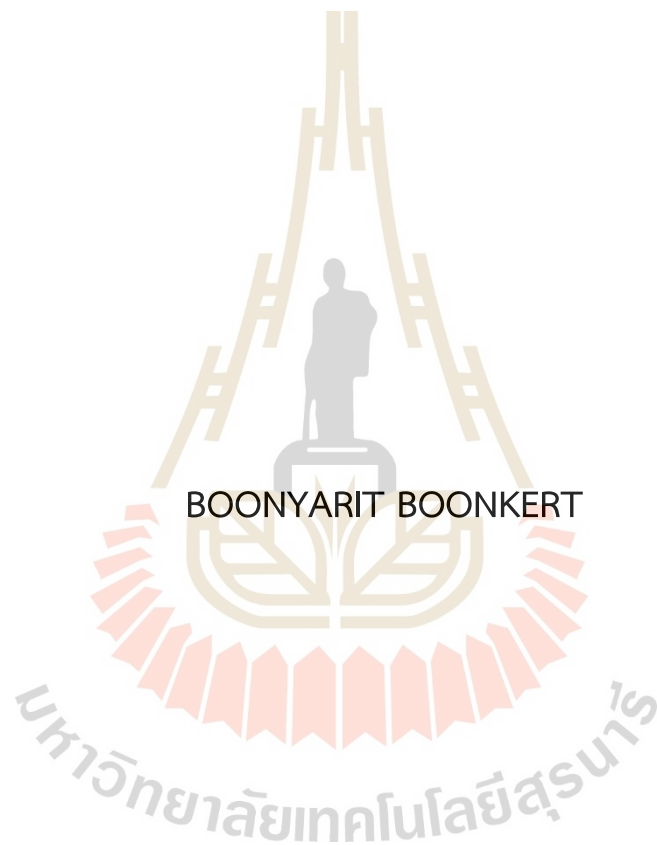


การศึกษาพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อชุด  
ด้วยผนังขวางสำหรับงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ  
ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2565

STUDYING OF THE BEHAVIOR OF SOIL-CEMENT COLUMN WALL  
ASSOCIATED WITH BASE IMPROVEMENT BY CROSS WALL FOR  
DEEP EXCAVATION IN BANGKOK SOFT CLAY WITH 3D FEM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Civil, Transportation and Geo-resources Engineering

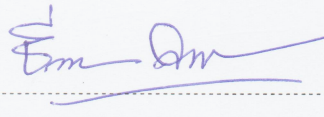
Suranaree University of Technology

Academic Year 2022

การศึกษาพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อชุด  
ด้วยผนังขวางสำหรับงานชุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ  
ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



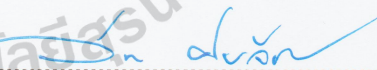
(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด: การศึกษาพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อ  
ขุดด้วยผนังขวางสำหรับงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์  
แบบสามมิติ (STUDYING OF THE BEHAVIOR OF SOIL-CEMENT COLUMN WALL  
ASSOCIATED WITH BASE IMPROVEMENT BY CROSS WALL FOR DEEP EXCAVATION  
IN BANGKOK SOFT CLAY WITH 3D FEM)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง, 105 หน้า.

คำสำคัญ : ผนังขวาง เสาเข็มดินซีเมนต์ การขุดดินลึก ดินเหนียวอ่อน วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column, SCC) ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่เพิ่มเสถียรภาพของบ่อขุดด้วยผนังขวาง (Cross wall) และ buttress ในการศึกษาใช้โครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดรถยนต์สำหรับอาคารชุดพักอาศัยย่านเขต  
สาทร ที่ได้มีการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในระหว่างการก่อสร้างและนำมาใช้ในการ  
วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Mohr-coulomb (MC  
model), Hardening soil (HS model) และ Mohr-Coulomb model with Young's modulus  
vary with depth (MC-VE model) และวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัวเพื่อหาค่า Young's modulus  
ของดินในการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนตัวของดิน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ใช้ Interface element  
เพื่อจำลองความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อระหว่าง SCC ผลการวิจัยพบว่า SCC wall ที่ใช้ผนังขวางมี  
เสถียรภาพเพิ่มขึ้นและลดการเคลื่อนตัวของดินอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิง  
ประสบการณ์ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติพบว่า ค่า Young's modulus ของดิน  
เหนียวอ่อนเท่ากับ  $500 S_u$  ให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดและ MC-VE  
model ให้ผลการวิเคราะห์ได้ไม่แตกต่างจาก HS model โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบ  
กำลังอัดแกนเดียวที่ใช้ต้นทุนและเวลาในการทดสอบดินน้อยกว่าการทดสอบ triaxial และ  
oedometer เพื่อหาพารามิเตอร์ให้ HS model มาก

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2565

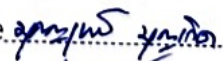
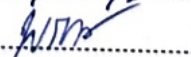
ลายมือชื่อนักศึกษา บุญญฤทธิ์ บุญเกิด  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง

BOONYARIT BOONKERT : STUDYING OF THE BEHAVIOR OF SOIL-CEMENT  
COLUMN WALL ASSOCIATED WITH BASE IMPROVEMENT BY CROSS WALL FOR  
DEEP EXCAVATION IN BANGKOK SOFT CLAY WITH 3D FEM  
THESIS ADVISOR : ASST. PROF PORNPOT TANSENG, Ph.D., 105 PP.

KEYWORD : CROSS WALL/SOIL CEMENT COLUMN/DEEP EXCAVATION/SOFT CLAY/3D  
FINITE ELEMENT METHOD

This research studied the behavior of soil cement columns (SCC) in Bangkok's soft clay layer associated with base stability improvement by cross wall and buttress for a construction project underground car park in the Sathorn area. The behavior of wall is observed by measurement of wall movement and soil surface settlement during construction and used for analysis by the 3D finite element method using Mohr-Coulomb model (MC model), Hardening Soil model (HS model), and Mohr-Coulomb model with Young's modulus vary with depth (MC-VE model) were compared. Furthermore, used interface element to model the imperfect interface between the SCC. The results indicated that SCC wall with cross wall and buttress had significantly increased stability and reduced soil displacement compared to empirical method. The finite element method results show that the Young's modulus of the soft clay soil is  $500 S_u$ , agreed wall with obtained from measurement. Finally, the MC-VE model had the lateral movement behavior consistent results from the Hardening Soil model, using parameters obtained from unconfined compressive strength tests which were less time and resources compared to triaxial and oedometer tests for parameter in the Hardening Soil model.

School of Civil Engineering  
Academic Year 2022

Student's Signature   
Advisor's Signature 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุน และการให้ความร่วมมือจากบุคคล และกลุ่มบุคคลที่กรุณาให้คำปรึกษาในเชิงวิชาการและการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ ของการวิจัย ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยในทุกๆ ขั้นตอน ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณะกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์ทั้งด้านเนื้อหา ระเบียบ วิธีการวิจัย ตลอดจนแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา และผู้ที่ผู้วิจัยให้ความเคารพทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ตีมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 เสาคementซีเมนต์.....	4
2.1.1 วิธีการก่อสร้างเสาคementซีเมนต์ .....	5
2.1.2 การประยุกต์ใช้เสาคementซีเมนต์ในงานขุดดินลึก .....	7
2.1.3 อิทธิพลของพื้นที่ทับซ้อนของเสาคementซีเมนต์.....	13
2.1.4 รูปแบบการวิบัติของกำแพงเสาคementซีเมนต์ .....	14
2.2 ผังขวาง .....	18
2.3 พฤติกรรมเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน .....	32
2.4 การวิเคราะห์งานขุดดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	35
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E_u / S_u$ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ .....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	46
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 ข้อมูลของโครงการที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.1.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน.....	51
3.1.3 ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	52
3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดในสนาม.....	55
3.2.1 การติดตั้ง Inclinometer เพื่อวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง .....	55
3.2.2 การติดตั้ง Surface settlement เพื่อวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน .....	56
3.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ .....	57
3.3.1 Mohr-Coulomb model.....	58
3.3.2 Hardening soil model.....	59
3.3.3 Mohr-Coulomb model with Young's modulus vary with depth.....	60
3.4 การวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัว.....	61
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	62
4.1 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวที่ผิวดิน.....	62
4.1.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพง .....	62
4.1.2 การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง.....	64
4.2 การเปรียบเทียบรูปแบบการจำลอง SCC ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ.....	64
4.3 การวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัว.....	67
4.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	70
4.5 อิทธิพลของผนังขวางที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของ SCC wall.....	72
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	76
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	77
เอกสารอ้างอิง .....	78
ภาคผนวก ก.....	82
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	82
ประวัติผู้เขียน .....	105



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางสรุปการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและผลการตรวจวัดภาคสนาม.....	28
2.2 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดิน Hardening soil ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ.....	41
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $E_u$ และค่า $S_u$ ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ .....	43
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $E_u$ และค่า $S_u$ ของชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ .....	45
3.1 ชื่อคำเรียกกำแพงแต่ละฝั่งและคำอธิบาย .....	49
3.2 คุณสมบัติของดินและดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	53
3.3 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบภาคสนาม.....	54
3.4 คุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย MC model.....	59
3.5 คุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย HS model.....	59

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ.....	4
2.2 ขั้นตอนการผสมแบบ Wet mixing method.....	5
2.3 ใบพัดผสมของ Dry jet mixing method.....	6
2.4 วิธีการผสมลึกลับแบบ Dry jet mixing method.....	6
2.5 ระบบการผสมด้วยการฉีดน้ำปูน.....	7
2.6 ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ (a) และ (b) แบบเสาเข็ม (จัดเรียงแบบจตุรัสและสามเหลี่ยม) (c) กำแพงแถวเดี่ยวสัมพันธ์กัน (d) กำแพงซ้อนกัน (e) กำแพงหลายแถวสัมพันธ์กัน (f) ตาข่ายสัมพันธ์ (g) กำแพงแถวเดี่ยวสัมพันธ์กันแบบมีค้ำยัน (h) รวงผึ้งสัมพันธ์กัน (i) วงแหวน (j) ช่องตาข่าย (k) เสาเข็ม กลุ่ม (l) เสาเข็มกลุ่มสัมพันธ์กัน (m) กลุ่มก้อน.....	8
2.7 ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน (a) ลักษณะทั่วไปของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (b) กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเหล็กรูปพรรณใช้ร่วมกับผนังคอนกรีต (c) กำแพงกันดินเชิง ประกอบ (d) งานป้องกันดินถล่ม (e) งานปรับปรุงเสถียรภาพของทางลาด.....	9
2.8 รูปตัดตามยาวของโครงการก่อสร้างที่ใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่แรงดันดินทั้งสองฝั่งไม่มีความ สมดุล.....	11
2.9 ฝั่งแสดงตำแหน่งกำแพงกันดินของโครงการ.....	12
2.10 การจำลองรูปแบบการจัดเรียงตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายในกล่องเดือนตรง.....	13
2.11 กำลังรับแรงเฉือนบริเวณรอยต่อ.....	14
2.12 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์.....	15
2.13 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก.....	16
2.14 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน.....	16
2.15 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก.....	17
2.16 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางเชื่อมที่กรุง Oslo (a) รูปตัดตามยาว (b) รูปตัดตามขวาง.....	18
2.17 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall ของอุโมงค์ทางเชื่อมเมือง Oslo.....	19

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18	20
2.19	20
2.20	21
2.21	22
2.22	22
2.23	23
2.24	24
2.25	25
2.26	26
2.27	26
2.28	27
2.29	29
2.30	30
2.31	30
2.32	31
2.33	32
2.34	32

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการรูดของดินใต้ข้อคุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความในการขุด .....	34
2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุดกับอัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด .....	34
2.37 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากการวัดในสนามและการวิเคราะห์ด้วย วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	36
2.38 การเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวในสนามกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (a) bottom-up construction (b) top-down construction) .....	37
2.39 แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ .....	38
2.40 การจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการขบกันระหว่างต้นด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ .....	39
2.41 แบบจำลองกลไกการวิบัติของดินที่มีการใช้ผนังขวางเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทดสอบแบบ full scale ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ.....	40
2.42 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบจริงในสนามกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (a) การทดสอบแบบที่ 1 (b) การทดสอบแบบที่ 2....	40
2.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear modulus กับ shear strain.....	42
2.44 Shear modulus ของดินกรุงเทพฯที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter สำหรับดินเหนียวอ่อน.....	42
2.45 Shear modulus ของดินกรุงเทพฯที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter สำหรับดินเหนียวแข็ง.....	43
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	47
3.2 ผังแสดงรายละเอียดของโครงการ ตำแหน่งการเจาะทดสอบดิน ดินซีเมนต์ และเครื่องมือตรวจวัดภาคสนาม.....	48
3.3 รูปตัดตามขวางของโครงการที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.4 กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย (a) มุมมองด้านบน (b) รูปตัดตามขวาง .....	51

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 รูปตัดชั้นดินของโครงการที่ใช้ในงานวิจัย.....	52
3.6 การติดตั้งเครื่องมือวัด Inclinator.....	55
3.7 การวัดการเคลื่อนตัวของดินด้วยเครื่องมือตรวจวัด Inclinator .....	56
3.8 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด Surface settlement .....	56
3.9 การจำลองหน้าตัดของ SCC (a) รูปแบบ Solid (b) รูปแบบ 4-Discrete (c) รูปแบบ 8-Discrete .....	58
3.10 การจำลองการขบเหลี่ยมกันของ SCC wall ที่ใช้ Interface element (a) รูปแบบ Solid (b) รูปแบบ 4-Discrete (c) รูปแบบ 8-Discrete.....	58
3.11 คุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง MC-VE model.....	60
4.1 ผลตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงหลังจากเริ่มขุดดินจนถึงสิ้นสุดการขุดดิน.....	63
4.2 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง .....	64
4.3 FEM mesh (a) รูปแบบ Solid (b) รูปแบบ 4-Discrete (c) 8-Discrete .....	65
4.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่จำลอง SCC แต่ละรูปแบบ .....	65
4.5 ผลการวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่แปรผันค่า $E_u / S_u$ ของดินเหนียวอ่อน.....	67
4.6 ผลการวิเคราะห์กลับการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่แปรผันค่า $E_u / S_u$ ของดินเหนียวอ่อน .....	68
4.7 การประมาณค่า Shear strain ที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนของกำแพงทั้งสองฝั่ง.....	69
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus กับ Shear strain ของดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการทดสอบ Self-boring pressure meter.....	69
4.9 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	70
4.10 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการใช้ผนังขวางในการเพิ่มเสถียรภาพกันบ่อ .....	72
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการูดของดินใต้บ่อขุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความในการขุด .....	73

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุดกับอัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด .....	74
4.13 เส้นชั้นการเคลื่อนตัวของดินในระนาบที่ตั้งฉากกับผนังขวางที่แสดงถึงการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างดินกันบ่อกับผนังขวาง ทำให้เกิดแรงต้านทานการรูดของดินกันบ่อ .....	75



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$S_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
$q_u$	=	กำลังรับแรงอัดแกนเดียว
$E$	=	Young's modulus
$G$	=	Shear modulus
$\nu$	=	Poisson ratio
$R_{inter}$	=	Interface reduction factor
$\gamma$	=	หน่วยน้ำหนักดิน
$\varepsilon_s$	=	ความเครียดเฉือน
$\delta H_{max}$	=	ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด
$\delta V_{max}$	=	ค่าการทรุดตัวสูงสุด
$F.S.$	=	สัดส่วนความปลอดภัย
MC	=	Mohr-Coulomb
HS	=	Hardening soil
MC-VE	=	Mohr-Coulomb model with Young's modulus vary with depth
SCC	=	เสาเข็มดินซีเมนต์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันกรุงเทพมหานคร เป็นเมืองที่กำลังพัฒนาซึ่งเริ่มมีการขุดชั้นใต้ดินเป็นจำนวนมาก เพื่อที่จะได้ใช้สอยพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น อาคารจอดรถใต้ดิน ศูนย์การค้าขนาดใหญ่ อุโมงค์ใต้ดิน รถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น โดยในการก่อสร้างชั้นใต้ดินมีความจำเป็นต้องใช้กำแพงกันดินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพังทลายของดิน และในหลายกรณีกำแพงกันดินจำเป็นต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอต่อการต้านแรงดันดินที่กระทำ เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง โดยชั้นดินในกรุงเทพฯส่วนมากเป็นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากหนาประมาณ 10 ถึง 13 เมตรจากผิวดิน ที่เรียกว่า ดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) มักก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากในขั้นตอนการขุดดิน โดยกำแพงกันดินที่นิยมได้แก่ กำแพงกันดินแบบ sheet pile wall, pile wall, และ diaphragm wall (D-wall) เนื่องจากเป็นระบบกำแพงที่วิศวกรไทยได้มีการใช้งานและมีประสบการณ์ในการใช้งานมาเป็นระยะเวลาเวลานานกว่า 30 ปี กำแพงที่กล่าวมานั้นเป็นกำแพงกันดินแบบ flexural wall ที่ต้องใช้ระบบค้ำยันทางด้านข้างเพื่อไม่ให้แรงที่เกิดขึ้นในกำแพงสูงจนทำให้ต้องใช้หน้าตัดกำแพงใหญ่หรือใช้เหล็กเสริมในปริมาณที่สูง การที่ต้องใช้ค้ำยันชั่วคราวทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการติดตั้งและการรื้อถอนค้ำยัน อีกทั้งการก่อสร้างกำแพงที่ต้องการติดตั้งโดยใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการติดตั้งทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและเสียงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ออาคารและพื้นที่ข้างเคียง ในปัจจุบันเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพดินที่กำลังได้รับความนิยมแพร่หลายซึ่งรู้จักกันในชื่อ เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column, SCC) และวิศวกรไทยมีประสบการณ์ในการใช้งานมากขึ้น ในหลายโครงการจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนให้มีกำลังสูงขึ้นและใช้เป็นกำแพงกันดิน

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column wall, SCC wall) สำหรับงานขุดดินลึก 7.4 เมตรของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดรถยนต์เพื่อใช้เป็นทางเข้าชั้นจอดรถใต้ดินของอาคารคอนโดมิเนียม ตั้งอยู่ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร ที่อยู่ในพื้นที่ของโรงแรมสุโขทัย โดยมีการเพิ่มเสถียรภาพของบ่อขุดด้วยผนังขวาง SCC และเพิ่มเสถียรภาพที่ด้านหน้ากำแพงด้วย SCC buttress แทนการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว เพื่อลดระยะเวลาในการก่อสร้างและในการก่อสร้าง SCC ใช้วิธีการผสมแบบเครื่องจักรแรงดันต่ำ (Low pressure mechanically



mix method) ที่สามารถก่อสร้างได้รวดเร็วโดยใช้เครื่องจักรเพียงชนิดเดียวและยังก่อสร้างได้โดยที่มีเสียงและความสั่นสะเทือนรบกวนผู้ใช้โรงแรมที่ต่ำกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีอื่น ในการศึกษานี้ได้เก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงด้วย Inclinomater และการทรุดตัวที่ผิวดินด้วย Surface settlement โดยนำมาวิเคราะห์หาค่าด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลจากการแปรผันค่า Young's modulus ของดินที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของ SCC wall เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของ SCC wall และได้มีการใช้ Interface element ในการจำลองการแยกตัวกันของ SCC เพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของ SCC wall ที่เกิดขึ้นจริงในสนาม นอกจากนี้ได้ทำการจำลองพฤติกรรมของ SCC wall ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติโดยใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb, Hardening soil และ Mohr-Coulomb model with Young's modulus vary with depth เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของ SCC wall โดยผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพของบ่อชุดด้วยผนังขวางในลักษณะเดียวกันนี้ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในการศึกษางานวิจัยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพของบ่อชุดด้วยผนังขวางและเพิ่มเสถียรภาพที่ด้านหน้ากำแพงด้วย Buttress
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่า Young's modulus ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของ SCC wall ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลการจำลอง SCC ด้วย Interface element ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของ SCC wall ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ
- 1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองดินในการวิเคราะห์พฤติกรรมของ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพของบ่อชุดด้วยผนังขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ ที่ใช้แบบจำลอง Mohr-coulomb model, Hardening soil model และ Mohr-Coulomb model with Young's modulus vary with depth

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ได้แก่

- 1.3.1 งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินและการทรุดตัวที่ผิวดินหลัง SCC wall ที่ก่อสร้างด้วยวิธีการผสมแบบเครื่องจักรแรงดันต่ำ ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอด ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร
- 1.3.2 งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของ SCC wall ในช่วงก่อสร้างเท่านั้น ซึ่งถือว่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นยังคงค้างอยู่ในดิน
- 1.3.3 ใช้ PLAXIS 3D software ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติสำหรับ SCC wall

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ได้แก่

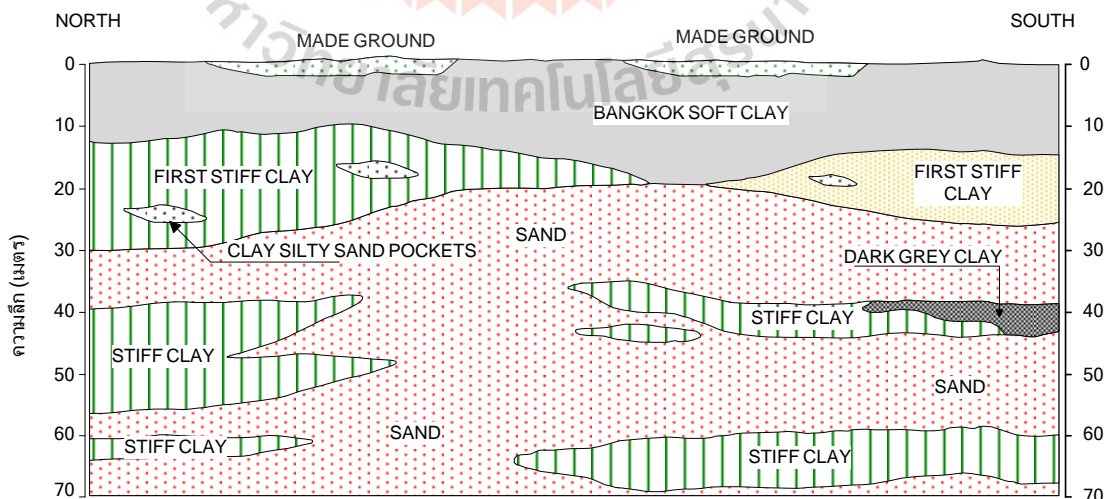
- 1.4.1 เพื่อเข้าใจถึงพฤติกรรมของ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพของบ่อขุดด้วยผนังขวาง และเพิ่มเสถียรภาพที่ด้านหน้ากำแพงด้วย Butress
- 1.4.2 เพื่อได้ค่า Young's modulus ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของ SCC wall ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ
- 1.4.3 เพื่อเข้าใจถึงอิทธิพลการจำลอง SCC ด้วย Interface element ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของ SCC wall ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ
- 1.4.4 เพื่อทราบถึงแบบจำลองดินที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพของบ่อขุดด้วยผนังขวางที่สอดคล้องกับพฤติกรรมในสนามมากที่สุด

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เสาค้ำดินซีเมนต์

เสาค้ำดินซีเมนต์ (Soil cement column, SCC) คือ เทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดินชนิดหนึ่ง เหมาะสำหรับดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากหรือดินที่มีความชื้นสูง ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่น้อย โดยจะนำซีเมนต์ที่มีกำลังสูงกว่าเข้ามาผสมเพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของดินให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการทรุดตัวของดินและเพิ่มประสิทธิภาพในงานก่อสร้างได้ดีขึ้น ในประเทศไทยนิยมใช้บริเวณแถบชายฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา เช่น กรุงเทพมหานคร ปริมณฑล เป็นต้น โดย (Teparaksa et al., 1999) ได้รายงานชั้นดินกรุงเทพโดยประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 13 ถึง 16 เมตร ปริมาณความชื้นของดิน (Water content) โดยประมาณอยู่ระหว่าง 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ชีตจำกัดเหลว (Liquid limit) มีค่าสูง โดยมีค่าใกล้เคียงกับ Water content คือมีค่าระหว่าง 60 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) ประมาณ 2.0 ค่ากำลังรับแรงเฉือนประมาณ 0.4 ถึง 1.5 ตันต่อตารางเมตร และมีความไวตัว (sensitivity) สูง ถัดลงมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก ความชื้นของดินอยู่ในช่วง 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ มีความไวต่ำ อยู่ที่ระดับความลึก 16 ถึง 25 เมตร กำลังรับแรงเฉือนสูงประมาณ 8 ถึง 16 ตันต่อตารางเมตร ถัดลงมาเป็นชั้นทรายชั้นแรกอยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำหนา 10 ถึง 15 เมตร โดยได้แสดงหน้าตัดความลึกชั้นดินของดินกรุงเทพ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ (Teparaksa et al., 1999)

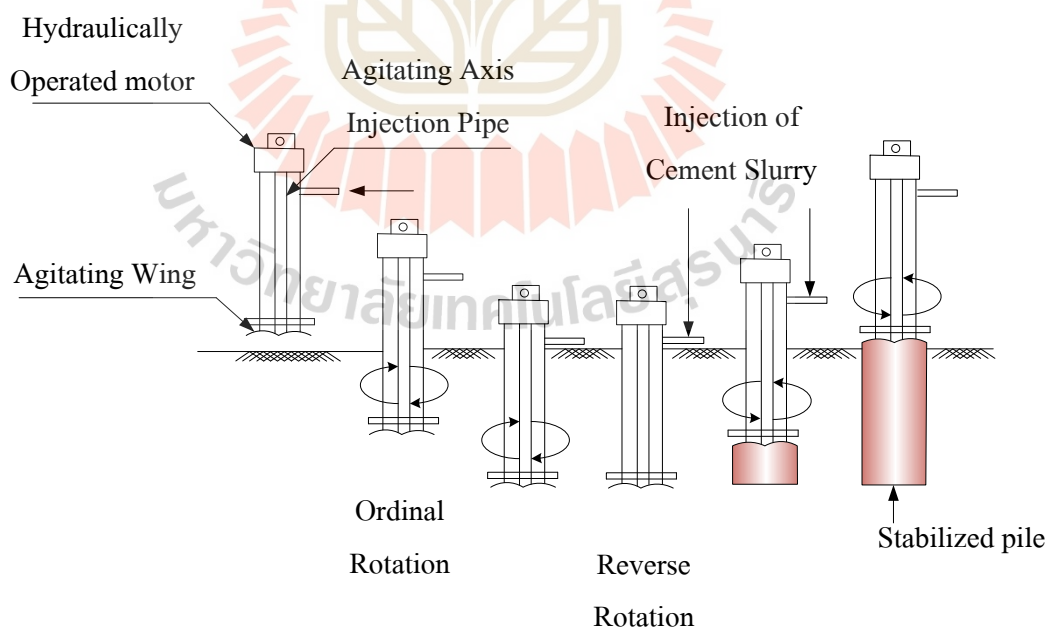
### 2.1.1 วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี โดยในแต่ละวิธีก็จะมีลักษณะและข้อได้เปรียบที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท โดยสามารถจำแนกออกได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีการผสมเชิงกล (Mechanical mixing method) วิธีนี้เป็นการใช้ใบพัดที่อยู่ตามแนวแกนเจาะ ช่วยในการผสมดินให้เข้ากันกับสารผสม โดยวิธีนี้เป็นการผสมโดยใช้แรงดันที่ต่ำ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ตามลักษณะของสารผสมที่ใช้ผสมกับดินดังนี้

#### ก) Wet mixing method

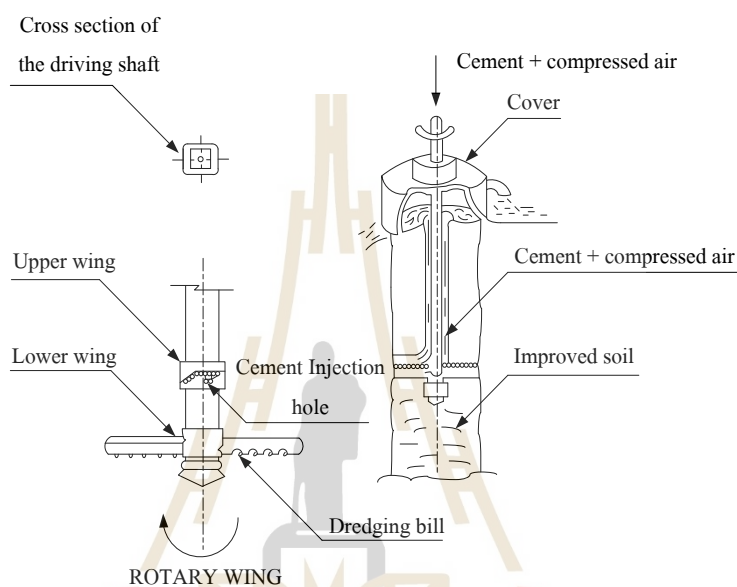
รูปแบบของวิธี Wet mixing จะเป็นการใช้น้ำปูน (cement slurry) นำเข้าไปปรับปรุงดิน ด้วยแรงดันที่ไม่สูงมาก (น้อยกว่า 5 บาร์) และผสมกับดินเหนียวด้วยใบพัด เครื่องจักรประกอบด้วยรถเจาะพร้อมเครื่องปั่น ก้านเจาะ ซึ่งตรงปลายมีใบพัดสำหรับผสมดินและรูจ่ายน้ำปูน โดยไม่มีการเจาะดินขึ้นจากหลุม จะทำการตีควนด้วยใบพัดผสมไปพร้อมๆกันทำให้ดินและน้ำปูนผสมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่กับที่หลุมเจาะจึงไม่มีการพังทลาย และในระหว่างซั๊กก้านผสมขึ้น ใบพัดผสมจะทำการตีควนอีกครั้งโดยเป็นการหมุนวนกับการกดลงในตอนแรก ดังรูปที่ 2.2 เป็นลำดับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธี Wet mixing method โดยขนาดของเสาเข็ม (column) จะมีขนาดเท่ากับรัศมีการหมุนของใบพัด



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผสมแบบ Wet mixing method (Miki, 1985)

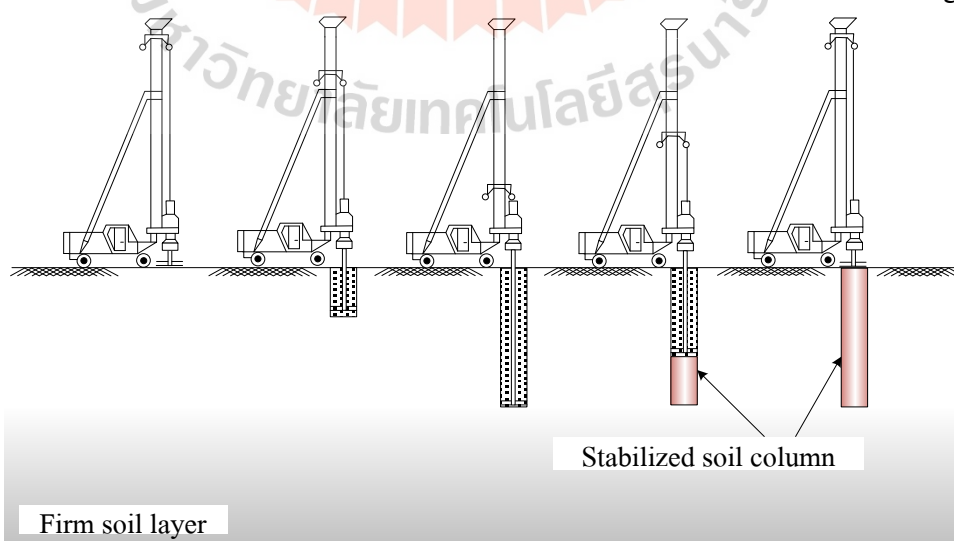
ข) Dry jet mixing method

วิธีการติดตั้งและเครื่องจักรมีลักษณะคล้ายกับการผสมเปียกจะต่างกันในส่วนของการจ่ายซีเมนต์ ซึ่งจะถูกจ่ายไปตามก้านเจาะด้วยแรงดันสูงประมาณ 5 บาร์ ไปสู่ใบพัดผสมดังรูปที่ 2.3 และ สถานะของสารผสมคือ นำผงซีเมนต์ (cement powder) มาใช้ในการผสมแทนการใช้ น้ำปูนผสมตีควนให้เข้ากันด้วยใบพัดผสมที่ได้ออกแบบมาโดยเฉพาะวิธีนี้ดังรูปที่ 2.4



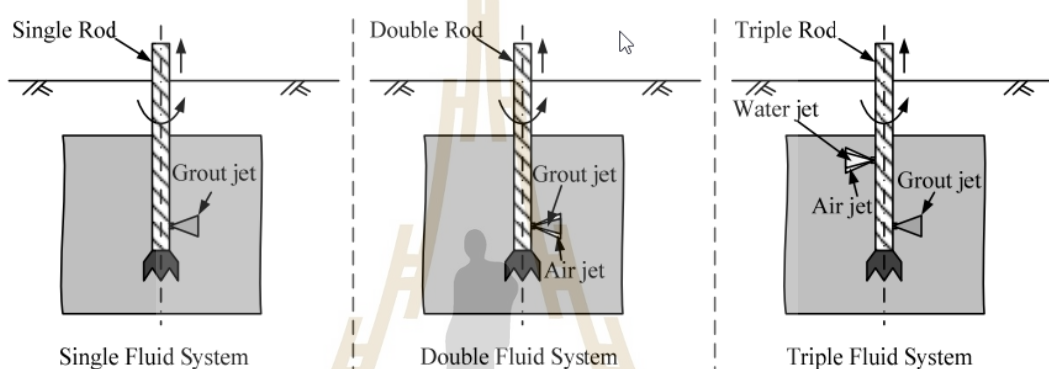
รูปที่ 2.3 ใบพัดผสมของ Dry jet mixing method (DJM Research Group, 1984)

- 1) Positioning
- 2) Penetration
- 3) Completion of penetration
- 4) Withdrawing (Feeding agent)
- 5) Completion of withdrawing



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

2. วิธีการผสมด้วยการฉีดน้ำปูน (Jet mixing method) การปรับปรุงวิธีนี้จะใช้สารผสมในรูปน้ำปูนฉีดพ่นด้วยแรงดันสูงประมาณ 200 ถึง 500 บาร์ ผ่านรูเล็กๆ (nozzles) ที่ปลายหัวเจาะพร้อมกับหมุนก้านเจาะเพื่อให้ได้น้ำปูนผสมเข้าเป็นเนื้อเนื้อเดียวกับรอบๆ ก้านเจาะ เมื่อน้ำปูนผสมดินเหนียวและทำปฏิกิริยาแล้วจะได้เสาเข็ม ทั้งนี้ในการก่อสร้างเริ่มต้นด้วยการกดหัวเจาะไปพร้อมกับการทำ Pre-cut ดินเหนียวจนถึงระดับปลายเสาเข็ม ซึ่งทำได้โดยการใช้น้ำฉีดหรืออากาศอัดหรือใช้ทั้งน้ำและอากาศอัดลงไปพร้อมกัน เพื่อกวนให้ดินเหลวและง่ายต่อการฉีดน้ำปูนผสมกับดินขณะดึงก้านเจาะขึ้น มีระบบการผสมด้วยการฉีดน้ำปูนสามระบบ ดังรูปที่ 2.5

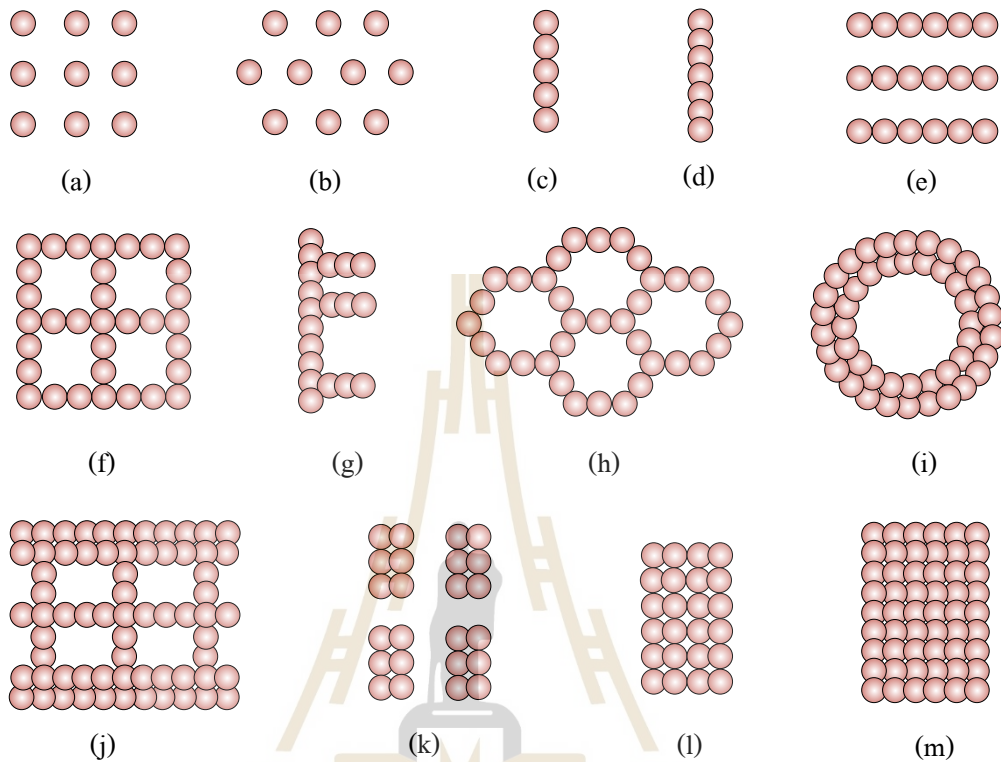


รูปที่ 2.5 ระบบการผสมด้วยการฉีดน้ำปูน (Wang et al., 2013)

