

การวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

SETTLEMENT ANALYSIS FROM ADJACENT STRUCTURE OF UNDERGROUND
STRUCTURE



นาย กลศ วรคชิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SETTLEMENT ANALYSIS OF UNDERGROUND ELECTRICITY STRUCTURE DUE TO ADJACENT
CONSTRUCTIONS



MR. Klods Vorrakachin

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

กลศ วรชชิน : การวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินเนื่องจากการก่อสร้างข้างเคียง (SETTLEMENT ANALYSIS OF UNDERGROUND ELECTRICITY STRUCTURE DUE TO ADJACENT CONSTRUCTIONS) อ. ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ ศิริศิริโรจนากร, หน้า, 458 หน้า

ปัญหาการแตกร้าของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลมักจะมีพบบ่อยครั้ง ซึ่งมีสาเหตุจากหลายประการและหนึ่งในสาเหตุหลักคือ ผลกระทบจากการก่อสร้างของสิ่งก่อสร้างข้างเคียง งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงต่อท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน โดยมุ่งเน้นทำการศึกษาชนิดของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในเขตชุมชนเมือง ซึ่งมักนิยมใช้กันอยู่ 3 ประเภทของโครงสร้าง กล่าวคือ โครงสร้างท่อคั่นลอค (Pipe Jacking) ระบบท่อเจาะตึงแนวราบ (Horizontal Directional Drilling) และการวางท่อแบบขุดเปิดหน้าดิน (Duct Bank) จากนั้นทำการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยแบ่งงานก่อสร้างที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อระบบท่อร้อยสายไฟฟ้าออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การขุดเปิดหน้าดิน งานก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม การปักเข็มพืด และงานก่อสร้างท่อสาธารณูปโภค ส่วนการจำลองสภาพชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น จะใช้ชั้นดินเชิงภาพรวมของพื้นที่ในเขต กรุงเทพฯและปริมณฑล โดยอ้างอิงผลข้อมูลหลุมเจาะจำนวน 256 หลุม

การวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ ระยะห่างของสิ่งก่อสร้างข้างเคียง ขนาดความกว้างและความลึกของการขุดเปิดหน้าดิน น้ำหนักบรรทุกและความยาวของเสาเข็มกลุ่ม ตลอดจนขนาดของท่อสาธารณูปโภคข้างเคียง จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มานำเสนอในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินกับค่าที่สนใจ เช่น ค่าการทรุดตัว ค่าหน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน สำหรับผลการวิจัยนี้อาจจะนำไปเป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตอิทธิพลของผลกระทบจากการก่อสร้างข้างเคียง เพื่อใช้ป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบท่อร้อยสายไฟฟ้าในเขตชุมชนเมืองได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต..... กศ ๖๐๓๗
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ส.เชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง
ปีการศึกษา..... 2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ธเนศ ศิริศิริโรจนากร

4770213621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: UNDERGROUND STRUCTURE / ADJACENT STRUCTURE / DISPLACEMENT

KLODS VORRAKACHIN : SETTLEMENT ANALYSIS OF UNDERGROUND ELECTRICITY STRUCTURE DUE TO ADJECENT CONSTRUCTIONS. THESIS ADVISOR: DR. SUCHAD LIKITLERSUANG, D.Phil, CO-ADVISOR: DR. TANATE SRESIROTJANAKORN, PhD, 458 pp.

The problems of underground electricity structure failure are often found in Bangkok and Metropolitans due to many causes. One of the main causes is the effect of the adjacent underground construction activities that many cause the underground electricity structures to settle or break down. This research aims to study the effect which caused by the adjacent constructions toward the underground electricity structures, and focused on three kinds of these underground electricity structures that commonly used in the urban areas namely Pipe Jacking, Horizontal Directional Drilling, and Duct Bank. By dividing the adjacent construction activities into 4 groups: shallow excavation, pipe group, sheet pipe, and utility tunnel; and using typical soil profiles in Bangkok and Metropolitans base on 256 boring logs data, the models for analyzing settlements of the underground electricity structures could be simulated. These models then were analyzed using Finite Element Method.

The analysis found that there were several factors such as distances, widths, and depths of the ground excavations; loads and lengths of pipe groups; sizes of adjacent structures could cause the settlement and stress to the under ground electricity structures. Subsequently, the results of analysis were presented in graphs showing the correlations between the distance of the underground electricity structures and settlement, axial force, shear force, and bending moment respectively. This research could be used as a guidance for limiting the boundary that the underground construction activities could cause the damages to the exiting underground electricity structures, as well as prohibit the construction activities within these influencing areas. As a result, the underground electricity structures would be prevented from the damages in the city.

Department.....Civil Engineering.....Student's signature.....
Field of study.....Civil Engineering.....Advisor's signature.....
Academic year.....2007.....Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “การวิเคราะห์การหลุดตัวของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินเนื่องจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง” ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและให้ประสบการณ์ที่ดีในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณปรัชญา สุวัฒนานันท์ คุณสมบุญณ์ ดิลนานนท์ คุณพงสันต์ จุลวงศ์ คุณเลิศทศพล เตือนฉาย คุณวิชา ซาครพิพัฒน์ คุณภิญโญ ฤกษ์เย็น คุณวิชชุพงษ์ ณ แก้ว และคณะวิศวกรของการไฟฟ้านครหลวงทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่ามอบคำแนะนำและข้อมูลสำคัญต่างๆ เพื่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณนัฐวุฒิ เหมะธูลิน นิสิตปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ และร่วมค้นหาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัทชอยเทสดีงสยาม ที่ให้ข้อมูลอันสำคัญยิ่งในการวิเคราะห์ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้ก้าวหน้าด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพีทุกท่าน และเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่สละเวลาและความสุขส่วนตัว เพื่อให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้า

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำ ความรู้ ร่วมทั้งเป็นกำลังใจและให้คำแนะนำให้ข้าพเจ้าได้ทำงานเล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ธรณีวิทยาของชั้นดินกรุงเทพฯ และปริมณฑล.....	5
2.1.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ (Geological Condition of Bangkok).....	5
2.1.2 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ.....	6
2.2 สมบัติของดินทางด้านวิศวกรรมที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ.....	8
2.2.1 สมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนักของดิน.....	8
2.2.1.1 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)	8
2.2.1.2 กำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำ.....	9
2.2.2 สมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของดิน.....	12
2.2.2.1 ดินเม็ดละเอียด (Fine-grained soil).....	12
2.2.2.2 ดินเม็ดหยาบ (Coarse-grained soil).....	17
2.2.3 สมบัติทางด้านการซึมของน้ำในดิน.....	18
2.3 ชั้นน้ำบาดาลกรุงเทพฯและปริมณฑล.....	19
2.4 หลักการพื้นฐานของการทรุดตัว.....	21
2.4.1 การทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate Settlement).....	22

2.4.2 การทรวัดตัวอันเนื่องมาจากกระบวนการอัดตัวคายน้ (Consolidation Settlement).....	23
2.4.3 การทรวัดตัวขั้นที่ 2 (Secondary Consolidation).....	25
2.5 ระเบียบวิธีการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method).	25
2.6 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาการทรวัดตัวด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	29
2.7 สมมุติฐานและข้อมูลที่ใช้ (Assumption and Input Data).....	30
2.7.1 ข้อมูลทางเรขาคณิต (Geometries).....	30
2.7.2 ข้อมูลชั้นดิน (Soil Conditions).....	30
2.7.3 ข้อมูลทางวิศวกรรม (Engineering Condition).....	31
2.7.4 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Constitutive Models).....	31
2.8 ข้อมูลชนิดของโครงสร้างและวิธีการก่อสร้าง (Structure Types and Construction Methods).....	33
2.8.1 ท่อตันลอด (Pipe Jacking).....	33
2.8.2 ท่อเจาะตั้งแนวราบ (Horizontal Directional Drilling, HDD).....	41
2.8.3 ท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน (Open Cut)	46
2.8.3.1 การขุดบ่อกักขนาดเล็ก โดยติดตั้งบล็อกคอนกรีต (Duct Bank).....	47
2.8.3.2 การขุดบ่อกักขนาดใหญ่ เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้าง...	50
2.9 ข้อมูลสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่นำมาแบ่งหมวดวิเคราะห์.....	50
2.9.1 เสาเข็มกลุ่ม.....	51
2.9.2 เข็มพีต (Sheet Pile).....	52
2.9.3 ท่อสาธารณูปโภคใต้ดิน (Utility Tunnel).....	54
2.9.4 การขุดเปิดดินโดยไม่มีค้ำยัน (Open Cut).....	55
2.10 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	55
2.10.1 แรงตามแนวแกนที่เกิดจากการดันท่อ.....	56
2.10.2 แรงดันดินในแนวราบ.....	56
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง.....	57
3.2 วิเคราะห์ข้อมูลชั้นดินเบื้องต้น.....	57
3.3 กรณีในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Cases of Finite Element Analysis)	60
3.4 วิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง.....	64

3.5 ตัวอย่างขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงต่อท่อร้อยสายไฟฟ้า ใต้ดิน.....	64
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง.....	75
4.1.1 ท่อดินลอด.....	77
4.1.1.1 ผลกระทบของท่อดินลอดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	77
4.1.1.2 ผลกระทบของท่อดินลอดเนื่องจากเข็มพืด.....	88
4.1.1.3 ผลกระทบของท่อดินลอดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม.....	98
4.1.1.4 ผลกระทบของท่อดินลอดเนื่องจากอุโมงค์สาธารณูปโภค.....	108
4.1.2 ท่อเจาะดินแนวราบ (HDD).....	119
4.1.2.1 ผลกระทบของท่อเจาะตั้งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	119
4.1.2.2 ผลกระทบของท่อเจาะตั้งแนวราบเนื่องจากเข็มพืด.....	124
4.1.2.3 ผลกระทบของท่อเจาะตั้งแนวราบเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม.....	126
4.1.2.4 ผลกระทบของท่อเจาะตั้งแนวราบเนื่องจากอุโมงค์สาธารณูปโภค.....	131
4.1.3 ท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน (Open Cut).....	136
4.1.3.1 ผลกระทบของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน	136
4.1.3.2 ผลกระทบของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากเข็มพืด.....	142
4.1.3.3 ผลกระทบของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม.....	147
4.1.3.4 ผลกระทบของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากอุโมงค์ สาธารณูปโภค.....	152
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	158
5.1.1 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	158
5.1.2 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการปักเข็มพืด.....	160
5.1.3 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม....	161
5.1.4 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการก่อสร้าง อุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง.....	168
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	172
5.3 อุปสรรคและปัญหา ข้อจำกัดที่เอาผลการวิเคราะห์ไปใช้.....	172
5.4 ตัวอย่างการใช้ผลการวิเคราะห์ในการออกแบบ.....	173
5.5 ข้อเสนอแนะต่องานวิจัยในอนาคต.....	177

รายการอ้างอิง.....	178
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	180
ภาคผนวก ข.....	439
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	458



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	สรุปลักษณะและคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินกรุงเทพฯ.....	7
ตารางที่ 2.2	ค่ามุมต้านทานแรงเฉือนของดินกรุงเทพฯจากการทดสอบ SPT.....	11
ตารางที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง E_v/s_v ของดินเม็ดละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์.....	15
ตารางที่ 2.4	ค่าการซึมของน้ำในดินกรุงเทพฯ.....	18
ตารางที่ 2.5	สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯที่เคยมีงานวิจัยในอดีต.....	19
ตารางที่ 2.6	ค่าคงที่ของดิน (Soil Parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	32
ตารางที่ 2.7	ค่าคงที่ของคอนกรีต (Material Parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	32
ตารางที่ 2.8	ขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานท่อตันลอด.....	38
ตารางที่ 2.9	คุณสมบัติปลอกเหล็กต่อเชื่อมท่อตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น.....	39
ตารางที่ 2.10	คุณสมบัติปลอกเหล็กต่อเชื่อมท่อตามมาตรฐานของประเทศอังกฤษ.....	39
ตารางที่ 2.11	ขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อร้อยสายไฟที่ใช้ในงานท่อเจาะดึงแนวราบ.....	42
ตารางที่ 2.12	คุณสมบัติของเครื่องเจาะแต่ละชนิดในงานท่อเจาะดึงแนวราบ.....	43
ตารางที่ 2.13	ขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อร้อยสายไฟที่ใช้ในท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน.....	47
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	59
ตารางที่ 3.2	จำนวนกรณีวิเคราะห์การก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มที่มีผลกระทบกับโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	61
ตารางที่ 3.3	จำนวนกรณีจากการก่อสร้างเสาเข็มพีตที่มีผลกระทบกับโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	62
ตารางที่ 3.4	จำนวนกรณีจากการขุดเปิดหน้าดินที่มีผลกระทบกับโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	62
ตารางที่ 3.5	จำนวนกรณีการก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคที่มีผลกระทบกับโครงสร้าง	

	สายไฟฟ้าใต้ดิน.....	63
ตารางที่ 4.1	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อตันลอดขนาด 0.60 เมตร.....	77
ตารางที่ 4.2	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อท่อตันลอดทั้ง 7 ขนาด....	88
ตารางที่ 4.3	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อตันลอดขนาด 0.60 เมตร.....	98
ตารางที่ 4.4	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อตันลอด ขนาด 0.60 เมตร.....	108
ตารางที่ 4.5	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อเจาะดิ่งแนวราบ...	119
ตารางที่ 4.6	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อท่อเจาะดิ่งแนวราบ.....	124
ตารางที่ 4.7	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อเจาะดิ่งแนวราบ..	126
ตารางที่ 4.8	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อเจาะดิ่ง แนวราบ.....	131
ตารางที่ 4.9	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อระบบขุดเปิด หน้าดิน.....	136
ตารางที่ 4.10	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน...	142
ตารางที่ 4.11	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อระบบขุดเปิด หน้าดิน.....	147
ตารางที่ 4.12	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อระบบ ขุดเปิดหน้าดินรูปแบบที่ 1.....	152
ตารางที่ ๑-1	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อตันลอด.....	440
ตารางที่ ๑-2	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อเจาะดิ่งแนวราบ.....	441
ตารางที่ ๑-3	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน.	442
ตารางที่ ๑-4	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อท่อตันลอด.....	443
ตารางที่ ๑-5	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อท่อเจาะดิ่งแนวราบ.....	444
ตารางที่ ๑-6	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อโครงสร้างท่อระบบขุดเปิด หน้าดิน.....	444
ตารางที่ ๑-7	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อตันลอด.....	445
ตารางที่ ๑-8	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อเจาะดิ่ง แนวราบ.....	448
ตารางที่ ๑-9	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อระบบขุดเปิด	

	หน้าดิน.....	449
ตารางที่ ข-10	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อตันลอด.....	452
ตารางที่ ข-11	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อเจาะดึง แนวราบ.....	455
ตารางที่ ข-12	สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อระบบชุด เปิดหน้าดิน.....	456



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ตาราง		หน้า
รูปที่ 1.1	สิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	1
รูปที่ 1.2	กลุ่มท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่เกิดความเสียหายจากการก่อสร้างคันทาง....	2
รูปที่ 2.1	ชั้นดินกรุงเทพฯและปริมณฑล.....	6
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าBlow Count จาก SPT กับ ค่าแรงเฉือนแบบไม่ ระบายน้ำ.....	9
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่า N กับค่า แรงกดทับ ประสิทธิผลในแนวดิ่ง.....	10
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N' กับค่า σ'	11
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Angle of Internal Friction กับค่า Plasticity Index สำหรับดินเหนียวโดย.....	12
รูปที่ 2.6	นิยามของค่าโมดูลัสชนิดต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.7	การหาค่าโมดูลัสจากการยุบตัวคายน้ำใน 1 มิติ.....	13
รูปที่ 2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_u และค่า OCR.....	14
รูปที่ 2.9	สัมประสิทธิ์การอัดตัว สัมประสิทธิ์การอัดตัวซ้ำและหน่วยแรงสูงสุดในอดีต	16
รูปที่ 2.10	รูปหน้าตัดแสดงชั้นน้ำบาดาลบริเวณ เขตกรุงเทพมหานคร ในแนวเหนือ-ใต้ จากอำเภอ นครหลวงถึงป้อมพระจุล.....	20
รูปที่ 2.11	ส่วนประกอบของการทรุดตัว.....	22
รูปที่ 2.12	การวิเคราะห์ทรุดตัวทันทีทันใด.....	23
รูปที่ 2.13	ตัวอย่างของอิลิเมนต์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	26
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และแรงผ่านทางแบบจำลองพฤติกรรม ของดิน.....	27
รูปที่ 2.15	ความสำคัญของเงื่อนไขขอบเขตที่มีต่อการหาผลเฉลยของระบบสมการ.....	28
รูปที่ 2.16	ภาพรวมในการเจาะท่อตันลอด.....	34
รูปที่ 2.17	ส่วนประกอบของท่อตันลอด.....	34
รูปที่ 2.18	หัวเจาะท่อตันลอด.....	35
รูปที่ 2.19	ภาพจำลองของสถานีต้นข่อย.....	35
รูปที่ 2.20	แผ่นคอนกรีตรองกระจายแรงดันที่ใช้ในประเทศไทย.....	36
รูปที่ 2.21	แนวท่อแบบ Single Pass ในประเทศไทย.....	36
รูปที่ 2.22	จุดเชื่อมต่อของท่อตันลอด ก) เป็นการต่อเชื่อมแบบปาและ ข) การต่อเชื่อม	

	แบบชน.....	37
รูปที่ 2.23	บ่อดันที่อยู่กลางถนนในกรุงเทพฯ.....	37
รูปที่ 2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการเจาะเมื่อเพิงสถานีต้นย่อย	41
รูปที่ 2.25	ตัวอย่างการฉีดน้ำปูนในงานท่อตันลอด.....	41
รูปที่ 2.26	การทำงานท่อเจาะดึงแนวราบที่ใช้ในกรุงเทพฯ.....	42
รูปที่ 2.27	ส่วนประกอบของเครื่องเจาะในงานท่อเจาะดึงแนวราบ (HDD).....	43
รูปที่ 2.28	การเจาะหลุมนำ (Pilot Hole)	45
รูปที่ 2.29	ขั้นตอนของการคว้าน (Reaming)	46
รูปที่ 2.30	ขั้นตอนการดึงกลับ (Pullback)	46
รูปที่ 2.31	เปรียบเทียบระหว่างราคาค่าก่อสร้างเทียบกับความลึกในการขุดของวิธีขุด เปิดหน้าดินกับวิธีเจาะท่อแนวราบแบบไม่รบกวนผิวดิน.....	47
รูปที่ 2.32	แบบมาตรฐานท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินของหน่วยงานรัฐ.....	48
รูปที่ 2.33	การวางแนวท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินแบบขุดเปิดหน้าดินก่อนเทคอนกรีต....	49
รูปที่ 2.34	Mandrel ใช้สำหรับทดสอบขนาดท่อที่ใช้จริงในประเทศไทย.....	50
รูปที่ 2.35	รูปแบบเข็มตอกมาตรฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	51
รูปที่ 2.36	การขุดเปิดหน้าดินโดยใช้เข็มพืดป้องกันดินพัง.....	52
รูปที่ 2.37	รูปแบบมาตรฐานของเข็มพืดที่ใช้กันทั่วไปโดยในเส้นปะเป็นรูปแบบที่ใช้ใน ประเทศไทย.....	53
รูปที่ 2.38	ค่ามาตรฐานของเข็มพืดรูปแบบต่างๆ.....	54
รูปที่ 2.39	ท่อสาธารณูปโภคอื่นที่มีผลกระทบต่อท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	55
รูปที่ 2.40	รูปแบบการถ่ายแรงของดินระหว่างการขุดเปิดหน้าดินและไม่ขุดเปิด หน้าดิน.....	56
รูปที่ 3.1	พื้นที่วิจัยแบ่งตามจังหวัด.....	57
รูปที่ 3.2	พื้นที่วิจัยแบ่งตามเขตอำเภอ.....	58
รูปที่ 3.3	ชั้นดินเชิงภาพรวมที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	58
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการขุดเปิดหน้าดินที่มีต่อท่อตันลอด.....	65
รูปที่ 3.5	ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการปักเข็มพืดที่มีต่อท่อตันลอด.....	68
รูปที่ 3.6	ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการตอกเสาเข็มกลุ่มที่มีต่อท่อระบบขุดเปิด หน้าดิน.....	70
รูปที่ 3.7	ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการขุดท่อสาธารณูปโภคที่มีต่อท่อระบบ ขุดเปิดหน้าดิน.....	73

รูปที่ 4.1	ทิศทางแนวแกนที่ใช้ในการแสดงผลการคำนวณ.....	78
รูปที่ 4.2	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	80
รูปที่ 4.3	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุดเปิดหน้า ดิน.....	80
รูปที่ 4.4	แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุด เปิดหน้าดิน.....	81
รูปที่ 4.5	แรงตามแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	81
รูปที่ 4.6	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุดเปิดหน้า ดิน.....	82
รูปที่ 4.7	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุดเปิดหน้า ดิน.....	82
รูปที่ 4.8	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	83
รูปที่ 4.9	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากการขุดเปิดหน้า ดิน.....	83
รูปที่ 4.10	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตร เนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	84
รูปที่ 4.11	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตร เนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	84
รูปที่ 4.12	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตร เนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	85
รูปที่ 4.13	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตร เนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	85
รูปที่ 4.14	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตร เนื่องจากการขุดเปิดหน้า ดิน.....	86
รูปที่ 4.15	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตร เนื่องจากการขุดเปิดหน้า ดิน.....	86
รูปที่ 4.16	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตร เนื่องจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	87

	เสาเข็มกลุ่ม.....	103
รูปที่ 4.41	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	103
รูปที่ 4.42	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	104
รูปที่ 4.43	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	104
รูปที่ 4.44	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	105
รูปที่ 4.45	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	105
รูปที่ 4.46	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	106
รูปที่ 4.47	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	106
รูปที่ 4.48	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	107
รูปที่ 4.49	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 เมตรเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	107
รูปที่ 4.50	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	111
รูปที่ 4.51	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	111
รูปที่ 4.52	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	112
รูปที่ 4.53	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	112
รูปที่ 4.54	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	113
รูปที่ 4.55	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	113

รูปที่ 4.56	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	114
รูปที่ 4.57	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	114
รูปที่ 4.58	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	115
รูปที่ 4.59	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	115
รูปที่ 4.60	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	116
รูปที่ 4.61	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	116
รูปที่ 4.62	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	117
รูปที่ 4.63	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	117
รูปที่ 4.64	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	118
รูปที่ 4.65	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	118
รูปที่ 4.66	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	121
รูปที่ 4.67	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	121
รูปที่ 4.68	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	122
รูปที่ 4.69	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	122
รูปที่ 4.70	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	123
รูปที่ 4.71	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	123

	หน้าดิน.....	123
รูปที่ 4.72	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เข็มพืด.....	125
รูปที่ 4.73	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด	125
รูปที่ 4.74	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	127
รูปที่ 4.75	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	127
รูปที่ 4.76	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	128
รูปที่ 4.77	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	128
รูปที่ 4.78	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	129
รูปที่ 4.79	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	129
รูปที่ 4.80	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	130
รูปที่ 4.81	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	130
รูปที่ 4.82	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียง วางตัวด้านข้าง.....	133
รูปที่ 4.83	การทรุดตัวทั้งหมดท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียง วางตัวด้านข้าง.....	133
รูปที่ 4.84	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียง วางตัวด้านข้าง.....	134
รูปที่ 4.85	แรงแนวแกนทั้งหมดท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียง วางตัวด้านข้าง.....	134
รูปที่ 4.86	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียง วางตัวด้านข้าง.....	135
รูปที่ 4.87	แรงเฉือนทั้งหมดท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากอุโมงค์ข้างเคียง	

	วางตัวด้านข้าง.....	135
รูปที่ 4.88	การทрудตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	138
รูปที่ 4.89	การทрудตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	138
รูปที่ 4.90	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	139
รูปที่ 4.91	แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	139
รูปที่ 4.92	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	140
รูปที่ 4.93	แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	140
รูปที่ 4.94	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	141
รูปที่ 4.95	โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	141
รูปที่ 4.96	การทрудตัวที่เพิ่มขึ้นของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด.....	143
รูปที่ 4.97	การทрудตัวทั้งหมดของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด.....	143
รูปที่ 4.98	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด.....	144
รูปที่ 4.99	แรงแนวแกนทั้งหมดของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด.....	144
รูปที่ 4.100	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด.....	145
รูปที่ 4.101	แรงเฉือนทั้งหมดของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด.....	145
รูปที่ 4.102	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด.....	146

รูปที่ 4.103	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของ เข็มพืด.....	146
รูปที่ 4.104	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	148
รูปที่ 4.105	การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม	148
รูปที่ 4.106	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	149
รูปที่ 4.107	แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	149
รูปที่ 4.108	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม	150
รูปที่ 4.109	แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม...	150
รูปที่ 4.110	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	151
รูปที่ 4.111	โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม	151
รูปที่ 4.112	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียง ขนาด $D = 0.5D_m$	154
รูปที่ 4.113	การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	154
รูปที่ 4.114	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียง ขนาด $D = 0.5D_m$	155
รูปที่ 4.115	แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียง ขนาด $D = 0.5D_m$	155
รูปที่ 4.116	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	156
รูปที่ 4.117	แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	156
รูปที่ 4.118	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียง ขนาด $D = 0.5D_m$	157
รูปที่ 4.119	โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$	157
รูปที่ 5.1	อัตราส่วนการลอยตัวของท่อตันลอดขนาด 0.60 ม. เนื่องจากการขุดเปิด	

	หน้าดิน.....	158
รูปที่ 5.2	อัตราการลอยตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	159
รูปที่ 5.3	เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมอัตราการลอยตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	160
รูปที่ 5.4	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากการปักเข็มพีตที่ระยะห่างระหว่าง 2 – 4 ม.....	161
รูปที่ 5.5	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากการปักเข็มพีตที่ระยะห่างระหว่าง 2 - 4 ม.....	162
รูปที่ 5.6	เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากการปักเข็มพีตที่ระยะห่างระหว่าง 2 – 4 ม.....	162
รูปที่ 5.7	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม.....	163
รูปที่ 5.8	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.....	164
รูปที่ 5.9	เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.....	165
รูปที่ 5.10	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.....	166
รูปที่ 5.11	เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.....	166
รูปที่ 5.12	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 6 ม.....	167
รูปที่ 5.13	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 6 ม.....	167
รูปที่ 5.14	เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 6 ม.....	168
รูปที่ 5.15	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากท่อเสาธรณีรูปโกลข้างเคียงด้านข้าง.....	169
รูปที่ 5.16	อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากท่อเสาธรณีรูปโกลข้างเคียงด้านล่าง.....	170
รูปที่ 5.17	เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากท่อเสาธรณีรูปโกลข้างเคียงด้านข้าง.....	170
รูปที่ 5.18	เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากท่อเสาธรณีรูปโกลข้างเคียงด้านล่าง.....	171
รูปที่ 5.19	แสดงพื้นที่ที่เกิดการลอยตัวเนื่องจากการทรุดตัวของท่อเสาธรณีรูปโกลข้างเคียงด้านข้าง.....	172

รูปที่ 5.20	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	174
รูปที่ 5.21	หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจาก ผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม.....	174
รูปที่ 5.22	หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากผลกระทบ ของเสาเข็มกลุ่ม.....	175
รูปที่ 5.23	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากผลกระทบของ เสาเข็มกลุ่ม.....	175
รูปที่ 5.24	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากผลกระทบของ เข็มพีค.....	176
รูปที่ 5.25	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากผลกระทบของเข็ม พีค.....	177
รูปที่ ก-1.1.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน	181
รูปที่ ก-1.1.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน	181
รูปที่ ก-1.1.2.1	แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	182
รูปที่ ก-1.1.2.2	แรงตามแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	182
รูปที่ ก-1.1.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน...	183
รูปที่ ก-1.1.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	183
รูปที่ ก-1.1.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน.	184
รูปที่ ก-1.1.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน..	184
รูปที่ ก-1.1.5.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน	185
รูปที่ ก-1.1.5.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน..	185
รูปที่ ก-1.1.6.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิด หน้าดิน.....	186
รูปที่ ก-1.1.6.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน	186
รูปที่ ก-1.1.7.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน...	187
รูปที่ ก-1.1.7.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตร จากการขุดเปิดหน้าดิน...	187
รูปที่ ก-1.1.8.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน	188
รูปที่ ก-1.1.8.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 เมตรจากการขุดเปิดหน้าดิน..	188

รูปที่ ก-3.14.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	357
รูปที่ ก-3.14.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม	357
รูปที่ ก-3.14.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	358
รูปที่ ก-3.14.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	358
รูปที่ ก-3.14.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม	359
รูปที่ ก-3.14.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม...	359
รูปที่ ก-3.14.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจาก เสาเข็มกลุ่ม.....	360
รูปที่ ก-3.14.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม	360
รูปที่ ก-4.1.1.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	361
รูปที่ ก-4.1.1.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	361
รูปที่ ก-4.1.1.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	362
รูปที่ ก-4.1.1.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	362
รูปที่ ก-4.1.1.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	363
รูปที่ ก-4.1.1.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5 D_m$	363
รูปที่ ก-4.1.1.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	364
รูปที่ ก-4.1.1.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	364
รูปที่ ก-4.1.2.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	365
รูปที่ ก-4.1.2.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอกจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	

	$D = D_m$	365
รูปที่ ก-4.1.2.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = D_m$	366
รูปที่ ก-4.1.2.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = D_m$	366
รูปที่ ก-4.1.2.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = D_m$	367
รูปที่ ก-4.1.2.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	367
รูปที่ ก-4.1.2.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = D_m$	368
รูปที่ ก-4.1.2.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = D_m$	368
รูปที่ ก-4.1.3.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	369
รูปที่ ก-4.1.3.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2 D_m$	369
รูปที่ ก-4.1.3.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	370
รูปที่ ก-4.1.3.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	370
รูปที่ ก-4.1.3.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2 D_m$	371
รูปที่ ก-4.1.3.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2 D_m$	371
รูปที่ ก-4.1.3.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	372
รูปที่ ก-4.1.3.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2 D_m$	372
รูปที่ ก-4.1.4.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 0.5D_m$	373
รูปที่ ก-4.1.4.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	

	$D = 0.5D_m$	373
รูปที่ ก-4.1.4.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	374
รูปที่ ก-4.1.4.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	374
รูปที่ ก-4.1.4.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5 D_m$	375
รูปที่ ก-4.1.4.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5 D_m$	375
รูปที่ ก-4.1.4.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D=0.5D_m$	376
รูปที่ ก-4.1.4.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$	376
รูปที่ ก-4.1.5.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	377
รูปที่ ก-4.1.5.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	377
รูปที่ ก-4.1.5.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	378
รูปที่ ก-4.1.5.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	378
รูปที่ ก-4.1.5.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	379
รูปที่ ก-4.1.5.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	379
รูปที่ ก-4.1.5.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	380
รูปที่ ก-4.1.5.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$	380
รูปที่ ก-4.1.6.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$	381
รูปที่ ก-4.1.6.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	

	$D = 2D_m$	381
รูปที่ ก-4.1.6.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	382
รูปที่ ก-4.1.6.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	382
รูปที่ ก-4.1.6.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	383
รูปที่ ก-4.1.6.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	383
รูปที่ ก-4.1.6.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	384
รูปที่ ก-4.1.6.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด	
	$D = 2D_m$	384
รูปที่ ก-4.1.7.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัว	
	ด้านข้าง.....	385
รูปที่ ก-4.1.7.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัว	
	ด้านข้าง.....	385
รูปที่ ก-4.1.7.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัว	
	ด้านข้าง.....	386
รูปที่ ก-4.1.7.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัว	
	ด้านข้าง.....	386
รูปที่ ก-4.1.7.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัว	
	ด้านข้าง.....	387
รูปที่ ก-4.1.7.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัว	
	ด้านข้าง.....	387
รูปที่ ก-4.1.8.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 0.5D_m$	388
รูปที่ ก-4.1.8.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 0.5D_m$	388
รูปที่ ก-4.1.8.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 0.5D_m$	389

	$D = 2D_m$	397
รูปที่ ก-4.1.10.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 2D_m$	397
รูปที่ ก-4.1.10.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 2D_m$	398
รูปที่ ก-4.1.10.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 2D_m$	398
รูปที่ ก-4.1.10.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 2D_m$	399
รูปที่ ก-4.1.10.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	$D = 2D_m$	399
รูปที่ ก-4.2.1.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5 D_m$	400
รูปที่ ก-4.2.1.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5D_m$	400
รูปที่ ก-4.2.1.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5D_m$	401
รูปที่ ก-4.2.1.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5D_m$	401
รูปที่ ก-4.2.1.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5 D_m$	402
รูปที่ ก-4.2.1.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5 D_m$	402
รูปที่ ก-4.2.1.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5D_m$	403
รูปที่ ก-4.2.1.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = 0.5D_m$	403
รูปที่ ก-4.2.2.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = D_m$	404
รูปที่ ก-4.2.2.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด	
	$D = D_m$	404

รูปที่ ก-4.2.6.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$	421
รูปที่ ก-4.2.6.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$	421
รูปที่ ก-4.2.6.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$	422
รูปที่ ก-4.2.6.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$	422
รูปที่ ก-4.2.6.4.1	โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$	423
รูปที่ ก-4.2.6.4.2	โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$	423
รูปที่ ก-4.2.7.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง	424
รูปที่ ก-4.2.7.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง..	424
รูปที่ ก-4.2.7.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัว ด้านข้าง.....	425
รูปที่ ก-4.2.7.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง	425
รูปที่ ก-4.2.7.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง...	426
รูปที่ ก-4.2.7.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง....	426
รูปที่ ก-4.2.8.1.1	การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5m$	427
รูปที่ ก-4.2.8.1.2	การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5m$	427
รูปที่ ก-4.2.8.2.1	แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5m$	428
รูปที่ ก-4.2.8.2.2	แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5m$	428
รูปที่ ก-4.2.8.3.1	แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5m$	429
รูปที่ ก-4.2.8.3.2	แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5m$	429

	D = 2.0m.....	437
รูปที่ ก-4.2.10.4.1	โมเมนต์ตัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	D = 2.0m.....	438
รูปที่ ก-4.2.10.4.2	โมเมนต์ตัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด	
	D = 2.0m.....	438



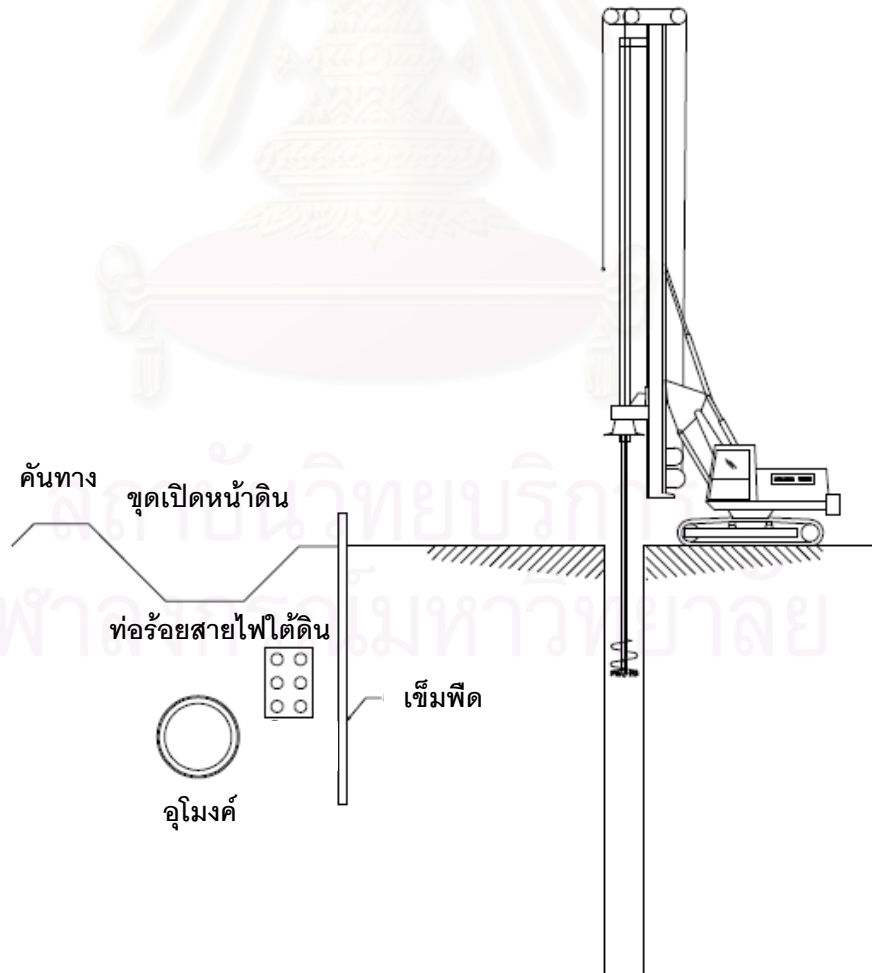
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินมีการก่อสร้างกันมาเป็นเวลานานหลายสิบปีแล้วด้วยกัน เมื่อเมืองขยายตัวใหญ่ขึ้น ประชากรหนาแน่นขึ้นความต้องการขึ้นพื้นฐานก็มากยิ่งขึ้นทำให้ต้องมีการขยายจำนวนสาธารณูปโภคพื้นฐานมากยิ่งขึ้น จึงมีการก่อสร้างโครงสร้างต่างๆมากขึ้นภายในเขตนครหลวง ไม่ว่าจะเป็น ที่อยู่อาศัย ท่อน้ำประปา คู่สายโทรศัพท์ หรือแม้แต่โครงสร้างต่างๆที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการจราจร เช่น สัญญาณไฟจราจร ป้ายโฆษณา ทางข้ามแยก อุโมงค์ข้ามแยก ฯลฯ ทำให้การก่อสร้างจำเป็นต้องกระทำในบริเวณใกล้เคียงกันหรือซ้อนทับกันดังแสดงในรูปที่ 1.1 และเนื่องจากพื้นที่ในเขตเมืองมีสภาพทางธรณีวิทยาเป็นดินเหนียวตะกอนแม่น้ำที่อ่อนนุ่ม ทำให้การก่อสร้างสิ่งก่อสร้างที่อยู่ใกล้เคียงกันมีผลกระทบต่อโครงสร้างอื่นๆทั้งที่สร้างก่อนและหลัง ซึ่งอาจสร้างความเสียหายต่อโครงสร้างทั้งที่มีอยู่แล้วและเพิ่งสร้างใหม่ได้ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 สิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน



รูปที่ 1.2 กลุ่มท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่เกิดความเสียหายจากการก่อสร้างคันทาง

จากปัญหาการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงทั้งจากภาครัฐและเอกชนซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยแต่ยังมีการศึกษาค้นคว้าไม่มากนัก ดังนั้นหากโครงสร้างนั้นได้รับการออกแบบและก่อสร้างโดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากการทรุดตัวของโครงสร้างข้างเคียง จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างใต้ดินเป็นอย่างมาก ซึ่งการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ด้วยสมการแบบปิด (Closed-Form Solution) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะสมมติให้ดินมีลักษณะเป็นวัสดุพลาสติกโดยสมบูรณ์ (Perfectly Plastic) ค่าที่ได้อาจไม่ตรงกับความเป็นจริง จึงมีการใช้วิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์เข้ามาวิเคราะห์เนื่องจากมีความละเอียดมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบปิด โดยโปรแกรมที่นำมาใช้วิเคราะห์มีชื่อว่า PLAXIS เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีงานวิจัยรองรับในวงการวิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering) ซึ่งการวิเคราะห์จะใช้ทฤษฎีอิลาสติก (Elastic Theory) โดยตั้งสมมุติฐานว่าดินเป็นวัสดุอิลาสติกเชิงเส้นครึ่งอนันต์ (Linear Elastic Infinite-Half Space) โดยผลการวิเคราะห์จะช่วยสร้างประโยชน์สำหรับเป็นแนวทางและเป็นข้อมูลในการวิจัยเพิ่มเติมในอนาคตรวมทั้งหารูปแบบวิธีการก่อสร้างระบบท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่เหมาะสมและเป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบและช่วยลดความเสียหายจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินเกิดความเสียหายเนื่องจากเขตเมืองมีพื้นที่จำกัด ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาปัญหาในข้างต้น โดยวิเคราะห์และประเมินการเคลื่อนตัว และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินรูปแบบต่างๆที่ใช้ในกรุงเทพฯและปริมณฑล พร้อมทั้งจัดทำกราฟการเคลื่อนตัว และหน่วยแรงแนวแกนเพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาวิธีป้องกันที่มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาและประมวลผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PLAXIS

1.3.2 ศึกษารูปแบบการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้กันอยู่ในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

1.4.1 โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์มีรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งมีข้อจำกัดคือสามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างตามแนวยาว (Plane Strain Condition) และค่าที่ได้อาจไม่ตรงกับค่าในสนามในบางกรณี

1.4.2 การตรวจสอบการวิเคราะห์ทำได้ยากเนื่องจากไม่เคยมีการเก็บข้อมูลในเชิงตัวเลขจากการทำงานจริงในสนาม และการจำลองการก่อสร้างตามแบบจำลองในภาคสนามต้องใช้เวลาและต้นทุนที่สูง

1.4.3 การตรวจสอบการวิเคราะห์ด้วยการคำนวณด้วยทฤษฎีนั้นทำได้ยาก เนื่องจากการวิเคราะห์มีความซับซ้อนสูงมาก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงค่าประมาณการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินเนื่องจากผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงเพื่อนำไปออกแบบแนวท่อในอนาคต

1.5.2 สามารถตรวจสอบค่าการทรุดตัว หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในท่อได้จากกราฟความสัมพันธ์

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อมูลคุณสมบัติทางโครงสร้างของท่อร้อยสายไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบัน ข้อมูลปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม ข้อมูลงานวิจัยในอดีต ฯลฯ เพื่อนำมาใช้ในงานวิจัย ทั้งจากงานที่เคยมีผู้วิจัยมา การออกแบบสอบถามไปยังหน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้อง การสอบถามจากวิศวกรที่ทำหน้าที่ควบคุมงาน การสอบถามจากวิศวกรที่อยู่ในหน่วยงานออกแบบท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน การสอบถามข้อมูลชั้นดินจากหลายหน่วยงาน โดยข้อมูลที่ได้ เช่น ข้อมูลชั้นดินทั้ง 50 เขตของกรุงเทพฯ ข้อมูลชั้นดินของจังหวัดนนทบุรีและสมุทรปราการ รูปแบบและวิธีการท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ใช้ในปัจจุบัน ลักษณะงานก่อสร้างอื่นที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ข้อมูลความเสียหายของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินในเชิงคุณภาพ และแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและใช้อยู่ในปัจจุบัน

1.6.2 ศึกษา PLAXIS เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหา โดยทำความเข้าใจพารามิเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม วิธีวิเคราะห์ และการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์

1.6.3 วิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลดินจาก 50 เขตในกรุงเทพฯ จังหวัดนนทบุรี และสมุทรปราการรวมเป็นข้อมูลต้นแบบ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง

1.6.4 จัดหมวดหมู่ปัญหาที่เกิดขึ้นจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงเป็นหมวดๆ โดยสามารถจัดปัญหาทั้งหมดเป็น 4 หมวดใหญ่เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้แก่ งานขุดเปิดหน้าดิน งานปักเข็มพืด งานเสาเข็มกลุ่ม และงานท่อใต้ดิน

1.6.5 วิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่เกิดขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS ตามหมวดงานก่อสร้างที่แบ่งไว้

1.6.6 แสดงผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้น โดยจัดทำในรูปแบบกราฟค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างข้างเคียงของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินทุกโครงสร้าง

1.6.7 ประยุกต์ใช้ผลวิเคราะห์ การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ในการเป็นข้อกำหนดและจุดสังเกตเบื้องต้นในการป้องกันสิ่งก่อสร้างใหม่ที่จะมา มีผลกระทบกับท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน รวมทั้งนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยไปเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรณีวิทยาของชั้นดินกรุงเทพฯ และปริมณฑล

2.1.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ (Geological Condition of Bangkok)

ว.ส.ท. (2520) สรุปชั้นดินกรุงเทพฯ เป็นดินตกตะกอน (Transported Soil) ชนิด ดินตะกอนน้ำทะเล (Marine)และ ดินตะกอนแม่น้ำ (Alluvial) ซึ่งเป็นแบบการตกตะกอนจากน้ำหรือสิ่งพัดพาจากพื้นดิน (Terrestrial Deposit) มีความหนาแน่นกว่า 1,500 ม. ชั้นล่างเป็นชั้นหินดานซึ่งอยู่ที่ความลึกไม่แน่นอน เป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ตัวเมืองกรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยอยู่ห่างจากทะเลฝั่งอ่าวไทยประมาณ 20 กม. ความยาวเฉลี่ยจากเหนือถึงใต้และจากตะวันออกไปถึงตะวันตกประมาณ 250 และ 200 กม. ตามลำดับ พื้นที่รวมประมาณ 53,400 กม.

สุรจันทร (2540) สรุปว่าดินเหนียวส่วนบนที่อยู่เหนือดินเหนียวอ่อนมักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลาง มีความหนาประมาณ 3-5 ม. และมักถูกเรียกว่า ดินเหนียวกรุงเทพฯ (Weathered Bangkok Clay) เพราะถูกแปรสภาพมากดินเหนียวส่วนนี้อาจเป็นได้ทั้งดินที่ทับถมบนแผ่นดิน (Terrestrial Deposit) และ ดินที่ทับถมในทะเล (Marine Deposit) เชื่อว่าเป็น Terrestrial Deposit เสียส่วนใหญ่ ในบริเวณใกล้ปากอ่าวเกือบจะไม่มีชั้นดินชั้นนี้

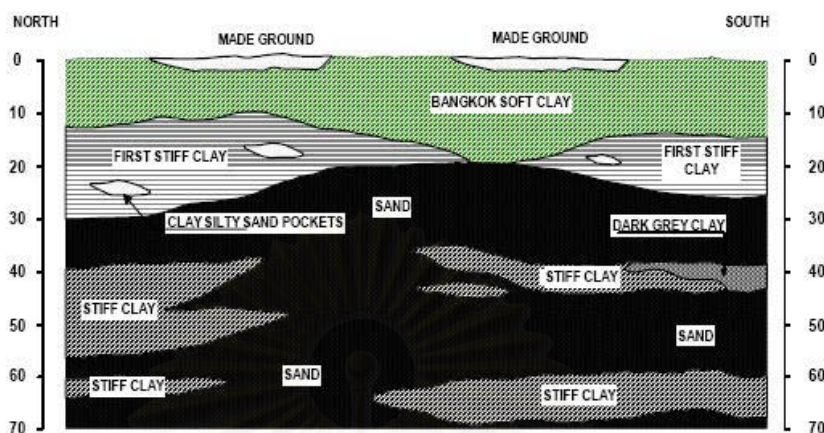
ดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวส่วนบนถูกชะล้าง (Leaching) ในเวลาต่อมา การชะล้างของดินเหนียวอ่อนที่เป็น Marine Deposit ทำให้ปริมาณเกลือในน้ำลดลงไปเป็นผลให้โครงสร้างของดินไม่มีเสถียรภาพ ดินจึงมีพฤติกรรมที่มีความไวตัว (Sensitivity) สูง ดินเหนียวส่วนบนก็มีความไวเช่นกันแต่น้อยกว่าดินเหนียวอ่อนนั้นล้นล้นมาก

ดินเหนียวในช่วงบริเวณที่เกิดจากการกัดเซาะทางธรรมชาติ (Weathered Zone) ซึ่งส่วนมากเป็น Terrestrial Deposit อยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว สาเหตุส่วนใหญ่เชื่อว่ามาจากขบวนการกัดเซาะทางธรรมชาติ (Weathering) โดยเฉพาะมาจากการกัดเซาะทางเคมี (Chemical Weathering) และจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน และการสูญเสียน้ำของดิน (Desiccation) ส่วนผลของการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงเนื่องจากการสึกกร่อนเชื่อว่าไม่ใช่เป็นส่วนประกอบสำคัญ

ดินเหนียวอ่อนที่เป็น Marine Deposit ก็อยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated) เช่นกัน กลไกของการเกิดการอัดแน่นเกินตัว เชื่อว่าส่วนใหญ่มาจากการทับถมเป็นเวลานาน (Aging) อันเป็นผลของการอัดตัวครั้งที่สอง

2.1.2 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

สรุปลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯแต่ละชั้นจากผิวดินแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชั้นดินกรุงเทพฯและปริมาณซัล (วันชัย, 1999)

สุรฉัตร (2540) สรุปลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay)

มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทาและน้ำตาล มีความหนาประมาณ 1-4 ม. มักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งแรงปานกลางเนื่องจากดินชั้นนี้ถูกกระบวนการทางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินจากต้นกำเนิดเดิมไปมาก กล่าวคือ ผิวตอนบนถูกแดดเผาและปฏิกิริยาคาพิลลารี (Capillary Action) ทำให้เกิดเปลือกโลกแห้ง (Drying Crust) ใต้เปลือกโลกแห้งเกิดกระบวนการกร่อนทำลายทางเคมี (Chemical Weathering) และเนื้อดินได้รับการชะล้างจากน้ำที่ซึมลงใต้ดิน (Leaching) ทำให้เกิด Weathering Zone (Drying Crust รวมกับ Weathered Zone เรียกว่า Crust) ผลพวงจากกระบวนการธรรมชาติต่างๆทำให้ชั้น Crust มีปริมาณน้ำในดิน (Water Content) ลดลง 20-30 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณน้ำในดินประมาณ 35-70 เปอร์เซ็นต์ หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 1.6-1.9 ตันต่อลบ.ม. สัดส่วนการอัดตัวคายน้ำเพิ่มขึ้น จากการรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยมีค่าประมาณ 2-11 และมีปริมาณเกลือในดิน (Salt Content) ต่ำลง ในบริเวณส่วนใหญ่ของกรุงเทพฯใกล้ปากอ่าวจะไม่ค่อยพบดินชั้นนี้

ชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงแข็งแรงปานกลาง (Very Soft to Medium Stiff Marine Clay)

เป็นดินเหนียวที่มีสีเทาเข้มหรือเทาปนเขียว หนาประมาณ 10-15 ม. เป็นดินที่มีความไวตัว (Sensitivity) สูงค่าประมาณความชื้นในมวลดินสูงเกือบเท่าประมาณความชื้นที่ขีดเหลว (Liquid Limit) และมีค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดี่ยว (Unconfined Compressive Strength) ประมาณ 1-2 ตันต่อ ตร.ม. หน่วยน้ำหนักประมาณ 1.8-2.0 ตันต่อลบ.ม. และสัดส่วนการอัดตัวคายน้ำ (Overconsolidation Ratio, OCR) ประมาณ 1.1-3.3

ชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay)

เป็นดินเหนียวแข็งชั้นแรกสีเทาและน้ำตาลที่มีความหนาประมาณ 5-10 ม. ความหนาจะน้อยในบริเวณทางเหนือและตะวันตกของส่วนกลางกรุงเทพฯ ค่าประมาณความชื้นประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ และมีค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว ประมาณ 5-23 ตันต่อตร.ม. ด้วยวิธีทดสอบหน่วยแรงเฉือนแบบ 1 แกน หน่วยน้ำหนักประมาณ 2.0-2.1 ตันต่อลบ.ม. และจากการรวบรวมข้อมูลชั้นดินในงานวิจัย สัดส่วนการอัดตัวคายน้ำประมาณ 1.1-1.7

ชั้นทรายชั้นแรก (First Silty Sand Layer)

จะพบที่ความลึกประมาณ 20-26 ม. โดยมีความหนาไม่แน่นอนกล่าวคือมีความหนาประมาณ 5-15 ม. ทรายชั้นนี้เป็นทรายเม็ดละเอียด มีส่วนประกอบของน้ำตามธรรมชาติประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ หน่วยน้ำหนักประมาณ 2.0-2.1 ตันต่อลบ.ม. และจากการรวบรวมข้อมูลชั้นดินในงานวิจัยมีค่าการทดสอบหน่วยแรงเฉือนในสนามแบบเจาะทะลุ (Standard Penetration Test, SPT) ประมาณ 33-68 ครั้งต่อฟุต ซึ่งในบางพื้นที่อาจพบดินเหนียวหรือดินทรายแป้ง (Silt) ปนอยู่

ชั้นทรายชั้นที่สอง (Second Sand Layer)

โดยทั่วไปพบที่ความลึกประมาณ 50 ม. เป็นดินทรายที่มีความแน่นมาก ค่าการทดสอบหน่วยแรงเฉือนในสนามแบบเจาะทะลุ ประมาณ 25-90 ครั้งต่อฟุต

ตารางที่ 2.1 สรุปลักษณะและคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินกรุงเทพฯ (ชาญชัย, 2542)

Soil Type	Depth (ม.)		w_n [%]	LL [%]	PL [%]	PI [%]	LI	γ [ตัน/ลบ.ม.]
	From	to						
Weathered Clay	0	2	35-70	35-70	-	23-30	0.7-1.0	1.60-1.80
Soft Clay	1	16	65-90	65-90	30-40	40-63	0.6-0.9	1.50-1.70
Stiff Clay	10	25	24-34	40-75	20-28	18-50	0.1-0.2	1.90-2.00
First Sand	14	38	17-25	-	-	-	-	1.80-2.10
Hard Clay	24	43	30-35	55-69	18-25	31-44	0.1-0.3	1.80-2.00
Second Sand	30	58	20	-	-	-	-	1.80-2.60
Hard Clay	24	43	30-35	55-69	18-25	31-44	0.1-0.3	2.04
Sand	67	85	19	-	-	-	-	-
Hard Clay	79	96	19-20	56-57	22-26	32-34	-0.1	2.00-2.10

w_n = ปริมาณน้ำในดิน (Water Content); PL = ขีดพลาสติก (Plastic Limit); LI = ดรรชนีสภาพของเหลว (Liquidity Index); LL = ขีดเหลว (Liquid Limit); PI = ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index); γ = หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight)

2.2 สมบัติของดินทางด้านวิศวกรรมที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ

สุรฉัตร (2540) สรุปสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบในงานวิศวกรรมสมบัติทางด้านนี้ประกอบด้วยสมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนักหรือความแข็งแรงของดิน สมบัติทางด้าน การเคลื่อนตัวของดิน และสมบัติด้านการไหลซึมของดิน

2.2.1 สมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนักของดิน

สมบัติทางด้านนี้บอกค่าความแข็งแรงของดิน ซึ่งสมบัติที่สำคัญทางด้านนี้ได้แก่ กำลังรับหน่วยแรงเฉือนของดิน (Shear Strength) แบ่งเป็นสองรูปแบบคือ

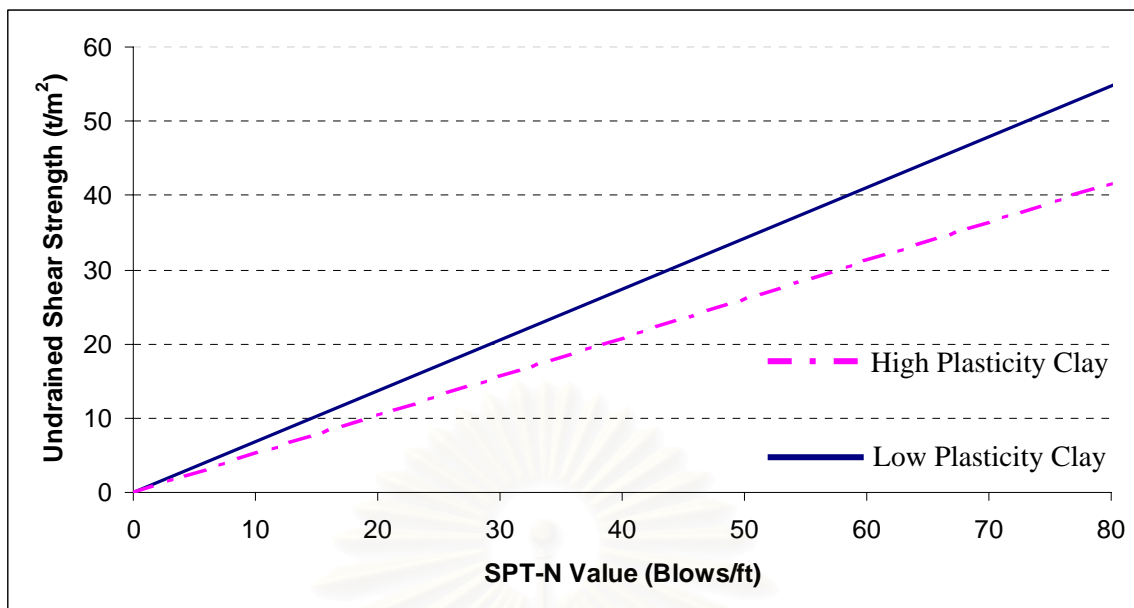
2.2.1.1 กำลังรับหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ซึ่งหมายถึงกำลังรับน้ำหนักหรือกำลังรับหน่วยแรงเฉือนของดินที่อิ่มตัวในลักษณะที่ดินถูกหน่วยแรงมากระทำจนเกิดการวิบัติในมวลดินในขณะที่ปริมาณความชื้นของดินไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อความชื้นไม่เปลี่ยนแปลงด้วยผลของหน่วยแรงที่มากระทำจะทำให้ความดันน้ำในโพรงของดินเปลี่ยนแปลง กำลังรับหน่วยแรงเฉือนชนิดนี้เป็นสมบัติที่สำคัญของดินเหนียวหรือดินที่มีแรงเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) เพราะทันทีที่มีหน่วยแรงมากระทำดินดังกล่าว น้ำจะไหลออกจากดินได้ลำบากเนื่องจากดินชนิดนี้เป็นดินเม็ดละเอียด การไหลซึมของน้ำเกิดขึ้นได้ช้ามาก

กำลังรับหน่วยแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในสนาม แต่โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า s_u จากการทดสอบกำลังรับหน่วยแรงเฉือนโดยแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) หรือการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Blow Count จากการทดสอบ Standard Penetration Test (N) กับค่า s_u โดยค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำพื้นที่ กทม. สรุปไว้ในตารางที่ 2.4 และค่าที่ใช้ในการวิจัยสรุปในตารางที่ 3.1 (วีระนันท์, 2526) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯชั้นแรก ดังต่อไปนี้

$s_u = 0.685 N$ หน่วยเป็น ตันต่อตร.ม. สำหรับดินเหนียวประเภท CH

$s_u = 0.520 N$ หน่วยเป็น ตันต่อตร.ม. สำหรับดินเหนียวประเภท CL

โดยค่าความแตกต่างที่วัดได้ระหว่างดินแบบ CH กับ CL เทียบกับค่า SPT-N Value มีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Blow Count จาก SPT กับ ค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (วีระนันท์, 2526)

2.2.1.2 กำลังรับหน่วยแรงเฉือนแบบระบายน้ำ (Drained Shear Strength) ซึ่งหมายถึงกำลังรับน้ำหนักหรือกำลังรับหน่วยแรงเฉือนของดินในลักษณะที่เมื่อดินถูกหน่วยแรงมากระทำจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ปริมาณความชื้นและปริมาตรของดินจะเปลี่ยนแปลง แต่ความดันน้ำในโพรงของดินจะมีค่าคงที่ กำลังรับหน่วยแรงเฉือนชนิดนี้เป็นสมบัติของดินเม็ดหยาบหรือดินที่มีการไหลซึมของน้ำได้รวดเร็วเป็นส่วนมาก ตลอดจนเป็นสมบัติของดินเม็ดละเอียดที่ได้รับหน่วยหน่วยแรงเฉือนในอัตราที่ช้ามาก

ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) และค่าความเชื่อมแน่น (c) ซึ่งเป็นสมบัติแสดงถึงหลักการที่กำหนดการวิบัติของดินของมอร์และโคลอมบ์ (Mohr-Colomb's Failure Criteria)

ค่ามุมเสียดทานภายในสามารถหาได้จากการทดสอบหน่วยแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) หรือการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ในห้องปฏิบัติการ แต่ทั้งนี้อาจเกิดปัญหาต่างๆ คือความยากลำบากในการเก็บตัวอย่างทรายให้อยู่ในสภาพตามธรรมชาติโดยถูกรบกวน นอกจากนี้ในการทดสอบแรงอัดสามแกน สำหรับตัวอย่างทรายอาจจะเกิดปัญหาการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกและต้องใช้อุปกรณ์หุ้มดินตัวอย่าง (Membrane) ที่หนากว่าปกติ

วีระนันท์ (2526) เสนอการหาค่ามุมเสียดทานภายในโดยใช้วิธีการทดสอบในสนามในรูปแบบความสัมพันธ์ที่ได้จากการสังเกต (Empirical) ได้มีผู้เสนอไว้มากมาย ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในกับค่า N ซึ่งได้จากผลวิเคราะห์หักลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ

$$\text{ค่ามุมเสียดทานภายใน } (\phi) = 12.041 N^{0.162}$$

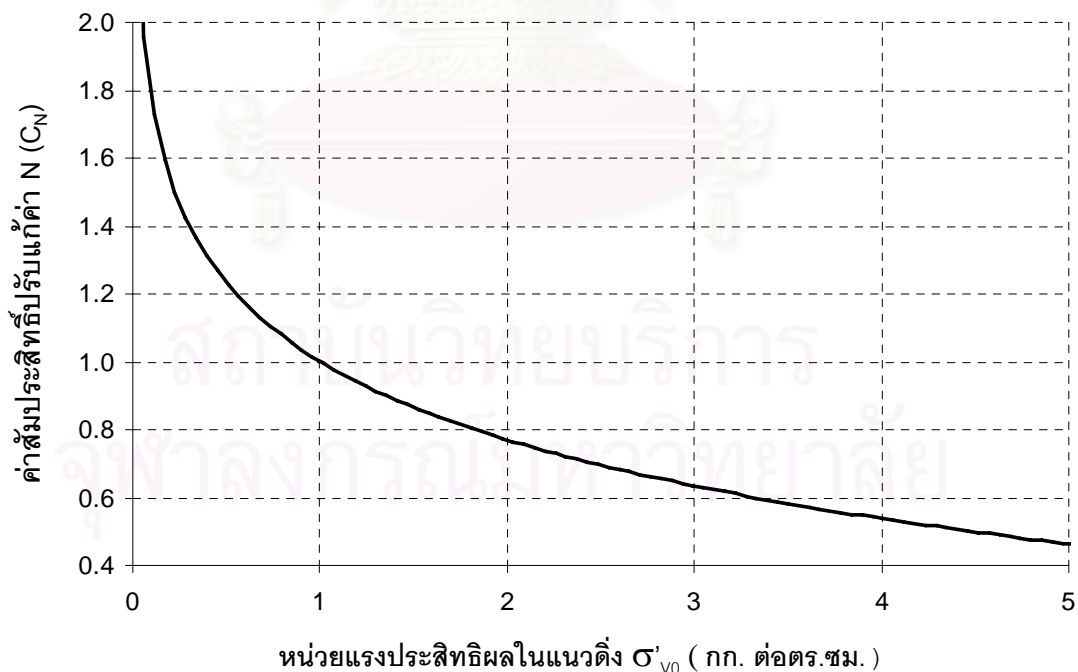
โดยค่า N ที่นำมาใช้เป็นค่าที่ได้จากการปรับแก้จากผลของน้ำหนักกดทับของน้ำหนักดินที่อยู่ด้านบนจุดที่เราพิจารณาแล้ว

โดยวิธีการปรับแก้ค่า N นั้น Peck *et al.* (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า Correction Factor ซึ่งใช้เป็นค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงกดทับประสิทธิภาพในแนวดิ่ง (σ'_{v0}) ที่ระดับความลึกที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.3

$$N' = C_N \cdot N$$

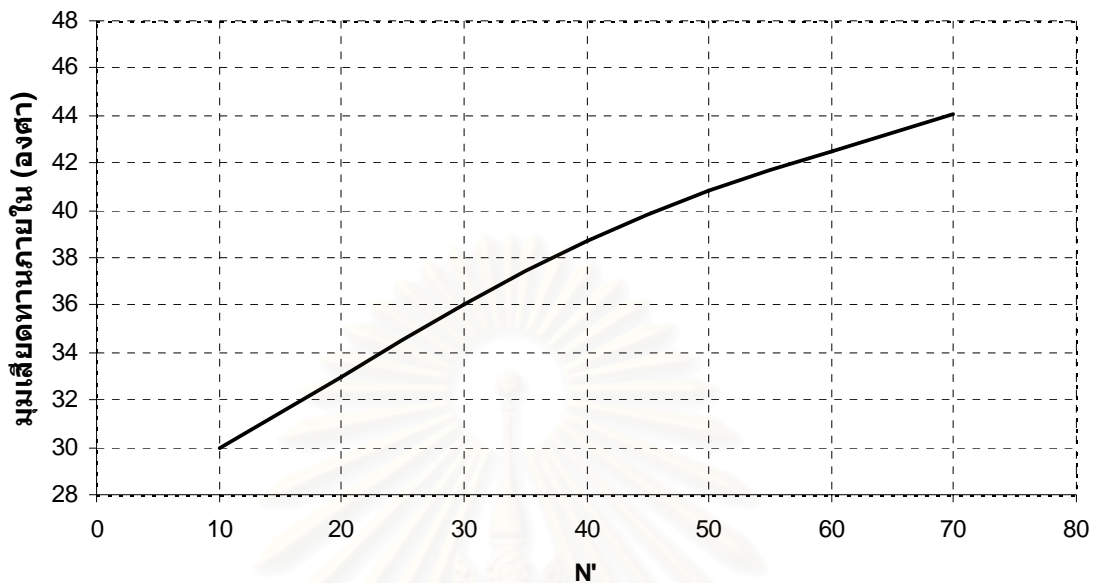
$$C_N = 0.77 \log_{10} (20 / \sigma'_{v0})$$

เมื่อ N' = ค่า N ที่ได้รับการปรับแก้เนื่องจากน้ำหนักกดทับของดิน
 C_N = สัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่า N
 σ'_{v0} = แรงกดทับประสิทธิภาพในแนวดิ่ง (กก. ต่อ ตร. ซม.)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่า N กับค่า แรงกดทับประสิทธิภาพในแนวดิ่ง (Peck *et al.*, 1974)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N' กับ σ' ที่เสนอโดย Peck et al. (1974) แสดงดังรูปที่ 2.4



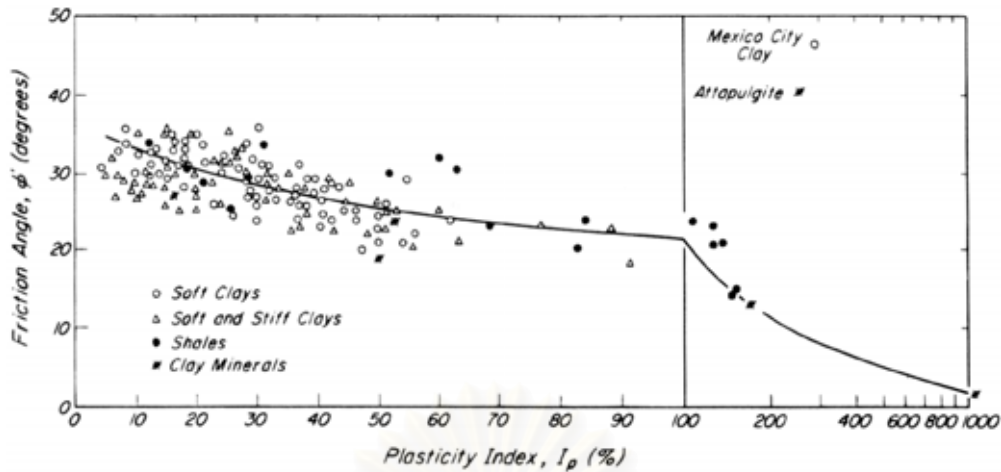
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N' กับค่า σ' (Peck et al., 1974)

สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯมีค่ามมเสียดทานภายในจากการทดสอบหน่วยแรงเฉือนในสนามแบบเจาะทะลุ (Standard Penetration Test, SPT) ตามตารางที่ 2.2 และ ค่ามมเสียดทานภายในที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 2.2 ค่ามมเสียดทานภายในของดินกรุงเทพฯจากการทดสอบ SPT (วรากร, 2549)

สภาพดิน	ค่า N (ครั้งตอ่ฟุต)	มมเสียดทานภายใน (องศา)
ชั้นทรายชั้นแรก		
หลวม - ปานกลาง	4-30	28 - 36
ชั้นทรายชั้นที่สอง		
แน่น - แน่นมาก	31 - 50	36 - 41

สำหรับในดินเหนียวได้โดยใช้ความสัมพันธ์กับค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI หรือ I_p) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายใน กับค่าดัชนีพลาสติกสำหรับดินเหนียวโดย (Terzaghi et al., 1996)

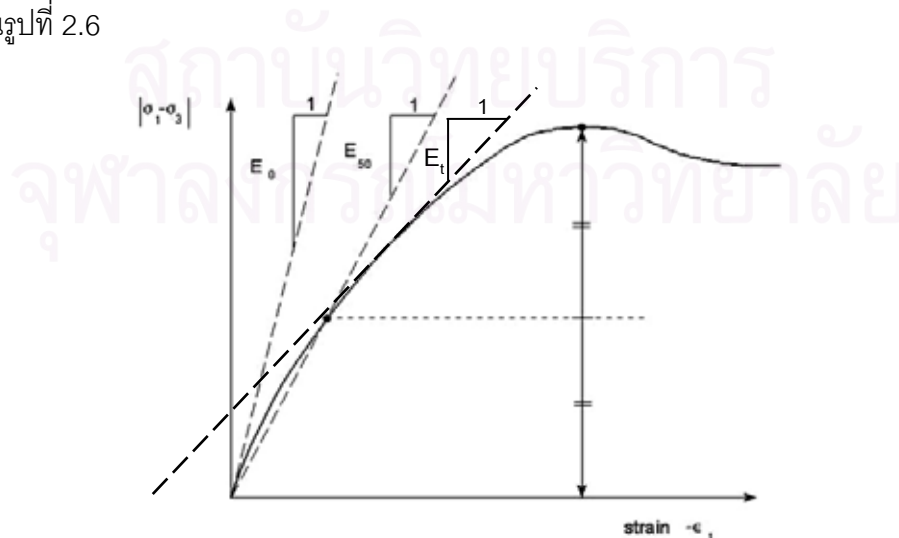
2.2.2 สมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของดิน

สมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของดิน แบ่งออกเป็นของดินเม็ดละเอียดและดินเม็ดหยาบ

2.2.2.1 ดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soil)

1. โมดูลัสความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Modulus of Elasticity, E_u)

ค่าโมดูลัสของดินนั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ในทางปฏิบัติ ผู้ออกแบบมักจำเป็นต้องประมาณค่าดังกล่าวจากข้อมูลคุณสมบัติอื่นๆของดิน เช่น จากค่ากำลังรับหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ หรือ จากประวัติหน่วยแรงกดทับของดิน เป็นต้น ซึ่งค่าโมดูลัสที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นมักหมายถึงค่า Secant Modulus (E_{50}) ซึ่งมีความแตกต่างกับค่าโมดูลัสชนิดอื่นๆ อีกสองชนิดคือ Initial Modulus (E_0) และ Tangent Modulus (E_t) ความแตกต่างของค่าโมดูลัสทั้ง 3 ชนิดนี้แสดงในรูปที่ 2.6

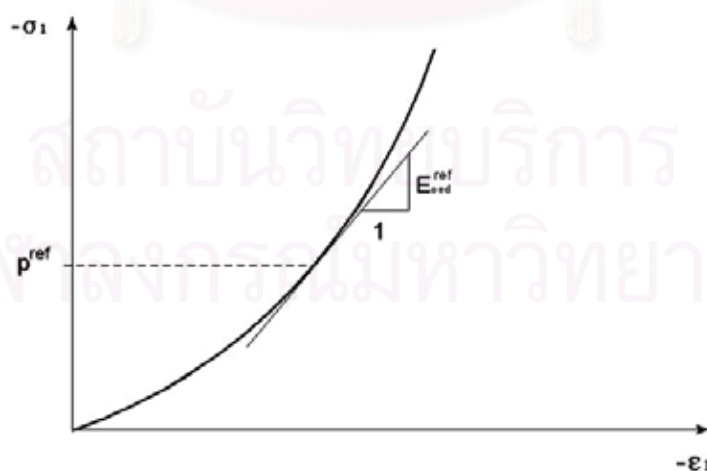


รูปที่ 2.6 นิยามของค่าโมดูลัสชนิดต่างๆ (Plaxis Manual, 1998)

เนื่องจากค่า Tangent Modulus และ Secant Modulus นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของหน่วยแรงเค้นในการเขียนสัญลักษณ์นิยมใช้ตัวห้อยเพื่อบอกว่าค่าที่ใช้เป็นค่าที่วัดเมื่อความเค้นมีค่าเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของความเค้นสูงสุด เช่น E_{50} หมายถึงค่าโมดูลัสที่ 50 % ของความเค้นสูงสุด สาเหตุที่นิยมใช้ค่า Secant Modulus นั้น เพราะว่าเป็นค่าที่เฉลี่ยผลตอบสนองของดินตั้งแต่เริ่มรับแรงกระทำไปจนกระทั่งเกิดการพังทลาย

สำหรับความชันของเส้นการยุบอัดตัวคายน้ำของดินในช่วงอัดตัวแน่นปกติและช่วงอัดตัวแน่นปกติและช่วงอัดตัวแน่นเกินตัวนั้นมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อพูดในอีกนัยหนึ่งนั้นอาจกล่าวได้ว่า ความชันหรือโมดูลัสในกรณีเพิ่มแรงกระทำและลดแรงกระทำต่อดินนั้นมีค่าไม่เท่ากัน (Loading and Unloading Condition, Compression and Recompression Condition) เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วค่าโมดูลัสสำหรับงานประเภทขุด ค้ำยัน หรืออุโมงค์ ก็ควรจะมีความแตกต่างจากโมดูลัสสำหรับการวิเคราะห์งานดินถม หรืองานฐานราก

โดยทั่วไปแล้วค่าที่ได้จากการทดสอบในเครื่องทดสอบ 3 แกนนั้นมักเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในการประมาณค่าคุณสมบัติดังกล่าว อย่างไรก็ตามการทดสอบดังกล่าวมักใช้เวลานานและเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าการทดสอบแบบอื่น การทดสอบอีกแบบหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าโมดูลัสได้คือการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำใน 1 มิติ หรือ Oedometer Test ซึ่งมักได้ผลการทดสอบออกมาในรูปของกราฟกึ่งลอการิทึมระหว่างอัตราส่วนช่องว่าง และหน่วยแรงเค้นประสิทธิผล เมื่อแปลงค่าดังกล่าวในรูปของหน่วยแรงเค้นประสิทธิผลและผลหารของอัตราส่วนช่องว่างด้วยปริมาตรจำเพาะจะได้ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ซึ่งสามารถหาค่าโมดูลัสของความชันของกราฟดังกล่าวได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (จิวรัตน์, 2548)



รูปที่ 2.7 การหาค่าโมดูลัสจากการยุบตัวคายน้ำใน 1 มิติ (Plaxis Manual, 1998)

ค่าโมดูลัสที่หาได้จากการทดสอบ Oedometer เรียกว่า E_{oed} ซึ่งมีค่าแตกต่างจาก Secant Modulus ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสภาพเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการทดสอบยุบอัดตัวคายนี้นั้นมีการจำกัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ค่าโมดูลัสที่หาได้จึงเป็นค่าเฉพาะกรณีและจำเป็นต้องปรับแก้ไปเป็นค่าโมดูลัสในสภาพทั่วไปเสียก่อนโดยใช้ความสัมพันธ์

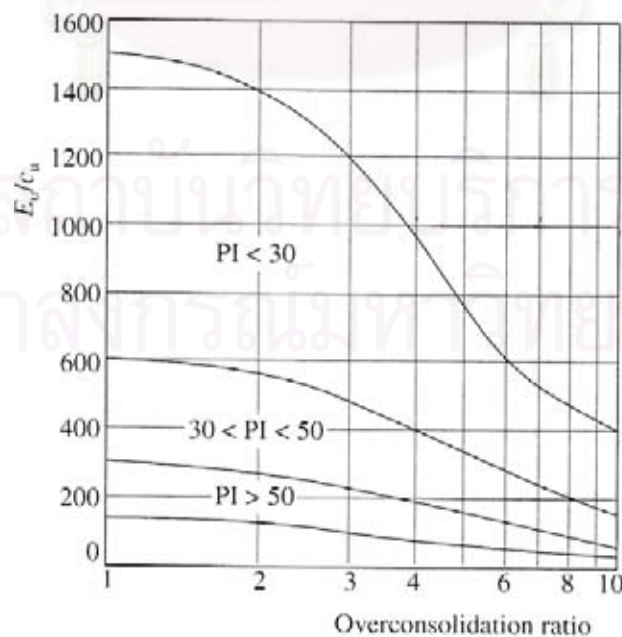
$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} E_{\text{oed}}$$

ในกรณีที่สมมุติให้อัตราส่วนปัวส์ซองที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ (End of Consolidation) มีค่าเท่ากับ $1/3$ ค่าโมดูลัสทั้งสองจะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$E = \frac{2}{3} E_{\text{oed}}$$

และในกรณีที่ปัวส์ซองมีค่าน้อยค่าดังกล่าวจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ในปีค.ศ. 1979 Jamiolkowski *et al* ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{E_u}{s_u}$ กับ ค่า Overconsolidation Ratio (OCR) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยในที่นี้สำหรับดินกรุงเทพฯค่า $\frac{E_u}{s_u}$ ที่เลือกใช้อู่ระหว่าง 100-200



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_u และค่า OCR (Jamiolkowski *et al.*, 1979)

สรุปค่าอัตราส่วนระหว่าง $\frac{E_u}{s_u}$ สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS ของงานอุโมงค์ชั้นดินกรุงเทพฯ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{E_u}{s_u}$ ของดินเม็ดละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (วันชัย, 1999)

ชั้นดิน	s_u (ตันต่อตร.ม.)	$\frac{E_u}{s_u}$
ดินถม	3.5	300
ดินเหนียวอ่อน	1.7-2.2	240
ดินเหนียวแข็งมาก	10.0-15.0	480

ในการวิเคราะห์หาค่าการอัดตัวครั้งที่ 1 (Primary Compression) ค่าสัดส่วนการอัดตัว (Compression Ratio, CR) มีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index, C_c) ดังนี้

$$CR = \frac{C_c}{1 + e_0}$$

เมื่อ e_0 = อัตราส่วนช่องว่าง โดยที่ดินเหนียวอ่อนชั้นแรกของกรุงเทพฯ มีค่า C_c อยู่ประมาณ 0.004 ถึง 0.005 w_n (สุรฉัตร, 2540) และสมศักดิ์ (2528) พบว่าสำหรับดินเหนียวแข็งชั้นแรกของกรุงเทพฯ ค่า CR ขึ้นกับค่า PL ดังนี้

$$CR = 0.012 (PL - 13.71)$$

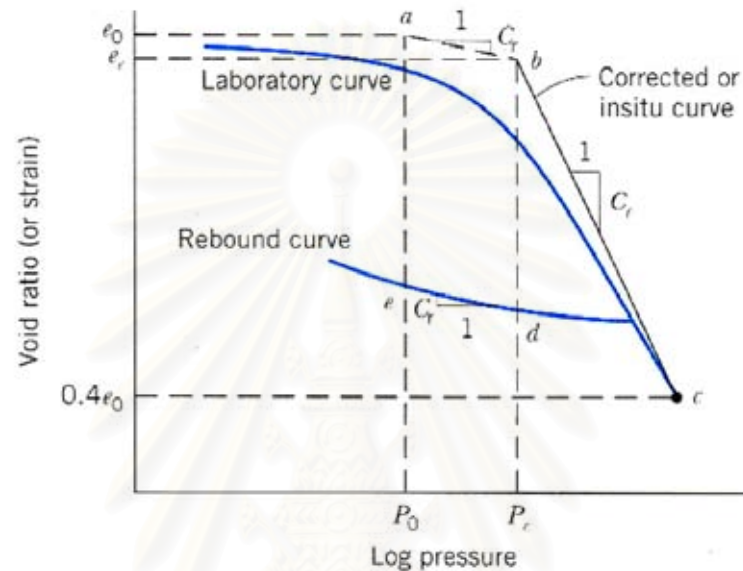
สำหรับค่าสัดส่วนการอัดตัวซ้ำ (Recompression Ratio, RR) มีความสัมพันธ์กับค่า ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index, C_r) ดังนี้

$$RR = \frac{C_r}{1 + e_0}$$

โดยที่ดินเหนียวแข็งชั้นแรกของกรุงเทพฯ มีค่า RR สัมพันธ์กับค่า w_n ดังนี้

$$RR = 0.0035 (w_n - 22.90) \quad (\text{สูตรจักร, 2540})$$

และรูปที่ 2.9 แสดงนิยามค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว และสัมประสิทธิ์การอัดตัวซ้ำและหน่วยแรงสูงสุดในอดีต



รูปที่ 2.9 นิยามค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว สัมประสิทธิ์การอัดตัวซ้ำและหน่วยแรงสูงสุดในอดีต (Cernica, 1995)

หน่วยแรงประสิทธิ์ผลสูงสุดในอดีต (Maximum Past pressure หรือ Preconsolidation Pressure, P_c) เป็นค่าที่แสดงถึงหน่วยแรงภายนอกในอดีตที่กระทำกับมวลดิน โดยเป็นจุดเปลี่ยนความโค้งของกราฟความสัมพันธ์การอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ซึ่งจุดเปลี่ยนความโค้งสามารถหาได้จากการลากเส้น VCL (Virgin Compression Line) ซึ่งเป็นเส้นที่ขนานกับเส้น Compression Index (C_c) ตัดกับเส้น RCL (Recompression Line) ซึ่งเป็นเส้นที่ขนานกับเส้น Recompression Index (C_r) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

2 โมดูลัสความยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำ (Drained Modulus of Elasticity, E')
ค่านี้หาได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนหรืออาศัยทฤษฎียืดหยุ่น ได้แก่

$$E' = 3K(1 - 2\nu')$$

เมื่อ K คือโมดูลัสของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Bulk Modulus)

ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นในสภาพระบายน้ำกับโมดูลัสยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำได้แก่

$$E_u = \frac{3E'}{2(1+\nu')}$$

เมื่อ E' = Drained Modulus

E_u = Undrained Modulus

อัตราส่วนของ Poisson (Poisson's Ratio, ν') เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างการยุบตัวของมวลดินในแนวแรงต่อการขยายตัวของมวลดินในแนวตั้งฉากกับแรง โดยดินเม็ดละเอียดเมื่อปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงและโมดูลัสของดินที่ใช้เป็นแบบไม่ระบายน้ำ อัตราส่วนของปัวซองจะมีค่าเท่ากับ 0.5

สัมประสิทธิ์การอัดตัวครั้งที่ 2 (Coefficient of Secondary Compression, C_α) เป็นพฤติกรรมทรุดตัวที่เกิดขึ้นหลังจากการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นลง โดยการทรุดตัวนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และขึ้นกับเวลา โดยคุณสมบัติการทรุดตัวแบบนี้จะนิยามโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวระยะที่สอง

2.2.2.2 ดินเม็ดหยาบ (Coarse Grained Soil)

1. โมดูลัสความยืดหยุ่น ในสภาพระบายน้ำ (Drained Modulus of Elasticity, E')

ในกรณีของดินเม็ดหยาบ หรือ ดินทรายเมื่อไม่สามารถหาค่าโมดูลัสจากการทดสอบได้โดยตรงอาจประยุกต์ใช้ค่าซึ่งรายงานโดย Janbu (1985) ดังสมการ

$$E_{\text{oad}} = a \sqrt{\sigma'_v}$$

เมื่อ E_{oad} และ σ'_v อยู่ในหน่วย kPa และ a มีค่าอยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,500 (สำหรับทรายหลวมถึงทรายแน่น) หรือแสดงในรูปโมดูลัสทั่วไปได้ดังนี้

$$E = b \sqrt{\sigma'_v}$$

โดยที่ b มีค่าอยู่ระหว่าง 666 ถึง 3,333

นอกจากนี้ยังอาจประมาณโมดูลัสของดินทรายจากการทดสอบ Cone Penetration Test (CPT) ได้ด้วยโดยได้มีรายงานไว้ว่าค่าต้านทานของโคน (q_c) มีความสัมพันธ์กับค่า E_{oad} ดังนี้

$$E_{\text{oad}} = \alpha q_c$$

โดยค่า α มีค่าระหว่าง 1-3 (โดยปกติใช้ค่าเท่ากับ 3) (ฐิรวัตถ, 2548)

ค่าอัตราส่วนระหว่าง $\frac{E_u}{s_u}$ สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS ของงานอุโมงค์ชั้นดินกรุงเทพฯ ดังนี้ (วันชัย, 1999)

$$E' = 200N' \text{ ตันต่อ ตร.ม.}$$

2.2.3 สมบัติทางด้านการซึมของน้ำในดิน

ด้วยความแตกต่างของพลังงานศักย์ และพลังงานความดันของน้ำในโพรง น้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะไหลจากจุดที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังจุดที่มีพลังงานต่ำกว่าอย่างช้าๆ ปริมาณการไหลของน้ำ และอัตราการไหลของน้ำขึ้นอยู่กับสมบัติทางด้านการซึมของดินซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึม (Coefficient of Permeability) การไหลของน้ำเกิดขึ้นโดยอัตราส่วนช่องว่างไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่ดินไม่ถูกหนอยแรงมากกระทำหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงในหน่วยแรงประสิทธิผล ค่าการซึมของน้ำในดินกรุงเทพฯแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าการซึมของน้ำในดินกรุงเทพฯ (Duangkhae, 1970)

ชั้นดิน	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านแนวตั้ง (k_v), ซม.ต่อวินาที	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านแนวราบ (k_h), ซม.ต่อวินาที	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านดินที่ถูกרבกวน (Remolded, k_r), ซม.ต่อวินาที
ดินตะกอนชั้นบน	8×10^{-5}	6×10^{-5}	2×10^{-5}
ดินตะกอนชั้นล่าง	6×10^{-8}	2×10^{-7}	2×10^{-8}
ดินเหนียวอ่อน	3×10^{-8}	6×10^{-8}	4×10^{-8}
ดินเหนียวแข็งมาก	3×10^{-9}	5×10^{-9}	3.5×10^{-9}

คุณสมบัติทางวิศวกรรมนอกจากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นยังมีผู้อื่นที่ได้วิจัยไว้อีกดังสรุปในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯที่เคยมีงานวิจัยในอดีต (วารสาร, 2549)

ลักษณะชั้นดิน	อ้างอิง	s_u (UC) (ตันต่อตร.ม.)	Sensitivity (UC)	s_u (Vane) (ตันต่อตร.ม.)	Sensitivity (Vane)	e_0	C_c	C_r	$c_v \cdot 10^{-4}$ (ตร.ซมต่อวินาที)	หมายเหตุ
ดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง	ศรีบุญฤทธิ์ (1977)	3.13±1.98	2.60±1.87	2.72±1.7	2.59±1.67	1.73±0.33	0.81±0.3	0.29±0.9		ดินตัวอย่างมีความลึก 2 – 14 ม.
	TSAI (1982)					2.06±0.32	1.11±0.21	0.17±0.4	1.64±0.59	ดินตัวอย่างที่ AIT
	TSAI (1982)					2.99±0.51	1.42±0.49	0.2±0.7	1.47±0.5	ดินตัวอย่างที่หนองงูเห่า
	TSAI (1982)					1.68±0.38	0.78±0.2	0.14±0.7	1.86±0.44	ดินตัวอย่างที่เขตปทุมวัน
	TSAI (1982)					2.19±0.38	0.87±1.3	0.17±0.06	2.04±1.1	ดินตัวอย่างที่ป้อมพระจุล
	Parentilla (1983)						0.21±1.4	0.16±0.18		
	กำธร (2529)	2.85±1.22								ดินตัวอย่างมีความลึก 0 – 14.02 ม.
กวีวงศ์ (2530)	2.4-3.4			2.4-4.9		1.1-1.6	0.5-0.6	0.05-1.4		
ดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก	Vongthieres (1966)		1.3-1.5							
	Hengchavovanich (1969)	5-15	1.3							
	ศรีบุญฤทธิ์ (1977)	15.6±9.15					0.30±0.22	0.15±0.08		ดินตัวอย่างมีความลึก 14 – 25 ม.
	Tasneenart (1984)									
	กำธร (2529)	6.93±2.4								
	กวีวงศ์ (2530)	10-12					0.74-0.84	0.74-0.84	0.03-0.08	

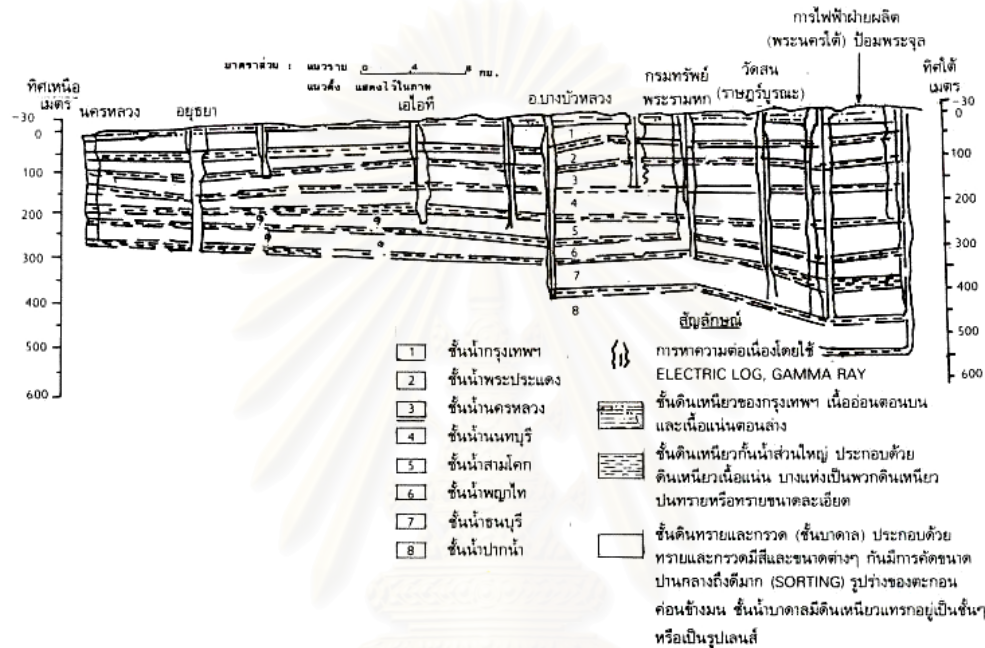
s_u (UC) = กำลังหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ; Sensitivity(UC) = ความไวจากการทดสอบหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ; s_u (Vane) = กำลังหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบด้วยใบมีด ; Sensitivity(Vane) = ความไวจากการทดสอบหน่วยแรงเฉือนด้วยใบมีด ; e_0 = อัตราส่วนของว่าง ; C_c = ดัชนีความยุบอัดตัว ; C_r = ดัชนีความยุบอัดตัวครั้งที่ 2 ; c_v = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ

2.3 ชั้นน้ำบาดาลกรุงเทพฯและปริมาตร

วินัย (2540) อธิบายในหนังสือวิศวกรรมน้ำบาดาลว่า กรุงเทพฯตั้งอยู่บริเวณที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนใต้ ใต้พื้นดินกรุงเทพฯลงไปมีแหล่งกวดทรายที่มีเม็ดขนาดใหญ่และกลมมนจึงมีช่องว่างสามารถซับน้ำบาดาลไว้ได้มาก ชั้นกวดทรายดังกล่าววางตัวสลับกับชั้นดินเหนียวจึงทำให้มีชั้นน้ำบาดาลหลายชั้นและแต่ละชั้นแยกออกจากกันโดยตลอด แต่ขยายไปทางทิศเหนือถึงจังหวัด

ชั้นน้ำทาง ด้านทิศตะวันตกและทิศตะวันออกของกรุงเทพฯจรดขอบแอ่งเจ้าพระยา และทางทิศใต้จรดอ่าวไทยถือได้ว่ากรุงเทพฯมีแหล่งน้ำบาดาลขนาดใหญ่และมีปริมาณมากที่สุดในประเทศไทย

ความหนาของชั้นกรวดทรายและดินเหนียวดังกล่าวมีความหนาและลึกมาก จากผลการเจาะสำรวจของกรมทรัพยากรธรณีพบว่าชั้นน้ำบาดาลในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลตั้งแต่ผิวดินลงไปมีความลึกประมาณ 600 ม. แบ่งได้เป็น 8 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และที่ระดับลึกกว่า 600 ม. ลงไปยังมีชั้นน้ำบาดาลอยู่แต่ยังไม่มีการนำขึ้นมาใช้ ชั้นน้ำบาดาลของกรุงเทพฯและปริมณฑลประกอบด้วย



รูปที่ 2.10 รูปหน้าตัดแสดงชั้นน้ำบาดาลบริเวณ เขตกรุงเทพมหานคร ในแนวเหนือ-ใต้ จากอำเภอ นครหลวงถึงป้อมพระจุล (กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี อ้างอิงโดย สง่า (2540))

ชั้นน้ำกรุงเทพฯ

มีความลึก 50 ม. มีความหนาเฉลี่ย 22 ม. เป็นชั้นที่มีปริมาณน้ำมากแต่คุณภาพของน้ำไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบริโภค เพราะส่วนใหญ่เป็นน้ำเค็มและน้ำกร่อย

ชั้นน้ำพระประแดง

มีความลึก 100 ม. เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นน้ำกรุงเทพฯ ลงไปมีความหนาประมาณ 20-25 ม. น้ำในชั้นนี้มีปริมาณมากแต่มีคุณภาพเป็นน้ำกร่อยและบางแห่งเป็นน้ำเค็ม เนื่องจากได้มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้มากโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมย่านถนนสุขสวัสดิ์ อำเภอพระประแดง จนทำให้เกิดผลกระทบทั้งปัญหาแผ่นดินทรุดและการรุกของน้ำเค็ม

ชั้นน้ำนครหลวง

มีความลึกประมาณ 50 ม. เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นน้ำพระประแดงลงไป มีความหนาประมาณ 50-70 ม. แผ่ขยายออกไปในแนวเหนือ-ใต้จนถึงจังหวัดชัยนาทและทางตะวันออก-ตะวันตก เป็นชั้นน้ำที่มีการสูบน้ำขึ้นมาใช้มากที่สุดเนื่องจากเป็นชั้นที่ให้น้ำดีทั้งปริมาณและคุณภาพ ยกเว้นบริเวณทางฝั่งธนบุรีและบริเวณตอนใต้ของกรุงเทพฯ ที่ให้น้ำกร่อยถึงน้ำเค็ม ป่อที่เจาะลึกถึงชั้นน้ำนครหลวงสามารถสูบน้ำได้ในอัตรา 100-200 ลบ.ม. ต่อชั่วโมง

ชั้นน้ำนนทบุรี

มีความลึก 200 ม. เป็นชั้นน้ำที่วางตัวขนานกับชั้นน้ำนครหลวงมีคุณสมบัติทางอุทกวิทยาคล้ายคลึงกับชั้นน้ำนครหลวงมีความหนาประมาณ 30-70 ม. สภาพน้ำบาดาลในชั้นน้ำนนทบุรีสามารถสูบน้ำปริมาณน้ำได้ถึง 150-300 ลบ.ม. ต่อชั่วโมง

ชั้นน้ำสามโคก

มีความลึกประมาณ 300 ม. วางตัวอยู่ใต้ชั้นน้ำนนทบุรีมีความหนาประมาณ 40-80 ม. ป่อน้ำที่เจาะลึกจนถึงชั้นจะอยู่บริเวณเหนือจังหวัดนนทบุรีจนถึงจังหวัดปทุมธานี คุณภาพน้ำบาดาลในชั้นนี้จะใกล้เคียงกับชั้นน้ำนนทบุรี แต่ปริมาณน้ำจะน้อยกว่า

ชั้นน้ำพญาไท

มีความลึก 350 ม. หนาประมาณ 40-60 ม. สภาพน้ำบาดาลคล้ายคลึงกับชั้นน้ำสามโคก โดยมีแหล่งน้ำจืดเฉพาะด้านทิศเหนือ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ ส่วนทางทิศใต้และนนทบุรีจะเป็นแหล่งน้ำเค็ม

ชั้นน้ำธนบุรี

มีความลึก 450 ม. ประกอบด้วยชั้นทรายแทรกสลับกับชั้นดินเหนียวอยู่ 3 ชั้น รวมความหนาประมาณ 50-100 ม. น้ำบาดาลในชั้นธนบุรีส่วนใหญ่เป็นน้ำจืดหรือค่อนข้างจืดยกเว้นบริเวณด้านทิศตะวันตกหรือทิศตะวันตกเฉียงใต้ที่มีน้ำกร่อยถึงน้ำเค็ม

ชั้นน้ำปากน้ำ

มีความลึก 550 ม. จัดเป็นชั้นน้ำที่ลึกที่สุด ให้น้ำจืดที่มีคุณภาพดีที่สุดทุกบริเวณ ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เจาะบ่อบาดาลและสูบน้ำจากชั้นน้ำนี้

2.4 หลักการพื้นฐานของการทรุดตัว

เมื่อน้ำหนักกระทำกับดินเหนียวที่อิ่มตัว ซึ่งมีค่าความสามารถซึมผ่านได้ (Permeability) ต่ำ ในทันทีทันใด ภายหลังจากการให้น้ำหนัก น้ำในโพรงจะเป็นตัวที่รับน้ำหนักไว้ทั้งหมดและต่อมาเมื่อน้ำในโพรงระบายออก น้ำหนักจะถูกส่งถ่ายไปยังเม็ดดิน ซึ่งจะยังผลให้ปริมาณของช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง ปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้เป็นสิ่งที่รู้กันทั่วไปว่าคือขบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ในทางปฏิบัติจะถือว่าการทรุดตัวของฐานรากที่ตั้งบนดินเหนียวที่อิ่มตัวประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

การทรุดตัวทันที (Immediate Settlement, ρ_i)

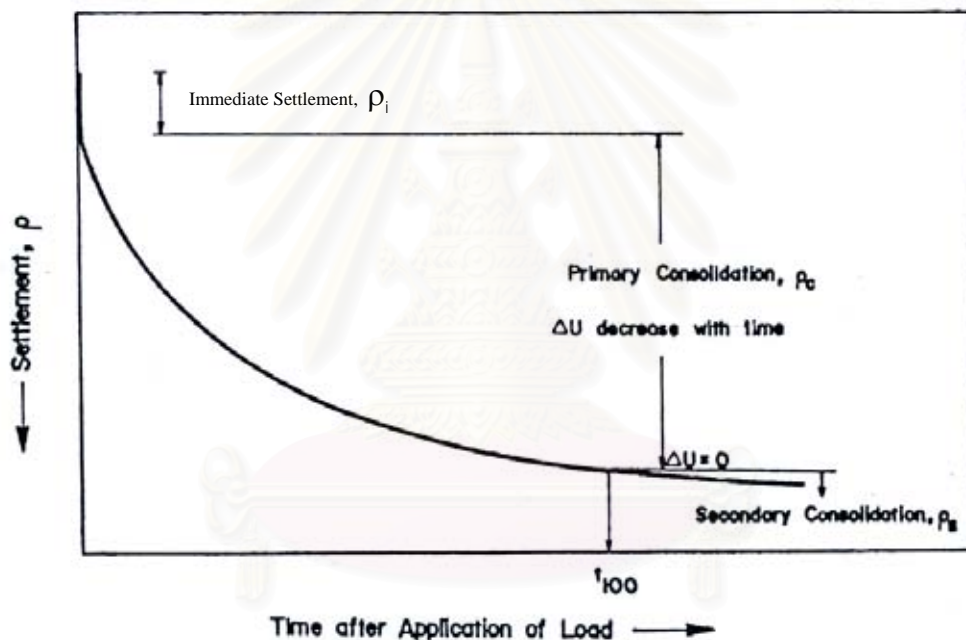
การทรุดตัวขั้นแรก (Primary Consolidation Settlement, ρ_c)

การทรุดตัวขั้นที่สอง (Secondary Consolidation Settlement, ρ_s)

การทรุดตัวทั้งหมด (Total Settlement, ρ_t) ของดินเหนียวอิ่มตัวคือ

$$\rho_t = \rho_i + \rho_c + \rho_s$$

โดยจะถือว่าการทรุดตัวเป็นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แต่ในความเป็นจริงแล้วบางส่วนของ การทรุดตัวขั้นที่สองสามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกับการทรุดตัวขั้นแรก

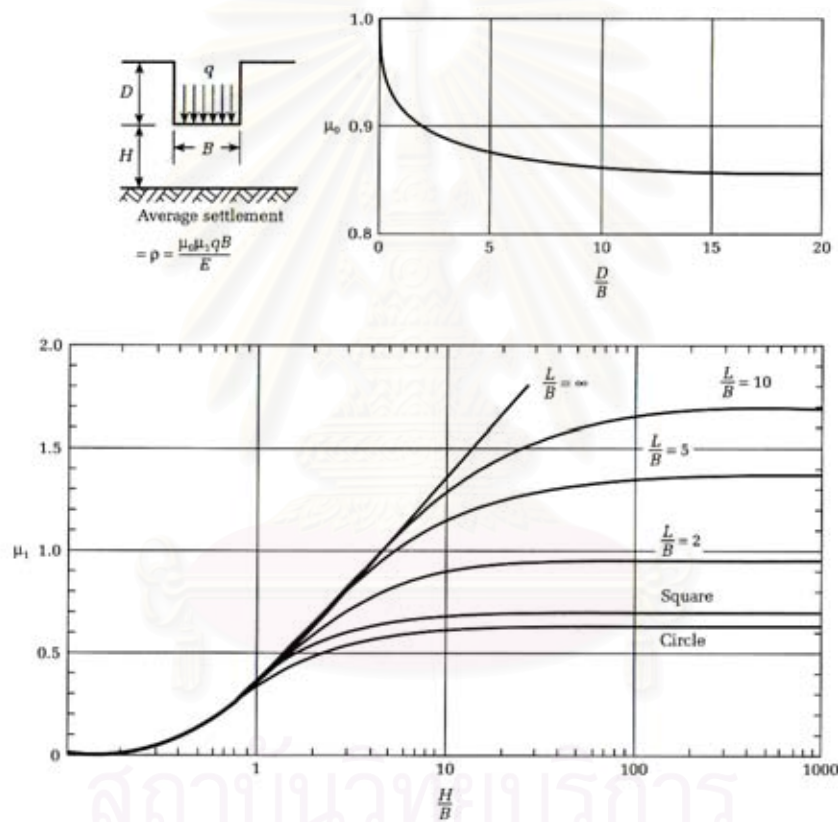


รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของการทรุดตัว (สุรฉัตร, 2540)

2.4.1 การทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate Settlement) เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในทันทีทันใดภายหลังจากดินได้รับหน่วยแรงกระทำภายนอกและมักจะสิ้นสุดภายหลังจากก่อสร้าง สำหรับการประมาณการทรุดตัวทันทีทันใดนี้ จะใช้ทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) โดยสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) จะใช้สมการของ Christian and Carrier (1978) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังนี้

$$\rho_i = \frac{\mu_0 \mu_1 q_n B}{E_d}$$

- โดยที่
- ρ_i = ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยทันทีที่ทันใด
 - μ_0 = ค่าสัมประสิทธิ์ ขึ้นกับความลึกของโครงสร้าง (D) และความกว้างของโครงสร้าง (B)
 - μ_1 = ค่าสัมประสิทธิ์ ขึ้นกับรูปร่างของโครงสร้างและความหนาของชั้นดินที่ได้รับหน่วยแรงกระทำจากโครงสร้าง
 - q_n = แรงดันฐานรากสุทธิ (Net Foundation Pressure)
 - E_d = ค่าโมดูลัสแบบระบายน้ำ (Drained Modulus)



รูปที่ 2.12 การวิเคราะห์การทรุดตัวทันทีที่ทันใด (Christian and Carrier, 1978)

โดยที่การกระจายของหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้าง (Stress Distribution) จะคิดให้หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างกระจายลงสู่ดินแบบประมาณโดยให้มีอัตราส่วนของการกระจายหน่วยแรง 3:1 (ตั้ง:ราบ)

2.4.2 การทรุดตัวอันเนื่องมาจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Settlement) เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในดินที่มีความชื้นแน่น โดยที่แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) ที่เกิดขึ้นภายหลังจากดินได้รับหน่วยแรงกระทำภายนอกจะค่อยๆ ระบายออกจากมวลดิน

ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลจะค่อยๆเพิ่มขึ้นและเกิดการทรุดตัว ดินที่มีความเชื่อมแน่นจะมีค่าความซึมน้ำต่ำ น้ำสามารถไหลผ่านได้ยาก ทำให้การทรุดตัวอันเนื่องมาจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำนี้ต้องใช้เวลานาน

การประมาณการทรุดตัวอันเนื่องมาจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำของดินจะใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติของ Terzaghi ซึ่งสามารถหาการทรุดตัวได้จากสมการดังนี้ สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นที่มีค่า Overconsolidation Ratio (OCR) เท่ากับ 1;

$$\rho_c = \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_c}{(1+e_o)} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{vo}} \right) L \right]_j$$

สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นที่มีค่า OCR มากกว่า 1;

$$\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v \leq \sigma'_p; \quad \rho_c = \sum_{j=1}^n \left[\frac{C_r}{(1+e_o)} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{vo}} \right) L \right]_j$$

$$\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v > \sigma'_p; \quad \rho_c = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{C_r}{(1+e_o)} \log \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \right) + \frac{C_c}{(1+e_o)} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_p} \right) \right) L \right]_j$$

โดยที่ ρ_c	=	การทรุดตัวอันเนื่องมาจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำ
C_r	=	ดรรชนีการความยุบอัดตัวครั้งที่ 2 (Recompression Index)
C_c	=	ดรรชนีความยุบอัดตัว (Compression Index)
e_o	=	อัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (Initial Void Ratio)
$\Delta\sigma_v$	=	หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงกระทำภายนอก
σ'_p	=	หน่วยแรงก่อนการอัดตัวคายน้ำ (Preconsolidation Stress)
σ'_{vo}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลแนวตั้งเริ่มต้น (Initial Vertical Effective Stress)
L	=	ความหนาของชั้นดินที่เกิดการทรุดตัว

อัตราการทรุดตัว (Rate of Settlement) ใช้ทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำในหนึ่งมิติของ Terzaghi ซึ่งสามารถคำนวณหาการทรุดตัวที่เวลาต่างๆได้ดังสมการ

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

โดยที่	T_v	=	Time Factor	
	T_v	=	$\frac{\pi}{4} U_v^2$	เมื่อ U_v น้อยกว่า 50 %
	T_v	=	$-\frac{4}{\pi^2} \left[\ln \frac{\pi^2}{8} (1 - U_v) \right]$	เมื่อ U_v มากกว่า 50 %
	U_v	=	องศาของการอัดตัวคายนํ้า (Degree of Consolidation)	
	c_v	=	สัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้า (Coefficient of Consolidation)	
	t	=	ระยะเวลาในการทรุดตัว	
	H	=	ระยะระบายนํ้าสูงสุด (Maximum Drainage Distance)	

2.4.3 การทรุดตัวขั้นที่ 2 (Secondary Consolidation, ρ_s)

หลักการคาดคะเนการทรุดตัวที่เกิดจากการอัดตัวครั้งที่ 2 หาได้จากสมการ

$$\rho_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \log \left(\frac{t_f}{t_{eop}} \right) H_i$$

t_f = เวลาที่สนใจในช่วงการทรุดตัวขั้นที่ 2

t_{eop} = เวลาที่จุดสิ้นสุดการอัดตัวคายนํ้าขั้นแรก (End of Primary

Consolidation)

2.5 ระเบียบวิธีการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method)

จิรวัตตร (2548) สรุปหลักการของวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์เริ่มจากการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาที่จะทำการคำนวณออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งอิลิเมนต์ย่อยนี้เองเราจำเป็นต้องสร้างสมการขึ้นมาสำหรับอิลิเมนต์นั้น ซึ่งสมการของอิลิเมนต์ดังกล่าวขึ้นตรงอยู่กับลักษณะของปัญหาที่เราต้องการแก้ เช่น ปัญหาทางด้านของแข็ง การถ่ายเทความร้อน หรือการไหล เป็นต้น เมื่อได้สมการของแต่ละอิลิเมนต์แล้ว จึงนำสมการของทุกอิลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดระบบสมการใหญ่ จากนั้นจึงทำการกำหนดกฎเกณฑ์ขอบเขตแล้วจึงแก้ระบบสมการใหญ่นั้นออกมาเพื่อผลลัพธ์ที่ต้องการ

จากลำดับขั้นตอนคร่าวๆดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าหัวใจที่สำคัญของวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์นี้คือ การสร้างสมการของอิลิเมนต์ขึ้นมาเพื่อให้สามารถจำลองแบบหรือปัญหาได้อย่างถูกต้อง การสร้างสมการของอิลิเมนต์สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีอาจมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป วิธีที่









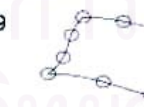




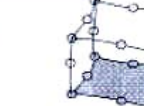

ง่ายที่สุดโดยเฉพาะในการเริ่มต้นเรียนวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ก็คือ การสร้างสมการของอิลิเมนต์ขึ้นมา จากความเข้าใจที่ง่าย ๆ โดยตรง

สำหรับในงานวิศวกรรมนั้น ระเบียบวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) ในงานวิศวกรรมปฐพีนั้นลักษณะของ ปัญหาจะแตกต่างไปจากงานวิศวกรรมอื่นๆ เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ หน่วยแรงที่ควบคุมพฤติกรรมของดิน ไม่ใช่หน่วยแรงรวมแต่เป็นหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ของหน่วยแรงจึงยุ่งยากกว่าวัสดุอื่น

วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยๆ 6 ขั้นตอนตามลำดับการคำนวณดังต่อไปนี้

1. การแบ่งชั้นดินออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (Discretisation) เช่น เป็นชิ้นส่วนรูปกล่องสี่เหลี่ยมที่วางเรียงซ้อนกัน (ผลลัพธ์ที่ได้จึงเหมือนการแบ่งบริเวณปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่นับได้) ชิ้นส่วนเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นโดยลักษณะทางเรขาคณิตง่ายๆ เป็นหลายรูปหลายเหลี่ยม (Polygons) และใช้จุดมุมต่างๆ (Nodes) เป็นส่วนสำคัญในการคำนวณพฤติกรรมของชิ้นส่วนนั้นๆ

ในรูปที่ 2.13 ได้แสดงถึงอิลิเมนต์ต่างๆ ที่นิยมนำมาใช้ในสภาพปัญหา 1 มิติ (อิลิเมนต์หมายเลข 1 ถึง 3) สภาพปัญหา 2 มิติ (อิลิเมนต์หมายเลข 4 ถึง 9) และ สภาพปัญหา 3 มิติ (อิลิเมนต์หมายเลข 10 ถึง 15)

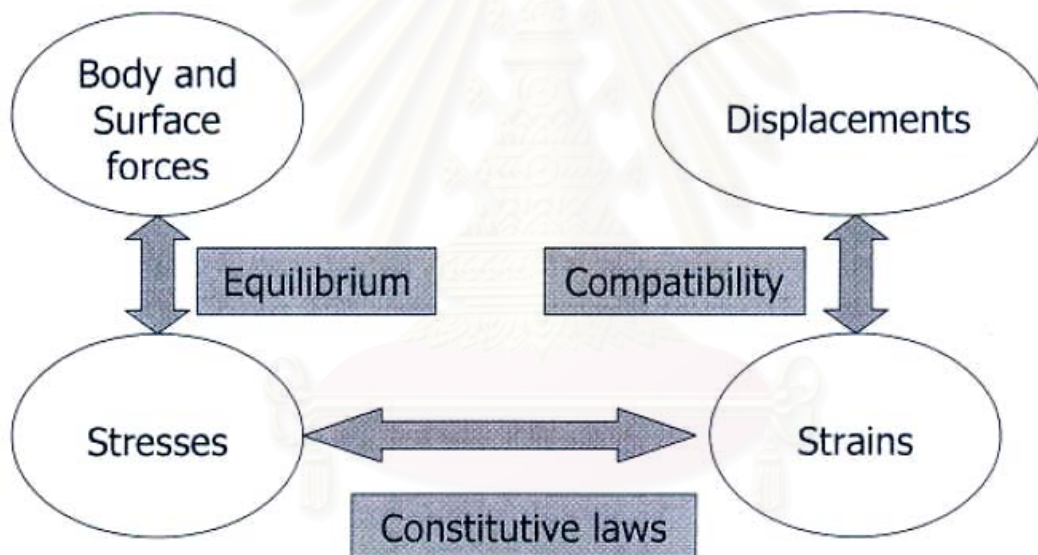
Linear elements	Quadratic elements	Cubic elements
1 	2 	3 
4 	5 	6 
7 	8 	9 
10 	11 	12 
13 	14 	15 

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของอิลิเมนต์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (จิรวัตร, 2548)

2. สร้างเมตริกความแข็งแรงของชิ้นส่วน (Build Element Stiffness Matrix) เมื่อแบ่งขอบเขตใหญ่ออกเป็นชิ้นส่วนย่อยแล้ว จะพิจารณาสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วน ซึ่งจะนำไปสู่สมการสมดุลของแรงชุดหนึ่ง การสร้างสมการในขั้นตอนนี้อาจจำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุนั้น (Constitutive Law or Constitutive Equations) เช่นเป็นวัสดุที่ประพฤติตามกฎของฮุก หรือเป็นวัสดุแบบบิลาสติก-พลาสติกและมีกำลังตามเกณฑ์ของมอร์-คูลอมป์ เป็นต้น

ถึงแม้ว่าเกณฑ์ด้านพฤติกรรมของวัสดุนี้เป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งในการจำลองปัญหาให้ได้ใกล้เคียงความเป็นจริง วิศวกรมักชอบที่จะใช้แบบจำลองพฤติกรรมง่ายๆ เช่นสมมุติให้วัสดุเป็นแบบบิลาสติกและเป็นวัสดุแบบมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Material) การจำลองแบบง่ายนี้ไม่ใช่สิ่งที่ไม่ดีตรงเท่าที่ค่าความผิดพลาดนั้นมีค่าน้อยและยอมรับได้

ความสัมพันธ์ด้านความเค้น-ความเครียดนี้ใช้เชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนที่และแรงโดยผ่านทางความเครียดและความเค้น ลักษณะความสัมพันธ์นี้ได้แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และแรงผ่านทางแบบจำลองพฤติกรรมของดิน (ฐิรวัดร, 2548)

สมการสำหรับหาค่าเมตริกซ์ความแข็งแรงระดับอีลิเมนต์ (Element Stiff Matrix), k , นั้นสามารถพัฒนาขึ้นจากสมดุลของแรง โดยใช้เทคนิคต่างๆเช่น วิธี Virtual Work, Weight Residual หรือ Variational Principle ในรูปแบบมาตรฐาน ค่าเมตริกซ์ k จะหาได้ดังสมการ

$$[k]^e = \int_{V_e} [B]^T [C] [B] dv \quad \text{เมื่อ} \quad [\epsilon] = [B][u]$$

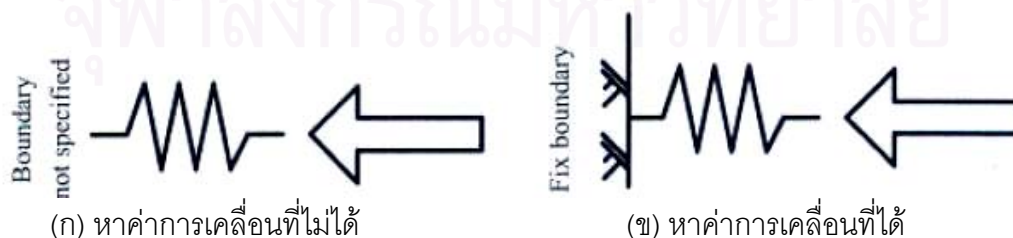
โดยที่ $[B]$ คือเมตริกซ์ที่ใช้แปลงการเคลื่อนที่ให้เป็นความเครียด $[C]$ คือเมตริกซ์ที่ใช้แปลงจากความเครียดเป็นความเค้น (Constitutive Matrix) การหาค่าอินทิเกรตในสมการข้างต้นนั้นจะใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธีของเกาส์ (Gauss Integration Scheme) ซึ่งเป็นวิธีการอินทิเกรตที่ให้ความแม่นยำสูง

3. รวมเมตริกซ์ความแข็งแรงแต่ละตัวซึ่งเป็นแต่ละปัญหาย่อยเข้าเป็นปัญหาใหญ่ (Assembly of Global Stiffness) เมื่อนำสมการสมดุลของแรงจากแต่ละชิ้นส่วนมาเขียนรวมกันจะทำให้เกิดระบบของสมการขึ้นในรูปทั่วไปแล้วสมการเหล่านี้จะสามารถเขียนได้ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$[K][U] = [F]$$

โดยที่ $[K]$ คือเมตริกซ์ความแข็งแรงของระบบ $[U]$ คือเมตริกซ์ของการเคลื่อนที่ของจุดมุมต่างๆ และ $[F]$ คือเมตริกซ์ของแรงกระทำภายนอกที่มีต่อระบบปัญหา โดยส่วนใหญ่แล้วเมตริกซ์ $[F]$ จะเป็นค่าที่ทราบอยู่แล้ว ในขณะที่เมตริกซ์ $[K]$ จะต้องคำนวณขึ้นมาและเมตริกซ์ $[U]$ จะเป็นเมตริกซ์ที่ไม่ทราบค่าซึ่งต้องแก้สมการหาค่าออกมา

4. กำหนดข้อมูลสภาพขอบเขต (Boundary Condition) เมื่อสร้างสมการได้แล้ว สิ่งหนึ่งที่จะต้องพิจารณาเพื่อหาค่าเฉลยคือข้อมูลด้านสภาพแวดล้อม เช่น มีบริเวณใดบ้างที่ดินไม่สามารถเคลื่อนตัว (Fixed boundary Condition) หรือบริเวณใดบ้างที่ดินได้รับแรงกระทำ รวมทั้งแรงกระทำนั้นมีค่าเท่าไรเป็นต้น บทบาทสำคัญสำหรับเงื่อนไขขอบเขตนี้คือการทำให้สามารถหาค่าผกผันของเมตริกซ์ $[K]$ ได้ (Nonsingular Matrix) ตัวอย่างง่ายๆ ที่เห็นได้ชัดเช่นการคำนวณหาค่าการหดตัวของสปริงนั้นถ้ามีจุดรองรับสปริงไว้ที่ด้านใดด้านหนึ่งก็จะมีจุดยึดตัวเกิดขึ้นได้ แต่ถ้าไม่มีจุดรองรับสปริงไว้สิ่งที่เกิดขึ้นในความเป็นจริงคือสปริงจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปได้เรื่อยๆ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ไม่สามารถหาค่าออกมาได้ เพราะไม่เป็นความสัมพันธ์ในลักษณะ 1 ต่อ 1 ลักษณะเช่นนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสำคัญของเงื่อนไขขอบเขตที่มีต่อการหาค่าเฉลยของระบบสมการ (ลู่วิวตร์, 2548)

5. หาค่าการเคลื่อนตัว (Primary Solution) เมื่อข้อมูลเรื่องสภาพขอบเขตได้รับการรวมเข้าไปในระบบสมการแล้วขั้นตอนต่อไปคือการแก้ระบบสมการนั่นเอง ในกรณีไฟไนต์อีลิเมนต์ นั้นค่าการเคลื่อนตัวของจุดมุมจะหาได้จาก

$$[u] = [K]^{-1} [F]$$

วิธีแก้สมการหาค่า $[U]$ นั้นจำเป็นต้องหาค่าผกผันของเมตริกซ์ $[K]$ ($[K]^{-1}$) เทคนิคที่ใช้ในการหาค่า $[K]^{-1}$ นั้นมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียและขีดจำกัดแตกต่างกันไป วิธีเหล่านี้มีตัวอย่างเช่น LU Factorization, Choleski Factorization, Conjugate Gradient, Successive Over Relaxation เป็นต้น

6. หาค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวที่ได้ (Secondary Solution) ค่าการเคลื่อนที่จากขั้นตอน 5 จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดได้จากลักษณะเช่นนี้ จึงอาจเรียกการเคลื่อนที่ของจุดมุมต่างๆ ว่าเป็นผลเฉลยปฐมภูมิ และค่าความเค้น ความเครียดว่าเป็นผลเฉลยทุติภูมิ

$$[\varepsilon] = [B][u]$$

$$[\sigma] = [C][\varepsilon] = [C][B][u]$$

ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ คือการวิเคราะห์ผลการคำนวณเนื่องจากไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นเพียงแค่เทคนิคในการแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ชนิดหนึ่งเท่านั้น ถ้าแบบจำลองพฤติกรรมของดินที่ใช้มีความไม่ถูกต้องหรือมีการจำลองสภาพปัญหาที่ไม่ถูกต้องแล้ว ค่าทางตัวเลขที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ก็จะไม่มี ความหมายแต่อย่างใด ปัญหานี้เป็นอย่างเดียวกันกับการตั้งค่าสมการคณิตศาสตร์ที่ผิดกับสภาพทางฟิสิกส์ ถึงแม้ว่าจะมีสมการเกิดขึ้นและนักคณิตศาสตร์สามารถหาคำตอบของระบบสมการออกมาได้ ค่าผลเฉลยที่ได้ก็ไม่มี ความหมายทางกายภาพแต่อย่างใด

2.6 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ลูิวัวตอร์ (2548) สรุปการวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS เนื่องจากโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีงานวิจัยรองรับหลายงาน โดยโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1974 โดย Pieter Vermeer จาก Delft University of Technology

ระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่ง เพื่อหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หลักการของวิธีคำนวณนี้คือ การวิเคราะห์โดยแบ่งบริเวณของปัญหาออกเป็นขอบเขตย่อยๆ (Discretisation) แล้วสร้างวิธีการคำนวณความ stiff ระหว่างหน่วยแรงในแต่ละส่วนย่อยๆ นั้น (Element Stiffness Matrix) จากนั้นนำความ stiff ดังกล่าวมาประกอบกันเป็นความ stiff ของทั้งปัญหาใหญ่ (Global Stiffness Matrix) รวมด้วยสภาพข้อจำกัดทางขอบเขต (Boundary Conditions) สุดท้ายก็สามารถหาผลเฉลยของปัญหาได้

สำหรับในงานวิศวกรรมนั้น ระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) ในงานวิศวกรรมปฐพีนั้น ลักษณะของปัญหาจะแตกต่างไปจากงานวิศวกรรมอื่นๆ เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ หน่วยแรงที่ควบคุมพฤติกรรมของดิน ไม่ใช่หน่วยแรงรวมแต่เป็นหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ดังนั้นสมการความ stiff ของหน่วยแรงจึงยุ่งยากกว่าวัสดุอื่น

คณะผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PLAXIS ในการวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้าง โดยที่โปรแกรม PLAXIS เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับงานด้านวิศวกรรมปฐพีโดยเฉพาะ

2.7 สมมุติฐานและข้อมูลที่ใช้ (Assumption and Input Data)

2.7.1 ข้อมูลทางเรขาคณิต (Geometries)

ข้อมูลทางเรขาคณิตหมายถึง ข้อมูลเชิงตัวเลขต่างๆ เช่น ขนาดของโครงสร้าง (Dimension) ความหนา (Thickness) ความลึก (Depth) ระยะห่างระหว่างโครงสร้าง (Spacing) รวมไปถึงความหนาของชั้นดิน (Soil Layering) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลส่วนนี้มีความสำคัญมากในการทำแบบจำลองในการวิเคราะห์ เพราะว่าการแบ่งชิ้นส่วน (Discretisation) จะต้องกำหนดขอบเขตและชั้นของปัญหาด้วย ข้อมูลนี้ได้มาจากข้อมูลโครงสร้างของแต่ละชนิดของโครงสร้าง ซึ่งรวมไปถึงแบบก่อสร้างจริง และแบบมาตรฐานการก่อสร้าง

2.7.2 ข้อมูลชั้นดิน (Soil Conditions)

ข้อมูลชั้นดินนี้ ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลชั้นดินทั่วกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยทำการแบ่งกลุ่มชั้นดินที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน และได้จัดทำชั้นดินเพื่อเป็นภาพรวมของตัวแทนของกรุงเทพฯ เพียง 1 เขต โดยการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์นี้จะอ้างอิงจากข้อมูลชั้นดินดังกล่าว

2.7.3 ข้อมูลทางวิศวกรรม (Engineering Conditions)

ข้อมูลในส่วนนี้จะอ้างอิงจากวิธีการก่อสร้าง และชนิดของโครงสร้างที่ใช้อยู่ในปัจจุบันในภาครัฐ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ Pipe Jacking, Horizontal Directional Drilling (HDD), Open Cut โดยที่ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจาก แบบมาตรฐานการก่อสร้าง มาตรฐานการทำงาน (Code of Practice) รวมถึงการสัมภาษณ์วิศวกรผู้ควบคุมงาน โดยการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์นี้จะอ้างอิงจากข้อมูลทางวิศวกรรมดังกล่าว และจะนำเสนอผลการวิเคราะห์แบ่งตามกลุ่มของชนิดโครงสร้าง

2.7.4 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Constitutive Models)

ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์ คือการเลือกแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Constitutive Models) ของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็น ดินเหนียว ดินทราย หรือคอนกรีต เป็นต้น

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดิน

การหาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินนั้น ใช้สมมุติฐานว่าดินเป็นวัสดุอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic Material) ในที่นี้จะใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb ซึ่งมีค่าคงที่ของวัสดุ (Material Parameters) คือ

- มุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction, ϕ')
- ความเชื่อมแน่น (Cohesion Intercept, c')
- Modulus of Elasticity (E)
- Poisson's Ratio (ν)

เนื่องจากการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมปฐพีแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองวิธีคือ การวิเคราะห์แบบใช้หน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และการวิเคราะห์แบบใช้หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) โดยการวิเคราะห์ทั้งสองแบบจะใช้ในกรณีต่างกันคือ แบบหน่วยแรงรวมจะใช้ในการวิเคราะห์ในช่วงเวลาสั้น (Short Term) คือโดยตามทฤษฎีแล้วจะถือว่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) ยังไม่ทันระบายออกไปจากมวลดิน หรือที่เรียกกันว่า Undrained Condition ส่วนการวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงประสิทธิผลนั้น จะทำการวิเคราะห์ในช่วงเวลานาน (Long Term) คือสมมุติว่าแรงดันน้ำส่วนเกินได้ระบายออกไปหมดแล้ว กรณีนี้บางครั้งเรียกว่า Drained Condition ค่าคงที่ของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ทั้งสองกรณีนั้นจะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ของดิน (Soil Parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ค่าคงที่ของวัสดุ (Material parameters)	Total stress analysis (Undrained condition)	Effective stress analysis (Drained condition)
Angle of internal friction	0	ϕ'
Cohesion intercept	Undrained shear strength, s_u	c'
Modulus of Elasticity	Undrained modulus, E_u	Drained modulus, E'
Poisson's ratio	$\nu_u = 0.5$	$\nu' \approx 0.2 - 0.3$

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต

โดยตั้งสมมุติฐานว่า คอนกรีตเป็นวัสดุอิลาสโตพลาสติกสมบูรณ์แบบ (Elastic Perfectly Plastic) ในที่นี้จะใช้แบบจำลอง Tresca โดยมีค่าคงที่ของวัสดุ (Material Parameters) คือ

- Modulus of Elasticity (E)
- Poisson's Ratio (ν)
- กำลังรับแรงอัดสูงสุด (f_c')

ค่าคงที่ของวัสดุของคอนกรีตสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ของคอนกรีต (Material Parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ค่าคงที่ของวัสดุของคอนกรีต (Material Parameters)	ท่อตันลอดคอนกรีต	ท่อคอนกรีตระบบ ชุดเปิดหน้าดิน
กำลังรับแรงอัดสูงสุด (f_c')	40 ตันต่อ ตร.ม.	17 ตันต่อ ตร.ม.
Modulus of Elasticity (E)	30,420 ตันต่อ ตร.ม.	19,830 ตันต่อ ตร.ม.
Poisson's Ratio (ν)	0.15	0.15

โดยการแบ่งชิ้นส่วน (Element) ในการวิเคราะห์นั้น โปรแกรม PLAXIS จะแบ่งเป็น Element แบบสามเหลี่ยม โดยเราจะกำหนดจุดในแต่ละชิ้นส่วนเป็นแบบ 15 จุดเพื่อความละเอียดในการวิเคราะห์ปัญหาและใช้การวิเคราะห์แบบ 2 มิติ (Plane Strain)

ในส่วนของ การคำนวณนั้นเราจะใช้การจำลองวิธีการก่อสร้าง (Stage Construction) เพื่อที่จะแยกผลการคำนวณเป็นแบบการหลุดตัวแบบทันทีทันใดและการอัดตัวคายน้ำ

ในส่วนของผลการวิเคราะห์ (Output) นั้น จะวิเคราะห์แยกออกเป็น 2 ส่วนคือในส่วนของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นซึ่งการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่เรานำมาวิเคราะห์และส่วนของการเคลื่อนตัวซึ่งเราจะสนใจในส่วนของการทรุดตัวแบบทันทีทันใดและการอัดตัวคายน้ำเป็นหลัก

2.8 ข้อมูลชนิดของโครงสร้างและวิธีการก่อสร้าง (Structure Types and Construction Methods)

วิธีการก่อสร้างและชนิดของโครงสร้างที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของการไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority) มีทั้งหมด 3 ชนิดคือ

1. ท่อดันลอด (Pipe Jacking)
2. ท่อเจาะตั้งแนวราบ (Horizontal Directional Drilling)
3. ขุดเปิดหน้าดิน (Open Cut)

2.8.1 ท่อดันลอด (Pipe Jacking)

การก่อสร้างวิธีท่อดันลอดเกิดขึ้นครั้งแรกประมาณ 100 ปีก่อนในสหรัฐอเมริกา แต่เพิ่งเริ่มพัฒนาใช้กันจริงๆเมื่อประมาณ 50 ปีที่ผ่านมา โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะหาวิธีการวางท่อใต้ดินหรือซ่อมแซมของเดิมที่ชำรุดเสียหายโดยไม่ต้องทำการขุดร่องจากผิวดินซึ่งเมื่อเริ่มแรกวิธีการนี้ใช้เฉพาะการวางท่อขนาดเล็ก ในการพัฒนาช่วงแรกๆการก่อสร้างยังไม่ซับซ้อนมากนักไม่ว่าในเรื่องการควบคุมแนวและระดับ แม่แรงที่ใช้ได้ขนาดไม่ใหญ่มาก ท่อที่ดันสามารถปิดปลายด้านหน้าจึงไม่มีดินไหลเข้าท่อและการเคลื่อนตัวของดินจากการดันท่อจะมีค่าน้อยไม่ทำให้ผิวดินยุบตัว ในกรณีที่ก่อสร้างในดินที่มีสภาพแข็งจะไม่สามารถดันท่อได้ เพราะจะทำให้ดินเคลื่อนตัวมากเกินไป จะใช้วิธีเจาะนำโดยใช้เครื่องเจาะแบบสว่าน หรือหัวเจาะอื่นช่วย เพราะท่อมีขนาดเล็กเกินไปที่คนงานจะเข้าไปทำงานได้

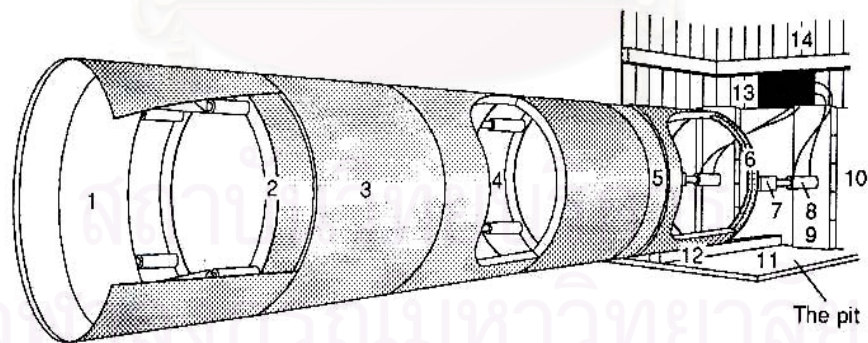
ต่อมาจึงมีการพัฒนาวิธีการ และเทคนิคเพื่อให้สามารถนำวิธีการดันท่อมาใช้ก่อสร้างท่อขนาดใหญ่ขึ้นในระดับเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ม. ในการดันท่อขนาดใหญ่ความยุ่งยากจะมากขึ้น กล่าวคือ แม่แรงที่ใช้ในการดันท่อจากบ่อต้นต้องมีกำลังสูงขึ้นเพราะท่อมีขนาดใหญ่ขึ้นแรงต้านทานในการดันท่อเพิ่มมากขึ้น แรงต้านจากดินในการดันต่อมีลักษณะคล้ายคลึงกับแรงต้านดินต่อการกดเสาเข็ม ต่างกันเพียงการดันท่ออยู่ในแนวนอนแต่การกดเข็มอยู่ในแนวตั้ง แรงต้านดินจะประกอบด้วยแรงเสียดทานที่ผิวท่อและแรงต้านทานที่ปลายท่อที่บริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะ

สำหรับในประเทศไทยได้เริ่มนำเทคนิคการก่อสร้างท่อดันลอดเข้ามาใช้เมื่อราว 20 ปีที่ผ่านมาในงานวางท่อขนาดเล็กช่วงสั้นข้ามถนน หลังจากนั้นได้เริ่มนำมาใช้ในการวางท่อประปาขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0-2.0 ม. ช่วงสั้นๆลอดข้ามถนนและคลองต่างๆในเขตนครหลวง

วิธีนี้เป็นการติดตั้งโครงสร้างซึ่งมักจะเป็นท่อคอนกรีตเสริมเหล็กในชั้นดิน โดยอาศัยแม่แรงขนาดใหญ่ในการดันโครงสร้างผ่านชั้นดินจากบ่อพักต้นทาง (Drive Shaft) ไปยังบ่อพักปลายทาง (Reception Shaft) ดังแสดงภาพรวมรูปแบบการเจาะในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพรวมในการเจาะท่อตันลอด (Pipe Jacking Associate of Australasia, 1995)
ส่วนประกอบของท่อตันลอดแสดงดังรูปที่ 2.17 มีดังต่อไปนี้

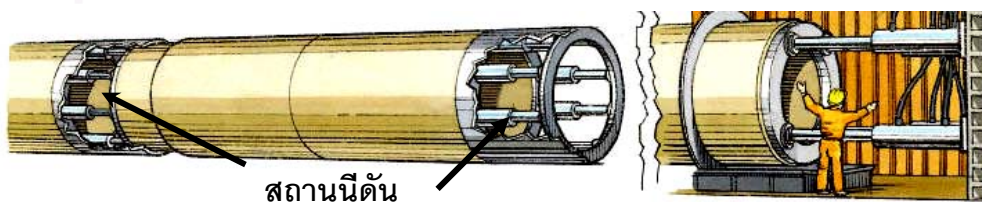


รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของท่อตันลอด (Kramer et al., 1992)



รูปที่ 2.18 หัวเจาะท่อตันลอด แบบ EPB (Earth Pressure Balance)

1. หัวเจาะ (Tunnel Boring Machine) ตามแบบก่อสร้าง โดยผู้รับเหมาเป็นผู้เสนอเป็นงานๆไป ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.18
2. เหล็กสอด (Steel Thrust)
3. ท่อคอนกรีตนำ (Concrete Lead Pipe)
4. สถานีดันย่อย (Intermediate Jacking Station) ดังแสดงในรูปที่ 2.19
5. ท่อดันภายใน (Interjack pipe)
6. แหวนสอดเหล็ก (Steel Thrust Ring)
7. สเปนเซอร์บล็อก (Spencer Block)
8. กระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic Jacks)
9. แผ่นเหล็กรับแรงดัน (Steel Pressure Plate)
10. แผ่นคอนกรีตรองรับกระจายแรงดัน (Concrete Thrust Wall) ดังแสดงในรูปที่ 2.20
11. พื้นคอนกรีต (Concrete Floor)
12. รางนำ (Guide Rails)
13. ชุดให้กำลัง (Power Pack)
14. บ่อดันท่อ (Thrust Pit)



รูปที่ 2.19 ภาพจำลองของสถานีดันย่อย (Pipe Jacking Associate, 1995)



รูปที่ 2.20 แผ่นคอนกรีตทรงกระจายแรงดันที่ใช้ในประเทศไทย

โดยท่อตันลอดสามารถแยกออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ

1. ส่วนหน้า (The Face)

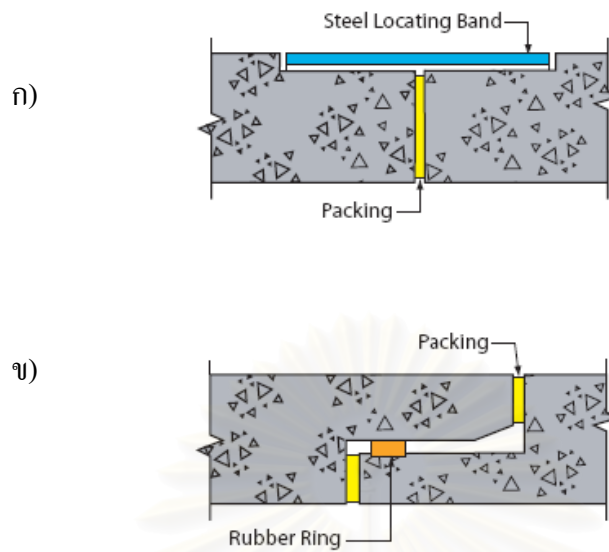
เป็นส่วนที่อยู่บริเวณหน้าสุดของแนวเจาะ โดยจะเป็นตัวนำในการเจาะ ช่วยในการกัดดินและส่งดินไปบริเวณด้านหลัง ช่วยป้องกันดินพังเพื่อความปลอดภัยในการทำงาน โดยระบบหัวเจาะที่ใช้สามารถจำแนกได้ 4 แบบได้แก่ แบบทั่วไป (Conventional) แบบแรงดันอากาศ (Compressed Air) แบบหัวเจาะสว่าน (Auger) แบบห้องแรงดัน (Pressure Chamber)

2. แนวท่อ (The Line)

เป็นโครงสร้างหลักของท่อตันลอด เป็นส่วนที่ตามหลังส่วนหน้า มีหน้าที่เป็นผนังหลุมเจาะเพื่อต้องการดินพัง ซึ่งแนวท่อแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การใช้ท่อเป็นแนวถาวรแบบท่อเดียว (Single Pass) การใช้ท่อแบบคู่ (Double Pass) คือใช้ท่อชั่วคราวนำก่อนแล้วจึงใช้ท่อถาวรตันออกเพื่อเป็นผนังท่อแทน การใช้ท่อถาวรสอดในท่อนำ (Casing System) รูปที่ 2.21 แสดงแนวท่อแบบ Single Pass ที่ใช้อยู่ในงานท่อประปาของประเทศไทย รูปที่ 2.22 แสดงรายละเอียดจุดเชื่อมต่อของท่อตันลอด



รูปที่ 2.21 แนวท่อแบบ Single Pass ในประเทศไทย



รูปที่ 2.22 จุดเชื่อมต่อของท่อตันลอด ก) เป็นการต่อเชื่อมแบบบ่าและ ข) การต่อเชื่อมแบบชน (Pipe Jacking Associate of Australasia, 1995)

3. บ่อตัน (The Pit)

เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง โดยจะอยู่ในส่วนท้ายสุดของงานท่อตันลอดเป็นที่ที่ผู้คนเข้าไปทำงานโดยการควบคุมหัวเจาะและยังเป็นบริเวณที่มีการประกอบท่อและดันท่อด้วย กระจบอกไฮดรอลิกดันเข้าผ่านคอนกรีตกระจายแรงดันที่อยู่บริเวณผนังบ่อตัน บ่อต้องใหญ่พอที่จะขนย้ายท่อลงและประกอบท่อได้ ซึ่งงานที่ทำในกรุงเทพฯส่วนใหญ่มันทำกลางถนนดังแสดงในรูปที่ 2.23 แสดงบ่อตันที่อยู่กลางถนน



รูปที่ 2.23 บ่อตันที่อยู่กลางถนนในกรุงเทพฯ

โดยระบบโครงสร้างท่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงาน Pipe Jacking ประกอบไปด้วย

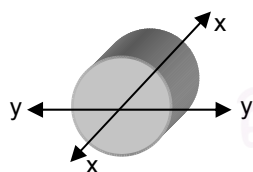
- ท่อคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อสำเร็จ (Pre-cast Reinforced Concrete Pipe)

ส่วนใหญ่ท่อที่ใช้สำหรับการก่อสร้างท่อตันตลอดจะเป็นท่อคอนกรีตหรือเหล็กหล่อเหนียว ถ้ามีการใช้เป็นแนวท่อถาวรจะต้องมีการออกแบบให้มีความแข็งแรงไม่ซึมน้ำและมีความคงทนเหมาะสมกับการใช้งานและสถานที่ก่อสร้าง ท่อเหล่านี้มีการออกแบบให้รับแรงในแนวแกนได้สูงเนื่องจากจากการดันท่อ ซึ่งที่จุดต่อจะมีวงแหวนเพื่อช่วยในการกระจายหน่วยแรงแนวแกนให้สม่ำเสมอ ซึ่งในประเทศไทยจะใช้แนวท่อที่เป็นคอนกรีตมากกว่าเหล็กเนื่องจากเหล็กมีราคาที่สูงและเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย (Corrosion)

สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งหล่อโดยวิธีแรงเหวี่ยง (Spinning) มีขนาดและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมดังสรุปในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานท่อตันตลอด

D_o (ม.)	D_i (ม.)	E (ตันต่อตร.ม.)	A (ตร.ม.)	I_y (ม. ⁴)	I_x (ม. ⁴)	EA (ตัน)	EI (ตัน.ตร.ม.)
0.60	0.4	3.02E+06	1.57E-01	5.10E-03	1.27E-02	4.75E+05	3.83E+04
0.80	0.6	3.02E+06	2.20E-01	1.37E-02	2.47E-02	6.65E+05	7.46E+04
1.00	0.8	3.02E+06	2.83E-01	2.90E-02	4.07E-02	8.55E+05	1.23E+05
1.25	1.0	3.02E+06	4.42E-01	7.08E-02	7.94E-02	1.34E+06	2.40E+05
1.48	1.2	3.02E+06	5.89E-01	1.34E-01	1.26E-01	1.78E+06	3.81E+05
1.82	1.5	3.02E+06	8.34E-01	2.90E-01	2.21E-01	2.52E+06	6.69E+05
2.38	2.0	3.02E+06	1.31E+00	7.90E-01	4.57E-01	3.95E+06	1.38E+06
2.98	2.5	3.02E+06	2.07E+00	1.95E-01	9.03E-01	6.25E+06	2.73E+06



เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของแนวท่อตันตลอด (Area); D_i = ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบด้านในแนวท่อ (Inner Diameter); D_o = ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบด้านนอกแนวท่อ (Outer Diameter); E = โมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus); I_x = โมเมนต์เฉื่อยแนวแกน x (Moment of Inertia in x Axis); I_y = โมเมนต์เฉื่อยแนวแกน y (Moment of Inertia in y Axis); EA = สติฟเนสแนวแกน (Normal Stiffness); EI = สติฟเนสความดัด (Flexural Stiffness)

- ปลอกเหล็กต่อเชื่อมท่อ (Collar)

Thomson (1993) ได้แบ่งจุดต่อของท่อคอนกรีตออกเป็น 2 แบบคือ แบบบ่า (Rebated) และแบบชน (Butt-jointed) โดยที่จุดต่อแบบบ่าจะมีเบ้า (Socket) และจุก (Spigot) ที่ผนังท่อและจะมีจุกวงแหวน (Sealing Ring) ใส่ที่จุดกึ่งกลางของผนังท่อที่มีทั้งแบบหมุน (Rolled) และแบบรัด (Confined) สำหรับจุดต่อแบบชน จะมีส่วนเว้าอยู่ด้านนอกของผนังท่อและมีจุกวงแหวนอยู่ที่ส่วนเว้าด้านนอกของผนังท่อ ดังแสดงไปแล้วในรูปที่ 2.21

สำหรับในประเทศไทยใช้การต่อเชื่อมแบบชน (Butt-jointed) ใช้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS G3106) และมาตรฐานอังกฤษ (BS 4360 grade 43A) ซึ่งมาตรฐานทั้งสองกำหนดไว้ดังตารางที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติปลอกเหล็กต่อเชื่อมท่อตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS G3106)

คุณสมบัติ	ค่า
คาร์บอน (C)	น้อยกว่า 0.18%
ซิลิก้า (Si)	น้อยกว่า 0.55%
แมงกานีส (Mn)	น้อยกว่า 1.60%
ฟอสฟอรัส (P)	น้อยกว่า 0.035%
ซัลเฟอร์ (S)	น้อยกว่า 0.035%
หน่วยแรงคดาก (Yield stress)	430 นิวตันต่อ ตร.มม.
หน่วยแรงดึง (Tensile strength)	570-720 นิวตันต่อ ตร.มม.

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติปลอกเหล็กต่อเชื่อมท่อตามมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (BS 4360 grade 43A)

คุณสมบัติ	ค่า
คาร์บอน (C)	น้อยกว่า 0.25%
ซิลิก้า (Si)	น้อยกว่า 0.50%
แมงกานีส (Mn)	น้อยกว่า 1.60%
ฟอสฟอรัส (P)	น้อยกว่า 0.050%
ซัลเฟอร์ (S)	น้อยกว่า 0.050%
หน่วยแรงคดาก (Yield stress)	240 นิวตันต่อ ตร.มม.
หน่วยแรงดึง (Tensile strength)	430-510 นิวตันต่อ ตร.มม.

- แหวนเชื่อม (Joint Ring)

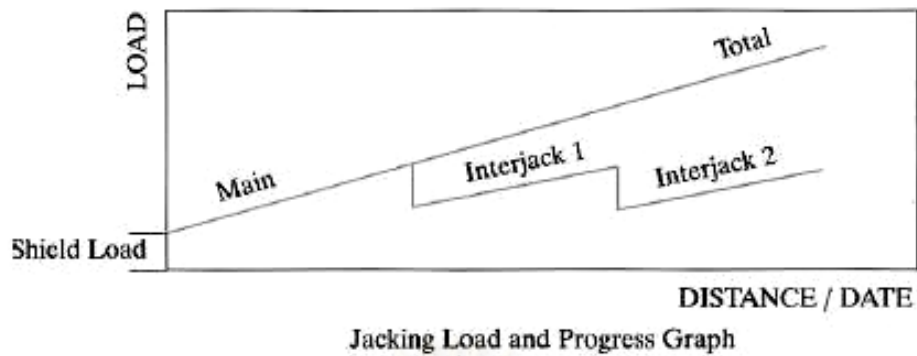
เป็นยางสำหรับกันน้ำระหว่างรอยต่อท่อ โดยจะต้องพองตัวเป็น 3 เท่าเมื่อโดนน้ำ

ขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction Procedure) ของงานท่อตันลอด

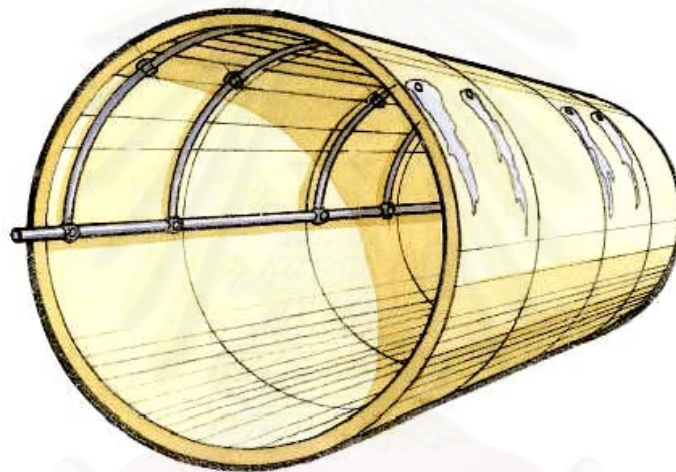
เริ่มจากการเตรียมและสำรวจโดยกำหนดหมุดอ้างอิง 2 หมุดที่บริเวณปากบ่อพัก (Shaft) และกำหนดแนวระดับของศูนย์กลางอุโมงค์เพื่อติดตั้งรางในการวางแนวท่อและหัวเจาะ หลังจากนั้นติดตั้งราง แผ่นโครงถัก (Truss Plate) ซึ่งเป็นตัวถ่ายแรงไปยังผนังบ่อพักแหวนเชื่อมตามแนวรอยต่อเพื่อกันน้ำซึมเข้าบ่อพัก และจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ หลังจากนั้นฉีดน้ำปูนระหว่างโครงถักกับผนังบ่อพักเพื่อถ่ายแรงดันของตัวหัวเจาะจากโครงถักไปสู่ผนังบ่อพักระหว่างการดันท่อ จากนั้นเริ่มติดตั้งกระบอกไฮดรอลิกเพื่อดันท่อและติดตั้งหัวเจาะลงบนรางที่ได้เตรียมไว้แล้ว พร้อมทั้งทำการต่อสายไฟควบคุมและติดตั้งท่อลำเลียงดินจากในบ่อไปยังถังพักดินบนผิวดินและติดตั้งกล้องสำรวจเพื่อตรวจสอบแนวท่อ

เริ่มทำการเจาะโดยใช้สารละลายเบนโทไนต์ (Bentonite) หล่อที่หัวเจาะจนกว่าจะติดตั้งหัวเจาะหัวที่พร้อมกับปล่อยสายควบคุมและสายไฟออก หลังจากการทำงานไประยะหนึ่งแล้วจะต้องมีการติดตั้งสถานีดันย่อย (Intermediate Jacking Station) เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างท่อกับดินจะมากขึ้นทำให้ต้องเพิ่มแรงถีบของกระบอกไฮดรอลิกมากขึ้นในการทำงานซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียหายแก่ท่อได้และทำให้การควบคุมแนวการเจาะทำได้ยากขึ้นโดยแสดงดังรูปที่ 2.24 ทำการติดตั้งสถานีดันย่อยหรือหัวเจาะที่ 2 จากนั้นเริ่มทำการติดตั้งปั๊มดินเพื่อลำเลียงดินที่เจาะออกมาด้านนอก เมื่อได้ระยะประมาณ 50 ม. ให้ทำการย้ายกล้องสำรวจ (Servo Total Station) เข้าไปในอุโมงค์ ห่างจากหัวเจาะเข้ามาประมาณ 40 ม. เพื่อตรวจสอบแนวการเจาะโดยติดตั้งเป้าปริซึมจำนวน 2 ตัว ห่างจากกล้องไปข้างหน้าประมาณ 12 ม. แล้วทำการติดตั้งเพิ่มที่บ่อตันอีก 1 ตัว เมื่อดันท่อเข้าไปจนได้ระยะทางด้านหลังกล้องประมาณ 40 ม. ให้ติดตั้งเป้าปริซึมเพิ่มอีก 1 ตัว หลังจากนั้นทำการติดตั้งสถานีดันย่อยตามแบบไปเรื่อยๆจนกระทั่งหัวเจาะทะลุ โดยหลังจากหัวเจาะทะลุแล้วปลดสถานีดันย่อยออกและให้ดันท่อจากบ่อตันจนกระทั่ง ปลอกของตัวสถานีดันย่อยประชิดกัน

ขั้นตอนสุดท้ายทำการฉีดน้ำปูนผสมเถ้าลอย (Fly Ash Cement) ตลอดความยาวระหว่างแนวท่อด้านนอกกับดินเพื่อป้องกันน้ำและการทรุดตัวของผิวดิน โดยการฉีดน้ำปูนแสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการเจาะเมื่อเพิงสถานีต้นขอย (Pipe Jacking Associate, 1995)



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการฉีดน้ำปูนในงานท่อตันลอด (Pipe Jacking Associate, 1995)

2.8.2 ท่อเจาะดิ่งแนวราบ (Horizontal Directional Drilling, HDD)

ท่อเจาะดิ่งแนวราบเป็นหนึ่งในวิธีการเจาะท่อแนวราบแบบไม่รบกวนผิวดิน (Trenchless Methodology) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าการขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากวิธีท่อเจาะดิ่งแนวราบรบกวนผิวดินน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.26 ใช้พื้นที่บริเวณผิวดินเพื่อทำงานน้อย ใช้เวลาทำงานสั้นกว่า อีกทั้งยังสามารถปรับแก้และรีดถอนได้ง่ายกว่าวิธีการขุดเปิดหน้าดิน ทำให้การก่อสร้างวิธีนี้เป็นที่นิยมอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาอันสั้นแม้ว่าจะยังไม่มีมาตรฐานในการก่อสร้างกลางที่แน่นอนโดยส่วนใหญ่จะเป็นมาตรฐานของแต่ละหน่วยงาน ซึ่งการก่อสร้างวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการแทนที่ท่อสาธารณูปโภคเก่าได้อีกด้วย



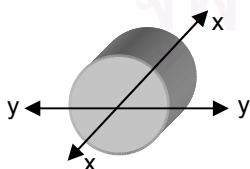
รูปที่ 2.26 การทำงานท่อเจาะดิ่งแนวราบที่ใช้ในกรุงเทพฯ

ส่วนประกอบพื้นฐานของวิธีท่อเจาะดิ่งแนวราบ จะประกอบไปด้วย

- หน่วยเจาะ (Drill unit)
- ระบบนำทาง (Guidance System หรือ Tracking System)
- ก้านเจาะและเครื่องมือเจาะ (Drill Pipe and Down Hole Tools)
- ระบบผสมการเจาะเหลวหรือระบบการนำกลับมาใช้ใหม่ (Drilling Fluid Mixing หรือ Recycling System)
- ท่อร้อยสายไฟ ซึ่งมีขนาดและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมดังสรุปในตารางที่ 2.11

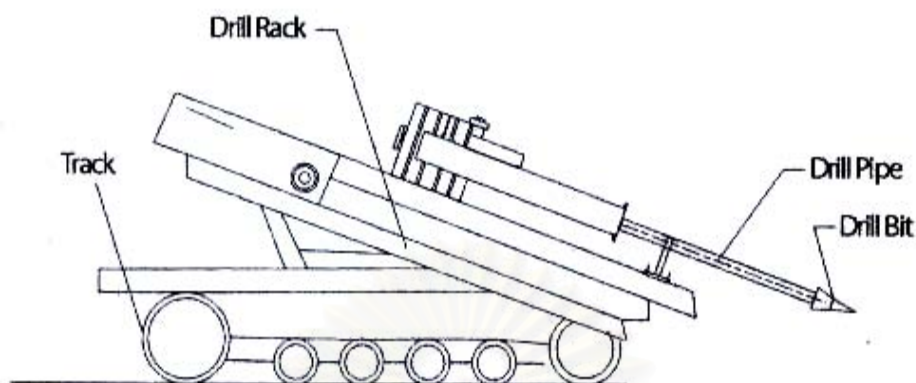
ตารางที่ 2.11 ขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อร้อยสายไฟที่ใช้ในงานท่อเจาะดิ่งแนวราบ

Type	D_o [ม.]	D_i [ม.]	E_{50} [ตันต่อ ตร.ม.]	A [ตร.ม.]	I_y [ม. ⁴]	I_x [ม. ⁴]	EA [ตัน]	EI [ตัน.ตร.ม.]
PN 8	0.16	1.41E-01	2.00E+03	4.40E-03	1.09E-04	1.29E-05	8.80E+00	2.58E-02
PN 10	0.16	1.36E-01	2.00E+03	5.50E-03	1.30E-04	1.52E-05	1.10E+01	3.04E-02
PN 12.5	0.16	1.31E-01	2.00E+03	5.50E-03	1.54E-04	1.77E-05	1.30E+01	3.04E-02



เมื่อ E = โมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus); E_{50} = โมดูลัสความยืดหยุ่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นสูงสุด (Young's Modulus at 50%); I_x = โมเมนต์เฉื่อยแนวแกน x (Moment of Inertia in x Axis); I_y = โมเมนต์เฉื่อยแนวแกน y (Moment of Inertia in y Axis); EA = สตีฟเนสแนวแกน (Normal Stiffness); EI = สตีฟเนสความดัด (Flexural Stiffness)

สำหรับเครื่องเจาะประกอบด้วยส่วนประกอบหลายส่วนดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ส่วนประกอบของเครื่องเจาะในงานท่อเจาะดิ่งแนวราบ (HDD)

การติดตั้งท่อประกอบไปด้วยการหมุนเจาะรูและการดึงกลับเพื่อขยายรูให้ใหญ่ขึ้นโดยใช้เครื่องเจาะซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ขนาด คือ

1. เครื่องเจาะขนาดเล็ก (Minimum – sized Drilling Rigs หรือ Mini Rigs)
2. เครื่องเจาะขนาดกลาง (Medium – sized Drilling Rigs หรือ Midi Rigs)
3. เครื่องเจาะขนาดใหญ่ (Maximum – sized Drilling Rigs หรือ Maxi Rigs)

โดยที่ระบบ HDD แต่ละระบบ มีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเครื่องเจาะดังต่อไปนี้

- แรงดัน (Thrust Force) หรือแรงดึงกลับ (Pull Back Force) (ปอนด์)
- เพลาบิด (ฟุต/ปอนด์)
- ปริมาณสูงสุดที่เครื่องสูบลูกสูบสามารถสูบได้ (ปริมาตร/เวลา)

ซึ่งคุณสมบัติที่ต่างกันของเครื่องเจาะแต่ละแบบได้แสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติของเครื่องเจาะแต่ละชนิดในงานท่อเจาะดิ่งแนวราบ

คุณสมบัติ	Mini Rigs	Midi Rigs	Maxi Rigs
แรงดัน/แรงดึงกลับ	< 1.8 ตัน หรือ 40,000 ปอนด์	1.8-45.4 ตัน หรือ 40,000- 100,000 ปอนด์	> 45.4 ตัน หรือ 100,000 ปอนด์
แรงบิดสูงสุด	< 0.54 ม./ ตัน หรือ 4000 ฟุต/ปอนด์	0.54-2.7 ม./ ตัน หรือ 4000-20000 ฟุต/ปอนด์	> 2.7 ม./ ตัน หรือ 20,000 ฟุต/ปอนด์
ความเร็วในการหมุน	> 130 รอบ/นาที	130-210 รอบ/นาที	< 210 รอบ/นาที

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะ	> 30 ม./นาที หรือ 100 ฟุต/นาที	27-30 ม./นาที หรือ 90-100 ฟุต/นาที	< 27 ม./นาที หรือ 90 ฟุต/นาที
เครื่องมือในการเคลื่อนที่	Chain, Cylinder หรือ Rack และ Pinion	Chain หรือ Rack และ Pinion	Rack และ Pinion
ความยาวก้านเจาะ	1.5-4.5 ม. หรือ 5-15 ฟุต	3-9 ม. หรือ 10-30 ฟุต	9-12 ม. หรือ 30-40 ฟุต
ระยะเจาะ	< 210 ม. หรือ 700 ฟุต	< 600 ม. หรือ 2000 ฟุต	< 1800 ม. หรือ 6000 ฟุต
แรงม้า	< 150 HP	150-250 HP	> 250 HP
เครื่องดูด	< 20 ลิตร/นาที หรือ 75 แกลลอน/นาที	13-53 ลิตร/นาที หรือ 50-200 แกลลอน/นาที	> 53 ลิตร/นาที หรือ 200 แกลลอน/นาที
พื้นที่ทำงานที่ต้องการ (กว้าง x ยาว)	0.9 ม. x 3 ม. - 2.1 ม. x 6 ม.	2.1 ม. x 6 ม. - 2.4 ม. x 13.5 ม.	2.4 ม. x 13.5 ม.
พื้นที่ในการติดตั้งสำนักงานสนาม (กว้าง x ยาว)	6 ม. x 18 ม.	30 ม. x 45 ม.	45 ม. x 75 ม.

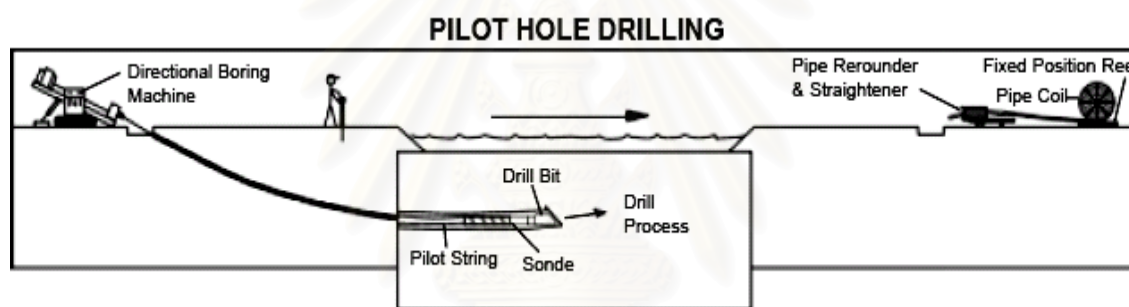
ขั้นตอนการทำงานของงานท่อเจาะดิ่งแนวราบ มีดังต่อไปนี้

เมื่อขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งก่อสร้างเสร็จสิ้น หัวเจาะ (Drilling Bit) จะถูกนำมาติดตั้งเข้ากับก้านเจาะ จากนั้นจะเริ่มทำการเจาะโดยเริ่มจากจุดเข้า (Entry Points) ซึ่งระบบนำทางจะถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดและตรวจสอบตำแหน่งและแนวของท่อ และเมื่อเจาะไปถึงจุดออก (Exit Points) หัวเจาะจะถูกเปลี่ยนเป็นหัวคว้าน (Reamer) ซึ่งการคว้านเป็นการเพิ่มขนาดของรูเจาะและขนาดของรูเจาะนั้นต้องใหญ่กว่าท่อที่ติดตั้งด้วย ในขณะที่ทำการคว้านและการติดตั้งท่อ ดินที่ถูกคว้านจะผสมด้วยของเหลว ซึ่งจะอยู่ในสภาพของโคลน (Mud) สำหรับการเจาะที่มีระยะยาวๆ หรือท่อที่จะติดตั้งมีขนาดใหญ่ ของเหลวที่ออกมาจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่

การติดตั้งท่อโดยวิธีท่อเจาะดิ่งแนวราบ โดยรวมแล้วมี 3 ขั้นตอน โดยขั้นแรกเกี่ยวข้องกับการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กไปตามแนวการก่อสร้าง (Pilot Hole) ขั้นที่สองเกี่ยวข้องกับการขยายรูที่เจาะให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (Reaming) และขั้นสุดท้ายจะเกี่ยวกับการติดตั้งท่อเข้าไปในรูที่ขยายใหญ่นั้น (Pull Back)

1. หลุมนำ (Pilot Hole)

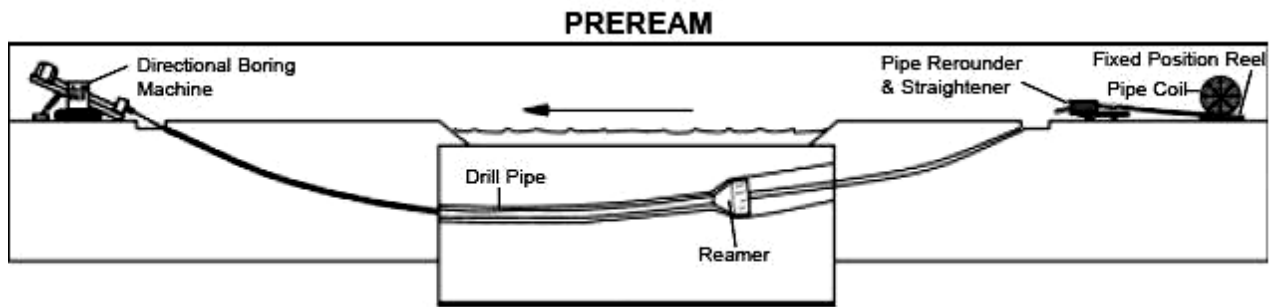
การเจาะรูจะเริ่มจากผิวดินจากตำแหน่งที่เป็นจุดทางเข้า (Entry Point) การเจาะจะเอียงเป็นมุมประมาณ 8 ถึง 18 องศาจากแนวราบ และเจาะลงไปจนแนวการเจาะ (Bore Path) วางตัวในแนวราบที่ระดับความลึกที่ออกแบบไว้ โดยก้านเจาะจะมีการโค้งหรือการโก่งออกอยู่สองจุดที่ด้านทางเข้าและด้านทางออก ซึ่งการโค้งที่สองจุดนี้ต้องมีการออกแบบและคำนวณเพื่อช่วยลดความเค้นในท่อขณะติดตั้ง รัศมีโค้ง (Bend Radius) เป็นกุญแจสำคัญในการเลือกใช้ขนาดของก้านเจาะและความหนาของก้านเจาะ โดยก้านเจาะที่มีขนาดใหญ่และหนาจะต้องใช้ระยะในการโค้งที่มากกว่าก้านเจาะที่มีขนาดเล็กและบางกว่า ซึ่งระบบการนำทางจะถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งและความลึกของรูเจาะ ลักษณะของการเจาะหลุมนำได้แสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การเจาะหลุมนำ (Pilot Hole)

2. การคว้าน (Reaming)

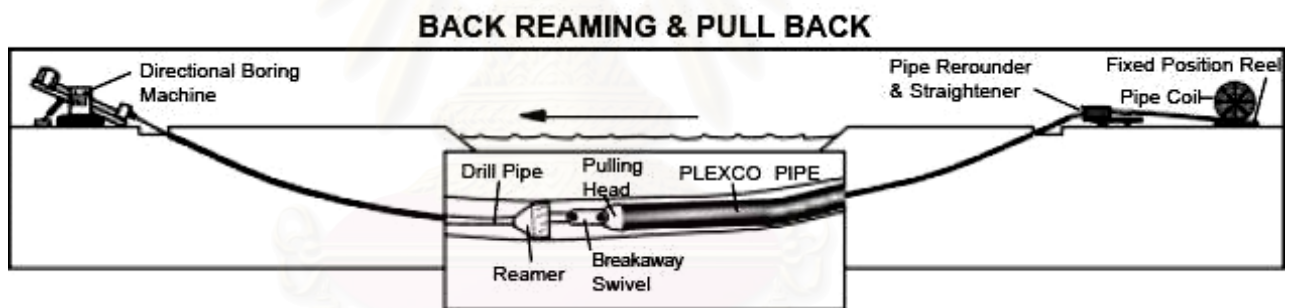
เมื่อเจาะหลุมนำเสร็จ ขนาดของรูหรือหลุมจะต้องมีขนาดใหญ่พอที่ท่อสามารถทำการติดตั้งได้ เช่น เมื่อท่อขนาดที่จะติดตั้งมีขนาด 20 ซม. หรือ 8 นิ้ว ขนาดของรูเจาะหรือหลุมเจาะจะต้องมีขนาด 30 ซม. หรือ 12 นิ้ว หรือมากกว่า ในขั้นตอนนี้หัวคว้าน (Reamer) จะถูกนำมาติดตั้งแทนหัวเจาะ (Drilling Bit) เพื่อคว้านในขณะที่ดึงก้านเจาะกลับ รูปที่ 2.29 แสดงขั้นตอนการคว้าน หรืออาจจะใช้อีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่า หลุมเจาะต่อเนื่อง (Continuous Borehole) คือ การเอาท่อที่จะติดตั้งต่อเข้ากับตัวคว้านพร้อมกันเลย บางทีการติดตั้งท่อไม่จำเป็นต้องมีการคว้านเมื่อขนาดของท่อมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามหากขนาดของท่อที่จะติดตั้งมีขนาดใหญ่มาก การคว้านอาจจะต้องทำหลายครั้ง โดยทั่วไปขนาดของหลุมเจาะหลังจากทำการคว้านขยายแล้ว จะมีขนาดประมาณ 1.25 ถึง 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อที่จะติดตั้ง



รูปที่ 2.29 ขั้นตอนของการคว้าน (Reaming)

3. การดึงกลับ (Pullback)

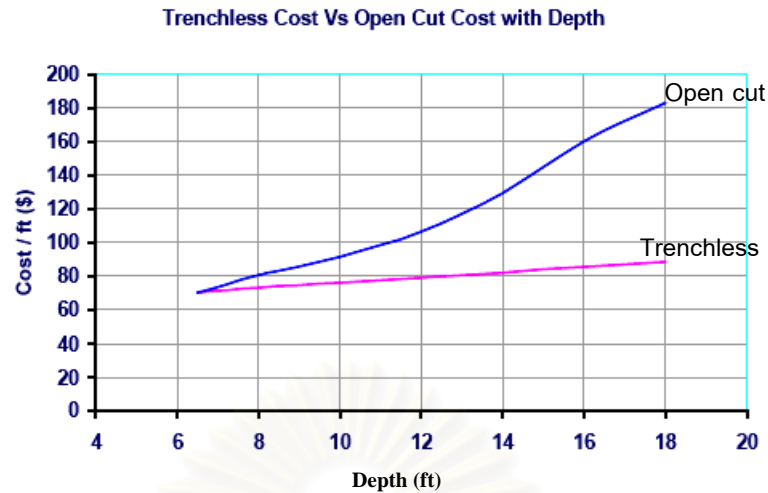
เมื่อทำการคว้านหลุมเจาะเสร็จแล้ว จะทำการติดตั้งท่อโดยท่อจะต่อเข้ากับหัวดึง (Pulling head) และหัวดึงจะต่อเข้ากับห่วงหยุด (Breakaway Swivel) ซึ่งหน้าที่ของห่วงหยุดนี้คือช่วยป้องกันท่อ เมื่อแรงดึงที่กระทำกับท่อเกินค่าที่ท่อจะรับได้ ห่วงดึงนี้จะแตกหักและนำตัวห่วงดึงต่อเข้ากับหัวคว้าน โดยขั้นตอนการดึงกลับจะต้องระวังในขณะติดตั้งเพราะว่าท่อจะมีการหมุน หรือการติดตั้งอาจทำไปพร้อมกับการขยายรูให้ใหญ่ขึ้น รูปที่ 2.30 แสดงขั้นตอนการดึงกลับ (Pullback)



รูปที่ 2.30 ขั้นตอนการดึงกลับ (Pullback)

2.8.3 ท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน (Open Cut)

การก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าแบบนี้ เป็นการขุดดินในแนวตั้งโดยอาจจะใช้แรงงานคน หรือเครื่องจักรเหมาะสำหรับการก่อสร้างในระยะสั้นๆไม่เกิน 1.8 ม. เนื่องจากค่าก่อสร้างจะแพงกว่าวิธีเจาะท่อแนวราบแบบไม่รบกวนดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.31 โดยวิธีนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มตามขนาดและความลึกของงานขุดคือ



รูปที่ 2.31 การเปรียบเทียบระหว่างราคาค่าก่อสร้างเทียบกับความลึกในการขุดของวิธีขุดเปิดหน้าดิน กับวิธีเจาะท่อแนวราบแบบไม่รบกวนผิวดิน (Detroit Rehab Road Show, 2003)

2.8.3.1 การขุดบ่อพักขนาดเล็ก โดยติดตั้งบล็อกคอนกรีต (Duct Bank)

วิธีนี้เป็นการขุดดินในแนวตั้งเพื่อทำการติดตั้งบล็อกคอนกรีต โดยที่ท่อร้อยสายไฟจะอยู่ระหว่างบล็อกคอนกรีตอีกที วิธีนี้จะกระทำได้ในระดับที่ไม่ลึกมากนัก ส่วนประกอบพื้นฐานของวิธี Duct bank จะประกอบไปด้วย

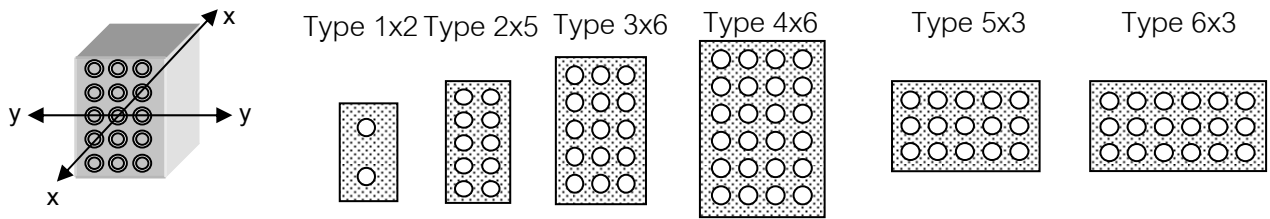
- คอนกรีตกำลังอัดไม่น้อยกว่า 170 กก.ต่อ ตร.ซม.
- ท่อ Reinforced Thermosetting Resin Conduit (RTRC) ขนาด 12.7 ซม. ความหนา 2 มม.
- Sheet Pile ตอกชิดกันพร้อมค้ำยัน ซึ่งต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 9 มม. ความยาวของ Sheet Pile ที่ฝังในดินต้องไม่น้อยกว่า $\frac{3}{4}$ เท่าของความลึกที่ขุด

ท่อร้อยสายไฟ ซึ่งมีขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังสรุปในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 ขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อร้อยสายไฟที่ใช้ในท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน

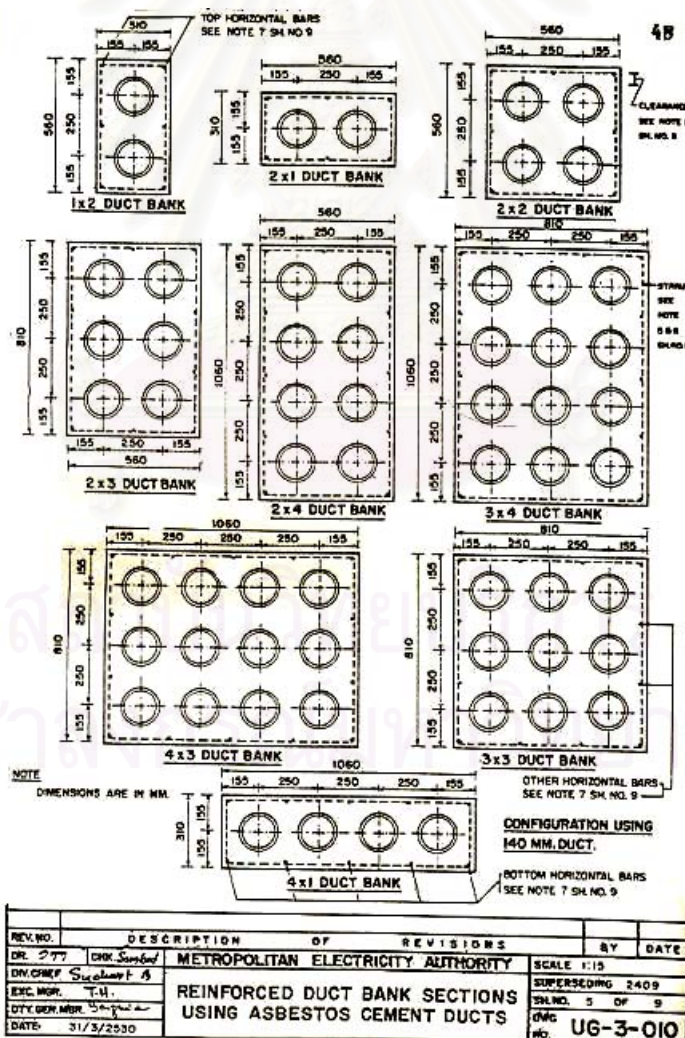
Type	B [ม.]	H [ม.]	E [ตันต่อ ตร.ม.]	A [ตร.ม.]	I_y [ม ⁴]	I_x [ม ⁴]	EA [ตัน]	EI [ตัน.ตร.ม.]
1x2	0.28	0.47	1.97E+06	1.32E-01	8.65E-03	2.42E-03	2.59E+05	1.71E+04
2x5	0.47	1.04	1.97E+06	4.89E-01	9.37E-02	4.41E-02	9.64E+05	1.85E+05
3x6	0.66	1.23	1.97E+06	8.12E-01	1.55E-01	1.02E-01	1.60E+06	3.06E+05
4x6	0.85	1.23	1.97E+06	1.05E-01	1.55E-01	1.32E-01	2.06E+06	3.06E+05

5x3	1.04	0.66	1.97E+06	6.86E-01	2.40E-02	2.49E-02	1.35E+06	4.72E+04
6x3	1.23	0.66	1.97E+06	8.12E-01	2.40E-02	2.95E-02	1.60E+06	4.72E+04



เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดท่อ (Area); B = ความกว้างของโครงสร้าง; H = ความสูงของโครงสร้าง; $RTRC$ number = จำนวนท่อ $RTRC$ ในโครงสร้าง; E = โมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus)

รูปแบบของท่อร้อยสายไฟจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ทำงานและจำนวนความต้องการใช้ไฟในพื้นที่นั้นๆ โดยมีรูปแบบมาตรฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แบบมาตรฐานท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินของหน่วยงานรัฐ (การไฟฟ้านครหลวง, 2530)

ขั้นตอนการก่อสร้างในงาน Duct Bank สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ก่อนเริ่มการขุดต้องติดตั้งระบบป้องกันดินพังทลาย โดยการติดตั้ง Sheet Pile หลังจากนั้นขุดดินในพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อทำการติดตั้งท่อร้อยสายไฟ โดยที่กองดินไม่ควรถูกล้ำบริเวณผิวจราจร เมื่อขุดดินได้ขนาดและระดับที่กำหนดแล้ว หากมีเลนดินให้ไถเลนดินออกจนถึงระดับดินแข็ง แล้วจึงใส่ทรายกระทุ้งแน่นหนาอย่างน้อย 10 ซม. จากนั้นจึงเทคอนกรีตหยาบหนาอย่างน้อย 5 ซม. เมื่อคอนกรีตหยาบแข็งตัวแล้วจึงดำเนินการวางท่อร้อยสายไฟดังแสดงในรูปที่ 2.33 โดยใช้แผ่นประกบรองท่อตัวล่าง โดยวางห่างกันระยะไม่เกิน 100 ซม. ก่อนการเทคอนกรีตให้ตรวจดูแนวท่อว่ามีการเคลื่อนตัวของแนวท่อหรือไม่ เมื่อแนวท่อตรงดีแล้วใช้เครื่องสั่นคอนกรีต ต้องไม่ควรถูกหัวสั่นคอนกรีตโดนท่อโดยตรง การเทคอนกรีตควรใช้รางเทคอนกรีตค่อยๆ เทตลอดแนวท่อร้อยสายไฟใต้ดิน เมื่อเทคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้วให้กลบร่องท่อและหลุมท่อบ่อพัก โดยใช้ทรายกลบพร้อมมบดอัดแน่นเป็นชั้นๆ รอกคอนกรีตแข็งตัวจึงทำการทดสอบด้วยอุปกรณ์การทดสอบท่อ (Mandrel) ดังแสดงในรูปที่ 2.34 เพื่อมิให้มีการอุดตันภายในท่อ ก่อนกลบท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินช่วงนั้นๆ

สำหรับงานซ่อมถนน ทางเท้า คับทางอื่นๆ ให้ผู้รับจ้างซ่อมตามแบบมาตรฐานของหน่วยงานที่เป็นผู้รับผิดชอบในเส้นทางหรือถนนนั้นๆ



รูปที่ 2.33 การวางแนวท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินแบบขุดเปิดหน้าดินก่อนเทคอนกรีต



รูปที่ 2.34 Mandrel สำหรับทดสอบขนาดท่อที่ใช้จริงในประเทศไทย

2.8.3.2 การขุดบ่อพักขนาดใหญ่ เพื่อใช้ในงานเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้าง

วิธีนี้เป็นการขุดบ่อดินในแนวตั้งโดยตรงโดยใช้แรงงานคน ขั้นตอนการก่อสร้างเริ่มจากการกำหนดขนาดของบ่อพัก จะต้องมีความไม่เล็กกว่าขนาดที่การไฟฟ้านครหลวงกำหนดเฉพาะแล้วแต่ งาน

วิธีการก่อสร้างให้ก่อสร้างโดยวิธีการจมบ่อ (Sinking Caisson Method) ยกเว้นได้รับการเห็นชอบให้ใช้กรณีอื่น ๆ เป็นงานไป (โดยเฉลี่ยความหนาผนังบ่อพักประมาณ 30 ซม.) หลังการจมบ่อแล้วเสร็จ จะทำการขุดดินภายในบ่อออก โดยหลังจากการขุดดินด้านในบ่อถึงระดับที่ต้องการตามแบบแล้ว ให้ติดตั้งช่องขึ้นลงฝาบ่อพร้อมบันไดจากพื้นถนนลงไปถึงพื้นล่างของบ่อ โดยบันไดทำด้วยเหล็กชุบสังกะสี การจมบ่อต้องติดตั้งระบบป้องกันน้ำซึมผ่านด้วย โดยให้ผู้รับจ้างนำเสนอวิธีและแบบโดยความเห็นชอบของหน่วยงานที่รับผิดชอบ หลังจากจมบ่อถึงระดับที่ต้องการ ให้ทำการเทคอนกรีตกันน้ำซึมผ่านบริเวณกันบ่อ โดยส่วนผสมและแบบก่อสร้างคอนกรีตให้ผู้รับจ้างเป็นผู้จัดทำนำเสนอ

การเอียงของบ่อพักทุกชนิด ผู้รับจ้างจะต้องดำเนินการก่อสร้างด้วยความระมัดระวัง และป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดเอียงจากสาเหตุใดก็ตาม ค่าความเอียงของบ่อพักที่ยอมให้จะต้องไม่เกิน 1: 50 หากค่าความเอียงมากกว่าที่กำหนด ผู้รับจ้างจะต้องทำการแก้ไข























2.9 ข้อมูลสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่นำมาแบ่งหมวดวิเคราะห์

จากปัญหาที่เราสนใจการจำแนกประเภทสิ่งก่อสร้างข้างเคียงจึงมีความสำคัญมากซึ่งจำเป็นจะต้องกำหนดประเภท ขนาด ความลึก ระยะห่าง และวิธีการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่จะมา มีผลกระทบต่อโครงสร้างหลัก โดยการรวบรวมข้อมูลสิ่งก่อสร้างข้างเคียงนั้นรวบรวมจากการทำแบบสอบถามไปยังหน่วยงานรัฐที่รับผิดชอบสายไฟฟ้าใต้ดินในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล การ

สอบถามปากเปล่าจากวิศวกรที่มีประสบการณ์ การไปดูสถานที่จริงที่เกิดความเสียหาย และจากประสบการณ์ตรงของผู้ทำวิจัย โดยสิ่งก่อสร้างข้างเคียงสามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

2.9.1 เสาเข็มกลุ่ม

เนื่องจากสภาพดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลมีลักษณะชั้นดินเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่หนา มาก การก่อสร้างสิ่งก่อสร้างต่างๆ ไม่ว่าจะขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ จำเป็นจะต้องใช้เสาเข็มเป็นตัว ถ่ายกำลังลงไปยังชั้นที่แข็งแรงกว่าเพื่อเสถียรภาพของโครงสร้าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วการก่อสร้างนั้น จะใช้เสาเข็มเป็นกลุ่มเพื่อความปลอดภัยในการก่อสร้างที่คุณภาพของการก่อสร้างอาจไม่เป็นไปตามที่ ออกแบบไว้ เช่น มีการเอียงศูนย์หรือวัสดุที่นำมาใช้คุณภาพไม่ตรงกับมาตรฐานที่ออกแบบไว้ และ เนื่องจากน้ำหนักโครงสร้างที่หลากหลายจึงจำเป็นต้องจำแนกความยาวเข็มเป็นเข็มสั้นและเข็มยาว รวมทั้งจำแนกน้ำหนักที่กระทำโดยจำแนกเป็นดังต่อไปนี้

No.	Section Size	Type	Weight kg./m.	Cross Section cm.2	Perimeter cm.	Safe Load Ton	Remarks
1		S-0.13x0.13x(2x7)m.=14.0 m.	41	169	52	5	Composited Pile(2pcs.)
2		I-0.13x0.13x8.0 m.	33	138	64	2.5	Single Length or Composited Pile
3		S-0.15x0.15x(2x9)m.=18.0 m.*	54	225	60	13	Composited Pile(2pcs.or 3pcs.)
4		I-0.15x0.15x10.0 m.	33	138	77	3.5	Single Length or Composited Pile
5		S-0.18x0.18x(2x10.5)m.=21.0 m.*	78	324	72	20-25	Composited Pile(2pcs.or 3pcs.)
6		I-0.18x0.18x14.0 m.	44	183	93	7-9	Single Length or Composited Pile
7		I-0.18x0.18x14.0 m.*	61	253	89	13-15	Single Length or Composited Pile
8		S-0.20x0.20x(2x10.5)m.=21.0 m.*	96	400	80	25-30	Composited Pile(2pcs.or 3pcs.)
9		I-0.20x0.20x16.0 m.	61	253	100	13-15	Single Length or Composited Pile
10		I-0.20x0.20x16.0 m.*	72	300	99	20-25	Single Length or Composited Pile
11		S-0.22x0.22x(2x10.5)m.=21.0 m.*	116	484	88	30-35	Composited Pile(2pcs.or 3pcs.)
12		I-0.22x0.22x21.0 m.	81	337	108	25-30	Single Length or Composited Pile
13		I-0.22x0.22x21.0 m.*	85	351	108	25-30	Single Length or Composited Pile
14		S-0.24x0.24x21.0 m.*	138	576	96	35-40	Single Length or Composited Pile
15		I-0.24x0.24x21.0 m.	96	400	118	30-35	Single Length or Composited Pile
16		S-0.26x0.26x21.0 m.*	162	676	104	40-45	Single Length or Composited Pile
17		I-0.26x0.26x21.0 m.*	109	455	128	35-40	Single Length or Composited Pile
18		S-0.30x0.30x21.0 m.*	216	900	120	45-50	Single Length or Composited Pile
19		I-0.30x0.30x21.0 m.*	144	600	147	40-45	Single Length or Composited Pile
20		I-0.30x0.30x21.0 m.*	151	630	148	40-45	Single Length or Composited Pile
21		I-0.30x0.30x21.0 m.*	158	660	143	40-45	Single Length or Composited Pile
22		S-0.35x0.35x21.0 m.*	294	1225	140	50-55	Single Length or Composited Pile
23		I-0.35x0.35x21.0 m.*	188	781	179	45-50	Single Length or Composited Pile
24		I-0.35x0.35x21.0 m.*	211	880	173	45-50	Single Length or Composited Pile
25		S-0.40x0.40x21.0 m.*	384	1600	160	55-60	Single Length or Composited Pile
26		I-0.40x0.40x21.0 m.*	298	1240	197	50-55	Single Length or Composited Pile

รูปที่ 2.35 รูปแบบเข็มตอกมาตรฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Sinthu Co., Ltd)

เสาเข็มกลุ่มยาว 6 ม. หรือเสาเข็มสั้น โดยปกติในประเทศไทยเสาเข็มสั้นจะมีความยาวตั้งแต่ 3 ถึง 6 ม. รับน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 1 ถึง 1.5 ตันต่อต้น โครงสร้างที่ใช้เสาเข็ม 6 ม. ได้แก่ แนวรั้ว ป้อมบำบัดน้ำเสีย บ้ายจรรยา องค์อาคารขนาดเล็กที่น้ำหนักไม่มาก ฯลฯ

เสาเข็มกลุ่มยาว 21 ม. หรือเสาเข็มขนาดกลาง โดยปกติเสาเข็มขนาดกลางเป็นได้ทั้งเสาเข็มตอกซึ่งมีรูปมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 2.35 และเสาเข็มเจาะซึ่งส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเสาเข็มทรงกลม โดยที่เสาเข็มตอกจะมีความยาวไม่แน่นอนขึ้นกับระยะยุบที่ 10 ฟุตสุดท้าย ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีความยาวตั้งแต่ 16 ถึง 28 ม. แล้วแต่พื้นที่ ส่วนเสาเข็มเจาะแบบแห้งความยาวจะอยู่ที่ 19 ถึง 22 ม. แล้วแต่ระดับชั้นทรายชั้นที่ 1 บริเวณนั้น

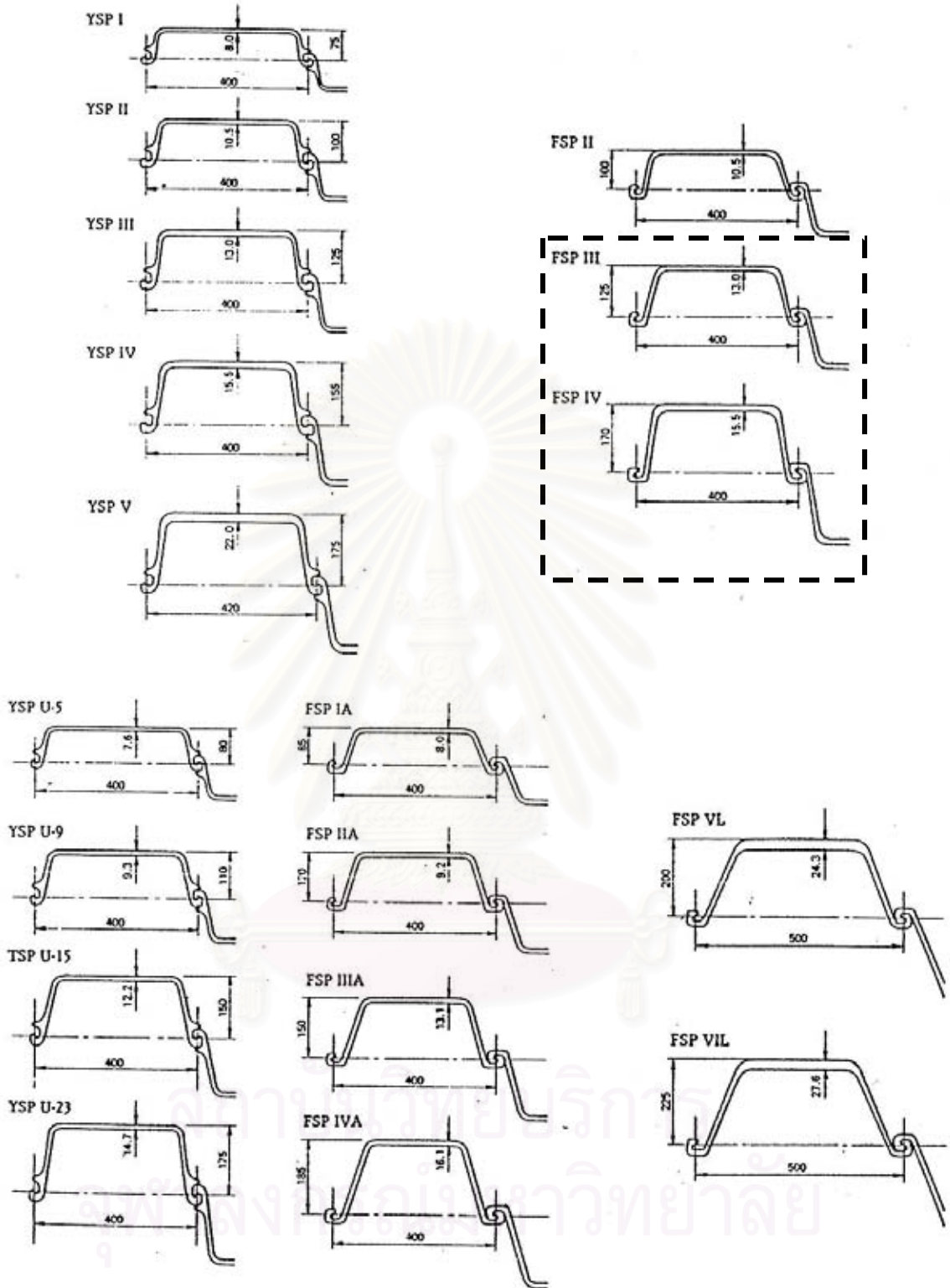
2.9.2 เข็มพืด (Sheet Pile)

ในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ ซึ่งมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนการขุดเปิดหน้าดินที่ความลึกมากๆ จำเป็นต้องใช้เข็มพืดช่วยในการป้องกันดินพัง ฉะนั้นเข็มพืดจึงเป็นโครงสร้างข้างเคียงอีกชนิดหนึ่งที่เข้ามามีผลกระทบกับท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่มีอยู่เดิม ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงด้วยเช่นกัน สำหรับในเขตกรุงเทพฯ และบริเวณชานเมืองเข็มพืดที่ใช้ความยาวตั้งแต่ 6 จนถึง 20 ม. ขึ้นกับความลึกของงานขุดซึ่งความยาวที่ใช้กันมากที่สุดจะอยู่ที่ 14 ถึง 17 ม. ดังแสดงในรูปที่ 2.36

สำหรับรูปแบบของเข็มพืดที่มีหลากหลายรูปแบบสำหรับประเทศไทยนั้นใช้เข็มพืดรูปแบบที่ FSP 3 และ FSP 4 เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.37 และ 2.38



รูปที่ 2.36 การขุดเปิดหน้าดินโดยใช้เข็มพืดป้องกันดินพัง



รูปที่ 2.37 รูปแบบมาตรฐานของซีมพีดที่ใช้กันทั่วไปโดยในเส้นปะเป็นรูปแบบที่ใช้ในประเทศไทย (วันชัย, 2548)

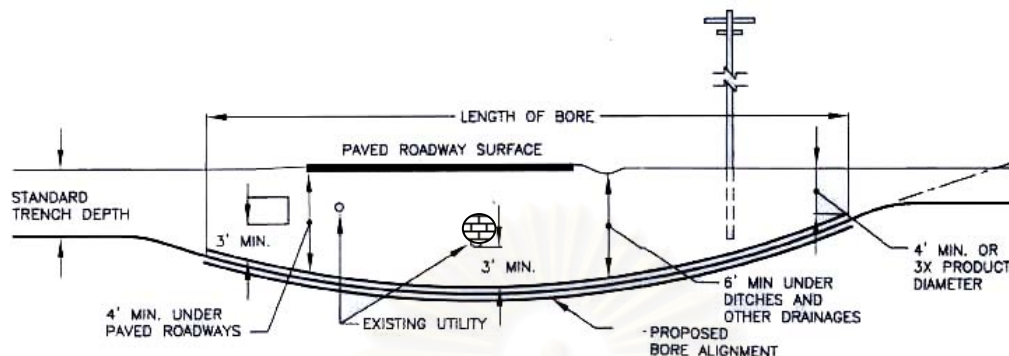
Section	Dimensions			Sectional Area	Weight		Moment of Inertia		Section Modulus	
	w	h	t	per pile	per pile	per wall width	per pile	per wall width	per pile	per wall width
	mm in	mm in	mm in	cm ² in ²	kg/m lbs/ft	kg/m ² lbs/ft ²	cm ⁴ in ⁴	cm ⁴ /m in ⁴ /ft	cm ³ in ³	cm ³ /m in ³ /ft
YSP I	400 15.7	75 2.95	8.0 0.315	46.49 7.206	36.5 24.5	91.2 18.7	429 10.3	3,820 28.0	66.4 4.05	509 9.47
YSP U-5	400 15.7	80 3.15	7.6 0.299	45.21 7.008	35.5 23.9	88.8 18.2	454 10.9	4,220 30.9	64.7 3.95	527 9.80
FSP IA	400 15.7	85 3.35	8.0 0.315	45.21 7.008	35.5 23.9	88.8 18.2	598 14.4	4,500 33.0	88.0 5.37	529 9.84
YSP II	400 15.7	100 3.94	10.5 0.413	61.18 9.483	48.0 32.3	120 24.6	986 23.7	8,690 63.6	121 7.38	869 16.2
FSP II	400 15.7	100 3.94	10.5 0.413	61.18 9.483	48.0 32.3	120 24.6	1,240 29.8	8,740 64.0	152 9.28	874 16.3
YSP U-9	400 15.7	110 4.33	9.3 0.366	55.01 8.527	43.2 29.0	108 22.1	1,070 25.7	9,680 70.9	120 7.32	880 16.4
FSP IIA	400 15.7	120 4.72	9.2 0.362	55.01 8.527	43.2 29.0	108 22.1	1,460 35.1	10,600 77.6	160 9.76	880 16.4
YSP III	400 15.7	125 4.92	13.0 0.512	76.42 11.85	60.0 40.3	150 30.7	1,920 46.1	16,400 120	196 12.0	1,310 24.4
FSP III	400 15.7	125 4.92	13.0 0.512	76.42 11.85	60.0 40.3	150 30.7	2,220 53.3	16,800 123	223 13.6	1,340 24.9
YSP U-15	400 15.7	150 5.91	12.2 0.480	74.40 11.53	58.4 39.2	146 29.9	2,700 64.9	22,800 167	238 14.5	1,520 28.3
FSP IIIA	400 15.7	150 5.91	13.1 0.516	74.40 11.53	58.4 39.2	146 29.9	2,790 67.0	22,800 167	250 15.3	1,520 28.3
YSP IV	400 15.7	155 6.10	15.5 0.610	96.99 15.03	76.1 51.1	190 38.9	3,690 88.7	31,900 234	311 19.0	2,060 38.3
FSP IV	400 15.7	170 6.69	15.5 0.610	96.99 15.03	76.1 51.1	190 38.9	4,670 112	38,600 283	362 22.1	2,270 42.2
YSP U-23	400 15.7	175 6.89	14.7 0.579	94.21 14.60	74.0 49.7	185 37.9	4,380 105	39,400 289	330 20.1	2,250 41.9
FSP IV A	400 15.7	185 7.28	16.1 0.634	94.21 14.60	74.0 49.7	185 37.9	5,300 127	41,600 305	400 24.4	2,250 41.9
YSP V	420 16.5	175 6.89	22.0 0.866	134.0 20.77	105 70.6	250 51.2	5,950 143	55,200 404	433 26.4	3,150 58.6
FSP V L	500 19.7	200 7.87	24.3 0.957	133.8 20.74	105 70.6	210 43.0	7,960 191	63,000 461	520 31.7	3,150 58.6
FSP VI L	500 19.7	225 8.86	27.6 1.09	153.0 23.72	120 80.6	240 49.2	11,400 274	86,000 630	680 41.5	3,820 71.1

รูปที่ 2.38 ค่ามาตรฐานของเข็มพืดรูปแบบต่างๆ (วันชัย, 2548)

2.9.3 ท่อสาธารณูปโภคใต้ดิน (Utility Tunnel)

เนื่องจากสภาพพื้นที่ในกรุงเทพฯ มีจำกัด การขยายตัวของประชากรทำให้ความต้องการสาธารณูปโภคเพิ่มมากขึ้น สาธารณูปโภคชนิดอื่นๆ นอกจากท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน จำเป็นต้องก่อสร้างใต้พื้นดิน ทำให้เกิดปัญหาสิ่งก่อสร้างข้างเคียงเนื่องจากท่อใต้ดินขึ้นมาอีกหมวดหนึ่ง โดยขนาดและชนิดของท่อสาธารณูปโภคใต้ดินที่จะมาก่อสร้างข้างเคียงนั้น มีมากมายหลายชนิด เราไม่สามารถกำหนดได้แน่นอนว่าจะเป็นการก่อสร้างด้วยวัสดุ วิธีการก่อสร้าง ขนาดท่อ รวมไปถึงระดับความลึกและทิศทางการวางตัวของแนวท่อที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.39 ซึ่งมีผลกับการหลุดตัว

และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินทั้งหมด จึงต้องสมมุติทั้งขนาดและทิศทางในการวางตัวของท่อแบบกว้างๆ เพื่อให้ครอบคลุมกรณีในการวิเคราะห์ไฟโนอีลิเมนต์ให้มากที่สุด ซึ่งท่อสาธารณูปโภคใต้ดินที่พบเห็นทั่วไปได้แก่ ท่อไฟฟ้า ท่อประปา ท่อสายโทรศัพท์ ท่อสายเคเบิล ฯลฯ



รูปที่ 2.39 ท่อสาธารณูปโภคอื่นที่มีผลกระทบต่อท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน (HDD Guide Line Handbook, 2002)

2.9.4 การขุดเปิดดินโดยไม่มีค้ำยัน (Open cut)

การขุดเปิดหน้าดินโดยไม่มีค้ำยันพบมากในเขตกรุงเทพฯ ในงานก่อสร้างที่จำเป็นต้องเปิดหน้าดินในระดับตื้นๆ เช่น การขุดเปิดเพื่อซ่อมแซมผิวถนน บักเสไฟฟ้า ฐานรากตื้น ถังบำบัดน้ำเสีย ฯลฯ ซึ่งขนาดการขุดและความลึกขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ฝังใต้ดิน ซึ่งโดยมากจะขุดได้ไม่เกิน 3 ม. และเนื่องจากประหยัดต้นทุนและรวดเร็วทำให้เป็นที่นิยมกันมากจึงจำเป็นต้องจัดเป็นอีกหมวดในการวิเคราะห์โครงสร้างข้างเคียง

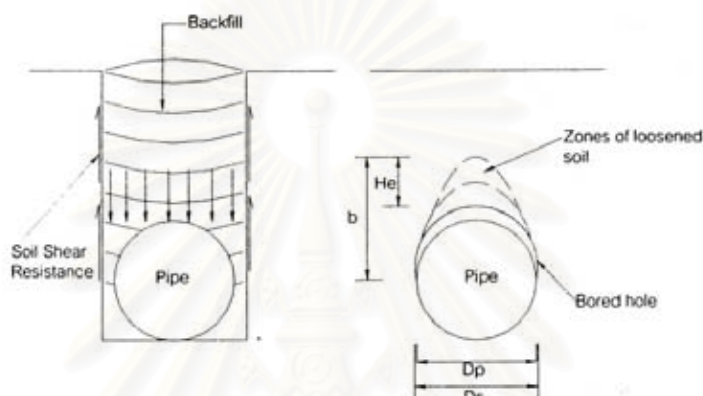
2.10 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินจะใช้ท่อกอนกรีต การออกแบบสมมุติให้อุโมงค์เป็นคานกลมต่อเนื่องและที่ผนังของอุโมงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขณะที่อุโมงค์ที่ทำจากเหล็ก หน่วยแรงดันดินต่ำสุดบนพื้นฐานกำลังเฉือนของมวลดิน (Active Pressure) และ หน่วยแรงดันดินสูงสุดบนพื้นฐานกำลังเฉือนของมวลดิน (Passive Pressure) จะไม่มีความสมดุลและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อและจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบเพิ่ม ซึ่งจะทำให้เกิดหน่วยแรงต้านด้านข้างสูงสุด (Passive Lateral Resistance) ขึ้นในดิน ด้วยเหตุนี้ทำให้แรงภายในผนังของอุโมงค์เกิดความไม่สมดุลและอยู่ในสภาวะหน่วยแรงอัด (Richardson, 1970)

การติดตั้งท่อหรืออุโมงค์มีหลักการที่แตกต่างจากวิธีขุดเปิดหน้าดินโดยสิ้นเชิง ซึ่งความแตกต่างของแรงที่กระทำต่อท่อกรณีของการขุดเปิดหน้าดินกับกรณีไม่เปิดหน้าดินมีดังต่อไปนี้ (Thomson, 1993)

สำหรับการขุดเปิดหน้าดินแล้วถมดินกลับ ดินที่ถมกลับจะเกิดการทรุดตัวมากกว่าส่วนที่ไม่ได้ขุด ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดหน่วยแรงเฉือนขึ้นระหว่างดินที่ขุดกับผนังของหลุม ด้วยเหตุนี้ เป็นสาเหตุให้แรงที่จะถ่ายไปยังท่อลดลงโดยแสดงดังรูปที่ 2.40

สำหรับการขุดเจาะของการติดตั้งท่อแบบไม่รบกวนผิวดิน จะใช้หัวเจาะที่มีขนาดใหญ่กว่าท่อ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ดินบริเวณรอบๆที่เจาะหลวมและก่อให้เกิดการทรุดตัวของดินลงทับบนท่อหลังจากการขุด แต่ถ้าดินเป็นทรายหลวมหรือดินอ่อนมาก ความสูงของดินที่จะกดทับจะน้อยกว่าความลึกของระดับท่อที่วางและด้วยเหตุนี้ทำให้แรงในแนวดิ่งจะน้อยกว่าแรงในราบดังแสดงในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 รูปแบบการถ่ายแรงของดินระหว่างการขุดเปิดหน้าดินและไม่ขุดเปิดหน้าดิน

(O'rouke et al., 1991)

สำหรับการติดตั้งด้วยระบบท่อตันตลอด ต้องพิจารณาหน่วยแรงตามหัวข้อดังต่อไปนี้ (Nirmal, 1973)

2.9.1 แรงตามแนวแกนที่เกิดจากการดันท่อ ประกอบไปด้วย

2.9.1.1 แรงที่เกิดจากแรงผลักดันของหัวเจาะเข้าไปในดินซึ่งขนาดของแรงขึ้นอยู่กับธรรมชาติของดินและขนาดของหัวเจาะ

2.9.1.2 แรงที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างดินกับท่อ ซึ่งแรงจะเพิ่มขึ้นตามความยาวท่อ

2.9.1.3 แรงที่เกิดจากน้ำหนักของท่อ

2.9.2 แรงดันดินในแนวราบ

ในการคิดแรงดันดินในแนวราบจะสมมุติให้ดินอยู่ในสภาพอยู่กับที่ (At Rest) เนื่องจากในขบวนการติดตั้งท่อโดยวิธีนี้จะใช้หัวเจาะที่มีขนาดใหญ่กว่าท่ออยู่เล็กน้อยและการติดตั้งจะต้องทำให้เสร็จก่อนที่ดินรอบๆท่อเคลื่อนที่เข้ามากระทำต่อโครงสร้างท่อ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินอยู่กับที่ที่เสนอโดย Bowles (1968) อยู่ในช่วง 0.4 – 0.6 สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น และอยู่ในช่วง 0.4 – 0.8 สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1 การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเป็นขั้นตอนการทบทวนเอกสารต่างๆ เพื่อรวบรวมข้อมูลที่มีความสำคัญและที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างระบบสายใต้ดิน โดยข้อมูลพื้นฐานที่จะศึกษาและรวบรวม ได้แก่

- ข้อมูลชั้นดินและคุณสมบัติของชั้นดิน
- ข้อมูลการทรุดตัวของชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ เพื่อนำมาประกอบในการคำนวณและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมต่อไป
- ข้อมูลของรูปแบบสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่จะมามีผลกระทบกับท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน
- การทบทวนเอกสารและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบและเทคนิคการก่อสร้างระบบอุโมงค์ ระบบ Shaft และระบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัว ที่มีใช้อยู่ทั่วโลกและเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล รวมถึงการรวบรวมและศึกษาข้อกำหนด (Specification) และมาตรฐาน (Standard) ที่เกี่ยวข้อง

3.2 วิเคราะห์ข้อมูลชั้นดินเบื้องต้น

ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจดินในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล ได้จากการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะจากโครงการต่างๆของการไฟฟ้านครหลวงโดยตรง ข้อมูลหลุมเจาะจากโครงการต่างๆที่ผู้วิจัยเกี่ยวข้อง และข้อมูลหลุมเจาะจากบริษัท ซอยส์เทสดีงสยาม จำกัด โดยพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์ปัญหาประกอบด้วย กรุงเทพฯ จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2

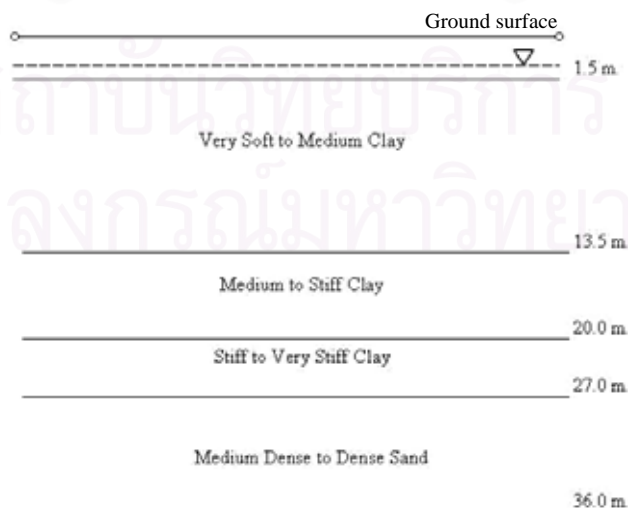


รูปที่ 3.1 พื้นที่วิจัยแบ่งตามจังหวัด



รูปที่ 3.2 พื้นที่วิจัยแบ่งตามเขตและอำเภอ

เนื่องจากการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงมีหลายกรณีอยู่แล้ว เพื่อลดความยุ่งยากจากข้อมูลชั้นดินที่แตกต่างกัน จึงเลือกใช้ข้อมูลดินเชิงภาพรวม (Typical Soil Profile) ซึ่งได้จากการเฉลี่ยจากหลุมเจาะทั้งหมดที่รวบรวม ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงนี้ โดยข้อมูลชั้นดินเชิงภาพรวมที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.3 และข้อมูลคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 ชั้นดินเชิงภาพรวมที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์

Depth	Soil Description	w _n %	Atterberg's Limits			Unit Weight		Sp.Gr.	Shear Strength					DST		SPT		Ø	E _u				
			LL	PL	PI	γ _t	γ _d		s _u (UC)	s _u (FV)			s _u (PP)	s _{u mob} (UC)	s _{u mob} (FV)	c	Ø			N	N'		
			%	%	%	(t/m ³)	(t/m ³)			PS	RS	S _t										(t/m ²)	(t/m ²)
0 - 1.5 m.	fill materail																						
1.5m - 13.5m.	Very Soft to Medium Clay	av	65.0	62.7	29.4	33.3	1.626		2.58	2.07	2.49	0.7		1.85	2.09	2.38	0.17	13.5	6			28.3	310
		max	34.6	52.1	25.9	26.2	1.474		2.57	1.14	2.28	0.3		1.2			0.17	13.5	5				
		min	90.3	74.3	34.3	40.0	1.872		2.60	3.55	3.96	1.4		3.66			0.17	13.5	7				
13.5 m - 20.0m.	Medium to Stiff Clay	av	44.3	59.3	27.8	35.0	1.789		2.59	7.52	4.37	1.1		6.73	7.58	3.73	1.99	7.7	16			28.1	1504
		max	33.0	46.9	21.0	28.5	1.615		2.45	6.18	2.29	0.7		5.16			1.05	1.3	10				
		min	60.3	72.9	35.1	39.7	1.975		2.66	11.43	5.71	1.4		12.56			2.8	13.3	18				
20.0m-27.0m.	Stiff to Very Stiff Clay	av	25.6	43.5	21.2	22.3	1.984		2.67	17.46	2.80			21.34	18.94	11.25	3.88	11.2	29			30.2	4345
		max	18.0	32.5	16.9	15.6	1.822		2.67	11.72	9.00			11.38			1.61	3.8	20				
		min	37.5	56.6	26.4	30.3	2.111		2.68	23.17	9.70			26.82			5.15	22.5	42				
27.0m-36.0m	Medium Dense to Dense Sand	av	20.70				2.000		2.61										51	33	37.7	6865	
		max	16.80				2.000		2.58										33				
		min	25.30				2.100		2.64										68				

W_n % = ปริมาณความชื้น ; LL = ชีดเหลว ; PL = ชีดพลาสติก ; PI = ดัชนีพลาสติกชีดี้ ; γ_t = หน่วยน้ำหนักรวม ; γ_d = หน่วยน้ำหนักแห้ง ; Sp.Gr. = ความถ่วงจำเพาะ ; s_u(UC) = กำลังรับหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบหน่วยแรงเฉือนแบบแรงอัด 1 แกน (Unconfined Compression Test) ; s_u(FV) = กำลังรับหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบด้วยใบมีด ; PS = กำลังสูงสุดจากการทดสอบด้วยใบมีด ; RS = กำลังจากการทดสอบด้วยใบมีดของดินที่ถูกรบกวน ; S_t = ความไว (PS/RS) ; s_{u mob}(UC) = กำลังรับหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำรวม ; s_{u mob}(FV) = กำลังรับหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบด้วยใบมีดรวม ; DST = การทดสอบหน่วยแรงเฉือนโดยตรง ; c = ความเหนียว ; Ø = มุมเสียดทานภายใน ; SPT = การทดสอบค่าทะลุทะลวงมาตรฐาน ; N = ค่าทะลุทะลวงมาตรฐาน ; N' = ค่าทะลุทะลวงมาตรฐาน ; E_u = โมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ

3.3 กรณีในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Cases of Finite Element Analysis)

การวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่มีต่อโครงสร้างสายใต้ดิน สามารถจำแนกตามชนิดสิ่งก่อสร้างข้างเคียง และโครงสร้างสายใต้ดินแบบต่างกันได้ดังนี้

3.3.1 เสาค้ำ

เสาค้ำนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆได้แก่ เสาค้ำเดี่ยวและเสาค้ำกลุ่ม โดยที่การวิเคราะห์นั้นเราจะสมมุติกรณีการวิเคราะห์เฉพาะเสาค้ำกลุ่มเนื่องจากการก่อสร้างเสาค้ำกลุ่มจะมีผลกระทบกับโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินมากกว่าเสาค้ำเดี่ยวและเพื่อไม่ให้จำนวนกรณีในการวิเคราะห์มากเกินไป โดยกำหนดให้แยกการวิเคราะห์เป็นเสาค้ำสั้นความยาว 6 ม. และเสาค้ำยาวที่ความยาว 21 ม. เนื่องจากเป็นความยาวที่นิยมใช้กันมากที่สุด และการวิเคราะห์สมมุติให้เป็นเสาค้ำตอก โดยที่สมมุติให้เสาค้ำมีจำนวน 3 ต้นเนื่องจากเป็นจำนวนที่ไม่มากเกินไปในการวิเคราะห์ และน้ำหนักที่กระทำกับเสาค้ำกลุ่มสำหรับเสาค้ำสั้นใช้ 3 ต้นเนื่องจากเสาค้ำสั้นที่ใช้อยู่ในเขตกรุงเทพฯ และบริเวณชานเมืองมีค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยไม่เกิน 1 ต้นต่อต้น และเสาค้ำยาวใช้ที่ 15 20 และ 25 ต้นเนื่องจากเสาค้ำขนาดกลางที่ใช้อยู่ในเขตกรุงเทพฯ และบริเวณชานเมืองมีค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยไม่เกิน 10 ต้นต่อต้น อีกทั้งสมมุติระยะห่างจากโครงสร้างเดิมเท่ากับ 1 2 และ 3 ม. จากเส้นผ่านศูนย์กลางโครงสร้างหลัก เนื่องจากถ้าวิเคราะห์ระยะห่างจำนวนมากกว่านี้จะทำให้กรณีในการวิเคราะห์มากเกินไป เป็นการกำหนดขอบเขตเบื้องต้น ซึ่งจำนวนที่ต้องทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 192 กรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

3.3.2 เข็มพืด

เข็มพืดเป็นโครงสร้างกันดินชนิดหนึ่งซึ่งนิยมใช้กันทั่วไป ตัวเข็มอาจเป็นเหล็กแผ่นตอกยึดติดกันเป็นแนว อาจเป็นเสาไม้หรือคอนกรีตที่มีสลักยึดติดกัน หรือเป็นเสาคอนกรีตที่มีแผ่นคอนกรีตเหน็บเป็นช่วงๆในการวิเคราะห์สมมุติให้เข็มพืดเป็นเข็มเหล็กแผ่นขนาด FSP 3 เนื่องจากเป็นขนาดมาตรฐานที่นิยมใช้ในประเทศไทย ความยาวเข็มพืดนั้นสมมุติให้ใช้ที่ 15 ม. เนื่องจากเป็นความยาวในระดับกลางๆที่พบเห็นได้มากในระดับการขุดไม่เกิน 5 ม. ในเขตกรุงเทพฯ และบริเวณชานเมือง สำหรับระยะห่างจากโครงสร้างหลักสมมุติให้ห่างเท่ากับ 1 2 และ 3 ม. จากเส้นผ่านศูนย์กลางโครงสร้างหลัก เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสาค้ำกลุ่ม ซึ่งจำนวนที่ต้องทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 48 กรณี ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

3.3.3 ขุดเปิดหน้าดินแบบไม่มีค้ำยัน

การขุดเปิดหน้าดินสามารถทำได้เฉพาะระดับการขุดตื้นๆเท่านั้น ฉะนั้นระดับความลึกที่พิจารณาจะไม่เกิน 3 ม. โดยความลึกที่ใช้วิเคราะห์ที่ระดับ 1 2 และ 3 ม. และเนื่องจากท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินส่วนใหญ่จะอยู่ในเมือง ฉะนั้นความกว้างของหลุมจึงมีไม่มากนักเนื่องจากพื้นที่จำกัด

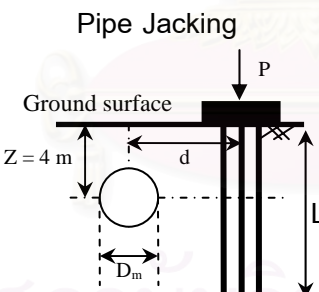
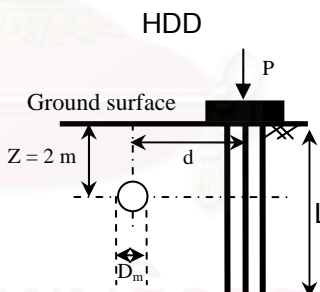
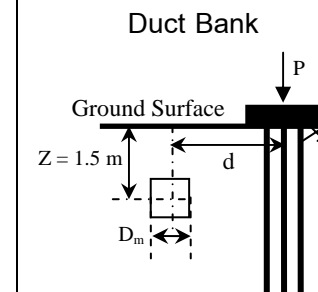
ความกว้างของหลุมจึงสมมุติที่ 2, 4, และ 6 ม. โดยกำหนดระยะห่างจากโครงสร้างหลักเท่ากับ 3 4 และ 5 ม. ตามลำดับ ซึ่งเป็นจำนวนที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์และกรณีในการวิเคราะห์ที่ไม่มากเกินไป ซึ่งจำนวนที่ต้องทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 432 กรณี ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

3.3.4 ท่อสาธารณูปโภคใต้ดิน

ท่อสาธารณูปโภคใต้ดินมีหลายหน่วยงานที่ใช้และใช้วัสดุหลากหลายชนิดในการทำท่อ ซึ่งในการวิเคราะห์เราจะสมมุติให้วัสดุเป็นคอนกรีตแบบเดียวกับท่อตันตลอดเนื่องจากท่อสาธารณูปโภคใต้ที่ทำด้วยคอนกรีตมีเป็นจำนวนมากและเพื่อความไม่ยุ่งยากในการวิเคราะห์ สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ข้างเคียงที่ใช้ขนาด 0.5 1.0 และ 2.0 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลัก เนื่องจากจะได้กรณีที่ครอบคลุมทั้งขนาดอุโมงค์ข้างเคียงที่ เล็กกว่า เท่ากันและใหญ่กว่า อุโมงค์หลักสำหรับแนวการขุดอุโมงค์ข้างเคียงจะให้มีการวางตัวทั้งแนวนอน แนวล่างและแนวข้าง ซึ่งจะวิเคราะห์เฉพาะในแนวที่ขนานกับอุโมงค์หลักเนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งเป็นแบบ 2 มิติระยะห่างจากอุโมงค์ข้างเคียงจะกำหนดที่ 3 ระยะเช่นเดียวกับโครงสร้างอื่นได้แก่ที่ระยะ 2 3 และ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์หลัก จำนวนที่ต้องทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 432 กรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ดังนั้นกรณีการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงเป็นจำนวนทั้งสิ้น 1104 กรณี ซึ่งครอบคลุมกรณีที่เป็นไปได้เกือบทั้งหมดของงานการก่อสร้างใต้ดินในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล

ตารางที่ 3.2 จำนวนกรณีวิเคราะห์การก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มที่มีผลกระทบกับโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน

โครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน	Pipe Jacking		HDD		Duct Bank	
						
ขนาดของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟ (D_m = เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน)	$D_m = 0.6 \ 0.8 \ 1.0 \ 1.2 \ 1.5 \ 2.0 \ 2.5 \text{ ม.}$		PN 8 PN 10 PN 12.5 $D_m = 0.16 \text{ ม.}$		ชนิดที่ 1 2 3 4 5 6 มีขนาด $D_m = 0.28 \ 0.47 \ 0.66 \ 0.85 \ 1.04 \ 1.23 \text{ ม.}$ ตามลำดับ	
ความยาวเสาเข็ม	6 ม.	21 ม.	6 ม.	21 ม.	6 ม.	21 ม.
น้ำหนักแบกทานต่อเข็ม 1 ต้น	3 ต้น	15 ตัน	3 ต้น	15 ตัน	3 ต้น	15 ตัน
		20 ตัน		20 ตัน		20 ตัน
		25 ตัน		25 ตัน		25 ตัน

ระยะห่างจาก โครงสร้างข้างเคียง (d)	2.5 5.0 7.5 ม.	1.0 2.0 3.0 ม.	1.0 2.0 3.0 ม.
จำนวนกรณี	84	36	72
รวมกรณีทั้งหมด 192 กรณี			

ตารางที่ 3.3 จำนวนกรณีจากการก่อสร้างเสาเข็มพืดที่มีผลกระทบกับโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน

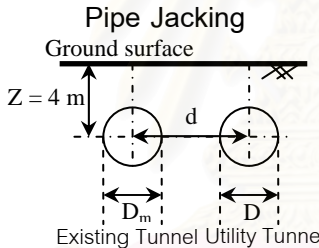
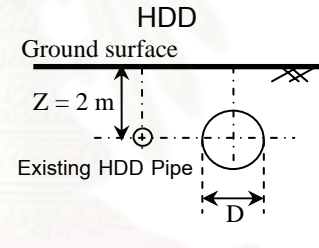
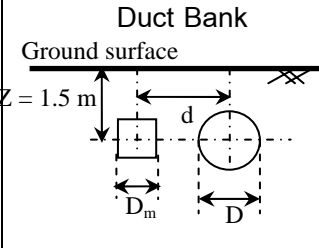
	Pipe Jacking	HDD	Duct Bank
โครงสร้างท่อร้อย สายไฟฟ้าใต้ดิน			
ขนาดของโครงสร้าง ท่อร้อยสายไฟ (D_m = เส้นผ่าน ศูนย์กลางภายใน)	$D_m = 0.6\ 0.8\ 1.0\ 1.2$ 1.5 2.0 2.5 ม.	PN 8 PN 10 PN 12.5 $D_m = 0.16$ ม.	ชนิดที่ 1 2 3 4 5 6 มีขนาด $D_m = 0.28\ 0.47\ 0.66\ 0.85$ 1.04 1.23 ม. ตามลำดับ
ความยาวเข็มพืด	15 ม.	15 ม.	15 ม.
ระยะห่างจาก โครงสร้างข้างเคียง (d)	2.0 3.0 4.0 ม.	2.0 3.0 4.0 ม.	2.0 3.0 4.0 ม.
จำนวนกรณี	21	9	18
รวมกรณีทั้งหมด 48 กรณี			

ตารางที่ 3.4 จำนวนกรณีจากการขุดเปิดหน้าดินที่มีผลกระทบกับโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน

	Pipe Jacking	HDD	Duct Bank
โครงสร้างท่อร้อย สายไฟฟ้าใต้ดิน			
ขนาดของโครงสร้าง ท่อร้อยสายไฟ	$D_m = 0.6\ 0.8\ 1.0\ 1.2$	PN 8 PN 10 PN 12.5	ชนิดที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 มี ขนาด

(D_m = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายใน)	1.5 2.0 2.5 ม.	$D_m = 0.16$ ม.	$D_m = 0.28 0.47 0.66 0.85$ 1.04 1.23 ม. ตามลำดับ
ความกว้างหลุม	3 4 5 ม.	3 4 5 ม.	3 4 5 ม.
ความลึกหลุม	1 2 3 ม.	1 2 3 ม.	1 2 3 ม.
ระยะห่างจาก โครงสร้างข้างเคียง (d)	3 4 5 ม. ($D_m = 0.6$ ถึง 1.0m) 4 5 6 ม. ($D_m = 1.2$ m) 5 6 7 ม. ($D_m = 1.5$ ถึง 2.5m)	2 3 4 ม.	3 4 5 ม.
จำนวนกรณี	189	81	162
รวมกรณีทั้งหมด 432 กรณี			

ตารางที่ 3.5 จำนวนกรณีการก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคที่มีผลกระทบกับโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน

โครงสร้างท่อร้อย สายไฟฟ้าใต้ดิน	Pipe Jacking 	HDD 	Duct Bank 
ขนาดของโครงสร้าง ท่อร้อยสายไฟ (D_m = เส้นผ่าน ศูนย์กลางภายใน)	$D_m = 0.6 0.8 1.0 1.2$ 1.5 2.0 2.5 ม.	PN 8 PN 10 PN 12.5	ชนิดที่ 1 2 3 4 5 6 มีขนาด $D_m = 0.28 0.47 0.66 0.85$ 1.04 1.23 ม. ตามลำดับ
ขนาดอุโมงค์ (D)	0.5 1 2 เท่าของ D_m	0.5 1 2 เท่าของ D_m	0.5 1 2 เท่าของ D_m
แนวการวางตัว	ด้านบน ด้านล่าง ด้านข้าง	ด้านบน ด้านล่าง ด้านข้าง	ด้านบน ด้านล่าง ด้านข้าง
ระยะห่างจาก โครงสร้างข้างเคียง (d)	2 3 4 เท่าของ D_m	2 3 4 เท่าของ D_m	2 3 4 เท่าของ D_m
จำนวนกรณี	189	81	162
รวมกรณีทั้งหมด 432 กรณี			

3.4 วิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง

การวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงเนื่องจากเป็นปัญหาที่ซับซ้อนมากใช้สมการแบบปิดไม่ได้ จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมทางไฟในอิลลิเมนต์ในการวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์เป็นแบบ 2 มิติ โดยการวิเคราะห์ได้จำลองขั้นตอนในการวิเคราะห์เนื่องจากมีผลต่อค่าการทรุดตัวและหน่วยแรงที่จะเกิดขึ้นเพราะขั้นตอนการก่อสร้างจะมีผลต่อการระบายน้ำออกของดินและการรบกวนดินที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละโครงสร้าง

การวิเคราะห์จะใช้ระยะจากผิวดินถึงศูนย์กลางท่อตันตลอดที่ความลึก 4 ม. เนื่องจากเป็นระดับความลึกที่เมื่อวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนตัวของท่อตันตลอดทั้ง 4 ระดับจากงานวิจัยเรื่อง การนำผลวิเคราะห์การทรุดตัวของระบบโครงสร้างไฟฟ้าใต้ดินมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการก่อสร้างแล้วมีค่ามากที่สุด ท่อเจาะตึงแนวราบที่ความลึก 2 ม. เนื่องจากเป็นความลึกที่นิยมเจาะมากที่สุด เนื่องจาก การขุดเปิดหน้าดินที่ความลึกต่ำกว่า 2 จะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการใช้ท่อตันตลอด ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ท่อระบบขุดเปิดหน้าดินใช้ความลึกที่ 1.5 ม. เนื่องจากเป็นความลึกที่เหมาะสมกับขนาดของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินและไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแบบเป็นหมวดของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงตามที่ได้จำแนกไว้ข้างต้นโดยค่าที่ได้จะสนใจค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ทั้งที่เพิ่มขึ้นจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงและรวมทั้งหมดตั้งแต่เริ่มก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน สำหรับผลการวิเคราะห์ได้นำเสนอในรูปแบบกราฟแสดงความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก

เนื่องจากกรณีทำการวิเคราะห์มีทั้งหมดถึง 1,104 กรณีตามที่จำแนกไว้แล้วข้างต้น ฉะนั้นจึงนำเสนอผลการวิเคราะห์เป็นตัวอย่างในบางกรณื่อดังแสดงต่อไป

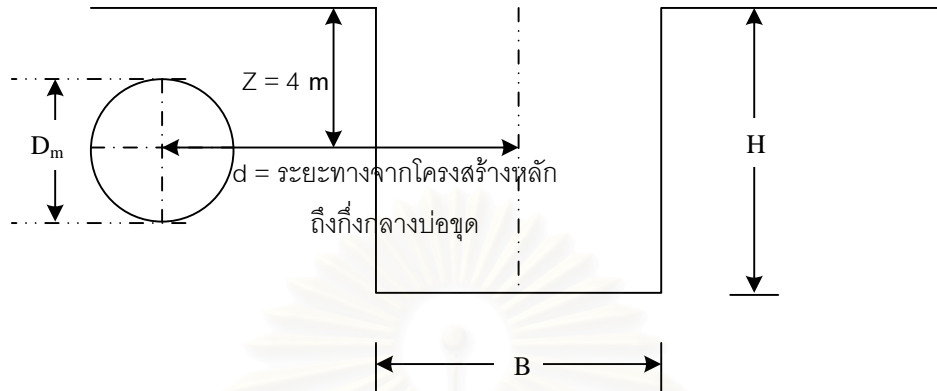
3.5 ตัวอย่างขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงต่อท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน

การวิเคราะห์สิ่งก่อสร้างข้างเคียงในแต่ละโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินมีหลายกรณีในการวิเคราะห์ โดยสามารถแยกสิ่งก่อสร้างข้างเคียงได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ ขุดเปิดหน้าดิน เข็มพืด เส้าเข็ม กลุ่ม และ อุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.9 โดยที่ขั้นตอนในการวิเคราะห์ ได้แสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 การวิเคราะห์กรณีของผลกระทบที่มีต่อท่อตันตลอด (Pipe jacking) เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน (Open cut)

ตัวอย่างที่ 1 นี้แสดงขั้นตอนของท่อตันตลอดที่ระดับความลึก 4 ม. โดยมีการขุดเปิดหน้าดินด้านข้าง ระยะ d ได้แก่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางหลุมถึงจุดศูนย์กลางท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน D_m

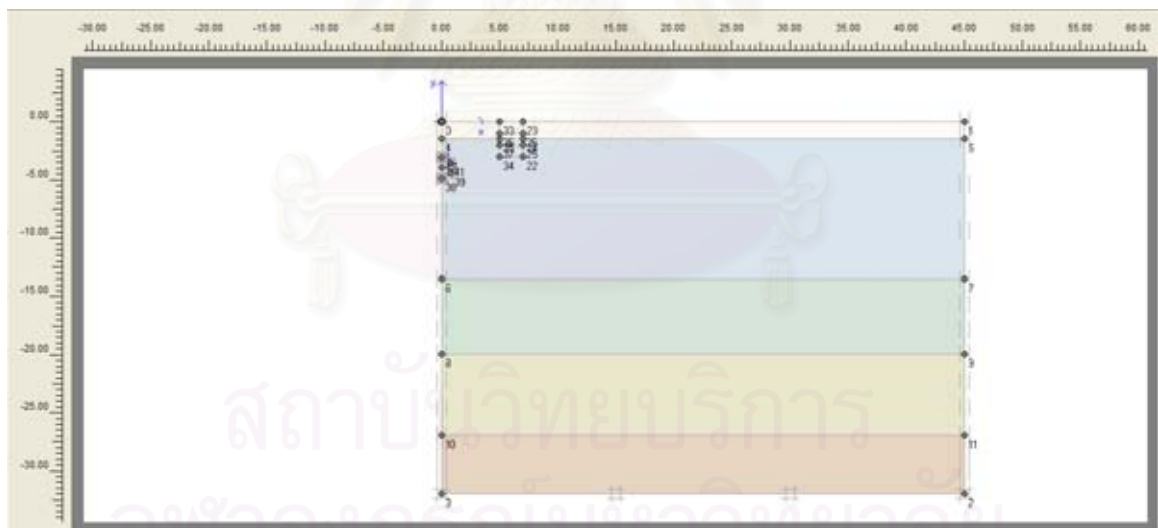
ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ โดยที่ H คือ ความสูงของท่อ และ B คือ ความกว้างของท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการขุดเปิดหน้าดินที่มีต่อท่อตันลอด

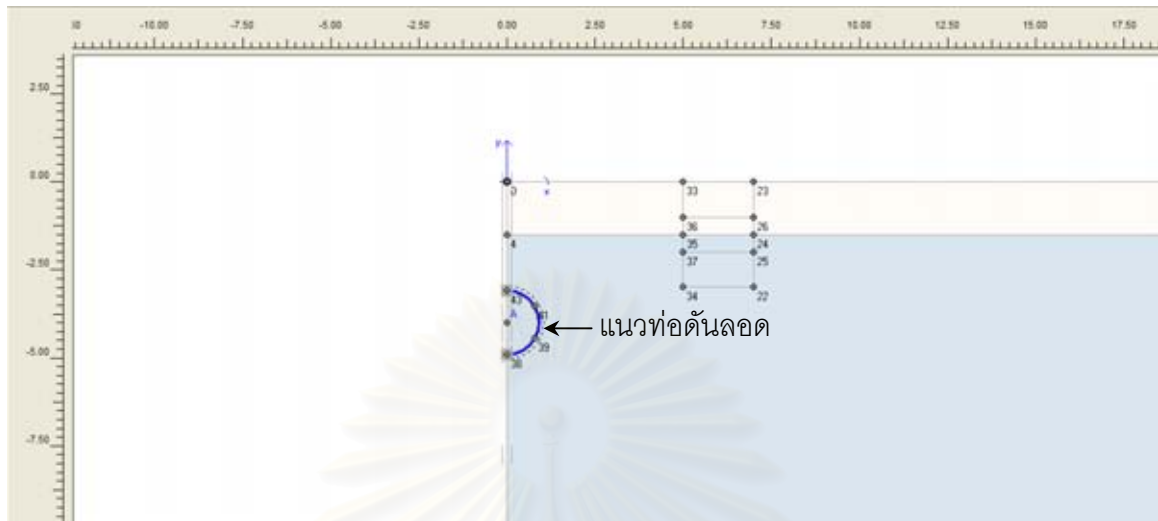
การจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

1. ขั้นตอนการเตรียมชั้นดิน

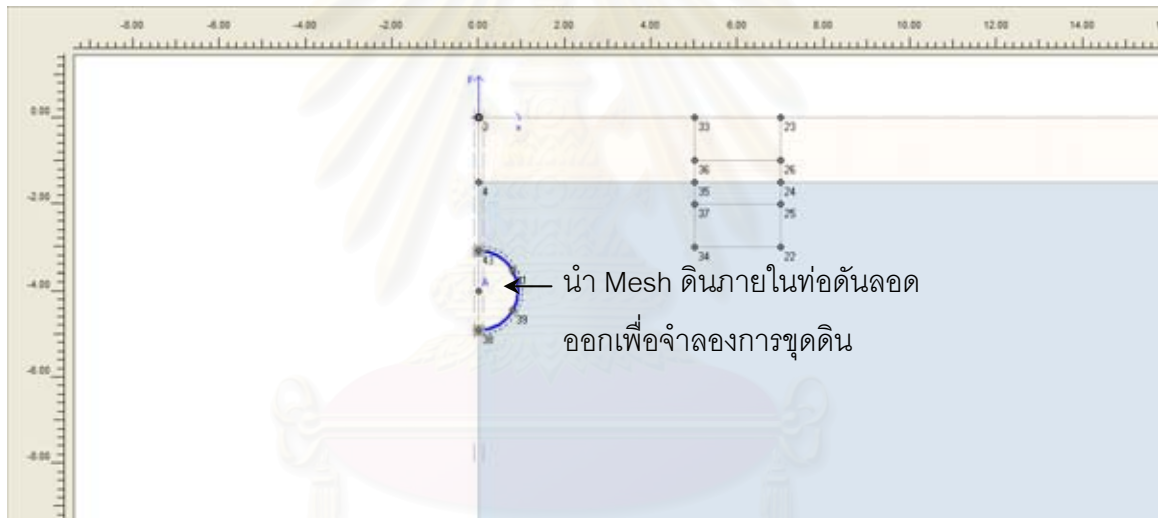


2. ขั้นตอนการก่อสร้างท่อตันลอด ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนย่อยคือ

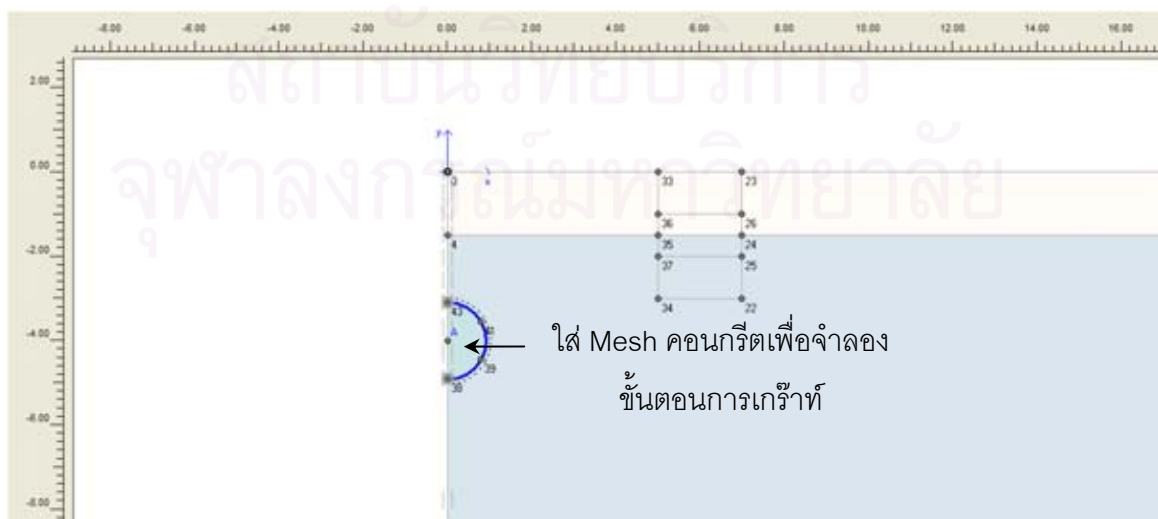
2.1 ขั้นตอนการตันท่อลอด



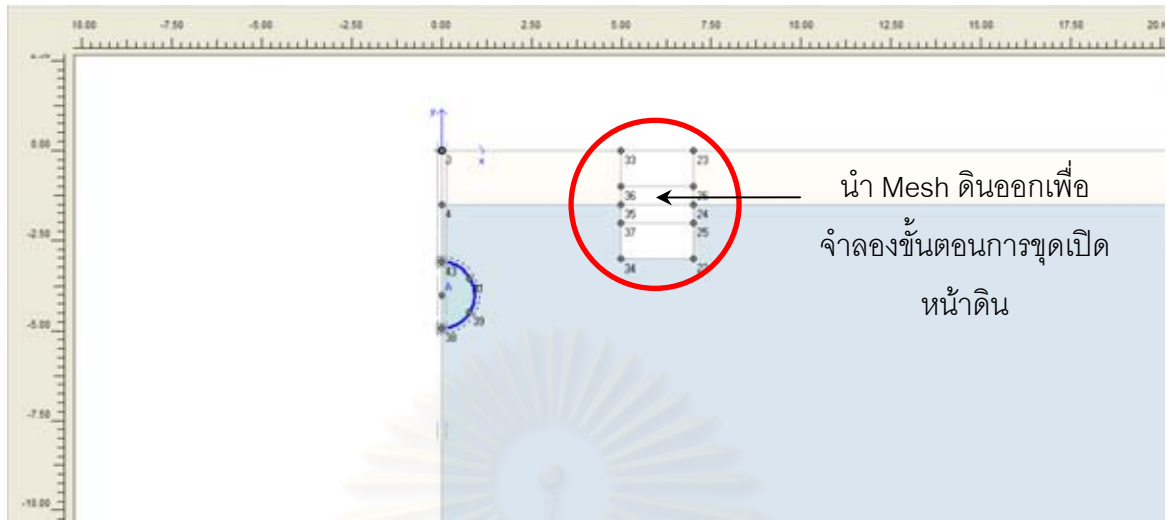
2.2 ขั้นตอนการขุดดินในท่อลอดออก



2.3 ขั้นตอนการทำ Concrete Grout

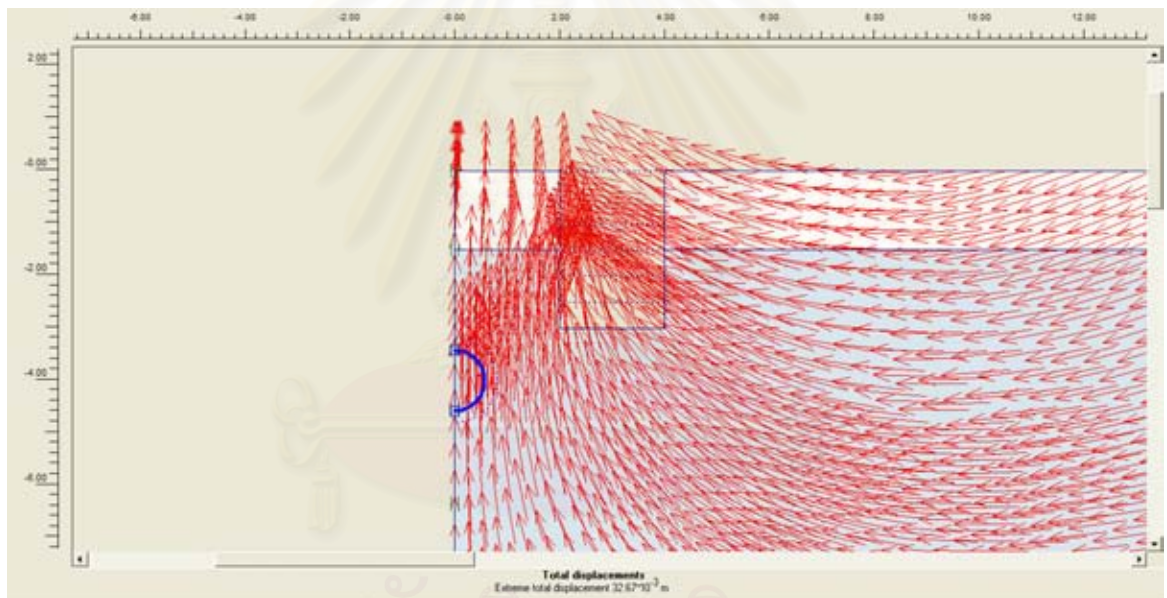


3. ขั้นตอนการขุดเปิดหน้าดิน

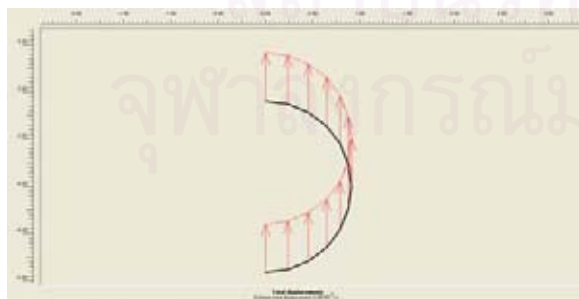


ผลการวิเคราะห์

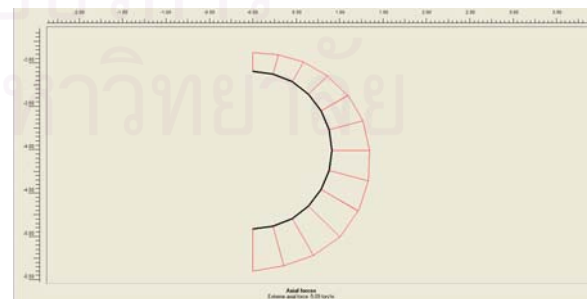
1. การเคลื่อนที่ของมวลดิน



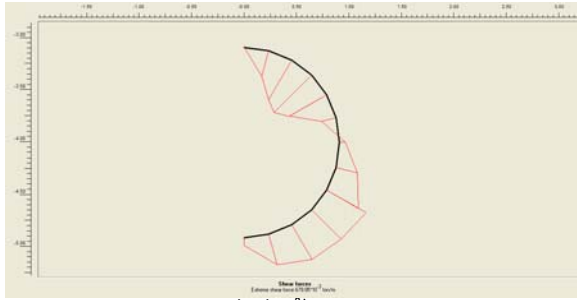
2. ผลกระทบต่อโครงสร้างระบบสายใต้ดิน



การเคลื่อนที่ตัวที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก



หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก



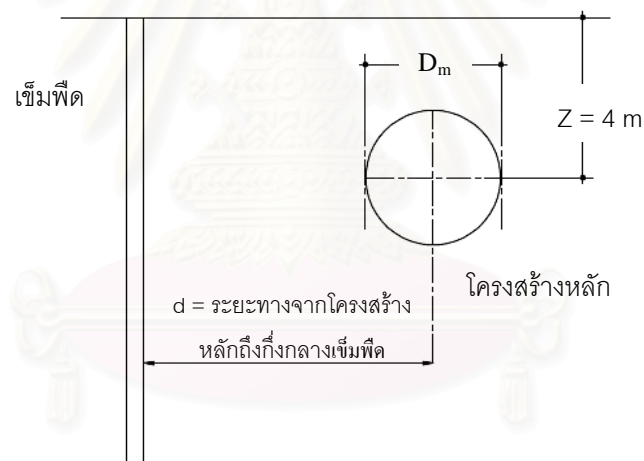
หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก



โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก

ตัวอย่างที่ 2 การวิเคราะห์กรณีของผลกระทบที่มีต่อท่อตันลอด (Pipe Jacking) เนื่องจากการก่อสร้างเข็มพืด (Sheet Pile)

ตัวอย่างที่ 2 นี้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างท่อตันลอดที่ระดับความลึก 4 ม. โดยมีการปักเข็มพืดด้านข้าง ซึ่ง d ได้แก่วัสดุจากจุดศูนย์กลางท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินถึงเข็มพืด และ D_m ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.5

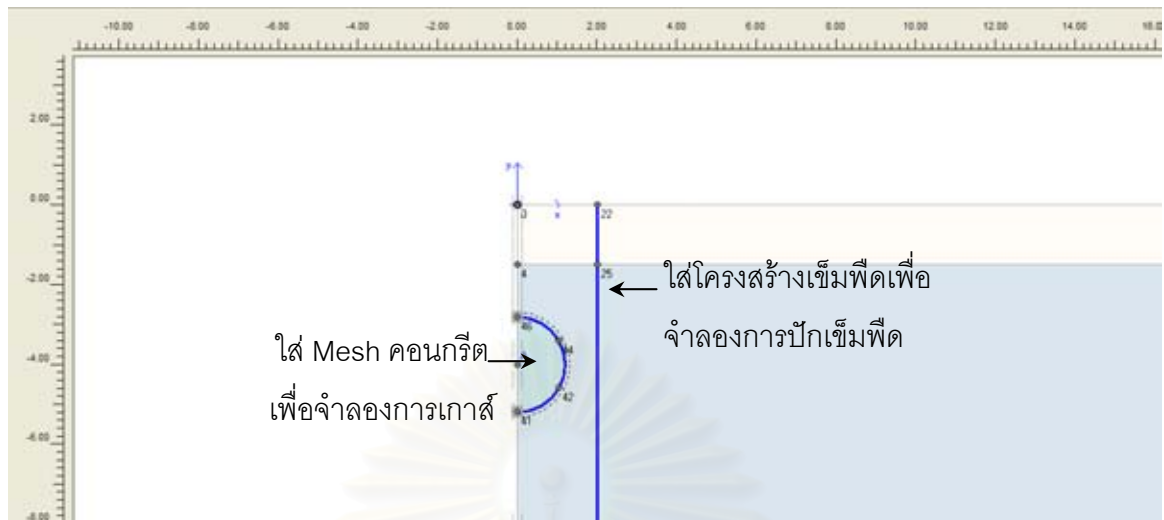


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการปักเข็มพืดที่มีต่อท่อตันลอด

ขั้นตอนการก่อสร้าง

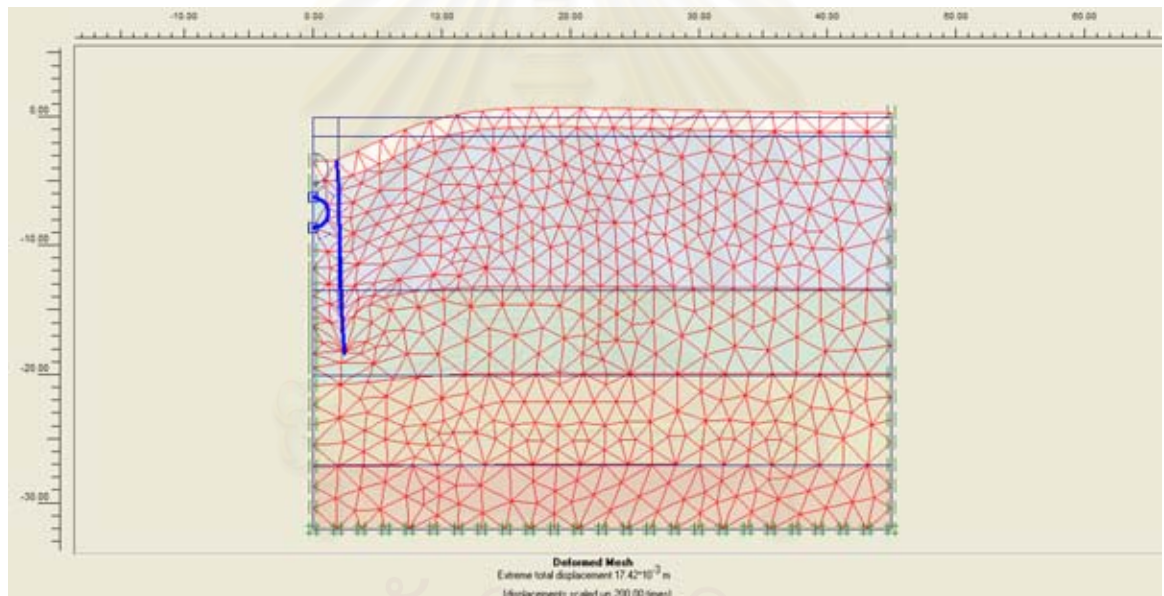
1. ขั้นตอนการเตรียมชั้นดิน (คล้ายคลึงกับตัวอย่างที่ 1)
2. ขั้นตอนการก่อสร้างท่อตันลอด (คล้ายคลึงกับตัวอย่างที่ 1) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนย่อยคือ
 - 2.1 ขั้นตอนการดันท่อลอด
 - 2.2 ขั้นตอนการขุดดินในท่อลอดออก
 - 2.3 ขั้นตอนการทำ Concrete Grout

3. ขั้นตอนการก่อสร้างเข็มพีต

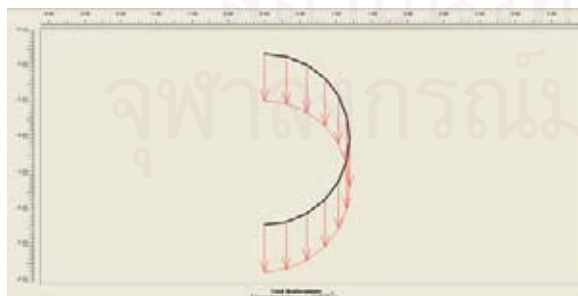


ผลการวิเคราะห์

1. การเคลื่อนที่ของมวลดิน



2. ผลกระทบต่อโครงสร้างระบบสายใต้ดิน



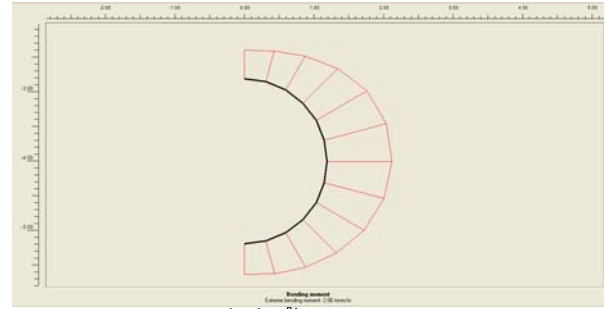
การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก



หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก



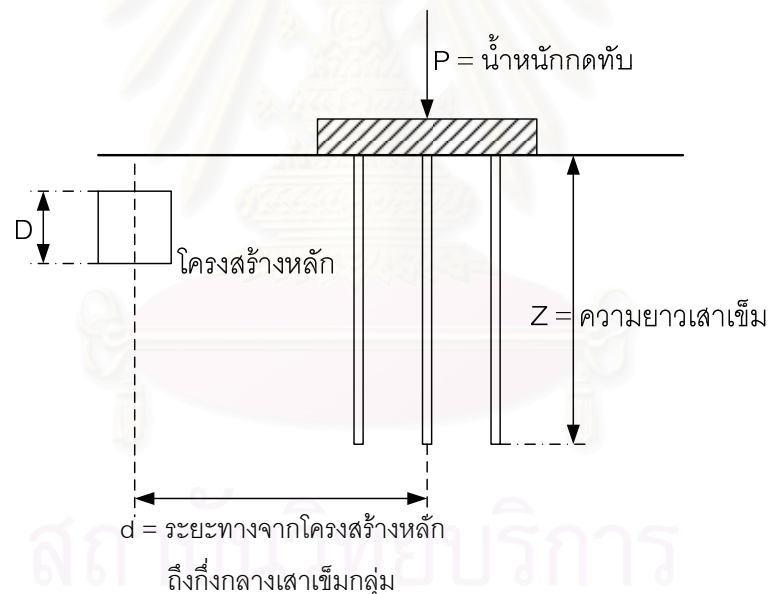
หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก



โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก

ตัวอย่างที่ 3 การวิเคราะห์กรณีของผลกระทบที่มีต่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม (Pile Group)

ตัวอย่างที่ 3 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าระบบชุดเปิดหน้าดินที่ระดับ 1.5 ม. มีเสาเข็มกลุ่มความยาวเสาเข็ม (Z) จำนวน 3 ต้นมากระทำด้านข้าง โดยที่ P ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม d ได้แก่ ระยะจากศูนย์กลางท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินถึงกึ่งกลางเสาเข็มกลุ่ม และ D ได้แก่ ความสูงของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.6

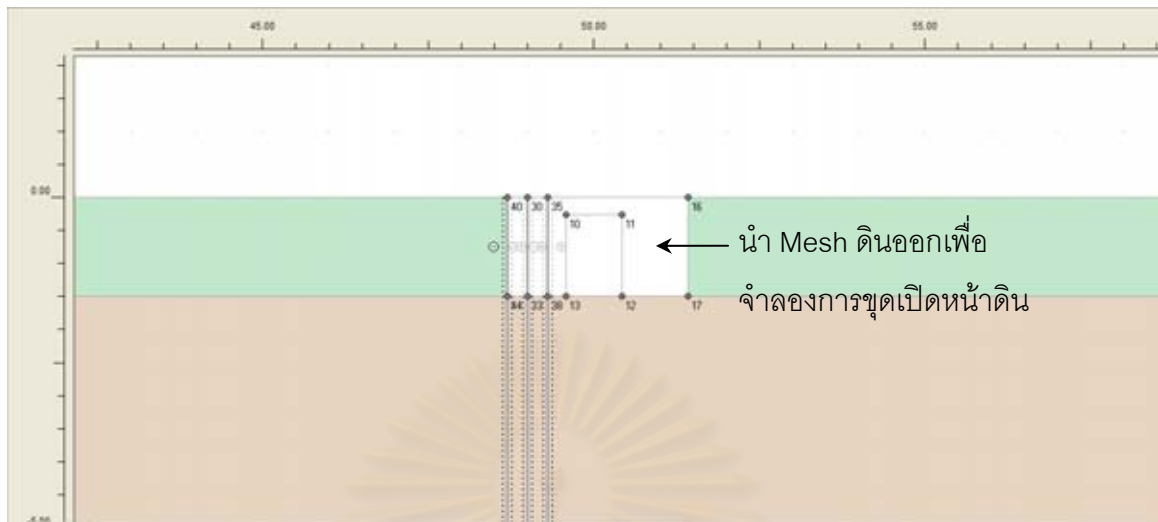


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการตอกเสาเข็มกลุ่มที่มีต่อระบบชุดเปิดหน้าดิน

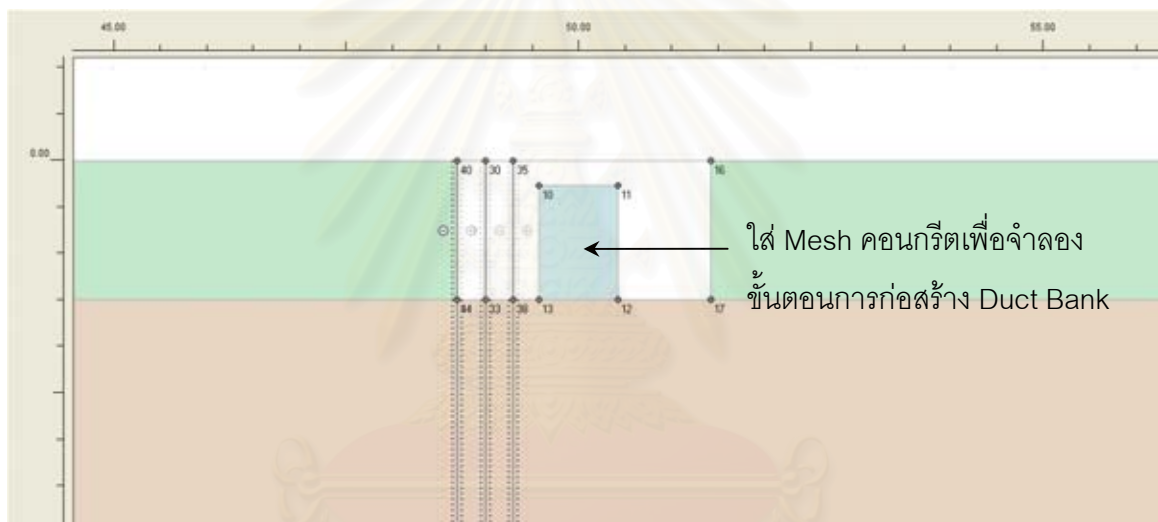
ขั้นตอนการก่อสร้าง

1. ขั้นตอนการเตรียมชั้นดิน (คล้ายคลึงกับตัวอย่างที่ 1)
2. ขั้นตอนการก่อสร้าง Duct Bank ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนย่อยคือ

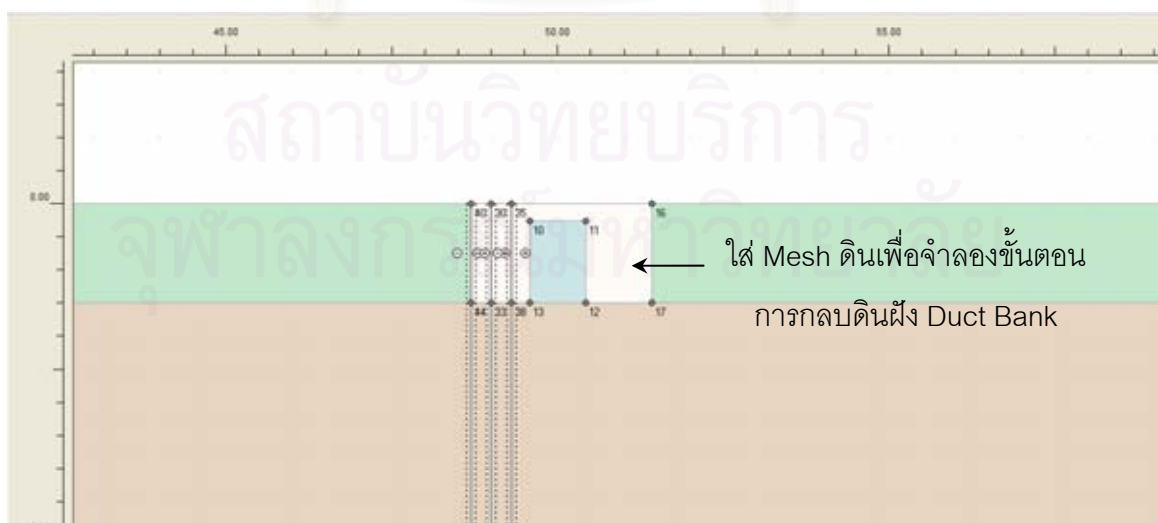
2.1 ขั้นตอนการขุดเปิดหน้าดิน



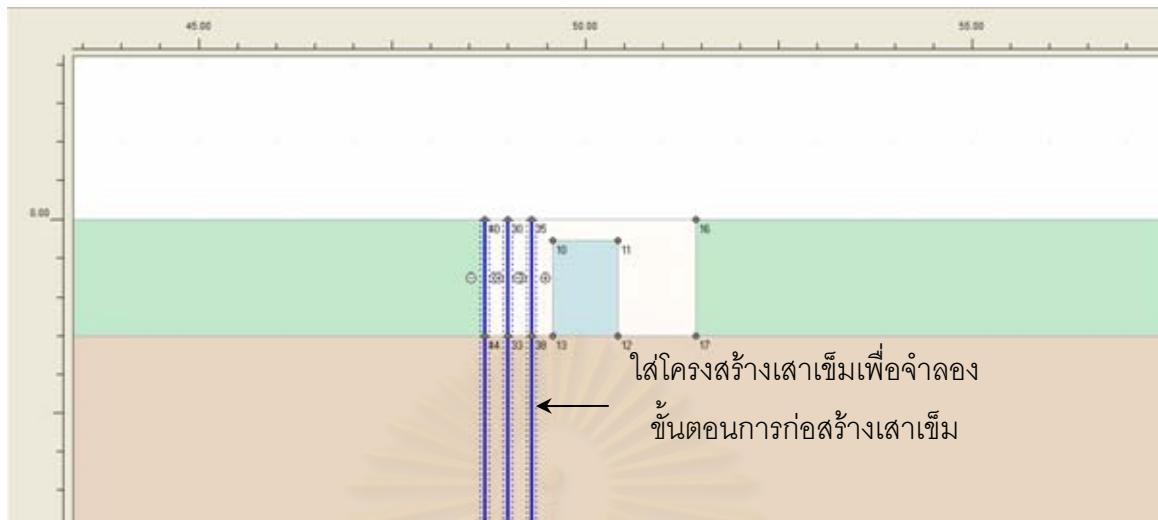
2.2 ขั้นตอนการติดตั้ง Duct Bank



2.3 ขั้นตอนการกลับหน้าดินกลับ

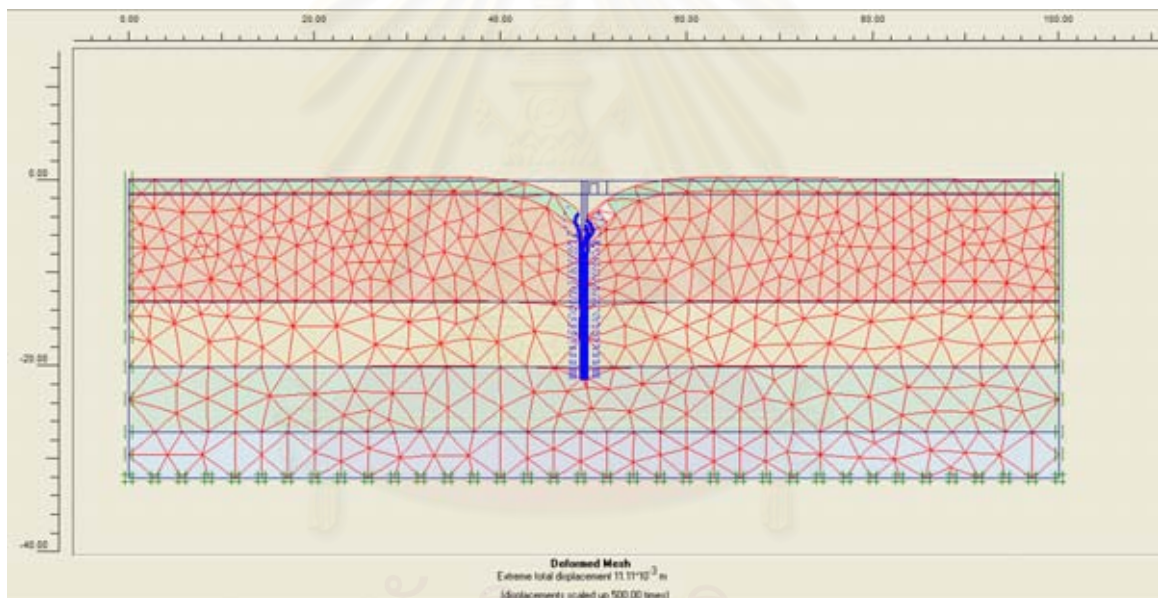


3. ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มพร้อมใส่น้ำหนักบรรทุก



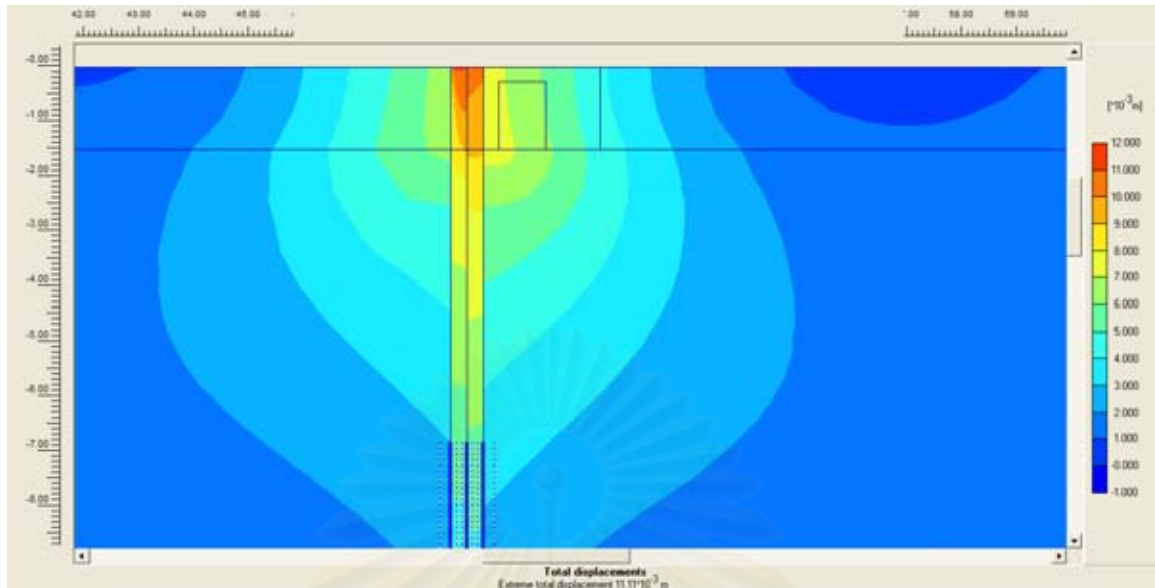
ผลการวิเคราะห์

1. การเคลื่อนที่ของมวลดิน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

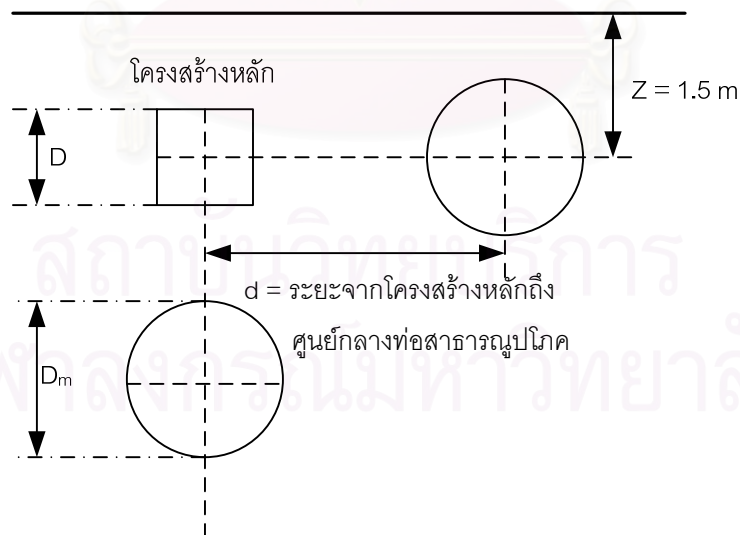
2. ผลกระทบต่อโครงสร้างระบบสายใต้ดิน



การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก

ตัวอย่างที่ 4 การวิเคราะห์กรณีของผลกระทบที่มีต่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์

ตัวอย่างที่ 4 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าระบบขุดเปิดหน้าดินที่ระดับ 1.5 ม. มีอุโมงค์ข้างเคียงมากระทำด้านข้าง โดยที่ d ได้แก่ระยะจากศูนย์กลางท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินถึงกึ่งกลางเสาเข็มกลุ่ม และ D ได้แก่ความสูงของท่อร้อยท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.7

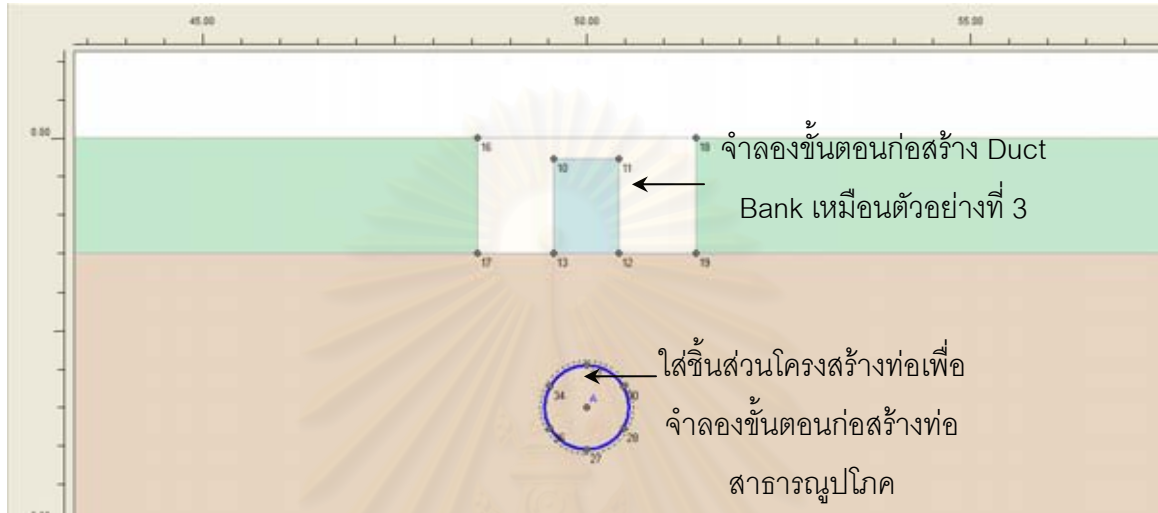


รูปที่ 3.7 ตัวอย่างผลกระทบข้างเคียงจากการขุดท่อสาธารณูปโภคที่มีต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน

ขั้นตอนการก่อสร้าง

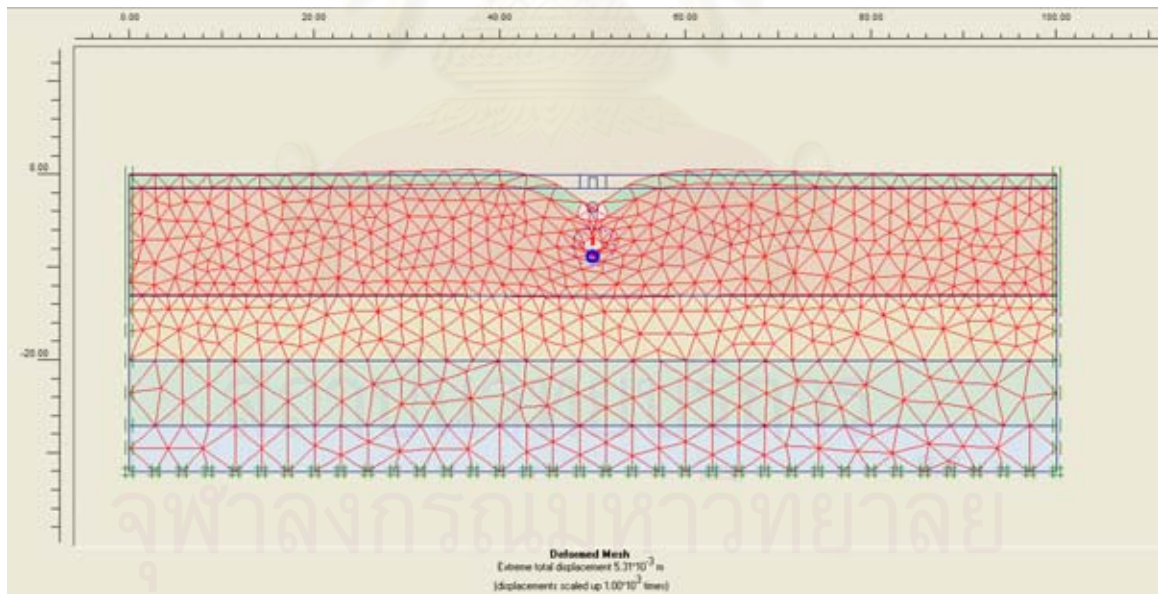
1. ขั้นตอนการเตรียมชั้นดิน (คล้ายคลึงกับตัวอย่างที่ 1)

2. ขั้นตอนการก่อสร้าง Duct Bank (คล้ายคลึงกับตัวอย่างที่ 3) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนย่อยคือ
 - 2.1 ขั้นตอนการขุดเปิดหน้าดิน
 - 2.2 ขั้นตอนการติดตั้ง Duct Bank
 - 2.3 ขั้นตอนการกลบหน้าดินกลับ
3. ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง

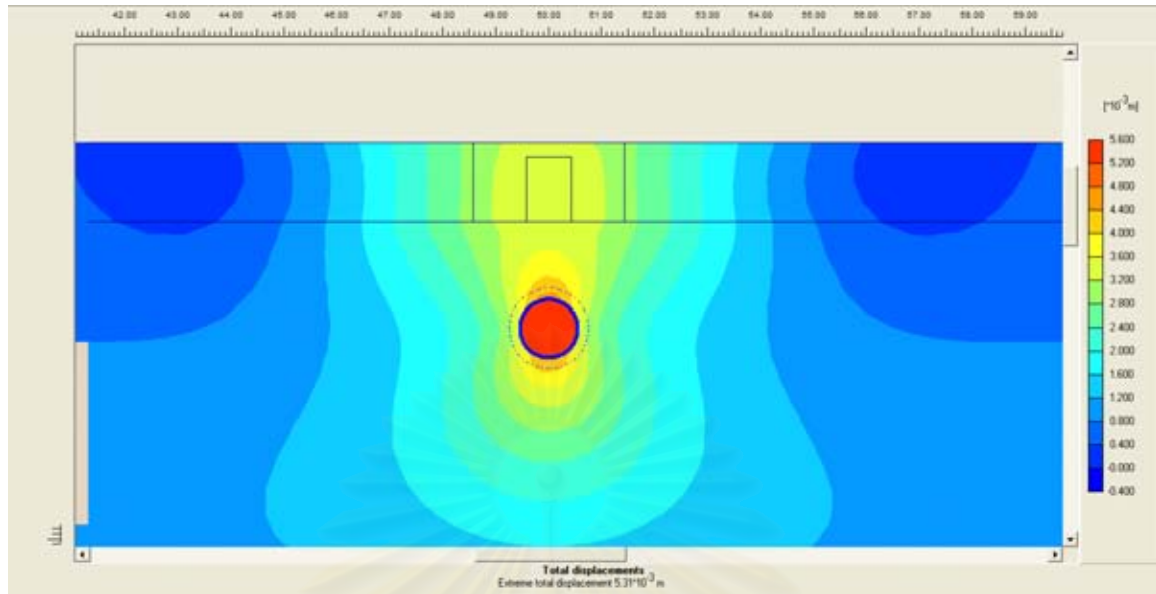


ผลการวิเคราะห์

1. การเคลื่อนที่ของมวลดิน



2. ผลกระทบต่อโครงสร้างระบบสายใต้ดิน



การเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างหลัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง

ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงจัดแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้นจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงกับระยะจากท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินถึงสิ่งก่อสร้างข้างเคียง ซึ่งกราฟทั้งหมดนี้จะรวบรวมอยู่ในภาคผนวก ก และตารางแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ข ซึ่งดัชนีรูปภาพที่ประกอบไปด้วยตัวเลข 4 หลัก คือ X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 โดยที่ตัวเลขในแต่ละหลักหมายถึง

- ตัวเลขหลักที่ 1 X_1 หมายถึงชนิดของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงคือ 1 = การขุดเปิดหน้าดิน 2 = การปักเข็มพืด 3 = การก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม 4 = การก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง
- ตัวเลขหลักที่ 2 X_2 จะมีเฉพาะในกรณีการก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียงเท่านั้น โดยที่ 1 = การวางตัวอุโมงค์ในแนวด้านข้าง และ 2 = การวางตัวอุโมงค์ในแนวด้านล่าง
- ตัวเลขหลักที่ 3 X_3 หมายถึงชนิดและขนาดของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินโดยที่ 1-7 = ท่อตันลอดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 0.8 1.0 1.2 1.5 2.0 และ 2.5 ม. ตามลำดับ 8 = ท่อเจาะตึงแนวราบ 9-14 = ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินวิธีขุดเปิดหน้าดิน ชนิดที่ 1-6 ตามลำดับ ยกเว้นในโครงสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียงเท่านั้นที่ 1 = อุโมงค์ข้างเคียงขนาด 0.5 เท่า 2 = อุโมงค์ข้างเคียงขนาด 1.0 เท่า 3 = อุโมงค์ข้างเคียงขนาด 2.0 เท่า
- ตัวเลขหลักที่ 4 X_4 ประกอบไปด้วยเลข 1-4 โดยหมายถึง ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงในแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ตามลำดับ
- ตัวเลขหลักที่ 5 X_5 มีค่าเท่ากับ 1 = ค่าแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง 2 = ค่าแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างทั้งหมด

ตัวอย่างค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด จะแยกตามโครงสร้างหลัก ท่อตันลอด ท่อเจาะตึงแนวราบ และ ท่อระบบขุดเปิดหน้าดินโดยกรณีในการวิเคราะห์และขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วย PLAXIS ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 โดยค่าที่ได้จะแยกเป็นค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมด หมายถึง ค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดจากขั้นตอนการก่อสร้างโครงสร้างหลักเองรวมกับค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดจากการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างข้างเคียง และค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดจากการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลจากการทรุดตัวจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงนั้นจะคิดเฉพาะในช่วงเวลาที่ก่อสร้างเท่านั้นไม่คิดรวมถึงการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคาน้ำ โดยค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดได้จากการใช้โปรแกรมโดยตัวอย่างค่าทั้งหมดข้างต้นแยกต่างโครงสร้างหลักและโครงสร้างที่มากกระทำได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ท่อตันลอด มีทั้งหมด 7 ขนาดแบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโดยความลึกในแต่ละขนาดที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 4 ม. เนื่องจากเป็นความลึกที่ไม่ต้นเกินไปในการดันท่อและให้ค่าการเคลื่อนตัวที่มากกว่าในระดับที่ลึกลงไป ซึ่งลักษณะการนำเสนอได้แสดงในหัวข้อที่ 4.1.1.1 ผลกระทบของท่อตันลอดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน 4.1.1.2 ผลกระทบของท่อตันลอดเนื่องเข็มพืด 4.1.1.3 ผลกระทบของท่อตันลอดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม และ 4.1.1.4 ผลกระทบของท่อตันลอดเนื่องจากอุโมงค์สาธารณูปโภค

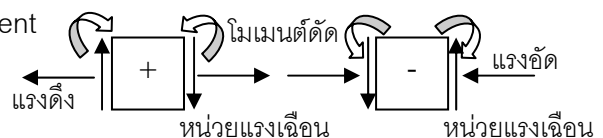
4.1.1.1 ผลกระทบที่มีต่อท่อตันลอดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดินข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.60 ม. ความกว้างขุดข้างเคียง 2 3 และ 4 ม. ความลึกขุด 1 2 และ 3 ม. ระยะทางจากศูนย์กลางขุดถึงศูนย์กลางท่อ 3 4 และ 5 ม. ตามลำดับ สำหรับในขนาดอื่นๆแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อตันลอดขนาด 0.60 ม.

แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12									
													Distance from main structure (m)			Incremental effect			Distance from main structure (m)		
													3	4	5				3	4	5
Pipe jacking	0.6	2	1	Total Displacement (mm)	-5.05	-2.07	0.86	Total Displacement (mm)	-11.54	-8.56	-5.63										
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.35	2.42	2.46	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.26	-0.19	-0.15										
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.21	0.29	0.35	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.14	-0.06	0.00										
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.70	0.72	0.74	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.09	-0.06	-0.05										
			2	Total Displacement (mm)	-7.53	-3.13	-0.01	Total Displacement (mm)	-14.02	-9.62	-6.50										
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.35	2.46	2.50	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.26	-0.15	-0.11										
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.26	0.32	0.35	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.09	-0.03	0.00										
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.68	0.74	0.75	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.10	-0.05	-0.04										
			3	Total Displacement (mm)	-8.52	-3.99	-0.52	Total Displacement (mm)	-15.01	-10.48	-7.01										
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.41	2.49	2.54	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.20	-0.12	-0.07										
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.32	0.36	0.38	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	0.01	0.03										
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.73	0.75	0.76	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.06	-0.03	-0.02										
		3	1	Total Displacement (mm)	-10.62	-5.89	-1.89	Total Displacement (mm)	-17.11	-12.38	-8.38										
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.17	2.35	2.42	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.44	-0.26	-0.19										
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.28	0.35	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.21	-0.07	0.00										
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.64	0.70	0.78	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.15	-0.08	-0.01										
			2	Total Displacement (mm)	-14.64	-7.77	-2.91	Total Displacement (mm)	-21.13	-14.26	-9.40										
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.18	2.40	2.45	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.43	-0.21	-0.16										
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.24	0.34	0.36	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.10	-0.01	0.01										
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.65	0.72	0.73	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.14	-0.07	-0.05										
			3	Total Displacement (mm)	-16.84	-8.81	-3.13	Total Displacement (mm)	-23.33	-15.30	-9.62										
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.27	2.43	2.48	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.34	-0.18	-0.13										
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.32	0.33	0.38	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	-0.02	0.04										
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.68	0.73	0.75	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.10	-0.06	-0.04										
4	1	Total Displacement (mm)	-16.67	-10.06	-4.90	Total Displacement (mm)	-23.16	-16.55	-11.39												
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.12	2.27	2.36	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.49	-0.34	-0.25												
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.24	0.33	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.27	-0.11	-0.02												
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.62	0.67	0.71	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.17	-0.11	-0.08												
	2	Total Displacement (mm)	-22.85	-12.73	-5.85	Total Displacement (mm)	-29.34	-19.22	-12.34												
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.09	2.32	2.40	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.52	-0.29	-0.21												
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.35	0.35	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.16	0.00	0.00												
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.62	0.70	0.72	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.16	-0.09	-0.07												
	3	Total Displacement (mm)	-26.07	-13.96	-5.93	Total Displacement (mm)	-32.56	-20.45	-12.42												
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.24	2.39	2.44	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.37	-0.22	-0.17												
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.39	0.37	0.39	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.03	0.04												
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.68	0.72	0.73	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.11	-0.07	-0.05												

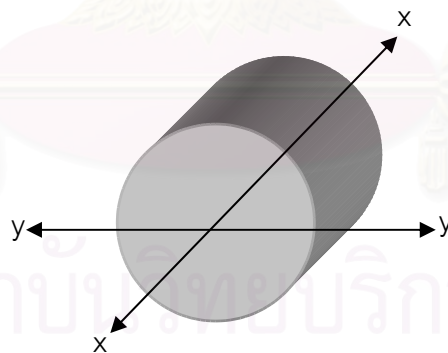
หมายเหตุ Total Displacement การทรุดตัว (+) การพองตัว (Heave) (-)

Axial, Shear and Bending Moment



พิจารณาตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อตันลอดโดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อตันลอดโดยมีทั้งหมด 7 ขนาด ในที่นี้เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ม. แถวที่ 3 เป็นความกว้างของบ่อขุดในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างที่อ้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นความลึกของบ่อขุด แถวที่ 5 เป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางบ่อขุดเป็นระยะ 3 4 และ 5 ม. ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดจากตารางจะนำไปจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์เพื่อนำไปใช้ได้สะดวกมากขึ้น โดยในรูปที่ 4.2 ถึง 4.9 แกนแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนแนวนราบ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d/D_m) และรูปที่ 4.10 ถึง 4.17 แกนแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกน X ระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตร โดยกราฟแต่ละเส้นแยกตามความลึก (H) และความกว้าง (B) บ่อขุด สำหรับในขนาดอื่นๆแสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.1 แสดงแนวแกนที่ใช้ในการคำนวณ

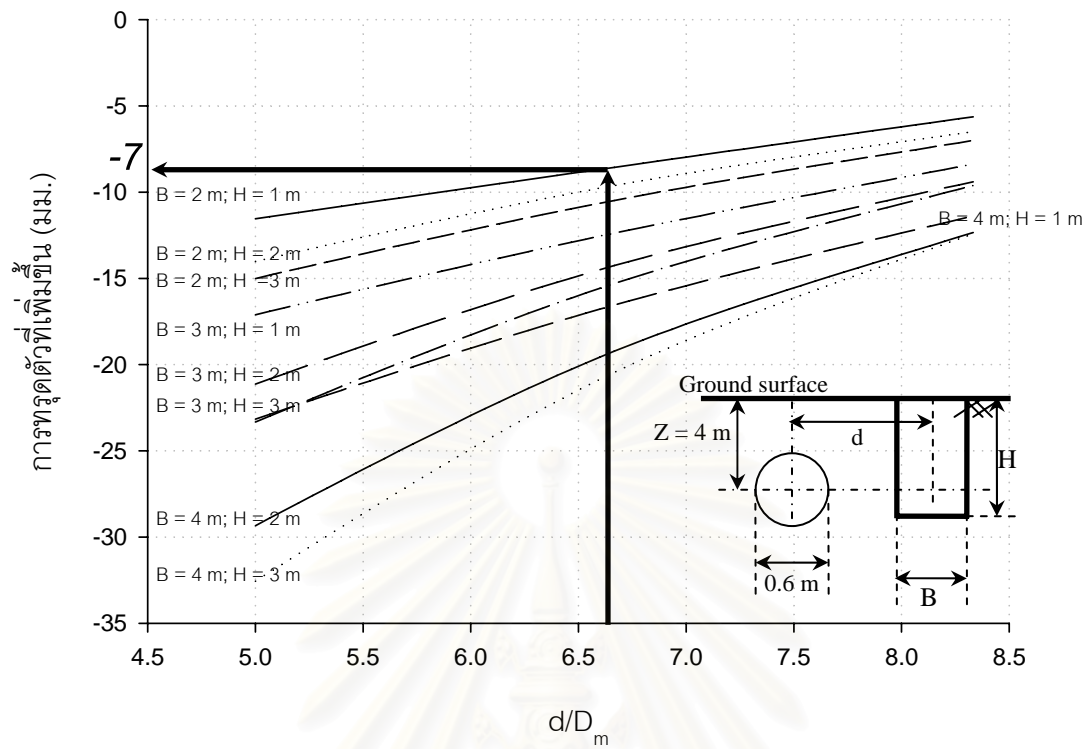
ตัวอย่างการใช้งานกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของศูนย์กลางท่อตันลอดถึงกึ่งกลางบ่อขุดข้างเคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อตันลอด (d/D_m) ของท่อตันลอดขนาด 0.60 ม. จากกราฟความสัมพันธ์สมมุติบ่อขุดมีขนาดความกว้าง 2 ม. สูง 1 ม. ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางท่อกับบ่อขุดเท่ากับ 3.96 ม. ฉะนั้น d/D_m เท่ากับ 6.6

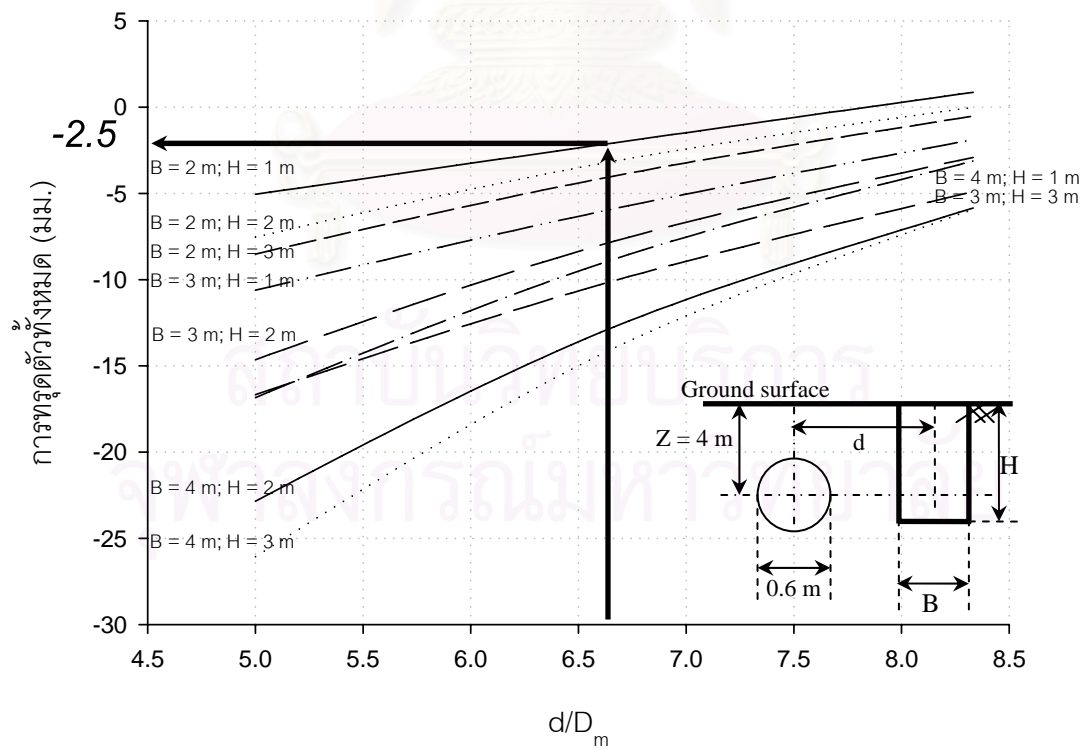
จะได้ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ -7 มม. ซึ่งหมายถึงดินเกิดการพองตัว (Heave) เท่ากับ 7 มม. และจากรูปที่ 4.3 เกิดการพองตัวทั้งหมดจากการก่อสร้าง 2.5 มม. ซึ่งหมายถึงการทรุดตัวที่เกิดเฉพาะจากการก่อสร้างที่ลดขนาด 0.60 ม. น้อยกว่าการพองตัวของดินที่เกิดจากการขุดเปิดหน้าดินข้างเคียงความกว้าง 2 ม. สูง 1 ม. ระยะห่าง 3.96 ม. สำหรับหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงในทิศทางตามขวางอุโมงค์ (y) ดังแสดงทิศทางในรูปที่ 4.1 โดยที่หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นมีค่า -0.17 ตันต่อ ตร.ม. ซึ่งเครื่องหมายลบหมายถึงแรงอัด ส่วนหน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดมีค่า 2.43 ตันต่อ ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีค่า -0.06 ตันต่อ ตร.ม. และหน่วยแรงเฉือนทั้งหมดมีค่า 0.24 ตันต่อ ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นมีค่า -0.15 ตัน.ตร.ม. และโมเมนต์ดัดทั้งหมดมีค่า 0.75 ตัน.ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ รูปที่ 4.10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นกับระยะห่างของศูนย์กลางที่ลดขนาดที่กึ่งกลางบ่อขุดข้างเคียงในหน่วยเมตร โดยที่ระยะ 3.96 ม. เกิดการพองตัว -7 มม. เช่นเดียวกับรูปที่ 4.2 ที่ d/D_m เท่ากับ 6.6 เพราะระยะระหว่างศูนย์กลางที่ลดขนาดถึงศูนย์กลางบ่อขุด (d) ที่ยกตัวอย่างนั้นเท่ากัน และรูปที่ 4.11 เกิดการพองตัวทั้งหมดเท่ากับ 2.5 มม. เช่นเดียวกับรูปที่ 4.3 สำหรับหน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดดังแสดงในรูปที่ 4.12 ถึง 4.17 มีค่าเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.4 ถึง 4.9 เนื่องจากในตัวอย่างใช้ระยะ d เท่ากัน

จากการวิเคราะห์จะเห็นว่าหน่วยแรงที่ได้สามารถนำไปรวมกับหน่วยแรงที่ใช้ออกแบบ (P_n, V_n, M_n) เพื่อหาหน่วยแรงประลัย (P_u, V_u, M_u) ในการคำนวณโครงสร้าง แต่จากการคำนวณหน่วยแรงที่ได้เป็นหน่วยแรงในแนวขวางอุโมงค์ซึ่งมีค่าน้อยมากอาจไม่นำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างได้ สำหรับบ่อขุดที่ความกว้างและความลึกอื่นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ที่ความกว้างและความลึกอื่นในลักษณะเดียวกัน โดยในกราฟความสัมพันธ์วิเคราะห์ที่ความกว้าง 2 ถึง 4 ม. และความลึกที่ 1 ถึง 3 ม. ดังแสดงที่แสดงไว้ในกราฟ

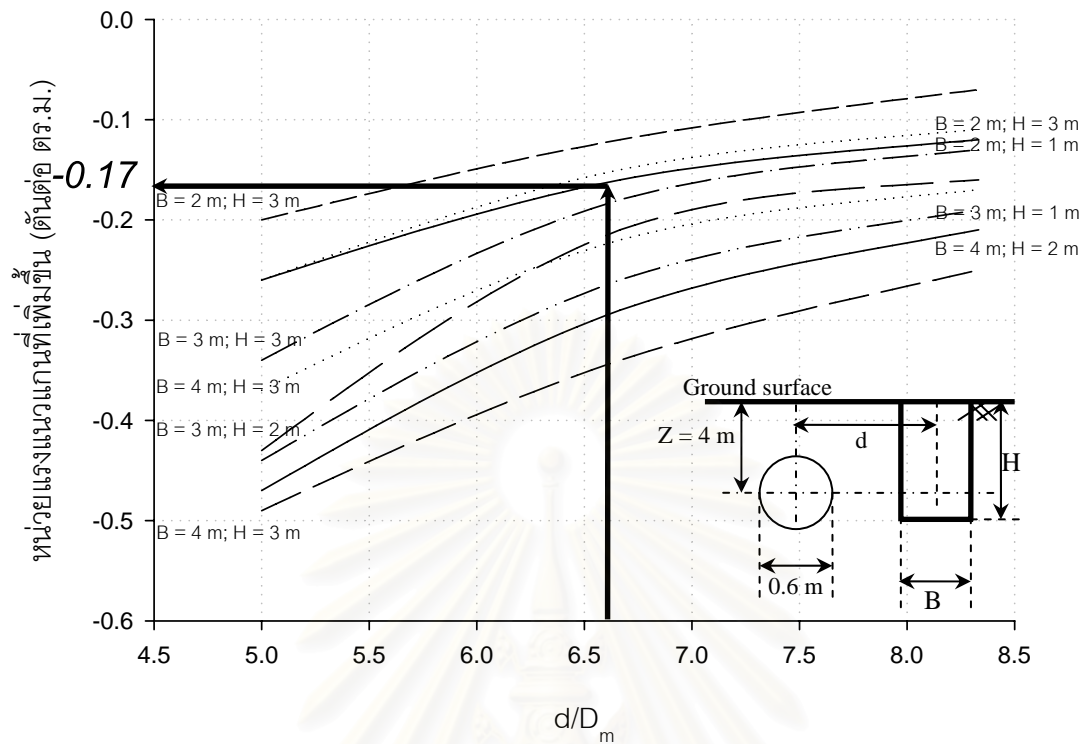
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



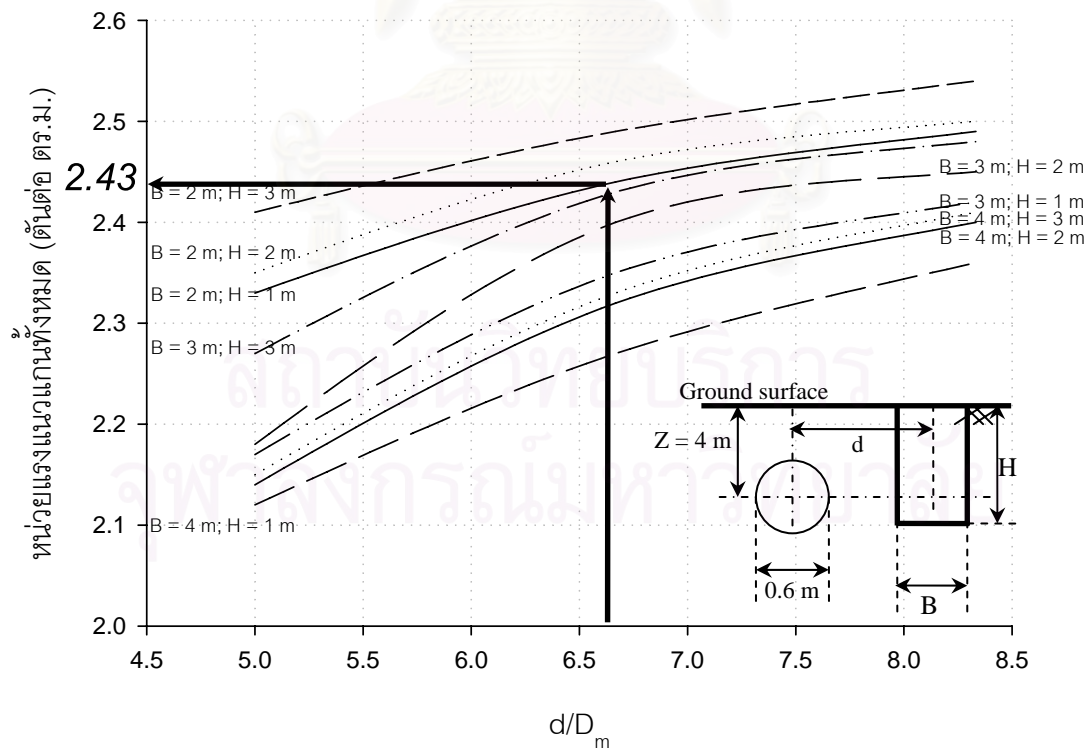
รูปที่ 4.2 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



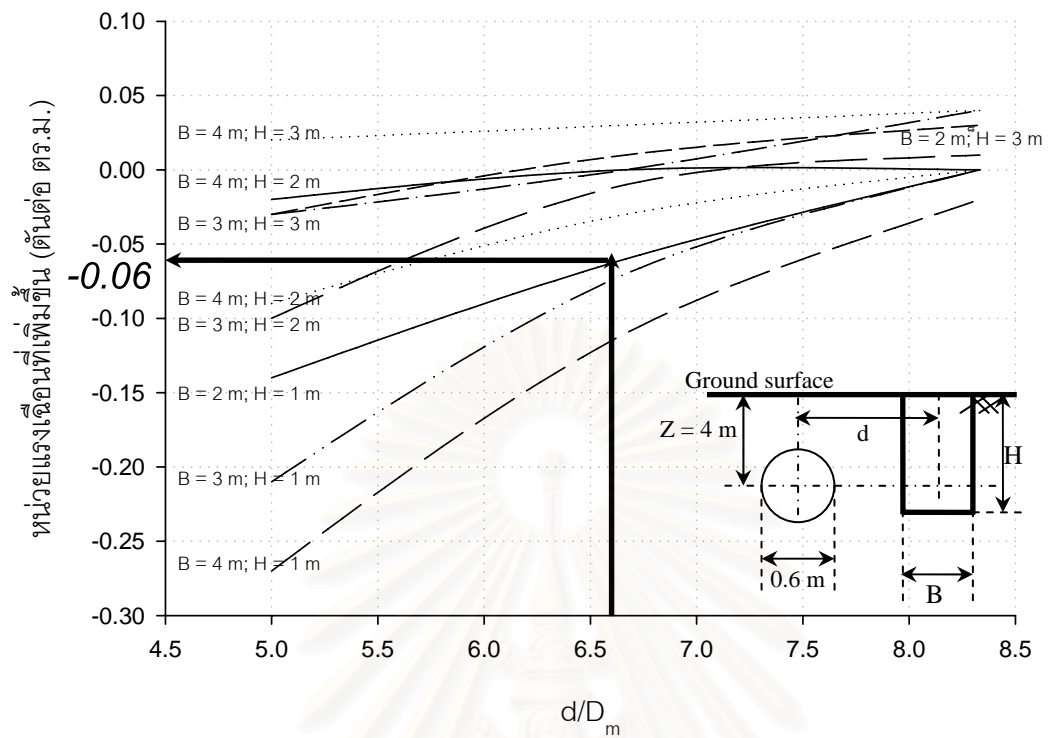
รูปที่ 4.3 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



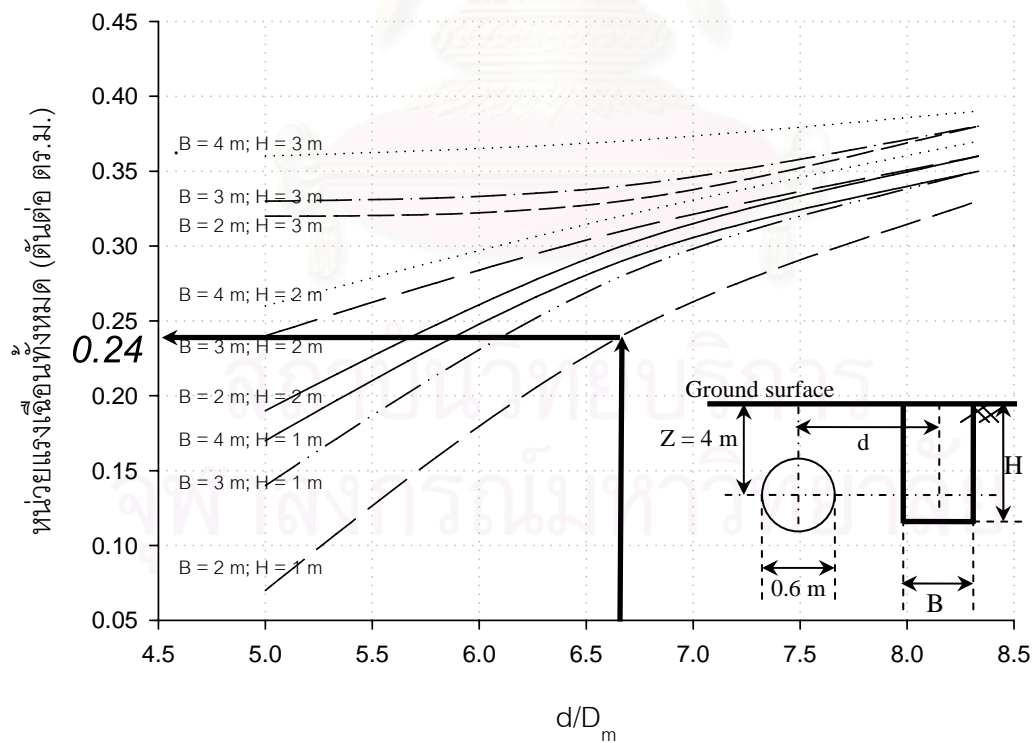
รูปที่ 4.4 หน่วยแรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



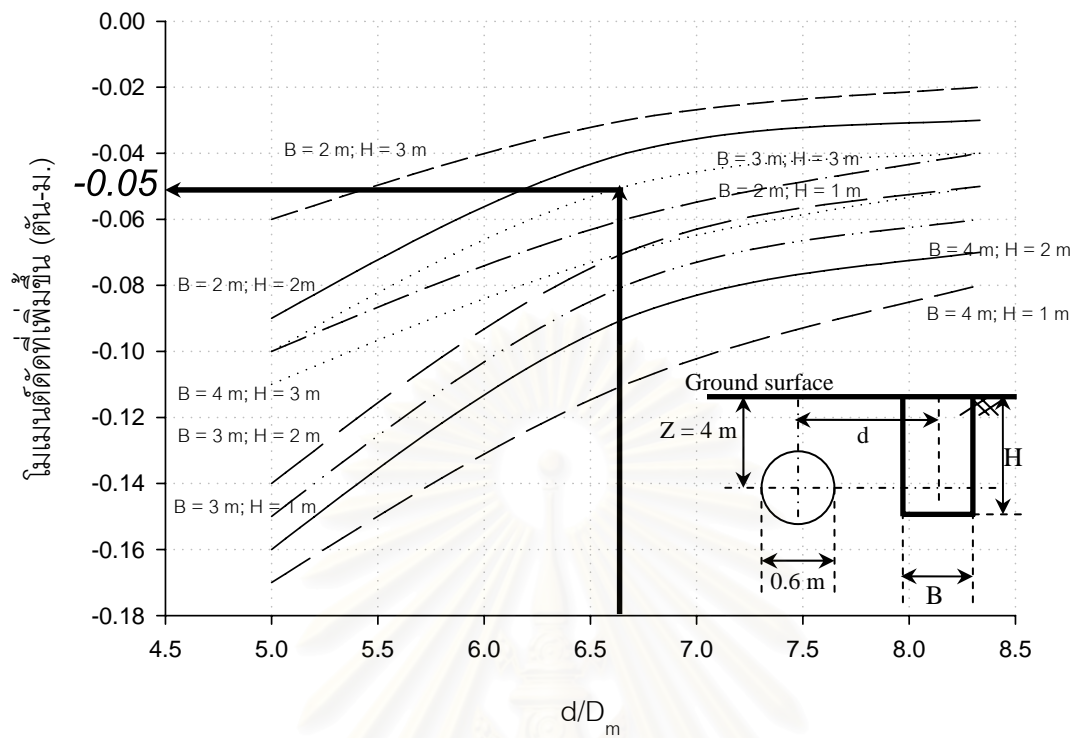
รูปที่ 4.5 หน่วยแรงตามแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



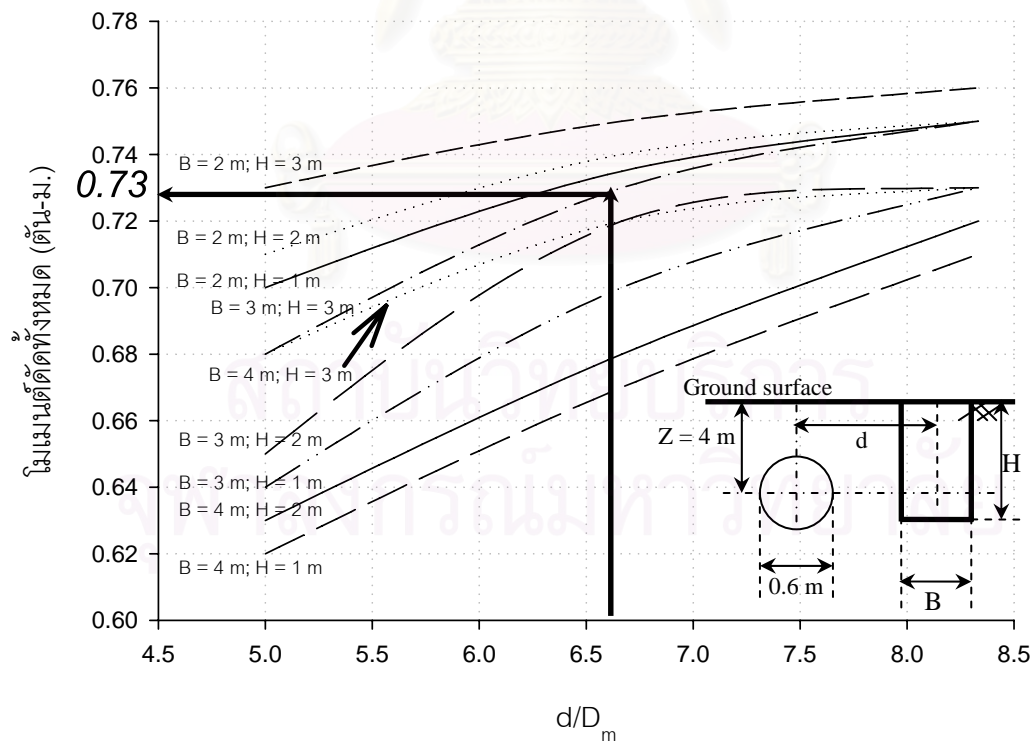
รูปที่ 4.6 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



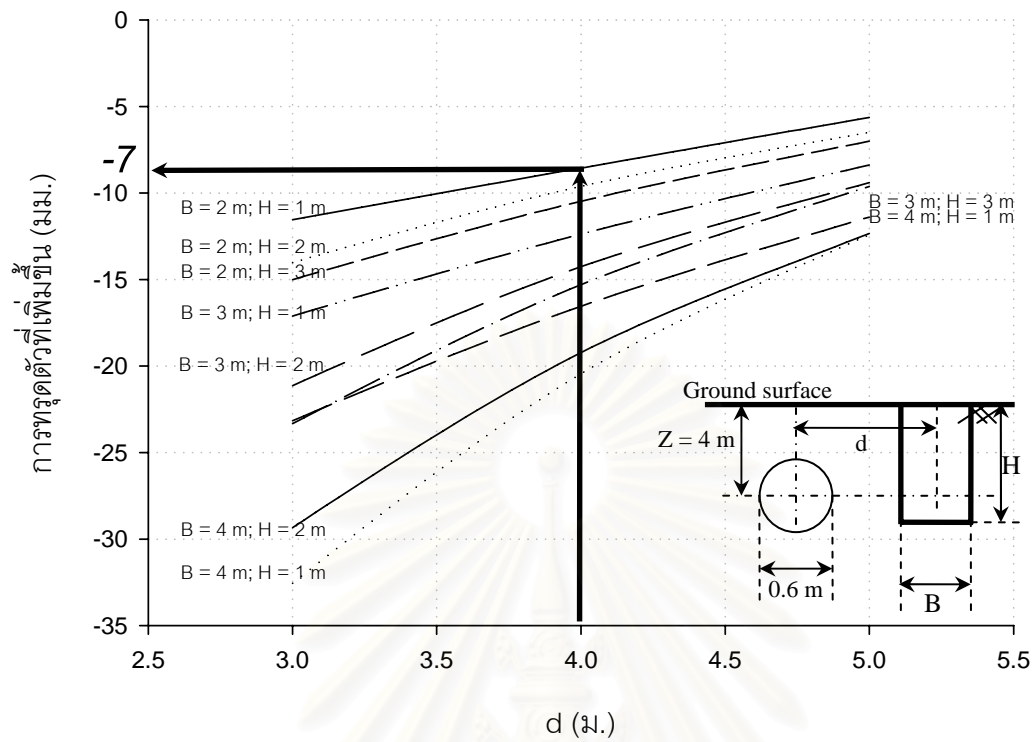
รูปที่ 4.7 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



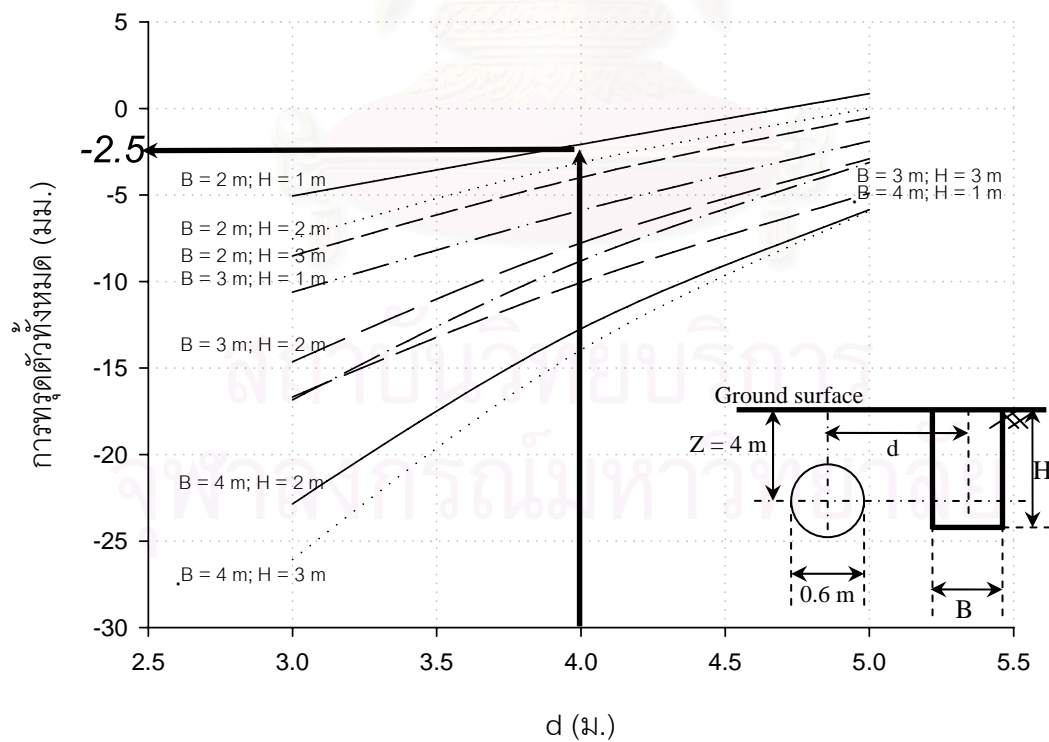
รูปที่ 4.8 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



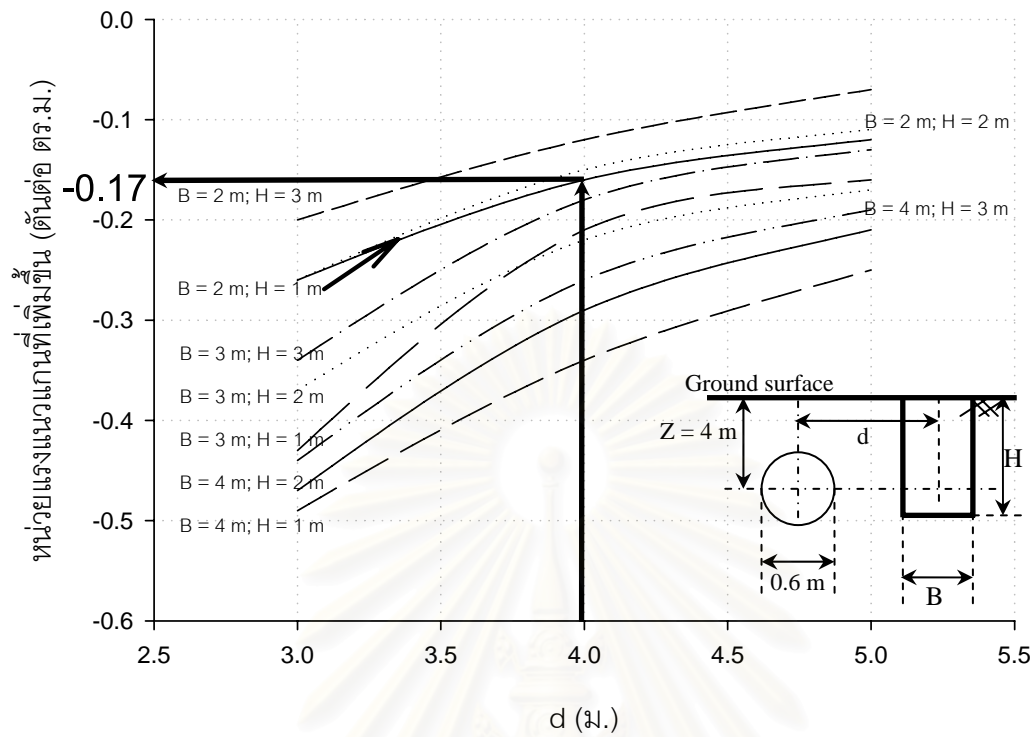
รูปที่ 4.9 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



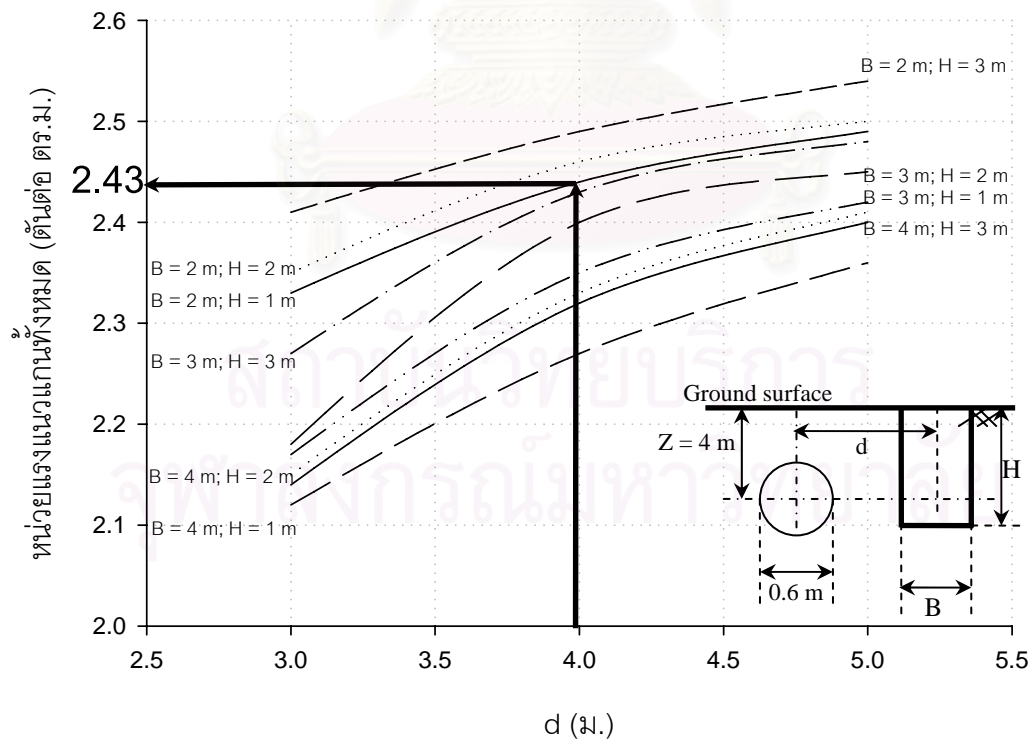
รูปที่ 4.10 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



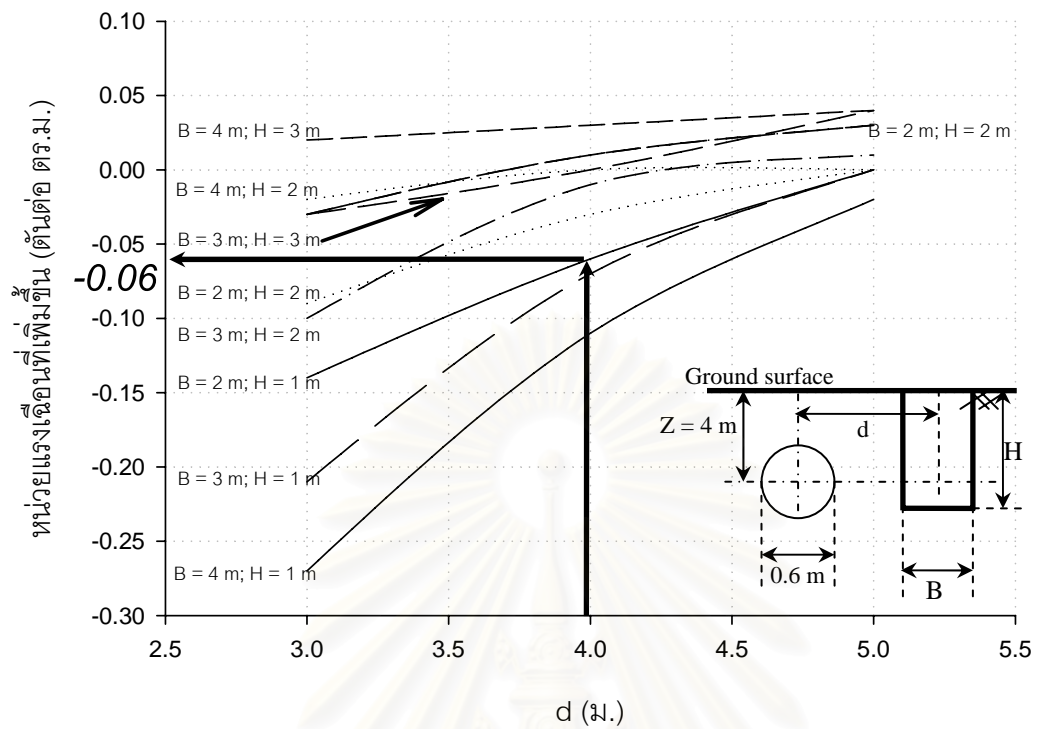
รูปที่ 4.11 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



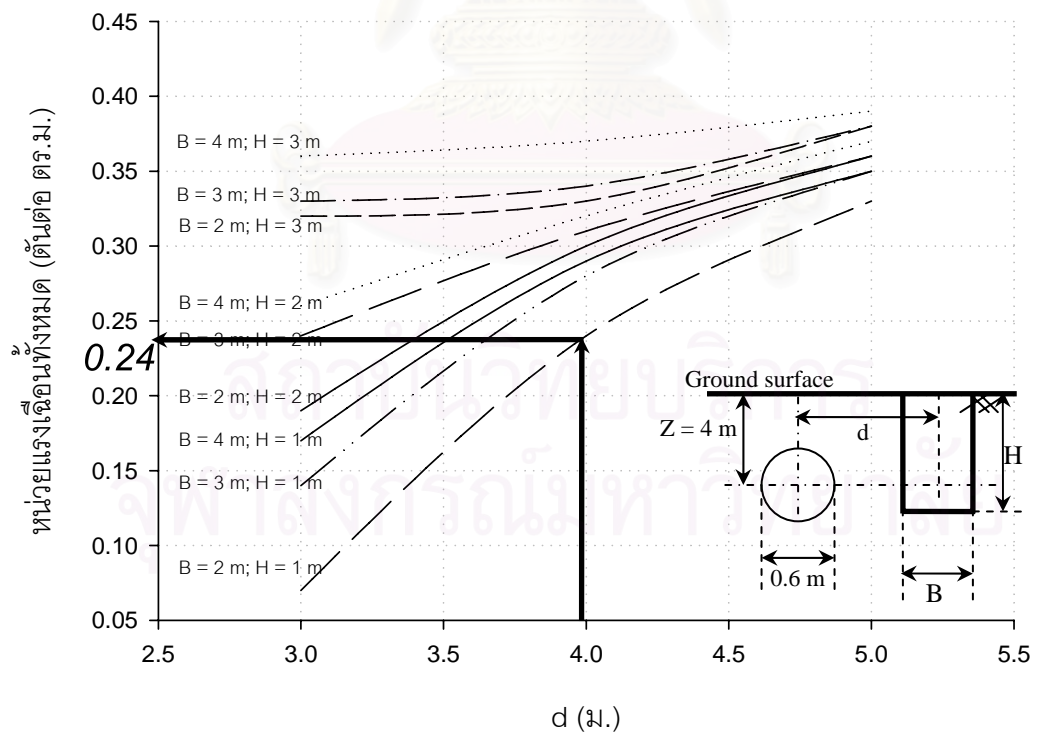
รูปที่ 4.12 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



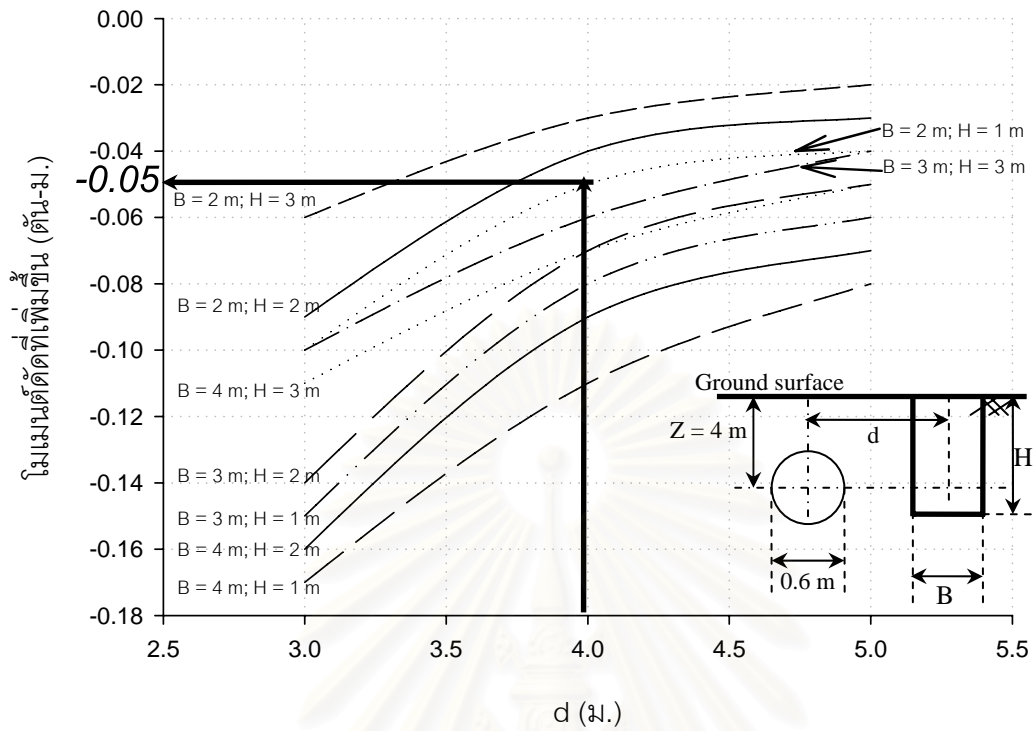
รูปที่ 4.13 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



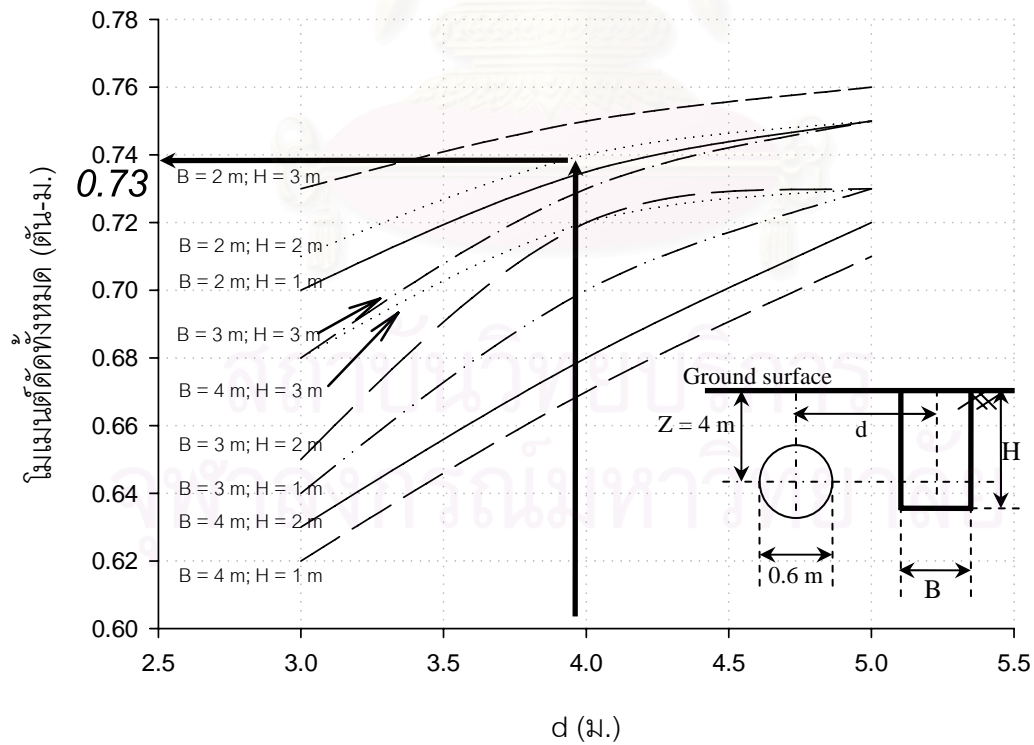
รูปที่ 4.14 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.15 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.16 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.17 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน

4.1.1.2 ผลกระทบที่มีต่อท่อตันลวดเนื่องจากการปักเข็มพืดข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลวดทั้ง 7 ขนาด โดยความลึกของเข็มพืดใช้ที่ระดับ 15.00 ม. เนื่องจากเป็นระดับความลึกที่นิยมใช้ในกรุงเทพฯ สำหรับงานขุดไม่เกิน 5.00 ม. ระยะห่างจากเข็มพืดเท่ากับ 2 3 และ 4 ม.ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อท่อตันลวดทั้ง 7 ขนาด

แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gro		
Pipe jacking	0.6	15	Total Displacement (mm) Max. Axial stress (ton/m ²) Max. Shear stress (ton/m ²) Max. Bending moment (ton.m ²)	Distance from main structure (m)			Incremental effect			Distance from main structure (m)			
				2	3	4	2	3	4	2	3	4	
				20.09	18.29	16.71	Total Displacement (mm)	16.33	14.53	12.95	0.00	0.04	0.09
				2.67	2.72	2.73	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.04	0.06	0.09	0.04	0.06	0.09
	0.41	0.44	0.45	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.03			
	0.81	0.82	0.82	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.03			
	0.8	15	Total Displacement (mm) Max. Axial stress (ton/m ²) Max. Shear stress (ton/m ²) Max. Bending moment (ton.m ²)	20.13	18.38	16.76	Total Displacement (mm)	16.37	14.62	13.00	0.06	0.09	0.15
				3.27	3.30	3.4	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.10	0.12	0.07	0.10	0.12
				0.49	0.51	0.55	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.04	0.05	0.02	0.04	0.05
				1.00	1.01	1.04	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.04	0.05	0.02	0.04	0.05
	1.0	15	Total Displacement (mm) Max. Axial stress (ton/m ²) Max. Shear stress (ton/m ²) Max. Bending moment (ton.m ²)	20.29	18.57	17.01	Total Displacement (mm)	16.49	14.77	13.21	0.06	0.10	0.13
				4.00	4.02	4.11	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.10	0.12	0.14	0.10	0.12	0.14
				0.58	0.60	0.65	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.06	0.07	0.04	0.06	0.07
				1.23	1.25	1.3	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.06	0.07	0.04	0.06	0.07
	1.2	15	Total Displacement (mm) Max. Axial stress (ton/m ²) Max. Shear stress (ton/m ²) Max. Bending moment (ton.m ²)	20.67	18.96	17.45	Total Displacement (mm)	16.84	15.13	13.62	0.09	0.13	0.2
				4.86	4.90	4.96	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.15	0.19	0.12	0.15	0.19
				0.66	0.70	0.74	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.09	0.12	0.07	0.09	0.12
				1.37	1.39	0.12	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.07	0.09	0.12	0.07	0.09	0.12
	1.5	15	Total Displacement (mm) Max. Axial stress (ton/m ²) Max. Shear stress (ton/m ²) Max. Bending moment (ton.m ²)	20.79	19.15	17.80	Total Displacement (mm)	16.98	15.34	13.99	0.13	0.17	0.23
				5.67	5.70	5.77	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.16	0.19	0.21	0.16	0.19	0.21
				0.74	0.77	0.79	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.12	0.15	0.10	0.12	0.15
				1.62	1.64	1.67	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.10	0.12	0.15	0.10	0.12	0.15
	2.0	15	Total Displacement (mm) Max. Axial stress (ton/m ²) Max. Shear stress (ton/m ²) Max. Bending moment (ton.m ²)	20.94	19.22	18.39	Total Displacement (mm)	17.16	15.44	14.61	0.15	0.18	0.20
				6.77	6.73	6.79	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.15	0.18	0.20	0.15	0.18	0.20
1.12				1.14	1.16	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.15	0.18	0.20	0.15	0.18	0.20	
2.14				2.15	2.18	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.07	0.10	0.04	0.07	0.10	
2.5	15	Total Displacement (mm) Max. Axial stress (ton/m ²) Max. Shear stress (ton/m ²) Max. Bending moment (ton.m ²)	20.96	19.30	18.44	Total Displacement (mm)	17.20	15.54	14.68	0.15	0.19	0.25	
			8.55	8.64	8.87	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.26	0.28	0.28	0.26	0.28	0.28	
			1.66	1.65	1.69	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.17	0.18	0.21	0.17	0.18	0.21	
			3.01	3.01	3.12	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.17	0.18	0.21	0.17	0.18	0.21	

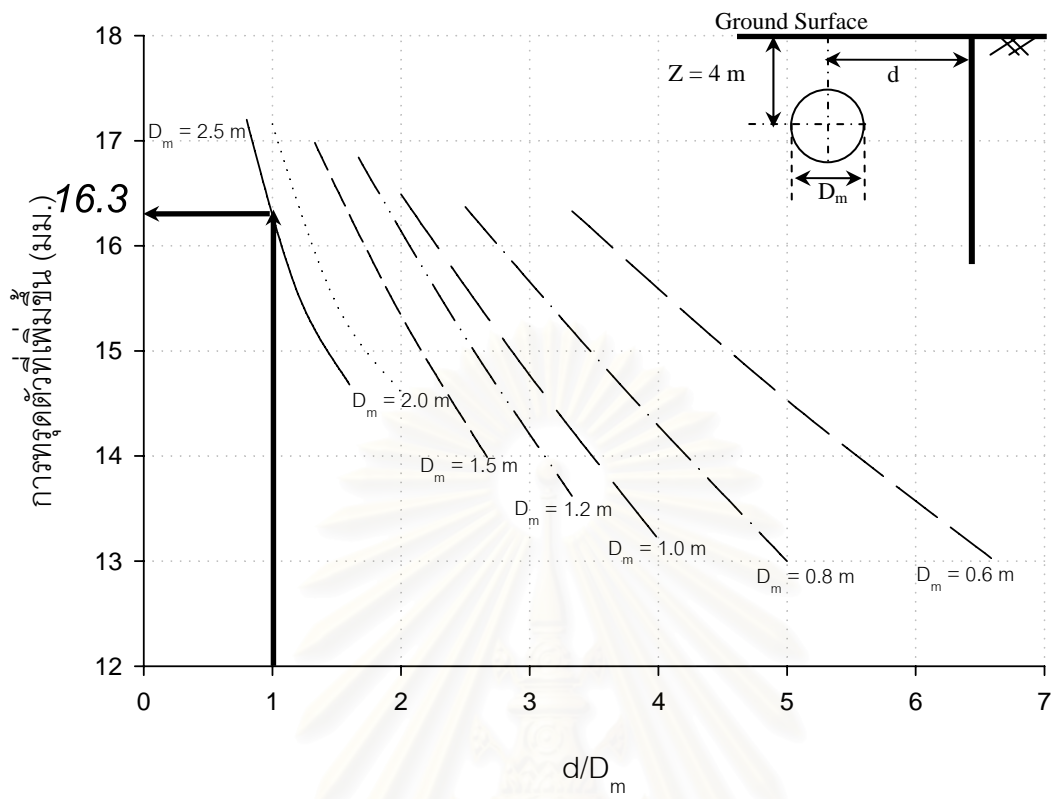
พิจารณาตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อตันลวดโดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลวดโดยมีทั้งหมด 7 ขนาด แถวที่ 3 เป็นความยาวเข็มพืดในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินโดยในการคำนวณคิดที่ความยาว 15 ม. แถวที่ 4 เป็นแถวบรรยายถึงการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 5 6 และ 7 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางบ่อขุดเป็นระยะ 2 3 และ 4 ม. ตามลำดับ แถวที่ 8 แถวบรรยายถึงการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 9 10 และ 11 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด จากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.18 ถึง 4.25 แกนในแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d/D_m) และรูปที่ 4.26 ถึง 4.33 แกนในแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้นแกนในแนวนอน ระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตรโดยแยกกราฟตามเส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อยสายไฟฟ้า สำหรับในขนาดอื่นๆแสดงไว้ในภาคผนวก ก

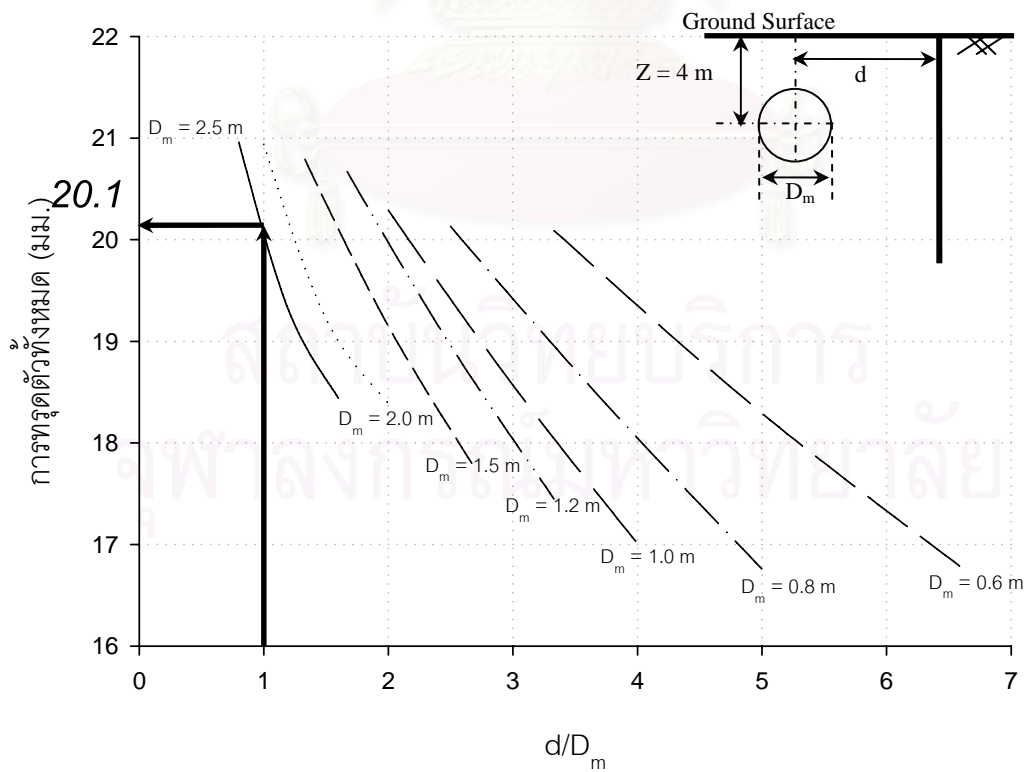
ตัวอย่างการใช้งานกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.18 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น กับ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของศูนย์กลางท่อตันลอดกับกึ่งกลางเสาเข็มพืดข้างเคียง (d/D_m) ของท่อตันลอดทุกขนาด จากกราฟความสัมพันธ์สมมุติเข็มพืดมีความยาว 15 ม. ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางท่อกับเข็มพืดเท่ากับ 2.50 ม. ท่อตันลอดขนาด 2.50 ม. ฉะนั้น d/D_m เท่ากับ 1 จะได้ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 16 มม. และจากรูปที่ 4.19 เกิดการทรุดตัวทั้งหมดจากการก่อสร้าง 20.1 มม. สำหรับหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงในทิศทางตามขวางอุโมงค์ (y) ดังแสดงทิศทางในรูปที่ 4.1 โดยที่หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.16 ตันต่อ ตร.ม. ซึ่ง ส่วนหน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดมีค่า 8.5 ตันต่อ ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.27 ตันต่อ ตร.ม. และหน่วยแรงเฉือนทั้งหมดมีค่า 1.65 ตันต่อ ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.17 ตัน.ตร.ม. และโมเมนต์ดัดทั้งหมดมีค่า 3 ตัน.ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ รูปที่ 4.26 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นกับระยะห่างของศูนย์กลางท่อตันลอดกับกึ่งกลางเข็มพืดข้างเคียงในหน่วยเมตร โดยที่ระยะ 2.50 ม. เกิดการทรุดตัว 16 มม.เช่นเดียวกับรูปที่ 4.18 ที่ d/D_m เท่ากับ 1 เพราะระยะระหว่างศูนย์กลางท่อตันลอดถึงศูนย์กลางเข็มพืด (d) ที่ยกตัวอย่างนั้นเท่ากัน และรูปที่ 4.27 เกิดการทรุดตัวทั้งหมดเท่ากับ 20.1 มม. เช่นเดียวกับรูปที่ 4.19 สำหรับหน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.25 มีค่าเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.28 ถึง 4.33 เนื่องจากในตัวอย่างใช้ระยะ d เท่ากัน

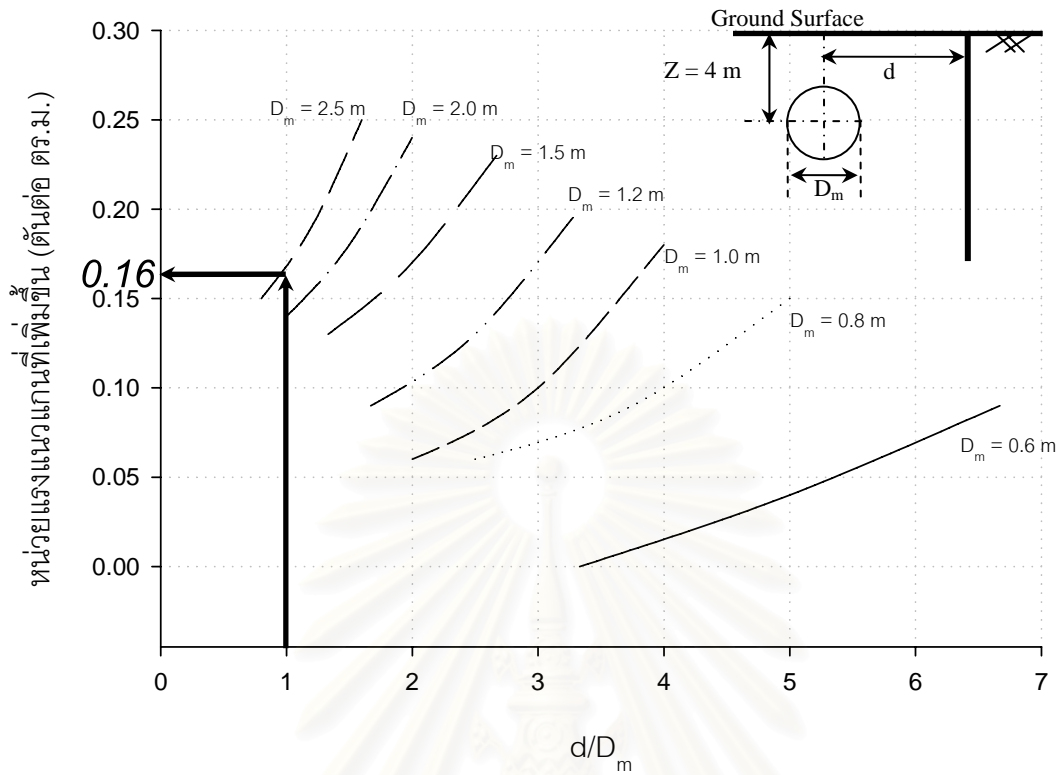
ซึ่งจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าหน่วยแรงที่ได้สามารถนำไปบวกกับหน่วยแรงที่ใช้ออกแบบ (P_u , V_u , M_u) เพื่อหาหน่วยแรงประลัย (P_u , V_u , M_u) ในการคำนวณโครงสร้าง สำหรับท่อตันลอดขนาดอื่นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ที่ระยะห่างอื่นในลักษณะเดียวกัน โดยในกราฟวิเคราะห์ที่ระยะห่าง 2 ถึง 4 ม.



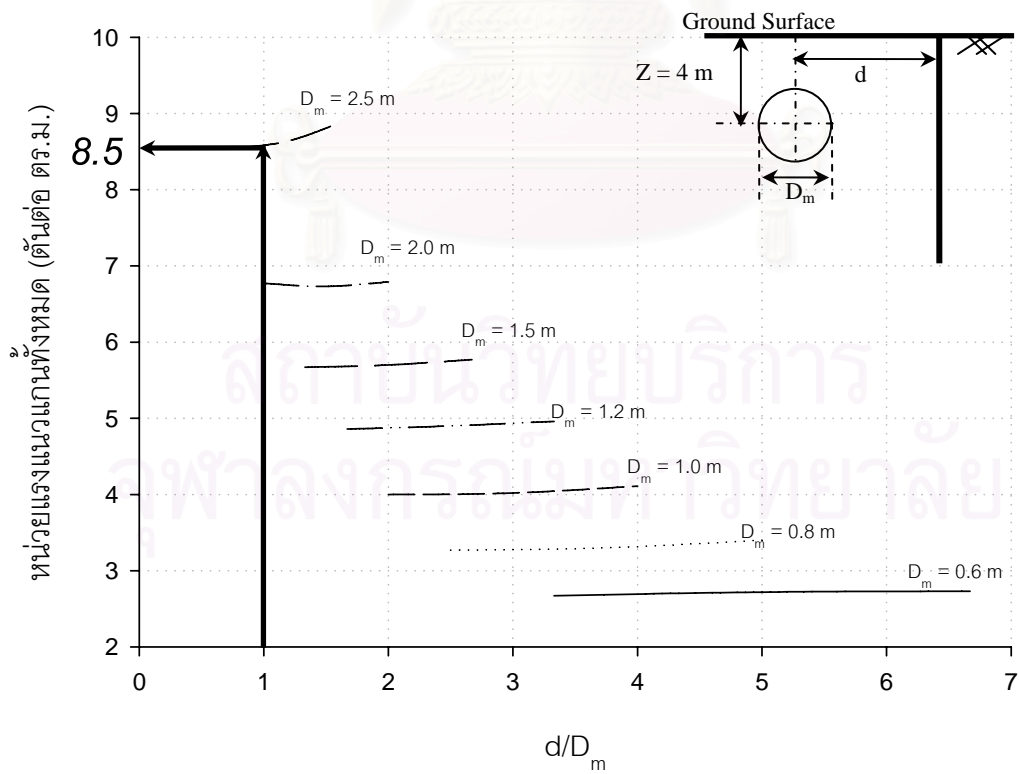
รูปที่ 4.18 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลวดเนื่องจากกรับกเข็มพีต



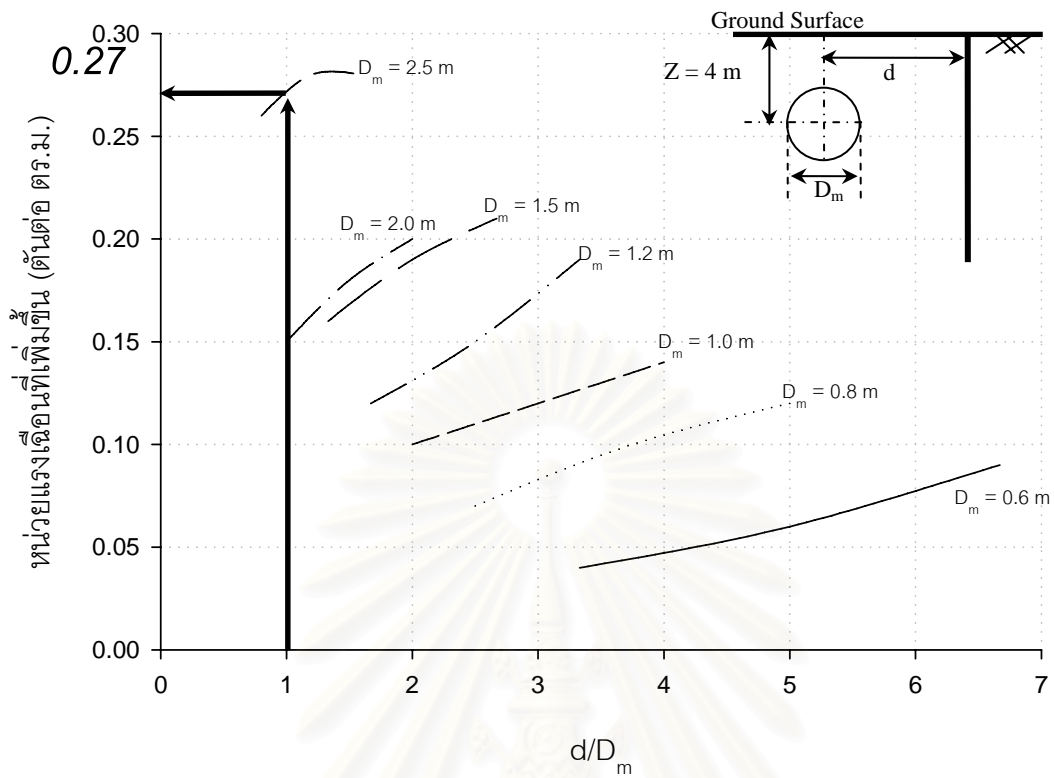
รูปที่ 4.19 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลวดเนื่องจากกรับกเข็มพีต



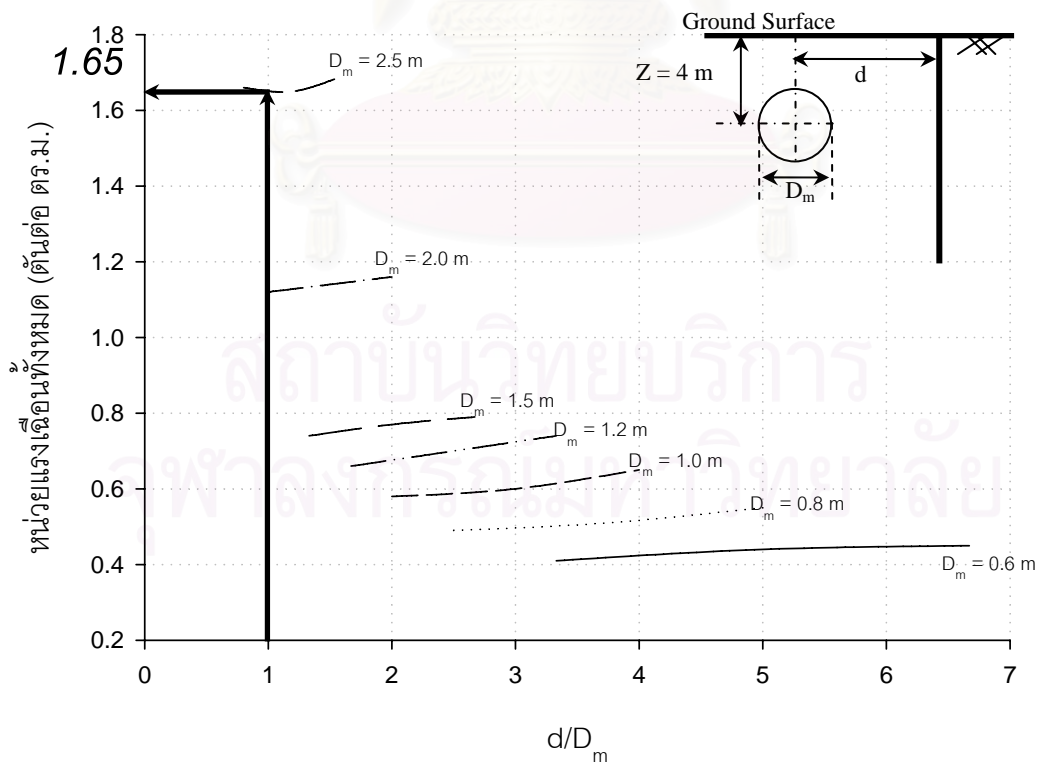
รูปที่ 4.20 หน่วยแรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มพืด



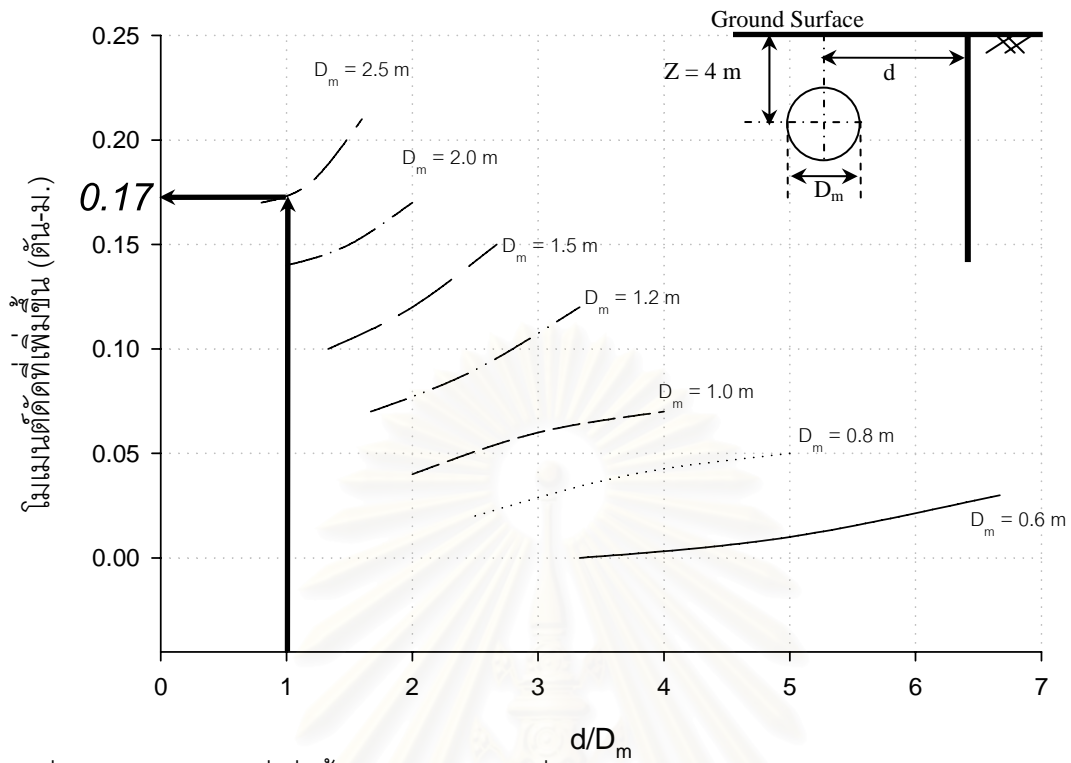
รูปที่ 4.21 หน่วยแรงตามแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มพืด



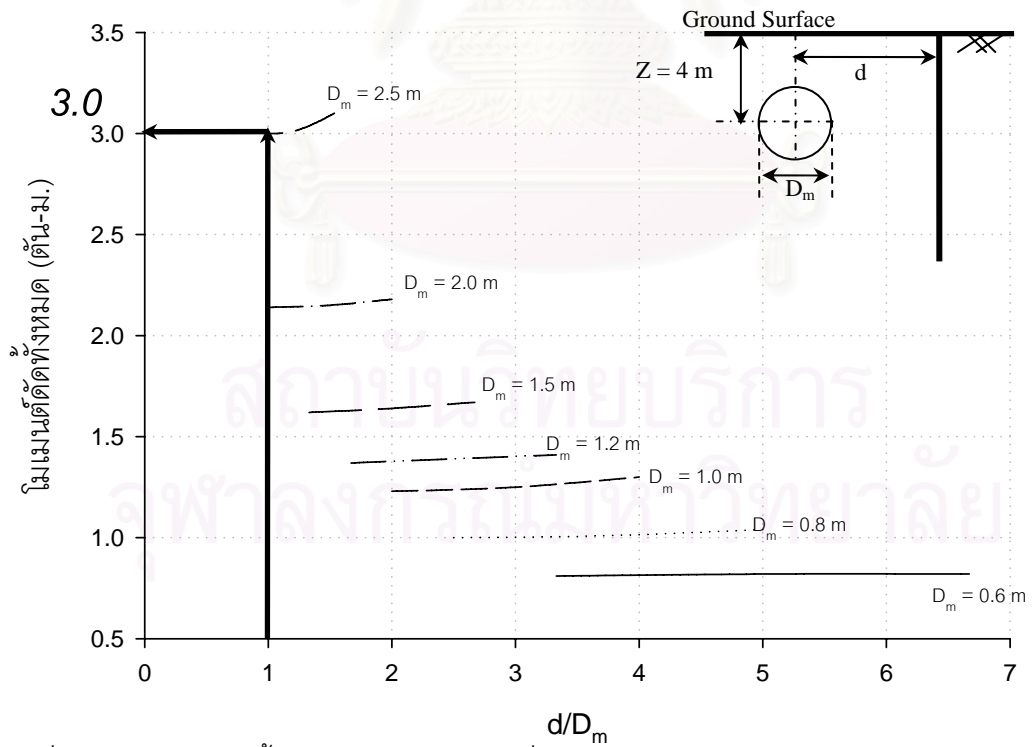
รูปที่ 4.22 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มพืด



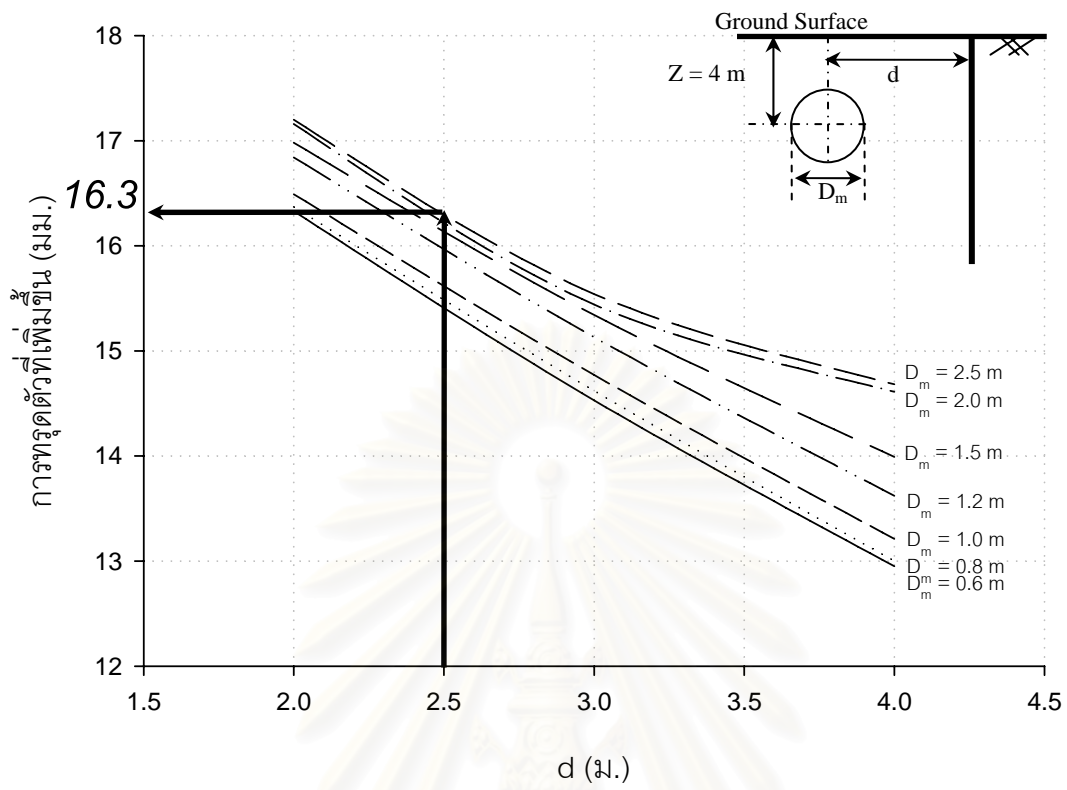
รูปที่ 4.23 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มพืด



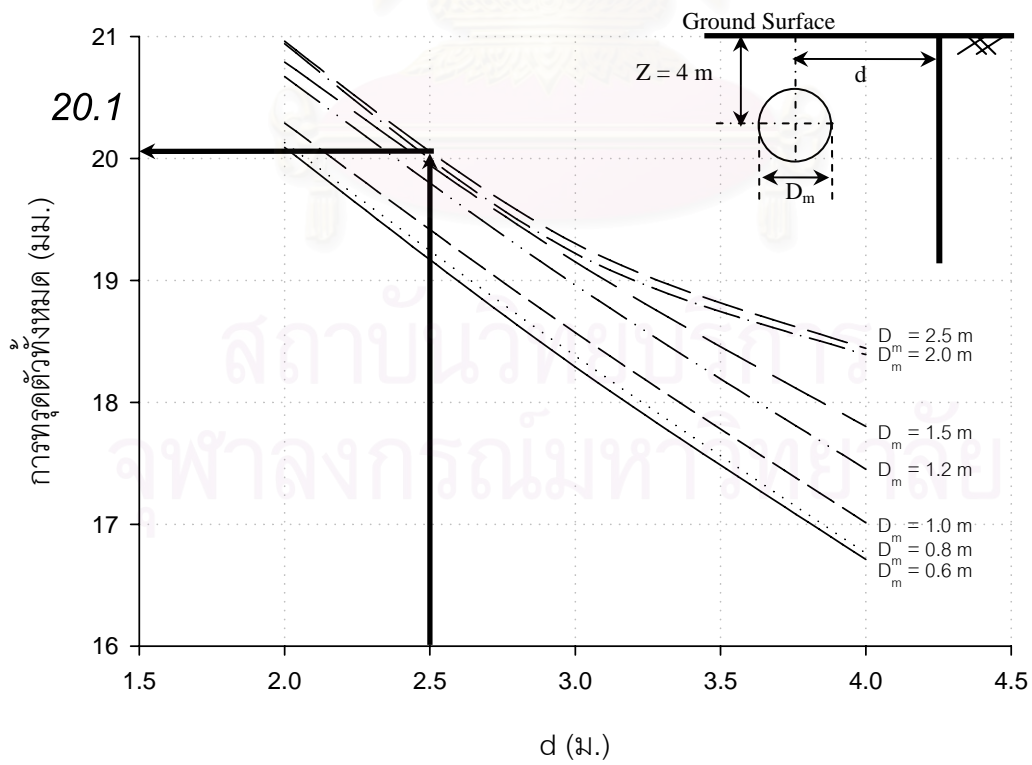
รูปที่ 4.24 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดเนื่องจากการปักเข็มฟัด



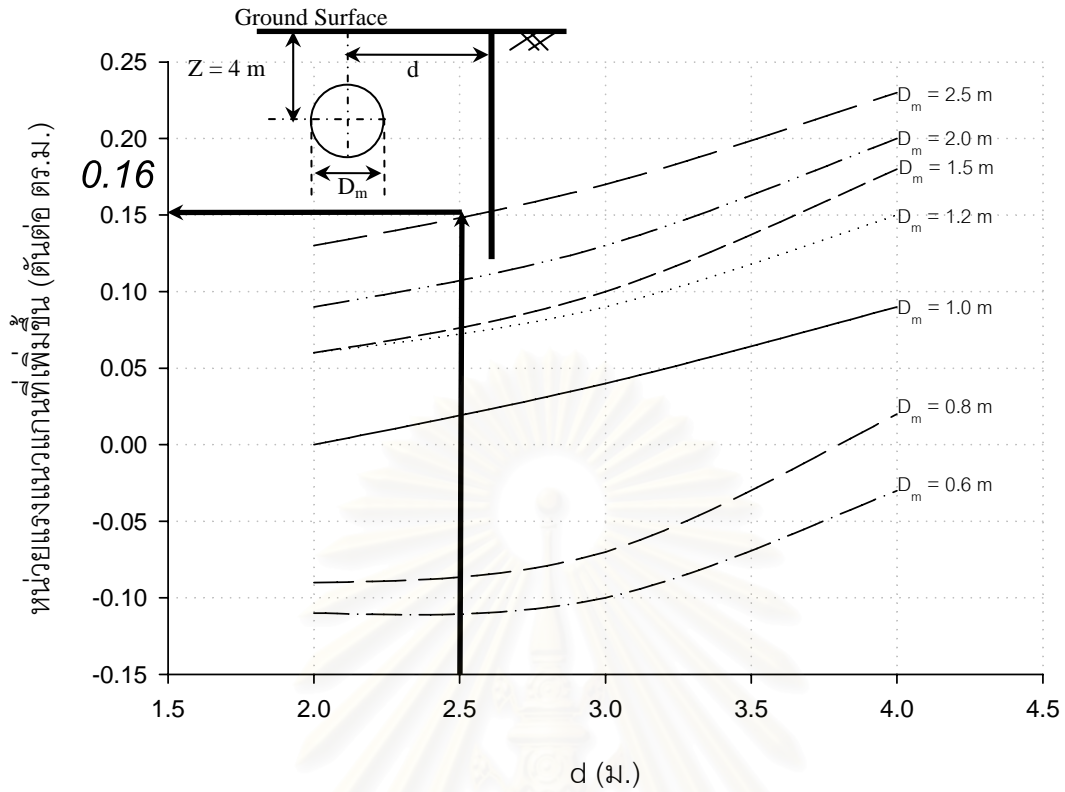
รูปที่ 4.25 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดเนื่องจากการปักเข็มฟัด



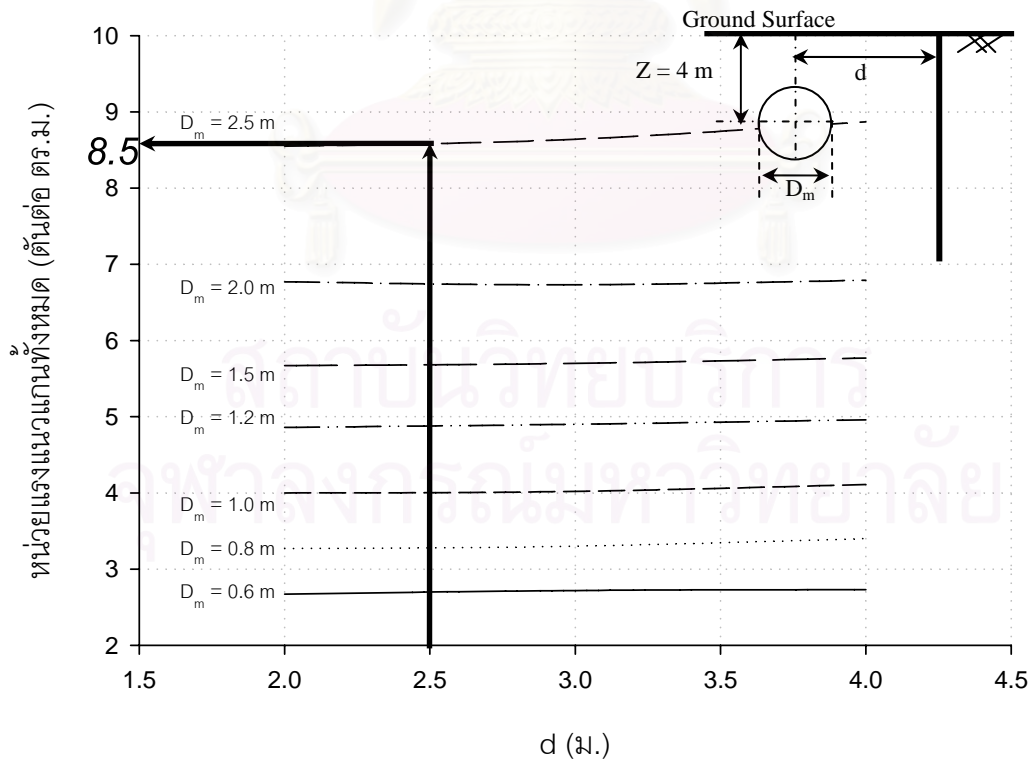
รูปที่ 4.26 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มฟัด



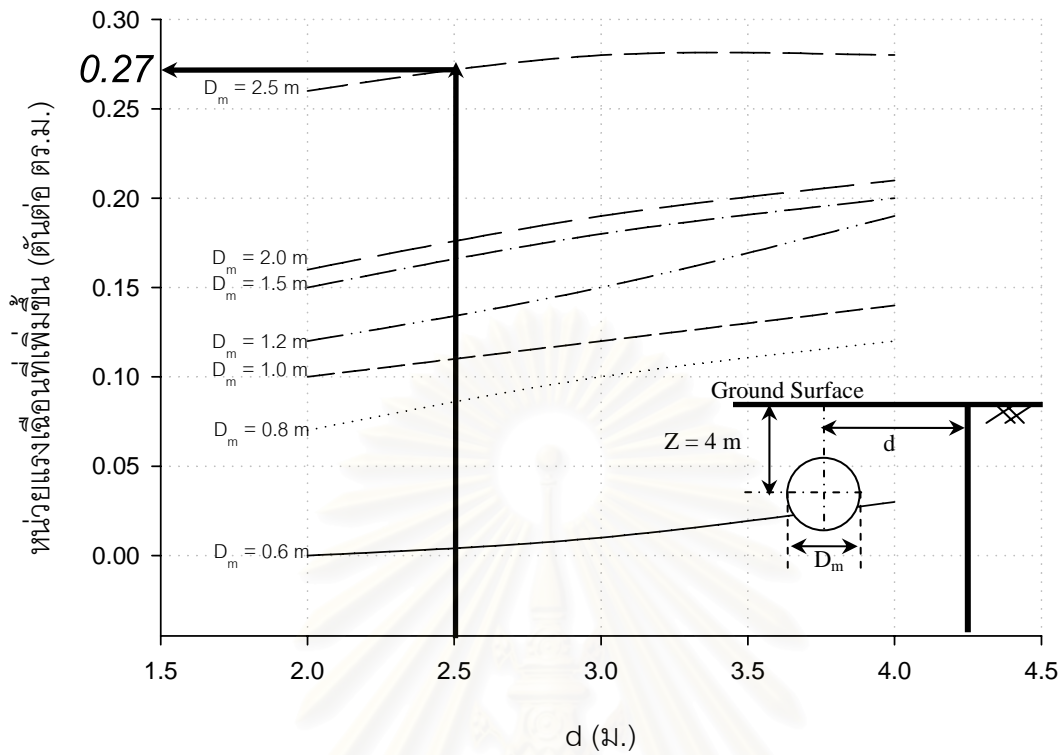
รูปที่ 4.27 การทรุดตัวที่ทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มฟัด



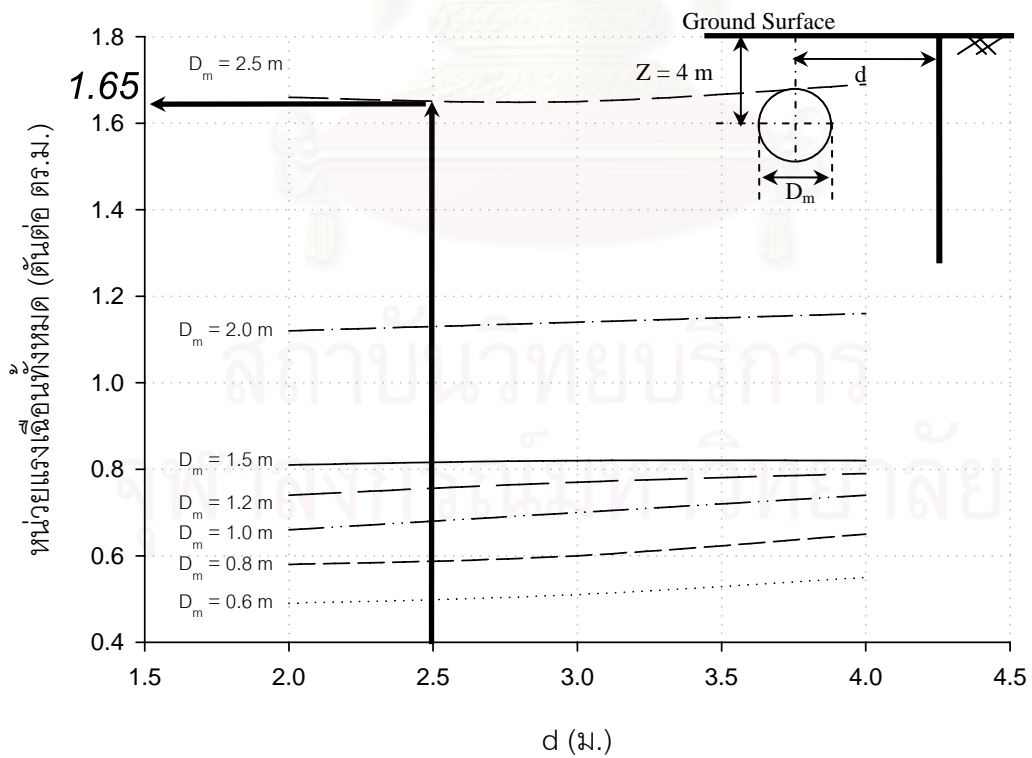
รูปที่ 4.28 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มผิด



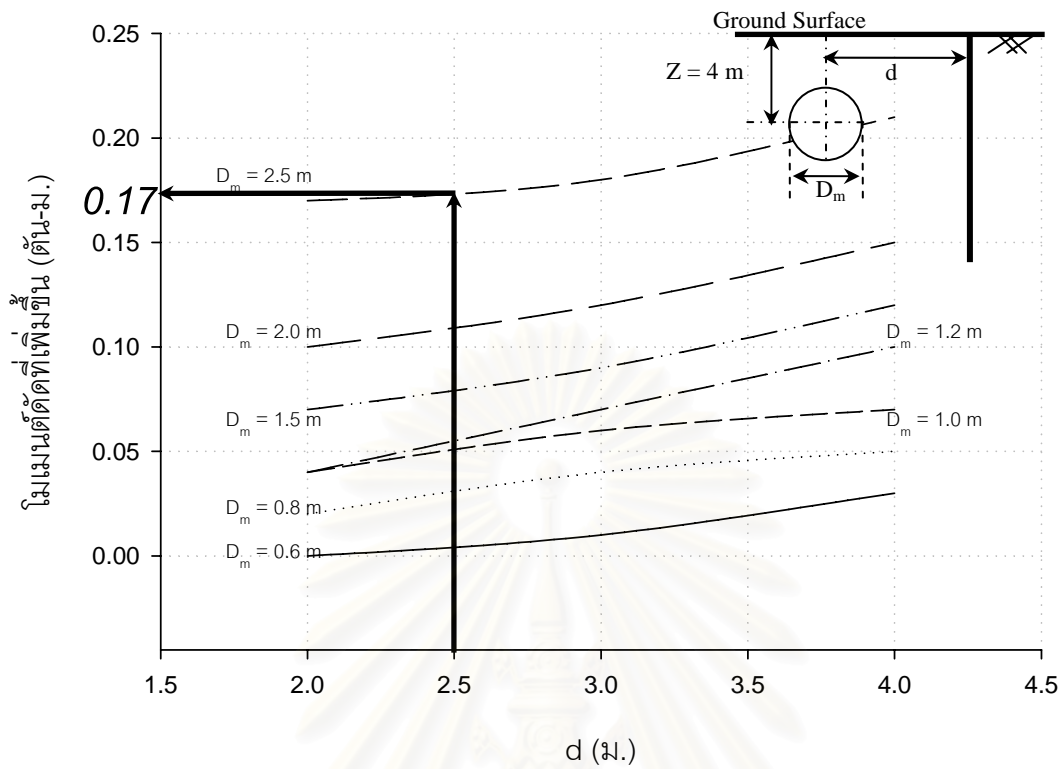
รูปที่ 4.29 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากการปักเข็มผิด



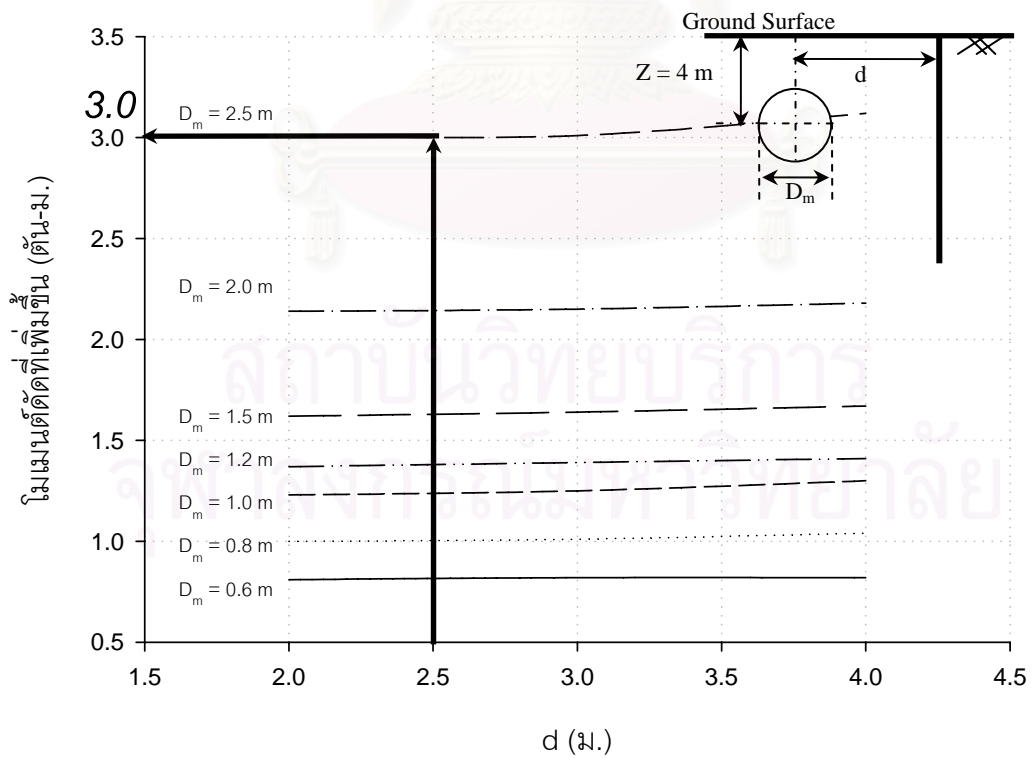
รูปที่ 4.30 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดเนื่องจากการปักเข็มพืด



รูปที่ 4.31 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อนลอดเนื่องจากการปักเข็มพืด



รูปที่ 4.32 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดเนื่องจากการปักเข็มพีต



รูปที่ 4.33 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดเนื่องจากการปักเข็มพีต

4.1.1.3 ผลกระทบที่มีต่อท่อตันลอดเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.3 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.60 ม. โดยแยกเสาเข็มกลุ่มออกเป็นสองประเภทคือเสาเข็มสั้นและ เสาเข็มยาว โดยที่เสาเข็มสั้นใช้ความยาว 6.00 ม. ส่วนเสาเข็มยาวใช้ที่ระดับ 21.00 ม. สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็ม เสาเข็มสั้นใช้ที่ 3 ตัน และเสาเข็มยาวใช้ที่ 15 20 และ 25 ตัน ระยะห่างจากสิ่งก่อสร้างใช้ที่ระยะ 2.5 5 และ 7.5 ม.ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.3 ส่วนท่อขนาดอื่นๆแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อตันลอดขนาด 0.60 ม.

แถวที่ 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Diameter (m)	Depth (m)	Load (Ton)		2.5	5	7.5		2.5	5	7.5
Pipe Jacking	0.6	6	3	Total Displacement (mm)	13.97	12.20	10.62	Total Displacement (mm)	7.50	5.73	4.15
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.82	2.85	2.86	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.03	0.00	0.01
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.16	0.13	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.07	0.04
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.86	0.86	0.86	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.02	0.02
				Total Displacement (mm)	19.86	13.97	8.85	Total Displacement (mm)	13.39	7.50	2.38
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.86	2.89	2.91	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	0.04	0.06
		15	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.13	0.07	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.04	-0.02	
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.88	0.87	0.85	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.03	0.01	
			21	Total Displacement (mm)	22.81	16.03	9.85	Total Displacement (mm)	16.34	9.56	3.38
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.88	2.89	2.92	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.04	0.07
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.23	0.15	0.07	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.07	-0.02
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.89	0.88	0.86	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.05	0.04	0.02
25	Total Displacement (mm)	25.94	18.09	10.86	Total Displacement (mm)	19.47	11.62	4.39			
	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.91	2.90	2.93	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.05	0.08			
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.28	0.18	0.08	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.10	-0.01			
	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.90	0.89	0.86	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	0.05	0.02			

พิจารณาตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อตันลอดโดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลอดโดยมีทั้งหมด 7 ขนาด ในที่นี้เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ม. แถวที่ 3 เป็นความยาวเสาเข็มกลุ่มในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างที่ร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็มกลุ่ม แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางเสาเข็มกลุ่มเป็นระยะ 2.5 5 และ 7.5 ม. ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

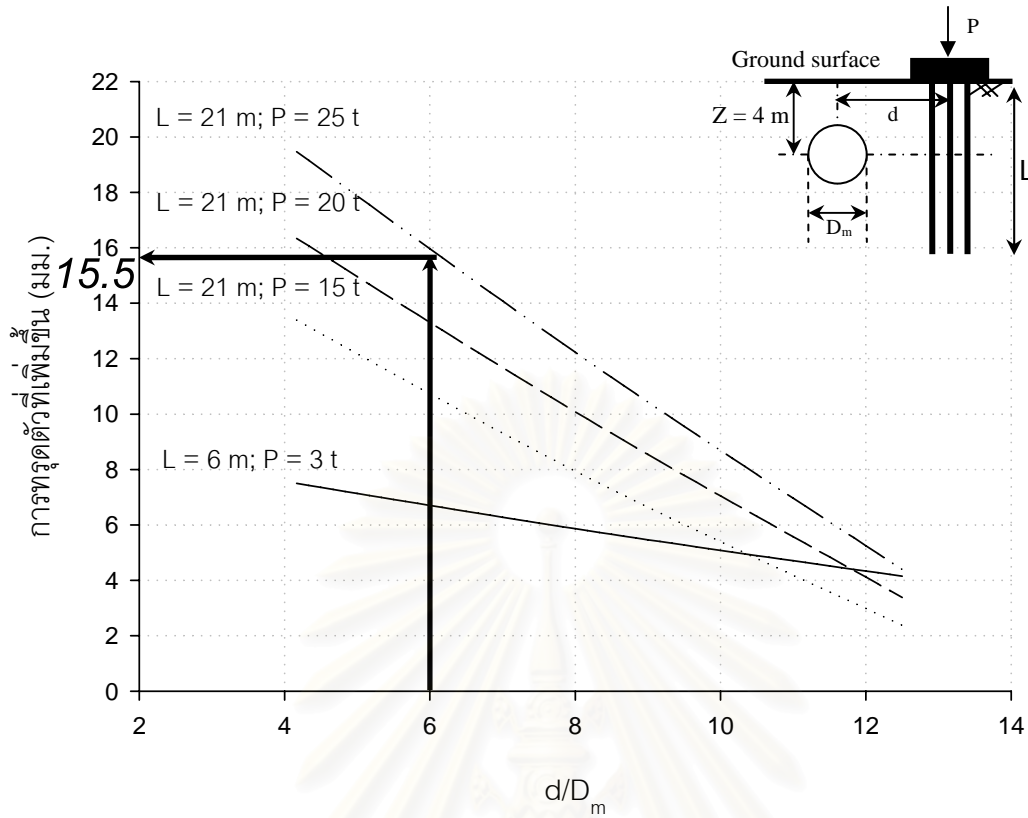
สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดจากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.34 ถึง 4.41 แกนในแนวตั้ง ความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกน

ในแนวนอน เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d/D_m) และรูปที่ 4.42 ถึง 4.49 แกนในแนวดิ่ง ความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน ระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตรโดยแยกกราฟตามความยาวเสาเข็มและน้ำหนักบรรทุก สำหรับในขนาดอื่นๆแสดงไว้ในภาคผนวก ก

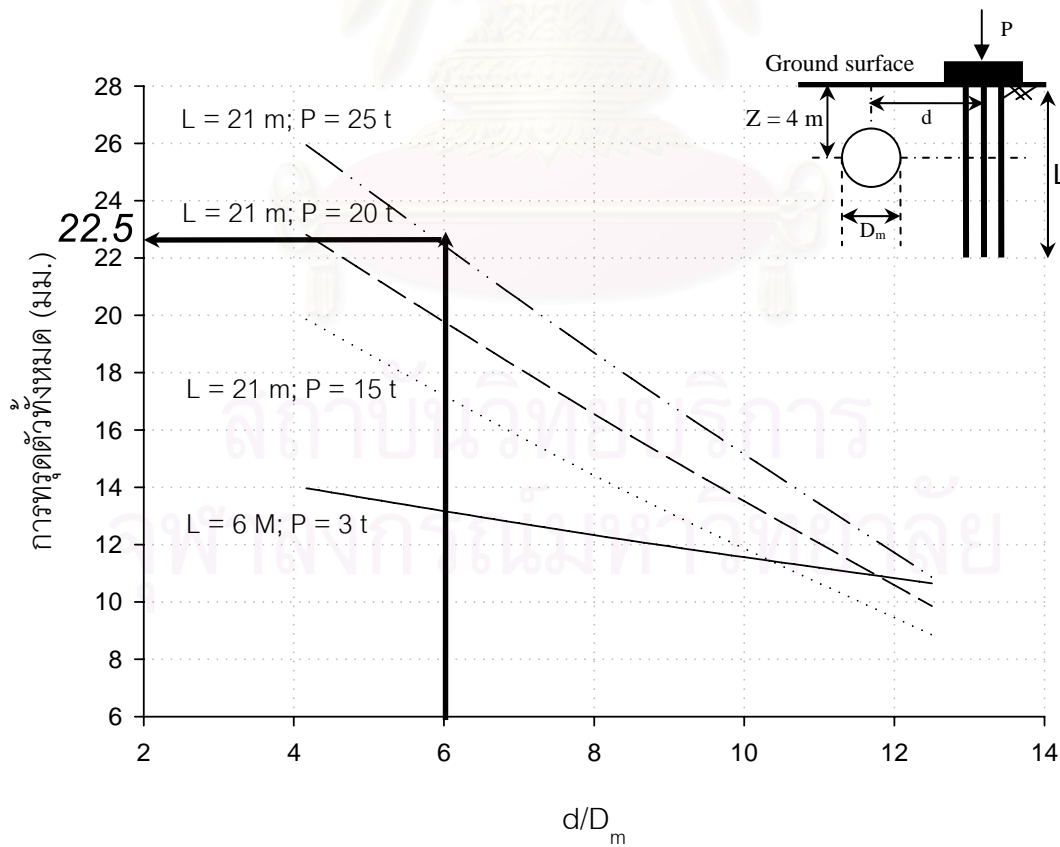
ตัวอย่างการใช้งานกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.34 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น กับ อัตราส่วนระหว่างระยะห่างของศูนย์กลางท่อตันตลอดกับกึ่งกลางเสาเข็มกลุ่มข้างเคียง (d/D_m) ของท่อตันตลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 ม. จากกราฟความสัมพันธ์สมมุติให้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางท่อกับเข็มกลุ่มเท่ากับ 3.60 ม. ใช้เข็มกลุ่ม 3 ต้นความยาวเสาเข็ม 21 ม. น้ำหนักบรรทุกรวม 25 ตัน ฉะนั้น d/D_m เท่ากับ 6 จะได้ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 15.5 มม. ตามรูปที่ 4.34 และจากรูปที่ 4.35 เกิดการทรุดตัวทั้งหมดจากการก่อสร้าง 22.5 มม. สำหรับหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงในทิศทางตามขวางอุโมงค์ (y) โดยที่หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.05 ตันต่อ ตร.ม. ซึ่ง ส่วนหน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดมีค่า 2.89 ตันต่อ ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.15 ตันต่อ ตร.ม. และหน่วยแรงเฉือนทั้งหมดมีค่า 0.24 ตันต่อ ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.06 ตัน.ตร.ม. และโมเมนต์ดัดทั้งหมดมีค่า 0.9 ตัน.ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.40 และ 4.41 ตามลำดับ รูปที่ 4.42 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นกับระยะห่างของศูนย์กลางท่อตันตลอดกับกึ่งกลางเสาเข็มกลุ่มข้างเคียงในหน่วยเมตร โดยที่ระยะ 3.6 ม. เกิดการทรุดตัว 15.5 มม. เช่นเดียวกับรูปที่ 4.34 ที่ d/D_m เท่ากับ 6 เพราะระยะระหว่างศูนย์กลางท่อตันตลอดถึงกึ่งกลางเสาเข็มกลุ่มข้างเคียง (d) ที่ยกตัวอย่างนั้นเท่ากัน และรูปที่ 4.43 เกิดการทรุดตัวทั้งหมดเท่ากับ 22.5 มม. เช่นเดียวกับรูปที่ 4.35 สำหรับหน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดดังแสดงในรูปที่ 4.44 ถึง 4.49 มีค่าเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.36 ถึง 4.41 เนื่องจากในตัวอย่างใช้ระยะ d เท่ากัน

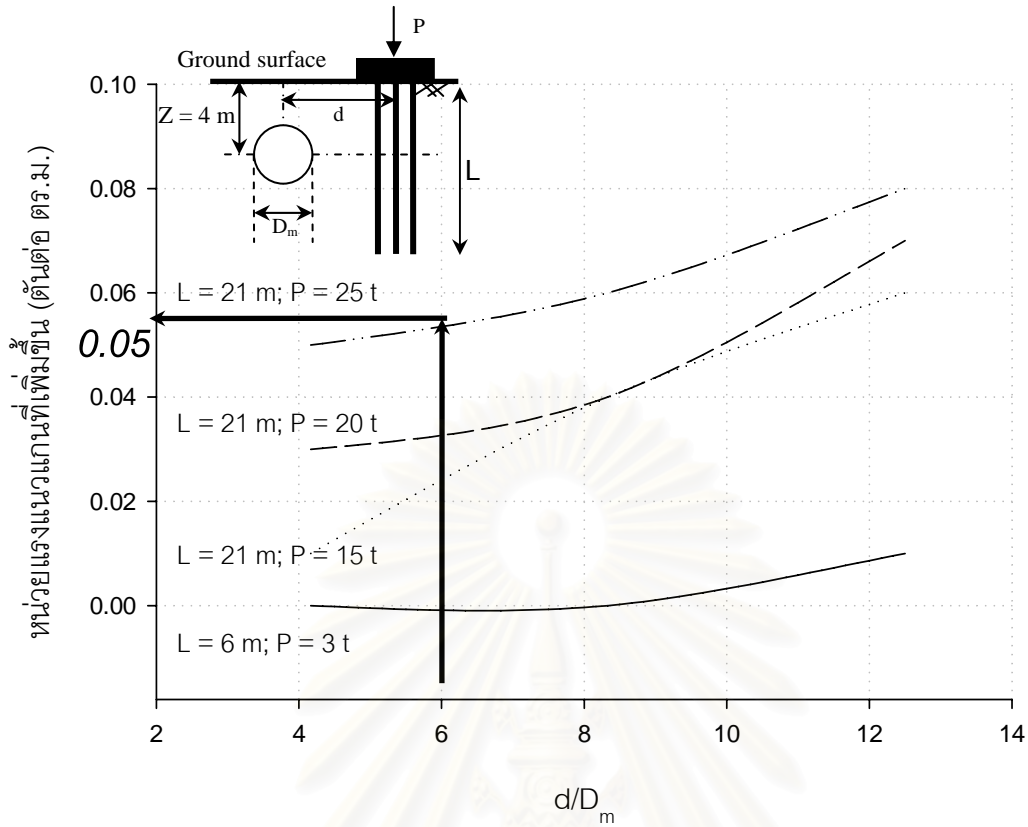
ซึ่งจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าหน่วยแรงที่ได้สามารถนำไปบวกกับหน่วยแรงที่ใช้ออกแบบ (P_n, V_n, M_n) เพื่อหาหน่วยแรงประลัย (P_u, V_u, M_u) ในการคำนวณโครงสร้าง สำหรับท่อตันตลอดขนาดอื่นสามารถหาค่าการทรุดตัว และหน่วยแรงได้จากกราฟอื่นๆในภาคผนวก ก โดยความสัมพันธ์แต่ละเส้นแยกตามความลึกของเสาเข็มกลุ่มและน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ



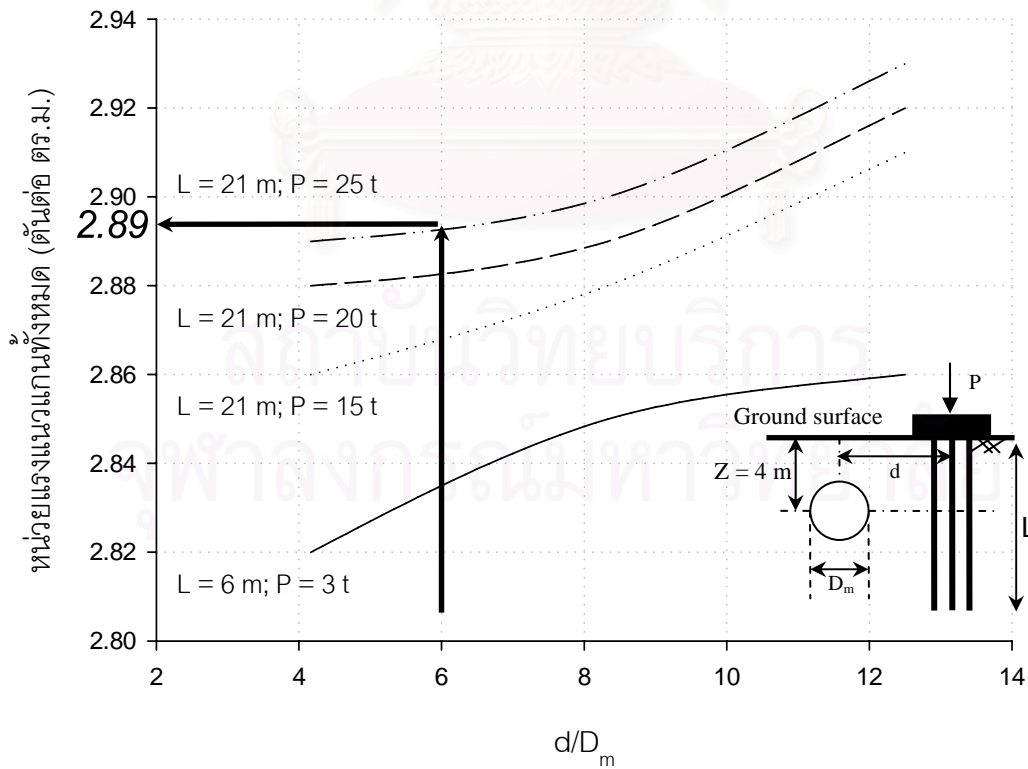
รูปที่ 4.34 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



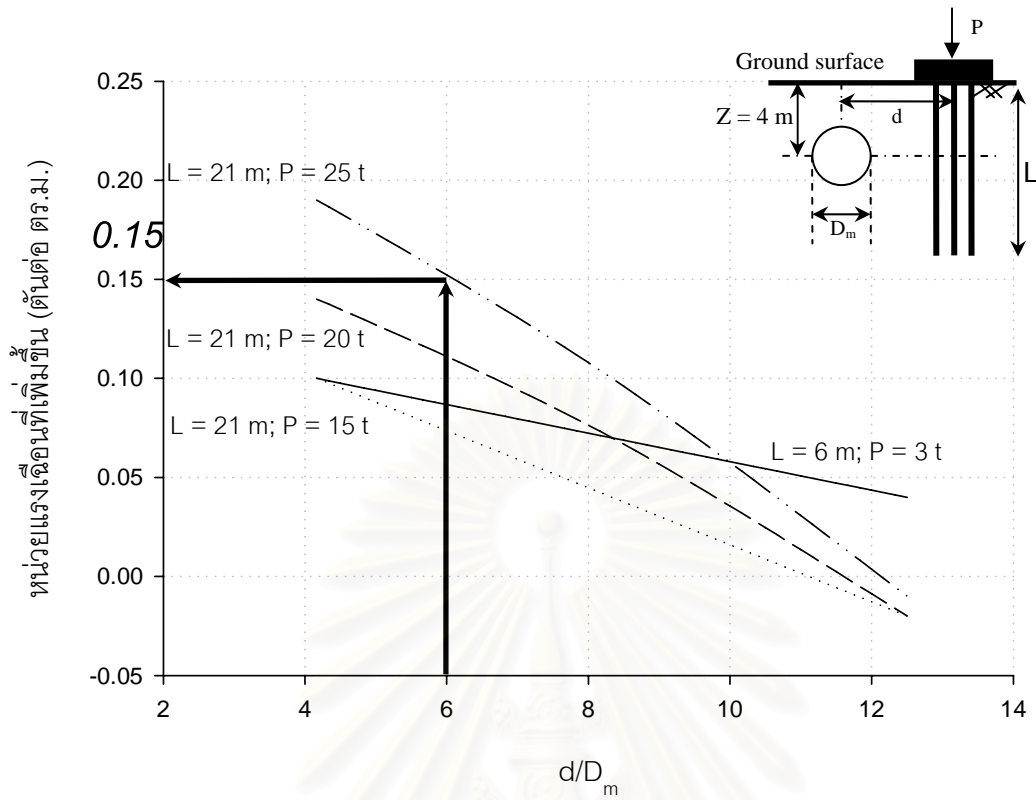
รูปที่ 4.35 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



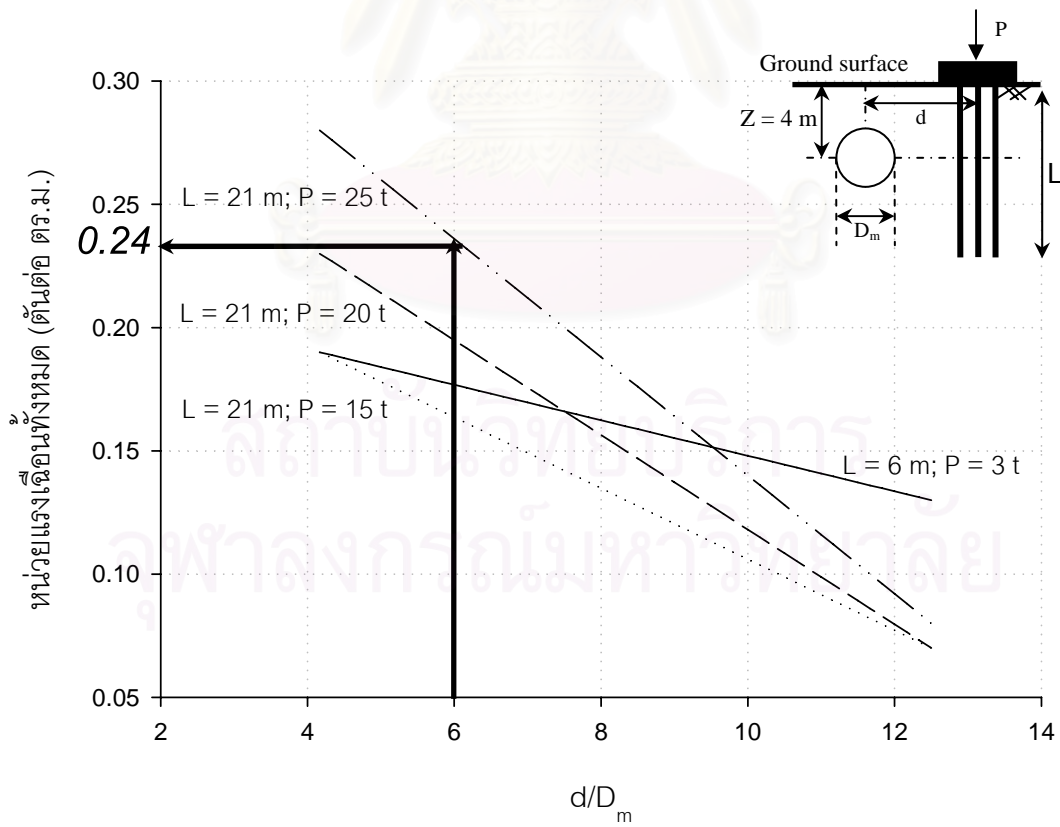
รูปที่ 4.36 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



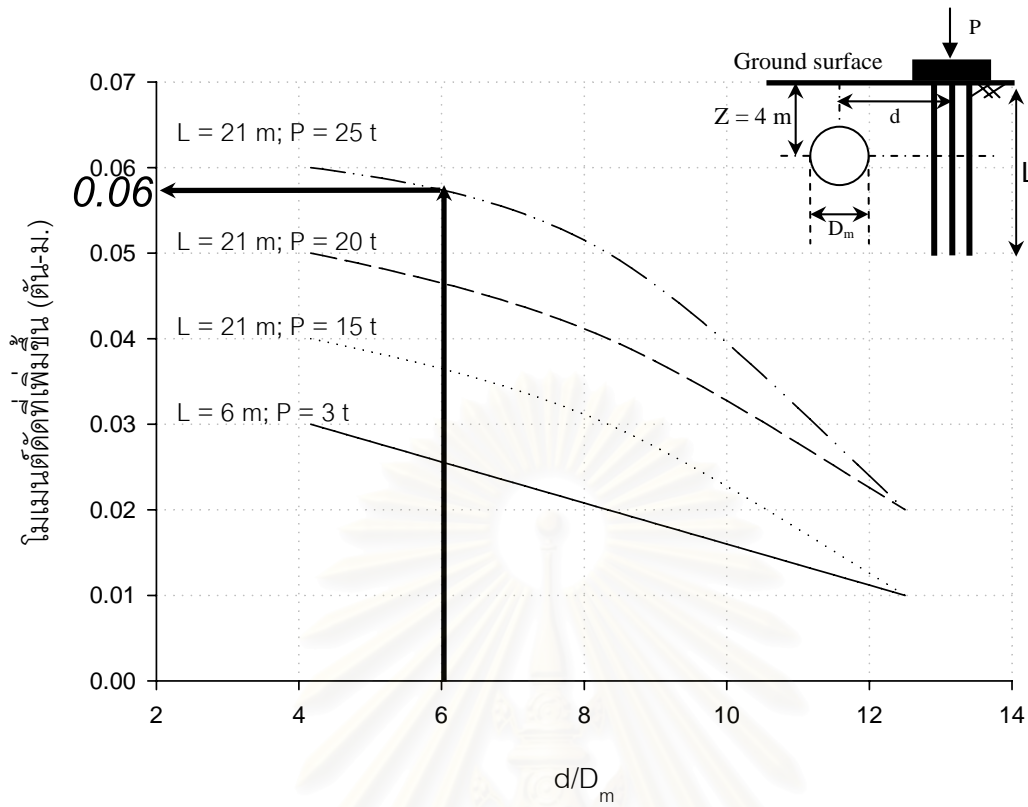
รูปที่ 4.37 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



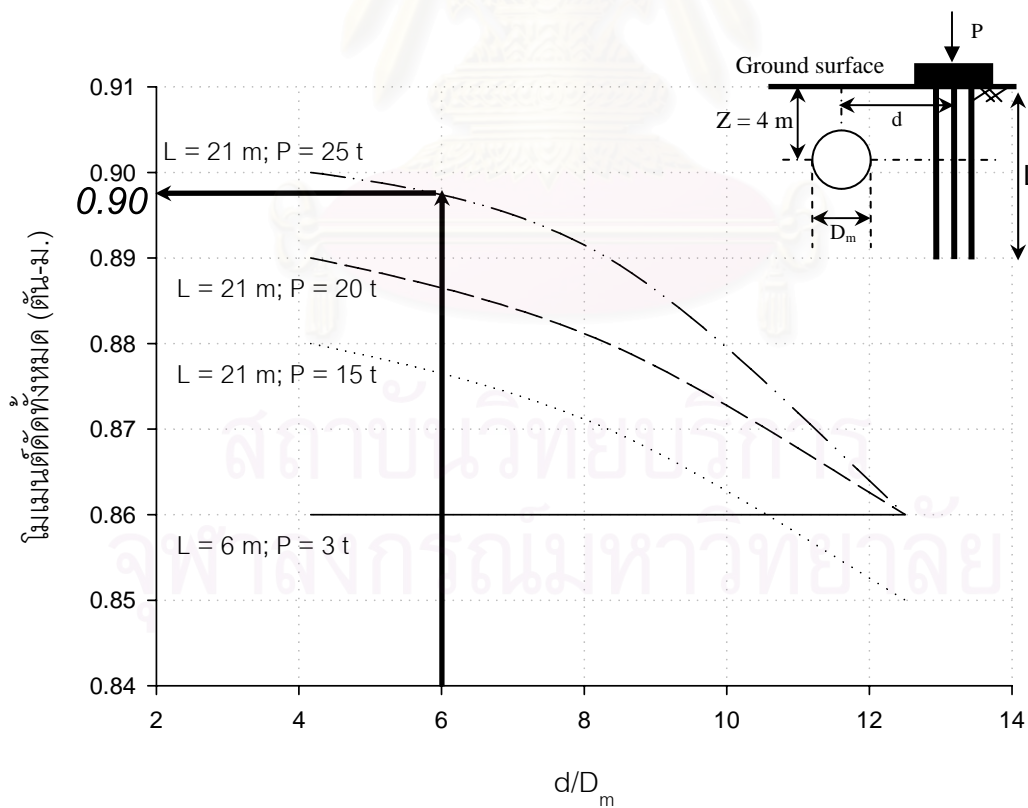
รูปที่ 4.38 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



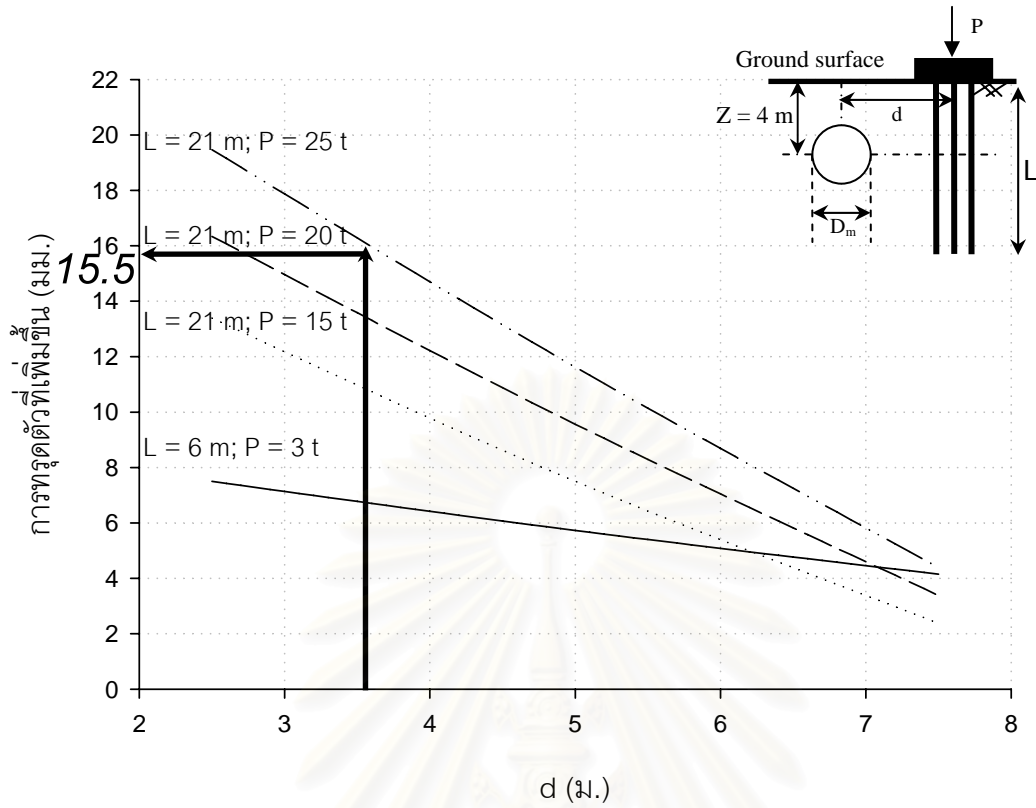
รูปที่ 4.39 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



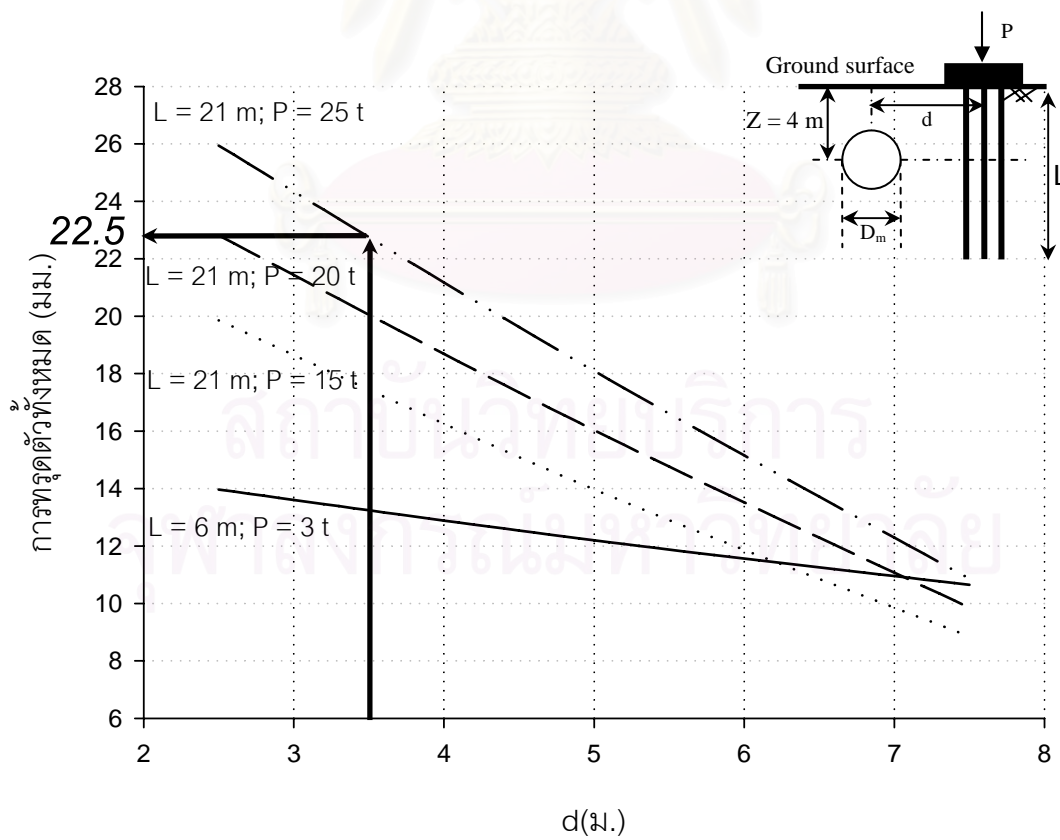
รูปที่ 4.40 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



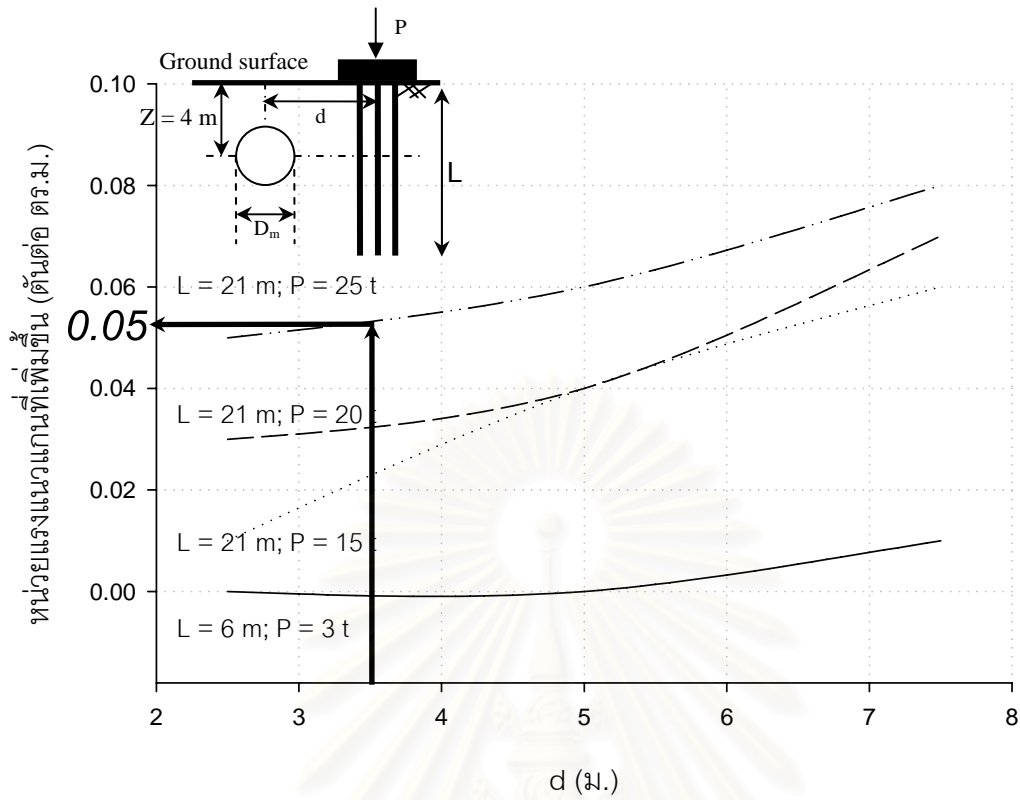
รูปที่ 4.41 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



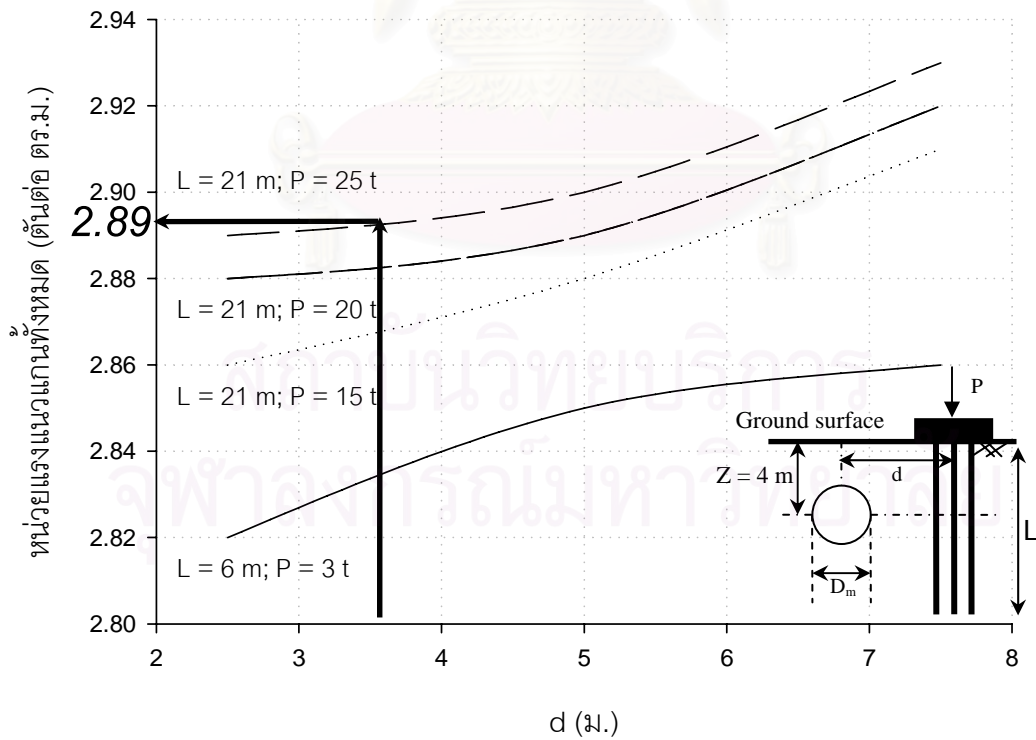
รูปที่ 4.42 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



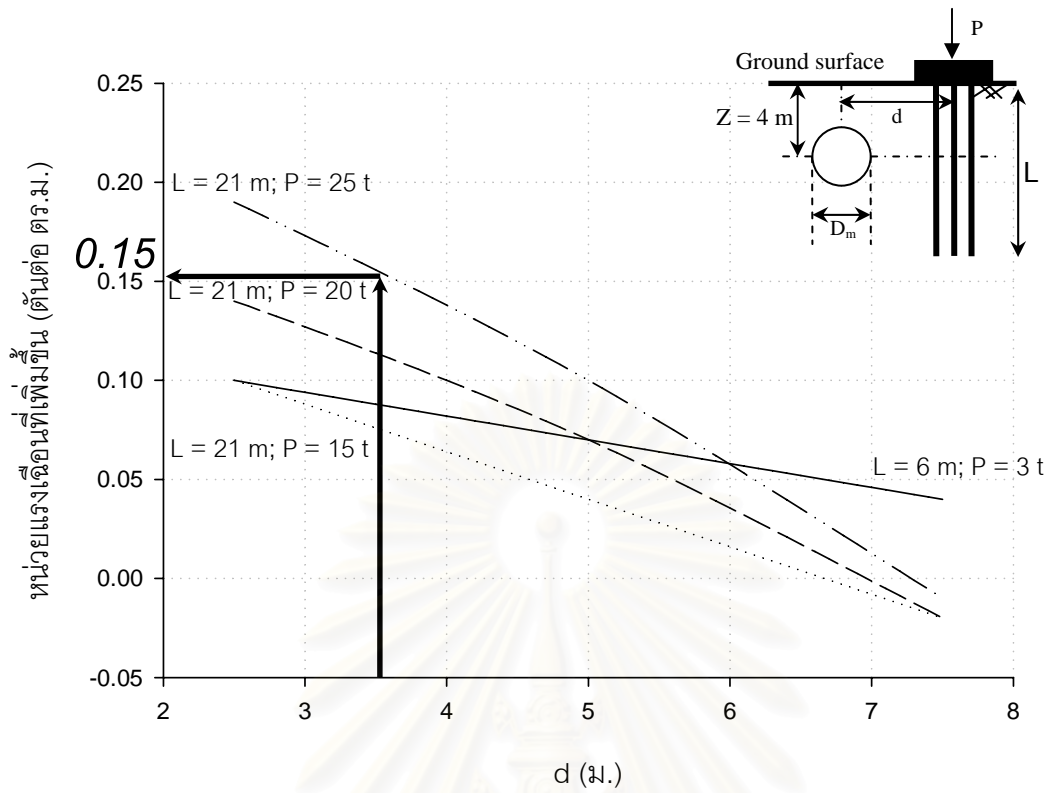
รูปที่ 4.43 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



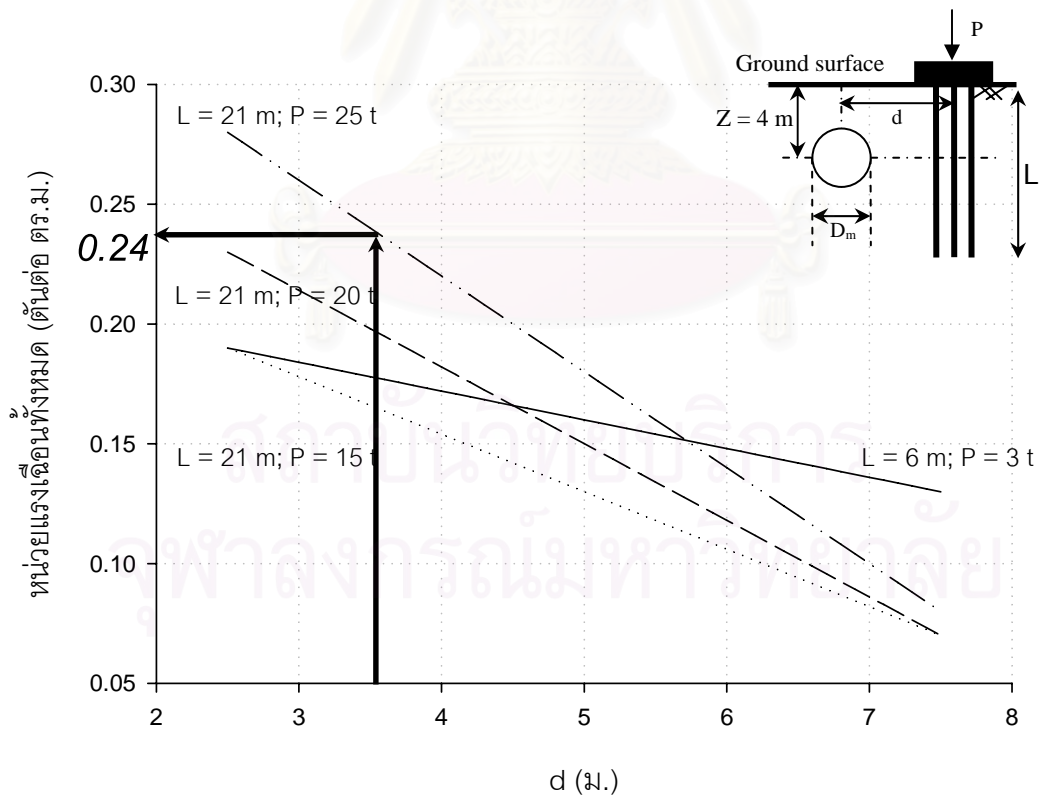
รูปที่ 4.44 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



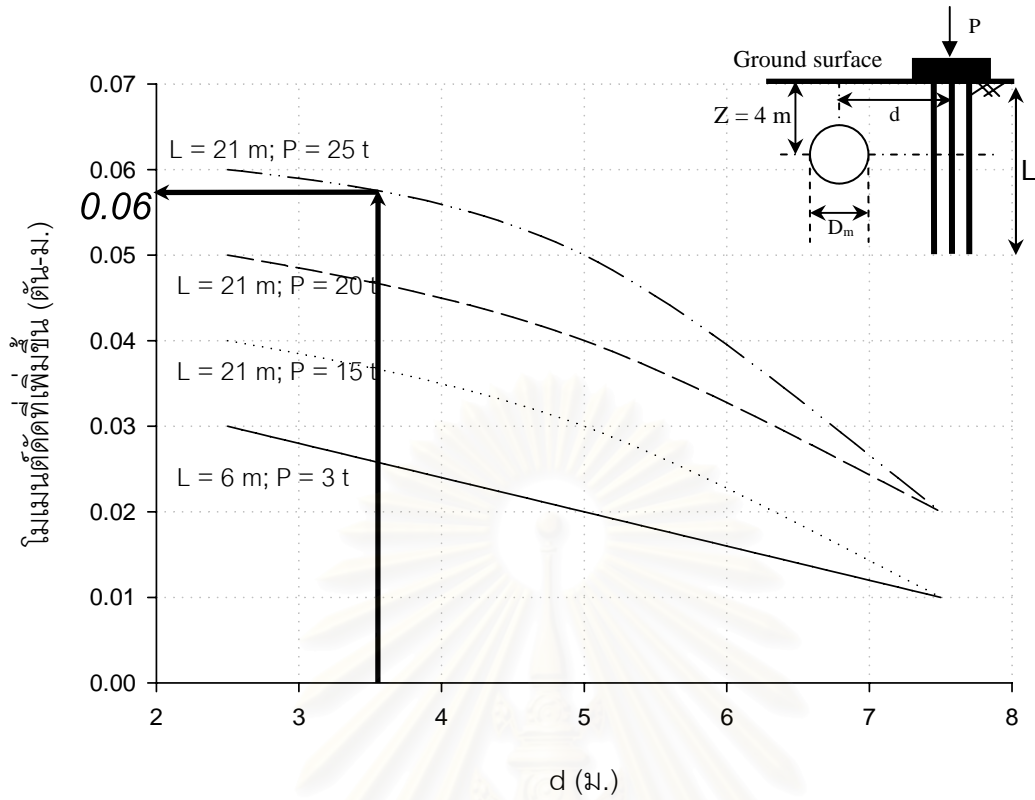
รูปที่ 4.45 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



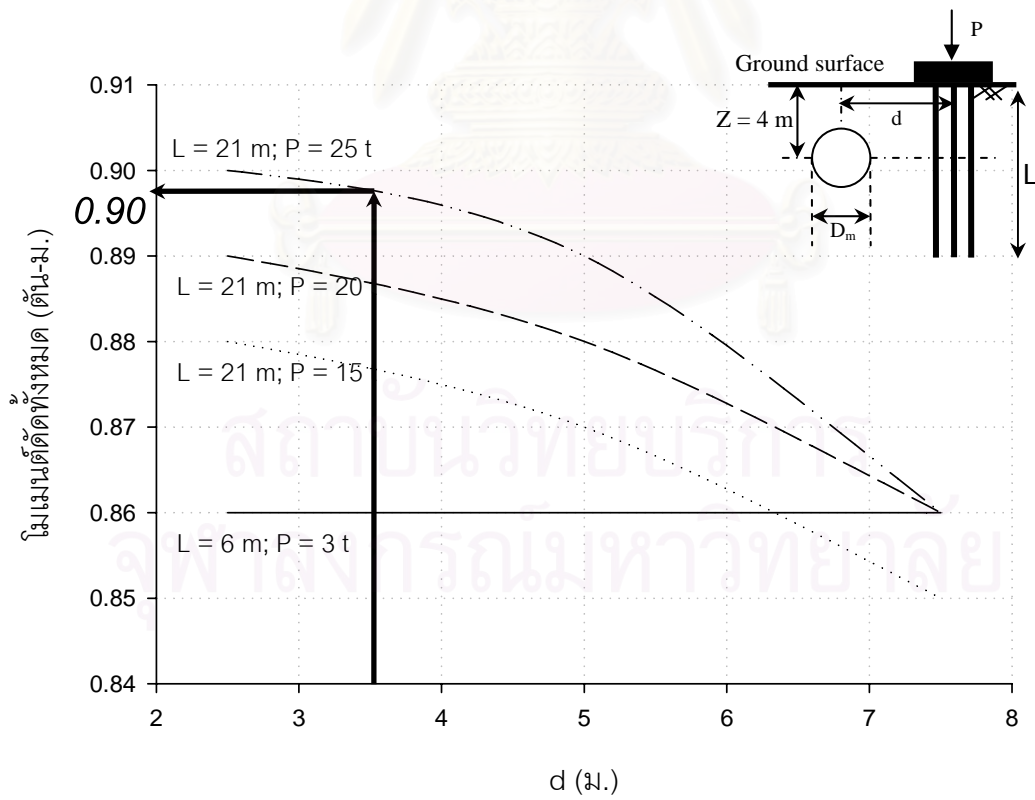
รูปที่ 4.46 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.47 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.48 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.49 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม

4.1.1.4 ผลกระทบที่มีต่อท่อตันลอดเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.4 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 0.60 ม. โดยแบ่งการวิเคราะห์แนวท่อเป็น 3 แนวได้แก่ แนวด้านบน แนวด้านข้าง และ แนวด้านล่าง อีกทั้งกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียงเป็น 3 ขนาดเป็นจำนวนเท่าของอุโมงค์หลัก ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 เท่าตามลำดับ โดยที่ระยะทางอุโมงค์ข้างเคียงกำหนดเป็น 2 3 และ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหลักตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.4 ส่วนท่อขนาดอื่นๆแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อตันลอดขนาด 0.60 ม.

แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Diameter (m)	Type	Adjacent tunnel diameter (times of main tunnel)	Distance from main structure (time)			Incremental effect			Distance from main structure (time)		
				2	3	4				2	3	4
Pipe jacking	0.6	Upper	0.5	Total Displacement (mm)	7.73			Total Displacement (mm)	1.78			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.74			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.06			
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.44			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.08			
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.83			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.02			
			1	Total Displacement (mm)	9.56			Total Displacement (mm)	3.61			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.81			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13			
		Max. Shear stress (ton/m ²)		0.53			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.16				
		Max. Bending moment (ton.m ²)		0.86			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.05				
		2	Total Displacement (mm)	13.38			Total Displacement (mm)	7.43				
			Max. Axial stress (ton/m ²)	2.97			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.29				
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.66			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.29				
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.91			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.10				
	Side	0.5	Inc. Total Displacement (mm)	8.32	7.87	7.58	Inc. Total Displacement (mm)	2.37	1.92	1.63		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	2.71	2.71	2.72	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.04		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.37	0.38	0.39	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.02	0.02		
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.82	0.82	0.82	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01		
		1	Inc. Total Displacement (mm)	11.28	10.28	9.61	Inc. Total Displacement (mm)	5.33	4.33	3.66		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	2.72	2.73	2.74	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.04	0.05	0.06		
	Max. Shear stress (ton/m ²)		0.40	0.40	0.41	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.04			
	Max. Bending moment (ton.m ²)		0.82	0.82	0.83	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.02	0.02			
	2	Inc. Total Displacement (mm)	17.17	14.86	13.36	Inc. Total Displacement (mm)	11.22	8.91	7.41			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.72	2.76	2.77	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.04	0.08	0.09			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.46	0.46	0.46	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.09	0.09	0.10			
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.82	0.84	0.84	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.03	0.03			
Under	0.5	Total Displacement (mm)	7.69	7.42	7.22	Total Displacement (mm)	1.74	1.47	1.27			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.60	2.62	2.63	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.08	-0.06	-0.05			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.30	0.32	0.33	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.06	-0.05	-0.03			
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.78	0.79	0.79	Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.03	-0.02	-0.01			
	1	Total Displacement (mm)	9.46	8.92	8.53	Total Displacement (mm)	3.51	2.97	2.58			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.52	2.58	2.61	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.16	-0.10	-0.07			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.24	0.28	0.30	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.13	-0.08	-0.06			
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.76	0.77	0.78	Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.05	-0.03	-0.03			
	2	Total Displacement (mm)	12.69	12.06	11.55	Total Displacement (mm)	6.74	6.11	5.60			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.43	2.48	2.52	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.25	-0.20	-0.16			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.17	0.21	0.23	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.19	-0.16	-0.13			
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.73	0.74	0.75	Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.08	-0.06	-0.05			

พิจารณาตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อตันลอดโดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลอดโดยมีทั้งหมด 7 ขนาด ในที่นี้เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ม. แถวที่ 3 เป็นทิศทางการวางตัวของอุโมงค์สาธารณูปโภคในบริเวณใกล้เคียง โครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินซึ่งมี 3 ทิศทางได้แก่ วางด้านบน ด้านข้างและด้านล่างของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง โดยในการ

คำนวณกำหนดไว้ 3 ขนาด ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน
 แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด
 แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรง
 เฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางเสาเข็มกลุ่มเป็นระยะ 2 3 และ
 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน
 หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่า
 การหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด
 จากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ของอุโมงค์ทั้ง 7 ขนาด โดยในรูปที่ 4.50 ถึง 4.57 แกนใน
 แนวตั้งความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด
 ทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงกับเส้นผ่าน
 ศูนย์กลางท่อ (d/D_m) ขนาดอุโมงค์ข้างเคียง 0.5 เท่า วางตัวแนวด้านข้าง รูปที่ 4.58 ถึง 4.65 แกนใน
 แนวตั้ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด
 ทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน เป็นระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโดยเรียงตามขนาด
 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน สำหรับในขนาดท่อข้างเคียงอื่นแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตัวอย่างการใช้งานกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณ

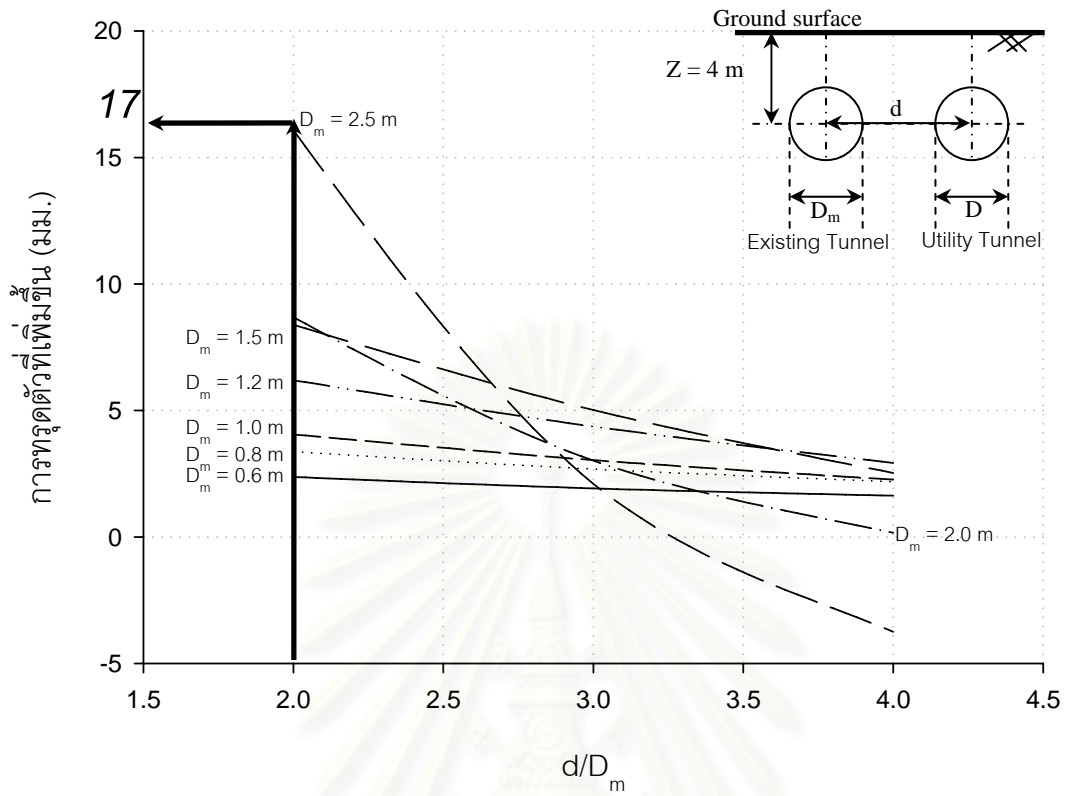
จากรูปที่ 4.50 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหลุดตัวที่เพิ่มขึ้น กับ อัตราส่วนระหว่าง
 ระยะห่างของศูนย์กลางท่อตันตลอดกับกึ่งกลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง (d/D_m) ของท่อตันตลอด
 ทุกขนาด จากกราฟความสัมพันธ์สมมุติให้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางท่อเท่ากับ 5 ม. ท่อ
 สาธารณูปโภคข้างเคียงมีขนาด 0.5 เท่าของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินขนาด 2.5 ม. ฉะนั้น d/D_m เท่ากับ
 2 จะได้ค่าการหลุดตัวที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 17 มม. จากรูปที่ 4.50 และจากรูปที่ 4.51 เกิดการหลุดตัว
 ทั้งหมดจากการก่อสร้าง 60 มม. สำหรับหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงในทิศทางตามขวางอุโมงค์ (y) โดยที่
 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.8 ตันต่อ ตร.ม. ซึ่ง ส่วนหน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดมีค่า 21 ตันต่อ
 ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.52 และ 4.53 ตามลำดับ หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีค่า 0.8 ตันต่อ ตร.ม. และ
 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดมีค่า 2.5 ตันต่อ ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.54 และ 4.55 ตามลำดับ โมเมนต์ดัดที่
 เพิ่มขึ้นมีค่า 0.8 ตัน.ตร.ม. และโมเมนต์ดัดทั้งหมดมีค่า 7.5 ตัน.ตร.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.56 และ 4.57
 ตามลำดับรูปที่ 4.58 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหลุดตัวที่เพิ่มขึ้นกับระยะห่างของศูนย์กลาง
 ท่อตันตลอดกับกึ่งกลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียงในหน่วยเมตรของท่อตันตลอดทุกขนาด โดยที่
 ระยะ 5 ม. เกิดการหลุดตัว 17 มม. เช่นเดียวกับรูปที่ 4.50 ที่ d/D_m เท่ากับ 2 เพราะระยะระหว่าง
 ศูนย์กลางท่อตันตลอดถึงกึ่งกลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง (d) ที่ยกตัวอย่างนั้นเท่ากัน และรูปที่

4.59 เกิดการทрудตัวทั้งหมดเท่ากับ 60 มม. เช่นเดียวกับรูปที่ 4.51 สำหรับหน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดตั้งแสดงในรูปที่ 4.59 ถึง 4.64 มีค่าเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.52 ถึง 4.57 เนื่องจากในตัวอย่างใช้ระยะ d เท่ากัน

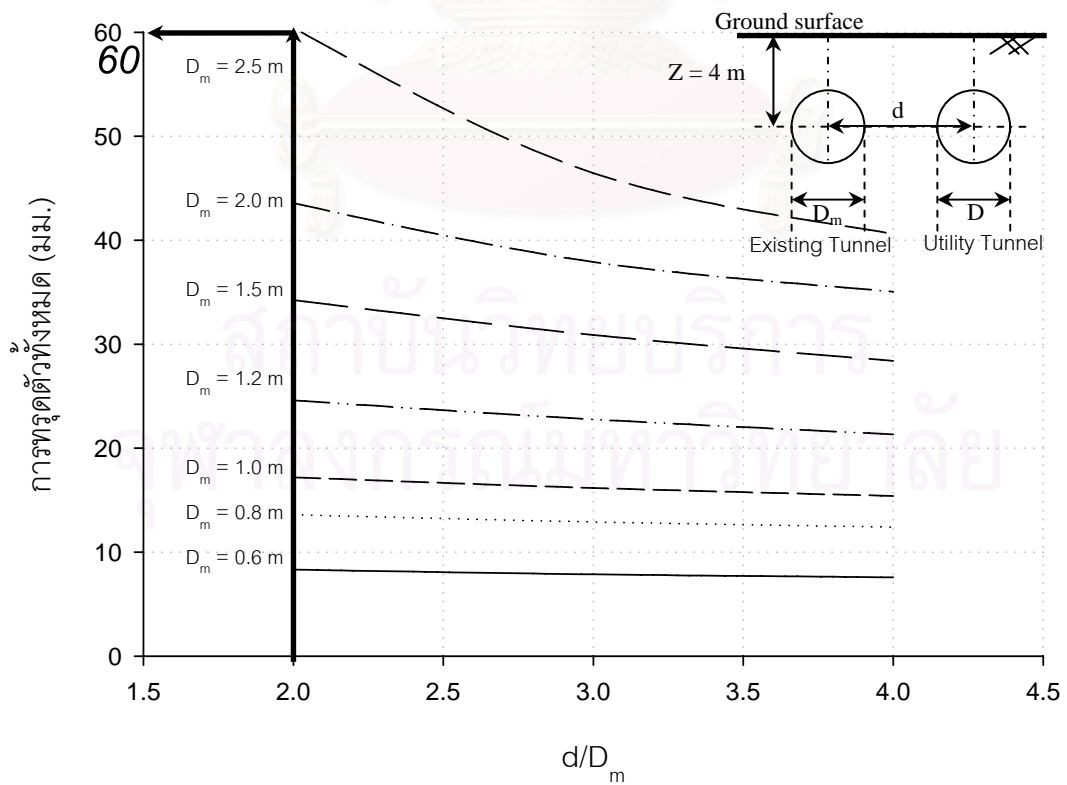
ซึ่งจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าหน่วยแรงที่ได้สามารถนำไปบวกกับหน่วยแรงที่ใช้ออกแบบ (P_n , V_n , M_n) เพื่อหาหน่วยแรงประลัย (P_u , V_u , M_u)



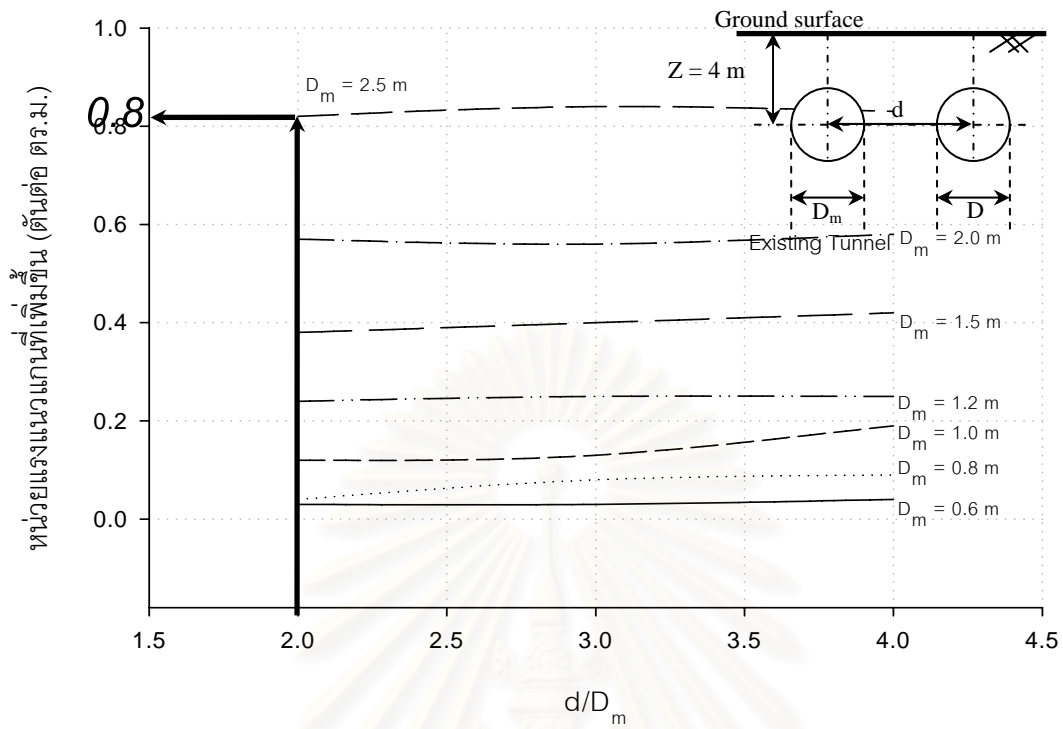
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



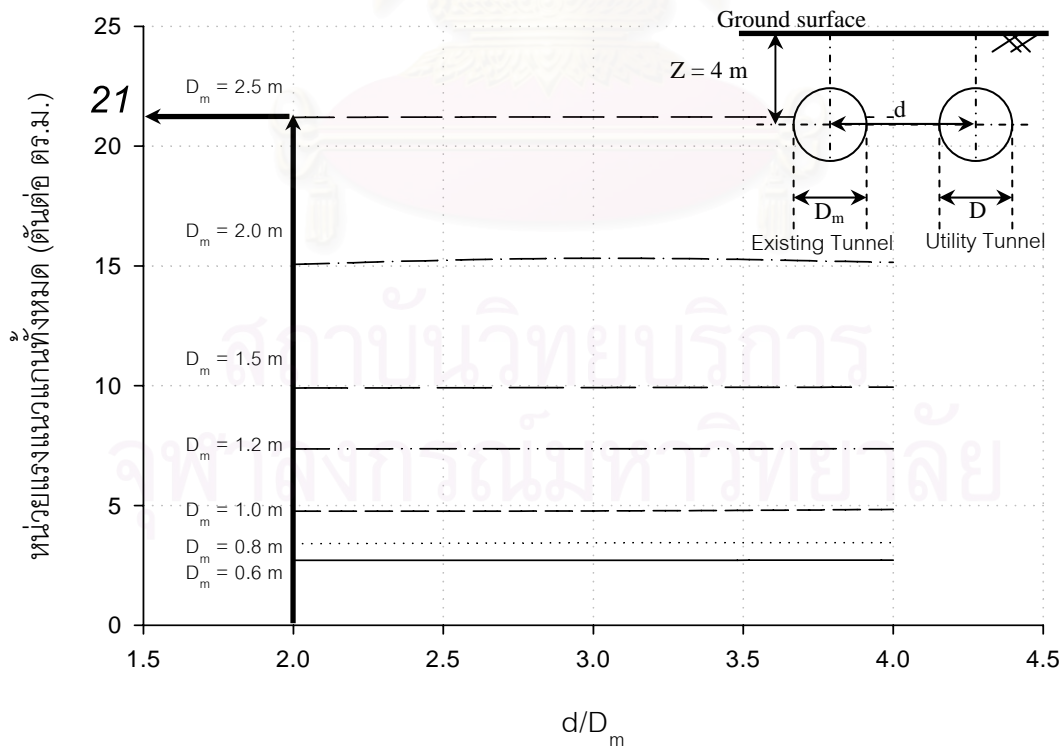
รูปที่ 4.50 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



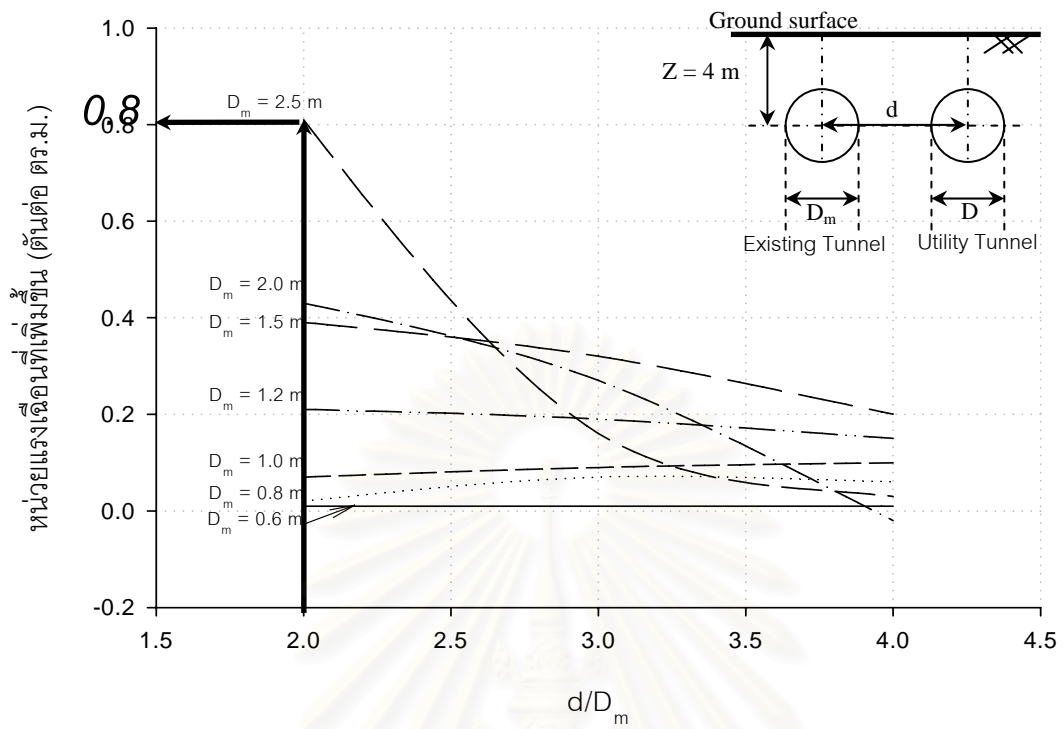
รูปที่ 4.51 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



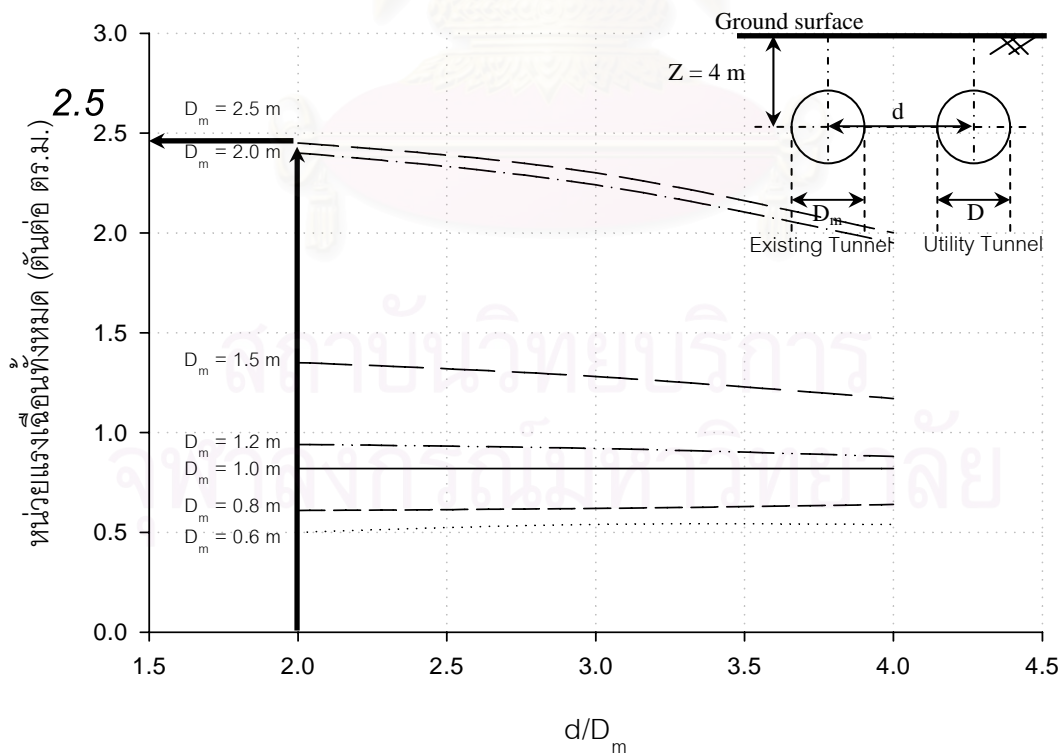
รูปที่ 4.52 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



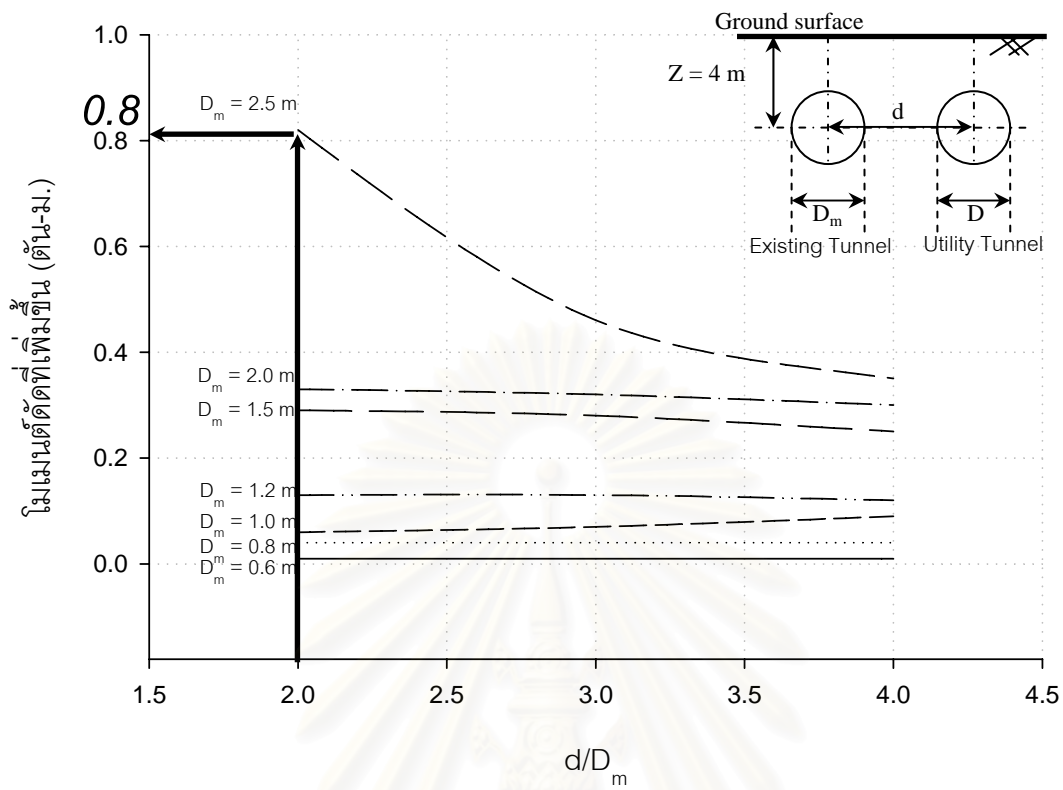
รูปที่ 4.53 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



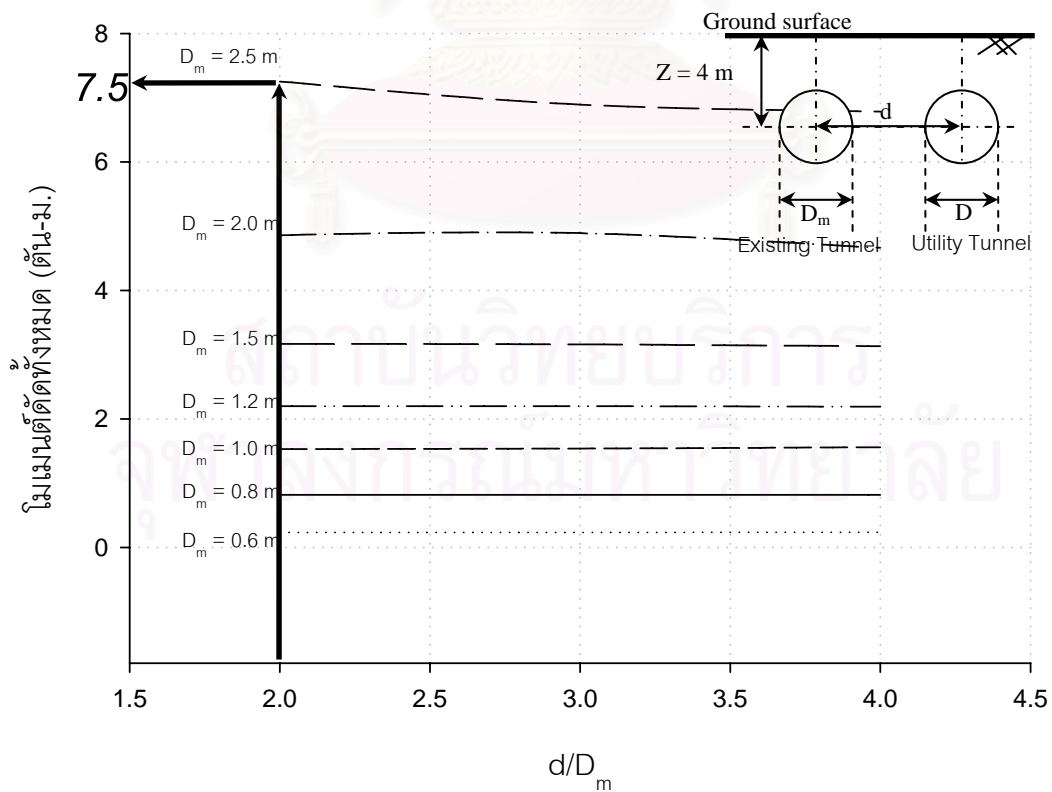
รูปที่ 4.54 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของ 토ัดันลวดจากผลจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



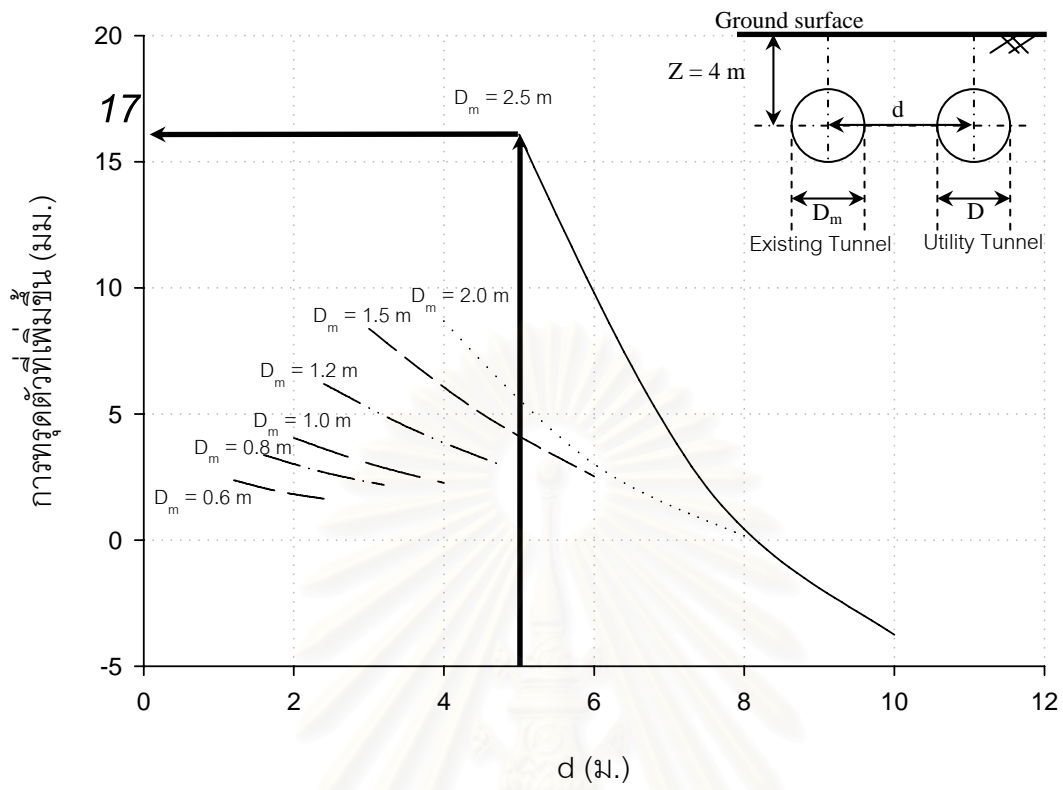
รูปที่ 4.55 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของ 토ัดันลวดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



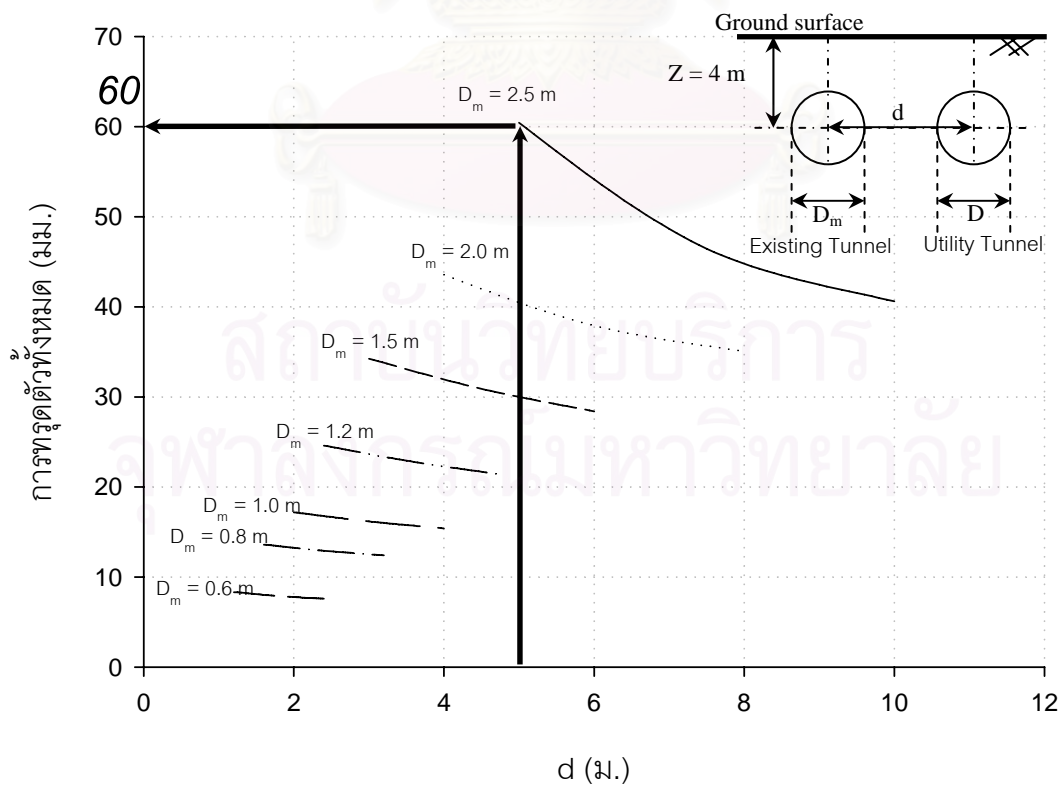
รูปที่ 4.56 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



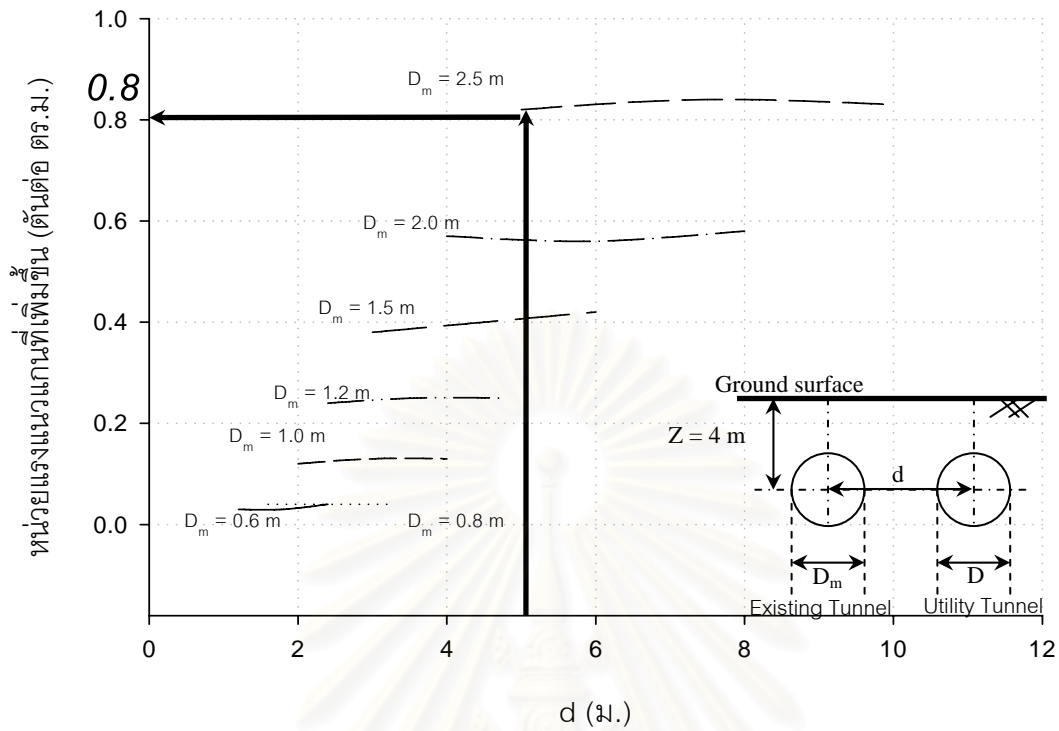
รูปที่ 4.57 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



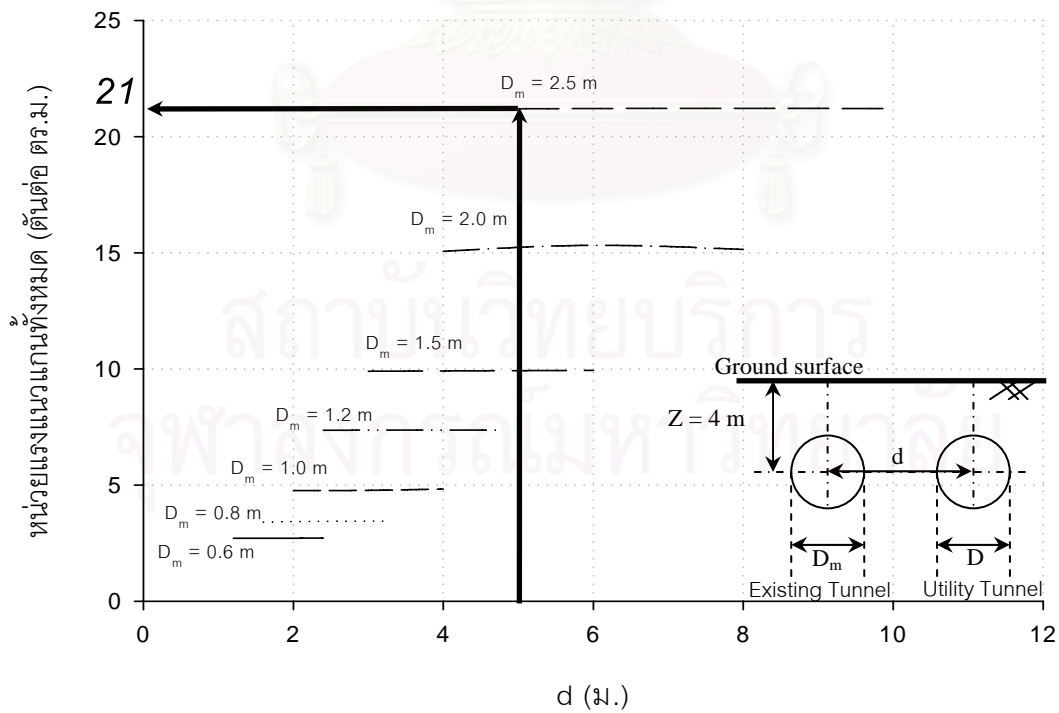
รูปที่ 4.58 การทูลดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



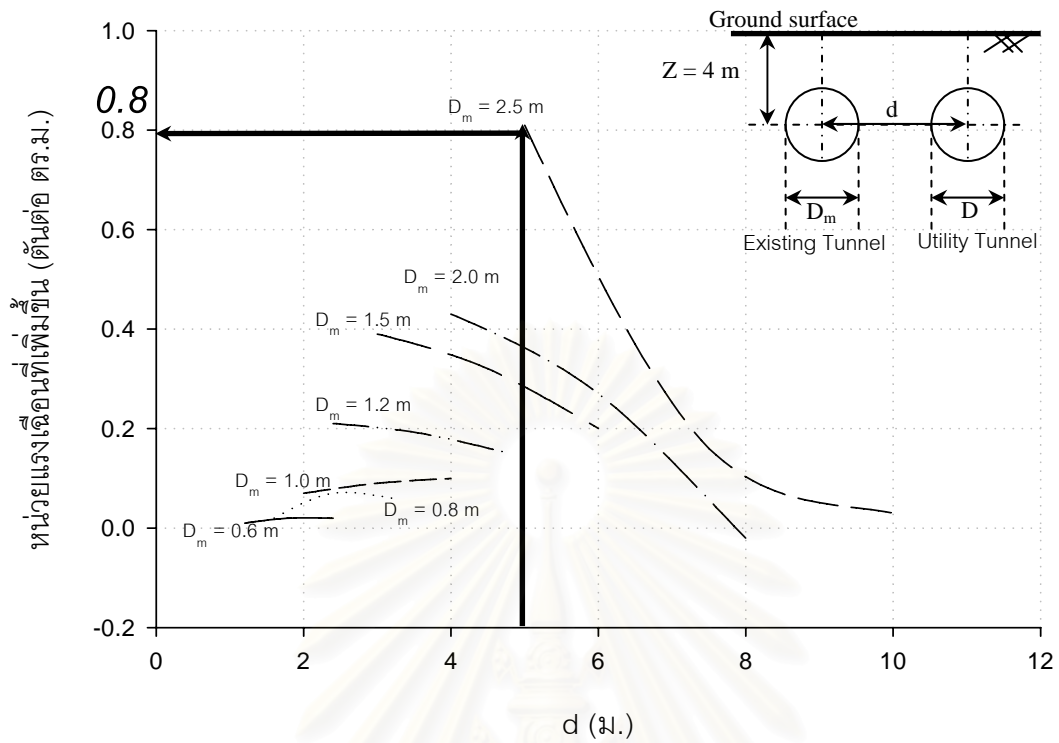
รูปที่ 4.59 การทูลดตัวทั้งหมดของท่อตันตลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



รูปที่ 4.60 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$

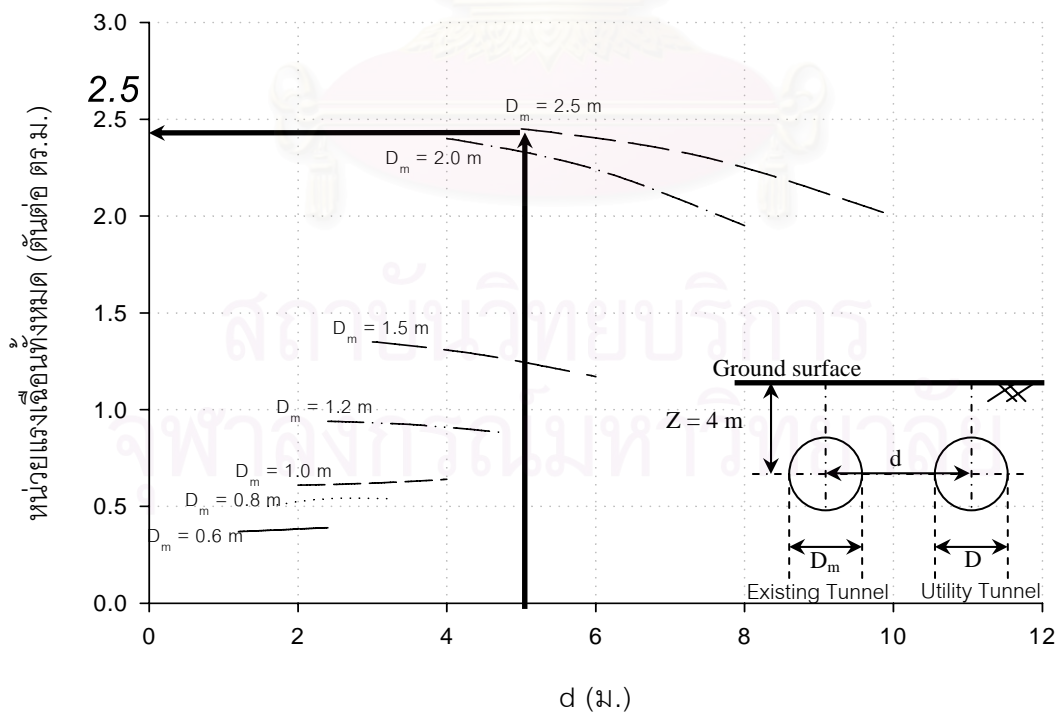


รูปที่ 4.61 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



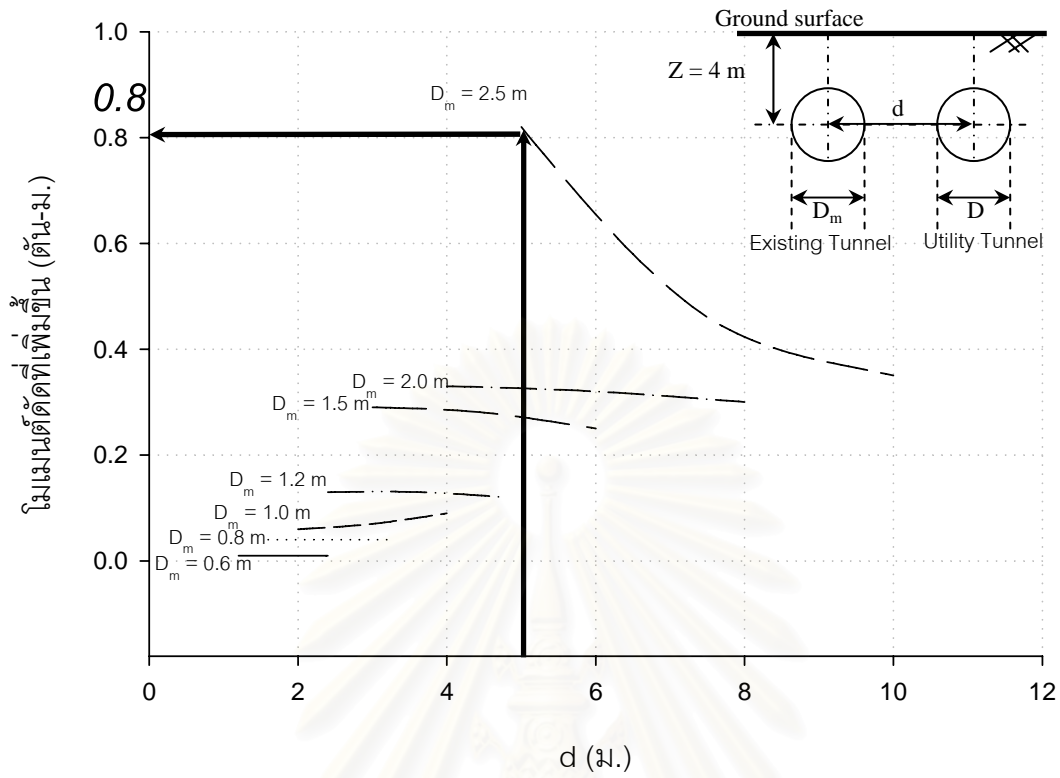
รูปที่ 4.62 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด

$$D = 0.5D_m$$

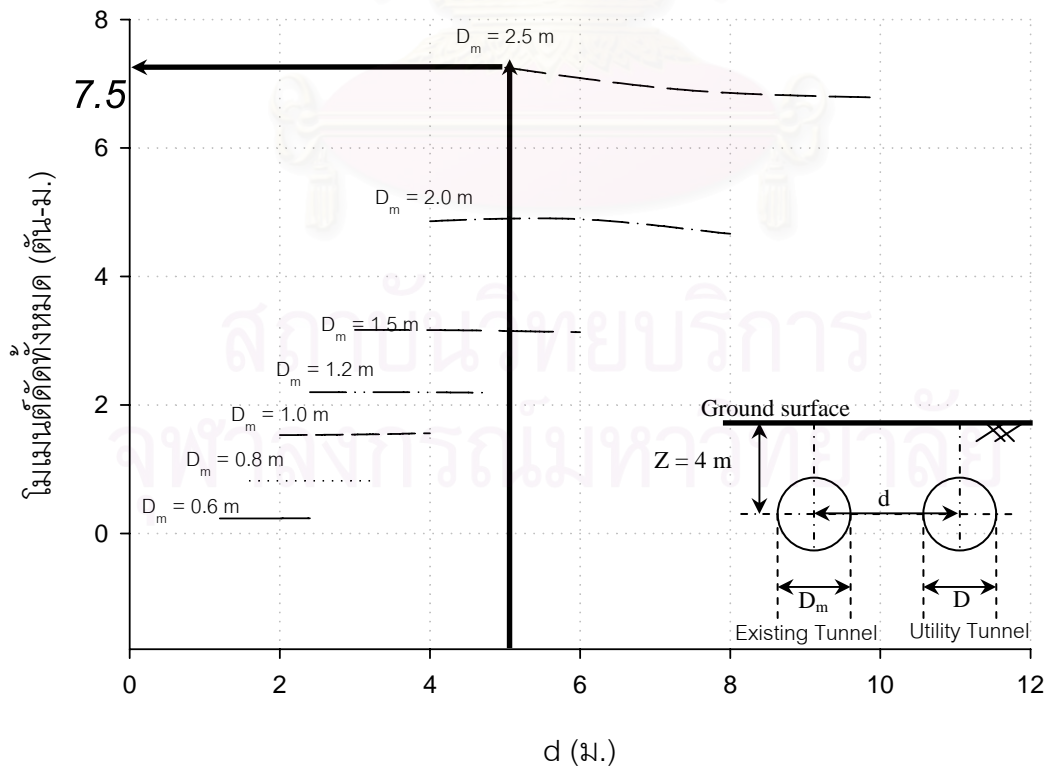


รูปที่ 4.63 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด

$$D = 0.5D_m$$



รูปที่ 4.64 โมเมนต์ตัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



รูปที่ 4.65 โมเมนต์ตัดทั้งหมดของท่อตันลดจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$

4.1.2 ท่อเจาะดินแนวราบ (HDD) มีทั้งหมด 3 ขนาด ได้แก่ PN8 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 ซม. ความหนาท่อ 1.92 ซม. PN10 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 ซม. ความหนาท่อ 2.36 ซม. และ PN12.5 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 ซม. ความหนาท่อ 2.90 ในการวิเคราะห์ด้วย FEM เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อมีขนาดเท่ากันและคุณสมบัติวัสดุต่างกันน้อยมากจึงทำการวิเคราะห์โดยรวมท่อเป็นรูปแบบเดียว โดยความลึกในแต่ละขนาดที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 2 ม. ซึ่งลักษณะการนำเสนอได้แสดงในหัวข้อที่ 4.1.2.1 ผลกระทบของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน 4.1.2.2 ผลกระทบของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องเข็มพืด 4.1.2.3 ผลกระทบของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม และ 4.1.2.4 ผลกระทบของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากอุโมงค์สาธารณูปโภค

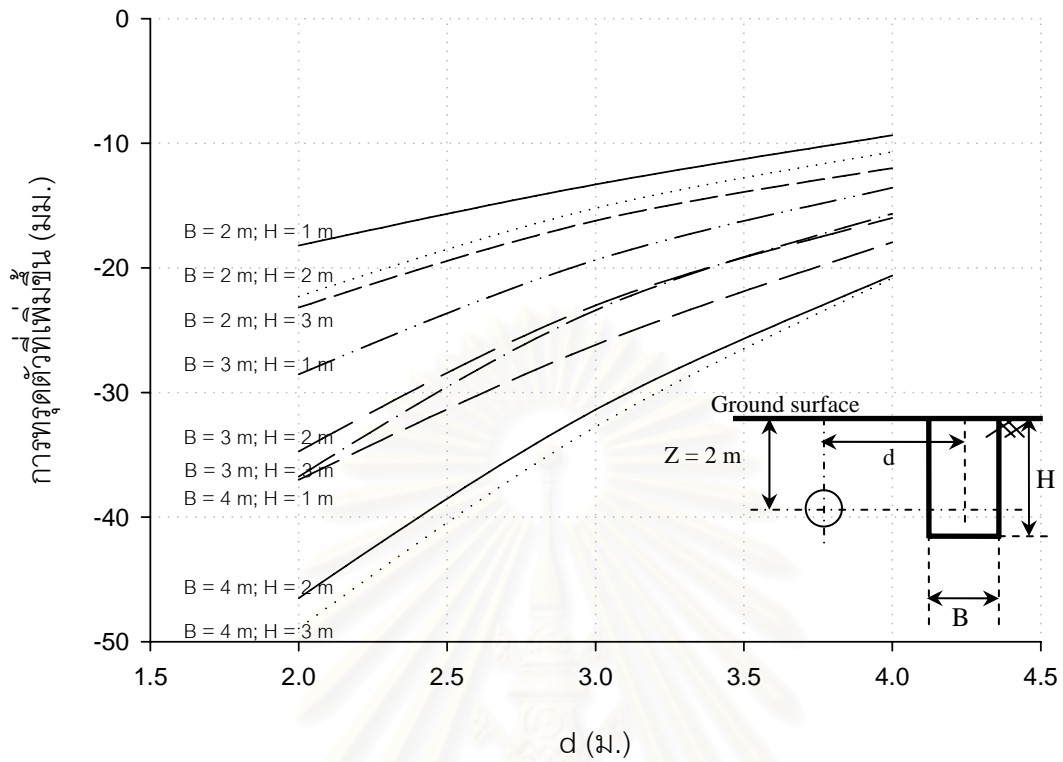
4.1.2.1 ผลกระทบที่มีต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดินข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.5 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น ความกว้างบ่อขุดข้างเคียง 2 3 และ 4 ม. ความลึกบ่อขุด 1 2 และ 3 ม. ระยะทางจากศูนย์กลางบ่อขุดถึงศูนย์กลางท่อ 3 4 และ 5 ม. ตามลำดับ สำหรับในขนาดอื่นๆแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบ

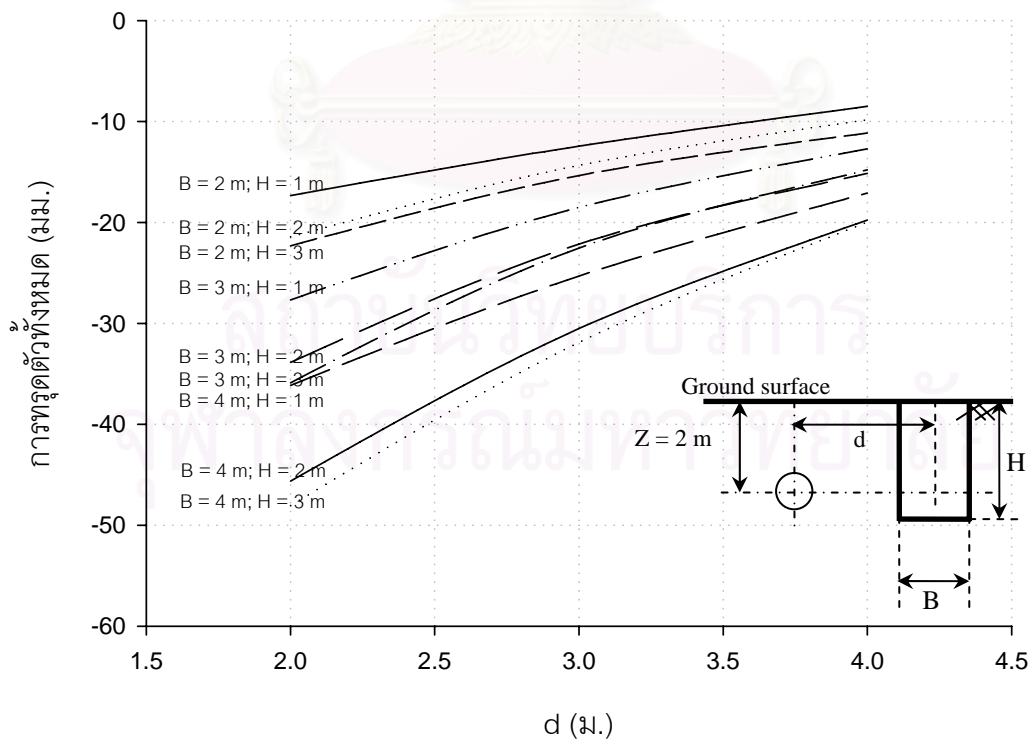
แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)	Distance from main structure (m)			Incremental effect			Distance from main structure (m)			
				2	3	4				2	3	4	
HDD	16	1	Total Displacement (mm)	-17.34	-12.44	-8.50	Total Displacement (mm)	-18.21	-13.31	-9.37			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.07	0.10	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.06	-0.03	-0.05			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.02	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.02	0.00	-0.01			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00			
		2	Total Displacement (mm)	-21.43	-14.35	-9.83	Total Displacement (mm)	-22.30	-15.22	-10.70			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.09	0.11	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.04	-0.01	-0.05			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.03	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	-0.01			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00			
		3	Total Displacement (mm)	-22.31	-15.35	-11.13	Total Displacement (mm)	-23.18	-16.22	-12.00			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.11	0.12	0.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	0.00	-0.04			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.06	0.05	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.00			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00			
	20	1	Total Displacement (mm)	-27.68	-18.51	-12.71	Total Displacement (mm)	-28.55	-19.38	-13.58			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.07	0.06	0.06	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.05	-0.05	-0.05			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.01	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.01	-0.02	-0.01			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00			
		2	Total Displacement (mm)	-33.86	-22.14	-15.13	Total Displacement (mm)	-34.73	-23.01	-16.00			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.10	0.08	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.03	-0.04	-0.05			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.01	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	-0.02	-0.01			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00			
		3	Total Displacement (mm)	-35.88	-22.53	-14.79	Total Displacement (mm)	-36.75	-23.40	-15.66			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.09	0.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	-0.03	-0.04			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.04	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.02	0.00			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00			
25	1	Total Displacement (mm)	-36.14	-25.31	-17.08	Total Displacement (mm)	-37.01	-26.18	-17.95				
		Max. Axial stress (ton/m ²)	0.55	0.08	0.07	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.43	-0.04	-0.05				
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.04	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.02	-0.01	-0.01				
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00				
	2	Total Displacement (mm)	-45.63	-30.51	-19.75	Total Displacement (mm)	-46.50	-31.38	-20.62				
		Max. Axial stress (ton/m ²)	0.10	0.09	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	-0.03	-0.05				
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.03	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	-0.01				
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00				
	3	Total Displacement (mm)	-48.06	-31.89	-19.97	Total Displacement (mm)	-48.93	-32.76	-20.84				
		Max. Axial stress (ton/m ²)	0.15	0.11	0.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.02	-0.01	-0.04				
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.08	0.06	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.05	0.04	0.01				
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00				

พิจารณาตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อเจาะตึ้งแนวราบโดยที่ (HDD) แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ HDD โดยมีเพียงขนาดเดียวคือ 16 ซม. แถวที่ 3 เป็นความกว้างของบ่อชุดในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นความลึกของบ่อชุด แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการท่อดัด หน่วยงานแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการท่อดัด หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางบ่อชุดเป็นระยะ 2 3 และ 4 ม. ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการท่อดัด หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการท่อดัด หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

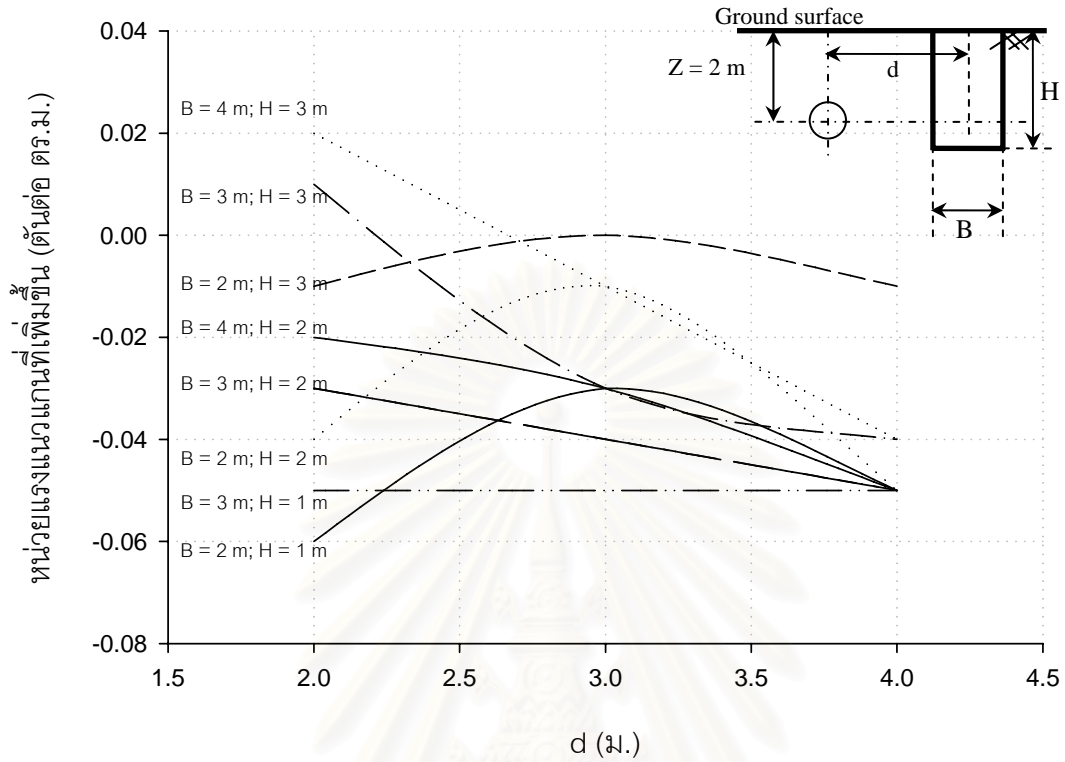
สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดจากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.66 ถึง 4.71 แกนในแนวดิ่ง ความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน เป็นระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตร ตามลำดับ โดยแยกกราฟตามความลึก (H) และ ความกว้าง (B) ของหลุมเจาะ ซึ่งหาการท่อดัด และหน่วยแรงแบบต่างๆ ได้จากความสัมพันธ์ในแต่ละเส้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ชุดกราฟของหน่วยแรงแนวแกนเป็นแนวโน้มของแต่ละความกว้างของบ่อชุด เนื่องจากผลของความกว้างมีผลต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในท่อมากกว่าความลึกจึงทำให้เส้นกราฟตัดกัน ดังสมการอิลาสติกของ Skopek (1961) และ Groth and Chapman (1969) สำหรับแนวโน้มเส้นกราฟถ้าวิเคราะห์ตามความกว้างของบ่อชุดที่เพิ่มขึ้นจะมีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากการเพิ่มความกว้างของบ่อชุดโดยที่ความกว้าง 2 ม. จะเกิดหน่วยแรงในแนวราบ (Horizontal Stress) มากที่สุดที่ระยะห่าง 3 ม. ซึ่งทำให้หน่วยแรงรวม (Total Stress) ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเพิ่มขึ้นที่ระยะ 3 ม. แล้วลดลงที่ 4 ม. ในขณะที่เดียวกันที่ความกว้าง 3 และ 4 ม. ที่ระยะ 4 ม. จะเกิดหน่วยแรงในแนวราบมากที่สุดทำให้เส้นแนวโน้มมีลักษณะเพิ่มขึ้นในทิศทางลบ โดยที่ชุดความสัมพันธ์ของค่าความลึก (H) และ ความกว้าง (B) สำหรับในขนาดต่างๆที่เหลือแสดงในภาคผนวก ก



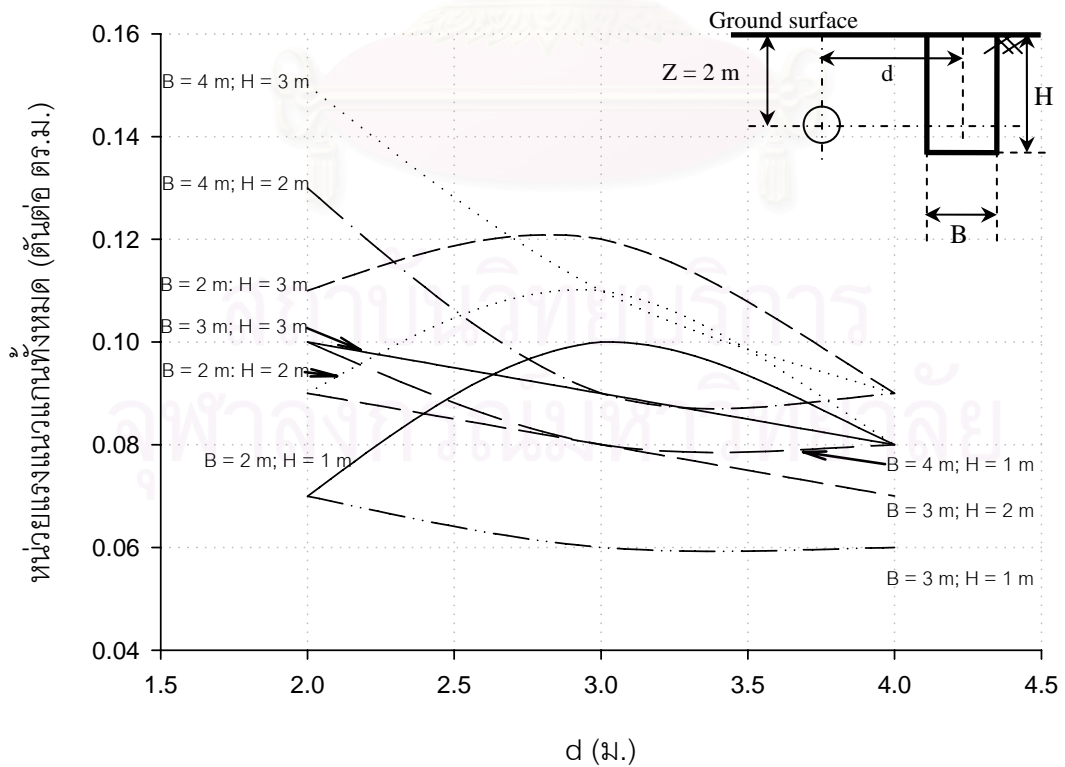
รูปที่ 4.66 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



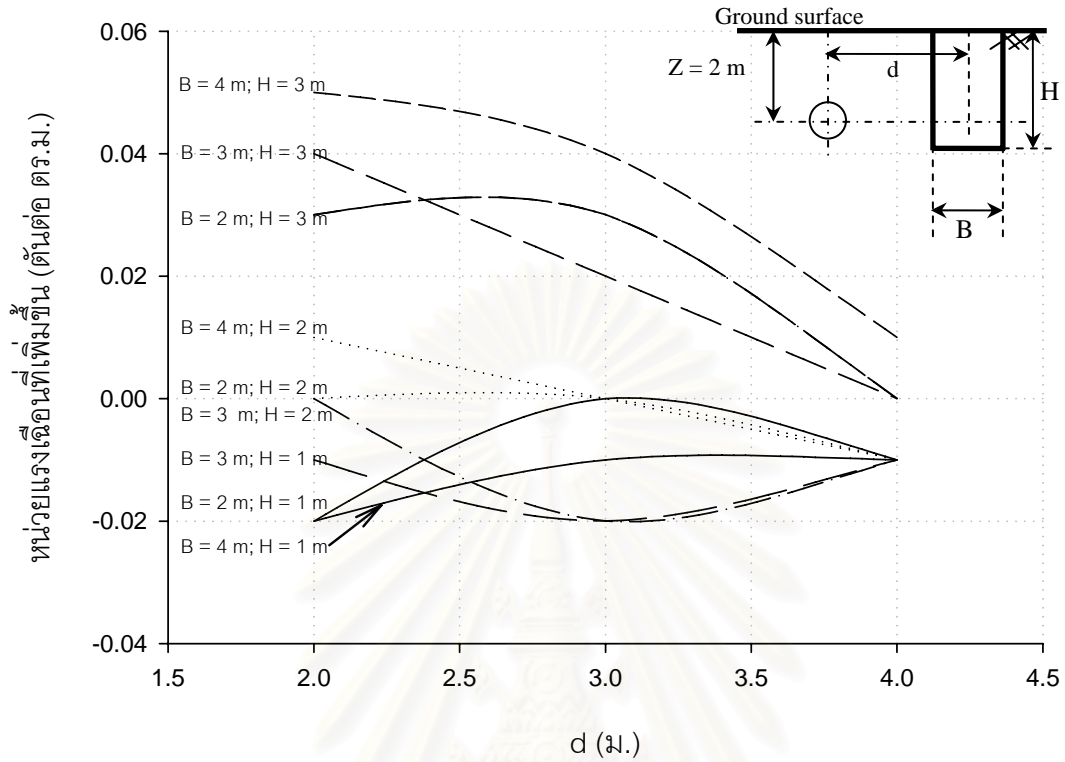
รูปที่ 4.67 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



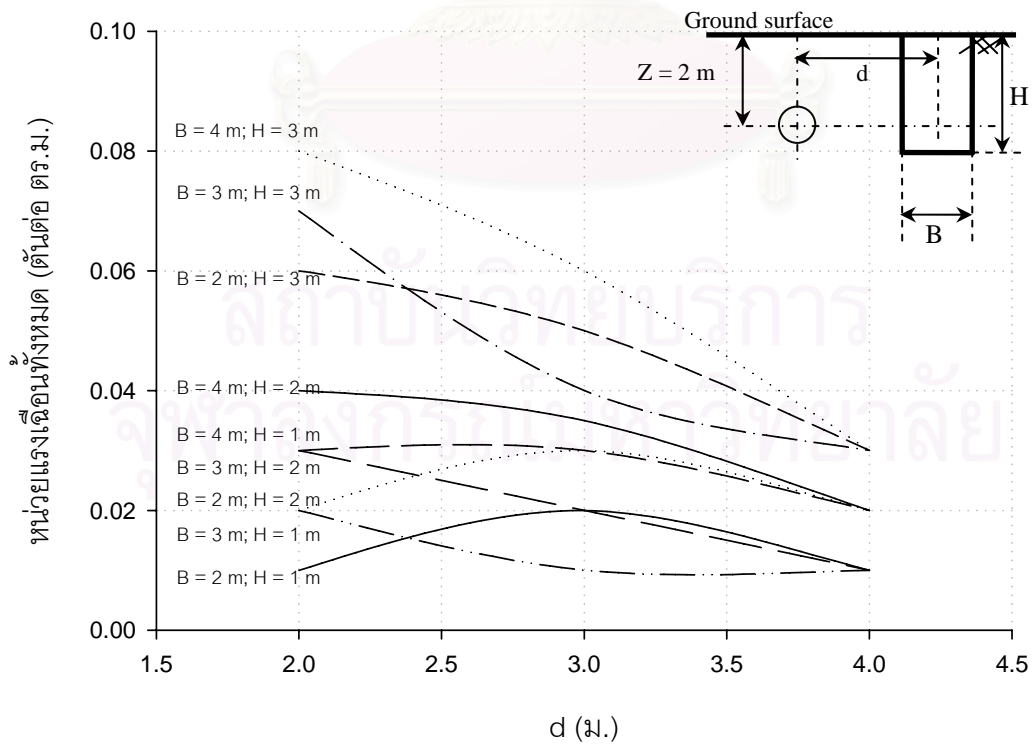
รูปที่ 4.68 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.69 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.70 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ๊งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.71 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อเจาะตึ๊งแนวราบเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน

4.1.2.2 ผลกระทบที่มีต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการปักเข็มพืดข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 ตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.6 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้น โดยความลึกของเข็มพืดใช้ที่ระดับ 15.00 ม. ระยะห่างจากเข็มพืดเท่ากับ 2 3 และ 4 ม. ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.6

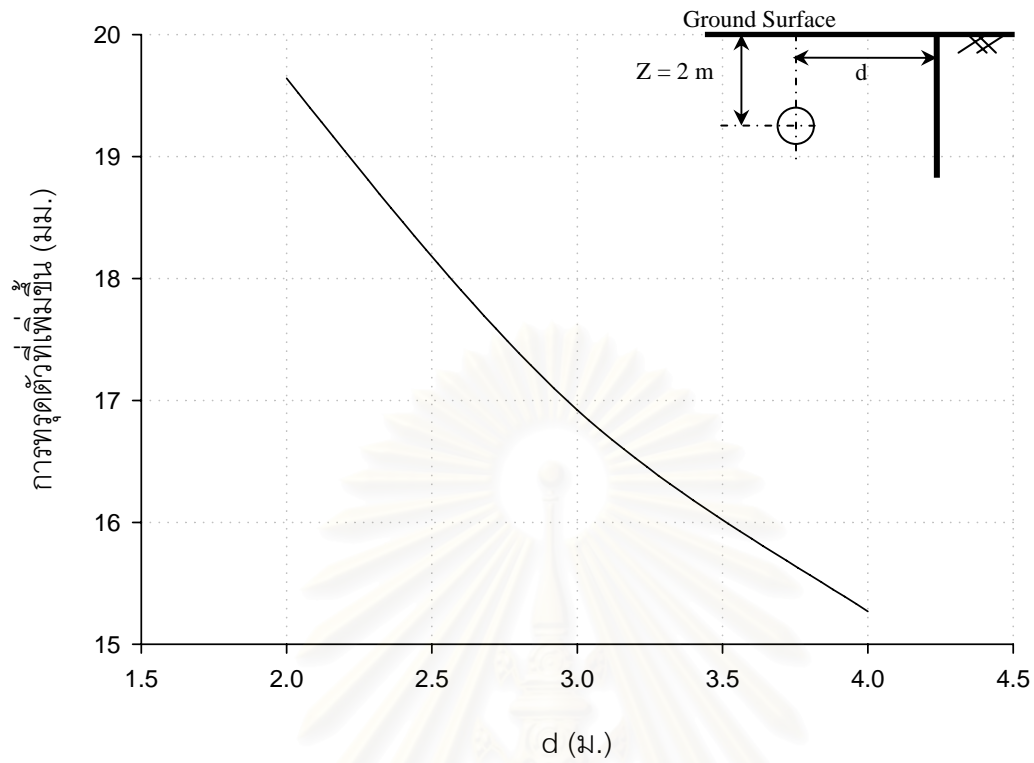
ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มพืดต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบ

แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									
											Distance from main structure (m)			Incremental effect			Distance from main structure (m)		
											2	3	4				2	3	4
HDD	Sheet Pile Tip (m)	15	Total Displacement (mm)	20.60	17.88	16.23	Total Displacement (mm)	19.64	16.92	15.27									
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.13	0.14	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.00	0.00	0.00									
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.03	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	0.00									
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00									

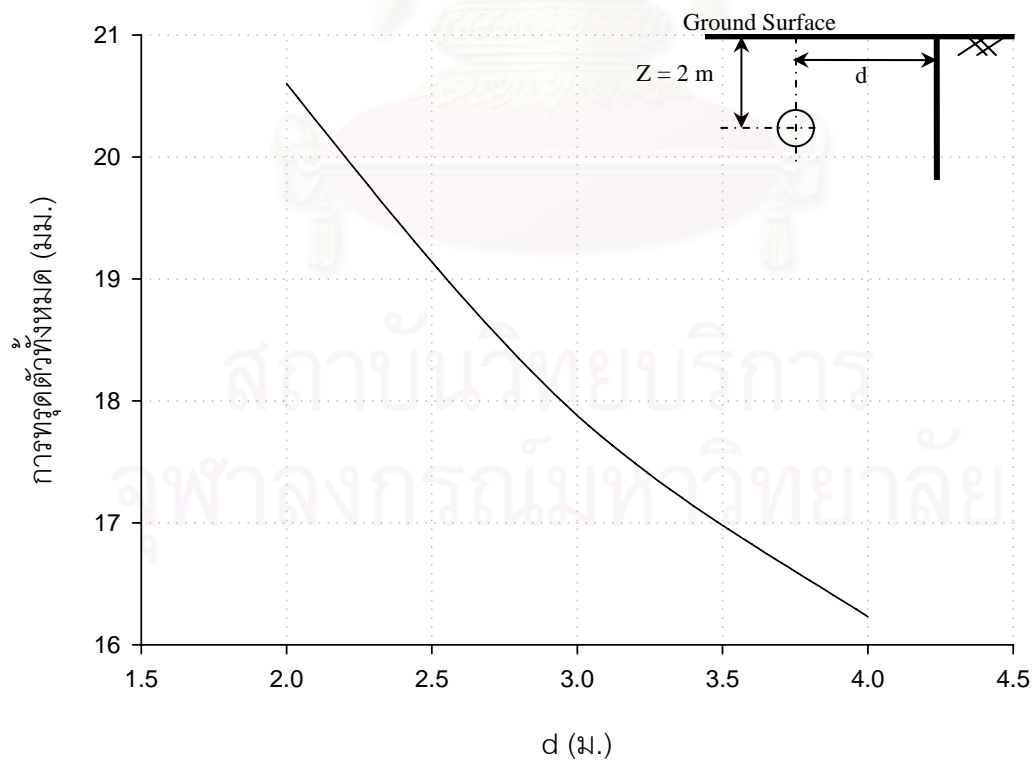
พิจารณาตารางที่ 4.6 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อเจาะตึ้งแนวราบ (HDD) แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นความลึกของเสาเข็มพืดซึ่งในการคำนวณใช้ 15 ม. แถวที่ 3 เป็นแถวบรรยายถึงการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 4 5 และ 6 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางเข็มพืดเป็นระยะ 2 3 และ 4 ม. ตามลำดับ แถวที่ 7 แถวบรรยายถึงการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 8 9 และ 10 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิเคราะห์เฉพาะค่าการเคลื่อนตัวจากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.72 ถึง 4.73 แกนในแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัวทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน เป็นระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตร เนื่องจากค่า หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงไม่จำเป็นต้องจัดทำกราฟความสัมพันธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.72 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการปักเข็มพืด



รูปที่ 4.73 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการปักเข็มพืด

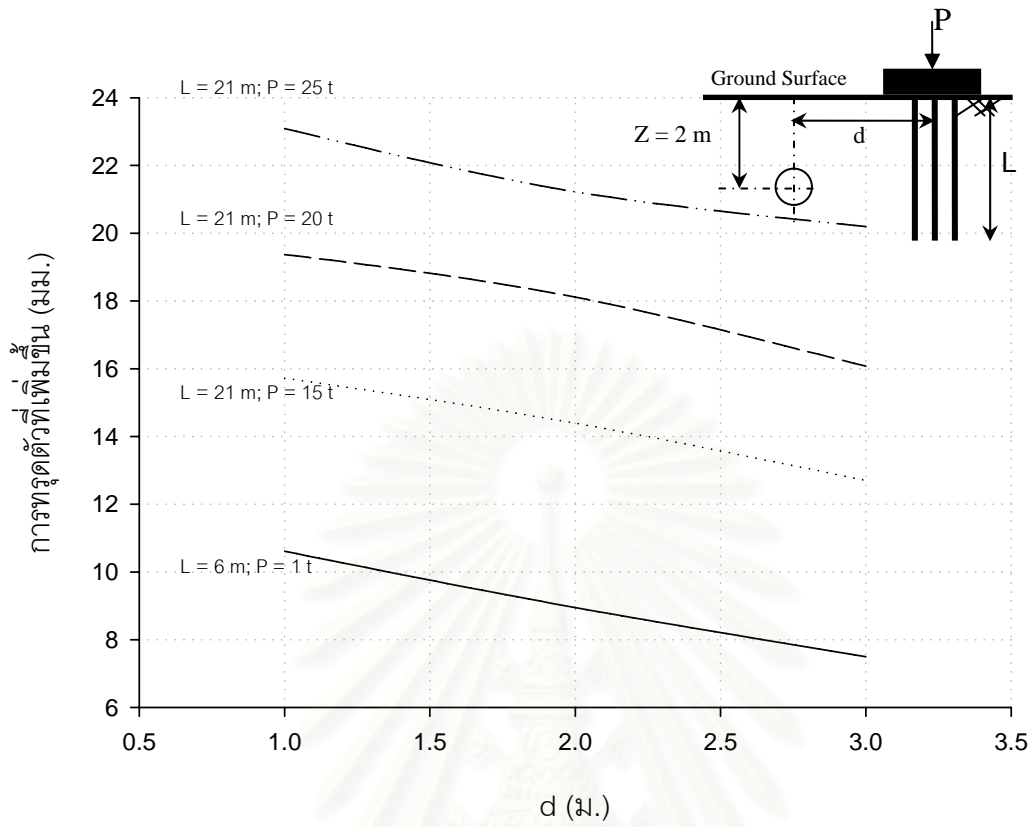
4.1.2.3 ผลกระทบที่มีต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.7 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้น โดยแยกเสาเข็มกลุ่มออกเป็นสองประเภทคือเสาเข็มสั้น และ เสาเข็มยาว โดยที่เสาเข็มสั้นใช้ความยาว 6.00 ม. ส่วนเสาเข็มยาวใช้ที่ระดับ 21.00 ม. สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็ม เสาเข็มสั้นใช้ที่ 3 ตัน และเสาเข็มยาวใช้ที่ 15 20 และ 25 ตัน ระยะห่างจากสิ่งก่อสร้างใช้ที่ระยะ 2.5 5 และ 7.5 ม.ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบ

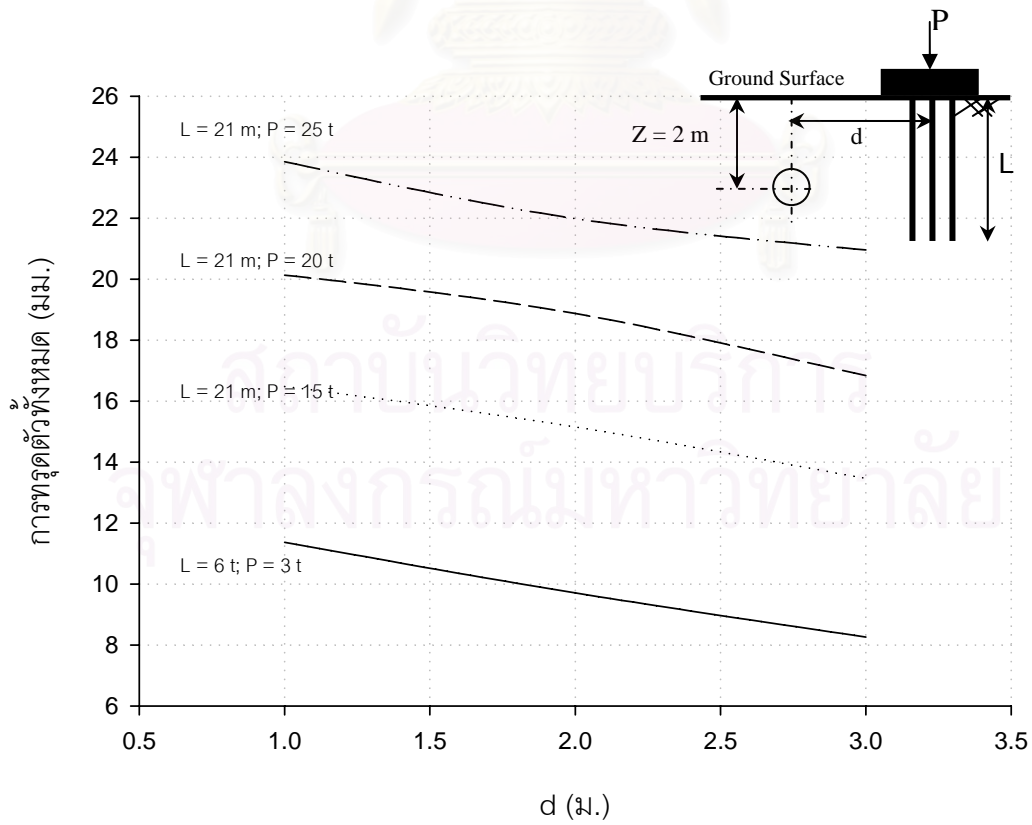
แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Diameter (m)	Depth (m)	Load (Ton)		Distance from main structure			Incremental effect			Distance from main structure (m)		
					1	2	3				1	2	3
HDD		6	3	Total Displacement (mm)	11.37	9.71	8.26	Total Displacement (mm)			10.61	8.95	7.50
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.11	0.11	0.10	Inc. Axial stress (ton/m ²)			0.00	0.00	0.01
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.01	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)			0.01	0.00	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)			0.00	0.00	0.00
				Total Displacement (mm)	16.48	15.15	13.46	Total Displacement (mm)			15.72	14.39	12.70
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.12	0.11	Inc. Axial stress (ton/m ²)			0.01	0.01	0.00
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.02	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)			0.02	0.01	0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)			0.01	0.00	0.00
				Total Displacement (mm)	20.13	18.87	16.83	Total Displacement (mm)			19.37	18.11	16.07
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.12	0.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)			0.01	0.01	0.01
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.03	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)			0.03	0.02	0.02
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)			0.01	0.01	0.01
Total Displacement (mm)	23.85	21.98	20.95	Total Displacement (mm)			23.09	21.22	20.19				
Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.13	0.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)			0.01	0.03	0.01				
Max. Shear stress (ton/m ²)	0.05	0.04	0.04	Inc. Shear stress (ton/m ²)			0.04	0.03	0.03				
Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)			0.01	0.01	0.01				

พิจารณาตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อเจาะตึ้งแนวราบ (HDD)โดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ HDD โดยมีเพียงขนาดเดียวคือ 16 ซม. แถวที่ 3 เป็นความยาวเสาเข็มกลุ่มในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็มกลุ่ม แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางเสาเข็มกลุ่มเป็นระยะ 1 2 และ 3 ม. ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

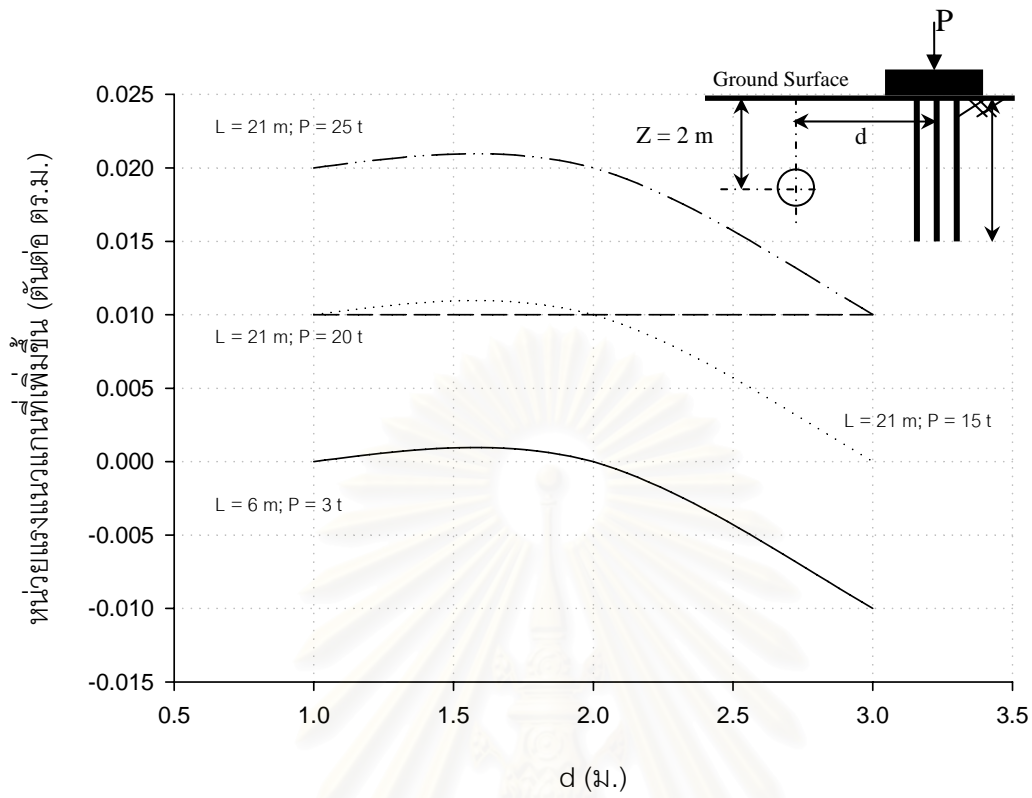
สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดจากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.74 ถึง 4.81 แกนในแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน เป็นระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตร ตามลำดับ โดยแยกกราฟตามความยาวเสาเข็มและน้ำหนักบรรทุก



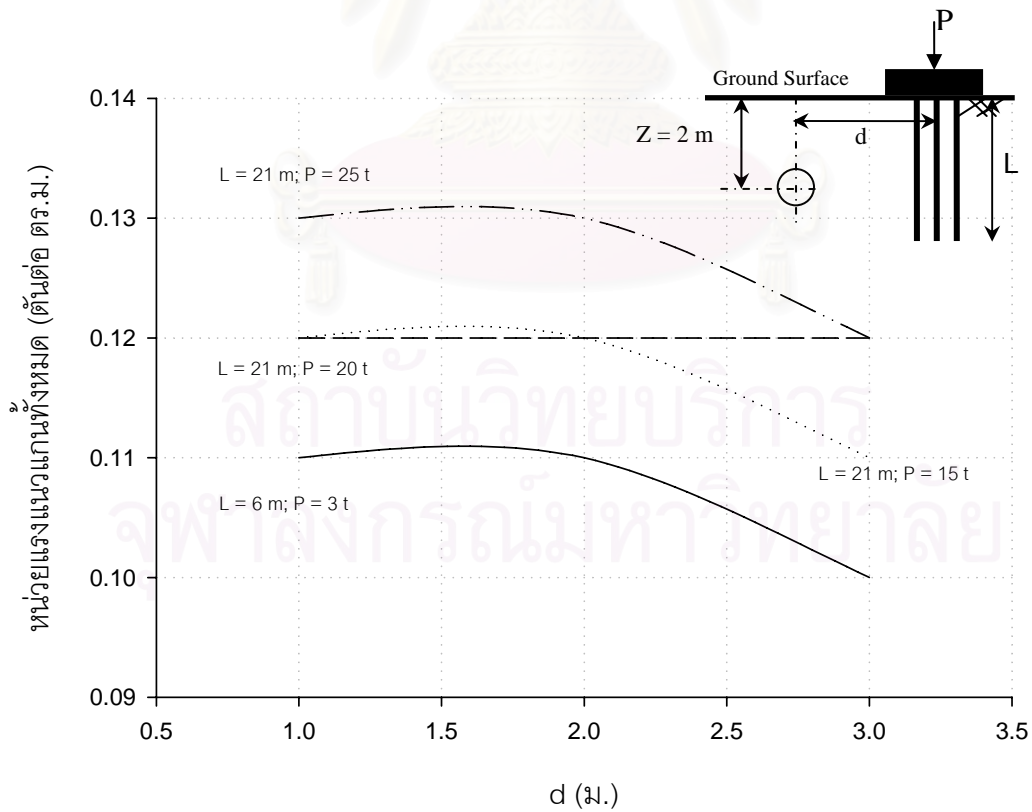
รูปที่ 4.74 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



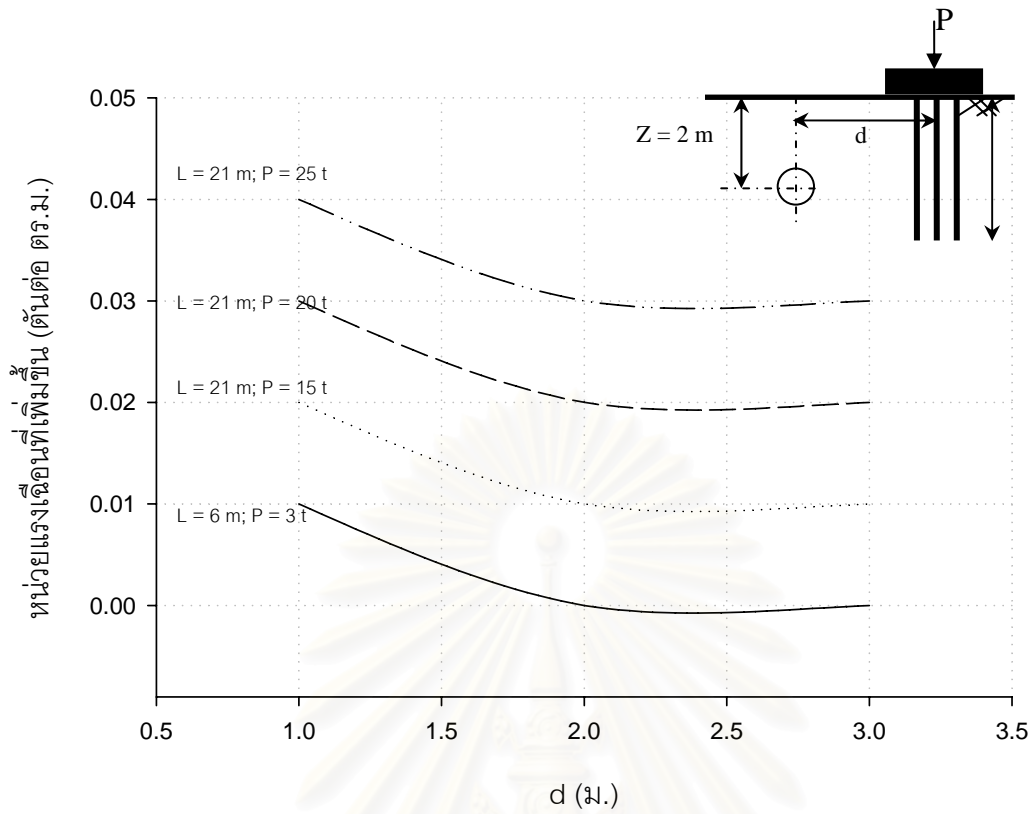
รูปที่ 4.75 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



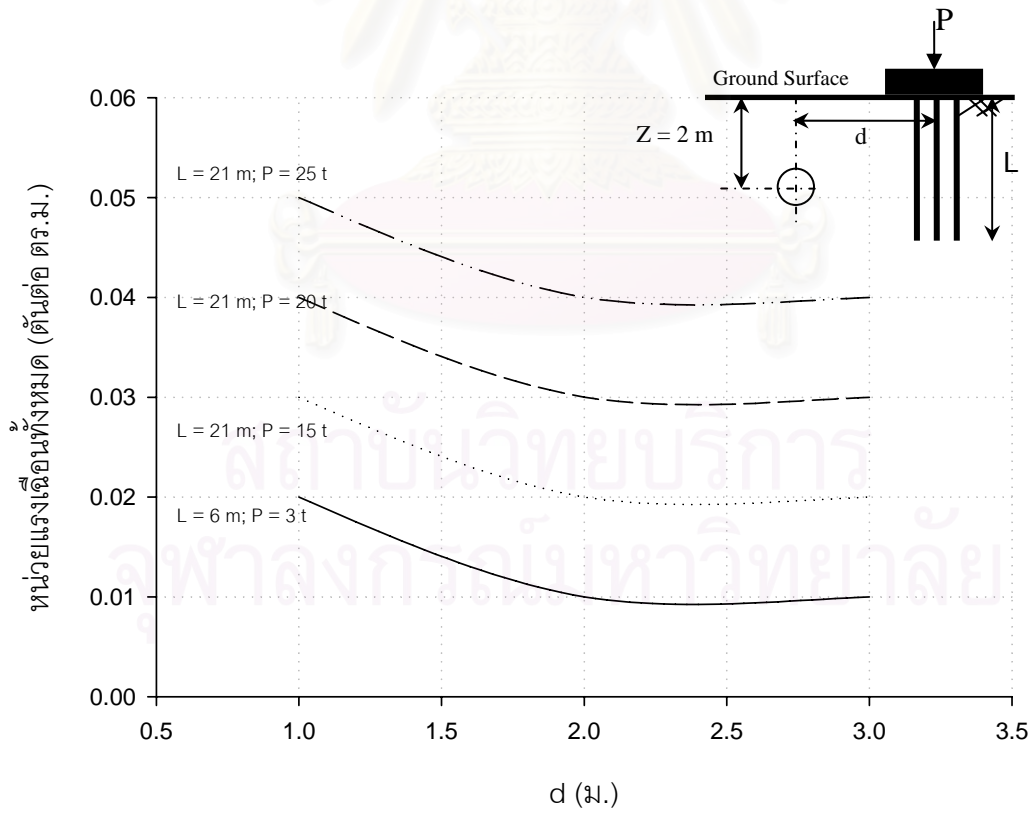
รูปที่ 4.76 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



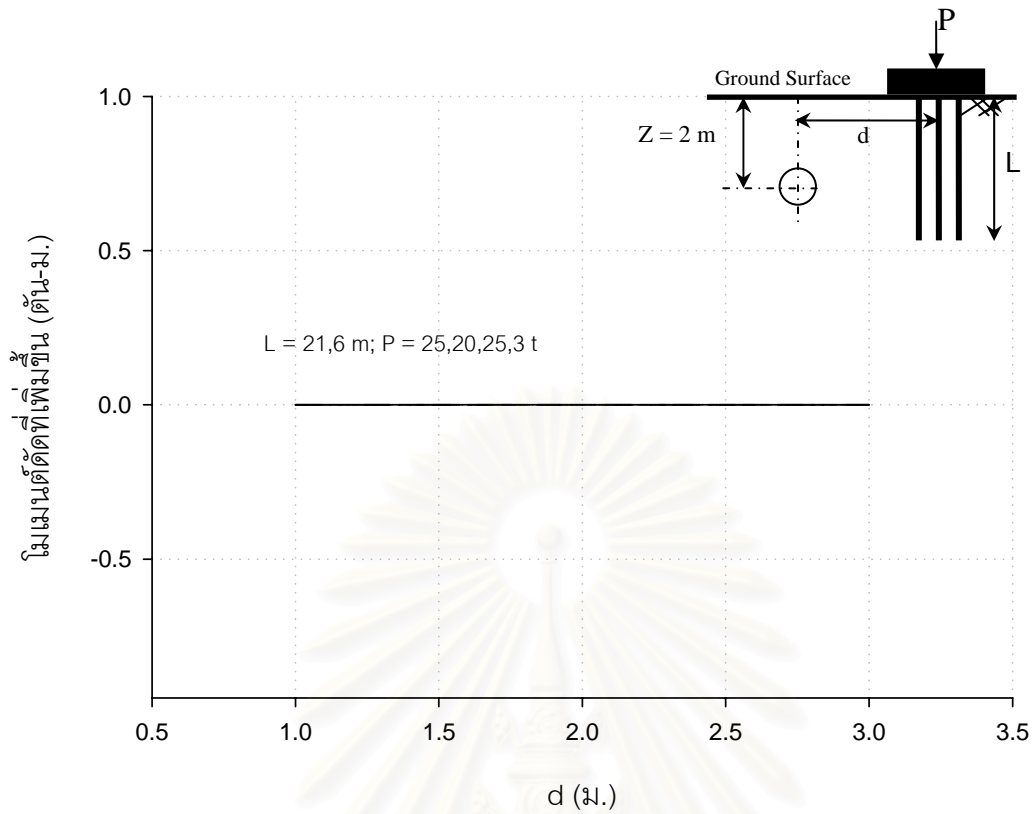
รูปที่ 4.77 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



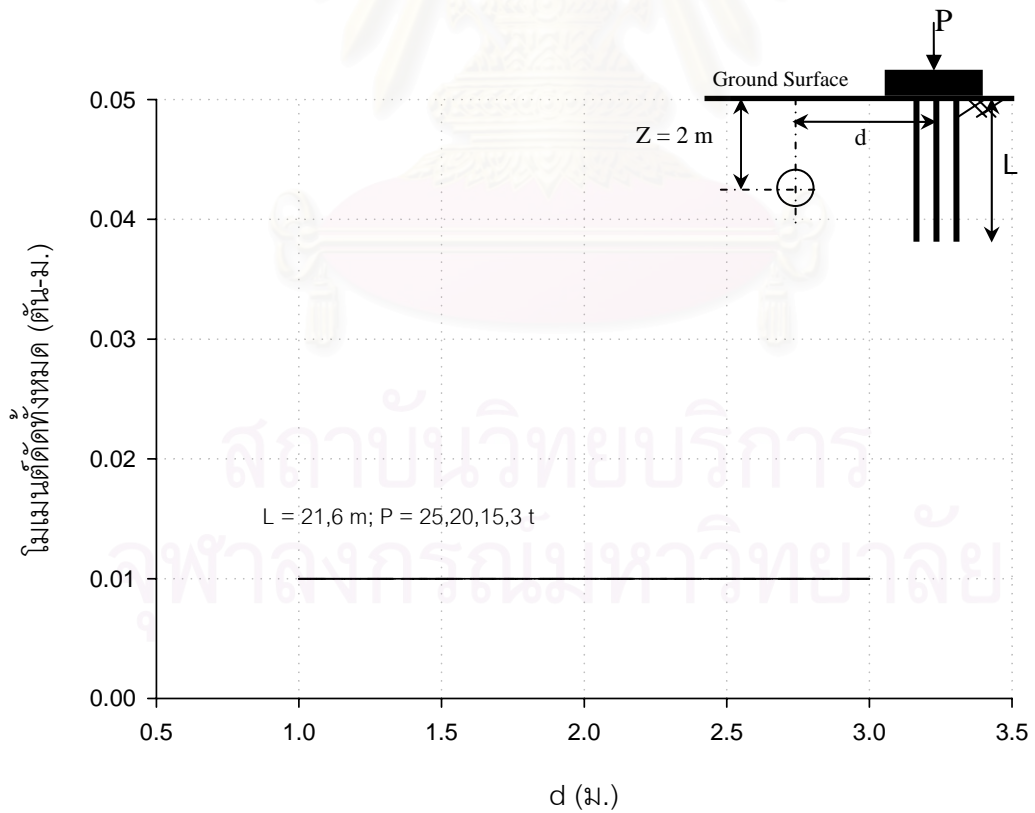
รูปที่ 4.78 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.79 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.80 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.81 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม

4.1.2.4 ผลกระทบที่มีต่อเจาะตึงแนวราบเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.8 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้น โดยแบ่งการวิเคราะห์แนวท่อเป็น 2 แนว ได้แก่ แนวด้านข้าง และ แนว ด้านล่าง อีกทั้งกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียงเป็น 3 ขนาด ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 ม. ตามลำดับ โดยที่ระยะทางอุโมงค์ข้างเคียงกำหนดเป็น 2 3 และ 4 เท่าของอุโมงค์ข้างเคียง ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อเจาะตึงแนวราบ

แถวที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Diameter (m)	Type	Adjacent tunnel diameter (m)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure		
				2	3	4		2	3	4
				Total Displacement (mm)	4.11	3.53		2.91	Total Displacement (mm)	3.22
Max. Axial stress (ton/m ²)	0.24	0.25	0.25	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.13	0.13			
Max. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.04	0.04	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.02			
Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00			
HDD	Side	0.5	Total Displacement (mm)	11.54	9.41	5.57	Total Displacement (mm)	10.65	8.52	4.68
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.25	0.25	0.25	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.13	0.12
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.05	0.05	0.05	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.02
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	
		1	Total Displacement (mm)	24.53	19.44	15.01	Total Displacement (mm)	23.64	18.55	14.12
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.25	0.25	0.25	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.13	0.13
	Max. Shear stress (ton/m ²)		0.05	0.05	0.05	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.03	
	2	Total Displacement (mm)	0.01	0.01	0.01	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	
		Max. Axial stress (ton/m ²)	3.48	3.17	2.95	Total Displacement (mm)	2.59	2.28	2.06	
Max. Shear stress (ton/m ²)		0.12	1.12	2.12	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	0.00	0.00		
Under	0.5	Total Displacement (mm)	0.02	0.02	0.02	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	0.00	
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	
		Max. Axial stress (ton/m ²)	7.48	6.41	5.57	Total Displacement (mm)	6.59	5.52	4.68	
	1	Total Displacement (mm)	0.12	1.12	2.12	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	-0.01	0.00	
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.02	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.01	-0.01	0.00	
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	
	2	Total Displacement (mm)	17.60	12.58	8.44	Total Displacement (mm)	16.71	11.69	7.55	
		Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	1.12	2.12	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	0.00	0.00	
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.02	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.01	0.00	0.00	
Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00			

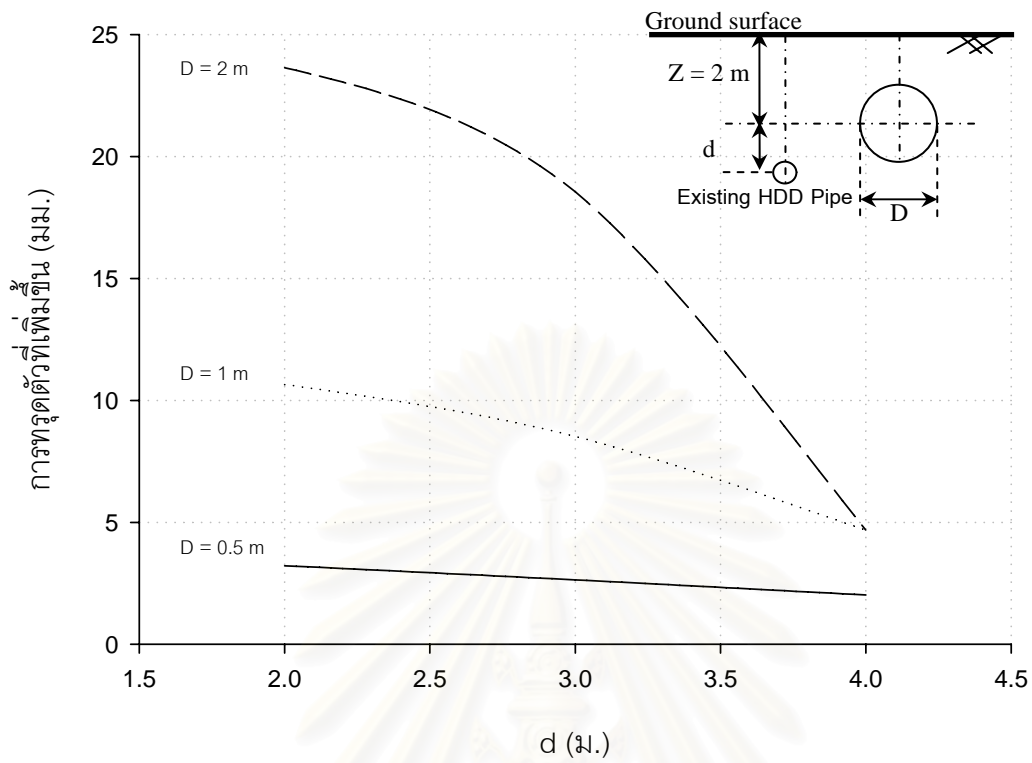
พิจารณาตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อเจาะตึงแนวราบ (HDD) โดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ HDD โดยมีเพียงขนาดเดียวคือ 16 ซม. แถวที่ 3 เป็นทิศทางการวางตัวของอุโมงค์สาธารณูปโภคในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินซึ่งมี 3 ทิศทางได้แก่ วางด้านบน ด้านข้างและด้านล่างของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง โดยในการคำนวณกำหนดไว้ 3 ขนาด ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 เท่าของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางเสาเข็มกลุ่มเป็นระยะ 2 3 และ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่

10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

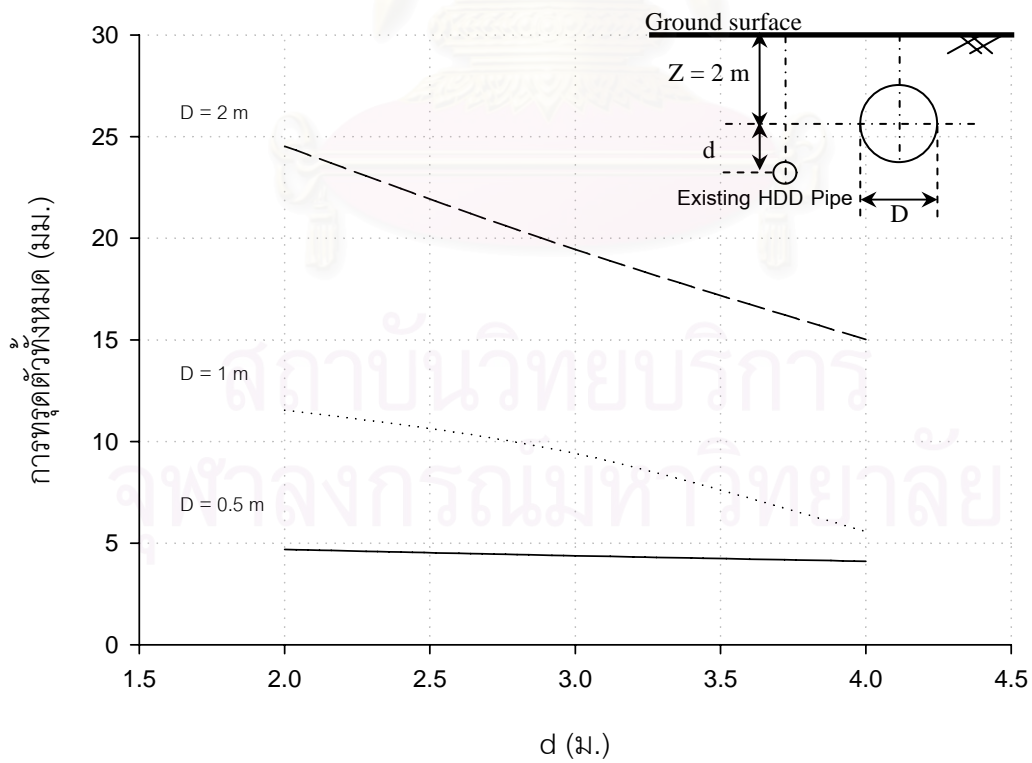
สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด จากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.82 ถึง 4.87 แกนในแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกน ในแนวนอน เป็นระยะห่างระหว่าง อุโมงค์ข้างเคียงกับท่อเจาะตึ้งแนวราบเป็นหน่วยเมตร โดยแยก กราฟตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออุโมงค์ข้างเคียง ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 ม.



