

พฤติกรรมเคลื่อนตัวของดินในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน



นาย ชีรพันธ์ ภูมิรัตนประพิณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-13-0339-4
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20034246

- 2 ก.ค. 2546

BEHAVIOR OF GROUND MOVEMENT IN THE CONSTRUCTION OF
A SUBWAY STATION

MR. THIRAPUN PHUMRATTANAPRAPIN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0339-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในการก่อสร้างสถานี
รถไฟฟ้าใต้ดิน

โดย

นายธีรพันธ์ ภูมิรัตนประพิณ


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

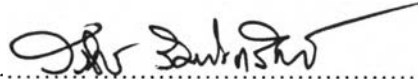
อาจารย์ที่ปรึกษา

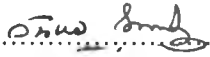
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรณรัตน์ สัมพันธ์ราษฎร์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน)

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

ธีรพันธ์ ภูมิรัตนประพิณ : พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน
(BEHAVIOR OF GROUND MOVEMENT IN THE CONSTRUCTION OF A SUBWAY STATION)

อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์, 111 หน้า, ISBN 974-13-0339-4

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน โดยโครงการที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แก่ โครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล ซึ่งมีระยะทางของโครงการประมาณ 20 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินจำนวน 18 สถานี การก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินใช้ระบบกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์เป็นระบบป้องกันดินขณะทำการขุดดินและใช้เป็นโครงสร้างถาวรของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินด้วย สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินจะมีความลึกของสถานีประมาณ 15-23 เมตร ความกว้าง 18-25 เมตร และความยาว 150-200 เมตร โดยลักษณะของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินออกได้เป็น 3 แบบ คือ แบบที่หนึ่งมีชานชลาอยู่ตรงกลาง, แบบที่สองมีชานชลาอยู่ด้านข้างของสถานี และแบบที่สามมีชานชลาซ้อนกัน ซึ่งทำการก่อสร้างโดยใช้วิธี Top-Down

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ที่เกิดขึ้นได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เพื่อนำมาใช้หาค่าพารามิเตอร์ของดินที่เหมาะสม โดยเฉพาะค่า Young's Modulus จากวิธีการวิเคราะห์กลับ (Back Analysis) ซึ่งมีสมมุติฐานกำหนดให้ปัญหาที่ทำการวิเคราะห์มีลักษณะเป็น 2 มิติ (Plane Strain) พร้อมทั้งทำการจำลองพฤติกรรมของดินโดยแบบจำลองของ Mohr-Coulomb

ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์โดยวิธี FEM ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน 4 สถานี ได้แก่ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร, บางซื่อ, หัวลำโพง และสามย่าน ให้ผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของไดอะแฟรมวอลล์ใกล้เคียงกับผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของไดอะแฟรมวอลล์ที่ได้จากการวัดจริงในงานก่อสร้างทุกขั้นตอนการก่อสร้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินทั้ง 4 สถานี โดยที่ค่า Young's Modulus ของดินที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์กลับสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ มีค่าประมาณ $(500-600)S_u$ และ $(1000-1150)S_u$ ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต.....ธีรพันธ์ ภูมิรัตนประพิณ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....อ.ช. เทพรักษ์.....

AN ABSTRACT

4170347521: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: YOUNG'S MODULUS/ DIAPHRAGM WALL / SUBWAY STATION / LATERAL MOVEMENT

THIRAPUN PHUMRATTANAPRAPIN: THESIS TITLE. (BEHAVIOR OF GROUND MOVEMENT IN THE CONSTRUCTION OF A SUBWAY STATION)

THESIS ADVISER: ASSIST. PROF. WANCHAI TEPARAKSA, Ph.D.

111 pp. ISBN 974-13-0339-4

The thesis aims to study the behavior of soil displacement in the construction of subway station. The research carried out based on the data of the blue line subway project of the Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA). The MRTA's project consists of 18 subway stations about 20 kilometers long. The diaphragm wall was used as the retaining structure during construction and was changed to be a permanent wall of subway station. Generally, the platform of the MRTA subway is divided into 3 types as center platform, side platform and stacked platform. The subway stations are about 18-25 m wide, 150-200 m long and 15-23 m deep. The method of subway station construction is the top down construction method.

The analyses of lateral movement of diaphragm wall is based on the Finite Element Method (FEM) to calculate the appropriate soil stiffness parameter especially Young's modulus by compared between the predicted lateral movement of diaphragm wall from FEM analysis with the field performance. The simulation of soil behavior is based on the Mohr-Coulomb soil model or elastic plastic model with plane strain condition (2 dimensions).