### 2.1.2 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานชุดดินลึก

Topolnicki (2004) ได้เสนอการเลือกรูปแบบการก่อสร้าง SCC ที่เหมาะสมสำหรับงานต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการประยุกต์ใช้งาน สภาพของสถานที่ก่อสร้าง อัตราส่วนปลอดภัยที่ต้องการ และราคาก่อสร้าง รูปแบบ SCC มีลักษณะที่แตกต่างกัน รูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.6 โดย SCC เดียวที่มีรูปแบบการก่อสร้างแบบตาข่ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสามเหลี่ยมหรือแบบรวมกันเป็นกลุ่ม ดังรูปที่ 2.6a และ 2.6b มักนำไปใช้ในงานที่ต้องการลดการทรุดตัวของดินฐานรากหรืองานปรับปรุงเสถียรภาพ เช่น งานคันทางถนน เป็นต้น รูปที่ 2.6c, 2.6d, 2.6e และ 2.6g ใช้ในการควบคุมงานชุดดิน เพื่อรักษาเสถียรภาพและป้องกันโครงสร้างที่ใช้ฐานรากตั้งรอบพื้นที่ชุดเพื่อใช้ต้านทานแรงแนวราบหรือแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถล ด้วยการใชรูปแบบเสาเข็มแบบแถวที่มีทิศทางเดียวกันกับน้ำหนักในแนวราบหรือตั้งฉากกับผิววัตถุที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ซึ่งเสาเข็มแบบกำแพงสามารถสร้างได้ทั้งแบบสัมผัสกัน แบบซ้อนกันใช้ในงานป้องกันน้ำไหลผ่าน รูปแบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่มสามารถใช้รองรับคันทางและฐานรากเพื่อลดการทรุดตัว และการเพิ่มกำลังแบกทาน SCC ชนิดกลุ่มมีหลายรูปแบบด้วยกันได้แก่ แบบตาข่ายสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.6f แบบรวงผึ้งสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.6h แบบวงแหวนซ้อนทับกัน ดังรูปที่ 2.6i แบบช่องตาข่าย ดังรูปที่ 2.6j ซึ่งเป็นระบบที่มี

ประสิทธิภาพและประหยัดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบกำแพงและแบบกลุ่มก้อน ดังรูปที่ 2.6m แบบเสาเข็มกลุ่ม ดังรูปที่ 2.6k และแบบเสาเข็มกลุ่มสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.6l

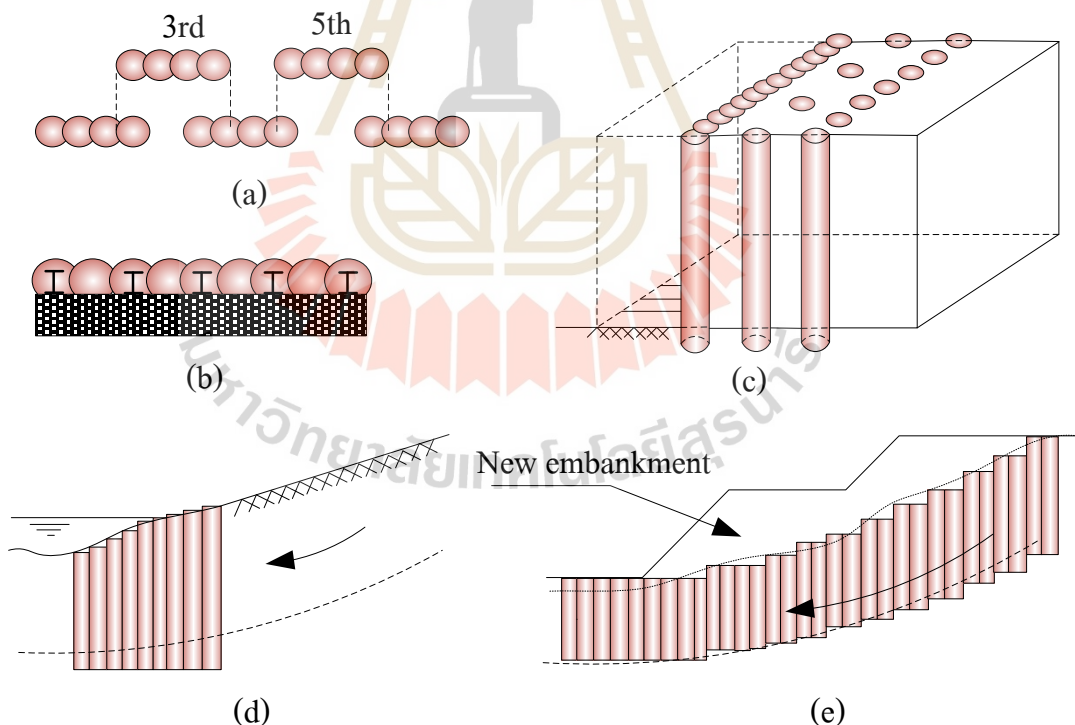


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ (a) และ (b) แบบเสาเข็ม (จัดเรียงแบบจัตุรัสและสามเหลี่ยม) (c) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกัน (d) กำแพงซ้อนกัน (e) กำแพงหลายแถวสัมผัสกัน (f) ตาข่ายสัมผัส (g) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกันแบบมีค้ำยัน (h) รวงผึ้งสัมผัสกัน (i) วงแหวน (j) ช่องตาข่าย (k) เสาเข็มกลุ่ม (l) เสาเข็มกลุ่มสัมผัสกัน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

งานระบบกันดิน เป็นการยึดรั้งแรงดันดินที่เกิดขึ้นระหว่างการขุดลึกและงานขุดตั้งในดินอ่อนด้วยการป้องกันโครงสร้างรอบๆ บริเวณที่ขุด การป้องกันดินฮูด (heave) การป้องกันดินถล่ม และการวิบัติของลาด (รูปที่ 2.7) สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบกันดินนั้นมักนิยมใช้รูปแบบกำแพงและตาข่าย การผสมดินกับซีเมนต์ต้องการกำลังและความแข็งแรงที่สูงเนื่องจากต้องรับแรงดันดินและแรงดันน้ำด้านข้าง ตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องการสำหรับงานป้องกันงานขุดได้แก่ ความเป็นเนื้อเดียวกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ในระดับสูงและเสาเข็มดินซีเมนต์ต้องอยู่ในแนวตั้งเพื่อให้ความหนาของเสาเข็มที่ต้องการและเพื่อให้ได้การซ้อนกันของเสาเข็มอย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 2.7c เป็นระบบที่ใช้รองรับงานขุดตึ้งมีลักษณะเป็นกำแพงกันดินประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงในแนวหน้าตามด้วยแถวหลังอีกหนึ่งแถวหรือมากกว่า เสาเข็มแถวหลังถูกกำหนดให้มีระยะห่างและขนาดที่ทำให้มั่นใจได้ว่าได้เกิดเป็นระบบเชิงประกอบระหว่างกำแพงและเพื่อรักษาเสถียรภาพภายนอกให้กับกำแพงโดยมีการใช้ดินผสมปูนซีเมนต์สร้างเป็นแผ่นเพื่อยึดกำแพงและกลุ่มเสาเข็มเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดการถ่ายน้ำหนักด้านบนลงมาสู่ด้านล่างของเสาเข็ม ระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบไม่ควรเกิน 1.2-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์

การป้องกันดินหลุดในงานขุด ทำได้โดยก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในบริเวณที่ทำการขุดเพื่อทำหน้าที่เป็นแกนยึดฝังผ่านระนาบวิบัติ ในบางครั้งด้านข้างของงานขุดอาจมีการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มแรงดันดินเชิงรับ (passive earth pressure) และลดระยะฝังของเสาเข็มพิทหรือเสาเข็มเจาะ เสาเข็มดินซีเมนต์ยังประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อป้องกันดินถล่มและการวิบัติของลาด โดยทั่วไปมักใช้รูปแบบของกำแพง รูปแบบกริด (grid) หรือแบบก้อน (block) ซึ่งความยาวต้องเพียงพอที่จะตัดกับระนาบวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (รูปที่ 2.7d และ 2.7e) ทำให้กำลังเฉือนรวมของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้น



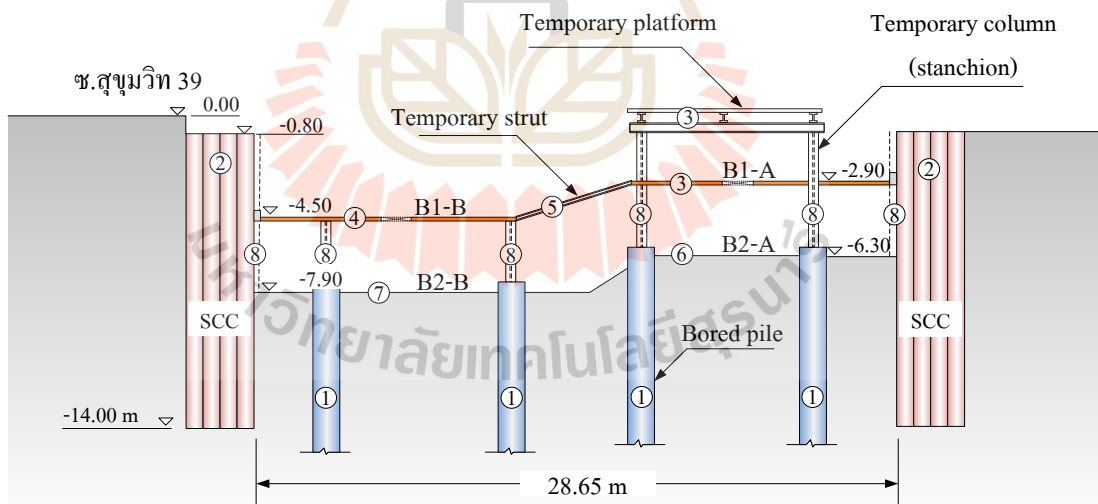
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน (a) ลักษณะทั่วไปของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (b) กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเหล็กกรุปพรรณใช้ร่วมกับผนังคอนกรีต (c) กำแพงกันดินเชิงประกอบ (d) งานป้องกันดินถล่ม (e) งานปรับปรุงเสถียรภาพของทางลาด (Topolnicki, 2004)



นฤทธิ์ (2546) ได้รายงานพฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ออกแบบให้เป็นระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างบ่อเก็บน้ำสำรอง โรงไฟฟ้าพลัง ความร้อนร่วมวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยาโดยบ่อเก็บน้ำแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนสถานีสูบน้ำเข้า (pump house) มีความกว้างประมาณ 6.2 เมตร ยาว 18 เมตร และลึก 7 เมตร และส่วนบ่อเก็บน้ำ มีความกว้างประมาณ 46 เมตร ยาวประมาณ 830 เมตร และลึก 5.5 เมตร ระบบกำแพงกันดิน ก่อสร้างด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ความลึกประมาณ 8 เมตร ฝังลงในชั้นดินเหนียวแข็ง จากพฤติกรรมการ เคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณทางเข้าบ่อเก็บน้ำ พบว่า ขณะทำการขุดดินในแนวตั้งลึก 7 เมตร ได้เกิดการเคลื่อนตัวในลักษณะของคานยื่น (cantilever mode) ซึ่งมีค่าความเครียดเฉือน (shear strain) ประมาณ 1.4 เปอร์เซ็นต์ จากนั้น กำแพงได้เกิดการวิบัติทั้งระบบ (overall slope failure) ในส่วนของระบบกำแพงกันดินที่บ่อเก็บน้ำ ซึ่งมีความลึกการขุด 5.5 เมตรได้มีการเปลี่ยนวิธีการขุดดินจากแนวตั้ง (vertical excavation) มาเป็น การขุดโดยเว้นให้มีความลาดดิน (slope excavation) ในส่วนที่ลึกกว่า 3.5 เมตร ทำให้สามารถลด การเกิดความเครียดเฉือนลงเหลือเพียง 0.21 ถึง 0.34 เปอร์เซ็นต์ และไม่เกิดการวิบัติ นอกจากนี้ยัง ได้เสนอค่าสติฟเนส (stiffness) ของดินที่เหมาะสมสำหรับการประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ของระบบกำแพงกันดินที่ก่อสร้างด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ให้ผลการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกับผลการ วัดในสนามด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (finite element method) พบว่า อัตราส่วนระหว่าง Young's modulus ต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน ( $E_u / S_u$ ) มีค่าเท่ากับ 120 ถึง 180, 600 ถึง 700 และ 650 ถึง 750 สำหรับดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามลำดับ

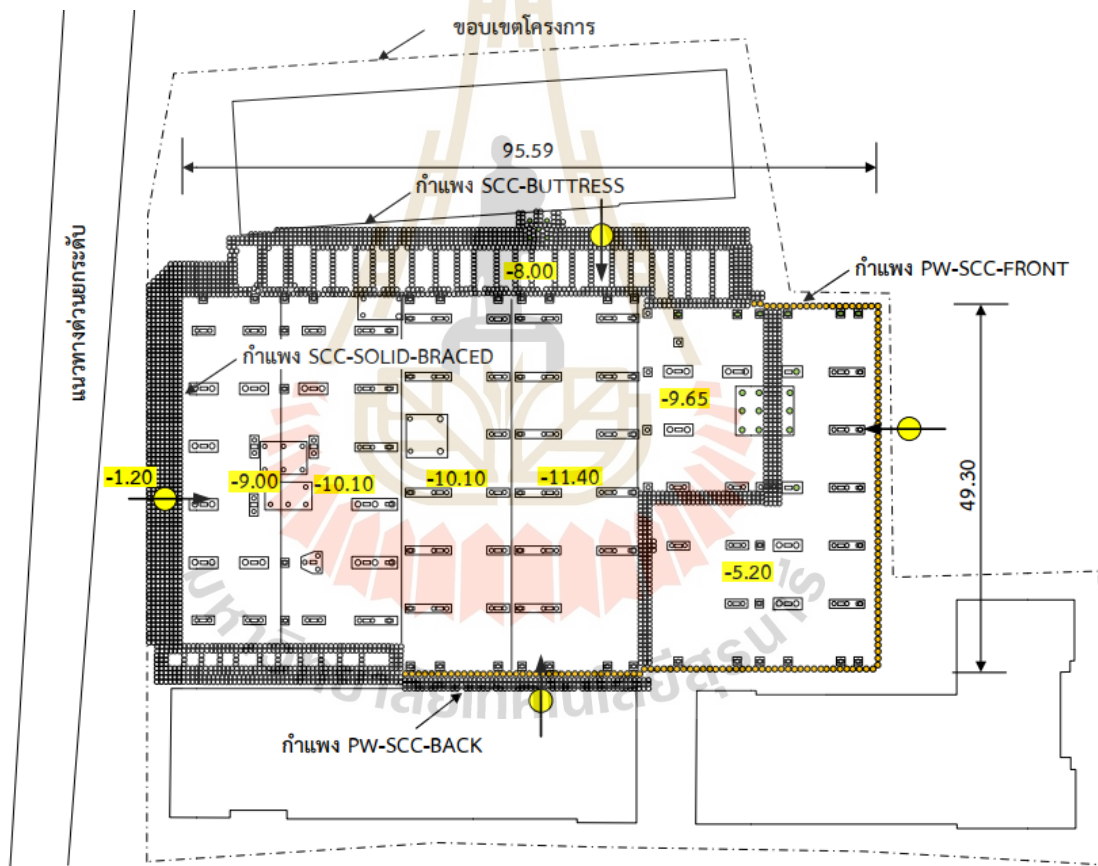
พรพจน์ (2554) ได้นำเสนอประสิทธิภาพของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกัน ดินในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นใต้ดินลึกในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่าการใช้กำแพงกันดินเสาเข็มดิน ซีเมนต์เป็นกำแพงกันดินมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมากสำหรับบางโครงการที่มีระยะห่างเขตที่ดินกับ ผนังของชั้นใต้ดินกว้างมากพอสามารถใช้ระบบกำแพงกันดินที่ไม่ต้องใช้ค้ำยันในการก่อสร้างได้และใน การก่อสร้างเครื่องจักรที่ใช้มีขนาดไม่ใหญ่ทำให้เกิดมลพิษทางเสียงและการสั่นสะเทือนน้อยกว่าการ ก่อสร้างกำแพงชนิดอื่น ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายสำหรับระบบกำแพงกันดินได้ประมาณ 57 เปอร์เซ็นต์ และลดระยะเวลาในการก่อสร้างระบบกำแพงลง 30 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งไม่ก่อให้เกิดปัญหา การเคลื่อนตัวของดินที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างฐานรากอีกด้วย

วิชิต (2557) ได้รายงานพฤติกรรมของระบบกำแพงกันดิน SCC ใช้ร่วมกับระบบการก่อสร้างชั้นใต้ดินชนิดที่สร้างพื้นชั้นบนก่อนพื้นชั้นล่าง ซึ่งเรียกโดยทั่วไปว่า ระบบก่อสร้างแบบบนลงล่าง (top-down construction) ลักษณะพื้นที่ศึกษาเป็นการก่อสร้างชั้นจอตลอดใต้ดิน ในซอยสุขุมวิท 39 ที่ใช้ SCC เป็นกำแพงกันดินและอาศัยพื้นถาวรของชั้นใต้ดินเป็นค้ำยันด้านข้าง โดยใช้ค้ำยันเหล็กชั่วคราวเพื่อถ่ายแรงอัดระหว่างแผ่นพื้น แรงดันดินในพื้นที่ศึกษามีความไม่สมดุล เนื่องจากระดับขุดที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.8 โดยที่ผ่านมายังไม่เคยมีการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างกันดินลักษณะนี้มาก่อน ในการศึกษาจึงติดตั้ง Inclinometer ในดินเพื่อวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง และใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสตีเฟนสพารามิเตอร์ของดินที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของดิน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากำแพง SCC สามารถลดผลเนื่องจากความไม่สมดุลของแรงดันดินและลดแรงอัดในค้ำยันเมื่อใช้ร่วมกับพื้นคอนกรีตหยาบ สตีเฟนสของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง ที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของดินในขั้นตอนการติดตั้ง SCC คือ  $E_u / S_u = 50$  เมื่อความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในดินเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ สตีเฟนสของดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และดินซีเมนต์ ที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของดินในขั้นตอนการขุดดิน คือ  $E_u / S_u = 500, 1000$  และ 500 ตามลำดับและความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในดินเป็น 0.3 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม



รูปที่ 2.8 รูปตัดตามยาวของโครงการก่อสร้างที่ใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่แรงดันดินทั้งสองฝั่งไม่มีความสมดุล (วิชิต, 2556)

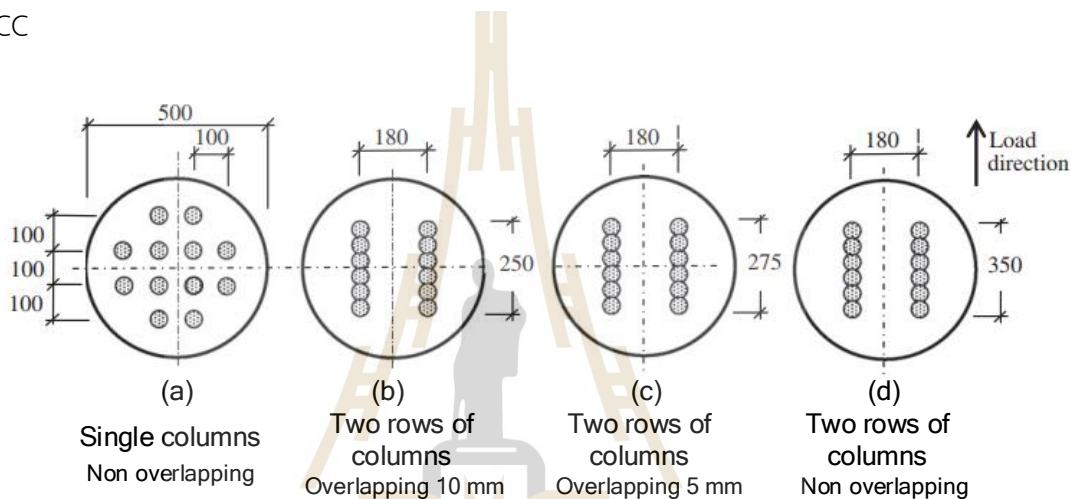
ธนกร (2561) ได้รายงานพฤติกรรมของระบบป้องกันดินพังและหาสติเฟนสของดินเหนียวเพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงสำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงกันดิน 4 รูปแบบ ที่ก่อสร้างในชั้นดินเดียวกัน ได้แก่ กำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง, กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์, และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ดังรูปที่ 2.9 โดยได้วัดการเคลื่อนตัวของกำแพงและแรงอัดในค้ำยัน และนำมาใช้วิเคราะห์หาค่ากลับโดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติและแบบสามมิติเพื่อหาสติเฟนสพารามิเตอร์ในเทอม  $E_u / S_u$  ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 750 ถึง 1250 สำหรับกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องและ 750 ถึง 2000 สำหรับกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าสติเฟนสแปรผกผันกับความเครียดเฉือนที่ประมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ได้จากการวัดจริงในสนาม



รูปที่ 2.9 ผังแสดงตำแหน่งกำแพงกันดินของโครงการ (ธนกร, 2561)

### 2.1.3 อิทธิพลของพื้นที่ทับซ้อนของเสาเข็มดินซีเมนต์

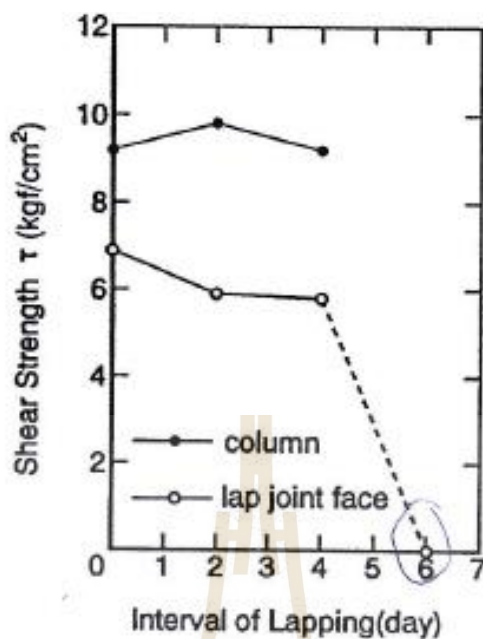
Larsson et al. (2012) ได้ทดสอบการรับแรงทางด้านข้างของ SCC ที่จำลองในกล่องเนื้อตรงขนาด 500 มิลลิเมตร โดยจำลอง SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร โดยจำลองรูปแบบการจัดเรียงตัวทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.10 พบว่า อิทธิพลของการขบเหลื่อมกัน (overlapping) ของ SCC ส่งผลให้มีกำลังต้านทานแรงเฉือนได้สูงกว่า SCC ที่จัดเรียงตัวแบบหนึ่งต้น และไม่มีการขบเหลื่อมกัน เนื่องจาก SCC ที่ขบกันมีกำลังต้านทานการตัดที่สูงกว่าเนื่องจากการเกิดรอยแตก (crack) ที่บริเวณผิวเสาเข็มทำให้พื้นที่ที่มีการขบกันระหว่าง SCC ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของ SCC



รูปที่ 2.10 การจำลองรูปแบบการจัดเรียงตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายในกล่องเนื้อตรง

(Larsson et al., 2012)

Larsson and Hakansson (1998) ทดสอบ Cone penetration test รายงานว่า กำลังต้านทานต่อการเฉือนบริเวณซ้อนทับของ SCC อาจต่ำมากเนื่องจากการการผสมที่ไม่เพียงพอ หรือระยะซ้อนทับน้อยเกินไป โดย (Yoshida, 1996) ได้รายงานความต้านทานแรงเฉือนไว้ว่า แรงเฉือนของดินที่ปรับปรุงในบริเวณที่ทับซ้อนมีค่าเพียง 2 ใน 3 ของกำลังต้านทานของกำลัง SCC ความต้านทานแรงเฉือนส่วนที่ซ้อนทับอยู่ในช่วงร้อยละ 40 และ 70 ของกำลังรับแรงเฉือนของ SCC และกำลังรับแรงเฉือนลดลงจนไม่มีการยึดเกาะหลังจาก 6 วัน ดังรูปที่ 2.11



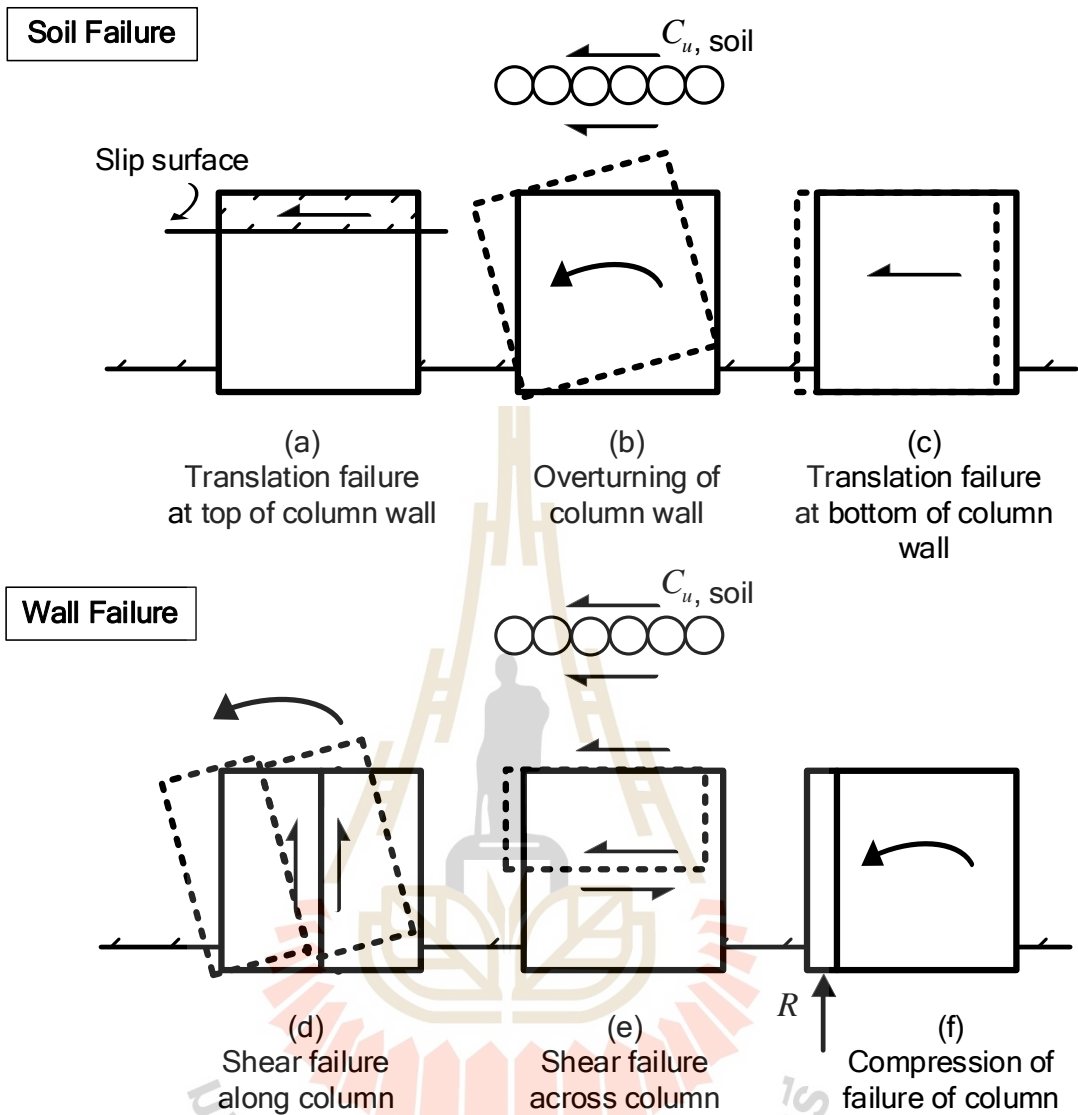
รูปที่ 2.11 กำลังรับแรงเฉือนบริเวณรอยต่อ (Yoshida, 1996)

นอกจากนี้ (Yoshizawa et al, 1997) ยังได้รายงานความต้านทานแรงเฉือนของดินที่ปรับปรุงในบริเวณที่ทับซ้อนโดยได้ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างทดสอบที่เก็บมาจากพื้นที่ทับซ้อนของ SCC พบว่า ความต้านทานแรงเฉือนส่วนที่ซ้อนทับกันที่ก่อสร้างต่างกันไม่เกิน 1 ชั่วโมงมีค่าประมาณร้อยละ 60 ของกำลังรับเฉือนของ SCC และจะลดลงตามระยะเวลาการก่อตัวของดินซีเมนต์

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (วิจิต, 2556) และ (ธนกร, 2561) ใช้ Interface element ในการจำลองการแยกตัวกัน SCC และใช้ค่า Interface reduction factor ( $R_{inter}$ ) = 0.75 เพื่อลดกำลังรับแรงเฉือนของ SCC เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังรับแรงเฉือนในพื้นที่ทับซ้อนที่กล่าวมาข้างต้น

#### 2.1.4 รูปแบบการวิบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

Moseley M.P. and Kirsch K. (2004) ได้นำเสนอพฤติกรรมการวิบัติของกำแพง SCC ที่เกิดจากการพังของกำแพงไว้ดังรูปที่ 2.12 โดยโหมดการวิบัติที่สำคัญได้แก่การวิบัติแบบเฉือน (shear failure) ตามแนวยาวของ SCC และการเฉือนขาดขวาง SCC โหมดการวิบัติเหล่านี้เกิดจากปัจจัยสำคัญได้แก่สภาพการยึดเกาะของ SCC แต่ละต้น (Tangent soil-cement column, TSCC) หรือแบบ Secant soil-cement column, SSCC

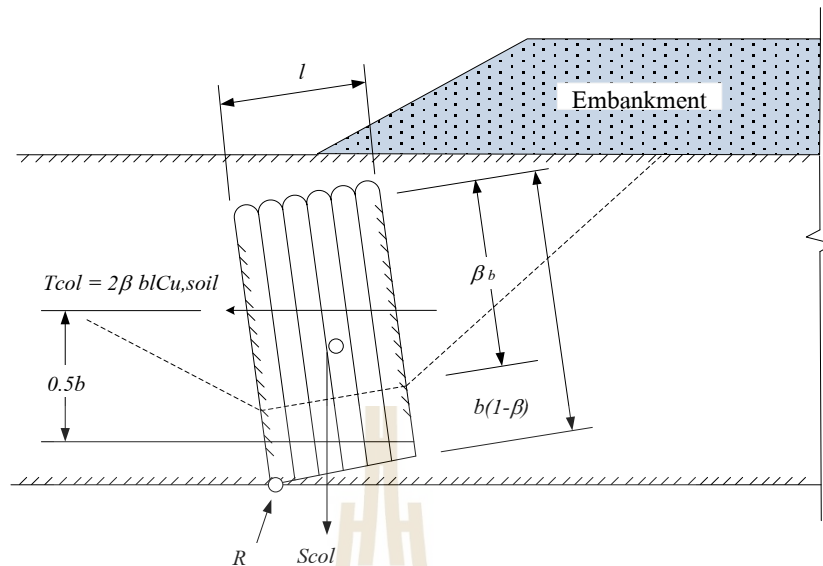


รูปที่ 2.12 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (Brom, 1984)

Yoshida (1996) เสนอรูปแบบการวิบัติของ SCC แบบกลุ่ม โดยมีรูปแบบการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นกับ SCC wall สำหรับงานขุดดินลึกและแนวทางในการแก้ไข ดังนี้

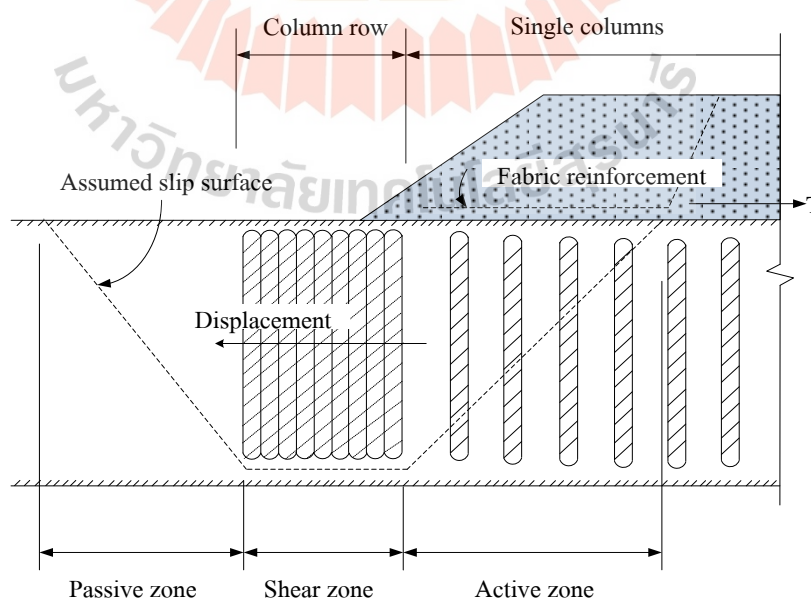
ก) การวิบัติเนื่องจากการพลิก (Failure by overturning) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กั้นดิน โดยความต้านทานโมเมนต์ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กั้นดินจากการพลิกคว่ำ สามารถป้องกันด้วยการเพิ่มความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์หรือจำนวนแถวของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กั้นดิน ดังรูปที่

2.13



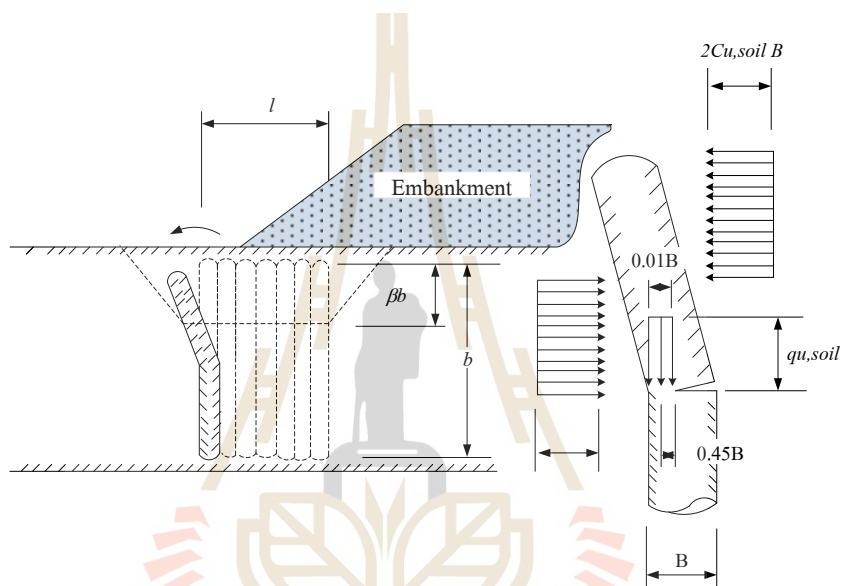
รูปที่ 2.13 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กั้นดินเนื่องจากการพลิก (Yoshida, 1996)

ข) การวิบัติเนื่องจากการเลื่อน (Failure by translation) ของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กั้นดิน การเลื่อนของโครงสร้างเกิดจากความต้านทานแรงเฉือนใต้ฐานรากของโครงสร้างเสาไม่เพียงพอในการรับแรงดันดินด้านข้าง สาเหตุหนึ่งเกิดจากการรบกวนดินใต้โครงสร้างทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงจึงเกิดการเลื่อนของโครงสร้างที่อยู่เหนือระนาบการรบกวน โดยแนวทางในการป้องกันคือโครงสร้างจะต้องใหญ่พอที่จะต้านแรงดันด้านข้างได้ระนาบการเลื่อนด้วยการเพิ่มจำนวนแถวของเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กั้นดินเนื่องจากการเลื่อน (Yoshida, 1996)

ค) การวิบัติเนื่องจากการแยก (Failure by separate) ของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดิน การแยกกันของเสาดินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน มักเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในตำแหน่งใกล้ส่วนบนของโครงสร้างเสา โดยแรงดันด้านข้างที่แยกสามารถประมาณจากสมมติฐานที่ว่าความต้านทานแรงเฉือนทั้ง 2 ข้างของเสาดินซีเมนต์เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ปรับปรุง โดยเสาคจะแยกออกจากกันเมื่อความกว้างของส่วนทับซ้อนระหว่างเสาดินซีเมนต์มีกำลังรับแรงดึงของช่วงทับซ้อนมีค่าน้อยมากๆ ซึ่งความต่อเนื่องหรือความเป็นเนื้อเดียวกันของดินซีเมนต์สามารถกระทำได้จากระยะซ้อนทับของเสาดินซีเมนต์จากขั้นตอนการก่อสร้าง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก (Yoshida, 1996)

