

พฤติกรรมการณ์เคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ติดตั้งสำหรับงานโครงสร้างกันดิน



นายณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

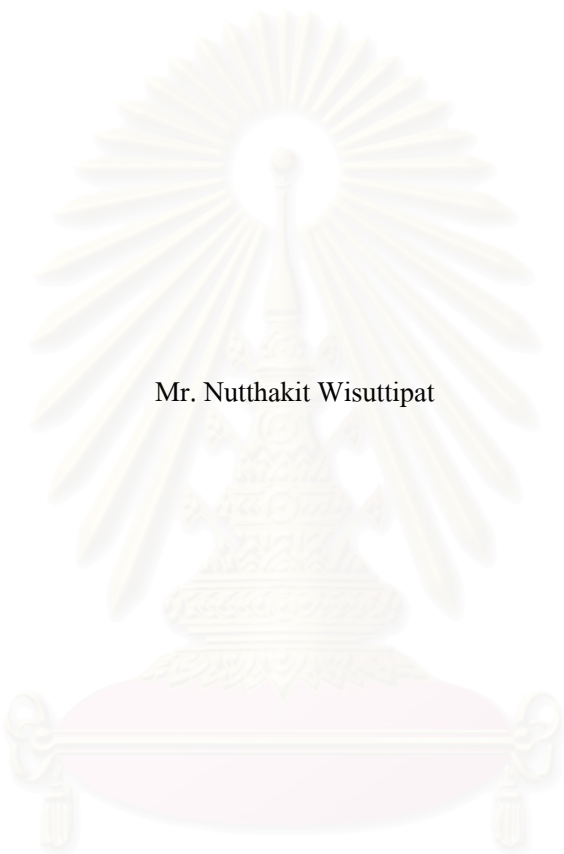
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2383-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MOVEMENT BEHAVIOR OF DEEP CEMENT MIXING COLUMN FOR RETAINING STRUCTURE



Mr. Nutthakit Wisuttiwat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 974-53-2383-7


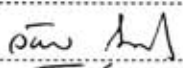
ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์ : พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มซีเมนต์ลึกสำหรับงาน โครงสร้างกันดิน.
(MOVEMENT BEHAVIOR OF DEEP CEMENT MIXING COLUMN FOR RETAINING
STRUCTURE) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร.วันชัย เทพรักษ์, 215 หน้า. ISBN 974-53-2383-7.

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของด้านข้างของเสาเข็มซีเมนต์ (Deep Cement Mixing Column ,DCM) ที่ประยุกต์มาใช้สำหรับงานขุดดินลึกในดินกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) เพื่อก่อสร้างโครงสร้างกันดินใน 2 ส่วน คือ โครงสร้างประตูระบายน้ำ และโครงสร้างคลอง โครงสร้างประตูระบายน้ำเป็นอาคารประตูระบายน้ำคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่ ที่มีการขุดดินลึกประมาณ 11.50 ม. และมีระบบป้องกันดินชั่วคราวเป็นระบบกำแพงเสาเข็มซีเมนต์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 ม. จำนวน 9 แถว ต่อเนื่องกัน เป็นความหนา 6.34 ม. ความลึกของเสาเข็มซีเมนต์แปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 11.00 – 18.00 ม. โดยออกแบบเป็นลักษณะของกำแพงทึบ (Gravity wall) ในส่วนโครงสร้างคลอง เป็นโครงสร้างกำแพงคลองที่ประยุกต์ใช้กำแพงเสาเข็มซีเมนต์เป็นกำแพงถาวร โดยกำแพงเสาเข็มซีเมนต์มีจำนวน 8 แถว หนา 5.56 ม. ลึก 18.00 ม. เพื่อขุดดินลึกประมาณ 8.00 ม. โดยมีการเสริมด้านหน้ากำแพงเสาเข็มซีเมนต์ด้วยแผ่นพื้นคอนกรีตหนา 0.30 ม. ลึก 20 ม.

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของด้านข้างของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์ ขณะทำการขุดดินลึก 11.50 ม. บริเวณประตูระบายน้ำ พบว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์เป็นลักษณะคานยื่น เมื่อค่าความเครียดเฉือน (Shear strain) ของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์อยู่ระหว่าง 1-2% แต่เมื่อการเคลื่อนตัวสูงขึ้น มีค่าความเครียดเฉือนมากกว่า 2% จะเกิดการวิบัติและเสาเข็มซีเมนต์จะเกิดการแยกตัวจากกัน ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าค่ากำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์มีค่าประมาณ 44-70% และ 20-43% ของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มซีเมนต์ สำหรับการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์ ที่มีค่าความเครียดเฉือนอยู่ระหว่าง 1-2% และมากกว่า 2% ตามลำดับ

พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของด้านข้างของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์บริเวณโครงสร้างคลอง ที่มีขุดดินตื้นกว่าที่ออกแบบไว้ โดยขุดดินลึกเพียงประมาณ 4 ม. จะมีการเคลื่อนตัวเป็นลักษณะคานยื่น แต่เสาเข็มซีเมนต์ไม่เกิดการแยกตัวจากกันและเกิดความเครียดเฉือนของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์น้อยกว่า 0.81% โดยมีค่ากำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์ใกล้เคียงกับกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มซีเมนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต 
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ปีการศึกษา 2548

4670294321: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: DEEP CEMENT MIXING COLUMN / RETAINING STRUCTURE / LATERAL MOVEMENT / SHEAR STRAIN /DEEP EXCAVATION

NUTTHAKIT WISUTTIPAT: MOVEMENT BEHAVIOR OF DEEP CEMENT MIXING COLUMN FOR RETAINING STRUCTURE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.WANCHAI TEPARAKSA, D.Eng., 215 pp. ISBN 974-53-2383-7.

This research aims to study lateral movement behavior of deep cement mixing column (DCM Column) acting as retaining structures for deep excavation in Bangkok clay. The retaining structures consists of 2 parts as the drainage gates structure and the canal structure. The drainage gate structure is the large reinforced concrete structure having deep excavation of 11.50 m. The temporary retaining structure for deep excavation consists of 9 rows of ϕ 0.80 m. deep cement mixing column about 6.34 m. thick with depth of DCM column vary from 11.00-18.00 m. The canal structure was designed by using the DCM column wall as the permanent canal wall structure. The DCM Column wall was faced with reinforced concrete sheet 0.30 m. thick and 20 m. long for excavation of 8.00 m. depth. The canal structure consists of 8 rows of ϕ 0.80 m. DCM column about 5.56 m. thick and 18.00 m. depth.

The lateral movement behavior of DCM column for 11.5 m. depth excavation at drainage gate structure was in the cantilever mode for shear strain of DCM wall in the order of 1-2%. When lateral movement of DCM wall was higher with shear strain more than 2%, the DCM wall was failed and each DCM columns was separated. The finite element analysis (FEM) showed that the shear interface between DCM column was in the order of 44-70% and 20-43% of the undrained shear strength of DCM column for DCM movement with shear strain of 1-2% and more than 2%, respectively.

The lateral movement behavior of DCM column for canal structure with depth of excavation only about 4 m. depth shallower than designed depth was in the cantilever mode but without any separating on DCM column. The shear strain of DCM wall was in the order of less than 0.81% and the shear interface between DCM column was closed to the undrained shear strength of DCM column.

DepartmentCivil Engineering..... Student's signature *Nutthakit Wisuttipat*
Field of study.....Civil Engineering..... Advisor's signature *Wanchai Teeparaksa*
Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ต้องกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งพรและกำลังใจ และญาติพี่น้องสำหรับความห่วงใยเอาใจใส่ เสมอมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วันชัย เทพรัักษ์ ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาในงานวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ได้สละเวลา และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท ซีโน-ไทย เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) เอื้อเพื่อข้อมูลและความรู้ในขั้นตอนการก่อสร้างทั้งหมดเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท สเตรตีเจีย เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านความรู้และวิชาการสำหรับสร้างแบบจำลองและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ บริษัท ริชอสส์ เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่เห็นประโยชน์ในการศึกษาและให้โอกาสดี ๆ

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ รุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่อยู่ในทุกหน่วยงานข้างต้นที่ให้คำแนะนำดี ๆ และกำลังใจอันอบอุ่น รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฅ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ห
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ.....	5
2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ.....	5
2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ.....	7
2.1.3 โมดูลัสของดิน (Soil Modulus).....	11
2.2 การคำนวณแรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure).....	13
2.2.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันทางด้านข้างแบบสถิตย์ (At Rest Pressure).....	13
2.2.2 การคาดคะเนหน่วยแรงดันดินด้านข้างโดยหลักการของ Rankine.....	16
2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีซีเมนต์ผสมลึก (Deep Cement Mixing Method)...	19
2.3.1 กลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์.....	19
2.3.2 กรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพดิน.....	20
2.3.3 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของส่วนผสมของดินซีเมนต์.....	24
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเพิ่มของกำลัง และการตรวจสอบคุณภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์.....	29

2.4	โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์.....	31
2.5	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม.....	35
2.6	พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์.....	41
2.6.1	การศึกษาพฤติกรรมของลาดขุดทดลองในดินอ่อน.....	41
2.6.2	การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุด.....	42
2.6.3	พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของแนวราบของโครงสร้างกันดิน เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุด.....	46
2.7	การคาดคะเนการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์....	47
2.7.1	คำนิยามทั่วไปของ Stress และ Strain.....	48
2.7.2	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์แบบประสิทธิผล.....	50

บทที่ 3 การรวบรวมข้อมูลและผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน.53

3.1	การตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	53
3.1.1	การหาคุณสมบัติของดินโดยวิธีการทดสอบในสนาม (In-situ Testing).....	53
3.1.1.1	การทดสอบแรงเฉือนดินในสนาม (Field Vane Shear Test).....	54
3.1.1.2	การทดสอบการตอกมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)....	56
3.1.2	การหาสมบัติของดินโดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Testing).....	60
3.1.2.1	คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน (Basic Soil Properties)	60
3.1.2.2	คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม.....	61
3.1.2.3	คุณสมบัติทางการเคลื่อนตัวของดิน	62
3.2	การทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินซีเมนต์	62
3.2.1	การหาสมบัติของดินซีเมนต์โดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Testing).....	63
3.2.1.1	คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินซีเมนต์ (Basic Soil Cement Properties).....	63

3.2.1.2	คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม.....	63
3.2.1.3	คุณสมบัติทางการเคลื่อนตัวของดินซีเมนต์	64
3.3	เครื่องมือทางเทคนิคชนิดที่ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง ของโครงสร้างกันดิน.....	64
3.3.1	อุปกรณ์.....	64
3.3.2	วิธีการตรวจวัดและแปลผล.....	67
3.4	ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์.....	69
3.4.1	สถานที่ตั้งโครงการ.....	69
3.4.2	รายละเอียดของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน.....	71
3.4.2.1	โครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน ชั่วคราว.....	71
3.4.2.2	โครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน ถาวร.....	73
3.4.3	ลักษณะของโครงสร้างของประตูระบายน้ำและคลอง.....	75
3.4.3.1	งานประตูระบายน้ำ.....	75
3.4.3.2	งานปรับปรุงคลอง.....	78
3.4.4	ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการสำรวจดิน.....	78
3.4.5	ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือ.....	80
3.5	ขั้นตอนการขุดและวิธีการแก้ไขปัญหาการก่อสร้างโครงสร้างกันดิน.....	81
3.5.1	ขั้นตอนการขุดและวิธีการแก้ไขปัญหของโครงสร้างกันดินชั่วคราว บริเวณประตูระบายน้ำ.....	81
3.5.2	ขั้นตอนการขุดและวิธีการแก้ไขปัญหของโครงสร้างกันดินถาวร บริเวณปรับปรุงคลอง.....	88
3.6	ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน	93
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน		
ระหว่างการก่อสร้าง.....		
4.1	ผลการศึกษาคงสมบัติของดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและ เจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง.....	96
4.1.1	ผลการศึกษาคงสมบัติขั้นพื้นฐานและด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์ ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ.....	96

4.1.2	ผลการศึกษาคูณสมบัติขั้นพื้นฐานและด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง.....	98
4.1.3	ผลการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง.....	102
4.2	ผลการศึกษาผลกระทบต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินในระหว่างการก่อสร้าง.....	106
4.2.1	ผลการศึกษาโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน บริเวณประตูระบายน้ำ.....	106
4.2.1.1	โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินฝั่งซ้ายของประตูระบายน้ำ.....	108
4.2.1.2	โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินฝั่งขวาของประตูระบายน้ำ.....	117
4.2.2	ผลการศึกษาโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน บริเวณคลอง.....	124
4.2.2.1	โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินของคลอง กม. 0+587.663.....	124
4.2.2.2	โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน ของคลอง กม. 0+612.630.....	128
4.2.2.3	โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินของคลอง กม. 0+662.540.....	130
4.3	การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินบริเวณประตูระบายน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	133
4.3.1	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน บริเวณประตูระบายน้ำ.....	133
4.3.1.1	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินเปรียบเทียบ INC-01.....	135
4.3.1.2	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินเปรียบเทียบ INC-02.....	144
4.3.1.3	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินเปรียบเทียบ INC-03.....	150
4.3.2	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาดินซีเมนต์และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาดินซีเมนต์.....	156
4.3.3	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาดินซีเมนต์และความเครียดเฉือน (Shear Strain , γ).....	160

4.4 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน บริเวณคลอง.....	162
4.4.1 ค่าพารามิเตอร์ของดินซีเมนต์และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์.....	162
4.4.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน บริเวณคลอง.....	165
4.4.2.1 โครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินของคลอง กม. 0+587.663	165
4.4.2.2 โครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินของคลอง กม.0+612.630.....	167
4.4.2.3 โครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินของคลอง กม. 0+662.540.....	169
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดเพื่อ ก่อสร้างคลองและความเครียดเนื่อง.....	171
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	175
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	175
5.1.1 กำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์เจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง เปรียบเทียบทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ.....	175
5.1.2 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงาน โครงสร้างกันดินระหว่างการก่อสร้าง.....	175
5.1.2.1 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงาน โครงสร้างกันดิน บริเวณประตูระบายน้ำ.....	175
5.1.2.2 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงาน โครงสร้างกันดินบริเวณคลอง.....	176
5.1.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงาน โครงสร้างกันดินบริเวณประตูระบายน้ำ โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method).....	176
5.1.4 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงาน โครงสร้างกันดินบริเวณคลอง โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method).....	176
5.2 ข้อเสนอแนะ	178

รายการอ้างอิง.....	179
ภาคผนวก.....	182
ภาคผนวก ก ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างดินซีเมนต์	
จากการทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ.....	183
ภาคผนวก ข ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างดินซีเมนต์	
จากการเจาะทดสอบ.....	192
ภาคผนวก ค ข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดในสนาม.....	197
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	215



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐาน โดยทั่วไปของดินกรุงเทพฯ (Tonyagate,1978)	6
2.2 สูตรคำนวณเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิตย์ (Ko).....	15
2.3 ข้อมูลทั่วไปของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี Deep Cement Mixing (DCM).....	25
2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบการเพิ่มของกำลัง (Terashi ,1997).....	29
2.5 การควบคุมและรับประกันคุณภาพของรายการทดสอบสำหรับเสาเข็มซีเมนต์.....	31
2.6 ผลจากการคำนวณจาก Centrifuge และ FEM.....	47
3.1 วิธีการปรับแก้ค่า N(SPT) เนื่องจากผลของ Effective Overburden Pressure, σ'_{vo}	58
3.2 แสดงค่าความแน่นของทราย และความแข็งของดินเหนียว จากผลการทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) Peck ,Hanson and Thornburn (1974).....	60
3.3 แสดงรายละเอียดของเสาเข็มซีเมนต์ ส่วนประกอบของโครงสร้างกันดินชั่วคราว...	73
3.4 แสดงรายละเอียดของเสาเข็มซีเมนต์ ส่วนประกอบของโครงสร้างกันดินถาวร.....	73
3.5 แสดงผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด ในแต่ละตำแหน่ง Inclinator.....	94
4.1 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐานและด้านวิศวกรรมของตัวอย่าง ดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ.....	98
4.2 ตัวอย่างเสาเข็มซีเมนต์ใช้สำหรับการทดสอบด้วยวิธีเจาะทดสอบในสนาม.....	99
4.3 คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด (UCS) ของเสาเข็มซีเมนต์ จากการเจาะทดสอบในสนาม.....	101
4.4 คุณสมบัติของดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับ โครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินบริเวณประตูระบายน้ำ.....	134
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร. ฝั่งซ้าย INC-01.....	156
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร. ฝั่งขวา INC-02.....	157

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร.ฝังขวา INC-03.....	157
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับความเครียดเฉือนของ โครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน	160
4.9 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับคลอง.....	162
4.10 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับหน้าตัด 0+587.663 เป็นผลสำรวจ VR 3-C301.....	163
4.11 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับหน้าตัด 0+612.630 เป็นผลสำรวจ VR 4-C394.....	163
4.12 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับหน้าตัด 0+662.540 เป็นผลสำรวจ VR 4-C506.....	164
4.13 คุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างประกอบแบบจำลอง.....	164
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างและการเคลื่อนตัวที่ได้ จากการวิเคราะห์ หน้าตัด กม. 0+587.663.....	165
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างและการเคลื่อนตัวที่ได้ จากการวิเคราะห์ หน้าตัด กม. 0+612.630.....	167
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างและการเคลื่อนตัวที่ได้ จากการวิเคราะห์ หน้าตัด กม. 0+662.540.....	169
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดและความเครียดเฉือน กม. 0+587.663.....	171
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดและความเครียดเฉือน กม. 0+612.630.....	172
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดและความเครียดเฉือน กม. 0+662.540.....	172

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999).....	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (วีระนันท์,2526).....	8
2.3 แรงดันน้ำสำหรับดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999).....	9
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_N กับค่า σ'_{vo} (Peck ,Hanson & Thornburn ,1974).....	10
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $N'(SPT)$ กับค่า ϕ' (Peck ,Hanson & Thornburn ,1974).....	11
2.6 ผลการทดสอบ Pressuremeter Test ดิน Bangkok Soft Clay (Teparaksa,1999b).....	12
2.7 ผลการทดสอบ Pressuremeter Test ดิน Bangkok Stiff Clay (Teparaksa,1999).....	13
2.8 ค่า K_o เป็นฟังก์ชันกับ OCR และค่า PI (Brooker & Ireland,1965).....	14
2.9 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ K_o และ OCR กับค่า PI (Ladd et al,1977).....	15
2.10 Active Rankine Pressure.....	17
2.11 Passive Rankine Pressure.....	19
2.12 วัสดุและอุปกรณ์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน.....	21
2.13 หัวเจาะประกอบด้วยใบกวน Share Blade.....	22
2.14 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์.....	23
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (UCS) ปริมาณซีเมนต์ และดิน(Hibino,1989).....	25
2.16 กำลังออกแบบ.....	26
2.17 การประมาณความเค้นคราก จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินซีเมนต์.....	27
2.18 ตำแหน่งการเจาะทดสอบ.....	30
2.19 การประเมินค่าความสม่ำเสมอ.....	30
2.20 โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ แบบแถวของ Tangent Column.....	32
2.21 โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ แบบมีค้ำรับ.....	33

2.22 รูปแบบต่างๆ ของการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มซีเมนต์.....	34
2.23 การวิเคราะห์ความเค้นภายในเสาเข็มซีเมนต์ (Taki และ Yang ,1991).....	35
2.24 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน Broms ,2004).....	36
2.25 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินแบบเนียน.....	38
2.26 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินแบบอัด.....	38
2.27 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก.....	39
2.28 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก.....	40
2.29 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน.....	40
2.30 แสดงการขุดทางเข้าบ่อเก็บน้ำ.....	43
2.31 ผลการประมาณการเคลื่อนตัว.....	44
2.32 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง...	45
2.33 การเคลื่อนตัวแนวราบด้านบนบนสุดของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์.....	46
2.34 แสดง Node และ Stress.....	48
2.35 แสดงระบบพิกัดและทิศทางในสามมิติ.....	49
2.36 พื้นฐานแบบจำลอง Elastic Perfectly Plastic.....	51
2.37 Yield surface ของ Mohr-Coulomb ในระนาบของหน่วยแรงหลัก(C=0).....	52
3.1 แสดงถึงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ (Field Vane Shear Test).....	55
3.2 แสดงค่าตัวคูณปรับแก้ μ สำหรับผลจากการทดสอบไบนเนียน(Bjerrum,1972).....	55
3.3 แสดงลักษณะของ Stand Spilt - Spoon Sample สำหรับ Standard Penetration Test (SPT).....	56
3.4 แสดงวิธีการทดสอบการตอกมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT).....	57
3.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ค่า SPT (Simon,N.E. and Menzies,B.K.).....	58
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT(N) กับ กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ แบบ Unconfine Compressive Strength(UC).....	59
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT(N) กับค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) (Simon,N.E. and Menzies,B.K.).....	59
3.8 Tilting Sensing Probe.....	65
3.9 Interconnecting Cable.....	66
3.10 Access Tube and Fitting.....	66

3.11 Data Logger.....	67
3.12 แสดงการวัดการเคลื่อนตัวด้วย Inclinator.....	68
3.13 แสดงที่ตั้งโครงการ.....	69
3.14 แสดงแปลนที่ตั้งโครงการ.....	70
3.15 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างกันดินบริเวณประตูระบายน้ำ.....	71
3.16 รูปตัดขวางโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินบริเวณประตูระบายน้ำ.....	72
3.17 รูปตัดขวางโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินบริเวณปรับปรุงคลอง.....	74
3.18 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างกันดินถาวร.....	75
3.19 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างประตูระบายน้ำ.....	76
3.20 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างคลองปรับปรุง.....	77
3.21 แสดงลักษณะชั้นดินของคลองส่งน้ำ.....	79
3.22 แสดงลักษณะชั้นดินโดยสังเขป.....	79
3.23 แสดงตำแหน่ง Inclinator	80
3.24 ขั้นตอนการขุดดินในแนวตั้ง.....	81
3.25 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาการเคลื่อนตัว.....	82
3.26 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับพื้น P2L และ P2M โดยใช้เข็มพืดเหล็ก.....	82
3.27 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับท้องพื้น P2L และ P2M ด้วยระบบค้ำยัน.....	83
3.28 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับท้องพื้น P1L ด้วยระบบค้ำยันแบบ Raker.....	83
3.29 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับท้องพื้น P1R ด้วยระบบค้ำยันแบบ Raker.....	84
3.30 สิ้นสุดงานขุดดินเปลี่ยนตำแหน่ง Raker เพื่อให้พื้นที่งานโครงสร้าง.....	84
3.31 แสดงงานขุดดินในแนวตั้ง จนกระทั่งเสาหินซีเมนต์ฝังชายวัด.....	85
3.32 แสดงงานตัดลาดเสาหินซีเมนต์เพื่อลดการเคลื่อนตัว และงานตอกเสาเข็ม.....	85
3.33 แสดงงานขุดดินพื้น P2L และ P2M ด้วยเข็มพืดเหล็ก.....	86
3.34 แสดงงานขุดค้ำยันเพื่อเท Lean Concrete P2L และ P2M.....	86
3.35 แสดงงานขุดค้ำยันด้วย Raker เพื่อเท Lean Concrete P1L.....	87
3.36 แสดงงานเปลี่ยนตำแหน่งค้ำยันเพื่อให้พื้นที่งาน โครงสร้างฝังชาย วัด ขวางขุด P1R.....	87
3.37 เสร็จสิ้นงานขุดส่วนประตูระบายน้ำทั้งหมด พร้อมเทพื้นคอนกรีตแล้วเสร็จ.....	88
3.38 ขั้นตอนงานก่อสร้างเสาหินซีเมนต์พื้นส่วนกลางคลอง.....	88
3.39 ขั้นตอนงานก่อสร้างเสาหินซีเมนต์พื้นที่ส่วนขอบคลอง.....	89

3.40	ขั้นตอนงานขุดดินจากระดับ -4.00 ม.รทก.ลงไป -7.00 ม.รทก.....	89
3.41	ขั้นตอนเติมน้ำเพื่อรักษาเสถียรภาพงานขุด และลดความกว้างชันคลองฝั่งขวา.....	90
3.42	ขั้นตอนเติมน้ำเพื่อรักษาเสถียรภาพงานขุดขั้นตอนสุดท้าย.....	90
3.43	แสดงงานขุดส่วนกลางคลองถึงระดับ -3.00 ม.รทก. เพื่อก่อสร้างเสาหินซีเมนต์...	91
3.44	แสดงงานขุดส่วนริมคลองถึงระดับ -3.00 ม.รทก. เพื่อก่อสร้างเสาหินซีเมนต์พื้น..	91
3.45	แสดงงานขุดคลองถึงระดับ -7.00 ม.รทก. และทิ้งชันคลองความกว้าง 9.50 ม..	92
3.46	แสดงงานเติมน้ำถึงระดับ -3.00 ม.รทก. และลดขนาดชันคลองกว้าง 5.00 ม.....	92
3.47	แสดงงานเติมน้ำถึงระดับ -1.00 ม.รทก. เสร็จสิ้นขั้นตอนงานขุดแห่งคลอง.....	93
4.1	ตำแหน่งตัวอย่างเสาหินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้าง สำหรับการทดสอบ.....	100
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ในขอบเขต V.....	103
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ในขอบเขต X.....	105
4.4	แสดงการพังทลายของ โครงสร้างกันดินฝั่งซ้ายในขั้นตอนงานขุดที่ระดับ -3.00 ม.รทก.....	107
4.5	แสดงการพังทลายของ โครงสร้างกันดินฝั่งขวาในขั้นตอนงานขุดที่ระดับ -3.00 ม.รทก.....	107
4.6	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ก) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย.....	110
4.7	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ข) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย....	111
4.8	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ค) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย....	112
4.9	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ง) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย....	113
4.10	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง จ) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย....	114
4.11	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ฉ) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย... 115	115
4.12	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ช) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย... 116	116
4.13	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ก) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวา... 119	119
4.14	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ข) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวา... 120	120
4.15	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ค) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวา... 121	121
4.16	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ง) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวา... 122	122
4.17	ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง จ) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวา... 123	123
4.18	การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินคลองที่ กม.0+587.663.....	125
4.19	รอยแยกด้านหลังโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินคลองกม.0 +587.663.....	126

4.20 รอยแยกด้านหลังโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน คลองขยายใหญ่ขึ้น.127	
4.21 ตำแหน่งของรอยแยกคลองที่ กม.0+587.663 จากการสำรวจก่อนเติมน้ำ.....	127
4.22 การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินคลองที่ กม.0+612.630.....	129
4.23 รูปตัดขวางหลังจากการขุดในชั้นตอนสุดท้ายของ กม.0+612.630.....	130
4.24 การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินคลองที่ กม.0+662.540.....	131
4.25 รูปตัดขวางหลังจากการขุดในชั้นตอนสุดท้ายของ กม.0+662.540.....	132
4.26 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ก) ข้อ 4.2.1.1.....	137
4.27 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ข) ข้อ 4.2.1.1.....	138
4.28 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ค) ข้อ 4.2.1.1.....	139
4.29 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ง) ข้อ 4.2.1.1.....	140
4.30แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน จ) ข้อ 4.2.1.1.....	141
4.31 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ฉ) ข้อ 4.2.1.1.....	142
4.32 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ช) ข้อ 4.2.1.1.....	143
4.33 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ก) ข้อ 4.2.1.2.....	145
4.34 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ข) ข้อ 4.2.1.2.....	146
4.35 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ค) ข้อ 4.2.1.2.....	147
4.36 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน ง) ข้อ 4.2.1.2.....	148
4.37 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอน จ) ข้อ 4.2.1.2.....	149
4.38 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามชั้นตอน ก) ข้อ 4.2.1.2...	151
4.39 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามชั้นตอน ข) ข้อ 4.2.1.2...	152
4.40 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามชั้นตอน ค) ข้อ 4.2.1.2...	153
4.41 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามชั้นตอน ง) ข้อ 4.2.1.2...	154
4.42 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามชั้นตอน จ) ข้อ 4.2.1.2...	155
4.43 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่า การเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร.ฝั่งซ้าย.....	158
4.44 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่า การเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร.ฝั่งขวา.....	158
4.45 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับ ค่าการเคลื่อนตัวแนวราบ.....	159

ภาพประกอบ

หน้า

4.46	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าความเครียดเฉือน...	161
4.47	แผนภาพเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงสุดจากเครื่องมือ และการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองหน้าตัด กม. 0+587.663.....	166
4.48	แผนภาพเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดจากเครื่องมือ และการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองหน้าตัด กม. 0+612.630.....	168
4.49	แผนภาพเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดจากเครื่องมือ และการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองหน้าตัด กม. 0+662.540.....	170
4.50	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดเพื่อก่อสร้างคลองกับค่า ความเครียดเฉือน.....	173



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และคำย่อ

S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนของมวลดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear Strength)
E_U	=	โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำในช่วง Elastic
ω_n	=	ปริมาณน้ำในมวลดิน/ตัวอย่างผสมตามธรรมชาติ (Natural Water Content)
LL	=	ขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit)
PL	=	Plastic Limit
PI	=	Plasticity Index
LI	=	Liquidity Index
γ	=	หน่วยน้ำหนักของดิน
σ'_{vo}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลของดินในแนวตั้งตามธรรมชาติ
ϕ	=	มุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Shearing Resistance)
N	=	Standard Penetration number
u	=	แรงดันน้ำ
C_N	=	ตัวคูณปรับแก้ค่า SPT (N)
E_s'	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของดินในสภาพระบายน้ำ
v_s'	=	อัตราส่วนปริมาตรของในสภาพระบายน้ำของดิน
m_v	=	Coefficient of Volume Change
M	=	Modulus multiplier
G	=	โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus)
σ'_{ho}	=	หน่วยแรงดันด้านข้างในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ
K_o	=	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบสถิต
OCR	=	สัดส่วนอัดแน่นเกินตัวของดิน (Over Consolidation Ratio)
c	=	หน่วยแรงเหนียว (cohesion)
k_a	=	สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันดินชนิด Active Earth Pressure
σ_a	=	หน่วยแรงดันด้านข้างรวมแบบ Active
Z_c	=	ระดับความลึกของชั้นดิน
σ_p	=	หน่วยแรงดันด้านข้างรวมแบบ Passive
K_p	=	สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันดินชนิด Passive Earth Pressure
q_U	=	Undrained Compressive Strength of Soil
C	=	ปริมาณปูนซีเมนต์เป็นร้อยละของน้ำหนักมวล
F_c	=	กำลังออกแบบ

F_{ts0}	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนออกแบบ
P_c	=	Consolidation Yield Stress
a_w	=	อัตราส่วนซีเมนต์ต่อดิน
K	=	โมดูลัสรวม (Bulk Modulus)
E_{oed}	=	Oedometer Modulus .
$\varepsilon, \dot{\varepsilon}$	=	Strain and Strain Rate
$\varepsilon^e, \dot{\varepsilon}^e$	=	Strain and Strain Rate of Elastic
$\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p$	=	Strain and Strain Rate of Plastic
ψ	=	มุมการพองตัว (Dilation Angle)
S_{uFV}	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ Field Vane ในสนาม
μ	=	ตัวปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบใบเฉือน
τ'	=	หน่วยแรงเฉือนประสิทธิผล (Effective Shearing Stress)
C_v	=	ค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation)
E_{50}	=	โมดูลัสที่ได้จากการหาโดยวิธี secant จากการทดสอบด้วย Unconfined Compression Test
θ_c	=	ค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงในช่วงความลึกที่วัด
R_{inter}	=	Interface Strength
Υ	=	ความเครียดเฉือน (Shear Strain)
N'	=	ค่า N (Standard Penetration number) ที่ได้รับการปรับแก้
ϕ'	=	มุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Shearing Resistance) ประสิทธิผล
N_c	=	Bearing Capacity Factor
D	=	ระดับความลึก
ν_s	=	อัตราปัวซองในสภาพไม่ระบายน้ำของดิน (Poisson's ratio of soil)
σ_{ho}	=	หน่วยแรงคั้นด้านข้างรวมแบบสถิตย์
σ_V	=	หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง (Vertical Total Stress)
$q_U(t)$	=	Unconfined Compressive Strength at t days
$q_U(t_0)$	=	Unconfined Compressive Strength at t_0 days
f_c	=	กำลังที่ต้องการภายใต้แรงกระทำปกติ
F_τ	=	ค่ากำลังรับแรงเฉือน
τ_{so}	=	กำลังรับแรงเฉือนที่ $\sigma_n = 0$
σ_n	=	ความเค้นปกติ (Normal Stress)

φ	=	มุมแรงเฉือนภายในของดินซีเมนต์
$\dot{\sigma}'$	=	stress rate tensors
M	=	Material Stiffness Matrix
E	=	Effective Young's Modulus .
λ	=	Plastic Multiplier
N_{field}	=	ค่า N (SPT) จากการทดสอบในสนาม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานขุดดินในพื้นที่ดินอ่อนในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโครงสร้างกันดินขึ้นมาหลายหลายวิธี สำหรับงานขุดในชั้นดินอ่อนที่หนามากส่วนใหญ่นิยมใช้โครงสร้างกันดินประเภทเข็มพืดเหล็ก(Sheet Pile) เข็มเจาะต่อเนื่อง(Secant Pile) หรือผนังที่บ้น้ำ(Diaphragm Wall) กรณีงานขุดพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งไม่ต้องการระบบค้ำยันและระบบสูบลดระดับน้ำภายในบ่อ สามารถนำเสาดินซีเมนต์ลึกลงมาประยุกต์ใช้ในงาน โครงสร้างกันดินได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้เพราะเป็นระบบป้องกันดินที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงทั้งด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ การก่อสร้างเสาดินซีเมนต์ลึกลงไปเป็นโครงสร้างกันดิน หากมีการออกแบบและขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่เหมาะสมตลอดจนขาดความระมัดระวังในการคุมงานก่อสร้าง อาจจะทำให้เกิดอันตรายและมีความเสี่ยงต่อความเสียหายต่องานก่อสร้างโครงการนั้นและอาคารข้างเคียงได้ ปัญหาที่พบในการก่อสร้าง เช่น การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ส่งผลให้อาคารข้างเคียงหรือถนนเกิดการทรุดตัว แตกร้าว เป็นต้น

โครงสร้างกันดินที่ประยุกต์ใช้เสาดินซีเมนต์ลึกลงไป ก่อสร้างด้วยวิธีการผสมลึกลงไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน (Deep Cement Mixing Method for Soil Stabilization) ขึ้นกับปัจจัยสำคัญคือ กำลังของเสาดินซีเมนต์และกำลังที่ผิวสัมผัสระหว่างเสาดินซีเมนต์ในโครงสร้าง ซึ่งการควบคุมปัจจัยทั้ง 2 ในการก่อสร้างมีข้อจำกัดในเรื่องขั้นตอนการก่อสร้าง เนื่องจากต้องดำเนินการแล้วเสร็จก่อนขั้นตอนงานขุดซึ่งไม่สามารถควบคุมคุณภาพของผิวสัมผัสระหว่างเสาดินซีเมนต์ได้ และคุณภาพของเสาดินซีเมนต์เนื่องจากมีปริมาณมากไม่สามารถเจาะมาทดสอบได้ทั้งหมด

ดังนั้นเพื่อให้งานขุดในชั้นดินอ่อน ซึ่งใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ลึกลงไปก่อสร้างเป็นโครงสร้างกันดินมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการป้องกันการเคลื่อนตัวของมวลดินในระหว่างทำการก่อสร้างและเพื่อลดความเสี่ยงของการก่อสร้างที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงต้องพิจารณาการออกแบบระบบ โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินโดยใช้วิธีการออกแบบและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างกันดิน ซึ่งการศึกษาใช้วิธีการตรวจวัดปริมาณการเคลื่อนตัวของแนวราบของโครงสร้างกันดินด้วยอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Inclinometer) และศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ เกี่ยวกับกำลังของโครงสร้างกันดินรวมทั้งพฤติกรรมที่ซับซ้อนระหว่างเสาดินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดินที่สอดคล้องด้วยวิธีการวิเคราะห์กลับ สำหรับตัวแปรพารามิเตอร์

ที่จะนำมาวิเคราะห์ปัญหาเหล่านี้ เช่น กำลังรับแรงเฉือนของมวลดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain Shear Strength, S_u) , โมดูลัสของมวลดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain Soil Modulus, E_u) และกำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัส (Interface Strength, R_{inter}) เป็นต้น

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของแนวราบของโครงสร้างเสาเข็มตักดิน ทั้งกรณีของโครงสร้างชั่วคราวและโครงสร้างถาวร ด้วยการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของแนวราบจากระเบียบวิธี Finite Element และการเคลื่อนตัวของแนวราบของโครงสร้างกันดินที่ได้มาจากการวัดจริงในสนาม เพื่อเสนอค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างเสาเข็มตักดิน พร้อมทั้งการแก้ปัญหาการเคลื่อนตัวของมวลดินในการก่อสร้างด้วยวิธีการใช้เข็มพืดเหล็กเป็นโครงสร้างกันดินชั่วคราว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ที่สามารถแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของแนวราบของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มตักดินด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Cement Mixing Method) ในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้าง
2. เพื่อศึกษาวิธีการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของแนวราบด้วยระเบียบวิธี Finite Element และเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวของแนวราบที่ได้มาจากการวัดจริงของโครงสร้างกันดินในสนาม
3. เพื่อศึกษาขั้นตอนการก่อสร้าง วิธีการก่อสร้างและแนวทางการแก้ไขปัญหาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาเข็มตักดินระหว่างการก่อสร้าง ด้วยวิธีขุดค้ำยัน (Braced Cut)
4. เพื่อเสนอแนะวิธีการและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบและประมาณค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มตักดินด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Cement Mixing Method)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้จะศึกษาถึงพฤติกรรมและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างกันดิน ซึ่งก่อสร้างด้วยเสาเข็มตักดินด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Cement Mixing Method) โดยขอบเขตของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาเฉพาะ กรณีการก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Cement Mixing Method) ที่ก่อสร้างในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เท่านั้น
2. ศึกษาเฉพาะกรณีการเคลื่อนตัวในแนวราบของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์ลึกกันดินโดยไม่คำนึงถึงเสถียรภาพโดยรวมของระบบประตูลอยน้ำและอาคารประกอบ
3. การวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์ทางโครงสร้างของโครงสร้างประตูลอยน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในแนวราบของโครงสร้างกันดินซึ่งก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Cement Mixing Method) ที่ก่อสร้างในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั้งกรณีของโครงสร้างชั่วคราวและโครงสร้างถาวร
2. แนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ระเบียบวิธี Finite Element สำหรับโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์ลึกกันดินในเขตพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
3. แนวทางแก้ไขปัญหาการเคลื่อนตัวแนวราบของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์ลึกกันดิน ที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างด้วยวิธีการขุดค้ำยัน (Braced Cut)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาโครงสร้างกันดินซึ่งก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Cement Mixing Method) ประกอบด้วยการศึกษา 2 ส่วนด้วยกัน คือ

- 1) โครงสร้างกันดิน (Retaining Structure) คือ โครงสร้างที่ทำหน้าที่ป้องกันการวิบัติ (Failure) หรือการเคลื่อนตัว (Displacement) ของดินที่มีระดับต่างกัน
- 2) การผสมลึก (Deep Cement mixing method) คือ วิธีการปรับปรุงดินซึ่งเกี่ยวกับการผสมด้วยแรงพร้อมกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางเคมี

ดังนั้นทฤษฎีที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์จะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างกันดิน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างกันดิน ปัจจัยแรก คือ แรงที่กระทำกับโครงสร้างกันดินซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่โครงสร้างกันดินนั้นรองรับอยู่และลักษณะรูปตัดตามขวางของผิวดิน ณ ตำแหน่งโครงสร้าง ปัจจัยที่สอง คือ ชนิดของโครงสร้างกันดินซึ่งแบ่งได้ตามความแข็งแรงของโครงสร้างเป็น 2 ระบบ คือ ระบบโครงสร้างกันดินแบบยืดหยุ่น (Flexible Retaining Structure) และระบบโครงสร้างกันดินแบบแข็ง (Rigid Retaining Structure) นอกจากนี้ทฤษฎีที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์อีกเรื่องหนึ่ง คือ วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Cement mixing method) ซึ่งเป็นการศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ เมื่อได้ศึกษาทฤษฎีทั้ง 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเนื่องจากโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน เป็นการประยุกต์ใช้เสาเข็มซีเมนต์เพื่อใช้ในงานชุดซึ่ง Yong Shao, Chunming Zhang และ Emir Jose Macari (1998) กล่าวว่า โดยทั่วไป โครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน อาจสมมุติให้เป็นโครงสร้างกันดินแบบแข็งหรือยืดหยุ่นก็ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของกำแพง ถึงแม้ว่ามันเสมือนเป็นโครงสร้างกันดินด้วยน้ำหนัก (Gravity Retaining Structure) แต่โดยทั่วไปโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินจะบางกว่าและถูกฝังลึกกว่า นอกจากนั้นยังอ่อนตัวมากกว่ากำแพงคอนกรีต ดังนั้นยังคงมีความขัดแย้งในการออกแบบซึ่งส่วนใหญ่ในการออกแบบจะใช้ประสบการณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบและเครื่องมือการตรวจวัดพฤติกรรมในสนาม ดังนั้นจึงต้องศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยลักษณะของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์ลึกกันดิน รูปแบบของการวิบัติของโครงสร้าง และพฤติกรรมเคลื่อนตัวด้านข้างที่ได้มีการศึกษา สุดท้ายจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าหน่วยแรงในโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน และการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง

2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินกรุงเทพฯ เป็นดินตกตะกอน (Transported Soil) ชนิด Marine และ Alluvial ซึ่งเป็นแบบ Terrestrial Deposit (การตกตะกอนจากน้ำหรือสิ่งพัดพาจากพื้นดิน) เป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ตัวเมืองกรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยอยู่ห่างจากทะเลฝั่งอ่าวไทยประมาณ 20 กิโลเมตร ความยาวเฉลี่ยจากเหนือถึงใต้ และจากตะวันออกไปถึงตะวันตกประมาณ 250 และ 200 กิโลเมตร ตามลำดับ พื้นที่รวมประมาณ 53,400 ตารางกิโลเมตร (ว.ส.ท.,2520)

2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

ชาญชัย (2542) ได้รวบรวมและสรุปลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ แต่ละชั้นจากผิวดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทา และน้ำตาล มีความหนาประมาณ 1-4 เมตร มักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลางเนื่องจากดินชั้นนี้ถูกแปรสภาพมาก ในบริเวณส่วนใหญ่ของกรุงเทพฯ ใกล้ปากอ่าวจะไม่ค่อยพบดินชั้นนี้

ชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงแข็งปานกลาง (Very Soft to Medium Stiff Marine Clay) เป็นดินเหนียวที่มีสีเทาเข้มหรือเทาปนเขียว หนาประมาณ 10-15 เมตร เป็นดินที่มีความไวตัว(Sensitivity) สูงค่าปริมาณความชื้นในมวลดินสูงเกือบเท่าปริมาณความชื้นที่ขีดเหลว (Liquid Limit) และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ประมาณ 1-2 ตันต่อตารางเมตร

ชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay) เป็นดินเหนียวแข็งชั้นแรก สีเทาและน้ำตาลที่มีความหนาประมาณ 5-10 เมตร ความหนาจะน้อยในบริเวณทางเหนือและตะวันตกของส่วนกลางกรุงเทพฯ ค่าปริมาณความชื้นประมาณ 20-30% และ S_u ค่าประมาณ 5-15 ตันต่อตารางเมตร

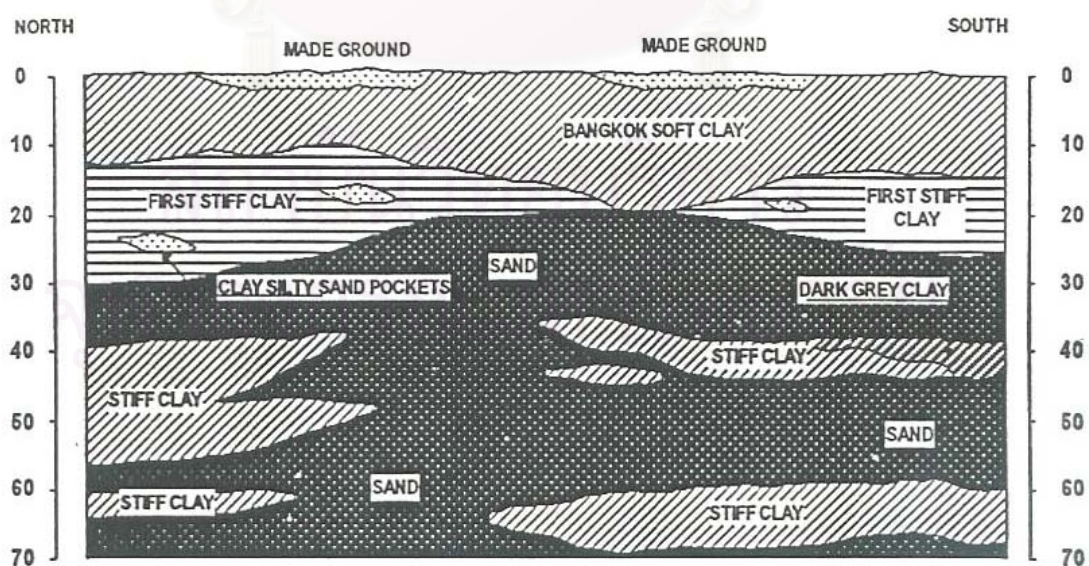
ชั้นทรายชั้นแรก (First Silty Sand Layer) จะพบที่ความลึกประมาณ 22-25 เมตร โดยมีความหนาไม่แน่นอนกล่าวคือมีความหนาประมาณ 5-15 เมตร ทรายชั้นนี้เป็นทรายเม็ดละเอียด ในบางพื้นที่อาจพบดินเหนียวหรือ Silt ปนอยู่บ้าง

ชั้นดินเหนียวแข็งมากถึงดินเหนียวแข็งดินดาน (Very Stiff to Hard Clay) จะอยู่ถัดจากชั้นทรายชั้นแรกซึ่งในบางบริเวณของพื้นที่กรุงเทพฯ จะไม่พบดินชั้นนี้ ลักษณะดินมีแนวโน้มที่จะเป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นเกินตัวน้อยหรือสภาพอัดแน่นปกติ (Slightly Overconsolidated or Normally Consolidated Clay) มีค่า S_u มากกว่า 15 ตันต่อตารางเมตร

ชั้นทรายชั้นที่สอง (Second Sand Layer) โดยทั่วไปจะพบที่ความลึกมากกว่า 50 เมตร เป็นดินทรายที่มีสภาพแน่นมาก

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐาน โดยทั่วไปของดินกรุงเทพฯ (Tonyagate,1978)

Soil Type	Depth (m)		Wn %	LL %	PL %	PI %	LI	γ (t/m ²)
	From	To						
Weathered Clay	0	2	35-70	35-55	-	23-30	0.7-1.0	1.60-1.80
Soft Clay	1	16	65-90	65-90	30-40	40-63	0.6-0.9	1.50-1.70
Stiff Clay	10	25	24-34	40-75	20-28	18-50	0.1-0.2	1.90-2.00
First Sand	14	38	17-25	-	-	-	-	1.80-2.10
Hard Clay	24	43	30-35	55-69	18-25	31-44	0.1-0.3	1.80-2.00
Second Sand	30	58	20	-	-	-	-	1.80-2.60
Hard Clay	51	67	22-26	48-70	23-25	25-46	0.1	2.04
Sand	67	85	16	-	-	-	-	-
Hard Clay	79	96	19-20	56-57	22-26	32-34	-0.1	2.00-2.10



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999)

2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ

ในการคำนวณแรงดันดินด้านข้างของเสาเข็มจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo})

- ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain Shear Strength; S_u) ของชั้นดินเหนียว

- ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) ของชั้นทราย เนื่องจากในแต่ละสถานที่ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินจะไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์แบบ Empirical ที่ไม่มีรากฐานจากทฤษฎีซึ่งจะใช้ได้เฉพาะแห่งเป็นส่วนใหญ่ สำหรับดินกรุงเทพฯได้เคยมีการวิจัยค่าต่างๆไว้ดังนี้

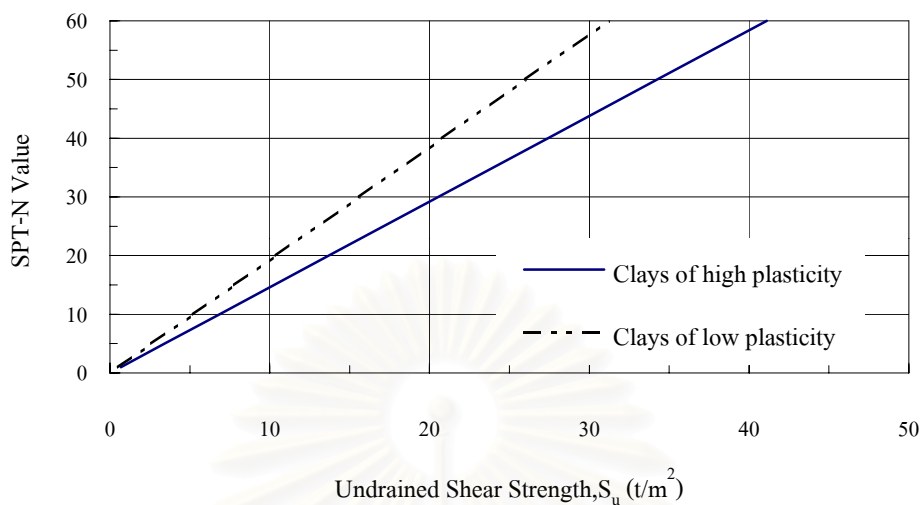
ก) ดินเหนียว ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test) และการทดสอบในสนาม (Field Vane Shear Test) แต่โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า S_u จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) หรือการใช้ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT กับ S_u ที่เสนอโดยวีระนันท์ (2526) สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ชั้นแรก ได้ให้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยข้อมูลส่วนใหญ่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT กับ S_u ดังนี้

$$S_u = 0.685N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียว CH}$$

$$S_u = 0.520N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียว CL}$$

N วัดในค่าจำนวนครั้งต่อฟุต โดยการจำแนกดินเหนียวใช้ระบบ Unified Soil Classification และค่า N ที่ใช้เป็นค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้และควรจะมีค่ามากกว่า

ข) ทราย ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับดินทรายคือ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) และค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) สำหรับดินกรุงเทพฯ เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลมีผลทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินเปลี่ยนแปลงไปจากในอดีต



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (วีระนันท์, 2526)

- ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) ในการคำนวณค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดิน ณ จุดที่พิจารณานั้น จำเป็นต้องทราบค่าหน่วยน้ำหนักรวมของมวลดิน (Total Unit Weight) โดยหาค่าได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและค่าความดันน้ำ (Pore Pressure) ณ จุดนั้น ซึ่งหาค่าได้โดยการวัดในสนามหรือหาจากความสัมพันธ์แบบ Empirical ตามที่เคยมีผู้วิจัยไว้ในอดีต

NG(1983) ได้เสนอความสัมพันธ์ค่าแรงดันน้ำในมวลดินตามความลึก ดังนี้

$$u = 0.747 (D-15) \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ u คือ แรงดันน้ำ (ตัน/ตารางเมตร)

D คือ ความลึก (เมตร)

จากข้อมูลการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินที่มีการก่อสร้างในปี 2542 พบว่าผลของการสูบน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯ ได้ทำให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยค่าแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับดินกรุงเทพฯ หาได้จาก

$$u = 0.984 (D-23) \dots\dots\dots(2.2)$$

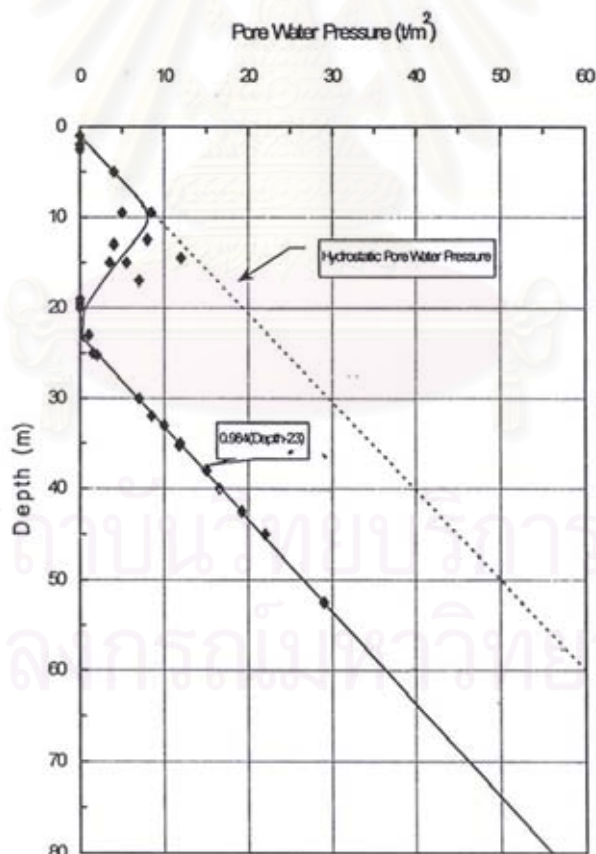
- ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Internal Friction ; ϕ)

สำหรับทรายจะใช้ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ') การหาค่ามุม ϕ' สามารถหาได้จากการทดสอบ Direct Shear หรือ Triaxial ในห้องปฏิบัติการ แต่ทั้งนี้อาจเกิดปัญหาต่างๆ คือความยากลำบากในการเก็บตัวอย่างทรายให้อยู่ในสภาพตามธรรมชาติโดยไม่ถูกรบกวน นอกจากนี้ในการทดสอบ Triaxial สำหรับตัวอย่างทรายอาจจะเกิดปัญหาการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกและต้องใช้ Membrane ที่หนากว่าธรรมดา

การหาค่ามุม ϕ' โดยใช้วิธีการทดสอบในสนามในรูปความสัมพันธ์แบบ Empirical ได้มีผู้เสนอไว้มากมาย เช่น สำหรับดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) วีระนันท์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ϕ' กับค่า SPT-N Value ซึ่งได้จากผลวิเคราะห์กลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ดังนี้

$$\phi' = 12.041 N^{0.162} \dots\dots\dots(2.3)$$

โดย N คือ ค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้ N อยู่ในหน่วย (ครั้ง/ฟุต)



รูปที่ 2.3 แรงดันน้ำสำหรับดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999)

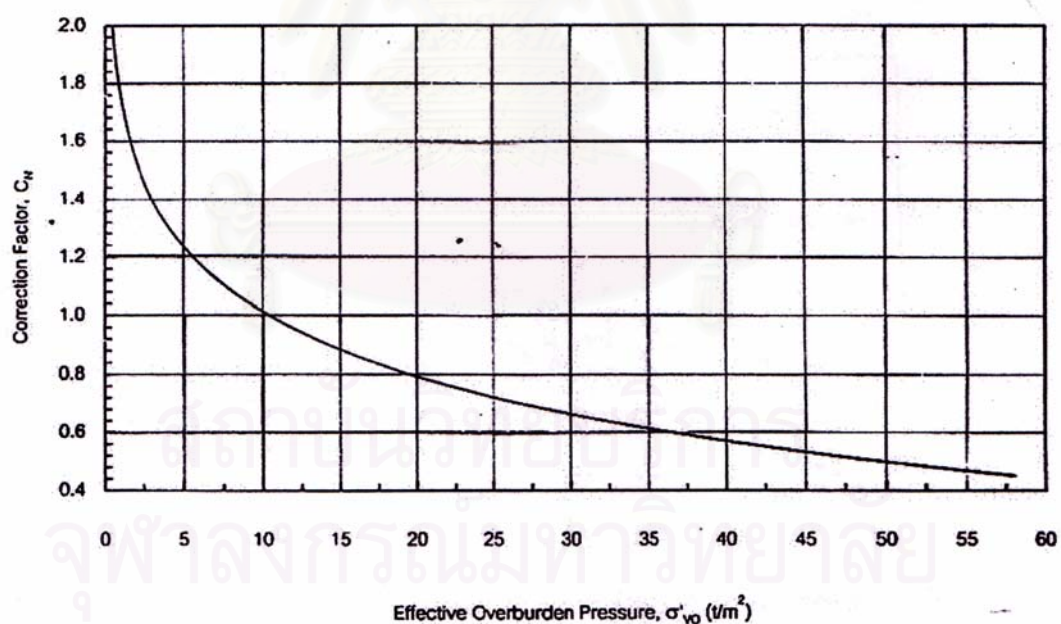
Peck , Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า Correction Factor ซึ่งใช้เป็นค่าปรับแก้เนื่องจากผลของ σ'_{vo} กับค่า σ'_{vo} ที่ระดับความลึกที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีสมการการปรับแก้ดังนี้

$$N' = C_N \times N \dots\dots\dots(2.4)$$

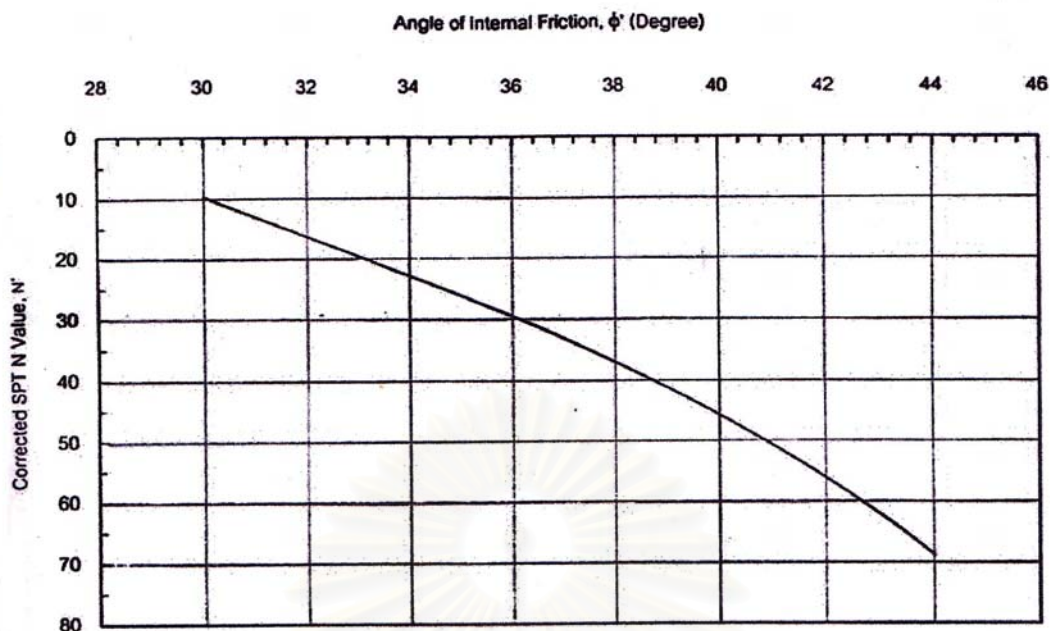
$$C_N = 0.77 \log (20 / \sigma'_{vo}) \dots\dots\dots(2.5)$$

โดยที่ N' คือ ค่า N ที่ได้รับการปรับแก้
 C_N คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของ σ'_{vo}
 σ'_{vo} คือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (ตันต่อตารางฟุต)

สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนดินแป้ง (Silty Sand, SM) จากผลการศึกษาของ Thanudkleung (1987) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ϕ' กับค่า N' ของดินกรุงเทพฯ ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Peck , Hanson & Thornburn (1974) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งค่า N' เป็นค่า N ที่ปรับแก้มาจากรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_N กับค่า σ'_{vo} (Peck , Hanson & Thornburn ,1974)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N' (SPT) กับค่า ϕ' (Peck , Hanson & Thornburn ,1974)

2.1.3 โมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

โมดูลัสของดินเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของดิน และค่าโมดูลัสของดินมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากระดับของหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไป และการหาค่าโมดูลัสของดินได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงกับในแนวตั้ง กับค่าเปลี่ยนแปลงความเครียดทางตั้ง ในสภาพที่ดินไม่มีการระบายน้ำแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถหาได้จากหลายวิธี เช่น Triaxial Compression Test , Plate Bearing Test นอกจากนี้ค่าโมดูลัสยึดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำสามารถคำนวณจากการยุบอัดตัวแบบ 1 มิติ โดยมีสมมติฐานให้ดินเป็นวัสดุแบบ Ideal Elastic (Davis และ Poulos , 1963) ดังนี้

$$E_u = \frac{3E'_s}{2(1 + \nu'_s)} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$E'_s = \frac{(1 + \nu'_s)(1 - 2\nu'_s)}{m_v(1 - \nu'_s)} \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อ E'_s คือ โมดูลัสยึดหยุ่นของดินในสภาพระบายน้ำ

ν'_s คือ อัตราปัวซองในสภาพระบายน้ำของดิน

ในการใช้ Finite Element Analysis (FEM) ทำนาค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน และการเคลื่อนตัวของดินจำเป็นต้องใช้ค่าโมดูลัสของดิน ซึ่งอาจหาค่าโมดูลัสของดินอยู่ในเทอมของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบ Empirical ได้ดังนี้

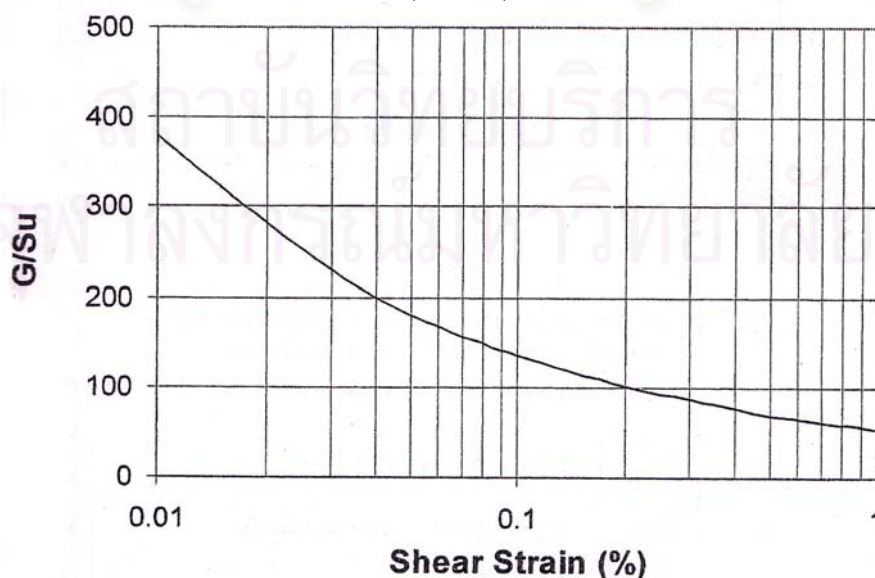
$$E_u = M \times S_u \dots\dots\dots(2.8)$$

เมื่อ E_u คือ โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำในช่วง Elastic ก่อนที่จะถึงสภาพ Plastic yielding
 M คือ Modulus multiplier

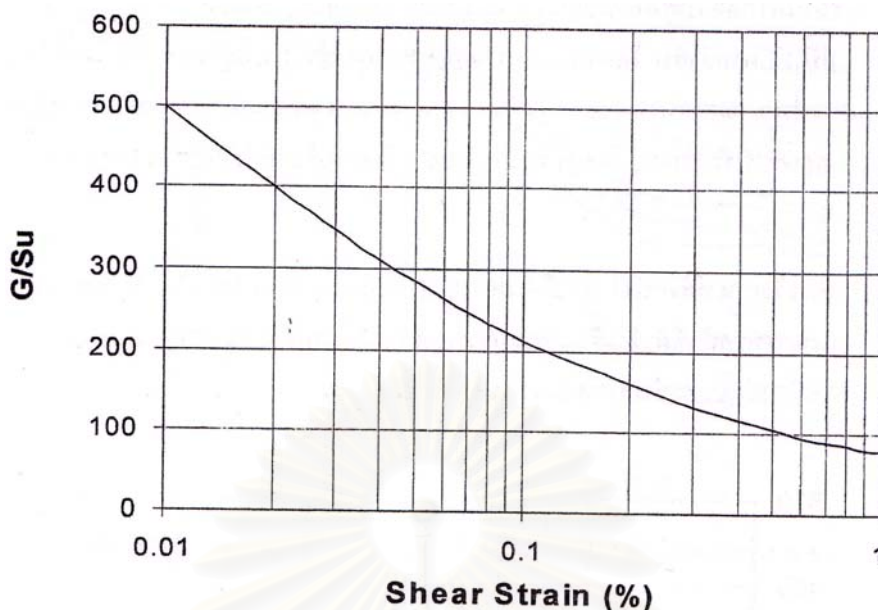
ค่า E_u นี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน ระดับของหน่วยแรงเฉือนก่อนถึงจุด Yield และหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำหรือ OCR ของดินเหนียว นอกจากนี้ M ยังขึ้นอยู่กับชนิดของการก่อสร้างและลักษณะของโครงสร้าง โดยปกติค่า M สำหรับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างควรสูงกว่าค่า M ในกรณีการทรุดตัวอยู่ในแนวตั้ง และค่า M จะลดลงเมื่อเทียบกับ Stress Level Teparaksa (1999b) สรุปค่า $\frac{G}{S_u}$ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของดิน เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งชั้นแรก ด้วยการทดสอบ Pressuremeter Test เพื่อหาค่า Young's Modulus ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยพิจารณาผลการทรุดตัวของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) โดยวิเคราะห์เป็น Total Stress Analysis ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear Modulus ของดินเหนียว กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และ Shear Strain ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 จากทฤษฎีของ Elasticity สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_u และ G ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และดินเหนียวแข็งชั้นแรก ได้ดังนี้

$$E_u = 2G(1+V)\dots\dots\dots(2.9)$$

เมื่อ G คือ Shear Modulus
 V คือ อัตราส่วนปัวซองของดินเหนียวสภาพไม่ระบายน้ำ ($V=0.50$)



รูปที่ 2.6 ผลการทดสอบ Pressuremeter Test ดิน Bangkok Soft Clay (Teparaksa, 1999b)



รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบ Pressuremeter Test ดิน Bangkok Stiff Clay (Teparaksa, 1999b)

2.2 การคำนวณแรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure)

แรงที่กระทำกับโครงสร้างกันดินจะเป็นแรงในแนวราบ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure) ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างกันดินต้องประมาณแรงดันดินด้านข้างที่กระทำให้เหมาะสม เพื่อจะใช้วิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบโครงสร้างกันดิน วิธีที่ใช้ประมาณค่าแรงดันดินด้านข้างมีด้วยกันหลายวิธี ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธี คือ ทฤษฎีสภาวะสมดุลแบบพลาสติก (Plastic equilibrium) ที่ถูกกำหนดโดย Mohr rupture envelope และไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) ใช้ทฤษฎีของสภาวะการต่อเนื่องแบบอีลาสติก (Elastic continuum) ซึ่งแรงกระทำด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้างกันดินมีอยู่ 3 สภาวะ ดังนี้

2.2.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันด้านข้างแบบสถิตย์ (At Rest Pressure)

ใช้ในกรณีที่โครงสร้างกันดินมีความแข็งแรงมาก โดยตั้งสมมุติฐานว่ากำแพงไม่มี การเคลื่อนตัวเลย เช่น Diaphragm wall และ Secant pile wall

$$\sigma'_{ho} = K_o \sigma'_v \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\sigma_{ho} = \sigma'_{ho} + u \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\sigma_{ho} = K_o \sigma'_v + u \dots\dots\dots(2.12)$$

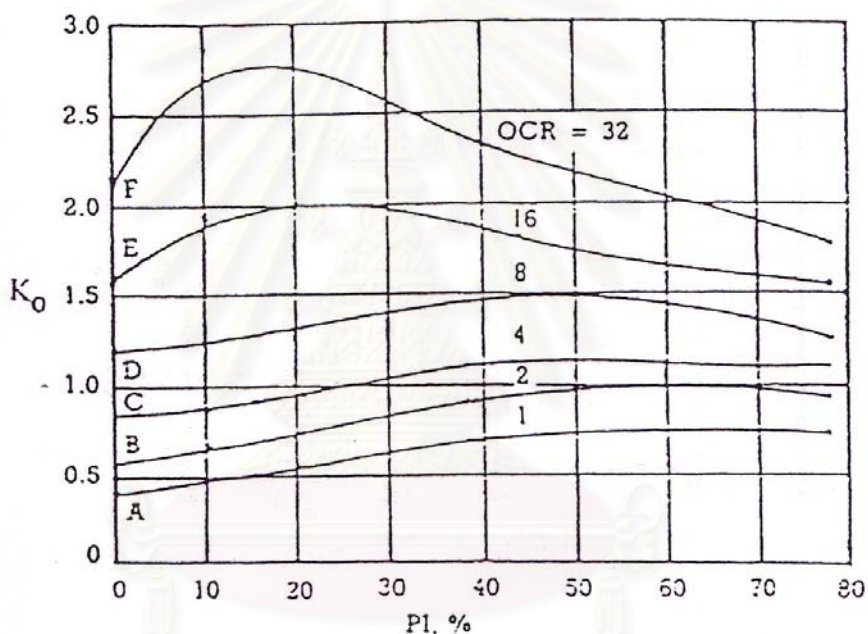
เมื่อ K_o คือ Coefficient of earth pressure at rest

Tavenas et al (1979) กล่าวว่า เป็นการยากที่จะหาค่า K_0 ในสภาพธรรมชาติ ฉะนั้นโดยทั่วไปแทนที่จะหาค่า K_0 จากการทดลองซึ่งต้องใช้เครื่องมือเฉพาะประกอบกับการทำงาน การหาค่า K_0 จึงมักใช้สูตร Empirical แล้วตรวจสอบระหว่างการทดลองหาค่า K_0 ดังแสดงในตาราง 2.2

Brooker & Ireland (1965) เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง K_0 , OCR และ PI ดังรูปที่ 2.8 และเสนอความสัมพันธ์ ระหว่าง K_0 กับ ϕ' ของ Normally Consolidated Clay

$$K_0 = 0.95 + \sin\phi' \dots\dots\dots(2.13)$$

ตามปกติ ϕ' ของดินเหนียวมีค่าอยู่ระหว่าง $20^\circ - 30^\circ$



รูปที่ 2.8 ค่า K_0 เป็นฟังก์ชันกับ OCR และค่า PI (Brooker & Ireland,1965)

Note : NC = Normally consolidated
 OC = Overconsolidated

Schmidth (1966) ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง K_0 กับ OCR จากการทดลองลดน้ำหนัก Unloading

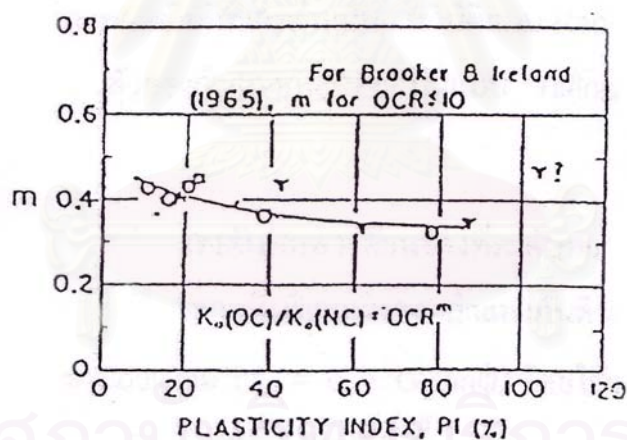
$$\sigma'_{ho} = K_0\sigma'_v \dots\dots\dots(2.14)$$

$$K_0(oc) = K_0(NC)OCR^m \dots\dots\dots(2.15)$$

ตารางที่ 2.2 สูตรคำนวณเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบสถิตย์ (K_o)

Formular	Remarks	Referance
$K_o = 1 - \sin \phi'$	For normally consolidated sand	Jaky (1944)
$K_o = 0.95 - \sin \phi'$	For cohesive soils, based on data Obtained from remolded specimen	Brooker & Ireland (1965)
$K_o = 0.19 - 2.333 \log PI(\%)$	Based on data published by Kenney (1959)	Alpan (1967)
$K_o = 0.24 - 0.311 \log PI(\%)$	K_o determined from in-situ tests	Lee & Jin (1979)
$K_o(oc) = K_o(NC)OCR^{m1}$ $m1 = 0.54 \exp(-PI/281)$	For over-consolidated clays	Alpan (1967)
$K_o(oc) = K_o(NC)OCR^{m2}$ $M2 = f(PI)$		Schmidth (1966) Ladd et al (1977)

Ladd (1977) เสนอค่า m ในสมการของ Schmidth กับค่า PI ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ m

ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ K_o และ OCR กับค่า PI (Ladd et al, 1977)

Moh และ Wang (1968) พบว่าค่า K_o สำหรับ Normally consolidated clay ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.60 ± 0.02

วันชัย(2539) สรุปว่าในกรณีชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) พบว่าค่า PI จะมีค่าอยู่ระหว่าง 36% - 40% ดังนั้นหากใช้ความสัมพันธ์ของ Brooker and Ireland (1965) จะพบว่าค่า $K_o = 0.4 + 0.007(38) = 0.67$ ซึ่งค่าจะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากรูปที่ 2.8 เนื่องจากดินเหนียวอ่อน

กรุงเทพฯ จะมีค่า OCR ประมาณ 1.5-1.6 จะได้ค่า $K_0 = 0.7$ ซึ่งจากผลการวิจัยดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ นั้นจะมีค่าประมาณ 0.65 สำหรับโครงการนี้ใช้ค่า K_0 สำหรับ Soft Clay = 0.75 และ สำหรับ Stiff Clay = 0.65

2.2.2 การคาดคะเนหน่วยแรงดันดินด้านข้างโดยหลักการของ Rankine

ทฤษฎีของ Rankine มาจากการวิบัติของดินตามทฤษฎีของ Mohr-Coulomb โดยพิจารณาว่าระนาบของดินในการวิบัติเป็นสภาพ Active และ Passive เป็น Planar surface

ก) Rankine Active Earth Pressure การวิบัติแบบ Rankine active เกิดจากการเคลื่อนตัวของออกของกำแพงกันดิน ดังรูปที่ 2.10 ทำให้ค่าหน่วยแรงในแนวราบลดลงเนื่องจากการขูดดินออกขณะที่แรงในแนวตั้งยังคงที่ตลอดจนกำแพงอยู่ในลักษณะ tilting พิจารณาเมื่อกำแพงไม่มีแรงเสียดทาน(Frictionless)และกำแพงเกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะ Tilting หน่วยแรงในแนวราบ σ_h ที่ความลึก Z จะมีค่าเท่ากับ $K_a\sigma_v$ แสดงโดย mohr' circle a ในรูปที่ 2.10(a) แสดงจุดพิบัติ Mohr'circle d ในรูปที่ 2.10(b) จาก geometry ของวงกลม Mohr และเส้นสัมผัส เราสามารถเขียนสมการสัมพันธ์ระหว่าง σ_h และ σ_v ได้ดังนี้

$$\sigma_a = \sigma_v \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) - 2C \tan(45 - \frac{\phi}{2}) \dots\dots(2.16)$$

กรณีของ Cohesionless soil $C = 0$ จะได้

$$\sigma_a = \sigma_v \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \dots\dots\dots(2.17)$$

อัตราส่วน σ_a/σ_v เรียกว่า Coefficient of Rankine's active earth pressure , K_a

$$K_a = \sigma_a/\sigma_v = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \dots\dots\dots(2.18)$$

ดังนั้น
$$\sigma_a = \sigma_v K_a - 2C \sqrt{K_a} \dots\dots\dots(2.19)$$

ที่ $Z = 0, \sigma_v = 0;$

$$\sigma_a = -2C \sqrt{K_a} \dots\dots\dots(2.20)$$

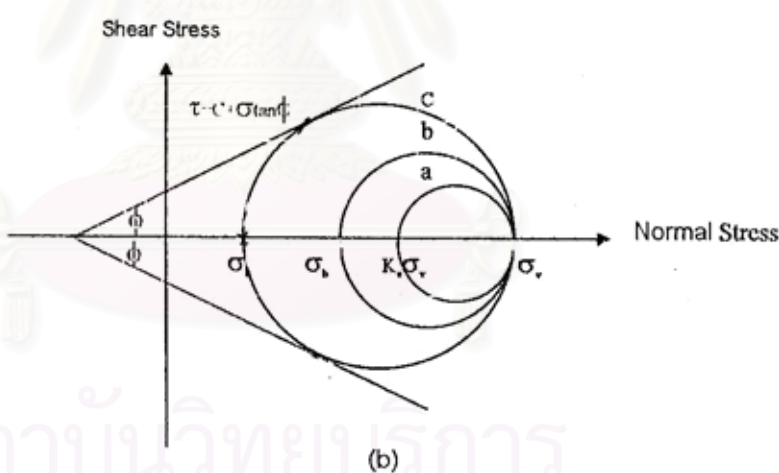
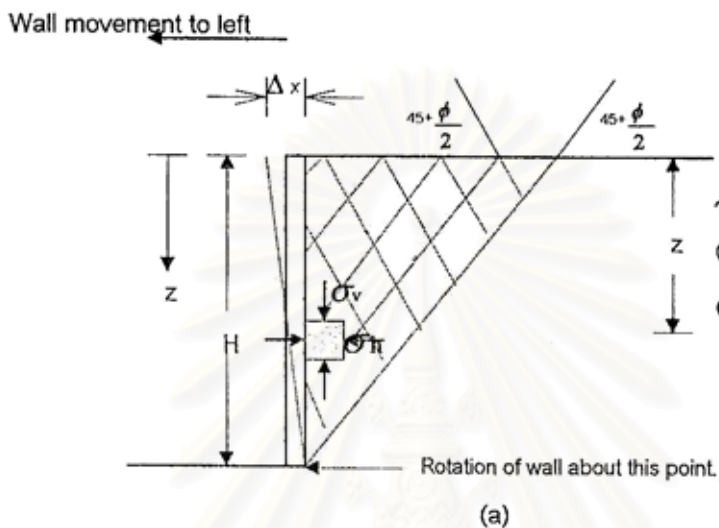
ที่ $Z = H, \sigma_v = \gamma H;$

$$\sigma_a = \gamma H K_a - 2C \sqrt{K_a} \dots\dots\dots(2.21)$$

กรณีการเกิด Tension crack

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \sigma_v K_a - 2C\sqrt{K_a} \\ 0 &= \gamma Z_c K_a - 2C\sqrt{K_a} \\ Z_c &= 2C / \gamma\sqrt{K_a} \dots\dots\dots(2.22) \end{aligned}$$

โดย Z_c คือ ความลึกที่เกิด Tension Crack



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.10 Active Rankine Pressure

ข) Rankine Passive Earth Pressure การวิบัติแบบ Rankine Passive เกิดจากการเคลื่อนตัวเข้าหากันของกำแพงกันดิน ดังรูปที่ 2.11 (a) ทำให้ค่าหน่วยแรงในแนวราบเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงในแนวตั้งยังคงที่ พิจารณาเมื่อกำแพงไม่มีแรงเสียดทาน (Frictionless) และไม่เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ($\Delta x = 0$) หน่วยแรงในแนวราบ σ_h ที่ความลึก Z จะมีค่าเท่ากับ $K' \sigma_v + U_0$ แสดงโดย Mohr's circle a ในรูปที่ 2.11 (a) แสดงจุดพิบัติ Mohr's circle C ในรูป

ที่ 2.11(b) และเมื่อกำแพงกันดินเคลื่อนตัวเข้าหาดินเพิ่มมากขึ้น ($\Delta x > 0$) หน่วยแรงในแนวราบ σ_h จะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะเกิดการบีบอัดตั้งวงกลม Mohr b ในรูปที่ 2.11(b) ในกรณีที่คิดแรงต้านของดินอยู่ในรูปของหน่วยแรงรวม

$$\sigma_p = \sigma_v \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2C \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \dots\dots(2.23)$$

กรณีของ Cohesionless soil $C = 0$ จะได้

$$\sigma_p = \sigma_v \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) \dots\dots\dots(2.24)$$

อัตราส่วน σ_p/σ_v เรียกว่า Coefficient of Rankine's passive earth pressure, K_p

$$K_p = \sigma_p/\sigma_v = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) \dots\dots\dots(2.25)$$

ดังนั้น
$$\sigma_p = \sigma_v K_p + 2C \sqrt{K_p} \dots\dots\dots(2.26)$$

ที่ $Z = 0$, $\sigma_v = 0$;

$$\sigma_p = 2C \sqrt{K_p} \dots\dots\dots(2.27)$$

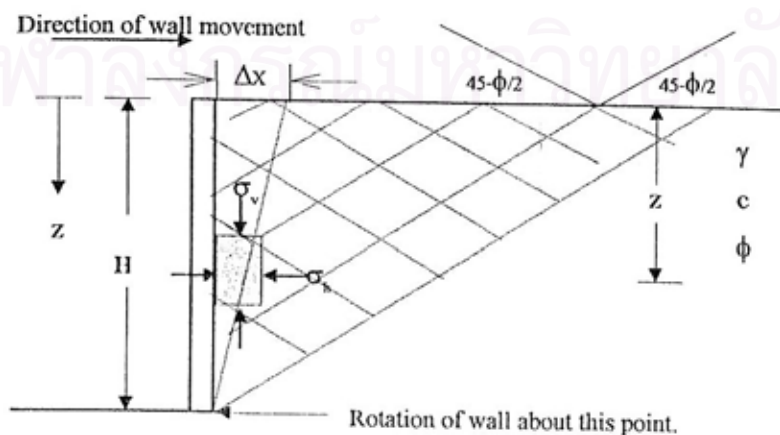
ที่ $Z = H$, $\sigma_v = \gamma H$;

$$\sigma_p = \gamma H K_p + 2C \sqrt{K_p} \dots\dots\dots(2.28)$$

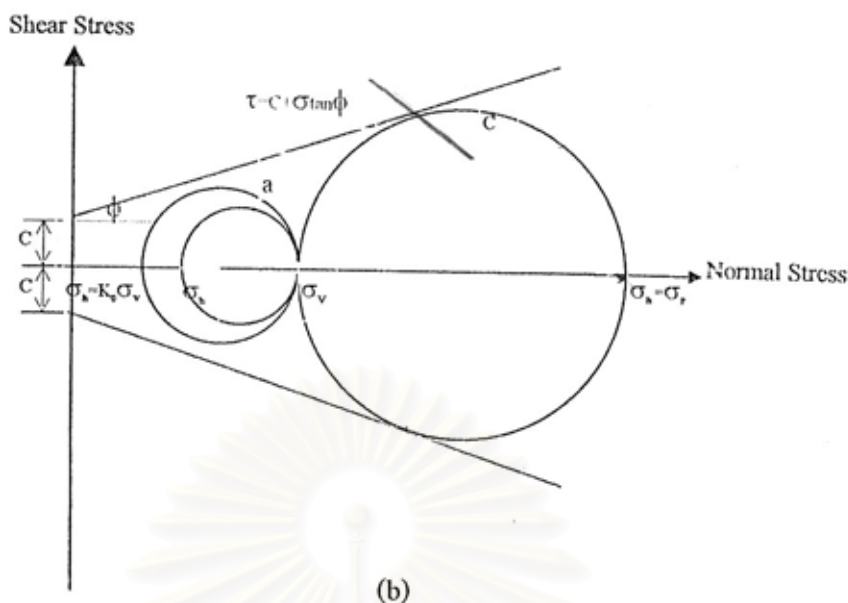
ดินเหนียว ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ ค่า $\phi = 0$ และค่า S_u จะเปลี่ยนไปตามความลึก จะได้ค่า $K_a = K_p = 1$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้สำหรับดินเหนียว คือ

$$\sigma_a = \sigma_v - 2C_u \dots\dots\dots(2.29)$$

$$\sigma_p = \sigma_v + 2C_u \dots\dots\dots(2.30)$$



(a)



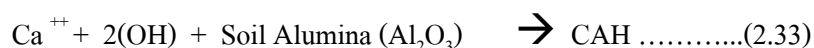
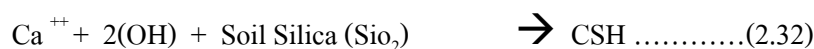
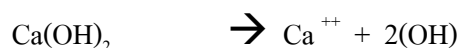
รูปที่ 2.11 Passive Rankine Pressure

2.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีซีเมนต์ผสมลึก (Deep Cement Mixing Method)

วิธีการผสมลึกเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน (Deep mixing method of soil stabilization) คือ วิธีการปรับปรุงดินซึ่งเกี่ยวกับการผสมด้วยแรงพร้อมกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางเคมี เช่น ปูนขาว หรือ ซีเมนต์ภายในพื้นระดับลึกที่สถานที่ก่อสร้าง เสถียรภาพที่เพิ่มขึ้นจากกำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ (Undrained Shear Strength)

2.3.1 กลไกของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์

เป็นการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งคล้ายกับปฏิกิริยา Cement Hydration ที่เกิดในคอนกรีต Moh (1962) สรุปไว้ว่าการพัฒนากำลังอัดของ Soil-Cement เกิดจากปฏิกิริยานุภาคซีเมนต์ผสมกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration เป็นปฏิกิริยาหลัก ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวจะก่อให้เกิดสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH) , Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Calcium Hydroxide $[Ca(OH)_2]$ สาร CSH และ CAH มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมยึด โดยสามารถเชื่อมยึดเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้รวมตัวกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น $Ca(OH)_2$ จะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรงปฏิกิริยา Cement Hydration สามารถจะเขียนออกมาในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

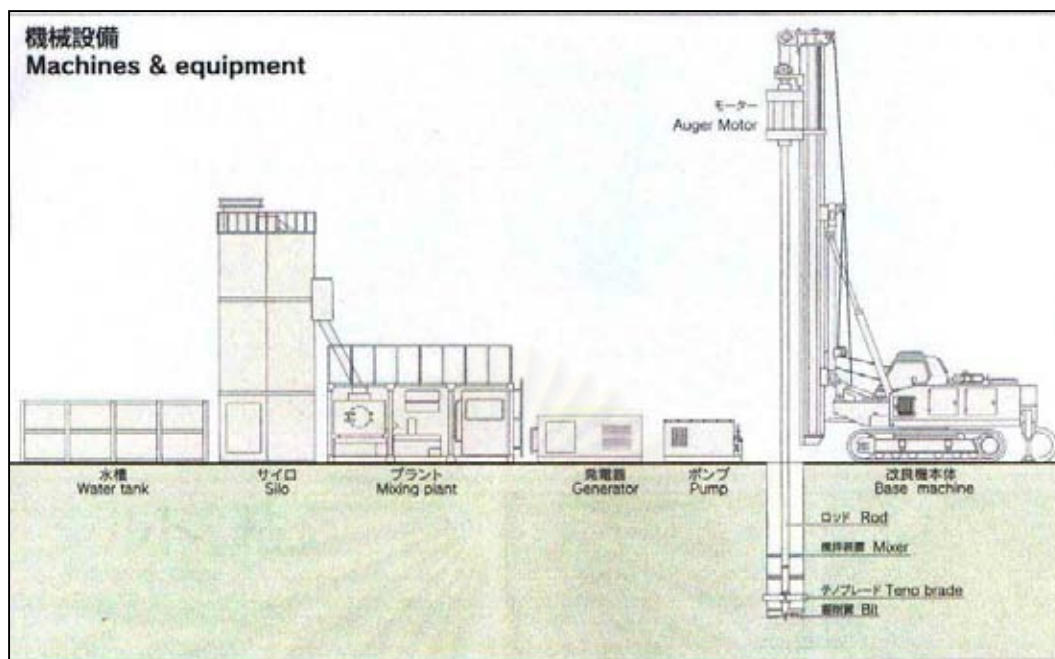


ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของปฏิกิริยา Cement Hydration ในดินจะก่อให้เกิดสาร CSH และ CAH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึดดังแสดงในสมการ (2.31), (2.32) และ (2.33) สมการที่ (2.31) เป็นสมการที่แสดงว่า CSH และ CAH เกิดจาก Cement Hydration โดยตรง ดังนั้น CSH และ CAH ที่เกิดจาก Cement Hydration โดยตรงนี้จะเรียกว่าปฏิกิริยาแรก สมการที่ (2.32) และ (2.33) เป็นสมการที่แสดงว่า CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง Ca(OH)_2 กับ Silica และ Alumina ในดิน ดังนั้นจะเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่าปฏิกิริยาที่ 2 Manfred R. Hausman (1990) สรุปไว้ว่าจากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวจะมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุก และ Stiffness เพิ่มขึ้นสามารถควบคุมปริมาตรได้แน่นอน (Better Volume Stability) และสามารถเพิ่มความคงทนให้แก่ดินมากกว่าเดิม

Kezdi(1979) พบว่าดินผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่ว่าดินเหนียวหรือดินทรายเมื่อนำมาอัดแน่นแบบ Proctor ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นจากดินเดิมเล็กน้อย แต่สำหรับดินจำพวกดินตะกอน (Silt) ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงเล็กน้อย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะลดค่า Plasticity Index ของดินเหนียวด้วย

2.3.2 กรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพดิน

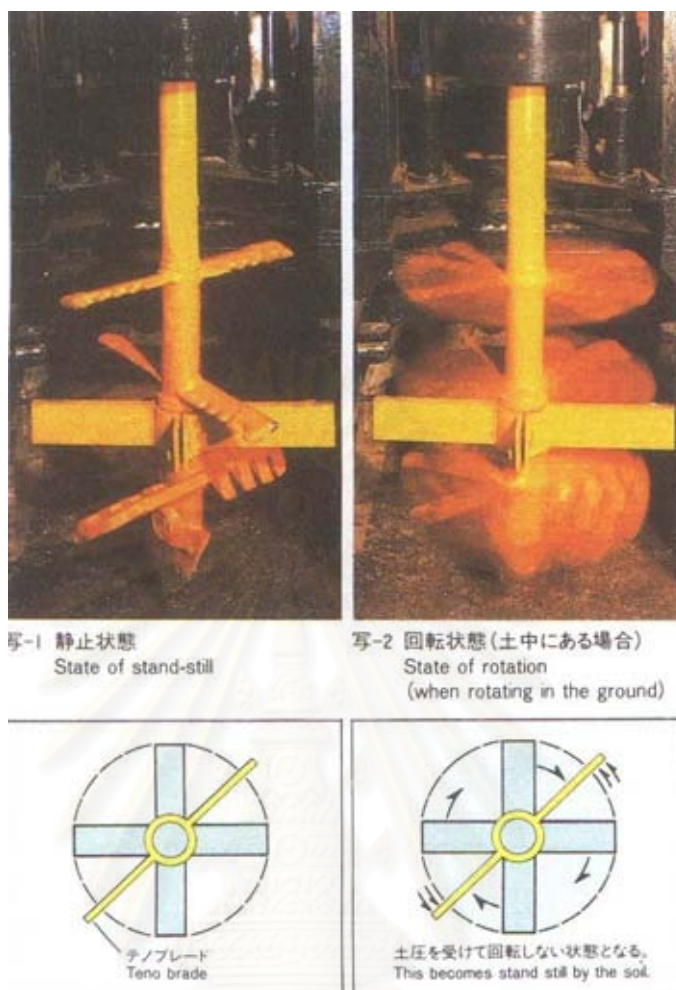
ดำเนินการโดยผสมน้ำซีเมนต์เหลวซึ่งได้จากการผสมน้ำกับซีเมนต์ตามอัตราส่วนที่ต้องการ กับดินธรรมชาติซึ่งคุณสมบัติแตกต่างกันได้ ตั้งแต่ดินเหนียวอนุภาคละเอียดจนถึงทรายอนุภาคหยาบและกรวด ในกระบวนการนี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วัสดุและอุปกรณ์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน

ก) วัสดุและอุปกรณ์ของงาน Deep Cement Mixing สามารถจำแนกได้ดังรูป 2.12 โดยแต่ละอุปกรณ์จะมีความสัมพันธ์กันโดยมีลำดับเริ่มตั้งแต่ถึงน้ำและถึงเก็บปูนซึ่งเป็นวัสดุในงาน DCM แล้วส่งต่อไปยังเครื่องผสมน้ำปูน จากนั้นนำน้ำปูนไปพักไว้ที่ถังพักเพื่อนำไปใช้งาน เมื่อจะใช้งานต้องใช้เครื่องสูบน้ำปูนไปยังฐานเจาะผ่านสายรับแรงดันและท่อกลางซึ่งเป็นแกนเจาะ สุกท้ายจะถูกปล่อยออกที่ปลายของหัวส่วนจึงถือเป็นการสิ้นสุดขั้นตอน นอกจากนั้นเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในสนามจำเป็นต้องขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้อุปกรณ์ต่างๆสามารถทำงานได้

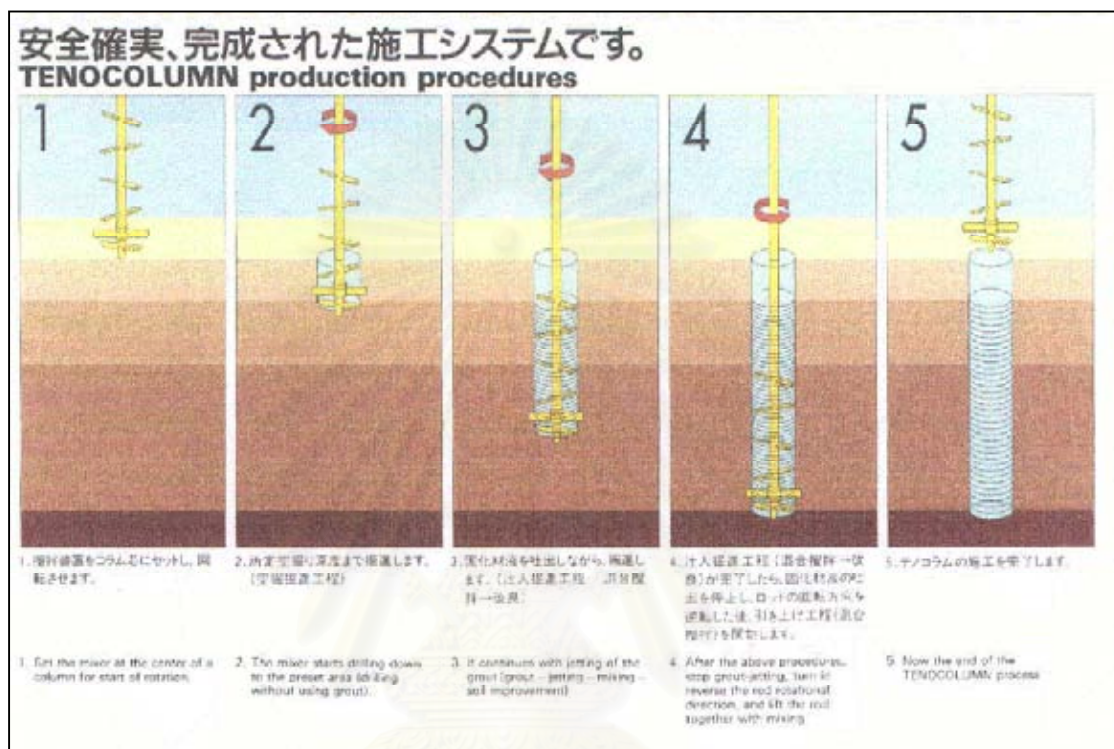
- รายละเอียดเครื่องมือติดตั้งเสาดินซีเมนต์พิเศษประกอบด้วยอุปกรณ์ก้านเจาะกลางเดียวกับเดือยหน้างานที่จุดสูงสุดของเพลลาเจาะ และเครื่องมือผสมพิเศษ ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ Share Blade ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ใหม่ ลักษณะของ Share Blade จะไม่ยึดติดกับเพลลาเจาะแต่จะเป็นอิสระจากการหมุนของเพลลา เส้นผ่านศูนย์กลางของ Share Blade จะค่อนข้างยาวกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะ เพื่อให้สามารถตัดเข้าสู่ด้านข้างของดินธรรมชาติ และมีมุมเอียงจากแกนเพลลาเจาะ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หัวเจาะประกอบด้วยใบกวน Share Blade

นอกจากนั้นใบกวนผสมและตัดดินจะทำมุมเอียงกับแนวราบเพื่อให้สามารถยกส่วนผสมของดิน-ซีเมนต์เมื่อการเจาะหมุนในทิศทางเจาะลงขณะหมุนขึ้นในระหว่างการถอนใบกวนผสมและตัดดินยกส่วนผสมดิน-ซีเมนต์ลงในเสาเนื่องจากทิศทางการหมุนกลับทิศ เครื่องมือผสมถูกแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมทั้งดินทรายและดินเหนียว อัตราความเร็วการหมุนโดยปกติของแกนหัวเจาะประมาณ 30 – 60 รอบ/นาที ที่อัตราความเร็วนี้อัตราการเจาะทะลุประมาณ 1.0 ม./นาที ซึ่งส่งผลให้ความลึกประมาณ 1.5 ถึง 3.0 ซม. สำหรับการหมุน 1 รอบของเพลลาหัวเจาะและเนื่องจากใบมีคู่ แสดงให้เห็นว่าด้านหนึ่งของเพลลาเจาะจะตัดเพียงครึ่งหนึ่งของการเจาะต่อรอบ ดังนั้นผลจะได้การตัดที่มีขนาดเล็กมาก จำเป็นต้องใช้ Share Blade เพื่อใช้อัตราส่วนน้ำ-ซีเมนต์ต่ำ พัฒนากำลังของดินให้สูงขึ้น และยังได้ประโยชน์จากการใช้แรงดันต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียปริมาณซีเมนต์และการสูญเสียเล็กน้อย ซึ่งการเสียหายเล็กน้อย คือ ปริมาณซีเมนต์ที่เสียไปเมื่องานทั้งหมดเสร็จแล้วส่วนผสมของดิน-ซีเมนต์จะแห้งและแข็ง การใช้เครื่องมือพิเศษ (Share Blade) ต้องการกำลังที่เพียงพอเพื่อผสมดินที่มีปริมาณน้ำในดินค่อนข้างให้สม่ำเสมอ

ข) ขั้นตอนการทำ Deep Cement Mixing ดิน-ซีเมนต์เกิดจากการผสมน้ำซีเมนต์เหลวซึ่งได้จากการผสมน้ำกับซีเมนต์ตามอัตราส่วนที่ต้องการ กับดินธรรมชาติ ซึ่งคุณสมบัติแตกต่างกันได้ ตั้งแต่ดินเหนียวอนุภาคละเอียดจนถึงทรายอนุภาคหยาบและกรวด ในกระบวนการนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาหินซีเมนต์

- จัดเพลเจาะให้ตรงตำแหน่งศูนย์กลางเสาเข็มแล้วเริ่มเจาะ (Auger Head set up in position)
- เจาะลงไปยังความลึกที่เริ่มปิดกั้นโดยปราศจากการอัดฉีดน้ำปูน (Drilling down)
- เจาะพร้อมกับอัดฉีดน้ำปูน (Cement milk injection) จากช่องปล่อยที่ตำแหน่งข้างๆ ใบเจาะเมื่อการผสมอัดน้ำปูนกับการตัด ขณะเจาะลงในดินธรรมชาติต่ำกว่าความลึกที่เริ่มปิดกั้น การตัดดินและการหมุนผสมด้วยใบเจาะและการผสมแบบบางส่วนร่วมกัน
- เมื่อเจาะลงไปถึงความลึกมากขึ้น ส่วนผสมของดินซีเมนต์จะพบกับ Share Blade ซึ่งไม่เกิดการหมุน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแรงเฉือนซึ่งจะผสมดิน-ซีเมนต์อย่างทั่วถึง การหมุนของ Share Blade ที่เกิดขึ้นจริงประมาณ 40 องศา/นาที ระหว่างการเจาะเนื่องจากความเอียงของ Share Blade

- ขณะเจาะลงไปถึงความลึกเพิ่มขึ้น ส่วนผสมของดิน-ซีเมนต์จะถูกผสมเพิ่มเติมด้วยใบตัดและกวนผสม
- หลังจากที่จะเจาะลงไปถึงระดับที่ต้องการ หมุนต่อเนื่องและอัดฉีดน้ำปูนเป็นเวลา 1 นาทีของการผสมที่ระดับล่างหลังจากนั้นก็ปิดการอัดฉีดน้ำปูน (Stop injection cement milk) เหตุผลที่ต้องทำการผสมที่ระดับล่างหลังจากที่เจาะลงถึงระดับความลึกที่ต้องการแล้วเพื่อให้ผสมกันอย่างทั่วถึงและอัดส่วนล่างของเสาเข็ม
- หลังจากผสมที่ส่วนล่างแล้ว เครื่องมือจะถูกถอนพร้อมกับเพลลาเจาะหมุนกลับทิศทาง (Auger motor reverse) อย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการอัดฉีดน้ำปูน เนื่องจากมุมของใบตัดผสมเป็นผลให้ดิน-ซีเมนต์ถูกกดลงในเสาเข็มระหว่างการถอนเครื่องมือ

2.3.3 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของส่วนผสมของดินซีเมนต์

เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งใช้เป็นโครงสร้างกันดิน จึงศึกษาค่าพารามิเตอร์ของดินซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลัง เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์กับพฤติกรรมของโครงสร้าง

Mitchell(1976) พบว่าค่า Unconfined Compressive Strength, q_u ของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ จะเพิ่มขึ้นเป็นกราฟเส้นตรงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับค่า Unconfined Compressive Strength, q_u ตามการศึกษาของ Mitchell(1976) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q_u(t) = q_u(t_0) + K \log t/t_0 \dots \dots \dots (2.34)$$

เมื่อ $q_u(t)$ คือ UCS at t days, Kpa

$q_u(t_0)$ คือ UCS at t_0 days, Kpa

K คือ 480C สำหรับดินทราย

และ 70C สำหรับดินเหนียว

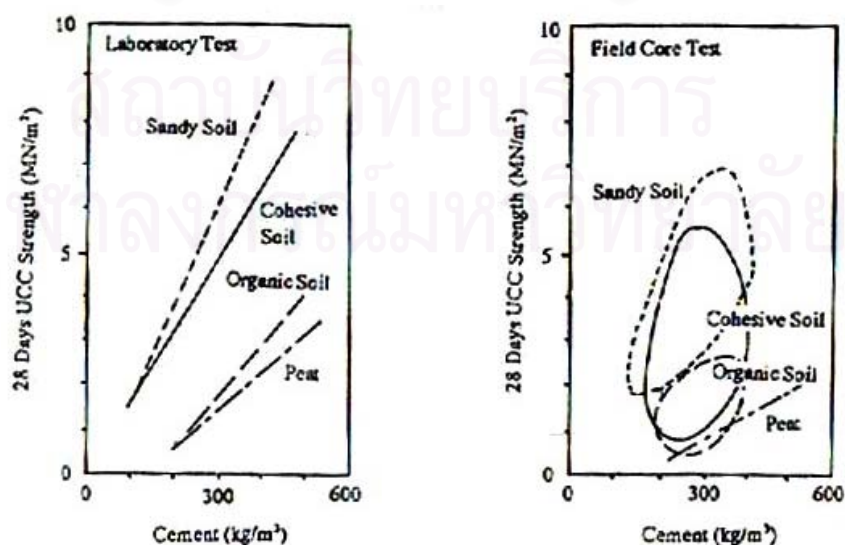
C คือ ปริมาณปูนซีเมนต์(ร้อยละของน้ำหนักมวล)

และค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) จะมีค่าระหว่างร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 33 ของ Unconfined compressive Strength

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลทั่วไปของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี Deep Cement Mixing (DCM)

U.C.S.	=	0.20 - 0.50 Mpa (0.5 - 5.0 Mpa สำหรับดินเหนียว) (0.2 – 2.0 Mpa ในดินละเอียด)
K	=	$10^{-6} - 10^{-9}$ m/s (ต่ำกว่านี้ถ้าใช้ Bentonite)
E	=	350 – 1000 เท่าของ U.C.S. จากตัวอย่างทดสอบ 150 – 500 เท่าของ U.C.S. จากตัวอย่างในสนาม
Shear Strength	=	40 – 50% ของ U.C.S. ที่ ค่า U.C.S. < 1 Mpa แต่อัตราส่วนนี้จะลดลงเมื่อ U.C.S. เพิ่มขึ้น
Tensile Strength	=	โดยทั่วไป 8- 14% -ของ U.C.S. (Donald A. Bruce, ,Mary Ellen C. Bruce และ Albert F. Dimillio,1998)

กำลังของดินซีเมนต์มีอิทธิพลมาจากปัจจัยหลัก คือ ประเภทของดิน ,ปริมาณซีเมนต์ ,ปริมาณน้ำของซีเมนต์เหลว ,ระยะเวลาในการบ่มและความทั่วถึงในชั้นตอนผสม โดยทั่วไปกำลังของดินซีเมนต์ในดินทรายจะสูงกว่าดินเหนียว สัดส่วนของกำลังจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์และแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของน้ำซีเมนต์ ปัจจัยพื้นฐานสำหรับความสำเร็จของกำลังออกแบบสำหรับเสาดิน-ซีเมนต์ คือ ต้องทำการผสมดิน-ซีเมนต์ให้สม่ำเสมอ กำลังรับแรงกด (Compressive Strength) ความสัมพันธ์ของกำลังดิน-ซีเมนต์กับชนิดของดิน และปริมาณซีเมนต์แสดงในรูปที่ 2.15 ข้อมูลในรูปจะอยู่ถูกปรับปรุงด้วยน้ำปูนด้วยอัตราส่วนน้ำ-ซีเมนต์แปรผันจาก 0.60 ถึง 1.20 และอัตราการอัดคินน้ำปูนด้วยค่าแปรผันจาก 0.23 ถึง 0.35 โดยปริมาตร โดยซีเมนต์ถูกผสมกับน้ำที่อัตราส่วนน้ำ-ซีเมนต์ที่ต้องการ

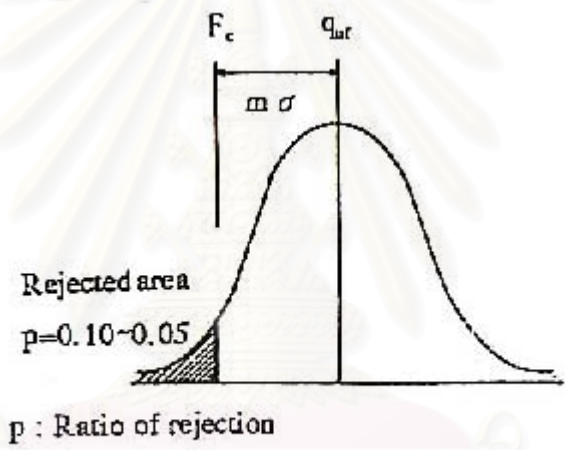


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (UCS), ปริมาณซีเมนต์และดิน (Hibino ,1989)

กำลังที่ออกแบบของดินซีเมนต์จะสำเร็จได้ด้วยการพิจารณาผลจากห้องทดลอง ผลทดสอบจากสนามและข้อมูลการออกแบบส่วนผสมจากโครงการก่อนหน้า ค่าของกำลังจะถูกประมาณด้วยผลจากการทดสอบรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined Compression Test) ในอุดมคติกำลังของเสาจะหาจากการขุดเสาจริงขึ้นมาแล้วทดสอบสำหรับการทดสอบทั่วไปเพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์จะได้อาจจากการเจาะทดสอบแท่งตัวอย่าง ซึ่งได้จากการเจาะแท่งหรือตัวอย่างจากแบบทดสอบที่เก็บหลังจากที่ติดตั้งเสาแล้วด้วยเครื่องมือพิเศษ

Sugimura (1997) อธิบายพฤติกรรมกำลังของดินซีเมนต์โดยทั่วไปซึ่งนำไปใช้ในการออกแบบ

ก) กำลังออกแบบ กำลังออกแบบ (F_c) ของดินซีเมนต์ตามรูปที่ 2.16 หาจากการเฉลี่ยค่ากำลังรับแรงอัดแบบจำกัด (q_{ur}) ของแท่งตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 กำลังออกแบบ

$$F_c = q_{ur} - 1.3\sigma \dots \dots \dots (2.35)$$

$$f_c = \frac{F_c}{3}$$

- เมื่อ F_c คือ กำลังออกแบบ (MN/m^2)
- f_c คือ กำลังที่ต้องการภายใต้แรงกระทำปกติ (MN/m^2)
- σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดสอบกำลัง

ข) กำลังรับแรงเฉือน (F_{τ})

$$F_{\tau} = \tau_{so} + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots(2.36)$$

เมื่อ τ_{so} คือ กำลังรับแรงเฉือนที่ $\sigma_n = 0$

σ_n คือ ความเค้นตั้งฉากกระทำ (Normal Stress)

สรุปจากข้อมูลผลการทดสอบของญี่ปุ่นซึ่งมุมแรงเสียดทานภายใน ϕ ของดินซีเมนต์ประมาณ 30 องศา สำหรับประเภทของดินส่วนใหญ่

จาก Direct Shear Test,

$$F_{\tau_{so}} = 0.29F_c$$

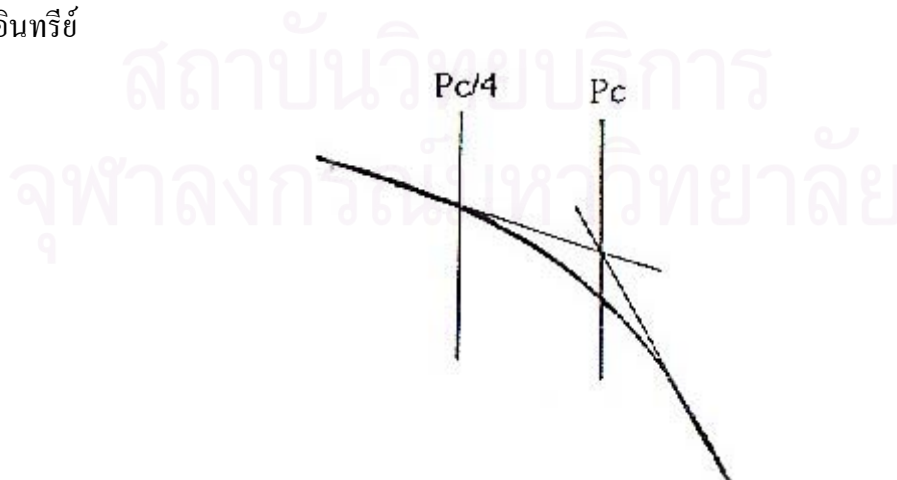
เมื่อ F_c คือ กำลังออกแบบ (MN/m^2)

จากการค้นคว้าที่ผ่านมาด้วย UCC (q_u) และกำลังรับแรงดึง, $F_{\tau_{so}} = 0.337F_c$ สำหรับเงื่อนไขทั่วไปเมื่อ $F_c \leq 2 \text{ MN/m}^2$,

$$F_{\tau_{so}} = 0.3F_c$$

เมื่อ $F_{\tau_{so}}$ คือ กำลังรับแรงเฉือนออกแบบ

ค) พฤติกรรมการดัด (Creep characteristic) แรงกระทำออกแบบระยะยาวควรจะต่ำกว่า $\frac{1}{4}$ ของ consolidation Yield Stress (P_c) ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 2.17 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำถูกกำหนดเพื่อประมาณค่าพฤติกรรมการดัดของดิน-ซีเมนต์ที่เกิดจากดินอินทรีย์



รูปที่ 2.17 การประมาณความเค้นครากจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินซีเมนต์

ง) Modulus of deformation สำหรับการออกแบบ

$$E_{50} = 180F_c \dots \dots \dots (2.37)$$

เมื่อ E_{50} คือ Modulus of deformation ที่ 50% ความเค้นออกแบบ
 F_c คือ กำลังออกแบบ

จ) Poisson's ratio (V): จากผลของการทดสอบแรงอัด 3 แกน และการทดสอบ UCC ค่าที่ได้ อยู่ระหว่าง 0.19 ถึง 0.30 ซึ่งโดยทั่วไปค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบ จะมีค่า 0.26

Yong Shao et al.(1998) ได้สรุปพฤติกรรมของดินซีเมนต์ไว้ดังนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบ UCC ของส่วนผสมดินซีเมนต์ที่แตกต่างกันแสดงค่าความแข็ง (Stiffness) และกำลัง (Strengths) ที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถบ่งชี้ด้วยคุณสมบัติที่สำคัญมากอย่างหนึ่งสำหรับวัสดุดินซีเมนต์ คือ กำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 300 ถึง 4000 Kpa ขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มเข้าไปในดิน สัดส่วนของกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curves) แตกต่างกันอย่างมากสำหรับวัสดุต่างกันเมื่อประมาณค่ากำลังวัสดุสูงสุดสำหรับส่วนผสมดินซีเมนต์ที่มีกำลังวัสดุมากกว่า 2,000 Kpa การพังจะเกิดขึ้นด้วยลักษณะการแตกหักแบบทันทีทันใดปราศจากการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) และกำลังวัสดุที่คงค้างจะต่ำมาก (Residual Strength) อีกอย่างหนึ่งสำหรับส่วนผสมดินซีเมนต์ที่มีกำลังวัสดุน้อยกว่า 2,000 Kpa ความเค้น-ความเครียด จะแสดงผลการเสียรูปแบบพลาสติกอย่างมาก (Plastic Deformation) ก่อนจะพัง

ผลการทดสอบทำให้สามารถสรุปได้ว่าความต้องการปริมาณซีเมนต์ในดินด้วยอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดิน (Cement – Soil ratio; a_w) อยู่ระหว่าง 8% -12% ของเสาดินซีเมนต์ ในโครงการงานขุดเนื่องจากเหตุผลข้างต้น เนื่องจากอัตราส่วนของดินซีเมนต์จะไม่น้อยกว่า 5% เพราะกำลังของส่วนผสมจะไม่เพียงพอที่จะเป็นโครงสร้างกันดิน สุดท้ายสามารถให้ความเห็นว่าอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดิน (Cement – Soil ratio; a_w) ไม่ควรมากกว่า 15% เพราะการแตกหักของส่วนผสมมากอาจเป็นผลให้เกิดการพังอย่างทันทีทันใดปราศจากการเตือนในกรณีที่ได้รับแรงเกินกำลัง

ปริมาณน้ำ (w) มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined compressive strength, q_u) ของส่วนผสม กำลังของส่วนผสมดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามเวลา แต่อย่างไรก็ตามยังแตกต่างจากคอนกรีต การทดสอบความสามารถในการซึมแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการซึมของดินซีเมนต์ลดลงขณะที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วน 10% ความ

สามารถการซึมผ่านของส่วนผสมจะมีค่า 10^{-7} ซม./วินาที ซึ่งเป็นสาเหตุของความสามารถป้องกันน้ำของโครงสร้างกันดินและไม่ต้องการระบบลดปริมาณน้ำในงานขุดดิน

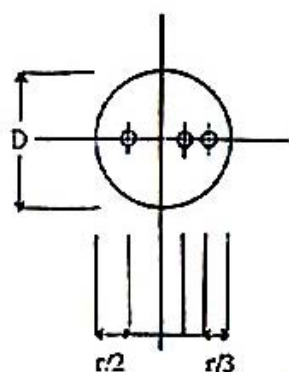
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเพิ่มของกำลัง และการตรวจสอบคุณภาพของเสาดินซีเมนต์

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน นอกจากเกิดจากการออกแบบแล้ว ยังสามารถเกิดจากคุณภาพของงานก่อสร้าง ดังนั้นเพื่อให้เป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาการเคลื่อนตัว Terashi (1997) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

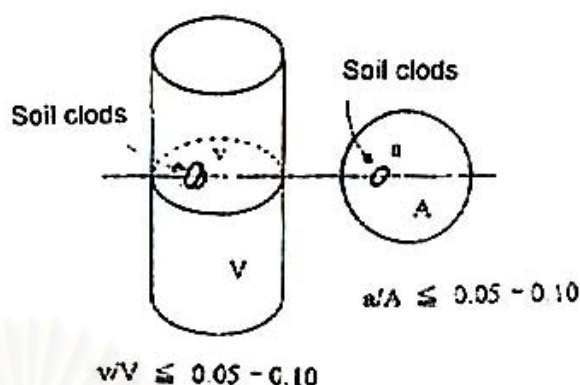
Osamu และ Roy (1998) ได้สรุปปัจจัยการควบคุมคุณภาพ (Quality Control) ที่จำเป็นระหว่างการติดตั้งเสาดินซีเมนต์ เพื่อให้ความสม่ำเสมอของการผสมดินซีเมนต์เป็นไปตามที่ต้องการ และเพื่อให้กำลังเป็นไปตามที่ออกแบบ การประกันคุณภาพสำเร็จได้จากบันทึกการติดตั้ง และจากผลการทดสอบกำลังของวัสดุตัวอย่างของดินซีเมนต์ ขั้นตอนแรกของการตรวจสอบคุณภาพเพื่อการออกแบบส่วนผสม โดยทั่วไปจะสำเร็จด้วยการเตรียมและการทดสอบส่วนผสมดินซีเมนต์ในห้องทดลองในขั้นตอนแรก และยืนยันผลการทดสอบด้วยการแสดงการเจาะและผสมทดสอบที่สถานที่โครงการ ขั้นตอนในห้องทดลองจะไม่ถูกใช้เพื่อผลิตเงื่อนไขส่วนผสมเดียวกันหรือผลของกำลังในขั้นตอนสนาม แต่จะเน้นส่วนผสมและกำลังที่ได้จากการทดสอบในสนาม

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเพิ่มของกำลัง (Terashi, 1997)

1) ลักษณะของสารเชื่อมประสาน	- ชนิดของสารเชื่อมประสาน
	- คุณภาพของสารเชื่อมประสาน
	- การผสมน้ำและสารผสมเพิ่ม
2) ลักษณะและเงื่อนไขของดิน (โดยเฉพาะดินเหนียว)	- คุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและแร่ของดิน
	- ปริมาณสารอินทรีย์
	- ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำในช่องว่าง
	- ปริมาณน้ำของส่วนผสมดินซีเมนต์
3) เงื่อนไขการผสม	- ปริมาณการผสมซีเมนต์ต่อดิน
	- เวลาที่ใช้ในการผสม
	- คุณภาพของสารเชื่อมประสาน
4) เงื่อนไขการบ่ม	- อุณหภูมิ
	- ระยะเวลาที่ใช้บ่ม
	- ความชื้น
	- ความเปียก ความแห้ง การแข็งตัวและการละลาย



รูปที่ 2.18 ตำแหน่งการเจาะทดสอบ



รูปที่ 2.19 การประเมินค่าความสม่ำเสมอ

การเจาะทดสอบบ่อยครั้งถูกใช้สำหรับทดสอบวัสดุเพื่อการประกันคุณภาพ เสาถูกเจาะอาจถูกเลือกอย่างสุ่มซึ่ง Osamu และ Roy (1998) เสนอหลักเกณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แต่การเจาะแท่งและทดสอบโดยทั่วไปจะถูกจัดทำ เมื่อเงื่อนไขของดินหรือเงื่อนไขการผสมมีปัญหา ซึ่งสังเกตได้ขณะติดตั้งตัวอย่างของแท่งทดสอบอาจได้จากตำแหน่งใกล้ศูนย์กลางรัศมีเสาซึ่งแสดงในรูปที่ 2.18 ความสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับลำดับของการผสมและดีที่สุดเมื่อไม่มีก้อนวัสดุ ความสม่ำเสมอสามารถประมาณค่าได้จากตัวอย่างแท่งทดสอบโดยวัดจากจำนวนของก้อนดินในรูปที่ 2.19 ความลึกของตัวอย่างทดสอบสำหรับทดสอบกำลังจะถูกวัดจากด้านบนของเสาและช่วงที่เป็นชั้นดินที่มีคุณสมบัติดีที่สุด ปลายบนของเสาบ่อยครั้งที่รับแรงกระทำมากดังนั้นโดยทั่วไปจะอยู่ในชั้นตอนทดสอบ ตัวอย่างแท่งจะถูกทดสอบด้านความต่อเนื่องและความสม่ำเสมอของส่วนผสมดินซีเมนต์และสำหรับความแข็งแรง ความสม่ำเสมอจะถูกประมาณด้วยเปอร์เซ็นต์ของความไม่ต่อเนื่อง และเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งที่เต็ม นอกจากนั้นความต่อเนื่องจะมากกว่า 95% ในดินทรายและมากกว่า 90% ในดินเหนียว

ขั้นตอนการควบคุมคุณภาพของดินซีเมนต์เริ่มตั้งแต่การตรวจสอบคุณภาพของน้ำซีเมนต์ ด้วยการวัดความถ่วงจำเพาะหลังจากผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นกับอัตราส่วนของน้ำ-ซีเมนต์ที่ใช้ในแต่ละโครงการ ในระหว่างการติดตั้งต้องมีการตรวจสอบคุณภาพด้วยข้อมูลปริมาณการไหล ,ความเร็วในการเจาะ ,อัตราการหมุนของส่วน ,ความลึกและอัตราซีเมนต์ที่ใช้ซึ่งจะแสดงผลดังกล่าวด้วยจอยคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนสุดท้ายเพื่อประกันคุณภาพของเสาดินซีเมนต์ คือ การเจาะแท่งทดสอบนำมาตรวจสอบความต่อเนื่อง ,ความสม่ำเสมอและความแข็งแรง ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การควบคุมและรับประกันคุณภาพของรายการทดสอบสำหรับเสาเข็มซีเมนต์

	รายการ	รายการทดสอบ	เครื่องมือ	ความถี่
QC	ซีเมนต์ที่ใช้	น้ำหนักรวม	การบันทึกการส่ง	รายวัน
	ปริมาณน้ำซีเมนต์	ความถ่วงจำเพาะ	Mud balance	ทุกถัง
	การอัดฉีด	ปริมาตร	การวัดการไหล	ทุกต้น
	เงื่อนไขการผสม	ความเร็วการเจาะ	บันทึก	ทุกต้น
		ความเร็วการหมุน	บันทึก	ทุกต้น
		ตัวอย่างเป็ยก	Trap door	1-2 ครั้งต่อวัน
	ความยาวเสา	ความยาวเพลลา	แกนเจาะ	ทุกต้น
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางเสา		เส้นผ่าศูนย์กลางเครื่องมือ	ทุกต้น	
QA	ความต่อเนื่อง	เจาะแท่งตัวอย่าง	Visual	การสุ่มตัวอย่าง
	ความสม่ำเสมอ	เจาะแท่งตัวอย่าง	Visual	การสุ่มตัวอย่าง
	ความแข็งแรง	แท่งตัวอย่าง	การทดสอบ UCC	การสุ่มตัวอย่าง

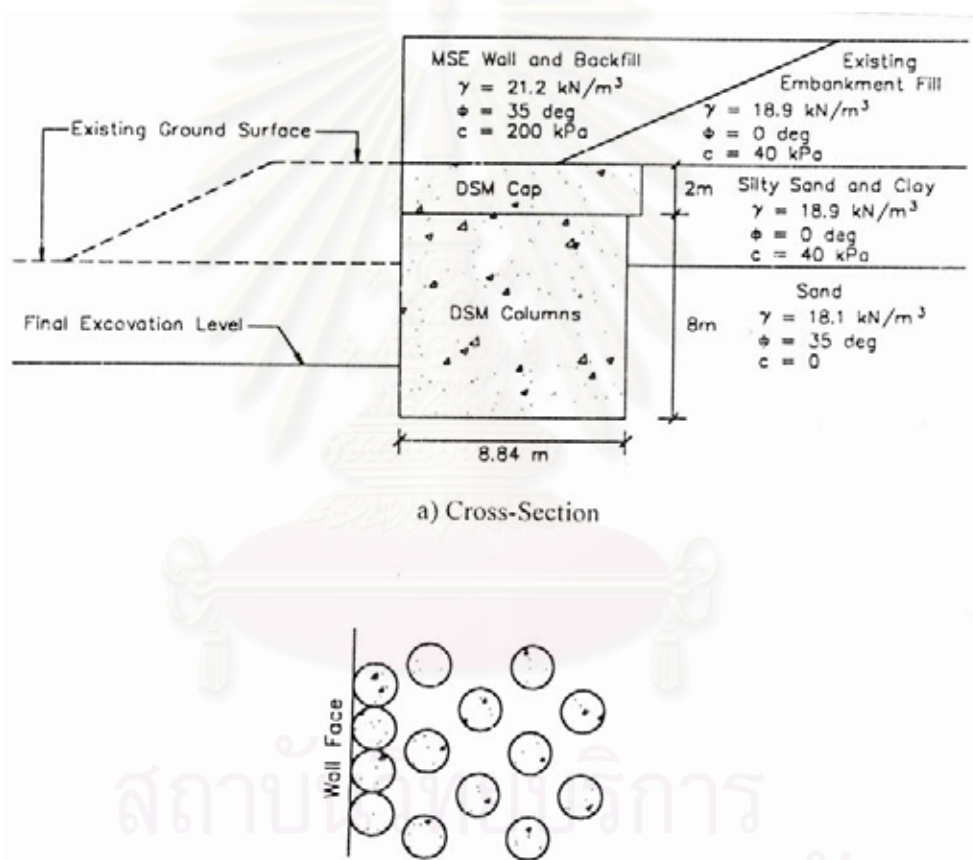
2.4 โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์

การพิจารณาออกแบบ Yong Shao et al.(1998) สรุปจากผลการทดสอบจากห้องทดลองว่า กำลังรับแรงคัตและแรงดึงของเสาเข็ม DCM พบว่ามีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัด ดังนั้นจะต้องใช้ประโยชน์ของกำลังรับแรงอัดอย่างเต็มที่ในการออกแบบกำแพงกันดินสำหรับงานขุดตัวเลือกที่ดีที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับเงื่อนไขนี้ คือ กำแพงกันดินที่รองรับด้วยน้ำหนักกำแพง (Self – supported gravity retaining walls) ในการทำเสาเข็ม DCM แต่ละต้นต้องทับซ้อนกันกับต้นข้างเคียงเพื่อให้เกิดโครงสร้างกันดินที่ต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตามด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์อาจไม่จำเป็นต้องก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ตลอดความหนาของโครงสร้างกันดินแต่ใช้ครีบบนช่วงระหว่างโครงสร้างกันดิน ครีบบนส่วนนี้มีความสำคัญมากเนื่องจากทำหน้าที่รักษาความแข็งแรงของโครงสร้างกันดินทั้งระบบ ดังนั้นเพื่อให้มีความปลอดภัยรอยต่อระหว่างครีบบ และเสาเข็มซีเมนต์ตามแนวยาวต้องมีความแข็งแรง

P.J.,Nicholson, J.K.,Mitchell, Hon., E.W.,Bahner , และ Y.,Moriwaki.(1998) สรุปลักษณะของโครงสร้างกันดินที่ก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ว่า เป็น โครงสร้างการจัดวางเสาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 ถึง 3.00 ม. ลงในพื้นที่ดินสู่ความลึกที่เหมาะสมถูกใช้เป็นการกำแพง (Gravity Wall) ซึ่งรู้จักกันว่า VERT (Vertically Earth Reinforced Technology) สำหรับนิยามการ

ออกแบบบางอย่างเป็นการรวมกันระหว่างรูปแบบที่นิยม 2 แบบ ของการผสมดินซีเมนต์เพื่อใช้ประโยชน์ คือ แถวของ Tangent หรือ Secant Column เป็นรูปแบบตามแนวเปิดของงานขุดดินแล้วเพิ่มเสาหินซีเมนต์เสริมแรงในแนวค้ำในรูปแบบซึ่งจะมั่นใจปฏิกริยาร่วมกันของมวลดินที่ถูกล้อมไว้ด้วยเสาหิน-ซีเมนต์ ในการติดตั้งโดยทั่วไปจะมี 3- 4 แถวที่เหลื่อมกัน เสาหินซีเมนต์ที่มีรูปแบบโครงสร้างกันดินโดยทั่วไปจะมีความกว้าง 0.6-0.80 เท่าของความสูงกำแพงที่ถูกเปิด สำหรับการออกแบบในปัจจุบันจะมีส่วนของ DCM กลุ่มเป็นความหนา 1.00 ม.ของการผสมระหว่างซีเมนต์กับดินที่เสียหายจากการก่อสร้าง ส่วนที่ยึดด้านบนมีเพื่อยึดด้านบนและใช้เป็นพื้นที่ใช้สำหรับดำเนินการก่อสร้าง ดังรูปที่ 2.20



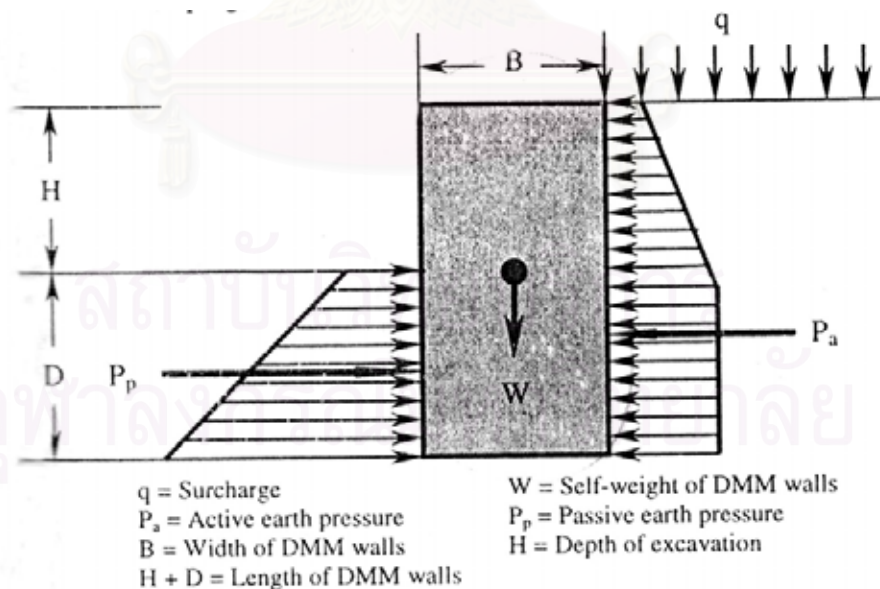
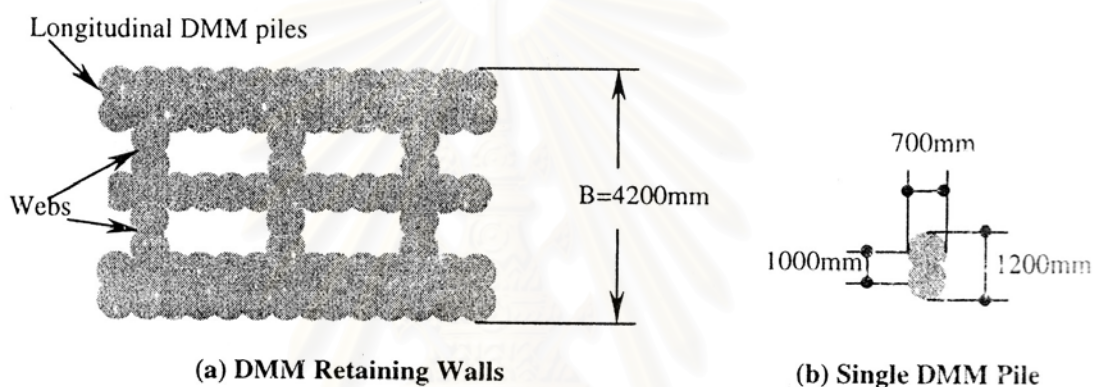
รูปที่ 2.20 โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาหินซีเมนต์ แบบแถวของ Tangent Column

Yong Shao et al.(1998) เสนอการออกแบบสรุปได้ว่ากำแพง DCM มีความเหมาะสมที่เป็นกำแพงกันดินแบบ Gravity retaining walls ดังนั้นจะต้องตรวจสอบเสถียรภาพทั้งหมด (Overall stability) ,ความต้านทานการหมุน (Anti-overturning) ,ความต้านทานการเลื่อน (Anti-sliding) และความต้านทานการซึม (Anti-seepage) เพิ่มเติมการตรวจสอบ ความต้านทาน

การอูด (Anti-heaving) และความต้านทานการลอยตัว (Anti-piping) สำหรับงานขุด ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับความปลอดภัย NAVFAC DM-7.2.(May 1982) คือ

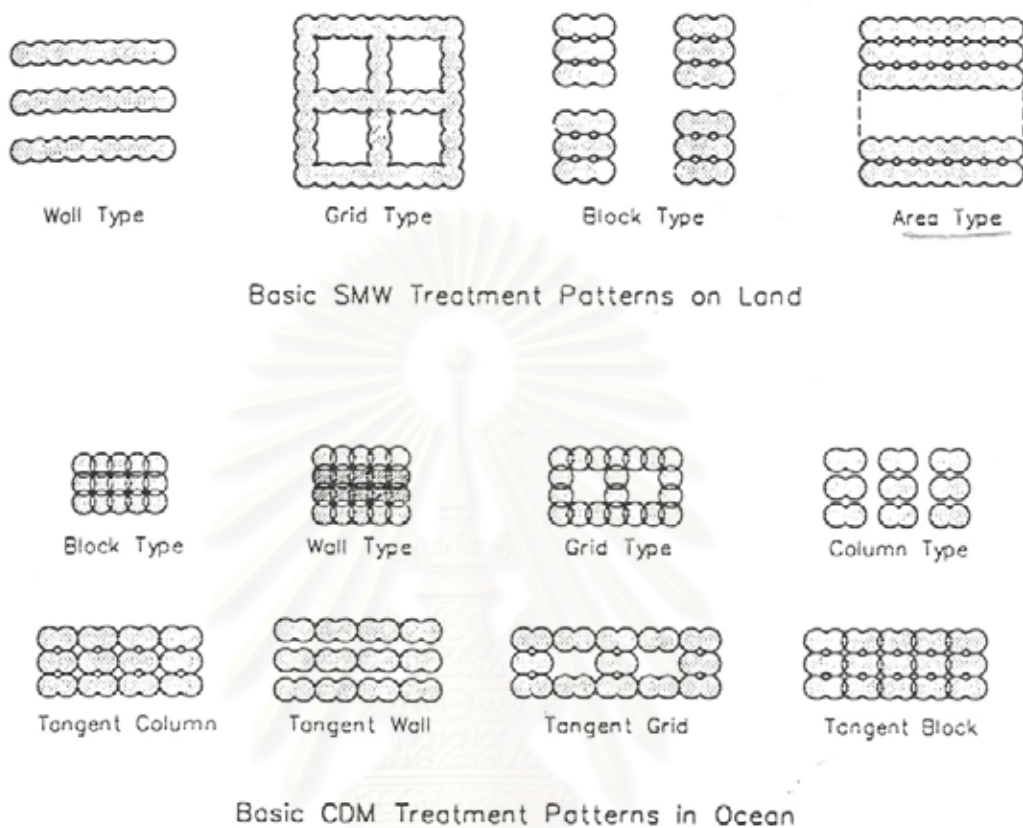
- FS (Overall = 2.0)
- FS (Overturning = 1.5)
- FS (Sliding = 1.5)
- FS (Seepage = 1.5)
- FS (Basal Heaving = 3.0)

ซึ่งลักษณะของแรงต่างๆ ที่กระทำและแปลนของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.21



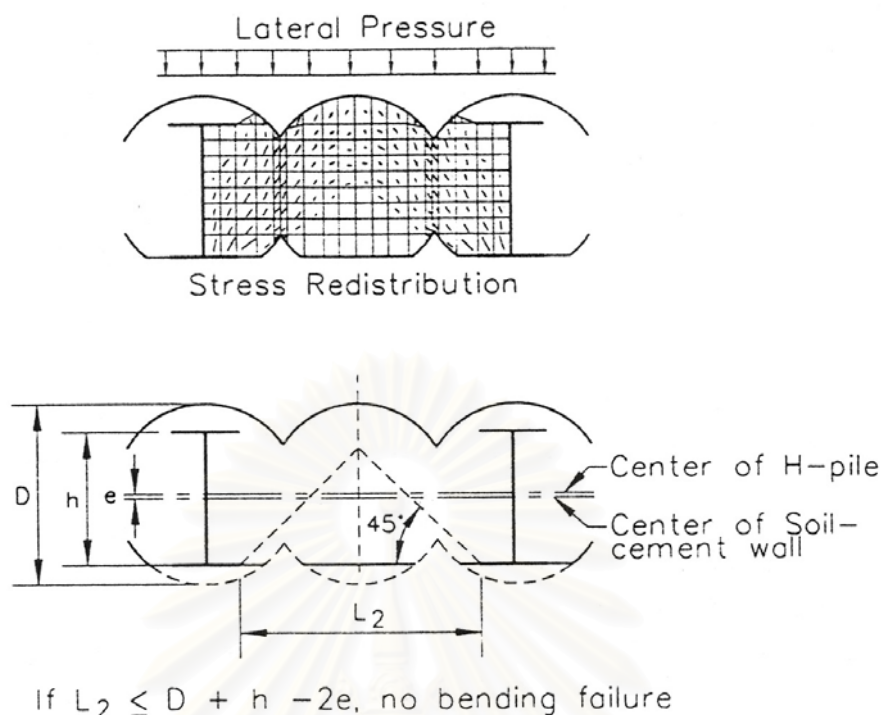
รูปที่ 2.21 โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ แบบมีค้ำ

CDM และ Yang (1994) เสนอรูปแบบชุดของเสาเข็มซีเมนต์ไว้หลากหลายรูปแบบ ตามลักษณะการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รูปแบบต่างๆ ของการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มซีเมนต์

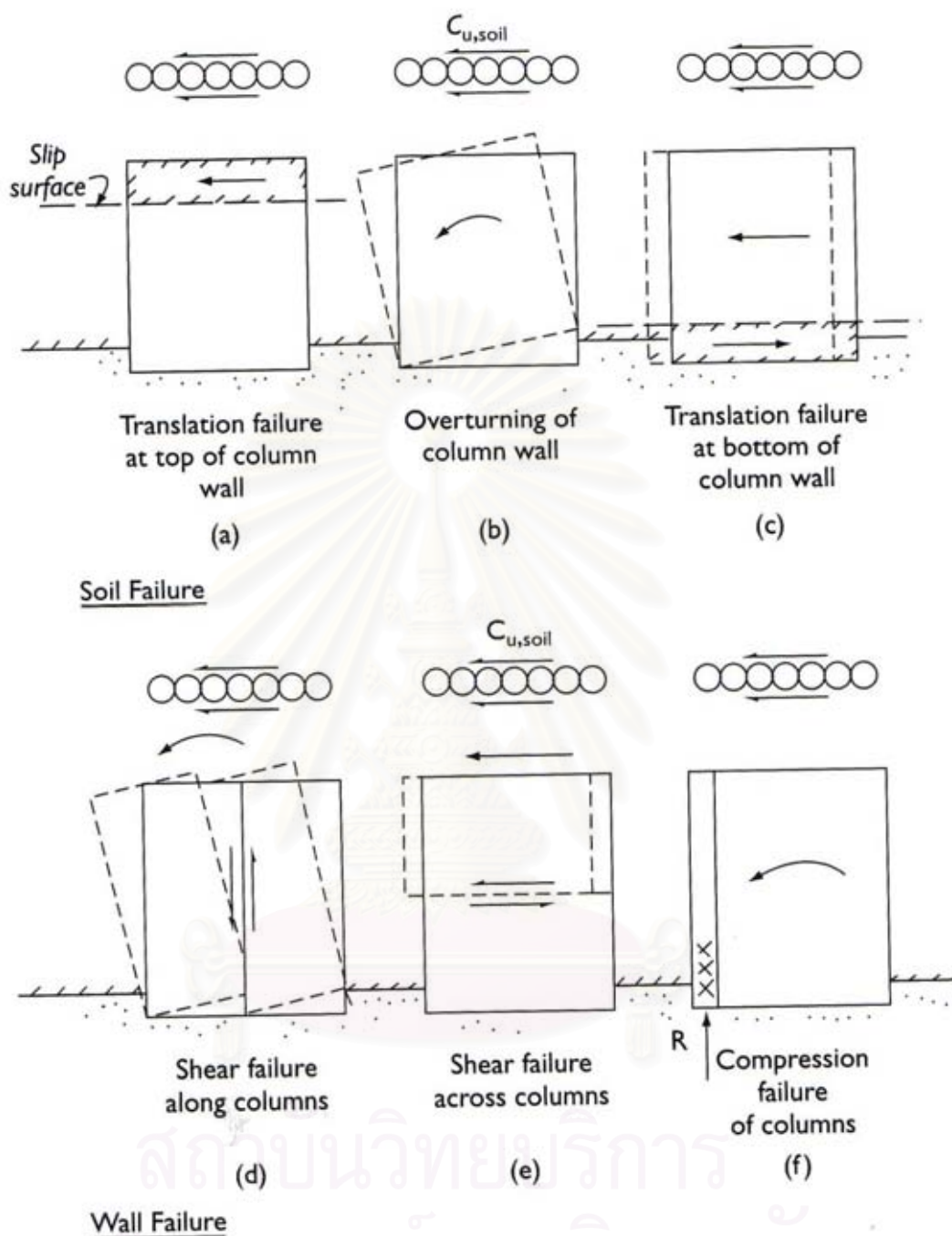
Taki และ Yang (1989) ได้สรุปลักษณะและการออกแบบเสาเข็มซีเมนต์ประยุกต์ใช้เป็นกำแพงกันดินรองรับงานชุดดังนี้ โดยทั่วไปกำแพงก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 550 มม. ถึง 900 มม. กำแพงที่ก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์นี้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่ากำแพงคอนกรีต และแรงดันดินด้านข้างสำหรับกำแพงแบบยึดหยุ่นถูกใช้สำหรับออกแบบโครงสร้างของกำแพงเสาเข็มซีเมนต์ ความเค้นภายในเสาเข็มซีเมนต์ระหว่างเสาเข็มเหล็ก H เสริมแรงถูกวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่ตั้งรับแรงดึงของเสาเข็มซีเมนต์ การวิเคราะห์ความเค้นภายในและความเค้นเฉือนตามระนาบตั้ง รวมทั้งการวิเคราะห์ความเค้นอัดหลังจากความเค้นแผ่กระจายภายในเสาเข็มซีเมนต์ ซึ่งโดยปกติกำลังรับแรงดึงของเสาเข็มซีเมนต์ไม่พิจารณาในการออกแบบการออกแบบช่องว่างระหว่างเสาเข็มเหล็ก H ถูกออกแบบเป็นโค้งเพื่อลดความเค้นดัดที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มซีเมนต์ จากแบบจำลอง ประสบการณ์ในสนามและเกณฑ์การออกแบบจากการทดลอง สำหรับช่องว่างระหว่างเสาเข็มเหล็ก H เพื่อหลีกเลี่ยงการวิบัติของเสาเข็มซีเมนต์เนื่องจากแรงดัด ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การวิเคราะห์ความเค้นภายในเสาหินซีเมนต์ (Taki และ Yang ,1991)

2.5 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์แบบกลุ่ม (Brom ,2004)

เนื่องจากโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน เป็นโครงสร้างกันดินซึ่งได้จากการประกอบกันของเสาหินซีเมนต์ ดังนั้นรูปแบบการวิบัตินอกจากเสถียรภาพทั้งหมดที่เสนอโดย Yong Shao et al.(1998) แล้วยังต้องพิจารณารูปแบบการวิบัติภายในโครงสร้าง ซึ่งเกิดจากเสาหินซีเมนต์หรือดินที่ไม่ถูกปรับปรุง Brom (2004) สรุปรูปแบบการวิบัติที่เป็นไปได้ ดังรูปที่ 2.24 กรณีการวิบัติของดินที่ไม่ถูกปรับปรุงนั้นอยู่ระหว่างเสาหินซีเมนต์ โดยดินนั้นจะถูกผลักหรือดันให้ออกจากโครงสร้าง ลักษณะการวิบัติ มีดังนี้ รูปที่ 2.24(a) เมื่อเกิดระนาบการวิบัติด้านบนของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน รูปที่ 2.24(b) โครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินพลิกคว่ำ (Overturning) เมื่อแรงดันที่ฐานของโครงสร้างสูง รูปที่ 2.24(c) กำแพงเคลื่อนตัวด้านข้างพร้อมกับดินที่ไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพได้ระนาบการวิบัติ รูปที่ 2.24 (d),(e) เกิดในกรณีที่มีความต้านทานแรงเฉือนของชั้นดินแข็งได้กำแพงมีค่าสูง รูปที่ 2.24(f) การวิบัติเนื่องจากเสาภายในโครงสร้างไม่สามารถรับแรงแบกทานที่มากเกินไป ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 2.24 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน (Brom ,2004)

ก) การวิบัติเนื่องจากแรงผลักของดินไม่ปรับปรุง (Extrusion Failure) โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน Terashi et al.(1983) ทดสอบ Centrifuge เรื่องความต้านทานของการผลักของดินที่ไม่ปรับปรุงระหว่างเสาดินซีเมนต์ ความต้านทานแรงเฉือนระหว่างโครงสร้างเสาดินซีเมนต์เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของดินไม่ปรับปรุง

ข) การวิบัติแบบเฉือน (Shear Failure) ของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน แสดงดังรูปที่ 2.25 รูปแบบการวิบัตินี้เกิดจากแรงเฉือนในแนวตั้งบริเวณที่ทับซ้อนของเสาหินซีเมนต์ เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของเสา เมื่อแรงเฉือนแนวตั้งจากสมการที่ 2.38

$$S/b = C_{u, \text{soil}} b \dots \dots \dots (2.38)$$

เมื่อ β คือ ตำแหน่งการเฉือนอยู่ได้ส่วนบนสุดของโครงสร้าง เท่ากับ 0.5

$$S/b = C_{u, \text{soil}} b(1-\beta) \dots \dots \dots (2.39)$$

เมื่อ β คือ ตำแหน่งการเฉือนอยู่สูงกว่ากึ่งกลางของโครงสร้าง มากกว่า 0.5

Larsson และ Hakansson (1998) ทดสอบ Cone Penetration Test (CPT) แนวเอียง พบว่า ความต้านทานแรงเฉือนของส่วนที่ทับซ้อนระหว่างเสาหินซีเมนต์มีค่าต่ำ เนื่องจากการผสมที่ไม่เพียงพอหรือระยะทับซ้อนน้อยเกินไป

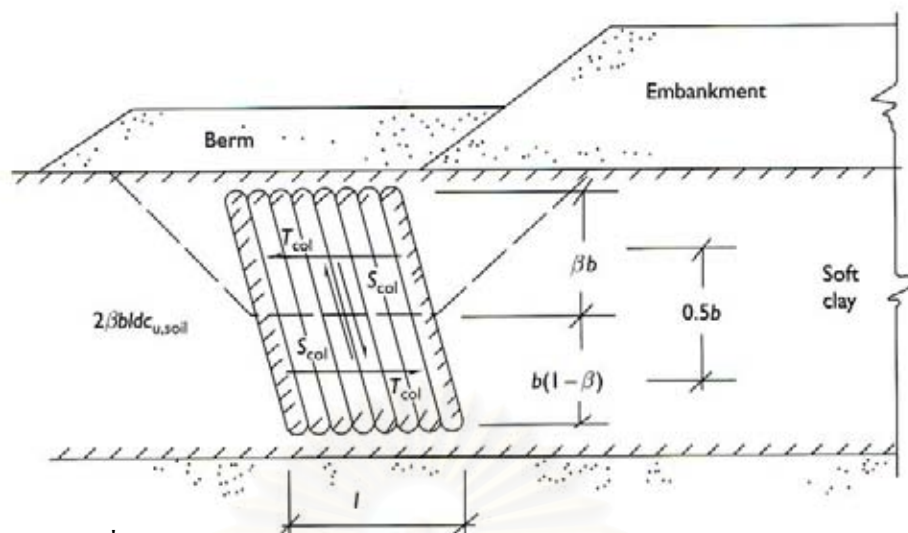
Yoshida (1996) รายงานว่าความต้านทานแรงเฉือนของดินปรับปรุงในบริเวณที่ทับซ้อนมีค่าเพียง $\frac{2}{3}$ ของกำลังรับแรงเฉือนของเสาหินซีเมนต์ ความต้านทานแรงเฉือนของส่วนทับซ้อนในช่วง 40-70% ของกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของเสาหินซีเมนต์

แรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหาได้จากสมการที่ 2.40

$$2S_{col}/b = 2C_{u, \text{soil}} b \dots \dots \dots (2.40)$$

เมื่อ β คือ ตำแหน่งการเฉือนอยู่ได้ส่วนบนสุดของโครงสร้าง เท่ากับ 0.5

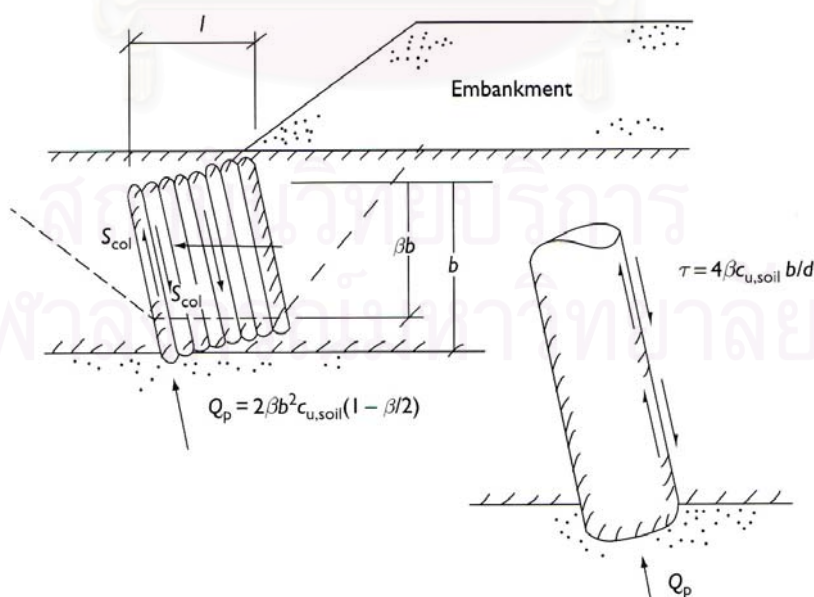
อย่างไรก็ตามความเครียดเฉือน $\frac{2T_{col}b}{I}$ ตามแนวทับซ้อนของเสาหินซีเมนต์ความกว้าง $\frac{d}{2}$ ต้องน้อยกว่าความเครียดเฉือนปลอดภัย $\frac{q_{u, col}}{4}$ หรือครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของเสาหินซีเมนต์ ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนของส่วนทับซ้อนระหว่างเสาหินซีเมนต์จะควบคุมกำลังรับแรงเฉือนของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน



รูปที่ 2.25 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินแบบเลื่อน

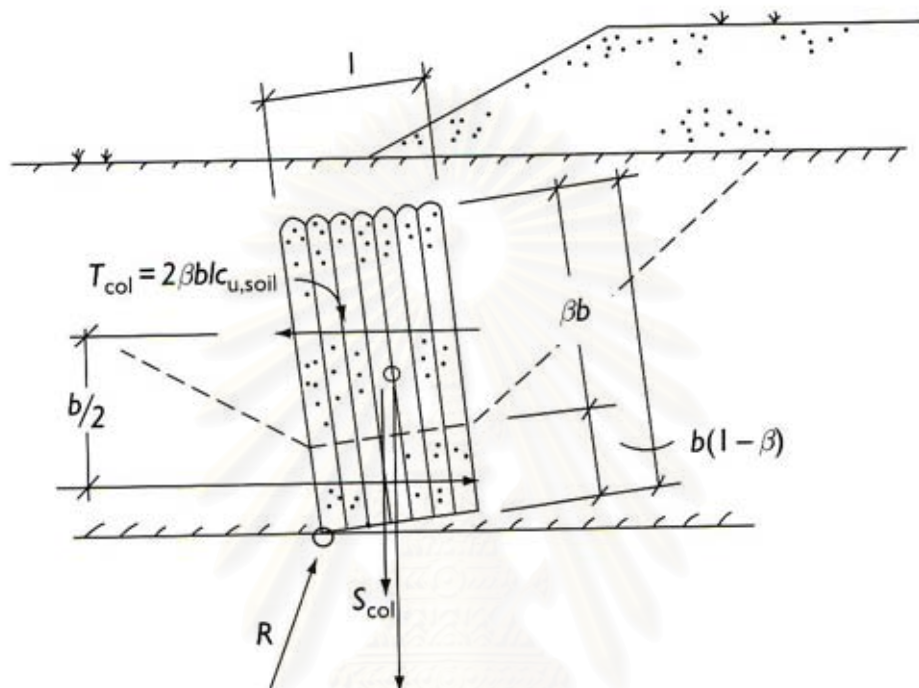
ค) การวิบัติของกำลังรับแรงอัด (Compression Failure) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน เกิดขึ้นเมื่อแรงเฉือนสูงสุด และระนาบวิบัติอยู่ใกล้ส่วนล่างของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน จนกระทั่งเสารับแรงแบกทานเป็นจุด ($\beta=1$) ดังรูปที่ 2.26 แรงเฉือนมีค่าเท่ากับ S_{col}/b ควรจะน้อยกว่ากำลังรับแรงเฉือนของส่วนทับซ้อน

แรงกระทำตามแนวแกนเป็น $2C_{u,soil} \beta b^2 (1 - \frac{\beta}{2})$ สำหรับเสาที่อยู่ในตำแหน่งไกลจากอีกด้านหนึ่งของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน ในกรณีของเสารับแรงแบกทานเป็นจุดเมื่อโครงสร้างหมุนในดิน แรงกระทำในแนวแกนน้อยกว่ากำลังรับแรงอัด $q_{u,col}$



รูปที่ 2.26 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินแบบอัด

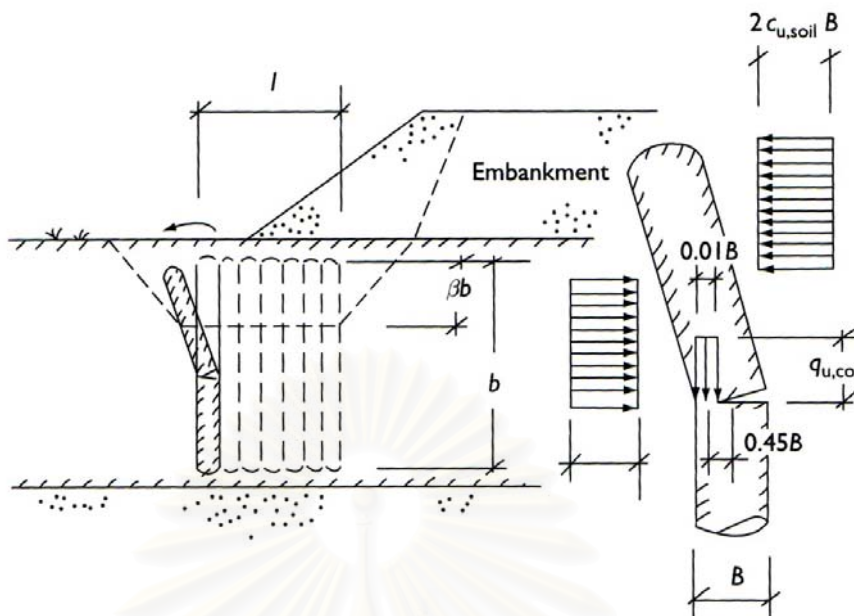
ง) การวิบัติเนื่องจากการพลิก (Failure by Overturning) ของโครงสร้างเสา
ดินซีเมนต์กันดิน ความต้านทานโมเมนต์ของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน จากการพลิกคว่ำ ดัง
แสดงในรูป 2.27 สามารถเพิ่มความยาวของเสาดินซีเมนต์หรือจำนวนแถวของโครงสร้างเสา
ดินซีเมนต์กันดิน



รูปที่ 2.27 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก

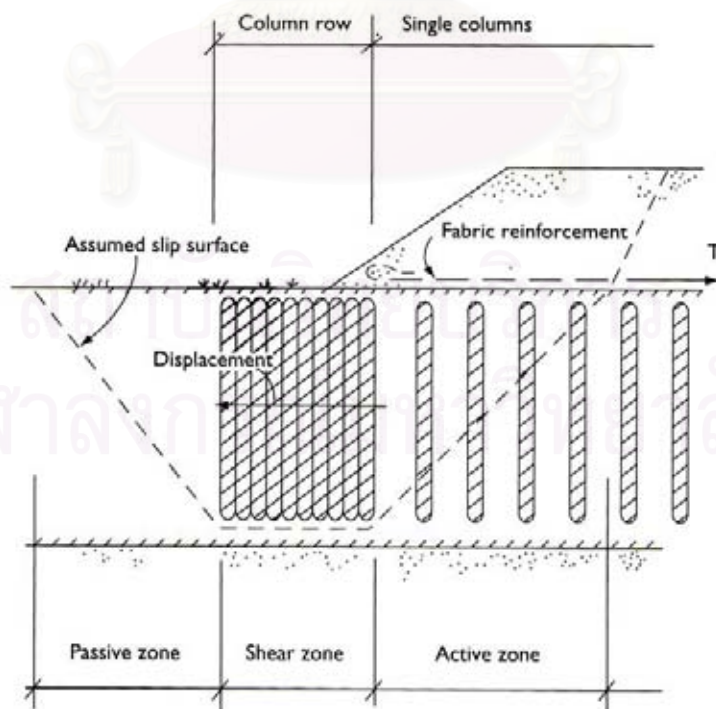
จ) การวิบัติเนื่องจากการแยก (Failure by Separate) ของโครงสร้างเสาดิน
ซีเมนต์กันดิน เนื่องจากการแยกกันของเสาดินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน ดังแสดงในรูปที่
2.28 เป็นการวิบัติที่ระนาบวิบัติเกิดในตำแหน่งใกล้ส่วนบนของโครงสร้างเสา แรงดันด้านข้างที่
แยกสามารถประมาณด้วยการสมมุติว่าความต้านทานแรงเฉือนทั้ง 2 ข้างของเสาดินซีเมนต์เท่ากับ
กำลังรับแรงเฉือนของดินไม่ปรับปรุง

เสาจะแยกออกจากกัน เมื่อความกว้างของส่วนทับซ้อนระหว่างเสาดินซีเมนต์น้อยและ
กำลังรับแรงดึงของช่วงทับซ้อนต่ำ Terashi et al. (1980) รายงานว่ากำลังรับแรงดึงมีค่าประมาณ
10%-20% ของกำลังรับแรงอัด UCS ของเสาดินซีเมนต์



รูปที่ 2.28 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มตักดินเนื่องจากการแยก

จ) การวิบัติเนื่องจากการเลื่อน (Failure by Translation) ของโครงสร้างเสาเข็มตักดิน การเลื่อนของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.29 ความต้านทานแรงเฉือนของโครงสร้างเสาเข็มเพียงในกรณีนี้จึงทำให้ระยะการเลื่อนรอบกวนดินใต้โครงสร้าง เมื่อกำลังรับแรงเฉือนลดลงจึงเกิดการเลื่อนของโครงสร้างที่อยู่เหนือระยะการเลื่อน โครงสร้างจะต้องใหญ่พอที่จะต้านแรงดันด้านข้างได้ระยะการเลื่อน



รูปที่ 2.29 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มตักดินเนื่องจากการเลื่อน

2.6 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์

แบบการเสยรูปของโครงสร้างกันดิน การวิบัติอันหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ คือ การเคลื่อนตัวที่มากเกินไปของโครงสร้างกันดิน การวิบัติอันนี้เกิดขึ้นมาจากความไม่แข็งแรงของโครงสร้างกันดิน อาจจะมาจากการออกแบบ และ/หรือการก่อสร้าง ในส่วนการออกแบบต้องพิจารณาถึงความแข็งแรงของโครงสร้างกันดินที่ต้องการในการรองรับปัญหาที่พบ การรับแรงจากภายนอก และภายในของโครงสร้างกันดิน

การเสยรูปของโครงสร้างกันดินสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่มีค้ำยัน และกลุ่มที่มีค้ำยันซึ่งลักษณะการเคลื่อนตัวแตกต่างกัน

ก) กลุ่มที่ไม่มีค้ำยันการเคลื่อนตัวจะเกิดการหมุนของผนังรอบจุดหมุนที่กั้นบ่ออาจหมุนเข้าหรือหมุนออกก็ได้หรือไม่เกิดการเคลื่อนที่เลยถ้าโครงสร้างกันดินแข็งแรงและน้ำหนักมากกรณีพฤติกรรมที่เกิดจริงก็อาจจะไม่เกิดการหมุนที่กั้นบ่อบ่อ แต่จะเกิดการหมุนที่ฐานของโครงสร้างกันดิน หรือเกิดการเคลื่อนตัวออกไปตรงๆก็ได้

ข) กลุ่มที่มีค้ำยันจะมีลักษณะการโก่งตัวระหว่างจุดที่มีค้ำยัน หรือ Anchored พร้อมกับเคลื่อนตัวของโครงสร้าง และการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินที่มีค้ำยันจะเกิดขึ้นน้อยในจุดที่มีค้ำยัน

การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของผนังกันดิน ถ้าผนังกันดินมีความแข็งแรงมากก็จะเกิดการเคลื่อนตัวน้อย

2.6.1 การศึกษาพฤติกรรมของลาดขุดทดลองในดินอ่อน

บริเวณโรงสูบน้ำเจริญราษฎร์ จังหวัดสมุทรปราการ ธนุ (2534) สรุปพฤติกรรมของลาดขุดทดลองในดินอ่อนบริเวณโรงสูบน้ำเจริญราษฎร์ จังหวัดสมุทรปราการมีรายละเอียดดังนี้

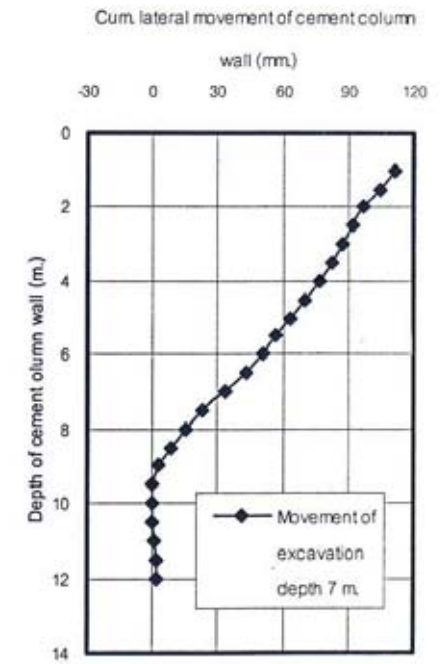
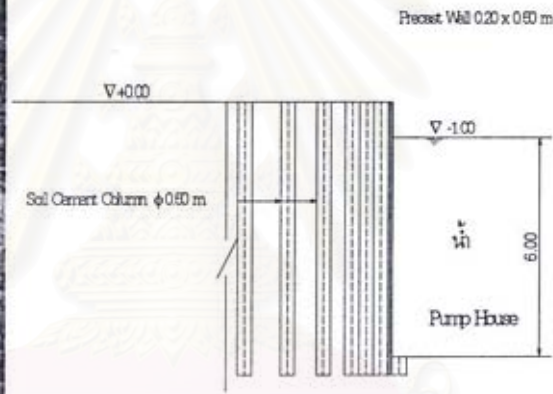
- บ่อขุดทดลองขนาดก้นบ่อ 40 x 30 เมตร มีความลึกจากระดับดินเดิม ประมาณ 4.00 เมตร
- ความลาดเอียงของลาดบ่อที่เสริมกำลังด้วย Soil Cement Column ความเอียง 1:3
- จากผลการทดสอบดินมีคุณสมบัติเหมือนดินอ่อนกรุงเทพฯ จัดอยู่ในกลุ่ม CH แต่มีค่า Plastic Index สูงกว่าดินอ่อนกรุงเทพฯ ในที่อื่นๆ อยู่ 20–30 %
- ด้าน Compressibility ของดินในบริเวณที่ศึกษามีค่า Over consolidation ratio (OCR) ประมาณ 1.3 ตลอดความลึกประมาณ 15.00 เมตร

- อุปกรณ์การตรวจวัดที่ใช้ในการทดลองสำหรับลาดดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ติดตั้งเฉพาะ Surface displacement pipe

พฤติกรรมของลาดดินระหว่างการขุดบ่อก่อสร้างและการทดสอบลาดดินมีพฤติกรรมสำคัญที่สรุปได้ดังนี้ ในระหว่างการขุดแบบ Dry excavation ไม่พบลักษณะการทรุดตัวหรือเคลื่อนตัวแต่อย่างใด จนความลึกบ่อประมาณ 1.80 เมตร ด้วยความลาดเอียงของลาดดินขุด 1:6 จนกระทั่งเมื่อทำการขุดถึงระดับความลึก 3.80 ม. พบรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณไหล่ของบ่อขุดที่ระยะประมาณ 7.00 เมตรจากขอบบ่อ ยาวขนานกับหน้าลาดขุด และเนื่องจากความไม่เสถียรที่เกิดจากงานขุดของลาดดินขุดด้านอื่น รอยแตกขยายตัวจนมีความกว้างประมาณ 20 ซม. จนในที่สุดลาดดินที่ 4 ก็ทรุดตัวลงใช้เวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบได้ 110 ซม. และการทรุดตัวในแนวตั้ง 80 ซม. เมื่อตรวจสอบ Soil Cement Column พบว่าในช่วงบนของลาดดินขุดถูกดันเอียงและเนื้อขนาดเกือบตลอดแนวลาดขุดที่ระดับความลึกจากปลายบนของ Column ประมาณ 90 ซม. ลักษณะของ column จะแยกออกเป็นชั้นบางๆ และแตกร่วนออกเป็นชั้นๆ ในทางราบได้ง่าย เป็นผลให้ Unconfined compressive strength (UCS) ของ Column ที่ตรวจสอบได้จากการก่อสร้างจริงมีค่าต่ำกว่าที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ

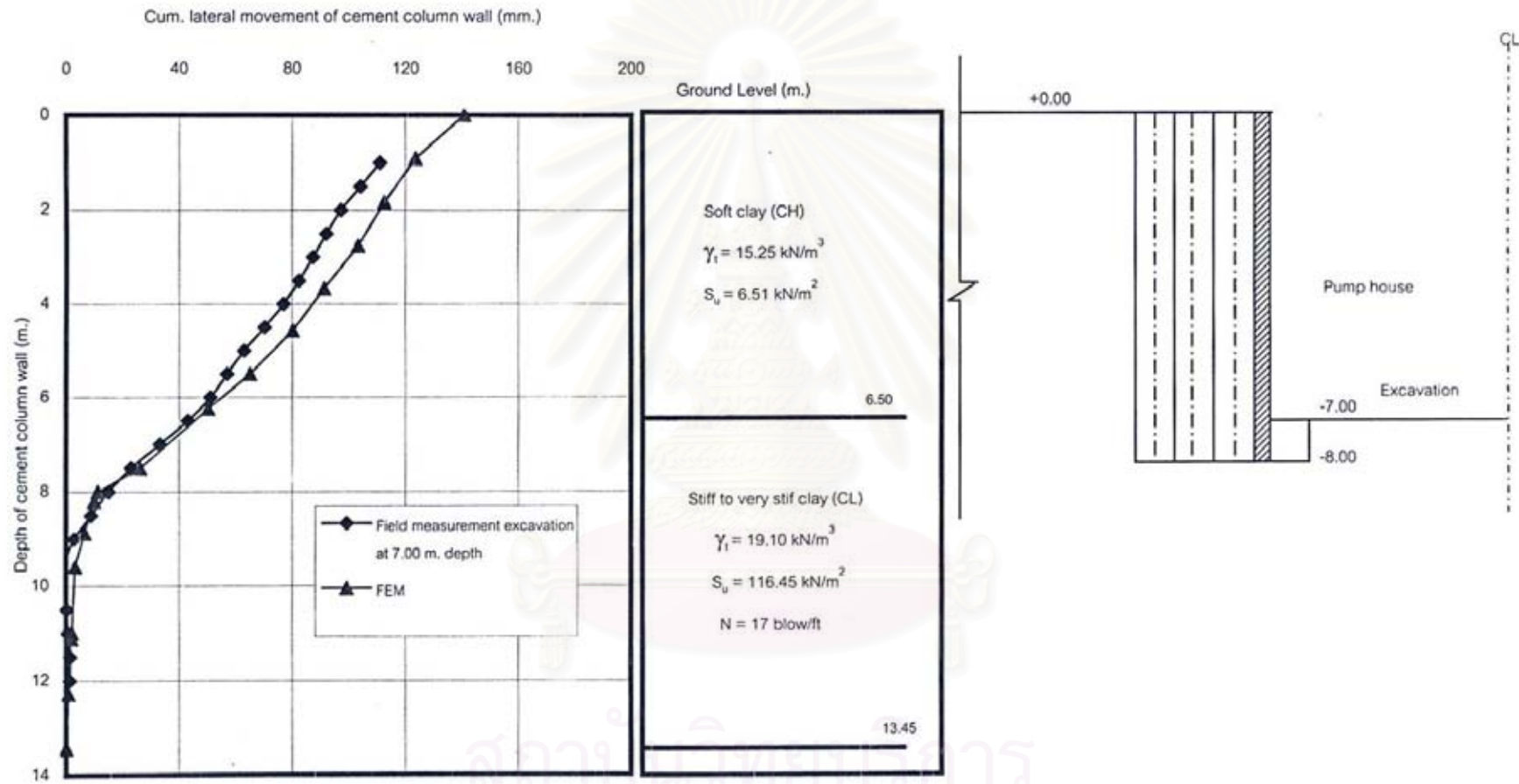
2.6.2 การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุด

ออกแบบให้เป็นระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์และประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วย Inclinometer ระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยจำลองพฤติกรรมของดินและของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ด้วยทฤษฎี Mohr-Coulomb เรื่อง การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในงานขุด นฤทธิ (2546) การศึกษามีรายละเอียดดังนี้ เสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 เมตร ลึก 8.00 เมตร ออกแบบเป็นระบบกำแพงกันดินฝังลงในดินเหนียวแข็ง โดยลักษณะของการขุดส่วนทางเข้าบ่อเก็บน้ำ (Pump House) มีความกว้างประมาณ 6.20 เมตร ยาว 18.0 เมตรและลึก 7.00 เมตร พฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างทางเข้าพบว่าขณะทำการขุดในแนวตั้งลึกตั้งแต่ผิวดิน จนถึงระดับความลึก 7.00 เมตรเกิดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างในลักษณะของคานยื่น (Cantilever Mode) ดังรูปที่ 2.30 แสดงการขุดทางเข้าบ่อเก็บน้ำ และรูปที่ 2.31 ผลการประมาณการเคลื่อนตัว ซึ่งค่าความเครียดทางด้านข้าง (Lateral Strain) ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1.4% หลังจากนั้นโครงสร้างจึงเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นการพังทลายของกำแพงกันดินทั้งระบบ (Overall Slope Failure) ดังรูปที่ 2.32 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง

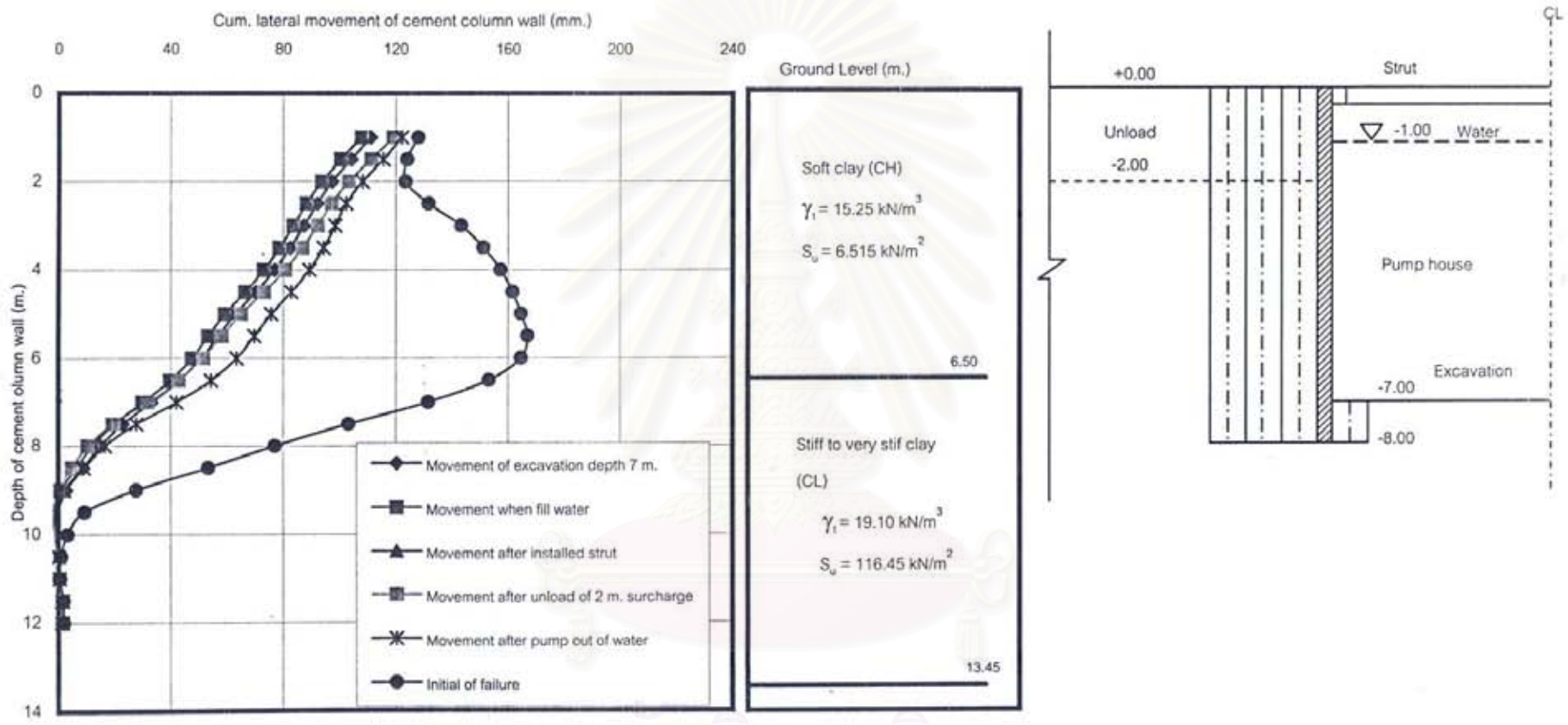


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.30 แสดงการขุดทางเข้าบ่อเก็บน้ำ



รูปที่ 2.31 ผลการประมาณการเคลื่อนตัว

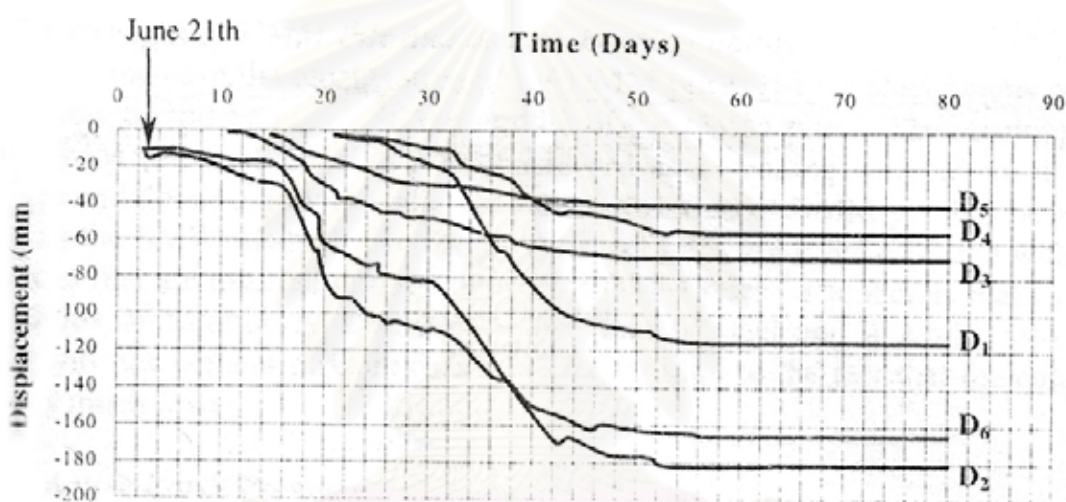


รูปที่ 2.32 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง

จากการศึกษาพบว่าสามารถประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินได้สอดคล้องกับผลการวัดในสนาม โดยมีอัตราส่วนระหว่าง Young's Modulus กับกำลังรับแรงเฉือนของดิน (E_u/S_u) เท่ากับ (120-180) , (600-700) และ (650-750) สำหรับดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็งและเสาเข็มดินซีเมนต์ตามลำดับ

2.6.3 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวแนวราบของโครงสร้างกันดิน เสาดินซีเมนต์ในงานชุด

Yong Shao et al.(1998) สรุปการเคลื่อนตัวแนวราบของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน ที่ตำแหน่งบนสุดของกำแพง ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 การเคลื่อนตัวแนวราบด้านบนบนสุดของกำแพงเสาหินซีเมนต์

และอธิบายว่าปกติการเคลื่อนตัวแนวราบด้านบนของกำแพงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกของงานชุดมากขึ้น ค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้สูงที่สุดที่ด้านบนของโครงสร้างเป็น 18.2 ซม. หรือ 1.52% ของความสูงกำแพง

นอกจากนั้น Yong Shao et al.(1998) ยังเปรียบเทียบการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวระหว่าง Centrifuge Test ,Finite Element Method และข้อมูลการเคลื่อนตัวจริงในสนาม โดยให้เหตุผลในการเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ว่าวิธี Conventional Design Method สมมติให้แรงดันดินด้านข้างจากทฤษฎี Rankine Earth Pressure ซึ่งไม่พิจารณาแรงเสียดทานระหว่างโครงสร้างกันดินกับมวลดิน นำไปสู่สมมติฐานของแรงดันดินข้างชนิด Passive ที่มีค่าไม่เหมาะสม ในบริเวณส่วนล่างของแรงดันดินข้างชนิด Passive ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่าสำหรับปัญหานี้จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว ค่าที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 2.6

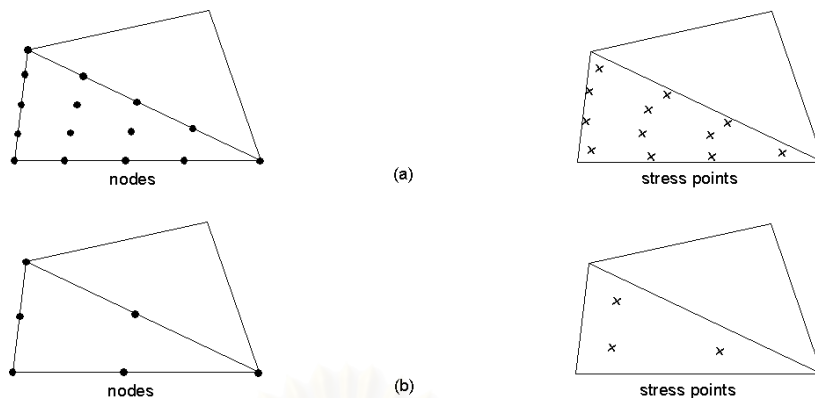
ตารางที่ 2.6 ผลจากการคำนวณจาก Centrifuge และ FEM

Methods	Maximum Displacement (cm.)			
	Toe of Walls	Top of Walls	Surface Settlement	Basal Heave
Centrifuge Test	4.8	15.3	7.4	2.0
FEM	7.9	11.3	8.3	1.5
Field Measurement	10.3	18.2	6.2	2.7

ค่าจากวิธีทั้ง 3 วิธี มีความใกล้เคียงกันยกเว้นการเคลื่อนตัวด้านข้างของฐานของกำแพง เพราะผลของ FEM ให้ค่าที่การคำนวณที่สูงกว่าตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้าย ไม่พิจารณาผลกระทบของระยะเวลาภายหลังการก่อสร้าง ขณะที่ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือในสนามเป็นค่าที่สูงที่สุดที่วัดได้ในตลอดระยะเวลาการก่อสร้าง ค่าการเคลื่อนตัวอาจเพิ่มขึ้นหลังจากขั้นตอนงานขุดขั้นสุดท้าย สำหรับ Centrifuge Test ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการวิบัติทางกลศาสตร์ของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังนั้นเงื่อนไขของการทดสอบค่อนข้างไม่ตรงกับเงื่อนไขการก่อสร้างจริง

2.7 การคาดคะเนการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การประมาณการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ทำการด้วยโปรแกรม Plaxis ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงและเสถียรภาพทางวิศวกรรมปฐพี โปรแกรม Plaxis เป็นการจำลองสภาพจริงจากการก่อสร้าง โดยการแบ่งดิน และโครงสร้างออกเป็น อิลิเมนต์ย่อย ๆ รูปสามเหลี่ยมที่ต่อเนื่องกัน แต่ละอิลิเมนต์จะมีจุดต่อ (Node Point) 6 หรือ 15 node และในแต่ละอิลิเมนต์มี 3 หรือ 12 Stress Point ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.34 และใน 1 อิลิเมนต์ จะมี Stress – Strain Law และ Failure Criteria ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำ และขอบเขตที่กำหนด ซึ่งสามารถคำนวณหาหน่วยแรง ความเครียด และการเสียรูปของดินได้อย่างถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 2.34 แสดง Node และ Stress

2.7.1 คำนิยามทั่วไปของ Stress และ Strain

แบบจำลองของวัสดุที่ใช้ใน Plaxis เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผล ($\dot{\sigma}'$) และอัตราความเครียด ($\dot{\epsilon}$) ดังสมการที่ 2.41

$$\dot{\underline{\sigma}}' = M \dot{\underline{\epsilon}}$$

$$\dot{\underline{\sigma}}' = \left(\begin{matrix} \dot{\sigma}'_{xx} & \dot{\sigma}'_{yy} & \dot{\sigma}'_{zz} & \dot{\sigma}'_{xy} & \dot{\sigma}'_{yz} & \dot{\sigma}'_{xz} \end{matrix} \right)^T \dots\dots\dots(2.41)$$

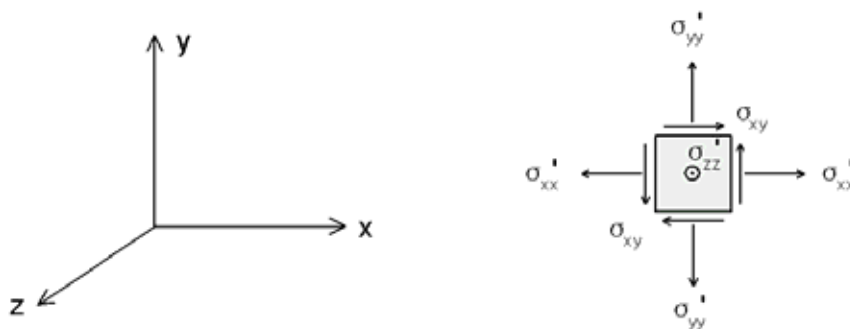
$$\dot{\underline{\epsilon}} = \left(\begin{matrix} \dot{\epsilon}'_{xx} & \dot{\epsilon}'_{yy} & \dot{\epsilon}'_{zz} & \dot{\gamma}'_{xy} & \dot{\gamma}'_{zy} & \dot{\gamma}'_{xz} \end{matrix} \right)^T$$

เมื่อ M คือ material stiffness matrix

$\dot{\sigma}'$ คือ stress rate tensors

$\dot{\epsilon}$ คือ strain rate tensors

เนื่องจากการวิเคราะห์ในลักษณะ Plane strain ทำให้ $\dot{\gamma}'_{zy}, \dot{\gamma}'_{xz}, \dot{\sigma}'_{yz}, \dot{\sigma}'_{zz}$ เท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.35 แสดงระบบพิกัดและทิศทางในสามมิติ

การวิเคราะห์แบบ Small strain ค่า strain ได้จากการเสียรูปร่างของดินที่พิจารณาตั้งสมการที่ 2.42 ถึง 2.44

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

$$\epsilon_{zz} = 0 \quad \text{(Plane strain)} \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{r} u_x \quad \text{(axisymmetry; r = radius)} \quad \dots\dots\dots(2.44)$$

ก) Elastic strain แบบจำลองของวัสดุในโปรแกรม Plaxis ใช้กฎของ Hooke's สำหรับพฤติกรรม Isotropic linear elastic ตั้งสมการที่ 2.45

$$\begin{bmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{zz} \\ \sigma'_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^e \\ \epsilon_{yy}^e \\ \epsilon_{zz}^e \\ \gamma_{xy}^e \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

- เมื่อ E' คือ Effective Young's modulus
- ν' คือ Effective Poisson's ratio

ความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus กับ Stiffness moduli ตัวอื่น เช่น Shear modulus (G), Bulk modulus (K) และ Oedometer modulus (E_{oed}) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.46

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \dots\dots\dots(2.46)$$

2.7.2 การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์แบบประสิทธิผล

ในโปรแกรม Plaxis การวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำด้วยหน่วยแรง ประสิทธิผล ทำได้โดยใช้แบบจำลองพารามิเตอร์ประสิทธิผล ซึ่งการวิเคราะห์แบบนี้เป็นการพิจารณาวัดดินและแรงดันน้ำในดินแยกออกจากกัน แต่จะอยู่รวมกันในขอบเขตของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์แบบนี้จะมีความยุ่งยากเกี่ยวกับการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับดินเหนียวเนื่องจากการทดสอบของดินเหนียวมักจะหาค่าพารามิเตอร์ในรูปหน่วยแรงรวม ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงประสิทธิผลจะได้มาจากการแปลงค่าพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงรวมตามสมการที่ 2.47

$$E = \frac{2(1+\nu)}{3} E_u \dots\dots\dots(2.47)$$

เมื่อ E คือ Effective Young's Modulus
 E_u คือ Undrained Young's Modulus
 ν คือ Drained Poisson's Ratio

ก) การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม โดยใช้พารามิเตอร์แบบหน่วยแรงรวม ในกรณีนี้เป็นการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) ซึ่งในการวิเคราะห์ไม่ได้แยกหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) และแรงดันน้ำ (Pore Pressure) ออกจากกัน การวิเคราะห์อาศัยหลักการสมดุลของแรง การวิเคราะห์แบบนี้จะมีความเหมาะสมกับดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil)

ข) แบบจำลองของ Mohr-Coulomb แบบจำลอง Mohr Coulomb หรือเรียกอีกอย่างว่า แบบจำลอง Elastic Perfectly Plastic Plasticity เกิดขึ้นเนื่องจากความเครียดหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่เกิดขึ้นไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ ในการประเมินการเกิดขึ้นของ Plasticity ทำได้โดยการคำนวณด้วย Yield function(f) ซึ่งเป็นพจน์ของ Stress และ Strain Yield function(f) มักจะถูกนำเสนอในรูปของพื้นผิวในระนาบของหน่วยแรงหลัก แบบจำลองนี้มีค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้ 5 ตัว คือ Young's Modulus, Poisson's Ratio, Cohesion, Friction angle และ Dilatency angleการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลอง Elastic Perfectly

Plastic จะประกอบด้วยความสัมพันธ์ของค่า Strain และค่าอัตรา Strain ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น Elastic และ Plastic ตามสมการที่ 2.48 โดยในส่วนของการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ภายใน Elastic จะอาศัยกฎของ Hooke's ตามสมการที่ 2.49 สำหรับการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดขึ้นในส่วน Plastic จะถูกกำหนดโดย Yield function (f)

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon}}^e + \underline{\underline{\epsilon}}^P \quad \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^P \quad \dots\dots\dots(2.48)$$

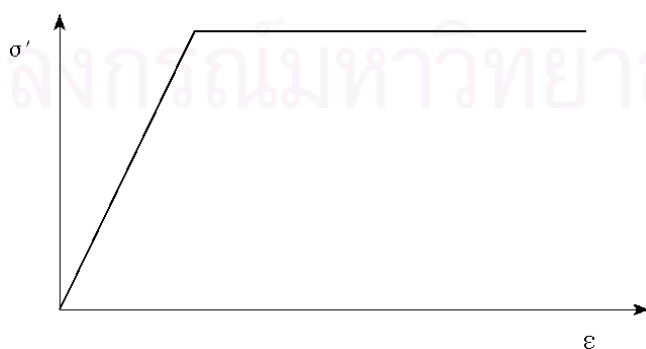
โดย $\underline{\underline{\epsilon}}, \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$ คือ Strain and Strain Rate
 $\underline{\underline{\epsilon}}^e, \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e$ คือ Strain and Strain Rate of Elastic
 $\underline{\underline{\epsilon}}^P, \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^P$ คือ Strain and Strain Rate of Plastic

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}'}} = \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e = \underline{\underline{D}}^e \left(\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^P \right) \quad \dots\dots\dots(2.49)$$

Plastic strain rate สามารถเสนอได้ในรูปของเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับ Yield surface สำหรับ Mohr- Coulomb ชนิดของ Yield function (f) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเกี่ยวข้องกับทฤษฎีของ Plasticity นำไปสู่การคาดคะเนค่า dilatancy ที่สูงเกินไป ดังนั้นนอกจาก Yield function (f) แล้วยังมี Plastic potential function (g) ที่ถูกนำมาใช้ใน Mohr- Coulomb โดยทั่วไป Plastic strain rate สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.50

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^P = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}'}} \quad \dots\dots\dots(2.50)$$

เมื่อ λ เป็นตัวคูณ Plastic มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับพฤติกรรม elastic และมีค่ามากกว่าศูนย์ สำหรับพฤติกรรม Plastic



รูปที่ 2.36 พื้นฐานแบบจำลอง Elastic Perfectly Plastic

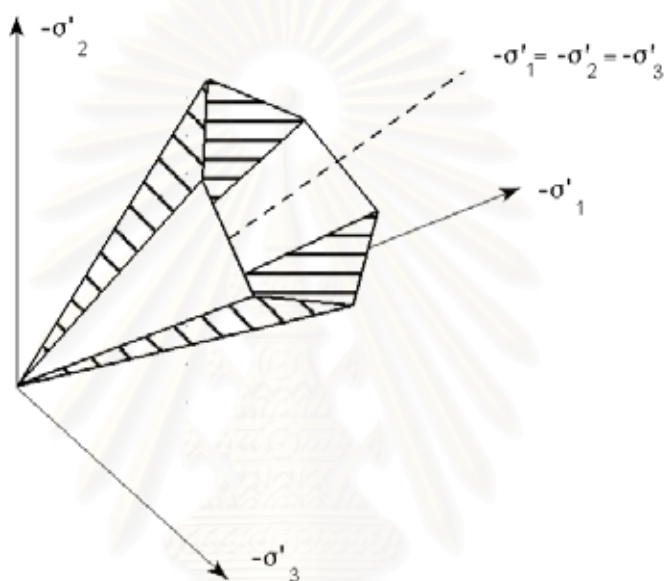
ใน Mohr- Coulomb เงื่อนไขการเกิด yield สามารถนิยามได้ด้วย yield function ตามสมการที่ 2.51 , 2.52 และ 2.53

$$f_1 = \frac{1}{2} | \sigma_2' - \sigma_3' | + \frac{1}{2} (\sigma_2' + \sigma_3') \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \dots\dots(2.51)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} | \sigma_3' - \sigma_1' | + \frac{1}{2} (\sigma_3' + \sigma_1') \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \dots\dots(2.52)$$

$$f_3 = \frac{1}{2} | \sigma_1' - \sigma_2' | + \frac{1}{2} (\sigma_1' + \sigma_2') \sin \phi - c \cos \phi \leq 0 \dots\dots(2.53)$$

เมื่อ ϕ คือ friction angle และ c คือ Cohesion



รูปที่ 2.37 Yield surface ของ Mohr – coulomb ในระนาบของหน่วยแรงหลัก (c=0)

นอกจาก Yield Function แล้ว ในแบบจำลอง Mohr - Coulomb ยังนิยาม Plastic potential function (g) ตามสมการที่ 2.54 2.55 และ 2.56

$$g_1 = \frac{1}{2} | \sigma_2' - \sigma_3' | + \frac{1}{2} (\sigma_2' + \sigma_3') \sin \psi \dots\dots\dots(2.54)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} | \sigma_3' - \sigma_1' | + \frac{1}{2} (\sigma_3' + \sigma_1') \sin \psi \dots\dots\dots(2.55)$$

$$g_3 = \frac{1}{2} | \sigma_1' - \sigma_2' | + \frac{1}{2} (\sigma_1' + \sigma_2') \sin \psi \dots\dots\dots(2.56)$$

เมื่อ ψ คือ dilatancy angle

บทที่ 3

การรวบรวมข้อมูลและผลการตรวจวัด การเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กั้นดิน

การทำวิจัยครั้งนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กั้นดิน ขั้นตอนงานชุดเพื่อก่อสร้าง และวิธีการแก้ไขปัญหาระหว่างการก่อสร้าง รวมทั้งข้อมูลการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กั้นดินที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างการก่อสร้าง โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการติดตั้งเครื่องมือทางธรณีเทคนิค (Geotechnical Instrumentation) และการสำรวจภาคสนามตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กั้นดิน ในบทนี้จะมีรายละเอียดที่กล่าวถึงข้อมูลทั่วไปของโครงการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ขั้นตอนงานชุดและวิธีการการแก้ไขปัญหาการก่อสร้างโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กั้นดินด้วยวิธีการผสมลึก(Deep Cement Mixing Method) มีรายละเอียดดังนี้

3.1 การตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

เพื่อให้การออกแบบระบบโครงสร้างกั้นดินมีความเหมาะสม จำเป็นที่จะต้องทราบถึงสภาพของชั้นดิน คุณสมบัติทางวิศวกรรม และการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน เพื่อที่จะได้นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ในการวิเคราะห์กำลัง และเสถียรภาพของระบบโครงสร้างกั้นดินที่จะออกแบบ สามารถตรวจสอบด้วยการเจาะสำรวจสภาพของชั้นดินซึ่งประกอบด้วยการเก็บตัวอย่างดินในสนาม การทดสอบในสนามและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น จากข้อมูลของการเจาะสำรวจดินในงานปรับปรุงคลอง ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของดินสามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ

ก) การหาคุณสมบัติของดินโดยวิธีการทดสอบในสนาม (In-situ Testing)

ข) การหาคุณสมบัติของดินโดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ(Laboratory Testing)

3.1.1 การหาคุณสมบัติของดินโดยวิธีการทดสอบในสนาม (In-situ Testing)

การทดสอบในสนามจะเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถหาคุณสมบัติของดินได้ โดยรายละเอียดของประเภท และวิธีการทดสอบ มีดังนี้

3.1.1.1 การทดสอบแรงเฉือนดินในสนาม (Field Vane Shear Test)

ใช้ในการทดสอบหา Shear Strength Parameter (Undrained Cohesion) ของ Soft ถึง Very Soft Sensitive Clays เป็นส่วนใหญ่ เพราะเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) ได้ยาก บางครั้งพบว่านำไปใช้กับ Stiff Fissured Clays การทดสอบเริ่มด้วยการกดใบมีดสี่แฉก (ความสูงเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) ลงไปในดินและหมุนด้วยอัตราความเร็ว 6 องศาต่อนาที บันทึกมุมที่บิดไปกับแรงที่หมุน หา Torque สูงสุดที่ทำให้ดินพังทลาย ควรทดสอบทุกๆ ช่วง 30 เซนติเมตร

โดยสมมติฐานที่ว่าระนาบการบิดของดินในการทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง D และส่วนสูง H เท่ากับขนาดของเวง Torque จึงเกิดจากความต้านทานมาจากกำลังรับแรงเฉือนของดินบริเวณผิวรอบทรงกระบอก และบริเวณส่วนบน ส่วนล่างของทรงกระบอก ด้วยสมมติฐานดังนี้ ค่า Su สามารถหาได้ดังนี้

$$Su_{FV} = \frac{2 T}{\pi D^3 \left(\frac{H}{D} + \frac{a}{2} \right)} \dots\dots\dots(3.1)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเวง

H คือ ส่วนสูงของเวง

a คือค่าคงที่ที่ซึ่งขึ้นอยู่กับการกระจายของหน่วยแรงเฉือนที่ส่วนบนและส่วนล่างของระนาบบิดเป็นรูปทรงกระบอก

$= \frac{2}{3}$ เมื่อพิจารณาว่าหน่วยแรงเฉือนกระจายสม่ำเสมอ (Uniform)

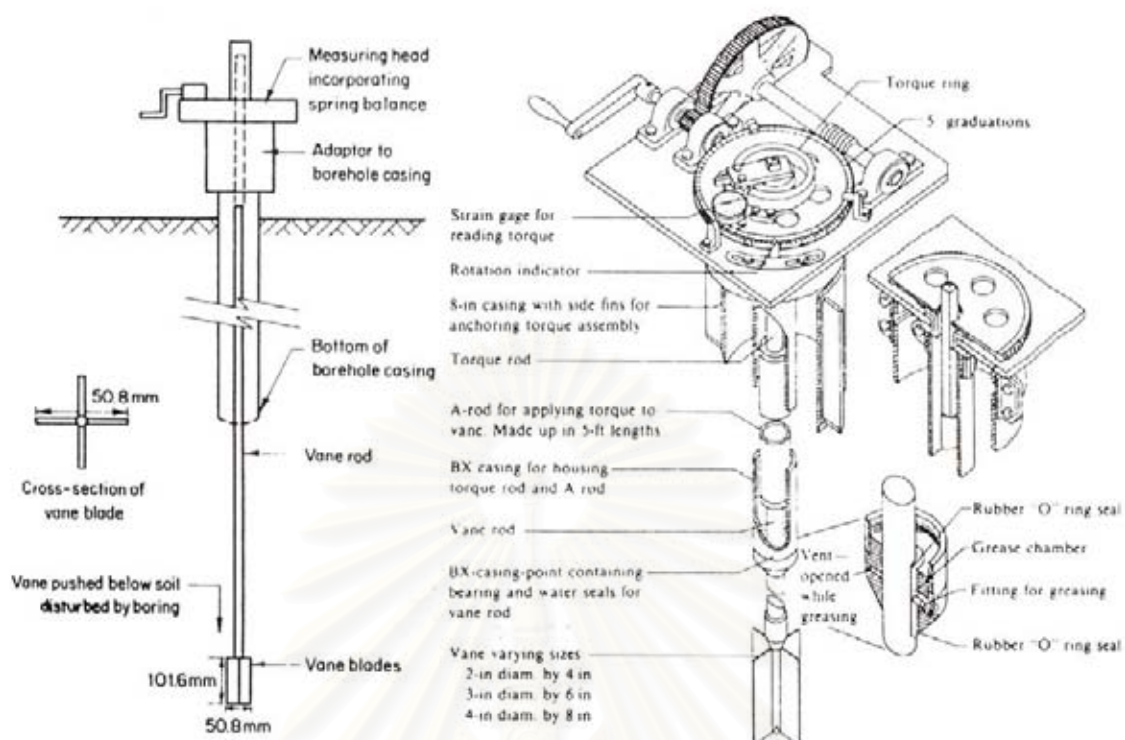
$= \frac{3}{5}$ เมื่อการกระจายเป็นรูปพาราโบลา (Parabola)

$= \frac{1}{2}$ เมื่อการกระจายเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular)

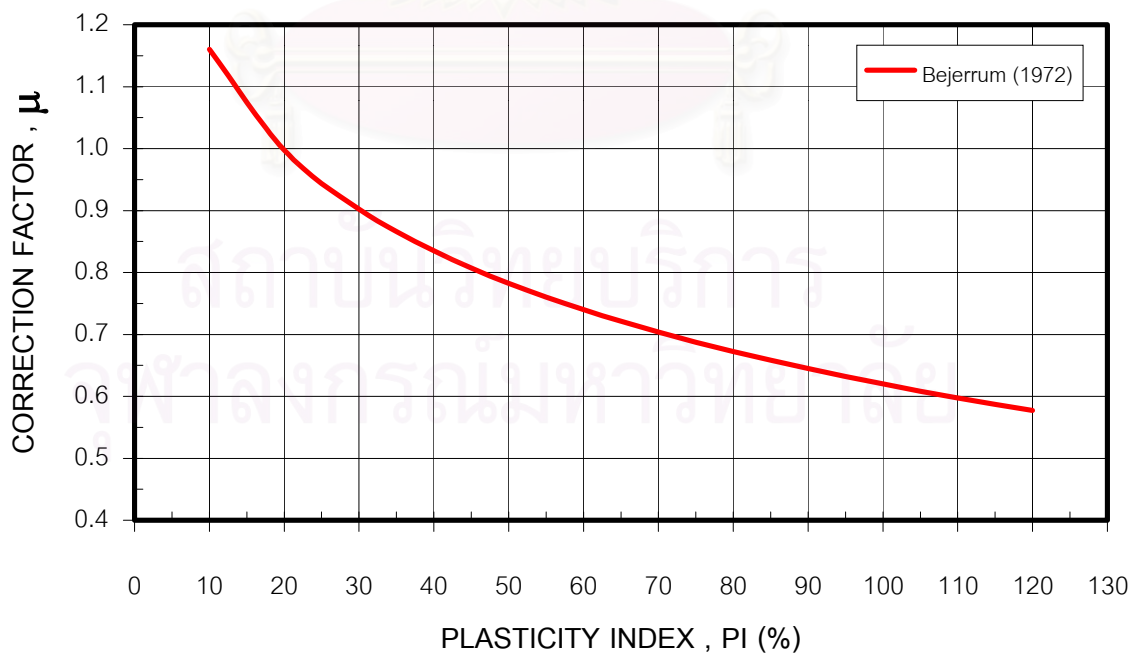
โดยทั่วไปการคำนวณจะใช้ค่า $a = \frac{2}{3}$ และ $\frac{H}{D} = 2$ ค่า $Su = \frac{6 T}{7 \pi D^3}$ และจาก

รูปที่ 3.1 แสดงถึงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ(Field Vane Shear Test)

Su_{FV} เป็นค่าที่ให้ความหมายได้ยาก เพราะระบบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบยุ่งยาก จะไม่เหมือนสภาพความเป็นจริง



รูปที่ 3.1 แสดงถึงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ(Field Vane Shear Test)



รูปที่ 3.2 แสดงค่าตัวคูณปรับแก้ μ สำหรับผลจากการทดสอบไบนเนียน Bjerrum (1972)

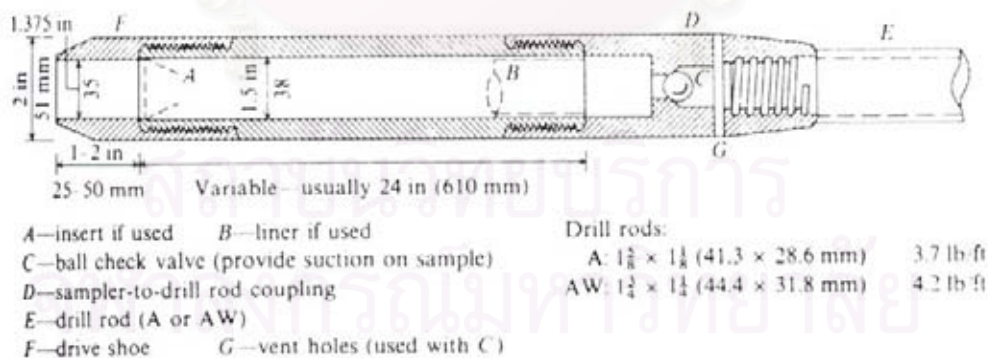
Bjerrum (1972) พบว่าสำหรับดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็งปานกลาง Su_{FV} จะมีค่าที่สูงเกินไปสำหรับดินเหนียวที่มี $PI > 20 \%$ เมื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบปัญหาทางด้านเสถียรภาพของคันดิน Bjerrum ได้เสนอตัวปรับแก้ μ เพื่อใช้กับ Su_{FV} ในการคำนวณเสถียรภาพของดินเหนียว โดย Su สำหรับการวิเคราะห์หาได้จากสมการดังนี้

$$Su = \mu \cdot Su_{FV} \dots\dots\dots(3.2)$$

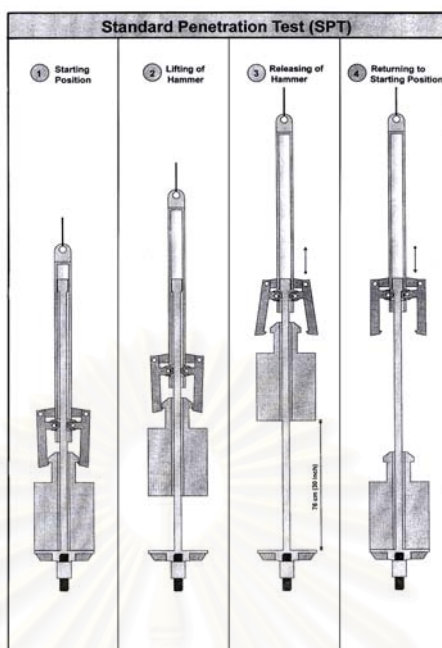
เมื่อ S_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
 S_{uFV} คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ Field Vane
 μ คือ ตัวปรับแก้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.1.1.2 การทดสอบการตอกมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

การทดสอบตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) เป็นการทดสอบที่จะต้องกระทำควบคู่การเจาะสำรวจดิน การทดสอบจะใช้กระบอกผ่ามาตรฐาน Standard Split – Spoon Sample ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.5 นิ้ว แสดงในรูปที่ 3.3 ลูกตุ้มขนาดมาตรฐาน 140 ปอนด์ (63.5 กก.) ตอกกระบอกผ่า ตามมาตรฐานด้วยระยะตก 30 นิ้ว (76 ซม.) จำนวนครั้งที่นับได้เรียกว่า N และขั้นตอนการทดสอบสามารถที่จะแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของ Stand Split – Spoon Sample สำหรับ Standard Penetration Test (SPT)



รูปที่ 3.4 แสดงวิธีการทดสอบการตอกมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

จากผลการทดสอบ SPT จะต้องทำการปรับแก้ก่อนที่จะนำค่าที่ได้ไปใช้ออกแบบ เพราะเนื่องจากผลของ Effective Overburden Pressure (σ'_{VO}) ที่อยู่ในสนามจะทำให้ค่า N_{field} สูงกว่าความเป็นจริง วิธีการปรับแก้ข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบสามารถกระทำได้ดังในสมการที่ 3.3

$$N = C_N N_{field} \dots\dots\dots(3.3)$$

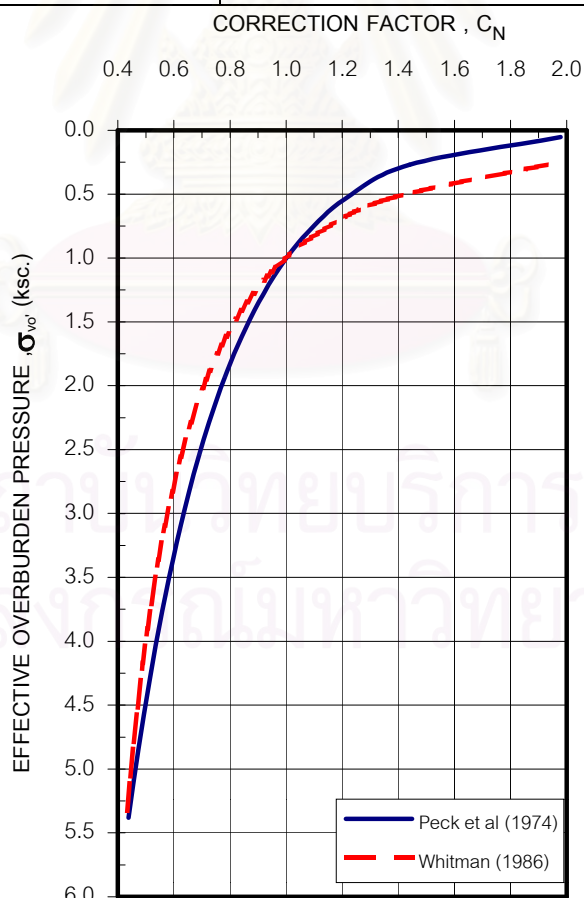
เมื่อ C_N คือ ตัวคูณปรับแก้ค่า SPT (N)
(ตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.5)

N_{field} คือ ค่า N (SPT) จากการทดสอบในสนาม

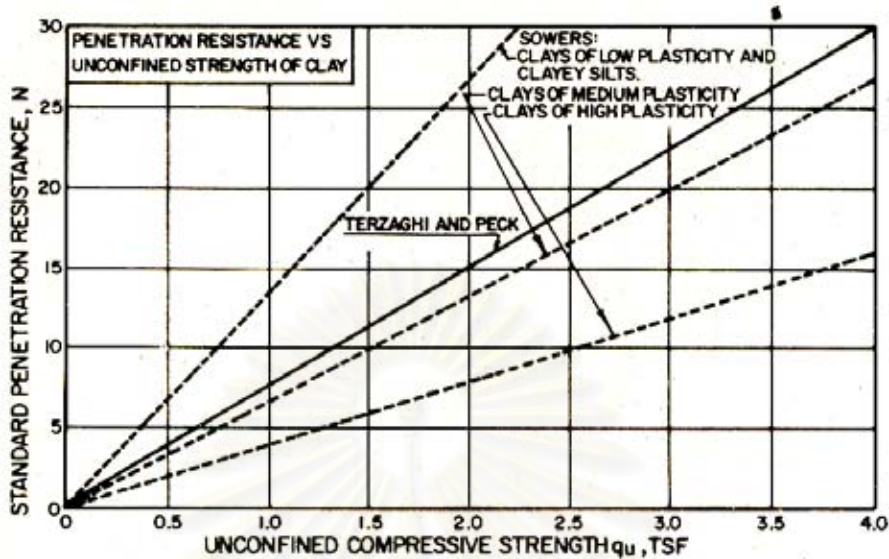
จากการทดสอบ SPT สามารถที่จะแปลงข้อมูลจาก N-Value ที่ได้รับการปรับแก้แล้วเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบจากการทดสอบแบบ Unconfined Compressive Strength (UC) สำหรับดินเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 3.6 หรือสามารถที่จะแปลงเป็นมุมเสียดทาน (ϕ) สำหรับดินเม็ดหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และสามารถนำค่า N ไปจำแนกความแข็ง-อ่อนของดินเหนียว หรือความแน่น-หลวม ของทราย ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 วิธีการปรับแก้ค่า N (SPT) เนื่องจากผลของ Effective Overburden Pressure, σ'_{VO}

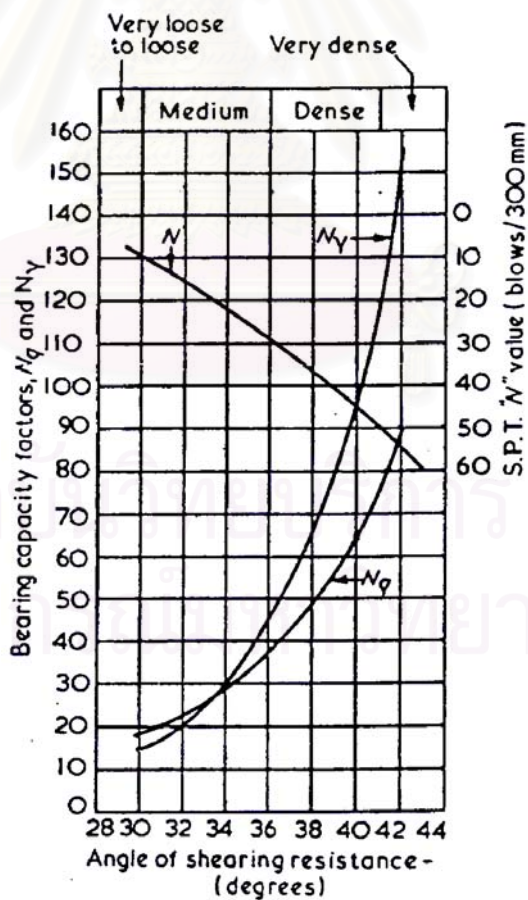
Reference	Correlation, C_N	Unit of σ'_{VO}
Teng (1962)	$C_N = \frac{50}{10 + \bar{\sigma}_v}$	psi.
Bazaraa (1967)	$C_N = \frac{4}{1 + 2\bar{\sigma}_v}, \quad \bar{\sigma}_v \leq 1.5 \text{ ksc.}$ $C_N = \frac{4}{3.25 + 0.5\bar{\sigma}_v}, \quad \bar{\sigma}_v > 1.5 \text{ ksc.}$	ksc.
Peck, Hansen and Thornburn (1974)	$C_N = 0.77 \log \frac{20}{\bar{\sigma}_v}$	tsf.
Tokimatsu and Yoshimi (1983)	$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \bar{\sigma}_v}$	ksc.
Seed (1976)	$C_N = 1 - 1.25 \log \sigma'_v$	tsf.



รูปที่ 3.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ค่า SPT [Simon, N.E. and Menzies, B.K.]



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT (N) กับ กำลังรับแรงเนื่องจากการทดสอบแบบ Unconfine Compressive Strength (UC)



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT (N) กับค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ)

[Simon,N.E. and Menzies,B.K.]

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความแน่นของทราย และความแข็งของดินเหนียว จากผลการทดสอบ ตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test) Peck, Hanson and Thornburn (1974)

ทราย (Sands)		ดินเหนียว (Clays)		
N, Blows / ft.	Relative Density	N, Blows / ft.	ค่าแข็ง-อ่อน	Undrained Shear Strength, t/m. ²
0 - 4	Very Loose	Below 2	Very Soft	0 – 2.5
4 - 10	Loose	2 - 4	Soft	2.5 – 5.0
10 - 30	Medium	4 - 8	Medium	5.0 – 10.0
30 - 50	Dense	8 - 15	Stiff	10.0 – 20.0
Over 50	Very Dense	15 - 30	Very Stiff	20.0 – 40.0
		Over 30	Hard	Over 40.0

3.1.2 การหาสมบัติของดินโดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Testing)

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถหาคุณสมบัติของดินได้ โดยรายละเอียดของประเภท และวิธีการทดสอบ มีดังนี้

3.1.2.1 คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน (Basic Soil Properties)

คุณสมบัติขั้นพื้นฐานจะบอกถึงลักษณะของดิน ชนิดของดิน และปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่จะเกิดขึ้นกับดินชนิดดังกล่าว บางทีมักจะเรียกคุณสมบัติเหล่านี้ว่าดัชนีของคุณสมบัติ (Index Property) จากข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบหาคุณสมบัติของดินดังต่อไปนี้

1. การทดสอบหาปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (Nature Water Content)
2. การทดสอบหาพิสัย Atterberg (Atterberg Limits)
3. การทดสอบหาขนาดของเม็ดดิน (Grain Size Analysis)
4. การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total Unit Weight)

3.1.2.2 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน เป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการออกแบบในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา คุณสมบัติทางด้านนี้ประกอบไปด้วยคุณสมบัติทางการรับน้ำหนักของดินหรือความแข็งแรงของดิน และข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบหาคุณสมบัติของดินดังต่อไปนี้

1. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ถูกจำกัด(Unconfined Compression Test) การทดสอบชนิดนี้เป็นการทดสอบที่ง่าย ตัวอย่างดินจะถูกกลึงเป็นรูปทรงกระบอกมีสัดส่วนระหว่างความสูงของตัวอย่างกับเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 2 ต่อ 1 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 1.4 นิ้ว ตัวอย่างดินจะถูกทดสอบโดยเพิ่มหน่วยแรงรวมในแนวตั้งจนกระทั่งเกิดวิบัติ หน่วยแรงสูงสุดในแนวตั้ง คือ Unconfined Compressive Strength, (q_u) หรือกำลังอัดแบบอิสระ และในกรณีที่ดินอิ่มน้ำด้วยน้ำ เมื่อต้องการใช้หลักการ $\phi = 0$ จะได้กำลังรับแรงเฉือน ดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$S_u = \frac{q_u}{2} \dots\dots\dots(3.4)$$

เมื่อ q_u คือ Unconfined Compressive Strength

2. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำ-ไม่ระบายน้ำ (UnConsolidated Undrained Triaxial Compression Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาความต้านทานแรงเฉือนของมวลดิน โดยวิธีทดสอบแรงอัดสามแกนเป็นวิธีที่มีสภาพของมวลดินตัวอย่างใกล้เคียงดินตามธรรมชาติมากที่สุด โดยกำหนดให้สถานะภาพของดินในการทดสอบเหมือนกับดินตามธรรมชาติที่อยู่ลึกลงไปจากผิวดินที่มีหน่วยแรงของน้ำหนักของมวลดินกระทำโดยรอบ

วิธีทดสอบแรงอัดสามแกนเป็นวิธีทดสอบที่มีความดันรอบข้าง (Confining Pressure) คือ $\sigma_2 = \sigma_3$ ซึ่งเรียกว่า Cell Pressure และหลังจากนั้นจะเพิ่มแรงกดในแนวแกนตั้งด้วยอัตราสม่ำเสมอ มีค่าเท่ากับ $\sigma_1 - \sigma_3$ ซึ่งเรียกว่า Deviator Stress จนกระทั่งถึงจุดที่ตัวอย่างดินพิบัติ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินสามแกนแบบไม่อัดตัวคายน้ำ-ไม่ระบายน้ำ นั้นจะไม่ยอมให้ตัวอย่างดินเกิดการอัดตัวคายน้ำเนื่องจากความดันรอบข้าง และจะไม่ยอมให้ดินระบายน้ำออกขณะทำการเฉือนดินด้วยการเพิ่มหน่วยแรงในแนวแกนตั้งจนกระทั่งดินพิบัติ

ดังนั้นเมื่อทราบค่า σ'_3 (Cell Pressure) และค่า $\sigma'_1 - \sigma'_3$ (Deviator Stress) ก็จะทราบค่า σ'_1 ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นวงกลมของมอร์ และค่าหน่วยแรงเหนี่ยวนำได้ระยะตัดของ

แกนตั้งซึ่งแทนค่าหน่วยแรงเฉือน ส่วนมุมเสียดทานภายในของมวลดินหาได้จากมุมเอียงของเส้น Mohr Enveloped และค่าความต้านทานแรงเฉือนสามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$\tau' = \sigma_n' \tan \phi' + C' \dots\dots\dots(3.5)$$

เมื่อ τ' คือ หน่วยแรงเฉือนประสิทธิผล (Effective Shearing Stress)

σ' คือ หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผล (Effective Normal Stress)

ϕ' คือ มุมเสียดทานภายในแท้จริง

(True Angle of Internal Friction)

C' คือ หน่วยแรงเหนียวแท้แท้จริง (True Cohesion)

3.1.2.3 คุณสมบัติทางการเคลื่อนตัวของดิน

คุณสมบัติทางการเคลื่อนตัวของดินเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดิน หลังจากที่ได้รับหน่วยแรงภายนอกกระทำ เพื่อที่จะทำการตรวจสอบเสถียรภาพของสิ่งก่อสร้าง และจากข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบหาคุณสมบัติของดินดังต่อไปนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation, C_v)
2. โมดูลัสความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Modulus of Elasticity, E_u)

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์

เพื่อให้ระบบโครงสร้างกันดินมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรงดันดินด้านข้างและแรงภายนอกอื่น ๆ ตามที่ออกแบบไว้ จำเป็นที่จะต้องทดสอบคุณสมบัติดินซีเมนต์เพื่อกำหนดอัตราส่วนที่จะใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ออกแบบไว้ และเมื่อก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แล้วเสร็จ ต้องดำเนินการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบอีกครั้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์ วิธีการตรวจสอบสามารถทำได้ด้วยการเจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ในสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น จากข้อมูลของการทดสอบคุณสมบัติดินซีเมนต์และเจาะเก็บแท่งตัวอย่างในงานปรับปรุงคลอง ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์โดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Testing)

3.2.1 การหาสมบัติของดินซีเมนต์โดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Testing)

การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถหาคุณสมบัติของดินได้ โดยรายละเอียดของประเภท และวิธีการทดสอบ มีดังนี้

3.2.1.1 คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินซีเมนต์ (Basic Soil Cement Properties)

จากข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบหาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบหาปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์ (Moisture Water Content)
2. การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total Unit Weight)

3.2.1.2 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินซีเมนต์ เป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการออกแบบอัตราส่วนผสมและคุณภาพของโครงสร้างกันดิน คุณสมบัติทางด้านนี้จะประกอบด้วยคุณสมบัติทางด้านการรับน้ำหนักของดินซีเมนต์หรือความแข็งแรงของดินซีเมนต์ และข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบหาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ดังต่อไปนี้

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ถูกจำกัด(Unconfined Compression Test) การทดสอบชนิดนี้เป็นทดสอบที่ง่าย ตัวอย่างดินจะถูกกลึงเป็นรูปทรงกระบอกมีสัดส่วนระหว่างความสูงของตัวอย่างกับเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 2 ต่อ 1 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 1.4 นิ้วตัวอย่างดินจะถูกทดสอบโดยเพิ่มหน่วยแรงรวมในแนวตั้งจนกระทั่งเกิดวิบัติ หน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่ง คือ Unconfined Compressive Strength, (q_u) หรือกำลังอัดแบบอิสระ และในกรณีที่ดินซีเมนต์อิมตัวด้วยน้ำ เมื่อต้องการใช้หลักการ $\phi = 0$ จะได้กำลังรับแรงเฉือน ดังแสดงในสมการที่ 3.6

$$S_u = \frac{q_u}{2} \dots\dots\dots(3.6)$$

เมื่อ q_u คือ Unconfined Compressive Strength

3.2.1.3 คุณสมบัติทางการเคลื่อนตัวของดินซีเมนต์

คุณสมบัติทางการเคลื่อนตัวของดินซีเมนต์เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องการนำมาทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน เสาดินซีเมนต์หลังจากที่ได้รับหน่วยแรงภายนอกมากระทำ เพื่อที่จะทำการตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้าง และจากข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบหาโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซีเมนต์ในสภาพไม่ระบายน้ำ (Secant Modulus of Elasticity, E_{50})

3.3 เครื่องมือทางเทคนิคครุฑที่ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดิน

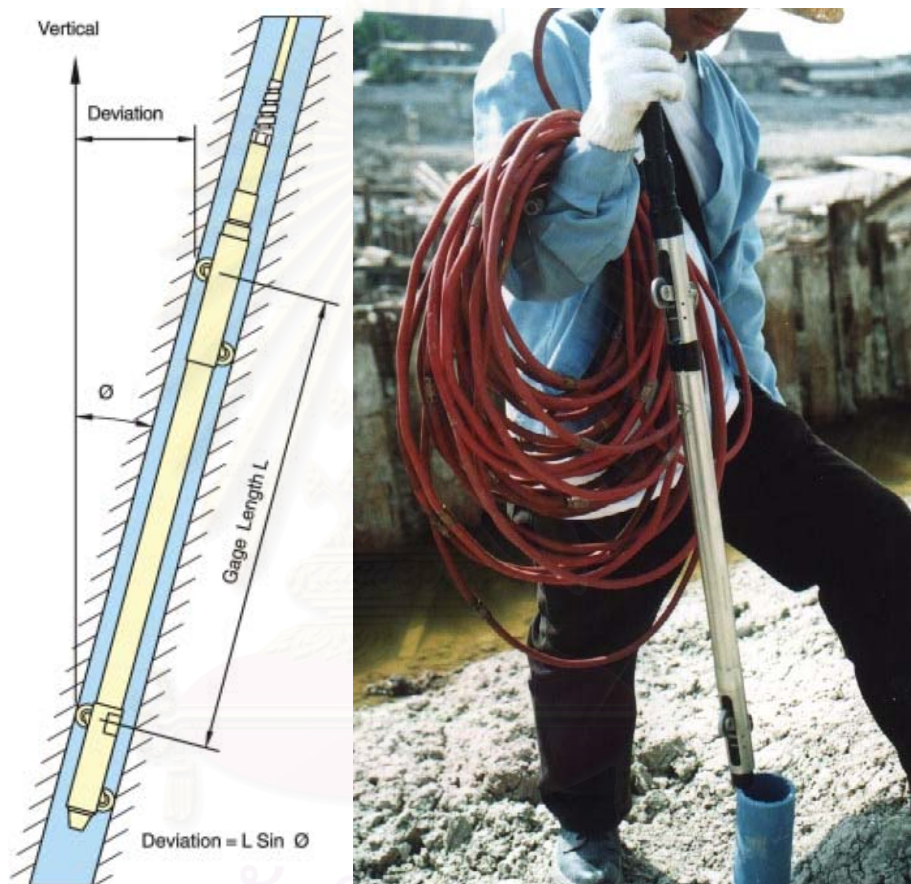
3.3.1 อุปกรณ์

เป็นเครื่องมือทางเทคนิคครุฑที่ใช้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินหรือส่วนของโครงสร้างที่สนใจ ในงานวิจัยนี้เป็นการวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน โดยวัดค่าเป็นมุมที่เอียงไปเพื่อนำมาคำนวณหาระยะที่เคลื่อนตัวไปของโครงสร้าง โครงการนี้เลือกใช้ Inclinometer ของ Encardio-Rite model EAN-20 ประกอบด้วย อุปกรณ์สำคัญ 4 ชิ้น คือ

ก) Tilt Sensing Probe เป็นอุปกรณ์ส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ มีลักษณะเป็นแท่ง Probe ทำด้วยสแตนเลส และติดอยู่กับล้อสปริง 2 คู่สามารถหมุนได้อย่างอิสระด้วยคลัตช์ลูกปืน ความยาวมาตรฐานระหว่างล้อตามแนวแกนเท่ากับ 0.50 เมตร ซึ่งล้อสปริงจะช่วยให้ตำแหน่งของ Probe อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของบ่อวัดทุกความลึก ลักษณะการวัดของ Probe จะประกอบด้วยแรง 2 แรงที่สร้างความสมดุลให้เครื่องมือตรวจจับความเร่ง โดยเครื่องมือตรวจจับความเร่งชุดแรกอยู่ในระนาบแกนล้อ ส่วนอีกชุดหนึ่งตั้งฉากกัน แล้วจะส่งสัญญาณเป็นค่าเบี่ยงเบนแนวราบระหว่าง Probe กับระนาบตั้ง โดยปลายด้านหนึ่งของอุปกรณ์จะติดกับ Interconnecting Cable ที่มีจุดเชื่อมต่อทั้งสิ้น 6 จุด ดังรูปที่ 3.8 และรายละเอียดทางด้านเทคนิคของ Tilt Sensing Probe มีดังนี้

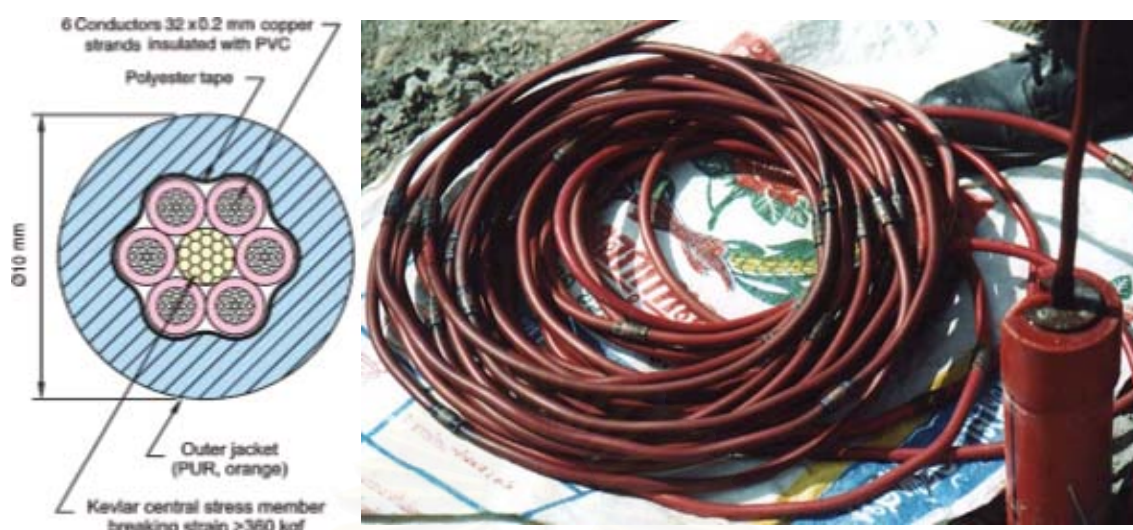
- Sensor	Dual servo accelerometer
- Distance between wheels	500 mm.
- Measuring range	$\pm 30^\circ$ of vertical
- Linearity	$\pm 0.2^\circ$ %fs
- Operating temperature	-5°C to 60°C
- Thermal effect on zero	0.01% fs/ $^\circ\text{C}$

- Span drift 0.015% reading /°C
- Shock resistance 1000 g for 11 ms
- Cross axis sensitivity 0.015% fs/°C
- Probe dimensions ϕ 28.50 mm. x Length 700mm.
- Probe weight 2.0 kg.
- Probe casing Stainless steel



รูปที่ 3.8 Tilt Sensing Probe

ข) Interconnecting Cable เป็นอุปกรณ์ต่อเชื่อม Tilt Sensing Probe กับ Data Logger และเป็นอุปกรณ์ควบคุมความลึกของ Probe ซึ่ง Interconnecting Cable มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 10 มม. ประกอบด้วยตัวนำทองแดงป็นเกลียวหุ้มด้วย PVC จำนวน 6 เส้นและแกนกลางของ Cable เป็นใยสังเคราะห์รับความเครียดดึงสูง (High Tensile Strain Membrane) โดยมีโครงเหล็กเส้นเพื่อให้ความยาวของ Cable คงที่ ส่วนที่ผิวของ Cable จะติดยางสีเพื่อบอกความยาวช่วงละ 0.50 เมตร ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Interconnecting Cable

ค) Access Tube and Fitting เป็นอุปกรณ์ที่อึดคุ้มกันบิบัติตัวทำจากวัสดุ PVC ภายในมีร่องให้ Tilt Sensing Probe สามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งร่องดังกล่าวเรียกว่า Longitudinal Keyway ตำแหน่งของร่องทำมุมกัน 90 องศา ตามแกนเครื่องมือวัดความเร่งของ Tilt Sensing Probe โดยแกนดังกล่าวเรียกว่าแกน A และ B สำหรับท่อที่ใช้ในโครงการนี้เป็นท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75.50 มม.(ภายนอก) 65.00 มม.(ภายใน)และความยาวท่อนละ 6.00 ม. ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 Access Tube and Fitting

ง) Data Logger เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณของ Tilt Sensing Probe ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าเบี่ยงเบนสะสม (Cumulative Horizontal Deviation) หรือ $L \sin \phi$ เมื่อ ϕ เป็นค่า Deviation Angle และ L เป็นความยาวของช่วงล่อ Tilt Sensing Probe ดังรูปที่ 3.11 และรายละเอียดทางด้านเทคนิคของ Data Logger มีดังนี้

- Display	LCD	
- Battery	Nickel Cadmium	
- Resolution	0.0001m, 0.0001 $\sin\phi$ or 0.00001 $\sin\phi$	
- Range	± 0.50	m.
- Temperature range	-10°C to 60	°C
- Processor	Hitachi HD 6303Y	
- System ROM	128K	bytes
- User RAM	64K	bytes
- Communication	75 to 2400 Baud	RS232C
- I/O port	7 pin	RS232C
- Size	215x225x60	mm
- Weight	2.20	kg.



รูปที่ 3.11 Data Logger

3.3.2 การตรวจวัดและแปลผล

ค่าที่แสดงออกมาทาง Data Logger จะเป็นค่าในเทอมของมุมเอียง ในรูป $\text{Constant} \times \sin \theta$ ซึ่งโดยปกติค่า Constant จะเท่ากับ 25000 ดังนั้นค่าที่อ่านได้จาก Data Logger จะเท่ากับ $25000 \times \sin \theta$ การตรวจวัดการเคลื่อนตัวแสดงดังรูปที่ 3.12

การอ่านค่าจะกระทำที่ระดับเดิมอีกครั้งหนึ่ง โดยกลับทิศทางของ Tilt Sensing Probe เป็นมุม 180° เพื่อลดความผิดพลาดจากความไม่เรียบของร่องในท่อ และเป็นการตรวจสอบความผิดพลาดของค่าที่อ่านได้ ในการบันทึกค่าจะบันทึกเป็น A0 และ A180

$$\text{Diff} = \text{Reading A0} - \text{Reading A180} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\text{Change} = \text{Current Diff} - \text{Initial Diff} \dots\dots\dots (3.8)$$

สามารถแสดงในรูปการเคลื่อนที่ตัวดังนี้

$$\text{Reading} = 2.5 \sin \theta \times 10000 \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\text{Diff} = 5 \sin \theta \times 10000 \dots\dots\dots (3.10)$$

จะได้ว่า $\text{Change} = 5 \sin \theta_c \times 10000 \dots\dots\dots (3.11)$

$$\sin \theta_c = \frac{\text{Change}}{50000} \dots\dots\dots (3.12)$$

โดย θ_c คือ ค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงในช่วงความลึกที่วัด

การเพิ่มของความลึกจะคงที่ คือ $L = 0.50$ เมตร ดังนั้นการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในช่วง L ดังสมการที่ 3.13

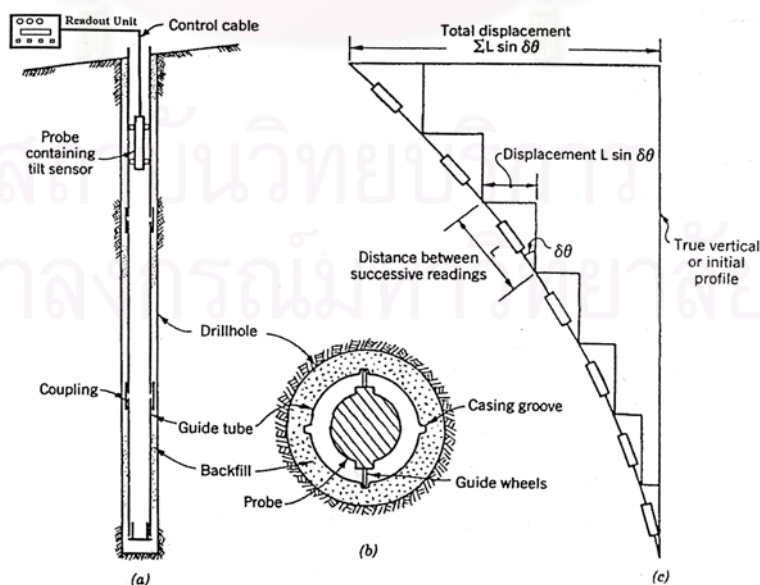
$$\text{Inclinometer Deflection} = L \sin \theta_c \dots\dots\dots (3.13)$$

จะได้ว่า $\text{Inclinometer Deflection} = L \frac{\text{Change}}{50000} \dots\dots\dots (3.14)$

แทนค่า $L = 500 \text{ mm}$.

จะได้ $\text{Inclinometer Deflection} = 0.01 \times \text{Change} \dots\dots\dots (3.15)$

$$\text{การโก่งตัวที่เกิดขึ้น (mm)} = 0.01(\text{SUM of Change}) \dots\dots\dots (3.16)$$



รูปที่ 3.12 แสดงการวัดการเคลื่อนที่ด้วย Inclinometer

3.4 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาหินซีเมนต์

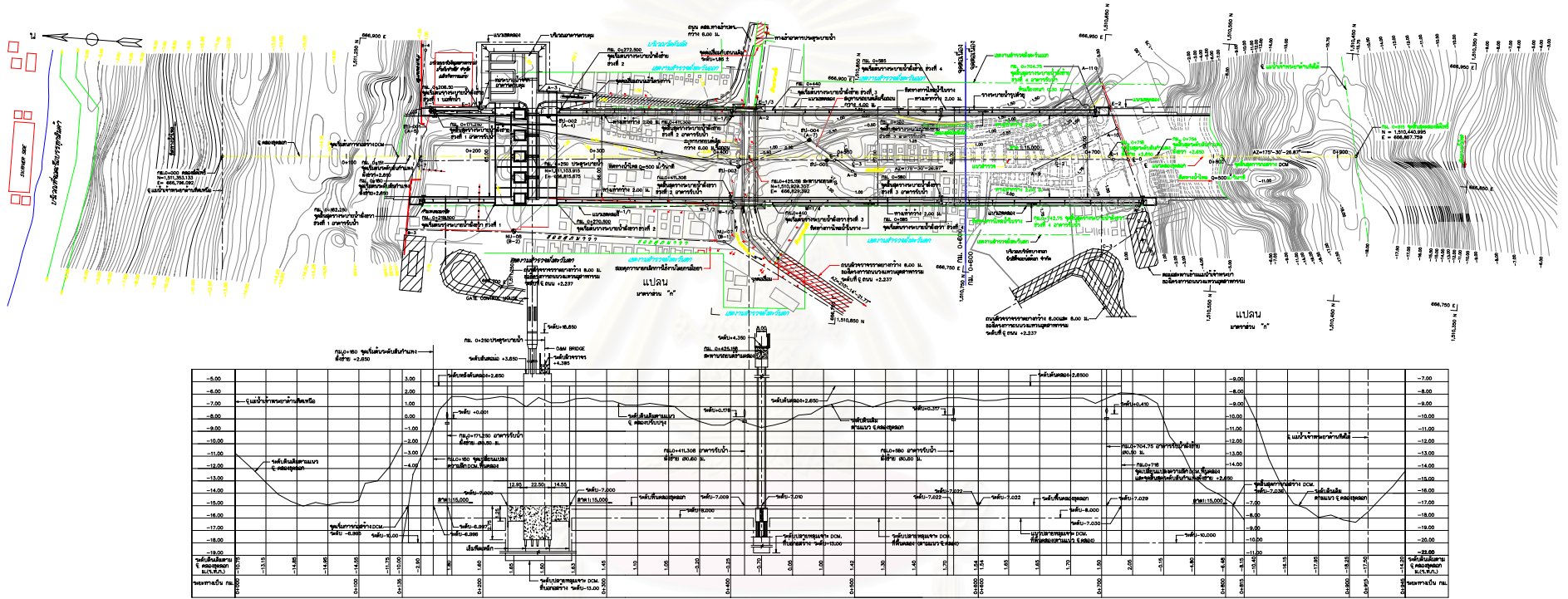
ข้อมูลทั่วไปสำหรับงานการวิจัยเป็นข้อมูลที่ได้จากโครงการหนึ่งใน อำเภอ พระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เป็นโครงการปรับปรุงขุดลอกคลองและก่อสร้างประตูระบายน้ำ เพื่อระบายน้ำบรรเทาอุทกภัยในฤดูน้ำหลากของแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณตอนบนของพื้นที่ บางกระเจ้า สาเหตุที่ใช้ระบบการก่อสร้างโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาหินซีเมนต์เป็นระบบ โครงสร้างถาวรในงานคลองระบายน้ำ และโครงสร้างชั่วคราวขณะก่อสร้างประตูระบายน้ำ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับงานขุดที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ไม่ต้องการระบบค้ำยันในงาน โครงสร้างกันดิน และระบบควบคุมระดับน้ำภายในงานขุดพื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินที่สูง นอกจากนี้ยังมีราคาค่าก่อสร้างถูกกว่างานขุดค้ำยันด้วยเข็มพืดเหล็กประมาณ 30% (Yong Shao et al.,1998) ซึ่งสอดคล้องกับ Nord(1990) และ Ouacha(1993) สรุปการเปรียบเทียบกันดินรองรับด้วยเสาหินซีเมนต์ราคาเป็น $\frac{1}{3}$ ของกันดินรองรับด้วยเสาเข็ม และ Holm (1979) รายงานว่าสามารถลดราคาค่าก่อสร้างได้ประมาณ 30% รายละเอียดลักษณะโครงการมีดังนี้

3.4.1 สถานที่ตั้งโครงการ

ต.ทรงคนอง อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ ดังรูปที่ 3.13 แสดงที่ตั้งโครงการ รูปที่ 3.14 แสดงแปลนที่ตั้งโครงการ



รูปที่ 3.13 แสดงที่ตั้งโครงการ



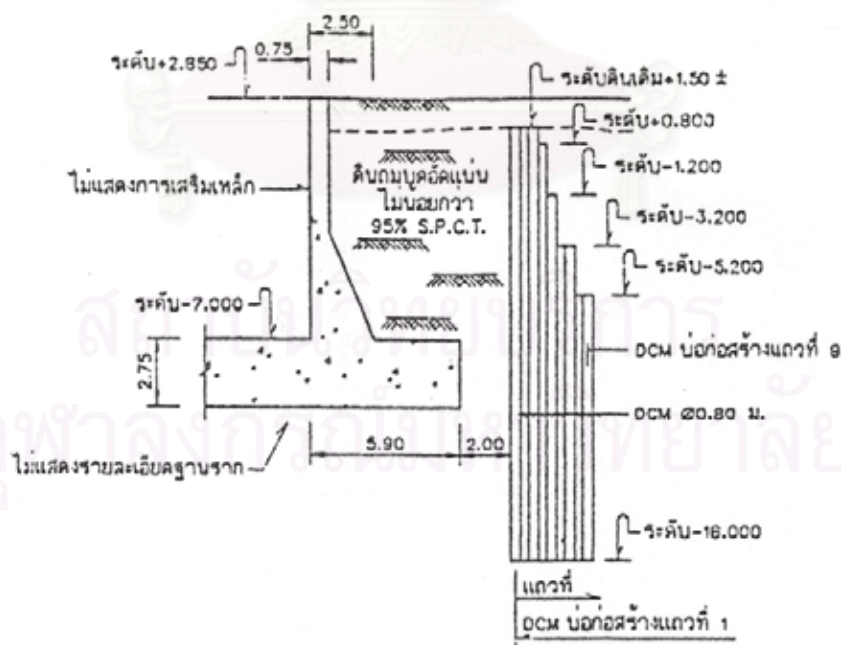
สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 รูปที่ 3.14 แสดงแปลนที่ตั้งโครงการ

3.4.2 รายละเอียดของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์ก้นดิน

ในงานชุดเพื่อก่อสร้างประตูละบายน้ำและคลอง ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จำเป็นที่จะต้องมึระบบกันดินเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวและการพังทลายของมวลดินโดยรอบ โครง การที่เข้าไปทำการวิจัยใช้ระบบโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ทั้งหมด แต่สามารถ แบ่งออกเป็น 2 บริเวณตามลักษณะของการใช้งาน คือ ส่วนของประตูละบายน้ำใช้โครงสร้างกัน ดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์เป็นโครงสร้างชั่วคราว ส่วนของคลองใช้โครงสร้างกันดินก่อสร้าง ด้วยเสาเข็มซีเมนต์เป็นโครงสร้างถาวร รายละเอียดของโครงสร้างกันดินแต่ละบริเวณแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17

3.4.2.1 โครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์ ก้นดินชั่วคราว

ด้วย Deep Cement Mixing Method (DCM) เป็นโครงสร้างกันดิน ชั่วคราว ความกว้าง 6.344 เมตร ความสูง 11.25 เมตร ฝังลึกในดิน 6.25 เมตร ประกอบด้วย เสาเข็มซีเมนต์ 9 แถว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มซีเมนต์แต่ละต้น 0.80 เมตร ระดับและ ความยาวของเสาเข็มซีเมนต์แสดงในตารางที่ 3.3 การติดตั้งเสาเข็มซีเมนต์และตำแหน่งของเสาเข็ม ซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดินแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างกันดินส่วนประตูละบายน้ำ

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของเสาหินซีเมนต์ ส่วนประกอบของโครงสร้างกันดินชั่วคราว

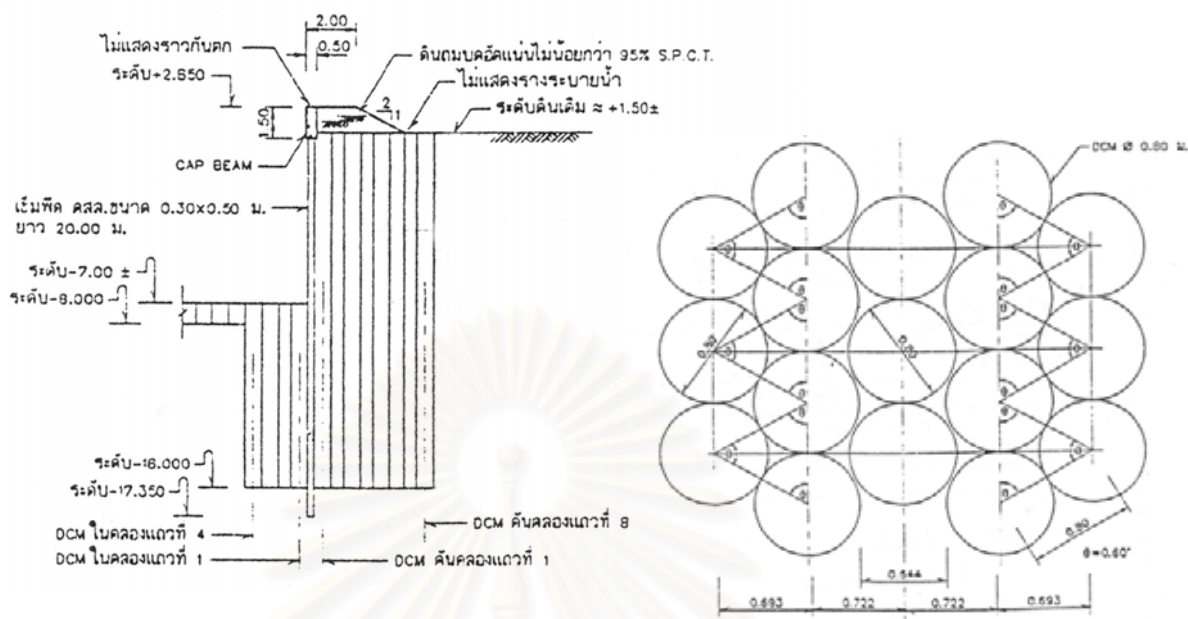
สัญลักษณ์	ระดับปลายบน DCM (ม.รทก.)	ระดับปลายล่าง DCM (ม.รทก.)	ความยาว DCM (เมตร)
1	ที่ระดับ +1.500	-16.000	17.50
8	ที่ระดับ +1.500	-16.000	17.50
9	+0.800	-16.000	16.80
10	-1.200	-16.000	14.80
11	-3.200	-16.000	12.80
12	-5.200	-16.000	11.80

3.4.2.2 โครงสร้างเสาหินซีเมนต์ กันดินถาวร

ด้วย Deep Cement Mixing Method (DCM) เป็นโครงสร้างกันดินถาวร ความกว้าง 5.60 เมตร ความสูง 8.50 เมตร ฝังลึกในดิน 9.00 เมตร ประกอบด้วยเสาหินซีเมนต์ 8 แถว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาหินซีเมนต์แต่ละต้น 0.80 เมตร ระดับและความยาวของเสาหินซีเมนต์แสดงในตารางที่ 3.4 การติดตั้งเสาหินซีเมนต์และตำแหน่งของเสาหินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดินแสดงในรูปที่ 3.18 และตอกเข็มพืด คอร. ขนาด 0.30x0.50x20.00 เมตรเป็นแนวกำแพงเพื่อให้เรียบและมีความสวยงาม

ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของเสาหินซีเมนต์ ส่วนประกอบของโครงสร้างกันดินถาวร

สัญลักษณ์	ระดับปลายบน DCM (ม.รทก.)	ระดับปลายล่าง DCM (ม.รทก.)	ความยาว DCM (เมตร)
DCM ที่โครงสร้างกันดิน 1	+1.500	-16.000	17.00
DCM ที่พื้นคลอง	พื้นคลอง		
4	ที่ระดับ -7.000	-16.000	9.00
5	ที่ระดับ -7.000	-8.000	1.00

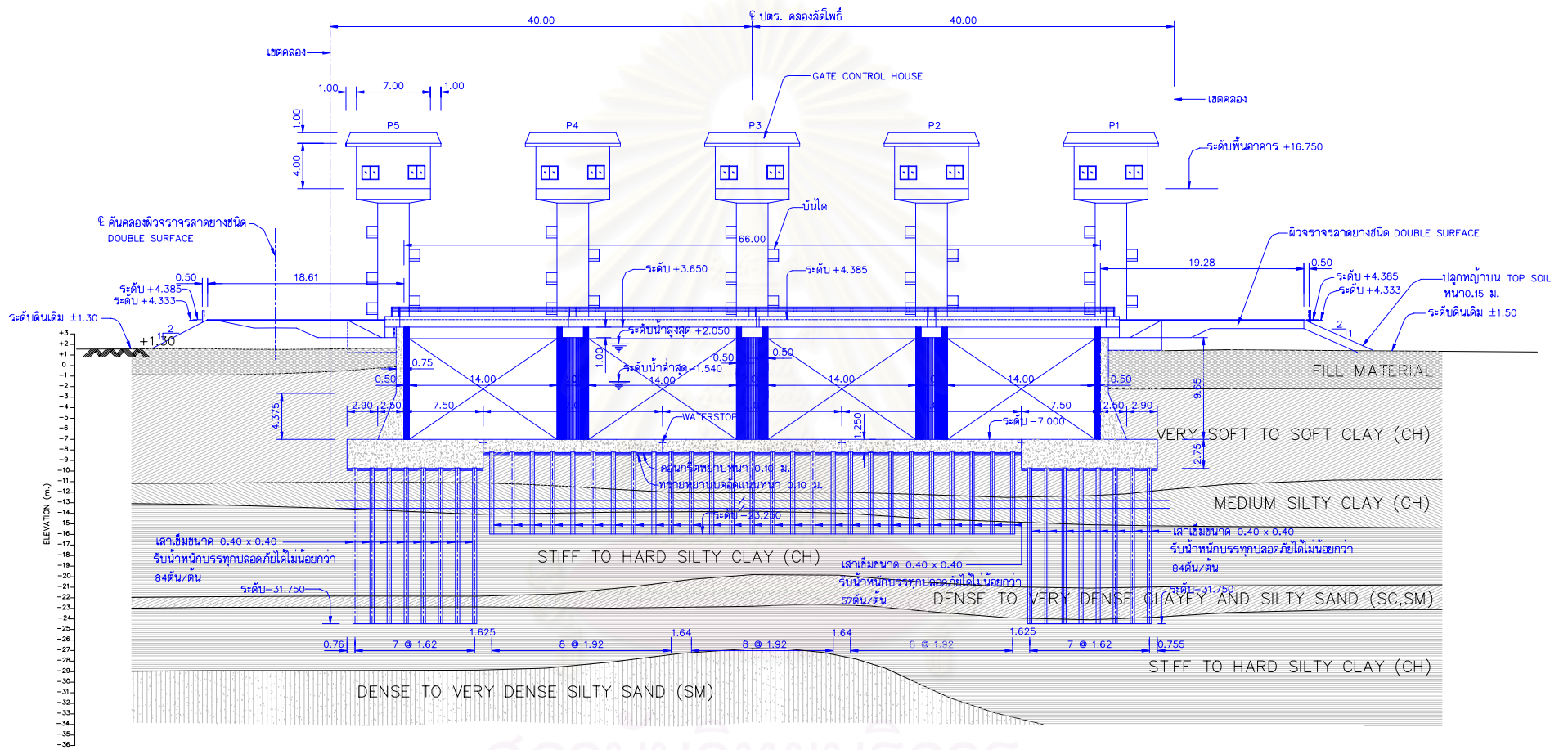


รูปที่ 3.18 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างกันดินถาวร

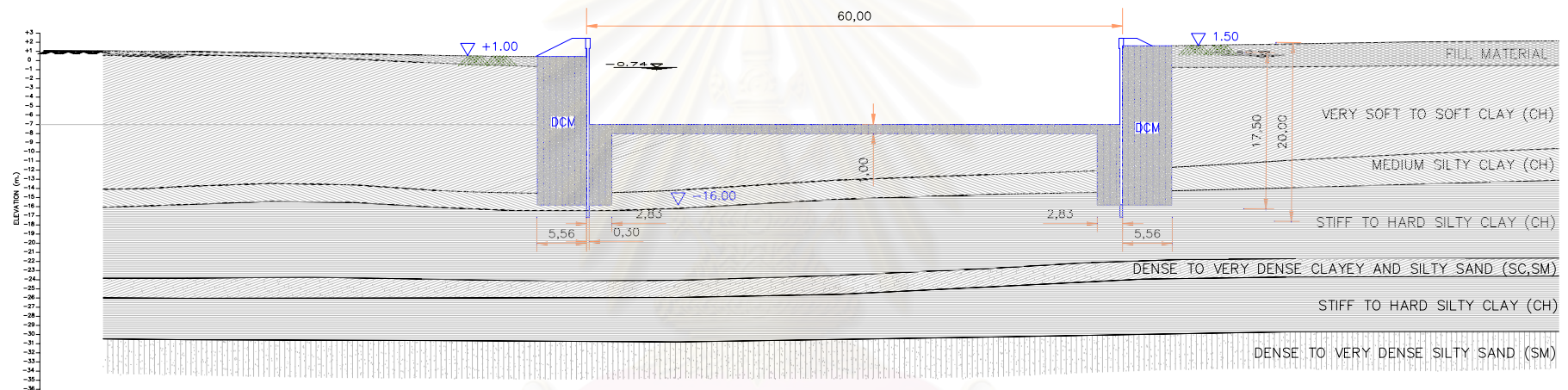
3.4.3 ลักษณะของโครงสร้างของประตูระบายน้ำและคลอง

3.4.3.1 งานประตูระบายน้ำ แสดงในรูปที่ 3.19 ประกอบด้วย

- | | | |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------|
| - ประเภทอาคาร | คอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่ | |
| - ระดับธรณีประตู | -7.00 | ม.รทก. |
| - ความยาวอาคาร | 48.40 | เมตร |
| - ฐานราก | เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง | |
| - สะพานคอนกรีต | กว้าง | 6.00 เมตร |
| | ยาว | 67.00 เมตร |
| - ชนิดของบานระบาย | Fixed Wheel Gate | |
| - บานประตูระบายน้ำ | กว้าง | 14.00 เมตร |
| | สูง | 9.55 เมตร |
| | จำนวน | 4.00 บาน |
| - อัตราการระบายน้ำ (ออกแบบ) | 500 | ลบ.ม./วินาที |



รูปที่ 3.19 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างประตูระบายน้ำ



รูปที่ 3.20 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดโครงสร้างคลองปรับปรุง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

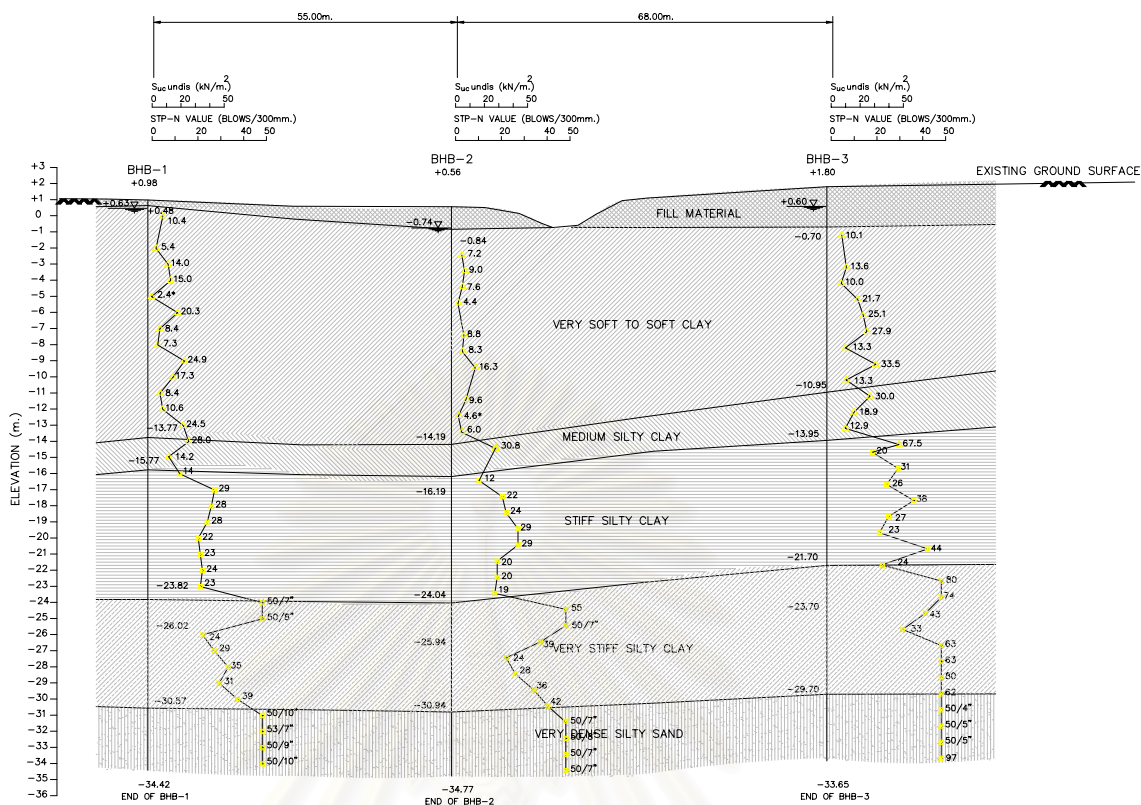
3.4.3.2 การปรับปรุงคลอง รูปตัดทั่วไปคลองปรับปรุงแสดงไว้ในรูปที่

3.20 รูปตัดขวางแสดงรายละเอียดคลองและคันคลอง ประกอบด้วย

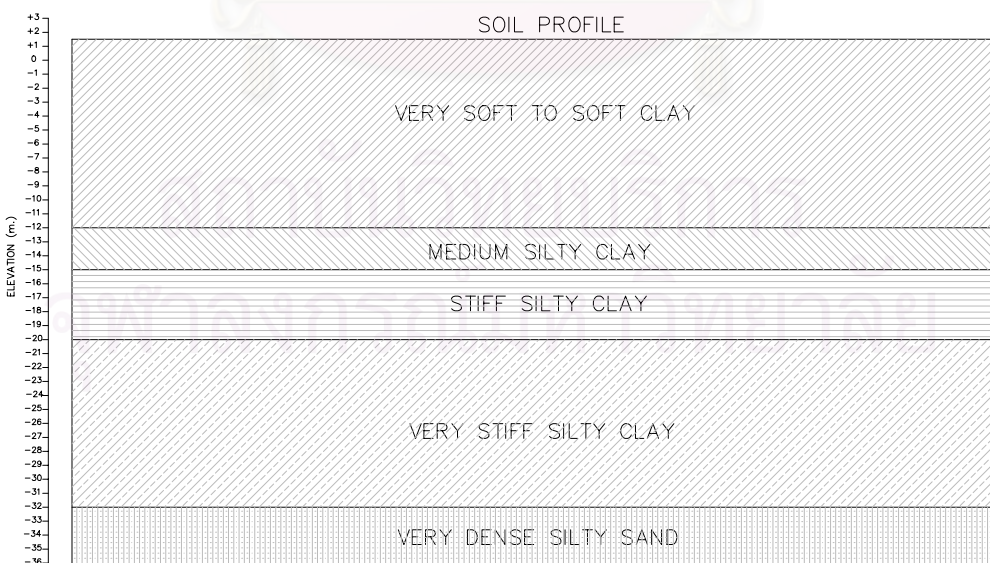
- เขตคลองกว้าง	80	เมตร
- ความยาวคลองปรับปรุง	600	เมตร
- ความกว้างคลองด้านเหนือน้ำ	65	เมตร
- ความกว้างคลองด้านท้ายน้ำ	66	เมตร
- ระดับท้องคลอง	-7.00	ม.รทก.
- ระดับถนนหลังคันคลอง	+2.65	ม.รทก.
- สะพานถนนข้ามคลอง แบบ Prestress girder Type		
	ยาว	80.00 เมตร
	กว้าง	8.00 เมตร
	ทางเท้ากว้าง	1.50 เมตร

3.4.4 ลักษณะของชั้นดินและข้อมูลการสำรวจดิน

ลักษณะของชั้นดินตลอดแนวงานปรับปรุงคลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก (Soft to Very Soft Clay) มีความหนาของชั้นดินประมาณ 8.25 ถึง 15.05 เมตร มีค่ากำลังรับแรงเฉือนประมาณ 0.80 ตัน/ตารางเมตร ชั้นต่อไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) มีความหนาของชั้นดินประมาณ 3.00 เมตร และมีค่ากำลังรับแรงเฉือน 2.50 ตัน/ตารางเมตร ชั้นถัดไปคือชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Silty Clay) มีความหนาของชั้นดินประมาณ 5 เมตร และมีค่า SPT – N Value ประมาณ 18 ครั้ง/ฟุต ชั้นที่ลึกลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Very Stiff Silty Clay) มีความหนาของชั้นดินประมาณ 12 ถึง 13.75 เมตร และมีค่า SPT – N Value ประมาณ 25 ครั้ง/ฟุต ในชั้นสุดท้ายที่ทำการสำรวจเป็นชั้นทรายปนทรายแข็งแน่นมาก (Very Dense Silty Sand) ความหนามากกว่า 1.80 เมตร พบที่ระดับความลึกตั้งแต่ - 30.00 ม.รทก. และมีค่า SPT – N Value ประมาณ 34-97 ครั้ง/ฟุต จากข้อมูลชั้นดินที่กล่าวมาสามารถแสดงชั้นดินโดยสังเขป ดังรูปที่ 3.22



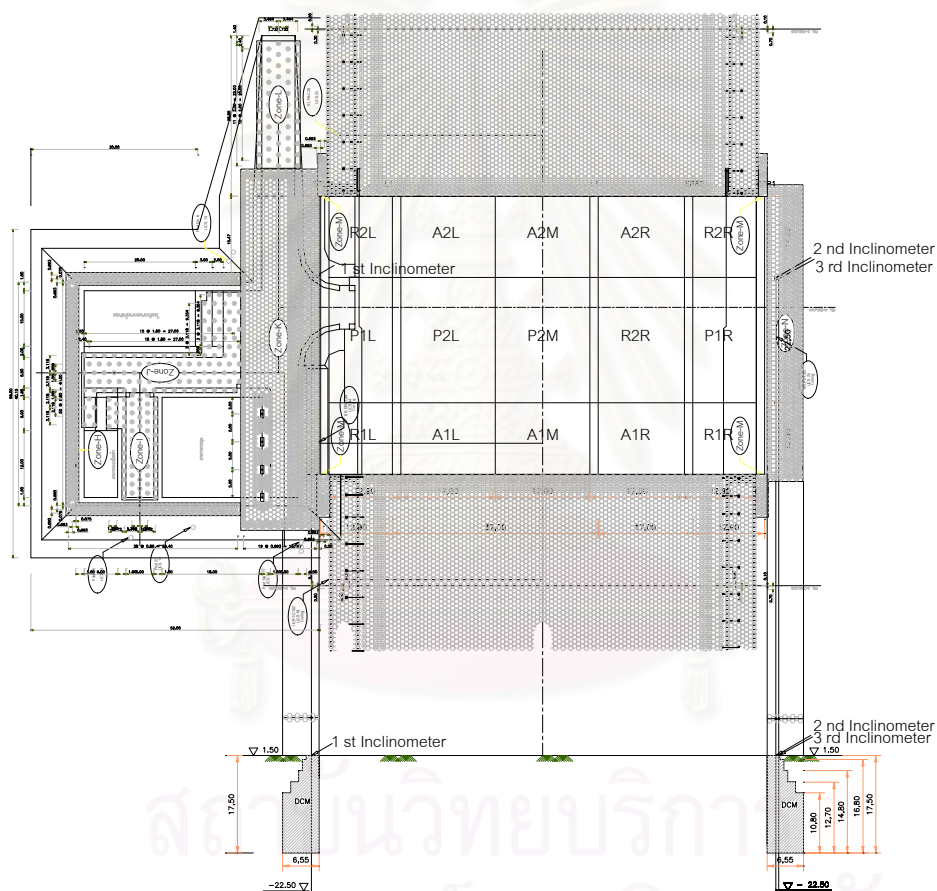
รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะชั้นดินของคลองส่งน้ำ



รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะชั้นดินโดยสังเขป

3.4.5 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือ

การติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินขณะก่อสร้างจนกระทั่งดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยติดตั้ง Inclinomater ทั้งหมด 3 ตำแหน่งในบริเวณโครงสร้างกันดินของประตูระบายน้ำ ซึ่งการติดตั้งแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ โครงสร้างกันดินของประตูระบายน้ำฝั่งซ้าย 1 ชุด และโครงสร้างกันดินของประตูระบายน้ำฝั่งขวา 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงตำแหน่ง Inclinomater

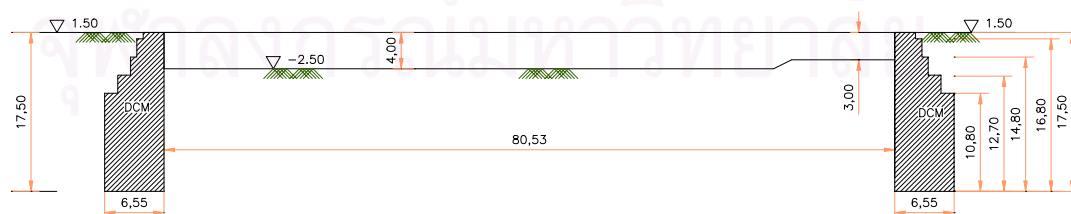
3.5 ขั้นตอนการขุดและวิธีการแก้ไขปัญหาค่อสร้างโครงสร้างกันดิน

โครงการที่ทำวิจัยแห่งนี้เป็นโครงการก่อสร้างคลองและประตูระบายน้ำโดยทำการขุดดิน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนประตูระบายน้ำและส่วนปรับปรุงคลองด้วยการขุดเปิดดินมีระดับความลึก 8 – 11.5 เมตร โครงสร้างกันดินออกแบบและก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ด้วยวิธี Deep Cement Mixing(DCM) โดยการออกแบบได้กำหนดให้โครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ ก่อสร้างด้วยวิธี DCM นี้เป็นทั้งโครงสร้างกันดินชั่วคราว และโครงสร้างกันดินถาวรเพื่อขุดดินในแนวค้ำ (Vertical Cantilever Excavation) โดยไม่มีระบบค้ำยัน แต่ระหว่างดำเนินการขุดเปิดในแนวค้ำความลึกประมาณ 4 เมตร เพื่อเตรียมงานตอกเสาเข็มประตูระบายน้ำเกิดการเคลื่อนตัวของกำแพง DCM มากจนกระทั่งกำแพงแฉกแรกหักพัง และเกิดรอยแตกกว้างเป็นแนวด้านหลังเป็นแนวขนาดความกว้างเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มซีเมนต์

ดังนั้นวิธีการและขั้นตอนการก่อสร้างจึงถูกปรับปรุงและแก้ไขเพื่อป้องกันการพังทลายของระบบโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน ทั้งบริเวณประตูระบายน้ำและคลองปรับปรุง ซึ่งมีขั้นตอนการขุดและวิธีการแก้ไขปัญหามุ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยสังเขปดังนี้

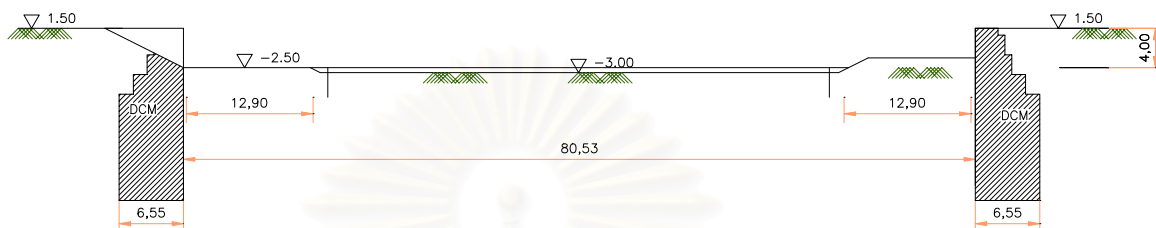
3.5.1 ขั้นตอนการขุดและวิธีการแก้ไขปัญหาค่อสร้างกันดินชั่วคราว ส่วนประตูระบายน้ำ มีขั้นตอน 7 ขั้นตอน ดังแสดงในรูป 3.24 ถึง 3.30 คือ

ก) ขั้นตอนที่ 1 หลังจากก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ของโครงสร้างกันดินเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการขุดดินในแนวค้ำ (Vertical Cantilever Excavation) จากระดับ +1.50 ม.รทก. ไปยังระดับ -2.50 ม.รทก. ความลึกของงานขุด 4.00 ม. จนกระทั่งเกิดการพังของเสาเข็มซีเมนต์แฉกแรก จึงหยุดการขุดเปิดด้วยวิธีการดังกล่าว ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.31



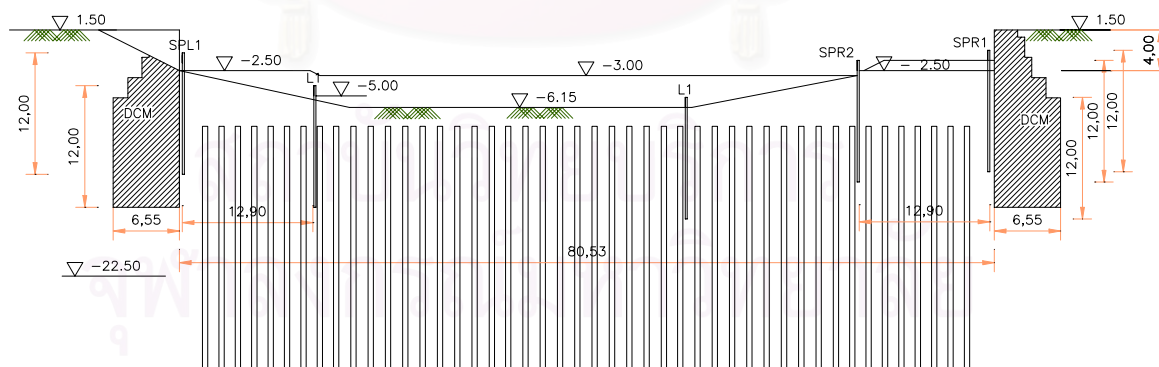
รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการขุดดินในแนวค้ำ

ข) ขั้นตอนที่ 2 เกิดการพังของเสาหินซีเมนต์จึงต้องดำเนินการตัดเสาหินซีเมนต์ส่วนบนของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย และขุดดินต่อไปยังระดับ -3.00 ม.รทก. ความลึกของงานขุด 4.50 ม.เพื่อตอกเสาเข็มของประตูระบายน้ำ ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.32



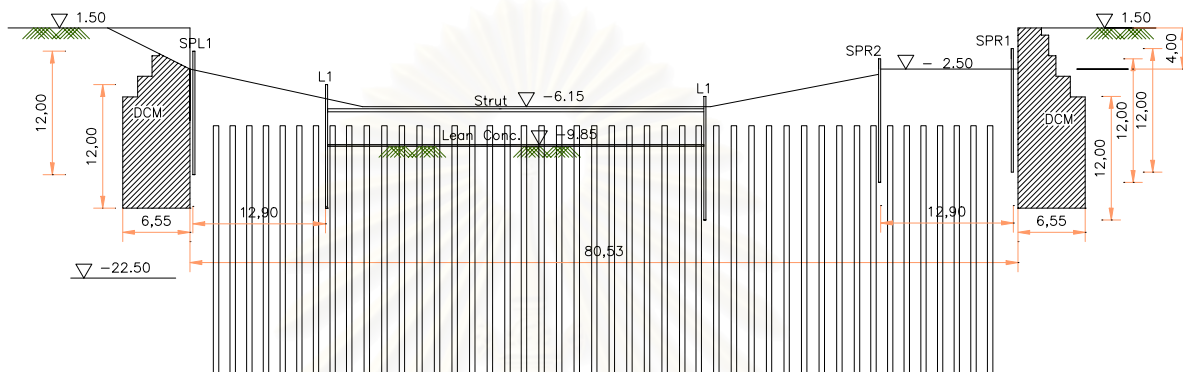
รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการแก้ไขปัญหาการเคลื่อนตัว

ค) ขั้นตอนที่ 3 เมื่อดำเนินการตอกเสาเข็มส่วนประตูระบายน้ำเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงขุดเปิดดินเพื่อก่อสร้างพื้น P2L และ P2M โดยขุดดินจากระดับ -3.00 ม.รทก. ไปยังระดับ -6.15 ม.รทก. ความลึกของงานขุดรวม 7.65 ม. ซึ่งเป็นการเปิดโดยใช้เข็มพืดเหล็กเข้าช่วยลดการเคลื่อนตัว จำนวน 5 ชุด พร้อมทั้งเกิดการวิบัติของเสาหินซีเมนต์ในส่วนของโครงสร้างกันดินฝั่งขวาแถวที่ 1 และ 2 ดำเนินการติดตั้ง Inclinometer ชุดที่ 1 ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.33



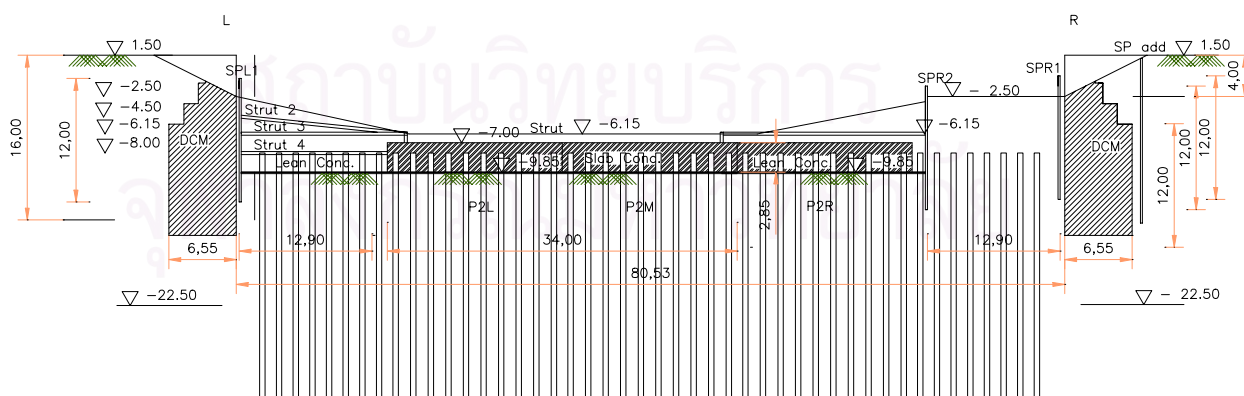
รูปที่ 3.26 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับพื้น P2L และ P2M โดยใช้เข็มพืดเหล็ก

ง) ขั้นตอนที่ 4 ขุดดินไปยังระดับท้องพื้นจาก -6.15 ม.รทก. ถึง -10.00 ม.รทก. ความลึกของงานขุดรวม 11.50 ม. การขุดในขั้นตอนนี้เป็นการขุดด้วยระบบค้ำยันเมื่อถึงระดับท้องพื้น ดำเนินการเทคอนกรีตหยาบ (Lean Concrete) ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน ดังรูปที่ 3.34



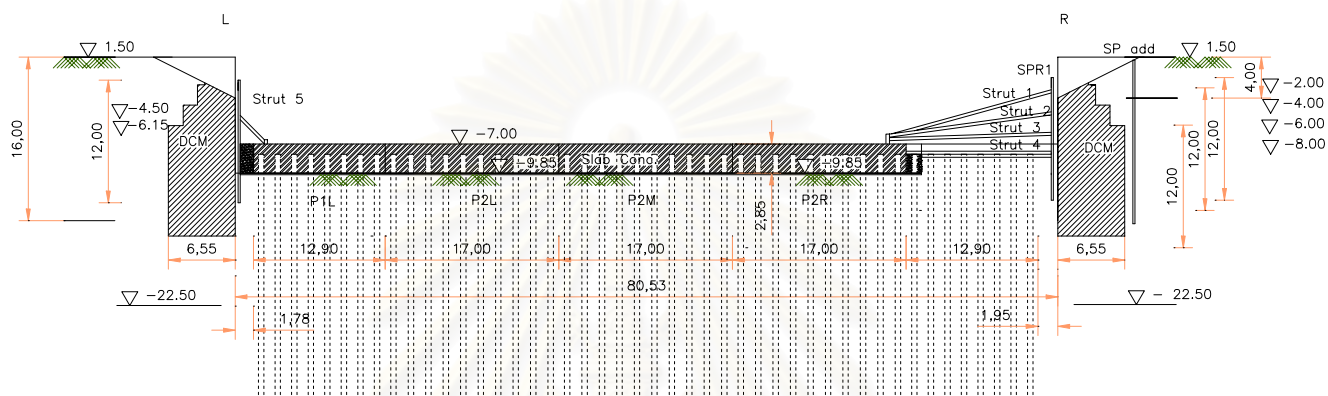
รูปที่ 3.27 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับท้องพื้น P2L และ P2M ด้วยระบบค้ำยัน

จ) ขั้นตอนที่ 5 เทพื้นคอนกรีต P2L, P2M และ P2R เสร็จแล้วดำเนินการขุดเปิดดิน P1L โดยใช้ระบบค้ำยันแบบ Raker 4 ระดับ เนื่องจากพื้นที่งานขุดมีขนาดใหญ่ เมื่อถึงระดับท้องพื้น P1L เทคอนกรีตหยาบ (Lean Concrete) การติดตั้ง Inclinometer 2 และ 3 ติดตั้งหลังจากดำเนินการขั้นตอนที่ 4 ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.35



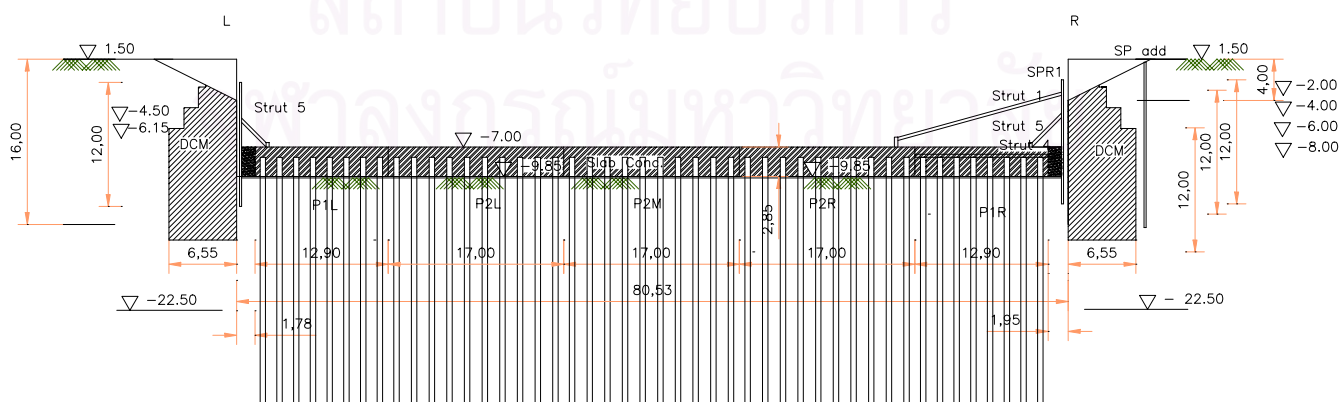
รูปที่ 3.28 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับท้องพื้น P1L ด้วยระบบค้ำยันแบบ Raker

จ) ขั้นตอนที่ 6 เทพื้นคอนกรีต P1L เสร็จแล้วเปลี่ยนตำแหน่งค้ำยันเพื่อให้สามารถดำเนินงานในส่วนของโครงสร้างได้ จากนั้นเริ่มขุดเปิดดิน P1R โดยใช้ระบบค้ำยันแบบ Raker 4 ระดับ แต่ต้องตัดส่วนบนของเสาดินซีเมนต์ฝั่งขวาเนื่องจากเกิดการเคลื่อนตัวมาก พร้อมทั้งเพิ่มเข็มพืดเหล็กด้านนอกเพื่อป้องกัน Total Failure ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.36



รูปที่ 3.29 ขั้นตอนการขุดเปิดไปยังระดับท้องพื้น P1R ด้วยระบบค้ำยันแบบ Raker

ข) ขั้นตอนที่ 7 เทพื้นคอนกรีต P1R เสร็จแล้วเปลี่ยนตำแหน่งค้ำยันเพื่อให้สามารถดำเนินงานในส่วนของโครงสร้างได้ เป็นสิ้นสุดงานขุดของประตูระบายน้ำทั้งหมด ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.37



รูปที่ 3.30 สิ้นสุดงานขุดดิน เปลี่ยนตำแหน่ง Raker เพื่อให้พื้นที่งานโครงสร้าง



รูปที่ 3.31 แสดงงานขุดในแนวตั้ง จนกระทั่งเสาเข็มซีเมนต์ฝังชำยวิบัติ



รูปที่ 3.32 แสดงงานตัดลาดเสาเข็มซีเมนต์เพื่อลดการเคลื่อนตัว และงานตอกเสาเข็ม



รูปที่ 3.33 แสดงงานขุดดินพื้น P2L และ P2M ด้วยเข็มพืดเหล็ก



รูปที่ 3.34 แสดงงานขุดค้ำยันเพื่อเท Lean Concrete P2L และ P2M



รูปที่ 3.35

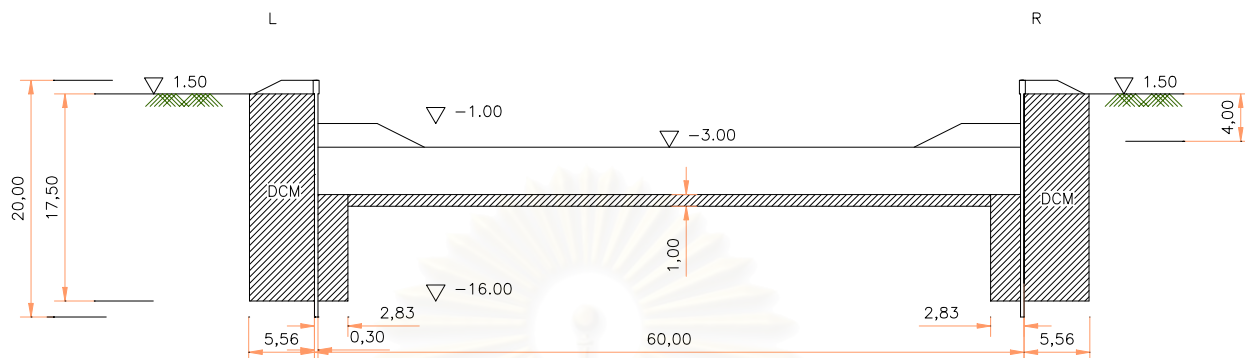
ค้ำยันด้วย

Raker เพื่อเท Lean Concrete P1L



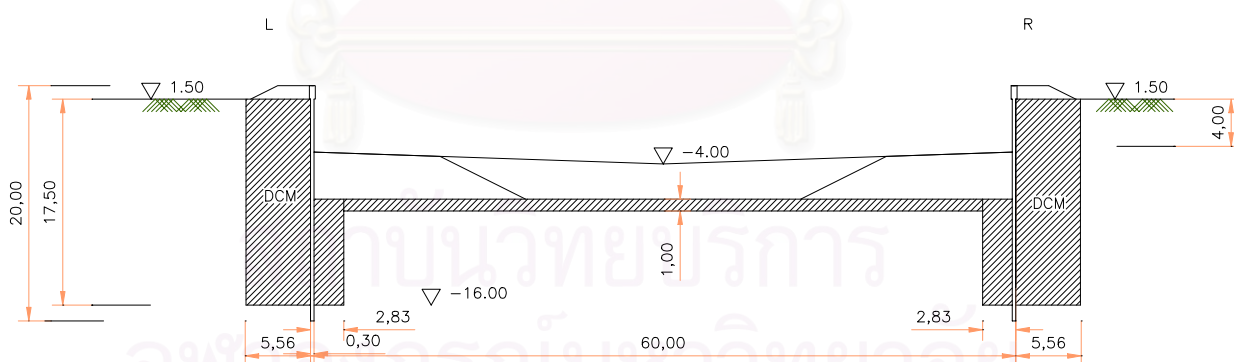
รูปที่ 3.36 แสดงงานเปลี่ยนตำแหน่งค้ำยันเพื่อให้พื้นที่งานโครงสร้างฝังซ้าย และฝังขวาชุด P1R

ข) ขั้นตอนที่ 2 ขุดเปิดดินที่ขอบคลองจากระดับ -1.00 ม.รทก. ถึง -3.00 ม.รทก. เพื่อติดตั้งพื้นเสาดินซีเมนต์ส่วนริมทั้ง 2 ข้างคลอง พร้อมทั้งถมดินคันคลองระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.44



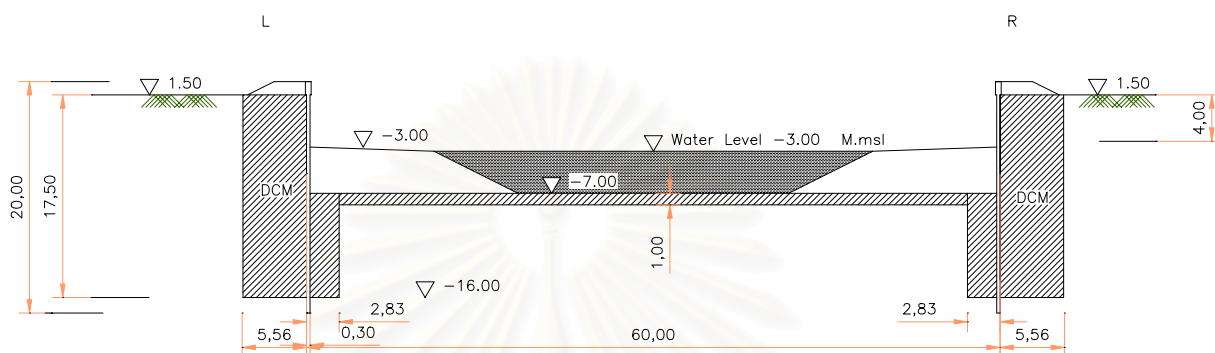
รูปที่ 3.39 ขั้นตอนงานก่อสร้างเสาดินซีเมนต์พื้นส่วนขอบคลอง

ค) ขั้นตอนที่ 3 ขุดเปิดดินส่วนกลางคลองจากระดับ -4.00 ม.รทก. ถึง -7.00 ม.รทก. ความลาด 1:2 และมีชันดินภายในคลองความกว้าง 9.50 ม. ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.45



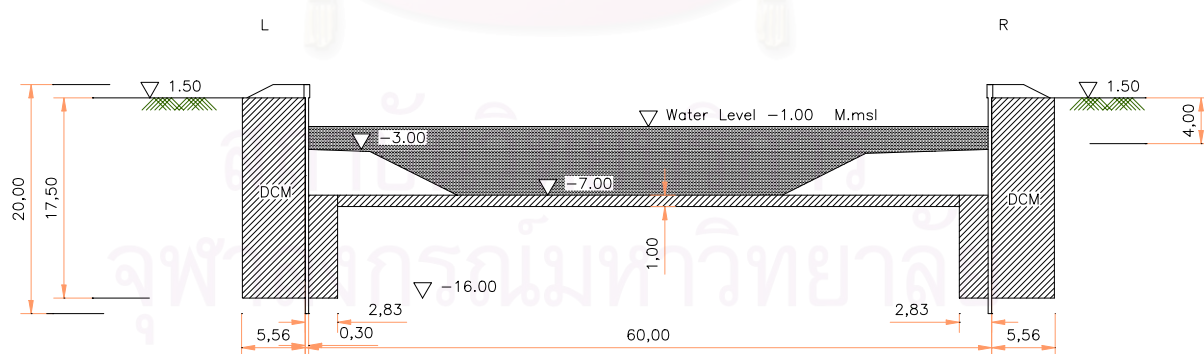
รูปที่ 3.40 ขั้นตอนงานขุดดินจากระดับ -4.00 ม.รทก.ลงไป -7.00 ม.รทก.

ง) ขั้นตอนที่ 4 เติมน้ำภายในงานขุดจนถึงระดับ -3.00 ม.รทก. เพื่อรักษาเสถียรภาพและขุดดินฝั่งขวาที่มีคุณภาพลดขนาดดินจนมีความกว้าง 5.00 ม. ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.46



รูปที่ 3.41 ขั้นตอนเติมน้ำเพื่อรักษาเสถียรภาพงานขุด และลดความกว้างขานคลองฝั่งขวา

จ) ขั้นตอนที่ 5 เติมน้ำภายในงานขุดจนถึงระดับ -1.00 ม.รทก. เพื่อรักษาเสถียรภาพและลดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน ระดับและมิติ ดังรูปแสดงการขุดเปิดดิน รูปที่ 3.47



รูปที่ 3.42 ขั้นตอนเติมน้ำเพื่อรักษาเสถียรภาพงานขุดขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 3.43 แสดงงานขุดส่วนกลางคลองถึงระดับ -3.00 ม.รทก. เพื่อก่อสร้างเสาหินซีเมนต์



รูปที่ 3.44 แสดงงานขุดส่วนริมคลองถึงระดับ -3.00 ม.รทก. เพื่อก่อสร้างเสาหินซีเมนต์พื้น



รูปที่ 3.45 แสดงงานขุดคลองถึงระดับ -7.00 ม.รทก. และทิ้งชานคลองความกว้าง 9.50 ม.



รูปที่ 3.46 แสดงงานเติมน้ำถึงระดับ -3.00 ม.รทก. และลดขนาดชานคลองกว้าง 5.00 ม.



รูปที่ 3.47 แสดงงานเติมน้ำถึงระดับ -1.00 ม.รทก. เสร็จสิ้นขั้นตอนงานขุดแห้งคลอง

3.6 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน

โครงการปรับปรุงคลองแห่งนี้ได้เลือกใช้เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง ของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินเป็น Inclinometer จำนวน 3 จุด ในบริเวณประตูระบายน้ำซึ่งเป็นงานขุดที่มีความลึก 11.25 ม. และในการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินส่วนปรับปรุงคลอง ใช้ Total Station เก็บค่าเบี่ยงเบนส่วนบนของโครงสร้างกันดิน ระยะเวลาการเก็บข้อมูลเริ่มจากเกิดปัญหาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินส่วนประตูระบายน้ำจนกระทั่งจบการก่อสร้าง สำหรับคลองส่งน้ำเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่ดำเนินการขุดคลองปรับปรุงจนถึงสิ้นสุดขั้นตอนงานขุดแห้ง ผลการเก็บข้อมูลตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินเกิดขึ้นในตำแหน่ง INC 01 ,INC 02 และ INC 03 ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงที่สุดในแต่ละตำแหน่ง Inclinator

INC 01		INC 02		INC 03	
Elev (m)	Displ. Change (mm.)	Elev (m)	Displ. Change (mm.)	Elev (m)	Displ. Change (mm.)
-1.8	594.4	-0.2	1843.1	0.6	1933.3
-2.3	563.3	-0.7	1796.3	0.1	1895.8
-2.8	531.6	-1.2	1749.7	-0.4	1858.2
-3.3	505.0	-1.7	1702.7	-0.9	1822.4
-3.8	484.6	-2.2	1655.5	-1.4	1784.8
-4.3	469.9	-2.7	1608.3	-1.9	1742.4
-4.8	454.4	-3.2	1560.7	-2.4	1693.8
-5.3	435.7	-3.7	1514.4	-2.9	1642.3
-5.8	415.6	-4.2	1465.0	-3.4	1586.7
-6.3	394.2	-4.7	1404.3	-3.9	1527.3
-6.8	371.7	-5.2	1338.9	-4.4	1463.8
-7.3	348.9	-5.7	1276.4	-4.9	1397.4
-7.8	322.2	-6.2	1215.7	-5.4	1331.6
-8.3	270.6	-6.7	1154.2	-5.9	1266.7
-8.8	226.4	-7.2	1090.2	-6.4	1202.8
-9.3	198.7	-7.7	1024.0	-6.9	1136.3
-9.8	171.3	-8.2	955.3	-7.4	1069.3
-10.3	142.6	-8.7	883.4	-7.9	1000.9
-10.8	115.1	-9.2	808.2	-8.4	931.2
-11.3	90.8	-9.7	729.2	-8.9	861.4
-11.8	69.2	-10.2	648.9	-9.4	783.8
-12.3	50.4	-10.7	568.9	-9.9	705.4
-12.8	33.4	-11.2	488.8	-10.4	620.2
-13.3	16.6	-11.7	405.2	-10.9	533.7
-13.8	10.3	-12.2	316.0	-11.4	449.4
-14.3	9.4	-12.7	224.7	-11.9	360.8

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงที่สุดในแต่ละตำแหน่ง Inclinator (ต่อ)

INC 01		INC 02		INC 03	
Elev (m)	Displ. Change (mm.)	Elev (m)	Displ. Change (mm.)	Elev (m)	Displ. Change (mm.)
-14.8	8.8	-13.2	142.5	-12.4	271.8
-15.3	8.1	-13.7	84.2	-12.9	193.1
-15.8	8.4	-14.2	38.8	-13.4	105.0
-16.3	7.6	-14.7	14.0	-13.9	39.9
-16.8	6.6	-15.2	7.8	-14.4	10.4
-17.3	6.3	-15.7	7.5	-14.9	4.1
-17.8	6.3	-16.2	7.0	-15.4	2.5
-18.3	4.4	-16.7	5.6	-15.9	1.4
-18.8	0.0	-17.2	3.6	-16.4	0.3
-19.3	-0.9	-17.7	2.2	-16.9	-0.3
-19.8	-1.6	-18.2	0.3	-17.4	1.6
-20.3	-2.0	-18.7	1.3	-17.9	0.7
-20.8	-1.3	-19.2	0.8	-18.4	0.7
-21.3	0.3	-19.7	0.2	-18.9	0.3
-21.8	0.0	-20.2	1.1	-19.4	0.2
		-20.7	0.9	-19.9	0.6
		-21.2	0.0	-20.4	0.0

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้าง ของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน ระหว่างการก่อสร้าง

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดำเนินการศึกษาดูการณ์และประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน จากการก่อสร้างทั้งโครงสร้างกันดินชั่วคราวบริเวณประตูระบายน้ำ และโครงสร้างกันดินถาวรบริเวณคลอง รวมทั้งเปรียบเทียบกำลังของเสาเข็มซีเมนต์ที่ก่อสร้างในสถานที่ก่อสร้างกับเสาเข็มซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ และแนวทางออกแบบที่เหมาะสมในการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน กำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์ในโครงสร้างกันดิน

การวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Finite Element Method โดยใช้โปรแกรม PLAXIS 7.2 เพื่อวิเคราะห์ประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินระหว่างการก่อสร้างประตูระบายน้ำและคลอง ซึ่งมีรายละเอียดและผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง

4.1.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติขั้นพื้นฐานและด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ

ผลการศึกษาดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับตัวอย่างดินจากความลึก 3 ,6 ,12 และ 15 เมตร ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัม/ดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งคุณสมบัติสำหรับตัวอย่างดินที่มีความลึกต่างๆ มีดังนี้

ตัวอย่างดินซีเมนต์ความลึก 0.00 – 3.00 ม.

- มีค่าปริมาณความชื้น (Water Contents, ω %) ประมาณ 64.13 %
- มีค่าความหนาแน่นรวม, γ_t ประมาณ 1.574 t/m³
- มีค่าความหนาแน่นแห้ง, γ_d ประมาณ 0.959 t/m³

ตัวอย่างดินซีเมนต์ ความลึก 3.00-6.00 ม.

- มีค่าปริมาณความชื้น (Water Contents, ω %) ประมาณ 61.99 %
- มีค่าความหนาแน่นรวม, γ_t ประมาณ 1.560 t/m³
- มีค่าความหนาแน่นแห้ง, γ_d ประมาณ 0.962 t/m³

ตัวอย่างดินซีเมนต์ ความลึก 6.00-12.00 ม.

- มีค่าปริมาณความชื้น (Water Contents, ω %) ประมาณ 63.07 %
- มีค่าความหนาแน่นรวม, γ_t ประมาณ 1.549 t/m³
- มีค่าความหนาแน่นแห้ง, γ_d ประมาณ 0.950 t/m³

ตัวอย่างดินซีเมนต์ ความลึก 12.00 – 15.00 ม.

- มีค่าปริมาณความชื้น (Water Contents, ω %) ประมาณ 49.16 %
- มีค่าความหนาแน่นรวม, γ_t ประมาณ 1.603 t/m³
- มีค่าความหนาแน่นแห้ง, γ_d ประมาณ 1.074 t/m³

คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์ ในการวิจัยนี้จะใช้การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยวิธีทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression test) เมื่อได้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) จึงนำมาวิเคราะห์หาโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) จากการทดสอบได้ผลการทดสอบแบ่งตามช่วงความลึก ดังต่อไปนี้

ระดับความลึก 0.00 – 3.00 เมตร ผลการทดสอบหาค่า

- กำลังรับแรงอัด, q_u เท่ากับ 187.90 t/m²
- กำลังรับแรงเฉือน, S_u เท่ากับ 93.95 t/m²
- โมดูลัสความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำเฉลี่ยที่ 50% ความเค้นสูงสุด (50% Secant Modulus of Elasticity) เท่ากับ 4,608.63t/m²

ระดับความลึก 3.00 – 6.00 เมตร ผลการทดสอบหาค่า

- กำลังรับแรงอัด, q_u เท่ากับ 155.30 t/m²
- กำลังรับแรงเฉือน, S_u เท่ากับ 77.65 t/m²
- โมดูลัสความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำเฉลี่ยที่ 50% ความเค้นสูงสุด (50% Secant Modulus of Elasticity) เท่ากับ 3,599.31t/m²

ระดับความลึก 6.00 – 12.00 เมตร ผลการทดสอบหาค่า

- กำลังรับแรงอัด, q_u เท่ากับ 151.61 t/m²
- กำลังรับแรงเฉือน, S_u เท่ากับ 75.81 t/m²
- โมดูลัสความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำเฉลี่ยที่ 50% ความเค้นสูงสุด (50% Secant Modulus of Elasticity) เท่ากับ 4,350.33 t/m²

ระดับความลึก 12.00 – 15.00 เมตร ผลการทดสอบหาค่า

- กำลังรับแรงอัด, q_u เท่ากับ 202.09 t/m²
- กำลังรับแรงเฉือน, S_u เท่ากับ 101.04 t/m²
- โมดูลัสความยืดหยุ่นในสภาพไม่ระบายน้ำเฉลี่ยที่ 50% ความเค้นสูงสุด (50% Secant Modulus of Elasticity) เท่ากับ 4,416.16 t/m²

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ สามารถผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินซีเมนต์จะนำไปใช้วิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์เหมาะสมในการออกแบบต่อไป

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐานและด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ

ระดับความลึก ดินตัวอย่าง	ซีเมนต์/ดิน กก./ลบ.ม.	เวลาบ่ม (วัน)	γ_d (t/m ³)	γ_t (t/m ³)	q_u (t/m ²)	S_u (t/m ²)	E_{50} (t/m ²)	E_u/S_u	W_n %
0.00 - 3.00	200	28	0.959	1.574	187.9	93.95	4608.63	49.054	64.13
3.00 - 6.00	200	28	0.962	1.560	155.3	77.65	3599.31	46.353	61.99
6.00 - 9.00	200	28	0.95	1.549	151.6	75.81	4350.33	45.577	63.07
9.00 - 12.00	200	28	0.95	1.549	151.6	75.81	4350.33	45.577	63.07
12.00 - 15.00	200	28	1.074	1.603	202.09	101.04	4416.16	43.707	49.16

4.1.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติชั้นพื้นฐานและด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง

ผลการศึกษาดินซีเมนต์ได้จากการเจาะแท่งตัวอย่าง (Coring) นำมาใช้ทดสอบสำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์จากความลึก 3 ,6 ,9 ,12 ,15 และ 17.50 เมตร อัตราส่วนผสมดินซีเมนต์ 200 กิโลกรัมต่อดินปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน และเนื่องจากโครงการมีจำนวนเสาดินซีเมนต์มากจึงจำเป็นต้องแบ่งการเจาะทดสอบออกเป็นขอบเขตพื้นที่ซึ่งมีทั้งหมด 21

ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 6 ตัวอย่าง ตามความลึก ซึ่งชื่อตัวอย่างและตำแหน่งการทดสอบแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 สำหรับคุณสมบัติของดินซีเมนต์ด้านกำลังรับแรงอัดแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างเสาหินซีเมนต์ใช้สำหรับการทดสอบด้วยวิธีเจาะทดสอบในสนาม

ที่	กม.	DCM No.	อายุการบ่ม (วัน)	อัตราส่วน ซีเมนต์ (kg/m ³)	ผู้ดำเนินการ (บริษัท)	บริเวณ
1	0+163.02	- DCM No.1G,R8-C30	28	200	A	กันคลองฝั่งขวา
2	0+244.50	- DCM No.8N,R2-C65	28	200	A	ปตร.ฝั่งขวา
3	0+280.62	- DCM No.1O,R4-C28	28	200	A	กันคลองฝั่งซ้าย
4	0+331.82	- DCM No.1O,R2-C156	28	200	A	กันคลองฝั่งซ้าย
5	0+339.02	- DCM No.1Q,R2-C174	28	200	A	กันคลองฝั่งขวา
6	0+350.22	- DCM No.Q,R6-C202	28	200	B	กันคลองฝั่งขวา
7	0+427.02	- DCM No.1U,R2-C73	28	200	B	กันคลองฝั่งขวา
8	0+469.02	- DCM No.V,R7-C49	28	200	B	กันคลองฝั่งซ้าย
9	0+469.42	- DCM No.X,R4-C50	28	200	B	กันคลองฝั่งขวา
10	0+499.44	- DCM No.1X,R7-C125	28	200	A	กันคลองฝั่งขวา
11	0+507.84	- DCM No.1V,R4-C146	28	200	A	กันคลองฝั่งซ้าย
12	0+550.22	- DCM No.1X,R8-C252	28	200	A	กันคลองฝั่งขวา
13	0+565.42	- DCM No.1V,R4-C290	28	200	A	กันคลองฝั่งซ้าย
14	0+569.84	- DCM No.V,R3-C301	28	200	B	กันคลองฝั่งซ้าย
15	0+607.04	- DCM No.V,R4-C394	28	200	B	กันคลองฝั่งซ้าย
16	0+622.24	- DCM No.X,R6-C432	28	200	B	กันคลองฝั่งขวา
17	0+651.32	- DCM No.V,R4-C506	28	200	B	กันคลองฝั่งซ้าย
18	0+689.04	- DCM No.X,R3-C599	28	200	B	กันคลองฝั่งขวา
19	0+695.42	- DCM No.V,R3-C615	28	200	B	กันคลองฝั่งซ้าย
20	0+705.42	- DCM No.V,R4-C732	28	200	B	กันคลองฝั่งซ้าย
21	0+737.42	- DCM No.X,R4-C720	28	200	B	กันคลองฝั่งขวา

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด (UCS) ของเสาหินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบในสนาม

ตัวอย่าง	บริษัท ก่อสร้าง	DCM No.	qu Coring Test at Depth					
			0-3 m. (ksc.)	3-6 m. (ksc.)	6-9 m. (ksc.)	9-12 m. (ksc.)	12-15 m. (ksc.)	15-17.5 m. (ksc.)
1	A	1G,R8-C30	32.050	32.502	10.433	20.922	11.072	14.454
2	A	8N,R2-C65	20.799	17.061	15.882	16.103	17.507	17.736
3	A	1O,R4-C28	12.963	18.337	12.495	10.719	10.569	5.694
4	A	1O,R2-C156	18.414	16.314	15.554	18.721	13.323	18.007
5	A	1Q,R2-C174	15.656	15.541	15.920	16.639	17.059	16.366
6	A	1X,R7-C125	19.043	13.150	6.013	7.829	17.619	11.092
7	A	1V,R4-C146	12.457	6.148	6.278	14.740	15.617	8.543
8	A	1X,R8-C252	7.148	13.221	6.197	7.655	7.022	7.215
9	A	1V,R4-C290	12.211	15.045	12.755	14.203	13.846	12.874
10	B	Q,R6-C202	12.726	13.128	19.777	10.730	18.596	17.890
11	B	1U,R2-C73	9.190	13.880	9.108	15.470	11.757	12.328
12	B	V,R7-C49	13.175	14.958	21.182	15.274	15.883	20.943
13	B	X,R4-C50	7.270	7.802	5.492	10.953	7.000	9.438
14	B	V,R3-C301	6.642	7.189	6.091	9.169	16.838	17.529
15	B	V,R4-C394	9.380	11.831	10.666	19.848	19.204	5.330
16	B	X,R6-C432	9.837	12.589	11.191	10.791	7.818	17.924
17	B	V,R4-C506	8.375	6.824	13.367	18.040	11.831	14.397
18	B	X,R3-C599	16.208	16.019	9.547	8.677	16.879	16.436
19	B	V,R3-C615	7.837	9.280	8.653	19.004	10.416	18.591
20	B	V,R4-C732	16.576	14.688	16.271	17.497	19.407	16.091
21	B	X,R4-C720	16.163	9.421	7.245	15.625	8.406	8.669

4.1.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์ที่ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์ที่ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและเจาะสำหรับทดสอบในสถานที่ก่อสร้างจะเลือกพิจารณาในขอบเขตที่มีตัวอย่างการเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้างสูงที่สุด ซึ่งเป็นขอบเขต V และ X ค่าอัตราส่วนกำลังดินซีเมนต์เจาะทดสอบต่อกำลังดินซีเมนต์ที่ทดลองผสมในห้องปฏิบัติอยู่ระหว่างช่วง 58.7% ถึง 77.5% ผลของการวิเคราะห์ที่แสดงด้วยแผนภาพของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์ที่ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

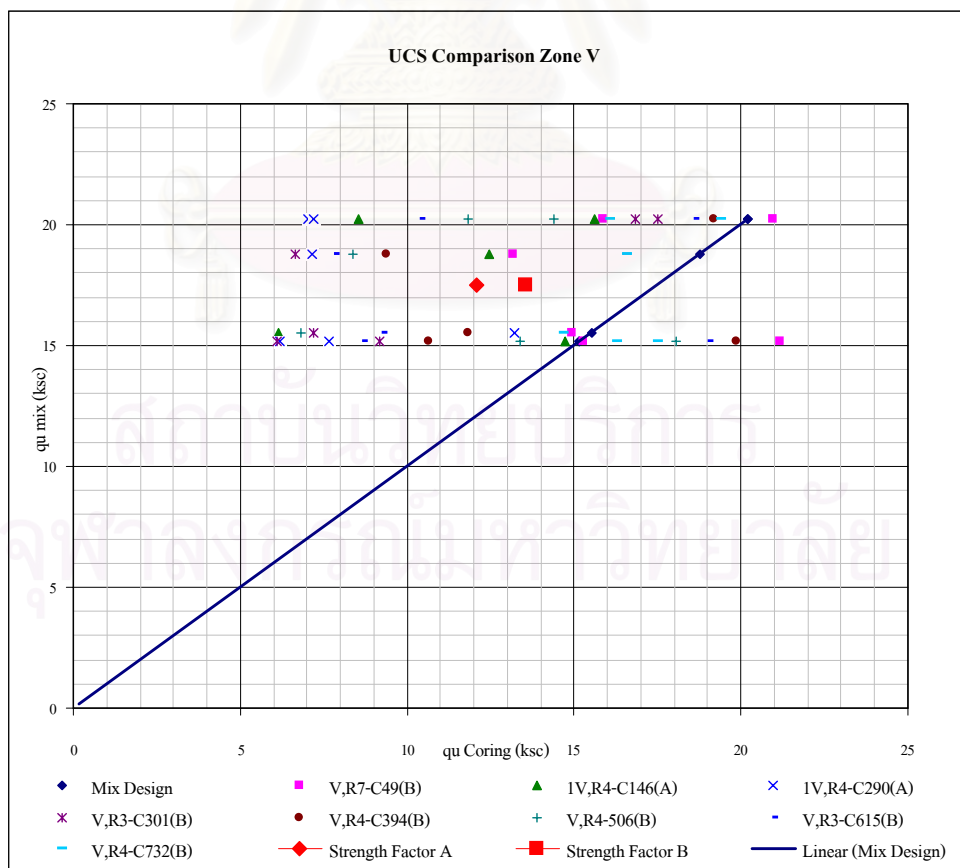
Zone V	A	คลองปรับปรุงด้านท้ายน้ำ		
ลำดับที่	ความลึก (m.)	qu Mix Design (ksc.)	qu Coring Test	
			1	2
			1V,R4-C146 (ksc.)	1V,R4-C290 (ksc.)
1	3	18.790	12.457	12.211
2	6	15.530	6.148	15.045
3	9	15.161	6.278	12.755
4	12	15.161	14.740	14.203
5	15	20.209	15.617	13.846
6	17.5	20.209	8.543	12.874
		17.510	10.631	13.489

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \text{ Reduction Factor of Strength Zone V} &= ((10.631+13.489)/2)/17.51 \\ \text{ดังนั้น} \text{ Reduction Factor of Strength} &= \mathbf{0.689} \end{aligned}$$

Zone V	B	คลองปรับปรุงด้านท้ายน้ำ								
		ความลึก	qu	qu Coring Test						
				Mix	1	2	3	4	5	6
				Design	V,R7-C49	V,R3-C301	V,R4-C394	V,R4-C506	V,R3-C615	V,R4-C732
(m.)	(ksc.)	(ksc.)	(ksc.)	(ksc.)	(ksc.)	(ksc.)	(ksc.)			
1	3	18.790	13.175	6.642	9.380	8.375	7.837	16.576		
2	6	15.530	14.958	7.189	11.831	6.824	9.280	14.688		
3	9	15.161	21.182	6.091	10.666	13.367	8.653	16.271		
4	12	15.161	15.274	9.169	19.848	18.040	19.004	17.497		
5	15	20.209	15.883	16.838	19.204	11.831	10.416	19.407		
6	17.5	20.209	20.943	17.529	5.330	14.397	18.591	16.091		
		17.510	16.903	10.577	12.710	12.139	12.297	16.755		

$$\text{ดังนั้น Reduction Factor of Strength Zone V} = \frac{((16.903+10.577+12.71+12.139+12.297+16.755)/6)/17.51}{}$$

$$\text{ดังนั้น Reduction Factor of Strength} = \mathbf{0.775}$$



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ในขอบเขต V

Zone X	A	คลองปรับปรุงด้านท้ายน้ำ		
ลำดับที่	ความลึก (m.)	qu Mix Design (ksc.)	qu Coring Test	
			1	2
			1X,R7-C125 (ksc.)	1X,R8-C252 (ksc.)
1	3	18.790	19.043	7.148
2	6	15.530	13.150	13.221
3	9	15.161	6.013	6.197
4	12	15.161	7.829	7.655
5	15	20.209	17.619	7.022
6	17.5	20.209	11.092	7.215
		17.510	12.458	8.077

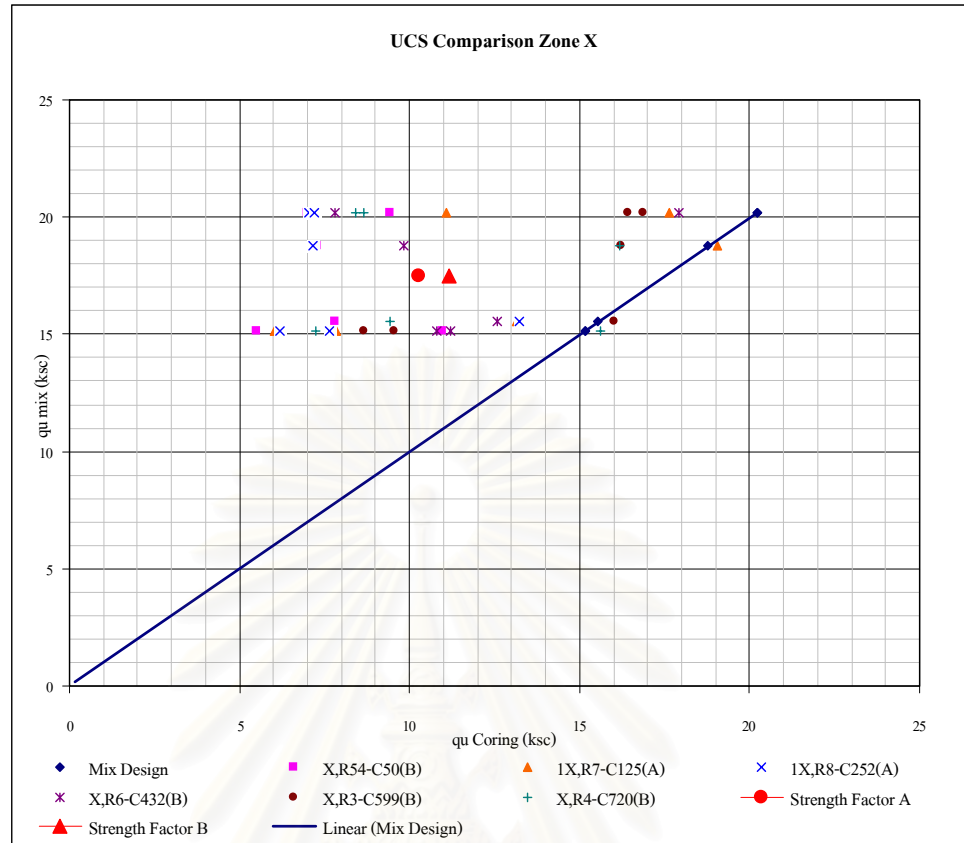
$$\text{ดังนั้น Reduction Factor of Strength Zone X} = ((12.458+8.077)/2)/17.51$$

$$\text{ดังนั้น Reduction Factor of Strength} = \mathbf{0.587}$$

Zone X	B	คลองปรับปรุงด้านท้ายน้ำ				
ลำดับที่	ความลึก (m.)	qu Mix Design (ksc.)	qu Coring Test			
			1	2	3	4
			X,R4-C50 (ksc.)	X,R6-C432 (ksc.)	X,R3-C599 (ksc.)	X,R4-C720 (ksc.)
1	3	18.790	7.270	9.837	16.208	16.163
2	6	15.530	7.802	12.589	16.019	9.421
3	9	15.161	5.492	11.191	9.547	7.245
4	12	15.161	10.953	10.791	8.677	15.625
5	15	20.209	7.000	7.818	16.879	8.406
6	17.5	20.209	9.438	17.924	16.436	8.669
		17.510	7.993	11.692	13.961	10.922

$$\text{ดังนั้น Reduction Factor of Strength Zone X} = ((7.993+11.692+13.961 + 10.922)/4)/17.51$$

$$\text{ดังนั้น Reduction Factor of Strength} = \mathbf{0.637}$$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ในขอบเขต X

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการและเจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้าง ในแผนภาพพบว่ากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบมีความกระจายตัวมากโดยส่วนใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบน้อยกว่าทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัด(UCS) ของดินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบมีความสอดคล้องกันทั้ง 2 ขอบเขตที่เลือกพิจารณาและในแต่ละขอบเขต ข้อมูลการทดสอบของแต่ละบริษัทก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์มีความใกล้เคียงกัน โดยกำลังรับแรงอัด(UCS) ของดินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบจะมีค่าอยู่ระหว่าง 58.7% ถึง 77.5% ของกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์จากการเจาะทดสอบที่ลดลงจากการทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ จะมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งใช้ก่อสร้างเป็นโครงสร้างกันดิน ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป จะเลือกใช้ข้อมูลเสาเข็มดินซีเมนต์ในตารางที่ 4.3 เพื่อสร้างแบบจำลองวัสดุหน้าตัดที่พิจารณา โดยจะกล่าวในการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

4.2 ผลการศึกษาผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์เคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มตักันดินในระหว่างการก่อสร้าง

จากการศึกษาขั้นตอนการก่อสร้างของงานประตู่ระบายน้ำระหว่างขั้นตอนงานขุดพบว่ามีการเคลื่อนตัวที่สูงมาก และเมื่อได้ทำการขุดเกิดการพังทลายที่ส่วนบนของโครงสร้างเสาเข็มตักันดินประตู่ระบายน้ำ ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 จนต้องแก้ไขโดยตัดลาด ณ ตำแหน่งที่เกิดการพังทลายช่วงบนของโครงสร้างกันดิน จากการพังทลายจะพบว่ามีการแยกตัวของโครงสร้างเสาเข็มตักันดินเป็นแถว ซึ่งมีขนาดของความกว้างแต่ละแถวประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มตักันดิน จึงได้มีการแก้ไขรูปแบบการก่อสร้างและขั้นตอนงานขุด ด้วยการใส่ระบบเข็มพืดเหล็ก(Steel Sheet Pile) มาช่วยในงานขุดแบบใช้ค้ำยัน(Braced Cut) ซึ่งขั้นตอนของการแก้ไขได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.5.1 ขั้นตอนการขุดและวิธีการแก้ไขปัญหาของโครงสร้างกันดินชั่วคราว ส่วนประตู่ระบายน้ำ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวกับพฤติกรรมการณ์ในระหว่างการก่อสร้างซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนประตู่ระบายน้ำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาเข็มตักันดิน ด้วยข้อมูลการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ตรวจวัดได้จาก Inclinometer ทั้งหมดที่ติดตั้งในโครงสร้างกันดินของประตู่ระบายน้ำ ซึ่งมีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ INC-01 ,INC-02 และ INC-03 และส่วนคลองการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาเข็มตักันดิน โดยใช้ข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ตำแหน่ง Cap Beam ของเข็มพืดคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด กม. 0+587.663 , 0+612.630 และ 0+662.540 ผลการวิเคราะห์มีดังนี้

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างเสาเข็มตักันดิน บริเวณประตู่ระบายน้ำ

ผลการศึกษาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของประตู่ระบายน้ำฝั่งซ้ายและประตู่ระบายน้ำฝั่งขวา เนื่องจากทั้ง 2 ส่วนดำเนินการไม่พร้อมกันโดยดำเนินการในส่วนของฝั่งซ้ายก่อน ซึ่งมีเครื่องมือ Inclinometer ติดตั้ง 1 ชุด คือ INC-01 สำหรับฝั่งขวานั้นติดตั้งเครื่องมือ Inclinometer 2 ชุด คือ INC-02 และ INC -03 โดยเครื่องมือทั้ง 3 ชุด ติดตั้งอยู่ที่หน้าตัดขวางเดียวกัน



รูปที่ 4.4 แสดงการพังทลายของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้ายในขั้นตอนงานขุดที่ระดับ -3.00 ม.รทก.



รูปที่ 4.5 แสดงการพังทลายของโครงสร้างกันดินฝั่งขวาในขั้นตอนงานขุดที่ระดับ -3.00 ม.รทก.

4.2.1.1 โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินฝั่งซ้ายของประตูระบายน้ำ

จากข้อมูลการเคลื่อนตัวของเครื่องมือ Inclinator INC -01 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) ขั้นตอนการขุดจากระดับ - 6.15 ม.รทก. ถึง -10.00 ม.รทก. ใช้เป็นขั้นตอนแรกในการศึกษาเนื่องจากเครื่องมือ Inclinator ติดตั้งหลังจากใช้เข็มพืดเหล็กเข้ามาแก้ไขปัญหา การเคลื่อนตัวของด้านข้างที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ มีปริมาณการเคลื่อนตัวมากที่สุด 98.2 มิลลิเมตร ที่ด้านบนสุดของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน และการเคลื่อนที่ที่ฐานของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาดินซีเมนต์ประมาณ 3 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึก 17.50 ม. จากระดับดินเดิมเดิมดังรูปที่ 4.6

ข) ขั้นตอนถมกลับทราย ระหว่างคอนกรีตพื้น P2L และเข็มพืดเหล็ก L1 เพื่อลดค่าชั้นชุดที่ 1 ที่ระดับ -6.15 ม.รทก. ปริมาณการเคลื่อนตัวมากที่สุดประมาณ 162.8 มิลลิเมตร ที่ด้านบนสุดของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาดินซีเมนต์ พบว่ามีการเคลื่อนตัวมากในช่วงของระดับตั้งแต่ -10.00 ม.รทก. จนถึงระดับบนสุดของโครงสร้าง การเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างกันดิน 4.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.7

ค) ขั้นตอนถอดเข็มพืดเหล็ก L1 เมื่อขุดดินบริเวณ P1L ให้อัตราการเคลื่อนตัวที่เพิ่มสูงมาก เนื่องจากความแตกต่างของระดับดินด้านหลังเข็มพืดเหล็ก ปริมาณการเคลื่อนตัวมากที่สุดประมาณ 267.6 มิลลิเมตร ที่ด้านบนสุดของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาดินซีเมนต์ สำหรับการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างกันดินเกิดการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 5.0 มม. ดังรูปที่ 4.8

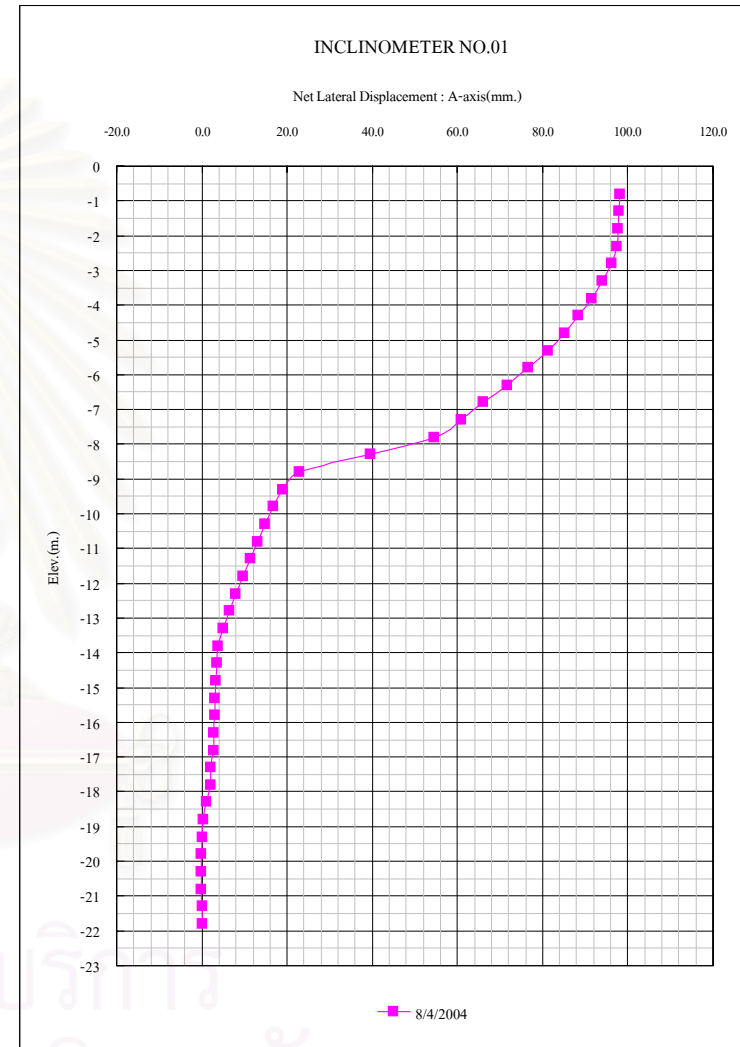
ง) ขั้นตอนการขุดโดยใช้ค้ำยันระหว่าง SPL1 กับพื้น P2L เป็นขั้นตอนการขุดจากระดับ -4.50 ม.รทก. ไปที่ระดับ -6.15 ม.รทก. เพื่อติดตั้งค้ำยันเพิ่มอีก 1 ชุด เป็นขั้นตอนที่ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีปริมาณการเคลื่อนตัวมากที่สุดประมาณ 316.4 มม. ที่ด้านบนสุดของโครงสร้างกันดินโดยขั้นตอนจะเห็นได้ชัดเจนในตำแหน่งที่มีการค้ำยันจะมีการเปลี่ยนความชันของค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง ตำแหน่งฐานของโครงสร้างกันดินมีค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 5.9 มม. ดังรูปที่ 4.9

จ) ขั้นตอนการขุดในบริเวณ P1L จากระดับ -6.15 ม.รทก. ไปยังระดับ -10.00 ม.รทก. เพื่อเทคอนกรีตหลา การเคลื่อนตัวในขั้นตอนนี้เปลี่ยนแปลงไม่มากนักที่ระดับ -1.8 ม.รทก. จากเดิมค่าการเคลื่อนตัว 316.4 มม. เคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 353 มม. บริเวณฐานของโครงสร้างกันดินมีค่าการเคลื่อนตัวประมาณ 6.4 มม. ดังรูปที่ 4.10

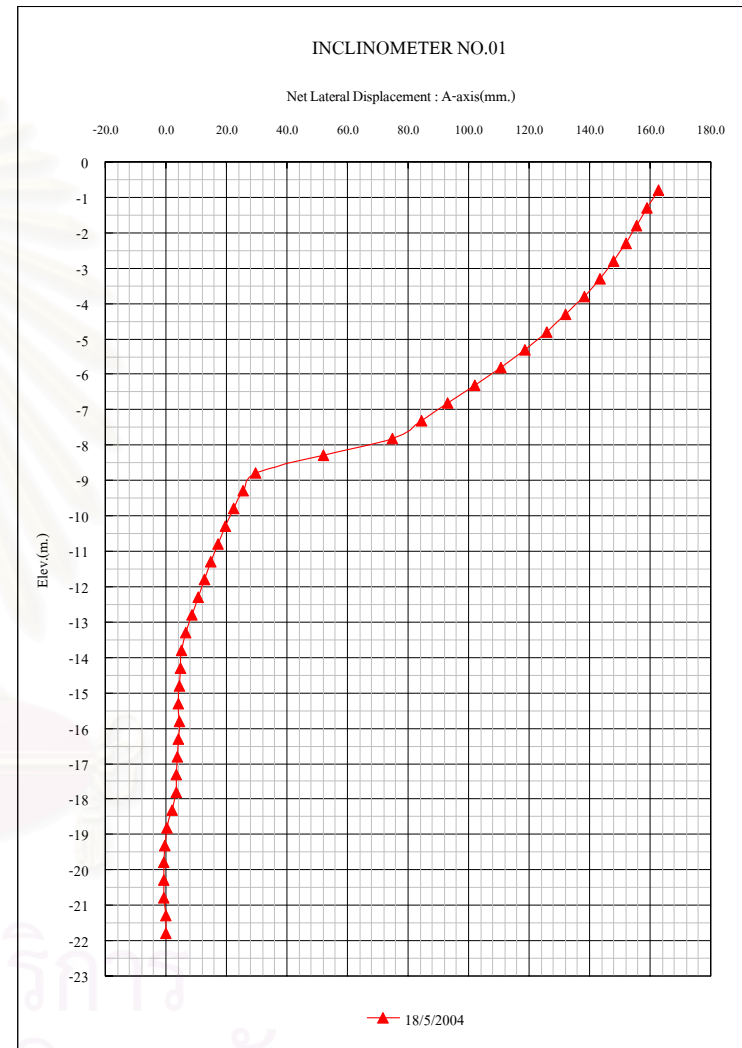
ณ) ขั้นตอนการเทคอนกรีต และถอดค้ำยันที่ระดับ -8.00 ม.รทก เพื่อเทคอนกรีตในบริเวณ PIL พบว่าการเคลื่อนตัวในขั้นตอนนี้มากขึ้น ปริมาณการเคลื่อนตัวที่ด้านบนสุดของโครงสร้างกันดินมากที่สุดประมาณ 417.5 มม. และค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างกันดิน จะเกิดการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 7.5 มม. ดังรูปที่ 4.11

ข) ขั้นตอนนี้เป็นเป็นการถมกลับ ระหว่างพื้น PIL และ SPL 1 พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงจุดติดตั้งค้ำยันทั้งหมดเหลือเพียงจุดเดียวที่ระดับ -2.00 ม.รทก. เพื่อให้พื้นที่งานโครงสร้างพบว่าการเคลื่อนตัวที่ด้านบนสุดของโครงสร้างกันดิน 594.4 มม. และเกิดรอยแยกระหว่างเสาเข็มซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน ค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างกันดิน 8.1 มม. ดังรูปที่ 4.12

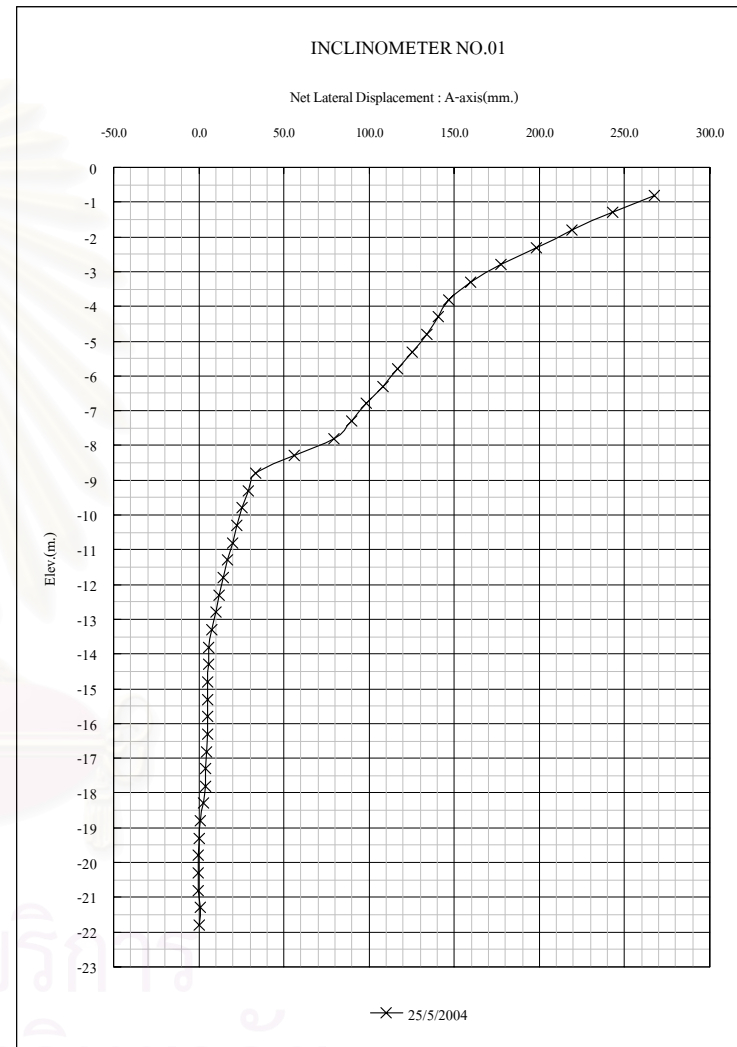
จากพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวที่แสดงในรูปของขั้นตอน ของการก่อสร้างจะสังเกตว่าลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะรูปแบบเหมือนกับเป็น Cantilever Beam เนื่องจากปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของโครงสร้างเกิดที่ตำแหน่งสูงสุดของโครงสร้าง และที่ฐานของโครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างน้อยมาก นอกจากนี้มีสิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือพฤติกรรมการแยกตัวของโครงสร้างกันดินที่เกิดขึ้นในแต่ละแถวตามระดับค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น



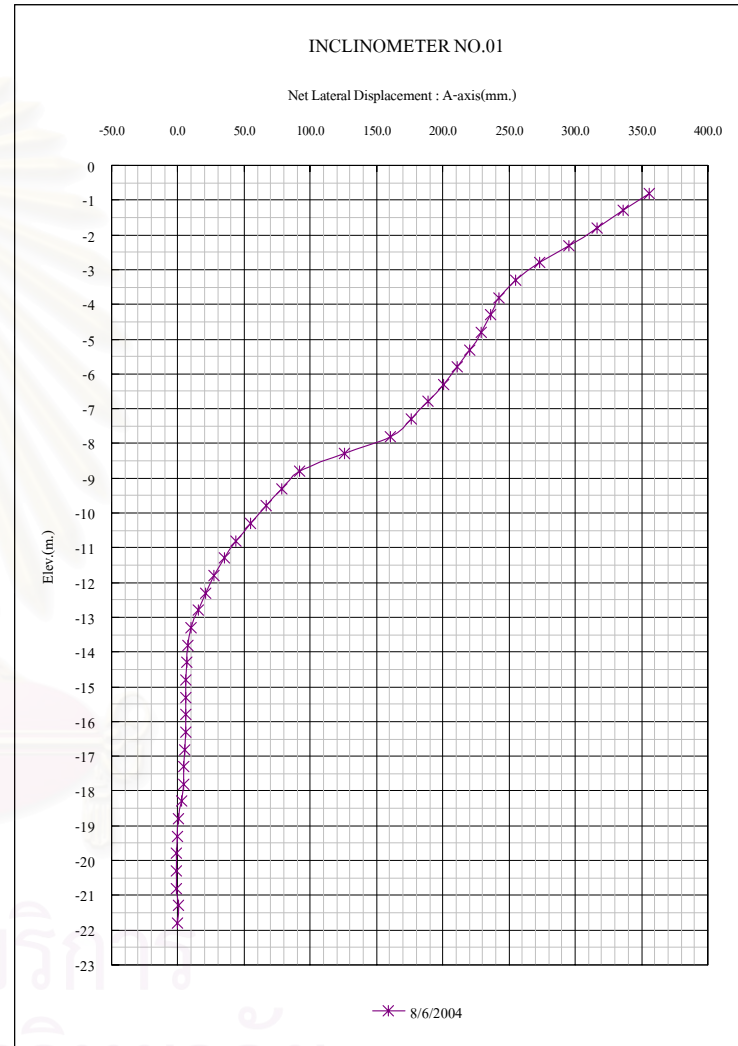
รูปที่ 4.6 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ก) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย



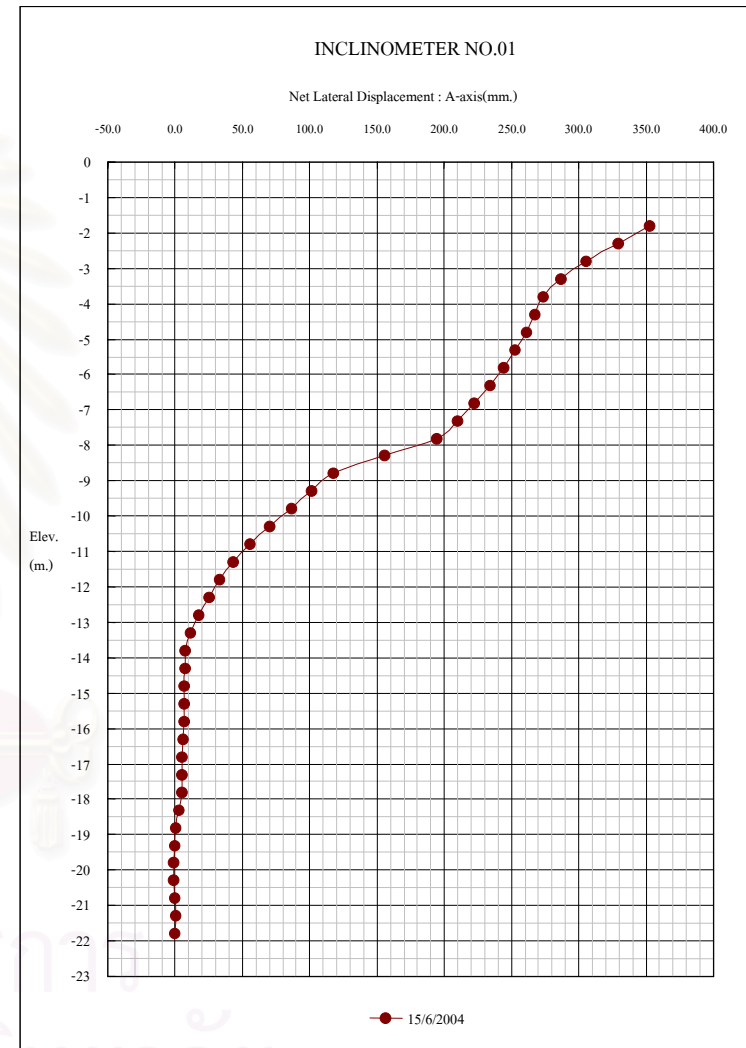
รูปที่ 4.7 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ข) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย



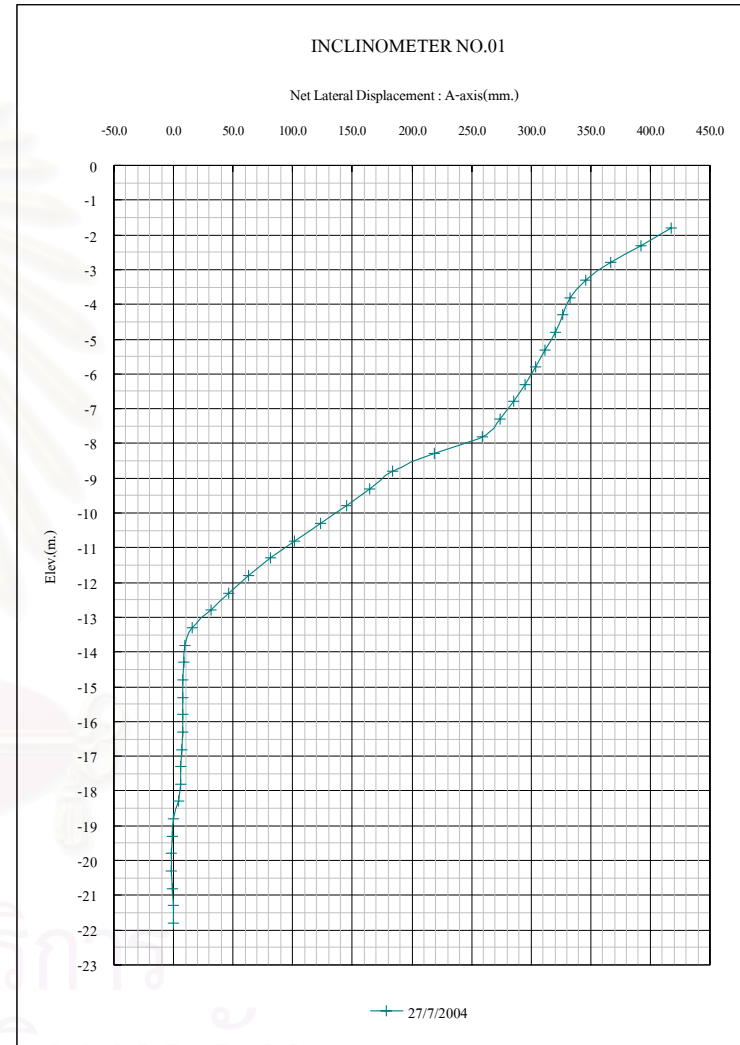
รูปที่ 4.8 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ค) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย



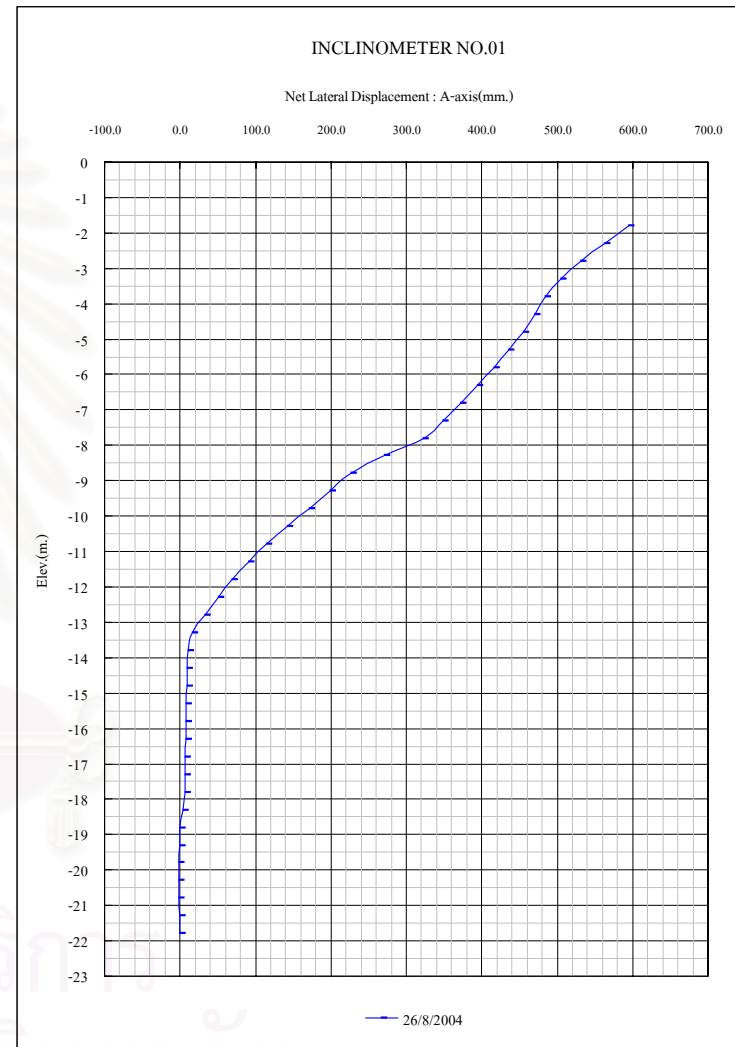
รูปที่ 4.9 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ง) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้ายซ้าย



รูปที่ 4.10 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง จ) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย



รูปที่ 4.11 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ค) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้าย



รูปที่ 4.12 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ข) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งซ้ายซ้ายซ้าย

4.2.1.2 โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินฝั่งขวาของประตูระบายน้ำ

จากข้อมูลการเคลื่อนตัวของเครื่องมือ Inclinator 02 และ 03 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) ขั้นตอนการขุดจากระดับ - 6.15 ม.รทก. ถึง -10.00 ม.รทก.
ใช้เป็นขั้นตอนแรกในการศึกษาและมีการนำเครื่องจักรเข้าไปติดตั้งเข็มพีคเหล็กโดยยื่นบนคันดิน โดยปริมาณการเคลื่อนตัวมากที่สุด มีค่า 725.6 มม. สำหรับ INC-03 ประมาณ 749.7 มม. ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาดินซีเมนต์ และฐานของโครงสร้างกันดินเกิดการเคลื่อนตัว 1.80 มิลลิเมตร สำหรับ INC-03 ประมาณ 6.6 มม. ที่ระดับความลึก 17.50 ม. จากระดับดินเดิมดังรูป 4.13

ข) ขั้นตอนถมกลับทราย ระหว่างคอนกรีตพื้น P2R และเข็มพีคเหล็ก SPR2 เพื่อถอดค้ำยันและเข็มพีคเหล็ก SPR2 ออก รวมทั้งมีการนำเครื่องจักรสำหรับงานขุดเข้าไปในบริเวณ P1R เพื่อลดระดับดินในพื้นที่ด้านหลัง SPR2 ผลของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินสูงขึ้นมาก สำหรับ INC-02 ประมาณ 1413.9 มม. และสำหรับ INC-03 ประมาณ 1437.3 มม. ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดิน และที่ฐานของโครงสร้างกันดินเกิดการเคลื่อนตัวสำหรับ INC-02 ประมาณ 0.7 มม. และ INC-03 ประมาณ 2.0 มม. เนื่องจากเครื่องจักรที่เข้าไปในพื้นที่ที่ระดับความลึก 17.50 ม. จากระดับ ดังรูปที่ 4.14

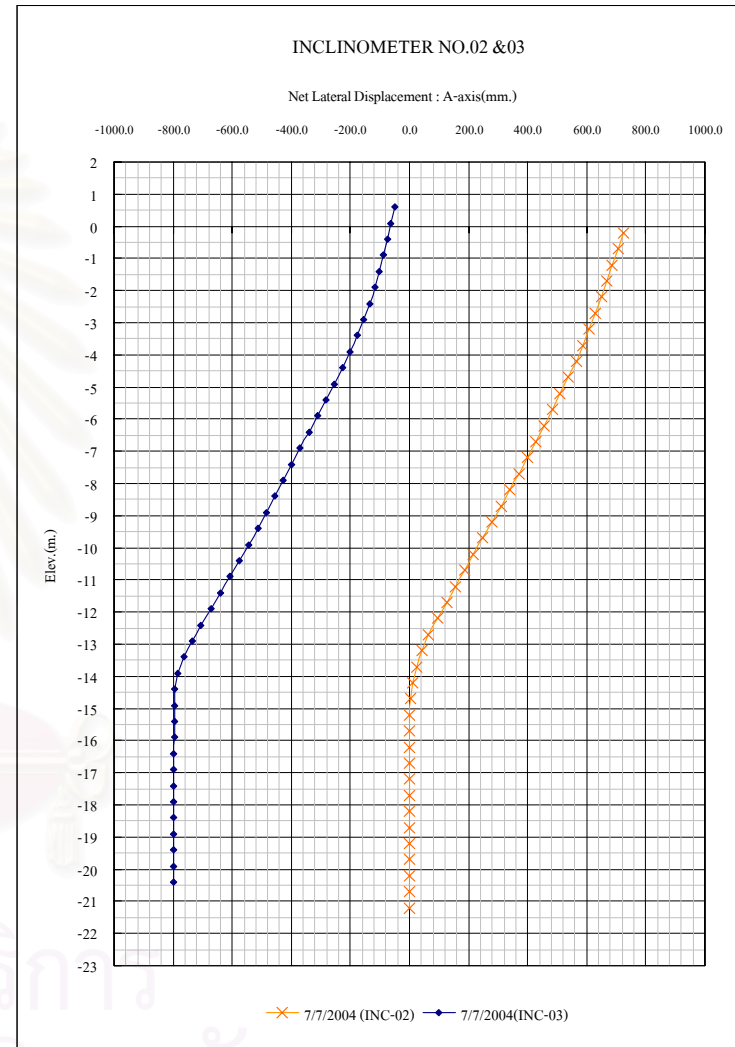
ค) ขั้นตอนงานขุดจากระดับ -2.00 ม.รทก. ถึง -4.00 ม.รทก.
พร้อมทั้งติดตั้งค้ำยันในบริเวณ P1R เพื่อติดตั้งค้ำยันชุดที่ 2 พบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวมากที่สุด สำหรับ INC-02 ประมาณ 1,668.5 มม. และ INC-03 ประมาณ 1,732.8 มม. ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดินและที่ฐานของโครงสร้างกันดินเกิดการเคลื่อนตัวสำหรับ INC-02 มีค่าประมาณ 1.9 มม. และสำหรับ INC-03 มีค่าประมาณ 7.2 มม. ดังรูปที่ 4.15

ง) ขั้นตอนงานขุดจากระดับ -6.00 ม.รทก. ถึง -10.00 ม.รทก.
พร้อมทั้งติดตั้งค้ำยันชุดที่ 4 ในบริเวณ P1R นอกจากนี้โครงการก่อสร้างข้างเคียงได้นำเครื่องจักรขนาด 250 ตัน เข้ามาพักไว้ในพื้นที่ข้างพื้นที่งานขุด ส่งผลให้ปริมาณการเคลื่อนตัวมากที่สุด สำหรับ INC-02 ประมาณ 1,800.7 มม. และสำหรับ INC-03 ประมาณ 1,885.2 มม. ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดิน และที่ฐานของโครงสร้างกันดินเกิดการเคลื่อนตัวสำหรับ INC-02 มีค่าประมาณ 11.7 มม. และสำหรับ INC-03 มีค่าประมาณ 9.6 มม. ดังรูป 4.16

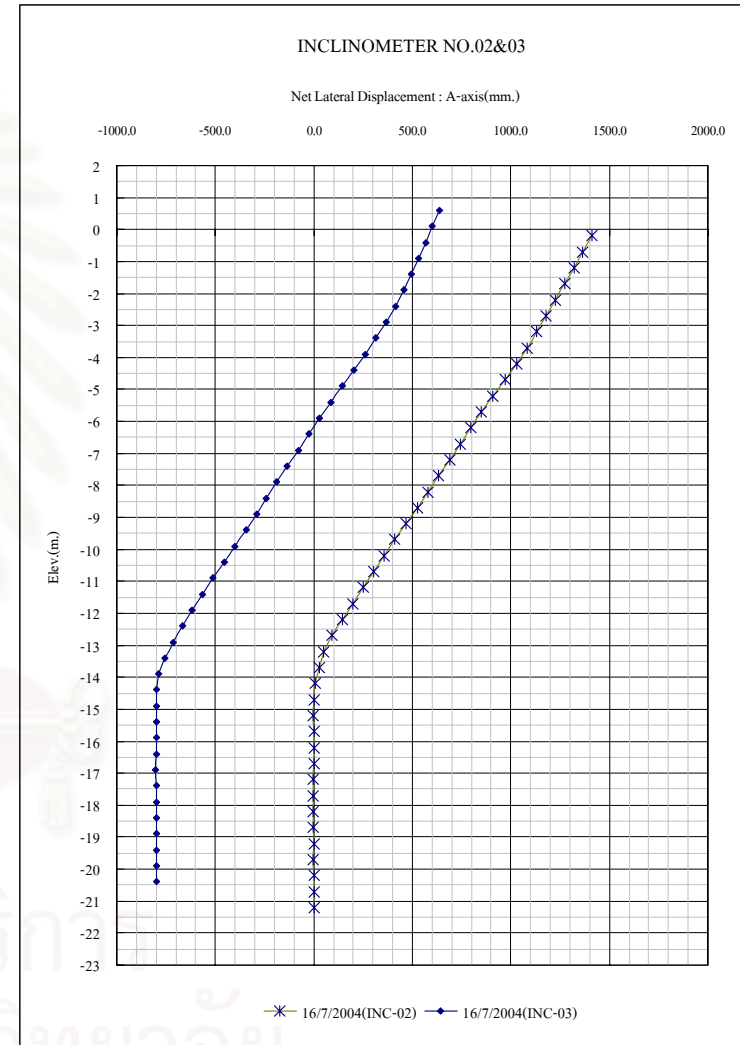
จ) เป็นขั้นตอนดำเนินการถมกลับระหว่างพื้น P1R และ SPR1

และเปลี่ยนจุดติดตั้งค้ำยันที่ระดับ - 4.00 ม.รทก. เพื่อให้พื้นที่งานโครงสร้างส่วนค้ำยันที่ระดับ - 2.00 ม.รทก. และ -8.00 ม.รทก. นั้น ไม่สามารถปลดออกได้ เนื่องจากในขั้นตอนดังกล่าวเครื่องจักรของโครงการข้างเคียงยังคงจอดพักอยู่ ปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดสำหรับ INC-02 ประมาณ 1,843.1 มม. และสำหรับ INC-03 ประมาณ 1933.3 มม. ที่ระดับบนสุดของโครงสร้างกันดิน และที่ฐานของโครงสร้างกันดินเกิดการเคลื่อนตัวสำหรับ INC-02 ประมาณ 14 มม. และ สำหรับ INC-03 ประมาณ 10.4 มม. ดังรูปที่ 4.17

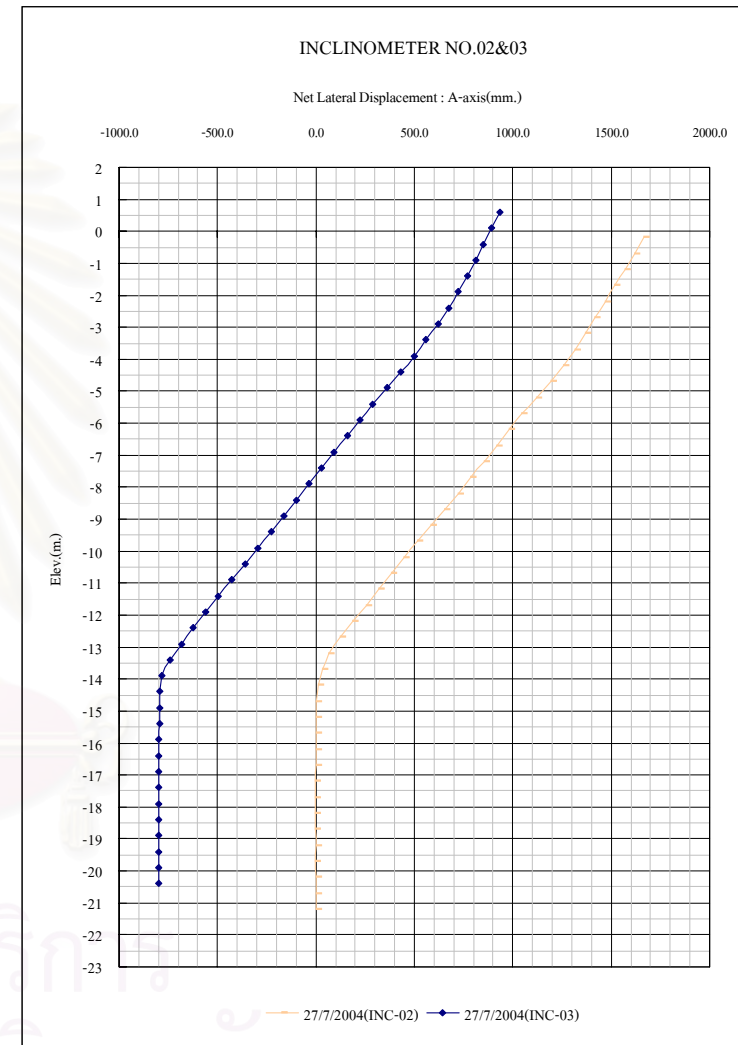
จากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่แสดงในรูปของขั้นตอนของการก่อสร้างเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งบนสุดและฐานของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มต่จะพบว่าตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้าง และที่ฐานของโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวน้อยที่สุดก็สามารถสรุปได้ว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเป็น Cantilever Beam เมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวจากเครื่องมือ INC-02 และ INC-03 พบว่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง INC-03 จะมากกว่า INC-02 ทุกขั้นตอนการก่อสร้างซึ่งกรณีนี้ไม่ควรจะเกิดขึ้นสำหรับโครงสร้างกันดินแบบ Gravity Wall เนื่องจากการเคลื่อนตัวด้านข้างที่แตกต่างกันเนื่องจากองศาที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับแนวตั้งที่ต่างกัน สำหรับการเคลื่อนตัวลักษณะดังกล่าวจะใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element method เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่อไป



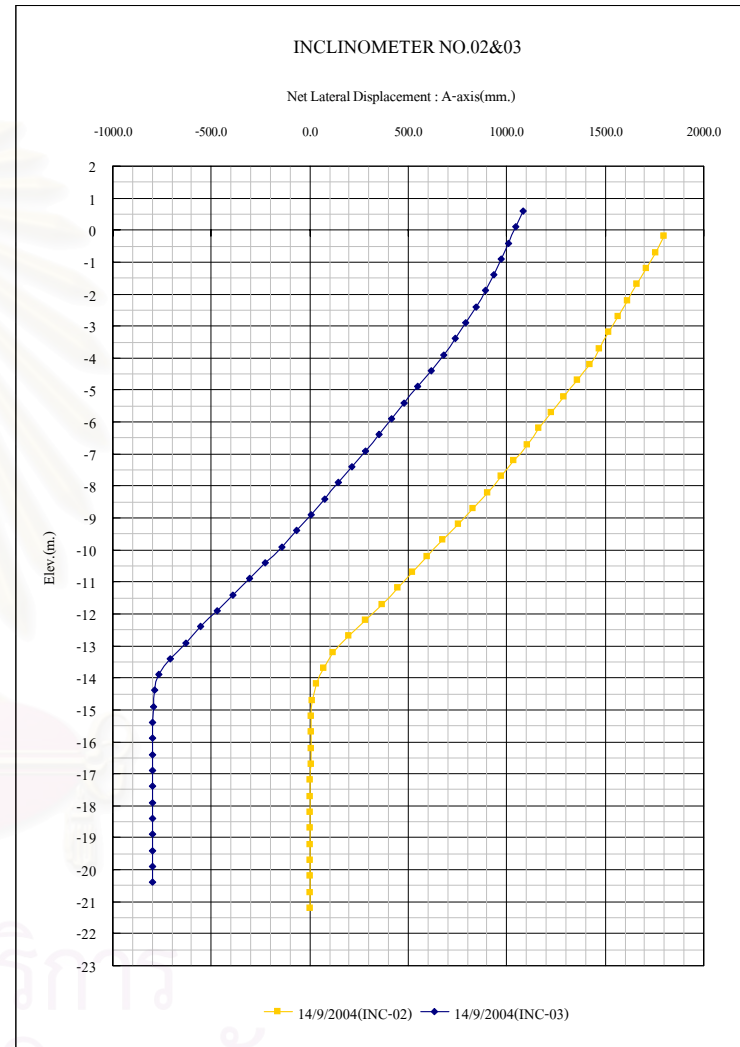
รูปที่ 4.13 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ก) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวา



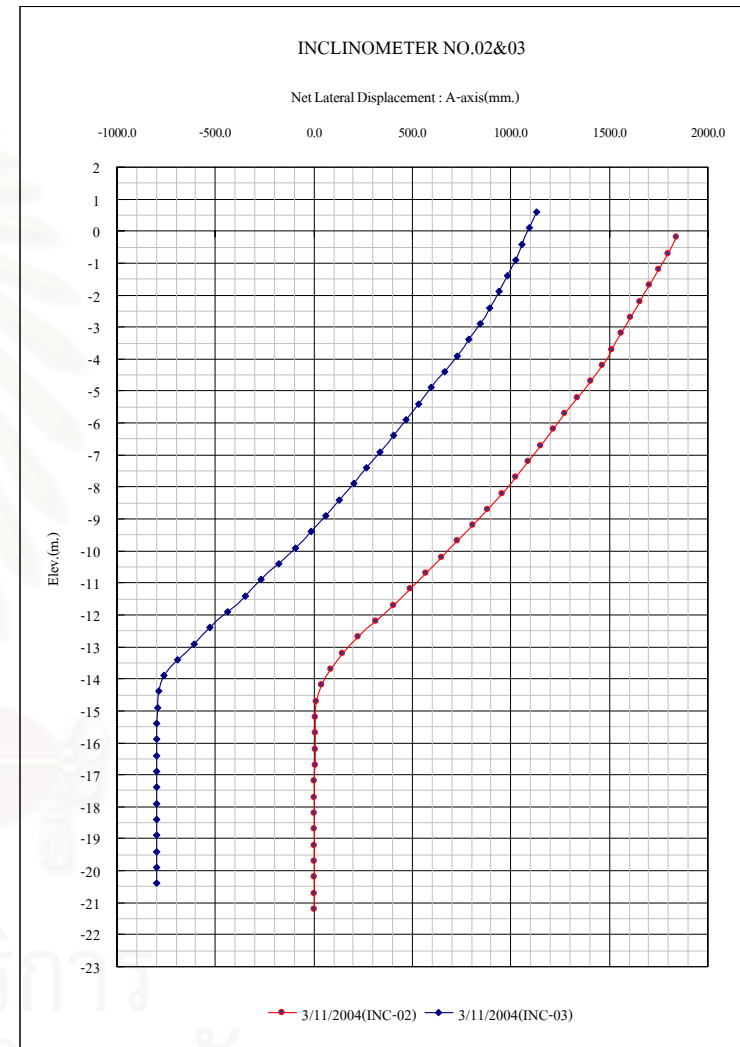
รูปที่ 4.14 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ข) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวาซ้าย



รูปที่ 4.15 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ค) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวาซ้าย



รูปที่ 4.16 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง ง) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวาซ้าย



รูปที่ 4.17 ภาพขั้นตอนการก่อสร้าง จ) และค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินฝั่งขวาซ้าย

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินบริเวณคลอง

ผลการศึกษาสามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 ส่วน เนื่องจากงานในส่วนคลองนั้นมีความยาวเพื่อให้การศึกษาครอบคลุมจึงเลือกพิจารณาเป็น 3 หน้าตัดด้วยกัน สำหรับการศึกษาจะเป็นการศึกษาการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดินระหว่างการก่อสร้างคลอง โดยอาศัยข้อสรุปลักษณะการเคลื่อนตัวแบบคานยื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ส่วนประจุนำ และเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลสำรวจการเคลื่อนตัวด้านข้าง

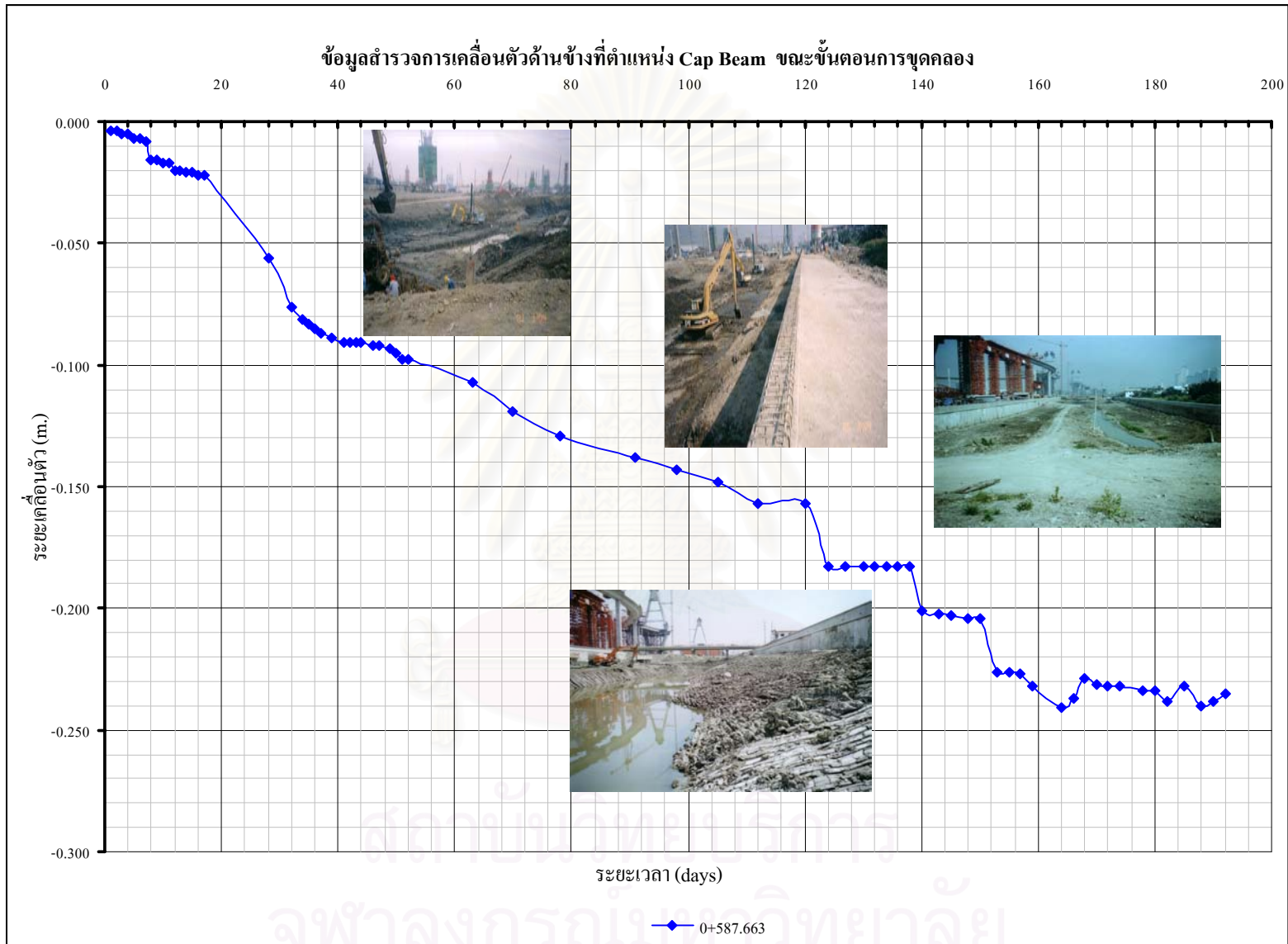
4.2.2.1 โครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินของคลอง กม. 0+587.663

จากข้อมูลการเคลื่อนตัวจากการสำรวจ แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) ขั้นตอนการขุดจากระดับ - 1.00 ม.รทก. ถึงระดับ - 3.00 ม.รทก.บริเวณกลางคลอง เพื่อก่อสร้างเสาดินซีเมนต์ที่พื้นคลองความลึก 1.00 ม. เป็นขั้นตอนแรกของการเก็บข้อมูลสำรวจ ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (อ้างอิง จากข้อมูล ปตร. เนื่องจากพบว่าตำแหน่งการเคลื่อนตัวสูงที่สุดจะอยู่ในส่วนบนของโครงสร้างกั้นคานยื่น (Cantilever mode)) ประมาณ 98 มม. ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 4.00 ม.

ข) ขั้นตอนการขุดจากระดับ - 1.00 ม.รทก. ถึงระดับ -3.00 ม.รทก. บริเวณริมคลอง ชิดกับโครงสร้างกันดิน เพื่อก่อสร้างเสาดินซีเมนต์ที่พื้นคลอง ความลึก 1.00 ม. ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ประมาณ 183 มิลลิเมตร ที่ความลึกงานขุด 4.00 ม.จากระดับดินเดิม

ค) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -3.00 ม.รทก. ถึงระดับ - 4.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลอง เพื่อเป็นร่องน้ำสำหรับระบายน้ำในส่วนของคลอง ในขั้นตอนนี้พบรอยแยกระหว่างโครงสร้างเสาดินซีเมนต์แถวสุดท้ายกับดินด้านหลังโครงสร้างกันดิน แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ประมาณ 201 มิลลิเมตร ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 5.00 ม.



รูปที่ 4.18 การเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินคลองที่ กม.0+587.663

ง) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -4.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลองโดยทิ้งขาคล่องความกว้าง 9.50 ม. ใช้ลาดดิน 1:2 โดยมีระดับน้ำภายในคลองระหว่างการขุดที่ - 5.00 ม.รทก. พบรอยแยกระหว่างโครงสร้างเสาดินซีเมนต์แถวสุดท้ายกับดินด้านหลังโครงสร้างกับดินมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยไม่พบรอยแยกระหว่างเสาดินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 และตำแหน่งในรูปที่ 4.21 ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ประมาณ 226 มิลลิเมตร ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 8.00 ม.

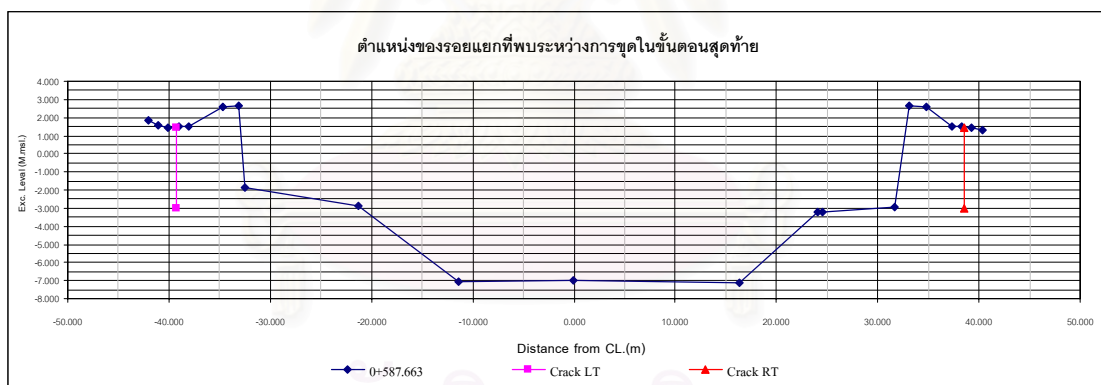


รูปที่ 4.19 รอยแยกด้านหลังโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินคลอง กม. 0+587.663

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 รอยแยกด้านหลังโครงสร้างเสาคอนกรีตกั้นดินคลองขยายใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.21 ตำแหน่งของรอยแยกของคลองที่ กม. 0+587.663 จากการสำรวจก่อนเติมน้ำ

จากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกั้นดินก่อสร้างด้วยเสาคอนกรีต ไม่พบการแยกตัวของเสาคอนกรีตภายในโครงสร้างกั้นดิน แต่พบการแยกตัวของโครงสร้างกั้นดินทั้งหมดออกจากมวลดินด้านหลังซึ่งเริ่มแยกตัวในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งมีค่าการเคลื่อนตัวแนวราบ 183 มิลลิเมตร เมื่อใช้ข้อสรุปพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกั้นดินในลักษณะ Cantilever mode ที่ได้จากโครงสร้างของประตูระบายน้ำข้างฝั่งซ้ายและฝั่งขวา สรุปว่ารอยแยกนั้นมีขนาดใหญ่ที่สุดที่ผิวดิน ทั้งนี้ลักษณะการเคลื่อนตัวดังกล่าวจะวิเคราะห์ ด้วยวิธี Finite Element Method เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่อไป

4.2.2.2 โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกันดิน ของคลอง กม. 0+612.630

จากข้อมูลการเคลื่อนตัวของโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 สามารถอธิบายได้ดังนี้

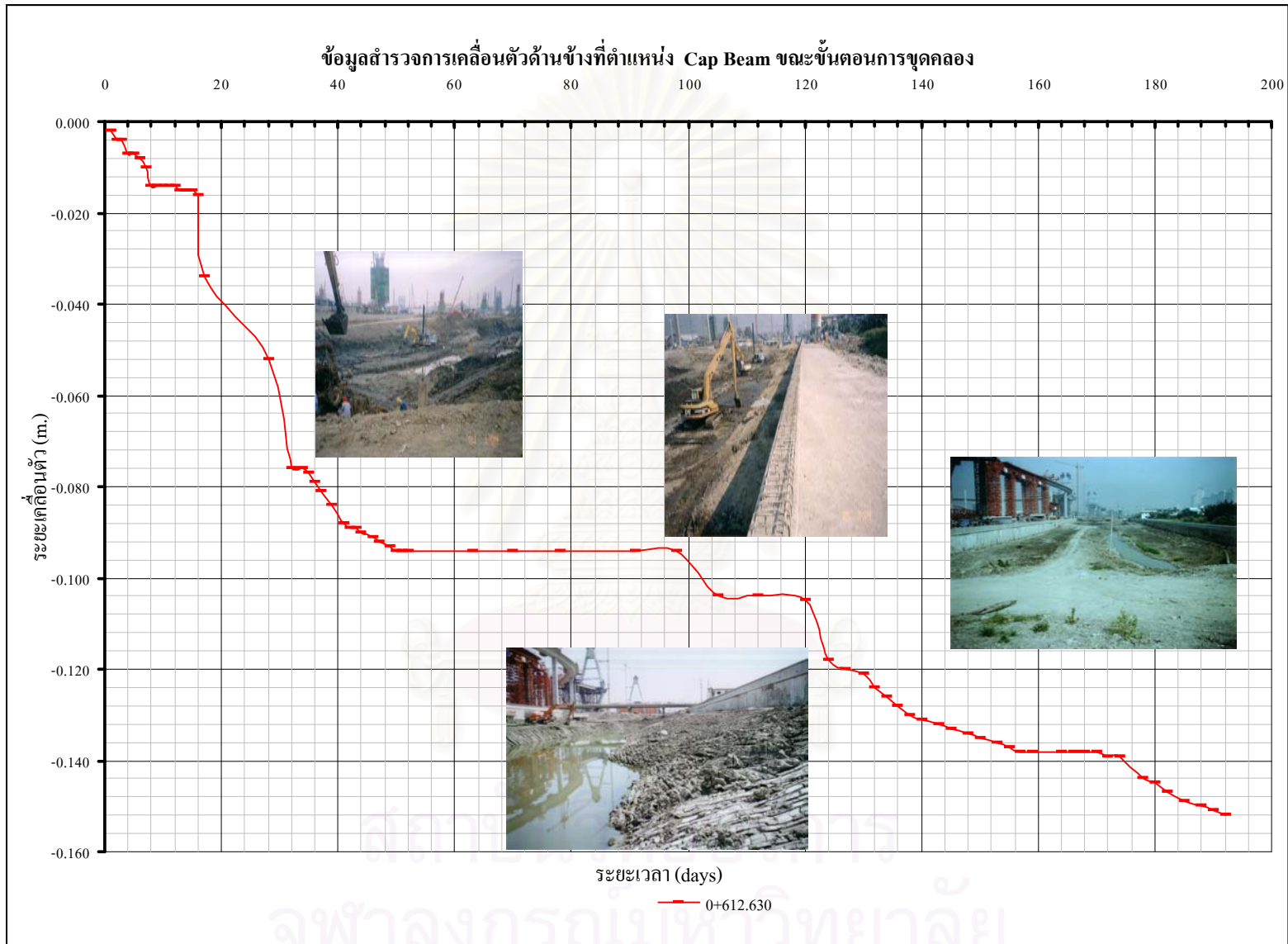
ก) ขั้นตอนงานขุดจากระดับ -1.00 ม.รทก. ถึงระดับ -3.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลอง เพื่อก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพื้นคลองลึก 1.00 ม. เป็นขั้นตอนแรกของการเก็บข้อมูลสำรวจ ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ส่วนบนของโครงสร้างกันดินประมาณ 94 มม. ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 4.00 ม.

ข) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -1.00 ม.รทก. ถึงระดับ -3.00 ม.รทก. บริเวณริมคลอง ชิดกับโครงสร้างกันดิน เพื่อก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่พื้นคลองความลึก 1.00 ม. ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ส่วนบนสุดของโครงสร้างกันดินประมาณ 118 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 4.00 ม. จากดินเดิม

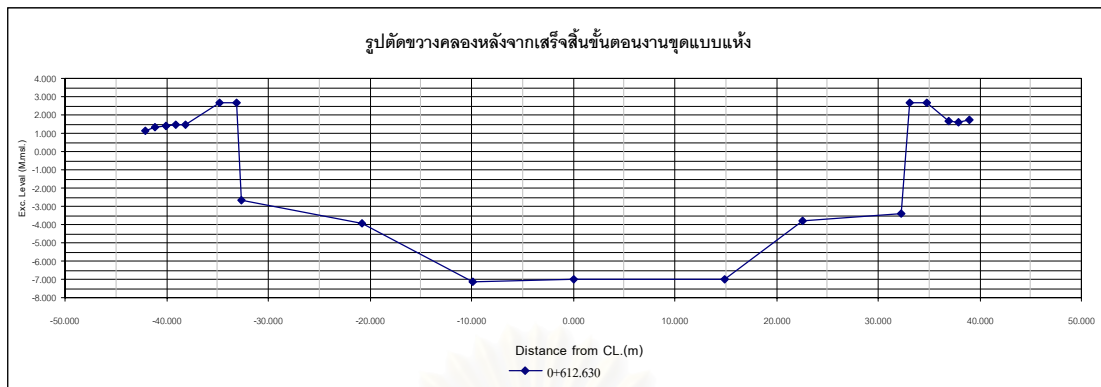
ค) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -3.00 ม.รทก. ถึงระดับ -4.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลอง เพื่อเป็นร่องน้ำสำหรับระบายน้ำในคลอง ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดินประมาณ 134 มิลลิเมตร ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 5.00 ม.

ง) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -4.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลอง โดยที่ท้องคลองความกว้าง 9.50 ม. ใช้ลาดดิน 1:2 โดยมีระดับน้ำภายในคลองระหว่างการขุดที่ - 5.00 ม.รทก. ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดินประมาณ 151 มิลลิเมตร ระดับความแตกต่างของดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 8.00 ม.

จากพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไม่พบการแยกตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายในโครงสร้างกันดินและระหว่างโครงสร้างกันดินและมวลดินด้านหลัง ซึ่งแตกต่างจากหน้าตัด กม. 0+587.663 ซึ่งสอดคล้องกับผลกำลังที่ได้ดำเนินการเจาะทดสอบของหน้าตัดที่พิจารณาของหน้าตัด กม.0+612.630 เฉลี่ยทุกความลึกสูงกว่าหน้าตัด กม. 0+587.663 จากสรุปพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินในลักษณะ Cantilever mode พบว่าค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของหน้าตัด เท่ากับ 151 มิลลิเมตร โดยไม่มีรอยแยกใดๆ ดังรูปที่ 4.23 รูปตัดขวางสุดท้ายของงานขุด กม. 0+612.630



รูปที่ 4.22 การเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินคลองที่ กม.0+612.630



รูปที่ 4.23 รูปตัดขวางหลังจากการระเบิดในชั้นตอนสุดท้ายของ กม.0+612.630

4.2.2.3 โครงสร้างเสาหินซีเมนต์กั้นดินของคลอง กม. 0+662.540

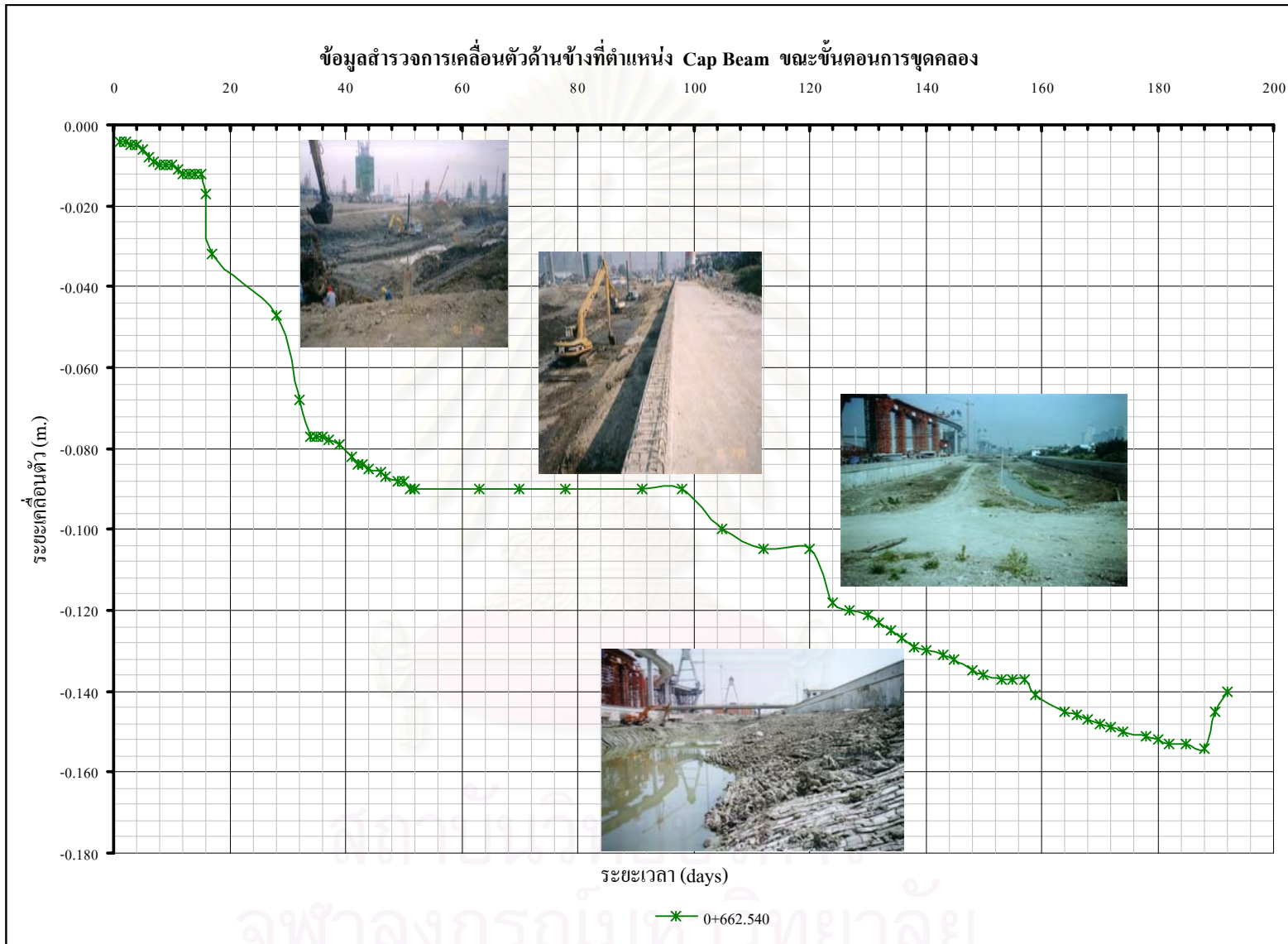
จากข้อมูลการเคลื่อนตัวจากการสำรวจแสดงไว้ในรูปที่ 4.24 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -1.00 ม.รทก. ถึง ระดับ -3.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลอง เพื่อก่อสร้างเสาหินซีเมนต์ที่พื้นคลองลึก 1.00 ม. เป็นขั้นตอนแรกของการเก็บข้อมูลสำรวจ ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ส่วนบนของโครงสร้างกั้นดินประมาณ 90 มม. ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 4.00 ม.

ข) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -1.00 ม.รทก. ถึงระดับ -3.00 ม.รทก. บริเวณริมคลอง ชิดกับโครงสร้างกั้นดินเพื่อก่อสร้างเสาหินซีเมนต์ที่พื้นคลองความลึก 1.00 ม. ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ส่วนบนสุดของโครงสร้างกั้นดินประมาณ 115 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 4.00 ม. จากดินเดิม

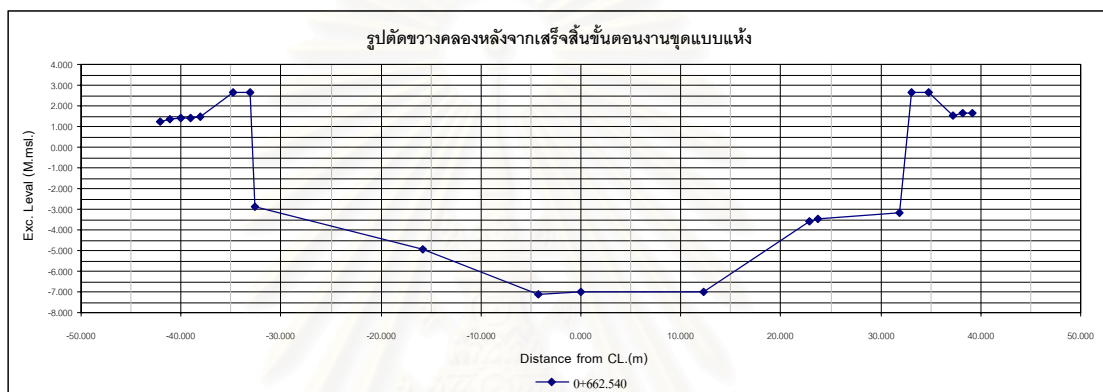
ค) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -3.00 ม.รทก. ถึงระดับ -4.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลอง เพื่อรองรับการระบายน้ำในคลอง ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกั้นดินประมาณ 134 มิลลิเมตร ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 5.00 ม.

ง) ขั้นตอนการขุดจากระดับ -4.00 ม.รทก. ถึงระดับ -7.00 ม.รทก. บริเวณกลางคลอง โดยที่ขนาดความกว้าง 9.50 ม. วัสดุดิน 1:2 โดยมีระดับน้ำภายในคลองระหว่างการขุดที่ -5.00 ม.รทก. ปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Cantilever mode) ที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกั้นดินประมาณ 151 มิลลิเมตร ความแตกต่างของระดับดินภายนอกและภายในคลองเท่ากับ 8.00 เมตร



รูปที่ 4.24 การเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินคลองที่ กม.0+662.540

จากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มที่ไม่พบการแยกตัวของเสาเข็มภายในโครงสร้างกันดินและระหว่างโครงสร้างกันดินและมวลดินด้านหลัง ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับ กม. 0+612.630 และยังมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในขั้นตอนสุดท้ายเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับผลกำลังที่ได้ดำเนินการเจาะทดสอบของหน้าตัดที่พิจารณาของหน้าตัด กม.0+662.540 เฉลี่ยทุกความลึกใกล้เคียงหน้าตัด กม. 0+612.630 จากสรุปพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินในลักษณะ Cantilever mode พบว่าค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของหน้าตัด เท่ากับ 151 มิลลิเมตร โดยไม่มีรอยแยกใดๆ ดังรูปที่ 4.25 รูปตัดขวางสุดท้ายของงานชุด กม. 0+662.540



รูปที่ 4.25 รูปตัดขวางหลังจากการขุดในขั้นตอนสุดท้ายของ กม.0+662.540

เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มกันดินส่วนบนของโครงสร้างทั้ง 3 หน้าตัดพบว่า การเคลื่อนตัวจะเพิ่มขึ้นที่ส่วนบนของโครงสร้างเมื่อเพิ่มความลึกของงานขุดดิน โดยการเคลื่อนตัวเป็นไปในลักษณะเดียวกันทั้ง 3 หน้าตัดที่พิจารณา และหน้าตัดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด คือ หน้าตัด กม. 0+587.663 ปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดินประมาณ 226 มิลลิเมตร ซึ่งการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเป็นผลให้เกิดรอยแยกระหว่างโครงสร้างเสาเข็มกันดินและมวลดินหลังโครงสร้างเท่านั้น โดยไม่เกิดการแยกตัวระหว่างเสาเข็มภายในโครงสร้างกันดิน โดยเริ่มแยกในขั้นตอนงานขุดขั้นที่ 3 สำหรับหน้าตัด 0+612.630 และ 0+662.540 ไม่เกิดการแยกตัว

4.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มตักันดินบริเวณประตูระบายน้ำ โดยวิธีไฟไนเอลิเมนต์

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มตักันดิน สำหรับการก่อสร้างประตูระบายน้ำ โดยวิธีการของไฟไนเอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS VERSION 7.2 ชนิดของแบบจำลองที่เลือกไว้ในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลอง Elastic perfectly plastic ,Material model Mohr – coulomb ที่เหมาะสำหรับการศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับดินซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ซับซ้อน รวมทั้งตอบสนองค่าตัวแปรที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและเจาะทดสอบในสนามสำหรับมีค่าของปัญหากำหนดให้เป็น 2 มิติ (Plain strain) เนื่องจากโครงสร้างเสาเข็มตักันดิน ที่ศึกษามีความยาว 600 ม. และมีความกว้าง 65 ม. ซึ่งอัตราส่วน B/L ใกล้เคียง 0 (Bjerrum and Eide,1956) ซึ่งเรียกลักษณะของปัญหาแบบนี้ว่า Infinite Long ดังนั้นการพิจารณาการเคลื่อนตัว จะพิจารณาเฉพาะแกน X-Y เท่านั้น เนื่องจากคุณสมบัติของดินซีเมนต์ทั้งหมดที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นเงื่อนไขกรณีไม่ระบายน้ำ เพื่อให้สามารถใช้ข้อมูลในแบบจำลองได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม จึงเลือกการวิเคราะห์โดยใช้วิธีหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แต่อยู่ในรูปของหน่วยแรงรวมพร้อมทั้งอาศัยหลักการ $\phi = 0$ มาใช้ในการวิเคราะห์ พร้อมทั้งกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเป็น non – porous สำหรับค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวจะใช้ E_u เป็น E_{50} เนื่องจากมีผลทดสอบจากห้องปฏิบัติการรองรับ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มตักันดินบริเวณประตูระบายน้ำ

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างตักันดิน ด้วยโปรแกรม PLAXIS นั้น จำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติและพารามิเตอร์วัสดุต่างๆ มาใช้เพื่อให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างตักันดินสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวของโครงสร้างตักันดินที่ได้จากข้อมูลการตรวจวัดของเครื่องมือ Inclinomter จากการก่อสร้างได้ โดยการวิเคราะห์ในส่วนของประตูระบายน้ำนั้น ได้ติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างตักันดิน 3 ตำแหน่ง ซึ่งอยู่ที่หน้าตัดขวางกันทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.23 แสดงตำแหน่ง Inclinomter การวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลทั้งหมด สำหรับค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของดินสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 สำหรับขั้นตอนในการวิเคราะห์ จะใช้ขั้นตอนเหมือนกับข้อ 4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างเสาเข็มตักันดิน บริเวณประตูระบายน้ำ

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินบริเวณประตูระบายน้ำ

ลำดับ	ประเภทวัสดุ	คุณสมบัติ								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		วัสดุดินเดิมในสถานที่ก่อสร้าง	γ_d	γ_w	kx	ky	V	Eref	Cref	Rinter
	(KN/m ³)	(KN/m ³)	(m./day)	(m./day)		(KN/m ²)	(KN/m ²)		Per.	
1	Soft Clay	9.48	14.22	5.0E-04	2.5E-04	0.5	942	7.85	1.00	N-porous
2	Medium Clay	10.31	16.19	1.7E-03	8.6E-04	0.5	4,905	24.53	1.00	N-porous
3	Stiff Silty Clay	14.12	18.64	1.7E-04	8.6E-05	0.5	41,202	117.72	1.00	N-porous
4	Very Stiff Silty Clay	16.49	19.62	1.7E-05	8.6E-06	0.5	100,062	166.77	1.00	N-porous

ลำดับ	ประเภทวัสดุ	คุณสมบัติ								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		วัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้าง	γ_d	γ_w	kx	ky	V	Eref	Cref	R _{inter}
	(KN/m ³)	(KN/m ³)	(m./day)	(m./day)		(KN/m ²)	(KN/m ²)		Per.	
1	DCM 0.00 - 3.00	12.16	16.42	7.5E-03	7.5E-03	0.119	50,045	1020.19	Trial	N-Porous
2	DCM 3.00 - 6.00	9.32	14.90	7.5E-03	7.5E-03	0.124	38,790	836.84	Trial	N-Porous
3	DCM 6.00 - 9.00	9.98	15.94	7.5E-03	7.5E-03	0.127	35,505	779.01	Trial	N-Porous
4	DCM 9.00 - 12.00	9.42	14.62	7.5E-03	7.5E-03	0.130	35,999	789.85	Trial	N-Porous
5	DCM 12.00 - 15.00	9.89	15.53	7.5E-03	7.5E-03	0.132	37,532	858.72	Trial	N-Porous
6	DCM 15.00 -17.50	11.09	14.71	7.5E-03	7.5E-03	0.138	38,023	869.95	Trial	N-Porous

เนื่องจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ครบทุกค่า คือ Wet Unit Weight (γ_t), 50% Secant Modulus of Elasticity (E_{50}), Undrained Shear strength (S_u) ดังนั้นสามารถใช้ค่าที่ได้ในการสร้างแบบจำลองได้ แต่ค่าพารามิเตอร์ที่สนใจและสอดคล้องกับพฤติกรรมการพังทลายของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน คือ กำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างเป็นโครงสร้างกันดิน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการพังทลายของโครงสร้าง เมื่อเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างมาก เป็นค่าที่ต้องประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่ประมาณได้ ด้วยการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลองกับค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากเครื่องมือ Inclinator

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างเสาคินซีเมนต์กันดิน โดยกำหนดให้ลักษณะของโครงสร้างเป็น Gravity Wall โดยไม่ลดกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาคินซีเมนต์พบว่า ไม่สามารถให้ค่าการเคลื่อนตัวที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างได้ ซึ่งปริมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดที่วิเคราะห์ได้เท่ากับ 322.39 มิลลิเมตร เท่านั้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับสมมติฐานว่ามีการเลื่อนและแยกกันของเสาคินซีเมนต์ภายในโครงสร้างเสาคินซีเมนต์ กันดินเนื่องจากสามารถให้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างได้สูงกว่า

ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองเพื่อทดสอบสมมติฐานดังกล่าว ด้วยการใส่ผิวสัมผัสระหว่างเสาคินซีเมนต์แต่ละต้นเพื่อให้สามารถลดทอนกำลัง ระหว่างผิวสัมผัสระหว่างเสาคินซีเมนต์ได้แล้ว เปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวที่ขั้นตอนการก่อสร้างเดียวกันเพื่อหาค่ากำลังของผิวสัมผัส ที่ให้ค่าการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากเครื่องมือ ผลจากการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินเปรียบเทียบ INC-01

รูปที่ 4.26 แสดงผลการวิเคราะห์การขุดจากระดับ -6.15 ม.รทก ถึง -10.00 ม.รทก เทียบกับค่าที่วัดได้จากสนามที่ระดับความลึกตั้งแต่ 0.8 เมตร ถึงระดับความลึก 15.3 เมตร แสดงให้เห็นว่าค่าที่วัดได้จริงและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM มีใกล้เคียงกันมาก เช่น ตำแหน่งที่มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ระดับ 0.8 ม.รทก ค่าที่วัดได้จากสนามเท่ากับ 98.2 มิลลิเมตร ส่วนค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เท่ากับ 113.01 มิลลิเมตร และพฤติกรรมจากการวิเคราะห์ยังมีลักษณะเดียวกันโดยที่ระดับความลึกของฐานโครงสร้างกันดิน การวิเคราะห์จากแบบจำลองให้ค่าการเคลื่อนตัวที่ระดับความลึก -15.3 ม.รทก เท่ากับ 3.00 มิลลิเมตร ค่ากำลังของผิวสัมผัสของเสาคินซีเมนต์ปริมาณ 85% ของกำลังรับแรงแบบไม่ระบายน้ำของเสาคินซีเมนต์

รูปที่ 4.27 แสดงผลของการวิเคราะห์ การถมกลับทรายและถอดค้ำยันชุดที่ 1 ค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของ FEM เท่ากับ 143.34 มิลลิเมตร สำหรับค่าที่ได้จากการวัด 162.8 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกันนอกจากนั้นยังพบว่าจุดหมุนของโครงสร้างอยู่ที่ฐานของโครงสร้างที่ระดับความลึกประมาณ -15.30 ม.รทก ค่ากำลังผิวสัมผัสของเสาคินซีเมนต์ประมาณ 70 % ของกำลังรับแรงเฉือน แบบไม่ระบายน้ำของเสาคินซีเมนต์

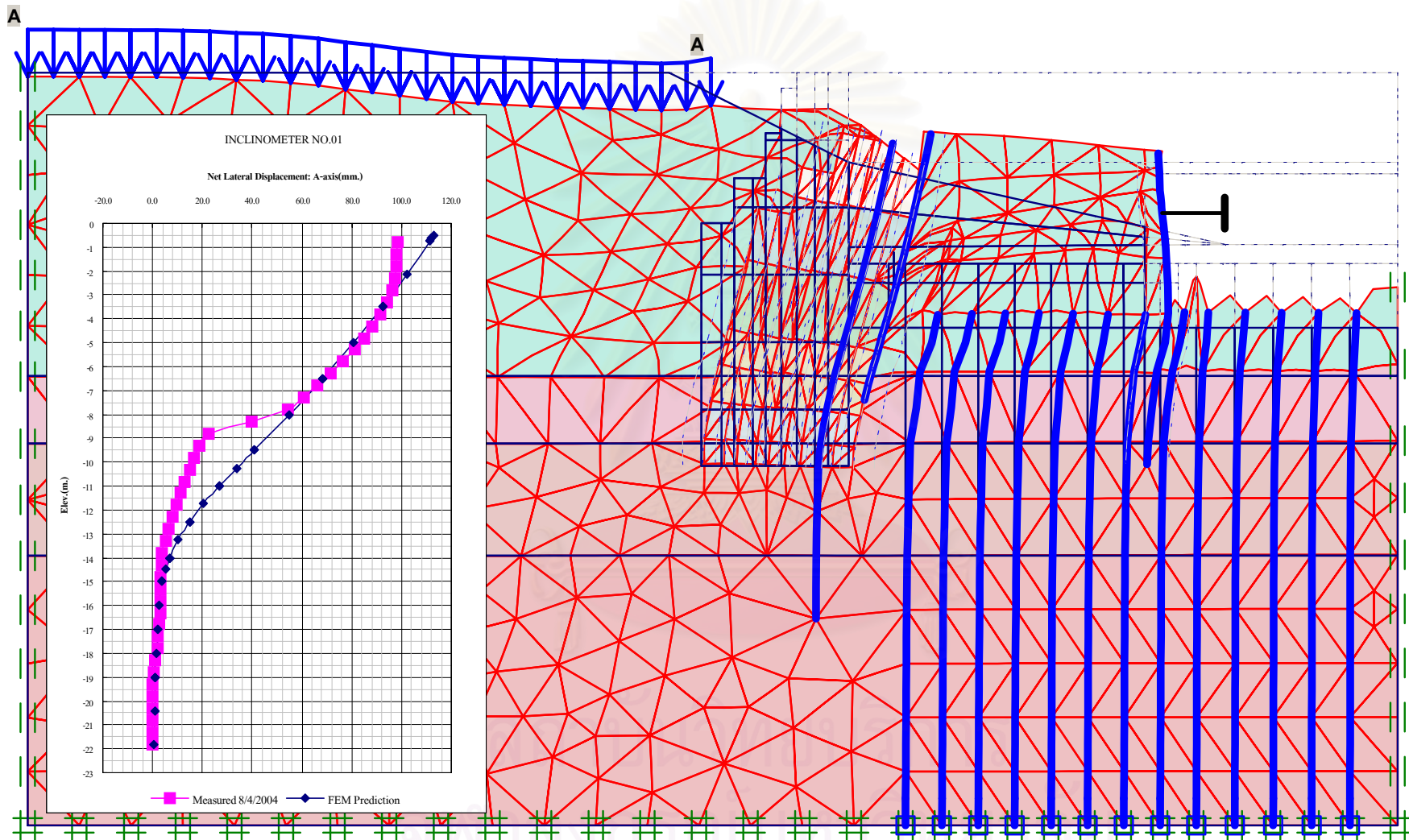
และเมื่อพิจารณารูปนี้ 4.28 , 4.29 , 4.30, 4.31 และ 4.32 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบตามขั้นตอนในข้อ 4.2.1.1 โครงสร้างเสาคินซีเมนต์กันดินฝั่งซ้ายของ ปตร. ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของ FEM เท่ากับ 234.79, 289.33, 323.71, 399.04 และ 525.47 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับปริมาณการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากเครื่องมือมีค่าประมาณ 267.6, 316.14, 353.0, 417.5 และ 594.4

มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับส่วนฐานของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินมีค่าใกล้เคียงกันทุกชั้นตอน การก่อสร้างซึ่งเป็นค่าการเคลื่อนตัวที่น้อย ค่ากำลังของผิวสัมผัสของเสาหินซีเมนต์ที่ให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวดังกล่าวมีค่าตั้งแต่ 80%,60%,53%,50% และ 35

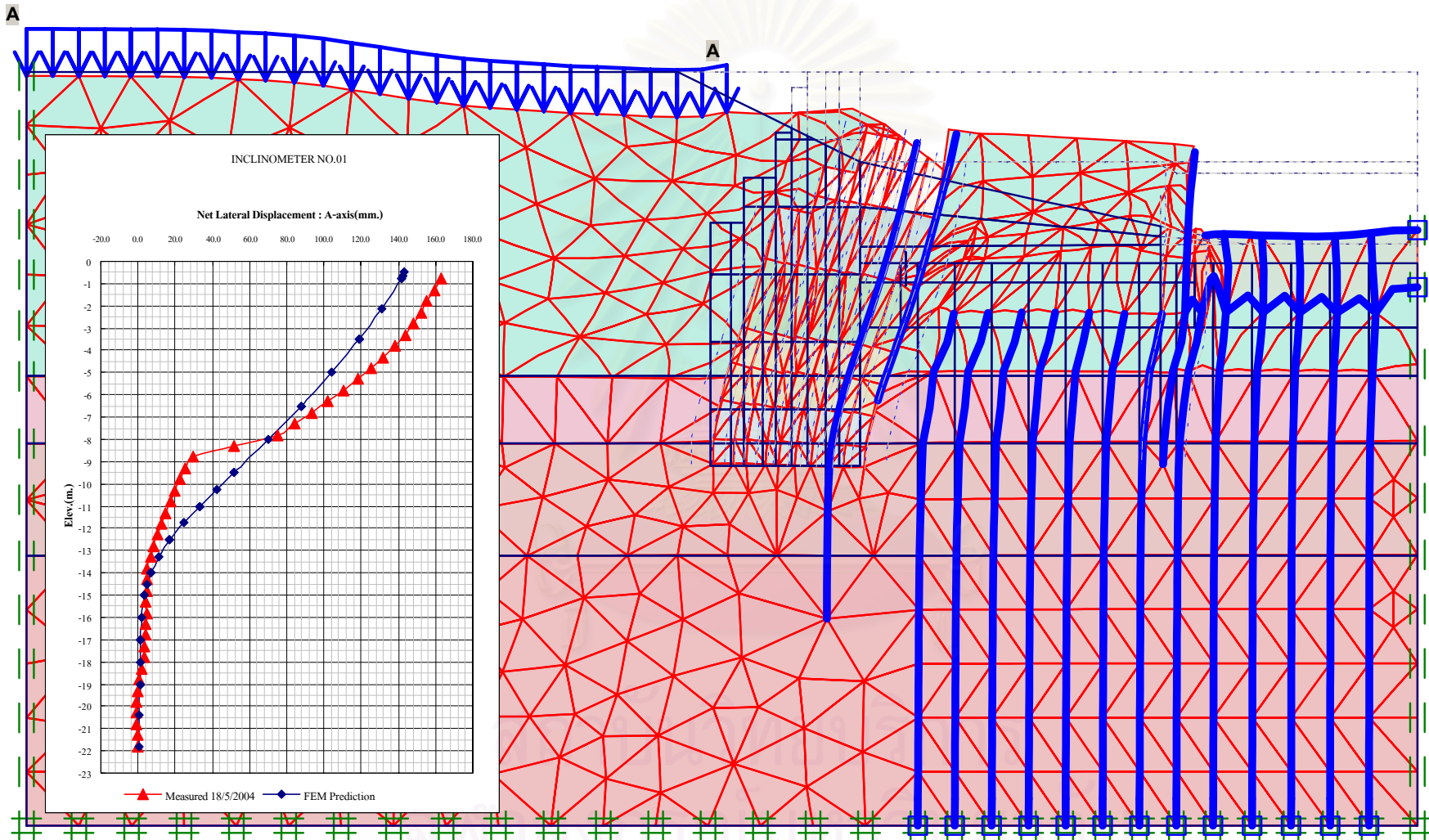
จากผลการวิเคราะห์ค่ากำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์ มีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยค่ากำลังของผิวสัมผัสจะมีค่าอยู่ระหว่าง 35% - 85% ของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาหินซีเมนต์ เมื่อค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้างอยู่ระหว่าง 98.2 มิลลิเมตร ถึง 594.4 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน มีแนวโน้มที่จะเกิดการเลื่อนและแยกกันของเสาหินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดินเมื่อค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังของผิวสัมผัสและปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน จะวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

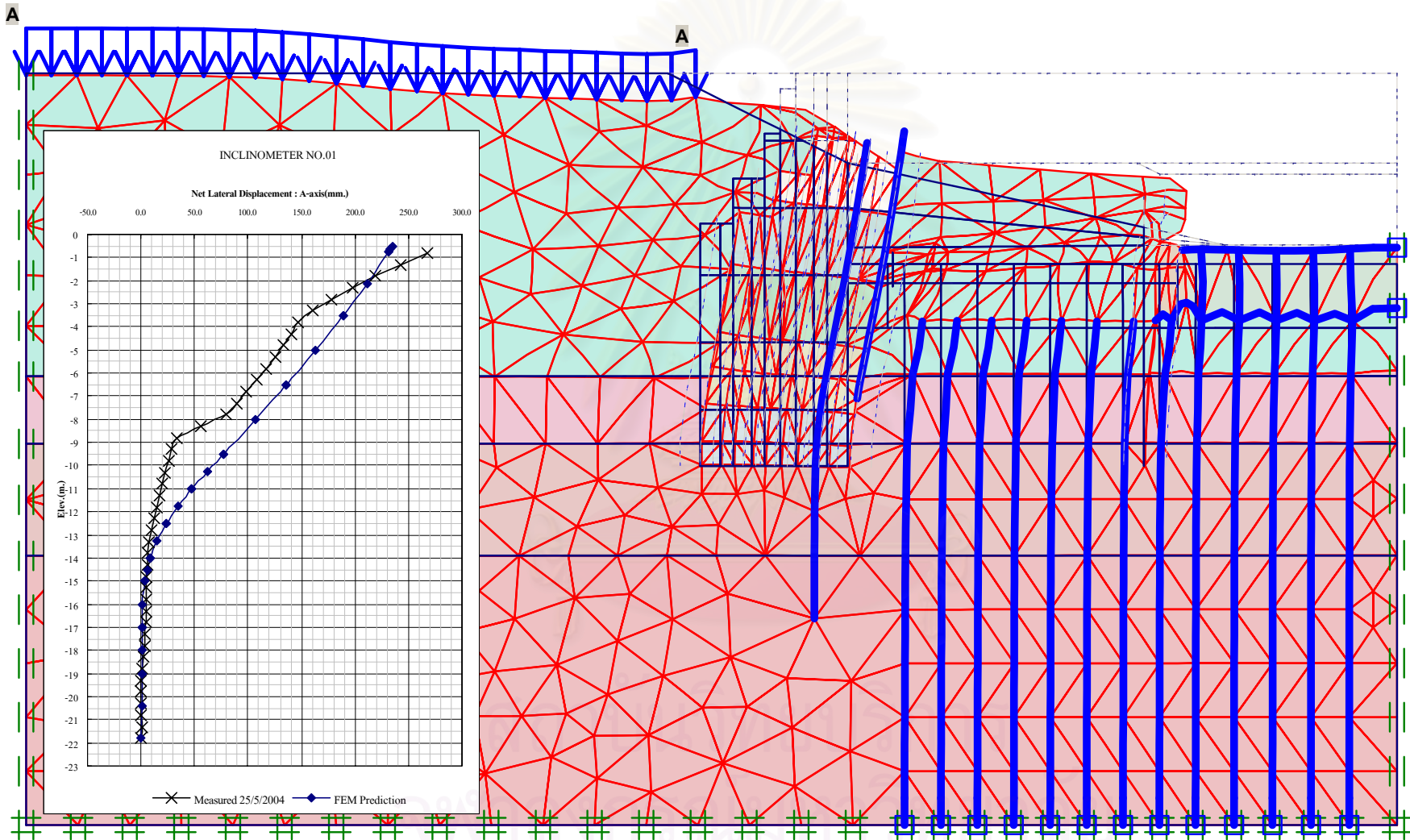


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

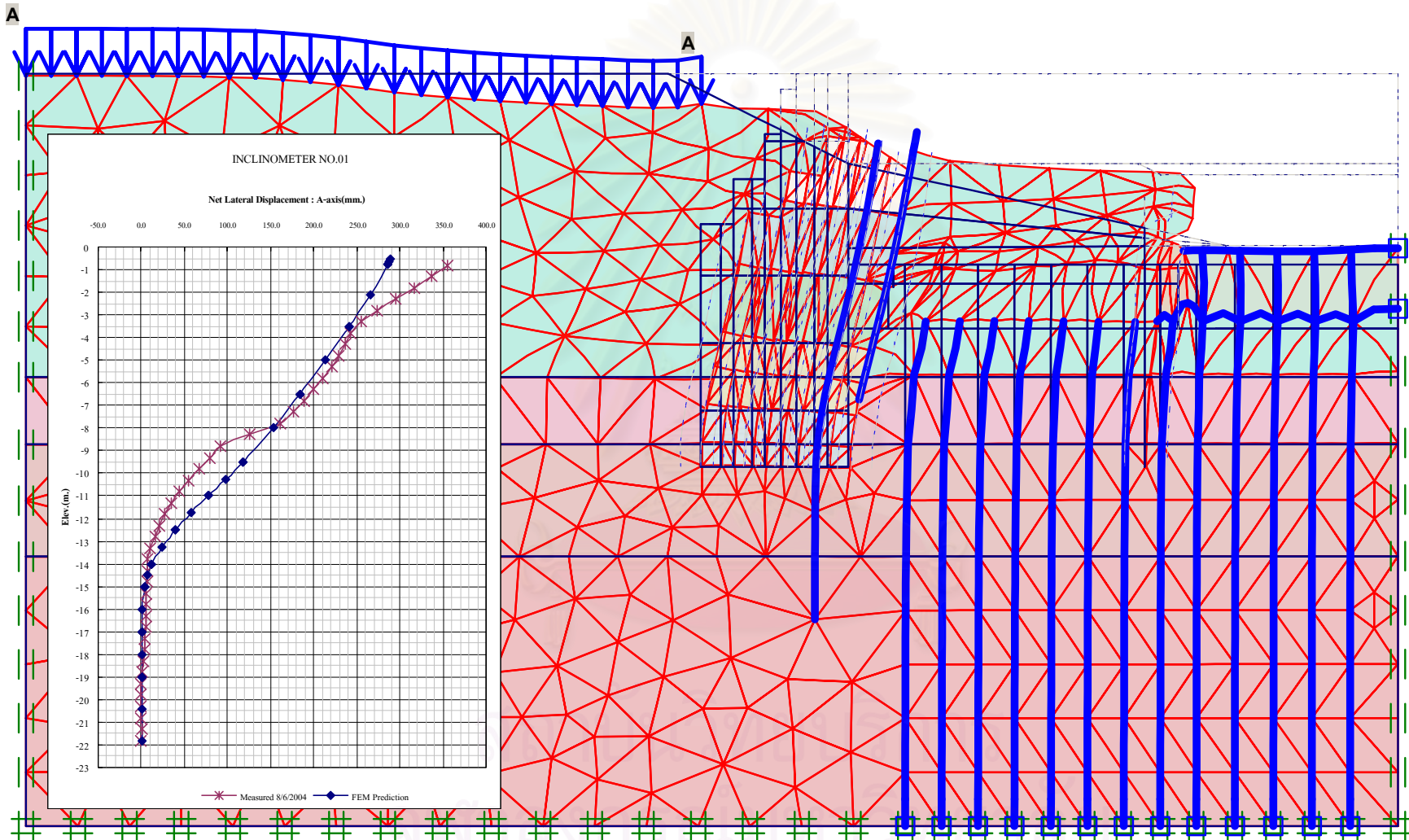


รูปที่ 4.26 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของตัวตามขั้นตอน ก) ข้อ 4.2.1.1

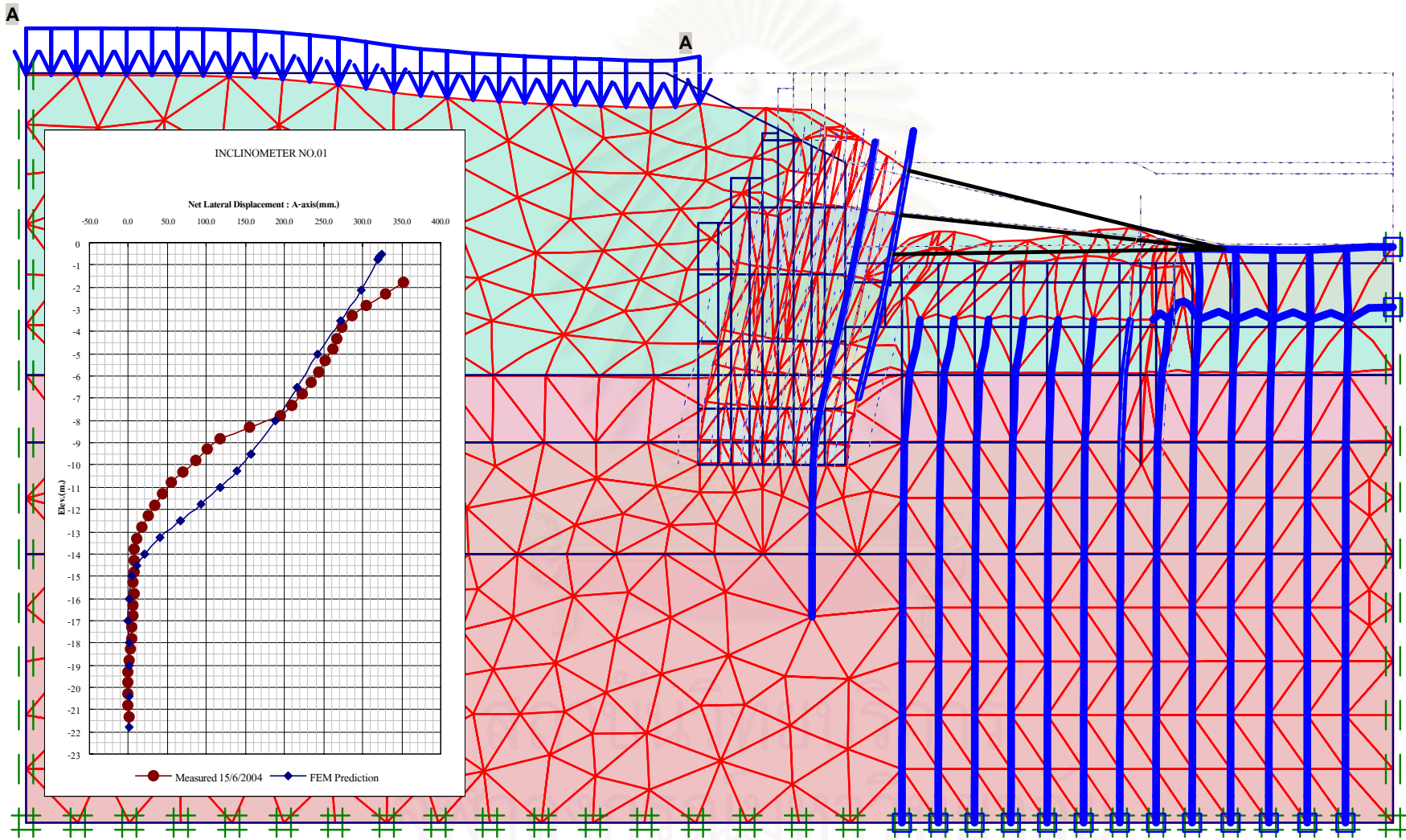




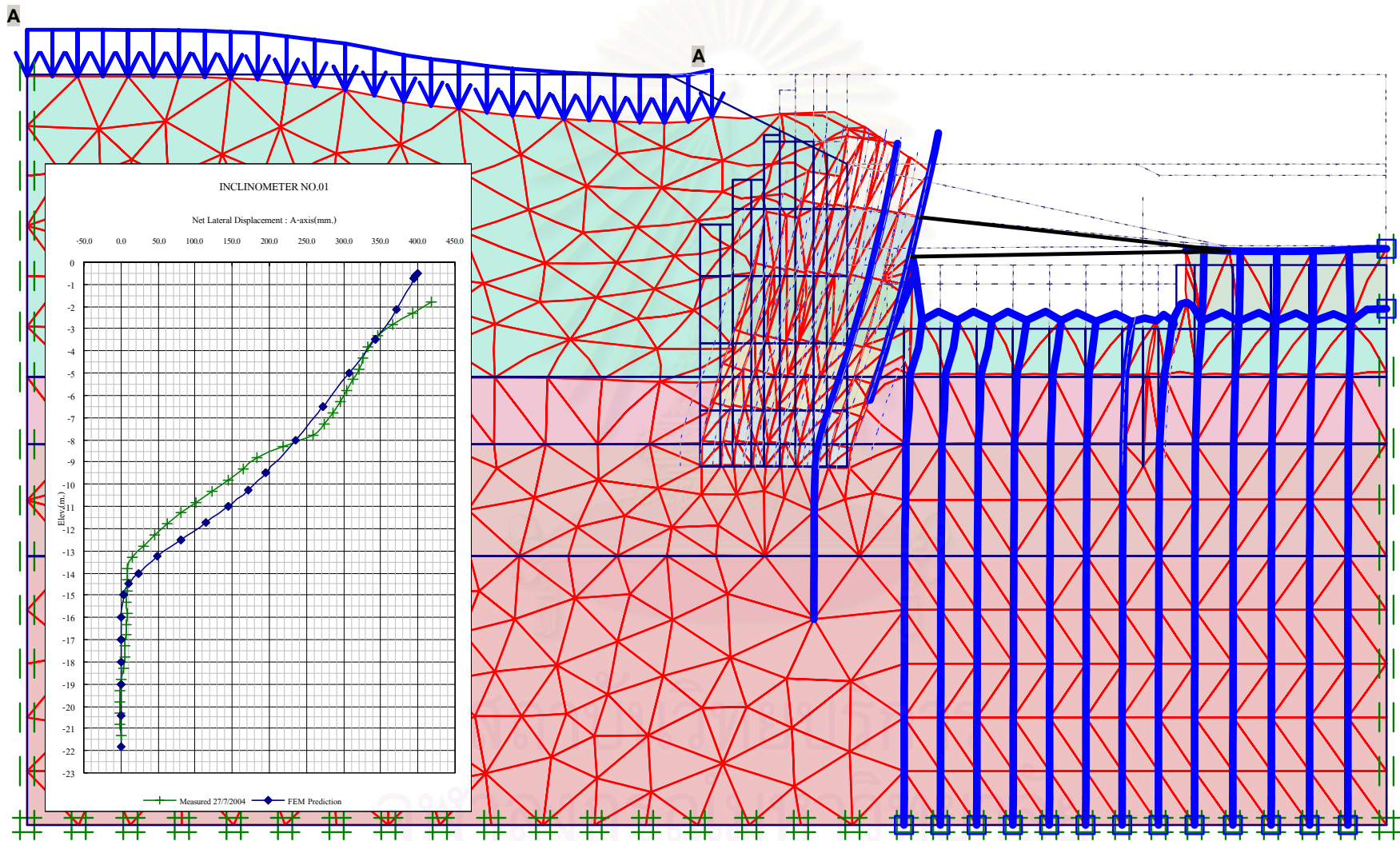
รูปที่ 4.28 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของตัวตามชั้นตอม ค) ข้อ 4.2.1.1



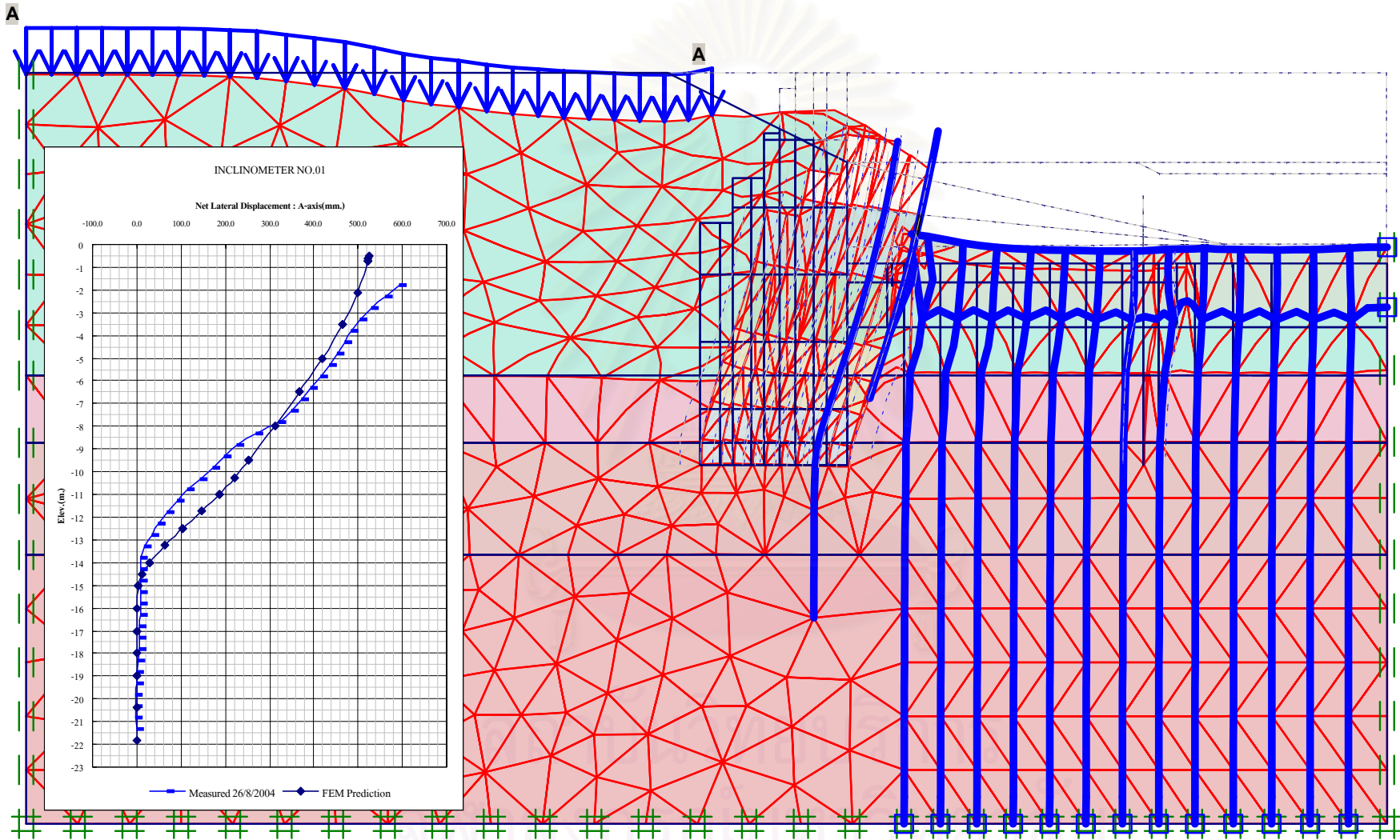
รูปที่ 4.29 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของตามชั้นตอน ง) ข้อ 4.2.1.1



รูปที่ 4.30 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นต่อน จ) ข้อ 4.2.1.1



รูปที่ 4.31 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอม ด) ข้อ 4.2.1.1



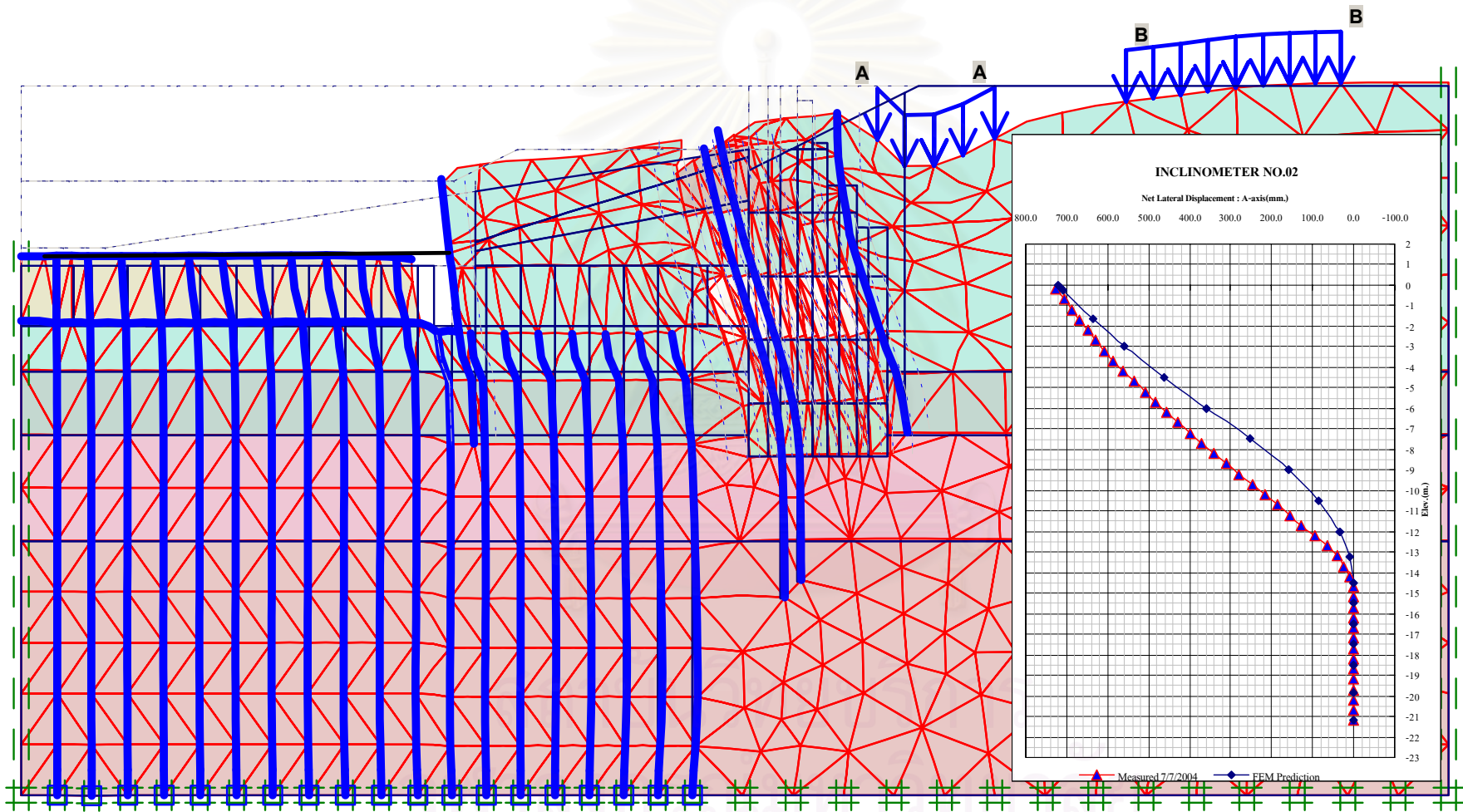
รูปที่ 4.32 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของตัวตามชั้นตอน ซ) ข้อ 4.2.1.1

4.3.1.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินเปรียบเทียบ

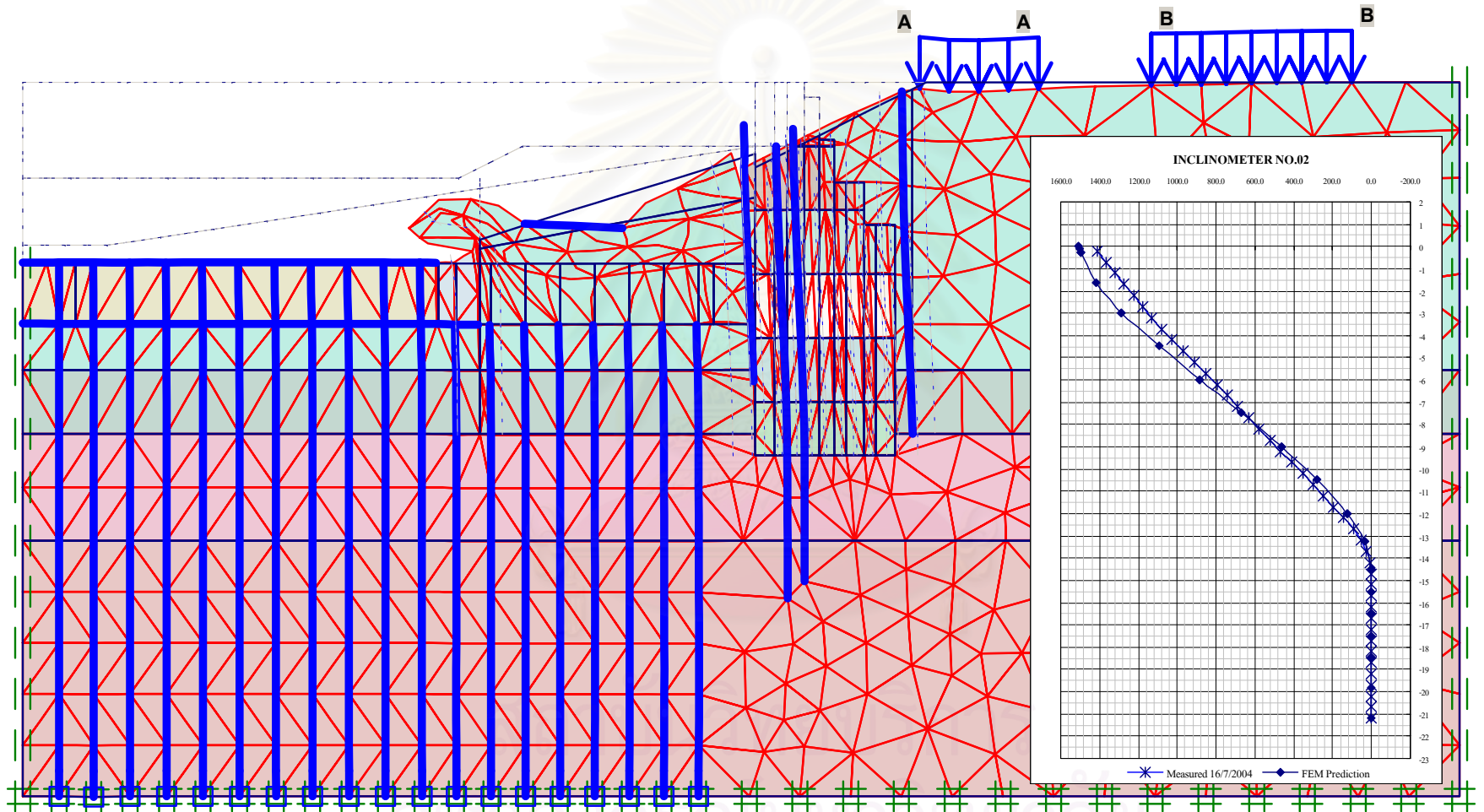
INC-02

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ด้วยโปรแกรม PLAXIS และ ปริมาณการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดในสนามตามข้อ 4.2.1.2 โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วย เสาดินซีเมนต์ฝั่งขวาของ ปตร. ให้ปริมาณการเคลื่อนตัวในแต่ละชั้นตอนดังนี้ ผลจากการวิเคราะห์ ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดส่วนบนของโครงสร้างกันดินมีค่าเท่ากับ 722.01, 1509.20, 1649.21, 1960.40 และ 1961.66 มิลลิเมตร ตามลำดับและปริมาณการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดด้วยเครื่องมือมีค่าเท่ากับ 725.6,1413.9,1668.5,1800.7 และ1843.1 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานของ โครงสร้างกันดินที่ระดับ -14.7 ม.รทก ยังคงมีค่าการเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย และสอดคล้องกันทั้ง ผลการวิเคราะห์และค่าการตรวจวัด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.33,4.34,4.35,4.36 และ 4.37 ตามลำดับ ค่ากำลังของผิวสัมผัสของเสาหินซีเมนต์ที่ให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวดังกล่าวมีค่า 22 %,22%,21%,20% และ 20% ตามลำดับ

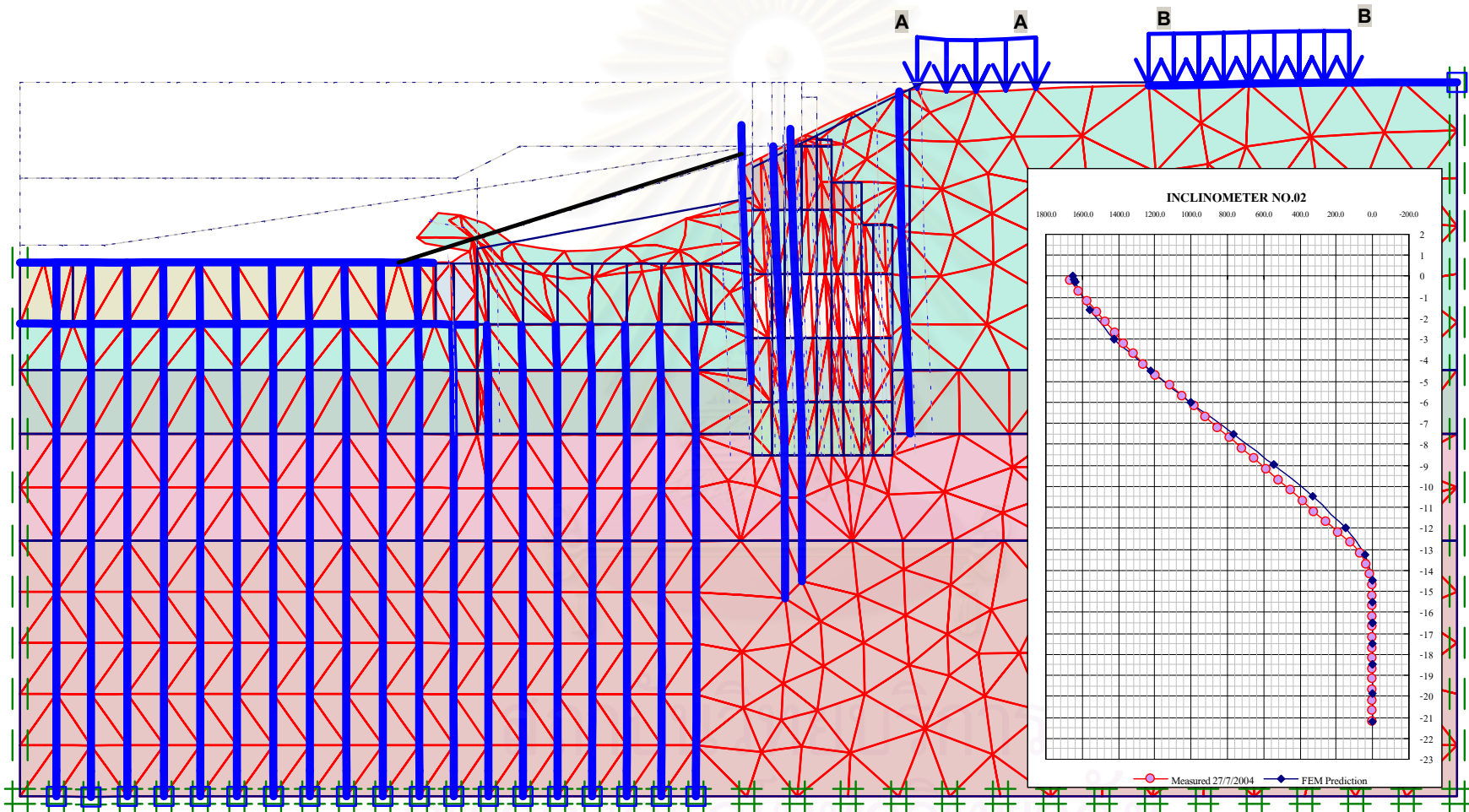
จากปริมาณการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือพบว่าปริมาณการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาหินซีเมนต์ พิจารณามากกว่าฝั่งซ้ายมากทั้งนี้เนื่อง จากมีการนำเครื่องจักรขนาดใหญ่ทั้งของโครงการ และ โครงการข้างเคียงเข้าไปในพื้นที่ก่อสร้าง ด้านหลังของโครงสร้างกันดินฝั่งขวาจึงส่งผลต่อการเคลื่อนตัวดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์ค่ากำลัง ของผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เนื่องจากค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินฝั่งขวาปริมาณการเคลื่อน ตัวสูงมาก ค่ากำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบแต่ส่งผลต่อการ เคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงมาก โดยค่ากำลังของผิวสัมผัสจะมีค่าระหว่าง 20 % -22 % ของกำลังรับแรง เหมือน แบบไม่ระบายน้ำของเสาหินซีเมนต์ เมื่อค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้างอยู่ระหว่าง 725.6 มิลลิเมตร ถึง 1843.1 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงมากเมื่อกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์อยู่ในระดับ ต่ำ ทั้งนี้การเคลื่อนตัวด้านข้างดังกล่าวจะถูกจำกัดด้วยความเครียดของโครงสร้าง ซึ่งความสัมพันธ์ และขีดจำกัดของการเคลื่อนตัวโดยไม่เกิดการวิบัติ จะวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป



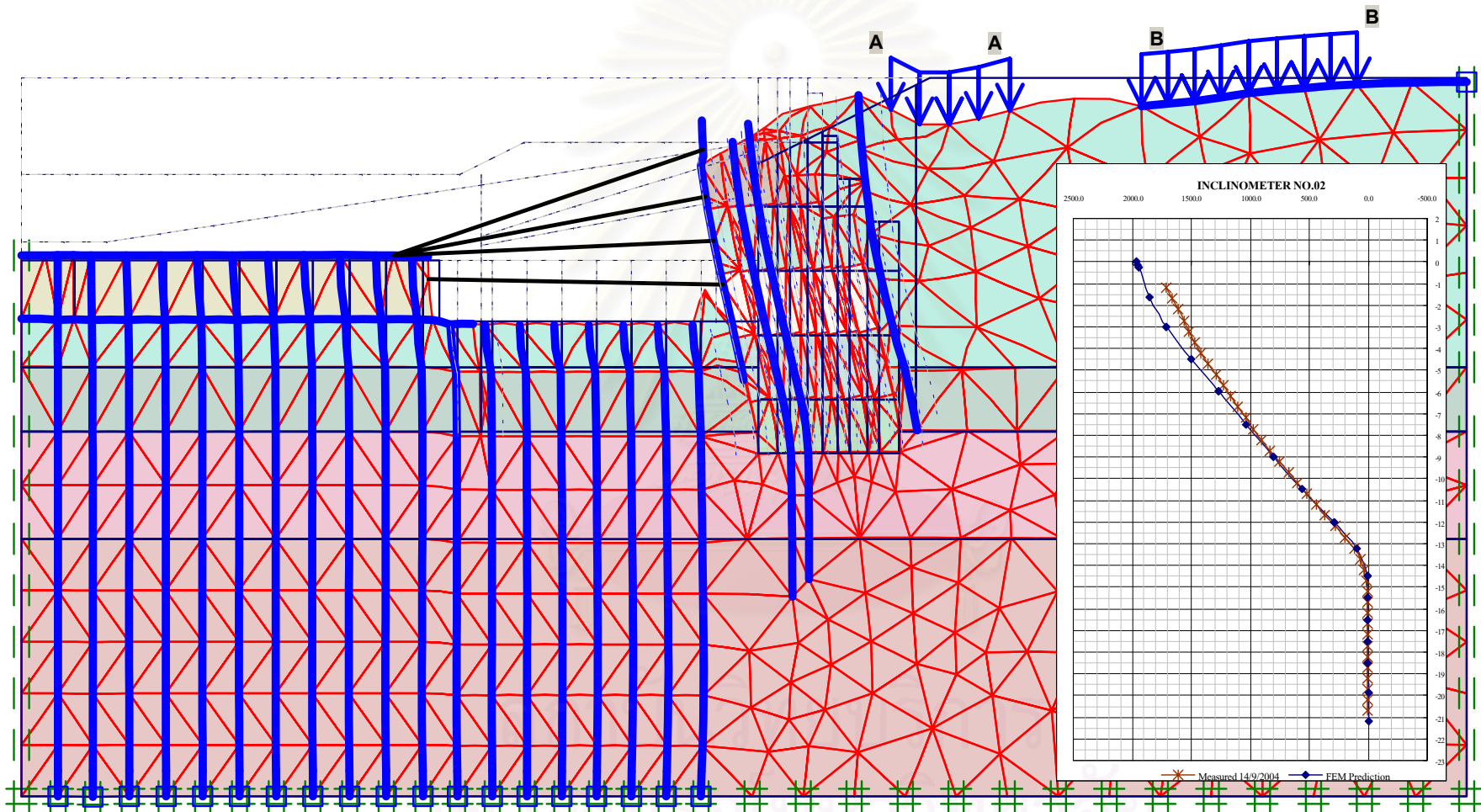
รูปที่ 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามขั้นตอน ก) ข้อ 4.2.1.2



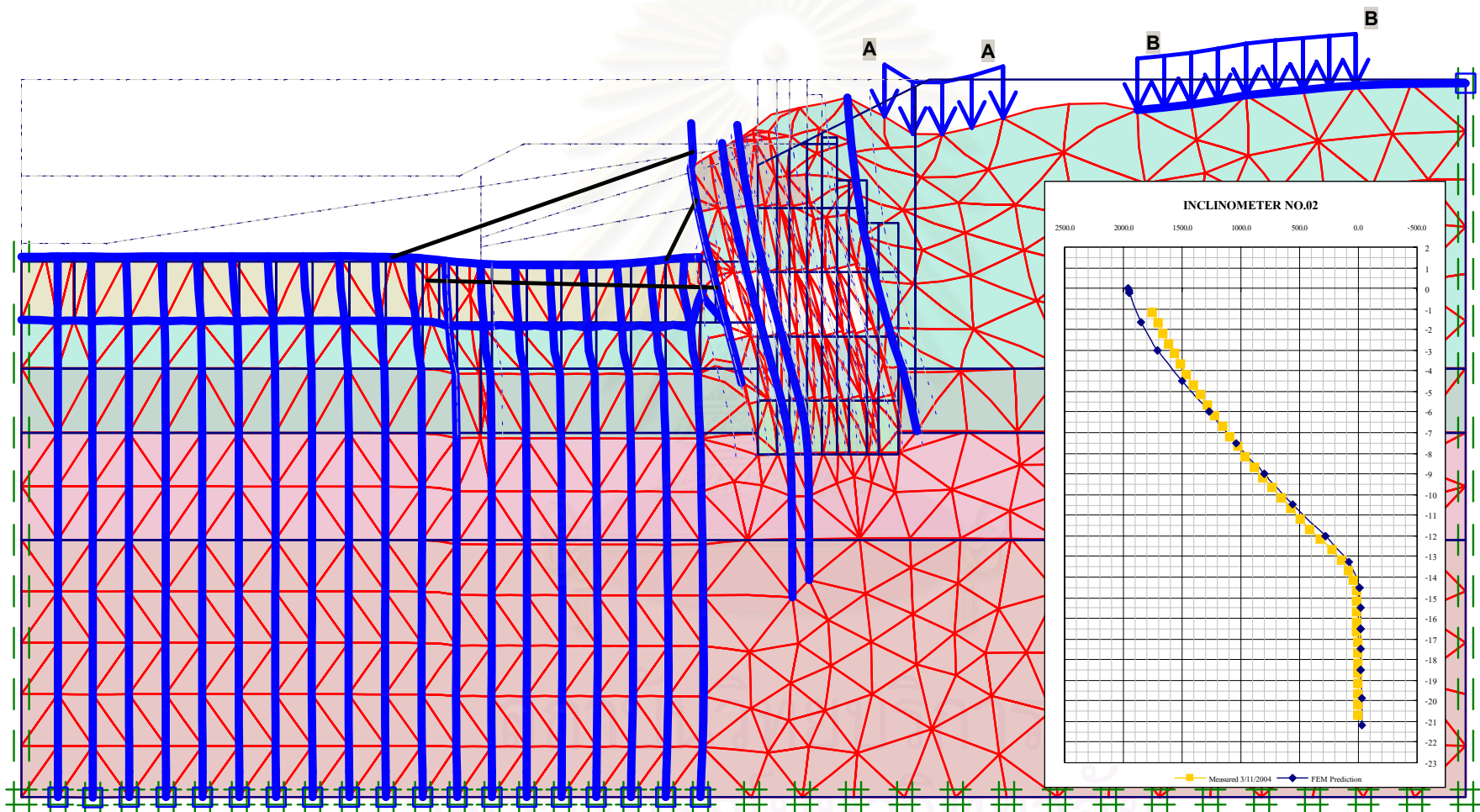
รูปที่ 4.34 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอม (ข) ข้อ 4.2.1.2



รูปที่ 4.35 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามชั้นตอม ค) ข้อ 4.2.1.2



รูปที่ 4.36 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวตามขั้นตอน ง) ข้อ 4.2.1.2



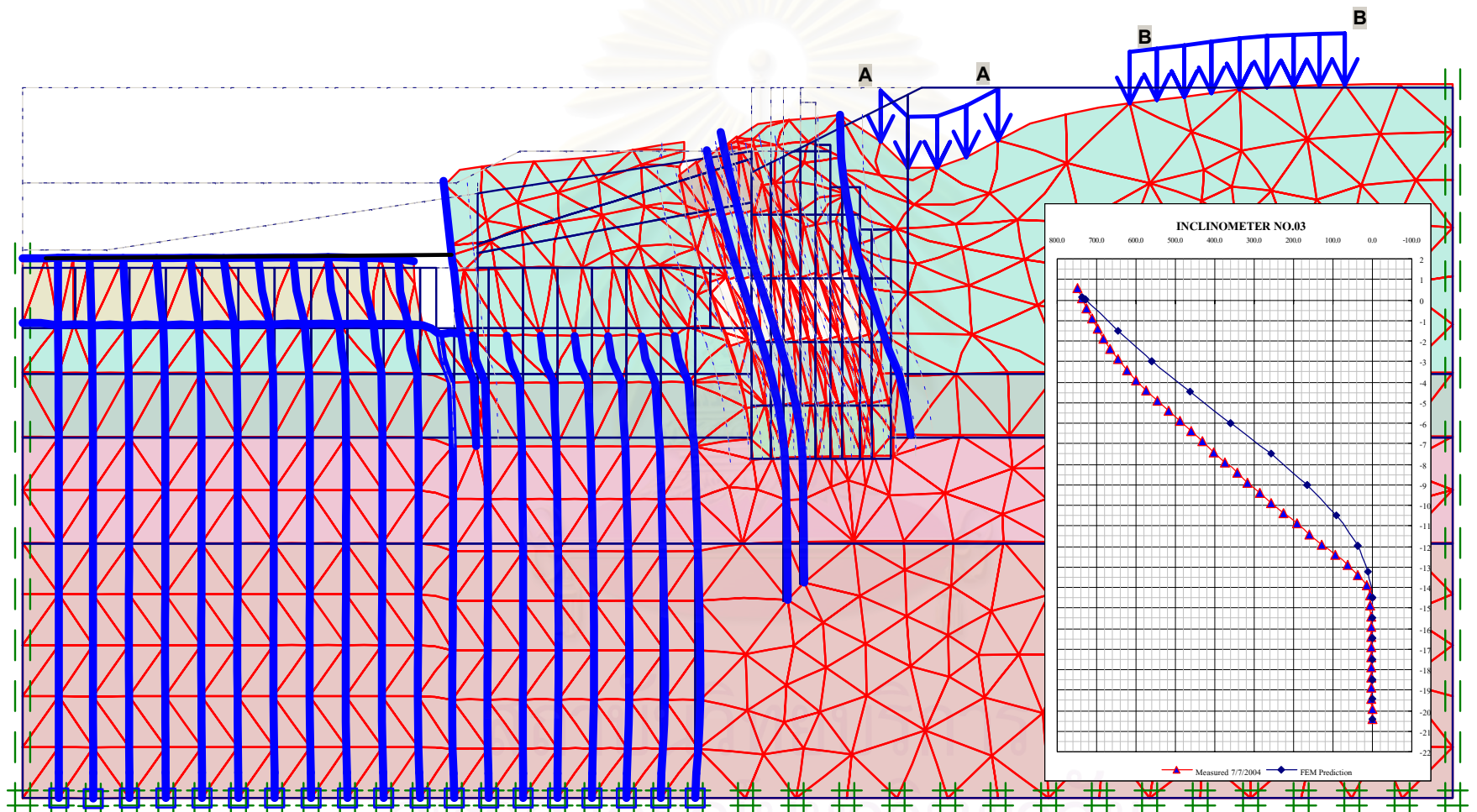
รูปที่ 4.37 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของตามขั้นตอน จ) ข้อ 4.2.1.2

4.3.1.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน

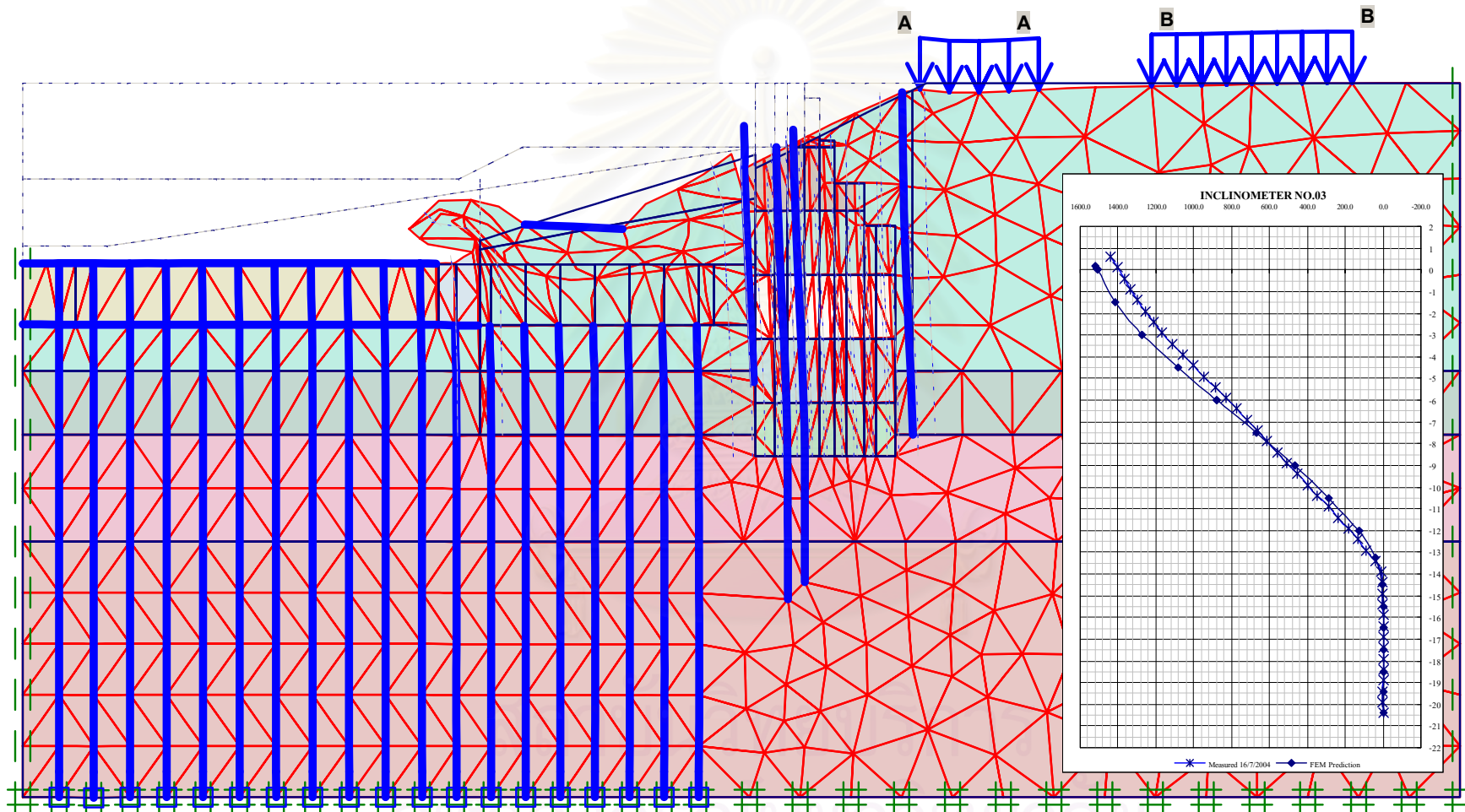
เปรียบเทียบ INC- 03

จากปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากการ วิเคราะห์ด้วย โปรแกรม PLAXIS และปริมาณการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดด้วยเครื่องมือ Inclinator ในขั้นตอน ตามข้อ 4.2.1.2 โครงสร้างเสาเข็มกันดินฝั่งขวาของ ปตร. ให้ปริมาณการเคลื่อนตัวจากการ วิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดส่วนบนของ โครงสร้างเสาเข็มกันดิน มีค่าเท่ากับ 737.6,1517.08,1661.35,1986.03 และ 1986.86 มิลลิเมตรตามลำดับ และปริมาณการตรวจวัดการ เคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด ด้วย Inclinator มีค่าเท่ากับ 749.7,1437.3,1732.8,1885.2 และ 1933.3 มิลลิเมตร ตามลำดับซึ่งค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานของโครงสร้างกันดินที่ระดับ -14.4 ม.รทก มีปริมาณ การเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อยและสอดคล้องกันทั้งผลการวิเคราะห์และค่าการตรวจวัดจากเครื่องมือ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.38,4.39,4.40,4.41 และ 4.42 ตามลำดับ

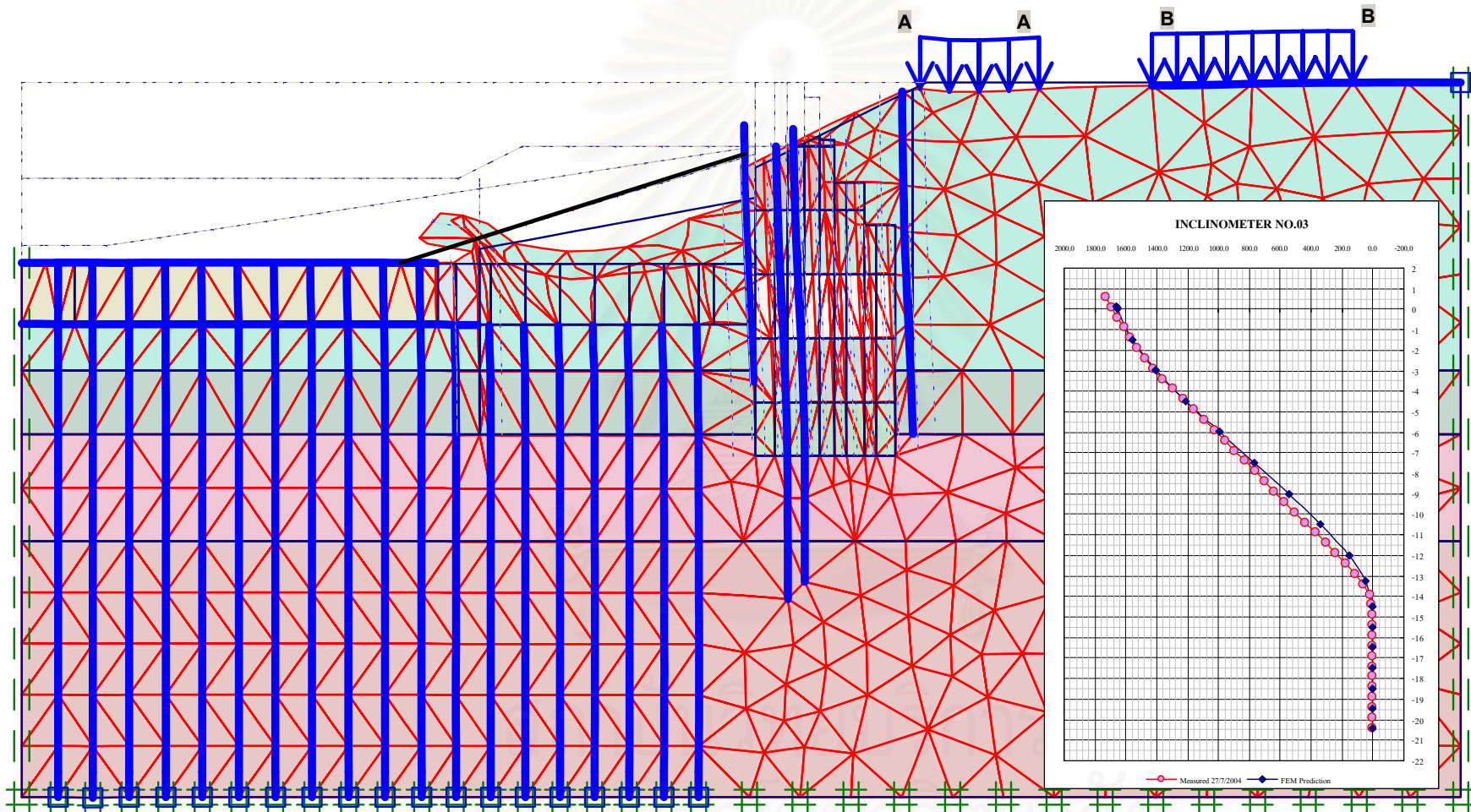
ระหว่างเครื่องมือ INC-02 และ INC-03 ปริมาณการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากเครื่องมือ ของ INC-03 มีค่าสูงกว่า INC-02 ในทุกขั้นตอนการก่อสร้างซึ่งผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สอดคล้องกันคือ INC-03 มีค่าสูงกว่า INC-02 ซึ่งผลการเคลื่อนตัวของ การวิเคราะห์เป็นไปในลักษณะ Cantilever mode โดยเกิดการเคลื่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มกันดิน สำหรับค่ากำลังของผิวสัมผัสของเสาเข็มกันดินที่ให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวดังกล่าวมีค่า เท่า กันทั้ง INC-02 และ INC-03 คือ 22 %,22%,21%,20% 20% ตามลำดับ



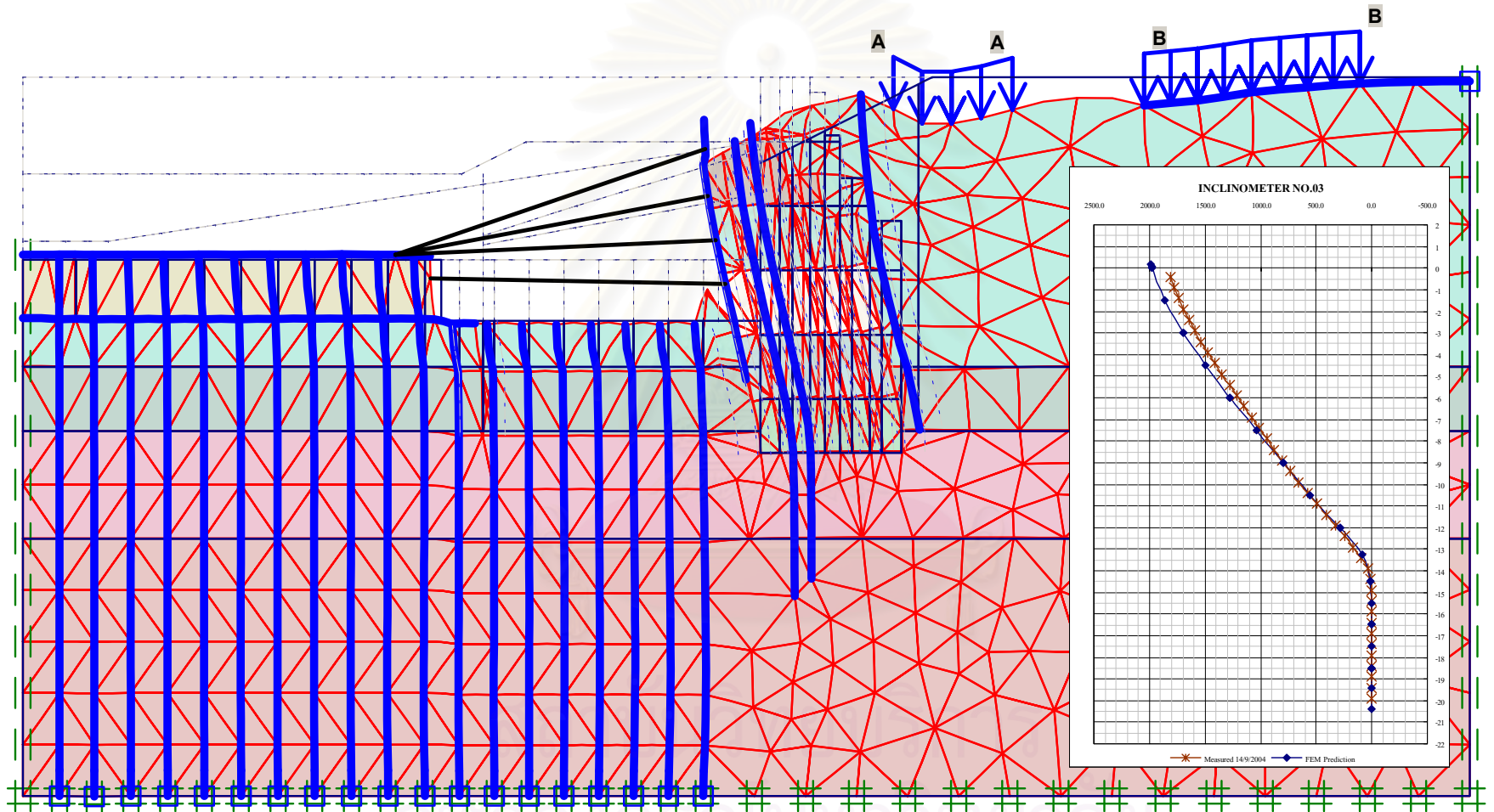
รูปที่ 4.38 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามขั้นตอน ก) ข้อ 4.2.1.2



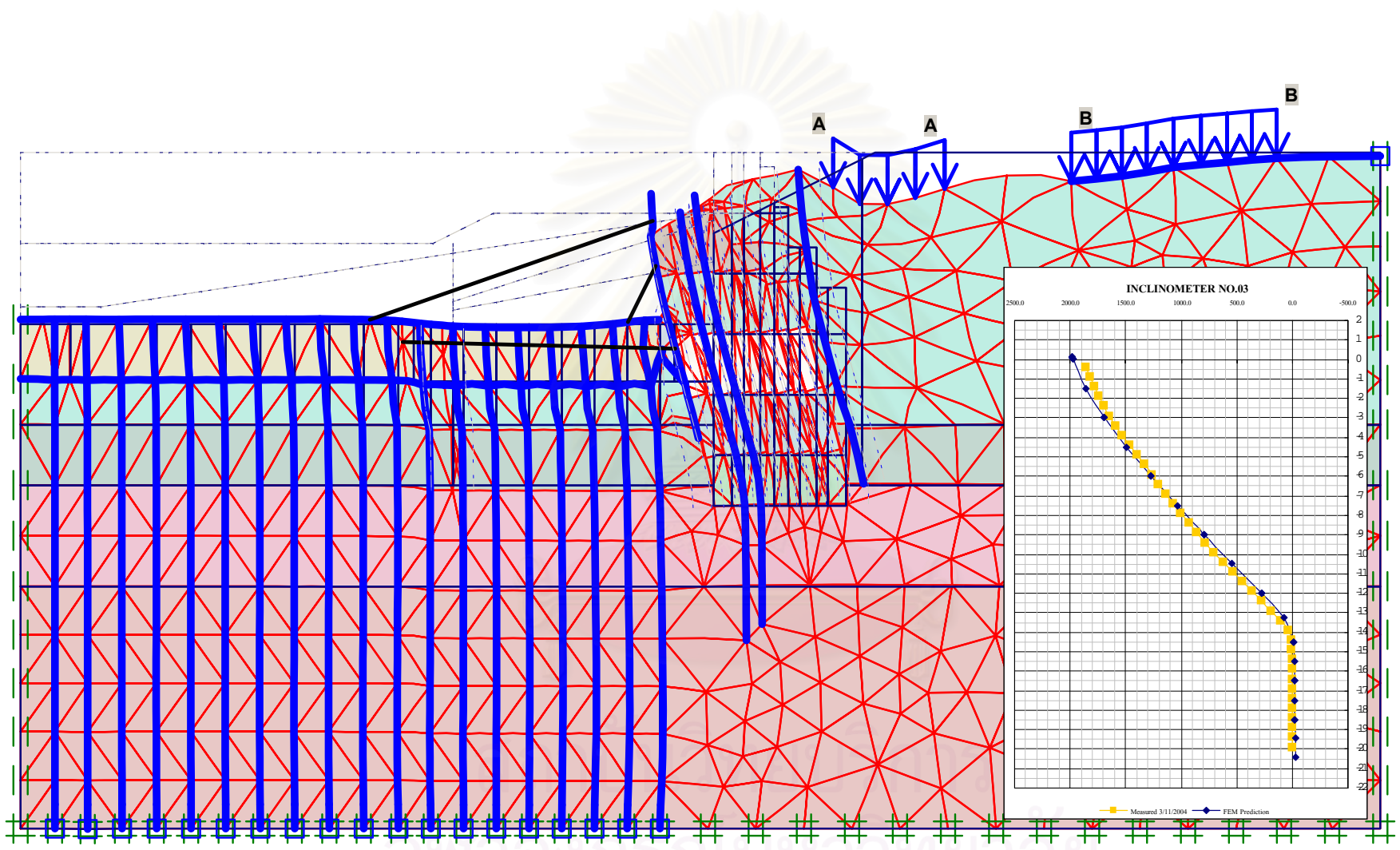
รูปที่ 4.39 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามขั้นตอน ข) ข้อ 4.2.1.2



รูปที่ 4.40 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามขั้นตอน ค) ข้อ 4.2.1.2



รูปที่ 4.41 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามขั้นตอน ง) ข้อ 4.2.1.2



รูปที่ 4.42 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบ INC-03 ตามขั้นตอน จ) ข้อ 4.2.1.2

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณประตูระบายน้ำให้ผลของกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สัมพันธ์กับปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จึงนำผลวิเคราะห์มาเขียนแผนภาพเพื่อวิเคราะห์ที่สัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ,4.6 และ 4.7 และแสดงในรูปที่ 4.43 ,4.44 และ 4.45

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร. ฟังซ้าย INC-01

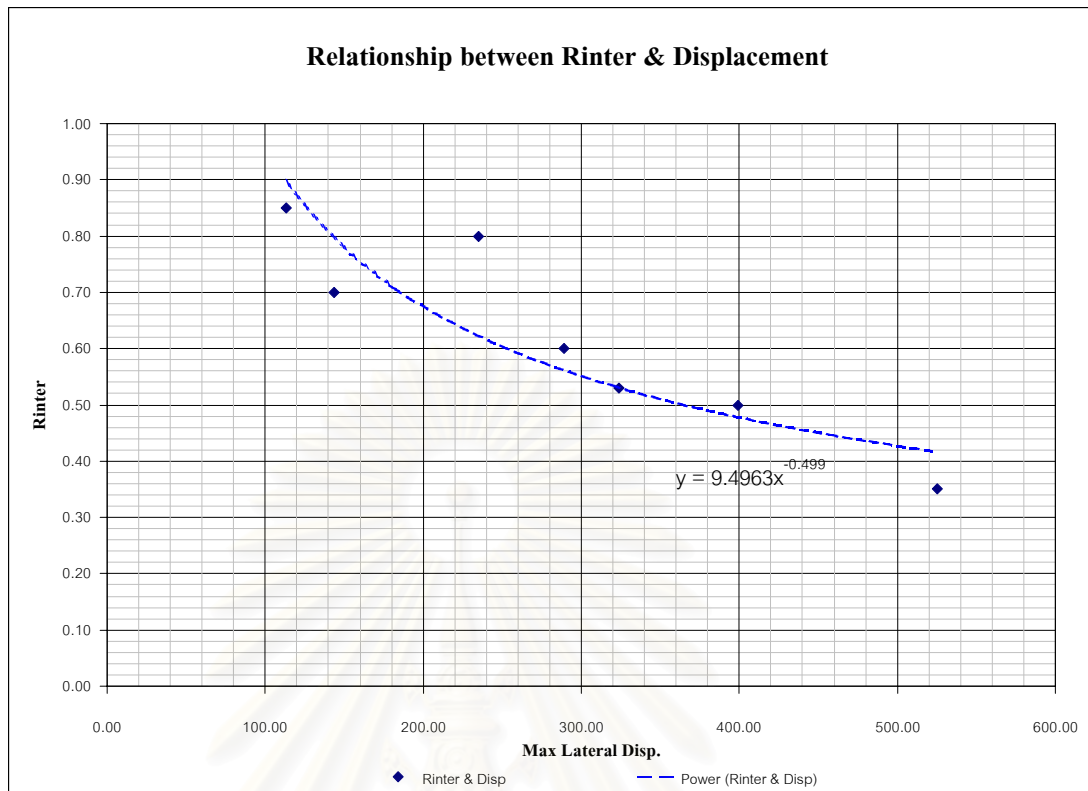
ขั้นตอนที่	ขั้นตอนการก่อสร้าง	ระดับงานขุด (ม.รทก.)	การเคลื่อนตัวแนวราบสูงสุด (มม.)	Rinter
1	ก่อสร้าง DCM แล้วเสร็จ	0.00 0.00		
2	งานขุดถึงระดับ -3.00 ม.รทก.	1.50 -3.00		
3	งานขุด Zone P2M และ P2L โดยใช้ระบบขุดค้ำยัน	-3.00 -9.85	113.01	0.85
4	Backfill ทรายระหว่าง P2L และ L1 และถอดค้ำยัน		143.34	0.70
5	ถอด Sheet Pile L1 ออก		234.79	0.80
6	ขุดดินในช่วงพื้น P1L พร้อมทั้งติดตั้ง Strut 1,2 และ 3	-3.00 -6.15	289.33	0.60
7	ติดตั้ง Strut 4 และถอด Strut 1	-6.15 -8.00	323.71	0.53
8	เท Lean P1L และ ถอด Strut 4 เพื่อเทคอนกรีต	-8.00 -9.85	399.04	0.50
9	เปลี่ยนตำแหน่ง Strut		525.47	0.35

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร.
ฝั่งขวา INC-02

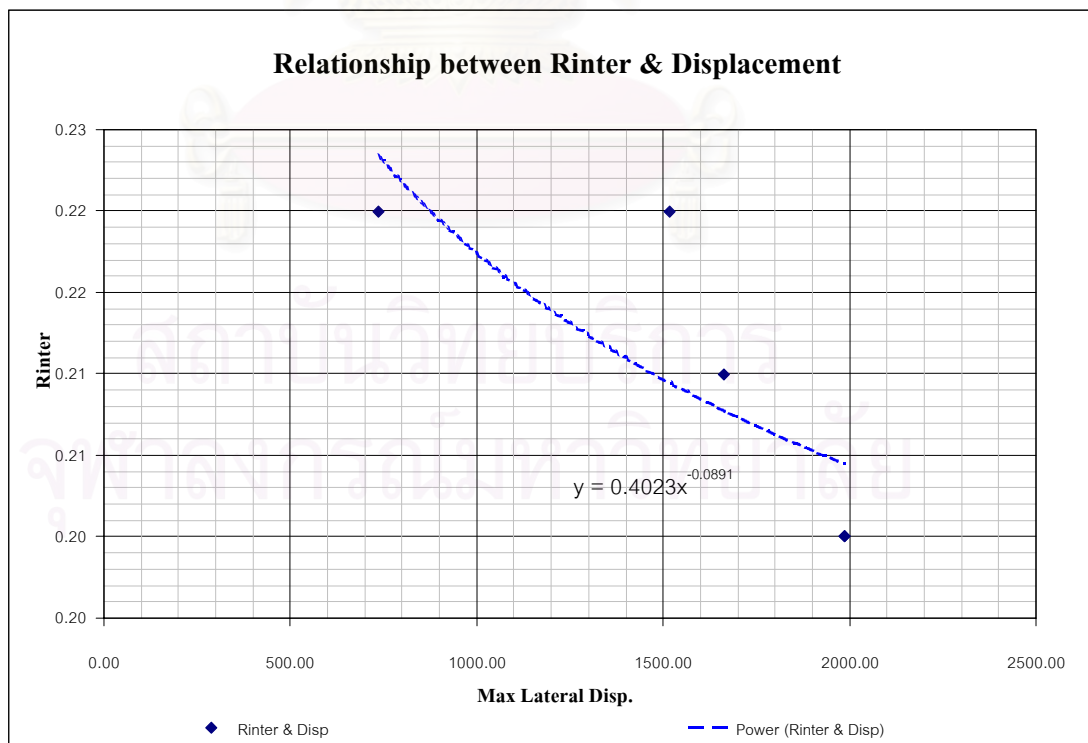
ชั้นตอน ที่	ชั้นตอนการก่อสร้าง	ระดับ งานขุด (ม.รทก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบสูงที่สุด (มม.)	Rinter
1	ก่อสร้าง DCM แล้วเสร็จ และขุดดินถึงระดับ -3.00 ม.รทก.	1.50 -3.00		
2	เท Lean คอนกรีต P2M และ P2L ค้ำยัน L1 ติดตั้ง Inc02	-3.00 -9.85		
3	เทคอนกรีต P2R และค้ำยัน SPR2 ,ติดตั้ง Total Failure SHP Crane 50 Tons ยื่นขุดงานขุด และถอด SPR1		722.01	0.22
4	Backfill และถอดค้ำยันขุดที่ 2 SPR2	-6.15 -9.85	1509.20	0.22
5	ขุดดินติดตั้ง Raker ขุดที่ 2 (มี Crane 250 T)		1649.21	0.21
6	ขุดดินถึงระดับ -8.00 ม.	-6.00 -8.00	1960.40	0.20
7	เทคอนกรีตพื้น P1R	-8.00 -9.75	1961.66	0.20

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร.
ฝั่งขวา INC-03

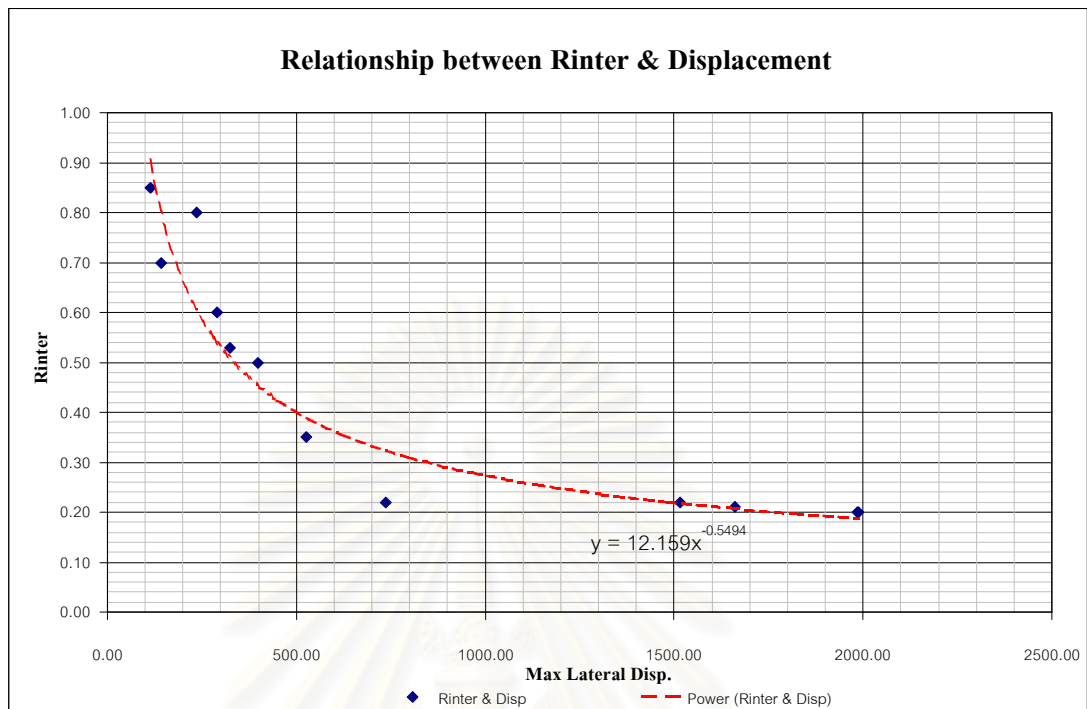
ชั้นตอน ที่	ชั้นตอนการก่อสร้าง	ระดับ งานขุด (ม.รทก.)	การเคลื่อนตัว แนวราบสูงที่สุด (มม.)	Rinter
1	ก่อสร้าง DCM แล้วเสร็จ และขุดดินถึงระดับ -3.00 ม.รทก.	1.50 -3.00		
2	เท Lean คอนกรีต P2M และ P2L ค้ำยัน L1 ติดตั้ง Inclinator	-3.00 -9.85		
3	เทคอนกรีต P2R และค้ำยัน SPR2 ,ติดตั้ง Total Failure SHP Crane 50 Tons ยื่นขุดงานขุด และถอด SPR1		737.06	0.22
4	Backfill และถอดค้ำยันขุดที่ 2 SPR2	-6.15 -9.85	1517.08	0.22
5	ขุดดินติดตั้ง Raker ขุดที่ 2 (มี Crane 250 T)		1661.35	0.21
6	ขุดดินถึงระดับ -8.00 ม.	-6.00 -8.00	1986.03	0.20
7	เทคอนกรีตพื้น P1R	-8.00 -9.75	1986.86	0.20



รูปที่ 4.43 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร. ฝั่งซ้าย



รูปที่ 4.44 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบของ ปตร. ฝั่งขวา



รูปที่ 4.45 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าการเคลื่อนตัวแนวราบ

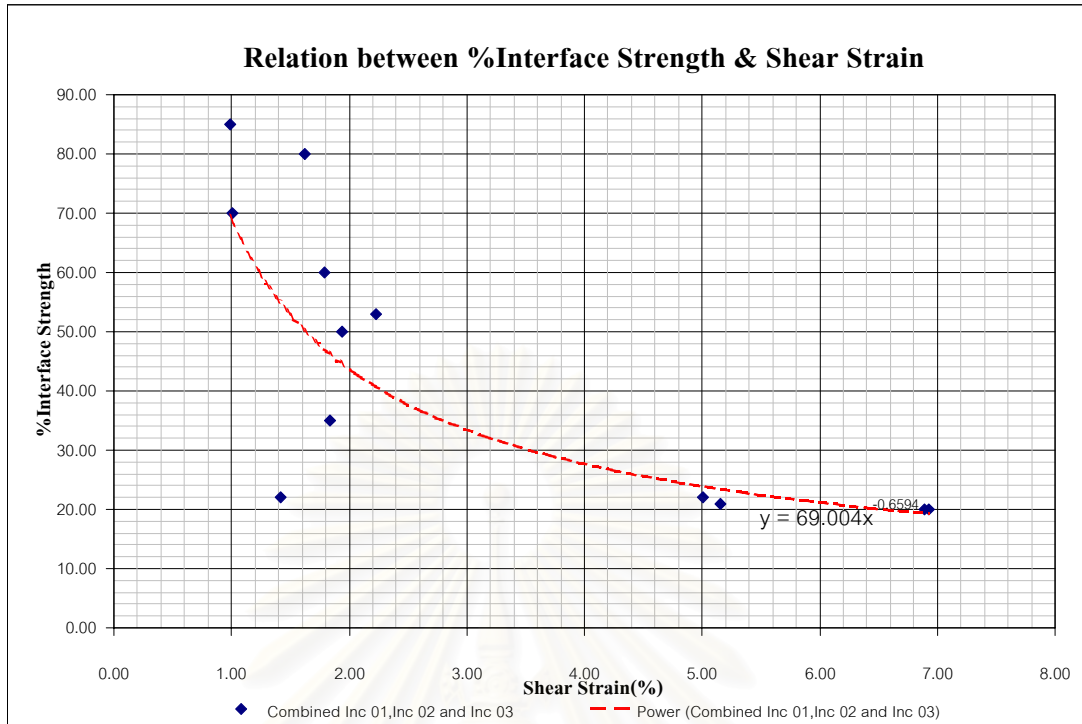
จากแผนภาพความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่าในช่วงการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินอยู่ระหว่าง 100 มม. ถึง 500 มม. กำลังของผิวสัมผัสของเสาเข็มซีเมนต์จะลดลงอย่างรวดเร็วอยู่ในช่วงระหว่าง 40% ถึง 90% ของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มซีเมนต์ แต่เมื่อค่าการเคลื่อนตัวมากกว่า 500 มม. การเปลี่ยนแปลงของกำลังระหว่างผิวสัมผัสของดินซีเมนต์เพียงเล็กน้อย จะให้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินที่สูงมาก ซึ่งแผนภาพนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมการพังทลายของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ ดังนี้ การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินเกิดจากการขูดดินเพื่อก่อสร้างประตูระบายน้ำ โดยความแตกต่างของระดับดินด้านหน้าและด้านหลังกำแพงกันดิน ก่อให้เกิดแรงดันด้านข้างกระทำต่อโครงสร้างกันดิน เมื่อโครงสร้างกันดินรับแรงกระทำก็เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้าง ในช่วงแรกของการเคลื่อนตัวพฤติกรรมอาจอยู่ในลักษณะของโครงสร้างกันดินด้วยน้ำหนักของโครงสร้าง (Gravity Retaining Structures) โดยมีลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นคานยื่น (Cantilever Beam) เมื่อการเคลื่อนตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้กำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์ลดลงจนกระทั่งเกิดการวิบัติของโครงสร้าง ซึ่งเกิดจริงในสนามในช่วงแรกของการขุด ซึ่งมีลักษณะของการวิบัติเป็นการแยกตัวระหว่างเสาเข็มซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน ขีดจำกัดของการวิบัติจะวิเคราะห์ให้ในตอนต่อไป

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์และความเครียดเฉือน (Shear Strain, γ)

จากความสัมพันธ์ในข้อ 4.3.2 ความสัมพันธ์ของกำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มซีเมนต์ พบว่าไม่สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนตัวสูงสุดก่อนการวิบัติได้จึง วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์และความเครียดเฉือน ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และแสดงในรูปที่ 4.46

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับความเครียดเฉือนของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน

ขั้นตอน ที่	ขั้นตอนการก่อสร้าง	ระดับ งานขุด (ม.รทก.)	Rinter %	Max. Shear Strain %
1	ก่อสร้าง DCM แล้วเสร็จ	0.00 0.00		
2	งานขุดถึงระดับ -3.00 ม.รทก.	1.50 -3.00		
3	งานขุด Zone P2M และ P2L โดยใช้ระบบขุดค้ำยัน	-3.00 -10.00	85.00	0.99
4	Backfill ทราขระหว่าง P2L และ L1 และถอดค้ำยัน		70.00	1.00
5	ถอด Sheet Pile L1 ออก		80.00	1.63
6	ขุดดินในช่วงพื้น P1L พร้อมทั้งติดตั้ง Strut 1,2 และ 3	-3.00 -6.15	60.00	1.79
7	ติดตั้ง Strut 4 และถอด Strut 1	-6.15 -8.00	53.00	2.23
8	เท Lean P1L และถอด Strut 4 เพื่อเทคอนกรีต	-8.00 -10.00	50.00	1.94
9	เปลี่ยนตำแหน่ง Strut		35.00	1.84
ขั้นตอน ที่	ขั้นตอนการก่อสร้าง	ระดับ งานขุด (ม.รทก.)	Rinter %	Max. Shear Strain %
1	ก่อสร้าง DCM แล้วเสร็จ และขุดดินถึงระดับ -3.00 ม.รทก.	1.50 -3.00		
2	เท Lean คอนกรีต P2M และ P2L ค้ำยัน L1 ติดตั้ง Inclino	-3.00 -10.00		
3	เทคอนกรีต P2R และค้ำยัน SPR2, ติดตั้ง Total Failure SHP Crane 50 Tons ยื่นชิดงานขุด และถอด SPR1		22.00	1.42
4	Backfill และถอดค้ำยันชุดที่ 2 SPR2	-6.15 -10.00	22.00	5.00
5	ขุดดินติดตั้ง Raker ชุดที่ 2 (มี Crane 250 T)		21.00	5.16
6	ขุดดินถึงระดับ -8.00 ม.	-6.00 -8.00	20.00	6.89
7	เทคอนกรีตพื้น P1R	-8.00 -10.00	20.00	6.93



รูปที่ 4.46 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผิวสัมผัสกับค่าความเครียดเฉือน

จากแผนภาพความสัมพันธ์พบว่าค่าความเครียดเฉือนก่อนการวิบัติประมาณ 2% หลังจากนั้นความเครียดเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่กำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดินเกือบคงที่ ซึ่งจากแผนภาพพบว่ากำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์จะอยู่ในช่วง 44%-70% และค่าความเครียดเฉือนอยู่ในช่วง 1-2% ก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งสอดคล้อง Ahnberg et al.(1995) สรุปว่าความเครียดวิบัติของเสาหินซีเมนต์ประมาณ 0.5 – 2.0% เมื่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัด (UCS) สูงกว่า 200 ถึง 300 kpa

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มตักดิน บริเวณคลอง

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มตักดินสำหรับการก่อสร้างคลอง โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 7.2 การวิเคราะห์จะพิจารณาลักษณะของปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ (Plane Strain) และจำลองพฤติกรรมของมวลดิน ใช้แบบจำลองชนิด Mohr's Coulumb โดยการวิเคราะห์ใช้วิธีของหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และอาศัยหลักการหลักการ $\phi = 0$ มาร่วมในการวิเคราะห์

นอกจากนี้พิจารณาส่วนระบบของเข็มพืดคอนกรีตอัดแรง และเหล็กสมอ W300x 300 เป็น Beam Element โดยที่มีค่าคุณสมบัติขึ้นอยู่กับค่า EA, EI, น้ำหนักของส่วนโครงสร้างและค่าอัตราส่วนผิวของคอนกรีต ($V = 0.15$) รายละเอียดต่างๆ กล่าวในหัวข้อถัดไป

4.4.1 ค่าพารามิเตอร์ของดินซีเมนต์และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของดินซีเมนต์และตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องและในการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต้องเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมกับประเภทของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ด้วย สำหรับค่าพารามิเตอร์ของดินซีเมนต์ รวมทั้งตัวแปรและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้จะมีด้วยกันหลายตัวแปรซึ่งตัวแปรใดที่มีการทดสอบจะใช้ค่าจากรายงานการทดสอบหากตัวแปรใดที่เกี่ยวข้องแต่ไม่ได้ทำการศึกษาโดยตรง จะใช้ค่าจากงานวิจัยโครงสร้างในลักษณะเดียวกันซึ่งศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องนั้นเป็นหลักมาปรับใช้ โดยขั้นตอนของการก่อสร้างให้วิเคราะห์ตามขั้นตอนในข้อที่ 4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างเสาเข็มตักดินบริเวณคลอง การวิเคราะห์นั้นได้เลือกหน้าตัดที่พิจารณาทั้งหมด 3 หน้าตัด คือ หน้าตัด กม. 0+587.663 , กม. 0+612.630 และ กม. 662.540 โดยนำค่าคุณสมบัติของดินซีเมนต์ รวมทั้งตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.9-4.13

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับคลอง

ลำดับ	ประเภทวัสดุ	คุณสมบัติ							
	วัสดุดินเดิมในสถานที่ก่อสร้าง	1 γ_d (KN/m ³)	2 γ_t (KN/m ³)	3 kx (m./day)	4 ky (m./day)	5 V	6 Eref (KN/m ²)	7 Cref (KN/m ²)	8 Interface Per.
1	Soft Clay	9.48	14.22	5.0E-04	2.5E-04	0.5	942	7.85	N-P
2	Medium Clay	10.31	16.19	1.7E-03	8.6E-04	0.5	4,905	24.53	N-P
3	Stiff Silty Clay	14.12	18.64	1.7E-04	8.6E-05	0.5	41,202	117.72	N-P
4	Very Stiff Silty Clay	16.49	19.62	1.7E-05	8.6E-06	0.5	100,062	166.77	N-P

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับหน้าตัด
0+587.663 เป็นผลสำรวจ VR 3-C301

ลำดับ	ประเภทวัสดุ	คุณสมบัติ							
	วัสดุเสาดิน ซีเมนต์ที่ก่อสร้าง VR3-C301	1 γ_d (KN/m ³)	2 γ_t (KN/m ³)	3 kx (m./day)	4 ky (m./day)	5 V	6 Eref (KN/m ²)	7 Cref (KN/m ²)	8 Interface Per.
	1	DCM 0.00 - 3.00	9.17	14.99	7.5E-03	7.5E-03	0.127	15,981	325.79
2	DCM 3.00 - 6.00	9.74	15.05	7.5E-03	7.5E-03	0.125	16,345	352.62	N-P
3	DCM 6.00 - 9.00	9.62	15.02	7.5E-03	7.5E-03	0.123	13,617	298.76	N-P
4	DCM 9.00 - 12.00	9.53	14.89	7.5E-03	7.5E-03	0.125	20,498	449.74	N-P
5	DCM 12.00 - 15.00	11.25	16.12	7.5E-03	7.5E-03	0.128	36,098	825.90	N-P
6	DCM 15.00 -17.50	11.98	16.28	7.5E-03	7.5E-03	0.125	37,579	859.80	N-P

ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับหน้าตัด
0+612.630 เป็นผลสำรวจ VR 4-C394

ลำดับ	ประเภทวัสดุ	คุณสมบัติ							
	วัสดุเสาดิน ซีเมนต์ที่ก่อสร้าง VR4-C394	1 γ_d (KN/m ³)	2 γ_t (KN/m ³)	3 kx (m./day)	4 ky (m./day)	5 V	6 Eref (KN/m ²)	7 Cref (KN/m ²)	8 Interface Per.
	1	DCM 0.00 - 3.00	8.22	14.29	7.5E-03	7.5E-03	0.125	22,569	460.09
2	DCM 3.00 - 6.00	9.53	15.34	7.5E-03	7.5E-03	0.125	26,899	580.31	N-P
3	DCM 6.00 - 9.00	9.80	15.59	7.5E-03	7.5E-03	0.125	23,844	523.17	N-P
4	DCM 9.00 - 12.00	11.40	16.58	7.5E-03	7.5E-03	0.126	43,558	955.69	N-P
5	DCM 12.00 - 15.00	10.81	16.29	7.5E-03	7.5E-03	0.126	41,170	941.96	N-P
6	DCM 15.00 -17.50	11.38	16.68	7.5E-03	7.5E-03	0.122	11,427	261.44	N-P

ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับหน้าตัด
0+662.540 เป็นผลสำรวจ VR 4-C506

ลำดับ	ประเภทวัสดุ วัสดุเสาดิน ซีเมนต์ที่ก่อสร้าง VR4-C506	คุณสมบัติ							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		γ_d (KN/m ³)	γ_t (KN/m ³)	k_x (m./day)	K_y (m./day)	V	E_{ref} (KN/m ²)	C_{ref} (KN/m ²)	Interface Per.
1	DCM 0.00 - 3.00	8.97	14.98	7.5E-03	7.5E-03	0.125	20,151	410.79	N-P
2	DCM 3.00 - 6.00	8.98	15.18	7.5E-03	7.5E-03	0.125	15,515	334.72	N-P
3	DCM 6.00 - 9.00	9.12	15.15	7.5E-03	7.5E-03	0.127	29,883	655.65	N-P
4	DCM 9.00 - 12.00	9.58	15.48	7.5E-03	7.5E-03	0.125	40,329	884.86	N-P
5	DCM 12.00 - 15.00	10.75	16.23	7.5E-03	7.5E-03	0.125	25,364	580.31	N-P
6	DCM 15.00 -17.50	12.61	17.07	7.5E-03	7.5E-03	0.132	30,865	706.17	N-P

ตารางที่ 4.13 คุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างประกอบแบบจำลอง

ลำดับ	ประเภทวัสดุ วัสดุโครงสร้าง	คุณสมบัติ					
		1	2	3	4	5	6
		Elastic Modulus (KN/m ²)	Sectional Area (cm ² /m)	Moment Inertia (cm ⁴ /m)	Weight (KN/m/m.)	EA (KN/m)	EI (KN.m ² /m.)
1	Concrete piles 500 x 300	3.72E+06	1,500.00	112,500	7.06	5.57E+05	4.18E+03
2	Strut W 300x 300	2.04E+08	24.96	1,406	0.19	5.09E+05	2.87E+03
		(KN/m ²)	(cm ²)	(cm ⁴)	(KN/m.)	(KN.)	(KN.m ²)
3	Tied Rod	2.04E+08	4.91	-	0.04	1.00E+05	-

4.4.2 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มตักันดินคลอง

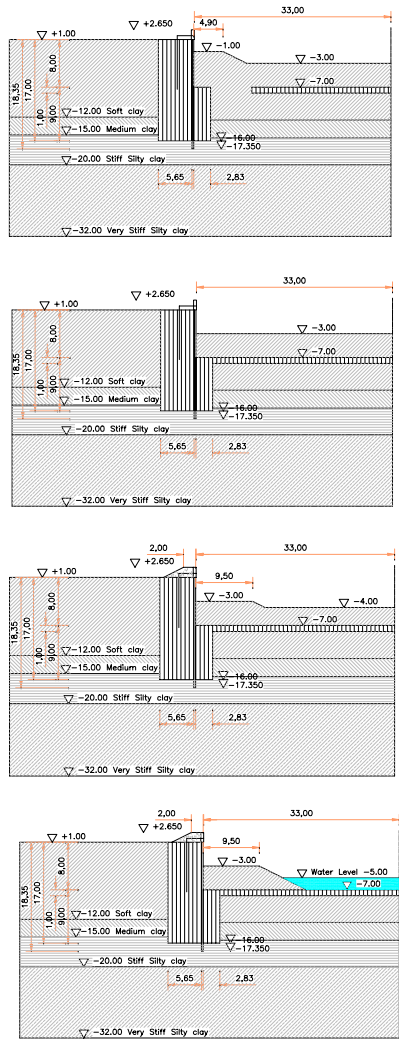
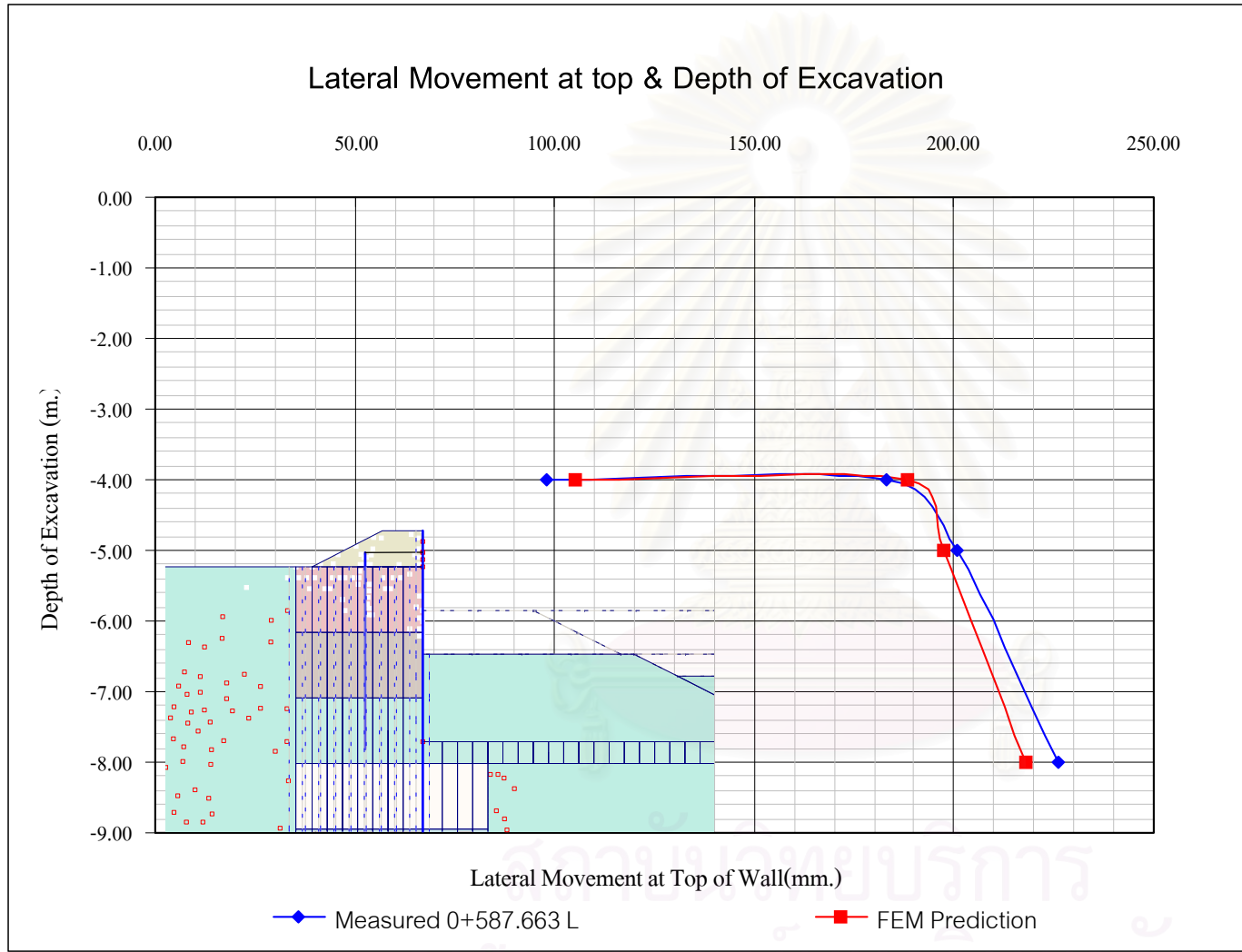
จากการจำลองขั้นตอนของการขุดดินความลึกของงานขุด 3 ระดับ คือ ความลึก 4 เมตร, 5 เมตร และ 8 เมตร ดังแสดงในข้อ 3.5.2 ขั้นตอนการขุดและวิธีแก้ไขปัญหาของโครงสร้างกันดินถาวร ส่วนปรับปรุงคลอง โดยนำผลข้อมูลการเคลื่อนตัวด้านข้างจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนของการขุดดินที่ระดับความลึกต่างๆ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากการสำรวจในสนาม เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเสาเข็มตักันดิน ผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.4.2.1 โครงสร้างเสาเข็มตักันดินของคลอง กม. 0+587.663

การเคลื่อนตัวสูงสุดที่ตำแหน่งบนสุด ของโครงสร้างกันดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เท่ากับ 218.04 มิลลิเมตร สำหรับผลการเคลื่อนตัวจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่ตำแหน่งสูงสุดของโครงสร้าง มากที่สุดในขั้นตอนสุดท้ายเท่ากับ 226 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่ากำลังของผิวสัมผัสดินซีเมนต์เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มตักันดิน แสดงว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็น Gravity Wall ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.47 ในขั้นตอนที่ 3 เกิดรอยแยกระหว่างโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มตักันดินกับมวลดินด้านหลังโครงสร้าง

ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างและการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์หน้าตัด กม. 0+587.663

ขั้นตอนที่	ขั้นตอนการก่อสร้าง	ความลึก	การเคลื่อนตัวสำรวจ(มม.)		การเคลื่อนตัว FEM(มม.)		Rinter จาก Trial
			ขั้นตอน	สะสม	ขั้นตอน	สะสม	
1	งานขุด Zone VR3-C301 กม.0+587.663 ตำแหน่งกลาง และก่อสร้าง DCM พื้นคลอง	4.00	98.00	98.00	105.30	105.30	1.00
2	งานขุด Zone VR3-C301 กม.0+587.663 ตำแหน่งริม และก่อสร้าง DCM พื้นขอบคลอง	4.00	85.00	183.00	83.04	188.34	1.00
3	ถมดินกันคลองและขุดช่วงกลาง	5.00	18.00	201.00	8.96	197.30	1.00
4	งานขุดกลางคลองทิ้งขานคลอง 9.50 ม. ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.	8.00	25.00	226.00	20.74	218.04	1.00



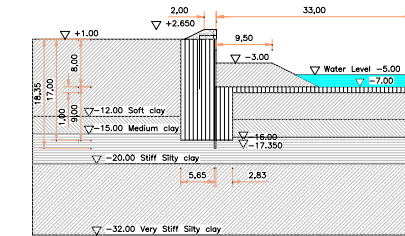
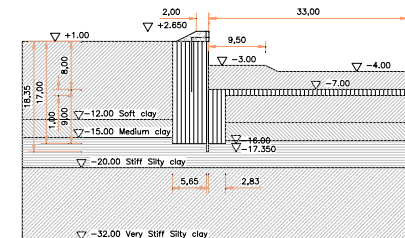
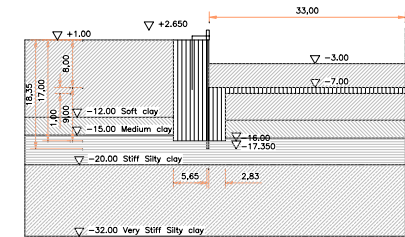
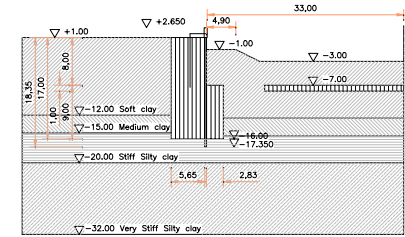
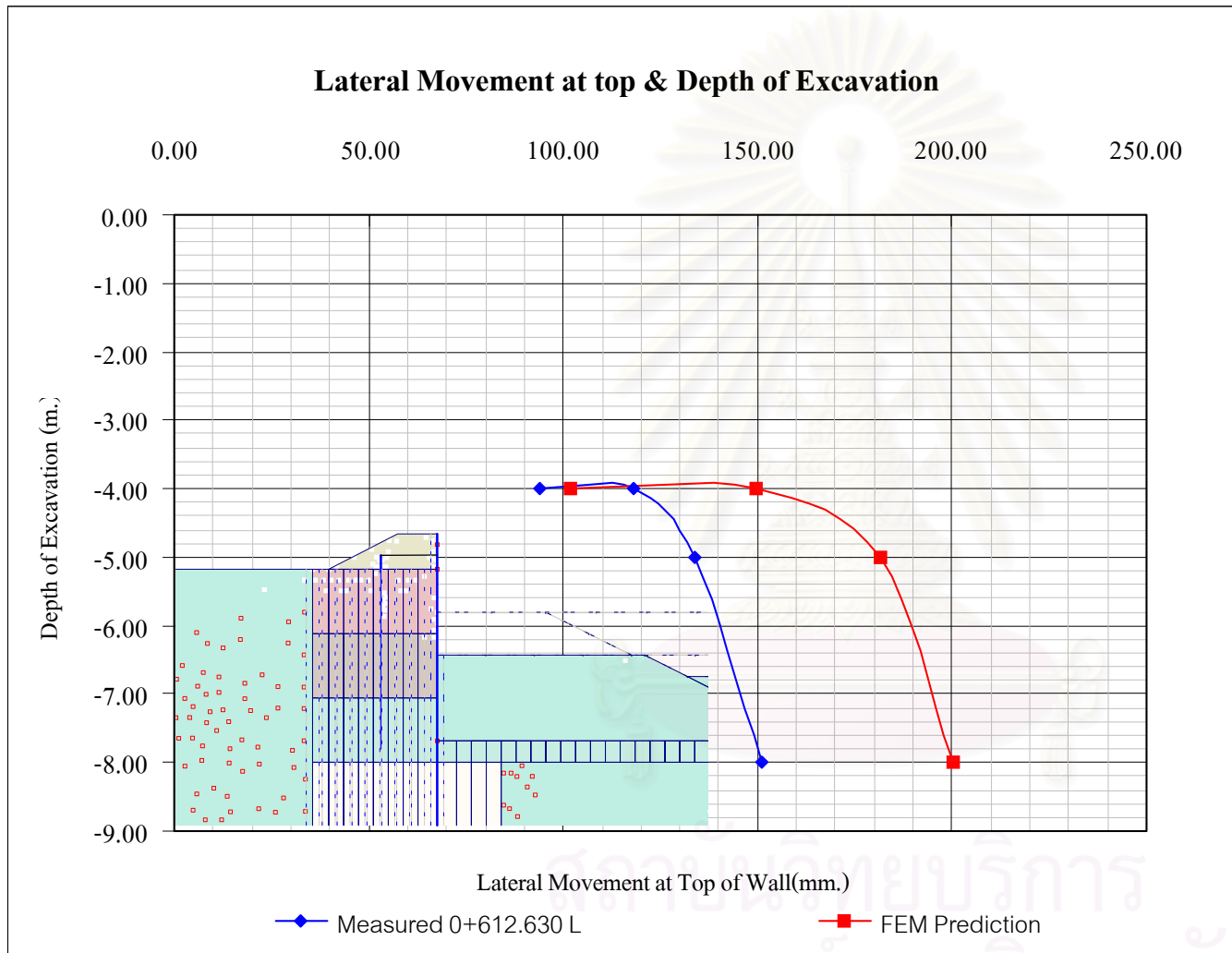
รูปที่ 4.47 แผนภาพเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงสุดจากเครื่องมือและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองหน้าตัด กม. 0+587.663

4.4.2.2 โครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินของคลอง กม.0+612.630

การเคลื่อนตัวสูงสุดที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างกันดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 200.43 มิลลิเมตร สำหรับผลการเคลื่อนตัวจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่ตำแหน่งสูงสุดของโครงสร้างมีค่ามากที่สุดในช่วงตอนสุดท้ายเท่ากับ 151 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้จากแบบจำลองสูงกว่าประมาณ 25% แต่ไม่สามารถปรับลดลงได้อีกเนื่องจากใช้ค่ากำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์สูงสุดแล้ว ความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากคุณสมบัติของกำลังที่ใช้ไม่ตรงกับตำแหน่งหน้าตัดที่พิจารณาแต่เป็นตัวอย่างที่อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้ที่สุด ซึ่งพฤติกรรมของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินนั้นยังขึ้นอยู่กับกำลังเป็นหลักเนื่องจากพฤติกรรมยังเป็นแบบ Gravity Wall จึงสรุปได้ว่ากำลังของหน้าตัดที่สำรวจสูงกว่ากำลังของตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลอง แต่ปริมาณการเคลื่อนตัวที่ระดับชั้นตอนต่างๆ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.48 ไม่เกิดรอยแยกตั้งแต่การขุดชั้นตอนแรกจนถึงชั้นตอนสุดท้าย

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นตอนการก่อสร้างและการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์หน้าตัด กม. 0+612.630

ชั้นตอนที่	ชั้นตอนการก่อสร้าง	ความลึก	การเคลื่อนตัวสำรวจ(มม.)		การเคลื่อนตัว FEM(มม.)		Rinter จาก Trial
			ชั้นตอน	สะสม	ชั้นตอน	สะสม	
1	งานขุด Zone VR4-C394 กม.0+612.630 ตำแหน่งกลาง และก่อสร้าง DCM พื้นคลอง	4.00	94.00	94.00	101.88	101.88	1.00
2	งานขุด Zone VR4-C394 กม.0+612.630 ตำแหน่งริม และก่อสร้าง DCM พื้นขอบคลอง	4.00	24.00	118.00	47.89	149.77	1.00
3	ถมดินกันคลองและขุดช่วงกลาง	5.00	16.00	134.00	31.82	181.58	1.00
4	งานขุดกลางคลองทิ้งชานคลอง 9.50 ม. ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.	8.00	17.00	151.00	18.84	200.43	1.00



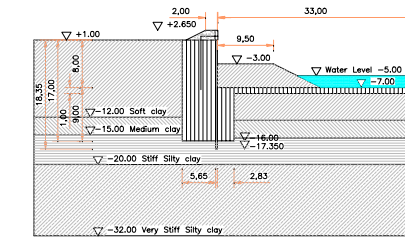
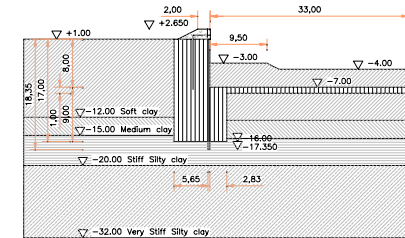
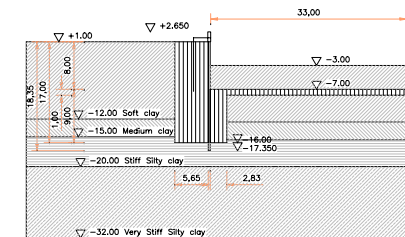
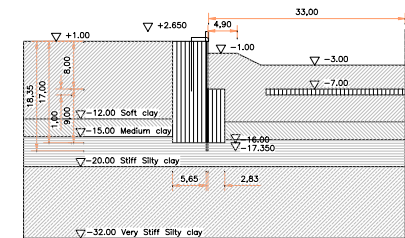
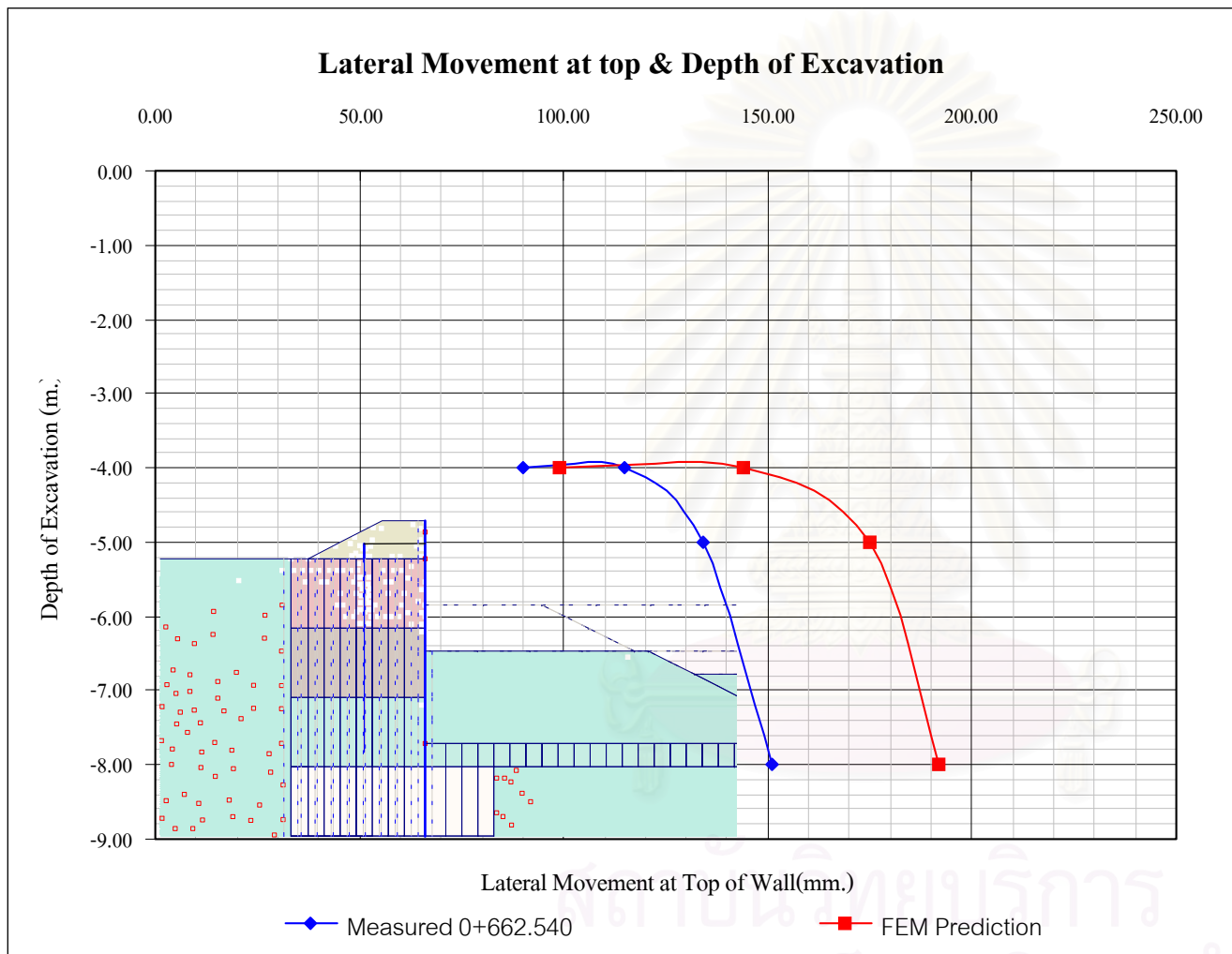
รูปที่ 4.48 แผนภาพเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของด้านข้างสูงสุดจากเครื่องมือและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองหน้าตัด กม. 0+612.630

4.4.2.3 โครงสร้างเสาเข็มค้ำดินของคลอง กม. 0+662.540

การเคลื่อนตัวสูงสุดของโครงสร้างค้ำดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 191.79 มิลลิเมตร สำหรับผลการเคลื่อนตัวจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่ตำแหน่งสูงสุดของโครงสร้างมากที่สุดในขั้นตอนสุดท้ายเท่ากับ 151 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้จากแบบจำลองสูงกว่าประมาณ 25% แต่ไม่สามารถปรับลดลงได้อีกเนื่องจากไว้ค่ากำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มค้ำดินสูงสุดเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มค้ำดิน ความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากคุณสมบัติของกำลังที่ใช้ไม่ตรงกับตำแหน่งหน้าตัดที่พิจารณาแต่เป็นตัวอย่างที่อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้ที่สุด ซึ่งพฤติกรรมของโครงสร้างค้ำดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มค้ำดินนั้นยังขึ้นอยู่กับกำลังเป็นหลักเนื่องจากพฤติกรรมยังเป็นแบบ Gravity Wall จึงสรุปได้ว่ากำลังของหน้าตัดที่สำรวจสูงกว่ากำลังของตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลอง แต่ค่าการเคลื่อนตัวที่ระดับขั้นตอนต่างๆ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.49 ไม่เกิดรอยแยกตั้งแต่การขุดขั้นตอนแรกจนถึงขั้นตอนสุดท้าย

ตารางที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างและการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ หน้าตัด กม. 0+662.540

ขั้นตอน ที่	ขั้นตอนการก่อสร้าง	ความลึก	การเคลื่อนตัว สำรวจ(มม.)		การเคลื่อนตัว FEM(มม.)		Rinter จาก Trial
			ขั้นตอน	สะสม	ขั้นตอน	สะสม	
1	งานขุด Zone VR4-C506 กม.0+662.540 ตำแหน่งกลาง และก่อสร้าง DCM พื้นคลอง	4.00	90.00	90.00	99.07	99.07	1.00
2	งานขุด Zone VR4-C506 กม.0+662.540 ตำแหน่งริม และก่อสร้าง DCM พื้นขอบคลอง	4.00	25.00	115.00	45.16	144.23	1.00
3	ถมดินค้ำคลองและขุดช่วงกลาง	5.00	19.00	134.00	30.72	174.94	1.00
4	งานขุดกลางคลองทิ้งขานคลอง 9.50 ม. ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.	8.00	17.00	151.00	16.85	191.79	1.00



รูปที่ 4.49 แผนภาพเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดจากเครื่องมือและการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองหน้าตัด กม. 0+662.540

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดิน บริเวณคลองพบว่าค่ากำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มซีเมนต์ทั้งหมด ที่ให้ปริมาณการเคลื่อนตัว จากการวิเคราะห์ได้เท่ากับหรือมากกว่าปริมาณการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากเครื่องมือสำรวจการเคลื่อนตัวด้านข้างเท่ากับกำลังของเสาเข็มซีเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเคลื่อนตัวในช่วงแรกของ โครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์จะมีพฤติกรรมเป็น Gravity Wall และเนื่องจากโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวแบบคานยื่นเมื่อค่าการเคลื่อนตัวได้ระดับหนึ่งจะเกิดการแยกระหว่างโครงสร้างกันดินและมวลดินด้านหลัง ดังนั้นพฤติกรรมแบบ Gravity Wall จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงข้างต้น ซึ่งการวิเคราะห์ขอบเขตของช่วงการเคลื่อนตัวจะใช้การวิเคราะห์ด้วยความเครียดเฉือนของโครงสร้าง

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดเพื่อก่อสร้างคลอง และความเครียดเฉือน

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ของคลอง พบว่าพฤติกรรมของโครงสร้างกันดินในแต่ละหน้าตัดแตกต่างกัน เช่น กรณีของหน้าตัด กม. 0+587.663 เกิดรอยแยกของเสาเข็มซีเมนต์แถวที่อยู่ชิดกับมวลดินด้านหลัง ในขณะที่อีก 2 หน้าตัดที่พิจารณาไม่เกิด จากข้อ 4.4.2 สรุปได้ว่าการเคลื่อนตัวเป็นแบบ Gravity Wall โดยมีค่าการเคลื่อนตัวแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ดังนั้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมนี้จึงเขียนความสัมพันธ์ของขั้นตอนการก่อสร้างและความเครียดเฉือน แล้ววิเคราะห์ช่วงความเครียดเฉือนที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างกันดิน สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.17 ,4.18 และ 4.19 แล้วแสดงในรูปแบบที่ 4.48

ตารางที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดและความเครียดเฉือน กม. 0+587.663

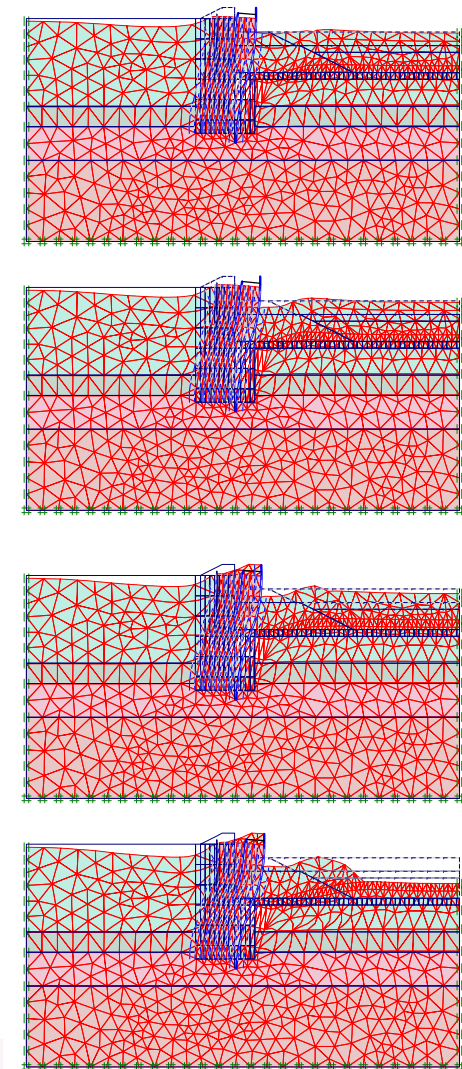
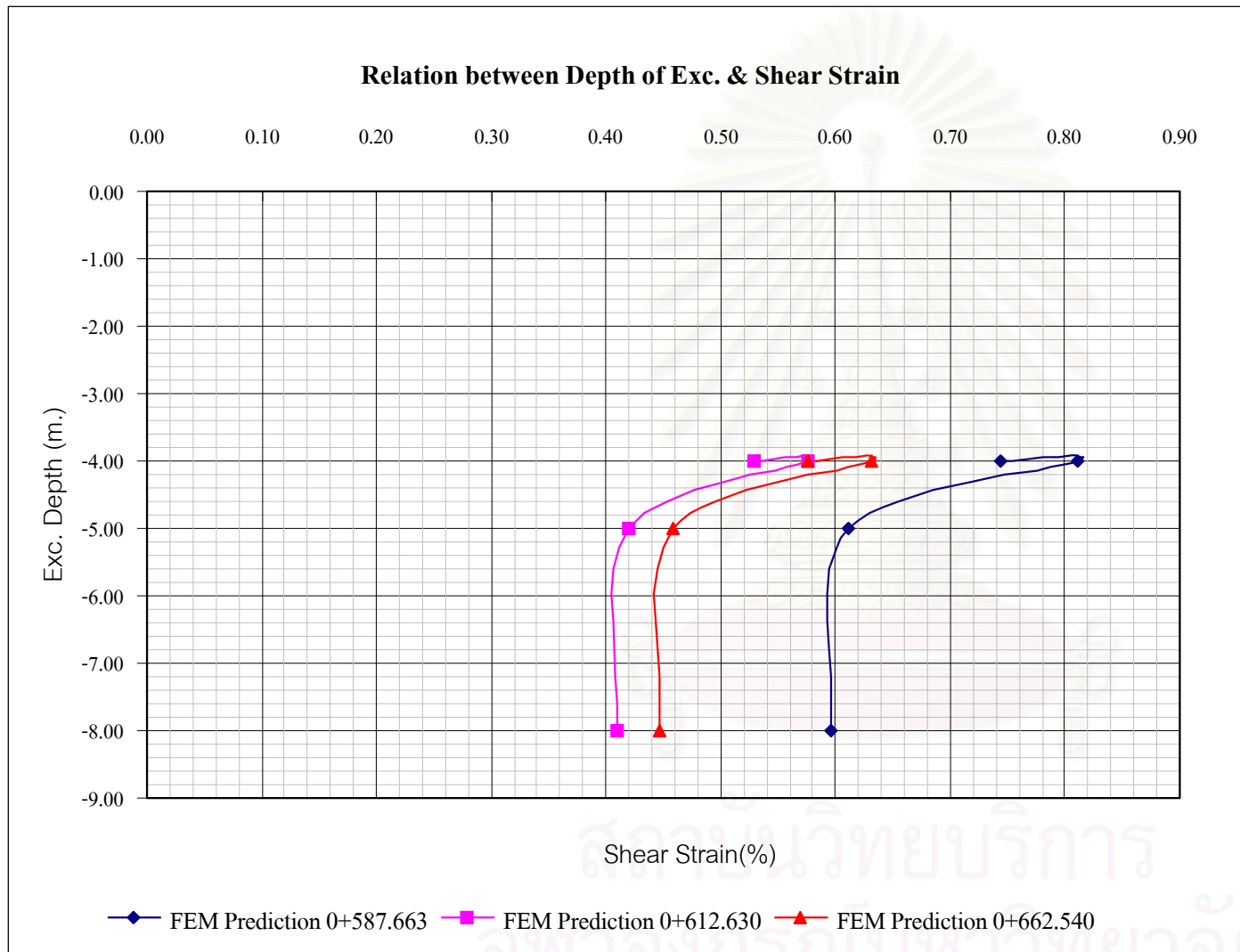
ขั้นตอนที่	ขั้นตอนการก่อสร้าง กม. 0+587.663	ความลึก	Lateral Strain %	Shear Strain %
1	งานขุด Zone VR3-C301 กม.0+587.663 ตำแหน่งกลาง และก่อสร้าง DCM พื้นคลอง	4.00	0.94	0.74
2	งานขุด Zone VR3-C301 กม.0+587.663 ตำแหน่งริม และก่อสร้าง DCM พื้นขอบคลอง	4.00	1.08	0.81
3	ถมดินกันคลองและขุดช่วงกลาง	5.00	1.08	0.61
4	งานขุดกลางคลองทิ้งขานคลอง 9.50 ม. ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.	8.00	1.10	0.60

ตารางที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดและความเครียดเฉือน กม. 0+612.630

ชั้นตอนที่ ที่	ชั้นตอนการก่อสร้าง กม. 0+612.630	ความลึก	Lateral Strain %	Shear Strain %
1	งานขุด Zone VR4-C394 กม.0+612.630 ตำแหน่งกลาง และก่อสร้าง DCM พื้นคลอง	4.00	0.62	0.53
2	งานขุด Zone VR4-C394 กม.0+612.630 ตำแหน่งริม และก่อสร้าง DCM พื้นขอบคลอง	4.00	0.69	0.58
3	ถมดินคันคลองและขุดช่วงกลาง	5.00	0.70	0.42
4	งานขุดกลางคลองทิ้งขานคลอง 9.50 ม. ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.	8.00	0.71	0.41

ตารางที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดและความเครียดเฉือน กม. 0+662.540

ชั้นตอนที่ ที่	ชั้นตอนการก่อสร้าง กม. 0+662.540	ความลึก	Lateral Strain %	Shear Strain %
1	งานขุด Zone VR4-C506 กม.0+662.540 ตำแหน่งกลาง และก่อสร้าง DCM พื้นคลอง	4.00	0.76	0.58
2	งานขุด Zone VR4-C506 กม.0+662.540 ตำแหน่งริม และก่อสร้าง DCM พื้นขอบคลอง	4.00	0.89	0.63
3	ถมดินคันคลองและขุดช่วงกลาง	5.00	0.92	0.46
4	งานขุดกลางคลองทิ้งขานคลอง 9.50 ม. ระดับน้ำในคลองอยู่ที่ระดับ -5.00 ม.	8.00	0.95	0.45



รูปที่ 4.50 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดเพื่อก่อสร้างคลองกับค่าความเครียดเฉือน

จากแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของงานขุดเพื่อก่อสร้างคลองกับความเครียดเนื่อง วิเคราะห์ร่วมกับ ข้อ 4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างเสาเข็มซีเมนต์กันดินบริเวณ คลอง พบว่าในหน้าตัด กม. 0+587.663 ขั้นตอนการก่อสร้างขั้นที่ 3 เกิดรอยแยกระหว่าง เสาเข็มซีเมนต์แฉกนอกสุดกับมวลดินด้านหลัง ซึ่งความเครียดเนื่องในขั้นตอนดังกล่าว ประมาณ 0.61% ถึง 0.81% โดยลักษณะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเป็น Cantilever Beam อ้างอิงจากผลสรุปของโครงสร้างกันดินประตูระบายน้ำ และในระหว่างช่วงความเครียดเนื่อง ดังกล่าวก็ไม่มีรอยแยกของเสาเข็มซีเมนต์ภายในโครงสร้าง สำหรับอีก 2 หน้าตัดที่นำมาพิจารณา คือ กม. 0+612.630 และ 0+662.540 ไม่มีรอยแยกของโครงสร้างกันดินทั้งภายในและด้านหลัง ซึ่งความเครียดเนื่องของหน้าตัดดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.41% ถึง 0.58% และ 0.45% ถึง 0.63% ตาม ลำดับ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวช่วงแรกของโครงสร้าง กันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ได้ว่า ในช่วงของความเครียดเนื่องระหว่าง 0% ถึง 0.81% โครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์มีพฤติกรรมเป็น Gravity Wall ซึ่งในช่วงนี้สามารถ แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ไม่มีการแยกระหว่างโครงสร้างและมวลดินด้านหลัง (Active) ค่าความเครียดเนื่องอยู่ในช่วงระหว่าง 0% ถึง 0.63% หลังจากนั้นในช่วงความเครียดเนื่องในช่วง 0.64% ถึง 0.81% โครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์จะเคลื่อนตัวแยกออกจากมวลดิน ด้านหลังแบบคานยื่น (Active) ซึ่งจะพบรอยแยกระหว่างโครงสร้างกันดินและมวลดินด้านหลัง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงานโครงสร้างกันดินที่ ก่อสร้างอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 กำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์เจาะทดสอบในสถานที่ก่อสร้างเปรียบเทียบกับทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ

ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์เจาะทดสอบ มีค่าอยู่ระหว่าง 58.7% ถึง 77.5% ของกำลังรับแรงอัด(UCS) ของดินซีเมนต์ทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ ซึ่งกำลังดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ปกติเมื่อเทียบงานวิจัยที่ผ่านมา โดยค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) ของดินซีเมนต์เจาะทดสอบ จะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินในสภาวะที่โครงสร้างกันดินมีพฤติกรรมเป็นกำแพง (Gravity Wall)

5.1.2 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงานโครงสร้างกันดิน ระหว่างการก่อสร้าง

จากข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้าง สามารถพิจารณาการเคลื่อนตัวได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

5.1.2.1 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึกลับ สำหรับงานโครงสร้างกันดิน บริเวณประตูระบายน้ำ

ลักษณะการเคลื่อนตัวด้านข้างเป็นคานยื่น (Cantilever Mode) และเมื่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงขึ้นเกิดการเลื่อนของเสาหินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน และแยกตัวออกจากกันมากที่สุด

5.1.2.2 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึก สำหรับงานโครงสร้างกันดิน บริเวณคลอง

ปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างน้อยกว่าส่วนประตุน้ำ เมื่อการเคลื่อนตัวด้านข้างถึงระดับหนึ่งเกิดรอยแยกระหว่างโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดิน และมวลดินด้านหลังโครงสร้าง ไม่พบการแยกตัวระหว่างเสาหินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน

5.1.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึก สำหรับงานโครงสร้างกันดินบริเวณประตุน้ำ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึก ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม PLAXIS จำลองพฤติกรรมของดินซีเมนต์เป็นแบบ Mohr Coulomb แล้วตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ตรวจวัดได้ในสนาม เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังระหว่างผิวสัมผัสของเสาหินซีเมนต์ (Rinter) กับความเครียดเฉือน(γ)ที่เกิดขึ้นของเสาหินซีเมนต์ลึก

พบว่ามีความสัมพันธ์ดังนี้

- (1) เมื่อความเครียดเฉือน(γ)มีค่าอยู่ระหว่าง 1%-2% กำลังผิวสัมผัสของเสาหินซีเมนต์ (Rinter) อยู่ในช่วง 44% -70%
- (2) เมื่อความเครียดเฉือน(γ)มีค่ามากกว่า 2% กำลังผิวสัมผัสของเสาหินซีเมนต์ (Rinter) อยู่ในช่วง 20% -43%

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะเห็นว่าค่ากำลังระหว่างผิวสัมผัสของเสาหินซีเมนต์ (Rinter) แปรผกผันกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดิน เมื่อความเครียดเฉือนของโครงสร้างเสาหินซีเมนต์กันดินเพิ่มจาก 1% - 2% กำลังของผิวสัมผัสระหว่างเสาหินซีเมนต์จะลดลง จนกระทั่งวิบัติเมื่อความเครียดเฉือนมากกว่า 2% ซึ่งจะสอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนและการแยกตัวระหว่างเสาหินซีเมนต์บริเวณประตุน้ำ

5.1.4 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาหินซีเมนต์ลึก สำหรับงานโครงสร้างกันดินบริเวณคลอง โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

การวิเคราะห์ใช้เงื่อนไขเหมือนกับบริเวณประตุน้ำ จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่ากำลังระหว่างผิวสัมผัสของเสาหินซีเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 1 ซึ่งแสดงว่า

โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็น Gravity Wall ดังนั้นการเคลื่อนตัวของโครงสร้างขึ้นอยู่กับกำลังของเสาเข็มซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดินเพียงอย่างเดียว แต่ในช่วงของพฤติกรรมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงด้วยกัน ตามความเครียดเฉือนของโครงสร้าง ดังนี้

(1) เมื่อความเครียดเฉือน(γ)มีค่าอยู่ระหว่าง 0%-0.63% ไม่มีการแยกระหว่างโครงสร้างกันดิน และมวลดินด้านหลังโครงสร้าง

(2) เมื่อความเครียดเฉือน(γ)มีค่าอยู่ระหว่าง 0.64 %- 0.81% เกิดรอยแยกระหว่างโครงสร้างกันดินและมวลดินด้านหลังโครงสร้าง

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ลึก ไม่ใช่โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด แต่จะมีพฤติกรรมแบ่งเป็น 4 ช่วงด้วยกัน คือ

ช่วงแรกมีพฤติกรรมเป็นกำแพง Gravity Wall ซึ่งมีสถานะเป็น Active ไม่เกิดรอยแยกระหว่างโครงสร้างกันดินและมวลดินด้านหลัง พฤติกรรมขึ้นอยู่กับกำลังของเสาเข็มซีเมนต์ทั้งหมด ช่วงนี้จะมีค่าความเครียดเฉือนในช่วง 0% - 0.63%

ช่วงที่ 2 มีพฤติกรรมเป็นกำแพง Gravity Wall ซึ่งมีสถานะเป็น Active และจะเกิดการแยกระหว่างโครงสร้างกันดินและมวลดินด้านหลัง พฤติกรรมในช่วงนี้ยังขึ้นอยู่กับกำลังของเสาเข็มซีเมนต์ทั้งหมด ความเครียดเฉือนอยู่ในช่วง 0.64% - 0.81%

ช่วงที่ 3 พฤติกรรมของกำแพงจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากกำลังของพิวสัสมัศระหว่างเสาเข็มซีเมนต์จะเริ่มลดลงอยู่ในช่วง 44% - 70% ของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มซีเมนต์ เมื่อค่าความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้นระหว่าง 1% - 2%

ช่วงสุดท้าย โครงสร้างกันดินจะเกิดการแยกระหว่างเสาเข็มซีเมนต์ภายในโครงสร้าง ซึ่งค่าความเครียดเฉือนในช่วงนี้มีค่ามากกว่า 2%

ดังนั้นพฤติกรรมของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ลึก จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนตัวด้านข้างที่เพิ่มมากขึ้น สามารถจำแนกช่วงของพฤติกรรมตามความเครียดเฉือนของโครงสร้างซึ่งแสดงไว้ข้างต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) จากข้อสรุปจะพบว่าพฤติกรรมของโครงสร้างกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนตัวของโครงสร้างกันดินซึ่งส่งผลกระทบต่อ Soil-Structure Interaction ในช่วงต่างๆ ของความเครียดเฉือน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโครงสร้าง เดิมการวิเคราะห์ห่ออกแบบส่วนใหญ่ที่ใช้วิธี Classical Method ซึ่งเหมาะสำหรับการหาเสถียรภาพของมวลดิน แต่ไม่สามารถคาดคะเนการเคลื่อนตัวในแนวราบได้เป็นผลให้ไม่สามารถประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างได้ ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์-ออกแบบโครงสร้างกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มซีเมนต์ลึก จะต้องใช้วิธี Finite Element Method

(2) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องความกว้างของระยะทับซ้อน (Overlapping Width) ว่ามีผลต่อการเพิ่มช่วงความเครียดเฉือนของพฤติกรรมกำแพง (Gravity Wall) ให้มากขึ้นหรือไม่ และขนาดความกว้างระยะทับซ้อนเท่าใดจึงจะเหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังของเสาเข็มซีเมนต์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชาญชัย ทรัพย์มันฉวีวงศ์. (2542). พฤติกรรมของเสาเข็มแบบเรีตและเสาเข็มเจาะติดตั้งเครื่องมือวัดในชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนุ หาญพัฒนพานิชย์. (2534). พฤติกรรมของลาดชุดทดลองในดินอ่อน บริเวณโรงสูบน้ำเจริญราษฎร์ จังหวัดสมุทรปราการ. การสัมมนาทางวิชาการเรื่อง งานฐานรากและงานก่อสร้างใต้ดิน. คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, หน้า 5-1 ถึง 5-45. 26-27 กุมภาพันธ์ 2534 ณ โรงแรมเอเชีย.
- นฤทธิ์ ประกอบบุญ. (2546). การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วสท. (2520). ข้อมูลสภาพชั้นดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- วีระนันท์ ปิตุปรกรณ์. (2526). การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยสแตนด์การ์ด เพเนเตอร์ชั้นทดสอบ ในชั้นดินกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วันชัย เทพรักษ์. (2539). การออกแบบระบบค้ำยันเข็มพืดสำหรับงานขุดดินลึกในดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ. การสัมมนาทางวิชาการและทัศนศึกษาเรื่องประสบการณ์การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, หน้า 4-27. ณ โรงแรมเจ้าพระยาปาร์ค

ภาษาอังกฤษ

- B.B., Broms. (2004). Lime and lime/cement columns. In M.P.Moseley & K.Kirsch, Ground Improvement. 2nd ed., pp.252-330. New York: Spon Press.
- CDM. (1994). CDM Design and Construction Manual. CDM Research Institute.
- Donald, A. Bruce, Mary Ellen, C.Bruce ,and Albert, F. Dimillio. (1998). Deep Mixing Method, Soil Improvement for Big Digs, pp.1-15. Massachusetts.

- Hibino, S. (1989). Summary and Histories of Tenocolumn Method. Foundation Engineering & Equipment (Kiso-Ko): pp. 90-96.
- Manfred R. Haumann. (1990). Engineering Principles of Ground Modification. New York: McGraw-Hill.
- NAVFAC DM-7.1. (1982). Soil Mechanics. Department of the Navy Naval Facilities Engineering Command.
- NAVFAC DM-7.2. (1982). Foundation and Earth Structures. Department of the Navy Naval Facilities Engineering Command.
- NG., Kim Cheng. (1983). The Construction Problem and Performance of Large Bored Piles in Second Sand Layer. Master' Thesis, AIT.
- Osamu Taki, M.ASCE. and Roy A.Bell, M.ASCE. (1998). Soil-Cement Pile/Column-A System of Deep Mixing, Soil Improvement for Big Digs, pp. 59-71. Massachusetts.
- P.J., Nicholson, J.K., Mitchell, Hon., E.W., Bahner and Y., Moriwaki., M.ASCE. (1998). Design of A Soil Mixed Composite Gravity Wall, Soil Improvement for Big Digs, pp.27-40. Massachusetts.
- Sugimura, Y. (1997). Deep Mixing System by Cement Reagent, Guideline of Design and Quality Control of Ground Improvement for Buildings, Japan Building Center.
- Taki, O. and Yang, D.S. (1989). Excavation Support and Groundwater Control using Soil-Cement Mixing Wall for Subway Projects, Rapid Excavation and Tunneling Conference, pp. 156-175. Los Angeles: CA.
- Taki, O. and Yang, D.S. (1991). Soil-Cement Mixed Wall Technique, ASCE Special Conference: Denver, CO.
- Teparaksa, W., Thasananipan, N. and M.A.Anwar. (1999). Based Grouting of Wet Process Bored Pile in Bangkok Subsoils, 11th Asian Conference in Soil mech. & Geo.Eng., Korea.
- Teparaksa, W. (1999b). Principal and application of instrumentation for the first MRTA subway project in Bangkok. Proc. Of 5th International Conference on Field Measurement in Geomechanics: pp. 411-416.
- Terashi, M. (1997). Deep Mixing Method-Brief State-of-The-Art. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering : p.4.

- Thanudkleung, C. (1987). Correlations Between Undisturbed Strength Deformation Characteristics and Those Developed from SPT Data for Bangkok First Sand. Master' Thesis, AIT.
- Tonyagate, Werapong. (1978). Geotechnical properties of Bangkok Subsoils for Subsidence Analysis. Master' Thesis, AIT.
- Yang, D.S. (1994). The Applications of Soil Mix Walls in the United States. Geotechnical News: pp.44-47
- Yong Shao, Chunming Zhang, and Emir Jose Macari, M.ASCE. (1998). The Application of Deep Mixing pile walls for Retaining Structures in Excavations, Soil Improvement for Big Digs, pp.84-95. Massachusetts.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ภาคผนวก ก

ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างดินซีเมนต์

จากการทดลองผสมในห้องปฏิบัติการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



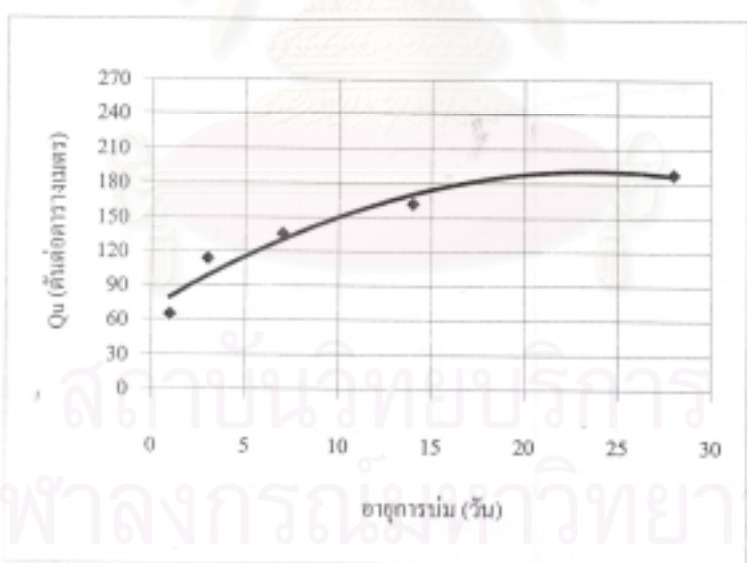
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK
Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education

SOIL MECHANICS LABORATORY

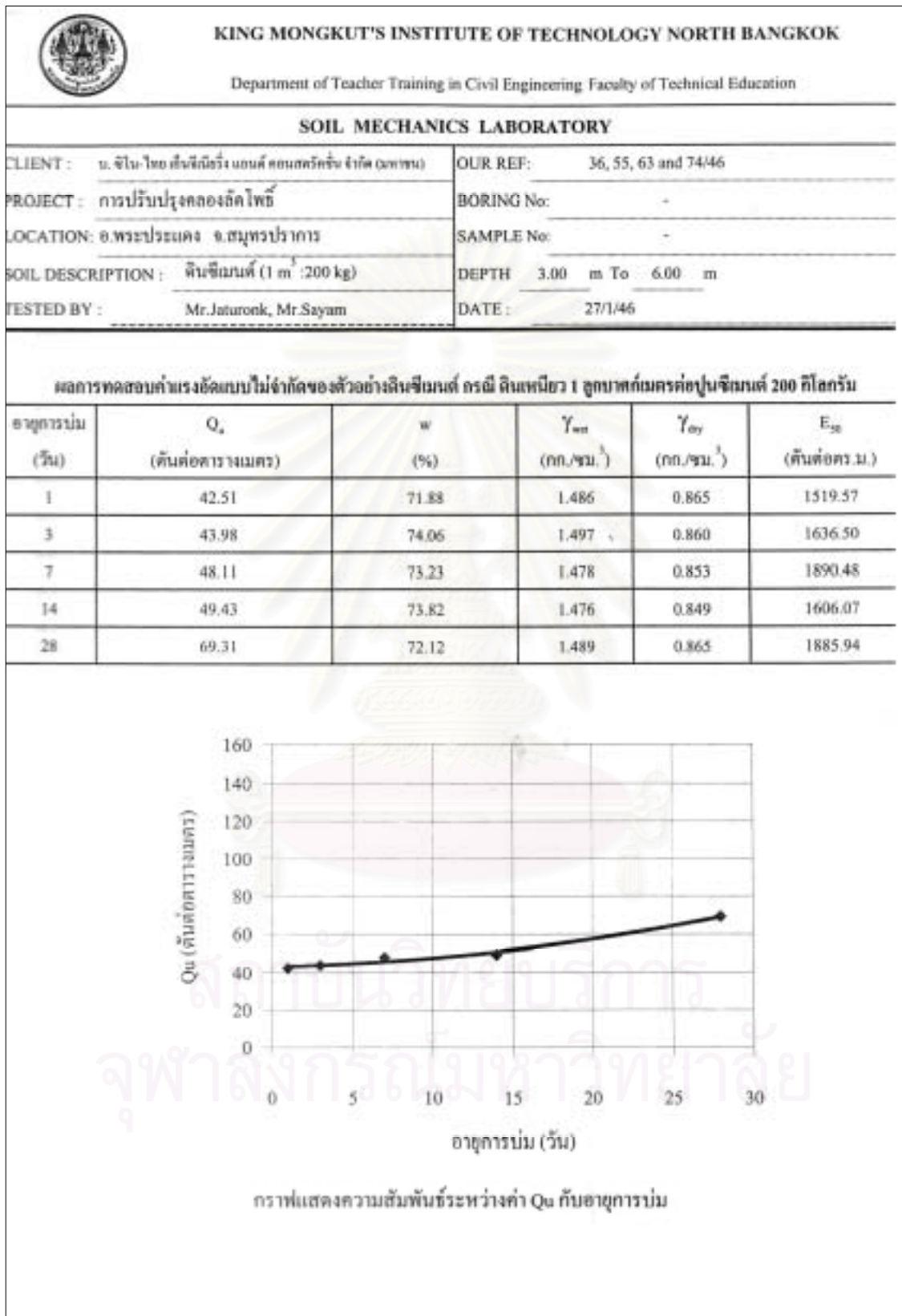
CLIENT : <u>ร. ชิน-โรจน์สินธุ์รัตน์ องค์กรมหาชน จำกัด (มหาชน)</u>	OUR REF: <u>36, 55, 63 and 74/46</u>
PROJECT : <u>การปรับปรุงคลองลาดพร้าว</u>	BORING No: <u>-</u>
LOCATION: <u>อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ</u>	SAMPLE No: <u>-</u>
SOIL DESCRIPTION : <u>ดินเหนียว (1 m³ :200 kg)</u>	DEPTH <u>0.00</u> m To <u>3.00</u> m
TESTED BY : <u>Mr.Jaturak, Mr.Sayam</u>	DATE : <u>27/1/46</u>


ผลการทดสอบค่าแรงต้านแบบไม่จำกัดของตัวอย่างดินเหนียว กรณี ดินเหนียว 1 อุณหภูมิมาตรฐานที่อุณหภูมิ 200 กิโลกรัม

อายุการบ่ม (วัน)	Q_u (ตันต่อตารางเมตร)	w (%)	γ_{sat} (กก./ซม. ³)	γ_{sp} (กก./ซม. ³)	E_{50} (ตันต่อตร.ม.)
1	64.86	65.41	1.547	0.935	1859.23
3	113.78	64.71	1.551	0.942	3092.57
7	135.66	64.55	1.538	0.935	3516.65
14	162.26	62.25	1.553	0.957	3250.03
28	187.90	64.13	1.574	0.959	4608.63



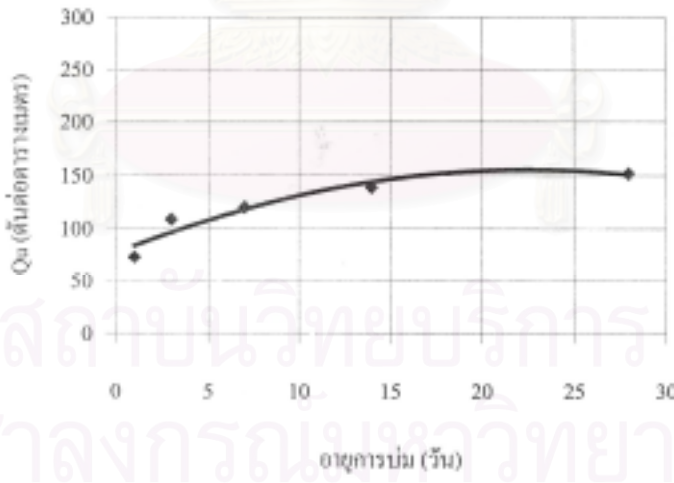
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับอายุการบ่ม




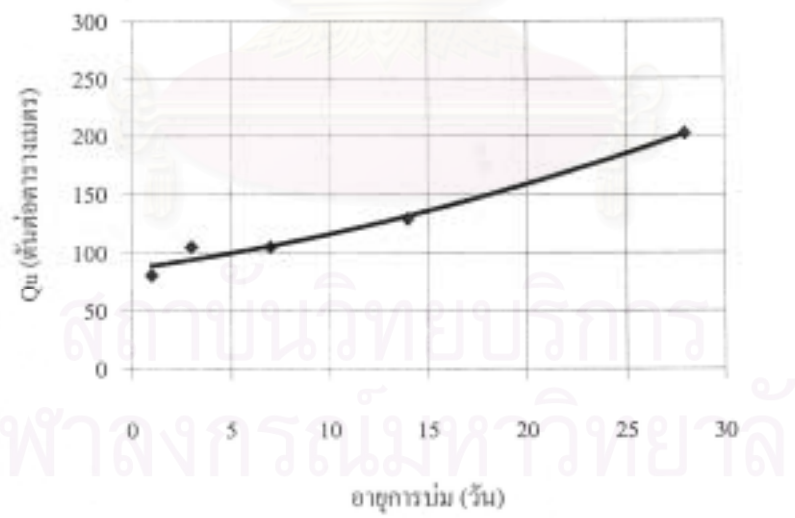
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education	
SOIL MECHANICS LABORATORY	
CLIENT : <u>ข. ชีวโภาสวิศวกรรม จำกัด (มหาชน)</u>	OUR REF: <u>36, 55, 63 and 7446</u>
PROJECT : <u>การปรับปรุงคลองอีดโคซี่</u>	BORING No: <u>-</u>
LOCATION: <u>อ.พระปฐมเจดีย์ จ.สมุทรปราการ</u>	SAMPLE No: <u>-</u>
SOIL DESCRIPTION : <u>ดินเหนียว (1 m³ : 200 kg)</u>	DEPTH <u>6.00</u> m To <u>12.00</u> m
TESTED BY : <u>Mr.Jaturonk, Mr.Sayam</u>	DATE : <u>27/1/46</u>


ผลการทดสอบค่าแรงยึดเหนี่ยวในชั้นดินของตัวอย่างดินเหนียว กรณี ดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตรต่อปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัม


อายุการบ่ม (วัน)	Q_u (ตันต่อตารางเมตร)	w (%)	γ_{sat} (กก./ซม. ³)	γ_{dry} (กก./ซม. ³)	E_{50} (ตันต่อตร.ม.)
1	72.91	62.62	1.567	0.964	1166.69
3	108.98	63.35	1.558	0.954	3721.57
7	120.38	63.98	1.542	0.940	3457.92
14	138.91	64.73	1.565	0.950	3983.53
28	151.61	63.07	1.549	0.950	4350.33





กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับอายุการบ่ม

 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education					
SOIL MECHANICS LABORATORY					
CLIENT : บ. จีโ-โกล เทคเน็ทริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)	OUR REF: 36, 55, 63 and 74/46				
PROJECT : การปรับปรุงคลองลัดโพธิ์	BORING No: -				
LOCATION: อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ	SAMPLE No: -				
SOIL DESCRIPTION : ดินซีเมนต์ (1 m ³ :200 kg)	DEPTH 12.00 m To 15.00 m				
TESTED BY : Mr.Jaturonk, Mr.Sayam	DATE : 27/1/46				
ผลการทดสอบค่าแรงอัดแบบไม่จำกัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ กรณี ดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตรต่อปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัม					
อายุการบ่ม (วัน)	Q_u (ตันต่อตารางเมตร)	w (%)	γ_{wet} (กก./ซม. ³)	γ_{dry} (กก./ซม. ³)	E_{50} (ตันต่อตร.ม.)
1	80.75	55.55	1.565	1.006	2752.89
3	105.07	50.39	1.628	1.083	2760.03
7	105.18	51.95	1.604	1.056	3354.70
14	129.20	52.07	1.611	1.059	3942.27
28	202.09	49.16	1.603	1.075	4416.16
 <p style="text-align: center;">กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับอายุการบ่ม</p>					

		KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK			
Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education					
SOIL MECHANICS LABORATORY					
CLIENT :	น. ชิน-โสม สีนจิมิธีร์ เกษต์ อนุสรณ์ชัง ชำกัด (มหาชน)	OUR REF:	36, 55, 63 and 74/46		
PROJECT :	การปรับปรุงคลองกักน้ำ	BORING No:	-		
LOCATION:	อ.พระปฐมเจดีย์ จ.สมุทรปราการ	SAMPLE No:	-		
SOIL DESCRIPTION :	ดินเหนียว (1 m ³ : 200 kg)	DEPTH	0.00 m To	3.00 m	
TESTED BY :	Mr.Jaturonk, Mr.Sayam	DATE :	27/1/45		
ผลการทดสอบค่าแรงอัดแบบไม่จำกัดของตัวอย่างดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตรต่อปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัม					
ลำดับ (วัน)	Q _u (ตันต่อตารางเมตร)	w (%)	γ _{sat} (กก./ชม. ³)	γ _{sp} (กก./ชม. ³)	E ₅₀ (ตันต่อตร.ม.)
1	62.07	66.12	1.562	0.940	1976.88
	67.18	63.72	1.546	0.944	1584.34
	65.33	66.38	1.532	0.921	2016.48
ค่าเฉลี่ย	64.86	65.41	1.547	0.935	1859.23
3	106.52	65.23	1.548	0.937	3096.50
	118.31	65.34	1.552	0.939	3268.20
	116.52	65.56	1.553	0.949	2913.00
ค่าเฉลี่ย	113.78	64.71	1.551	0.942	3092.57
-	138.18	65.30	1.550	0.938	3665.31
	125.41	64.62	1.511	0.918	3335.32
	143.39	63.72	1.552	0.948	3549.31
ค่าเฉลี่ย	135.66	64.55	1.538	0.935	3516.65
14	160.82	61.11	1.564	0.971	3336.60
	171.66	62.32	1.576	0.971	3238.90
	154.29	63.33	1.519	0.930	3174.60
ค่าเฉลี่ย	162.26	62.25	1.553	0.957	3250.03
20	163.45	65.79	1.564	0.943	3714.77
	178.43	64.82	1.568	0.951	5012.19
	221.80	61.77	1.589	0.982	5098.94
ค่าเฉลี่ย	187.90	64.13	1.574	0.959	4608.63

		KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK			
		Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education			
SOIL MECHANICS LABORATORY					
CLIENT :	บ. ชีโน-ไทย สีนซีมีเย็ว แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)		OUR REF:	36, 55, 63 and 74/46	
PROJECT :	การปรับปรุงกองออสถิตโพธิ์		BORING No:	-	
LOCATION:	อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ		SAMPLE No:	-	
SOIL DESCRIPTION :	ดินซีเมนต์ (1 m ³ :200 kg)		DEPTH	3.00 m To 6.00 m	
TESTED BY :	Mr.Jaturonk, Mr.Sayam		DATE:	27/1/46	
ผลการทดสอบค่าแรงอัดแบบไม่จำกัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ กรณี ดินเหนียว 1 ถูกบดและบดหยาบที่อุณหภูมิ 200 กิโลกรัม					
อายุการบ่ม (วัน)	Q _u (ตันต่อตารางเมตร)	w (%)	γ _{sat} (กก./ซม. ³)	γ _{dry} (กก./ซม. ³)	E ₅₀ (ตันต่อตร.ม.)
1	67.26	63.43	1.573	0.962	1827.72
	69.78	64.60	1.566	0.951	2326.00
	72.57	59.42	1.571	0.985	1577.52
ค่าเฉลี่ย	69.87	62.48	1.570	0.965	1910.41
3	85.97	63.42	1.569	0.960	2865.70
	89.51	64.37	1.539	0.936	2331.00
	98.34	63.66	1.552	0.948	3073.10
ค่าเฉลี่ย	91.27	63.82	1.553	0.948	2756.60
7	100.29	62.27	1.546	0.953	3067.03
	123.07	63.14	1.557	0.954	3188.46
	115.26	63.66	1.547	0.945	3370.23
ค่าเฉลี่ย	112.88	63.02	1.550	0.951	3208.57
14	118.87	61.61	1.569	0.971	3230.10
	123.91	61.89	1.548	0.956	2842.00
	108.81	60.68	1.553	0.967	2720.30
ค่าเฉลี่ย	117.20	61.39	1.557	0.965	2930.80
28	118.54	61.92	1.563	0.965	3527.98
	177.61	62.20	1.553	0.957	3895.00
	169.76	61.86	1.563	0.966	3374.95
ค่าเฉลี่ย	155.30	61.99	1.560	0.963	3599.31

		KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK			
Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education					
SOIL MECHANICS LABORATORY					
CLIENT : บ. ชีโน-ไทย เซ็นซิทีฟ รีสมอนด์ คอมพิวเตอร์ อินเตอร์เนชั่นแนล (มหาชน)			OUR REF: 36, 55, 63 and 74/46		
PROJECT : การปรับปรุงคลองลัดโพธิ์			BORING No: -		
LOCATION: อ.พระปฐมเจดีย์ จ.สมุทรปราการ			SAMPLE No: -		
SOIL DESCRIPTION : ดินซีเมนต์ (1 m ³ :200 kg)			DEPTH 6.00 m To 12.00 m		
TESTED BY : Mr.Jaturonk, Mr.Sayam			DATE : 27/1/46		
ผลการทดสอบค่าแรงยึดแบบไม่จำกัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ กรณี ดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตรต่อปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัม					
อายุการบ่ม (วัน)	Q _u (ตันต่อตารางเมตร)	w (%)	γ _{sat} (กก./ลบ.ม.)	γ _{dry} (กก./ลบ.ม.)	E ₅₀ (ตันต่อตร.ม.)
1	87.64	63.16	1.570	0.962	1197.30
	79.13	63.67	1.586	0.969	1388.21
	51.95	61.02	1.545	0.960	914.58
ค่าเฉลี่ย	72.91	62.62	1.567	0.964	1165.69
3	114.57	63.40	1.555	0.952	3558.20
	102.04	64.04	1.559	0.950	3618.60
	110.07	62.61	1.561	0.960	3987.90
ค่าเฉลี่ย	108.89	63.35	1.558	0.954	3721.57
7	111.12	63.44	1.528	0.935	3287.69
	131.02	64.32	1.547	0.941	3119.53
	119.00	64.18	1.550	0.944	3966.53
ค่าเฉลี่ย	120.38	63.98	1.542	0.940	3457.92
14	127.50	65.11	1.566	0.948	3863.70
	157.09	64.87	1.578	0.957	4245.60
	132.14	64.21	1.552	0.945	3841.30
ค่าเฉลี่ย	138.91	64.73	1.565	0.950	3983.53
28	156.97	63.48	1.560	0.954	4230.94
	179.97	62.55	1.534	0.944	4453.17
	117.91	63.18	1.552	0.951	4366.89
ค่าเฉลี่ย	151.61	63.07	1.549	0.950	4350.33

		KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK			
Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education					
SOIL MECHANICS LABORATORY					
CLIENT :	น. จิโน-โท เทคโนโลยีรวิ เอนจิเนียริ่ง จำกัด (มหาชน)		OUR REF:	36, 55, 63 and 74/46	
PROJECT :	การปรับปรุงคลองลัดโพธิ์		BORING No:	-	
LOCATION:	อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ		SAMPLE No:	-	
SOIL DESCRIPTION :	ดินเหนียว (1 m ³ :200 kg)		DEPTH	12.00 m To 15.00 m	
TESTED BY :	Mr.Jaturonk, Mr.Sayam		DATE :	27/1/46	
ผลการทดสอบค่าแรงอัดแบบไม่จำกัดของตัวอย่างดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตรต่อปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัม					
อายุการบ่ม (วัน)	Q _u (ตันต่อตารางเมตร)	w (%)	γ _{sat} (กก./ซม. ³)	γ _{dry} (กก./ซม. ³)	E ₅₀ (ตันต่อตร.ม.)
1	87.40	57.28	1.559	0.991	2875.00
	76.06	55.18	1.566	1.009	2569.66
	78.79	54.20	1.570	1.018	2814.00
ค่าเฉลี่ย	80.75	55.55	1.565	1.006	2752.89
3	108.61	50.95	1.637	1.084	2843.10
	101.97	49.47	1.638	1.096	2562.00
	104.65	50.74	1.610	1.068	2875.00
ค่าเฉลี่ย	105.07	50.39	1.628	1.083	2760.03
7	122.21	51.90	1.596	1.051	3855.08
	90.16	51.70	1.622	1.069	3174.79
	103.16	52.24	1.595	1.048	3034.24
ค่าเฉลี่ย	105.18	51.93	1.604	1.056	3354.70
14	120.54	52.14	1.601	1.052	4367.50
	137.45	51.98	1.616	1.063	4066.50
	129.61	52.10	1.617	1.063	3392.80
ค่าเฉลี่ย	129.20	52.07	1.611	1.060	3942.27
28	222.24	48.11	1.593	1.076	4831.35
	184.30	49.99	1.609	1.073	4256.35
	199.72	49.38	1.606	1.075	4160.79
ค่าเฉลี่ย	202.09	49.16	1.603	1.074	4416.16



ภาคผนวก ข

ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างดินซีเมนต์

จากการเจาะทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK


Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education

SOIL MECHANICS LABORATORY	UNCONFINED COMPRESSION TEST * Complied with ASTM D 2166-85 *
CLIENT : น. ชัยโน-ไวศ เสน่ห์นิกร รุ่ง แสงดี กองสหกิจชั้น ชั้นตรี (ภท.รชบ.)	OUR REF: 149/46
PROJECT : การปรับปรุงถนนลาด โหล	BORING No: -
LOCATION : อ. พระประแดง จ.สมุทรปราการ	TYPE : No.8N, R2-C65
SOIL DESCRIPTION : ดินชั้นตื้นทุกการบ่ม 25 วัน อัตราส่วน 200 kg : 1 m	DEPTH : m. TO m.
TESTED BY : Mr. Sayam , Mr. Jaturonk	DATE : 9/5/46

ตารางแสดงค่า Qu ของดินชั้นตื้น No.8N, R2-C65

Depth (m)	ค่า Qu จากผลการทดสอบ Unconfined Compression Test (ksc)	อัตราความบ่ม (วัน)
0-3	20.799	25
3-6	17.061	25
6-9	15.882	25
9-12	16.103	25
12-15	17.507	25
15-17.5	17.736	25

สถาบันวิทยบริการ


 (Mr. Narin Sridokmas)

Certified by:




 (Mrs. Pienphit Pankaew)
 Head of Department

Note : 1. The testing results are good only for those specimen tested.

2. Not valid unless signed and sealed.



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education

SOIL MECHANICS LABORATORY		UNCONFINED COMPRESSION TEST * Complied with ASTM D 2166-85 *	
CLIENT : น. จิน- โย สืบพันธ์ อำนวยการบริหารงานทั่วไป (อาคาร)		OUR REF: 7347	
NOTE: การรับน้ำหนักของดิน		BORING No: Zone V, R3 - C301	
LOCATION: อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ		TYPE: -	
SOIL DESCRIPTION: ดินเหนียวสีเทาปนดำ 28 วัน อัตราส่วน 200 kg : 1 m ³		DEPTH: - m TO - m	
TESTED BY: Mr. Sayam , Mr. Jaturak		DATE: 24/11/46	

ค่าของ q_u ของดินบริเวณ Zone V, R3 - C301

Depth (m)	ค่า q_u จากกราฟทดสอบ Unconfined Compression Test (ksc)	ความลึก (ม.)
0-3	6.642	28
3-6	7.189	28
6-9	6.091	28
9-12	9.169	28
12-15	16.838	28
15-17.5	17.529	28

สถาบันวิทยบริการ

P. Veolipruex
(Asst.Prof.Dr.Pasich Veolipruex)

Certified by: *Pisit Methapatana*
(Asst.Prof.Dr. Pisit Methapatana)

Plempit
(Mrs. Plempit Pankaw)
Head of Department



Note : 1. The testing results are valid only for those soil/s tested.
2. Not valid unless signed and sealed.



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education

SOIL MECHANICS LABORATORY	UNCONFINED COMPRESSION TEST * Complied with ASTM D 2166-85 *
CLIENT: น. ชโน-โฆส เอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)	OUR REF: 58/47
SUBJECT: การปรับปรุงถนนลาดโพธิ์	BORING No: DCM, V R4-C394
LOCATION: ถนนพระราม4 เขตปทุมธานี	TYPE: -
SOIL DESCRIPTION: ดินร่วนปนทราย 28 วัน สัมผัสด้วย 200 kg : 1 m	DEPTH: - m TO - m.
TESTED BY: Mr. Sayam, Mr. Jaturonk	DATE: 14/11/46

ตารางแสดงค่า q_u ของดินชั้นที่ DCM, V R4-C394

Depth (m)	ค่า q_u จากกราฟทดสอบ Unconfined Compression Test (ksc)	ความร่วน (วัน)
0-3	9.380	28
3-6	11.831	28
6-9	10.666	28
9-12	19.484	28
12-15	19.204	28
15-17.5	5.330	28

Tested by:

Narin Sridokmai

(Mr. Narin Sridokmai)

Certified by:

Pisit Meelungstara

(Asst.Prof.Dr. Pisit Meelungstara)

Approved by:

Piengkaj Pankaew

(Mrs. Piengkaj Pankaew)

Head of Department



- Note :
1. The testing results are good only for these specimens tested.
 2. Not valid unless signed and sealed.



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education

SOIL MECHANICS LABORATORY	UNCONFINED COMPRESSION TEST * Complied with ASTM D 2166-85 *
TEST: ๙. ซึโน โอนเซ็นเคียว มอนต์ คอนกรีตชั้น ๖ ชั้น (อาคาร)	OUR REP: 35/47
DIRECT: การปรับปรุงดินอัดโพธิ์	BORING No: DCM, V R4-C506
CATION: ๐.พริบรเวม๘๔ ๙.ตฤพรปรวกร	TYPE: -
E. DESCRIPTION: ดินเหนียวสีเทาอ่อน 28 วัน คัดรส่วน 200 kg : 1 m	DEPTH: - m. TO - m.
TESTED BY: Mr. Sayam, Mr. Jaturak	DATE: 3/11/46

รายละเอียดค่า q_u ของดินชั้นที่ DCM, V R4-C506

Depth (m)	ค่า q_u ๐1001๖๗๗๗๗๗๗ Unconfined Compression Test (ksc)	ความดัน (ตัน)
0-3	8.375	28
3-6	6.824	28
6-9	13.367	28
9-12	18.040	28
12-15	11.831	28
15-17.5	14.397	28


 (Asst.Prof.Dr. Sunchai Inthapichai)

Certified by: 
 (Asst.Prof.Dr. Pinit Methagatara)


 (Mrs. Pienphit Pankaw)
 Head of Department

Dean
 Faculty of Technical Education



Note : 1. The testing results are good only for those specimens tested.
2. Not valid unless signed and sealed.



ภาคผนวก ค

ข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดในสนาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์ เกิดวันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2523 จังหวัด ตราด สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2544 เข้าทำงานใน บริษัท รีซอสส์ เอนจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัดในปีเดียวกัน จากนั้นขอลาเรียนเพื่อเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2546 จนจบหลักสูตรในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย