

การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากงานรุดเจาะอุโมงค์ผ่านสิ่งกีดขวางใต้ดิน



นางสาว วราภรณ์ ธนัตวรานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-1637-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOIL DISPLACEMENT INDUCED BY TUNNELLING PASS THROUGH
UNDERGROUND OBSTRUCTION

Miss.Waraporn Thanutwaranon

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 2005

ISBN 974-53-1637-7

481761

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากงานขุดเจาะอุโมงค์ผ่านสิ่งกีดขวางใต้ดิน

โดย

นางสาว วราภรณ์ ธนัตวรานนท์


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา


อาจารย์ที่ปรึกษา

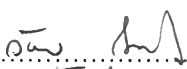
รองศาสตราจารย์.ดร. วันชัย เทพรัักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรัักษ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร.จิรวัด บัญญะฐิติ)

วราภรณ์ ธันต์วราภรณ์ : การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ผ่านสิ่งกีดขวางใต้ดิน. (SOIL DISPLACEMENT INDUCED BY TUNNELLING PASS THROUGH UNDERGROUND OBSTRUCTION) อ.ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรัักษ์, 124 หน้า. ISBN 974-53-1637-7.

งานวิจัยศึกษาการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ ด้วยหัวเจาะแรงดันดิน สมดุลย์ลอดผ่านและตัดผ่านสิ่งกีดขวางใต้ดิน ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำการประปาจากโรงกรองน้ำบางเขนสู่ถนนงามวงศ์วาน อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.07 เมตร เจาะในชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทรายที่ระดับความลึกกึ่งกลางอุโมงค์ประมาณ 20 – 21 เมตร ต่ำจากระดับผิวดิน ผลการตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดินพบว่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ การทรุดตัวช่วงก่อนหัวเจาะเคลื่อนตัวมาถึง (Flow in shield) ช่วงที่หัวเจาะทำการเจาะผ่าน (In Shield) และช่วงหัวเจาะผ่านพ้นไปแล้ว (Tail Void) การทรุดตัวช่วงหัวเจาะผ่านพ้นไปแล้วจะมีค่ามากที่สุดเนื่องจากช่องว่างระหว่างหัวเจาะกับดาตอุโมงค์ การเคลื่อนตัวด้านข้างของดินจะเกิดการเคลื่อนตัวออกจากแนวขุดเจาะในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลางที่ระดับความลึกประมาณ 10 – 14 เมตร ในขณะที่เกิดการเคลื่อนตัวเข้าหาแนวขุดเจาะในชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับแนวขุดเจาะ และมีปริมาณการเคลื่อนตัวน้อยกว่าระดับเหนืออุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง ปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินในบริเวณที่มีเสาเข็มโครงสร้างอยู่ใกล้กับแนวการขุดเจาะอุโมงค์พบว่ามีค่าน้อยกว่าในบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มอยู่ใกล้

ในการประมาณการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ผ่านอุปสรรค ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ โดยใช้ทฤษฎีการพังทลายของดินชนิด Mohr – Coulomb พบว่าสามารถประมาณการเคลื่อนตัวของดินและโครงสร้างสอดคล้องกับผลการตรวจวัด โดยพบว่าอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสของดิน (Eu, Young's Modulus) กับ กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Su, Undrained shear strength) มีค่า $Eu/Su = 240$ และ 480 ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....*อนงค์ ธรรมรักษ์*
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*วันชัย เทพรัักษ์*
ปีการศึกษา.....2548.....

4570519521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : EPB / TUNNELLING / FEM / GROUND SURFACE / SETTLEMENT /
OBSTRUCTION

WARAPORN THANUTWARANON : SOIL DISPLACEMENT INDUCED BY
TUNNELLING PASS THROUGH UNDERGROUND OBSTRUCTION. THESIS
ADVISOR : ASSOCIATE PROF. WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng., 124 pp. ISBN
974-53-1637-7.

This research aims to investigate the soil displacement induced by tunneling pass through underground obstruction by Earth Pressure Balance (EPB) shield. The research project is the transmission tunnel project from Bangkhen water treatment plant to Ngamwongwan Road. The outer diameter of tunnel is 4.07 m. bored in the stiff clay and sand layer with centerline of tunnel at about 20-21 m. below ground surface. The result of ground surface settlement showed that there were 3 phases of ground settlement stage, as flow in shield, in shield and at tail void. The maximum ground surface settlement was maximum at tail void stage because of the void between cutting soil and the segment. The horizontal soil displacements showed the ground deformed outward to the tunnel center in the soft clay at 10 – 14 m. depth, while the ground deformed inward to the tunnel center in the stiff clay layer. For the soil to the pile foundation position, the horizontal displacement was smaller.