นอกจากนี้ Yoshida (1996) ได้กล่าวว่า กำแพง DCM มีความเหมาะสมที่จะสามารถใช้เป็นกำแพงกันดินแบบ gravity retaining wall โดยจะต้องมีการตรวจสอบเสถียรภาพทั้งหมด (overall stability) คือ ความต้านทานการหมุน (overturning), ความต้านทานการเลื่อน (sliding), ความต้านทานการซึม (seepage), ความต้านทานการอูท (heaving) และความต้านทานการลอย (piping) สำหรับงานชุด โดย NAVFAC DM-7.2. (May 1982) ได้เสนอการตรวจสอบเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับตรวจสอบความปลอดภัยของระบบกำแพงกันดิน ดังนี้

FS (Overall = 2.0)

FS (Overturning = 1.5)

FS (Sliding = 1.5)

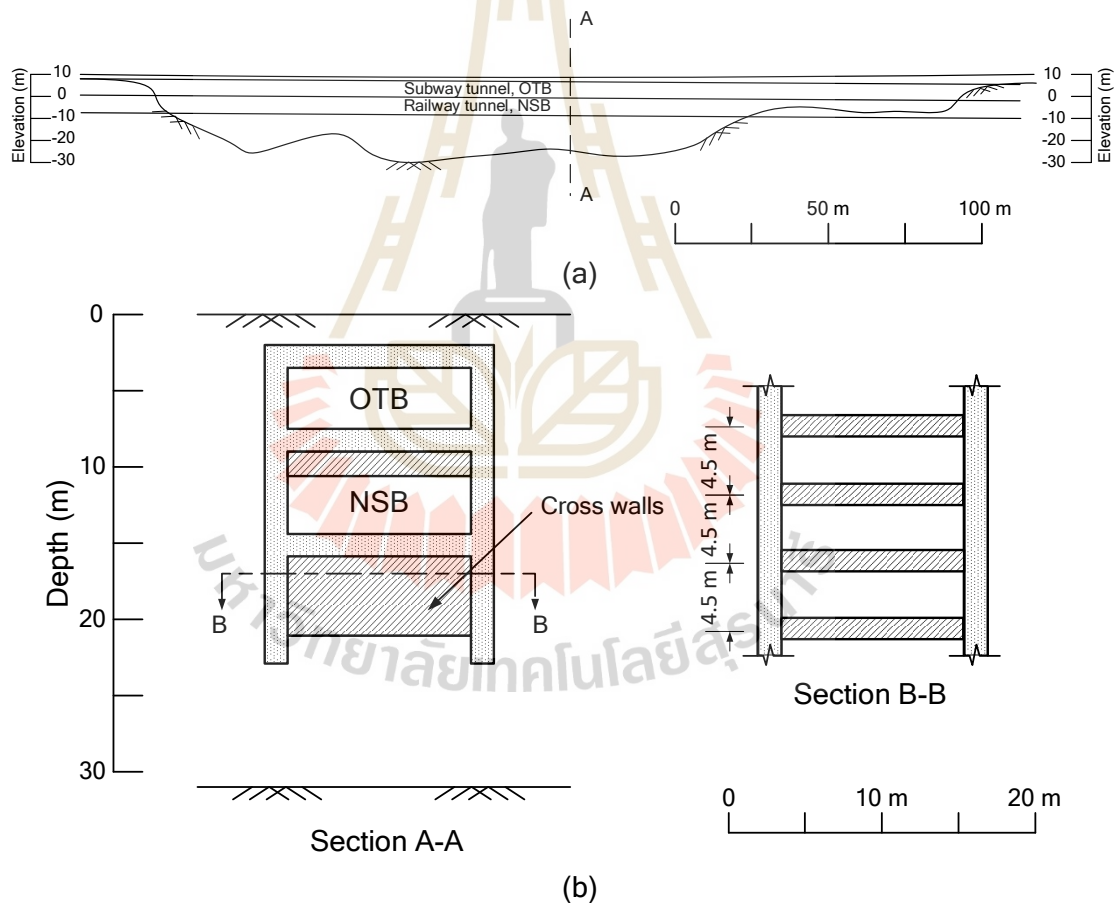
FS (Seepage = 1.5)

FS (Basal Heaving = 3.0)



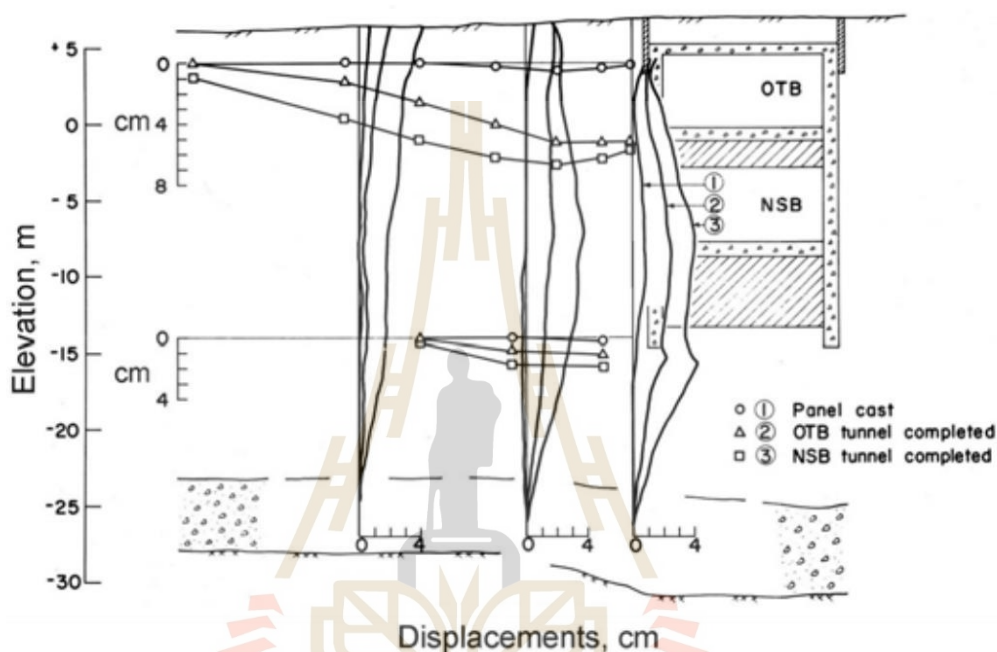
## 2.2 ผนังขวาง

ผนังขวาง (Cross wall) คือโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับแรงอัดจากกำแพงกันดินเพื่อลดการโก่งตัวของกำแพงกันดิน โดยถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1970 ที่กรุง Oslo ประเทศนอร์เวย์ โดย (Eide et al., 1972) ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ผนังขวางกับ D-wall เป็นครั้งแรก ซึ่งได้รายงานไว้โดย (Karlsrud et al., 2008) พบว่า ผนังขวางได้ถูกนำมาใช้ในการลดการอูดของดินใต้บ่อขุด (base heave) และลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินโดยใช้ D-wall ในการก่อสร้างอุโมงค์ทางเชื่อม โดยเป็นทางเชื่อม 2 ชั้นโดยชั้นบนเป็น Subway tunnel (OTB) และชั้นล่างเป็น Railway tunnel (NSB) ดังรูปที่ 2.16a โดยทำการขุดดินลึก 15.5 เมตร และมีผนังขวางอยู่ใต้พื้นอุโมงค์ในแต่ละชั้น มีความหนา 1 เมตร มีระยะห่างของผนังขวางอยู่ที่ 4.5 เมตร ดังรูปที่ 2.16b



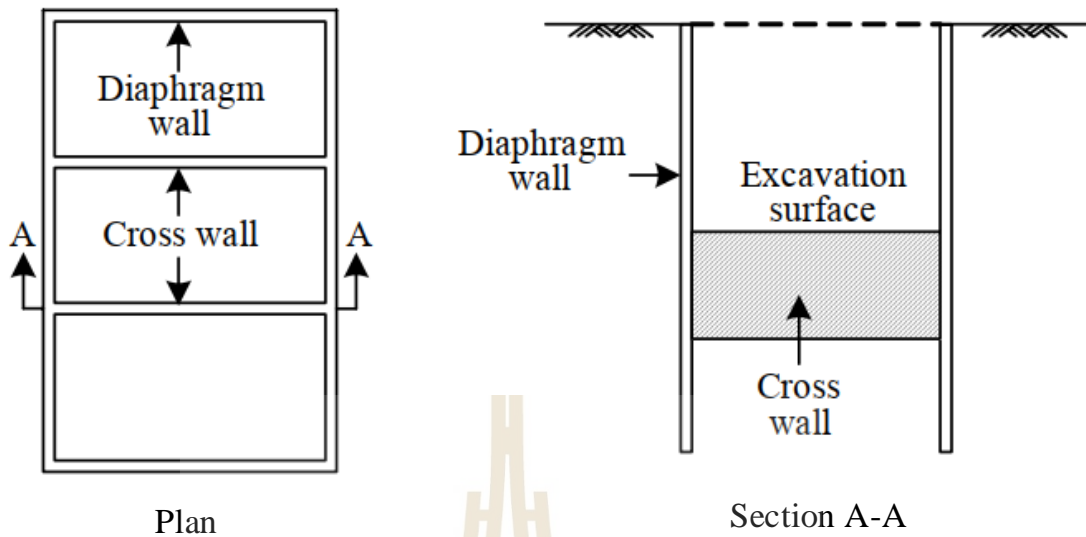
รูปที่ 2.16 โครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางเชื่อมที่กรุง Oslo (a) รูปตัดตามยาว (b) รูปตัดตามขวาง (Karlsrud et al., 1981)

รูปที่ 2.17 เป็นผลการวัดการโก่งตัวของ D-wall โดยที่โครงการนี้ได้มีการนำผนังขวางมาใช้ในงานก่อสร้างนี้พบว่า D-wall มีค่าการโก่งตัวสูงสุดอยู่ที่ 43 มิลลิเมตร และดินที่บริเวณบ่อขุดด้านหลังกำแพงที่ระดับขุดดินมีค่าการทรุดตัว 32 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าดินมีการเคลื่อนตัวไปยังกันบ่อขุดค่อนข้างน้อย กล่าวคือผนังขวางนี้สามารถลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินและลดการเกิดการทรุดตัวของดินได้บ่อขุดได้

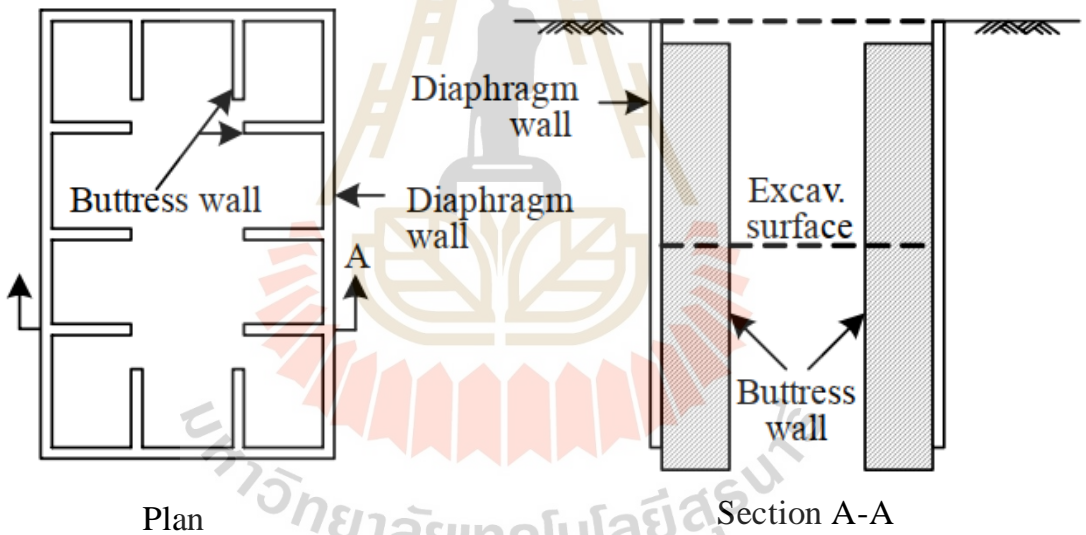


รูปที่ 2.17 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall ของอุโมงค์ทางเชื่อมเมือง Oslo (Karlsruud et al., 1981)

Ou et al. (2006) ได้นำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่มีการประยุกต์ใช้ผนังขวางในงานขุดดินที่ประเทศไต้หวัน สำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินของอาคารสูง 30 ชั้น โดยผนังขวางจะทำหน้าที่รับแรงอัดจากกำแพงกันดินเพื่อลดการโก่งตัวของกำแพงและลดการทรุดตัวจากผิวดินที่อาจก่อผลกระทบต่อพื้นที่ข้างเคียง เนื่องจากพื้นที่การก่อสร้างอยู่ติดกับอาคารสูง อีกทั้งยังนำ Buttress wall มาช่วยลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินอีกด้วย โดยลักษณะทั่วไปของผนังขวางจะทำการก่อสร้างไปพร้อมกำแพงกันดินและจะทำการรื้อออกโดยการสกัดเมื่อทำการขุดดินออก โดยจะหยุดสกัดผนังขวางก็ต่อเมื่อทำการขุดดินถึงระดับที่ต้องการ และผนังขวางที่ไม่ถูกสกัดจะทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยันกับกำแพงกันดินดังรูปที่ 2.18 แต่สำหรับ Buttress wall จะไม่มีการรื้อออกจนกว่าจะมีการก่อสร้างโครงสร้างของอาคาร โดยที่ Buttress wall จะยื่นออกจากกำแพงกันดินเพื่อรับแรงต้านของดินในแนวนอนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวของ Buttress wall ดังรูปที่ 2.19 โดยแรงทั้งสองนี้จะทำหน้าที่เป็นค้ำยันที่รองรับการโก่งตัวของกำแพงกันดินที่ได้รับผลกระทบจากแรงต้านของดิน

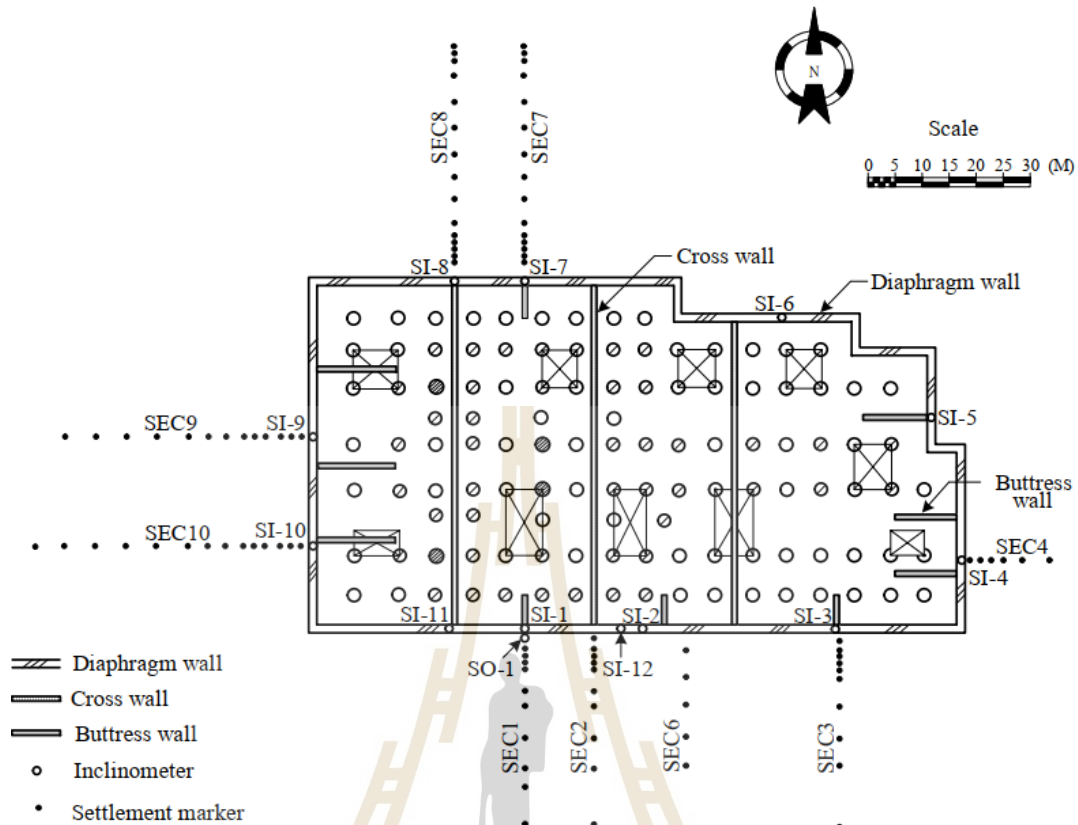


รูปที่ 2.18 แผนผังของ Cross wall (Ou et al., 2006)



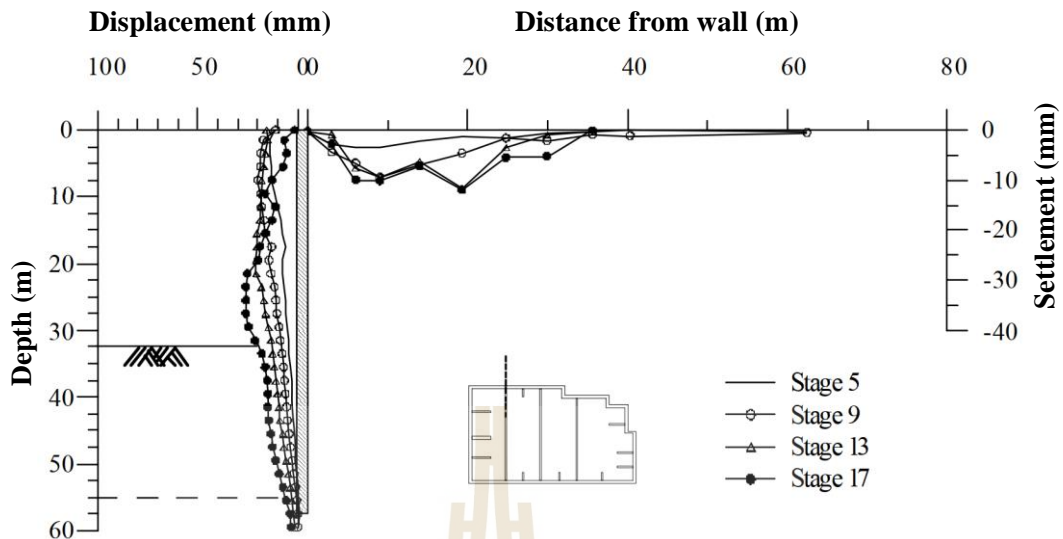
รูปที่ 2.19 แผนผังของ Buttress wall (Ou et al., 2006)

โดยมีการขุดดินลึก 32.5 เมตร เพื่อก่อสร้างห้องใต้ดิน 7 ชั้น ที่ใช้วิธีการก่อสร้างแบบ bottom-up โดยใช้ D-wall เป็นกำแพงกันดินมีความหนา 1.5 เมตร และความลึก 57.5 เมตร ร่วมกับการใช้ผนังขางที่มีความหนา 1 เมตร ความลึก 43.5 เมตร และมีความยาว 66.1 เมตร โดยมีระยะห่างระหว่างผนังขางมากที่สุด 25.6 เมตร รวมทั้งยังมีการติดตั้งเครื่องมือวัดภาคสนาม Inclinator วัดการโก่งตัวของ D-wall และ Settlement marker วัดการทรุดตัวที่ผิวดิน ดังรูปที่ 2.20



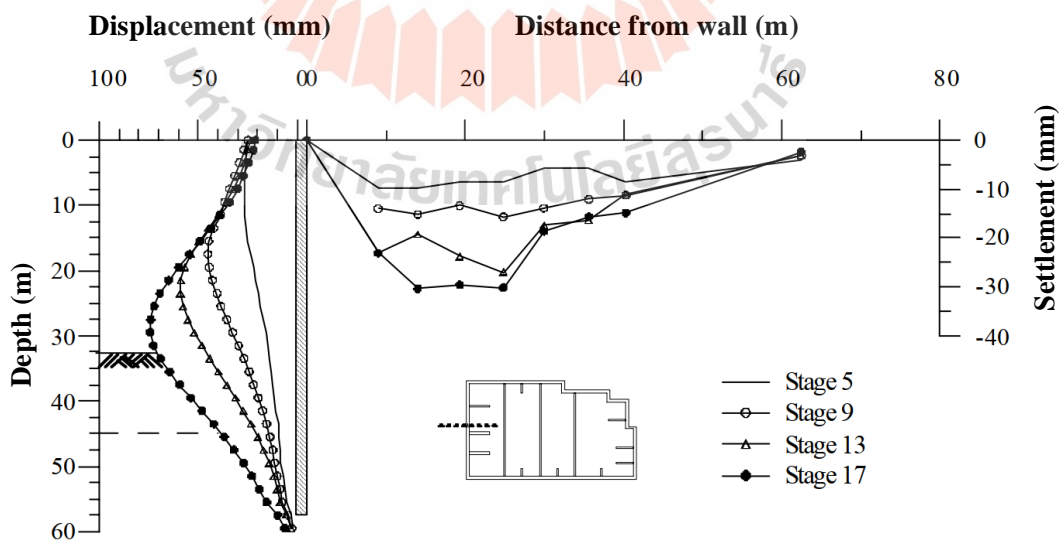
รูปที่ 2.20 แผนผังของโครงการก่อสร้างห้องใต้ดินลึก 32.5 เมตร (Ou et al., 2006)

โครงการนี้มีลักษณะของชั้นดินเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 30 เมตร และมีอาคารข้างเคียงอยู่ติดกับโครงการนี้ ทำให้ในการก่อสร้างห้องใต้ดินจะต้องไม่สร้างผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงหรือพื้นผิวดินบริเวณนั้น เมื่อมีการนำผนังขวางมาใช้ร่วมกับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกพบว่า การโก่งตัวของ D-wall ที่มีการติดตั้งผนังขวาง มีการโก่งตัวอยู่ที่ 29 มิลลิเมตร และการทรุดตัวที่ผิวดินอยู่ที่ 12 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างจาก D-wall 50 เมตร ดังรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่า ผนังขวางสามารถช่วยลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินและลดการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงได้



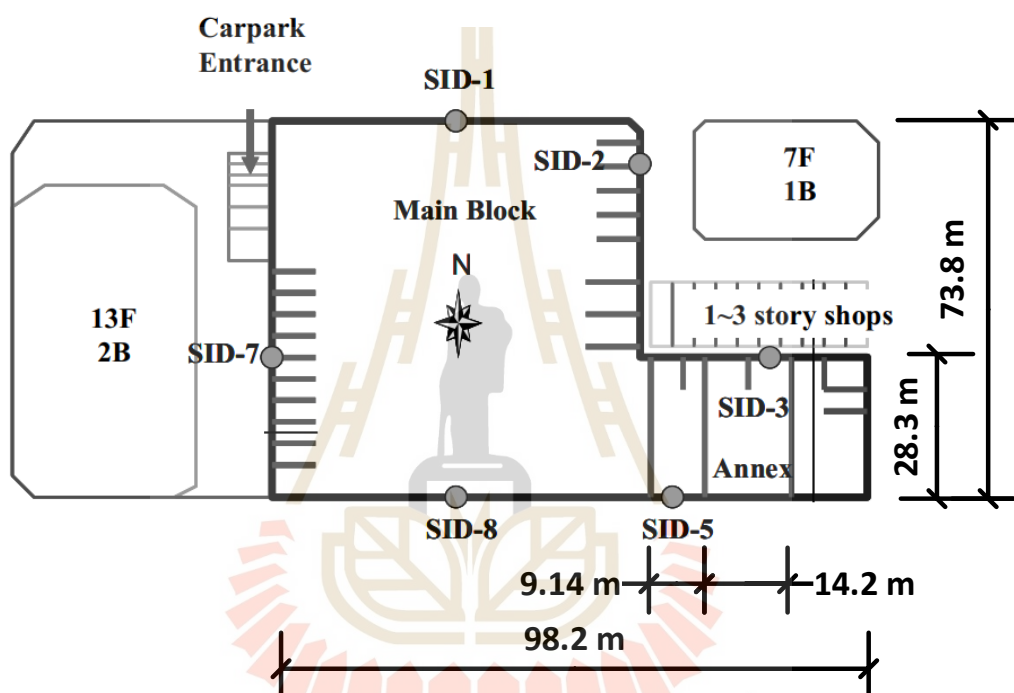
รูปที่ 2.21 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall และการทรุดตัวที่ผิวดินตำแหน่งการวัด SI-8 และ SEC8 (Ou et al., 2006)

รูปที่ 2.22 เป็นผลการวัดการโก่งตัวของ D-wall และผลการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่มีการนำ Buttress wall มาใช้ร่วมในการขุดชั้นใต้ดินของโครงการนี้ ตามตำแหน่งดังรูปที่ 2.22 โดยมีความหนา 1 เมตร ความลึก 43.5 เมตร และมีความยาว 14.5 เมตร พบว่า การโก่งตัวของ D-wall ที่มีการใช้ Buttress wall มีค่า 74.4 มิลลิเมตร และการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง 30.4 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างจาก D-wall 65 เมตร กล่าวคือ Buttress wall สามารถช่วยลดการโก่งตัวของ D-wall และลดการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง



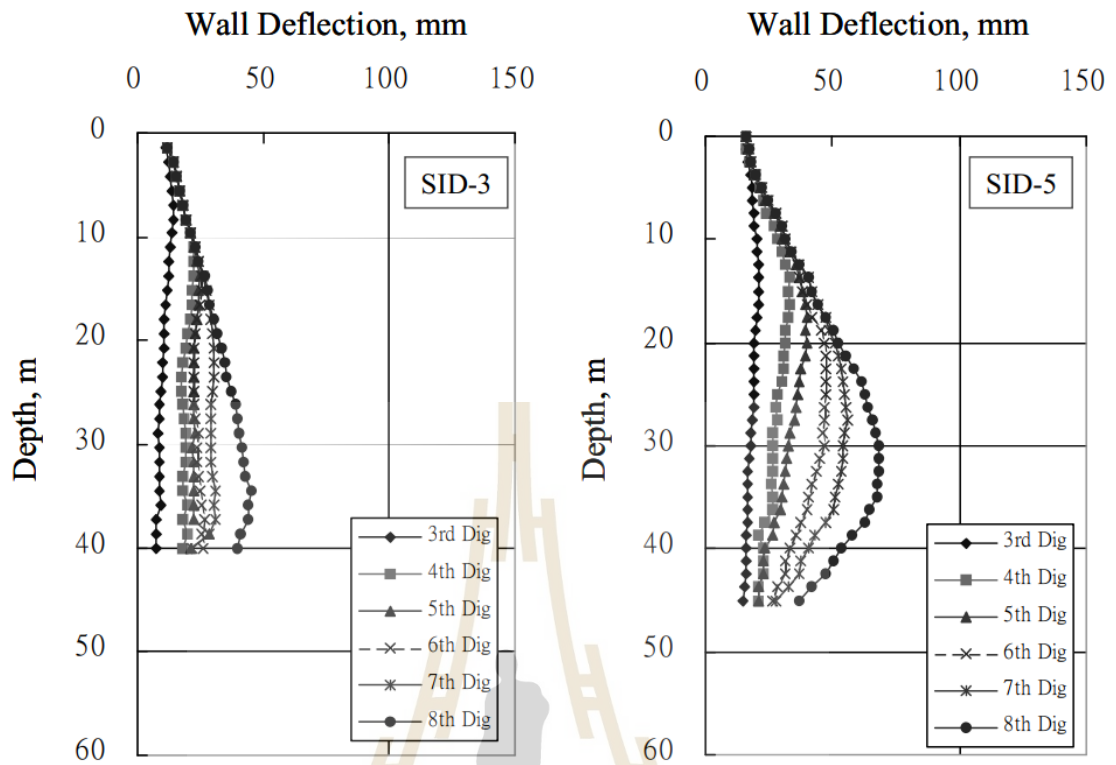
รูปที่ 2.22 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall และผลการทรุดตัวที่ผิวดินตำแหน่งการวัด SI-9 และ SEC9 (Ou et al., 2006)

Moh and Hwang (1999) ได้นำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่มีการประยุกต์ใช้ผนังขวางในงานขุดดินสำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินของอาคารสูง ที่มีการขุดดินลึก 26.6 เมตร ตั้งอยู่ในประเทศไต้หวัน โดยใช้วิธีการก่อสร้างห้องใต้ดินแบบ top-down ใช้ D-wall เป็นกำแพงกันดินมีความหนา 1.2 เมตร และความลึก 55 เมตร ร่วมกับการใช้ผนังขวางยาว 28.3 เมตร หนา 1 เมตร ลึก 29 เมตร และมีระยะห่างระหว่างผนังขวางมากที่สุด 14.2 เมตร นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งเครื่องมือการตรวจวัด Inclinometer ดังรูปที่ 2.23



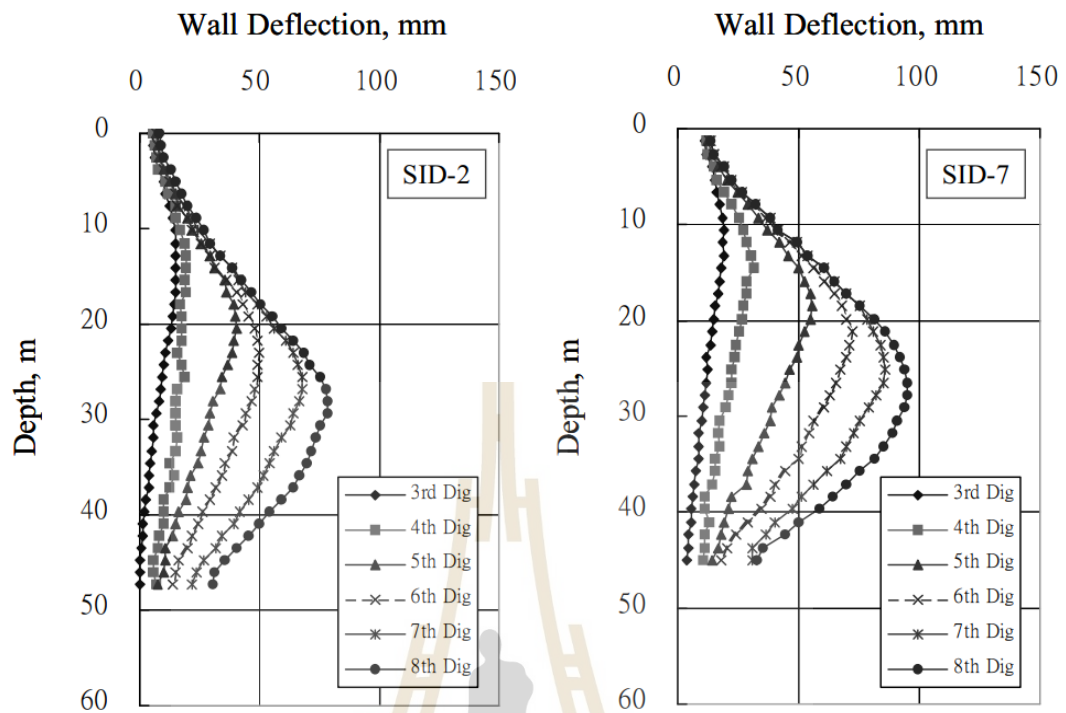
รูปที่ 2.23 แผนผังโครงการก่อสร้างห้องใต้ดินลึก 26.6 เมตร (Moh and Hwang, 1999)

โครงการนี้มีลักษณะของชั้นดินเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 34 เมตร และมีอาคารสูงเป็นอาคารข้างเคียงที่อยู่ติดกับโครงการนี้ ในการก่อสร้างห้องใต้ดินนี้จึงต้องไม่สร้างผลกระทบใดๆ ที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียงหรือพื้นผิวดินบริเวณนั้น ซึ่งผนังขวางสามารถช่วยลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินได้ โดยการโก่งตัวของ D-wall ที่มีการติดตั้งผนังขวาง ที่ตำแหน่ง SID-3 มีการโก่งตัวอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่ง SID-5 มีการโก่งตัวอยู่ที่ 70 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของผนังขวางที่นำมาใช้ร่วมกับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกสามารถลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินได้



รูปที่ 2.24 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall ที่ตำแหน่งการวัด SID-3 และ SID-5  
(Moh and Hwang, 1999)

นอกจากนี้ทางโครงการได้มีการนำ Buttress wall มาใช้ร่วมกับการก่อสร้างห้องใต้ลิค ดังรูปที่ 2.23 โดยมีความหนา 1 เมตร ความลึก 40 เมตร และมีความยาวประมาณ 6 ถึง 8 เมตร โดยมีผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall ที่ตำแหน่ง SID-2 ประมาณ 80 มิลลิเมตร และตำแหน่ง SID-7 ประมาณ 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการใช้ Buttress wall ร่วมกับการก่อสร้างห้องใต้ดินลิค สามารถลดการโก่งของ D-wall ได้ถึงแม้ว่าการโก่งตัวของ D-wall จะมีค่าที่สูงกว่า D-wall ที่ใช้ร่วมกับผนังขวาง

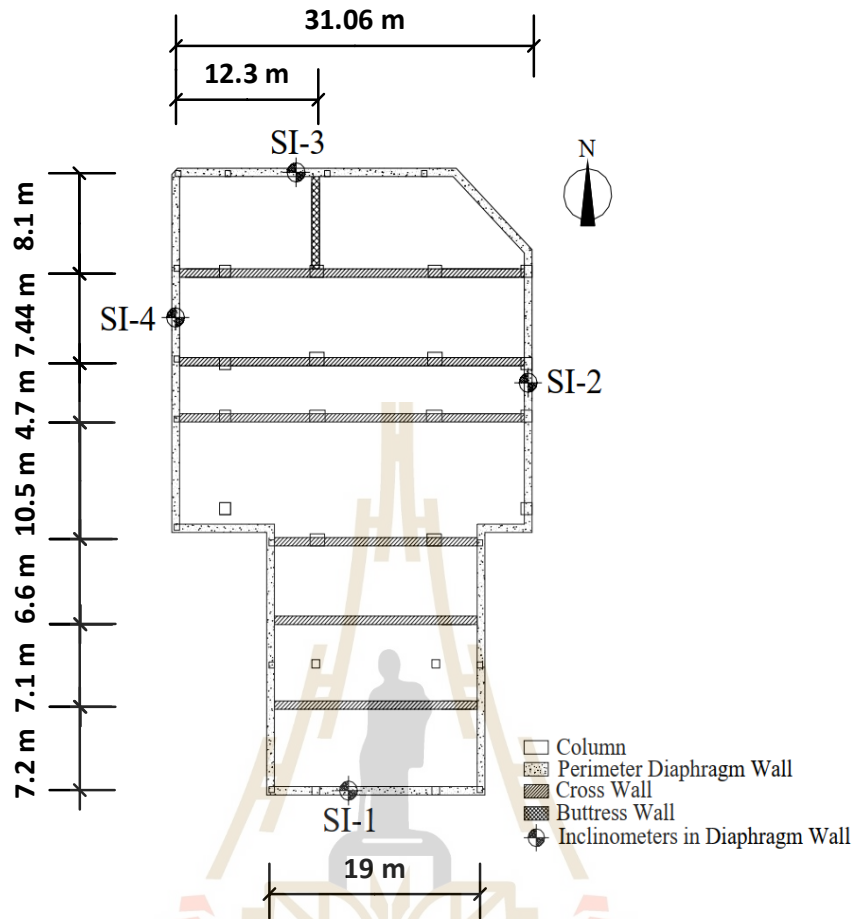


รูปที่ 2.25 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall ที่ตำแหน่งการวัด SID-2 และ SID-7 (Moh and Hwang, 1999)