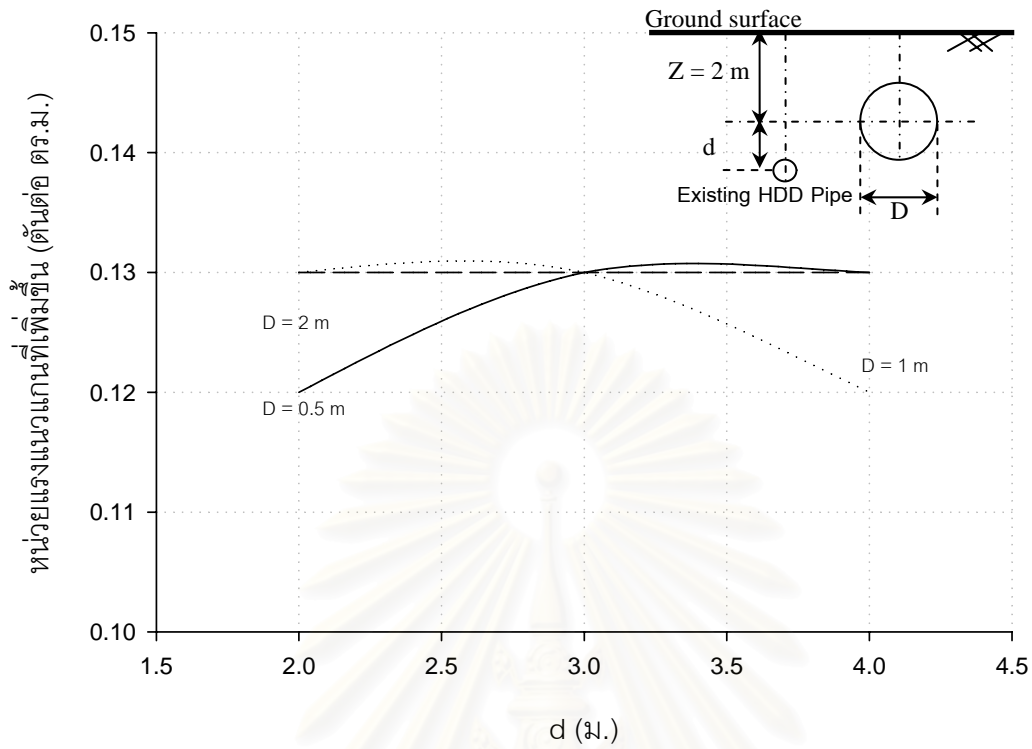
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



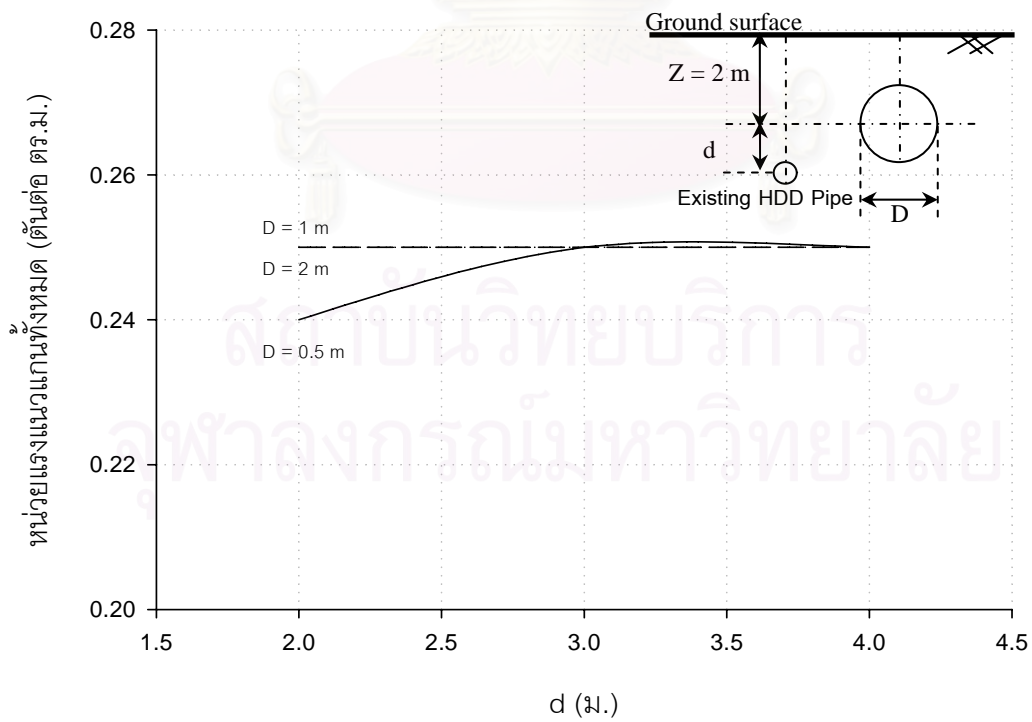
รูปที่ 4.82 การท่อดูตัวที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะดึงแนวราบจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงที่วางตัวด้านข้าง



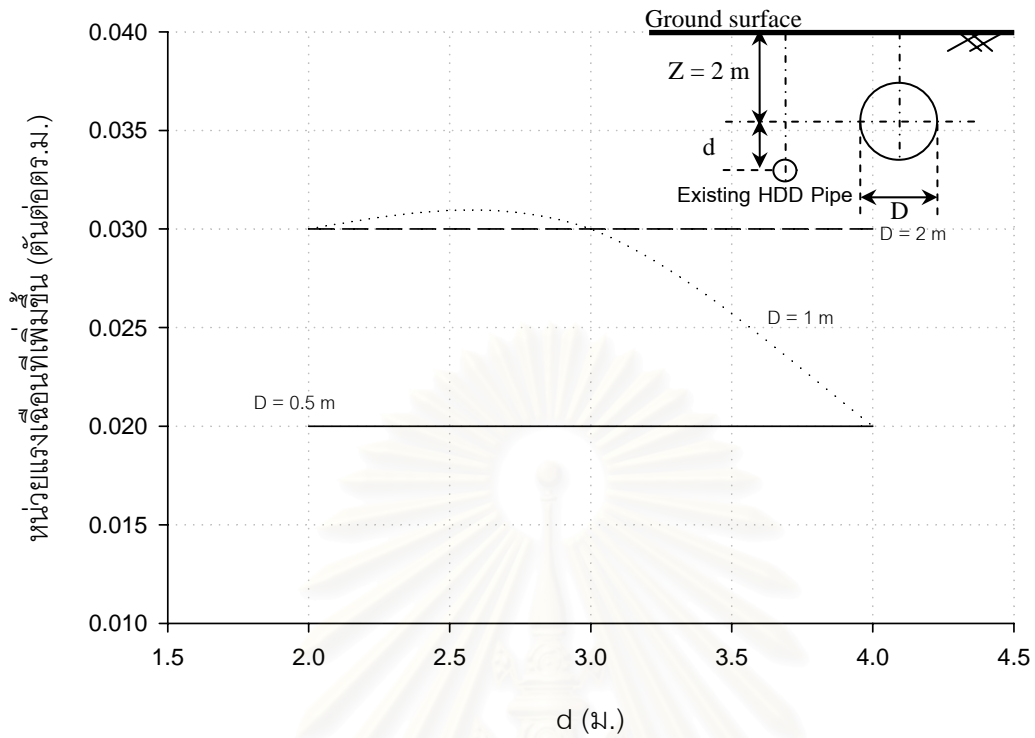
รูปที่ 4.83 การท่อดูตัวทั้งหมดต่อเจาะดึงแนวราบจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงที่วางตัวด้านข้าง



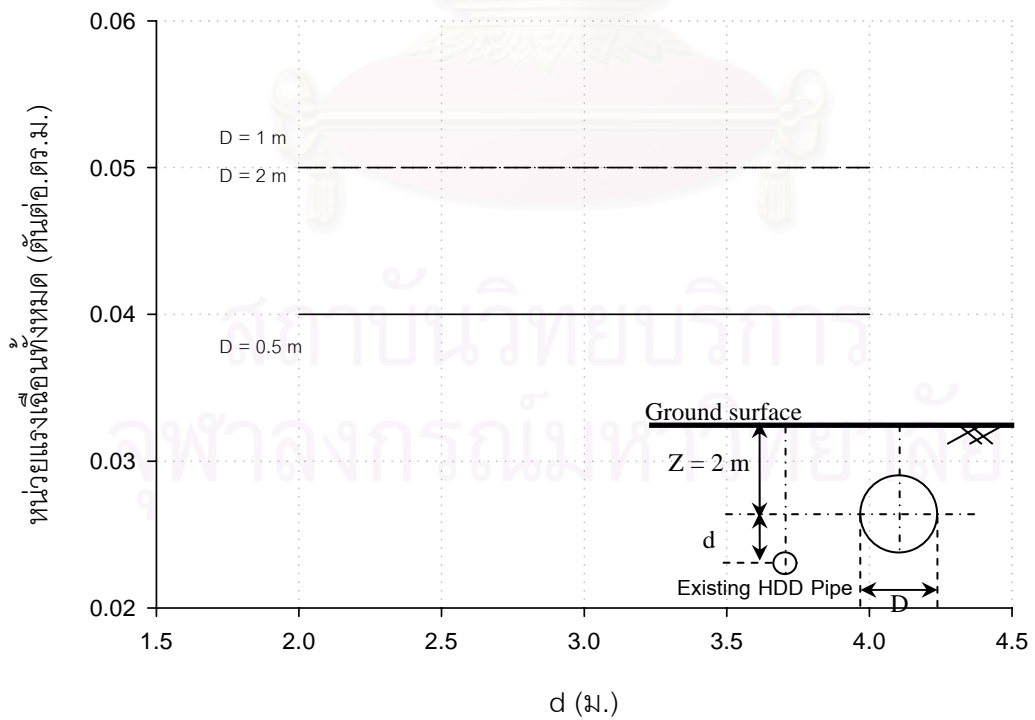
รูปที่ 4.84 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงที่วางตัวด้านข้าง



รูปที่ 4.85 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงที่วางตัวด้านข้าง



รูปที่ 4.86 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงที่วางตัวด้านข้าง



รูปที่ 4.87 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงที่วางตัวด้านข้าง

4.1.3 ท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน (Open Cut) มีทั้งหมด 6 ประเภทโดยแยกตามจำนวนท่อ แนวนอนตั้งแต่ 1 ท่อ ถึง 6 ท่อตั้งที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 โดยความลึกในแต่ละขนาดที่ใช้ในการ วิเคราะห์เท่ากับ 1.5 ม. เนื่องจากเป็นความลึกที่มาตราฐานในการทำงานเพราะไม่จำเป็นต้องใช้เข็มพืด และค้ำยันในการทำงาน ซึ่งลักษณะการนำเสนอได้แสดงในหัวข้อที่ 4.1.3.1 ผลกระทบของท่อระบบขุด เปิดหน้าดินเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน 4.1.3.2 ผลกระทบของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องเข็มพืด 4.1.3.3 ผลกระทบของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม และ 4.1.3.4 ผลกระทบของท่อ ระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากอุโมงค์สาธารณูปโภค

4.1.3.1 ผลกระทบที่มีต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดินข้างเคียง โดย รูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการ วิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.9 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้น ความกว้างขุดข้างเคียง 2 3 และ 4 ม. ความลึกขุด 1 2 และ 3 ม. ระยะทางจากศูนย์กลางขุดถึงศูนย์กลางท่อ 3 4 และ 5 ม. ตามลำดับ สำหรับในขนาดอื่นๆแสดงใน ภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.9 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน

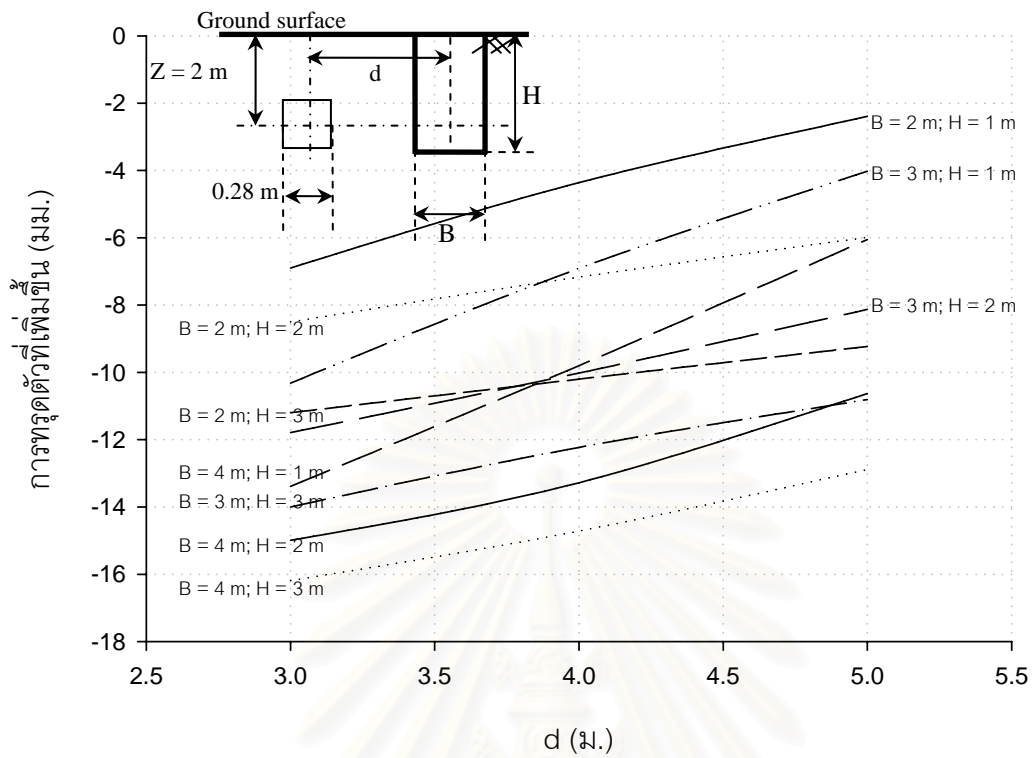
แถวที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

DB	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					3	4	5		3	4	5
	1	2	1	Total Displacement (mm)	-12.50	-9.96	-7.99	Total Displacement (mm)	-6.90	-4.36	-2.39
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.95	8.89	9.95	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.92	3.86	4.91
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.92	8.02	10.18	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.95	0.06	2.21
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.10	1.16	1.82	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.89	-0.05	0.61	
			Total Displacement (mm)	-14.10	-12.77	-11.59	Total Displacement (mm)	-8.50	-7.17	-5.99	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	13.97	14.54	14.79	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.94	9.50	9.76	
		2	Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.77	9.49	12.21	Max. Vertical stress (ton/m ²)	5.80	1.52	4.24	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	3.55	1.63	2.59	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.34	0.42	1.38	
			Total Displacement (mm)	-16.80	-15.80	-14.83	Total Displacement (mm)	-11.20	-10.20	-9.23	
		3	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	21.35	19.09	18.58	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	16.31	14.06	13.54	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	19.26	12.93	14.23	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.29	4.97	6.27	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	5.00	2.08	3.26	Max. Shear stress (ton.m ²)	3.79	0.87	2.06	
	3	3	1	Total Displacement (mm)	-15.92	-12.51	-9.62	Total Displacement (mm)	-10.32	-6.91	-4.02
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.10	10.21	10.68	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.06	5.17	5.65
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.00	12.04	8.76	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.03	4.07	0.79
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.55	2.43	1.24	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.34	1.22	0.04	
			Total Displacement (mm)	-17.39	-15.62	-13.73	Total Displacement (mm)	-11.79	-10.02	-8.13	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	14.64	16.50	15.36	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.61	11.46	10.32	
		2	Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.00	16.48	10.11	Max. Vertical stress (ton/m ²)	4.03	8.52	2.15	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	3.31	4.09	1.75	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.11	2.89	0.54	
			Total Displacement (mm)	-19.60	-17.83	-16.41	Total Displacement (mm)	-14.00	-12.23	-10.81	
		3	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	22.97	18.65	16.10	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	17.93	13.61	11.06	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	16.98	18.03	11.38	Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.01	10.07	3.41	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	4.47	4.57	1.96	Max. Shear stress (ton.m ²)	3.26	3.36	0.75	
4	4	1	Total Displacement (mm)	-18.99	-15.40	-11.65	Total Displacement (mm)	-13.39	-9.80	-6.05	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.90	7.27	9.48	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-1.14	2.24	4.45	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	5.66	9.53	8.00	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.31	1.56	0.03	
		Max. Shear stress (ton.m ²)	1.43	2.01	1.50	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.22	0.80	0.29		
		Total Displacement (mm)	-20.59	-18.88	-16.23	Total Displacement (mm)	-14.99	-13.28	-10.63		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.70	12.28	13.15	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.66	7.24	8.12		
	2	Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.60	12.32	10.21	Max. Vertical stress (ton/m ²)	4.63	4.35	2.24		
		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.68	3.47	2.12	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.47	2.26	0.91		
		Total Displacement (mm)	-21.79	-20.32	-18.49	Total Displacement (mm)	-16.19	-14.72	-12.89		
	3	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.00	17.24	15.82	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.96	12.20	10.78		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.66	16.00	11.87	Max. Vertical stress (ton/m ²)	3.69	8.03	3.90		
		Max. Shear stress (ton.m ²)	1.58	4.52	2.46	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.37	3.31	1.25		

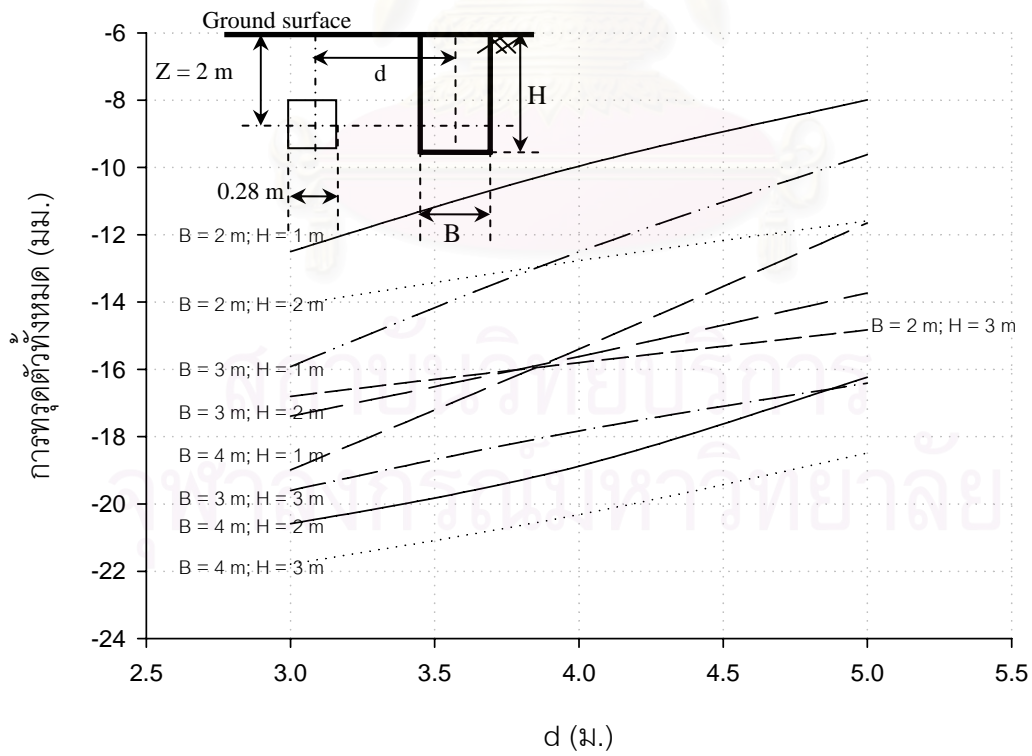
พิจารณาตารางที่ 4.9 ซึ่งเป็นโครงสร้างต่อระบบขุดเปิดหน้าดินโดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นชนิดของต่อระบบขุดเปิดหน้าดิน โดยที่ในการคำนวณแบบออกเป็น 6 ชนิด ตามจำนวนต่อแวนอน แถวที่ 3 เป็นความกว้างของบ่อขุดในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างที่อ้อย สายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นความลึกของบ่อขุด แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางต่อถึงศูนย์กลางบ่อขุดเป็นระยะ 3 4 และ 5 ม. ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากตารางสามารถจัดทำในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งจะแทนค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน หรือโมเมนต์ดัด โดยค่าดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปของผลรวมทั้งหมด และรูปของผลที่เพิ่มขึ้น สำหรับแกนนอน จะแทนระยะห่างของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตร ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลด้วยการเปลี่ยนค่าความกว้างและความลึกของการขุดเปิดหน้าดินสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการหลุดตัวกับระยะห่างของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงดังแสดงในรูปที่ 4.88 และ 4.89 จากกราฟดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า แนวโน้มของเส้นกราฟถูกควบคุมด้วยความกว้างของการขุดเปิดหน้าดินเป็นหลัก เนื่องจากอิทธิพลของความกว้างทำให้เกิดหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวมากกว่าอิทธิพลจากความลึกของการขุดเปิดหน้าดิน ซึ่งสอดคล้องกับสมการอิลาสติกของ Skopek (1961) และ Groth and Chapman (1969)

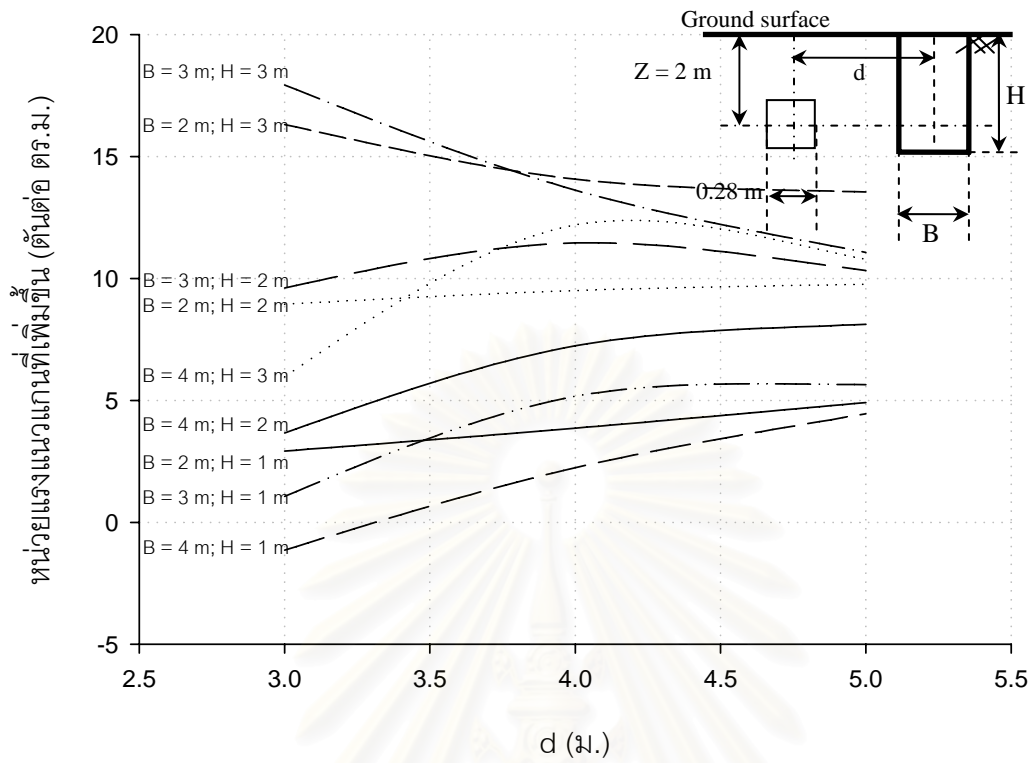
สำหรับค่าหน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดนั้นกราฟจะสัมพันธ์กันตามความกว้างของการขุดเปิดหน้าดินในแต่ละชุด โดยที่ความกว้างของการขุดเปิดหน้าดินขนาด 2 ม. จะเกิดหน่วยแรงในแนวราบ (Horizontal Stress) มากที่สุดที่ระยะห่าง 3 ม. และจะเกิดหน่วยแรงในแนวราบน้อยที่สุดที่ระยะห่าง 4 ม. ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าของหน่วยแรงรวม (Total Stress) ที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงที่ระยะห่าง 4 ม. แล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ระยะห่าง 5 ม. ในขณะที่เดียวกันที่ความกว้างของการขุดเปิดหน้าดินขนาด 3 ม. และ 4 ม. ค่าหน่วยแรงรวมในแนวราบจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะห่าง 4 ม. แล้วจะมีค่าลดลงที่ระยะห่าง 5 ม. ดังนั้นกราฟของชุดความกว้างการขุดเปิดหน้าดินขนาด 2 ม. จึงตัดกับกราฟของชุดความกว้างการขุดเปิดหน้าดินขนาด 3 และ 4 ม. ซึ่งในทำนองเดียวกันสำหรับทุกรูปแบบอื่นๆ กราฟความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวข้างต้นจะรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก



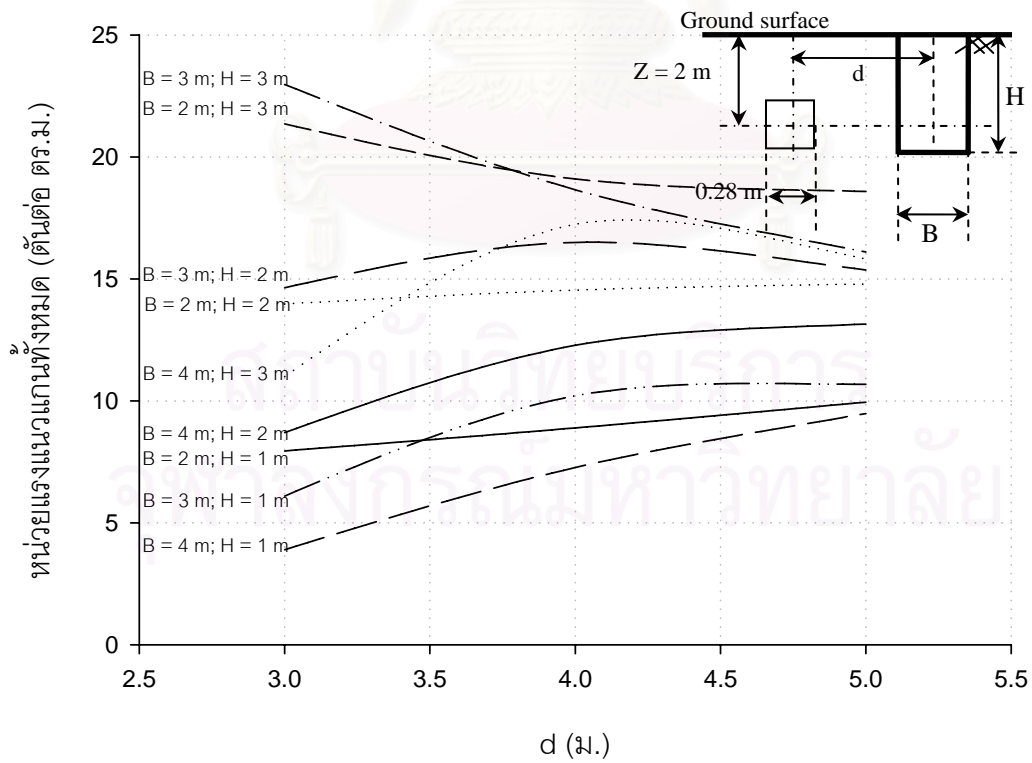
รูปที่ 4.88 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



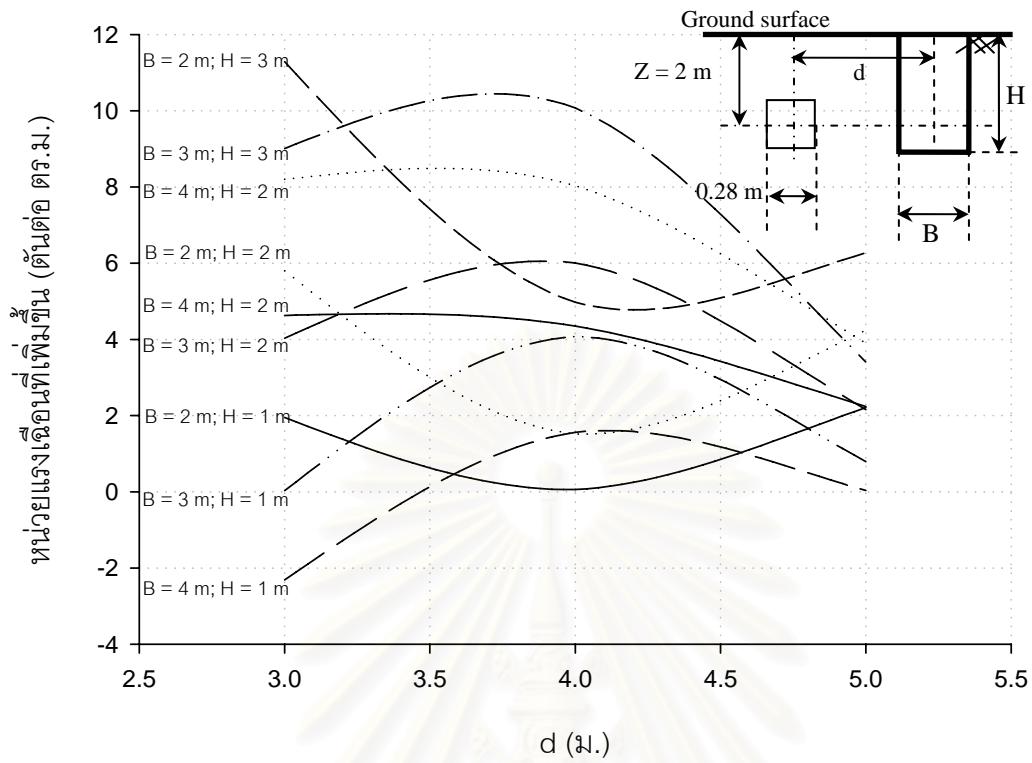
รูปที่ 4.89 การทรุดตัวทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



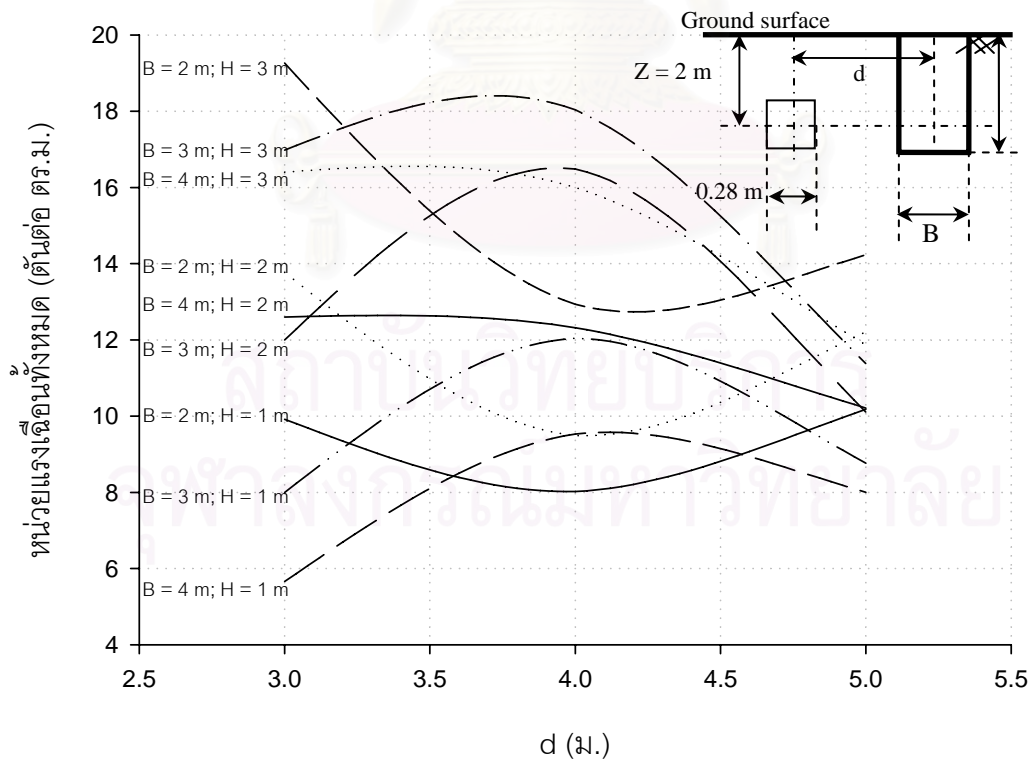
รูปที่ 4.90 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการขุดเปิดหน้าดิน



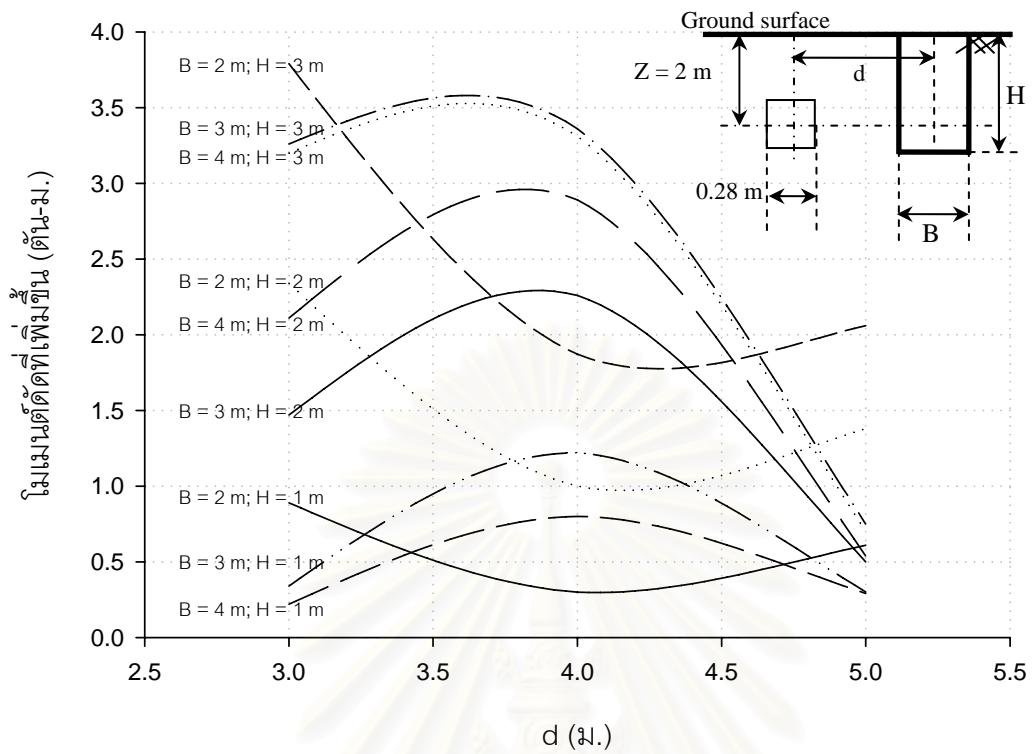
รูปที่ 4.91 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการขุดเปิดหน้าดิน



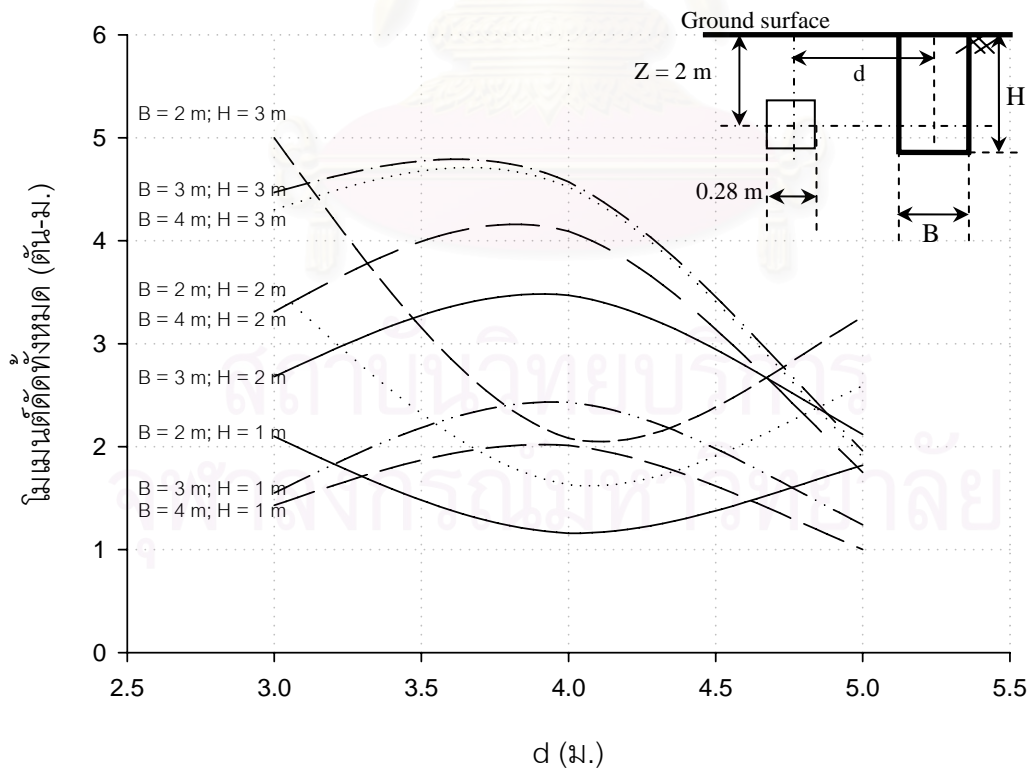
รูปที่ 4.92 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.93 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.94 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 4.95 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน

4.1.3.2 ผลกระทบที่มีต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มพืดข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.10 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้น โดยความลึกของเข็มพืดใช้ที่ระดับ 15.00 ม. ระยะห่างจากเข็มพืดเท่ากับ 2 3 และ 4 ม.ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.10

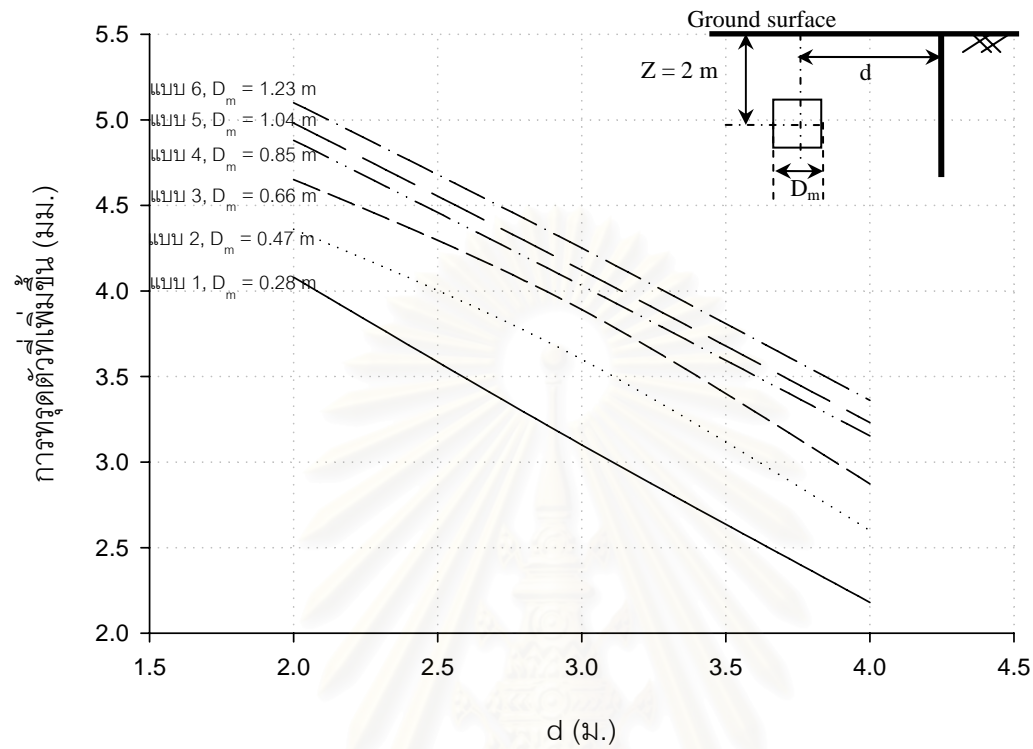
ตารางที่ 4.10 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากปักเข็มพืดที่มีต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน

แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Diameter (m)	Sheet Pile Tip (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)			
				2	3	4		2	3	4	
open cut	1.0	15	Total Displacement (mm)	-1.19	-2.17	-3.10	Total Displacement (mm)	4.08	3.10	2.18	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	17.66	8.88	6.75	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.61	2.83	0.70	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	19.23	13.59	12.54	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.02	5.38	4.33	
	2.0	15	Max. Shear stress (ton/m ²)	5.09	1.95	2.03	Max. Shear stress (ton/m ²)	3.87	0.73	0.81	
			Total Displacement (mm)	4.88	4.42	3.54	Total Displacement (mm)	4.36	3.90	3.02	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.52	3.39	2.36	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.18	1.06	0.03	
	3.0	15	Max. Shear stress (ton/m ²)	19.00	18.23	17.51	Max. Shear stress (ton/m ²)	2.20	1.43	0.72	
			Max. Bending moment (ton.m ²)	3.54	3.85	2.55	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.42	0.73	-0.58	
			Total Displacement (mm)	5.65	4.89	3.87	Total Displacement (mm)	4.65	3.89	2.872	
	4.0	15	Max. Axial stress (ton/m ²)	5.22	4.17	3.52	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.38	0.33	-0.32	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	17.10	16.30	14.91	Max. Shear stress (ton/m ²)	2.20	1.40	0.02	
			Max. Bending moment (ton.m ²)	3.86	3.48	2.51	Max. Bending moment (ton.m ²)	1.00	0.62	-0.35	
	5.0	15	Total Displacement (mm)	6.23	5.39	4.51	Total Displacement (mm)	4.88	4.03	3.152	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	6.17	3.35	3.68	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.82	-1.00	-0.67	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	13.90	14.59	13.07	Max. Shear stress (ton/m ²)	1.03	1.72	0.20	
	6.0	15	Max. Bending moment (ton.m ²)	2.66	2.31	1.96	Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.03	-0.39	-0.74	
			Total Displacement (mm)	5.90	5.04	4.15	Total Displacement (mm)	4.98	4.12	3.23	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	7.13	6.23	4.63	Max. Axial stress (ton/m ²)	3.26	2.36	0.76	
	7.0	15	Max. Shear stress (ton/m ²)	9.65	9.75	9.47	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.60	0.70	0.42	
			Max. Bending moment (ton.m ²)	2.13	1.99	1.56	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.79	0.65	0.22	
			Total Displacement (mm)	6.23	5.38	4.49	Total Displacement (mm)	5.10	4.25	3.36	
	8.0	15	Max. Axial stress (ton/m ²)	6.68	4.98	4.93	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.68	-0.02	-0.07	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	9.10	8.96	8.95	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.60	0.46	0.45	
			Max. Bending moment (ton.m ²)	2.43	2.44	2.09	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.50	0.50	0.15	

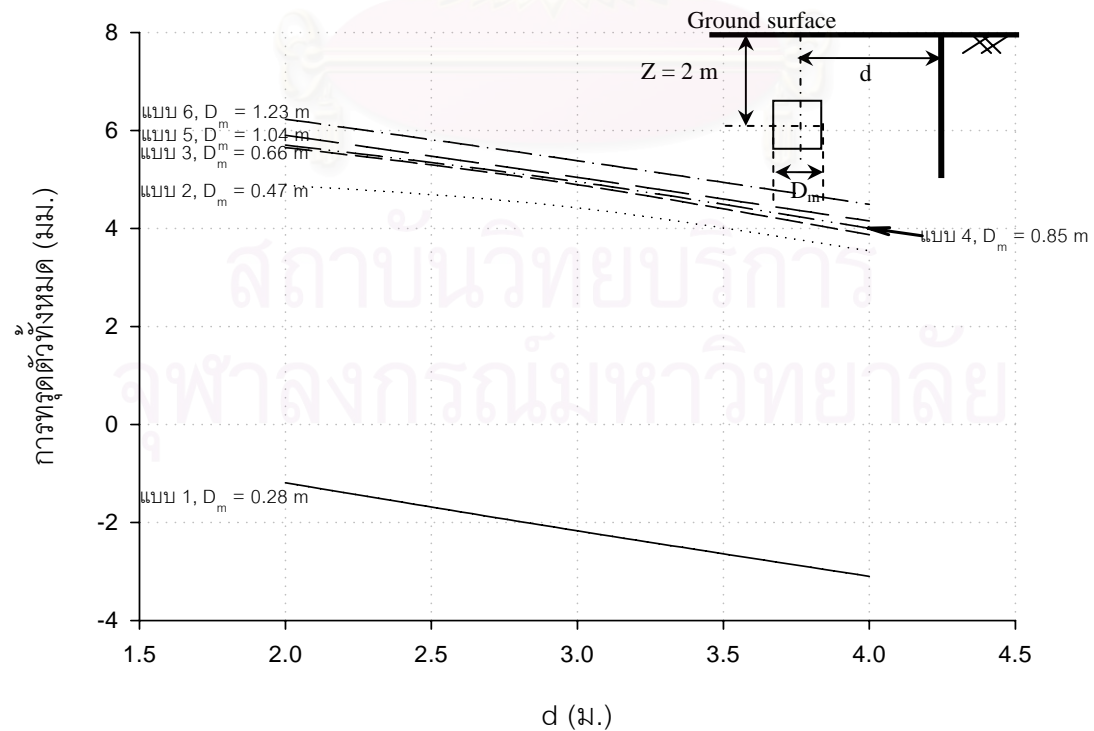
พิจารณาตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นชนิดของท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน โดยที่ในการคำนวณแบบออกเป็น 6 ชนิดตามจำนวนท่อแวนนอน แถวที่ 3 เป็นเป็นความยาวเข็มพืดที่ใช้คำนวณแถวที่ 4 เป็นแถวบรรยายถึงการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 5 6 และ 7 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางเข็มพืดเป็นระยะ 2 3 และ 4 ม. ตามลำดับ แถวที่ 8 แถวบรรยายถึงการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 9 10 และ 11 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิเคราะห์เฉพาะค่าการเคลื่อนตัวจากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.96 ถึง 4.103 แกนในแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน เป็น

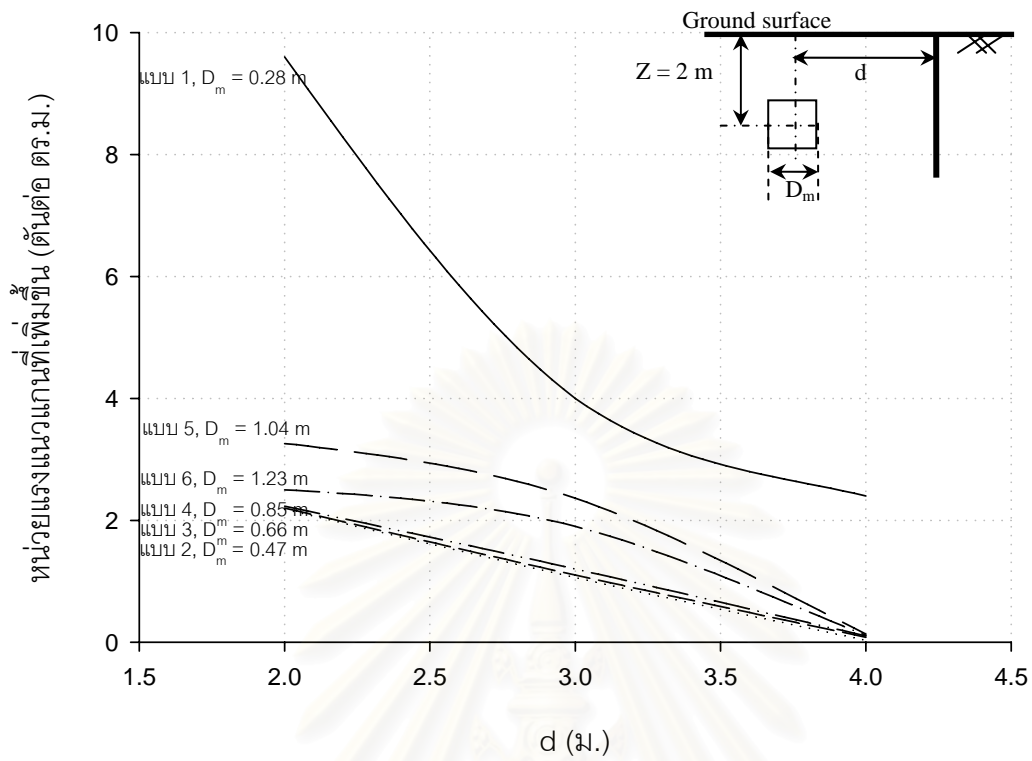
ระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตรโดยแยกกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบที่ระบบชุดเปิด
หน้าดินทั้ง 6 รูปแบบ



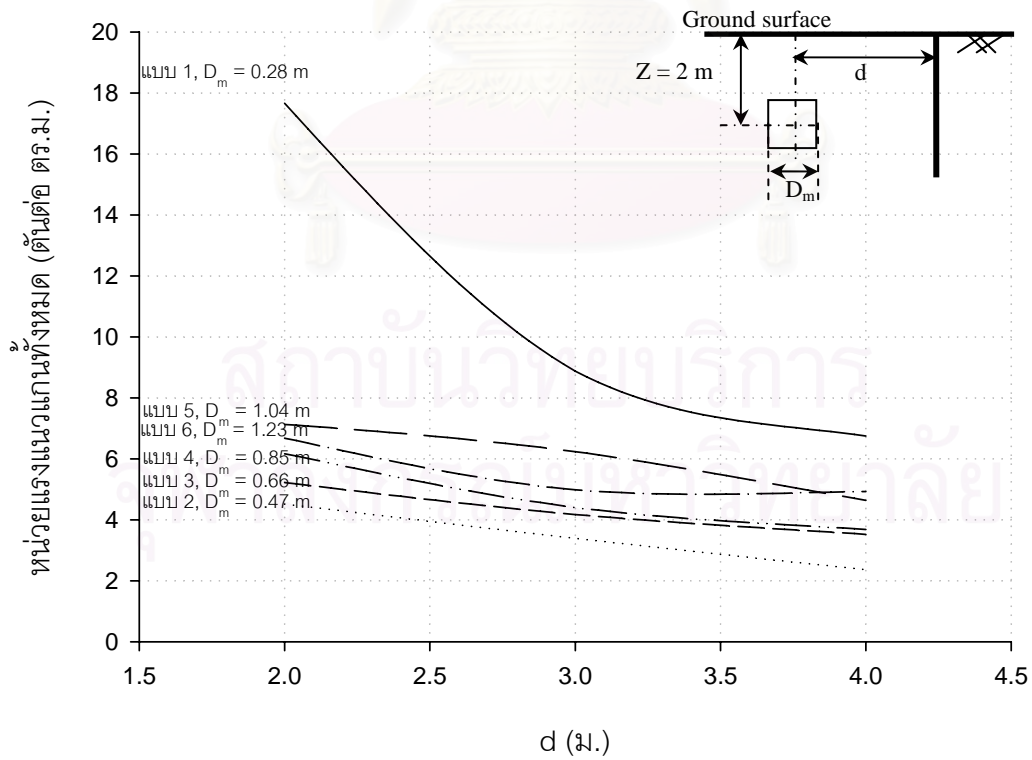
รูปที่ 4.96 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มพืด



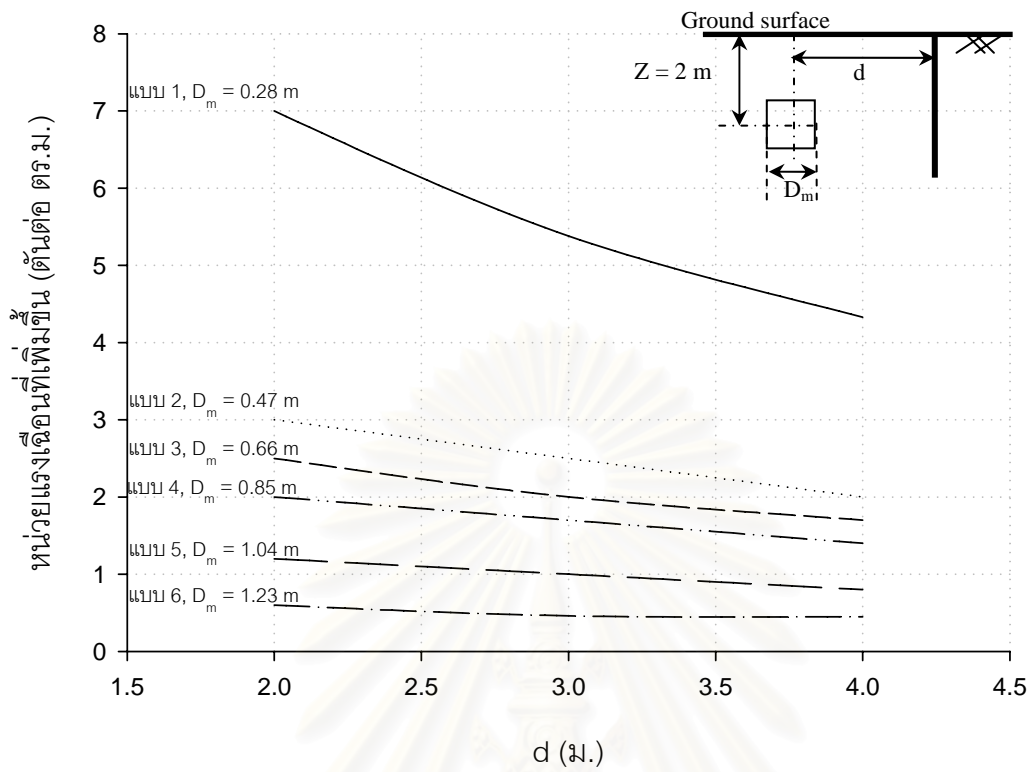
รูปที่ 4.97 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มพืด



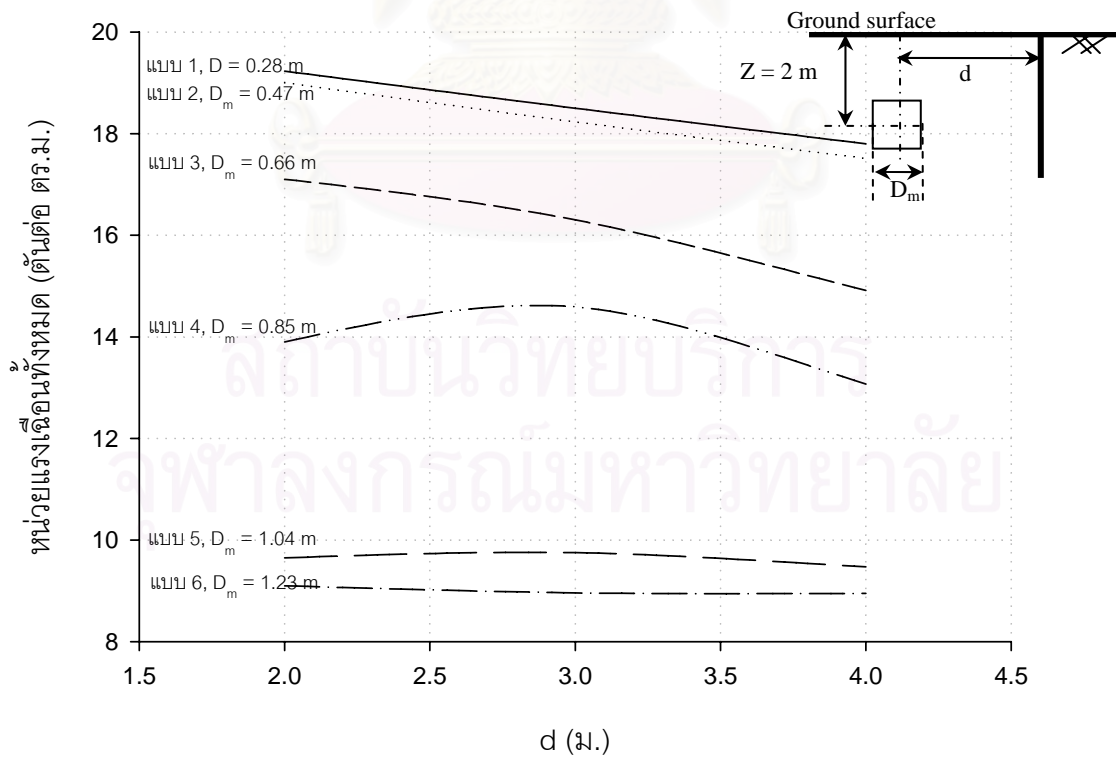
รูปที่ 4.98 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มพืด



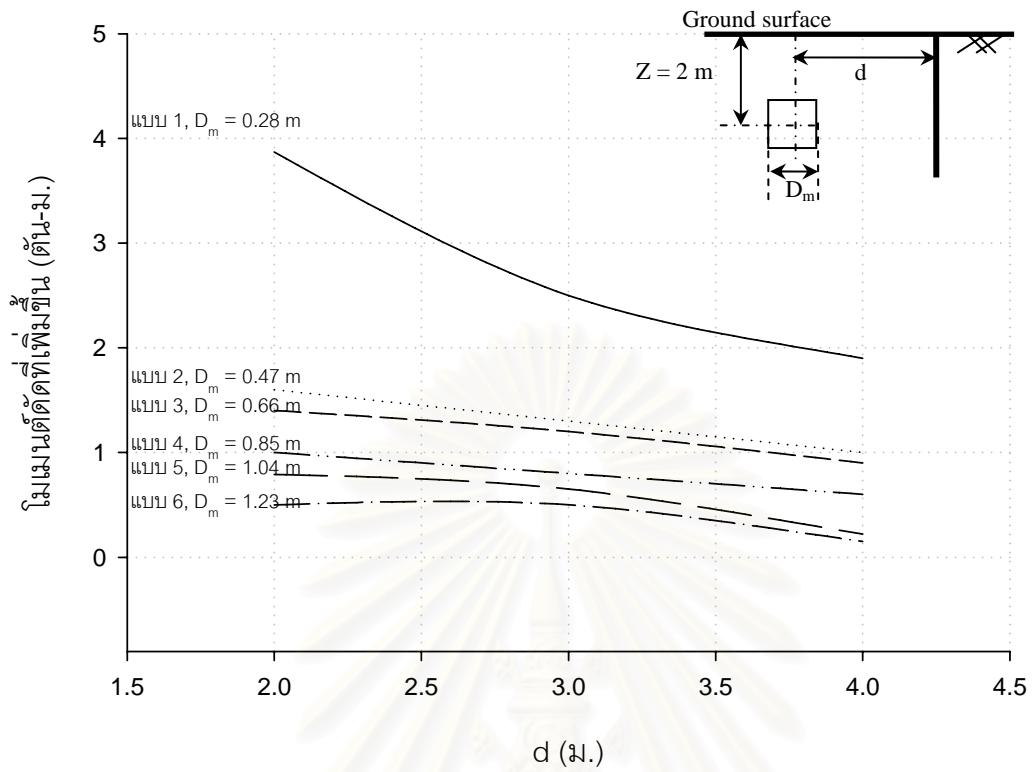
รูปที่ 4.99 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดของท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มพืด



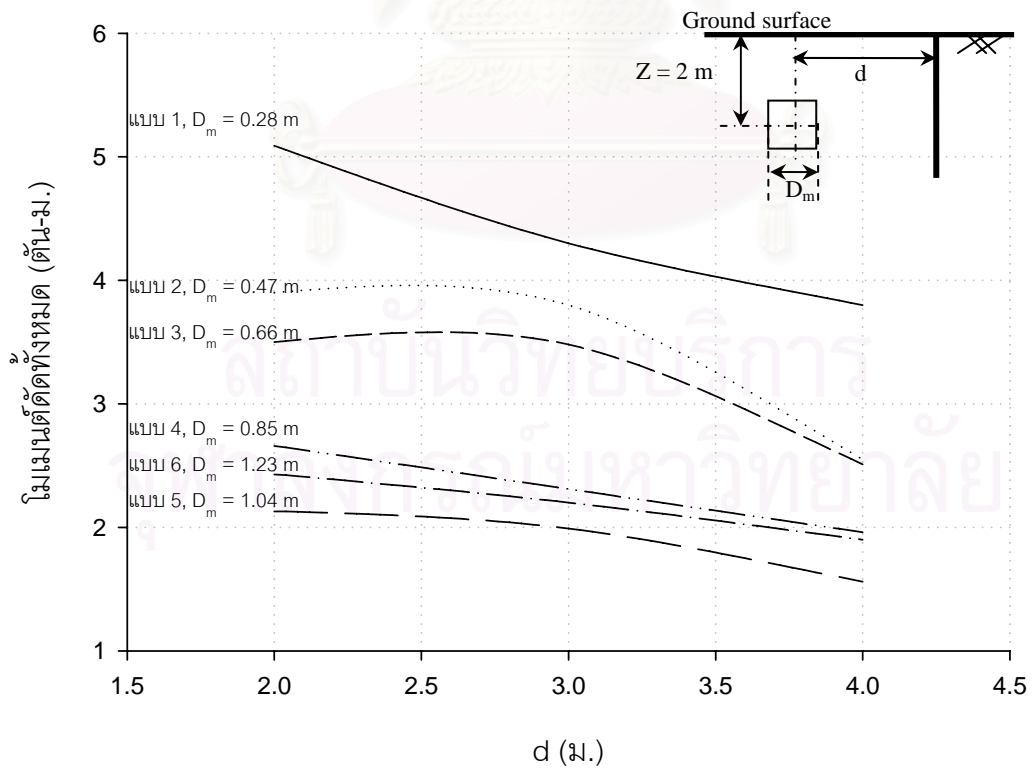
รูปที่ 4.100 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มฟัด



รูปที่ 4.101 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดของท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มฟัด



รูปที่ 4.102 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบ खुดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มพีต



รูปที่ 4.103 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อระบบ खुดเปิดหน้าดินเนื่องจากการปักเข็มพีต

4.1.3.3 ผลกระทบที่มีต่อท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดยตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.11 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้น โดยแยกเสาเข็มกลุ่มออกเป็นสองประเภทคือเสาเข็มสั้น และ เสาเข็มยาว โดยที่เสาเข็มสั้นใช้ความยาว 6.00 ม. ส่วนเสาเข็มยาวใช้ที่ระดับ 21.00 ม. สำหรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็ม เสาเข็มสั้นใช้ที่ 3 ตัน และเสาเข็มยาวใช้ที่ 15 20 และ 25 ตัน ระยะห่างจากสิ่งก่อสร้างใช้ที่ระยะ 2.5 5 และ 7.5 ม.ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.11

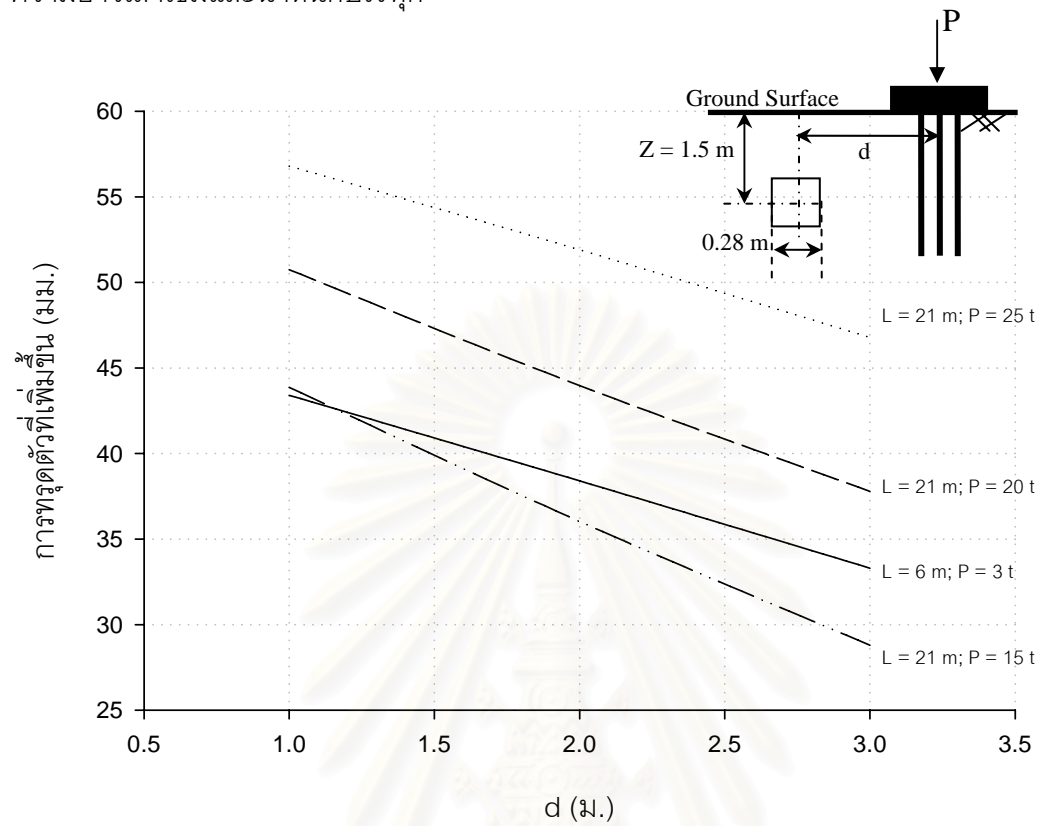
ตารางที่ 4.11 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน

แถวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
													Diameter (m)
Open Cut													
1													
6													
3													
				Total Displacement (mm)	43.40	38.40	33.30	Total Displacement (mm)	49.00	44.00	38.90		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.01	5.04	5.05	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.03	0.00	0.01		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	8.06	8.04	8.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.07	0.04		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.23	1.23	1.22	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.02	0.02		
15													
				Total Displacement (mm)	56.79	51.90	46.78	Total Displacement (mm)	62.39	57.50	52.38		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.05	5.08	5.10	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	0.04	0.06		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	8.07	8.01	7.94	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.04	-0.02		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.25	1.24	1.22	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.03	0.01		
21													
				Total Displacement (mm)	50.74	43.96	37.78	Total Displacement (mm)	56.34	49.56	43.38		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.07	5.08	5.11	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.04	0.07		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	8.11	8.03	7.95	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.07	-0.02		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.26	1.25	1.23	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.05	0.04	0.02		
25													
				Total Displacement (mm)	43.87	36.02	28.79	Total Displacement (mm)	49.47	41.62	34.39		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.10	5.09	5.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.05	0.08		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	8.16	8.06	7.96	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.10	-0.01		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.27	1.26	1.23	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	0.05	0.02		

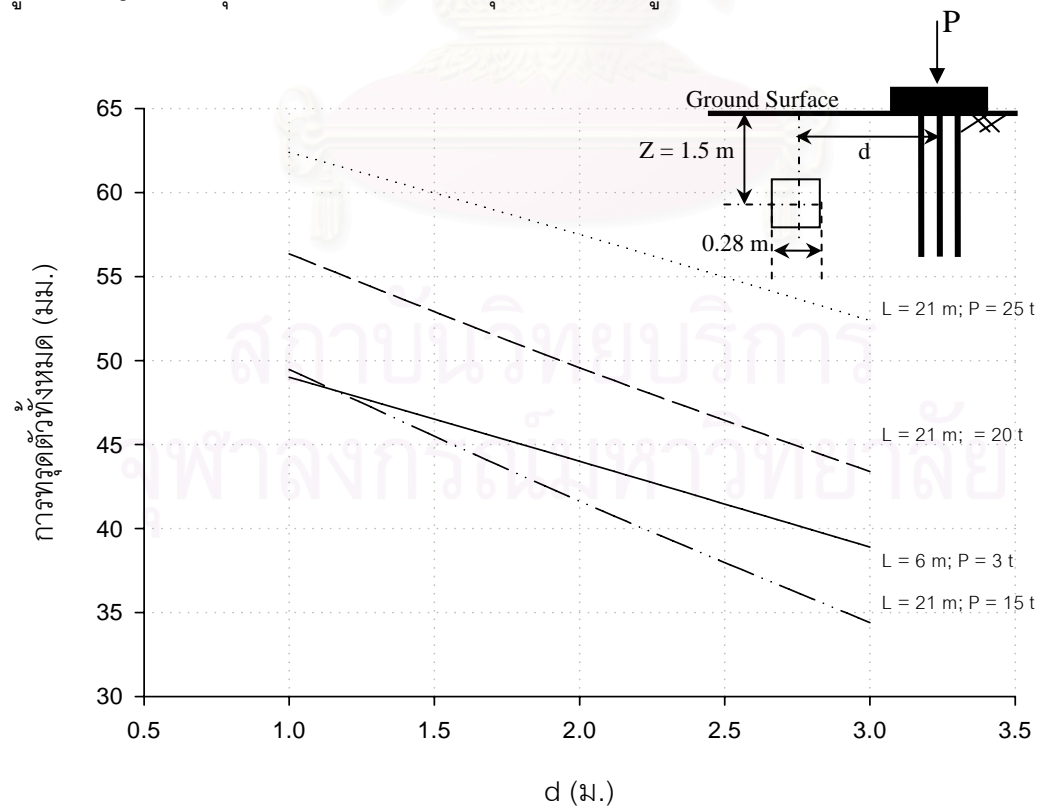
พิจารณาตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2.14 โดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นชนิดของท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน โดยที่ในการคำนวณแบบออกเป็น 6 ชนิด ตามจำนวนท่อแวนนอน สำหรับรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่ 1 แถวที่ 3 เป็นความยาวเสาเข็มกลุ่มในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็มกลุ่ม แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลางเสาเข็มกลุ่มเป็นระยะ 1 2 และ 3 ม. ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดจากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.104 ถึง 4.111 แกนในแนวตั้ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่

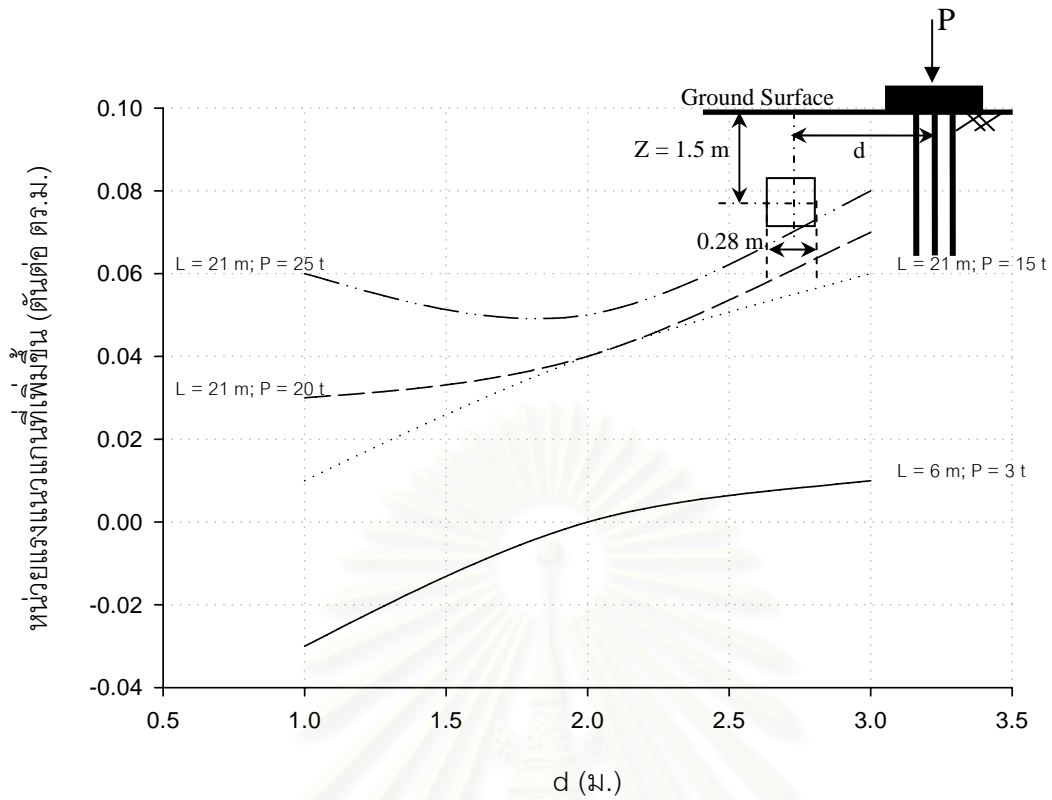
เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน ระยะห่างสิ่งก่อสร้างข้างเคียงในหน่วยเมตร ตามลำดับ โดยแยกกราฟตาม ความยาวเสาเข็มและน้ำหนักบรรทุก



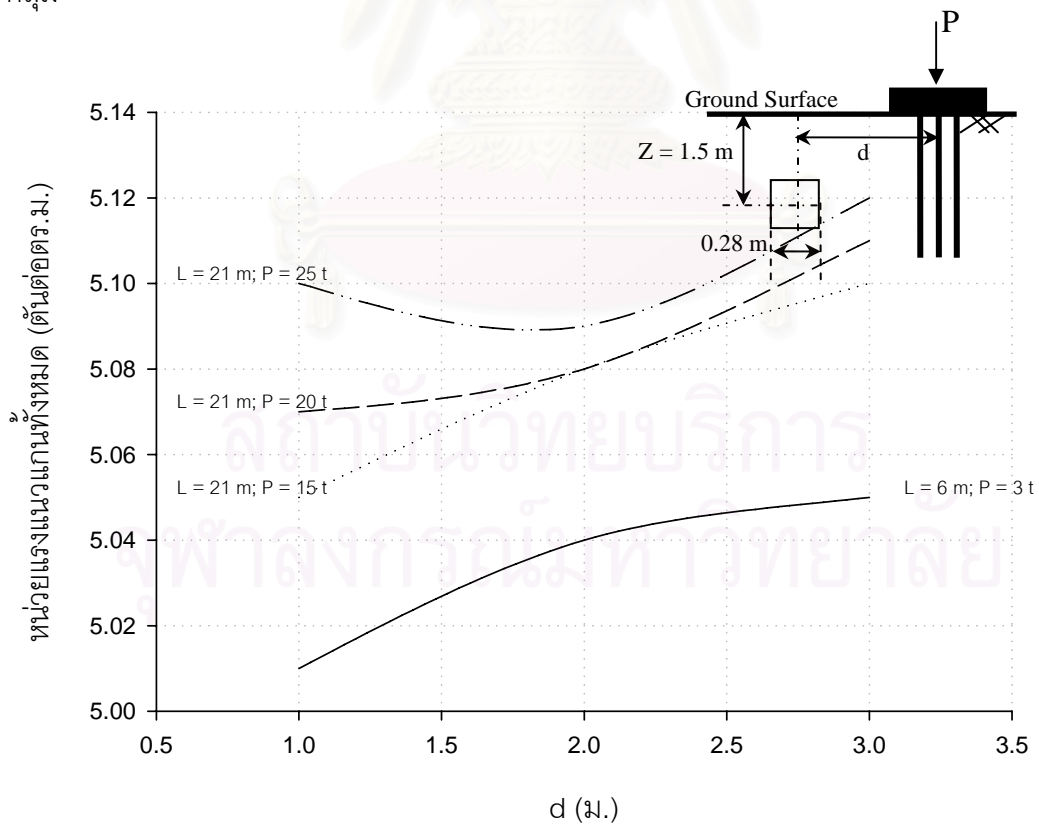
รูปที่ 4.104 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



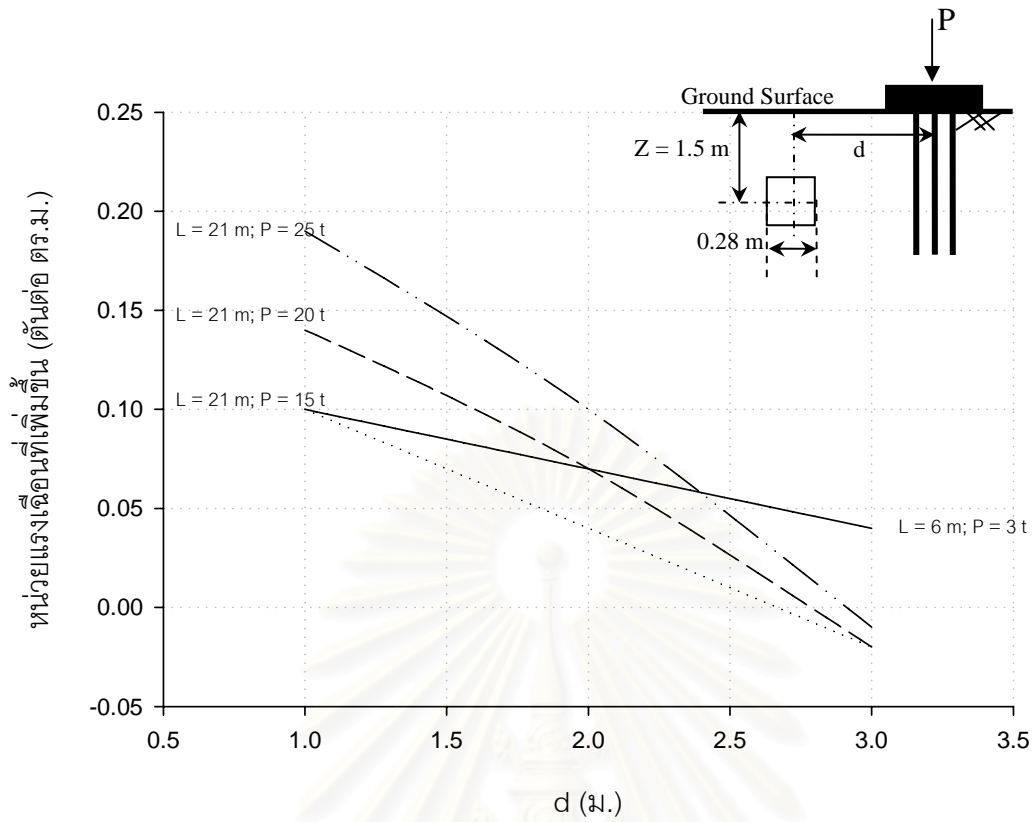
รูปที่ 4.105 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



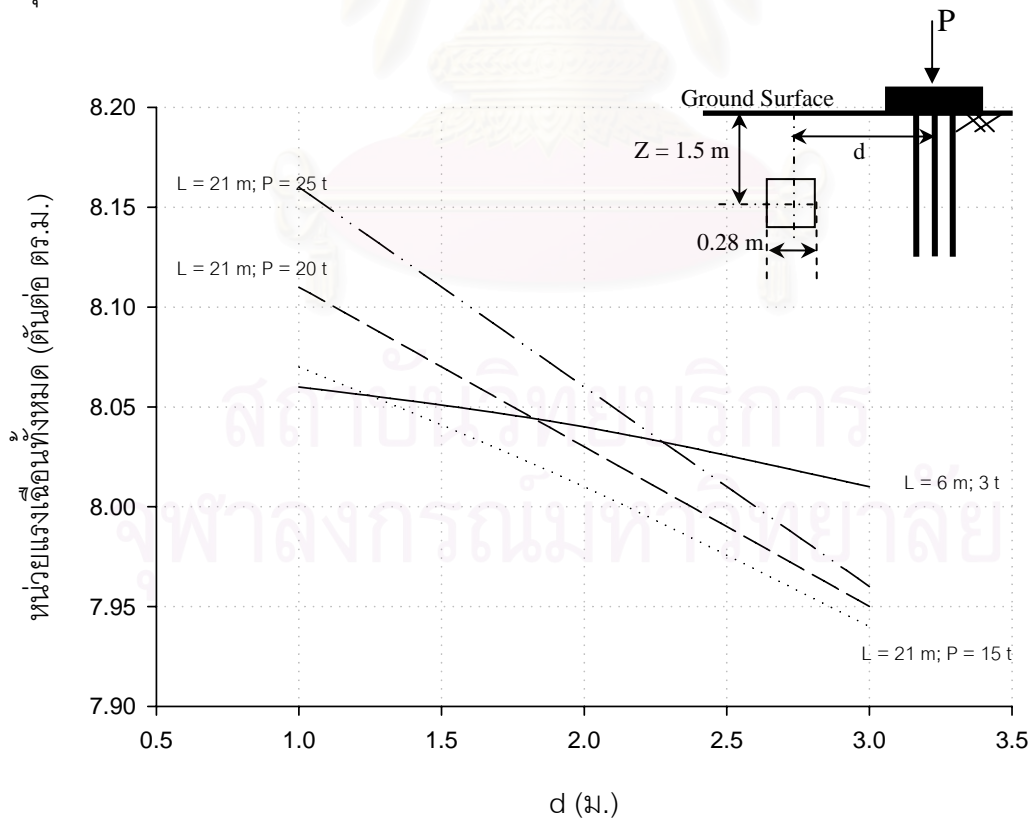
รูปที่ 4.106 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



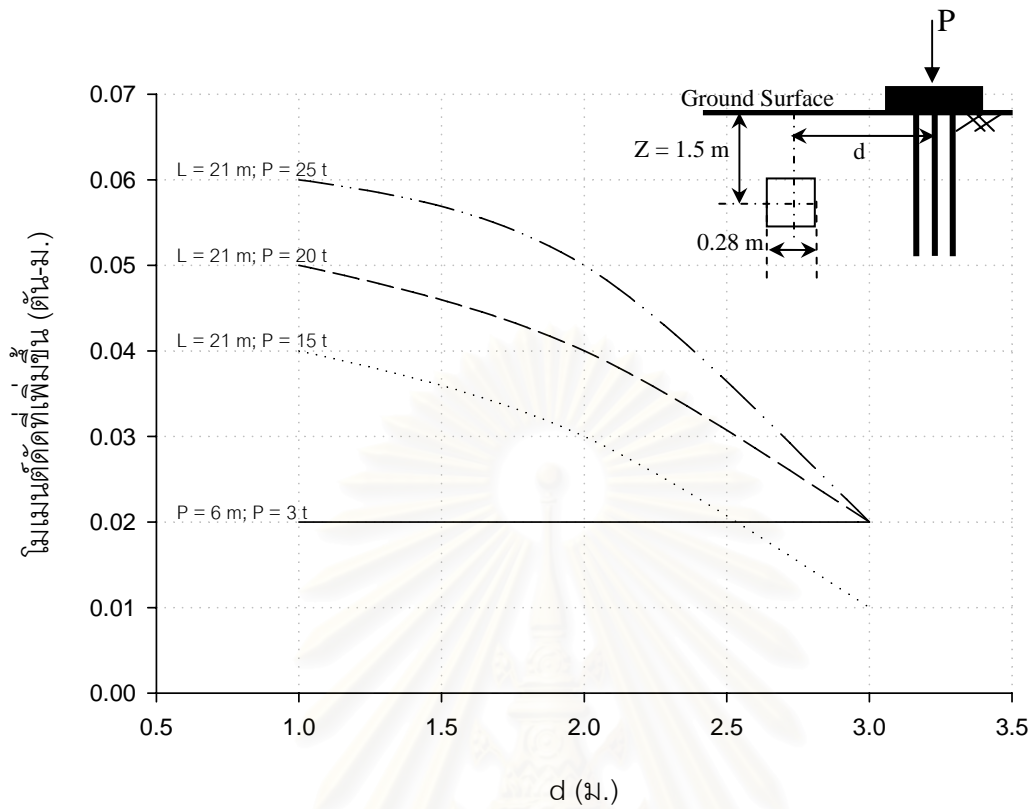
รูปที่ 4.107 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



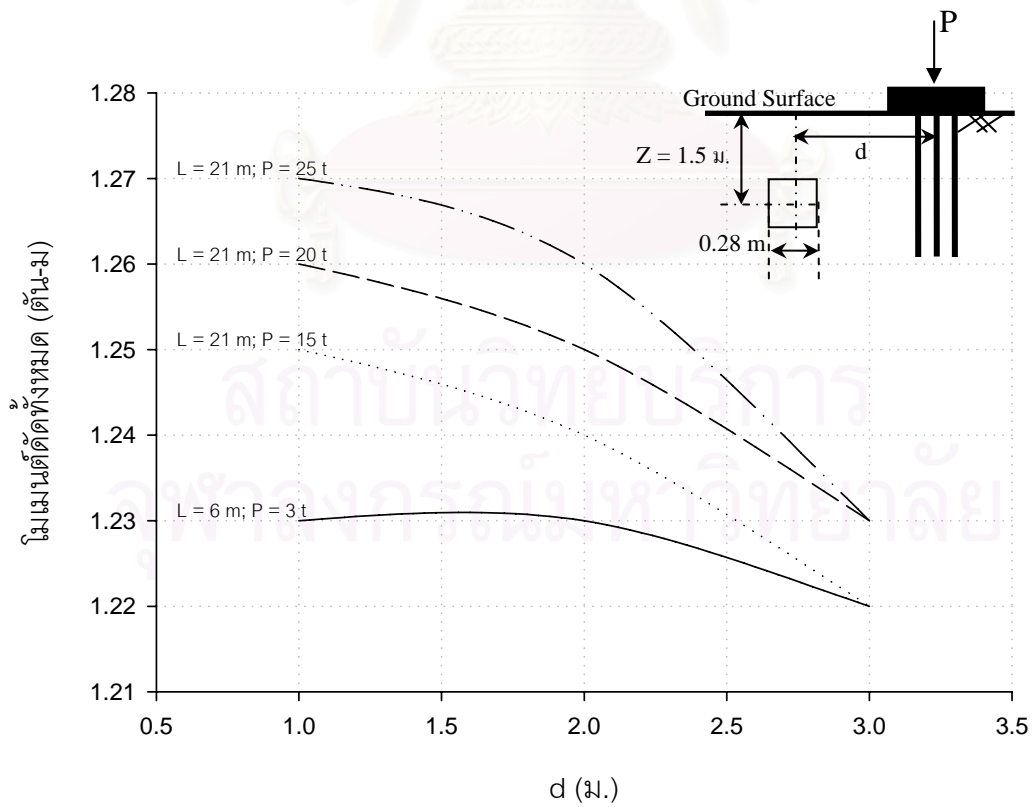
รูปที่ 4.108 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.109 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.110 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.111 โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม

4.1.3.4 ผลกระทบที่มีต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ สาธารณูปโภคข้างเคียง โดยรูปแบบการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 3.2 ถึง 3.5 โดย ตัวอย่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.12 เป็นค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมด และที่เพิ่มขึ้น โดยแบ่งการวิเคราะห์แนวท่อเป็น 2 แนวได้แก่ แนวด้านข้าง และ แนวด้านล่าง อีกทั้งกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียงเป็น 3 ขนาด ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 ม. ตามลำดับ โดยที่ระยะทางอุโมงค์ข้างเคียงกำหนดเป็น 2 3 และ 4 เท่าของอุโมงค์ข้างเคียง ตามลำดับ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.12 ตารางส่วนที่เหลือแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.12 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน รูปแบบ 1

แถวที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Open Cut	Type	Type	Adjacent tunnel diameter (m)		Distance from main structure			Incremental effect			Distance from main structure		
					2	3	4	2	3	4	2	3	4
1	Side	0.5	0.5	Total Displacement (mm)	-2.46	-2.59	-2.79	Total Displacement (mm)	2.81	2.68	2.48		
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.94	1.94	1.64	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-4.11	-4.11	-4.41		
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	21.34	22.07	20.25	Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.13	13.86	12.04		
				Max. Shear stress (ton.m ²)	2.96	3.21	2.30	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.73	1.99	1.07		
				Total Displacement (mm)	1.03	-0.09	-1.42	Total Displacement (mm)	6.30	5.18	3.85		
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.92	2.39	7.03	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-4.13	-3.66	0.98		
		1	1	Max. Vertical stress (ton/m ²)	25.75	25.46	10.07	Max. Vertical stress (ton/m ²)	17.53	17.25	1.86		
				Max. Shear stress (ton.m ²)	3.26	3.65	1.81	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.04	2.43	0.59		
				Total Displacement (mm)	7.61	0.63	-3.18	Total Displacement (mm)	12.88	5.90	2.09		
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.24	6.94	9.84	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.19	0.89	3.79		
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.82	10.38	9.07	Max. Vertical stress (ton/m ²)	5.61	2.17	0.86		
				Max. Shear stress (ton.m ²)	2.64	1.61	1.11	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.42	0.38	-0.11		
	2	2	Total Displacement (mm)	-1.46	-1.81	-2.27	Total Displacement (mm)	3.81	3.46	3.00			
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.09	1.47	8.36	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-4.96	-4.58	2.31			
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.09	12.03	12.76	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.88	3.81	4.55			
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.54	2.62	2.27	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.32	1.40	1.04			
			Total Displacement (mm)	2.59	1.38	0.48	Total Displacement (mm)	7.86	6.65	5.75			
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.40	8.11	7.11	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.35	2.06	1.06			
	Under	0.5	0.5	0.5	Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.09	6.89	7.52	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.12	-1.32	-0.69	
					Max. Shear stress (ton.m ²)	1.40	0.75	1.02	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.17	-0.47	-0.20	
					Total Displacement (mm)	14.59	9.45	4.71	Total Displacement (mm)	19.86	14.72	9.98	
					Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.07	9.33	8.44	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.02	3.28	2.39	
					Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.06	7.41	8.69	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.16	-0.80	0.48	
					Max. Shear stress (ton.m ²)	1.75	1.26	1.38	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.53	0.03	0.16	
1		1	1	1	Total Displacement (mm)	10.07	9.33	8.44	Total Displacement (mm)	4.02	3.28	2.39	
					Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.06	7.41	8.69	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-2.16	-0.80	0.48	
					Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.06	7.41	8.69	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.16	-0.80	0.48	
					Max. Shear stress (ton.m ²)	1.75	1.26	1.38	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.53	0.03	0.16	
					Total Displacement (mm)	14.59	9.45	4.71	Total Displacement (mm)	19.86	14.72	9.98	
					Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.07	9.33	8.44	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.02	3.28	2.39	
2	2	2	2	Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.06	7.41	8.69	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.16	-0.80	0.48		
				Max. Shear stress (ton.m ²)	1.75	1.26	1.38	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.53	0.03	0.16		
				Total Displacement (mm)	14.59	9.45	4.71	Total Displacement (mm)	19.86	14.72	9.98		
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.07	9.33	8.44	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.02	3.28	2.39		
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.06	7.41	8.69	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.16	-0.80	0.48		
				Max. Shear stress (ton.m ²)	1.75	1.26	1.38	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.53	0.03	0.16		

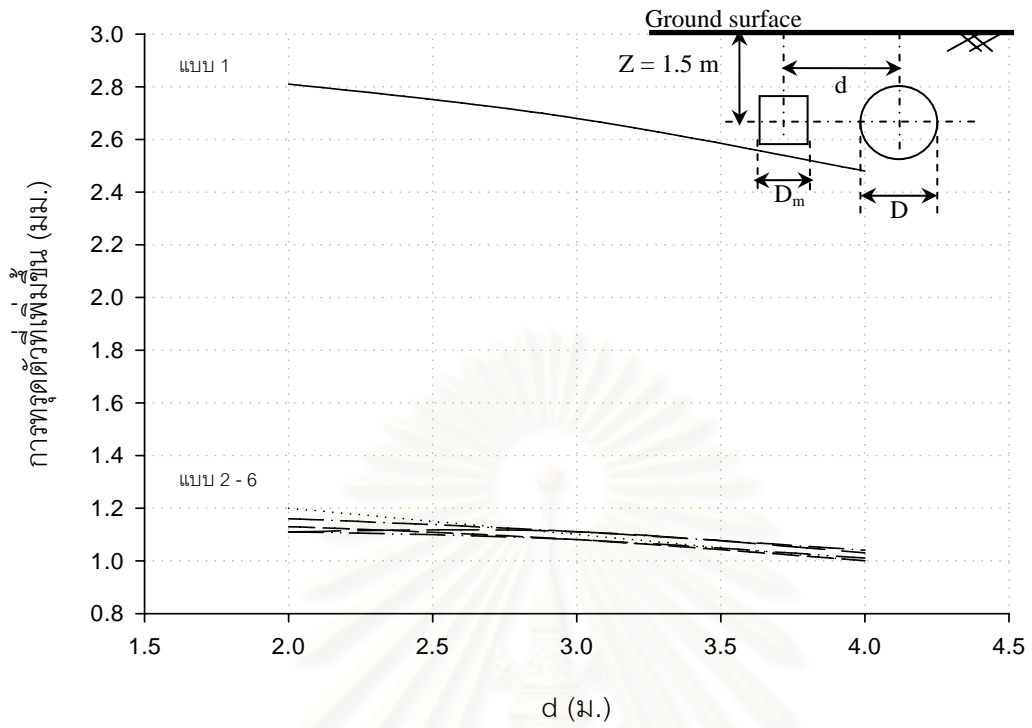
พิจารณาตารางที่ 4.12 ซึ่งเป็นโครงสร้างท่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2.14 โดยที่ แถวที่ 1 แสดงชนิดของของโครงสร้างหลัก แถวที่ 2 เป็นชนิดของท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน โดยที่ ในการคำนวณแบบออกเป็น 6 ชนิด ตามจำนวนท่อแนวนอน สำหรับรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่ 1 แถวที่ 3 เป็นทิศทางการวางตัวของอุโมงค์สาธารณูปโภคในบริเวณใกล้เคียงโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งมี 2 ทิศทางได้แก่ ด้านข้างและด้านล่างของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 4 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง โดยในการคำนวณกำหนดไว้ 3 ขนาด ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 เท่าของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน แถวที่ 5 เป็นแถวบรรยายถึงการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด แถวที่ 6 7 และ 8 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการหลุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดทั้งหมด ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางท่อถึงศูนย์กลาง

เสาเข็มกลุ่มเป็นระยะ 2 3 และ 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหลัก ตามลำดับ แถวที่ 9 แถวบรรยายถึงการท่อดัด หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น แถวที่ 10 11 และ 12 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเป็นค่าการท่อดัด หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น

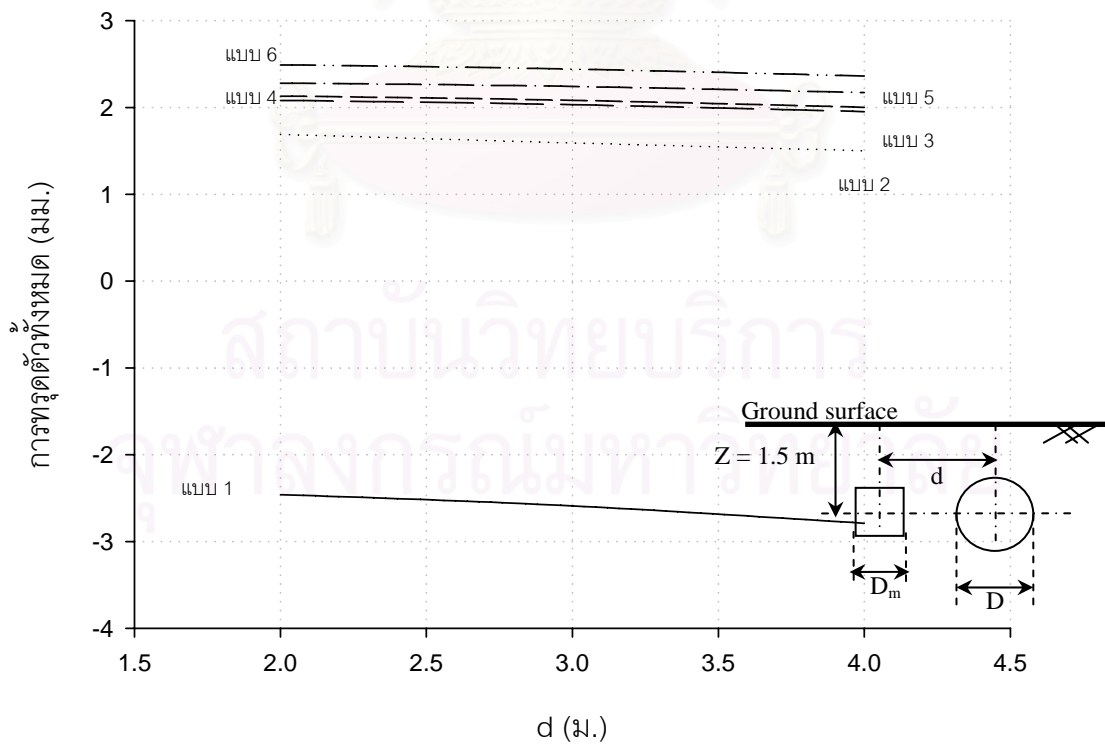
สรุปผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดจากตารางจัดทำในรูปกราฟความสัมพันธ์ โดยในรูปที่ 4.112 ถึง 4.119 แกนในแนวดิ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทั้งหมดและที่เพิ่มขึ้น แกนในแนวนอน ระยะห่างระหว่าง อุโมงค์ข้างเคียงกับท่อระบบชุดเปิดหน้าดินเป็นหน่วยม. โดยแยกกราฟตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออุโมงค์ข้างเคียง ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 ม.



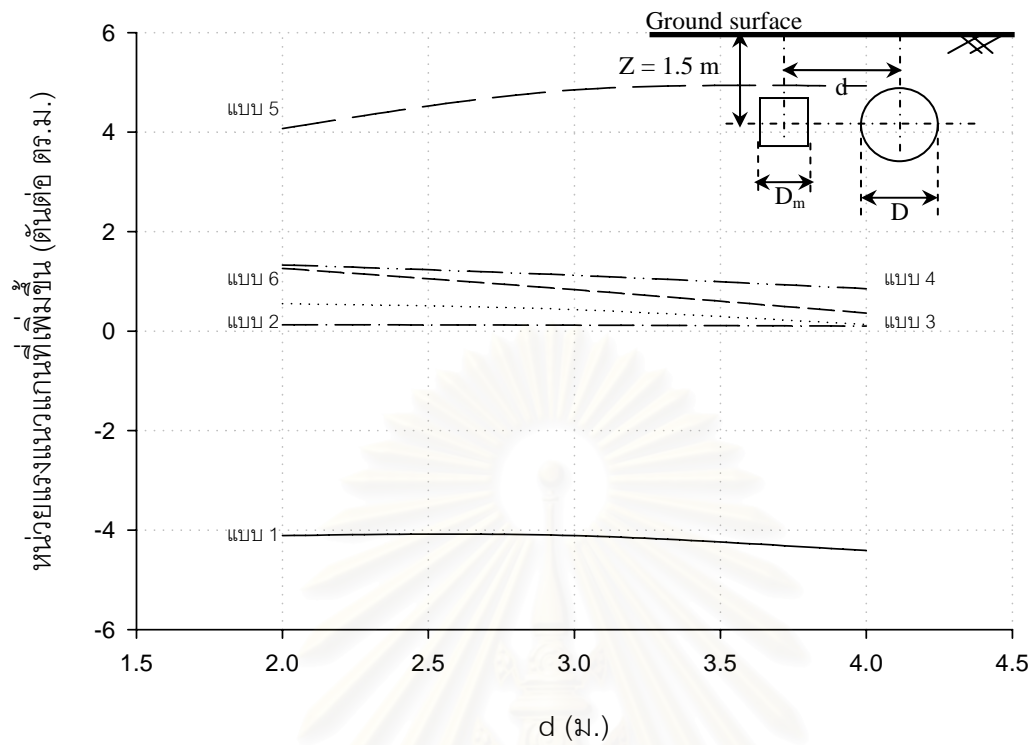
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



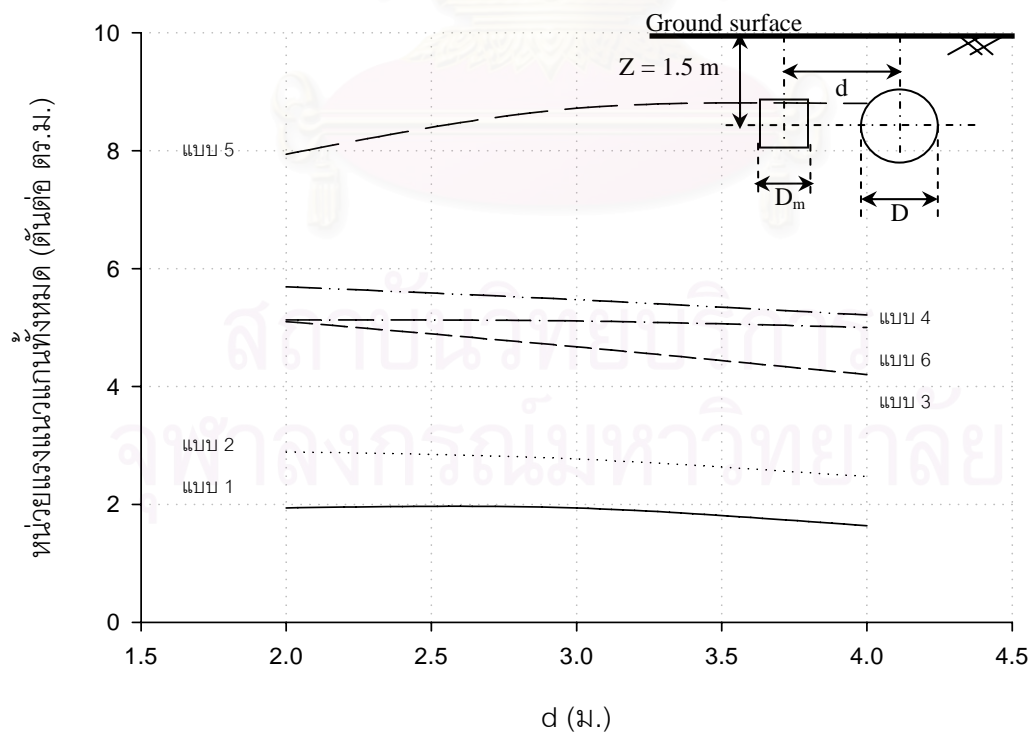
รูปที่ 4.112 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



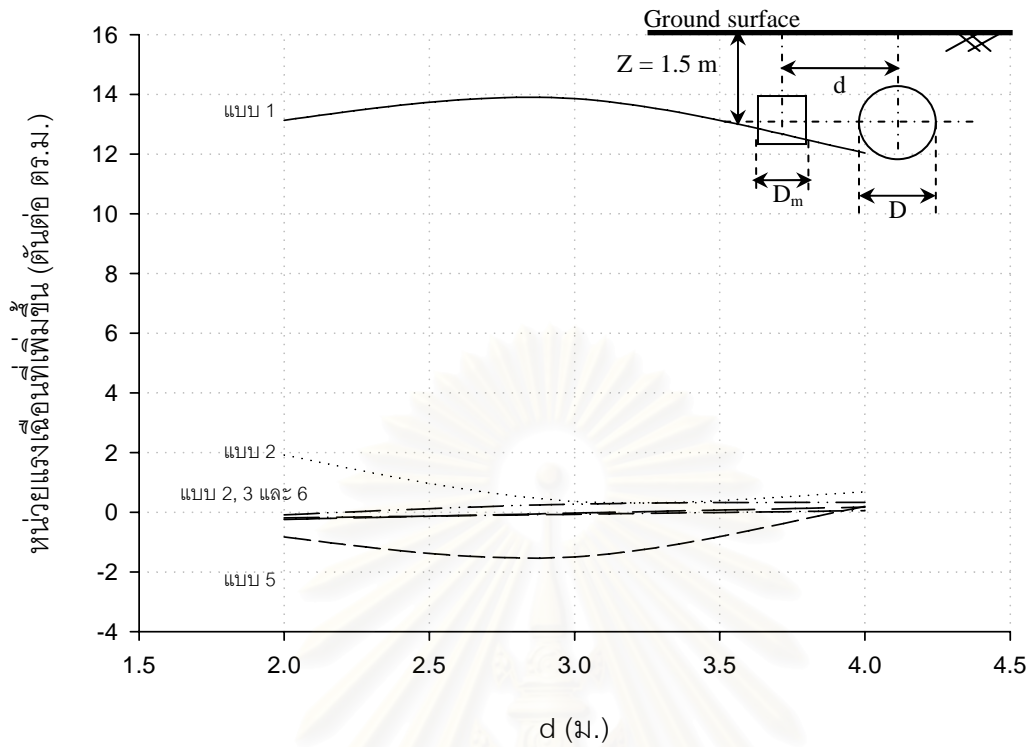
รูปที่ 4.113 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



รูปที่ 4.114 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง
ขนาด $D = 0.5D_m$

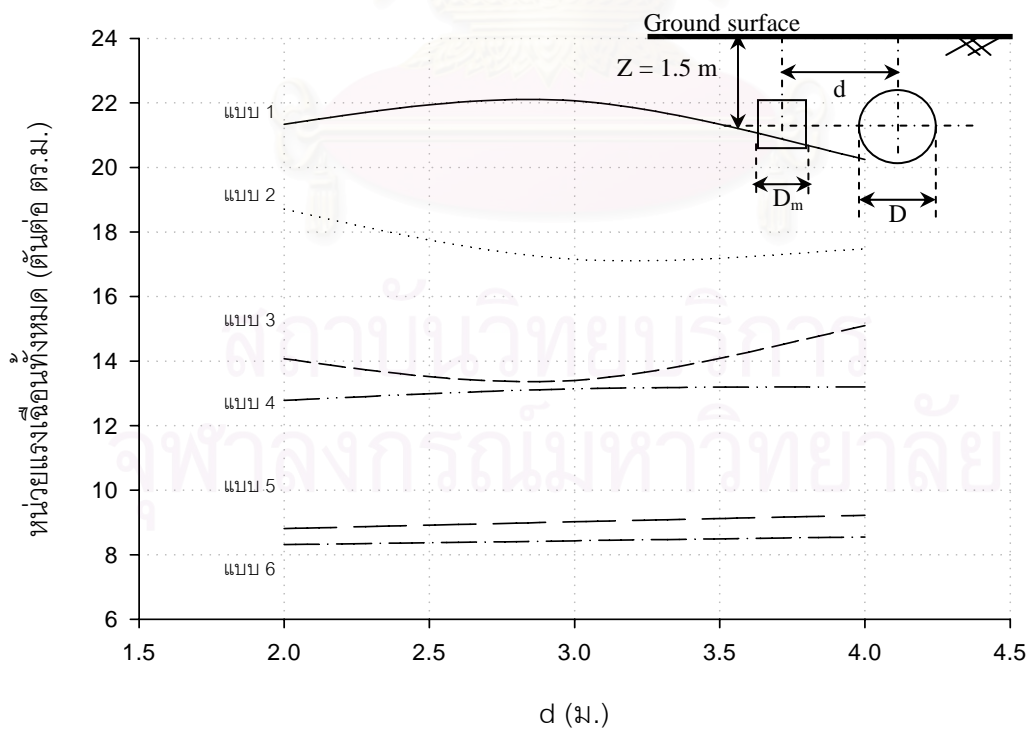


รูปที่ 4.115 หน่วยแรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียง
ขนาด $D = 0.5D_m$



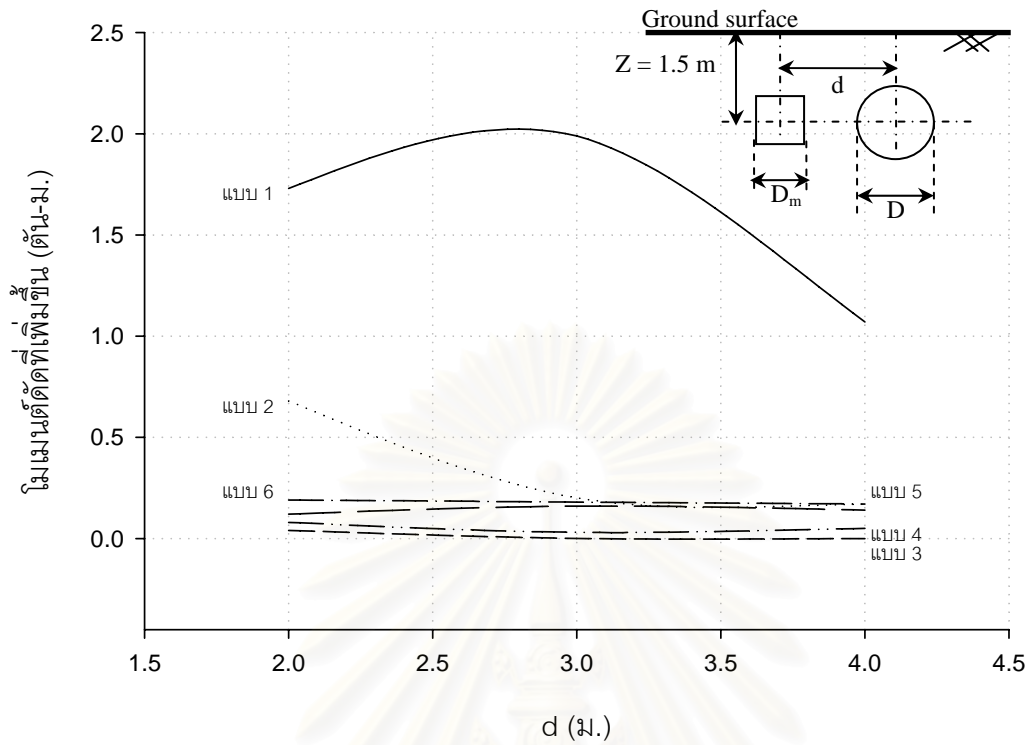
รูปที่ 4.116 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด

$$D = 0.5D_m$$

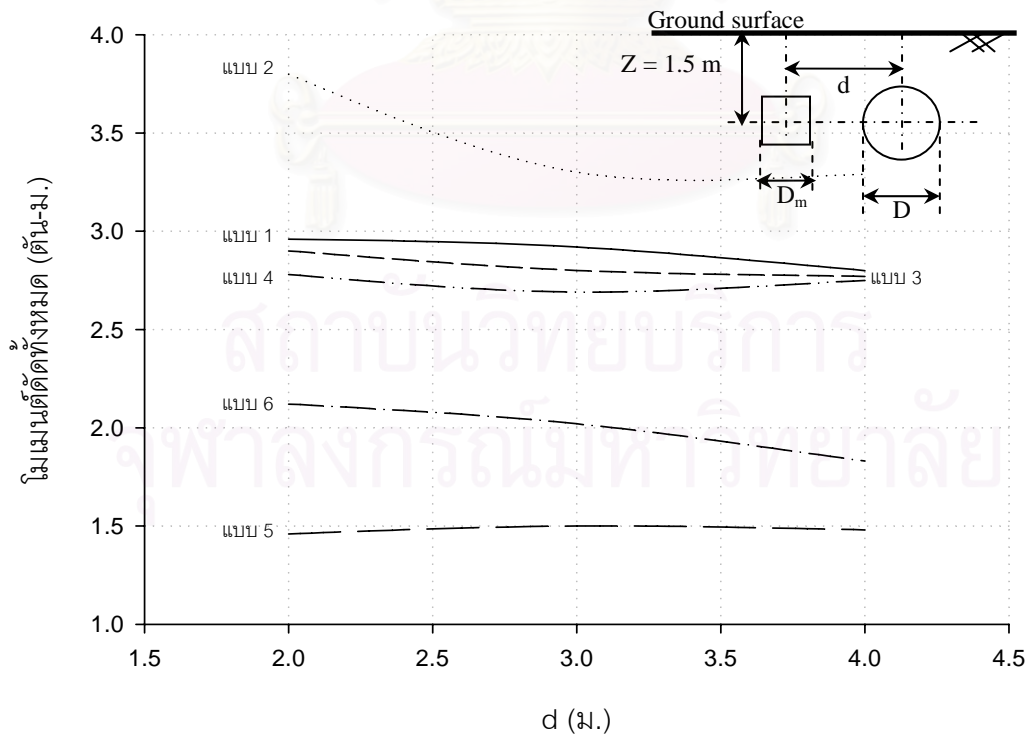


รูปที่ 4.117 หน่วยแรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด

$$D = 0.5D_m$$



รูปที่ 4.118 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



รูปที่ 4.119 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$

บทที่ 5

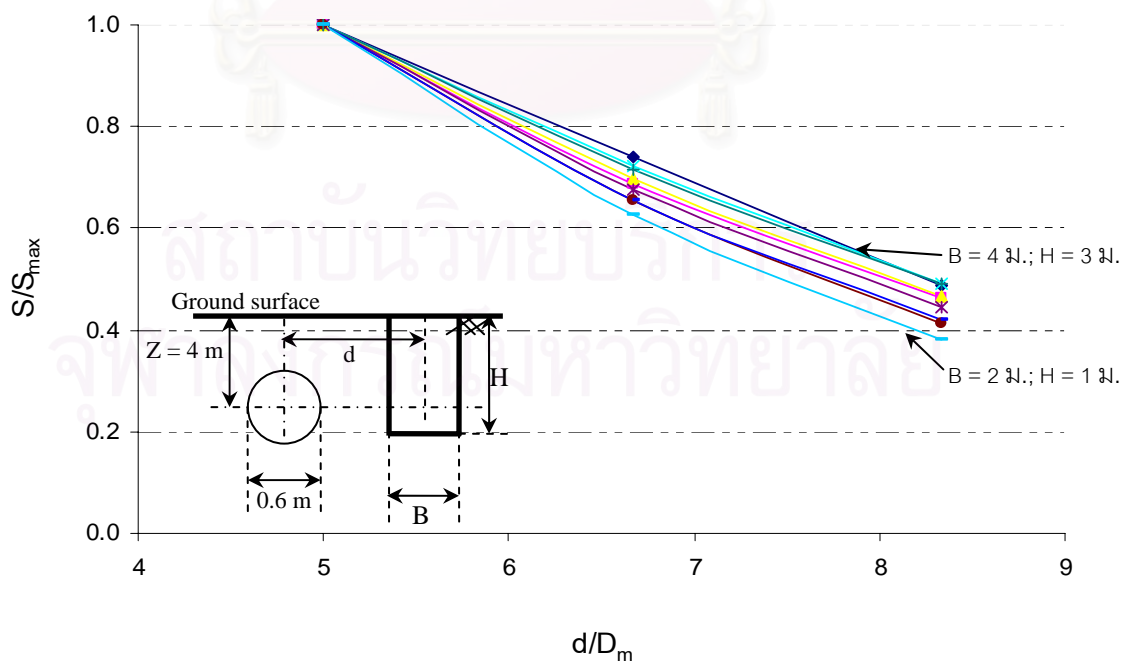
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงต่อโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ทำการวิเคราะห์ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วยความสัมพันธ์ที่ได้ในรูปแบบกราฟ การเคลื่อนตัว หน่วยแรง แนวแกน หน่วยแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัด โดยแบ่งเป็นหมวดตามที่เสนอไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์แยกตามกรณีของโครงสร้างข้างเคียงได้ดังนี้

5.1.1 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน

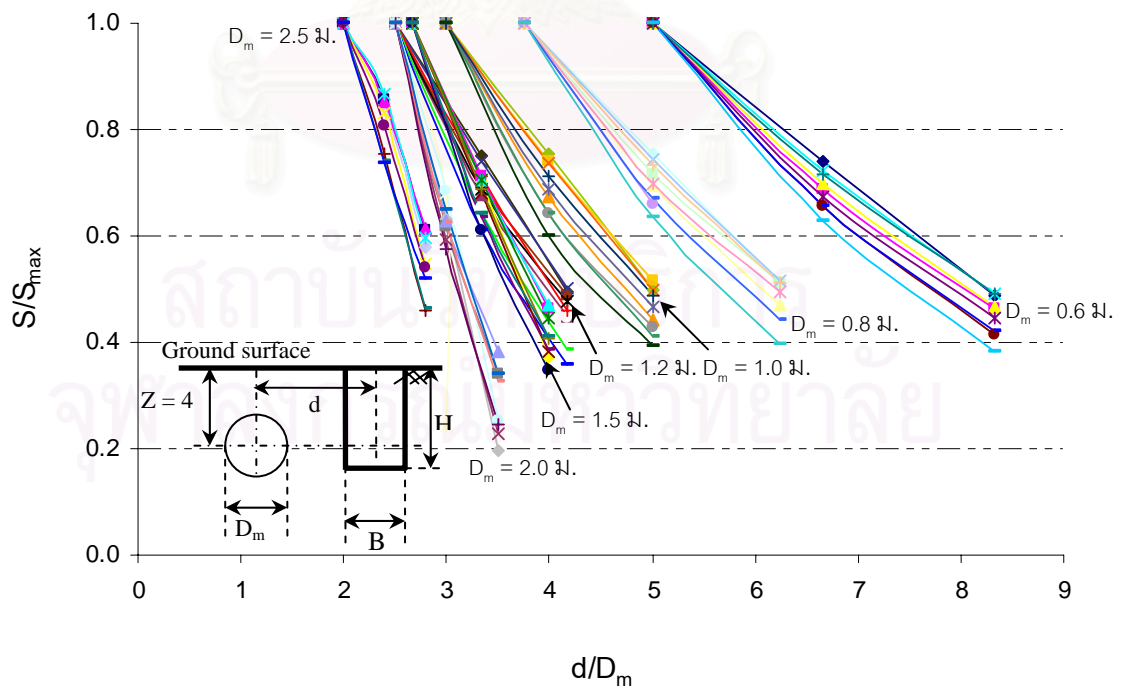
การขุดเปิดหน้าดินเป็นการลดแรง (Unloading) มีผลทำให้ดินบริเวณด้านข้างของหลุมขุดพยายามเคลื่อนตัวเข้ากลางหลุม สำหรับดินข้างใต้หลุมเมื่อมีการนำดินด้านบนออกทำให้แรงที่เคยกดทับหายไป ดินบริเวณนี้จึงพยายามขยายตัวขึ้น ซึ่งเมื่อแนวท่ออยู่บริเวณใกล้เคียงขุดแนวท่อจะเกิดการลอยตัวขึ้น จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างตั้งแต่ 2 ม. ถึง 4 ม. และความลึกตั้งแต่ 1 ม. ถึง 3 ม. ของการขุดเปิดหน้าดิน ส่งผลกระทบต่ออัตราการลอยตัว (S/S_{max}) ของท่อตันลอดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นกราฟอัตราส่วนการลอยตัวของท่อตันลอดขนาด 0.60 ม.



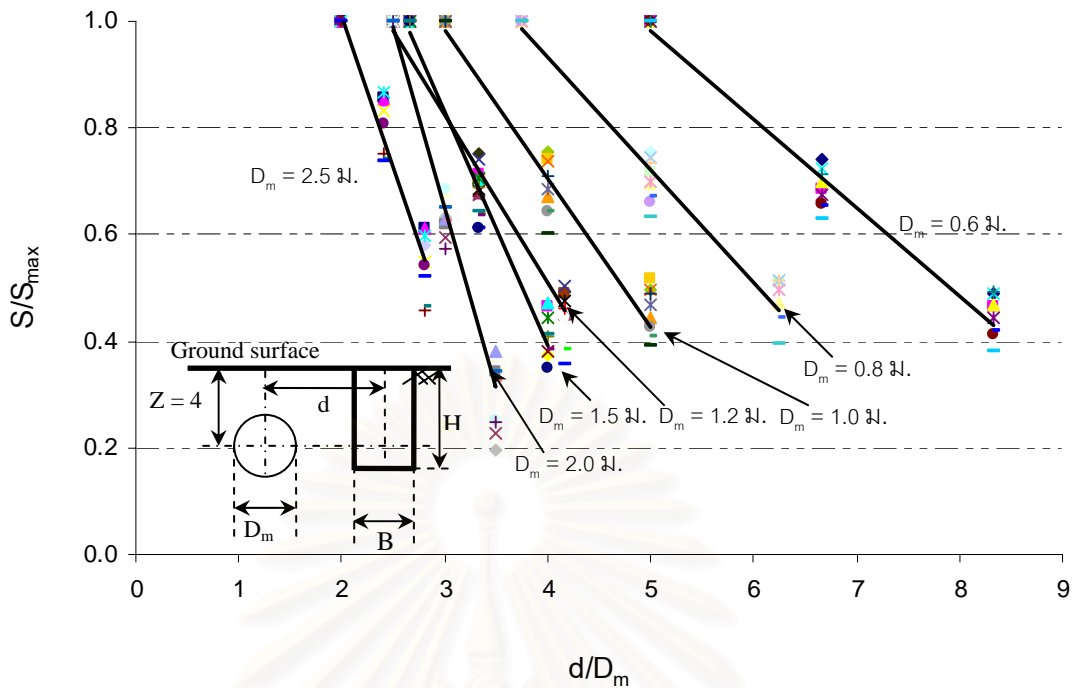
รูปที่ 5.1 อัตราส่วนการลอยตัวของท่อตันลอดขนาด 0.60 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน

- เมื่อ S = ค่าการลดตัวของท่อตันลอดที่ระยะห่าง ระหว่างท่อตันลอดกับ ศูนย์กกลางบ่อขุดขนาดต่างๆกัน
- S_{max} = ค่าการลดตัวของท่อตันลอดสูงสุด (พบว่า เป็นกรณี ที่ระยะห่างเท่ากับ 3 ม.)
- d = ระยะห่างระหว่างท่อตันลอดกับ ศูนย์กกลางบ่อขุด
- D_m = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลอด

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของท่อตันลอดในทุกขนาด จากนั้นนำข้อมูลแต่ละชุดหาเส้น ตัวแทนเชิงภาพรวมของท่อตันลอดแต่ละขนาดดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยกราฟที่ได้ในแต่ละขนาดท่อจะมีอัตราการลดตัวซึ่งสามารถประมาณได้ว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยการลดตัวจะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น และจากกราฟพบว่าอัตราการลดตัวของท่อตันลอด (S/S_{max}) ขึ้นกับระยะห่างของการขุดเปิดหน้าดินเป็นสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามการเปลี่ยนแปลงขนาดของการขุดเปิดหน้าดินไม่ว่าจะเป็นความกว้างหรือความลึกแทบจะไม่มีผลต่อการทรุดตัว ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5.1 เมื่อสนใจที่เส้นกราฟของการขุดเปิดหน้าดินความกว้าง 4 ม. และความลึก 3 ม. โดยที่ระยะ d/D_m เท่ากับ 5 จะพบว่าค่า S/S_{max} มีค่าเท่ากับ 1 และเมื่อเปลี่ยนระยะ d/D_m เป็น 6 จะพบว่าค่า S/S_{max} มีค่าลดลงประมาณ 20% ในขณะเดียวกันเมื่อสนใจที่ความกว้าง 4 ม. และเปลี่ยนความลึกจาก 3 ม. เป็น 1 ม. จะพบว่าค่า S/S_{max} มีค่าลดลงประมาณ 1% และเมื่อเปลี่ยนระยะความกว้างจาก 4 ม. เป็น 2 ม. จะพบว่าค่า S/S_{max} มีค่าลดลงประมาณ 5%



รูปที่ 5.2 อัตราการลดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 5.3 เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมอัตราการลดยตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน

เมื่อ S_{max} = ค่าการลดยตัวของท่อตันลอดสูงสุดของแต่ละขนาดท่อตันลอด

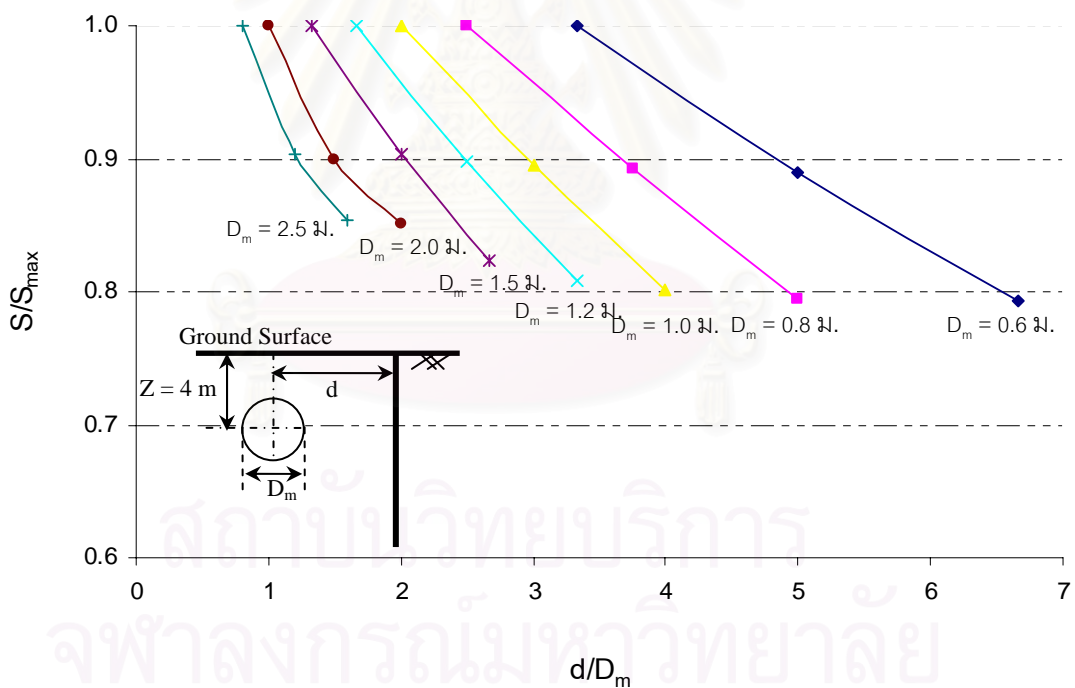
หมายเหตุ จากกราฟที่ 5.3 สังเกตได้ว่าในกลุ่มเส้นกราฟของท่อตันลอดขนาด 1.2 ม. ตัดกับเส้นกราฟของท่อตันลอดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากระยะห่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ของท่อตันลอดขนาด 1.2 ม. มีค่าเท่ากับ 3 4 และ 5 ม. ดังนั้นอัตราส่วนระยะห่างของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (d/D_m) มีค่าเท่ากับ 2.5 3.33 และ 4.17 ตามลำดับ และในส่วนของท่อตันลอดขนาด 1.5 ม. มีค่าเท่ากับ 4 5 และ 6 ม. ดังนั้น d/D_m จึงมีค่าเท่ากับ 2.66 3.33 และ 4 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้เส้นกราฟของท่อตันลอดทั้งสองกลุ่มจึงตัดกันที่ค่า d/D_m เท่ากับ 3.33

สำหรับการประยุกต์ใช้กราฟที่ 5.3 อาจนำไปประมาณค่าการลดยตัวของท่อตันลอดเนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน ที่ระดับความกว้างตั้งแต่ 2 ถึง 4 ม. และความลึกตั้งแต่ 1 ถึง 3 ม. และยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดของเขตอิทธิพลในอนาคตได้

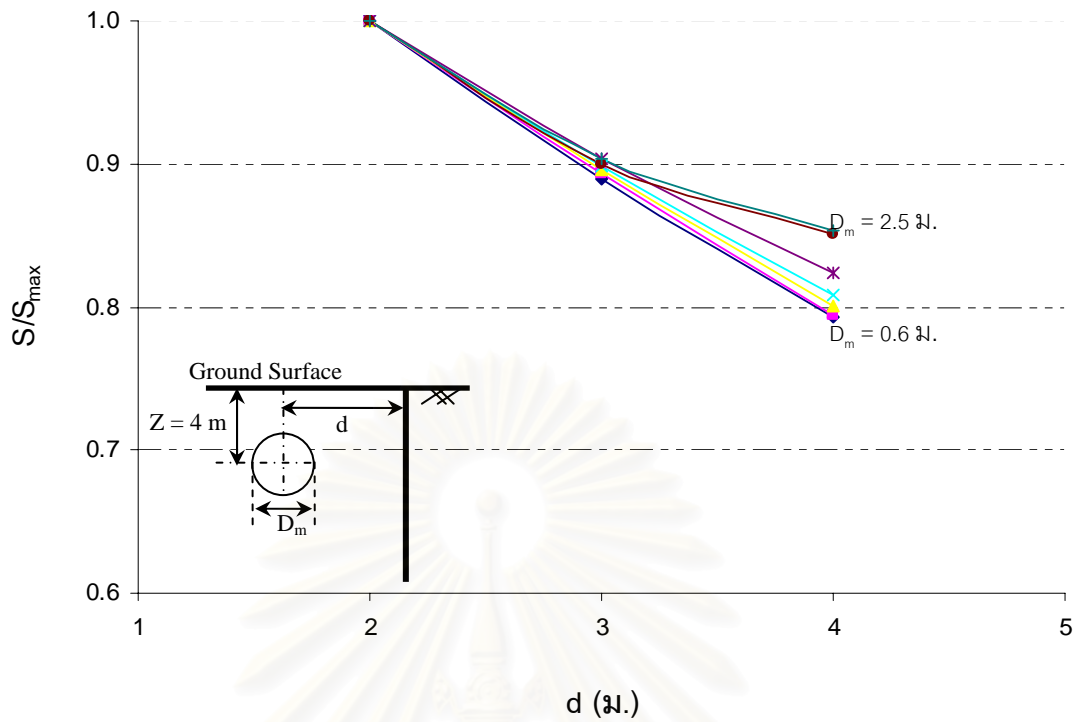
5.1.2 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการปักเข็มพืด

การปักเข็มพืดเป็นการรบกวนดินอย่างหนึ่ง ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน เนื่องจากการแทนที่มวลดินของเข็มพืดและหน่วยแรงในการปักทำให้เกิดการทรุดตัวของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งจากการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาแต่ละขนาดท่อตันลอดพบว่าขนาดของท่อตัน

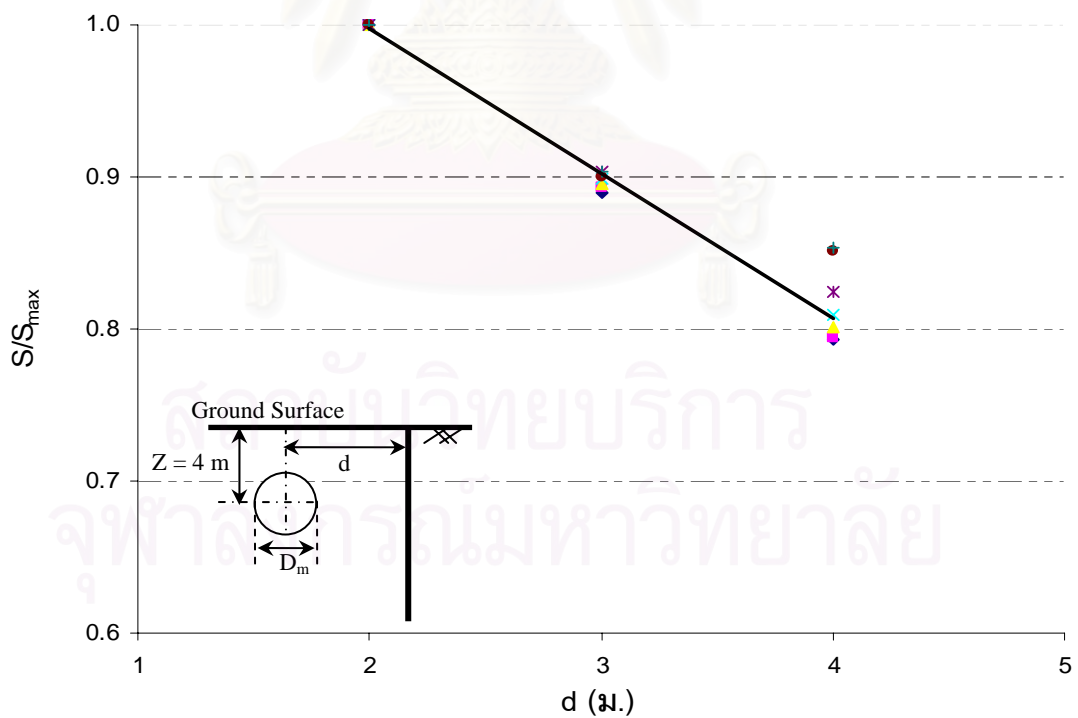
ลวดจะส่งผลต่ออัตราการทรุดตัวใกล้เคียงกัน อัตราการทรุดตัวของท่อตันลวดเนื่องจากผลกระทบจากการปักเข็มพืดแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทรุดตัว (S/S_{max}) กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของเข็มพืดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลวด (d/D_m) สำหรับรูปที่ 5.5 เป็นกราฟระหว่างอัตราการทรุดตัว (S/S_{max}) กับระยะห่างของเข็มพืด (d) จากนั้นนำข้อมูลแต่ละชุดหาเส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของท่อตันลวดทุกขนาด ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยกราฟที่ได้จะมีค่าอัตราการทรุดตัวซึ่งสามารถประมาณได้ว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยการทรุดตัวจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น และจากกราฟที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าอัตราการทรุดตัวของท่อตันลวดขึ้นกับระยะห่างของการปักเข็มพืดเป็นสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามขนาดท่อตันลวดมีผลกระทบต่ออัตราการทรุดตัวน้อยมาก ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5.5 พิจารณาระยะห่างของเสาเข็มพืดที่ระยะ 3 ม. ค่าอัตราการทรุดตัวของท่อตันลวด (S/S_{max}) ขนาด 2.5 ม. มีค่าเท่ากับ 0.9 และเมื่อเปลี่ยนระยะห่างจาก 3 ม. เป็น 4 ม. ค่า S/S_{max} มีค่าลดลงประมาณ 10% ในขณะที่ระยะห่าง 3 ม. เมื่อเปลี่ยนขนาดท่อตันลวดจากขนาด 2.5 ม. เป็น ขนาด 0.6 ม. S/S_{max} จะมีค่าลดลงประมาณ 2%



รูปที่ 5.4 อัตราการทรุดตัวของท่อตันลวดทุกขนาดเนื่องจากการปักเข็มพืดที่ระยะห่างระหว่าง 2 – 4 ม.



รูปที่ 5.5 อัตราการทรุดตัวของท่อตันตลอดทุกขนาดเนื่องจากการปักเข็มฟีดที่ระยะห่างระหว่าง 2 - 4 ม.



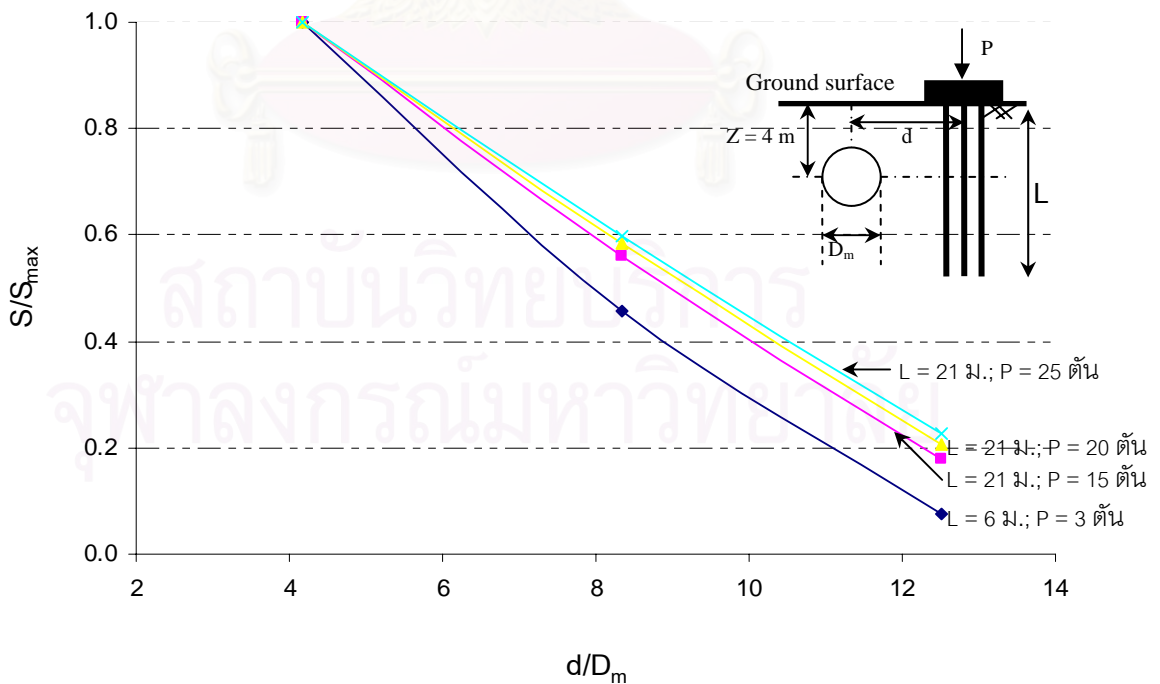
รูปที่ 5.6 เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมอัตราการทรุดตัวของท่อตันตลอดทุกขนาดเนื่องจากการปักเข็มฟีดที่ระยะห่างระหว่าง 2 - 4 ม.

เมื่อ S_{max} = ค่าการทรุดตัวของท่อตันลวดสูงสุด (พบว่าเป็นกรณีที่ระยะห่าง 2 ม.)

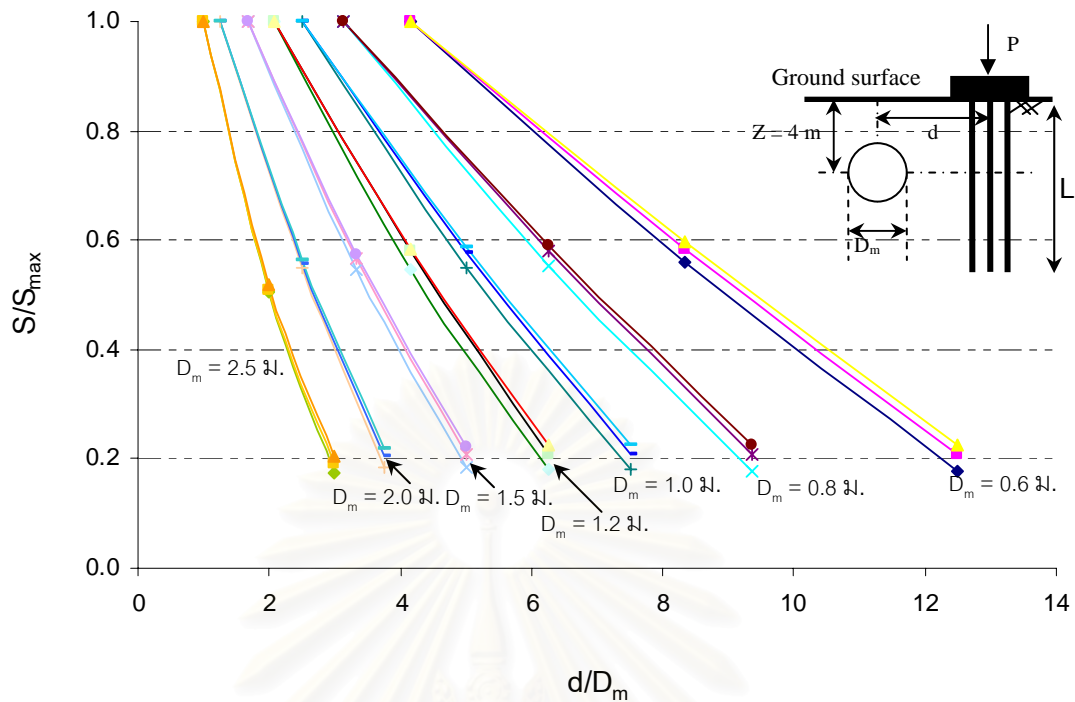
สำหรับการประยุกต์ใช้กราฟที่ 5.6 อาจนำไปประมาณค่าอัตราการทรุดตัวที่ลดลงเมื่อระยะห่างของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงมากขึ้นสำหรับท่อตันลวดทุกขนาด และยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตอิทธิพลของท่อตันลวดขนาดตั้งแต่ 0.6 ม. ถึง 2.5 ม. เนื่องจากผลกระทบจากการปักเข็มพีตได้

5.1.3 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม

การก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มเป็นการเพิ่มแรง (Loading) ให้กับมวลดินยังผลให้เกิดการทรุดตัวกับโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าผลจากการเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มส่งผลกระทบต่ออัตราการทรุดตัวเมื่อเทียบกับระยะห่างของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างอัตราการทรุดตัว (S/S_{max}) กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของท่อตันลวดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลวด (d/D_m) สำหรับอัตราการทรุดตัวระหว่างเสาเข็มสั้นที่มีความยาว 6 ม. และเสาเข็มยาวที่มีความยาว 21 ม. จะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่เสาเข็มสั้น 6 ม. มีอัตราการทรุดตัวน้อยกว่า ด้วยเหตุนี้จึงแบ่งอัตราการทรุดตัวเนื่องจากโครงสร้างเสาเข็มกลุ่มเป็น 2 ส่วนตามขนาดความยาวเสาเข็ม



รูปที่ 5.7 อัตราการทรุดตัวของท่อตันลวดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม

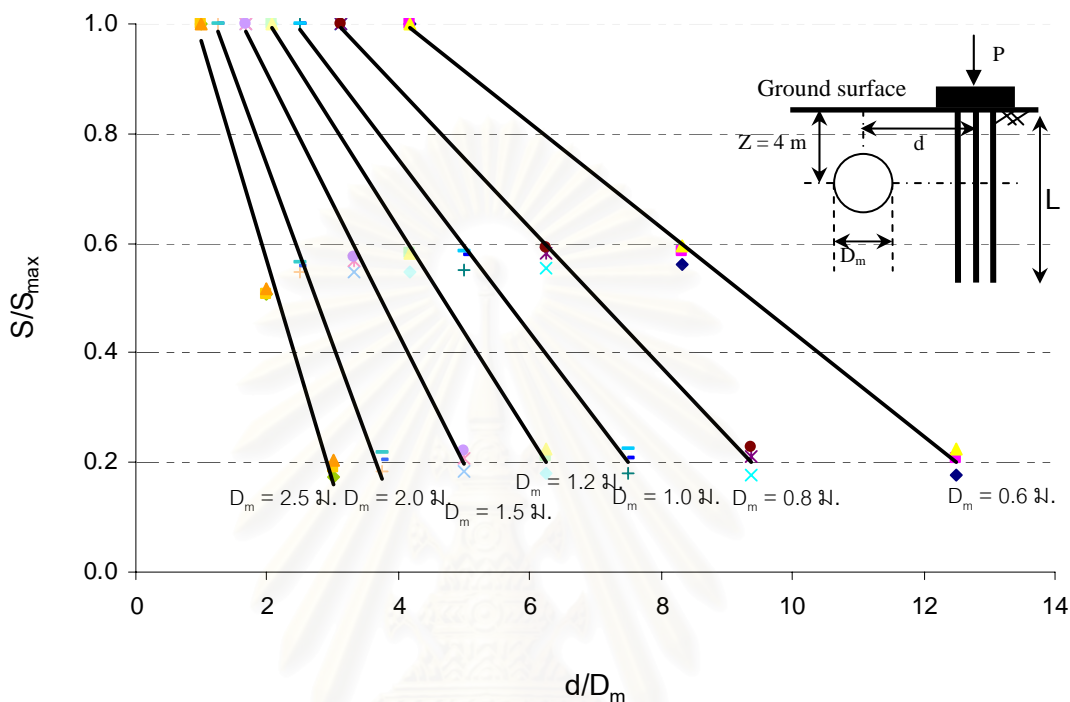


รูปที่ 5.8 อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.

ในรูปที่ 5.8 แสดงกราฟอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดในทุกขนาด จากนั้นนำข้อมูลแต่ละชุดหาเส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของท่อตันลอดแต่ละขนาด ดังแสดงในรูปที่ 5.9 โดยกราฟที่ได้ในแต่ละขนาดท่อตันลอดจะมีอัตราการทรุดตัวซึ่งสามารถประมาณได้ว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยการทรุดตัวจะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการทรุดตัวขึ้นกับระยะห่างของการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มเป็นสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 15 ถึง 25 ตัน จะไม่ส่งผลต่ออัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดมากนัก ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5.7 พิจารณาท่อตันลอดขนาด 0.6 ม. ขนาดความยาวเสาเข็ม 21 ม. และมีน้ำหนักบรรทุกที่ 25 ตัน พบว่าที่ระยะห่าง d/D_m เท่ากับ 8 มีค่า S/S_{max} เท่ากับ 0.6 และเมื่อเพิ่ม d/D_m จาก 8 เป็น 12 S/S_{max} จะมีค่าลดลงประมาณ 40% ในขณะที่เดียวกันที่ระยะห่าง d/D_m เท่ากับ 8 เมื่อลดน้ำหนักบรรทุกคั้งที่จาก 25 ตัน เป็น 15 ตัน ค่า S/S_{max} จะลดลงประมาณ 2%

สำหรับในรูปที่ 5.10 เป็นกราฟระหว่างอัตราการทรุดตัวกับระยะห่างเสาเข็มกลุ่มที่มีความยาวเสาเข็ม 21 ม. โดยที่เส้นกราฟแต่ละเส้นได้จากการเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกจาก 15 20 และ 25 ตัน ของท่อตันลอดขนาดตั้งแต่ 0.6 ถึง 2.5 ม. จากนั้นนำข้อมูลแต่ละชุดหาเส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของท่อตันลอดดังแสดงในรูปที่ 5.11 โดยการทรุดตัวจะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการทรุดตัวขึ้นกับระยะห่างของการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มเป็นสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามการเปลี่ยนขนาดท่อตันลอด ส่งผลต่ออัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดไม่มากนักเมื่อเทียบกับการเพิ่ม

ระยะห่างของเสาเข็ม ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5.10 พิจารณาเส้นกราฟของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. พบว่าที่ระยะห่างเท่ากับ 5 ม. มีค่า S/S_{max} เท่ากับ 0.6 และเมื่อเพิ่มระยะห่างจาก 5 ม. เป็น 7.5 ม. จะพบว่า S/S_{max} มีค่าลดลงประมาณ 40% ในขณะที่เดียวกันที่ระยะห่างเท่ากับ 5 ม. เมื่อเพิ่มขนาดท่อตันลดจาก 0.6 ม. เป็น 2.5 ม. ค่า S/S_{max} จะลดลงประมาณ 10%

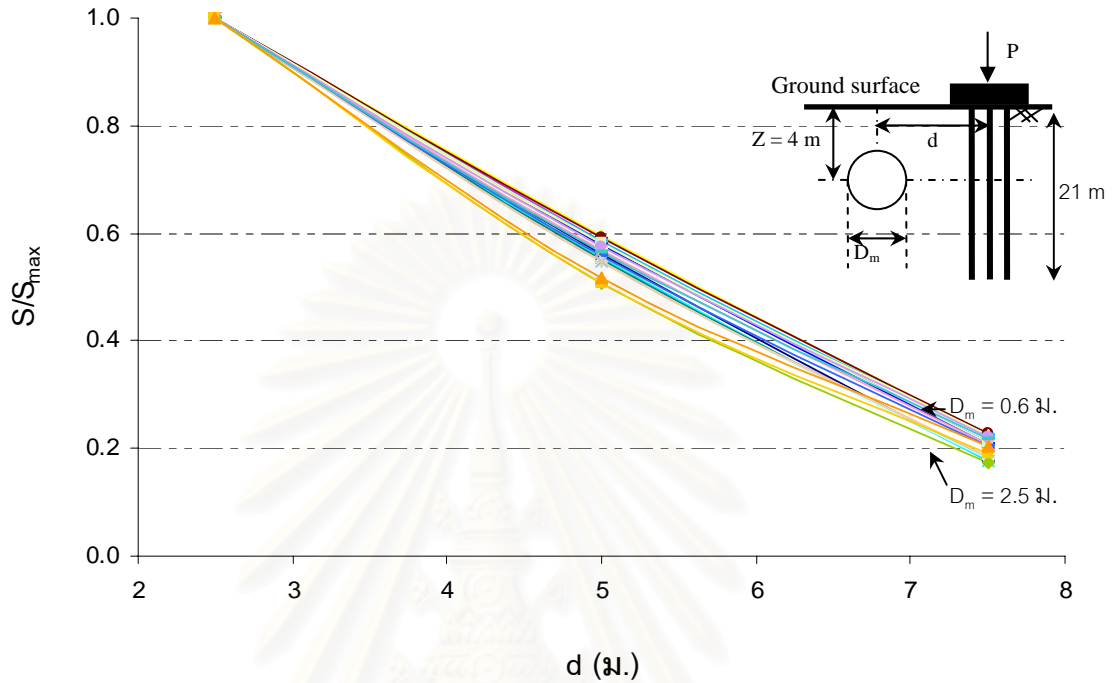


รูปที่ 5.9 เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมอัตราการผลิตตัวของท่อตันลดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.

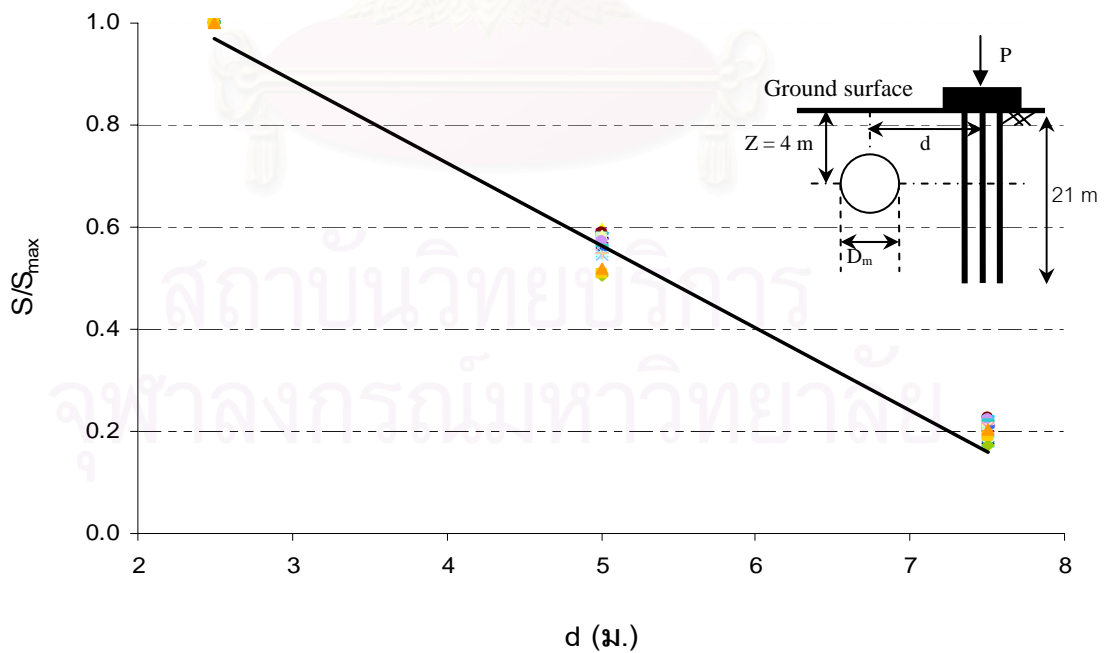
เมื่อ S_{max} = ค่าการผลิตตัวของท่อตันลดสูงสุด (พบว่าเป็นกรณีที่ระยะห่าง 2.5 ม.)

สำหรับในรูปที่ 5.12 เป็นกราฟระหว่างอัตราการผลิตตัว (S/S_{max}) กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกลุ่มขนาดความยาว 6 ม. และมีน้ำหนักบรรทุกกระทำขนาด 3 ตัน กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลด (d/D_m) โดยที่เส้นกราฟแต่ละเส้นเป็นอัตราการผลิตตัวเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มของท่อตันลดแต่ละขนาด สำหรับรูปที่ 5.13 เป็นกราฟระหว่างอัตราการผลิตตัว (S/S_{max}) กับระยะห่างของเสาเข็มกลุ่มที่มีความยาว 6 ม. จากกราฟจะพบว่าค่าอัตราการผลิตตัวเกือบจะซ้อนทับกัน ดังนั้นจึงนำข้อมูลแต่ละชุดหาเส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของท่อตันลด ดังแสดงในรูปที่ 5.14 โดยกราฟที่ได้ในแต่ละขนาดท่อจะมีอัตราการผลิตตัวที่สามารถประมาณได้ว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยการลดตัวจะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการผลิตตัวขึ้นกับระยะห่างของการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม แต่ในทางตรงกันข้ามการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อตันลดไม่ส่งผลต่ออัตราการผลิตตัวของท่อตันลด ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5.13 เมื่อทำการพิจารณาเส้นกราฟของ

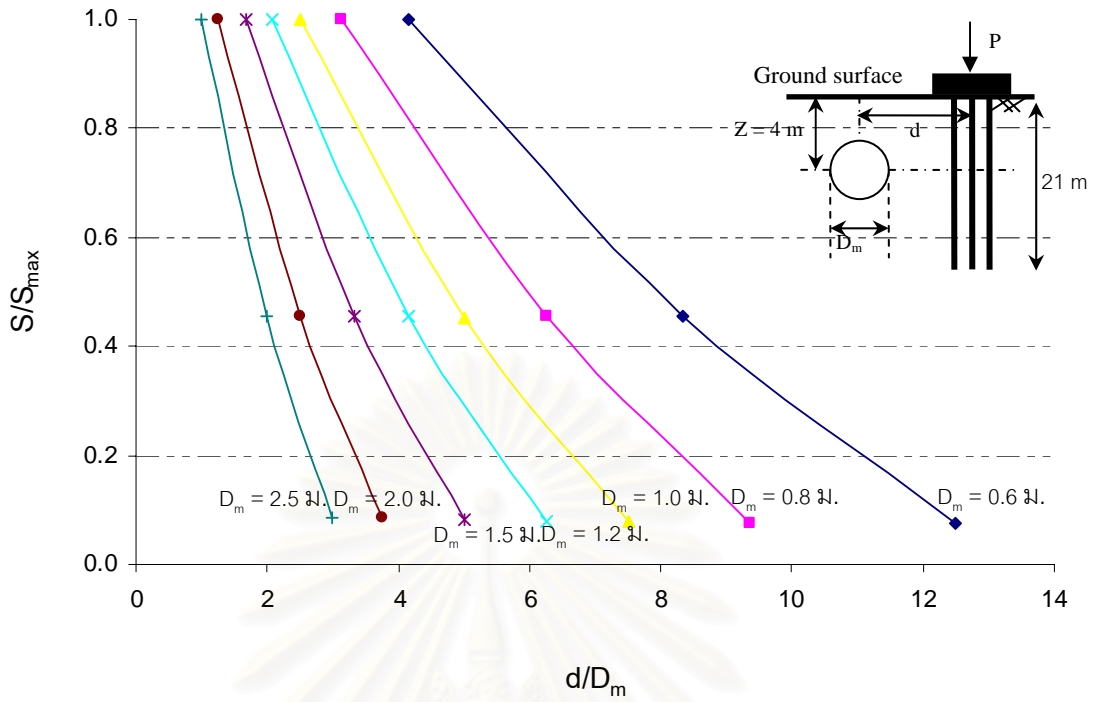
ท่อตันลอดขนาด 0.6 ม. จะพบว่าที่ระยะห่างเท่ากับ 5 ม. มีค่า S/S_{max} เท่ากับ 0.45 และเมื่อเพิ่มระยะห่างจาก 5 ม. เป็น 7.5 ม. จะพบว่า S/S_{max} มีค่าลดลงประมาณ 40% ในขณะที่ระยะห่างเท่ากับ 5 ม. เมื่อเพิ่มขนาดท่อตันลอดจาก 0.6 ม. เป็น 2.5 ม. ค่า S/S_{max} แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



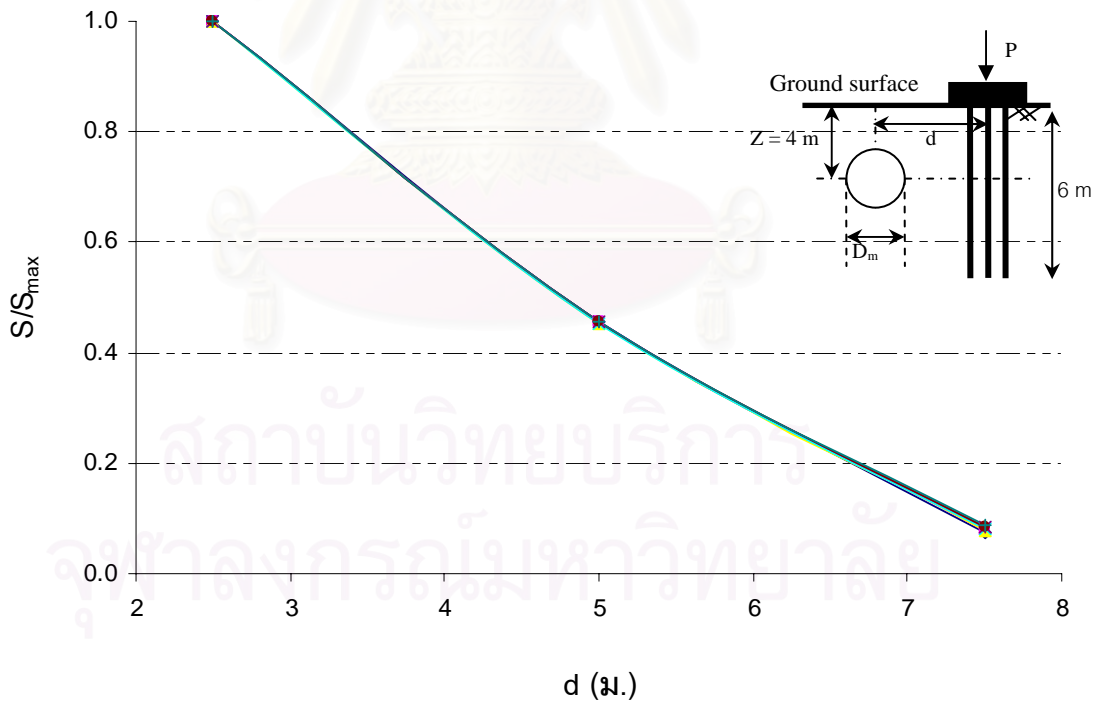
รูปที่ 5.10 อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.



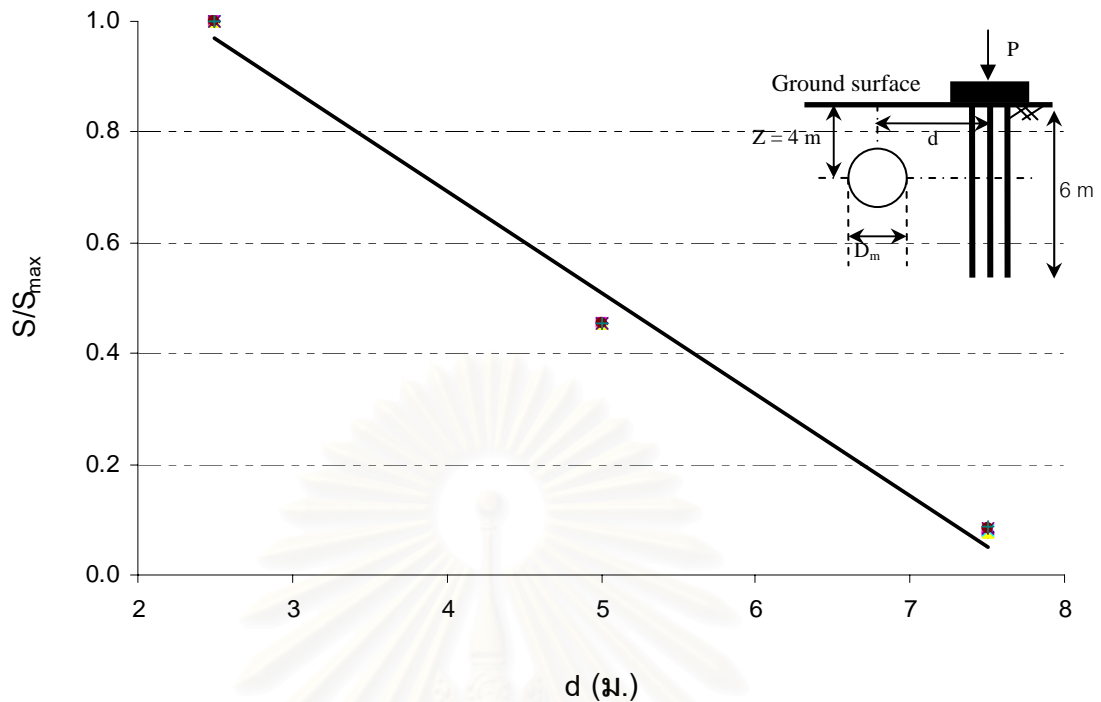
รูปที่ 5.11 เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 21 ม.



รูปที่ 5.12 อัตราการทรุดตัวของท่อตันตลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 6 ม.



รูปที่ 5.13 อัตราการทรุดตัวของท่อตันตลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 6 ม.



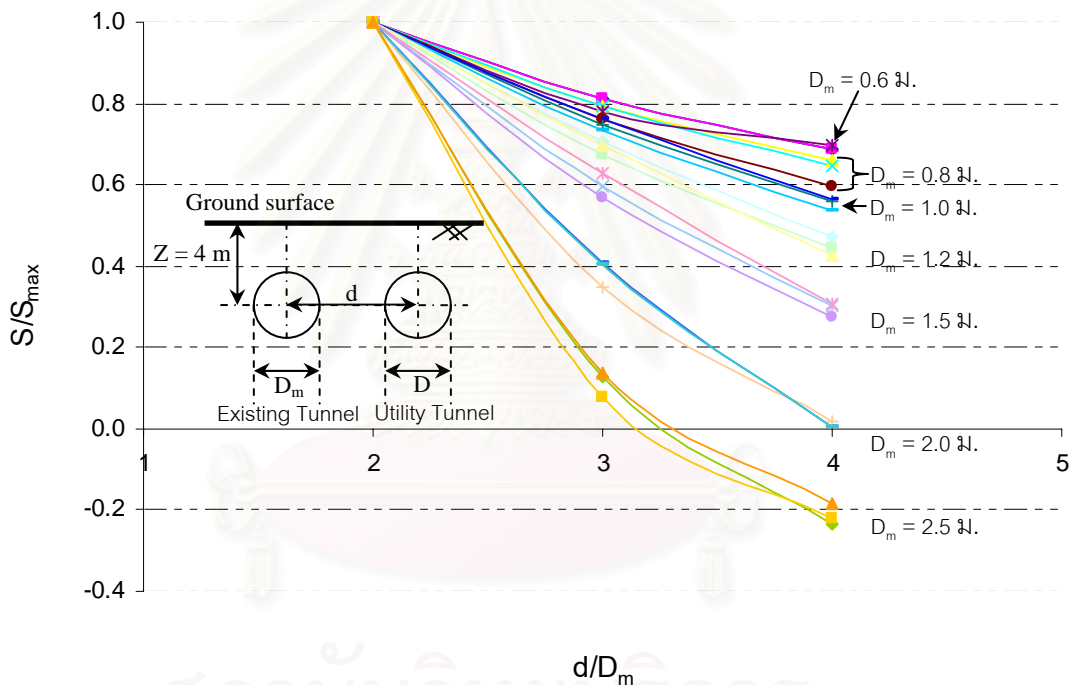
รูปที่ 5.14 เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม 6 ม.

เมื่อ S_{max} = ค่าการทรุดตัวของท่อตันลอดสูงสุด (พบว่าเป็นกรณีที่ระยะห่าง 2.5 ม.)

สำหรับการประยุกต์ใช้กราฟที่ 5.9 5.11 และ 5.14 อาจนำไปประมาณค่าอัตราการทรุดตัวที่ลดลงเมื่อระยะห่างของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงมากขึ้นสำหรับท่อตันลอดทุกขนาด และยังอาจใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตอิทธิพลของท่อตันลอดขนาดตั้งแต่ 0.6 ม. ถึง 2.5 ม. เนื่องจากผลกระทบจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มได้

5.1.4 ผลกระทบของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง การก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภค มีผลทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงที่ตำแหน่งทั้งด้านข้างและด้านล่างของขนาดอุโมงค์สาธารณูปโภคตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการทรุดตัวเมื่อเทียบกับระยะห่างของอุโมงค์สาธารณูปโภคเอง ดังแสดงในรูปที่ 5.15 และ 5.16 เป็นกราฟระหว่างอัตราการทรุดตัว (S/S_{max}) กับอัตราส่วนระยะห่างของท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตันลอดตั้งแต่ขนาดตั้งแต่ 0.6 ถึง 2.5 ม. (d/D_m) จากนั้นนำข้อมูลแต่ละชุดมาหาเส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของท่อแต่ละ

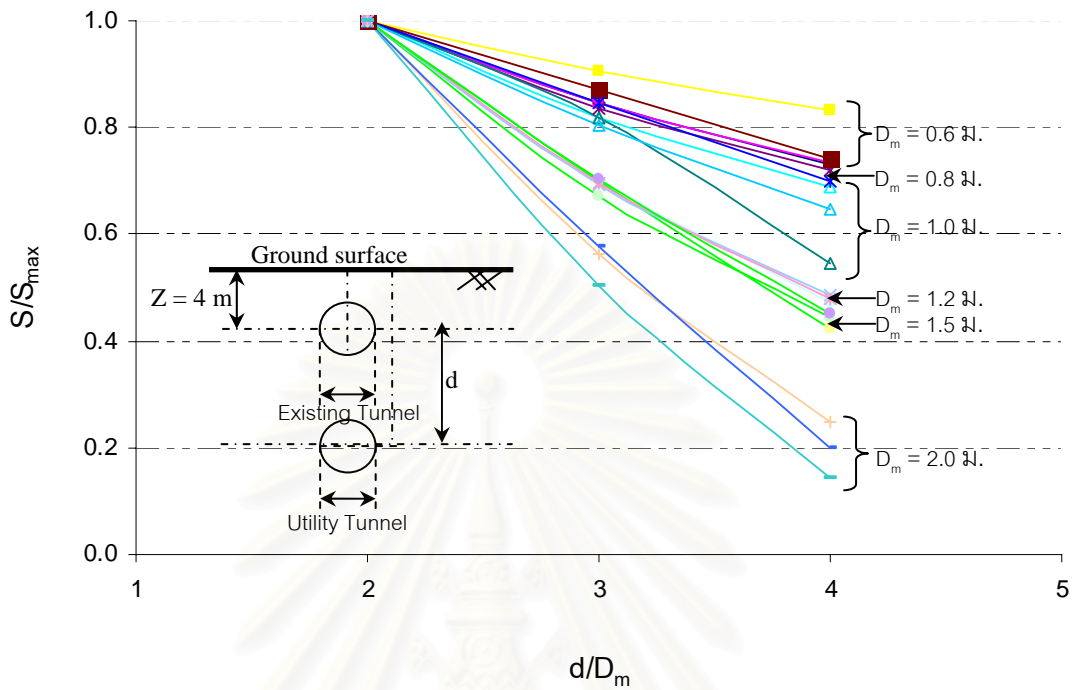
ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 5.17 และ 5.18 โดยกราฟที่ได้ในแต่ละขนาดท่อจะมีอัตราการทรุดตัวซึ่งสามารถประมาณได้ว่ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยการทรุดตัวจะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น และจากกราฟพบว่าอัตราการทรุดตัวของท่อดินลดลงขึ้นกับระยะห่างของท่อสาธารณูปโภคเป็นสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงแทบจะไม่มีผลต่ออัตราการทรุดตัว ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5.15 พิจารณาที่เส้นกราฟของท่อดินลดขนาด 0.6 ม. ท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงขนาด 0.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เมื่อสนใจที่ระยะ d/D_m เท่ากับ 3 จะพบว่าค่า S/S_{max} เท่ากับ 0.8 และเมื่อเปลี่ยนระยะ d/D_m จาก 3 เพิ่มเป็น 4 จะพบว่า S/S_{max} มีค่าลดลงประมาณ 15% ในขณะที่ระยะ d/D_m เท่ากับ 3 เมื่อเปลี่ยนขนาดท่อจาก 0.5 เป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่า S/S_{max} จะมีค่าลดลงประมาณ 1%



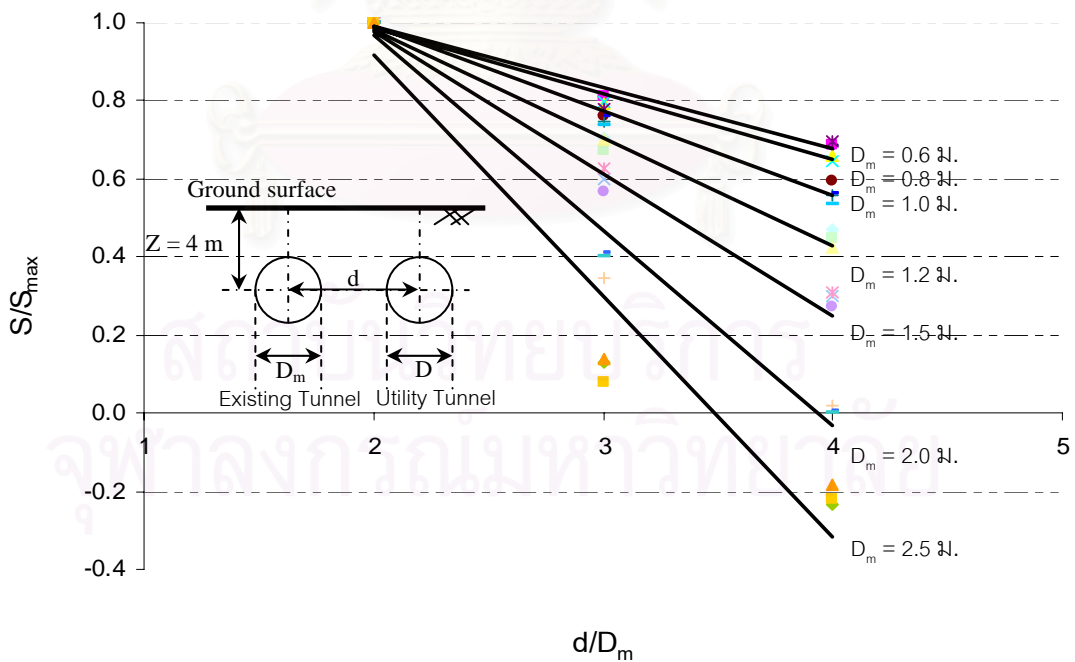
รูปที่ 5.15 อัตราการทรุดตัวของท่อดินลดขนาดเนื่องจากท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงด้านข้าง

สำหรับการประยุกต์ใช้กราฟที่ 5.17 และ 5.18 อาจนำไปประมาณค่าการทรุดตัวของท่อดินลดเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์สาธารณูปโภคข้างเคียง ณ ตำแหน่งด้านข้างและด้านล่างของท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อได้ อีกทั้งยังอาจใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตอิทธิพลเนื่องจากการก่อสร้างท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงได้ สำหรับแนวการวางตัวของท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงด้านบนนั้น เนื่องจากการวิเคราะห์นั้น ทำการวิเคราะห์เฉพาะในกรณีที่ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินวางตัวที่ความลึก 4 ม. ใต้ผิวดิน ด้วยเหตุนี้จึงวิเคราะห์ที่

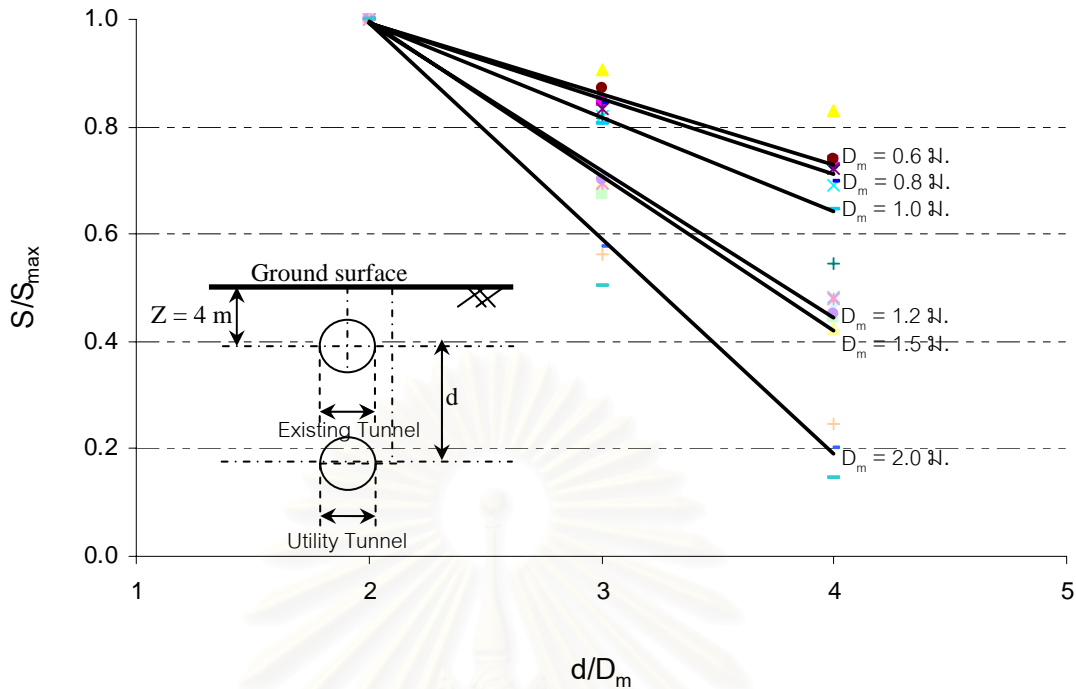
ระยะห่างของสิ่งก่อสร้างข้างที่ระยะ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพียงระยะเดียว ซึ่งค่าการทรุดตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 5.16 อัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงด้านล่าง



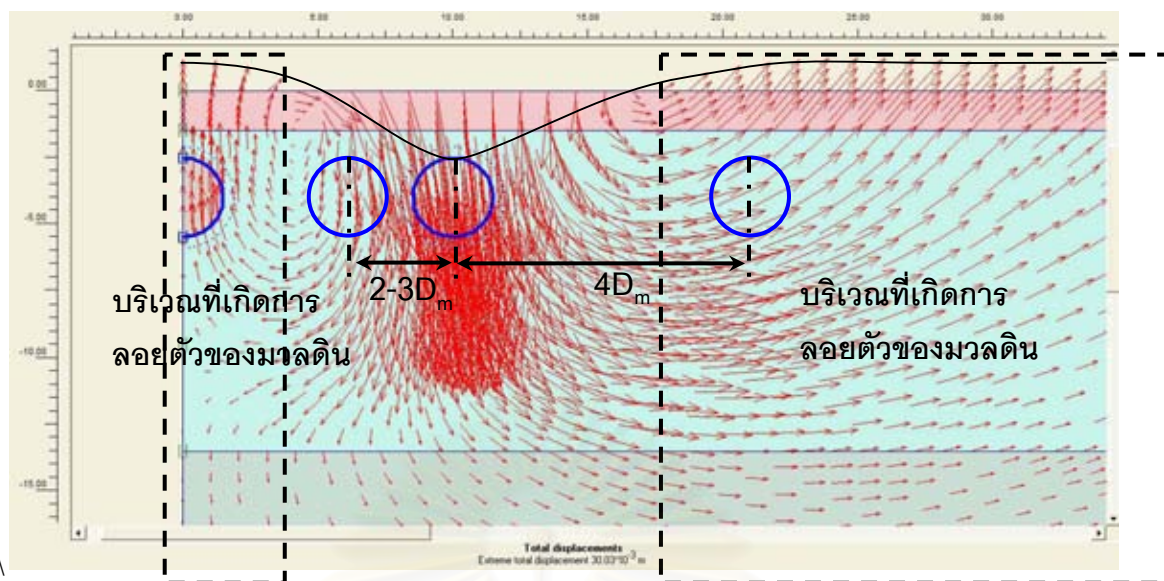
รูปที่ 5.17 เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของอัตราการทรุดตัวของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงด้านข้าง



รูปที่ 5.18 เส้นตัวแทนเชิงภาพรวมของอัตราการทำซ้ำของท่อตันลอดทุกขนาดเนื่องจากท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงด้านล่าง

เมื่อ S_{max} = ค่าการทำซ้ำของท่อตันลอดสูงสุด (พบว่าเป็นกรณีที่ระยะห่าง 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง)

หมายเหตุ จากรูปที่ 5.17 พบว่ากราฟค่าอัตราการทำซ้ำของท่อตันลอดขนาด 2.5 ม. ที่ระยะห่าง 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าติดลบ ซึ่งหมายถึงท่อตันลอดมีการเคลื่อนตัวขึ้น เนื่องจากการก่อสร้างท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงที่ระยะห่าง 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในบริเวณที่มวลดินเกิดการเคลื่อนตัวขึ้น ดังแสดงด้วยภาพจำลองการก่อสร้างสาธารณูปโภคในรูปที่ 5.19 โดยแนวการทำซ้ำเนื่องจากการก่อสร้างท่อสาธารณูปโภคสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 บริเวณ คือบริเวณที่เกิดการทำซ้ำ และบริเวณที่เกิดการยกตัว จากการวิเคราะห์ที่ระยะห่างของท่อสาธารณูปโภคด้านข้าง 2 และ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ทิศทางของเวกเตอร์การเคลื่อนตัวมีทิศทางลง หมายความว่าโครงสร้างท่อตันลอดเกิดการทำซ้ำ ในขณะที่ระยะห่างของท่อสาธารณูปโภคด้านข้างตั้งแต่ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ทิศทางการเคลื่อนตัวของเวกเตอร์มีทิศทางขึ้น กล่าวคือโครงสร้างท่อตันลอดเกิดการยกตัวหรือเคลื่อนตัวขึ้น



รูปที่ 5.19 แสดงพื้นที่ที่เกิดการลอบตัวเนื่องจากการทรุดตัวของท่อสาธารณูปโภคข้างเคียงด้านข้าง

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

การนำเสนอผลการวิเคราะห์การทรุดตัวเนื่องจากผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง จัดทำในรูปแบบกราฟการเคลื่อนตัว หน่วยแรงแนวแกน หน่วยแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด โดยแยกเป็นหมวดหมู่ตามลักษณะของสิ่งก่อสร้างข้างเคียง ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบการก่อสร้างแต่ละหมวดได้เพื่อนำไปหาวิธีการก่อสร้างและขนาดของท่อร้อยสายไฟที่เหมาะสม ผลการวิจัยพบว่าการก่อสร้างท่อสาธารณูปโภคข้างเคียง การปักเข็มพืด การก่อสร้างเสาเข็มกลุ่ม ยิ่งก่อสร้างใกล้โครงสร้างท่อร้อยสายไฟมากจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัว และหน่วยแรงในท่อร้อยสายไฟมากขึ้น ส่วนการขุดเปิดหน้าดินจะส่งผลให้ท่อร้อยสายไฟเกิดการลอบตัวขึ้น ในส่วนของการเปลี่ยนขนาดของท่อร้อยสายไฟ การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกในเสาเข็มกลุ่ม และการเพิ่มขนาดความกว้างกับความลึกของการขุดเปิดหน้าดิน มีผลต่ออัตราการทรุดตัวเนื่องจากการก่อสร้างข้างเคียงน้อยมาก สำหรับท่อ HDD ค่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างท่อ HDD เองมีค่าน้อยเนื่องจากขนาดเล็กและน้ำหนักเบา การเคลื่อนตัวส่วนใหญ่จึงเกิดจากการก่อสร้างข้างเคียงเป็นหลัก สำหรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในท่อ HDD มีค่าน้อยมาก ซึ่งจากการวิเคราะห์ปัญหานั้น อาจใช้ในการคาดการณ์ค่าการทรุดตัวและหน่วยแรง อีกทั้งอาจใช้เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตอิทธิพลเนื่องจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง เพื่อป้องกันความเสียหายของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินได้

5.3 อุปสรรคและปัญหา ข้อจำกัดในการนำผลการวิเคราะห์ไปใช้

การวิเคราะห์ปัญหาจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงจำเป็นจะต้องใช้วิธีทางไฟไนติคัลเมนต์ในการวิเคราะห์โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PLAXIS แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดที่สามารถจำลองปัญหาได้

เฉพาะในแบบ 2 มิติ อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การวิเคราะห์ได้ผลที่คลาดเคลื่อนออกไปจากความเป็นจริงในภาคสนาม รวมถึงการตรวจสอบค่าความถูกต้องจากผลการวิเคราะห์ทำได้ยากเนื่องจากไม่มีการเก็บค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนามในเชิงปริมาณ และการตั้งโจทย์ในการวิเคราะห์ได้จากการสอบถามในสถานะที่ท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินเกิดความเสียหายแล้วเป็นหลัก นอกจากนี้ยังไม่มีรวบรวมข้อมูลว่า สิ่งก่อสร้างข้างเคียงชนิดใดที่สร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินบ้าง ด้วยเหตุนี้ การจำลองปัญหาโครงสร้าง แบบจำลองและการตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จึงค่อนข้างกว้างและอาจไม่สามารถเจาะจงปัญหาได้ตรงจุด อีกทั้งกระบวนการตัดตัวคาน้ำของโครงสร้างหลักกว่าจะเสร็จสิ้นต้องใช้เวลาหลายปี จึงทำได้เพียงการจำลองปัญหาโดยใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และกำหนดพารามิเตอร์ในการคำนวณให้ใกล้เคียงกับสภาพจริง และจำลองขั้นตอนการก่อสร้างให้ใกล้เคียงกับการก่อสร้างจริงที่สุด

สำหรับผลการวิเคราะห์อาจใช้เป็นแนวทางในการป้องกันผลกระทบจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงได้ในเบื้องต้น เนื่องจากผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลชั้นดินเชิงภาพรวมในกรุงเทพฯ และปริมณฑล อีกทั้งใช้ทฤษฎีอิลาสติคสมมุติความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นส่งผลให้การเคลื่อนตัวที่ได้มักจะมากกว่าความเป็นจริงซึ่งเป็นค่าที่ปลอดภัย (Conservative) จึงควรจะทำการวิเคราะห์เป็นกรณีไป เพื่อความถูกต้องปลอดภัยของโครงสร้างและไม่ทำให้สิ้นเปลืองค่าก่อสร้างจนเกินไป

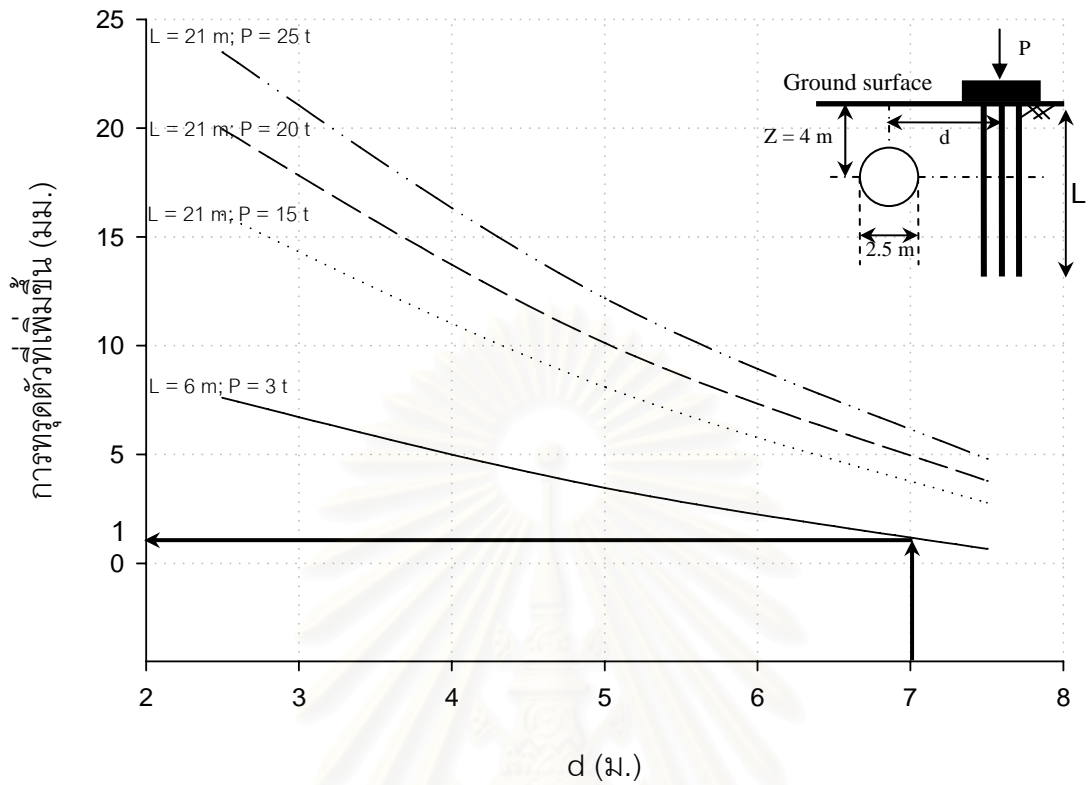
5.4 ตัวอย่างการใช้ผลการวิเคราะห์ในการออกแบบ

ตัวอย่างการนำค่าการทรุดตัว และหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้

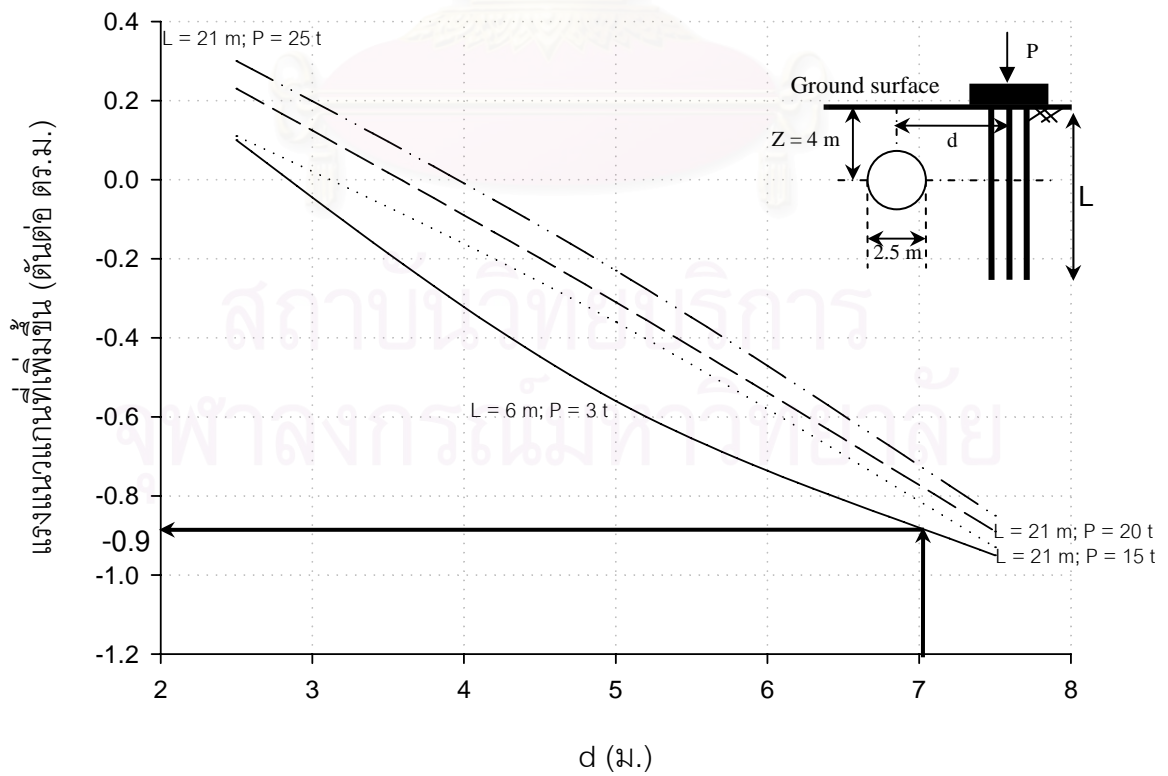
ปัญหาที่ 1 ผลกระทบที่มีต่อท่อตันลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ม. เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มบริเวณใกล้เคียง

หากต้องการทราบการทรุดตัวและหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มสั้นความยาวเสาเข็ม 6 ม. ใช้น้ำหนักบรรทุกคงที่กระทำที่ปลายเข็มหนัก 3 ตัน มีระยะห่างจากโครงสร้างหลักเป็นระยะทาง 7 ม. โดยที่โครงสร้างหลักเป็นท่อตันลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2.5 ม.

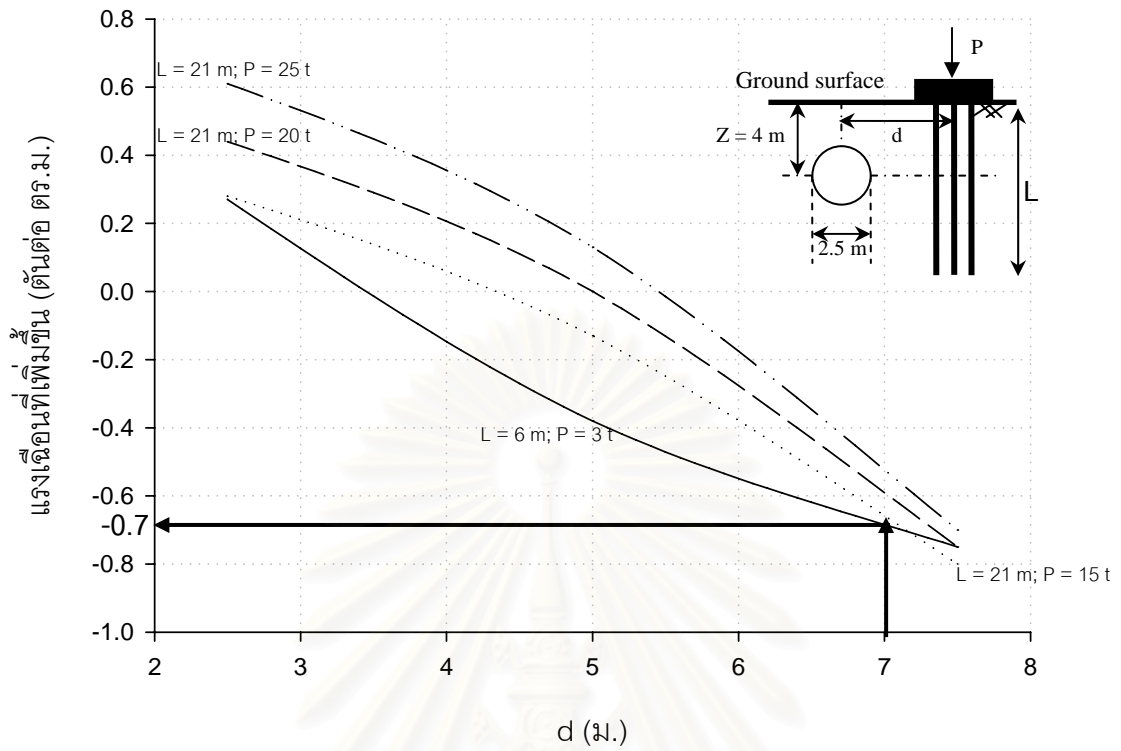
จากรูป 5.20 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มกลุ่มสั้น ระยะห่าง 7 ม. มีค่าเท่ากับ 1 มม. รูปที่ 5.21 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ -0.9 ตันต่อ ตร.ม. รูปที่ 5.22 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ -0.7 ตันต่อ ตร.ม. รูปที่ 5.23 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ -0.9 ตัน.ม.



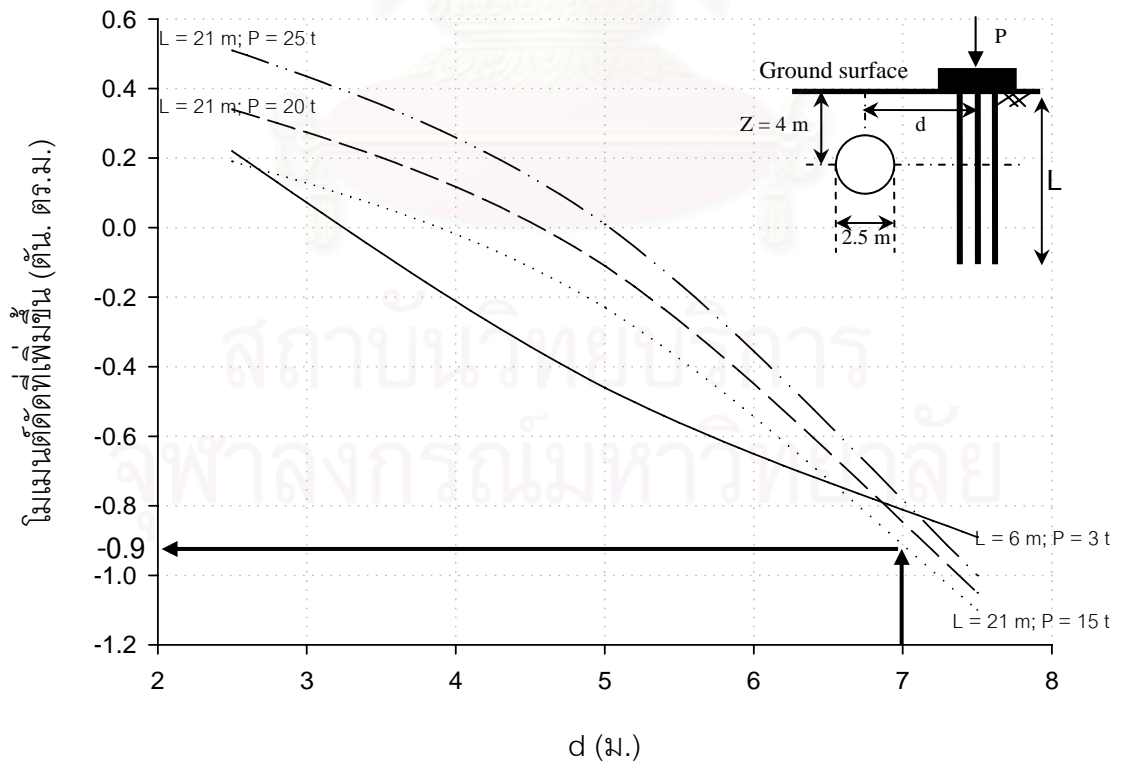
รูปที่ 5.20 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 5.21 หน่วยแรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



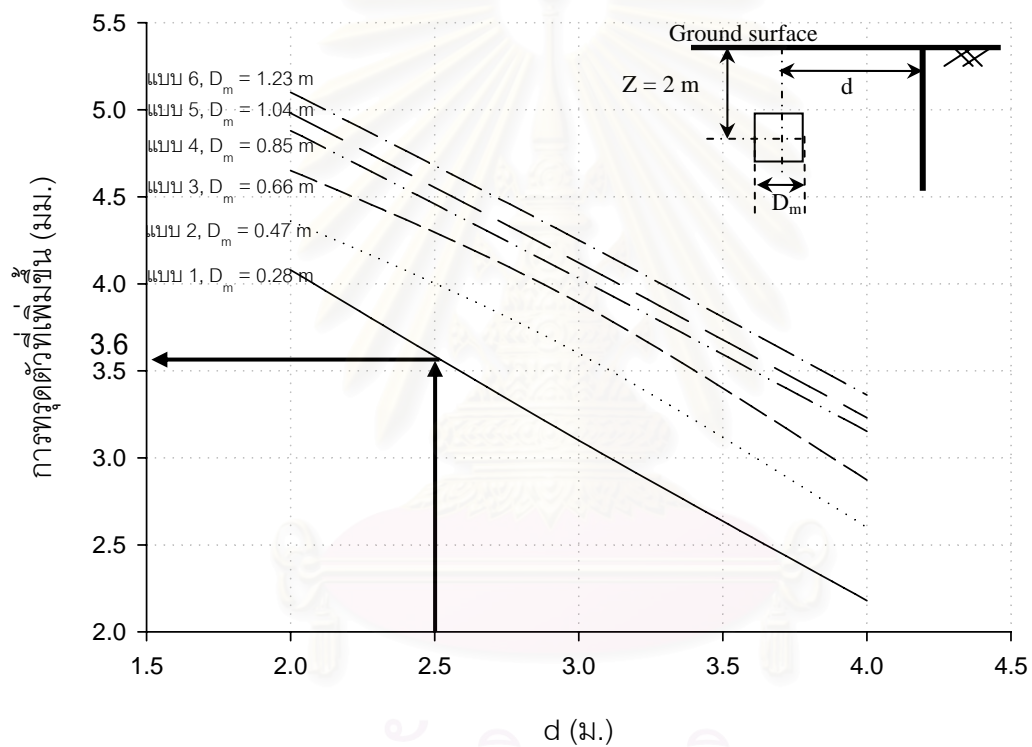
รูปที่ 5.22 หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 5.23 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม

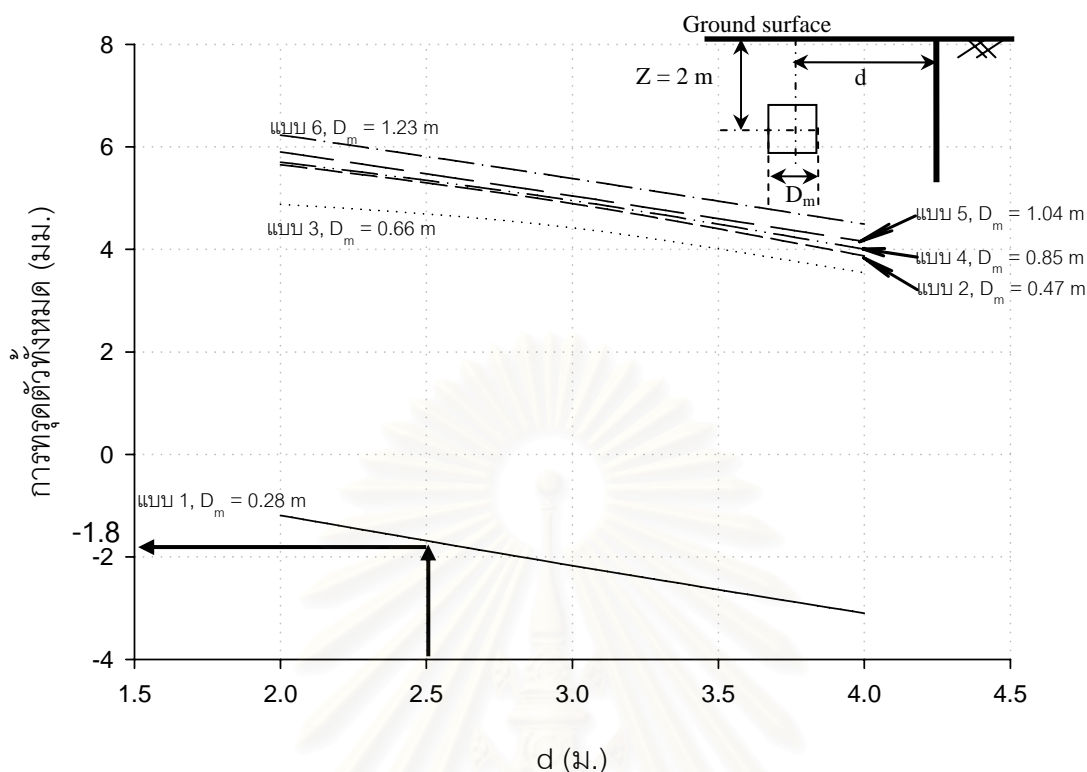
ปัญหาที่ 2 ผลกระทบที่มีต่อระบบ खुดเปิดหน้า เนื่องจากการก่อสร้างเข็มพืดบริเวณใกล้เคียง หากต้องการทราบการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นและการทรุดตัวทั้งหมดจากการปักเข็มพืดที่ระดับความลึก 15 ม. มีระยะห่างจากโครงสร้างหลักเป็นระยะทาง 2.5 ม. โดยที่โครงสร้างหลักเป็นท่อระบบ खुดเปิดหน้าดินรูปแบบที่ 1

จากรูป 5.24 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างเข็มพืด ระยะห่าง 2.5 ม. มีค่าเท่ากับ 3.6 มม. รูปที่ 5.25 การทรุดตัวทั้งหมดมีค่าเท่ากับ -1.8 มม.



รูปที่ 5.24 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบ खुดเปิดหน้าดินเนื่องจากการก่อสร้างเข็มพืด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.25 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อระบบขุดเปิดหน้าดินเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด

5.5 ข้อเสนอแนะต่องานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่สามารถยืนยันค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ว่าสอดคล้องกับค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม เพราะไม่มีผลตรวจวัดเชิงปริมาณในภาคสนามมาก่อน ในอนาคตจึงควรมีการเก็บข้อมูลทางวิศวกรรมในเชิง ปริมาณที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรม รวมทั้งยังนำมาปรับค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรมให้เหมาะสมกับโครงสร้างข้างเคียงแต่ละโครงสร้างเพื่อความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นสำหรับการคำนวณในอนาคต

นอกจากนี้การรวบรวมชนิดของสิ่งก่อสร้างข้างเคียง รูปแบบการก่อสร้าง ผลกระทบทางด้านแรง ค่าการทรุดตัว และระยะเวลาใช้งานของท่อร้อยสายไฟฟ้าก่อนเกิดความเสียหาย ควรทำการเก็บข้อมูลในอนาคต เนื่องจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียงแต่ละชนิดมีผลต่อการทรุดตัว และหน่วยแรงที่มากระทำกับโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าได้ดินไม่เท่ากัน การรวบรวมชนิดของสิ่งก่อสร้างข้างเคียงที่ทำให้โครงสร้างเสียหายจะช่วยให้กรณีในการวิเคราะห์น้อยลงและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

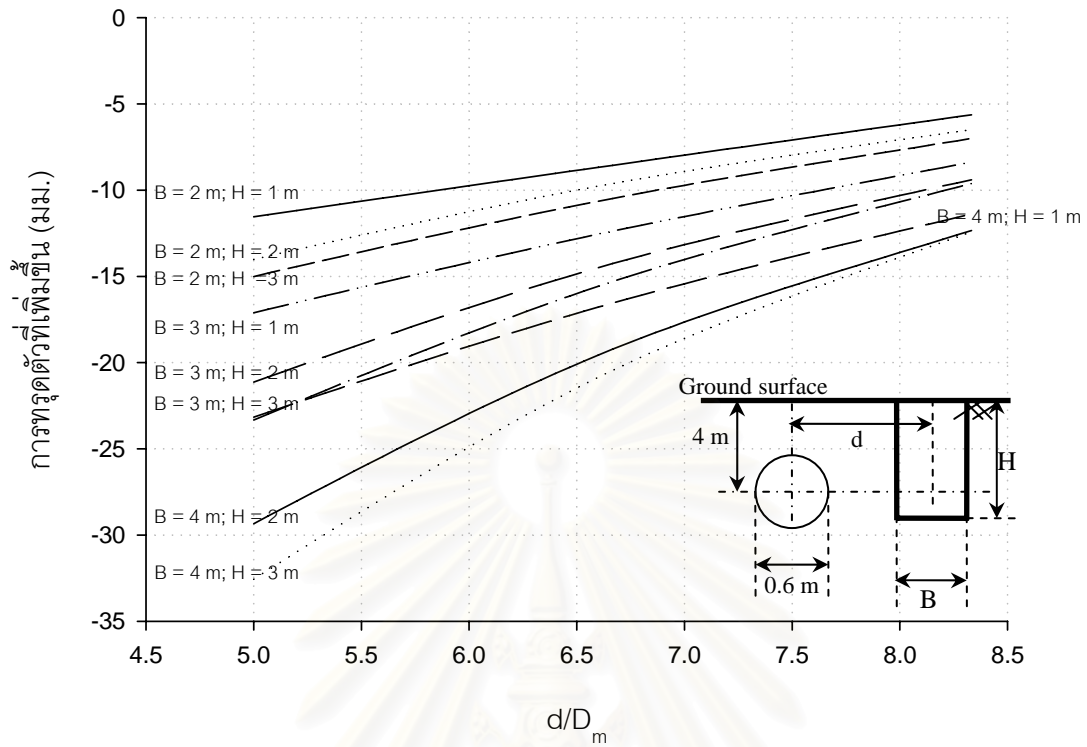
1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. กรุงเทพมหานคร, 2530.
2. สง่า ตั้งชวาล. ธรณีวิศวกรรมขั้นพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
3. ชินะวัฒน์ มุกตพันธ์. ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 7. ขอนแก่น : หน่วยงานบรรณงานบริการและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยขอนแก่น, 2544.
4. ลีรวัตร์ บุญญะฐิติ. ความรู้พื้นฐานและการประยุกต์ใช้วิธี Finite element สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบทางวิศวกรรมปฐพี. ในเอกสารการอบรมการประยุกต์ใช้วิธี Finite element ทางวิศวกรรมปฐพี จัดโดย สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (กันยายน 2546).
5. วีระนันท์ ปิตุปรกรณ์. การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยสแตนด์การ์ด เพนเทรชันเทสต์ ในชั้นดินกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
6. ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์. พฤติกรรมของเสาเข็มแบเรตและเสาเข็มเจาะที่ติดเครื่องมือวัดในชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
7. พรสวรรค์ วงศ์วิวัฒน์. การศึกษาพฤติกรรมการยุบตัวของชั้นน้ำบาดาลระดับลึกเพื่อวิเคราะห์การทรุดตัวของพื้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
8. Asian Institute of Technology [A.I.T.]. Investigation of Land Subsidence Caused by Deep Well Pumping in Bangkok. Comprehensive report 1978-1981 (1981).
9. Christian, J.T. and Carrier, W.D. Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's chart reinterpreted. Canadian Geotechnical Journal, 15, 123-128.
10. Electrical Standard Section Electrical Engineering Division Engineering Department. Underground construction standards. กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้านครหลวง, 2530.
11. Euro code No. 7. Geotechnical design. European Committee for Standardization. Draft report. London: British Standards Institution, 1995.
12. Kramer, S.R., McDonald, W.J. and Thomson, J.C. An Introduction to trenchless

- technology, New York, Van Nostrand Reinhold, 1992.
13. Moh, Z.C. Strength and compressibility of Bangkok clay. Res. Rep. No. 7 A.I.T., 1969.
 14. Nutalaya, P. and J.L. Rau. Geomorphology and land subsidence in Bangkok: In guidebook for field trip Itinerary in the short course on applied quaternary geology. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1981: pp. 181-202.
 15. Peck, R. P., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H. Foundation Engineering, 2nd ed, New York: John Wiley & Sons, 1974.
 16. Peckwork, H. Concrete pipe handbook. American Concrete Pipe Association. Chicago, 1959.
 17. Poulos, H.G. and Davis, E.H. Elastic solution for soil and rock mechanics. New York: Wiley & Sons, 1963.
 18. Teeparaksa, W., Photayanuvat, C., Boonsong, C., Boonard, J. Design of subway tunnel under the Chao Phraya river for Bangkok south blue line extension: International symposium on underground excavation and tunneling (February 2006).
 19. Terzaghi, K. Erdbaumechanik auf boden-physicalischen grundlagen. Deuticke. Vienna, 1925.
 20. Terzaghi, K. and Peck, R.B., Soil mechanics in engineering practice, John Wiley and Sons, 1948.
 21. Terzaghi, K., Peck, R. P., and Mesri, G. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
 22. Thepparak, S. Analysis of Settlement and Compression of Shallow Soil Strata Due to Drawdown of Groundwater in an Underlying Aquifer from Well Pumping in the Bangkok Area. Master's Thesis, Geotechnical Engineering, School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology, 2001.
 23. Tomlinson, M.J. Foundation design and construction. 7th ed. London: Pearson Education, 2001.
 24. Tonyagate, W. Geotechnical Properties of Bangkok Subsoil for Subsidence Analysis. Master's Thesis, Geotechnical Engineering, School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology, 1978.

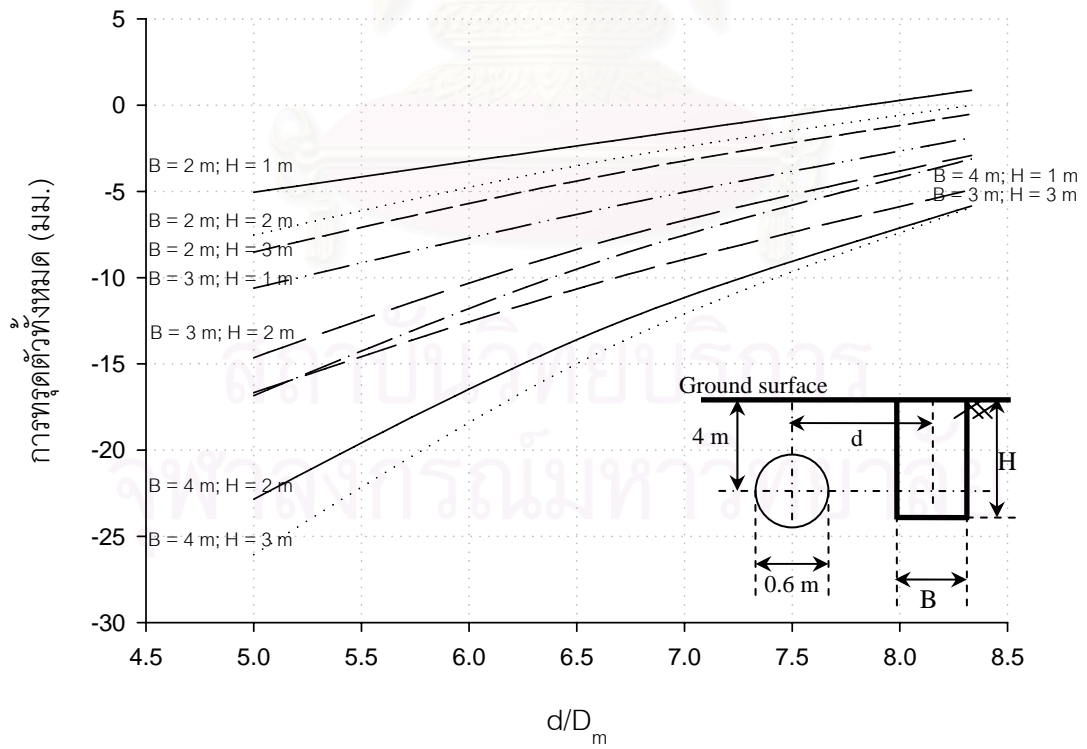
25. Willoughby, D.A. Horizontal Directional Drilling utility and pipeline applications,
New York: McGraw-Hill, 2005.



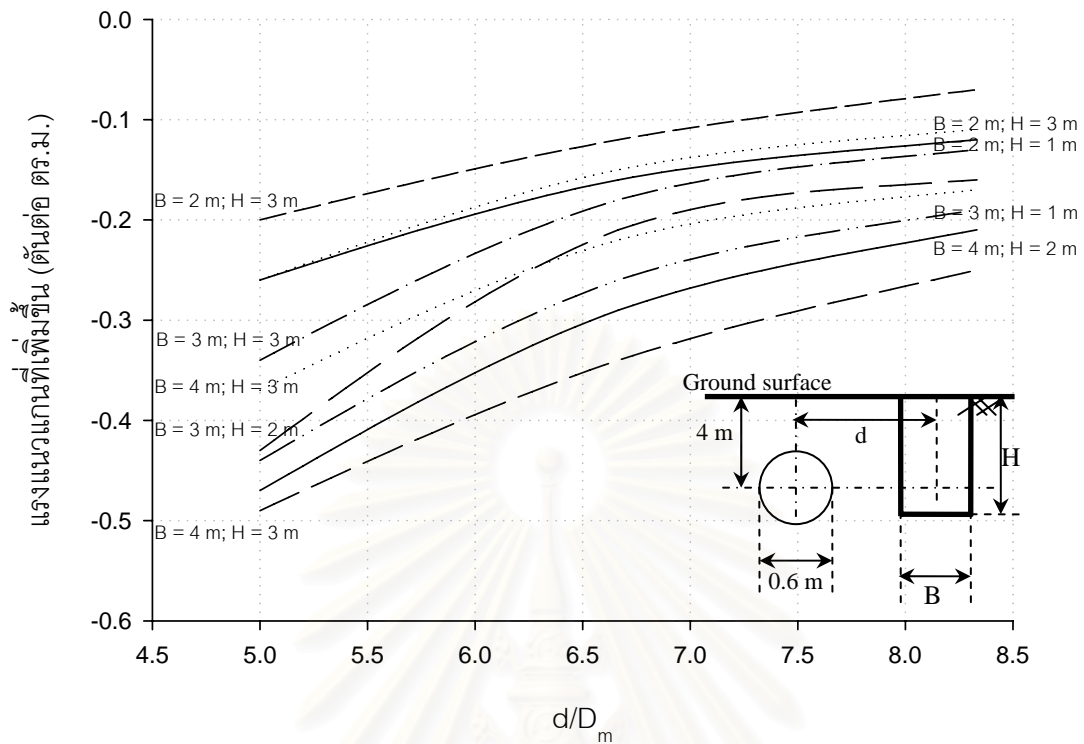
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



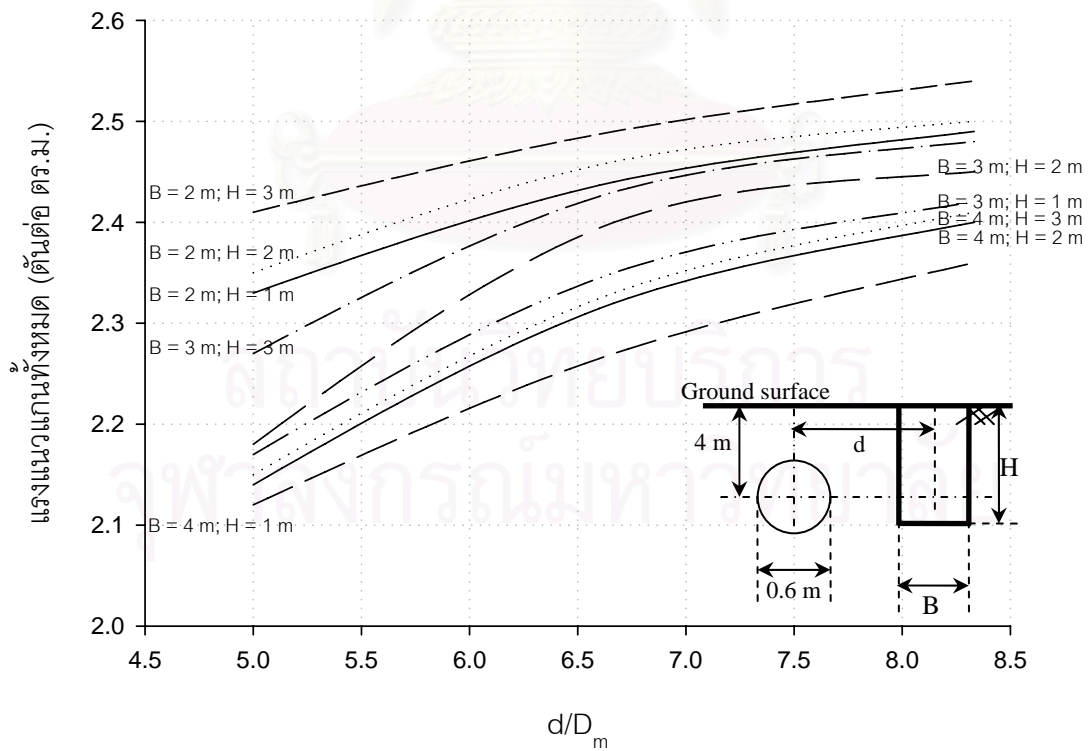
รูปที่ ก-1.1.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการขุดเปิดหน้าดิน



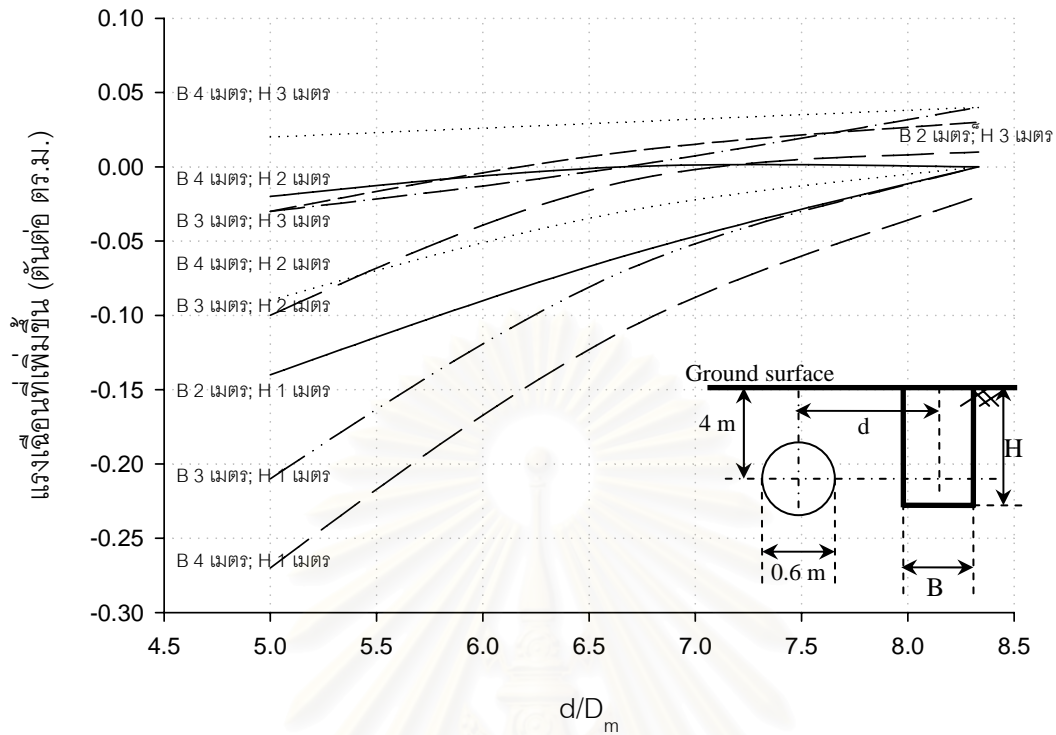
รูปที่ ก-1.1.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการขุดเปิดหน้าดิน



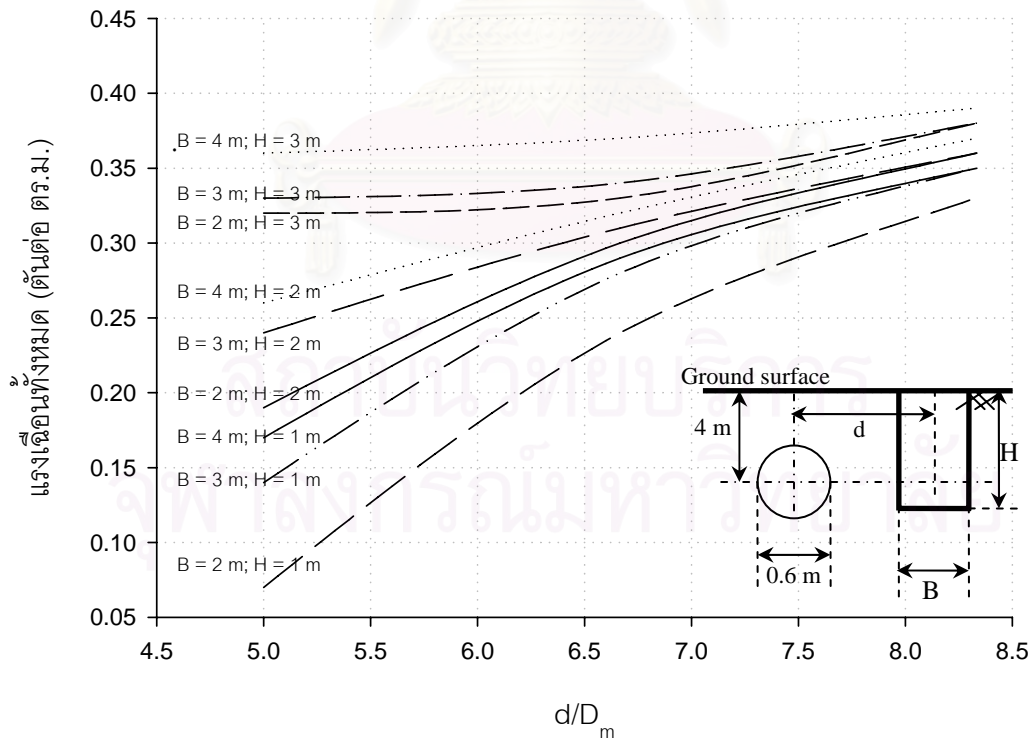
รูปที่ ก-1.1.2.1 แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการขุดเปิดหน้าดิน



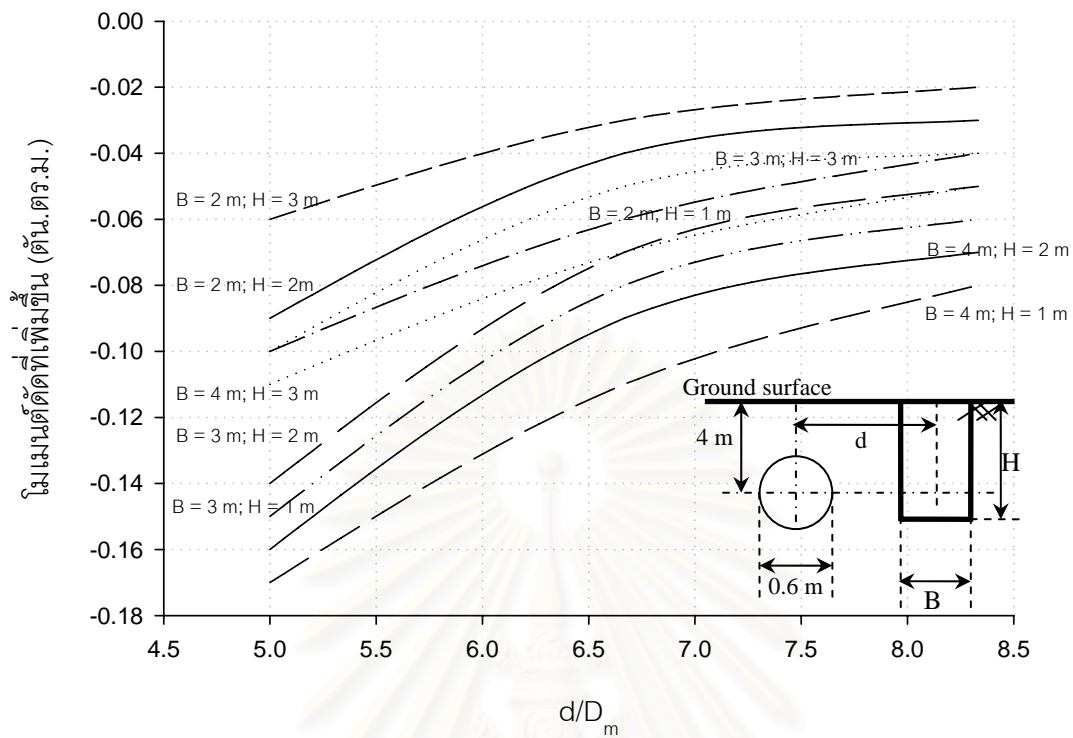
รูปที่ ก-1.1.2.2 แรงตามแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการขุดเปิดหน้าดิน



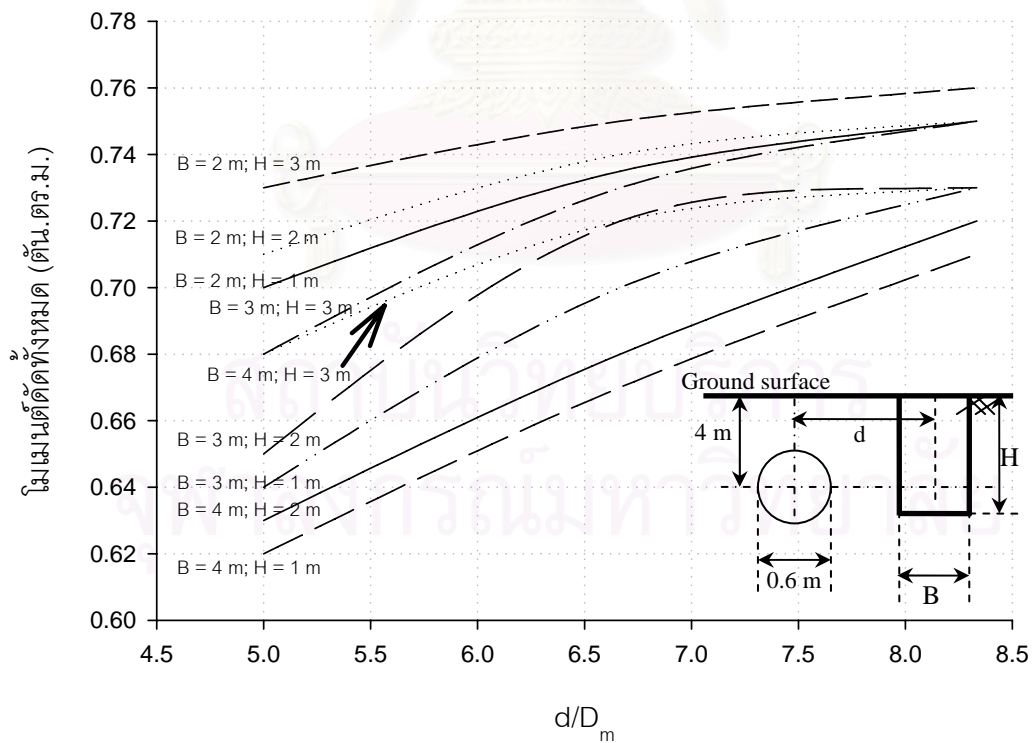
รูปที่ ก-1.1.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการขุดเปิดหน้าดิน



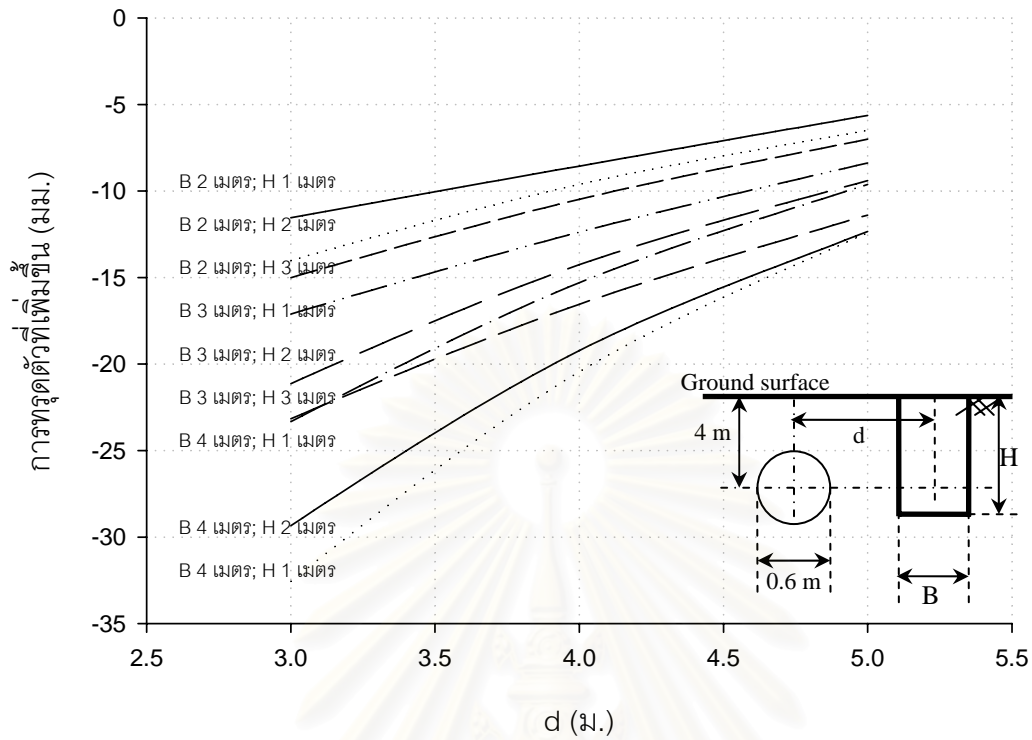
รูปที่ ก-1.1.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. จากการขุดเปิดหน้าดิน



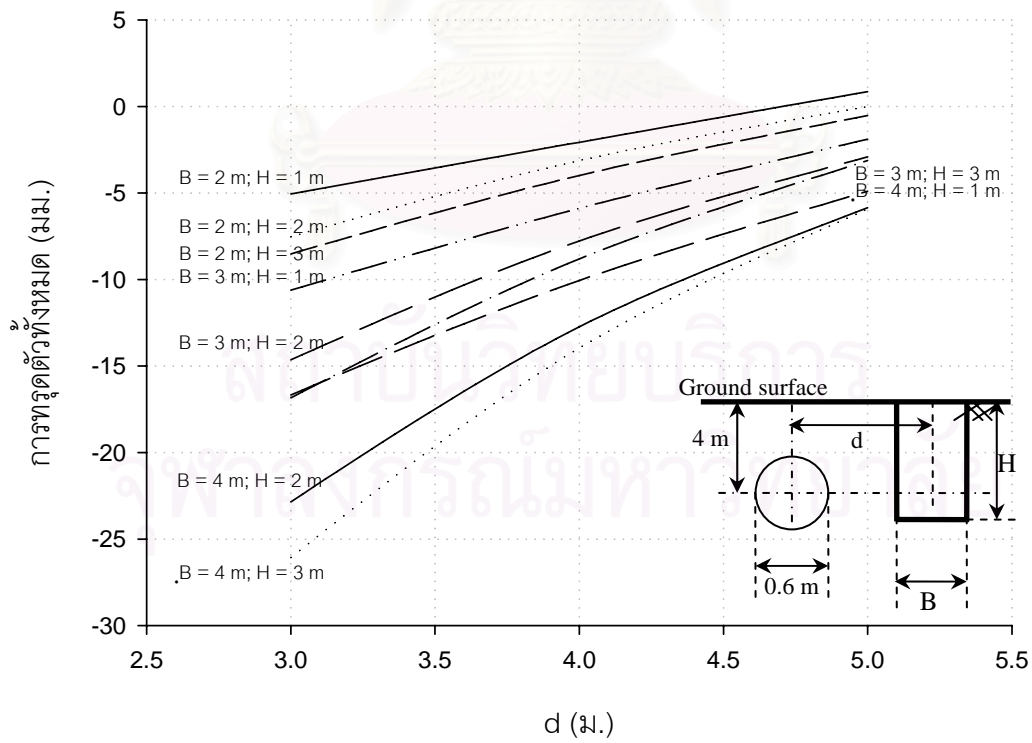
รูปที่ ก-1.1.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



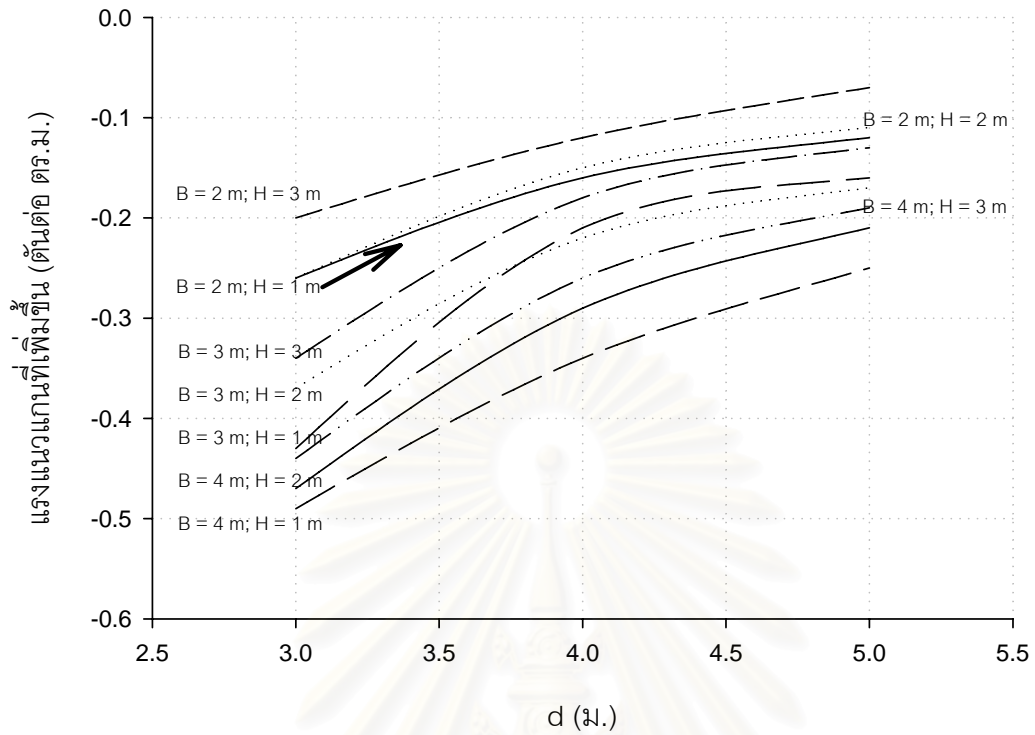
รูปที่ ก-1.1.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



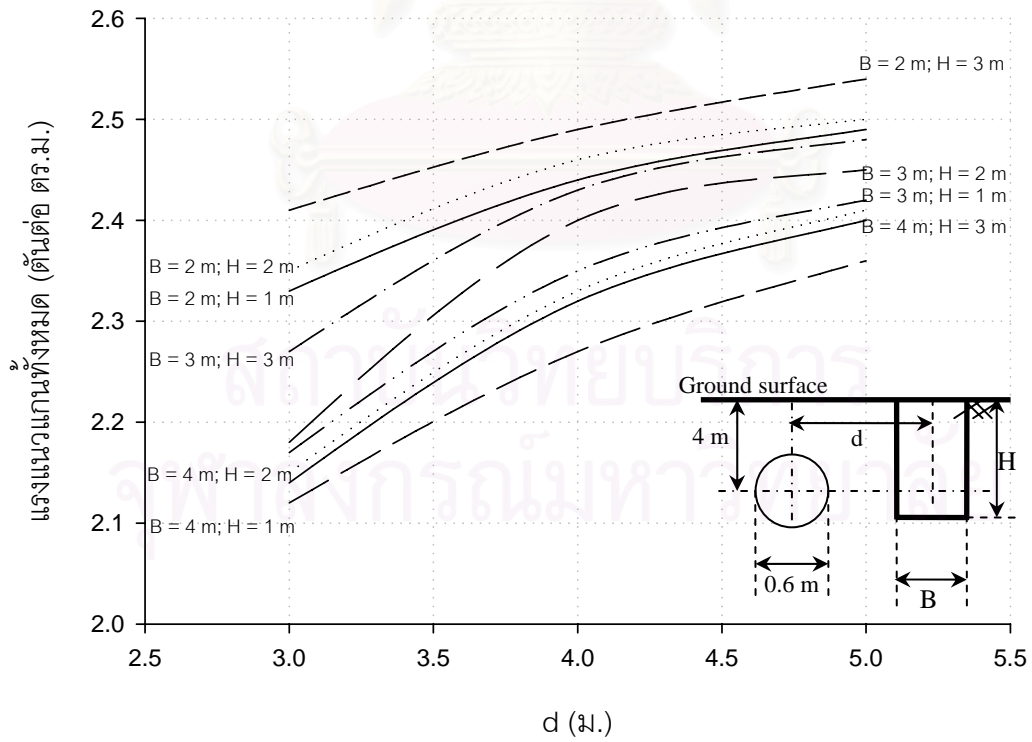
รูปที่ ก-1.1.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



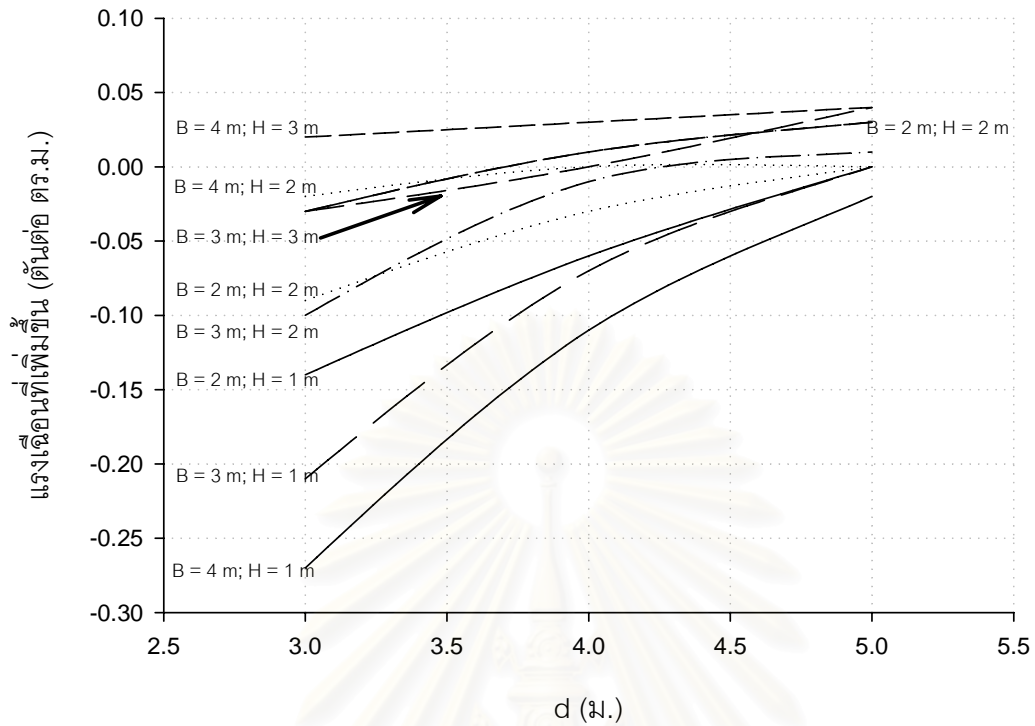
รูปที่ ก-1.1.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



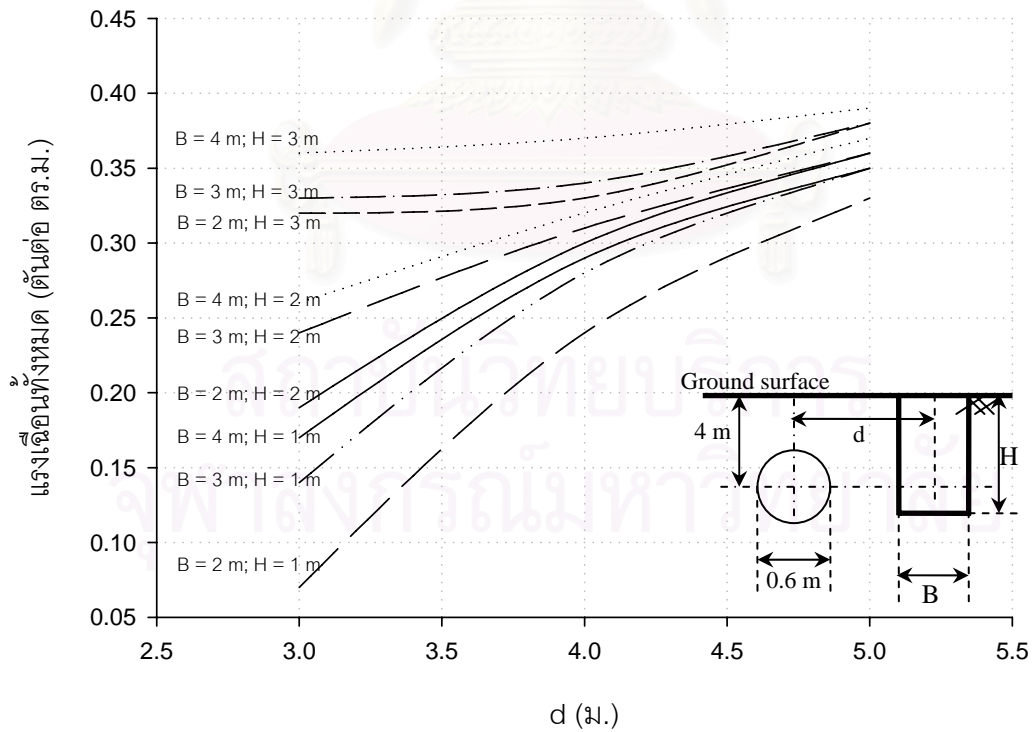
รูปที่ ก-1.1.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



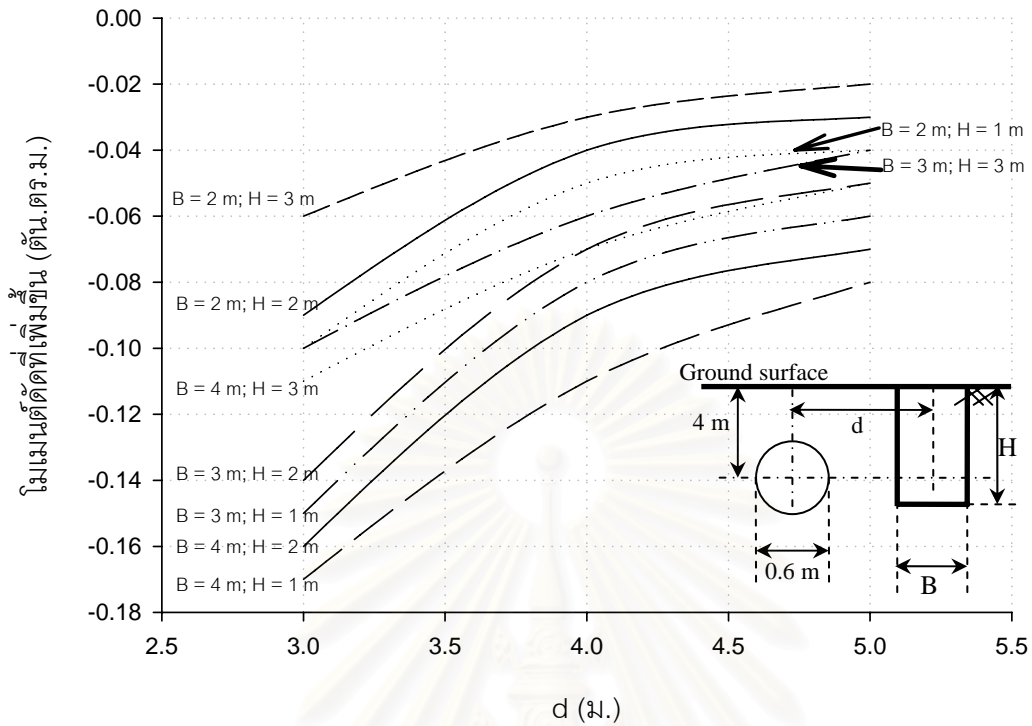
รูปที่ ก-1.1.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



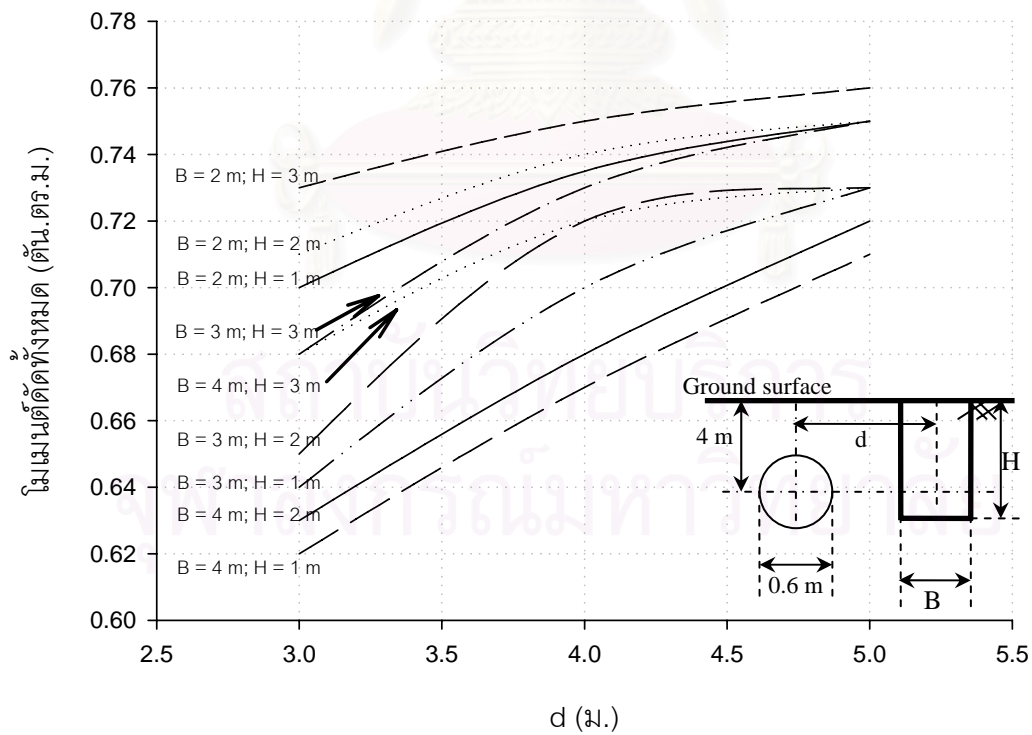
รูปที่ ก-1.1.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



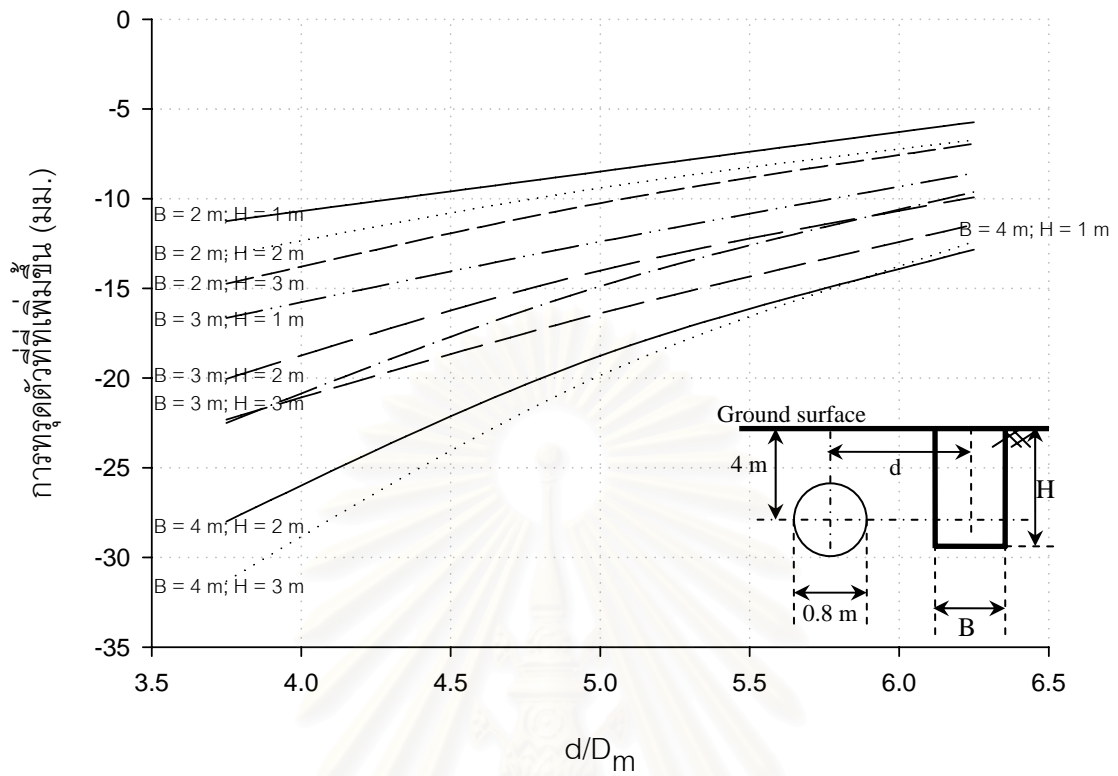
รูปที่ ก-1.1.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



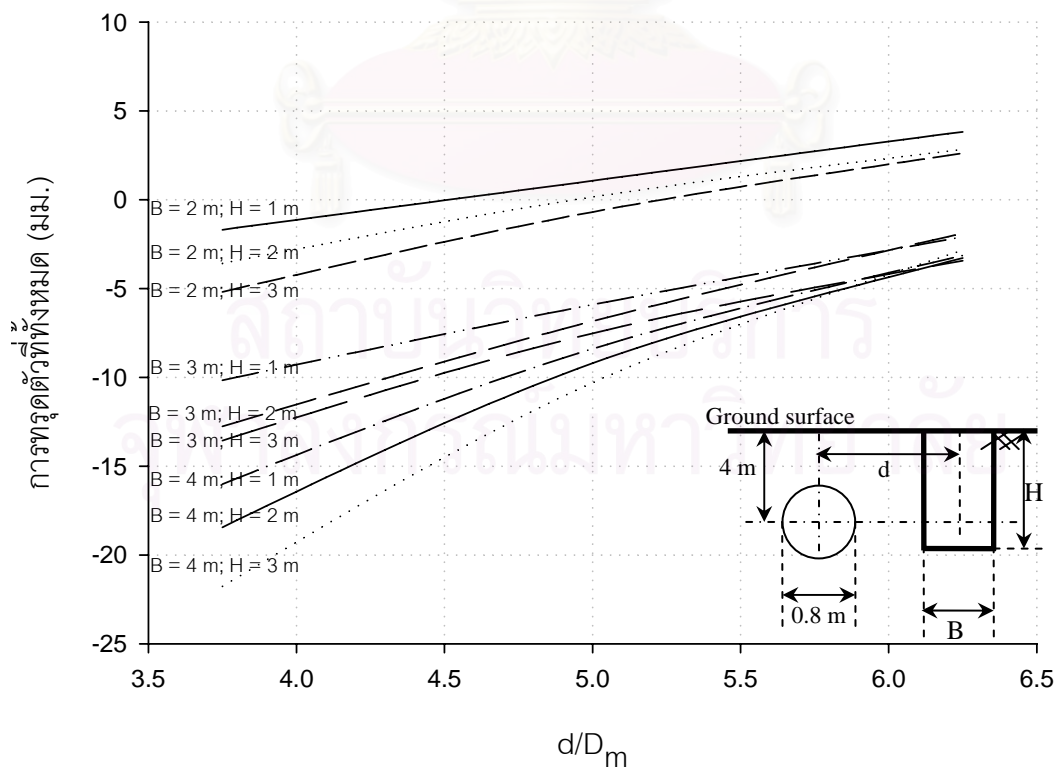
รูปที่ ก-1.1.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



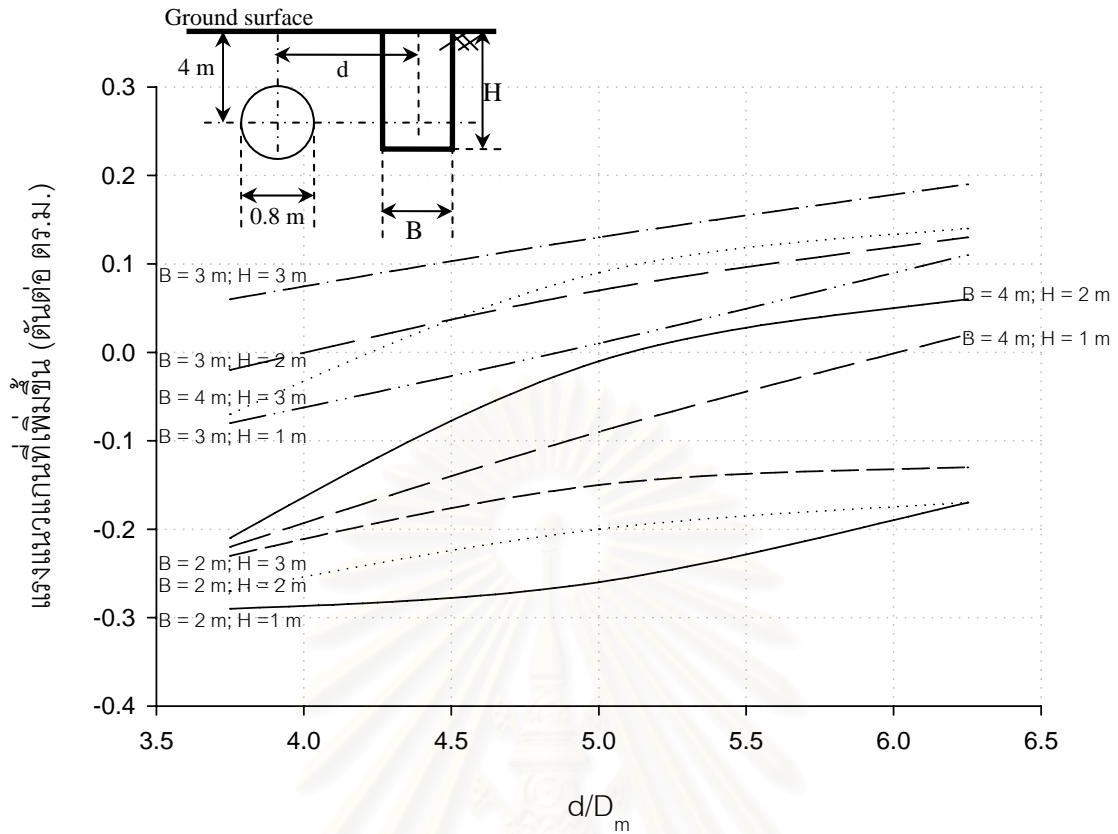
รูปที่ ก-1.1.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



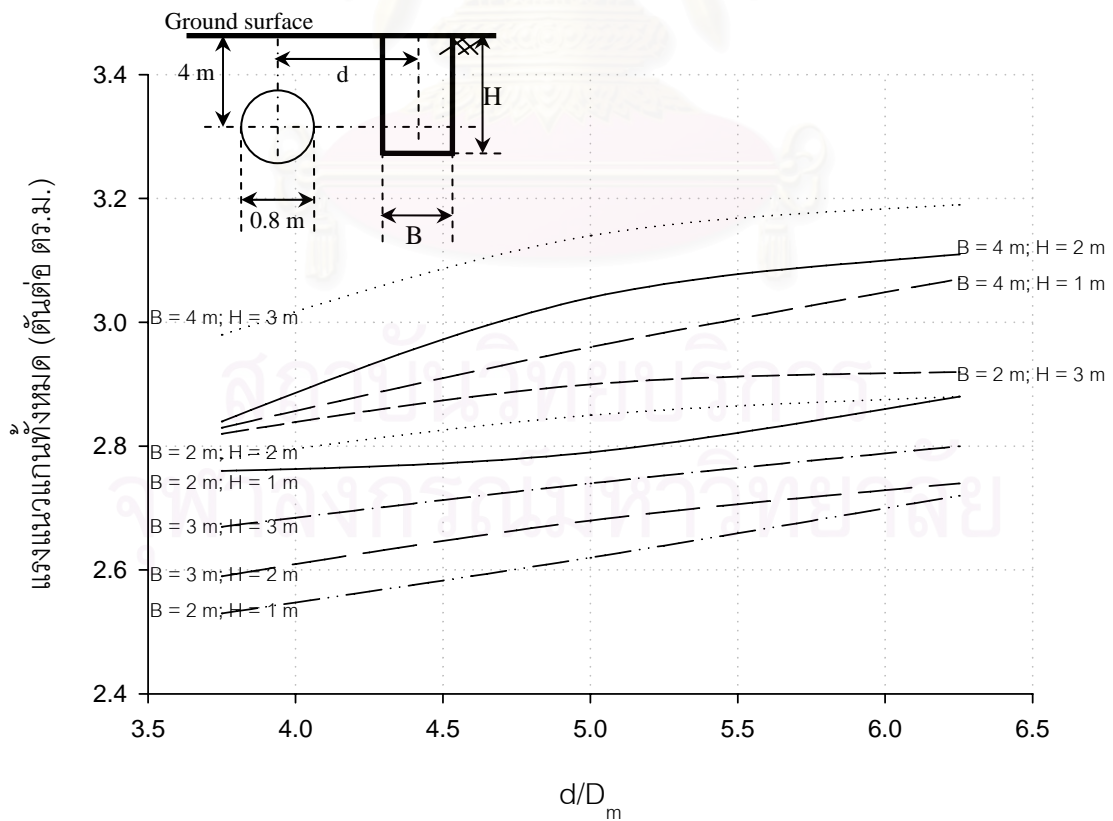
รูปที่ ก-1.2.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



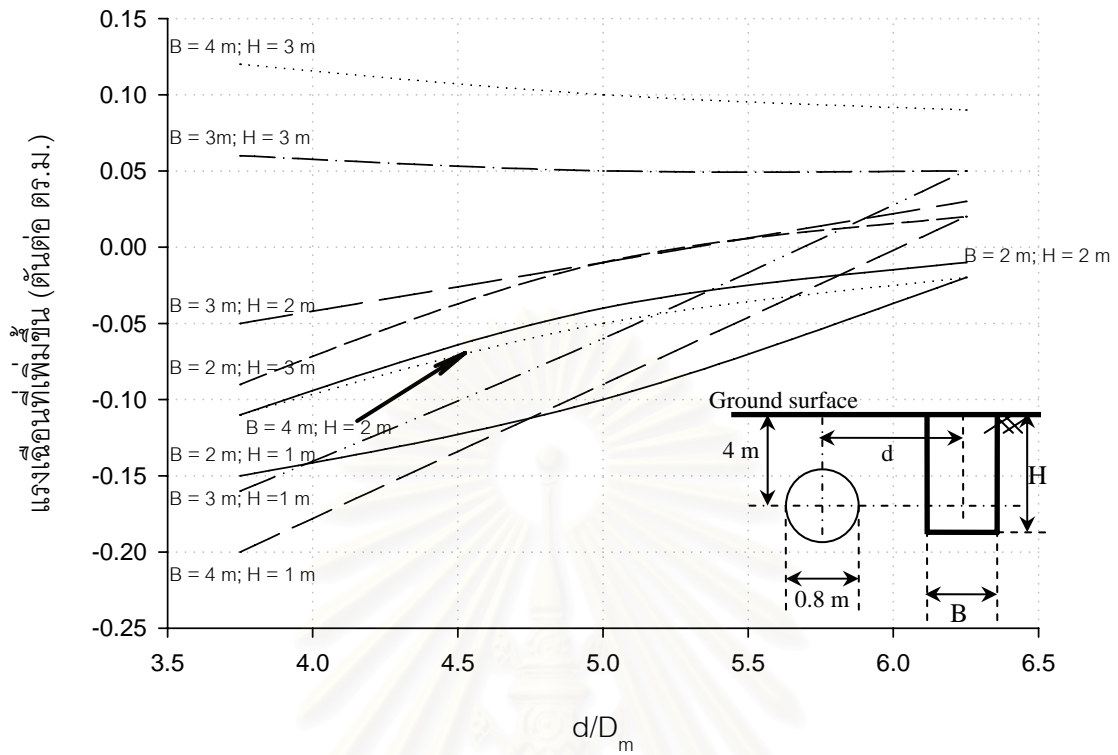
รูปที่ ก-1.2.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



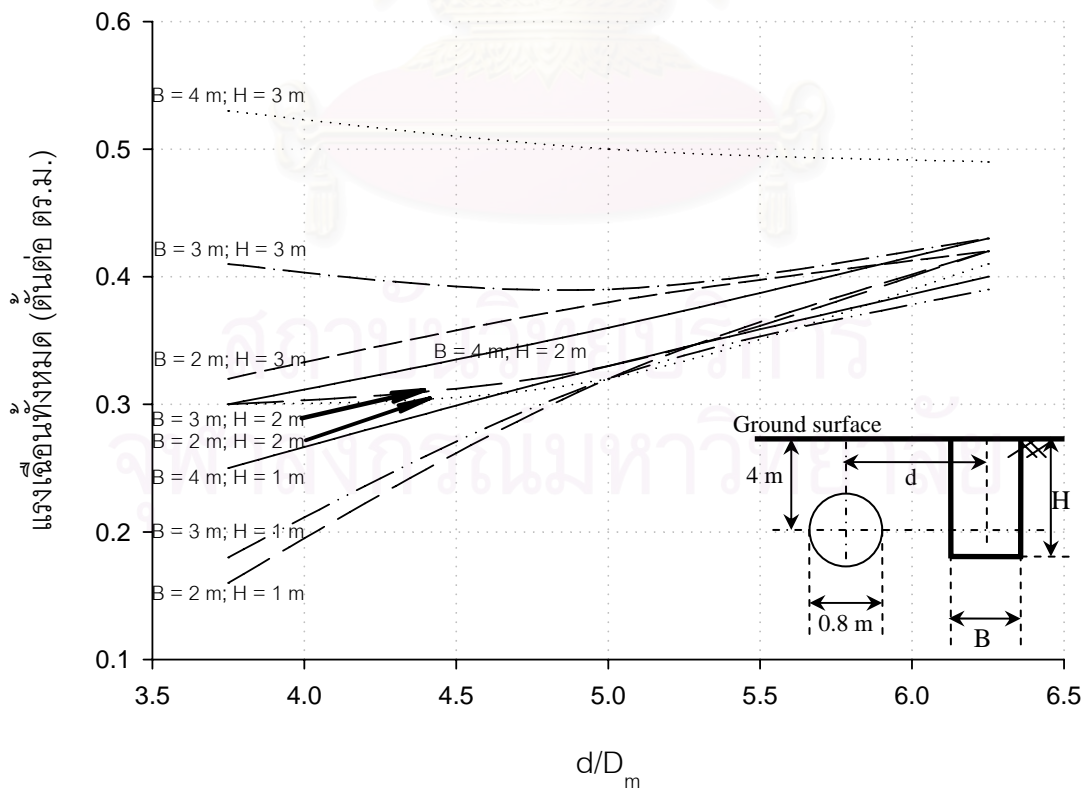
รูปที่ ก-1.2.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



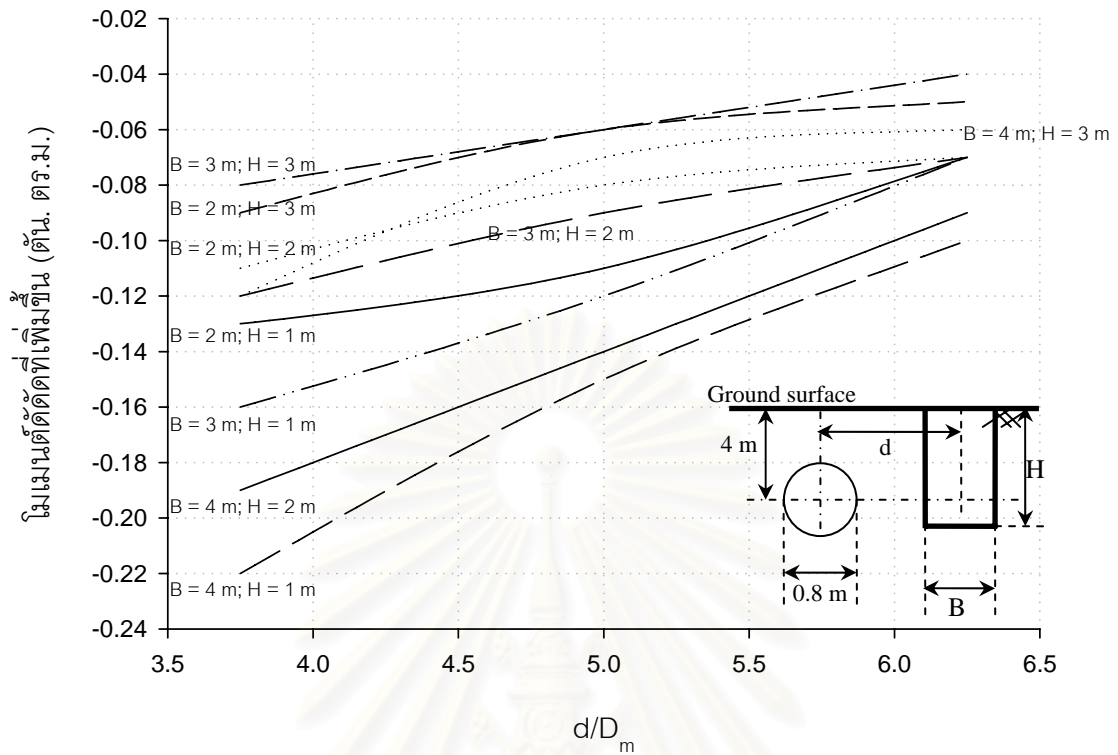
รูปที่ ก-1.2.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



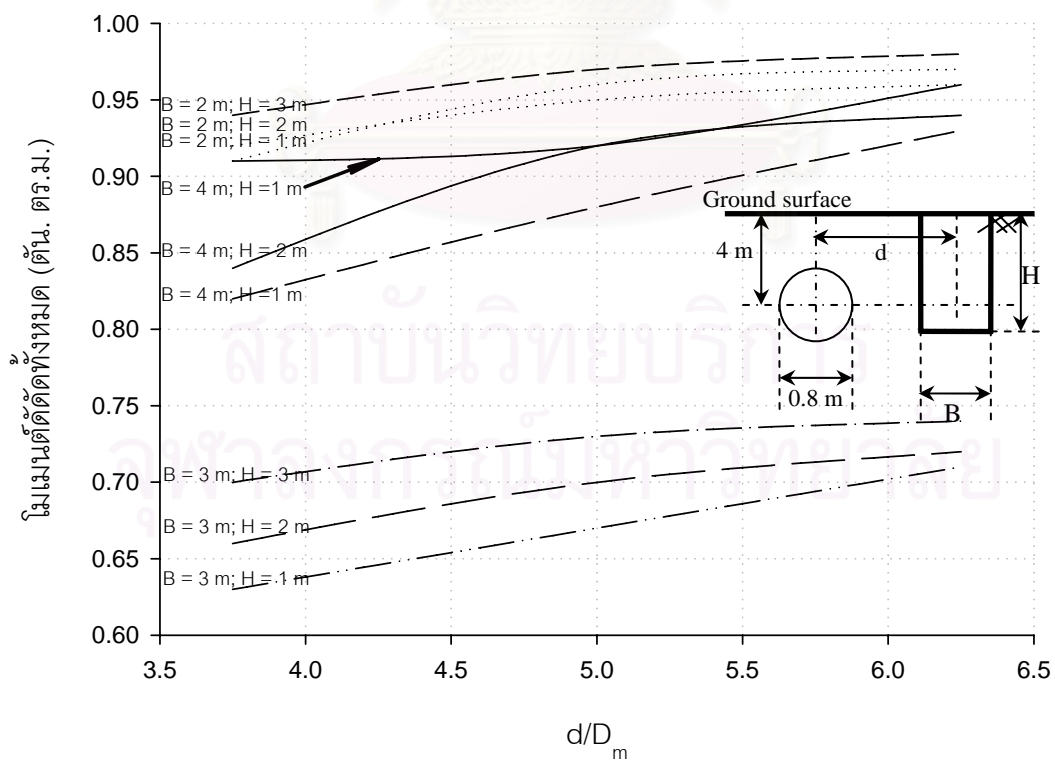
รูปที่ ก-1.2.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



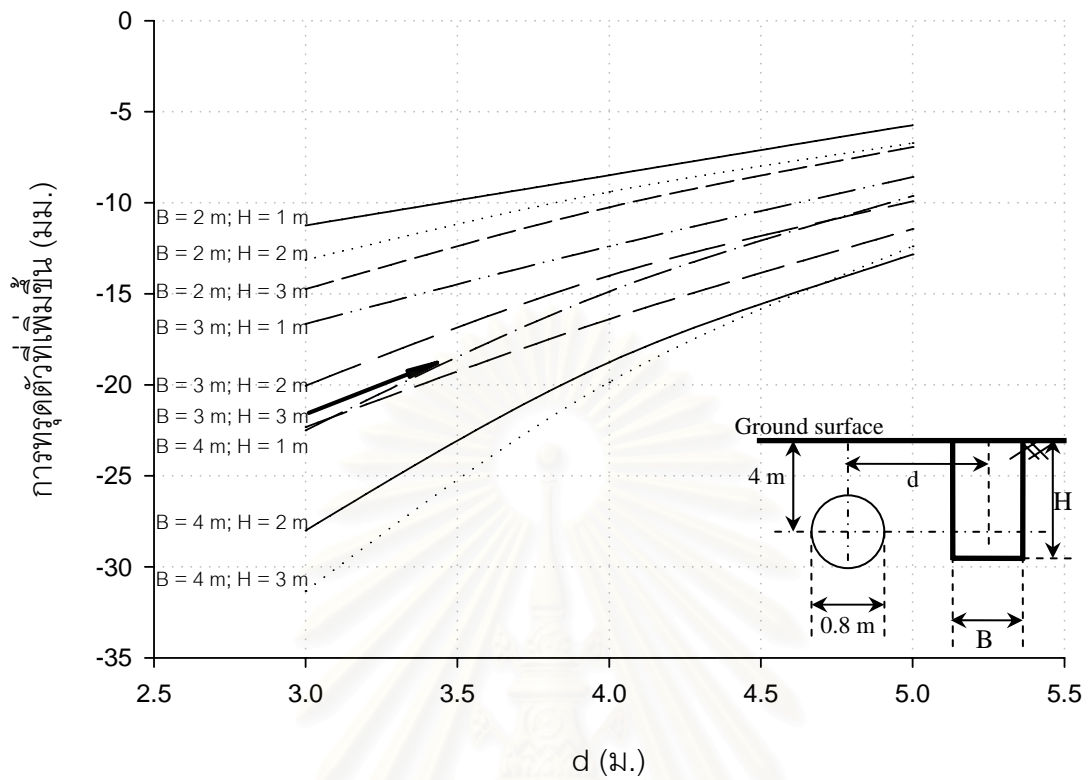
รูปที่ ก-1.2.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



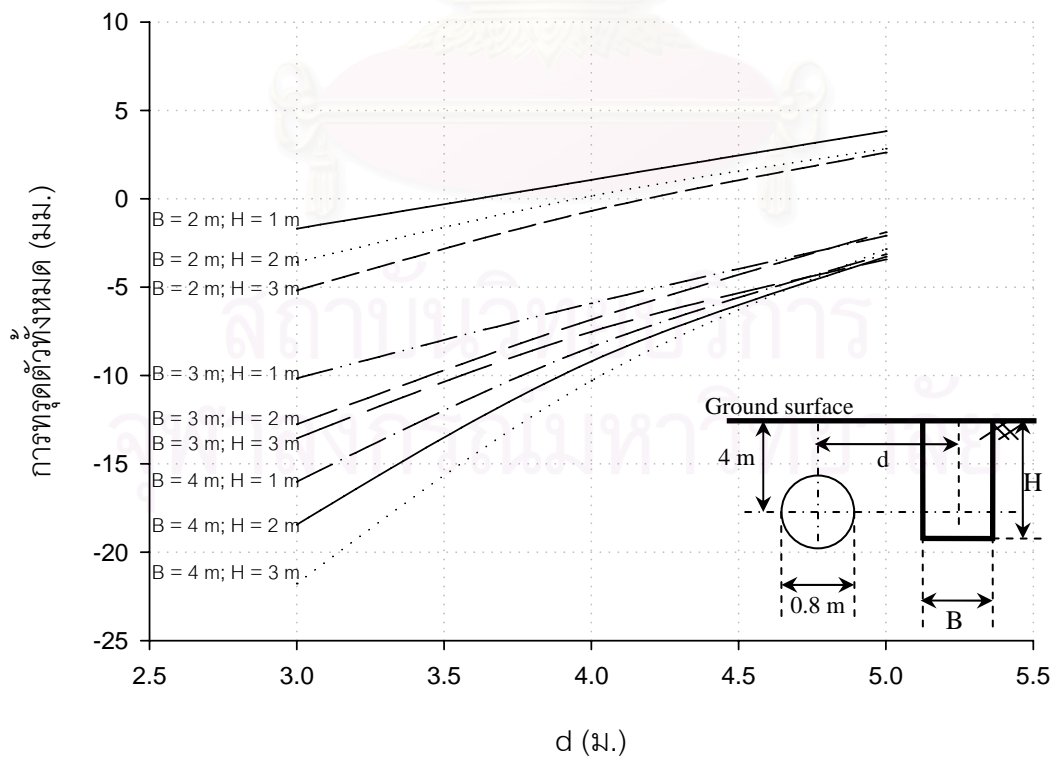
รูปที่ ก-1.2.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



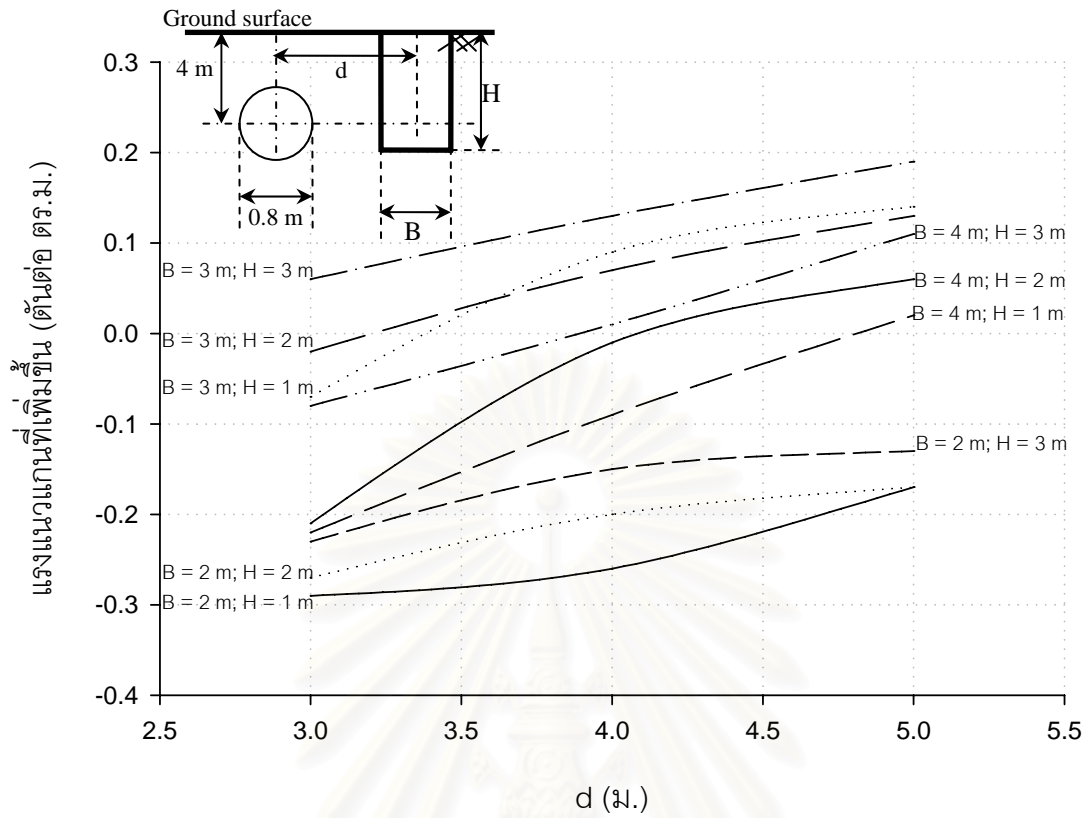
รูปที่ ก-1.2.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



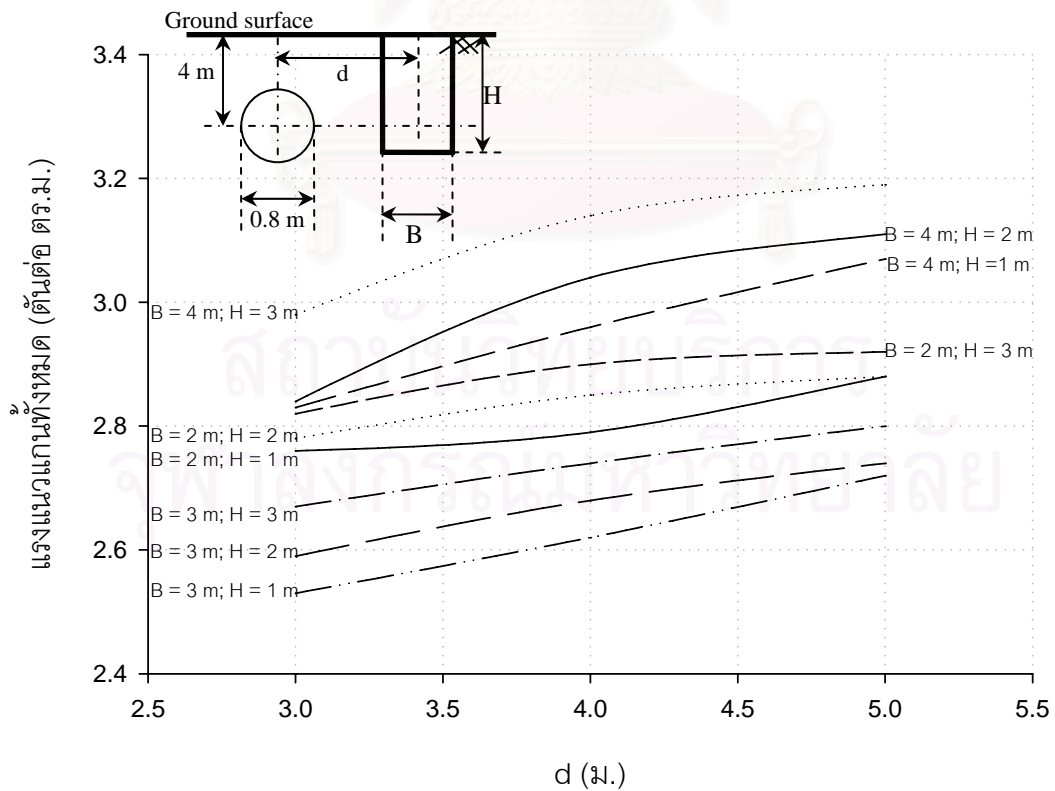
รูปที่ ก-1.2.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



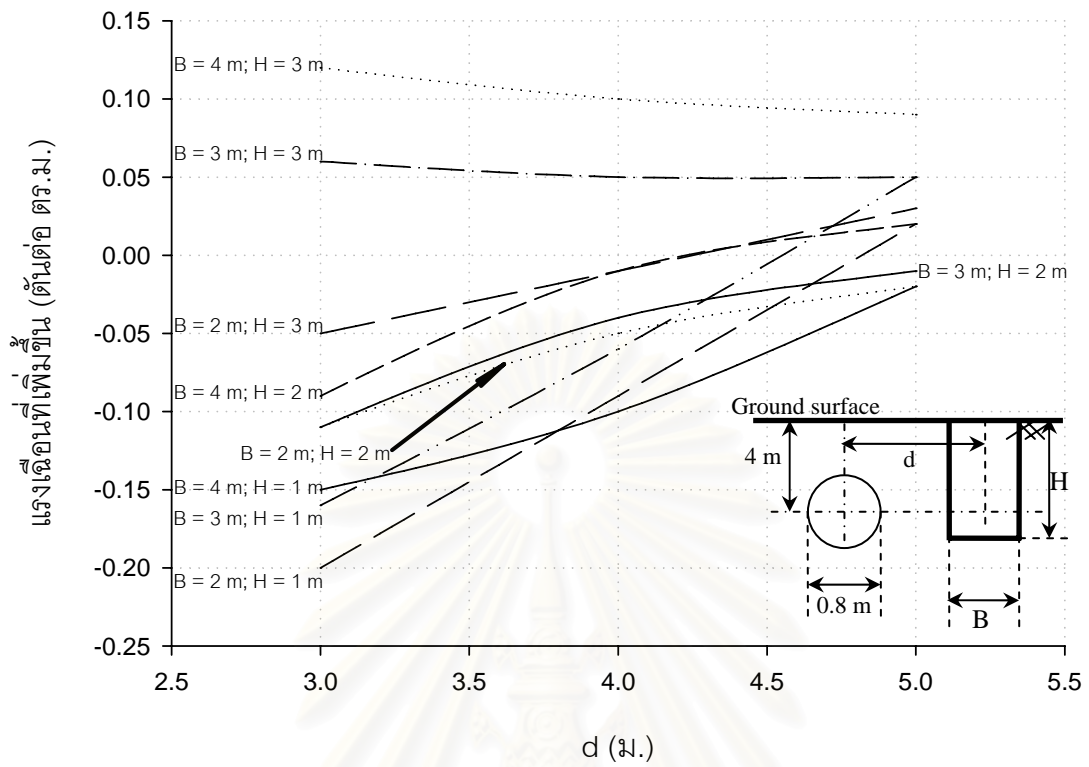
รูปที่ ก-1.2.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



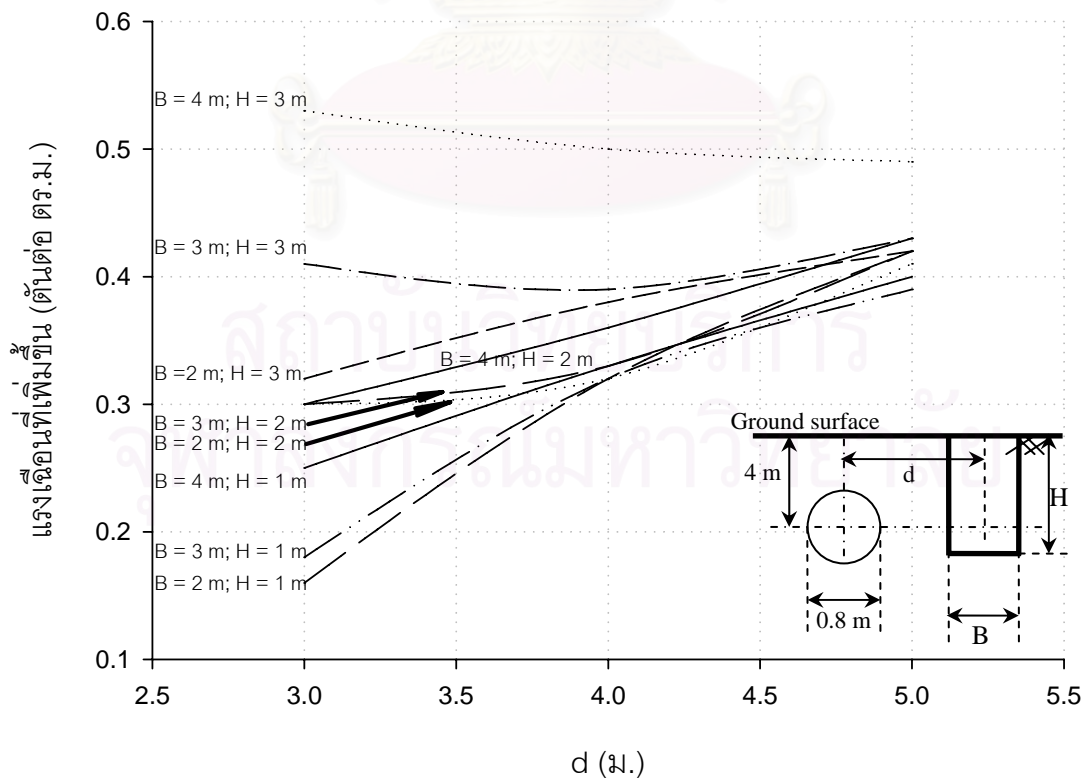
รูปที่ ก-1.2.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



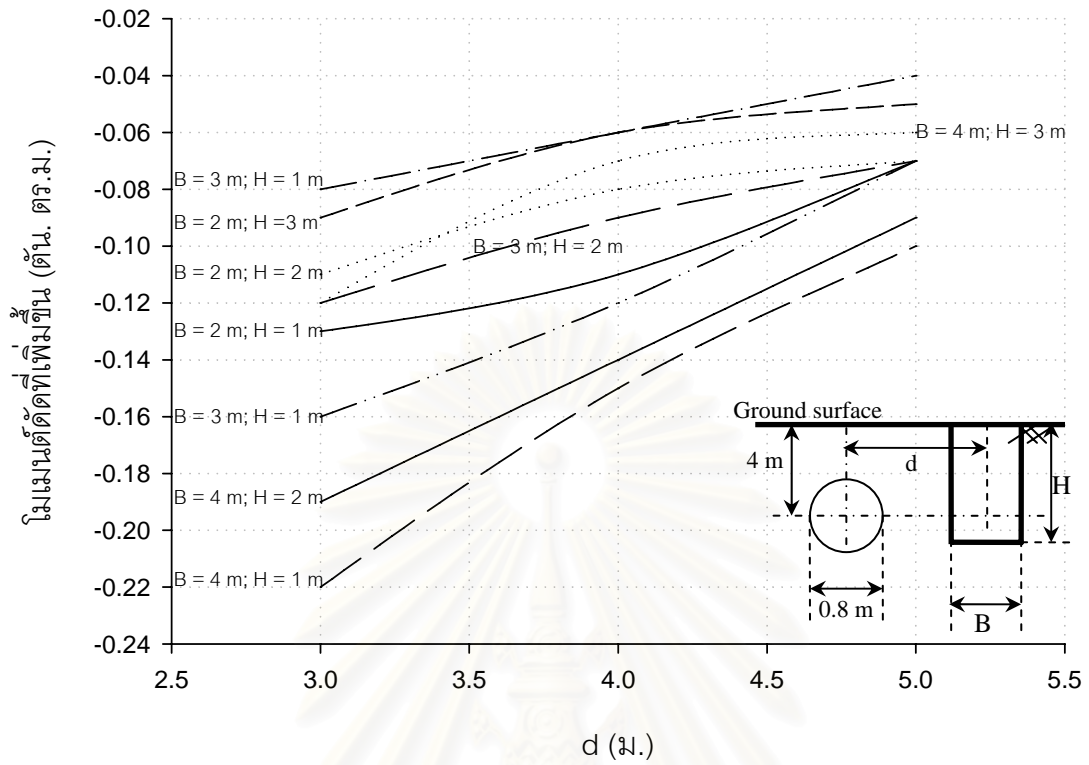
รูปที่ ก-1.2.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



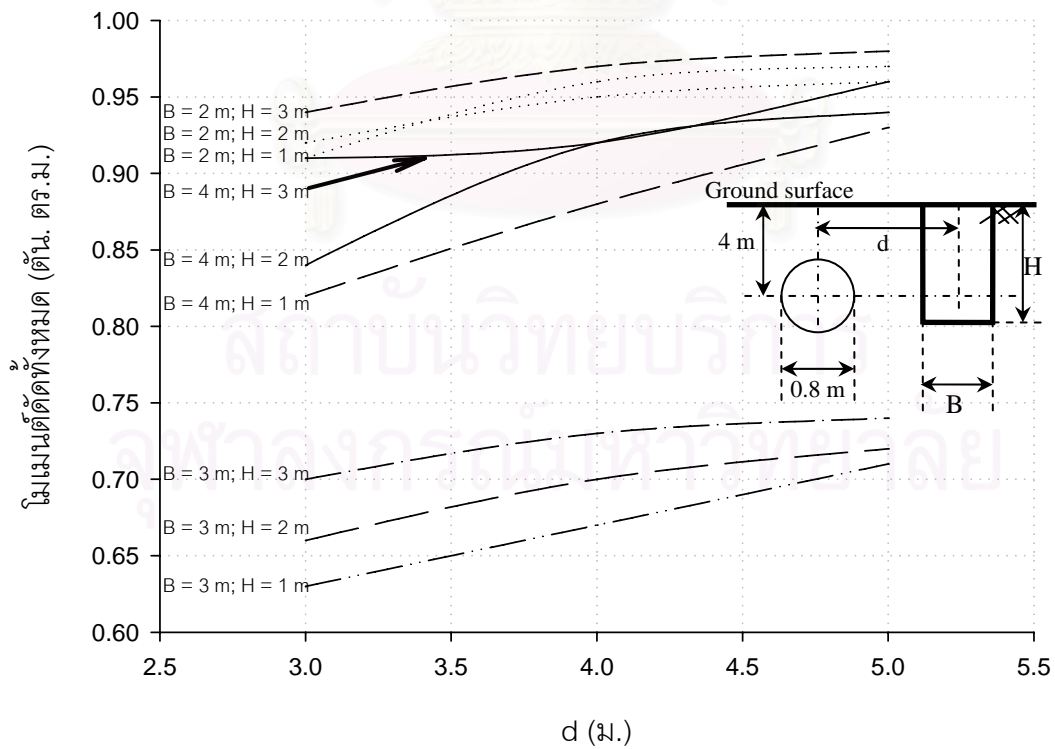
รูปที่ ก-1.2.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



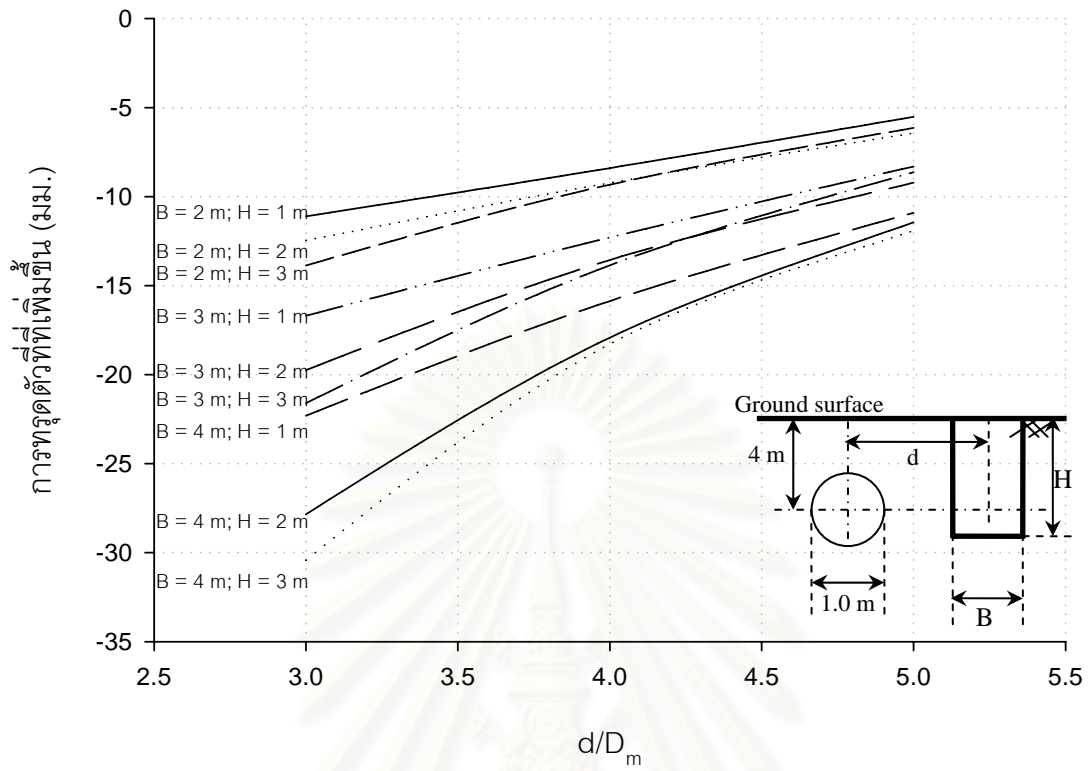
รูปที่ ก-1.2.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



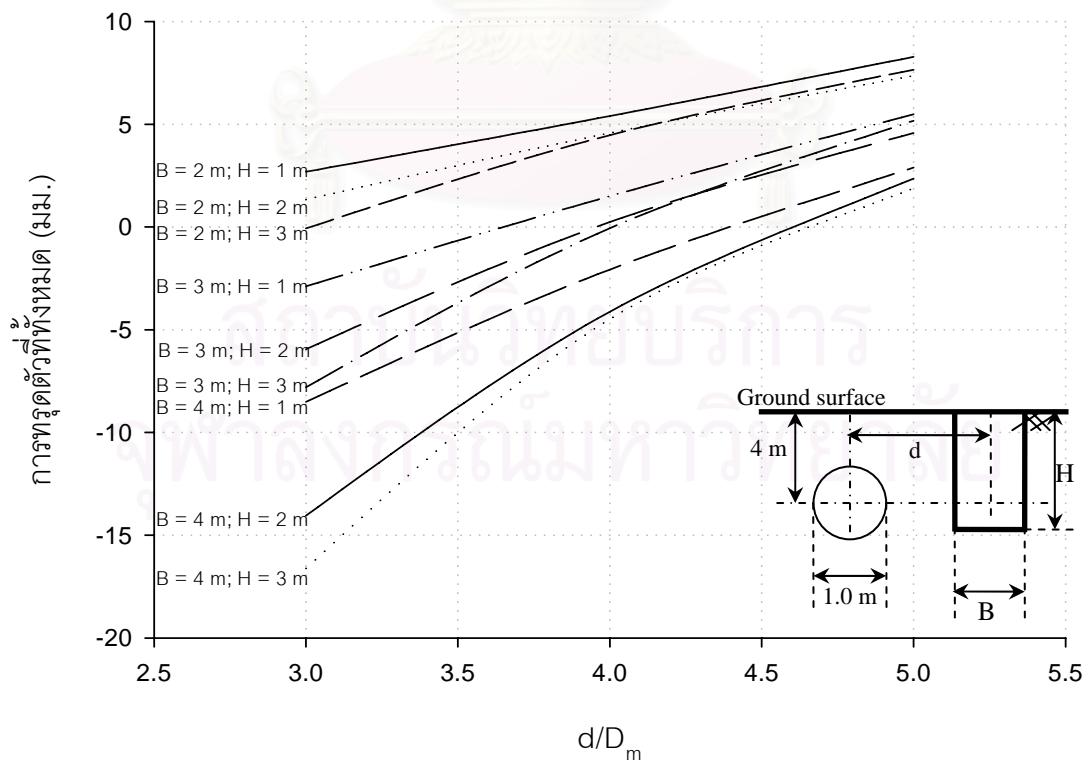
รูปที่ ก-1.2.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



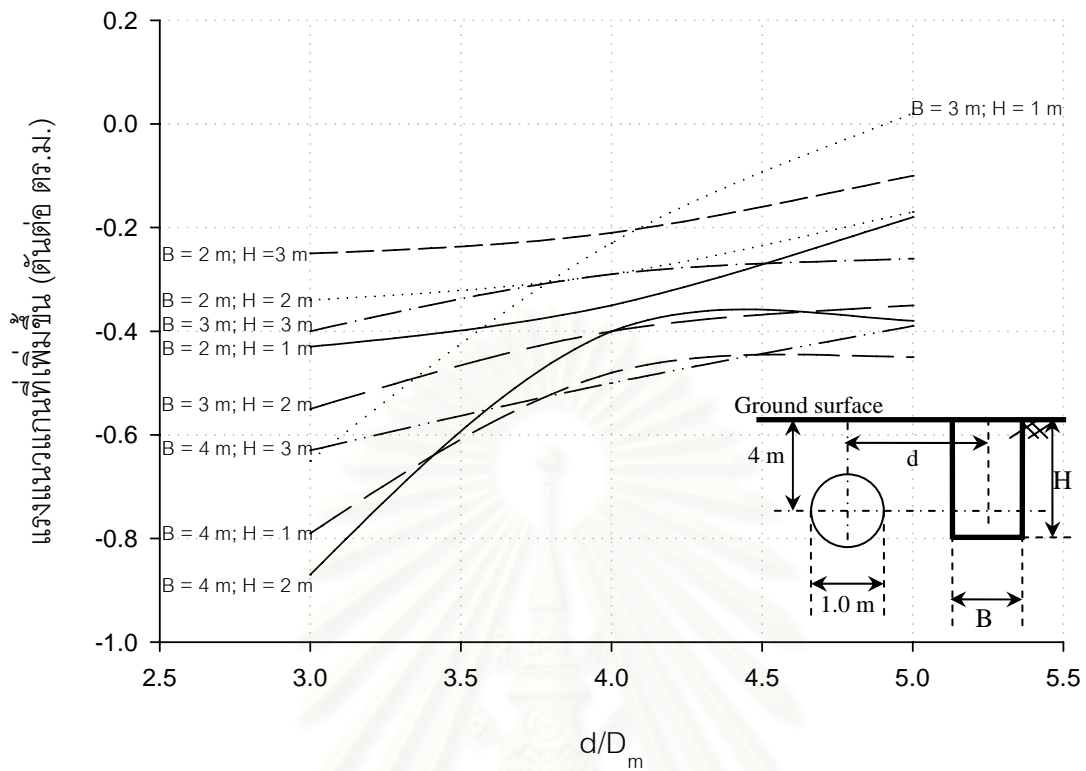
รูปที่ ก-1.2.7.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



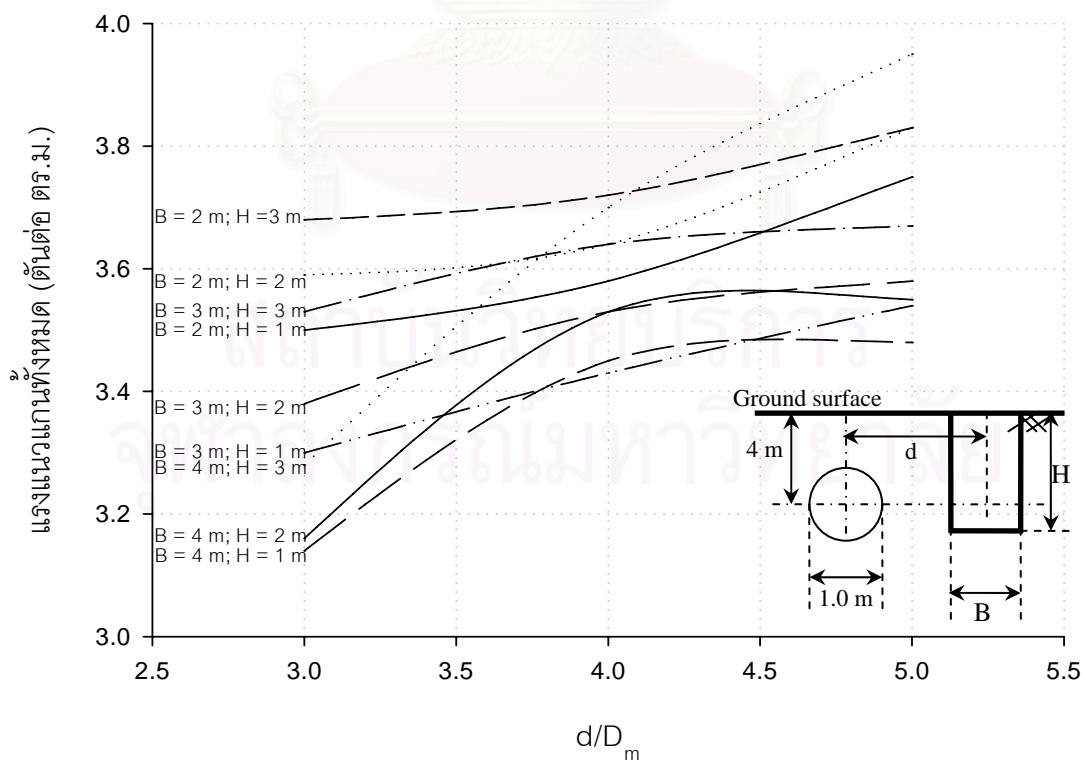
รูปที่ ก-1.3.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



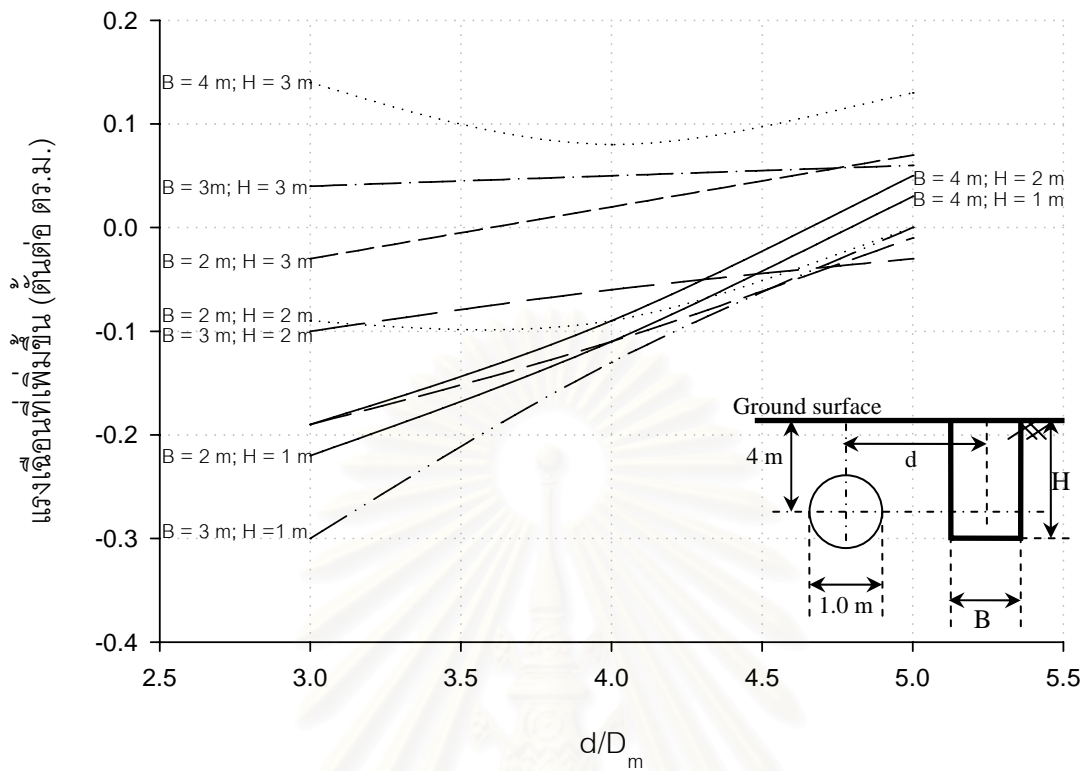
รูปที่ ก-1.3.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



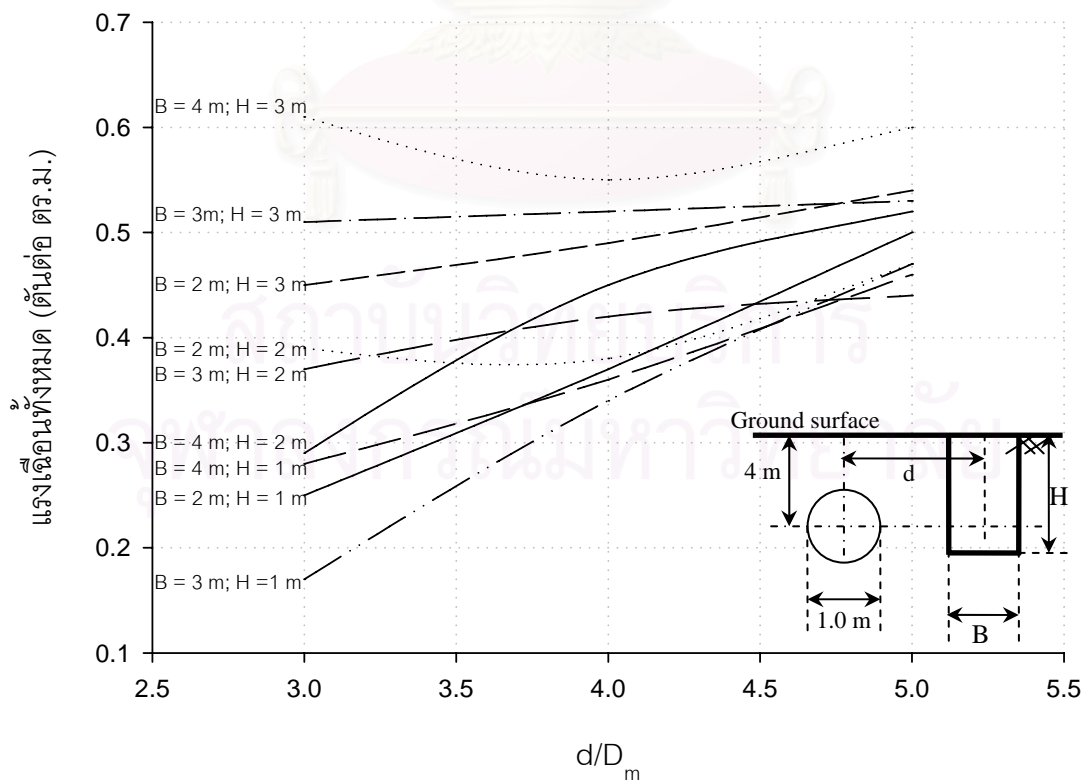
รูปที่ ก-1.3.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



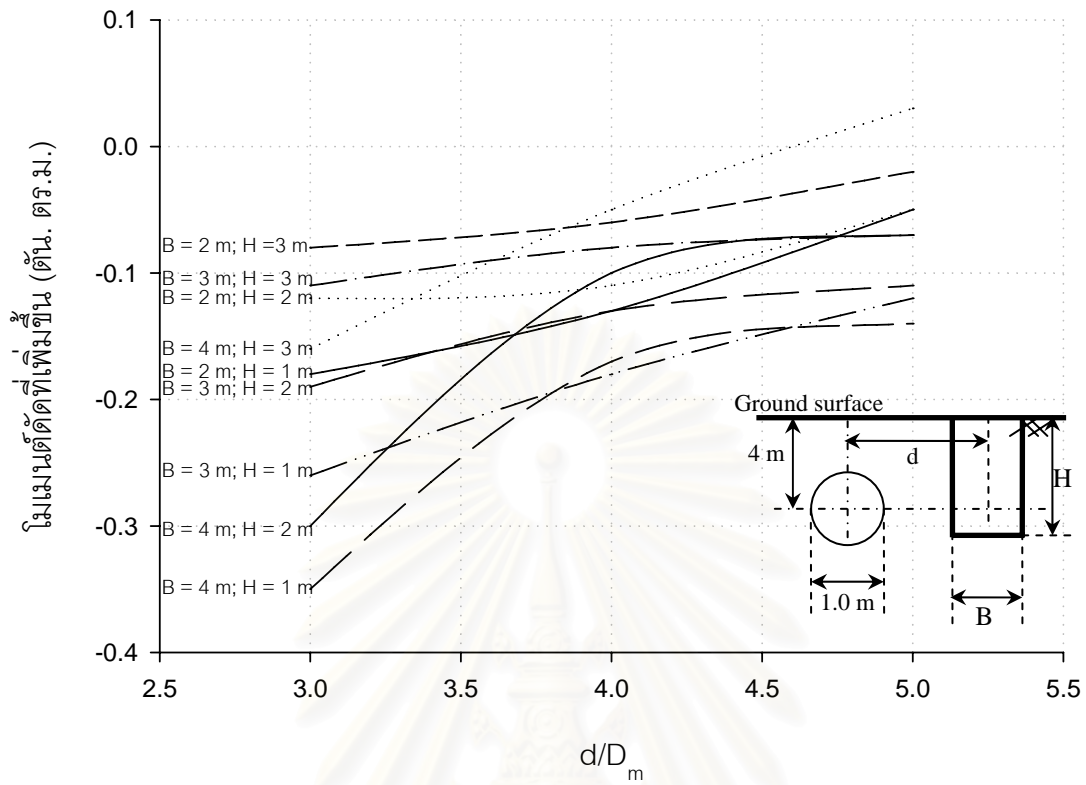
รูปที่ ก-1.3.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



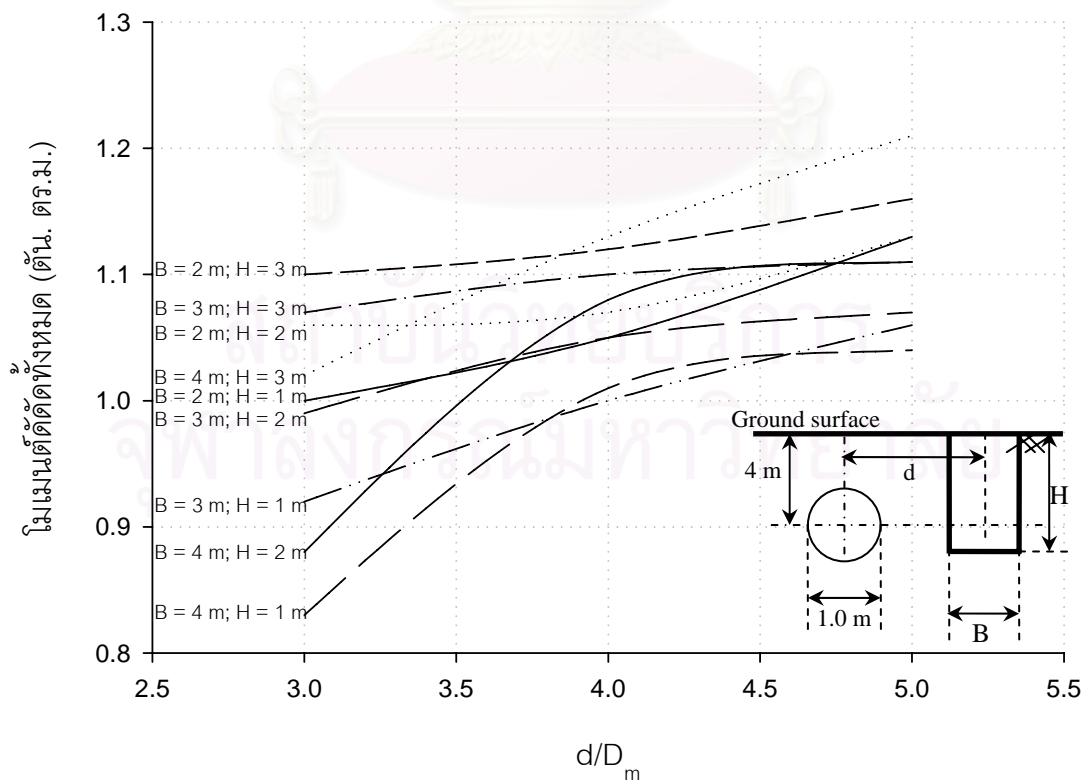
รูปที่ ก-1.3.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



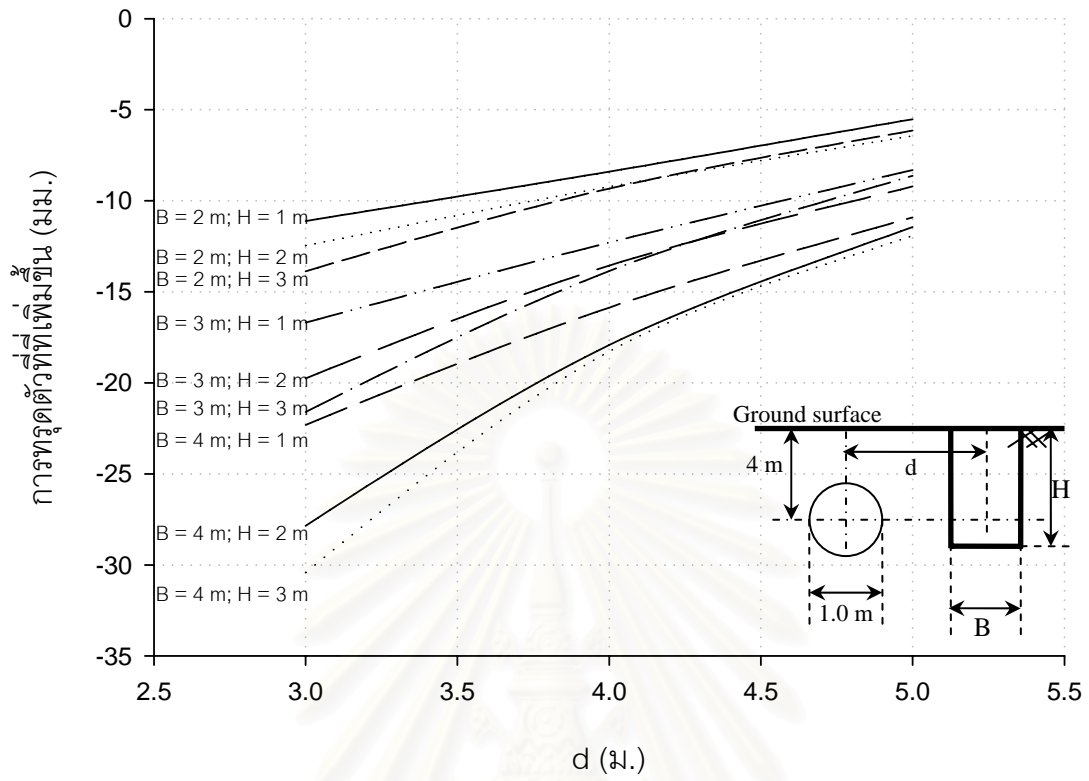
รูปที่ ก-1.3.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



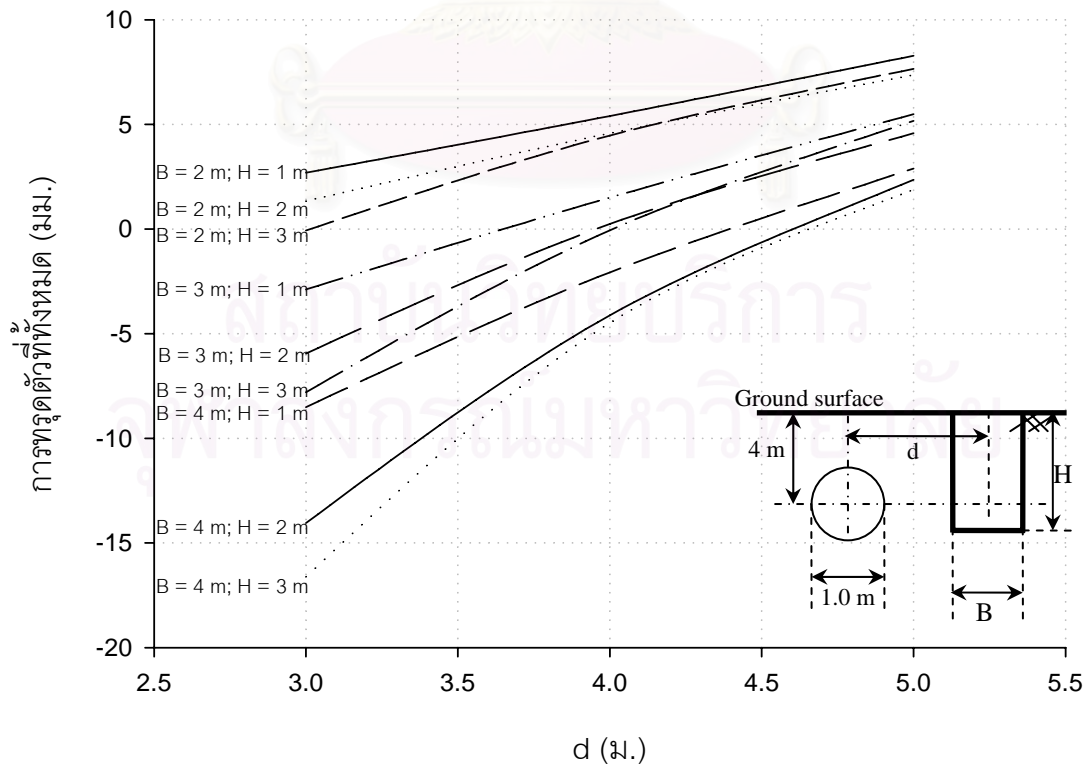
รูปที่ ก-1.3.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