The results of analysis show that the lateral movements of diaphragm wall for Thiam Ruam Mit subway station, Bang Sue subway station, Hua Lamphong subway station and Sam Yan subway station based on back analysis agree with the field observations in every stage of construction. The appropriated Young's modulus (E_u) of Bangkok soft clay and Bangkok stiff clay from back analysis is about $(500-600)S_u$ and $(1000-1150)S_u$, respectively.

Department Civil Engineering

Field of study Civil Engineering

Academic year 2000

Student's signature.....*Thirapun Phumrattaprapin*.....

Advisor's signature.....*Wanchai Teeparaksa*.....

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน” ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้เขียนเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณองค์การรถไฟฟ้ามหานครที่ได้อนุญาตในการรวบรวมและนำข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินมาใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณกิจการร่วมค้า ION, BCKT และบริษัท GMT Corporation Ltd. ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเพื่อการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณสุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ นักศึกษาปริญญาเอก จาก Massachusetts Institute of Technology ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาทั่วไป

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมเพื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ของดินจากวิธีการวิเคราะห์กลับ

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนและส่งเสริมให้ผู้เขียนสำเร็จการศึกษาจนมาถึงปัจจุบันนี้

ธีรพันธ์ ภูมิรัตนประพิณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ลักษณะของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานในอดีต.....	6
2.1 ระบบค้ำยันสำหรับงานชุด.....	6
2.1.1 ระบบกำแพงกันดินแบบยึดหยุน	6
2.1.2 ระบบกำแพงกันดินแบบแข็ง.....	6
2.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินทางด้านข้าง	7
2.2.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินทางด้านข้างแบบสถิตย์.....	7
2.2.1.1 ค่า K_0 สำหรับดินเม็ดหยาบ	7
2.2.1.2 ค่า K_0 สำหรับดินเหนียว.....	8
2.2.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินทางโดยหลักการของ Rankine.....	9
2.2.2.1 Rankine's Active Earth Pressure	9
2.2.2.2 Rankine's Passive Earth Pressure	12
2.2.3 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินโดยใช้ไดอะแกรมขอบเขตของหน่วยแรงดันดิน	
ปรากฏ.....	14
2.2.3.1 ไดอะแกรมของหน่วยแรงดันดินโดย Terzaghi and Peck (1967)	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3.2 ไตอะแกรมของหน่วยแรงดันดินโดย Tschebotarioff (1973)	14
2.2.3.3 ไตอะแกรมของหน่วยแรงดันดินโดย Sower (1979).....	15
2.3 เสถียรภาพสำหรับงานขุดดิน	16
2.3.1 การหาเสถียรภาพของกันหลุมโดย Teng	16
2.3.2 การหาเสถียรภาพของกันหลุมโดย Terzaghi's Theory	18
2.3.3 การหาเสถียรภาพของกันหลุมโดย Bjerrum and Eide	19
2.4 การวิเคราะห์งานขุดดินโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	20
2.4.1 ชนิดของการกำหนดลักษณะปัญหาในการวิเคราะห์	21
2.4.2 ลักษณะของเอลิเมนต์	22
2.4.3 ชนิดของแบบจำลองพฤติกรรมสำหรับดิน	22
2.4.4 ลักษณะของการวิเคราะห์ปัญหา	23
2.4.5 แบบจำลองของ Mohr-Coulomb	24
2.5 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในงานขุด	26
2.5.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินเนื่องจากการขุด	26
2.5.2 การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงกันดินเนื่องจากงานขุด	31
2.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินกับ การทรุดตัวที่ผิวดิน	32
บทที่ 3 การรวบรวมและข้อมูลในการวิจัย	33
3.1 บทนำ	33
3.2 รายละเอียดข้อมูลของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร	33
3.2.1 ข้อมูลทั่วไป	33
3.2.2 ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน	33
3.2.3 ข้อมูลขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร	36
3.2.4 ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างส่วนต่างๆ ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร	38
3.2.5 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์	39
3.3 รายละเอียดข้อมูลของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ	43
3.3.1 ข้อมูลทั่วไป	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน.....	43
3.3.3 ข้อมูลขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ.....	44
3.3.4 ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างส่วนต่างๆ ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ.....	46
3.3.5 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์.....	47
3.4 รายละเอียดข้อมูลของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	52
3.4.1 ข้อมูลทั่วไป.....	52
3.4.2 ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน.....	52
3.4.3 ข้อมูลขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	53
3.4.4 ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างส่วนต่างๆ ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	56
3.4.5 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์.....	60
3.5 รายละเอียดข้อมูลของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	63
3.5.1 ข้อมูลทั่วไป.....	63
3.5.2 ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการเจาะสำรวจดิน.....	63
3.5.3 ข้อมูลขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	64
3.5.4 ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างส่วนต่างๆ ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	69
3.5.5 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์.....	69
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินโดยวิธีไฟไนต์เอลลิเมนต์.....	71
4.1 กำลังรับแรงเฉือนของดิน.....	71
4.1.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ.....	71
4.1.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว.....	72
4.1.2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	73
4.1.2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากการทดสอบแบบเวนในสนาม.....	76
4.1.2.3 กำลังรับแรงเฉือนของดินจากวิธี Empirical.....	77
4.2 มุมต้านทานแรงเฉือนของดิน.....	78
4.3 ระดับน้ำใต้ดิน.....	79
4.4 ค่าโมดูลัสของดิน.....	80
4.5 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.1 ข้อมูลเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินสำหรับการวิเคราะห์.....	82
4.5.2 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม PLAXIS เปรียบเทียบกับข้อมูลในสนาม.....	84
4.5.2.1 ผลการวิเคราะห์ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร	84
4.5.2.2 ผลการวิเคราะห์ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ	85
4.5.2.3 ผลการวิเคราะห์ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	86
4.5.2.4 ผลการวิเคราะห์ของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	87
4.5.3 พฤติกรรม Plastic ของดินหลังการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	100
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์	100
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม.....	101
รายการอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	111

