

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานชุด

นาย นฤทธิ ประกอบบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4162-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# LATERAL MOVEMENT ANALYSIS OF CEMENT COLUMN IN EXCAVATION WORK

Mr. Narit Prakopbun

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 2003

ISBN 974-17-4162-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานชุด  
โดย    นาย นฤทธิ์ ประกอบบุญ  
สาขาวิชา                                      วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา                              รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เทพรัักษ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

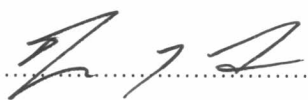
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวันยศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ)

นายณฤทธิ์ ประกอบบุญ : การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุด (LATERAL MOVEMENT ANALYSIS OF CEMENT COLUMN IN EXCAVATION WORK) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร.วันชัย เทพรักษ์, 142 หน้า. ISBN 974-17-4162-6.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Cement column) ที่ออกแบบให้เป็นระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำสำรองโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย บ่อเก็บน้ำเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนทางเข้าบ่อเก็บน้ำ (Pump house) มีความกว้างประมาณ 6.2 เมตร ยาว 18.0 เมตร และลึก 7.0 เมตร และส่วนบ่อเก็บน้ำ มีความกว้างประมาณ 46 เมตร ยาวประมาณ 830 เมตร และลึก 5.5 เมตร

ระบบกำแพงกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ความลึกประมาณ 8 เมตร ฝังลงในชั้นดินเหนียวแข็ง พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณทางเข้าบ่อเก็บน้ำพบว่า ขณะทำการขุดดินในแนวตั้งลึก 7 เมตร ได้เกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะของคานยื่น (Cantilever mode) ซึ่งมีค่าความเครียดทางด้านข้าง (Lateral strain) ประมาณ 1.4% จากนั้นจึงเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นการพังทลายของกำแพงกันดินทั้งระบบ (Overall slope failure) ในส่วนของระบบกำแพงกันดินที่บ่อเก็บน้ำซึ่งมีความลึกการขุด 5.5 เมตรได้มีการเปลี่ยนลักษณะการขุดดินจากแนวตั้ง (Vertical excavation) มาเป็นการขุดโดยการเพิ่มความลาดดิน (Slope excavation) ในส่วนที่ลึกกว่า 3.5 เมตร ทำให้สามารถลดการเกิดความเครียดทางด้านข้าง (Lateral strain) ลงเหลือเพียง 0.21-0.34% และไม่เกิดการพังทลาย

การประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) โดยการจำลองพฤติกรรมของดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยทฤษฎี Mohr-Coulomb เปรียบเทียบกับผลการวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินด้วย Inclinomter พบว่า สามารถประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ได้สอดคล้องกับผลการวัดในสนาม โดยมีค่าอัตราส่วนระหว่าง Young's modulus กับ กำลังรับแรงเฉือนของดิน ( $E_p/S_u$ ) เท่ากับ (120-180), (600-700), (650-750) สำหรับดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามลำดับ

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่อนิสิต..... 

สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ปีการศึกษา..... 2546.....

# # 4370352821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING



KEY WORD: YOUNG'S MODULUS / CEMENT COLUMN WALL / LATERAL MOVEMENT

NARIT PRAKOPBUN : LATERAL MOVEMENT ANALYSIS OF CEMENT  
COLUMN IN EXCAVATION WORK. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.  
WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng., 142 pp. ISBN 974-17-4162-6.

The research aims to study the lateral movement behavior of cement column which is designed as the retaining structure for excavation work of reservation cistern for Wangnoi power plant. The reservoir was divided into 2 parts as pump house area having dimension of 6.20 m. wide, 18.0 m. long and 7.0 m. depth, and reservoir cistern having dimension of 46 m wide, 830 m long and 5.5 m depth.

The retaining structure was constructed by means of cement column of about 8 m. long embeded into the stiff silty clay layer. The lateral movement behavior of cement column retaining structure during vertical excavation of 7 m. depth in pump house area showed the movement in the cantilever mode with large lateral strain in the order of 1.4%. After reaching large lateral strain level, the behavior of retaining structure was changed to be the overall slope failure of the whole retaining structure. In the part of reservoir cistern area for excavation of 5.5 m. depth, the excavation pattern was changed from vertical excavation as same as pump house area to be the slope excavation below 3.5 m. depth. This slope excavation induced a lower lateral strain of cement column retaining structure in the order of 0.21-0.34% and did not cause any failure.