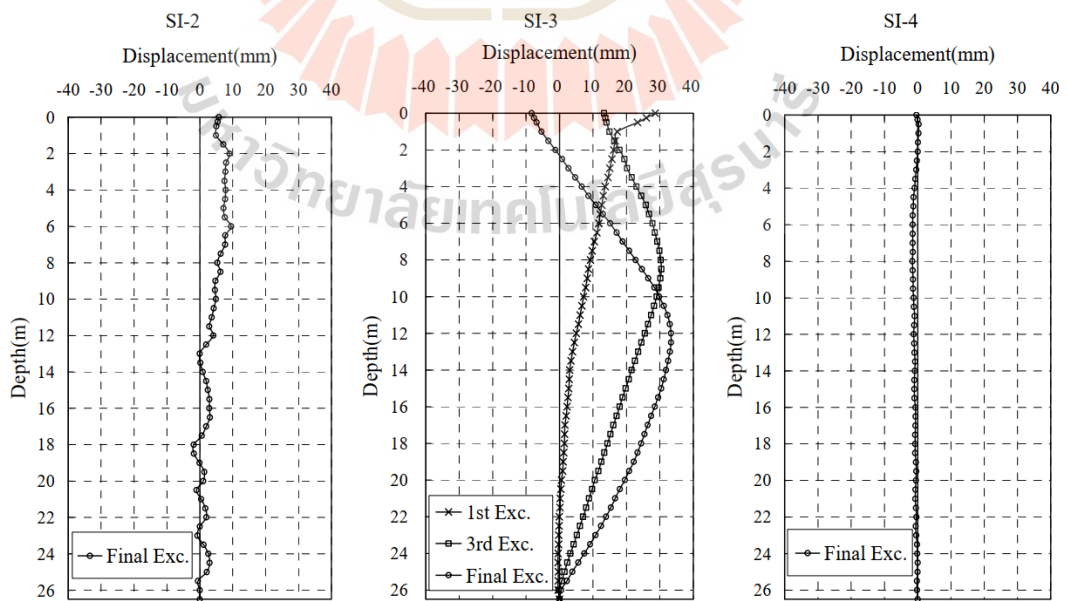
Hsieh et al. (2008) ได้นำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่มีการประยุกต์ใช้ผนังขวางในการก่อสร้างห้องใต้ดินของอาคารสูง 14 ชั้น ที่จุดดินลึก 12 เมตร โดยก่อสร้างห้องใต้ดินทั้งหมด 3 ชั้น ตั้งอยู่ในประเทศไต้หวัน ใช้วิธีการก่อสร้างห้องใต้ดินแบบ bottom-up โดยใช้ D-wall เป็นกำแพงกันดินที่มีความหนา 0.7 เมตร มีความลึก 27 เมตร ร่วมกับการใช้ผนังขวางยาว 31.06 เมตร หนา 0.7 เมตร ลึก 21 เมตร และมีระยะห่างระหว่างผนังขวางกับผนังขวางมากที่สุด 7.44 เมตร ดังรูปที่ 2.26

โครงการนี้มีลักษณะของชั้นดินเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 39 เมตร โดยมีอาคารข้างเคียงที่อยู่ติดกับโครงการนี้เป็นอาคารสูง อยู่ห่างออกไปประมาณ 10 เมตร ในการก่อสร้างห้องใต้ดินนี้ต้องไม่สร้างผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารข้างเคียงหรือพื้นผิวดินบริเวณนั้น ซึ่งผนังขวางสามารถช่วยลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินได้และยังมีการติดตั้งเครื่องมือการวัดไว้ตามตำแหน่งดังรูปที่ 2.26 โดยมีผลการโก่งตัวสูงสุดของ D-wall ที่ตำแหน่ง SI-2 ประมาณ 10 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง SI-3 ประมาณ 33 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่ง SI-4 ประมาณ 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.27



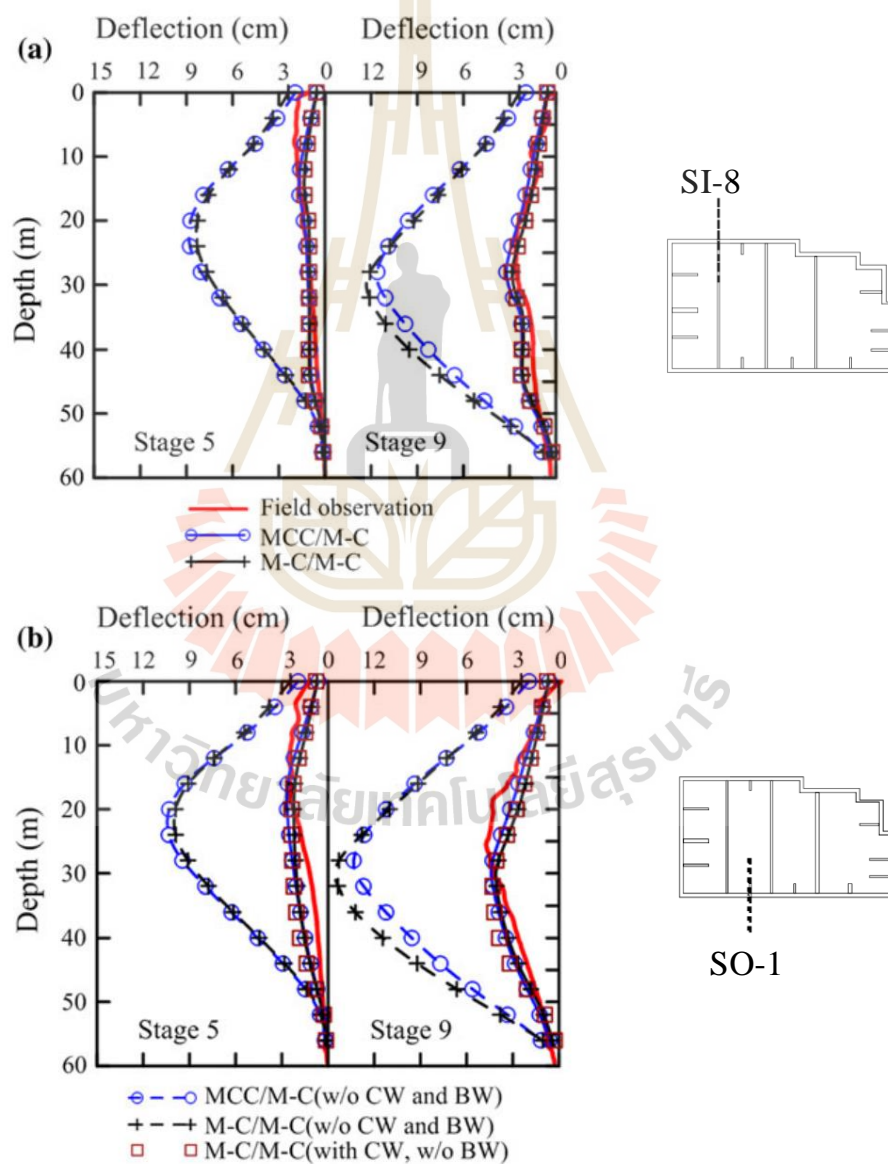


รูปที่ 2.26 แผนผังโครงการก่อสร้างห้องใต้ดินลึก 12 เมตร (Hsieh et al., 2008)



รูปที่ 2.27 ผลการตรวจวัดการโก่งตัวของ D-wall ที่ตำแหน่ง SI-2, SI-3 และ SI-4 (Hsieh et al., 2008)

Hsieh et al. (2012) ได้นำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่มีการประยุกต์ใช้ผนังขวางในการก่อสร้างที่ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis) เพื่อศึกษาถึงการก่อสร้างที่มีการนำผนังขวางมาใช้ร่วมกับการก่อสร้างว่า ประสิทธิภาพของผนังขวางสามารถช่วยลดการโก่งตัวของกำแพงกันดินได้มากน้อยเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับงานก่อสร้างที่ไม่มีการใช้ผนังขวาง โดยได้นำข้อมูลของโครงการก่อสร้างห้องใต้ดินลึก 32.5 เมตร (Ou et al., 2006) มาทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนามที่ได้จาก Inclinometer ที่ Stage 5 (mid excavation) และ Stage 9 (final excavation) ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขกับผลการตรวจวัดในสนาม

(a) ตำแหน่งการวัด SI-8 (b) ตำแหน่งการวัด SO-1 (Hsieh et al., 2012)

จากรูปที่ 2.28 การก่อสร้างที่มีการใช้ผนังขวางมีการโค้งตัวของกำแพงอยู่ที่ 3.12 เซนติเมตร และ 4.11 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งการวัด SI-8 และ SO-1 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การก่อสร้างที่ไม่มีการใช้ผนังขวางมีการโค้งตัวอยู่ที่ 15.13 เซนติเมตร และ 14.58 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งการวัด SI-8 และ SO-1 ตามลำดับ เห็นว่าการใช้ผนังขวางร่วมกับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกสามารถช่วยในการลดการโค้งตัวของกำแพงกันดินได้สูง

นอกจากนี้ (Hsieh et al., 2012) ยังทำการรวบรวมข้อมูลของโครงการก่อสร้างห้องใต้ดินที่มีการนำผนังขวางมาช่วยลดการโค้งตัวของกำแพงกันดินไว้ทั้งหมด 4 โครงการ รวมโครงการข้างต้นด้วย โดยได้นำเสนอประสิทธิภาพของการใช้ผนังขวางในการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกดังตารางที่ 2.1

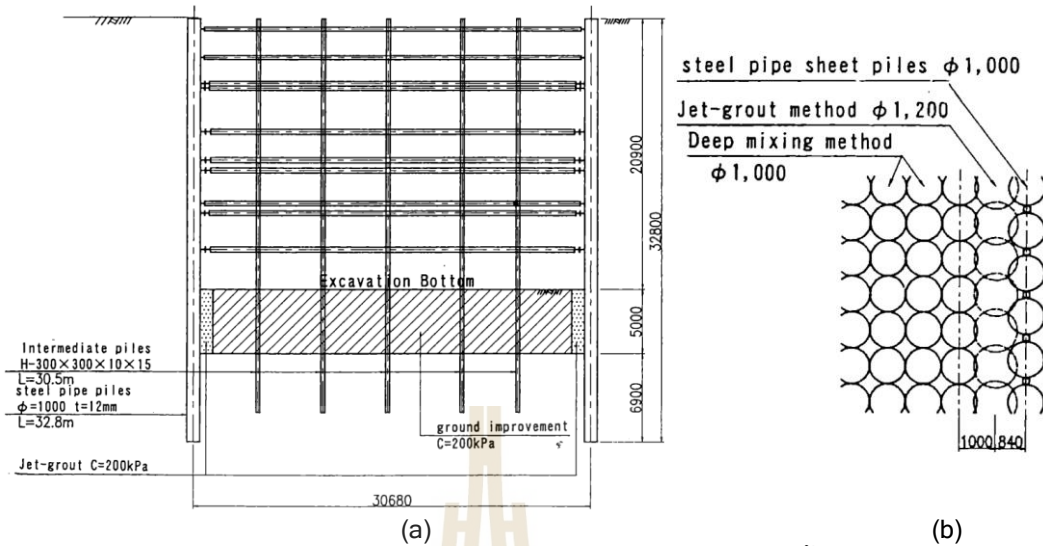
ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและผลการตรวจวัดภาคสนาม

Project No.	1	2	3	4
$H_E$ (Final excavation) [m]	32.5	23.6	13.5	12.6
$H_W$ (Depth of D-wall) [m]	61	43	30	28.5
$H_{CW}$ (Depth of cross wall) [m]	45	35	20	28.5
L (Length of cross wall) [m]	66.1	35	20	28.5
L' (Distance of cross wall) [m]	26	45.6	28.7	34
$\delta_{hm,cw}$ with CW <sup>a</sup> [mm]	31.2	27	16.3	13.6
$\delta_{hm,cw}$ with out CW <sup>a</sup> [mm]	151.3	117.3	49.5	79
Rb cw [%]	79.4	77.0	67.1	82.8

<sup>a</sup>Maximum lateral wall deflection at the cross wall

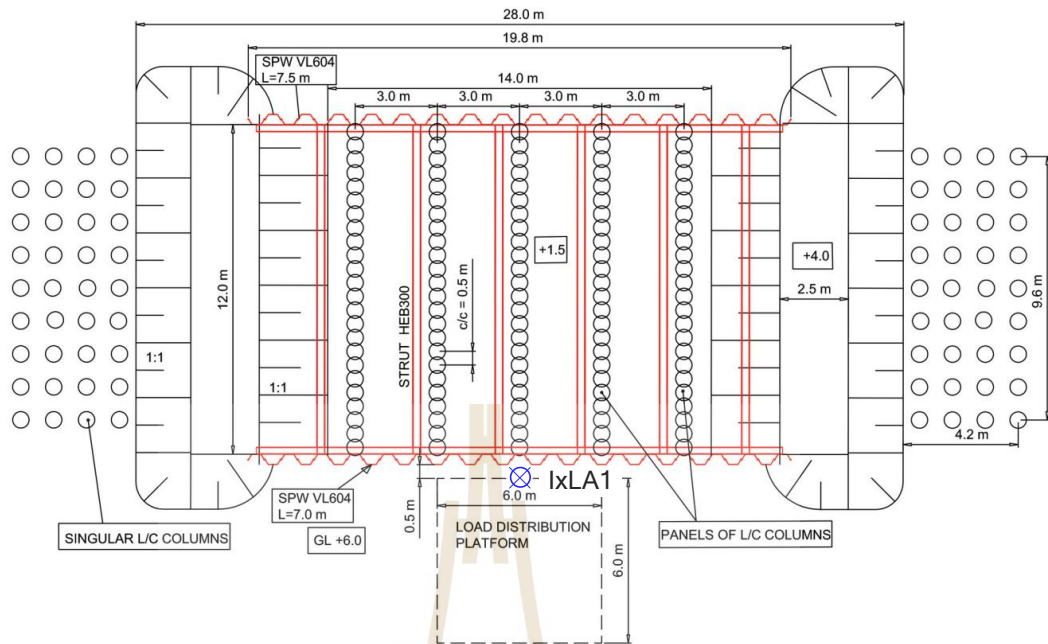
<sup>b</sup>Percentage of reduction at cross wall

Kubota et al. (2000) ได้นำเสนอผลการตรวจวัดการป้องกันการเกิดการออกในระหว่างการก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยการปรับปรุงคุณภาพดินทั่วทั้งกันบ่อขุดที่ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้กำแพงกันดินเป็น steel pipe sheet pile ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1,000 มิลลิเมตร ที่มีการขุดดินลึก 21 เมตร ร่วมกับการใช้ SCC ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่กันบ่อในแนวตั้งฉากกับแนวกำแพง Sheet pile ที่นำมาใช้ในการค้ำยันจากการขุดดินลึก ซึ่งเรียกกำแพงชนิดนี้ว่า Cross wall ที่มีความลึก 5 เมตร ดังรูปที่ 2.29 พบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินที่กันบ่อสามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงได้ อีกทั้งยังช่วยลดการเกิดการออกที่กันบ่อให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยและยังช่วยเพิ่มแรงต้านด้าน Passive ให้กำแพงมีเสถียรภาพที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.29 การใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินมาใช้ร่วมกับงานก่อสร้างชั้นใต้ดินที่ประเทศญี่ปุ่น  
(a) ภาพตัดตามขวางของโครงการ (b) ภาพมุมมองทางด้านบน (Kubota et al., 2000)

Ignat et al. (2016) ได้ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงเหล็ก Sheet pile ที่มีการใช้ SCC เป็นผนังขวางที่ก่อสร้างแบบ Dry mixing โดยได้ทำการทดสอบแบบ full scale ที่ประเทศสวีเดน ทดสอบในที่โล่งแจ้ง ห่างไกลจากอาคารและสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ ทำการทดสอบทั้งหมด 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ขุดดินลึก 4.5 เมตร ใช้ระยะห่างของผนังขวาง 3 เมตร และแบบที่ 2 ขุดดินลึก 4.5 เมตร ใช้ระยะห่างของผนังขวาง 1.5 เมตร มีขนาดบ่อขุด 20x30 ตารางเมตร ลักษณะของชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อนหนา 10 เมตร หลังจากนั้นจึงเป็นดินทราย กำแพงเหล็ก Sheet pile ฝั่งลึก 7 เมตร ผนังขวางที่ใช้ SCC มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ลึก 9 เมตร มีระยะ overlapping 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.30 ในการทดสอบจะทำการทดสอบจนถึง Ultimate หรือดินเกิดการวิบัติ และมีการติดตั้งน้ำหนักบรรทุกบริเวณด้านบนของกำแพงเหล็ก Sheet pile โดยใช้ถังขนาดใหญ่ 6x6 ตารางเมตร ที่บรรจุดินจนเต็มถึง ดังรูปที่ 2.31a นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งเหล็กค้ำยันชั่วคราวไว้ต่ำกว่าระดับผิวดิน 1 เมตร และติดตั้ง Inclinator ไว้ในดินหลังกำแพงเหล็ก Sheet pile เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของดินหลังเกิดการวิบัติ พบว่า การวิบัติเกิดขึ้นแบบฉับพลัน (brittle failure) ทั้งสองการทดสอบ โดยที่การทดสอบแบบที่ 1 มีการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดการวิบัติ 80 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate capacity,  $q_{load}$ ) เท่ากับ 40 กิโลปาสคาล และการทดสอบแบบที่ 2 มีการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดการวิบัติ 260 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 55 กิโลปาสคาล ดังรูปที่ 2.32 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างของผนังขวางส่งผลต่อประสิทธิภาพในการต้านแรงกระทำทางด้านข้างของกำแพง



รูปที่ 2.30 แผนผังการทดสอบแบบ full scale ที่ประเทศสวีเดน (Ignat et al., 2016)

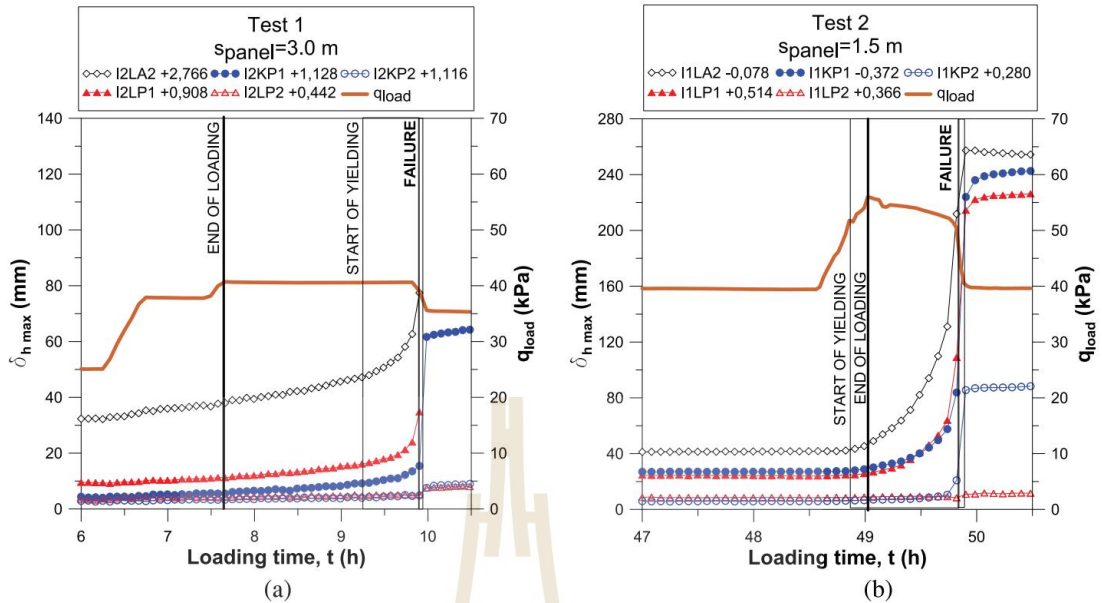


(a)

(b)

รูปที่ 2.31 ภาพถ่ายการทดสอบแบบ full scale ที่ประเทศสวีเดน

(a) ก่อนเกิดการวิบัติ (b) หลังเกิดการวิบัติ (Ignat et al., 2016)

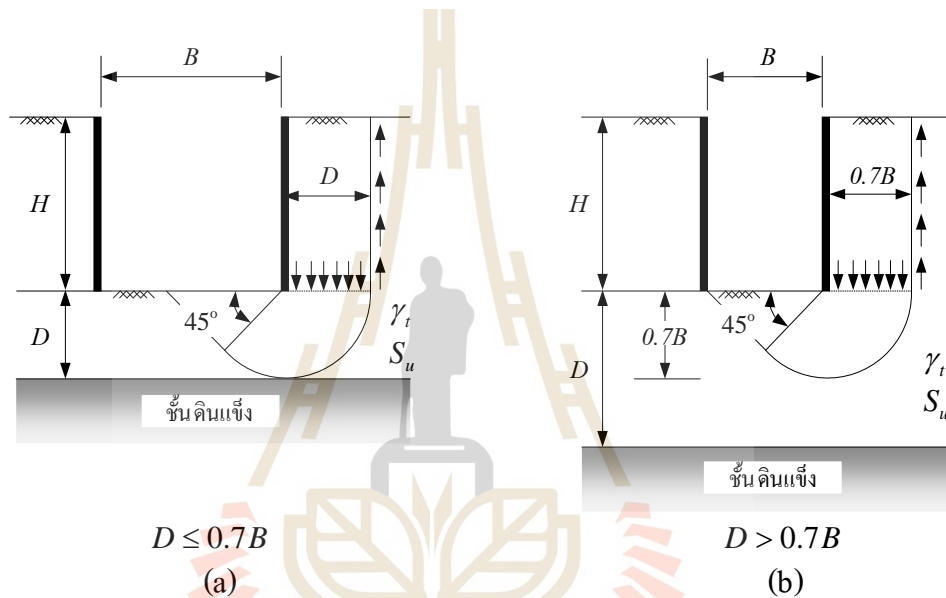


รูปที่ 2.32 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินที่ทดสอบจนดินเกิดการวิบัติของการทดสอบแบบ full scale ที่ประเทศสวีเดน (a) การทดสอบแบบที่ 1 (b) การทดสอบแบบที่ 2 (Ignat et al., 2016)

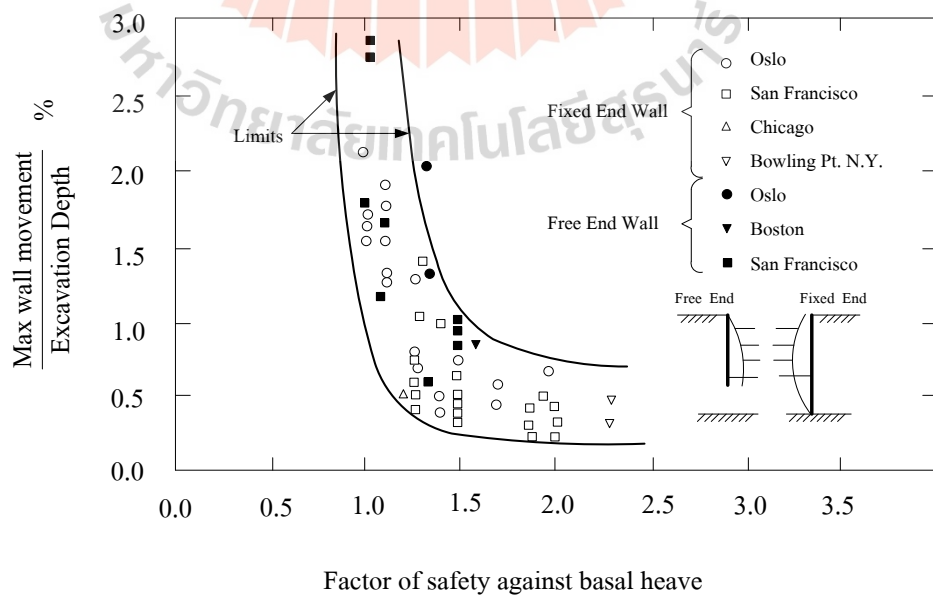
จากการศึกษาผลงานที่เกี่ยวข้องกับผนังขวาง พบว่างานก่อสร้างที่ได้มีการนำผนังขวางมาใช้ ร่วมกับการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากหนา 20 ถึง 30 เมตร โดยที่งานก่อสร้างในประเทศนอร์เวย์ มีระยะห่างของผนังขวางค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับผนังขวางที่ใช้ในการก่อสร้างประเทศไต้หวัน เนื่องจากกำแพงกันดิน D-wall ที่ใช้นั้นได้มีการออกแบบให้เหล็กเสริมในแนวราบระหว่าง D-wall แต่ละแผง (panel) มีความต่อเนื่องกัน ส่งผลให้ D-wall มีความแข็งเชิงดัด (flexural rigidity) ในแนวราบทำให้สามารถรับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันดินทางด้านข้างได้ จึงทำให้สามารถใช้ประสิทธิภาพของผนังขวางที่มีระยะห่าง 20 ถึง 30 เมตร ได้อย่างเต็มที่ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่เคยมีการศึกษาถึงผนังขวางที่เป็น SCC ที่ใช้ร่วมกับกำแพงกันดิน SCC ที่ไม่มีใช้ระบบค้ำยันชั่วคราว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ แบบไม่ใช่ค้ำยันที่เพิ่มเสถียรภาพของบ่อชุดด้วยผนังขวาง SCC ในงานชุดดินก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดในชั้นดินเหนียวอ่อน ที่มีระยะห่างจากอาคารข้างเคียง 2.5 เมตร

### 2.3 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของทางด้านข้างของกำแพงกันดิน

Mana and Clough (1981) ได้เสนอวิธีการประมาณการแอนตัวของกำแพง โดยใช้วิธีรวบรวมข้อมูลเชิงประสบการณ์ (Empirical method) ของการแอนตัวมากที่สุดของกำแพงชนิด Sheet pile ที่ใช้ระบบค้ำยันด้านข้างจากการขุดดินในหลายๆโครงการ เพื่อสร้างกรอบความสัมพันธ์กับกลไกการวิบัติ (failure mechanism) ของดินใต้บ่อขุดที่ได้เสนอโดย (Terzaghi, 1943) ดังรูปที่ 2.33 ซึ่งพบว่าที่การเคลื่อนตัวแนวราบสูงสุดต่อระดับการขุดมีค่ามากจะทำให้สัดส่วนความปลอดภัยต่อการปูดของดินใต้บ่อขุดมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.33 กลไกการวิบัติเมื่อ (a) ระดับชั้นดินแข็งอยู่ตื้น (b) ระดับชั้นดินแข็งอยู่ลึก (Terzaghi, 1943)



รูปที่ 2.34 การประมาณการแอนตัวของกำแพงกันดินชนิด Sheet pile (Mana and Clough, 1981)

นอกจากนี้ (Terzaghi, 1943) ยังได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อชุด (Factor of safety against base heave,  $F.S.$ ) สำหรับกรณีที่เกิดการวิบัติเป็นดังรูปที่ 2.33a และ 2.33b ไว้ดังสมการที่ 2.1a และ 2.1b ตามลำดับ

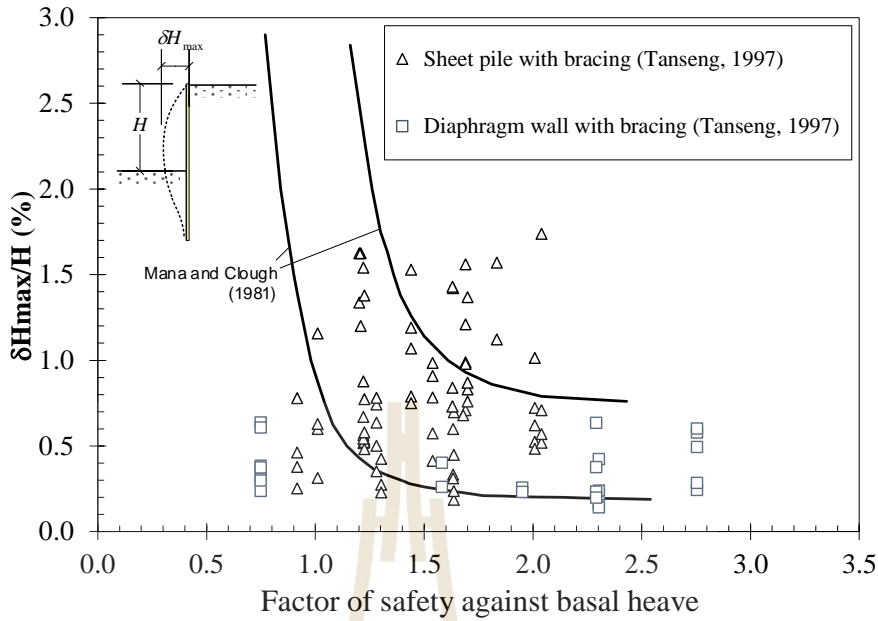
$$FS = \frac{1}{H} \frac{5.7S_u}{\gamma_t - \frac{S_u}{D}} \quad (2.1a)$$

$$FS = \frac{1}{H} \frac{5.7S_u}{\gamma_t - \frac{S_u}{0.7B}} \quad (2.1b)$$

เมื่อ	$H$	คือ	ความลึกในการขุดดิน
	$S_u$	คือ	Undrained shear strength
	$\gamma_t$	คือ	หน่วยน้ำหนักของดิน
	$D$	คือ	ระยะห่างของระดับดินขุดถึงชั้นดินแข็ง
	$B$	คือ	ความกว้างของบ่อชุด

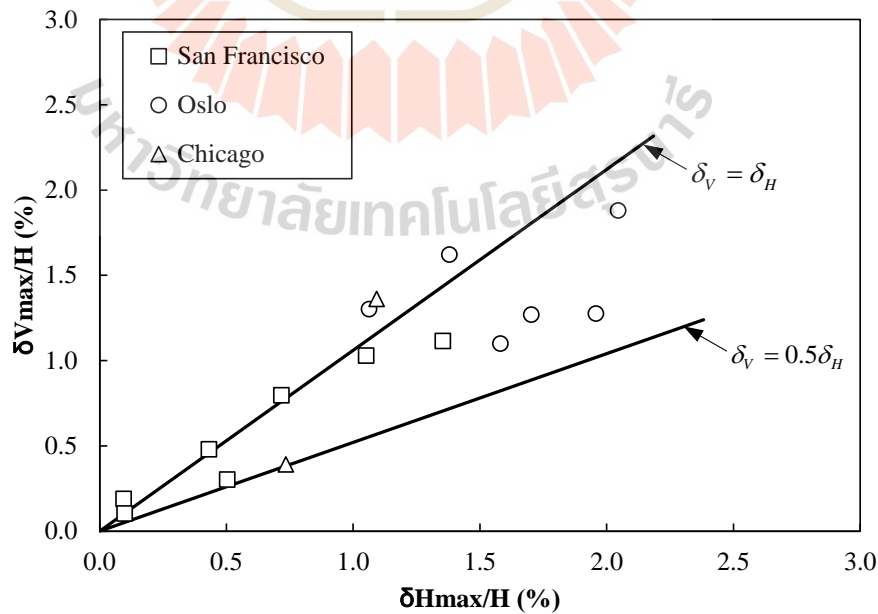
Tanseng (1997) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินที่มีการก่อสร้างขึ้นใต้ดินในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯของกำแพงชนิด Sheet pile และ D-wall ที่มีการใช้ระบบค้ำยันชั่วคราวในการก่อสร้างขึ้นใต้ดิน และได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อชุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุด ( $\delta H_{\max} / H$ ) ที่ได้อ้างอิงถึงงานวิจัยของ (Mana and Clough, 1981) ดังรูปที่ 2.35





รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการูดของดินใต้ข้อุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความในการขุด (Tanseng, 1997)

นอกจากนี้ (Mana and Clough, 1981) ยังได้เสนอวิธีการประมาณการแอนตัวของกำแพงจากการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุดกับอัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด ( $\delta V_{max} / H$ ) ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุดกับอัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด (Mana and Clough, 1981)

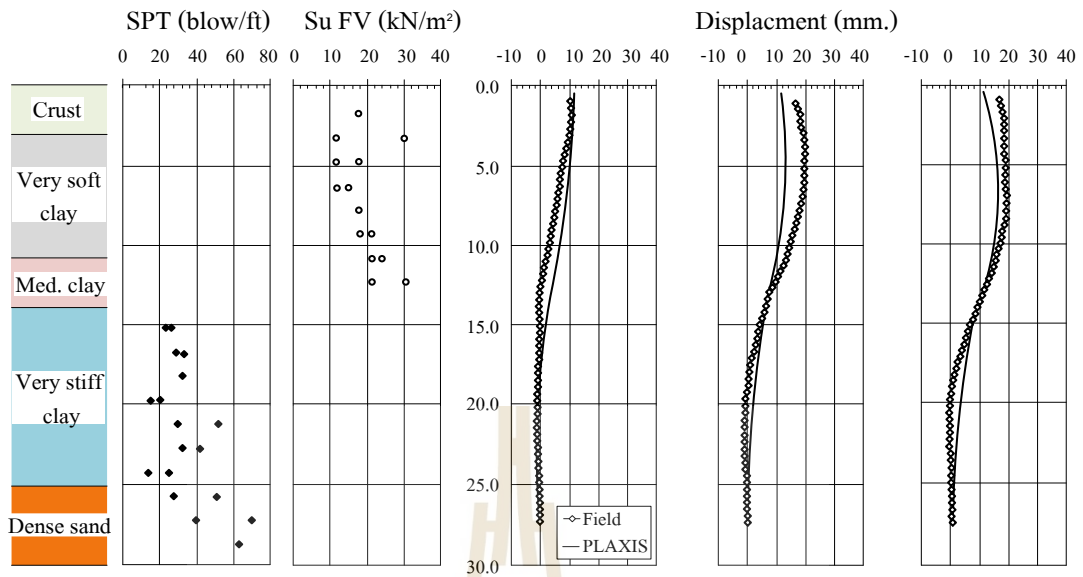
Eide et al. (1972) ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการูดของดินใต้บ่อชุดที่ได้คำนึงถึงอิทธิพลจากผนังขวางไว้ดังสมการที่ 2.2

$$FS = \frac{S_u N_c + \frac{\alpha S_u 2(B+L)h}{BL}}{\gamma_i H + q} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$N_c$	คือ	Bearing capacity factor
	$\alpha$	คือ	Adhesion factor
	$L$	คือ	ระยะห่างของผนังขวาง
	$h$	คือ	ความลึกของผนังขวาง
	$q$	คือ	น้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดขึ้นในระกวางการก่อสร้าง

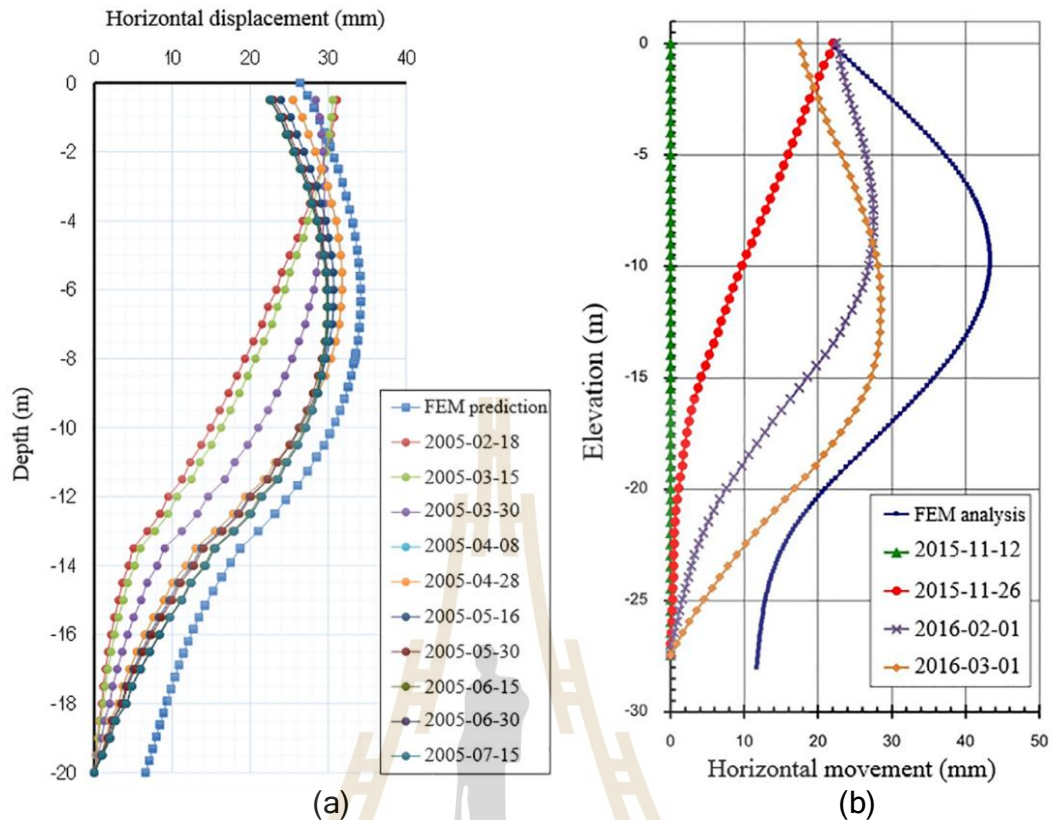
#### 2.4 การวิเคราะห์งานขุดดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

Teparaksa et al. (1999) ได้อาศัยความสัมพันธ์ของค่า Young's modulus กับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ทำการวิเคราะห์ที่กลับการเคลื่อนตัวด้านข้างเพื่อหาค่าสติเฟเนสที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงการก่อสร้างห้องใต้ดิน อาคารแห่งหนึ่งภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ท่าพระจันทร์ โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS ซึ่งได้เสนอค่า  $E_u / S_u = 500$  และ  $2000$  สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและดินเหนียวแข็งตามลำดับ พบว่าให้ผลการเคลื่อนตัวตามที่ได้คาดคะเนเป็นอย่างดี ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากการวัดในสนามและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Teparaksa et al., 1999)