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร	83
4.2 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ	83
4.3 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	83
4.4 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	84

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 แนวเส้นทางโครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล	2
1.2 ลักษณะของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน.....	3
2.1 ความสัมพันธ์ของ K_0 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ PI และ OCR (Brooker & Ireland, 1965)	8
2.2 สัมประสิทธิ์ m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ K_0 และ OCR กับค่า PI (Ladd et al, 1977) ...	9
2.3 Rankine's Active Earth Pressure State	10
2.3a ลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในสภาพ Active ของ Rankine	10
2.3b Rankine's Active Pressure	10
2.4 แรงดันดินทางด้านข้างของ Rankine's Active State	12
2.5 Rankine's Passive Earth Pressure State	13
2.5a ลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในสภาพ Passive ของ Rankine ...	13
2.5b Rankine's Passive Pressure.....	13
2.6 แรงดันดินทางด้านข้างของ Rankine's Passive State.....	14
2.7 ไดอะแกรมขอบเขตหน่วยแรงดันดินปรากฏโดย Terzaghi and Peck (1967).....	15
2.8 รูปแบบแรงดันดินโดย Tschebotarioff.....	15
2.9 รูปแบบแรงดันดินโดย Sower (1979)	16
2.10 ลักษณะการเกิด Heave Effect ของ Teng (1980)	17
2.11 การหาค่า Factor of Safety against Basal Heave โดยวิธีของ Terzaghi	19
2.12 Bearing Capacity Factor, N_c (after Bjerrum and Eide)	20
2.13 ลักษณะของ Nodal Point สำหรับเอลลิเมนต์ของดิน	22
2.14 ลักษณะของ Nodal Point ของเอลลิเมนต์สำหรับโครงสร้าง	22
2.15 Yield function สำหรับ Mohr-Coulomb Model.....	25
2.16 ลักษณะของ Yield function สำหรับกรณี Elastic point และ Plastic point	25
2.17 Elastic and Plastic Stress Point.....	26
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety against Basal Heave กับ Nondimensionalize Maximum Lateral Wall Movement (Mana and Clough, 1981).....	27
2.19 การเคลื่อนตัวของดินในบริเวณรอบการขุด.....	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.20 Idealized Undrained Deformation of Influence Block.....	28
2.21 การหาค่า Secant and Tangent moduli.....	30
2.22 การเปรียบเทียบปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมากที่สุดจากวิธี FEM กับ ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากวิธี Secant Modulus	31
2.23 การทรุดตัวที่ผิวดินที่ระยะห่างจากกำแพงกันดินต่างๆ ของ Peck (1969).....	31
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านสูงสุดของกำแพงกันดินกับปริมาณ การทรุดตัวที่ผิวดินสูงสุดของบริเวณด้านหลังงานขุด Mana and Clough (1981).....	32
3.1 แผนผังของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร.....	34
3.2 ลักษณะของชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดินในบริเวณสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียม ร่วมมิตร	35
3.3 ขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตรส่วนตัวสถานีหลัก	40
3.4 ขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตรส่วนที่ใช้ติดตั้งหัวเจาะ อุโมงค์.....	41
3.5 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ (IND-03) ในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร.....	42
3.6 แผนผังของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ	43
3.7 ลักษณะของชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดินในบริเวณสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน บางซื่อ	48
3.8 ขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อส่วนตัวสถานีหลัก.....	49
3.9 ขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อส่วนปลายสถานี.....	50
3.10 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ (IND-02) ในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ.....	51
3.11 แผนผังของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง	52
3.12 ลักษณะชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดินในบริเวณสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน หัวลำโพง	57
3.13 ขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพงส่วนสถานีหลัก.....	58
3.14 ขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพงส่วนอุโมงค์ของสถานี	59

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.15 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ (IND-03) ในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	61
3.16 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ (IND-04) ในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	62
3.17 แผนผังของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน	63
3.18 ลักษณะชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดินในบริเวณสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน สามย่าน	67
3.19 ขั้นตอนการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	68
3.20 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ (IND 06) ในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	70
4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายจากการทดสอบ Direct shear.....	72
4.2 หน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดินจากการทดสอบ Triaxial.....	73
4.3 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CD ของ NC Clay.....	74
4.4 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CU ของ NC Clay.....	74
4.5 เส้นการวิบัติจากการทดสอบแบบ UU และ Unconfined Compression ของ NC Clay	75
4.6 เส้นแสดงการวิบัติของ Mohr-Coulomb สำหรับ Overconsolidated Clay	76
4.7 ตัวปรับแก้ μ ของ Bjerrum (1972) ที่ใช้กับการทดสอบแบบ FV.....	77
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ ϕ' ของดินเม็ดหยาบ (TPEC, 1985).....	79
4.9 ตัวปรับแก้ C_N สำหรับการหาค่า N_{cor} และ ϕ'	79
4.10 ค่าแรงดันน้ำใต้ดินเนื่องจากผลของการสูบน้ำบาดาลในชั้นดินกรุงเทพฯ.....	80
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ ไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับค่าดัชนีความเหลวและ OCR (Duncan and Buchigani, 1976)	81
4.12 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริง ในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเทียมร่วมมิตร.....	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการก่อสร้างขั้นสุดท้ายที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน เทียมร่วมมิตร	90
4.14 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริง ในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อ.....	91
4.15 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการก่อสร้างขั้นสุดท้ายที่ได้จาก โปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน บางซื่อ	92
4.16 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริง ในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง (IND No.03)	93
4.17 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการก่อสร้างขั้นสุดท้ายที่ได้จาก โปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน หัวลำโพง (IND No.04)	94
4.18 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริง ในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง.....	95
4.19 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการก่อสร้างขั้นสุดท้ายที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินหัวลำโพง	96
4.20 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริง ในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	97
4.21 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริง ในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน.....	98
4.22 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการก่อสร้างขั้นสุดท้ายที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินสามย่าน	99

สัญลักษณ์

C	= Cohesion
C_N	= ค่าปรับแก้ที่ได้จาก Peck Hanson and Thornburn (1973)
E'	= Drained Young's Modulus
E_u	= Undrained Young's Modulus
ϕ'	= มุมต้านทานแรงเฉือนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล
G	= Shear Modulus
K_0	= Coefficient of Earth Pressure at Rest
$K_{0(NC)}$	= สัมประสิทธิ์แรงดันดินทางด้านข้างของดินเหนียวชนิดอัดแน่นปกติ
$K_{0(OC)}$	= สัมประสิทธิ์แรงดันดินทางด้านข้างของดินเหนียวชนิดอัดแน่นเกินตัว
OCR	= Overconsolidated Ratio
q_u	= Unconfined Compression Strength
γ_t	= Total Unit Weight
S_u	= Undrained Shear Strength
$S_{u(FV)}$	= Undrained Shear Strength from Field Vane Shear Test
σ_{ho}	= Horizontal Total Overburden Pressure
σ_{vo}	= Vertical Total Overburden Pressure
σ'_{ho}	= Horizontal Effective Overburden Pressure
σ'_{vo}	= Vertical Effective Overburden Pressure
σ'_p	= หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต
τ_t	= กำลัรับแรงเฉือนสูงสุดของดินขณะเกิดการวิบัติ
u	= Pore Water Pressure
μ	= ตัวปรับแก้ที่ได้จาก Bjerrum
ν	= Undrained Poisson's Ratio
ν'	= Drained Poisson's Ratio
CD Test	= Consolidated Drained Triaxial Test
CU Test	= Consolidated Undrained Triaxial Test
UU Test	= Unconsolidated Undrained Triaxial Test