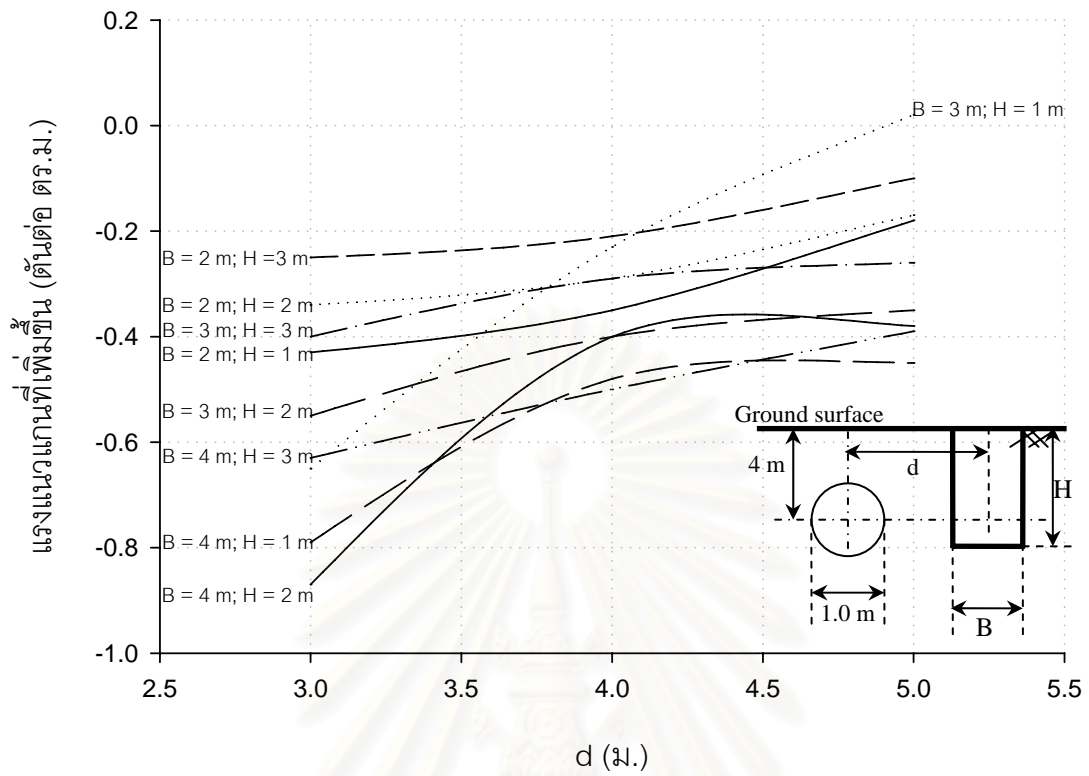
รูปที่ ก-1.3.4.2 โมเมนต์ดัดที่ลดลงของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



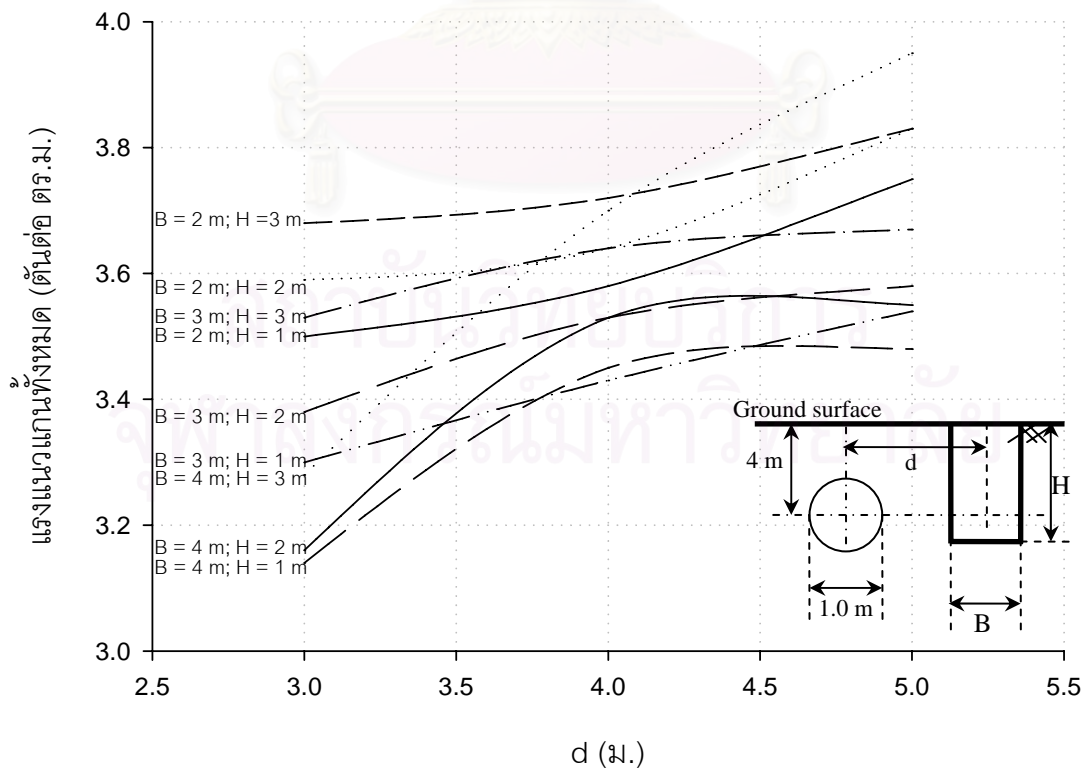
รูปที่ ก-1.3.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



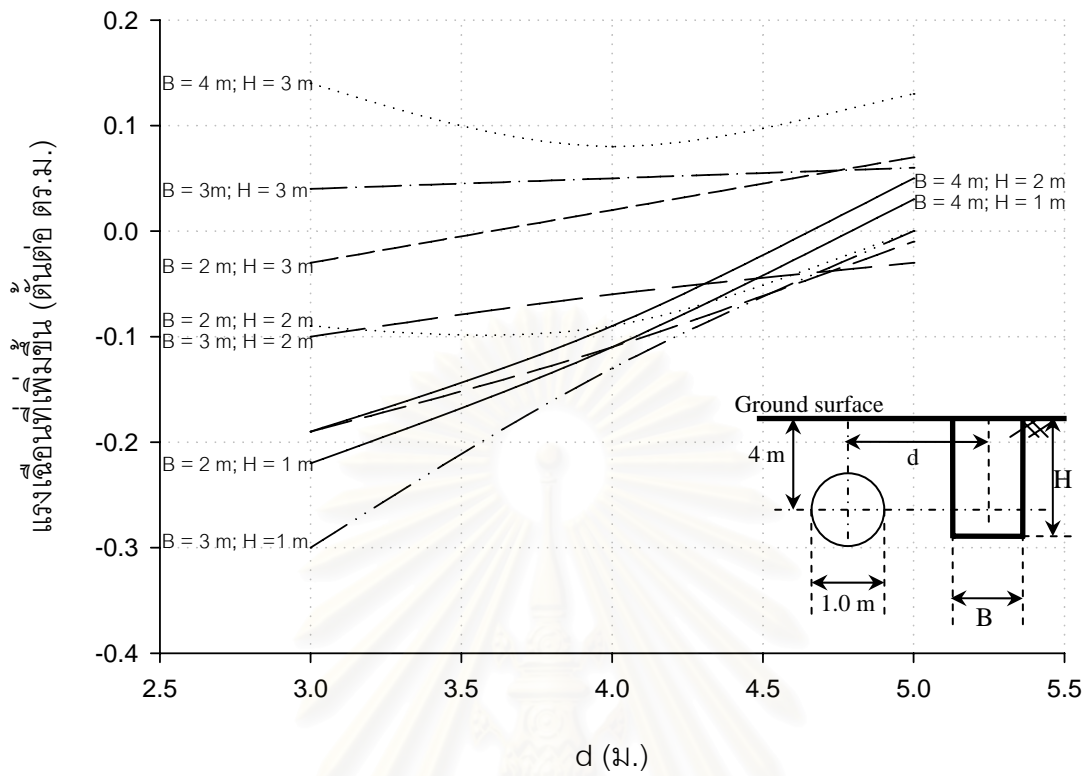
รูปที่ ก-1.3.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



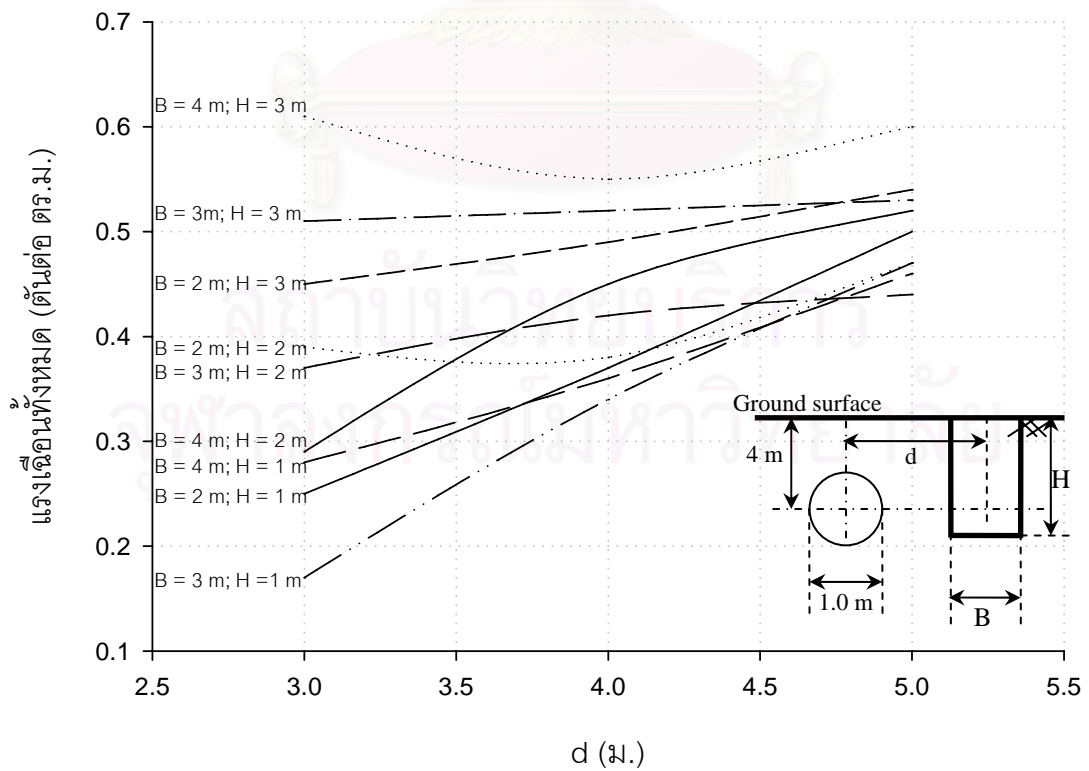
รูปที่ ก-1.3.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



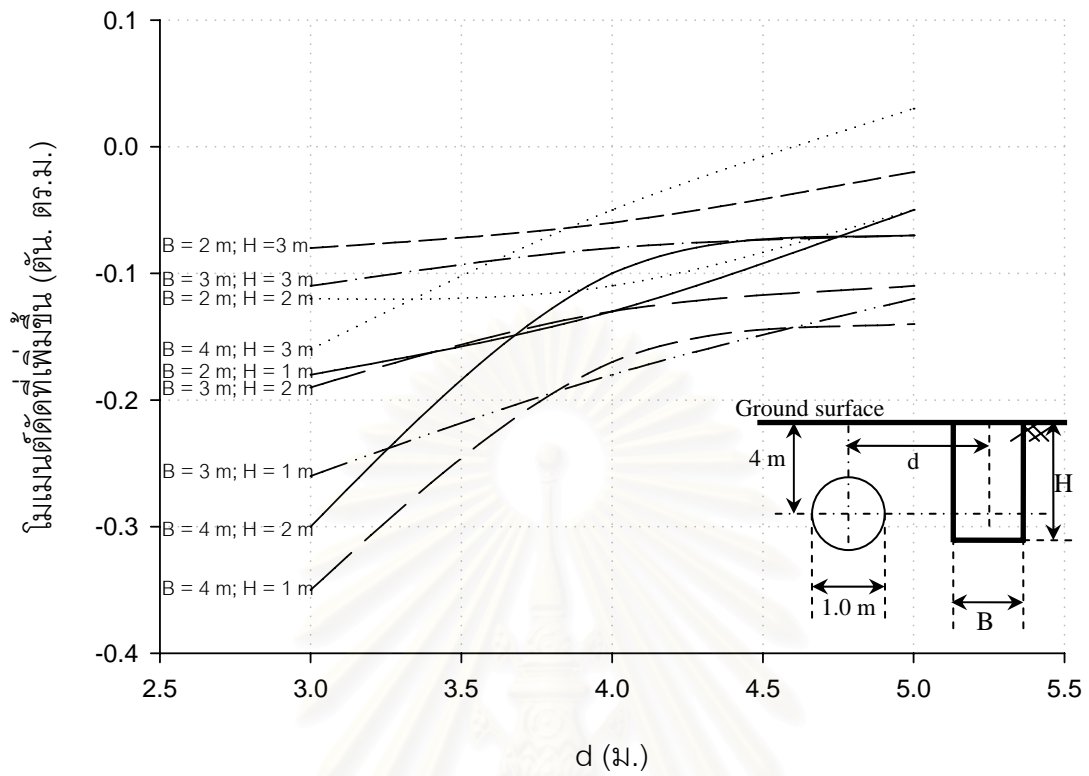
รูปที่ ก-1.3.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



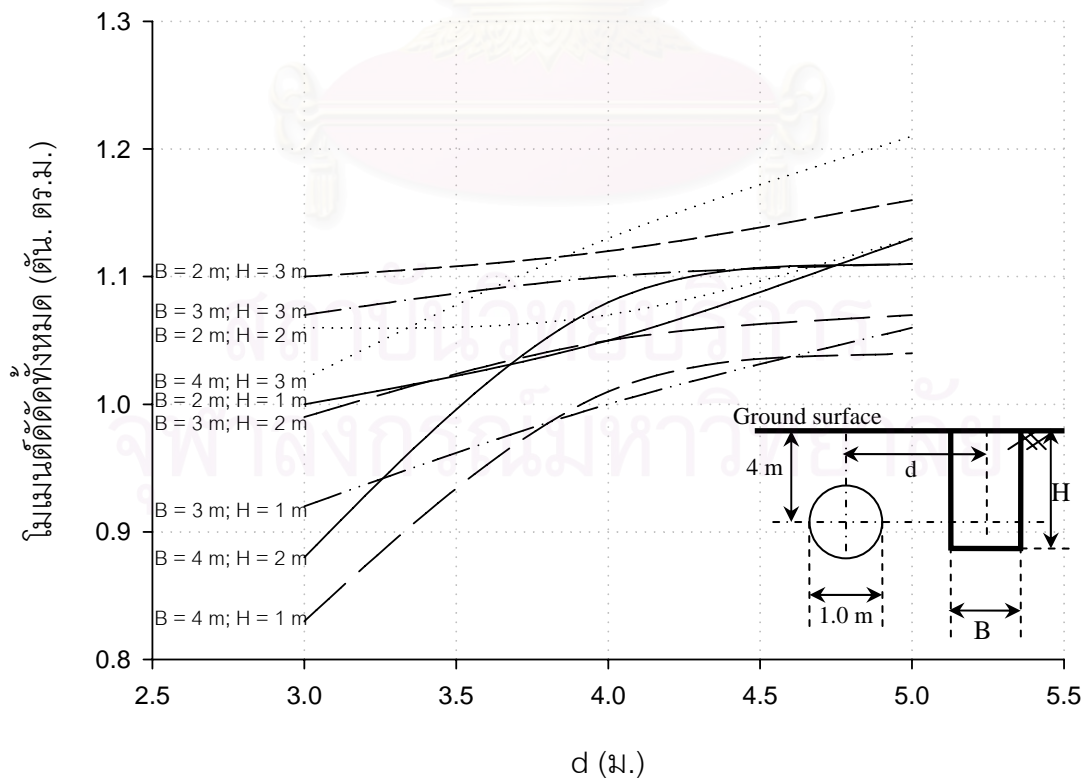
รูปที่ ก-1.3.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



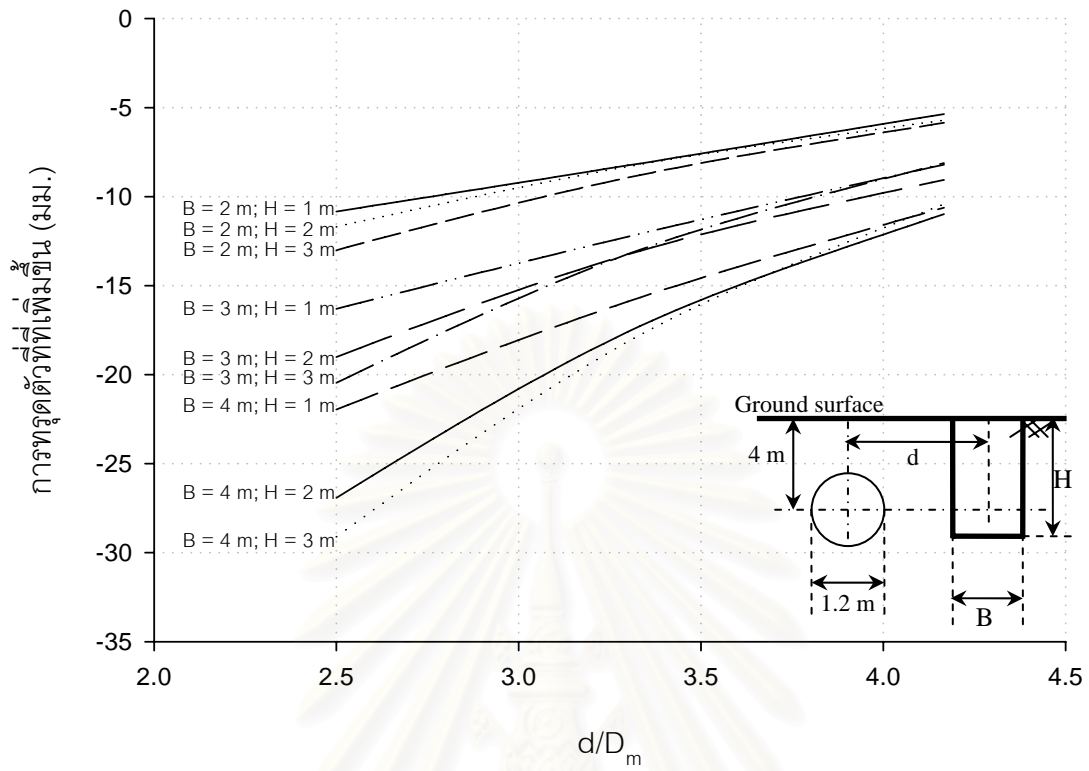
รูปที่ ก-1.3.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



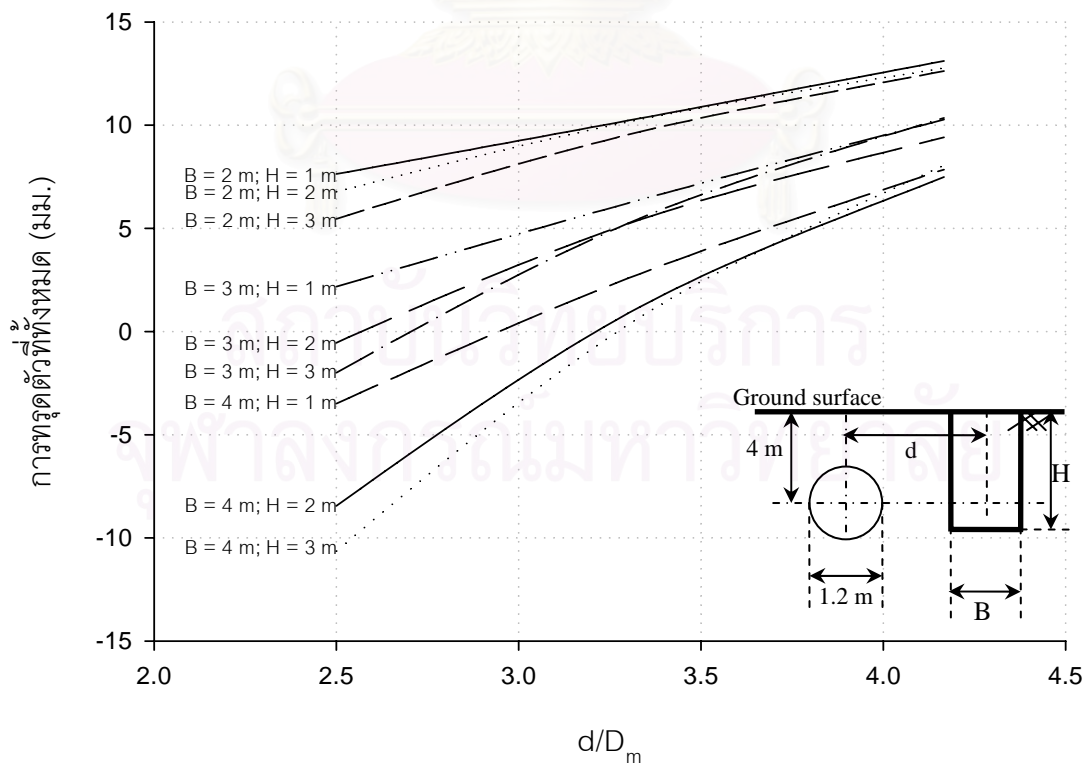
รูปที่ ก-1.3.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



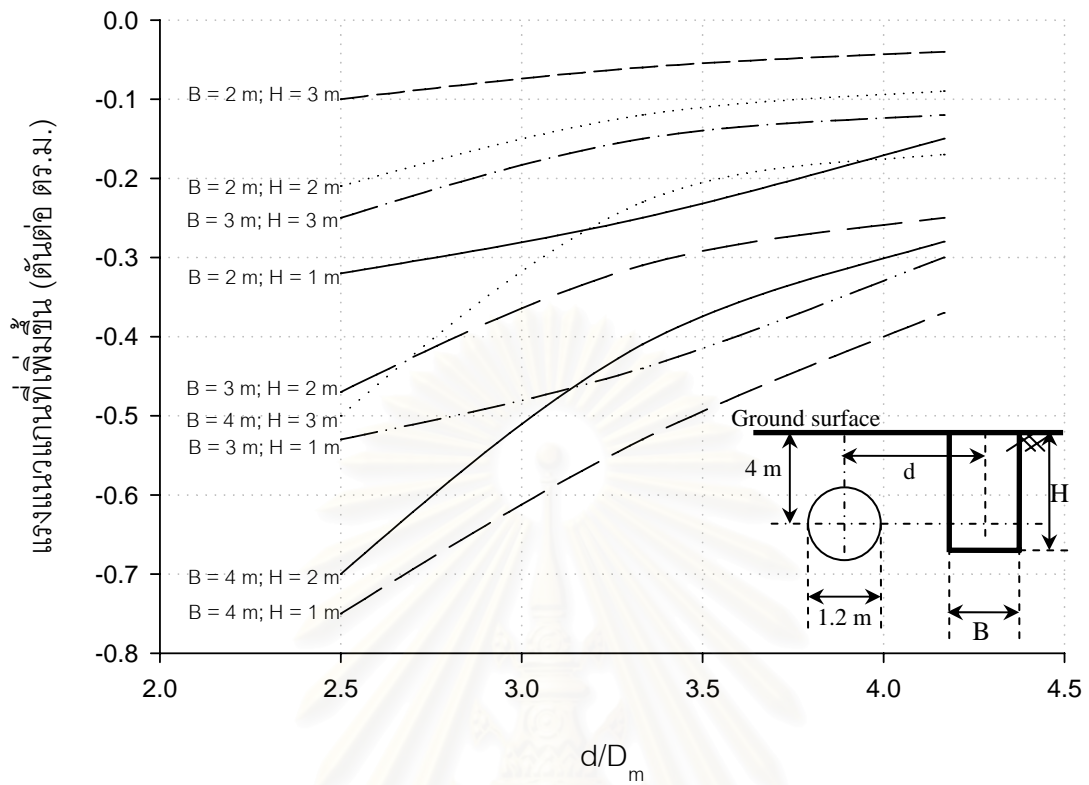
รูปที่ ก-1.3.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



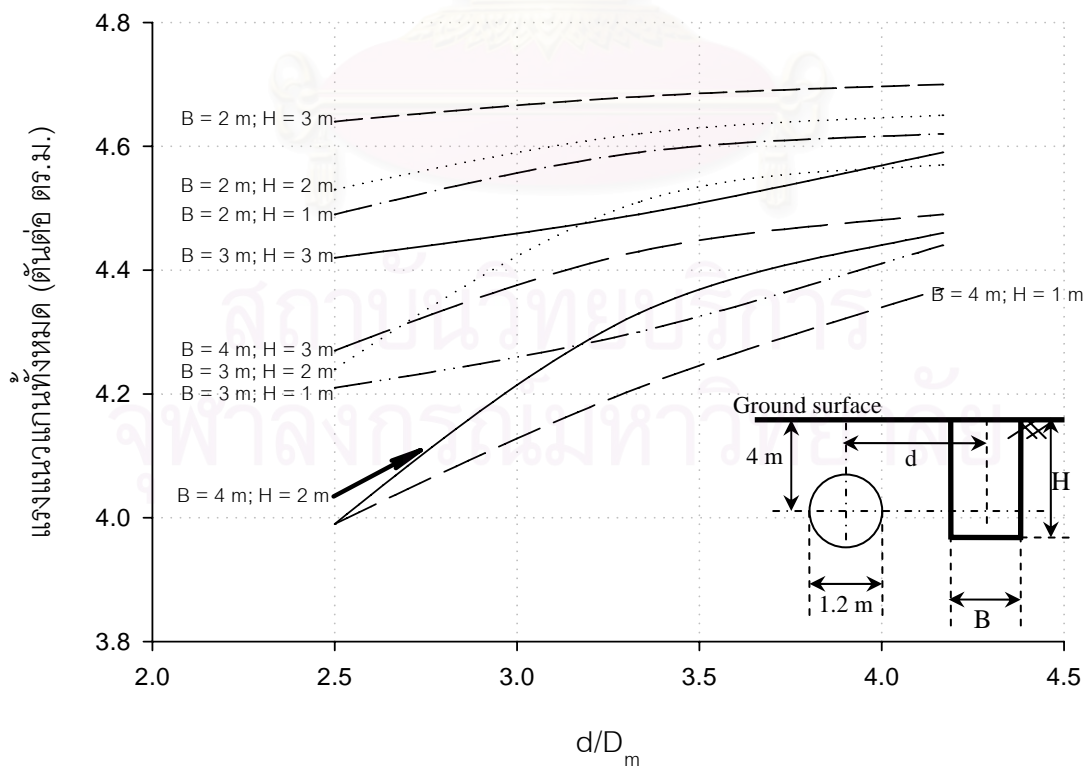
รูปที่ ก-1.4.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



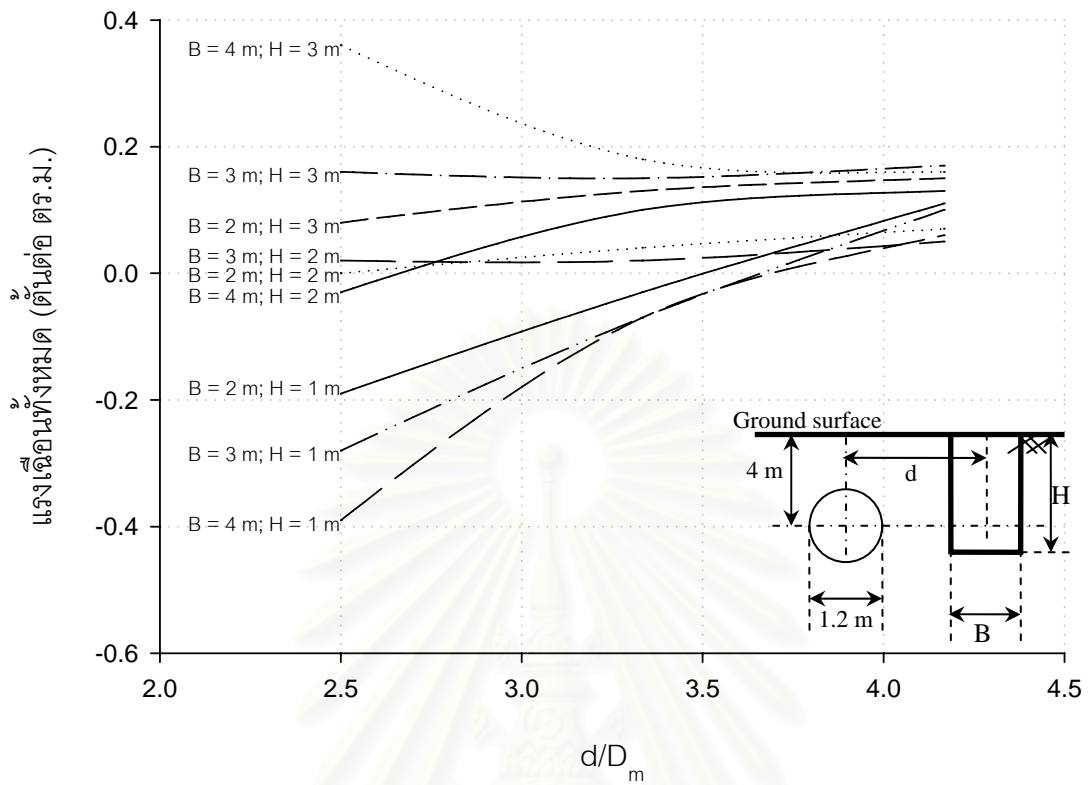
รูปที่ ก-1.4.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



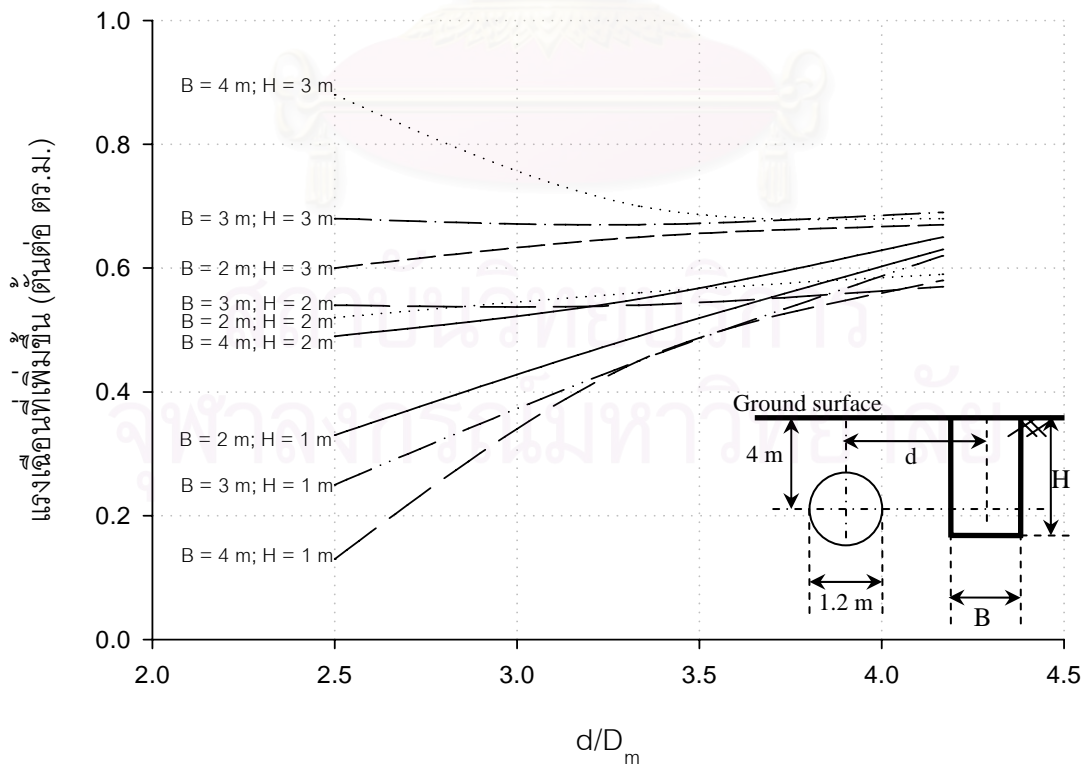
รูปที่ ก-1.4.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



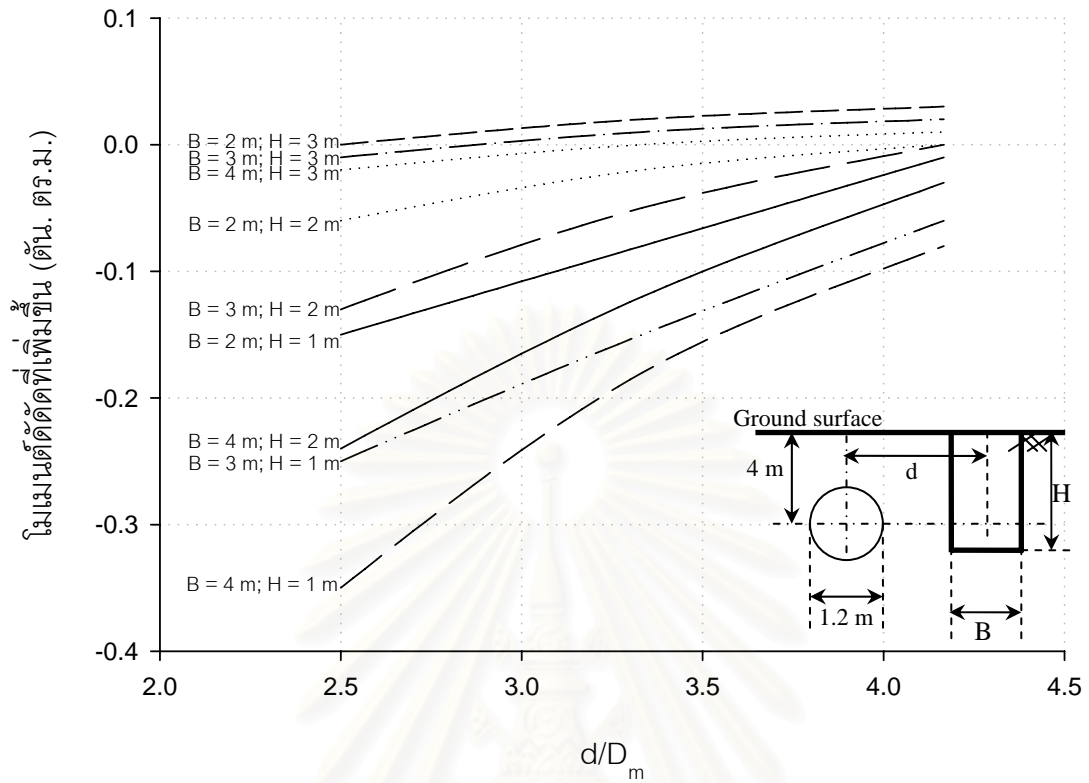
รูปที่ ก-1.4.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



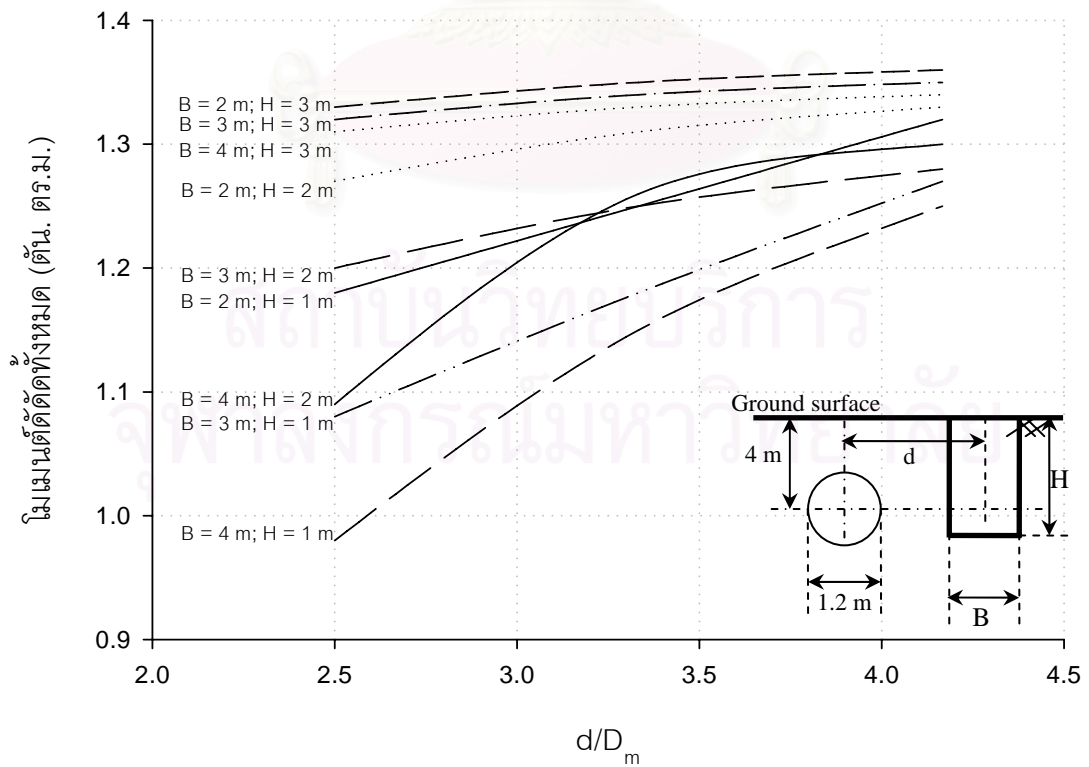
รูปที่ ก-1.4.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



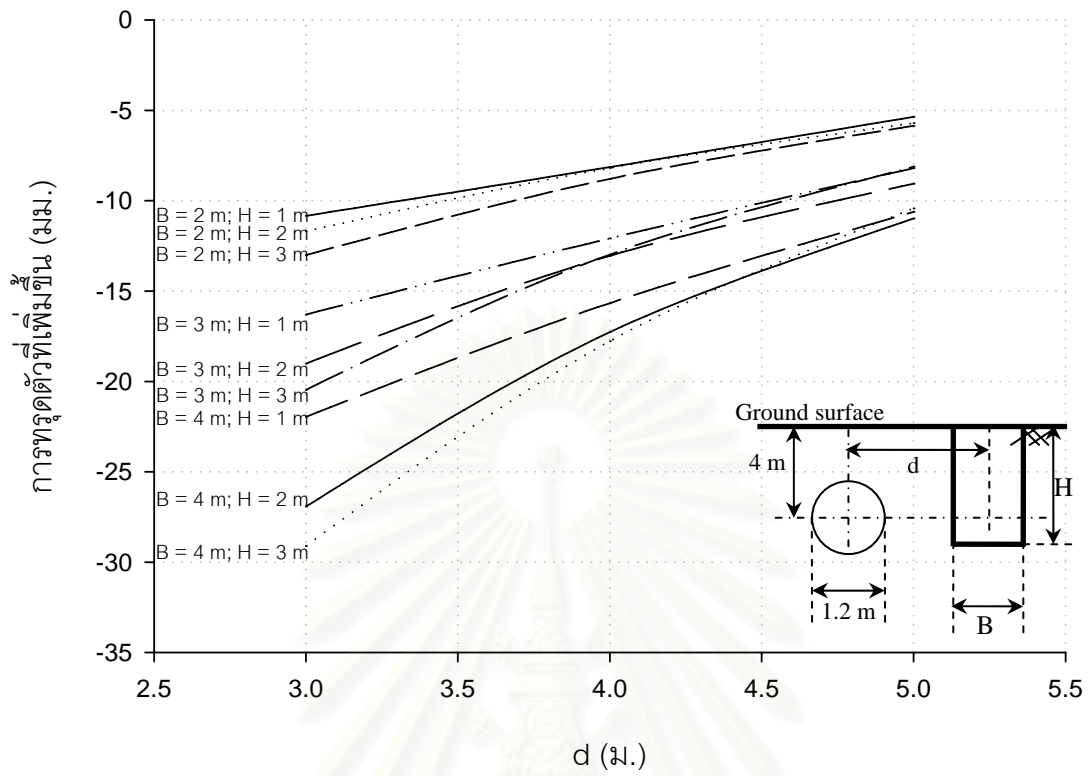
รูปที่ ก-1.4.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



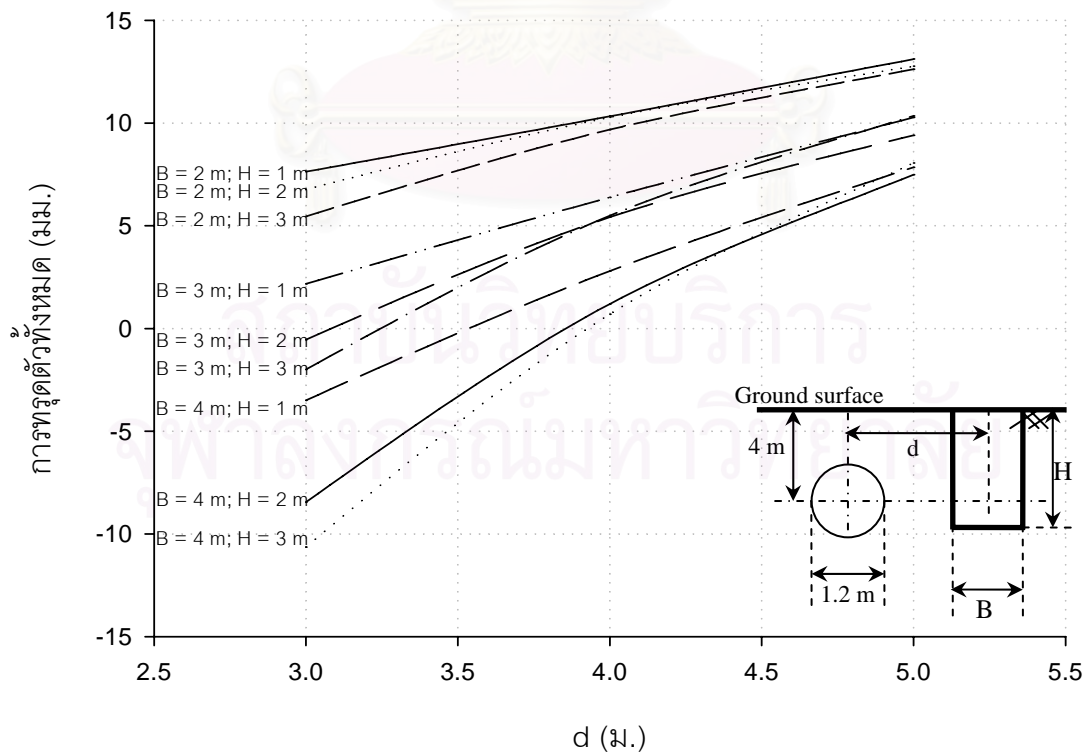
รูปที่ ก-1.4.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



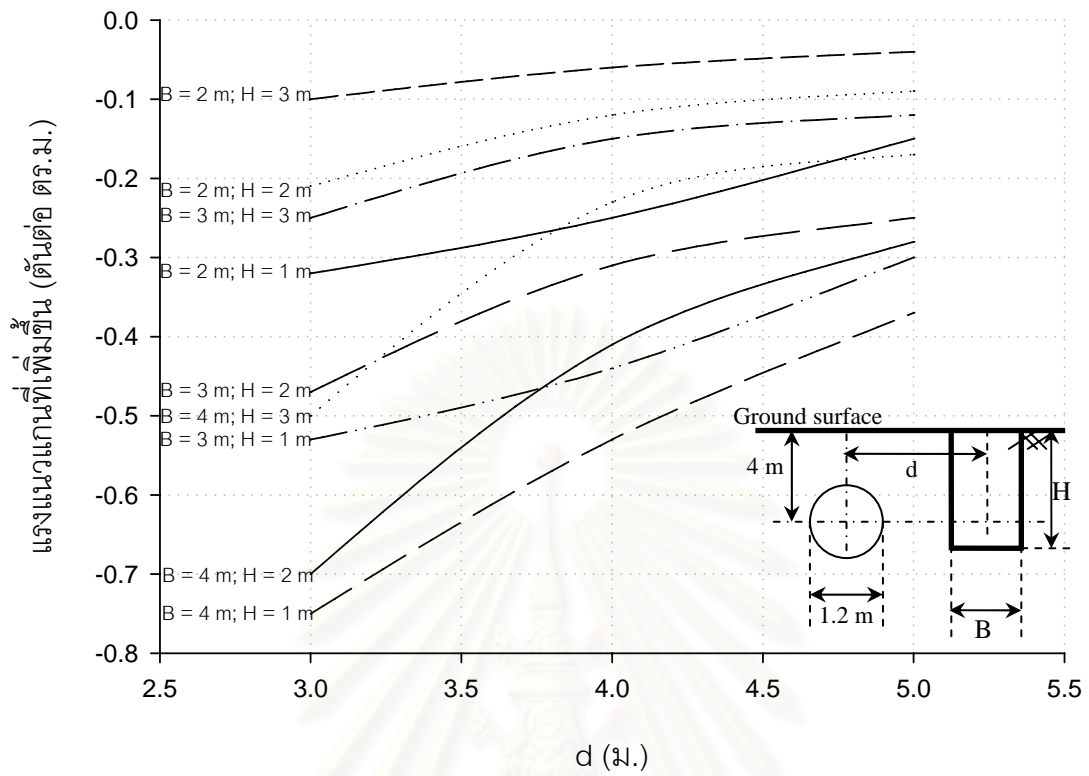
รูปที่ ก-1.4.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



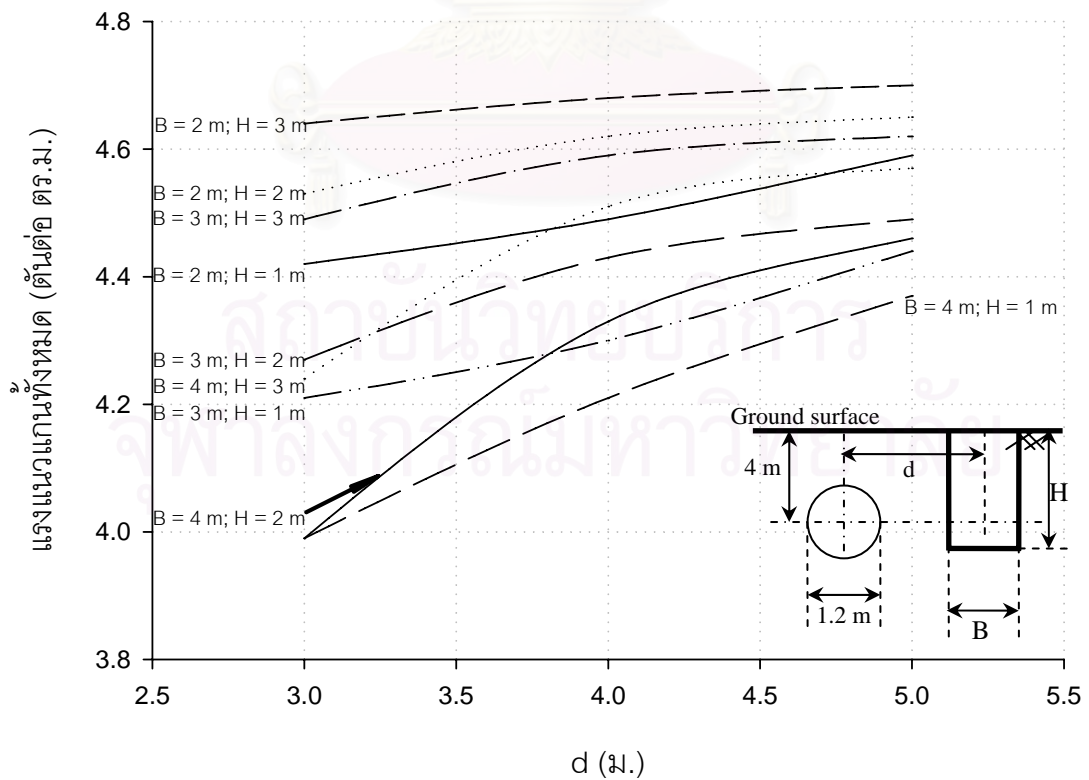
รูปที่ ก-1.4.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



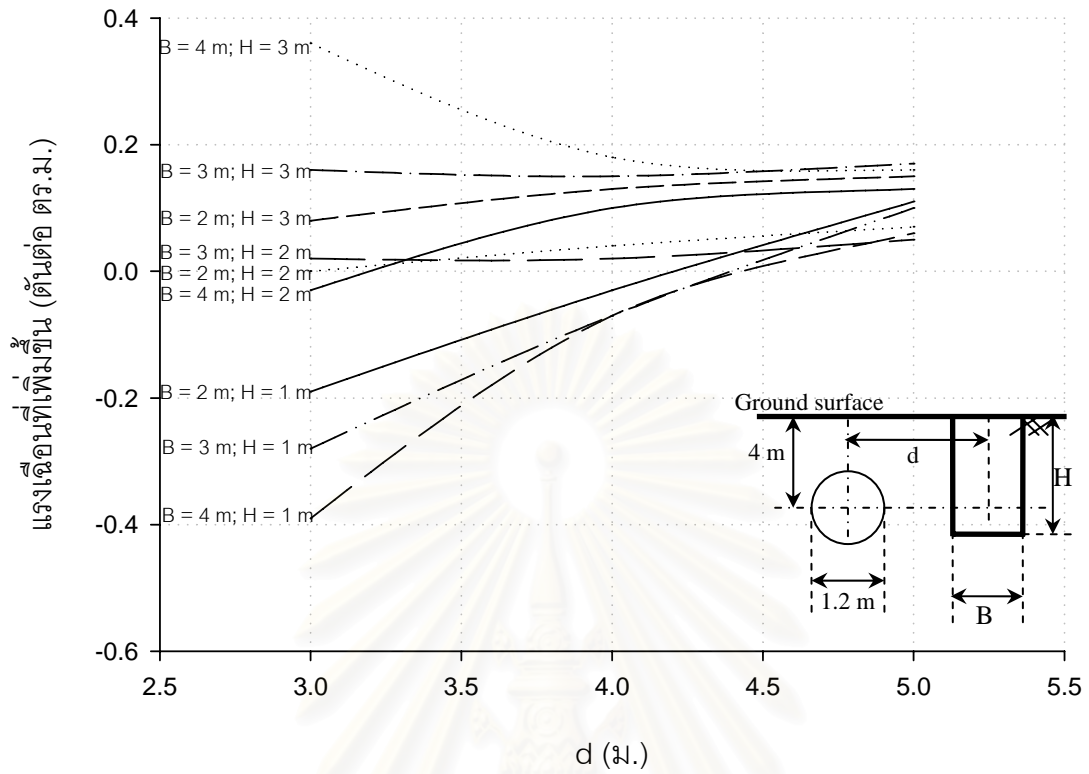
รูปที่ ก-1.4.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



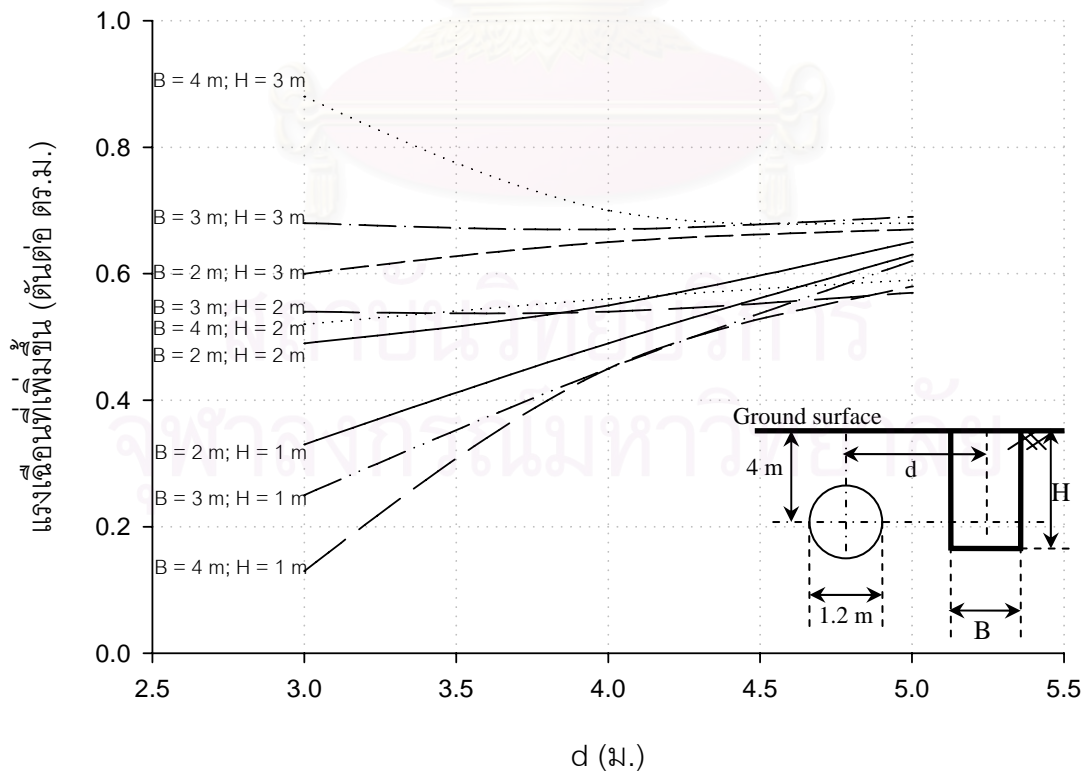
รูปที่ ก-1.4.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



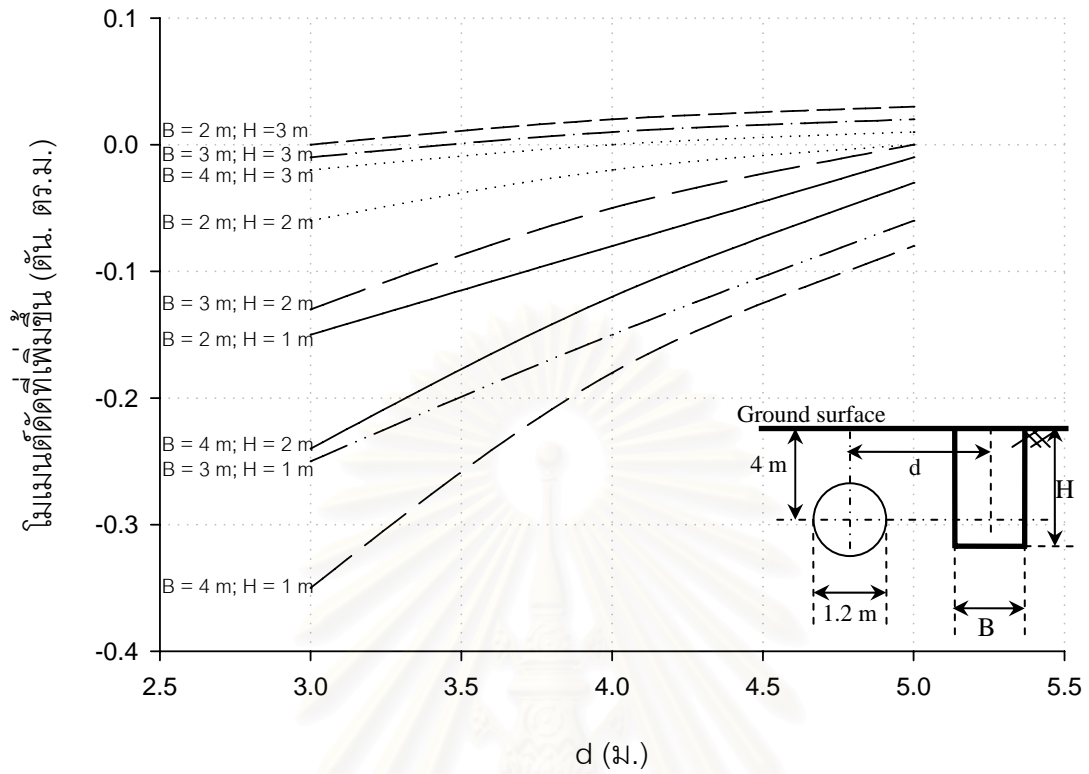
รูปที่ ก-1.4.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



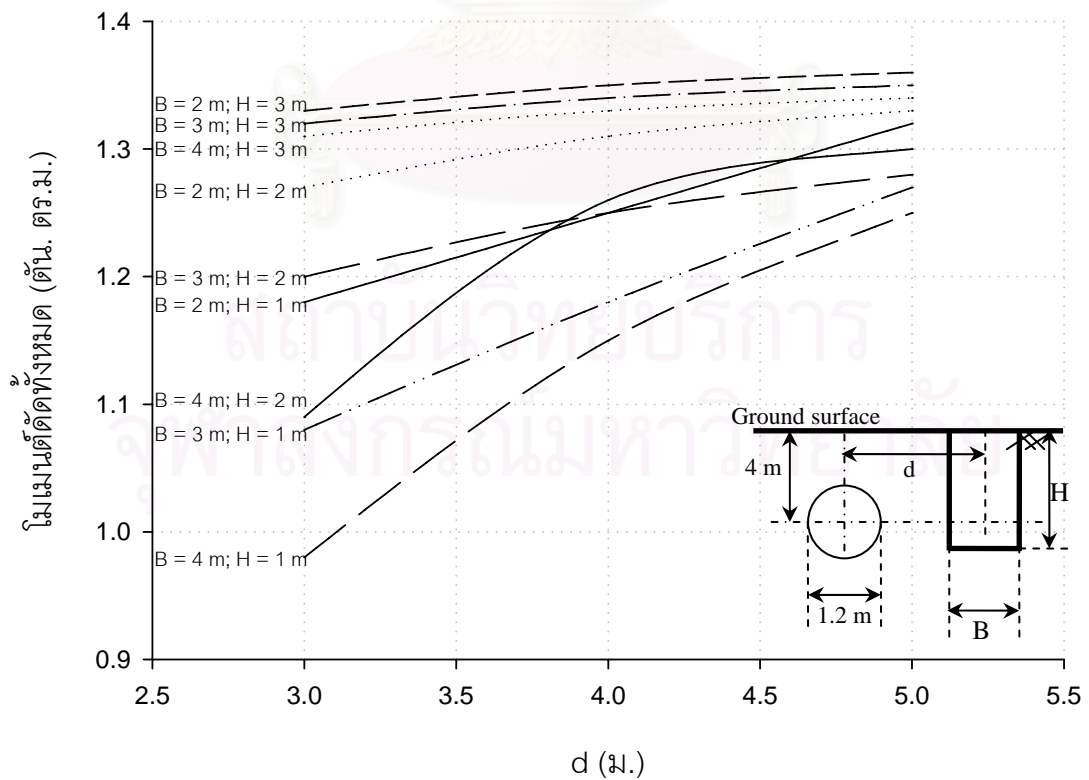
รูปที่ ก-1.4.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



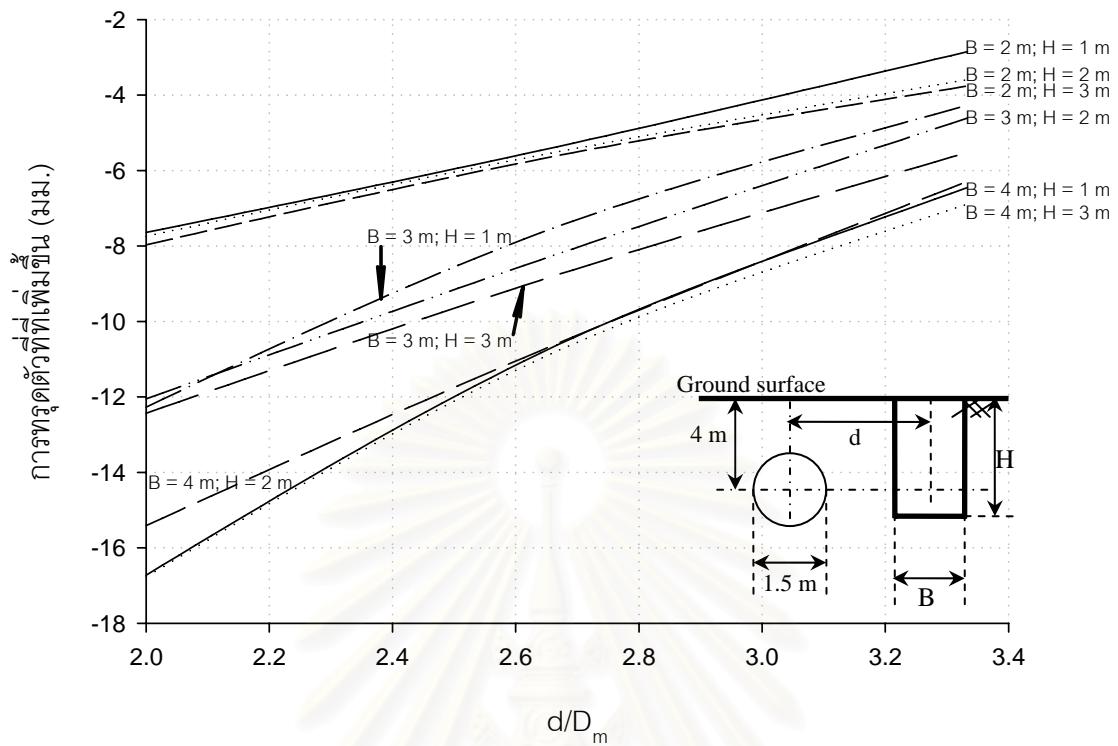
รูปที่ ก-1.4.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



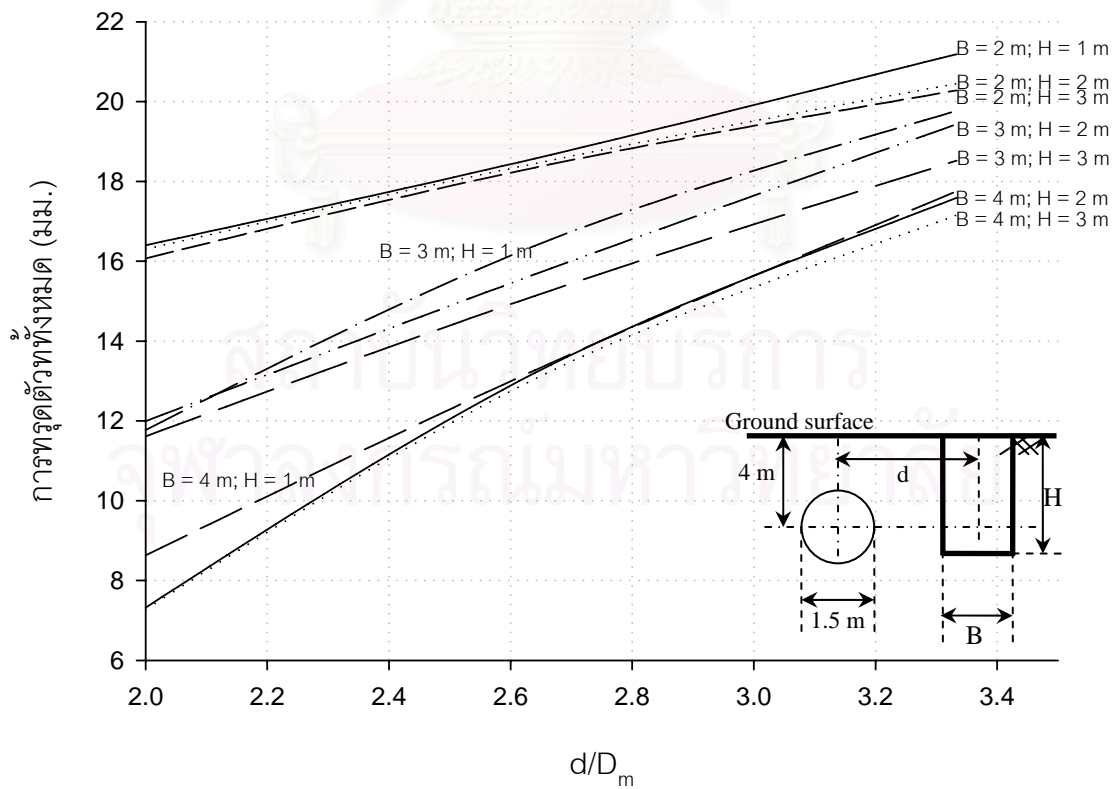
รูปที่ ก-1.4.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



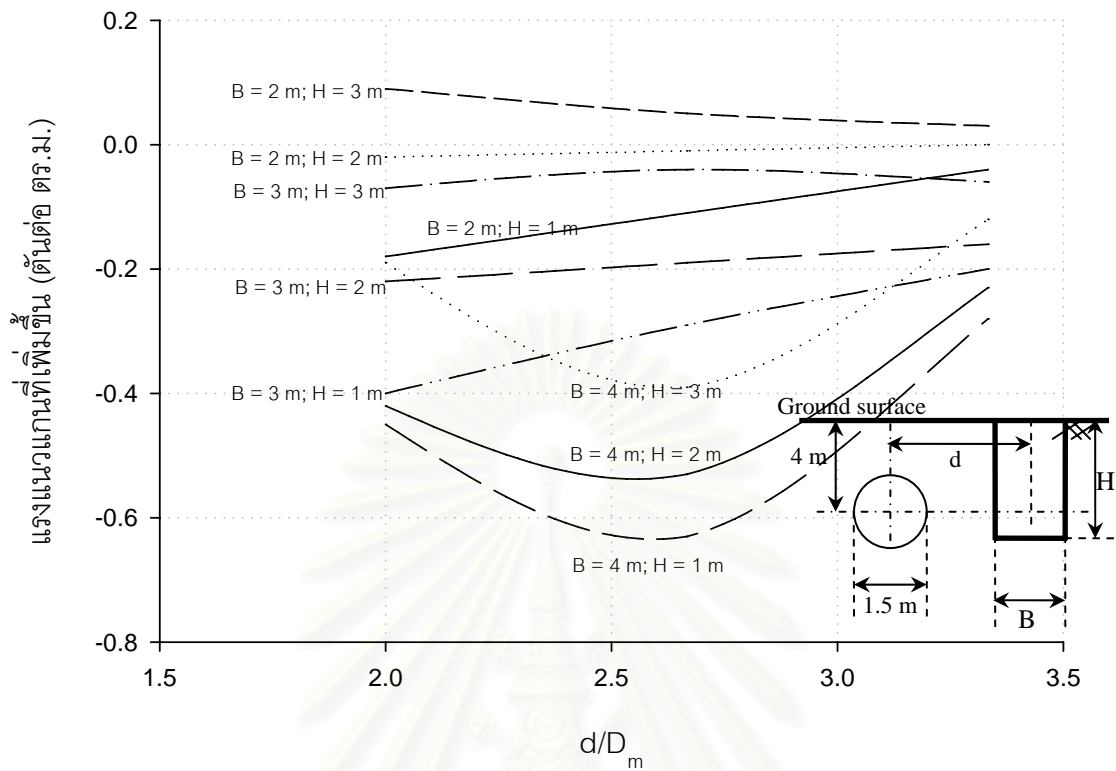
รูปที่ ก-1.4.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



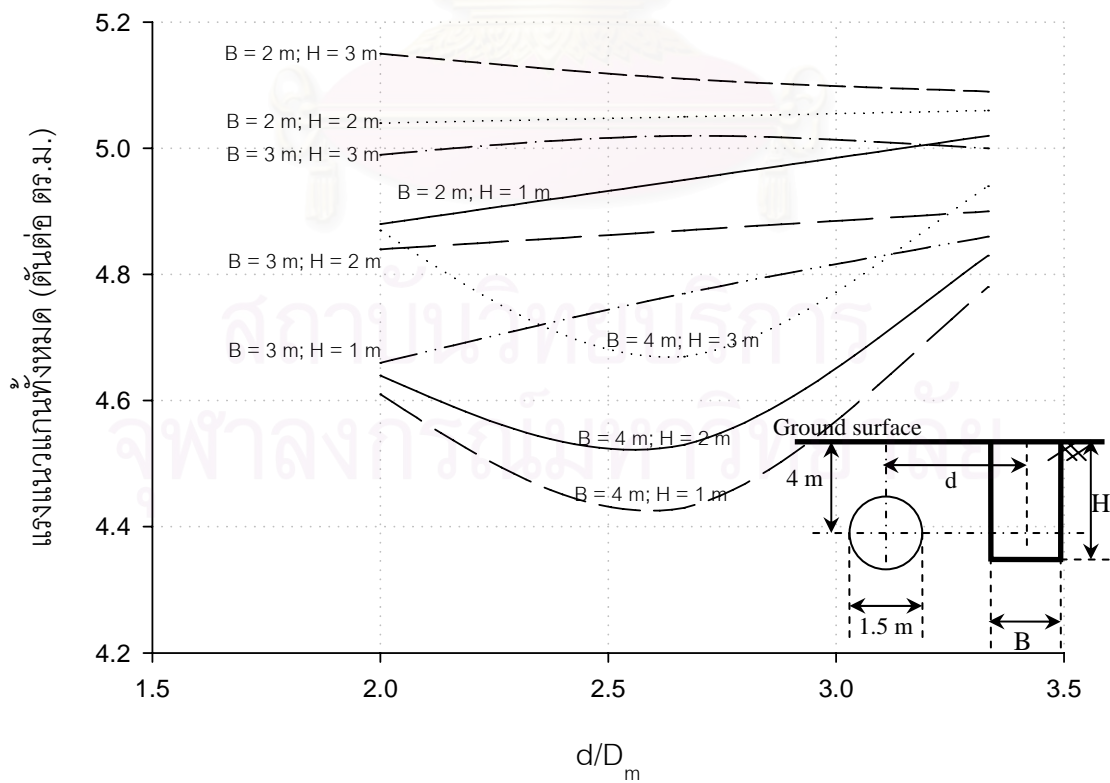
รูปที่ ก-1.5.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



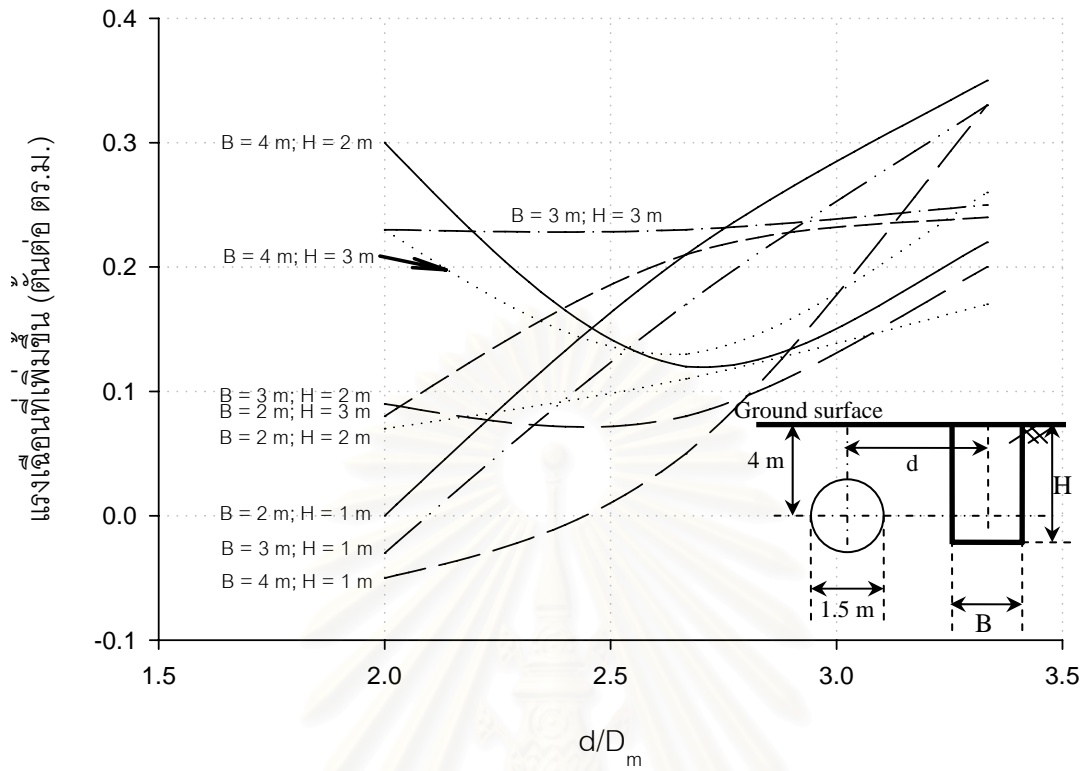
รูปที่ ก-1.5.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



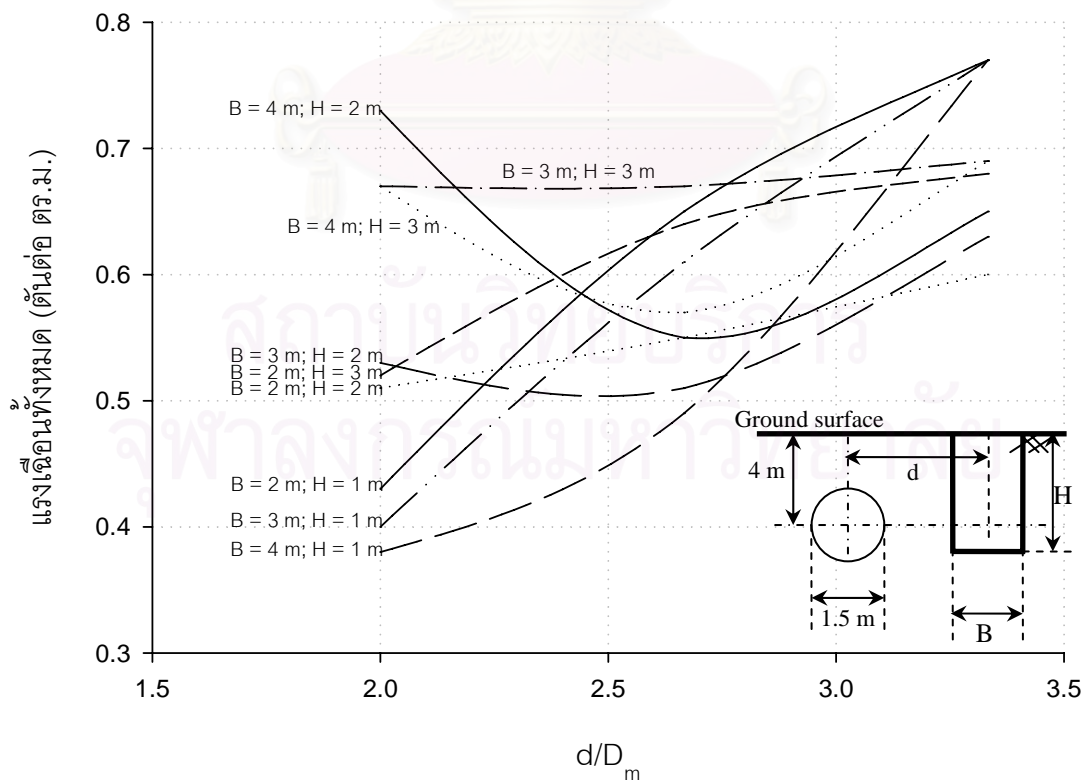
รูปที่ ก-1.5.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



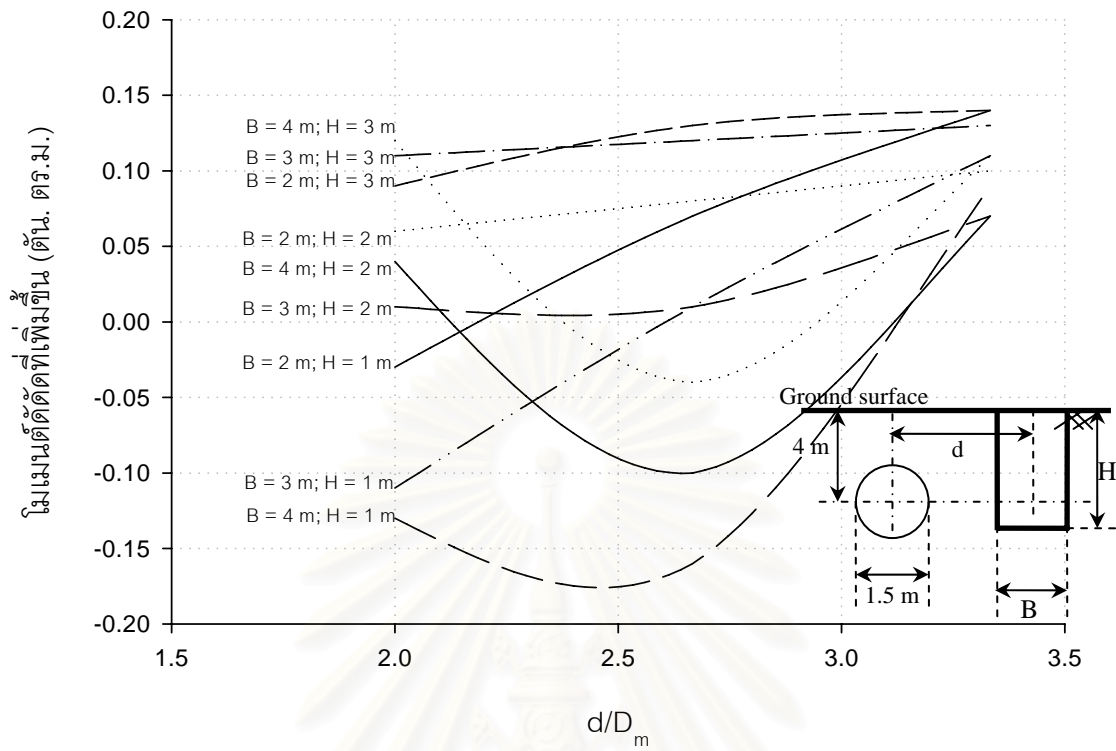
รูปที่ ก-1.5.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



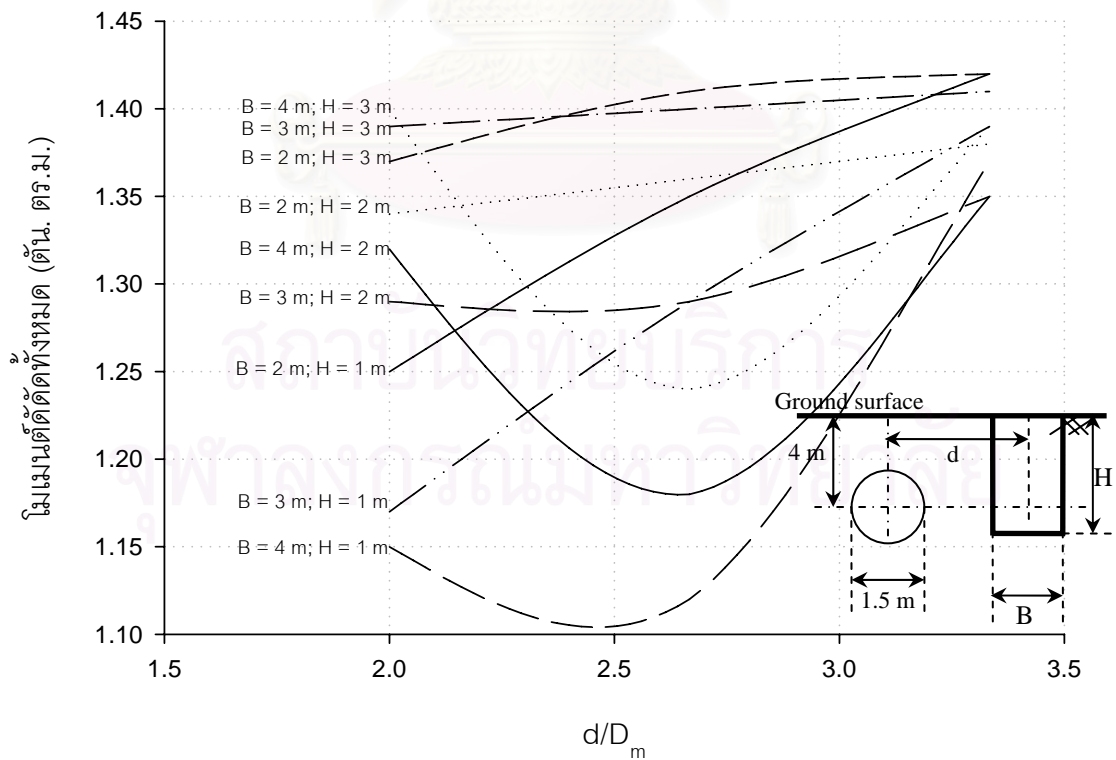
รูปที่ ก-1.5.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



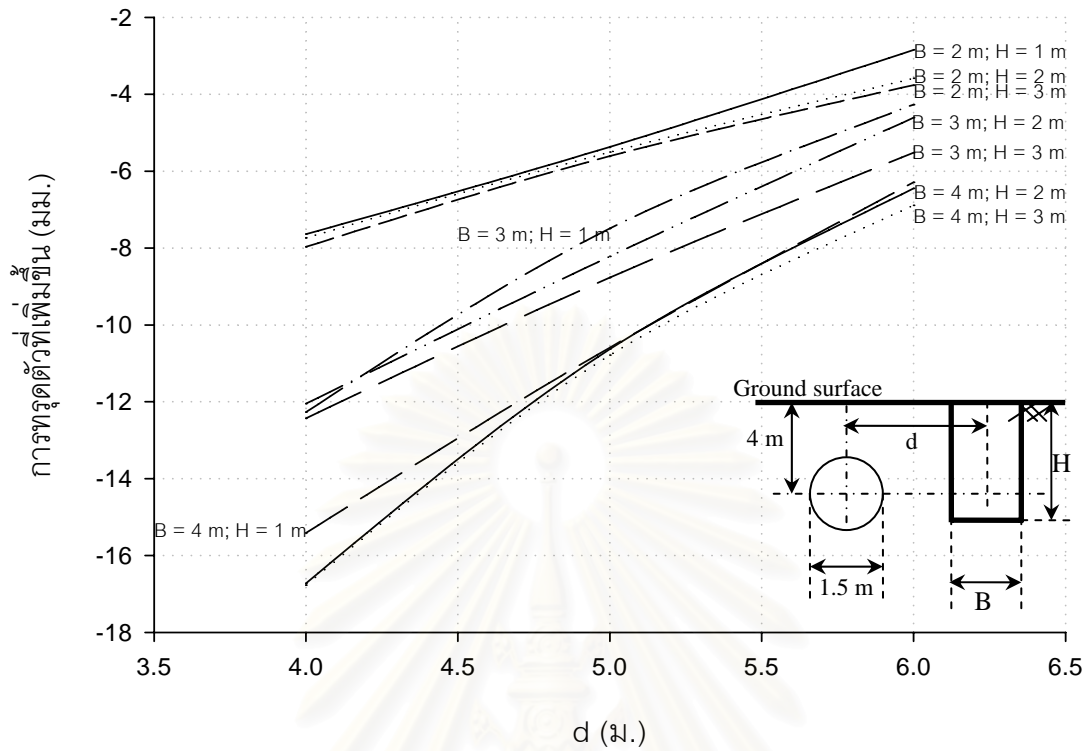
รูปที่ ก-1.5.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



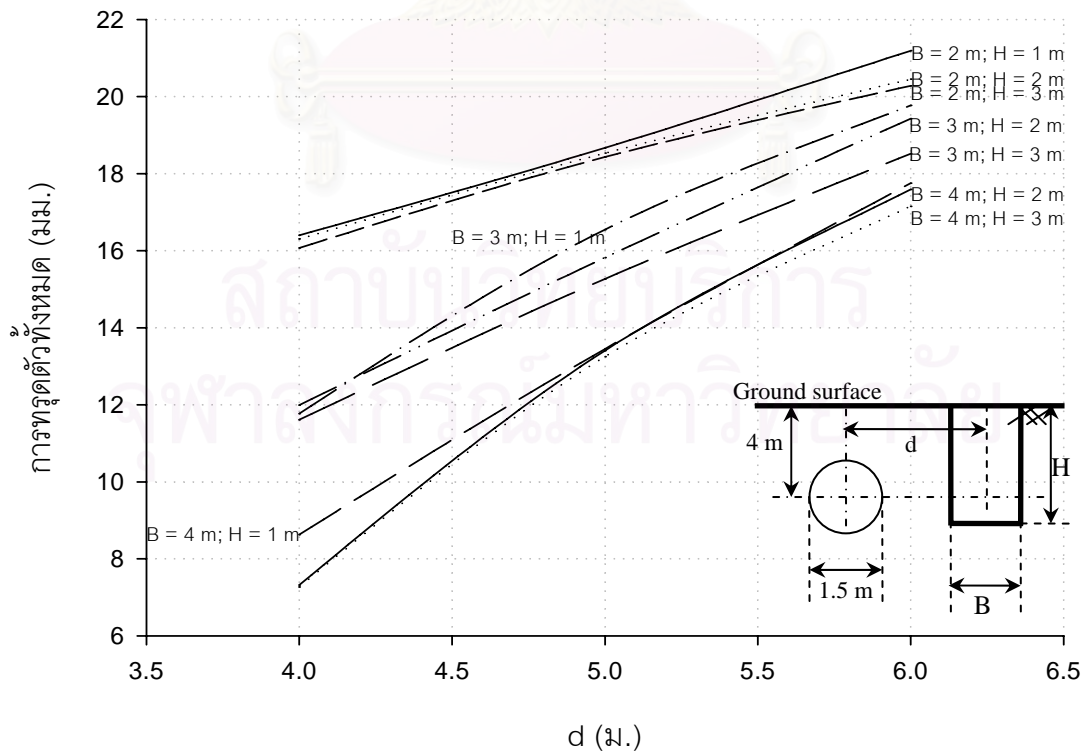
รูปที่ ก-1.5.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



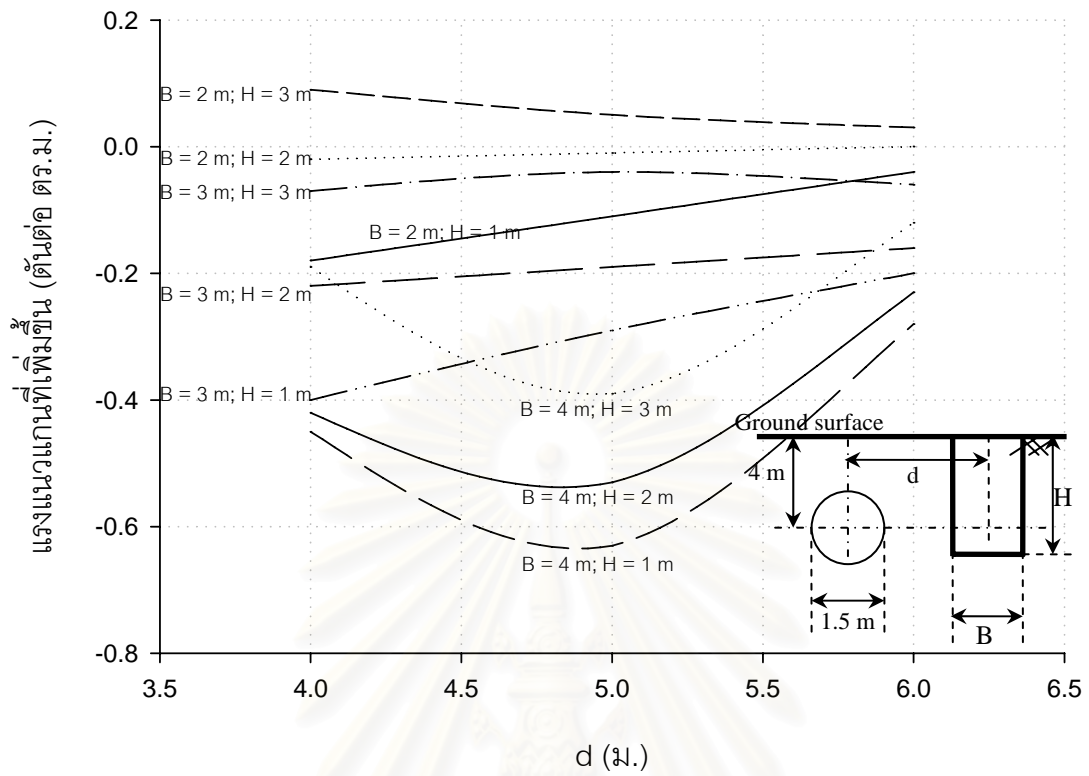
รูปที่ ก-1.5.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



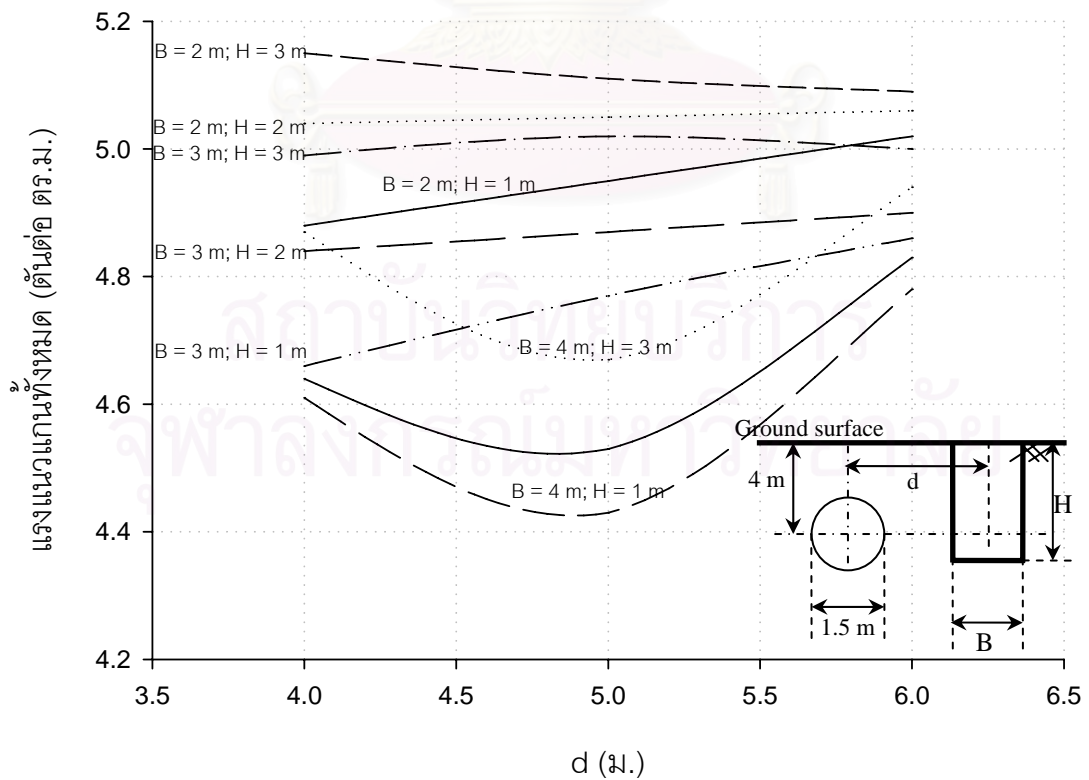
รูปที่ ก-1.5.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



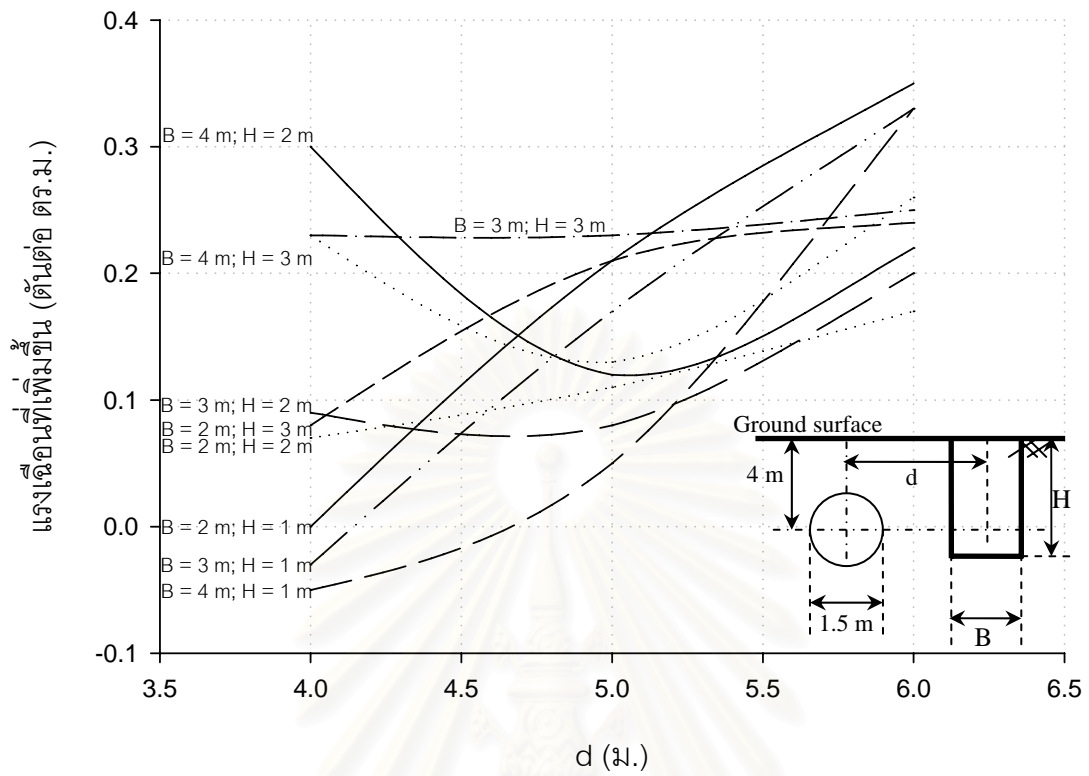
รูปที่ ก-1.5.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



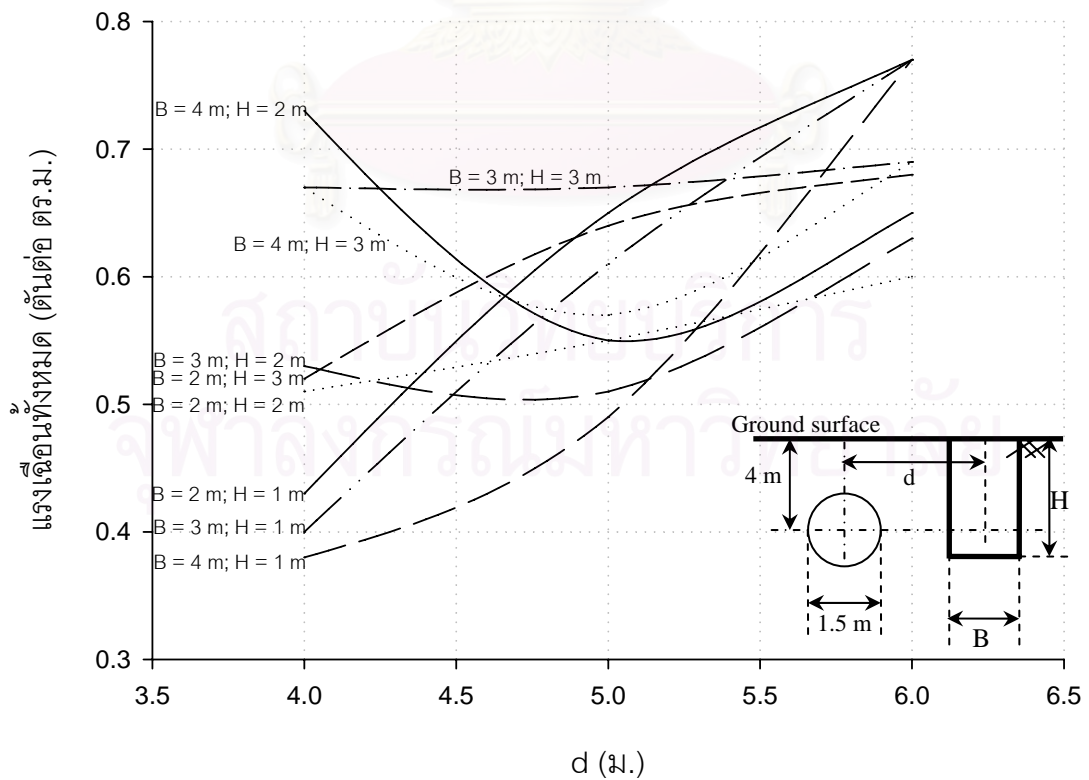
รูปที่ ก-1.5.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



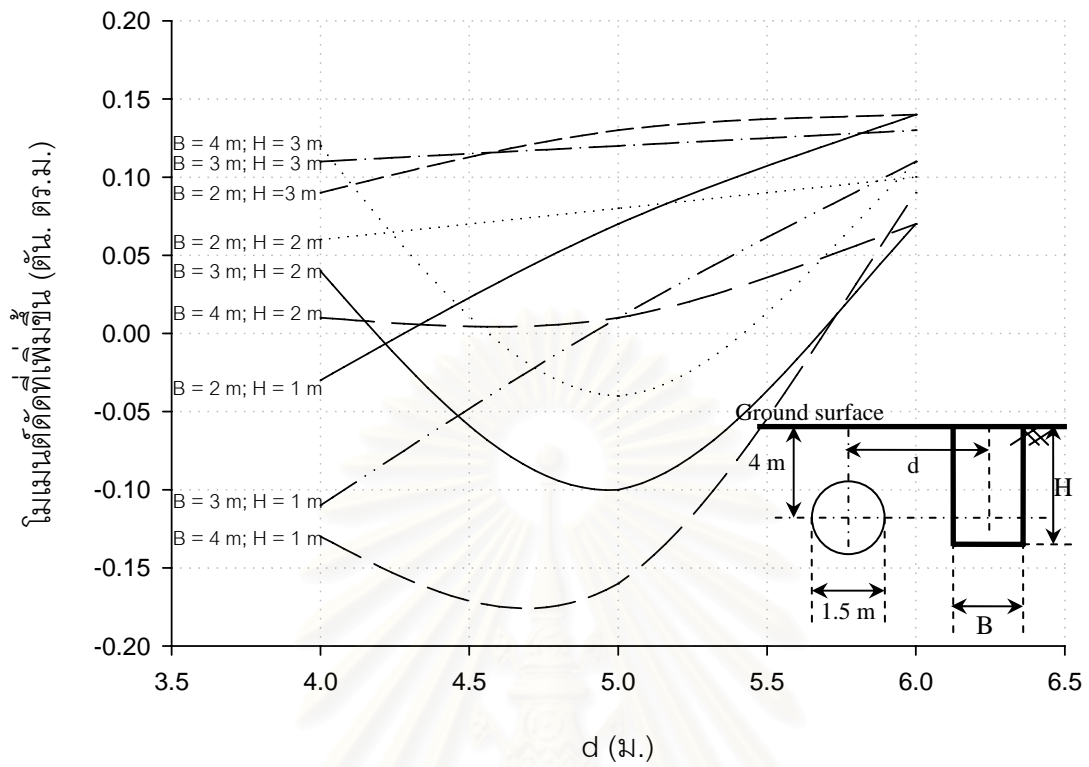
รูปที่ ก-1.5.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



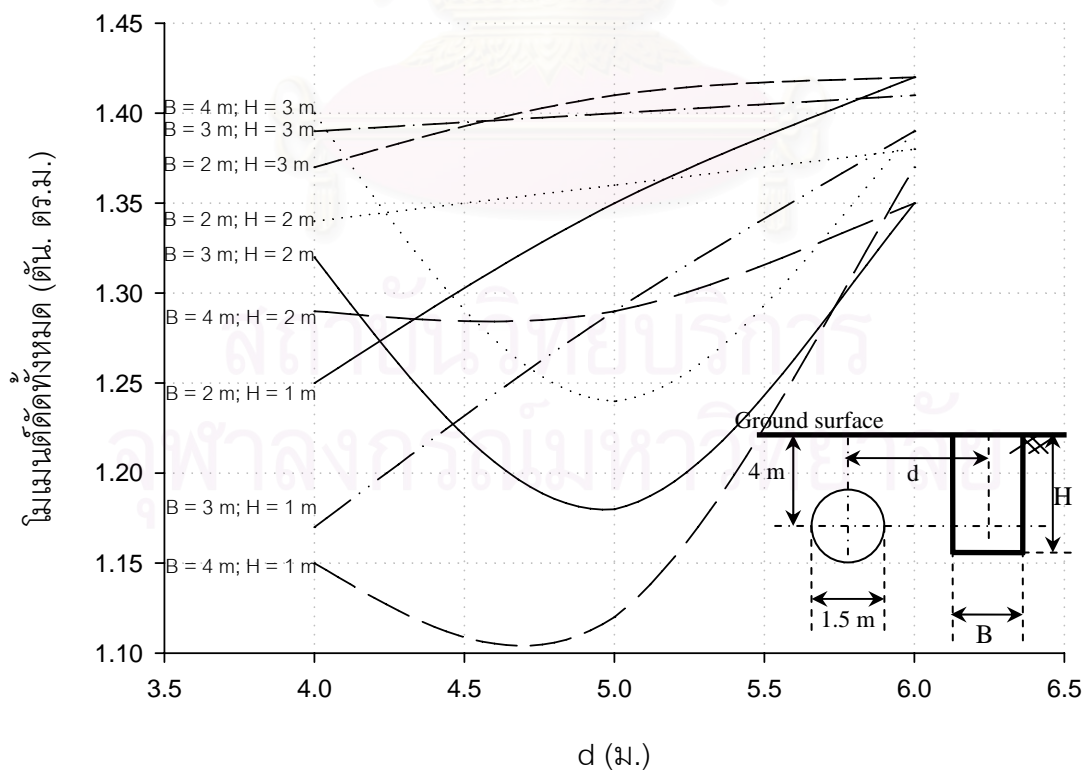
รูปที่ ก-1.5.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



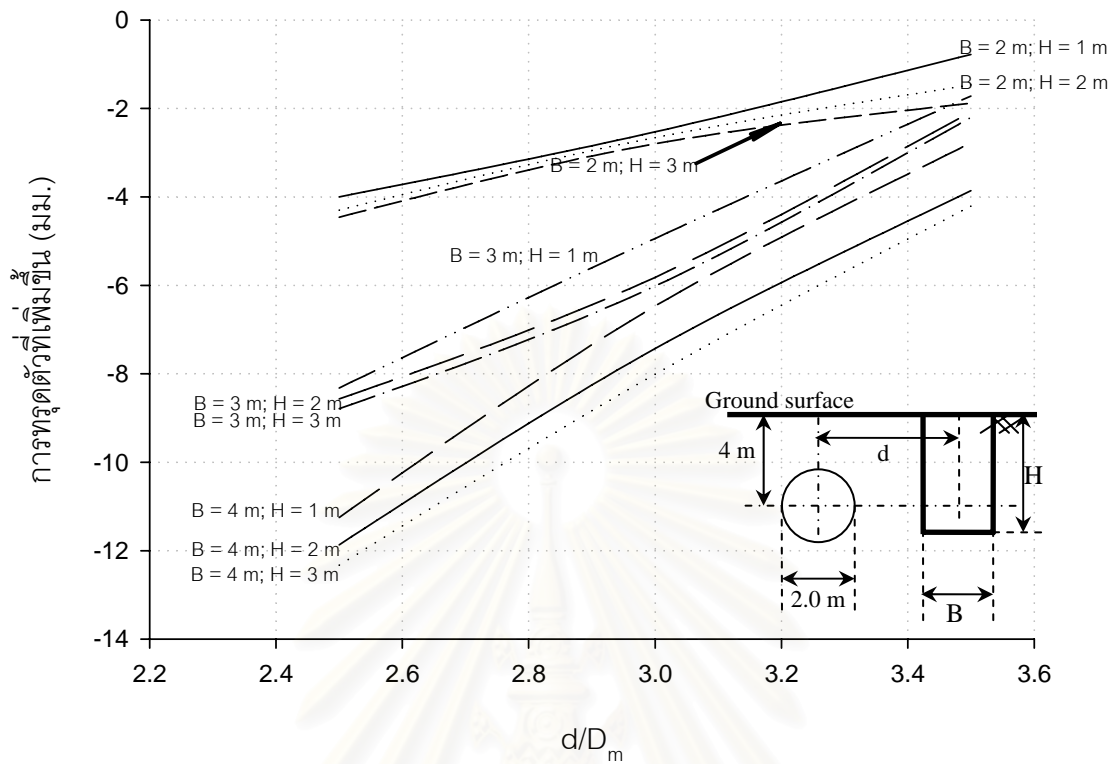
รูปที่ ก-1.5.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



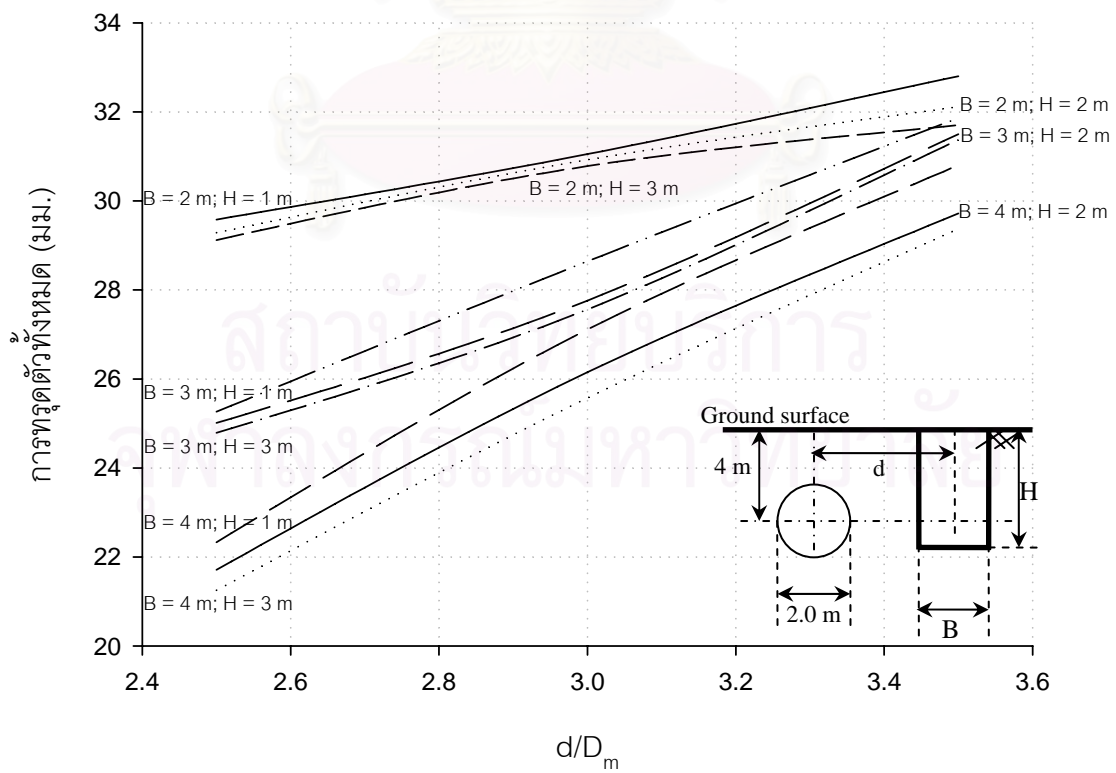
รูปที่ ก-1.5.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



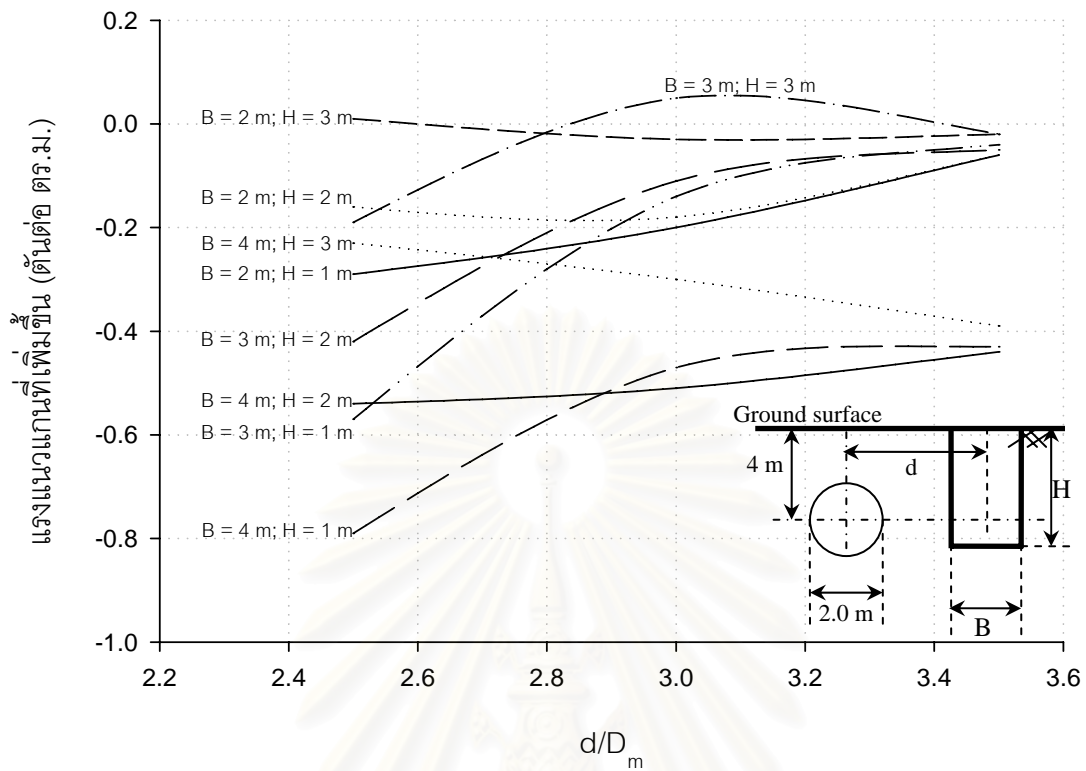
รูปที่ ก-1.5.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 1.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



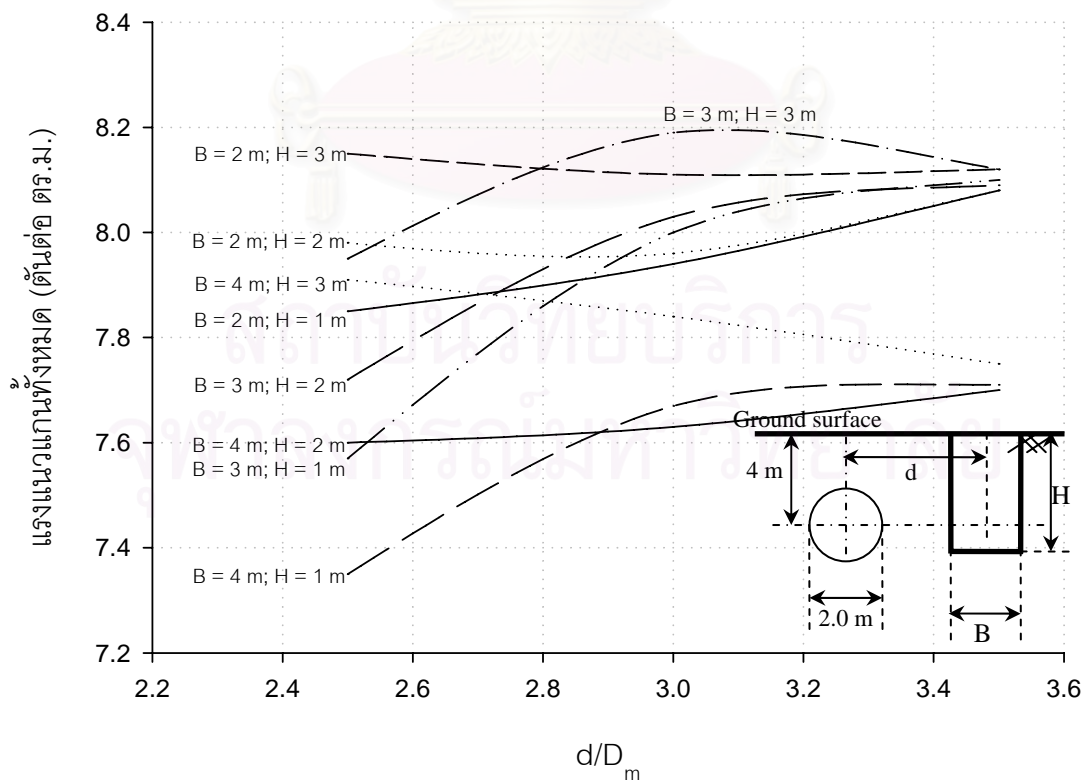
รูปที่ ก-1.6.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



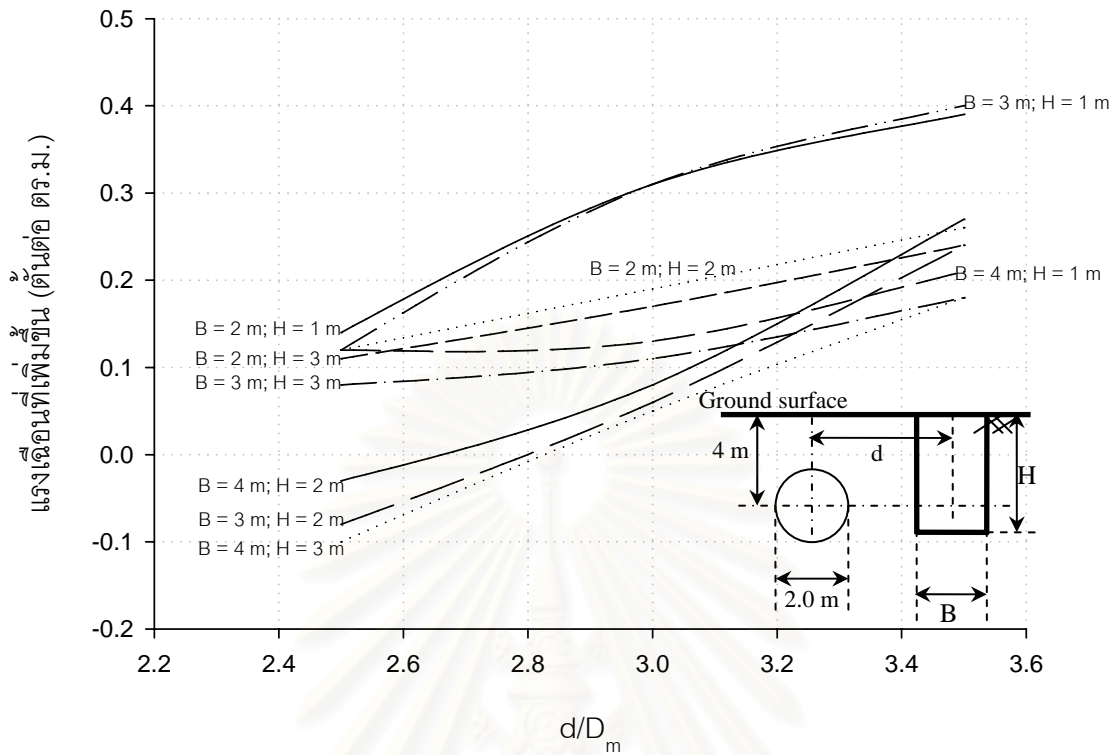
รูปที่ ก-1.6.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



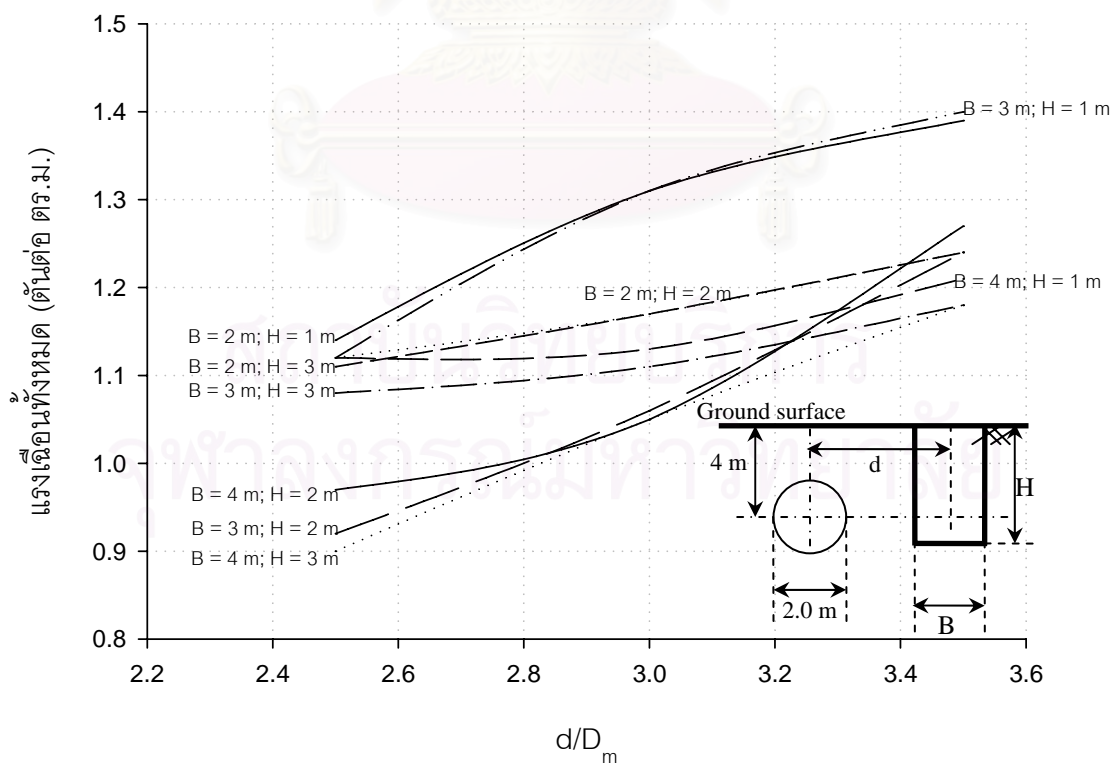
รูปที่ ก-1.6.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



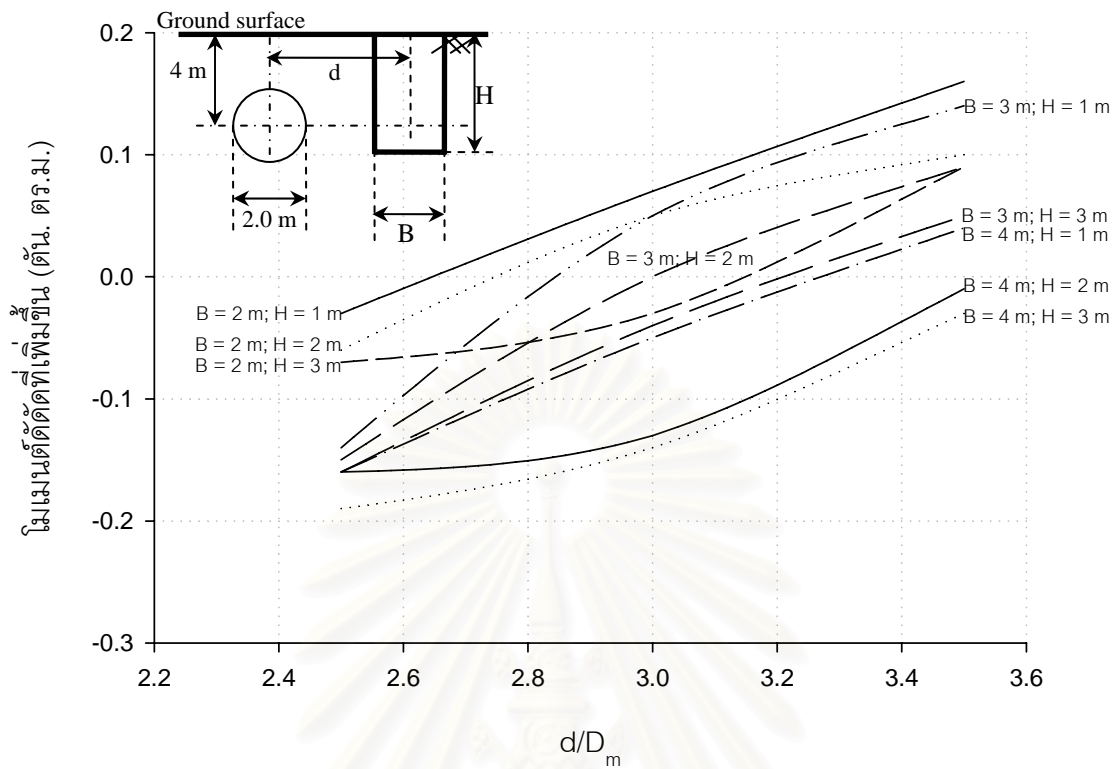
รูปที่ ก-1.6.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



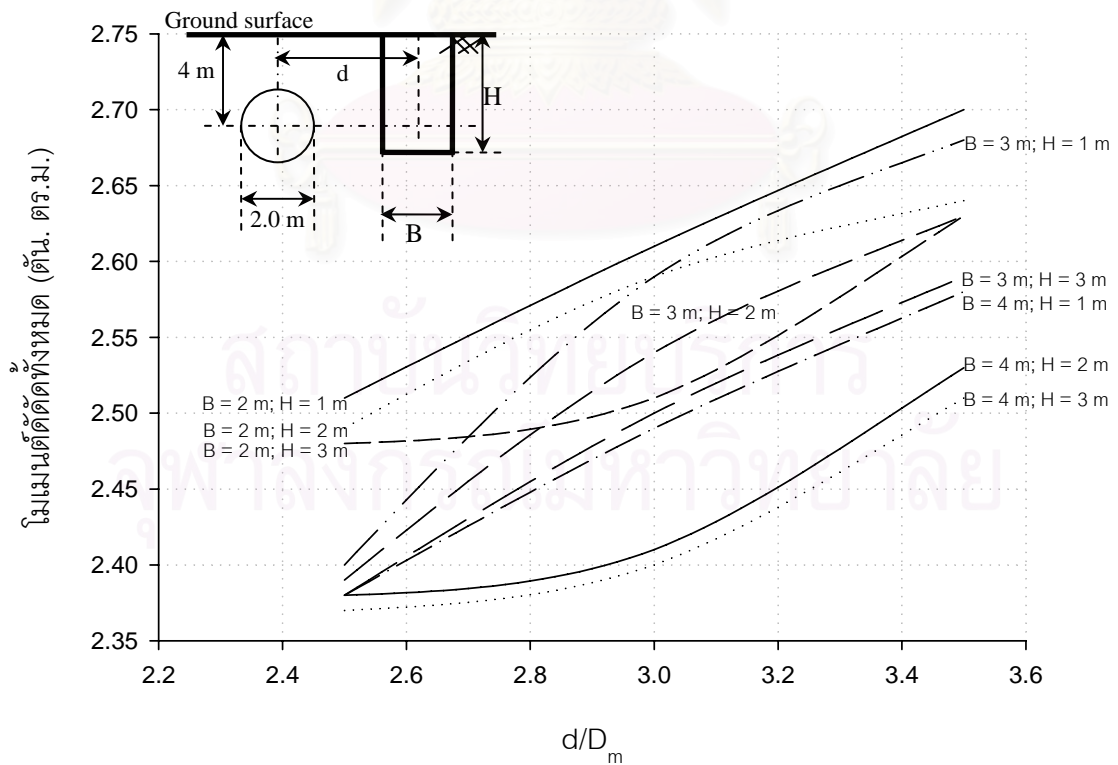
รูปที่ ก-1.6.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



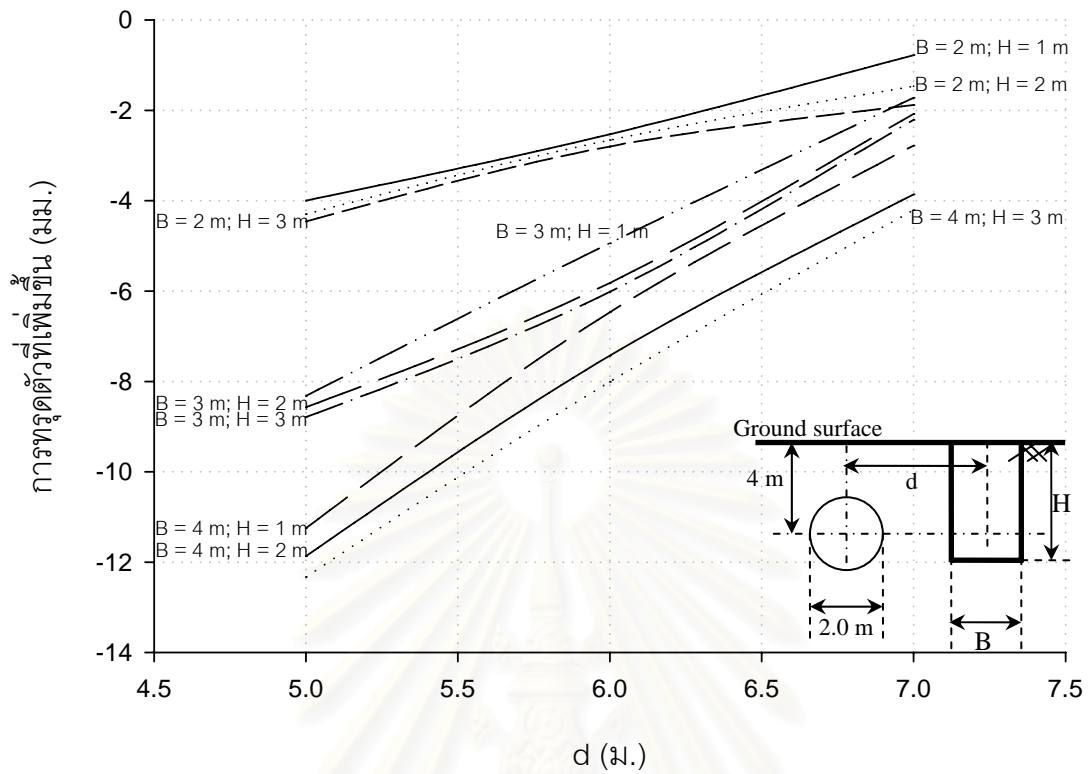
รูปที่ ก-1.6.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



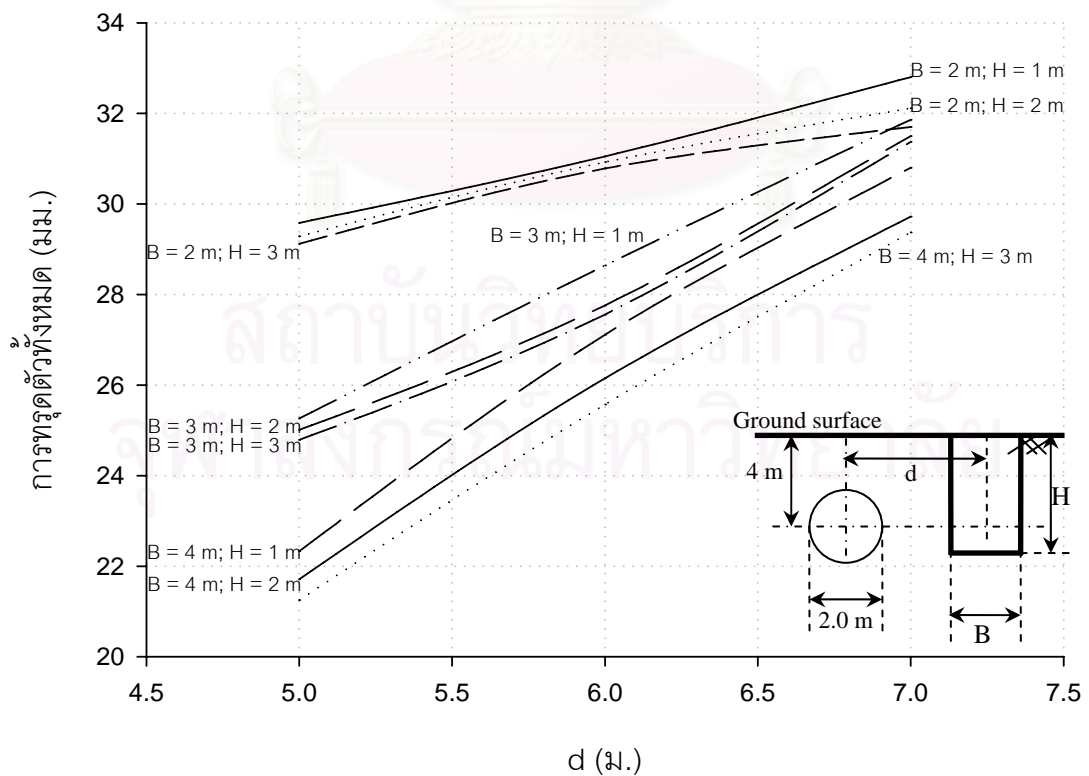
รูปที่ ก-1.6.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



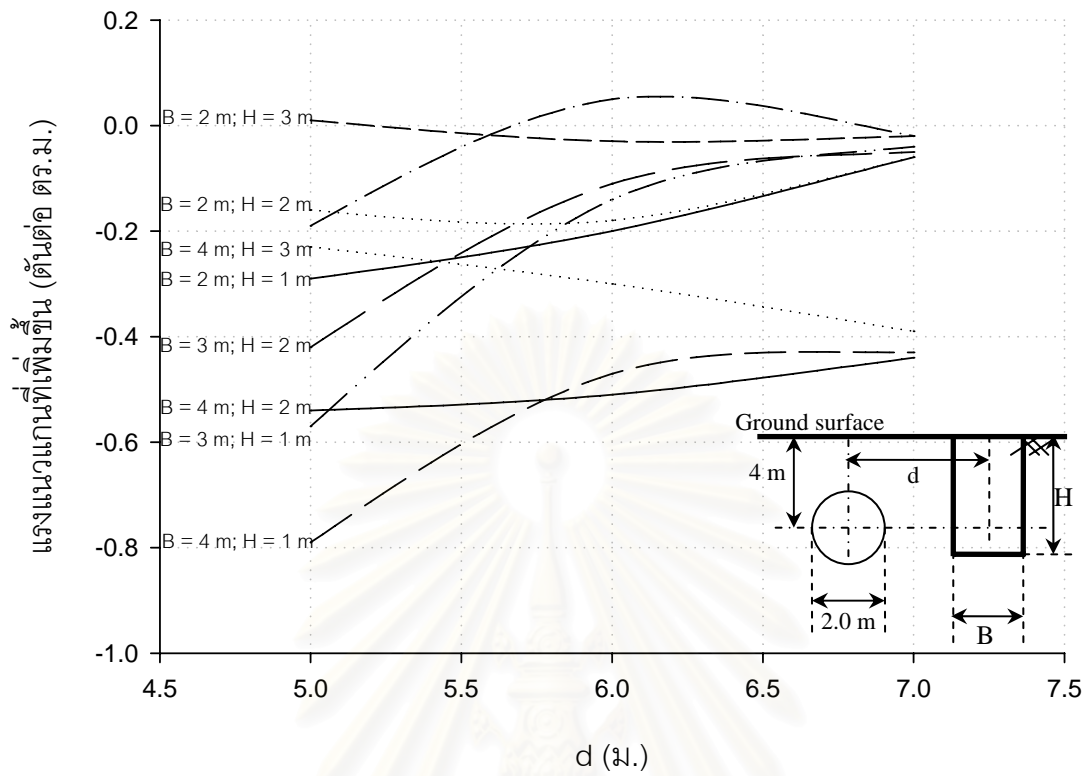
รูปที่ ก-1.6.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



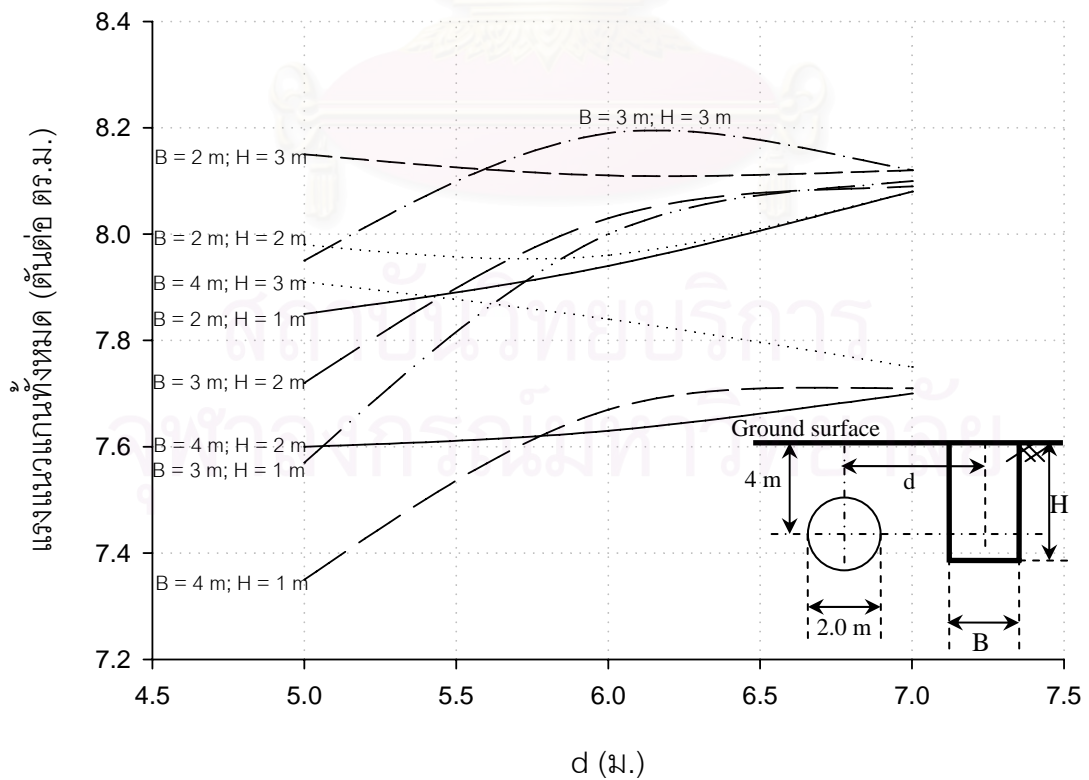
รูปที่ ก-1.6.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



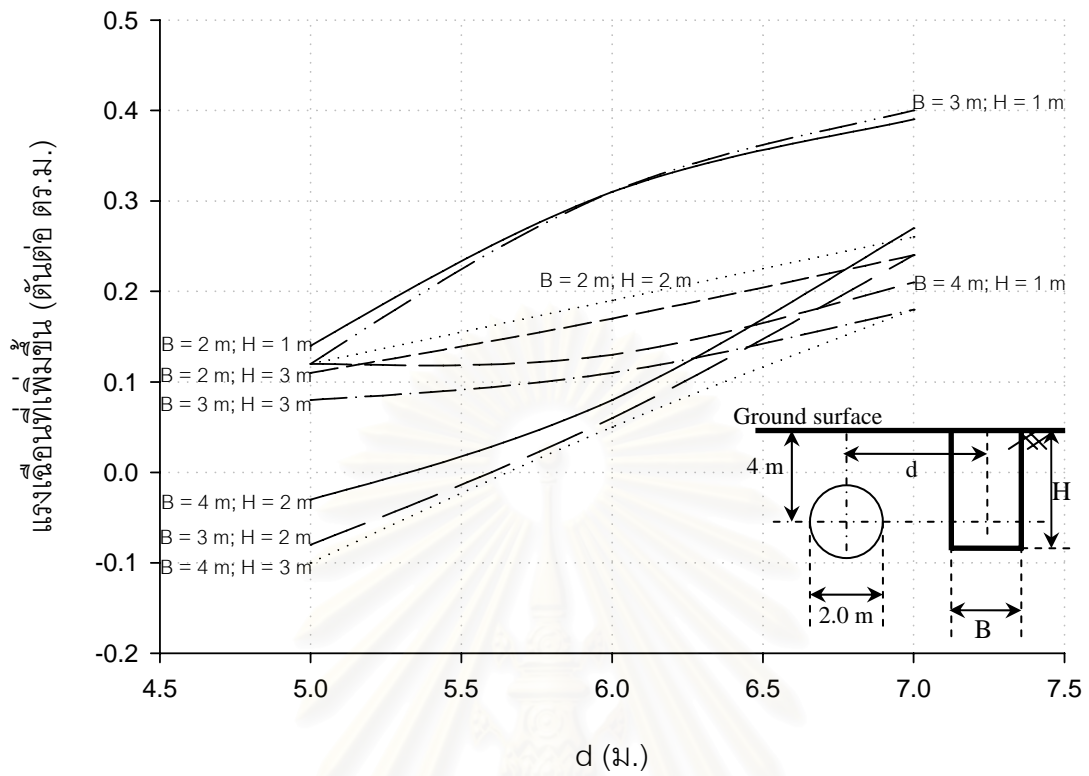
รูปที่ ก-1.6.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



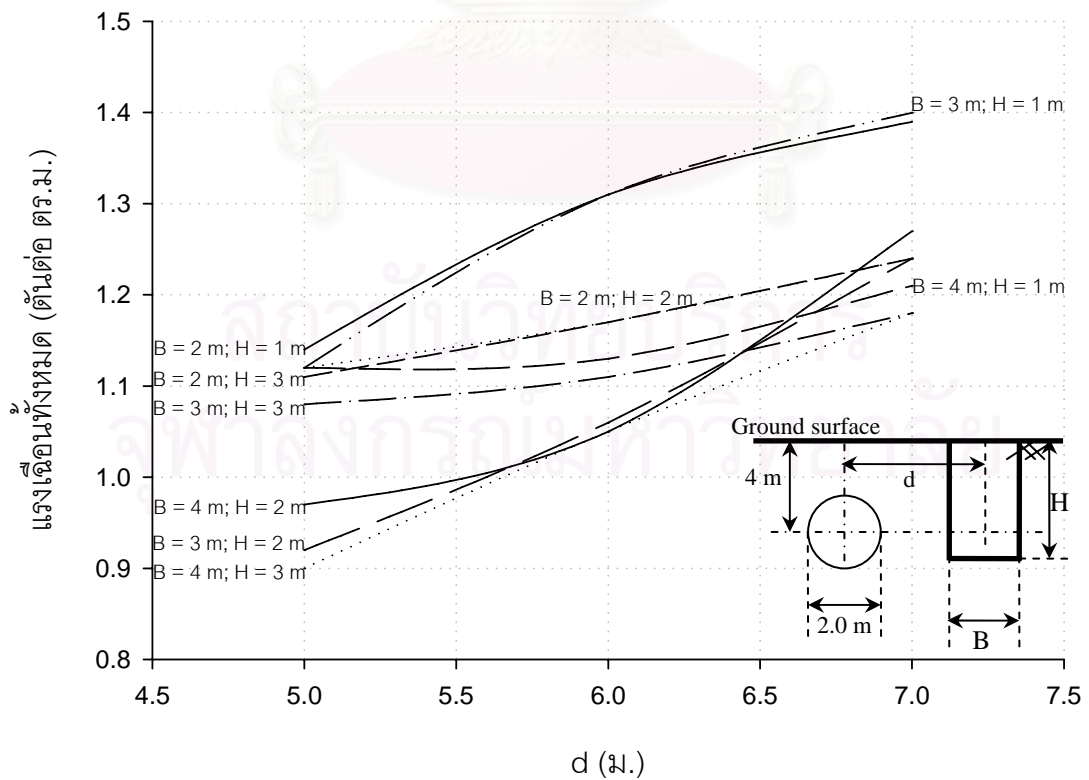
รูปที่ ก-1.6.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



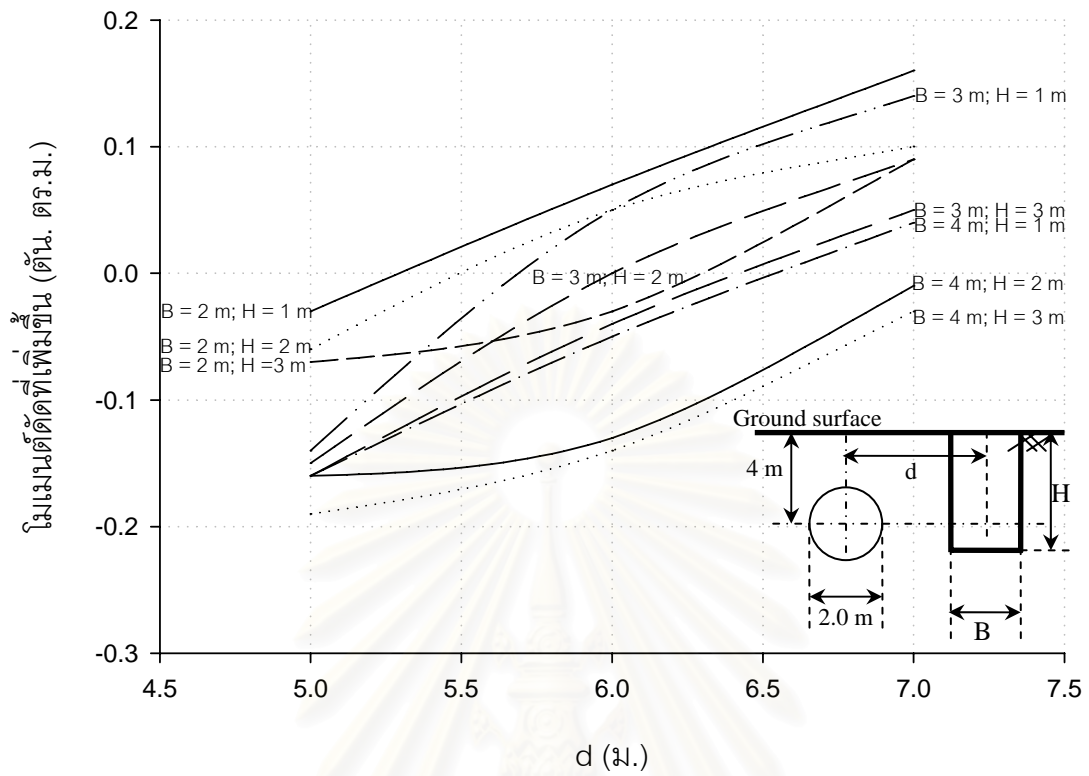
รูปที่ ก-1.6.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



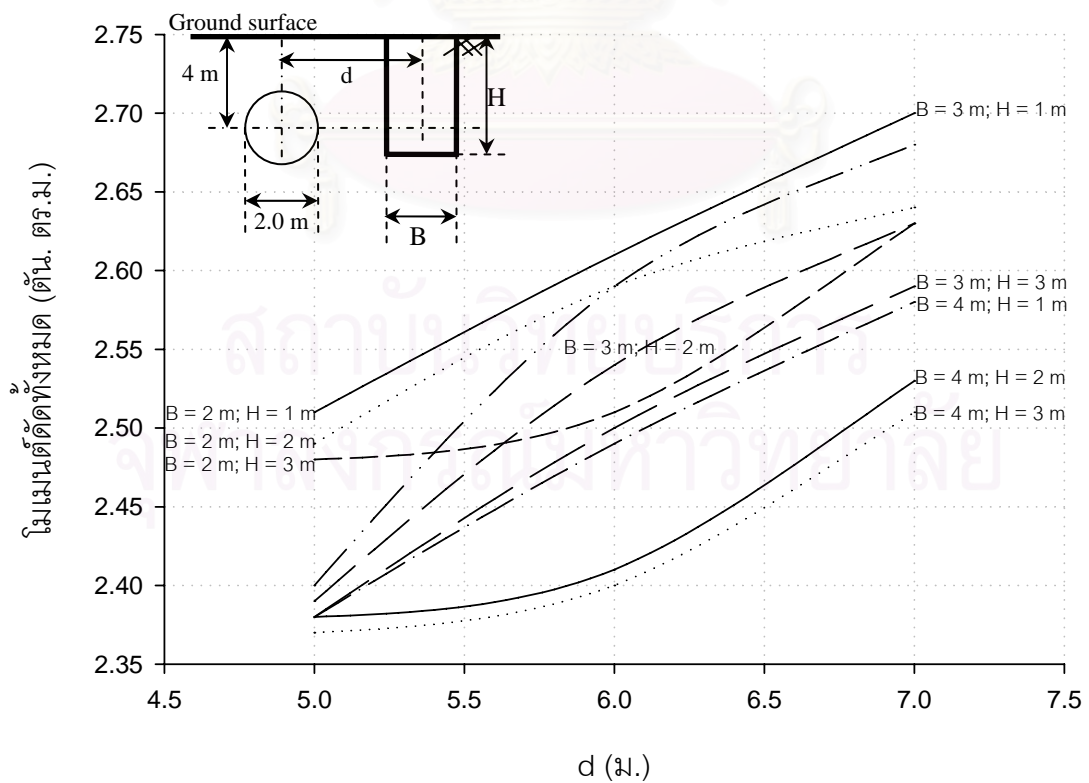
รูปที่ ก-1.6.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



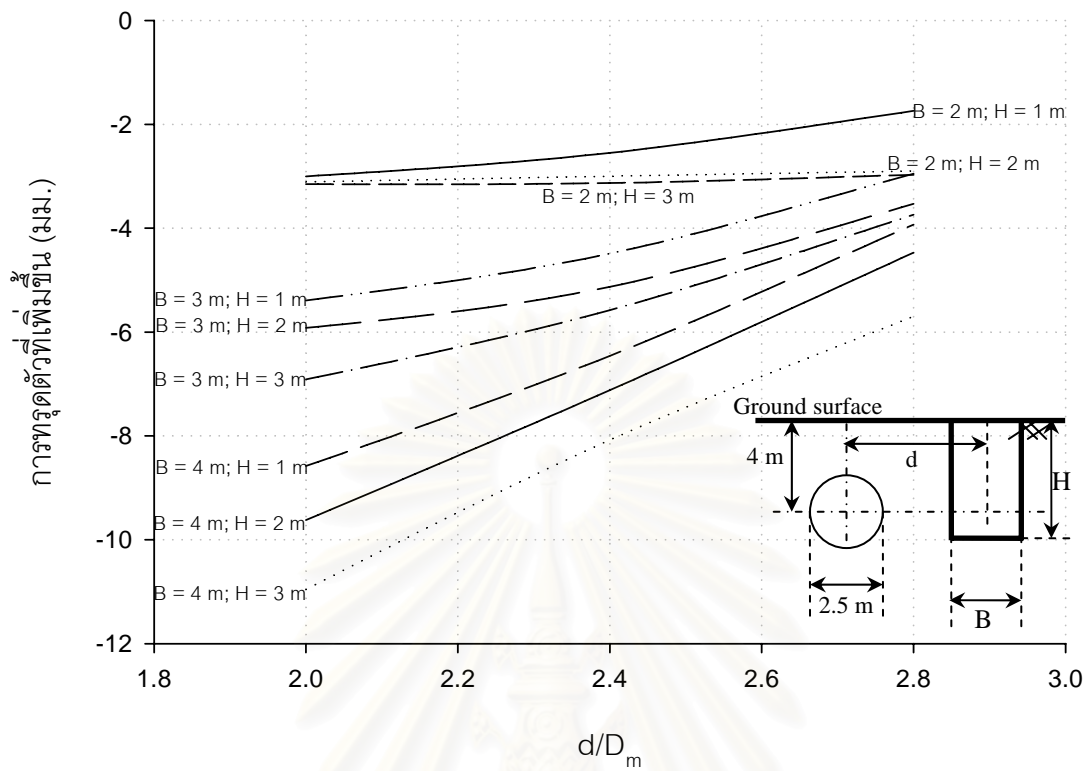
รูปที่ ก-1.6.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



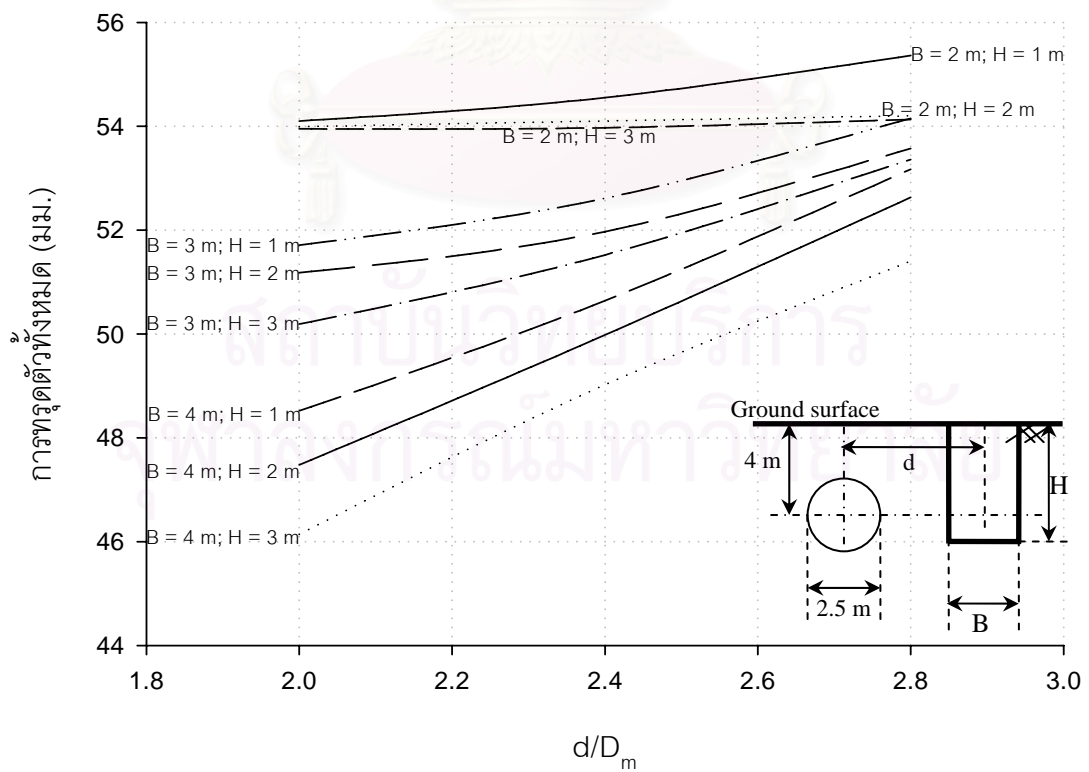
รูปที่ ก-1.6.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



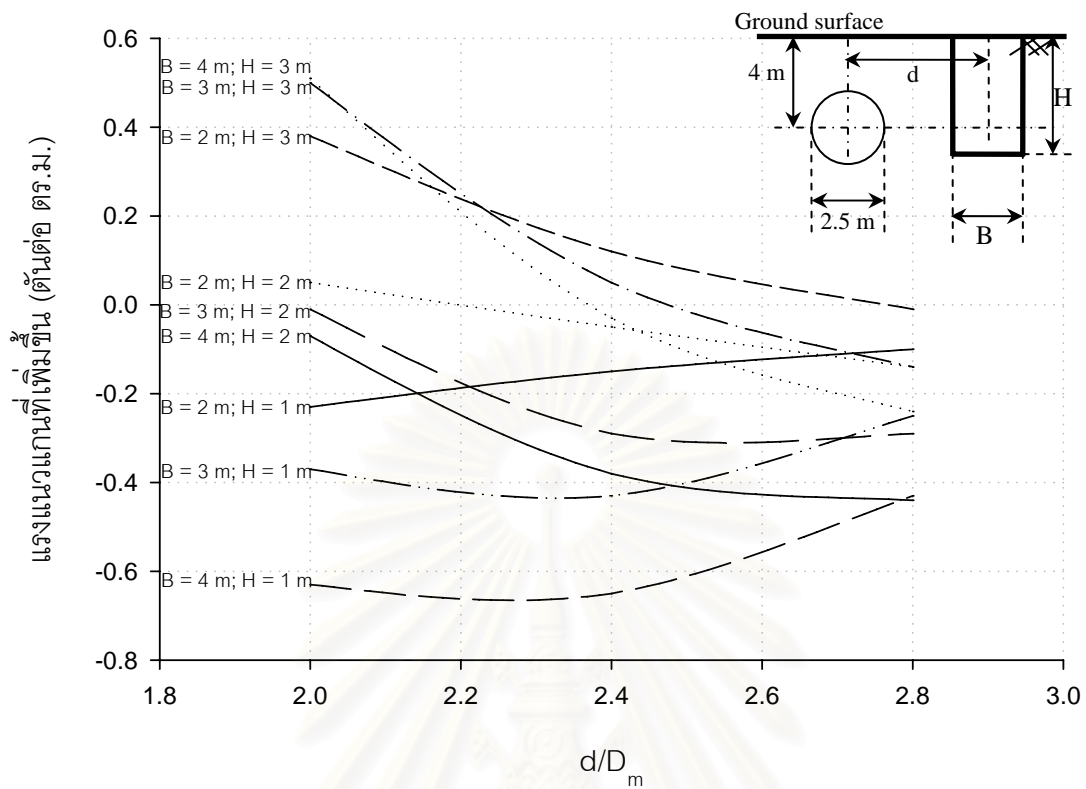
รูปที่ ก-1.6.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



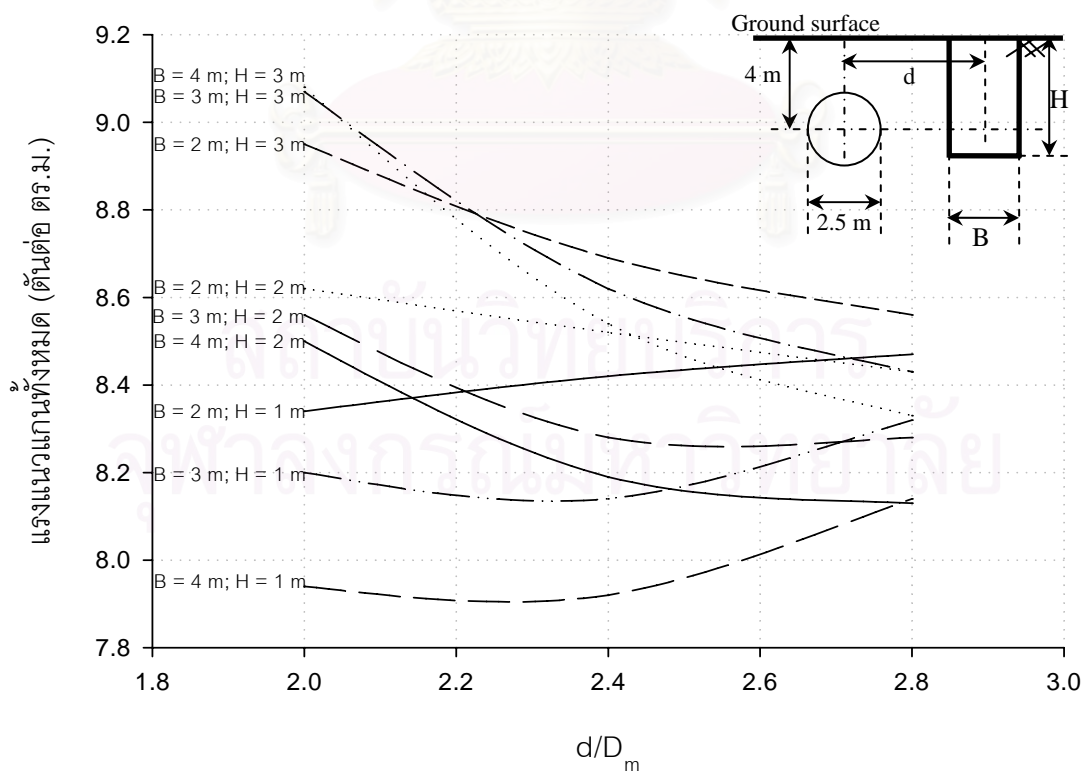
รูปที่ ก-1.7.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



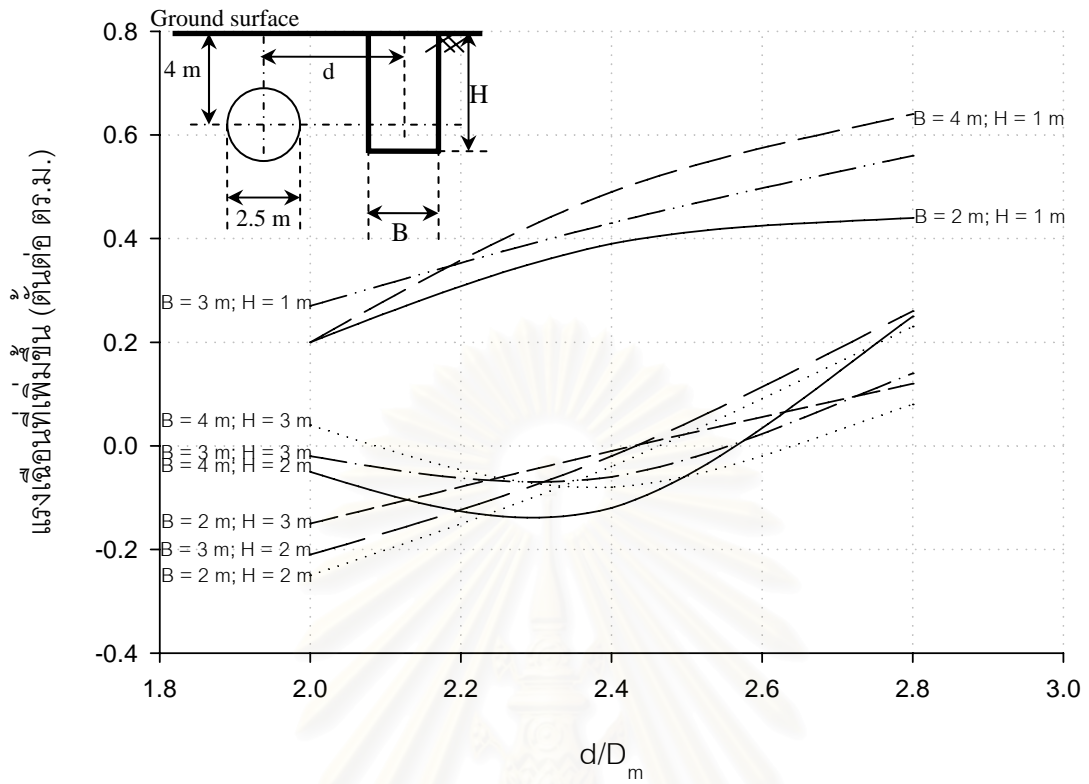
รูปที่ ก-1.7.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



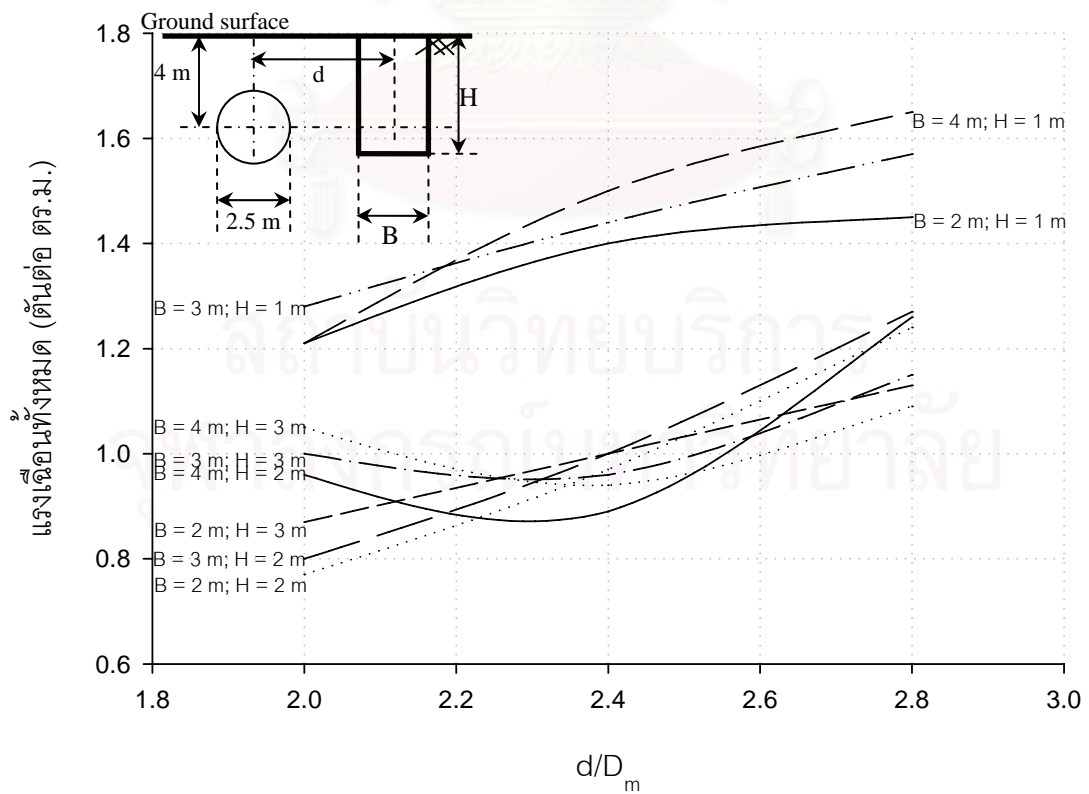
รูปที่ ก-1.7.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



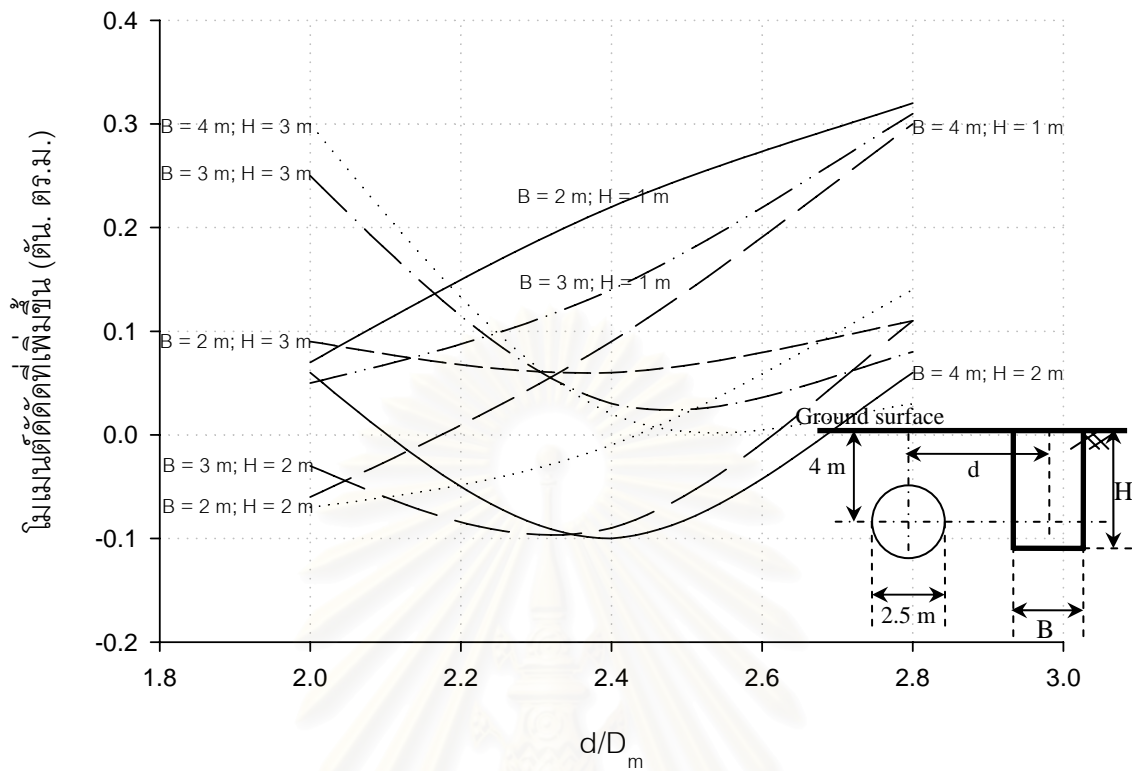
รูปที่ ก-1.7.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



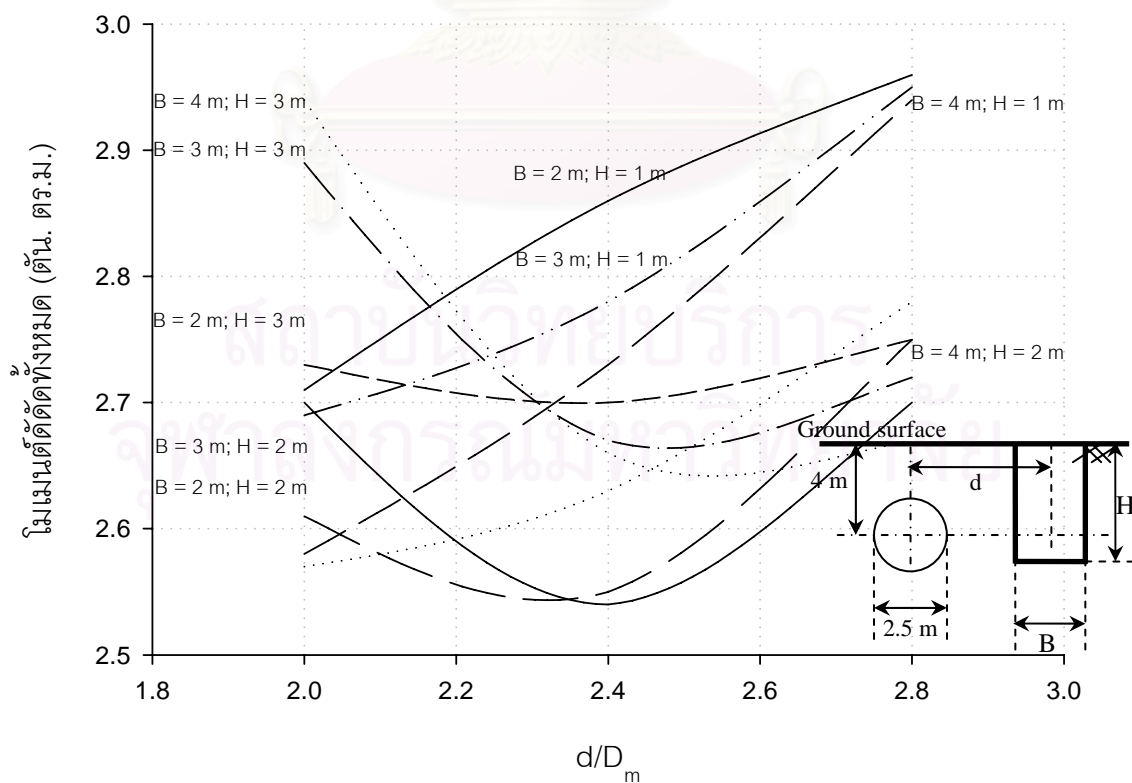
รูปที่ ก-1.7.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



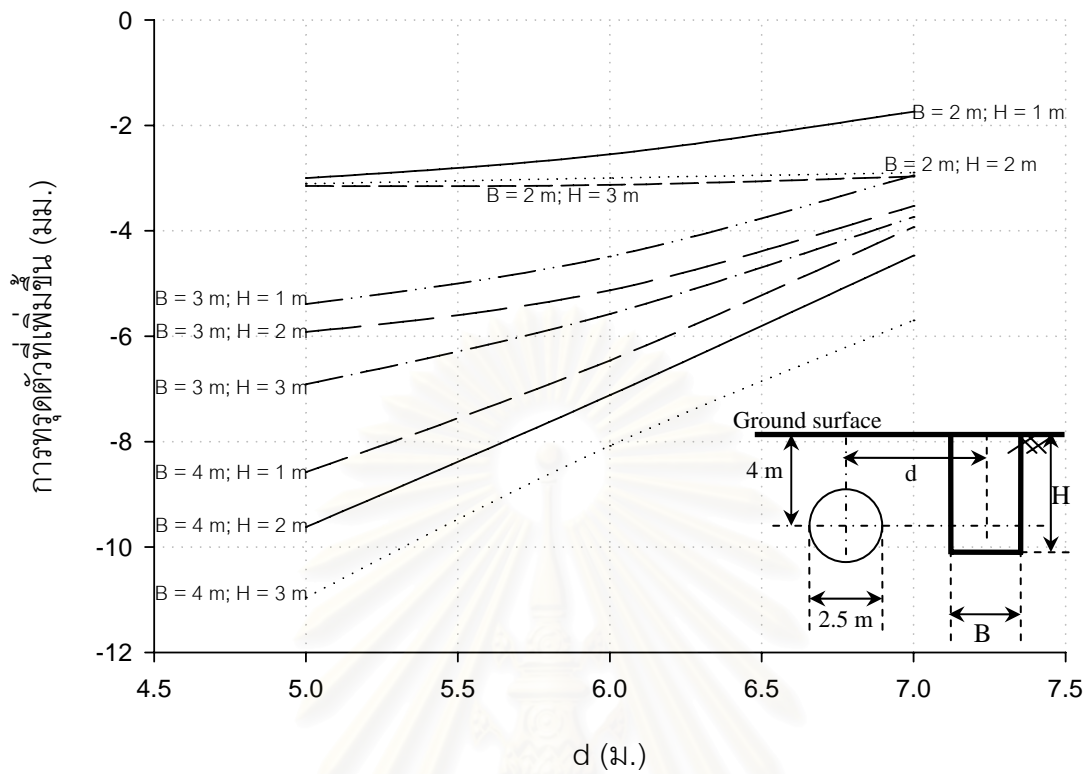
รูปที่ ก-1.7.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



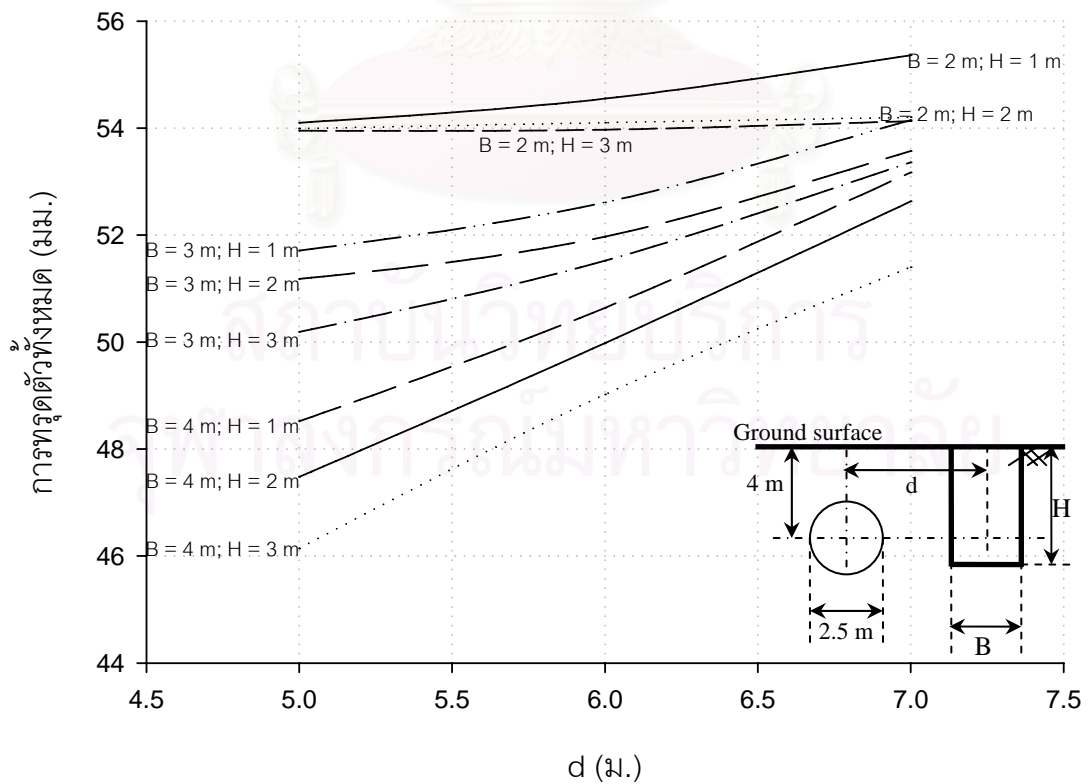
รูปที่ ก-1.7.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



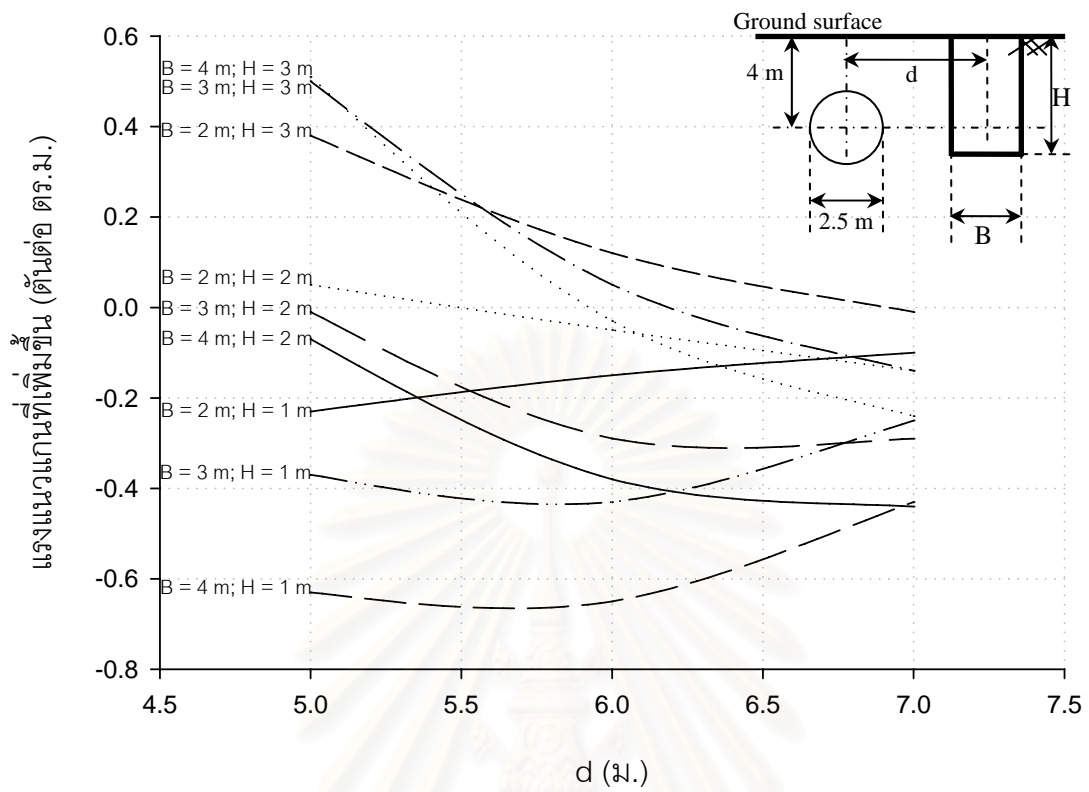
รูปที่ ก-1.7.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



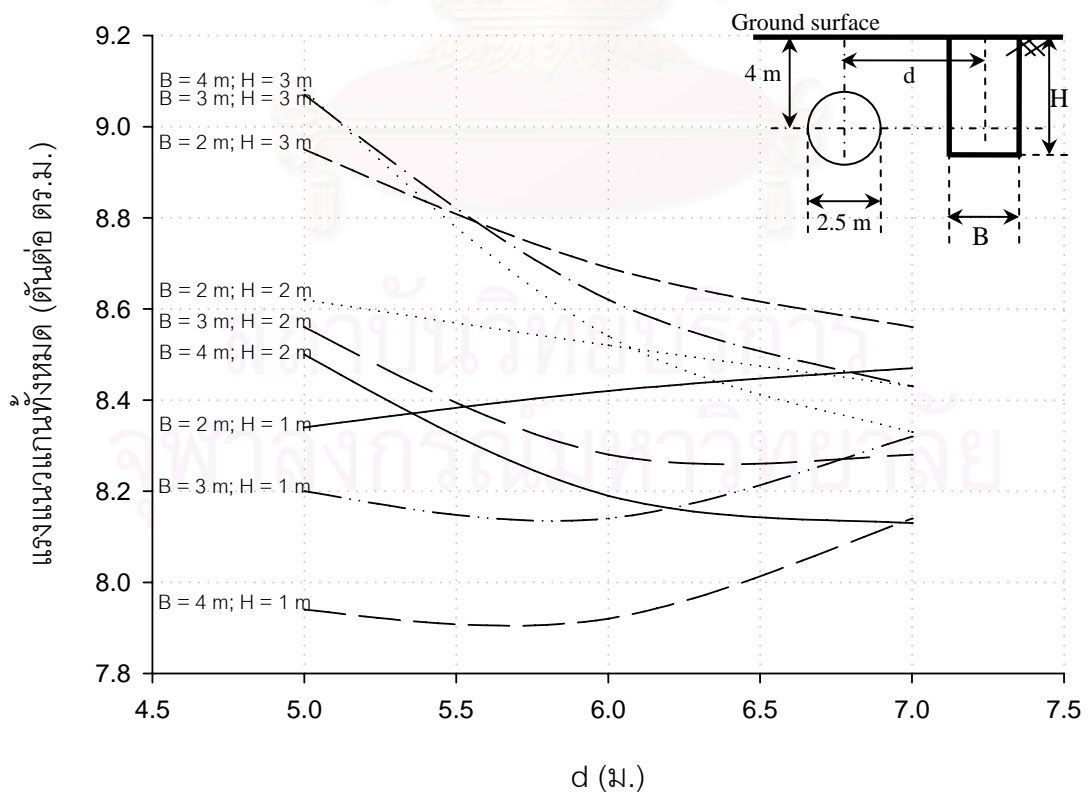
รูปที่ ก-1.7.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



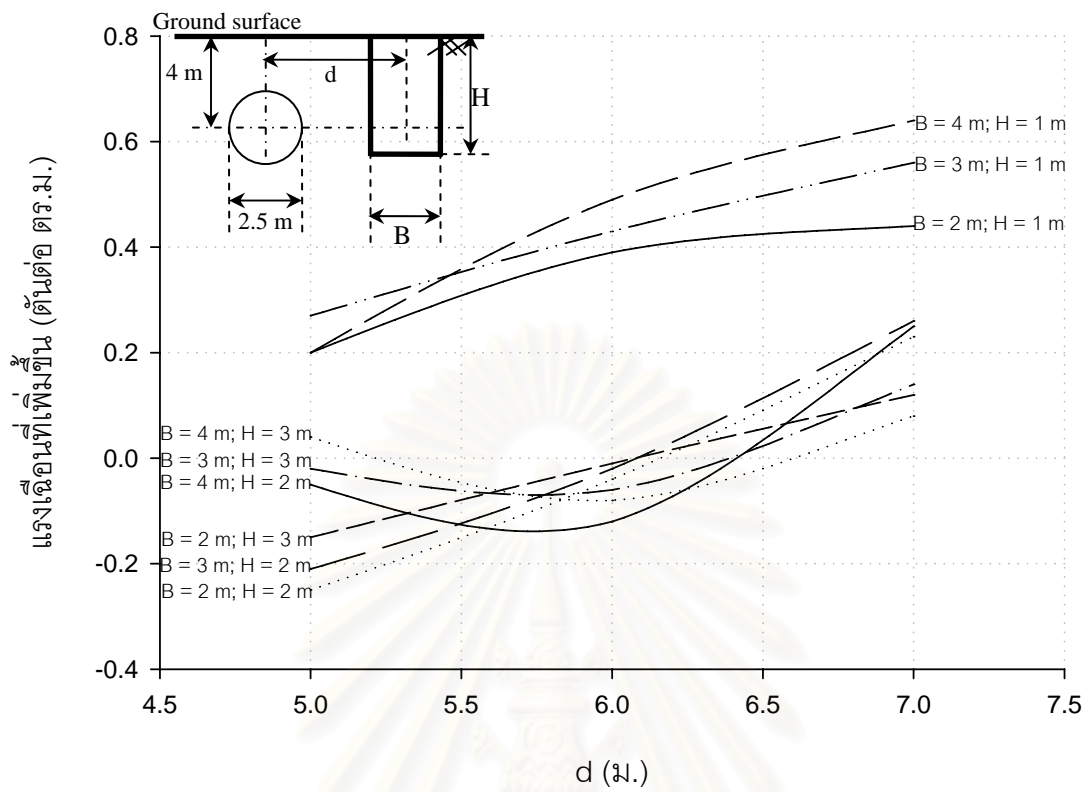
รูปที่ ก-1.7.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



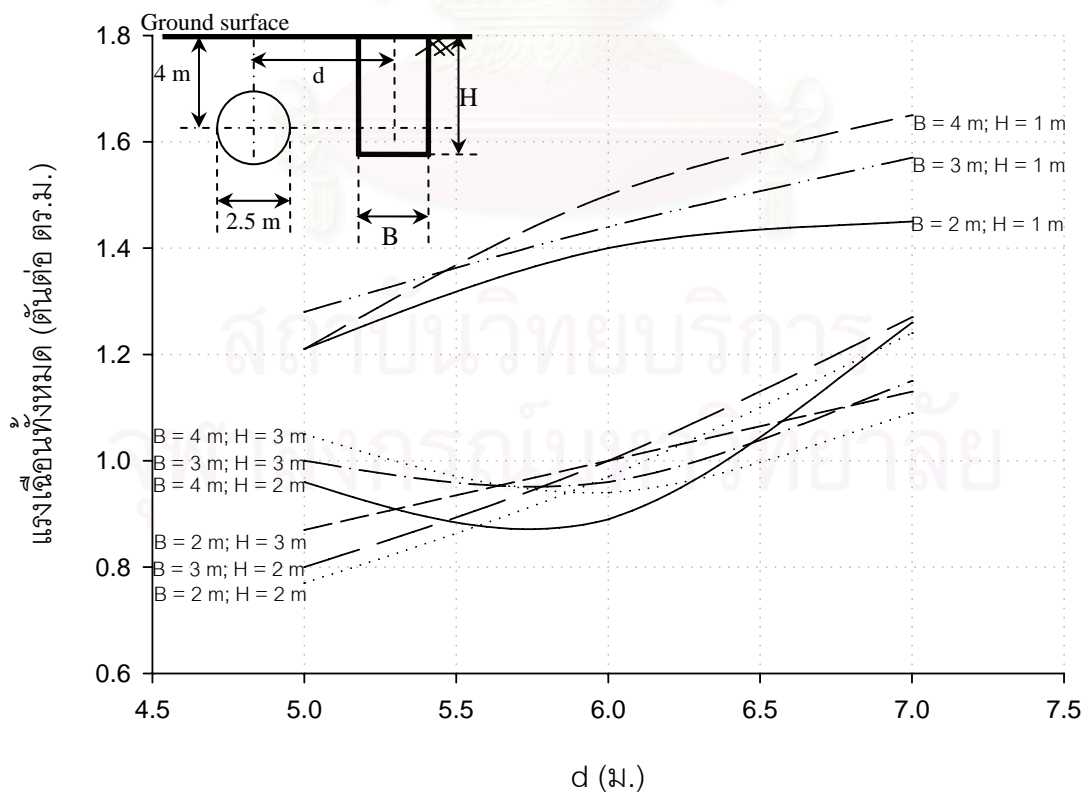
รูปที่ ก-1.7.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



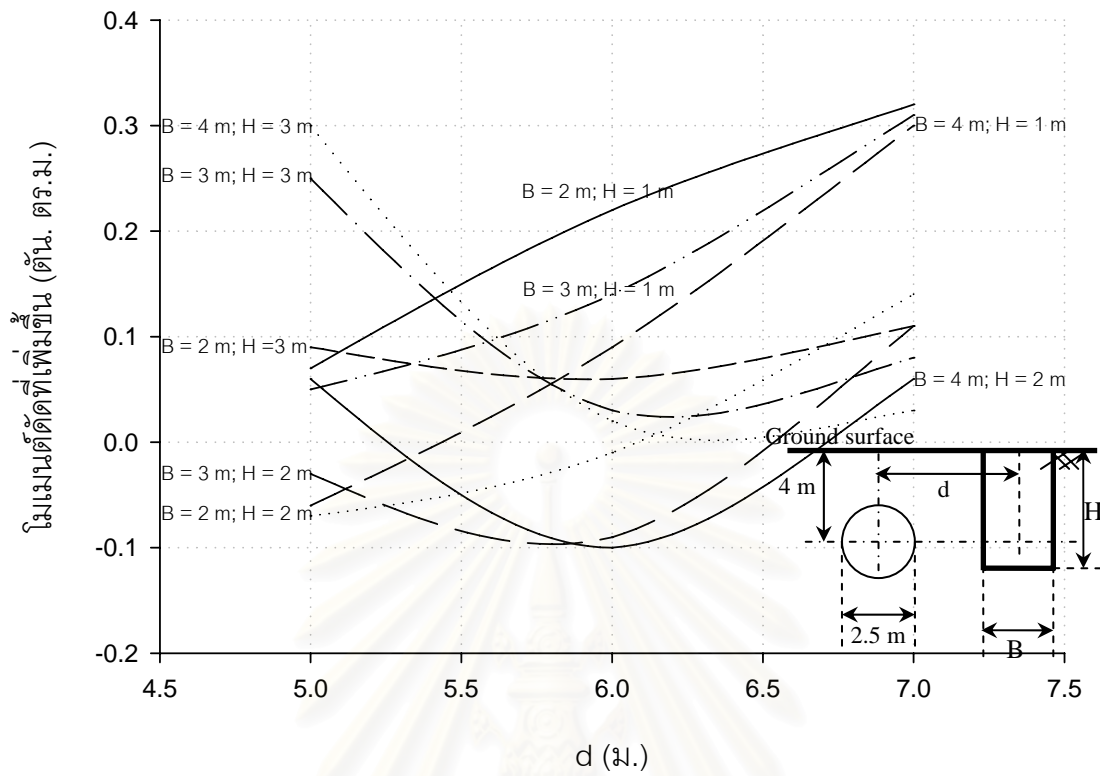
รูปที่ ก-1.7.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



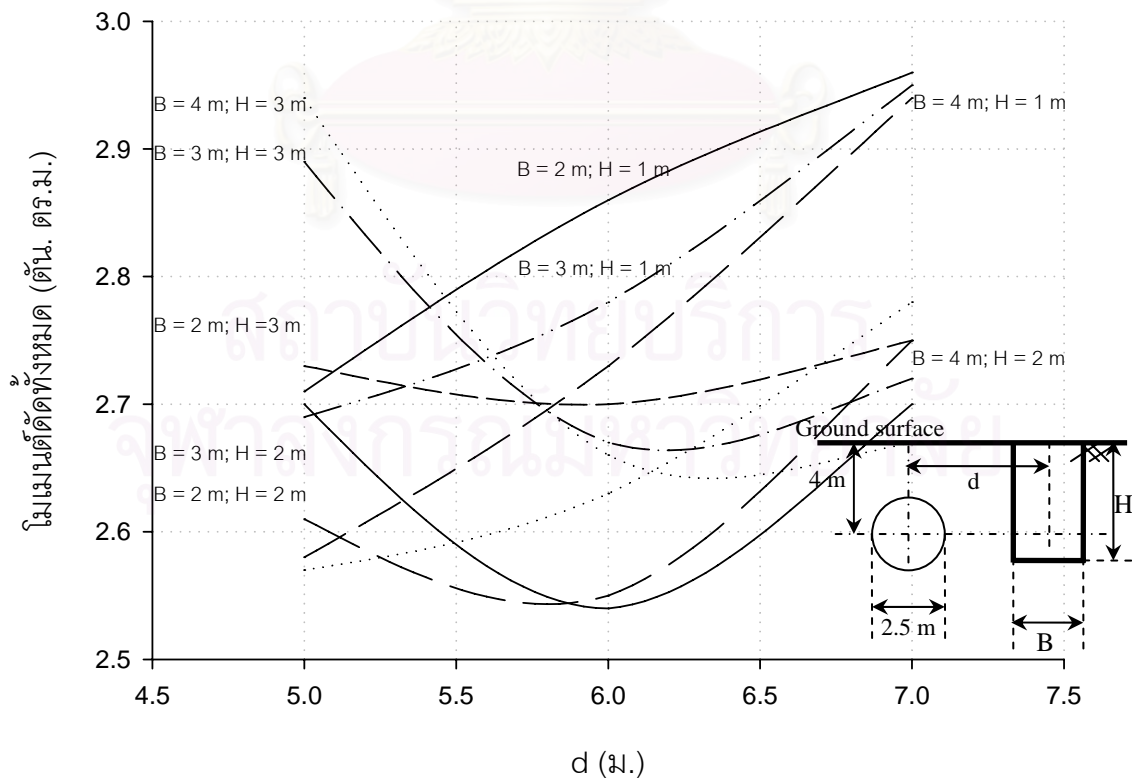
รูปที่ ก-1.7.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



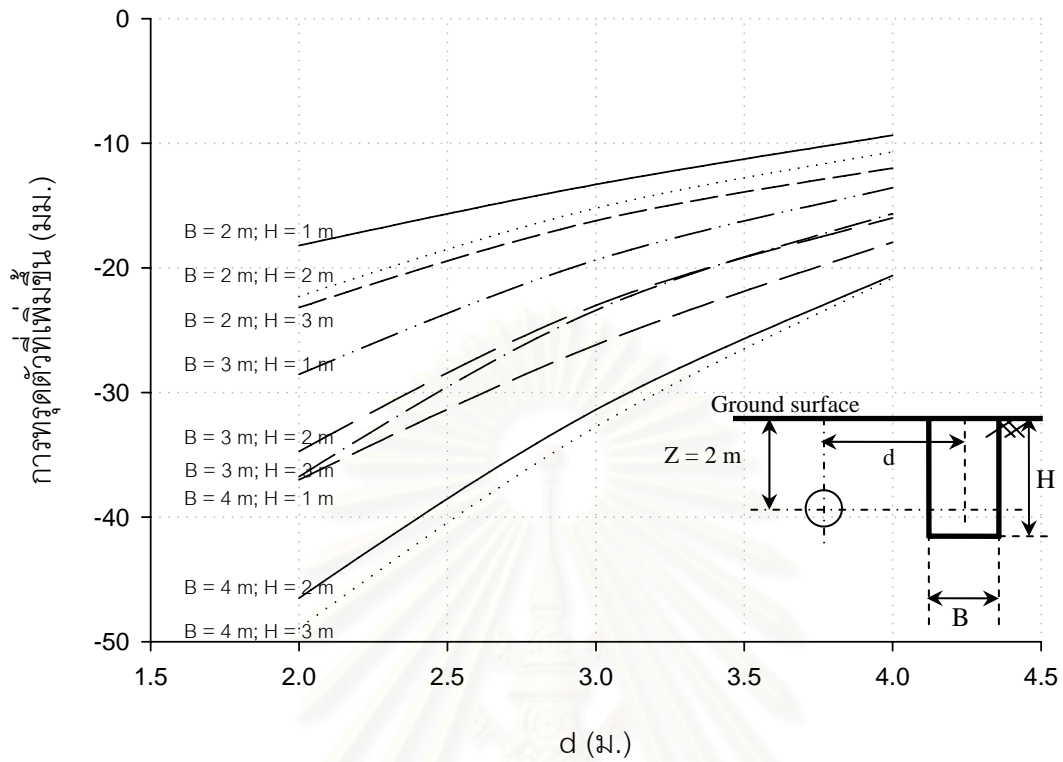
รูปที่ ก-1.7.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



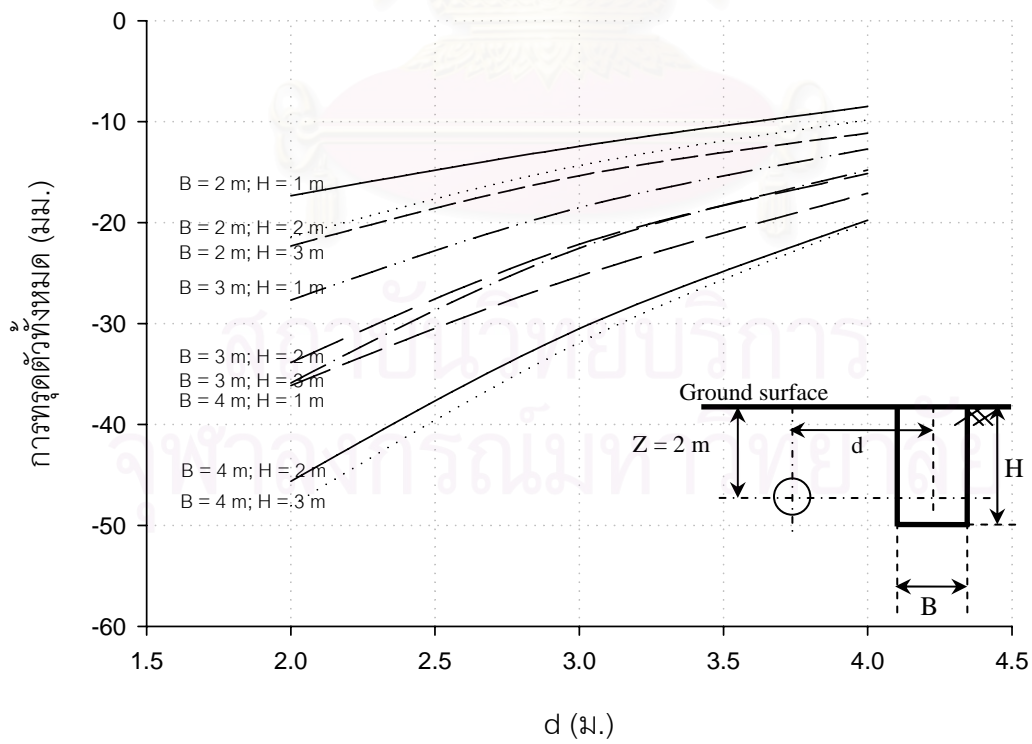
รูปที่ ก-1.7.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



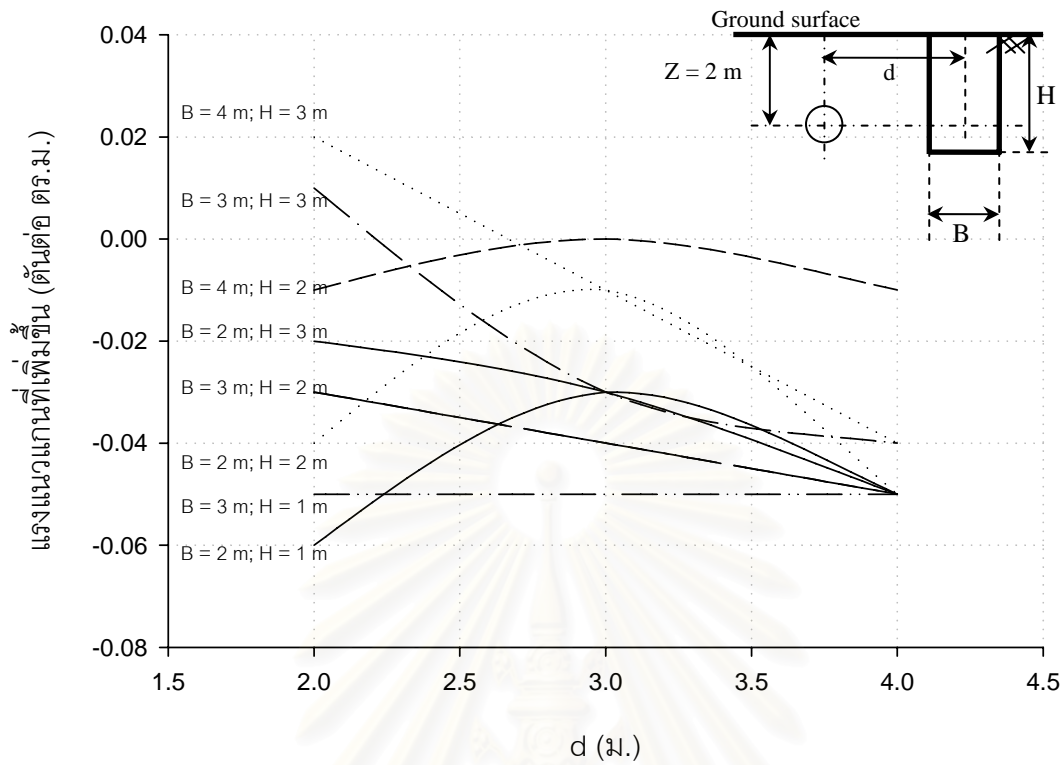
รูปที่ ก-1.7.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



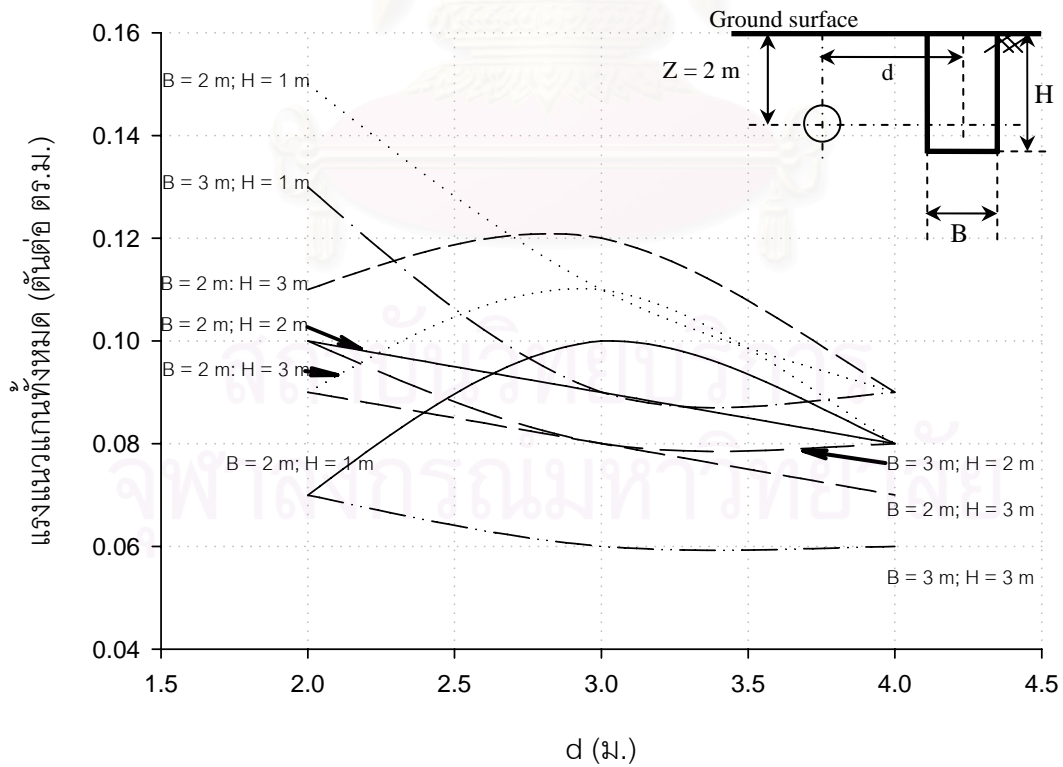
รูปที่ ก-1.8.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน



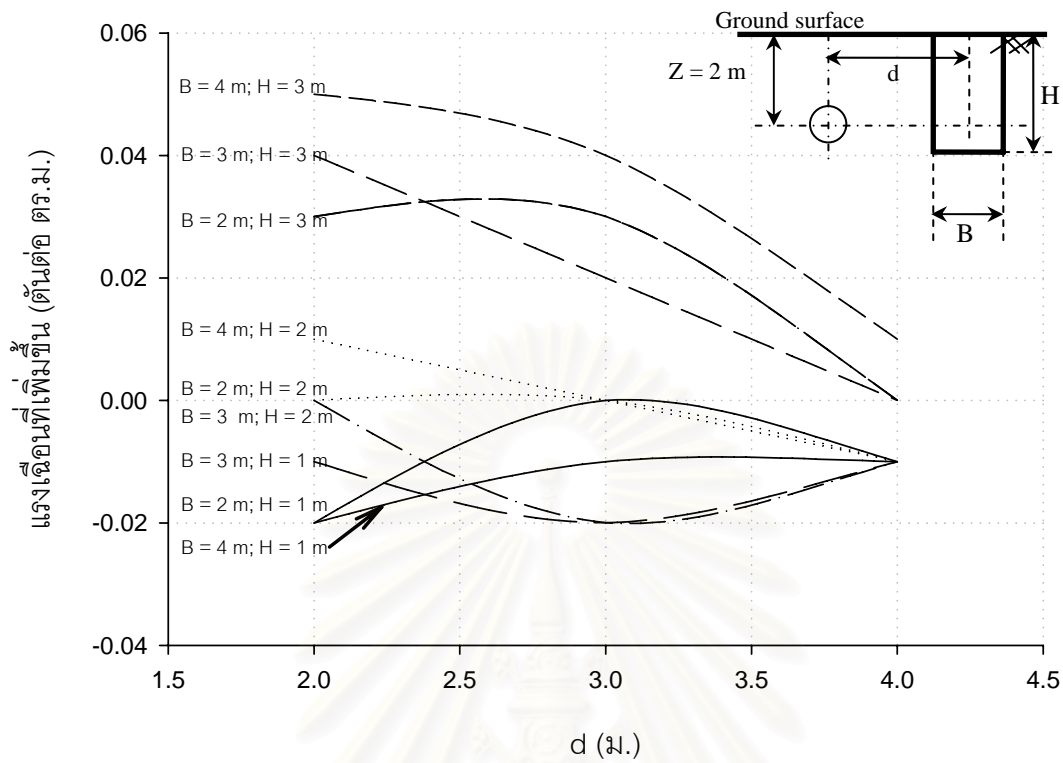
รูปที่ ก-1.8.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน



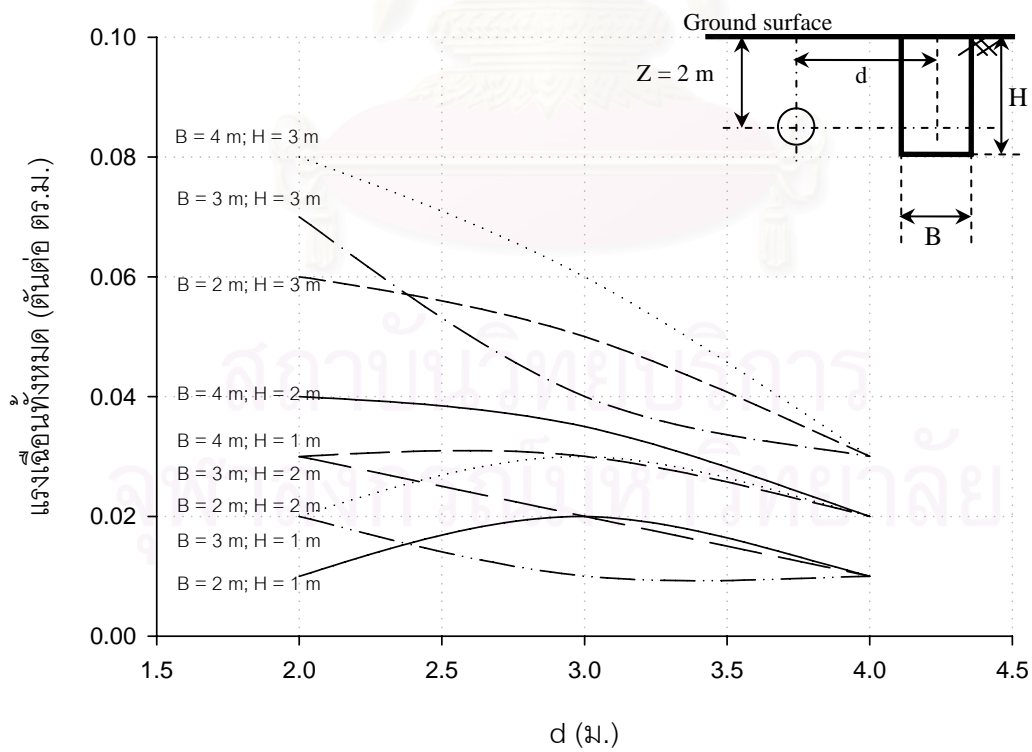
รูปที่ ก-1.8.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน



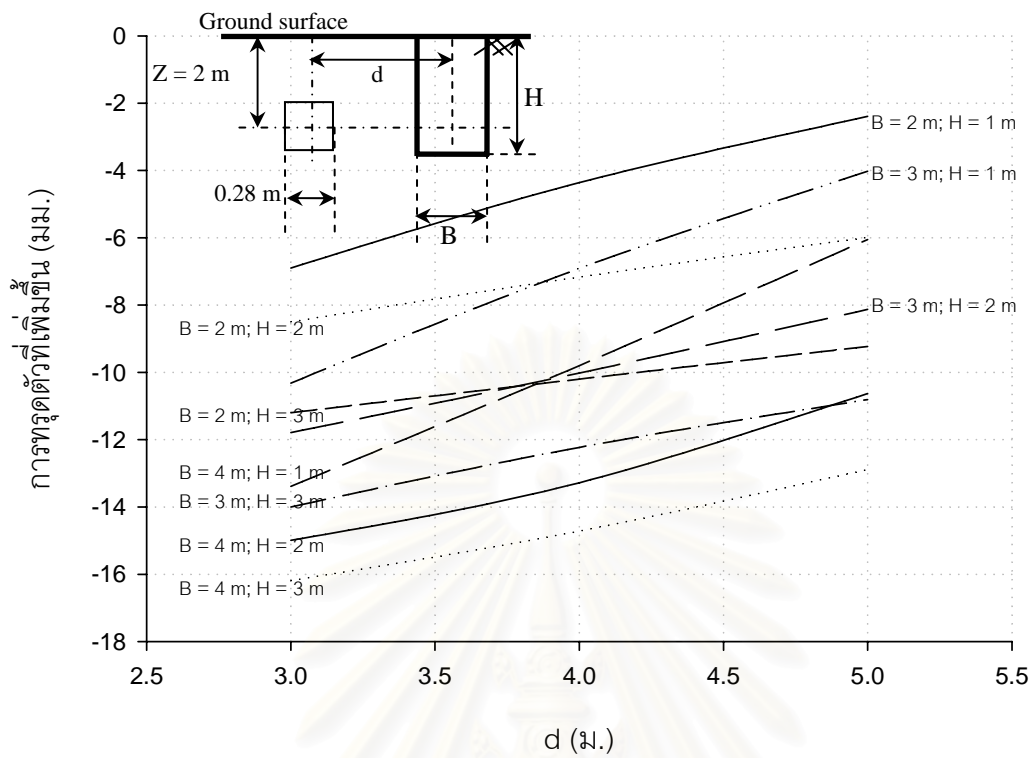
รูปที่ ก-1.8.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน



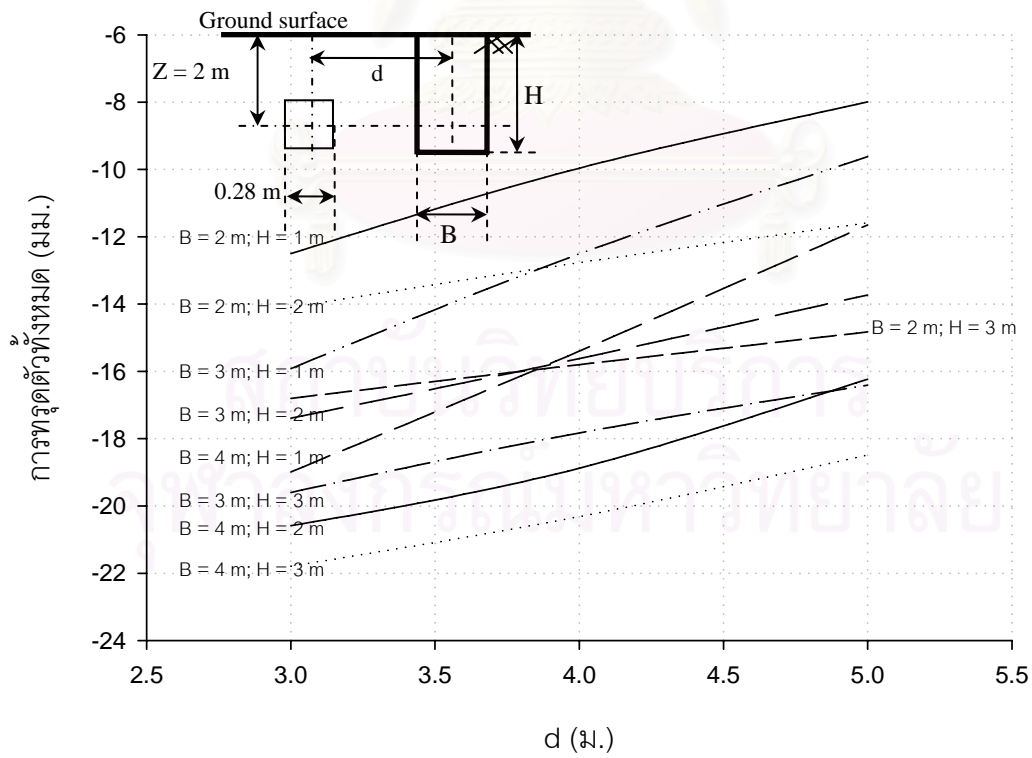
รูปที่ ก-1.8.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน



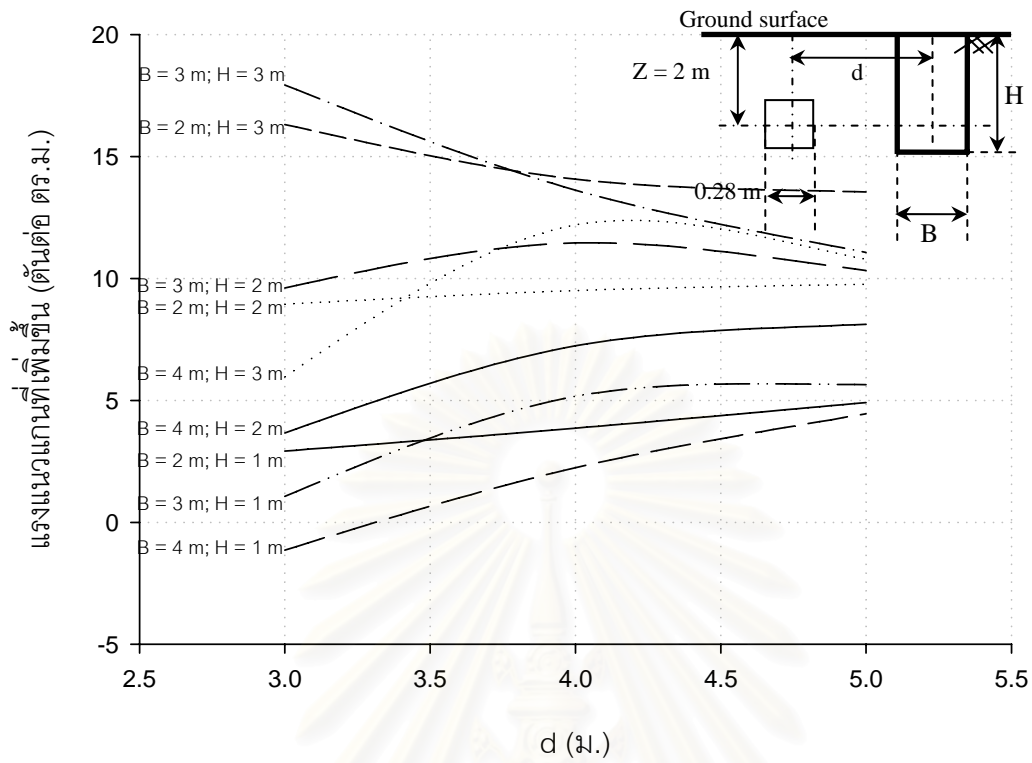
รูปที่ ก-1.8.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลจากการขุดเปิดหน้าดิน



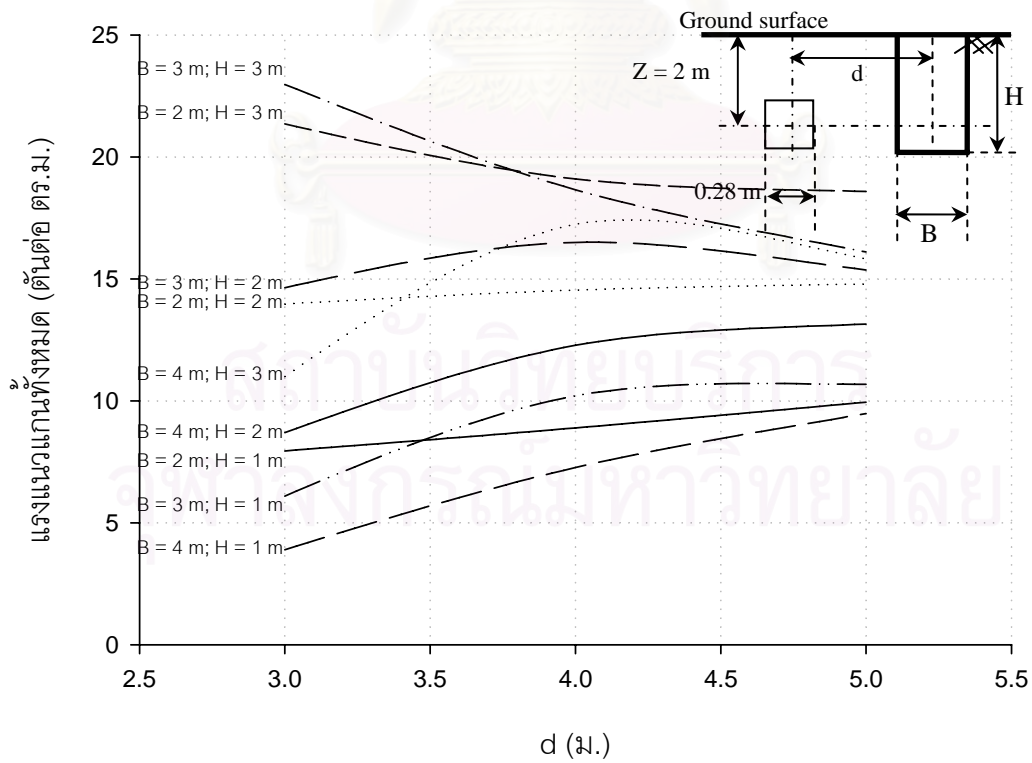
รูปที่ ก-1.9.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



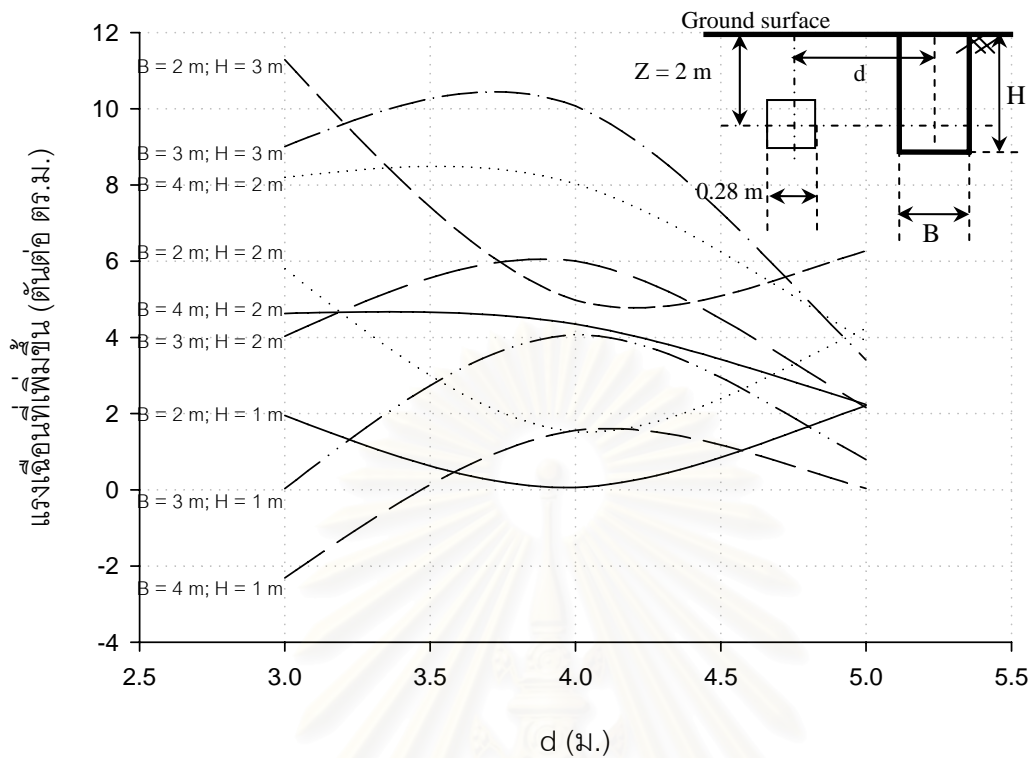
รูปที่ ก-1.9.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



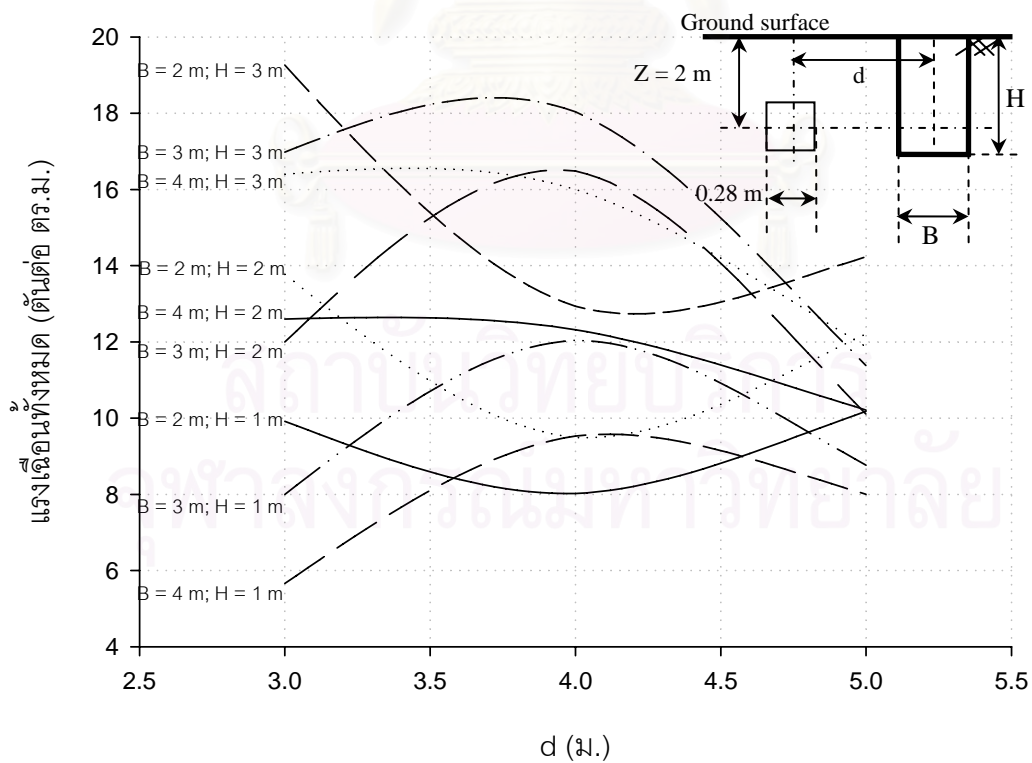
รูปที่ ก-1.9.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการขุดเปิดหน้าดิน



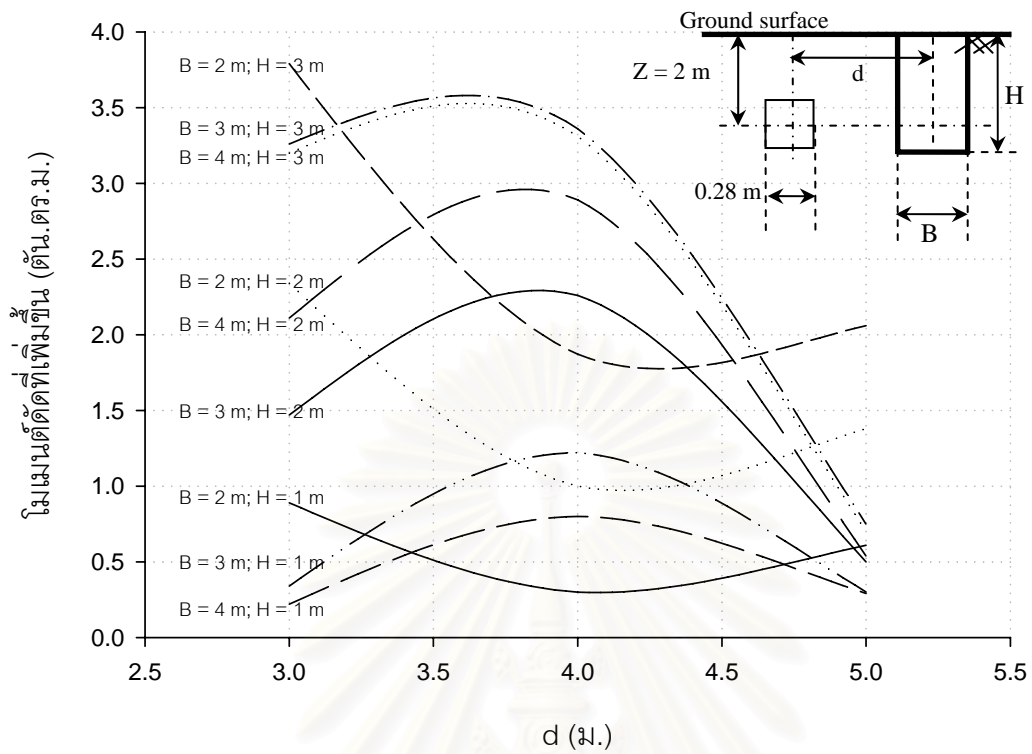
รูปที่ ก-1.9.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 จากการขุดเปิดหน้าดิน



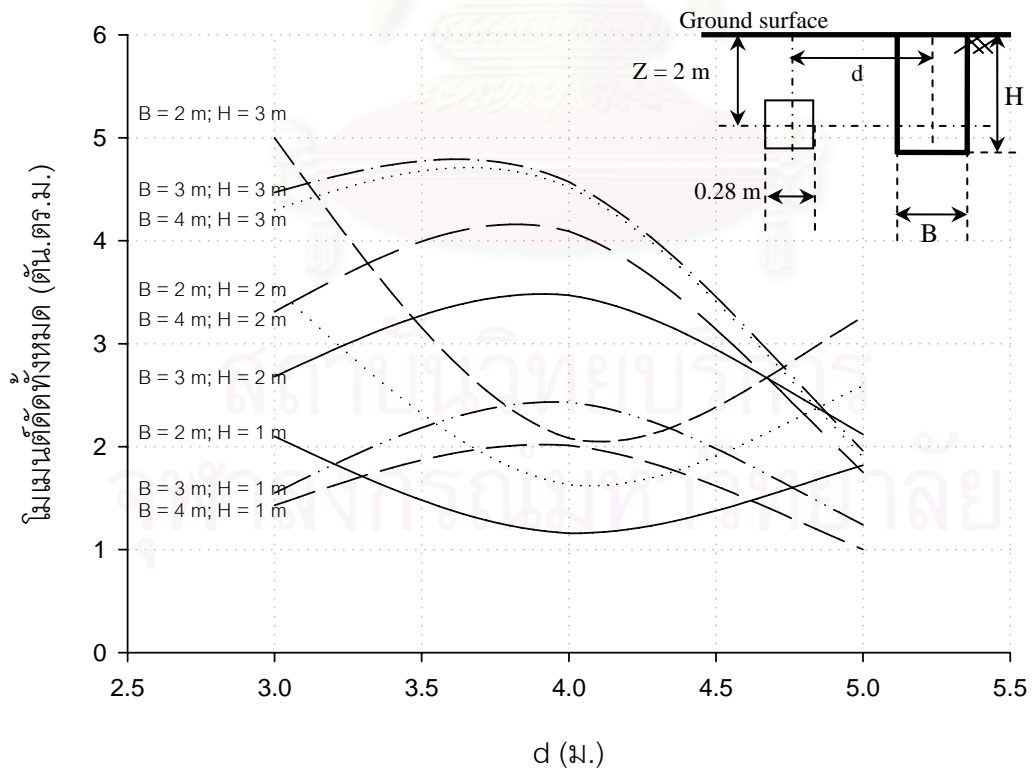
รูปที่ ก-1.9.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



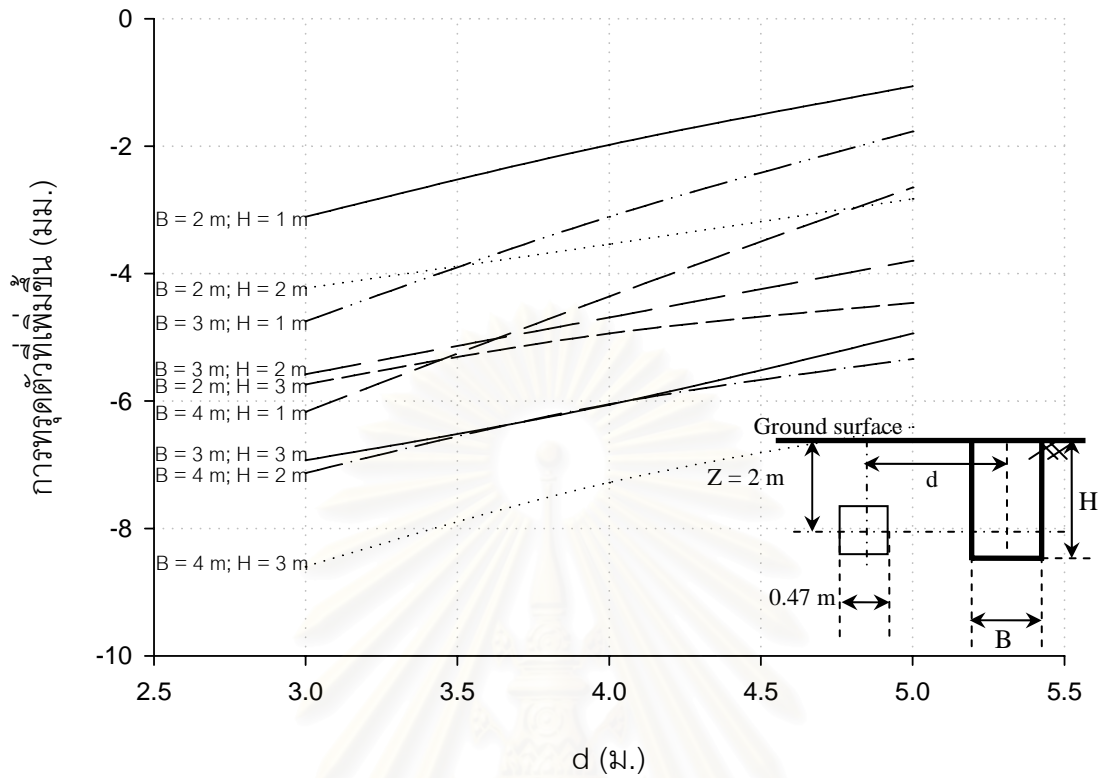
รูปที่ ก-1.9.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



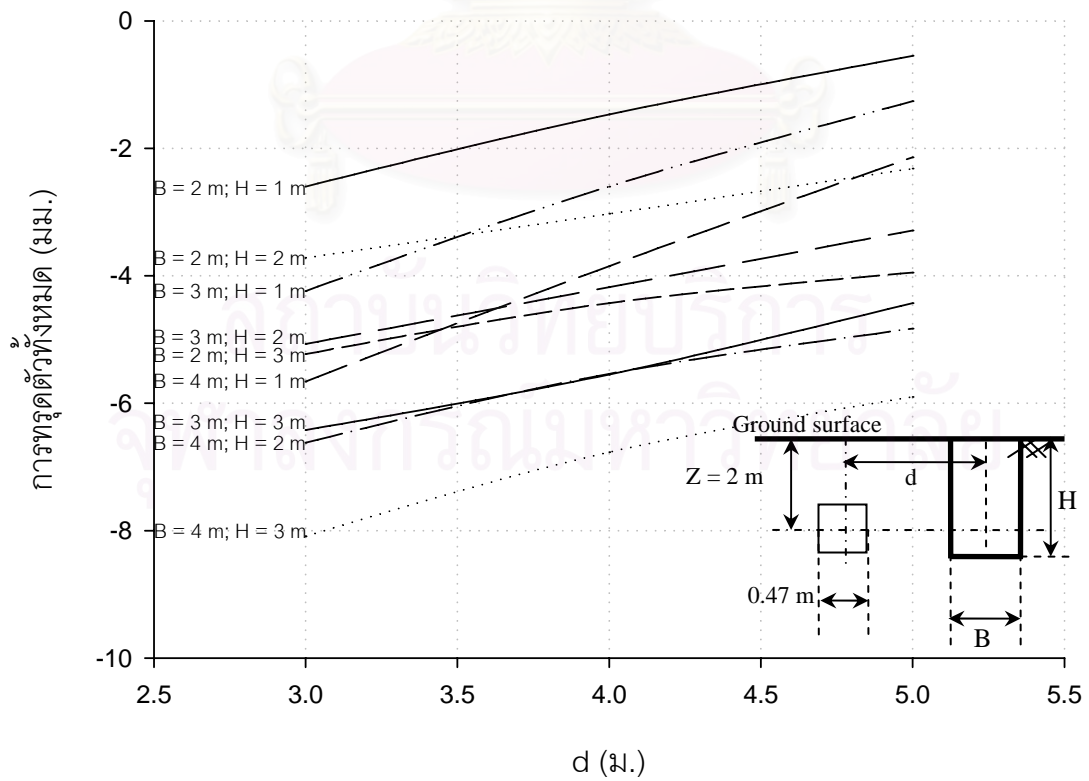
รูปที่ ก-1.9.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



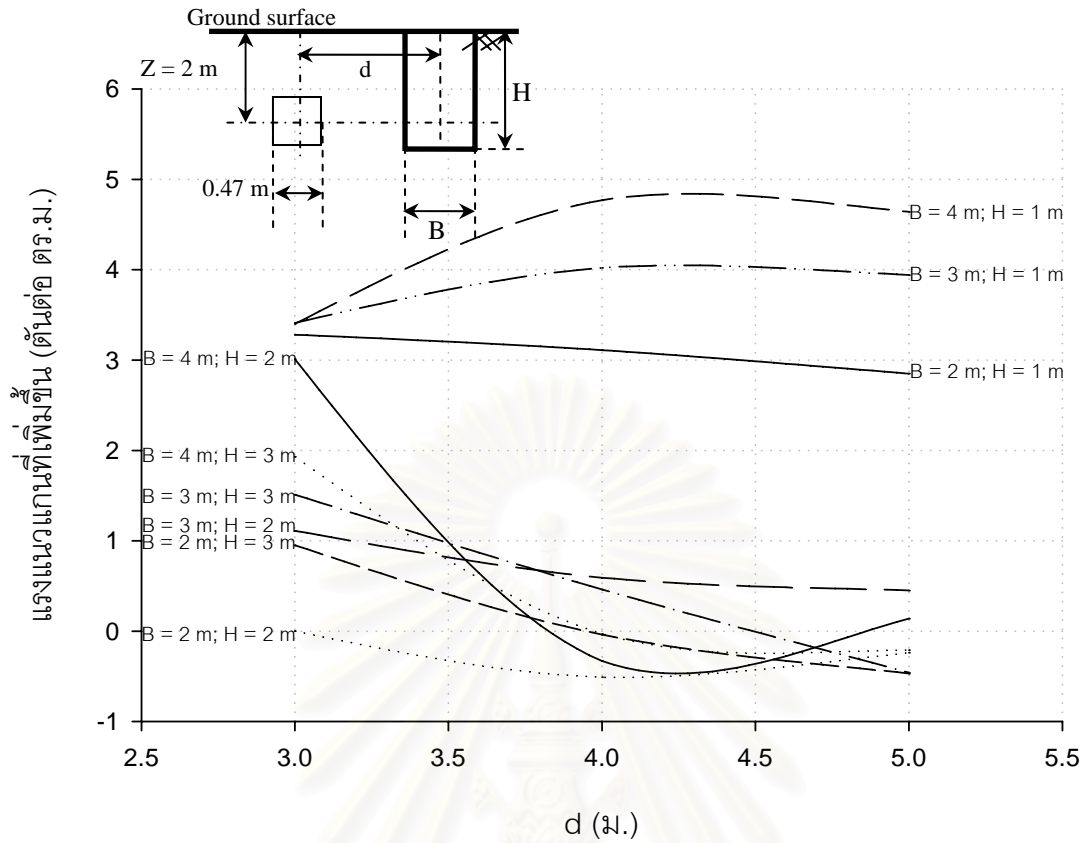
รูปที่ ก-1.9.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



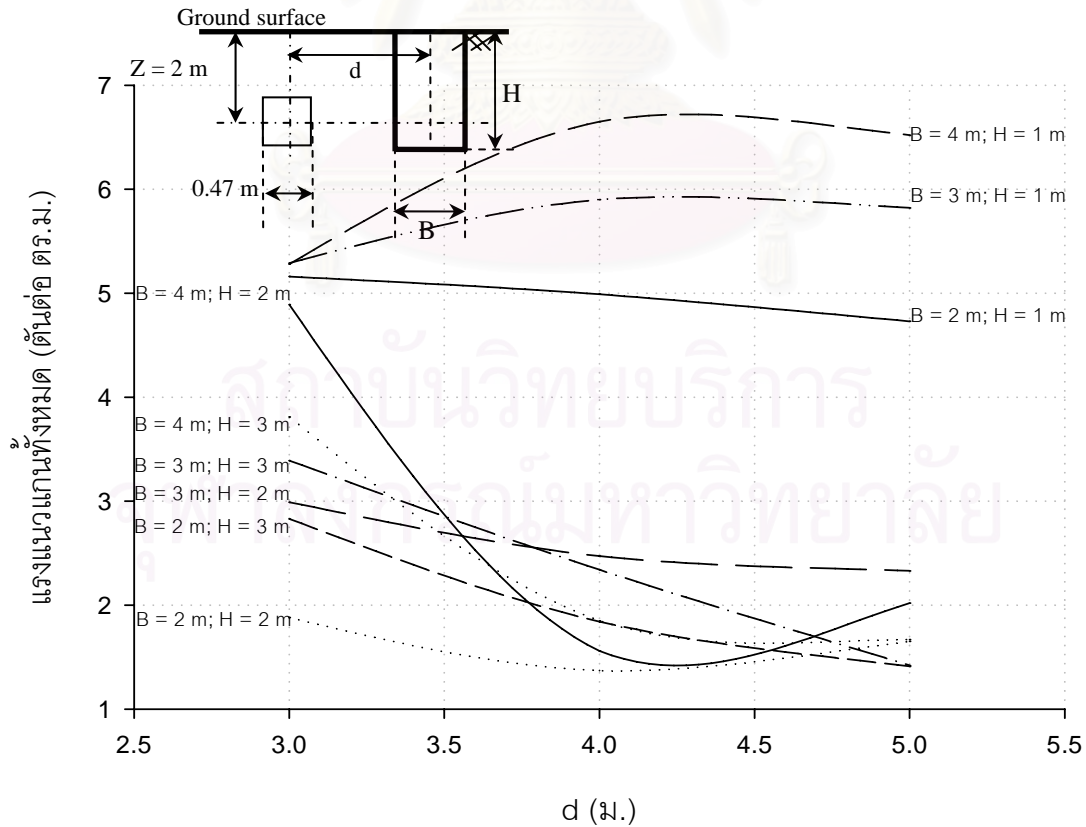
รูปที่ ก-1.10.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 จากการขุดเปิดหน้าดิน



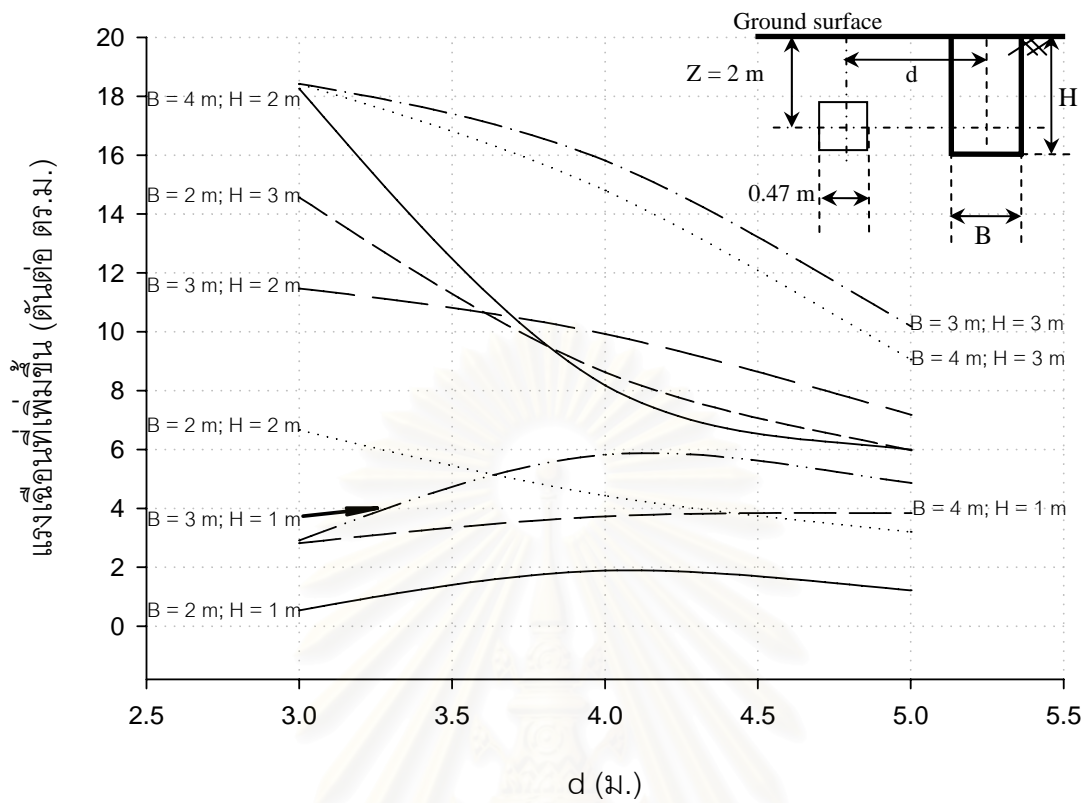
รูปที่ ก-1.10.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 จากการขุดเปิดหน้าดิน



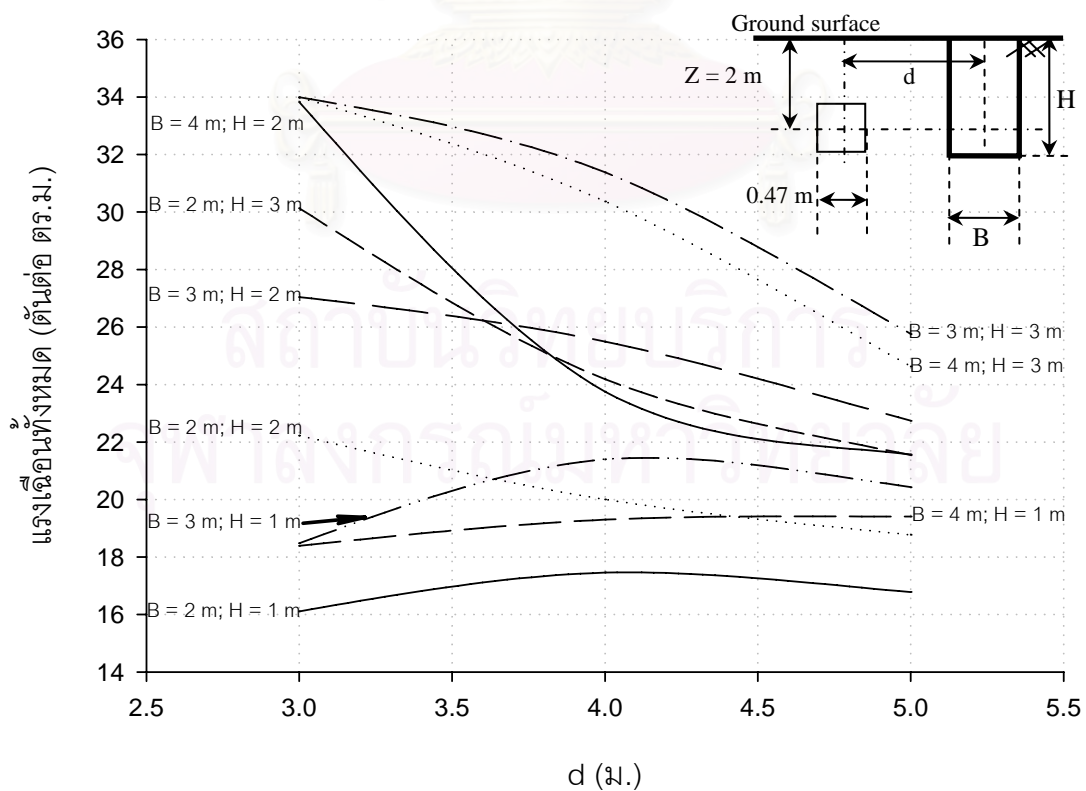
รูปที่ ก-1.10.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 จากการขุดเปิดหน้าดิน



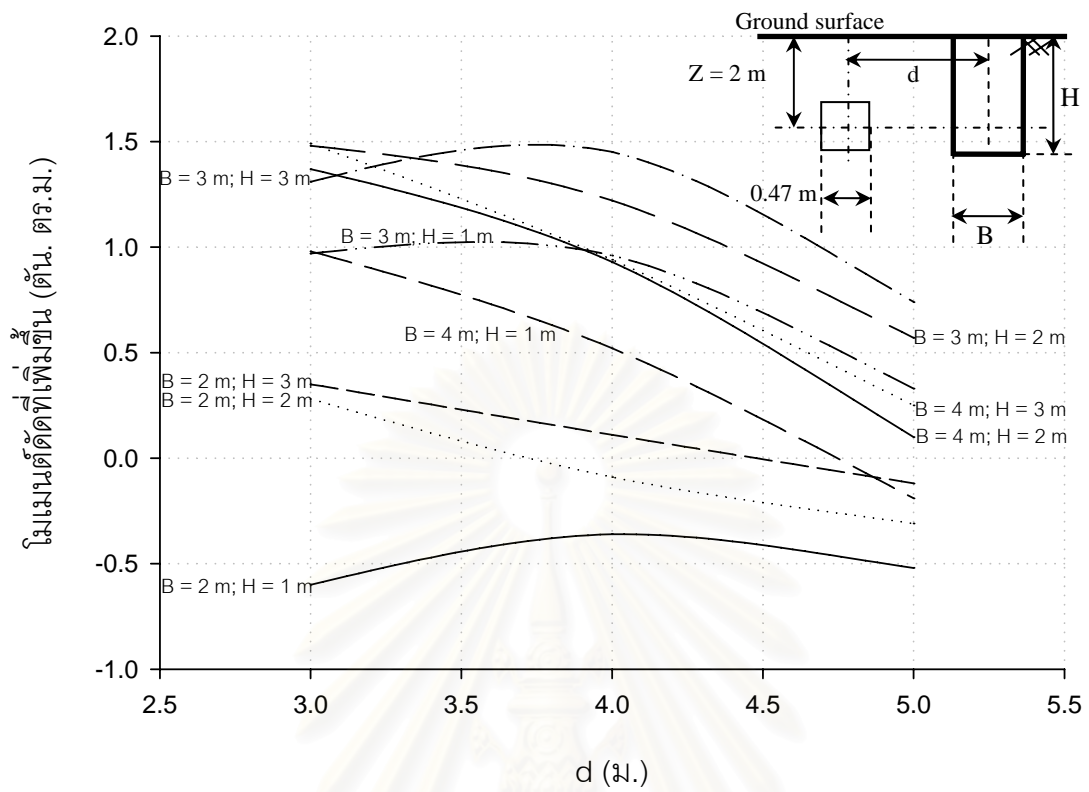
รูปที่ ก-1.10.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 จากการขุดเปิดหน้าดิน



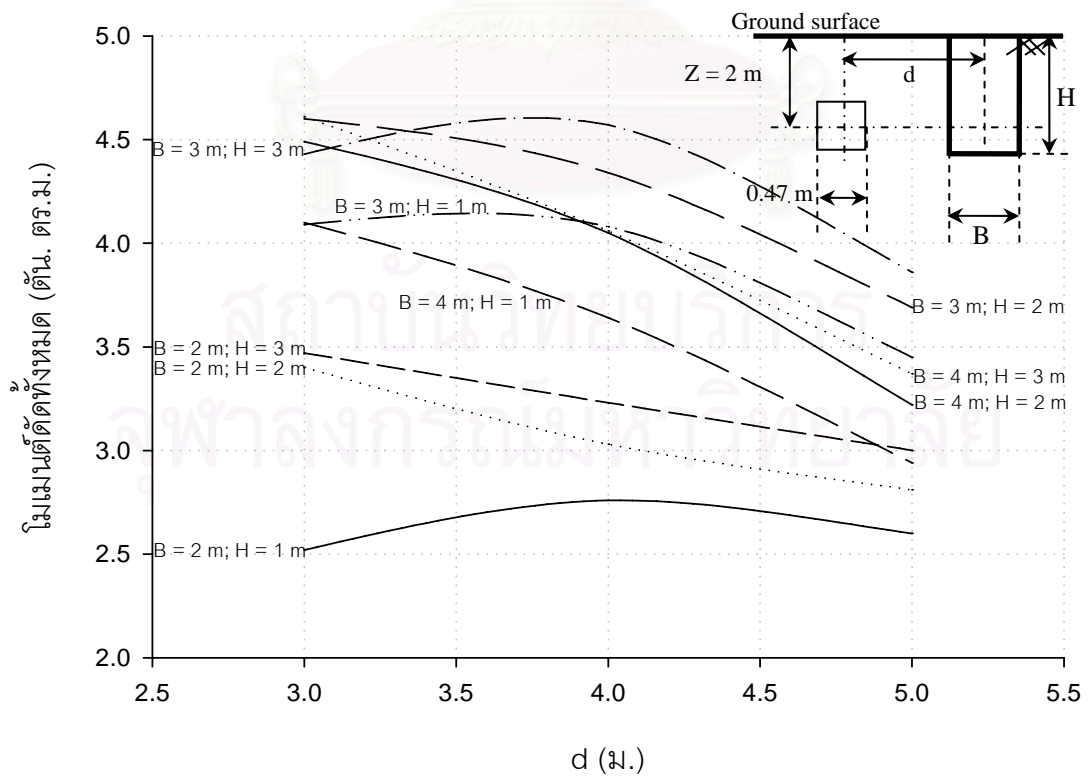
รูปที่ ก-1.10.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



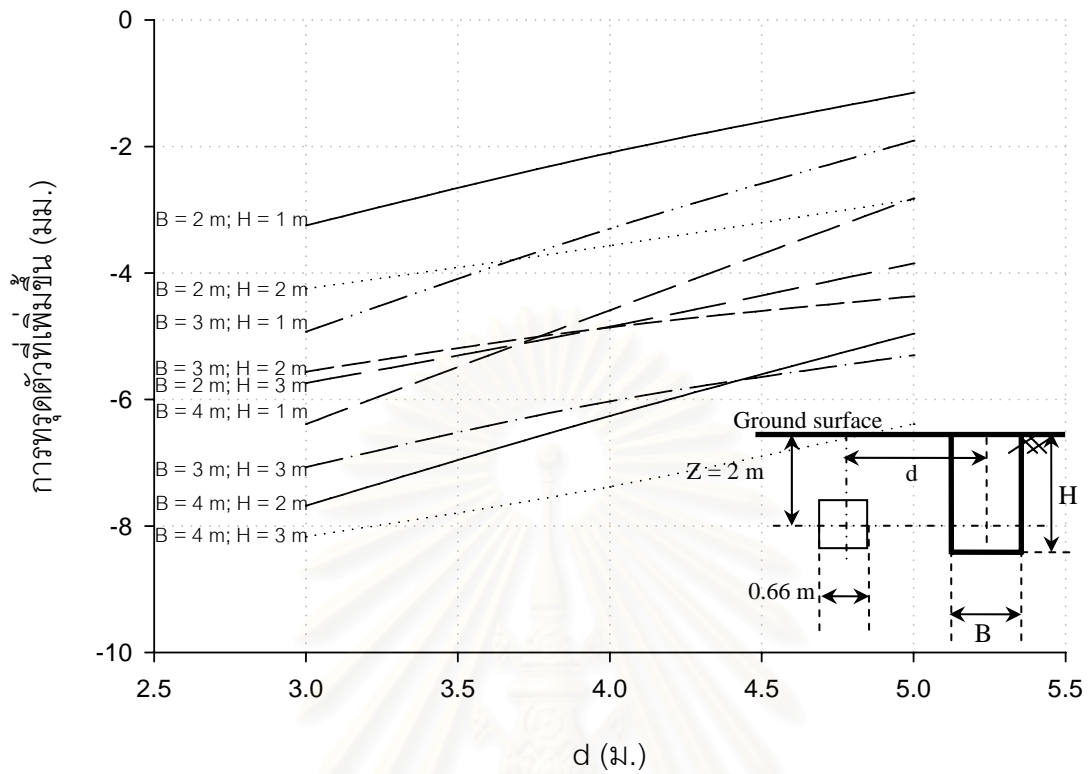
รูปที่ ก-1.10.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากการขุดเปิดหน้าดิน



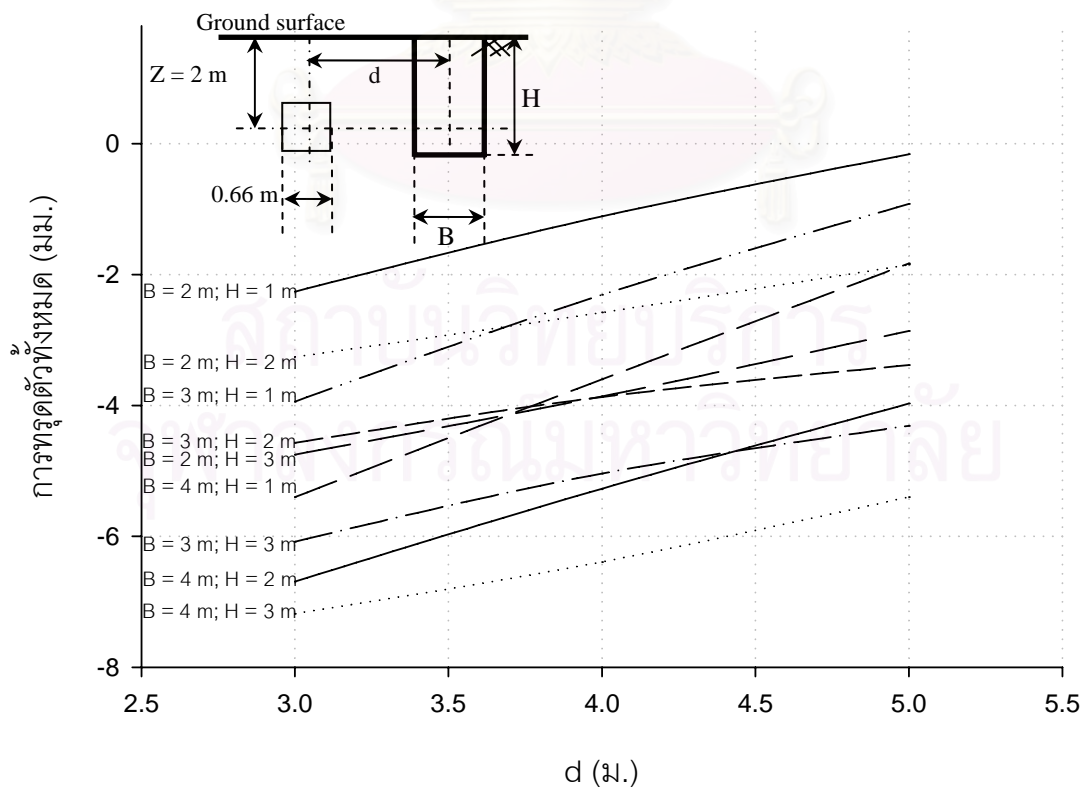
รูปที่ ก-1.10.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 จากการขุดเปิดหน้าดิน



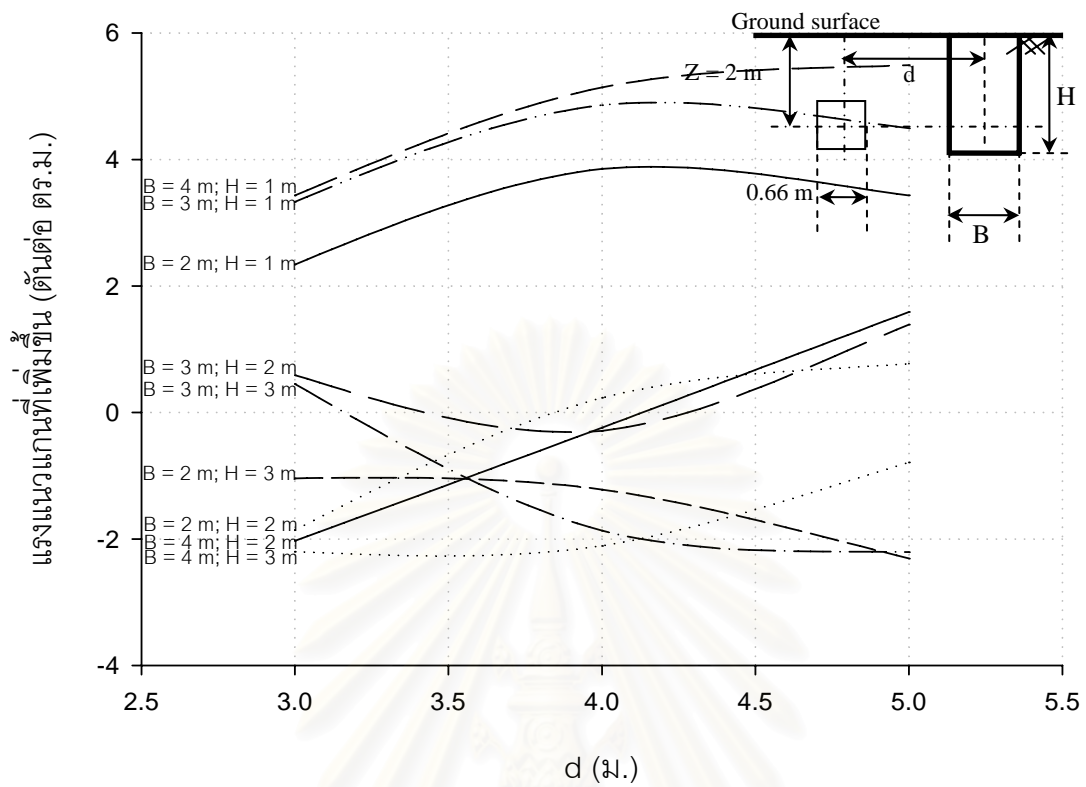
รูปที่ ก-1.10.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 จากการขุดเปิดหน้าดิน



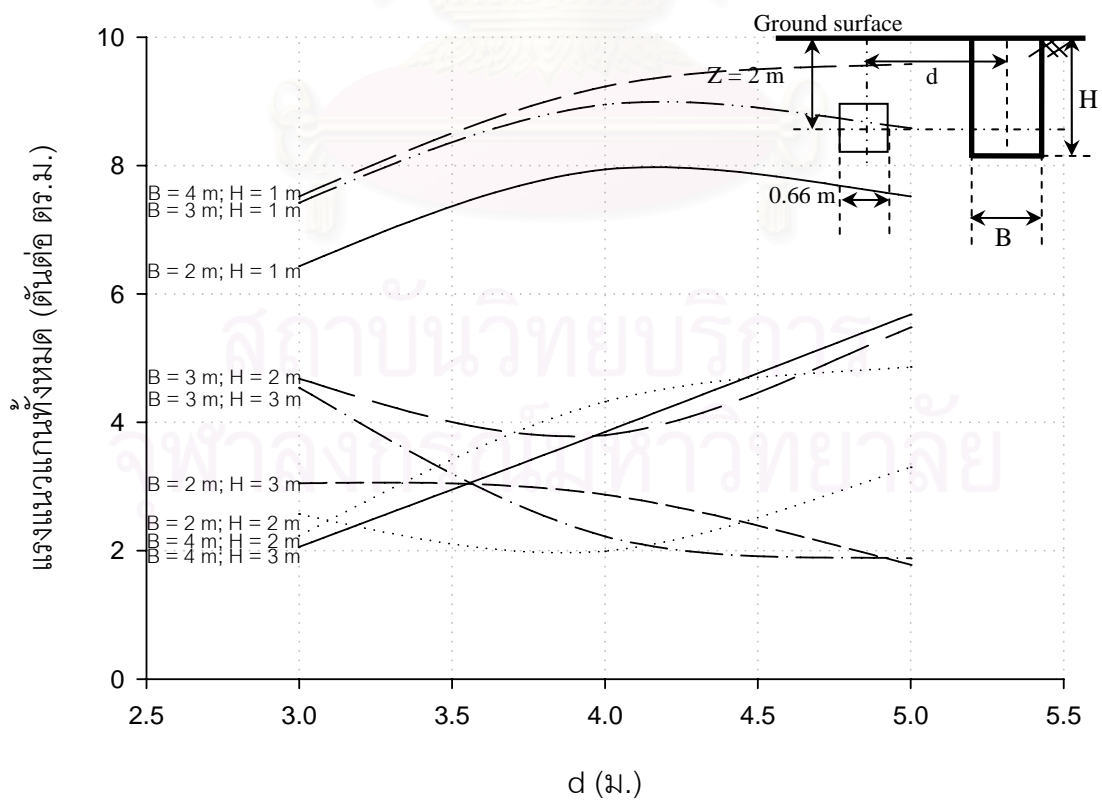
รูปที่ ก-1.11.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการขุดเปิดหน้าดิน



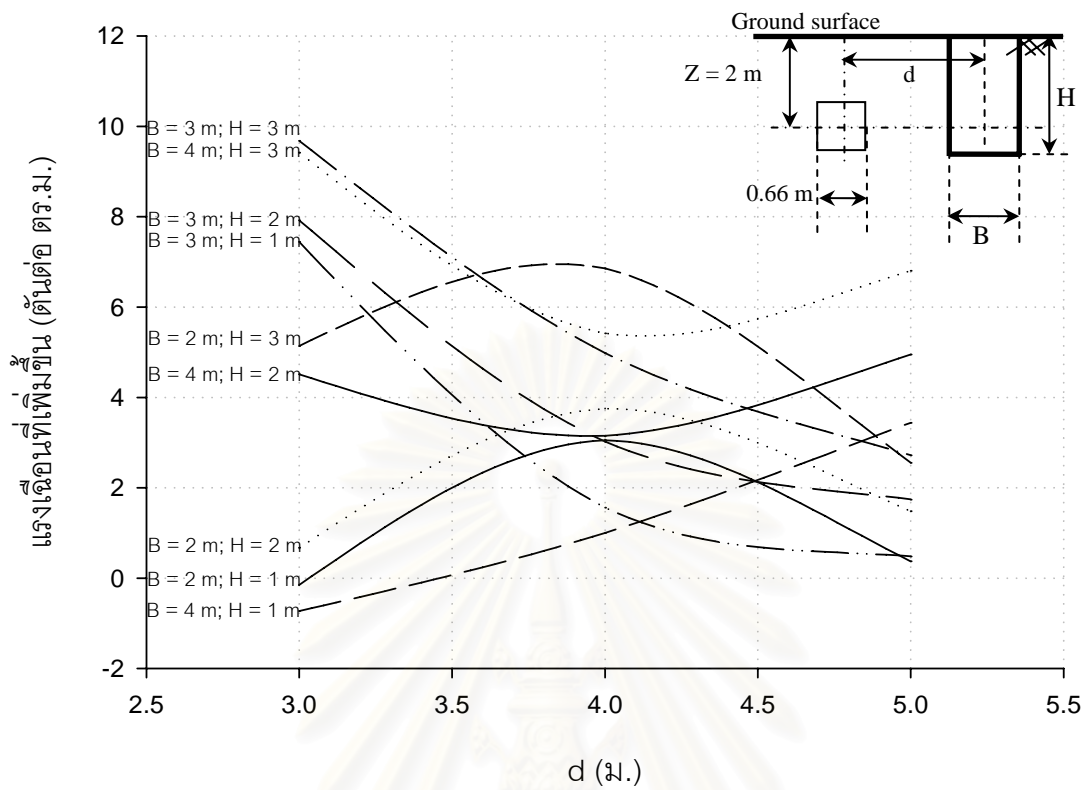
รูปที่ ก-1.11.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการขุดเปิดหน้าดิน



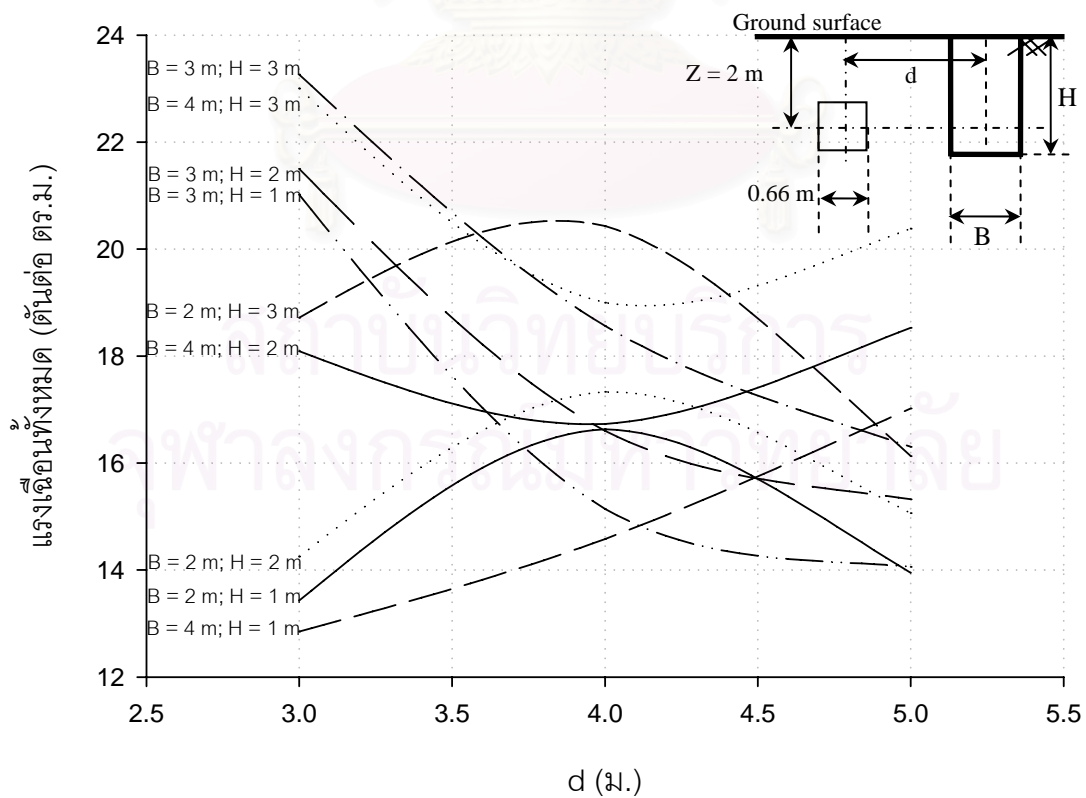
รูปที่ ก-1.11.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการชุดเปิดหน้าดิน



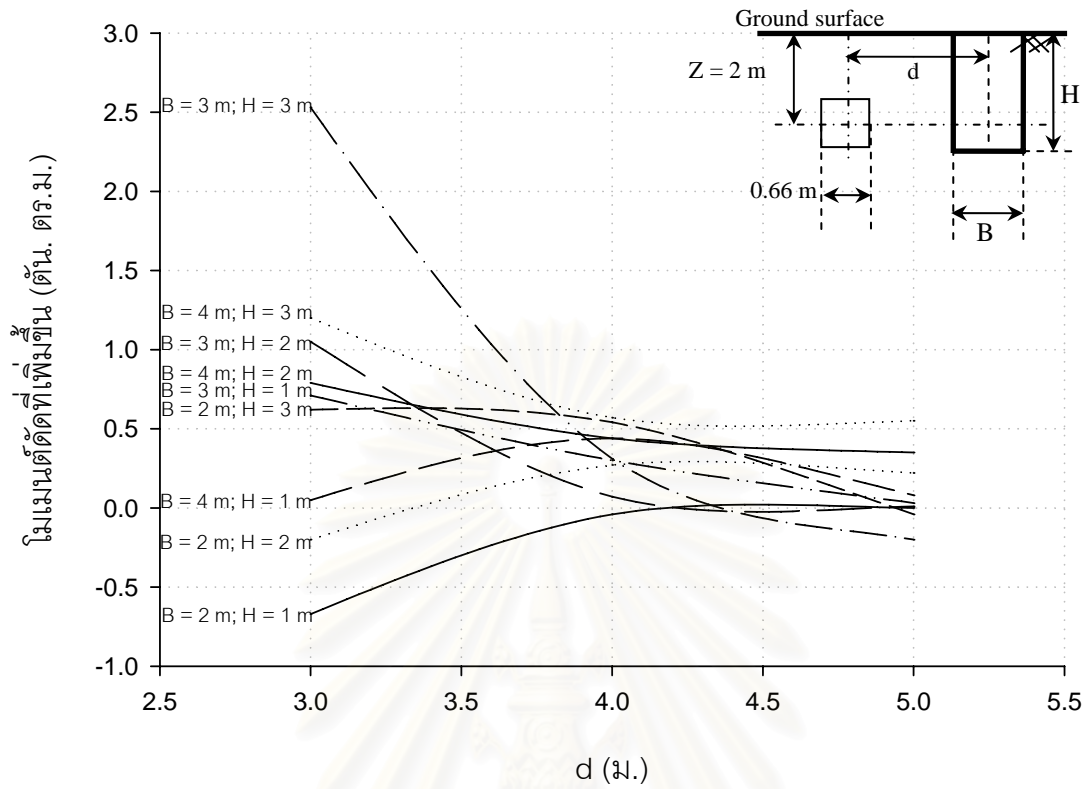
รูปที่ ก-1.11.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการชุดเปิดหน้าดิน



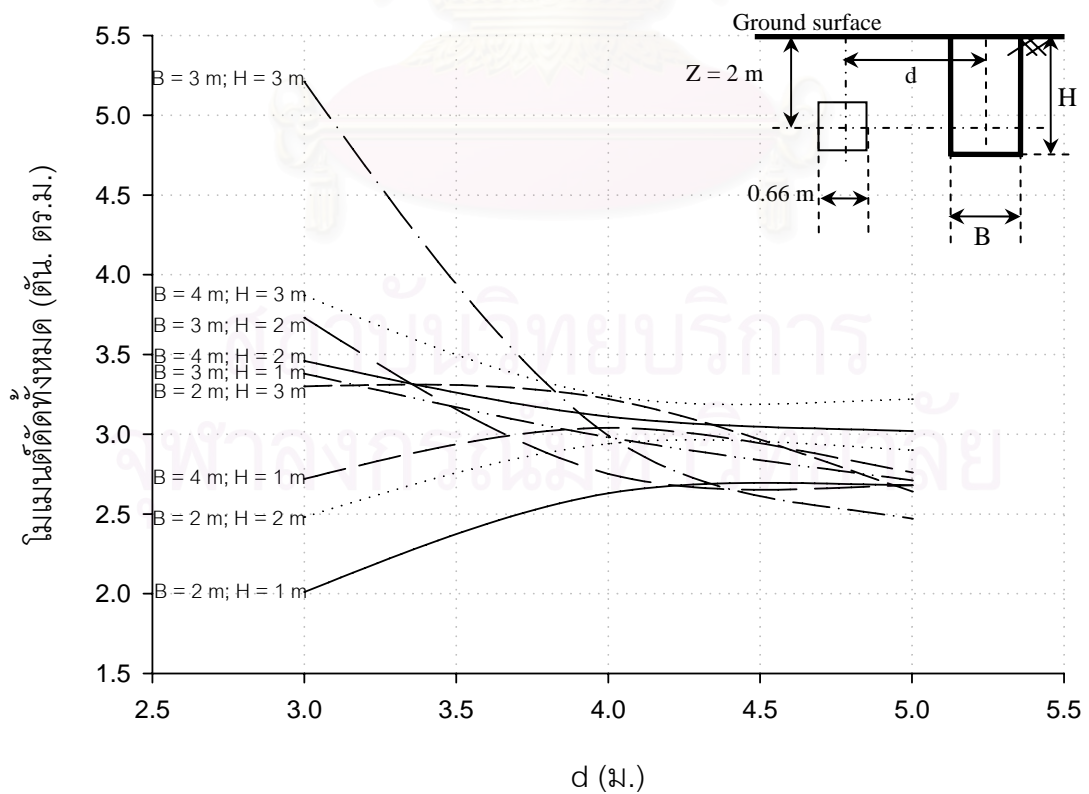
รูปที่ ก-1.11.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการขุดเปิดหน้าดิน



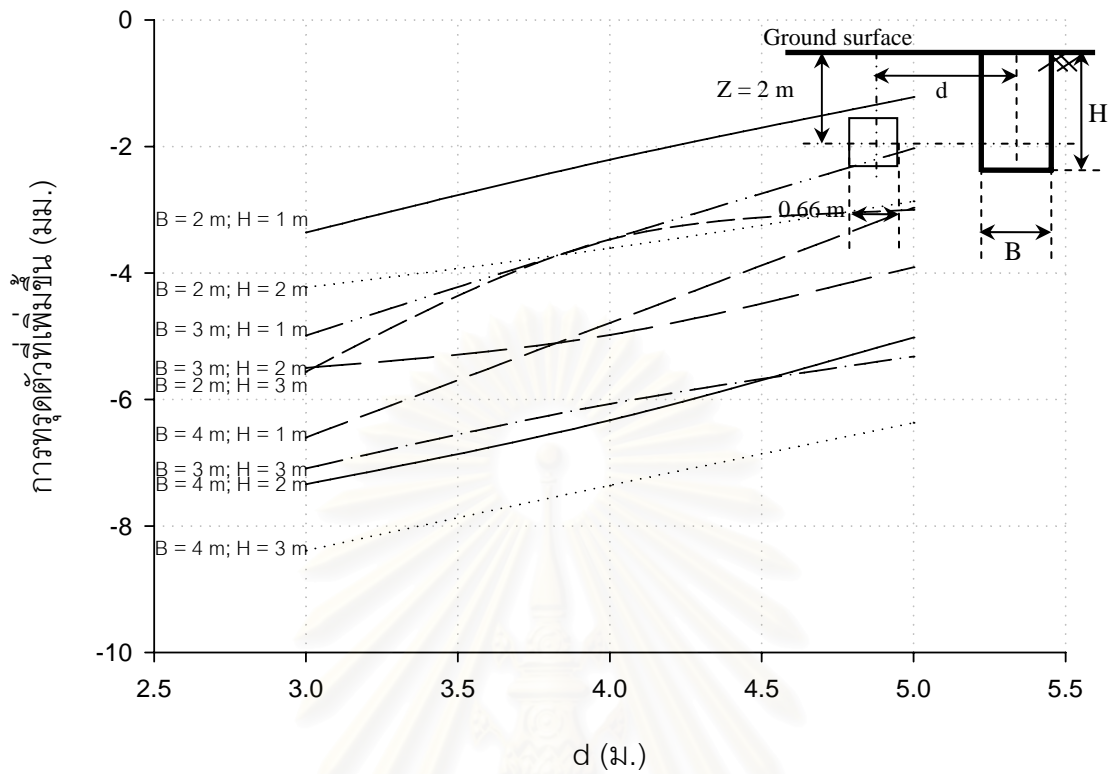
รูปที่ ก-1.11.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการขุดเปิดหน้าดิน



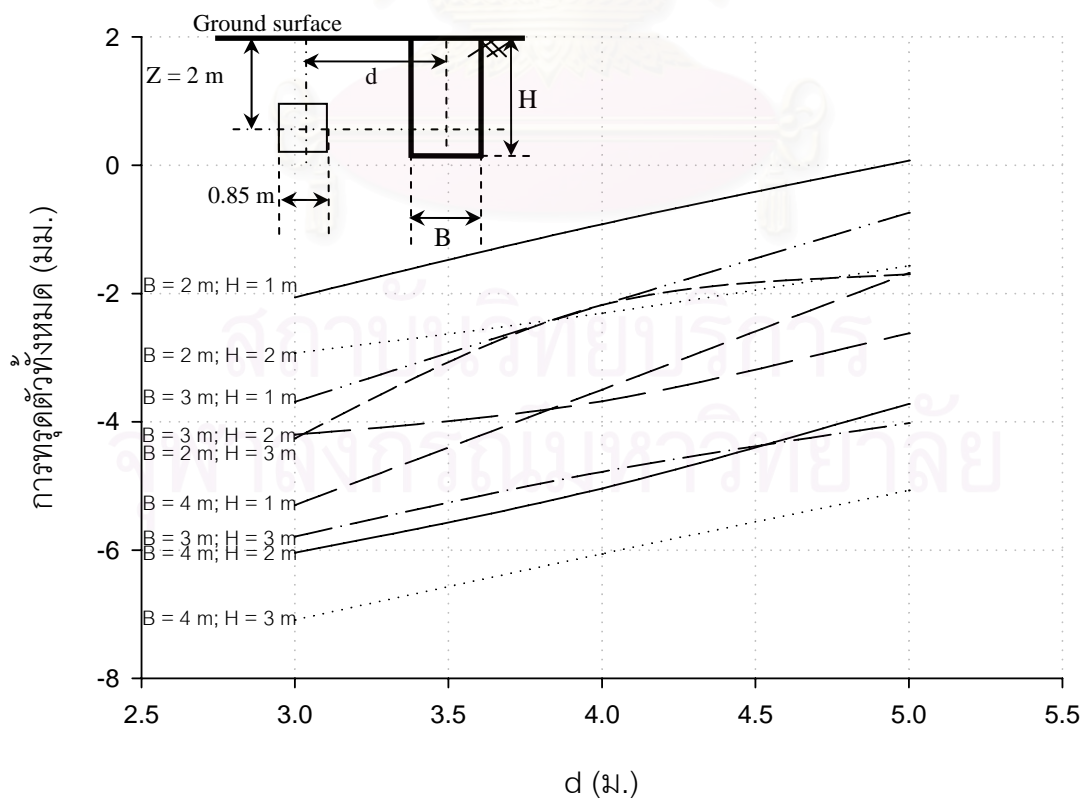
รูปที่ ก-1.11.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการขุดเปิดหน้าดิน



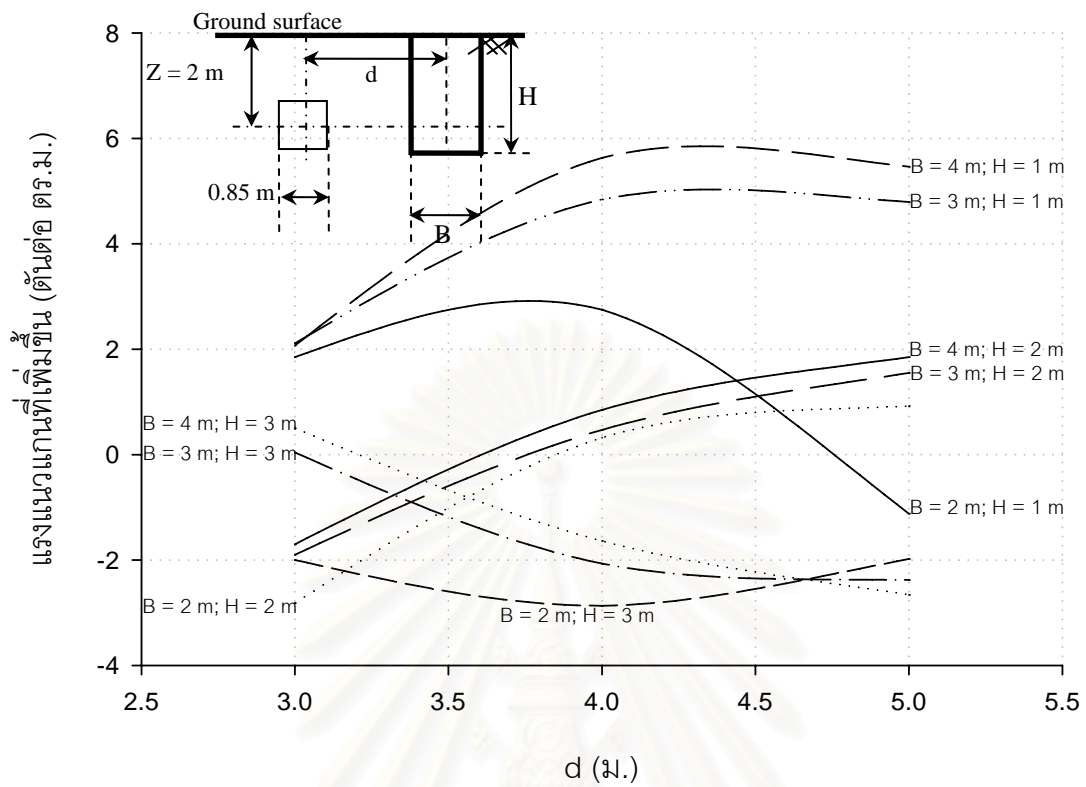
รูปที่ ก-1.11.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 จากการขุดเปิดหน้าดิน



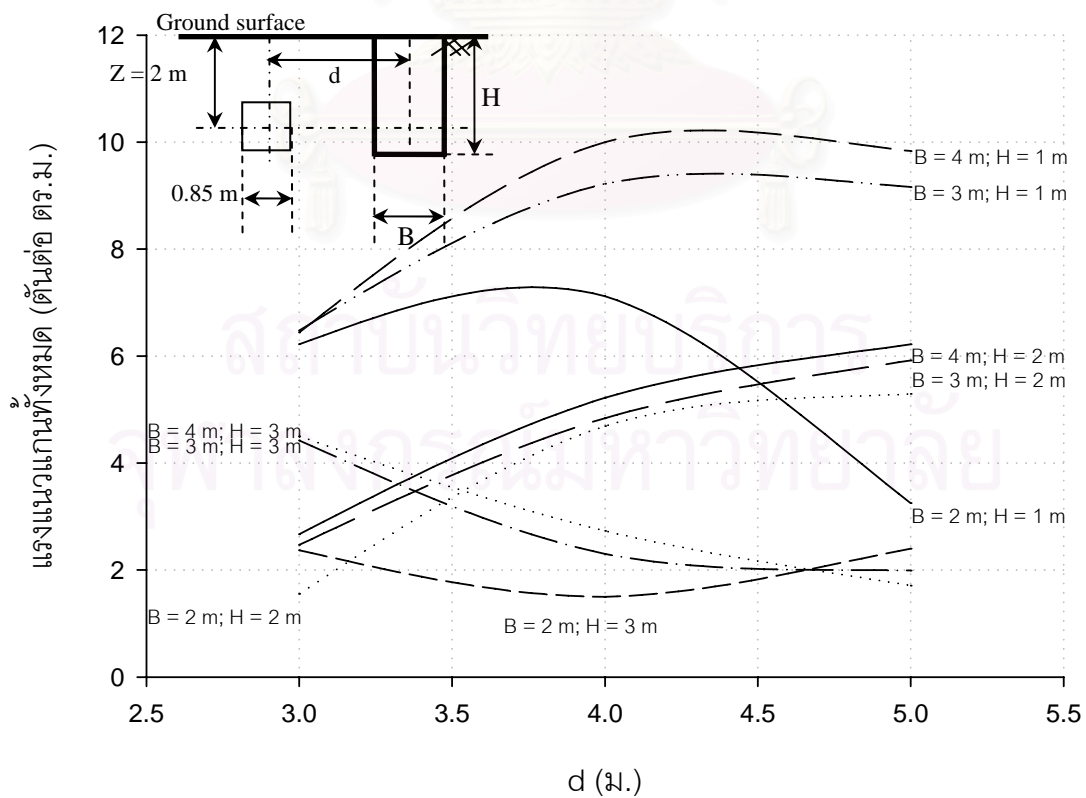
รูปที่ ก-1.12.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



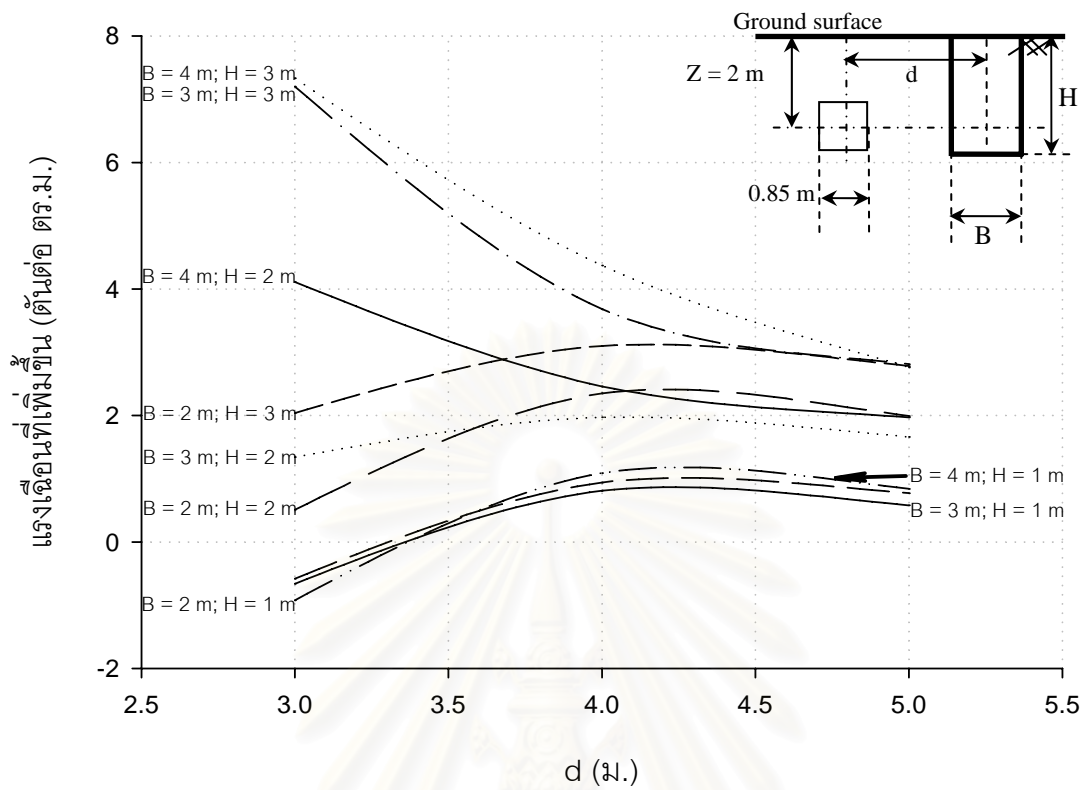
รูปที่ ก-1.12.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



