

การนำผลวิเคราะห์การหลุดตัวของระบบโครงสร้างไฟฟ้าใต้ดินมาประยุกต์ใช้
ในการออกแบบและการก่อสร้าง



นายรัฐวุฒิ เหมะภูลิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF SETTLEMENT ANALYSIS RESULTS IN PRACTICAL DESIGN AND
CONSTRUCTION OF UNDERGROUND ELECTRICAL UTILITY

Mr. Nattawut Hemathulin

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

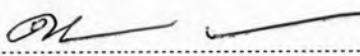
Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

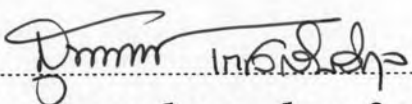
490881

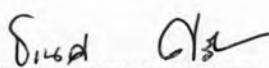
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำผลวิเคราะห์การหลุดตัวของระบบโครงสร้างไฟฟ้าใต้ดินมา
ประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการก่อสร้าง
โดย นายณัฐวุฒิ เหมะรุฉิน
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ธิขิตเลอสรวง

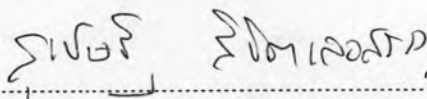
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

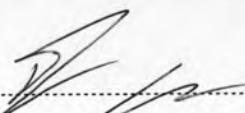
 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)

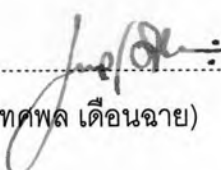
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร)

 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ ธิขิตเลอสรวง)

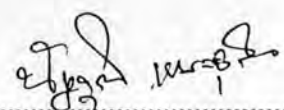
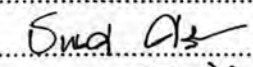
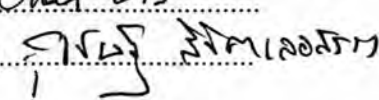
 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวัตร บุญญะฐิติ)

 กรรมการ
(นายเลิศทศพล เตือนฉาย)

✓ วิทยานิพนธ์ เหมะธลิน : การนำผลวิเคราะห์การทรุดตัวของระบบโครงสร้างไฟฟ้าใต้ดินมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการก่อสร้าง. (APPLICATION OF SETTLEMENT ANALYSIS RESULTS IN PRACTICAL DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND ELECTRICAL UTILITY) อ. ที่ปรึกษา: อ.ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร. สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง, 214 หน้า

ปัจจุบันในประเทศไทย วิธีการก่อสร้างและชนิดของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินมีด้วยกัน 3 ระบบคือ Pipe jacking, Horizontal Directional Drilling [HDD] และ Duct bank การวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินในงานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนลิเมนต์ และคำนวณด้วยมือในกรณีของ Pipe jacking 7 ขนาด ที่ 4 ความลึก จาก -4 ถึง -18 เมตร กรณีของ HDD 3 ชนิด ที่ 5 ความลึกจาก -2 ถึง -10 เมตร และกรณีของ Duct bank 6 แบบ ที่ 3 ความลึกจาก -1.5 ถึง -5 เมตรโดยได้ทำการวิเคราะห์ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการซึ่งได้ถูกแบ่งออกเป็น 10 พื้นที่ตามลักษณะของชั้นดินที่คล้ายคลึงกัน จากการวิจัยพบว่า สาเหตุของการทรุดตัวของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่เกิดจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง การสูบน้ำบาดาล และการรบกวนดินขณะก่อสร้าง และพบว่าค่าการทรุดตัวจากการสูบน้ำบาดาลเป็นองค์ประกอบหลักของค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด

เมื่อวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกันของโครงสร้างท่อต่างชนิดกัน พบว่าค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเองสำหรับ Pipe jacking มีค่ามากเมื่อท่อมีขนาดใหญ่ และเมื่อพิจารณาท่อที่มีขนาดเท่ากัน ค่าความแตกต่างของการทรุดตัวระหว่างท่อ Pipe jacking และบ่อพัก ลดลงตามความลึกของท่อที่ติดตั้ง ส่วน HDD นั้นการทรุดตัวเกิดขึ้นน้อยมากที่ความลึกท่อ 2-10 เมตรเพราะท่อมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา และในส่วนของ Duct bank เกิดได้ทั้งการทรุดตัว และลอยตัวเมื่อก่อสร้างแบบขุดเปิดหน้าดินโดยใช้เข็มพืด ซึ่งต้องวิเคราะห์เป็นกรณีไป เพราะปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวมีมากเช่น ลักษณะของชั้นดิน ความกว้างของ Duct bank ความยาวของเข็มพืด และระยะห่างของการค้ำยัน ส่วนค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันของโครงสร้างท่อต่างชนิดกันที่ระยะเวลา 10, 30 และ 50 ปี หลังจากเริ่มก่อสร้างพบว่าจะเพิ่มขึ้นตามเวลา

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต..... 
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 
 ปีการศึกษา..... 2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... 

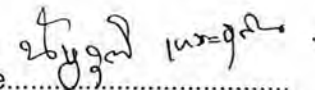
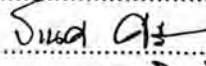
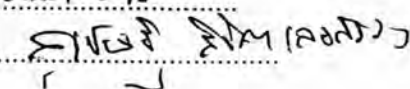
4770324621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: SETTLEMENT / UNDERGROUND ELECTRICAL UTILITY / PRACTICAL DESIGN

NATTAWUT HEMATHULIN: APPLICATION OF SETTLEMENT ANALYSIS RESULTS IN PRACTICAL DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND ELECTRICAL UTILITY. THESIS ADVISOR: TANATE SRISIROJANAKORN, PhD, THESIS COADVISOR: SUCHED LIKITLERSUANG, D.Phil, 214 pp.

The area of Bangkok, Nonthaburi, and Samut Prakarn provinces was divided in this thesis into 10 parts with similar soil conditions. The construction techniques mostly used presently in Thailand for underground electrical utility are Pipe jacking, Horizontal Directional Drilling [HDD], and Duct bank. Finite element method and closed-form solutions are the two approaches used for settlement analysis of the underground electrical utility. The analysis was carried out for (1) Pipe jacking in 7 different sizes at 4 different depths from 4-18 m, (2) HDD of 3 different types at 5 different depths from 2-10 m, and (3) Duct bank of 6 types at 3 different depths from 1.5-5 m. The analysis suggests that the settlement of electrical utility is induced by structural weight, soil remolding, and dewatering, which is the main cause of settlement.

Considering the same size of jacked pipe, the differential settlement between jacked pipe and manhole decreases with depth and increases with the size of pipe. The analyzed settlements of HDD pipe at 2-10 m depths are comparable because of its small size and light weight. The duct bank pipe can either settle or heave when constructed with steel sheet pile, depending upon many factors, such as soil characteristics, width of duct bank, sheet pile length, and strut spacing. The study of long term settlement in 10, 30, and 50 years after construction displays that the settlement increases with time.

Department..... Civil Engineering..... Student's signature..... 
Field of study..... Civil Engineering..... Advisor's signature..... 
Academic year..... 2006..... Co-advisor's signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง "การนำผลวิเคราะห์การทรุดตัวของระบบโครงสร้างไฟฟ้า ได้ดินมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการก่อสร้าง" ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิจัยด้วยดีตลอดมา และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รวิวัตร บุญญะฐิติ และคุณ เลิศทศผล เดือนฉายที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณปรัชญา สุวัฒนานันท์ คุณสมบุญณ์ ดิลกานนท์ คุณพงสันต์ จุลวงศ์ คุณวิชา ชاکรพิพัฒน์ คุณภิญโญ ฤกษ์เย็น คุณวิชชุพงษ์ ณ แก้ว และเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า นครหลวงทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำและข้อมูลต่างๆ ในงานวิจัยนี้ บริษัท STS ที่อนุเคราะห์ข้อมูลดิน