The prediction of soil displacement due to tunnelling pass through underground obstruction by the Finite Element Method (FEM), with Mohr-Coulomb failure criteria showed well agreement with the measured results. The ratio of Young's Modulus and undrained shear strength (E_u/S_u) were in the order 240 and 480 for soft clay and stiff clay, respectively.

Department..... Civil Engineering Student's signature..... *Waraporn Thanutwanon*
Field of study..... Civil Engineering Advisor's signature..... *Wanchai Teeparaksa*
Academic year..... 2005

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ภายใต้ความรู้ความสามารถของผู้เขียนเพียงผู้เดียวเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลความรู้ต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นมาเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ถูกรวบรวมมาจาก บุคคลผู้มีความรู้ความสามารถในด้านงานฐานรากและชุดเจาะอุโมงค์ ผู้เขียนจึงขอขอบคุณ ผู้สนับสนุนข้อมูลและผู้ที่ให้โอกาสในการทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรัักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ทั้งความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงศ์ และอาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ ที่สละเวลามาร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณการประปานครหลวง กิจการร่วมค้า ที่เอ็น ที่ให้ความรู้และอนุญาตให้ทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณกิตติศักดิ์ เกิดสม วิศวกรบริษัทเอเชียเทค ดีเวลอปเม้นท์ ที่ช่วยให้ความรู้ในการจัดการ และเรียบเรียงข้อมูล

ขอกราบขอบพระคุณ คุณชลธิชา บุญส่ง และคุณ วิรัช พิทักษ์ทรายทอง ที่ช่วยให้ความรู้ในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PLAXIS และให้คำปรึกษาอย่างดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอรำลึกถึงพระคุณบิดามารดา ครู อาจารย์ คุณพิชัย แทนชวาล และเพื่อนร่วมงาน หจก.ประมวลสยามและ บริษัทสกุลไทย ที่ได้อบรมสั่งสอนและช่วยสนับสนุนให้ผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5. วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1. แนวคิดและทฤษฎี.....	8
2.2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.2.1. ประวัติความเป็นมาเกี่ยวกับงานอุโมงค์ในต่างประเทศ.....	10
2.2.2. ประวัติความเป็นมาเกี่ยวกับงานอุโมงค์ในประเทศไทย.....	13
2.2.3. ประวัติและการขุดเจาะโดย Earth Pressure Balance Shield.....	16
2.2.4. ผนังอุโมงค์ (Lining).....	19
2.2.5. การคาดคะเนหาค่าการทรุดตัวของดินในงานขุดเจาะอุโมงค์.....	20
2.2.6. การหาค่าปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน Vs.....	23
2.2.7. การหาค่า Ground loss (VL) จากการขุดเจาะอุโมงค์.....	24
2.2.8. การคาดคะเนการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่าง ๆ.....	26
2.2.9. การพิจารณา Ground Loss ในงานอุโมงค์.....	27

2.2.10. การอุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting).....	30
2.2.11. การทรุดตัวของดินตามแนวการเจาะอุโมงค์.....	31
2.2.12. สาเหตุของการทรุดตัวของดินเนื่องจากการเจาะอุโมงค์.....	32
2.2.13. การควบคุมการเคลื่อนตัวของดินในการเจาะอุโมงค์ (Controlling Ground Movements in Tunnel).....	33
2.2.14. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของหัวเจาะ.....	34
2.2.15. ปัญหาอุปสรรคและวิธีการแก้ไขในขณะดำเนินงานเจาะอุโมงค์.....	35
2.2.16. ตรวจสอบการทรุดตัวของสิ่งก่อสร้างรอบแนวเจาะอุโมงค์.....	37

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. ลักษณะทั่วไปของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำในช่วงแรก สัญญาเลขที่ G-MC-7A....	41
3.2. ข้อมูลชั้นดินที่ทำการเจาะสำรวจ.....	43
3.3. ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการทำงานของหัวเจาะ.....	46
3.4. ชนิดของดาดอุโมงค์ที่ใช้ (Segment).....	49
3.4.1. Precast Concrete Segment.....	49
3.4.2. Composite Segment.....	54
3.4.3. Steel Segment.....	55
3.5. ข้อมูลสถานที่ติดตั้งและตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน (Monitoring Instrument).....	58
3.5.1. Obstruction บริเวณ Pipe Support ของการประปานครหลวง.....	61
3.5.2. Obstruction บริเวณ Oil pipe line, Fiber optic cable และ รางรถไฟ.....	69
3.5.3. Obstruction บริเวณ North Park Underpass.....	75
3.5.4. Obstruction บริเวณตอม่อเสาเข็มสะพานดอนเมืองโทลเวย์.....	81

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1. การวิเคราะห์ข้อมูลการทรุดตัวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	85
4.1.1. การเลือกใช้แบบจำลองดิน.....	85
4.1.2. การเลือก Input Parameter.....	85

4.2. การทำการวิเคราะห์.....	91
4.2.1 ข้อมูลแนวหน้าตัดที่ Station ต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์.....	91
4.2.2 ข้อมูลดินและข้อมูลสิ่งกีดขวางใต้ดินที่ทำการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element Method.....	92
4.3 การวิเคราะห์ผล.....	97
4.3.1. ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Pipe Support.....	97
4.3.2. ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Oil Pipe Line, Fiber Optic and Railway Embankment	102
4.3.3. ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Underpass North park (STA 2+140 – STA 2+148)	112
4.3.4. ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินบริเวณ ดอนเมือง Toll way (STA 2+210 – STA 2+212)	116
 บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์	
5.1. สรุปผลการวิเคราะห์.....	120
รายการอ้างอิง.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงประวัติของการเจาะอุโมงค์ในอดีตที่ผ่านมา.....	11
ตารางที่ 2.2 ชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์.....	13
ตารางที่ 3.1 ลักษณะทั่วไปของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำสัญญา G-MC-7A.....	42
ตารางที่ 3.2 ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดิน.....	43
ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล.....	48
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูล ตำแหน่ง Station ที่ทำการวิเคราะห์ข้อมูล.....	90
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลดินบริเวณ Pipe Support (Station 1+949, Station 1+959 , Station 1+961 , Station 1+983, Station 1+985)	91
ตารางที่ 4.3. Material properties of the Pipe Support (Above Ground)	92
ตารางที่ 4.4. Material properties of the Pipe Support (Below Ground)	92
ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลดินบริเวณ Fiber Optic, Oil Pipe Line and Railway Embankment.....	93
ตารางที่ 4.6. Material properties of the Fiber Optic, Oil Pipe Line and Railway Embankment.....	93
ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลดินบริเวณ North Park Underpass.....	94
ตารางที่ 4.8. Material properties of the Underpass North Park.....	95
ตารางที่ 4.9 แสดงข้อมูลดินบริเวณดอนเมืองโทลล์เวย์.....	95
ตารางที่ 4.10. Material properties of the Tollway.....	96
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์และข้อมูลที่วัดได้ จากสนาม บริเวณ Pipe Support (Foundation Below Ground)	100
ตารางที่ 4.12 แสดงค่า Ground Surface Settlement ที่ Pipe Support (Above Ground).....	100
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์และข้อมูลที่วัดได้ จากสนาม บริเวณ Pipe Support (Foundation Above Ground)	102
ตารางที่ 4.14 แสดงค่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์และข้อมูลที่วัดได้ จากสนาม บริเวณ Oil Pipe Line, Fiber Optic and Railway Embankment.....	112
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์และข้อมูลที่วัดได้ จากสนาม บริเวณ Underpass North Park.....	115

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์และข้อมูลที่วัดได้	119
จากสนาม บริเวณทางยกระดับดอนเมืองโทลล์เวย์.....	

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนที่แสดงที่ตั้งโครงการก่อสร้างโครงการปรับปรุงกิจการประปาแผนหลักครั้งที่ 7.....	3
รูปที่ 2.1 ภาพแสดงประวัติการพัฒนางานก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทย.....	15
รูปที่ 2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ระบบ Earth Pressure Balance Shield.....	16
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการติดตั้ง Segment (Sketchy, 1979).....	18
รูปที่ 2.4 แสดงการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck, 1969).....	20
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความกว้างของแนวการทรุดตัว (i/R) กับอัตราส่วนความลึกจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ต่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ ($Z0/2R$) (Peck, 1969).....	21
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า i กับค่าความลึก z (O'Reilly and New, 1982)....	22
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวที่มากที่สุดที่ระดับความลึกต่าง ๆ กับขนาดของอุโมงค์ที่ทำการขุดเจาะ.....	23
รูปที่ 2.8 แสดงการทรุดตัวที่ผิวดินและการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในการขุดเจาะอุโมงค์ (Mair, 1993).....	26
รูปที่ 2.9 ค่า K ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกการเจาะอุโมงค์ในดินเหนียว (Mair, 1993).....	26
รูปที่ 2.10 แสดงชนิดของ Ground Loss ที่เกิดขึ้น (Lee et al, 1992).....	27
รูปที่ 2.11 แสดง Ground Loss เหนือหัวเจาะอุโมงค์เนื่องจาก Overcutting (Lee et al, 1992)....	29
รูปที่ 2.12 แสดง Ground Loss เนื่องจากการติดตั้งผนังอุโมงค์ (Lee et al, 1992).....	29
รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของอุโมงค์.....	30
รูปที่ 2.14 การทรุดตัวของดินตามแนวขุดเจาะอุโมงค์ (Mitsutaka Sukimoto และอภิชาติ ธรรมมูล, 1999).....	32
รูปที่ 2.15 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน Inclinator.....	37
รูปที่ 2.16 แสดงภาพตัดขวางของการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน Inclinator.....	38
รูปที่ 2.17 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดิน Extensometer.....	39
รูปที่ 2.18 แสดงภาพตัดขวางของการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน Extensometer.....	40
รูปที่ 3.1 แนวเส้นทางของอุโมงค์ส่งน้ำจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนถึงถนนงามวงศ์วานตัดใหม่.....	41
รูปที่ 3.2 แนวเส้นทางขุดเจาะ ตำแหน่งของหลุมเจาะและตาดอุโมงค์ที่ใช้.....	44
รูปที่ 3.3 ลักษณะชั้นดินโดยทั่วไปของแนวเส้นทางขุดเจาะอุโมงค์ส่งน้ำสัญญาเลขที่ G-MC-7A.....	45

รูปที่ 3.4 แสดงภาพหัวเจาะชนิดปรับแรงดันดินสมดุลย์.....	46
รูปที่ 3.5 แสดงภาพการติดตั้ง Segment ภายในอุโมงค์จากด้านล่างไปสู่ด้านบน.....	47
รูปที่ 3.6 แสดงภาพ Curve Bolt ที่ยึด Segment ระหว่าง ring เข้าด้วยกัน.....	47
รูปที่ 3.7 แสดงภาพ Bolt ที่ยึด Segment	47
รูปที่ 3.8 แบบหล่อ Segment concrete.....	49
รูปที่ 3.9 โครงเหล็กเสริมในแบบหล่อ Segment.....	49
รูปที่ 3.10 Segment สำหรับทางตรง Strength Segment ST.....	51
รูปที่ 3.11 Segment สำหรับทางโค้ง Taper Segment T1.....	52
รูปที่ 3.12 Segment สำหรับทางโค้ง Taper Segment T2.....	53
รูปที่ 3.13 Composite Segment.....	54
รูปที่ 3.14 Steel Segment.....	56
รูปที่ 3.15 Steel Segment ยังไม่ได้ทำสีด้านการกัดกร่อน.....	57
รูปที่ 3.16 Steel Segment ทำสีด้านทานการสึกกร่อน	57
รูปที่ 3.17 แสดงบริเวณที่ทำการศึกษานิว Obstruction ทั้ง 4 จุด.....	58
รูปที่ 3.18 แสดงภาพขยายบริเวณที่ทำการศึกษานิว Obstruction ทั้ง 4 จุด.....	59
รูปที่ 3.19 แสดงแนวการขุดเจาะอุโมงค์ลอดผ่านเสาเข็ม และการเสริมความแข็งแรงให้กับฐานรากเดิมบริเวณ Pipe Support.....	62
รูปที่ 3.20 แสดงการเสริมฐานรากบริเวณ Pipe Support above Ground.....	63
รูปที่ 3.21 แสดงการเสริมฐานรากบริเวณ Pipe Support below Ground.....	64
รูปที่ 3.22 แสดงการทำเข็มเจาะเสริมฐานราก.....	65
รูปที่ 3.23 แสดงแนวศูนย์กลางการทำเข็มเจาะเสริมฐานราก.....	66
รูปที่ 3.24 แสดงการเสริมฐานราก.....	67
รูปที่ 3.25 Temporary Support.....	67
รูปที่ 3.26 Instrumentation บริเวณ Pipe Support.....	68
รูปที่ 3.27 Plan แสดงแนวเส้นทางขุดเจาะอุโมงค์ผ่าน Fiber Optic cable, Oil Pipe Line และ Railway Embankment.....	69
รูปที่ 3.28 แสดงแนวขุดเจาะอุโมงค์ลอดผ่าน Fiber Optic, Oil Pipe Line และ Embankment.....	70

รูปที่ 3.29 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Fiber Optic cable, Oil Pipe Line และ Railway Embankment.....	72
รูปที่ 3.30 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Inclinomater และ Extensometer ที่ Sta 2+071 m.....	73
รูปที่ 3.31 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Mark Point บริเวณ รางรถไฟ	74
รูปที่ 3.32 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Mark Point บริเวณ - Sta 2+115, Sta. 2+115.5, Sta. 2+116, Sta. 2+121, Sta. 2+121.5 และ Sta. 2+122.....	75
รูปที่ 3.33 แสดงแนวการขุดเจาะอุโมงค์ตัดผ่านเสาเข็ม และการเสริมความแข็งแรงให้กับฐานรากเดิมบริเวณ North Park Underpass.....	76
รูปที่ 3.34 แสดง Plan แนวอุโมงค์ตัดผ่านเสาเข็มโครงสร้าง Underpass North Park.....	77
รูปที่ 3.35 สกัดคอนกรีตออกเพื่อถอดเสาเข็มเหล็กจำนวนครั้งละ 2 ต้น.....	78
รูปที่ 3.36 ดันเสาเข็มเหล็ก H 150 x 150 ด้วย Hydraulic Jack ขนาด 50 ตัน.....	79
รูปที่ 3.37 เสริมเหล็ก เทคอนกรีตทับ นำแผ่นเหล็กมาปิด.....	79
รูปที่ 3.38 การทำเสริมเหล็ก เทคอนกรีตทับ และนำแผ่นเหล็กมาปิด.....	79
รูปที่ 3.39 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด Ground settlement marker Sta 2+148 และ Sta 2+140 บริเวณ under pass North Park.....	81
รูปที่ 3.40 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดบริเวณต่อม่อเสาเข็มดอนเมืองโทลเวย์.....	83
รูปที่ 3.41 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งการติดตั้ง Inclinomater และ Extensometer บริเวณเสาเข็มต่อม่อดอนเมืองโทลเวย์.....	84
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับ N เสนอโดย DM 7-1.....	86
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง friction angle of granular soil กับ $N - SPT$ Peck, Hanson and Thorburn, 1973.....	87
รูปที่ 4.3 ตัวปรับแก้ CN จากค่า σ_{V0}' สำหรับหาค่า N'	88
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Stiffness ของดินกับระดับการเสียรูป Mair, 1993.....	89
รูปที่ 4.5 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวของแนวตั้งที่ผิวดินที่บริเวณ Pipe Support (Foundation Below Ground - Station 1+949.....	97
รูปที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ ground loss ที่ได้จากการสมการของ Peck 1969 และ O'Reilly and New 1982.....	98

รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดินโดยวิธี Finite Element Method ที่บริเวณ โครงสร้าง Pipe Support (Foundation Below Ground) Station 1+949.....	99
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดินโดยวิธี Finite Element Method ที่บริเวณ โครงสร้าง Pipe Support (Foundation Above Ground) Station 1+959.....	101
รูปที่ 4.9 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน ด้วย Nail Point ที่บริเวณ Station 2+071.....	103
รูปที่ 4.10 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ ground loss ที่หาได้จากสมการของ Peck 1969 และ O'Reilly And New 1982.....	104
รูปที่ 4.11 แสดงค่าการทรุดตัวที่ผิวดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method.....	105
รูปที่ 4.12 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวสะสมของผิวดินที่บริเวณ Railway Embankment (Station 2+108).....	106
รูปที่ 4.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ ground loss ที่หาได้จากสมการของ Peck 1969 และ O'Reilly and New 1982 ที่บริเวณ Station 2+108.....	107
รูปที่ 4.14 แสดงค่าการทรุดตัวที่ผิวดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element Method เปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวในสนามของ Railway Embankment ที่บริเวณ Station 2+108.....	108
รูปที่ 4.15 แสดงค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element Method เปรียบเทียบกับค่าตรวจวัดจริงในสนามที่บริเวณ Oil Pipe Line.....	109
รูปที่ 4.18 แสดงค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ระดับความลึก 13.5 m. ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element Method เปรียบเทียบกับค่าตรวจวัดจริงในสนามที่บริเวณแนว Oil Pipe Line and Fiber Optic Cable.....	110
รูปที่ 4.19 แสดงค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ระดับความลึก 13.5 m. ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element Method เปรียบเทียบกับค่าตรวจวัดจริงในสนามที่บริเวณแนว Railway Embankment.....	111
รูปที่ 4.20 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวในแนวตั้งที่ผิวดินที่บริเวณ Underpass North Park – Station 2+148.....	113
รูปที่ 4.21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ ground loss ที่ได้จากสมการของ Peck 1969 และ O'Reilly and New 1982.....	114

รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดินโดยวิธี Finite Element Method ที่บริเวณ โครงสร้าง Underpass North park – Station 2+148.....	115
รูปที่ 4.23 แสดงผลการตรวจวัดข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างบริเวณทางยกระดับ ดอนเมือง – Station 2+212.8.....	117
รูปที่ 4.24 แสดงค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ระดับความลึก 13.5 m. ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite element Method เปรียบเทียบกับค่าตรวจวัดจริงในสนามที่บริเวณทาง ยกระดับดอนเมือง - Station 2+210.....	118

สัญลักษณ์

b	=	ความกว้างของ Segment
D_i	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของอุโมงค์
D_o	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์
E'	=	ค่าโมดูลัสของดินในสภาพระบายน้ำ
E_u	=	ค่าโมดูลัสของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ
E_c	=	ค่าโมดูลัสของคอนกรีต
EI	=	ค่าสติเฟนตของคอนกรีต
f_c	=	ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
FEM	=	วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Finite Element Method)
G	=	Shear Modulus
h	=	ความหนาของชิ้นส่วน Segment
i	=	ระยะจากจุดกึ่งกลางของแนวอุโมงค์ถึงจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection)
I	=	Moment of Inertia
K_o	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิตย์
$K_{o(NC)}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิตย์ ของดินเหนียวในสภาพอัดแน่นปกติ
$K_{o(OC)}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิตย์ ของดินเหนียวในสภาพอัดแน่นเกินปกติ
K_{oTotal}	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง
L	=	ความยาวของหัวเจาะ
m	=	ค่าคงที่ค่าหนึ่ง มีค่าแปรผันตามค่า PI ของดิน
OCR	=	Over Consolidation Ratio
P	=	ค่ามุมเอียงของหัวเจาะ
P_i	=	แรงดันดินด้านหน้าหัวเจาะ
P_o	=	แรงดันดินด้านหน้าหัวเจาะในสภาพ Total Stress
P_w	=	แรงดันน้ำในดินด้านหน้าหัวเจาะ
PI	=	Plasticity Index ของดิน
a	=	ค่ารัศมีภายในของอุโมงค์
r_o	=	ค่ารัศมีภายนอกของอุโมงค์
S	=	ปริมาณการทรุดตัวของดินที่ผิวดิน ที่ระยะ x ใด ๆ

S_{max}	=	ปริมาณการทรุดตัวของดินสูงที่สุด ณ จุดกึ่งกลางของแนวอุโมงค์
$S_{max,z}$	=	ปริมาณการทรุดตัวของดินสูงที่สุด ณ จุดกึ่งกลางของแนวอุโมงค์ ที่ความลึกใด ๆ
S_u	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ
$S_{u_{field}}$	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำในสนาม
V_{ex}	=	ปริมาตรของดินที่ถูกขุดออกต่อความยาวอุโมงค์ 1 เมตร
V_s	=	ปริมาตรของดินที่ทรุดตัวต่อความยาวอุโมงค์ 1 เมตร
x	=	ระยะทางในแนวราบจากหน้าตัดกึ่งกลางของแนวอุโมงค์
Z_0	=	ระยะความลึกจากผิวดินถึงจุดกึ่งกลางของแนวอุโมงค์
Z	=	ระยะความลึกจากผิวดินถึงตำแหน่งที่ทำการพิจารณาการทรุดตัวของดิน
ϵ_s	=	Shear Strain ของดิน
σ_H	=	Horizontal total stress
σ'_H	=	Horizontal effective stress
σ_V	=	Vertical total stress
σ'_V	=	Vertical effective stress
γ_t	=	หน่วยน้ำหนักจำเพาะของดิน
γ_w	=	หน่วยน้ำหนักจำเพาะของน้ำ
ϕ'	=	มุมเสียดทานภายใน
μ	=	ค่าปรับแก้กำลังรับแรงเฉือนของ Bejerrum
ν	=	ค่าอัตราส่วนปัวซอง