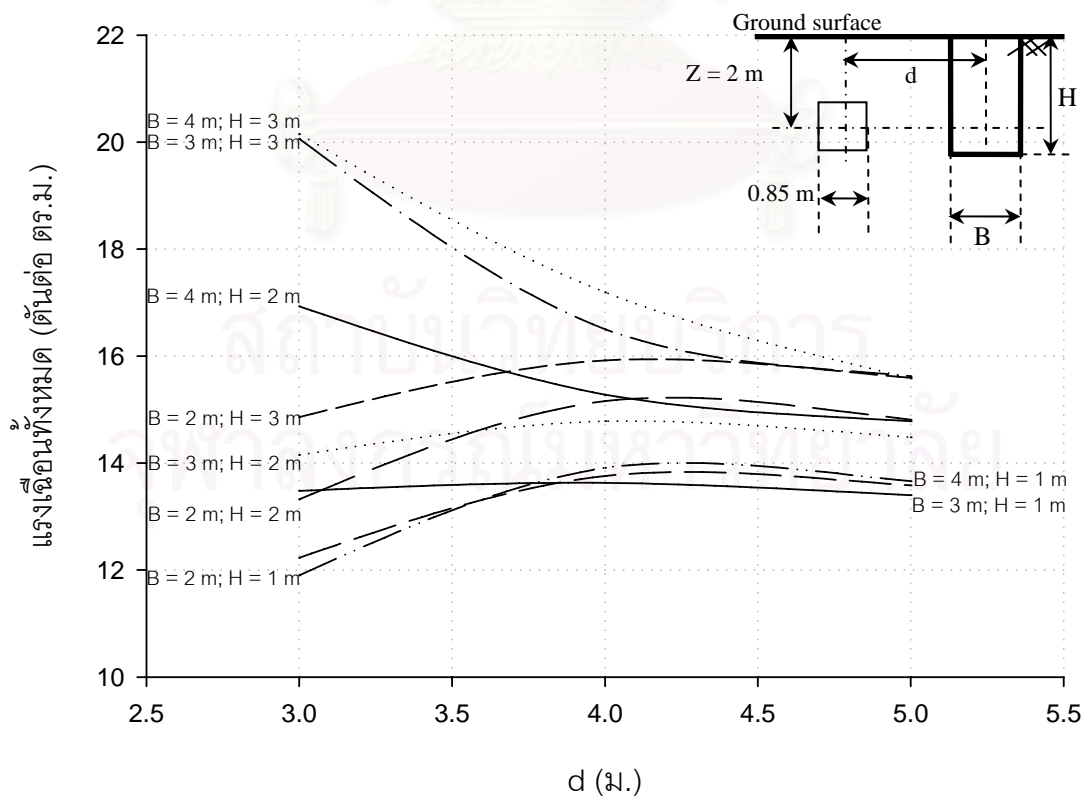
รูปที่ ก-1.12.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



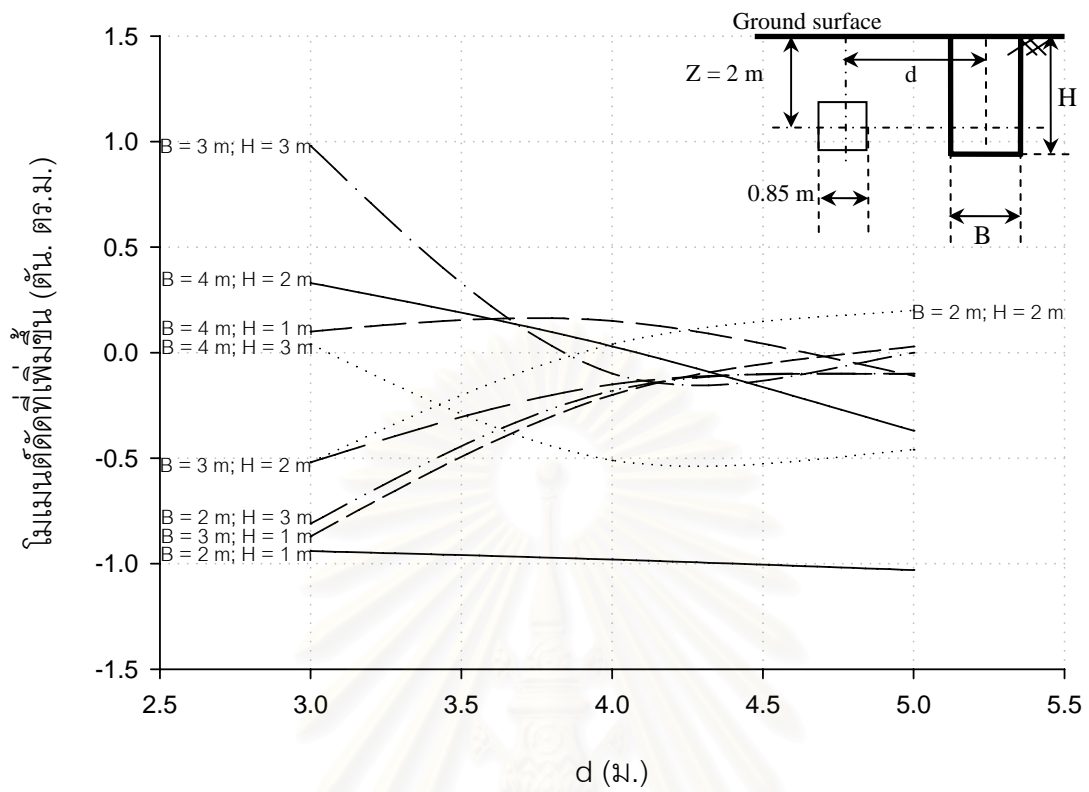
รูปที่ ก-1.12.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



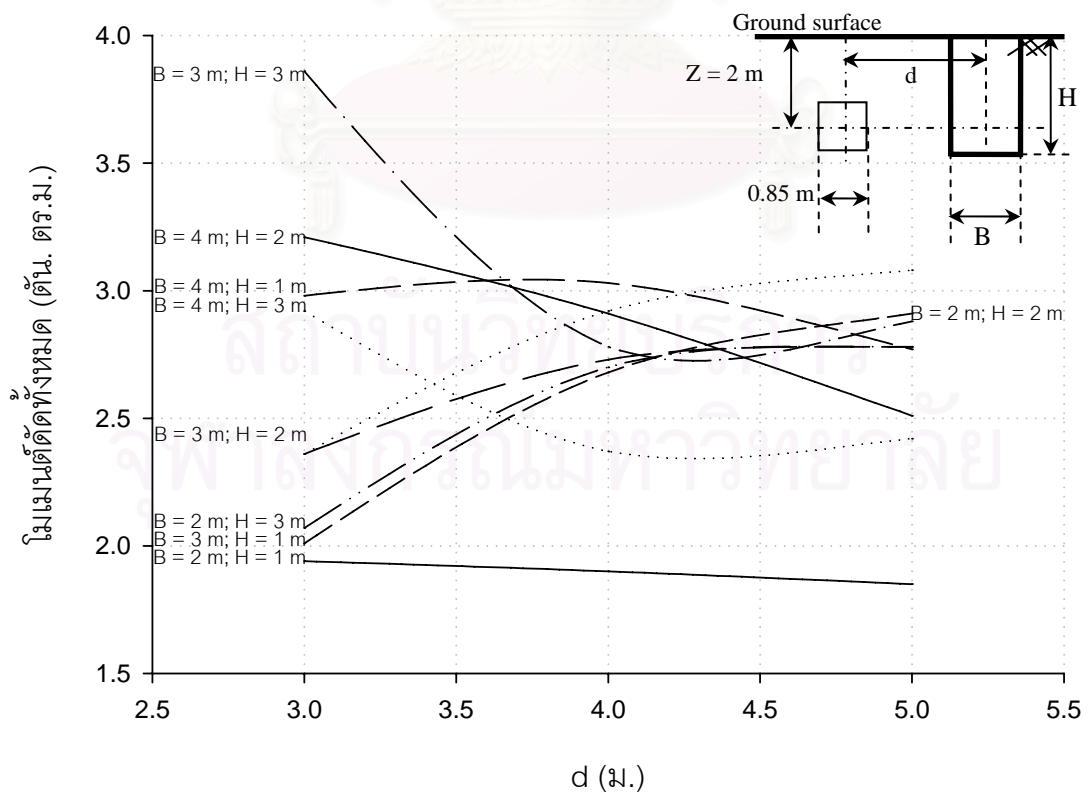
รูปที่ ก-1.12.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



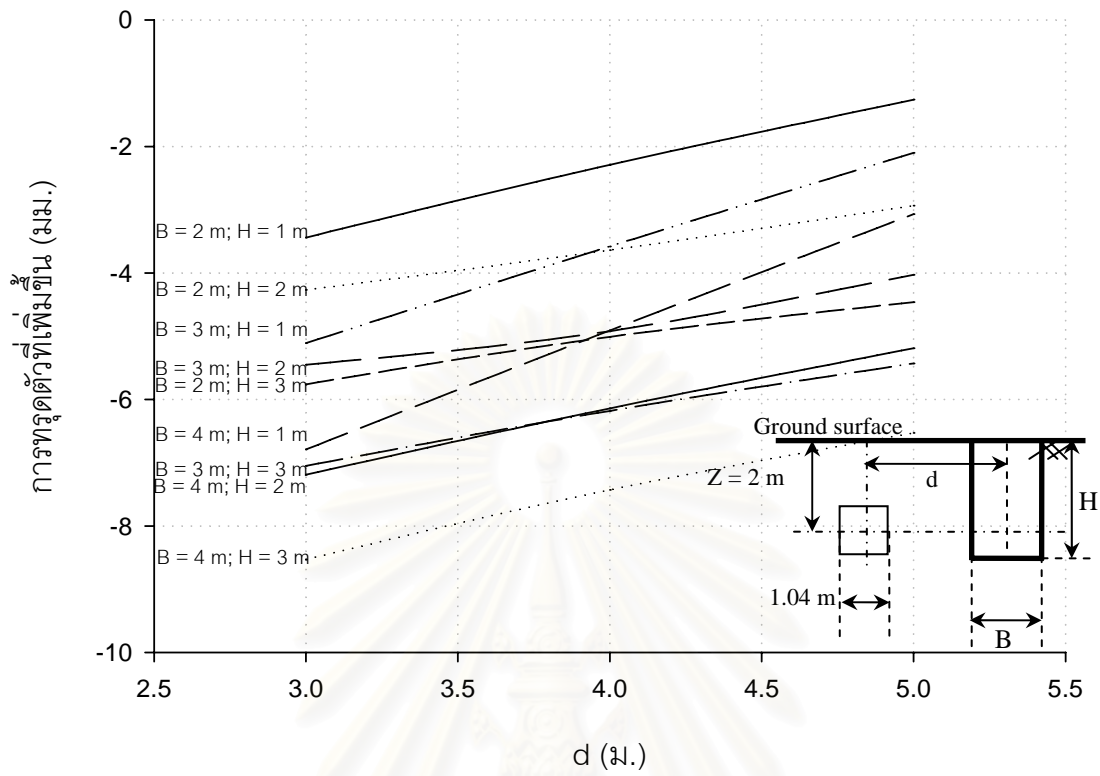
รูปที่ ก-1.12.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



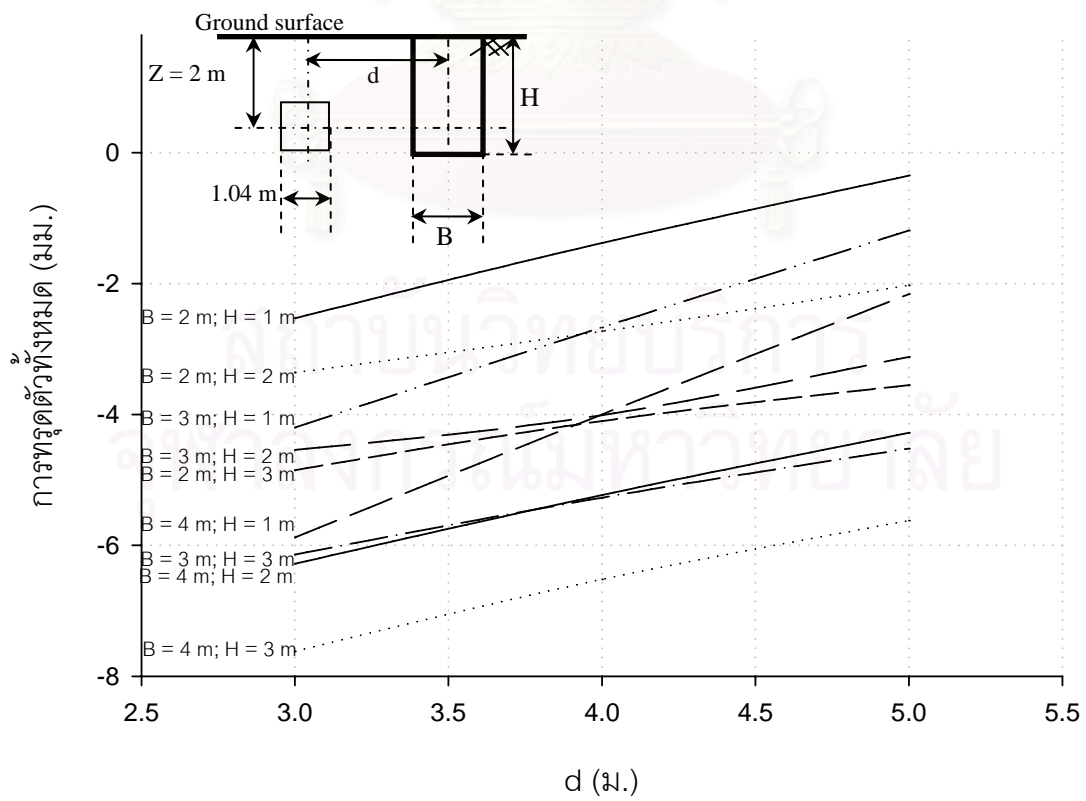
รูปที่ ก-1.12.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



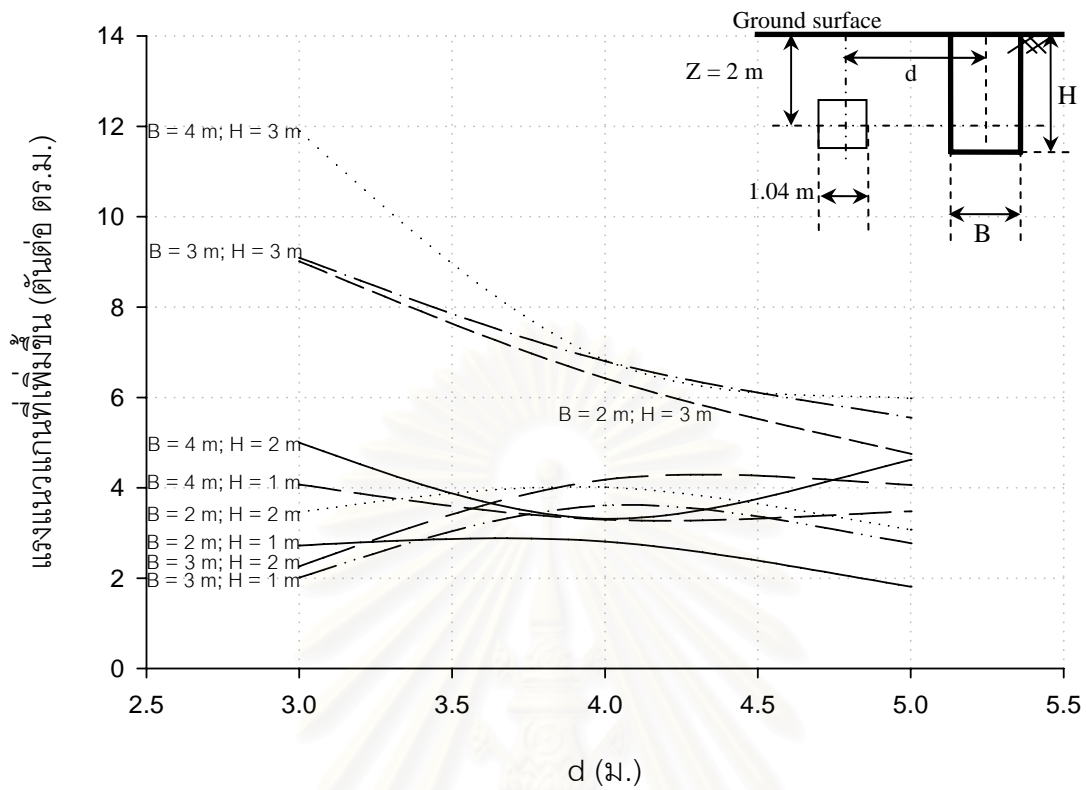
รูปที่ ก-1.12.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 จากการขุดเปิดหน้าดิน



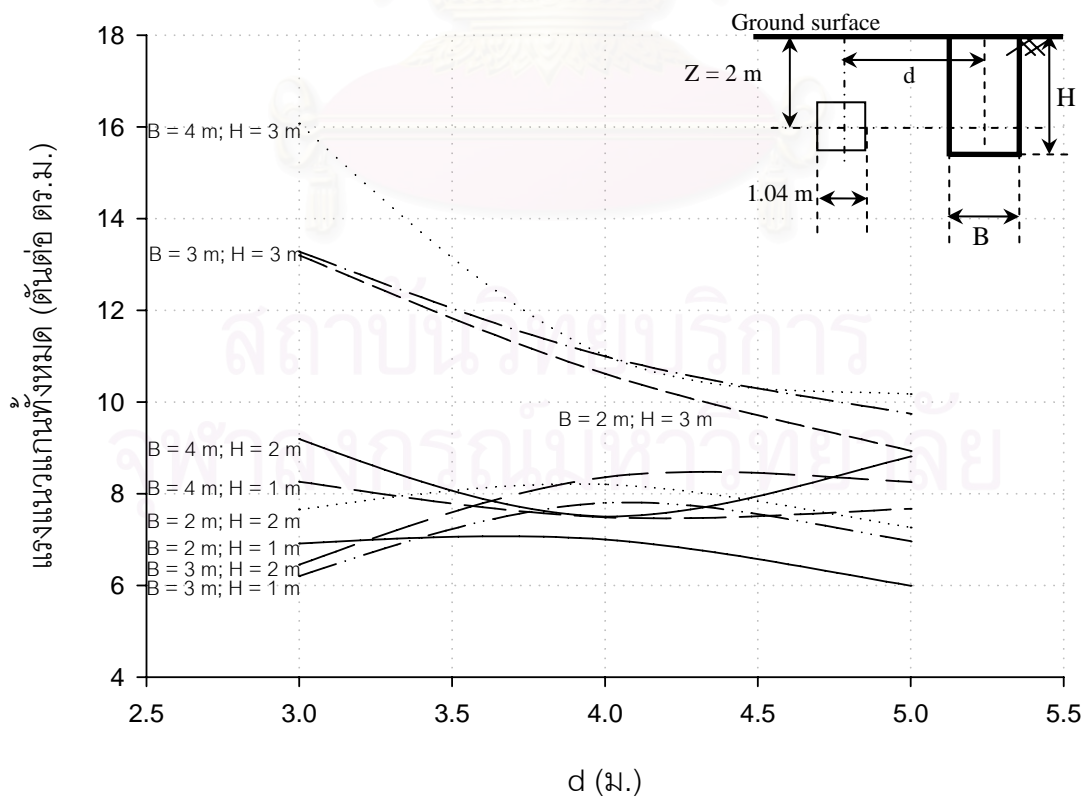
รูปที่ ก-1.13.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



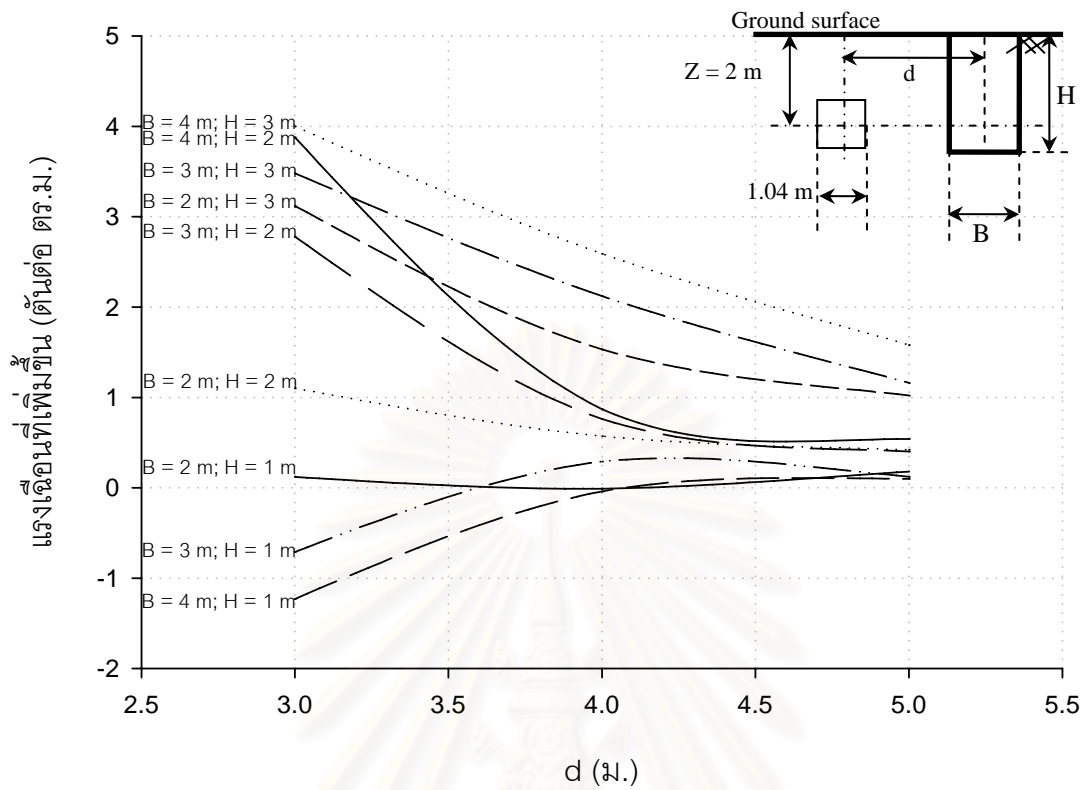
รูปที่ ก-1.13.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



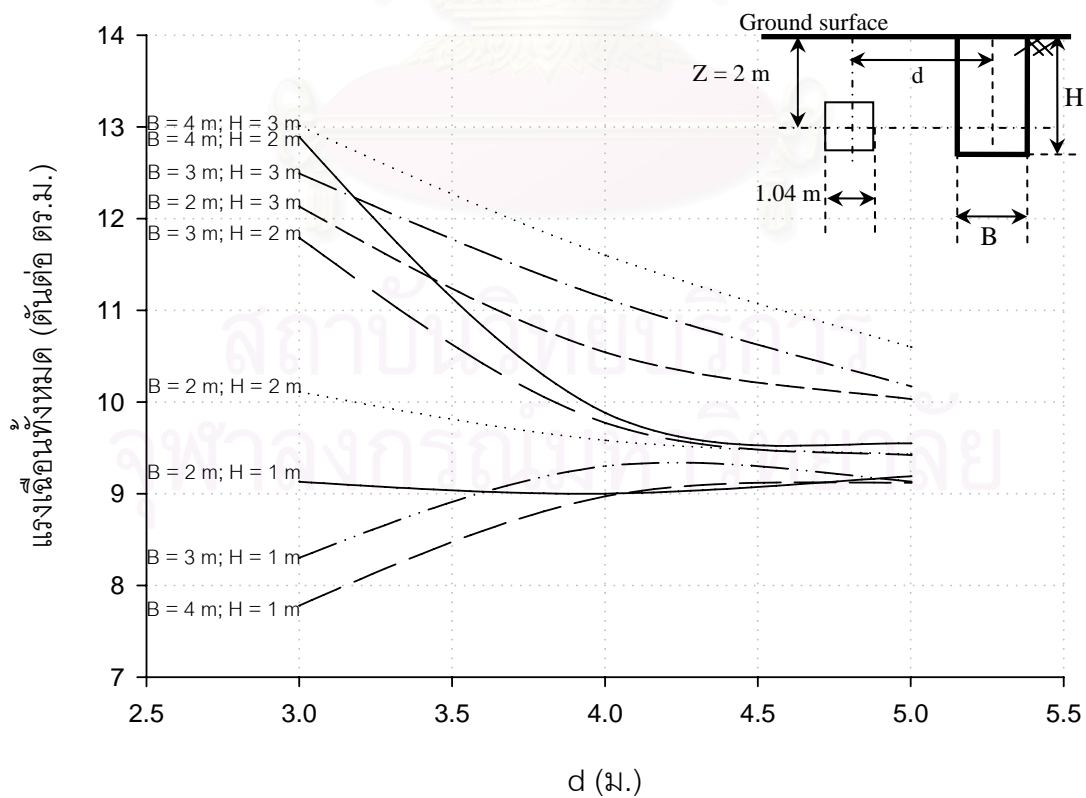
รูปที่ ก-1.13.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



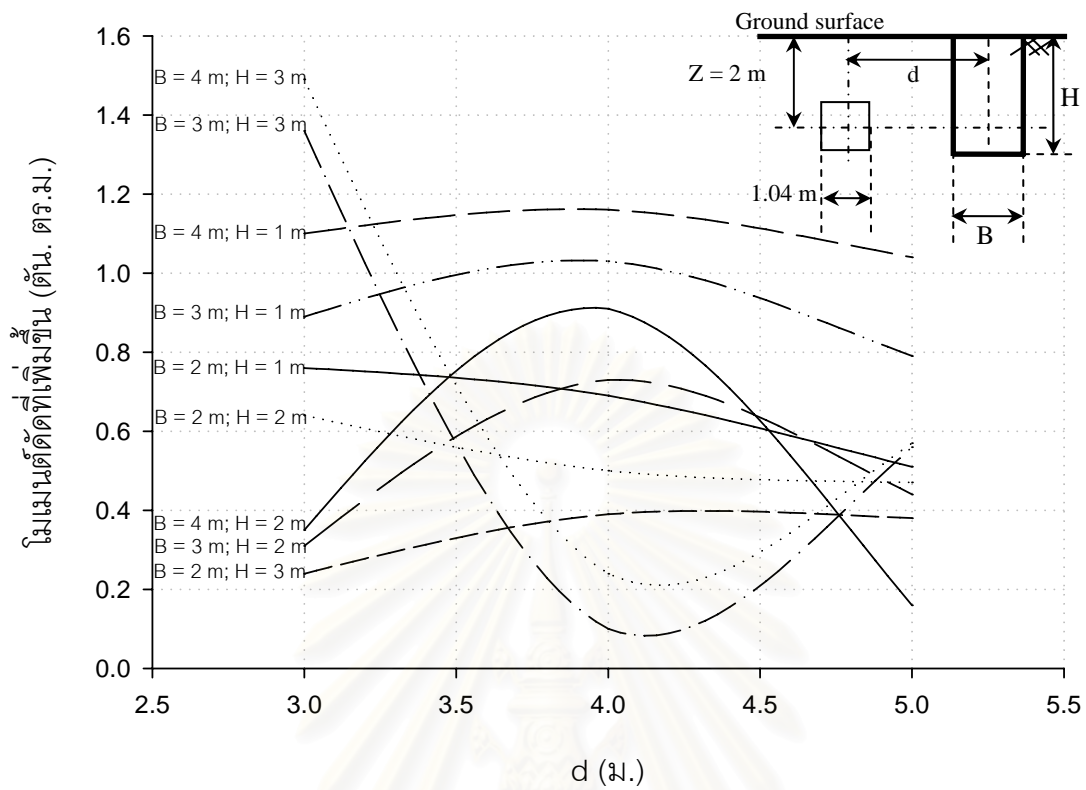
รูปที่ ก-1.13.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



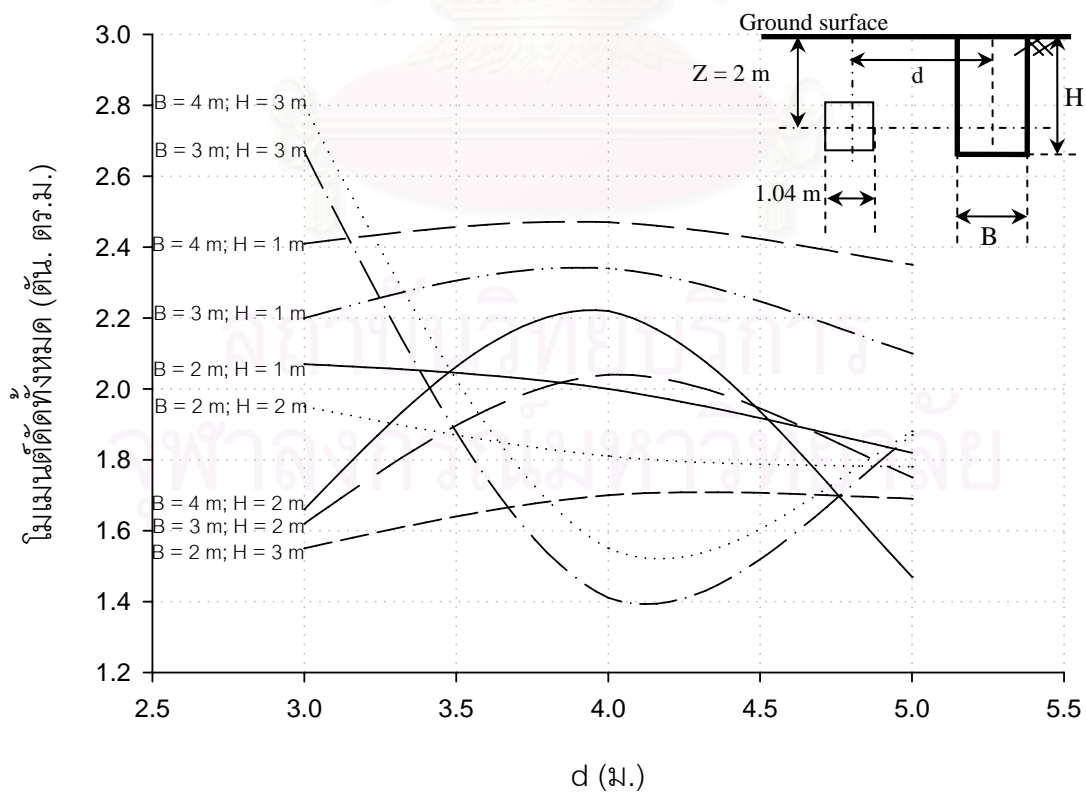
รูปที่ ก-1.13.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



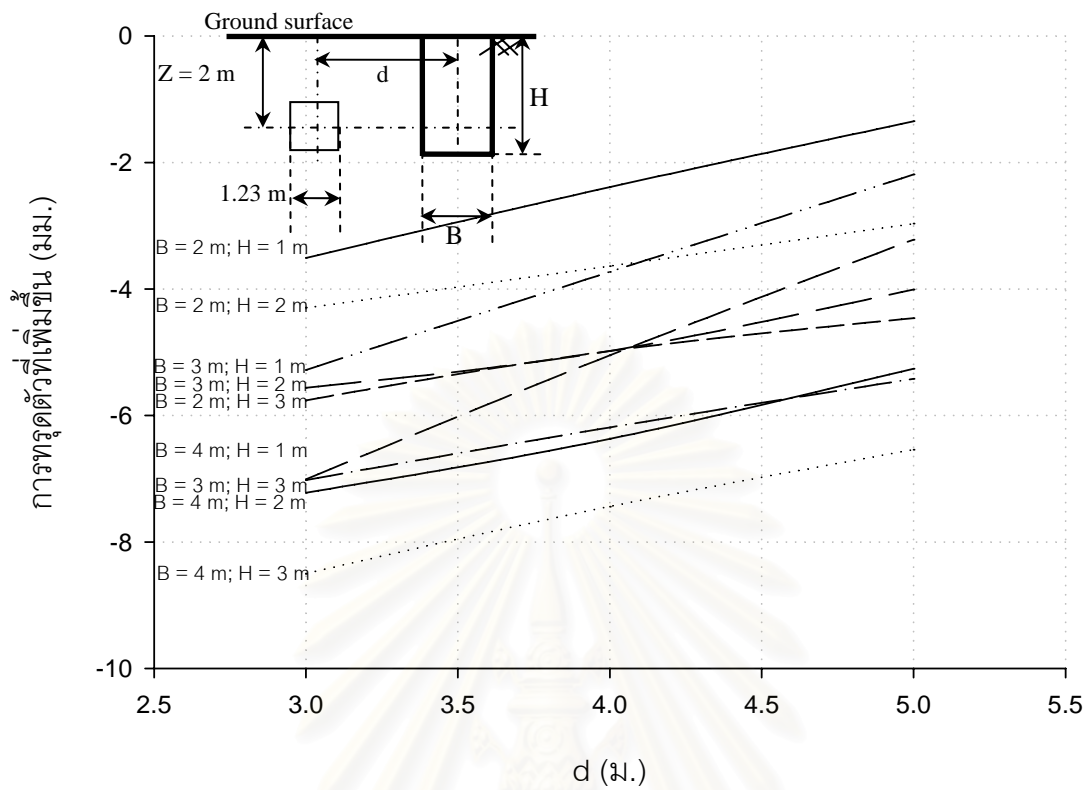
รูปที่ ก-1.13.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



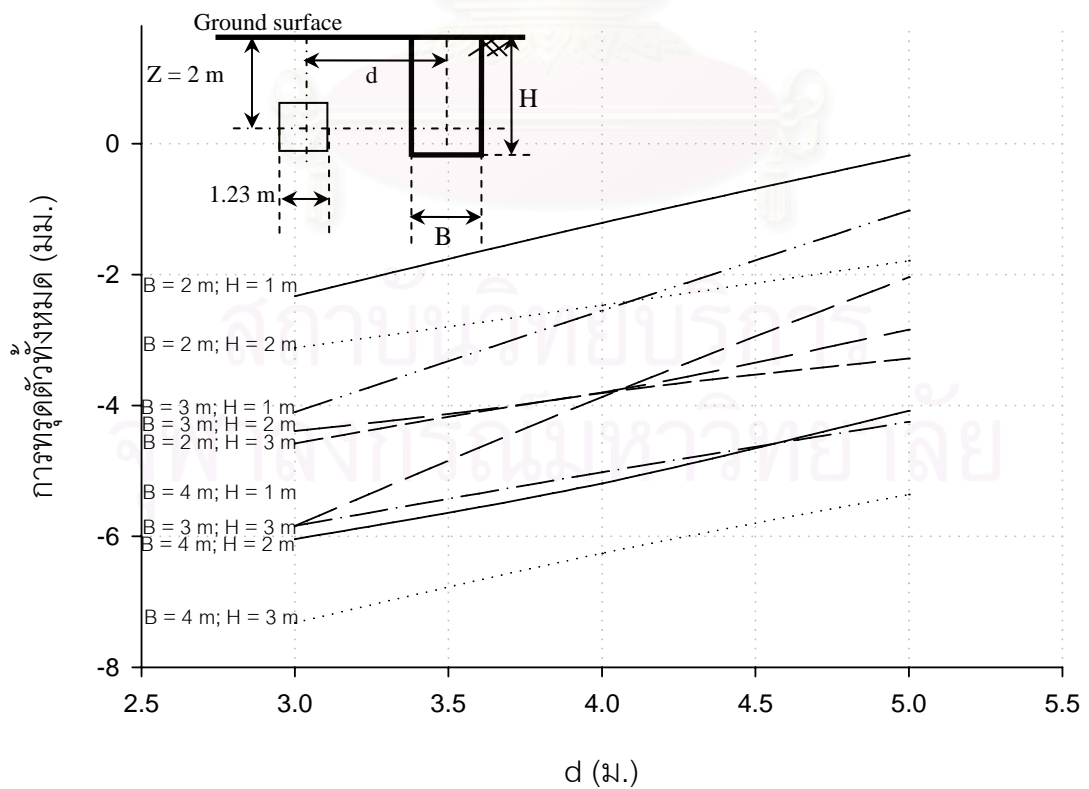
รูปที่ ก-1.13.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



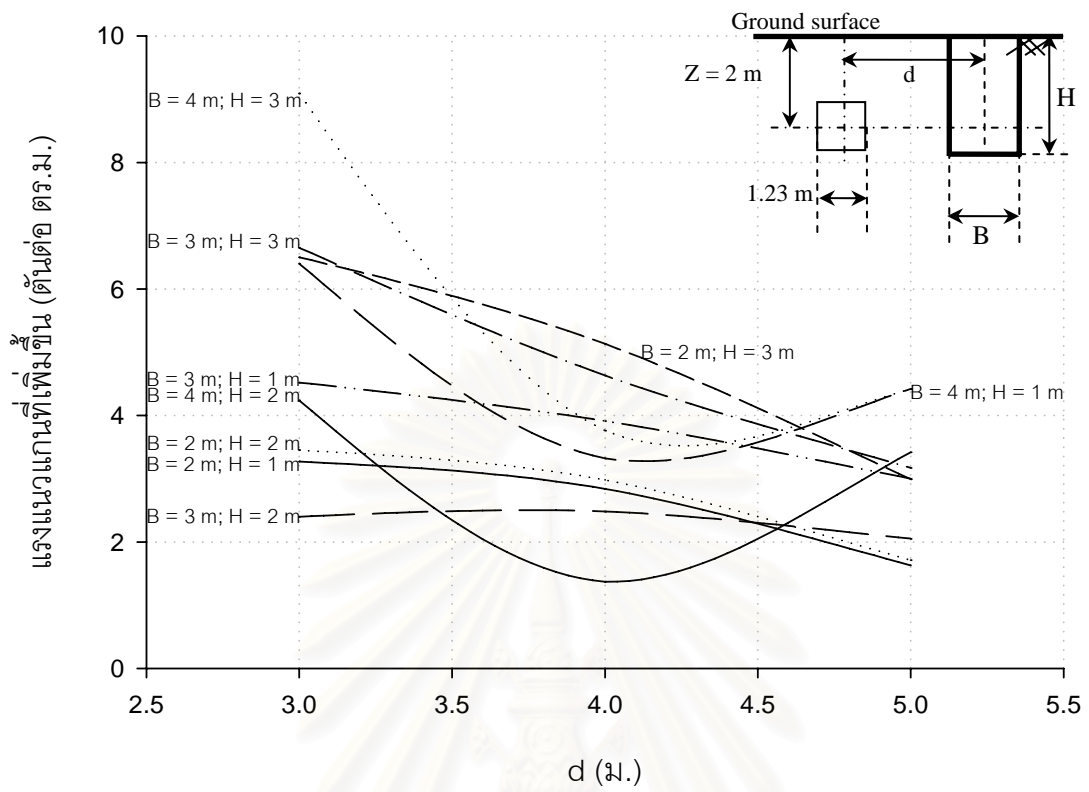
รูปที่ ก-1.13.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 จากการขุดเปิดหน้าดิน



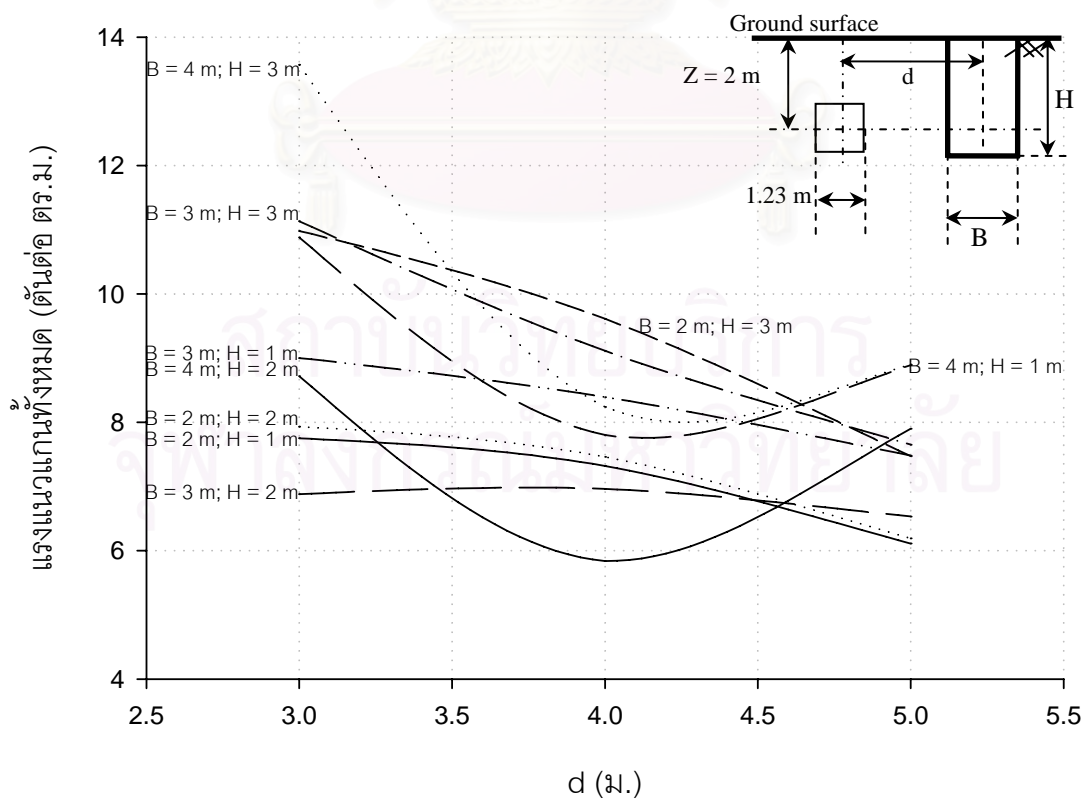
รูปที่ ก-1.14.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการขุดเปิดหน้าดิน



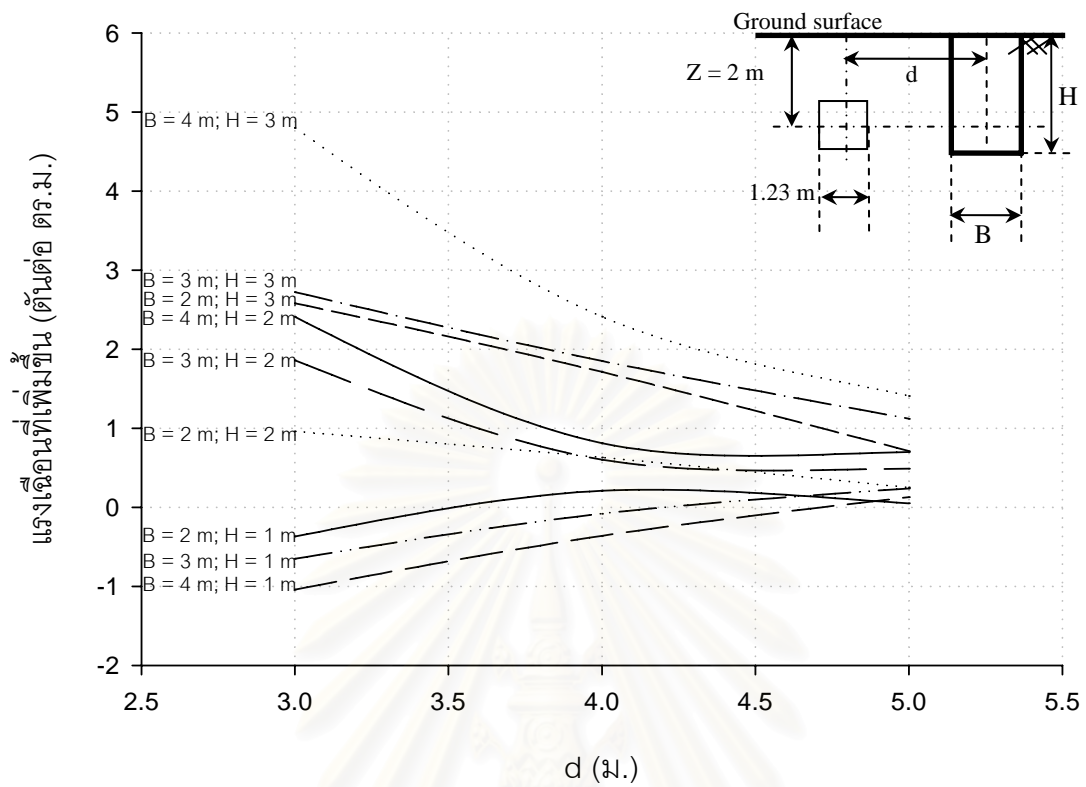
รูปที่ ก-1.14.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการขุดเปิดหน้าดิน



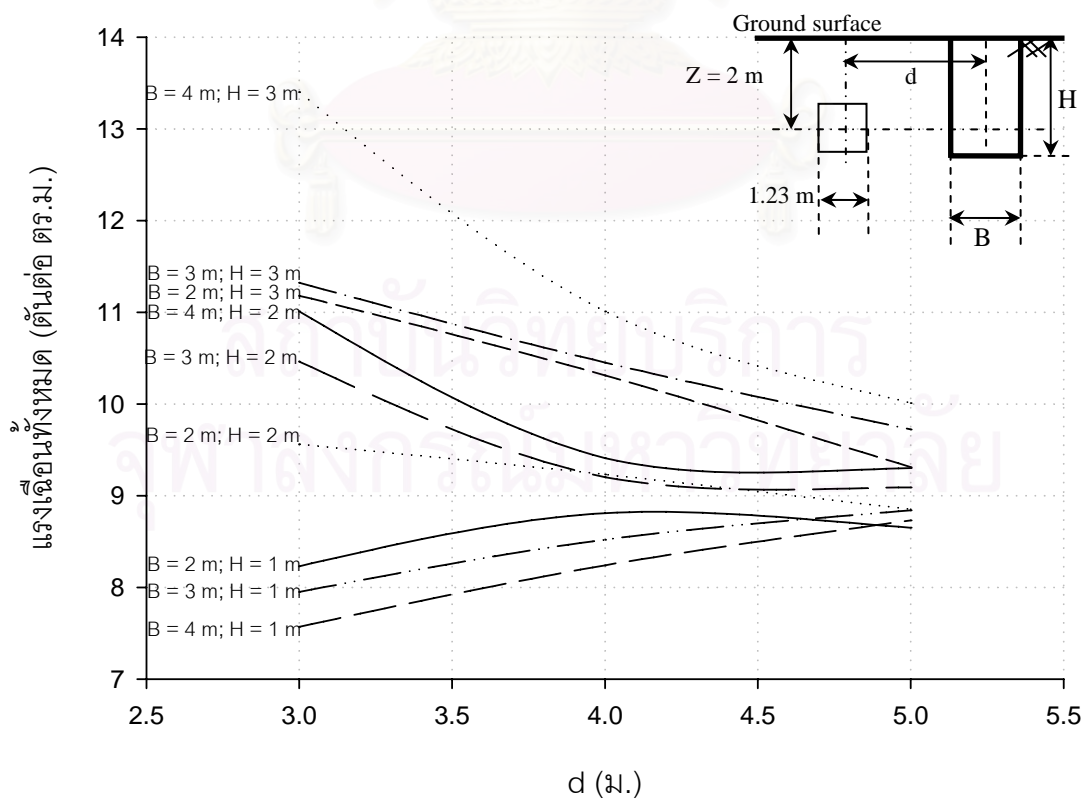
รูปที่ ก-1.14.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการชุดเปิดหน้าดิน



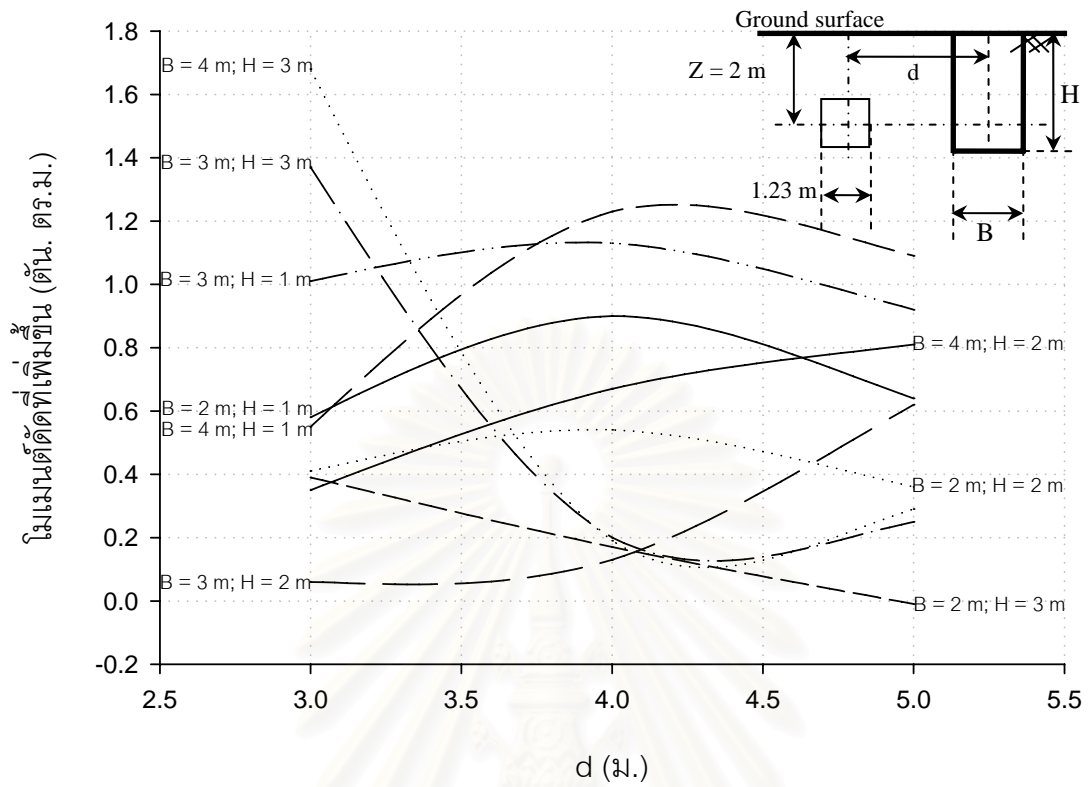
รูปที่ ก-1.14.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการชุดเปิดหน้าดิน



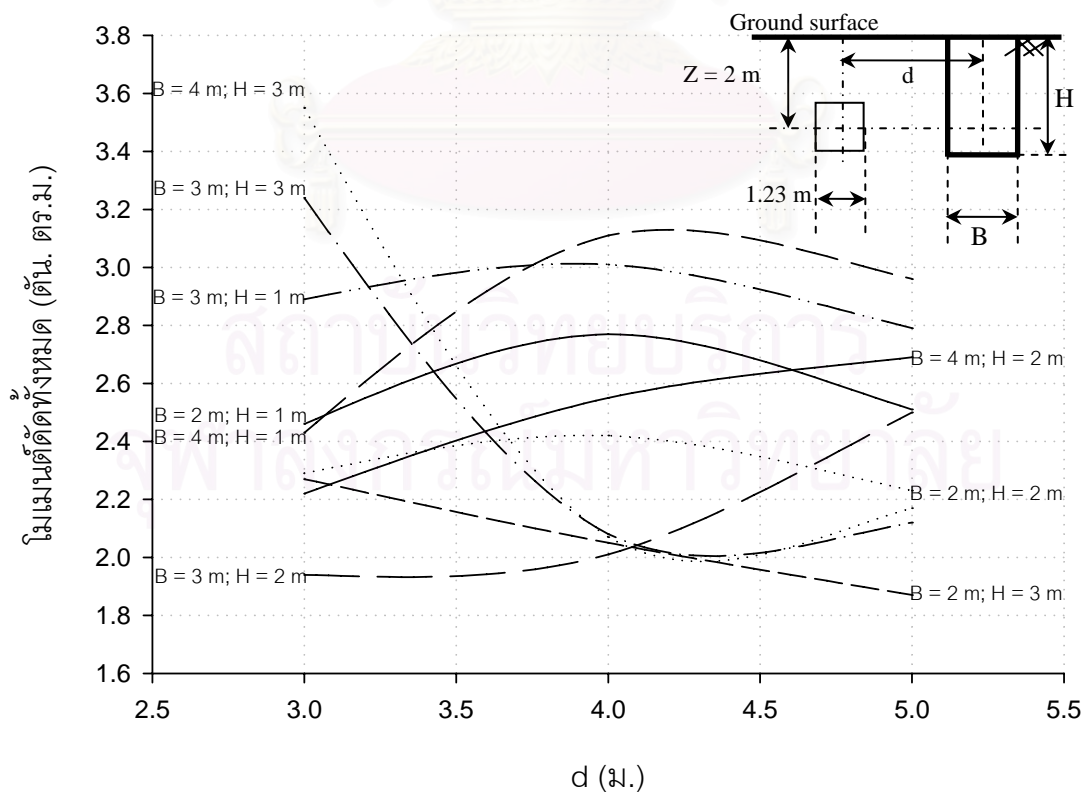
รูปที่ ก-1.14.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการขุดเปิดหน้าดิน



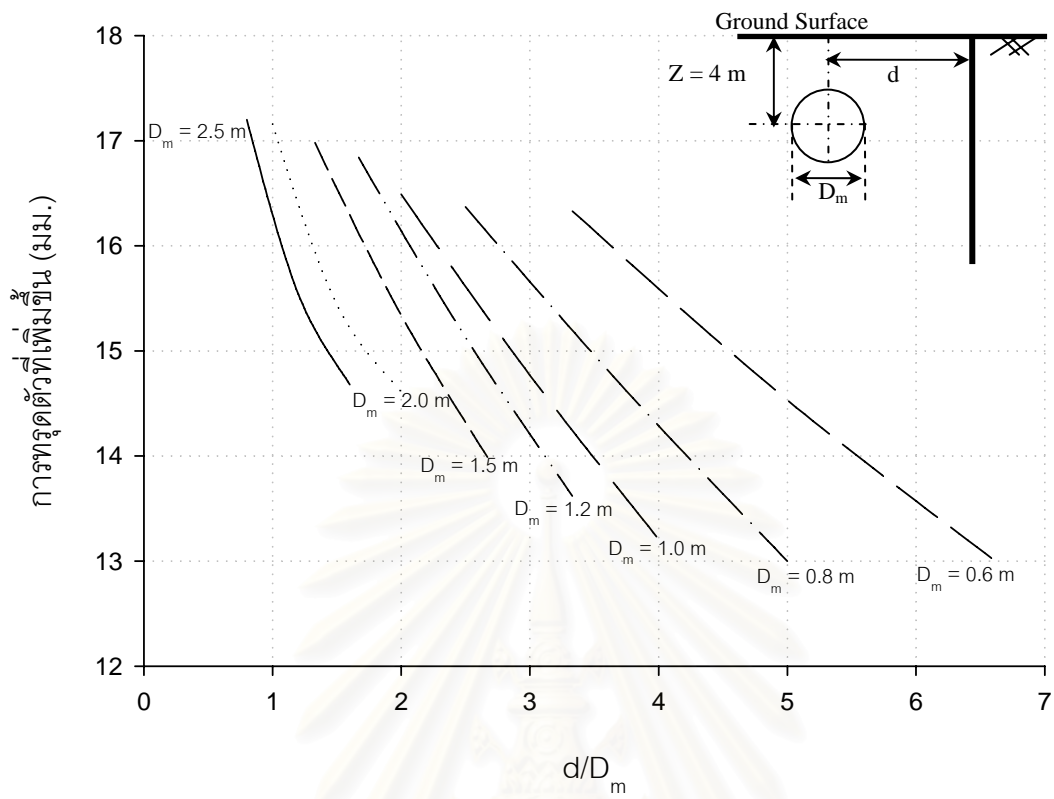
รูปที่ ก-1.14.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการขุดเปิดหน้าดิน



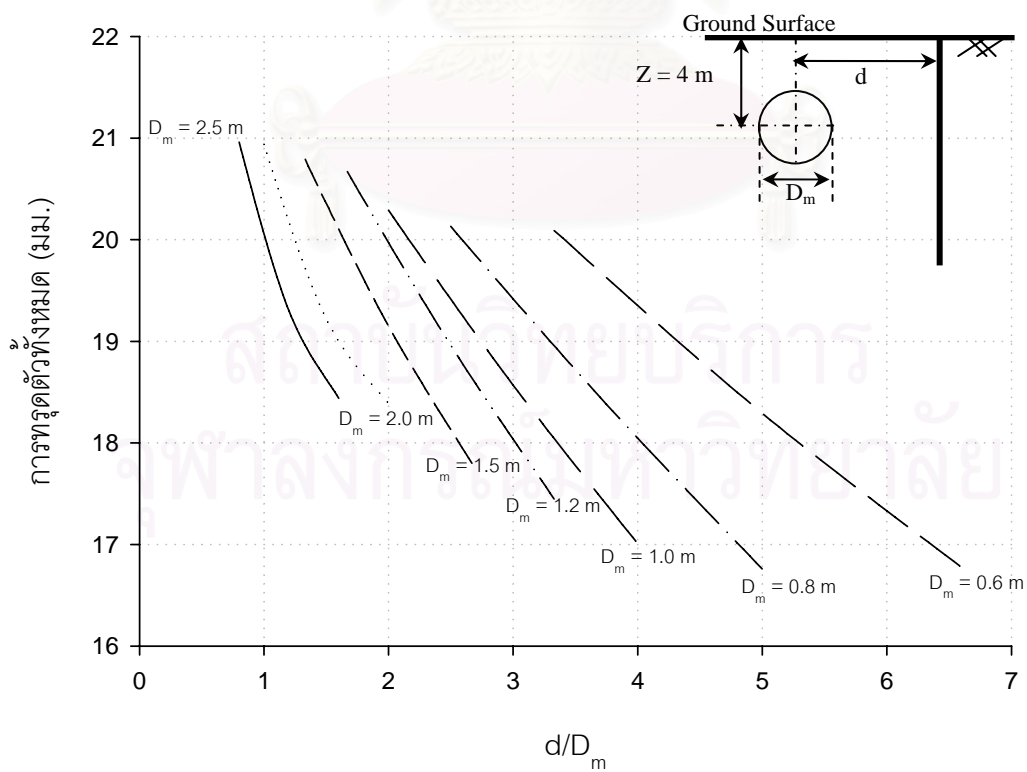
รูปที่ ก-1.14.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการขุดเปิดหน้าดิน



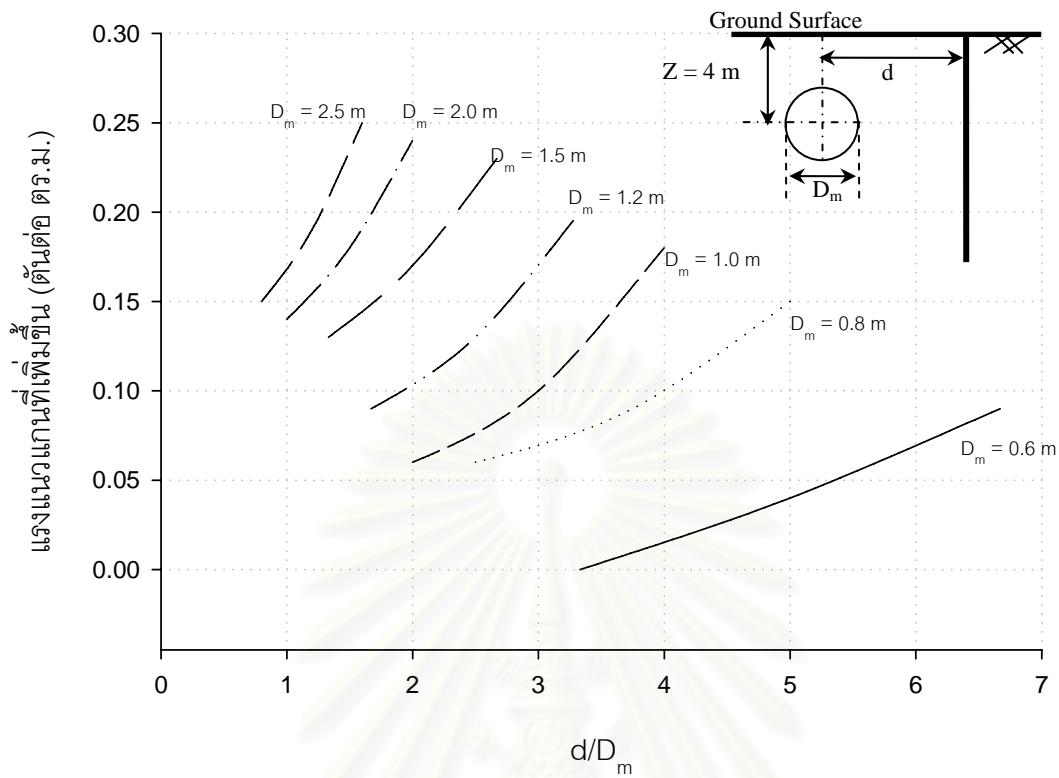
รูปที่ ก-1.14.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 จากการขุดเปิดหน้าดิน



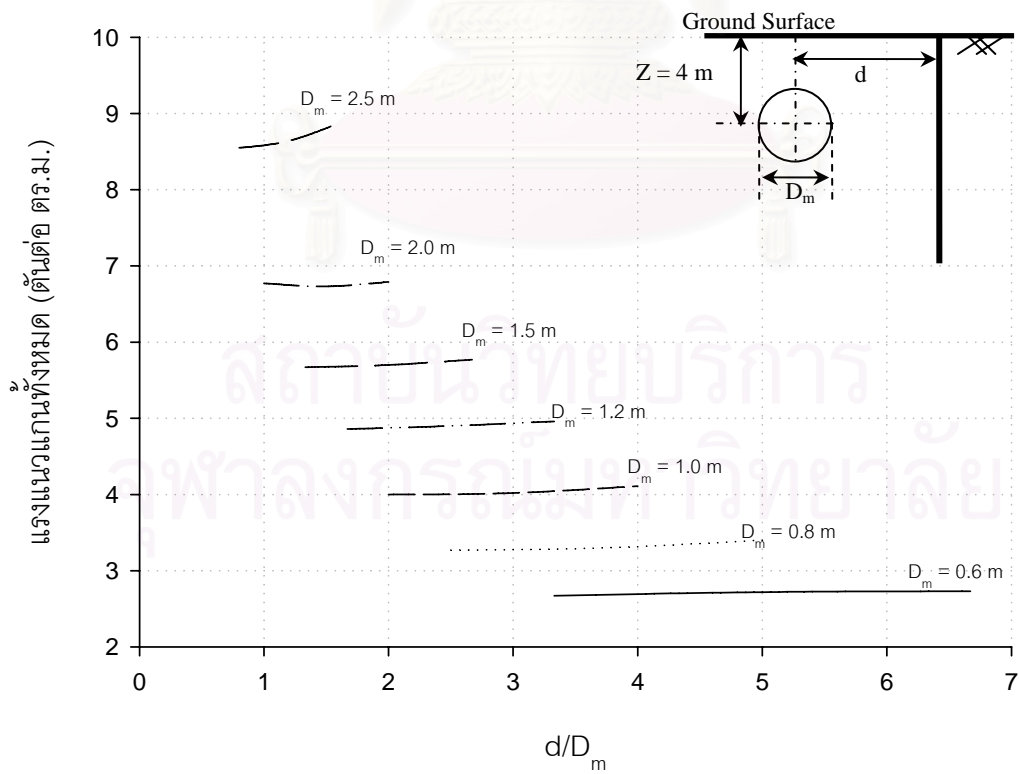
รูปที่ ก-2.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



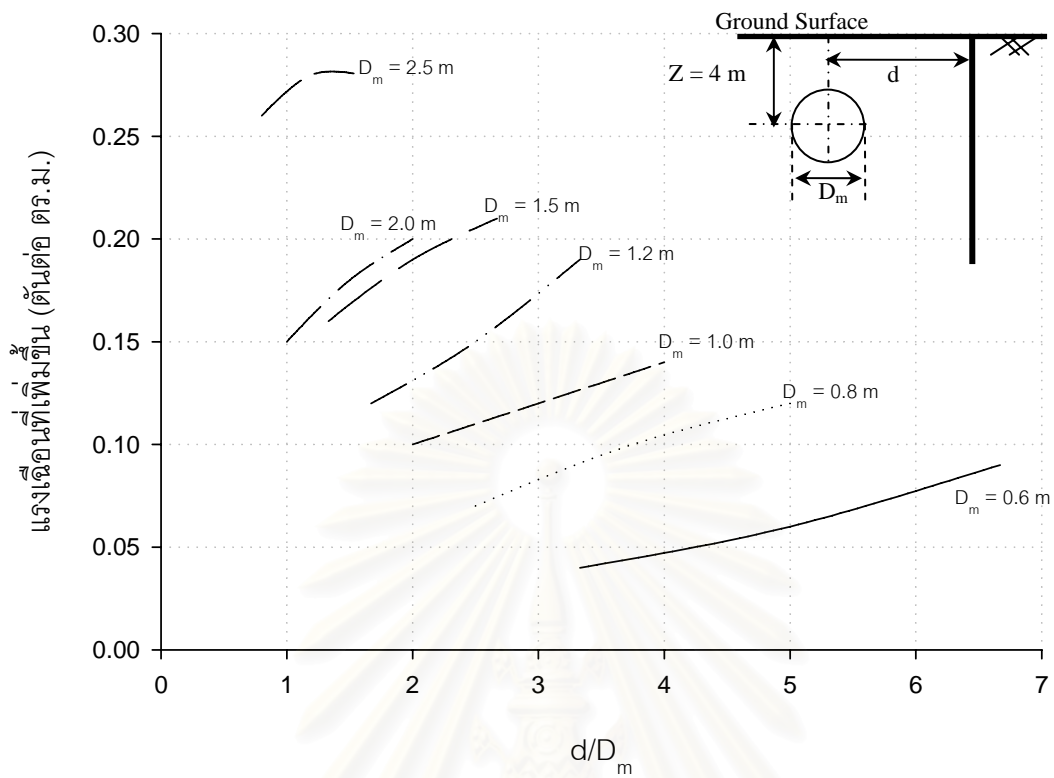
รูปที่ ก-2.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



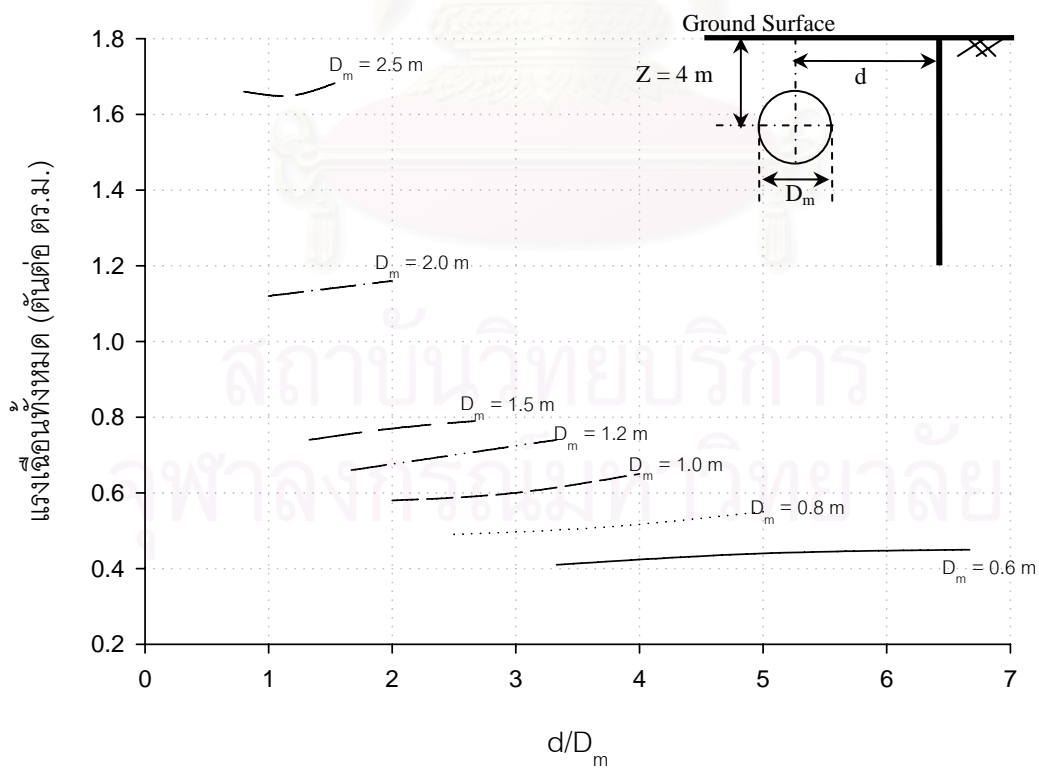
รูปที่ ก-2.2.1 แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพีต



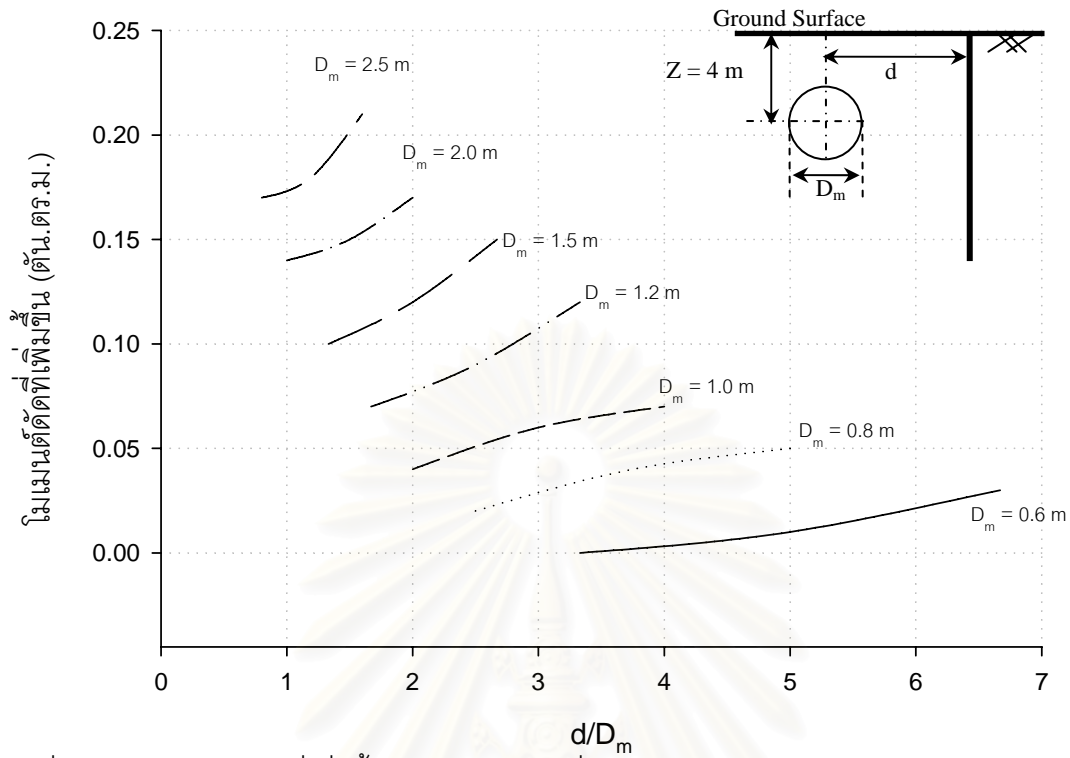
รูปที่ ก-2.2.2 แรงตามแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพีต



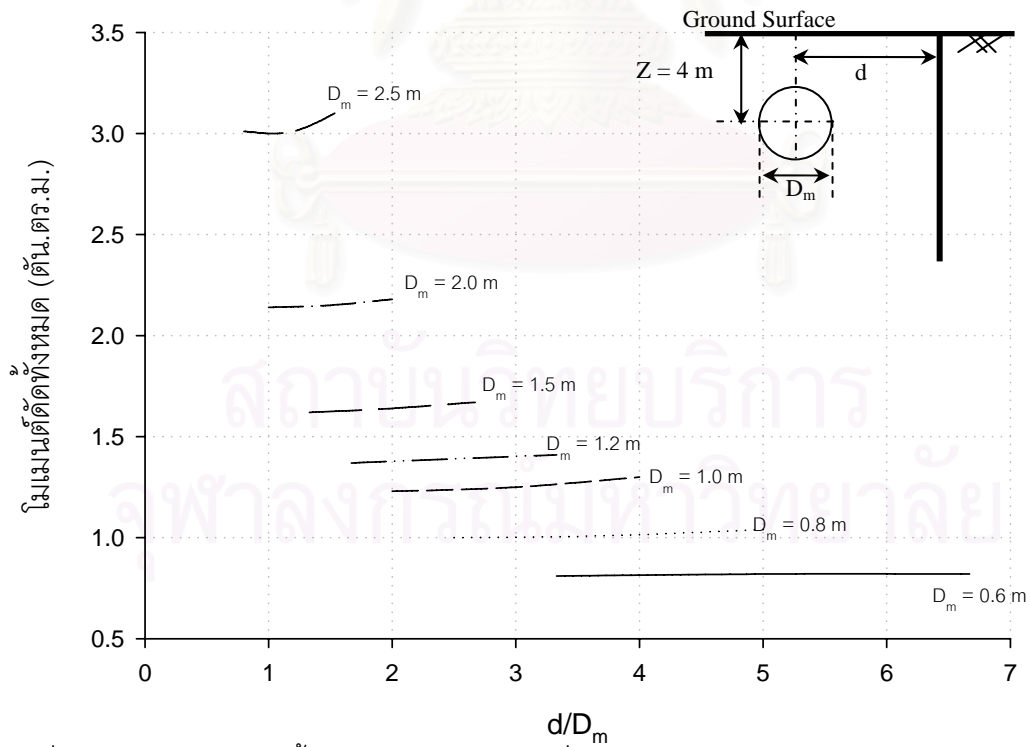
รูปที่ ก-2.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



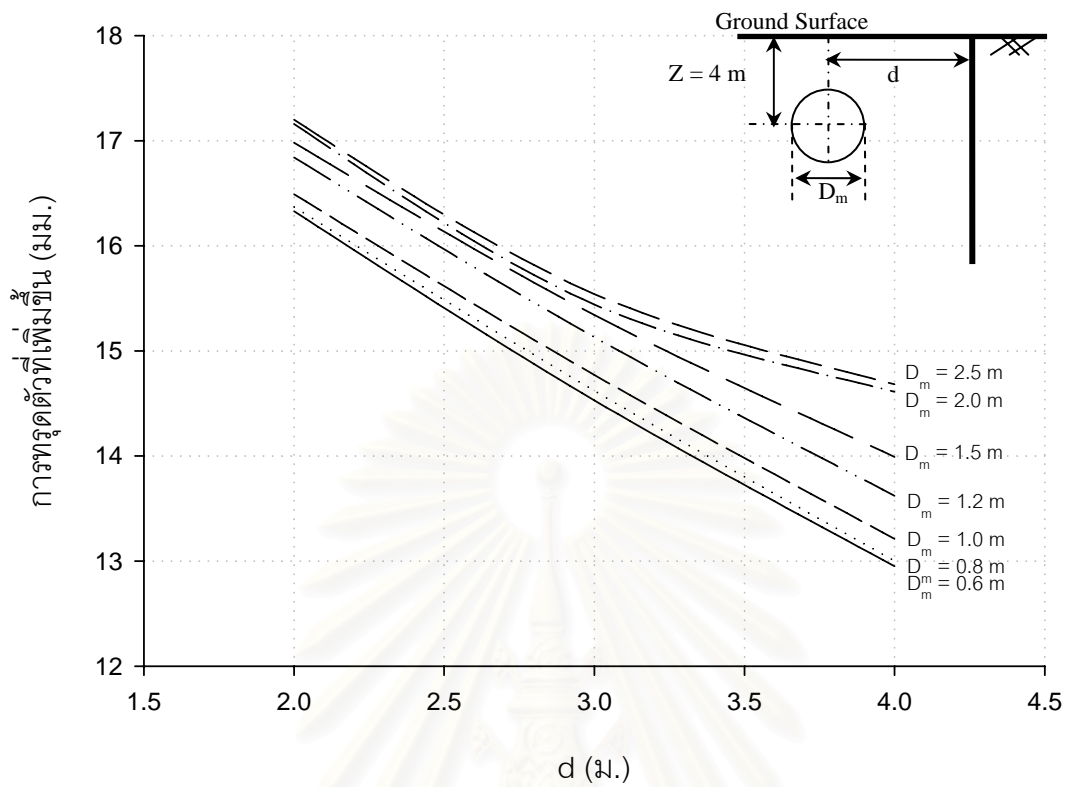
รูปที่ ก-2.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



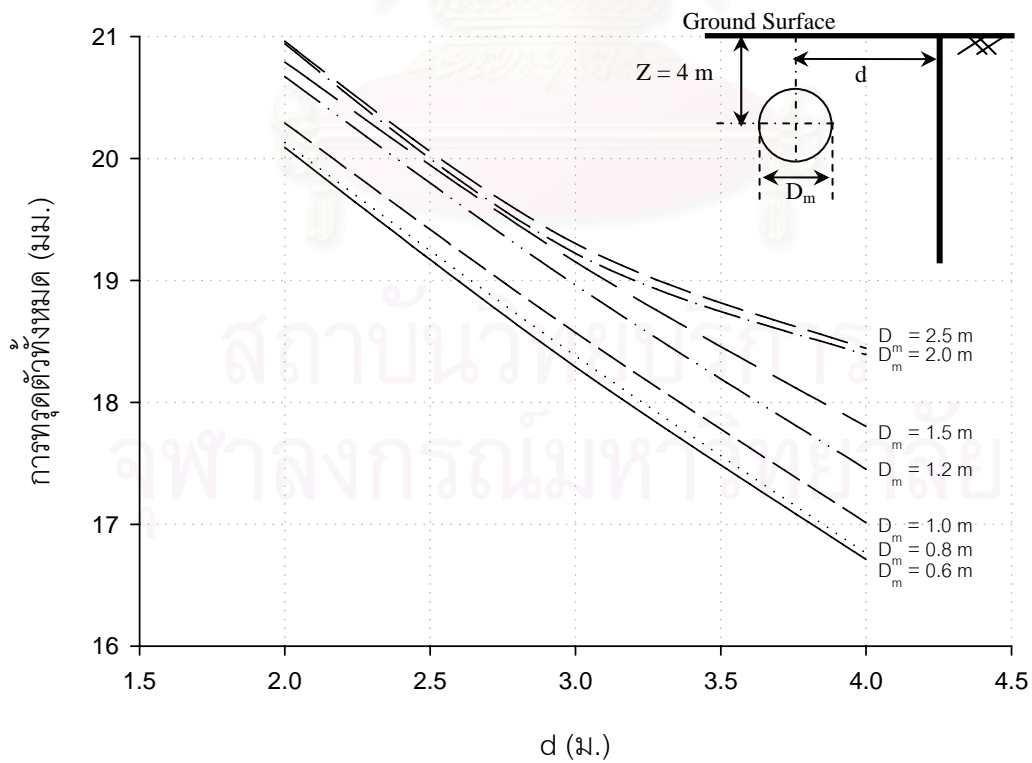
รูปที่ ก-2.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



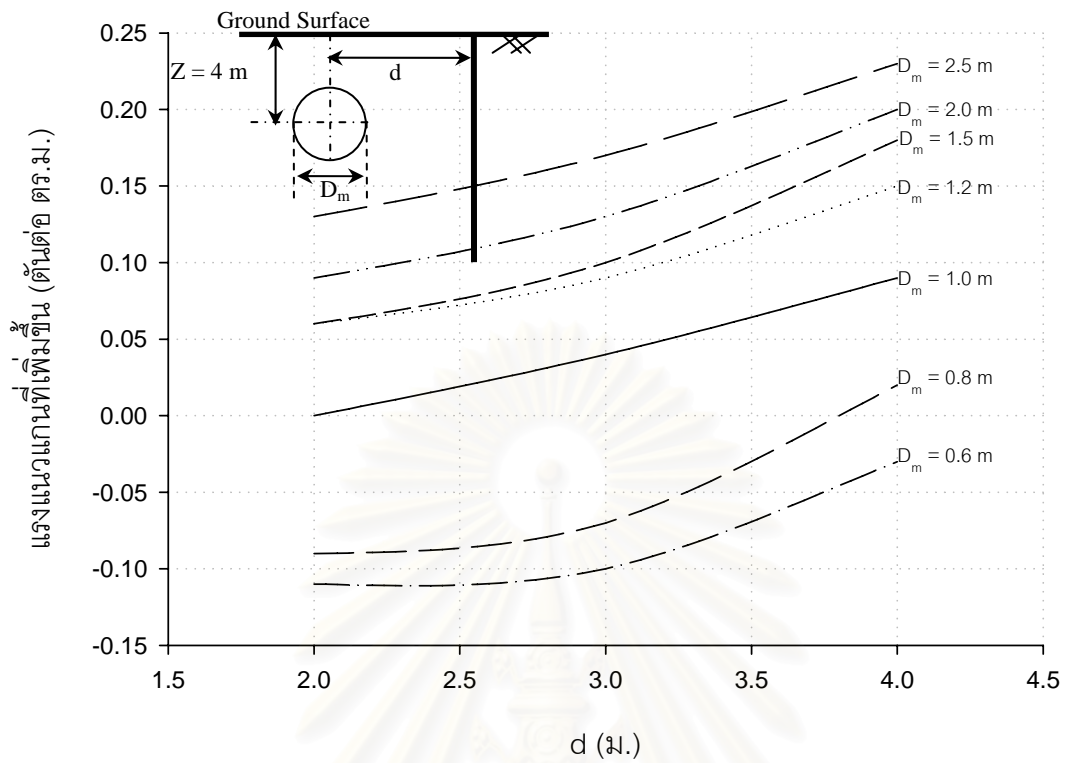
รูปที่ ก-2.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



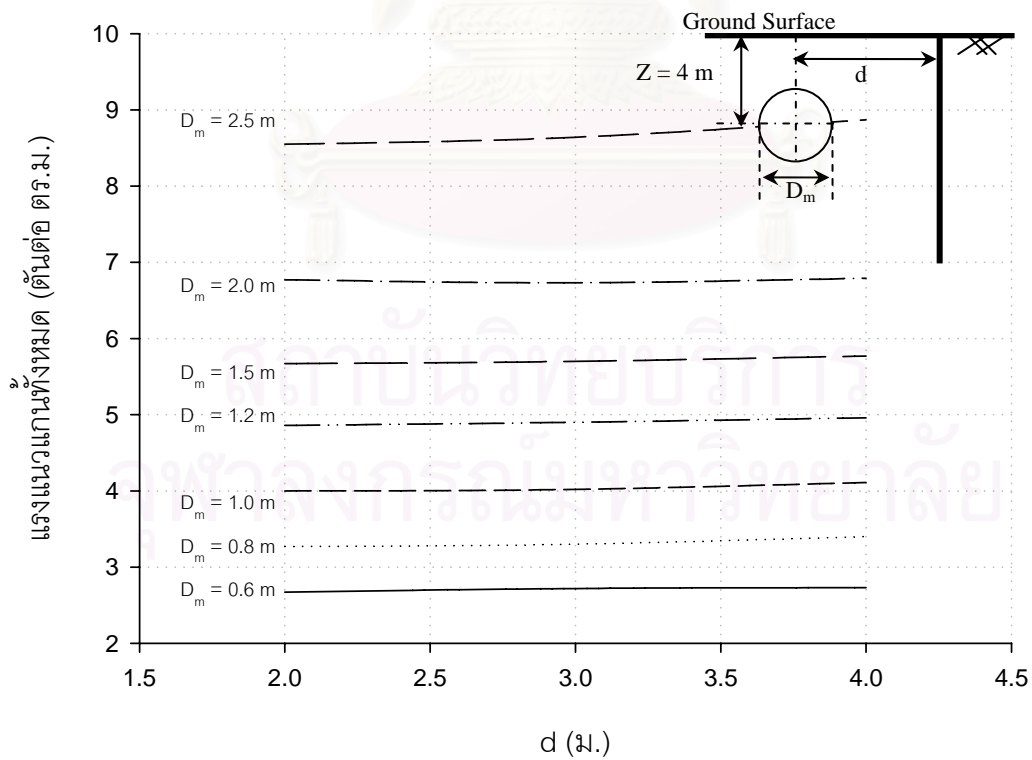
รูปที่ ก-2.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



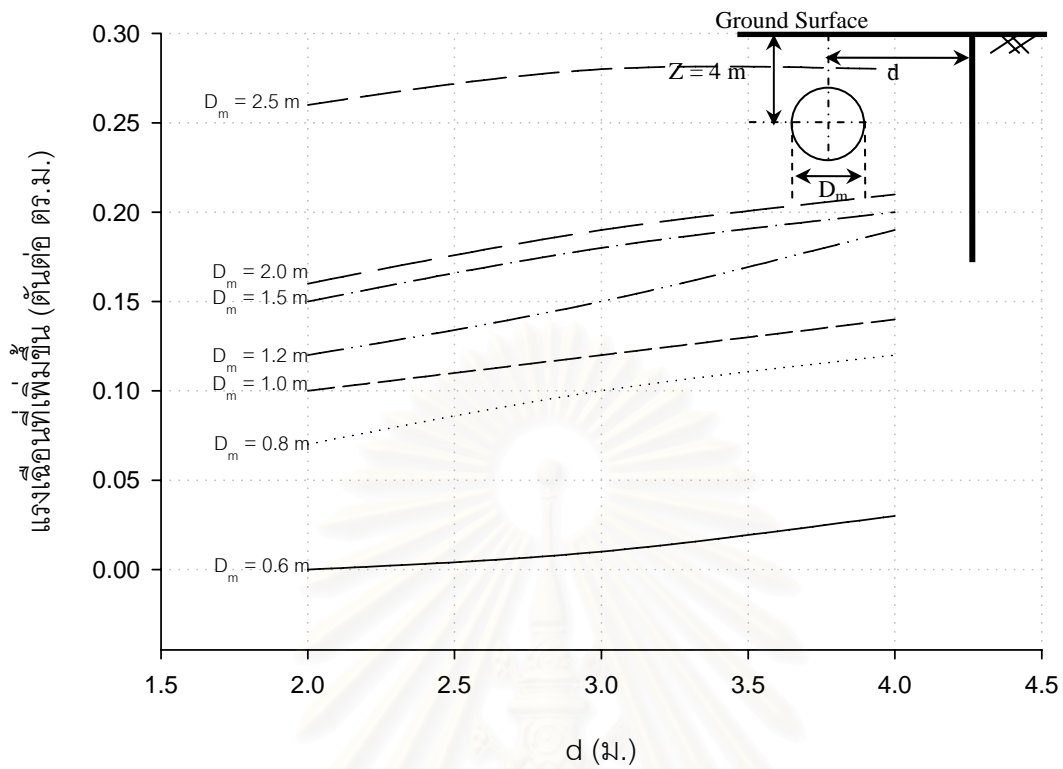
รูปที่ ก-2.5.2 การทรุดตัวที่ทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



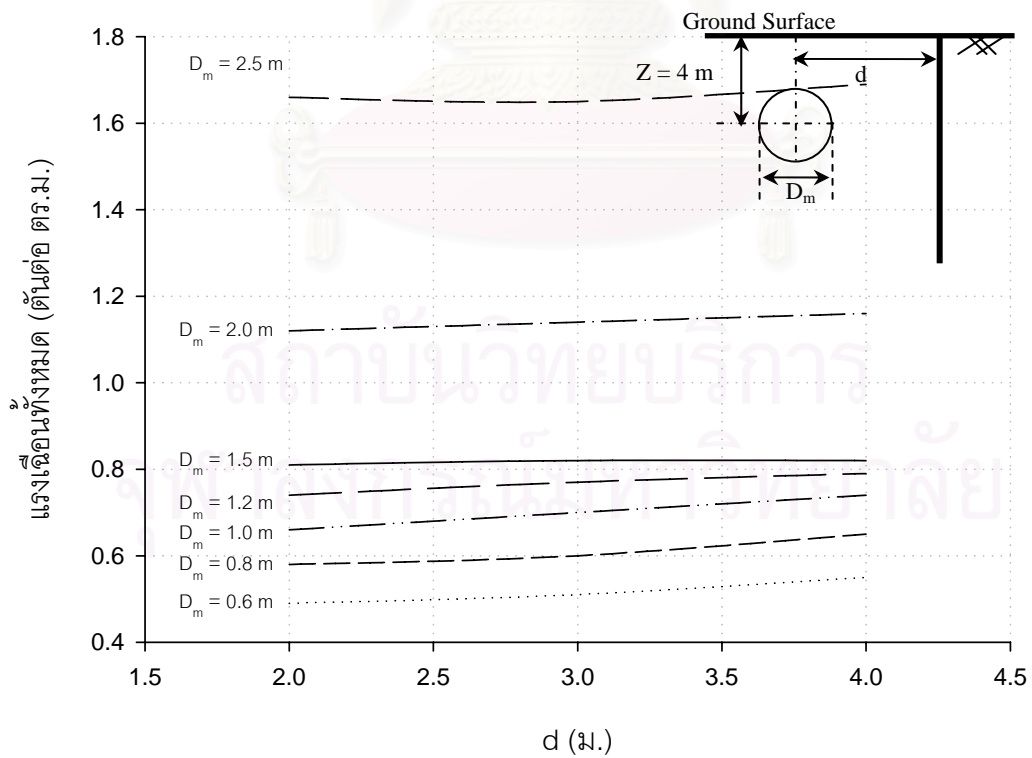
รูปที่ ก-2.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



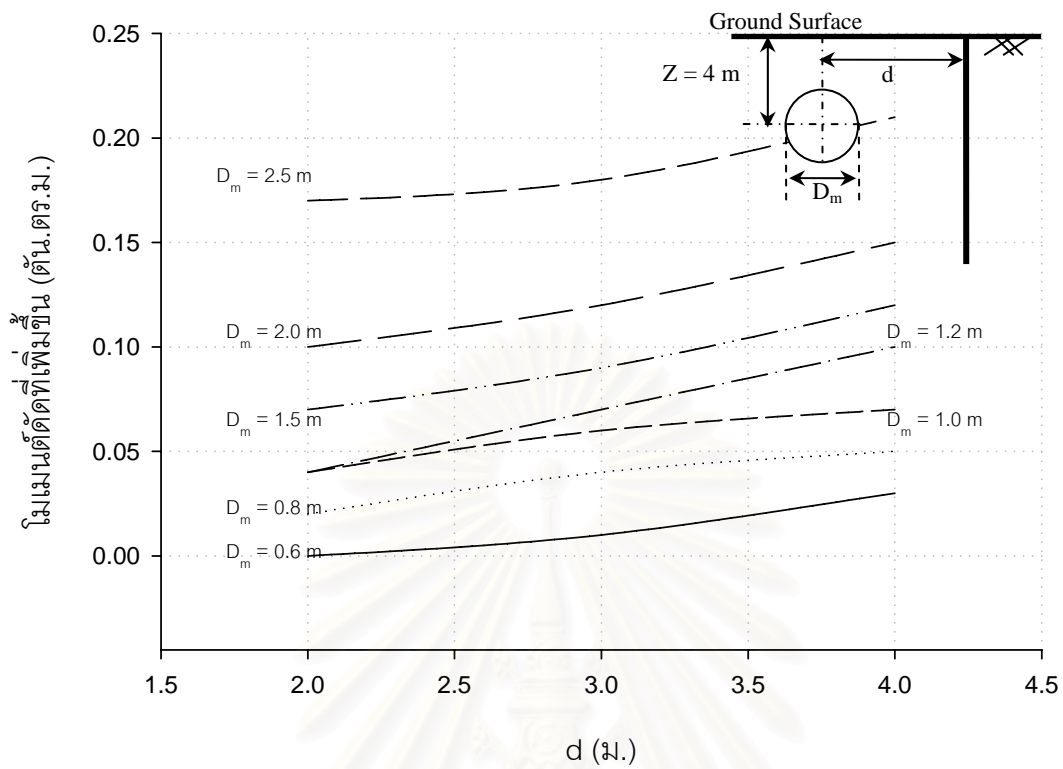
รูปที่ ก-2.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



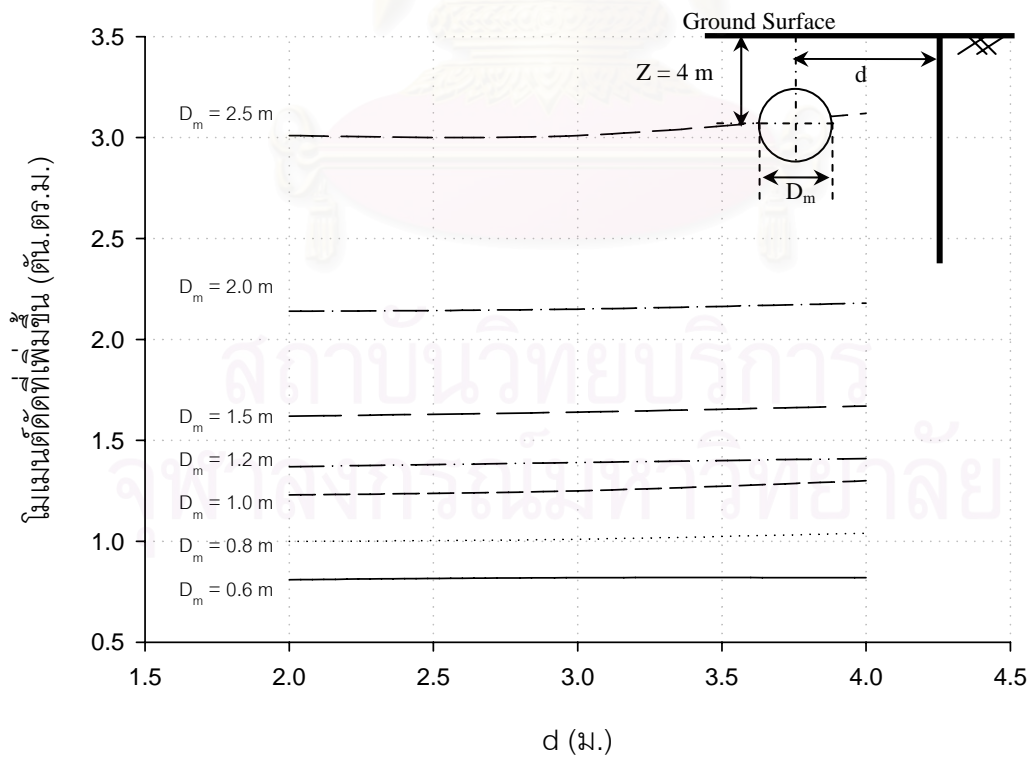
รูปที่ ก-2.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มฟัด



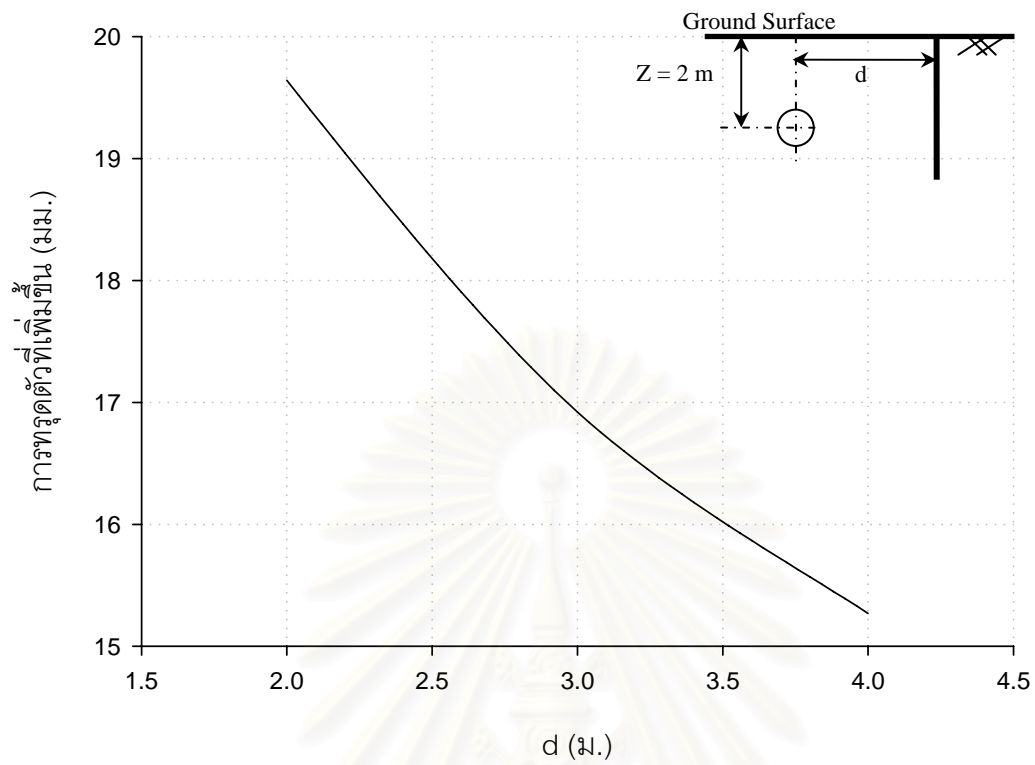
รูปที่ ก-2.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มฟัด



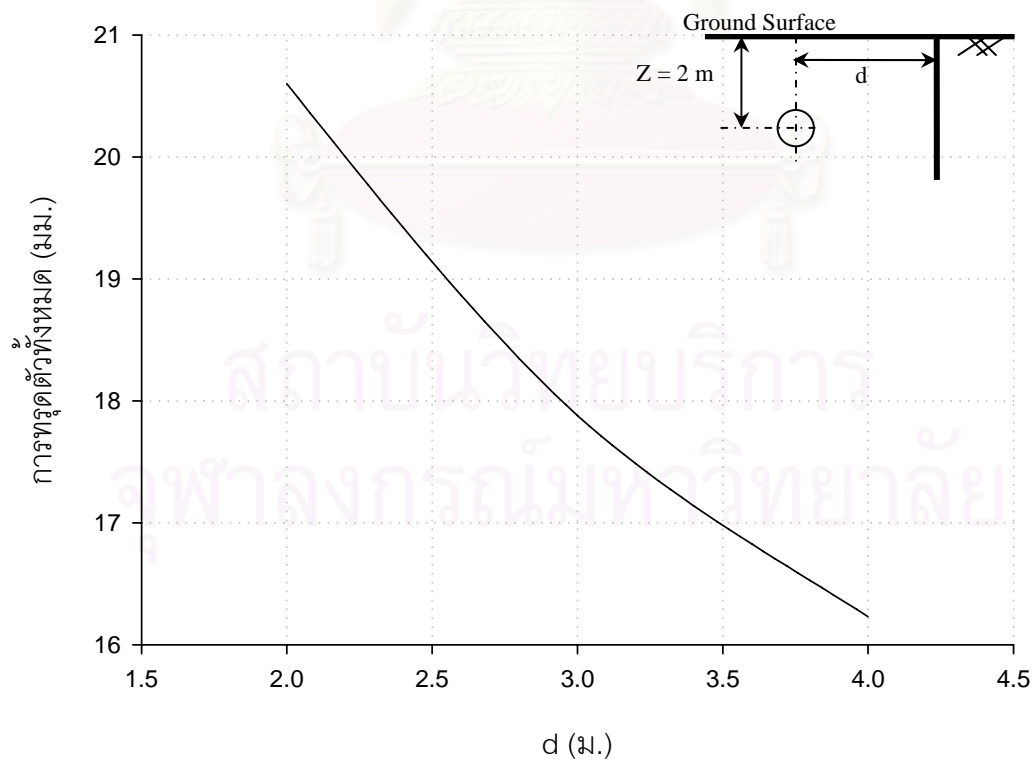
รูปที่ ก-2.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



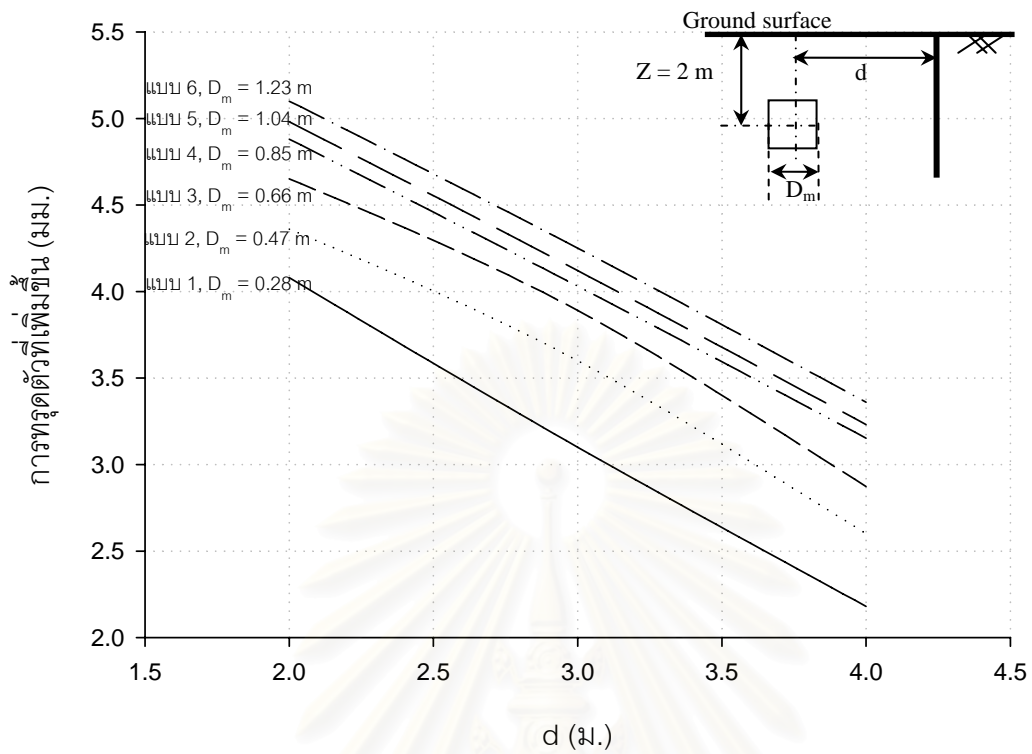
รูปที่ ก-2.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดเนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



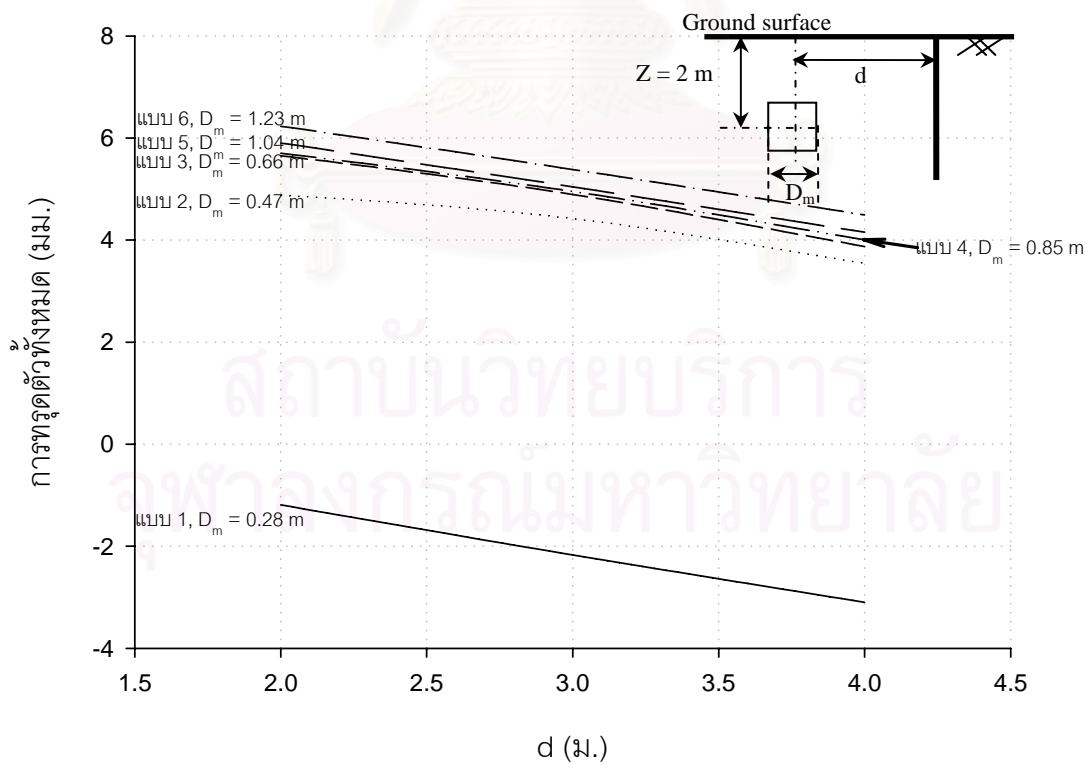
รูปที่ ก-2.9.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



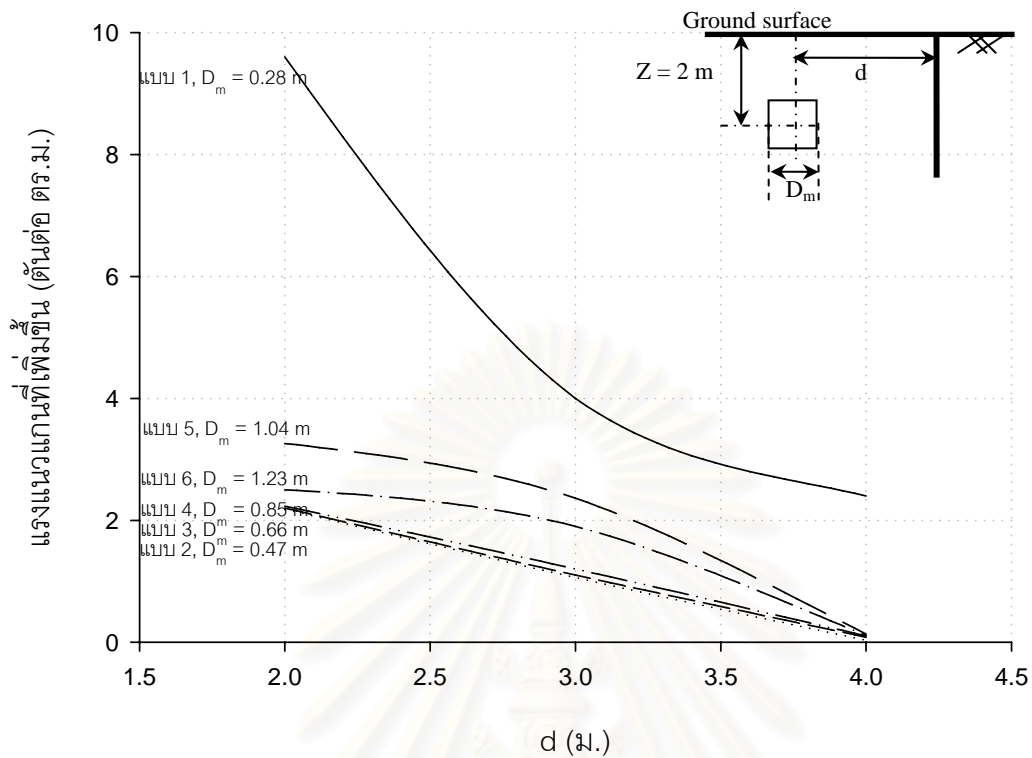
รูปที่ ก-2.9.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



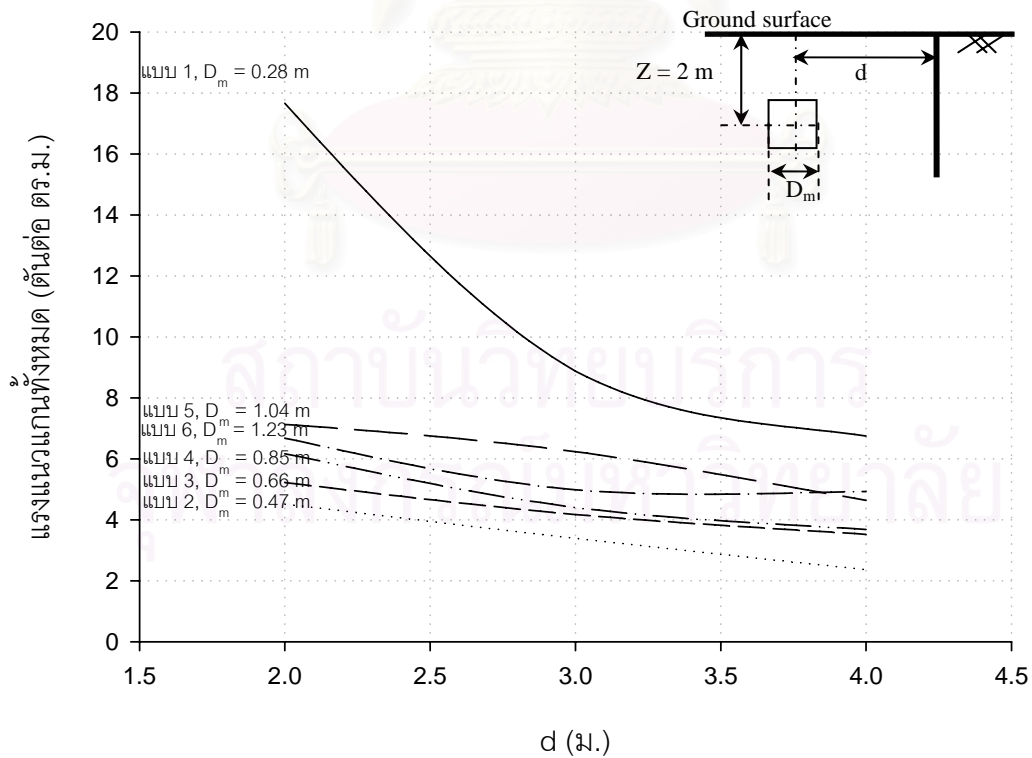
รูปที่ ก-2.10.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



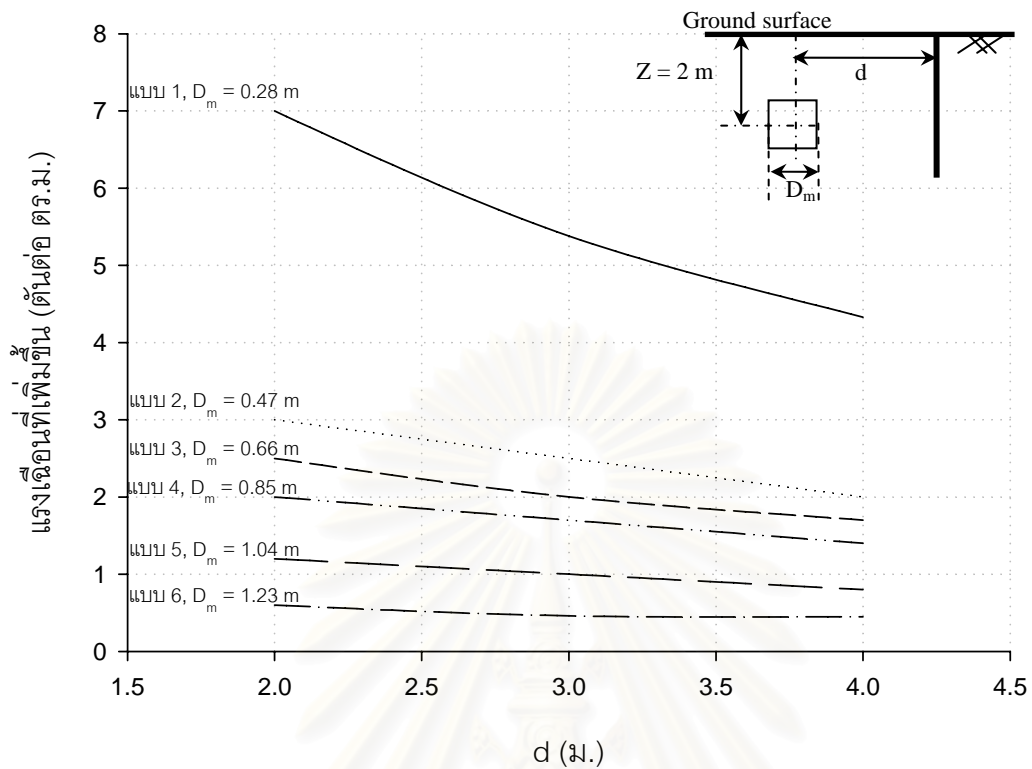
รูปที่ ก-2.10.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



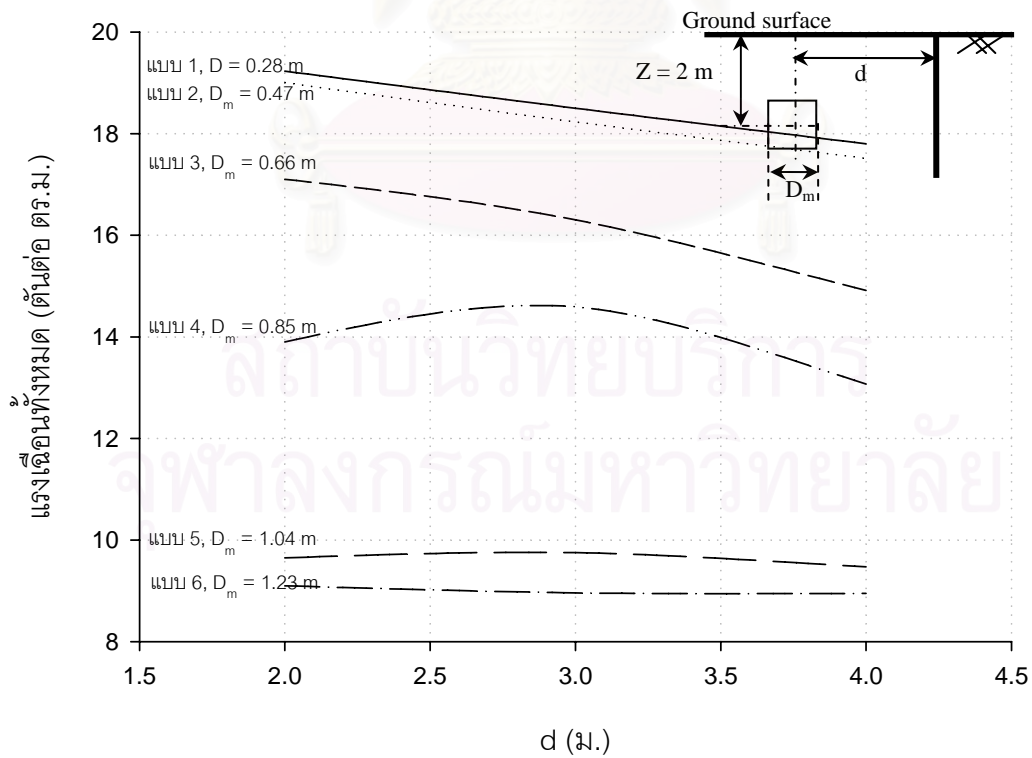
รูปที่ ก-2.11.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



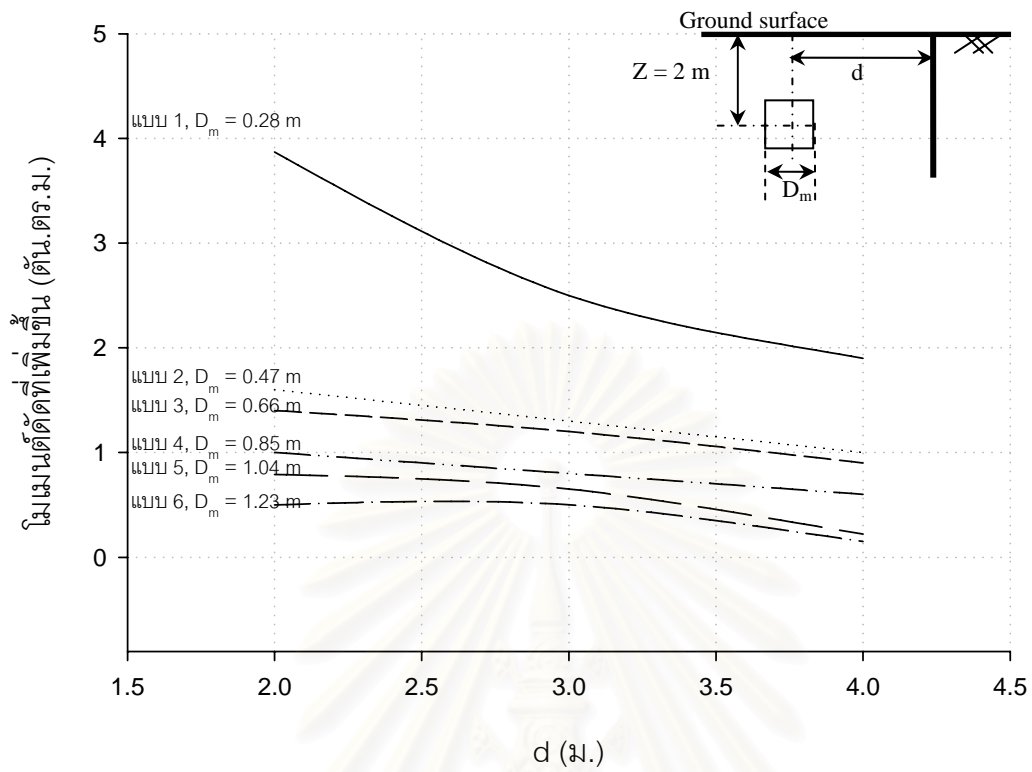
รูปที่ ก-2.11.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



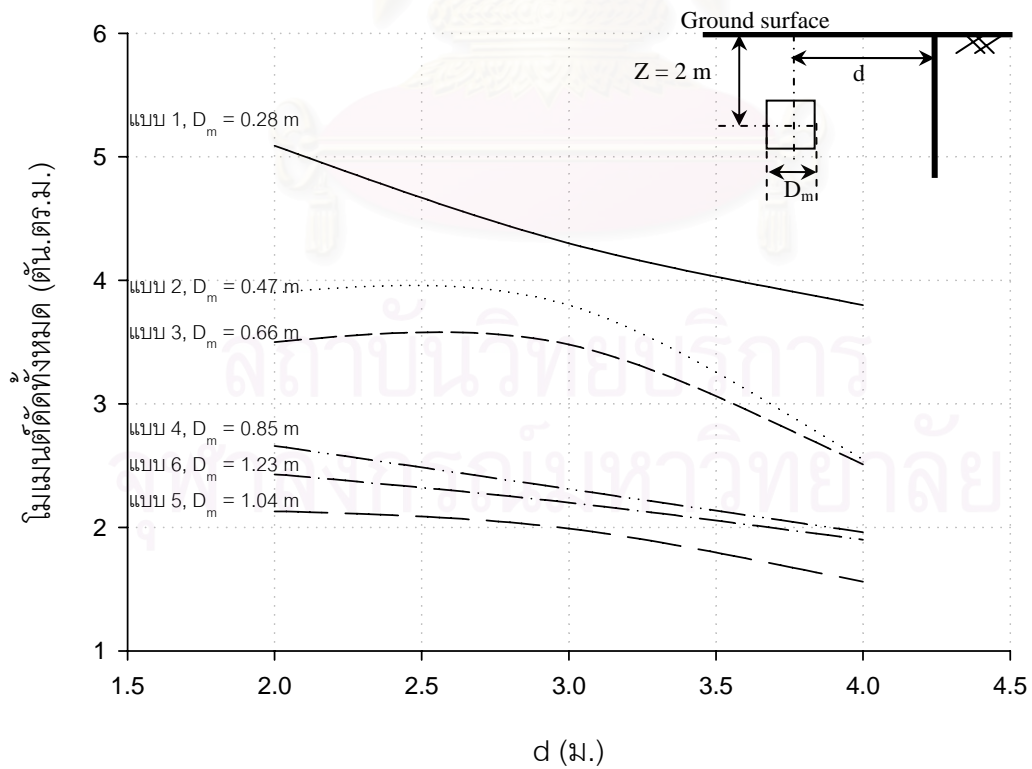
รูปที่ ก-2.12.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



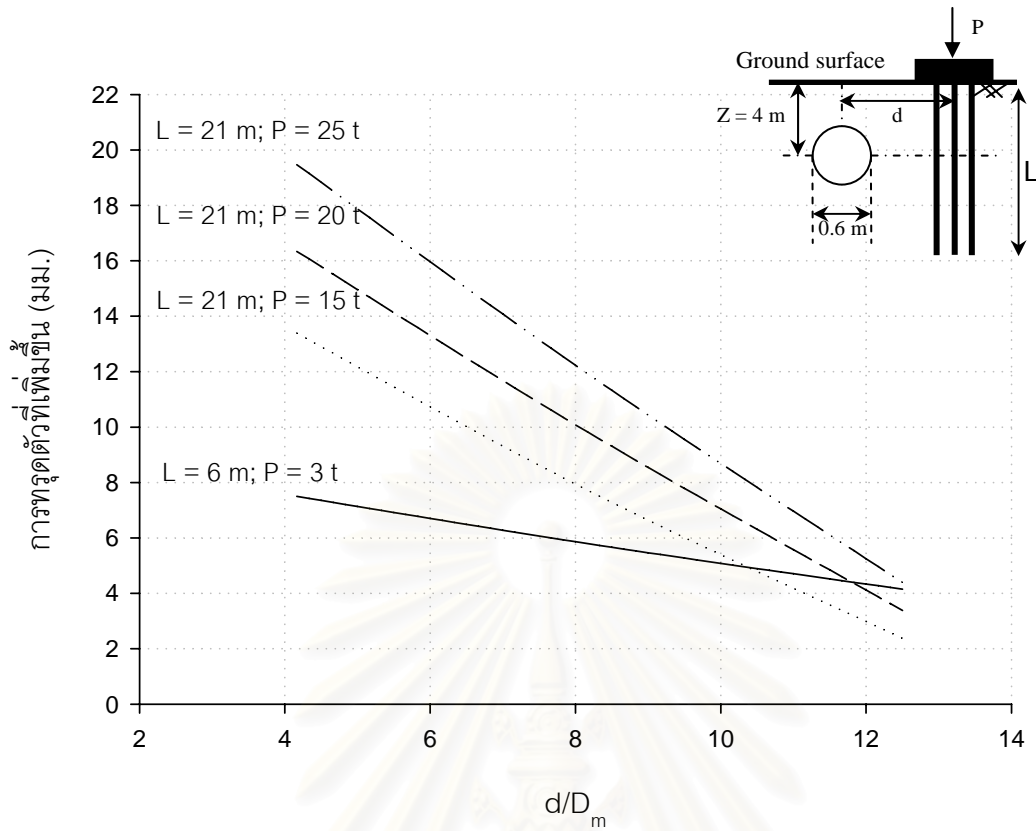
รูปที่ ก-2.12.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพืด



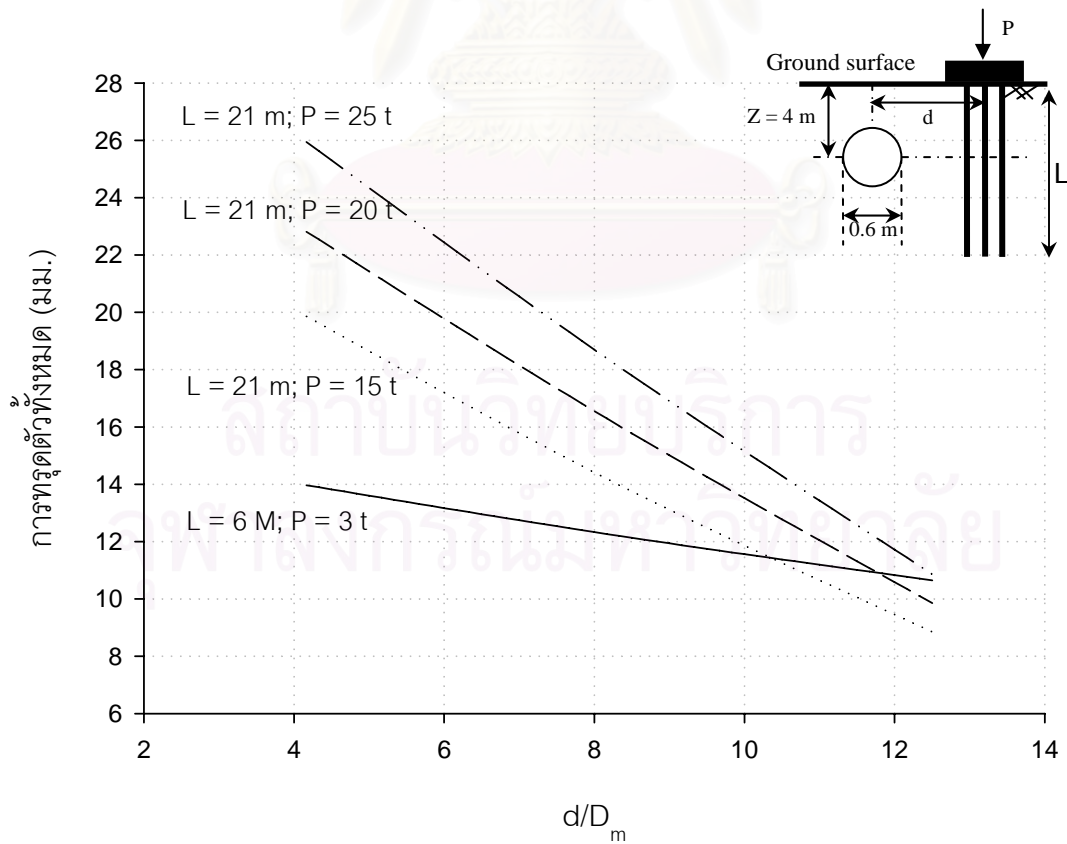
รูปที่ ก-2.13.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพีต



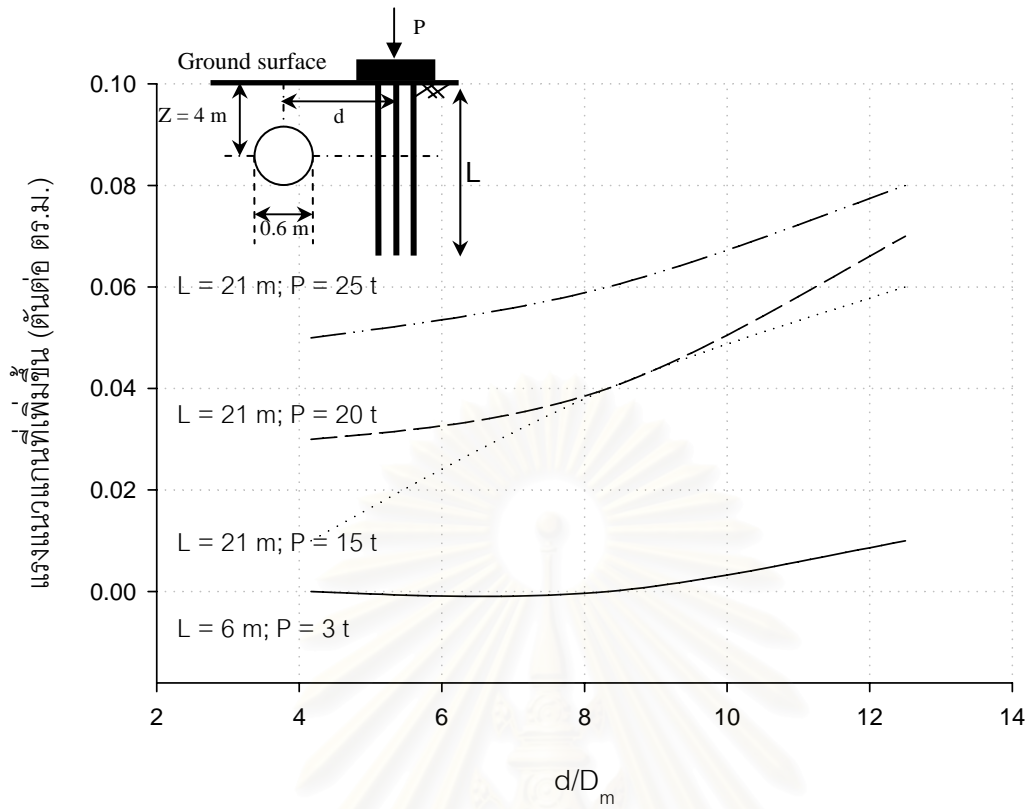
รูปที่ ก-2.13.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อระบบขุดเปิดหน้าดิน เนื่องจากผลกระทบของเข็มพีต



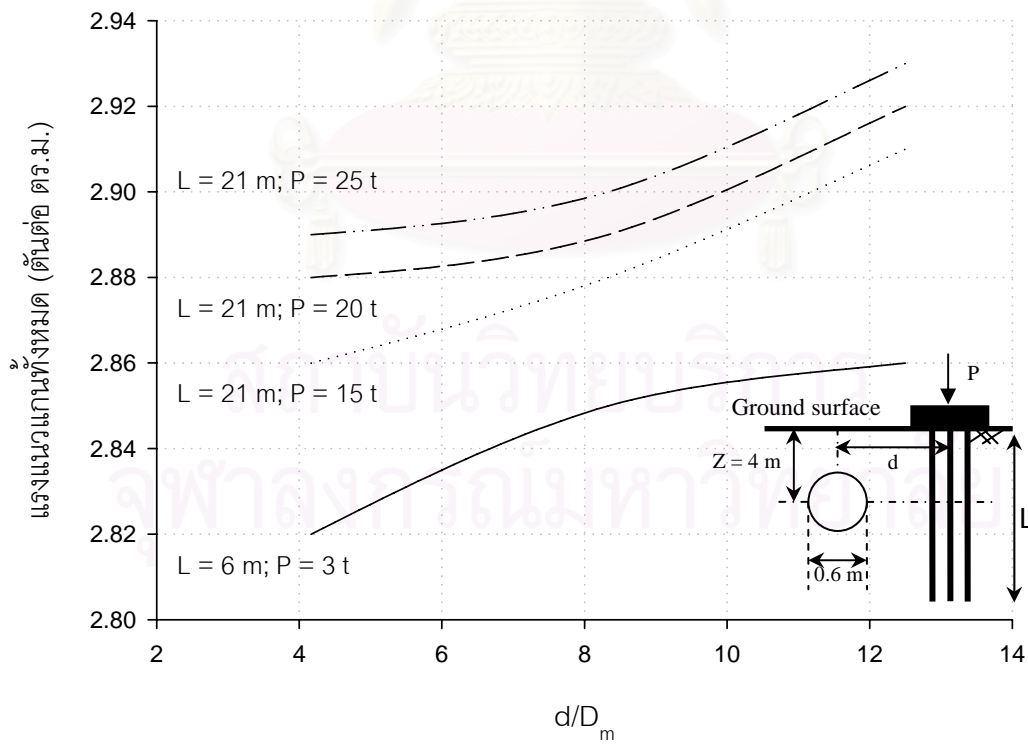
รูปที่ ก-3.1.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



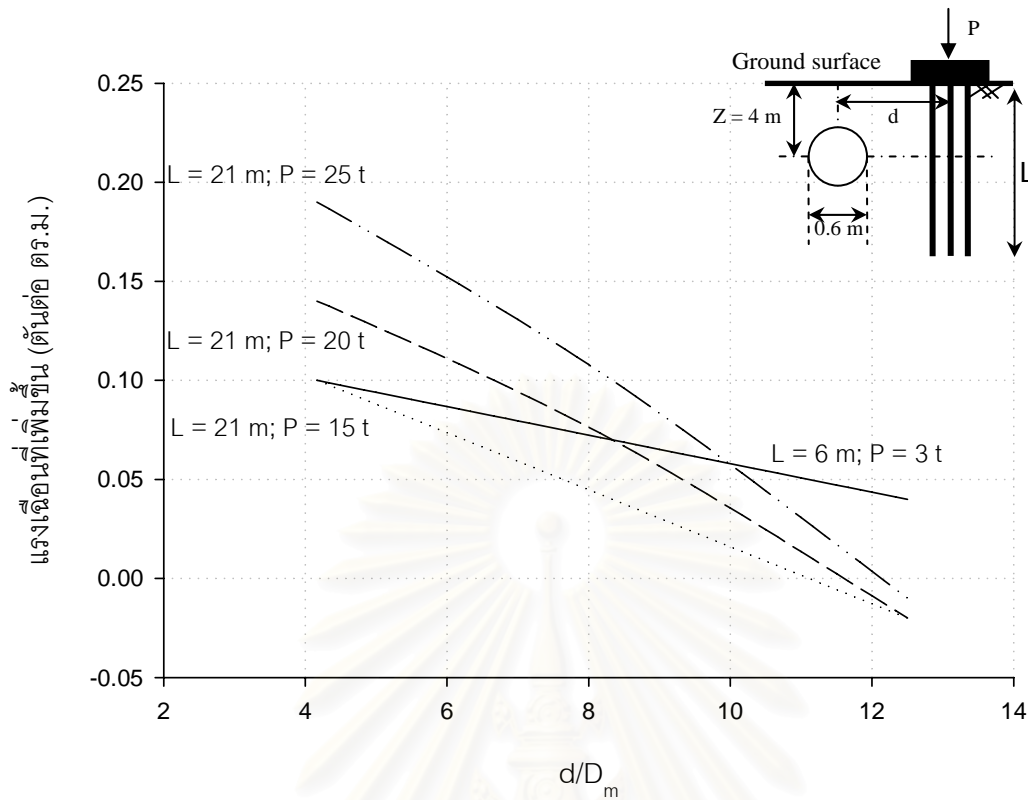
รูปที่ ก-3.1.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



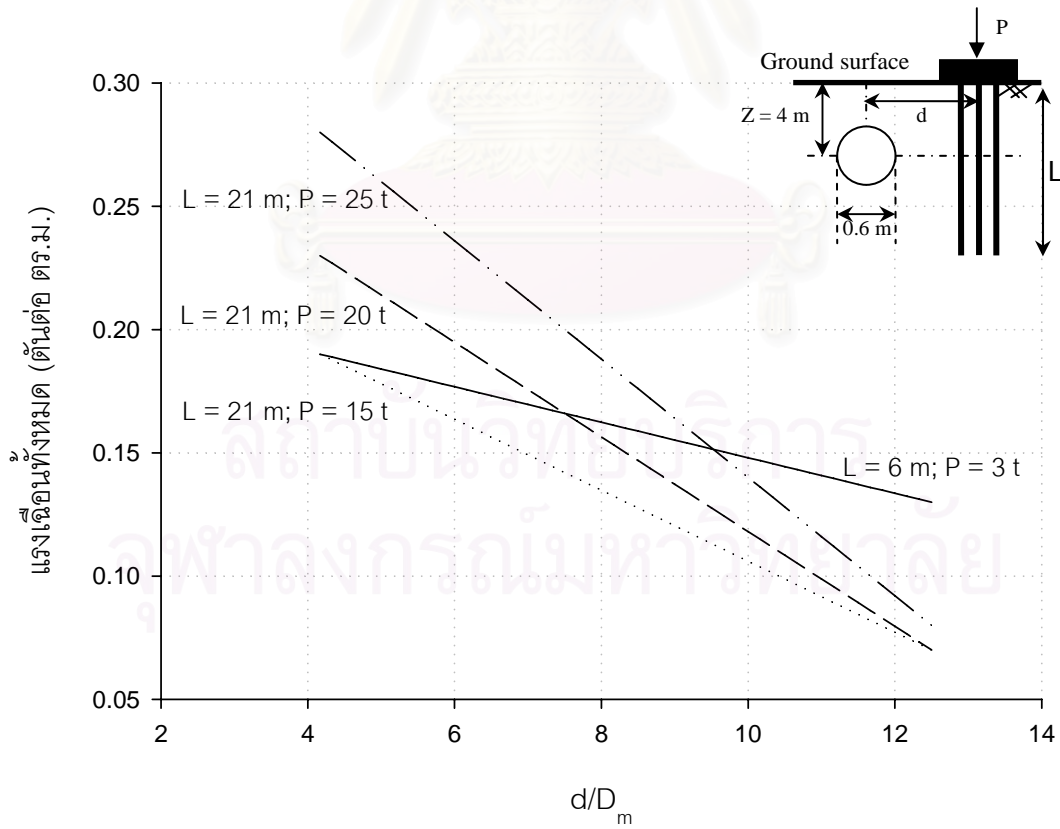
รูปที่ ก-3.1.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



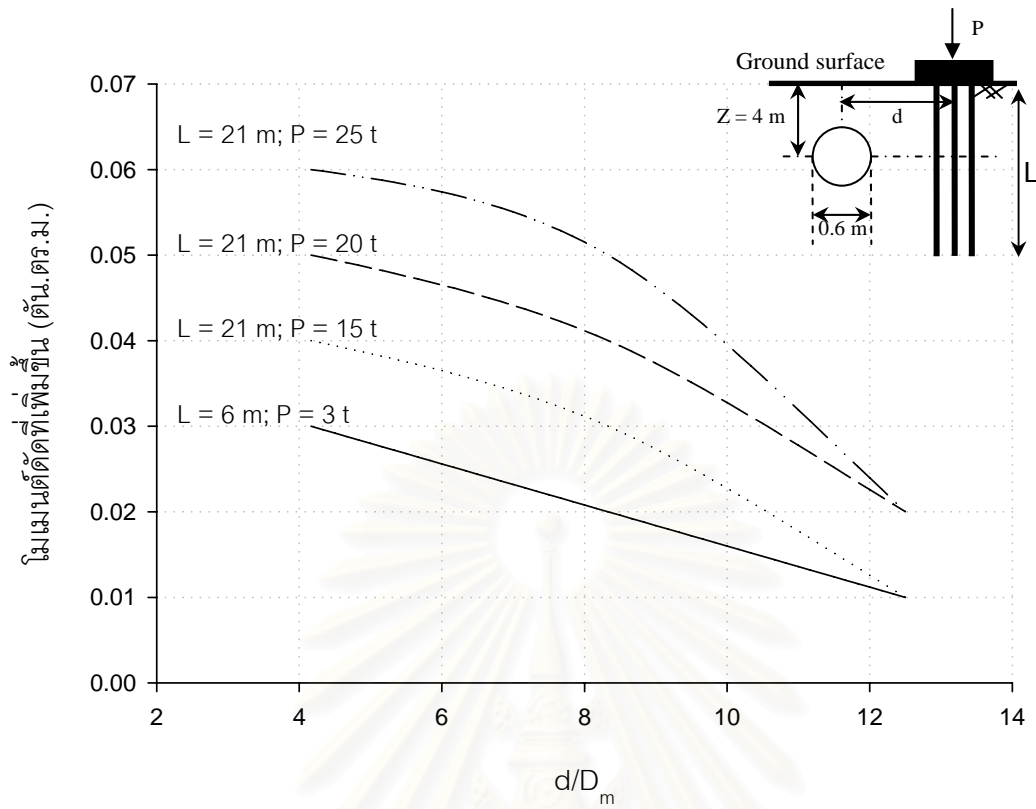
รูปที่ ก-3.1.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



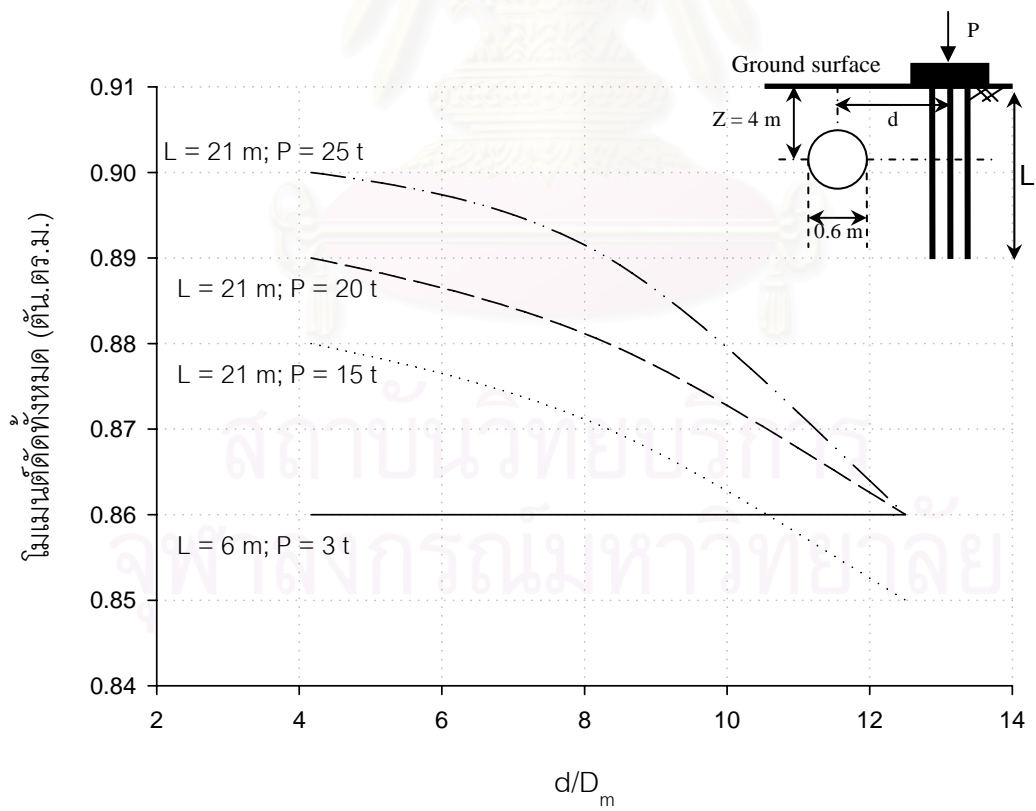
รูปที่ ก-3.1.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



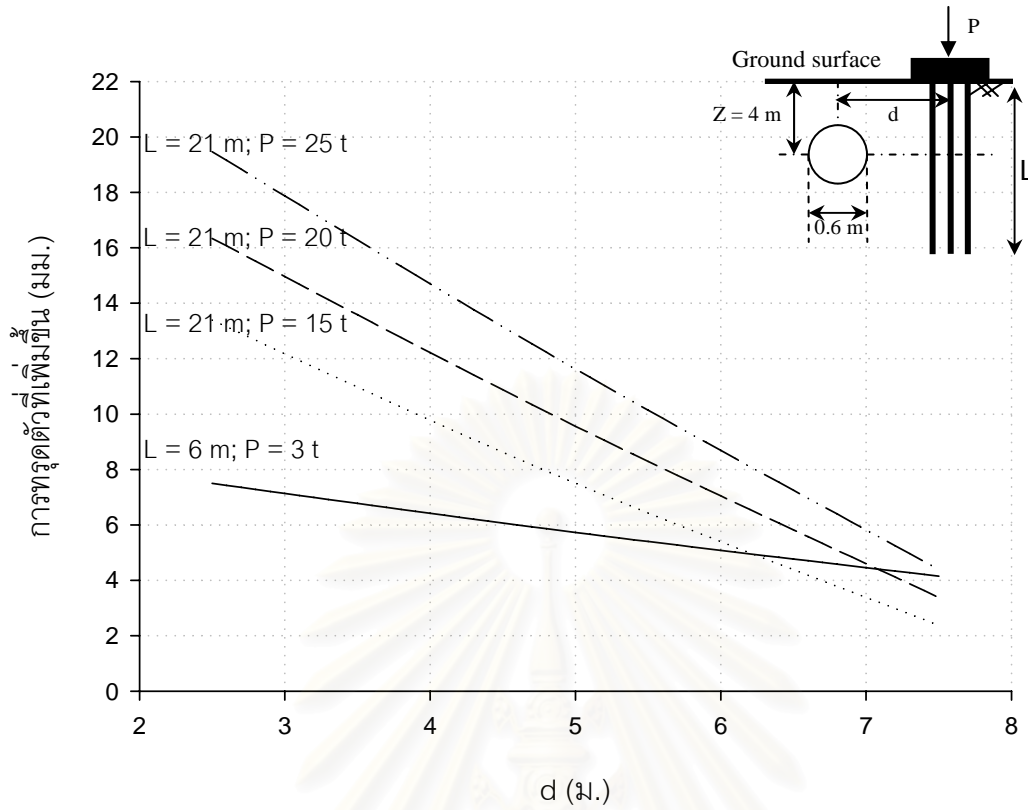
รูปที่ ก-3.1.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



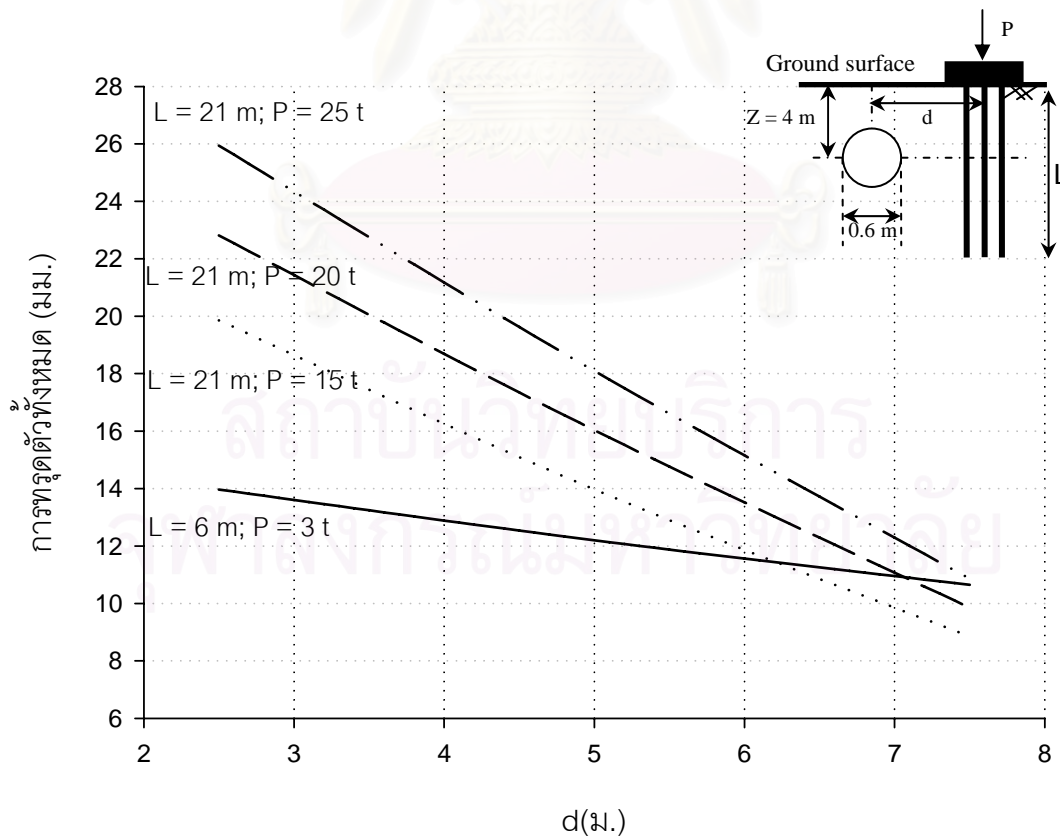
รูปที่ ก-3.1.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



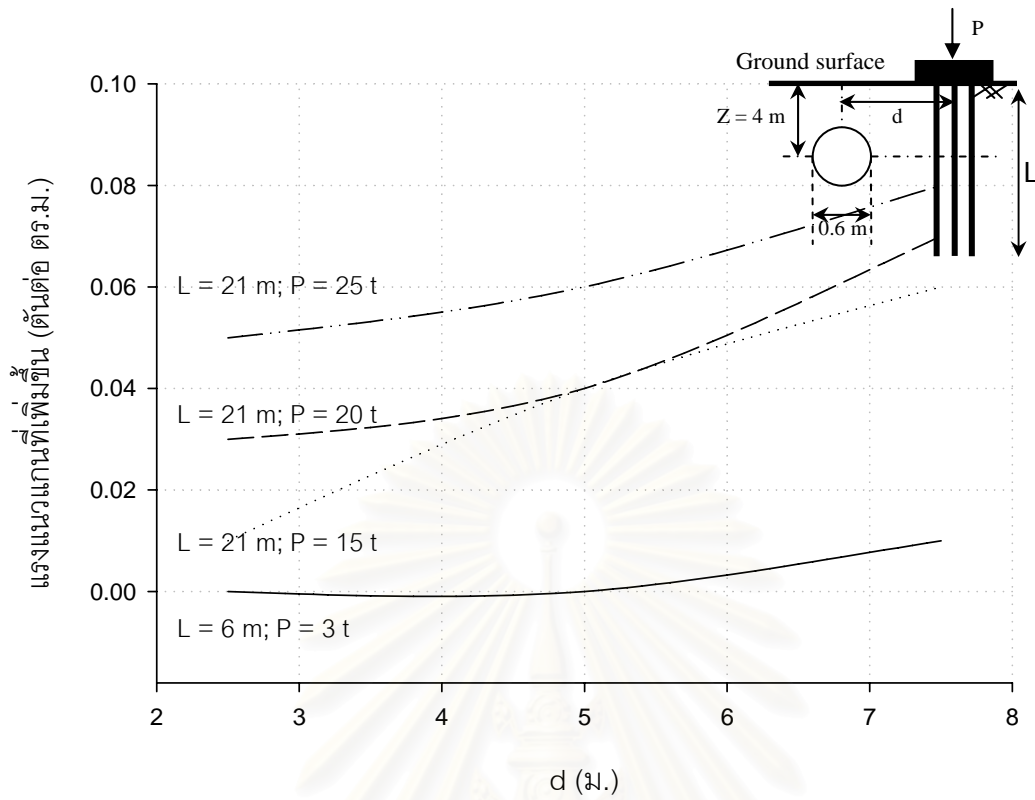
รูปที่ ก-3.1.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



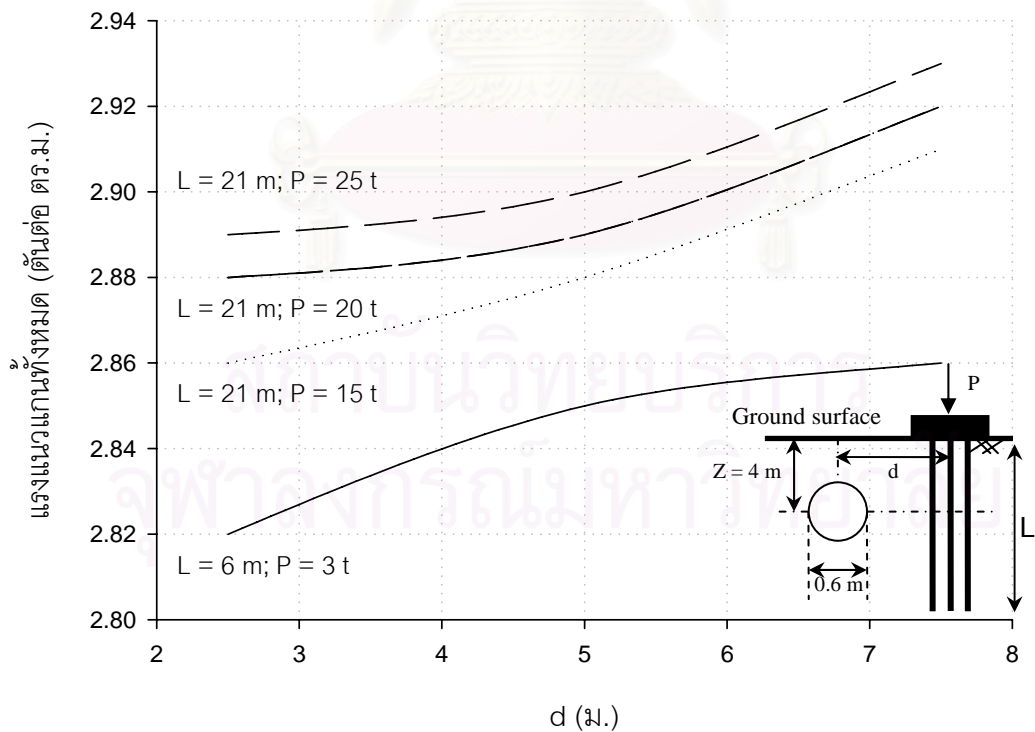
รูปที่ ก-3.1.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



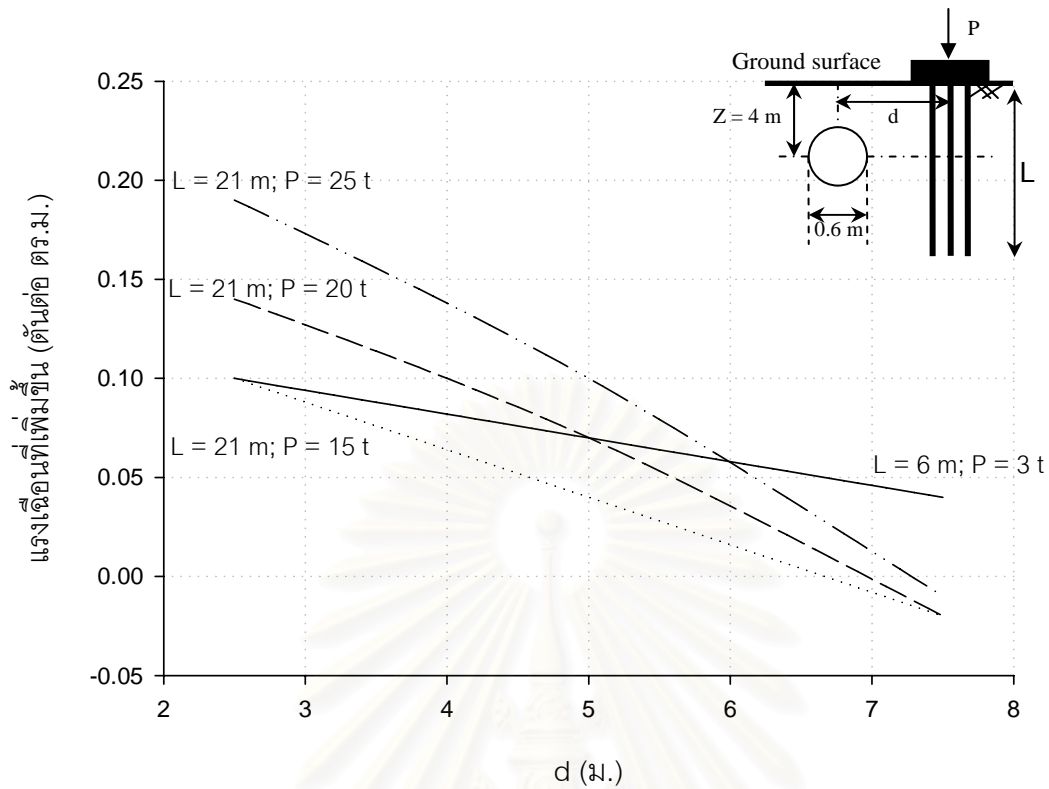
รูปที่ ก-3.1.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



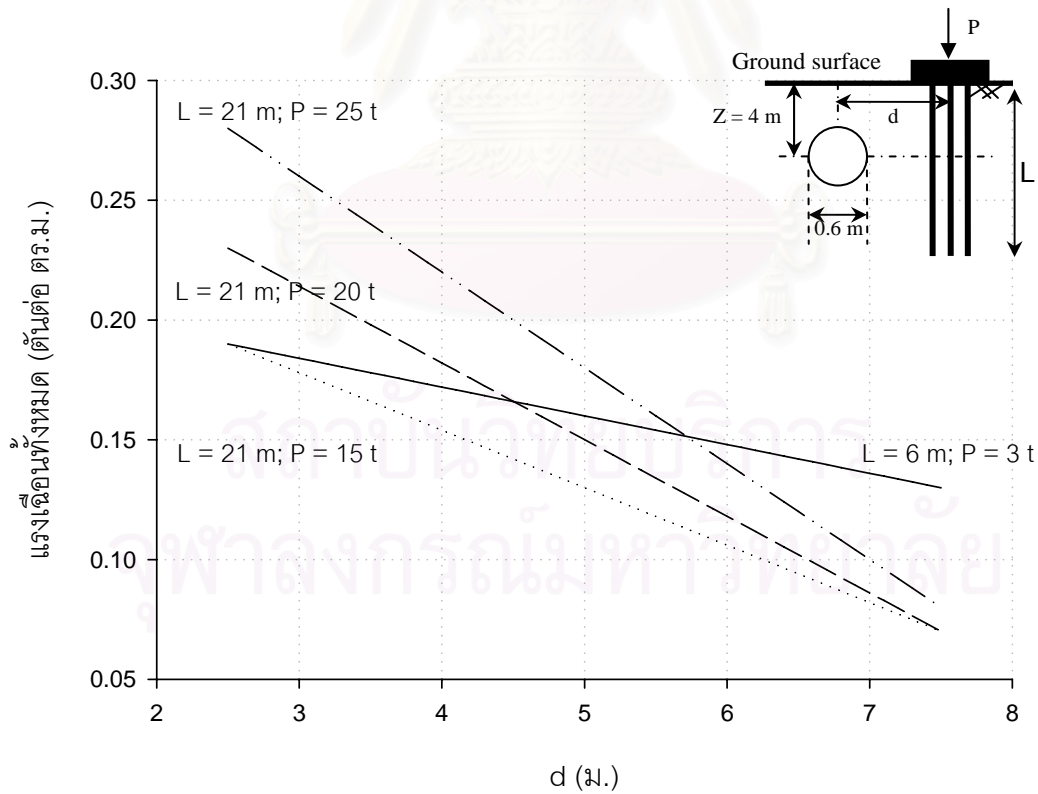
รูปที่ ก-3.1.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



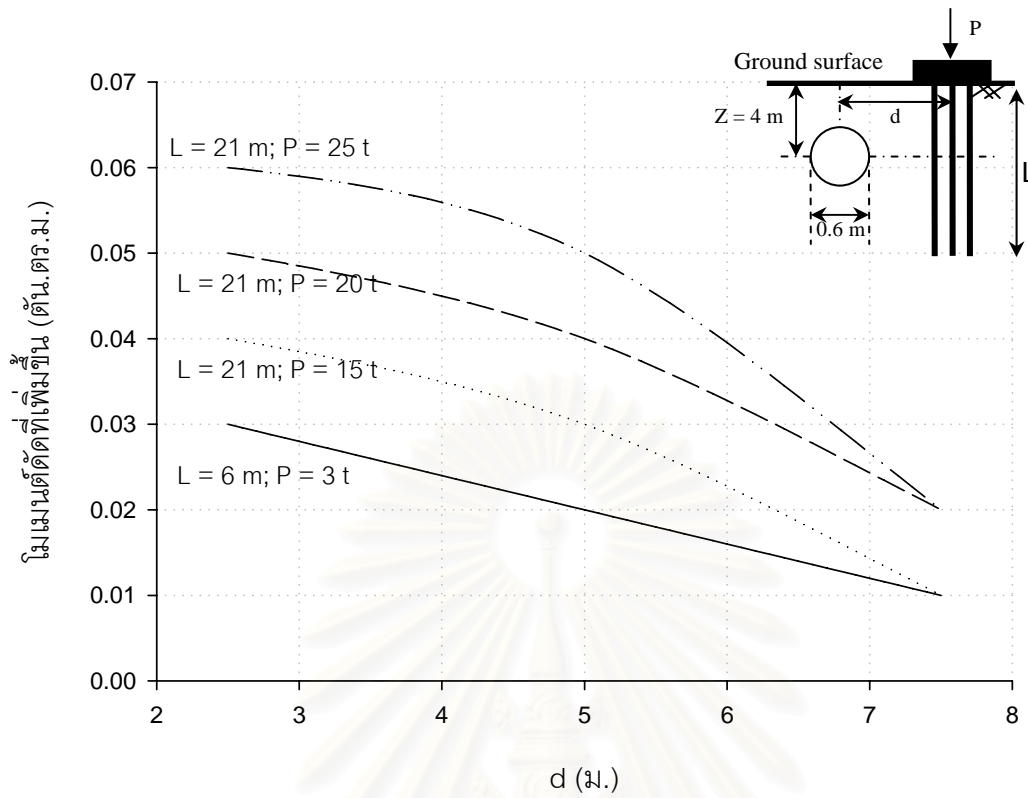
รูปที่ ก-3.1.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



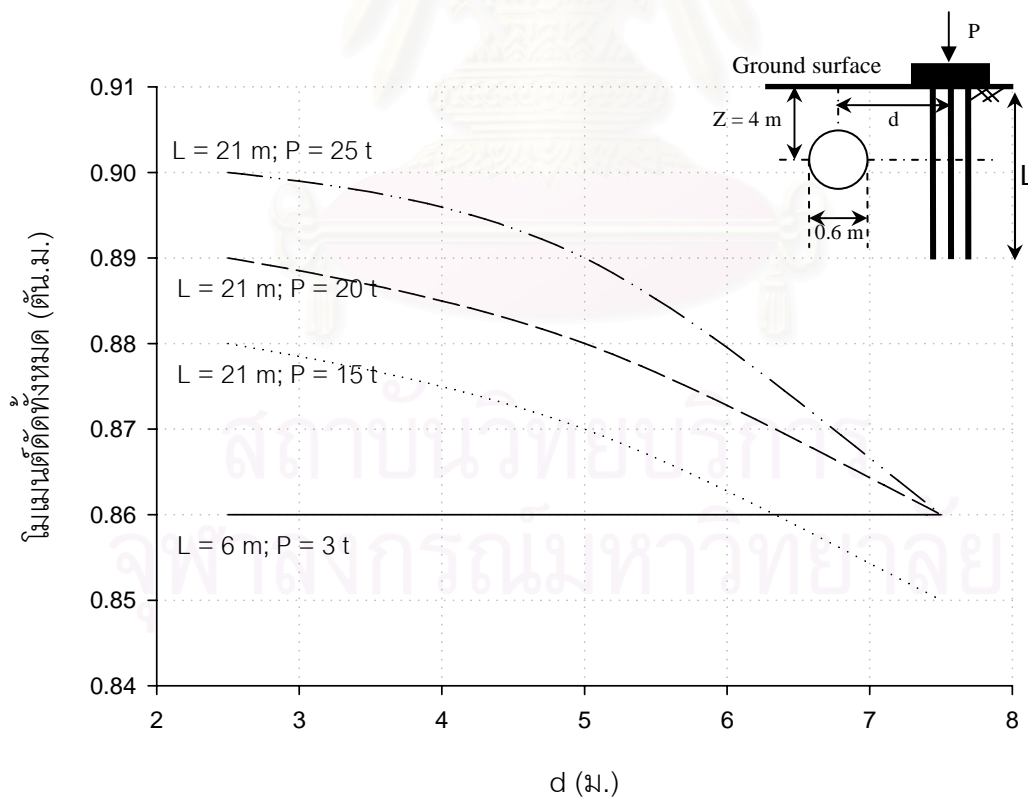
รูปที่ ก-3.1.7.1 แรงเค้นที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



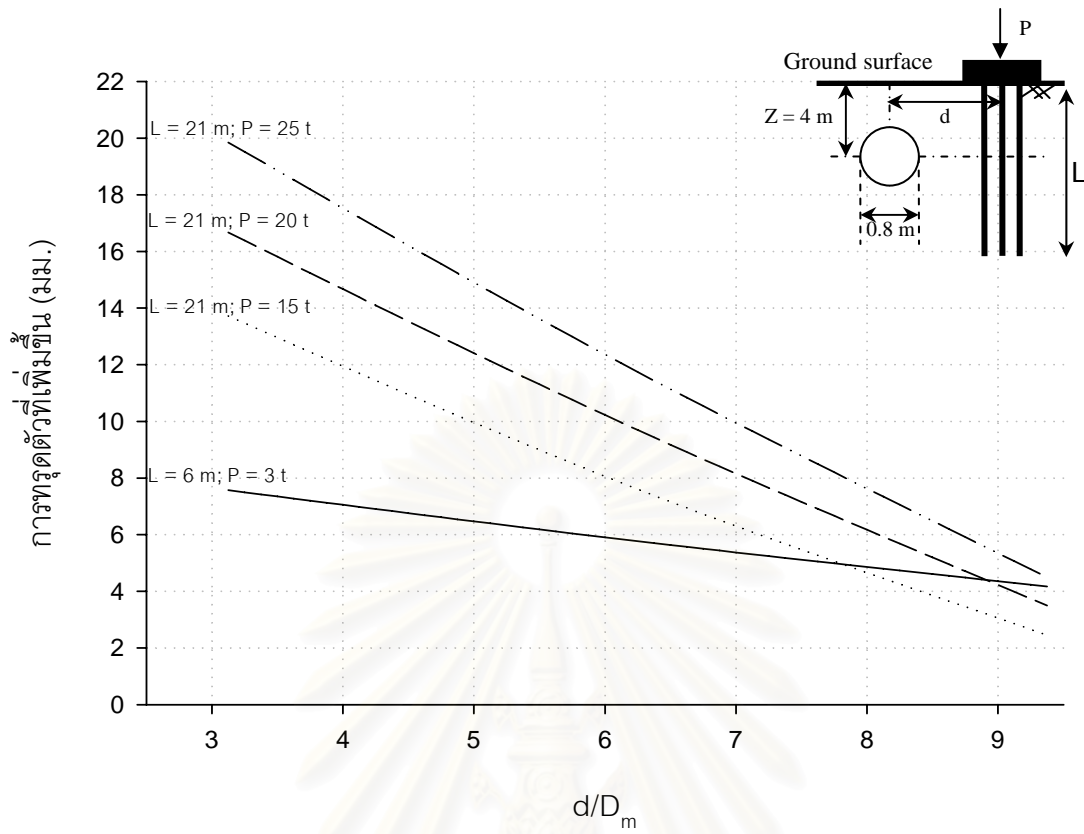
รูปที่ ก-3.1.7.2 แรงเค้นทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



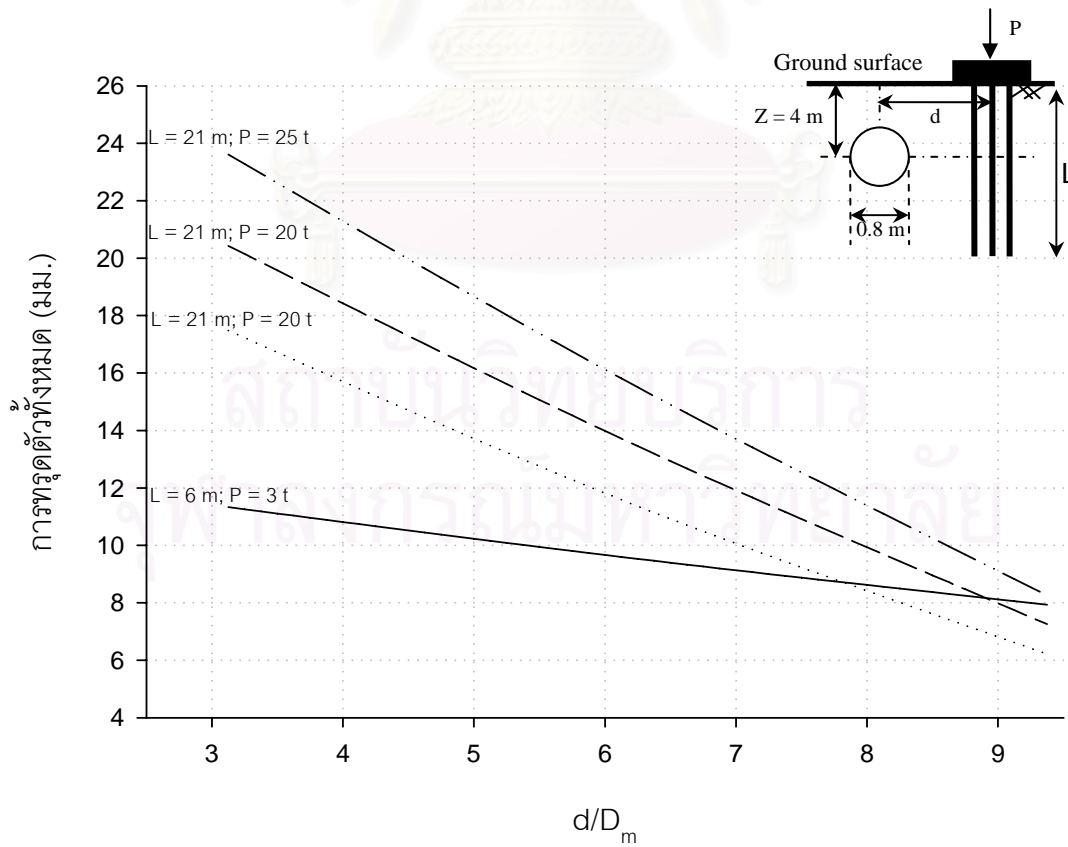
รูปที่ ก-3.1.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



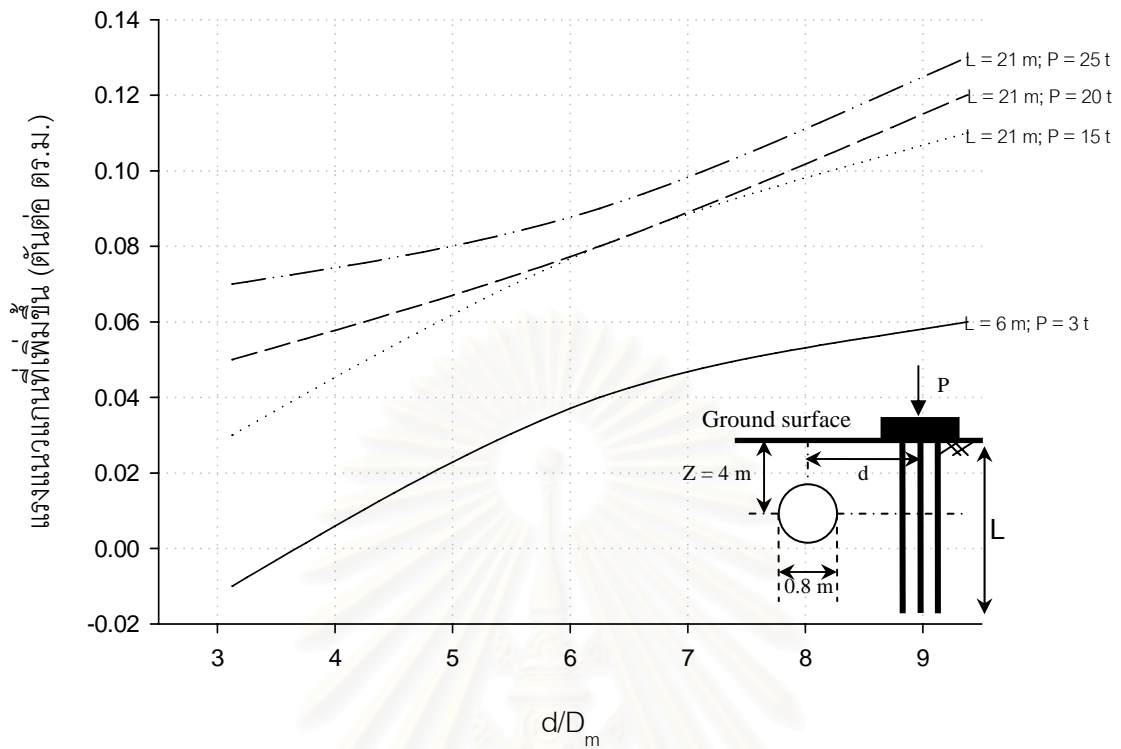
รูปที่ ก-3.1.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.6 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



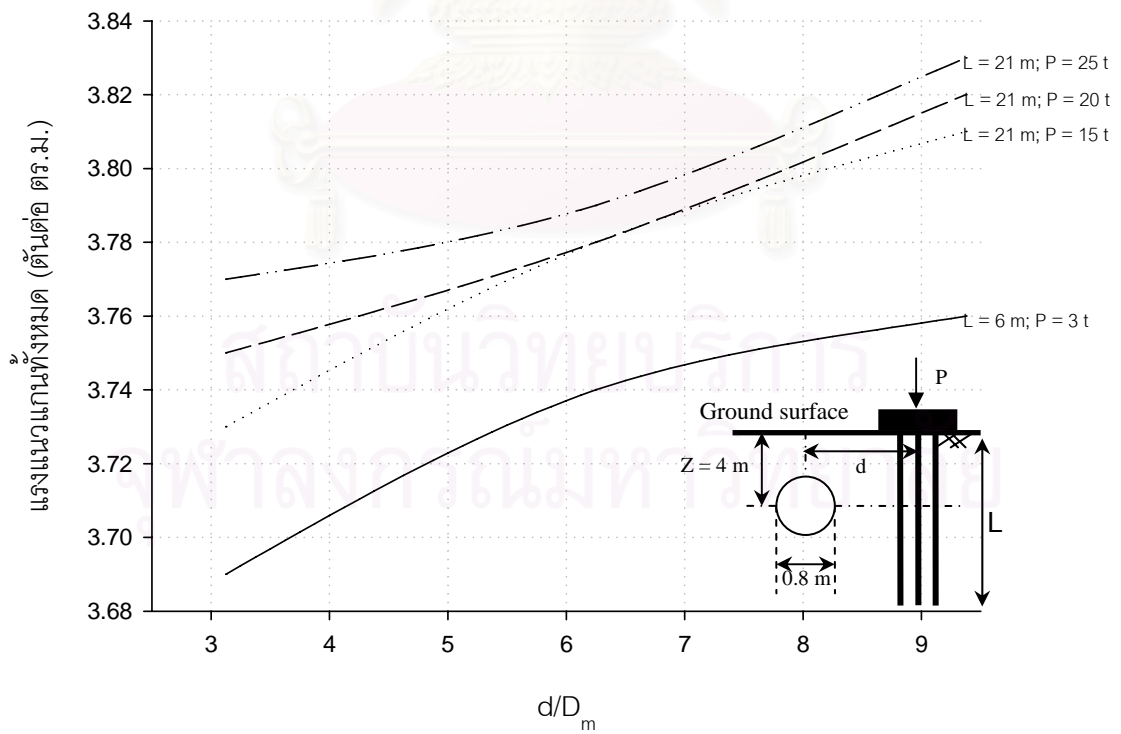
รูปที่ ก-3.2.1.1 การทรุดตัวของหัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



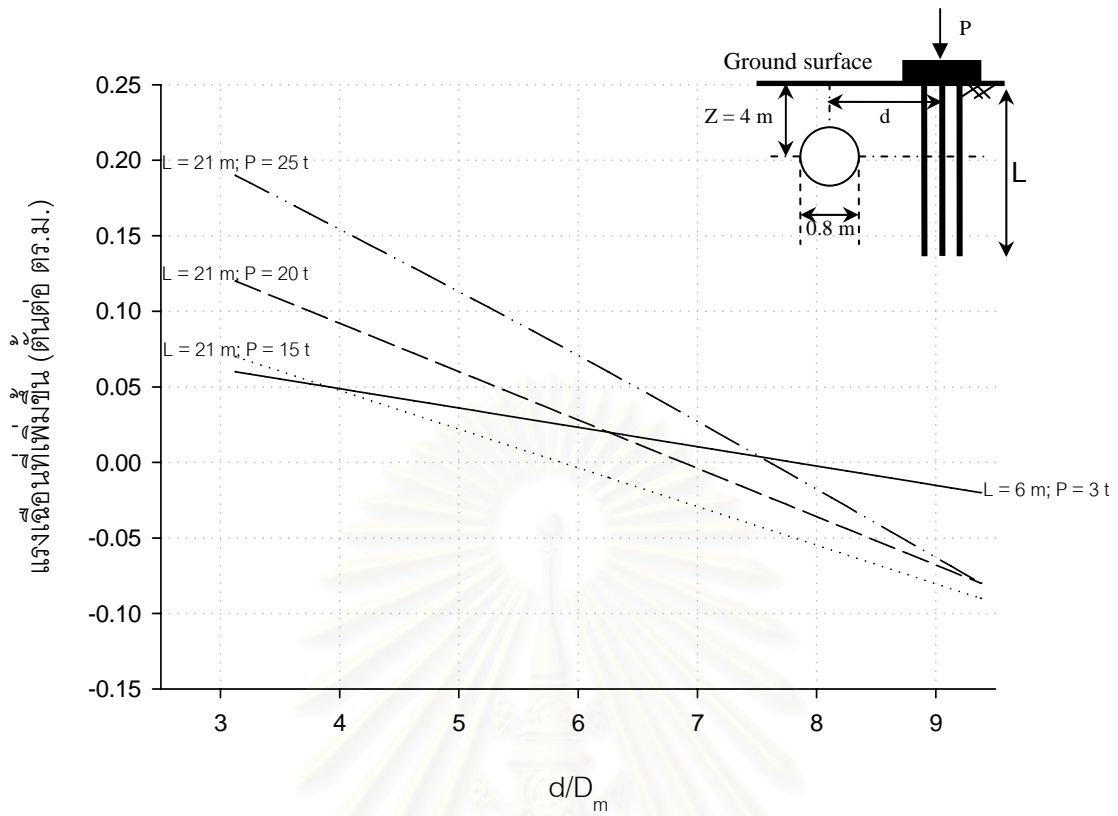
รูปที่ ก-3.2.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



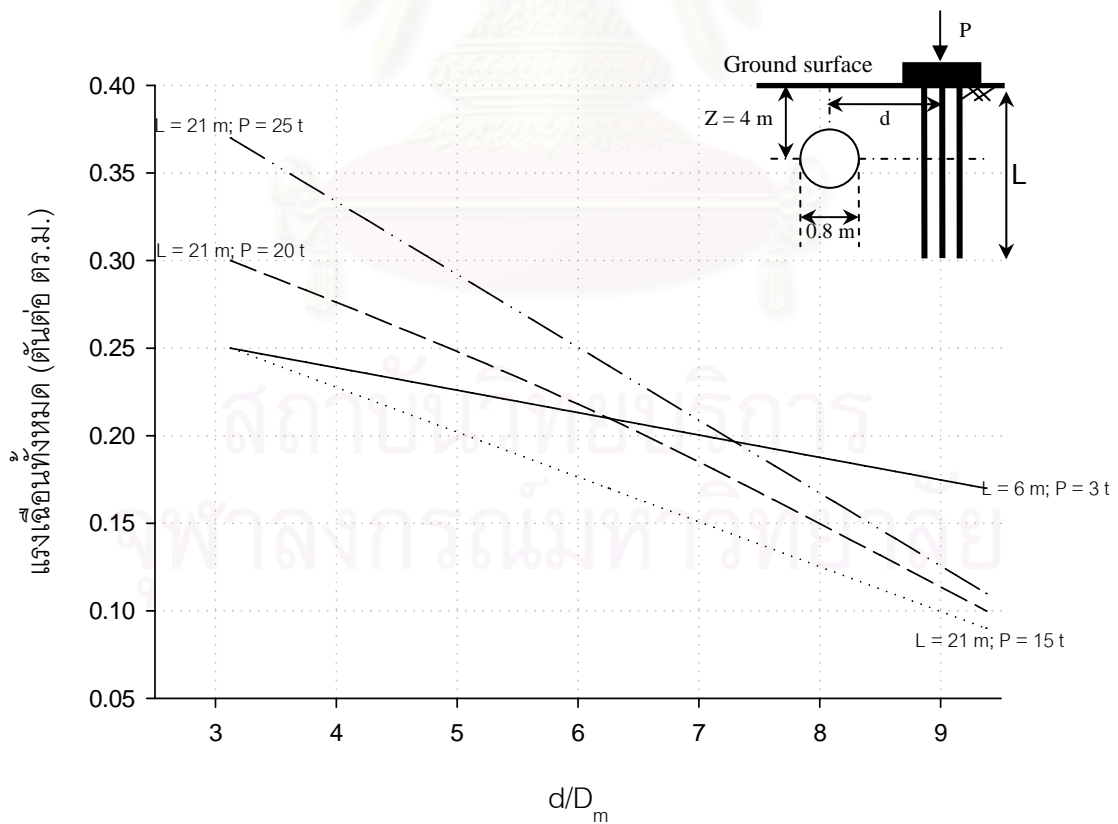
รูปที่ ก-3.2.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



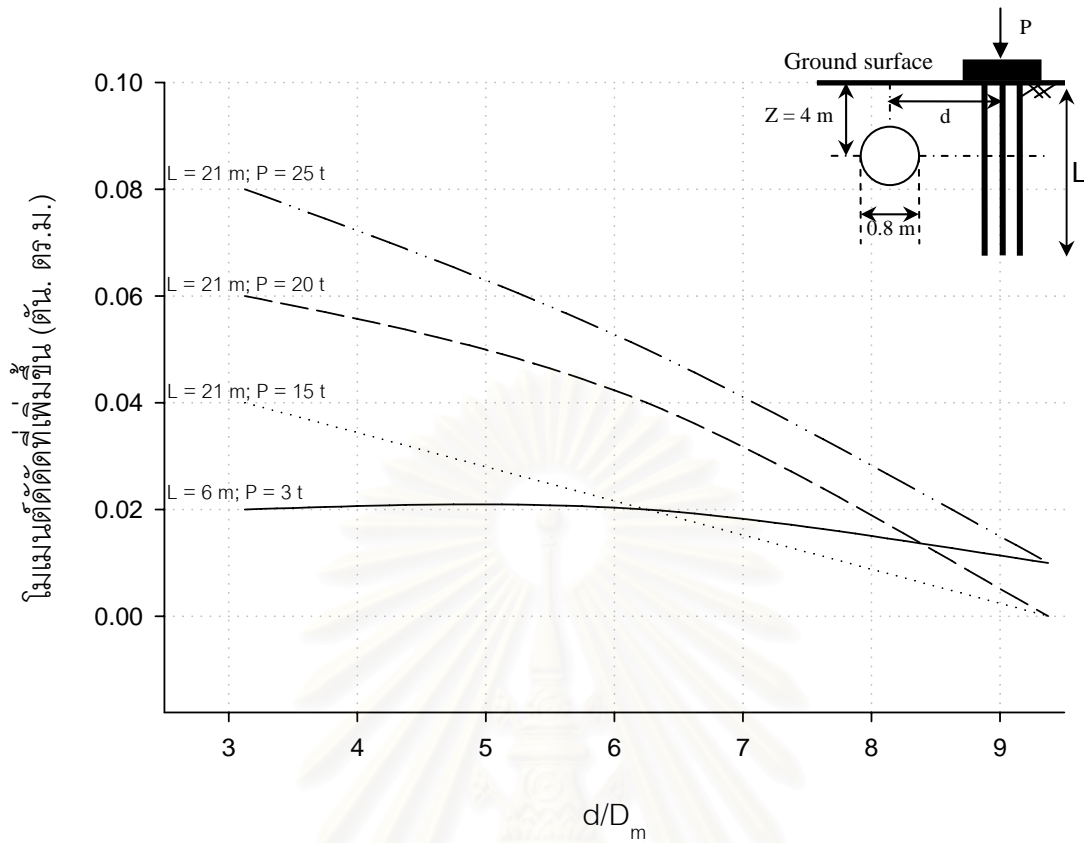
รูปที่ ก-3.2.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



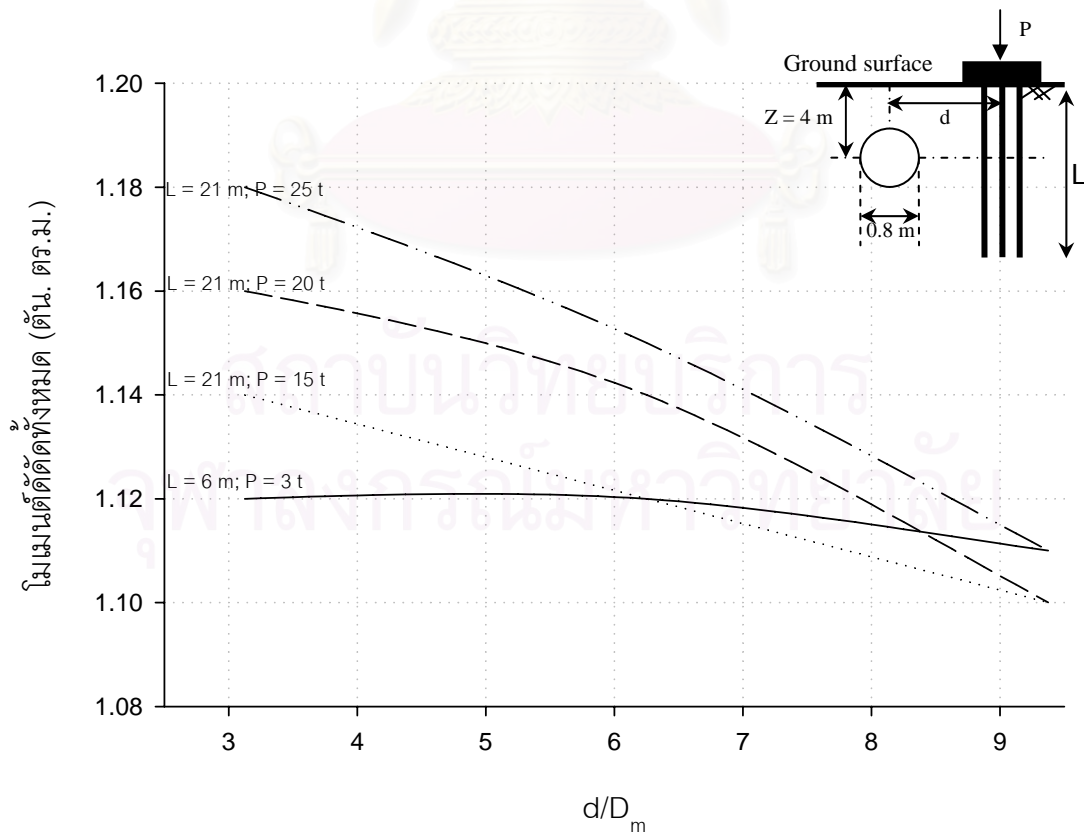
รูปที่ ก-3.2.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



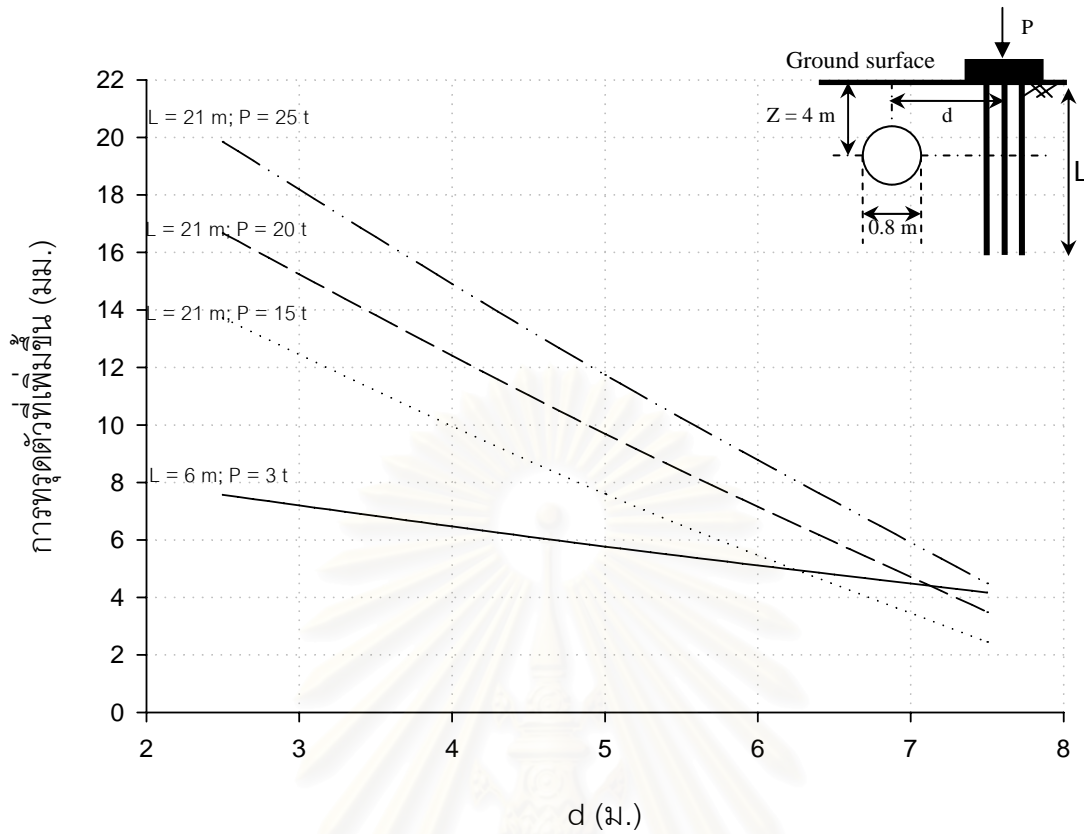
รูปที่ ก-3.2.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



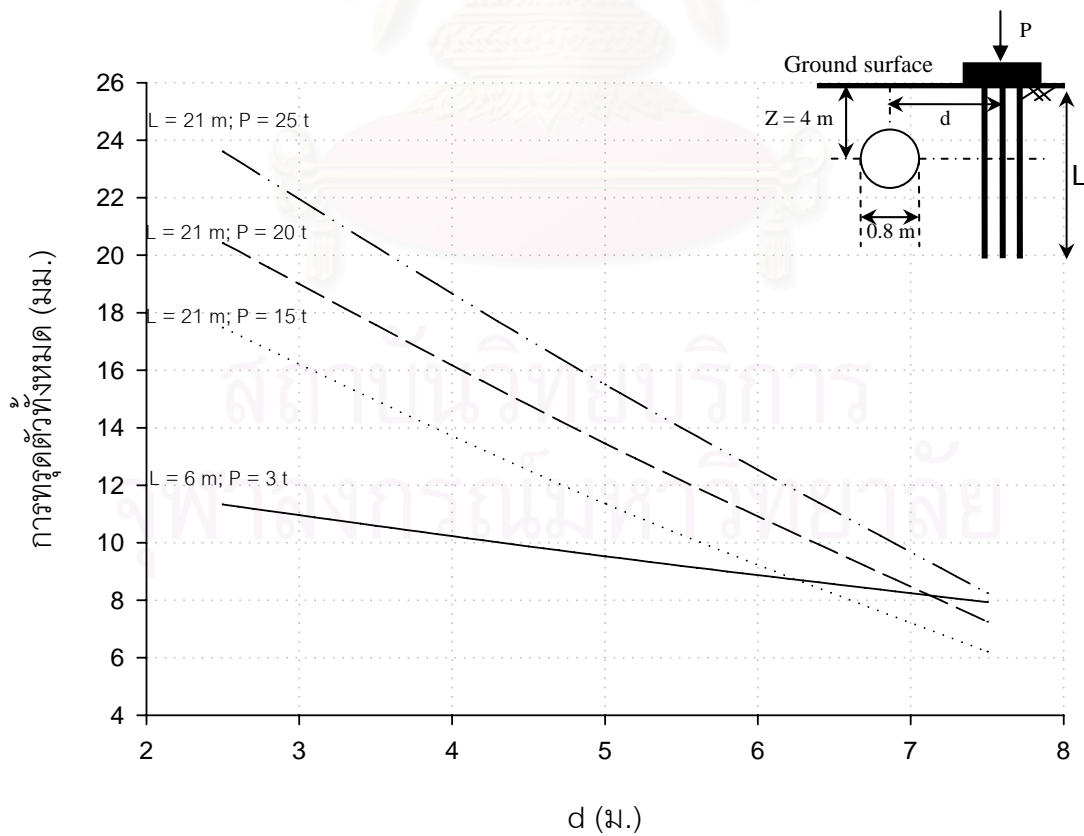
รูปที่ ก-3.2.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



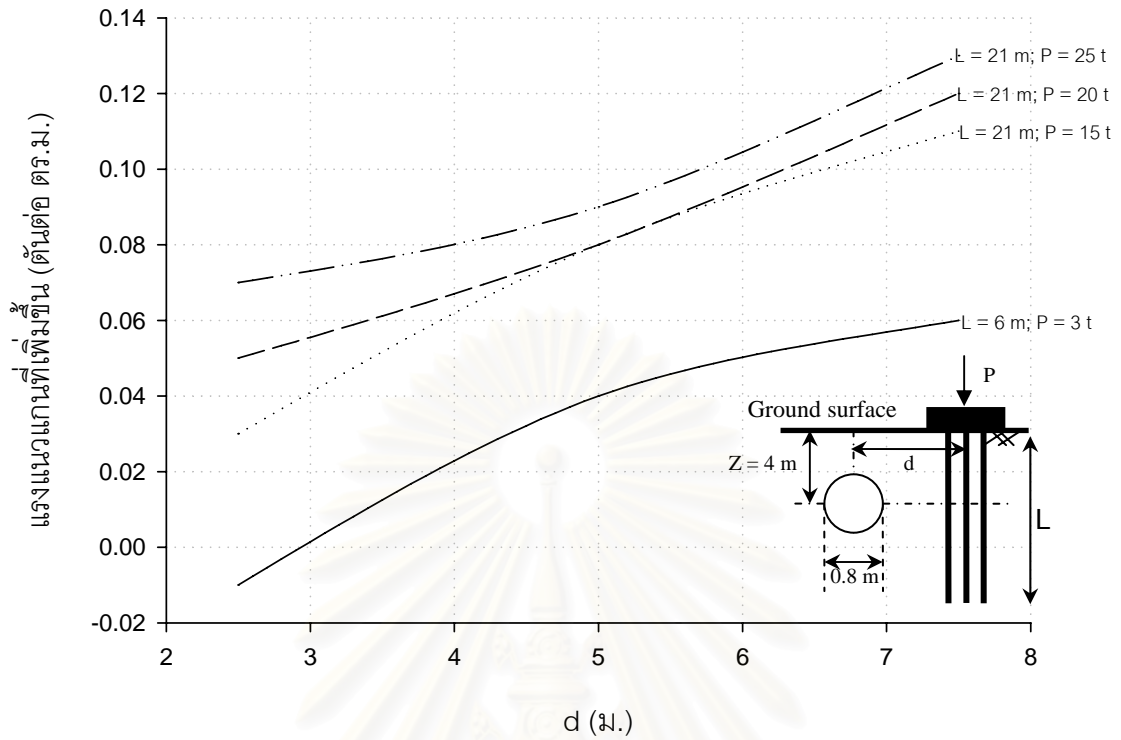
รูปที่ ก-3.2.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



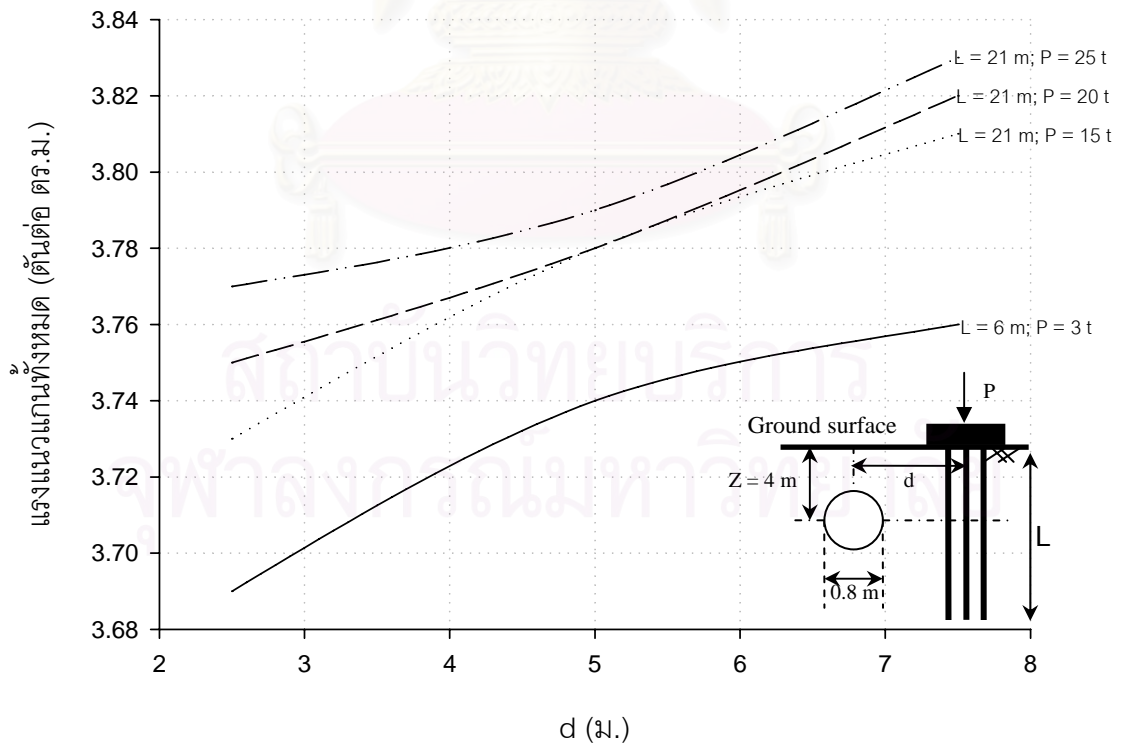
รูปที่ ก-3.2.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



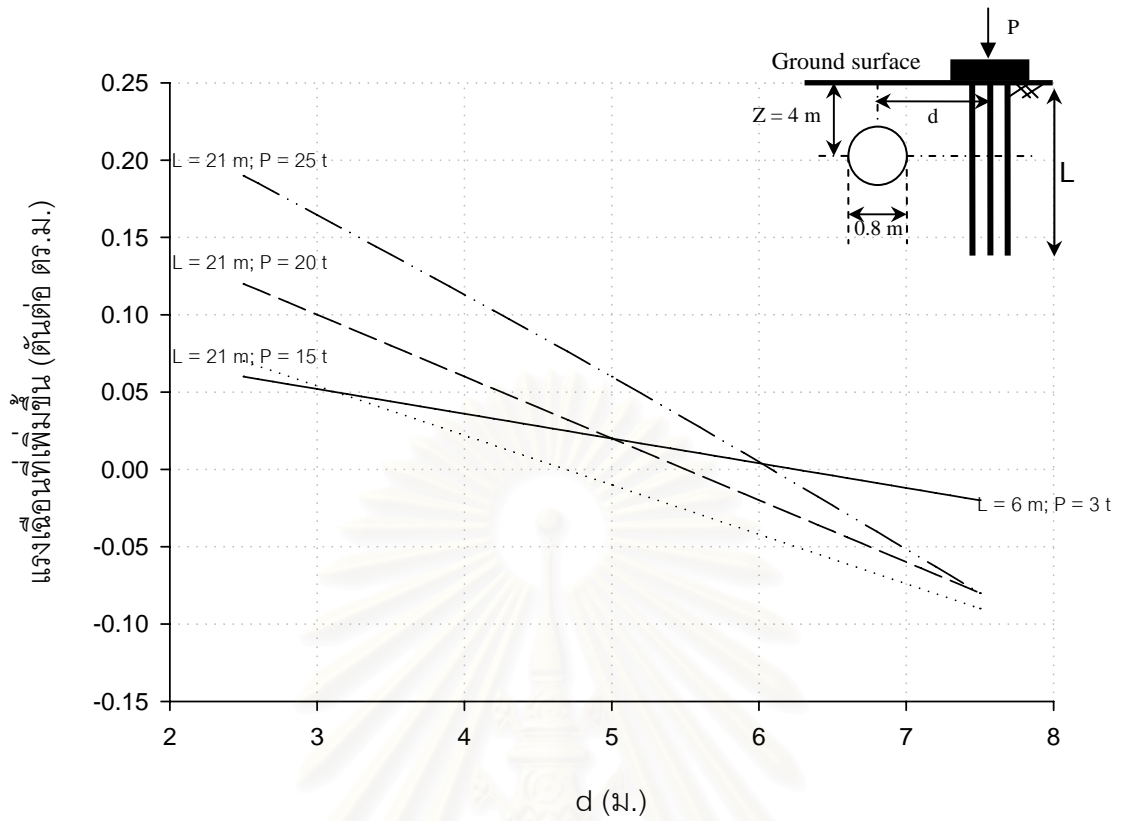
รูปที่ ก-3.2.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



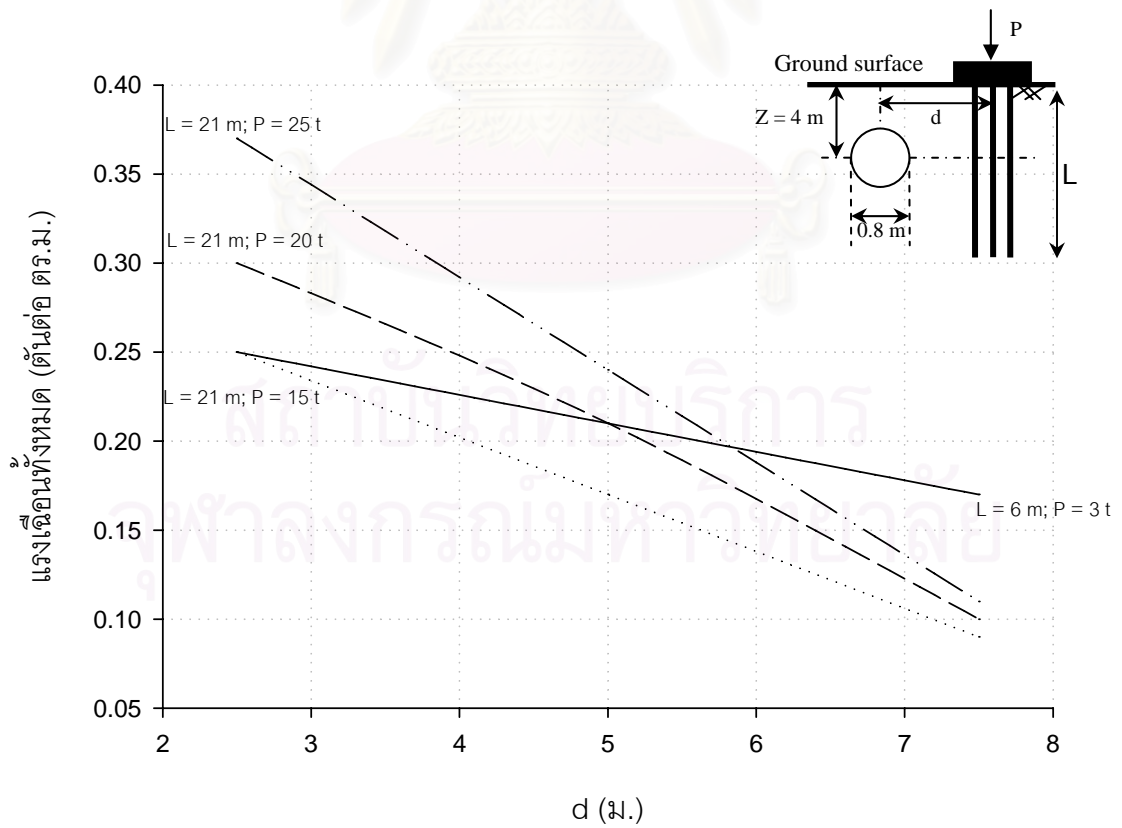
รูปที่ ก-3.2.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



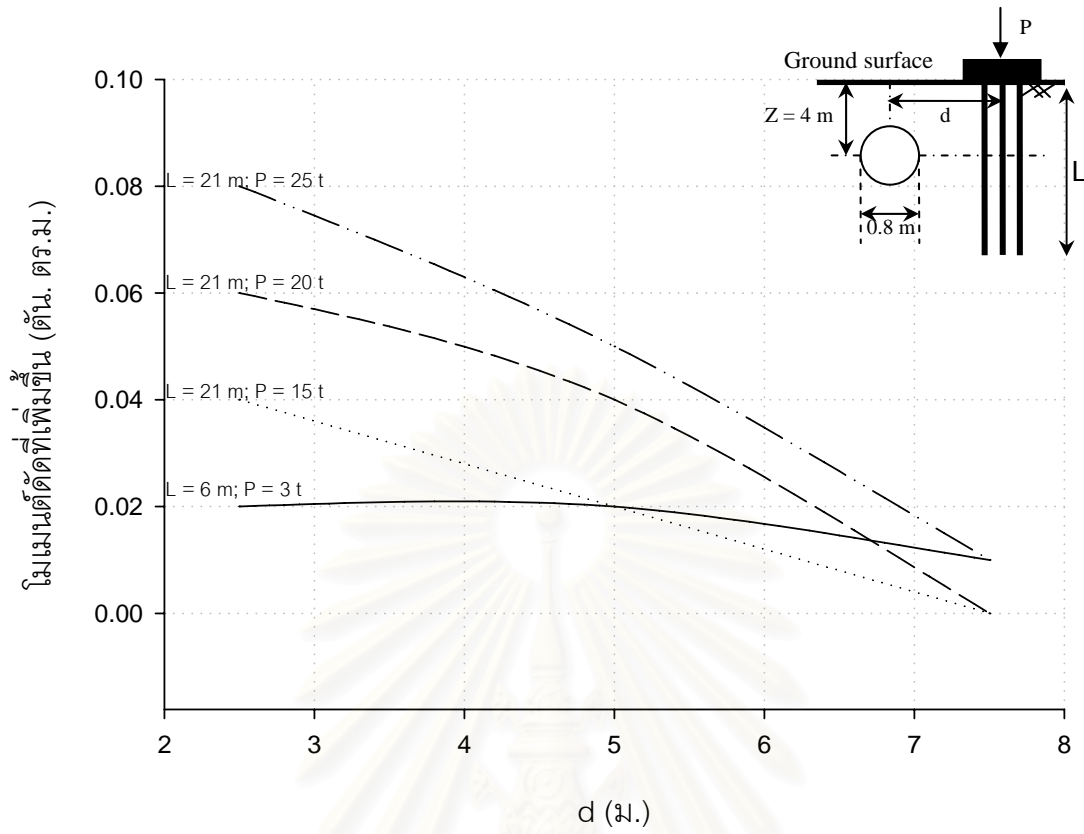
รูปที่ ก-3.2.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



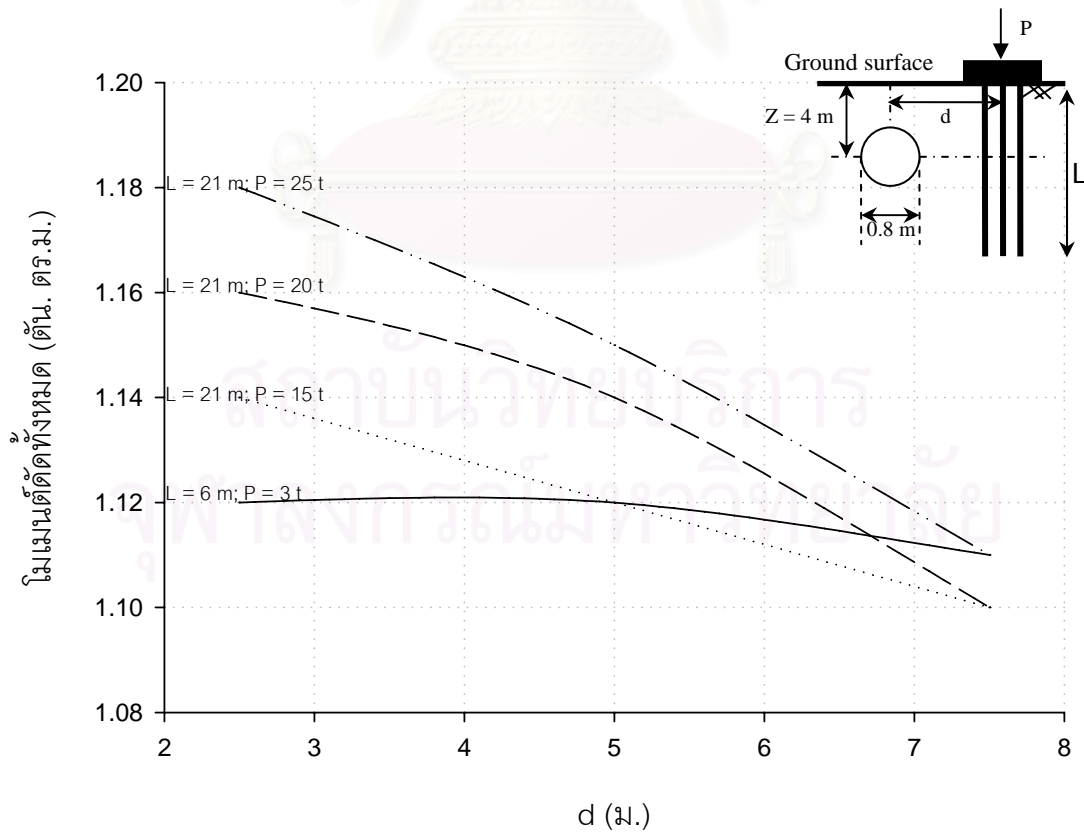
รูปที่ ก-3.2.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



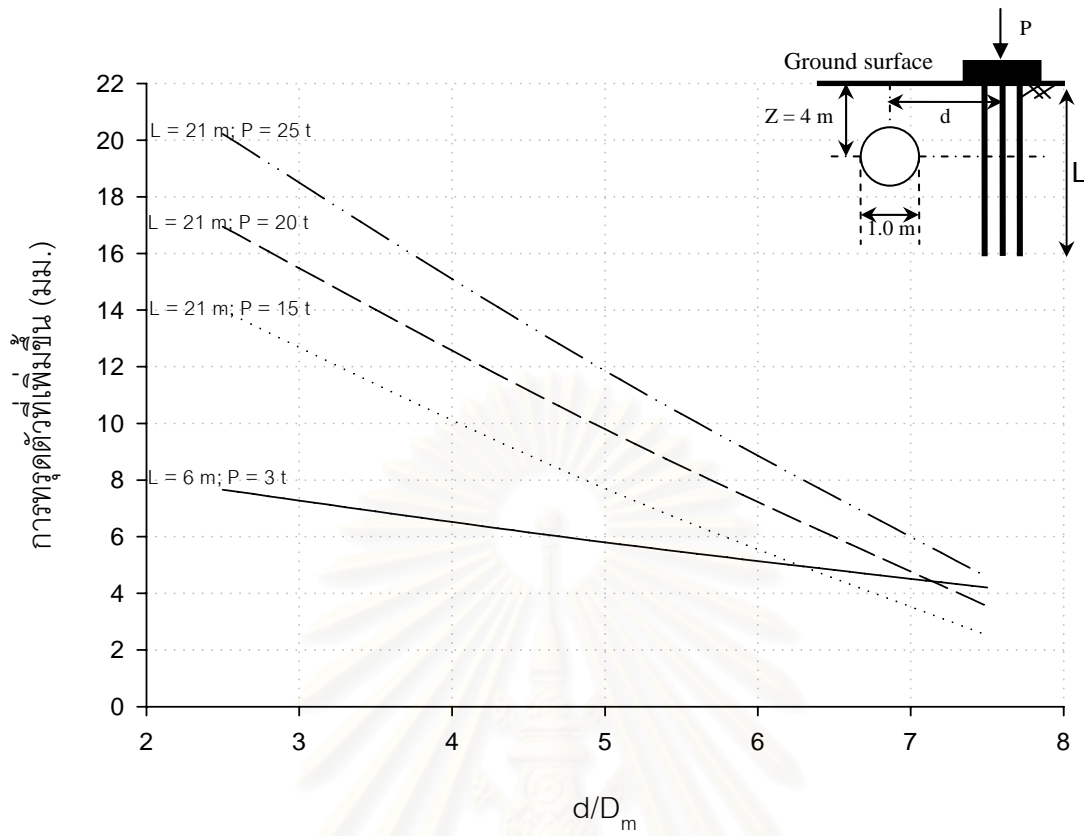
รูปที่ ก-3.2.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



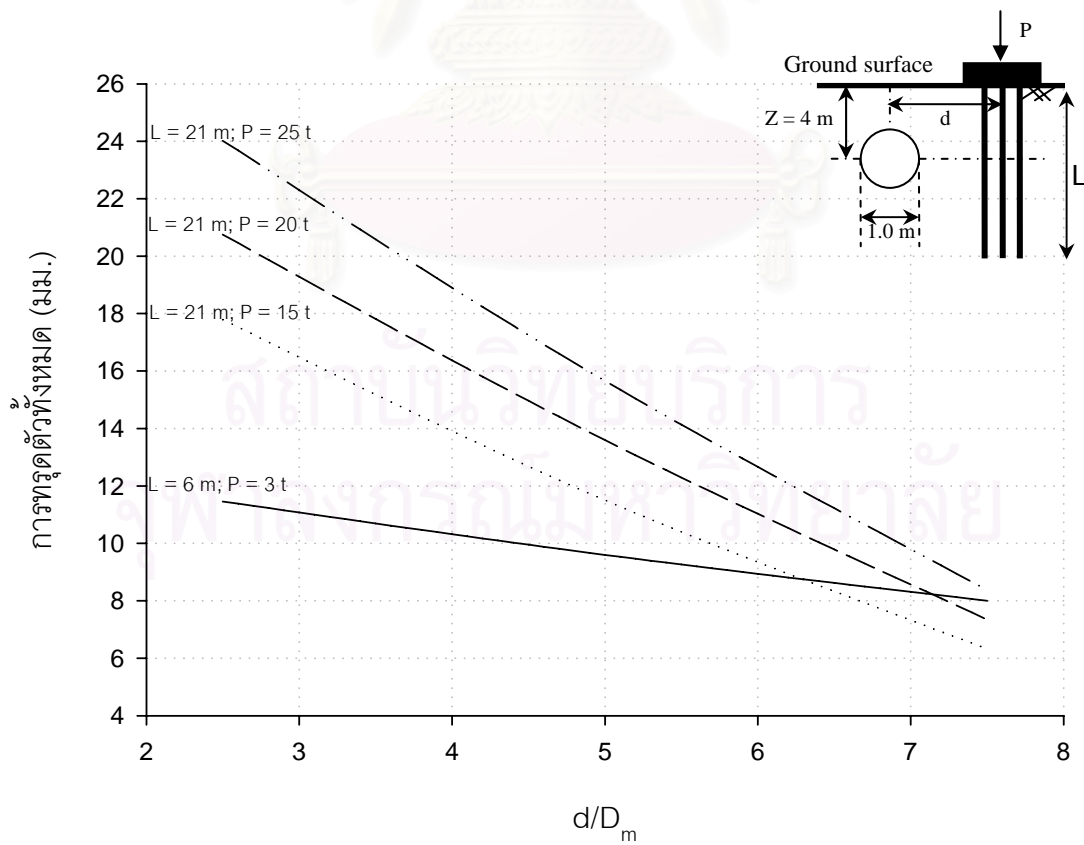
รูปที่ ก-3.2.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



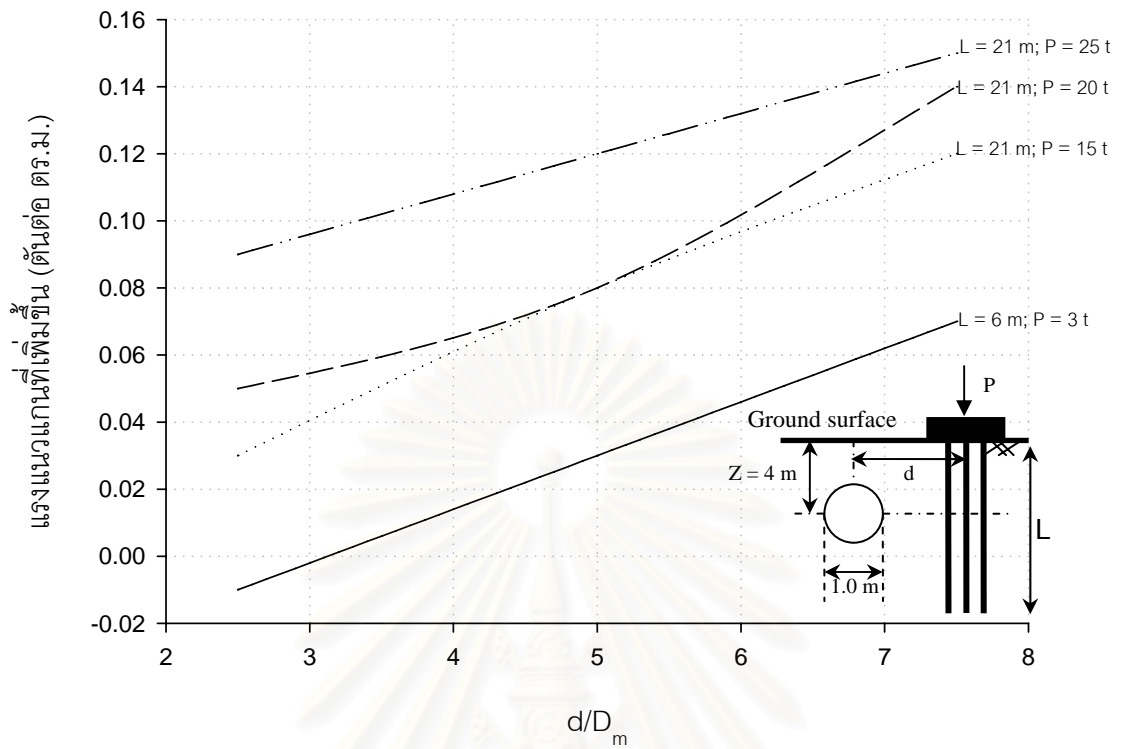
รูปที่ ก-3.2.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 0.8 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



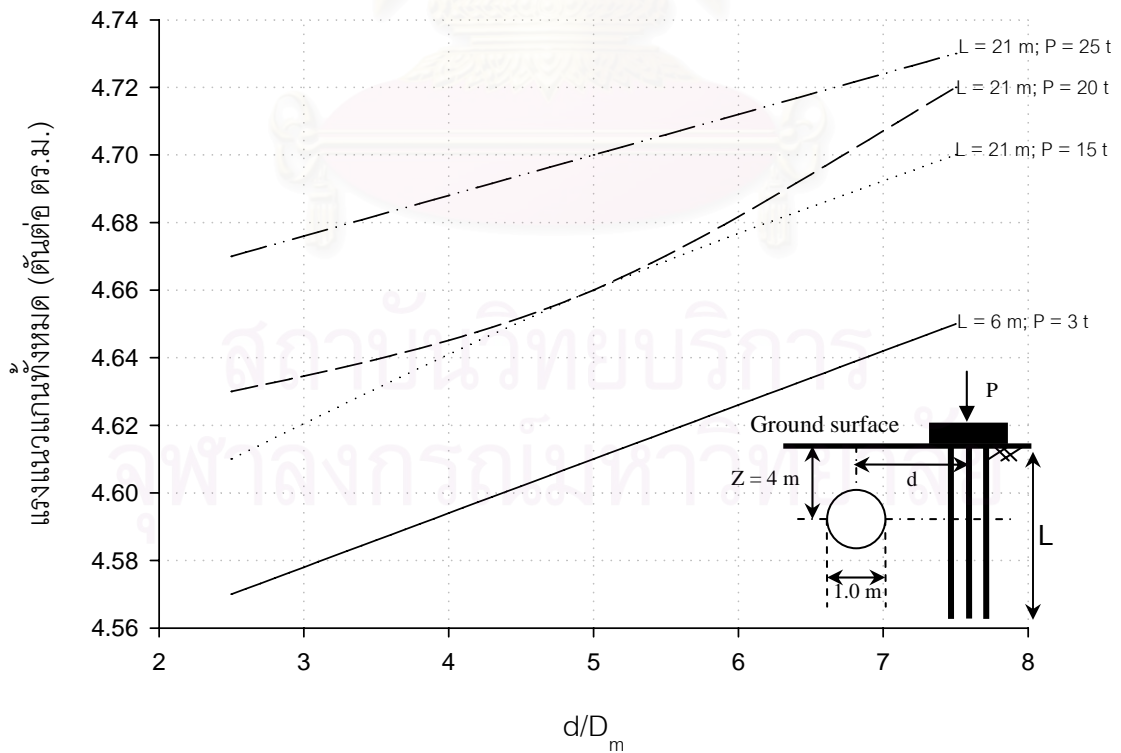
รูปที่ ก-3.3.1.1 การทรุดตัวของหัวเข็มหมุดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



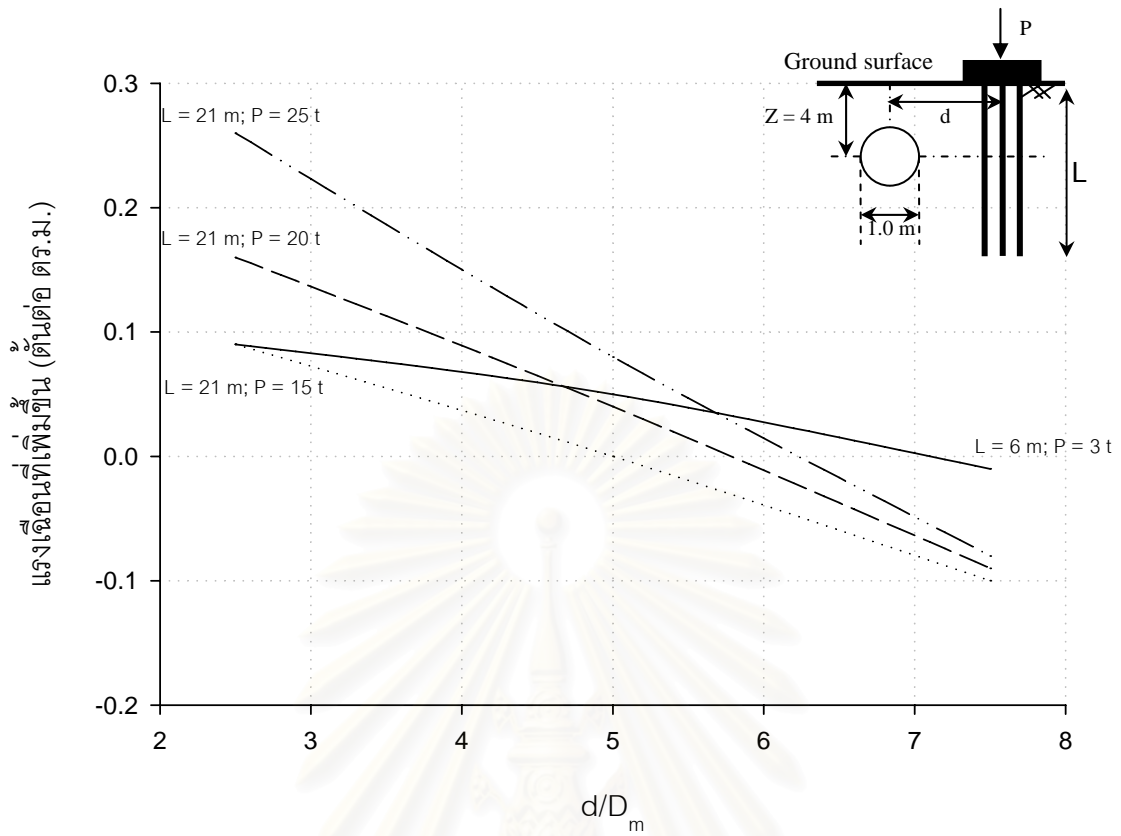
รูปที่ ก-3.3.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



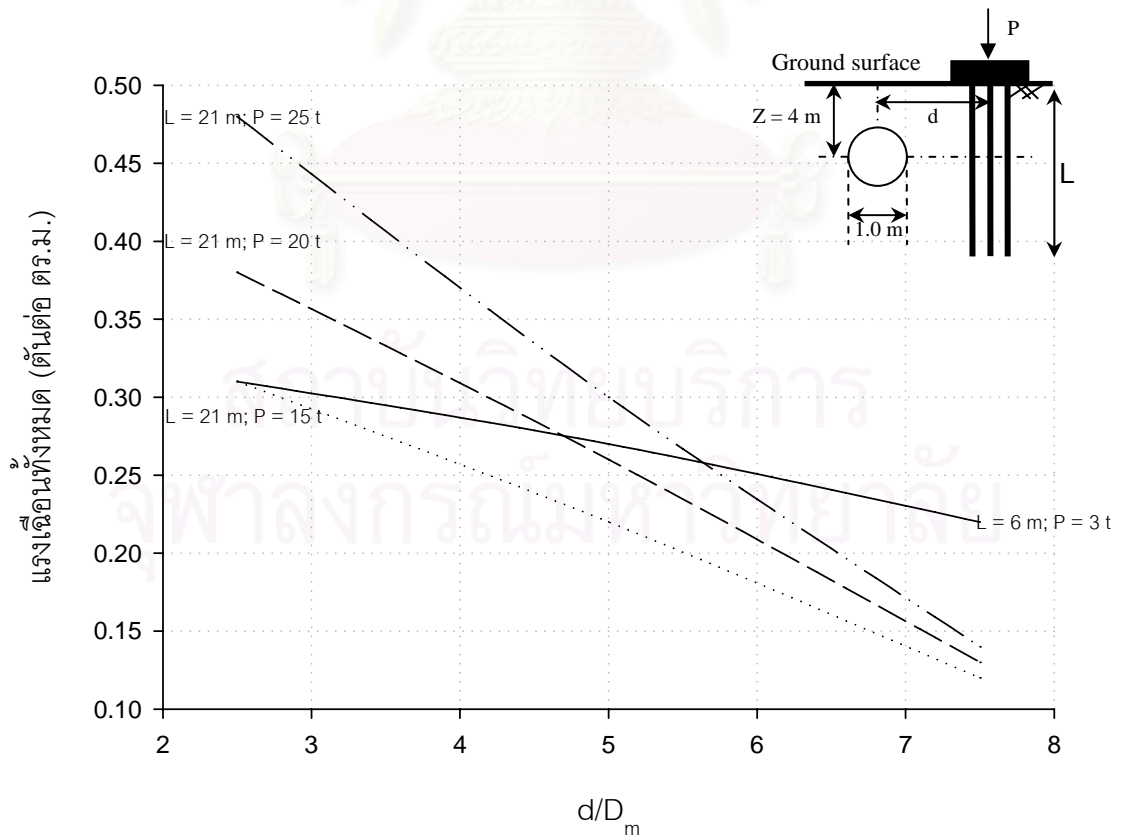
รูปที่ ก-3.3.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



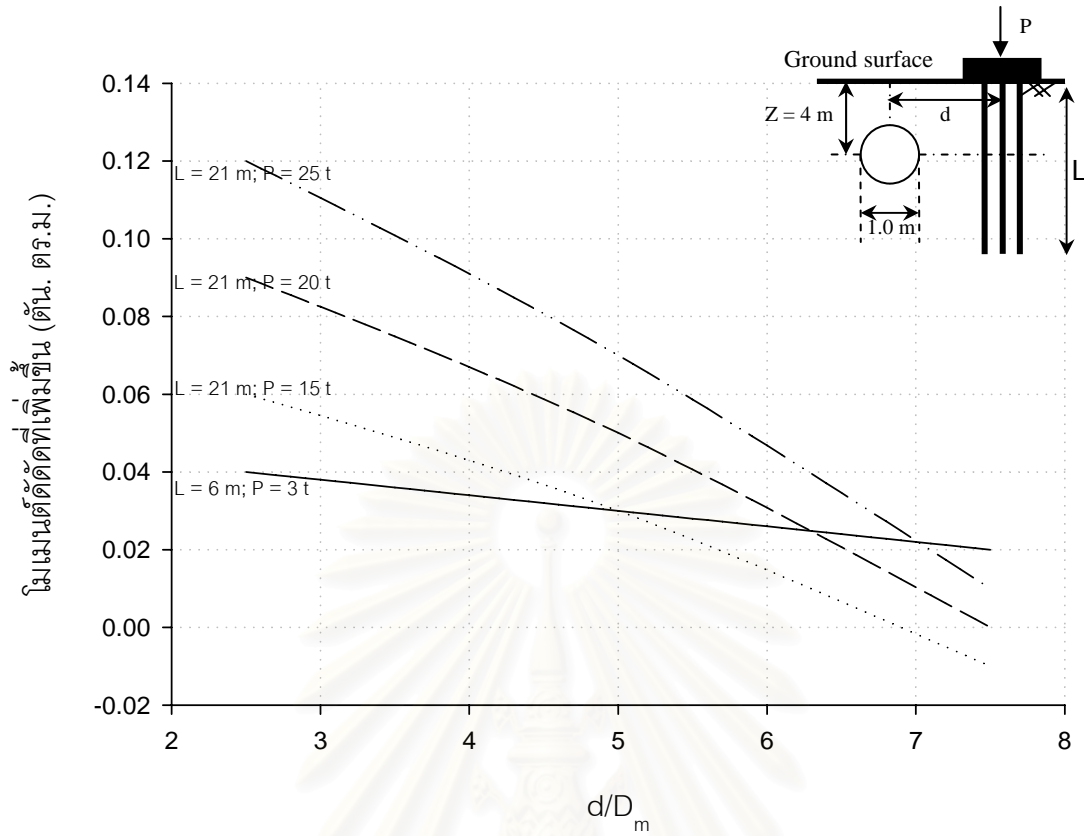
รูปที่ ก-3.3.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



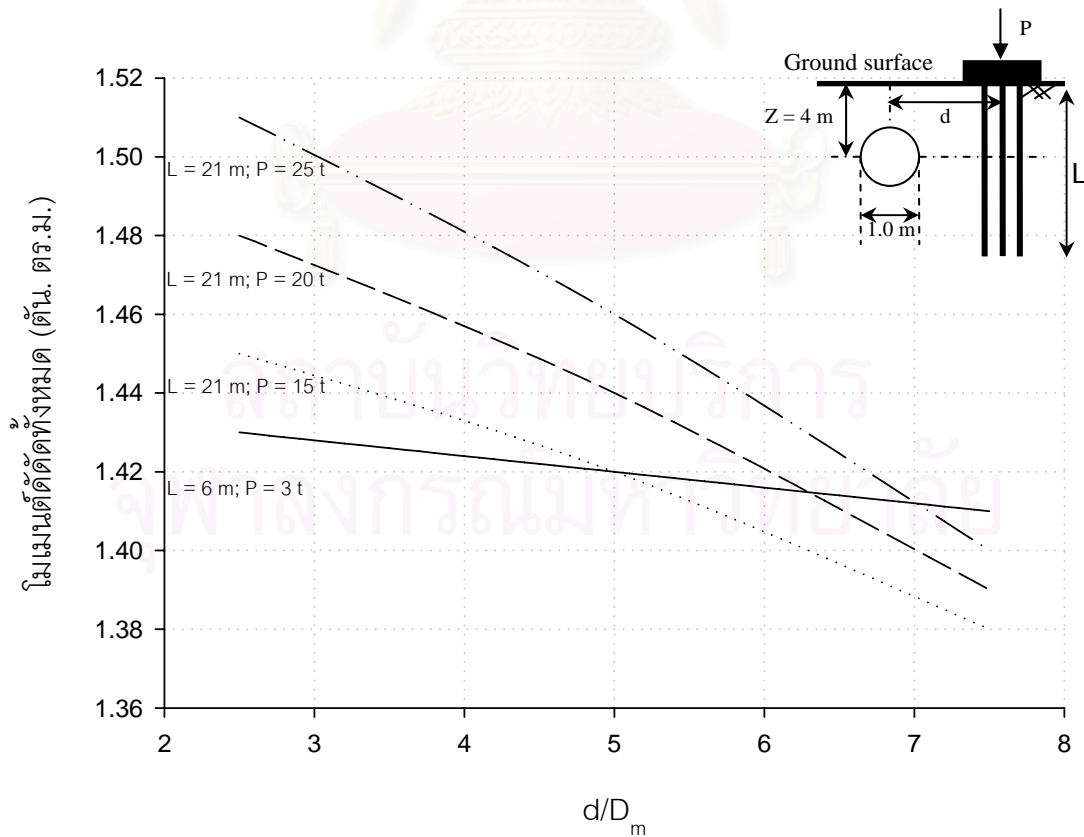
รูปที่ ก-3.3.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



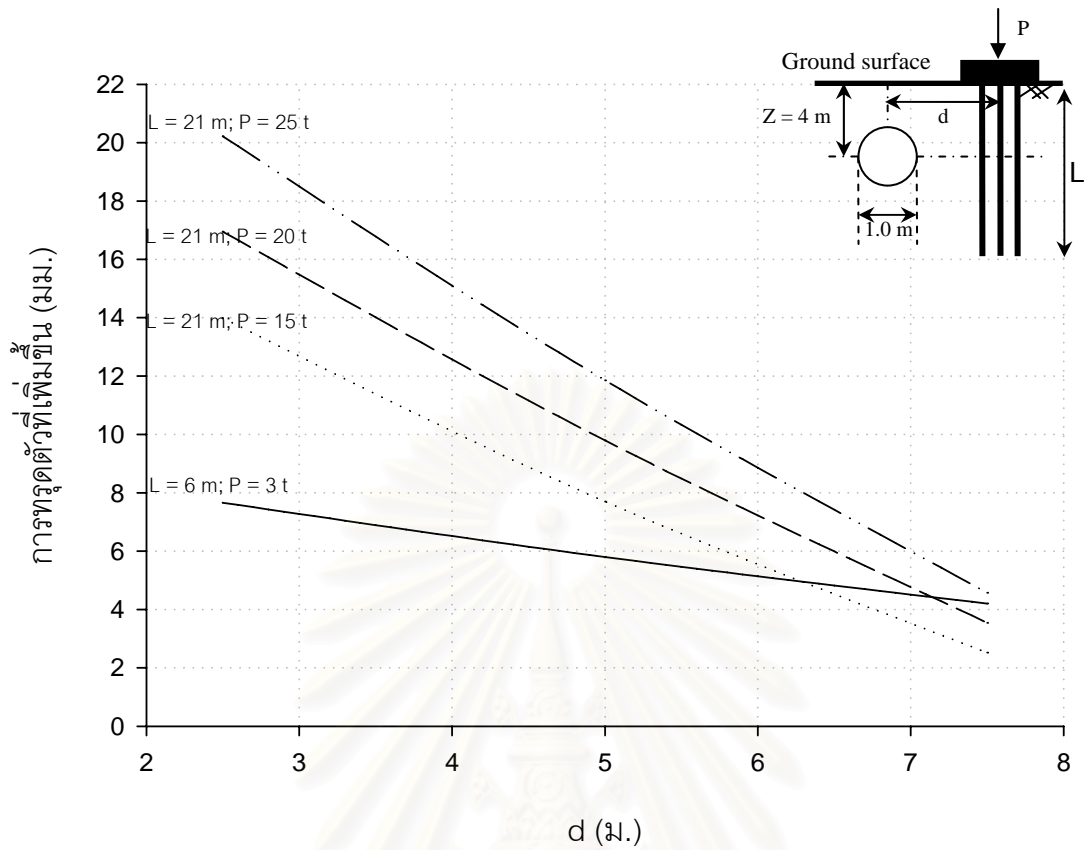
รูปที่ ก-3.3.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



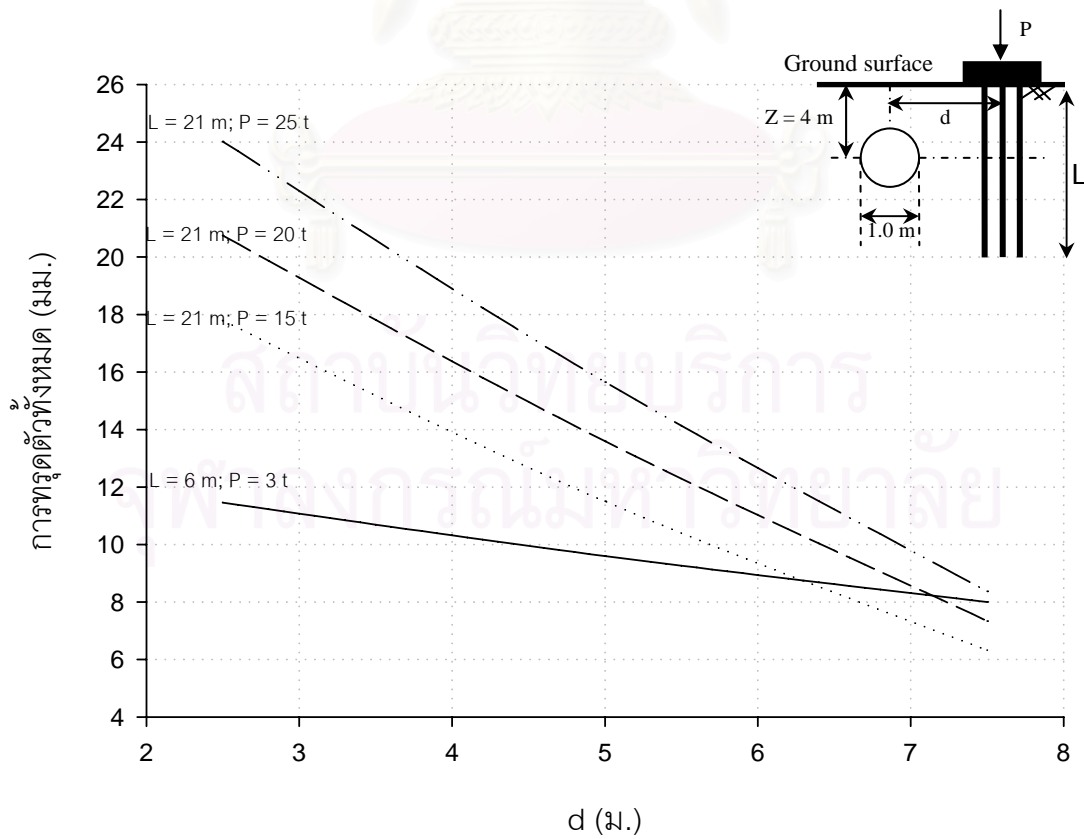
รูปที่ ก-3.3.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



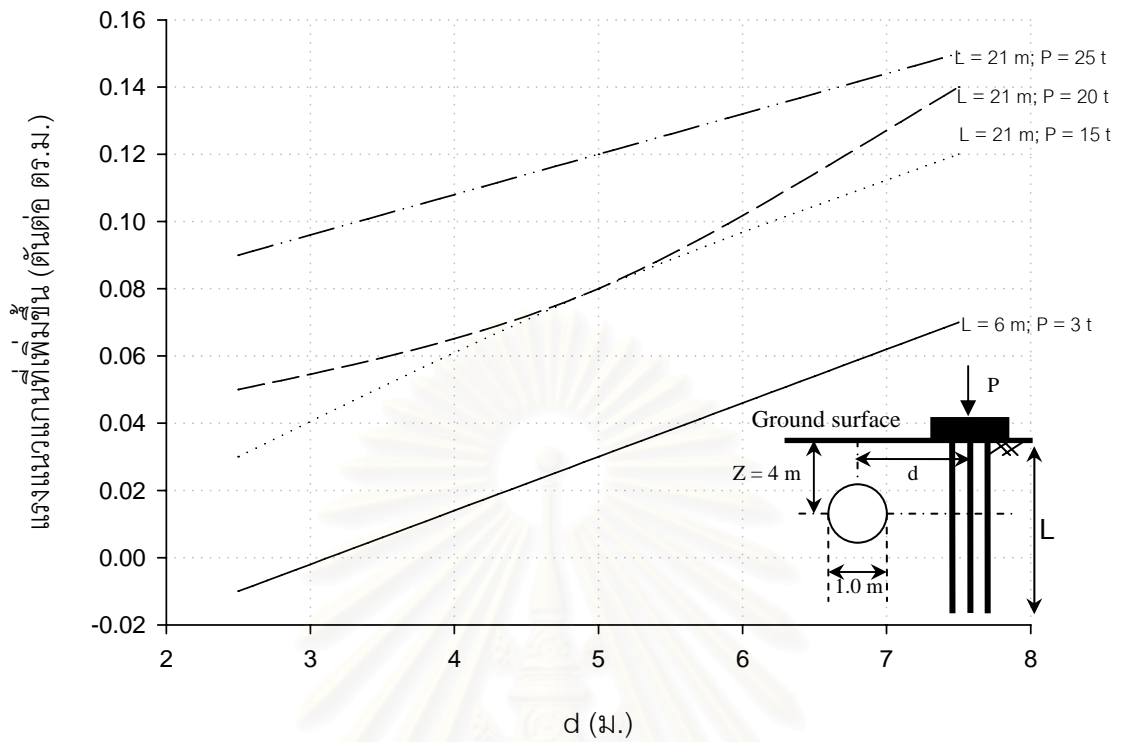
รูปที่ ก-3.3.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



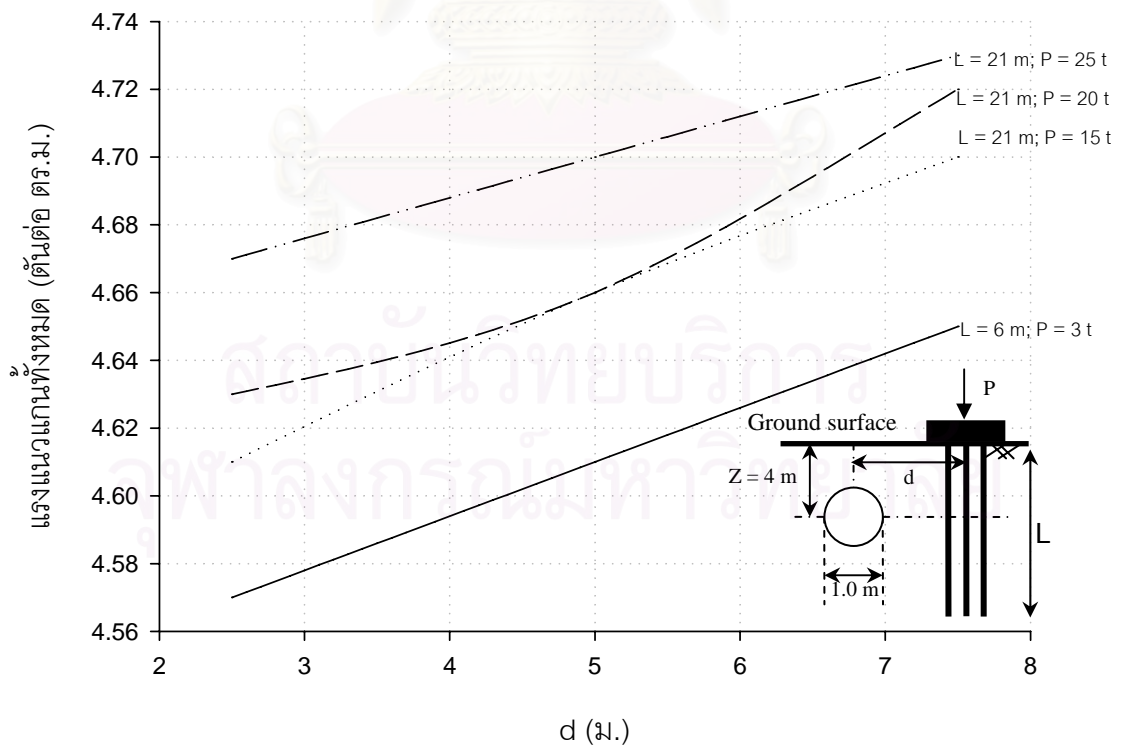
รูปที่ ก-3.3.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



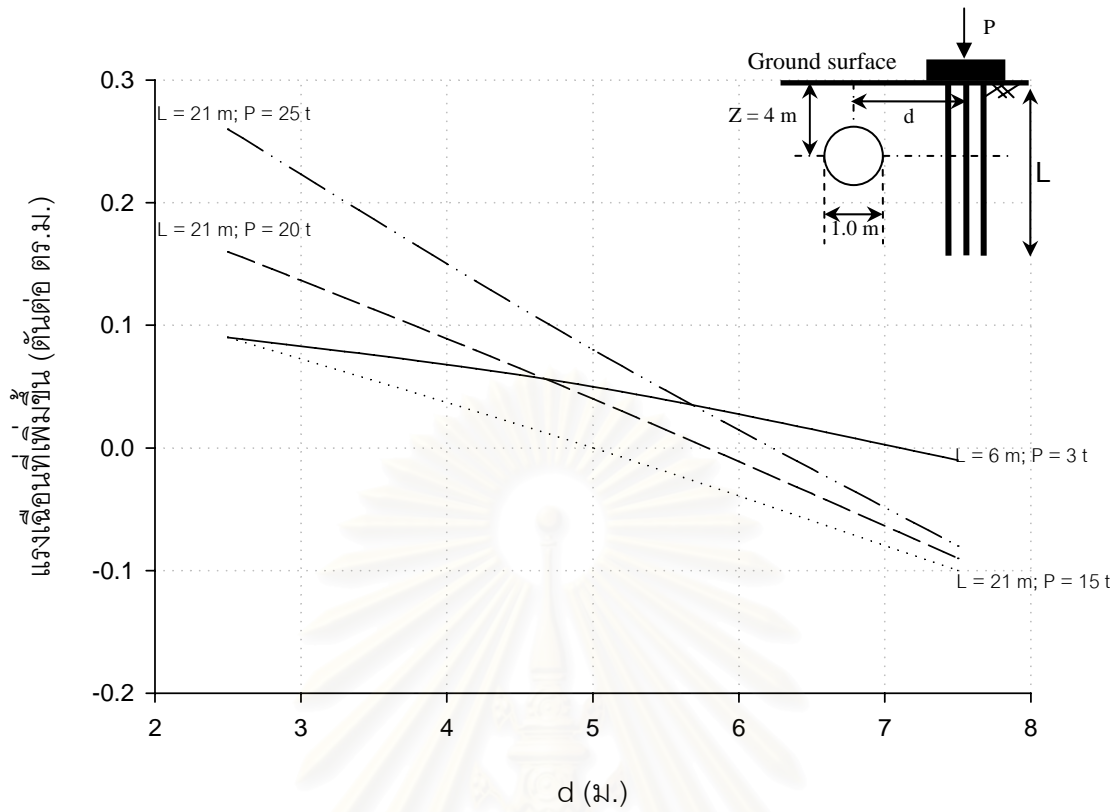
รูปที่ ก-3.3.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



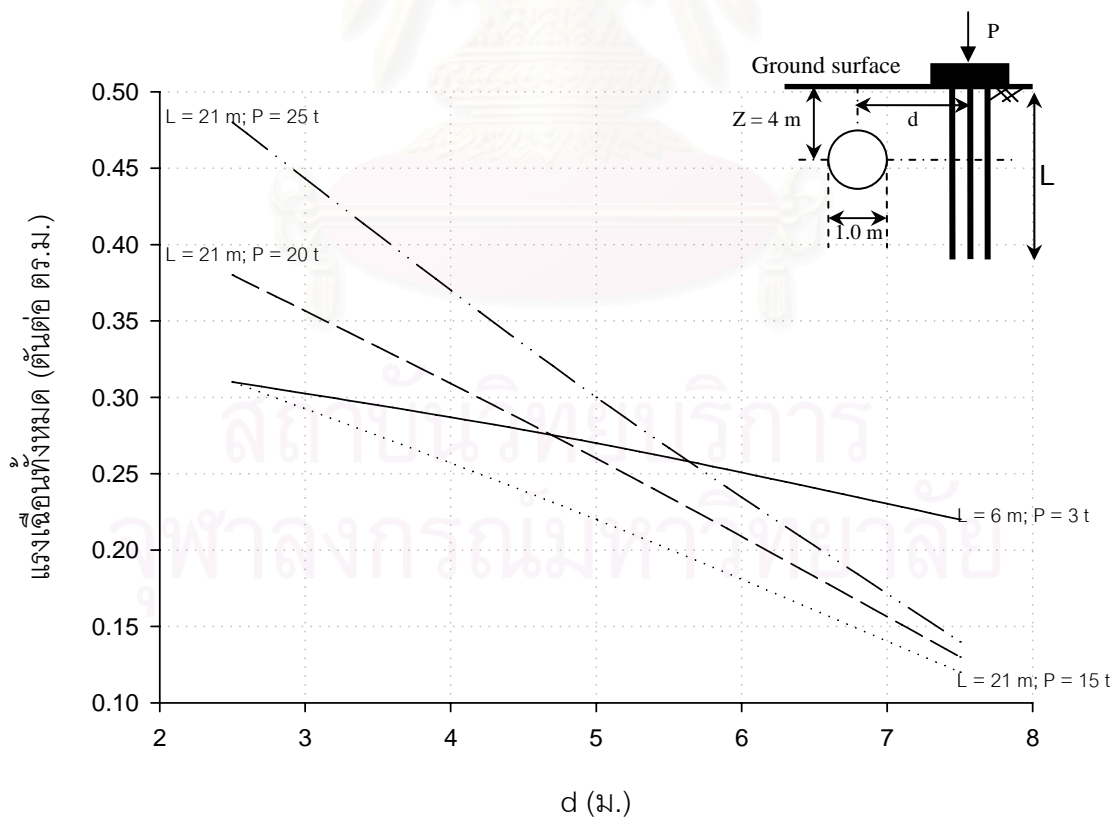
รูปที่ ก-3.3.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



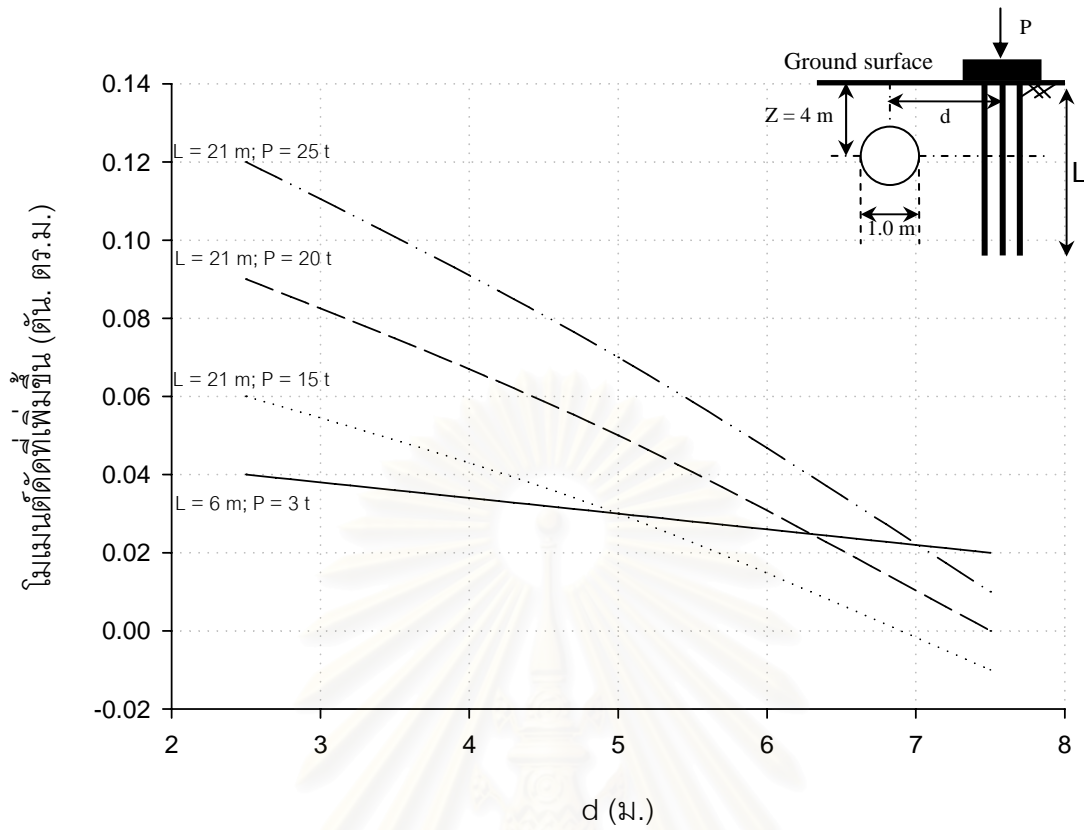
รูปที่ ก-3.3.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



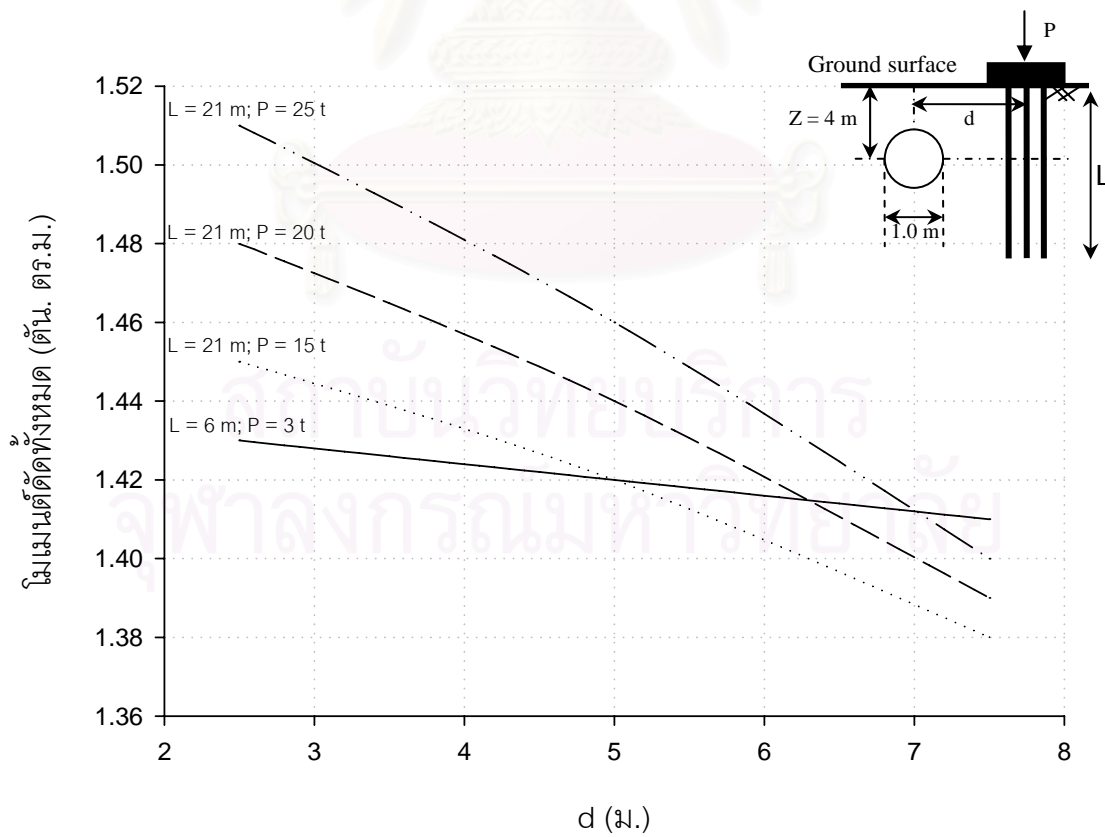
รูปที่ ก-3.3.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



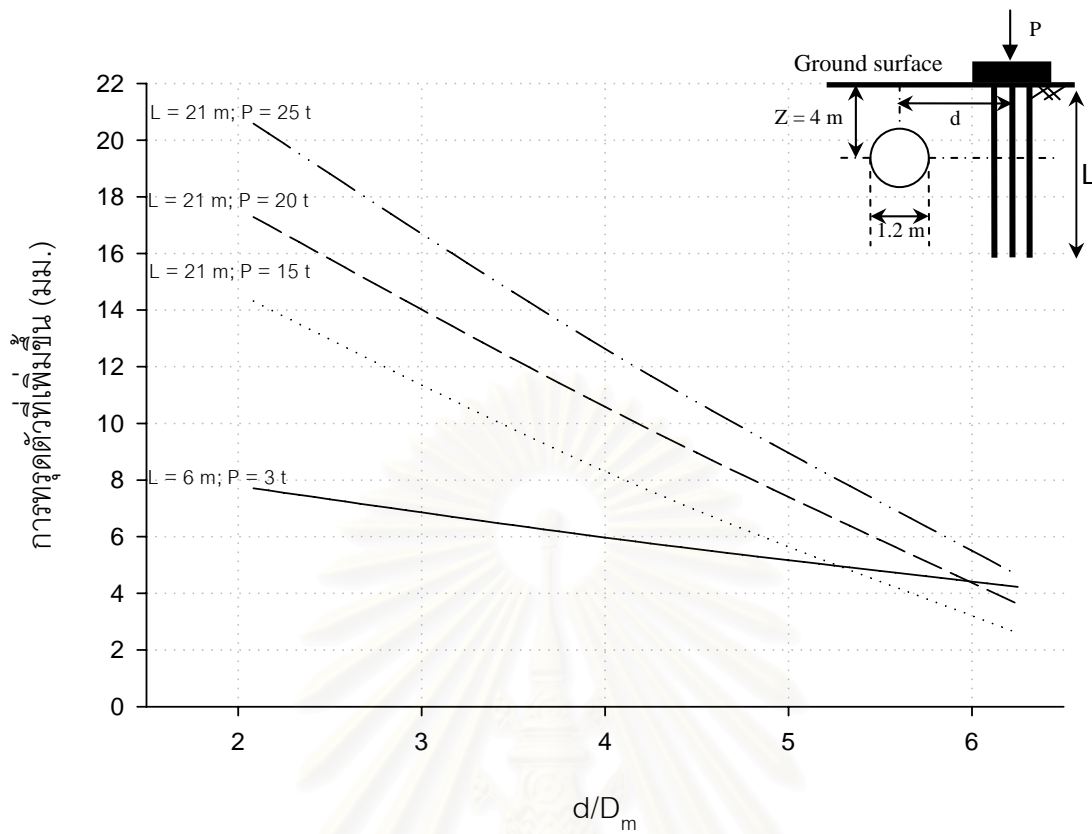
รูปที่ ก-3.3.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



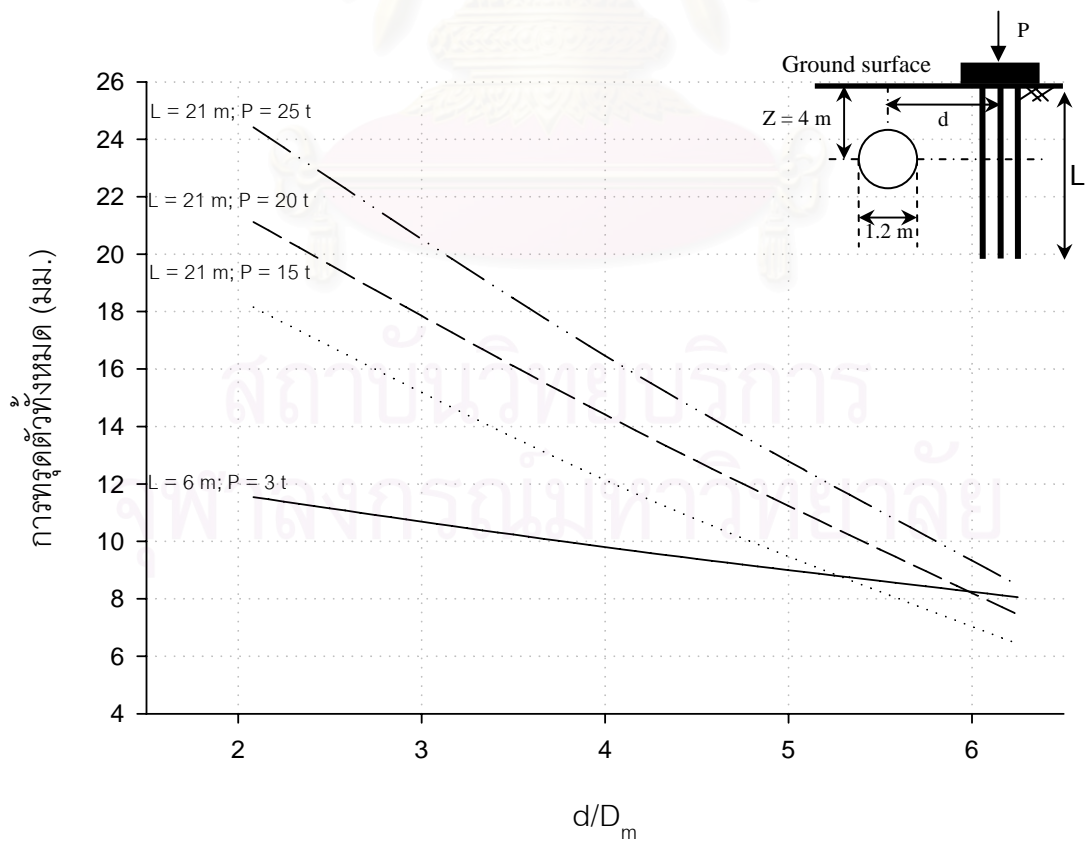
รูปที่ ก-3.3.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



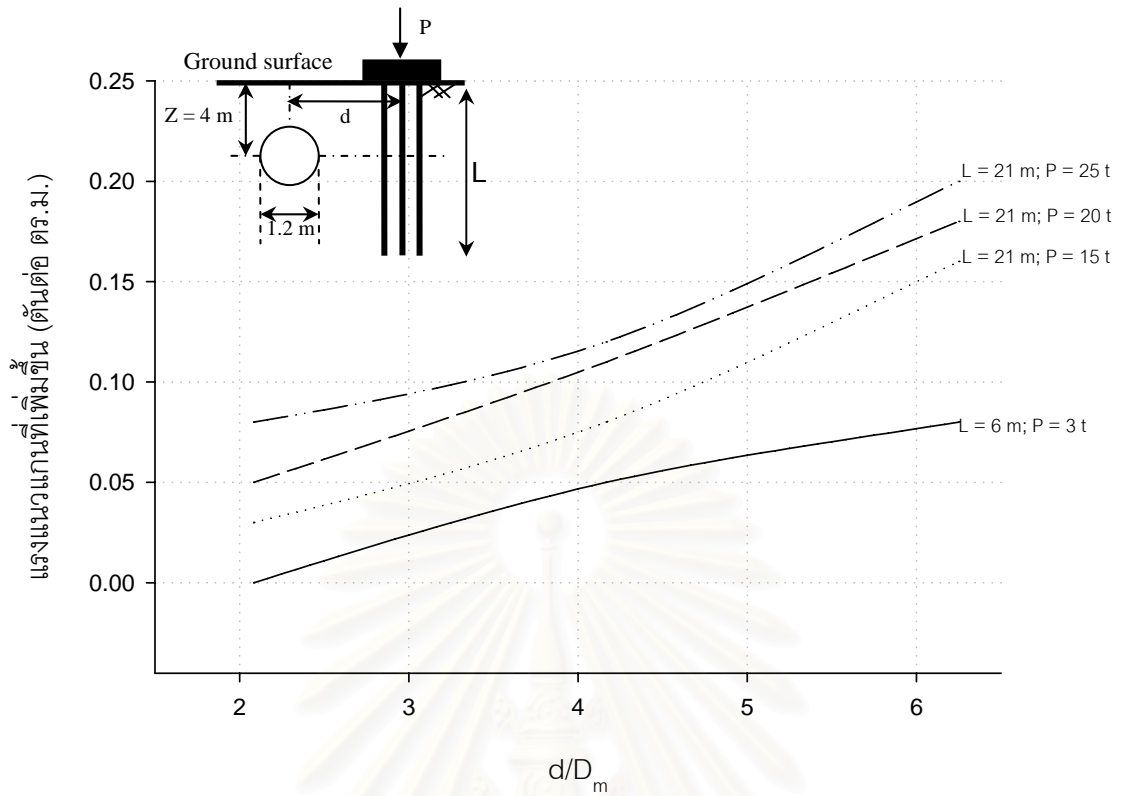
รูปที่ ก-3.3.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดขนาด 1.0 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



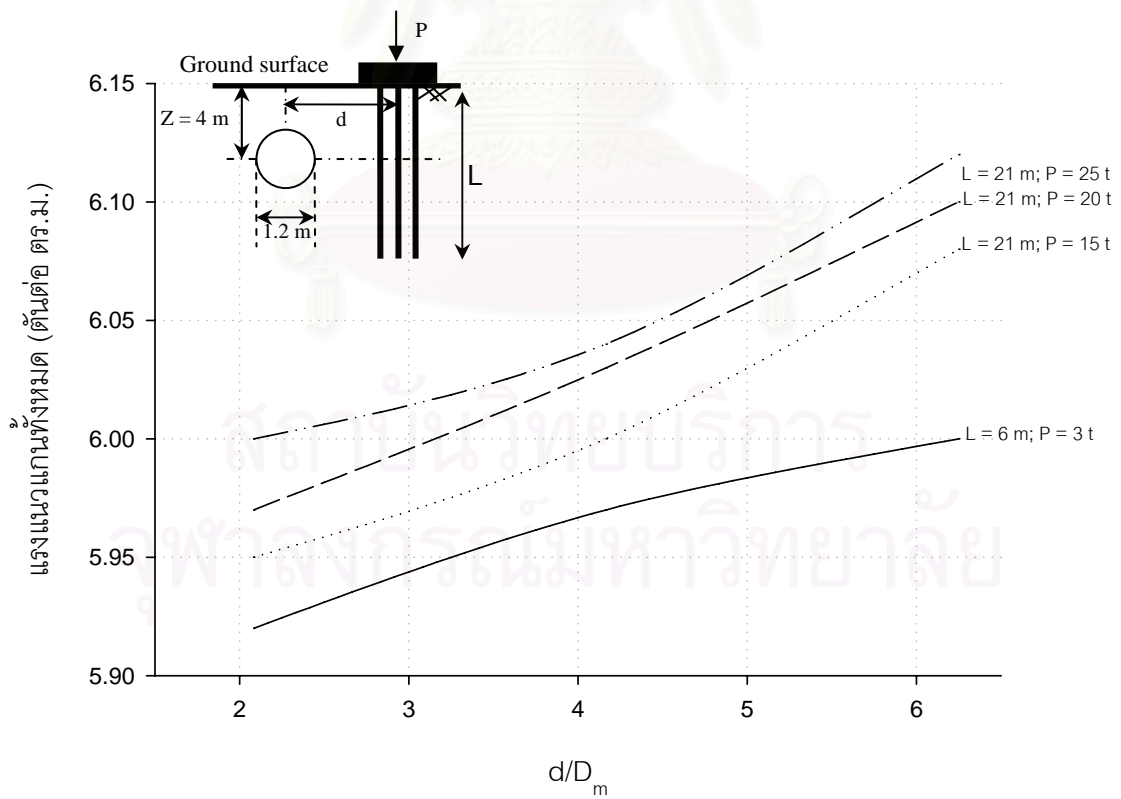
รูปที่ ก-3.4.1.1 การทรุดตัวของหัวเข็มหมุดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



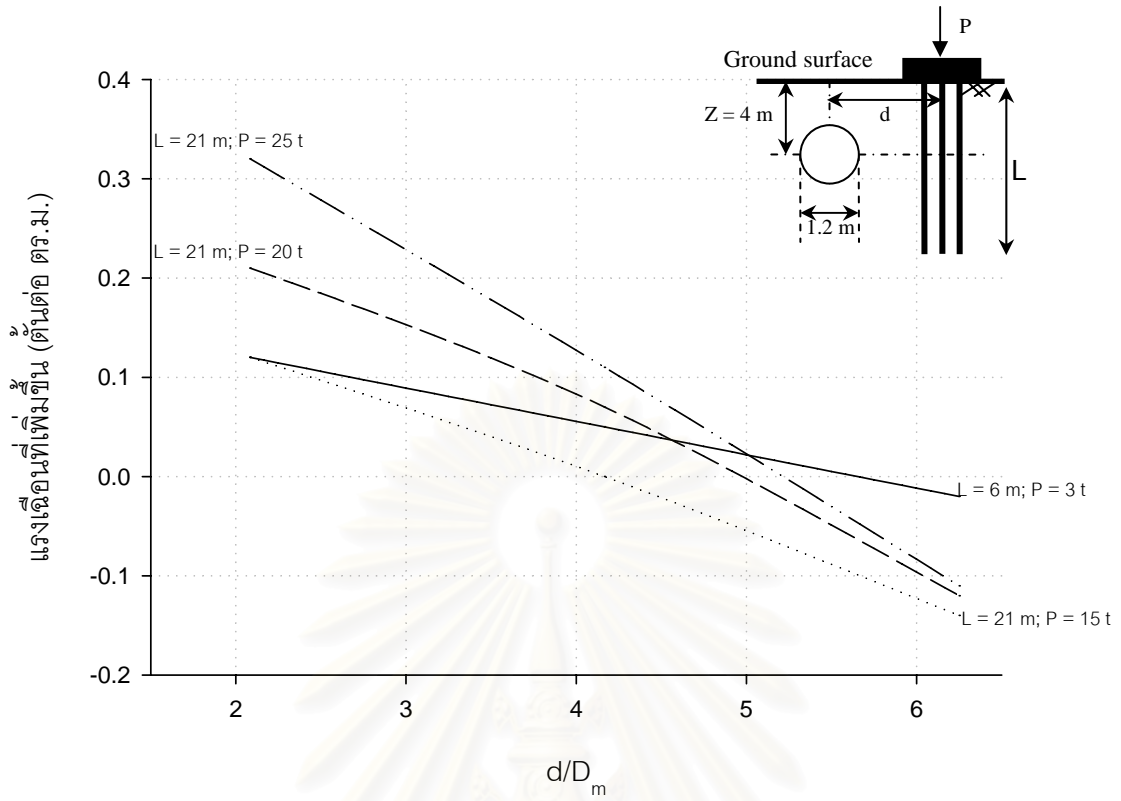
รูปที่ ก-3.4.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



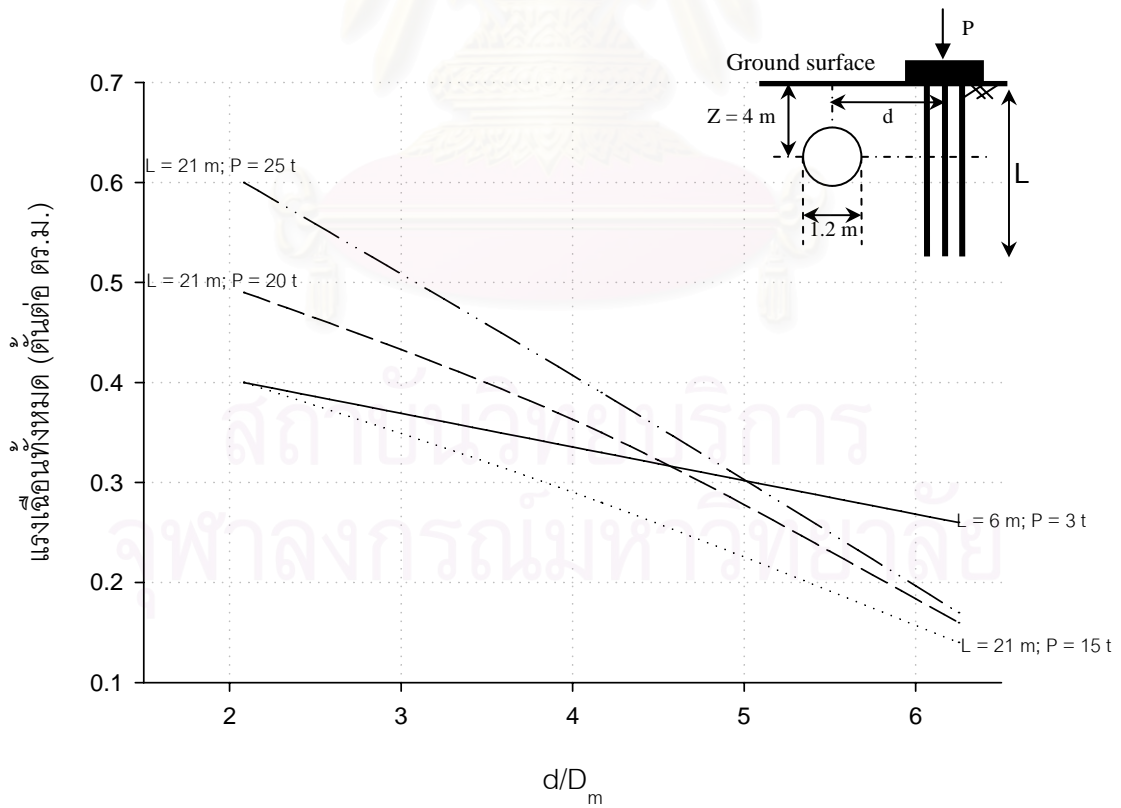
รูปที่ ก-3.4.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



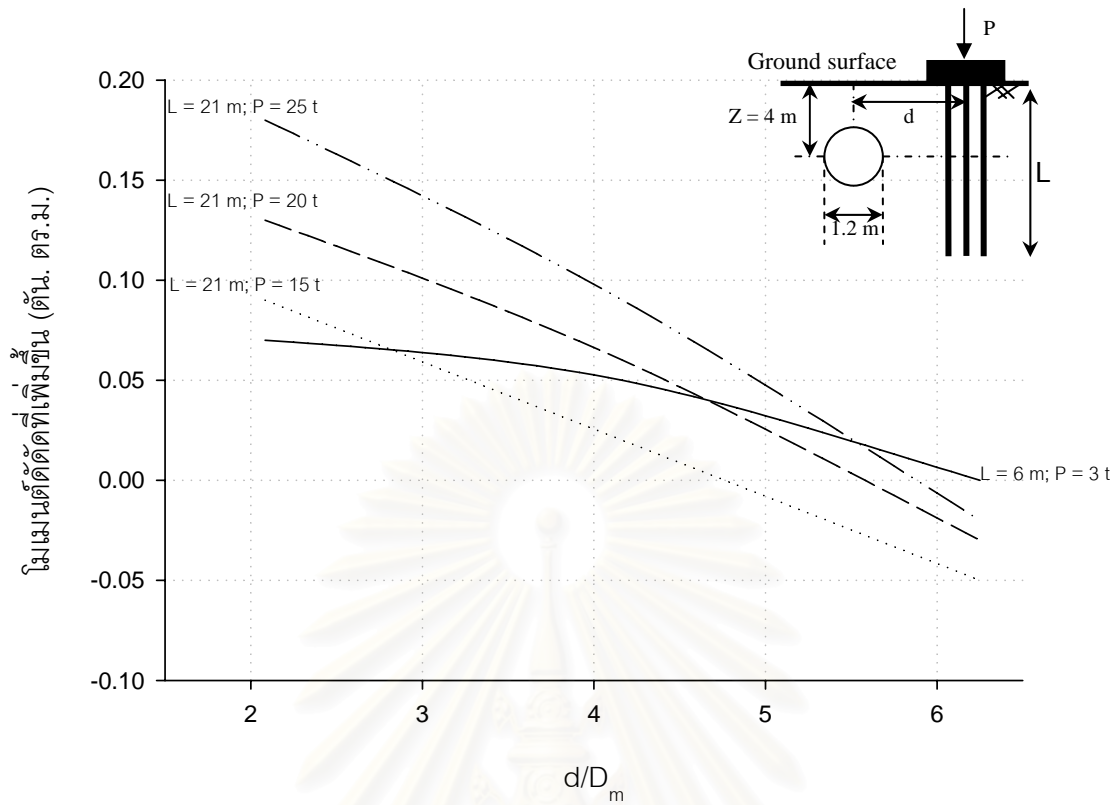
รูปที่ ก-3.4.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



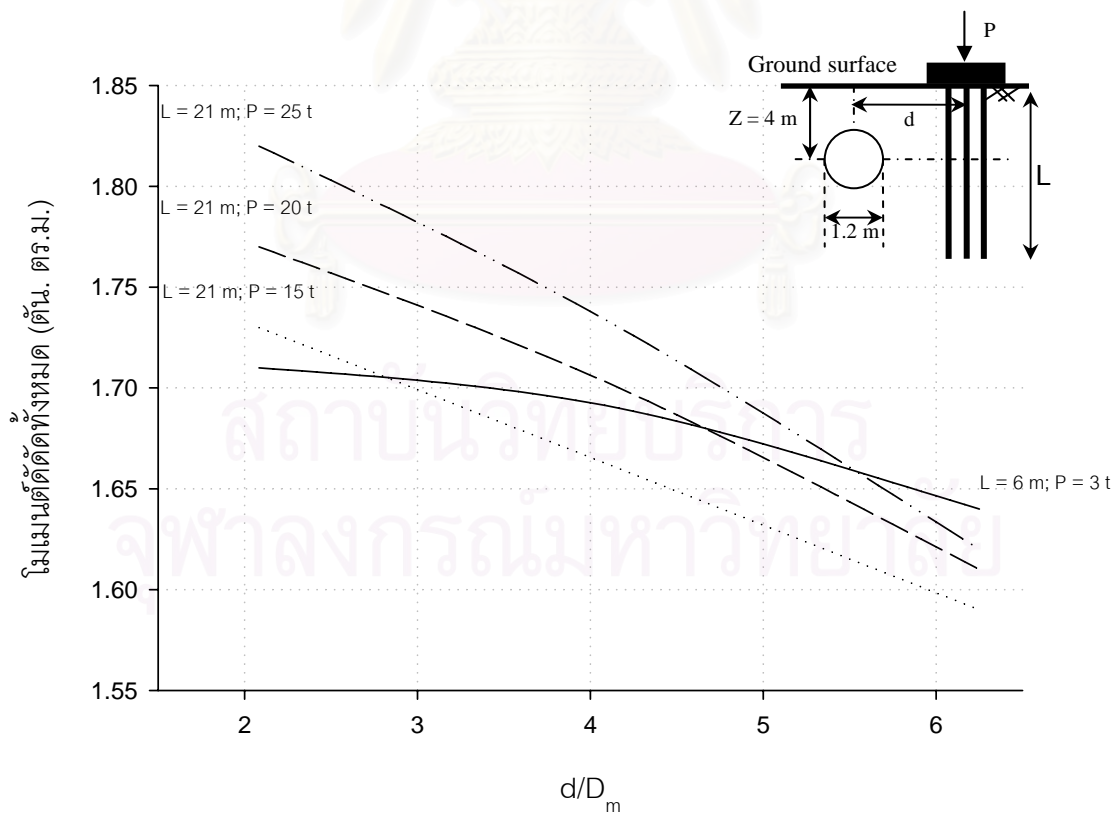
รูปที่ ก-3.4.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



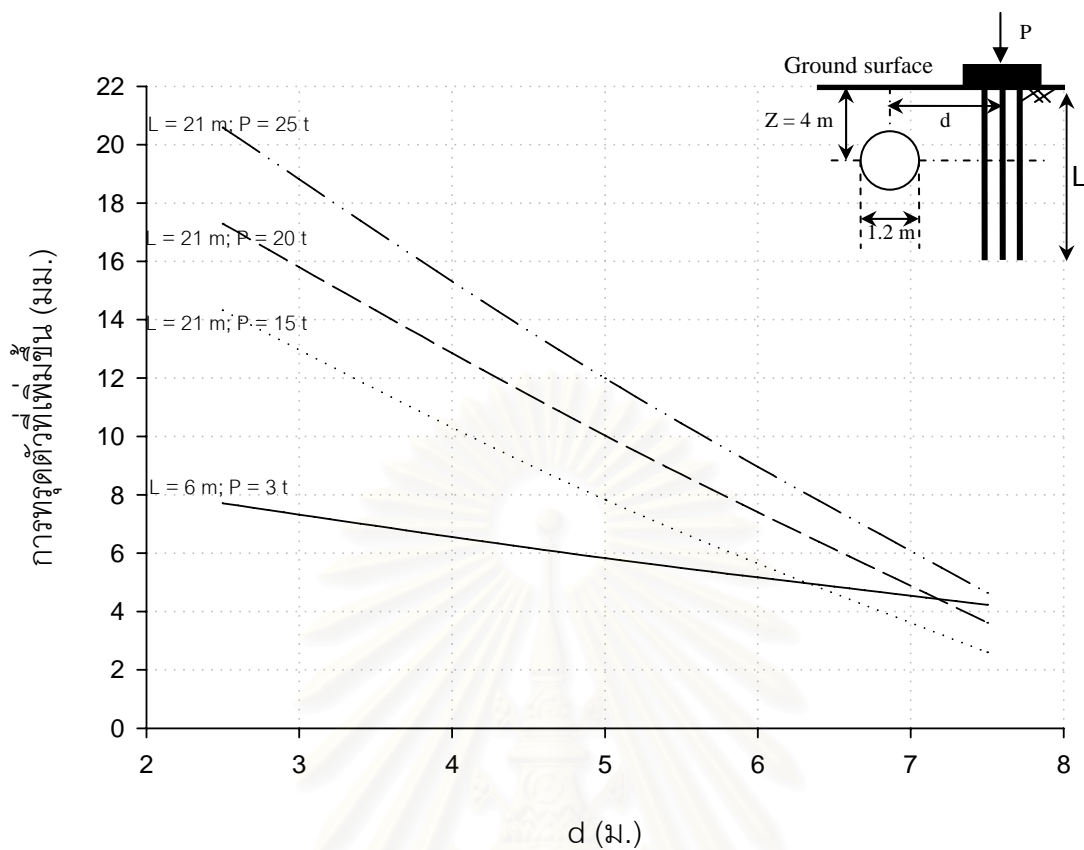
รูปที่ ก-3.4.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



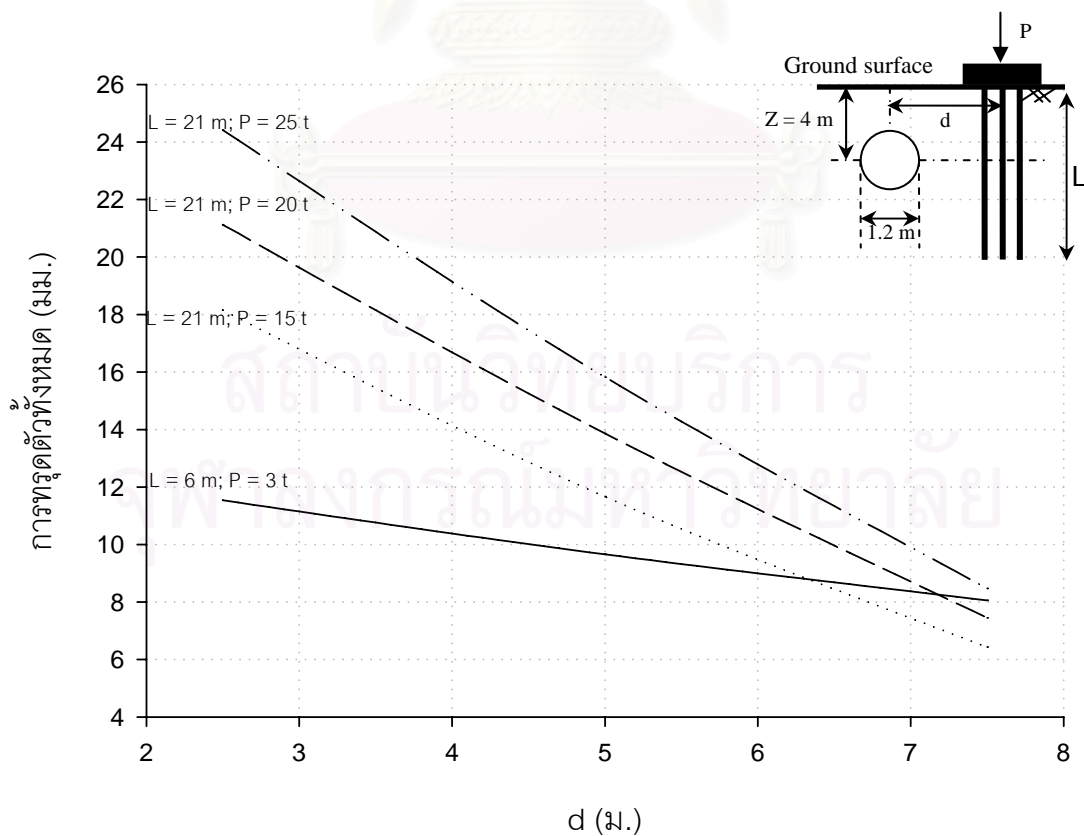
รูปที่ ก-3.4.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