The prediction of lateral movement of the cement column retaining structure was carried out by means of Finite Element Method (FEM) of analysis using Mohr-columb soil modeling. The prediction based on FEM analysis agrees with measured lateral movement of cement column retaining structure. The appropriate ratios of Young's modulus and undrained shear strength of soil ( $E_v/S_v$ ) for prediction of retaining wall movement are in order of (120-180), (600-700), and (650-750) for soft clay, stiff silty clay and cement column, respectively.

Department ..... Civil Engineering ..... Student's signature .....  .....  
Field of study ..... Civil Engineering ..... Advisor's signature .....  .....  
Academic year ..... 2003 .....

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลงได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ ความเอาใจใส่ของบิดา มารดา และครอบครัว ที่ช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ ทุนทรัพย์ และความห่วงใยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วันชัย เทพรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และให้คำปรึกษา ในปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นอย่างมากมาย ในการปฏิบัติงาน จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อำนวยความสะดวกในการศึกษาและเก็บข้อมูล ณ สถานที่ก่อสร้าง จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณศิริมาศ วิเศษศรี ที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อขอข้อมูลและประสานงาน และให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณก้องเกียรติ วิเศษรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และให้คำปรึกษาทั้งด้านหลักวิชาการ การวิเคราะห์ข้อมูล และในด้านอื่น ๆ ด้วยดี

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ รุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ทุกท่าน ในความเป็นเพื่อนร่วมงาน ในความช่วยเหลือ ในการเป็นผู้รับฟัง และให้คำแนะนำดี ๆ เสมอมา รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด

### บทที่

<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ลักษณะของโครงการที่ทำการศึกษา.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	10
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานในอดีต.....</b>	<b>11</b>
2.1 บทนำ.....	11
2.1.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน.....	11
2.1.2 กรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของดิน.....	11
2.2 กลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์.....	12
2.3 ผงกันดิน.....	13
2.4 ผงกันดินซีเมนต์.....	15
2.5 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน.....	17
2.6 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว.....	17
2.6.1 แรงที่กระทำกับกำแพงกันดิน.....	17
2.6.1.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินทางด้านข้างแบบสถิตย์.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1.1.1	ค่า $K_0$ สำหรับดินเม็ดหยาบ.....	18
2.6.1.1.2	ค่า $K_0$ สำหรับดินเหนียว .....	18
2.6.1.2	การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินแบบกระทำ .....	20
2.6.1.2.1	Rankine's Active Earth Pressure.....	20
2.6.1.3	การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินแบบถูกกระทำ.....	23
2.6.1.3.1	Rankine's Passive Earth Pressure .....	23
2.6.1.4	การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินทางด้านข้างเนื่องจาก Surcharge โดยทฤษฎี Elasticity .....	25
2.6.1.4.1	น้ำหนักที่กระทำแบบจุด .....	26
2.6.1.4.2	น้ำหนักที่กระทำแบบเส้น .....	27
2.6.1.4.3	น้ำหนักที่กระทำแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า .....	28
2.6.2	ชนิดของกำแพงกันดิน.....	28
2.6.3	ความแข็งแรงของกำแพงกันดิน.....	29
2.7	เสถียรภาพสำหรับงานขุดดิน .....	30
2.7.1	การหาเสถียรภาพของกันหลุมโดย Terzaghi's Theory(1943).....	30
2.8	การวิเคราะห์งานขุดดินโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	32
2.8.1	ชนิดของการกำหนดลักษณะปัญหาในการวิเคราะห์.....	32
2.8.2	ลักษณะของเอลิเมนต์.....	33
2.8.3	ชนิดของแบบจำลองพฤติกรรมสำหรับดิน.....	34
2.8.4	ลักษณะของการวิเคราะห์ปัญหา.....	35
2.8.5	แบบจำลองของ Mohr-Coulomb.....	36
2.9	กำลังรับแรงเฉือน.....	38
2.9.1	กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ.....	38
2.9.2	กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว.....	39
2.10	มุมต้านทานแรงเฉือนของดิน.....	46
2.11	ค่าโมดูลัสของดิน.....	47
2.12	พฤติกรรมเคลื่อนตัวของกำแพง.....	49