ขอขอบคุณกลศ วรคชิน ที่ร่วมค้นหาข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพีทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ พี่ เพื่อน น้อง นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรม ปฐพีทุกท่าน และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่ดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าจนได้สำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ข้อจำกัดและอุปสรรคของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ธรณีวิทยาของชั้นดินกรุงเทพฯ และปริมณฑล	5
2.1.1 การเกิดของดินเหนียวกรุงเทพฯ	5
2.1.2 สภาพชั้นดินอ่อนกรุงเทพฯ	7
2.1.3 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ	8
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดิน (Basic Soil Properties)	14
2.2.1 ความชื้นในมวลดิน	14
2.2.2 ซีดพิกัดของแอสเตอร์เบิร์ก	15
2.2.3 หน่วยน้ำหนักของมวลดิน	15
2.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังของชั้นดิน (Strength properties)	15
2.3.1 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำ	15
2.3.2 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบประสิทธิผล	16
2.3.3 โมดูลัสของดิน	18
2.4 หลักการพื้นฐานของการทรุดตัว	18

	หน้า
2.4.1 การประมาณการทรุดตัวทั้งหมด.....	19
2.4.2 การทรุดตัวทันที.....	19
2.4.3 การทรุดตัวขั้นแรก	21
2.4.4 การทรุดตัวครั้งที่สอง	25
2.5 ความรู้พื้นฐานและการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนติคัลเมนต์.....	26
สมมติฐานและข้อมูลที่ใช้	29
2.6 การทรุดตัวอันเนื่องมาจากการรบกวนดิน และการสูญเสียปริมาตร	30
2.7 ชั้นน้ำบาดาลกรุงเทพฯ และปริมณฑล.....	33
2.7.1 พฤติกรรมการลดระดับของแรงดันน้ำและกลไกการเกิด การทรุดตัว.....	34
2.8 ข้อมูลเบื้องต้น	36
2.8.1 การดันท่อ (Pipe jacking).....	36
2.8.2 Horizontal Directional Drilling (HDD).....	42
2.8.3 Duct bank	46
2.8.4 บ่อพัก (Manhole)	49
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	51
3.1 จำแนกพื้นที่ในการวิเคราะห์ข้อมูล	51
3.2 การทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล ที่ระดับความลึกต่างๆ จาก ผิวดิน.....	64
3.2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล	64
3.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล	66
3.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวใน แนวตั้งของโครงสร้างการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินในแต่ละรูปแบบ ด้วย FEM.....	72
3.3.1 Pipe jacking	72
3.3.2 Horizontal Directional Drilling (HDD)	73
3.3.3 การขุดเปิดหน้าดิน (Open cut) เพื่อติดตั้ง (Duct bank)	74
3.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งโดยการคำนวณด้วยมือ.....	76

	หน้า
3.4.1 การประมาณการทรุดตัวทันที.....	76
3.4.2 การประมาณการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ.....	78
3.4.3 การประมาณการทรุดตัวขั้นที่สอง.....	79
3.4.4 การหาค่า t_{eop}	80
3.4.5 การทรุดตัวเนื่องจากการรบกวนดิน และการสูญเสีย ปริมาตร.....	82
3.5 การประยุกต์ใช้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	83
3.5.1 การเคลื่อนตัวทั้งหมดของโครงสร้างในแนวดิ่งที่ระยะเวลานาน.....	83
3.5.2 การหาค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของ โครงสร้าง.....	84
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	85
4.1 ผลการวิเคราะห์.....	85
4.1.1 ค่าการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งโดย FEM และการคำนวณ ด้วยสมการของ Terzaghi พร้อมด้วยค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งใน เงื่อนไข Long term ของแต่ละชนิดของโครงสร้าง.....	85
4.1.2 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งจากการสูบน้ำบาดาลกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นทั้งหมด.....	94
4.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์การทรุดตัวที่แตกต่างกันของ โครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่ก่อสร้างด้วยวิธีต่างๆ โดยวิธี FEM แยกกรณี.....	95
4.2 แนวทางการแก้ปัญหาการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของระบบท่อและ โครงสร้างประกอบ.....	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	107
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	108
5.3 อุปสรรค/ปัญหา ข้อจำกัดที่นำเอาผลการวิเคราะห์ไปใช้.....	110
5.4 ตัวอย่างการใช้ผลการวิเคราะห์ในการออกแบบ.....	110
5.5 ข้อเสนอแนะต่องานวิจัยในอนาคต.....	112

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก.....	117
ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐานต่างๆ ใน เขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล	118
ภาคผนวก ข.	134
ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างโครงสร้างร้อย สายไฟฟ้าใต้ดิน	135
ภาคผนวก ค.	185
ค่าความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่าง โครงสร้างร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินกับบ่อพัก	186
การเปรียบเทียบที่เวลา 10, 30 และ 50 ปีหลังการ ก่อสร้าง ระหว่างค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ทั้งหมดของโครงสร้างต่างๆ และค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัว ในแนวตั้งจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯและ ปริมณฑล.....	213
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	214

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางธรณีกาล.....	6
ตารางที่ 2.2 สรุปลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ แต่ละชั้นจากผิวดิน.....	12
ตารางที่ 2.3 สรุปค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	13
ตารางที่ 2.4 สรุปค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ	14
ตารางที่ 2.5 สมการสำหรับการหาค่า C_u และ CR สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	24
ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ของดิน (Soil parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยไฟไนติคัล เม้นต์.....	30
ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ของคอนกรีต (Material parameters) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดย ไฟไนติคัลเม้นต์	30
ตารางที่ 2.8 การสูญเสียเชิงปริมาตรและคุณภาพในการเจาะอุโมงค์	32
ตารางที่ 2.9 ขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงาน Pipe jacking.....	41
ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติปลอกเหล็กต่อเชื่อมท่อตามมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (BS 4360 grade 43 A)	41
ตารางที่ 2.11 แสดงขนาดและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของท่อร้อยสายไฟที่ใช้ในงาน HDD	42
ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติของเครื่องเจาะแต่ละชนิดในงาน HDD	43
ตารางที่ 2.13 ขนาดและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของ Duct bank.....	46
ตารางที่ 3.1 พื้นที่จัดแบ่งตามข้อมูลชั้นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรม และความหนา ชั้นดินใกล้เคียงกัน.....	52
ตารางที่ 3.2 การแบ่งชั้นดินเหนียวตามค่า q_u และ N	52
ตารางที่ 3.3 การแบ่งชั้นดินทรายตามค่า N.....	53
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐานคณะ พาณิชยศาสตร์ฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (BM8) ในพื้นที่ที่ 1	64
ตารางที่ 3.5 หมุดหลักฐานทั้งหมดที่ใช้อ้างอิงการทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล	64
ตารางที่ 3.6 สรุปอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งโดยเฉลี่ยเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลที่ ความลึกต่างๆ.....	71

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.7	การหาค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายนํ้าของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 4 เมตรในพื้นที่ที่ 1..... 78
ตารางที่ 3.8	การหาค่าการทรุดตัวชั้นที่สองของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 4 เมตร ในพื้นที่ที่ 1 79
ตารางที่ 3.9	สรุปค่าในการคำนวณหาเวลาสิ้นสุดการอัดตัวคายนํ้า 81
ตารางที่ 3.10	ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งในเงื่อนไข Long term ของโครงสร้าง Pipe jacking ขนาด 0.8 เมตร ที่ความลึก 8 เมตร ในพื้นที่ที่ 1 83
ตารางที่ 3.11	ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของโครงสร้างท่อ Pipe jacking ขนาด 0.8 เมตร ที่ความลึก 8 เมตร ในพื้นที่ที่ 1 85
ตารางที่ 4.1	ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 1 86
ตารางที่ 4.2	ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 1 90
ตารางที่ 4.3	ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ HDD ในพื้นที่ที่ 1 93
ตารางที่ 4.4	ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ HDD ในพื้นที่ต่างๆ 98
ตารางที่ 4.5	ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างโครงสร้าง Duct bank กับบ่อพักที่ความลึก 1.5 เมตร จากผิวดินถึงพื้น Duct bank ในพื้นที่ที่ 1 99
ตารางที่ ก-1	ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐาน สนง. นโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (BM26) ในพื้นที่ที่ 2 118
ตารางที่ ก-2	ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐาน สถาบันเทคโนโลยี บางมด (BM22) ในพื้นที่ที่ 3 118
ตารางที่ ก-3	ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐาน รพ สมเด็จพระปิ่นเกล้า (BM11) ในพื้นที่ที่ 4 119
ตารางที่ ก-4	ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐานสถานีไทย ที.วี.สี ช่อง 3 (BM19) ในพื้นที่ที่ 5 119
ตารางที่ ก-5	ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐานพุทธมณฑล อ.นครชัยศรี (BM37) ในพื้นที่ที่ 5 120
ตารางที่ ก-6	ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐานชุมสายฯ เอกชัย เขตบางขุนเทียน (BM40) ในพื้นที่ที่ 5 120
ตารางที่ ก-7	ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมุดหลักฐาน สถานีกำจัดน้ำเสีย ดอนเมือง (BM15) ในพื้นที่ที่ 6..... 121

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ก-8 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน กรมพัฒนาที่ดิน (BM2) ในพื้นที่ที่ 6	122
ตารางที่ ก-9 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน วัดราชบูรณะฯ (วัดเลียบ) (BM7) ในพื้นที่ที่ 6	123
ตารางที่ ก-10 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน ม. รามคำแหง หัวหมาก (BM10) ในพื้นที่ที่ 6	124
ตารางที่ ก-11 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน คลังพัสดุการเคหะฯ คลองจั่น (BM18) ในพื้นที่ที่ 6	125
ตารางที่ ก-12 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน กองบินตำรวจรามอินทรา (BM16) ในพื้นที่ที่ 6	126
ตารางที่ ก-13 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน วัดกึ่งแก้ว (BM29) ในพื้นที่ที่ 7	127
ตารางที่ ก-14 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน ร.ร. บางพลีราษฎร์บำรุง อ.บางพลี (BM30) ในพื้นที่ที่ 7	127
ตารางที่ ก-15 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน เทศบาลสมุทรปราการ (BM31) ในพื้นที่ที่ 7	128
ตารางที่ ก-16 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน ร.ร. ชุมชนบางบ่อ อ. บางบ่อ (BM38) ในพื้นที่ที่ 7	128
ตารางที่ ก-17 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน สนง เขตมีนบุรี (BM28) ใน พื้นที่ที่ 8	129
ตารางที่ ก-18 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน วัดราษฎร์ศรัทธาธรรม อ่อนนุช (BM14) ในพื้นที่ที่ 8	129
ตารางที่ ก-19 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน สถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง (BM20) ในพื้นที่ที่ 8	130
ตารางที่ ก-20 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน วัดสีชมพู เขตหนองจอก (BM56) ในพื้นที่ที่ 9	130
ตารางที่ ก-21 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน วัดราษฎร์บำรุง เขตหนองจอก (BM57) ในพื้นที่ที่ 9	131

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ก-22 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน ศาลากลางจังหวัด นนทบุรี (BM33) ในพื้นที่ที่ 10.....	131
ตารางที่ ก-23 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน วัดไทรน้อย อ.ไทรน้อย (BM33) ในพื้นที่ที่ 10	132
ตารางที่ ก-24 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน การไฟฟ้าบางกรวย (BM1) ใน พื้นที่ที่ 10	132
ตารางที่ ก-25 ข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หมดหลักฐาน กรมชลประทานปาก เกร็ด (BM17) ในพื้นที่ที่ 10.....	133
ตารางที่ ข-1 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 2	135
ตารางที่ ข-2 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 3	137
ตารางที่ ข-3 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 4	140
ตารางที่ ข-4 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 5	142
ตารางที่ ข-5 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 6	145
ตารางที่ ข-6 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 7	147
ตารางที่ ข-7 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 8	150
ตารางที่ ข-8 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 9	152
ตารางที่ ข-9 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของท่อ Pipe jacking ในพื้นที่ที่ 10	155
ตารางที่ ข-10 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 2.....	158
ตารางที่ ข-11 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 3.....	160
ตารางที่ ข-12 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 4.....	162
ตารางที่ ข-13 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 5.....	164
ตารางที่ ข-14 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 6.....	166
ตารางที่ ข-15 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 7	168
ตารางที่ ข-16 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 8.....	170
ตารางที่ ข-17 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 9.....	172
ตารางที่ ข-18 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ Duct bank ในพื้นที่ที่ 10.....	174
ตารางที่ ข-19 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ HDD ในพื้นที่ที่ 2.....	176
ตารางที่ ข-20 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ HDD ในพื้นที่ที่ 3.....	177
ตารางที่ ข-21 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทั้งหมดของ HDD ในพื้นที่ที่ 4.....	178