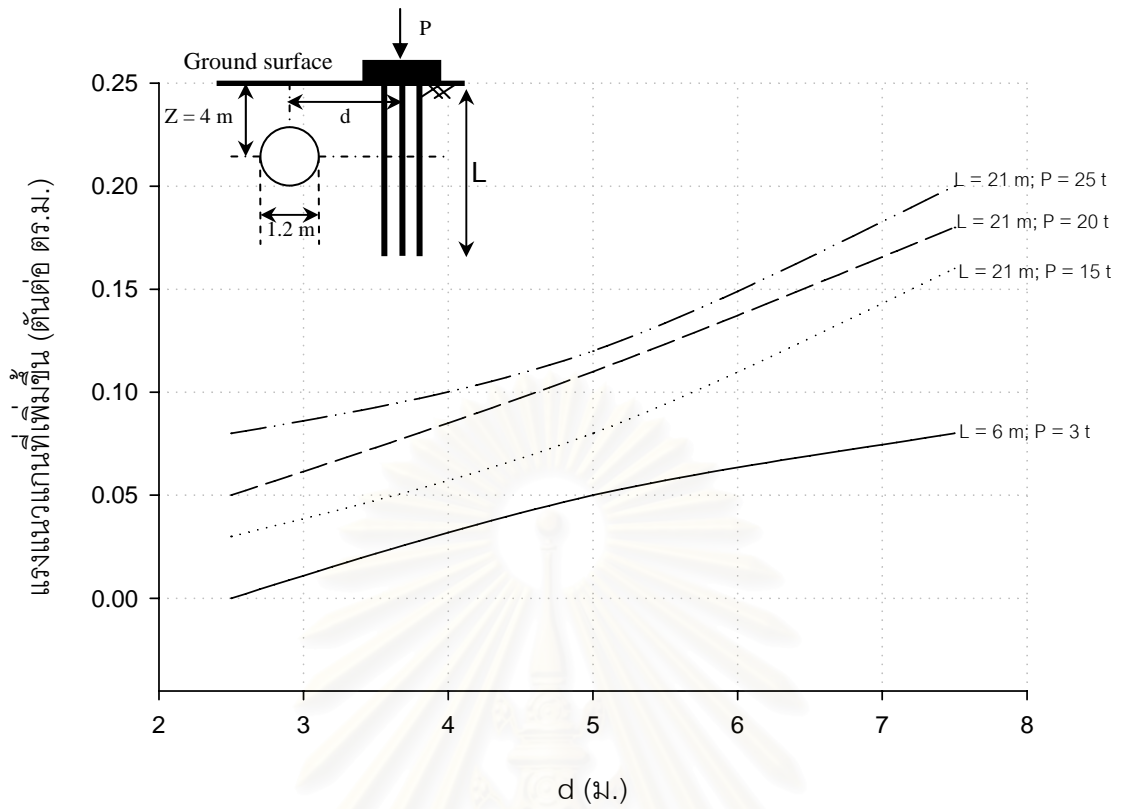
รูปที่ ก-3.4.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



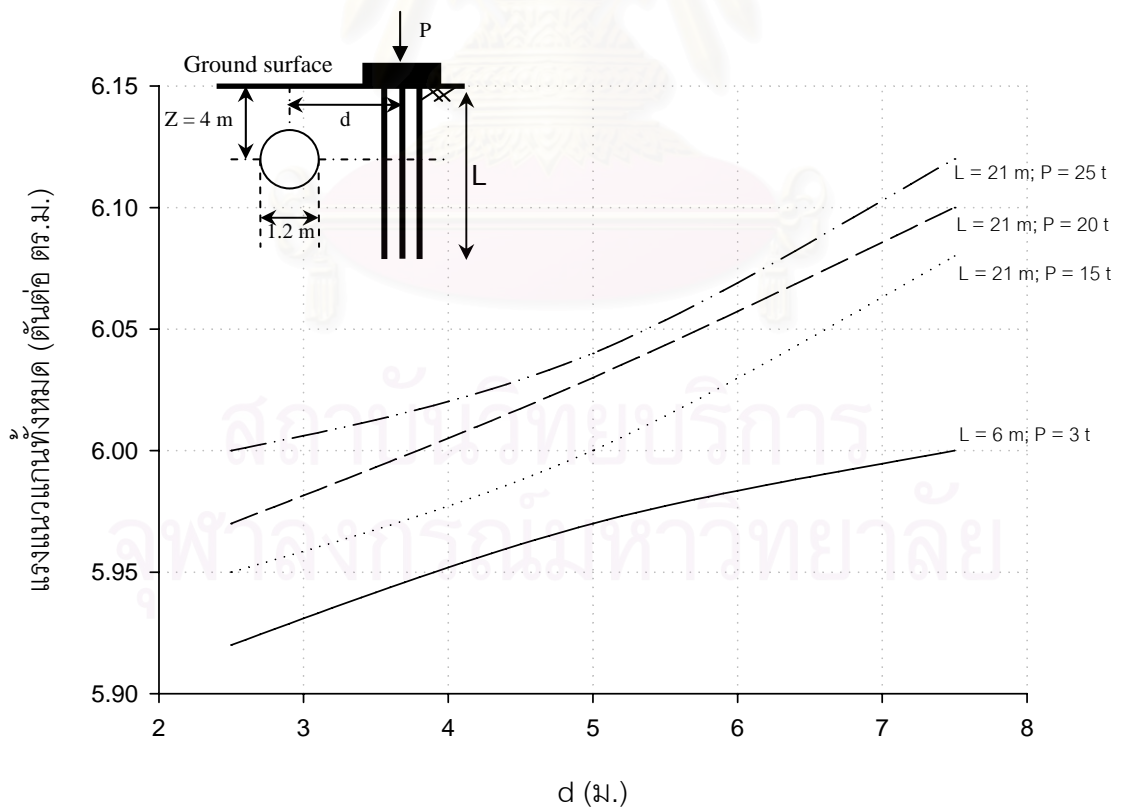
รูปที่ ก-3.4.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



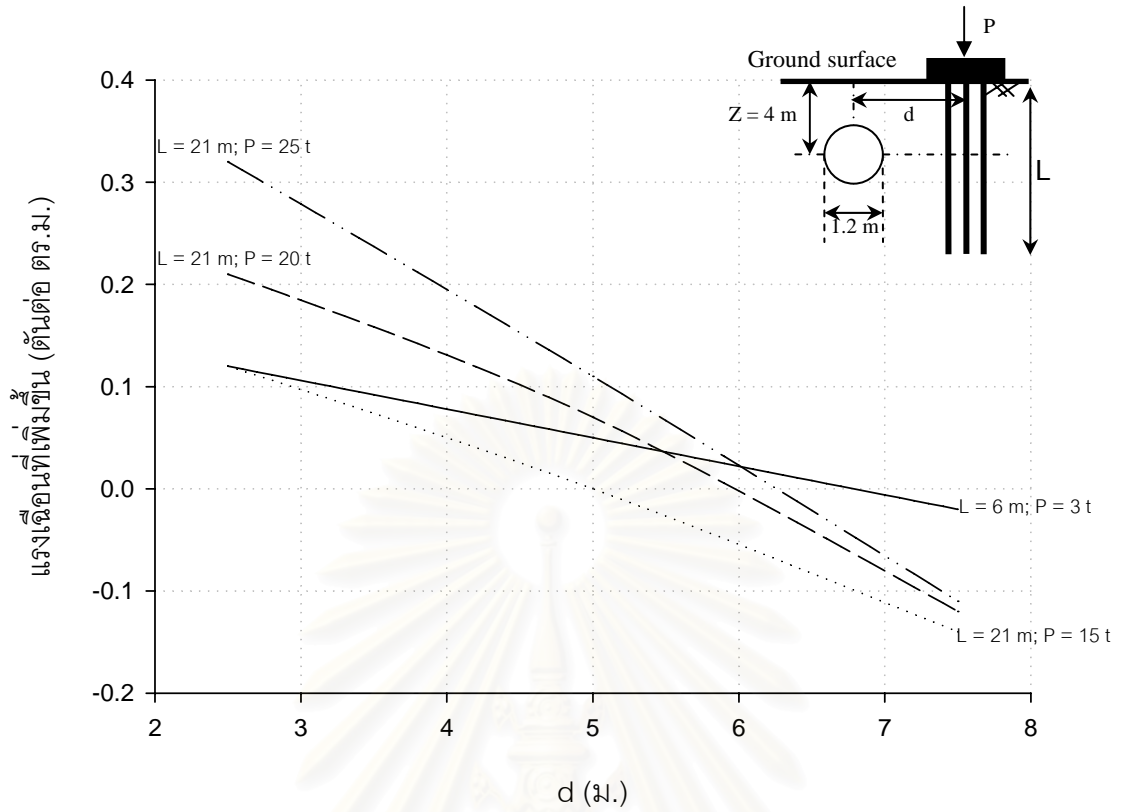
รูปที่ ก-3.4.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



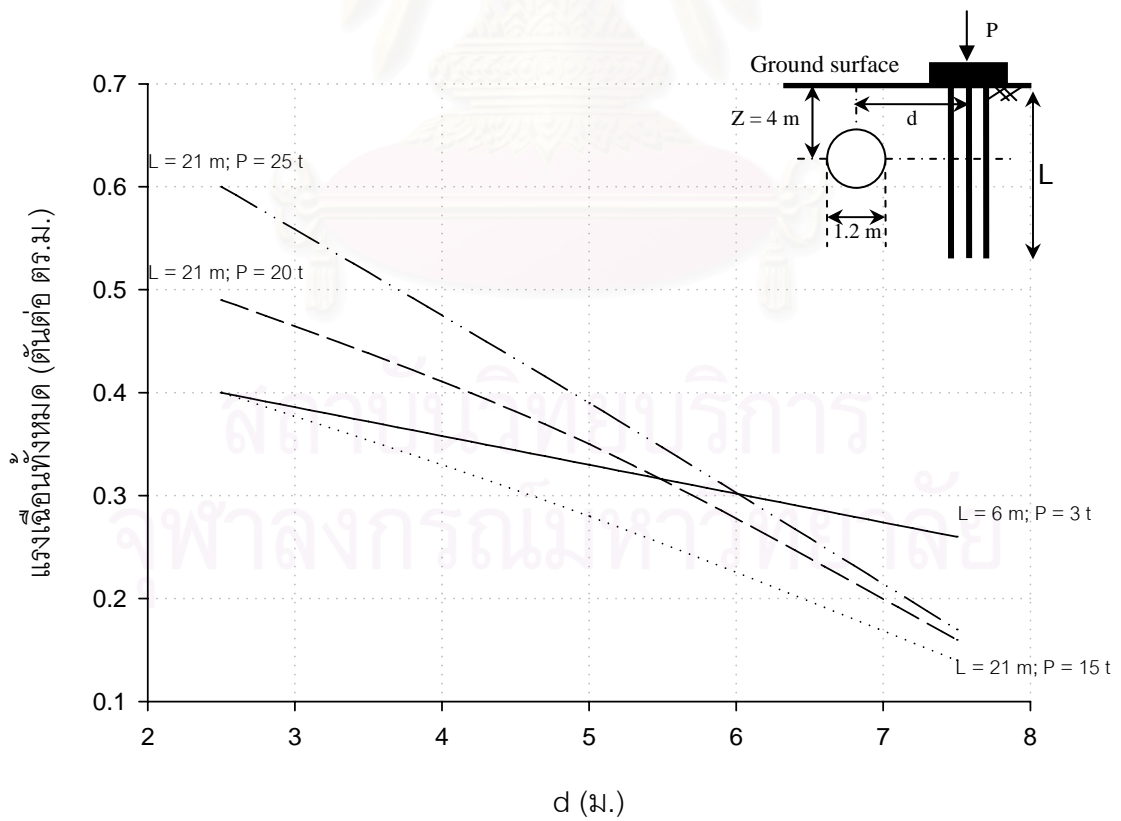
รูปที่ ก-3.4.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



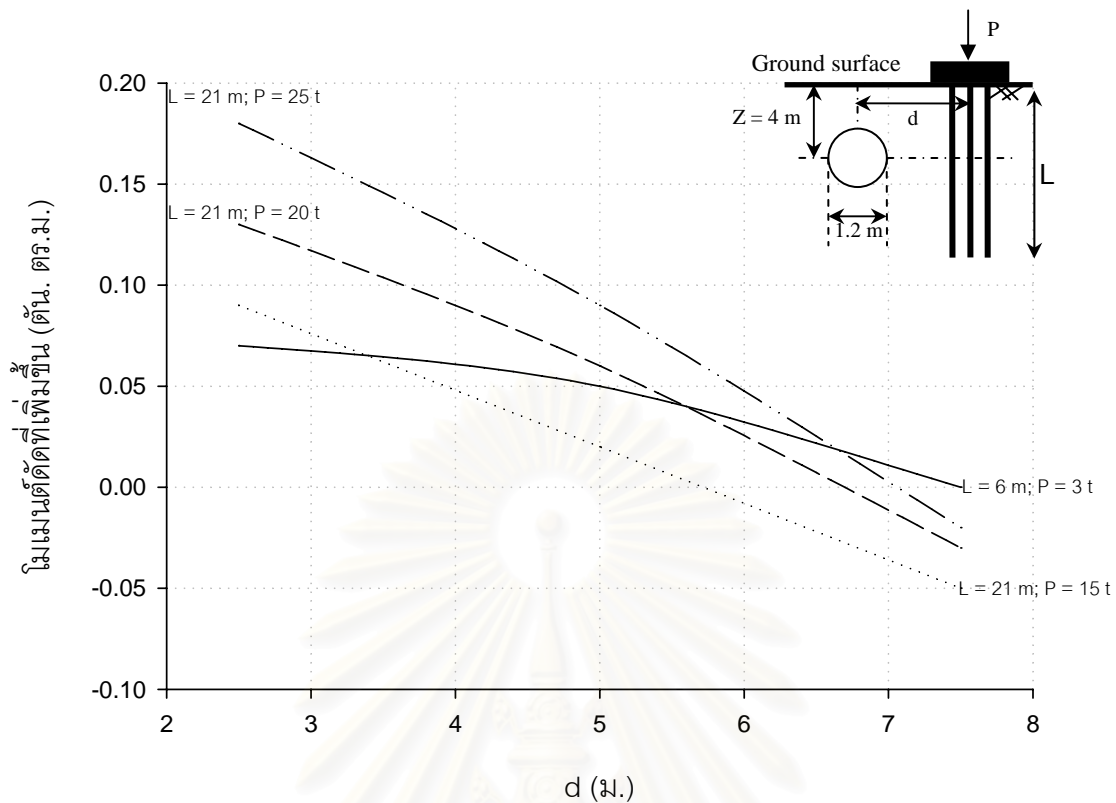
รูปที่ ก-3.4.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



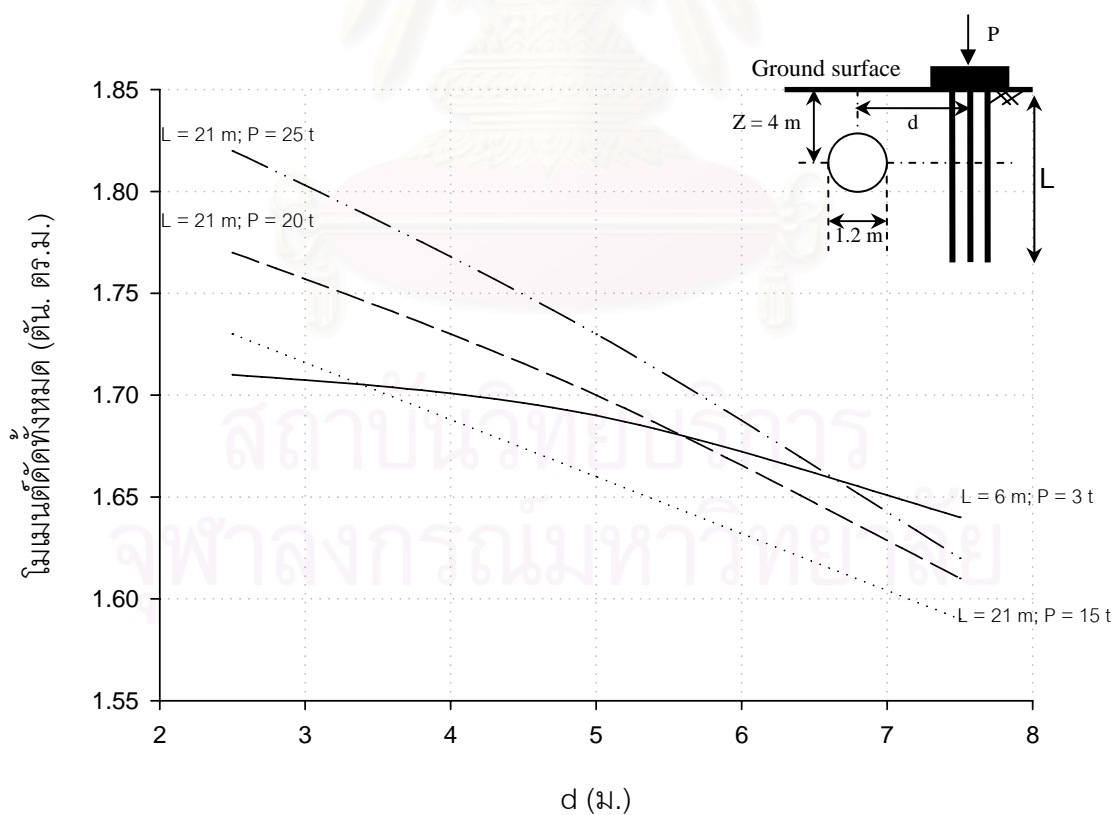
รูปที่ ก-3.4.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



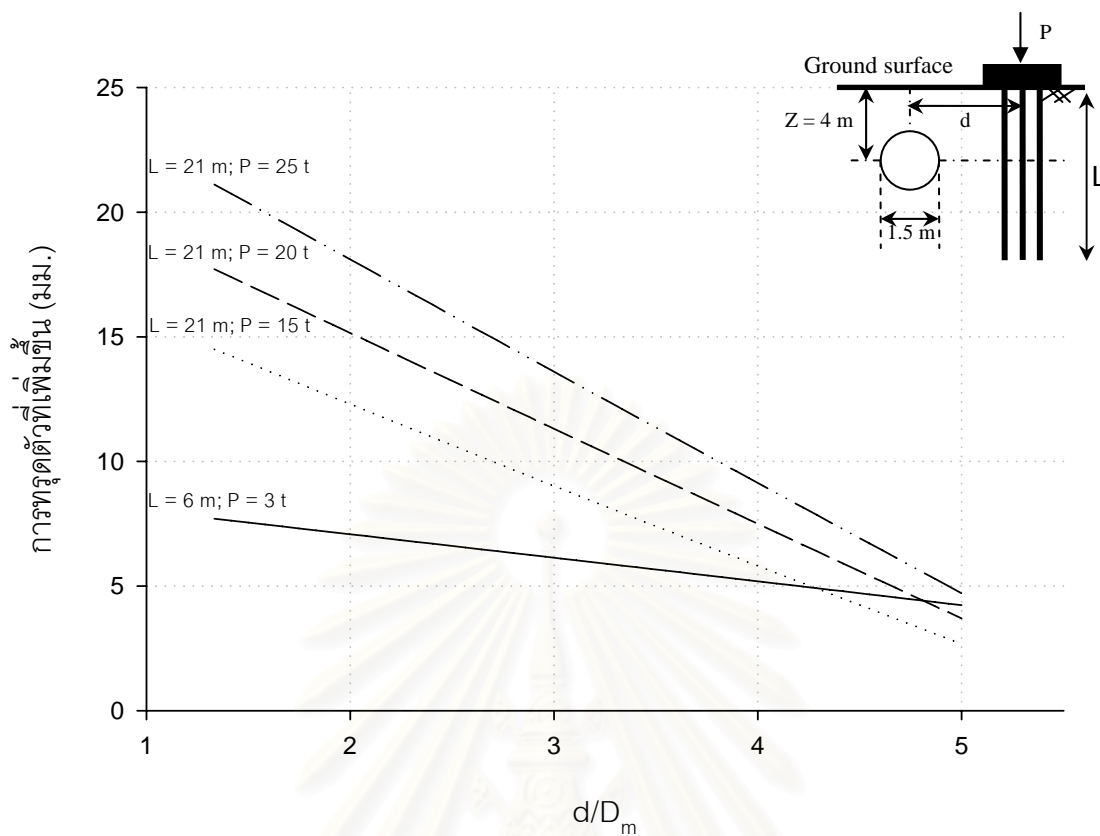
รูปที่ ก-3.4.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



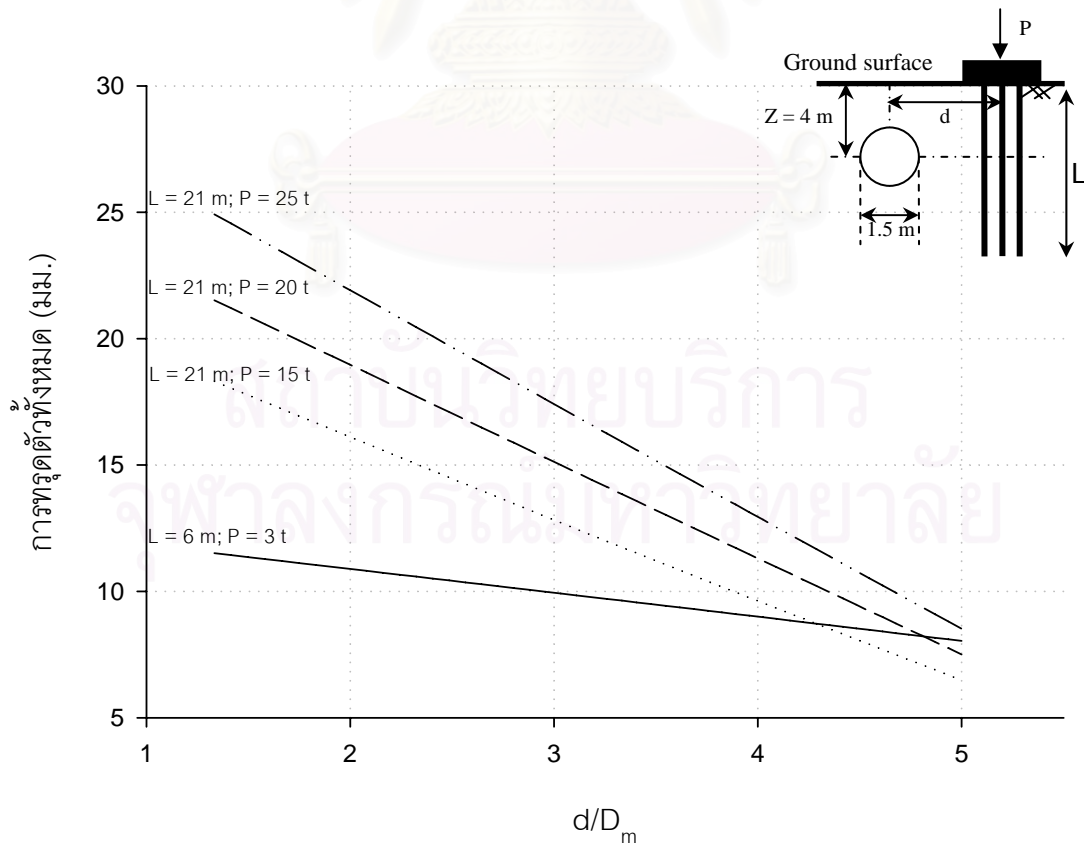
รูปที่ ก-3.4.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



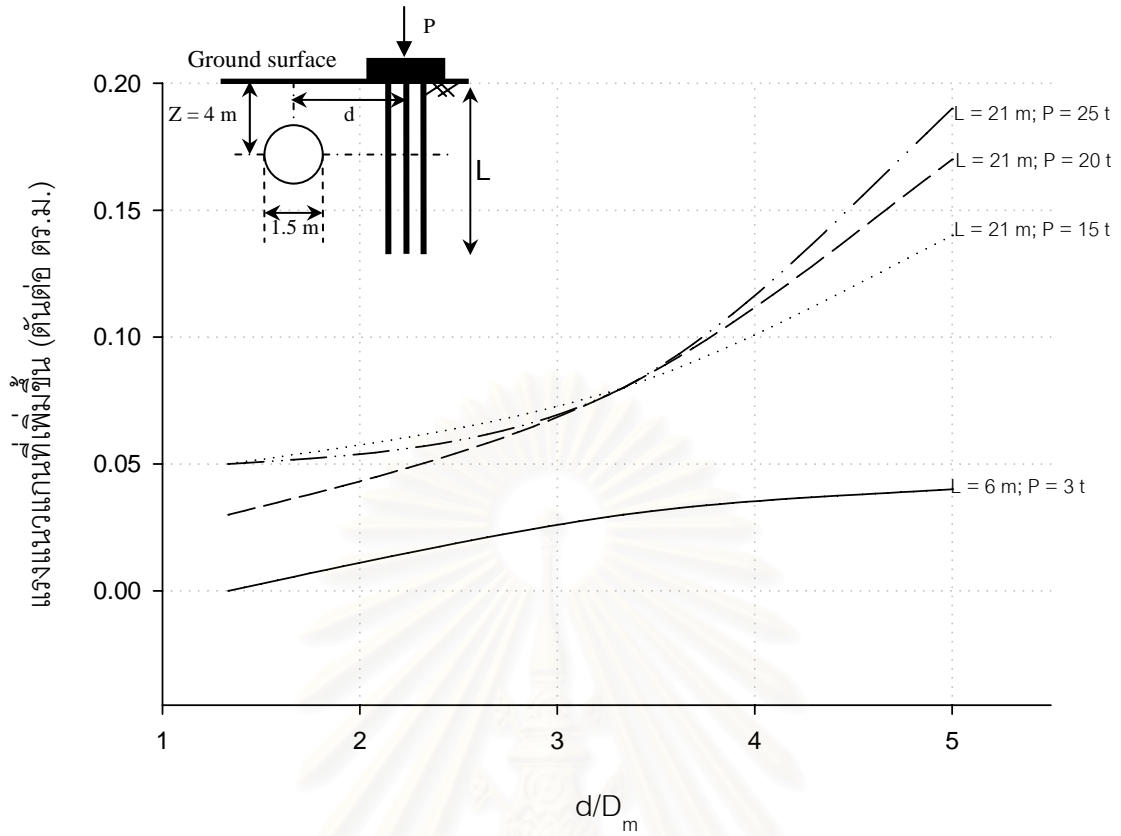
รูปที่ ก-3.4.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.2 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



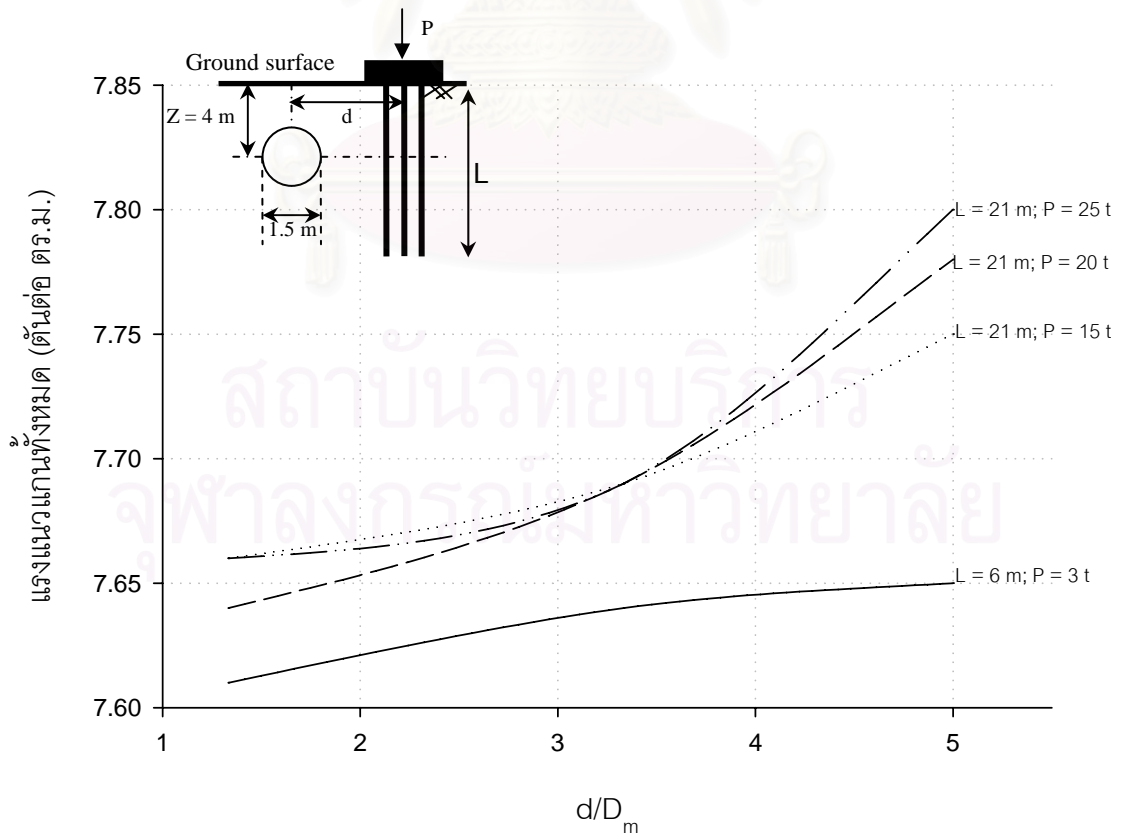
รูปที่ ก-3.5.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



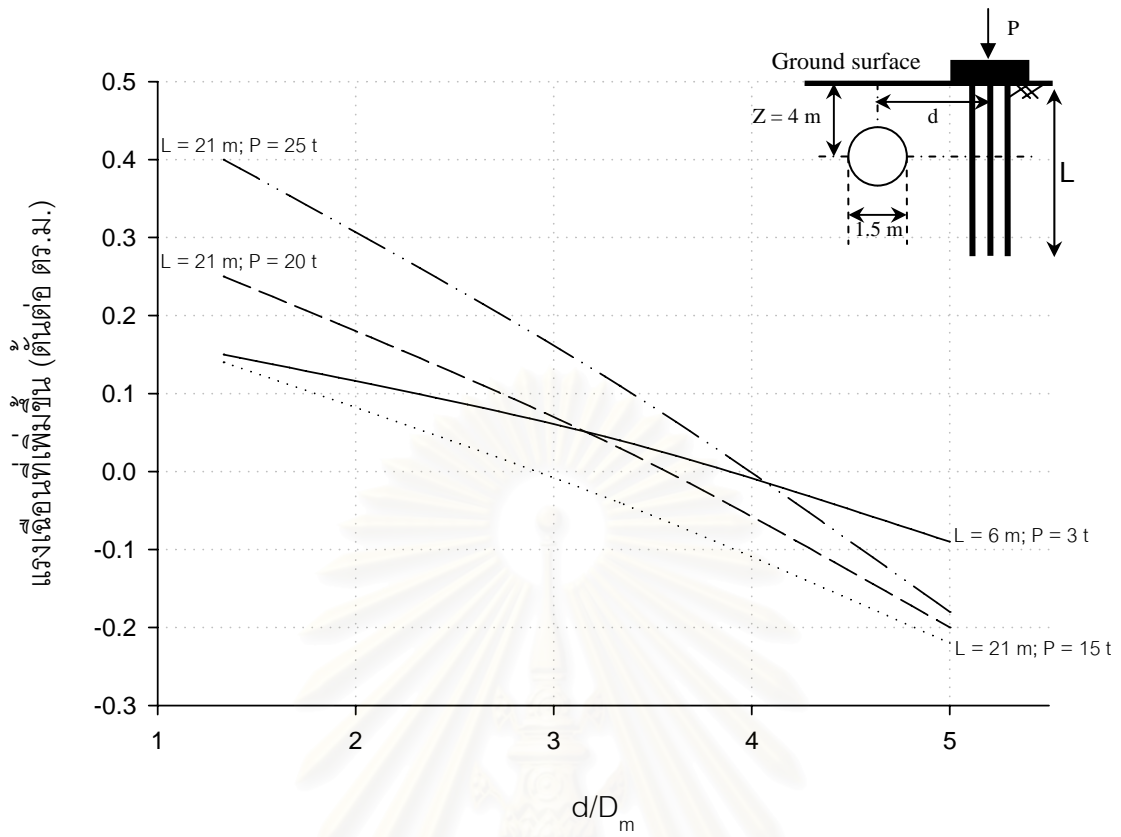
รูปที่ ก-3.5.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



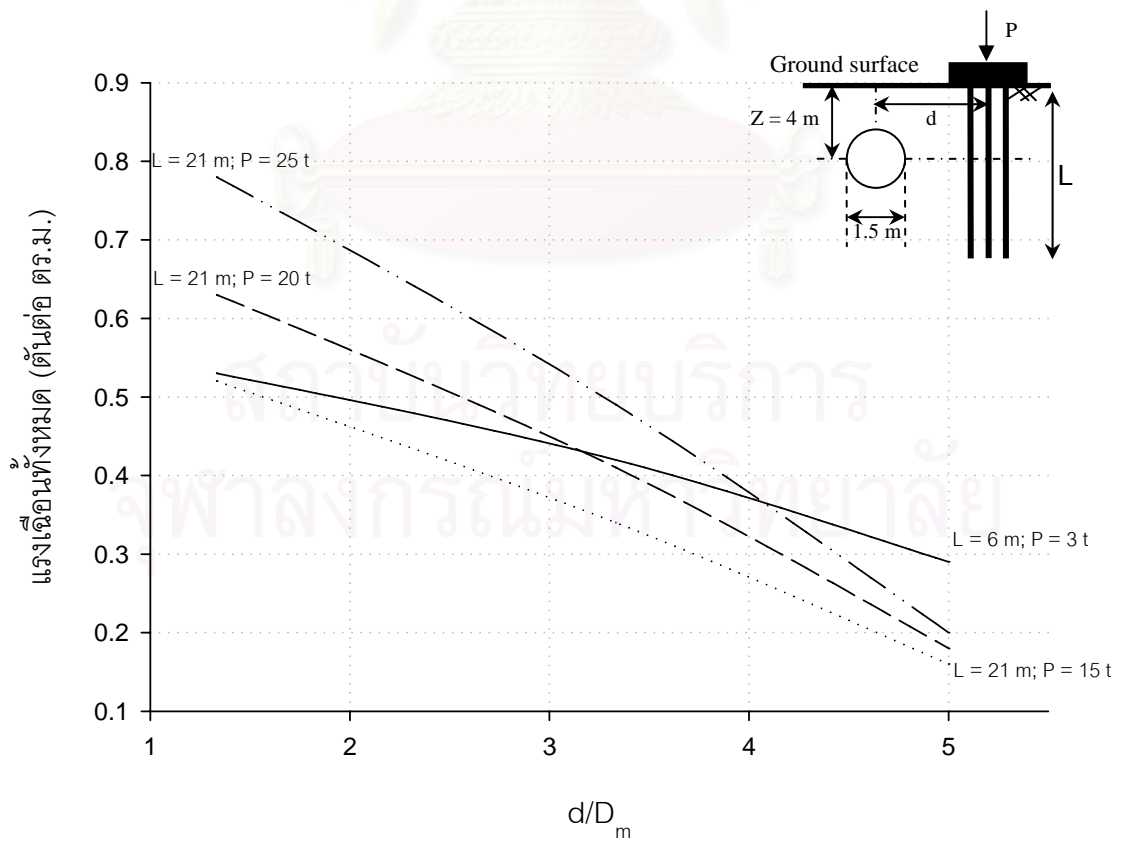
รูปที่ ก-3.5.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



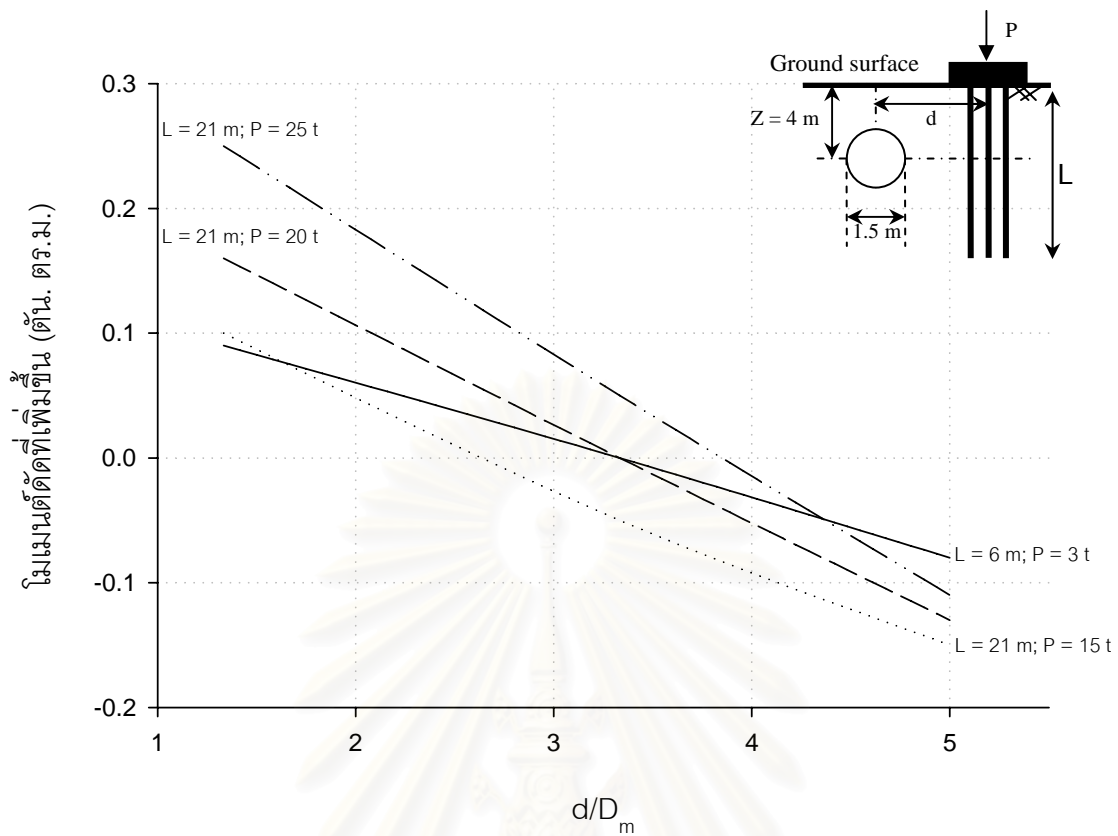
รูปที่ ก-3.5.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



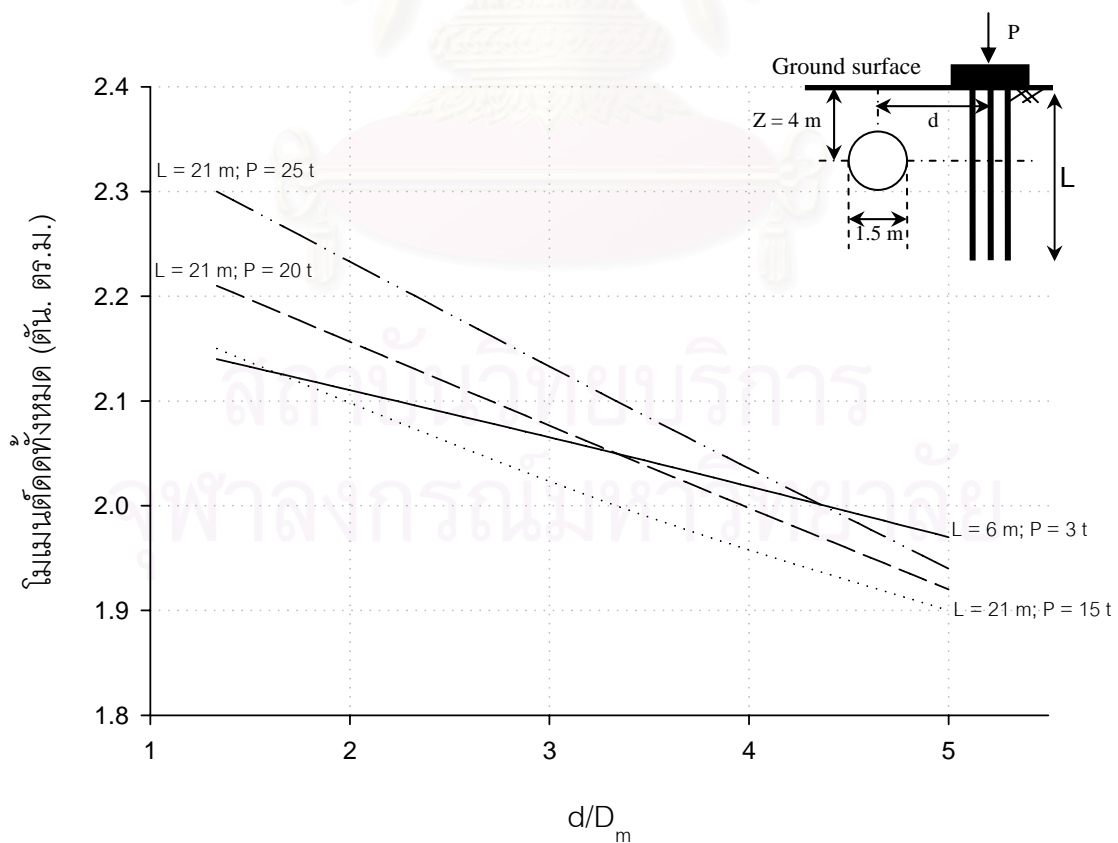
รูปที่ ก-3.5.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



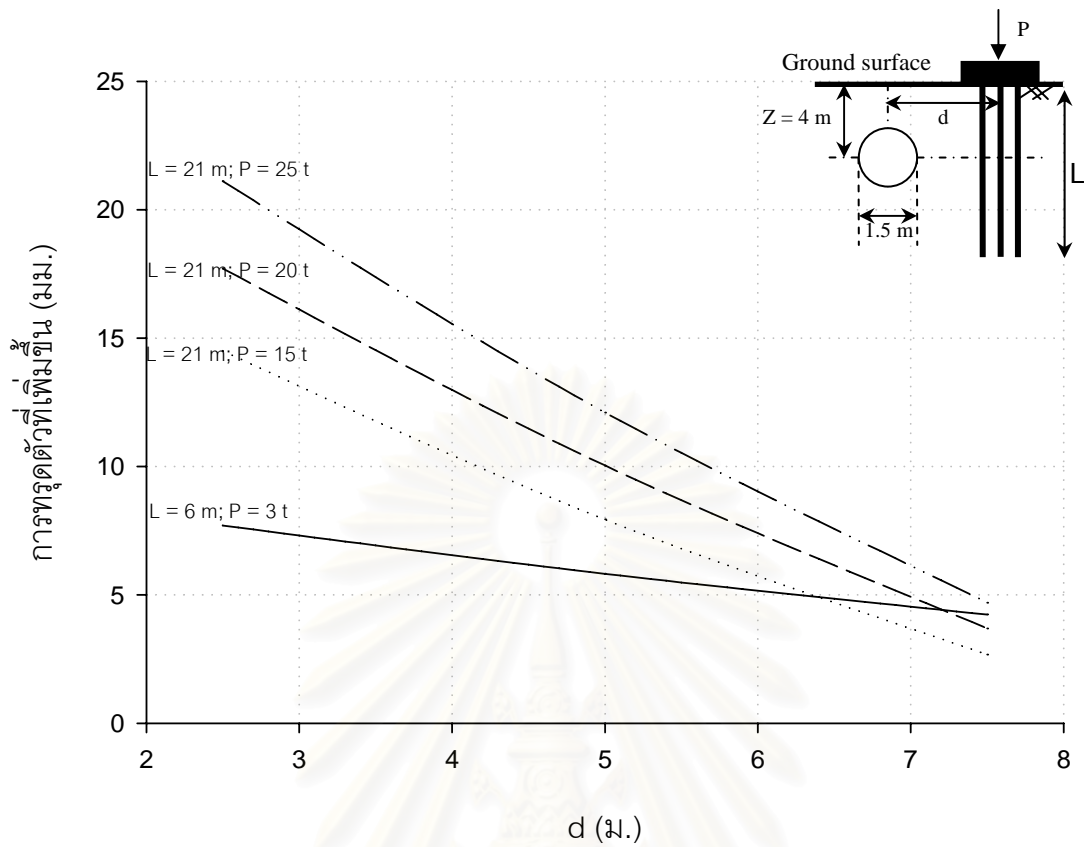
รูปที่ ก-3.5.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



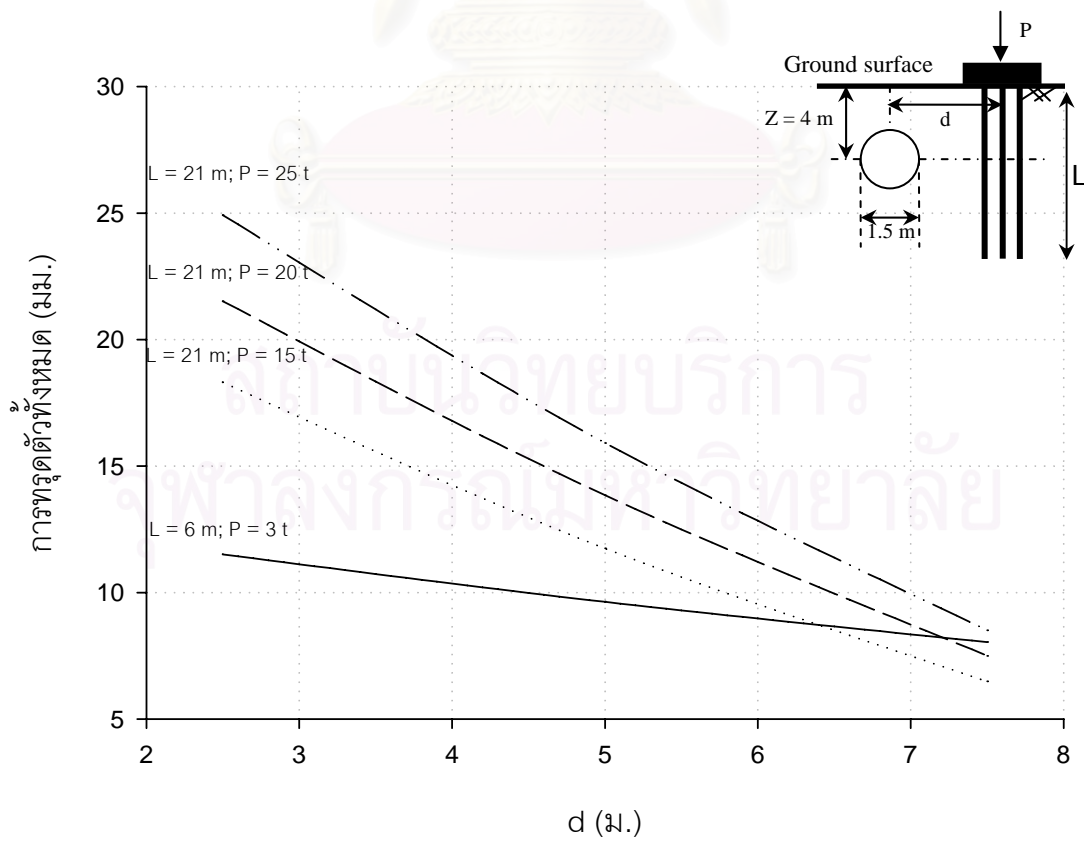
รูปที่ ก-3.5.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



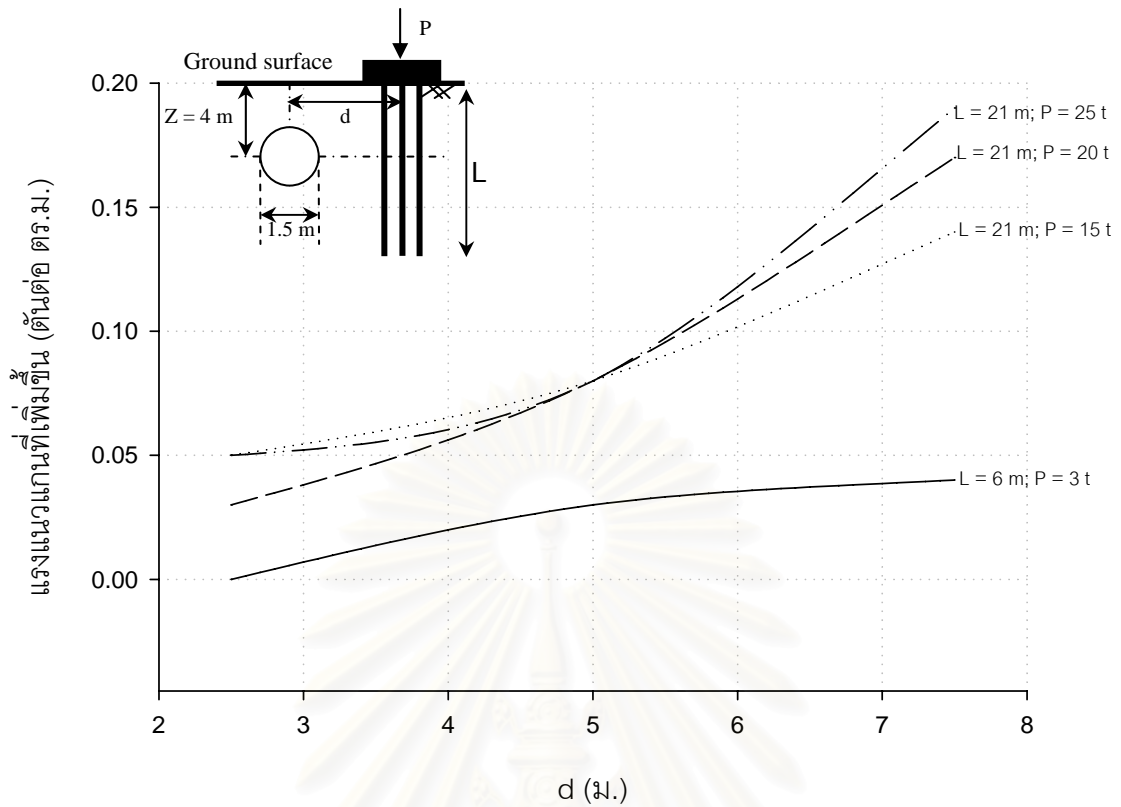
รูปที่ ก-3.5.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



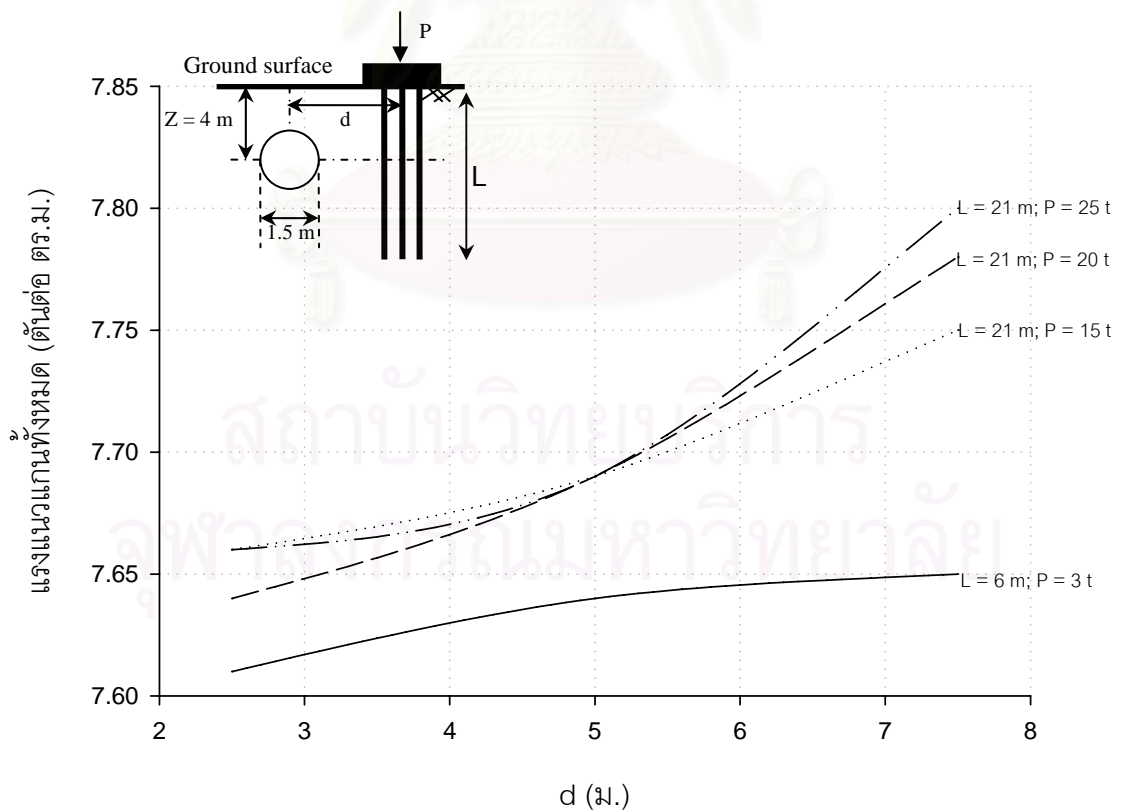
รูปที่ ก-3.5.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



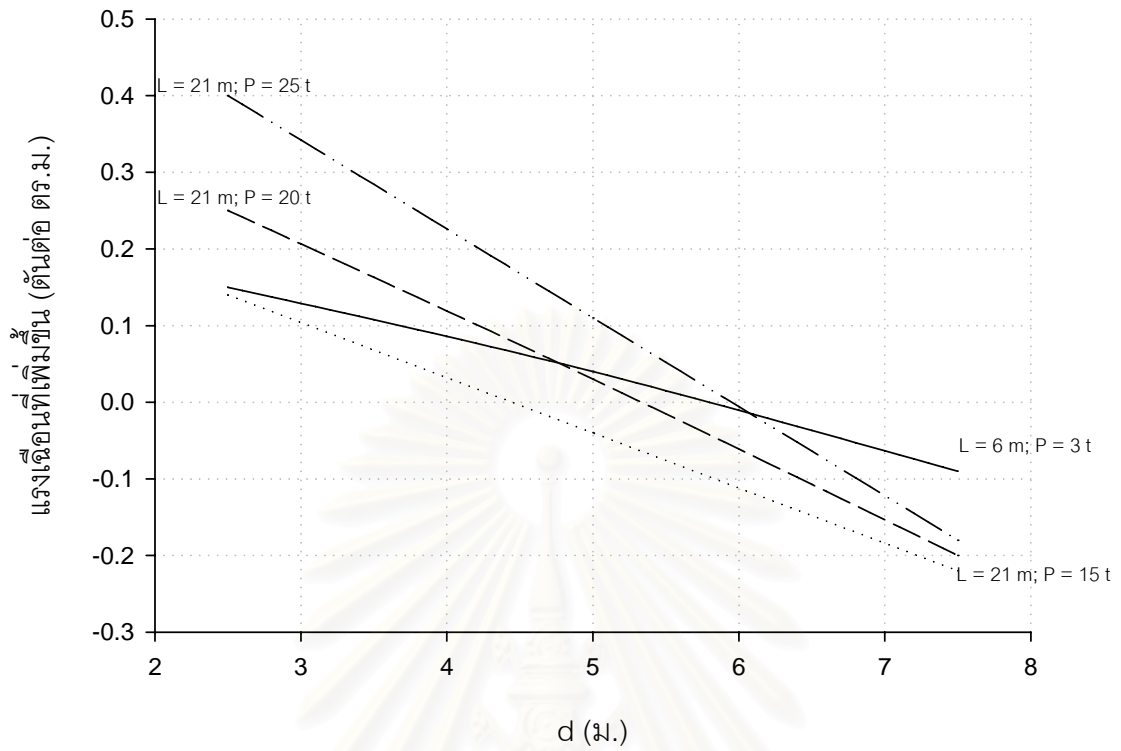
รูปที่ ก-3.5.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



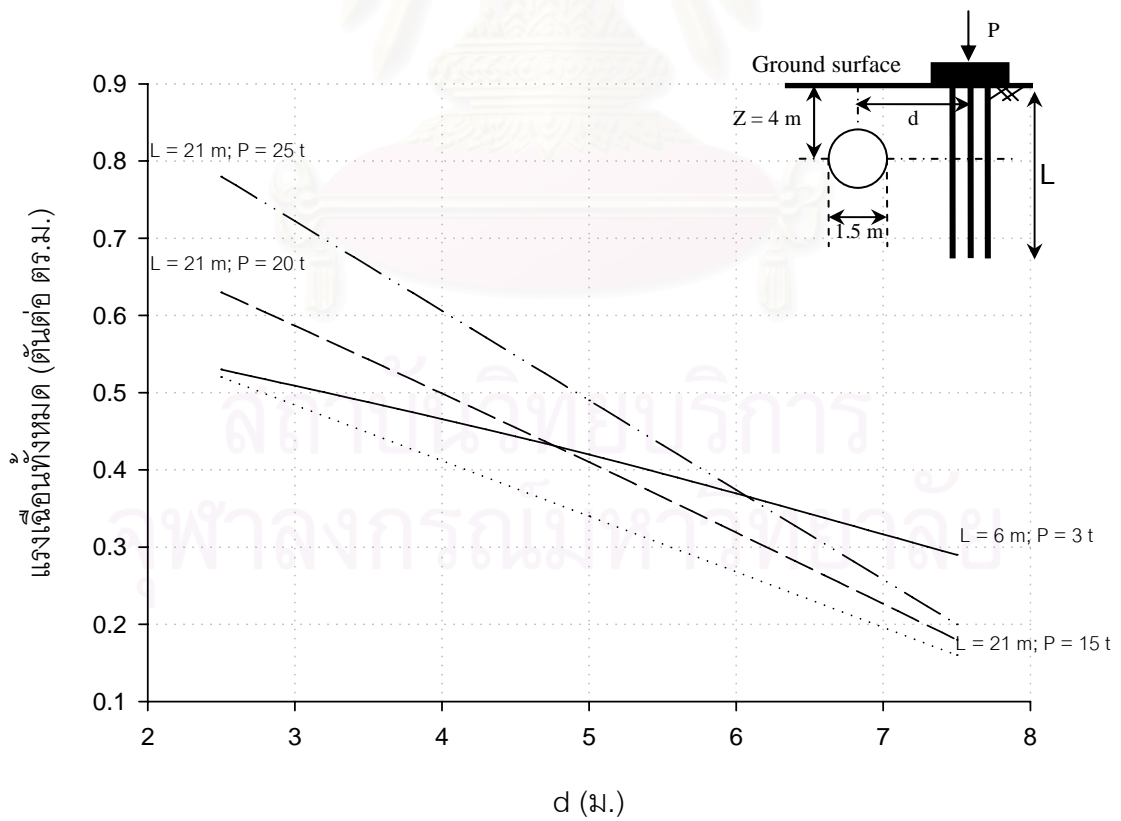
รูปที่ ก-3.5.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



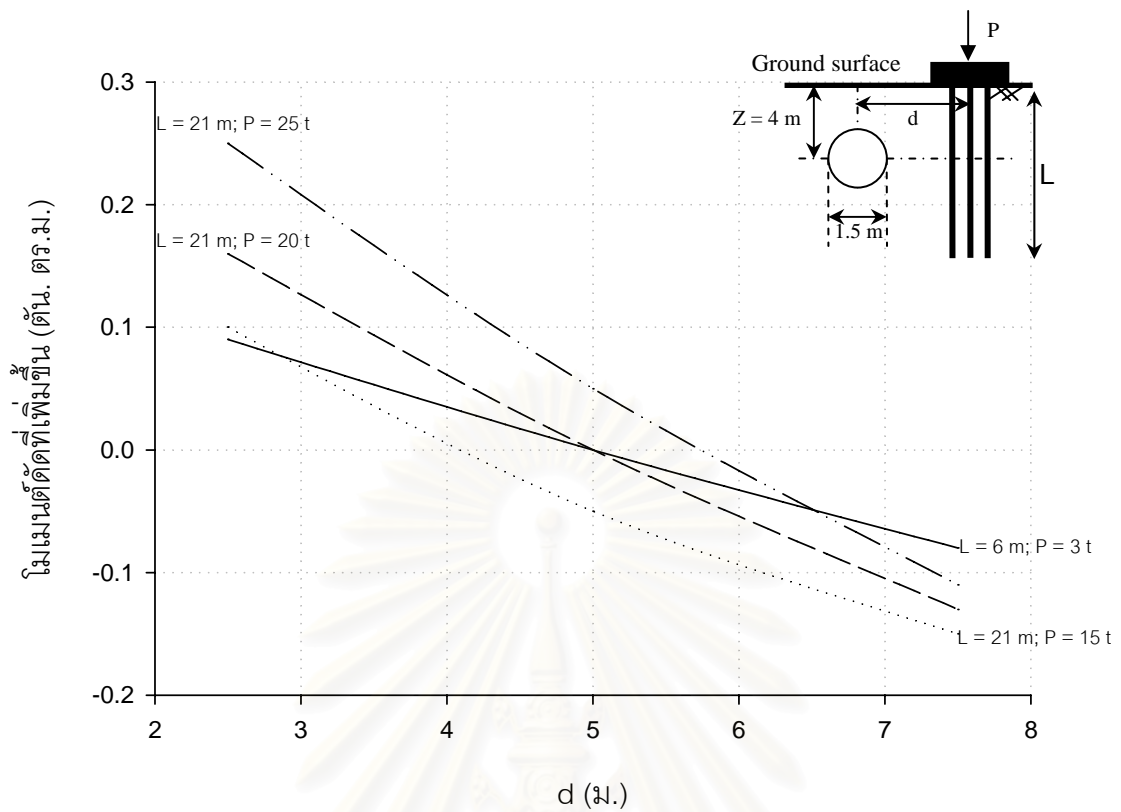
รูปที่ ก-3.5.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



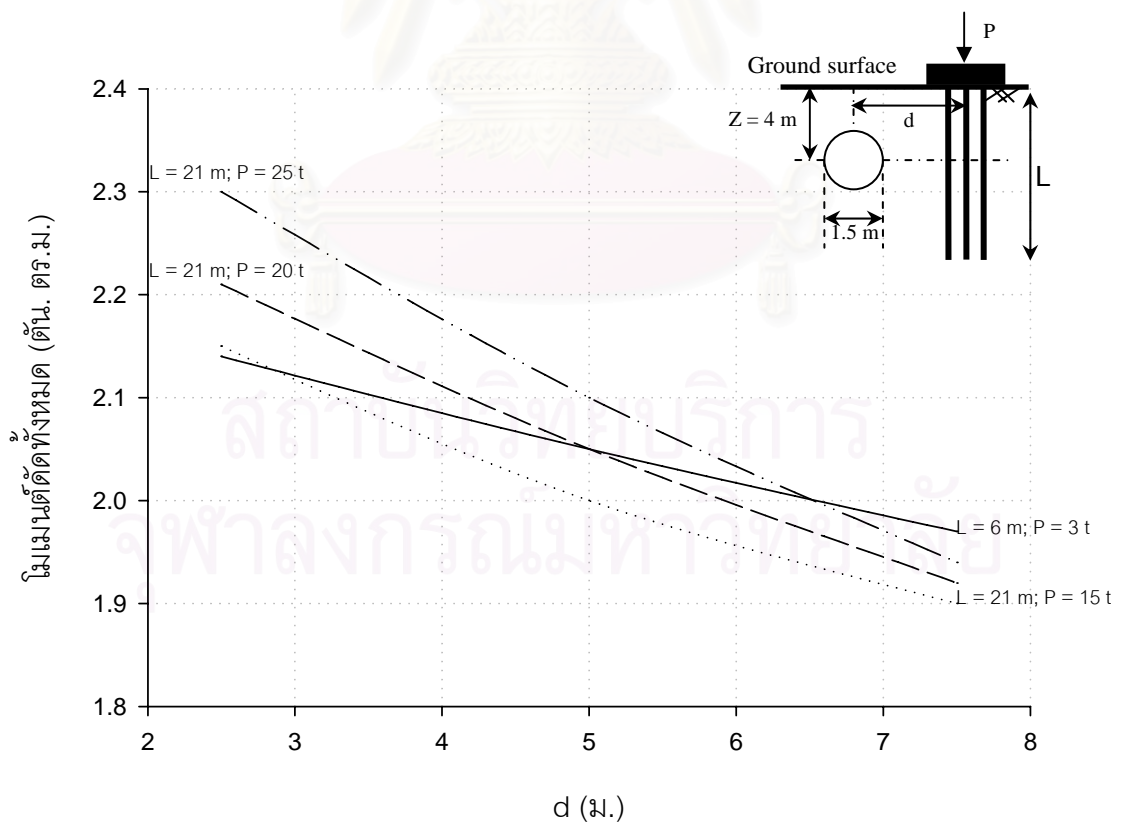
รูปที่ ก-3.5.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



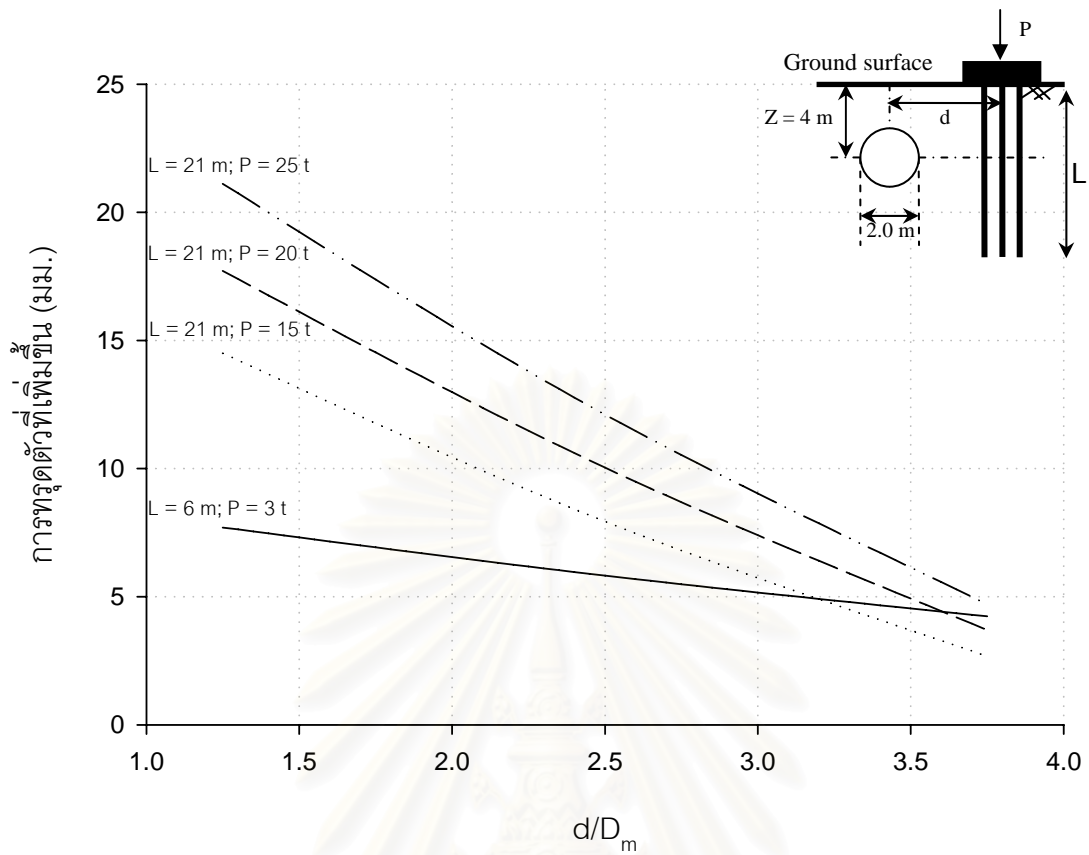
รูปที่ ก-3.5.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



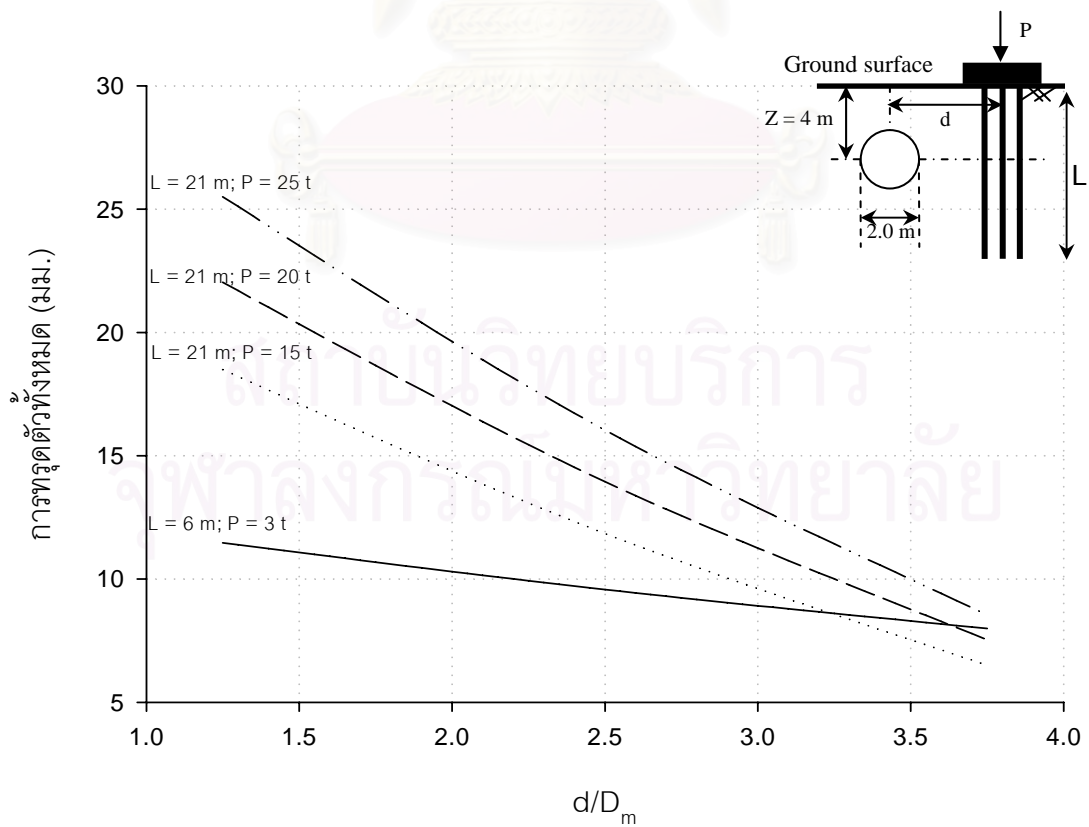
รูปที่ ก-3.5.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



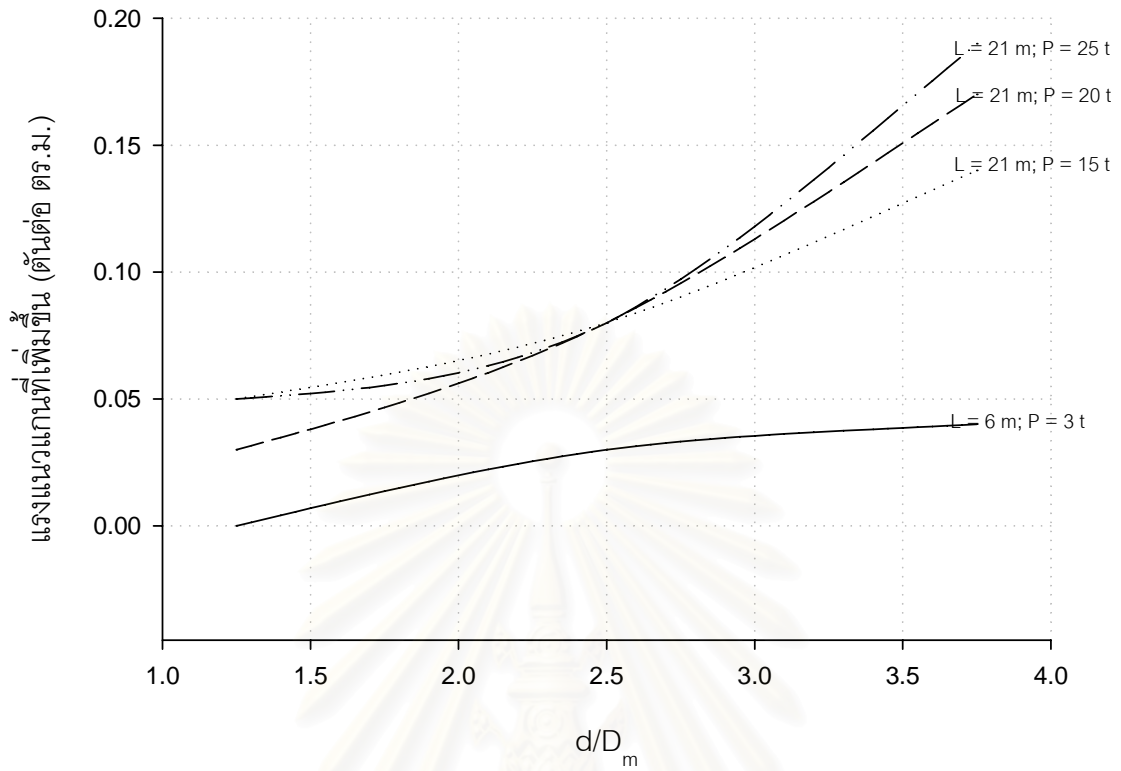
รูปที่ ก-3.5.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 1.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



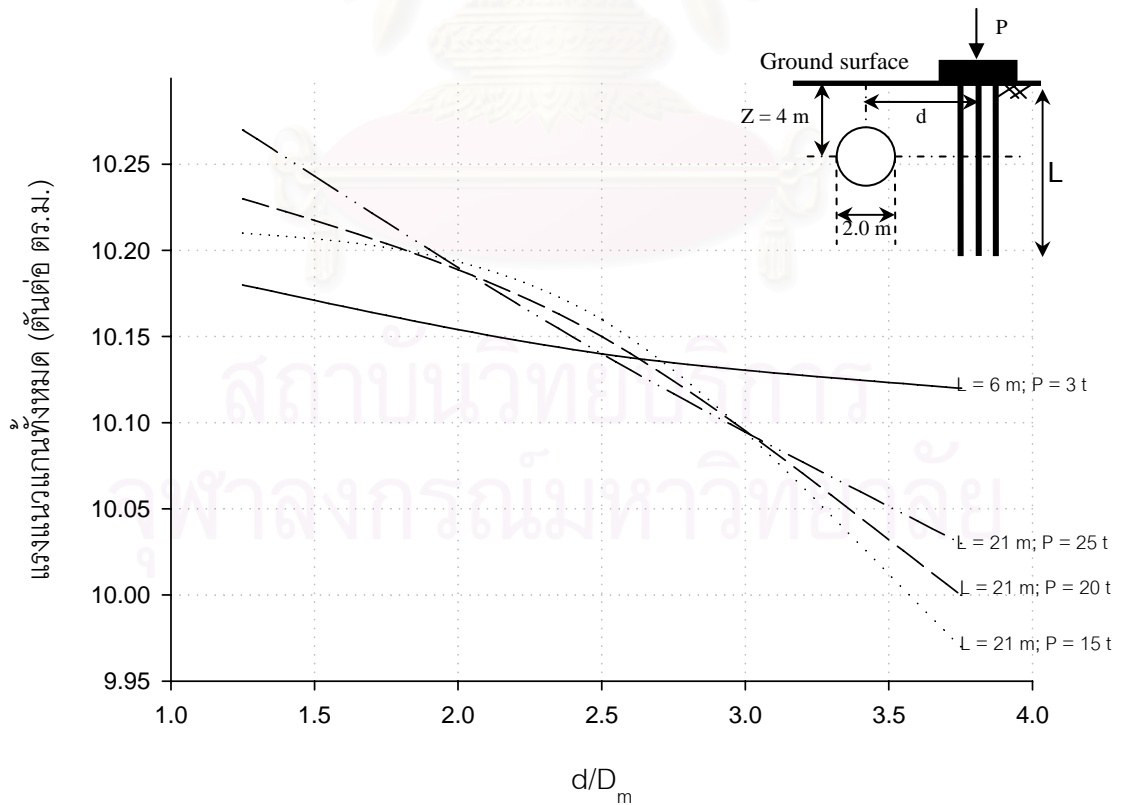
รูปที่ ก-3.6.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



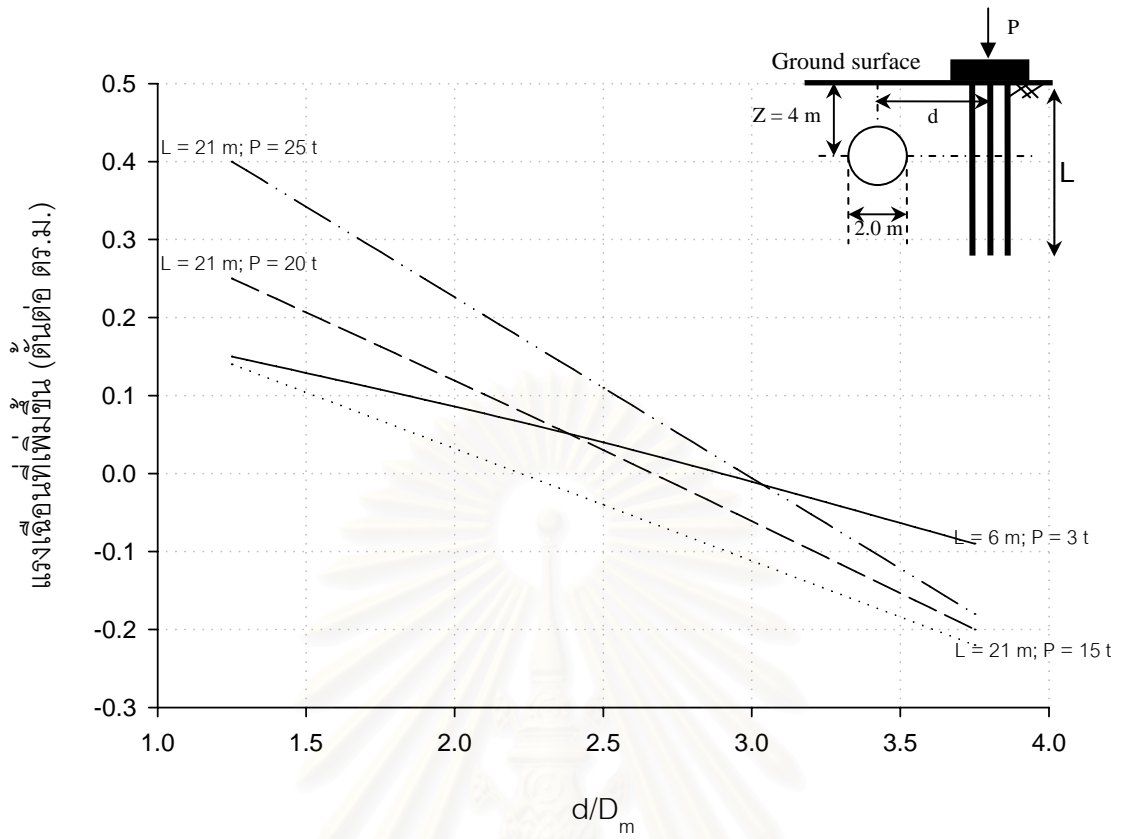
รูปที่ ก-3.6.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



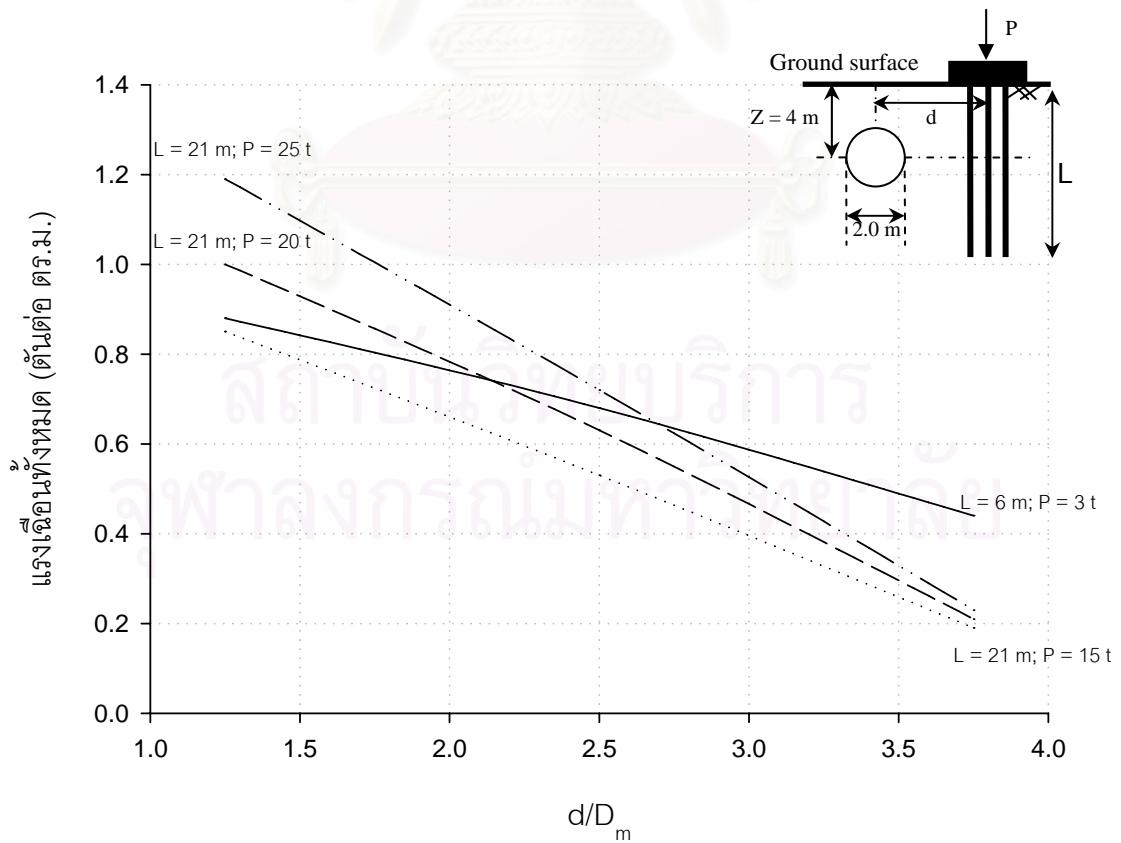
รูปที่ ก-3.6.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



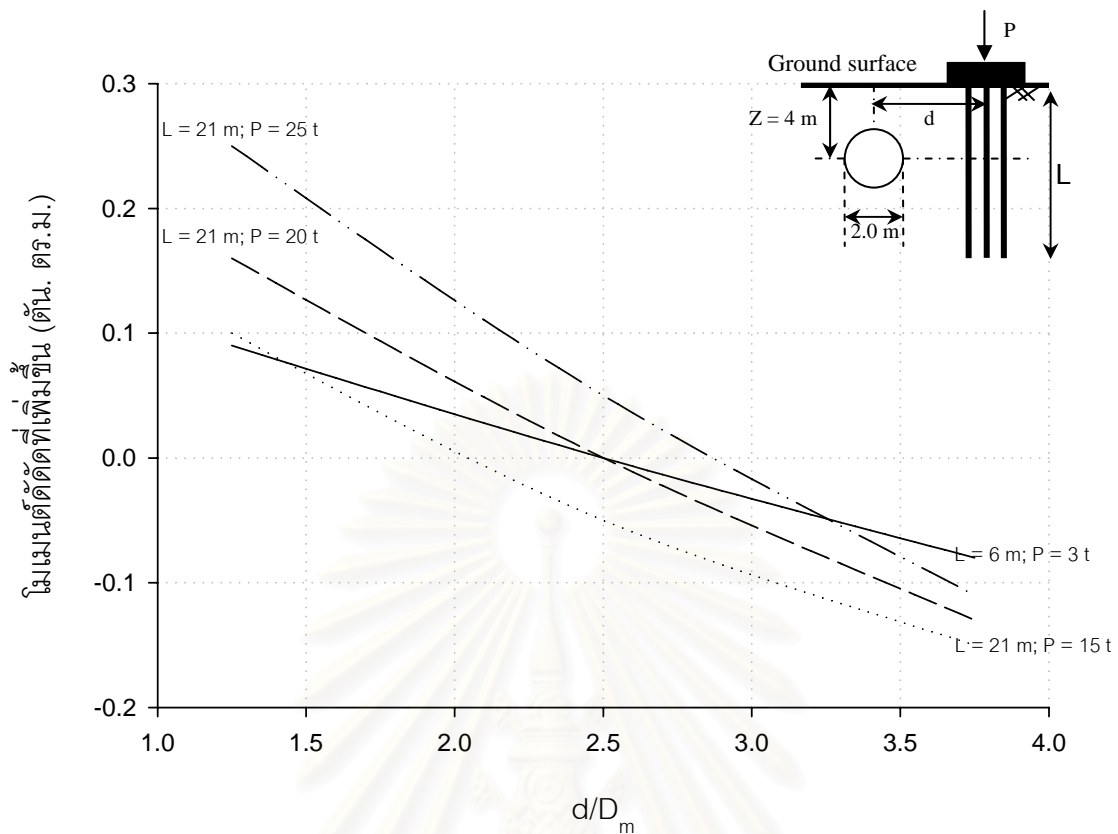
รูปที่ ก-3.6.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



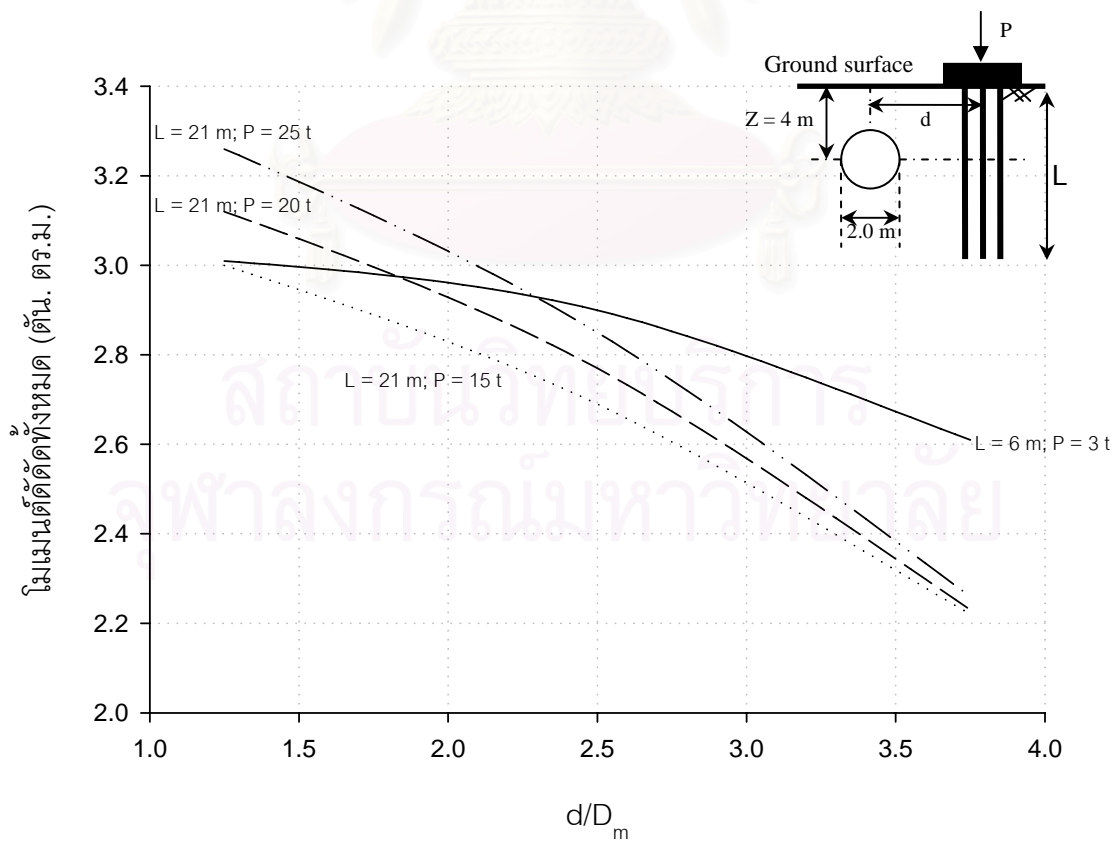
รูปที่ ก-3.6.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



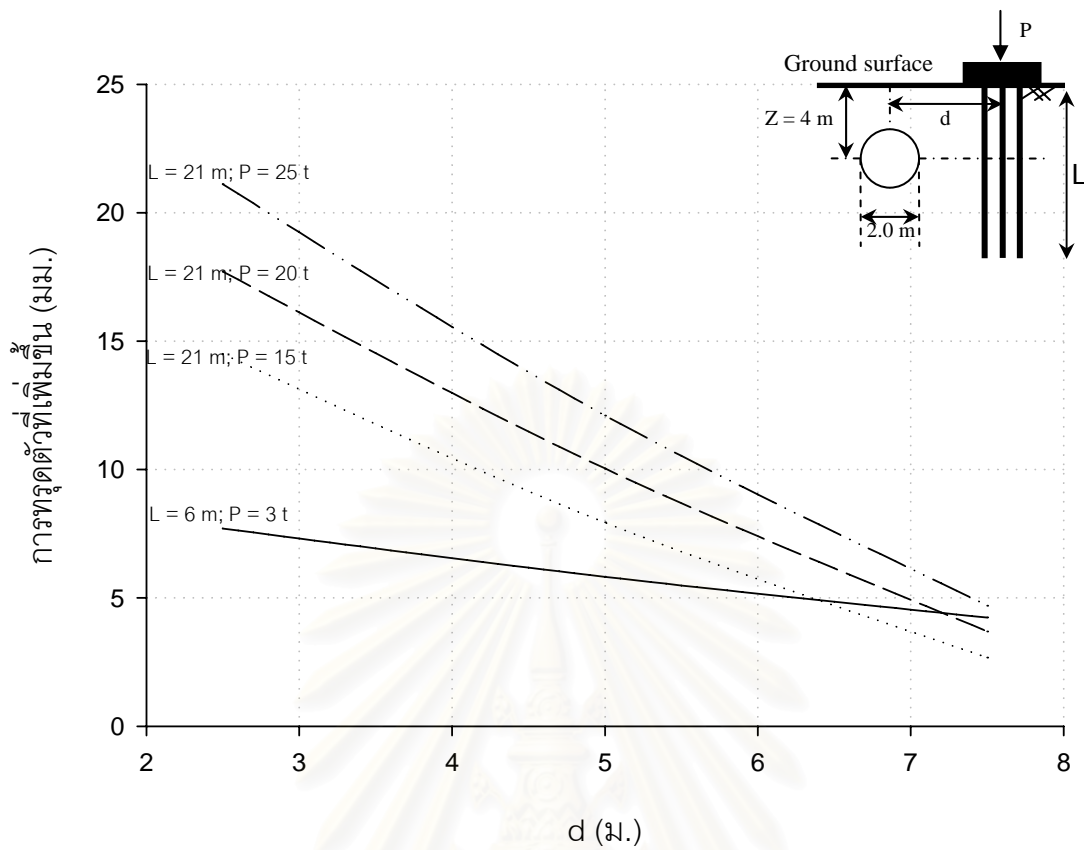
รูปที่ ก-3.6.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



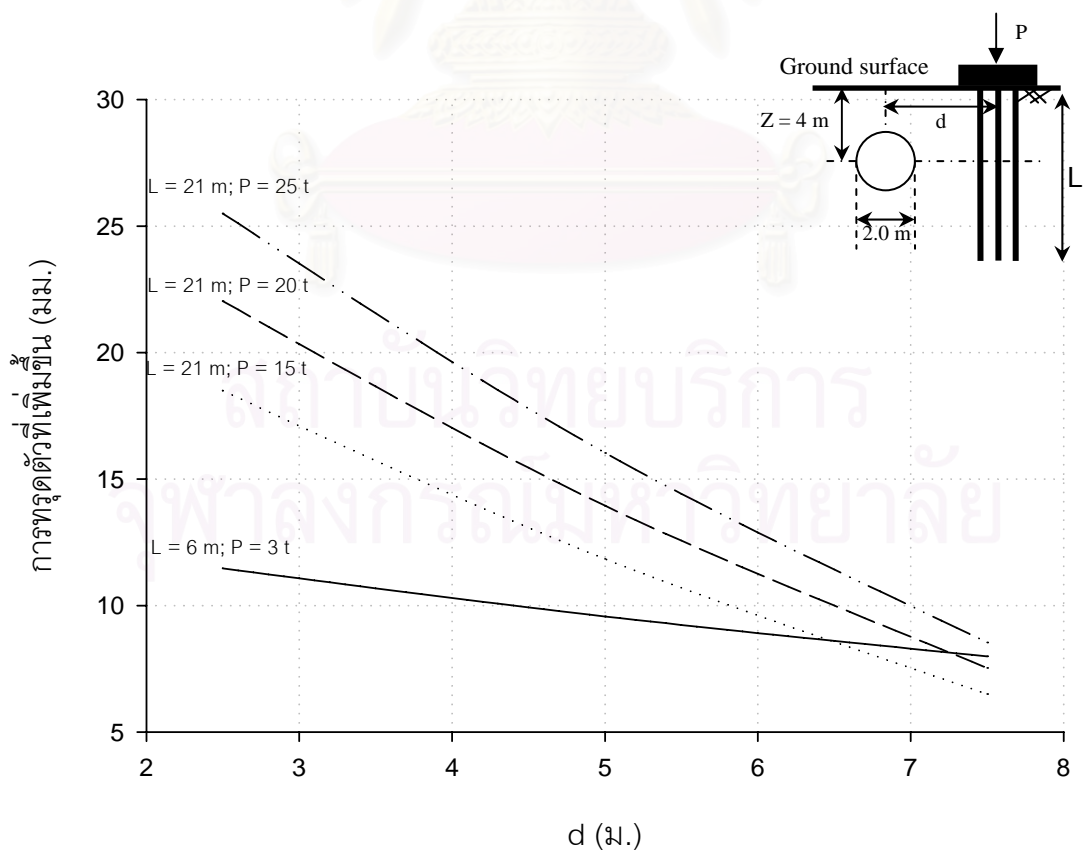
รูปที่ ก-3.6.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



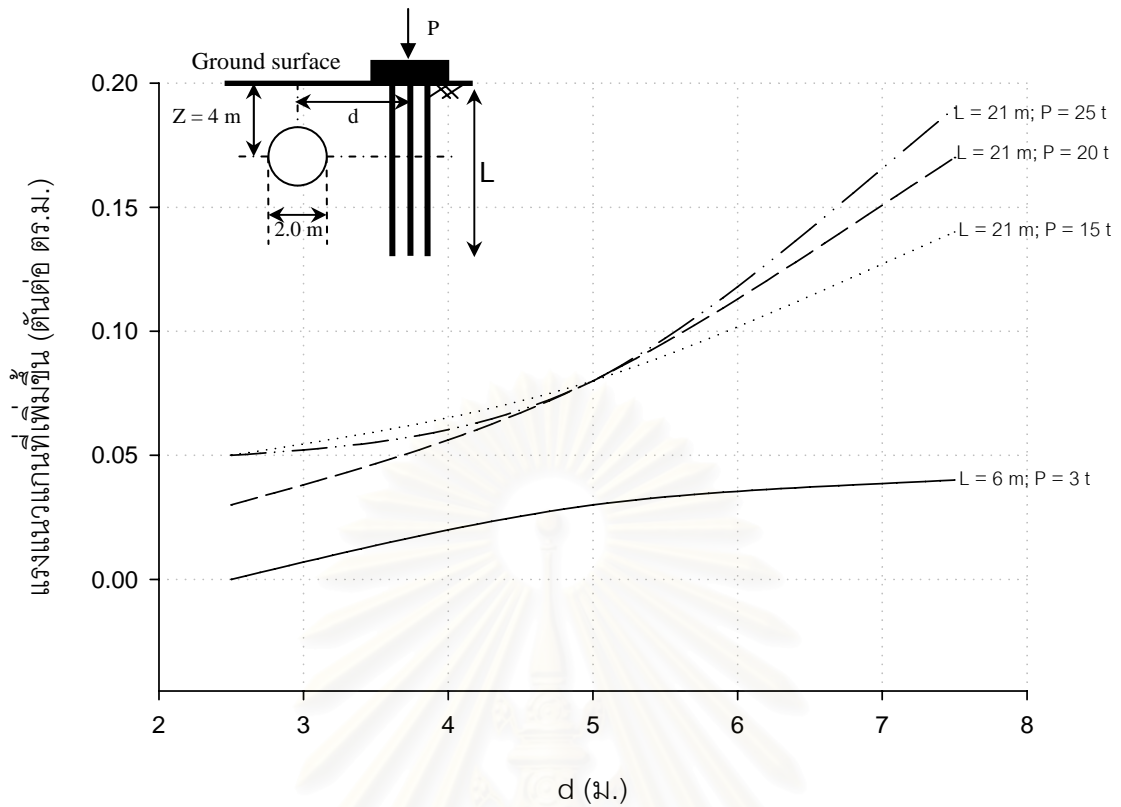
รูปที่ ก-3.6.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



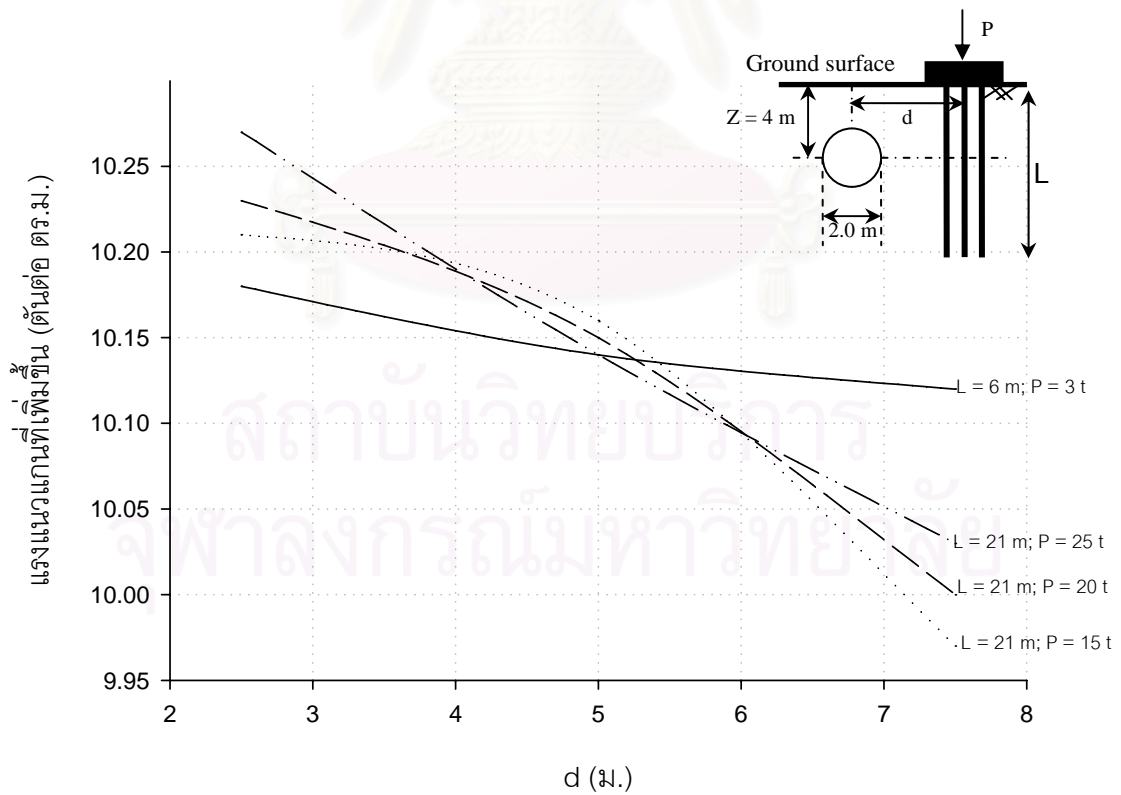
รูปที่ ก-3.6.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



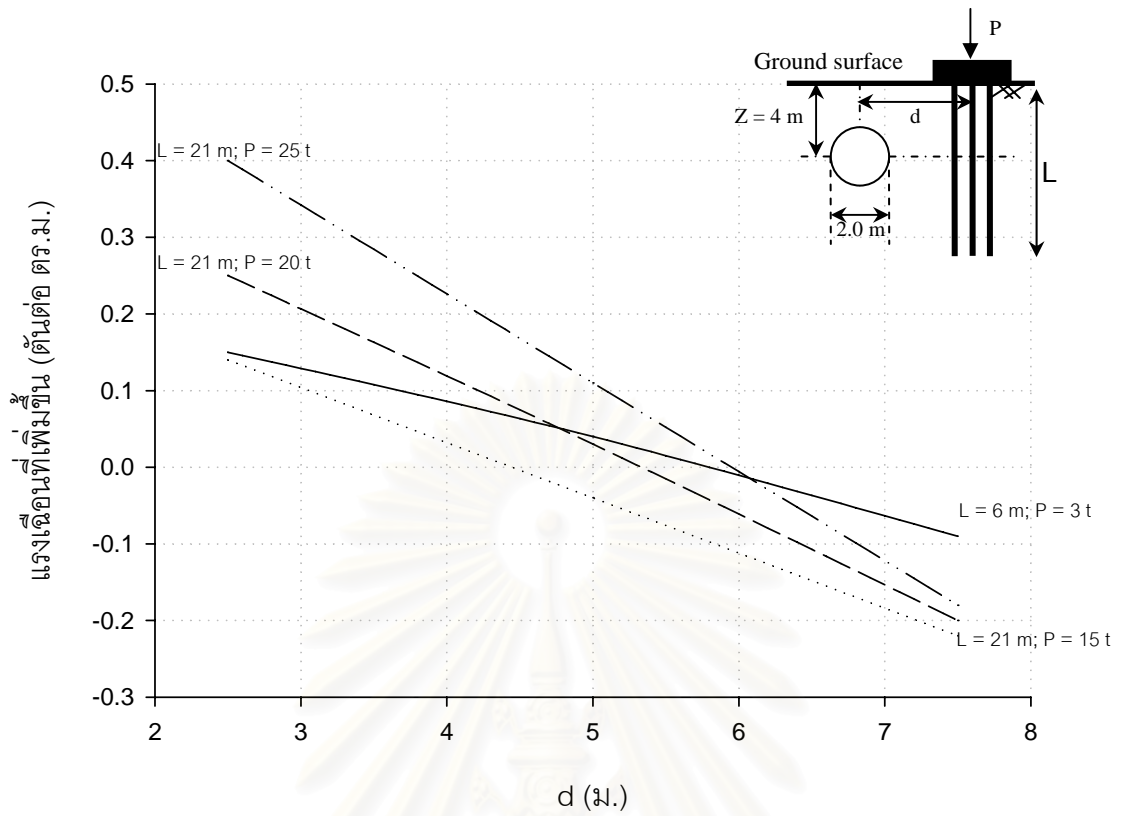
รูปที่ ก-3.6.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



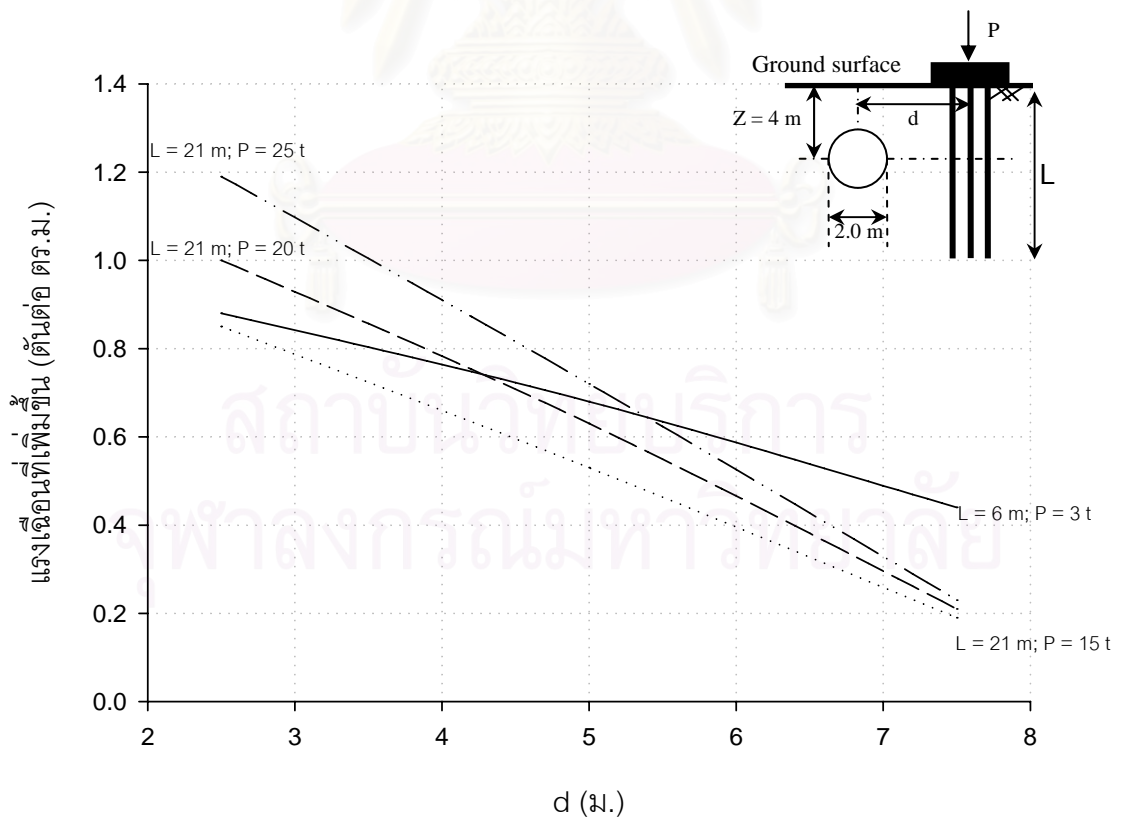
รูปที่ ก-3.6.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



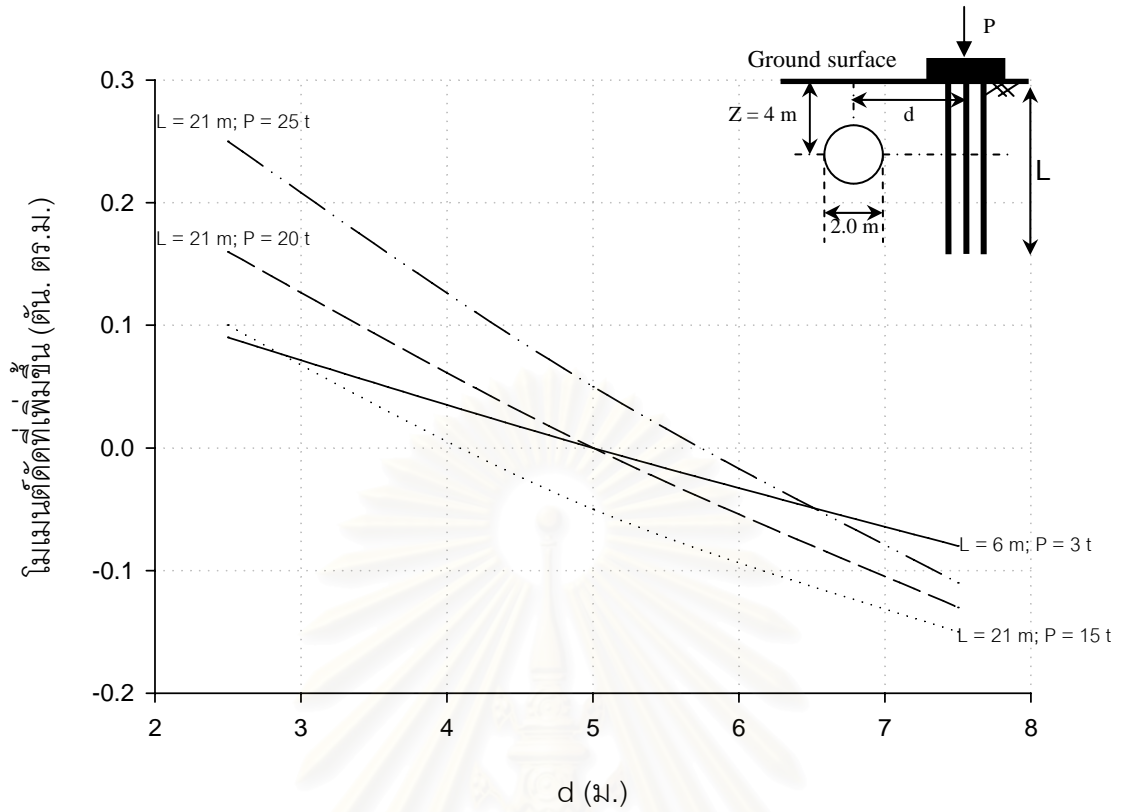
รูปที่ ก-3.6.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



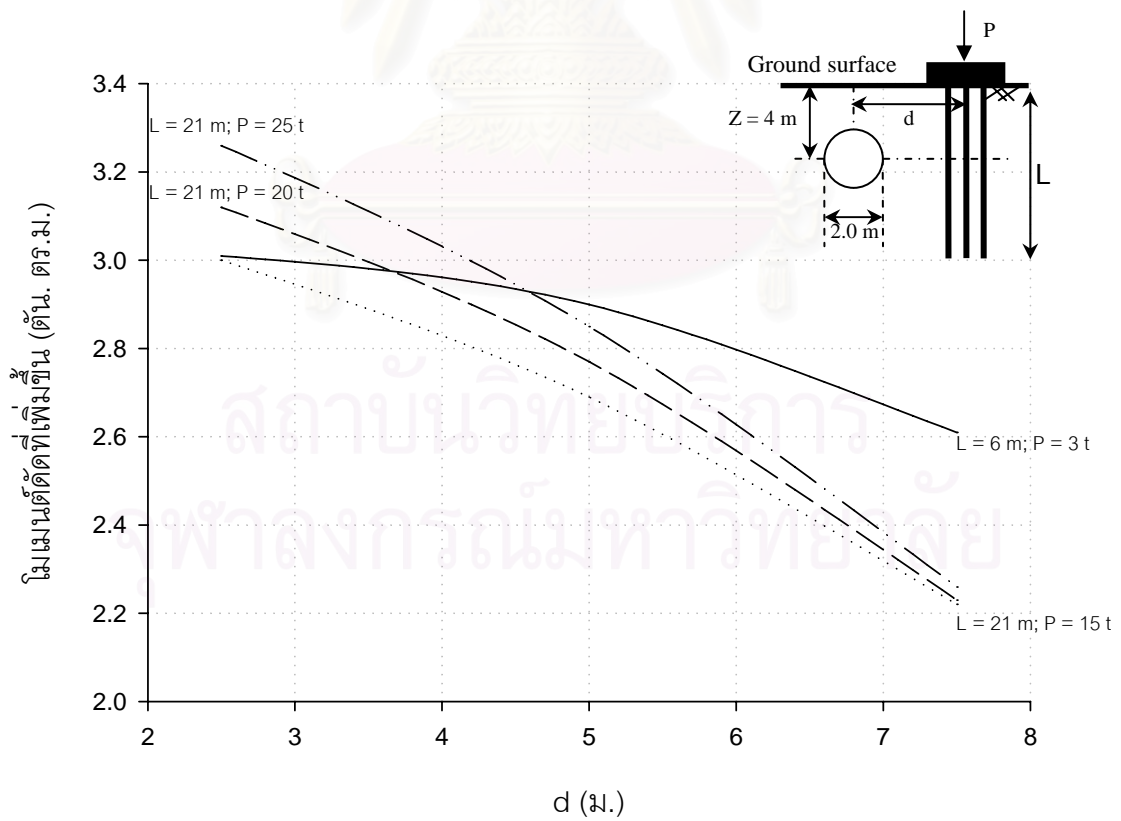
รูปที่ ก-3.6.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



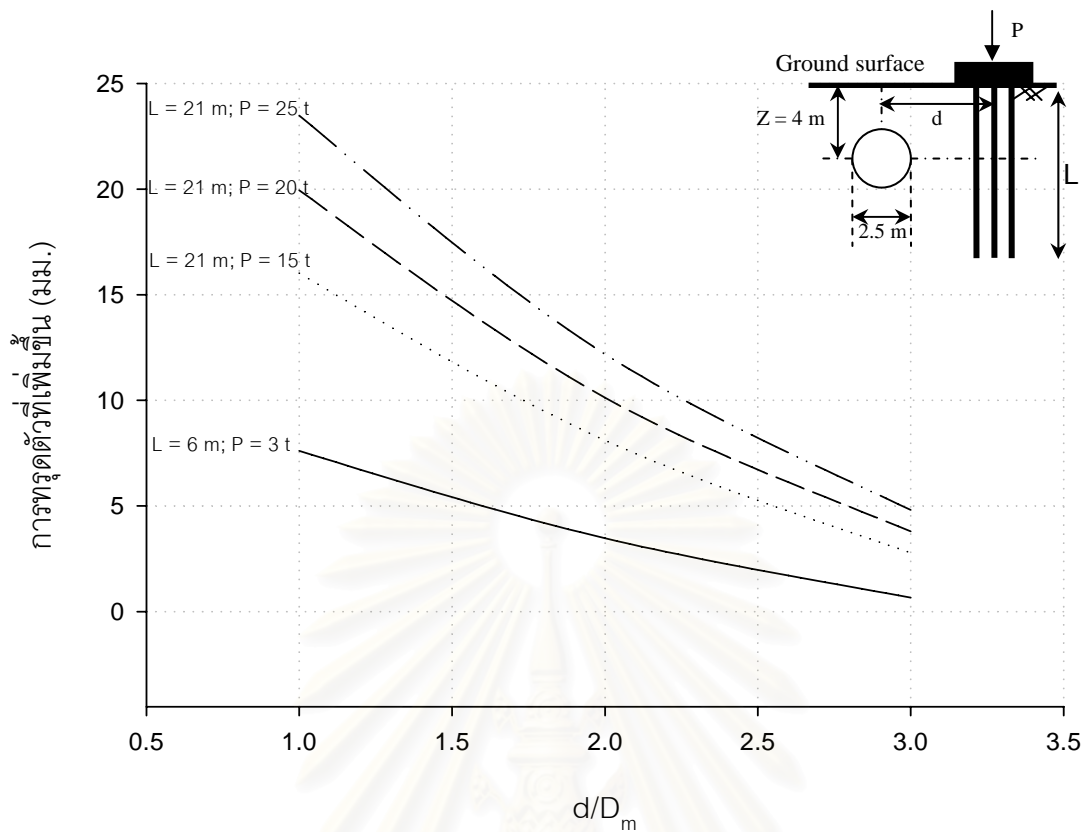
รูปที่ ก-3.6.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



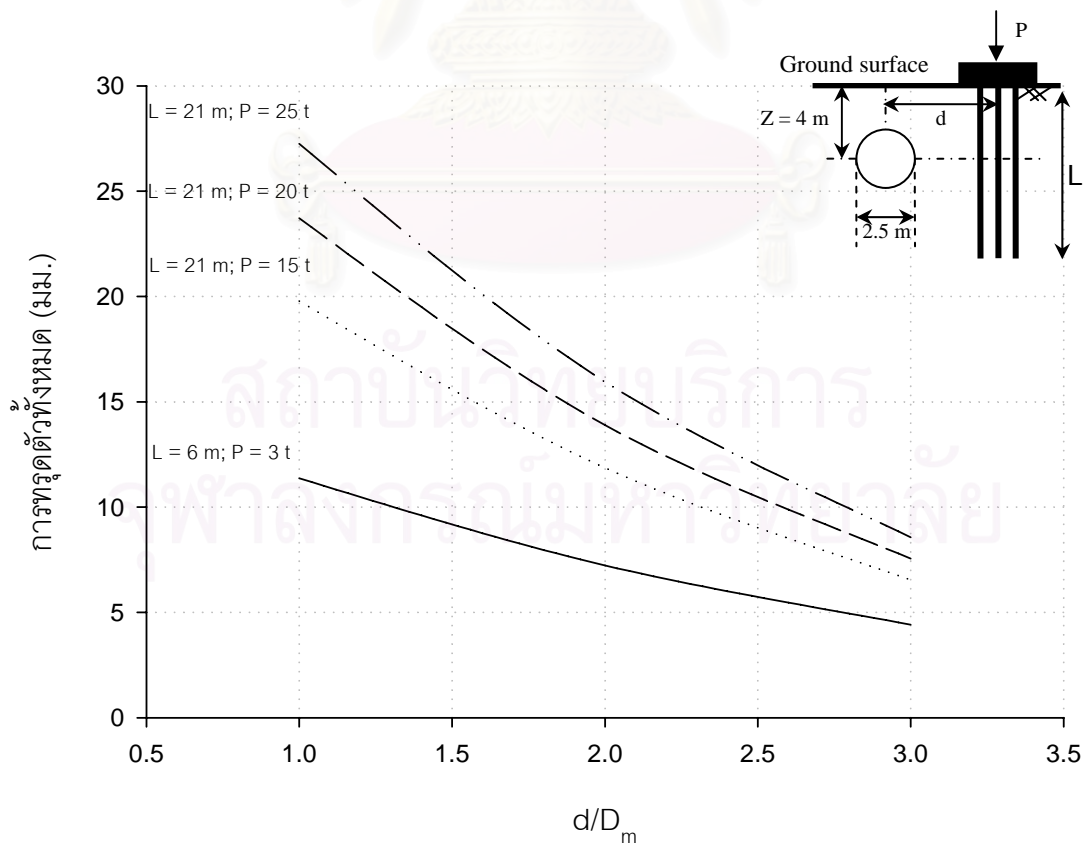
รูปที่ ก-3.6.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



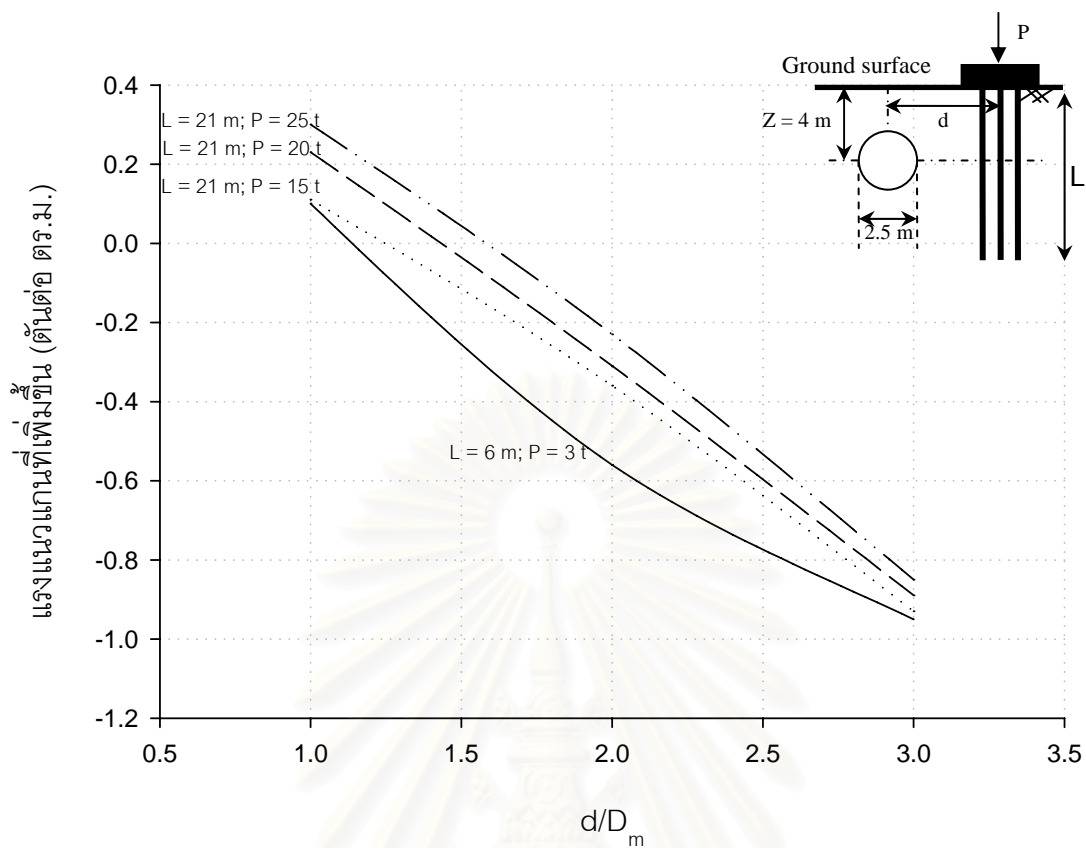
รูปที่ ก-3.6.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 2.0 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



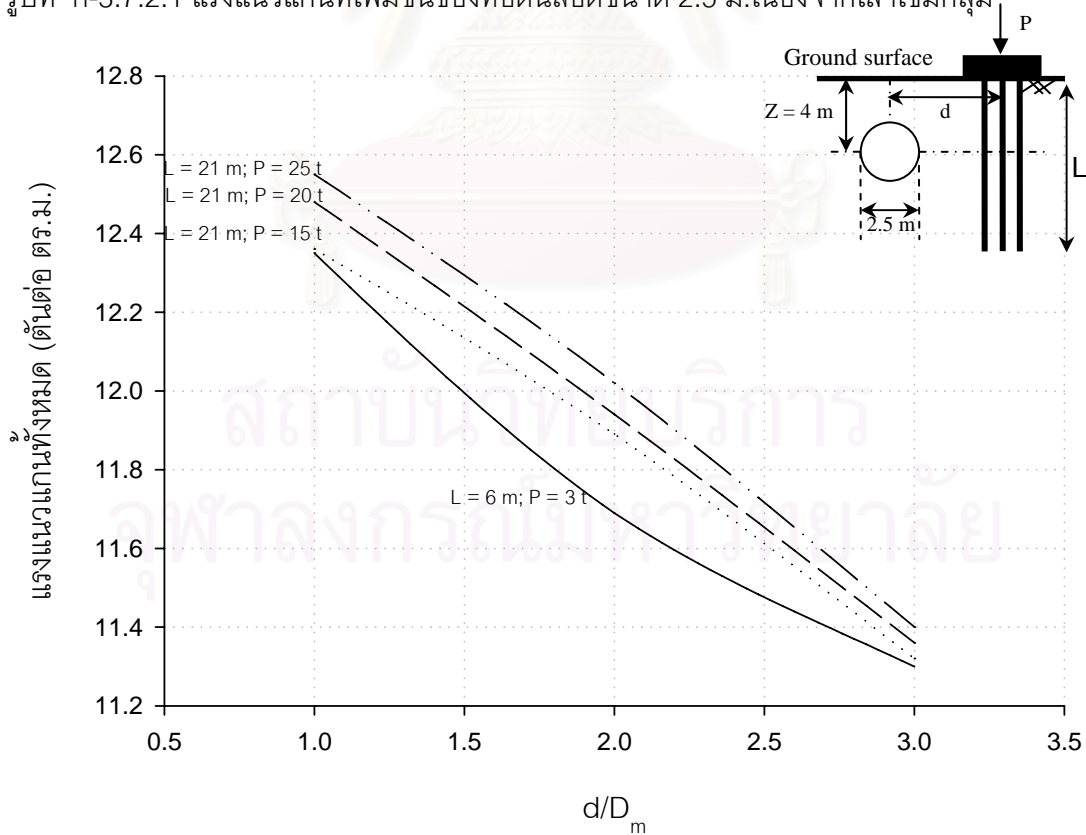
รูปที่ ก-3.7.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



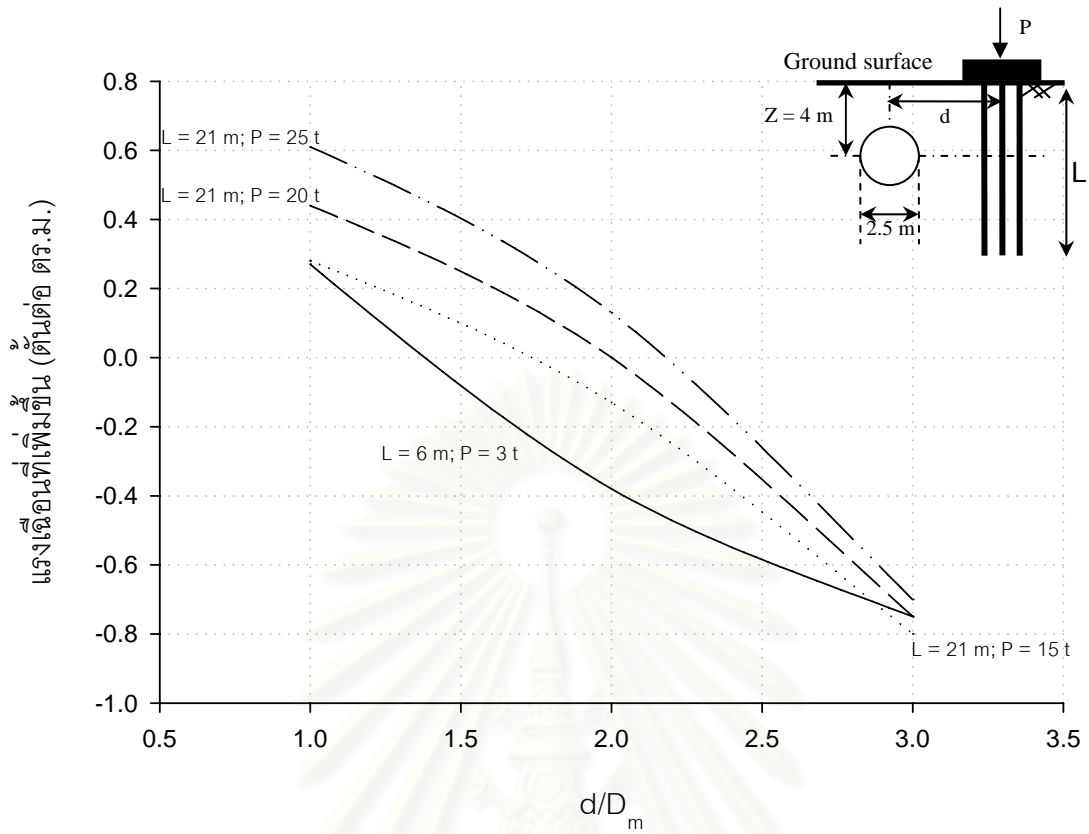
รูปที่ ก-3.7.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



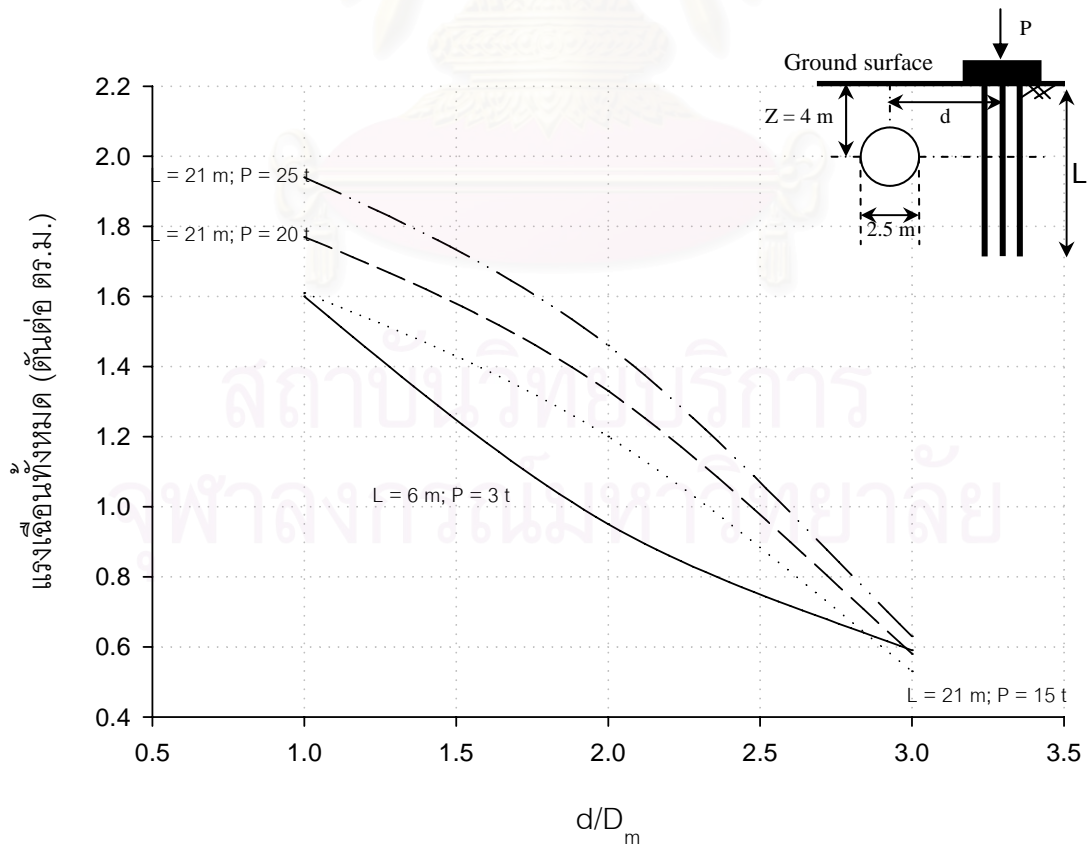
รูปที่ ก-3.7.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



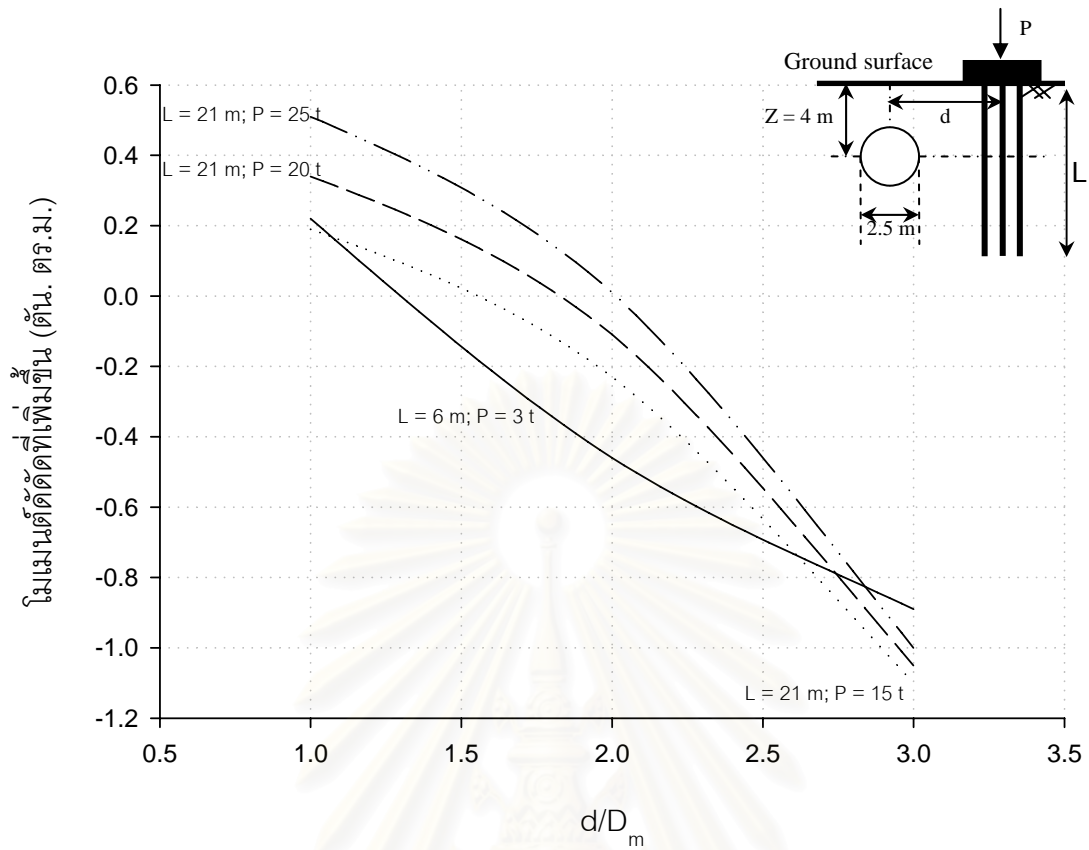
รูปที่ ก-3.7.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม. เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



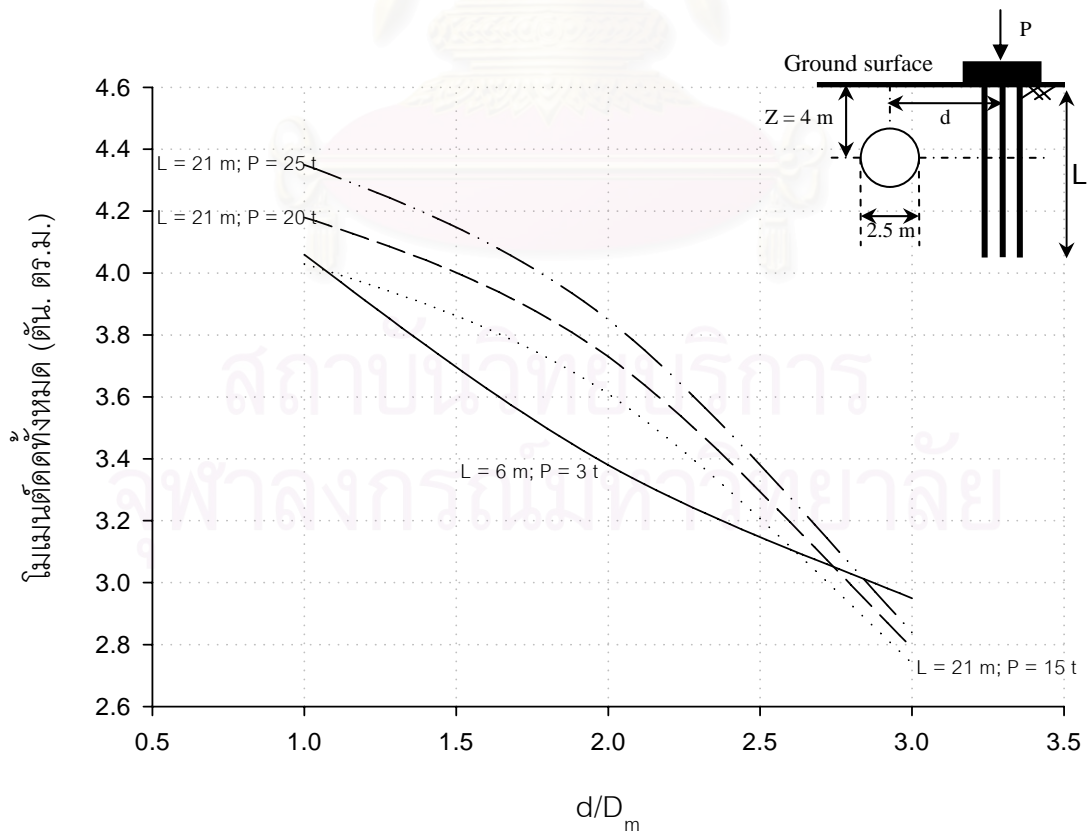
รูปที่ ก-3.7.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



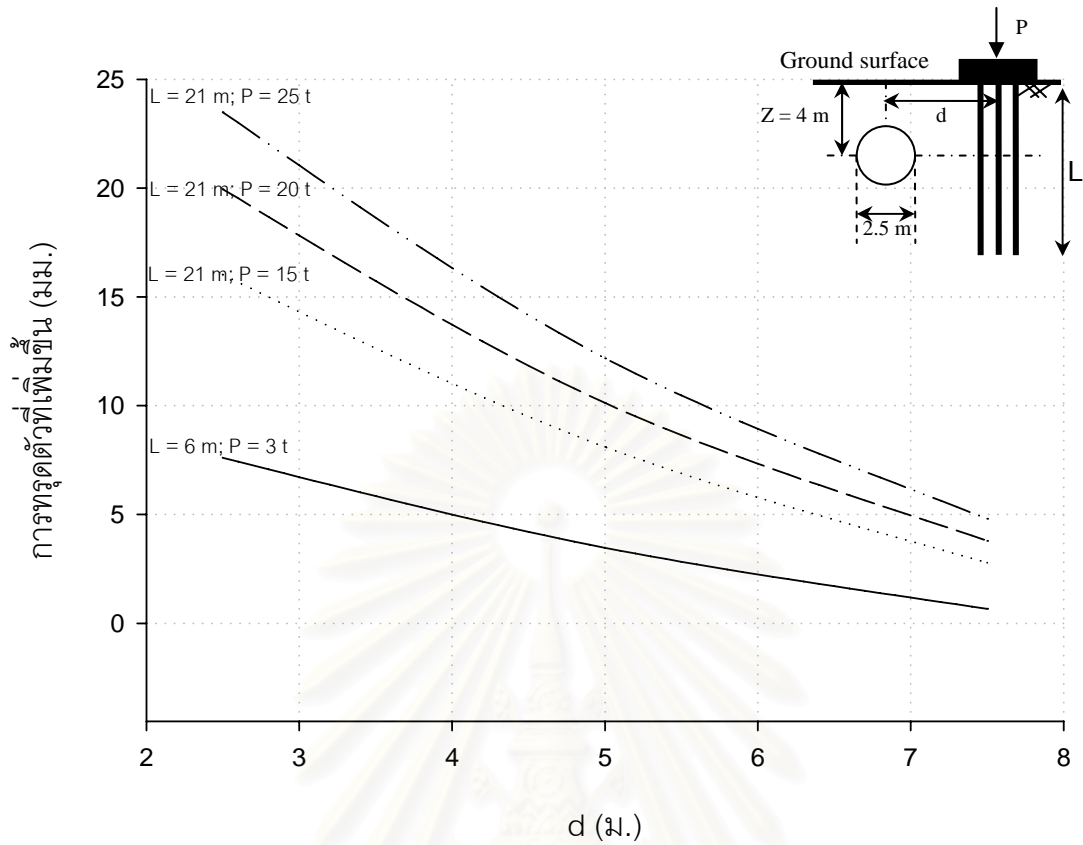
รูปที่ ก-3.7.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



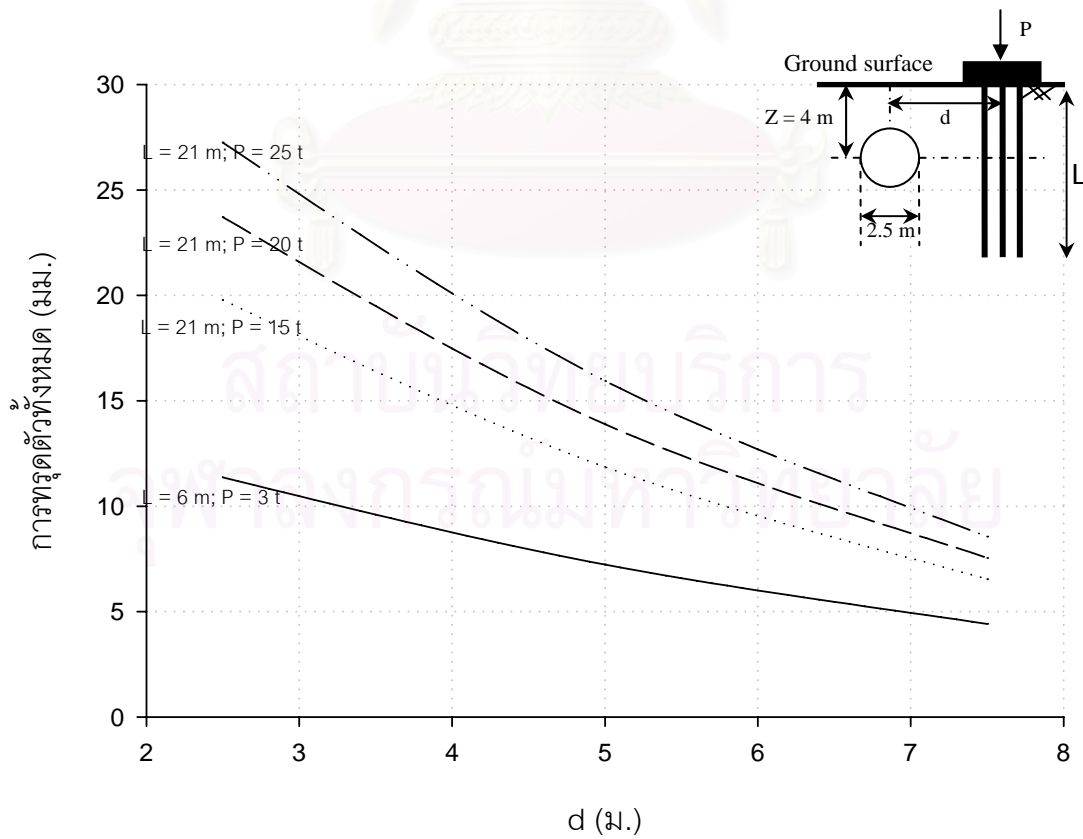
รูปที่ ก-3.7.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



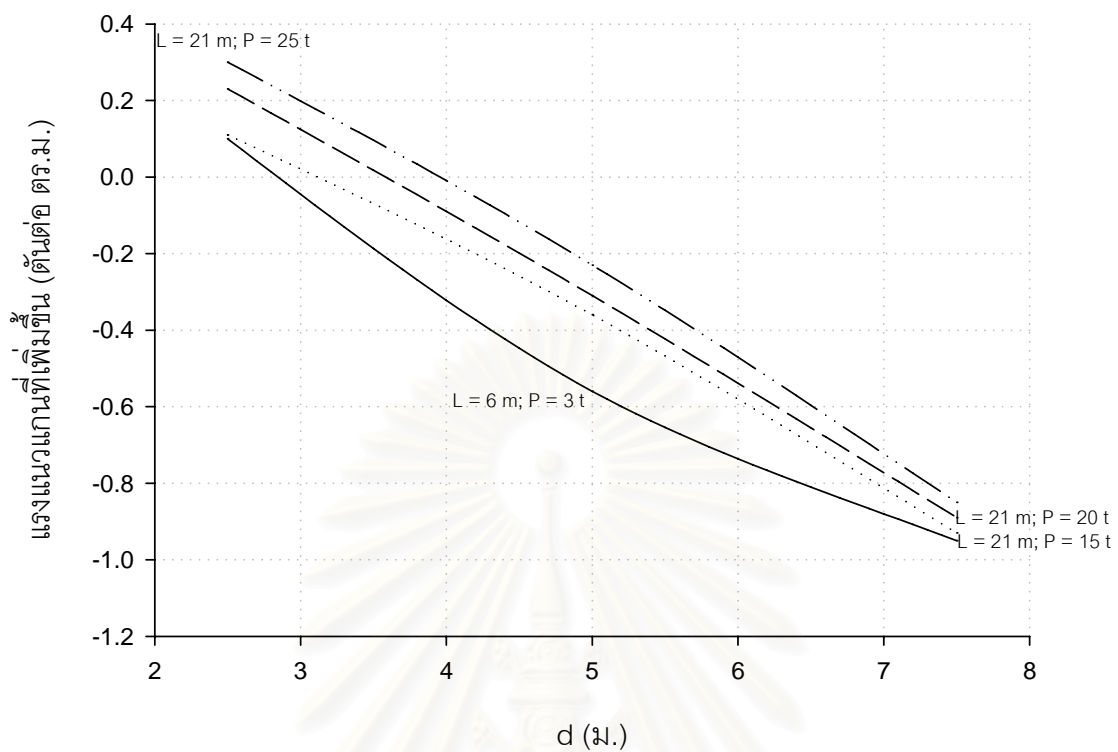
รูปที่ ก-3.7.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



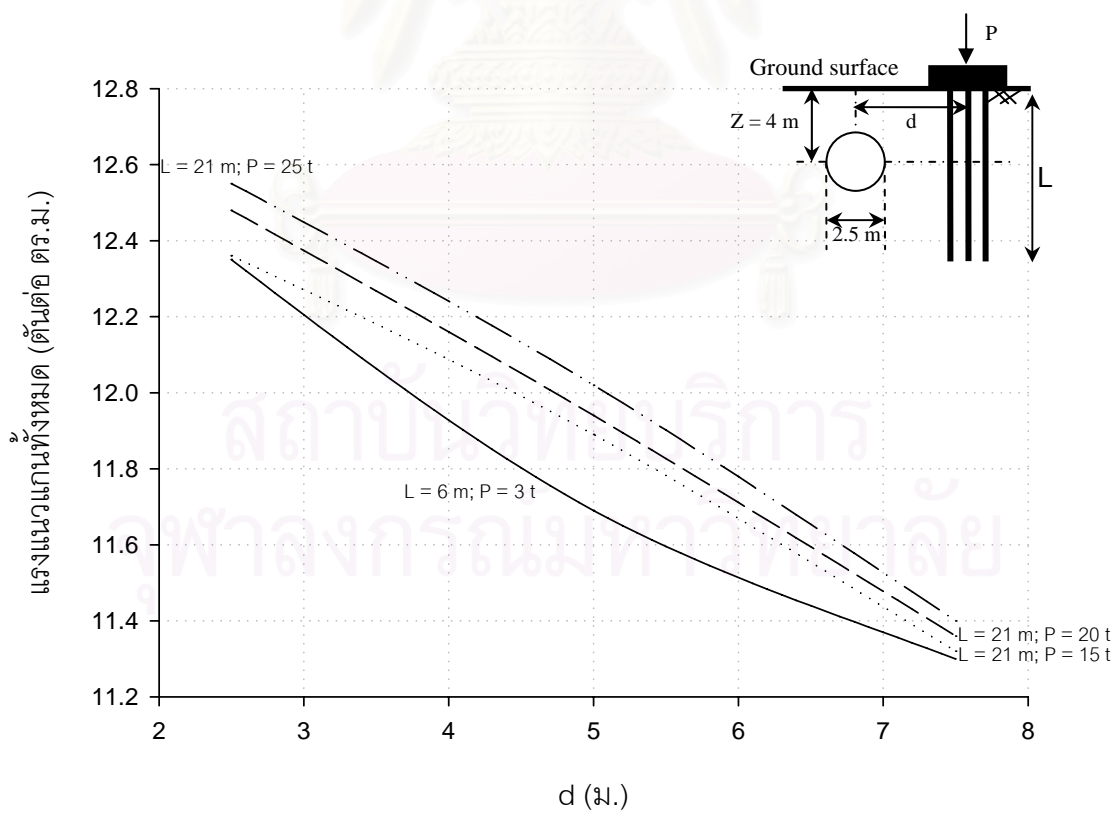
รูปที่ ก-3.7.5.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



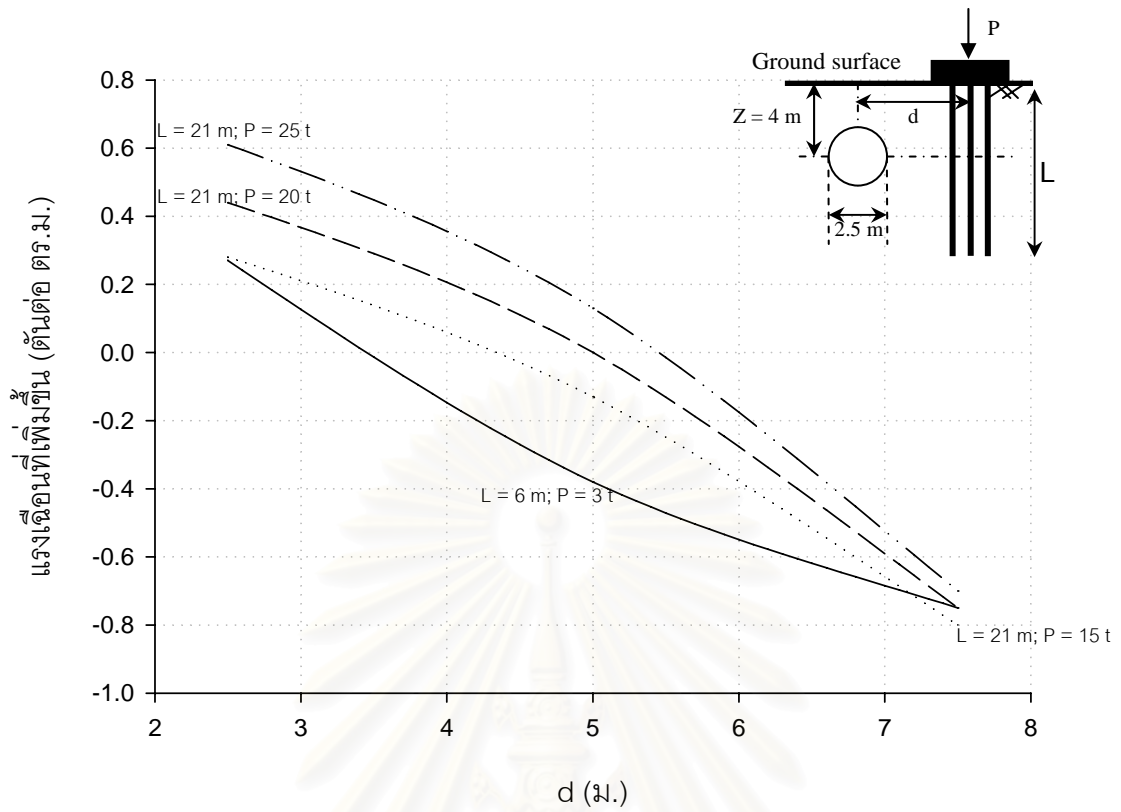
รูปที่ ก-3.7.5.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



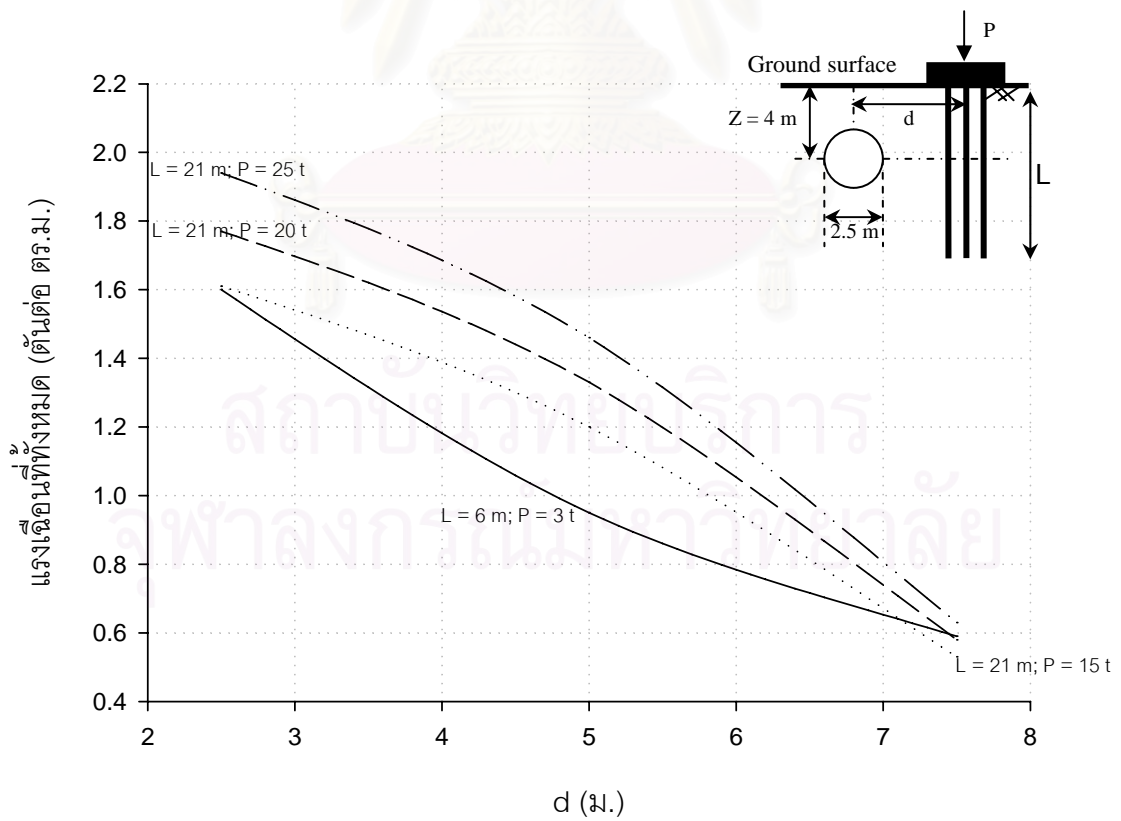
รูปที่ ก-3.7.6.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อนัดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



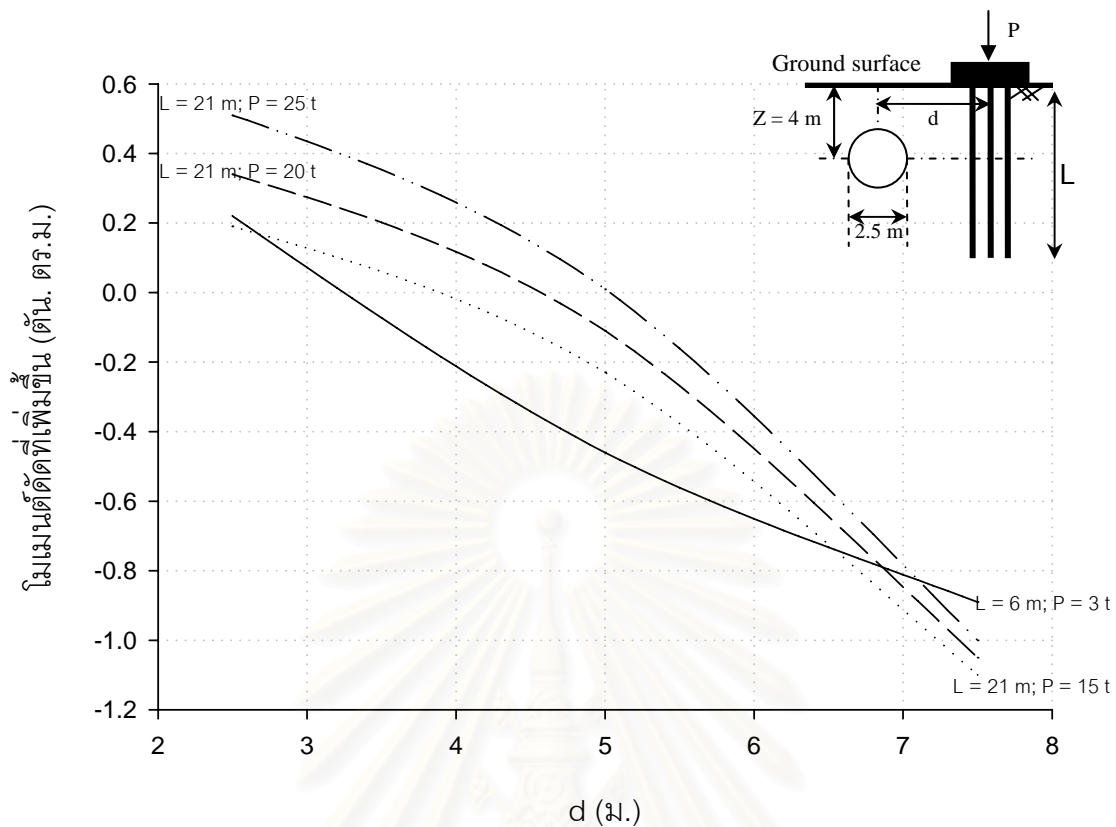
รูปที่ ก-3.7.6.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อนัดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



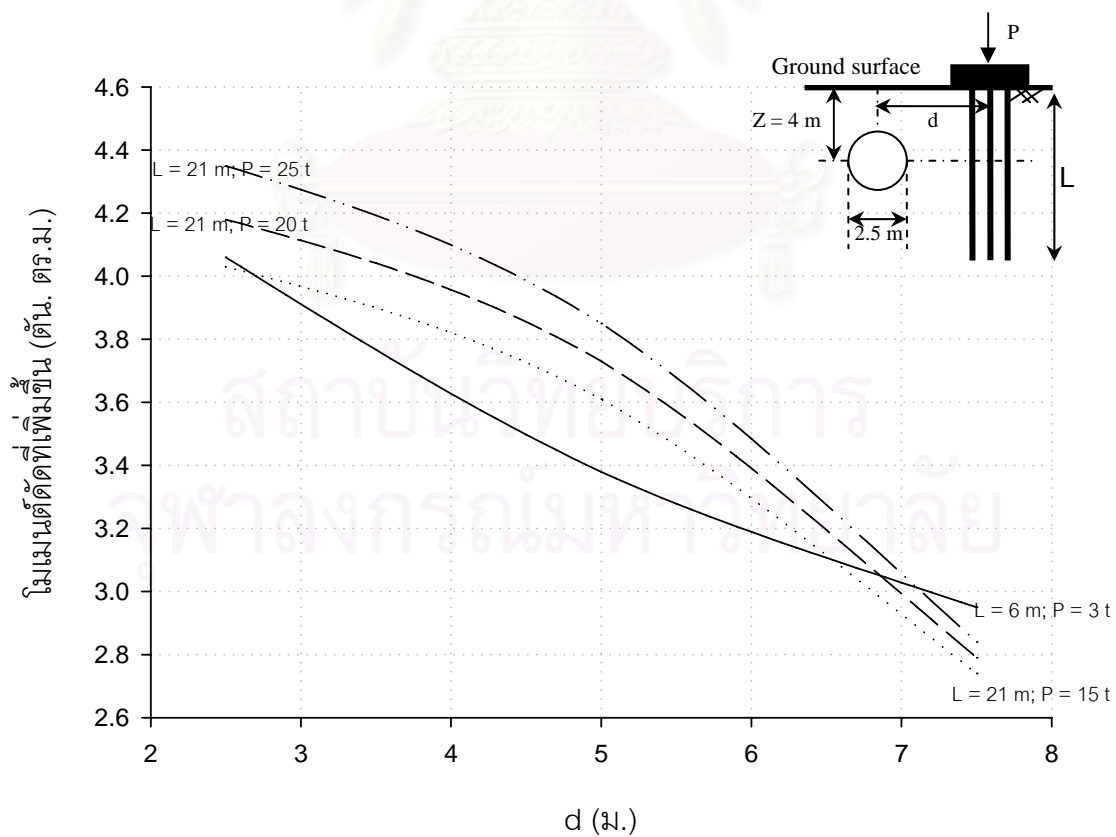
รูปที่ ก-3.7.7.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



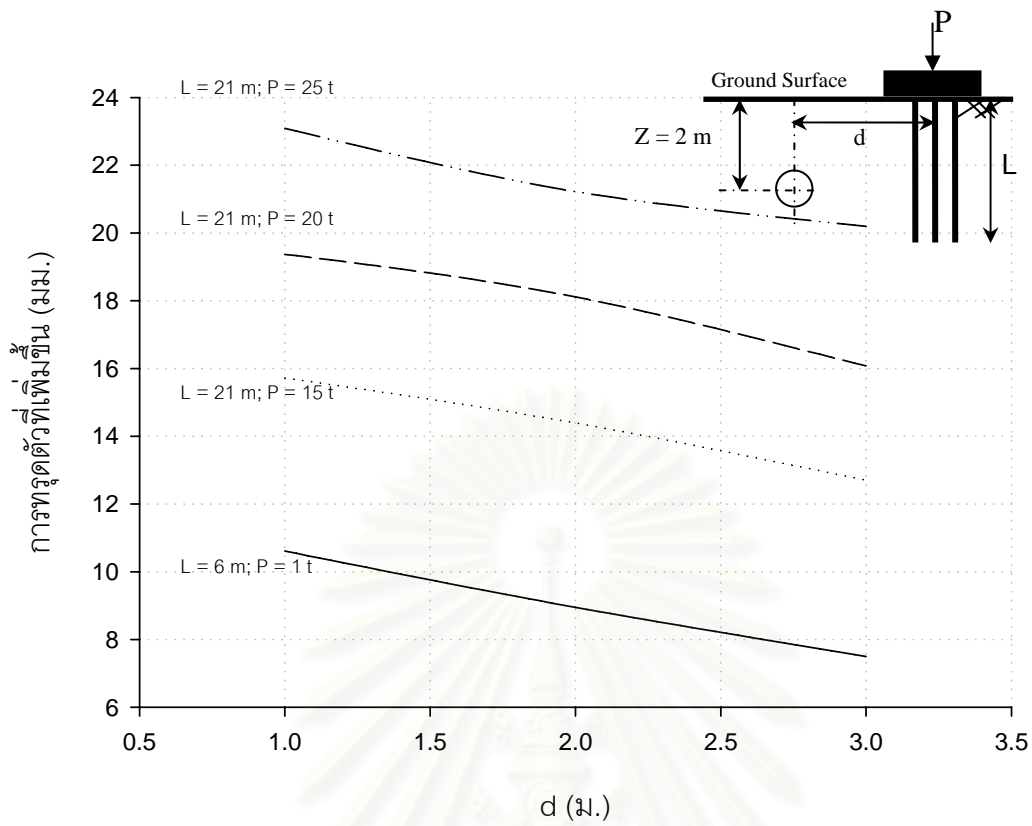
รูปที่ ก-3.7.7.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



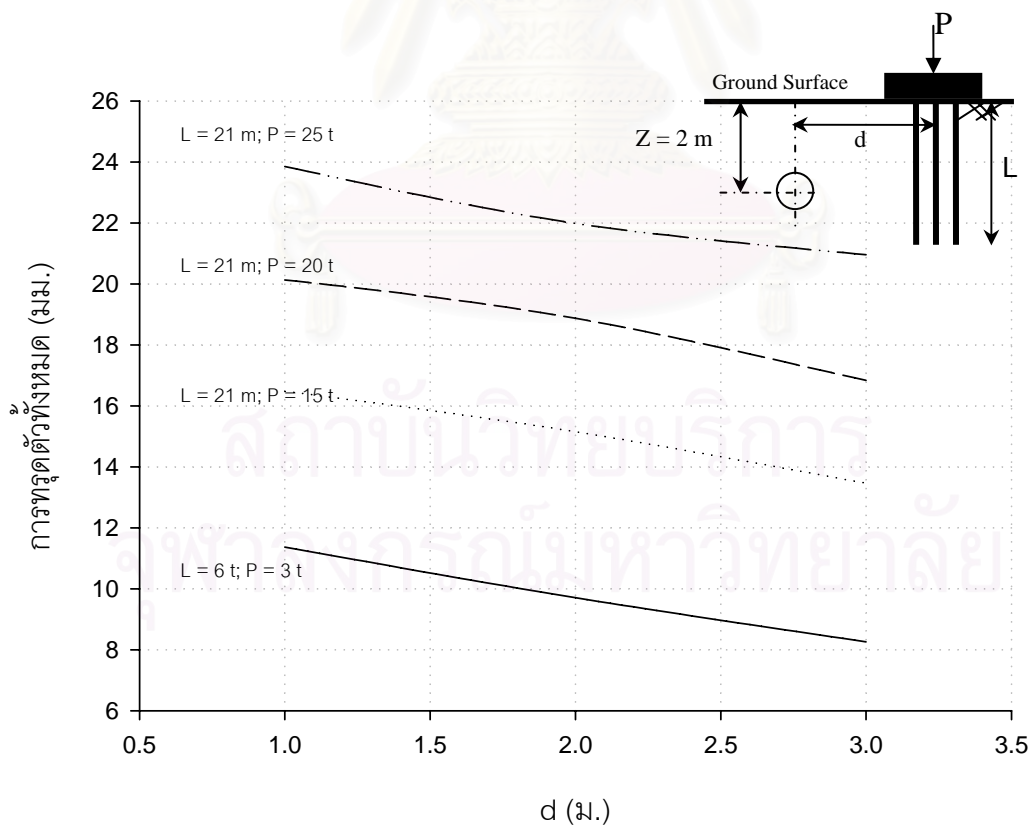
รูปที่ ก-3.7.8.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อนลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



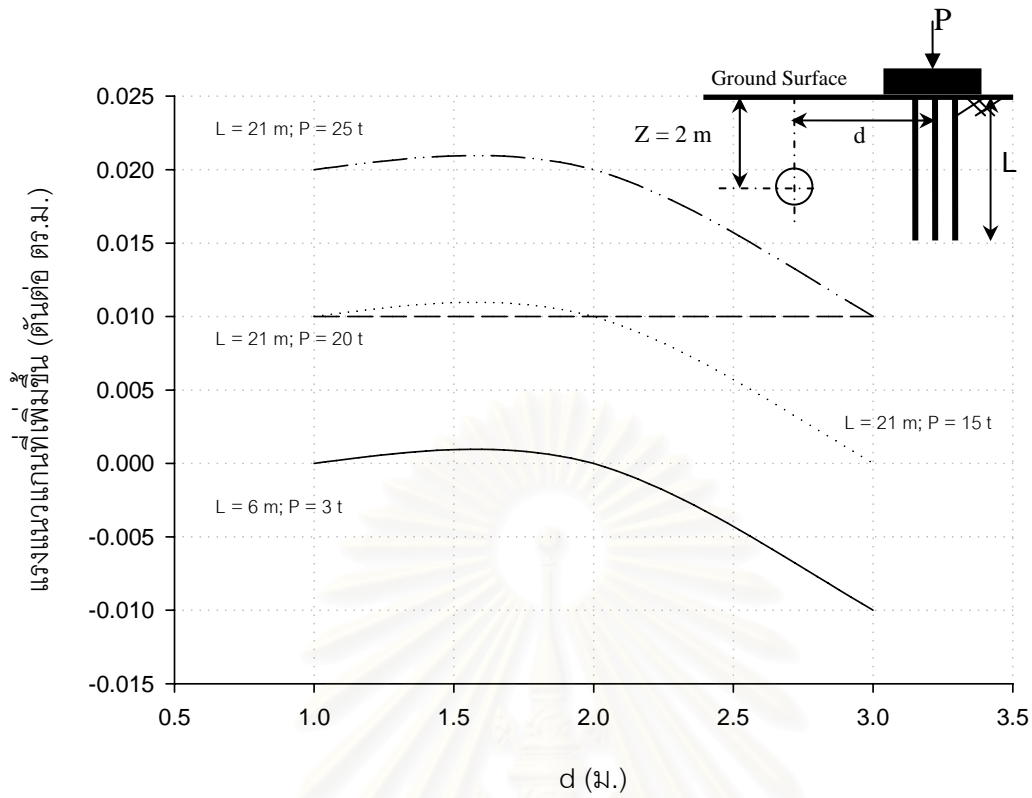
รูปที่ ก-3.7.8.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อนลอดขนาด 2.5 ม.เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



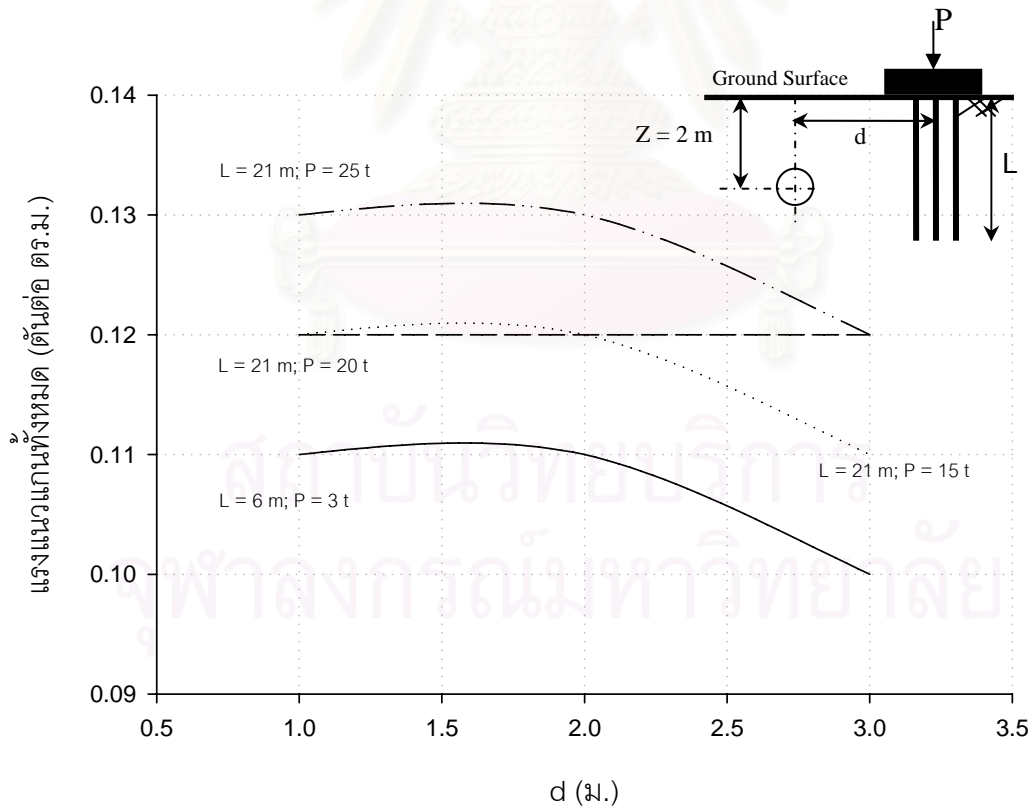
รูปที่ ก-3.8.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



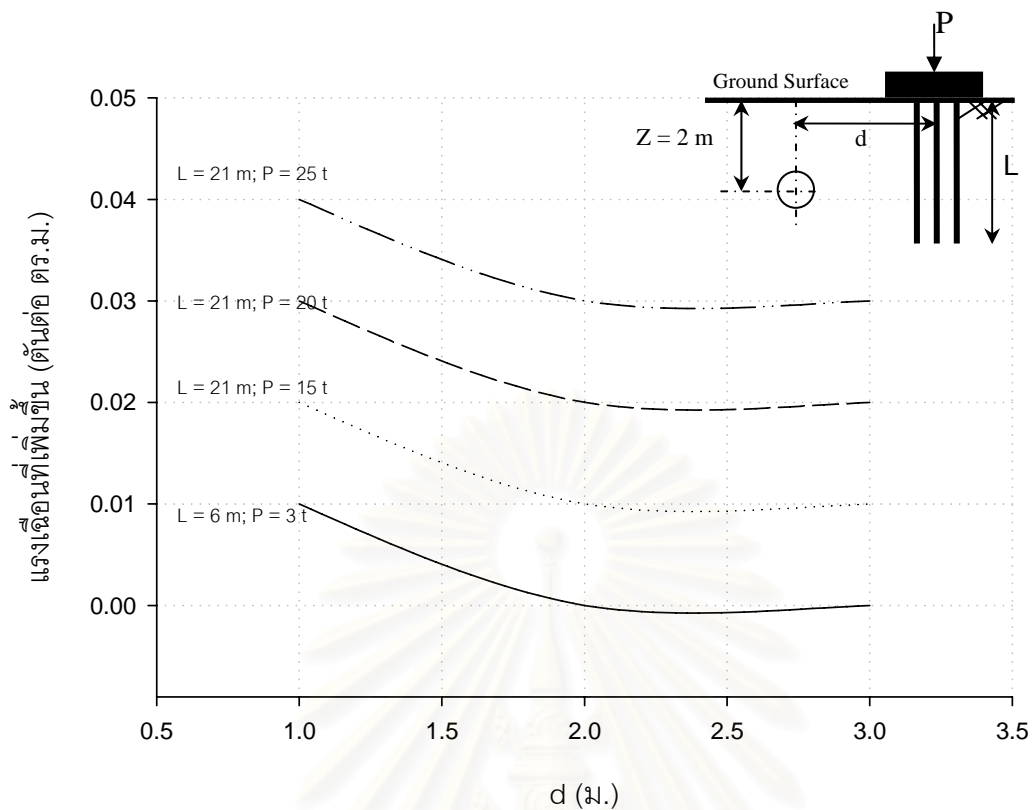
รูปที่ ก-3.8.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



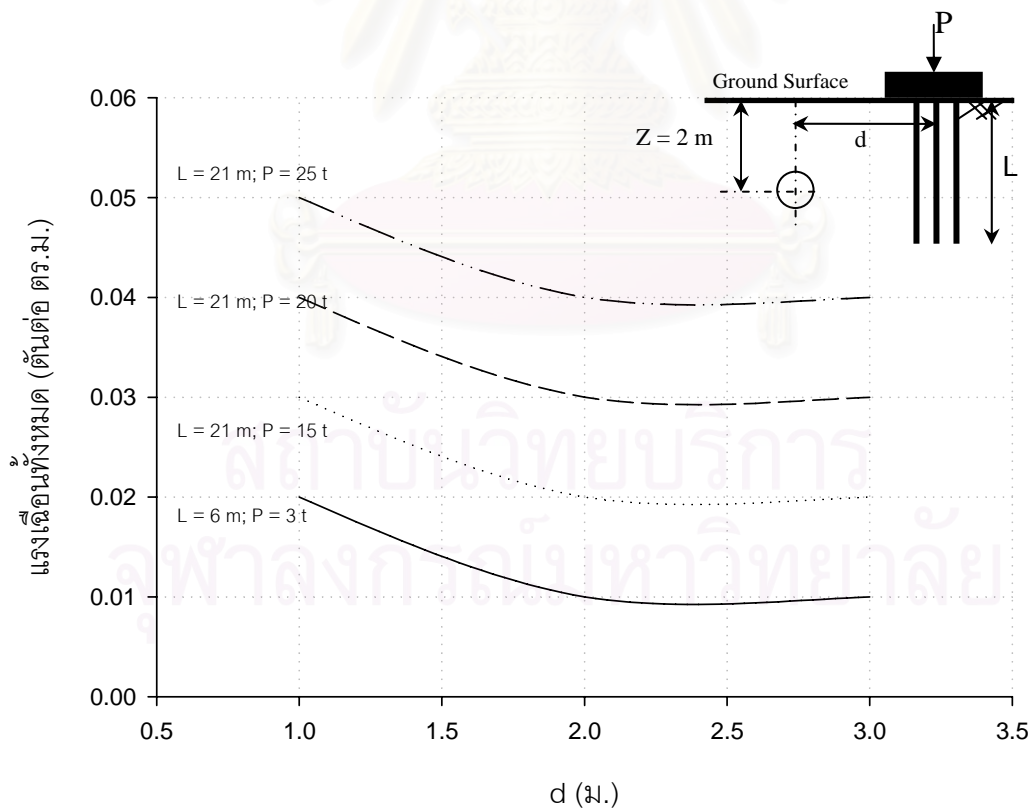
รูปที่ ก-3.8.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



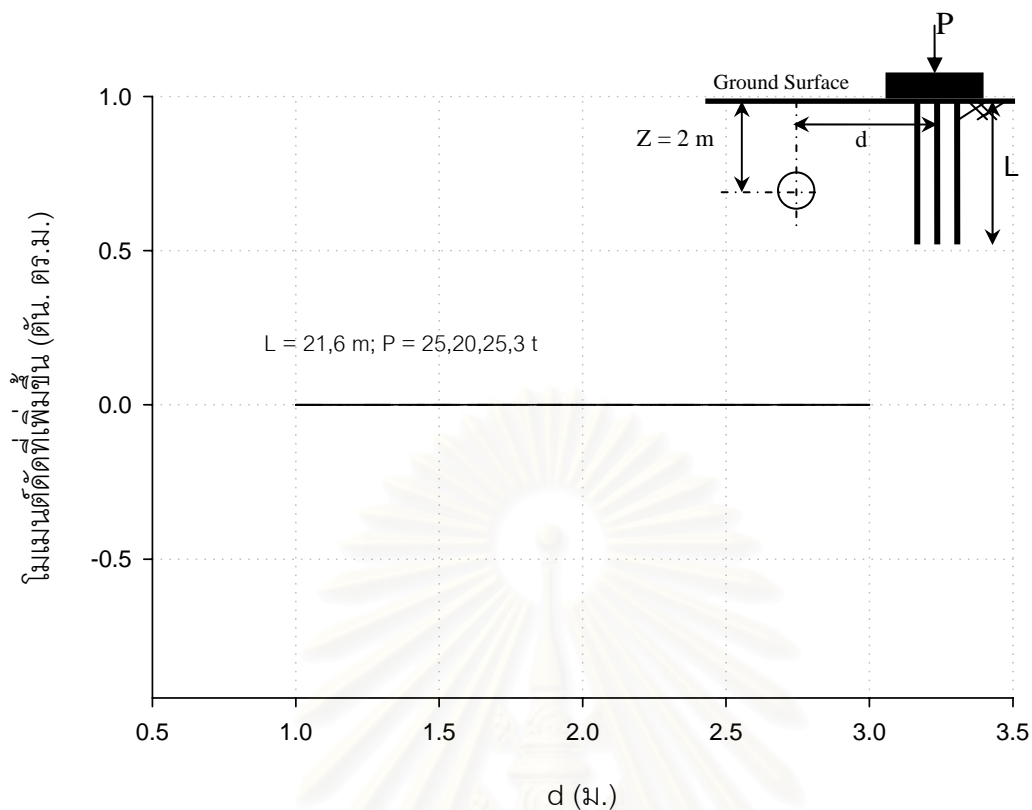
รูปที่ ก-3.8.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



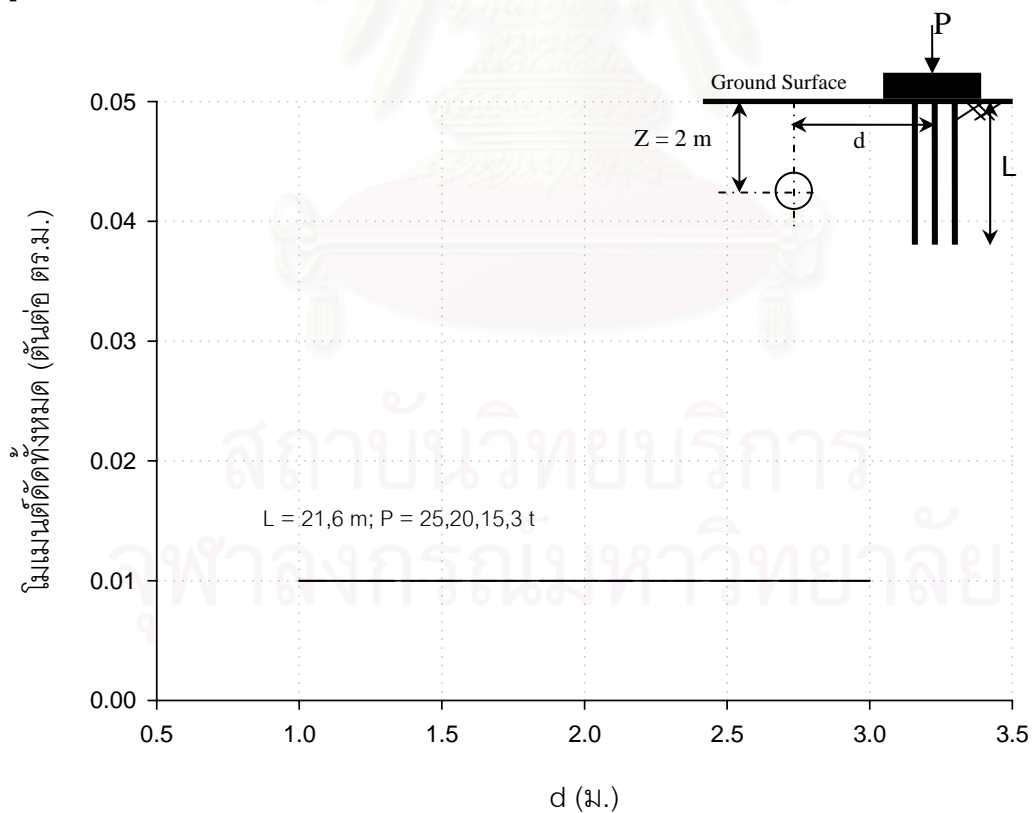
รูปที่ ก-3.8.3.1 แรงเขื่อนที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตังแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



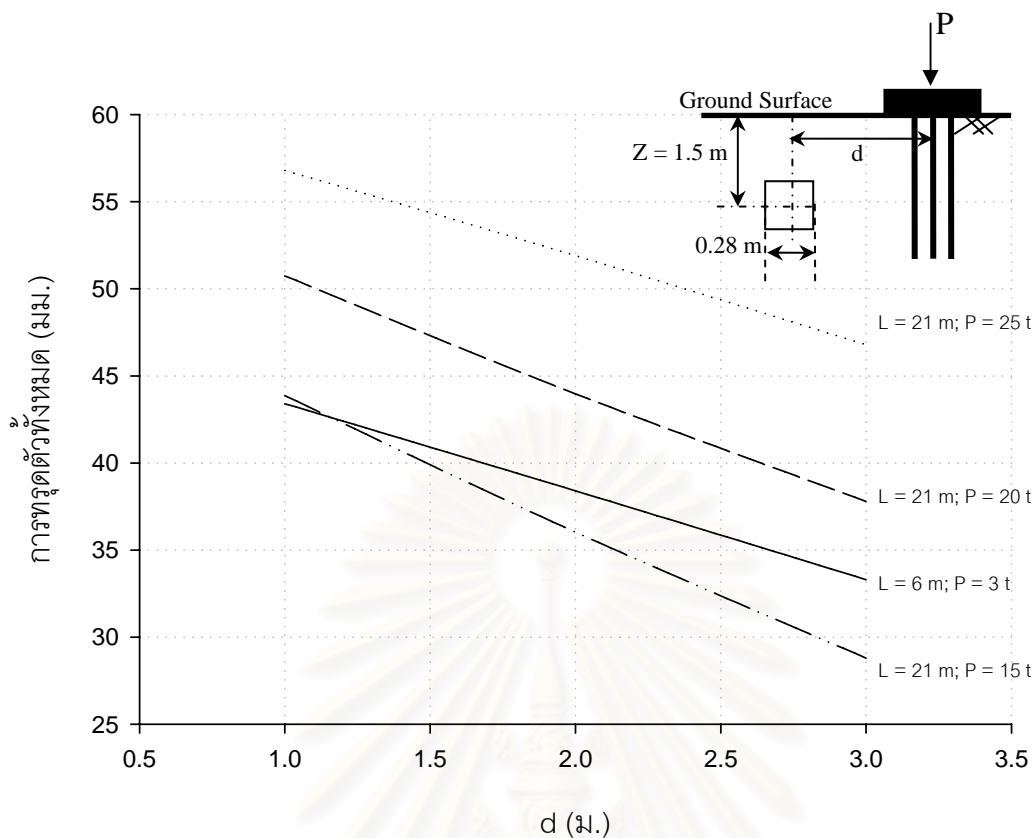
รูปที่ ก-3.8.3.2 แรงเขื่อนทั้งหมดของท่อเจาะตังแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



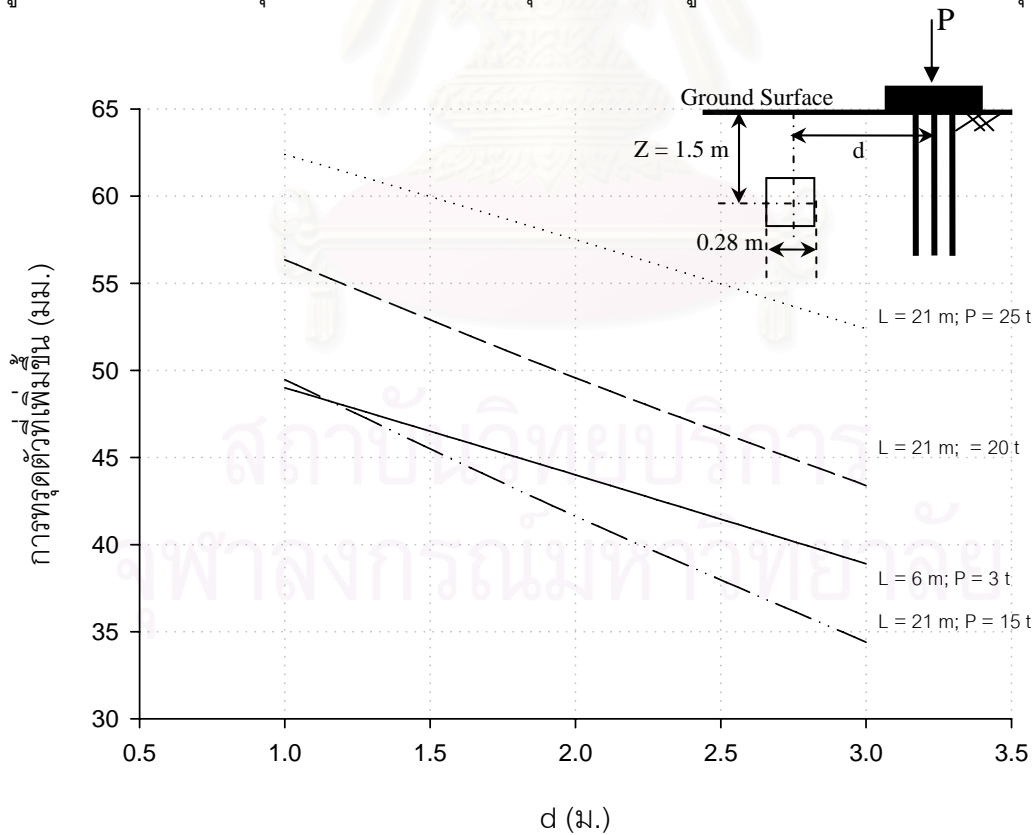
รูปที่ ก-3.8.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



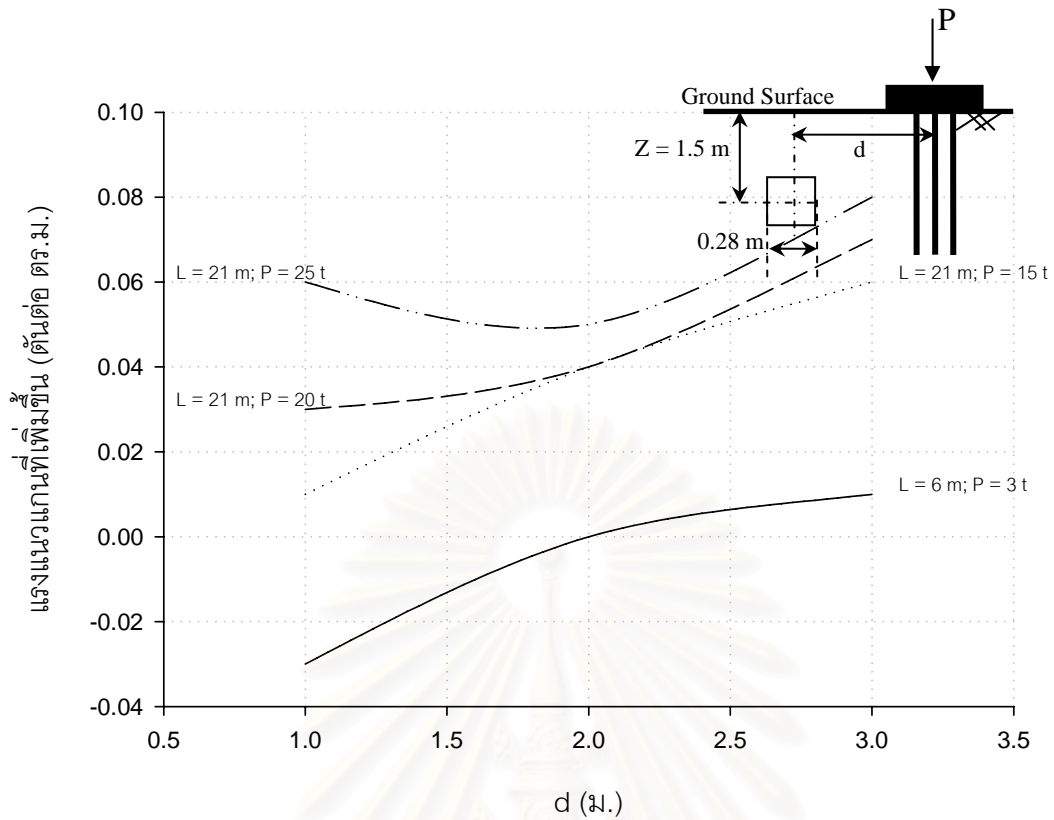
รูปที่ ก-3.8.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อเจาะตึ้งแนวราบ เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มกลุ่ม



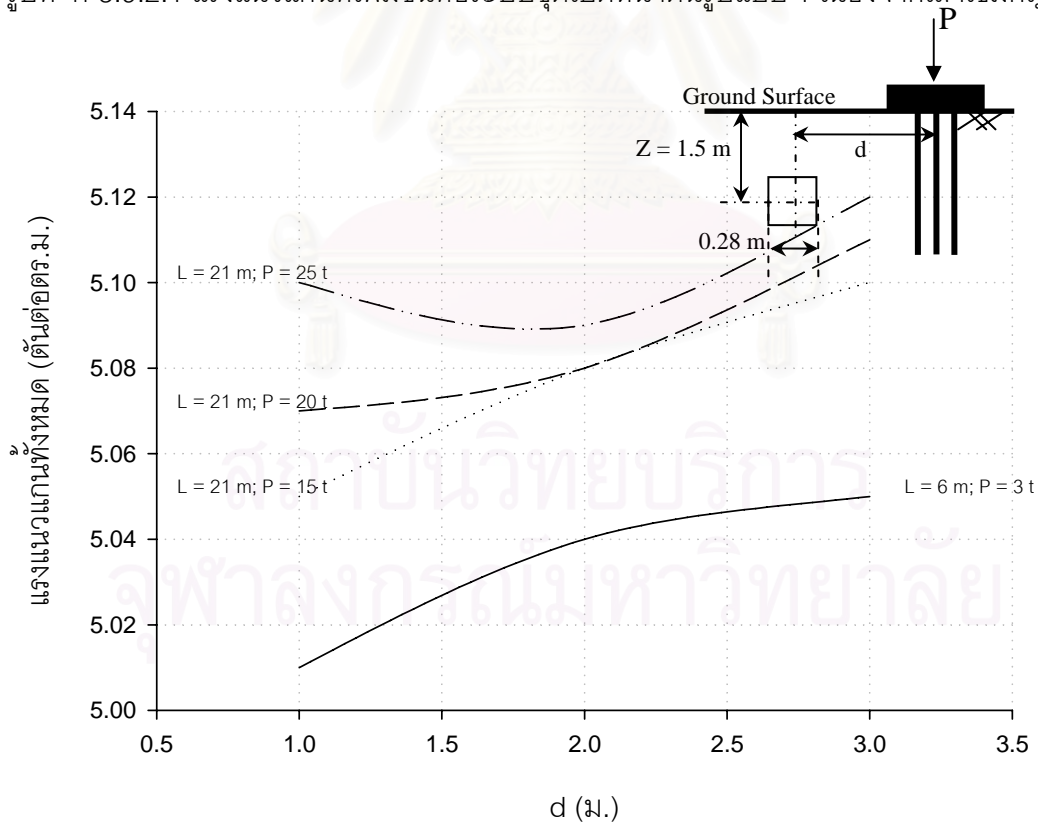
รูปที่ ก-3.9.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



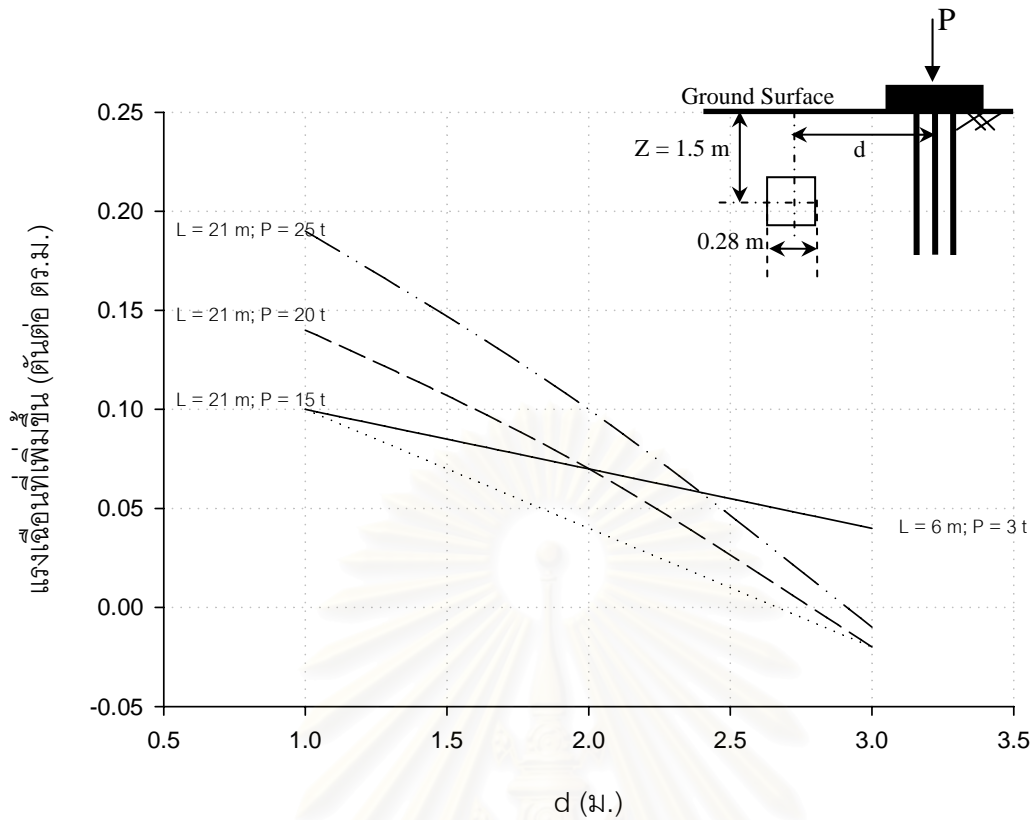
รูปที่ ก-3.9.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



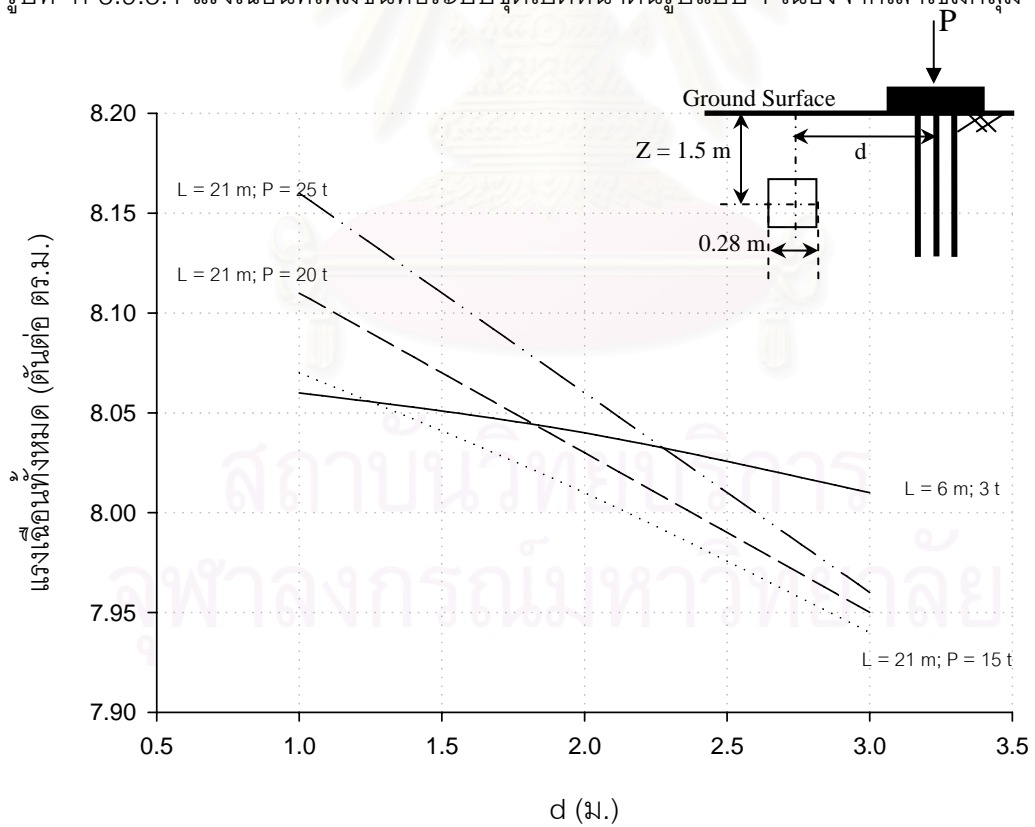
รูปที่ ก-3.9.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



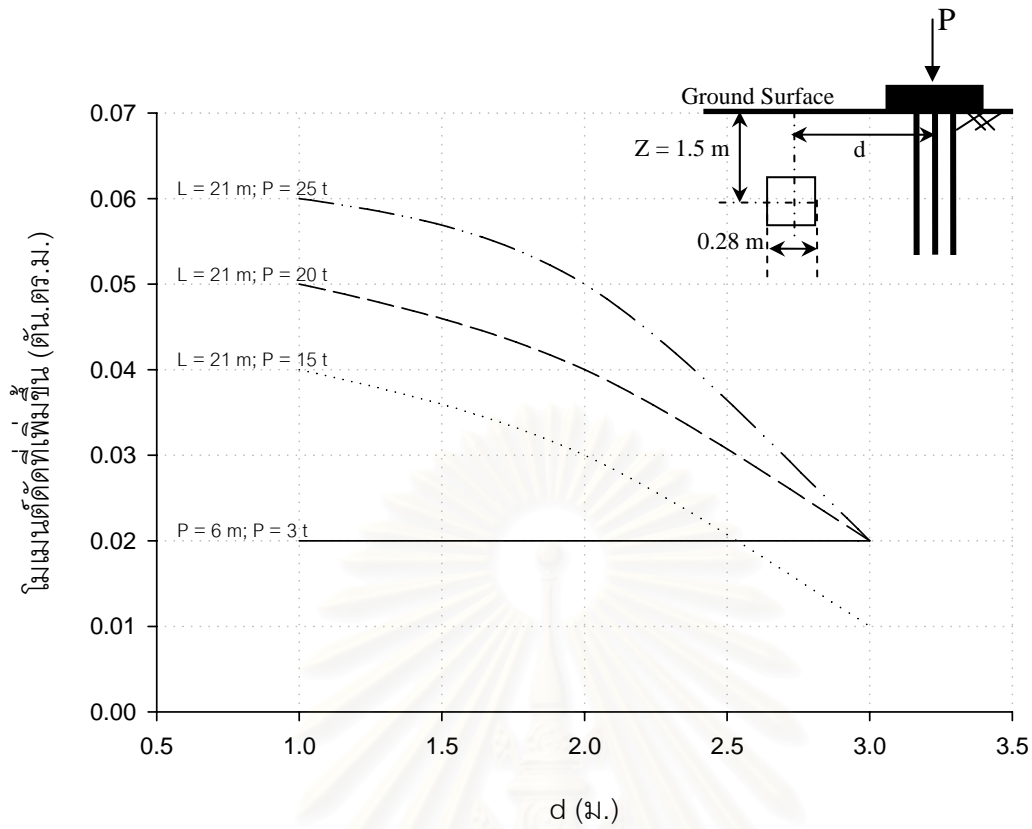
รูปที่ ก-3.9.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



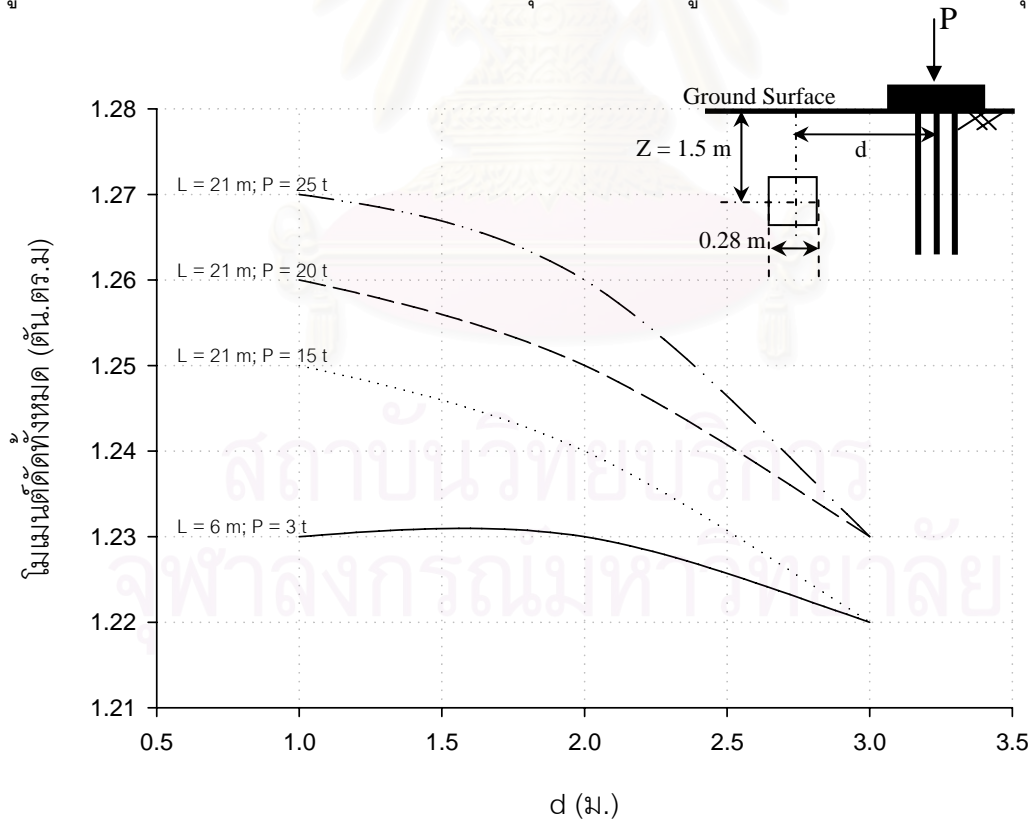
รูปที่ ก-3.9.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



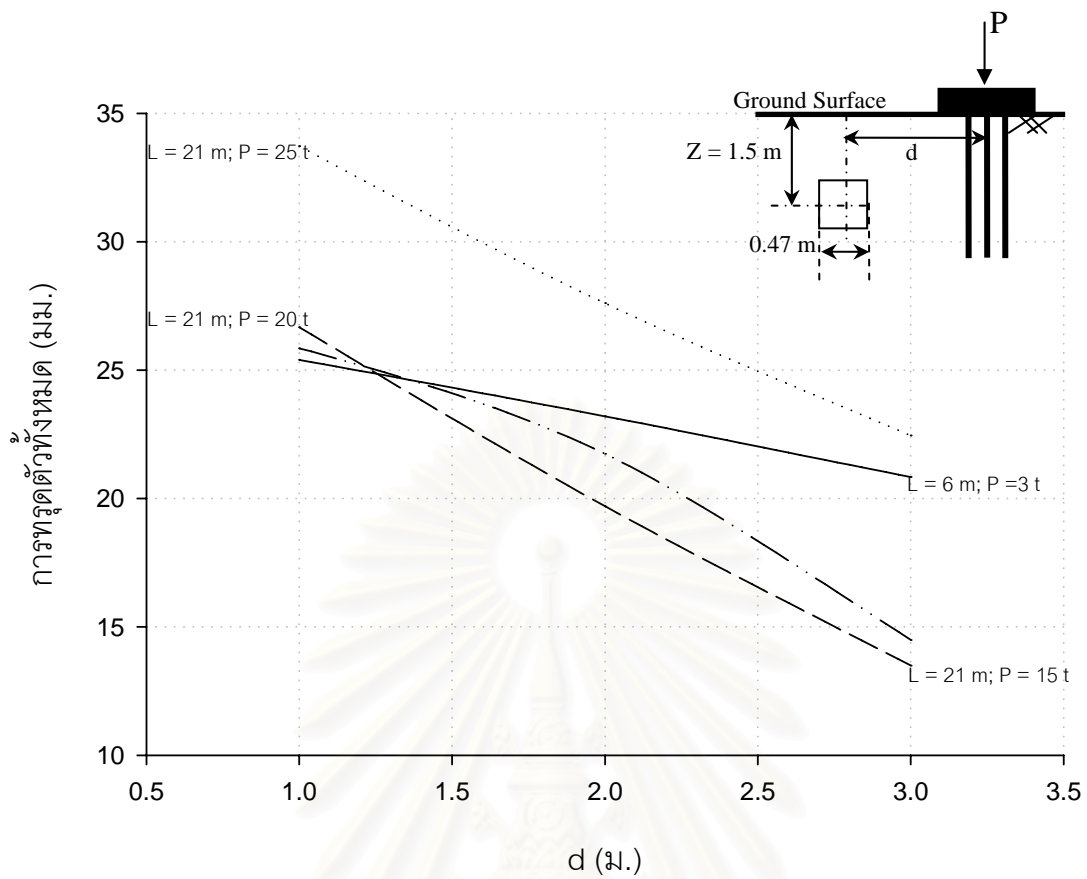
รูปที่ ก-3.9.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



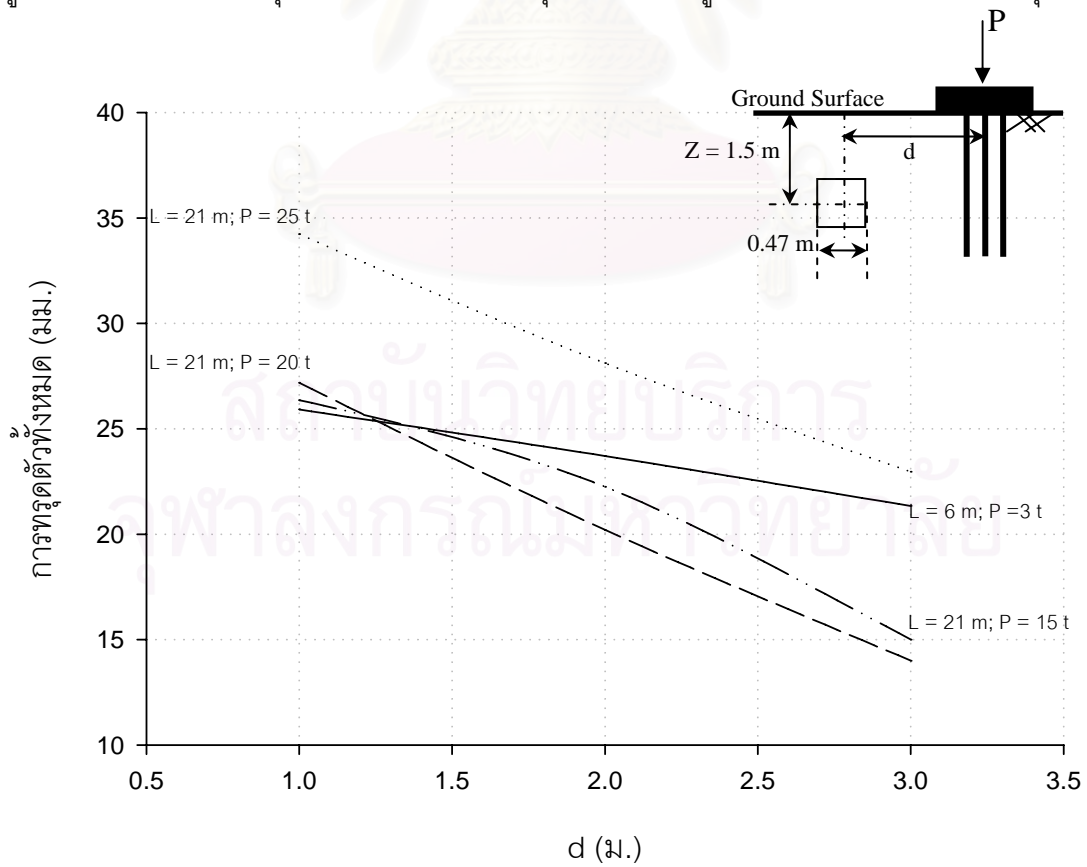
รูปที่ ก-3.9.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



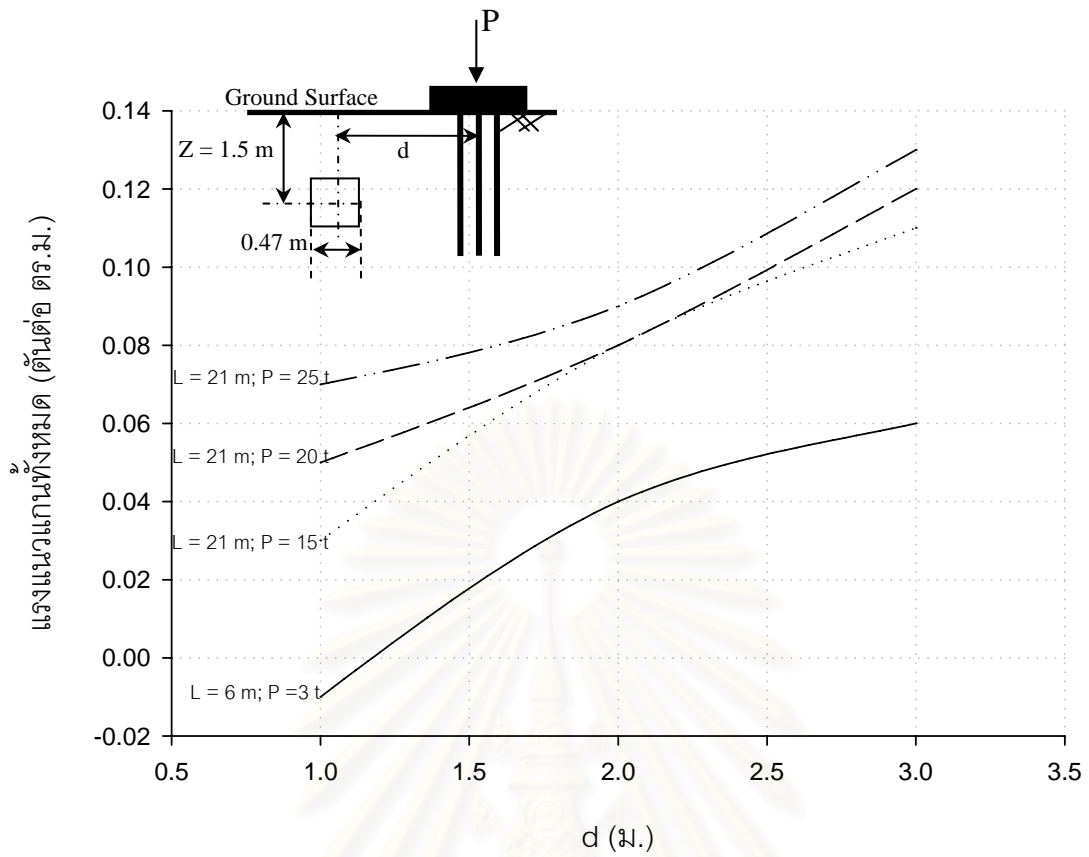
รูปที่ ก-3.9.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 1 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



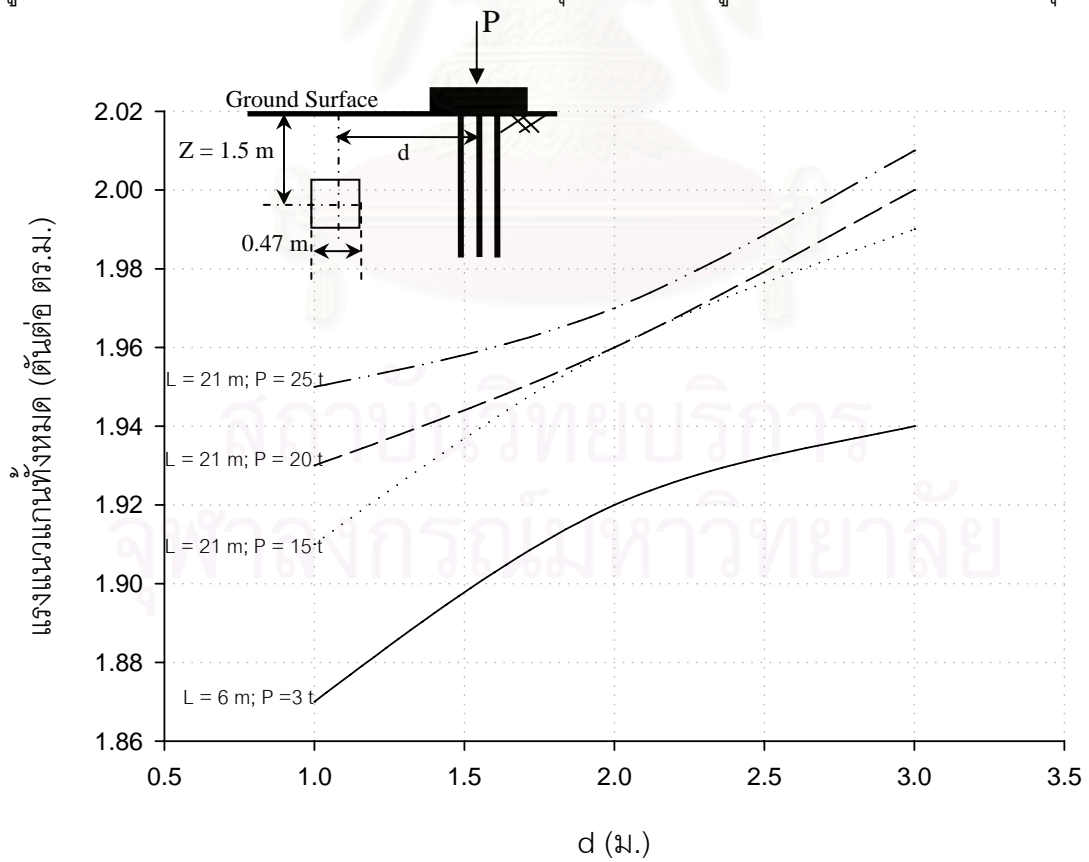
รูปที่ ก-3.10.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



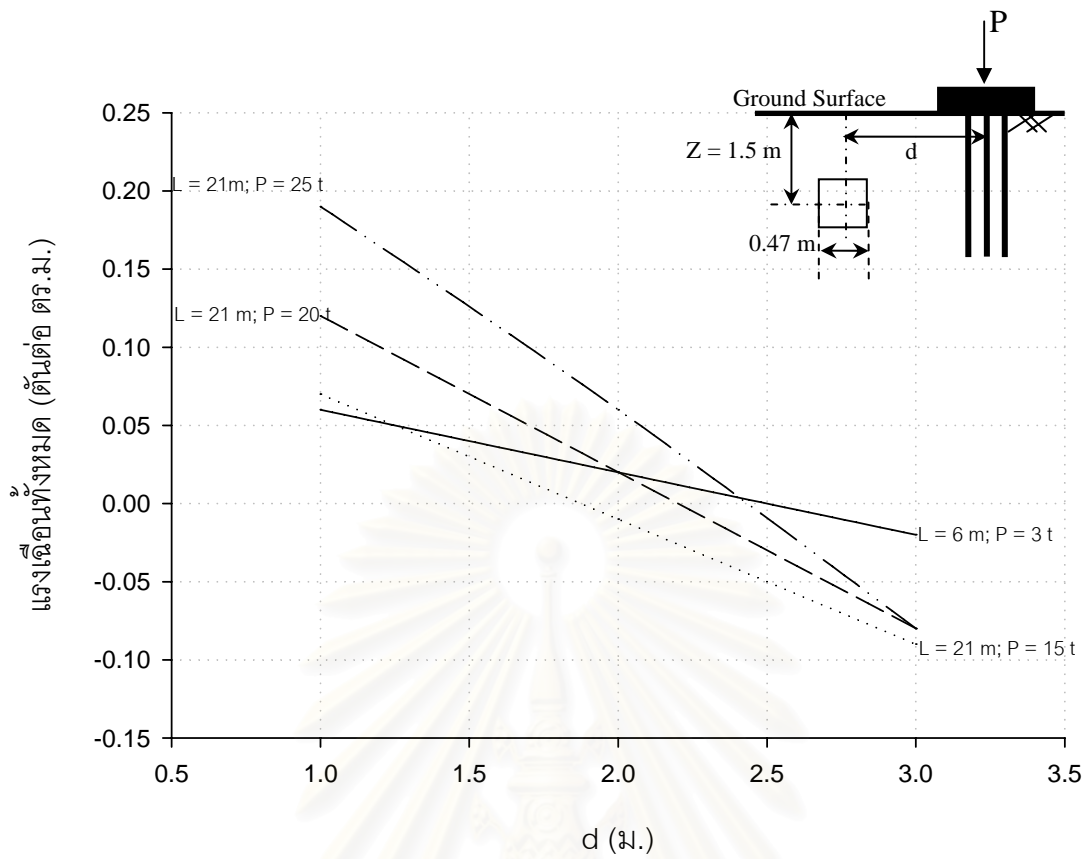
รูปที่ ก-3.10.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



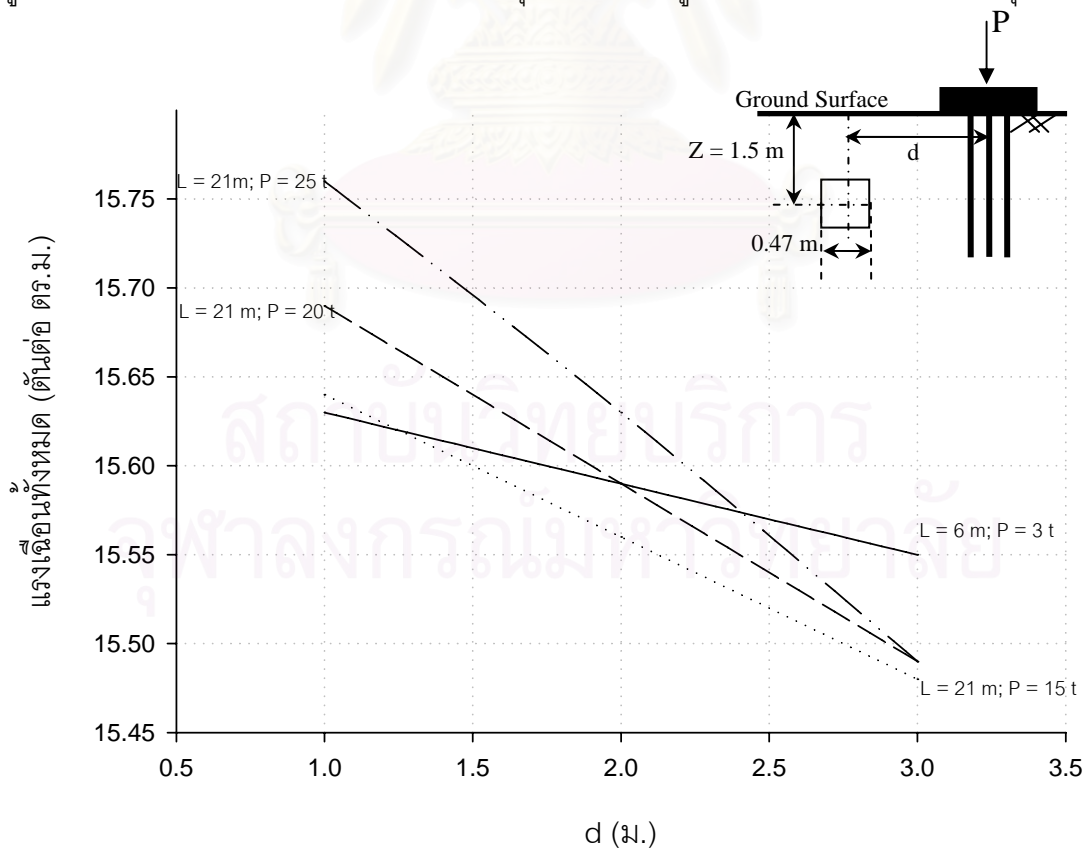
รูปที่ ก-3.10.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



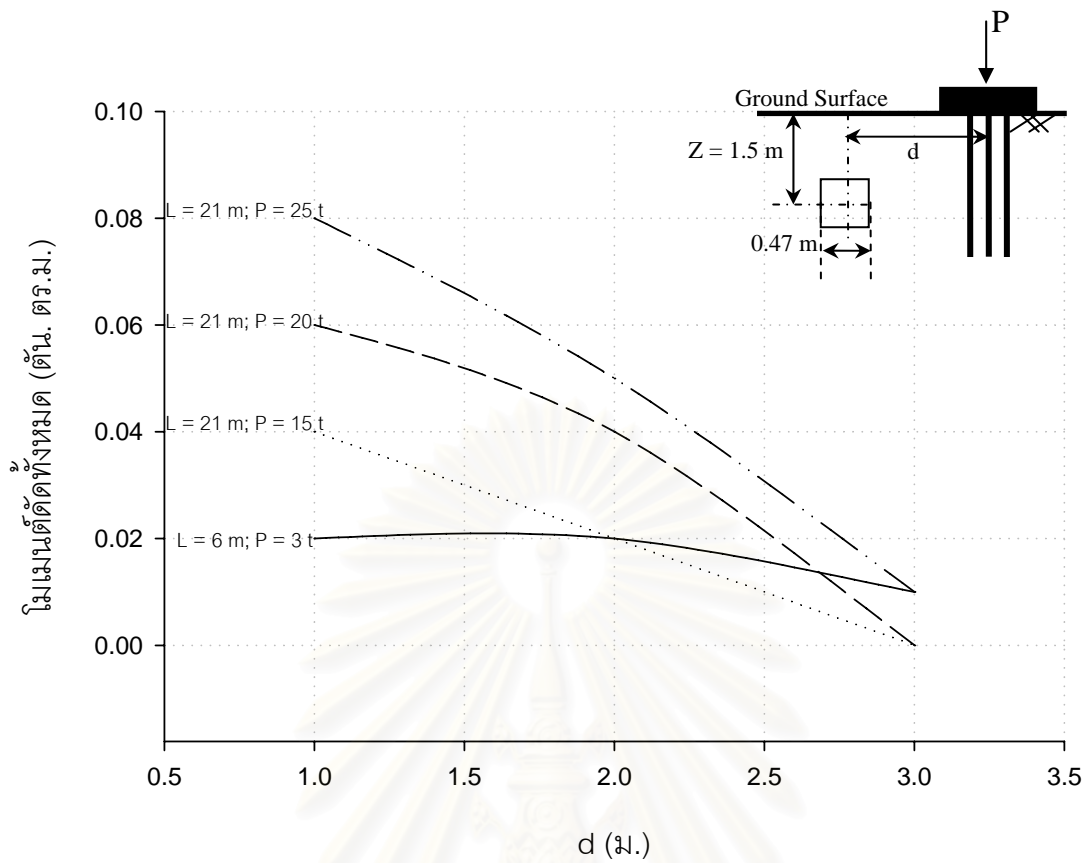
รูปที่ ก-3.10.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



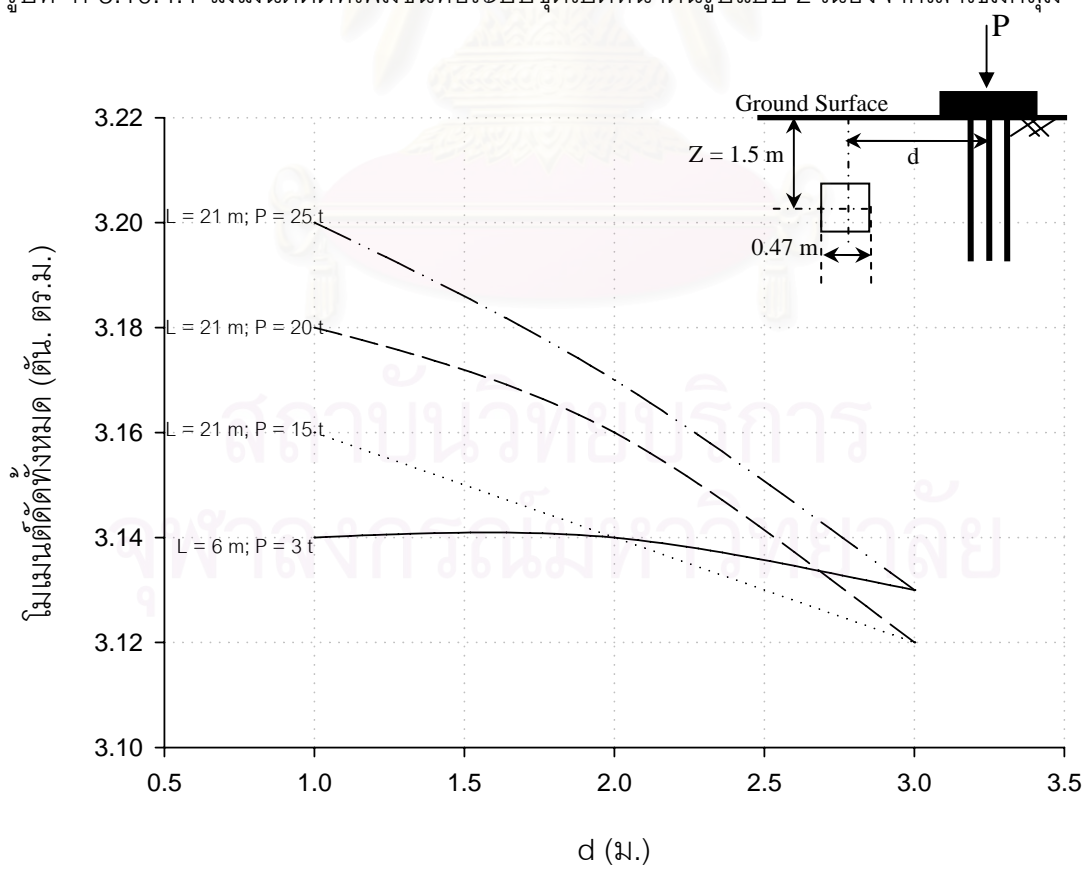
รูปที่ ก-3.10.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



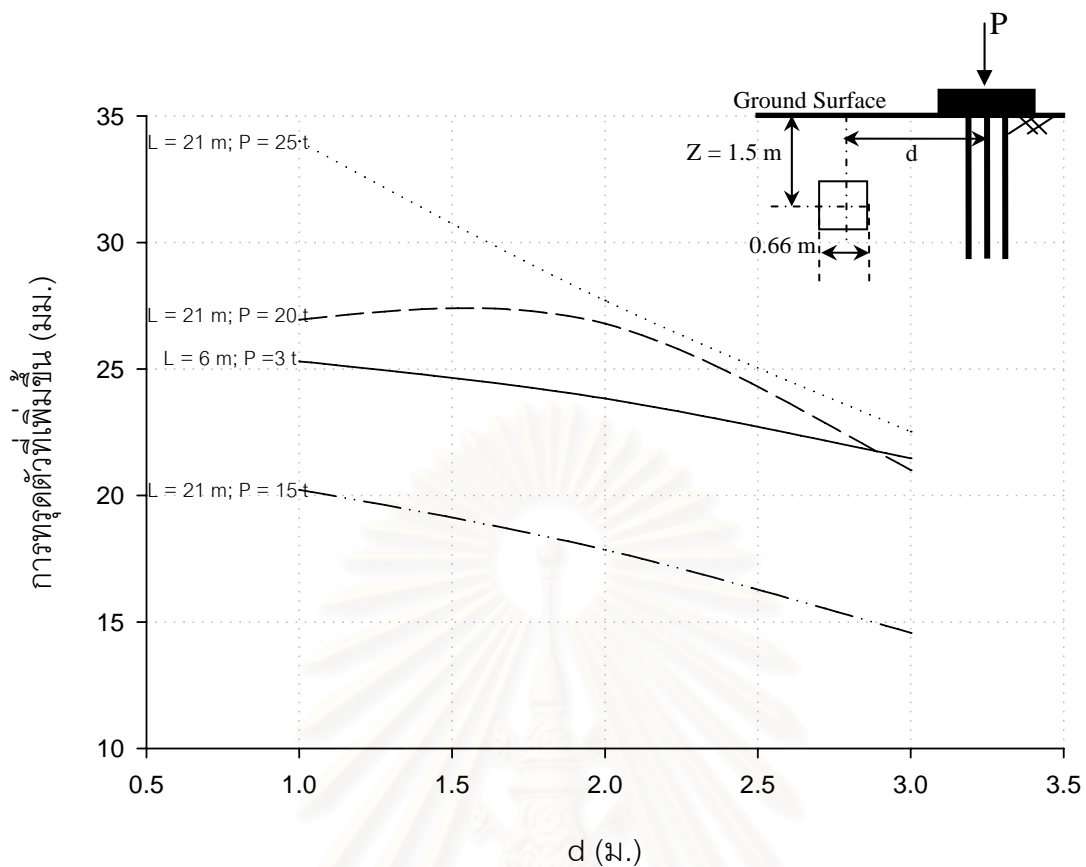
รูปที่ ก-3.10.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



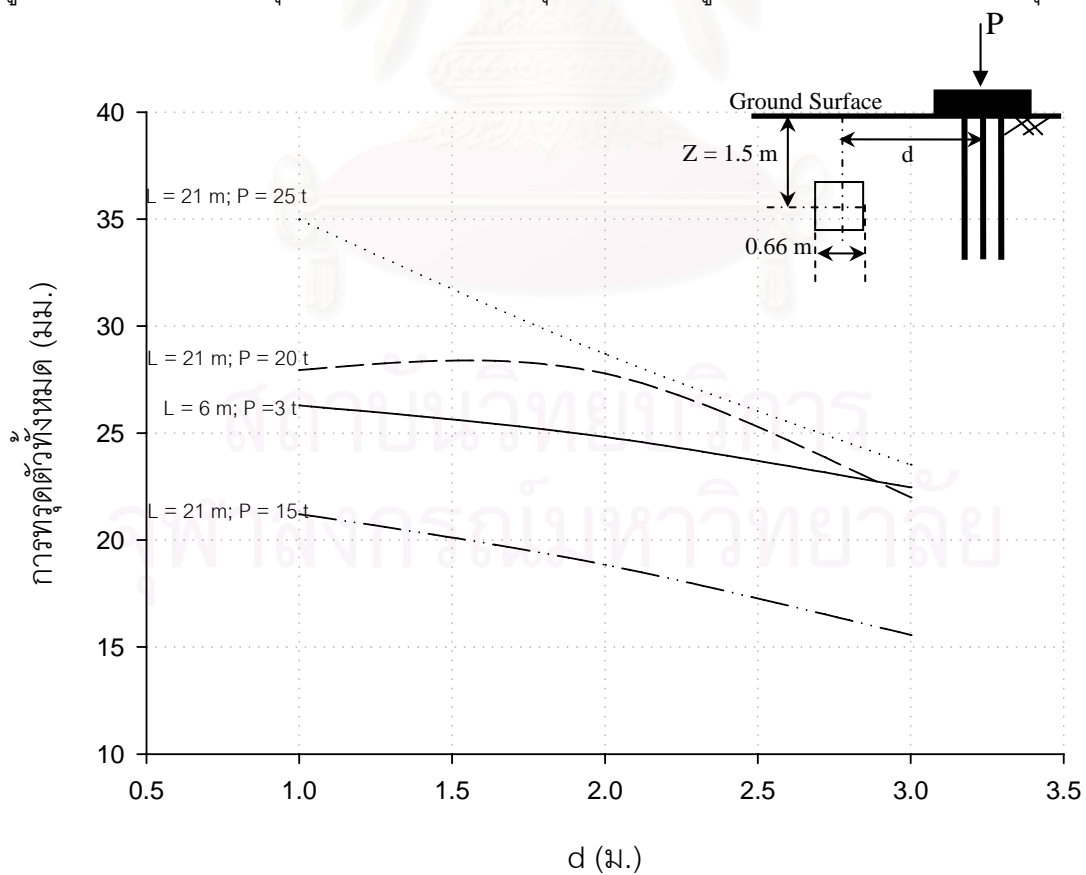
รูปที่ ก-3.10.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



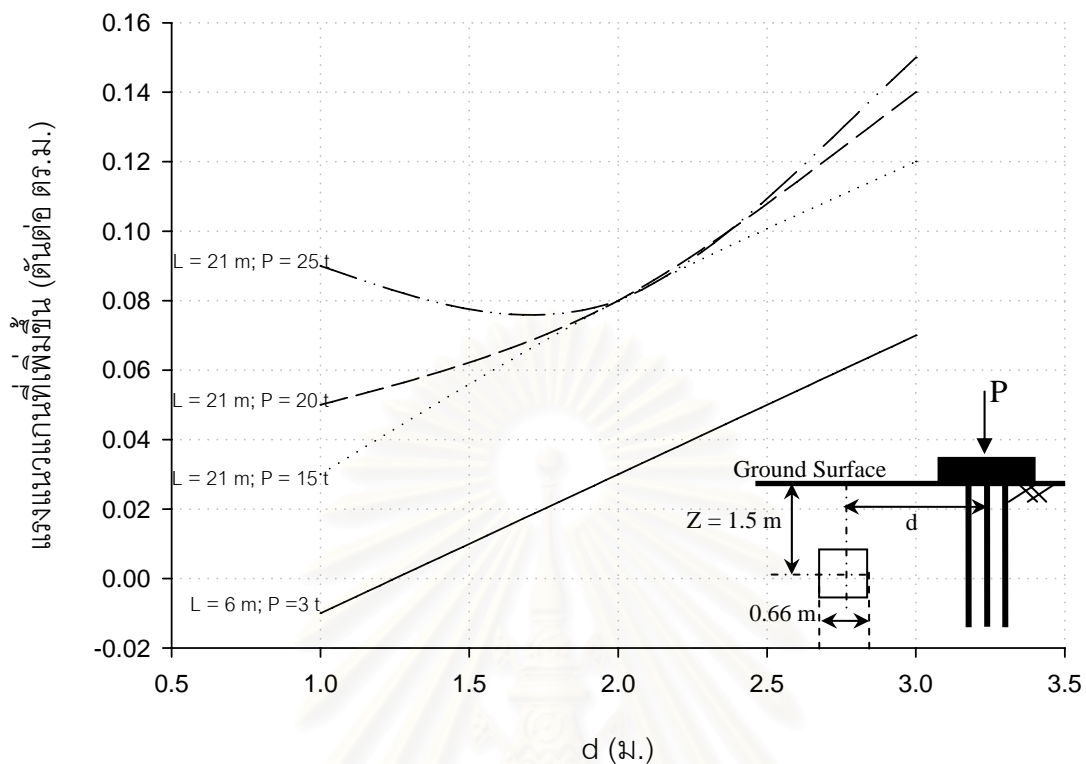
รูปที่ ก-3.10.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 2 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



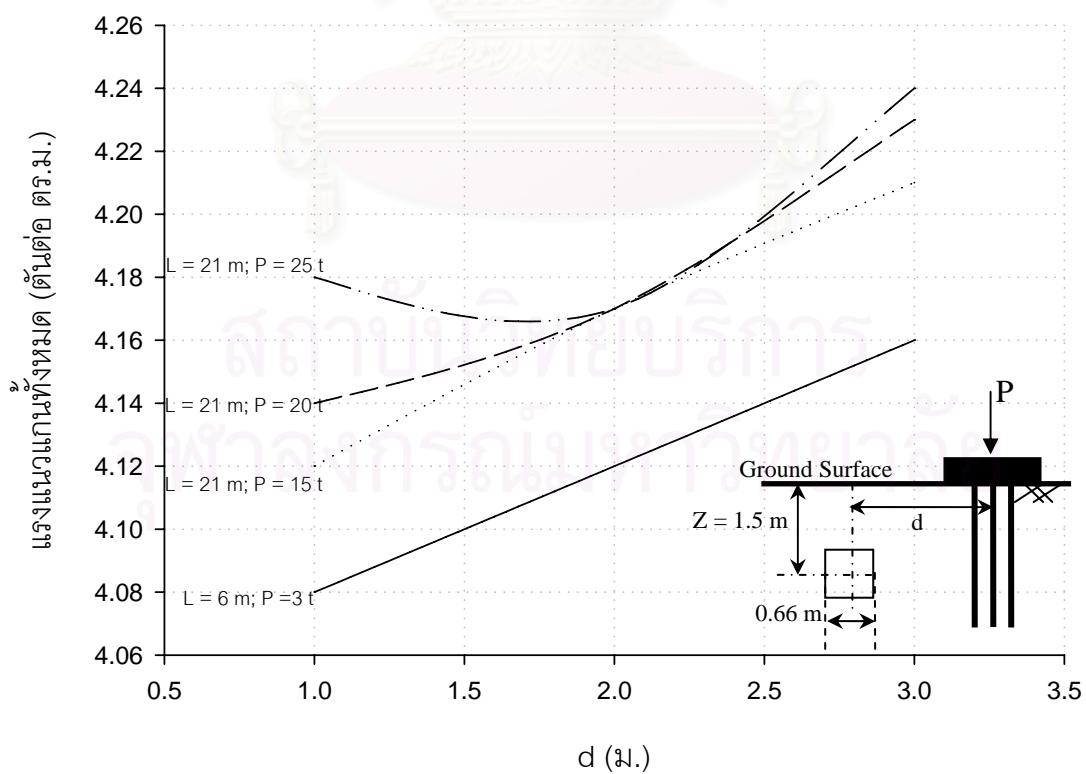
รูปที่ ก-3.11.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



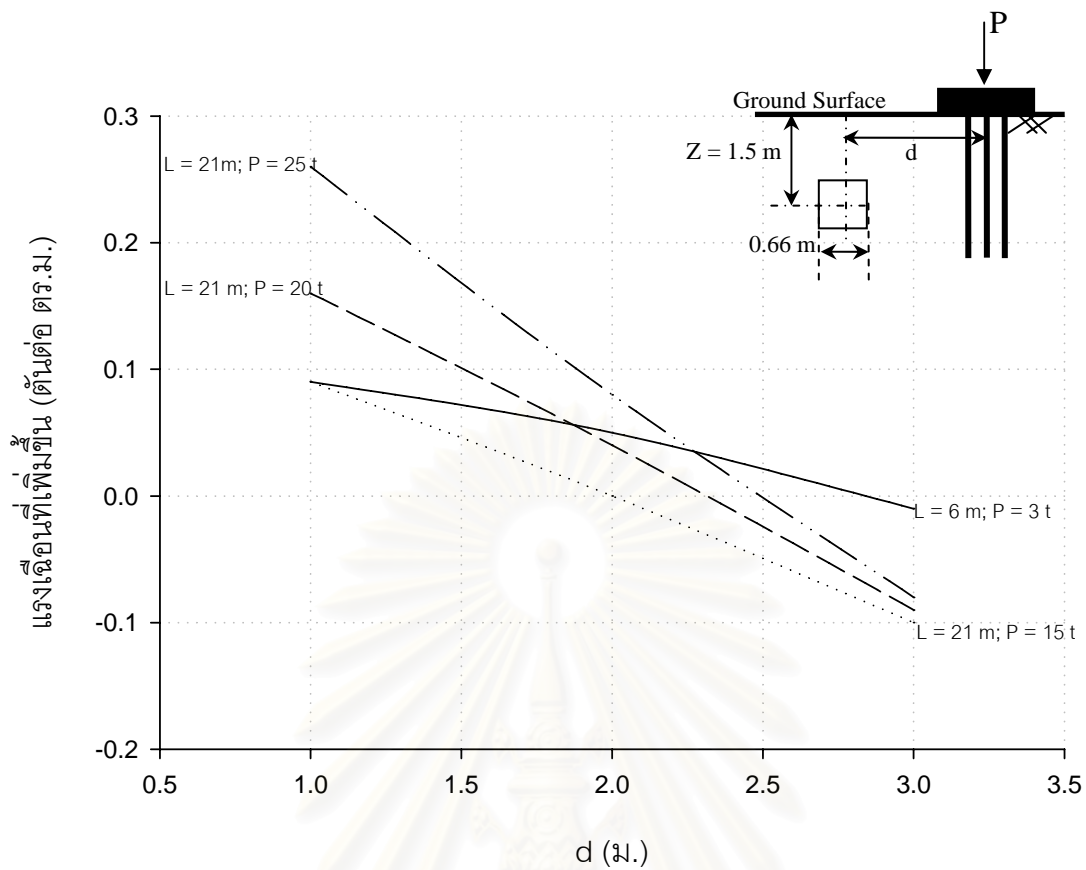
รูปที่ ก-3.11.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



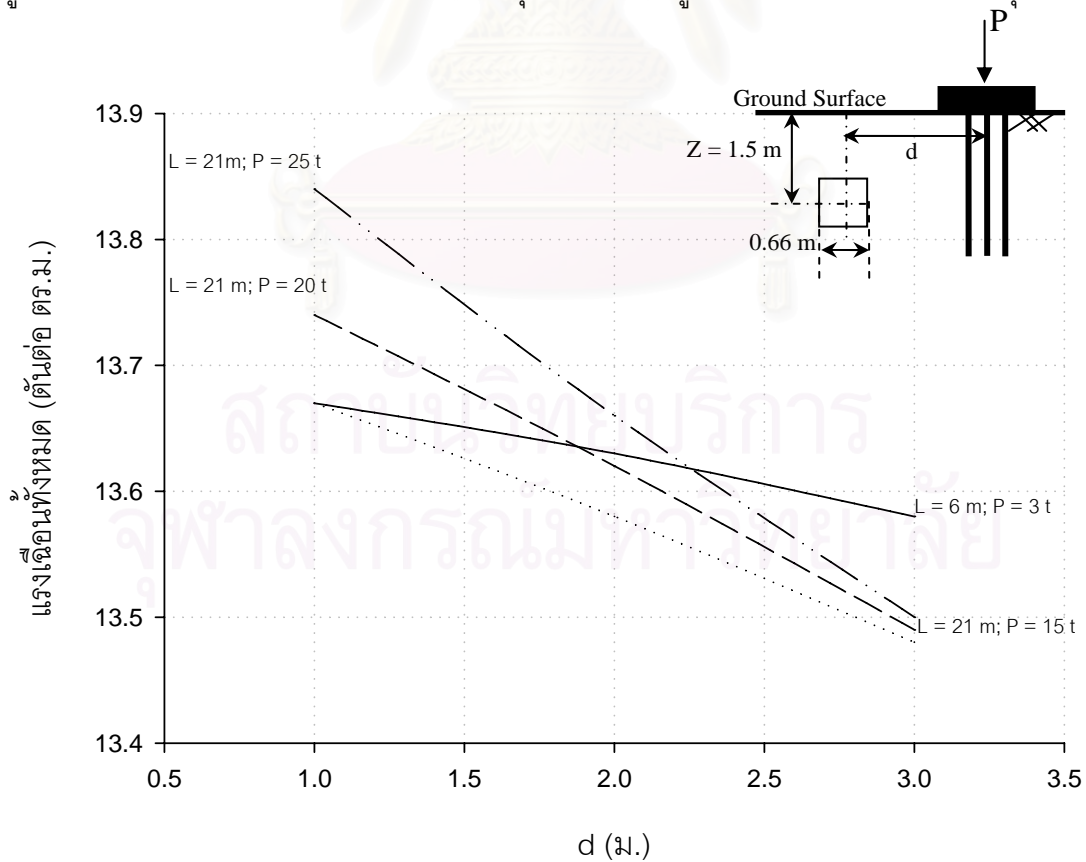
รูปที่ ก-3.11.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



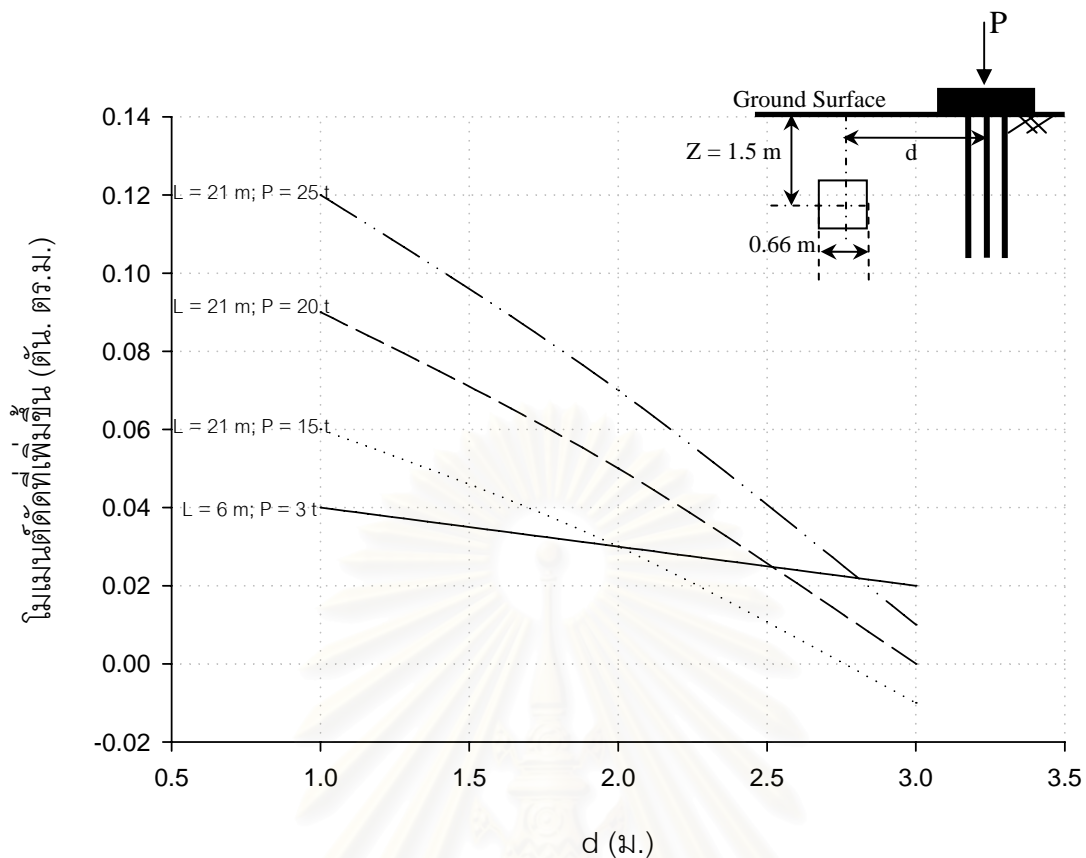
รูปที่ ก-3.11.2.2 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



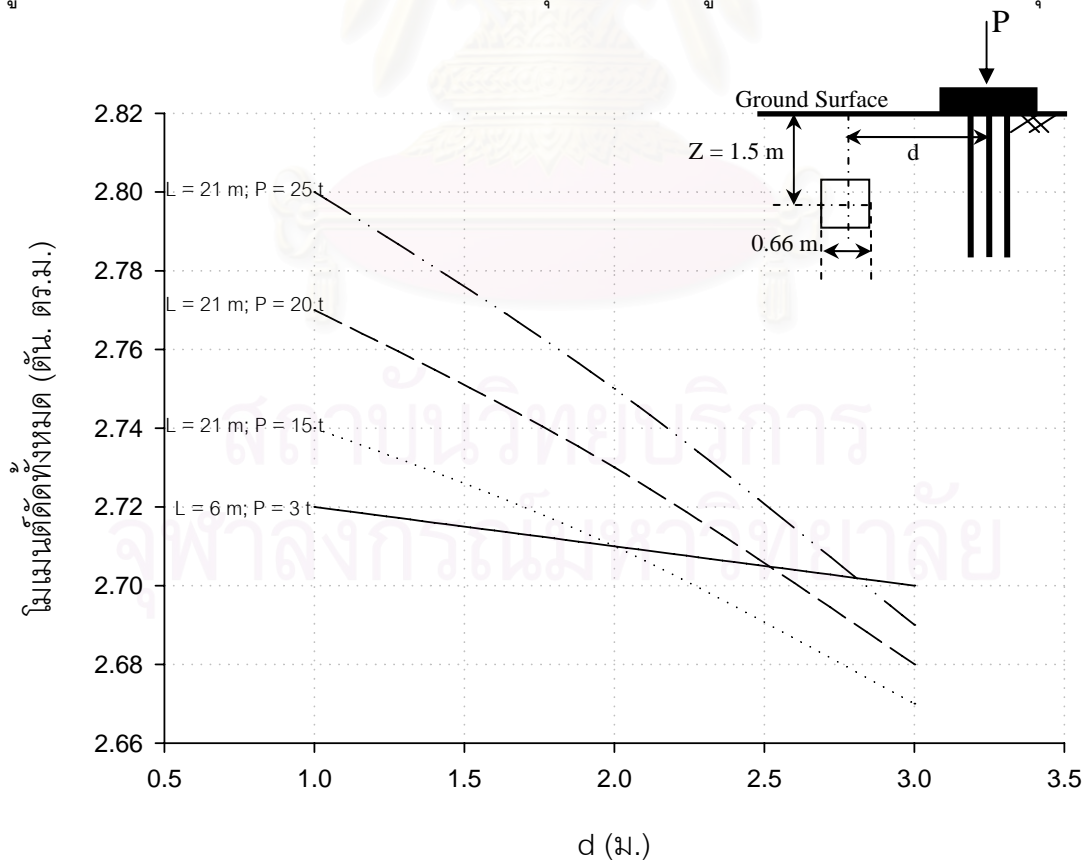
รูปที่ ก-3.11.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



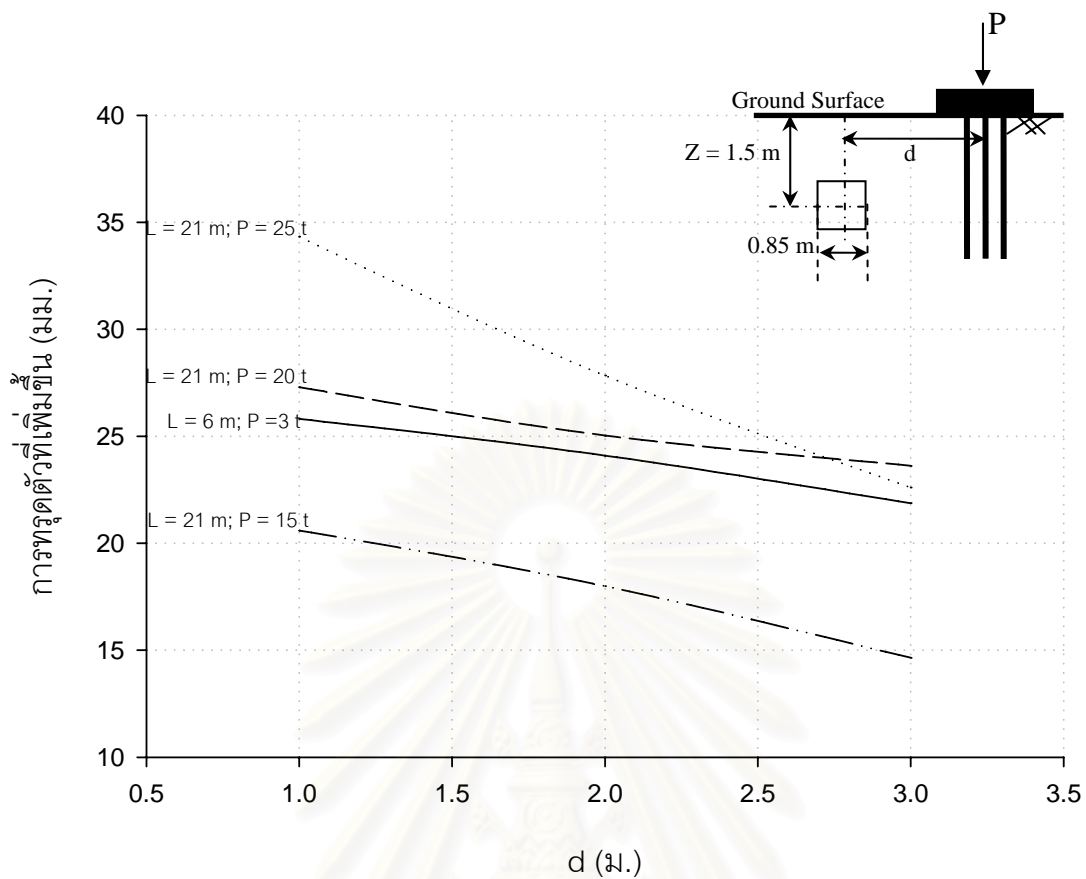
รูปที่ ก-3.11.3.2 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



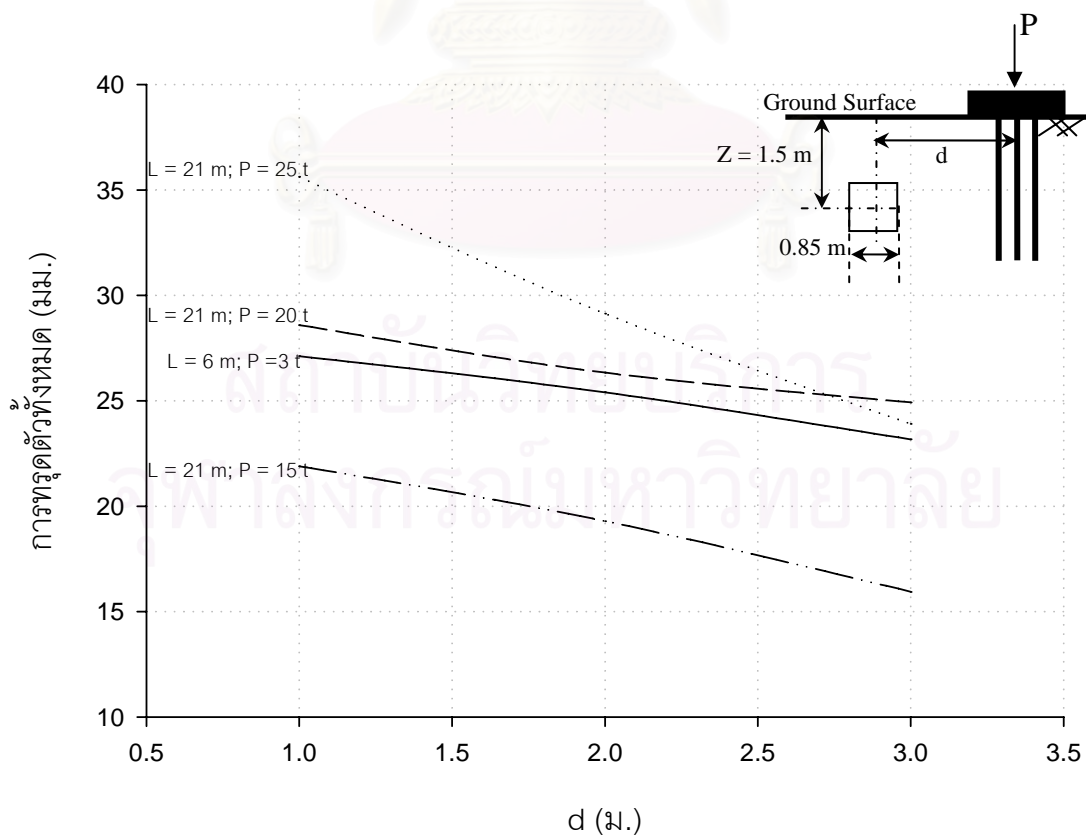
รูปที่ ก-3.11.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



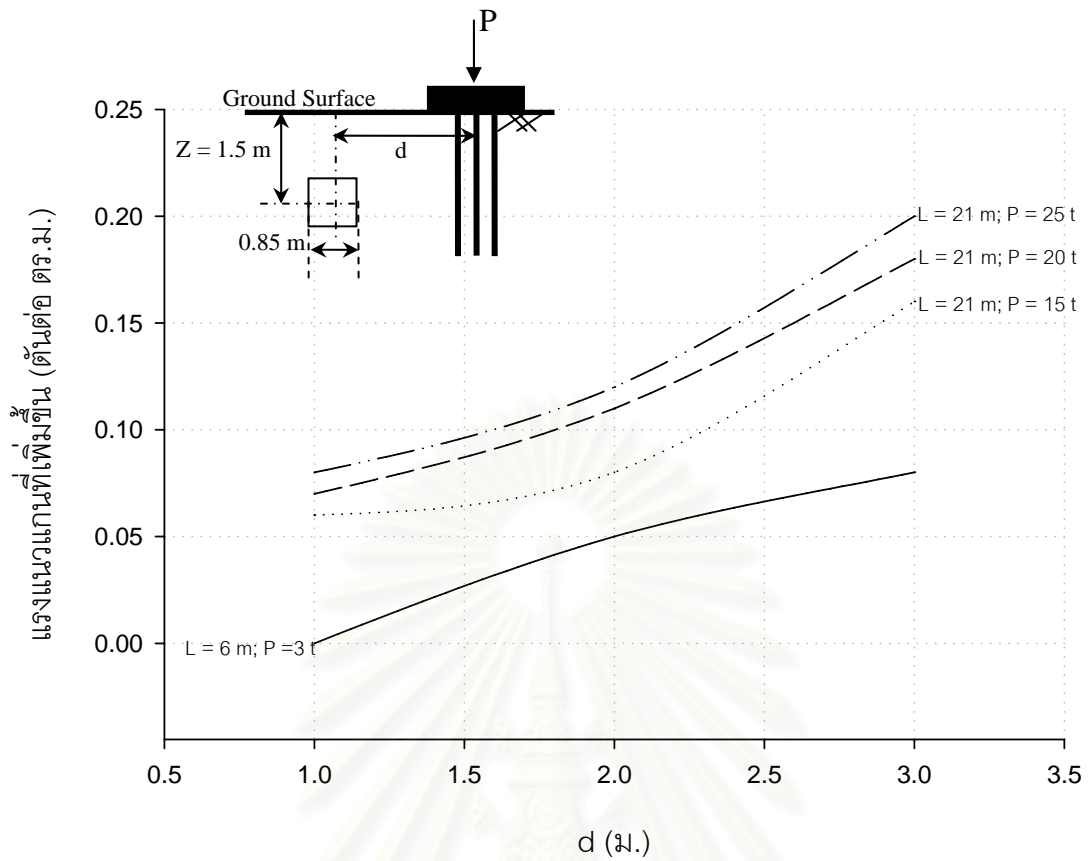
รูปที่ ก-3.11.4.2 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 3 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



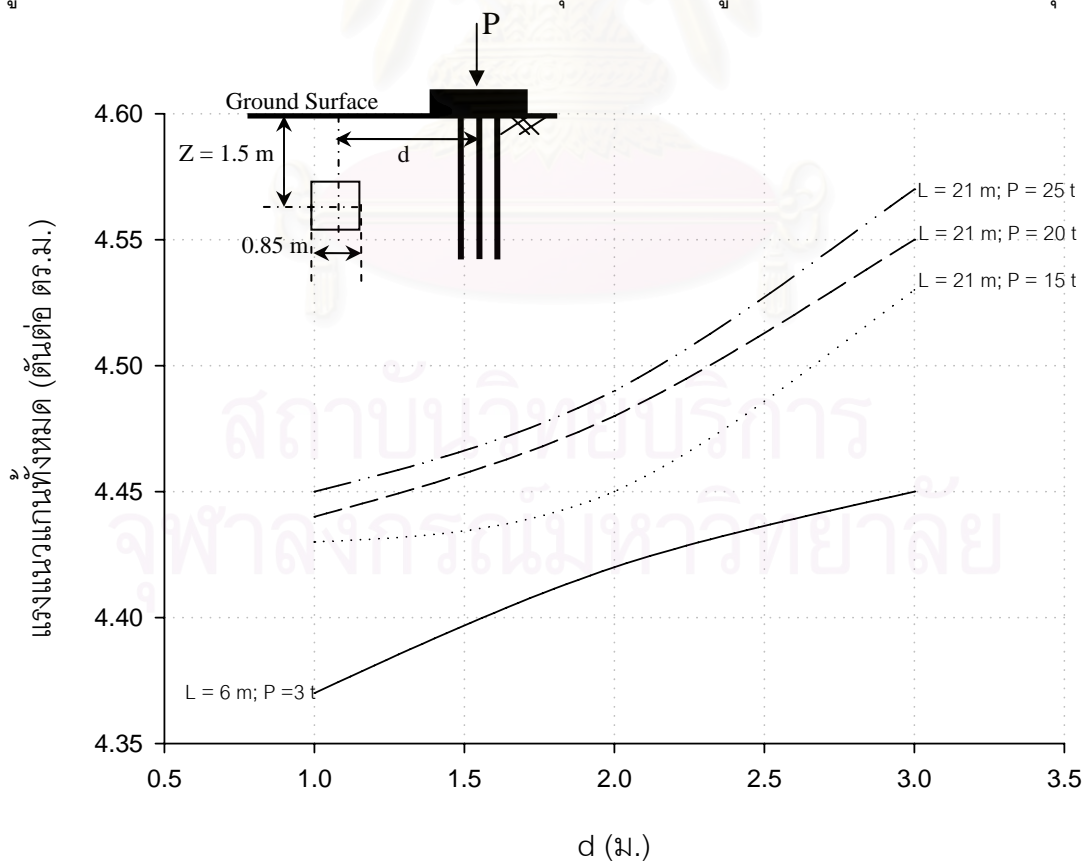
รูปที่ ก-3.12.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



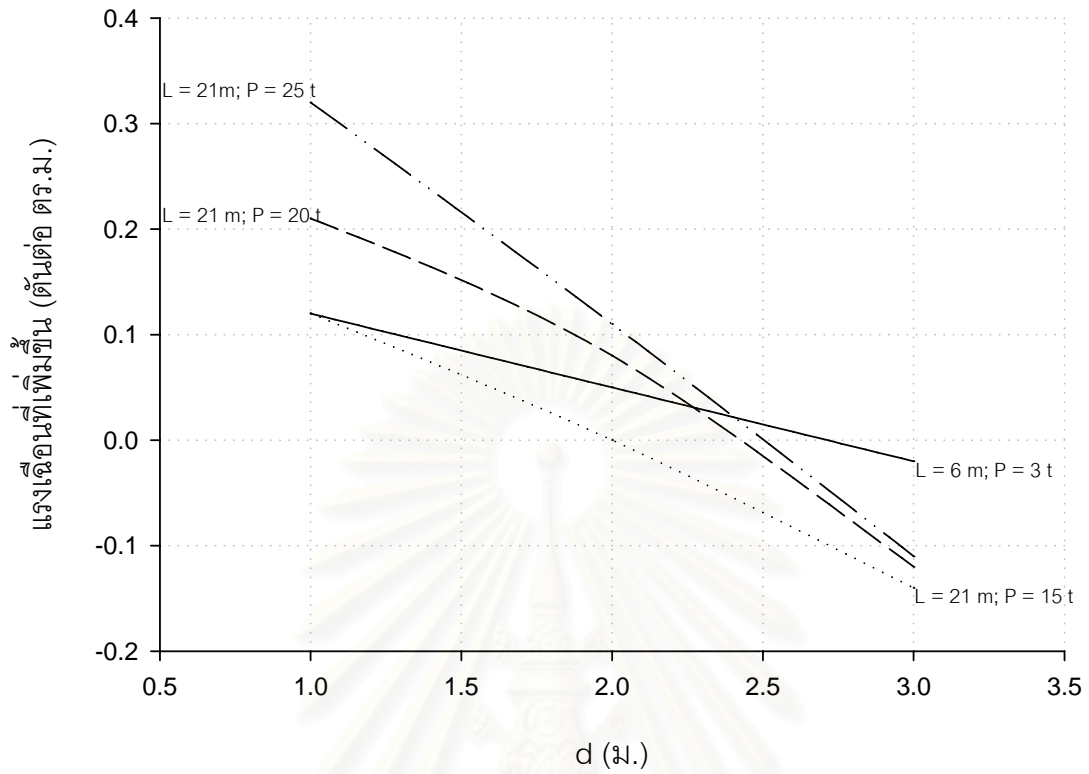
รูปที่ ก-3.12.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



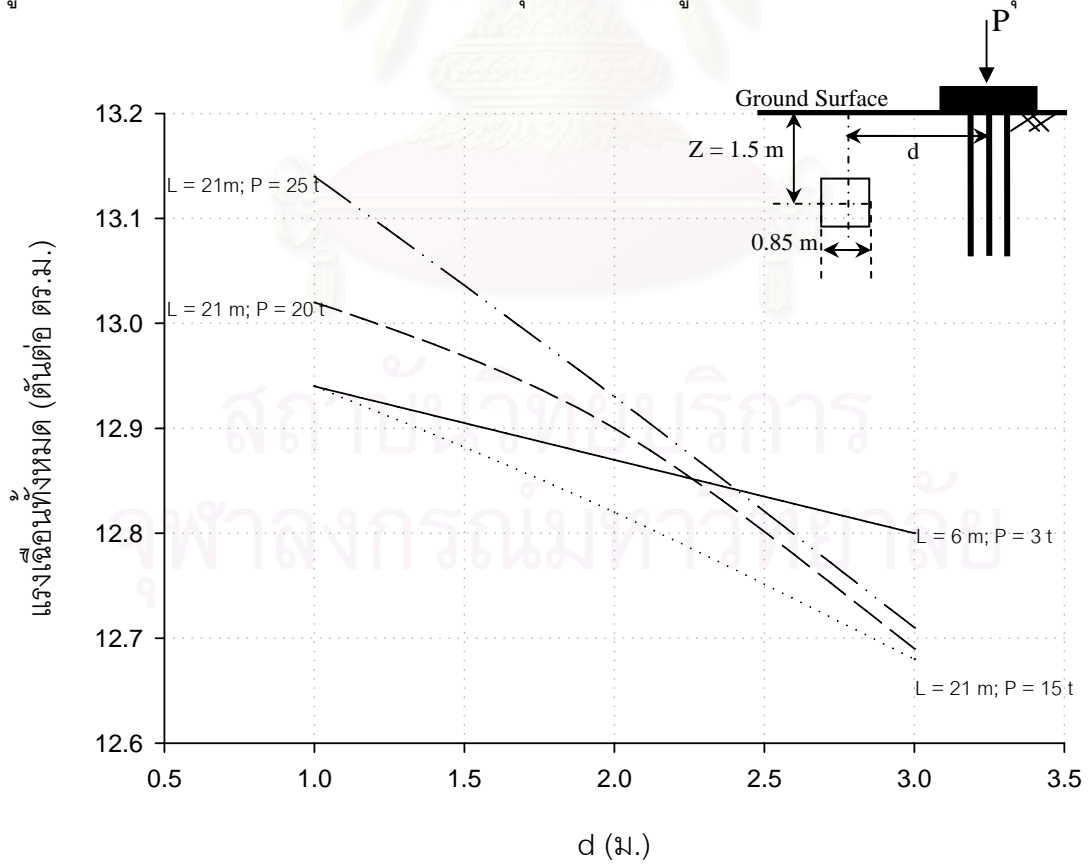
รูปที่ ก-3.12.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



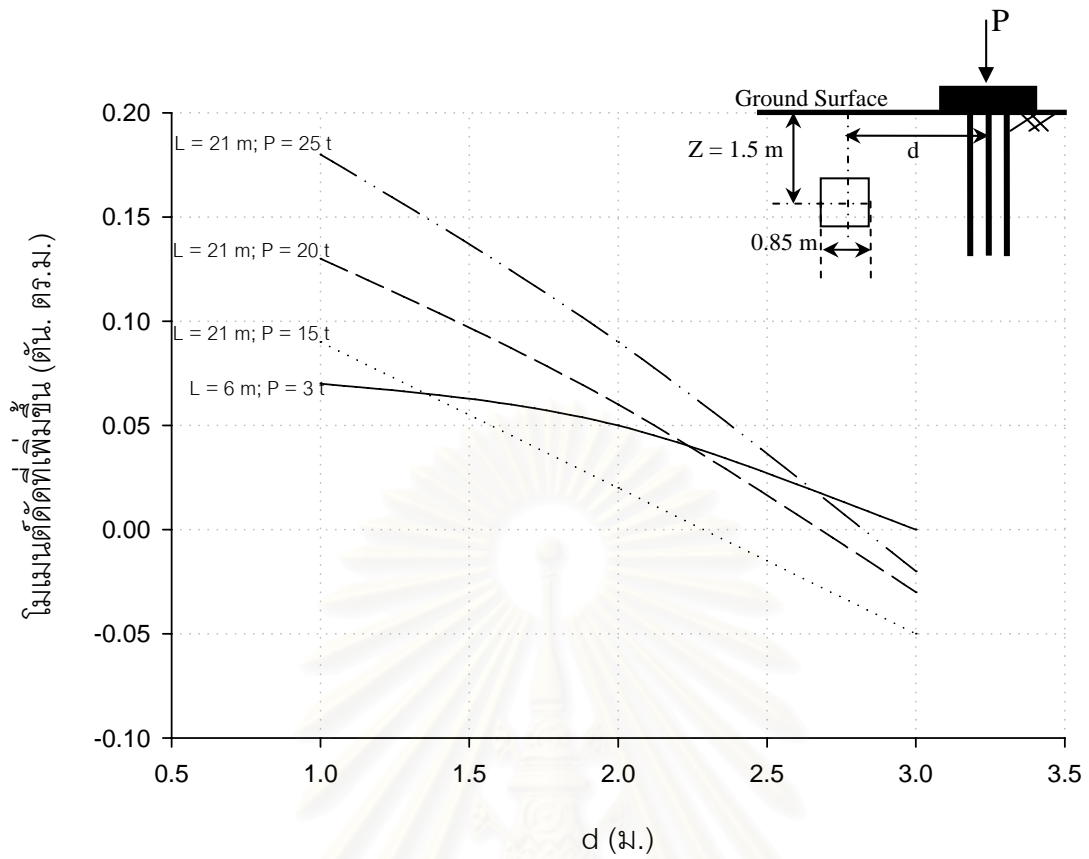
รูปที่ ก-3.12.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



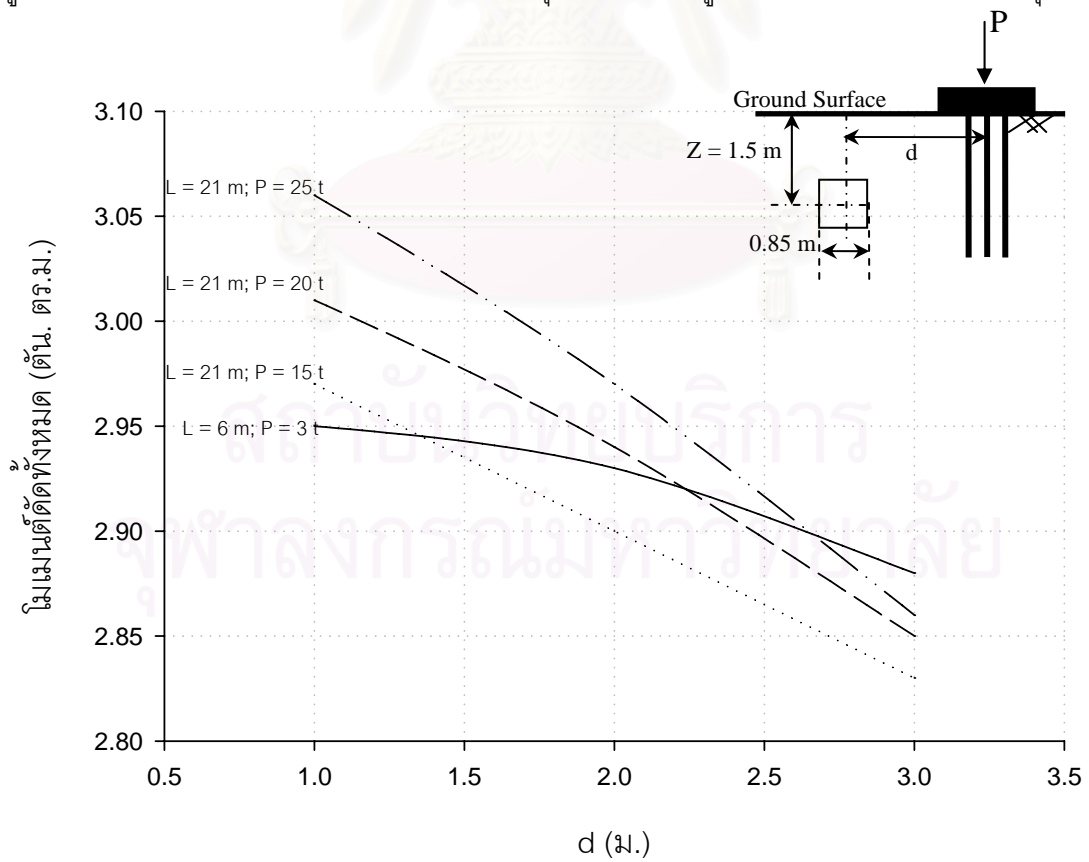
รูปที่ ก-3.12.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



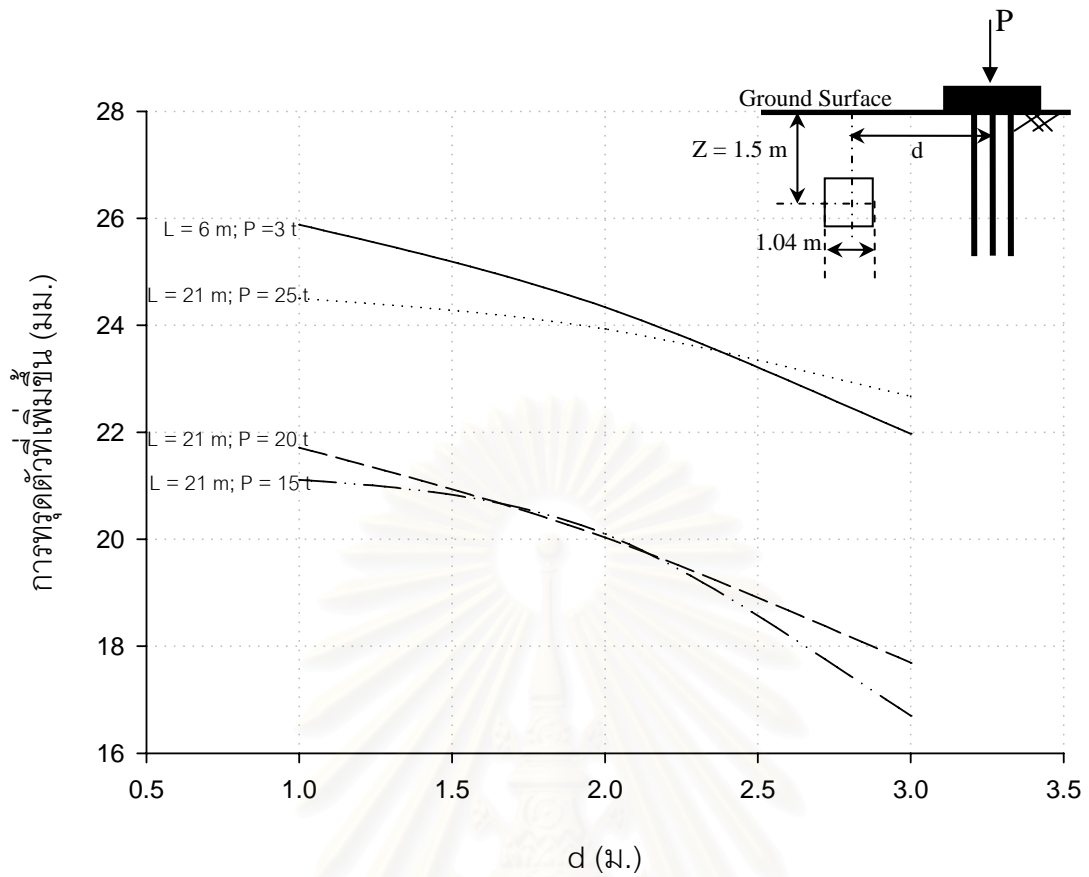
รูปที่ ก-3.12.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



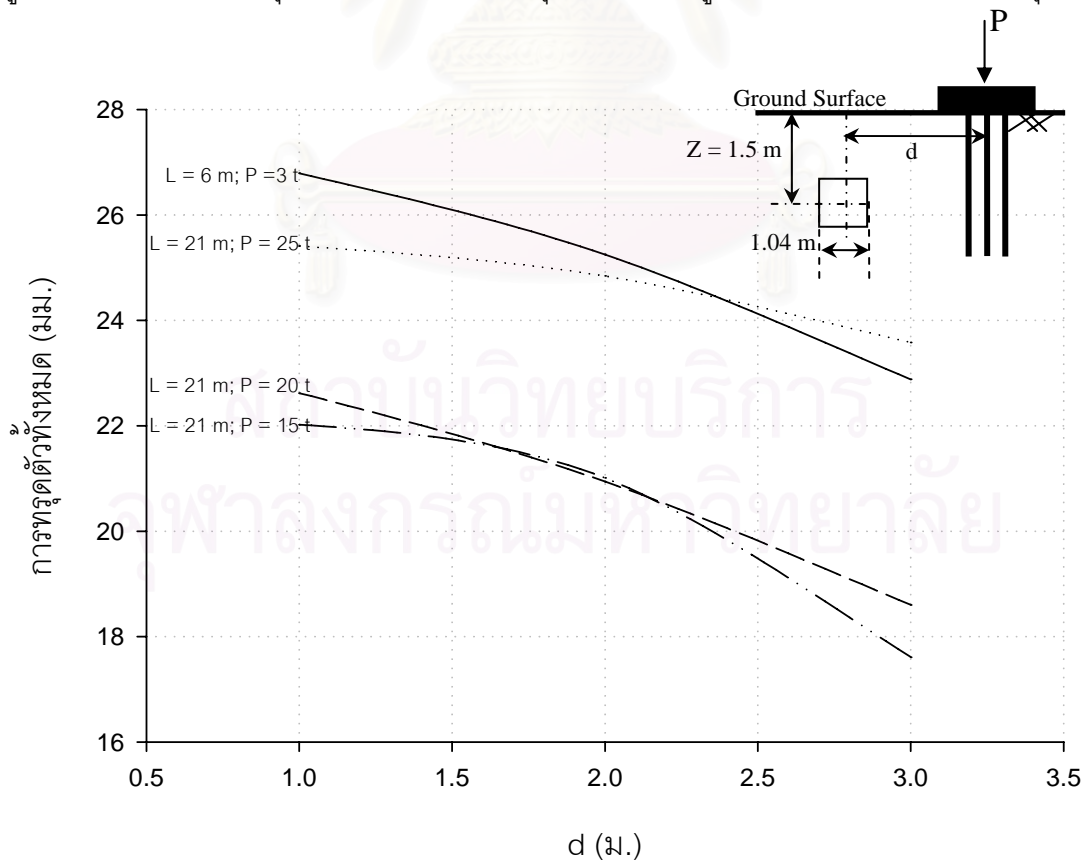
รูปที่ ก-3.12.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



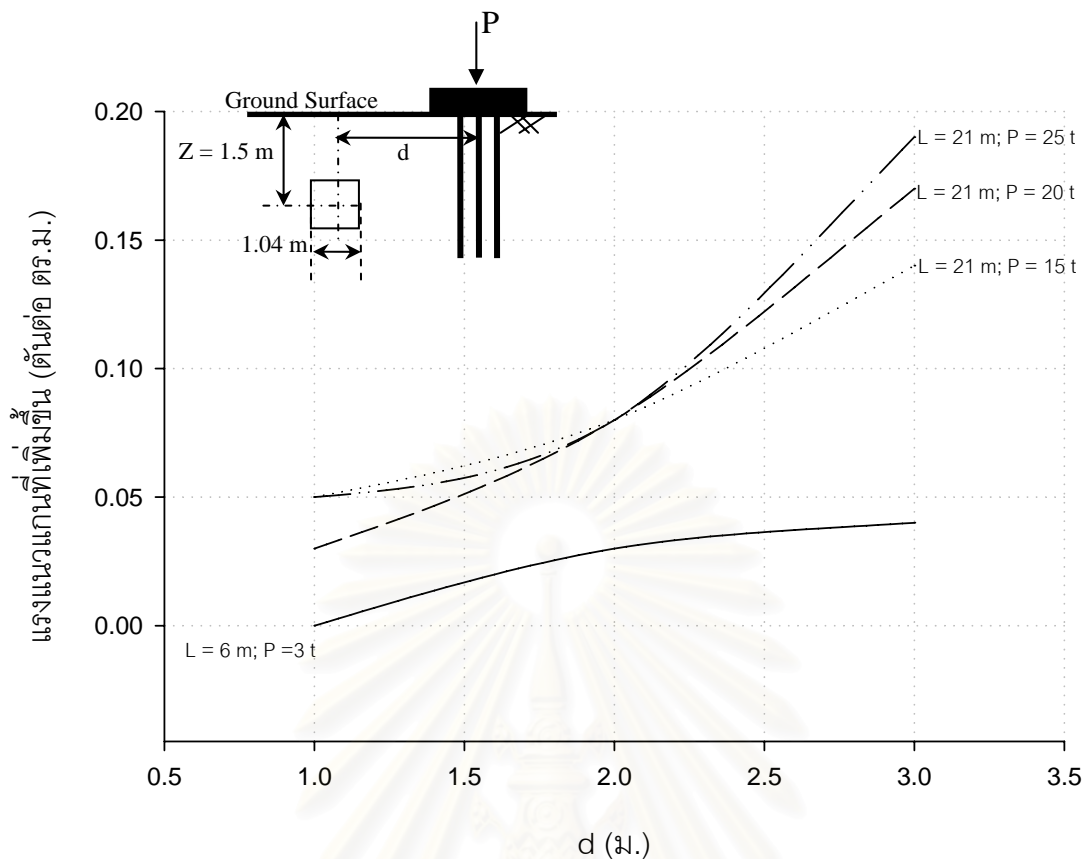
รูปที่ ก-3.12.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 4 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



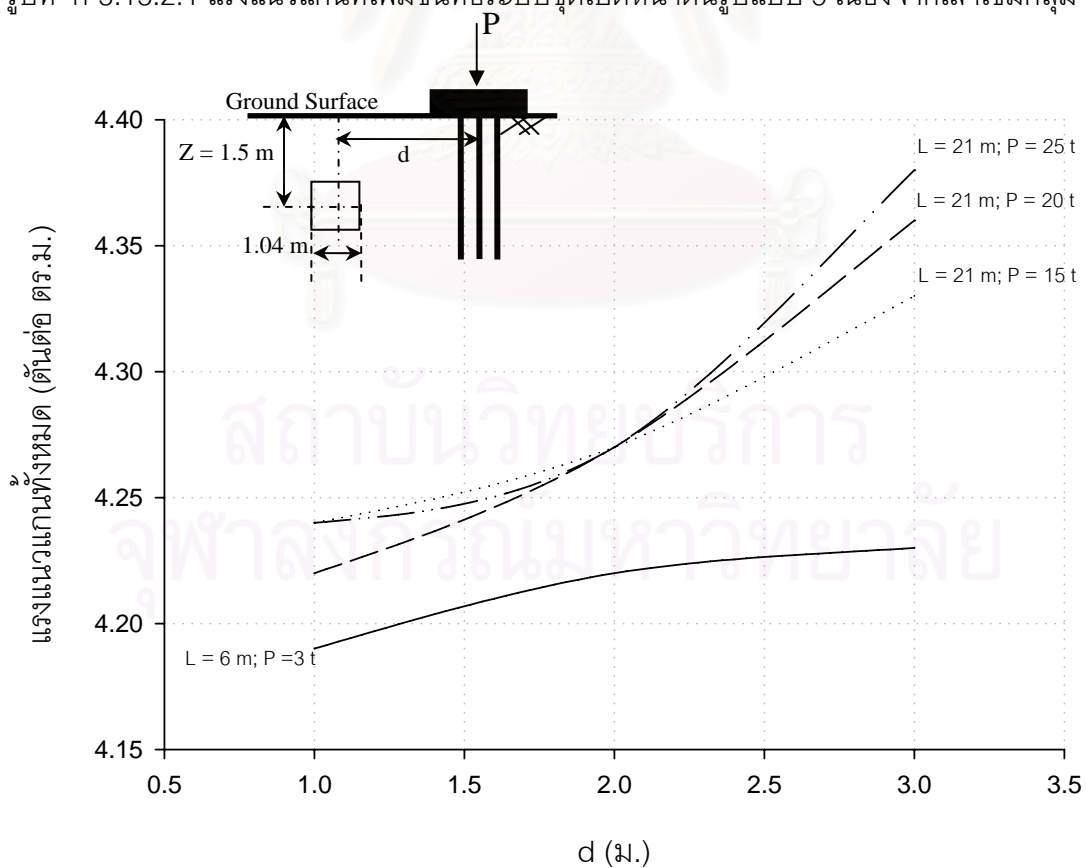
รูปที่ ก-3.13.1.1 การทรุดตัวของตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



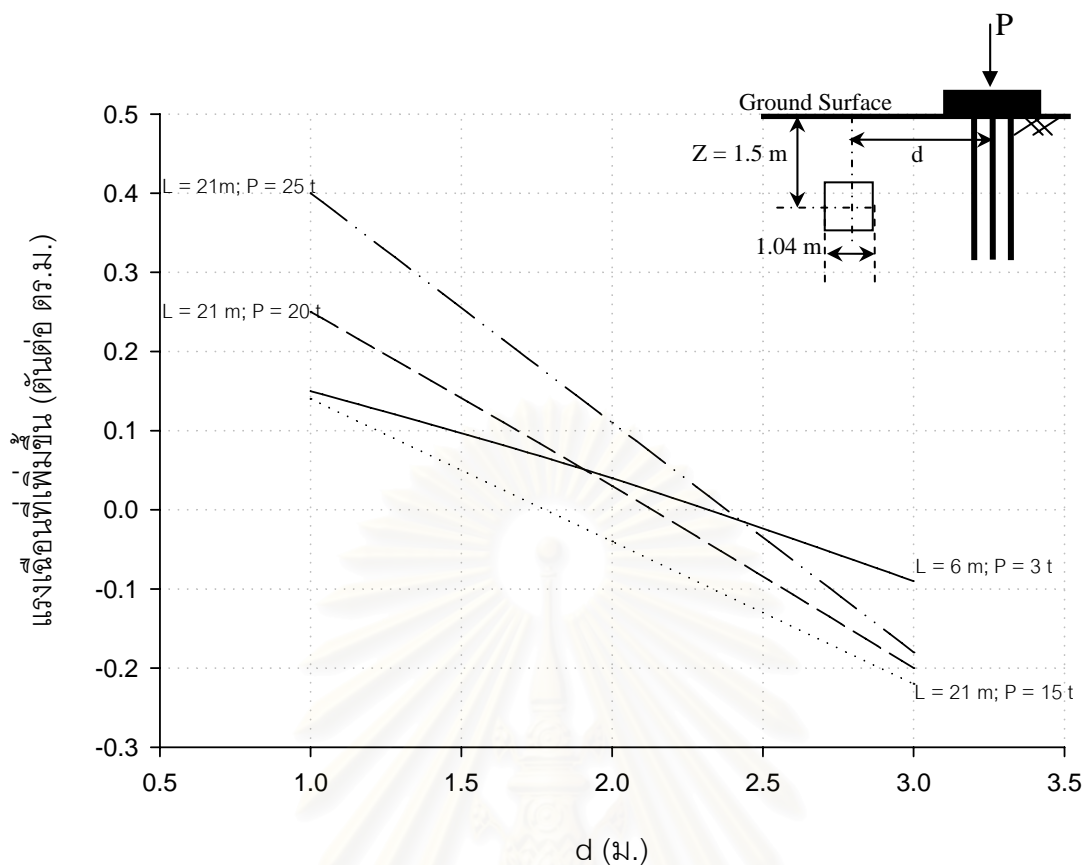
รูปที่ ก-3.13.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



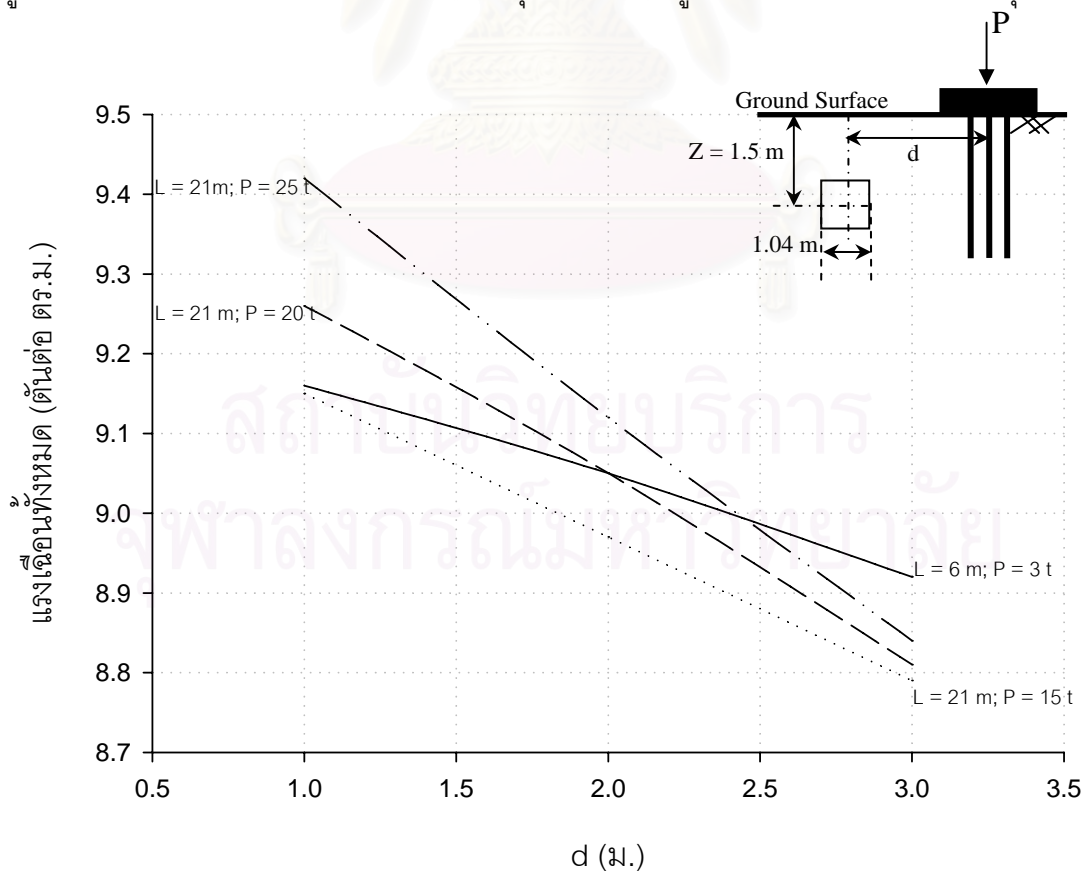
รูปที่ ก-3.13.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



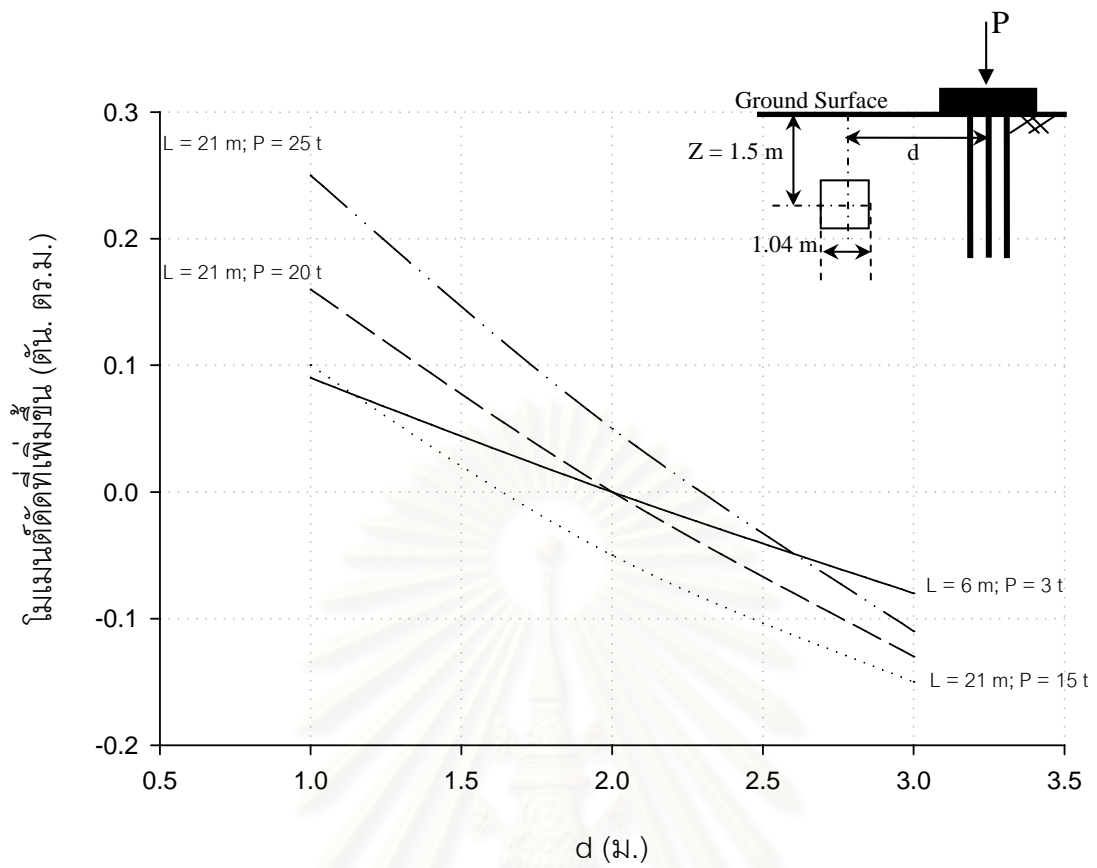
รูปที่ ก-3.13.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



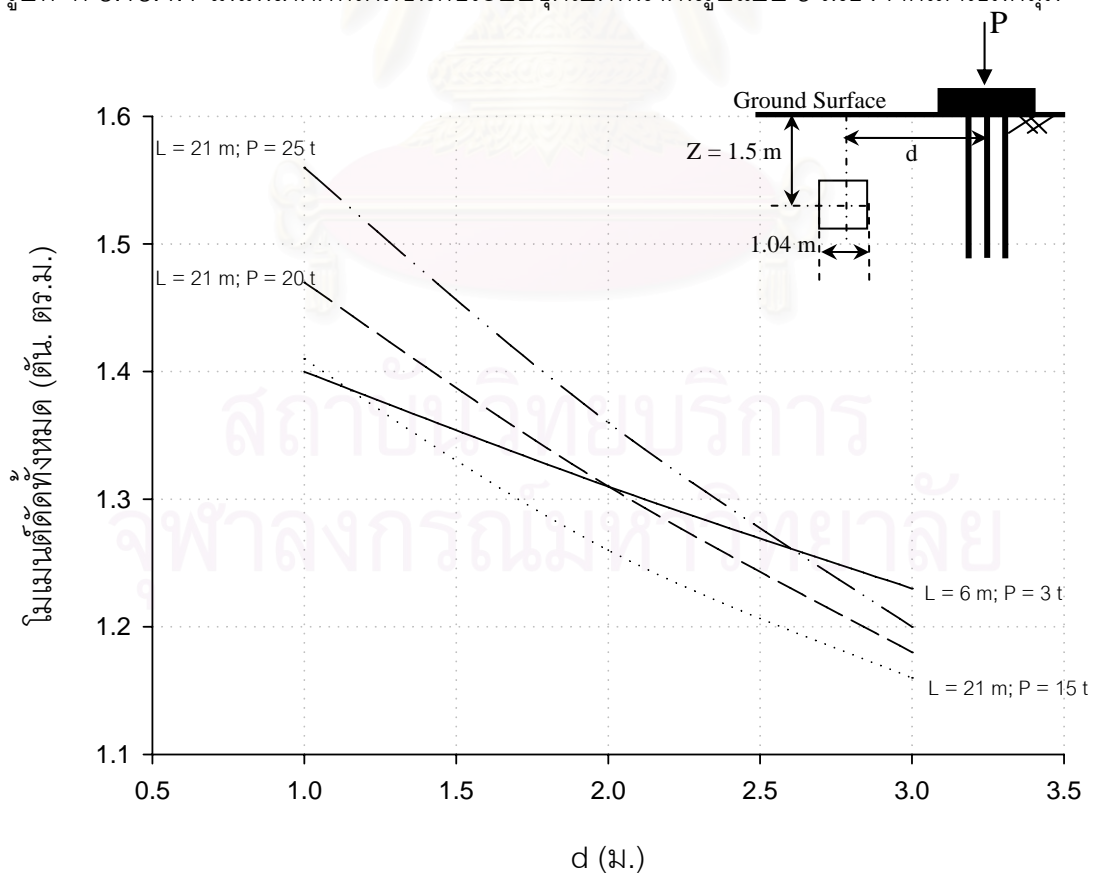
รูปที่ ก-3.13.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



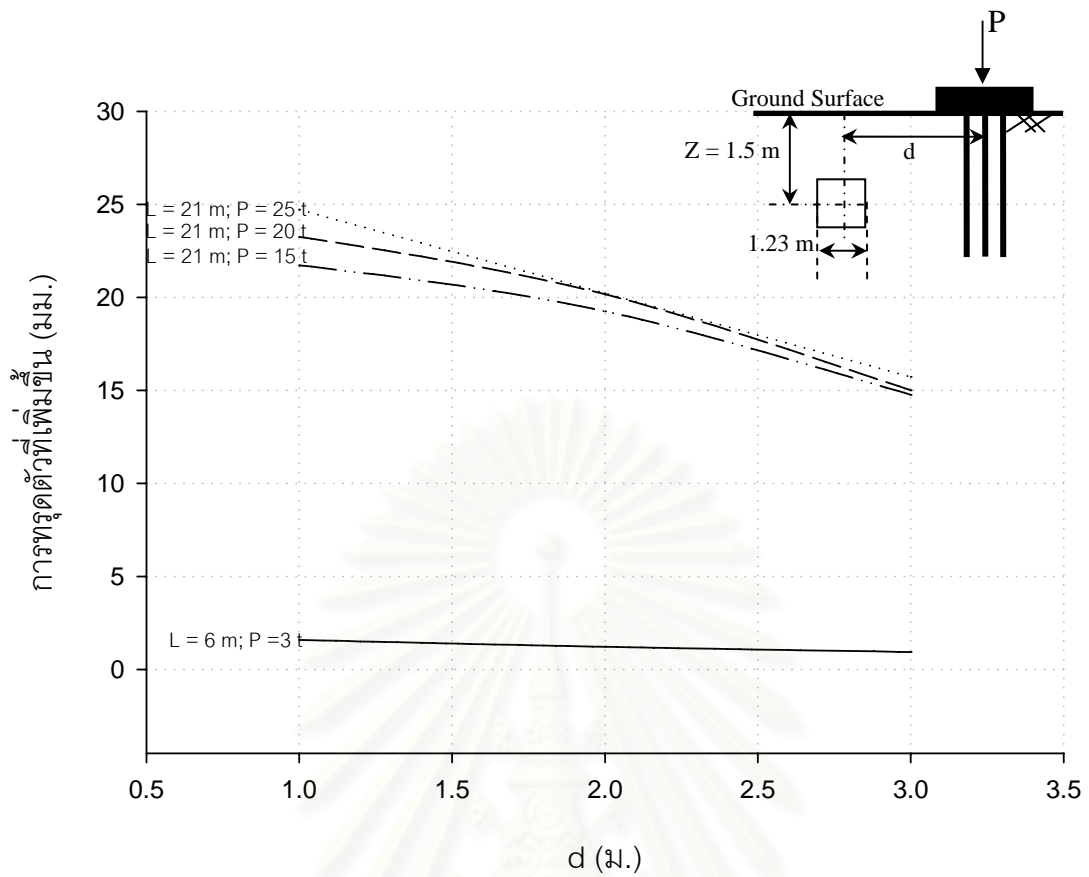
รูปที่ ก-3.13.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



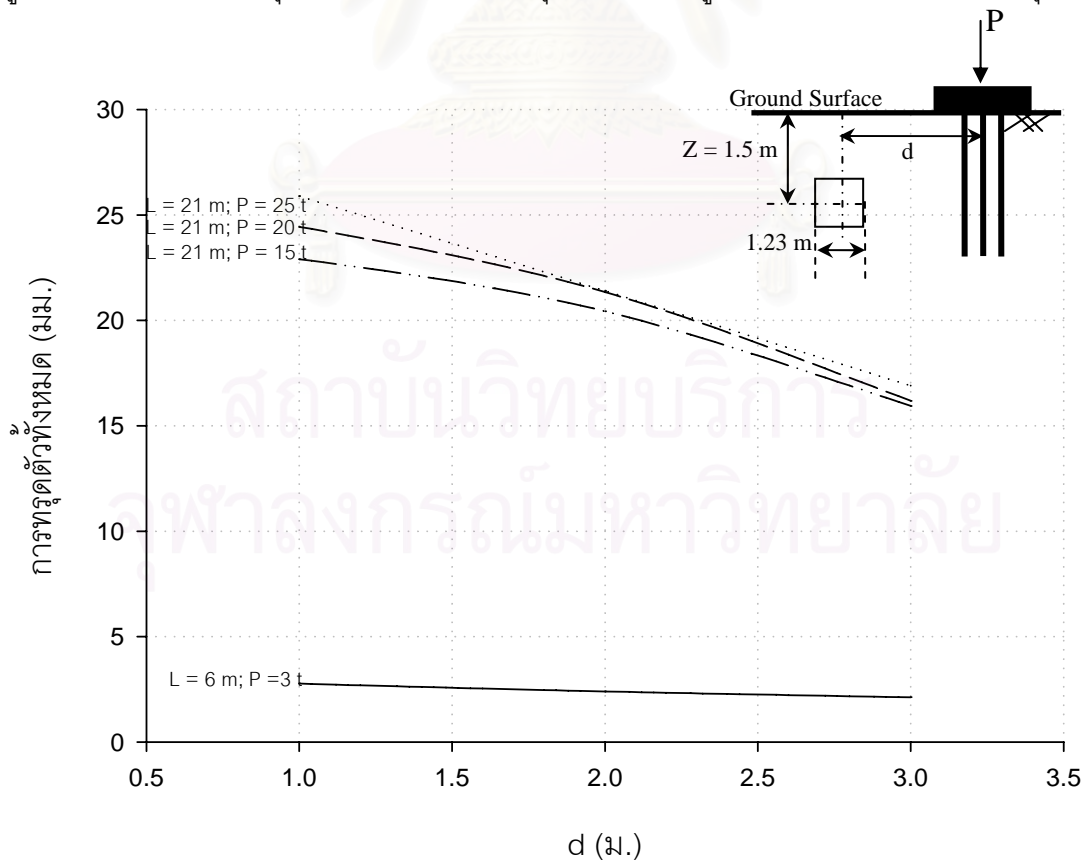
รูปที่ ก-3.13.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



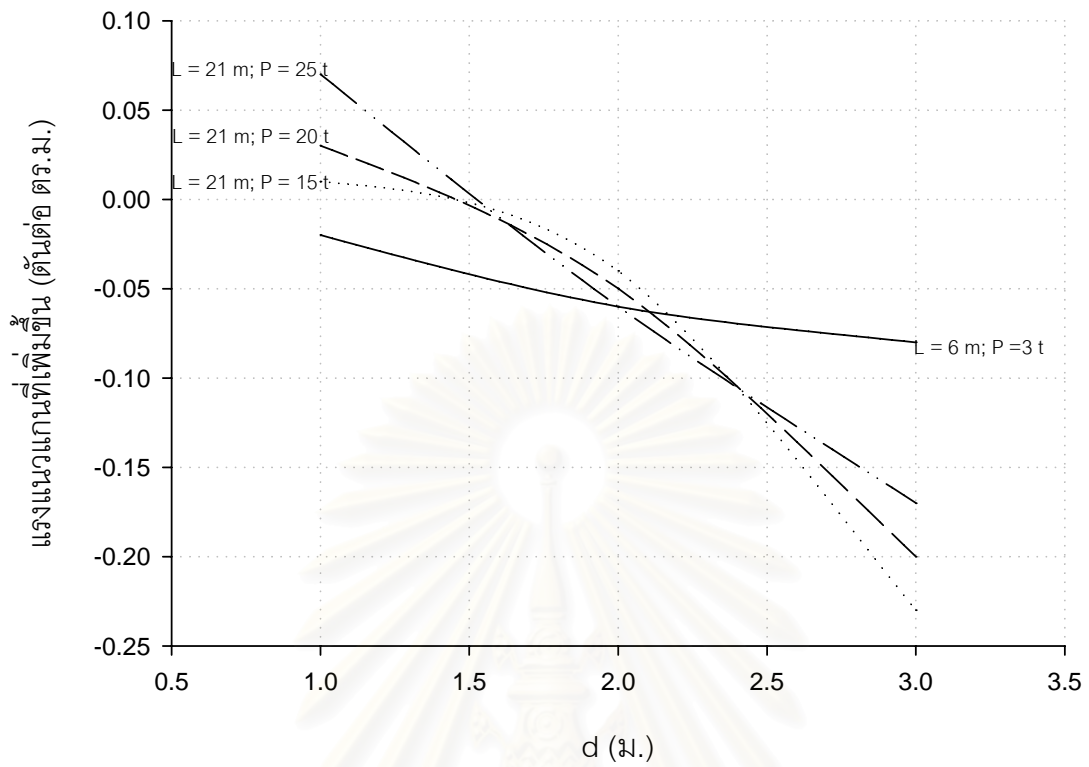
รูปที่ ก-3.13.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 5 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



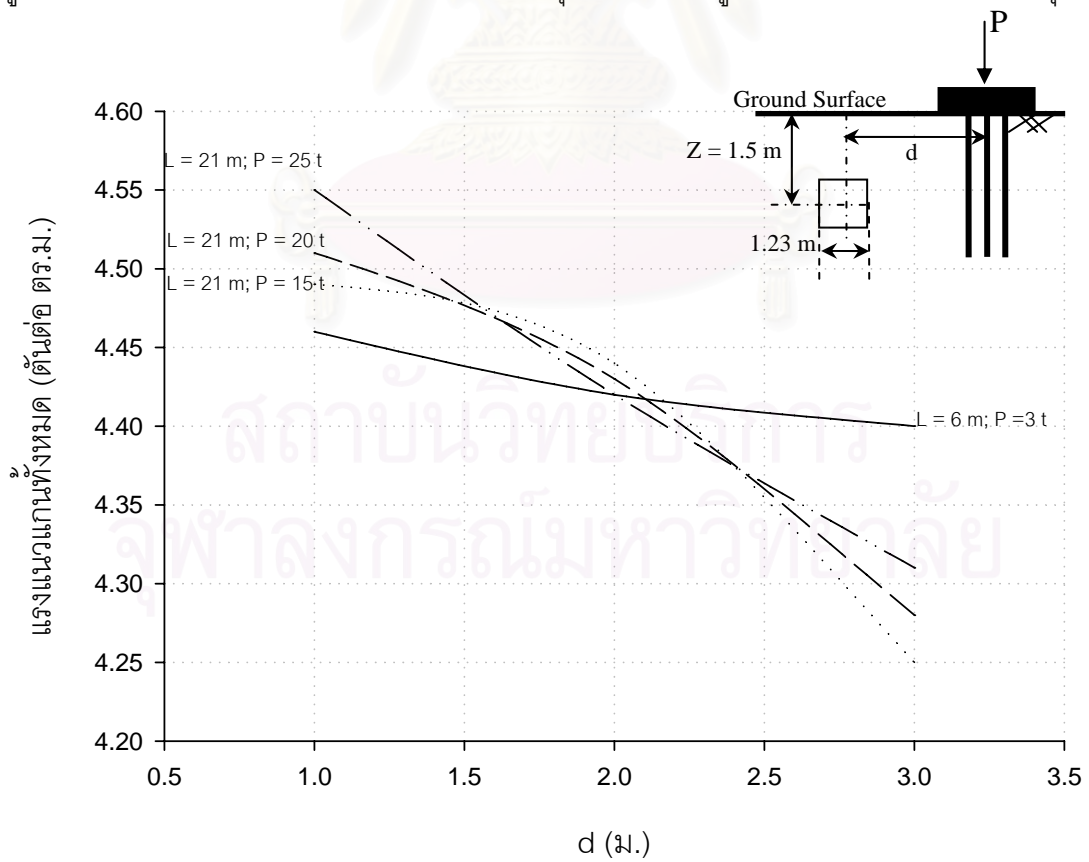
รูปที่ ก-3.14.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



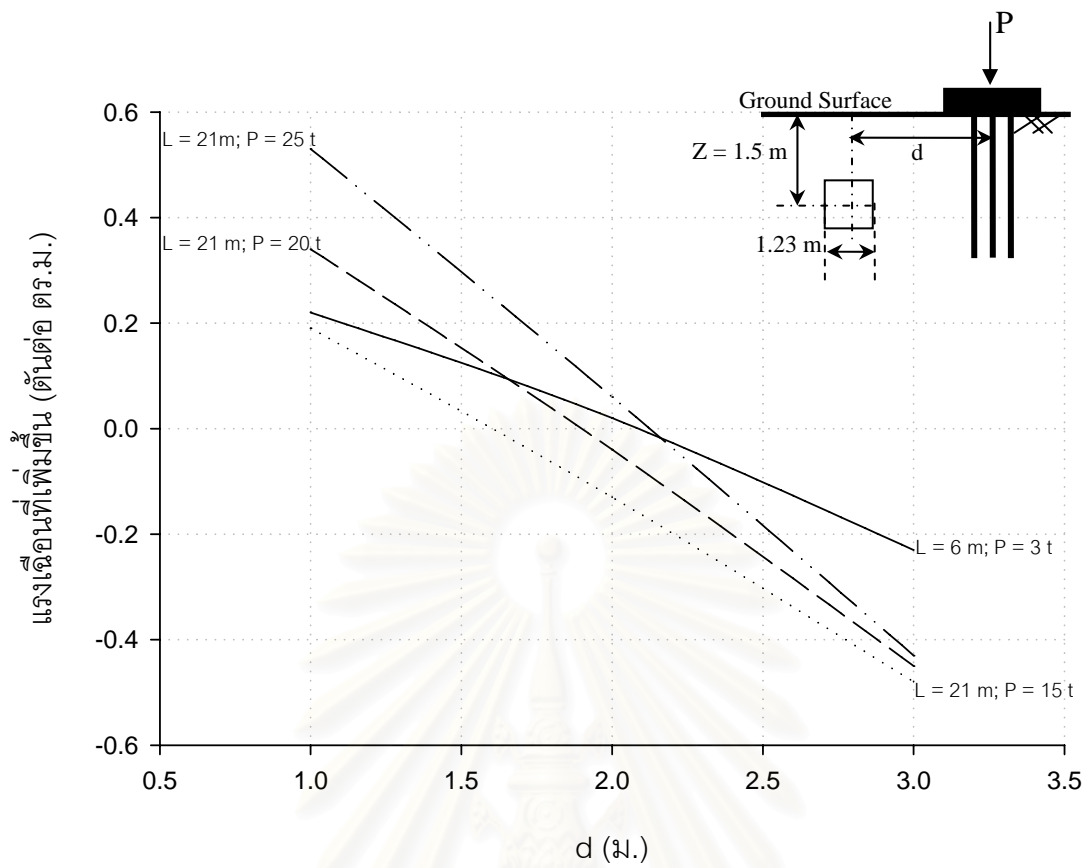
รูปที่ ก-3.14.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



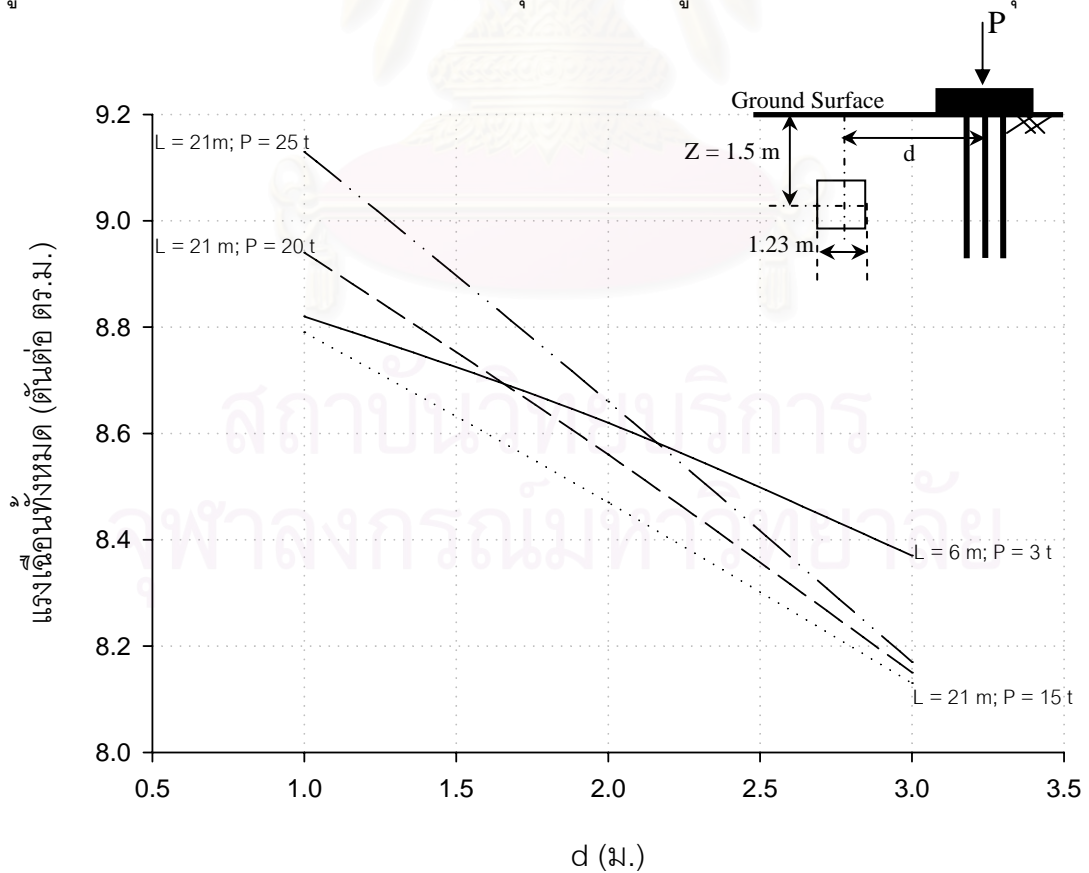
รูปที่ ก-3.14.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



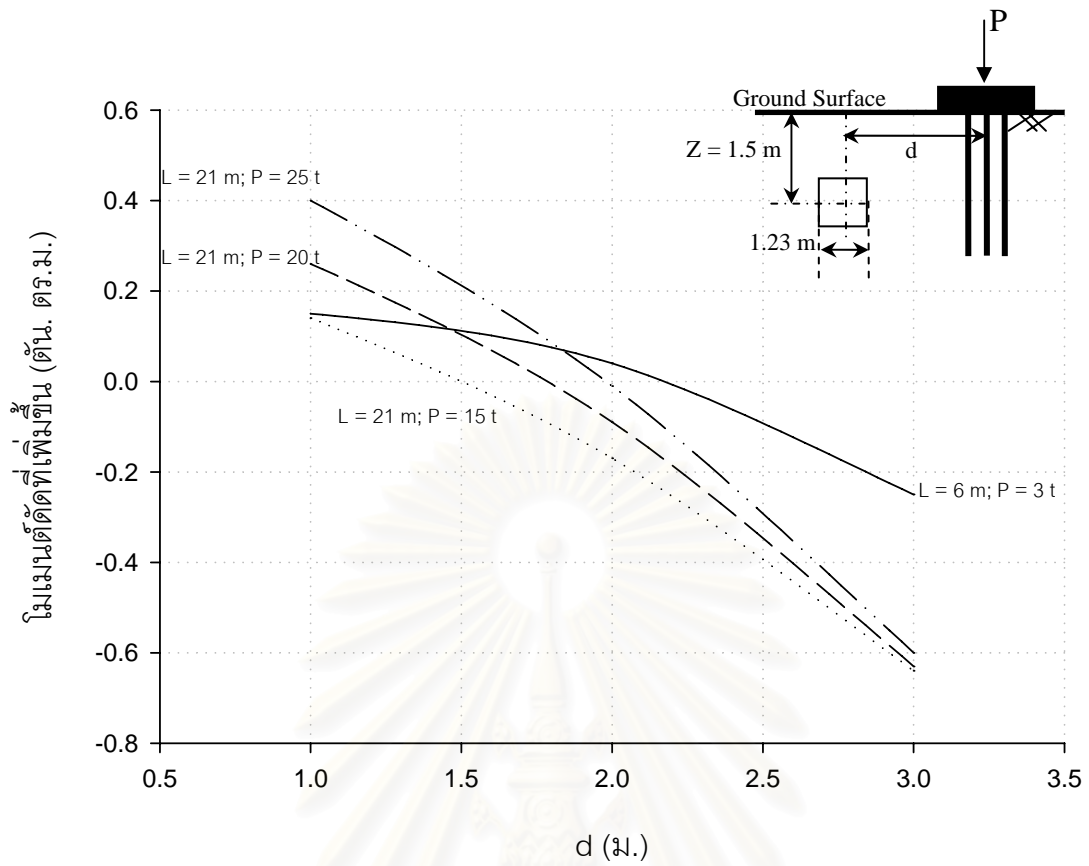
รูปที่ ก-3.14.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



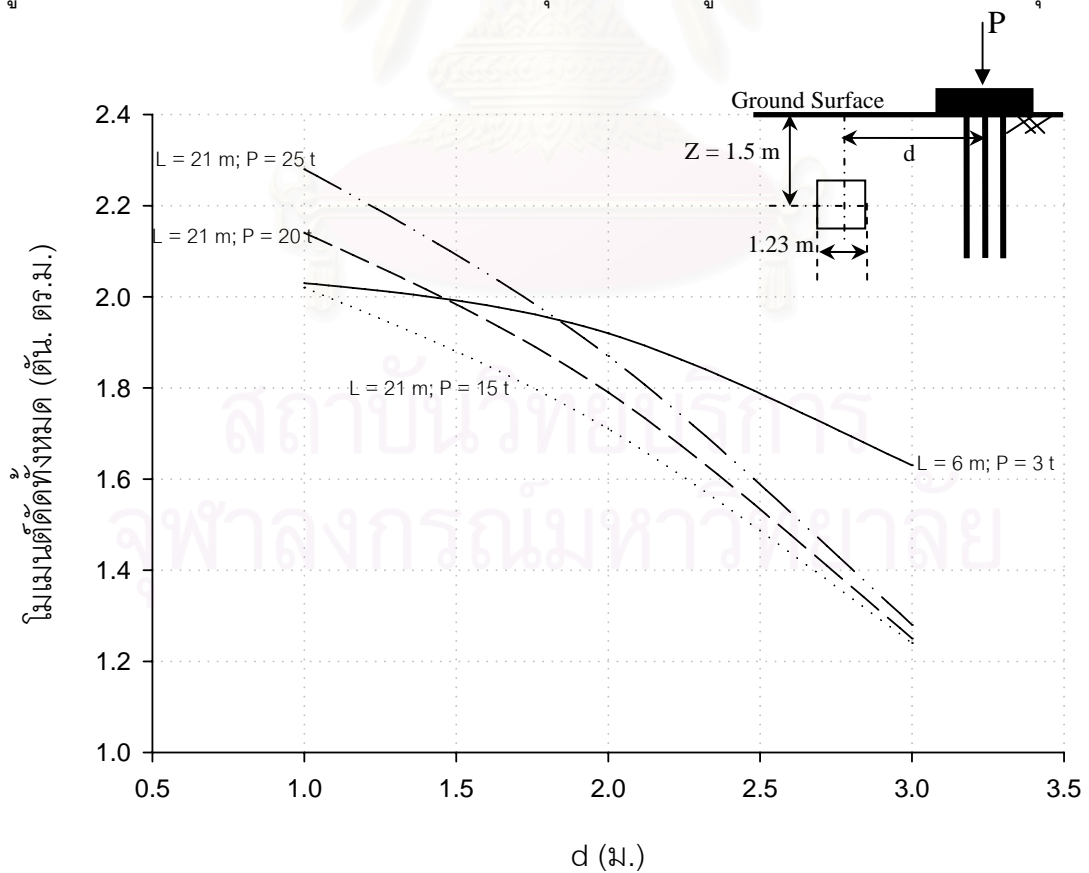
รูปที่ ก-3.14.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



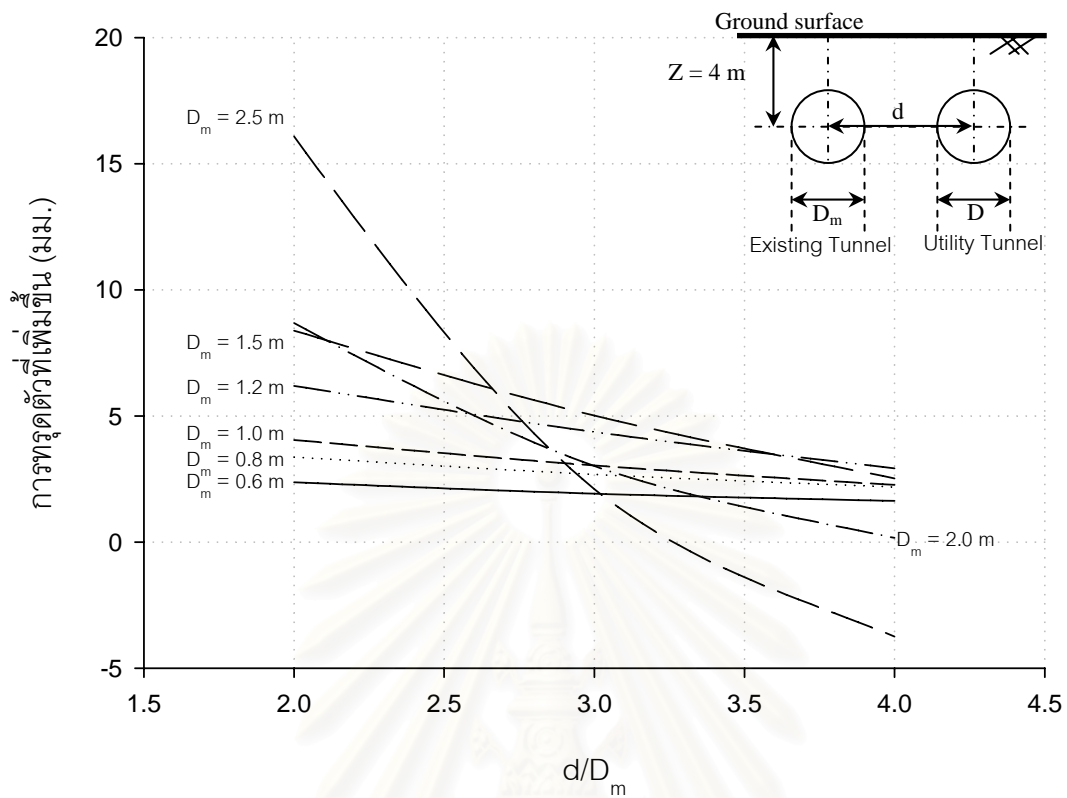
รูปที่ ก-3.14.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



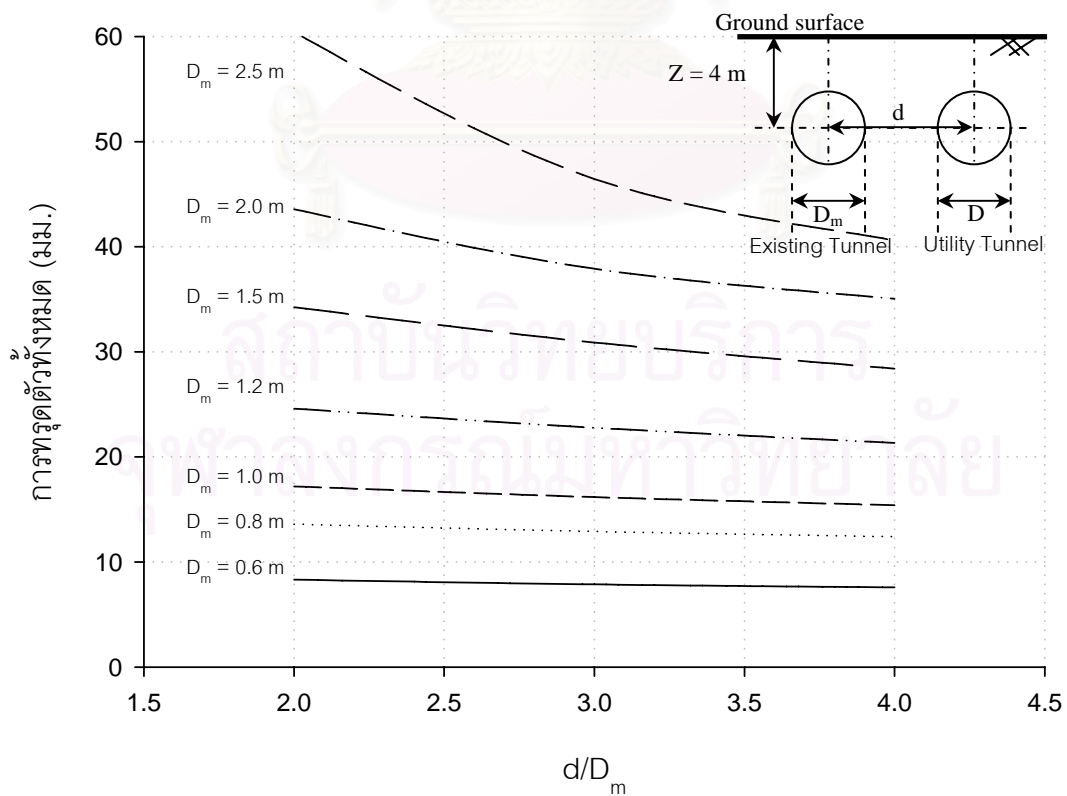
รูปที่ ก-3.14.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



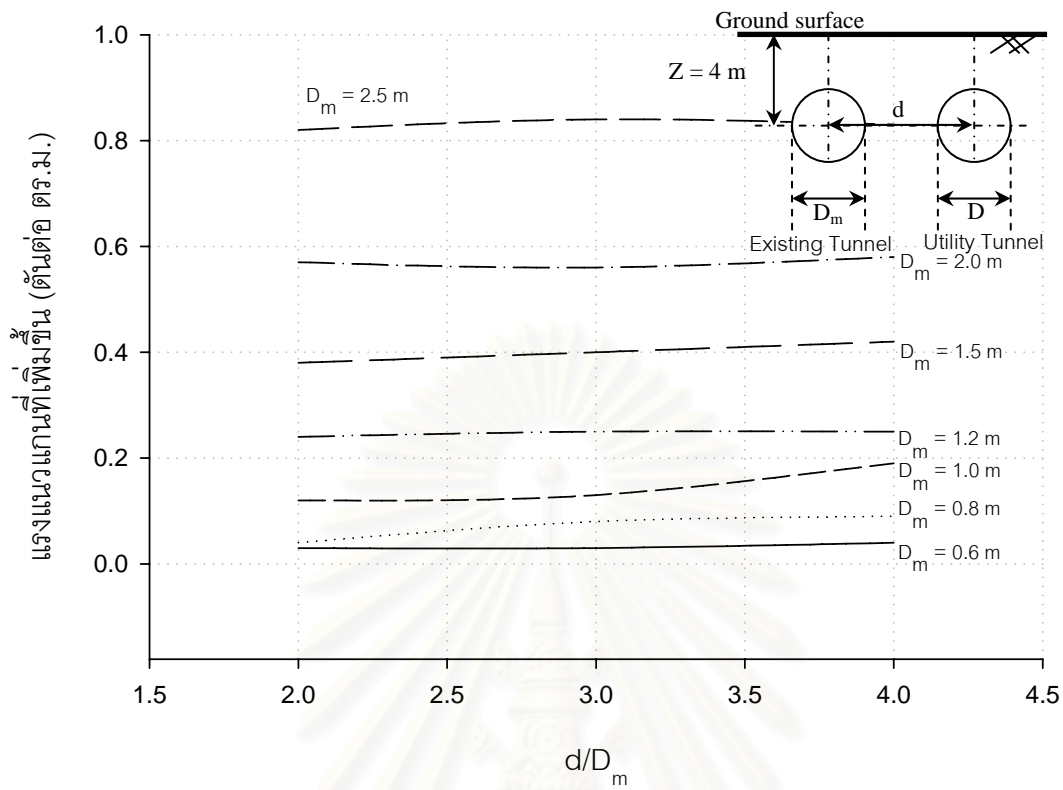
รูปที่ ก-3.14.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินรูปแบบ 6 เนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม



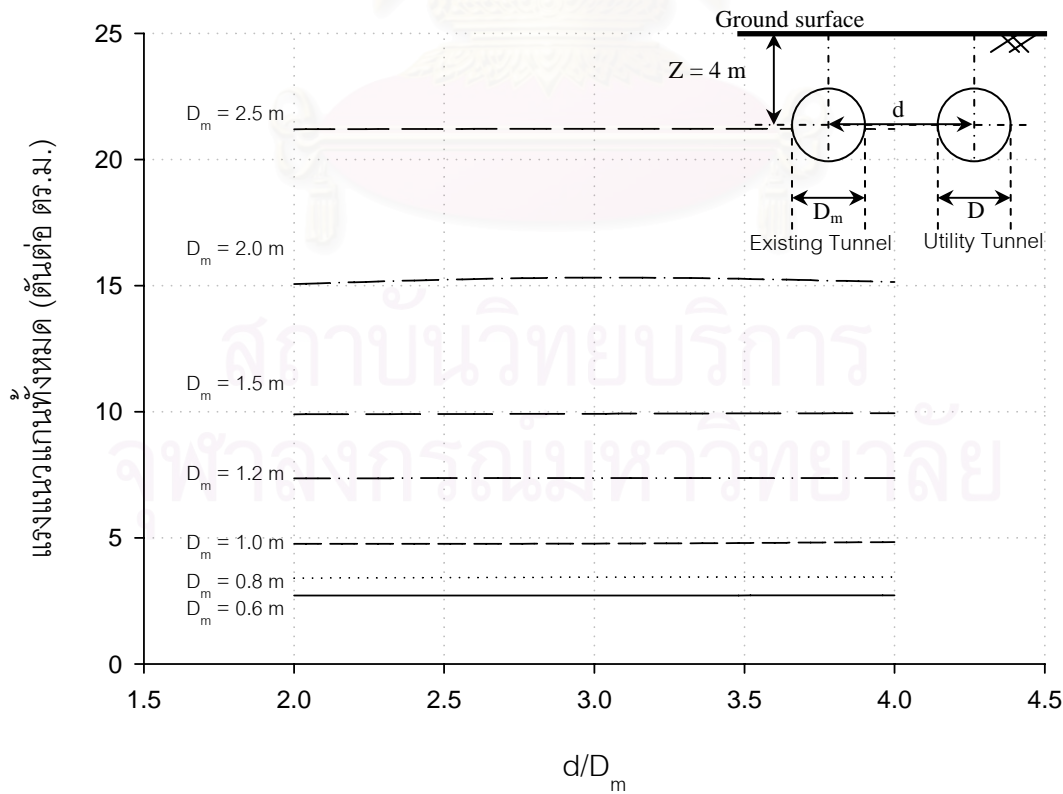
รูปที่ ก-4.1.1.1.1 การท่อดัดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D=0.5D_m$



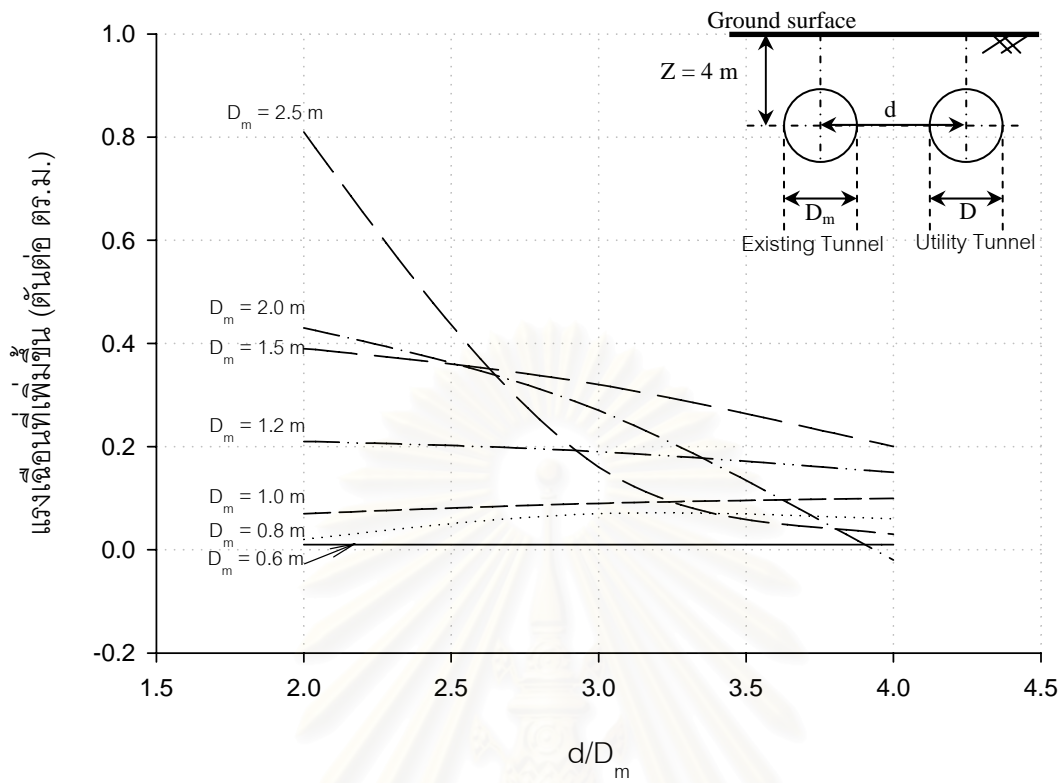
รูปที่ ก-4.1.1.1.2 การท่อดัดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



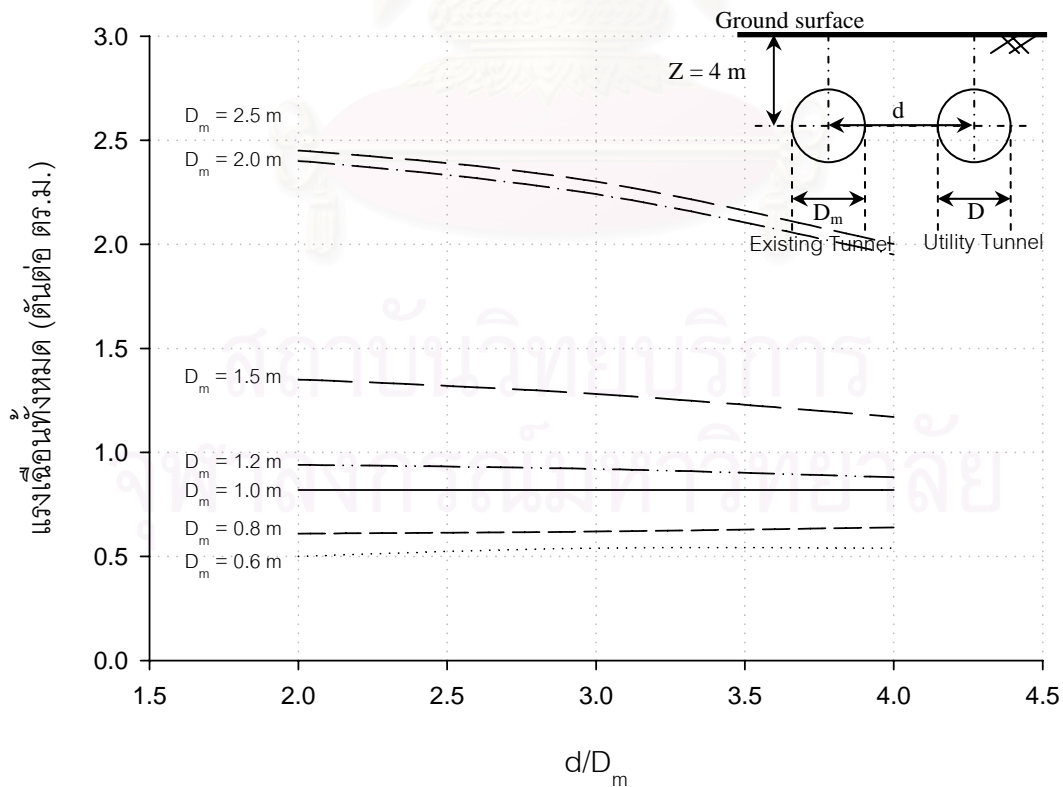
รูปที่ ก-4.1.1.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



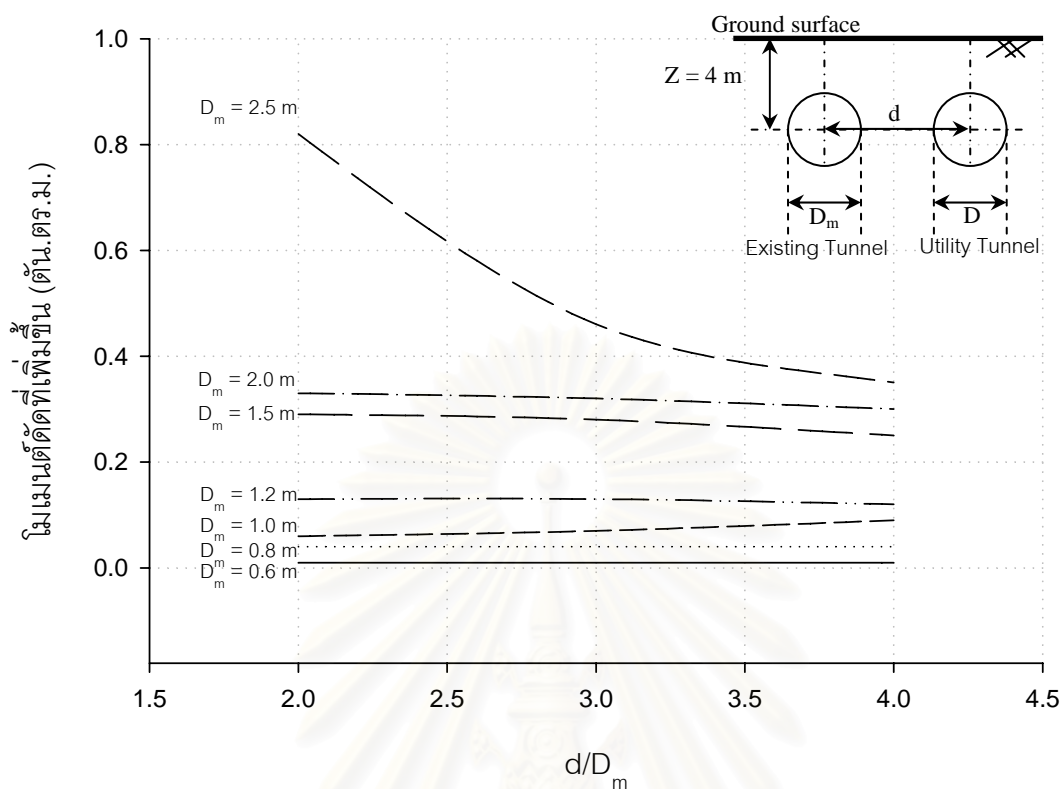
รูปที่ ก-4.1.1.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



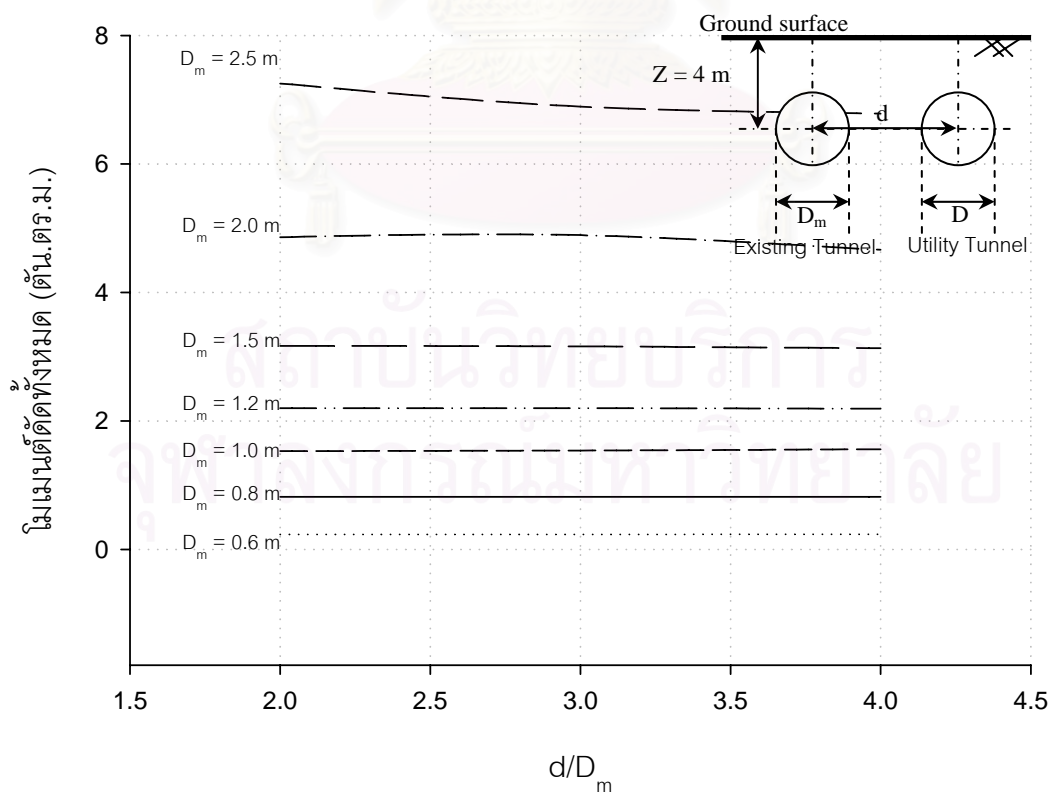
รูปที่ ก-4.1.1.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



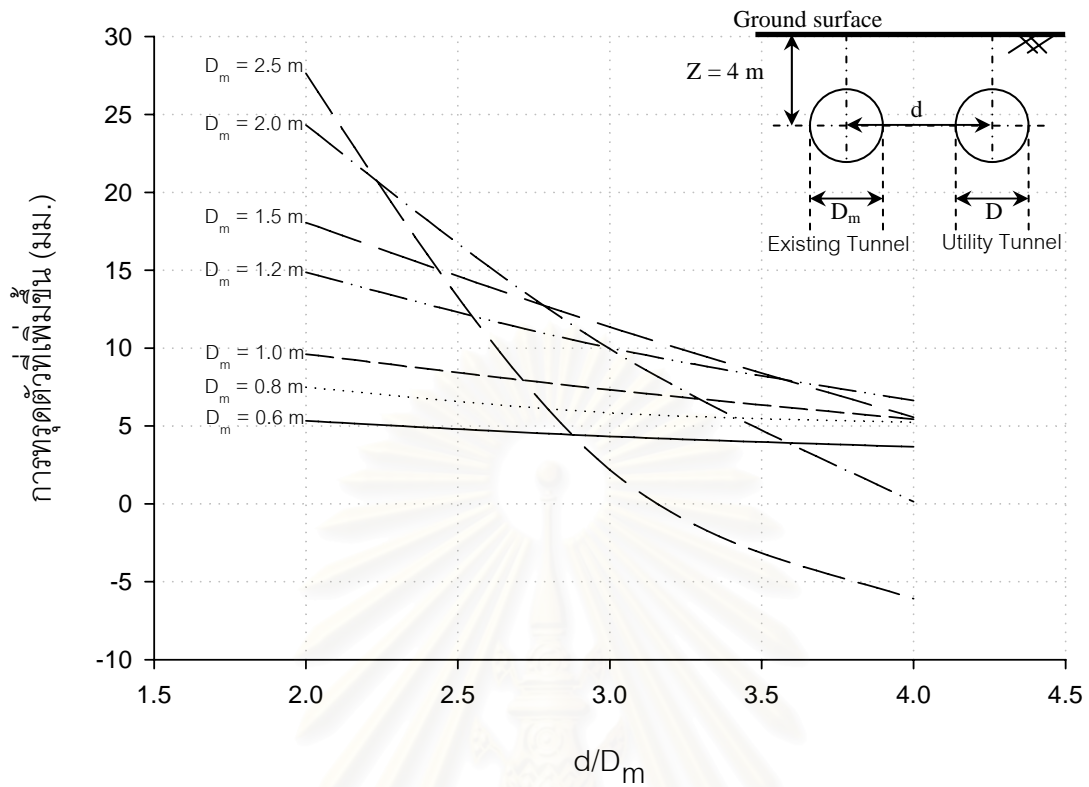
รูปที่ ก-4.1.1.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5 D_m$



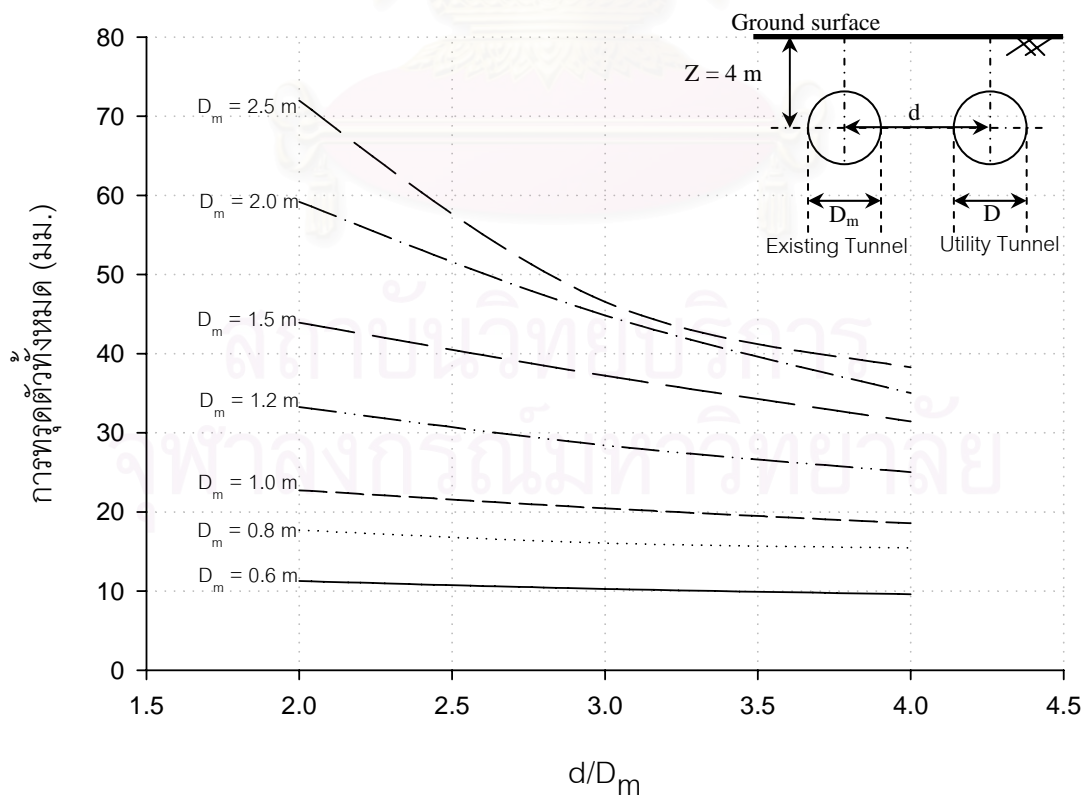
รูปที่ ก-4.1.1.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D=0.5D_m$



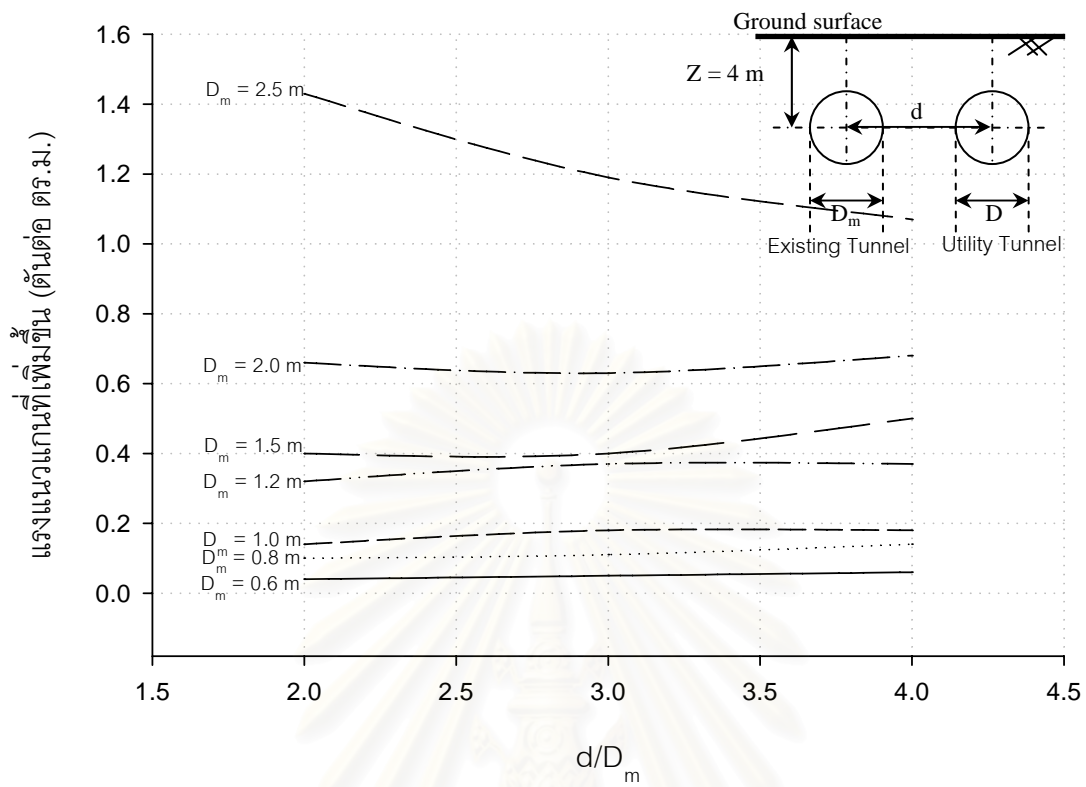
รูปที่ ก-4.1.1.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D=0.5D_m$



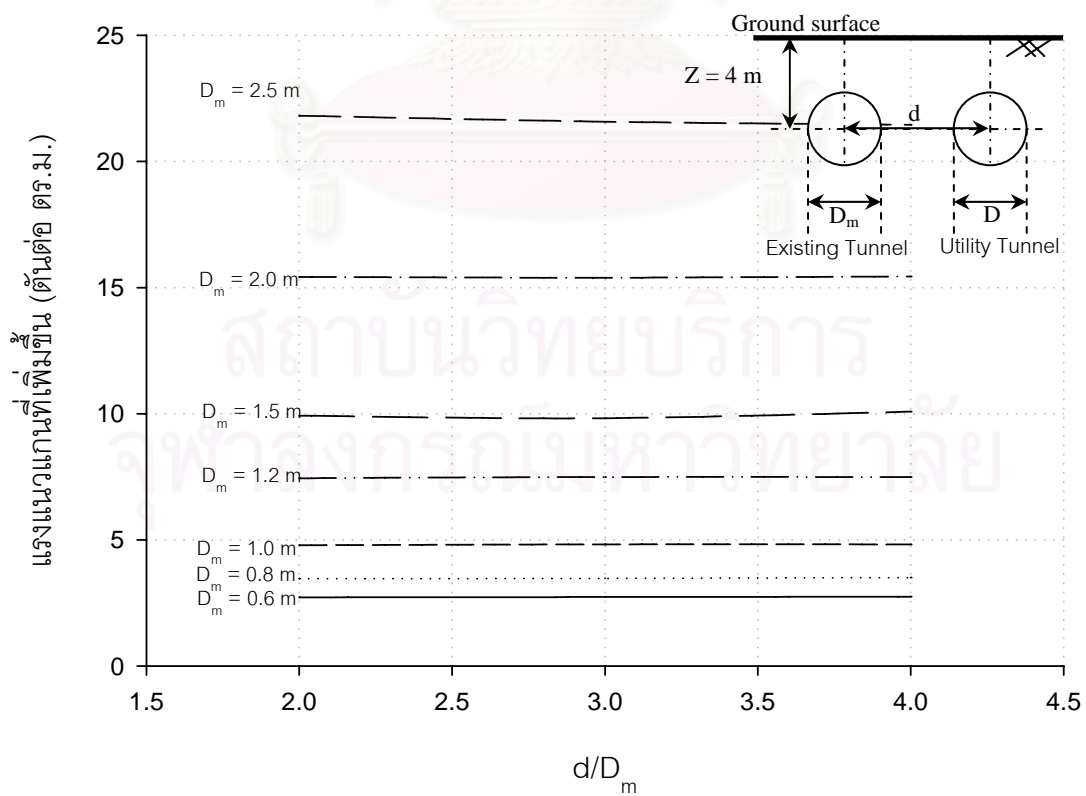
รูปที่ ก-4.1.2.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



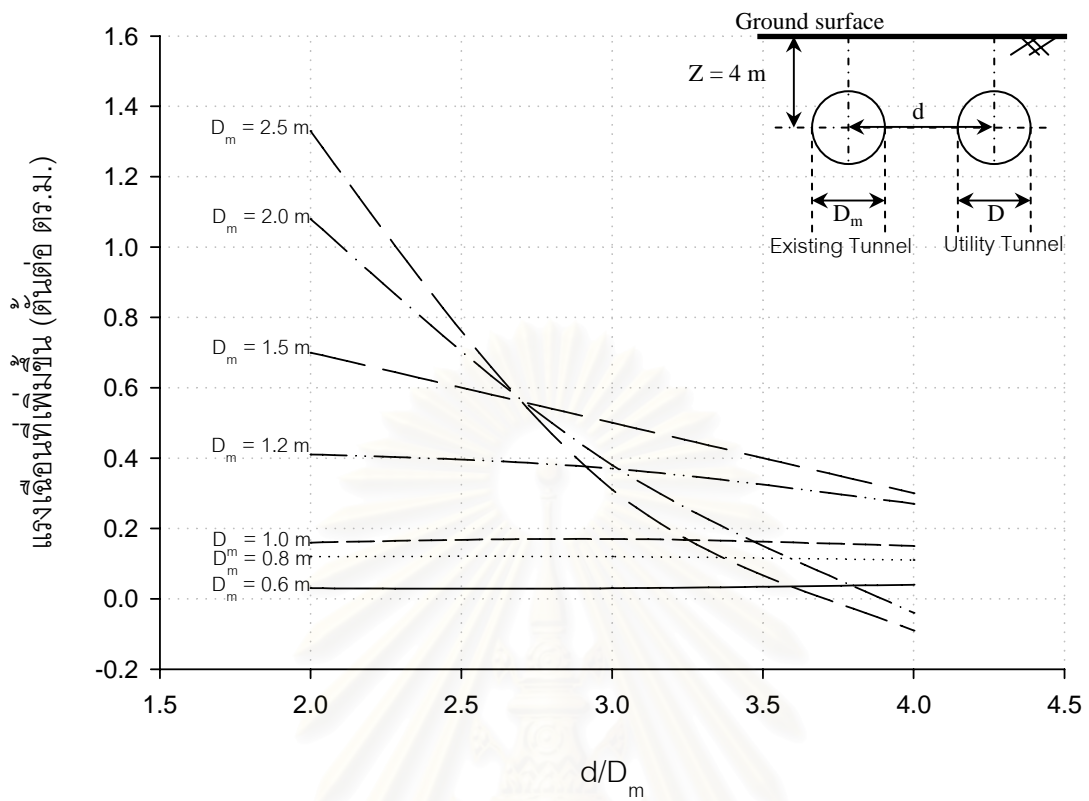
รูปที่ ก-4.1.2.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



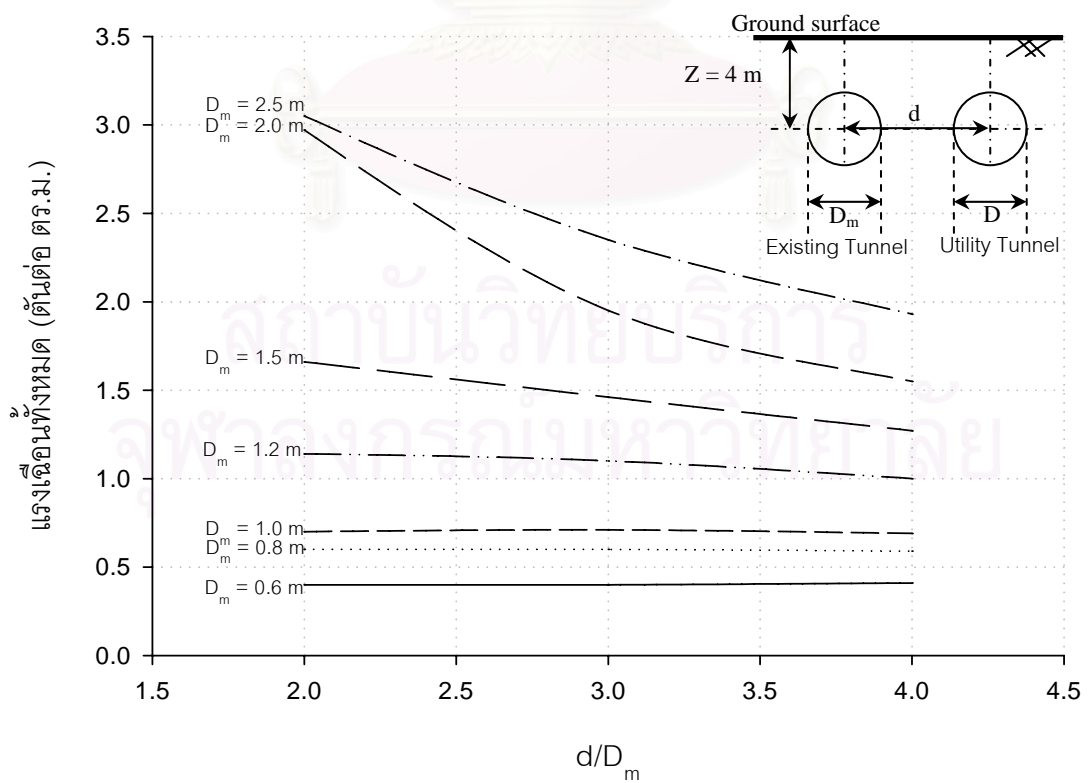
รูปที่ ก-4.1.2.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



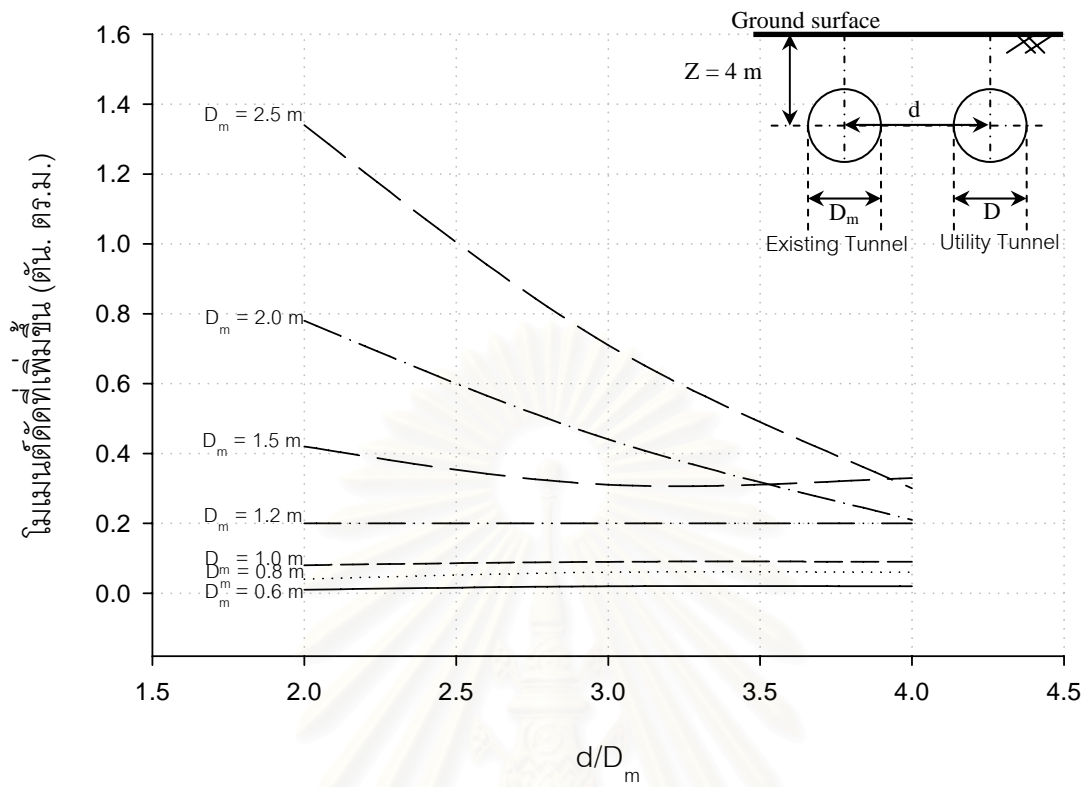
รูปที่ ก-4.1.2.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



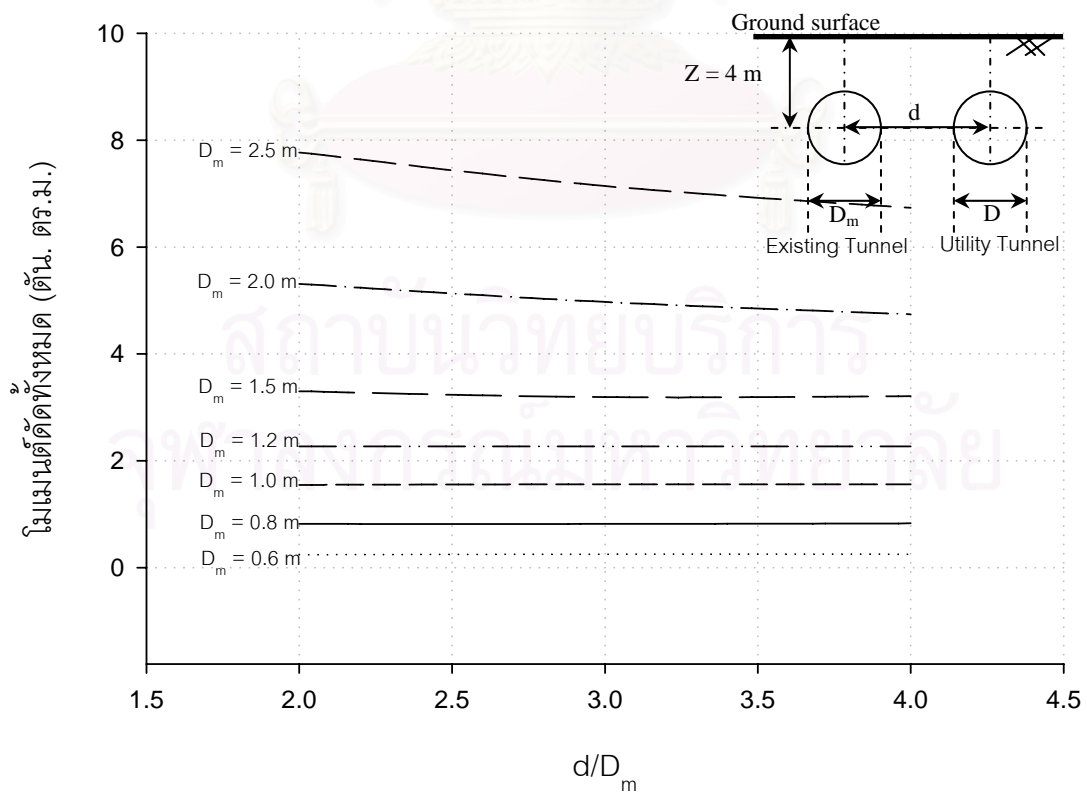
รูปที่ ก-4.1.2.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



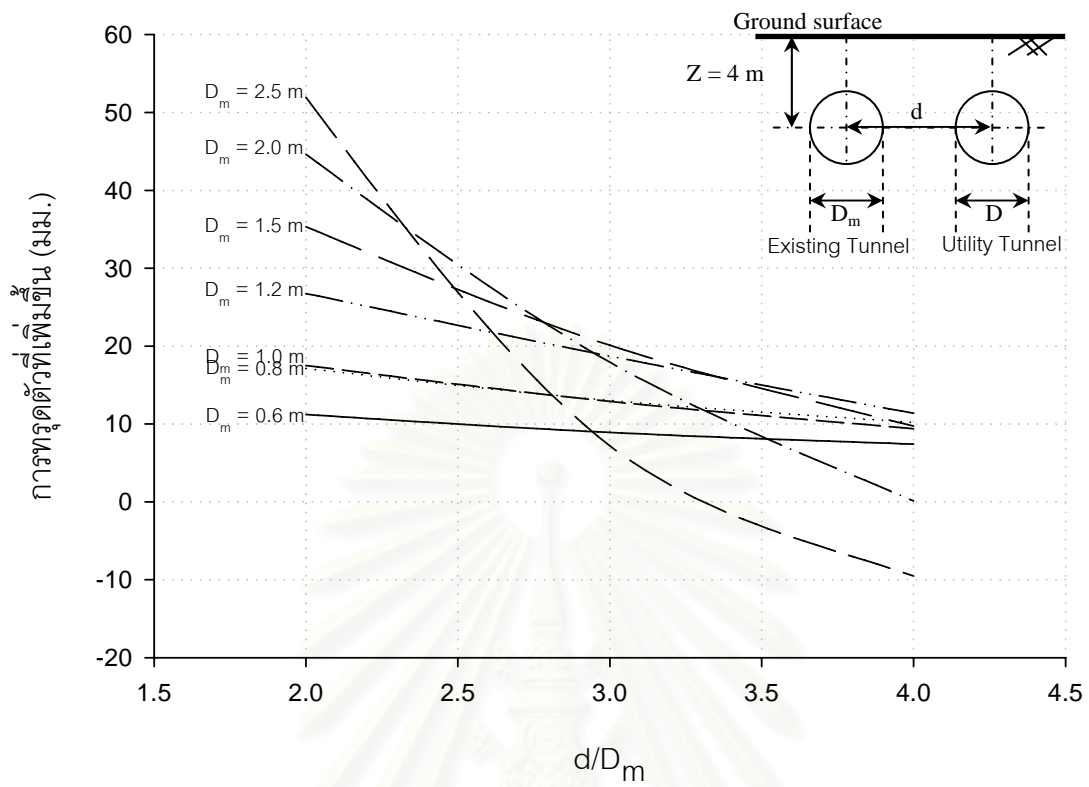
รูปที่ ก-4.1.2.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



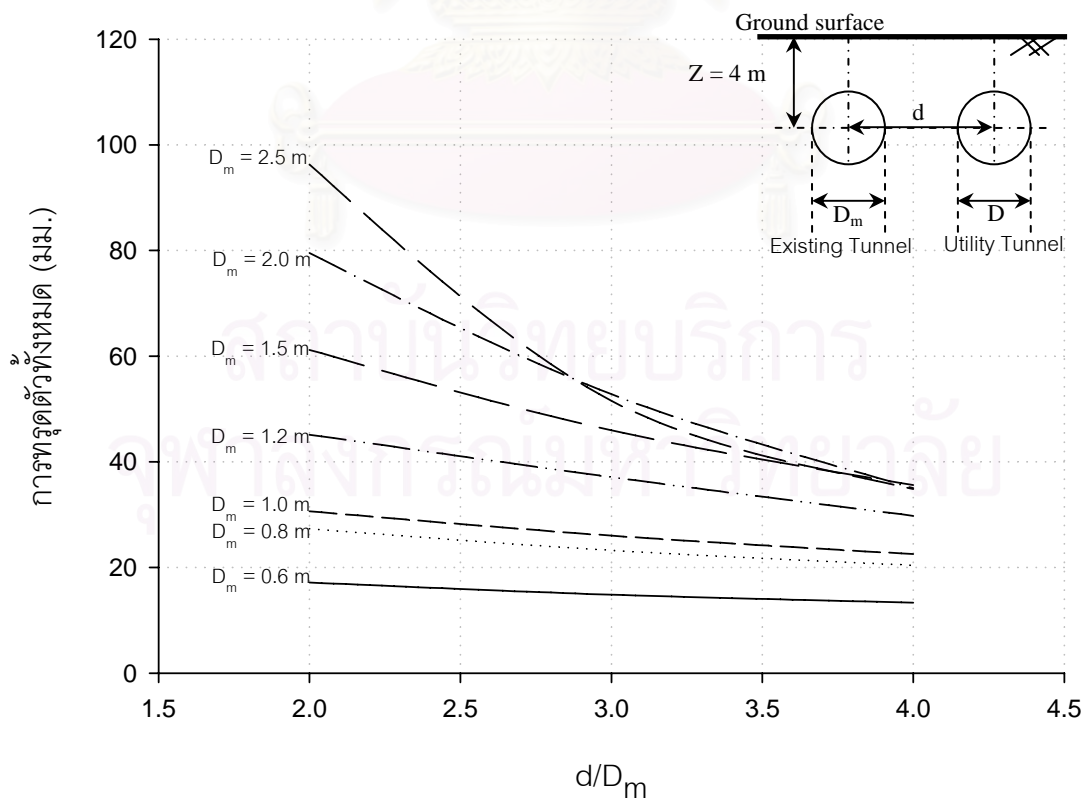
รูปที่ ก-4.1.2.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



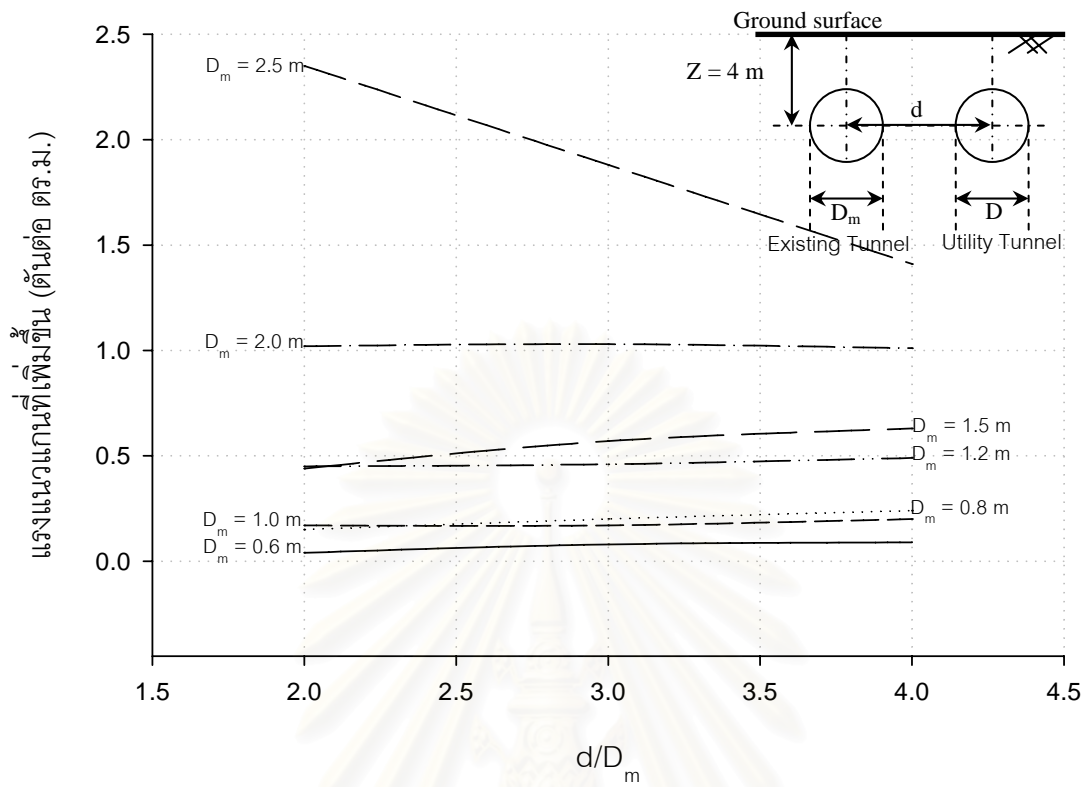
รูปที่ ก-4.1.2.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



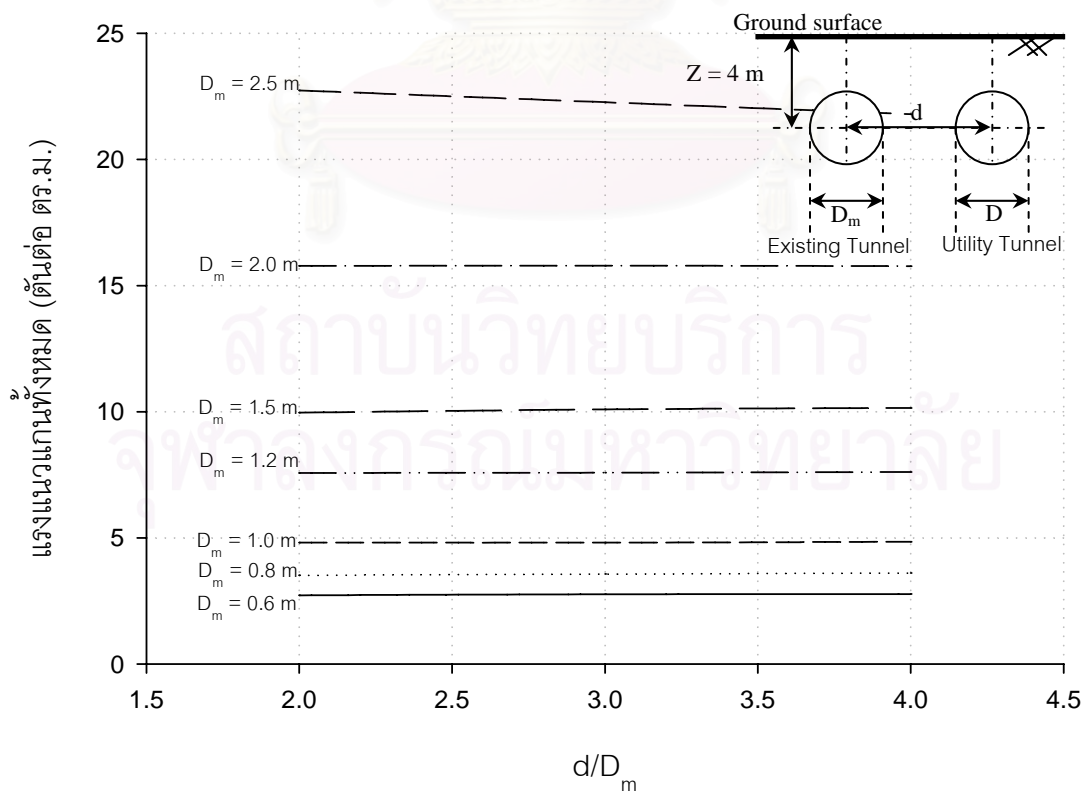
รูปที่ ก-4.1.3.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



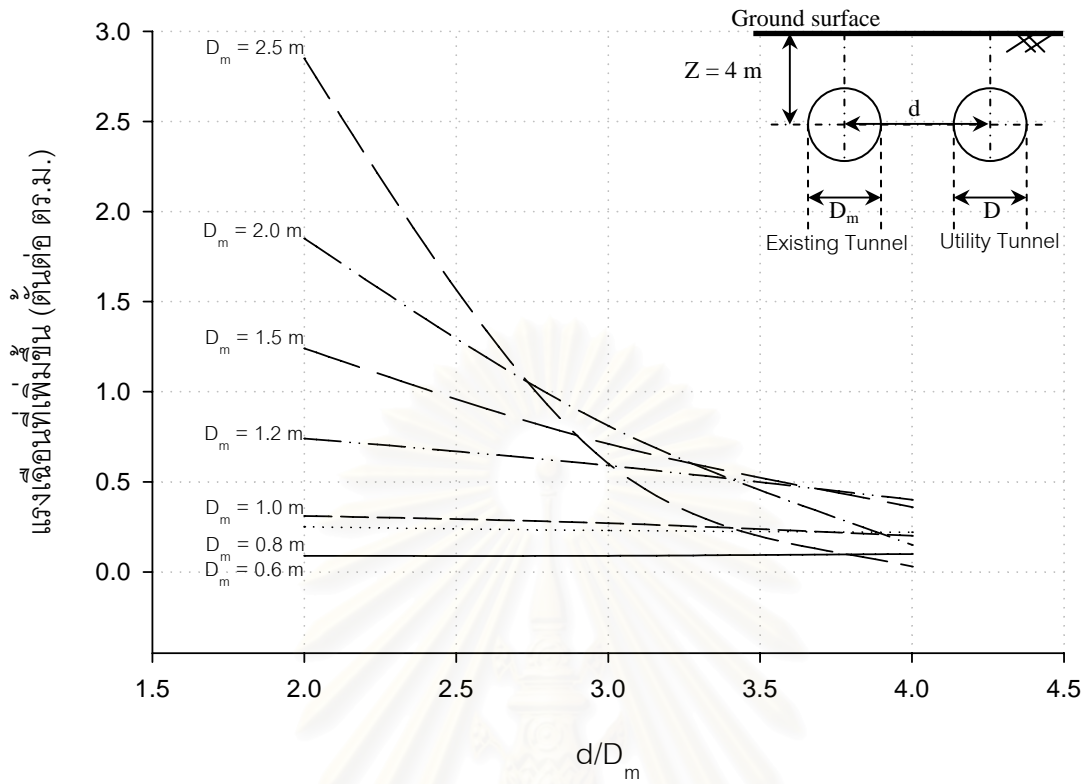
รูปที่ ก-4.1.3.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



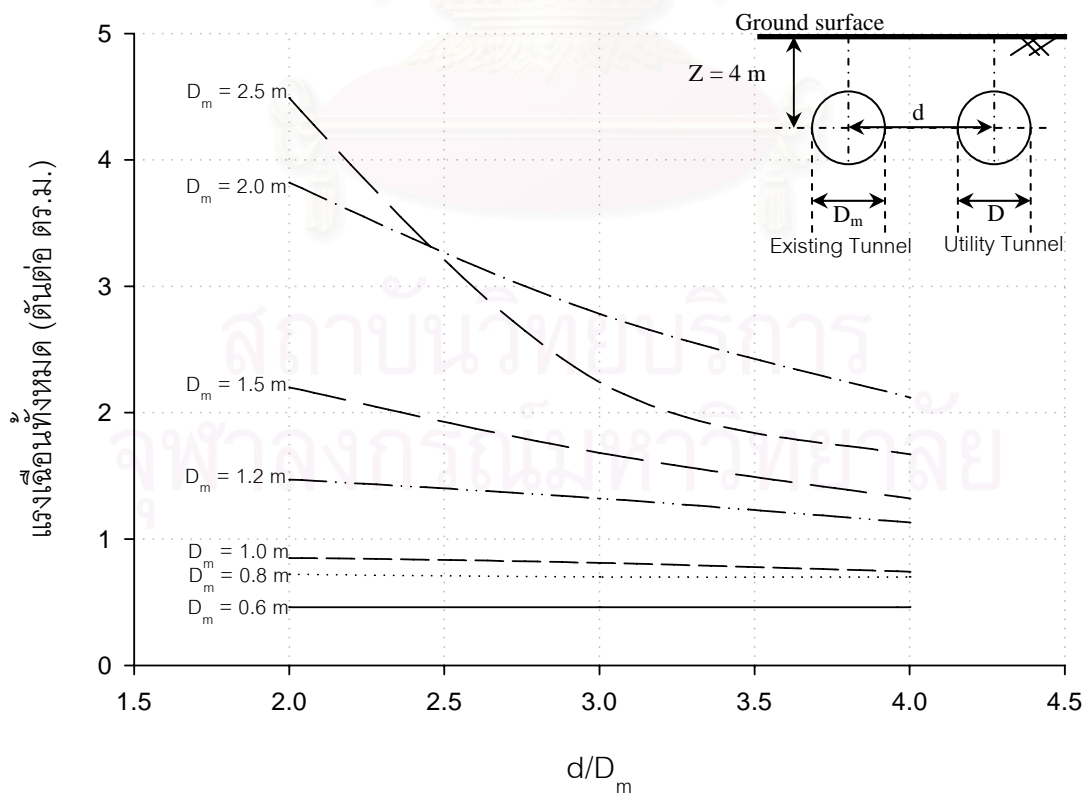
รูปที่ ก-4.1.3.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นที่ต่อต้านลวดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



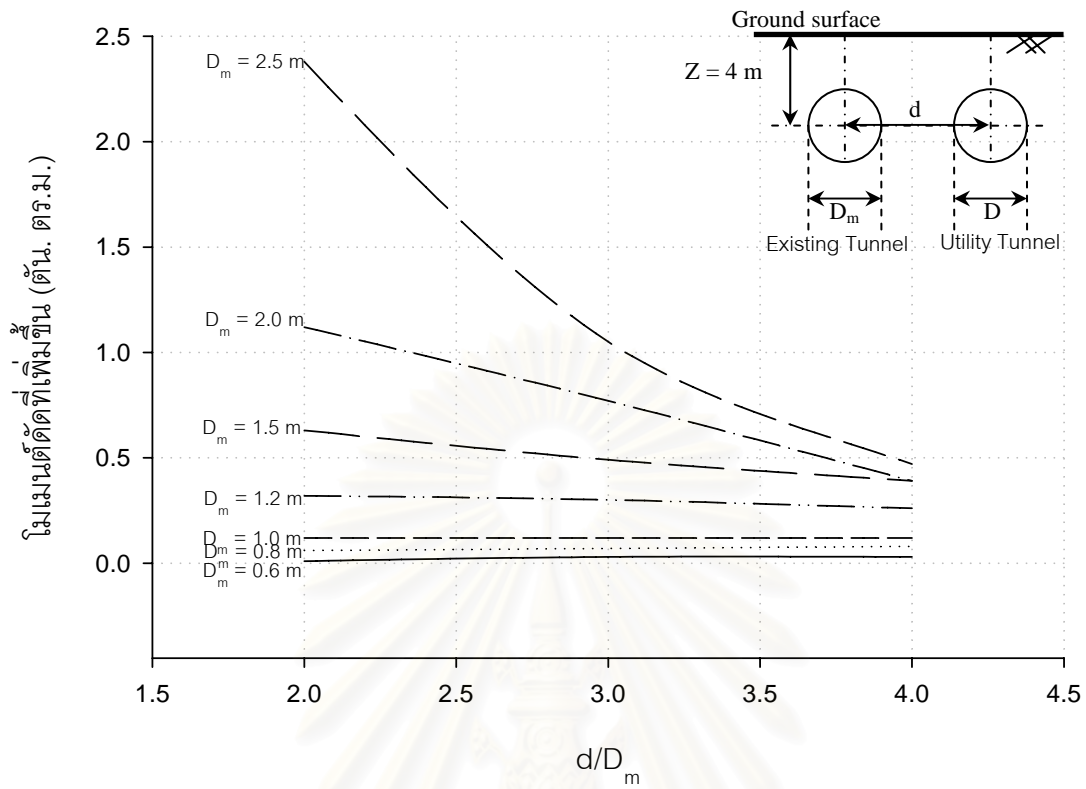
รูปที่ ก-4.1.3.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลวดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



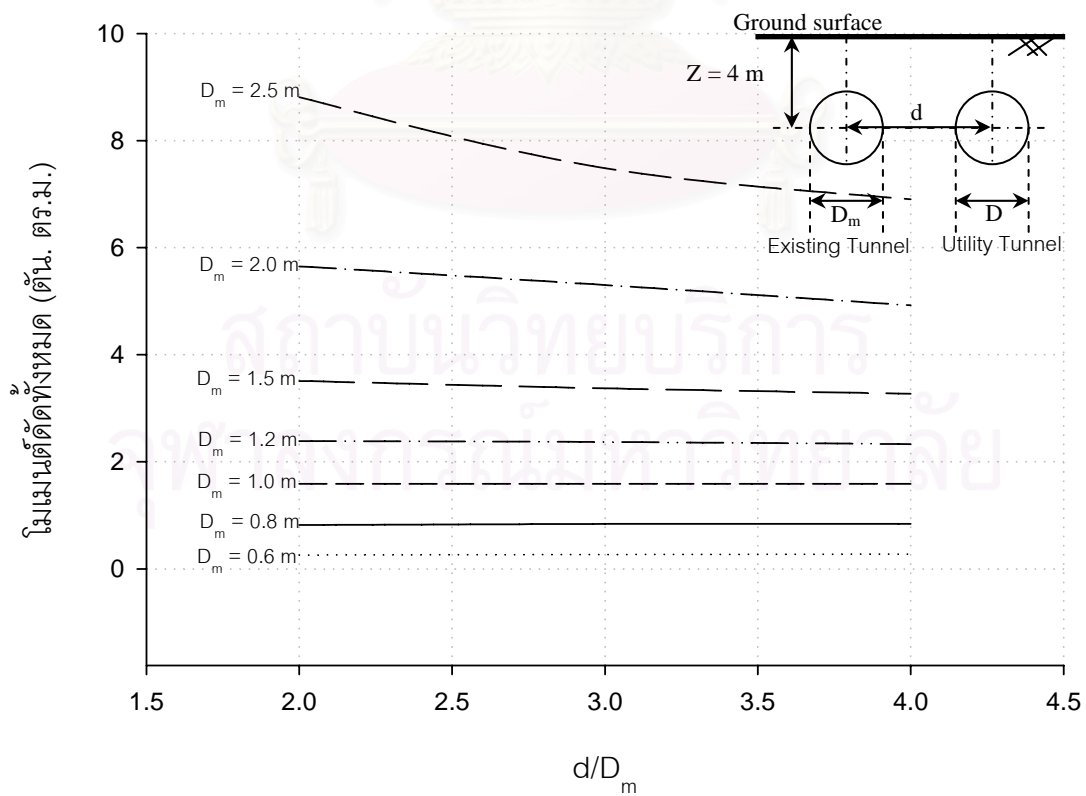
รูปที่ ก-4.1.3.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2 D_m$



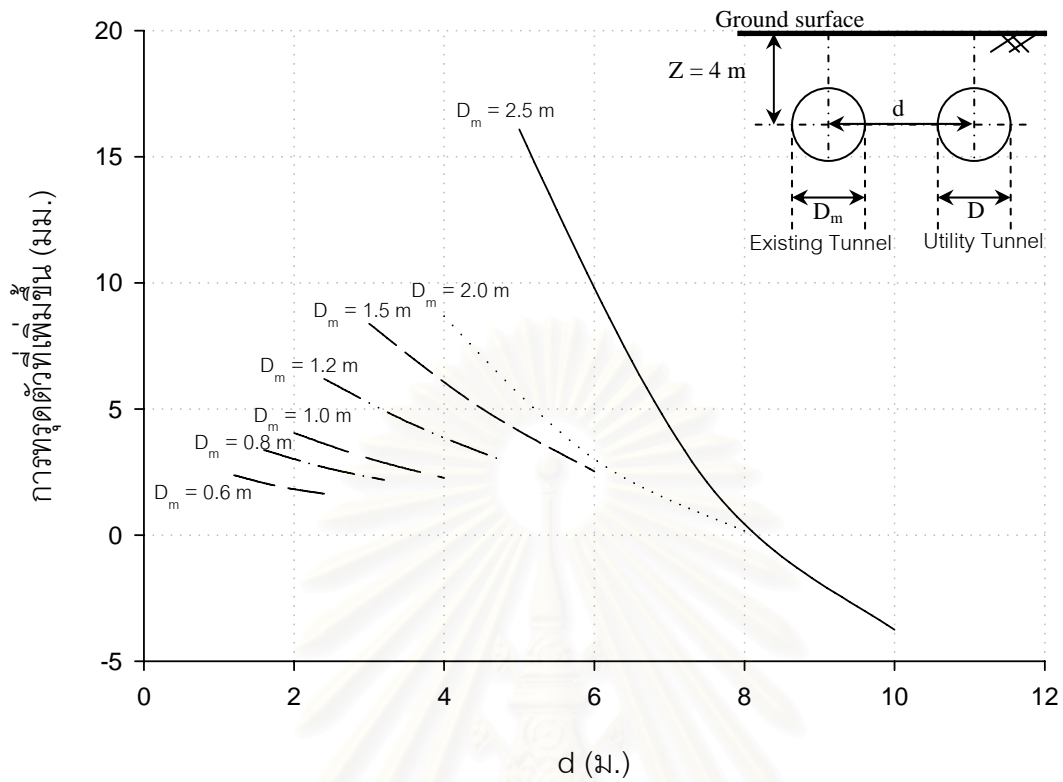
รูปที่ ก-4.1.3.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2 D_m$



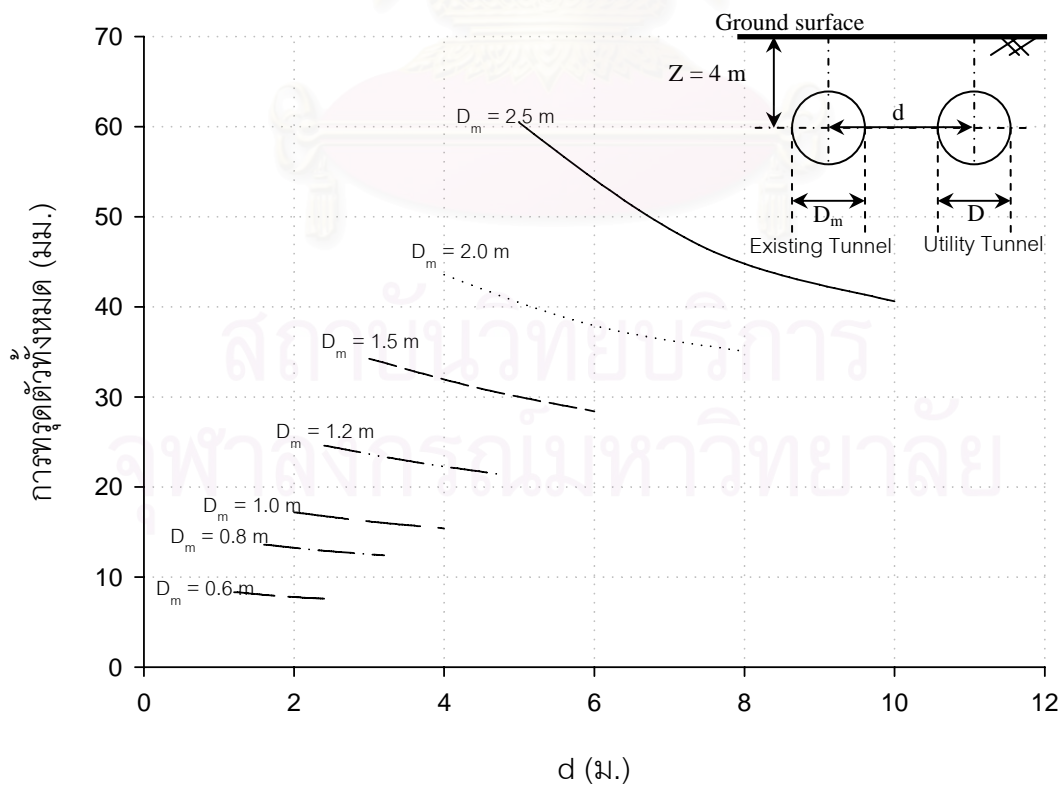
รูปที่ ก-4.1.3.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



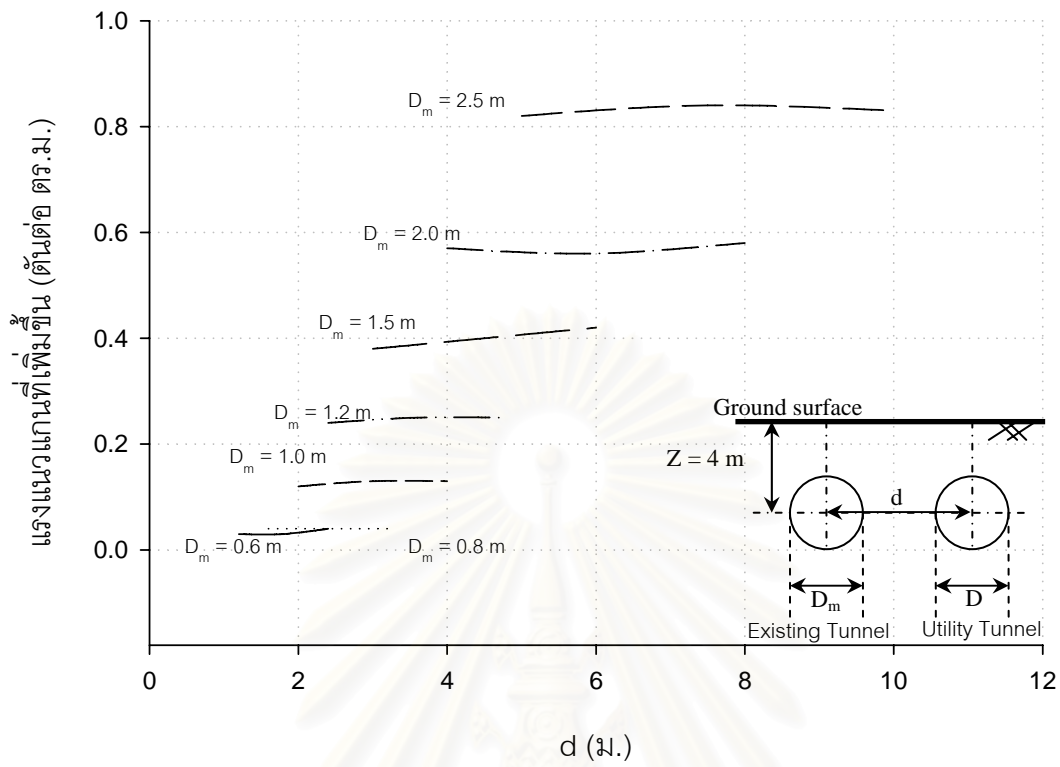
รูปที่ ก-4.1.3.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2 D_m$



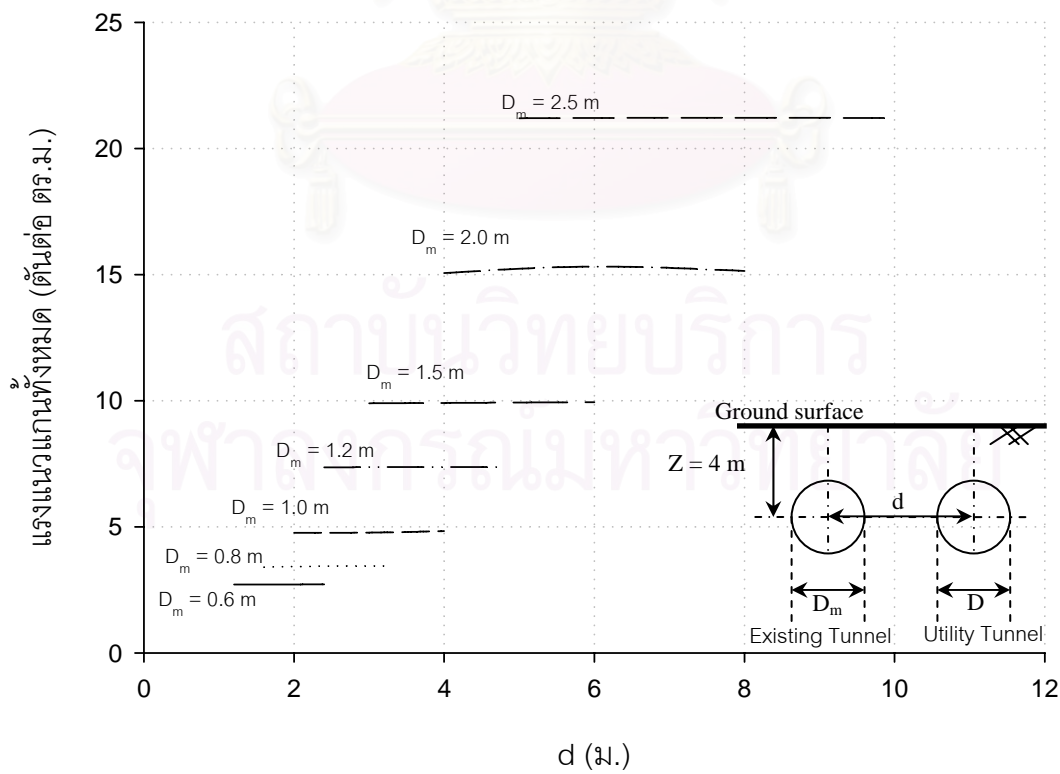
รูปที่ ก-4.1.4.1.1 การท่อดูตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



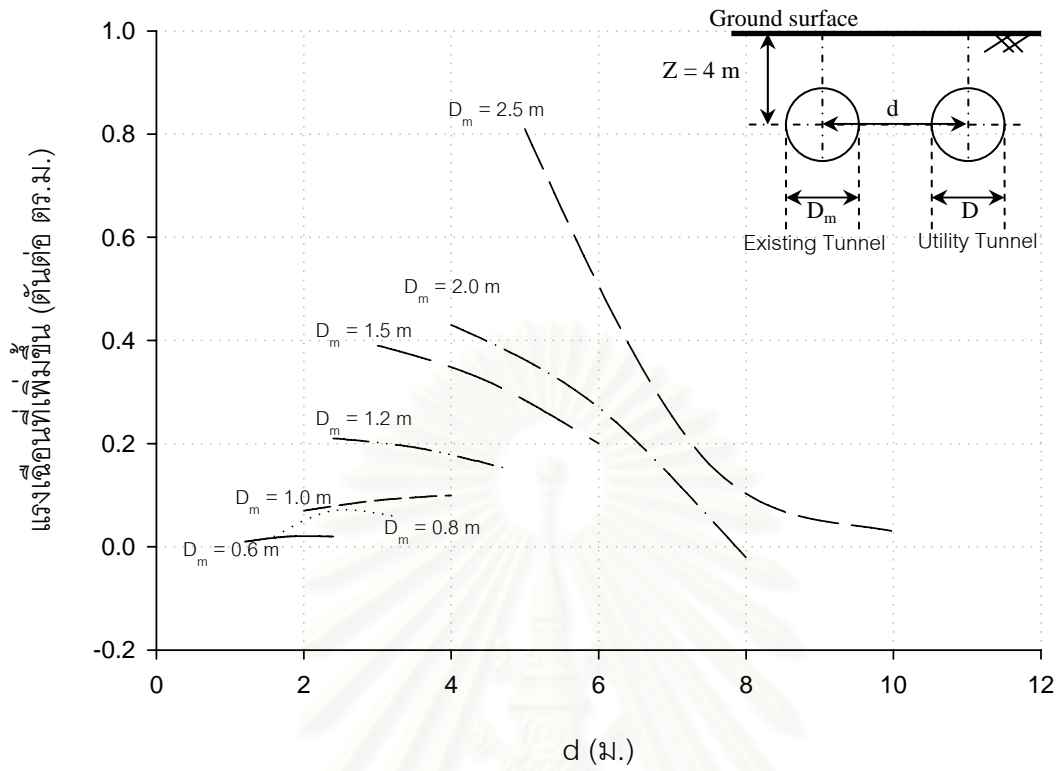
รูปที่ ก-4.1.4.1.2 การท่อดูตัวทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



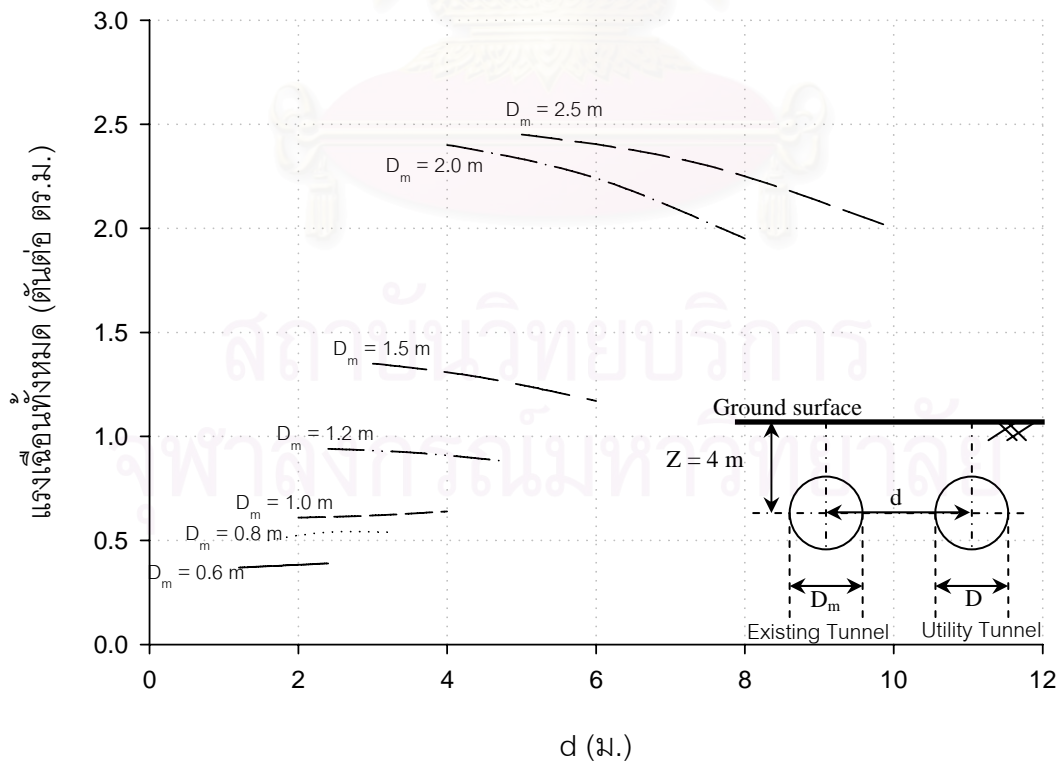
รูปที่ ก-4.1.4.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D=0.5D_m$



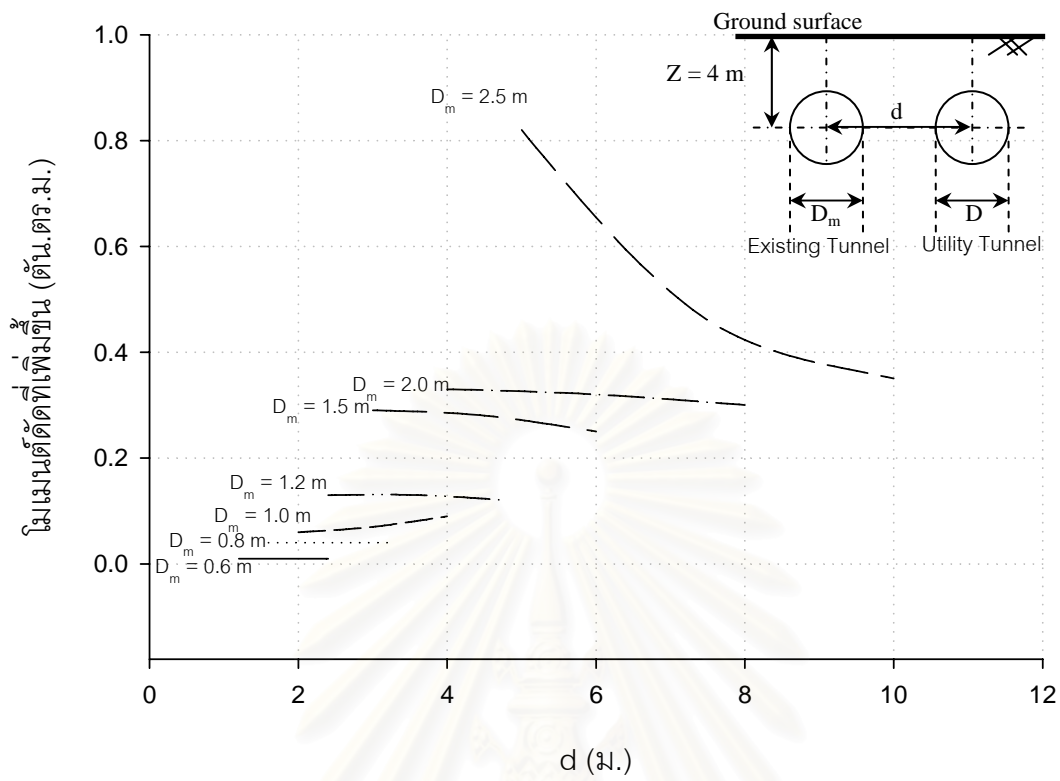
รูปที่ ก-4.1.4.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D=0.5D_m$



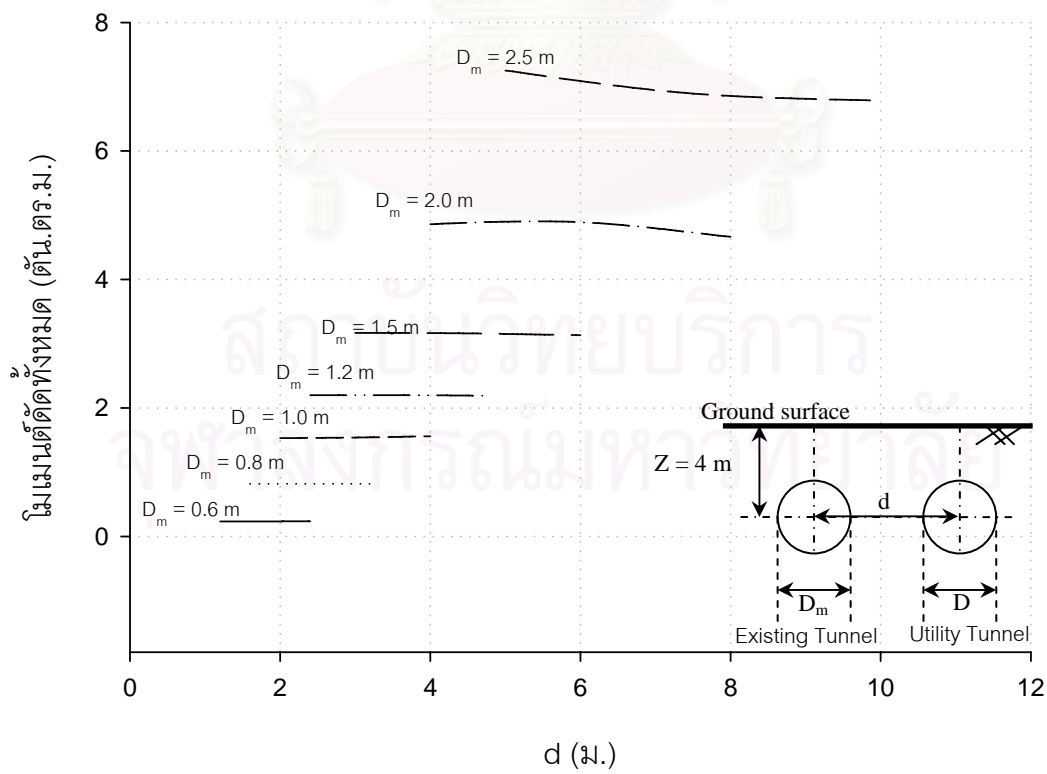
รูปที่ ก-4.1.4.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5 D_m$



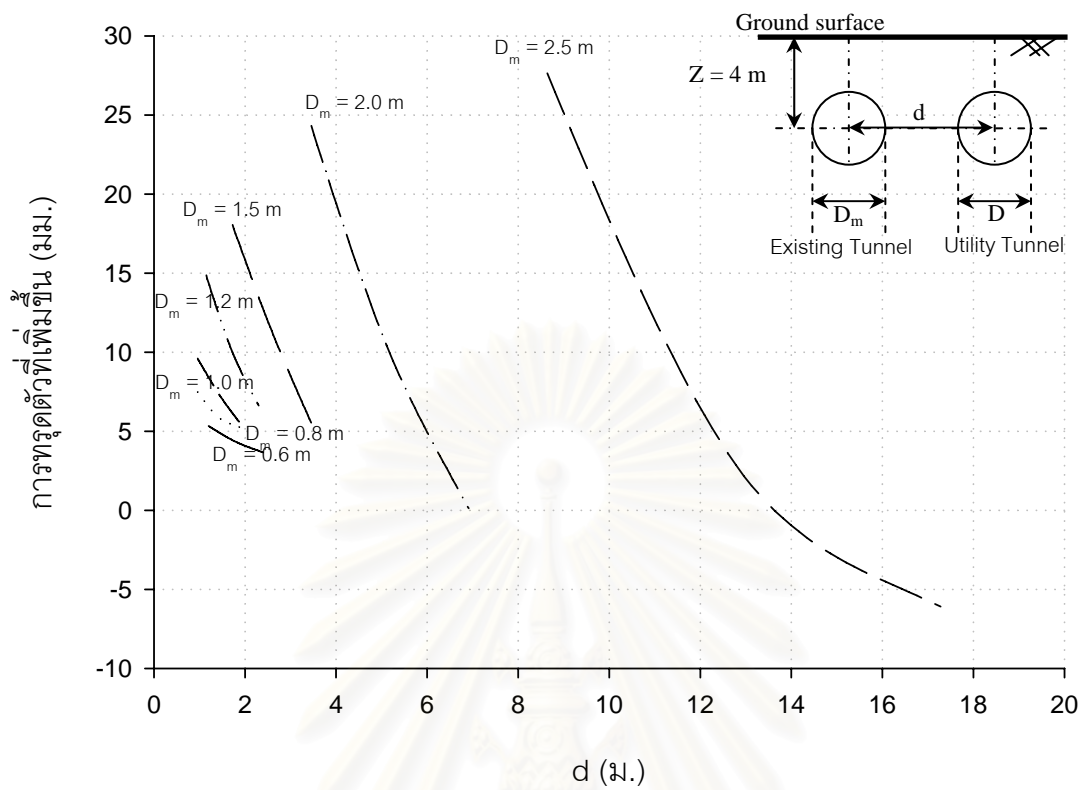
รูปที่ ก-4.1.4.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5 D_m$



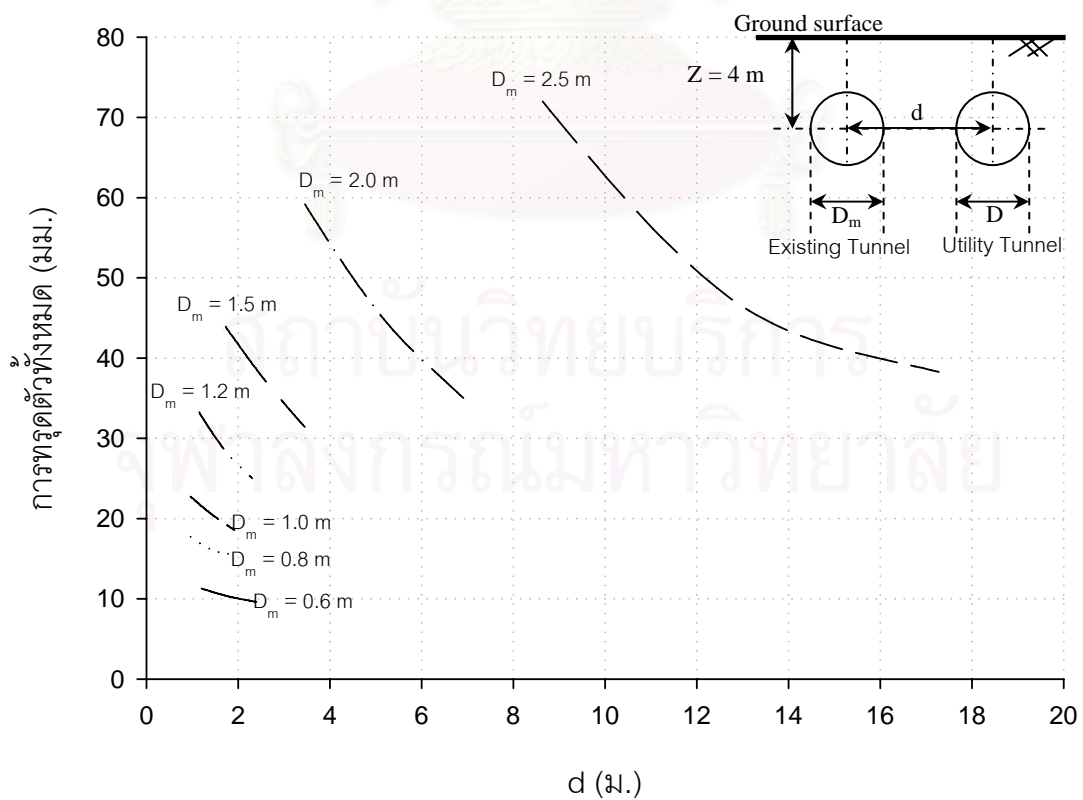
รูปที่ ก-4.1.4.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



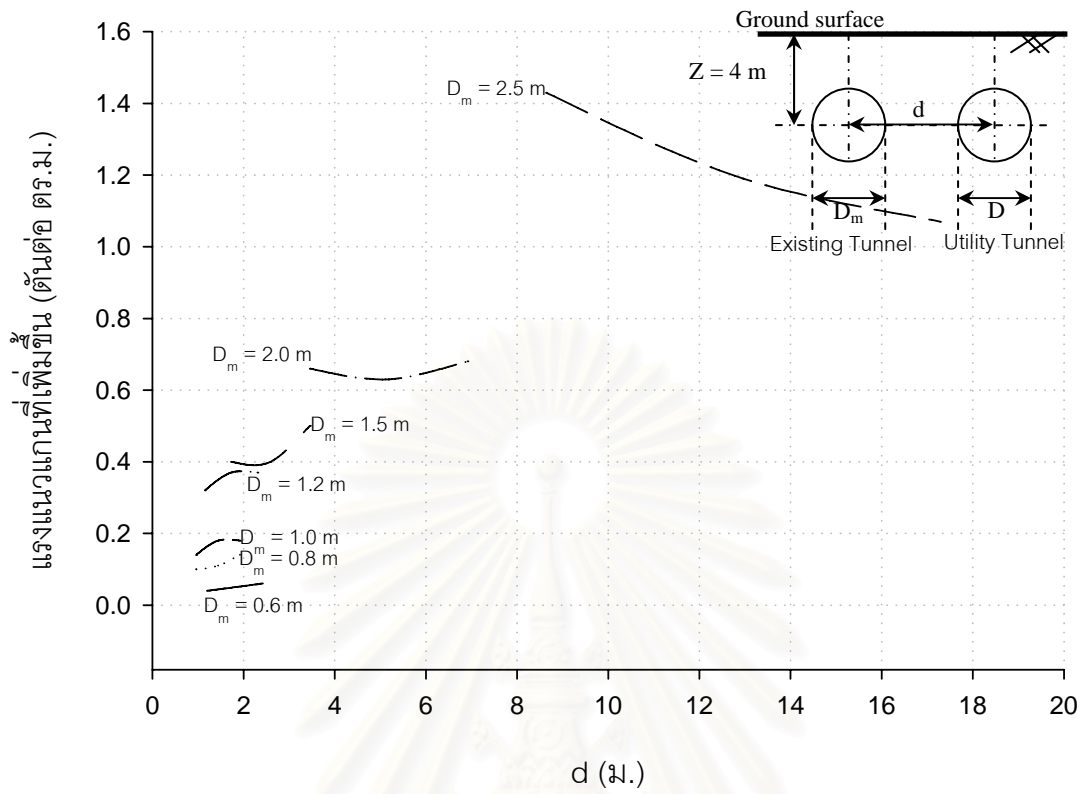
รูปที่ ก-4.1.4.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 0.5D_m$



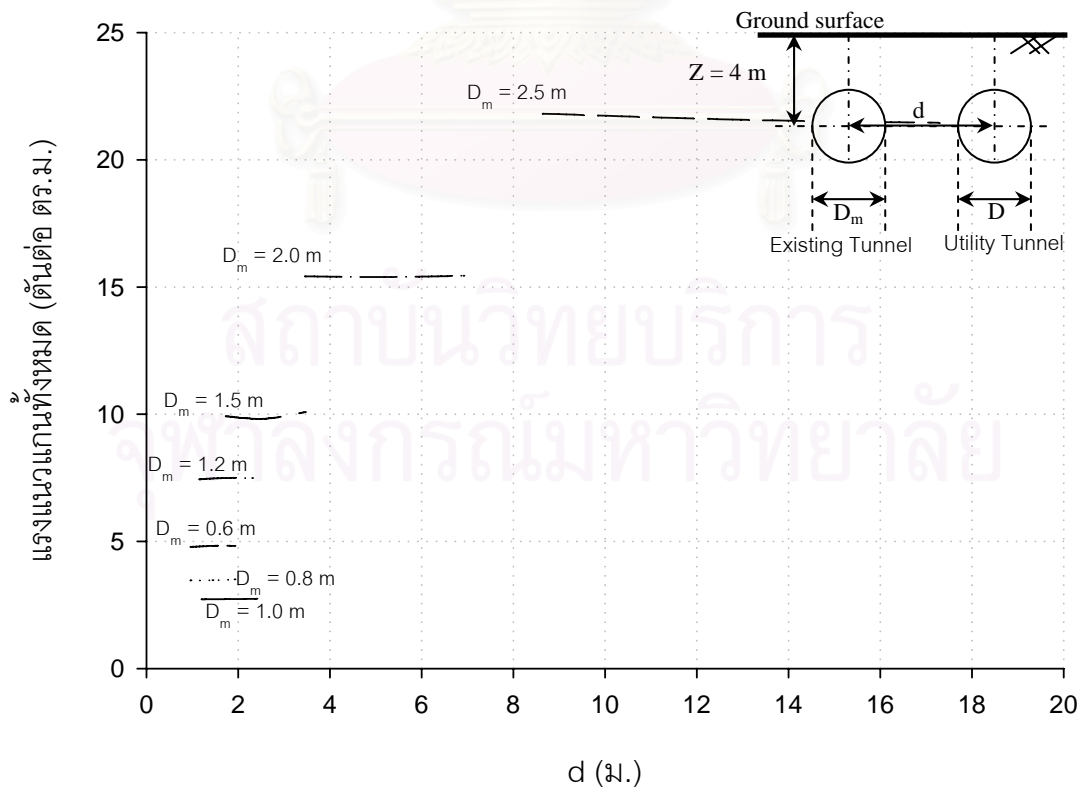
รูปที่ ก-4.1.5.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



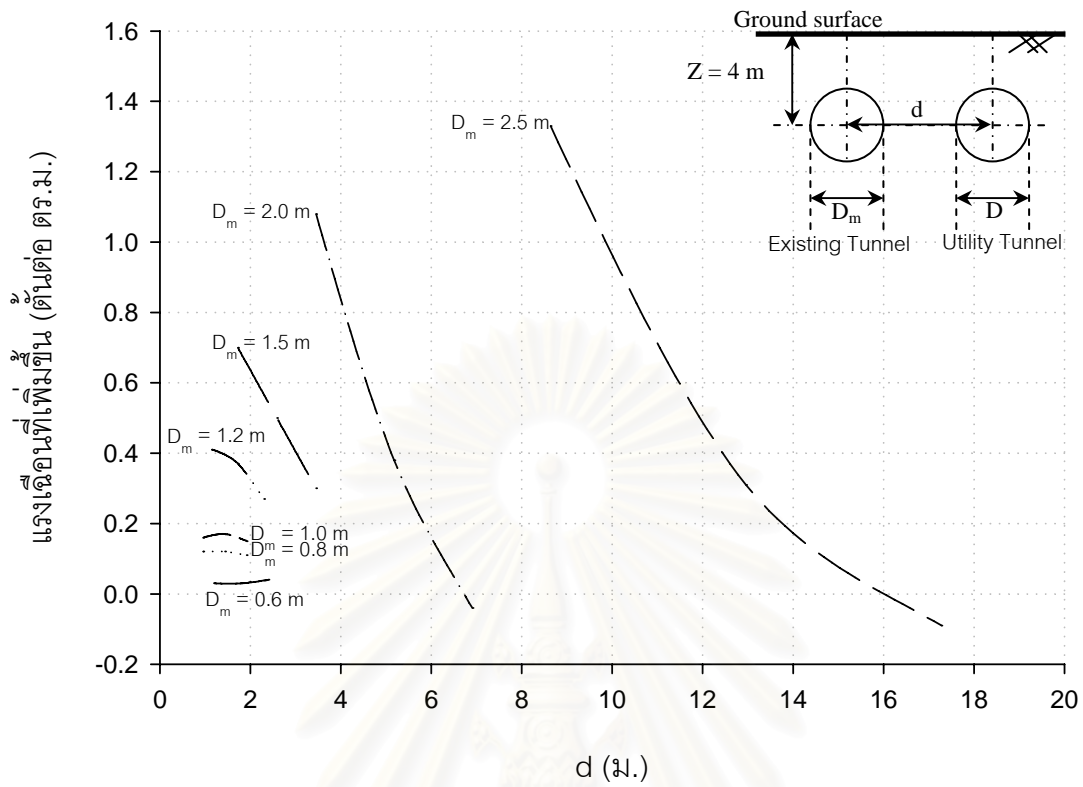
รูปที่ ก-4.1.5.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



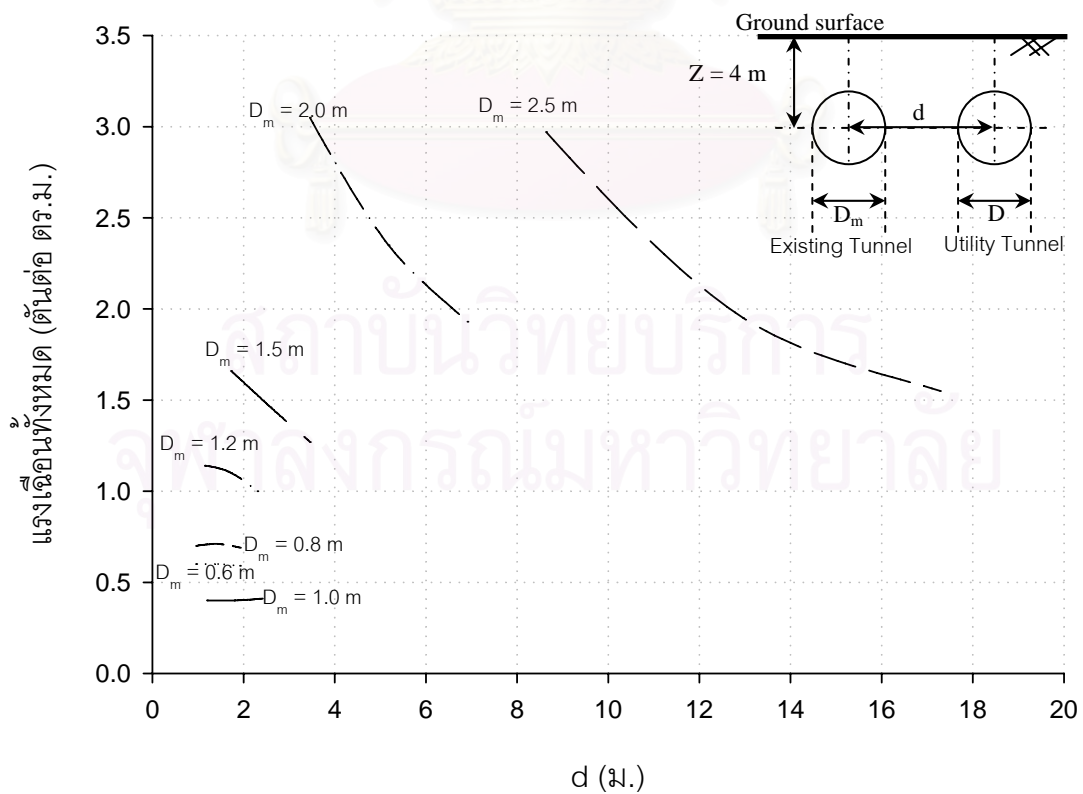
รูปที่ ก-4.1.5.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



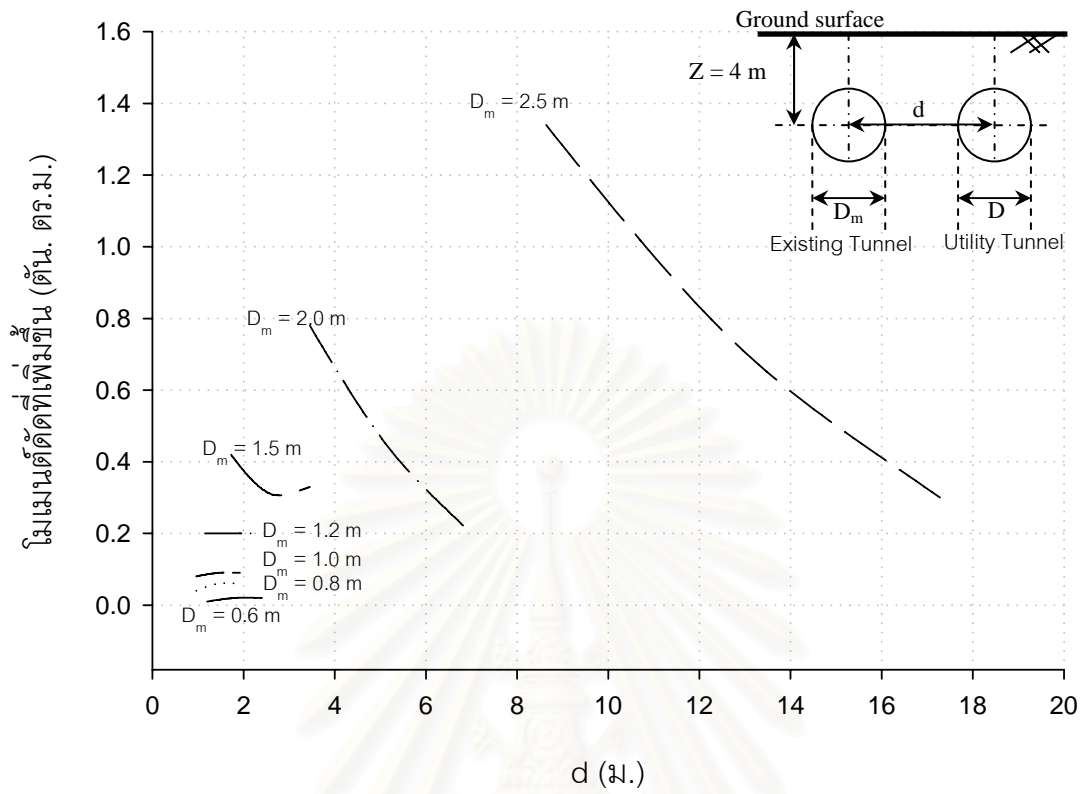
รูปที่ ก-4.1.5.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



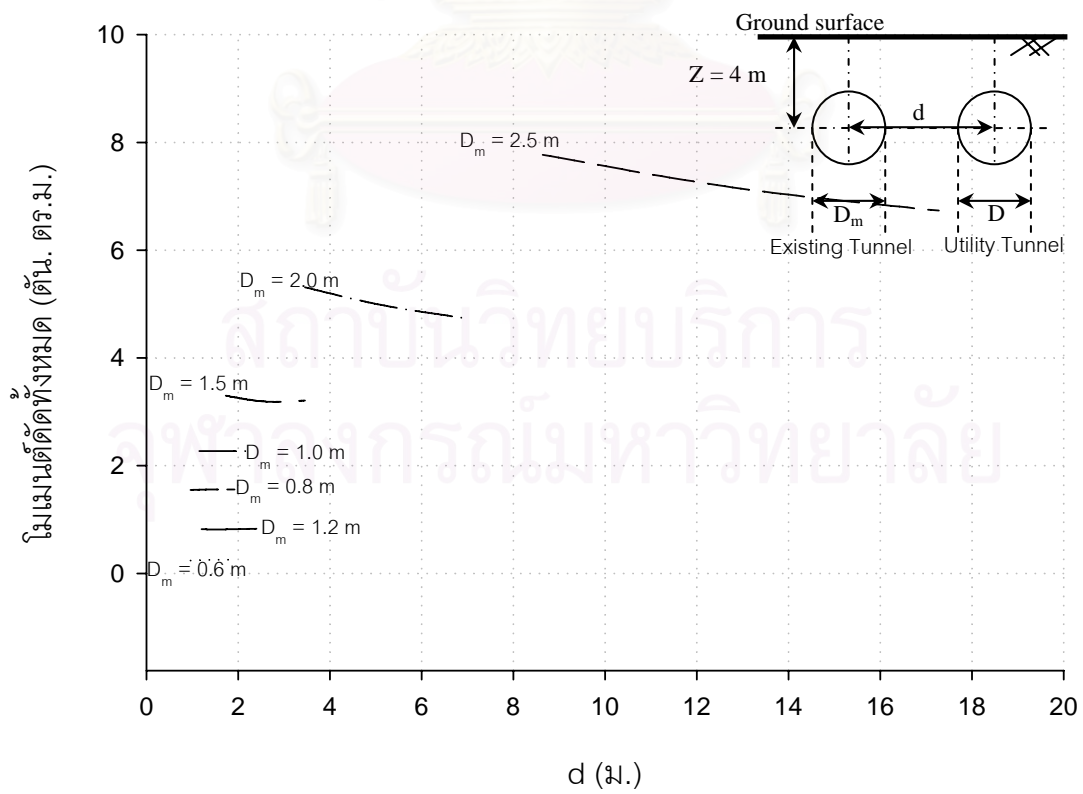
รูปที่ ก-4.1.5.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



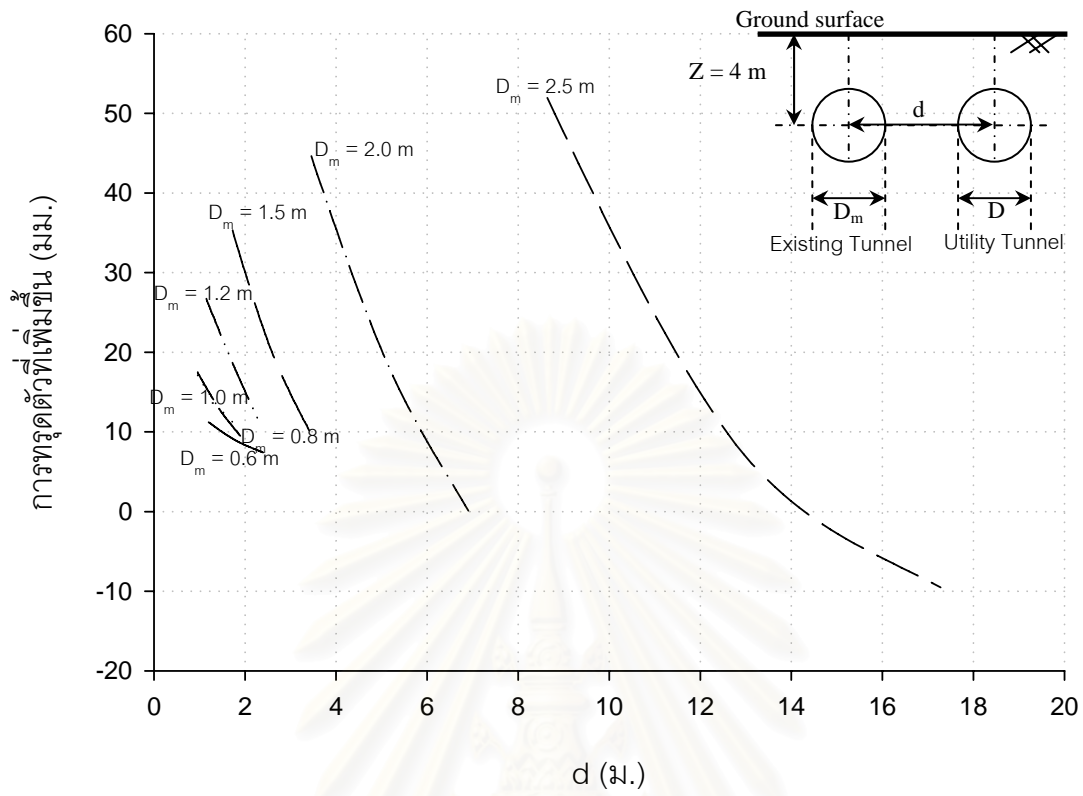
รูปที่ ก-4.1.5.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



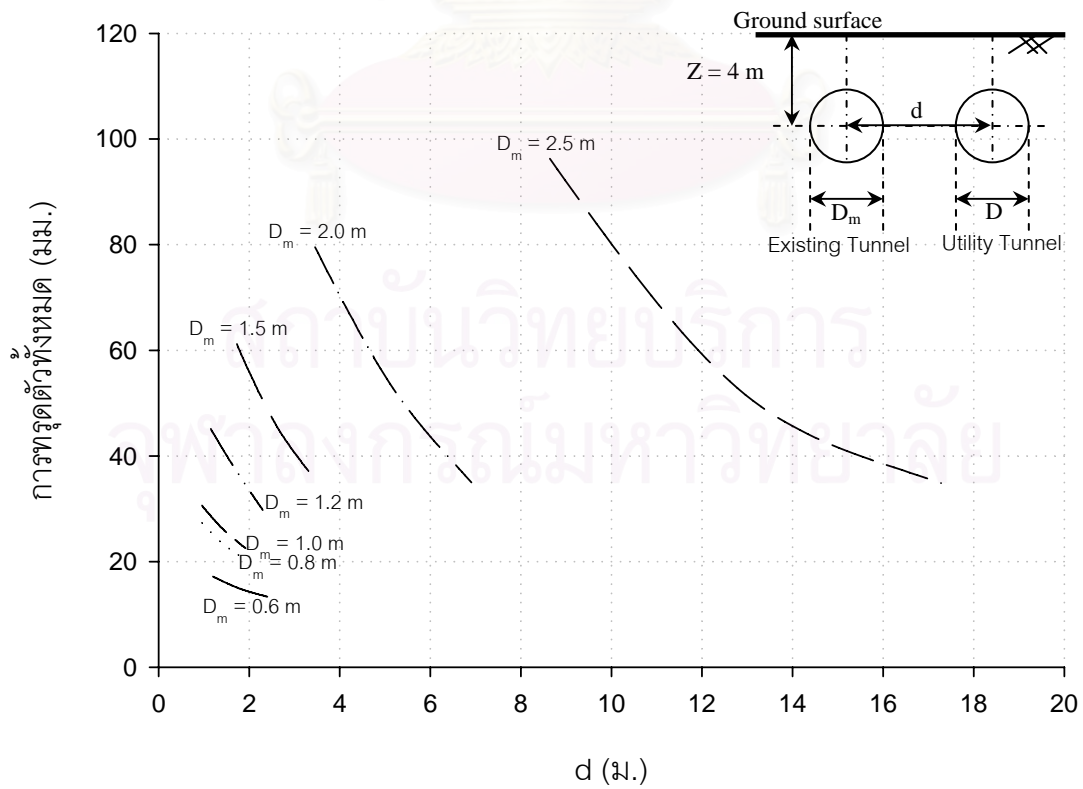
รูปที่ ก-4.1.5.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



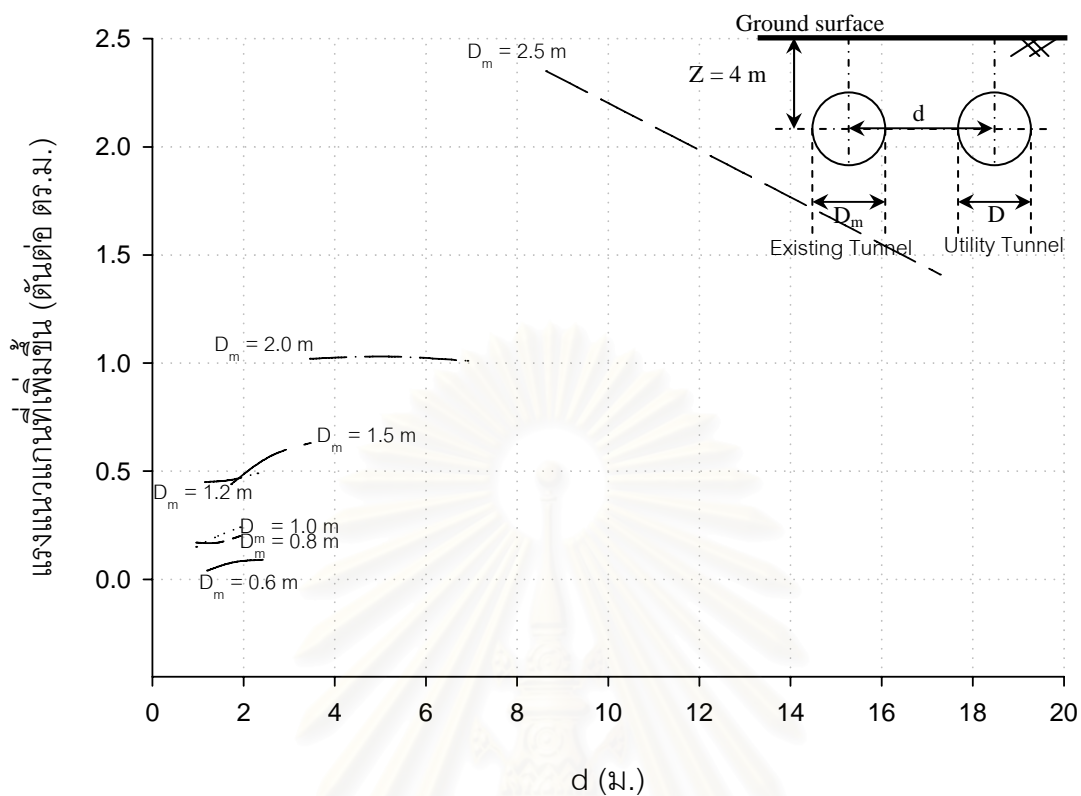
รูปที่ ก-4.1.5.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = D_m$



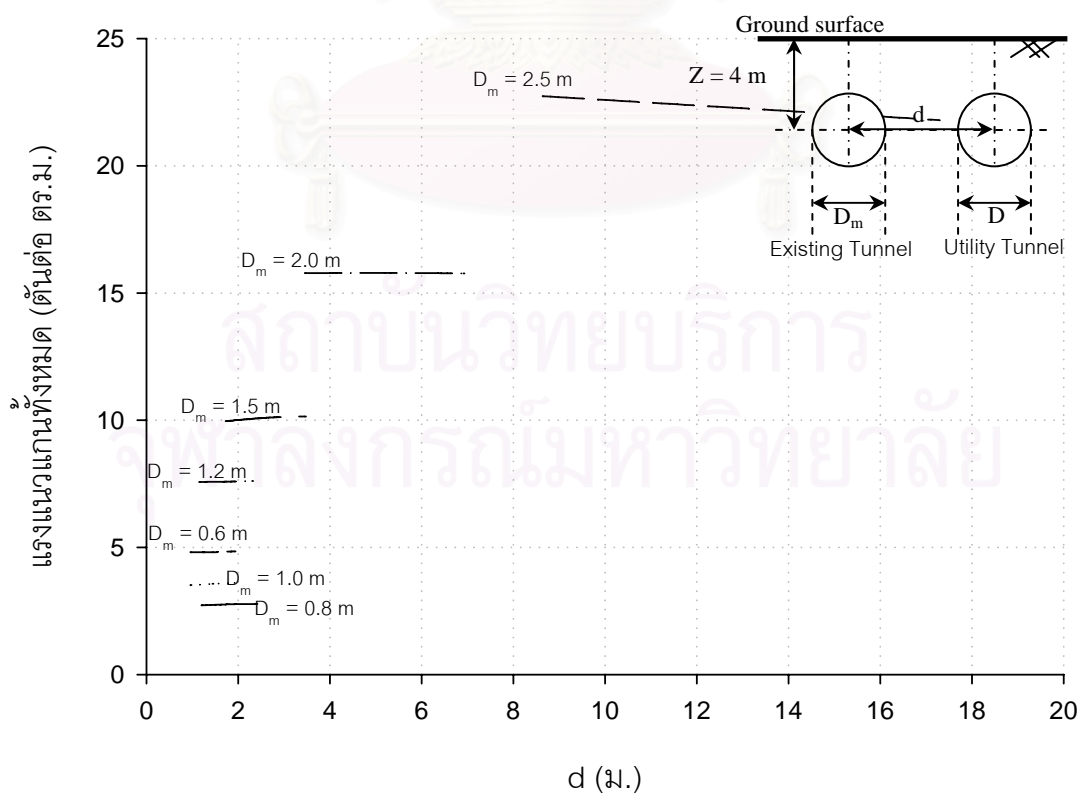
รูปที่ ก-4.1.6.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



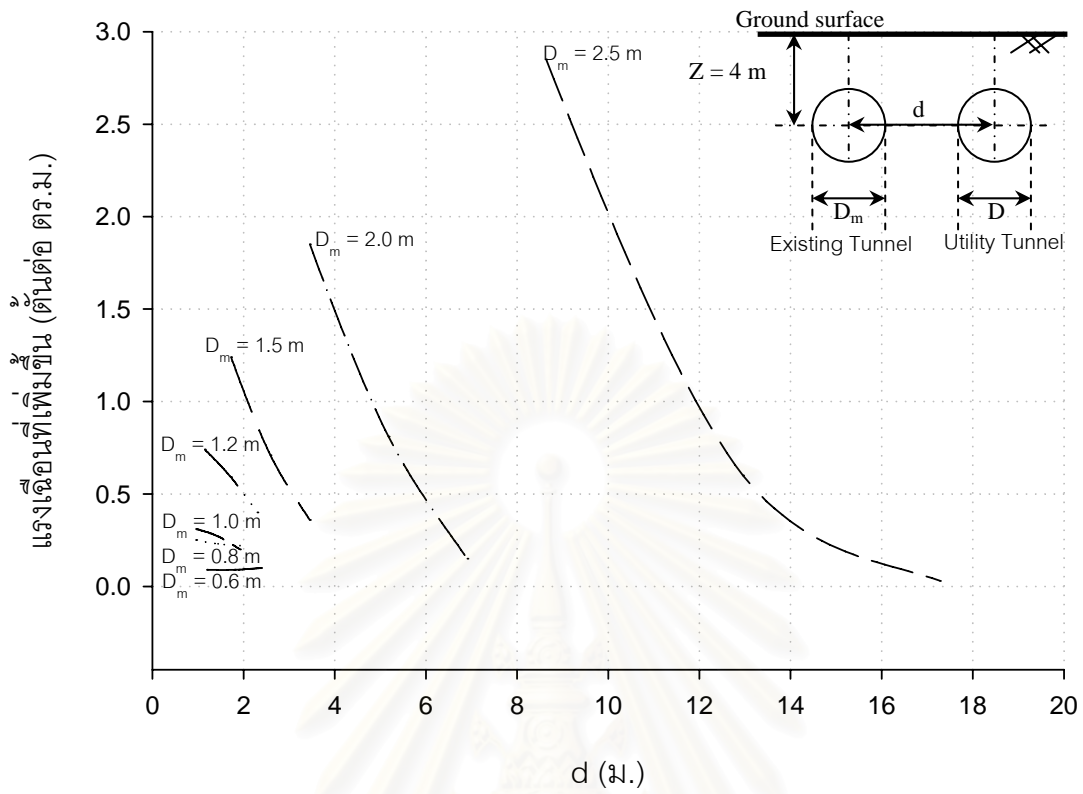
รูปที่ ก-4.1.6.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



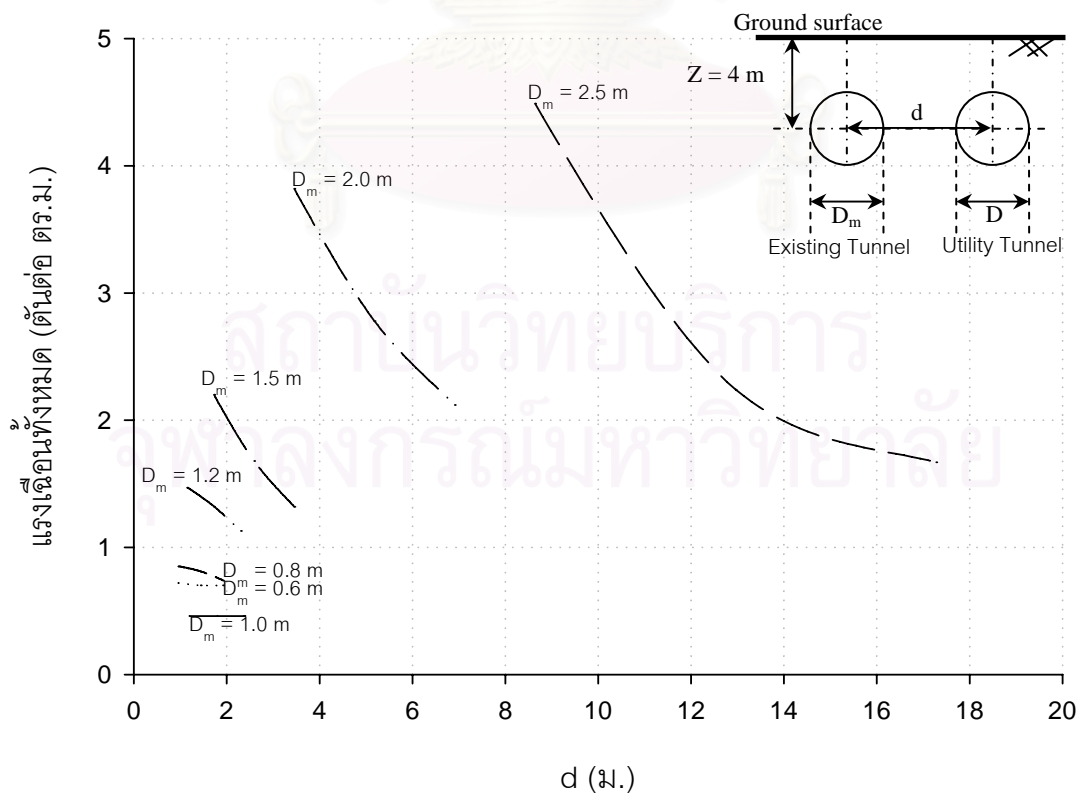
รูปที่ ก-4.1.6.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



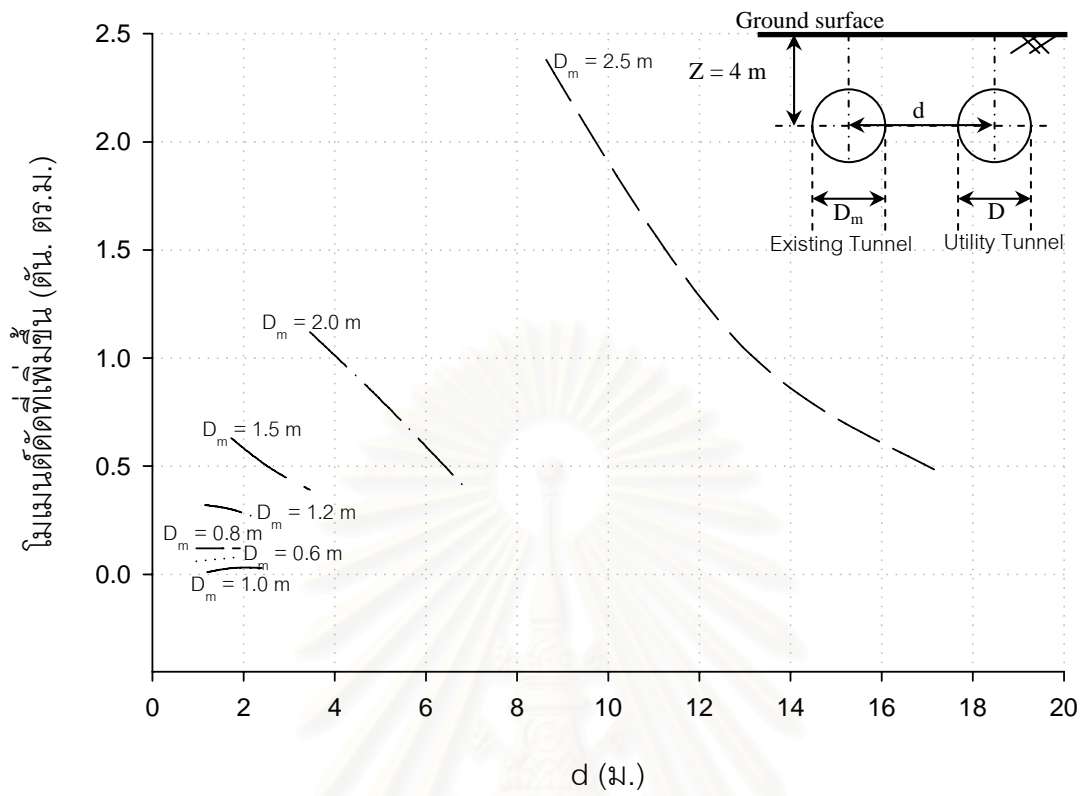
รูปที่ ก-4.1.6.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



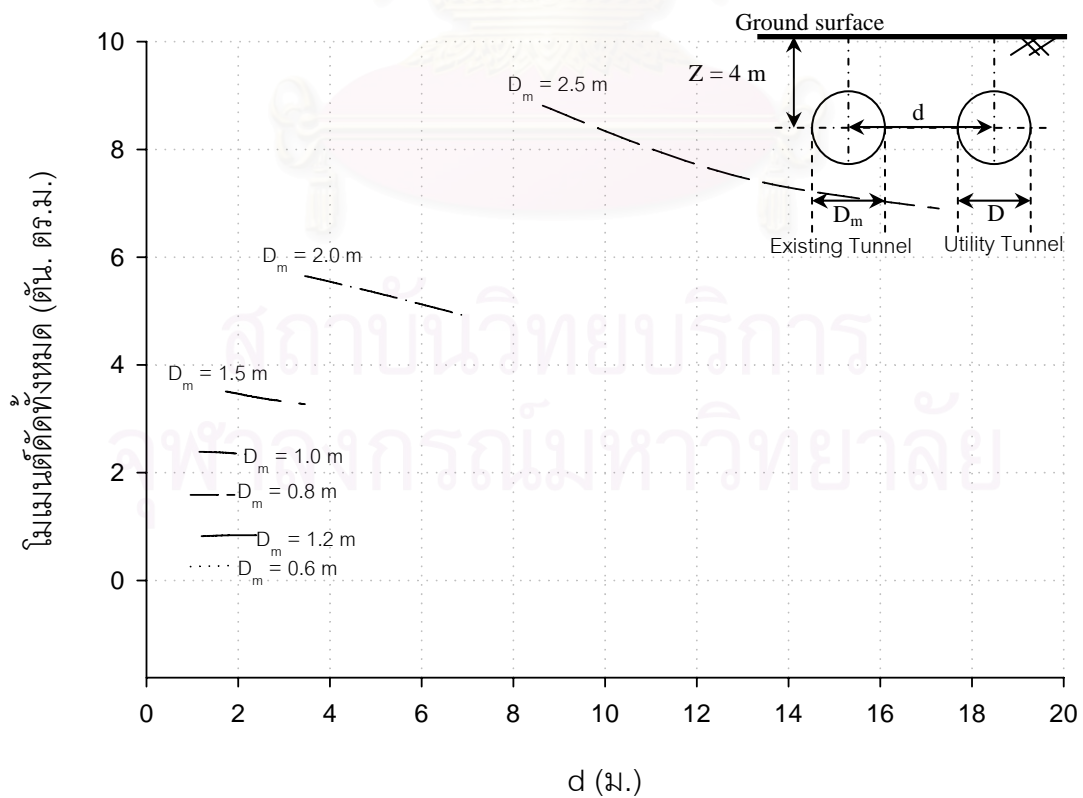
รูปที่ ก-4.1.6.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2 D_m$



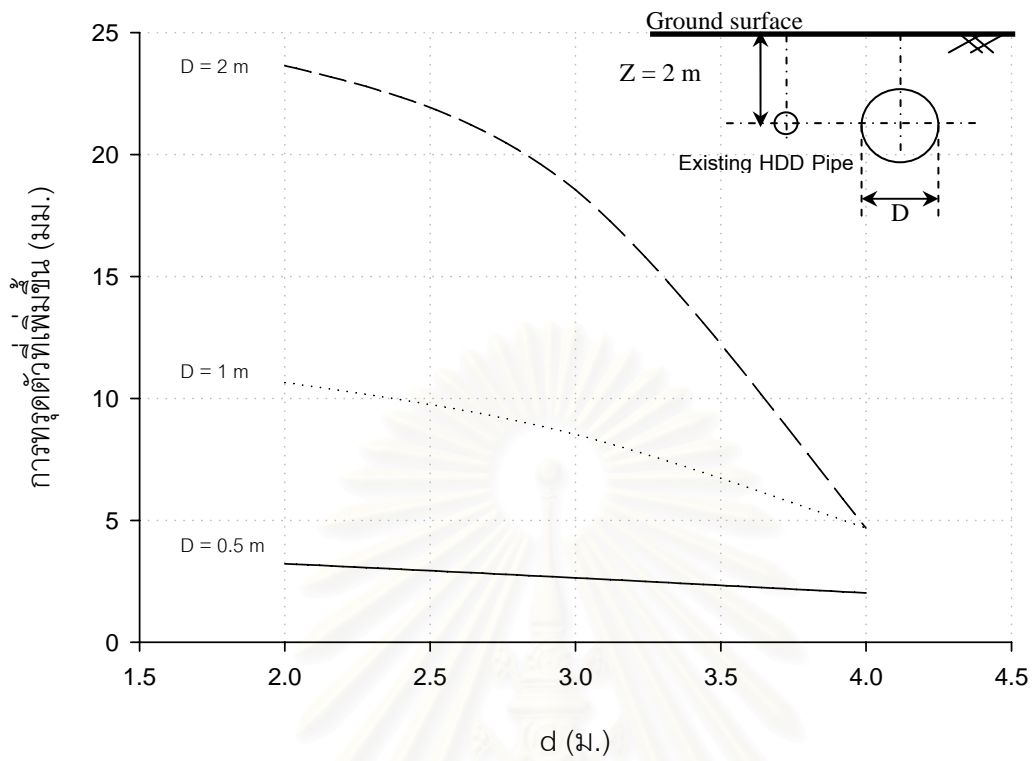
รูปที่ ก-4.1.6.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2 D_m$



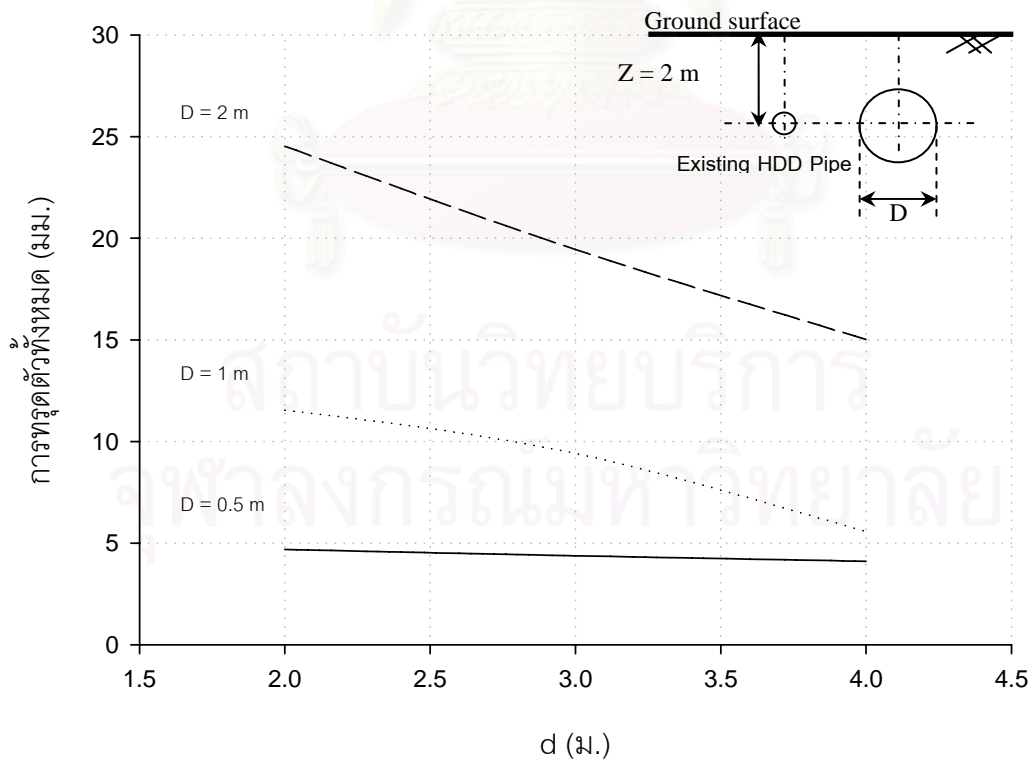
รูปที่ ก-4.1.6.4.1 ไม่น้อยกว่าที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอกจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



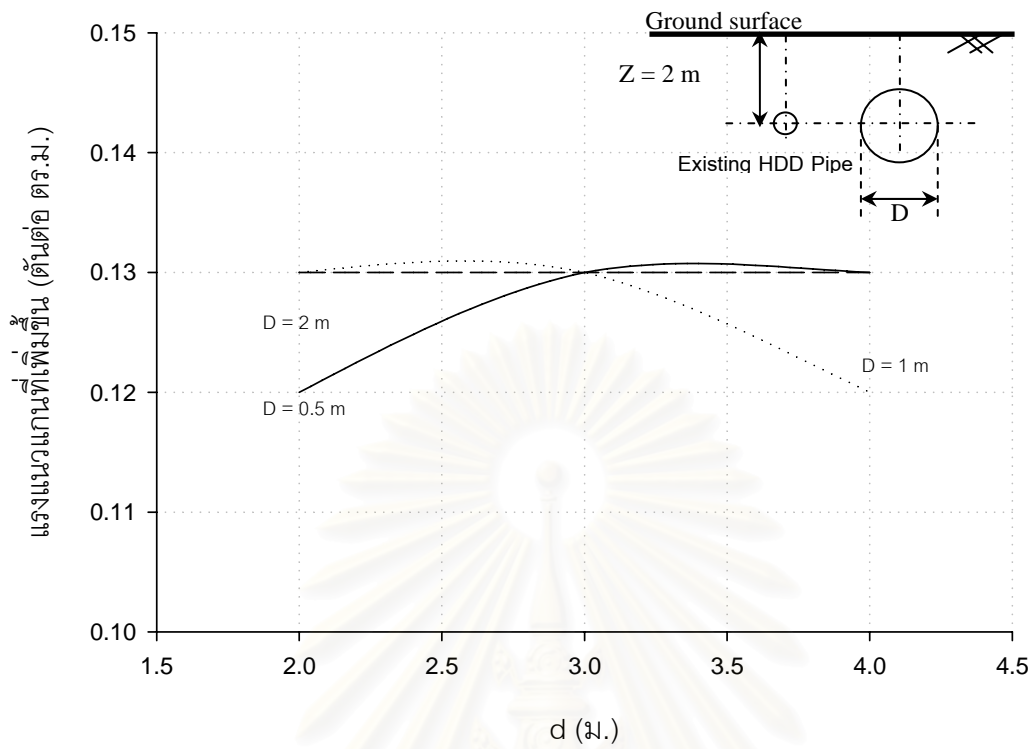
รูปที่ ก-4.1.6.4.2 ไม่น้อยกว่าทั้งหมดของท่อตันลอกจากคูโมงค์ข้างเคียงด้านข้างขนาด $D = 2D_m$



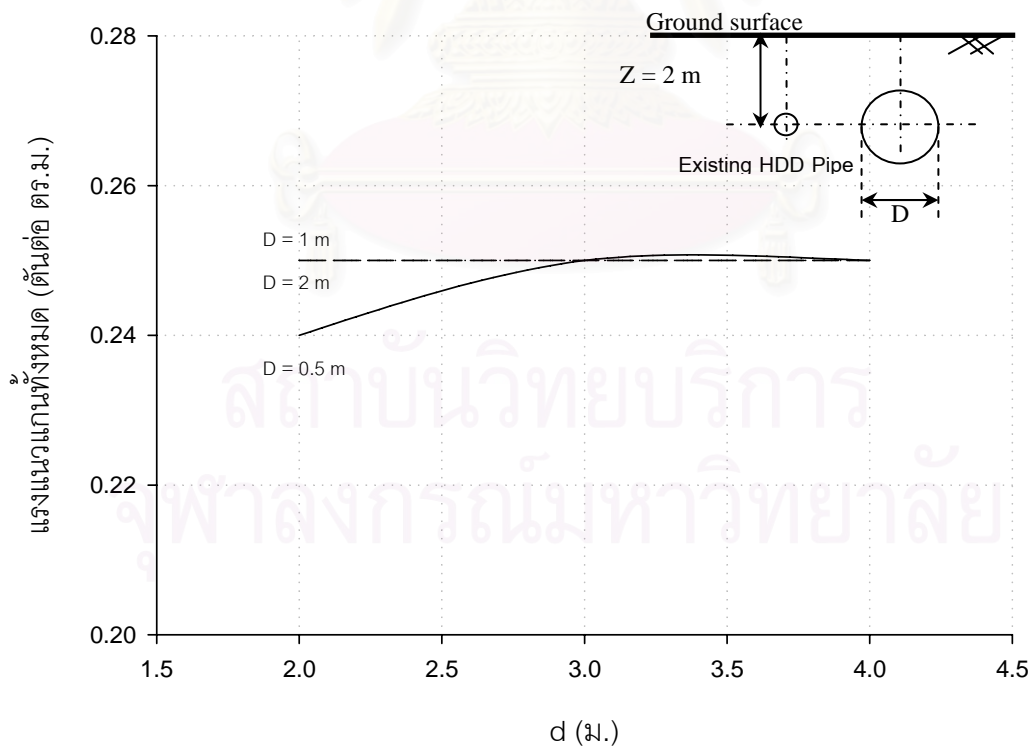
รูปที่ ก-4.1.7.1.1 การท่อดูตัวที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



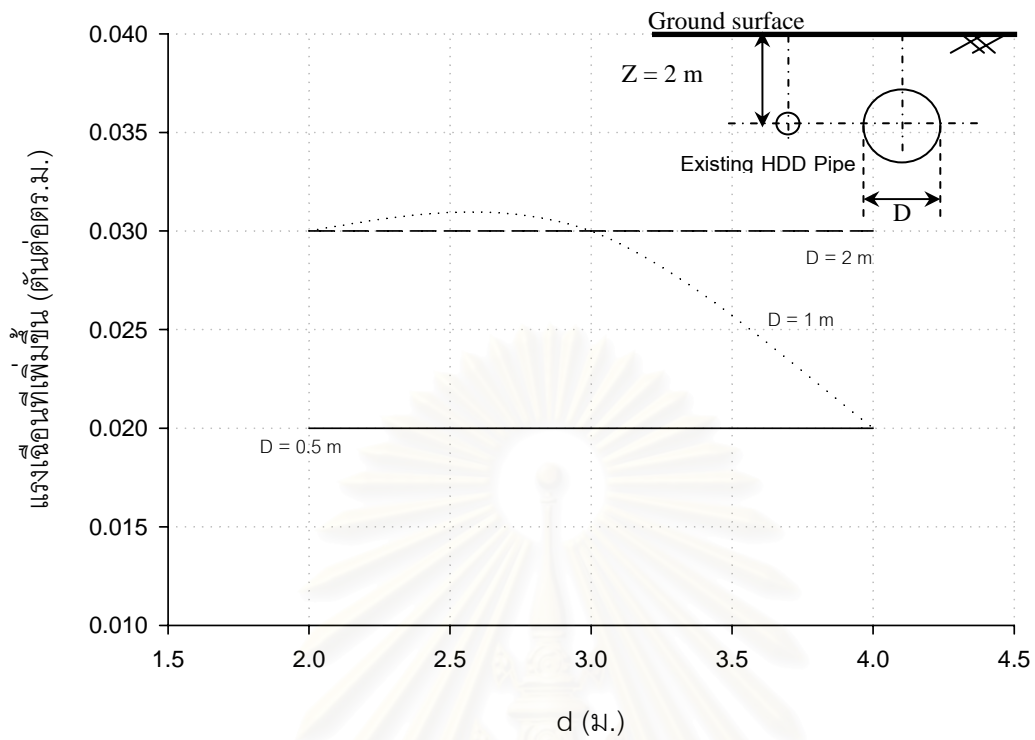
รูปที่ ก-4.1.7.1.2 การท่อดูตัวทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบ เนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



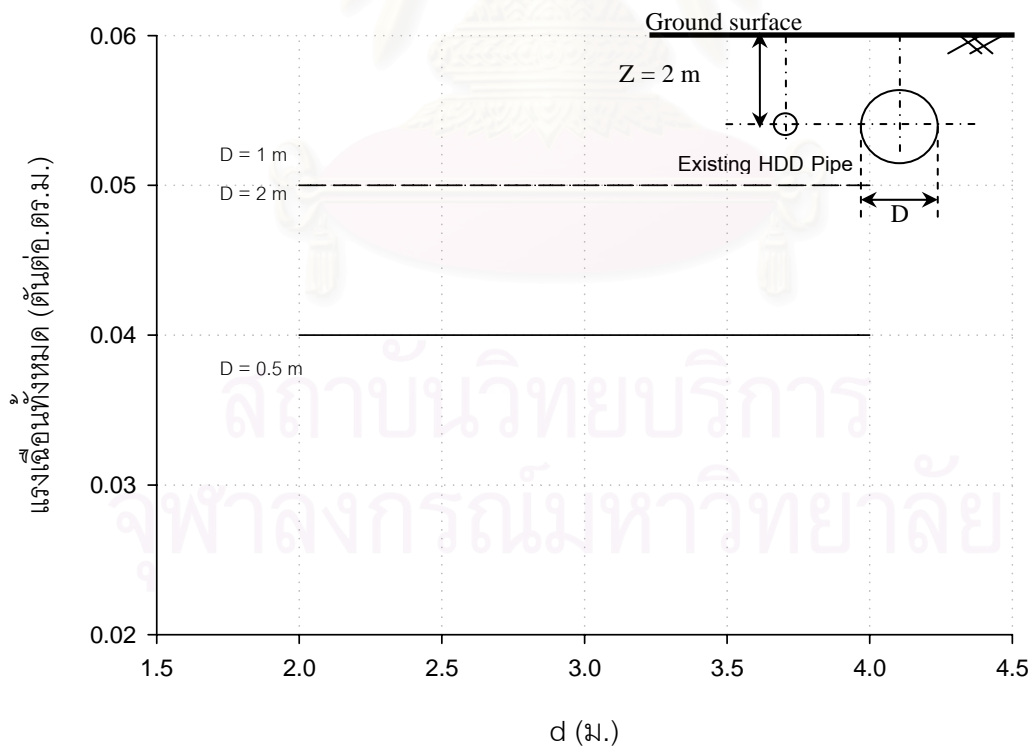
รูปที่ ก-4.1.7.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะดึงแนวราบจากคูโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



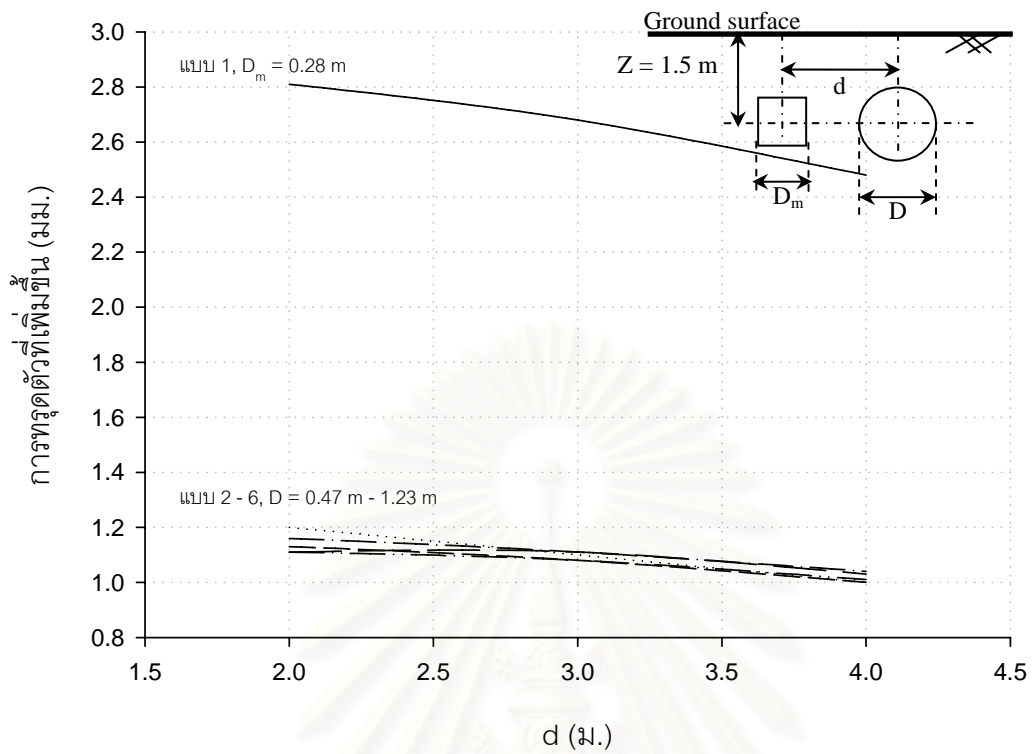
รูปที่ ก-4.1.7.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อเจาะดึงแนวราบจากคูโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



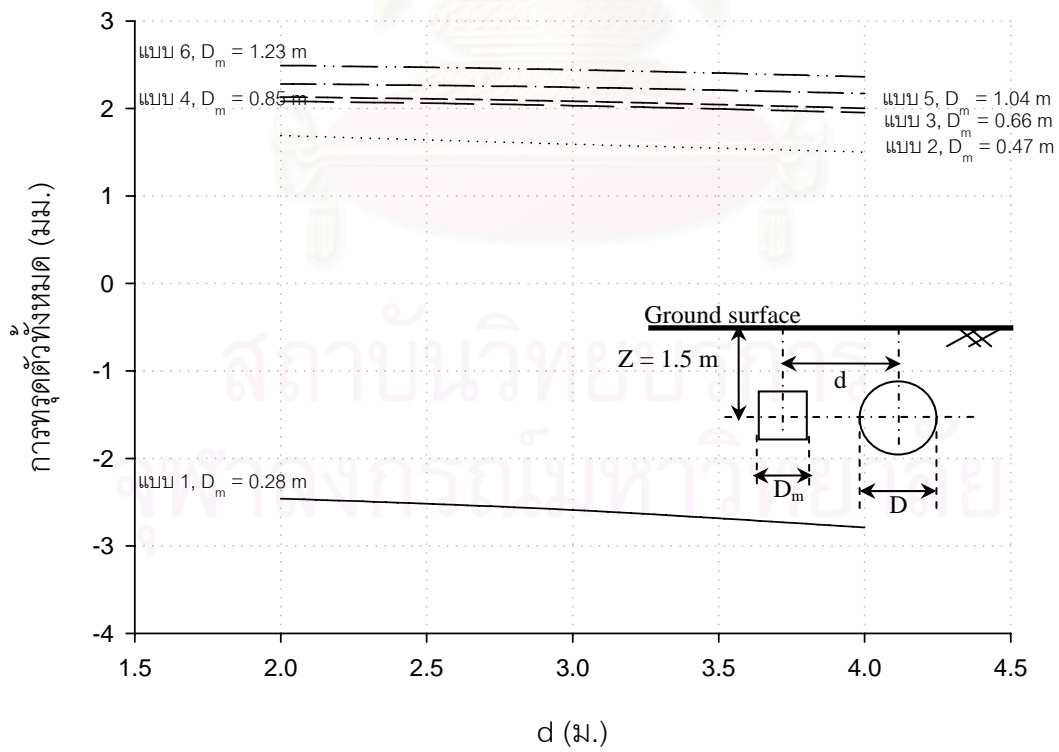
รูปที่ ก-4.1.7.3.1 แรงเคื่อนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบเนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



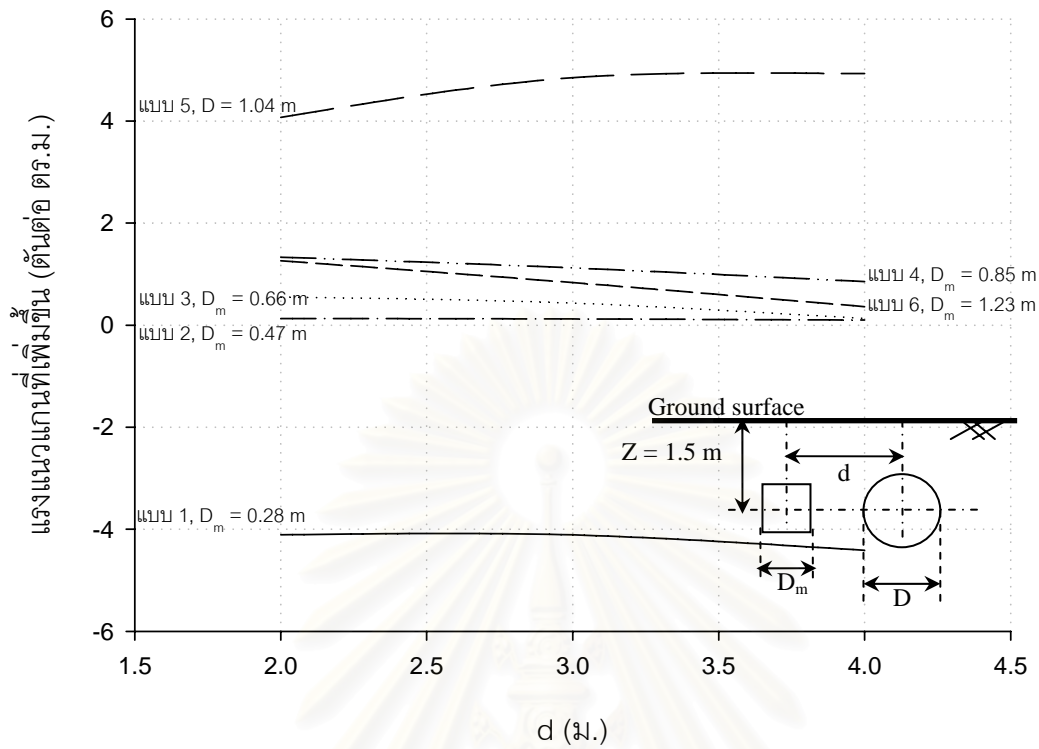
รูปที่ ก-4.1.7.3.2 แรงเคื่อนทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบเนื่องจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



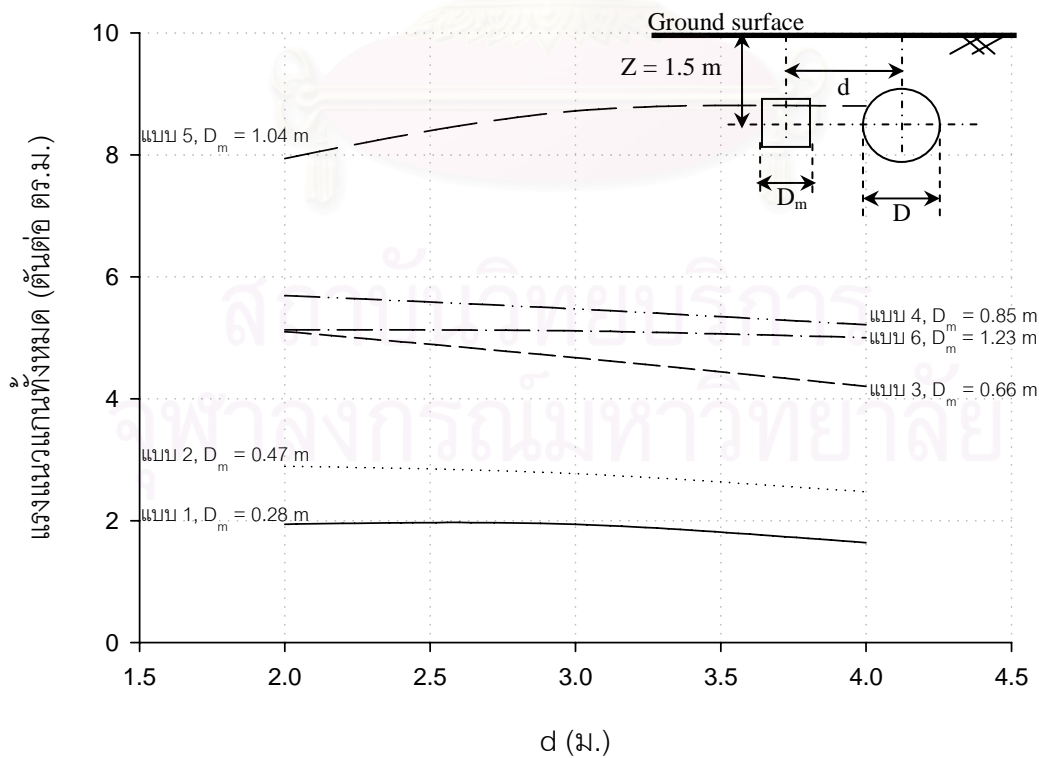
รูปที่ ก-4.1.8.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=0.5D_m$



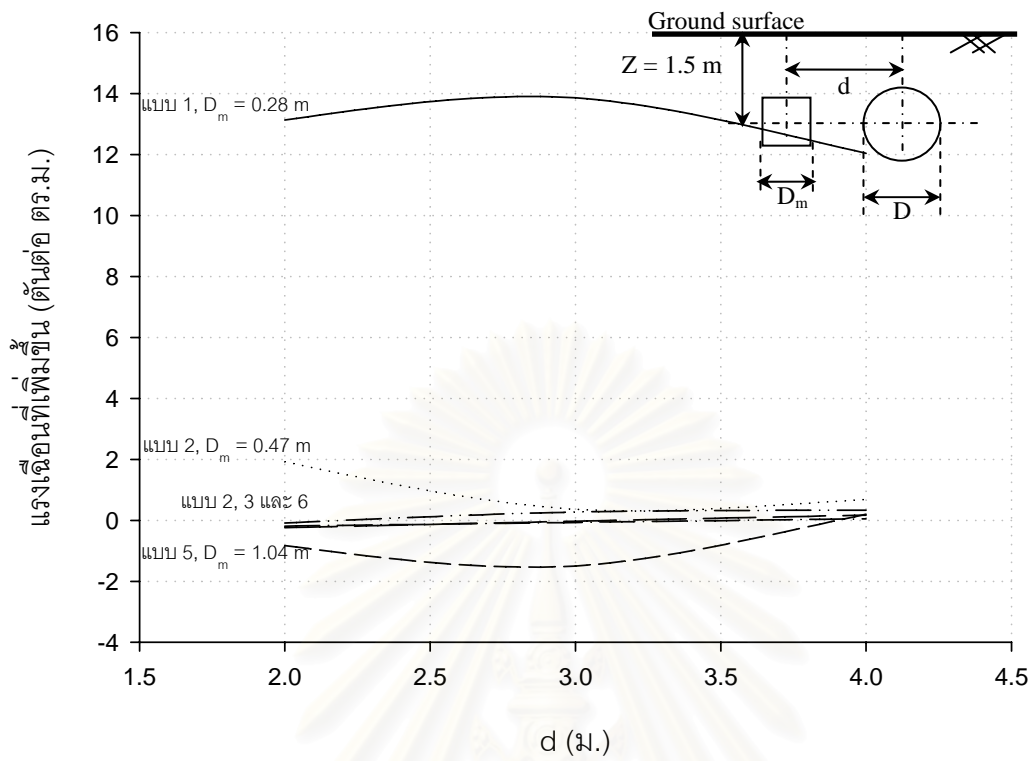
รูปที่ ก-4.1.8.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=0.5D_m$



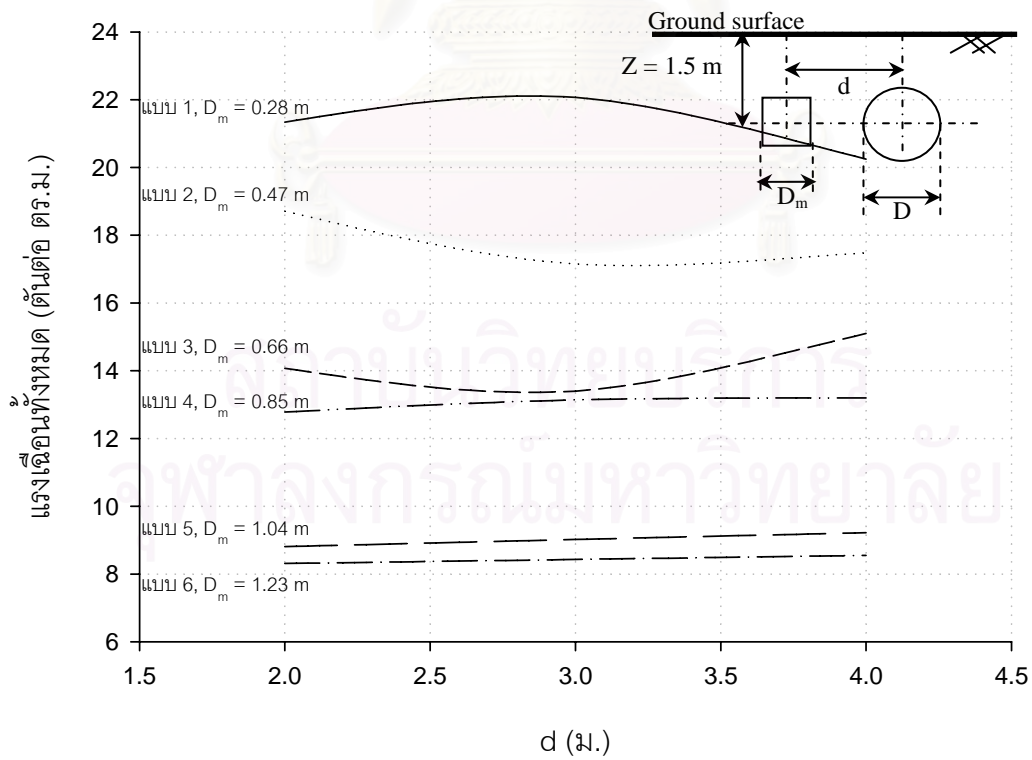
รูปที่ ก-4.1.8.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



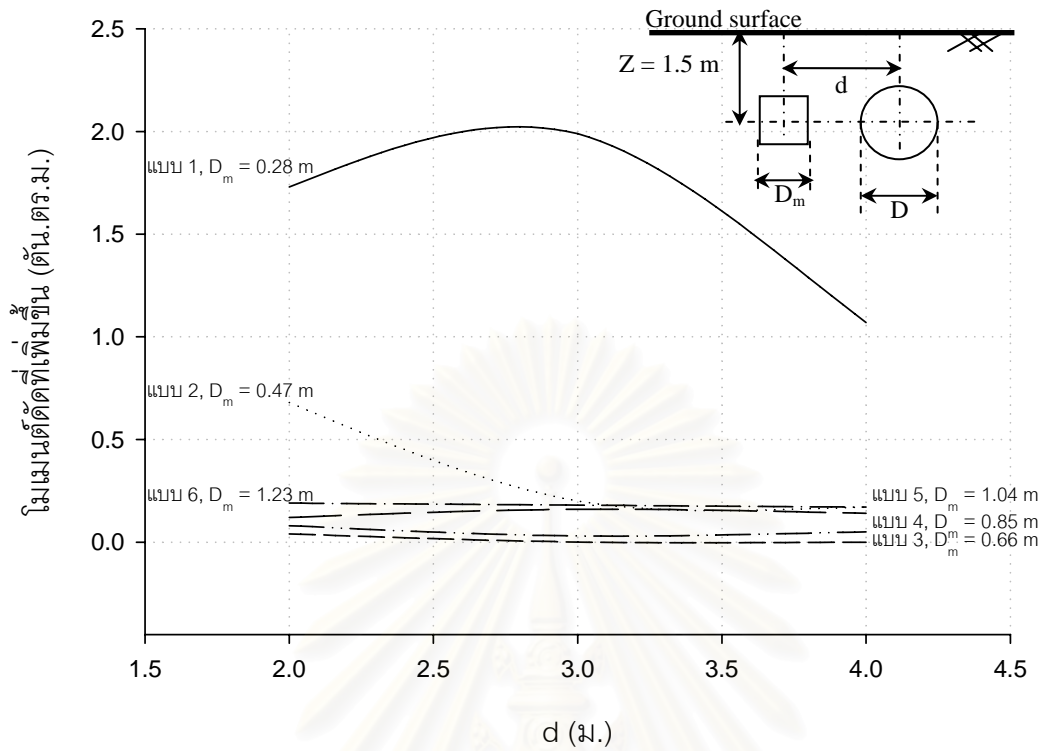
รูปที่ ก-4.1.8.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



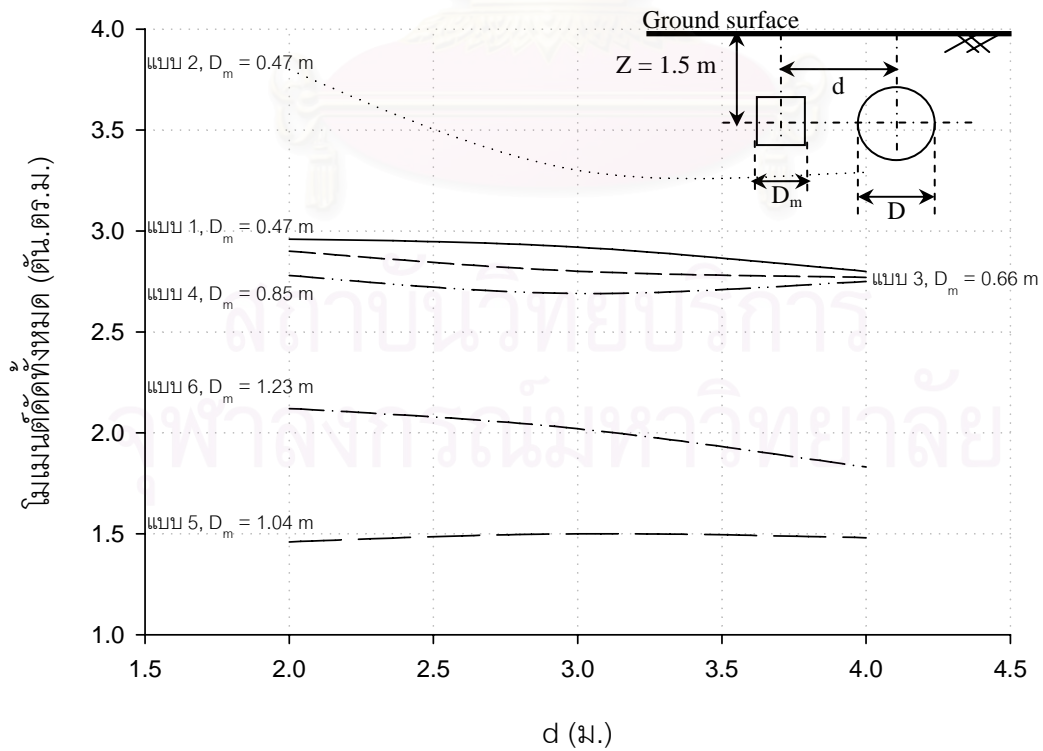
รูปที่ ก-4.1.8.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



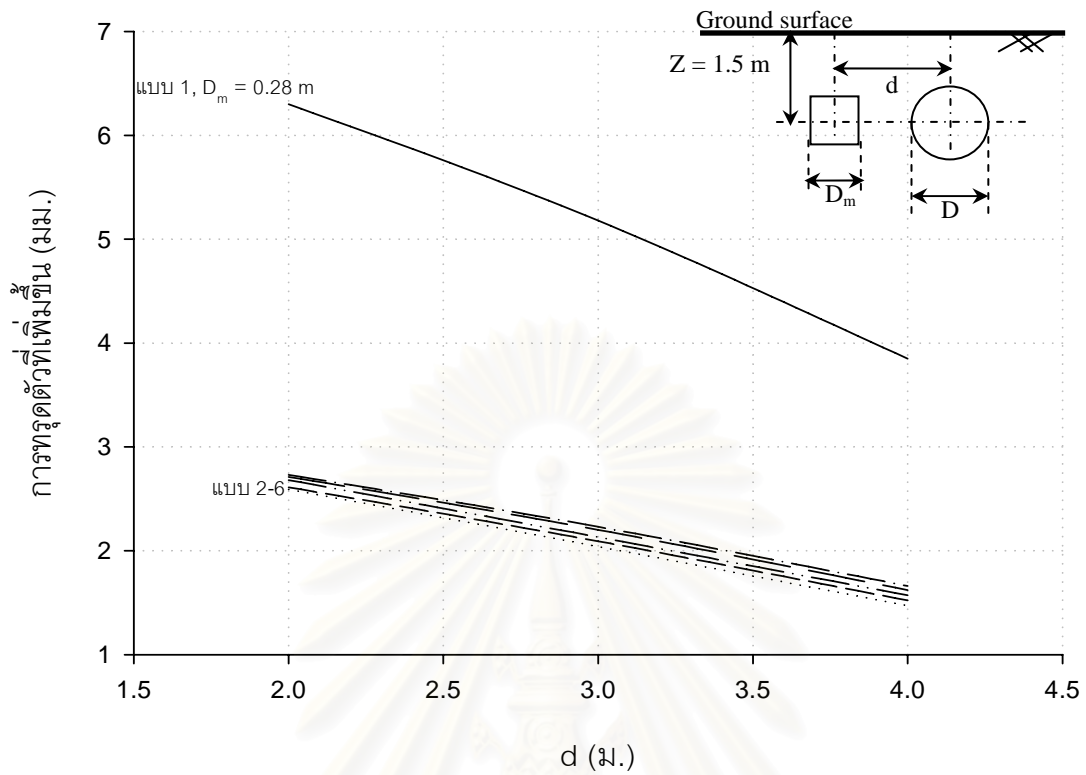
รูปที่ ก-4.1.8.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5D_m$



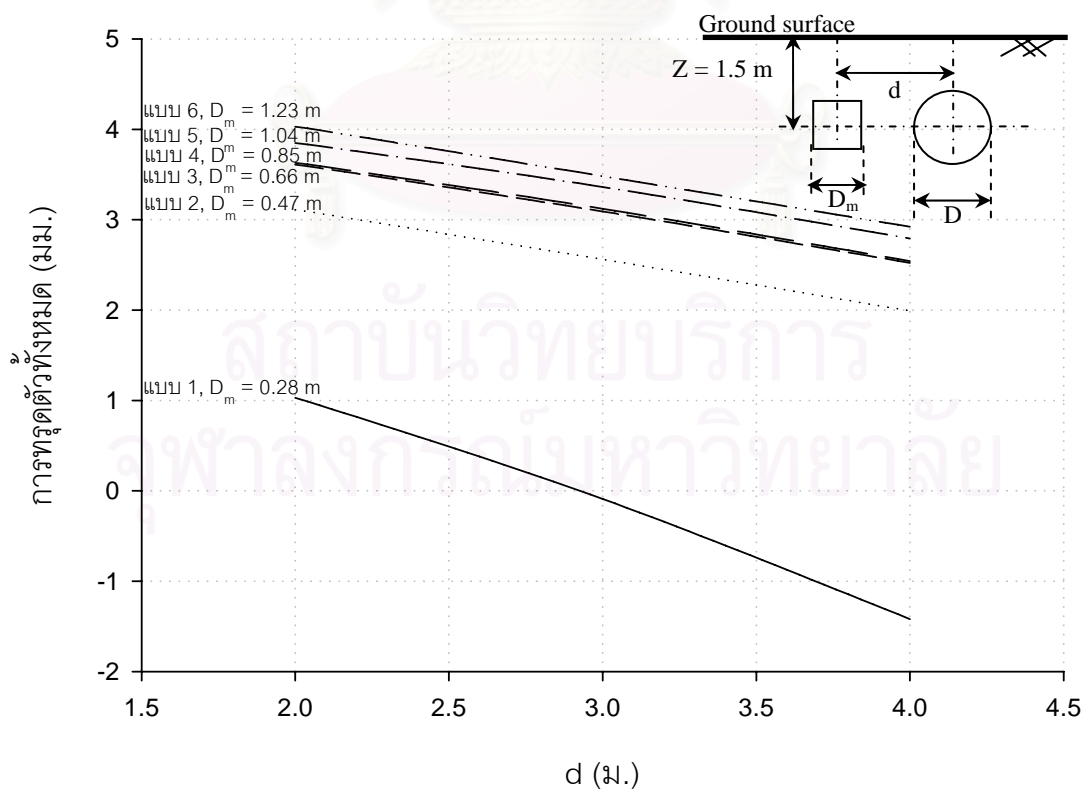
รูปที่ ก-4.1.8.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=0.5D_m$



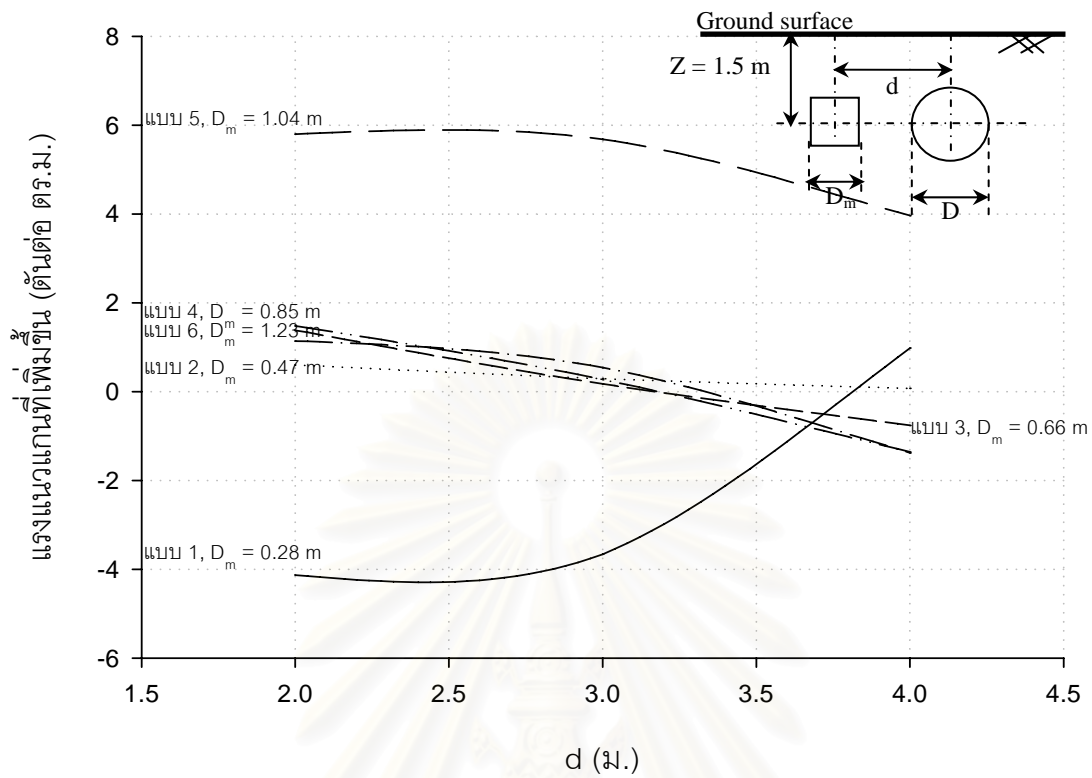
รูปที่ ก-4.1.8.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=0.5D_m$



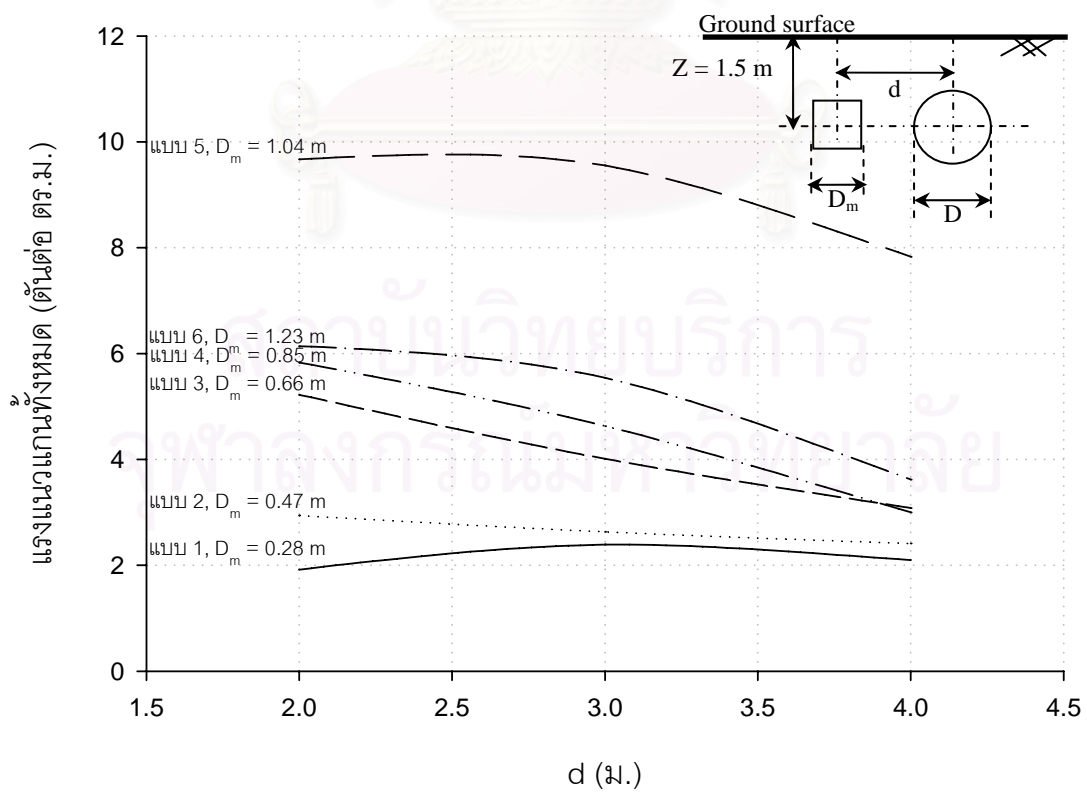
รูปที่ ก-4.1.9.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



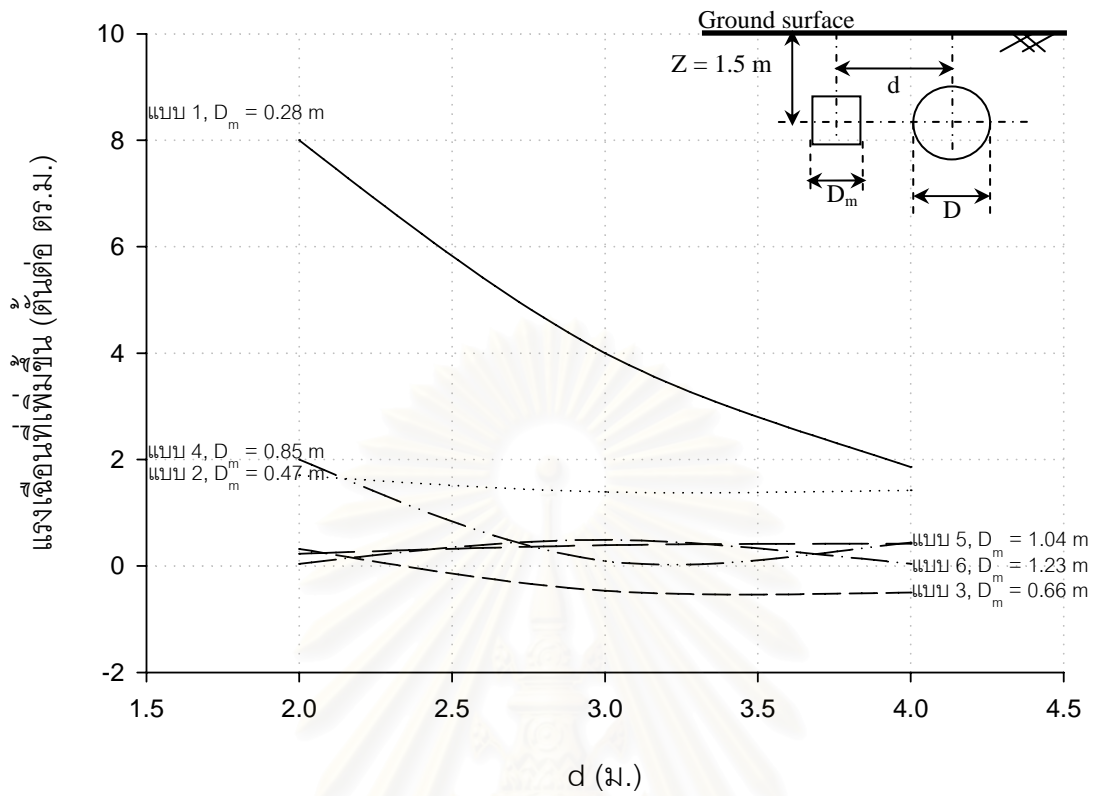
รูปที่ ก-4.1.9.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



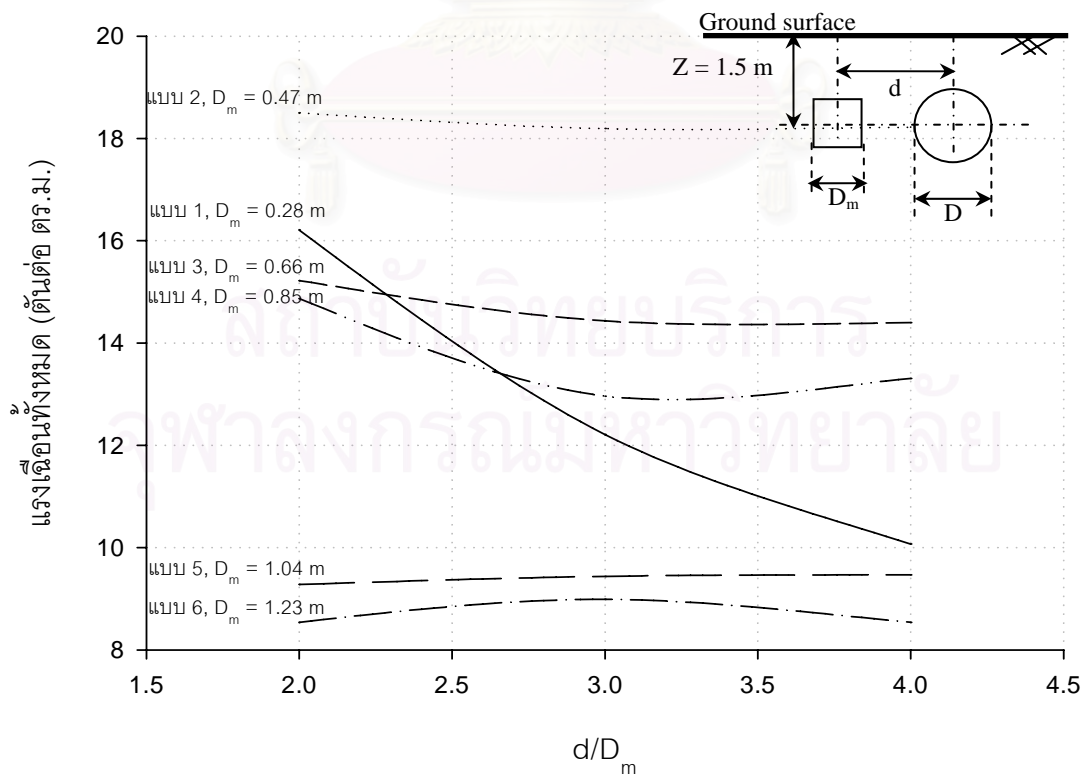
รูปที่ ก-4.1.9.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



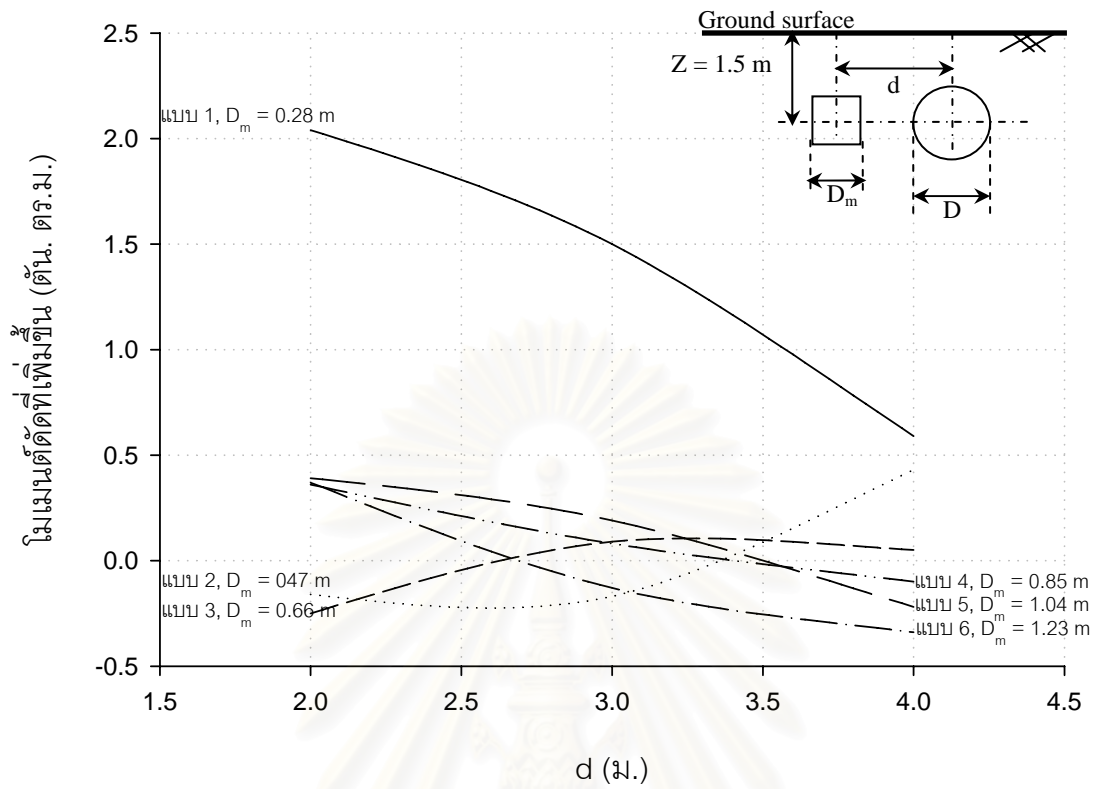
รูปที่ ก-4.1.9.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



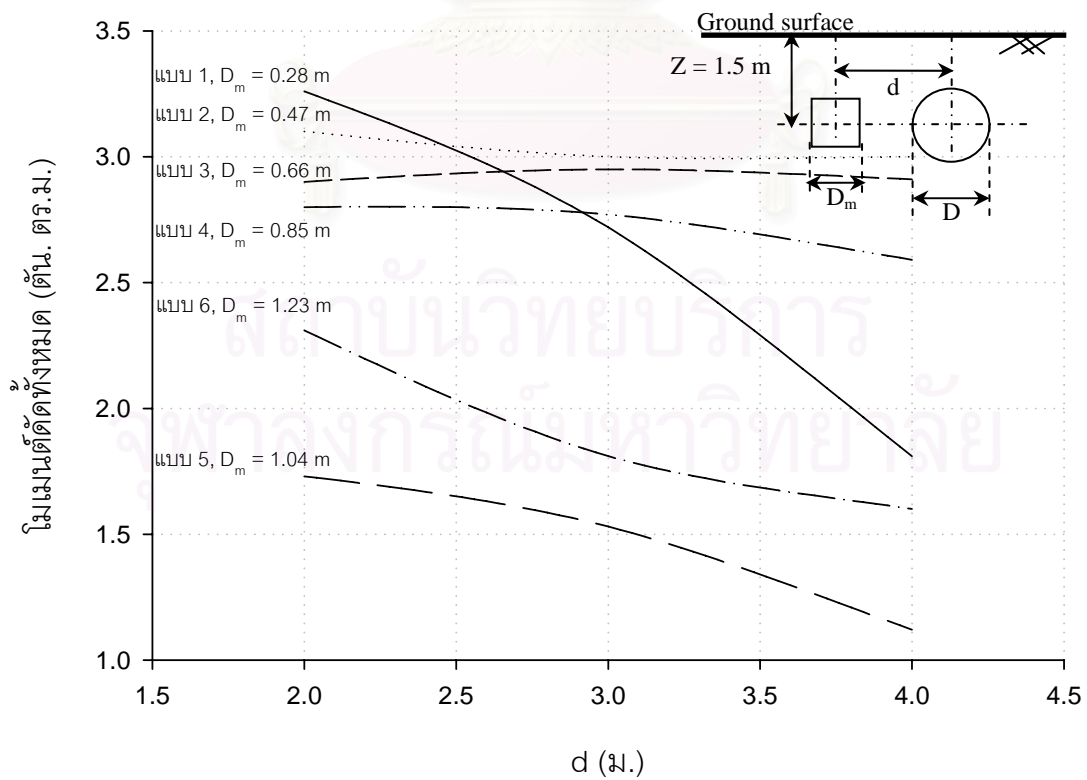
รูปที่ ก-4.1.9.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



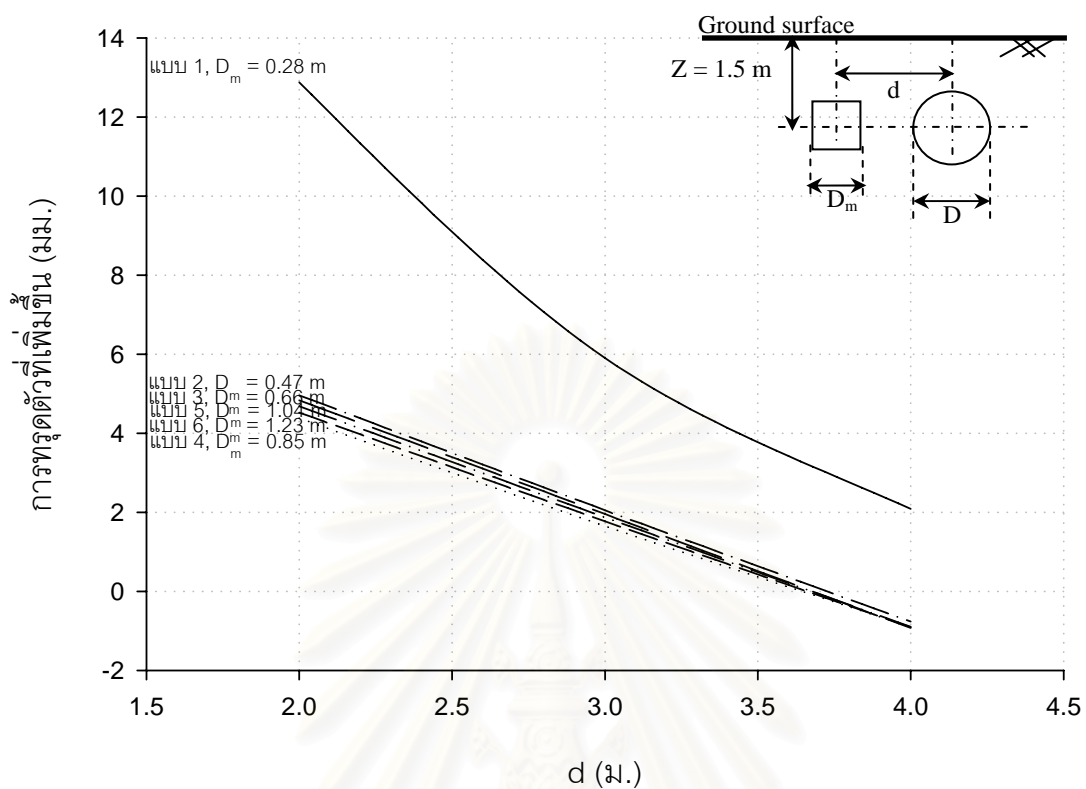
รูปที่ ก-4.1.9.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



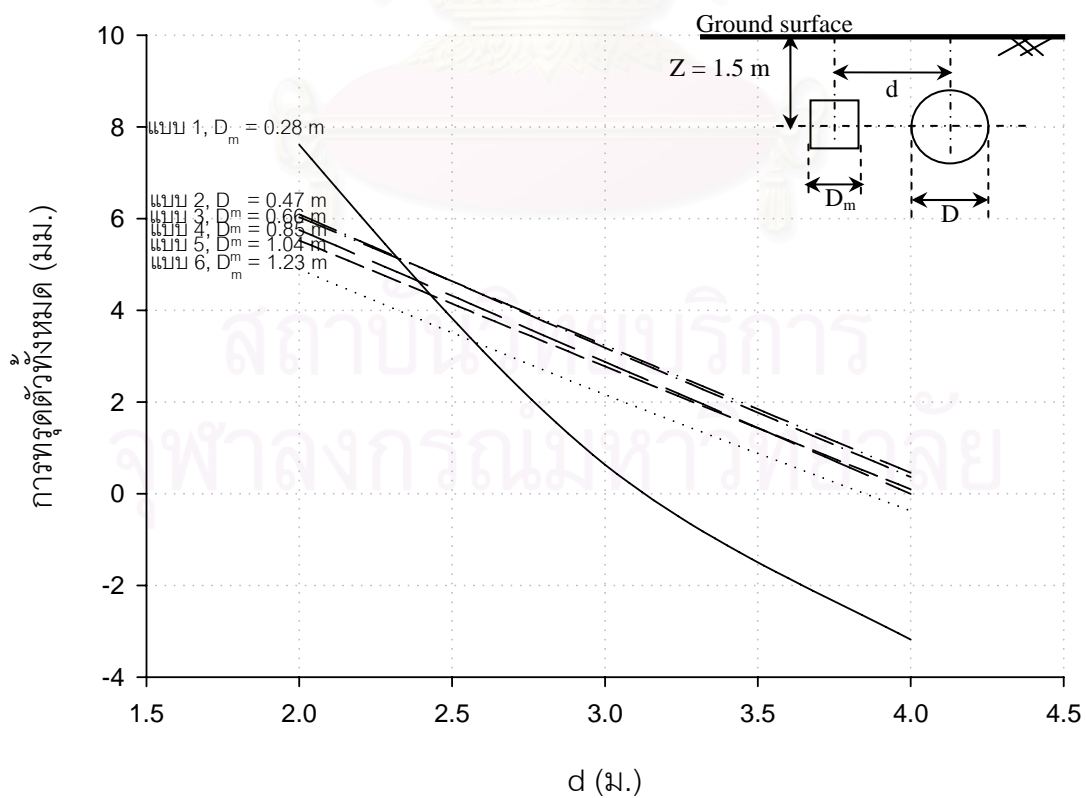
รูปที่ ก-4.1.9.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



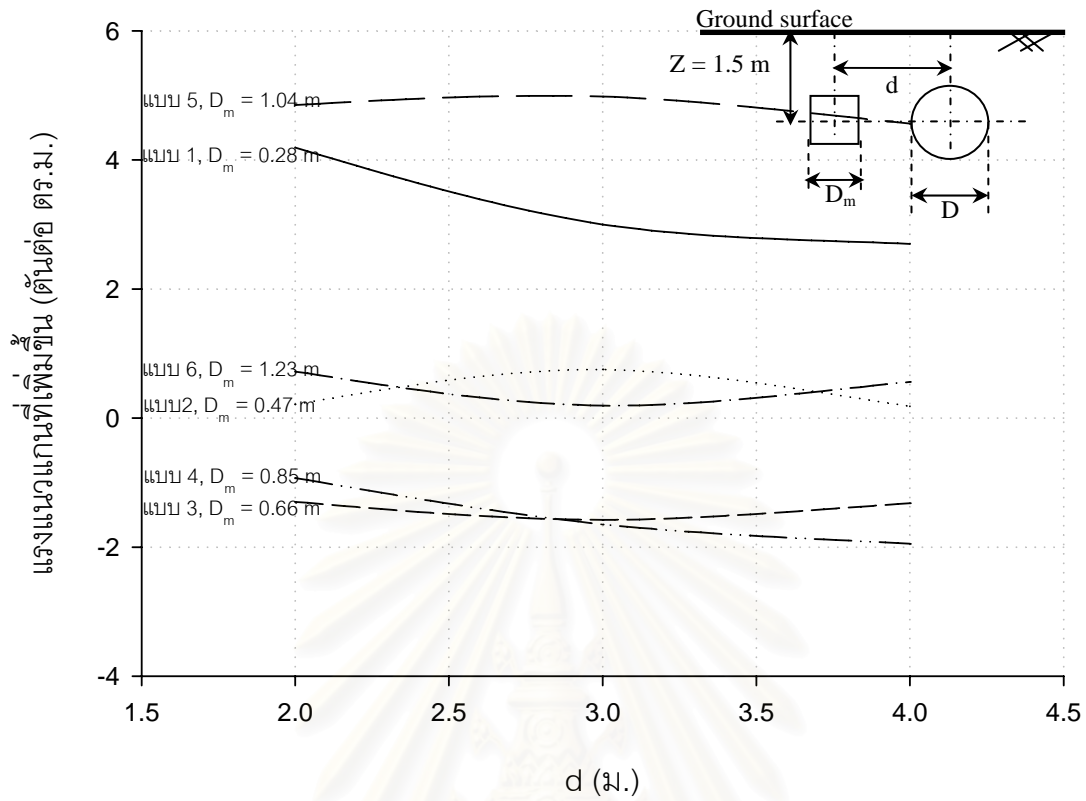
รูปที่ ก-4.1.9.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = D_m$



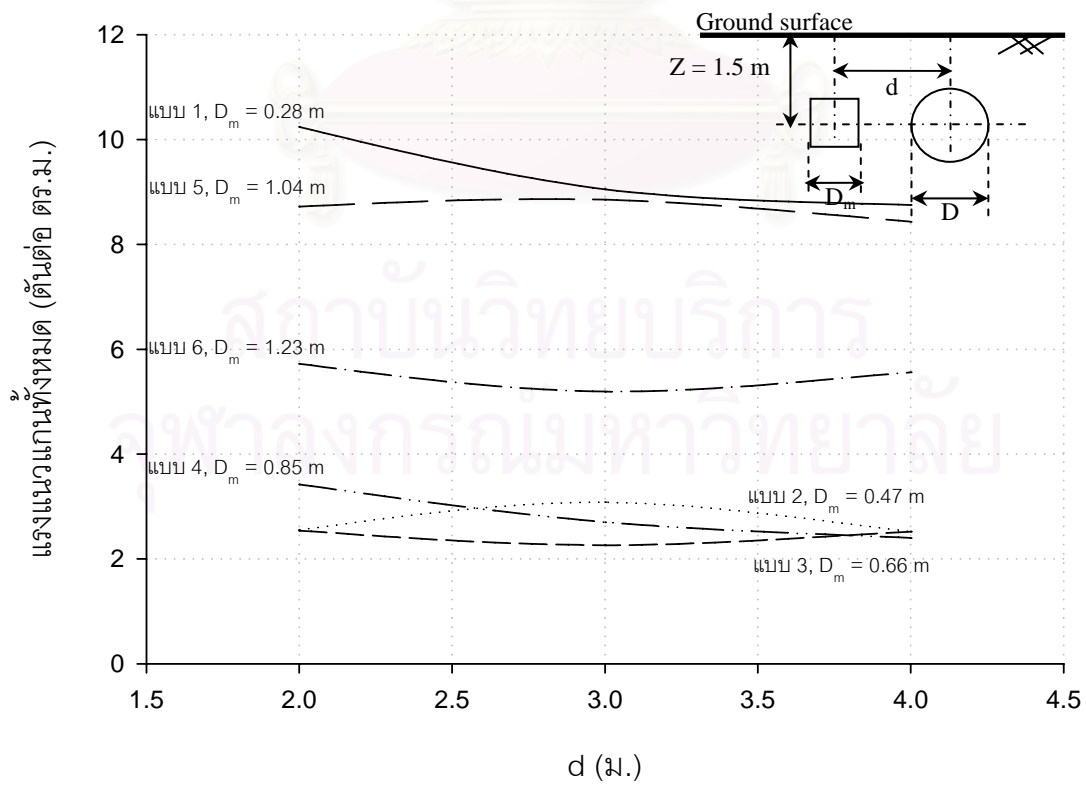
รูปที่ ก-4.1.10.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 2D_m$



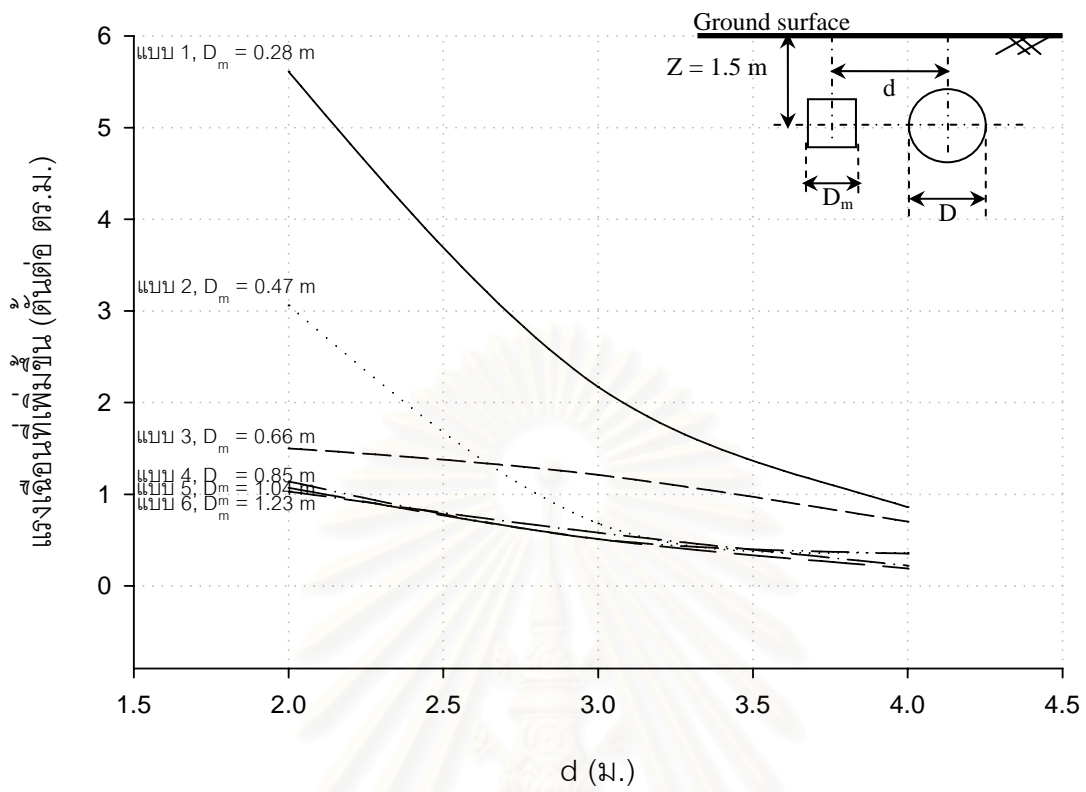
รูปที่ ก-4.1.10.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 2D_m$



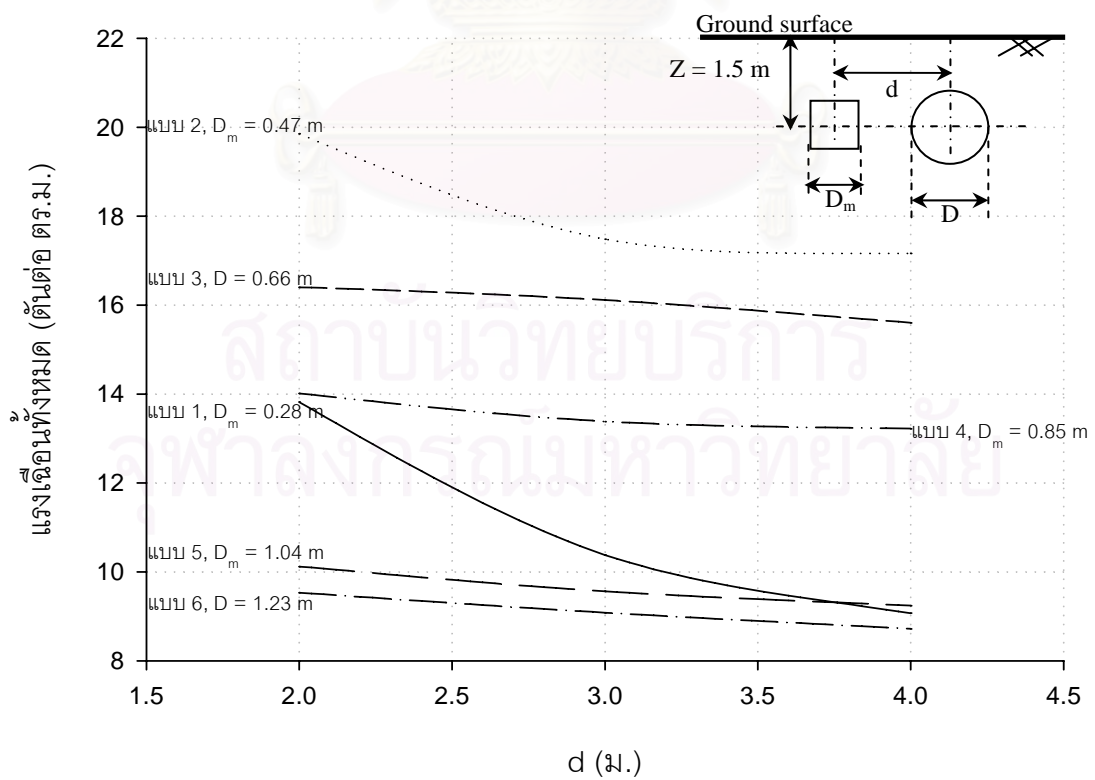
รูปที่ ก-4.1.10.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=2D_m$



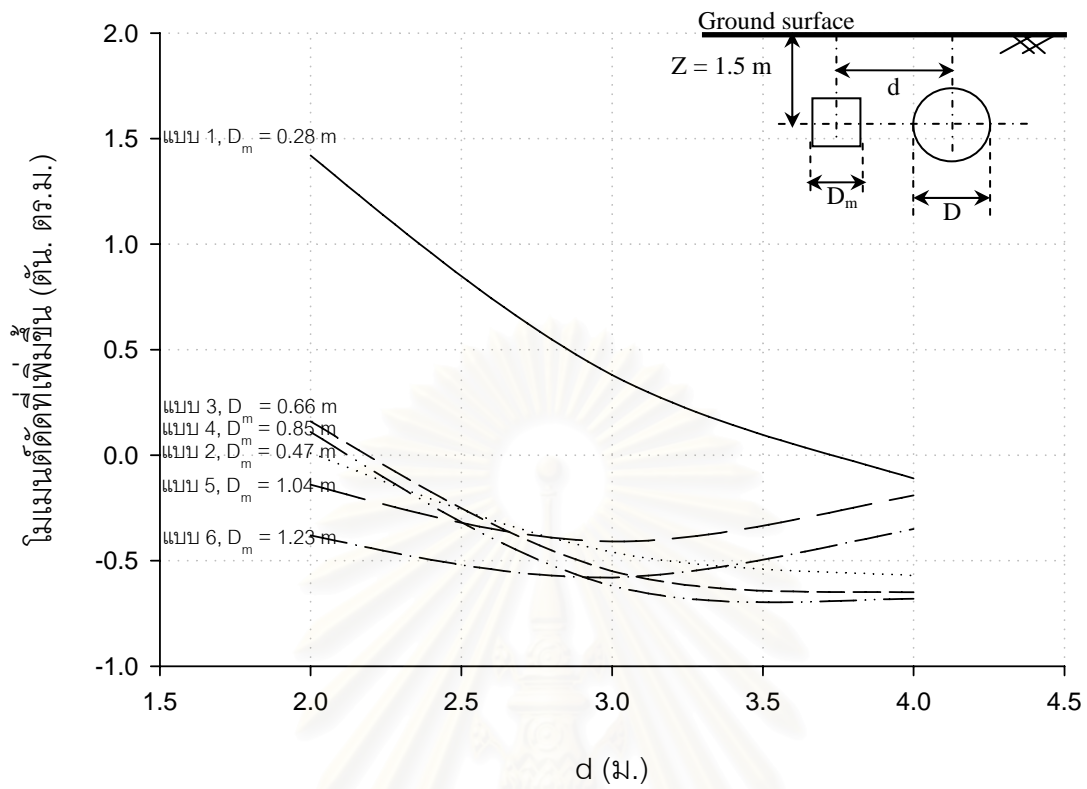
รูปที่ ก-4.1.10.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=2D_m$



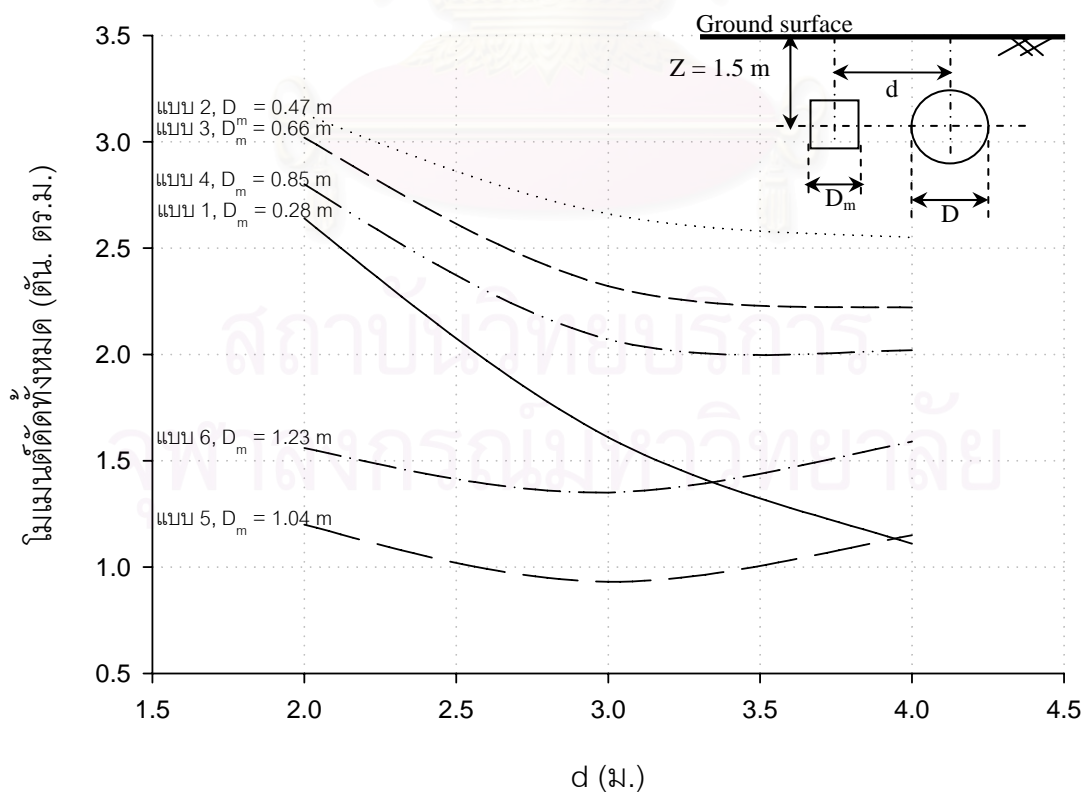
รูปที่ ก-4.1.10.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 2D_m$



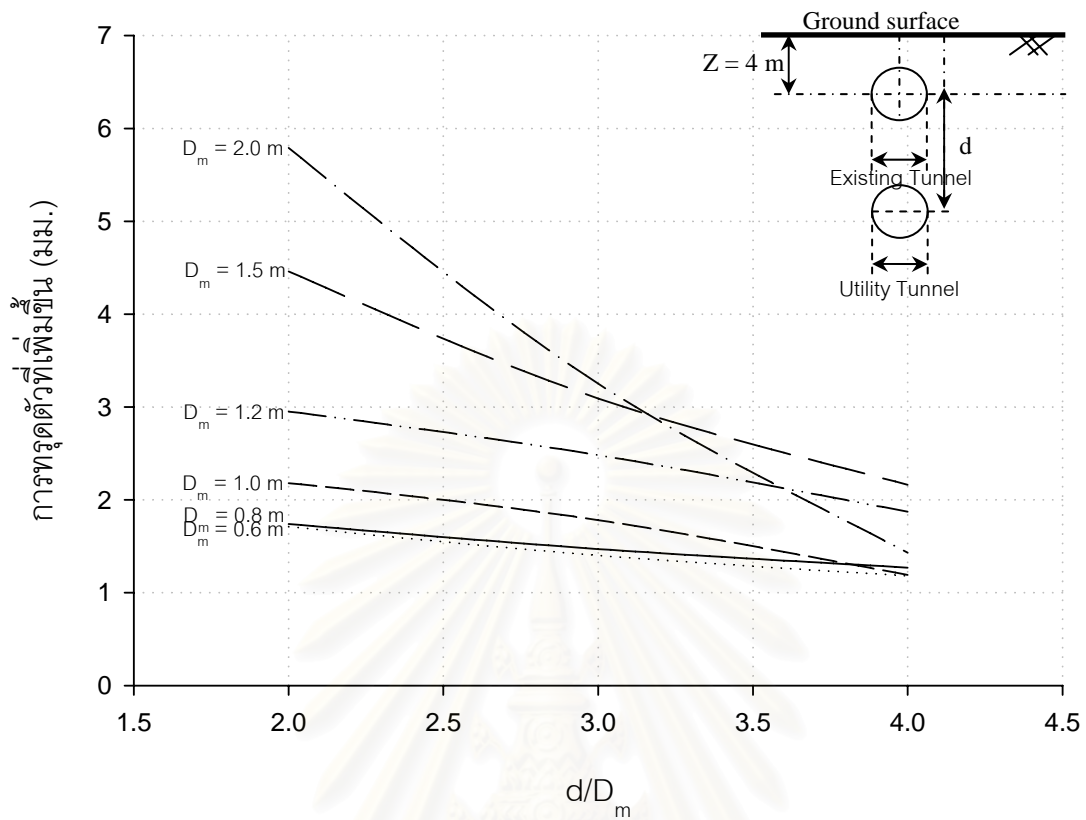
รูปที่ ก-4.1.10.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 2D_m$



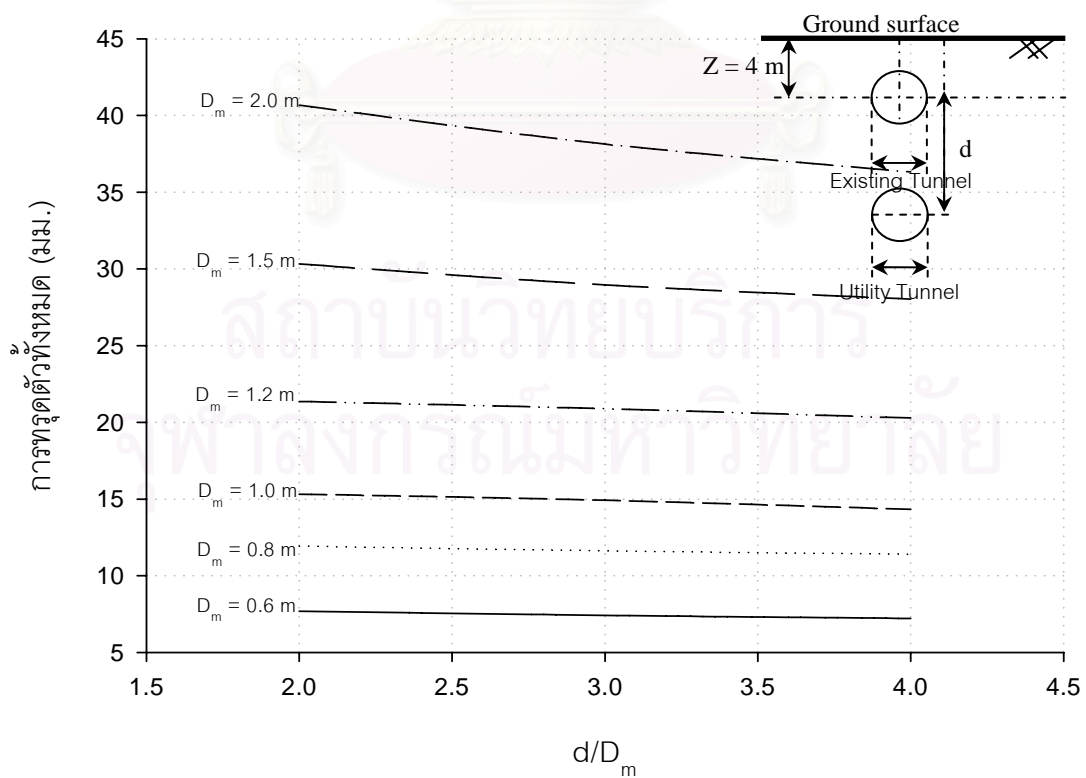
รูปที่ ก-4.1.10.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=2D_m$



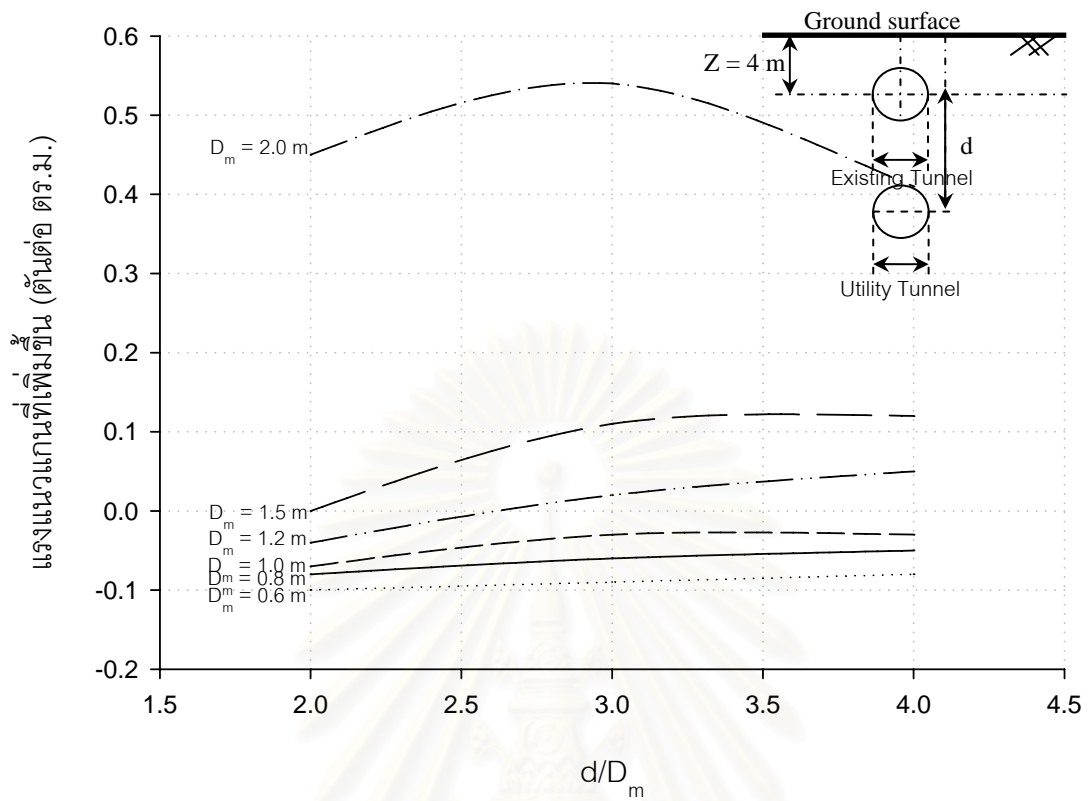
รูปที่ ก-4.1.10.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 2D_m$



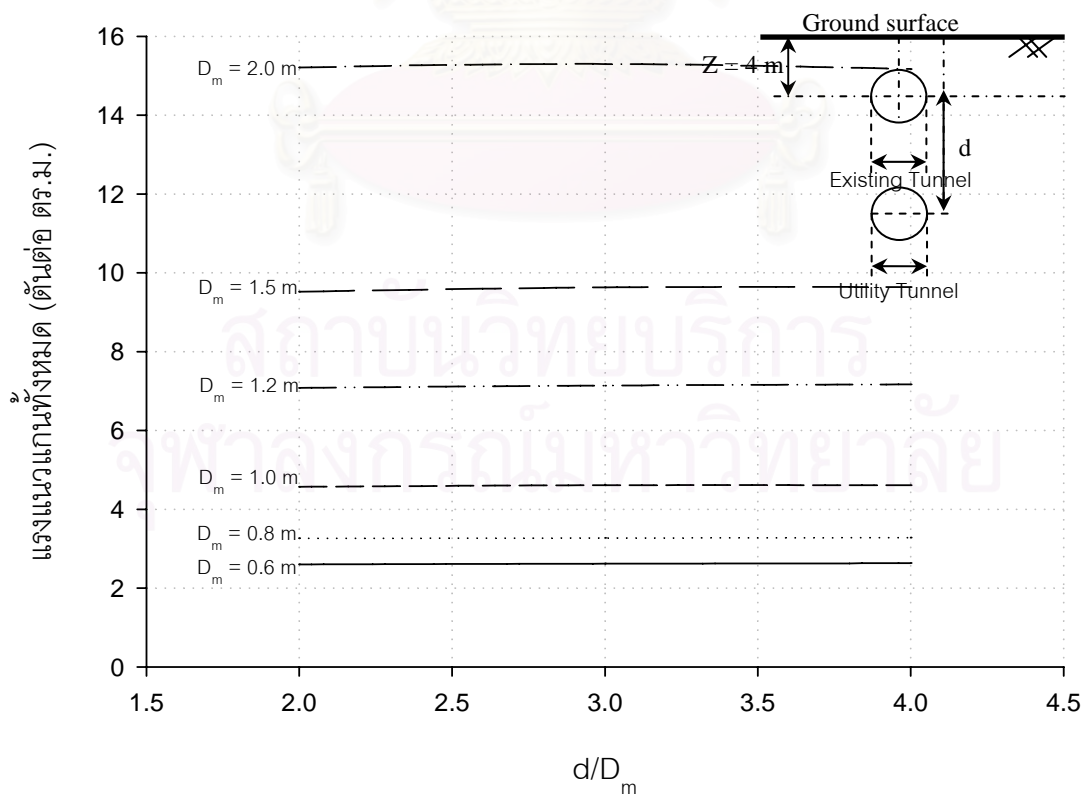
รูปที่ ก-4.2.1.1.1 การทูลดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5 D_m$



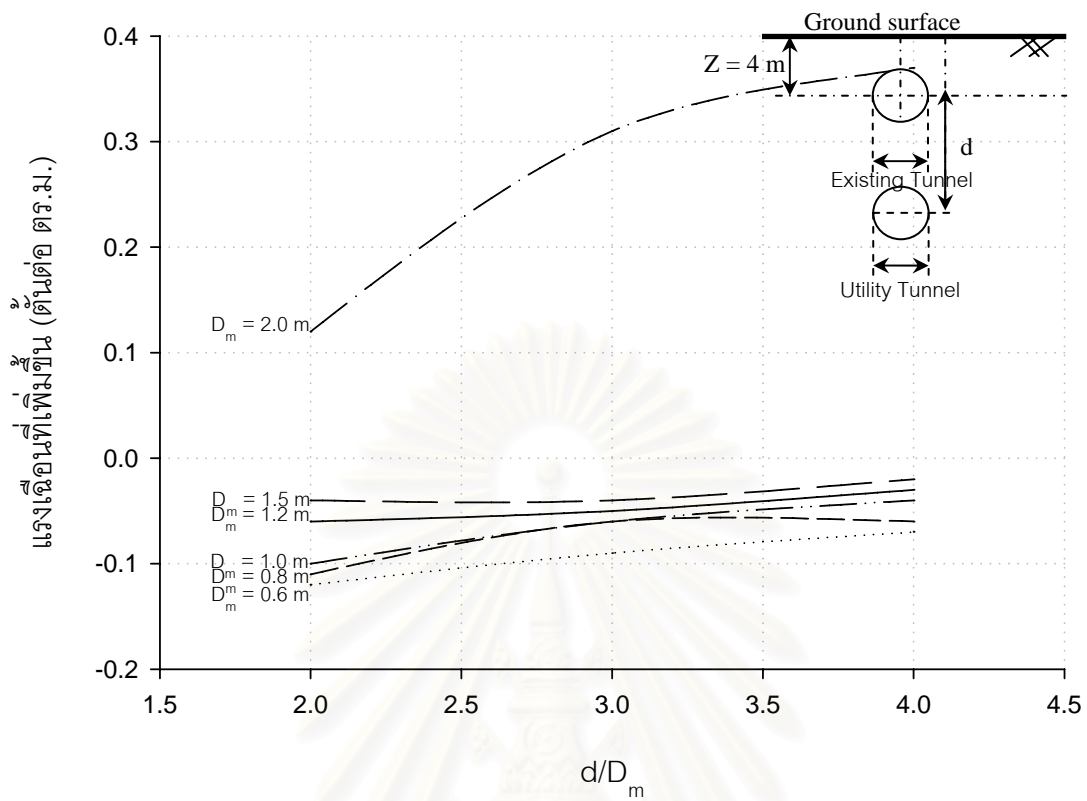
รูปที่ ก-4.2.1.1.2 การทูลดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5 D_m$



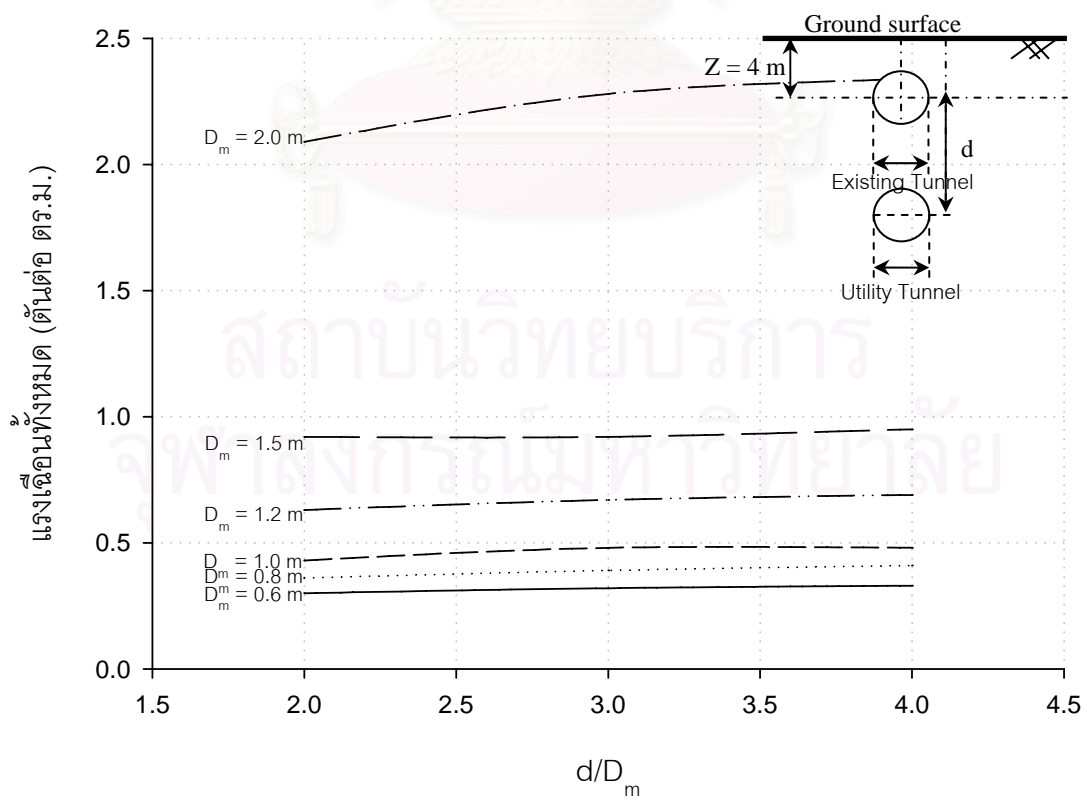
รูปที่ ก-4.2.1.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5D_m$



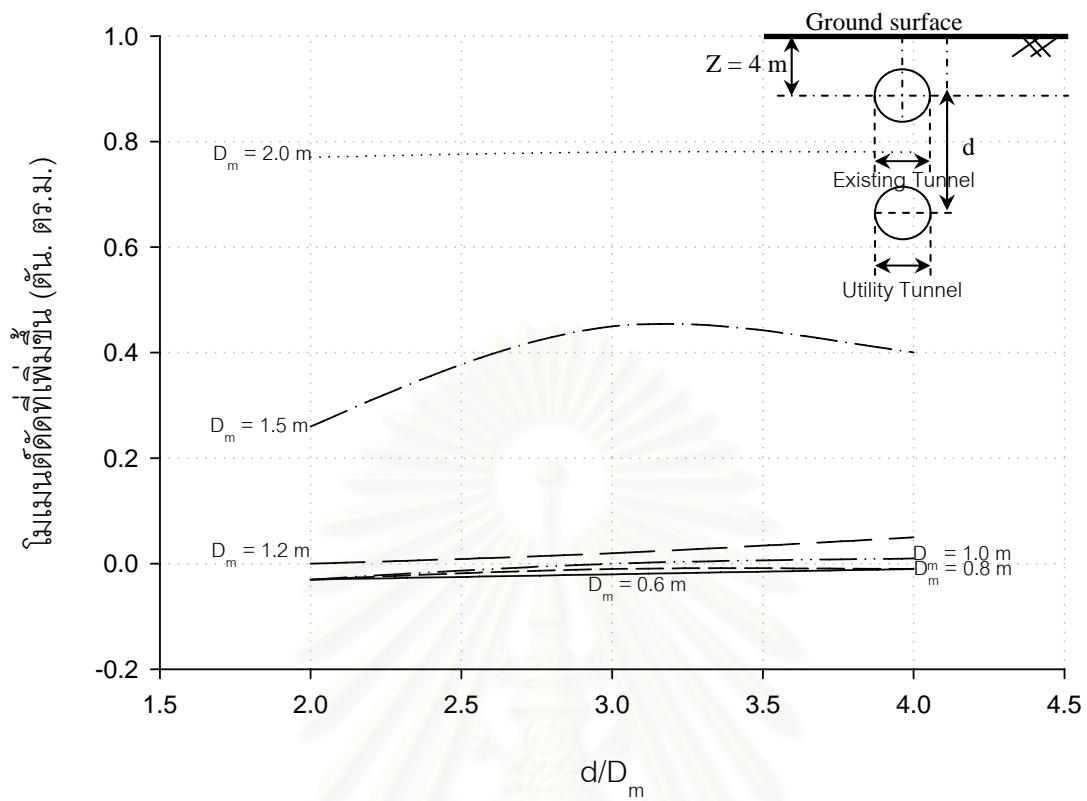
รูปที่ ก-4.2.1.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5D_m$



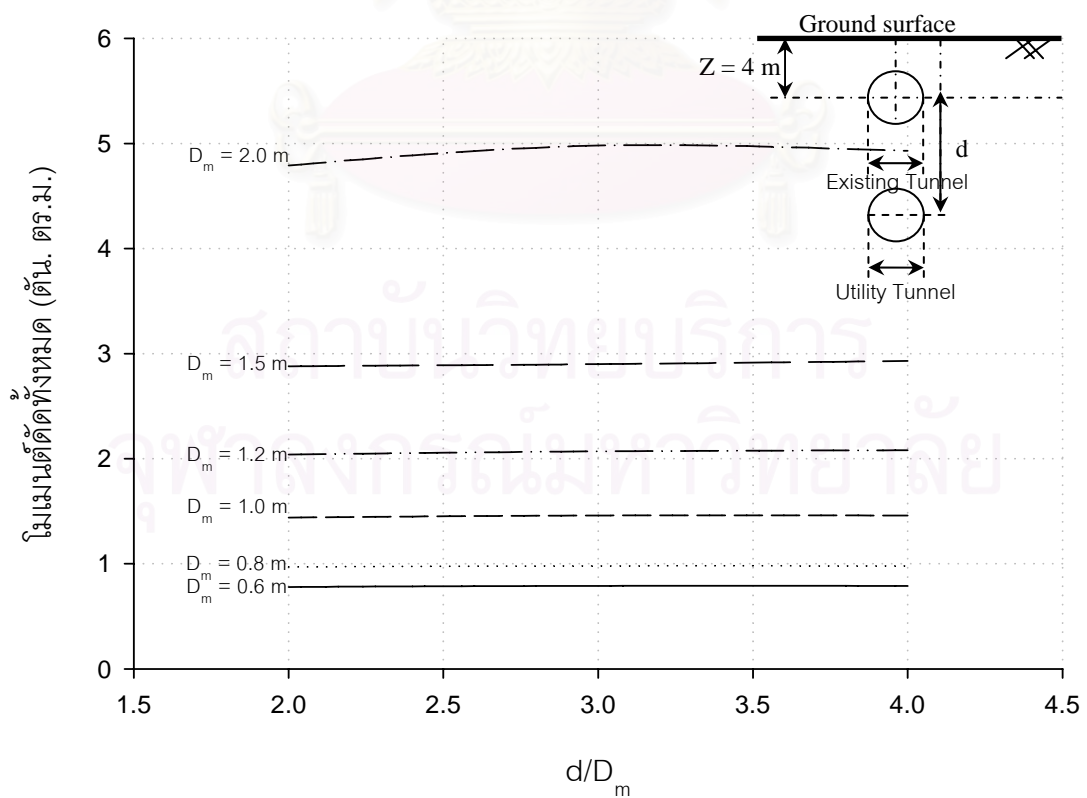
รูปที่ ก-4.2.1.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5 D_m$



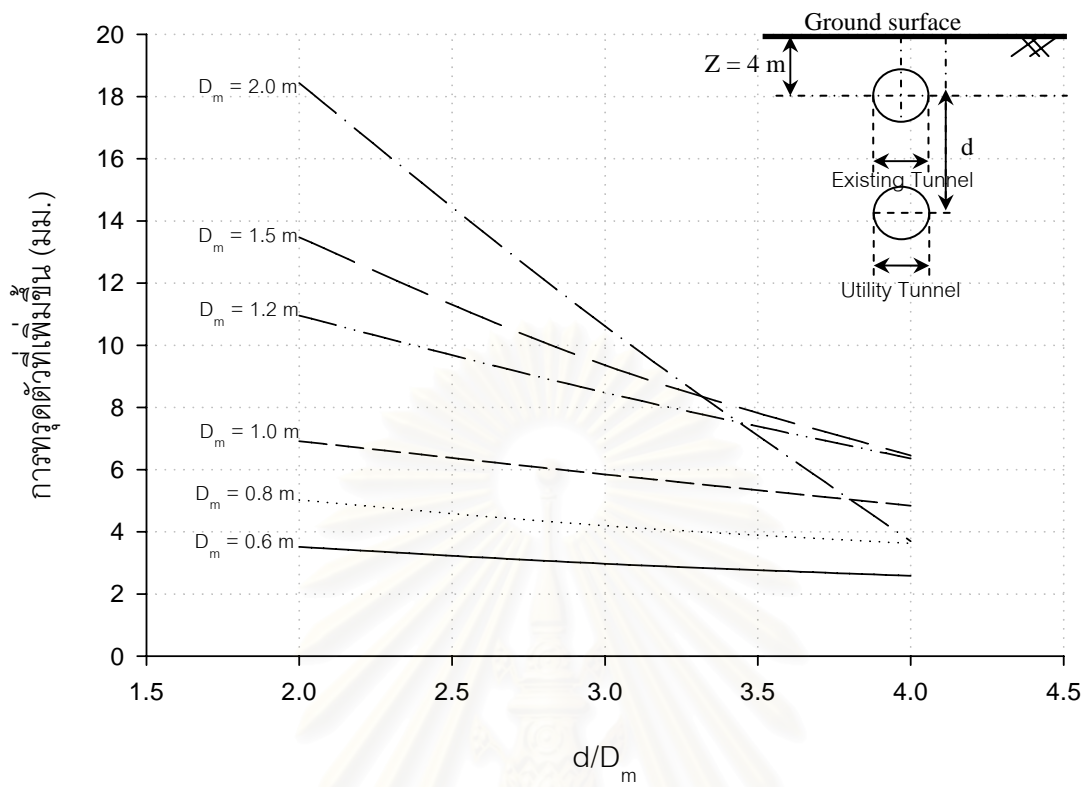
รูปที่ ก-4.2.1.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5 D_m$



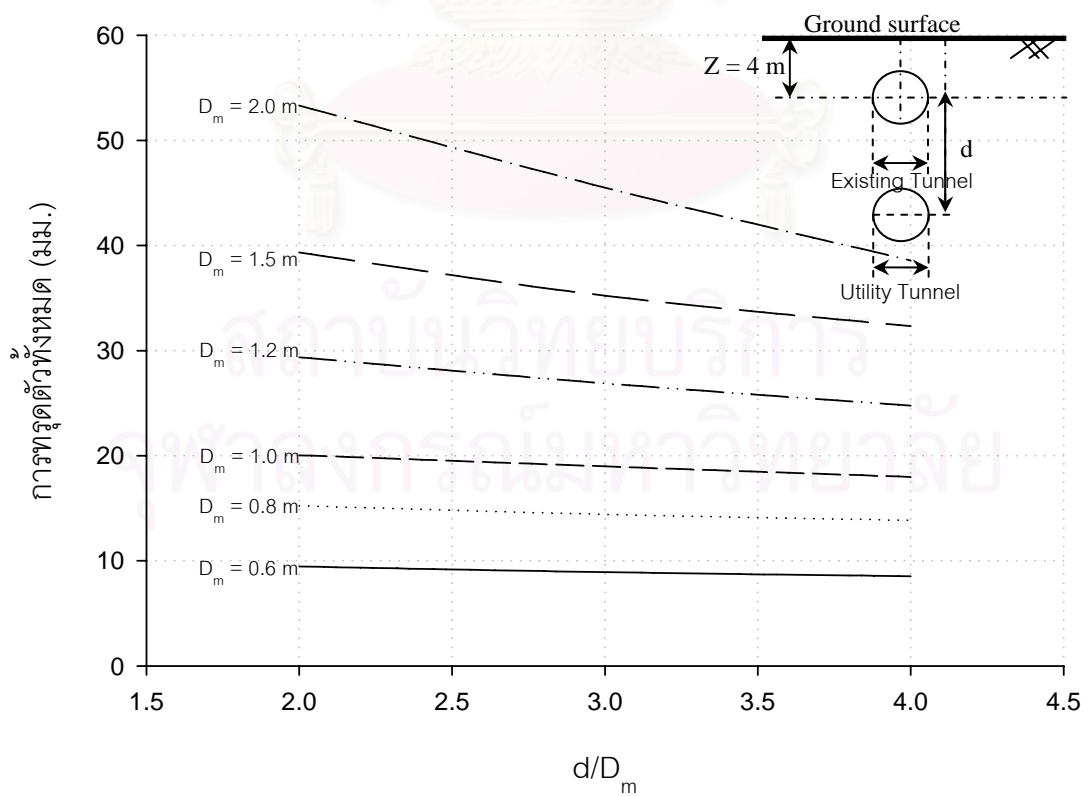
รูปที่ ก-4.2.1.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D=0.5D_m$



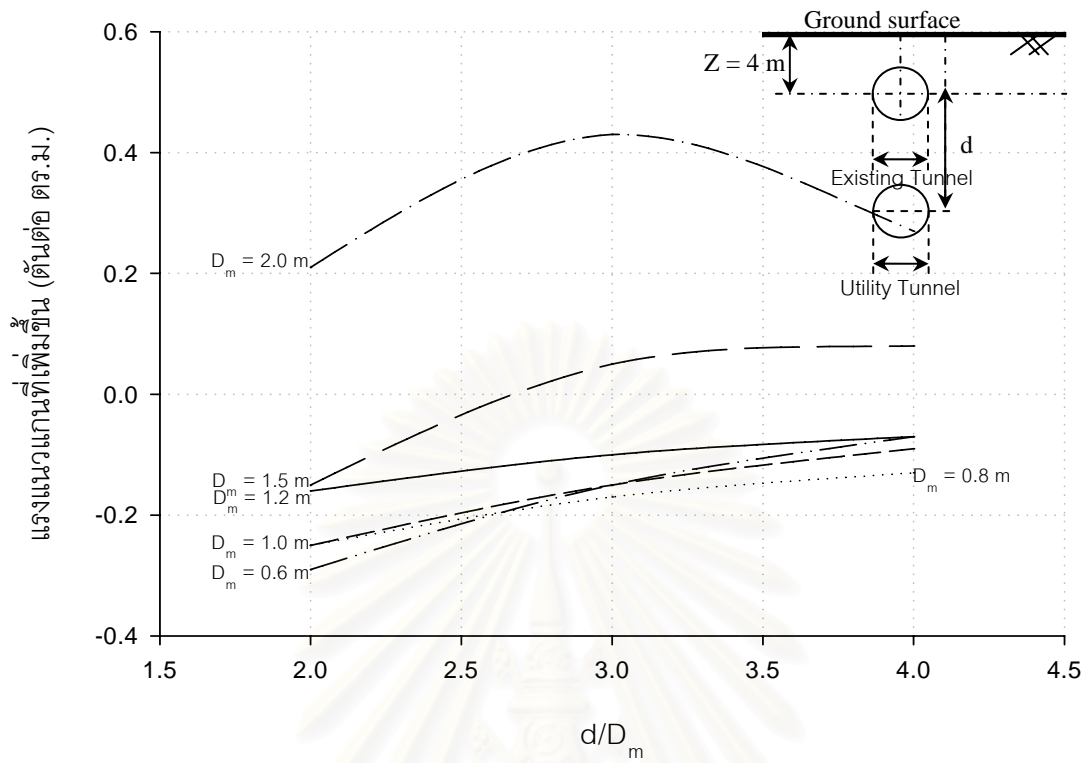
รูปที่ ก-4.2.1.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D=0.5D_m$



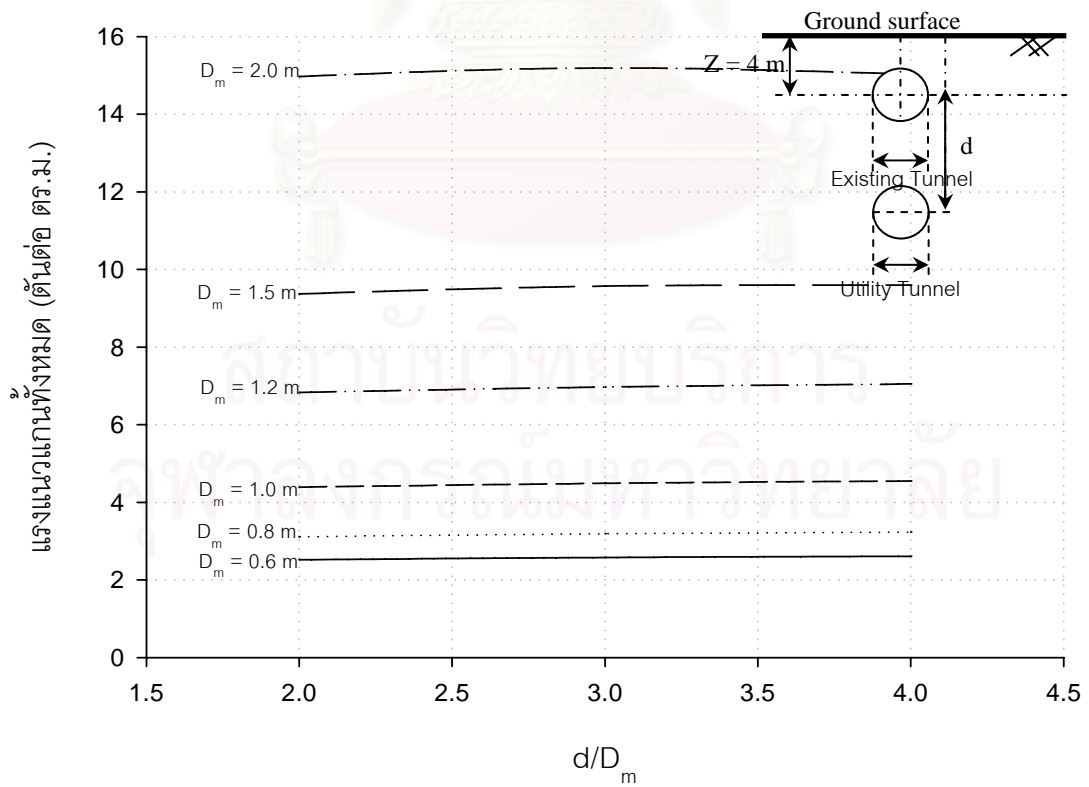
รูปที่ ก-4.2.2.1.1 การท่อดัดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