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>บทที่ 3 ข้อมูลและขั้นตอนการวิจัย.....</b>	<b>52</b>
3.1 บทนำ.....	52
3.2 การเจาะสำรวจดิน.....	52
3.3 วิธีการดำเนินงานและอุปสรรคการก่อสร้าง.....	57
3.3.1 ทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....	57
3.3.2 บ่อเก็บน้ำ.....	61
3.4 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน.....	65
3.5 วิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์.....	69
<b>บทที่ 4 การวิเคราะห์และอภิปรายผล.....</b>	<b>78</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบต่อพฤติกรรมของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์ของทางเข้าบ่อเก็บน้ำ ในระหว่างการก่อสร้าง.....	78
4.1.1 สาเหตุการพังทลายของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์ในส่วนของทางเข้าบ่อเก็บน้ำ...85	
4.1.2 การแก้ไขในส่วนที่เกิดการพังทลาย.....86	
4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ของบ่อเก็บน้ำในระหว่างก่อสร้าง....88	
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-3.....88	
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4.....89	
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-7.....89	
4.3 ผลการวิเคราะห์การก่อสร้างทางเข้าบ่อเก็บน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....90	
4.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....96	
4.4.1 เสถียรภาพของการขุด.....96	
4.4.2 เสถียรภาพของกันหลุม.....97	
4.4.3 เสถียรภาพของกำแพงกันดินแบบคานยื่น.....97	
4.4 ผลการวิเคราะห์การก่อสร้างบ่อเก็บน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....98	
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-3.....102	
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4.....102	
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-7.....102	

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	113
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	113
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม.....	114
รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	124
ภาคผนวก ค.....	127
ภาคผนวก ง.....	132
ภาคผนวก จ.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142

## สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

2.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของการปรับปรุงคุณภาพดิน .....	49
3.1 แสดงตำแหน่งของหลุม และความลึกของ Inclinator Casing.....	66
4.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-9.....	91
4.2 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพของงานชุด.....	96
4.3 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-3.....	99
4.4 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4.....	99
4.5 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-7.....	99
ค.1 อัตราส่วนความปลอดภัยจากการวิเคราะห์ด้วย Finite Element Method.....	131

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 สถานที่ของโครงการที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัย .....	2
1.2 สถานที่ของโครงการที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัย .....	2
1.3 แสดงแปลนของโครงการและตำแหน่งของ Inclinometer .....	3
1.4 แสดงหน้าตัดของทางเข้าบ่อเก็บน้ำ .....	4
1.5 แสดงหน้าตัดของเก็บน้ำ .....	5
1.7 แสดงการทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ .....	8
2.1 แสดงชนิดของกำแพงกันดิน .....	14
2.2 แสดงเครื่องมือการทำ Jet mixing การทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์และผนังดินซีเมนต์ .....	16
2.3 ความสัมพันธ์ของ $K_0$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ PI และ OCR (Brooker & Ireland, 1965) .....	19
2.4 สัมประสิทธิ์ $m$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $K_0$ และ OCR กับค่า PI (Ladd et al, 1977) .....	20
2.5 Rankine's Active Earth Pressure State .....	21
2.6 แรงดันดินทางด้านข้างของ Rankine's Active State .....	23
2.7 Rankine's Passive Earth Pressure State .....	25
2.8 แรงดันดินทางด้านข้างของ Rankine's Passive State .....	25
2.9 หน่วยแรงทางด้านข้างที่กระทำต่อกำแพงเนื่องจาก Point Load .....	26
2.10 หน่วยแรงทางด้านข้างที่กระทำกับกำแพงเนื่องจาก Line Load .....	27
2.11 หน่วยแรงทางด้านข้างที่กระทำกับกำแพงเนื่องจาก Strip Load .....	28
2.12 ลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแบบไม่มีค้ำยัน .....	29
2.13 ลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแบบมีค้ำยัน .....	29
2.14 การหาค่า Factor of safety against Basal Heave โดยวิธีของ Terzaghi .....	30
2.15 การหาค่า Factor of safety against Basal Heave for layered soil (Terzaghi 1943 and Smith 1987) .....	31
2.16 ลักษณะของ Nodal Point สำหรับเอลิเมนต์ของดิน .....	33
2.17 ลักษณะของ Nodal Point ของเอลิเมนต์สำหรับโครงสร้าง .....	34
2.18 Yield function สำหรับ Mohr-Coulomb Model .....	37
2.19 ลักษณะของ Yield function สำหรับกรณี Elastic point และ Plastic point .....	37

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.20 Elastic and Plastic Stres Point.....	37
2.21 ผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายจากการทดสอบ Direct Shear.....	39
2.22 หน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดินจากการทดสอบ Triaxial.....	40
2.23 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CD ของ NC Clay.....	41
2.24 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CU ของ NC Clay.....	41
2.25 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ UU และ Unconfined Compression ของ NC Clay.....	42
2.26 เส้นแสดงการวิบัติของ Mohr-Coulomb สำหรับ Overconsolidated Clay.....	43
2.27 ตัวปรับแก้ $\mu$ ของ Bjerrum(1972) ที่ใช้กับการทดสอบ FV.....	44
2.28 ตัวปรับแก้ $\lambda$ ของ Aas(1986) ที่ใช้กับการทดสอบ FV.....	45
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $N$ กับ $\phi'$ ของดินเม็ดหยาบ (TPEC, 1973).....	47
2.30 ตัวปรับแก้ $C_N$ สำหรับการหาค่า $N_{cor}$ และ $\phi'$ .....	47
2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบาย น้ำที่ขึ้นกับค่าดัชนีความเหลวและ OCR (Duncan and Buchigani, 1976).....	48
2.32 แบบจำลองการเคลื่อนตัวก่อนการวิเคราะห้.....	50
2.33 แบบจำลองกำแพงกันดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	50
2.34 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์.....	51
3.1 แสดงตำแหน่งหลุมเจาะและตำแหน่งการทำ Vane Shear Test.....	53
3.2 ภาพการเก็บน้ำตัวอย่างดินแบบ Wash Boring.....	53
3.3 แสดงลักษณะของชั้นดินบริเวณบ่อเก็บน้ำ.....	55
3.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนในสนาม.....	56
3.5 ผลการทดสอบ SPT และค่า Shear Strength ของดิน.....	57
3.6 แสดงการวางระยะห่างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่กำลังแวงและถนนของทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....	58
3.7 ขั้นตอนการก่อสร้างทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....	59
3.8 แสดงการวางระยะห่างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่กำลังแวงและถนนของบ่อเก็บน้ำ.....	61
3.9 แสดงแบบก่อนทำการแก้ไขของบ่อเก็บน้ำ.....	62
3.10 แสดงแบบแก้ไขของบ่อเก็บน้ำ.....	63

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.11 ขั้นตอนการก่อสร้างบ่อเก็บน้ำ.....	64
3.12 แสดงตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน.....	66
3.13 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4, IN-5, และ IN-7.....	67
3.14 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัด IN-1, IN-3, และ IN-6.....	67
3.15 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัด IN-9.....	67
3.16 แสดงการวัดการเคลื่อนตัวของดินโดย Inclinometer.....	68
3.17 ลักษณะของชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดิน ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-9.....	70
3.18 ลักษณะของชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดิน ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-3.....	71
3.19 ลักษณะของชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดิน ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-4.....	72
3.20 ลักษณะของชั้นดินและค่าคุณสมบัติของดิน ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-7.....	73
3.21 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์ในแต่ละขั้นตอน การก่อสร้าง ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-9.....	74
3.22 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์ในแต่ละขั้นตอน การก่อสร้าง ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-3.....	75
3.23 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์ในแต่ละขั้นตอน การก่อสร้าง ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-4.....	76
3.24 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์ในแต่ละขั้นตอน การก่อสร้าง ณ ตำแหน่งเครื่องมือวัด IN-7.....	77
4.1 แสดงการขุดทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....	79
4.2 แสดงรอย Crack บริเวณด้านหลังของ Precast wall.....	80
4.3 แสดงการเติมน้ำลงไปบ่อขุด.....	81
4.4 แสดงการติดตั้งค้ำยัน.....	82
4.5 แสดงผลการเคลื่อนตัวเมื่อทำการขุดดินด้านนอกทางเข้าบ่อเก็บน้ำออกไปประมาณ 2 เมตร.....	83
4.6 แสดงบ่อขุดหลังจากทำการสูบน้ำออก.....	84
4.7 แสดงการพังทลายของกำแพงกันดิน-ซีเมนต์ในส่วนช่องทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....	85
4.8 แสดงบ่อขุดหลังจากทำการถมดินกลับเรียบร้อยแล้ว.....	86

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.9 แสดงการซ่อมแซมโดยการทำ Jet grouting ใหม่.....	86
4.10 แสดงแผนแก้ไขการซ่อมแซมทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....	87
4.11 แสดงทางเข้าบ่อเก็บน้ำภายหลังจากขุดเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....	87
4.12 แสดงการพังทลายของบ่อเก็บน้ำ ณ ตำแหน่ง STA+650.....	88
4.13 ผลการประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดดินลึก 7 เมตร ด้วยวิธี FEM กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-9.....	93
4.14 ผลการประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดดินครั้งละ 1 เมตร จนถึงความลึก 7 เมตร ด้วยวิธี FEM ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-9.....	94
4.15 ผลการประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการนำดินด้านข้างออก 2 เมตร ด้วยวิธี FEM และเปรียบเทียบกับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-9.....	95
4.16 แสดงการเคลื่อนตัวของดินจากขั้นตอนของการขุดดินลึก 5.5 เมตรก่อนการแก้ไข.....	100
4.17 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดดินแนวตั้งลึก 5.5 เมตรก่อนทำการแก้ไขแบบและการขุดดินครั้งที่ 2 ด้วยวิธี FEM เทียบกับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4.....	101
4.18 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการถมคันดินที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-3.....	103
4.19 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดครั้งที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS ..... กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-3.....	104
4.20 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดครั้งที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-3.....	105
4.21 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการถมคันดินที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4.....	106
4.22 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดครั้งที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4.....	107

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.23 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดครั้งที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-4.....	108
4.24 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการถมคันดินที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-7 .....	109
4.25 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดครั้งที่ 1 ที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-7 .....	110
4.26 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างในขั้นตอนการขุดครั้งที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าการวัดจริงในสนาม ณ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด IN-7.....	111
ก.1 แสดงการหล่อ Cap Beam.....	118
ก.2 แสดงการติดตั้งท่อ Inclinator .....	118
ก.3 แสดงท่อ Inclinator Casing ที่ติดตั้งเสร็จแล้ว.....	119
ก.4 แสดงวิธีการเก็บค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วย Inclinator .....	119
ก.5 แสดงการบดอัดคันดินถมถนน .....	120
ก.6 แสดงการทำ Lining ของคันดินถนน.....	120
ก.7 แสดงลักษณะและวิธีการขุดขั้นตอนที่ 1.....	121
ก.8 แสดงลักษณะและวิธีการขุดขั้นตอนที่ 2.....	121
ก.9 แสดงสภาพบ่อหลังจากขุดเสร็จสิ้น.....	122
ข.1 แสดงการเคลื่อนตัวของดินจากผลของงานขุดดินลึก .....	124
ข.2 แสดงการเคลื่อนตัวของดินจากผลของการนำดินทางด้านข้างของกำแพงออก 2 เมตร .....	124
ข.3 แสดงการเคลื่อนตัวของดินจากผลของงานถมคันดิน.....	124
ข.4 แสดงการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดครั้งที่ 1 .....	125
ข.5 แสดงการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดครั้งที่ 2 .....	125
ข.6 แสดงทิศทางของการเคลื่อนตัวของดิน.....	125
ค.1 แสดงค่าความปลอดภัยของทางเข้าบ่อเก็บน้ำในการวิเคราะห์กรณีที่ 1.....	127
ค.2 แสดงค่าความปลอดภัยของทางเข้าบ่อเก็บน้ำในการวิเคราะห์กรณีที่ 2.....	127
ค.3 แสดงค่าความปลอดภัยของทางเข้าบ่อเก็บน้ำในการวิเคราะห์กรณีที่ 3.....	128



## สัญลักษณ์

$C$	= Cohesion
$C_N$	= ค่าปรับแก้ที่ได้จาก Peck Hanson and Thornburn (1973)
$E'$	= Drained Young's Modulus
$E_u$	= Undrained Young's Modulus
$\phi'$	= มุมต้านทานแรงเฉือนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล
$G$	= Shear Modulus
$K_o$	= Coefficient of Earth Pressure at Rest
$K_{O(NC)}$	= สัมประสิทธิ์แรงดันดินทางด้านข้างของดินเหนียวชนิดอัดแน่นปรกติ
$K_{O(OC)}$	= สัมประสิทธิ์แรงดันดินทางด้านข้างของดินเหนียวชนิดอัดแน่นเกินตัว
OCR	= Overconsolidated Ratio
$q_u$	= Unconfined Compress Strength
$\gamma_t$	= Total Unit Weigth
$S_u$	= Undrained Shear Strength
$S_{u(FV)}$	= Undrained Shear Strength from Field Vane Shear Test
$\sigma_{ho}$	= Horizontal Total Overburden Pressure
$\sigma_{vo}$	= Vertical Effective Overburden Pressure
$\sigma'_{ho}$	= Horizontal Effective Overburden Pressure
$\sigma'_{vo}$	= Vertical Effective Overburden Pressure
$\sigma'_p$	= หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต
$\tau_f$	= กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินขณะเกิดการวิบัติ
$u$	= Pore Water Pressure
$\mu$	= ตัวปรับแก้ที่ได้จาก Bjerrum
$\nu$	= Undrained Poisson's Ratio
$\nu'$	= Drained Poisson's Ratio
CD Test	= Consolidated Drained Triaxial Test
CU Test	= Consolidated Unrained Triaxial Test
UU Test	= Unconsolidated Undrained Triaxial Test