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปตัดตามแนวเหนือ – ใต้ ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง	7
รูปที่ 2.2 แผนที่เขตจังหวัดและเขตดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	9
รูปที่ 2.3 Isopach map ของความหนาดินเหนียวกรุงเทพฯ	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ	13
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ s_u	16
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Angle of internal friction กับค่า Plasticity index สำหรับดินเหนียว	17
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Angle of internal friction กับค่า SPT-N สำหรับดินทราย	17
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของการทรุดตัว.....	19
รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์การทรุดตัวแบบทันทีทันใดของ Christian และ Carrier	20
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index และ Natural water content	22
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index และ Initial void ratio	23
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index และ Liquid limit	23
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของอิลลิเมนต์ชนิดต่างๆที่ใช้ในการคำนวณโดย FEM.....	27
รูปที่ 2.14 รูปหน้าตัดแสดงชั้นน้ำบาดาลบริเวณ เขตกรุงเทพมหานครในแนวเหนือ-ใต้ จากอำเภอ นครหลวงถึงป้อมพระจุลฯ	34
รูปที่ 2.15 ผลการตรวจวัดการลดระดับของแรงดันน้ำ และการเพิ่มขึ้นของแรงดันประสิทธิผลในดินเหนียวกรุงเทพฯ	35
รูปที่ 2.16 การเกิดการทรุดตัวของแผ่นดินอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ	36
รูปที่ 2.17 การใช้หลักของ Pipe jacking ประยุกต์ใช้สว่านเจาะ	37
รูปที่ 2.18 การใช้หลักของ Pipe jacking ประยุกต์ใช้ใน Microtunneling	37
รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของระบบ Pipe jacking	39
รูปที่ 2.20 ท่อและข้อต่อ	40
รูปที่ 2.21 ภาพจำลองของสถานีดินย้อย	40
รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบของเครื่องเจาะในงาน HDD	42
รูปที่ 2.23 การเจาะหลุมนำ (Pilot hole)	45
รูปที่ 2.24 ขั้นตอนของการคว้าน (Reaming).....	45

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.25 ขั้นตอนการติดตั้ง	46
รูปที่ 2.26 Mandrel ที่ใช้งานในสนาม	47
รูปที่ 2.27 (ก) ตัวอย่างการติดตั้งท่อร้อยสายไฟ	48
รูปที่ 2.27 (ข) ท่อร้อยสายไฟฟ้า	48
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างรูปมาตรฐาน Duct bank	49
รูปที่ 3.1 พื้นที่จัดแบ่งตามข้อมูลชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลแบ่งตามเขต และอำเภอ	51
รูปที่ 3.2 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 1	54
รูปที่ 3.3 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 2	55
รูปที่ 3.4 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 3	56
รูปที่ 3.5 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 4	57
รูปที่ 3.6 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 5	58
รูปที่ 3.7 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 6	59
รูปที่ 3.8 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 7	60
รูปที่ 3.9 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 8	61
รูปที่ 3.10 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 9	62
รูปที่ 3.11 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 10	63
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 1	66
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 2	67
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 3	67
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 4	68
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 5	68
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 6	69
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 7	69
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 8	70
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 9	70
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 10	71
รูปที่ 3.22 กระเปาะความเค้นที่เพิ่มขึ้นในกรณีน้ำหนักแบบสม่ำเสมอกระทำเป็นแนว ยาว	77

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.23 ตัวอย่างประกอบกรคำนวณหาค่า t_{oop} ของท่อ 0.6 เมตรที่ความลึก 8 เมตร ในพื้นที่ที่ 1	81
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบที่เวลา 10, 30 และ 50 ปีหลังการก่อสร้าง ระหว่างค่าเฉลี่ย การเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมดของโครงสร้าง Pipe jacking และค่าเฉลี่ย การเคลื่อนตัวในแนวตั้งจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯและ ปริมณฑล.....	95
รูปที่ 4.2 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jackingกับบ่อ พักในพื้นที่ที่ 1	97
รูปที่ 4.3 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ใน พื้นที่ที่ 1	100
รูปที่ 4.4 การอุดช่องว่างระหว่างบ่อพักกับท่อด้วย Mortar	102
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการติดตั้ง Manhole boot.....	102
รูปที่ 4.6 ตัวอย่าง Manhole boot	103
รูปที่ 4.7 อีกหนึ่งตัวอย่าง Manhole boot	104
รูปที่ 4.8 (ก) ตัวอย่างการติดตั้ง Omega seal joint.....	105
รูปที่ 4.8 (ข) ตัวอย่างภาพถ่าย Omega seal joint.....	105
รูปที่ 4.9 (ก) การติดตั้ง Crown seal joint.....	106
รูปที่ 4.9 (ข) ภาพถ่าย Crown seal joint.....	106
รูปที่ 5.1 สัดส่วนค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวตั้งจากการสูบน้ำบาดาลกับค่าเฉลี่ย การเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมดในแต่ละวิธีการก่อสร้างตามช่วงเวลาใช้งาน ในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล	108
รูปที่ ค-1 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jackingกับบ่อ พักในพื้นที่ที่ 2	186
รูปที่ ค-2 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jackingกับบ่อ พักในพื้นที่ที่ 3	187
รูปที่ ค-3 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jackingกับบ่อ พักในพื้นที่ที่ 4	188
รูปที่ ค-4 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jackingกับบ่อ พักในพื้นที่ที่ 5	189

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ ค-5 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jacking กับบ่อพักในพื้นที่ที่ 6	190
รูปที่ ค-6 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jacking กับบ่อพักในพื้นที่ที่ 7	191
รูปที่ ค-7 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jacking กับบ่อพักในพื้นที่ที่ 8	192
รูปที่ ค-8 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jacking กับบ่อพักในพื้นที่ที่ 9	193
รูปที่ ค-9 ความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งระหว่างท่อ Pipe jacking กับบ่อพักในพื้นที่ที่ 10	194
รูปที่ ค-10 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 2	204
รูปที่ ค-11 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 3	205
รูปที่ ค-12 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 4	206
รูปที่ ค-13 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 5	207
รูปที่ ค-14 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 6	208
รูปที่ ค-15 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 7	209
รูปที่ ค-16 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 8	210
รูปที่ ค-17 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 9	211
รูปที่ ค-18 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของ Duct Bank กับบ่อพัก ในพื้นที่ที่ 10	212

ภาพประกอบ

หน้า

- รูปที่ ค-19 การเปรียบเทียบที่เวลา 10, 30 และ 50 ปีหลังการก่อสร้าง ระหว่างค่าเฉลี่ย
การเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมดของโครงสร้าง Duct bank และค่าเฉลี่ยการ
เคลื่อนตัวในแนวตั้งจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล 213
- รูปที่ ค-20 การเปรียบเทียบที่เวลา 10, 30 และ 50 ปีหลังการก่อสร้าง ระหว่างค่าเฉลี่ย
การเคลื่อนตัวในแนวตั้งทั้งหมดของโครงสร้าง HDD และค่าเฉลี่ยการ
เคลื่อนตัวในแนวตั้งจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล 213