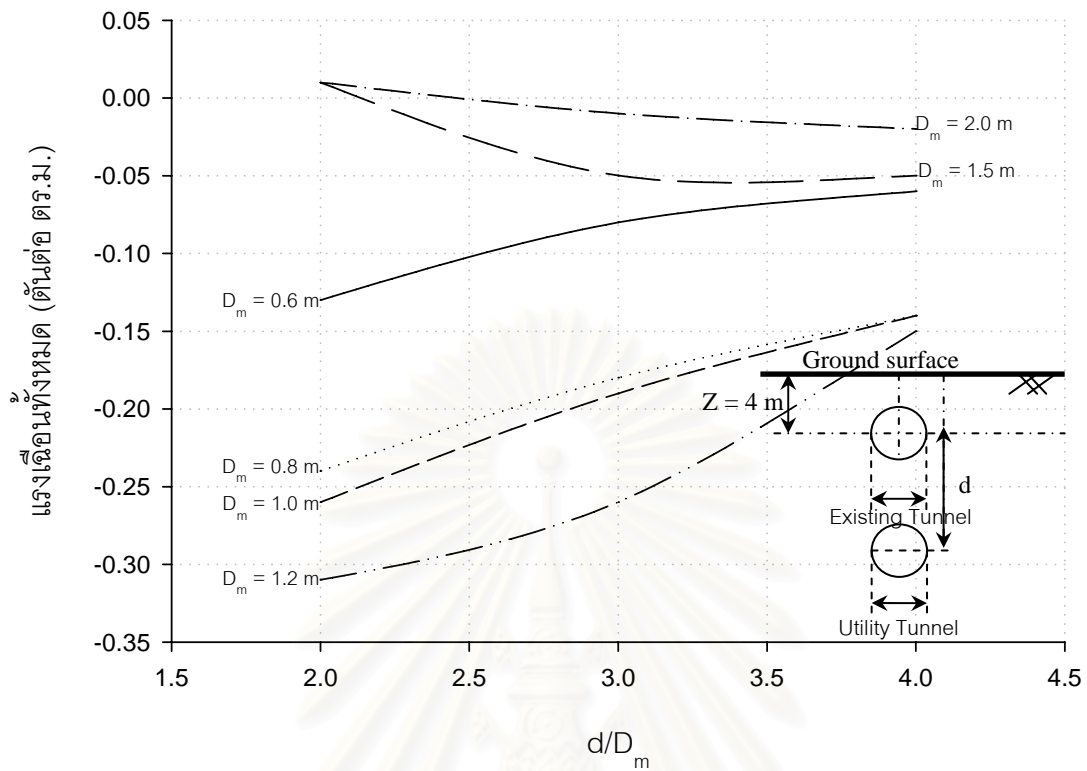
รูปที่ ก-4.2.2.1.2 การท่อดัดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



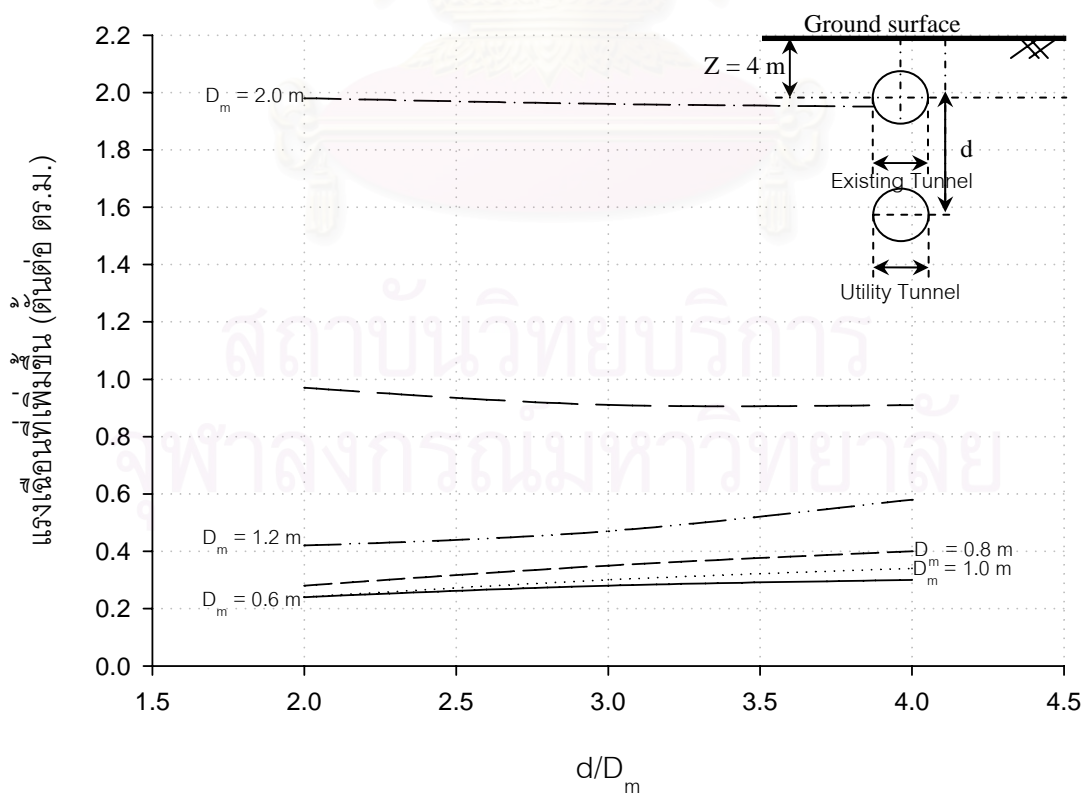
รูปที่ ก-4.2.2.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



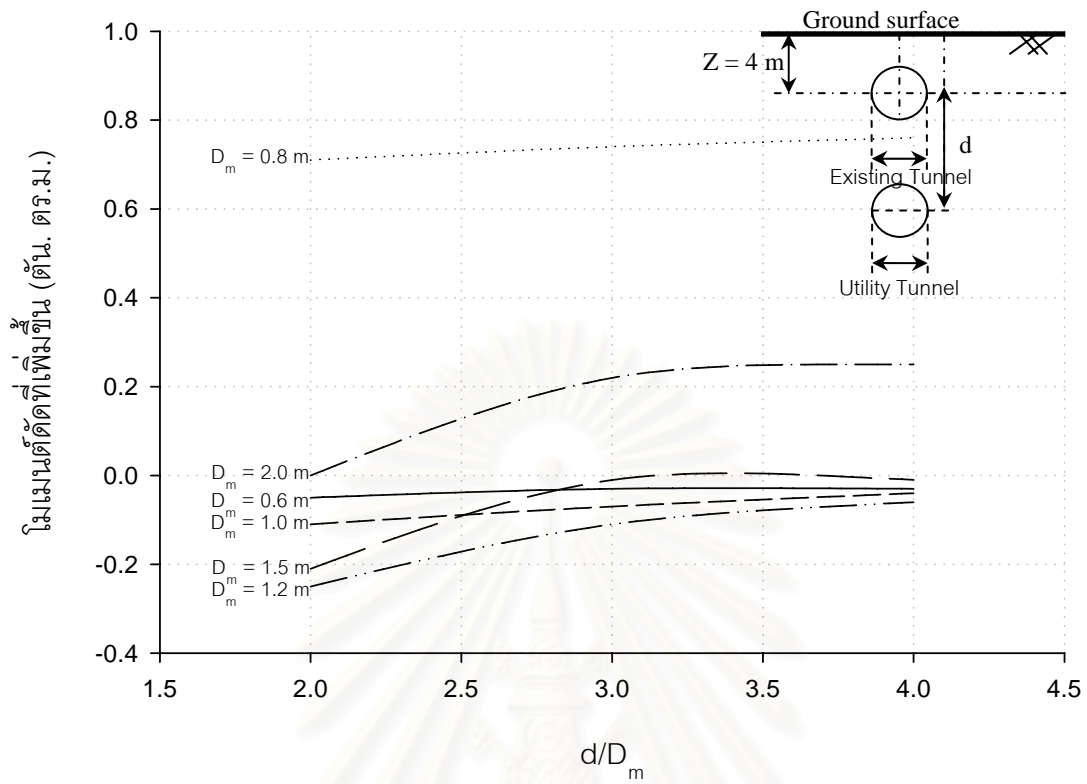
รูปที่ ก-4.2.2.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



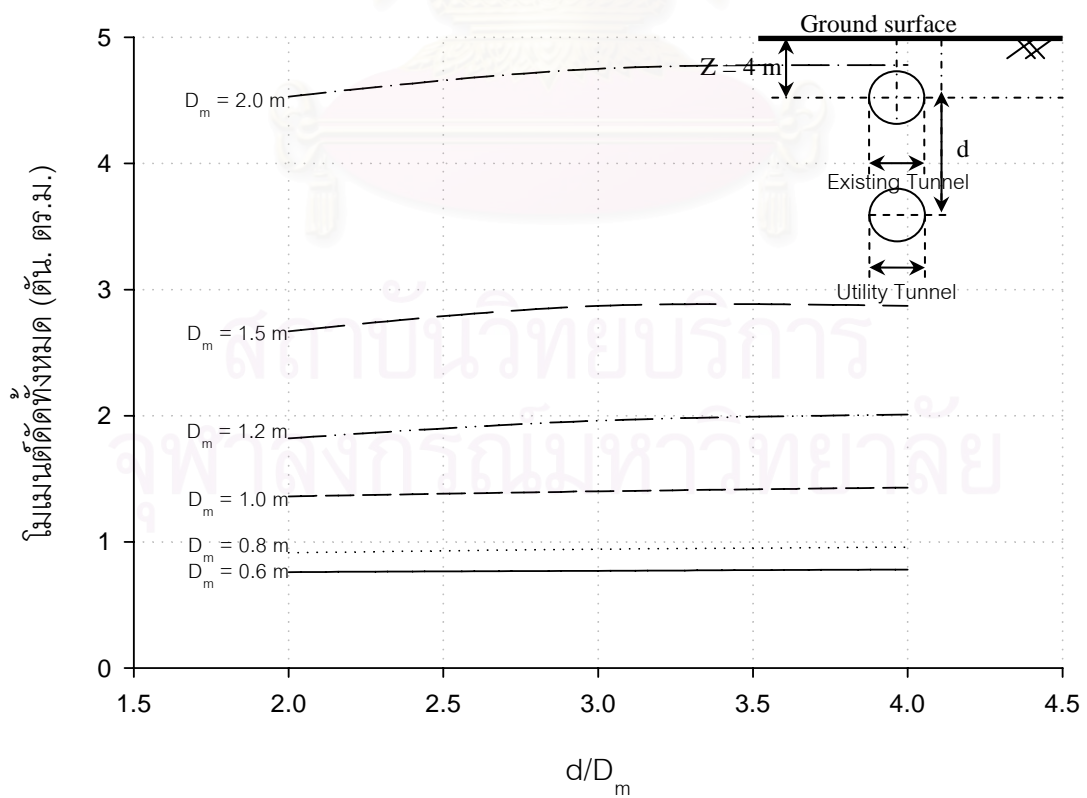
รูปที่ ก-4.2.2.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



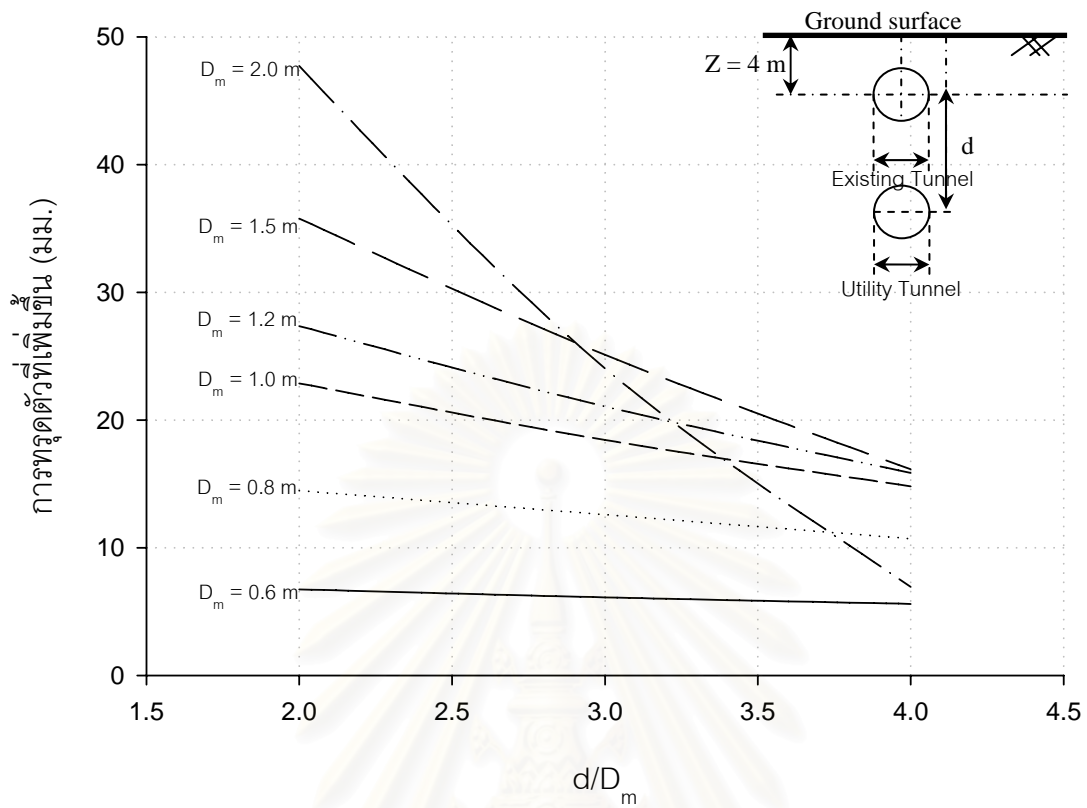
รูปที่ ก-4.2.2.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



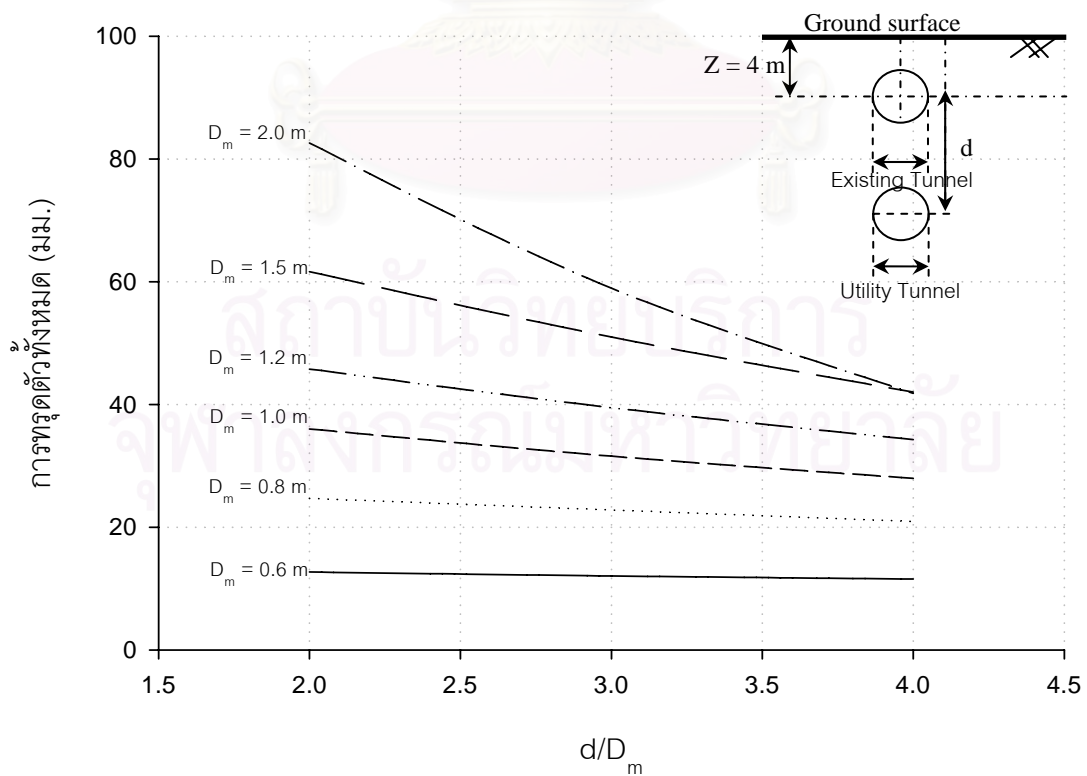
รูปที่ ก-4.2.2.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



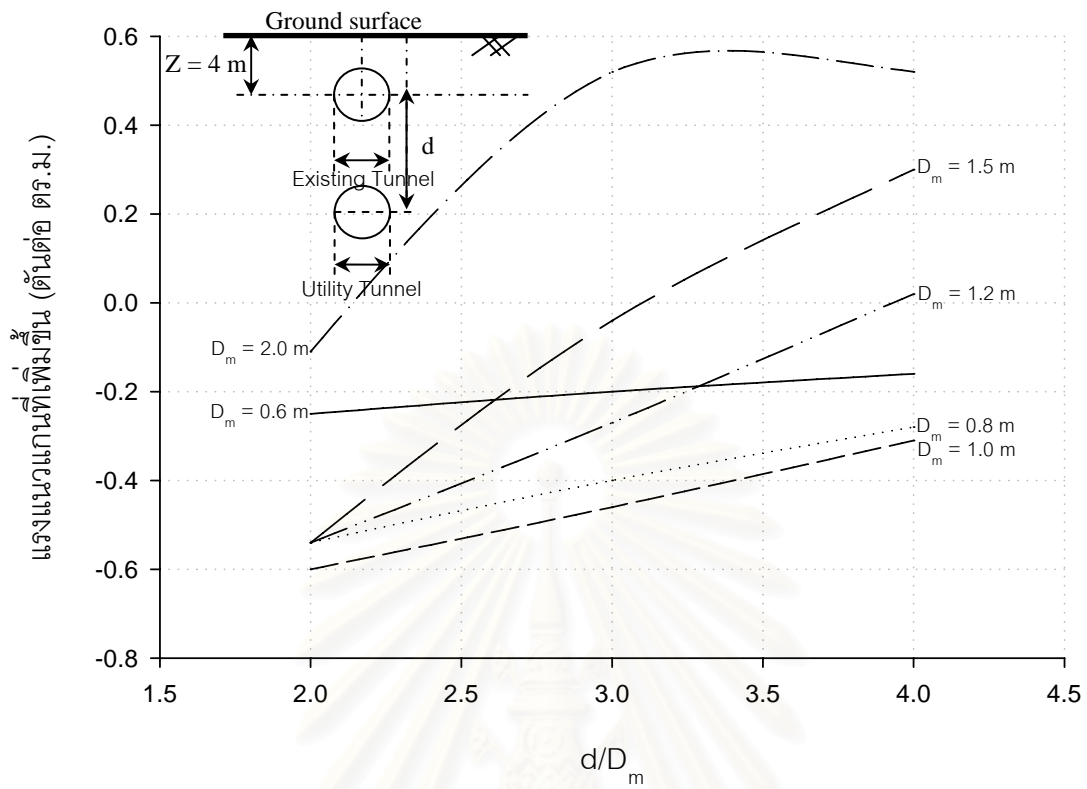
รูปที่ ก-4.2.2.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



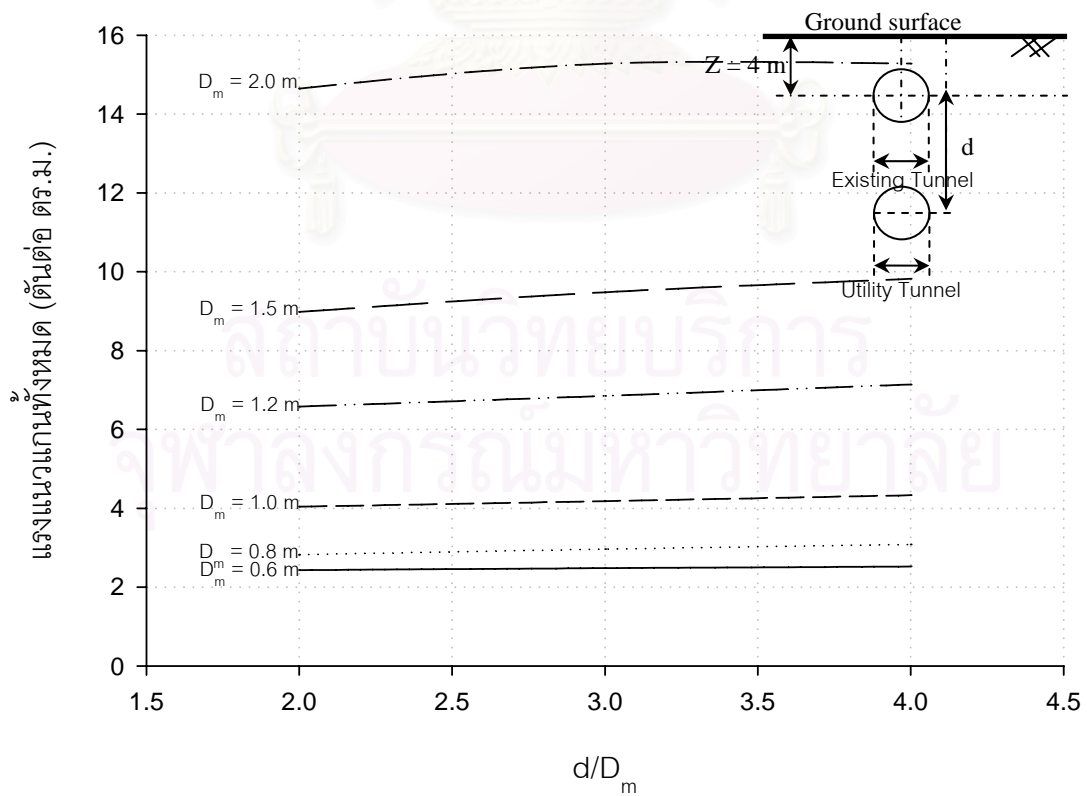
รูปที่ ก-4.2.3.1.1 การทูลดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



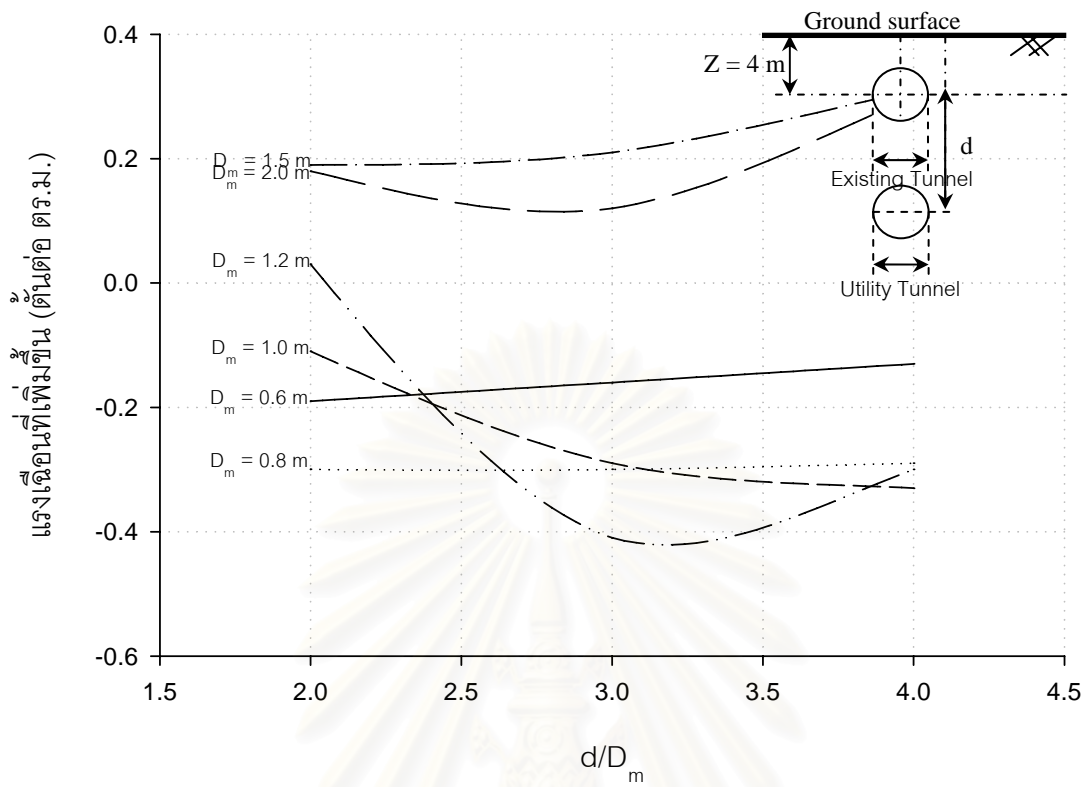
รูปที่ ก-4.2.3.1.2 การทูลดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



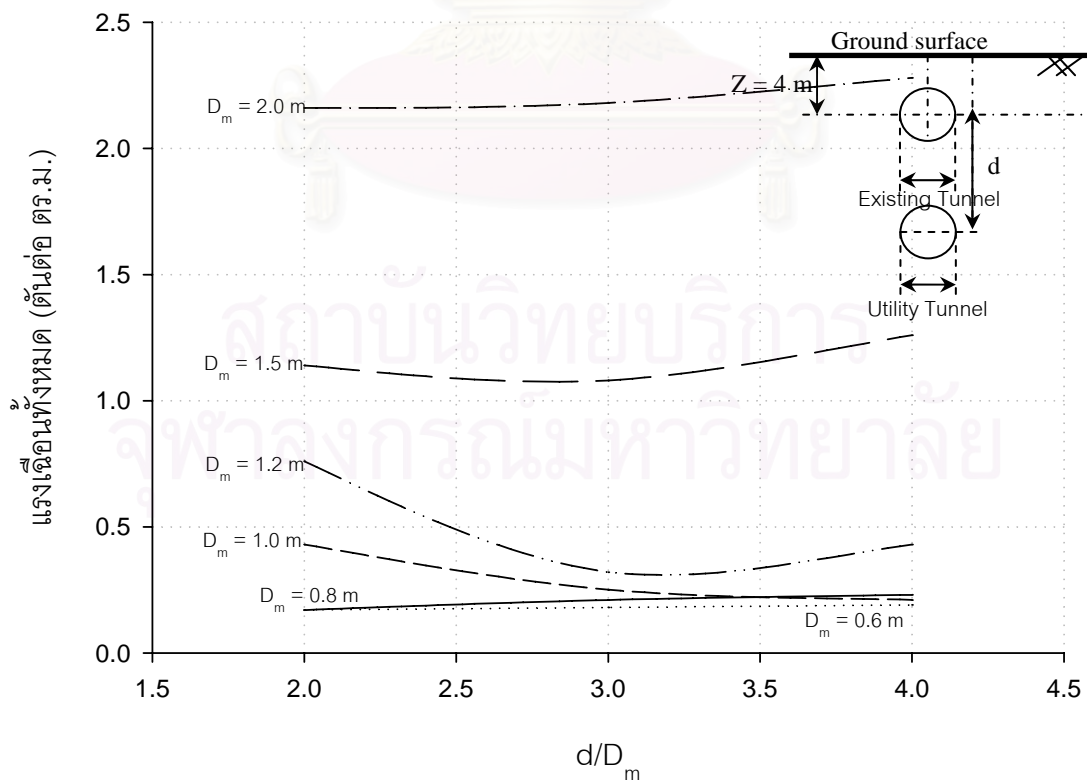
รูปที่ ก-4.2.3.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



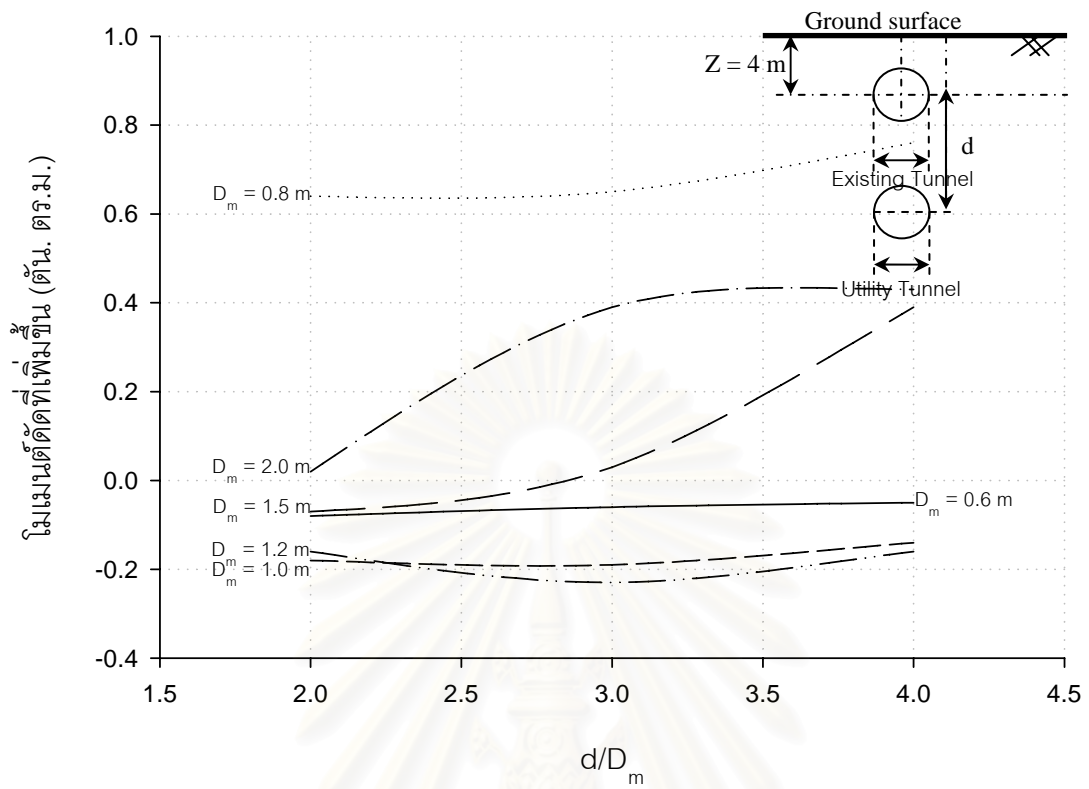
รูปที่ ก-4.2.3.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



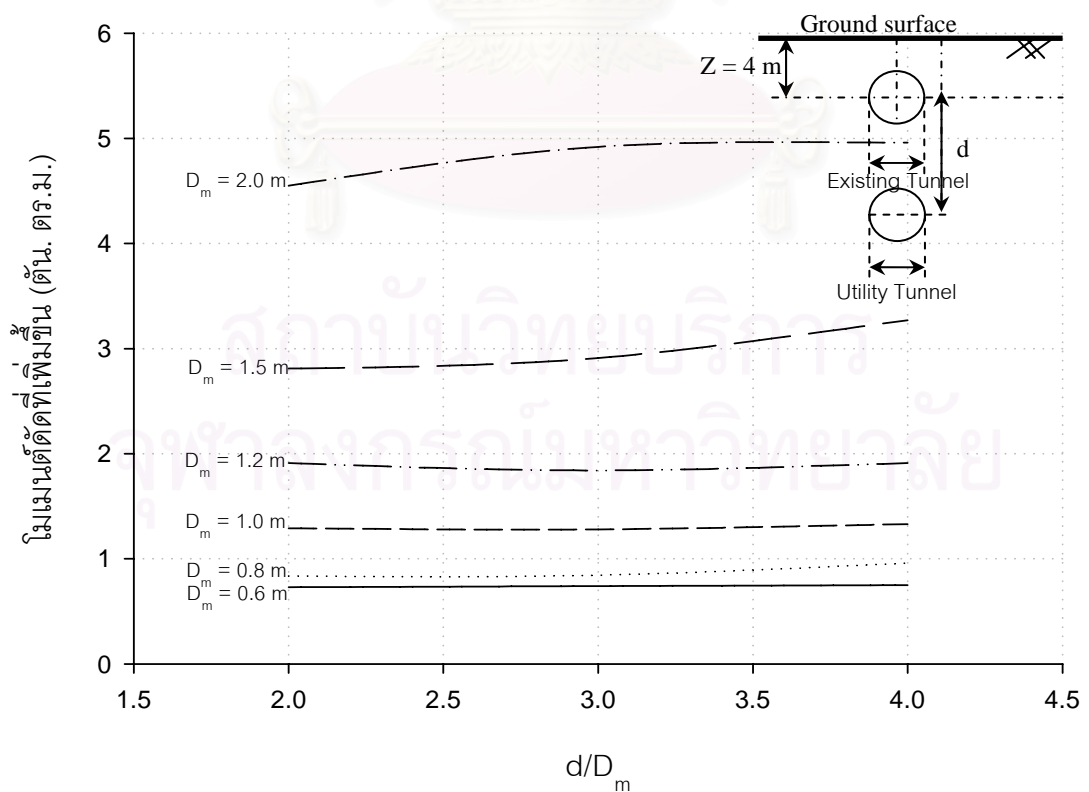
รูปที่ ก-4.2.3.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



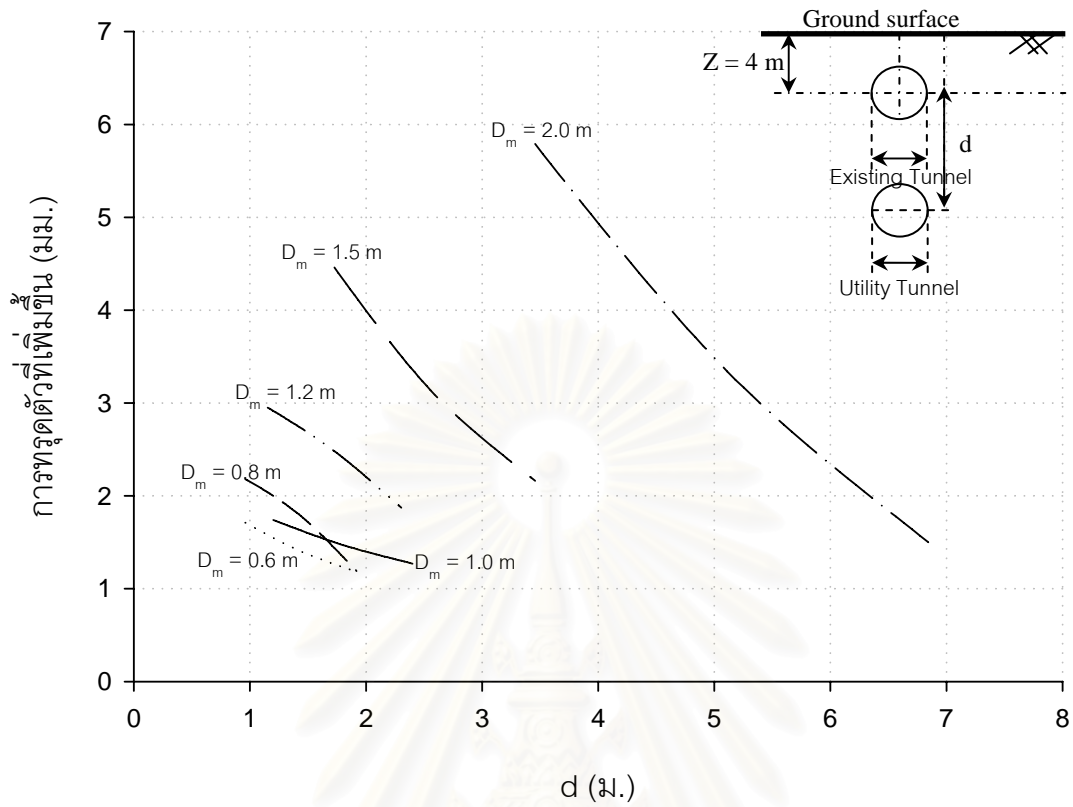
รูปที่ ก-4.2.3.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



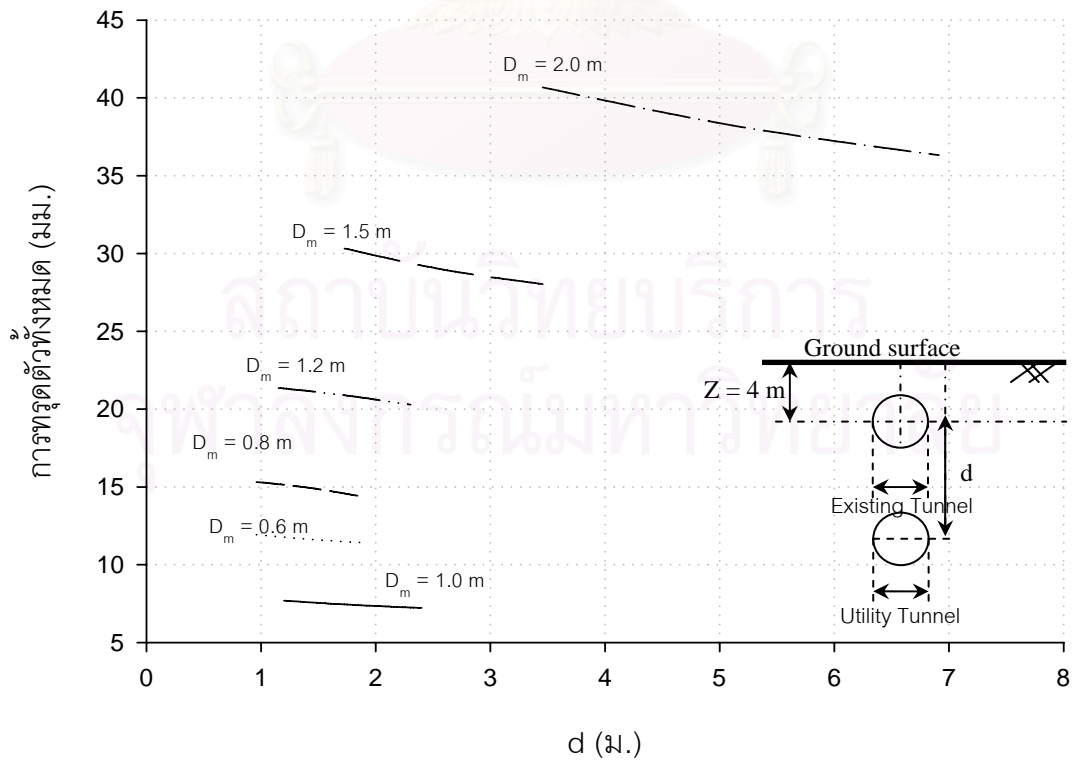
รูปที่ ก-4.2.3.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



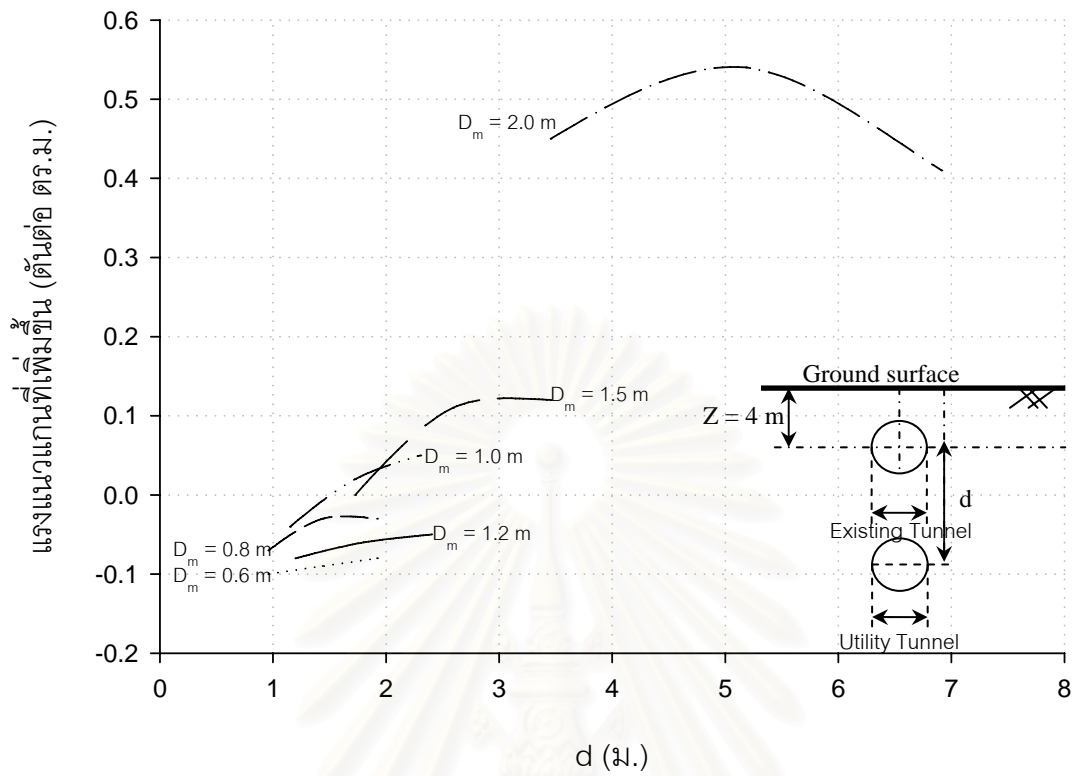
รูปที่ ก-4.2.3.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



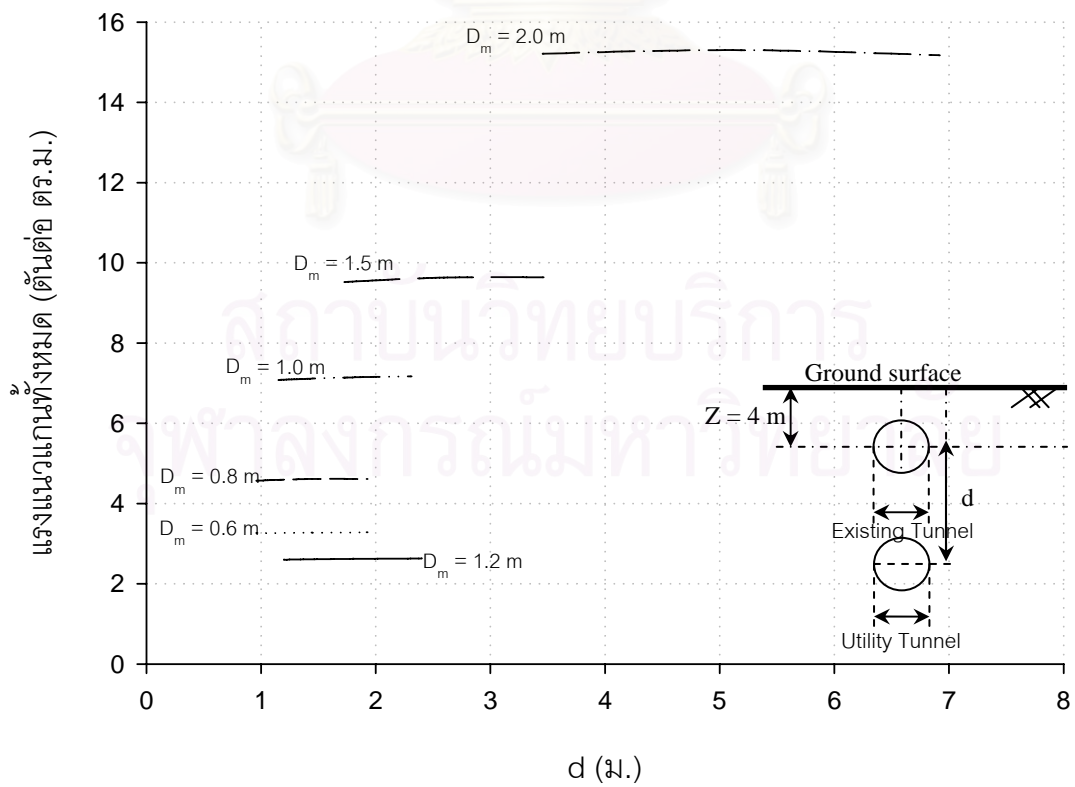
รูปที่ ก-4.2.4.1.1 การท่อดูตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5D_m$



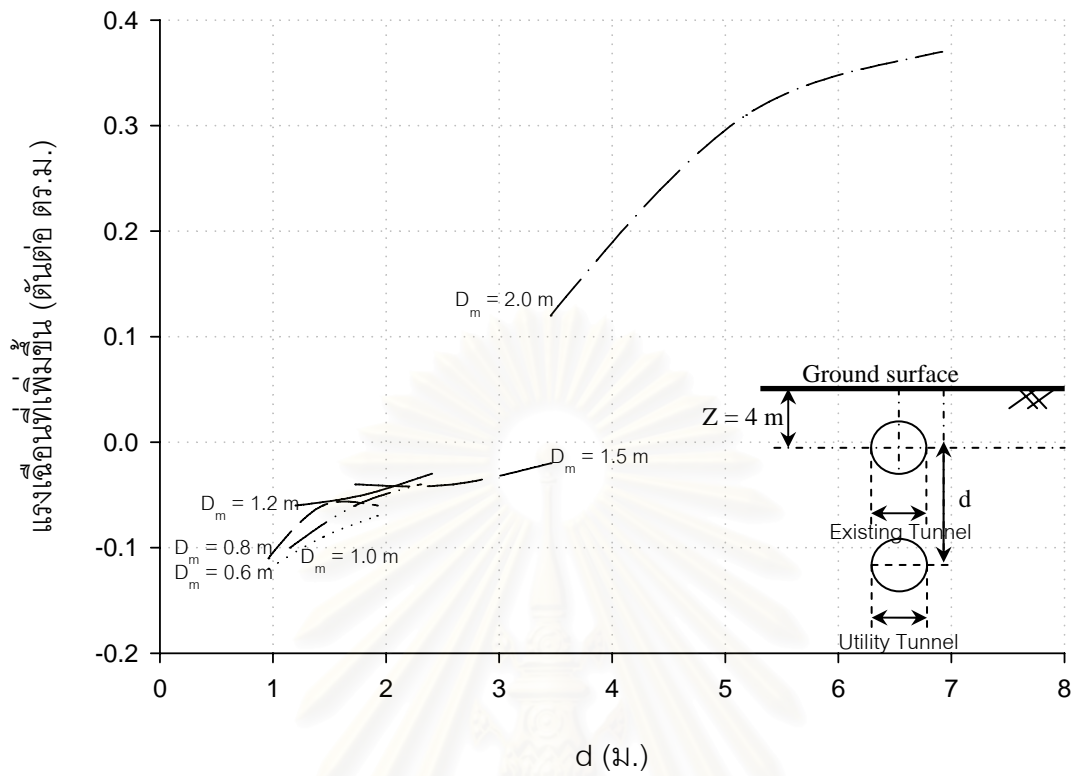
รูปที่ ก-4.2.4.1.2 การท่อดูตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5D_m$



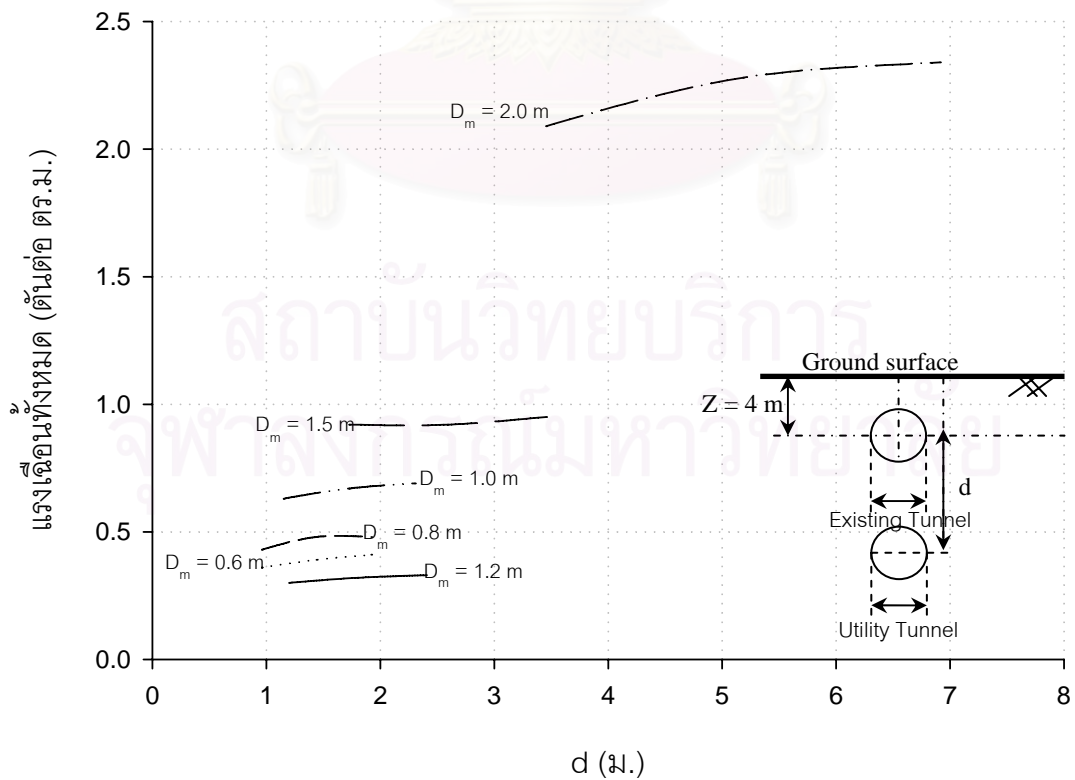
รูปที่ ก-4.2.4.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5D_m$



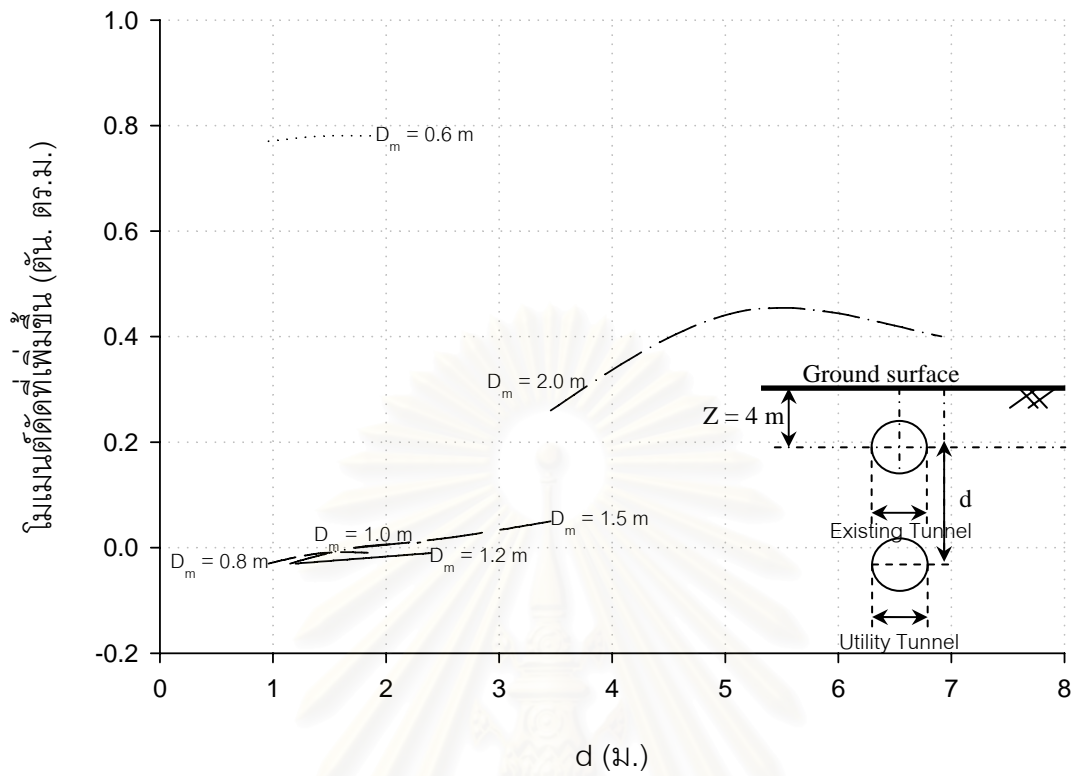
รูปที่ ก-4.2.4.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5D_m$



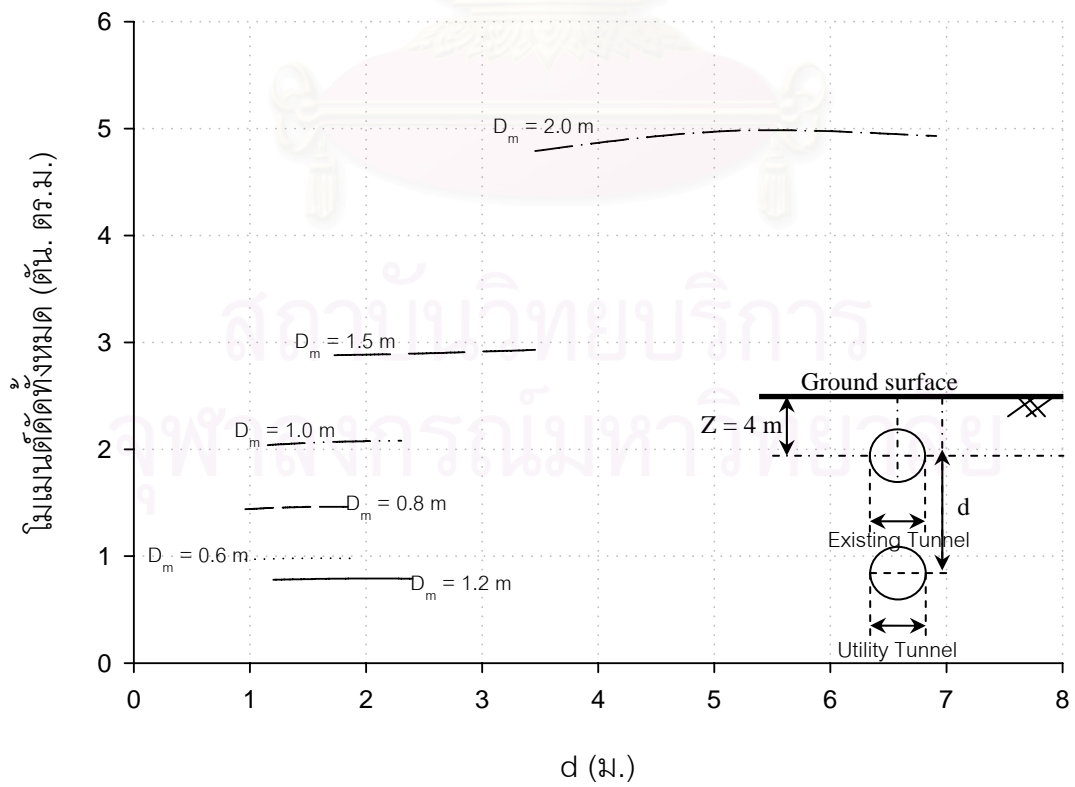
รูปที่ ก-4.2.4.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5 D_m$



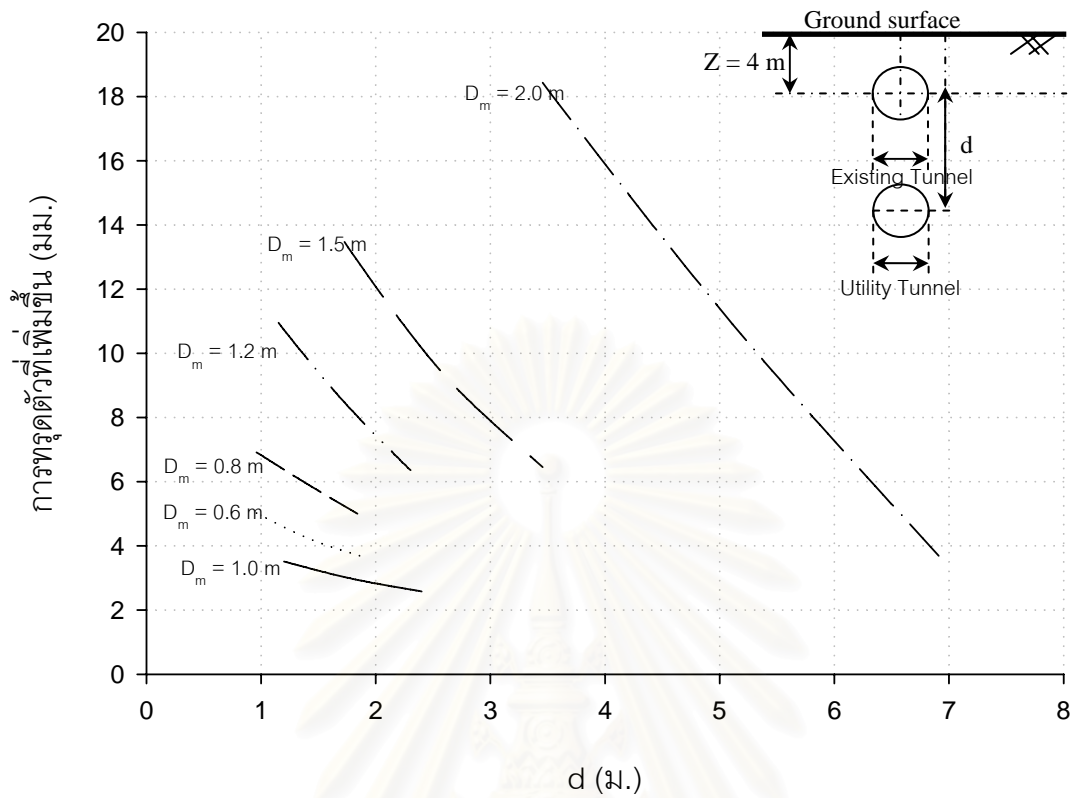
รูปที่ ก-4.2.4.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 0.5 D_m$



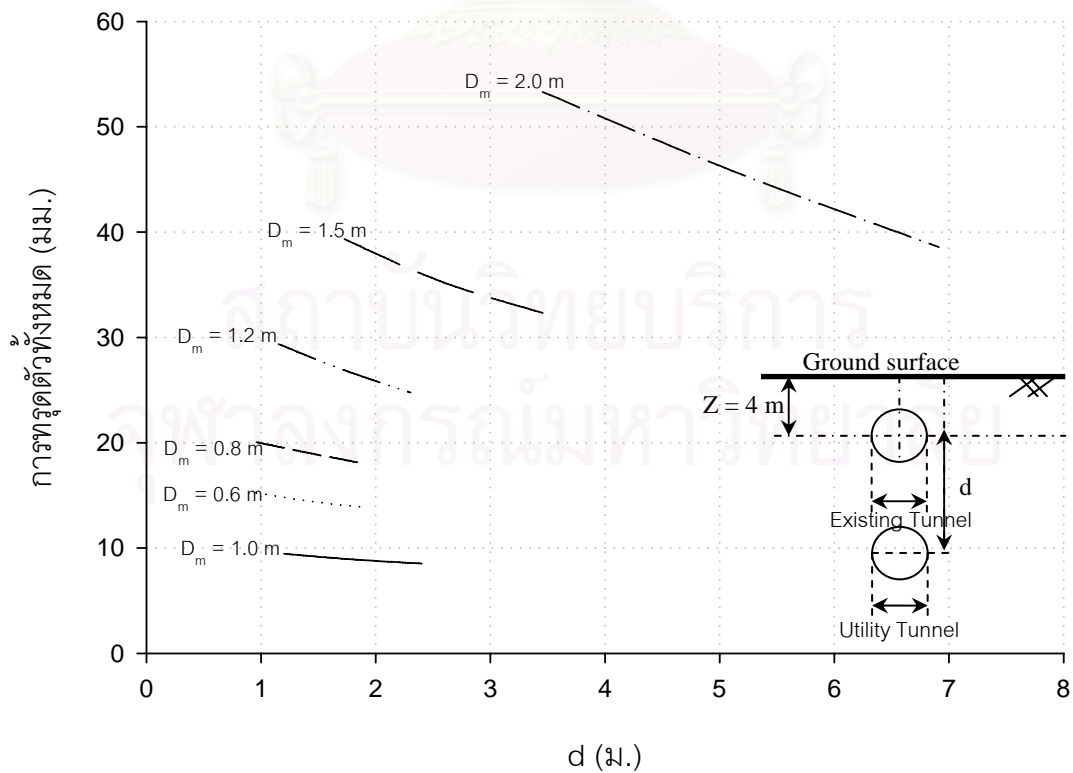
รูปที่ ก-4.2.4.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D=0.5D_m$



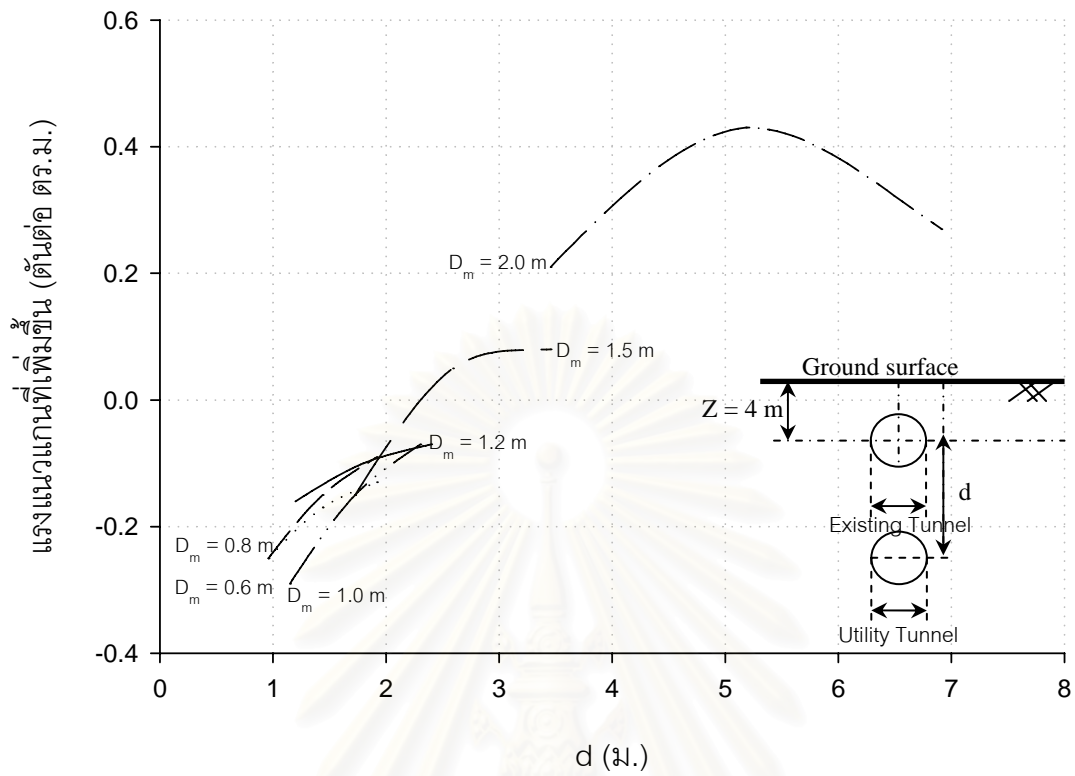
รูปที่ ก-4.2.4.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D=0.5D_m$



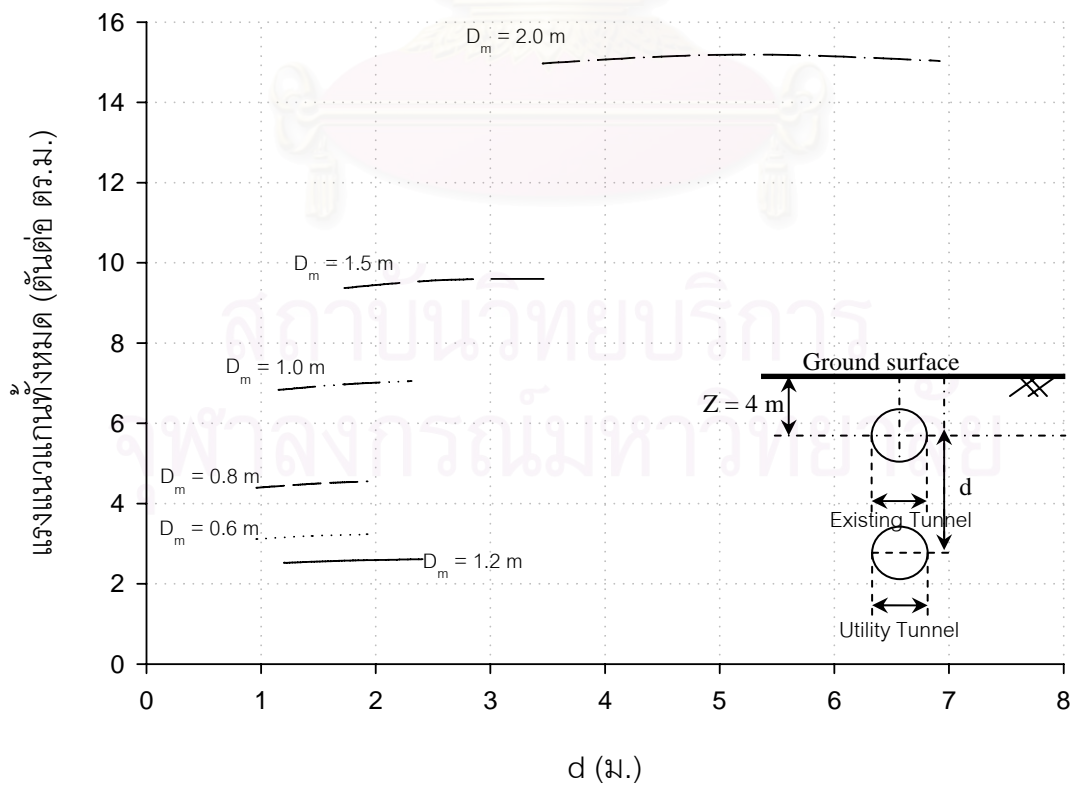
รูปที่ ก-4.2.5.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



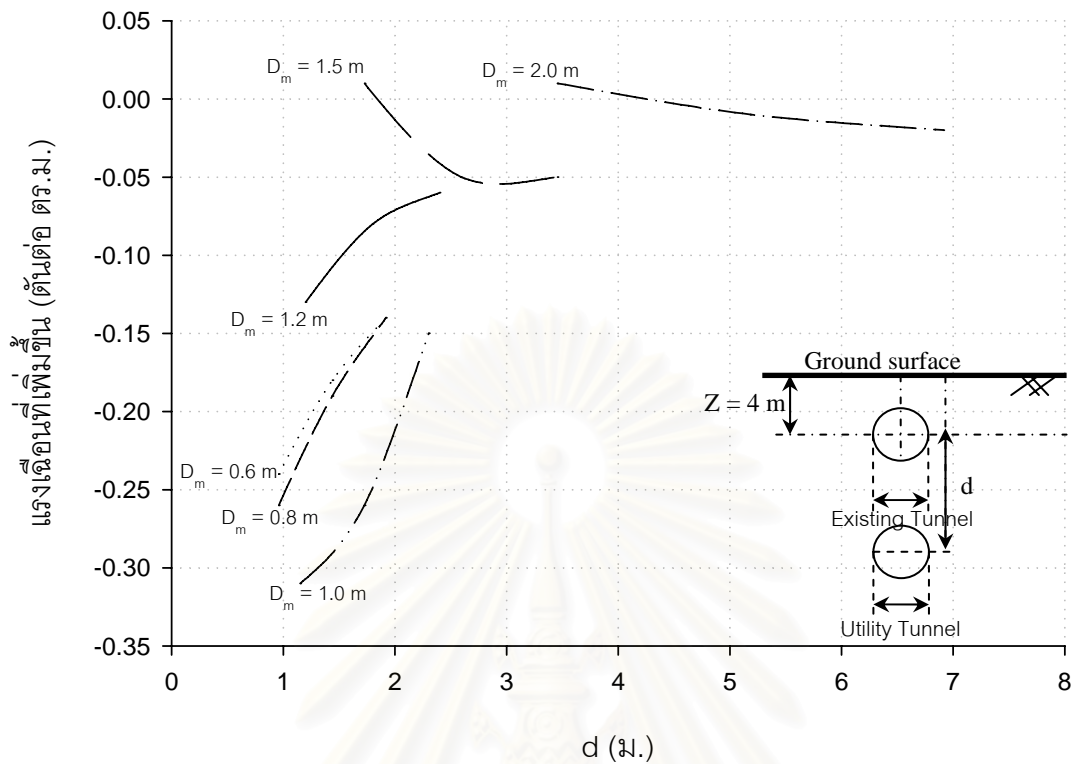
รูปที่ ก-4.2.5.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



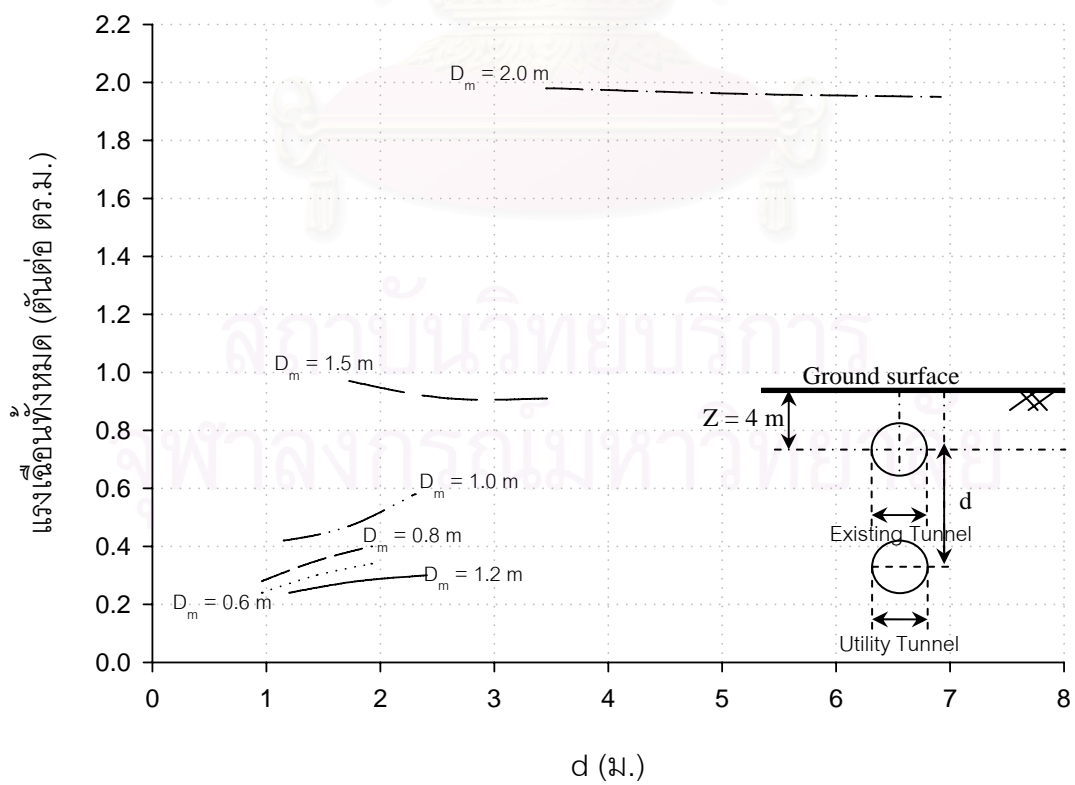
รูปที่ ก-4.2.5.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



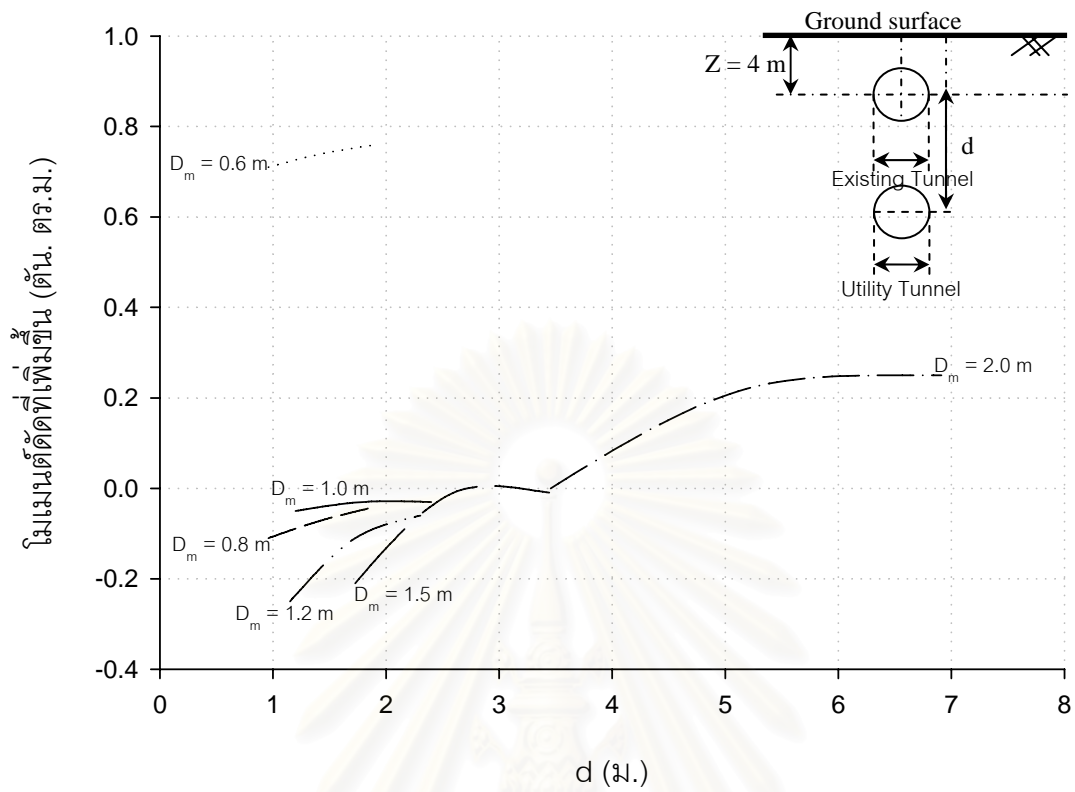
รูปที่ ก-4.2.5.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันลดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



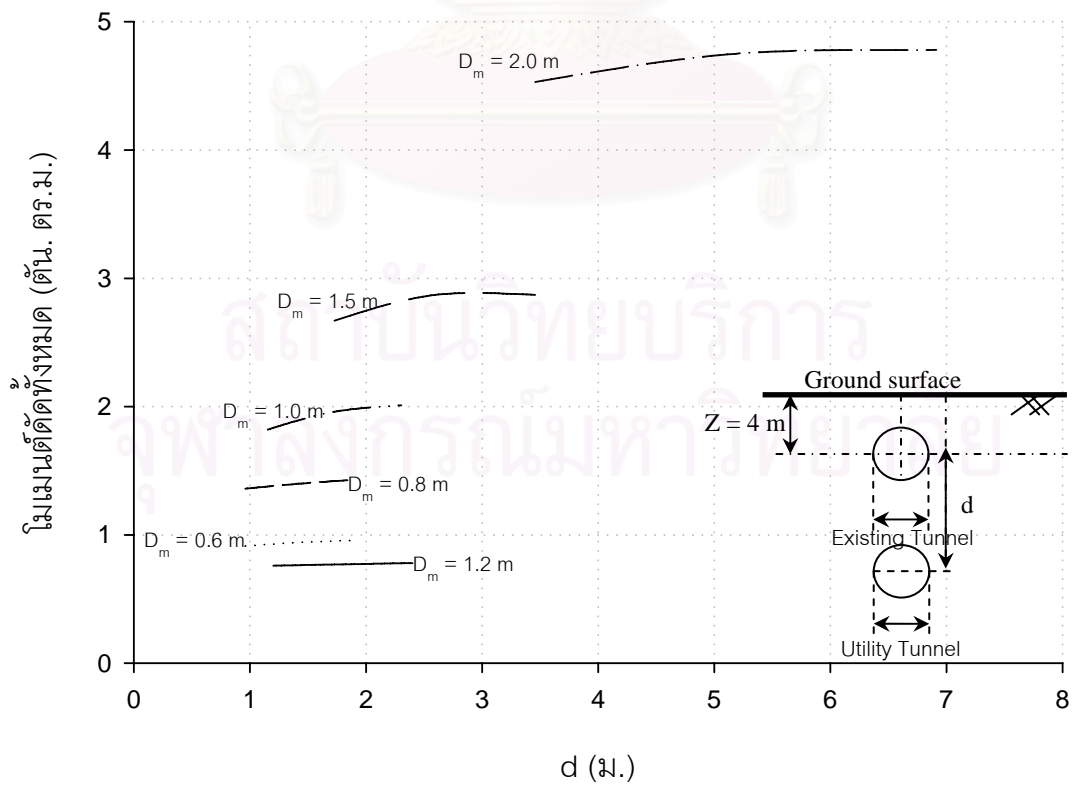
รูปที่ ก-4.2.5.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



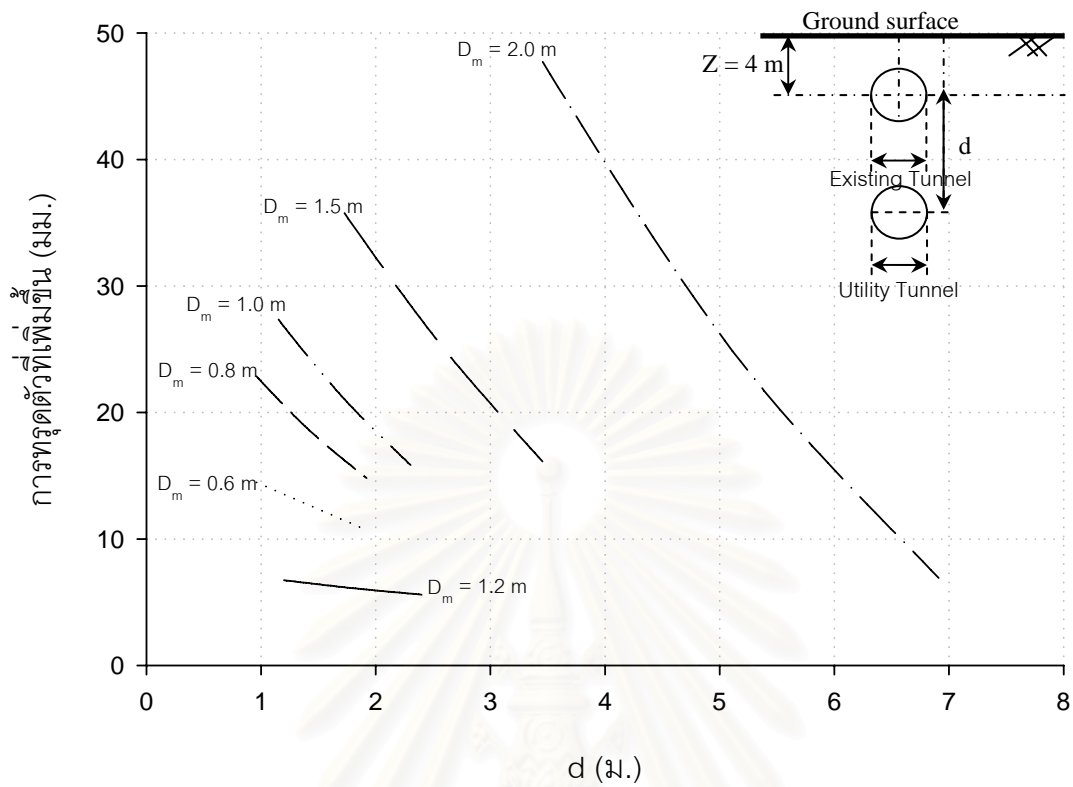
รูปที่ ก-4.2.5.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



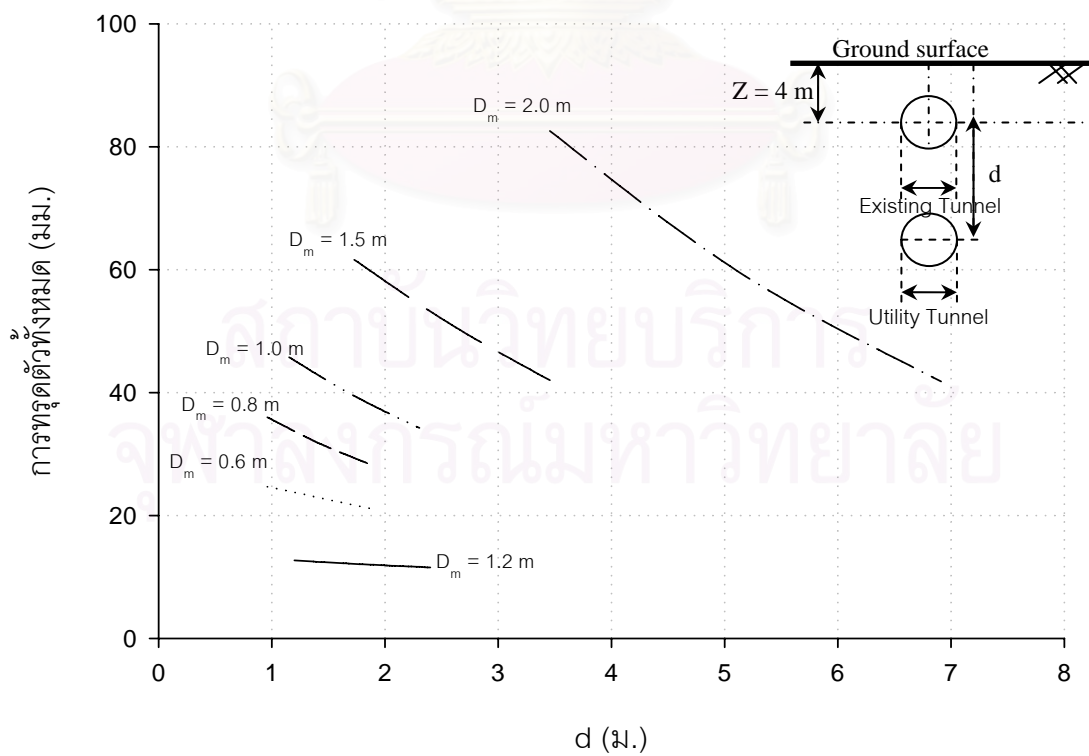
รูปที่ ก-4.2.5.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



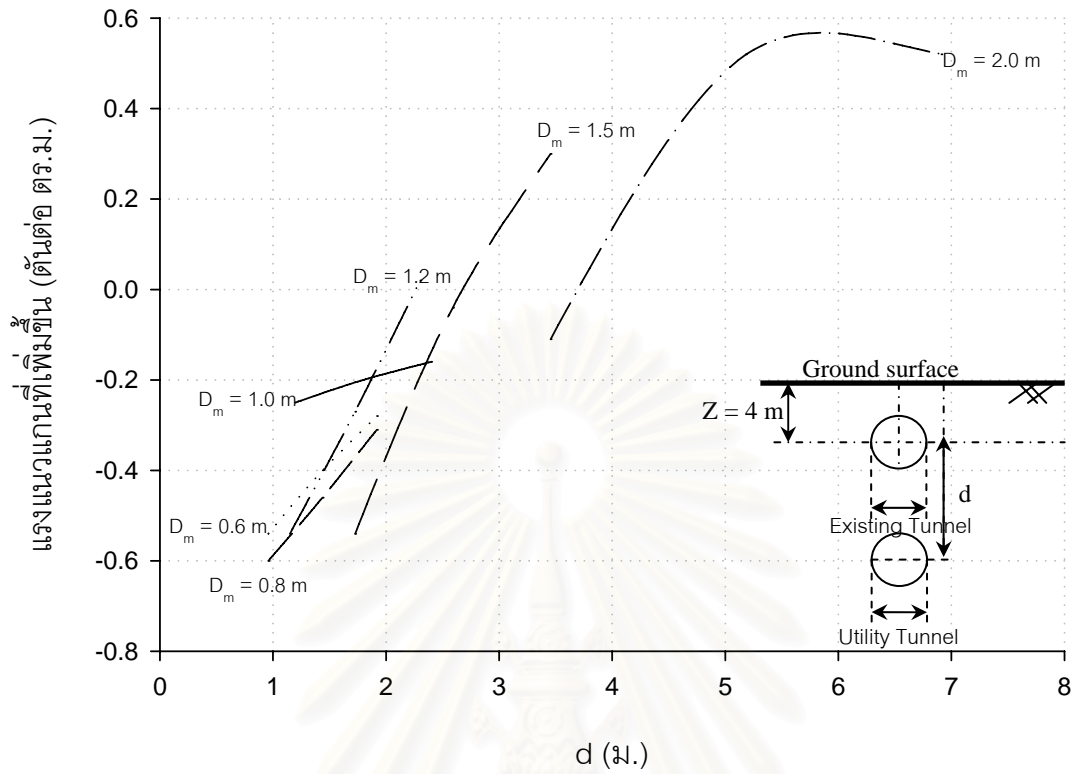
รูปที่ ก-4.2.5.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = D_m$



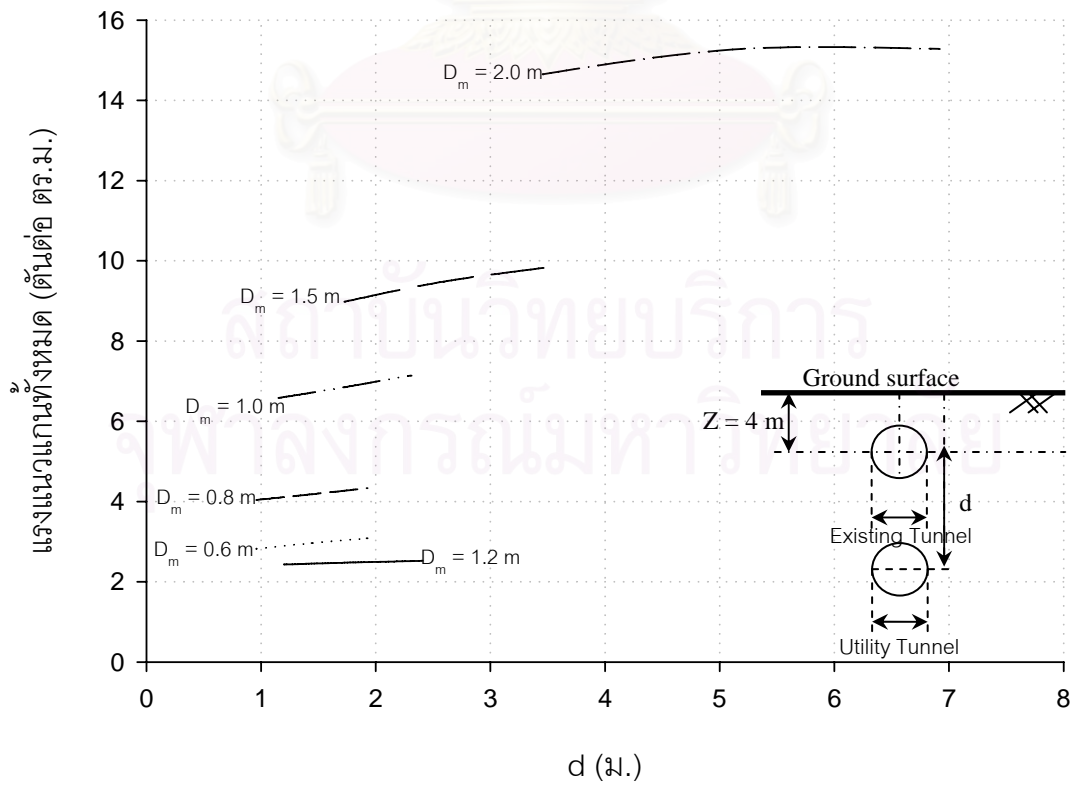
รูปที่ ก-4.2.6.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



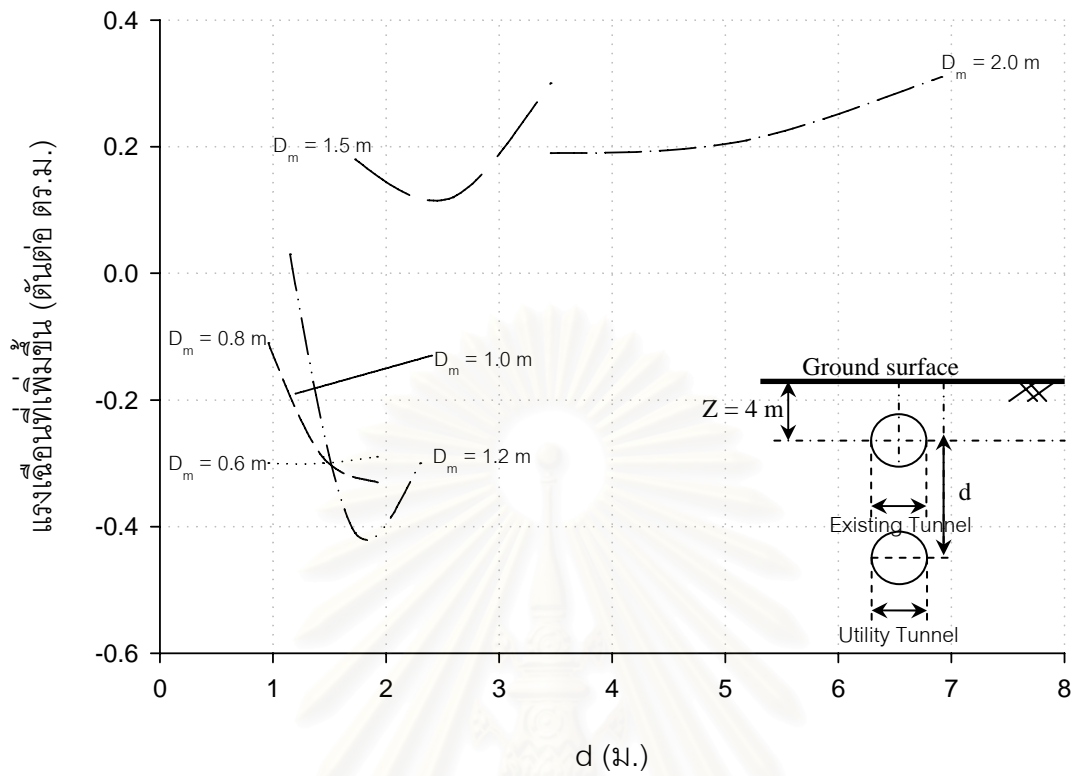
รูปที่ ก-4.2.6.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



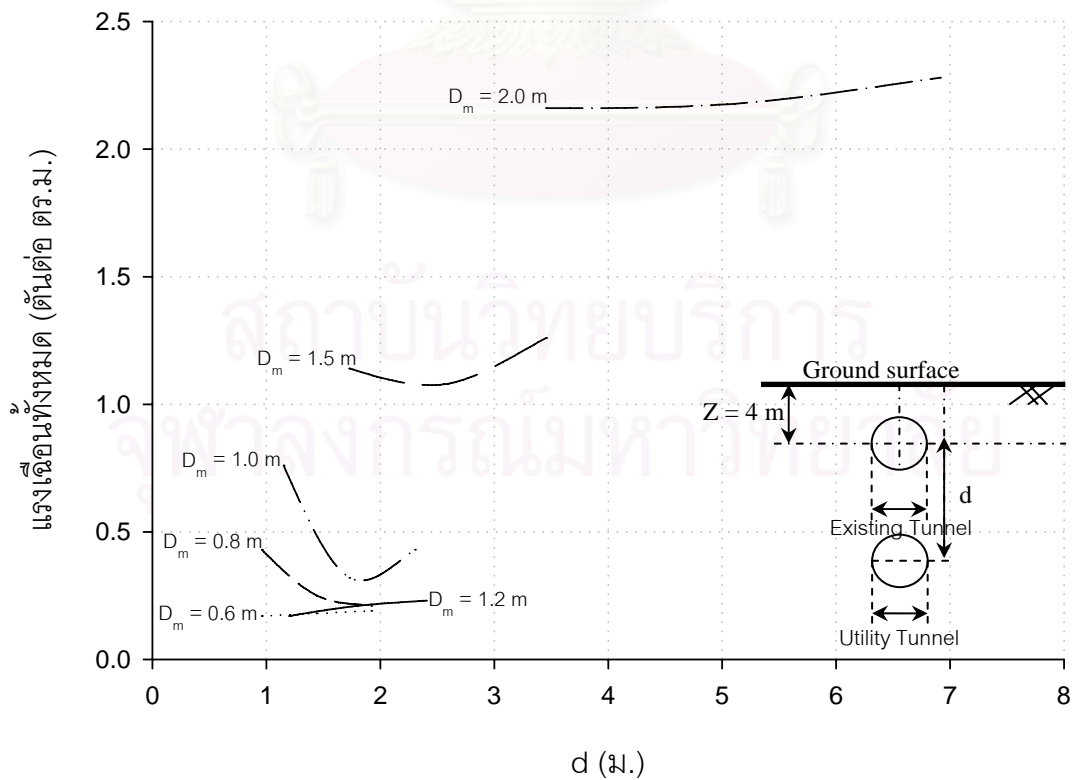
รูปที่ ก-4.2.6.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



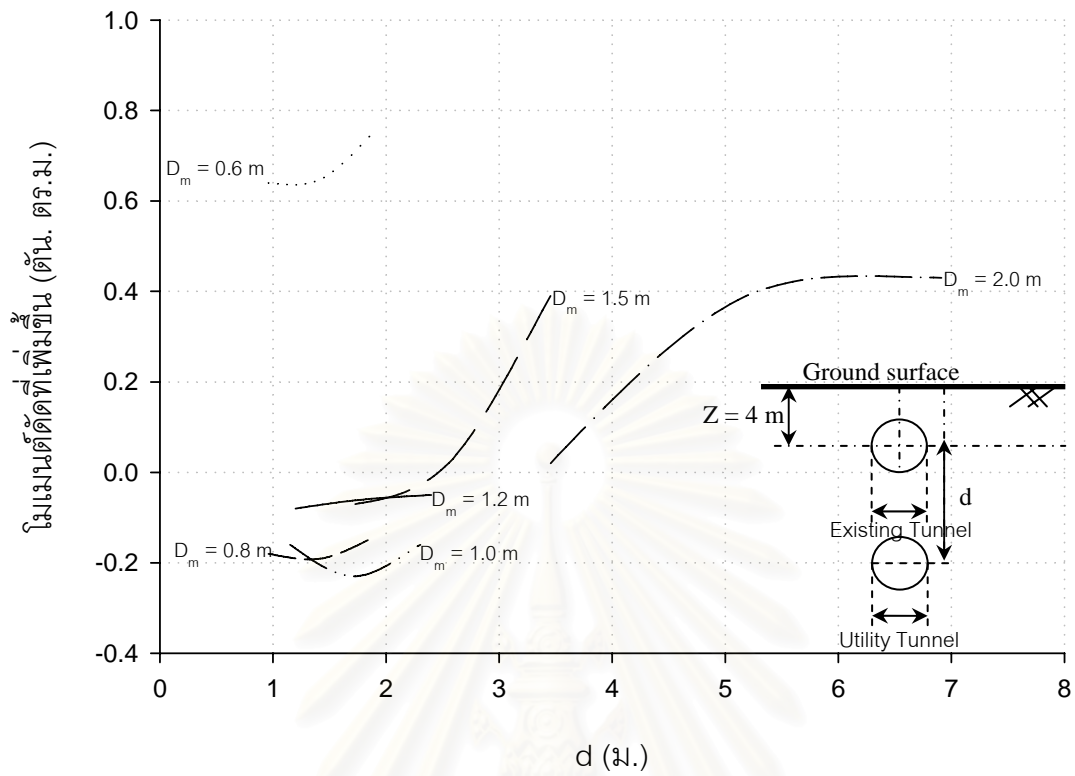
รูปที่ ก-4.2.6.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดของท่อตันตลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



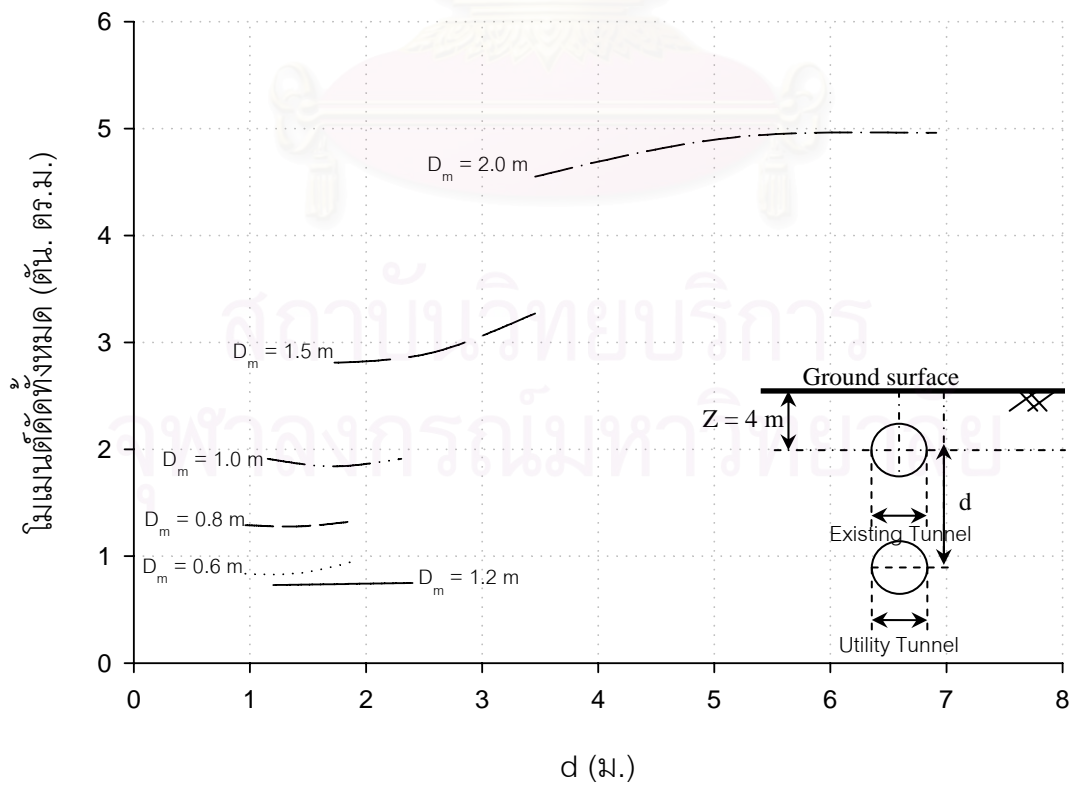
รูปที่ ก-4.2.6.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



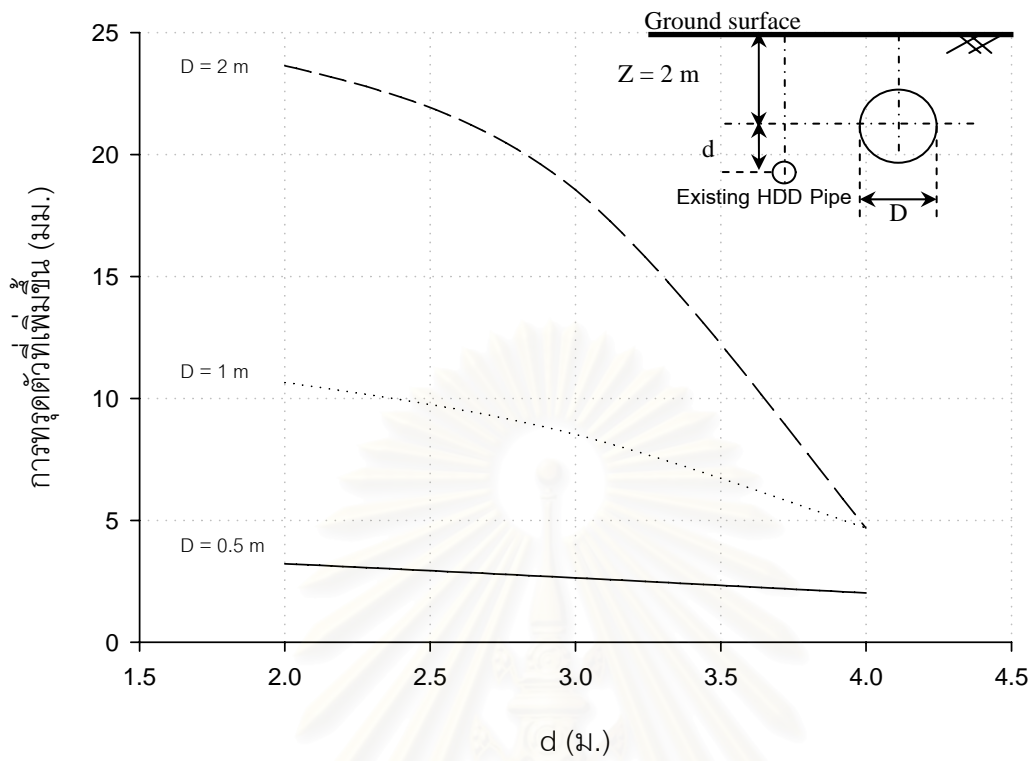
รูปที่ ก-4.2.6.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



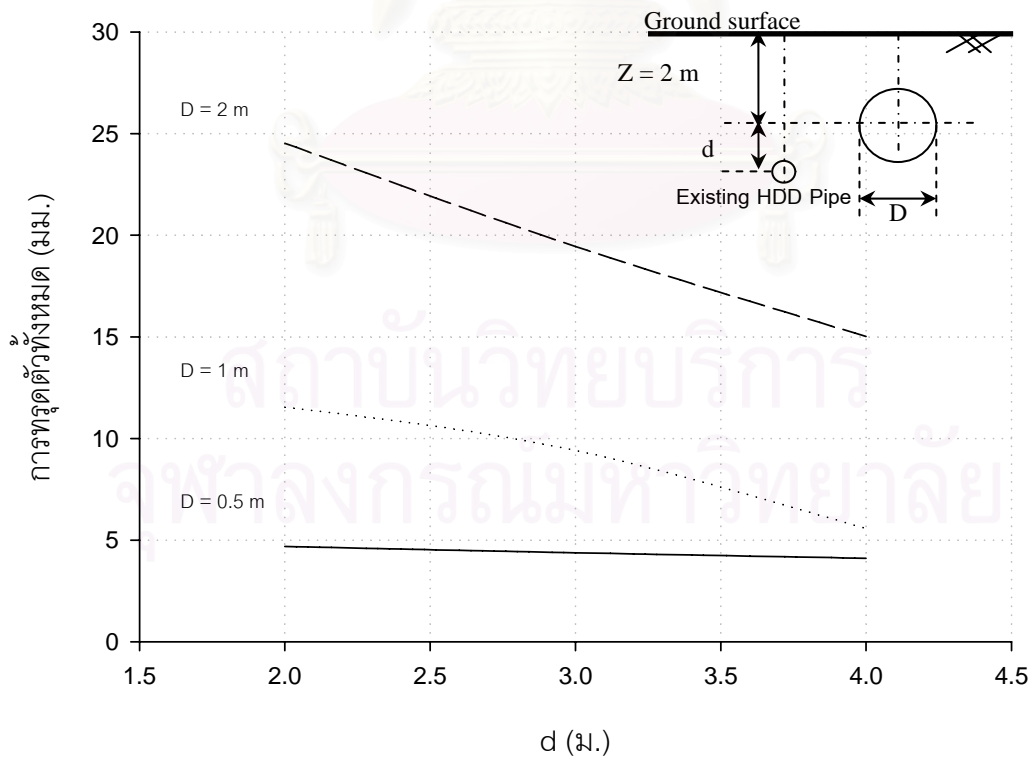
รูปที่ ก-4.2.6.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



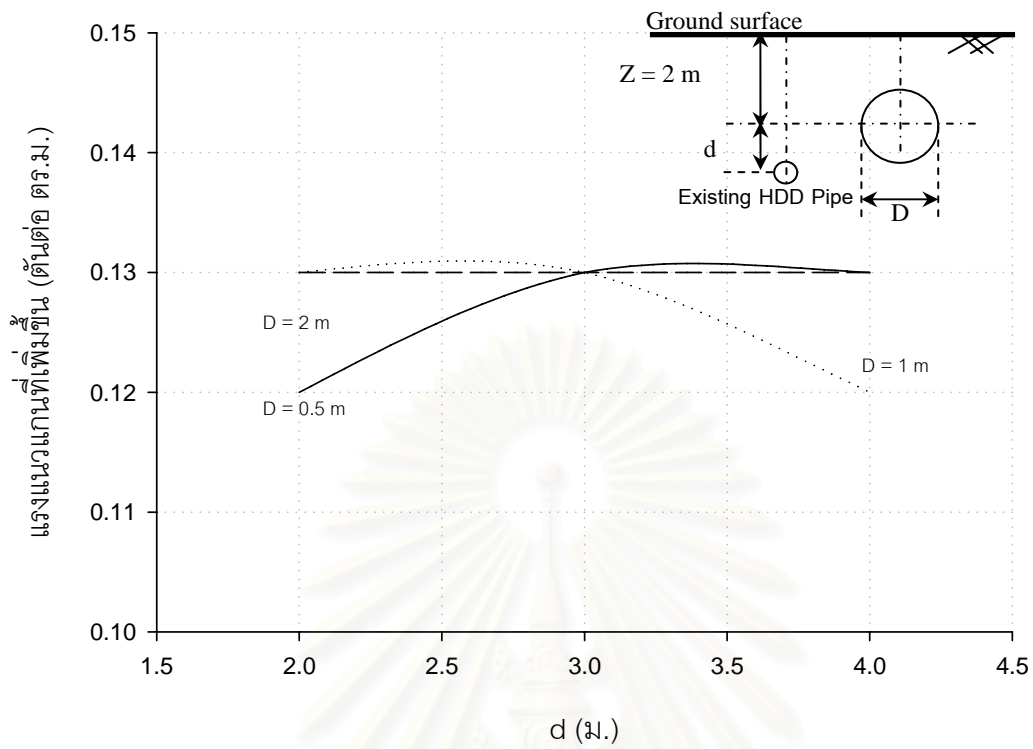
รูปที่ ก-4.2.6.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดของท่อตันลอดจากอุโมงค์ข้างเคียงด้านล่างขนาด $D = 2D_m$



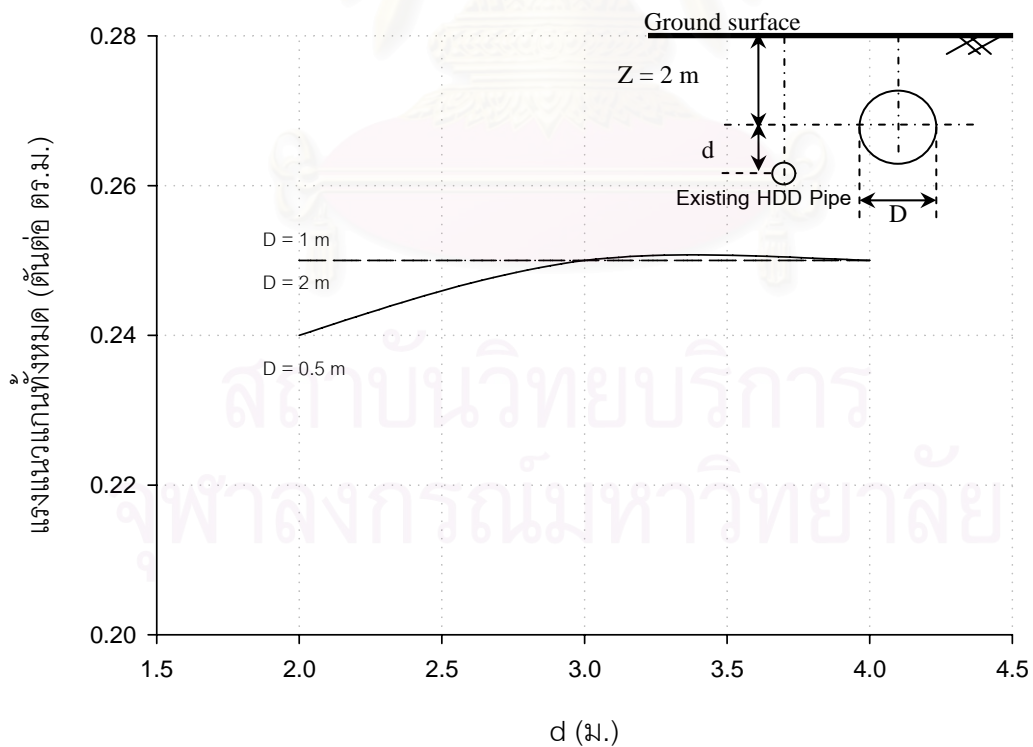
รูปที่ ก-4.2.7.1.1 การท่อดัดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



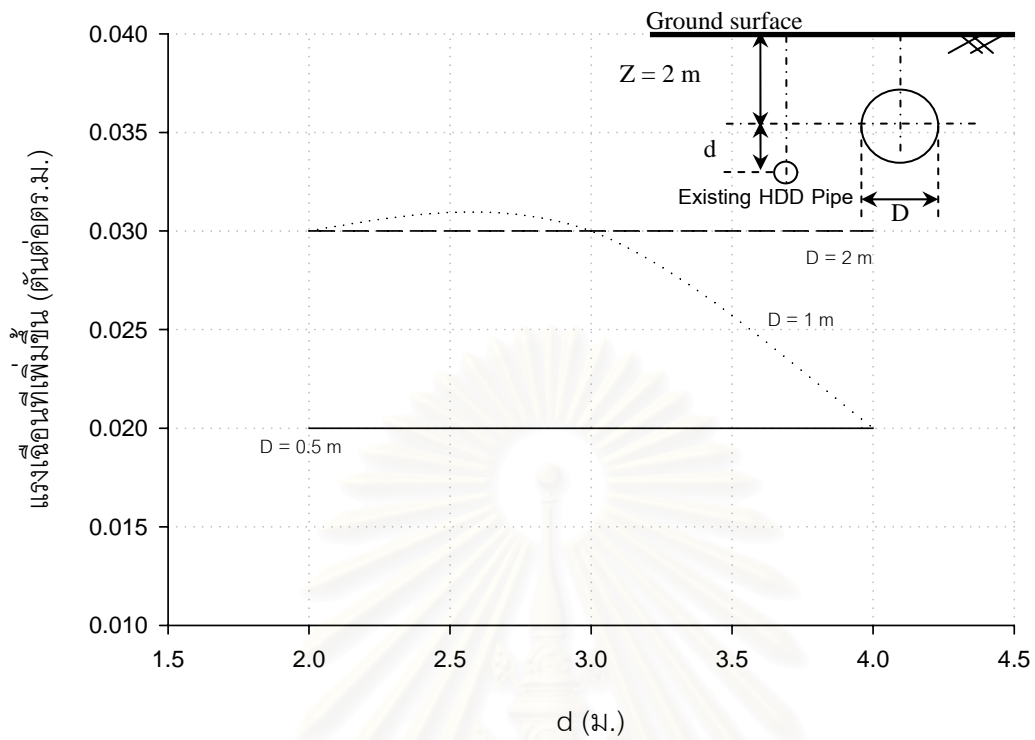
รูปที่ ก-4.2.7.1.2 การท่อดัดตัวทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบจากอุโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



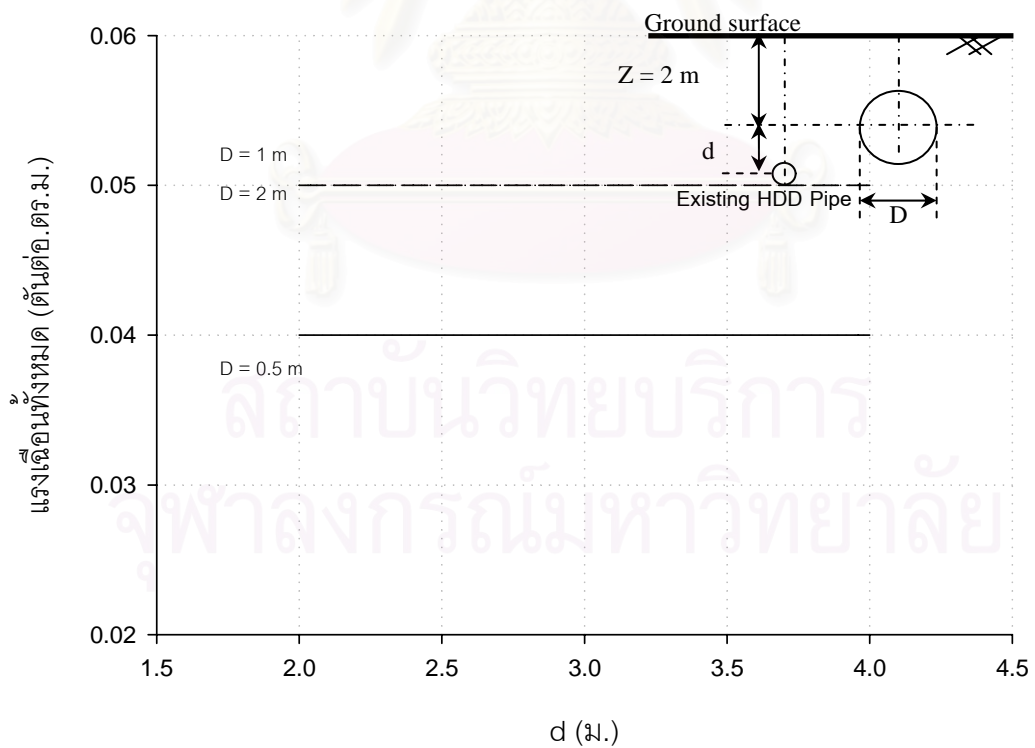
รูปที่ ก-4.2.7.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะตึงแนวราบจากคูโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



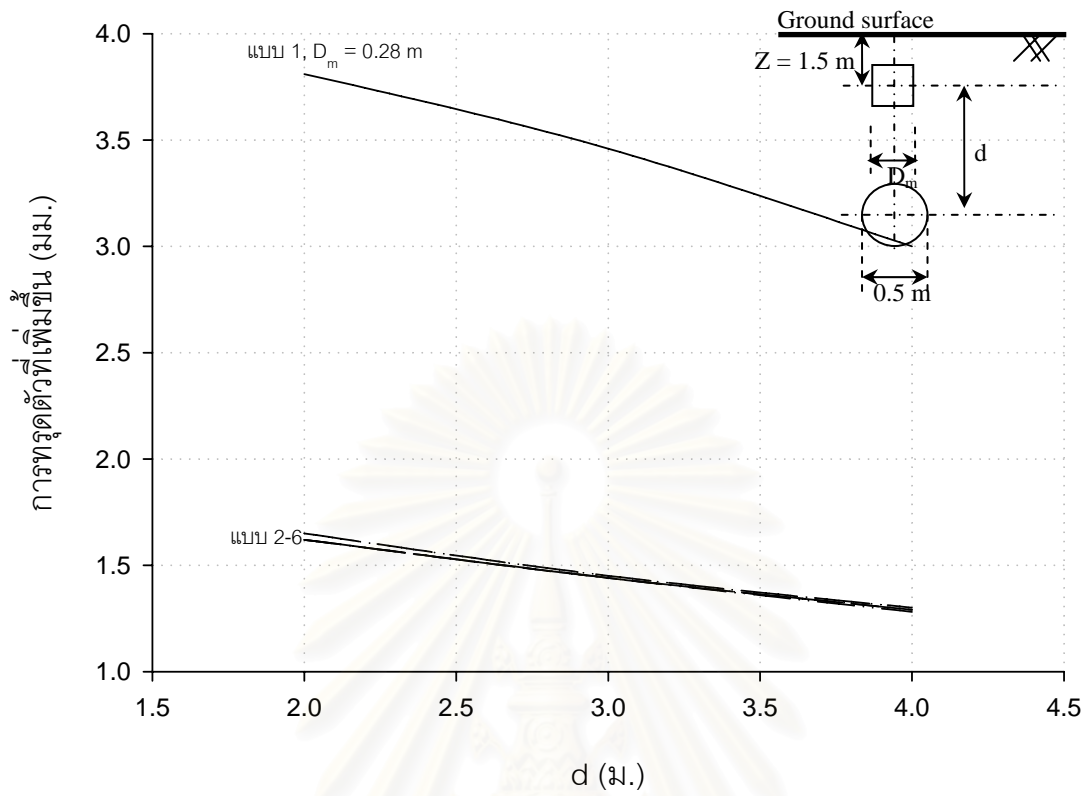
รูปที่ ก-4.2.7.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อเจาะตึงแนวราบจากคูโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



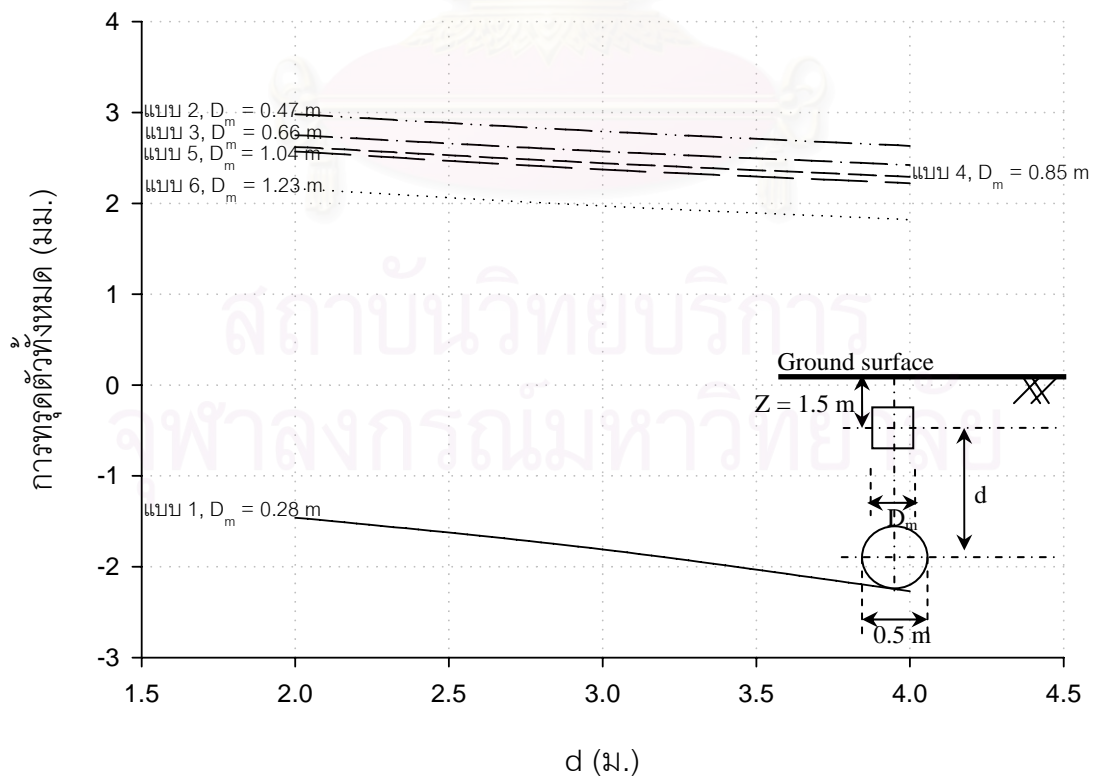
รูปที่ ก-4.2.7.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อเจาะดึงแนวราบจากคูโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



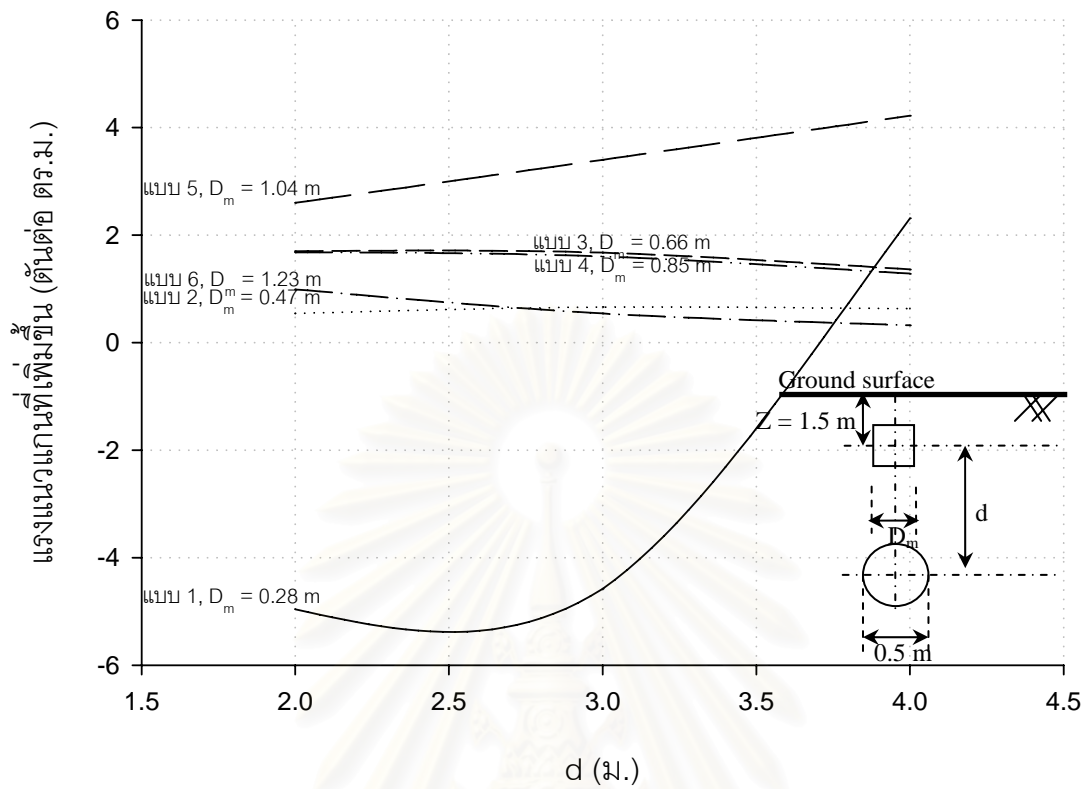
รูปที่ ก-4.2.7.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อเจาะดึงแนวราบจากคูโมงค์ข้างเคียงวางตัวด้านข้าง



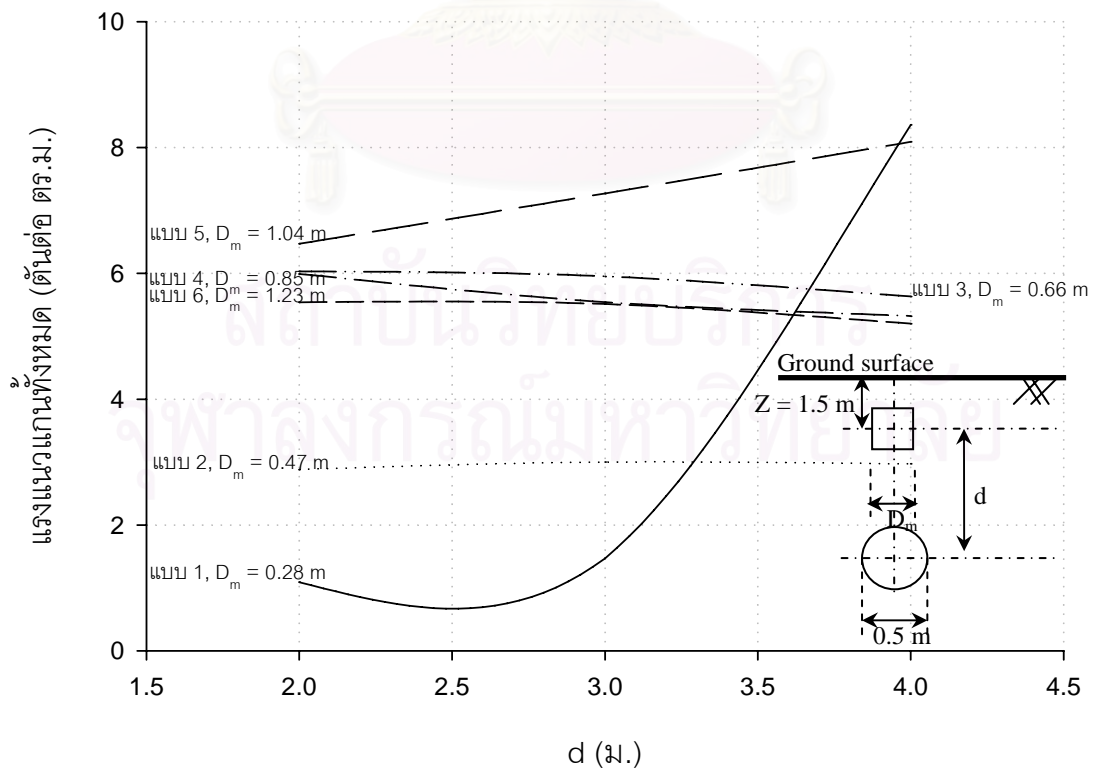
รูปที่ ก-4.2.8.1.1 การท่อดั้วที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=0.5$ m



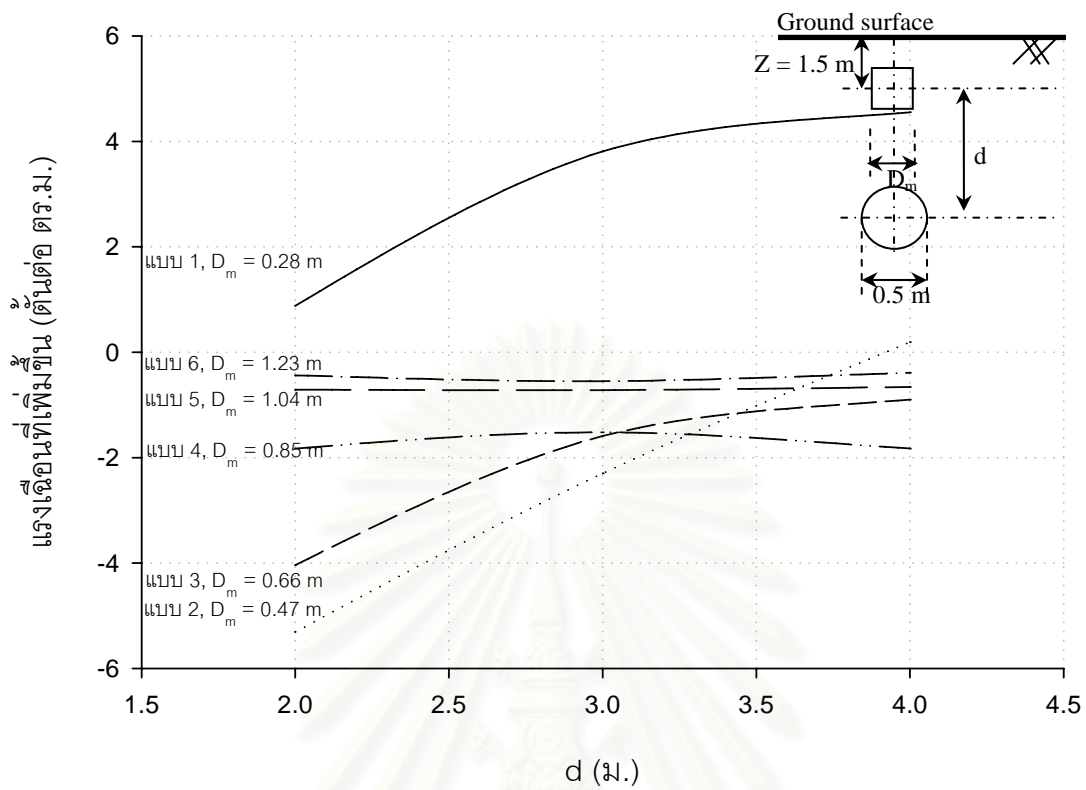
รูปที่ ก-4.2.8.1.2 การท่อดั้วทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 0.5$ m



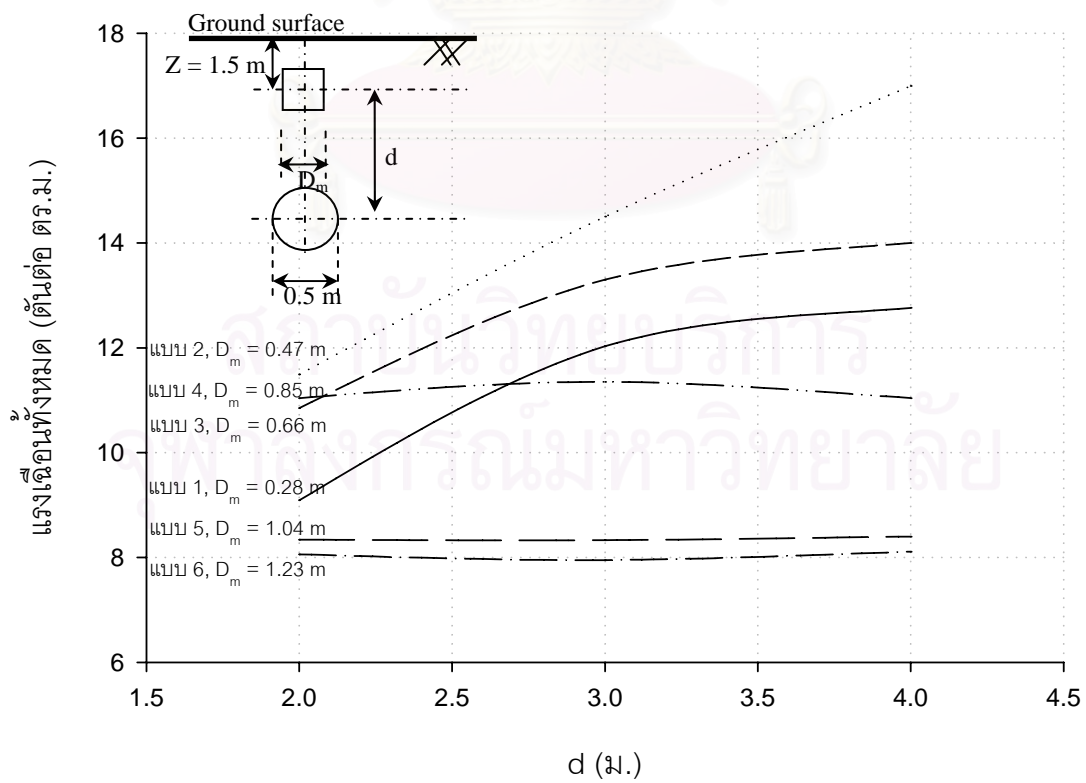
รูปที่ ก-4.2.8.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=0.5\text{m}$



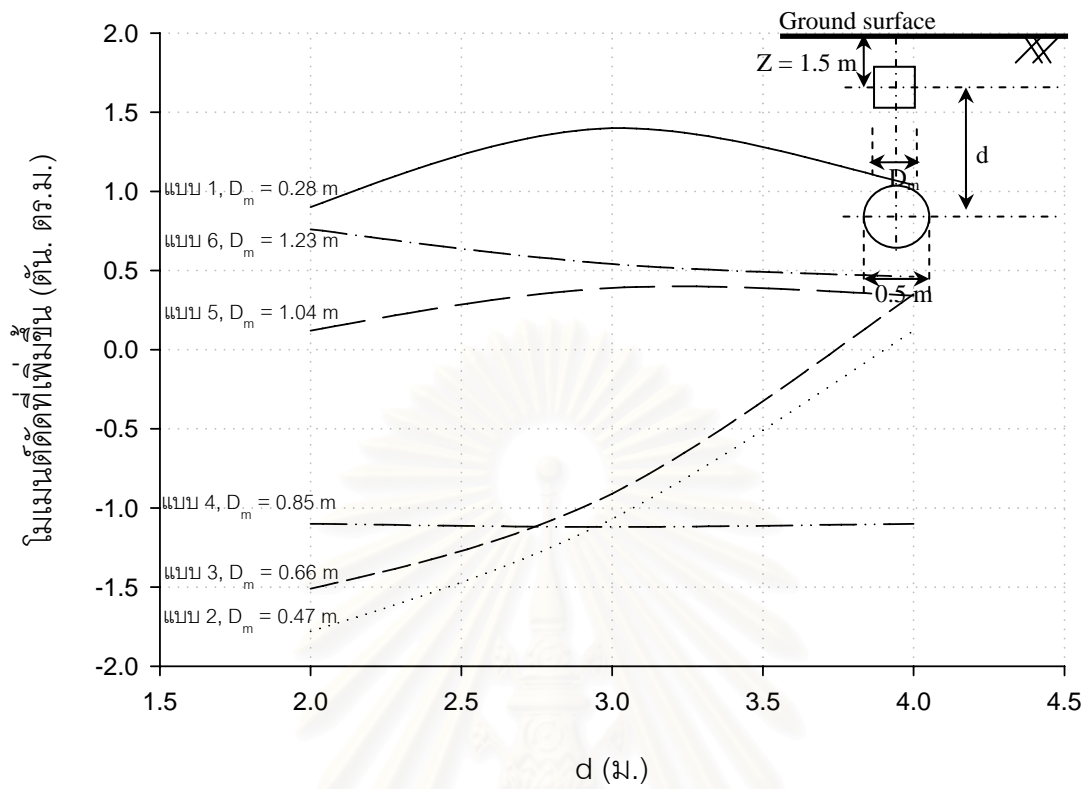
รูปที่ ก-4.2.8.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=0.5\text{m}$



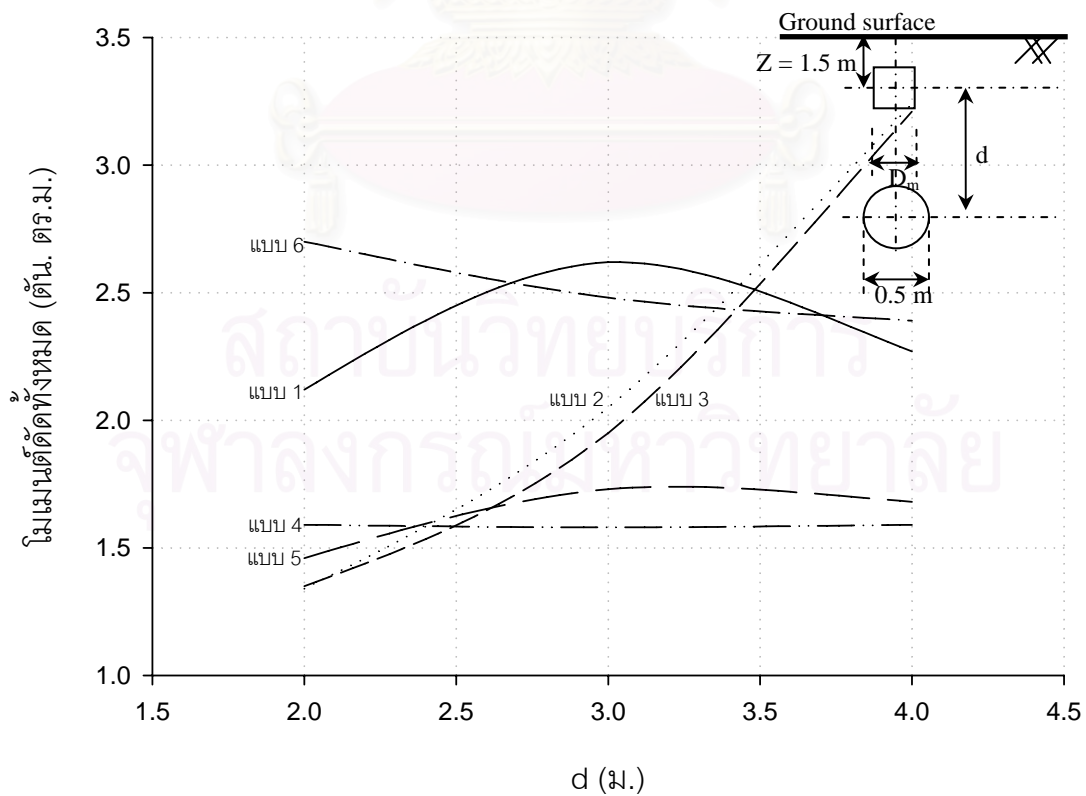
รูปที่ ก-4.2.8.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด D = 0.5m



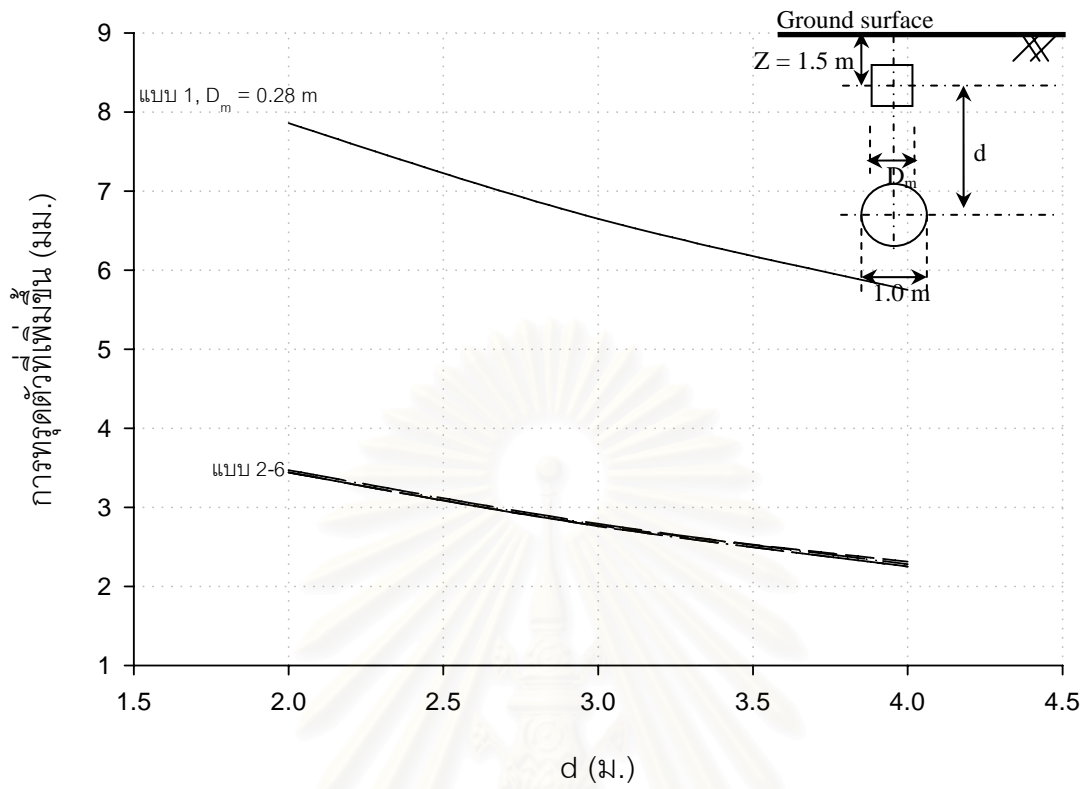
รูปที่ ก-4.2.8.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด D = 0.5m



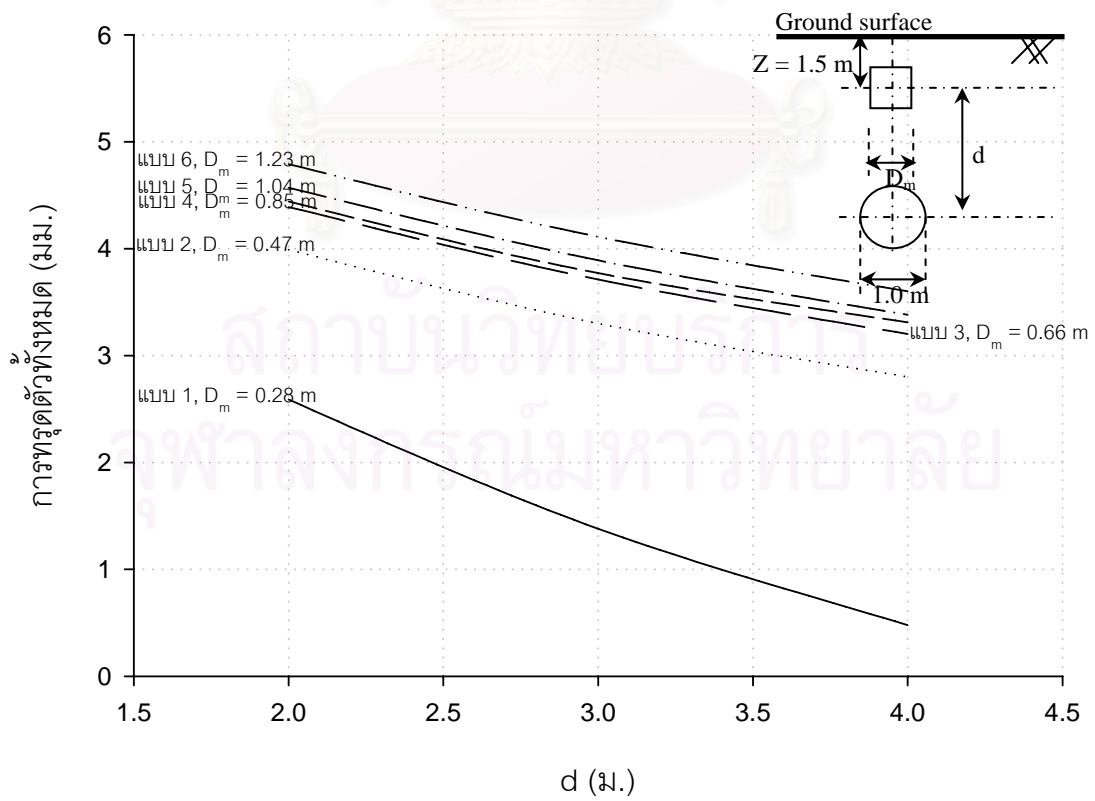
รูปที่ ก-4.2.8.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด D=0.5m



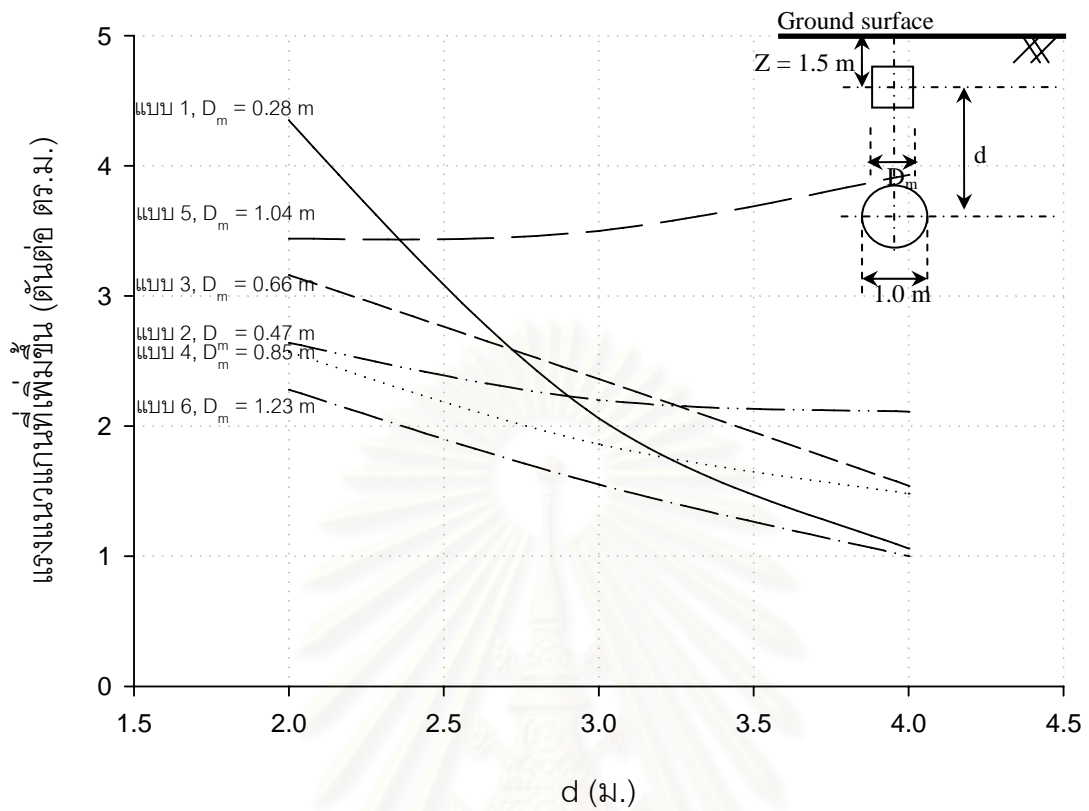
รูปที่ ก-4.2.8.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด D = 0.5m



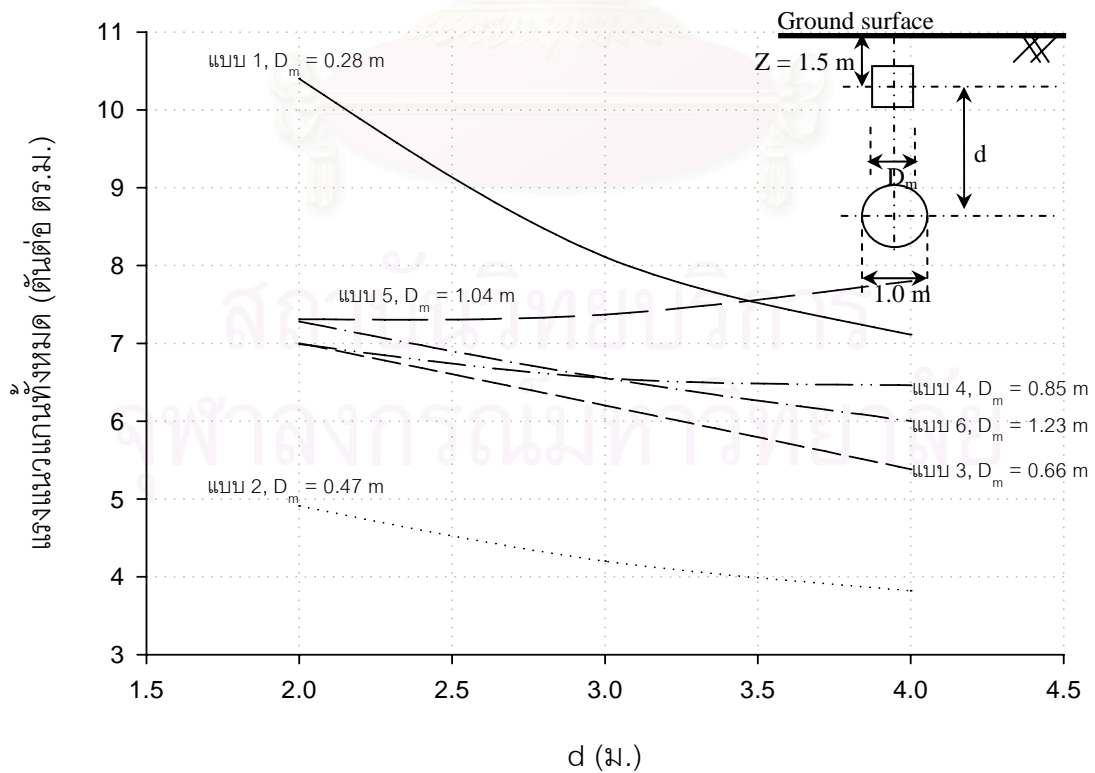
รูปที่ ก-4.2.9.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=1.0$ m



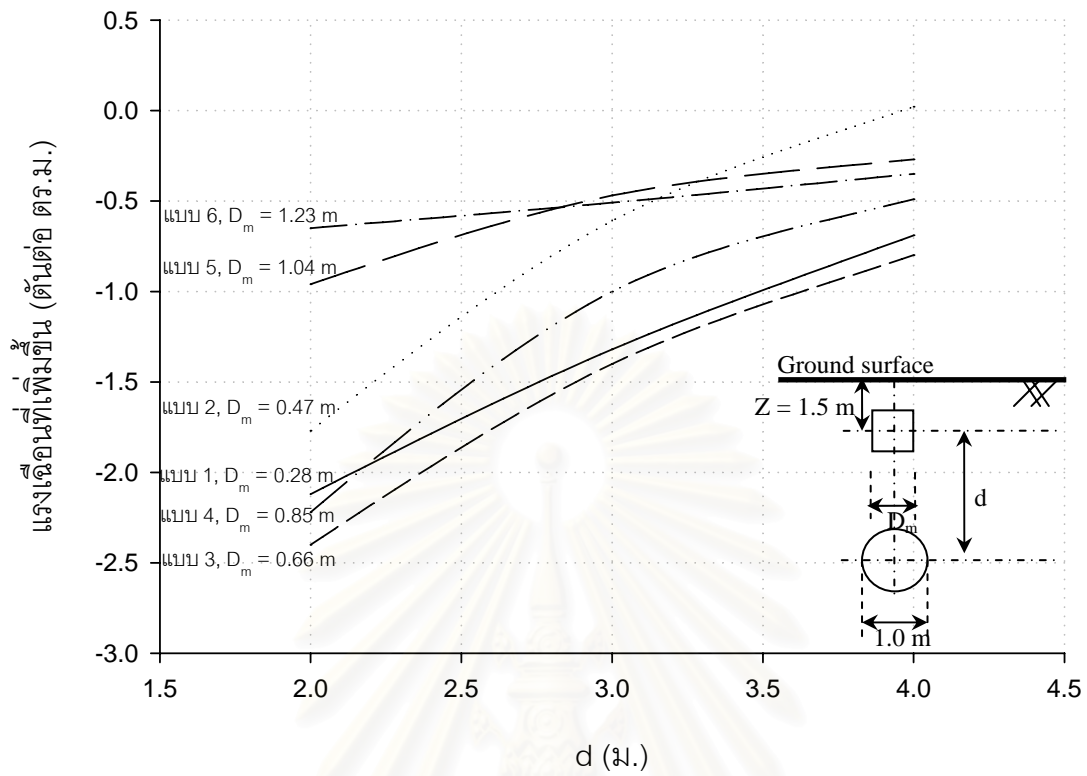
รูปที่ ก-4.2.9.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 1.0$ m



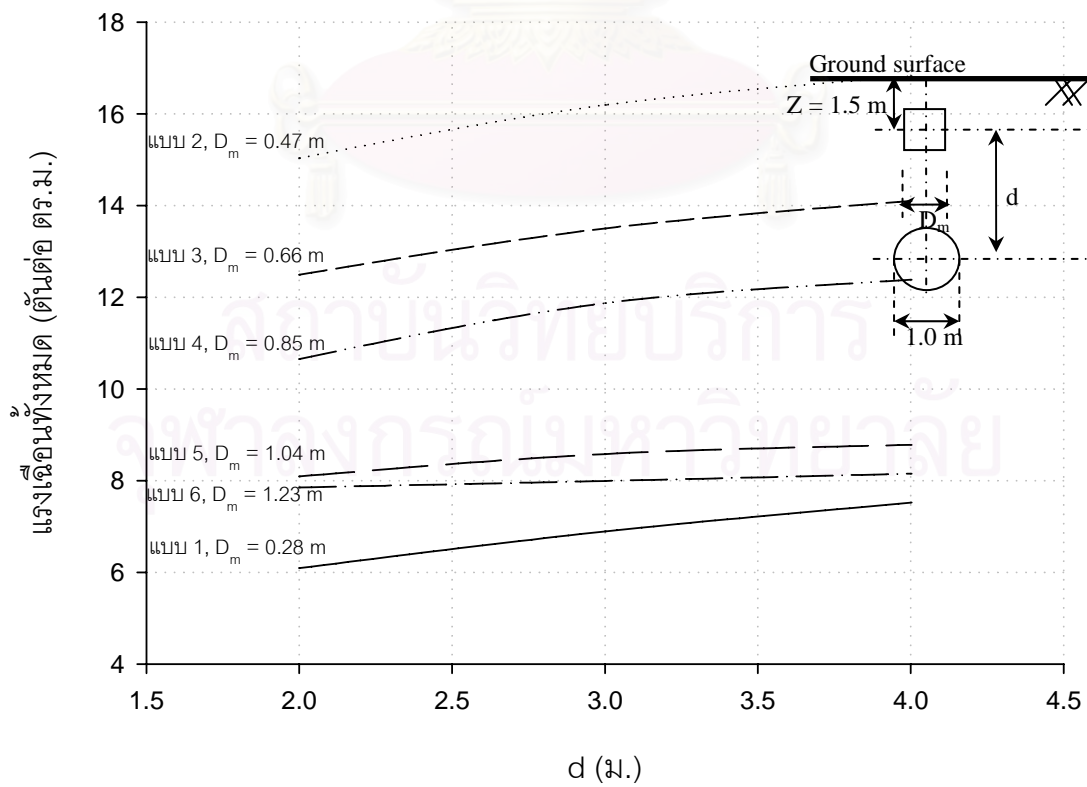
รูปที่ ก-4.2.9.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด D=1.0m



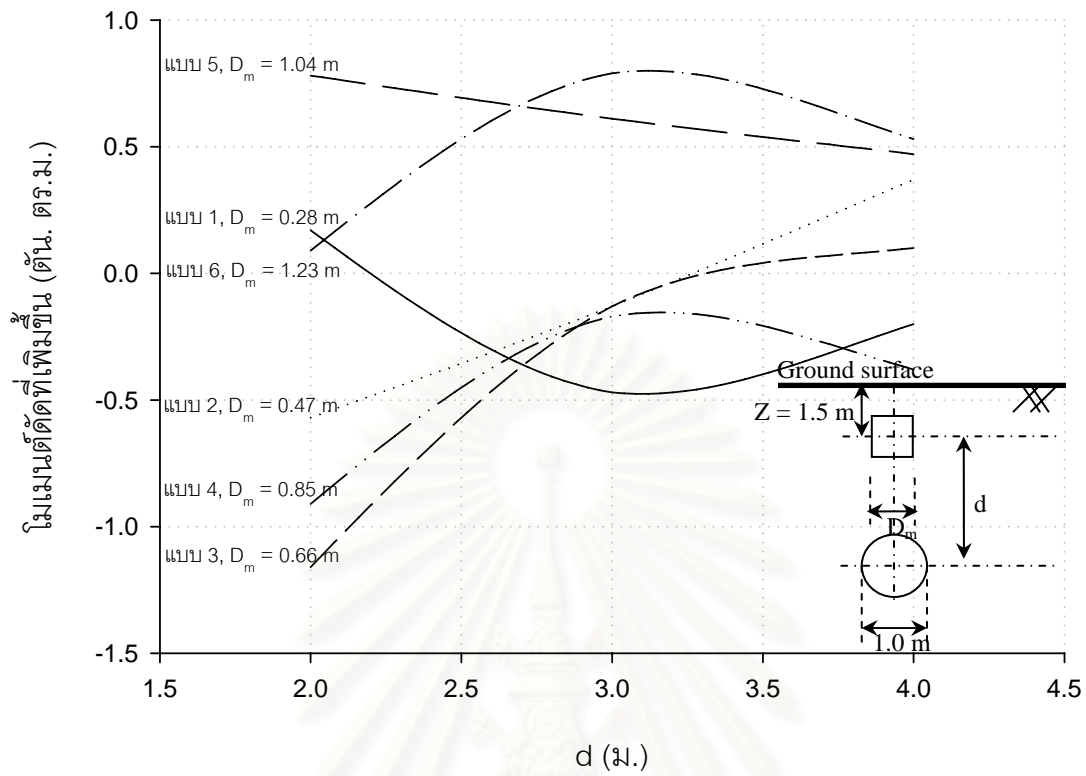
รูปที่ ก-4.2.9.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด D=1.0m



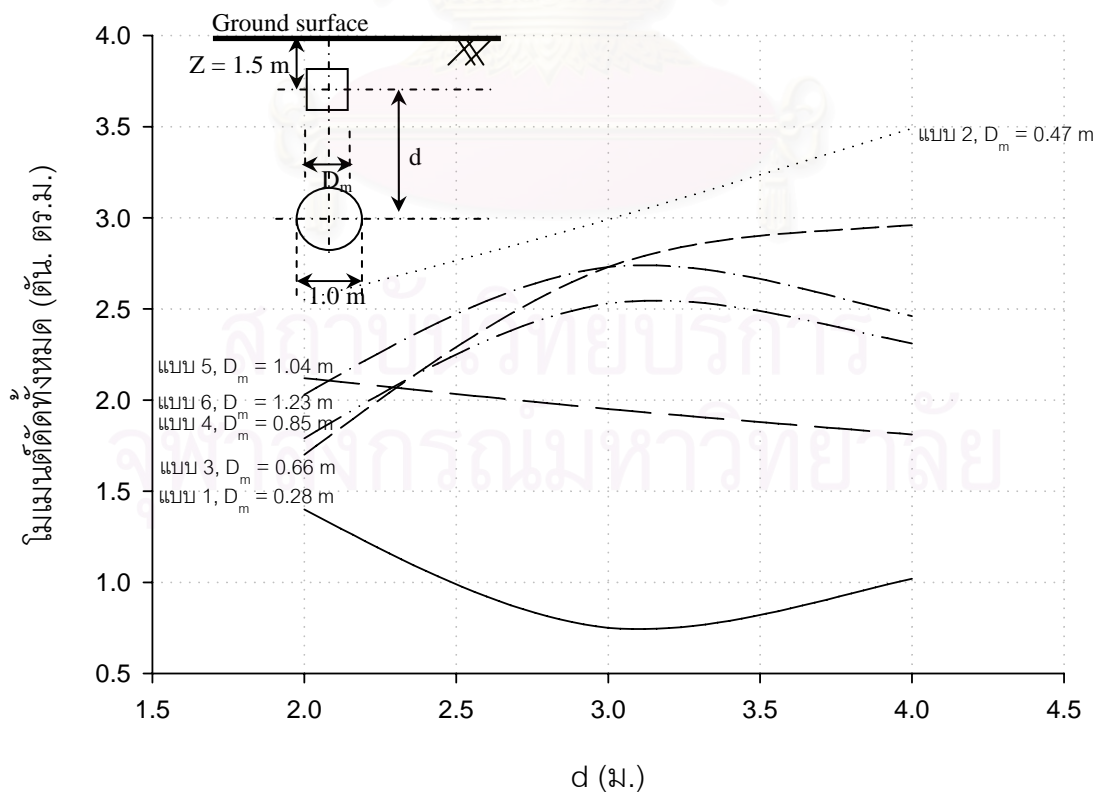
รูปที่ ก-4.2.9.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 1.0\text{m}$



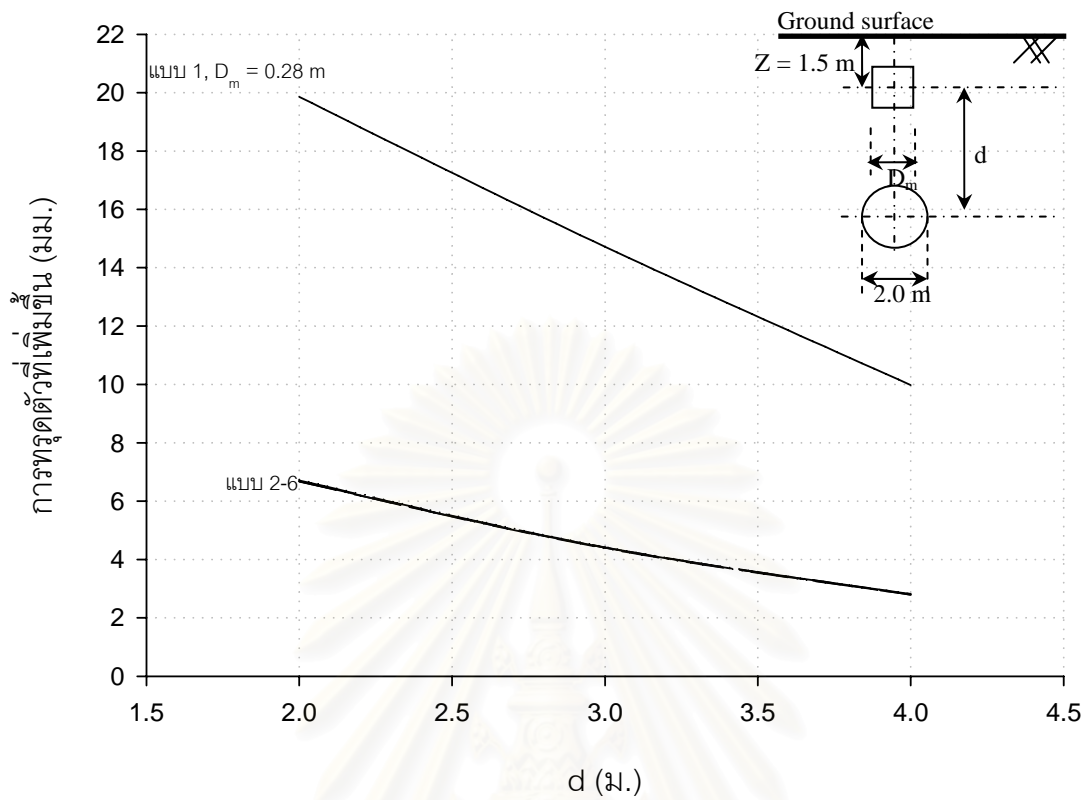
รูปที่ ก-4.2.9.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 1.0\text{m}$



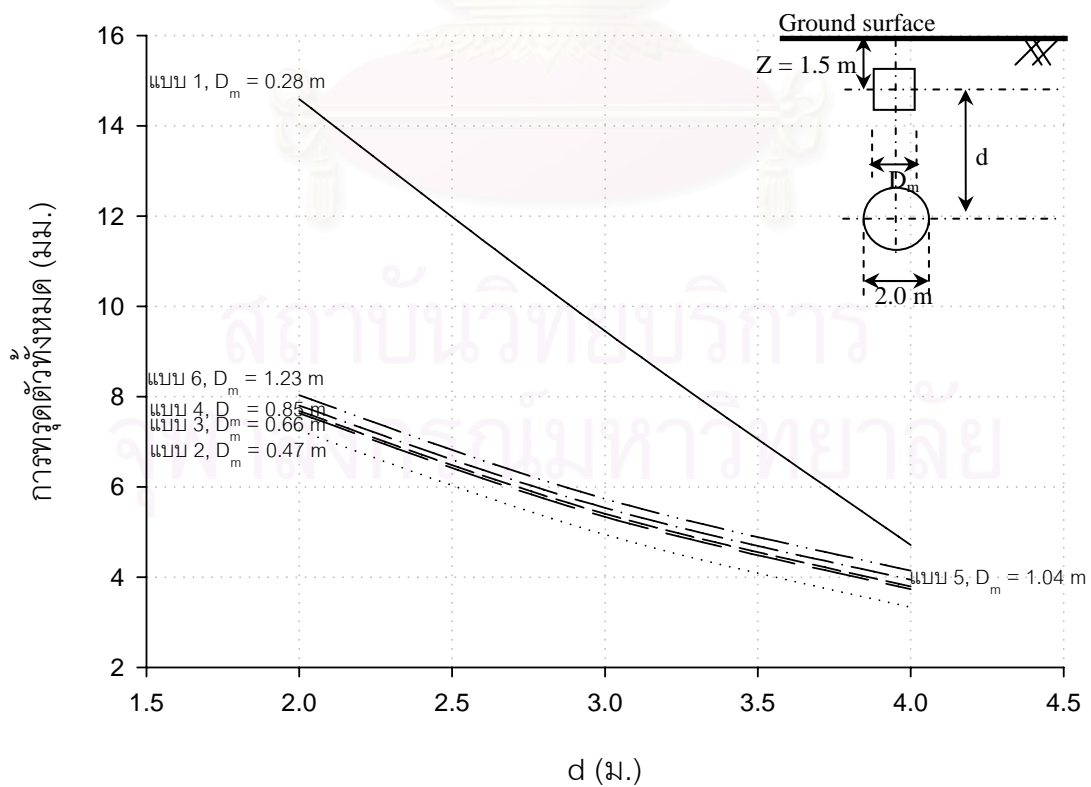
รูปที่ ก-4.2.9.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D=1.0$ m



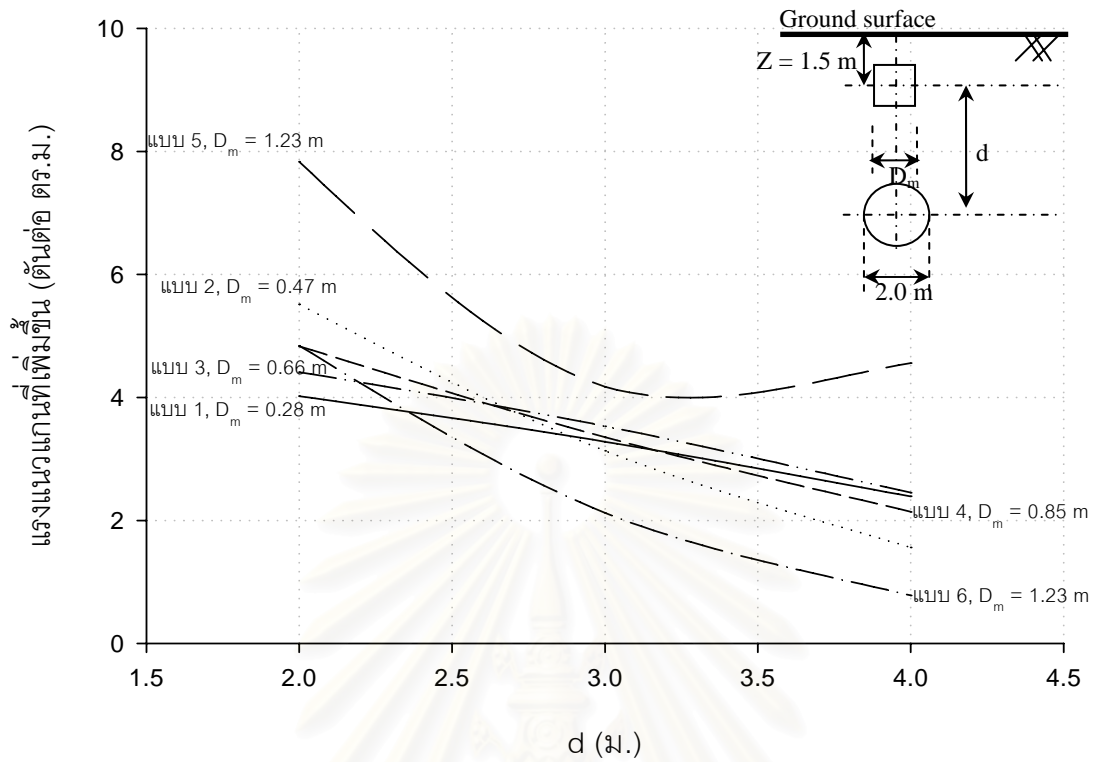
รูปที่ ก-4.2.9.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่ระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 1.0$ m



รูปที่ ก-4.2.10.1.1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด D=2.0m

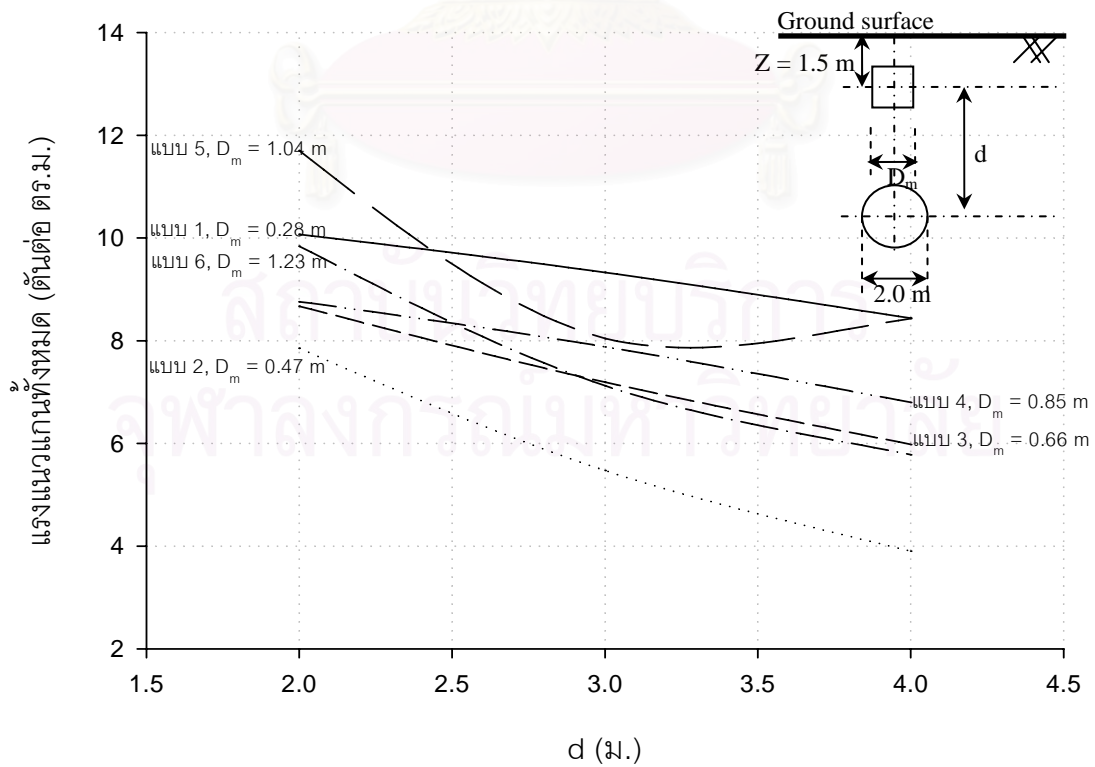


รูปที่ ก-4.2.10.1.2 การทรุดตัวทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด D=2.0m

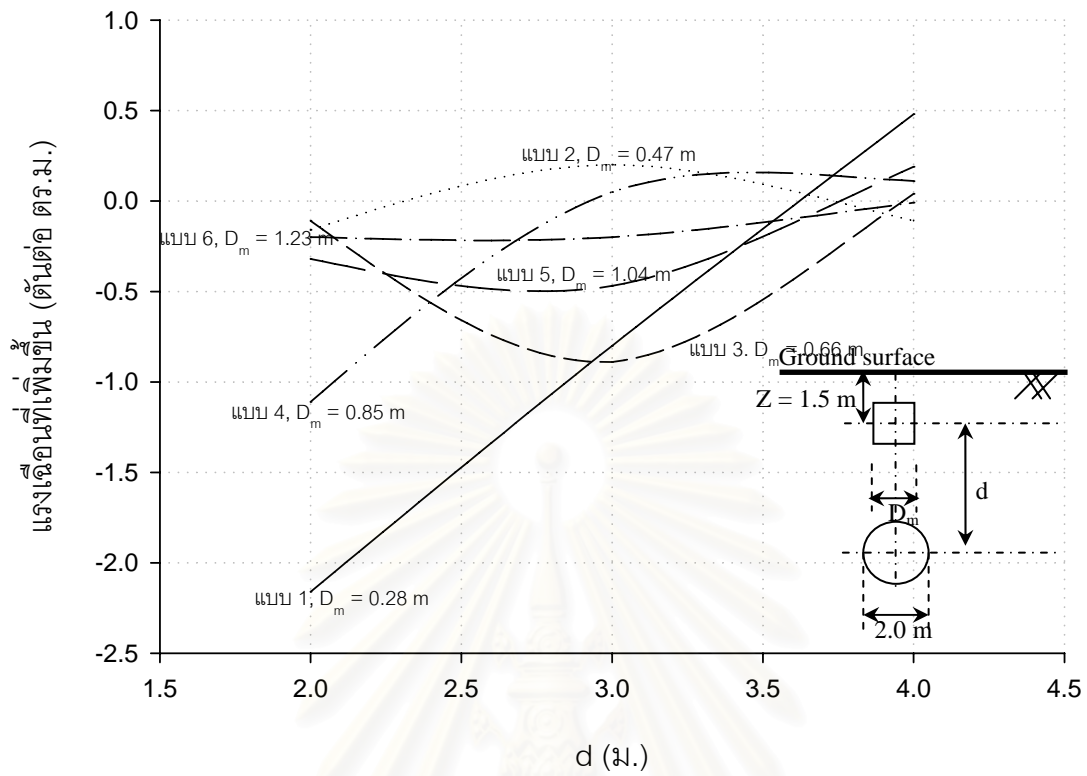


รูปที่ ก-4.2.10.2.1 แรงแนวแกนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด

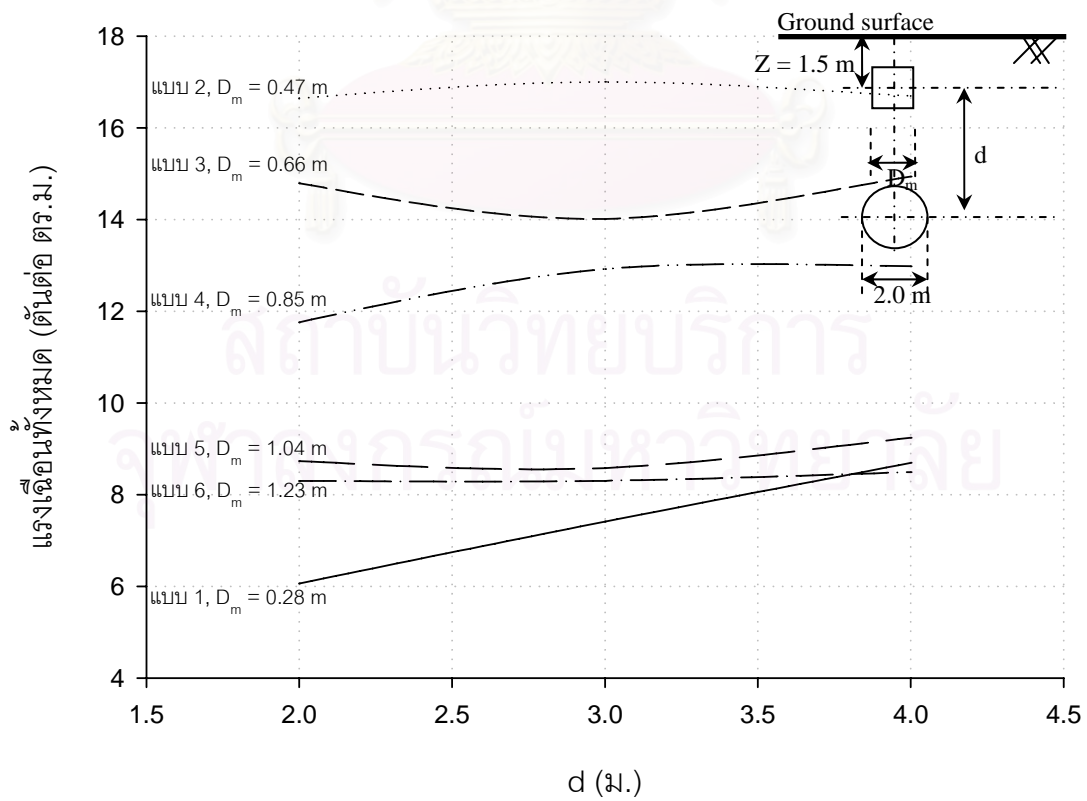
D=2.0m



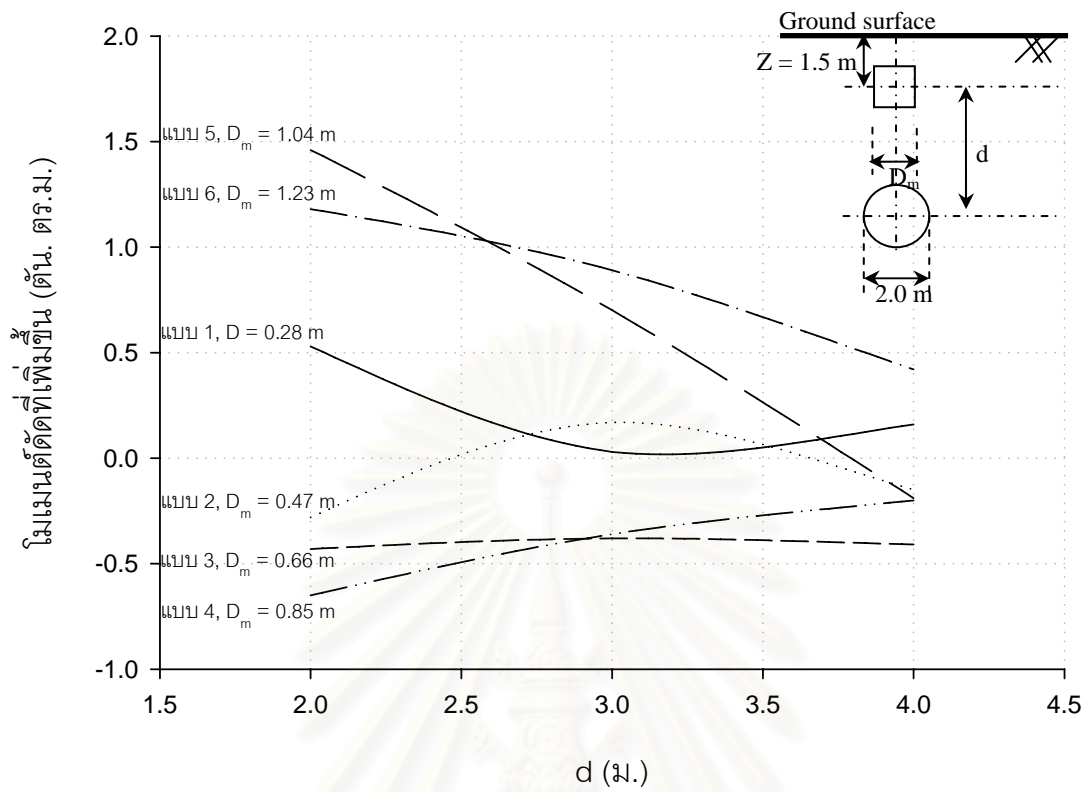
รูปที่ ก-4.2.10.2.2 แรงแนวแกนทั้งหมดต่อระบบชุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด D=2.0m



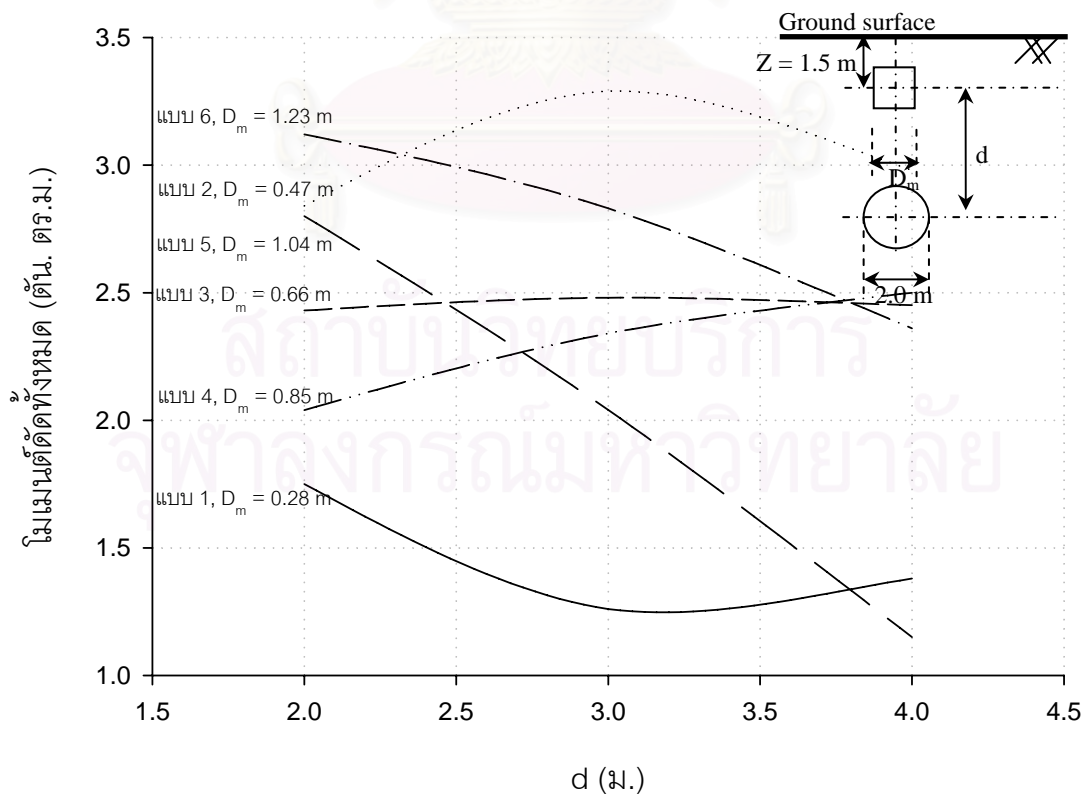
รูปที่ ก-4.2.10.3.1 แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 2.0$ m



รูปที่ ก-4.2.10.3.2 แรงเฉือนทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากอุโมงค์ข้างเคียงขนาด $D = 2.0$ m



รูปที่ ก-4.2.10.4.1 โมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด D=2.0m



รูปที่ ก-4.2.10.4.2 โมเมนต์ดัดทั้งหมดต่อระบบขุดเปิดหน้าดินจากคูโมงค์ข้างเคียงขนาด D=2.0m



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาร่วมกลุ่มต่อท่อตันลอด

	Diameter (m)	Depth (m)	Load (Ton)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					2.5	5	7.5		2.5	5	7.5
Pipe Jacking	0.6	6	3	Total Displacement (mm)	13.97	12.20	10.62	Total Displacement (mm)	7.50	5.73	4.15
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.82	2.85	2.86	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.03	0.00	0.01
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.16	0.13	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.07	0.04
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.86	0.86	0.86	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.02	0.02		
		21	15	Total Displacement (mm)	19.86	13.97	8.85	Total Displacement (mm)	13.39	7.50	2.38
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.86	2.89	2.91	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	0.04	0.06
	Max. Shear stress (ton/m ²)			0.19	0.13	0.07	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.04	-0.02	
	25	20	Total Displacement (mm)	22.81	16.03	9.85	Total Displacement (mm)	16.34	9.56	3.38	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	2.88	2.89	2.92	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.04	0.07	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.23	0.15	0.07	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.07	-0.02	
	25	25	Total Displacement (mm)	25.94	18.09	10.86	Total Displacement (mm)	19.47	11.62	4.39	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	2.91	2.90	2.93	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.05	0.08	
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.28	0.18	0.08	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.10	-0.01		
Max. Bending moment (ton.m ²)	0.90	0.89	0.86	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	0.05	0.02				
Pipe Jacking	0.8	6	3	Total Displacement (mm)	11.33	9.53	7.93	Total Displacement (mm)	7.57	5.77	4.17
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.69	3.74	3.76	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	0.04	0.06
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.25	0.21	0.17	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.06	0.02	-0.02
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.12	1.12	1.11	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.02	0.01		
		21	15	Total Displacement (mm)	17.48	11.36	6.21	Total Displacement (mm)	13.72	7.60	2.45
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.73	3.78	3.81	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.08	0.11
	Max. Shear stress (ton/m ²)			0.25	0.17	0.09	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.07	-0.01	-0.09	
	25	20	Total Displacement (mm)	20.43	13.45	7.25	Total Displacement (mm)	16.67	9.69	3.49	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	3.75	3.78	3.82	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.12	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.30	0.21	0.10	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.02	-0.08	
	25	25	Total Displacement (mm)	23.61	15.50	8.25	Total Displacement (mm)	19.85	11.74	4.49	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	3.77	3.79	3.83	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.07	0.09	0.13	
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.37	0.24	0.11	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.06	-0.08		
Max. Bending moment (ton.m ²)	1.18	1.15	1.11	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.08	0.05	0.01				
Pipe Jacking	1.0	6	3	Total Displacement (mm)	11.46	9.60	8.00	Total Displacement (mm)	7.66	5.80	4.20
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.57	4.61	4.65	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	0.03	0.07
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.31	0.27	0.22	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.09	0.05	-0.01
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.43	1.42	1.41	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.03	0.02		
		21	15	Total Displacement (mm)	17.79	11.50	6.32	Total Displacement (mm)	13.99	7.70	2.52
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.61	4.66	4.70	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.08	0.12
	Max. Shear stress (ton/m ²)			0.31	0.22	0.12	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.09	0.00	-0.10	
	25	20	Total Displacement (mm)	20.75	13.59	7.34	Total Displacement (mm)	16.95	9.79	3.54	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.63	4.66	4.72	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.14	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.38	0.26	0.13	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.16	0.04	-0.09	
	25	25	Total Displacement (mm)	24.02	15.65	8.37	Total Displacement (mm)	20.22	11.85	4.57	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.67	4.70	4.73	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.09	0.12	0.15	
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.48	0.30	0.14	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.26	0.08	-0.08		
Max. Bending moment (ton.m ²)	1.51	1.46	1.40	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.12	0.07	0.01				
Pipe Jacking	1.2	6	3	Total Displacement (mm)	11.54	9.66	8.06	Total Displacement (mm)	7.71	5.83	4.23
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.92	5.92	5.92	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.00	0.05	0.08
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.28	0.28	0.28	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.05	-0.02
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.64	1.64	1.64	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.07	0.05	0.00		
		21	15	Total Displacement (mm)	18.15	11.66	6.43	Total Displacement (mm)	14.32	7.83	2.60
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.92	5.92	5.92	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.08	0.16
	Max. Shear stress (ton/m ²)			0.28	0.28	0.28	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.00	-0.14	
	25	20	Total Displacement (mm)	21.12	13.86	7.45	Total Displacement (mm)	17.29	10.03	3.62	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	5.92	5.92	5.92	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.11	0.18	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.28	0.28	0.28	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.21	0.07	-0.12	
	25	25	Total Displacement (mm)	24.42	15.82	8.47	Total Displacement (mm)	20.59	11.99	4.64	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	5.92	5.92	5.92	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.08	0.12	0.20	
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.28	0.28	0.28	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.32	0.11	-0.11		
Max. Bending moment (ton.m ²)	1.64	1.64	1.64	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.18	0.09	-0.02				

	Diameter (m)	Depth (m)	Load (Ton)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					2.5	5	7.5		2.5	5	7.5
Pipe Jacking	1.5	6	3	Total Displacement (mm)	11.51	9.63	8.04	Total Displacement (mm)	7.70	5.82	4.23
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.61	7.64	7.65	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.00	0.03	0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.53	0.42	0.29	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.15	0.04	-0.09
		Max. Bending moment (ton.m ²)	2.14	2.05	1.97	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.09	0.00	-0.08		
		Total Displacement (mm)	18.31	11.74	6.48	Total Displacement (mm)	14.50	7.93	2.67		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	7.66	7.69	7.75	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.14		
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.52	0.34	0.16	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	-0.04	-0.22			
	Max. Bending moment (ton.m ²)	2.15	2.00	1.90	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.10	-0.05	-0.15			
	21	20	Total Displacement (mm)	21.52	13.84	7.50	Total Displacement (mm)	17.71	10.03	3.69	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	7.64	7.69	7.78	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.08	0.17	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.63	0.41	0.18	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.25	0.03	-0.20	
	25		Total Displacement (mm)	24.92	15.91	8.51	Total Displacement (mm)	21.11	12.10	4.70	
Max. Axial stress (ton/m ²)			7.66	7.69	7.80	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.19		
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.78	0.49	0.20	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.40	0.11	-0.18		
Max. Bending moment (ton.m ²)	2.30	2.10	1.94	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.25	0.05	-0.11				
Pipe Jacking	2.0	6	3	Total Displacement (mm)	11.47	9.57	7.99	Total Displacement (mm)	7.69	5.79	4.21
				Max. Axial stress (ton/m ²)	10.18	10.14	10.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	-0.06	-0.08
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.88	0.68	0.44	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.22	0.02	-0.23
		Max. Bending moment (ton.m ²)	3.01	2.90	2.61	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.15	0.04	-0.25		
		Total Displacement (mm)	18.49	11.84	6.50	Total Displacement (mm)	14.71	8.06	2.72		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	10.21	10.16	9.97	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	-0.04	-0.23		
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.85	0.53	0.19	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	-0.13	-0.48			
	Max. Bending moment (ton.m ²)	3.00	2.69	2.22	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.14	-0.17	-0.64			
	21	20	Total Displacement (mm)	22.03	13.94	7.53	Total Displacement (mm)	18.25	10.16	3.75	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	10.23	10.15	10.00	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	-0.05	-0.20	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.00	0.63	0.21	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.34	-0.04	-0.45	
	25		Total Displacement (mm)	3.12	2.77	2.23	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.26	-0.09	-0.63	
Total Displacement (mm)			25.50	16.03	8.54	Total Displacement (mm)	21.72	12.25	4.76		
Max. Axial stress (ton/m ²)			10.27	10.14	10.03	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.07	-0.06	-0.17		
Max. Shear stress (ton/m ²)	1.19	0.72	0.23	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.53	0.06	-0.43				
Max. Bending moment (ton.m ²)	3.26	2.85	2.26	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.40	-0.01	-0.60				
Pipe Jacking	2.5	6	3	Total Displacement (mm)	11.37	7.23	4.42	Total Displacement (mm)	7.61	3.47	0.66
				Max. Axial stress (ton/m ²)	12.35	11.69	11.30	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.10	-0.56	-0.95
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.60	0.95	0.59	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.27	-0.38	-0.75
		Max. Bending moment (ton.m ²)	4.06	3.38	2.95	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.22	-0.46	-0.89		
		Total Displacement (mm)	19.78	11.86	6.54	Total Displacement (mm)	16.02	8.10	2.78		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	12.36	11.89	11.32	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.11	-0.36	-0.93		
	Max. Shear stress (ton/m ²)	1.61	1.20	0.53	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.28	-0.13	-0.80			
	Max. Bending moment (ton.m ²)	4.03	3.61	2.74	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.19	-0.23	-1.10			
	21	20	Total Displacement (mm)	23.71	13.88	7.55	Total Displacement (mm)	19.95	10.12	3.79	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	12.48	11.94	11.36	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.23	-0.31	-0.89	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.77	1.33	0.58	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.44	0.00	-0.75	
	25		Total Displacement (mm)	4.18	3.73	2.79	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.34	-0.11	-1.05	
Total Displacement (mm)			27.25	15.94	8.56	Total Displacement (mm)	23.49	12.18	4.80		
Max. Axial stress (ton/m ²)			12.55	12.02	11.40	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.30	-0.23	-0.85		
Max. Shear stress (ton/m ²)	1.94	1.46	0.63	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.61	0.13	-0.70				
Max. Bending moment (ton.m ²)	4.35	3.85	2.84	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.51	0.01	-1.00				

ตารางที่ ข-2 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่มต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบ

	Diameter (m)	Depth (m)	Load (Ton)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					1	2	3		1	2	3
HDD	6	6	3	Total Displacement (mm)	11.37	9.71	8.26	Total Displacement (mm)	10.61	8.95	7.50
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.11	0.10	0.13	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.00	-0.01	0.02
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.01	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.00	0.00
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00		
		Total Displacement (mm)	16.48	15.15	13.46	Total Displacement (mm)	15.72	14.39	12.70		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.12	0.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	0.01	0.01		
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.01	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.00	0.00			
	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00			
	21	20	Total Displacement (mm)	20.13	18.87	16.83	Total Displacement (mm)	19.37	18.11	16.07	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.12	0.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	0.01	0.01	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.02	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.01	0.01	
	25		Total Displacement (mm)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	
Total Displacement (mm)			23.85	21.98	20.95	Total Displacement (mm)	23.09	21.22	20.19		
Max. Axial stress (ton/m ²)			0.12	0.14	0.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	0.03	0.01		
Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.00				
Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01				

ตารางที่ ข-3 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเสาค้ำกลุ่มต่อที่ระบบชุดเปิดหน้าดิน

	Diameter (m)	Depth (m)	Load (Ton)		Distance from main structure (m)			Incremental effect			Distance from main structure (m)		
					1	2	3	1	2	3	1	2	3
					Open Cut	1	6	3	Total Displacement (mm)	43.40	38.40	33.30	Total Displacement (mm)
Max. Axial stress (ton/m ²)	5.01	5.04	5.05	Inc. Axial stress (ton/m ²)					-0.03	0.00	0.01		
Max. Shear stress (ton/m ²)	8.06	8.04	8.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)					0.10	0.07	0.04		
Max. Bending moment (ton.m ²)	1.23	1.23	1.22	Inc. Bending moment (ton.m ²)			0.02	0.02	0.02				
Total Displacement (mm)	43.87	36.02	28.79	Total Displacement (mm)			49.47	41.62	34.39				
Max. Axial stress (ton/m ²)	5.05	5.08	5.10	Inc. Axial stress (ton/m ²)			0.01	0.04	0.06				
Max. Shear stress (ton/m ²)	8.07	8.01	7.94	Inc. Shear stress (ton/m ²)		0.10	0.04	-0.02					
Max. Bending moment (ton.m ²)	1.25	1.24	1.22	Inc. Bending moment (ton.m ²)		0.04	0.03	0.01					
21	20	Total Displacement (mm)	50.74	43.96		37.78	Total Displacement (mm)	56.34	49.56	43.38			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	5.07	5.08		5.11	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.04	0.07			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	8.11	8.03		7.95	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.07	-0.02			
	Max. Bending moment (ton.m ²)	1.26	1.25	1.23		Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.05	0.04	0.02				
	25	Total Displacement (mm)	56.79	51.90	46.78	Total Displacement (mm)	62.39	57.50	52.38				
		Max. Axial stress (ton/m ²)	5.10	5.09	5.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.05	0.08				
Max. Shear stress (ton/m ²)		8.16	8.06	7.96	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.10	-0.01					
Max. Bending moment (ton.m ²)	1.27	1.26	1.23	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	0.05	0.02						
Open Cut	2	6	3	Total Displacement (mm)	25.91	23.71	21.34	Total Displacement (mm)	25.40	23.20	20.83		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	1.87	1.92	1.94	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	0.04	0.06		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	15.63	15.59	15.55	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.06	0.02	-0.02		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	3.14	3.14	3.13	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.02	0.01				
		21	15	Total Displacement (mm)	34.23	28.11	22.96	Total Displacement (mm)	33.72	27.60	22.45		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	1.91	1.96	1.99	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.08	0.11		
	Max. Shear stress (ton/m ²)			15.64	15.56	15.48	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.07	-0.01	-0.09			
	Max. Bending moment (ton.m ²)		3.16	3.14	3.12	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.02	0.00				
	20		Total Displacement (mm)	40.18	37.20	34.00	Total Displacement (mm)	39.67	36.69	33.49			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	1.93	1.96	2.00	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.12			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	15.69	15.59	15.49	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.02	-0.08				
	Max. Bending moment (ton.m ²)	3.18	3.16	3.12	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	0.04	0.00					
25	Total Displacement (mm)	46.36	42.25	37.00	Total Displacement (mm)	45.85	41.74	36.49					
	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.95	1.97	2.01	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.07	0.09	0.13					
	Max. Shear stress (ton/m ²)	15.76	15.63	15.49	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.06	-0.08					
Max. Bending moment (ton.m ²)	3.20	3.17	3.13	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.08	0.05	0.01						
Open Cut	3	6	3	Total Displacement (mm)	26.29	24.82	22.46	Total Displacement (mm)	25.30	23.83	21.47		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.08	4.12	4.16	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	0.03	0.07		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	13.67	13.63	13.58	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.09	0.05	-0.01		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	2.72	2.71	2.70	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.03	0.02				
		21	15	Total Displacement (mm)	34.98	28.69	23.51	Total Displacement (mm)	33.99	27.70	22.52		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.12	4.17	4.21	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.08	0.12		
	Max. Shear stress (ton/m ²)			13.67	13.58	13.48	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.09	0.00	-0.10			
	Max. Bending moment (ton.m ²)		2.74	2.71	2.67	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	0.03	-0.01				
	20		Total Displacement (mm)	37.94	30.78	24.53	Total Displacement (mm)	36.95	29.79	23.54			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.14	4.17	4.23	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.14			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	13.74	13.62	13.49	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.16	0.04	-0.09				
	Max. Bending moment (ton.m ²)	2.77	2.73	2.68	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.09	0.05	0.00					
25	Total Displacement (mm)	41.21	38.84	35.56	Total Displacement (mm)	40.22	37.85	34.57					
	Max. Axial stress (ton/m ²)	4.18	4.17	4.24	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.09	0.08	0.15					
	Max. Shear stress (ton/m ²)	13.84	13.66	13.50	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.26	0.08	-0.08					
Max. Bending moment (ton.m ²)	2.80	2.75	2.69	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.12	0.07	0.01						
Open Cut	4	6	3	Total Displacement (mm)	27.11	25.40	23.17	Total Displacement (mm)	25.81	24.10	21.87		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.37	4.42	4.45	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.00	0.05	0.08		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	12.94	12.87	12.80	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.05	-0.02		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	2.95	2.93	2.88	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.07	0.05	0.00				
		21	15	Total Displacement (mm)	35.62	29.13	23.90	Total Displacement (mm)	34.32	27.83	22.60		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.43	4.45	4.53	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.08	0.16		
	Max. Shear stress (ton/m ²)			12.94	12.82	12.68	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.00	-0.14			
	Max. Bending moment (ton.m ²)		2.97	2.90	2.83	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.09	0.02	-0.05				
	20		Total Displacement (mm)	38.59	34.33	31.92	Total Displacement (mm)	37.29	33.03	30.62			
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.42	4.48	4.55	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.11	0.18			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	13.02	12.95	12.69	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.21	0.13	-0.12				
	Max. Bending moment (ton.m ²)	3.01	2.94	2.85	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.13	0.06	-0.03					
25	Total Displacement (mm)	46.89	42.29	37.94	Total Displacement (mm)	45.59	40.99	36.64					
	Max. Axial stress (ton/m ²)	4.45	4.49	4.57	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.08	0.12	0.20					
	Max. Shear stress (ton/m ²)	13.14	12.93	12.71	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.32	0.11	-0.11					
Max. Bending moment (ton.m ²)	3.06	2.97	2.86	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.18	0.09	-0.02						

	Diameter (m)	Depth (m)	Load (Ton)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					1	2	3		1	2	3
					Open Cut	5	6		3	Total Displacement (mm)	26.79
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.19	4.22	4.23	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.00	0.03	0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	9.16	9.05	8.92	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.15	0.04	-0.09
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.40	1.31	1.23	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.09	0.00	-0.08
		21	15	Total Displacement (mm)	35.41	33.84	31.58	Total Displacement (mm)	34.50	32.93	30.67
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.24	4.27	4.33	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.14
				Max. Shear stress (ton/m ²)	9.15	8.97	8.79	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	-0.04	-0.22
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.41	1.26	1.16	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.10	-0.05	-0.15
			20	Total Displacement (mm)	42.62	39.94	37.60	Total Displacement (mm)	41.71	39.03	36.69
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.22	4.27	4.36	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.08	0.17
				Max. Shear stress (ton/m ²)	9.26	9.05	8.81	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.25	0.03	-0.20
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.47	1.31	1.18	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.16	0.00	-0.13
			25	Total Displacement (mm)	48.02	45.01	41.61	Total Displacement (mm)	47.11	44.10	40.70
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.24	4.27	4.38	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	0.08	0.19
				Max. Shear stress (ton/m ²)	9.42	9.12	8.84	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.40	0.11	-0.18
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.56	1.36	1.20	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.25	0.05	-0.11
Open Cut	6	6	3	Total Displacement (mm)	2.77	2.40	2.12	Total Displacement (mm)	1.59	1.22	0.94
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.46	4.42	4.40	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	-0.06	-0.08
				Max. Shear stress (ton/m ²)	8.82	8.62	8.37	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.22	0.02	-0.23
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.03	1.92	1.63	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.15	0.04	-0.25
		21	15	Total Displacement (mm)	21.89	19.24	16.90	Total Displacement (mm)	20.71	18.06	15.72
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.49	4.44	4.25	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	-0.04	-0.23
				Max. Shear stress (ton/m ²)	8.79	8.47	8.13	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.19	-0.13	-0.48
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.02	1.71	1.24	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.14	-0.17	-0.64
			20	Total Displacement (mm)	29.43	27.34	25.93	Total Displacement (mm)	28.25	26.16	24.75
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.51	4.43	4.28	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.03	-0.05	-0.20
				Max. Shear stress (ton/m ²)	8.94	8.56	8.15	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.34	-0.04	-0.45
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.14	1.79	1.25	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.26	-0.09	-0.63
			25	Total Displacement (mm)	36.90	33.43	30.94	Total Displacement (mm)	35.72	32.25	29.76
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.55	4.42	4.31	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.07	-0.06	-0.17
				Max. Shear stress (ton/m ²)	9.13	8.66	8.17	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.53	0.06	-0.43
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.28	1.87	1.28	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.40	-0.01	-0.60

ตารางที่ ข-4 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากเข็มที่ติดตั้งตลอด

	Diameter (m)	Sheet Pile Tip (m)	Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
			2	3	4		2	3	4
Pipe jacking	0.6	15	22.80	21.00	19.42	Total Displacement (mm)	16.33	14.53	12.95
			2.67	2.72	2.73	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.00	0.04	0.09
			0.41	0.44	0.45	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.06	0.09
			0.81	0.82	0.82	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.01	0.03
	0.8	15	20.13	18.38	16.76	Total Displacement (mm)	16.37	14.62	13.00
			3.27	3.30	3.4	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.09	0.15
			0.49	0.51	0.55	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.10	0.12
			1.00	1.01	1.04	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.04	0.05
	1.0	15	20.29	18.57	17.01	Total Displacement (mm)	16.49	14.77	13.21
			4.00	4.02	4.11	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.10	0.13
			0.58	0.60	0.65	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.12	0.14
			1.23	1.25	1.3	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.06	0.07
	1.2	15	20.67	18.96	17.45	Total Displacement (mm)	16.84	15.13	13.62
			4.86	4.90	4.96	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.09	0.13	0.2
			0.66	0.70	0.74	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.15	0.19
			1.37	1.39	0.12	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.07	0.09	0.12
	1.5	15	20.79	19.15	17.80	Total Displacement (mm)	16.98	15.34	13.99
			5.67	5.70	5.77	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.17	0.23
			0.74	0.77	0.79	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.16	0.19	0.21
			1.62	1.64	1.67	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.10	0.12	0.15
	2.0	15	20.94	19.22	18.39	Total Displacement (mm)	17.16	15.44	14.61
			6.77	6.73	6.79	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.11	-0.10	-0.03
			1.12	1.14	1.16	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.15	0.18	0.20
			2.14	2.15	2.18	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.07	0.10
2.5	15	20.96	19.30	18.44	Total Displacement (mm)	17.20	15.54	14.68	
		8.55	8.64	8.87	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.09	-0.07	0.02	
		1.66	1.65	1.69	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.26	0.28	0.28	
		3.01	3.01	3.12	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.17	0.18	0.21	

ตารางที่ ข-5 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบบจากเข็มที่ติดตั้งต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบ

HDD	Sheet Pile Tip (m)	Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
		2	3	4		2	3	4
15	15	20.60	17.88	16.23	Total Displacement (mm)	19.64	16.92	15.27
		0.13	0.13	0.14	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.00	0.00	0.00
		0.03	0.03	0.03	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	0.00
		0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ข-6 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบบจากเข็มที่ติดตั้งต่อโครงสร้างท่อระบบชุดเปิดหน้าดิน

open cut	Diameter (m)	Sheet Pile Tip (m)	Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
			2	3	4		2	3	4
1.0	15	15	-1.19	-2.17	-3.10	Total Displacement (mm)	4.08	3.10	2.18
			17.66	8.88	6.75	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.61	2.83	0.70
			19.23	13.59	12.54	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.02	5.38	4.33
			5.09	1.95	2.03	Max. Shear stress (ton/m ²)	3.87	0.73	0.81
			4.88	4.42	3.54	Total Displacement (mm)	4.36	3.90	3.02
			4.52	3.39	2.36	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.18	1.06	0.03
			19.00	18.23	17.51	Max. Shear stress (ton/m ²)	2.20	1.43	0.72
			3.54	3.85	2.55	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.42	0.73	-0.58
			5.65	4.89	3.87	Total Displacement (mm)	4.65	3.89	2.872
			5.22	4.17	3.52	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.38	0.33	-0.32
			17.10	16.30	14.91	Max. Shear stress (ton/m ²)	2.20	1.40	0.02
			3.86	3.48	2.51	Max. Bending moment (ton.m ²)	1.00	0.62	-0.35
2.0	15	15	6.23	5.39	4.51	Total Displacement (mm)	4.88	4.03	3.152
			6.17	3.35	3.68	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.82	-1.00	-0.67
			13.90	14.59	13.07	Max. Shear stress (ton/m ²)	1.03	1.72	0.20
			2.66	2.31	1.96	Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.03	-0.39	-0.74
			5.90	5.04	4.15	Total Displacement (mm)	4.98	4.12	3.23
			7.13	6.23	4.63	Max. Axial stress (ton/m ²)	3.26	2.36	0.76
			9.65	9.75	9.47	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.60	0.70	0.42
			2.13	1.99	1.56	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.79	0.65	0.22
			6.23	5.38	4.49	Total Displacement (mm)	5.10	4.25	3.36
			6.68	4.98	4.93	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.68	-0.02	-0.07
			9.10	8.96	8.95	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.60	0.46	0.45
			2.43	2.44	2.09	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.50	0.50	0.15



ตารางที่ ข-7 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อตันลอด

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)				
					3	4	5		3	4	5		
					Pipe jacking	0.6	2		1	Total Displacement (mm)	-5.05	-2.07	0.86
Max. Axial stress (ton/m ²)	2.35	2.42	2.46	Inc. Axial stress (ton/m ²)				-0.26		-0.19	-0.15		
Max. Shear stress (ton/m ²)	0.21	0.29	0.35	Inc. Shear stress (ton/m ²)				-0.14		-0.06	0.00		
Max. Bending moment (ton.m ²)	0.70	0.72	0.74	Inc. Bending moment (ton.m ²)				-0.09		-0.06	-0.05		
2	Total Displacement (mm)	-7.53	-3.13	-0.01				Total Displacement (mm)	-14.02	-9.62	-6.50		
	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.35	2.46	2.50				Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.26	-0.15	-0.11		
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.26	0.32	0.35				Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.09	-0.03	0.00		
	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.68	0.74	0.75				Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.10	-0.05	-0.04		
3	Total Displacement (mm)	-8.52	-3.99	-0.52				Total Displacement (mm)	-15.01	-10.48	-7.01		
	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.41	2.49	2.54				Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.20	-0.12	-0.07		
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.32	0.36	0.38				Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	0.01	0.03		
	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.73	0.75	0.76				Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.06	-0.03	-0.02		
3	1	Total Displacement (mm)	-10.62	-5.89			-1.89	Total Displacement (mm)	-17.11	-12.38	-8.38		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.17	2.35			2.42	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.44	-0.26	-0.19		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.28			0.35	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.21	-0.07	0.00		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.64	0.70			0.78	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.15	-0.08	-0.01		
	2	Total Displacement (mm)	-14.64	-7.77			-2.91	Total Displacement (mm)	-21.13	-14.26	-9.40		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.18	2.40			2.45	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.43	-0.21	-0.16		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.24	0.34			0.36	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.10	-0.01	0.01		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.65	0.72			0.73	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.14	-0.07	-0.05		
	3	Total Displacement (mm)	-16.84	-8.81			-3.13	Total Displacement (mm)	-23.33	-15.30	-9.62		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.27	2.43			2.48	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.34	-0.18	-0.13		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.32	0.33			0.38	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	-0.02	0.04		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.68	0.73			0.75	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.10	-0.06	-0.04		
4	1	Total Displacement (mm)	-16.67	-10.06			-4.90	Total Displacement (mm)	-23.16	-16.55	-11.39		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.12	2.27			2.36	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.49	-0.34	-0.25		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.24			0.33	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.27	-0.11	-0.02		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.62	0.67			0.71	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.17	-0.11	-0.08		
	2	Total Displacement (mm)	-22.85	-12.73			-5.85	Total Displacement (mm)	-29.34	-19.22	-12.34		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.09	2.32			2.40	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.52	-0.29	-0.21		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.35			0.35	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.16	0.00	0.00		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.62	0.70			0.72	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.16	-0.09	-0.07		
	3	Total Displacement (mm)	-26.07	-13.96			-5.93	Total Displacement (mm)	-32.56	-20.45	-12.42		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.24	2.39			2.44	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.37	-0.22	-0.17		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.39	0.37			0.39	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.03	0.04		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.68	0.72			0.73	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.11	-0.07	-0.05		
Pipe jacking	0.8	2	1	Total Displacement (mm)			-1.69	1.07	3.82	Total Displacement (mm)	-11.25	-8.49	-5.74
				Max. Axial stress (ton/m ²)			2.76	2.79	2.88	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.29	-0.26	-0.17
				Max. Shear stress (ton/m ²)			0.25	0.31	0.40	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.15	-0.10	-0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)			0.91	0.92	0.96	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.12	-0.11	-0.07
			2	Total Displacement (mm)			-3.59	0.15	2.83	Total Displacement (mm)	-13.15	-9.41	-6.73
				Max. Axial stress (ton/m ²)			2.78	2.85	2.88	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.27	-0.20	-0.17
				Max. Shear stress (ton/m ²)			0.30	0.36	0.39	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.11	-0.05	-0.02
				Max. Bending moment (ton.m ²)			0.92	0.95	0.96	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.11	-0.08	-0.07
			3	Total Displacement (mm)			-5.19	-0.69	2.62	Total Displacement (mm)	-14.75	-10.25	-6.94
				Max. Axial stress (ton/m ²)			2.82	2.90	2.92	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.23	-0.15	-0.13
				Max. Shear stress (ton/m ²)			0.32	0.40	0.42	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.09	-0.01	0.02
				Max. Bending moment (ton.m ²)			0.94	0.97	0.98	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.09	-0.06	-0.05
		3	1	Total Displacement (mm)	-10.16	-5.91	-2.09	Total Displacement (mm)	-16.65	-12.40	-8.58		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.53	2.62	2.72	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.08	0.01	0.11		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.18	0.28	0.39	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.16	-0.06	0.05		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.63	0.67	0.71	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.16	-0.12	-0.07		
			2	Total Displacement (mm)	-13.56	-7.52	-3.43	Total Displacement (mm)	-20.05	-14.01	-9.92		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.59	2.68	2.74	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	0.07	0.13		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.30	0.33	0.38	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.05	-0.01	0.03		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.66	0.70	0.72	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.12	-0.09	-0.07		
			3	Total Displacement (mm)	-16.01	-8.39	-3.14	Total Displacement (mm)	-22.50	-14.88	-9.63		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.67	2.74	2.80	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.06	0.13	0.19		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.41	0.39	0.43	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.06	0.05	0.09		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.70	0.73	0.74	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.08	-0.06	-0.04		
		4	1	Total Displacement (mm)	-12.76	-6.84	-1.89	Total Displacement (mm)	-22.32	-16.40	-11.45		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.83	2.96	3.07	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.22	-0.09	0.02		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.16	0.32	0.42	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.25	-0.09	0.02		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.82	0.88	0.93	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.22	-0.15	-0.10		
			2	Total Displacement (mm)	-18.44	-9.20	-3.28	Total Displacement (mm)	-28.00	-18.76	-12.84		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.84	3.04	3.11	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.21	-0.01	0.06		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.30	0.41	0.43	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.11	0.00	0.03		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.84	0.92	0.94	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.19	-0.11	-0.09		
			3	Total Displacement (mm)	-21.77	-10.30	-2.84	Total Displacement (mm)	-31.33	-19.86	-12.40		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	2.98	3.14	3.19	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.07	0.09	0.14		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.53	0.50	0.49	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.10	0.08		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.91	0.96	0.97	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.12	-0.07	-0.06		

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					3	4	5		3	4	5
Pipe jacking	1.0	2	1	Total Displacement (mm)	2.69	5.40	8.28	Total Displacement (mm)	-11.11	-8.40	-5.52
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.50	3.58	3.75	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.43	-0.35	-0.18
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.25	0.37	0.50	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.22	-0.11	0.03
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.00	1.05	1.13	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.18	-0.13	-0.05
			2	Total Displacement (mm)	1.33	4.57	7.36	Total Displacement (mm)	-12.47	-9.23	-6.44
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.59	3.64	3.76	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.34	-0.29	-0.17
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.39	0.38	0.47	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.09	-0.09	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.06	1.07	1.13	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.12	-0.11	-0.05
			3	Total Displacement (mm)	-0.07	4.47	7.66	Total Displacement (mm)	-13.87	-9.33	-6.14
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.68	3.72	3.83	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.25	-0.21	-0.10
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.45	0.49	0.54	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	0.02	0.07
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.10	1.12	1.16	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.08	-0.06	-0.02
		3	1	Total Displacement (mm)	-2.89	1.50	5.49	Total Displacement (mm)	-16.69	-12.30	-8.31
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.30	3.43	3.54	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.63	-0.50	-0.39
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.17	0.34	0.47	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.30	-0.13	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.92	1.00	1.06	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.26	-0.18	-0.12
			2	Total Displacement (mm)	-5.95	0.24	4.58	Total Displacement (mm)	-19.75	-13.56	-9.22
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.38	3.53	3.58	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.55	-0.40	-0.35
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.37	0.42	0.44	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.10	-0.06	-0.03
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.99	1.05	1.07	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.19	-0.13	-0.11
			3	Total Displacement (mm)	-7.80	-0.06	5.17	Total Displacement (mm)	-21.60	-13.86	-8.63
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.53	3.64	3.67	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.40	-0.29	-0.26
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.51	0.52	0.53	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.05	0.06
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.07	1.10	1.11	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.11	-0.08	-0.07
4	1	Total Displacement (mm)	-8.51	-2.07	2.89	Total Displacement (mm)	-22.31	-15.87	-10.91		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	3.14	3.45	3.48	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.79	-0.48	-0.45		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.28	0.36	0.46	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.19	-0.11	-0.01		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.83	1.01	1.04	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.35	-0.17	-0.14		
	2	Total Displacement (mm)	-14.05	-4.12	2.36	Total Displacement (mm)	-27.85	-17.92	-11.44		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	3.06	3.53	3.55	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.87	-0.40	-0.38		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.28	0.56	0.52	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.19	0.09	0.05		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.88	1.08	1.11	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.30	-0.10	-0.07		
	3	Total Displacement (mm)	-16.62	-4.48	1.88	Total Displacement (mm)	-30.42	-18.28	-11.92		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	3.28	3.70	3.95	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.65	-0.23	0.02		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.61	0.55	0.60	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.08	0.13		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.02	1.13	1.21	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.16	-0.05	0.03		
Pipe jacking	1.2	2	1	Total Displacement (mm)	7.63	10.33	13.11	Total Displacement (mm)	-10.84	-8.14	-5.36
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.42	4.49	4.59	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.32	-0.25	-0.15
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.33	0.49	0.63	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.19	-0.03	0.11
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.18	1.25	1.32	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.15	-0.08	-0.01
			2	Total Displacement (mm)	6.77	10.27	12.76	Total Displacement (mm)	-11.70	-8.20	-5.71
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.53	4.62	4.65	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.21	-0.12	-0.09
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.52	0.56	0.59	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.04	0.07
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.27	1.31	1.33	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.06	-0.02	0.00
			3	Total Displacement (mm)	5.46	9.68	12.62	Total Displacement (mm)	-13.01	-8.79	-5.85
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.64	4.68	4.70	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.10	-0.06	-0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.60	0.65	0.67	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.08	0.13	0.15
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.33	1.35	1.36	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.02	0.03
		3	1	Total Displacement (mm)	2.17	6.38	10.27	Total Displacement (mm)	-16.30	-12.09	-8.20
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.21	4.30	4.44	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.53	-0.44	-0.30
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.25	0.45	0.62	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.28	-0.07	0.10
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.08	1.18	1.27	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.25	-0.15	-0.06
			2	Total Displacement (mm)	-0.54	5.42	9.41	Total Displacement (mm)	-19.01	-13.05	-9.06
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.27	4.43	4.49	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.47	-0.31	-0.25
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.54	0.54	0.57	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.05
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.20	1.25	1.28	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.13	-0.08	-0.05
			3	Total Displacement (mm)	-1.99	5.49	10.35	Total Displacement (mm)	-20.46	-12.98	-8.12
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.49	4.59	4.62	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.25	-0.15	-0.12
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.68	0.67	0.69	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.16	0.15	0.17
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.32	1.34	1.35	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.01	0.01	0.02
4	1	Total Displacement (mm)	-3.49	2.80	7.85	Total Displacement (mm)	-21.96	-15.67	-10.62		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	3.99	4.21	4.37	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.75	-0.53	-0.37		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.13	0.45	0.58	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.39	-0.07	0.06		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.98	1.15	1.25	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.35	-0.18	-0.08		
	2	Total Displacement (mm)	-8.45	1.20	7.49	Total Displacement (mm)	-26.92	-17.27	-10.98		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	3.99	4.33	4.46	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.75	-0.41	-0.28		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.49	0.70	0.65	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	0.18	0.13		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.09	1.26	1.30	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.24	-0.07	-0.03		
	3	Total Displacement (mm)	-10.64	0.70	8.05	Total Displacement (mm)	-29.11	-17.77	-10.42		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	4.24	4.51	4.57	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.50	-0.23	-0.17		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.88	0.70	0.68	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.36	0.18	0.16		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.31	1.33	1.34	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.02	0.00	0.01		

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					4	5	6		4	5	6
Pipe jacking	1.5	2	1	Total Displacement (mm)	16.40	18.67	21.19	Total Displacement (mm)	-7.64	-5.37	-2.85
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.88	4.95	5.02	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.18	-0.11	-0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.43	0.65	0.72	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.21	0.29
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.25	1.35	1.42	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.03	0.07	0.14
			2	Total Displacement (mm)	16.30	18.53	20.45	Total Displacement (mm)	-7.74	-5.51	-3.59
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.04	5.05	5.06	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	-0.01	0.00
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.51	0.55	0.60	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.11	0.17
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.34	1.36	1.38	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	0.08	0.10
			3	Total Displacement (mm)	16.07	18.43	20.28	Total Displacement (mm)	-7.97	-5.61	-3.76
				Max. Axial stress (ton/m ²)	5.15	5.11	5.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.09	0.05	0.03
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.52	0.64	0.68	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.08	0.21	0.24
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.37	1.41	1.42	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.09	0.13	0.14
		3	1	Total Displacement (mm)	11.99	15.82	19.43	Total Displacement (mm)	-12.05	-8.22	-4.61
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.66	4.77	4.86	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.40	-0.29	-0.20
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.40	0.61	0.77	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	0.17	0.33
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.17	1.29	1.39	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.11	0.01	0.11
			2	Total Displacement (mm)	11.61	15.27	18.52	Total Displacement (mm)	-12.43	-8.77	-5.52
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.84	4.87	4.90	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.22	-0.19	-0.16
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.53	0.51	0.63	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.09	0.08	0.20
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.29	1.29	1.35	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.07
			3	Total Displacement (mm)	11.77	16.55	19.77	Total Displacement (mm)	-12.27	-7.49	-4.27
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.99	5.02	5.00	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.07	-0.04	-0.06
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.67	0.67	0.69	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.23	0.23	0.25
				Max. Bending moment (ton.m ²)	1.39	1.40	1.41	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.11	0.12	0.13
4	1	Total Displacement (mm)	8.63	13.45	17.75	Total Displacement (mm)	-15.41	-10.59	-6.29		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	4.61	4.43	4.78	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.45	-0.63	-0.28		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.38	0.49	0.77	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.05	0.05	0.33		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.15	1.12	1.37	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.13	-0.16	0.09		
	2	Total Displacement (mm)	7.32	13.41	17.59	Total Displacement (mm)	-16.72	-10.63	-6.45		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	4.64	4.53	4.83	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.42	-0.53	-0.23		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.73	0.55	0.65	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.30	0.12	0.22		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.32	1.18	1.35	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	-0.10	0.07		
	3	Total Displacement (mm)	7.27	13.25	17.15	Total Displacement (mm)	-16.77	-10.79	-6.89		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	4.87	4.67	4.94	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.19	-0.39	-0.12		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.67	0.57	0.69	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.23	0.13	0.26		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	1.40	1.24	1.39	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.12	-0.04	0.11		
Pipe jacking	2.0	2	1	Total Displacement (mm)	29.58	31.05	32.80	Total Displacement (mm)	-4.00	-2.53	-0.78
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.85	7.94	8.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.29	-0.20	-0.06
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.14	1.31	1.39	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.14	0.31	0.39
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.51	2.61	2.70	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.03	0.07	0.16
			2	Total Displacement (mm)	29.28	30.92	32.11	Total Displacement (mm)	-4.30	-2.66	-1.47
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.98	7.96	8.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.16	-0.18	-0.06
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.10	1.17	1.24	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.10	0.17	0.24
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.48	2.51	2.63	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.06	-0.03	0.09
			3	Total Displacement (mm)	29.12	30.78	31.70	Total Displacement (mm)	-4.46	-2.80	-1.88
				Max. Axial stress (ton/m ²)	8.15	8.11	8.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	-0.03	-0.02
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.11	1.17	1.24	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.11	0.17	0.24
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.58	2.59	2.64	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.05	0.10
		3	1	Total Displacement (mm)	25.26	28.64	31.86	Total Displacement (mm)	-8.32	-4.94	-1.72
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.57	8.00	8.10	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.57	-0.14	-0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.12	1.31	1.40	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.31	0.40
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.40	2.59	2.68	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.14	0.05	0.14
			2	Total Displacement (mm)	25.01	27.76	31.50	Total Displacement (mm)	-8.57	-5.82	-2.08
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.72	8.03	8.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.42	-0.11	-0.05
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.92	1.06	1.24	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.08	0.06	0.24
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.38	2.50	2.59	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.16	-0.04	0.05
			3	Total Displacement (mm)	24.79	27.56	31.37	Total Displacement (mm)	-8.79	-6.02	-2.21
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.95	8.19	8.12	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.19	0.05	-0.02
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.08	1.11	1.18	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.08	0.11	0.18
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.52	2.57	2.58	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.02	0.03	0.04
4	1	Total Displacement (mm)	22.33	27.11	30.80	Total Displacement (mm)	-11.25	-6.47	-2.78		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	7.35	7.67	7.71	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.79	-0.47	-0.43		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	1.12	1.13	1.50	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.13	0.50		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	2.32	2.54	2.63	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.22	0.00	0.09		
	2	Total Displacement (mm)	21.71	26.15	29.72	Total Displacement (mm)	-11.87	-7.43	-3.86		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	7.60	7.63	7.70	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.54	-0.51	-0.44		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.97	1.02	1.27	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.03	0.02	0.27		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	2.38	2.41	2.53	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.16	-0.13	-0.01		
	3	Total Displacement (mm)	21.25	25.57	29.37	Total Displacement (mm)	-12.33	-8.01	-4.21		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	7.91	7.84	7.75	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.23	-0.30	-0.39		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	1.15	1.05	1.18	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.15	0.05	0.18		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	2.55	2.50	2.51	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	-0.04	-0.03		

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					5	6	7		5	6	7
					Pipe jacking	2.5	3		1	Total Displacement (mm)	54.10
				Max. Axial stress (ton/m ²)	8.34	8.42	8.47	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.23	-0.15	-0.10
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.21	1.40	1.45	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.20	0.39	0.44
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.68	2.86	2.92	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.22	0.28
			2	Total Displacement (mm)	53.99	54.10	54.20	Total Displacement (mm)	-3.11	-3.00	-2.90
				Max. Axial stress (ton/m ²)	8.62	8.52	8.43	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.05	-0.05	-0.14
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.77	0.97	1.24	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.25	-0.04	0.23
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.57	2.63	2.78	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.07	-0.01	0.14
			3	Total Displacement (mm)	53.95	53.97	54.13	Total Displacement (mm)	-3.15	-3.13	-2.97
				Max. Axial stress (ton/m ²)	8.95	8.69	8.56	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.38	0.12	-0.01
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.87	1.00	1.13	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.15	-0.01	0.12
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.73	2.70	2.75	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.09	0.06	0.11
			1	Total Displacement (mm)	51.71	52.61	54.15	Total Displacement (mm)	-5.39	-4.49	-2.95
				Max. Axial stress (ton/m ²)	8.20	8.14	8.32	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.37	-0.43	-0.25
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.28	1.44	1.57	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.27	0.43	0.56
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.69	2.78	2.95	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.05	0.14	0.31
			2	Total Displacement (mm)	51.18	51.97	53.57	Total Displacement (mm)	-5.92	-5.13	-3.53
				Max. Axial stress (ton/m ²)	8.56	8.28	8.28	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	-0.29	-0.29
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.80	1.00	1.27	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.21	-0.02	0.26
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.61	2.55	2.75	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.03	-0.09	0.11
			3	Total Displacement (mm)	50.19	51.52	53.36	Total Displacement (mm)	-6.91	-5.58	-3.74
				Max. Axial stress (ton/m ²)	9.07	8.62	8.43	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.50	0.05	-0.14
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.00	0.96	1.15	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.02	-0.06	0.14
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.89	2.67	2.72	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.25	0.03	0.08
			1	Total Displacement (mm)	48.52	50.64	53.17	Total Displacement (mm)	-8.58	-6.46	-3.93
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.94	7.92	8.14	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.63	-0.65	-0.43
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.21	1.50	1.65	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.20	0.49	0.64
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.58	2.73	2.94	Inc. Bending moment (ton.m ²)	-0.06	0.09	0.30
			2	Total Displacement (mm)	47.48	49.98	52.63	Total Displacement (mm)	-9.62	-7.12	-4.47
				Max. Axial stress (ton/m ²)	8.50	8.19	8.13	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.07	-0.38	-0.44
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.96	0.89	1.26	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.05	-0.12	0.25
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.70	2.54	2.70	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.06	-0.10	0.06
			3	Total Displacement (mm)	46.14	49.02	51.40	Total Displacement (mm)	-10.96	-8.08	-5.70
				Max. Axial stress (ton/m ²)	9.08	8.54	8.33	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.51	-0.03	-0.24
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.05	0.94	1.09	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.04	-0.08	0.08
				Max. Bending moment (ton.m ²)	2.94	2.66	2.67	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.30	0.02	0.03

ตารางที่ ข-8 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเปิดหน้าดินต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบ

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					2	3	4		2	3	4
					HDD				1	Total Displacement (mm)	-17.34
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.07	0.10	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.06	-0.03	-0.05
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.02	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.02	0.00	-0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			2	Total Displacement (mm)	-21.43	-14.35	-9.83	Total Displacement (mm)	-22.30	-15.22	-10.70
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.09	0.11	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.04	-0.01	-0.05
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.03	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	-0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			3	Total Displacement (mm)	-22.31	-15.35	-11.13	Total Displacement (mm)	-23.18	-16.22	-12.00
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.11	0.12	0.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	0.00	-0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.06	0.05	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			1	Total Displacement (mm)	-27.68	-18.51	-12.71	Total Displacement (mm)	-28.55	-19.38	-13.58
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.07	0.08	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.05	-0.05	-0.05
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.01	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.01	-0.02	-0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			2	Total Displacement (mm)	-33.86	-22.14	-15.13	Total Displacement (mm)	-34.73	-23.01	-16.00
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.10	0.08	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.03	-0.04	-0.05
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.01	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	-0.02	-0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			3	Total Displacement (mm)	-35.88	-22.53	-14.79	Total Displacement (mm)	-36.75	-23.40	-15.66
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.09	0.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.01	-0.03	-0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.04	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.02	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00
			1	Total Displacement (mm)	-36.14	-25.31	-17.08	Total Displacement (mm)	-37.01	-26.18	-17.95
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.55	0.08	0.07	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.43	-0.04	-0.05
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.02	0.01	Inc. Shear stress (ton/m ²)	-0.02	-0.01	-0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			2	Total Displacement (mm)	-45.63	-30.51	-19.75	Total Displacement (mm)	-46.50	-31.38	-20.62
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.10	0.09	0.08	Inc. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	-0.03	-0.05
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.02	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	-0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			3	Total Displacement (mm)	-48.06	-31.89	-19.97	Total Displacement (mm)	-48.93	-32.76	-20.84
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.15	0.11	0.09	Inc. Axial stress (ton/m ²)	0.02	-0.01	-0.04
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.06	0.03	Inc. Shear stress (ton/m ²)	0.05	0.04	0.01
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00	Inc. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.00	0.00

ตารางที่ ข-9 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเปิดหน้าดินต่อที่ระบบขุดเปิดหน้าดิน

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					3	4	5		3	4	5
DB	1	2	1	Total Displacement (mm)	-12.50	-9.96	-7.99	Total Displacement (mm)	-6.90	-4.36	-2.39
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.95	8.89	9.95	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.92	3.86	4.91
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.92	8.02	10.18	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.95	0.06	2.21
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.10	1.16	1.82	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.89	-0.05	0.61	
			2	Total Displacement (mm)	-14.10	-12.77	-11.59	Total Displacement (mm)	-8.50	-7.17	-5.99
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	13.97	14.54	14.79	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.94	9.50	9.76
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.77	9.49	12.21	Max. Vertical stress (ton/m ²)	5.80	1.52	4.24
			Max. Shear stress (ton.m ²)	3.55	1.63	2.59	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.34	0.42	1.38	
			3	Total Displacement (mm)	-16.80	-15.80	-14.83	Total Displacement (mm)	-11.20	-10.20	-9.23
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	21.35	19.09	18.58	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	16.31	14.06	13.54
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	19.26	12.93	14.23	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.29	4.97	6.27
			Max. Shear stress (ton.m ²)	5.00	2.08	3.26	Max. Shear stress (ton.m ²)	3.79	0.87	2.06	
		3	1	Total Displacement (mm)	-15.92	-12.51	-9.62	Total Displacement (mm)	-10.32	-6.91	-4.02
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.10	10.21	10.68	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.06	5.17	5.65
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.00	12.04	8.76	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.03	4.07	0.79
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.55	2.43	1.24	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.34	1.22	0.04	
			2	Total Displacement (mm)	-17.39	-15.62	-13.73	Total Displacement (mm)	-11.79	-10.02	-8.13
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	14.64	16.50	15.36	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.61	11.46	10.32
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.00	16.48	10.11	Max. Vertical stress (ton/m ²)	4.03	8.52	2.15
			Max. Shear stress (ton.m ²)	3.31	4.09	1.75	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.11	2.89	0.54	
			3	Total Displacement (mm)	-19.60	-17.83	-16.41	Total Displacement (mm)	-14.00	-12.23	-10.81
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	22.97	18.65	16.10	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	17.93	13.61	11.06
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	16.98	18.03	11.38	Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.01	10.07	3.41
			Max. Shear stress (ton.m ²)	4.47	4.57	1.96	Max. Shear stress (ton.m ²)	3.26	3.36	0.75	
4	1	Total Displacement (mm)	-18.99	-15.40	-11.65	Total Displacement (mm)	-13.39	-9.80	-6.05		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.90	7.27	9.48	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-1.14	2.24	4.45		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	5.66	9.53	8.00	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.31	1.56	0.03		
	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.43	2.01	1.50	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.22	0.80	0.29			
	2	Total Displacement (mm)	-20.59	-18.88	-16.23	Total Displacement (mm)	-14.99	-13.28	-10.63		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.70	12.28	13.15	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.66	7.24	8.12		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.60	12.32	10.21	Max. Vertical stress (ton/m ²)	4.63	4.35	2.24		
	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.68	3.47	2.12	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.47	2.26	0.91			
	3	Total Displacement (mm)	-21.79	-20.32	-18.49	Total Displacement (mm)	-16.19	-14.72	-12.89		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.00	17.24	15.82	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.96	12.20	10.78		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.66	16.00	11.87	Max. Vertical stress (ton/m ²)	3.69	8.03	3.90		
	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.58	4.52	2.46	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.37	3.31	1.25			
DB	2	3	1	Total Displacement (mm)	-2.60	-1.47	-0.55	Total Displacement (mm)	-3.11	-1.98	-1.06
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.16	4.99	4.73	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.28	3.11	2.85
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	16.11	17.46	16.78	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.54	1.89	1.22
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.52	2.76	2.60	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.60	-0.36	-0.52	
			2	Total Displacement (mm)	-3.72	-3.03	-2.32	Total Displacement (mm)	-4.23	-3.54	-2.83
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.88	1.37	1.65	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.00	-0.51	-0.24
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	22.22	20.00	18.77	Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.66	4.43	3.20
			Max. Shear stress (ton.m ²)	3.40	3.03	2.81	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.28	-0.09	-0.31	
			3	Total Displacement (mm)	-5.23	-4.43	-3.95	Total Displacement (mm)	-5.74	-4.94	-4.46
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.83	1.84	1.41	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.95	-0.04	-0.47
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	30.13	24.18	21.54	Max. Vertical stress (ton/m ²)	14.56	8.62	5.97
			Max. Shear stress (ton.m ²)	3.47	3.23	3.00	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.35	0.11	-0.12	
		4	1	Total Displacement (mm)	-4.24	-2.60	-1.26	Total Displacement (mm)	-4.75	-3.11	-1.77
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.29	5.90	5.82	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.41	4.02	3.94
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	18.48	21.40	20.43	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.91	5.83	4.86
			Max. Shear stress (ton.m ²)	4.09	4.08	3.45	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.97	0.96	0.33	
			2	Total Displacement (mm)	-5.07	-4.18	-3.29	Total Displacement (mm)	-5.58	-4.69	-3.80
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.99	2.47	2.33	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.11	0.59	0.45
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	27.04	25.49	22.74	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.47	9.92	7.18
			Max. Shear stress (ton.m ²)	4.60	4.34	3.69	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.48	1.22	0.57	
			3	Total Displacement (mm)	-6.62	-5.54	-4.83	Total Displacement (mm)	-7.13	-6.05	-5.34
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.39	2.34	1.42	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.51	0.46	-0.46
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	33.99	31.38	25.76	Max. Vertical stress (ton/m ²)	18.42	15.81	10.19
			Max. Shear stress (ton.m ²)	4.43	4.57	3.86	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.31	1.45	0.74	
4	1	Total Displacement (mm)	-5.66	-3.85	-2.14	Total Displacement (mm)	-6.17	-4.36	-2.65		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.28	6.65	6.52	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.40	4.77	4.64		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	18.39	19.30	19.41	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.82	3.73	3.84		
	Max. Shear stress (ton.m ²)	4.10	3.64	2.94	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.98	0.52	-0.19			
	2	Total Displacement (mm)	-6.42	-5.55	-4.43	Total Displacement (mm)	-6.93	-6.06	-4.94		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.89	1.56	2.02	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.01	-0.33	0.14		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	33.83	23.75	21.57	Max. Vertical stress (ton/m ²)	18.26	8.18	6.00		
	Max. Shear stress (ton.m ²)	4.49	4.05	3.22	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.37	0.93	0.10			
	3	Total Displacement (mm)	-8.09	-6.77	-5.90	Total Displacement (mm)	-8.60	-7.28	-6.41		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.81	1.85	1.67	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.93	-0.03	-0.21		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	33.98	30.37	24.63	Max. Vertical stress (ton/m ²)	18.41	14.80	9.06		
	Max. Shear stress (ton.m ²)	4.61	4.06	3.37	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.49	0.94	0.25			

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)				
					3	4	5		3	4	5		
					DB	3	2		1	Total Displacement (mm)	-2.26	-1.11	-0.16
Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.43	7.94	7.52	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.34			3.85		3.43			
Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.43	16.63	13.95	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.15			3.05		0.37			
				Max. Shear stress (ton.m ²)	2.01		2.63	3.18	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.67	-0.04	0.50	
		2	2	Total Displacement (mm)	-3.26		-2.58	-1.85	Total Displacement (mm)	-4.25	-3.57	-2.84	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.89			4.32	4.86		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-2.20	0.23	0.77			
Max. Vertical stress (ton/m ²)	14.25			17.33	15.06		Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.67	3.75	1.48			
				Max. Shear stress (ton.m ²)	2.48		2.94	2.90	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.20	0.27	0.22	
		3	3	Total Displacement (mm)	-4.57		-3.87	-3.38	Total Displacement (mm)	-5.56	-4.86	-4.37	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.05			2.87	1.78		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-1.04	-1.22	-2.31			
Max. Vertical stress (ton/m ²)	18.72			20.43	16.13		Max. Vertical stress (ton/m ²)	5.14	6.85	2.55			
				Max. Shear stress (ton.m ²)	3.30		3.22	2.64	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.62	0.54	-0.04	
	3	3	1	Total Displacement (mm)	-3.94	-2.31	-0.92	Total Displacement (mm)	-4.93	-3.30	-1.91		
Max. Horizontal stress (ton/m ²)				7.42	8.95	8.58	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.33	4.86	4.49			
Max. Vertical stress (ton/m ²)				21.02	15.14	14.06	Max. Vertical stress (ton/m ²)	7.44	1.56	0.48			
					Max. Shear stress (ton.m ²)	3.38	2.71	2.98	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.71	0.03	0.30	
			2	2	Total Displacement (mm)	-4.75	-3.86	-2.86	Total Displacement (mm)	-5.74	-4.85	-3.85	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)		4.68			3.80	5.48	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.59	-0.29	1.39			
Max. Vertical stress (ton/m ²)		31.50			16.60	15.32	Max. Vertical stress (ton/m ²)	17.92	3.02	1.74			
					Max. Shear stress (ton.m ²)	3.73	2.75	2.68	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.05	0.07	0.01	
			3	3	Total Displacement (mm)	-6.08	-5.04	-4.31	Total Displacement (mm)	-7.07	-6.03	-5.30	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.54	2.22			1.88	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.45	-1.87	-2.21				
Max. Vertical stress (ton/m ²)	23.26	18.56			16.30	Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.68	4.98	2.72				
				Max. Shear stress (ton.m ²)	5.21	2.99	2.47	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.53	0.31	-0.20		
	4	4	1	Total Displacement (mm)	-5.40	-3.60	-1.83	Total Displacement (mm)	-6.39	-4.59	-2.82		
Max. Horizontal stress (ton/m ²)				5.52	9.23	9.58	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.43	5.14	5.49			
Max. Vertical stress (ton/m ²)				12.85	14.58	17.02	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.73	1.00	3.44			
					Max. Shear stress (ton.m ²)	2.72	3.92	2.76	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.05	1.25	0.08	
			2	2	Total Displacement (mm)	-6.69	-5.27	-3.97	Total Displacement (mm)	-7.68	-6.26	-4.96	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)		2.06			3.85	5.68	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-2.03	-0.24	1.59			
Max. Vertical stress (ton/m ²)		18.09			16.73	18.53	Max. Vertical stress (ton/m ²)	4.51	3.15	4.95			
					Max. Shear stress (ton.m ²)	3.46	3.11	3.02	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.79	0.44	0.35	
			3	3	Total Displacement (mm)	-7.18	-6.39	-5.40	Total Displacement (mm)	-8.17	-7.38	-6.39	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.23	1.99			3.30	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-1.86	-2.11	-0.79				
Max. Vertical stress (ton/m ²)	23.00	19.00			20.38	Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.42	5.42	6.80				
				Max. Shear stress (ton.m ²)	2.64	3.24	3.22	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.03	0.57	0.55		
DB	4	2	1	Total Displacement (mm)	-2.06	-0.92	0.07	Total Displacement (mm)	-3.36	-2.21	-1.22		
Max. Horizontal stress (ton/m ²)				6.22	7.12	3.25	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.85	2.75	-1.12			
Max. Vertical stress (ton/m ²)				12.72	13.63	13.40	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.10	0.81	0.58			
						Max. Shear stress (ton.m ²)	1.94	1.90	1.85	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.94	-0.98	-1.03
				2	2	Total Displacement (mm)	-2.93	-2.31	-1.57	Total Displacement (mm)	-4.23	-3.61	-2.87
Max. Horizontal stress (ton/m ²)			1.55			4.69	5.29	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-2.82	0.32	0.92		
Max. Vertical stress (ton/m ²)			14.15			14.78	14.48	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.34	1.97	1.66		
						Max. Shear stress (ton.m ²)	2.36	2.92	3.08	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.52	0.04	0.20
				3	3	Total Displacement (mm)	-4.26	-2.18	-1.70	Total Displacement (mm)	-5.56	-3.47	-3.00
Max. Horizontal stress (ton/m ²)			2.37			1.50	2.40	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-2.00	-2.87	-1.98		
Max. Vertical stress (ton/m ²)			14.86			15.92	15.59	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.04	3.10	2.78		
						Max. Shear stress (ton.m ²)	2.01	2.68	2.91	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.87	-0.20	0.03
		4	3	1	Total Displacement (mm)	-3.69	-2.18	-0.74	Total Displacement (mm)	-4.99	-3.47	-2.03	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)					6.48	9.22	9.16	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.11	4.84	4.79		
Max. Vertical stress (ton/m ²)					11.90	13.91	13.66	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.92	1.09	0.84		
						Max. Shear stress (ton.m ²)	2.07	2.70	3.30	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.81	-0.18	0.42
				2	2	Total Displacement (mm)	-4.20	-3.68	-2.62	Total Displacement (mm)	-5.50	-4.98	-3.91
Max. Horizontal stress (ton/m ²)			2.47			4.84	5.92	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-1.90	0.47	1.55		
Max. Vertical stress (ton/m ²)			13.32			15.16	14.81	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.51	2.35	1.99		
						Max. Shear stress (ton.m ²)	2.36	2.62	2.09	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.52	-0.26	-0.79
				3	3	Total Displacement (mm)	-5.79	-4.78	-4.02	Total Displacement (mm)	-7.09	-6.07	-5.32
Max. Horizontal stress (ton/m ²)			4.42			2.30	1.99	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.04	-2.07	-2.38		
Max. Vertical stress (ton/m ²)			20.46			16.50	15.62	Max. Vertical stress (ton/m ²)	7.64	3.68	2.81		
						Max. Shear stress (ton.m ²)	3.86	2.78	2.88	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.98	-0.10	0.00
	4	4	1	Total Displacement (mm)	-5.30	-3.50	-1.68	Total Displacement (mm)	-6.60	-4.79	-2.97		
Max. Horizontal stress (ton/m ²)				6.44	10.00	9.83	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.07	5.63	5.46			
Max. Vertical stress (ton/m ²)				12.23	13.76	13.58	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.58	0.94	0.77			
					Max. Shear stress (ton.m ²)	2.98	3.03	2.77	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.10	0.15	-0.11	
			2	2	Total Displacement (mm)	-6.04	-5.04	-3.72	Total Displacement (mm)	-7.34	-6.33	-5.02	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)		1.86			4.09	5.97	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-2.51	-0.28	1.60			
Max. Vertical stress (ton/m ²)		16.93			15.28	14.78	Max. Vertical stress (ton/m ²)	4.11	2.46	1.97			
					Max. Shear stress (ton.m ²)	3.21	2.91	2.51	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.33	0.03	-0.37	
			3	3	Total Displacement (mm)	-7.09	-6.06	-5.07	Total Displacement (mm)	-8.39	-7.36	-6.37	
Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.47	2.73			1.71	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-1.90	-1.64	-2.66				
Max. Vertical stress (ton/m ²)	20.15	17.19			15.58	Max. Vertical stress (ton/m ²)	7.33	4.37	2.76				
				Max. Shear stress (ton.m ²)	2.92	2.37	2.42	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.04	-0.51	-0.46		

	Diameter (m)	Width (m)	Depth (m)		Distance from main structure (m)			Incremental effect	Distance from main structure (m)		
					3	4	5		3	4	5
DB	5	2	1	Total Displacement (mm)	-2.53	-1.38	-0.35	Total Displacement (mm)	-3.44	-2.29	-1.26
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.91	7.00	5.99	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.72	2.81	1.81
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.13	9.00	9.19	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.12	-0.01	0.18
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.07	2.00	1.82	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.76	0.69	0.51	
			Total Displacement (mm)	-3.36	-2.73	-2.03	Total Displacement (mm)	-4.27	-3.64	-2.94	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.65	8.20	7.26	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.46	4.01	3.07	
		2	Total Displacement (mm)	10.11	9.58	9.43	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.10	0.57	0.42	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.95	1.81	1.78	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.64	0.50	0.47	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	-4.85	-4.10	-3.55	Total Displacement (mm)	-5.76	-5.01	-4.46	
		3	Total Displacement (mm)	13.20	10.61	8.93	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.01	6.42	4.75	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	12.13	10.54	10.03	Max. Vertical stress (ton/m ²)	3.12	1.53	1.02	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.55	1.70	1.69	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.24	0.39	0.38	
	3	1	Total Displacement (mm)	-4.20	-2.67	-1.19	Total Displacement (mm)	-5.11	-3.58	-2.10	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.20	7.80	6.96	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.01	3.61	2.77	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.30	9.30	9.13	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.71	0.29	0.12	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.20	2.34	2.10	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.89	1.03	0.79	
			Total Displacement (mm)	-4.54	-4.01	-3.12	Total Displacement (mm)	-5.45	-4.92	-4.03	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.45	8.36	8.25	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.26	4.18	4.06	
		2	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.79	9.77	9.42	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.78	0.76	0.40	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.62	2.04	1.75	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.31	0.73	0.44	
			Total Displacement (mm)	-6.14	-5.27	-4.52	Total Displacement (mm)	-7.05	-6.18	-5.43	
		3	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	13.28	10.99	9.74	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.09	6.80	5.55	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.49	11.13	10.17	Max. Vertical stress (ton/m ²)	3.48	2.12	1.16	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.67	1.41	1.87	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.36	0.10	0.56	
4	1	Total Displacement (mm)	-5.88	-4.00	-2.16	Total Displacement (mm)	-6.79	-4.91	-3.07		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.26	7.48	7.67	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.07	3.29	3.48		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	7.78	8.97	9.12	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-1.23	-0.04	0.10		
	2	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.41	2.47	2.35	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.10	1.16	1.04		
		Total Displacement (mm)	-6.28	-5.23	-4.28	Total Displacement (mm)	-7.19	-6.14	-5.19		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.19	7.50	8.81	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.00	3.31	4.62		
3	Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.89	9.88	9.55	Max. Vertical stress (ton/m ²)	3.88	0.87	0.54			
	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.66	2.22	1.47	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.35	0.91	0.16			
	Total Displacement (mm)	-7.62	-6.52	-5.62	Total Displacement (mm)	-8.53	-7.43	-6.53			
6	2	1	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	16.07	11.01	10.17	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.89	6.82	5.98	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.41	11.60	10.60	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.40	2.59	1.58	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.80	1.55	1.88	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.49	0.24	0.57	
		2	Total Displacement (mm)	-2.33	-1.21	-0.18	Total Displacement (mm)	-3.51	-2.39	-1.35	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.75	7.32	6.11	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.27	2.84	1.63	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.23	8.81	8.65	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.37	0.21	0.05	
	3	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.46	2.77	2.51	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.58	0.90	0.64		
		Total Displacement (mm)	-3.12	-2.47	-1.79	Total Displacement (mm)	-4.30	-3.64	-2.97		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.41	7.46	6.19	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.93	2.98	1.71		
	3	1	Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.56	9.23	8.85	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.96	0.63	0.25	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.29	2.42	2.23	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.41	0.54	0.36	
			Total Displacement (mm)	-4.58	-3.81	-3.28	Total Displacement (mm)	-5.76	-4.98	-4.46	
2		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.98	9.61	7.47	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.50	5.13	2.99		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.18	10.31	9.31	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.58	1.71	0.71		
		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.27	2.05	1.87	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.39	0.17	-0.01		
3	Total Displacement (mm)	-4.10	-2.55	-1.02	Total Displacement (mm)	-5.28	-3.73	-2.19			
	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.00	8.39	8.02	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.52	3.91	3.54			
	Max. Vertical stress (ton/m ²)	7.95	8.52	8.84	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.65	-0.08	0.24			
4	3	1	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.89	3.01	2.79	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.01	1.13	0.92	
			Total Displacement (mm)	-4.39	-3.80	-2.84	Total Displacement (mm)	-5.56	-4.98	-4.01	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.88	6.96	6.53	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.40	2.48	2.05	
		2	Max. Vertical stress (ton/m ²)	10.46	9.20	9.09	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.86	0.60	0.49	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.94	2.01	2.50	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.06	0.13	0.62	
			Total Displacement (mm)	-5.84	-5.02	-4.25	Total Displacement (mm)	-7.02	-6.19	-5.42	
	3	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.13	9.11	7.65	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.65	4.63	3.17		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.32	10.45	9.72	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.72	1.85	1.12		
		Max. Shear stress (ton.m ²)	3.24	2.08	2.12	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.37	0.20	0.25		
	4	1	Total Displacement (mm)	-5.84	-3.87	-2.04	Total Displacement (mm)	-7.01	-5.05	-3.22	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.10	7.80	8.89	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.62	3.32	4.42	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	7.57	8.24	8.73	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-1.04	-0.36	0.13	
2		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.43	3.11	2.96	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.55	1.23	1.09		
		Total Displacement (mm)	-6.04	-5.19	-4.08	Total Displacement (mm)	-7.22	-6.37	-5.26		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.72	5.84	7.90	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.24	1.37	3.42		
3	Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.53	9.41	9.30	Max. Vertical stress (ton/m ²)	4.93	0.81	0.70			
	Max. Shear stress (ton.m ²)	2.22	2.55	2.69	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.35	0.67	0.81			
	Total Displacement (mm)	-7.32	-6.26	-5.36	Total Displacement (mm)	-8.50	-7.44	-6.54			
4	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	13.57	8.24	8.90	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.09	3.76	4.42			
	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.01	11.01	10.01	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.41	2.41	1.41			
	Max. Shear stress (ton.m ²)	3.55	2.07	2.17	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.68	0.19	0.29			

ตารางที่ ข-10 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อท่อตันลอด

Diameter (m)	Type	Adjacent tunnel diameter (times of main tunnel)		Distance from main structure (time)			Incremental effect	Distance from main structure (time)				
				2	3	4		2	3	4		
				Pipe jacking	0.6	Upper		0.5	Total Displacement (mm)	7.73		
Max. Axial stress (ton/m ²)	2.74						Max. Axial stress (ton/m ²)		0.06			
Max. Shear stress (ton/m ²)	0.44						Max. Shear stress (ton/m ²)		0.08			
Max. Bending moment (ton.m ²)	0.83						Max. Bending moment (ton.m ²)	0.02				
1	Total Displacement (mm)	9.56						Total Displacement (mm)	3.61			
	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.81						Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13			
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.53					Max. Shear stress (ton/m ²)	0.16				
2	Total Displacement (mm)	13.38					Total Displacement (mm)	7.43				
	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.97					Max. Axial stress (ton/m ²)	0.29				
	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.66					Max. Shear stress (ton/m ²)	0.29				
Side	0.5	Inc. Total Displacement (mm)	8.32			7.87	7.58	Inc. Total Displacement (mm)	2.37	1.92	1.63	
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.71			2.71	2.72	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.04	
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.37		0.38	0.39	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.02	0.02		
		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.82		0.82	0.82	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01		
		1	Inc. Total Displacement (mm)		11.28	10.28	9.61	Inc. Total Displacement (mm)	5.33	4.33	3.66	
			Max. Axial stress (ton/m ²)		2.72	2.73	2.74	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.04	0.05	0.06	
	Max. Shear stress (ton/m ²)		0.40		0.40	0.41	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.04		
	2	Inc. Total Displacement (mm)	17.17		14.86	13.36	Inc. Total Displacement (mm)	11.22	8.91	7.41		
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.72		2.76	2.77	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.04	0.08	0.09		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.46		0.46	0.46	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.09	0.09	0.10		
	Under	0.5	Total Displacement (mm)		7.69	7.42	7.22	Total Displacement (mm)	1.74	1.47	1.27	
			Max. Axial stress (ton/m ²)		2.60	2.62	2.63	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.08	-0.06	-0.05	
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.30		0.32	0.33	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.06	-0.05	-0.03		
Max. Bending moment (ton.m ²)			0.78		0.79	0.79	Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.03	-0.02	-0.01		
1			Total Displacement (mm)	9.46	8.92	8.53	Total Displacement (mm)	3.51	2.97	2.58		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	2.52	2.58	2.61	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.16	-0.10	-0.07		
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.24	0.28	0.30	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.13	-0.08	-0.06			
2		Total Displacement (mm)	12.69	12.06	11.55	Total Displacement (mm)	6.74	6.11	5.60			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	2.43	2.48	2.52	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.25	-0.20	-0.16			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.17	0.21	0.23	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.19	-0.16	-0.13			
Pipe jacking		0.8	Upper	0.5	Total Displacement (mm)	11.99			Total Displacement (mm)	1.77		
					Max. Axial stress (ton/m ²)	3.45			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.09		
	Max. Shear stress (ton/m ²)				0.54			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.06			
	Max. Bending moment (ton.m ²)			0.214			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.02				
	1			Total Displacement (mm)	15.55			Total Displacement (mm)	5.33			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.55			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.19			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.66			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.18				
	2		Total Displacement (mm)	26.01			Total Displacement (mm)	15.79				
			Max. Axial stress (ton/m ²)	3.85			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.49				
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.96			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.48				
	Side		0.5	Total Displacement (mm)	13.59	12.90	12.40	Total Displacement (mm)	3.37	2.68	2.18	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.40	3.44	3.45	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.04	0.08	0.09	
		Max. Shear stress (ton/m ²)		0.50	0.54	0.54	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.07	0.06		
		Max. Bending moment (ton.m ²)		0.235	0.235	0.237	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.04	0.04	0.04		
		1		Total Displacement (mm)	17.71	16.06	15.45	Total Displacement (mm)	7.49	5.84	5.23	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.46	3.47	3.50	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.10	0.11	0.14	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.60	0.60	0.59	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.12	0.11		
		2	Total Displacement (mm)	27.33	23.23	20.41	Total Displacement (mm)	17.11	13.01	10.19		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	3.51	3.56	3.60	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.15	0.20	0.24		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.72	0.70	0.70	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.25	0.23	0.22		
		Under	0.5	Total Displacement (mm)	11.93	11.62	11.40	Total Displacement (mm)	1.71	1.40	1.18	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	3.26	3.27	3.28	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.10	-0.09	-0.08	
	Max. Shear stress (ton/m ²)			0.36	0.39	0.41	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.12	-0.09	-0.07		
	Max. Bending moment (ton.m ²)			0.97	0.98	0.98	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.77	0.78	0.78		
1	Total Displacement (mm)			15.24	14.41	13.84	Total Displacement (mm)	5.02	4.19	3.62		
	Max. Axial stress (ton/m ²)			3.11	3.19	3.23	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.25	-0.17	-0.13		
	Max. Shear stress (ton/m ²)		0.24	0.30	0.34	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.24	-0.18	-0.14			
2	Total Displacement (mm)		24.68	22.80	20.92	Total Displacement (mm)	14.46	12.58	10.70			
	Max. Axial stress (ton/m ²)		2.82	2.96	3.08	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.54	-0.40	-0.28			
	Max. Shear stress (ton/m ²)		0.17	0.18	0.19	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.30	-0.30	-0.29			
					Max. Bending moment (ton.m ²)	0.836	0.843	0.957	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.64	0.65	0.76

	Diameter (m)	Type	Adjacent tunnel diameter (times of main tunnel)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure			
					2	3	4		2	3	4	
Pipe jacking	1.0	Upper	0.5	Total Displacement (mm)	15.38			Total Displacement (mm)	2.25			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.82			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.18			
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.75			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.21			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	1.55			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.08				
			1	Total Displacement (mm)	20.27			Total Displacement (mm)	7.14			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.98			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.34			
		Max. Shear stress (ton/m ²)		0.88			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.34				
		2	Total Displacement (mm)	36.99			Total Displacement (mm)	23.86				
			Max. Axial stress (ton/m ²)	5.33			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.69				
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.24			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.70				
		Side	0.5	Total Displacement (mm)	17.18	16.16	15.39	Total Displacement (mm)	4.05	3.03	2.26	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.76	4.77	4.83	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.13	0.19	
	Max. Shear stress (ton/m ²)			0.61	0.62	0.64	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.07	0.09	0.10		
	1		Total Displacement (mm)	22.74	20.44	18.55	Total Displacement (mm)	9.61	7.31	5.42		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.78	4.82	4.82	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.14	0.18	0.18		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.70	0.71	0.69	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.16	0.17	0.15		
	2		Total Displacement (mm)	30.62	26.00	22.50	Total Displacement (mm)	17.49	12.87	9.37		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.81	4.81	4.84	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.17	0.17	0.20		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.85	0.81	0.74	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.31	0.27	0.20		
	Under		0.5	Total Displacement (mm)	15.31	14.91	14.32	Total Displacement (mm)	2.18	1.78	1.19	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	4.57	4.61	4.61	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.07	-0.03	-0.03	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.43	0.48	0.48	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.11	-0.06	-0.06	
		1	Total Displacement (mm)	20.04	18.97	17.96	Total Displacement (mm)	6.91	5.84	4.83		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.39	4.49	4.55	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.25	-0.15	-0.09		
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.28	0.35	0.40	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.26	-0.19	-0.14			
2		Total Displacement (mm)	36.00	31.55	27.93	Total Displacement (mm)	22.87	18.42	14.80			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	4.04	4.18	4.33	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.60	-0.46	-0.31			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.43	0.25	0.21	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.11	-0.29	-0.33			
Pipe jacking		1.2	Upper	0.5	Total Displacement (mm)	21.47			Total Displacement (mm)	3.07		
					Max. Axial stress (ton/m ²)	7.34			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.22		
					Max. Shear stress (ton/m ²)	0.93			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.20		
	1			Total Displacement (mm)	29.52			Total Displacement (mm)	11.12			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.48			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.36			
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.22			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.49			
	2		Total Displacement (mm)	52.67			Total Displacement (mm)	34.27				
			Max. Axial stress (ton/m ²)	8.01			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.89				
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.55			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.82				
	Side		0.5	Total Displacement (mm)	24.59	22.76	21.32	Total Displacement (mm)	6.19	4.36	2.92	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.36	7.37	7.37	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.24	0.25	0.25	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.94	0.92	0.88	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.21	0.19	0.15	
		1	Total Displacement (mm)	33.26	28.40	25.02	Total Displacement (mm)	14.86	10.00	6.62		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	7.44	7.49	7.49	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.32	0.37	0.37		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.14	1.10	1.00	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.41	0.37	0.27		
		2	Total Displacement (mm)	45.14	37.09	29.75	Total Displacement (mm)	26.74	18.69	11.35		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	7.57	7.58	7.61	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.45	0.46	0.49		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.47	1.32	1.13	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.74	0.59	0.40		
		Under	0.5	Total Displacement (mm)	21.35	20.88	20.27	Total Displacement (mm)	2.95	2.48	1.87	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	7.08	7.14	7.17	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.04	0.02	0.05	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.63	0.67	0.69	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.10	-0.06	-0.04	
	1		Total Displacement (mm)	29.35	26.87	24.75	Total Displacement (mm)	10.95	8.47	6.35		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	6.83	6.97	7.05	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.29	-0.15	-0.07		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.51	0.47	0.58	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.78	-0.26	-0.15		
2	Total Displacement (mm)		45.75	39.45	34.24	Total Displacement (mm)	27.35	21.05	15.84			
	Max. Axial stress (ton/m ²)		6.73	6.85	7.88	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.39	-0.27	0.76			
	Max. Shear stress (ton/m ²)		0.76	0.32	0.43	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	-0.41	-0.30			
					Total Displacement (mm)	1.91	1.84	1.91	Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.16	-0.23	-0.16

	Diameter (m)	Type	Adjacent tunnel diameter (times of main tunnel)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure			
					2	3	4		2	3	4	
Pipe jacking	1.5	Upper	0.5	Total Displacement (mm)	29.23			Total Displacement (mm)	3.37			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	10.00			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.48			
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.31			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.35			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	3.12			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.24				
			1	Total Displacement (mm)	38.71			Total Displacement (mm)	12.85			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	10.35			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.83			
		Max. Shear stress (ton/m ²)		1.67			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.71				
		2	Total Displacement (mm)	66.34			Total Displacement (mm)	40.48				
			Max. Axial stress (ton/m ²)	10.83			Max. Axial stress (ton/m ²)	1.31				
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.87			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.91				
		Side	0.5	Total Displacement (mm)	34.24	30.87	28.38	Total Displacement (mm)	8.38	5.01	2.52	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	9.90	9.92	9.94	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.38	0.40	0.42	
	Max. Shear stress (ton/m ²)			1.35	1.28	1.17	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.39	0.32	0.20		
	1		Total Displacement (mm)	43.91	37.20	31.41	Total Displacement (mm)	18.05	11.34	5.55		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	9.92	9.82	10.08	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.40	0.30	0.56		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.66	1.46	1.27	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.70	0.50	0.30		
	2		Total Displacement (mm)	61.18	45.93	35.56	Total Displacement (mm)	35.32	20.07	9.70		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	9.96	10.09	10.15	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.44	0.57	0.63		
			Max. Shear stress (ton/m ²)	2.20	1.68	1.32	Max. Shear stress (ton/m ²)	1.24	0.71	0.36		
	Under		0.5	Total Displacement (mm)	30.32	28.95	28.02	Total Displacement (mm)	4.46	3.09	2.16	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	9.30	9.63	9.64	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.22	0.11	0.12	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.60	0.89	0.95	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.37	-0.08	-0.02	
		1	Total Displacement (mm)	39.33	35.21	32.31	Total Displacement (mm)	13.47	9.35	6.45		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	8.90	9.57	9.60	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.62	0.05	0.08		
Max. Shear stress (ton/m ²)			0.97	0.84	0.83	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.01	-0.13	-0.14			
2		Total Displacement (mm)	61.62	50.95	41.98	Total Displacement (mm)	35.76	25.09	16.12			
		Max. Axial stress (ton/m ²)	8.98	9.48	9.82	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.54	-0.04	0.30			
		Max. Shear stress (ton/m ²)	1.39	1.08	1.32	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.43	0.12	0.36			
Pipe jacking		2.0	Upper	0.5	Total Displacement (mm)	39.94			Total Displacement (mm)	5.06		
					Max. Axial stress (ton/m ²)	15.07			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.31		
					Max. Shear stress (ton/m ²)	2.12			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.15		
	Max. Bending moment (ton.m ²)			4.81			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.28				
	1			Total Displacement (mm)	54.81			Total Displacement (mm)	19.93			
				Max. Axial stress (ton/m ²)	15.85			Max. Axial stress (ton/m ²)	1.09			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	2.54			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.57				
	2		Total Displacement (mm)	166.49			Total Displacement (mm)	131.61				
			Max. Axial stress (ton/m ²)	19.25			Max. Axial stress (ton/m ²)	4.49				
			Max. Shear stress (ton/m ²)	3.61			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.64				
	Side		0.5	Total Displacement (mm)	43.56	37.89	35.04	Total Displacement (mm)	8.68	3.01	0.16	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	15.06	15.32	15.14	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.30	0.56	0.38	
		Max. Shear stress (ton/m ²)		2.40	2.24	1.95	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.43	0.27	-0.02		
		1	Total Displacement (mm)	4.86	4.89	4.66	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.33	0.36	0.13		
			Total Displacement (mm)	59.20	44.82	35.01	Total Displacement (mm)	24.32	9.94	0.13		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	15.42	15.39	15.44	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.66	0.63	0.68		
		2	Max. Shear stress (ton/m ²)	3.05	2.35	1.93	Max. Shear stress (ton/m ²)	1.08	0.38	-0.04		
			Max. Bending moment (ton.m ²)	5.31	4.97	4.74	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.78	0.44	0.21		
			Total Displacement (mm)	79.51	52.78	34.99	Total Displacement (mm)	44.63	17.90	0.11		
		Under	0.5	Max. Axial stress (ton/m ²)	15.78	15.79	15.77	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.02	1.03	1.01	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	3.82	2.78	2.12	Max. Shear stress (ton/m ²)	1.85	0.81	0.15	
				Max. Bending moment (ton.m ²)	5.65	5.30	4.92	Max. Bending moment (ton.m ²)	1.12	0.77	0.39	
	1		Total Displacement (mm)	40.67	38.13	36.31	Total Displacement (mm)	5.79	3.25	1.43		
			Max. Axial stress (ton/m ²)	15.21	15.30	15.17	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.45	0.54	0.41		
Max. Shear stress (ton/m ²)			2.09	2.28	2.34	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.12	0.31	0.37			
2	Max. Bending moment (ton.m ²)		4.79	4.98	4.93	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.26	0.45	0.4			
	Total Displacement (mm)		53.31	45.49	38.57	Total Displacement (mm)	18.43	10.61	3.69			
	Max. Axial stress (ton/m ²)		14.97	15.19	15.03	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.21	0.43	0.27			
2	Max. Shear stress (ton/m ²)		1.98	2.03	2.18	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.01	0.06	0.21			
	Max. Bending moment (ton.m ²)		4.53	4.75	4.78	Max. Bending moment (ton.m ²)	0	0.22	0.25			
	Total Displacement (mm)		82.60	58.91	41.80	Total Displacement (mm)	47.72	24.03	6.92			
2	Max. Axial stress (ton/m ²)	14.65	15.28	15.28	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.11	0.52	0.52				
	Max. Shear stress (ton/m ²)	2.16	2.18	2.28	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.19	0.21	0.31				
	Max. Bending moment (ton.m ²)	4.55	4.92	4.96	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.02	0.39	0.43				

Pipe jacking	Diameter (m)	Type	Adjacent tunnel diameter (times of main tunnel)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure		
					2	3	4		2	3	4
					2.5	Upper	0.5		Total Displacement (mm)	49.41	
			Max. Axial stress (ton/m ²)	21.40			Max. Axial stress (ton/m ²)	1.02			
			Max. Shear stress (ton/m ²)	2.26			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.62			
			Max. Bending moment (ton.m ²)	7.13			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.70			
			1	Total Displacement (mm)	67.57			Total Displacement (mm)	23.22		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	22.84			Max. Axial stress (ton/m ²)	2.46		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	2.83			Max. Shear stress (ton/m ²)	1.19		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	7.92			Max. Bending moment (ton.m ²)	1.49		
			2	Total Displacement (mm)	261.67			Total Displacement (mm)	217.32		
				Max. Axial stress (ton/m ²)	28.87			Max. Axial stress (ton/m ²)	8.49		
				Max. Shear stress (ton/m ²)	5.11			Max. Shear stress (ton/m ²)	3.47		
				Max. Bending moment (ton.m ²)	11.24			Max. Bending moment (ton.m ²)	4.81		
		Side	0.5	Total Displacement (mm)	60.43	46.44	40.60	Total Displacement (mm)	16.08	2.09	-3.75
				Max. Axial stress (ton/m ²)	21.20	21.22	21.21	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.82	0.84	0.83
				Max. Shear stress (ton/m ²)	2.45	1.80	1.67	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.81	0.16	0.03
				Max. Bending moment (ton.m ²)	7.25	6.89	6.78	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.82	0.46	0.35
			1	Total Displacement (mm)	71.99	46.52	38.25	Total Displacement (mm)	27.64	2.17	-6.10
				Max. Axial stress (ton/m ²)	21.81	21.57	21.45	Max. Axial stress (ton/m ²)	1.43	1.19	1.07
				Max. Shear stress (ton/m ²)	2.97	1.95	1.55	Max. Shear stress (ton/m ²)	1.33	0.31	-0.09
				Max. Bending moment (ton.m ²)	7.77	7.14	6.73	Max. Bending moment (ton.m ²)	1.34	0.71	0.30
			2	Total Displacement (mm)	96.30	51.51	34.81	Total Displacement (mm)	51.95	7.16	-9.54
				Max. Axial stress (ton/m ²)	22.73	22.26	21.79	Max. Axial stress (ton/m ²)	2.35	1.88	1.41
				Max. Shear stress (ton/m ²)	4.49	2.24	1.67	Max. Shear stress (ton/m ²)	2.85	0.60	0.03
				Max. Bending moment (ton.m ²)	8.81	7.48	6.90	Max. Bending moment (ton.m ²)	2.38	1.05	0.47
		Under	0.5	Total Displacement (mm)	51.24	47.26		Total Displacement (mm)	6.89	2.91	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	20.73	20.52		Max. Axial stress (ton/m ²)	0.35	0.14	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.62	1.67		Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.02	0.03	
				Max. Bending moment (ton.m ²)	6.63	6.54		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.20	0.11	
			1	Total Displacement (mm)	66.55	50.99		Total Displacement (mm)	22.20	6.64	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	20.46	20.51		Max. Axial stress (ton/m ²)	0.08	0.13	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.63	1.61		Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.01	-0.03	
				Max. Bending moment (ton.m ²)	6.42	6.48		Max. Bending moment (ton.m ²)	-0.01	0.05	
			2	Total Displacement (mm)	91.45	56.83		Total Displacement (mm)	47.10	12.48	
				Max. Axial stress (ton/m ²)	19.89	20.26		Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.49	-0.12	
				Max. Shear stress (ton/m ²)	1.95	1.44		Max. Shear stress (ton/m ²)	0.31	-0.21	
				Max. Bending moment (ton.m ²)	6.49	6.32		Max. Bending moment (ton.m ²)	0.06	-0.11	

ตารางที่ ข-11 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สำรวจรูปโมคต่อท่อเจาะตึ้งแนวราบ

HDD	Diameter (m)	Type	Adjacent tunnel diameter (m)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure		
					2	3	4		2	3	4
						Side	0.5		Total Displacement (mm)	4.11	3.53
			Max. Axial stress (ton/m ²)	0.24	0.25	0.25	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	0.13	0.13	
			Max. Shear stress (ton/m ²)	0.04	0.04	0.04	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.02	
			Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	
			1	Total Displacement (mm)	11.54	9.41	5.57	Total Displacement (mm)	10.65	8.52	4.68
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.25	0.25	0.25	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.13	0.12
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.05	0.05	0.05	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.02
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			2	Total Displacement (mm)	24.53	19.44	15.01	Total Displacement (mm)	23.64	18.55	14.12
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.25	0.25	0.25	Max. Axial stress (ton/m ²)	0.13	0.13	0.13
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.05	0.05	0.05	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.03	0.03	0.03
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.01	0.01	0.01	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
		Under	0.5	Total Displacement (mm)	3.48	3.17	2.95	Total Displacement (mm)	2.59	2.28	2.06
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	1.12	2.12	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	0.00	0.00
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.02	Max. Shear stress (ton/m ²)	0.00	0.00	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			1	Total Displacement (mm)	7.48	6.41	5.57	Total Displacement (mm)	6.59	5.52	4.68
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	1.12	2.12	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.01	-0.01	0.00
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.02	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.01	-0.01	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00
			2	Total Displacement (mm)	17.60	12.58	8.44	Total Displacement (mm)	16.71	11.69	7.55
				Max. Axial stress (ton/m ²)	0.12	1.12	2.12	Max. Axial stress (ton/m ²)	-0.02	0.00	0.00
				Max. Shear stress (ton/m ²)	0.02	0.02	0.02	Max. Shear stress (ton/m ²)	-0.01	0.00	0.00
				Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00	Max. Bending moment (ton.m ²)	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ข-12 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุโมงค์สาธารณูปโภคต่อที่ระบบขุดเปิดหน้าดิน

Open Cut	Type	Type	Adjacent tunnel diameter (m)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure		
					2	3	4		2	3	4
1	Side	0.5		Total Displacement (mm)	-2.46	-2.59	-2.79	Total Displacement (mm)	2.81	2.68	2.48
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.94	1.94	1.64	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-4.11	-4.11	-4.41
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	21.34	22.07	20.25	Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.13	13.86	12.04
		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.96	3.21	2.30	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.73	1.99	1.07		
		1		Total Displacement (mm)	1.03	-0.09	-1.42	Total Displacement (mm)	6.30	5.18	3.85
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.92	2.39	7.03	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-4.13	-3.66	0.98
	Max. Vertical stress (ton/m ²)			25.75	25.46	10.07	Max. Vertical stress (ton/m ²)	17.53	17.25	1.86	
	2		Total Displacement (mm)	7.61	0.63	-3.18	Total Displacement (mm)	12.88	5.90	2.09	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.24	6.94	9.84	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.19	0.89	3.79	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	13.82	10.38	9.07	Max. Vertical stress (ton/m ²)	5.61	2.17	0.86	
	Under	0.5		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.64	1.61	1.11	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.42	0.38	-0.11
				Total Displacement (mm)	-1.46	-1.81	-2.27	Total Displacement (mm)	3.81	3.46	3.00
Max. Horizontal stress (ton/m ²)				1.09	1.47	8.36	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-4.96	-4.58	2.31	
1			Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.09	12.03	12.76	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.88	3.81	4.55	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.54	2.62	2.27	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.32	1.40	1.04	
			Total Displacement (mm)	2.59	1.38	0.48	Total Displacement (mm)	7.86	6.65	5.75	
2		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.40	8.11	7.11	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.35	2.06	1.06		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.09	6.89	7.52	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.12	-1.32	-0.69		
		Max. Shear stress (ton.m ²)	1.40	0.75	1.02	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.17	-0.47	-0.20		
2		Total Displacement (mm)	14.59	9.45	4.71	Total Displacement (mm)	19.86	14.72	9.98		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	10.07	9.33	8.44	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.02	3.28	2.39		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	6.06	7.41	8.69	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.16	-0.80	0.48		
Max. Shear stress (ton.m ²)	1.75	1.26	1.38	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.53	0.03	0.16				
2	Side	0.5		Total Displacement (mm)	1.69	1.59	1.50	Total Displacement (mm)	1.17	1.07	0.99
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.89	2.77	2.47	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.55	0.43	0.13
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	18.71	17.15	17.48	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.92	0.36	0.68
		Max. Shear stress (ton.m ²)	3.80	2.99	3.29	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.68	-0.13	0.17		
		1		Total Displacement (mm)	3.11	2.56	1.99	Total Displacement (mm)	2.59	2.04	1.47
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.94	2.63	2.41	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.60	0.29	0.07
	Max. Vertical stress (ton/m ²)			18.50	18.19	18.22	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.70	1.39	1.42	
	2		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.96	2.96	3.55	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.16	-0.17	0.43	
			Total Displacement (mm)	4.89	2.16	-0.38	Total Displacement (mm)	4.38	1.65	-0.90	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.55	3.08	2.52	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.21	0.75	0.18	
	Under	0.5		Max. Vertical stress (ton/m ²)	19.85	17.48	17.16	Max. Vertical stress (ton/m ²)	3.06	0.68	0.36
				Max. Shear stress (ton.m ²)	3.13	2.66	2.55	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.01	-0.46	-0.57
Total Displacement (mm)				2.16	1.97	1.82	Total Displacement (mm)	1.65	1.45	1.30	
1			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.88	3.00	2.97	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.54	0.66	0.63	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.49	14.50	16.99	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-5.31	-2.30	0.19	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.34	2.05	3.24	Max. Shear stress (ton.m ²)	-1.78	-1.07	0.12	
2		Total Displacement (mm)	3.99	3.30	2.80	Total Displacement (mm)	3.47	2.78	2.28		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.91	4.20	3.82	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.57	1.86	1.48		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	15.03	16.19	16.82	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-1.77	-0.61	0.02		
2		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.55	2.99	3.49	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.57	-0.13	0.37		
		Total Displacement (mm)	7.25	4.94	3.33	Total Displacement (mm)	6.74	4.43	2.81		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.85	5.47	3.90	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.51	3.13	1.56		
Max. Vertical stress (ton/m ²)	16.64	17.00	16.69	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.16	0.20	-0.11				
Max. Shear stress (ton.m ²)	2.84	3.29	2.98	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.28	0.17	-0.15				
3	Side	0.5		Total Displacement (mm)	2.13	2.08	2.00	Total Displacement (mm)	1.13	1.08	1.00
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.10	4.67	4.20	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.26	0.83	0.36
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	14.07	13.40	15.10	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.83	-1.50	0.20
		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.90	1.47	3.66	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.04	-1.39	0.80		
		1		Total Displacement (mm)	3.61	3.09	2.52	Total Displacement (mm)	2.61	2.09	1.52
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.22	4.01	3.08	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.38	0.17	-0.76
	Max. Vertical stress (ton/m ²)			15.22	14.43	14.40	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.32	-0.47	-0.50	
	2		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.61	2.95	2.91	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.25	0.09	0.05	
			Total Displacement (mm)	5.52	2.77	0.09	Total Displacement (mm)	4.52	1.77	-0.91	
			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.54	2.26	2.52	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-1.30	-1.58	-1.32	
	Under	0.5		Max. Vertical stress (ton/m ²)	15.55	16.11	15.60	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.65	1.21	0.70
				Max. Shear stress (ton.m ²)	3.02	2.32	2.22	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.16	-0.55	-0.65
Total Displacement (mm)				2.62	2.44	2.29	Total Displacement (mm)	1.62	1.44	1.29	
1			Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.54	5.51	5.20	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.70	1.67	1.36	
			Max. Vertical stress (ton/m ²)	10.85	13.30	14.00	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-4.04	-1.59	-0.90	
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.35	1.95	3.21	Max. Shear stress (ton.m ²)	-1.51	-0.91	0.35	
2		Total Displacement (mm)	4.44	3.77	3.31	Total Displacement (mm)	3.44	2.77	2.31		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.00	6.20	5.38	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.16	2.36	1.54		
		Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.49	13.89	16.32	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.40	-1.01	1.42		
2		Max. Shear stress (ton.m ²)	1.70	3.20	4.08	Max. Shear stress (ton.m ²)	-1.16	0.34	1.22		
		Total Displacement (mm)	7.68	5.40	3.79	Total Displacement (mm)	6.68	4.40	2.79		
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.67	7.19	5.98	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.83	3.35	2.14		
Max. Vertical stress (ton/m ²)	14.79	14.01	14.94	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.11	-0.89	0.04				
Max. Shear stress (ton.m ²)	2.43	2.48	2.45	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.43	-0.38	-0.41				

	Type	Type	Adjacent tunnel diameter (times of main tunnel)		Distance from main structure			Incremental effect	Distance from main structure		
					2	3	4		2	3	4
Open Cut	4	Side	0.5	Total Displacement (mm)	2.49	2.44	2.36	Total Displacement (mm)	1.13	1.08	1.01
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.69	5.47	5.21	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.33	1.12	0.85
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	12.78	13.14	13.20	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.09	0.27	0.33
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.78	2.69	2.75	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.08	0.00	0.05	
			1	Total Displacement (mm)	4.03	3.48	2.92	Total Displacement (mm)	2.68	2.13	1.57
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.83	4.63	3.00	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.48	0.27	-1.36
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	14.87	12.96	13.31	Max. Vertical stress (ton/m ²)	2.00	0.09	0.44
			Max. Shear stress (ton.m ²)	3.05	2.77	2.59	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.36	0.08	-0.10	
			2	Total Displacement (mm)	6.03	3.23	0.45	Total Displacement (mm)	4.68	1.87	-0.90
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)		3.42	2.70	2.40	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	-0.93	-1.65	-1.95	
		Max. Vertical stress (ton/m ²)		14.01	13.38	14.30	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.14	0.51	1.43	
		Max. Shear stress (ton.m ²)	2.80	2.07	2.02	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.11	-0.62	-0.68		
		Under	0.5	Total Displacement (mm)	2.98	2.79	2.63	Total Displacement (mm)	1.62	1.44	1.28
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.03	4.49	6.03	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.68	0.14	1.68
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.04	11.35	11.04	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-1.83	-1.52	-1.83
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.59	1.58	1.59	Max. Shear stress (ton.m ²)	-1.10	-1.12	-1.10	
			1	Total Displacement (mm)	4.79	4.11	3.60	Total Displacement (mm)	3.44	2.76	2.25
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.99	5.48	6.46	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.64	1.12	2.11
Max. Vertical stress (ton/m ²)	10.65			12.49	12.38	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-2.22	-0.38	-0.49		
Max. Shear stress (ton.m ²)	1.79		2.53	2.31	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.91	-0.17	-0.38			
2	Total Displacement (mm)		8.03	5.73	4.14	Total Displacement (mm)	6.68	4.38	2.79		
	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	8.76	7.88	6.80	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.41	3.53	2.45			
	Max. Vertical stress (ton/m ²)	11.76	12.92	12.98	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-1.11	0.05	0.11			
Max. Shear stress (ton.m ²)	2.04	2.34	2.50	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.65	-0.36	-0.20				
Open Cut	5	Side	0.5	Total Displacement (mm)	2.08	2.03	1.95	Total Displacement (mm)	1.16	1.11	1.03
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.94	8.72	8.80	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.07	4.85	4.93
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.81	9.02	9.22	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.24	-0.03	0.17
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.46	1.50	1.48	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.12	0.16	0.14	
			1	Total Displacement (mm)	3.63	3.12	2.54	Total Displacement (mm)	2.71	2.20	1.62
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.67	9.55	7.83	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.80	5.68	3.96
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	9.28	9.44	9.47	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.23	0.39	0.42
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.73	1.53	1.12	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.39	0.19	-0.22	
			2	Total Displacement (mm)	5.75	2.87	-0.01	Total Displacement (mm)	4.83	1.95	-0.93
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)		8.72	8.85	8.43	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.85	4.98	4.56	
		Max. Vertical stress (ton/m ²)		10.12	9.56	9.24	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.07	0.51	0.19	
		Max. Shear stress (ton.m ²)	1.20	0.93	1.15	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.14	-0.41	-0.19		
		Under	0.5	Total Displacement (mm)	2.57	2.37	2.22	Total Displacement (mm)	1.65	1.45	1.30
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.47	7.27	8.09	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.60	3.40	4.22
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.34	8.33	8.40	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.71	-0.72	-0.66
			Max. Shear stress (ton.m ²)	1.46	1.73	1.68	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.12	0.39	0.34	
			1	Total Displacement (mm)	4.39	3.71	3.20	Total Displacement (mm)	3.47	2.79	2.28
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.31	7.37	7.80	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	3.44	3.50	3.93
Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.09			8.58	8.78	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.96	-0.47	-0.27		
Max. Shear stress (ton.m ²)	2.12		1.95	1.81	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.78	0.61	0.47			
2	Total Displacement (mm)		7.63	5.33	3.73	Total Displacement (mm)	6.71	4.41	2.81		
	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	11.70	8.04	8.43	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.83	4.17	4.56			
	Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.73	8.58	9.24	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.32	-0.47	0.19			
Max. Shear stress (ton.m ²)	2.80	2.04	1.15	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.46	0.70	-0.19				
Open Cut	6	Side	0.5	Total Displacement (mm)	2.28	2.24	2.17	Total Displacement (mm)	1.16	1.11	1.04
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.13	5.20	5.36	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.13	0.20	0.36
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.31	8.43	8.55	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.19	-0.07	0.05
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.12	2.02	1.83	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.19	0.08	-0.10	
			1	Total Displacement (mm)	3.85	3.36	2.79	Total Displacement (mm)	2.73	2.23	1.66
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	6.14	5.54	3.62	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	1.14	0.54	-1.38
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.54	8.99	8.54	Max. Vertical stress (ton/m ²)	0.04	0.49	0.04
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.31	1.81	1.60	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.37	-0.13	-0.34	
			2	Total Displacement (mm)	6.09	3.18	0.36	Total Displacement (mm)	4.96	2.05	-0.77
		Max. Horizontal stress (ton/m ²)		5.72	5.19	5.56	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.72	0.19	0.56	
		Max. Vertical stress (ton/m ²)		9.53	9.08	8.72	Max. Vertical stress (ton/m ²)	1.03	0.58	0.22	
		Max. Shear stress (ton.m ²)	1.56	1.35	1.59	Max. Shear stress (ton.m ²)	-0.38	-0.58	-0.35		
		Under	0.5	Total Displacement (mm)	2.75	2.57	2.42	Total Displacement (mm)	1.62	1.44	1.29
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	5.99	5.54	5.32	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	0.99	0.54	0.32
				Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.06	7.95	8.11	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.44	-0.55	-0.39
			Max. Shear stress (ton.m ²)	2.70	2.48	2.39	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.76	0.54	0.46	
			1	Total Displacement (mm)	4.57	3.89	3.38	Total Displacement (mm)	3.44	2.76	2.25
				Max. Horizontal stress (ton/m ²)	7.28	6.55	6.00	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	2.28	1.55	1.00
Max. Vertical stress (ton/m ²)	7.85			7.99	8.15	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.65	-0.51	-0.35		
Max. Shear stress (ton.m ²)	2.03		2.73	2.46	Max. Shear stress (ton.m ²)	0.09	0.79	0.53			
2	Total Displacement (mm)		7.80	5.53	3.94	Total Displacement (mm)	6.67	4.40	2.81		
	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	9.84	7.12	5.78	Max. Horizontal stress (ton/m ²)	4.84	2.12	0.78			
	Max. Vertical stress (ton/m ²)	8.30	8.30	8.49	Max. Vertical stress (ton/m ²)	-0.20	-0.20	-0.01			
Max. Shear stress (ton.m ²)	3.12	2.83	2.36	Max. Shear stress (ton.m ²)	1.18	0.89	0.42				

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกลศ วรรณชิน สถานที่เกิด กรุงเทพฯ เมื่อวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2521 สำเร็จ
การศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัด กรุงเทพฯ เมื่อปี พ.ศ. 2543 และ
เข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ.
2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย