

พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะ
เรียงต่อเนื่องเสริมด้วยกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**BEHAVIOR OF SOIL-CEMENT COLUMN WALL AND
CONTIGUOUS PILE WALL WITH REINFORCED
SOIL-CEMENT COLUMN WALL**

Thanakorn Sukumamas



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะ
เรียงต่อเนื่องเสริมด้วยกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์

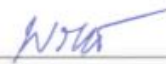
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติบุญยางกูร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.พรพจน์ ดันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.สมโพธิ อยู่ไว)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนดรร ขำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธนกร สุขุมมาศ : พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงกันดินเสาเข็ม
เจาะเรียงต่อเนื่องเสริมด้วยกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (BEHAVIOR OF SOIL-
CEMENT COLUMN WALL AND CONTIGUOUS PILE WALL WITH REINFORCED
SOIL-CEMENT COLUMN WALL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์
ตันแสง, 112 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังและหาสถิติของดินเหนียวเพื่อใช้
ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงสำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงกันดิน 4 รูปแบบ ที่ก่อสร้างใน
ชั้นดินเดียวกัน ได้แก่ กำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (PW), กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์
(SCCW), และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ในงานวิจัยได้วัด
การเคลื่อนตัวของกำแพงและแรงอัดในค้ำยัน และนำมาใช้วิเคราะห์หาค่ากลับโดยการจำลองด้วยวิธี
ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสองมิติและแบบสามมิติเพื่อหาสถิติพารามิเตอร์ในเทอมของ E_u/S_u ซึ่งมีค่า
อยู่ระหว่าง 750-1250 สำหรับกำแพง PW และ 750-2000 สำหรับกำแพง SCCW ในงานวิจัยยังได้
พบว่าสถิติพารามิเตอร์แปรผกผันกับความเครียดเฉือนที่ประมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ได้จากการวัด
และแรงอัดในค้ำยันที่ได้จากการวิเคราะห์สอดคล้องกับแรงอัดที่วัดได้จริงในสนาม



THANAKORN SUKUMAMAS : BEHAVIOR OF SOIL-CEMENT
COLUMN WALL AND CONTIGUOUS PILE WALL WITH REINFORCED
SOIL-CEMENT COLUMN WALL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF
PORNPOT TANSENG, Ph.D. 112 PP

SOIL – CEMENT COLUMN/RETAINING WALL/DEEP EXCUVATION
SOFT CLAY/FINITE ELEMENT METHOD

This research studies behavior of earth retaining system for deep excavation and determine appropriate stiffness of clay for prediction of wall displacement using finite element method. Four types of retaining wall constructed in the same subsoil profiles is used in the studies i.e. contiguous pile wall (PW), soil-cement column wall (SCCW), and pile wall reinforced with soil-cement column (SCC). The behavior of wall is observed by measurement of wall displacements and strut load at various stages of excavation and used for back-analysis with 2D and 3D finite element. The stiffness of clay in term of E_u/S_u is 750 – 1250 for PW reinforced with SCC and 750-2000 for SCCW. Also the stiffnesses of clay reduce as the approximated shear strain from measured wall movement increase. The calculated strut forces agree well with the forces measured from the field.

School of Civil Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature ธนกร สุขุมามาส

Advisor's Signature พรพศพร แสนสง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย งานวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ถ้าปราศจากการช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำ ในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำคำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมโพธิ อยู่ไว กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บริษัท ไซมิทแอสเซท จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัย อำนวยความสะดวกในการติดตั้งเครื่องมือและดำเนินการตรวจวัด

บริษัท สแตนไพล์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา และผู้ที่ผู้วิจัยให้ความเคารพทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

ชนกร สุขุมมาศ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ปิทธิรสนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความเป็นมาของเสาเข็มดินซีเมนต์	3
2.2 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน	4
2.2.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์	4
2.2.2 วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์	6
2.3 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุดดินลึก	10
2.4 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม	18
2.5 ระบบกำแพงไคอะแฟรมที่ใช้ร่วมกับงานขุดดินลึกแบบบนลงล่าง (top-down) และแบบล่างขึ้นบน (bottom-up)	21
2.6 พฤติกรรมของระบบกำแพงไคอะแฟรมสำหรับงานขุดดินลึกในสภาวะแรงดันดินที่ไม่สมดุล	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	สมการเชิงประสพการณ์เพื่อใช้ทำนายการแอ่นตัวของกำแพงกันดิน.....	25
2.8	ทฤษฎีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	27
2.8.1	การคำนวณโดยหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล.....	27
2.8.2	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรง ประสิทธิผล.....	28
2.8.3	การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงรวม.....	29
2.8.4	โมดูลัสของดิน (Soil modulus).....	30
2.8.5	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength; S_u).....	34
2.8.6	ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่าง E_u/S_u สำหรับการวิเคราะห์.....	34
2.8.7	ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิต (K_0^{total}).....	36
2.9	ความเป็นมาของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous piles wall).....	38
2.10	การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องในอดีต.....	40
2.10.1	บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ.....	41
2.10.2	บันทึกการก่อสร้างอาคารสมเด็จพระเทพรัตน์.....	41
2.11	ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง.....	42
2.11.1	กรณีเรือน้ำไหลซึมขณะขุดดิน.....	42
2.11.2	กรณีเรือนดินไหลออกขณะขุดดิน.....	42
2.12	ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง.....	43
2.12.1	ประโยชน์การใช้งาน.....	43
2.12.2	การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง.....	43
2.12.3	ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง.....	43
2.12.4	ขอบเขตจำกัดอื่น ๆ.....	44
2.13	วิธีการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง.....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	46
3.1	การเจาะสำรวจดิน	47
3.2	การติดตั้งเครื่องมือวัดในสนาม	51
3.2.1	การวัดการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW) และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall)	51
3.2.2	การตรวจวัดแรงอัดในค้ำยันชั่วคราว	52
3.3	การวิเคราะห์ห้กลับการเคลื่อนตัว	58
4	ผลการวิจัย	59
4.1	พื้นที่วิจัย	59
4.2	ข้อมูลชั้นดิน	64
4.3	เสาเข็มดินซีเมนต์	64
4.4	การวัดการเคลื่อนตัวและแรงอัดในค้ำยัน	65
4.4.1	การเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัด	65
4.4.2	แรงอัดในค้ำยัน	73
4.5	การวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์	75
5	บทสรุป	88
5.1	สรุปผลการวิจัย	88
5.2	ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต	89
	รายการอ้างอิง	90
	ภาคผนวก ก. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	
	ประวัติผู้เขียน	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าโมดูลัสดินเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังก่อสร้าง SCC.....16
2.2	กรณีศึกษางานขุดดินในโครงการที่ใช้ Diaphragm wall.....21
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า S_u ชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ.....32
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า S_u ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ.....33
2.5	บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพ.....41
3.1	รายละเอียด electrical resistance strain gauge ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....57
4.1	ชื่อที่ใช้เรียกระบบป้องกันดินพังในโครงการ.....61
4.2	แสดงค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่วัดจริงในสนามของกำแพงแต่ละแบบที่ทำ การวัดด้วย Inclinator.....71
4.3	แสดงค่าสลิปเฟสของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริง ในสนามของกำแพงแบบต่างๆ.....84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ.....4
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ%สารผสมเพิ่ม.....5
2.3	ขั้นตอนการผสมแบบ Wet mixing method.....7
2.4	วิธีการผสมแบบ Dry jet mixing method.....8
2.5	ใบพัดผสมของ Dry jet mixing method.....9
2.6	ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์.....11
2.7	ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน.....12
2.8	รายละเอียดการใช้ DCM ของโครงการหนึ่งในอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ.....14
2.9	การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Diaphragm wall.....15
2.10	การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกเพื่อก่อสร้างกำแพงป้องกันตลิ่ง.....16
2.11	รูปตัดตามยาวของโครงการ โดยแสดงระดับของการขุด ระบบกำแพงกันดิน และตำแหน่ง พื้นชั้นใต้ดิน.....17
2.12	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก.....18
2.13	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน.....19
2.14	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก.....20
2.15	เปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดของโครงการที่ใช้ระบบการก่อสร้างแบบบนลงล่าง กับระบบล่างขึ้นบน.....22
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดกับความลึกในการขุดดิน.....23
2.17	แผนที่โครงการก่อสร้าง.....24
2.18	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงดันดินที่ไม่สมดุลของการขุดโดยใช้กำแพง ไคอะแฟรมริมแม่น้ำเจ้าพระยา.....24
2.19	ผลการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงดันดินที่ไม่สมดุลของการขุดโดยใช้กำแพงไคอะแฟรมของ ฝั่ง I-7 และ I-2.....25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20	กลไกการวิบัติ เมื่อ (a) ระดับชั้นดินแข็งอยู่ตื้น และ (b) ระดับชั้นดินแข็งอยู่ลึก.....26
2.21	การประมาณการแอนตัวของกำแพงชนิด Sheet pile.....26
2.22	แสดงค่าประมาณ Modulus multiplier ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ.....31
2.23	เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของด้านข้างจากการวัดในสนามและการวิเคราะห์ผล ด้วย FEM.....32
2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการเฉือนกับความเครียดเฉือน.....35
2.25	โมดูลัสเฉือนของดินกรุงเทพที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter.....36
2.26	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ K_0 และ OCR กับค่าพลาสติก.....37
2.27	แรงดันน้ำในดินกรุงเทพ.....38
2.28	กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง Contiguous pile wall.....39
2.29	Contiguous pile wall อุโมงค์ลอดทางแยกเกษตร.....40
2.30	ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม.....43
2.31	ขั้นตอนการทำกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง.....45
2.32	กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเมื่อเสร็จสมบูรณ์.....45
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....46
3.2	ตำแหน่งการเจาะทดสอบดิน.....47
3.3	ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-1.....48
3.4	ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-2.....49
3.5	ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-3.....50
3.6	การวัดการเคลื่อนตัวของดิน โดย Inclinator.....51
3.7	ตำแหน่งท่อ Inclinator ในโครงการ.....52
3.8	ส่วนประกอบของเกจวัดความเครียด.....53
3.9	ขั้นตอนการติดตั้ง Strain gauge กับผิววัสดุ.....54
3.10	แสดงตำแหน่งการติดตั้งค้ำยันชั่วคราวในโครงการ.....56
3.11	ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gauge ในค้ำยันชั่วคราว.....56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12	การอ่านค่าความเครียดจากเครื่องมือวัด.....57
4.1	ผังโครงการ.....60
4.2	รูปตัดของกำแพงแบบที่ 1 SCC-SOLID-BRACED และกำแพงแบบที่ 3 PW-SCC-FRONT.....60
4.3	รูปตัดของกำแพงแบบที่ 4 PW-SCC-BACK และกำแพงแบบที่ 2 SCC-BUTTRESS.....60
4.4	ภาพถ่ายโครงการ.....61
4.5	กำแพง SCC-SOLID-BRACED.....62
4.6	กำแพง SCC-BUTTRESS.....62
4.7	กำแพง PW-SCC-FRONT.....63
4.8	กำแพง PW-SCC-BACK.....63
4.9	รูปตัดชั้นดิน, คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล.....64
4.10	ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์.....65
4.11	การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-SOLID-BRACED.....67
4.12	การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-BUTTRESS.....68
4.13	การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-FRONT.....70
4.14	การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-BACK.....71
4.15	การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพง.....72
4.16	ภาพแสดงตำแหน่ง Wale, Strut และ Strain gauge.....73
4.17	แรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยัน.....73
4.18	ภาพแสดงการโก่งตัวของรัดครอบ(Wale)เมื่อทำการขุดลาดดินออก.....74
4.19	ผลการวิเคราะห์ห้กรณีที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสถิติของดินเหนียวอ่อน ของกำแพง SCC-SOLID-BRACED.....76
4.20	ผลการวิเคราะห์ห้กรณีที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสถิติของดินเหนียวแข็ง ของกำแพง SCC-SOLID-BRACED.....77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง SCC-SOLID-BRACED.....77
4.22	ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวอ่อนของ กำแพง SCC-BUTTRESS.....78
4.23	ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็ง ของกำแพง SCC-BUTTRESS.....79
4.24	แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง SCC-BUTTRESS.....79
4.25	ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวอ่อน ของกำแพง PW-SCC-FRONT.....80
4.26	ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็ง ของกำแพง PW-SCC-FRONT.....81
4.27	แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง PW-SCC-FRONT.....81
4.28	ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวอ่อน ของกำแพงแบบที่ 4 PW-SCC-BACK.....82
4.29	ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็ง ของกำแพง PW-SCC-BACK.....83
4.30	แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง PW-SCC-BACK.....83
4.31	การเสียรูปของดินที่วัดจาก Inclinator.....85
4.32	ความเครียดเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจริงในสนามของกำแพงทั้ง 4 แบบ.....86
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับสตีเฟนที่เหมาะสมในเทอมของ E_u/S_u87
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับ G/S_u87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Wn	=	ปริมาณความชื้น
LL	=	ขีดจำกัดเหลว
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก
PI	=	ดัชนีความเหนียวของดิน
E_u	=	โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ
S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
q_u	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ถูกจำกัด
ν	=	อัตราส่วนปัวซอง
ϕ'	=	ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน
σ'_{vo}	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง
γ	=	หน่วยน้ำหนักดิน
M	=	Modulus multiplier
P	=	แรงที่กระทำในทิศทางตั้งฉาก
A	=	พื้นที่หน้าตัด
σ	=	ความเค้นตั้งฉาก
ε	=	ความเครียดตั้งฉาก
δ	=	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาด
L_0	=	ความยาวเริ่มต้น
E	=	โมดูลัสของยังส์
G_s	=	ความถ่วงจำเพาะของดิน
ΔE	=	การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ทางไฟฟ้า
ΔF	=	ค่าแรงอัดเปลี่ยนแปลง
ΔT	=	ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง
SCC	=	เสาเข็มดินซีเมนต์
DCM	=	การปรับปรุงดินโดยวิธีผสมลิก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้พื้นที่ในเขตพื้นที่เมืองของกรุงเทพมหานครในอัตราที่สูงมาก พื้นที่พัฒนาส่วนใหญ่มีอยู่จำกัดและมีราคาสูงจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นโครงการพัฒนาส่วนใหญ่จึงพัฒนาไปในทางที่จะเพิ่มเนื้อที่ที่ใช้สอยโดยการก่อสร้างขึ้นได้ดิน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นที่ยอดคราดได้ดิน สำหรับการก่อสร้างขึ้นได้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากจำเป็นต้องใช้ระบบป้องกันดินพังระบบป้องกันดินพังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและวิศวกรส่วนใหญ่มีความคุ้นเคย ได้แก่ระบบ ระบบกำแพงกันดิน เข็มพืดเหล็ก (Sheet pile) และระบบค้ำยันชั่วคราว, ระบบกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall), และระบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Diaphragm wall) ซึ่งวิศวกรสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้เป็นปกติในปัจจุบัน แต่ด้วยความต้องการในการแข่งขันด้านต้นทุน และระยะเวลาในการก่อสร้างจึงได้มีการนำระบบป้องกันดินพังแบบอื่นมาใช้โดยเฉพาะระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์คำนวณยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของวิศวกรผู้ออกแบบและวิศวกรก่อสร้างเท่าใดนัก อีกทั้งงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของระบบกำแพง SCCW ที่ใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดดินลึกกว่า 6 เมตรยังมีไม่มากนัก

ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังที่ผ่านมา เป็นการเปรียบเทียบระบบกำแพงกันดินต่างรูปแบบในชั้นดินที่แตกต่างกัน จึงมีความแปรปรวนเนื่องจากคุณสมบัติของชั้นดิน, กรรมวิธีการก่อสร้าง, และปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอันทำให้การเปรียบเทียบพฤติกรรมมีความคลาดเคลื่อนได้มาก ดังนั้นในการวิจัยพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพัง โดยเฉพาะกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีรูปแบบแตกต่างกันจึงควรกระทำในพื้นที่เดียวกันเพื่อจัดตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังรูปแบบแตกต่างกัน 4 รูปแบบที่ได้ก่อสร้างในบริเวณเดียวกัน โดยกำแพงแต่ละรูปแบบเป็นระบบกำแพง กันดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นองค์ประกอบ โดยกำแพงสองรูปแบบแรกใช้ SCCW เป็นกำแพงกันดินหลัก ที่ใช้ระบบค้ำยันและไม่ใช้ระบบค้ำยัน และอีกสองรูปแบบหลังใช้ SCCW ร่วมกับ PW โดยมีการเสริม SCCW ด้านนอกบ่อขุดและด้านในบ่อขุด ในการวิจัยได้เก็บข้อมูลการ

เคลื่อนตัวของระบบกำแพงกันดินแต่ละแบบด้วย Incilnometer และได้เก็บข้อมูลแรงอัดในค้ำยันด้วย strain gauge ซึ่งได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากลับโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อหาสถิติพื้นที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อให้ทราบถึงการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW), กำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall), และกำแพงกันดินเสาเข็มเรียงต่อเนื่องที่ใช้ร่วมกับกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW+Pile wall)

1.2.2 เพื่อให้ทราบถึงสถิติแรง (E_u / S_u) ที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแบบต่างๆ ที่ก่อสร้างในบริเวณเดียวกันในขั้นตอนการขุดดิน

1.2.3 เพื่อให้ทราบถึงแรงอัดที่เกิดในค้ำยันชั่วคราว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ ได้แก่

1.3.1 งานวิจัยนี้เลือกศึกษาเฉพาะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW), กำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall), และกำแพงกันดินเสาเข็มเรียงต่อเนื่องที่ใช้ร่วมกับกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW+Pile wall) เท่านั้น

1.3.2 งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินในช่วงก่อสร้างเท่านั้น ซึ่งถือว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นยังคงค้างอยู่ในดิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ ได้แก่

1.4.1 ทำให้ทราบถึงการเคลื่อนตัวของกำแพงแบบต่างๆ

1.4.2 ทำให้ทราบถึงแรงอัดในค้ำยันชั่วคราว

1.4.3 ทำให้ทราบถึงสถิติพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของระบบกำแพงกันดินแบบต่างๆ

บทที่ 2

ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

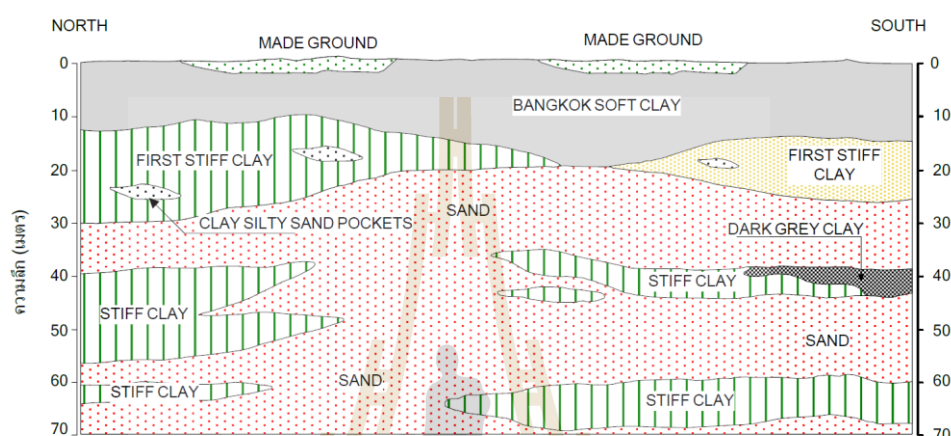
2.1 ความเป็นมาของเสาเข็มดินซีเมนต์

สมโชค ประเสริฐวินิจกุล (2545) กล่าวว่า เสาเข็มดินซีเมนต์เริ่มใช้ในประเทศสวีเดนและประเทศญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2513 เป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้ปูนขาวและซีเมนต์ โดยประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกที่ใช้วิธีการผสมแบบลึกเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนของโครงสร้างบริเวณท่าเรือ และปัจจุบันได้นำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับงานคันทาง งานฐานรากอาคารและถังเก็บน้ำ โดยในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์เป็นที่นิยมมากกว่าการปรับปรุงด้วยปูนขาว เช่นเดียวกับประเทศไทย จากที่ปรากฏหลักฐานเริ่มมีการใช้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 และจากนั้นก็มีการนำ มาประยุกต์ใช้กับคันทางของถนน งานฐานรากอาคารต่างๆ และงานซ่อมแซมฐานรากเพื่อที่จะลดการเกิดการทรุดตัว

เกษม เพชรเกตุ (2536) กล่าวว่า การฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงกับดินเหนียวอ่อน บริเวณอำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี ซึ่งดินมีค่าการซึมผ่านน้ำได้ต่ำ จะทำให้ดินเหนียวมีกำลังสูงขึ้นตามปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ผสม โดยพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วสูงกว่าดินเดิมประมาณ 20 เท่า ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำนวน 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินเปียก นอกจากนี้ยังสามารถทำ Jet mixing ให้เป็นเสาหรือให้ติดกันเป็นพืดทำเป็น Gravity wall ได้ และสามารถใช้งาน Deep excavation ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพได้ดี

จากข้อมูลของ วสท. (2520) ระบุว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เป็นดินที่มีความลึกประมาณ 10-18 เมตร เป็นดินที่มีขนาดเม็ดเล็กมาก ถูกพัฒนามาจากทางตอนเหนือของกรุงเทพมหานคร เมื่อกระแสน้ำมาปะทะกับน้ำทะเลในอ่าวไทย ทำให้เกิดกระแสน้ำลดความเร็วลง ดินที่ถูกพัดพาจึงตกตะกอนเป็นบริเวณกว้าง บางส่วนถูกน้ำพัดพาลงสู่อ่าวไทย เมื่อน้ำขึ้นดินส่วนที่ตกตะกอนบริเวณอ่าวไทยไม่หมดก็จะถูกน้ำพัดพามาตกตะกอนบริเวณปากอ่าว เช่น บริเวณกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม ชลบุรี และฉะเชิงเทรา เป็นต้น ดังนั้นดินบริเวณนี้จึงเป็นดินที่มีขนาดเม็ดเล็กมาก โดยมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น มีปริมาณความชื้น (Water content) ที่สูง Tonyagate (1978) ได้รายงานปริมาณความชื้นโดยประมาณของชั้นดินเหนียวอ่อน เท่ากับ

65-90% ชีดจำกัดเหลว (Liquid limit) มีค่าสูง โดยมีค่าใกล้เคียงกับ Water content คือมีค่าระหว่าง 60-140% ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ประมาณ 2.0 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าต่ำ คือประมาณ 0.4-1.5 ตันต่อตารางเมตร และความไวตัว (Sensitivity) มีค่าระหว่าง 8-10 เป็นต้น โดย Teparaksa et al (1999) ได้แสดงหน้าตัดความลึกชั้นดินของดินกรุงเทพ บริเวณทางตอนเหนือถึงตอนล่างของเขตพื้นที่กรุงเทพ ที่ระดับความลึก -70 เมตรจากผิวดิน ดังรูปที่ 2.1



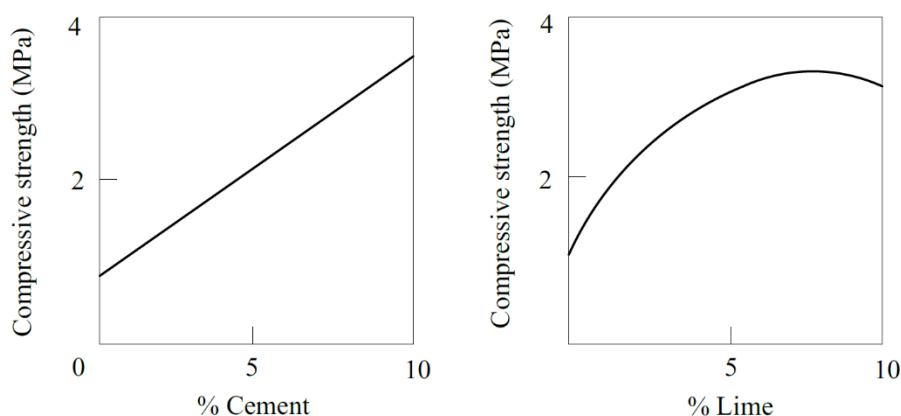
รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ (Teparaksa et al., 1999)

2.2 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน

การปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อนต้องมีการควบคุมคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วยหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบต่างๆ ที่ส่งผลต่อกำลัง รูปแบบการก่อสร้างตามแต่ละวิธี เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์

ก. ปริมาณซีเมนต์ (Cement Content) การพัฒนากำลังของดินผสมดินซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ Metcalf (1977) พบว่าค่า Unconfined Compressive Strength, q_u ของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ จะแปรผันเชิงเส้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต่างกับปูนขาวที่มีความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยเมื่อผสมปูนขาวเกิน 8 เปอร์เซ็นต์ กำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



Strength gain vs. % admixture

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ%สารผสมเพิ่ม (Metcalf, 1977)

ข. ชนิดของปูนซีเมนต์ (Type of Cement) จากประเภทของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ได้มีการศึกษาและทดลองใช้ปูนซีเมนต์แต่ละชนิดผสมกับดินปรากฏว่าปูนซีเมนต์ประเภท 3 มีการพัฒนากำลังได้ดีกว่าประเภท 1 Felt (1955) แต่อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ประเภท 1 ยังเป็นที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินมากกว่า เนื่องจากจัดหาง่ายและมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น

ค. ชนิดของดิน (Type of Soil) โดยทั่วไปดินผสมซีเมนต์ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์จะมีค่าต่ำเมื่อดินมีสารอินทรีย์ปนอยู่ในปริมาณมาก ผลกระทบจากปูนซีเมนต์โดยทั่วไปลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณดินเหนียว อย่างไรก็ตามดินที่ผสมปูนขาวจะมีค่ากลับกัน Terrel et al. (1979) โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนอนุภาคของดินเหนียวในกระบวนการ Pozzolanic reaction แต่ในส่วนที่ดินผสมกับปูนซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อมประสานในกระบวนการ Cement hydration นอกจากนี้ Broms (1986) พบว่า การเพิ่มปริมาณเกลือในดินประเภท Marine clay ซึ่งเป็นดินเหนียวที่เกิดจากการตกตะกอนบริเวณชายฝั่งที่มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบ Flocculated structure เมื่อเริ่มทำการผสมกับซีเมนต์ก็เป็นสาเหตุให้เพิ่มกำลังของดินได้

ง. ระยะเวลาในการบ่ม (Curing time) กำลังรับแรงเฉือนของดินหลังการผสมซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มเหมือนกับคอนกรีตและดินผสมปูนขาว อัตราการพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและลดลงในช่วงหลังตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตาม อัตราการพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์ในช่วงแรกจะมีค่ามากกว่าดินผสมปูนขาว Herzog et al. (1963)

2.2.2 วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี โดยในแต่ละวิธีก็มีลักษณะและข้อได้เปรียบที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท โดยรูปแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

1. รูปแบบ Mechanical mixing method ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

- Wet mixing method
- Dry mixing method

2. รูปแบบ Jet grouting method โดยลักษณะของหัวฉีดสามารถแบ่งได้เป็น

3 ประเภท คือ

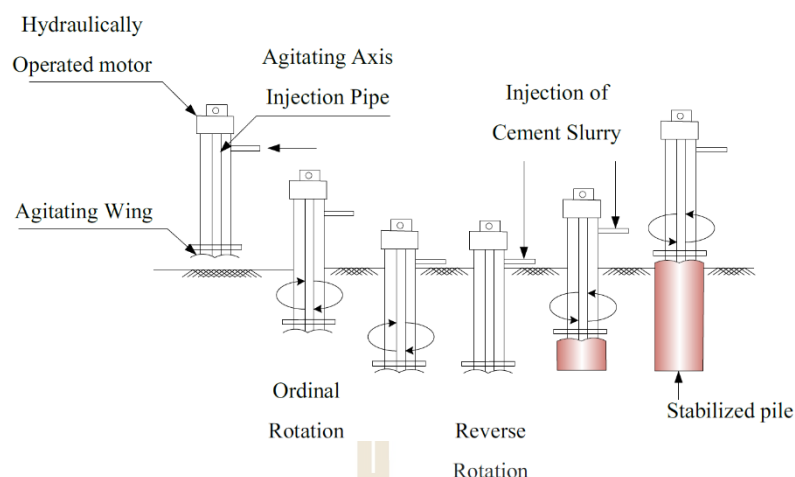
- ระบบท่อเดี่ยว (Single system)
- ระบบท่อกู่ (Double system)
- ระบบสามท่อ (Triple system)

โดยงานวิจัยนี้ใช้ระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์จากการก่อสร้างด้วยวิธี Mechanical mixing method ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าเฉพาะรูปแบบการก่อสร้าง ข้อได้เปรียบข้อด้อย ของวิธีนี้เท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Mechanical mixing method วิธีนี้เป็นการใช้ใบพัดที่อยู่ตามแนวแกนเจาะช่วยในการผสมดินให้เข้ากันกับสารผสมเพิ่มที่ประกอบไปด้วย 2 สถานะของสารผสมเพิ่มคือ สถานะที่มีลักษณะเป็นน้ำ ปูน (Cement slurry หรือ Cement milk) จะเรียกว่า Wet mixing method และสถานะที่มีลักษณะเป็นซีเมนต์ผง (Cement powder) โดยทั่วไปจะเรียกวิธีการที่ใช้สารผสมเพิ่มลักษณะนี้ว่า Dry jet mixing method ซึ่งรายละเอียดของวิธีการต่างๆ อธิบายได้ดังนี้

ก) Wet mixing method

รูปแบบของวิธี Wet mixing จะเป็นการใช้น้ำปูนนำเข้าไปปรับปรุงดิน ซึ่งขบวนการก่อสร้างจะมีลักษณะคล้ายกันกับวิธี Dry jet mixing โดยอาจมีรูปแบบปลีกย่อยที่แตกต่างกันอยู่บ้าง โดยวิธีการนี้จะทำการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันขนาด 10-15 บาร์ ในขณะที่ก่อกำแพงเจาะลงแล้วทำการตีควงด้วยใบพัดผสมไปพร้อมๆกันทำให้ดินและน้ำปูนผสมเป็นเนื้อเดียวกันและในระหว่างชักกั้นผสมขึ้น ใบพัดผสมจะทำการตีควงอีกครั้งโดยเป็นการหมุนวนกับการกดลงในตอนแรก ดังรูปที่ 2.3 เป็นลำดับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธี Wet mixing method



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผสมแบบ Wet mixing method (Miki, 1985)

ข้อได้เปรียบของการผสมด้วยวิธี Wet mixing method

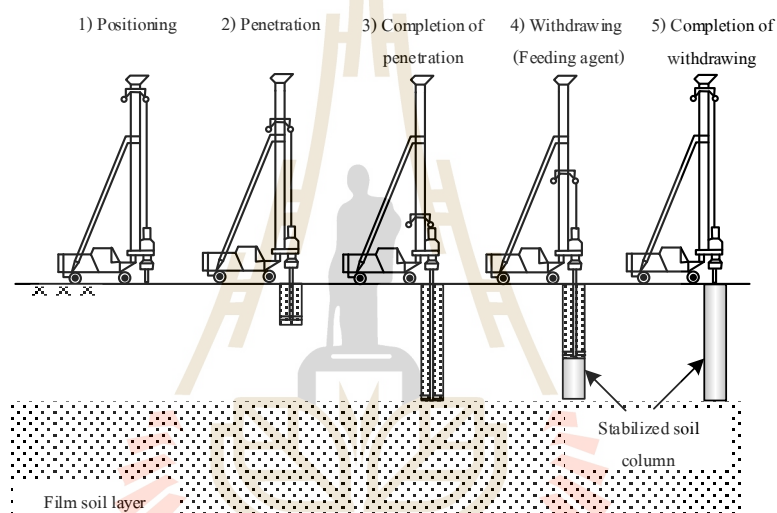
- ก) การกวนผสมให้ดินเข้ากับสารผสมทำได้ง่ายกว่าวิธีผสมแห้ง จึงทำให้เนื้อดินผสมซีเมนต์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ
- ข) สามารถใช้ผสมได้กับดินทุกชนิดโดยไม่ต้องปรับสัดส่วนผสม และขบวนการกวนผสมให้เหมาะสมกับดินแต่ละชนิด
- ค) การควบคุมคุณภาพทำได้ง่ายกว่าการผสมแห้ง เพราะสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่ได้

ข้อด้อยของการผสมด้วยวิธี Wet mixing method

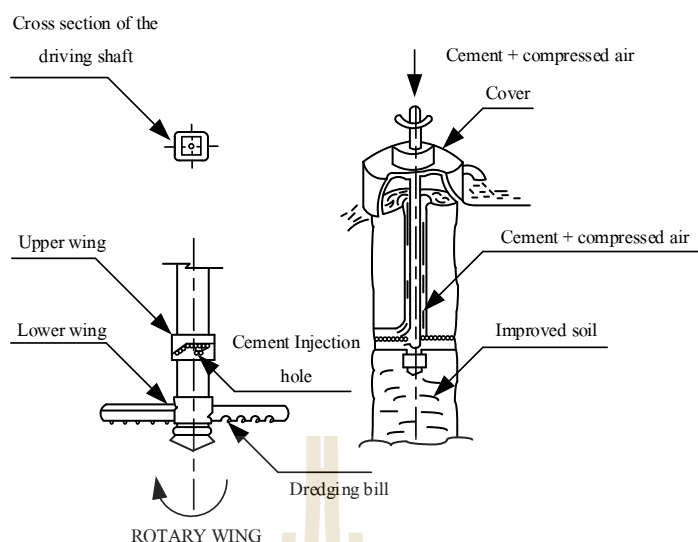
- ก) ในกรณีที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันจะมีกำลังต่ำกว่าระบบแห้ง เนื่องจากการเพิ่มน้ำให้เนื้อดินทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง และที่กำลังของเสาเข็มเดียวกันจะใช้ปูนซีเมนต์มากกว่าวิธีผสมแห้ง
- ข) โดยปกติพื้นที่ก่อสร้างจะสกปรกกว่า เนื่องจากจะมีเศษน้ำปูนบริเวณปากหลุมเจาะ โดยเฉพาะวิธีการผสมเปียกที่ใช้ระบบความดันสูง ส่วนระบบความดันต่ำจะมีปัญหาน้อยกว่า
- ค) โดยทั่วไปแล้วจะมีอัตราการก่อสร้างช้ากว่าวิธีการผสมแห้ง

ข) Dry jet mixing method

Chida. (1982) นำซีเมนต์ผง (Cement powder) มาใช้ในการผสมแทนการใช้น้ำปูน โดยวิธีการ Deep mixing machine จะทำการตัดย่อยดินในขณะที่ใบพัดเคลื่อนที่ลง ใบพัดผสมจะมีลักษณะแตกต่างจากใบพัดตัดย่อยดิน เมื่อถึงความลึกที่เป็นปลายของเสาเข็มดินซีเมนต์ก้นเจาะจะทำการฉีดผงปูนตลอดความลึกชั้นดิน โดยผ่านท่อกระบอกฉีดที่ถูกอัดด้วยอากาศ จากนั้นผงซีเมนต์จะถูกผสมโดยใบพัดผสมซึ่งจะเป็นการหมุนกลับทางของใบพัดในขาลง พร้อมกับการชักก้านผสมขึ้นสู่ผิวดินในอัตราคงที่ โดยขั้นตอนการผสมและลักษณะของใบพัดแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 วิธีการผสมลึกแบบ Dry jet mixing method (Miki, 1985)



รูปที่ 2.5 ใบพัดผสมของ Dry jet mixing method (DJM Research Group, 1984)

ข้อได้เปรียบของการผสมด้วยวิธี Dry jet mixing method

ก) ในกรณีที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน กำลังของเสาเข็มระบบแห้งจะสูงกว่าเพราะไม่มีการเติมน้ำในระหว่างการผลิตทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ หรือในกรณีที่กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากัน วิธีการผสมแบบแห้งจะใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าวิธีผสมแบบเปียก โดยแบบผสมแห้งจะใช้ปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่แบบผสมเปียกจะใช้ปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ข) ในสภาพหน้างานปกติเครื่องจักรจะทำงานได้ในอัตราที่เร็วกว่าวิธี Wet mixing method

ค) ไม่จำเป็นต้องจัดหาน้ำในการผสม และเหมาะสำหรับชั้นดินเหนียวที่มีเนื้อสม่ำเสมอ และมีความชื้นในดินสูงกว่า 60-70% ตลอดชั้นดิน

ง) พื้นที่ก่อสร้างสะอาดกว่า เนื่องจากไม่มีเศษน้ำปูนหลงเหลือบริเวณปากหลุมเจาะ

ข้อด้อยของการผสมด้วยวิธี Dry jet mixing method

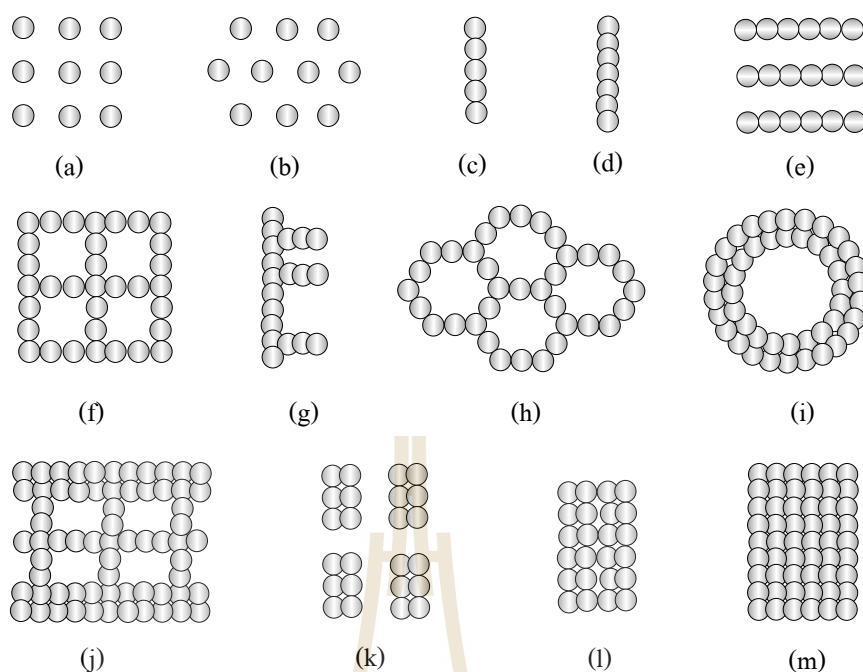
ก) การควบคุมปริมาณซีเมนต์ให้เข้ากับเนื้อดินทำได้ยากกว่าซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของเสาเข็ม

ข) การควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่ทำได้ยากกว่า ซึ่งอาจส่งผลต่อกำลังของเสาเข็ม

ค) เหมาะสมกับการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีปริมาณความชื้นในดินสูง

2.3 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานชุดดินลึก

Topolnicki (2004) ได้เสนอการเลือกรูปแบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับงานต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการประยุกต์ใช้งาน สภาพของสถานที่ก่อสร้าง อัตราส่วนปลอดภัยที่ต้องการ และราคาก่อสร้าง รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์มีลักษณะที่แตกต่างกัน รูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.6 โดยเสาเข็มดินซีเมนต์เดี่ยวที่มีรูปแบบการก่อสร้างแบบดาข่ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสามเหลี่ยม หรือแบบรวมกันเป็นกลุ่ม ดังรูปที่ 2.6a และ 2.6b มักนำไปใช้ในงานที่ต้องการลดการทรุดตัวของดินฐานราก หรืองานปรับปรุงเสถียรภาพ เช่น งานคันทางถนน เป็นต้น รูปที่ 2.6c, 2.6d, 2.6e และ 2.6g ใช้ในการควบคุมงานชุดดิน เพื่อรักษาเสถียรภาพและป้องกันโครงสร้างที่ฐานรากดินรอบพื้นที่ชุด เพื่อใช้ต้านทานแรงแนวราบหรือแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถล ด้วยการใช้รูปแบบเสาเข็มแบบแถวที่มีทิศทางเดียวกันกับน้ำหนักในแนวราบหรือตั้งฉากกับผิววิถีที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ซึ่งเสาเข็มแบบกำแพงสามารถสร้างได้ทั้งแบบสัมผัสกัน แบบซ้อนกันใช้ในงานป้องกันน้ำไหลผ่าน รูปแบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่มสามารถใช้รองรับคันทางและฐานรากเพื่อลดการทรุดตัว และการเพิ่มกำลังแบกทานเสาเข็มดินซีเมนต์ชนิดกลุ่มมีหลายรูปแบบด้วยกัน ได้แก่ แบบดาข่ายสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.6f แบบวางฝั่งสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.6h แบบวางแหวนซ้อนทับกัน ดังรูปที่ 2.6i แบบช่องดาข่าย ดังรูปที่ 2.6j ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพและประหยัดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบกำแพงและแบบกลุ่มก้อน ดังรูปที่ 2.6m แบบเสาเข็มกลุ่ม ดังรูปที่ 2.6k และแบบเสาเข็มกลุ่มสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.6l



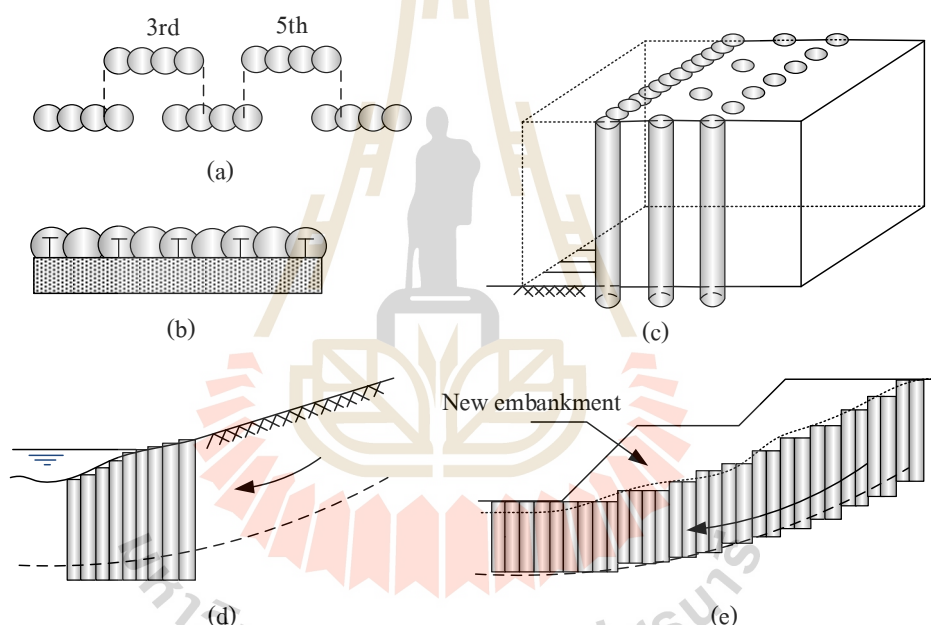
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ (a) และ (b) แบบเสาเข็ม (จัดเรียงแบบจัตุรัสและสามเหลี่ยม) (c) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกัน (d) กำแพงซ้อนกัน (e) กำแพงหลายแถวสัมผัสกัน (f) ตาข่ายสัมผัสกัน (g) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกันแบบมีค้ำยัน (h) รวงผึ้งสัมผัสกัน (i) วงแหวน (j) ช่องตาข่าย (k) เสาเข็มกลุ่ม (l) เสาเข็มกลุ่มสัมผัสกัน (m) กลุ่มก้อน (Topolnicki, 2004)

งานระบบกันดิน เป็นการยึดรั้งแรงดันดินที่เกิดขึ้นระหว่างการขุดลึกและงานขุดค้ำในดินอ่อนด้วยการป้องกัน โครงสร้างรอบๆ บริเวณที่ขุด การป้องกันดินออก (Heave) การป้องกันดินถล่ม และการวิบัติของลาด (รูปที่ 2.6) สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบกันดินนั้นมักนิยมใช้รูปแบบกำแพงและตาข่าย การผสมดินกับซีเมนต์ต้องการกำลังและความแข็งแรงที่สูงเนื่องจากต้องรับแรงดันดินและแรงดันน้ำด้านข้าง ตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องการสำหรับงานป้องกันงานขุดได้แก่ ความเป็นเนื้อเดียวกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ในระดับสูงและเสาเข็มดินซีเมนต์ต้องอยู่ในแนวตั้งเพื่อให้ความหนาของเสาเข็มที่ต้องการและเพื่อให้ได้การซ้อนกันของเสาเข็มอย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 2.6 c เป็นระบบที่ใช้รองรับงานขุดค้ำมีลักษณะเป็นกำแพงกันดินประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงในแถวหน้าตามด้วยแถวหลังอีกหนึ่งแถวหรือมากกว่า เสาเข็มแถวหลังถูกกำหนดให้มีระยะห่างและขนาดที่ทำให้มั่นใจได้ว่าได้เกิดเป็นระบบเชิงประกอบระหว่างกำแพงและเพื่อรักษาเสถียรภาพภายนอกให้กับกำแพงโดยมีการใช้ดินผสมปูนซีเมนต์สร้างเป็นแผ่นเพื่อยึด

กำแพงและกลุ่มเสาเข็มเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดการถ่ายน้ำหนักด้านบนลงมาสู่ด้านล่างของเสาเข็ม ระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบไม่ควรเกิน 1.2-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์

การป้องกันดินถล่มในงานขุด ทำได้โดยก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในบริเวณที่ทำการขุดเพื่อทำหน้าที่เป็นแกนยึดฝังผ่านระนาบวิบัติ ในบางครั้งด้านข้างของงานขุดอาจมีการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มแรงดันดินแบบแพชซีฟ (Passive earth pressure) และลดระยะฝังของเสาเข็มพืดหรือเสาเข็มเจาะ เสาเข็มดินซีเมนต์ยังประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อป้องกันดินถล่มและการวิบัติของลาด โดยทั่วไปมักใช้รูปแบบของกำแพง รูปแบบกริด (grid) หรือแบบก้อน (block) ซึ่งความยาวต้องเพียงพอที่จะตัดกับระนาบวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (รูปที่ 2.7d และ 2.7e) ทำให้กำลังเฉือนรวมของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้น



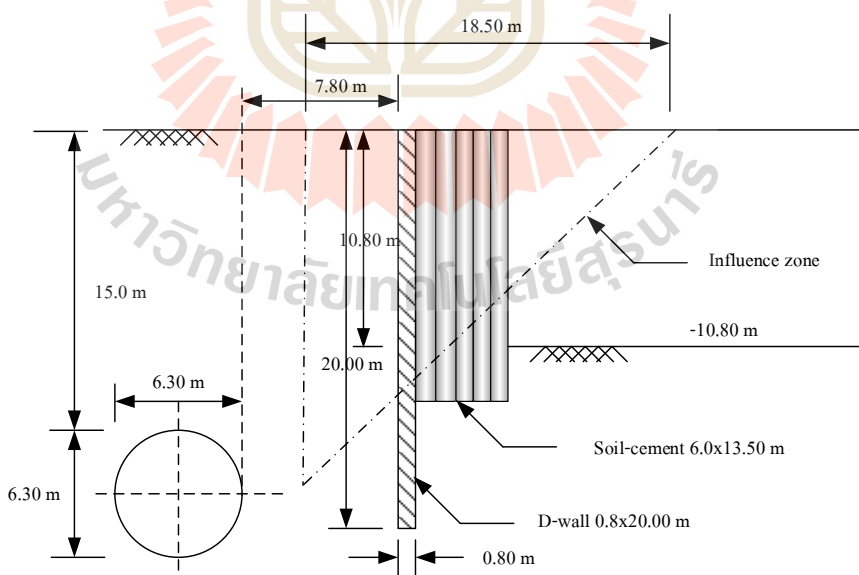
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน (a) ลักษณะทั่วไปของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (b) กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเหล็กกรุปพรรณใช้ร่วมกับผนังคอนกรีต (c) กำแพงกันดินเชิงประกอบ (d) งานป้องกันดินถล่ม (e) งานปรับปรุงเสถียรภาพของลาด (Topolnicki, 2004)

นฤทธิ ประกอบบุญ (2546) ได้รายงานพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ออกแบบให้เป็นระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำสำรองโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยบ่อเก็บน้ำ แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนสถานีสูบน้ำเข้า (Pump house) มีความกว้างประมาณ 6.2 เมตร ยาว 18 เมตร และลึก 7 เมตร และส่วนบ่อเก็บน้ำมีความกว้างประมาณ 46 เมตร ยาวประมาณ 830 เมตร และลึก 5.5 เมตร ระบบกำแพงกันดินก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ความลึกประมาณ 8 เมตร ฝังลงในชั้นดินเหนียวแข็ง จากพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณทางเข้าบ่อเก็บน้ำพบว่า ขณะทำการขุดดินในแนวค้ำลึก 7 เมตร ได้เกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะของคานยื่น (Cantilever mode) ซึ่งมีค่าความเครียดเฉือน (Shear strain) ประมาณ 1.4% จากนั้นกำแพงได้เกิดการวิบัติทั้งระบบ (Overall slope failure) ในส่วนของระบบกำแพงกันดินที่บ่อเก็บน้ำซึ่งมีความลึกการขุด 5.5 เมตร ได้มีการเปลี่ยนวิธีการขุดดินจากแนวค้ำ (Vertical excavation) มาเป็นการขุดโดยเว้นให้มีความลาดดิน (Slope excavation) ในส่วนที่ลึกกว่า 3.5 เมตร ทำให้สามารถลดการเกิด Shear strain ลงเหลือเพียง 0.21-0.34% และไม่เกิดการวิบัติ นอกจากนี้ยังได้เสนอค่าสถิติของดินที่เหมาะสมสำหรับการประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ให้ผลการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกับผลการวัดในสนามด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) พบว่า อัตราส่วนระหว่าง Young's Modulus ต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน (E_u/S_u) มีค่าเท่ากับ 120-180, 600-700 และ 650-750 สำหรับดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามลำดับ

ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์ (2548) ได้รายงานพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ประยุกต์มาใช้สำหรับงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เพื่อก่อสร้างโครงสร้างกันดินใน 2 ส่วนคือ โครงสร้างประตูระบายน้ำและโครงสร้างกำแพงกันดินริมคลอง ของโครงการหนึ่งในอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ โดยโครงสร้างประตูระบายน้ำเป็นอาคารประตูระบายน้ำคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่ที่มีการขุดดินลึกประมาณ 10 เมตร และมีระบบป้องกันดินชั่วคราวเป็นระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร เรียงต่อเนื่องจำนวน 9 แถว เป็นความหนา 6.34 เมตร ความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 11.0-18.0 เมตร โดยออกแบบเป็นกำแพง Gravity wall ดังรูปที่ 2.8 a ในส่วนโครงสร้างคลองเป็นโครงสร้างกำแพงที่ประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร เป็นกำแพงถาวร จำนวน 8 แถว หนา 5.60 เมตร ลึก 16 เมตร เพื่อขุดดินลึกประมาณ 8 เมตร โดยมีการเสริมด้านหน้ากำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการตอกเข็มพีคขนาดหน้าตัด 0.30x0.50 เมตร ยาว 20 เมตร ดังรูปที่ 2.8b จากรายงานพฤติกรรม

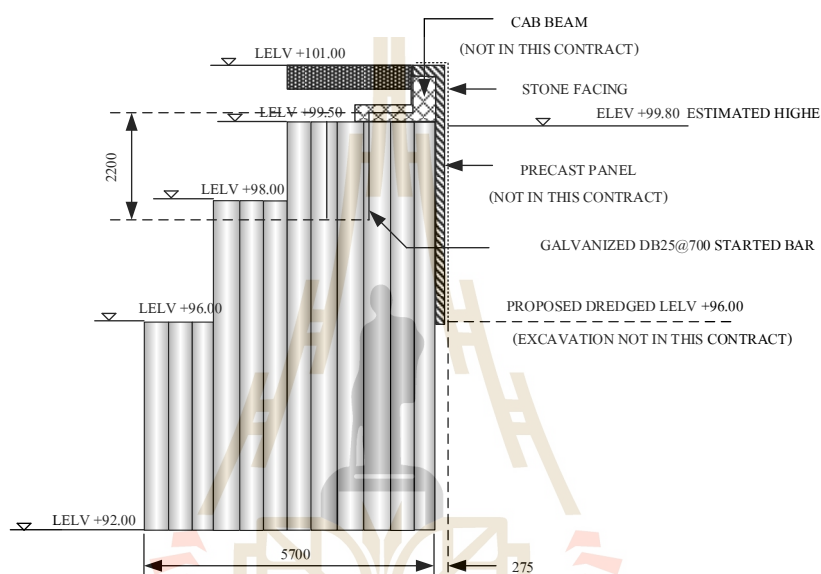
ณรงค์ และคณะ (2550) ได้รายงานกรณีศึกษาการปรับปรุงกำลังของดินด้วยการผสมดินเชิงกลแบบลึกเพื่อลดการเคลื่อนตัวด้านข้างของ 2 โครงการ ได้แก่

กรณีศึกษาที่ 1 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเมื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินในแนวเขตป้องกันของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) โดยใช้ Diaphragm wall เป็นกำแพงกันดิน ระดับความลึกที่ทำการขุดดินทั่วไปสำหรับโครงการนี้กำหนดไว้ที่ -10.80 เมตรจากระดับดินเดิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ 6.30 เมตร ระยะห่างจากขอบอุโมงค์ถึงขอบกำแพงกันดินที่ใกล้ที่สุดประมาณ 7.80 เมตร ความลึกจากผิวดินถึงขอบอุโมงค์ประมาณ 15.0 เมตร ซึ่งเป็นแนวแสดงการขุดดินที่อาจมีผลกระทบต่ออุโมงค์ นอกจากใช้กำแพงกันดินระบบ Stiff wall แล้ว การปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีผสมลึกบริเวณด้านที่มีการขุดดินหน้ากำแพง (Excavation side) โดยทำการปรับปรุงดินแบบบล็อคซึ่งมีความกว้างของการปรับปรุงดินรวม 6.0 เมตร มีระดับปลายของการปรับปรุงกำลังอยู่ที่ -13.5 เมตร จากผิวดิน ดังรูปที่ 2.9 จากรายงานผลการเคลื่อนตัวพบว่า กำแพงกันดินด้านที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงกำลังมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 20-27 มิลลิเมตร ในขณะที่กำแพงด้านที่มีการปรับปรุงดินมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 15-18 มิลลิเมตร ซึ่งบล็อคเสาเข็มดินซีเมนต์นอกจากจะช่วยลดการเคลื่อนตัวด้านข้างแล้วยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพงานขุดดินและป้องกันการเกิดการอุดของดินในบริเวณกำแพงกันดิน



รูปที่ 2.9 การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Diaphragm wall (ณรงค์ และคณะ, 2550)

กรณีศึกษาที่ 2 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ก่อสร้างแบบบล็อกเป็นกำแพงกันดิน เพื่อใช้ในการขุดดินลึกประมาณ 4 เมตร ลักษณะดินเป็นทรายหลวม เสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการนี้มีความลึก 8 เมตร ก่อสร้างแบบบล็อกกว้าง 5.70 เมตร ดังรูปที่ 2.10 อย่างไรก็ตามไม่ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดในโครงการนี้ ค่าการเคลื่อนตัวของดินจึงได้มาจากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของดินดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยพบว่า ค่าโมดูลัสของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 200% และดินทรายที่ผ่านการผสมมีลักษณะเป็นบล็อกขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของงานขุดดินให้มีเสถียรภาพ

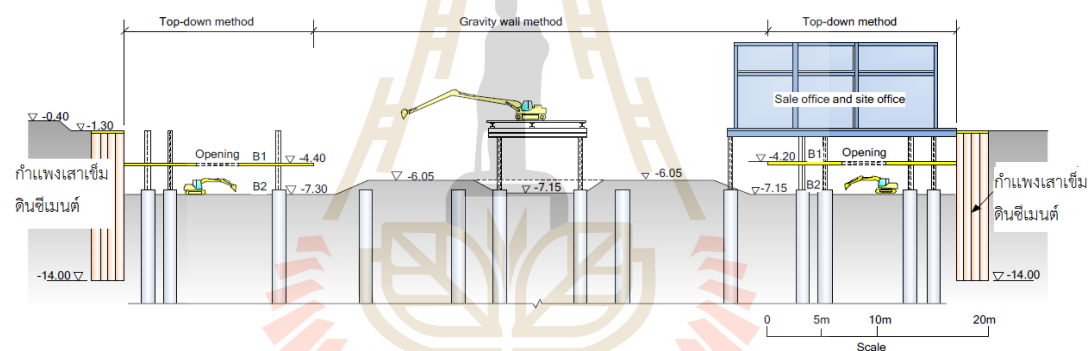


รูปที่ 2.10 การใช้การผสมเชิงกลแบบบล็อกเพื่อก่อสร้างกำแพงป้องกันตลิ่ง (ณรงค์ และคณะ, 2550)

ตารางที่ 2.1 ค่าโมดูลัสดินเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังก่อสร้าง SCC (ณรงค์ และคณะ, 2550)

รายการ	ทรายหลวม	ดินซีเมนต์
กำลังรับแรงเฉือน (T/m^2)	N/A	30 - 110
SPT-N (blow/ft)	3 - 12	N/A
ค่าโมดูลัสของดิน (T/m^2)	2000-4000	7000-15000
วิธีการทดสอบ	SPT-N	UCS-cored sample
หมายเหตุ	$E_{sand} = 300 \text{ N}$	E_{50} from UCS

พรพจน์ ดันเต้ง (2555) ได้รายงานการเคลื่อนตัวแนวราบของกำแพงกันดินที่ใช้ระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกับเทคนิคการก่อสร้างแบบ top-down สำหรับการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกในชั้น ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยปูนซีเมนต์ และการใช้โครงสร้างพื้นของอาคารเป็นค้ำยันถาวร เพื่อลดการเคลื่อนตัวแนวราบของโครงการก่อสร้างชั้นใต้ดิน อาคารคอนโดมิเนียมแห่งหนึ่ง ในซอยสุขุมวิท 31 ที่มีชั้นใต้ดิน 2 ชั้น และขุดดินลึก 7.3 เมตร ดังรูปที่ 2.11 โดยเสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร เรียงขบกัน 100 มิลลิเมตร โดยไม่สลับพื้นปลา ซึ่งได้ความหนาของกำแพงเป็น 2.90 เมตร ปลายกำแพงอยู่ที่ระดับความลึก -14 เมตร และปลายกำแพงฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง 1 เมตร งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวแนวราบของเทคนิคงานก่อสร้างแบบขุดเปิดหน้าดินปกติกับเทคนิคการก่อสร้างแบบ top-down และนำเสนอเทคนิคการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับการตรวจสอบพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินด้วยเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.11 รูปตัดตามยาวของโครงการ โดยแสดงระดับของการขุด ระบบกำแพงกันดิน และตำแหน่งพื้นชั้นใต้ดิน (พรพจน์ ดันเต้ง, 2555)

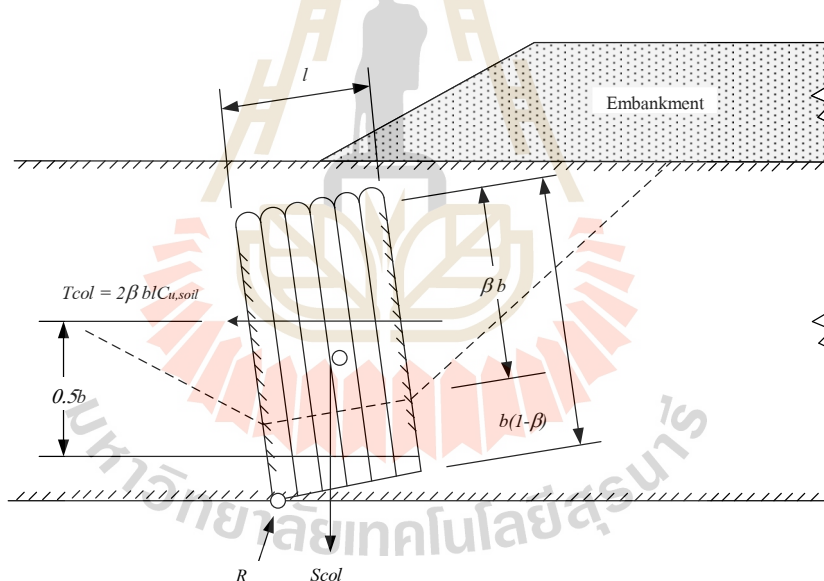
จากการเคลื่อนตัวแนวราบด้วยวิธีการก่อสร้างแบบ top-down กับ การก่อสร้างด้วยวิธีการขุดเปิดหน้าดินปกติ พบว่ากำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ค้ำยันด้วยพื้น โครงสร้างถาวรก่อนการขุดลึกลงไปจะมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างต่ำกว่า 30 มิลลิเมตร ในขณะที่กำแพงที่ก่อสร้างโดยไม่มีการค้ำยันและเป็นแบบ Gravity wall มีการเคลื่อนตัวที่สูงถึง 100 มิลลิเมตร โดยผู้วิจัยได้เสนอปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวดังกล่าว คือ คุณภาพของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ และขั้นตอนการก่อสร้างที่เหมาะสม กล่าวโดยสรุปคือ ระบบการก่อสร้างแบบ top-down ร่วมกับระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถลดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการก่อสร้างแบบ Gravity wall method นั้นจำเป็นต้องมีระยะเพียงพอที่จะก่อสร้างกำแพงให้มีความหนาที่เหมาะสม

นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางการวิเคราะห์ โดยใช้หน่วยแรงรวมในสถานะไม่ระบายน้ำ ที่พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถประมาณค่าการเคลื่อนตัวและแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้ในสนามมาก ดังที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยของ Teparaksa et al. (1999)

2.4 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม

Yoshida (1996) เสนอรูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม โดยมีรูปแบบการวิบัติที่อาจจะเกิดขึ้นกับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึกและแนวทางในการแก้ไขดังนี้

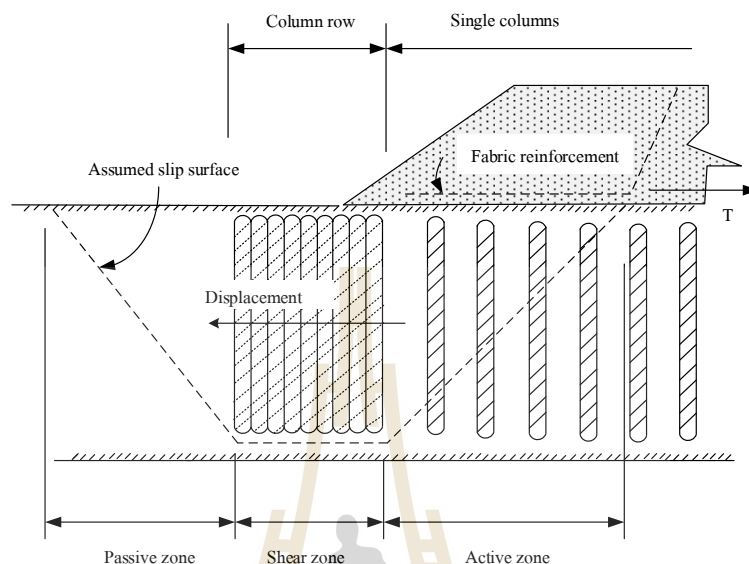
ก) การวิบัติเนื่องจากการพลิก (Failure by overturning) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน โดยความต้านทานโมเมนต์ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินจากการพลิกคว่ำสามารถป้องกันด้วยการเพิ่มความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์หรือจำนวนแถวของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก (Yoshida, 1996)

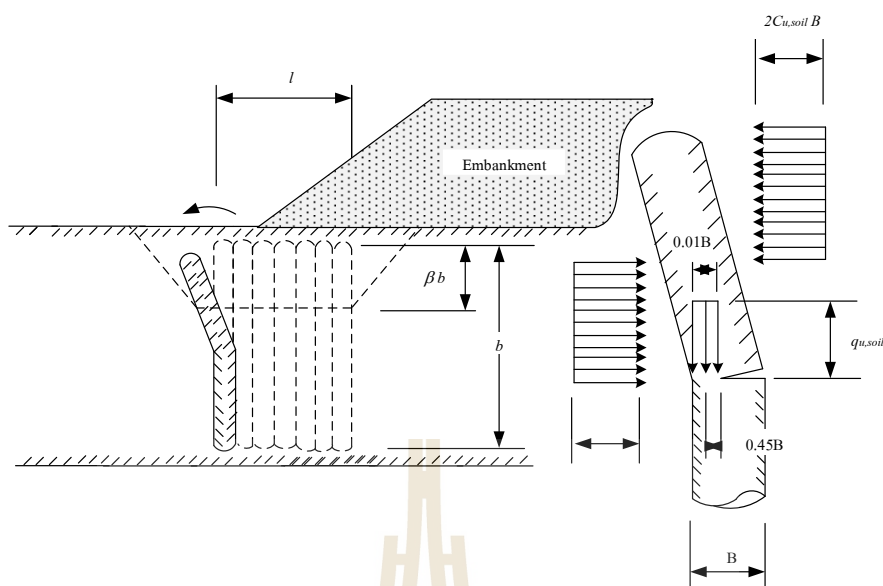
ข) การวิบัติเนื่องจากการเลื่อน (Failure by translation) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน การเลื่อนของโครงสร้างเกิดจากความต้านทานแรงเฉือนใต้ฐานรากของโครงสร้างเสาไม่เพียงพอในการรับแรงดันดินด้านข้าง สาเหตุหนึ่งเกิดจากการรบกวนดินใต้โครงสร้างทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงจึงเกิดการเลื่อนของโครงสร้างที่อยู่เหนือระยะการรบกวนโดย

แนวทางในการป้องกัน คือ โครงสร้างจะต้องใหญ่พอที่จะต้านแรงดันด้านข้างได้ระนาบการเลื่อน ด้วยการเพิ่มจำนวนแถวของเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบการวิบัติของ โครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน (Yoshida, 1996)

ค) การวิบัติเนื่องจากการแยก (Failure by separate) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน การแยกกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน มักเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในตำแหน่งใกล้ส่วนบนของโครงสร้างเสา โดยแรงดันด้านข้างที่แยกสามารถประมาณจากสมมุติฐานที่ว่า ความต้านทานแรงเฉือนทั้ง 2 ข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ปรับปรุง โดยเสาจะแยกออกจากกันเมื่อความกว้างของส่วนทับซ้อนระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์มีกำลังรับแรงดึงของช่วงทับซ้อนมีค่าน้อยมากๆ ซึ่งความต่อเนื่องหรือความเป็นเนื้อเดียวกันของดินซีเมนต์สามารถกระทำได้จากระยะซ้อนทับของเสาเข็มดินซีเมนต์จากขั้นตอนการก่อสร้าง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก (Yoshida, 1996)

นอกจากนี้ Yoshida (1996) ได้กล่าวว่า กำแพง DCM มีความเหมาะสมที่จะสามารถใช้เป็น กำแพงกันดินแบบ Gravity retaining wall โดยจะต้องมีการตรวจสอบเสถียรภาพทั้งหมด (Overall stability) ความต้านทานการหมุน (Overturning) ความต้านทานการเลื่อน (Sliding) ความต้านทานการซึม (Seepage) ความต้านทานการอู๊ด (Heaving) และความต้านทานการลอย (Piping) สำหรับ งานชุด โดย NAVFAC DM-7.2. (1982) ได้เสนอการตรวจสอบเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับ ตรวจสอบความปลอดภัยของระบบกำแพงกันดิน ดังนี้

FS (Overall = 2.0)

FS (Overturning = 1.5)

FS (Sliding = 1.5)

FS (Seepage = 1.5)

FS (Basal Heaving = 3.0)

2.5 ระบบกำแพงไคอะแฟรมที่ใช้ร่วมกับงานขุดดินลึกแบบบนลงล่าง (top-down) และแบบล่างขึ้นบน (bottom-up)

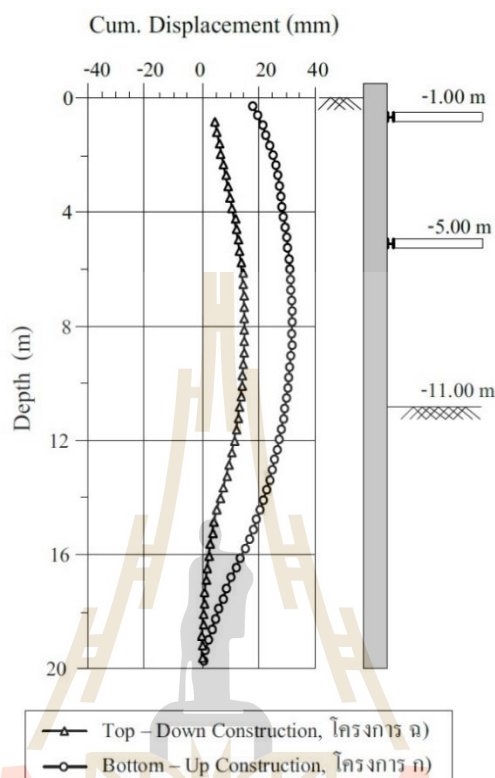
ณรงค์ และคณะ (2550) ได้รายงานการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบกำแพงกันดินที่เกิดจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน โดยมีเนื้อหาส่วนหนึ่งกล่าวถึงการเคลื่อนตัวในแนวราบของระบบ Diaphragm wall ที่ใช้ร่วมกับเทคนิคการก่อสร้างแบบบนลงล่าง (Top-down construction) เปรียบเทียบกับการก่อสร้างจากล่างขึ้นบน (Bottom-up construction) ซึ่งได้รวบรวมและเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 กรณีศึกษาขุดดินในโครงการที่ใช้ Diaphragm wall (ณรงค์ และคณะ, 2550)

โครงการ	Diaphragm Wall		ระดับการขุดลึก,H (ม.)	δ_{max}/H (%)
	หนา(ม.)	ระยะฝัง(ม.)		
<u>Bottom – Up Method</u>				
ก) Millennium Sukhumvit, ถ.สุขุมวิท	0.8	-20	-11	0.29
ข) BMA Art Museum, ถี่แยกปทุมวัน	0.8	-16	-9.5	0.26
ค) Thammasat, ท่าพระจันทร์	0.8	-28	-12.7	0.31
ง) Sathorn Complex, ถ.สาทร	0.8	-18	-14	0.24
จ) Belgavia, ถ.สุขุมวิท 30/1	0.8	-16	-6.50	0.60
<u>Top-Down Method</u>				
ฉ) Central Hospital, ถ.หลวง	0.8	-20	-11.0	0.17
ช) Bobae Bumrungmeung, ถ.บำรุงเมือง	0.8	-24	-19.0	0.10

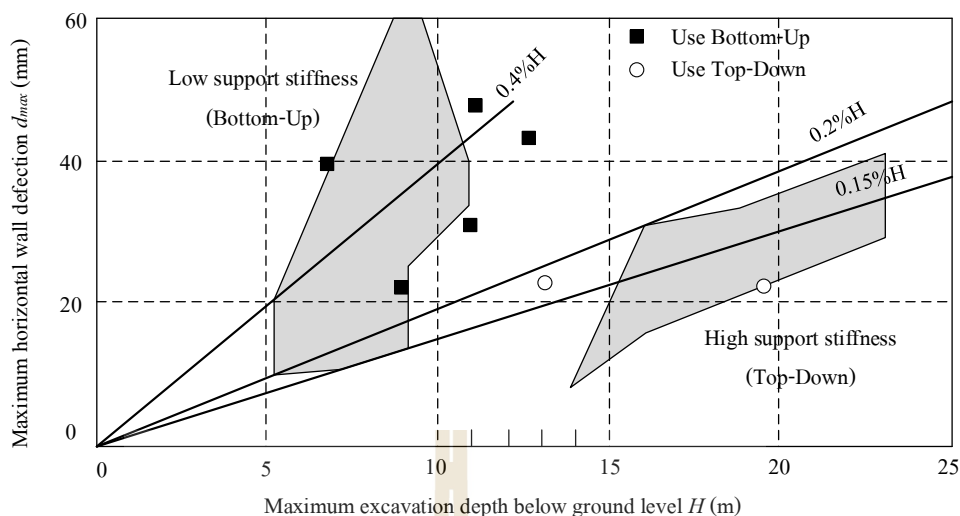
ผลการศึกษาพบว่า การก่อสร้างด้วยระบบการก่อสร้างจากบนลงล่าง โดยใช้ระบบ Diaphragm wall ซึ่งใช้พื้นโครงสร้างอาคารชั้นใต้ดินเป็นระบบค้ำยันถาวร จะช่วยลดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของ Diaphragm wall ให้เกิดน้อยกว่าการก่อสร้างด้วยระบบก่อสร้างจากล่างขึ้นบน ซึ่งมักจะใช้ระบบค้ำยันเหล็กชั่วคราว เนื่องจากตัวพื้นอาคารที่ใช้เป็นค้ำยันถาวร มีความแข็งแรงมากกว่า รูปที่ 2.15 เป็นการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดของโครงการ ก) และโครงการ ฉ) ในตาราง ที่ 2.2 ซึ่งมีระดับขุดมากที่สุดประมาณ 11 เมตร โดยใช้ Diaphragm wall ขนาด 0.80 เมตร ลึก -20 เมตร และมีจำนวนค้ำยัน 2 ชั้น เท่ากันแต่ใช้วิธีการก่อสร้างแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า

โครงการ จ) ซึ่งใช้ระบบก่อสร้างจากบนลงล่างให้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างต่ำกว่าโครงการ ก) ซึ่งก่อสร้างด้วยระบบก่อสร้างจากล่างขึ้นบน



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดของโครงการที่ใช้ระบบการก่อสร้างแบบบนลงล่างกับระบบล่างขึ้นบน (ณรงค์ และคณะ, 2550)

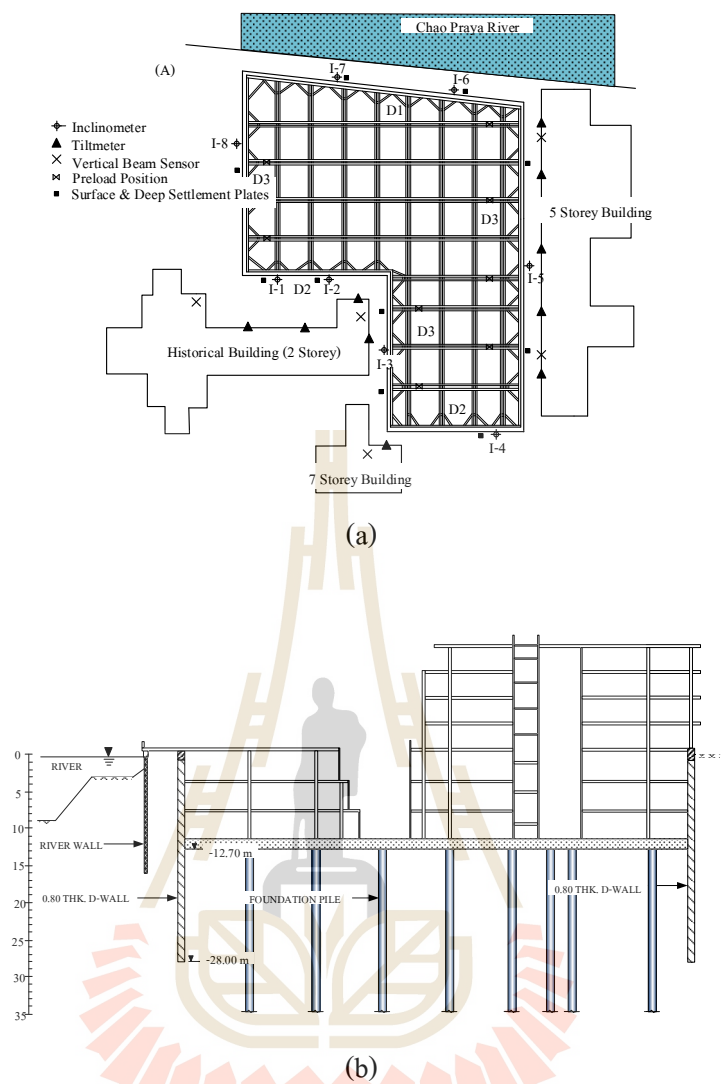
รูปที่ 2.16 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับขุดมากที่สุดกับค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดที่เสนอโดย St. John et al. (1992) พบว่า การก่อสร้างด้วยระบบ Top-down เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ต่ำกว่าการก่อสร้างด้วยระบบ Bottom-up เมื่อระดับการขุดดินในแนวตั้งเท่ากัน



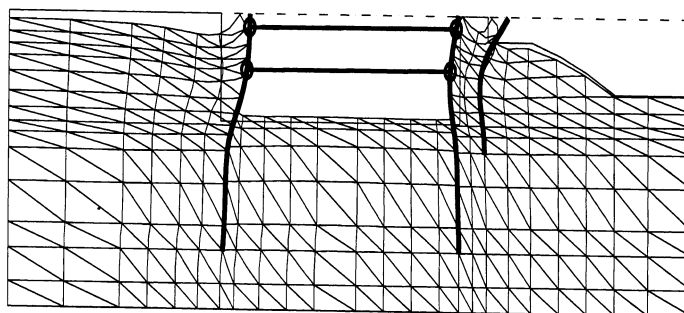
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุดกับความลึกในการขุดดิน
(St. John et al., 1992)

2.6 พฤติกรรมของระบบกำแพงไคอะแฟรมสำหรับงานขุดดินลึกในสถานะแรงดันดินที่ไม่สมดุล

Thasananipan et al. (1998) ได้รายงานถึงพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินไคอะแฟรมที่ใช้ก้ำยันทางด้านข้างในงานขุดเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน 3 ชั้นที่ระดับความลึก -12.70 เมตร ริมแม่น้ำเจ้าพระยา โดยชั้นใต้ดินเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูปที่ 2.17 b ระดับดินด้านหนึ่งของอาคารอยู่บนตลิ่งที่มีระดับสูงกว่าระดับดินด้านฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันดินที่ไม่สมดุล เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะเห็นได้ว่ารูปแบบการเคลื่อนตัวของระบบกำแพงกันดินแนวตั้งฉากกับแม่น้ำเจ้าพระยา เมื่อขุดดินแบบให้ระดับของการขุดเท่ากันจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงด้านดินที่สูงกว่าไปยังด้านฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา ดังรูปที่ 2.18

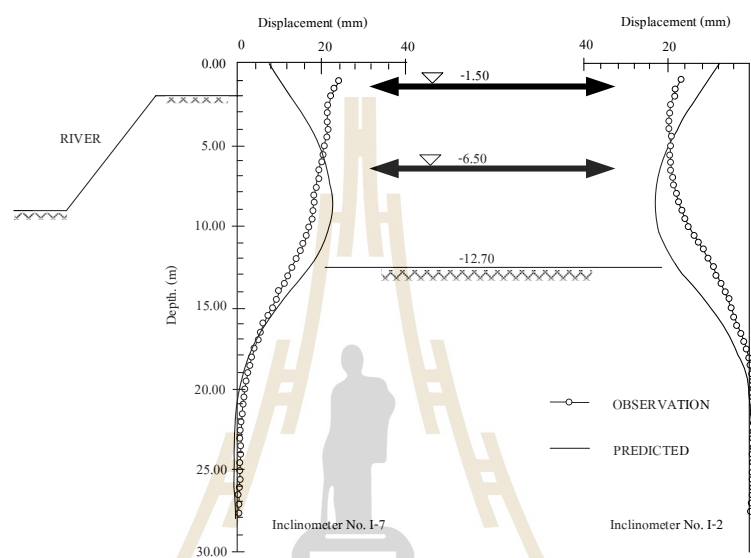


รูปที่ 2.17 แผนที่โครงการก่อสร้าง (Thasananipan et al., 1998)



รูปที่ 2.18 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงดันดินที่ไม่สมดุลของการขุดโดยใช้
กำแพงไคอะแฟรมริมแม่น้ำเจ้าพระยา (Thasananipan et al., 1998)

จากรูปแบบการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ จึงทำให้มีการปรับขั้นตอนของการขุดดินใหม่ โดยขุดดินด้านฝั่งริมแม่น้ำเจ้าพระยาไล่มาฝั่งตรงข้ามที่มีแรงดันดินมากกว่า เพื่อบังคับให้แรงดันดินด้านแม่น้ำเกิดขึ้นมากกว่า และดันกำแพงฝั่งตรงข้ามให้เกิดการเคลื่อนตัวต่ำสุด โดยพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินภายใต้แรงดันดินที่ไม่สมดุลนี้ได้ถูกยืนยันด้วยค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากผลตรวจวัดในระหว่างการก่อสร้างของกำแพงฝั่ง I-7 กับฝั่ง I-2 ดังรูปที่ 2.19

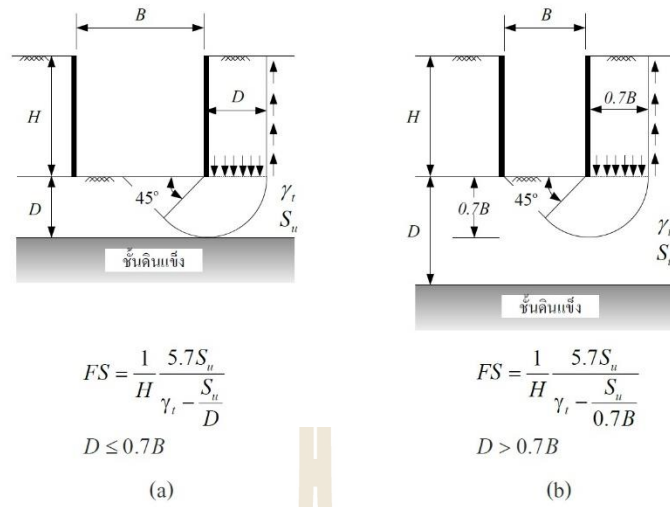


รูปที่ 2.19 ผลการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงดันดินที่ไม่สมดุลของการขุดโดยใช้กำแพงไคอะแฟรมของฝั่ง I-7 และ I-2 (Thasananipan et al., 1998)

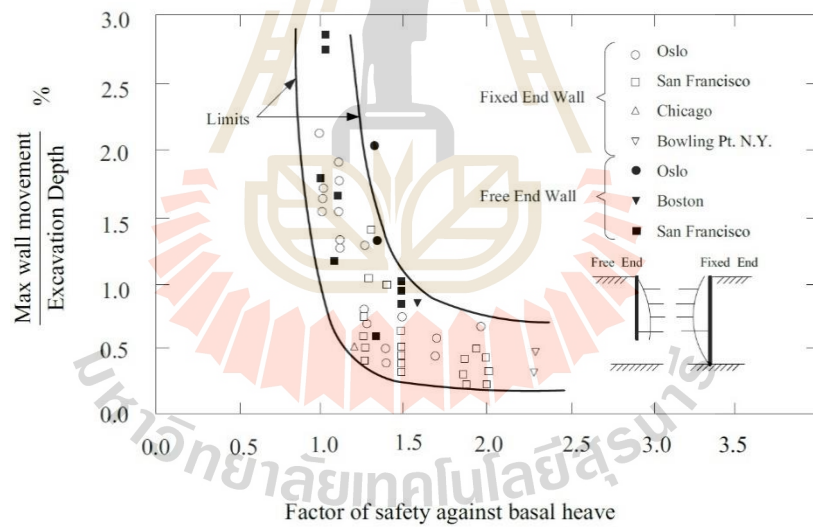
ดังนั้นจะเห็นได้ว่าที่สภาวะแรงดันดินที่ไม่สมดุลในงานขุดดินลึกเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดินสามารถลดการเคลื่อนตัวแนวราบได้ด้วยเทคนิคการก่อสร้าง การออกแบบที่เหมาะสม และการควบคุมงานที่ดี

2.7 สมการเชิงประสพการณ์เพื่อใช้ทำนายการแอ่นตัวของกำแพงกันดิน

Mana and Clough (1981) ได้เสนอวิธีการประมาณการแอ่นตัวของกำแพง โดยใช้วิธีรวบรวมข้อมูลเชิงประสพการณ์ของการแอ่นตัวมากที่สุดของกำแพงชนิด Sheet pile ที่ใช้ระบบค้ำยันด้านข้างจากการขุดดินในหลายๆ โครงการ เพื่อสร้างกรอบความสัมพันธ์กับกลไกการวิบัติ (Failure mechanism) ของดินใต้ข้อุดที่ได้เสนอโดย Terzaghi (1943) ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งพบว่าที่การเคลื่อนตัวแนวราบสูงสุดต่อระดับการขุดมีค่ามากจะทำให้สัดส่วนความปลอดภัยต่อการปูดของดินใต้ข้อุดมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 กลไกการวิบัติ เมื่อ (a) ระดับชั้นดินแข็งอยู่ตื้น และ (b) ระดับชั้นดินแข็งอยู่ลึกที่เสนอโดย (Terzaghi, 1943)



รูปที่ 2.21 การประมาณการแอ่นตัวของกำแพงชนิด Sheet pile ที่เสนอโดย (Mana and Clough, 1981)

2.8 ทฤษฎีไฟไนต์อีลิเมนต์

2.8.1 การคำนวณโดยหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล

แบบจำลองของวัสดุที่ใช้ใน PLAXIS 3D Tunnel เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราหน่วยแรงประสิทธิผล (Stress rate, $\{\dot{\sigma}'\}$) และอัตราความเครียด (Strain rate, $\{\dot{\epsilon}\}$) ดังสมการที่ 2.1

$$\{\dot{\sigma}'\} = [M]\{\dot{\epsilon}\} \quad (2.1 \text{ a})$$

$$\{\dot{\sigma}'\} = \{\dot{\sigma}'_{xx}, \dot{\sigma}'_{yy}, \dot{\sigma}'_{zz}, \dot{\sigma}'_{xy}, \dot{\sigma}'_{yz}, \dot{\sigma}'_{xz}\}^T \quad (2.1 \text{ b})$$

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}_{xx}, \dot{\epsilon}_{yy}, \dot{\epsilon}_{zz}, \dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{yz}, \dot{\gamma}_{xz}\}^T \quad (2.1 \text{ c})$$

เมื่อ	$\{\dot{\sigma}'\}$	คือ	Effective stress rate
	$\{\dot{\epsilon}\}$	คือ	Strain rate
	$[M]$	คือ	Material stiffness matrix

เมื่อใช้กฎของฮุก (Hooke's Law) สำหรับพฤติกรรมแบบ Isotropic and linear elastic จะมีความสัมพันธ์ในรูปของเมตริกซ์ ดังสมการที่ 2.2

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} \\ \dot{\epsilon}_{yy} \\ \dot{\epsilon}_{zz} \\ \dot{\epsilon}_{xy} \\ \dot{\epsilon}_{yz} \\ \dot{\epsilon}_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

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

Worth (1985) กล่าวว่า การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎี Elastoplastic ถือว่าเป็นการวิเคราะห์ที่ให้ผลใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดเนื่องจากวัสดุโดยทั่วไปมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ Elastoplastic material คือมีการเคลื่อนตัวทั้งในสภาวะ Elastic และที่สภาวะ Plastic ดังสมการ 2.3

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^p\} \quad (2.3 \text{ a})$$

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \{\dot{\varepsilon}^e\} + \{\dot{\varepsilon}^p\} \quad (2.3 \text{ b})$$

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus กับ Stiffness moduli อื่นๆ เช่น Shear modulus (G), Bulk modulus (K) และ Oedometer modulus (E_{oed}) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.4

$$G = \frac{E}{2(1+V)} \quad (2.4 \text{ a})$$

$$K = \frac{E}{3(1-2V)} \quad (2.4 \text{ b})$$

$$E_{oed} = \frac{(1-V)E}{(1-2V)(1+V)} \quad (2.4 \text{ c})$$

2.8.2 การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผล

การวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำด้วยหน่วยแรงประสิทธิผล ทำได้โดยใช้แบบจำลองพารามิเตอร์ประสิทธิผล ซึ่งการวิเคราะห์แบบนี้เป็นการพิจารณาผลดินและแรงดันน้ำในดินแยกออกจากกัน แต่จะอยู่รวมกันในขอบเขตของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์แบบนี้จะมีความยุ่งยากเกี่ยวกับการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับดินเหนียวเนื่องจากการทดสอบของดินเหนียวมักจะหาค่าพารามิเตอร์ในรูปหน่วยแรงรวม ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงประสิทธิผลจะได้มาจากการแปลงค่าพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงรวมตามสมการที่ 2.5

$$E = \frac{2(1-V')}{3} E_u \quad (2.5)$$

เมื่อ	E	คือ	Effective Young's modulus
	E_u	คือ	Undrained Young's modulus
	V'	คือ	Drained Poisson's Ratio

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ของ Hook's Law แทนค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวที่เป็น Elastic จะได้
 ดังสมการที่ 2.6 และเมื่ออินทิเกรตสมการ 2.2 จะได้สมการที่ 2.7 ในรูปของเมตริกซ์

$$\{\dot{\sigma}'\} = [D^e] \{\dot{\epsilon}^e\} = [D^e] (\{\dot{\epsilon}\} - \{\dot{\epsilon}^p\}) \quad (2.6)$$

เมื่อ $[D^e]$ คือ Stiffness Matrix

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx}^e \\ \dot{\epsilon}_{yy}^e \\ \dot{\epsilon}_{zz}^e \\ \dot{\gamma}_{xy}^e \\ \dot{\gamma}_{yz}^e \\ \dot{\gamma}_{xz}^e \end{Bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

ดังนั้นจะสามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของพารามิเตอร์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล
 ได้ดังสมการ 2.8

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx}^e \\ \dot{\epsilon}_{yy}^e \\ \dot{\epsilon}_{zz}^e \\ \dot{\gamma}_{xy}^e \\ \dot{\gamma}_{yz}^e \\ \dot{\gamma}_{xz}^e \end{Bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} - \dot{\sigma}_w \\ \dot{\sigma}'_{yy} - \dot{\sigma}_w \\ \dot{\sigma}'_{zz} - \dot{\sigma}_w \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

2.8.3 การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมโดยใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงรวม

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของอัตราหน่วยแรงรวม (Total stress rate, $\dot{\sigma}$) กับ
 อัตราส่วนปัวซองแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Poisson's ratio, ν_u) ดังสมการที่ 2.9

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx}^e \\ \dot{\epsilon}_{yy}^e \\ \dot{\epsilon}_{zz}^e \\ \dot{\gamma}_{xy}^e \\ \dot{\gamma}_{yz}^e \\ \dot{\gamma}_{xz}^e \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_u} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_u & -\nu_u & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_u & 1 & -\nu_u & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_u & -\nu_u & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2+2\nu_u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2+2\nu_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

ในเชิงทฤษฎี V_u จะมีค่าเท่ากับ 0.5 เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ดังนั้น ในการสมมุติพฤติกรรมดังกล่าวจึงใช้ค่า $V_u = 0.495$ เมื่อ $E=E_u$ และ $\varphi = \varphi_u = 0$

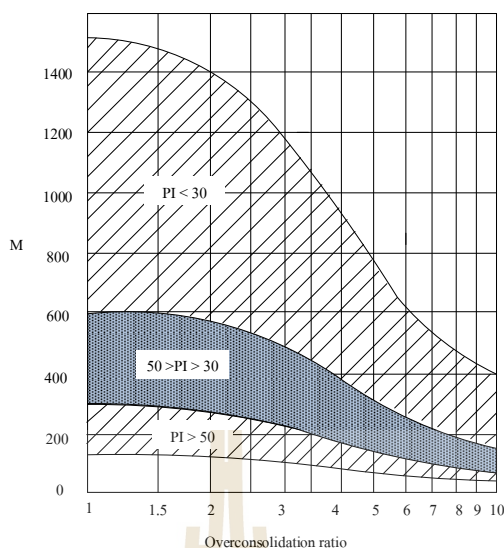
2.8.4 โมดูลัสของดิน (Soil modulus)

โมดูลัสของดินเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการวิเคราะห์ด้วย FEM ที่มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของดิน โดยค่าโมดูลัสของดินมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับของหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถหาค่าโมดูลัสของดินอยู่ในเทอมของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบ Empirical ได้ดังนี้

$$E_u = M \times S_u \quad (2.10)$$

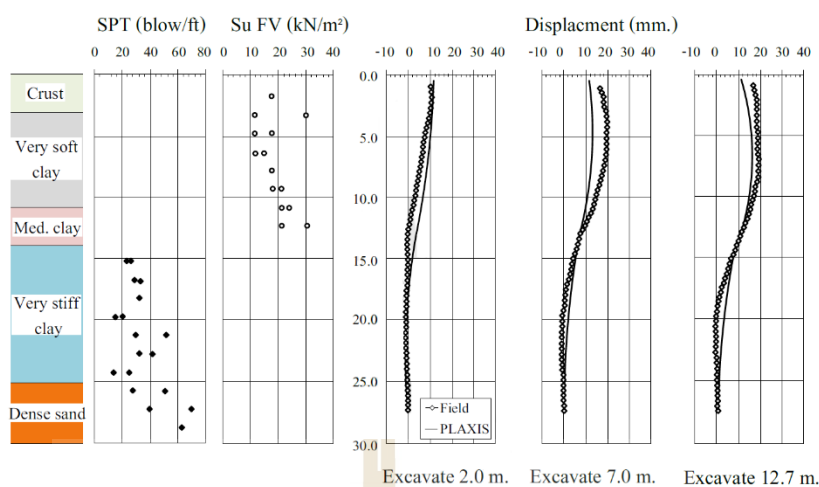
เมื่อ	E_u	คือ	โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำในช่วง Elastic ก่อนที่จะถึงสภาพ Plastic yielding
	M	คือ	Modulus multiplier
	S_u	คือ	ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน

โดยค่า E_u นี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดิน ระดับของหน่วยแรงเฉือนก่อนถึงจุด Yield และหน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ OCR ของดินเหนียว และ M ขึ้นอยู่กับชนิดของการก่อสร้างและลักษณะของโครงสร้าง โดย Duncan and Buchighani (1976) แนะนำค่า M ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 600-1000 สอดคล้องกับค่าประมาณความสัมพันธ์ระหว่าง E_u กับ S_u ของดินเหนียวที่มีคุณสมบัติ $PI < 30$ เมื่อ $OCR = 1$ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงค่าประมาณ Modulus multiplier ของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ
(Duncan. and Buchighani., 1976)

Teparaksa et al. (1999) ได้อาศัยความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวด้านข้างเพื่อหาค่าสถิติที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงการก่อสร้างห้องใต้ดิน อาคารแห่งหนึ่งภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ท่าพระจันทร์ โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS ซึ่งได้เสนอค่า $E_u/S_u = 500$ และ 2000 สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและ ดินเหนียวแข็งตามลำดับ พบว่าให้ผลการเคลื่อนตัวตามที่ได้คาดคะเนเป็นอย่างดี ดังรูปที่ 2.24 เช่นเดียวกับโครงการ Dindang Underpass และโครงการอาคาร Sathorn Complex ที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันด้านสิ่งแวดล้อมโดยรอบโครงการ



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของด้านข้างจากการวัดในสนามและการวิเคราะห์ผลด้วย FEM (Teparaksa W. et al., 1999)

นอกจากนี้ พงษ์ศิลป์ เดชะดวงศ์ (2553) ได้รวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า S_u ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและชั้นดินเหนียวแข็งที่มีผู้เสนอไว้ ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า S_u ชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 240-1200S_u$	Duncan and Buchighani	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ PI = 40-63%, OCR<3 (Tonyagate, 1978)
$E_u = 300-600S_u$	NAVFAC.DM.7.1 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ PI = 40-63% (Tonyagate, 1978) โดยนำ คุณสมบัติของดิน OCR<3 (Obchittikul, 1989) ค่า $30 < PI < 50\%$ และค่า $PI < 50\%$
$E_u = 500S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameter สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพง Flexible wall

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า S_u ชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ (ต่อ)

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 2000S_u$	วันชัย (1999)	Back Analysis งานก่อสร้างไดอะแฟรมวอลล์ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ
$E_u = 480S_u$	วันชัยและชินวุฒิ (2001)	Back Analysis งานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้า ใต้ดินกรุงเทพฯ ช่วง Strain 0.1-1.0%
$E_u = 1000-1100S_u$	วันชัยและธีรพันธ์ (2001)	Back Analysis งานก่อสร้างไดอะแฟรมวอลล์ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ
$E_u = 600-700S_u$ ($E_u = 650-750S_u$ สำหรับ SCC)	นฤทธิ (2546)	Back analysis งานระบบกำแพงกันดินสำหรับ การขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำสำรอง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า S_u ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 250-500S_u$	Bjerrum (1964)	S_u = Undrained shear strength unconfined compression test or Vane shear test
$E_u = 500S_u$	Cox (1973)	จากการทดสอบการทรุดตัวของดินในถนน ธนบุรี - ปากท่อ โดย S_u คิดจากค่าเฉลี่ยของชั้น ดินอ่อนที่สุด
$E_u = 100-500S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	Buchighani (1976) OCR < 3 (Tonyagate, 1978) จากการทดสอบ $C_{kou} - T_0$ ตัวอย่างของถนนบางนา-บางปะกง
$E_u = 125-300S_u$	Parnpoy (1985)	$S_{u(FV1)}$ = Uncorrected Field Vane Shear Strength S_u = ได้จากการทดสอบ Vane Shear Test
$E_u = 70-250S_{u(FV1)}$ $E_u = 100-150S_u$	Balasubramaniam บัณฑิต (2529)	เมื่อ $S_{u(FV2)}$ = corrected Field Vane Shear
$E_u = 42-162S_{u(FV1)}$	Brenner (1987)	Brenner (1987) เมื่อ PI=80%

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic modulus และค่า S_u ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (ต่อ)

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 150S_u$	Bergado et al. (1987)	Bangkok Clay เมื่อ $PI > 50\%$ จากการศึกษาการทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางปะกง จากหน้าตัด 30 จุดสายทาง 55 กม.
$E_u = 150S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameter สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Flexible wall
$E_u = 250-500S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameter สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Rigid wall
$E_u = 500S_u$	วันชัย (1999)	Back Analysis งานก่อสร้างไดอะแฟรมวอลล์ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ
$E_u = 240S_u$	วันชัยและชินวุฒิ (2001)	Back Analysis งานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ ช่วง Strain 0.1-1.0%
$E_u = 120-180S_u$	นฤทธิ (2546)	Back analysis งานระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำสำรอง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย

2.8.5 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength; S_u)

สำหรับชั้นดินเหนียว ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบ Field vane shear test ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ค่า S_u จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test, q_u) หรือหาจากสมการความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า SPT-N กับ S_u ที่เสนอโดย วีระนันท์ ปิตุปรกรณ์ (2526) สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12

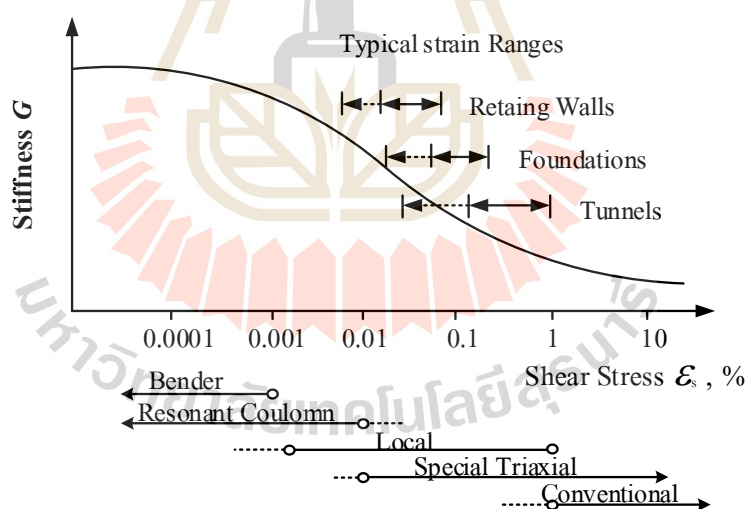
$$S_u = 0.685N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง} \quad (2.11)$$

$$S_u = 0.520N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ} \quad (2.12)$$

เมื่อ N คือ จำนวนครั้งของการตอกต่อฟุต โดยการจำแนกดินเหนียวใช้ระบบ Unified soil classification และ ค่า SPT-N ที่ใช้เป็นค่าที่ทดสอบได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้

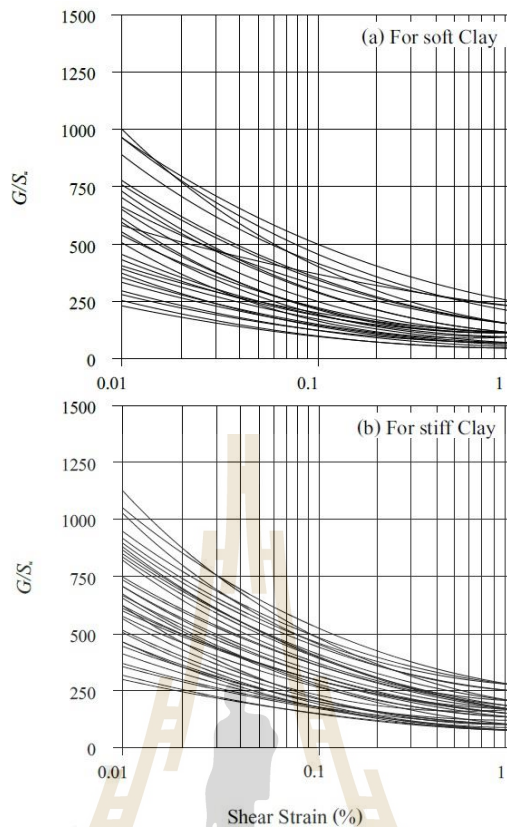
2.8.6 ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่าง E_u/S_u สำหรับการวิเคราะห์

ค่า E_u/S_u ที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนตัว จำเป็นต้องใช้การคำนวณกลับของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral movement) จากโครงการที่ได้ทำการศึกษา (Case study) ต่างๆ ที่มีการติดตั้ง Inclinomater โดยค่า Young' modulus (E) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของโมดูลัสการเฉือน (Shear modulus ; G) ดังที่ได้กล่าวไว้ในสมการที่ 2.4 a ซึ่งค่า Shear modulus เป็นค่าที่ไม่คงที่ โดยจะขึ้นกับค่าระดับความเครียดนั้นๆ Mair (1993) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสการเฉือนลดลงเมื่อค่า Shear strain เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างแต่ละชนิดก่อให้เกิดความเครียดเฉือนขึ้นไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.24 นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการปกติไม่สามารถใช้ระบุโมดูลัสการเฉือนในช่วงที่เกิดความเครียดเฉือนต่ำได้ เนื่องจากความละเอียดของเครื่องมือวัดช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับตัวอย่างทดสอบ และผลเนื่องจากการวัดการยุบตัวนอกตัวอย่าง โดยโครงสร้างที่จำกัดการเคลื่อนตัวเพื่อลดผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงจะเกิดความเครียดเฉือนที่ต่ำ ซึ่งโมดูลัสการเฉือนจะมีค่าสูงกว่าที่จะทดสอบได้โดยวิธีการทดสอบดินแบบปกติ



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสการเฉือนกับความเครียดเฉือน (Mair, 1993)

Teparaksa (1999) ได้รายงานผลการทดสอบสถิติเฟสของดินโดยใช้ Self-Boring pressure meter ในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง ดังรูปที่ 2.26a และ 2.26b ซึ่งสามารถวัดค่าสถิติเฟสในช่วงความเครียดเฉือนต่ำได้



รูปที่ 2.25 โมดูลัสเฉือนของดินกรุงเทพที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter เมื่อ
(a) สำหรับดินเหนียวอ่อน (b) สำหรับดินเหนียวแข็ง ที่เสนอโดย (Teparaksa, 1999)

2.8.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิต (K_0^{total})

ศิริมาศ วิเศษศรี (2541) ได้แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม จะใช้ค่า K_0^{total} เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ในกรณี Total stress analysis ซึ่งจำเป็นต้องหาค่า σ_{h0} โดยไม่จำเป็นต้อง input ค่า U_0 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง K_0^{total} ในการวิเคราะห์หาได้จากสมการ ดังนี้

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (2.13)$$

$$K_0^{total} = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{K_0 \sigma'_{v0} + U_0}{\sigma'_{v0} + U_0} \quad (2.14)$$

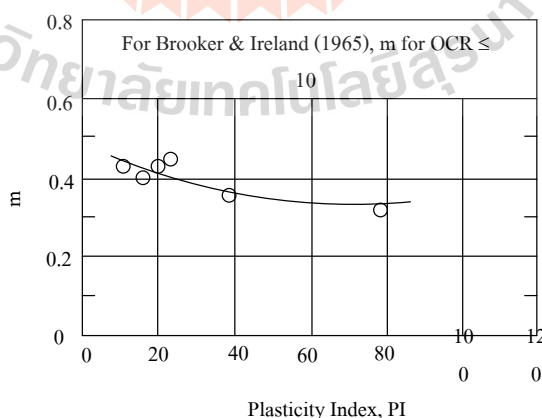
สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบสถิต $K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ เป็นฟังก์ชันของค่า OCR โดยสามารถประเมินค่า K_0 ด้วยสมการของ Ladd et al. (1997) ดังแสดงในสมการ 2.18

$$K_{0(OC)} = K_{0(NC)} OCR^m \quad (2.15)$$

เมื่อ	$K_{0(OC)}$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตของดินเหนียวอัดตัวแน่นเกินตัว (Overconsolidated clay)
	$K_{0(NC)}$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างสถิตของดินเหนียวอัดตัวแน่นปกติ (Normally consolidated clay) สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ใช้ค่าเท่ากับ 0.60 ± 0.02 ที่เสนอโดย Mohr และ Wang (1968)
	m	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับดัชนีพลาสติกของดิน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าดัชนีพลาสติกจากการทดสอบดินในโครงการซึ่งมีค่าเท่ากับ 35 จากนั้นอาศัยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ m ที่เสนอโดย Ladd et. al. (1977) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับดัชนีพลาสติก ดังรูปที่ 2.27

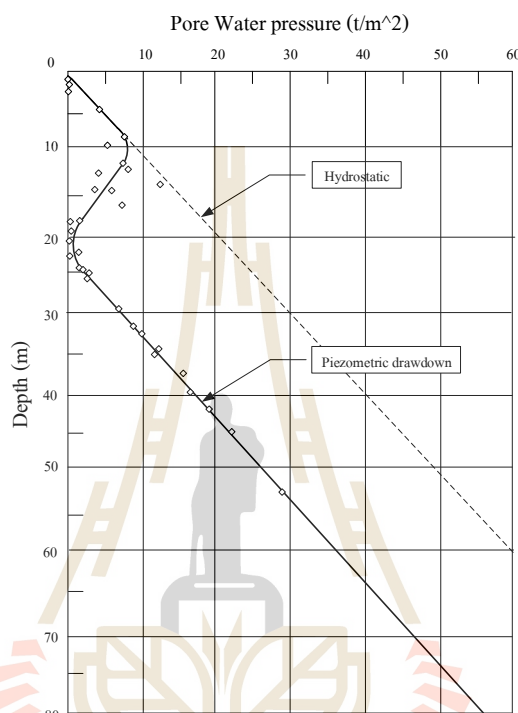
ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบรับแรงอัดแบบไม่จำกัด $S_{u(SU)}$ สำหรับหาค่า σ'_{vm} จากสมการ 2.16

$$\sigma'_{vm} = \frac{S_{u(UC)}}{0.22} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ K_0 และ OCR กับค่าดัชนีพลาสติก (Ladd et al., 1977)

Teparaksa et al. (1999) ได้รายงานข้อมูลการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดิน (Pore water pressure) ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินที่มีการก่อสร้างในปี 2542 พบว่า ผลของการสูบน้ำใต้ดินในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ได้ทำให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.27 โดยงานวิจัยนี้ใช้ Piezometric drawdown สำหรับการคำนวณแรงดันน้ำ

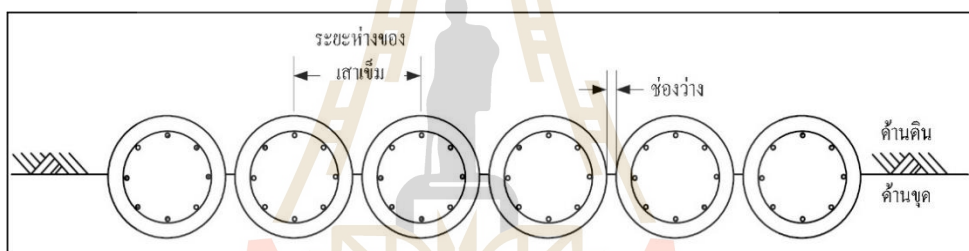


รูปที่ 2.27 แรงดันน้ำในดินกรุงเทพ (Teparaksa et al., 1999)

2.9 ความเป็นมาของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous piles wall)

ประวัติการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous piles wall) ได้เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2534 ที่ถนนจันทน์ เขตยานนาวา กรุงเทพฯ ใช้เป็นกำแพงกันดินขุดดินลึก 15.5 เมตร ประจิต จีระปภา (2536) ในขณะนั้นราคาของเสาเข็มเจาะชนิดนี้จะมีราคาประมาณครึ่งหนึ่งของกำแพงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Diaphragm Wall) เหตุผลในเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งทำให้ระบบกันดินชนิดนี้ได้เกิดขึ้น

กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง ลักษณะคือการก่อสร้างเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อกันตามแนวของกำแพงกันดิน หรือล้อมรอบบริเวณที่ขุดเปิดหน้าดินดังรูปที่ 2.28 การก่อสร้างจะใช้วิธีเกี่ยวกับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะทั่วไปโดยอาจใช้ปลอกเหล็ก (ถ้าจำเป็น) ขนาดช่องว่างระหว่างเสาเข็มสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อความเหมาะสมกับสภาพหน้างานและสภาพดินในโครงการ โดยจะมีช่วงระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็มเท่ากับ 50 ถึง 150 มิลลิเมตร ประจิด จิรปภา (2539) ความลึกมากที่สุดของการก่อสร้างกำแพงชนิดนี้จะขึ้นกับความยาวของก้านเจาะเสาเข็ม โดยปกติจะยาวสุดประมาณ 34 ถึง 55 เมตร ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่ายอมให้ของความเอียงจากแนวดิ่งเนื่องจากเสาเข็มอาจเอียงออกจากกันทำให้ระยะห่างของเสาเข็มเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถยอมรับได้ หรืออีกกรณีหนึ่งคือเสาเข็มเอียงเข้าหากันทำให้เสาเข็มหลวมเข้าไปในพื้นที่เสาเข็มอีกต้นทำให้เจาะไม่ได้ ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้กำแพงเสาเข็มลึกเกินกว่า 25 เมตร แต่อาจออกแบบให้เสาเข็มบางต้นมีปลายลึกลงไปเพื่อใช้ต้านแรงกระทำในแนวดิ่ง



รูปที่ 2.28 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง Contiguous pile wall

โดยทั่วไปเสาเข็มชนิดนี้จะถูกติดตั้งให้มีช่องว่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 10 เซนติเมตร เพราะฉะนั้นการเกิดช่องว่างในโครงสร้างของกำแพงกันดิน ก็จะทำให้ดินได้รับอิทธิพลจากการขุดดิน ทางเลือกนี้เหมาะสมถ้าดินยังคงสภาพปกติหรือแน่น (ทั่วไปจะไม่เป็นดินเม็ดหยาบ) และผลกระทบจากระดับน้ำใต้ดินด้านล่างที่ระดับการขุดลึกสุด การใช้กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) ในงานขุดดินกรุงเทพฯ ช่องว่างระหว่างเสาเข็มจะไม่มีการปิดกั้นซึ่งก็พบว่าใช้งานได้ดีไม่มีการรั่วไหลของดินและน้ำ จุดนี้เป็นเงื่อนไขสำคัญที่ทำให้ในอดีตไม่มีการใช้เสาเข็ม ในลักษณะนี้ และทำให้จำเป็นต้องใช้กำแพงกันดินชนิดอื่น เช่น เข็มพืดเหล็ก (Steel sheet pile) , กำแพงแผ่นคอนกรีตหล่อในที่ (Diaphragm wall) , กำแพงเสาเข็มเจาะซ้อน (Secant pile wall) แล้วแต่เป็นวิธีการก่อสร้างที่ซับซ้อนและราคาก่อสร้างสูงทั้งนั้น ถึงแม้ว่า เข็มพืดเหล็ก (Steel sheet pile) จะมีราคาก่อสร้างที่ถูกกว่าแต่ความสามารถในการรับแรงดันดินก็น้อยกว่ากำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) ซึ่งมีวิธีการก่อสร้างที่ง่าย มีหลายวิธีการก่อสร้าง

สามารถทำงานในพื้นที่จำกัดได้ ไม่มีผลกระทบด้านแรงสั่นสะเทือน จึงคาดว่ากำแพงกันดินระบบนี้ จะสามารถเข้ามาอยู่ในงานชุดดินอย่างกว้างขวางในอนาคต

ประสพศิริ แสงภู (2546) กล่าวถึงประโยชน์จากกำแพงกันดินระบบนี้มีข้อดีกว่าระบบ กำแพงแผ่นคอนกรีตหล่อในที่ (Diaphragm wall) โดยให้เหตุผลว่าเนื่องจากเทคนิคการก่อสร้างที่ ง่ายกว่า ราคาค่าก่อสร้างต่ำกว่า และลดการ โกงแอนด์ของ โครงสร้างกันดินได้ดีกว่าระบบเสาเข็มพีค แต่พบว่าไม่เป็นที่นิยมนั้นเกิดจากความเชื่อมั่นในประสิทธิภาพ ขาดข้อมูลงานวิจัยที่เพียงพอ การเผยแพร่และตัวอย่างการใช้งานจริงมีน้อย ระบบโครงสร้างกันดินดังกล่าว อาศัยพฤติกรรมแนว โค้งรับแรง (Arching effect) สู่เสาเข็ม โดยอาศัยระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสม กำลังต้านทาน แรงเฉือนและสติฟเนสของดินเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการเคลื่อนตัวของดินผ่านระหว่าง เสาเข็ม สำหรับตัวอย่างโครงการที่ใช้เสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเป็นกำแพงกันดิน ได้แก่ โครงการ ก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกเกษตร ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 Contiguous pile wall อุโมงค์ลอดทางแยกเกษตร (อรรถสิทธิ์ และคณะ, 2551)

2.10 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในอดีต

ลักษณะดินกรุงเทพมหานครส่วนบนเป็นดินเหนียวซึ่งการซึมน้ำต่ำมาก ทำให้สามารถใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องน้ำ ทำให้สามารถเรียงเป็นกำแพงกันดินชั่วคราว ที่มีราคาถูก และทำได้ง่ายกว่ากำแพงกันดินชนิดอื่น

2.10.1 บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ

ประจิด จีรปปภา (2539) ได้บันทึกและรายงานเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่อง ชนิดต่างๆ เป็นกำแพงกันดินชั่วคราว และถาวรในกรุงเทพฯ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ

สถานที่	ชนิดเสาเข็ม	ขนาด (ม.)	ระยะห่าง C-C (m.)	Gap (m.)	จุดลึก (ม.)
ตราชันทร สุริวงส์ กิ่งแก้ว	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.10	0.10	15.50
	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.10	0.10	11.50
	เข็มเจาะ	0.40 m dia.	0.50	0.10	7.45
คลองถม		0.40 m dia.	0.75	0.35	4.00
	เข็มเจาะ	0.60 m dia.	0.70	0.10	6.00
คลองด่าน	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	4.25
ปทุมวัน	เหล็กรูป I	WF300×150	0.30	0	4.80
คลองจั่น	เหล็กรูป I	WF300×150	0.45	0.30	4.30
คลองถม	เหล็กรูป I	WF300×300	0.45	0.15	6.00
ศาลาแดง	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	8.70
ช.ศูนย์วิจัย	เข็ม คสล	0.35×0.35m	0.60	0.25	3.80

2.10.2 บันทึกการก่อสร้างอาคารสมเด็จพระเทพรัตน

อรวินท์ อุบลเลิศ (2550) ได้บันทึกการก่อสร้างโครงการอาคารสมเด็จพระเทพรัตน คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ชั้น มีชั้นใต้ดิน 3 ชั้น ที่ความลึก 8.10 เมตร ในการก่อสร้างมีการใช้ระบบกำแพงกันดินแบบ Contiguous pile wall ซึ่งใช้ระยะห่าง เท่ากับ 1.10 เมตรมีปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก -20 เมตร ซึ่งมีแนวของ Contiguous pile wall ล้อมรอบโครงการเพื่อกันดินบริเวณรอบโครงการพังทลายและเพื่อป้องกันความเสียหายของอาคารข้างเคียงเนื่องจากโครงการจำเป็นต้องขุดดินเพื่อทำที่จอดรถใต้ดินโครงการได้เลือกใช้

Contiguous pile wall เนื่องจากโครงการเป็นดินเหนียวที่มีการซึมผ่านต่ำมีความเหมาะสมที่จะเลือกใช้

2.11 ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ปัญหาที่สำคัญของระบบกำแพงกันดินชนิดนี้ คือ ความทึบน้ำของกำแพง กำแพงชนิดนี้จะไม่สามารถกั้นน้ำได้เนื่องจากมีช่องว่างอยู่ตรงกลางระหว่างเสาเข็ม โดยเสาเข็มจะมีขนาดตั้งแต่ 0.35 เมตร ถึง 1.20 เมตร ปัญหาในเรื่องดินและน้ำจะไหลออกจากช่องว่างระหว่างผิวเสาเข็มขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ และสภาพแวดล้อมรอบๆ บริเวณเขตก่อสร้าง ซึ่งเราสามารถแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีได้ดังนี้

2.11.1 กรณีเรื่องน้ำไหลซึมขณะขุดดิน

ประจิต จิรปภา (2539) กล่าวว่าน้ำที่ไหลซึมออกมาขณะขุดดิน และไปชะนำพาให้ดินหลุดออกมาจนทำให้ดินบริเวณข้างเคียงทรุดหรือยุบลงจะไม่เกิดขึ้น เพราะไม่มีน้ำไหลแม้ว่าในดินจะมีปริมาณน้ำมากถึง 130 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม ทั้งนี้ความจริงแล้วไม่ใช่ น้ำดังกล่าวไม่ไหล มีการไหลเกิดขึ้นแต่อัตราการไหลช้ามาก โดยเฉพาะดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ (Coefficient of Permeability : K) ต่ำมาก คือประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที

Jamshed et al. (1975) รายงานว่าดินบริเวณรังสิตและบริเวณหนองจุฬา มีค่าสัมประสิทธิ์ การซึมของน้ำมากในส่วนที่ตื้น และมีค่าน้อยในส่วนที่ลึกโดยทั่วไปแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำในระดับ 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ก็ถือว่าไม่ซึม (Impermeable) อัตราการไหลซึมของน้ำจะน้อยจนน้อยกว่าอัตราการระเหยในบรรยากาศ ผลก็คือส่วนที่สัมผัสกับอากาศจะแห้ง น้ำมีโอกาสไหลซึมได้บ้างในระดับตื้น ซึ่งจะไม่ใช่ในดินโดยตรงแต่จะเป็นน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือนไหลจากท่อที่แตก หรือรางระบายน้ำ ผ่านลงไปดินถมหรือ ขยะ แล้วไหลออกตามซอกเข็ม

2.11.2 กรณีเรื่องดินไหลออกขณะขุดดิน

การไหลทะลักของดินระหว่างเสาเข็มนั้นจะเกิดขึ้นได้แต่อยู่ในระดับที่ควบคุมได้ ประจิต จิรปภา (2539) ได้มีการออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มซึ่งระยะห่างระหว่างเสาเข็มนี้อาจขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างหน้าตัดของเสาเข็ม แรงดันดินด้านข้างและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน



รูปที่ 2.30 ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม (ประจิด จีรปภา, 2539)

2.12 ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ถ้านำกำแพงกันดินเสาเข็มเรียงต่อเนื่องชนิดต่างๆ มาเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยกันแล้ว ต้องพิจารณาถึงเรื่องประโยชน์การใช้งาน การเคลื่อนตัวของดินหรือความปลอดภัยในการขุด ราคา และระยะเวลาในการก่อสร้างและของขีจจำกัคดอย่างอื่นซึ่งเราสามารถวิจารณ์เปรียบเทียบเป็นลำดับ ดังนี้

2.12.1 ประโยชน์การใช้งาน

หมายถึง ประโยชน์ในการใช้งานเป็นกำแพงกันดินทั้งชั่วคราวและถาวร ประโยชน์ในการนำกลับมาใช้ซ้ำหลายครั้งหรือดัดแปลงใช้งานชนิดอื่น เช่น เข็มเหล็กรูป H หรือ I สามารถใช้เป็นคานค้ำยันหรือเสาได้เมื่อถูกตัดสั้นๆ ก็ยังใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้ ในขณะที่กำแพงเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่หรือกำแพงเสาเข็มคอนกรีตตอกจะใช้ประโยชน์ได้หนึ่งเดียว คือเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวหรือถาวรเท่านั้น และเมื่อใช้เป็นกำแพงถาวรก็จะมีน้ำหนักมากซึ่งไปเพิ่มภาระแก่ฐานราก

2.12.2 การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง

เสาเข็มคอนกรีตจะมีการเคลื่อนตัวน้อยเพราะมีความแกร่ง ในขณะที่เสาเข็มเหล็กหน้าตัดรูปตัว H หรือ I อาจจะทำให้ความแข็งแรงมาก แต่การถอนกลับมาใช้ทำให้ดินรอบข้างมีโอกาสเคลื่อนตัวมากกว่า

2.12.3 ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง

ทั่วไปแล้วเสาเข็มเจาะมักจะมากกว่าทั้งด้านราคาและเวลา แต่เสาเข็มเหล็กก็แพงกว่าถ้าไม่สามารถถอนกลับมาได้

2.12.4 ขอบเขตจำกัดอื่น ๆ

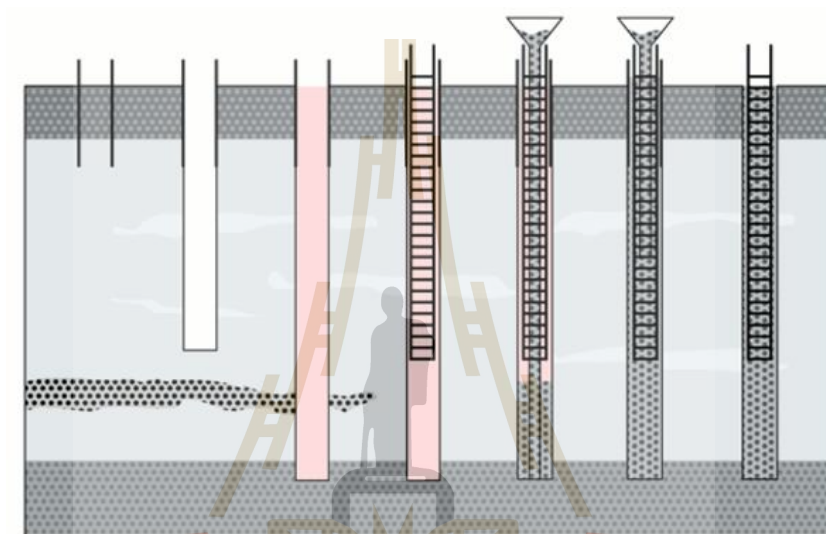
เสาเข็มตอก หรือเสาเข็มเหล็กซึ่งต้องใช้การเขย่าลงจะมีแรงสั่นสะเทือนทำให้เกิดปัญหาข้างเคียง และเสาเข็มเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องความลึกด้วยเพราะยิ่งลึกมากการตอกก็ยากขึ้น แรงสั่นสะเทือนก็มากขึ้นการถอนกลับก็ยิ่งยากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากดินกรุงเทพในส่วนที่อยู่ลึกจะเป็นดินที่แข็งมาก ยากแก่การตอกเสาเข็ม

2.13 วิธีการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง

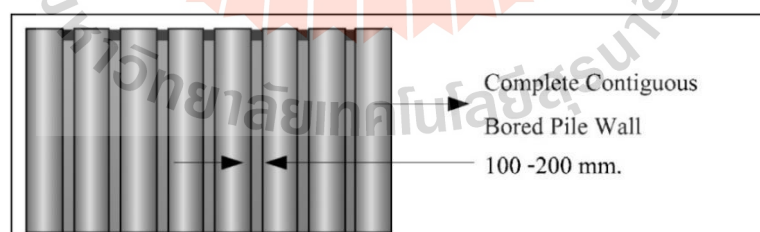
รูปที่ 2.31 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง สามารถก่อสร้างได้ทั้งระบบแห้งและระบบเปียกขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินและขนาดความยาวของเสาเข็ม โดยมีรายละเอียดในการก่อสร้าง ดังนี้

โดยกำหนดตำแหน่งของหลุมเจาะโดยใช้หมุดกำหนดจุดที่กึ่งกลางของเสาเข็ม วางตำแหน่งโดยให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มห่างกันเท่ากับ 10 ถึง 20 เซนติเมตร ลงปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินอ่อน ปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินพังที่ใช้ต้องมีความยาวลึกเพียงพอที่จะป้องกันชั้นดินอ่อน โดยปลายปลอกเหล็กต้องยาวถึงระดับบนของชั้นดินแข็งและปลอกเหล็กที่ตกลงไปต้องอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด และได้ดังตามรายการปลอกเหล็กนอกจากจะเป็นตัวป้องกันดินอ่อนแล้วยังเป็นส่วนนำสว่านหัวเจาะให้เจาะได้ดังด้วย หากกดปลอกเฉียงเสาเข็มก็จะเฉียงด้วย เจาะดินภายในปลอกเหล็กออก กระทำโดยใช้สว่านเจาะดินเมื่อเจาะเกือบถึงระดับชั้นดินที่ไม่คงรูป ถ้าปลอกกันดินชั่วคราวยาวไม่พอกับความลึกที่ต้องการขุด จะใช้สารละลายเบนโทไนท์เติมลงไปในหลุมเจาะ เพื่อป้องกันการพังของหลุมเจาะแทนปลอกกันดินชั่วคราวในส่วนที่อยู่ต่ำกว่าปลอกกันดินชั่วคราว และสร้างแรงดันด้านทานแรงดันของ ชั้นดิน แล้วทำการเจาะดินภายใต้สารละลายเบนโทไนท์ เจาะหลุมเจาะด้วยเครื่องเจาะ โดยขุดดินออกจากปลอกกันดินชั่วคราวดินที่อยู่รอบๆ หลุมเจาะจะเป็นตัวป้องกันปลอกกันดินชั่วคราวการลงเหล็กเสริม ใช้เครนยกโครงเหล็กเสริมติดตั้งในหลุมเจาะ การติดตั้งโครงเหล็กเสริมเหล็กเสริมควรออกแบบให้มีความยาวตลอดทั้งต้น และโครงเหล็กเสริมต้องผูกให้แข็งแรง และมีระยะคอนกรีตหุ้ม 7.5 เซนติเมตร สำหรับเสาเข็มต้นที่มี Inclinator tube จะทำการผูกท่อไว้ที่ท่อนบนสุดแล้วทำการเติมน้ำปิดฝาให้แน่น การเทคอนกรีตต้องทำการเทแบบเทได้น้ำ (Termie concrete) ก่อนทำการเทคอนกรีตชุดแรกลงไป ในท่อจะต้องวางตำแหน่งของปลายท่อเทให้ห่างจากกันหลุมไม่เกิน 10 เซนติเมตร ใช้เม็คโฟมเทลงไปที่ก้นระหว่างคอนกรีตกับสารละลายเบนโทไนท์ไม่ให้ผสมกัน เทคอนกรีตโดยปล่อยให้ไหลลงไปในหลุมเจาะ เมื่อเทคอนกรีตชุดแรกจนคอนกรีตไหลออกจากท่อหุ้มปลายท่อแล้ว จะต้องรักษาระดับปลายท่อให้ฝังอยู่ในคอนกรีตที่เทลงไปก่อนหน้าตลอดเวลา สารละลายเบนโทไนท์ที่ถูกแทนที่โดยคอนกรีตจะสันออกมาจากปากหลุมจะถูกสูบกลับไปทำความสะอาดเพื่อปรับปรุงคุณภาพสำหรับการใช้งานซ้ำการ

ถอนปลอกเหล็ก เมื่อเทคอนกรีตจนถึงระดับ Cut off เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการถอนปลอกเหล็กออก โดยใช้เครื่องเขย่า (Vibro hammer) ดึงเขย่าปลอกเหล็ก (Casing) ขึ้นมาระดับหนึ่งแล้วถอดเครื่องเขย่า (Vibro hammer) ออก จากนั้นดึงปลอกเหล็ก (Casing) ออกโดยใช้เครนดึง เมื่อดึงปลอกเหล็ก (Casing) ออกอาจจะทำให้ดินบริเวณปากหลุมมีการยุบตัวลง จึงไม่ควรยืนอยู่ใกล้ปากหลุมขณะที่ดึงปลอกเหล็กออกทำซ้ำตามขั้นตอนทั้งหมดตามแนวความยาวของกำแพง หรือจนรอบบริเวณที่ต้องการขุดเปิดหน้าดินจนเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 2.31 ขั้นตอนการทำกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง

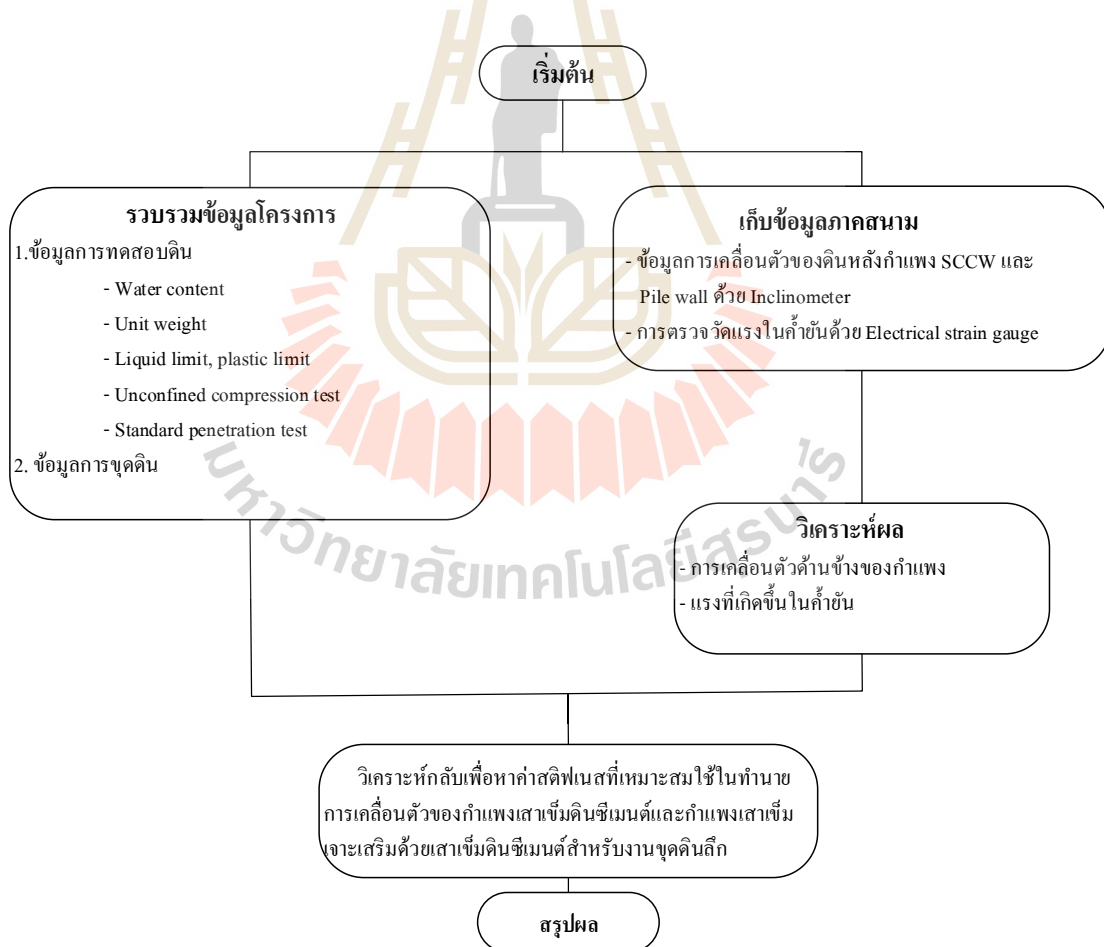


รูปที่ 2.32 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเมื่อเสร็จสมบูรณ์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนดำเนินการวิจัยแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ของโครงการ และการวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วย Inclinator ส่วนที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือวัดในสนาม โดยการติดตั้ง Strain gauge ในค้ำยัน และส่วนที่ 3 เป็นการวิเคราะห์หาค่าสถิติที่เหมาะสมใช้ในทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงเสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานชุดคั่นลึก รูปที่ 3.1 เป็นแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

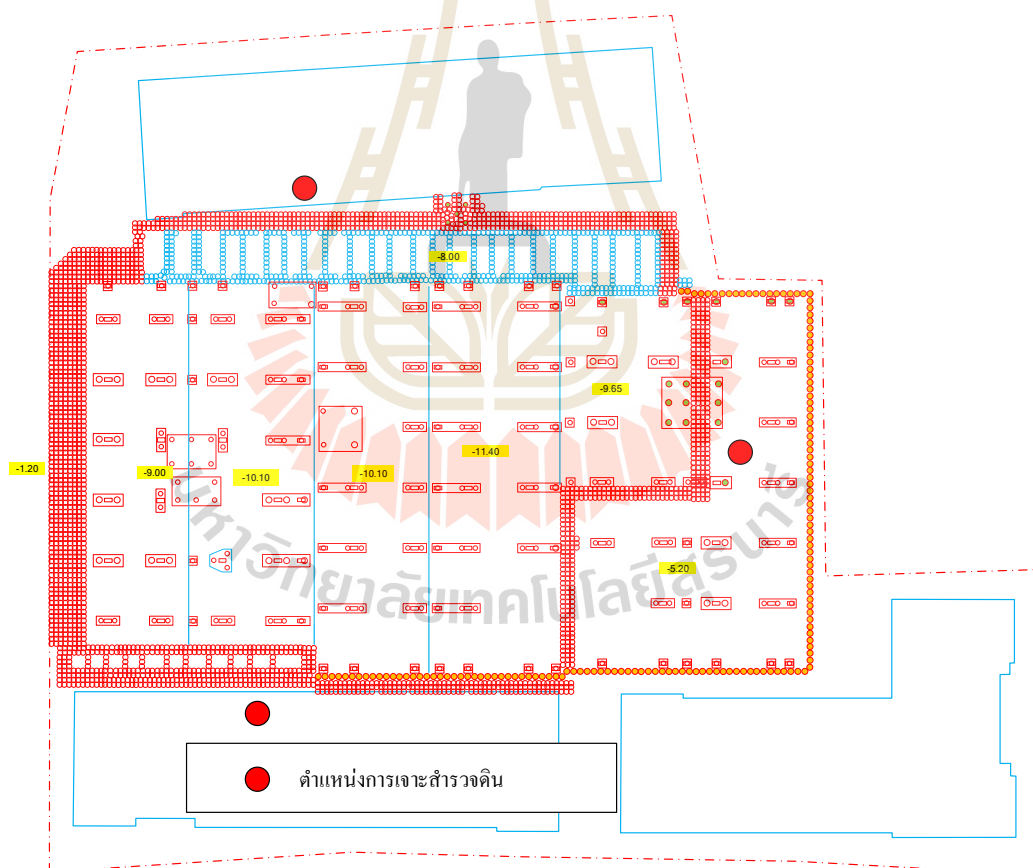


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

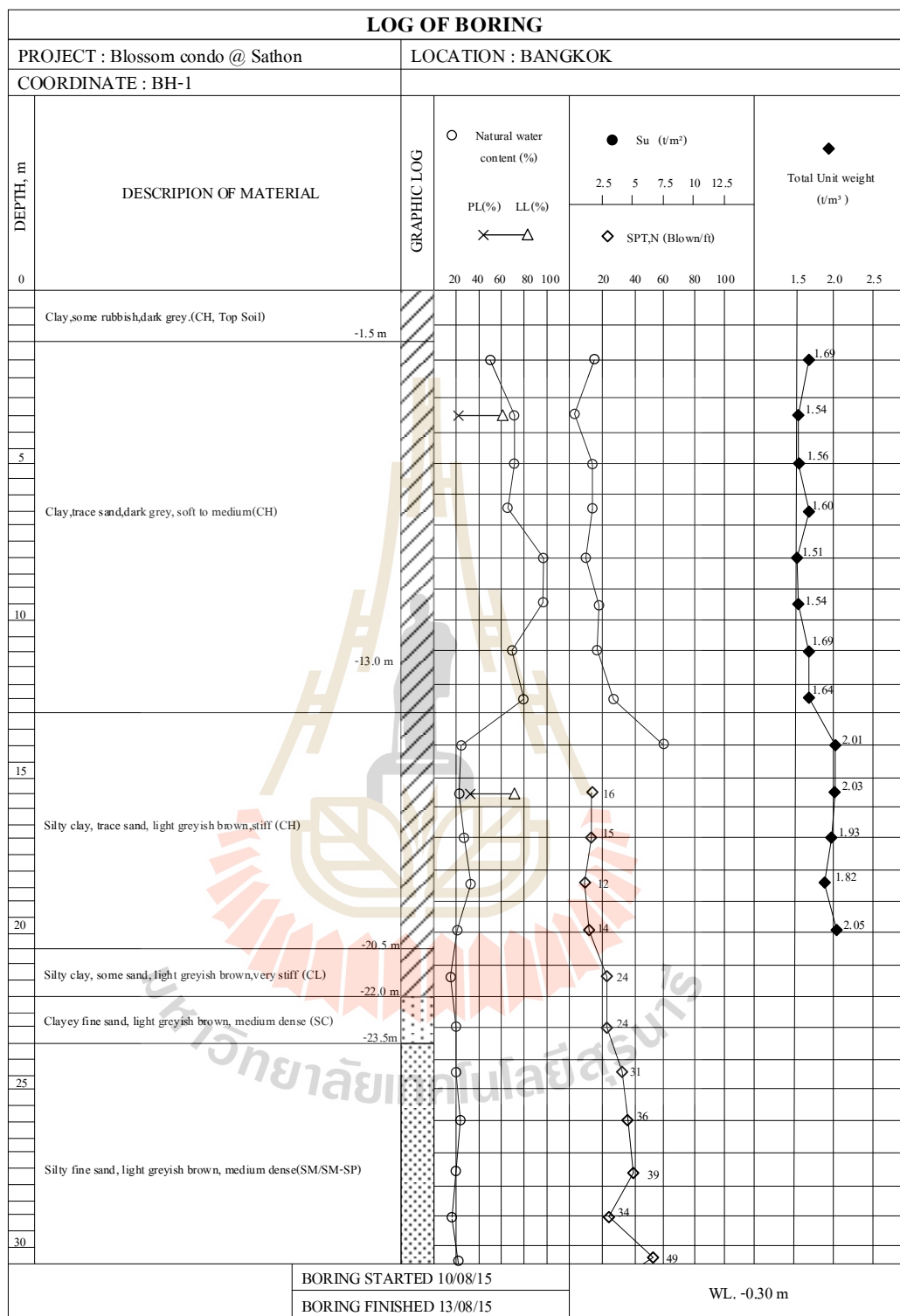
3.1 การเจาะสำรวจดิน

จากการรวบรวมข้อมูล โครงการนี้ได้มีการเจาะสำรวจโดยใช้เครื่องเจาะชนิด Rotary วิธีการเจาะในช่วง 1-2 เมตรแรก ใช้วิธีการเจาะโดย Auger และที่ระดับความลึกลงไปใช้วิธีเจาะแบบ Wash Boring จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจ ขณะทำการเจาะได้ใช้ปลอกเหล็ก (Casing) และน้ำผสม Bentonite ใส่เพื่อป้องกันหลุมพัง

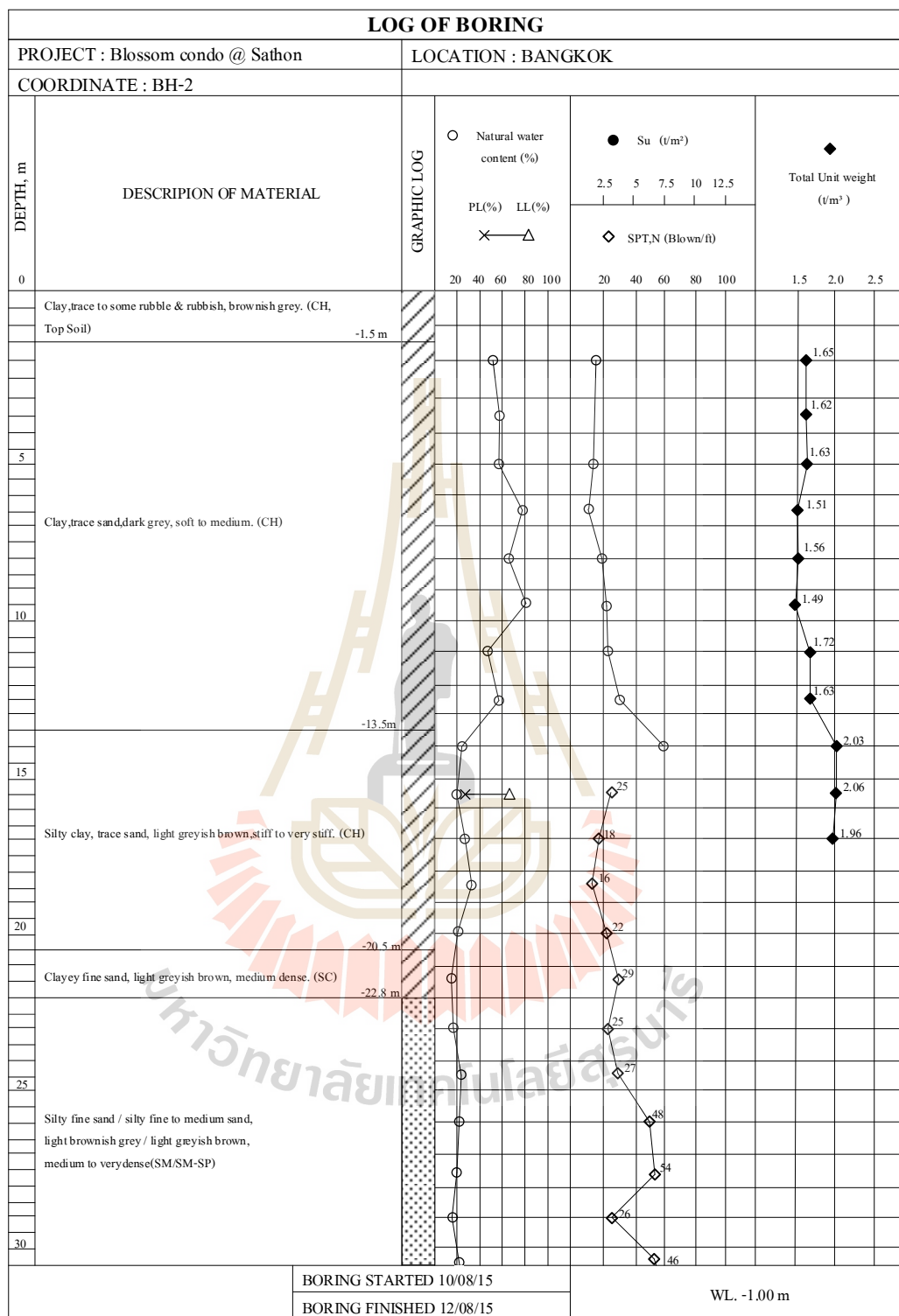
การเก็บตัวอย่างดิน ได้เก็บตัวอย่างแบบคงสภาพโดยใช้กระบอกบาง เก็บตัวอย่างในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง จากนั้นเปลี่ยนเป็นเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed) ในชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทรายโดยใช้กระบอกผ่าซีกแบบมาตรฐานพร้อมกับการทดสอบ Standard Penetration test (SPT) รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งการเจาะทดสอบดิน และรูปที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 เป็นผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-1 - BH-3



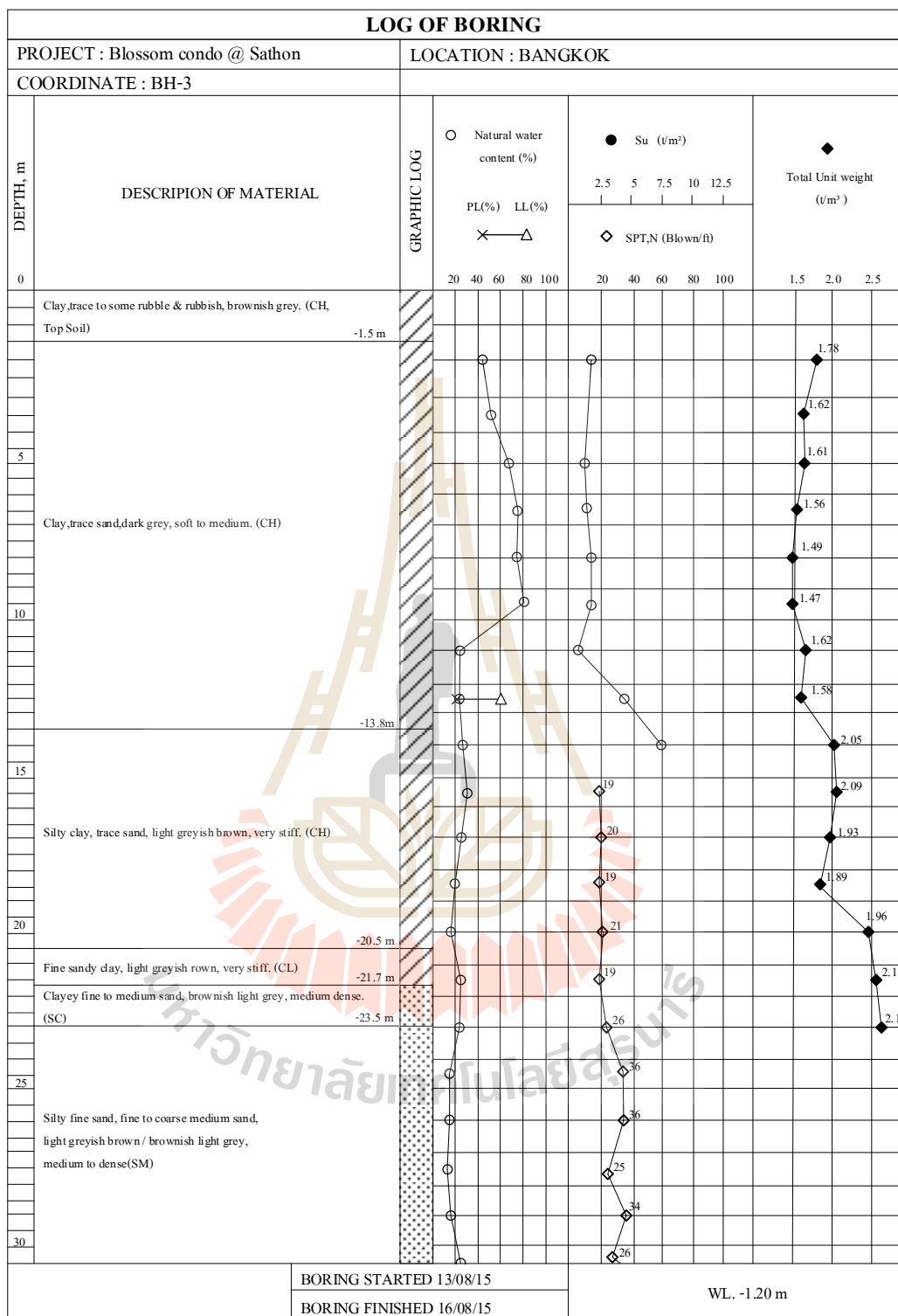
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการเจาะทดสอบดิน



รูปที่ 3.3 ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-1



รูปที่ 3.4 ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-2

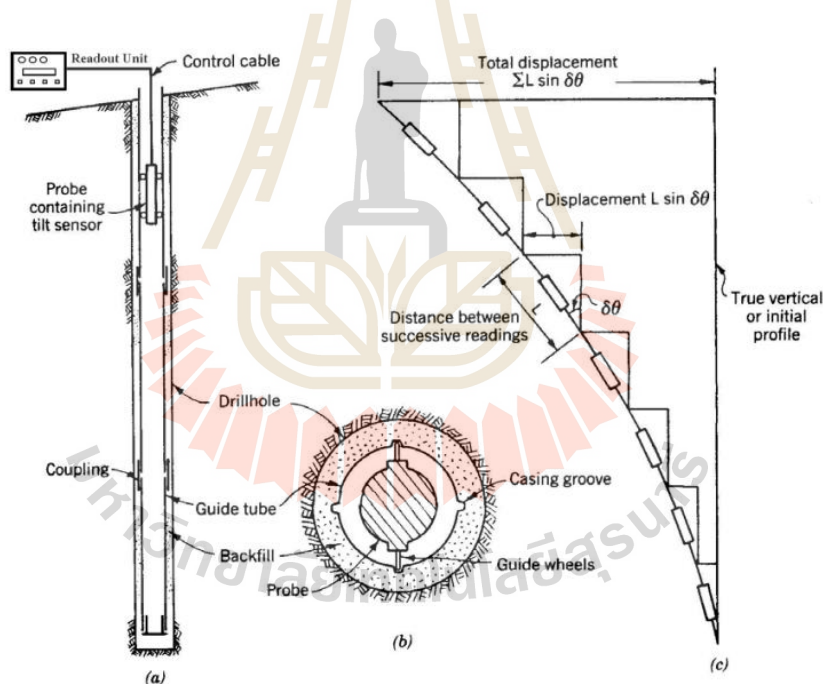


รูปที่ 3.5 ผลการเจาะสำรวจดินหลุมเจาะ BH-3

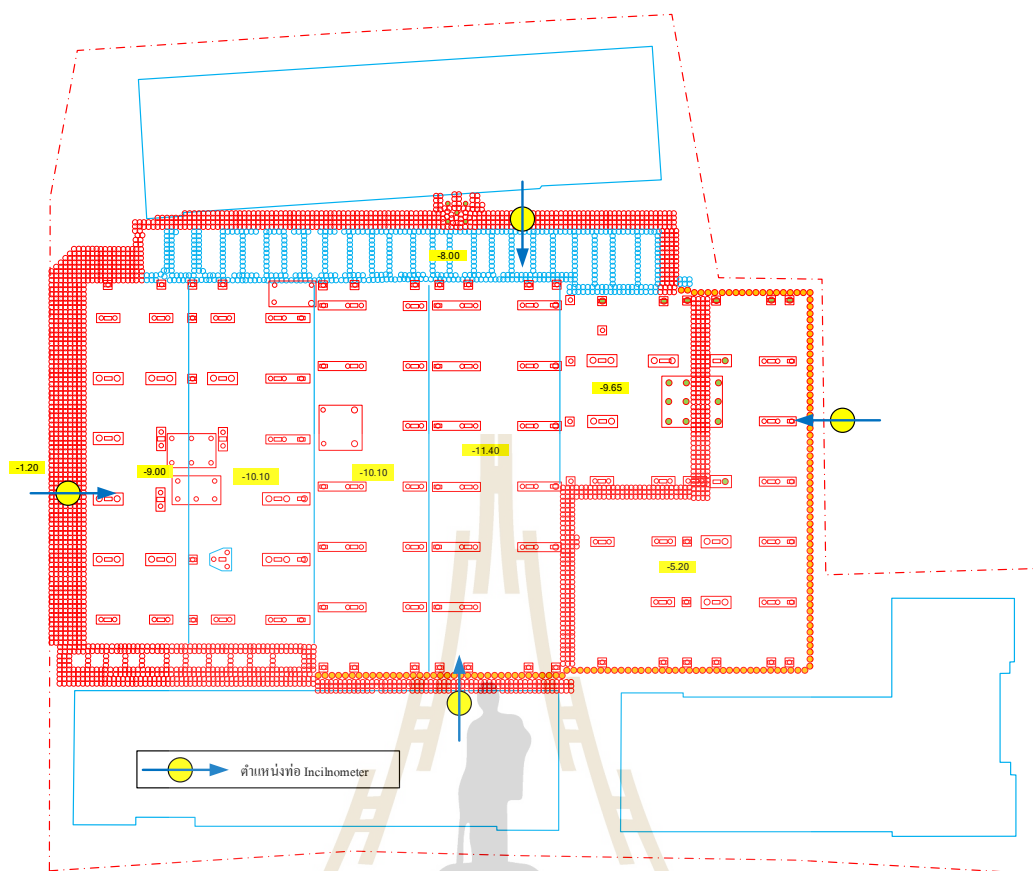
3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดในสนาม

3.2.1 การวัดการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW) และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall)

การติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW) และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall) ของโครงสร้างกันดินขณะก่อสร้าง จนกระทั่งดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ ได้ทำการติดตั้งท่อ Inclinator ไว้ในทุกด้านของโครงการ ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 Inclinator ทั้ง 4 จุด มีความลึก -20 เมตร, -17.5 เมตร, -17 เมตร, และ -16.5 เมตร ตามลำดับจากผิวดิน โดยปลายของท่อ Inclinator ฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งเพื่อให้ไม่เกิดการเคลื่อนตัวของปลายท่อ การเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างนี้ จะทำการเก็บข้อมูลทุกๆช่วงเวลาที่มีการขุดดินด้านหน้ากำแพงต่างระดับกัน เนื่องจากแรงดันดินด้านหลังกำแพงจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ชัดเจนกว่า



รูปที่ 3.6 การวัดการเคลื่อนตัวของดิน โดย Inclinator

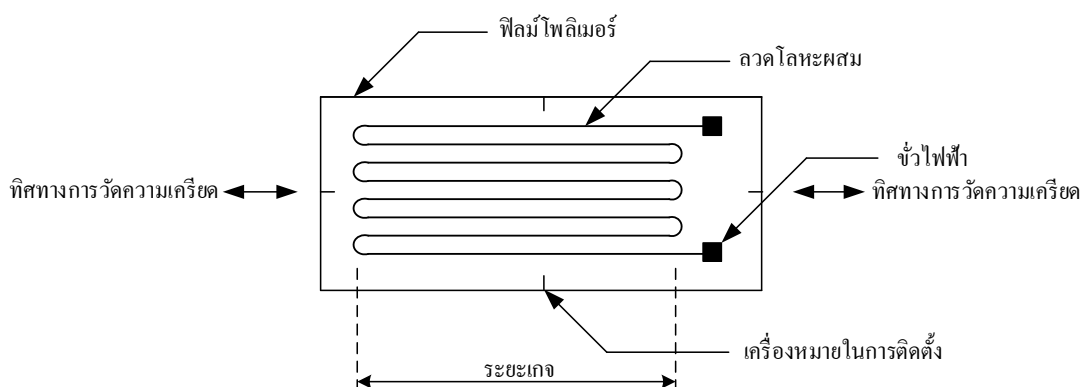


รูปที่ 3.7 ตำแหน่งท่อ Inclinator ในโครงการ

3.2.2 การตรวจวัดแรงอัดในค้ำยันชั่วคราว

การตรวจวัดแรงอัดในค้ำยันชั่วคราวในงานวิจัยนี้เลือกใช้ เกจวัดความเครียดแบบ ความต้านทานไฟฟ้า (electrical-resistance strain gage) ซึ่งเป็นตัวแปลงแบบเฉื่อยงาน (Passive Transducer) ที่ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในเส้นลวด เพื่อการตรวจวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สเตรนเกจมีการใช้งานในการตรวจวัดอย่างกว้างขวาง เช่น การวัดน้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกลหรือการเคลื่อนที่ (Displacement)

หลักการทำงาน เมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออก ความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ผลก็คือ ความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทานของโลหะตัวนำจะแปรผันโดยตรงกับความยาว และแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของเกจวัดความเครียด

โครงสร้างมีสมบัติทางกลคงที่ในทุกๆตำแหน่งและทิศทาง เนื้อวัสดุกระจายอย่าง ต่อเนื่องโดยไม่มีช่องว่างใดๆเกิดขึ้น และถูกกระทำจากแรงที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล ความเค้นตั้งฉาก (normal stress หรือ σ) สามารถนิยามได้จากแรง (P) ที่กระทำในทิศทางตั้งฉากบนพื้นที่หน้าตัด (A) ขนาด 1 หน่วยพื้นที่ โดยมีขนาดเป็นบวก ถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงดึง หรือมีขนาดเป็นลบถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงอัด จากสมการ 3.1 ดังนี้

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

ความเค้นเกิดขึ้นในโครงสร้างส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด (deformation) ซึ่งมีทิศทางตามความเค้นที่มากระทำ ถ้าถูกกระทำจากความเค้นที่เป็นบวกหรือความเค้นดึง โครงสร้างจะยืดยาวขึ้นตามทิศทางของแรง (tensile stress) แต่ถ้าถูกกระทำจากความเค้นที่เป็นลบ หรือ ความเค้นอัด (compressive stress) โครงสร้างจะหดสั้นลงตามทิศทางของแรง ความเครียดตั้งฉาก (normal strain; ε) สามารถนิยามได้จากอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด (δ) ต่อระยะปกติ (L_0) จากสมการ 3.2 ดังนี้

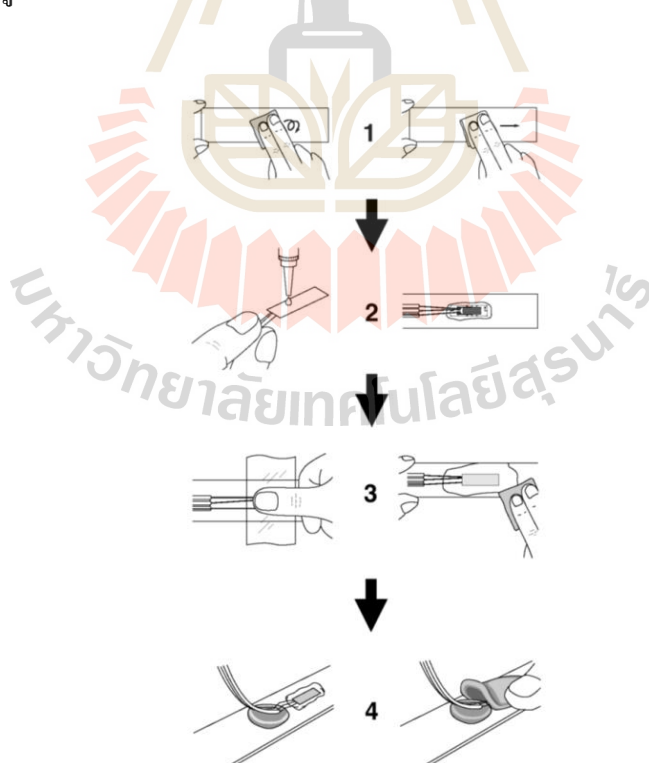
$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (3.2)$$

ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุจะกลับคืนสู่สภาวะเดิมทันทีเมื่อปล่อยแรงที่มากกระทำออก พฤติกรรมเช่นนี้ถูกเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบอีลาสติก (elastic deformation) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยกฎของฮุก (Hooke's law) จากสมการ 3.3 ดังนี้

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.3)$$

โดย E คือ โมดูลัสของยังส์ (Young's modulus) หรือ โมดูลัสของอีลาสติกซีดี (modulus of elasticity) สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ติดตั้ง strain gauge กับ เหล็ก WF500x114kg/m ที่มีค่า $E = 2.04 \times 10^8 \text{ KN/m}^2$ โดยรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

ในการติดตั้ง Strain gauge ทุกครั้ง ต้องมีการเตรียมพื้นที่ผิวให้ถูกต้อง โดยวัตถุประสงค์หลักในการเตรียมพื้นที่ผิวของวัสดุที่จะติด strain gauge คือ ต้องการที่จะปรับพื้นที่ผิวให้มีความหยาบ (Roughness) สภาพทางเคมีและความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่เหมาะสม และเพื่อที่จะได้เส้นที่บอกตำแหน่งและทิศทางของ strain gauge ที่ถูกต้องแล้วตรงจุดที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการติดตั้ง Strain gauge กับผิววัสดุ

1. การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน เป็นการชำระล้างสารต่างๆที่ติดมากับวัสดุออกไปจากพื้นผิว โดยใช้ผ้าเช็ดแผลจุ่ม Degreaser เช็ดที่บริเวณนั้นแล้วเช็ดให้แห้ง จากนั้นขัดผิวของวัสดุเพื่อที่จะได้ผิวที่เหมาะสมที่กาว (Adhesive) จะยึดติด strain gauge กับพื้นผิวได้ดีแล้วเช็ดทำความสะอาดอีกครั้ง ซึ่งในขั้นตอนการขัดผิวจะขัดไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นกำหนดทิศทางของผิววัสดุในการติดตั้ง strain gauge

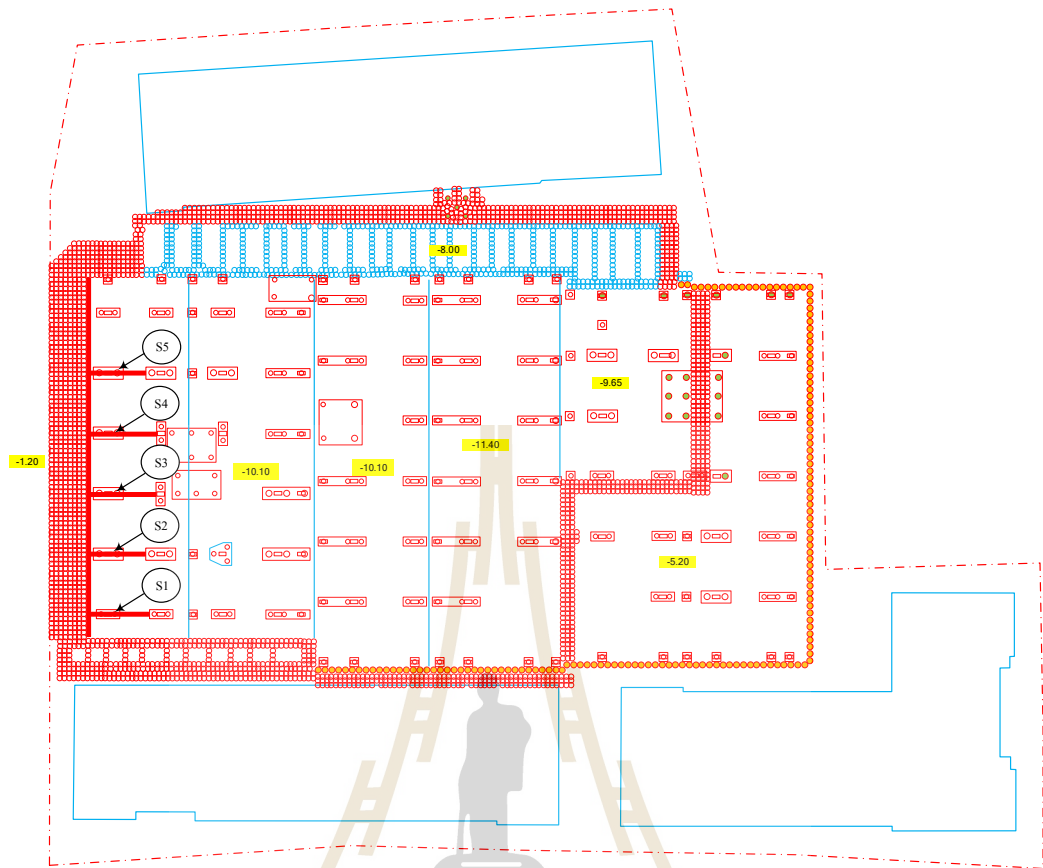
2. ติด strain gauge ด้านหลังกับกระดาษกาว (เพื่อความสะดวกในการติด)

3. ทากาวด้านหน้า strain gauge แล้วทำการติดตั้ง strain gauge กับผิววัสดุ

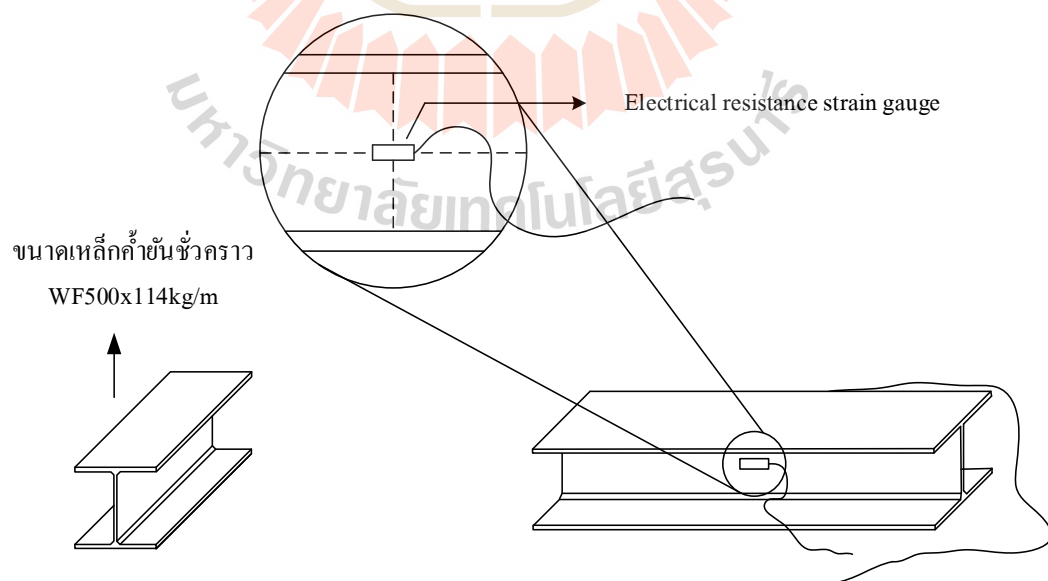
4. ติดฉลิตโคนเพื่อป้องกันการเสียหายของ strain gauge และเก็บสายไฟที่ต่อจากตัว strain gauge ให้เรียบร้อย

การศึกษานี้ได้ติดตั้ง electrical resistance strain gauge ไว้บนค้ำยันเหล็กชั่วคราวทุกจุด (ทั้งหมด 5 จุด) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยติดตั้งไว้ที่กึ่งกลางของแผ่น Web และทิศทางของ Strain gauge ตามยาว (ระยะเกจ) ขนานกับความยาวของค้ำยันชั่วคราว ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เพื่อขจัดผลเนื่องจากโมเมนต์ดัดที่จะเกิดขึ้นในค้ำยันชั่วคราว และรายละเอียด electrical resistance strain gauge ดังแสดงในตารางที่ 3.1





รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งการติดตั้งค้ำยันชั่วคราวในโครงการ

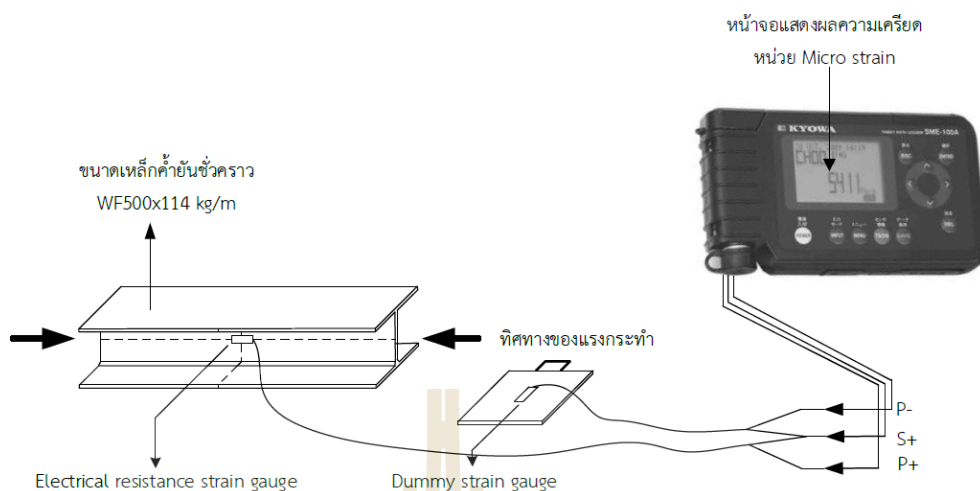


รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gauge ในค้ำยันชั่วคราว

ตารางที่ 3.1 รายละเอียด electrical resistance strain gauge ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

TYPE KFG-5-120-C1-11L3M2R	MADE IN JAPAN
GAGE FACTOR $2.06 \pm 1.0\%$	TEM. COEFFICIENT OF GAG FACTOR $+0.008\%/C^0$
GAGE LENGTH 5 mm	APPLICABLE GAGE CEMENT CC-33A , EP-34B
GAGE RESISTANCE $120.4 \pm 0.4\Omega$	QUANTITY 10
ADOPTABLE THERMAL EXPANSION $11.7 \text{ PPM}/C^0$	KYOWA STRAIN GAUGE

การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของ Strain gauge เพื่อคำนวณความเครียด (strain) ที่ติดตั้งไว้กับค้ำยันเหล็กชั่วคราว สำหรับเก็บข้อมูลการศึกษาแรงที่เกิดขึ้นในค้ำยันชั่วคราวของงานวิจัยนี้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นในการใช้เกจวัดความเครียดจึงวัดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ที่เกิดขึ้นในวงจร สโตนบริจ โดยใช้เครื่องอ่านค่าความเครียดแบบพกพาของ KYOWA Handy data logger รุ่น SME-100A ซึ่งมีหน้าจอแสดงผลความเครียดที่แปลงจากความต่างศักย์ไฟฟ้าและใช้วิธีการวัดแบบ quarter bridge โดยติดตั้ง dummy strain gauge ไว้ด้วย เพื่อขจัดผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัว strain gauge ออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งสามารถตรวจวัดได้สะดวกรวดเร็วกว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าโดยตรง



รูปที่ 3.12 การอ่านค่าความเครียดจากเครื่องมือวัด

3.3 การวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัว

งานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D และ 3D ในการวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัวเทียบกับผลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดจริงในสนาม โดยการแปรผันค่าสตีฟเนสในเทอมของ E_u/S_u ซึ่งเป็นการวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าสตีฟเนสที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินหลังจากที่มีการขุดดิน ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4

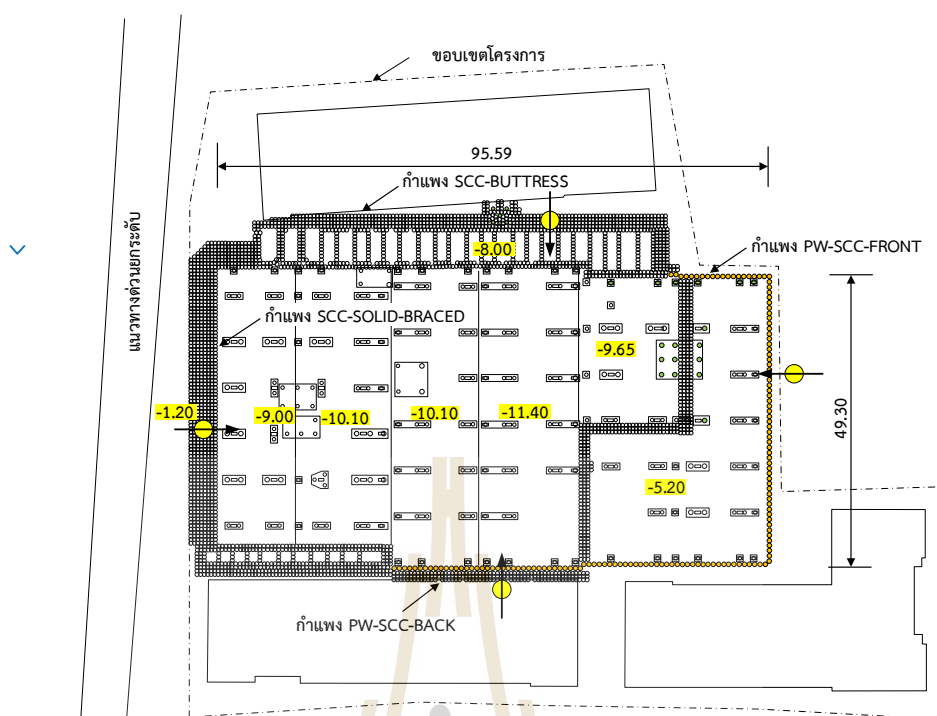
ผลการวิจัย

บทนี้เป็นผลการวิจัยซึ่งนำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดินแต่ละแบบที่ได้จากการตรวจวัด และการวิเคราะห์หาค่าสถิติเฟนสที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดการเคลื่อนตัวจริงของกำแพงในสนามด้วย Inclinomater และตรวจวัดแรงอัดในค้ำยันด้วย Strain gauge

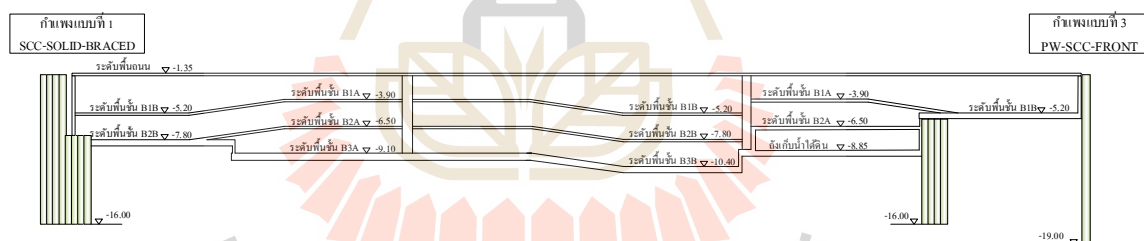
4.1 พื้นที่วิจัย

พื้นที่ใช้ในงานวิจัยเป็นโครงการก่อสร้างอาคารชุด ที่พักอาศัย 8 ชั้น จำนวน 5 อาคาร ดังรูปที่ 4.1 โครงการตั้งอยู่บนถนนเจริญราษฎร์ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร โดยบริเวณกลางโครงการเป็นชั้นจอดรถใต้ดิน 3 ชั้น มีความกว้าง 49.30 เมตร ยาว 95.59 เมตร ระดับดินขุดลึกที่สุดของโครงการเป็น -11.40 เมตร ระดับดินพื้นที่ข้างเคียงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ -1.20 เมตร ทำให้ความลึกมากที่สุดเป็น -10.20 เมตร เมื่อเทียบกับระดับดินของพื้นที่ข้างเคียง

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังรูปแบบแตกต่างกัน 4 รูปแบบที่ได้ก่อสร้างในบริเวณเดียวกัน ซึ่งเป็นการจัดปัญหาความแปรปรวนเนื่องจาก คุณสมบัติของชั้นดิน, กรรมวิธีการก่อสร้าง และปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวกับการก่อสร้างอันทำให้การเปรียบเทียบพฤติกรรมมีความคลาดเคลื่อนได้ โดยกำแพงแต่ละรูปแบบเป็นระบบกำแพงกันดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นองค์ประกอบ โดยกำแพงสองรูปแบบแรกใช้ SCCW เป็นกำแพงกันดินหลักที่ใช้ระบบค้ำยันและไม่ใช้ระบบค้ำยัน และอีกสองรูปแบบหลังใช้ SCCW ร่วมกับ PW โดยมีการเสริม SCCW ด้านนอกบ่อขุดและด้านในบ่อขุด ในการวิจัยได้เก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของระบบกำแพงกันดินแต่ละแบบ และได้เก็บข้อมูลแรงอัดในค้ำยัน ซึ่งได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสถิติเฟนสที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรม



รูปที่ 4.1 ผังโครงการ



รูปที่ 4.2 รูปตัดของกำแพงแบบที่ 1 SCC-SOLID-BRACED และกำแพงแบบที่ 3 PW-SCC-FRONT



รูปที่ 4.3 รูปตัดของกำแพงแบบที่ 4 PW-SCC-BACK และกำแพงแบบที่ 2 SCC-BUTTRESS



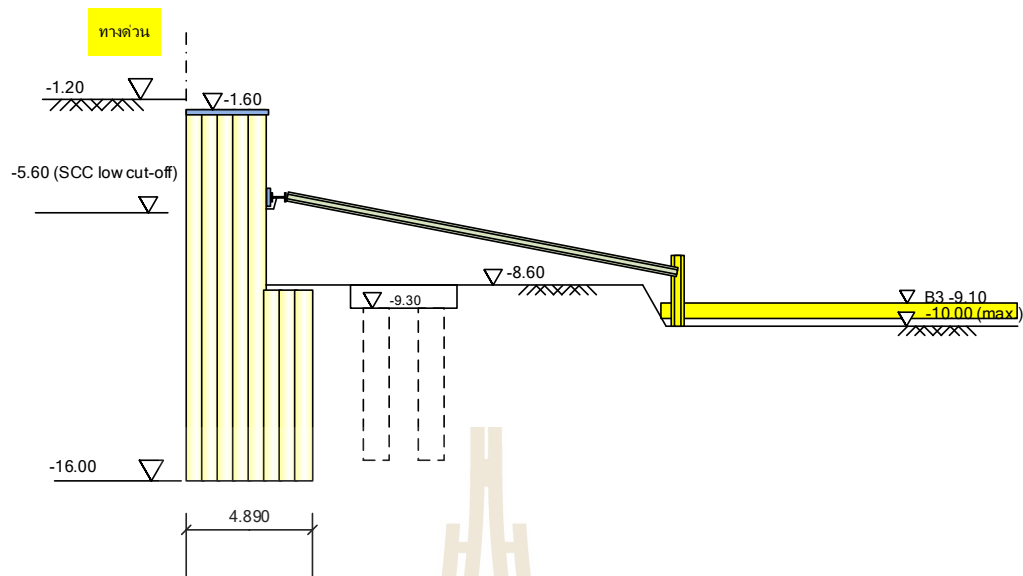
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงการ

ระบบป้องกันดินพังในโครงการแบ่งเป็น 4 แบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้คำเรียกดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชื่อที่ใช้เรียกระบบป้องกันดินพังในโครงการ

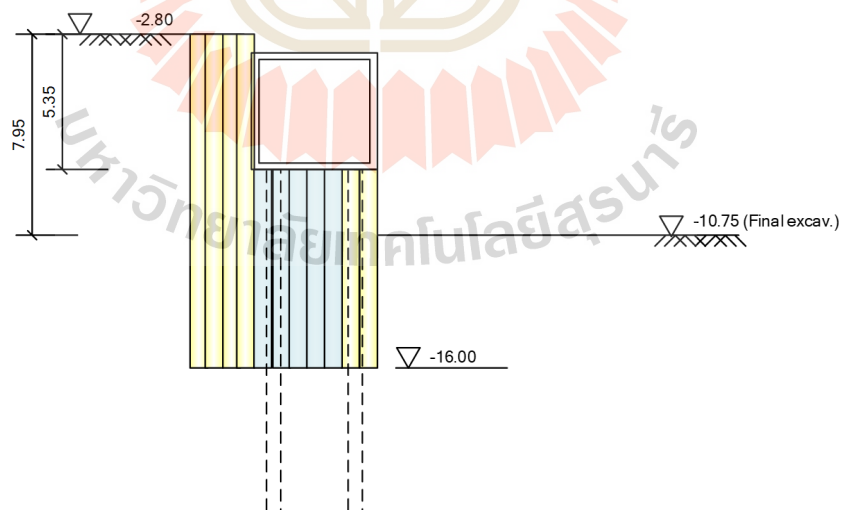
ชื่อเรียกกำแพง	คำอธิบาย
SCC-SOLID-BRACED	SCC ทึบ
SCC-BUTTRESS	SCC ทึบบางส่วน
PW-SCC-FRONT	ใช้ PW ร่วมกับ SCC โดย SCC อยู่ด้านหน้า PW
PW-SCC-BACK	ใช้ PW ร่วมกับ SCC โดย SCC อยู่ด้านหลัง PW

กำแพง SCC-SOLID-BRACED เป็นกำแพง SCCW เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร ก่อสร้างเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร จำนวน 8 แถว โดยด้านนี้มีระดับดินจุดเป็น -10 เมตร ในด้านนี้ใช้การก่อสร้างโดยก่อสร้างพื้นชั้นใต้ดินส่วนกลางอาคารก่อน จากนั้นจึงติดตั้งค้ำยันระหว่าง SCCW กับอาคารส่วนที่สร้างเสร็จแล้ว ดังรูปที่ 4.5



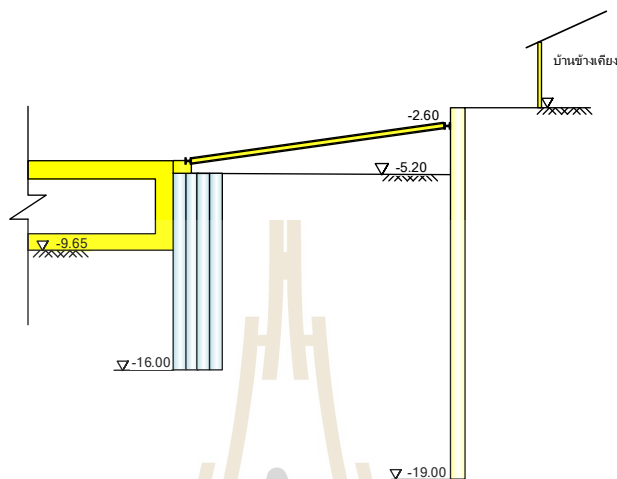
รูปที่ 4.5 กำแพง SCC-SOLID-BRACED

กำแพง SCC-BUTTRESS เป็นกำแพง SCC ที่ไม่มีการใช้ค้ำยันชั่วคราว กำแพงส่วนที่บเป็น SCC ขนาด 700 มิลลิเมตร จำนวน 4 แถว และมี SCC ที่มีลักษณะเป็นเซลล์ดูด้านในของบ่อขุด ระดับของการขุดมากที่สุดเป็น -10.75 เมตร ดังรูปที่ 4.6



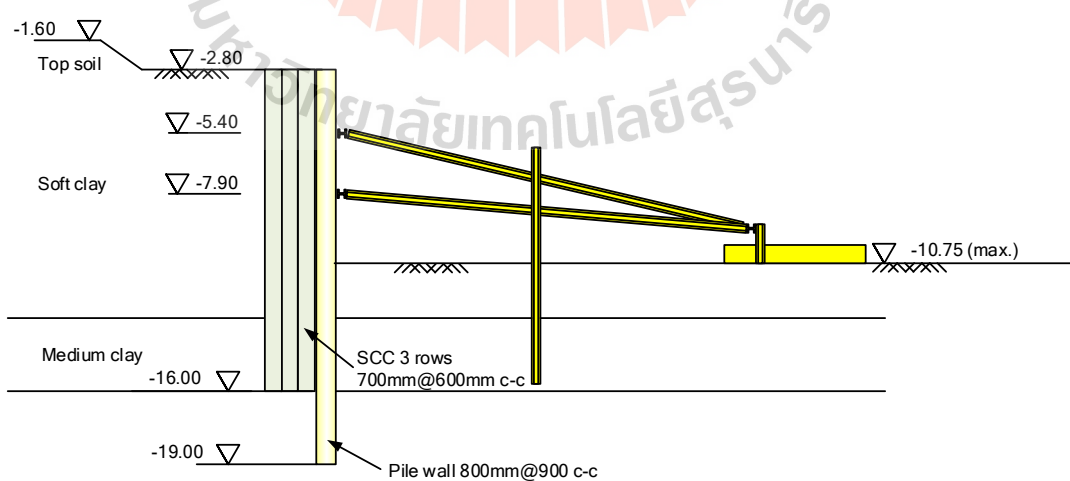
รูปที่ 4.6 กำแพง SCC-BUTTRESS

กำแพง PW-SCC-FRONT เป็นกำแพง PW เนื่องจากมีระยะห่างจากพื้นที่ข้างเคียงไม่เพียงพอสำหรับสร้างกำแพง SCCW ที่มีความหนาเพียงพอได้ ในด้านนี้มีระดับของการขุดลึกอยู่ที่ -9.65 เมตร ซึ่งอยู่ห่างจากแนวกำแพง PW 15 เมตร ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กำแพง PW-SCC-FRONT

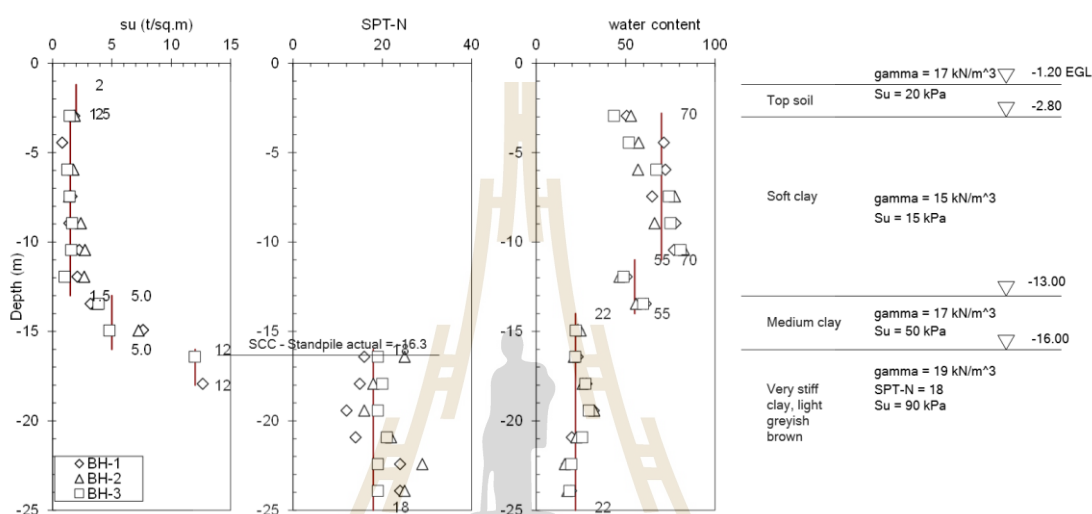
กำแพง PW-SCC-BACK เป็นกำแพง PW เสริมด้วย SCCW เนื่องจากมีพื้นที่ไม่กว้างพอที่จะสร้างกำแพง SCCW เป็น Gravity Wall ได้ และใช้ค้ำยันชั่วคราว 2 ชั้น ที่ติดตั้งหลังจากการก่อสร้างฐานรากส่วนกลางอาคารเสร็จ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กำแพง PW-SCC-BACK

4.2 ข้อมูลชั้นดิน

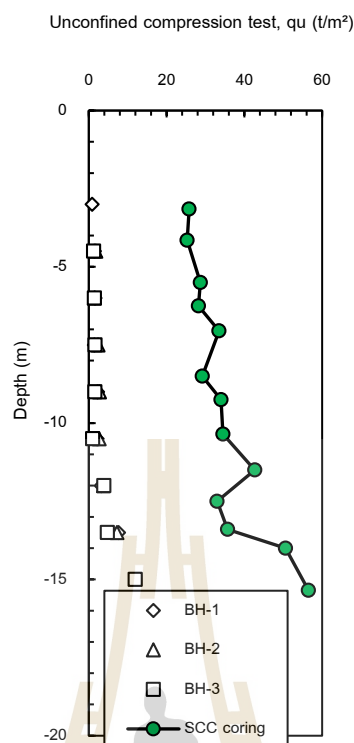
ในการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจดินโครงการจำนวน 3 หลุม โดยรูปที่ 4.9 เป็นรูปตัดชั้นดิน, คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล ชั้นดินประกอบไปด้วยชั้นดินส่วนบนหนา 2.8 เมตร วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10.2 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 3 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากลึกมากกว่า 45 เมตร จากผิวดิน



รูปที่ 4.9 รูปตัดชั้นดิน, คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล

4.3 เสาเข็มดินซีเมนต์

เสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการนี้ก่อสร้างโดยใช้ระบบเชิงกลและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ โดยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็น 200 กิโลกรัมต่อดินเดิม 1 ลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็น 1 ต่อ 1 ส่วน อัตราทดกันผสมนั้นสัมพันธ์กับอัตราการส่งน้ำปูนซึ่งมีค่าระหว่าง 0.9 ถึง 1.1 เมตรต่อนาที ส่วนความเร็วรอบของการหมุนก้านขึ้นกับลักษณะดินแต่ละชนิดซึ่งก้านเจาะจะหมุน 30-40 รอบต่อนาทีในชั้นดินเหนียวอ่อน เมื่อก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เรียบร้อยแล้วได้สุ่มเจาะแกนตัวอย่างขึ้นมาทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ได้ผลดังรูปที่ 4.10 ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์อยู่ที่ 25 ตันต่อตารางเมตร ในชั้นดินเหนียวอ่อน และ 45 ตันต่อตารางเมตรในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์

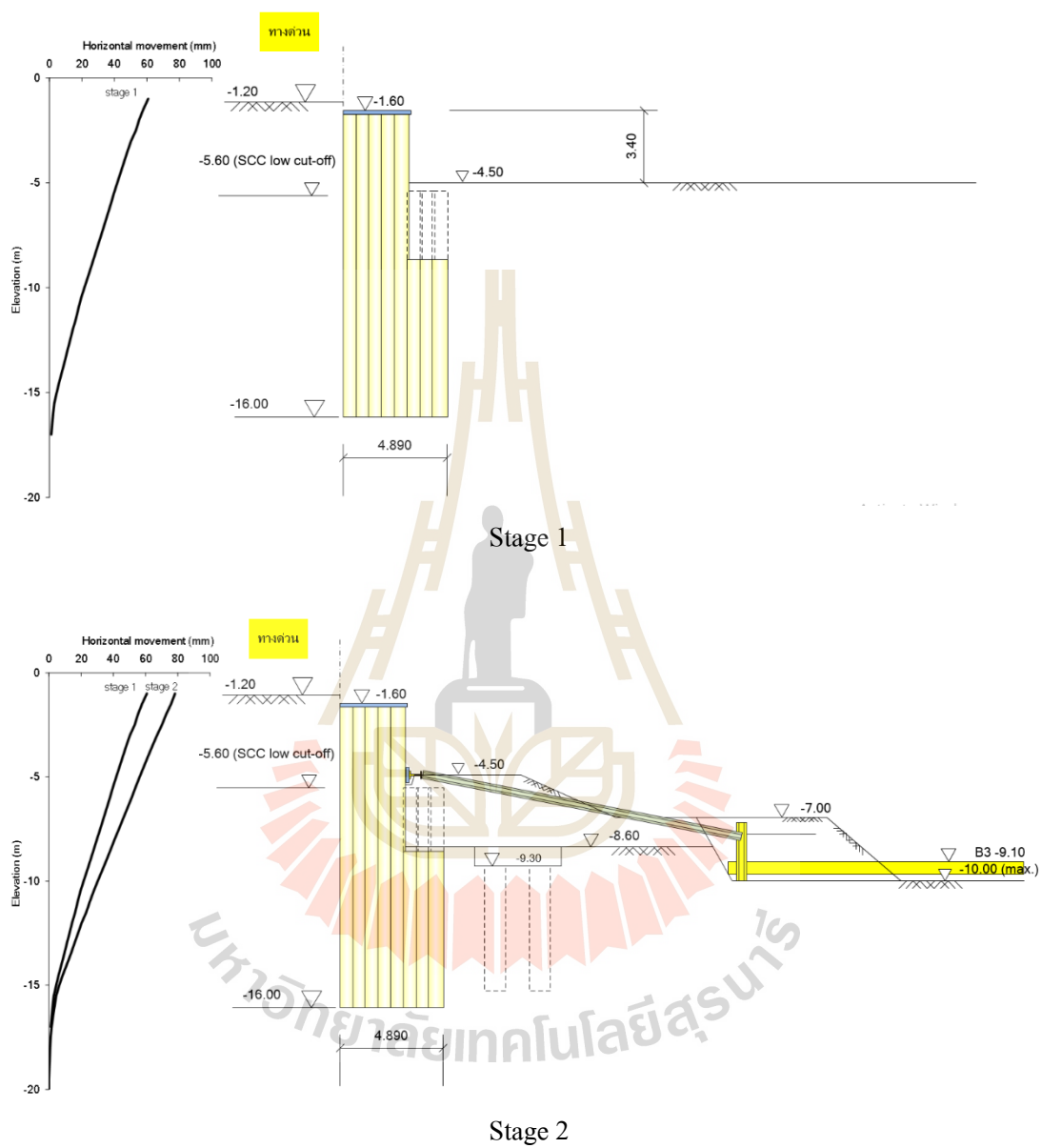
4.4 การวัดการเคลื่อนตัวและแรงอัดในค้ำยัน

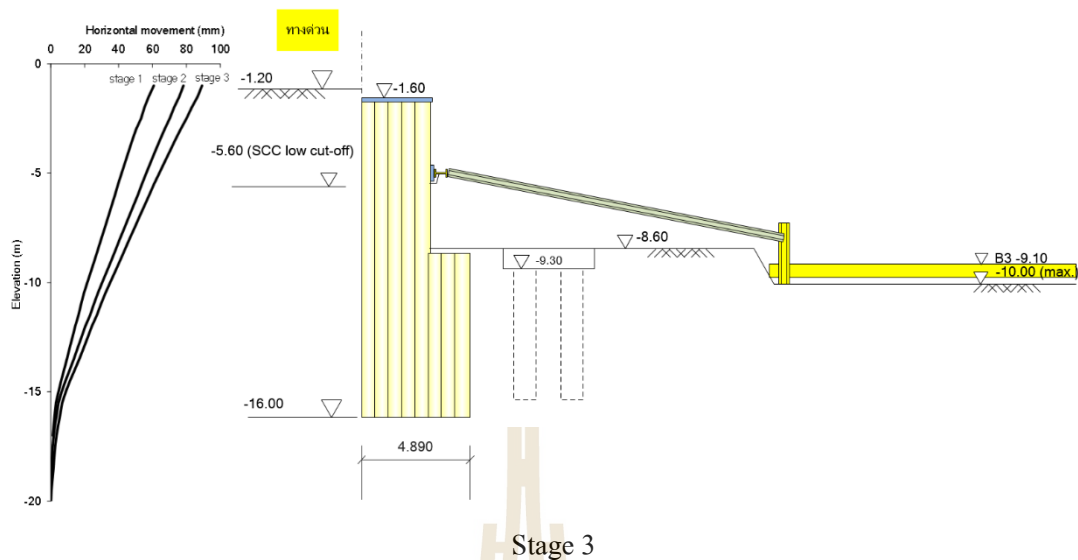
ในการวิจัยได้ติดตั้งท่อ Inclinator ไว้จำนวน 4 จุดในกำแพงแต่ละแบบ และทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงทุกชั้นตอนการก่อสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับดินชุดอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการวัดแรงอัดในค้ำยันใช้สเตรนเกจ (Strain gauge) สองตัวที่ติดตั้งไว้กับค้ำยันชั่วคราว โดยสเตรนเกจตัวแรกได้ติดตั้งไว้ที่แกนสะเทินของค้ำยัน และสเตรนเกจอีกตัวหนึ่งติดตั้งในทิศทางที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดเนื่องจากแรงภายนอกเพื่อชดเชยความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ เนื่องจากค้ำยันอยู่กลางแจ้ง

4.4.1 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัด

รูปที่ 4.11 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-SOLID-BRACED ซึ่งมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเป็นแบบคานยื่น โดยมีการเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ส่วนบนของกำแพง การเคลื่อนตัวในขั้นตอนที่ 1 ที่มีระดับการขุดเป็น -4.50 เมตร เป็น 60.70 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อติดตั้งค้ำยันชั่วคราวและขุดดินบริเวณกลางโครงการจนถึงระดับสุดท้าย การเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 78.26 มิลลิเมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดเมื่อขุดดินส่วนที่ติดกับกำแพง

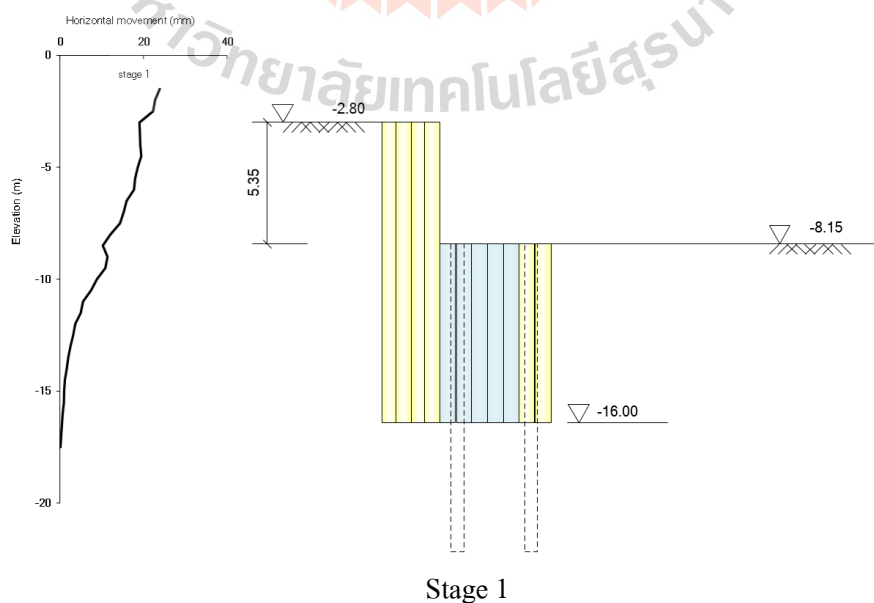
ออกเป็น 89.24 มิลลิเมตร ในส่วนนี้ได้ติดตั้งสเตรนเกจไว้ในค้ำยันเพื่อวัดแรงอัดโดยค่าแรงอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 16 ถึง 23 ตัน

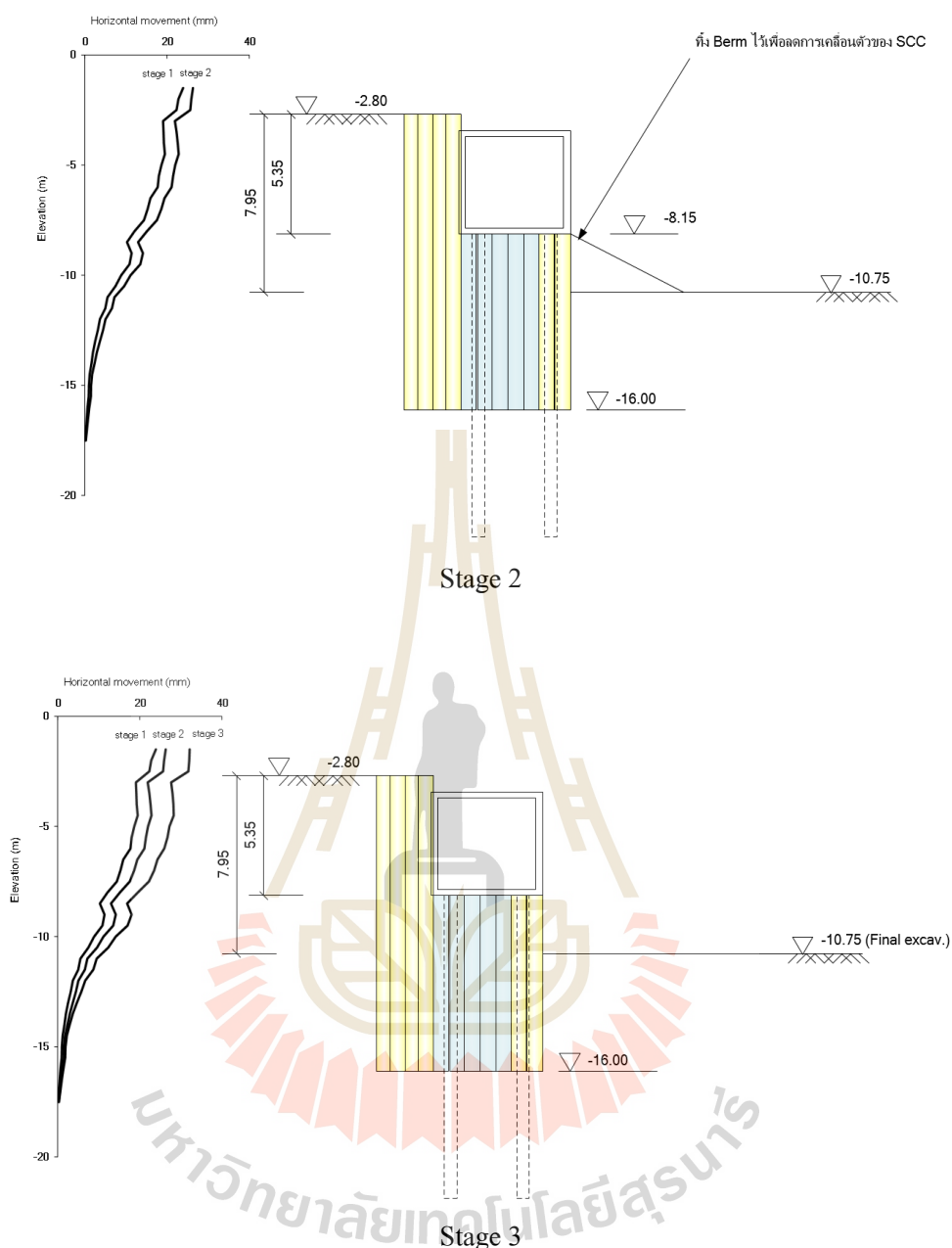




รูปที่ 4.11 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

รูปที่ 4.12 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-BUTTRESS ในขั้นตอนการขุดถึงระดับ -8.15 เมตร มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเป็น 23.91 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อก่อสร้างถึงเก็บน้ำใต้ดินคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วขุดดินบริเวณส่วนกลางโครงการถึงระดับ -10.75 เมตร และยังคงทิ้งลาดดินไว้บางส่วนการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 23.61 มิลลิเมตร และเมื่อขุดลาดดินบริเวณหน้ากำแพงจนหมดการเคลื่อนตัวสูงสุดเป็น 32.13 มิลลิเมตร

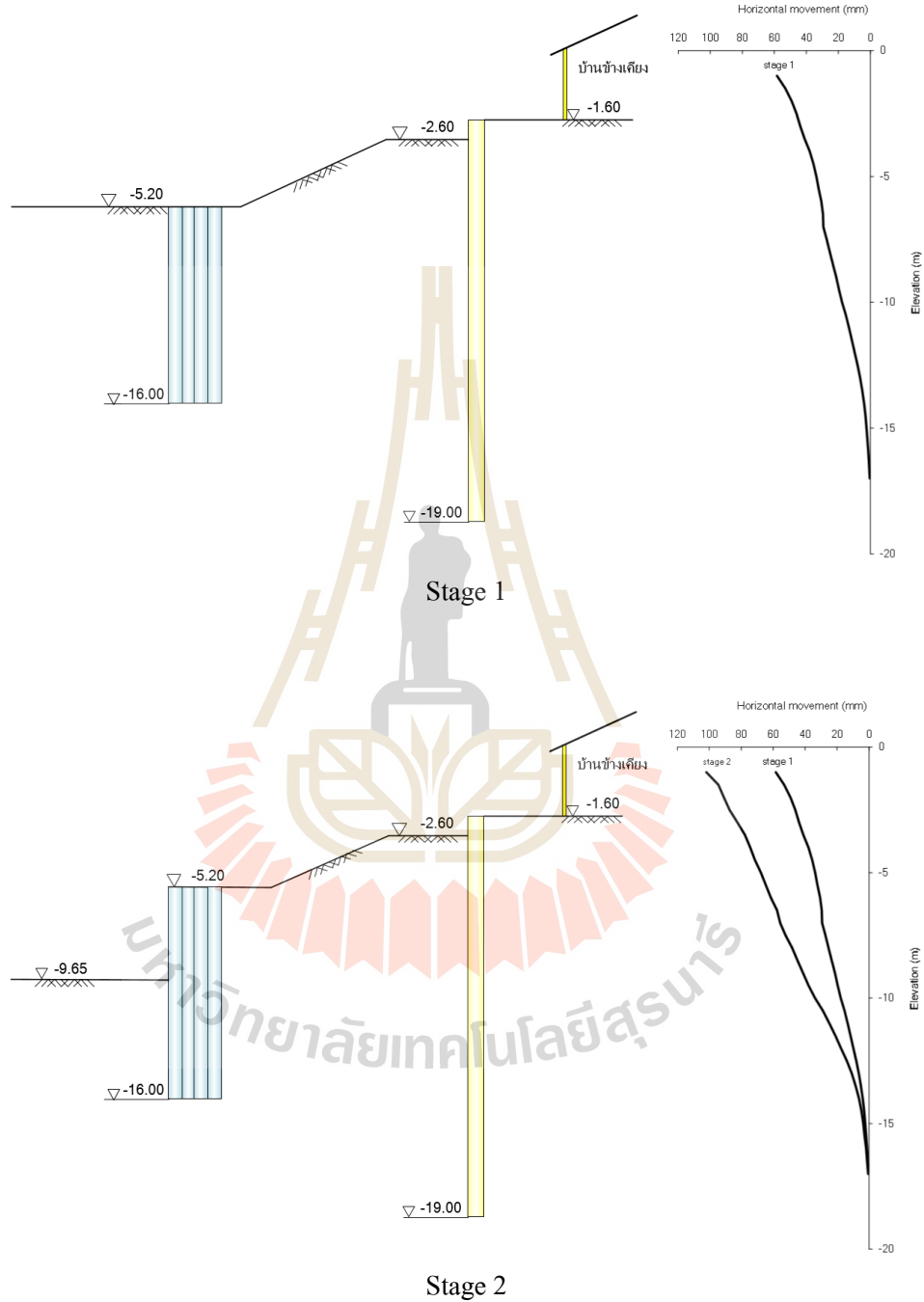


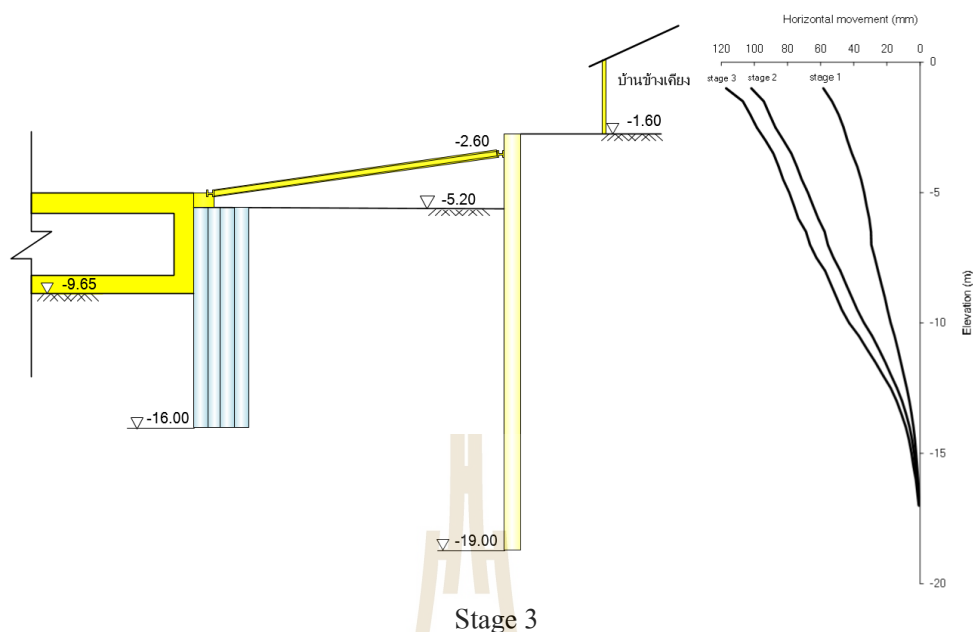


รูปที่ 4.12 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-BUTTRESS

รูปที่ 4.13 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-FRONT เมื่อขุดดินถึงระดับ -8.2 เมตร โดยคงลาดดินหน้ากำแพงไว้การเคลื่อนตัวสูงสุดของ PW เป็น 58.36 มิลลิเมตร และเมื่อขุดดินบริเวณกลางโครงการออกจนถึงระดับ -9.65 เมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ 101.88 มิลลิเมตร และหลังจากก่อสร้างชั้นใต้ดินส่วนกลางแล้วเสร็จได้ติดตั้ง

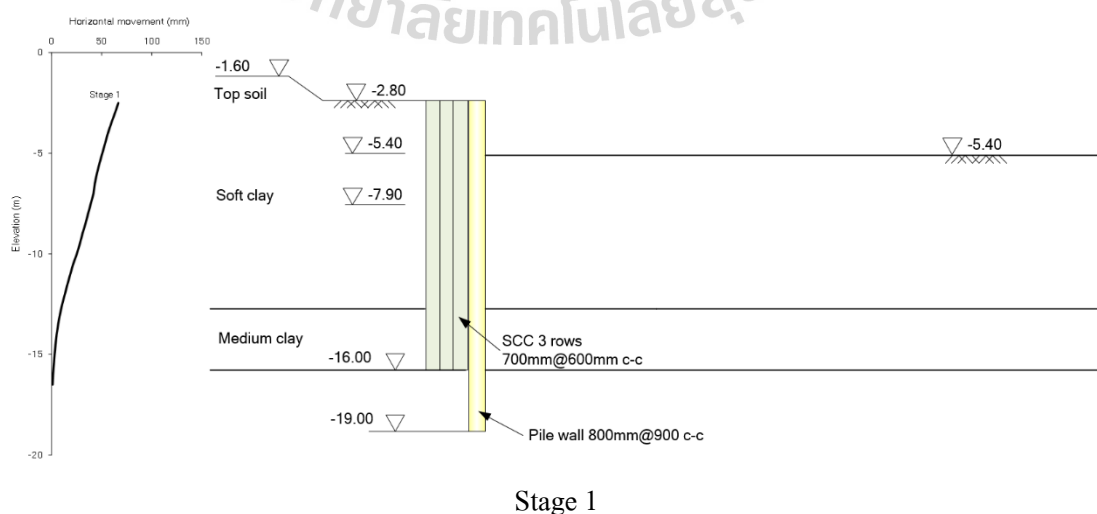
คำนวณช่วงระหว่าง PW กับ โครงสร้างส่วนกลาง แล้วจุดดินหน้า PW ออก การเคลื่อนตัวสูงสุดมีค่าเป็น 117.09 มิลลิเมตร

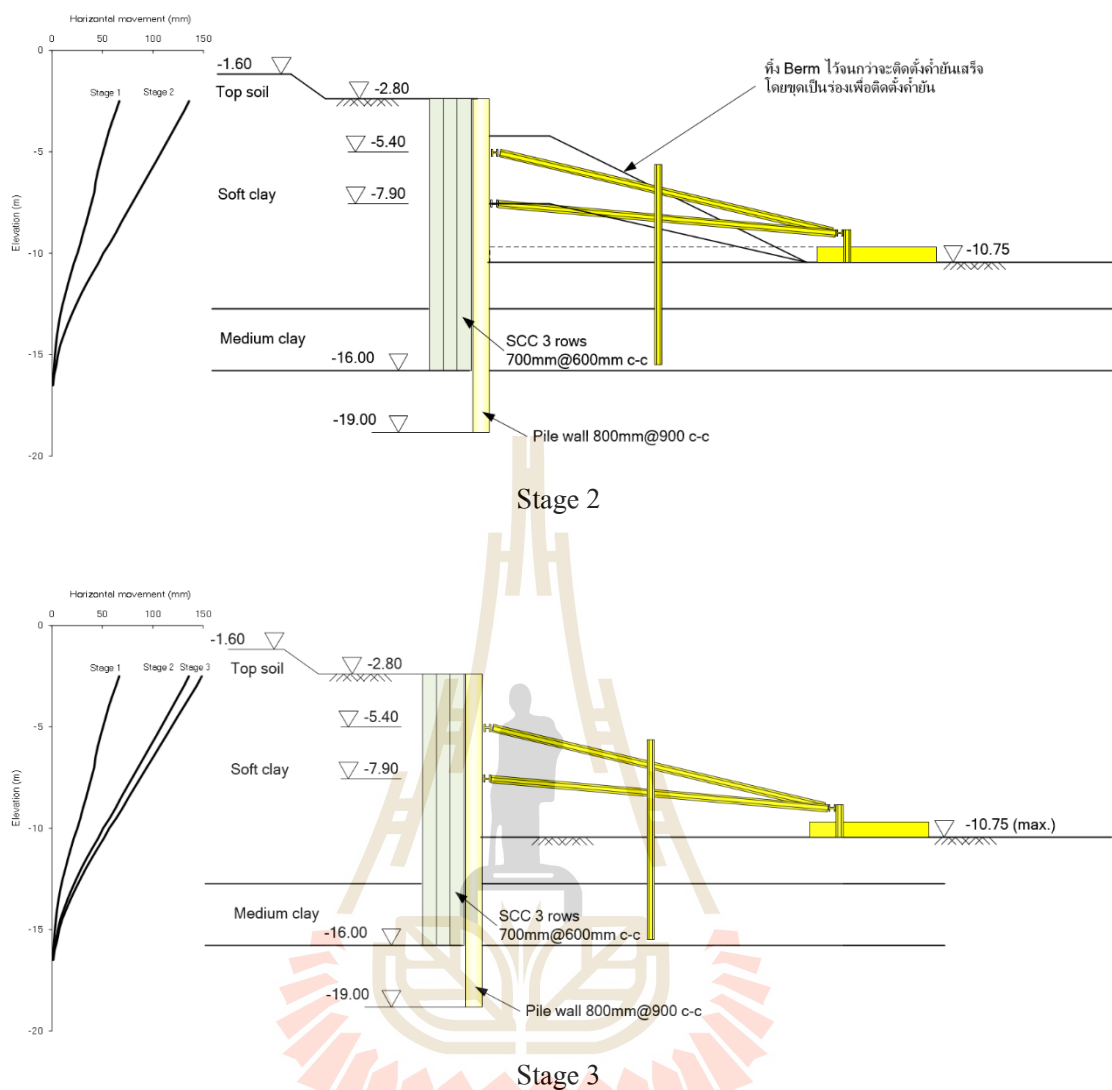




รูปที่ 4.13 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-FRONT

รูปที่ 4.14 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-BACK ซึ่งกำแพงชนิดนี้เป็นกำแพง PW เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้านหลังกำแพง ซึ่งเมื่อขุดดินถึงระดับ -5.40 เมตร การเคลื่อนตัวมีลักษณะเป็นแบบคานยื่นและมีค่าสูงสุดเป็น 66.66 มิลลิเมตร หลังจากนั้นขุดดินและก่อสร้างชั้นใต้ดินบริเวณกลางโครงการ โดยเว้นลาดดินหน้า PW ไว้ จากนั้นติดตั้งค้ำยันระหว่าง PW กับชั้นใต้ดินส่วนนี้แล้ว การเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 135.78 มิลลิเมตร และเมื่อขุดดินถึงระดับ -10.75 เมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 148.69 มิลลิเมตร



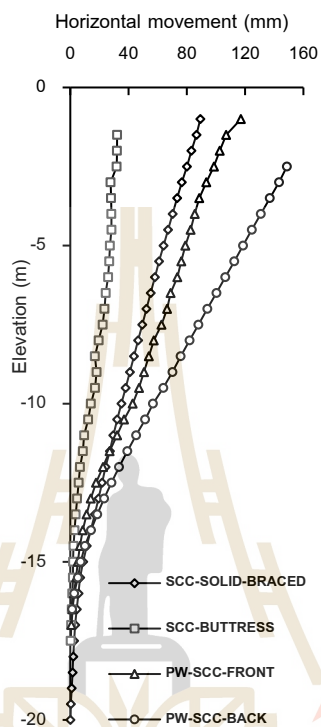


รูปที่ 4.14 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-BACK

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่วัดจริงในสนามของกำแพงแต่ละแบบที่ทำการวัดด้วย Inclinator

ชนิดของกำแพง	ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด (มิลลิเมตร)
SCC-SOLID-BRACED	89.24
SCC-BUTTRESS	32.13
PW-SCC-FRONT	117.09
PW-SCC-BACK	148.69

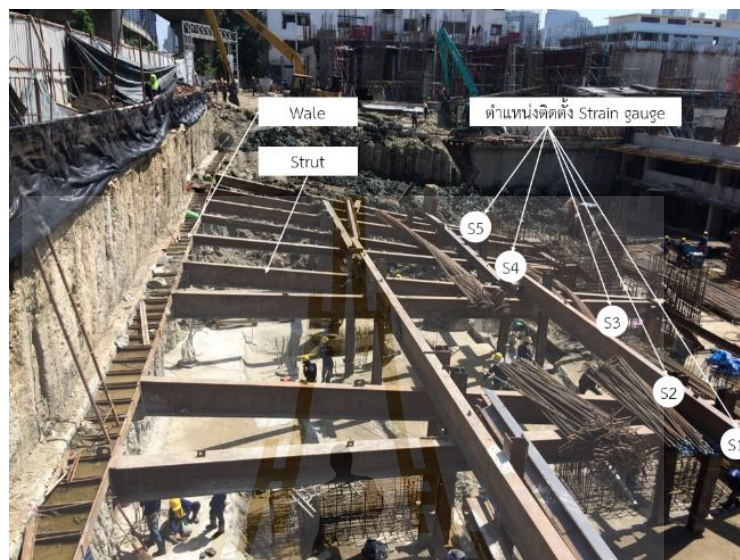
รูปที่ 4.15 เป็นการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงทั้ง 4 แบบ ซึ่งกำแพงที่มีการเคลื่อนตัวต่ำที่สุดคือ กำแพง SCC-BUTTRESS ส่วนกำแพงที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุดคือกำแพง PW-SCC-BACK



รูปที่ 4.15 การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพง

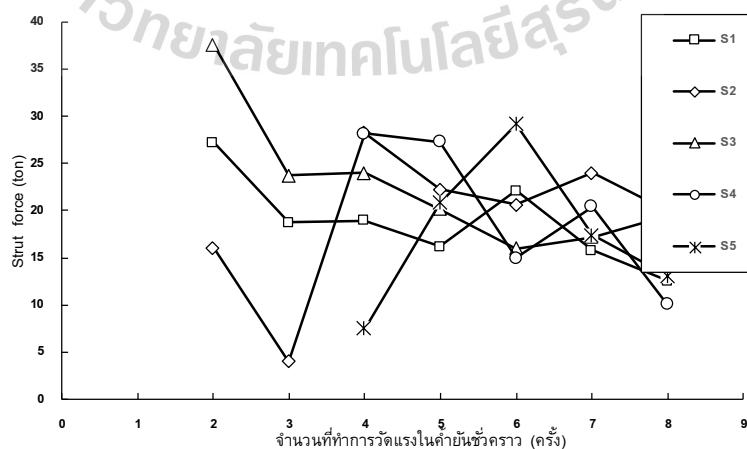
4.4.2 แรงอัดในค้ำยัน

รูปที่ 4.16 ภาพแสดงตำแหน่ง Wale ,Strut และ Strain gauge โดยแรงอัดในค้ำยันเกิดจากแรงดันดินด้านหลังกำแพงส่งถ่ายผ่านรัดครอบ(Wale) มายังค้ำยัน(Strut)

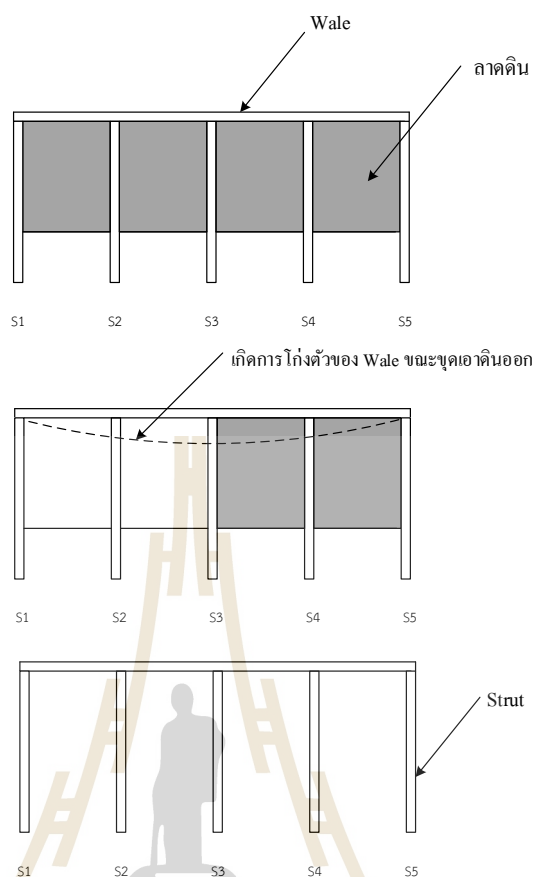


รูปที่ 4.16 ภาพแสดงตำแหน่ง Wale, Strut และ Strain gauge

รูปที่ 4.17 เป็นแรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยันได้ทำการวัดด้วย Strain gauge ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จริงในสนาม โดยทำการเก็บค่าทุกครั้งที่มีการขุดลาดดินออกอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.17 แรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยัน



รูปที่ 4.18 ภาพแสดงการโก่งตัวของรัศรอบ(Wale)เมื่อทำการขุดลาดดินออก

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงขั้นตอนการโก่งตัวของรัศรอบและแรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยัน โดยเป็นค่าที่ทำการวัดจริงในสนาม ซึ่งทำการเก็บทุกครั้งที่มีการขุดลาดดินออกอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในช่วงแรก (ทำการขุดลาดดินออกยังไม่หมด) แรงอัดในค้ำยันจะมีค่าสูงเนื่องจากรัศรอบ (Wale) มีการโก่งงอ จึงทำให้ค้ำยันรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงหลัง (ทำการขุดลาดดินออกหมดแล้ว) แรงอัดในค้ำยันจะมีค่าลดลงเนื่องจากรัศรอบ (Wale) เล็กมีการโก่งตัวทำให้แรงอัดมีค่าลดลง

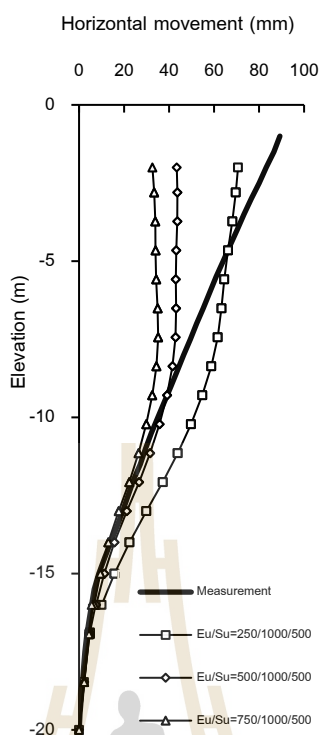
เมื่อวิเคราะห์หาค่าแรงที่เกิดขึ้นในค้ำยัน โดย PLAXIS 2D กำหนดค่า E_u/S_u ของดินเหนียวอ่อน, ดินเหนียวแข็ง, และดินซีเมนต์เท่ากับ 500, 1000 และ 500 ตามลำดับ แรงอัดที่ได้เท่ากับ 25.7 ตัน ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการวัดจริงในสนามมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าจะเห็นว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกันแบบมีนัยสำคัญ

4.5 การวิเคราะห์กลับโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

งานวิจัยได้ใช้โปรแกรม PLAXIS 2D และ PLAXIS 3D ในการจำลองการขุดดินแต่ละแบบ โดยในกรณีกำแพงแบบ SCC-SOLID-BRACED, PW-SCC-FRONT, และ PW-SCC-BACK ที่รูปตัดขวางกำแพงมีความสม่ำเสมอใช้การวิเคราะห์แบบสองมิติ ส่วนกรณีกำแพงแบบ SCC-BUTTRESS เป็นกำแพงที่มีรูปตัดขวางไม่คงที่ใช้การวิเคราะห์แบบสามมิติ โดยใช้แบบจำลองดินแบบอีลาสติคเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ อาศัยเกณฑ์การวิบัติของ มอห์ร์-คูลอมบ์ (Linear elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb failure criteria) และพฤติกรรมของดินเป็นแบบหน่วยแรงรวมไม่ระบายน้ำ (Undrained total stress) เหตุที่ใช้แบบจำลองดินชนิดนี้เนื่องจากงานวิจัยต้องการวิเคราะห์กลับเพื่อหาสถิติเฟนสพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของดิน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินโครงการ ซึ่งปกติแล้วจะมีผลการทดสอบเฉพาะกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน สำหรับแบบจำลองที่ซับซ้อนกว่านั้นส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองที่ต้องวิเคราะห์โดยอาศัยหน่วยแรงประสิทธิผลซึ่งจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลที่ส่วนใหญ่แล้วในงานขุดเพื่อก่อสร้างขั้นได้ดินทั่วไปจะไม่มีการทดสอบหาพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลนี้ การวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าสถิติเฟนสที่เหมาะสมเนื่องจากการขุดของกำแพงแต่ละแบบ จะแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ได้แก่กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยแปรผันค่าสถิติเฟนสของดินเหนียวอ่อน และกรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยแปรผันค่าสถิติเฟนสของดินเหนียวแข็ง

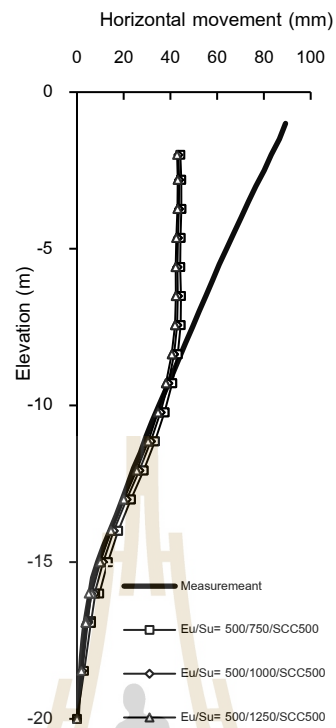
4.5.1 การวิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสถิติเฟนสของดินของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

รูปที่ 4.19 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสถิติเฟนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสถิติเฟนสของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 1000$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 750$



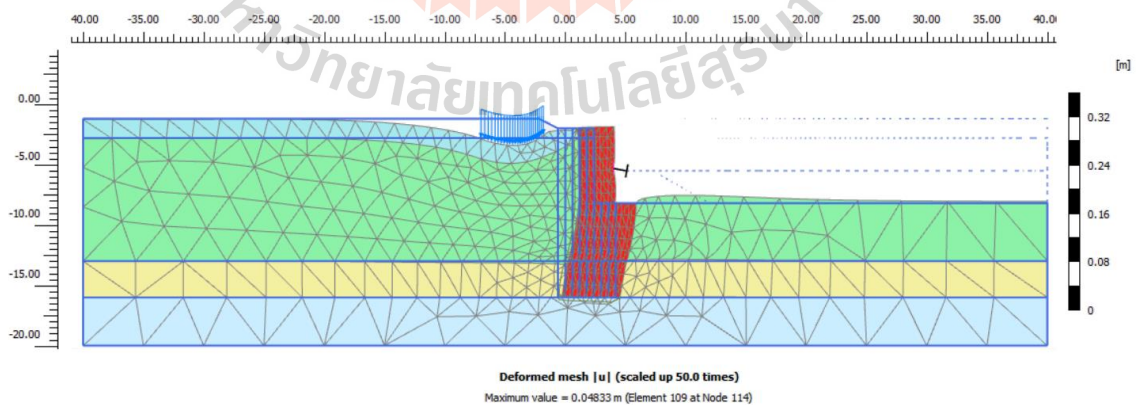
รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

รูปที่ 4.20 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 500$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์หกรณีที่ 2 วิเคราะห์หกรณ์โดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

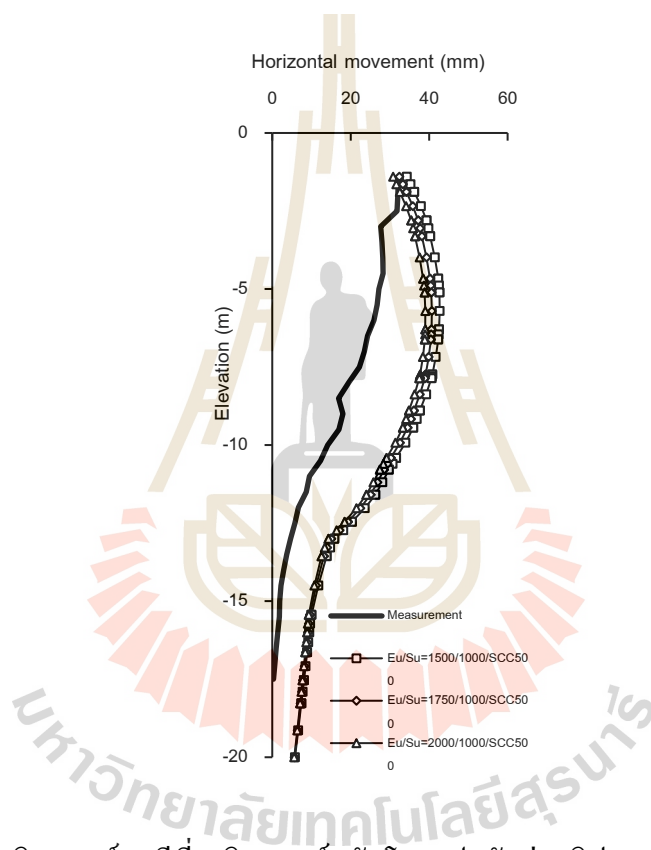
ค่าสตีฟเนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-SOLID-BRACED คือ $E_u/S_u = 750$ และ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.21 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง SCC-SOLID-BRACED

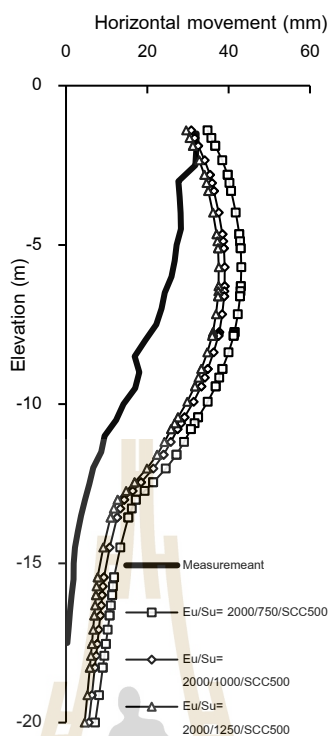
4.5.2 การวิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินของกำแพง SCC-BUTTRESS

รูปที่ 4.22 เป็นการวิเคราะห์ห้กลับที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 1500, 1750 และ 2000 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 1000$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 2000$



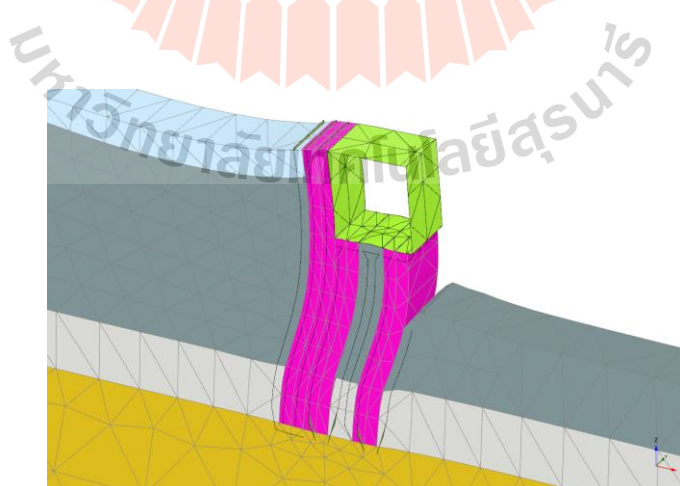
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ห้กลับที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพง SCC-BUTTRESS

รูปที่ 4.23 เป็นการวิเคราะห์ห้กลับที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสติฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสติฟเนสของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 2000$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ห้กรณีที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-BUTTRESS

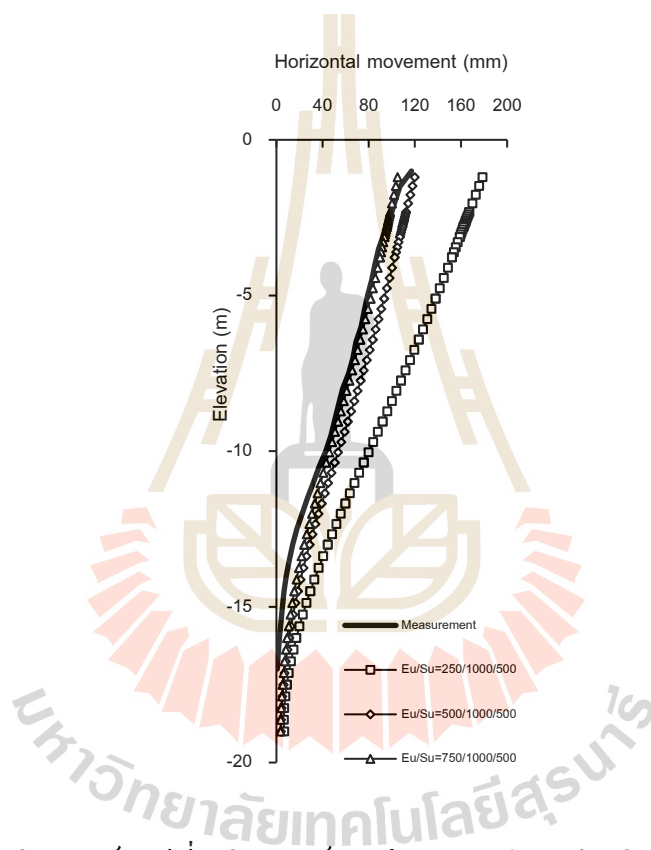
ค่าสตีเฟนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของกำแพง SCC-BUTTRESS คือ $E_u/S_u = 2000$ และ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.24 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง SCC-BUTTRESS

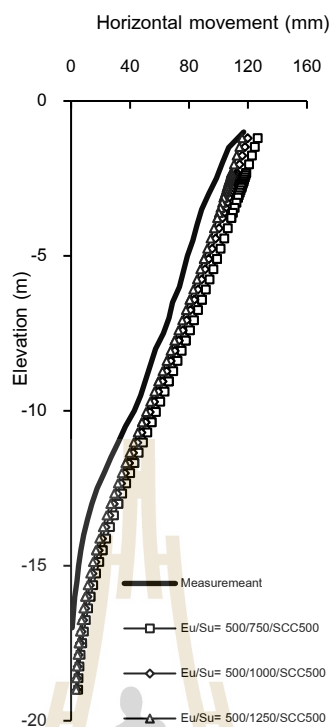
4.5.3 การวิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนสของดินของกำแพง PW-SCC-FRONT

รูปที่ 4.25 เป็นการวิเคราะห์ห้กลับที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟนสของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 1000$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 750$



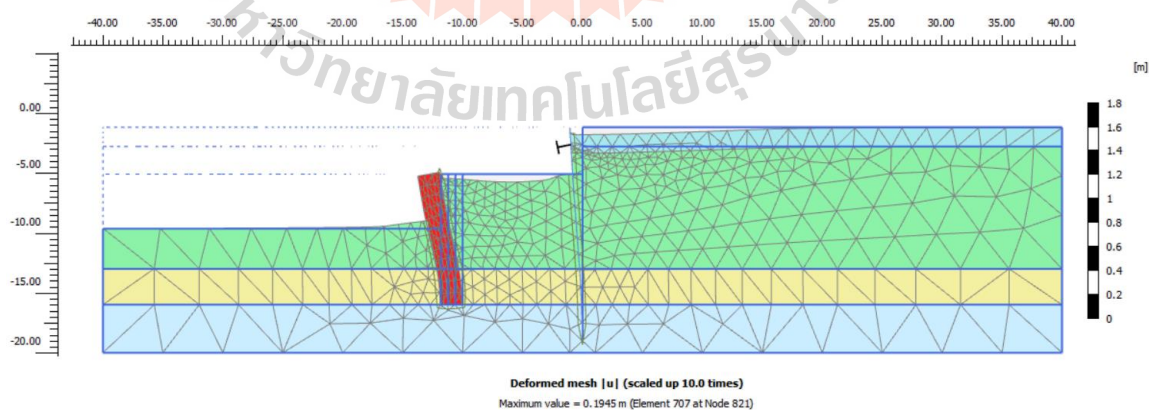
รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ห้กลับที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพง PW-SCC-FRONT

รูปที่ 4.26 เป็นการวิเคราะห์ห้กลับที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟนสของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 500$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีเฟนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง PW-SCC-FRONT

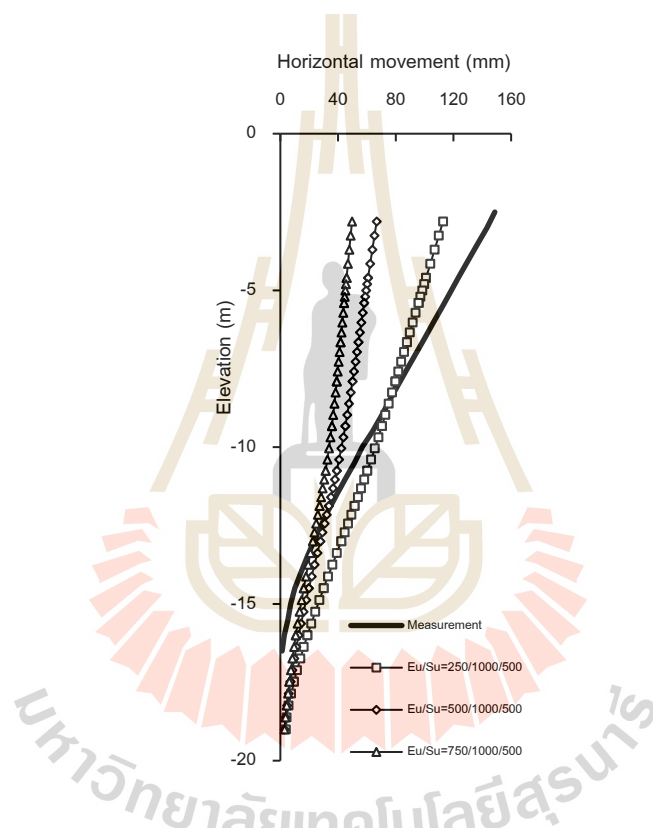
ค่าสตีเฟนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของกำแพง PW-SCC-FRONT คือ $E_u/S_u = 750$ และ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.27 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง PW-SCC-FRONT

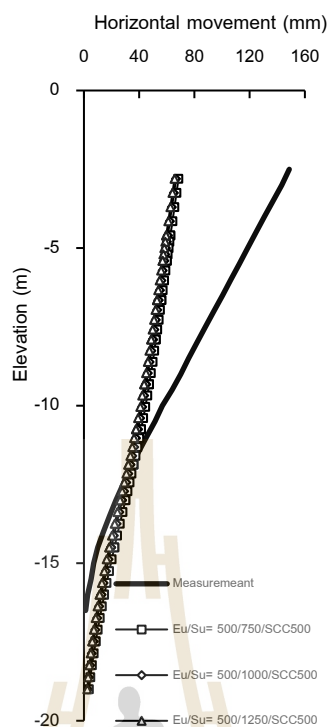
4.5.4 การวิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินของกำแพง PW-SCC-BACK

รูปที่ 4.28 เป็นการวิเคราะห์ห้กลับที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 1000$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 250$



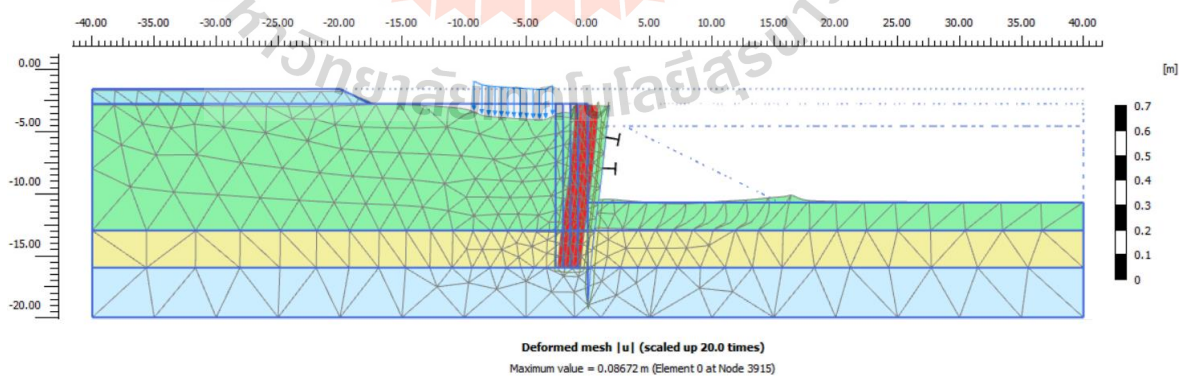
รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ห้กลับที่ 1 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อนของกำแพงแบบที่ 4 PW-SCC-BACK

รูปที่ 4.29 เป็นการวิเคราะห์ห้กลับที่ 2 วิเคราะห์ห้กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u/S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u/S_u = 500$ และ $E_u/S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็งของกำแพง PW-SCC-BACK

ค่าสตีฟเนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของกำแพง PW-SCC-BACK คือ $E_u/S_u = 250$ และ $E_u/S_u = 1250$



รูปที่ 4.30 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง PW-SCC-BACK

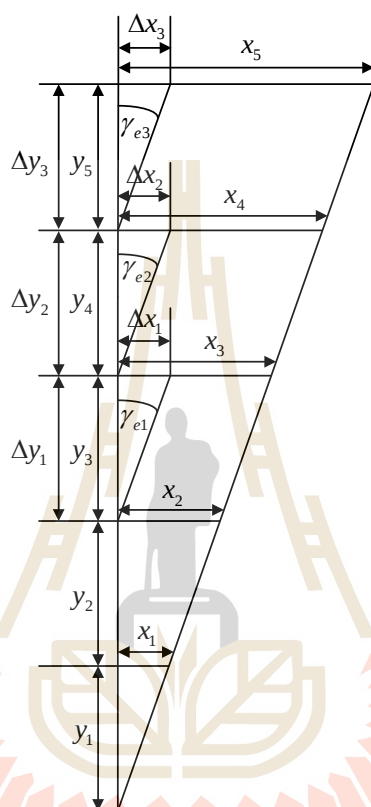
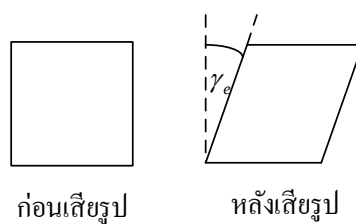
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสถิติเฟนสของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริง
ในสนามของกำแพงแบบต่างๆ

ชื่อเรียกกำแพง	(E_u/S_u) กรณีที่ 1 (ดินเหนียวอ่อน)	(E_u/S_u) กรณีที่ 2 (ดินเหนียวแข็ง)
SCC-SOLID-BRACED	750	1250
SCC-BUTTRESS	2000	1250
PW-SCC-FRONT	750	1250
PW-SCC-BACK	250	1250

จากผลการวิเคราะห์หาค่าสถิติเฟนสที่เหมาะสมเนื่องจากการขาดของกำแพงแต่ละแบบใน 2 กรณี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ค่า E_u/S_u ของดินต่ำ จะทำให้กำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงขึ้น และเมื่อใช้ค่า E_u/S_u ของดินที่สูงขึ้นพบว่ากำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ต่ำลง

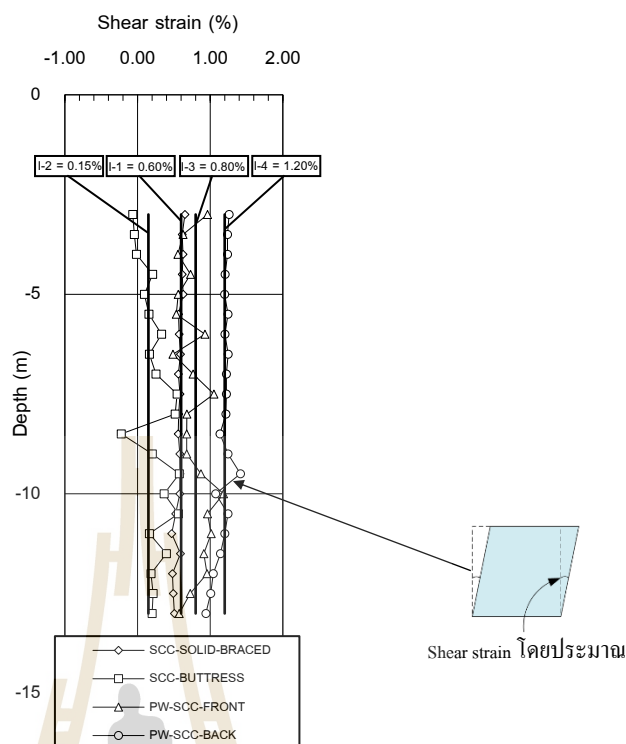
ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการประมาณค่าความเครียดเฉือนในดิน โดยคำนวณจากการเคลื่อนตัวของวัดได้ด้วย Inclinator ในการประมาณ โดยสมมุติให้ดินเสียรูปตาม Inclinator และคำนวณได้จากมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากแนวดิ่งในแต่ละความลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.31 จากสมการ (4.1)

$$\text{Estimated shear strain } \gamma_e = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (4.1)$$



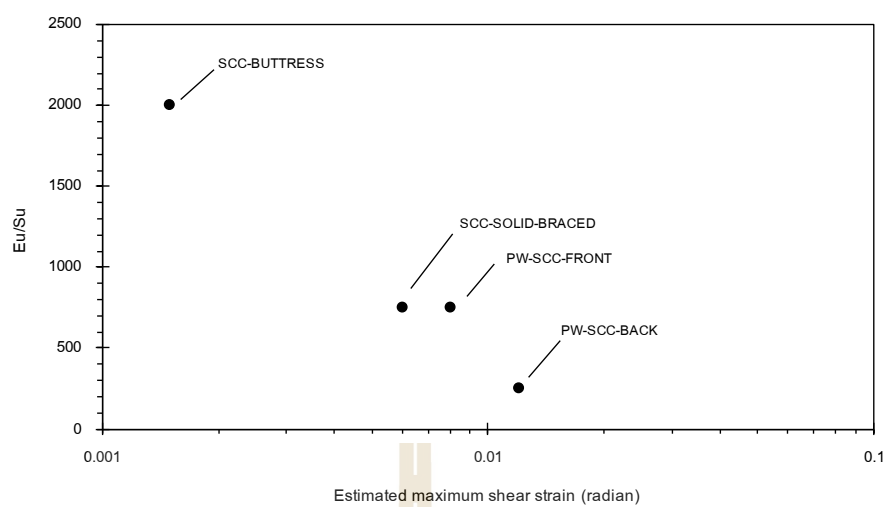
รูปที่ 4.31 การเสียรูปของดินที่วัดจาก Inclinator

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเนื่องกับความลึกของกำแพงแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 4.32 ความเครียดนี้เป็นเพียงค่าประมาณเพื่อแสดงแนวโน้มของความเครียด เป็นความเครียดของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจริงในสนามของกำแพงทั้ง 4 แบบ ซึ่งมีความลึกอยู่ที่ระดับ -3.00 เมตร ถึง -13.00 เมตร โดยกำแพง SCC-SOLID-BRACED, SCC-BUTTRESS, PW-SCC-FRONT และ PW-SCC-BACK มีค่า Shear strain เท่ากับ 0.60%, 0.15%, 0.80% และ 1.20% ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า กำแพงที่มีเปอร์เซ็นต์ Shear strain มากจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างมาก (PW-SCC-BACK) และกำแพงที่มีเปอร์เซ็นต์ Shear strain น้อยจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างน้อย (SCC-BUTTRESS)

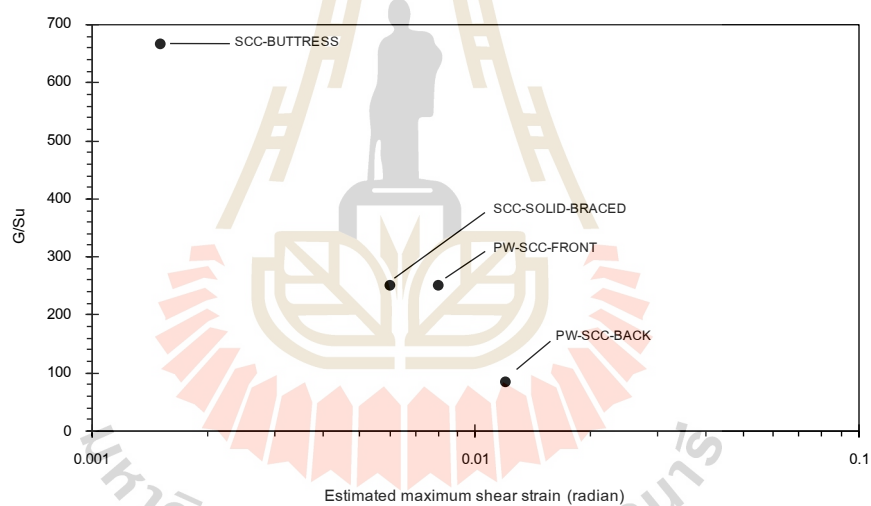


รูปที่ 4.32 ความเครียดเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจริงในสนามของกำแพงทั้ง 4 แบบ

เมื่อวิเคราะห์รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับสตีเฟเนสที่เหมาะสมในเทอมของ E_u/S_u เปรียบเทียบกับตารางที่ 4.3 แสดงค่าสตีเฟเนสของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงในสนามของกำแพงแบบต่างๆ พบว่าเมื่อค่า Shear strain ที่มีค่าต่ำ จะทำให้ค่า E_u/S_u ของดินสูง และค่า Shear strain ที่มีค่าสูง จะทำให้ค่าสตีเฟเนส E_u/S_u ของดินต่ำ ซึ่งจะเห็นได้จากกำแพง SCC-BUTTRESS มีค่า Shear strain เท่ากับ 0.16% ซึ่งค่าสตีเฟเนส E_u/S_u ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงในสนามเท่ากับ 2,000 และกำแพง PW-SCC-BACK มีค่า Shear strain เท่ากับ 1.20% ซึ่งค่าสตีเฟเนส E_u/S_u ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงในสนามเท่ากับ 250 โดยค่า Shear strain จากการวัดจริงในสนามจะใช้ประมาณค่าสตีเฟเนส E_u/S_u ของการวิเคราะห์กลับก่อนการก่อสร้างในพื้นที่ใกล้เคียงได้ในอนาคต



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับสลิปเฟนส์ที่เหมาะสมในทอมของ E_u/S_u



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับ G/S_u

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัย การหาสถิติของดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงเสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึก โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการวัดการเคลื่อนตัวในสนามของกำแพงทั้ง 4 รูปแบบที่ก่อสร้างในชั้นดินเดียวกันแสดงให้เห็นว่ากำแพง SCCW ที่ก่อสร้างให้มีความหนาเพียงพอได้แก่ SCC-BUTRESS มีการเคลื่อนตัวด้านข้างอยู่ที่ 32.13 มิลลิเมตร สำหรับการขุดลึก 7.95 เมตร โดยไม่ใช้ค้ำยัน ซึ่งเป็นชนิดกำแพงที่เกิดการเคลื่อนตัวต่ำที่สุด ถัดมาเป็น SCCW ที่มีความหนาน้อยกว่าและต้องใช้ค้ำยันด้านข้าง 1 จุดโดยมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 89.24 มิลลิเมตร ที่ความลึกของการขุด 8.8 เมตร ส่วนในกรณีของ PW เสริมด้วย SCC และใช้ค้ำยันด้านข้างนั้นมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 117.09 มิลลิเมตร ในกรณีที่เสริม SCC ไว้ด้านในบ่อขุด และมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 148.69 มิลลิเมตร ในกรณีที่เสริม SCC ไว้หลังกำแพงด้านนอกบ่อขุด

2. ค่าสถิติ E_u/S_u ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของดินก่อนการก่อสร้างสำหรับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ SCCW-SOLID-BRACED คือ 750 และ SCC-BUTRESS คือ 2000 ส่วน E_u/S_u ที่เหมาะสมสำหรับ PW เสริมด้วย SCC ไว้ด้านในบ่อขุดมีค่าเป็น 750 และเมื่อเสริมไว้หลังกำแพงด้านนอกบ่อขุดมีค่าเป็น 250

3. ค่าสถิติ E_u/S_u ของชั้นดินเหนียวแข็งไม่ส่งอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณอย่างมีนัยสำคัญ ค่าที่แนะนำให้ใช้ในการวิเคราะห์ไม่ควรต่ำกว่า 1250

4. แรงอัดในค้ำยันชั่วคราวซึ่งได้จากการวัดจริงในสนามมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 16-23 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 25.7 ตันซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต

ในงานวิจัยถึงว่าจะเสนอค่า E_u/S_u เพื่อใช้ประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับความเป็นจริงแล้ว แต่การนำไปใช้งานออกแบบควรจะต้องมีการลดค่าสตีเฟนลง 50-80% เพื่อให้เหมาะสมกับการออกแบบและการก่อสร้างในทางปฏิบัติ



รายการอ้างอิง

- เกษม เพชรเกตุ. (2536). การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การประชุมทางวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจธ. ครั้งที่ 1, ประจำปี 2536 ณ ห้องประชุมจรัสฉายะพงศ์, วันที่ 8-9 มิถุนายน 2536, หน้า 99-115.
- ณรงค์ ทศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว และชาญชัย ททรัพย์มณีวงศ์. (2550). การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่เกิดจากการขุดดินเพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน. เอกสารการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, จ. พิษณุโลก.
- ณรงค์ ทศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง และชยานันท์ บุญยรัักษ์. (2550). การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีการปรับปรุงกำลังโดยวิธีผสมดินเชิงกลแบบลึก. เอกสารการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, จ. พิษณุโลก.
- ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์. (2548). พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มตลิ่งสำหรับงานโครงสร้างกันดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 335 น.
- นฤทธิ์ ประกอบบุญ. (2546). การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 142 น.
- พงษ์ศิลป์ เดชะคนูวงศ์. (2553). การศึกษาพฤติกรรมความเค้นความเครียดของกำแพงกันดินชนิดเรียงต่อเนื่องด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 156 น.
- พรพจน์ ดันเส็ง. (2555). การก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบ top-down โดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน. การสัมมนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก 2555
- วสท.(2520). ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- วีระนันท์ ปิตุปกรณ. (2526). การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยสแตนด์การ์ด เพเนเตอร์ชั้นทดสอบในชั้นดินกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 335 น.

- ศิริมาส วิเศษศรี. (2541). พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเข็มพืดสำหรับงานขุดค้ำยันในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 130 น.
- สมโชค ประเสริฐวินิจกุล. (2545). การจำลองคันทางบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อนโดยวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 131 น.
- ประจิต จิรปภา (2536). การใช้เข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่องเป็นกำแพงกันดินในงานขุดห้องใต้ดินลึกมากในกรุงเทพฯ. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536 . วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. 66 – 78
- ประจิต จิรปภา (2539). กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องกับงานก่อสร้างใต้ดินในกรุงเทพฯ. การประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง "งานก่อสร้างใต้ดิน 39". 36-54
- ประสพศิริ แสงภู (2546). การศึกษาพฤติกรรมการโค้งของแนวแรงในดินทรายระหว่างเสาเข็มเมื่อรับแรงส่งผ่านในแนวราบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช, จุฑา สุนิตย์สกุล และมนตรี เดชาสกุลสม (2551). การศึกษาพฤติกรรมถ่ายภาพทางธรณีเทคนิคในระหว่างการก่อสร้างของทางลอดในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทางลอดที่แยกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, รายงานฉบับที่ วพ. 257, สำนักวิจัยและพัฒนา งานทาง, กรมทางหลวง
- อรรวินท์ อุบลเลิศ (2550). การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกมากโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบ Contiguous Pile Wall ในชั้นดินกรุงเทพฯ. รายงานปัญหาเฉพาะทางวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Azizi, F. 1999. **Applied analysis in Geotechnics**. University of Plymouth, UK.

Broms, B.B., (1986). **Stabilization of Soft Clay with Lime and Cement in Southeast Asia**. Nanyang Technical Institute, Applied Research Project RP 10/83, pp. 25 - 52.

Chida, S., (1982). **Dry Jet Mixing Method - State of the Art on Improvement Methods for Soft Ground**. Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.85, No. 2, pp. 69 - 76.

CIRIA_C517 (1999). **Temporary propping of deep excavations- guidance on design**, CIRIA

DJM Research Group, (1984). **The Manual for the Dry Jet Mixing Method**, Japan, pp. 20 - 31.

- Duncan, J.M. and Buchighani, A.L., (1976). **An Engineering Manual for Settlement Studie.** Geotech. Eng. Report, Departure of Civil Engineering, University of California at Berkeley, pp. 254 - 268.
- Felt, E.J., (1955). **Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixture.** Highway Research Broad, Bull. 108, pp. 138 - 162.
- Gaba A. R., Simpson B., Powrie W., Beadman D. R., (2003) CIRIA C580, **Embedded retaining walls-guidance for economic design**, CIRIA publisher.
- Herzog, A. and Mitchell, J.K., (1963). **Reactions Accompanying the Stabilization of Clay with Cement.** United State Highway Research Board Bulletin, Vol. 36, pp. 146 - 171.
- Ladd, C.C., Foote, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G., **Stress deformation and strength characteristic.** In Proc. 9th Int. Conf. On Soil Mechanic and Foundation Engineering. Pp. 421-494, Vol.2, Tokyo. 1997.
- Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1993). **Prediction of clay behaviour around tunnels using plastic solutions.** Pages 449-463 of Predictive Soil Mechanics, Proc. Wroth Memorial Symposium. Thomas Telford, London.
- Mana, A.I. and Clough, G.W., (1981). **Prediction of movement for braced cuts in clay.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 107, pp. 759 - 777.
- Metcalf, J.C., (1977). **Principal and Application of Cement and Lime Stabilization.** Australian Road Research Broad, No. 49, p. 20.
- Miki, G., (1985). **Soil Improvement by Jet Grouting.** Third International Geotechnical Seminar Soil Improvement Method, November, Singapore, pp. 45 - 52.
- NAVFAC DM-7.2. (1982). **Foundation and Earth Structures.** Department of the Navy Naval Facilities Engineering Command.
- St. John H. D., Potts D. M., Jardine R. J., Higfins K. G. (1992). **Prediction and Performance of Ground Response due to Construction of a Deep Basement at 60 Victoria Embankment.** Proc. Wroth mem Symp, Predictive soil mechanics, Oxford.
- Teparaksa, W., Thasananipan, N. and M.A. Anwar. (1999). **Based Grouting of Wet Process Bored Pile in Bangkok Subsoil, Pile in Bangkok subsoil.** 11th Asian Conference in Soil mech. & Geo. Eng., Korea.

- Tepasaksa W., Thasananipan N. and Tangseng P., (1999). **Analysis of lateral wall movement for deep excavation in Bangkok subsoils**. proceeding of the civil and Environmental Engineering Conference, Bangkok, Thailand, pp. II-67 – II-76.
- Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomsom, M.R., (1979). **Soil Stabilization in Pavement Structures A User's Manual Mixture Design Consideration**. US Government Printing Offices, Washington D.C., Vol. 2, p. 120.
- Terzaghi, K., **Theoretical Soil Mechanics**, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1943
- Thasananipan N., Muang A. W. and Tanseng P., and Wei S. H., (1998). **Performance of a Braced Excavation in Bangkok clay, Diaphragm wall subjected to unbalance loading conditions**. Proceeding of the 13th Southeast Asian Geotechnical conference, Taipei Taiwan ROC., 1998, pp. 655 - 660.
- Tonyagate, W. (1978). **Geotechnical properties of Bangkok Subsoils for Subsidence Analysis**. Master' Thesis, AIT. 97
- Topolnicki, M. (2004). **In situ soil mixing (SM)**. Ground Improvement 2nd edition, pp. 331- 423.
- Worth, C.P. (1985). Soil-Mechanics-Property Characterization and analysis Procedures,1-55. **Proceedings of The Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. AA.Balkema, Rotterdam , Netherlands
- Jamshed, A. and Danish, (1975). In Situ and Laboratory Permeability of Bangkok Clay at Nong Ngoo Hao and Rangsit. M.Eng Thesis .No. 765, AIT. Thailand.
- Yoshida, S. (1996) **Shear strength of improved soils at lap-joint-face**. Grouting and Deep Mixing, Yonekura, Terashi&shibazaki (eds) 1996 Balkema, Rotterdam.ISBN 90 5410 805 3

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ธนกร สุขุมามาศ และ พรพจน์ ดันเส็ง. (2561). การหาสถิติฟเนสของดินเหนียวด้วยวิธี
ไฟไนท์อีลีเมนต์เพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพง
เสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึก วารสารวิชาการครุศาสตร์
อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน 2563,
จำนวน 16 หน้า



การหาสตีเฟนของดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพง เสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงเสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึก

ธนกร สุขุมมาศ¹ และ พรพจน์ ดันแสง^{2*}

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนองานวิจัยที่เป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังและหาสตีเฟนของดินเหนียวเพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงสำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงกันดิน 4 รูปแบบที่ก่อสร้างในชั้นดินเดียวกัน ได้แก่กำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (PW), กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW), และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ในงานวิจัยได้วัดการเคลื่อนตัวของกำแพงและแรงอัดในค้ำยัน และนำมาใช้วิเคราะห์กลับโดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติและแบบสามมิติเพื่อหาสตีเฟนสฟารามีเตอร์ในเทอมของ E_p / S_p ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 750-1250 สำหรับกำแพง PW และ 750-2000 สำหรับกำแพง SCCW ในงานวิจัยยังได้พบว่สตีเฟนแปรผกผันกับความเครียดเฉือนที่ประมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ได้จากการวัด และแรงอัดในค้ำยันที่ได้จากการวิเคราะห์สอดคล้องกับแรงอัดที่วัดได้จริงในสนาม

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, กำแพงกันดิน, การขุดดินลึก, ดินเหนียวอ่อน, ไฟไนท์อีลิเมนต์

¹ นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี-แผน ก(2) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้บริหารประสานงาน โทรศัพท์ +664 422 4495 อีเมล: pompot@sut.ac.th

Determination of clay stiffness with finite element method for ground movement prediction of soil-cement column wall and pile wall reinforced with soil-cement column used in deep excavation

Thanakorn Sukumamas¹ and Pornpot Tanseng^{2*}

Abstract

This paper presents research work on studying behavior of earth retaining system for deep excavation and determines appropriate stiffness of clay for prediction of wall movement using finite element method. Four types of retaining wall constructed in the same subsoil profiles are used in the studies i.e. contiguous pile wall (PW), soil-cement column wall (SCCW), and pile wall reinforced with soil-cement column (SCC). The behavior of wall is observed by measurement of wall movements and strut load at various stages of excavation and used for back-analysis with 2D and 3D finite element. The stiffness of clay in term of E_u / S_u is 750 – 1250 for PW reinforced with SCC and 750-2000 for SCCW. The stiffnesses of clay is inversely proportional to the approximated shear strain from measured wall movement increase. The calculated strut forces agree well with the forces measured from the field.

Keywords: Soil-cement column, retaining wall, deep excavation, soft clay, finite element method

¹ Master Degree Student, Master of Engineering Program in Civil, Transportation and Geo-resources Engineering, School of Civil Engineering, Faculty Institute of Engineering Suranaree University of Technology

² Assistant Professor, School of Civil Engineering, Faculty Institute of Engineering Suranaree University of Technology

* Corresponding Author, Tel. +664 422 4495 email: pornpot@sut.ac.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้พื้นที่ในเขตพื้นที่เมืองของกรุงเทพมหานครในอัตราที่สูงมาก พื้นที่พัฒนาส่วนใหญ่มีอยู่จำกัดและมีราคาสูงจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นโครงการพัฒนาส่วนใหญ่จึงพัฒนาไปในทางที่จะเพิ่มเนื้อที่ใช้สอยโดยการก่อสร้างขึ้นใต้ดิน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นที่จอดรถใต้ดินสำหรับการก่อสร้างขึ้นใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก จำเป็นต้องใช้ระบบป้องกันดินพัง ระบบป้องกันดินพังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและวิศวกรส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยได้แก่ระบบกำแพงกันดินแบบ sheet pile และระบบค้ำยันชั่วคราว, ระบบกำแพงกันดิน pile wall, และระบบกำแพงกันดิน diaphragm wall ซึ่งวิศวกรสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้เป็นปกติในปัจจุบัน แต่ด้วยความต้องการในการแข่งขันด้านต้นทุนและระยะเวลาในการก่อสร้างจึงได้มีการนำระบบป้องกันดินพังแบบอื่นมาใช้โดยเฉพาะระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์คำนวณยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของวิศวกรผู้ออกแบบและวิศวกรก่อสร้างเท่าใดนัก อีกทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดิน SCCW ที่ใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดดินลึกกว่า 6 เมตรยังมีไม่มากนัก โดย [1] และ [2] ได้กล่าวถึงการขุดดินลึกโดยใช้ SCCW เป็นระบบป้องกันดินพังสำหรับงานขุดดินลึก 10.25 เมตรในชั้นดินเหนียวอ่อน การเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากการระยะฝั่งของ SCCW มีเพียง 1 เมตร จึงเกิดการวิบัติและทำให้เสาเข็มเสียหายจนต้องออกแบบฐานรากเสาเข็มใหม่ [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของ SCCW ที่ใช้สำหรับก่อสร้างบ่อเก็บน้ำและเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของวัดได้กับการจำลองด้วยโปรแกรม PLAXIS พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวได้แก่ความลึกของ SCCW ที่ฝังลงในชั้นดินเหนียวแข็งและการปรับปรุงดินด้านใน

ของบ่อ [4] ได้รายงานถึงการขุดดินลึกประมาณ 8.5 เมตร เพื่อก่อสร้างคลองระบายน้ำ การขุดใช้ SCC เป็นกำแพงกันดินถาวร โดยใช้วิธีการเรียงแบบไม่มีการเหลื่อมกันระหว่าง SCC และมีการใช้ SCC แบบปูพรมด้านในของบ่อขุด เมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงส่วนที่เป็นคานรัดหัวกำแพงมีค่าประมาณ 240 มิลลิเมตร [5] กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของ SCCW ที่ใช้ร่วมกับ SCCW ที่ก่อสร้างเป็นค้ำยันส่วนหน้าในระดับลึก และได้ใช้ SCCW ที่เรียงเหลื่อมกันระหว่าง SCC เป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดวัดโดย inclinometer เป็น 20 มิลลิเมตร [6] ได้กล่าวถึงระบบป้องกันดินพังแบบ soil-cement column ที่ใช้ร่วมกับระบบค้ำยันแบบถาวรและก่อสร้างโดยใช้เทคนิคการก่อสร้างแบบบนลงล่าง top-down ในเชิงพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังพบว่าสามารถลดการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสามมิติร่วมกับแบบจำลองดินชนิดอีลาสติคเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวในสนามเป็นอย่างมาก ในการเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังที่ผ่านมา เป็นการเปรียบเทียบระบบกำแพงกันดินต่างรูปแบบในชั้นดินที่แตกต่างกัน จึงมีความแปรปรวนเนื่องจาก คุณสมบัติของชั้นดิน, กรรมวิธีการก่อสร้าง และปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวกับการก่อสร้างอันทำให้การเปรียบเทียบพฤติกรรมมีความคลาดเคลื่อนได้มาก ดังนั้นในการวิจัยพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพัง โดยเฉพาะกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีรูปแบบแตกต่างกันจึงควรกระทำในพื้นที่เดียวกันเพื่อขจัดตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังรูปแบบแตกต่างกัน 4 รูปแบบที่ได้ก่อสร้างในบริเวณเดียวกัน โดยกำแพงแต่ละรูปแบบเป็นระบบกำแพงกันดินที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นองค์ประกอบ

โดยกำแพงสองรูปแบบแรกใช้ SCCW เป็นกำแพงกันดินหลัก ที่ใช้ระบบค้ำยันและไม่ใช้ระบบค้ำยัน และอีกสองรูปแบบหลังใช้ SCCW ร่วมกับ PW โดยมีการเสริม SCCW ด้านนอกบ่อชุด และด้านในบ่อชุด ในการวิจัยได้เก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของระบบกำแพงกันดินแต่ละแบบ และได้เก็บข้อมูลแรงอัดในค้ำยัน ซึ่งได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อหาสถิติที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรม

2. วิธีการวิจัย

2.1 พื้นที่วิจัย

พื้นที่ในงานวิจัยเป็นโครงการก่อสร้างอาคารชุดพักอาศัย 8 ชั้นจำนวน 5 อาคาร ดังรูปที่ 1 โครงการตั้งอยู่บนถนนเจริญราษฎร์ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร โดยบริเวณกลางโครงการเป็นชั้นจอดรถใต้ดิน 3 ชั้น มีความกว้าง 49.30 เมตร ยาว 95.59 เมตร ระดับดินชุดลึกที่สุดของโครงการเป็น -11.40 เมตร ระดับดิน

พื้นที่ข้างเคียงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ -1.20 เมตร ทำให้ความลึกมากที่สุดเป็น -10.20 เมตร เมื่อเทียบกับระดับดินของพื้นที่ข้างเคียง



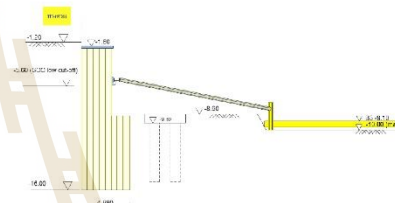
รูปที่ 1 ผังโครงการ

ระบบป้องกันดินพังในโครงการแบ่งเป็น 4 แบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้คำเรียกดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชื่อเรียกกำแพงและคำอธิบาย

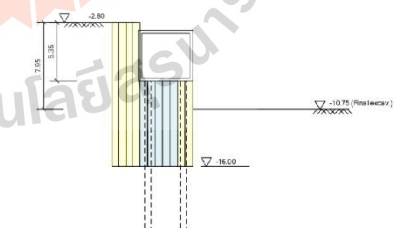
ชื่อเรียกกำแพง	คำอธิบาย
SCC-SOLID-BRACED	SCC ทึบ
SCC BUTTRESS	SCC พื้นบางส่วน
PW-SCC-FRONT	ใช้ PW ร่วมกับ SCC โดย SCC อยู่ด้านหน้า PW
PW-SCC-BACK	ใช้ PW ร่วมกับ SCC โดย SCC อยู่ด้านหลัง PW

กำแพง SCC-SOLID-BRACED เป็นกำแพง SCCW เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร ก่อสร้างเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร จำนวน 8 แถว โดยด้านนี้มีความระดับดินชุดเป็น -10 เมตร ในด้านนี้ใช้การก่อสร้างโดยก่อสร้างพื้นชั้นใต้ดินส่วนกลางอาคารก่อน จากนั้นจึงติดตั้งค้ำยันระหว่าง SCCW กับอาคารส่วนที่สร้างเสร็จแล้วดังรูปที่ 2



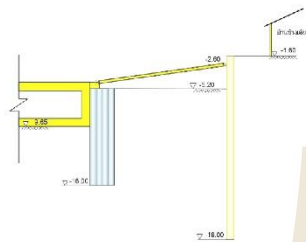
รูปที่ 2 กำแพง SCC-SOLID-BRACED

กำแพง SCC-BUTTRESS เป็นกำแพง SCC ที่ไม่มีการใช้ค้ำยันชั่วคราว กำแพงส่วนทึบเป็น SCC ขนาด 700 มิลลิเมตร จำนวน 4 แถว และมี SCC ที่มีลักษณะเป็นเซลล์ารด้านในของบ่อชุด ระดับของการขุดมากที่สุดเป็น -10.75 เมตร ดังรูปที่ 3



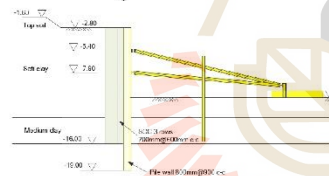
รูปที่ 3 กำแพง SCC-BUTTRESS

กำแพง PW-SCC-FRONT เป็นกำแพง PW เนื่องจากมีระยะห่างจากพื้นที่ข้างเคียงไม่เพียงพอสำหรับสร้างกำแพง SCCW ที่มีความหนาเพียงพอได้ ในด้านนี้มีระดับของการขุดลึกอยู่ที่ -9.65 เมตรซึ่งอยู่ห่างจากแนวกำแพง PW 15 เมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กำแพง PW-SCC-FRONT

กำแพง PW-SCC-BACK เป็นกำแพง PW เสริมด้วย SCCW เนื่องจากมีพื้นที่ไม่กว้างพอที่จะสร้างกำแพง SCCW เป็น Gravity Wall ได้ และใช้ค้ำยันชั่วคราว 2 ชั้น ที่ติดตั้งหลังจากการก่อสร้างฐานรากส่วนกลางอาคารเสร็จ ดังรูปที่ 5

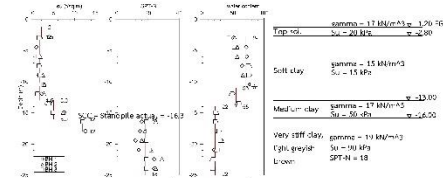


รูปที่ 5 กำแพง PW-SCC-BACK

2.2 ข้อมูลชั้นดิน

ในการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลเจาะสำรวจดินโครงการจำนวน 3 หลุม โดยรูปที่ 6 เป็นรูปตัดชั้นดินและคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล ชั้นดินประกอบไปด้วยชั้นดินส่วนบนหนา 2.8 เมตร วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10.2 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้น

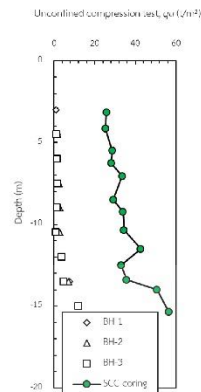
ดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 3 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากลึกมากกว่า 45 เมตร จากผิวดิน



รูปที่ 6 รูปตัดชั้นดิน

2.3 เสาเข็มดินซีเมนต์

เสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการนี้ก่อสร้างโดยใช้ระบบเชิงกลและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ โดยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็น 200 กิโลกรัมต่อดินเดิม 1 ลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็น 1 ต่อ 1 ส่วน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั้นสัมพันธ์กับอัตราการส่งน้ำปูนซึ่งมีค่าระหว่าง 0.9 ถึง 1.1 เมตรต่ออนาที ส่วนความเร็วรอบของการหมุนขึ้นกับลักษณะดินแต่ละชนิดซึ่งกำหนดจะหมุน 30-40 รอบต่อนาทีในชั้นดินเหนียวอ่อน เมื่อก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เรียบร้อยแล้วได้สุ่มเจาะแกนตัวอย่างขึ้นมาทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ได้ผลดังรูปที่ 7 ซึ่งกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์อยู่ที่ 25 ดันต่อตารางเมตรในชั้นดินเหนียวอ่อน และ 45 ดันต่อตารางเมตรในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง



รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์

2.4 การวัดการเคลื่อนตัวและแรงอัดในค้ำยัน

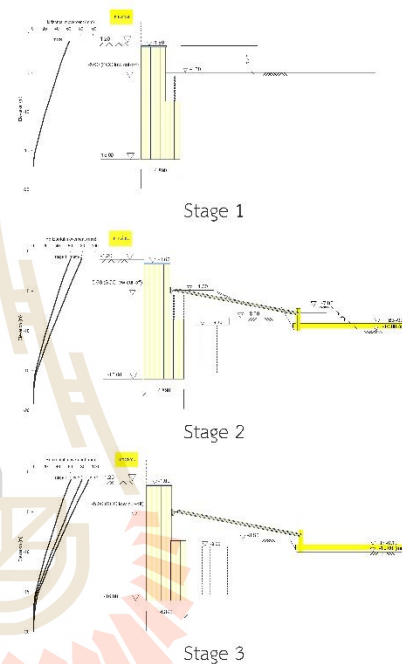
ในการวิจัยได้ติดตั้งท่อ inclinometer ไว้จำนวน 4 จุดในกำแพงแต่ละแบบ และทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงทุกขั้นตอนการก่อสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับดินชุดอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการวัดแรงอัดในค้ำยันใช้สเตรนเกจ (strain gauge) สองตัวที่ติดตั้งไว้กับค้ำยันชั่วคราว โดยสเตรนเกจตัวแรกได้ติดตั้งไว้ที่แกนสะเทินของค้ำยัน และสเตรนเกจอีกตัวหนึ่งติดตั้งในทิศทางที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดเนื่องจากแรงภายนอกเพื่อชดเชยความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ เนื่องจากค้ำยันอยู่กลางแจ้ง

3. ผลการวิจัย

3.1 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัด

รูปที่ 8 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-SOLID-BRACED ซึ่งมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเป็นแบบคานยื่น โดยมีการเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ส่วนบนของกำแพง การเคลื่อนตัวในขั้นตอนที่ 1 ที่มีระดับการขุดเป็น -4.50 เมตร เป็น

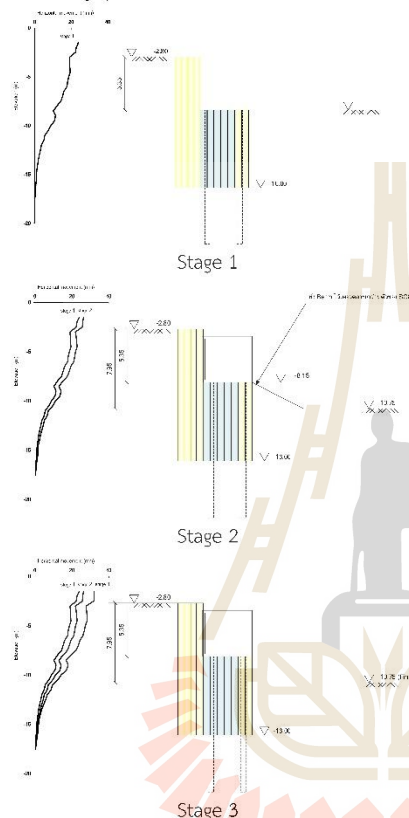
60.70 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อติดตั้งค้ำยันชั่วคราวและขุดดินบริเวณกลางโครงการจนถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 78.26 มิลลิเมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดเมื่อขุดดินส่วนที่ติดกับกำแพงออกเป็น 89.24 มิลลิเมตร ในส่วนนี้ได้ติดตั้งสเตรนเกจในค้ำยันเพื่อวัดแรงอัดโดยค่าแรงอัดมีค่าอยู่ระหว่าง 16 ถึง 23 ตัน



รูปที่ 8 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

รูปที่ 9 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-BUTTRESS ในขั้นตอนการขุดถึงระดับ -8.15 เมตร มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเป็น 23.91 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อก่อสร้างถึงแก่น้ำใต้ดินคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วขุดดินบริเวณส่วนกลางโครงการถึงระดับ -10.75 เมตร และยังคงทั้งลาดดินไว้

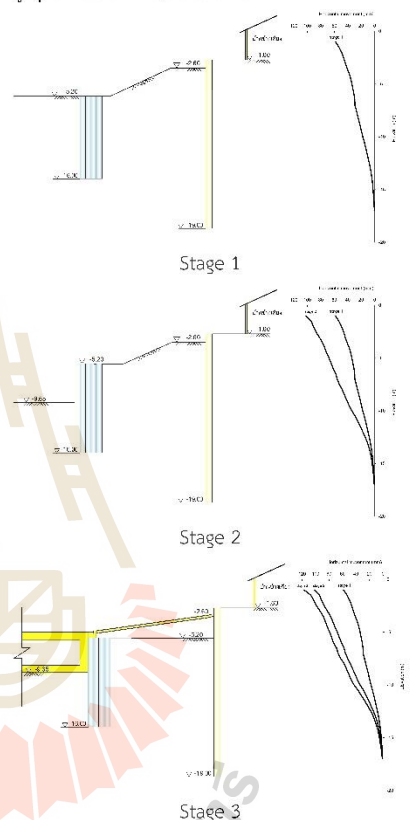
บางส่วนการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 26.31 มิลลิเมตร และเมื่อขุดลาดดินบริเวณหน้ากำแพงจนหมดการเคลื่อนตัวสูงสุดเป็น 32.13 มิลลิเมตร



รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง SCC-BUTTRESS

รูปที่ 10 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-FRONT เมื่อขุดดินถึงระดับ -8.2 เมตร โดยคงลาดดินหน้ากำแพงไว้ การเคลื่อนตัวสูงสุดของ PW เป็น 58.36 มิลลิเมตร และเมื่อขุดดินบริเวณกลางโครงการออกจนถึงระดับ

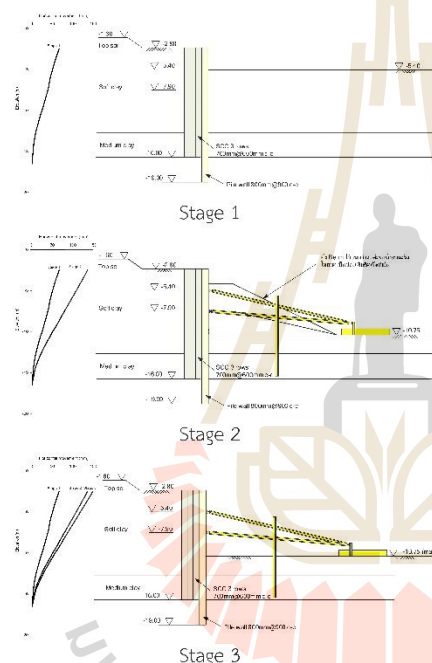
-9.65 เมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดอยู่ที่ 101.88 มิลลิเมตร และหลังจากก่อสร้างขึ้นได้ดินส่วนกลางแล้วเสร็จได้ติดตั้งค้ำยันชั่วคราวระหว่าง PW กับโครงสร้างส่วนกลาง แล้วขุดดินหน้า PW ออก การเคลื่อนตัวสูงสุดมีค่าเป็น 117.09 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-FRONT

รูปที่ 11 เป็นการเคลื่อนตัวในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-BACK ซึ่งกำแพงชนิดนี้เป็นกำแพง PW เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้าน

หลังกำแพง ซึ่งเมื่อขุดดินถึงระดับ -5.40 เมตร การเคลื่อนตัวมีลักษณะเป็นแบบคานยื่นและมีค่าสูงสุดเป็น 66.66 มิลลิเมตร หลังจากนั้นขุดดินและก่อสร้างชั้นใต้ดินบริเวณกลางโครงการโดยเว้นลาดดินหน้า PW ไว้ แล้วติดตั้งค้ำยันระหว่าง PW กับชั้นใต้ดินส่วนนี้แล้ว การเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 135.78 มิลลิเมตร และเมื่อขุดดินถึงระดับ -10.75 เมตร การเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 148.69 มิลลิเมตร

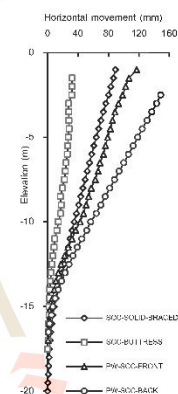


รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละขั้นตอน การก่อสร้างของกำแพง PW-SCC-BACK

ตารางที่ 2 แสดงค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่วัดจริงในสนามของกำแพงแต่ละแบบที่ทำการวัดด้วย Inclinometer

ชนิดของกำแพง	ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด (มิลลิเมตร)
SCC-SOI ID-BRACED	89.24
SCC-BUTTRSS	32.13
PW-SCC-FRONT	117.09
PW-SCC-BACK	148.69

รูปที่ 12 เป็นการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงทั้ง 4 แบบ ซึ่งกำแพงที่มีการเคลื่อนตัวต่ำที่สุดคือ กำแพง SCC-BUTTRSS ส่วนกำแพงที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุดคือ กำแพง PW-SCC-BACK



รูปที่ 12 การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพง

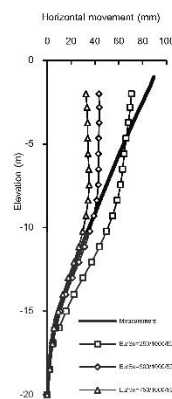
3.2 การวิเคราะห์ห้กลับโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

งานวิจัยได้ใช้โปรแกรม PLAXIS 2D และ PLAXIS 3D ในการจำลองการขุดดินแต่ละแบบ โดยในกรณีกำแพงแบบ SCC-SOLID-BRACED, PW-SCC-FRONT, และ PW-SCC-BACK ที่รูปตัดขวางกำแพงมีความสม่ำเสมอใช้การวิเคราะห์แบบสองมิติ ส่วน กรณีกำแพงแบบ SCC-BUTTRSS เป็นกำแพงที่มีรูปตัดขวางไม่คงที่ใช้การวิเคราะห์แบบสามมิติ โดยใช้แบบจำลองดิน

แบบอีลาสติกเชิงเส้น-พลาสติกอย่างสมบูรณ์ อาศัยเกณฑ์การวิบัติของ มอร์-คูลอมบ์ (linear elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb failure criteria) และพฤติกรรมของดินเป็นแบบหน่วยแรงรวมไม่ระบายน้ำ (undrained total stress) เหตุที่ใช้แบบจำลองดินชนิดนี้เนื่องจากงานวิจัยต้องการวิเคราะห์หากลัสมันเพื่อหาสตีเฟนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินโครงการ ซึ่งปกติแล้วจะมีผลการทดสอบเฉพาะกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน สำหรับแบบจำลองที่ซับซ้อนกว่านั้นส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองที่ต้องวิเคราะห์โดยอาศัยหน่วยแรงประสิทธิผลซึ่งจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลที่ส่วนใหญ่แล้วในงานชุดเพื่อก่อสร้างขั้นได้ดินทั่วไปจะไม่มีการทดสอบหาพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิผลนี้ การวิเคราะห์หากลัสมันเพื่อหาค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเนื่องจากการขาดของค่าพารามิเตอร์แต่ละแบบ จะแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ได้แก่กรณีที่ 1 วิเคราะห์หากลัสมันโดยแปรผันค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อน และกรณีที่ 2 วิเคราะห์หากลัสมันโดยแปรผันค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินเหนียวแข็ง

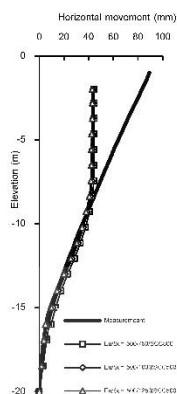
3.2.1 การวิเคราะห์หากลัสมันโดยแปรผันค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

รูปที่ 13 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์หากลัสมันโดยการแปรผันค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 1000$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 750$



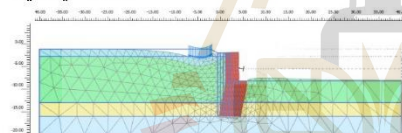
รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์หากลัสมันโดยการแปรผันค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อนของกำแพง SCC-SOLID-BRACED

รูปที่ 14 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์หากลัสมันโดยการแปรผันค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะแปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็งเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟนพารามิเตอร์ของดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 500$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดย
การแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็งของ
กำแพง SCC-SOLID-BRACED

ค่าสตีเฟนที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริง
ในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของ
กำแพง SCC-SOLID-BRACED คือ $E_u / S_u = 750$ และ
 $E_u / S_u = 1250$

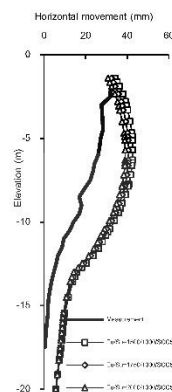


รูปที่ 15 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง
SCC-SOLID-BRACED

3.2.2 การวิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่า สตีเฟนของดินของกำแพง SCC-BUTTRESS

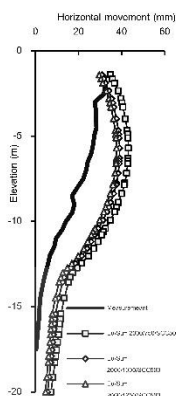
รูปที่ 16 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับ
โดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะ
แปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 1500, 1750
และ 2000 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียว
อ่อนเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่า
ค่าใดให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟน

ของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่
 $E_u / S_u = 1000$ และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่
ใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 2000$



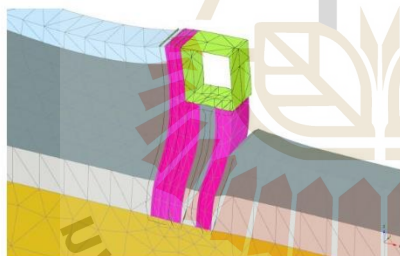
รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดย
แปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวอ่อนของ
กำแพง SCC-BUTTRESS

รูปที่ 17 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับ
โดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะ
แปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ
1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็ง
เปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใด
ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟน ของดิน
เหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 2000$
และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่
วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดย
การแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็งของ
กำแพง SCC-BUTTRESS

ค่าสตีเฟนที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริง
ในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของ
กำแพง SCC-BUTTRESS คือ $E_u / S_u = 2000$ และ
 $E_u / S_u = 1250$

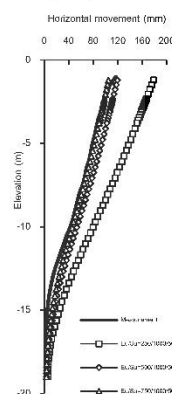


รูปที่ 18 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง
SCC-BUTTRESS

3.2.3 การวิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่า สตีเฟนของดินของกำแพง PW-SCC-FRONT

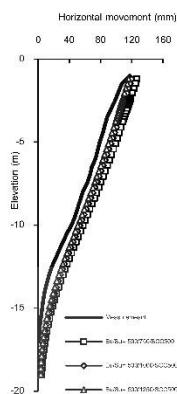
รูปที่ 19 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับ
โดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะ

แปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ
750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อน
เปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใด
ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟนของ
ดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 1000$
และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่
วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 750$



รูปที่ 19 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดย
การแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวอ่อน
ของกำแพง PW-SCC-FRONT

รูปที่ 20 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับ
โดยการแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะ
แปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ
1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็ง
เปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใด
ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีเฟนของ
ดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 500$
และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่
วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 20 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดย
การแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็งของ
กำแพง PW-SCC-FRONT

ค่าสตีฟเนสที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริง
ในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของ
กำแพง PW-SCC-FRONT คือ $E_u / S_u = 750$ และ
 $E_u / S_u = 1250$

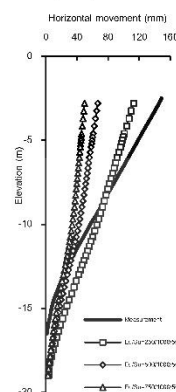


รูปที่ 21 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง
PW-SCC-FRONT

3.2.4 การวิเคราะห์กลับโดยการแปรผันค่า สตีฟเนสของดินของกำแพง PW-SCC-BACK

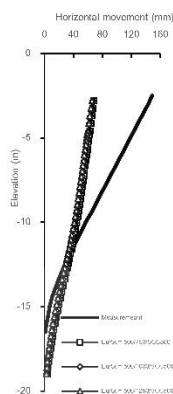
รูปที่ 22 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับ
โดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะ
แปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 250, 500 และ
750 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อน
เปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใด
ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีฟเนสของดิน

เหนียวแข็งและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 1000$
และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่
วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 250$



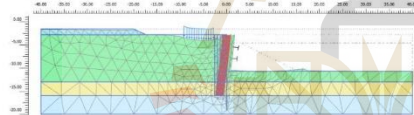
รูปที่ 22 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 1 วิเคราะห์กลับโดย
การแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวอ่อน
ของกำแพงแบบที่ 4 PW-SCC-BACK

รูปที่ 23 เป็นการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับ
โดยการแปรผันค่าสตีฟเนสของดินเหนียวแข็ง ซึ่งจะ
แปรผันค่า E_u / S_u ทั้งหมด 3 ค่า คือ 750, 1000 และ
1250 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินเหนียวแข็ง
เปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวที่วัดจริงในสนามว่าค่าใด
ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยกำหนดค่าสตีฟเนสของ
ดินเหนียวอ่อนและดินซีเมนต์ให้คงที่ที่ $E_u / S_u = 500$
และ $E_u / S_u = 500$ ตามลำดับ ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่
วัดจริงในสนามคือ $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 23 ผลการวิเคราะห์กรณีที่ 2 วิเคราะห์กลับโดย
การแปรผันค่าสตีเฟนของดินเหนียวแข็งของ
กำแพง PW-SCC-BACK

ค่าสตีเฟนที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริง
ในสนามของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งของ
กำแพง PW-SCC-BACK คือ $E_u / S_u = 250$ และ
 $E_u / S_u = 1250$



รูปที่ 24 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพง
PW-SCC-BACK

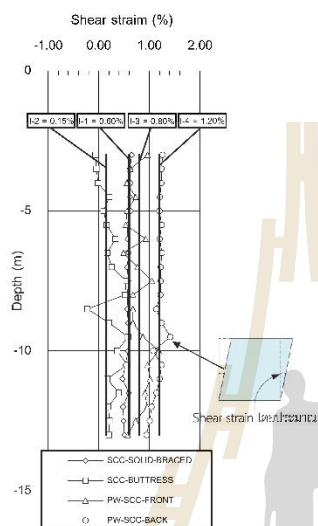
ตารางที่ 3 แสดงค่าสตีเฟนของชั้นดินเหนียวอ่อนและ
ชั้นดินเหนียวแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริง
ในสนามของกำแพงแบบต่างๆ

ชื่อเรียกกำแพง	(E_u/S_u) กรณีที่ 1 (ดินเหนียวอ่อน)	(E_u/S_u) กรณีที่ 2 (ดินเหนียวแข็ง)
SCC-SOI ID-BRACED	750	1250
SCC-BUTTRESS	2000	1250
PW-SCC+RIB	750	1250
PW SCC BACK	250	1250

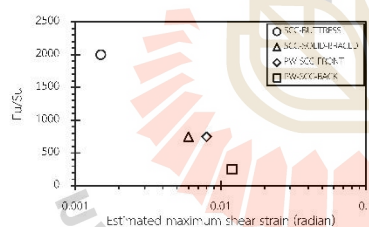
จากผลการวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่าสตีเฟน
ที่เหมาะสมเนื่องจากการขาดของกำแพงแต่ละแบบใน
2 กรณี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ค่า E_u / S_u ของ
ดินต่ำ จะทำให้กำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวทาง
ด้านข้างสูงขึ้น และเมื่อใช้ค่า E_u / S_u ของดินที่สูงขึ้น
พบว่ากำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ต่ำลง

จากรูปที่ 25 เป็นความเครียดเฉือนของชั้น
ดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจริงในสนามของกำแพงทั้ง
4 แบบซึ่งมีความลึกอยู่ที่ระดับ -3.00 เมตร ถึง
-13.00 เมตร โดยกำแพงแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่า
Shear strain เท่ากับ 0.60%, 0.15%, 0.80% และ
1.20% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 12 จะ
พบว่าผลสอดคล้องกัน คือ กำแพงที่มีอัตราร้อยละของ
Shear strain มากจะมีการเคลื่อนตัวด้านข้างมาก และ
กำแพงที่มีอัตราร้อยละของ Shear strain น้อยจะมีการ
เคลื่อนตัวด้านข้างน้อย และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ
ตารางที่ 3 พบว่าเมื่อค่า Shear strain ที่มีค่าน้อย
จะทำให้ค่า E_u / S_u ของดินสูง และค่า Shear strain ที่
มีค่าสูง จะทำให้ค่าสตีเฟน E_u / S_u ของดินต่ำ ซึ่งจะ
เห็นได้จากกำแพง SCC-BUTTRESS มีค่า Shear strain
เท่ากับ 0.16% ซึ่งค่าสตีเฟน E_u / S_u ที่ใกล้เคียงกับ
ค่าที่วัดจริงในสนามเท่ากับ 2,000 และกำแพง
PW-SCC-BACK มีค่า Shear strain เท่ากับ 1.20% ซึ่ง
ค่าสตีเฟน E_u / S_u ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงใน

สนามเท่ากับ 250 ซึ่งแปรผกผันกัน โดยค่า Shear strain จากการวัดจริงในสนามจะใช้ประมาณค่า สติฟเนส E_u / S_u ของการวิเคราะห์หกลับก่อนการก่อสร้างในพื้นที่ใกล้เคียงได้ในอนาคต



รูปที่ 25 ความเครียดเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นจริงในสนามของกำแพงทั้ง 4 แบบ



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับ สติฟเนสที่เหมาะสมในเทอมของ E_u / S_u

3.3 แรงอัดในค้ำยัน

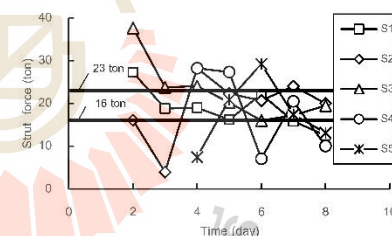
รูปที่ 27 ภาพแสดงตำแหน่ง Wale, Strut และ Strain gauge โดยแรงอัดในค้ำยันเกิดจากแรงดันดินด้านหลังกำแพงส่งถ่ายผ่านรัดครอบ (Wale) มายัง

ค้ำยัน (Strut) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หกลับเพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นในค้ำยันโดย PLAXIS 2D กำหนดค่า E_u / S_u ของดินเหนียวอ่อน, ดินเหนียวแข็ง, และดินซีเมนต์เท่ากับ 500, 1,000 และ 500 ตามลำดับ แรงอัดที่ได้เท่ากับ 25.7 ตัน



รูปที่ 27 ภาพแสดงตำแหน่ง Wale, Strut และ Strain gauge

รูปที่ 28 เป็นแรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยันได้ทำการวัดด้วย Strain gauge ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จริงในสนาม โดยทำการเก็บค่าทุกครั้งที่มีการขุดลาดดินออกอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 28 แรงอัดที่เกิดขึ้นในค้ำยัน

จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์หกลับเพื่อหาแรงอัดในค้ำยัน (Strut) มีค่าเท่ากับ 25.7 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับแรงอัดที่ได้จากการวัดจริงในสนาม ซึ่งในช่วงแรก (ทำการขุดลาดดินออกยังไม่หมด) แรงอัดในค้ำยันจะมีค่าสูงเนื่องจากรัดครอบ (Wale) มีการโค้งงอ จึงทำให้

ค้ำยันรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงหลัง (ทำการขุดลาดดินออกหมดแล้ว) แรงอัดในค้ำยันจะมีค่าลดลง เนื่องจากรัดครอบ (Wale) เล็กมีการโก่งตัวทำให้แรงอัดมีค่าลดลง ค่าโดยเฉลี่ยของแรงอัดในค้ำยันเท่ากับ 16-23 ตัน ซึ่งค่าที่วัดได้จริงในสนามและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์กลับมากลใกล้เคียงกัน

4. สรุป

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

4.1 ผลการวัดการเคลื่อนตัวในสนามของกำแพงทั้ง 4 รูปแบบที่ก่อสร้างในชั้นดินเดียวกันแสดงให้เห็นว่ากำแพง SCCW ที่ก่อสร้างให้มีความหนาเพียงพอได้แก่ SCC-BUTRESS มีการเคลื่อนตัวด้านข้างอยู่ที่ 32.13 มิลลิเมตร สำหรับการขุดลึก 7.95 เมตรโดยไม่ใช้ค้ำยัน ซึ่งเป็นชนิดกำแพงที่เกิดการเคลื่อนตัวต่ำที่สุด ถัดมาเป็น SCCW ที่มีความหนาน้อยกว่าและต้องใช้ค้ำยันด้านข้าง 1 จุดโดยมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 89.24 มิลลิเมตร ที่ความลึกของการขุด 8.8 เมตร ส่วนในการฉิมของ PW เสริมด้วย SCC และใช้ค้ำยันด้านข้างนั้นมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 117.09 มิลลิเมตร ในกรณีที่เสริม SCC ไว้ด้านในบ่อขุด และมีการเคลื่อนตัวอยู่ที่ 148.69 มิลลิเมตร ในกรณีที่เสริม SCC ไว้หลังกำแพงด้านนอกบ่อขุด

4.2 ค่าสตีเฟเนส E_u / S_u ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของดินก่อนการก่อสร้างสำหรับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ SCCW- SOLID- BRACED คือ 750 และ SCC-BUTRESS คือ 2000 ส่วน E_u / S_u ที่เหมาะสมสำหรับ PW เสริมด้วย SCC ไว้ด้านในบ่อขุดมีค่าเป็น 750 และเมื่อเสริมไว้หลังกำแพงด้านนอกบ่อขุดมีค่าเป็น 250

4.3 สตีเฟเนส E_u / S_u ของชั้นดินเหนียวแข็งไม่ส่งอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณอย่างมีนัยสำคัญ ค่าที่แนะนำให้ใช้ในการวิเคราะห์ไม่ควรต่ำกว่า 1250

4.4 แรงอัดในค้ำยันชั่วคราวซึ่งได้จากการวัดจริงในสนามมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 16-23 ตัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 25.7 ตันซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท ไซมิส แอสเสท จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินการเก็บข้อมูลในโครงการ และขอขอบพระคุณบริษัท สมตนด์ ไฟล์ จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Tay, Jet grouting an alternative to sheet pile method for basement excavation, proceeding of conference on foundation and underground construction, Bangkok, Thailand, 1991. (in Thai)
- [2] T.Sutabutr, Deformation analysis of Deep Excavation in Bangkok Subsoils, master thesis, Asian Institute of Technology, Thailand, 1992. (in Thai)
- [3] P. Samanrattanasatien, The study on behavior of cement column retaining wall during construction, master thesis, King Mongkut's University of Technology, Thonburi, Thailand, 2002. (in Thai)
- [4] N. Wisuttipat, Movement behavior of deep cement mixing column for retaining structure, master thesis, Chulalongkorn University, Thailand, 2005. (in Thai)

- [5] P. Tanseng, Soil-cement column wall with wall-strut to minimize ground movement for a road tunnel construction in Bangkok subsoils, World Tunnel Congress (WTC2012), Bangkok, 2012. (in Thai)
- [6] P. Tanseng and V. Namwiset, Performance of soil-cement column retaining wall used with top-down construction method for basement construction in Bangkok subsoil. Proceedings of ISSMGE TC207, international conference on soil structure interaction underground structures, Saint Petersburg, Russia, 2014. (in Thai)



ประวัติผู้เขียน

นายชนกร สุขุมามาศ เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 3 กรกฎาคม 2532 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนบุญวัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2557 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษากับบริษัท สโตนเฮ็นจ์ นอร์ท อีส จำกัด มหาชน เป็นระยะเวลา 4 เดือน และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2558 และมีผลงานเผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน 2563 จำนวน 16 หน้า

