

ผลกระทบของการเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินต่ออุโมงค์ส่งน้ำในดินกรุงเทพฯ



นาย กิจพล ไพรไพศาลกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1802-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2 6 ก.ค. 2549

I22036179

EFFECTS OF MRT TUNNELING ON EXISTING WATER TUNNEL IN BANGKOK SUBSOILS

Mr. Kitpon Pripisankit

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

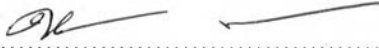
Chulalongkorn University

Academic Year 2004

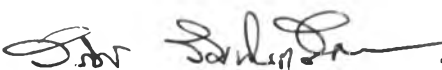
ISBN 974-53-1802-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินต่ออุโมงค์ส่งน้ำในดินกรุงเทพฯ
โดย นายกิจพล ไพรไพศาลกิจ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์

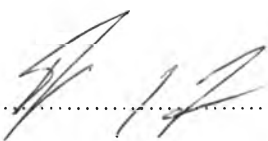
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัด บุญญะฐิติ)

กิจพล ไพรไพศาลกิจ : ผลกระทบของการเจาะอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินต่ออุโมงค์ส่งน้ำในดิน
กรุงเทพฯ (EFFECTS OF MRT TUNNELING ON EXISTING WATER TUNNEL IN
BANGKOK SUBSOILS) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์, 85 หน้า, ISBN
974-53-1802-7.

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรม และแนวทางในการคาดคะเนการทรุดตัวของดินจากการ
ก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ผ่านแนวอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวงบริเวณสามย่าน โดย
ทำการศึกษาจากขั้นตอนการก่อสร้างและข้อมูลที่จัดเก็บจากในสนาม เปรียบเทียบกับผลจากการ
วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์(Finite Difference
Analysis, FDA) และใช้กฎการวิบัติแบบ Mohr-Coulomb โดยทำการจำลองเสมือนการขุดเจาะแบบ 3
มิติ บนแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยเริ่มจากจำลองการขุดเจาะต่อเนื่องของอุโมงค์ระดับล่าง
(Southbound Tunnel, SB) ซึ่งมีระดับอยู่ใต้อุโมงค์ประจำ จากนั้นจึงทำการจำลองการขุดเจาะของ
อุโมงค์ระดับบน (Northbound Tunnel, NB) ซึ่งมีแนวพาดผ่านเหนืออุโมงค์ประจำ โดยอุโมงค์ SB
วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง(stiff clay) ในขณะที่อุโมงค์ NB วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน(soft clay)

ผลการวิเคราะห์แบบ Empirical พบว่า ณ หน้าตัดที่มีการติดตั้งเครื่องมือ ค่า i ของอุโมงค์ SB
และ NB มีค่าเท่ากับ 8 และ 6 เมตร และมีค่า K เท่ากับ 0.34 และ 0.55 ตามลำดับ โดยเกิดการสูญเสีย
มวลดินเพียง 0.35% สำหรับอุโมงค์ระดับล่าง(SB) และ 1.80% สำหรับอุโมงค์ระดับบน(NB)

จากผลการจำลองการขุดเจาะด้วยวิธี FDA พบว่า วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความ
เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์อุโมงค์เดี่ยว โดยสามารถนำไปคาดคะเนการทรุดตัวได้ดีสำหรับอุโมงค์ SB แต่
ไม่สามารถใช้ในการจำลองต่อเนื่องอุโมงค์ NB ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยในการขุดเจาะและการควบคุมงานขุด
เจาะที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่สำคัญอีกประการคือ อุโมงค์ NB อยู่ในระดับที่ตื้นมากเพียง 10.5 เมตร โดยมี
ระยะจากตาดอุโมงค์ถึงผิวดินเพียงประมาณ 7.30 เมตร อีกทั้งเป็นการวางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน(soft
clay) ดังนั้นปริมาณการเคลื่อนตัวที่มากจากการขุดเจาะ ส่งผลให้มวลดินเหนือหัวเจาะภายหลังการขุด
เจาะอุโมงค์เส้นบน(NB) อยู่ในสถานะวิบัติ(yield state) ซึ่งมีพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปจากปกติ จนทำให้ไม่
สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยแนวทางของการวิจัยที่กำหนดให้ดินมีพฤติกรรมตามกฎการวิบัติแบบ Mohr-
Coulomb

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา..... 2547.....

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

4470221321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TUNNELLING / GROUND LOSS / FDA / SETTLEMENT/ SPILING PIPE

KITPON PRIPISANKIT: EFFECTS OF MRT TUNNELING ON EXISTING WATER

TUNNEL IN BANGKOK SUBSOILS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.

WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng. , 85 pp. ISBN 974-53-1802-7.

This research aims to study the settlement behavior and the method for predicting the ground surface and subsurface settlements due to MRTA subway tunneling across MWA water supply tunnel in Samyan area. This research study the tunnelling sequence and compare the result from field instrumentation with Finite Difference Analysis(FDA) using Mohr-Coulomb failure criteria. The numerical study was conducted by simulating on 3D numerical model. The simulation started with the lower tunnel, SB, which its alignment pass beneath the MWA water tunnel, and followed by the upper tunnel, NB, which located above MWA water tunnel.

The results from empirical method at the instrumentation section show that $i = 8$ m. for SB tunnel and 6 m. for NB tunnel, $K = 0.34, 0.55$ and the groundloss were 0.35 and 1.80% for SB and NB tunnel, respectively.

The FDA result shown it was suitable for predicting the settlement of SB tunnel, but the FDA numerical analysis could not simulated this continuous approach of the NB tunnel. Since the upper tunnel(NB) in this study is located in the soft clay at the very shallow level, only 7.30 m. from tunnel crown to the ground surface. Excessive soil movement response due to tunneling in soft clay, this phenomena lead to induce soil behavior different from Mohr-Coulomb criteria.

Department..... Civil Engineering

Field of study..... Civil Engineering

Academic year..... 2004

Student's signature..... *Kitpon Prapisankit*

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

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิจัยนี้ มีปัญหาและอุปสรรคมากมาย ขอบเขตของความรู้และรูปแบบของงานวิจัยเองเกินกว่าความรู้ความสามารถของผู้เขียนที่จะสามารถดำเนินการวิจัยได้โดยลำพังหากปราศจากความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากผู้มีความรู้และผู้เกี่ยวข้องดังนี้

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ การรถไฟฟ้ามหานครแห่งประเทศไทยและบริษัททีโอไอเวียน (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ด้านข้อมูลสำหรับงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรัักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนการสนับสนุนต่างๆทั้งในการทำวิทยานิพนธ์ และในการศึกษาระดับมหาบัณฑิตมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาทำหน้าที่ประธานการสอบวิทยานิพนธ์และให้ทั้งการสอน และคำแนะนำที่มากคุณค่า

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรวิตร บุญญะฐิติ ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่สำคัญทั้งต่อการเรียนและการใช้ชีวิต

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำแนะนำการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ และช่วยไขข้อปัญหาต่างๆในการสร้างแบบจำลองหลายต่อหลายครั้ง

และต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุทธิวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับคำแนะนำและแนวความคิดการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผู้เขียนยังต้องกราบขอบพระคุณสำหรับอีกหลายท่านที่มีได้เอ่ยถึง ผู้เขียนตระหนักและระลึกถึงพระคุณของผู้เกี่ยวข้องทุกท่านเป็นอย่างสูง ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนและส่งเสริมให้ผู้เขียนสำเร็จการศึกษาจนมาถึงปัจจุบันนี้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
สัญลักษณ์	ฅ

บทที่

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและบททวนผลงานในอดีต.....	4
2.1 การคาดคะเนการทรุดตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์	4
2.1.1 การคาดคะเนการทรุดตัวที่ผิวดิน.....	5
2.1.2 การประเมินหาค่า width parameter(i).....	5
2.1.2.1 Peck(1969).....	5
2.1.2.2 O'Reilly & New(1982).....	5
2.1.3 การคาดคะเนการทรุดตัวใต้ผิวดิน.....	7
2.2 การสูญเสียมวลดินในการขุดเจาะ.....	9
2.2.1 การสูญเสียมวลดินและค่าการทรุดตัวมากที่สุดที่ผิวดิน.....	9
2.2.2 สาเหตุการสูญเสียมวลดินในระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์.....	10
2.2.2.1 การสูญเสียมวลดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ	
(Ground Loss into Face).....	11
2.2.2.2 การสูญเสียมวลดินเหนือหัวเจาะ	
(Ground Loss Over Shield).....	11

2.2.2.3 การสูญเสียมวลดินเนื่องจากช่องว่างรอบดาตอุโมงค์ (Ground Loss due to Tail Void Encroachment).....	12
2.2.2.4 การสูญเสียมวลดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อุโมงค์ (Ground Loss due to Deformation of Tunnel).....	13
2.2.3 การประเมินคุณภาพการขุดเจาะด้วยร้อยละของการสูญเสียมวลดิน.....	13
2.3 การทรุดตัวที่ช่วงเวลาต่างๆเนื่องจากหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล EPB.....	14
บทที่ 3 การรวบรวมข้อมูลและผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดิน.....	16
3.1 โครงการรถไฟฟ้ามหานคร.....	16
3.2 ลักษณะชั้นดินของกรุงเทพฯ.....	18
3.3 สภาพชั้นดินตลอดเส้นทางของการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน.....	19
3.4 การก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าผ่านแนวท่อประปา.....	22
3.5 กรณีศึกษาการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าผ่านแนวท่อประปาบริเวณสามย่าน.....	22
3.5.1 ข้อมูลทั่วไป.....	22
3.5.2 ข้อมูลของอุโมงค์และหัวเจาะที่ใช้.....	29
3.5.3 ขั้นตอนการก่อสร้าง.....	30
3.6 การทดลองทำการขุดเจาะในบริเวณ Trial Area.....	31
3.7 การตรวจวัดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของดินขณะ ทำการก่อสร้างของกรณีศึกษา ณ จุดตัดสามย่าน.....	33
3.7.1 รายละเอียดและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือ.....	33
3.7.2 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวและเคลื่อนตัวของชั้นดิน.....	34
1) การตรวจวัดจาก Shallow Subsurface Settlement.....	34
2) การตรวจวัดจาก Surface Settlement.....	34
3) การตรวจวัดจาก Subsurface Heave Indicator.....	35
บทที่ 4 การจำลองการขุดเจาะด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	39
4.1 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้วิธี ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนทิววิเคราะห์ปัญหา.....	39
4.1.1 ชั้นส่วนพื้นฐานที่ประกอบเป็นมวลดิน.....	39
4.1.2 ชั้นส่วนพื้นฐานแบบเปลือกบาง(Shell Element).....	40
4.1.3 ชั้นส่วนพื้นฐานแบบคาน(Beam Element).....	40

4.2 แบบจำลองวัสดุ Material Model และกฎการวิบัติ (Failure Criteria).....	41
4.3 การจำลองเสมือนการขุดเจาะแบบสามมิติ.....	42
4.3.1 หลักการเบื้องต้นในการสร้างแบบจำลอง.....	42
4.3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับศึกษาปัญหาการขุดเจาะ ผ่านแนวท่อประปาบริเวณสามย่าน.....	44
4.3.3 แบบจำลองที่สร้างขึ้น (Geometry Model).....	46
4.3.4 การจำลองขั้นตอนการขุดแบบต่อเนื่อง.....	48
 บทที่ 5 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์.....	51
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Soil Stiffness กับระดับการเสียรูป.....	51
5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน.....	53
5.2.1 คุณสมบัติของดิน (Properties of Soil).....	53
5.2.1.1 กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Stength).....	53
5.2.1.2 โมดูลัสของดิน (Soil Modulus).....	55
5.2.1.3 โมดูลัสของ Grouting Material.....	57
5.2.2 สถิติเฟนสของดาดอุโมงค์ (Stiffness of Lining, EI).....	57
5.2.3 การคำนวณแรงสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต.....	59
5.3 การวิเคราะห์กรณีศึกษาจุดตัดสามย่าน.....	61
5.3.1 ลักษณะชั้นดินและข้อมูลทั่วไป.....	61
5.3.2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	62
5.4 ผลการวิเคราะห์.....	64
5.4.1 การวิเคราะห์แบบ Empirical.....	64
5.4.2 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี Finite Difference.....	67
5.4.2.1 การจำลองการขุดเจาะในส่วนของอุโมงค์ระดับล่าง(ขุดเจาะก่อน).....	67
1) ผลของค่า Stiffness Ratio.....	67
2) ค่าการทรุดตัวสูงสุด ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งเครื่องมือ.....	68
3) ผลจากการขุดเจาะตามแนวยาว(Longitudinal Effect).....	71
3.1) Longitudinal profile at Ring No.22.....	71
3.1) Longitudinal profile at Ring No.42.....	72
4) การทรุดตัวตามยาวตามแนวเส้นทางการก่อสร้าง.....	73

5.4.2.2 การจำลองการขุดเจาะในส่วนของอุโมงค์ระดับบน(ขุดเจาะที่หลัง)....	76
1) ผลของค่า Stiffness Ratio.....	76
5.4.2.3 ผลการจำลองพฤติกรรมของ Spiling pipe.....	78
บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	79
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	79
6.2 ปัญหาที่พบ.....	79
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
บรรณานุกรม.....	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ground Loss กับคุณภาพของการก่อสร้างอุโมงค์.....	14
3.1 ลักษณะทั่วไปของโครงการ MRTA.....	16
3.2 รายละเอียดหัวเจาะที่ใช้.....	30
3.3 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับชนิดเครื่องมือ ระดับที่ติดตั้ง และค่าการหลุดตัว หลังขุดเจาะเสร็จสิ้น.....	35
5.1 แสดงคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการจำลองการขุดเจาะ.....	44
5.2 พารามิเตอร์สำหรับการผลจากการอัดฉีดน้ำปูนและการเคลื่อนตัวของมวลดินหลังหัวเจาะ.....	57
5.3 พารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	62
5.4 พารามิเตอร์ของหัวเจาะและดาตอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	63
5.5 พารามิเตอร์ของ Spiling Pipe ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	63
5.6 สรุปผลการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยวิธี Empirical(หน้าตัดSSS).....	64
5.7 เปรียบเทียบค่า K ของกรณีศึกษากับงานวิจัยอื่น.....	66
5.8 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์ด้วย FDA หลังการก่อสร้าง NB.....	77

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck 1969).....	4
2.2 กราฟสำหรับประมาณค่า I (เสนอโดย Peck 1969).....	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์ (Z_0) กับระยะถึงจุดดัดกลับ (i) ของหน้าตัดทรุดตัว (O'Reilly and New,1982).....	6
2.4 แสดงหน้าตัดการทรุดตัวที่ความลึกต่างๆจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Mair 1993).....	7
2.5 ผลของความลึกที่มีต่อแนวโน้มค่า K (Mair,1993).....	8
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวมากที่สุดที่ระดับความลึกต่างๆกับขนาดของอุโมงค์, วิรัช (2544).....	9
2.7 แสดงการสูญเสียมวลดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะ (Lee, K.M. et al.,1992).....	10
2.8 แสดง Ground Loss ที่เกิดเหนืออุโมงค์ เนื่องจากการ Overcutting และ Pitching.....	12
2.9 แสดง Ground Loss เนื่องจาก Tail Voids (Lee, K.M. et al.,1992).....	13
2.10 การทรุดตัวที่ผิวดิน ณ ช่วงเวลาต่างๆของการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล (Sramoon & Sugimoto ,1999).....	14
3.1 แนวเส้นทางของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล.....	17
3.2 แสดงความดันน้ำใต้ดินในชั้นดินกรุงเทพฯ.....	18
3.3 ลักษณะชั้นดินตลอดช่วงเส้นทางจากสถานีหัวลำโพงถึงพระรามเก้า.....	21
3.4 ลักษณะชั้นดินตลอดช่วงเส้นทางจากสถานีศูนย์วัฒนธรรม (เทียมร่วมมิตร) ถึงบางซื่อ.....	21
3.5 แสดงแนวอุโมงค์รถไฟฟ้า(MRTA)และแนวอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง(MWA).....	24
3.6 แสดงแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าและอุโมงค์ประปาบริเวณใกล้สถานีศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์.....	24
3.7 แสดงแนวท่ออุโมงค์และสิ่งกีดขวางบริเวณจุดตัดสามย่าน.....	25
3.8 แสดงภาพตัดชั้นดินจุดที่อุโมงค์รถไฟฟ้ามีการตัดผ่านกับแนวท่อประปาบริเวณใกล้ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์.....	26

3.9	แสดงภาพตัดชั้นดินจุดที่อุโมงค์รถไฟฟ้ามุ่งการตัดผ่านกับแนวท่อประปาบริเวณใกล้แยกสามย่าน.....	26
3.10	แสดงโครงข่ายท่อประปาในพื้นที่กรุงเทพมหานคร.....	27
3.11	แสดงจุดตัดระหว่างแนวท่อประปาและอุโมงค์รถไฟฟ้ายัดดิน.....	28
3.12	แสดงหน้าตัดของอุโมงค์ประปาบริเวณสามย่าน.....	29
3.13	แสดงชั้นดิน บริเวณทดสอบการขุดเจาะ (Trail Area) เพื่อชักซ้อมก่อนการทำงานที่จุดตัดสามย่าน.....	31
3.14	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือบริเวณหน้าตัดเจาะทดสอบ (Trial Area).....	32
3.15	แสดงผลระหว่างค่าที่ตรวจวัดได้จริงเปรียบเทียบกับที่วิเคราะห์จาก FEM บริเวณ Trial Area.....	32
3.16	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือทางธรณีเทคนิคในบริเวณจุดตัดสามย่าน.....	33
3.17	แสดงลักษณะปลายของ Subsurface Settlement.....	35
3.18	แสดงผลการตรวจวัดจากเครื่องมือ Shallow Subsurface Settlement (-0.45 m. Level).....	36
3.19	แสดงผลการตรวจวัดจากเครื่องมือ Subsurface Settlement(Ground Level).....	37
3.20	แสดงผลการตรวจวัดจากเครื่องมือ Subsurface Settlement(-15 m. Level).....	38
4.1	แสดง Zone แบบ 8 node และประกอบขึ้นจาก 5 Tetrahedral.....	39
4.2	แสดงชิ้นส่วนแบบ Shell ในแกน Local Coordinate System และดีกรีความอิสระที่จุดต่างๆ.....	40
4.3	แสดงแบบจำลองชิ้นส่วนแบบ Beam และดีกรีความอิสระที่จุดต่อ.....	41
4.4	แสดงพื้นผิววิบัติของ Mohr-Coulomb Model ใน Principal Stress Space.....	41
4.5	แสดงฟังก์ชันการวิบัติในระนาบ $\sigma_3 - \sigma_1$	42
4.6	แสดงขั้นตอนทั่วไปของการสร้างและทดสอบโมเดล.....	43
4.7	แสดงขอบเขตการจำลองปัญหา.....	44
4.8	แสดง Finite Difference Mesh ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปัญหา.....	46
4.9	แสดงมุมมองต่างๆของแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์.....	47
4.10	แสดงขั้นตอนการจำลองการขุดเจาะแบบต่อเนื่อง.....	49
5.1	แสดงค่า Stiffness ของดินกับระดับการเสียรูป, Mair(1993).....	51
5.2	แสดงผลการทดสอบ Pressuremeter test ของดิน Bangkok Soft Clay , Teparaksa(1999).....	52

5.3	แสดงผลการทดสอบ Pressuremeter test ของดิน Bangkok Stiff Clay , Teparaksa(1999).....	52
5.4	ค่าปรับแก้ μ ของ Bjerrum (1972) สำหรับ Geonor Vane.....	54
5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ m กับ PI ของดินเหนียว (Ladd et al.1977).....	59
5.6	แสดงชั้นดินบริเวณหน้าตัดที่มีการพาดผ่านของแนวอุโมงค์.....	61
5.7	แสดงลักษณะการวางตัวของ Spiling Pipe ของหน้าตัด ณ จุดพาดผ่านของ แนวอุโมงค์.....	62
5.8	หน้าตัดการทรุดตัวเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์เส้นล่าง(SB).....	65
5.9	หน้าตัดการทรุดตัวเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์เส้นล่าง(NB).....	65
5.10	หน้าตัดการทรุดตัวหลังขุดเจาะอุโมงค์แล้วเสร็จทั้งสองเส้น.....	66
5.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness Ratio,R ต่อค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ได้(SB).....	67
5.12	เปรียบเทียบผลการจำลองกับ Shallow Subsurface Settlement.....	68
5.13	เปรียบเทียบผลการจำลองกับ Surface Settlement.....	69
5.14	เปรียบเทียบผลการจำลองกับ Subsurface Settlement.....	70
5.15	Longitudinal profile at ring No.22.....	71
5.16	Longitudinal profile at ring No.42.....	72
5.17	แสดงค่าการทรุดตัวตามยาวเมื่อหัวเจาะอยู่ห่างจากสถานีสามย่าน 30 เมตร.....	74
5.18	แสดงค่าการทรุดตัวตามยาวเมื่อหัวเจาะอยู่ห่างจากสถานีสามย่าน 42 เมตร.....	74
5.19	แสดงค่าการทรุดตัวตามยาวเมื่อหัวเจาะอยู่ห่างจากสถานีสามย่าน 54 เมตร.....	75
5.20	แสดงค่าการทรุดตัวตามยาวเมื่อหัวเจาะอยู่ห่างจากสถานีสามย่าน 66 เมตร.....	75
5.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness Ratio,R ต่อค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ได้(NB).....	76

สัญลักษณ์

b	= ความกว้างของ Segment
C	= Undrained Shear Strength(S_u)
C'	= Effective Shear Strength
E'	= โมดูลัสของดินแบบสภาพระบายน้ำ
E_c	= Modulus of Concrete
E_I	= Stiffness of concrete segment
E_u	= โมดูลัสของดินแบบสภาพไม่ระบายน้ำ
f'_c	= กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
FDA	= Finite Difference Analysis
G	= Shear Modulus
h	= ความหนาของ Segment
i	= ระยะจากกึ่งกลางของแนวอุโมงค์ถึงจุดที่เปลี่ยนความโค้ง (inflexion)
I	= Moment of Inertia
K'	= Effective Bulk Modulus
K_o	= Effective coefficient of earth pressure at rest
$K_{o(NC)}$	= ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างสถิตของดินเหนียวชนิดอัดแน่นปกติ
$K_{o(OC)}$	= ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างสถิตของดินเหนียวชนิดอัดแน่นเกินตัว
K_{oTotal}	= Coefficient of earth pressure at rest (total stress)
L	= ความยาวของของหัวเจาะ
m	= ค่าคงที่ ขึ้นกับ PI ของดิน
N	= ค่าการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน
OCR	= Over Consolidation Ratio
P	= Pitching Angle
P_f	= แรงดันที่ด้านหน้าหัวเจาะ (Face Pressure)
P_o	= Total stress ที่ด้านหน้าหัวเจาะ
P_w	= Pore pressure at tunnel spring line
PI	= Plasticity Index ของดิน
q_{u28}	= กำลังอัดประลัยคอนกรีตที่เวลา 28 วัน
R	= Stiffness ratio(q_{u28}/E_{groul})

- r_0 = รัศมีภายนอกของอุโมงค์
 S = ปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน ที่ระยะ x ใด ๆ จากศูนย์กลางของแนวอุโมงค์
 S_{max} = ปริมาณการทรุดตัวที่มากที่สุดที่ผิวดิน ที่บริเวณกึ่งกลางแนวอุโมงค์
 $S_{max,z}$ = ปริมาณการทรุดตัวที่มากที่สุดที่ระดับความลึกต่างๆ ที่บริเวณกึ่งกลางแนวอุโมงค์
 S_u = ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
 $S_{u_{Field}}$ = ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนในสนาม
 $S_{u_{FV}}$ = ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนที่วัดได้จากการทดสอบแบบเวนในสนาม
 $S_{u_{SPT}}$ = ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรอนจากการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน
 V_{ex} = ปริมาตรของดินที่ถูกขุดออกต่อหนึ่งหน่วยเมตร จากเครื่องขุดเจาะอุโมงค์
 V_s = ปริมาณของดินที่ทรุดตัวต่อหนึ่งหน่วยเมตร
 x = ระยะทางตามขวางในแนวราบจากศูนย์กลางของอุโมงค์
 Z_0 = ความลึกจากผิวดินถึงศูนย์กลางของอุโมงค์
 Z = ความลึกจากผิวดินถึงระดับความลึกใดๆที่ต้องการพิจารณาค่าการทรุดตัว
 ϵ_s = ค่า Shear Strain
 σ_H = Horizontal total stress
 σ'_H = Horizontal effective stress
 σ_V = Vertical total stress
 σ'_V = Vertical effective stress
 γ_t = Total unit weight of soil
 γ_w = Unit weight of water
 ϕ' = มุมเสียดทานภายในรูปของ Effective Stress
 μ = ค่าปรับแก้ของ Bejerrum
 V = อัตราส่วนบัวของของดินเหนียวในสภาพไม่ระบายน้ำ
 V' = อัตราส่วนบัวของของดินเหนียวในสภาพระบายน้ำ