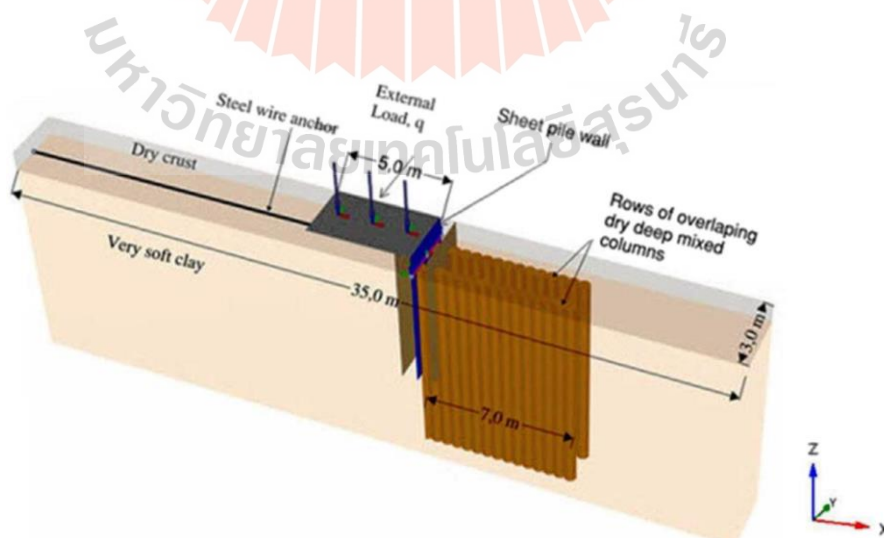
Teparaksa et al. (2019) ได้รายงานถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน D-wall ที่ใช้วิธีการก่อสร้างห้องใต้ดินที่แตกต่างกันสองวิธีคือ วิธีการก่อสร้างแบบ top-down ขุดดินลึก 15.8 เมตร ใช้กำแพงกันดินเป็น D-wall มีความหนา 1 เมตร ใช้พื้นที่ศึกษาของโครงการก่อสร้างสำนักงานใหญ่ธนาคารแห่งประเทศไทย และวิธีการก่อสร้างแบบ bottom-up ขุดดินลึก 21.3 เมตร ใช้กำแพงกันดินเป็น D-wall มีความหนา 1 เมตร ใช้พื้นที่ศึกษาของโครงการก่อสร้างโรงแรม Rosewood ที่จำลองพฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb สามารถทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน D-wall ได้ถึงแม้ว่าวิธีการก่อสร้างจะแตกต่างกันดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 การเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวในสนามกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (a) bottom-up construction (b) top-down construction (Teparaksa et al., 2019)

Likitlersuang et al. (2013) ได้เสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดิน D-wall หนา 1 เมตร ที่ใช้ในโครงการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าดินในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯที่มีการขุดดินลึก 21 เมตร ใช้วิธีการก่อสร้างแบบ top-down ที่จำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองดิน 4 ชนิด ได้แก่ Mohr-Coulomb model (MCM), Soft soil model (SSM), Hardening soil (HSM) และ Hardening soil with small strain stiffness (HSS) เพื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดในสนาม พบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่จำลองด้วยแบบจำลองดิน SSM และ HSM ให้ผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวที่ผิวดินใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนาม นอกจากนี้ยังกล่าวอีกว่า จากการวิเคราะห์นี้ยังไม่พบแบบจำลองดินที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินในสนามได้สอดคล้องเว้นแต่จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มีความเหมาะสมมากขึ้น

Ignat et al. (2015) ได้เสนอการจำลองพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพดินที่ใช้ Sheet pile เป็นกำแพงกันดิน เพื่อเปรียบเทียบกลไกการวิบัติ แรงเฉือนที่เกิดการวิบัติ และการเคลื่อนตัวของ SCC ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสองมิติ (2D Finite element method, 2D-FEM) กับแบบสามมิติ (3D-FEM) โดยใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb model ที่มีการจำลองชั้นดินสองชั้นได้แก่ ชั้นเปลือกดินแข็ง (stiff dry crust) หนา 1 เมตร และชั้นดินเหนียวอ่อนมาก (very soft clay) หนา 10.5 เมตร และเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจาก boundary จึงจำลองให้แบบจำลองกว้าง 35 เมตร และ 3 เมตรในแนวแกน x และ y ตามลำดับ กำแพงเหล็ก Sheet pile ยาว 7 เมตร SCC มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มิลลิเมตร ความยาว 10 เมตร นอกจากนี้ยังมีการกำหนดน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกที่ตำแหน่งหลังกำแพงเป็นระยะ 5 เมตร ดังรูปที่ 2.39 มีลำดับการจำลองการขุดดิน โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกขุดดินลึก 2 เมตร และติดตั้งสมอยึดรั้ง (anchor) ใต้ผิวดิน 1 เมตร โดยอัดแรงไปที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงครากของสมอยึดรั้งที่ 300 กิโลนิวตัน ขั้นตอนที่สองขุดดินไปที่ระดับ -4 เมตร และเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งละ 10 กิโลปาสคาล จนกำแพงเกิดการวิบัติ ในการจำลอง 2D-FEM มีการพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของ SCC ให้เทียบเท่ากับการจำลอง SCC ด้วย 3D-FEM โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ของพื้นที่ (area replacement ratio) ในส่วนของการจำลองด้วย 3D-FEM มีการคำนึงถึงการขบกันของ SCC ดังรูปที่ 2.40 พบว่า ในการจำลอง SCC ด้วย 2D-FEM มีผลการเคลื่อนตัวและแรงเนื่องจากการวิบัติน้อยกว่า 3D-FEM สำหรับ SCC ที่ไม่มีการขบกัน แต่ในกรณีของการจำลอง SCC ที่มีการขบกัน การจำลอง 3D-FEM มีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากมีการคำนึงถึงการขบกันซึ่งพื้นที่ของการขบกันนี้ช่วยในการเสริมความแกร่งให้กับ SCC ทำให้สามารถต้านทานแรงเฉือนได้ดีและมีการเคลื่อนตัวที่ต่ำกว่า SCC ที่จำลองให้ไม่มีการขบกันใน 2D-FEM



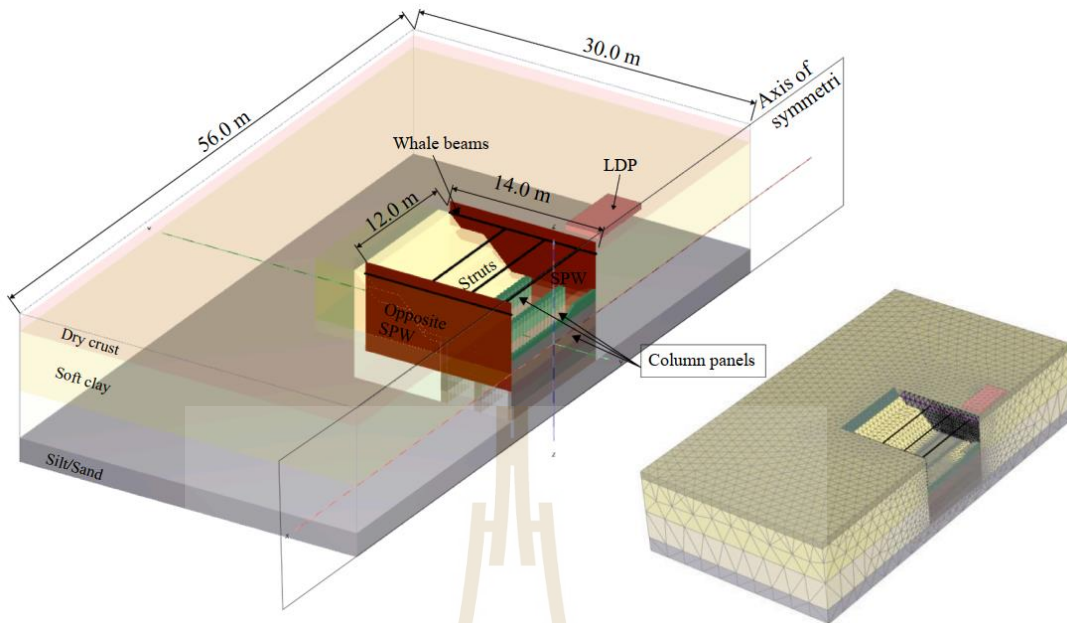
รูปที่ 2.39 แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Ignat et al., 2015)

Column Geometry	Tangential columns c/c columns=0.6m	Overlapping columns c/c columns=0.5m	Overlapping columns c/c columns=0.4m
Real column geometry			
Simplified column geometry Option 1			
Simplified column geometry Option 2 (columns rotated in x-y plane)			
* The hatched column geometries was used in the performed analyses			

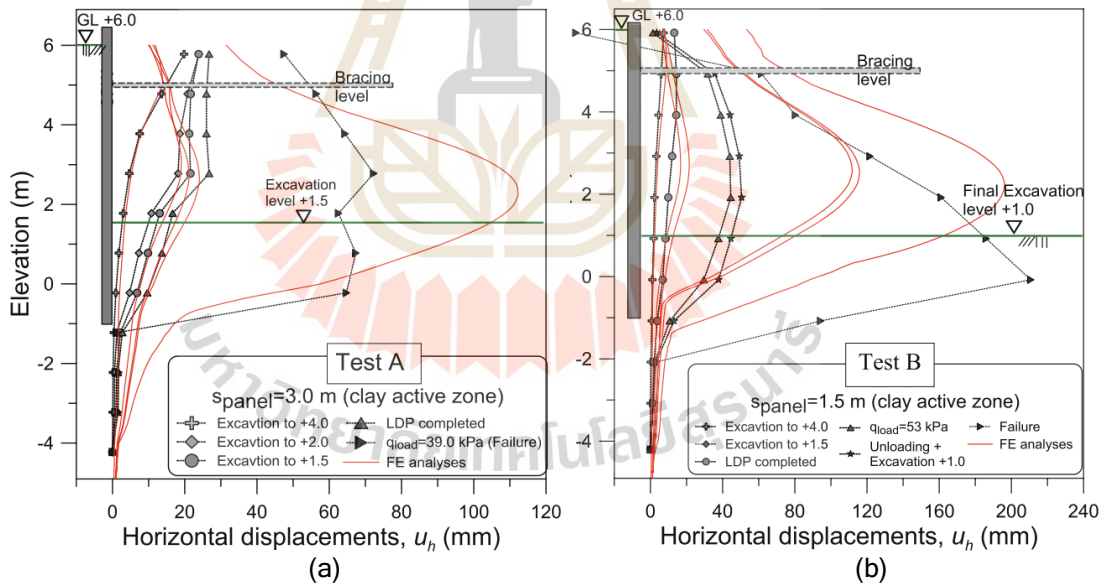
รูปที่ 2.40 การจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการชกกันระหว่างต้นด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ

(Ignat et al., 2015)

Ignat et al. (2020) ได้เสนอการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงเหล็ก Sheet pile ที่มีการใช้ SCC เป็นผนังขวางในการก่อสร้างแบบ Dry mixing โดยได้ทำการทดสอบแบบ full scale เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยแบบจำลองดิน Hardening soil model โดยทำการทดสอบทั้งหมด 2 แบบ แบบที่ 1 ใช้ระยะห่างของผนังขวาง 3 เมตรและขุดดินลึก 4.5 เมตร ในส่วนของแบบที่ 2 จะใช้ระยะห่างของผนังขวาง 1.5 เมตรขุดดินลึก 5 เมตร กำแพงเหล็ก Sheet pile ยาว 7 เมตร ผนังขวางที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มิลลิเมตร ลึก 9 เมตร มีระยะ overlapping 10 มิลลิเมตร ในการทดสอบมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุก (LDP) เพื่อทำการทดสอบจนดินเกิดการวิบัติ โดยขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนและมีการติดตั้งค้ำยันเหล็กชั่วคราวไว้ต่ำกว่าระดับผิวดิน 1 เมตร โดยจำลองให้บ่อขุดมีความกว้าง 12 เมตร และยาว 14 เมตรดังรูปที่ 2.41 พบว่า การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติสามารถจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงเหล็ก Sheet pile มีการใช้ SCC เป็นผนังขวางมีผลการเคลื่อนตัวที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนาม แม้ว่าจะมีการทดสอบที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาการทดสอบแบบที่ 1 ที่ดินเกิดการวิบัติและการทดสอบแบบที่ 2 ที่ขุดดินลึก 5 เมตร มีผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่สูงกว่าผลการทดสอบจริงอยู่มาก ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.41 แบบจำลองกลไกการวิบัติของดินที่มีการใช้ผนังขวางเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทดสอบแบบ full scale ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ (Ignat et al., 2019)



รูปที่ 2.42 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบจริงในสนามกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (a) การทดสอบแบบที่ 1 (b) การทดสอบแบบที่ 2 (Ignat et al., 2019)

Surarak et al. (2012) ได้เสนอค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ สำหรับแบบจำลองดิน Hardening soil โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Oedometer test และ Triaxial test เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS ที่ได้เสนอค่าพารามิเตอร์ไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดิน Hardening soil ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

Soil layer	$\phi'$ (deg.)	$\psi'$ (deg.)	$c'$ (kPa)	$E_{50}^{ref}$ (kPa)	$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	$R_f$	$m$	$K_0^{nc}$	$\nu_{ur}$
Soft clay	27	0	1	800	850	8000	0.9	1	0.74	0.2
Stiff clay	28	0	11.5	9500	12000	30000	0.9	1	0.5	0.2

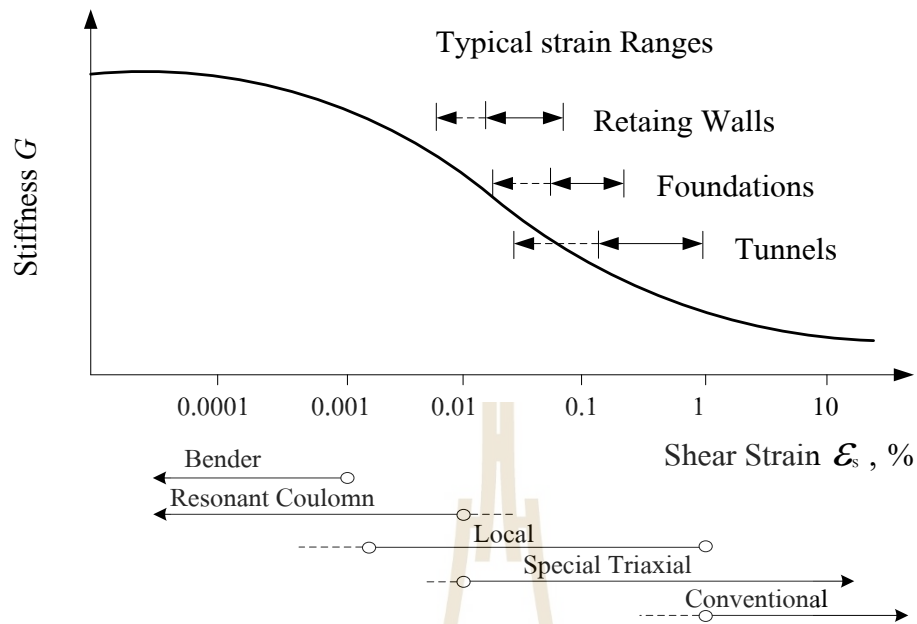
## 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E_u / S_u$ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

ค่า  $E_u / S_u$  ที่เหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนตัว จำเป็นต้องใช้การคำนวณกลับของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (lateral movement) จากโครงการที่ได้ทำการศึกษา (case study) ต่างๆ ที่มีการติดตั้ง Inclinator โดยค่า Young' modulus ( $E$ ) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของโมดูลัสการเฉือน (shear modulus,  $G$ ) ดังสมการที่ 2.3 ซึ่งค่า shear modulus เป็นค่าที่ไม่คงที่ โดยจะขึ้นกับค่าระดับ shear strain นั้นๆ (Mair, 1993) ได้แสดงให้เห็นว่าค่า shear modulus ลดลงเมื่อค่า shear strain เพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างแต่ละชนิดก่อให้เกิด shear strain ขึ้นไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.43 นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการปกติไม่สามารถใช้ระบุ shear modulus ในช่วงที่เกิด shear strain ต่ำได้ เนื่องจากความละเอียดของเครื่องมือวัด ช่องว่างระหว่างอุปกรณ์กับตัวอย่างทดสอบ และผลเนื่องจากการวัดการยุบตัวนอกตัวอย่าง โดยโครงสร้างที่จำกัดการเคลื่อนตัวเพื่อลดผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงจะเกิด shear strain ที่ต่ำ ซึ่ง shear modulus จะมีค่าสูงกว่าที่จะทดสอบได้โดยวิธีการทดสอบดินแบบปกติ

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

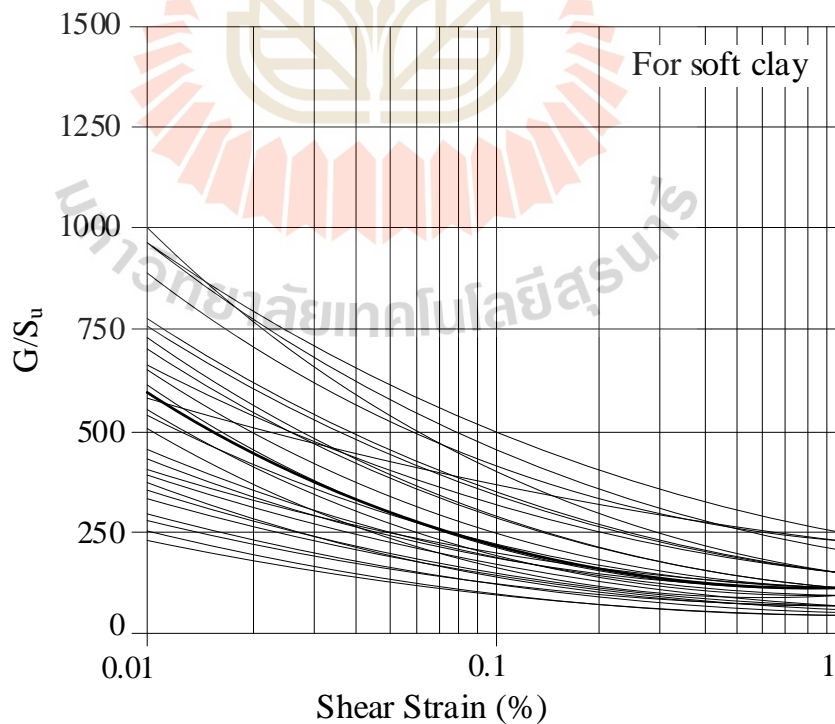
2.3



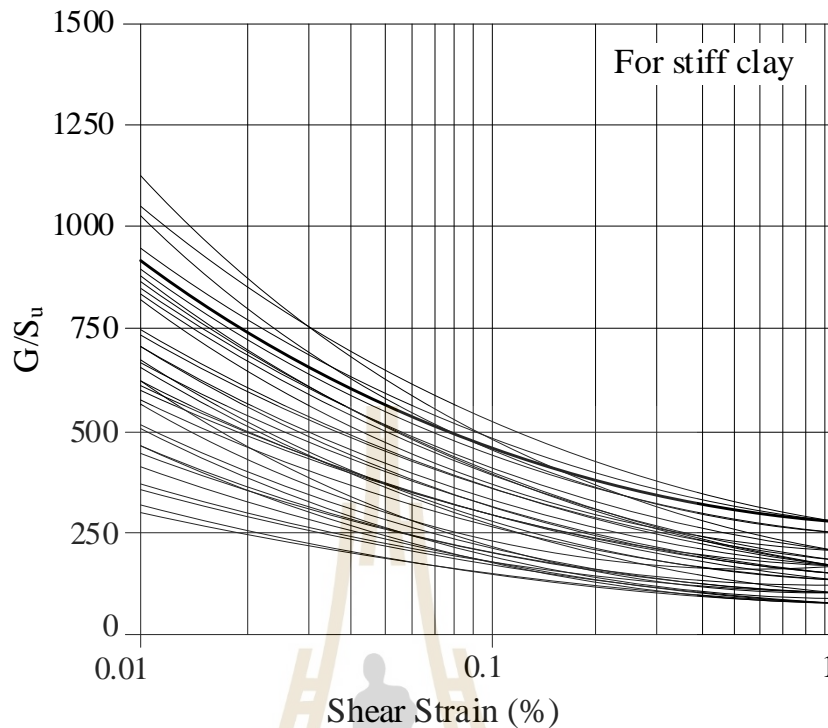


รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear modulus กับ shear strain (Mair, 1993)

Teparaksa (1999) ได้รายงานผลการทดสอบสติฟเนสของดินโดยใช้ Self-Boring pressure meter ในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง ดังรูปที่ 2.44 และ 2.45 ตามลำดับ ซึ่งสามารถวัดค่าสติฟเนสในช่วง shear strain ต่ำได้



รูปที่ 2.44 Shear modulus ของดินกรุงเทพฯที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter สำหรับดินเหนียวอ่อน (Teparaka, 1999)



รูปที่ 2.45 Shear modulus ของดินกรุงเทพฯที่ได้จากการทดสอบ Self-Boring pressure meter สำหรับดินเหนียวแข็ง (Teparaka, 1999)

นอกจากนี้ (วารุณี, 2553) ได้รวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_u$  และค่า  $S_u$  ของชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็งในชั้นดินกรุงเทพฯที่มีผู้เสนอไว้ และผู้วิจัยได้นำความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_u$  และ  $S_u$  ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.4 สำหรับการก่อสร้างที่ใช้กำแพงกันดินเป็น SCC ไว้ดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_u$  และค่า  $S_u$  ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 250-500 S_u$	Bjerrum (1964)	$S_u$ =Undrained shear strength unconfined compression test or Vane shear test
$E_u = 500 S_u$	Cox. (1973)	จากการทดสอบการทรุดตัวของดินในถนนธนบุรี-ปากท่อ โดย $S_u$ คัดจากค่าเฉลี่ยของชั้นดินอ่อนที่สุดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ $PI = 40-63\%$
$E_u = 100-500 S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	Buchighani (1976) $OCR < 3$ (Tonyagate,1978) จากการทดสอบ $C_{kou} - T_0$ ตัวอย่างของถนนบางนา-ตราด

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_u$  และค่า  $S_u$  ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (ต่อ)

$E_u = 125-300 S_u$	Parnploy (1985)	$S_{u(FV1)}$ = Uncorrected field vane shear strength $S_u$ = ได้จากการทดสอบ Vane shear test
$E_u = 70-250 S_{u(FV1)}$ $E_u = 100-150 S_u$	Balasubramania m บัณจิต (1986)	เมื่อ $S_{u(FV1)}$ = Corrected field vane shear
$E_u = 42-162 S_{u(FV1)}$	Brenner (1987)	Bejerum (1972) เมื่อ $PI = 80\%$
$E_u = 150 S_u$	Bergado et al. (1987)	Bangkok clay เมื่อ $PI > 50\%$ จากการศึกษาคาร์ทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางพระกม จากหน้าตัด 30 จุดสายทาง 55 กม.
$E_u = 150 S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameters สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Flexible wall
$E_u = 250-500 S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameters สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Rigid wall
$E_u = 500 S_u$	วันชัย (1999)	Back analysis งานก่อสร้าง D-wall สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ
$E_u = 240 S_u$	วันชัยและชินวุฒิ (2001)	Back analysis งานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินกรุงเทพฯ ช่วง Strain 0.1-1.0%
$E_u = 120-180 S_u$	นฤทธิ์ (2546)	Back analysis งานระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างพ่อกเก็บน้ำสำรอง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย
$E_u = 500 S_u$	วิจิต (2556)	Back analysis สำหรับงานขุดดินลึกด้วยระบบ top-down โดยใช้กำแพงกันดินเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์
$E_u = 750 S_u$	ธนกร (2561)	Back analysis สำหรับงานขุดดินลึกใช้กำแพงกันดินเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์

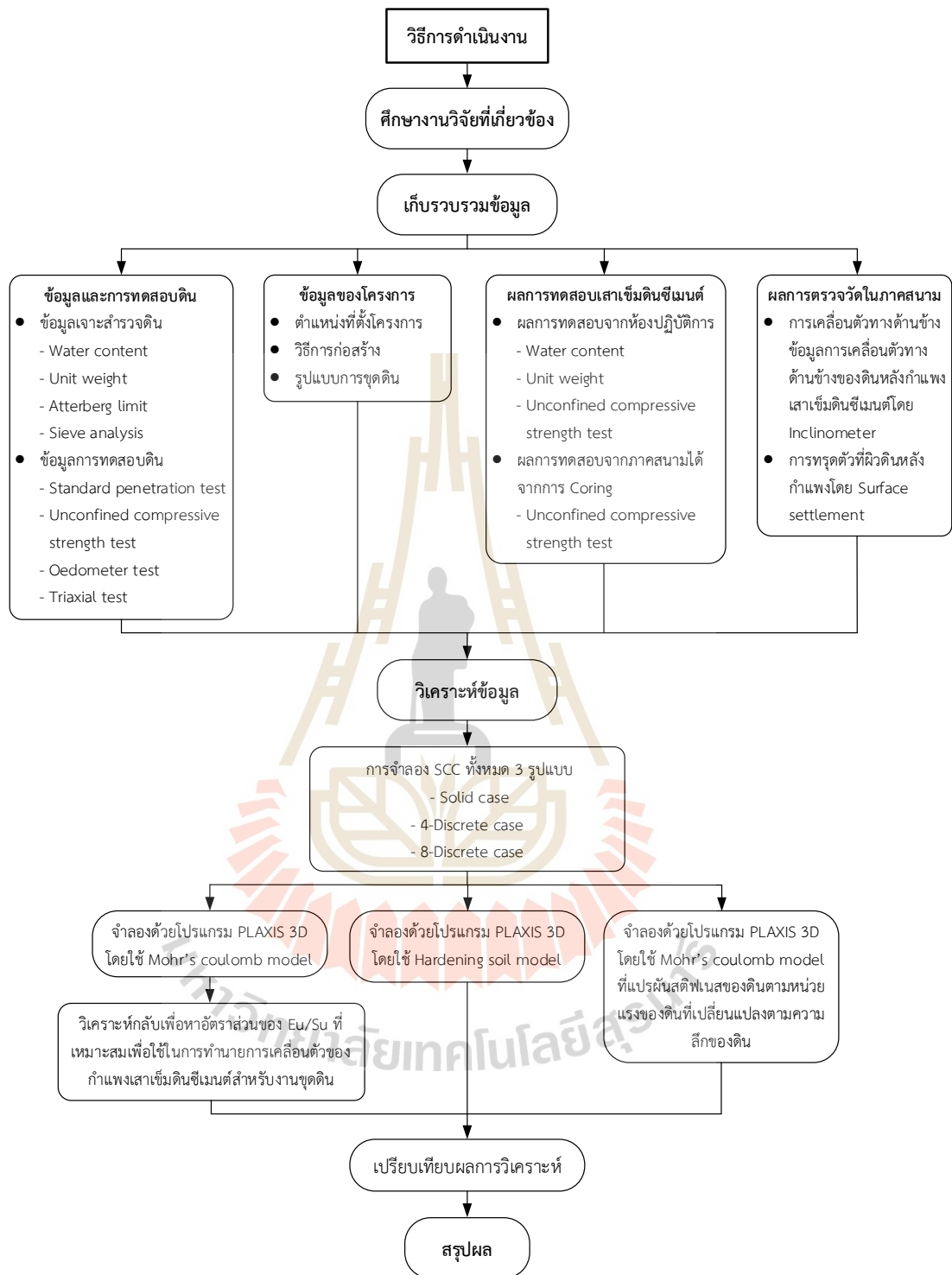
ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_u$  และค่า  $S_u$  ของชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ

รูปแบบความสัมพันธ์	อ้างอิง	หมายเหตุ
$E_u = 240-1200 S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ $PI = 40-63\%$ $OCR < 3$ (Tonyagate, 1978)
$E_u = 300-600 S_u$	NAVFAC.DM.7.1 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ $PI = 40-63\%$ (Tonyagate, 1978) โดยคุณสมบัติของดิน $OCR < 3$ (Obchittikul, 1989) ค่า $30 < PI < 50\%$ และค่า $PI < 50\%$
$E_u = 500 S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameters สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Flexible wall
$E_u = 1000 S_u$	Tanseng (1997)	Back analysis parameters สำหรับงานขุดดินลึก โดยใช้กำแพงระบบ Rigid wall
$E_u = 2000 S_u$	วันชัย (1999)	Back analysis งานก่อสร้าง D-wall สถานีรถไฟใต้ดินกรุงเทพ
$E_u = 480 S_u$	วันชัยและชินวุฒิ (2001)	Back analysis งานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินกรุงเทพ ช่วง Strain 0.1-1.0%
$E_u = 1000-1100 S_u$	วันชัยและธีรพันธ์ (2001)	Back analysis งานก่อสร้าง D-wall สถานีรถไฟใต้ดินกรุงเทพ
$E_u = 600-700 S_u$ ( $E_u = 650-750 S_u$ สำหรับ SCC)	นฤทธิ (2546)	Back analysis งานระบบกำแพงกันดินสำหรับการขุดดินเพื่อก่อสร้างพ่อกเก็บน้ำสำรอง โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมวังน้อย
$E_u = 1000 S_u$	วิจิต (2556)	Back analysis สำหรับงานขุดดินลึกด้วยระบบ top-down โดยใช้กำแพงกันดินเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์
$E_u = 1250 S_u$	ธนกร (2561)	Back analysis สำหรับงานขุดดินลึกใช้กำแพงกันดินเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การเก็บรวบรวมข้อมูลออกแบบและการก่อสร้างของโครงการโดยมีข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นของดิน การทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ และการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินในภาคสนามจากเครื่องมือ Inclinator และ Surface settlement ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินด้วยและเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติที่มีการจำลองรูปแบบของ SCC ที่แตกต่างกัน และการใช้แบบจำลองดินที่ต่างกัน นอกจากนี้มีการวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่า Young's modulus ที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของการเคลื่อนตัว และ ส่วนที่ 3 สรุปผลการวิจัย โดยมีแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังรูปที่ 3.1

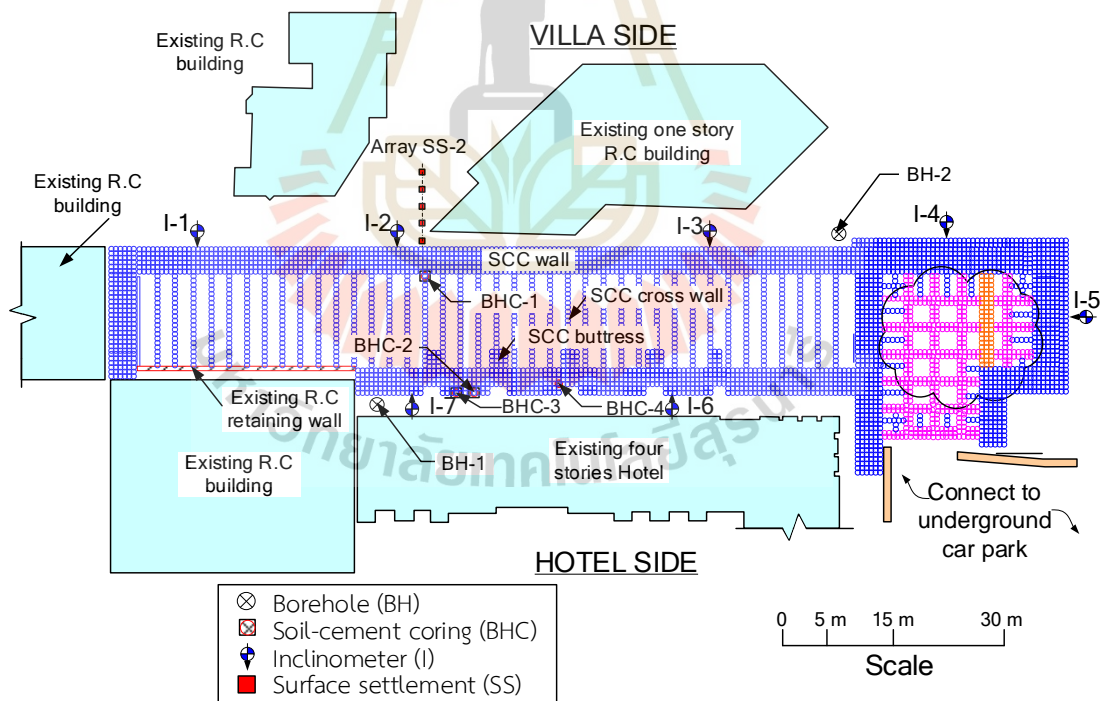


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

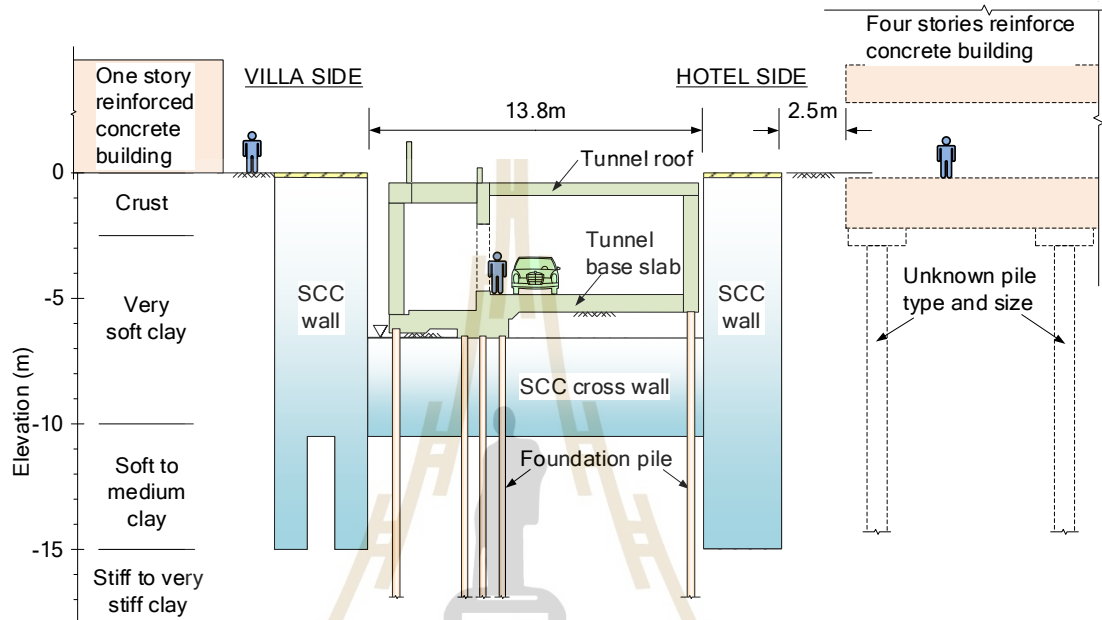
#### 3.1.1 ข้อมูลของโครงการที่ใช้ในงานวิจัย

โครงการที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์กว้าง 13.8 เมตร ยาว 96 เมตร ที่ใช้เป็นทางเข้าชั้นจอดรถใต้ดินของอาคารคอนโดมิเนียม ตั้งอยู่ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร โดยโครงการนี้ใช้วิธีการก่อสร้างอุโมงค์แบบ Open cut and cover โดยโครงการนี้ใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน (Soil cement column wall, SCC wall) มีการขุดดินลึกสูงสุด 7.4 เมตร ฝั่งที่ติดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ชั้น (Villa side) และ 6.5 เมตร ฝั่งที่ติดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 4 ชั้น (Hotel side) นอกจากนี้ในระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ทางโรงแรมยังดำเนินการให้บริการตามปกติ ทำให้เพื่อลดระยะเวลาในการก่อสร้างจึงไม่มีการติดตั้งค้ำยันในระหว่างการก่อสร้างโดยที่กำแพงทั้งสองฝั่งได้มีการเพิ่มเสถียรภาพที่กันบ่อด้วยผนังขวาง เพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพง นอกจากนี้กำแพงฝั่ง Hotel ได้มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress บริเวณด้านหน้าของ SCC wall เพื่อหลีกเลี่ยงสาธารณูปโภคที่ทำให้ไม่สามารถก่อสร้าง SCC wall ได้ตลอดทั้งแนวของอุโมงค์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ฝั่งแสดงรายละเอียดของโครงการ ตำแหน่งการเจาะทดสอบดิน ดินซีเมนต์ และเครื่องมือ  
ตรวจวัดภาคสนาม

รูปที่ 3.3 เป็นรูปตัดตามขวางของโครงการโดยที่เมื่อพิจารณาจากระยะห่างของอุโมงค์ถึงผนังของอาคารข้างเคียงทำให้ความหนาของกำแพงกันดินมีจำกัด ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทางผู้ออกแบบได้มีการนำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินมาใช้ร่วมในการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการนี้ด้วย โดยที่ระยะห่างของกำแพงกันดินกับผนังของอาคารข้างเคียงห่างกันเพียง 2.5 เมตร



รูปที่ 3.3 รูปตัดตามขวางของโครงการที่ใช้ในงานวิจัย

ระบบกำแพงกันดินที่ใช้ในโครงการแต่ละฝั่ง ในงานวิจัยนี้ใช้คำเรียกชื่อกำแพงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชื่อคำเรียกกำแพงแต่ละฝั่งและคำอธิบาย

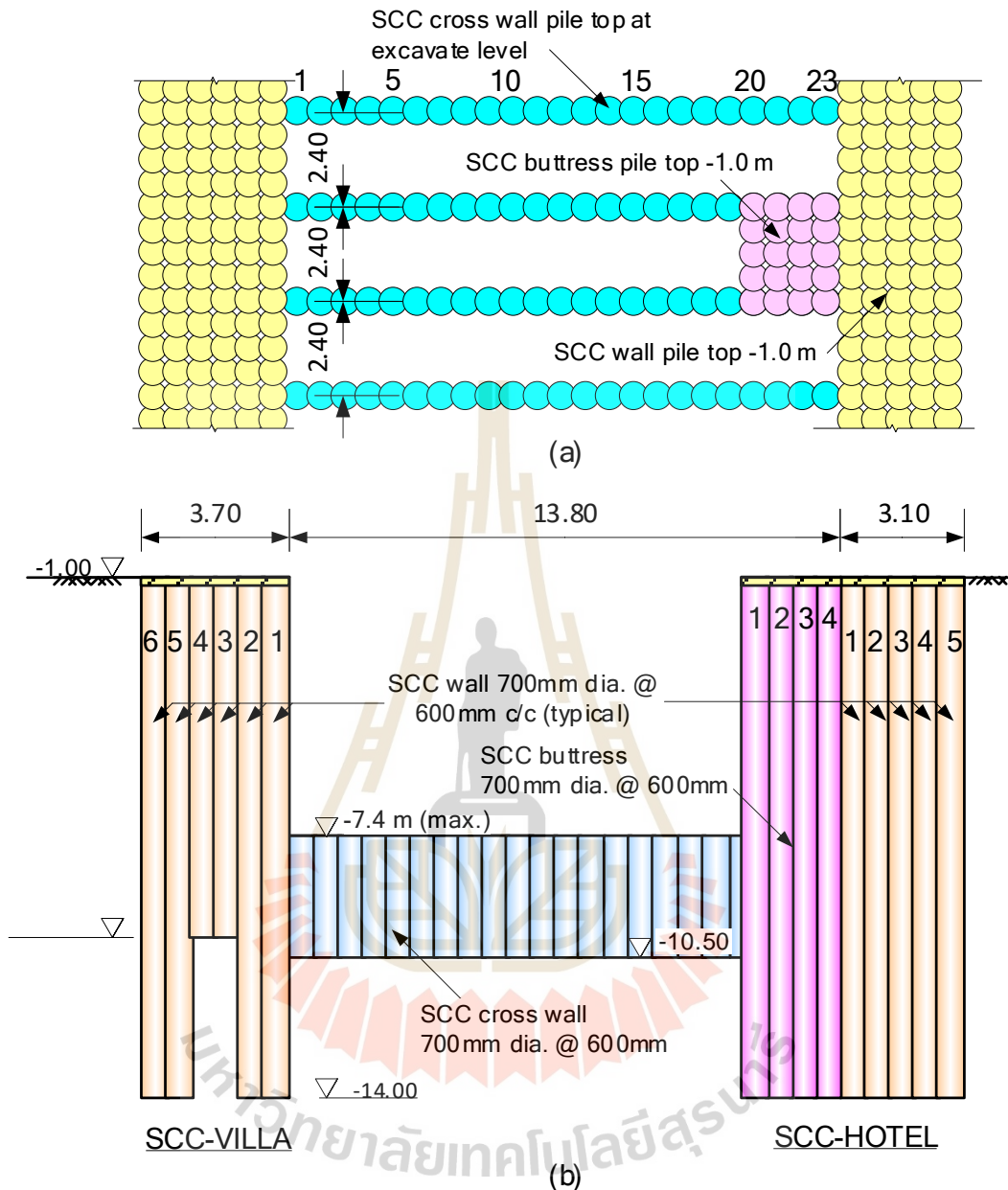
Side	Wall name	Description
Villa	SCC-Villa	SCC 6 ต้นที่มีปลายของ SCC ไม่เท่ากัน
Hotel	SCC-Hotel	SCC 5 ต้นที่มีปลายของ SCC เท่ากันและเพิ่มเสถียรภาพด้วย SCC buttress ที่ด้านหน้ากำแพง



กำแพง SCC-Villa เป็น SCC wall ที่มี SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกัน (Overlap) เป็นระยะ 100 มิลลิเมตร มีระดับหัวเสาอยู่ที่ความลึก 1 เมตร เรียงตัวกัน 6 แถว มีความยาวเสาไม่เท่ากันโดยที่แถวที่ 3 และ 4 เป็นแถวที่ SCC มีความลึกอยู่ที่ 10 เมตร และแถวที่เหลือมีความลึกอยู่ที่ 14 เมตร โดยอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง

กำแพง SCC-Hotel เป็น SCC wall ที่มี SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร มีระดับหัวเสาอยู่ที่ความลึก 1 เมตร เรียงตัวกัน 5 แถว โดยมีความยาวเสาเท่ากันที่ความลึก 14 เมตร และมีการเพิ่มเสถียรภาพที่ด้านหน้า SCC wall ด้วย Buttress เป็น SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เรียงตัวกันเป็นแถว 4 แถว ยื่นออกมาจาก SCC wall มีความลึกเท่ากับ SCC wall ที่ความลึก 14 เมตร โดยอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง

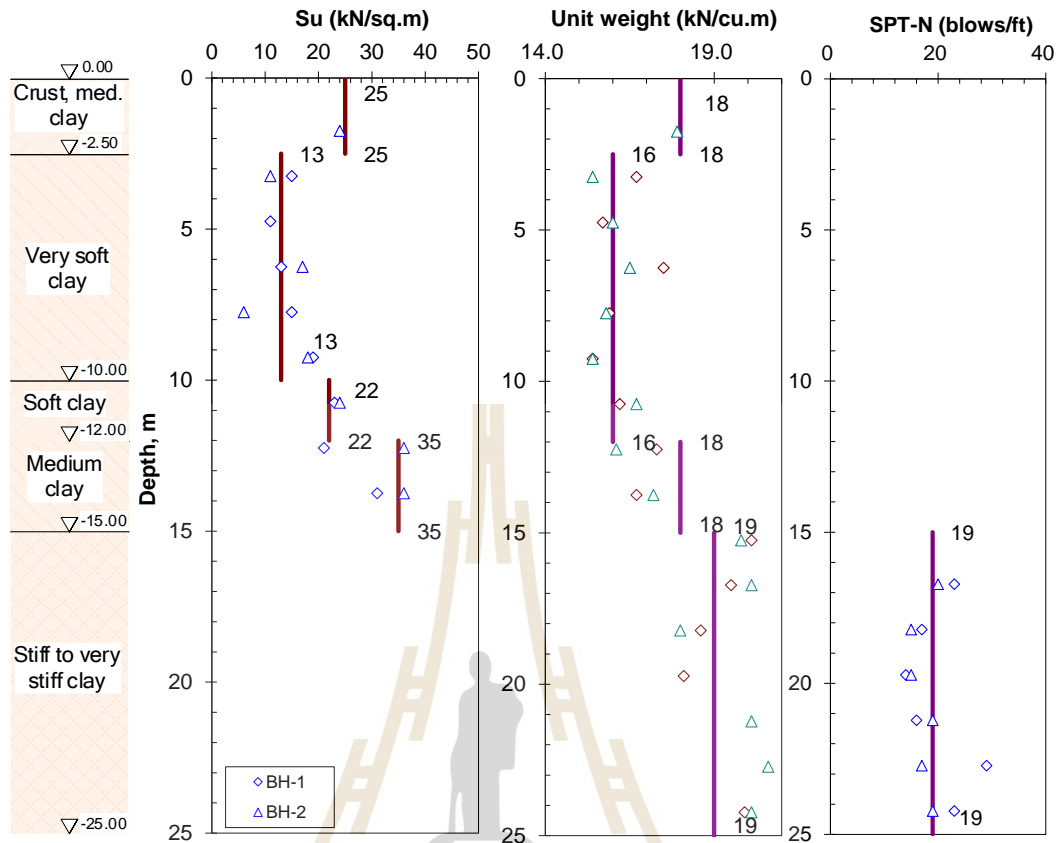
ผนังขวางเป็น SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร มีระดับหัวเสาอยู่ที่ระดับขุดดิน เรียงตัวกันเป็นระยะ 13.8 เมตร ตามความกว้างของบ่อขุดโดยมี SCC ทั้งหมด 23 ต้น โดยมีระยะห่างแต่ละแถวของผนังขวางอยู่ที่ 2.4 เมตร ตามแนวยาวของกำแพง โดยปลายของผนังขวางอยู่ที่ความลึก 10.5 เมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย (a) มุมมองด้านบน (b) รูปตัดตามขวาง

### 3.1.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน

จากการรวบรวมข้อมูล โครงการนี้ได้มีการเจาะสำรวจดินจำนวน 2 หลุมในพื้นที่ ดังรูปที่ 3.2 และทำการเก็บตัวอย่างดินได้แสดงรูปตัดชั้นดินดังรูปที่ 3.5 โดยมีส่วนบนสุดเป็นชั้นเปลือกดินและดินถมหนา 2.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากหนา 7.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 2 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 3 เมตร ชั้นดินชั้นล่างสุดเป็นชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากหนา 10 เมตร



รูปที่ 3.5 รูปตัดชั้นดินของโครงการที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.1.3 ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์

#### 1) ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

โดยที่การทดสอบดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการได้ทำการทดลองผสมดิน-ซีเมนต์โดยทดสอบหน่วยน้ำหนัก (Unit weight,  $\gamma$ ) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength,  $S_u$ ) ที่ส่วนผสมระหว่างปูน/ดิน และระยะบ่มที่ต่างกันทั้งของดินซีเมนต์และดินธรรมชาติ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของดินและดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Depth (m)	Cement Content (kg/m <sup>3</sup> )	Age (Day)	Undrained Shear Strength (kPa)		Soil	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )		Soil
			Sample No.			Sample No.		
			1	2		1	2	
3	175	7	581	226.2	16.1	16.2	16.2	17.2
		14	348.6	539.8		16.2	16.4	
		28	681.8	627.9		16.1	16.2	
	250	7	513.5	405.7		16.9	16.6	
		14	735.6	497.4		16.6	16.9	
		28	1222.9	1144.9		16.6	16.7	
5	175	7	327.2	306.9	11.1	15.6	15.5	15.5
		14	421.1	386.5		15.6	15.5	
		28	500.2	554.4		15.4	15.3	
	250	7	467.1	412		15.9	15.5	
		14	592.3	587.4		15.7	15.7	
		28	736	575		15.6	15.4	
7	175	7	271.1	288.6	12.6	15.5	15.6	15.2
		14	247.2	299.2		15.3	15.5	
		28	390.8	521.9		15.5	15.4	
	250	7	346.3	302.4		15.5	15.5	
		14	482.1	402.1		15.4	15.5	
		28	653.9	453.5		15.4	15.3	
11	175	7	165.7	237.8	35.1	15.5	15.6	15.9
		14	338.4	305.4		15.5	15.5	
		28	296.7	278.4		15.3	15.4	
	250	7	304	315.9		15.2	15.3	
		14	477.7	343.8		15.4	15.2	
		28	568.3	483.7		15.1	15.2	
13	175	7	185.6	201.1	30.8	16.4	16.7	17.6
		14	172.3	270		16.4	16.4	
		28	309.9	260.2		16.1	16.2	
	250	7	192.9	159.9		16.6	16.3	
		14	308.7	265.1		16.2	16.1	
		28	384.3	300.5		15.9	15.85	

## 2) ผลการทดสอบในภาคสนาม

ในส่วนของการทดสอบภาคสนามได้ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดจำนวน 4 หลุมเจาะ (BHC-1, BHC-2, BHC-3 และ BHC-4) ดังรูปที่ 3.2 โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test,  $q_u$ ) และกำลังรับแรงเฉือน ซึ่งหาได้จากสมการ  $S_u = q_u / 2$  ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบภาคสนาม

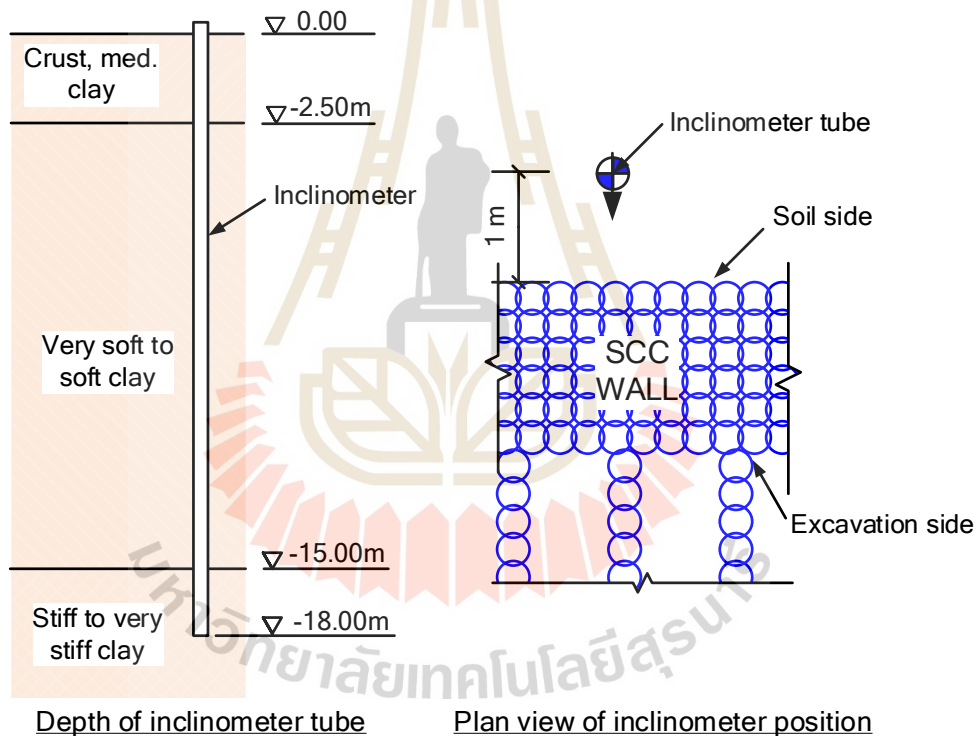
Boring No.	Cement Content (kg/m <sup>3</sup> )	Age (Day)	Depth		$q_u$ (kPa)	$S_u$ (kPa)
			from (m)	to (m)		
BHC-1	175	27	2.0	3.0	1971	985.5
			5.0	6.0	1106	553.0
			8.0	9.0	961	480.5
BHC-2	250	39	2.0	3.0	645	322.5
			5.0	6.0	1431	715.5
			11.0	12.0	1170	585.0
BHC-3	250	37	2.0	3.0	613	306.5
			5.0	6.0	1131	565.5
			11.0	12.0	2334	1167.0
BHC-4	250	31	2.0	3.0	1028	514.0
			6.0	7.0	756	378.0
			11.0	12.0	2140	1070.0

ในการพิจารณากำลังของ SCC ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ผู้ออกแบบได้ออกแบบไว้อยู่ที่ 300 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เมื่อนำผลที่ได้จากตาราง 3.3 มาพิจารณา พบว่า ผลทดสอบที่ได้มีค่ากำลังสูงกว่าดินเดิมประมาณ 30 เท่า หากพิจารณาเฉพาะกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบจะมีค่าที่สูงกว่ากำลังที่ออกแบบไว้มาก แต่ตัวอย่างทดสอบนั้นเป็นก้อนตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องของเนื้อวัสดุ ซึ่ง SCC ที่ใช้จริงนั้นจะมีเนื้อวัสดุไม่สม่ำเสมอโดยมักจะพบรอยแยกในเนื้อวัสดุเสมอ

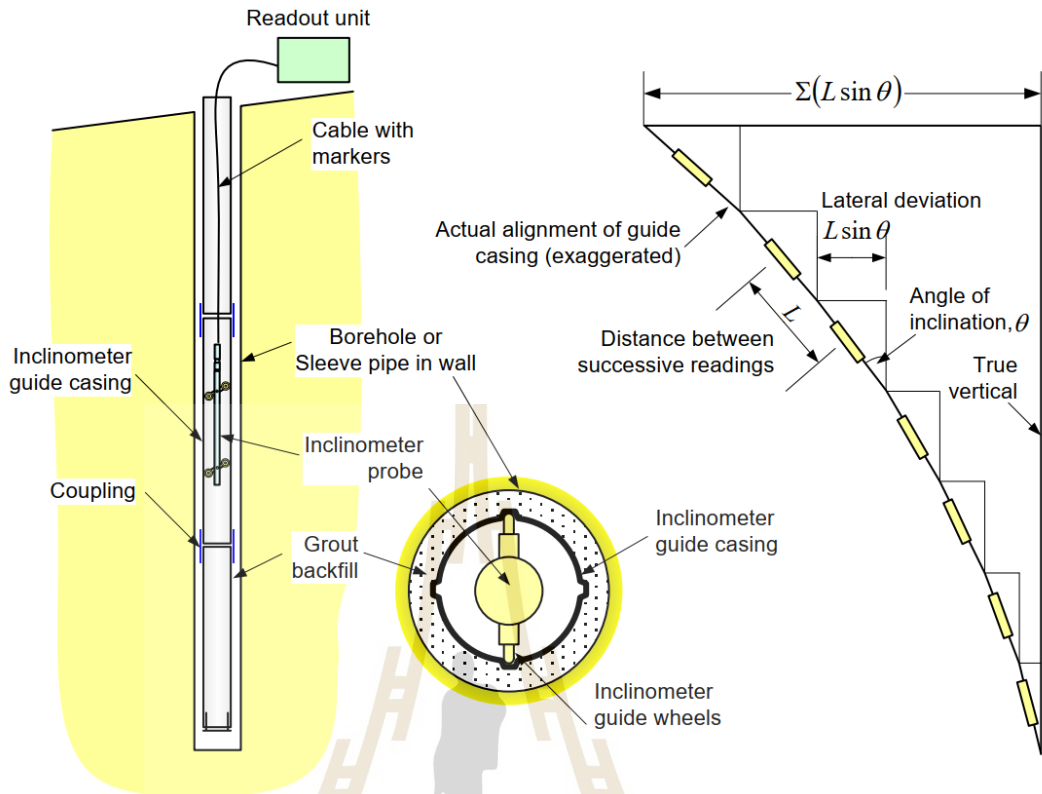
### 3.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดในสนาม

#### 3.2.1 การติดตั้ง Inclinator เพื่อวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง

ในการวัดการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall จะทำการติดตั้งท่อ Inclinator เครื่องมือที่ใช้วัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ SCC wall ขณะก่อสร้างจนกระทั่งดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จ ไว้ตามตำแหน่งที่ต้องการทั้งหมด 7 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.2 Inclinator ทั้ง 7 ตำแหน่ง มีความลึก 18 เมตรจากผิวดิน โดยปลายของท่อ Inclinator ฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวของปลายท่อ โดยมีการติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งดินหลังกำแพงเป็นระยะ 1 เมตร ดังรูปที่ 3.6 การเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างนี้จะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ ช่วงเวลาที่มีการขุดดินด้านหน้า กำแพงต่างระดับกัน เนื่องจากแรงดันดินด้านหลังจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ชัดเจนกว่า



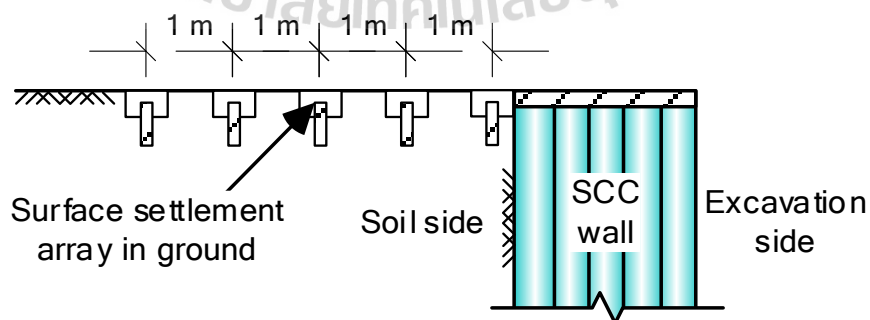
รูปที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องมือวัด Inclinator



รูปที่ 3.7 การวัดการเคลื่อนตัวของดินด้วยเครื่องมือตรวจวัด Inclinometer

### 3.2.2 การติดตั้ง Surface settlement เพื่อวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน

ทางโครงการได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดการตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดินโดยใช้ Surface settlement ตามตำแหน่งดังรูปที่ 3.2 โดยติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งหลัง SCC wall ทั้งหมด 5 หมุด มีระยะห่างระหว่างหมุดละ 1 เมตร โดยมีทั้งหมด 5 หมุด ดังรูปที่ 3.8 การเก็บข้อมูลนี้จะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ ช่วงเวลาที่มีการขุดดินด้านหน้ากำแพงต่างระดับกัน



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด Surface settlement

### 3.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ ในงานวิจัยนี้ใช้ PLAXIS 3D software การจำลอง SCC มีการจำลองสามรูปแบบ ที่จำลองรอยต่อระหว่าง SCC ที่ไม่เชื่อมติดกัน เนื่องจาก SCC แต่ละต้นไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ในก่อสร้างต้นชิดกันหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว และในการวิบัติของ SCC wall เกิดการแยกจากกันบริเวณรอยต่อระหว่างต้น โดยใช้ Interface element ในการจำลองการแยกตัวของ SCC จึงได้ทำการจำลองรูปแบบของ SCC เป็นดังนี้

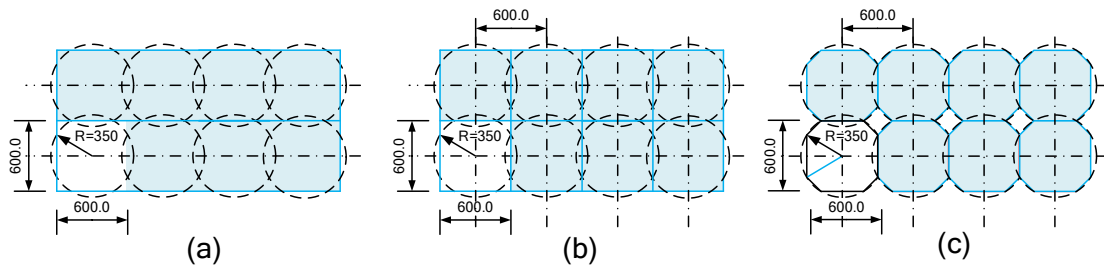
1. รูปแบบ Solid เป็นรูปแบบที่ทำการจำลอง SCC ให้มีความต่อเนื่องกันตามแนวยาวของกำแพง โดยทำการจำลองให้ SCC เป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างขนาด 600 มิลลิเมตร ความยาวตามแนวกำแพงที่ใช้ในโครงการดังรูปที่ 3.9a ที่บริเวณรอยต่อระหว่างแถวของ SCC wall แต่ละแถวจะใช้ Interface element เพียงสองด้านในการจำลองการแยกและการเฉือนตามยาวบริเวณรอยต่อระหว่าง SCC ดังรูปที่ 3.10a

2. รูปแบบ 4-Discrete เป็นรูปแบบที่ทำการจำลอง SCC ให้แต่ละไม่ต่อเนื่องกัน โดยจำลองให้หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเทียบเท่าที่มีขนาด 600 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.9b มีการใช้ Interface element ในแต่ละต้นทั้งสี่ด้านในการจำลองการขบเหลี่ยมกันและการเฉือนตามยาวบริเวณรอยต่อระหว่าง SCC ดังรูปที่ 3.10b

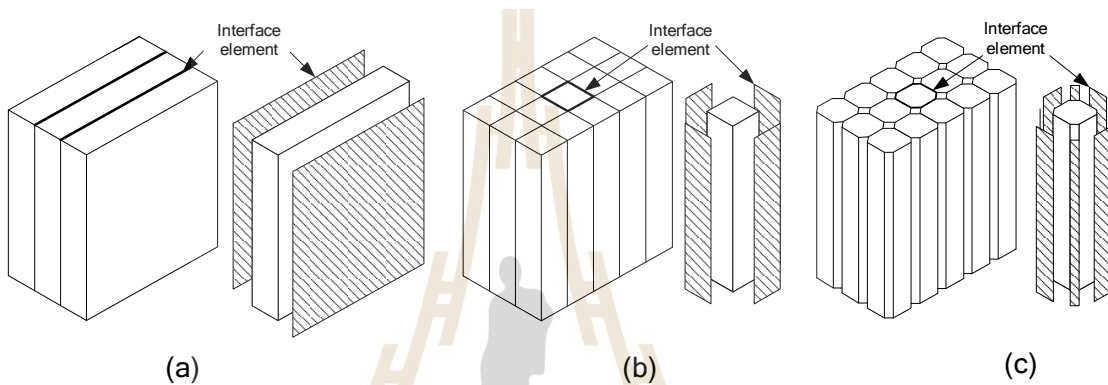
3. รูปแบบ 8-Discrete เป็นรูปแบบที่ทำการจำลอง SCC ให้แต่ละไม่ต่อเนื่องกัน เช่นเดียวกับกับรูปแบบ 4-Discrete เพียงแต่ในการจำลองจะให้หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการลบมุมให้เป็นรูปแปดเหลี่ยมโดยรูปแปดเหลี่ยมอยู่ภายในเส้นรอบวงของหน้าตัด SCC ที่มีขนาดดังรูปที่ 3.9c โดยระยะเหลี่ยมเป็นเส้นคอร์ดเช่นเดียวกับรูปแบบ 4-Discrete และใช้ Interface element ในแต่ละต้นทั้งแปดด้าน ดังรูปที่ 3.10c

ในการจำลอง SCC ทั้งสามรูปแบบนี้ใช้ Interface reduction factor ( $R_{inter}$ ) = 0.75 สำหรับรอยต่อระหว่าง SCC กับ SCC และรอยต่อระหว่าง SCC กับดิน เพื่อลดกำลังของ SCC ในพื้นที่ทับซ้อนกันตามที่ (Yoshida, 1996) และ (Yoshizawa et al, 1997) ได้เสนอเอาไว้และสอดคล้องกับการจำลอง SCC wall ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่เสนอโดย (วิจิต, 2556) และ (ธนกร, 2561) ที่กล่าวในหัวข้อ 2.1.3





รูปที่ 3.9 การจำลองหน้าตัดของ SCC (a) รูปแบบ Solid (b) รูปแบบ 4-Discrete  
(c) รูปแบบ 8-Discrete



รูปที่ 3.10 การจำลองการขบเหลี่ยมกันของ SCC wall ที่ใช้ Interface element (a) รูปแบบ Solid  
(b) รูปแบบ 4-Discrete (c) รูปแบบ 8-Discrete

เมื่อทราบถึงรูปแบบในการจำลอง SCC ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ ในงานวิจัยนี้ยังได้ใช้แบบจำลองที่ต่างกันในการจำลองพฤติกรรมของ SCC wall ดังนี้

### 3.3.1 Mohr-Coulomb model

การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Mohr-Coulomb (MC model) ทำการสมมติให้ดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำเนื่องจากโครงการนี้ใช้เวลาในการขุดดินไม่เกิน 6 เดือน ทำให้แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขุดดินส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งจัดเป็น Undrained type C เนื่องจากชั้นดินทั้งหมดเป็นดินเหนียวจึงใช้การวิเคราะห์เป็นแบบ Total stress analysis โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์และคุณสมบัติของดินได้จากการเจาะสำรวจของโครงการดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย MC model

Soil layer	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_u$ (kPa)	$v_u$
Crust	18	25	0.495
Very soft clay	16	13	0.495
Soft clay	16	22	0.495
Medium clay	18	35	0.495
Stiff to very stiff clay	19	98	0.495
SCC	16	300	0.495

### 3.3.2 Hardening soil model

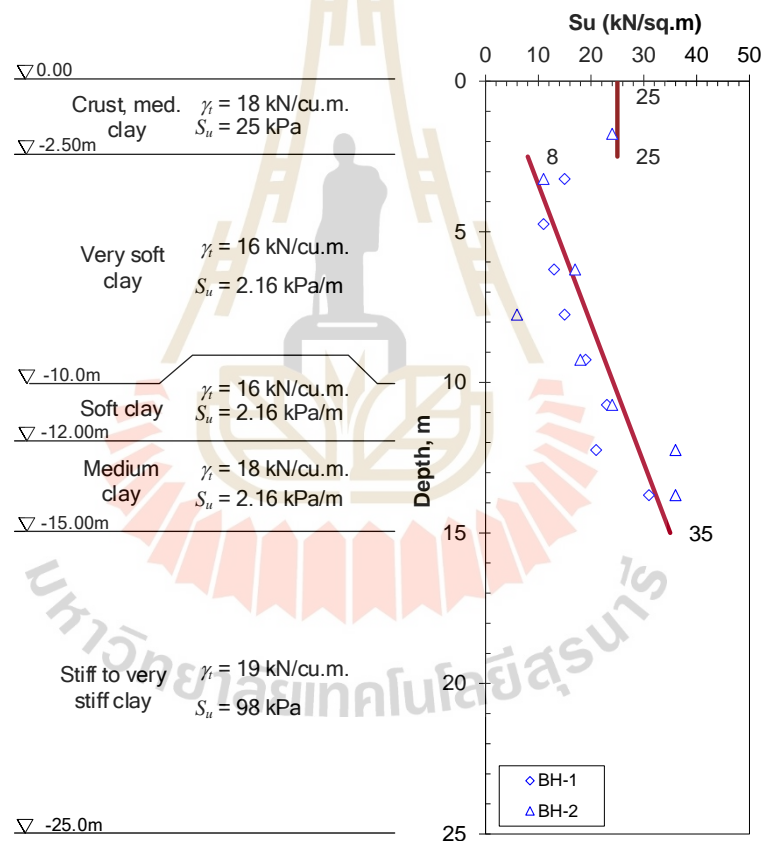
การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Hardening soil (HS model) ทำการสมมติให้ดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำเนื่องจากโครงการนี้ใช้เวลาในการขุดดินไม่เกิน 6 เดือน ทำให้แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขุดดินส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และการผลการทดสอบ Triaxial test พารามิเตอร์ที่ได้อยู่ในรูป Effective strength ซึ่งจัดเป็น Undrained type A โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์และคุณสมบัติของดิน ได้จากการเจาะสำรวจของโครงการข้างเคียงและงานวิจัยของ (Surarak et al., 2012) ที่ได้แนะนำค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินที่ก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย HS model

Soil layer	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (degree)	$E_{50}$ (kPa)	$E_{oed}$ (kPa)	$E_{ur}$ (kPa)
Crust	5	25	14000	4000	42000
Very soft clay	5	24	11500	2000	34500
Soft clay	5	25	14000	5000	42000
Medium clay	10	28	15000	10000	45000
Stiff to very stiff clay	20	27	24000	20000	72000
SCC	300	0	150000	150000	450000

### 3.3.3 Mohr-Coulomb model with Young's modulus vary with depth

เป็นการจำลองพฤติกรรมของดินด้วยแบบจำลอง MC model ที่มีการปรับให้ค่าสตีเฟนสพารามิเตอร์  $E_u$  และ  $S_u$  ไม่ใช่ค่าคงที่ตลอดทั้งความหนาของชั้นดิน กล่าวคือให้สตีเฟนของดินจะขึ้นกับหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกของดินซึ่งมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติของดิน โดยทั่วไปมาใช้ในการจำลองเพียงแต่ใช้ค่าพารามิเตอร์แบบเดียวกันกับ MC model จึงเรียกแบบจำลองนี้ว่า Mohr-Coulomb model with Young's modulus vary with depth (MC-VE model) โดยจะทำการปรับค่าสตีเฟนพารามิเตอร์  $E_u$  และ  $S_u$  เฉพาะชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากระดับดินชุดอยู่ในชั้นเหนียวอ่อนโดยใช้ค่าสตีเฟนสำหรับชั้นดินเหนียวแข็งคงที่ตลอดความลึก มีคุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 คุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง MC-VE model

### 3.4 การวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัว

การวิเคราะห์กลับ (Back analysis) เพื่อหาค่า Young's modulus ( $E_u$ ) ของดินเหนียวอ่อนจากการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากผลการตรวจวัดจริงในสนามกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลอง MC model โดยทำการแปรผันค่าสติฟเนสในเทอม  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวอ่อนทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 250, 500, 750, 1000, 1250 และ 1500 โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ ซึ่งจะคงค่าไว้ที่ 500 สำหรับดินเหนียวแข็งและดินซีเมนต์ตามที่ (วิจิต, 2556) และ (ธนกร, 2561) ได้เสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2 เนื่องจากชั้นดินเหนียวแข็งไม่ได้ส่งอิทธิพลถึงระดับขุดดินของโครงการที่เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนจึงหาค่า  $E_u$  ที่สอดคล้องกับผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงทั้งสองฝั่งและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง นอกจากนี้ยังพิจารณาจากการประมาณค่าความเครียดเฉือน (approximate shear strain,  $\epsilon_s$ ) ที่ได้จากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพงจากการตรวจวัดในสนามและนำมาหาค่า Shear modulus ตามที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.5 เพื่อหาค่า  $E_u$  ที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนตัวของ SCC wall

## บทที่ 4

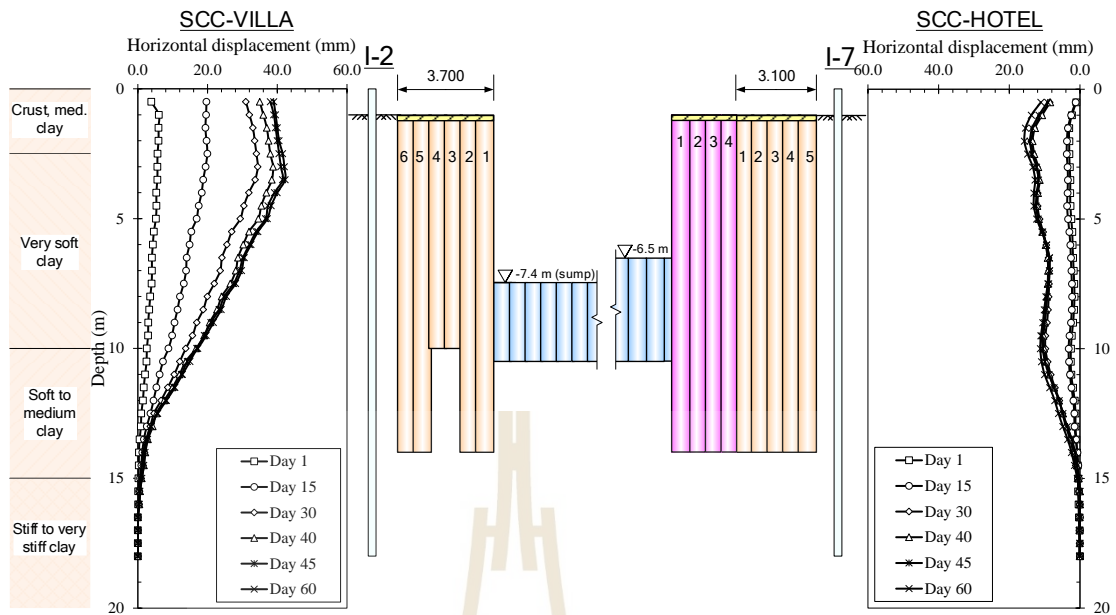
### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

จากที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดงานวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัยมาแล้วในบทที่ 3 โดยบทนี้เป็นผลการวิจัยการเคลื่อนตัว การวิเคราะห์หาค่าสถิติที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวที่ผิวดินของกำแพง และการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจวัดในสนามและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

#### 4.1 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวที่ผิวดิน

##### 4.1.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพง

รูปที่ 4.1 เป็นลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลัง SCC wall โดยเริ่มทำการตรวจวัดหลังจากมีการขุดดินผ่านไปแล้ว 1, 15, 30, 40, 45 และ 60 วัน เมื่อพิจารณาที่กำแพง SCC-Villa ที่ได้จากการตรวจวัด Inclinometer ตำแหน่ง I-2 เห็นได้ว่าพฤติกรรมของดินหลัง SCC wall ในช่วง 1 ถึง 40 วัน การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับในการขุดดิน เมื่อถึงช่วง 45 วัน ที่มีการขุดดินถึงระดับลึกที่สุดของโครงการที่ความลึก 7.4 เมตร พบว่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นสูงสุด 41 มิลลิเมตรที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร ซึ่งอยู่ในตำแหน่งชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก โดยที่ปลายกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 2 มิลลิเมตร การเคลื่อนตัวมีลักษณะที่คล้ายกับพฤติกรรมของคานยื่นที่มีการดัดกลับเล็กน้อย ในส่วนของกำแพง SCC-Hotel ที่ได้จากการตรวจวัด Inclinometer ตำแหน่ง I-7 เห็นได้ว่าในช่วง 1 ถึง 30 วัน การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับในการขุดดิน เมื่อขุดดินถึงระดับความลึก 6.5 เมตร พบว่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นสูงสุด 15 มิลลิเมตรที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร ซึ่งอยู่ในตำแหน่งชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก โดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 2 มิลลิเมตร ในช่วงเวลาที่ตรวจวัด 45 ถึง 60 วันที่มีการขุดถึงระดับที่ต้องการ การเคลื่อนตัวของดินไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาอย่างนัยสำคัญ

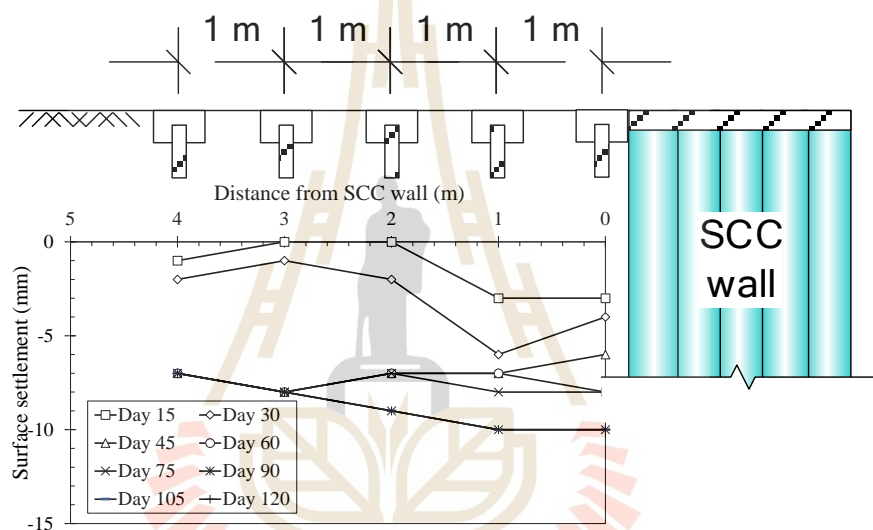


รูปที่ 4.1 ผลตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงหลังจากเริ่มขุดดินจนถึงสิ้นสุดการขุดดิน

จากการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall เห็นได้ชัดเลยว่า การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Hotel มีการเคลื่อนตัวที่น้อยกว่ากำแพง SCC-Villa อยู่ประมาณ 2.5 เท่าของการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa โดยที่กำแพง SCC-Hotel มีความหนาของกำแพงน้อยกว่ากำแพง SCC-Villa และมีการเพิ่มเสถียรภาพที่กันบ่อขุดด้วยผนังขวางเหมือนกันทั้งสองฝั่ง โดยที่มีผลมาจากระดับที่ขุดดินที่ต้องการไม่เท่ากัน โดยที่กำแพง SCC-Hotel มีระดับขุดดินที่ตื้นกว่ากำแพง SCC-Villa และกำแพง SCC-Hotel มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress ที่ด้านหน้ากำแพง ทำให้กำแพง SCC-Hotel มีความแข็งแรงที่มากกว่า SCC-Villa ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงมีค่าน้อยกว่ากำแพง SCC-Villa โดยประมาณ 1.5 เท่า แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกำแพงที่มีการเพิ่มเสถียรภาพที่ด้านหน้าของกำแพงด้วย Buttress สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกำแพงให้สูงขึ้นและช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับกำแพงที่ไม่มีความต่อเนื่องกันตลอดทั้งแนวของอุโมงค์ได้

#### 4.1.2 การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง

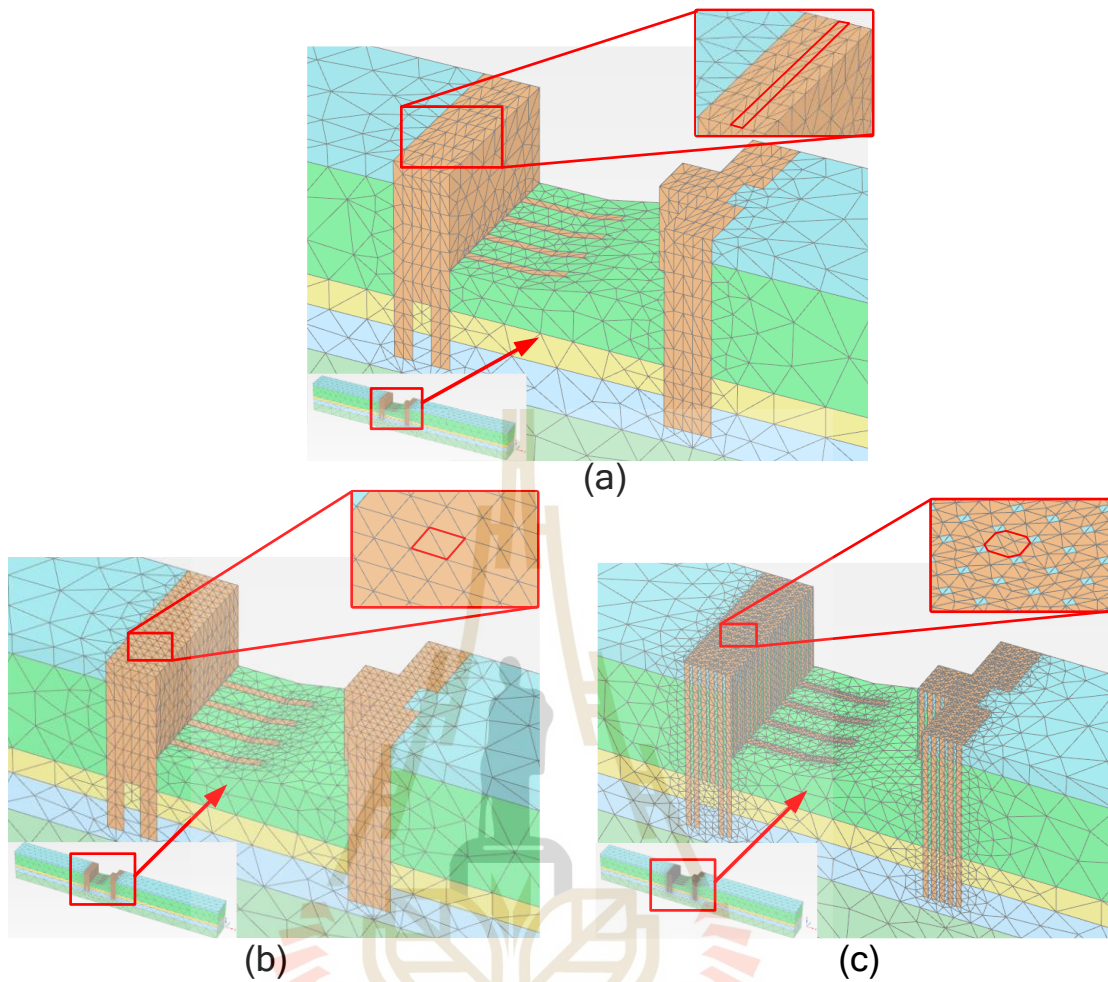
รูปที่ 4.2 เป็นผลการทรุดตัวที่ผิวดินบริเวณหลัง SCC wall ที่ได้จากการตรวจวัด Surface settlement ตำแหน่ง SS-2 โดยเริ่มตรวจวัดหลังจากผ่านไป 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน ตั้งแต่ที่เริ่มมีการขุดดินโดยมีค่าการทรุดตัวสูงสุด 10 มิลลิเมตร โดยบริเวณที่เกิดการทรุดตัวสูงสุดอยู่ในตำแหน่งดินที่สัมผัสกับกำแพงและค่าทรุดตัวเริ่มลดลงเมื่อมีระยะห่างจากกำแพงมากขึ้น เห็นได้ว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงแรกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในขุดดิน แต่เวลาการตรวจวัดตั้งแต่ 90 วันเป็นต้นไป เห็นได้ว่าการทรุดตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาอย่างนัยสำคัญ



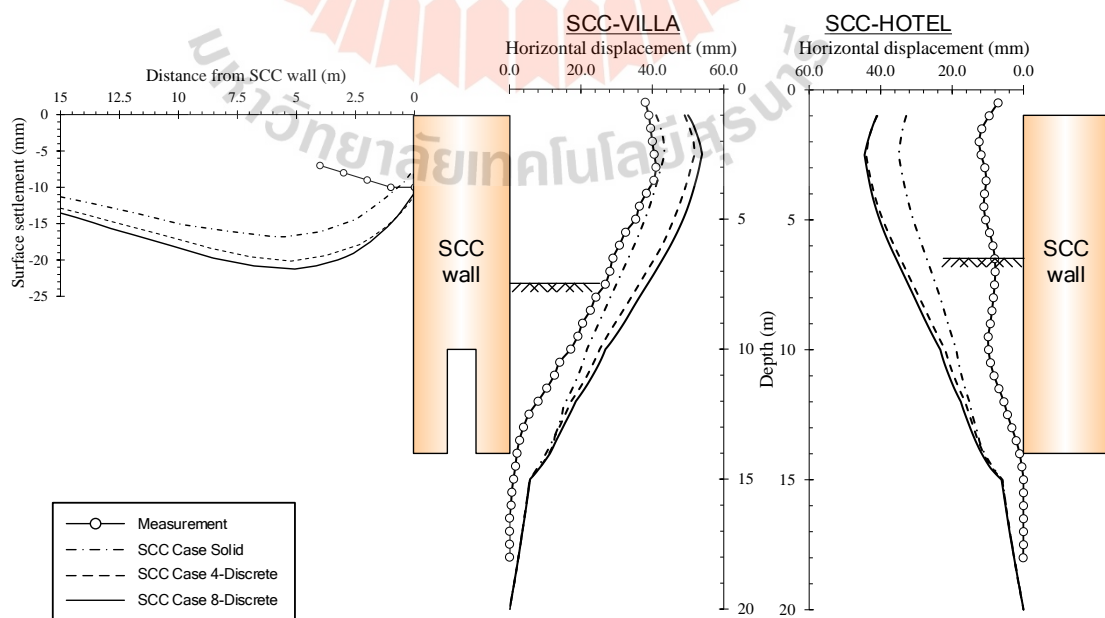
รูปที่ 4.2 ผลการตรวจวัดการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง

#### 4.2 การเปรียบเทียบรูปแบบการจำลอง SCC ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ

การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติได้จำลองรูปแบบ SCC ทั้งหมดสามรูปแบบโดยได้ทำการจำลองรูปแบบ Solid รูปแบบ 4-Discrete และรูปแบบ 8-Discrete เป็นดังรูปที่ 4.3a 4.3b และ 4.3c ตามลำดับ ในการเปรียบเทียบรูปแบบการจำลอง SCC จะทำการเลือกใช้ค่า  $E_u$  ที่ (วิจิต, 2556) และ (ธนกร, 2561) ได้เสนอเอาไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2 โดยเลือกใช้ค่า  $E_u$  เท่ากับ  $250 S_u$  สำหรับดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง และ  $500 S_u$  สำหรับดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากและเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยจะมีค่าการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 FEM mesh (a) รูปแบบ Solid (b) รูปแบบ 4-Discrete (c) 8-Discrete



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่จำลอง SCC แต่ละรูปแบบ

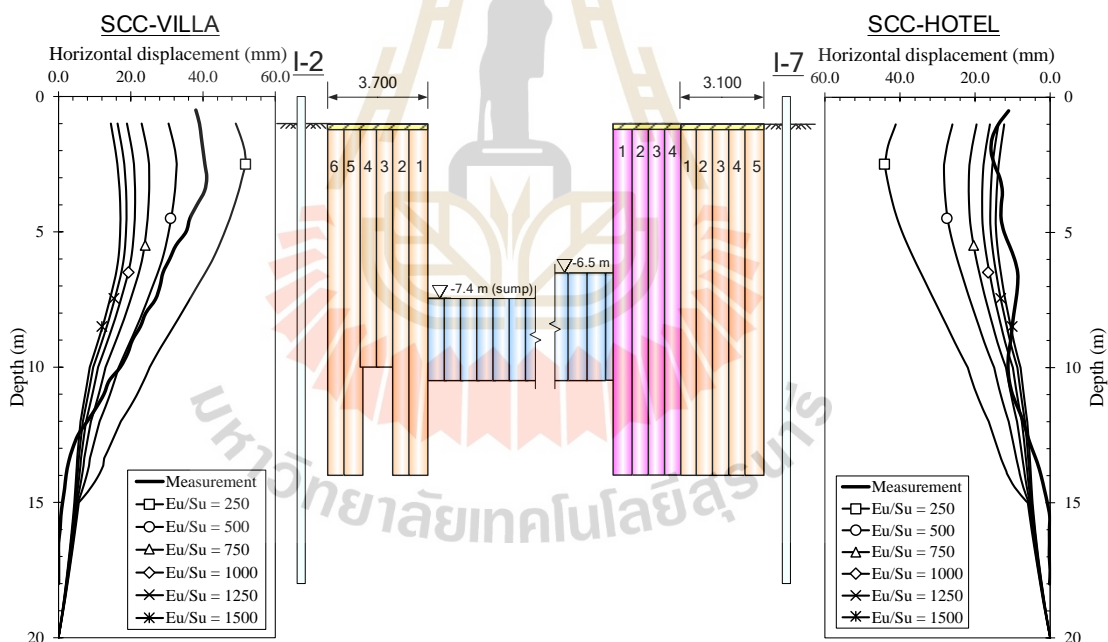


รูปแบบ Solid มีการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงสูงสุดของ SCC-Villa อยู่ที่ 44 มิลลิเมตร กำแพง SCC-Hotel 35 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งความลึกประมาณ 3 เมตรและมีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงสูงสุดอยู่ที่ 17 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งห่างจากกำแพงเป็นระยะประมาณ 6 เมตร ในส่วนของรูปแบบ 4-Discrete มีการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงสูงสุดของ SCC-Villa อยู่ที่ 52 มิลลิเมตร กำแพง SCC-Hotel 44 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งความลึกประมาณ 3 เมตรและมีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงสูงสุดอยู่ที่ 20 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งห่างจากกำแพงเป็นระยะประมาณ 6 เมตร และรูปแบบ 8-Discrete มีการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงสูงสุดของ SCC-Villa อยู่ที่ 54 มิลลิเมตร กำแพง SCC-Hotel 45 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งความลึกประมาณ 3 เมตรและมีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงสูงสุดอยู่ที่ 21 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งห่างจากกำแพงเป็นระยะประมาณ 6 เมตร

เห็นได้ว่ารูปแบบ Solid มีการเคลื่อนตัวที่น้อยกว่าอีกสองรูปแบบและมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนาม แม้ว่าพฤติกรรมการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงจะไม่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนามก็ตาม เพียงแต่หากพิจารณาที่พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงรูปแบบ Discrete มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนามมากกว่ารูปแบบ Solid และควรใช้ค่า  $E_u$  ที่สูงกว่านี้จึงทำให้ค่าการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากกว่านี้ อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.1.3 อิทธิพลของ SCC ที่ขบเหลี่ยมกันซึ่งรูปแบบ Solid ไม่ได้คำนึงถึงกรณีนี้ เมื่อพิจารณาที่รูปแบบ Discrete ทั้งสองรูปแบบ เห็นได้ว่ารูปแบบ 8-Discrete มีค่าการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวที่สูงกว่ารูปแบบ 4-Discrete เพียงเล็กน้อย โดยไม่ได้มีการเคลื่อนตัวที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หากพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบ 4-Discrete ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีในส่วนของรูปแบบ 8-Discrete ใช้เวลามากกว่าอยู่ที่ประมาณ 120 นาที โดยที่ใช้ CPU intel core i7 7820x 8core เนื่องมาจากจำลองพื้นที่หน้าตัดของ SCC ที่ต่างกันโดยคำนึงถึงหน้าตัดที่มีความใกล้เคียงกับหน้าตัดของ SCC ที่ใช้ในงานวิจัย ทำให้การแบ่ง Mesh element ของรูปแบบ 8-Discrete มี Element ที่มากกว่ารูปแบบ 4-Discrete ประมาณ 6 ถึง 7 เท่า จึงเลือกใช้รูปแบบ 4-Discrete ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของ SCC wall ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติที่ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว และยังคงคำนึงถึงการแยกตัวของ SCC แต่ละต้น

### 4.3 การวิเคราะห์ห้กลับการเคลื่อนตัว

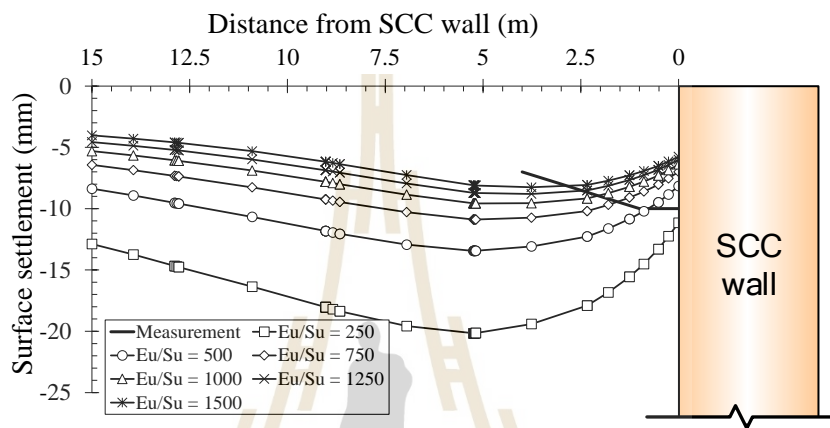
รูปที่ 4.5 เป็นผลการวิเคราะห์ห้กลับการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่แปรผันค่า  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวอ่อนด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่า  $E_u / S_u$  ที่มีผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากที่สุดคือ  $E_u / S_u$  เท่ากับ 500 และ 1500 ตามลำดับ เห็นได้ว่า ค่า  $E_u / S_u$  ของกำแพง SCC-Hotel มีค่าที่สูงกว่ากำแพง SCC-Villa เนื่องจากกำแพง SCC-Hotel มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress ที่ด้านหน้าของกำแพง ทำให้กำแพงมีสติเฟนสที่สูง แต่เมื่อทำการจำลองทั้งสองฝั่งพร้อมกันนั้นด้วยแบบจำลอง MC model ที่ต้องใช้ค่า  $E_u$  ที่คงที่ทั้งความหนาของชั้นดินทำให้การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากกว่าภายใต้การจำลองที่ใช้ค่า  $E_u$  ที่เท่ากันซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดินที่สติเฟนสขึ้นกับหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไปของดิน จึงได้พิจารณาที่ผลการวิเคราะห์ห้กลับของกำแพงทั้งสองฝั่ง พบว่าค่า  $E_u$  ที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเท่ากับ  $500 S_u$



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ห้กลับการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่แปรผันค่า

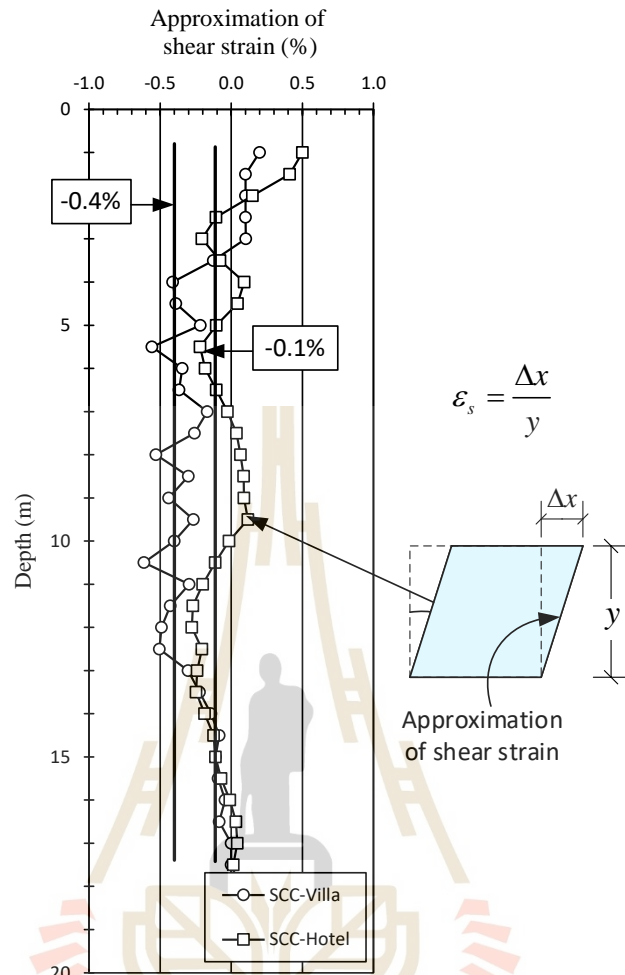
$E_u / S_u$  ของดินเหนียวอ่อน

รูปที่ 4.6 เป็นผลการวิเคราะห์ที่กลับการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่แปรผันค่า  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวอ่อนด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่า  $E_u / S_u$  ที่มีผลการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากที่สุดคือ  $E_u / S_u$  เท่ากับ 500 แต่ลักษณะของการทรุดตัวไม่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนาม เนื่องจากผลการตรวจวัดเกิดการทรุดตัวสูงสุดในตำแหน่งของดินที่สัมผัสกับกำแพง แต่การทรุดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ที่นั่นเกิดการทรุดตัวสูงสุดที่ตำแหน่งห่างออกไปจากกำแพงประมาณ 6 เมตร

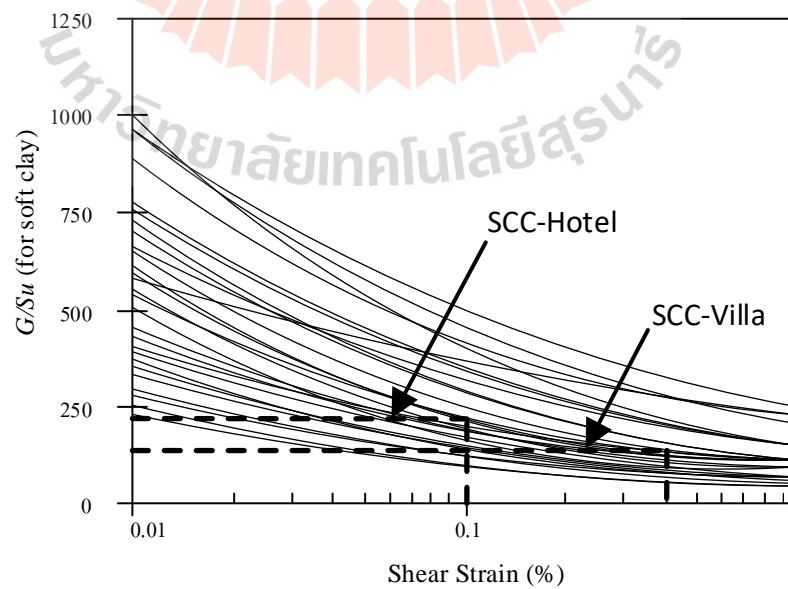


รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ที่กลับการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่แปรผันค่า  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวอ่อน

จากผลการวิเคราะห์ที่กลับการเคลื่อนตัวของดินเห็นได้ว่า กำแพงทั้งสองฝั่งมีค่า  $E_u$  ที่ต่างกัน เนื่องจากกำแพง SCC-Hotel ที่มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress มีสติเฟนสที่สูงกว่า SCC-Villa ส่งผลให้มีการเคลื่อนตัวของดินที่น้อยกว่าทำให้ความเครียดเฉือน (shear strain,  $\epsilon_s$ ) ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงไม่เท่ากับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนและสติเฟนสของดินได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5 จึงได้ทำการประมาณค่าความเครียดเฉือนได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ที่พิจารณาจากการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงทั้งสองฝั่งดังรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าความเครียดเฉือนของกำแพง SCC-Villa และกำแพง SCC-Hotel มีค่าประมาณ 0.4% และ 0.1% ตามลำดับ เมื่อนำไปพิจารณาหาโมดูลัสเฉือนจากความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับความเครียดของดินเหนียวอ่อนเป็นดังรูปที่ 4.8 พบว่าโมดูลัสเฉือนของกำแพง SCC-Villa และกำแพง SCC-Hotel มีค่าประมาณ  $150 S_u$  และ  $220 S_u$  ตามลำดับ จากนั้นทำการคำนวณหาค่า  $E_u$  ตามสมการที่ 2.3 พบว่ามีค่า  $E_u$  ของกำแพง SCC-Villa และกำแพง SCC-Hotel อยู่ที่  $450 S_u$  และ  $650 S_u$  เมื่อพิจารณาค่า  $E_u$  ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของกำแพงทั้งสองฝั่งพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่กลับการเคลื่อนตัวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์



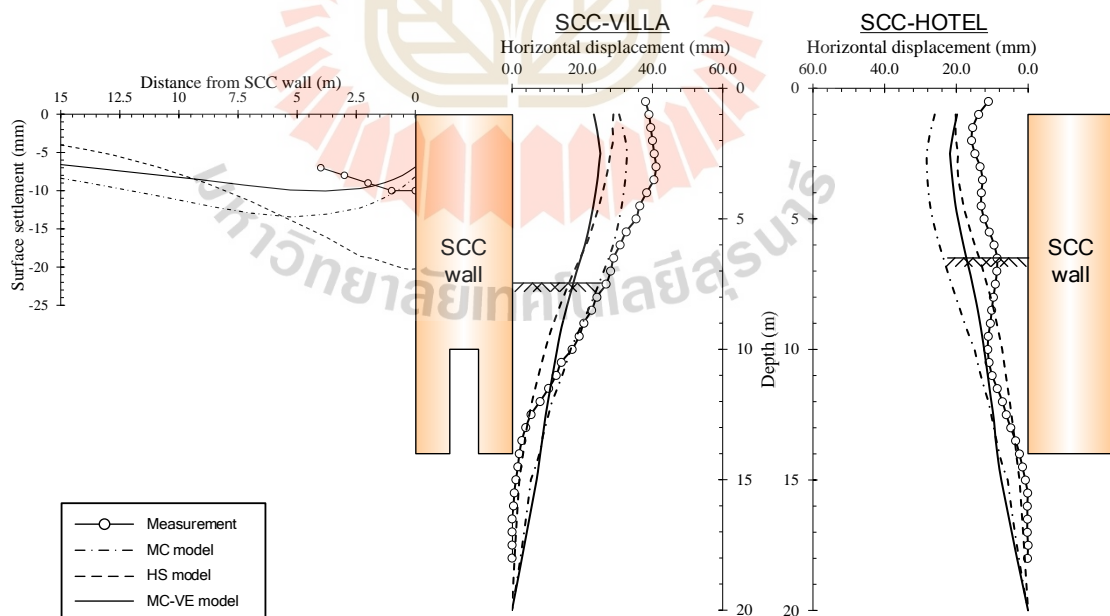
รูปที่ 4.7 การประมาณค่า Shear strain ที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อนของกำแพงทั้งสองฝั่ง



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus กับ Shear strain ของดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการทดสอบ Self-boring pressure meter (Teparaksa et al., 1999)

#### 4.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองดินด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

เมื่อทราบสตีเฟนของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินจากหัวข้อที่ 4.3 แล้วทำการจำลองพฤติกรรมของดินโดยเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสามแบบตามหัวข้อ 3.3 โดยมีผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบแบบจำลองดินด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.9 พบว่า แบบจำลอง MC model มีการเคลื่อนตัวสูงสุดของดินหลังกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel อยู่ที่ 33 และ 28 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร มีพฤติกรรมการเคลื่อนตัวคล้ายกับคานยื่นที่มีการดัดกลับเล็กน้อย โดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 7 มิลลิเมตร และมีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงสูงสุดเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งห่างจากกำแพงเป็นระยะประมาณ 6 เมตร ในส่วนของแบบจำลอง HS model มีการเคลื่อนตัวสูงสุดของดินหลังกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel อยู่ที่ 29 และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ตำแหน่งปลายด้านบนของกำแพง โดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 3 มิลลิเมตร และมีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงสูงสุดเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ในตำแหน่งของดินที่สัมผัสกับกำแพง และแบบจำลอง MC-VE model มีการเคลื่อนตัวสูงสุดของดินหลังกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel อยู่ที่ 25 และ 22 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร โดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 7 มิลลิเมตร และมีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงสูงสุดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งห่างจากกำแพงเป็นระยะประมาณ 3 เมตร



รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองดินด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

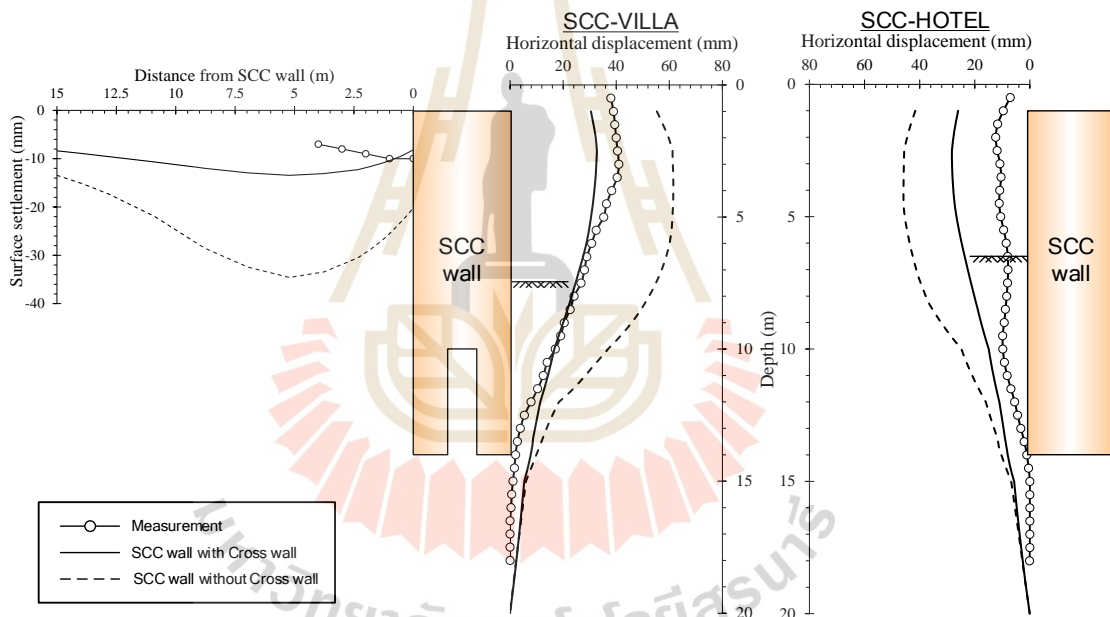
แบบจำลองดินที่มีค่าใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel ที่ได้จากการตรวจวัดในสนามมากที่สุดคือ แบบจำลอง MC model และแบบจำลอง HS model ตามลำดับ โดยที่ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกำแพงทั้งสองฝั่งไม่ได้สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัด เมื่อพิจารณากำแพงทั้งสองฝั่งพบว่า ไม่มีแบบจำลองใดที่สามารถจำลองพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของกำแพงทั้งสองฝั่งได้สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนาม เพียงแต่พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดินที่ได้จากแบบจำลอง HS model มีความคล้ายกับพฤติกรรมที่ได้จากการตรวจวัดในสนามมากกว่าเมื่อพิจารณาที่ปลายของกำแพง แบบจำลอง HS model นี้มีการเคลื่อนตัวที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในสนามที่มีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าที่เท่ากันของกำแพงทั้งสองฝั่ง แต่แบบจำลอง MC model และ MC-VE model มีการเคลื่อนตัวของปลายกำแพงที่สูงกว่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดอยู่มาก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง MC model ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดินบริเวณปลายของกำแพงได้ดีเมื่อเทียบกับแบบจำลอง HS model กล่าวคือแบบจำลอง HS model มีการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงทั้งสองฝั่งที่สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของดินที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุด

นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลอง MC-VE model ที่ใช้ค่าสตีเฟนส์ในเทอม  $E_u / S_u$  ที่สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของดินมีค่าการเคลื่อนตัวของดินที่ใกล้เคียงกับแบบจำลอง HS model แสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง MC model (Linear elastic perfectly plastic) ที่คำนึงถึงสตีเฟนส์ที่แปรผันตามหน่วยแรงของดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึก สามารถจำลองพฤติกรรมของดินได้สอดคล้องกับแบบจำลองดิน HS model ที่สตีเฟนส์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของ Plastic Strain ที่ใช้ทฤษฎีของ Plasticity มาทำการวิเคราะห์ โดยสามารถใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการเจาะสำรวจดินพื้นฐานในการวิเคราะห์และยังช่วยในการลดค่าใช้จ่ายรวมถึงระยะเวลาในการทำการทดสอบขั้นสูงได้

เมื่อพิจารณาที่การทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพงแบบจำลองดินที่มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุดคือแบบจำลอง MC-VE model แต่เมื่อพิจารณาที่ลักษณะการทรุดตัวพบว่าแบบจำลอง HS model มีพฤติกรรมทรุดตัวที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจวัดโดยมีตำแหน่งที่เกิดการทรุดตัวสูงสุดที่ตำแหน่งเดียวกันถึงแม้ว่าแบบจำลอง HS model จะมีค่าการทรุดตัวที่สูงกว่ามาก จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลอง HS model มีการทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพงที่สอดคล้องกับการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุด

#### 4.5 อิทธิพลของผนังขวางที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของ SCC wall

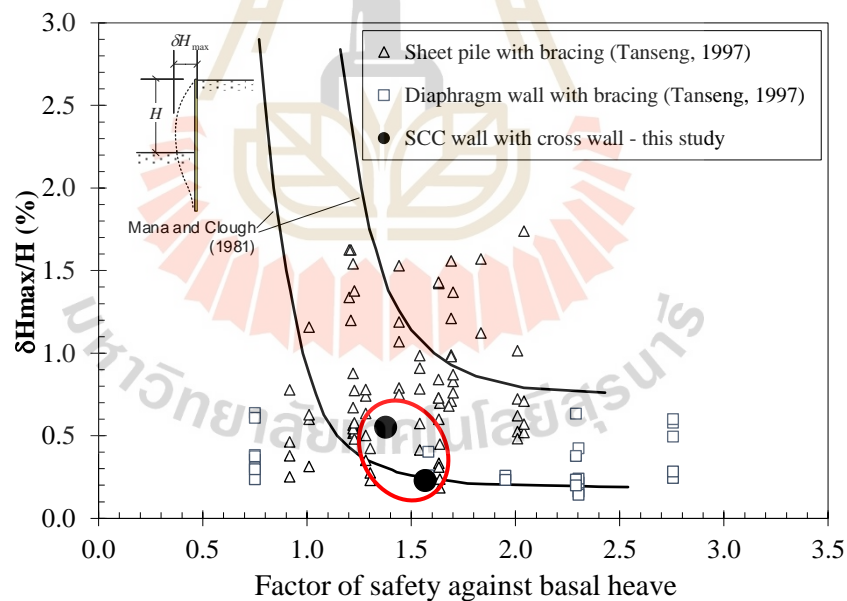
รูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในกรณีที่ SCC wall มีการใช้และไม่ใช้ผนังขวางในการเพิ่มเสถียรภาพที่กันบ่อชุด พบว่าการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่ไม่มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วยผนังขวางของกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel มีการเคลื่อนตัวสูงสุด 62 มิลลิเมตร และ 46 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงทั้งสองฝั่งมีพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่คล้ายกันแบบพฤติกรรมของคานยื่นที่มีการดัดกลับเล็กน้อย และผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงมีการทรุดตัวสูงสุด 35 มิลลิเมตร โดยที่มีพฤติกรรมทรุดตัวและตำแหน่งการทรุดตัวสูงสุดที่เหมือนกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของ SCC wall ที่มีการเพิ่มเสถียรภาพที่กันบ่อชุดด้วยผนังขวาง โดยที่ไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจวัดในสนามจริง



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการใช้ผนังขวางในการเพิ่มเสถียรภาพกันบ่อ

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเสถียรภาพที่กันบ่อด้วยผนังขวางสามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงได้ประมาณ 1.5 เท่า และช่วยลดการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงได้ประมาณ 3.5 เท่าของกำแพงที่ไม่มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วยผนังขวาง

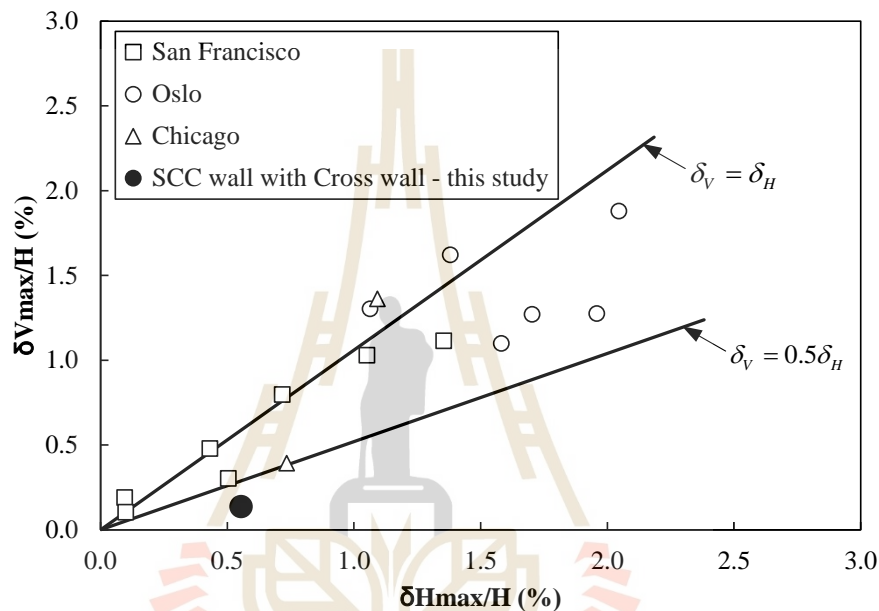
จากผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์ในการขุดดินในชั้นดินกรุงเทพฯที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุด (Factor of safety against base heave,  $F.S.$ ) กับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุด ( $\delta H_{\max} / H$ ) ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.3 โดยทำการคำนวณค่า  $\delta H_{\max} / H$  ของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลัง SCC wall ที่ได้จากการตรวจวัดในสนามมีค่าประมาณ 0.2 ถึง 0.5 และคำนวณค่า  $F.S.$  ที่ได้มาจากการคำนวณโดยสมการที่ 2.1 ที่ไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลของผนังขวางในการก่อสร้างมีค่าประมาณ 0.7 ซึ่งมีค่า  $F.S.$  สำหรับการก่อสร้างชั้นใต้ดินที่ไม่สอดคล้องกับผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่คำนวณได้น้อย ทำให้พิจารณาเลือกใช้สมการที่ 2.2 ที่คำนึงถึงอิทธิพลของผนังขวางที่ใช้ในการก่อสร้างพบว่ามีค่าประมาณ 1.5 แสดงให้เห็นว่า การใช้ผนังขวางที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อขุดนอกจากจะช่วยในการลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินยังช่วยเพิ่ม  $F.S.$  ในการก่อสร้างให้สูงขึ้น เมื่อนำค่า  $\delta H_{\max} / H$  และ  $F.S.$  เปรียบเทียบในความสัมพันธ์ที่กล่าวไว้ข้างต้นพบว่า มีค่าอยู่ในช่วงที่ (Mana and Clough, 1981) ได้เสนอไว้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความในการขุด (Tanseng, 1997)

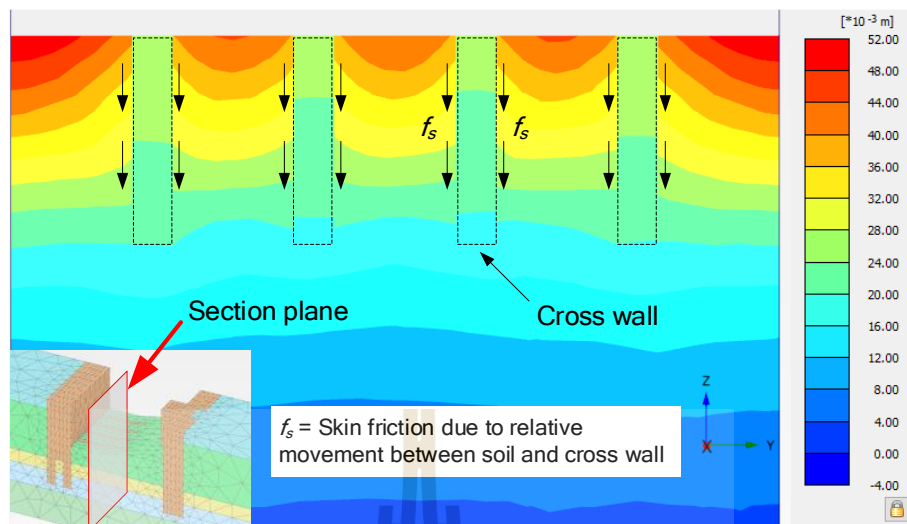


จากผลการหลุดตัวที่ผิวดินที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสพการณ์ในการขุดดินในต่างประเทศที่ใช้ความสัมพันธ์ของ (Mana and Clough, 1981) ที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุดกับอัตราส่วนของการหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด ( $\delta V_{\max} / H$ ) ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 เป็นดั่งรูปที่ 4.11 พบว่า ค่า  $\delta V_{\max} / H$  มีค่าที่ต่ำกว่าเส้นตรง  $\delta_V = 0.5 \delta_H$  แสดงให้เห็นถึงการหลุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงประมาณ 2 เท่า



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดต่อความลึกในการขุดกับอัตราส่วนของการหลุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด (Mana and Clough, 1981)

รูปที่ 4.13 เป็นผลการเคลื่อนตัวของดินกันบ่อที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ เห็นได้ว่าดินที่กันบ่อมีการอัดขึ้นในแนวตั้งประมาณ 40 ถึง 50 มิลลิเมตร โดยที่ผนังขวางถูกดันขึ้นประมาณ 25 มิลลิเมตร การอัดขึ้นของดินที่สูงกว่าการถูกดันขึ้นของผนังขวางนี้เป็นการเคลื่อนตัวแบบสัมผัสที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ผิวของผนังขวางและมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่สัมผัสนี้ แรงเสียดทานที่เกิดบนผิวของผนังขวางทำให้เกิดแรงต้านทานต่อการเกิดการอัดขึ้นโดยรวมของดินกันบ่อ ส่งผลให้สัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการอัดของดินใต้บ่อขุดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.2 โดยได้พิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวของผนังขวางให้เป็นแรงต้านทานต่อการอัดขึ้นของดินใต้บ่อขุด และผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์นี้ยังสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประสพการณ์ของรูปที่ 4.11 ที่แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแปรผกผันกับสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการอัดของดินใต้บ่อขุด



รูปที่ 4.13 เส้นชั้นการเคลื่อนตัวของดินในระนาบที่ตั้งฉากกับผนังขวางที่แสดงถึงการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างดินกับผนังขวาง ทำให้เกิดแรงต้านทานการูดของดินกับผนัง

จากผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงจากการเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SCC wall ที่มีการเพิ่มเสถียรภาพของกันบ่อด้วยผนังขวางสามารถช่วยลดเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวที่ผิวดิน นอกจากนี้ยังช่วยในการเพิ่มเสถียรภาพที่กันขุดทำให้มี  $F.S.$  ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จากการเคลื่อนตัวของดินที่กันขุดที่ทำให้เกิดแรงต้านทานการเกิดการูดจนส่งผลให้ค่า  $F.S.$  มีค่าเพิ่มขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัยพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อชุดด้วยผนังขวางสำหรับงานชุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสามมิติสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCC wall) ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อชุดด้วยผนังขวาง มีการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเท่ากับ 41 มิลลิเมตรและกำแพงที่มีการเพิ่มเสถียรภาพด้านหน้ากำแพงด้วย Buttress เท่ากับ 15 มิลลิเมตร และมีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงเท่ากับ 10 มิลลิเมตร กล่าวคือผนังขวางสามารถช่วยในการลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวที่ผิวดินได้และการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress ที่ด้านหน้ากำแพงยังสามารถช่วยลดการเคลื่อนได้อีกด้วย นอกจากนี้การใช้ผนังขวางในการเพิ่มเสถียรภาพของบ่อชุดก่อให้เกิดแรงต้านการออกตัวของดินกันบ่อชุด ส่งผลให้มีสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการออกตัวของดินใต้บ่อชุดเพิ่มขึ้น

2. ค่า Young's modulus ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวที่ผิวดินของ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อชุดด้วยผนังขวางโดยได้จากการวิเคราะห์กลับด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์คือ  $500 S_u$  และค่า Young's modulus ที่ได้จากประมาณค่า shear strain ได้จากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพง ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง shear modulus กับ shear strain จาก Self-boring pressure meter มีค่าประมาณ  $450 S_u$

3. ในการจำลอง SCC ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติพบว่า แบบจำลองที่ใช้ Interface element ในการจำลองการแยกตัวกันระหว่างต้น มีพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามมากที่สุด โดยแบบจำลองที่ใช้ Interface element ในการจำลองการแยกตัวกันระหว่างแถว มีผลการเคลื่อนตัวน้อยที่สุดแสดงให้เห็นว่า การจำลอง SCC ที่ใช้ Interface element ในการจำลองการแยกตัวของ SCC ส่งผลต่อการเคลื่อนตัว SCC wall อย่างมีนัยสำคัญ

4. การวิเคราะห์ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อชุดด้วยผนังขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลองดิน HS model มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวที่ผิวดินของ SCC wall ในสนามมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลอง MC-VE model สามารถจำลองพฤติกรรมเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง HS model โดยใช้ค่า Young's modulus ที่เสนอไว้ตามข้อที่ 2

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้

แบบจำลองดินที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพที่กันบ่อด้วยผนังขวางในงานวิจัยนี้ ยังไม่สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนตัวได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามของกำแพงทั้งสองฝั่ง เนื่องจากความเครียดเฉือนของกำแพงไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถจำลองโดยสตีเฟนส์ค่าใดค่าหนึ่งได้ ซึ่งผู้วิจัยแนะนำให้ใช้แบบจำลองดินที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินในช่วงที่ความเครียดต่ำได้ดี เช่น Hardening soil model with small-strain stiffness

## เอกสารอ้างอิง

- นฤทธิ์ ประกอบบุญ. (2546). การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานชุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 142 น.
- พรพจน์ ต้นเส็ง. (2554). การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดินในการก่อสร้างใต้ดินลึก. การสัมมนา การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินขนาดใหญ่ 25-26 สิงหาคม 2554
- ธนกร สุขุมมาศ และ พรพจน์ ต้นเส็ง. (2561). การหาสถิติพเนของดินเหนียวด้วยวิธี ไฟไนท์อีลีเมนต์ เพื่อใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพง เสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานชุดดินลึก. วารสารวิชาการครุศาสตร์ อดุสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน 2563, จำนวน 16 หน้า
- วารุณี กะการดี. (2553). การศึกษาความเหมาะสมของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยวิธี สมดุลจำกัดและวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ กรณีศึกษางานชุดดินในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 156 น.
- วิจิต นามวิเศษ. (2556). พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กับงานชุดดินลึกด้วยระบบ top-down ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 124 น.
- 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.
- Buathong, P. (2014). Stability analysis of excavated slope stabilized by DCM column: case study and parametric analysis. Ph.D. Dissertation, Kasetsart University. Bangkok.

- 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.
- Eide, O., Aas, G. and Jøsang, T. (1972) Special Application of Cast-in-Place Slurry Trench Walls for Tunnel in Soft Clay in Oslo. Proc. 5 ECSMFE, Madrid 1972, Vol1, pp 485-498.
- Hsieh, H. S., Lu, Y. C., and Lin, T. M. (2008). Effects of joint details on the behavior of cross walls. *Journal of GeoEngineering*, Vol. 3. No. 2, pp. 55-60.
- Hsieh, P.G., Ou, C.Y., and Lin, Y.L., (2012). Three-dimensional numerical analysis of deep excavations with cross walls. *Acta Geotechnical*, 8:33-48.
- Ignat R., Baker S., Larsson S. and Liedberg S. (2015) Two- and three-dimensional analyses of excavation support with rows of dry deep mixing columns. *Computers and Geotechnics* 66, 16-30.
- Ignat, R. and Baker, S. and Larsson, S. (2016). Behavior of braced excavation supported by panels of deep mixing columns. *Can. Geotech. J.* 53(10): 1671-1687.
- Ignat, R. and Baker, S., Karstunen, M., Liedberg, S. and Larsson, S. (2020). Numerical analysis of an experimental excavation support by panels of lime-columns. *Computers and Geotechnics* 118, 103296.
- Karlsrud, K. (1981). Performance and design of slurry walls in soft clay. ASCE Spring Convention New York 1981. Also published in Norwegian Geotechnical Institute Publ. no. 149.
- Karlsrud, K. and Andresen, L. (2008). Design and Performance of Deep Excavations in Soft Clays. 6<sup>th</sup> International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington.

- Kubota, N., Sako, H., Morota, M. and Kojima, K. (2000) Measure to prevent heaving during the excavation of soft ground. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Lasson, S., Malm, R., Charbit, B. and Ansell, A. (2012) Finite element modelling of laterally loaded lime-cement columns using a damage plasticity model. Computers and Geotechnics, Vol. 44, pp. 48-57.
- Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowaki, D., Oh, E. and Balasubramaniam, A. (2013) Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT. Soil and Foundation 53 (4), 756-773.
- Mair, R. J., and Taylor, R. N. (1993). Prediction of clay behavior 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 Board, No. 49, p. 20.
- Miki, G., (1985). Soil Improvement by Jet Grouting. Third International Geotechnical Seminar Soil Improvement Method, November, Singapore, pp. 45 - 52.
- Moh, Z.C., and Hwang, R.N., (1999). Geotechnical Issues in Underground Constructions. Proceedings of International Conference on Rail Transit.
- Moseley, M.P. and Krisch K. (2004). Ground Improvement: Lime and lime/cement columns. Abingdon, England.
- NAVFAC DM-7.2. (1982). Foundation and Earth Structures. Department of the Navy Naval Facilities Engineering Command.

- Ou, C.Y., Lin, Y.L., and Hsieh, P.G, (2006). Case record of an excavation with cross walls and buttress walls. *Journal of GeoEngineering*, Vol. 1. No. 2, pp. 79-86.
- Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., Guan, H., (2012) Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations* 52 (4), 682–697.
- Tanseng, P. (1997) Instrument deep excavation in Bangkok subsoils. Master thesis, Asian institute of technology, Thailand
- Teparaksa, W., Thasananipan, N. and M.A.Anwar. (1999). Based Grouting of Wet Process Bored Pile in Bangkok Subsoil, Pile in Bangkok subsoil. 11<sup>th</sup> 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.
- Teparaksa W., and Teparaksa J. (2019). Comparison of Diaphragm Wall Movement Prediction and Field Performance for Different Construction Techniques. *Underground Space*. 4(3). pp.225-234
- Topolnicki, M. (2004). In situ soil mixing (SM). *Ground Improvement* 2<sup>nd</sup> edition, pp. 331- 423.
- Wang, Z.F., Shen, S.L., Ho, C.E. and Kim, Y.H., (2013). Jet Grouting Practice: an Overview. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol. 44 No. 4
- Yoshida, S. (1996). Shear strength of improved soils at lap-joint-face. *Grouting and DeepMixing*, Yonekura, Terashi&shibazaki(eds)©1996 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 805 3
- Yoshizawa, H., Okumura, R., Hosoya, Y., Sumi, M. and Yamada, T. (1997). JGS TC Report: Factor affecting the quality of treated soil during excavation of DMM. *Grouting and Deep mixing*, Balkema, Roterdam, Netherlands.





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด และ พรพจน์ ตันเส็ง. (2566). การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 35 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2568, จำนวน 12 หน้า

พรพจน์ ตันเส็ง และ บุญญฤทธิ์ บุญเกิด. (2566). ประสิทธิภาพของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับอุโมงค์ทางลอดในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 28 (The 28<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering), GTE36, โรงแรมภูเก็ต แกรนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา, ภูเก็ต, วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566.





## การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด<sup>1\*</sup> และ พรพจน์ ต้นเส็ง<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ +669 4740 6014 อีเมล: boonyaritboonkert@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนองานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column wall, SCCW) ที่ไม่ใช้ค้ำยันในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ และใช้การปรับปรุงเสถียรภาพของบ่อชุดเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินด้วยกำแพงขวาง (Cross Wall) และครีบบัน (Buttress) ในงานวิจัยได้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของ SCCW และการทรุดตัวที่ผิวดินในระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดเพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ใช้ Interface element เพื่อจำลองความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อระหว่าง SCC ผลการวิจัยบ่งชี้ว่า SCCW ที่ใช้ Cross wall และ Buttress มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นและการเคลื่อนตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์ ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าค่า Young's modulus ของดินเหนียวอ่อนเท่ากับ  $500 S_u$  ให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด ซึ่งสอดคล้องกับค่า Shear modulus ที่ได้จากผลทดสอบของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบ SCCW ที่ปรับปรุงเสถียรภาพของบ่อชุดด้วย Cross wall และ Buttress

**คำสำคัญ:** กำแพงขวาง เสาเข็มดินซีเมนต์ การขุดดินลึก ดินเหนียวอ่อน วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ 3 มิติ



## Analysis of Behavior of Soil Cement Column Wall Associated with Base Improvement by Cross Wall with 3D Finite Element Method

Boonyarit Boonkert<sup>1\*</sup> and Pompot Tanseng<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>School of Civil Engineering, Faculty Institute of Engineering Suranaree University of Technology

\*Corresponding Author, Tel. +669 4740 6014, E-mail: boonyaritboonkert@gmail.com

### Abstract

This paper presents the research work on behavior of soil cement column wall (SCCW) without temporary bracing in Bangkok's soft clay layer associated with base stability improvement to reduce soil movement by cross wall and buttress. In this research measures the movement of SCCW and soil surface settlement during tunnel construction and compares the results to those obtained from finite element method. Furthermore, used interface element to model the imperfect interface between the SCC. The results indicated that SCCW with cross wall and buttress had significantly increased stability and reduced movement compared to empirical method. The finite element method results show that the Young's modulus of soft clay is  $500 S_u$ , which is consistent with the shear modulus obtained from measurement results. This research can be used for designing of SCCW associated with base improvement by cross wall and buttress.

**Keywords:** Cross wall, soil cement column, deep excavation, soft clay, 3D FEM



## 1. บทนำ

ปัจจุบันกรุงเทพมหานคร เป็นเมืองที่กำลังพัฒนาซึ่งมีการเริ่มขุดดินเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะใช้สอยพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์มากที่สุด เช่น อาคารจอดรถใต้ดิน ศูนย์การค้าขนาดใหญ่ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น โดยในงานก่อสร้างจำเป็นต้องใช้กำแพงกันดินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพังทลายของดิน และในหลายกรณีกำแพงกันดินต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะลดการเคลื่อนตัวของดินที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงเนื่องจากชั้นดินในกรุงเทพฯ มีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน โดยกำแพงกันดินที่นิยมใช้ได้แก่ กำแพงกันดินแบบ Sheet pile wall, pile wall, และ diaphragm wall (D-wall) เนื่องจากเป็นระบบกำแพงกันดินที่วิศวกรรมไทยได้มีการใช้งานและมีประสบการณ์ในการใช้งานมาเป็นระยะเวลาเกินกว่า 30 ปี กำแพงที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกำแพงกันดินแบบ Flexural wall ที่ต้องใช้ระบบค้ำยันทางด้านข้างเพื่อให้แรงที่เกิดในกำแพงไม่สูงจนทำให้ต้องใช้หน้าตัดกำแพงใหญ่หรือใช้เหล็กเสริมในปริมาณที่สูงเกินไป การที่ต้องใช้ระบบค้ำยันชั่วคราวทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการติดตั้งและการรื้อถอนค้ำยัน อีกทั้งการก่อสร้างกำแพงที่ต้องการติดตั้งโดยใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการติดตั้งทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและเสียงที่ส่งผลกระทบต่ออาคารใกล้เคียง ในปัจจุบันเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำเช่น ดินเหนียวอ่อนให้มีกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้นโดยการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินมีความนิยมแพร่หลายซึ่งรู้จักกันในชื่อ เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column, SCC) และวิศวกรรมไทยมีประสบการณ์ในการใช้งานมากขึ้นในหลายโครงการจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนให้มีกำลังสูงขึ้นและใช้เป็นกำแพงกันดิน โดยมีงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่ใช้ในงานขุดดินลึก [1]-[4] ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำแพงกันดินสามารถใช้ร่วมกับงานขุดดินลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ SCC ยังถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อกรณีที่ใช้ Sheet pile เป็นกำแพงกันดินกับงานวิจัย

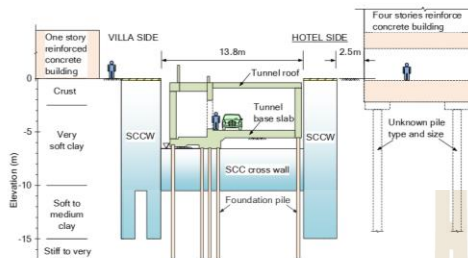
ของ [5], [6] ซึ่งใช้ SCC ปรับปรุงดินอ่อนทั่วทั้งกันบ่อและมีการวิจัยของ [7] ในการใช้ SCC เป็นกำแพงที่ปรับปรุงคุณภาพดินที่กันบ่อแบบขวางตั้งฉากกับแนวกำแพง sheet pile ที่นำมาใช้ในการค้ำยันจากการขุดดิน ซึ่งเรียกกำแพงชนิดนี้ว่า Cross wall โดย [8] ได้รายงานพฤติกรรมของ Cross wall ที่เป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก (D-wall) ในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อนที่กรุงออสโล ประเทศนอร์เวย์ และ [9] ได้รายงานพฤติกรรมของ Cross wall และ Buttress wall ที่ใช้ลดการเคลื่อนตัวของ D-wall โดย Cross wall และ Buttress wall ที่เป็น D-wall ในงานขุดดินลึกเพื่อสร้างห้องใต้ดินในประเทศไต้หวัน โดย Cross wall ที่ใช้มีระยะห่างมากกว่ากรณีที่ใช้ SCC เป็น Cross wall อยู่ 8 เท่า โดย D-wall ได้ออกแบบให้เหล็กเสริมระหว่าง D-wall แต่ละ panel มีความต่อเนื่องกัน ทำให้ D-wall มี Flexural rigidity ในแนวราบ จึงสามารถใช้ประสิทธิภาพของ Cross wall ได้อย่างเต็มที่

จากงานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้นยังไม่พบว่ามีการวิจัยที่กล่าวถึงการนำ SCC เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดดินลึกโดยไม่ใช้ค้ำยัน และใช้ร่วมกับการปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กันบ่อ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil-cement column wall, SCCW) ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กันบ่อขุดด้วย Cross wall และนำเสนอผลการวิเคราะห์หาค่าด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ เพื่อหาสตีเฟนส์ที่ทำนายพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของ SCCW เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบ SCCW ที่ใช้ร่วมกับการปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กันบ่อ

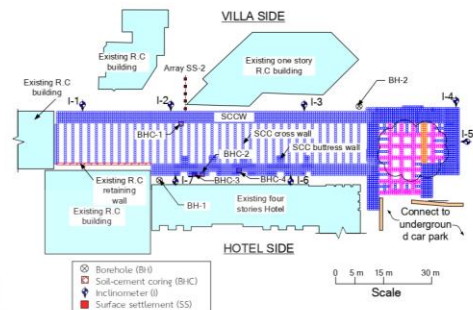
## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 พื้นที่วิจัยและข้อมูลชั้นดิน

พื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อการศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์กว้าง 13.8 เมตร ยาว 96 เมตร ที่ใช้เป็นทางเข้าชั้นจอดรถใต้ดินของอาคารคอนโดมิเนียม ตั้งอยู่ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร มีลักษณะอุโมงค์วางตัวตามแนวอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



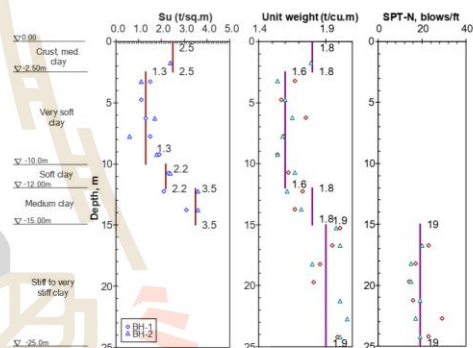
รูปที่ 1 รูปตัดขวางของโครงการและรูปตัดชั้นดิน



รูปที่ 2 ฝั่งตำแหน่งกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

โดยมีระยะห่างจากรูกราก 2.5 เมตร ดังรูปที่ 1 การออกแบบกำแพงกันดินจึงเลือกใช้เป็น SCCW เนื่องจากมีเสียงและความสั่นสะเทือนรบกวนผู้ใช้โรงแรมที่ต่ำกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีอื่นและเพื่อลดระยะเวลาในการก่อสร้างจึงไม่มีการติดตั้งค้ำยันในระหว่างการก่อสร้าง การใช้ SCCW เพียงอย่างเดียวทำให้กำแพงกันดินมีการเคลื่อนตัวที่สูง อาจส่งผลกระทบต่ออาคารโรงแรม จึงได้มีการปรับปรุงเสถียรภาพของกันบ่อโดยใช้ Cross wall และ Buttress เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกันบ่อโดยลดการเกิด Base heave และลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน โดยโครงการนี้ขุดดินลึก 7.4 เมตร ฝั่งที่ติดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ชั้น (Villa side) และ 6.5 เมตร ฝั่งที่ติดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 4 ชั้น (Hotel side) โดยที่กำแพงทั้งสองฝั่งได้มีการปรับปรุงเสถียรภาพที่กันบ่อด้วย Cross wall เพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพง นอกจากนี้กำแพงฝั่ง Hotel ได้มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress บริเวณด้านหน้าของ SCCW เพื่อหลีกเลี่ยงสาธารณูปโภคที่ทำให้ไม่สามารถก่อสร้าง SCCW ได้ตลอดทั้งแนวดังรูปที่ 2 เพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ได้รายงานโดย [9]

ลักษณะของชั้นดินในโครงการที่ได้จากการเจาะสำรวจดินจำนวน 2 หลุม มีลักษณะของชั้นดินเป็นดังรูปที่ 3 โดยมีส่วนบนสุดเป็นชั้นเปลือกดินและดินถมหนา 2.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงอ่อนหนา 7.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 2 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 3 เมตร ชั้นดินชั้นล่างสุดเป็นชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากหนา 10 เมตร



รูปที่ 3 รูปตัดชั้นดินของโครงการ

ระบบกำแพงกันดินที่ใช้ในโครงการแต่ละฝั่ง ในงานวิจัยนี้ใช้คำเรียกชื่อกำแพงดังตารางที่ 1

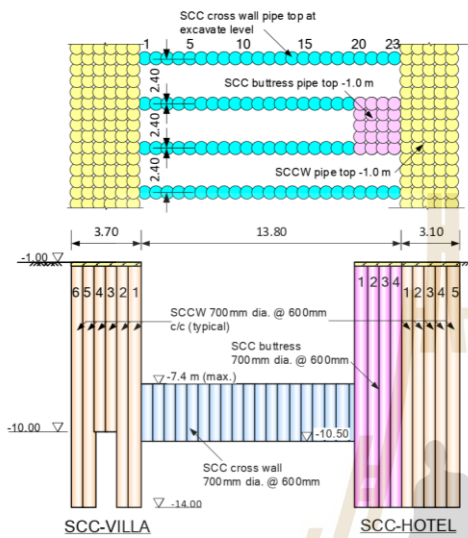
ตารางที่ 1 ชื่อคำเรียกกำแพงแต่ละฝั่งและคำอธิบาย

Side	Wall name	Description
Villa	SCC-Villa	SCC 6 ต้นมีปลาย SCC ไม่เท่ากัน
Hotel	SCC-Hotel	SCC 5 ต้นมีปลาย SCC เท่ากันและเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress

## 2.2 เสาเข็มดินซีเมนต์

### 2.2.1 กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

กำแพง SCC-Villa เป็น SCCW ที่มี SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกัน (Overlap) เป็นระยะ 100 มิลลิเมตร มีระดับหัวเสาอยู่ที่ความลึก 1 เมตร เรียงตัวกัน 6 แถว มีความยาวเสาไม่เท่ากันโดยที่แถวที่ 3 และ 4 เป็นแถวที่ SCC มีความลึกอยู่



รูปที่ 4 รูปแบบการเรียงตัวและรูปตัดขวางของกำแพง

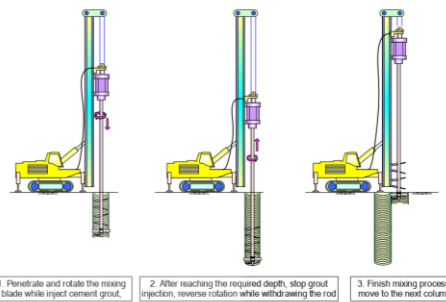
ที่ 10 เมตร และแถวที่เหลือมีความลึกอยู่ที่ 14 เมตร โดยอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง

กำแพง SCC-Hotel เป็น SCCW ที่มี SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร มีระดับหัวเสาอยู่ที่ความลึก 1 เมตร เรียงตัวกัน 5 แถว โดยมีความยาวเสาเท่ากันที่ความลึก 14 เมตร และมีการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress เป็น SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เรียงตัวกันเป็นแถว 4 แถว ยื่นออกมาจาก SCCW มีความลึกเท่ากับ SCCW ที่ความลึก 14 เมตร โดยอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง

Cross wall เป็น SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร มีระดับหัวเสาอยู่ที่ระดับขุดดิน เรียงตัวกันเป็นระยะ 13.8 เมตร ตามความกว้างของบ่อขุดมีระยะห่างของ Cross wall อยู่ที่ 2.4 เมตร ตามแนวยาวของกำแพง โดยปลายของ Cross wall อยู่ที่ความลึก 10.5 เมตร ดังรูปที่ 4

2.2.2 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

การก่อสร้าง SCC สำหรับโครงการนี้ใช้วิธีการผสมเชิงกลด้วยระบบใบกวนและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ (Low-



รูปที่ 5 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมเชิงกลโดยระบบใบกวนและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ

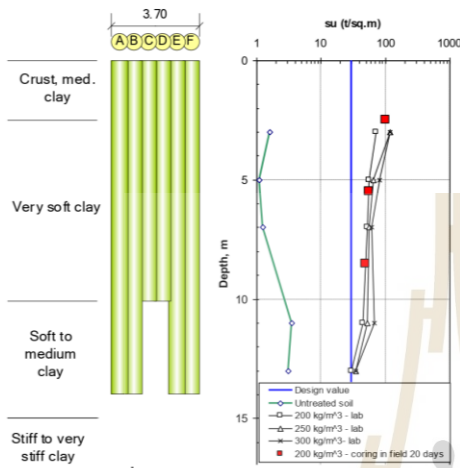
pressure mechanically mixing method) โดยน้ำปูนที่ใช้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณปูนเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินที่ยังไม่ผสม การผสมและการกวนจะใช้ความเร็วในการหมุนก้านเจาะประมาณ 30 ถึง 40 รอบต่อนาที ความเร็วในการกุดก้านเจาะประมาณ 1 เมตรต่อนาที โดยจะสัมพันธ์กับอัตราการฉีดน้ำปูนที่ 100 ถึง 200 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 5

2.2.3 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์

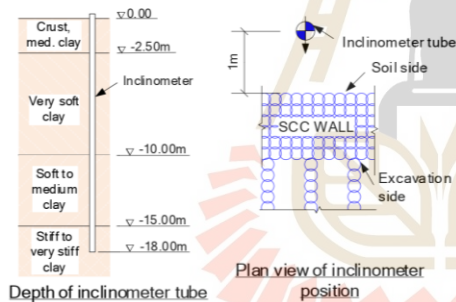
หลังจากก่อสร้าง SCCW แล้วเสร็จ ก่อนเริ่มการขุดดินได้ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างของ SCC เพื่อทดสอบรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive test) ตามตำแหน่งดังรูปที่ 2 โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนของ SCC ที่ออกแบบไว้อยู่ที่ 30 ตันต่อตารางเมตร พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของ SCC สูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมอยู่ที่ประมาณ 30 เท่า ดังรูปที่ 6

2.3 เครื่องมือวัด

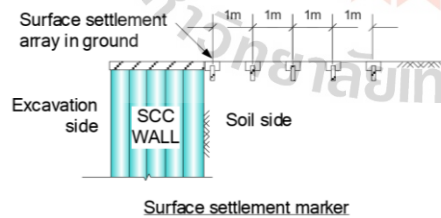
ในการก่อสร้างได้ติดตั้งเครื่องมือวัด Inclinator ทั้งหมด 7 ตำแหน่ง และ Surface settlement marker ไว้ที่หลัง SCCW ทั้งหมด 5 หมุด ดังรูปที่ 2 โดยติดตั้ง Inclinator ไว้ด้านหลังของ SCCW เป็นระยะ 1 เมตร ที่ความลึก 18 เมตรจากผิวดินโดยที่ปลายของท่อ Inclinator ฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งดังรูปที่ 7 และ Surface settlement marker จะติดตั้งไว้ด้านหลังกำแพง โดยมีระยะห่างระหว่างหมุดอยู่ที่ 1 เมตร ดังรูปที่ 8



รูปที่ 6 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 7 การติดตั้ง Inclinerometer



รูปที่ 8 การติดตั้ง Surface settlement

2.4 การจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

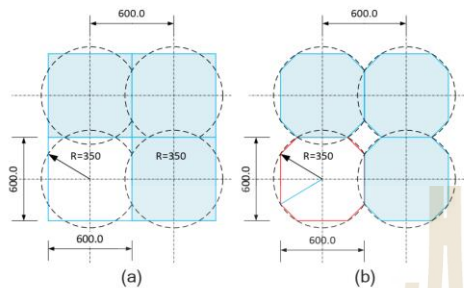
การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PLAXIS 3D ทำการจำลองการขุดดินและใช้คุณสมบัติของดินและดินซีเมนต์โดยใช้แบบจำลองดิน Linear elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb

failure criteria) โดยสมมุติให้ดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำเนื่องจากโครงการนี้ใช้เวลาในการขุดดิน 3 เดือน แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขุดดินส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และข้อมูลที่ได้การเจาะสำรวจดินของโครงการมีผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน (Standard penetration test, SPT-N) ดังนั้นจึงใช้สตีเฟนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained total stress) และกำลังรับแรงเฉือนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) สำหรับดินเหนียว ซึ่งเป็น Undrained type C โดยขอบเขตในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงความลึก 20 เมตรที่เป็นชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากซึ่งอิทธิพลเนื่องจากการขุดดินไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพง ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หาค่า Young's modulus ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพง ซึ่งอยู่ในเทอม  $E_u / S_u$  ตามที่เสนอโดยในงานวิจัยของ [3]-[4], [10] โดยแปรผัน  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวอ่อนทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 250, 500, 750, 1000, 1250 และ 1500 โดยคง  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวแข็งไว้ที่ 500 และเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดจริงในสนาม โดยในการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ ดังตารางที่ 2

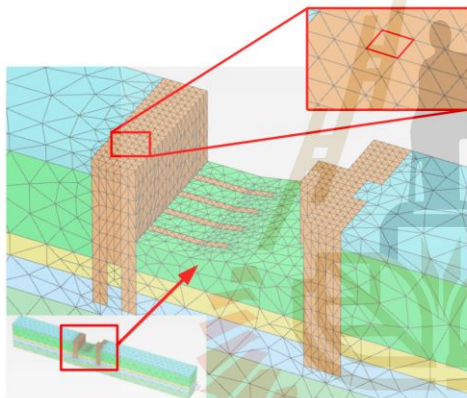
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

Soil layer	$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_u$ (kPa)	$v_s$
Crust	18	25	0.495
Very soft clay	16	13	0.495
Soft clay	16	22	0.495
Medium clay	18	35	0.495
Stiff to very stiff clay	19	98	0.495
SCC	16	300	0.495

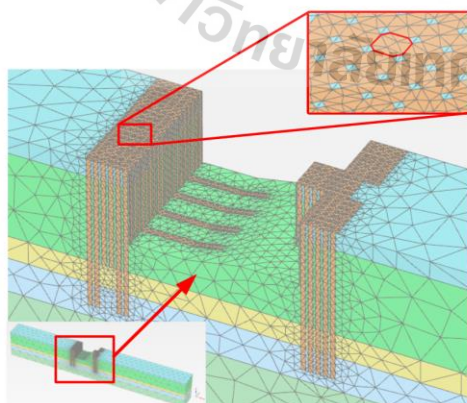




รูปที่ 9 การจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ (a) รูปแบบ Solid (b) รูปแบบ Discrete



รูปที่ 10 FEM Mesh ที่ใช้ในการจำลอง SCCW รูปแบบ Solid



รูปที่ 11 FEM Mesh ที่ใช้ในการจำลอง SCCW รูปแบบ Discrete

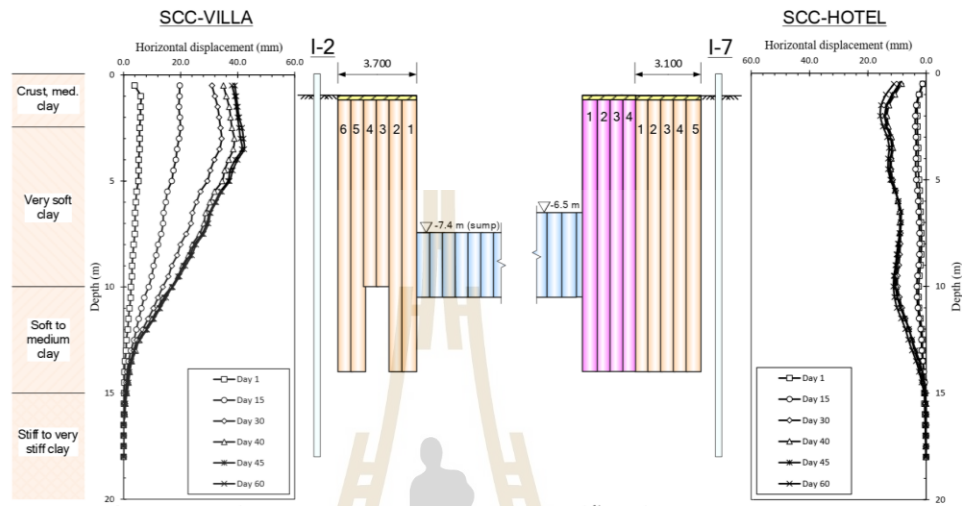
ในงานวิจัยทำการจำลอง SCC สองรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบ Solid และรูปแบบ Discrete โดยรูปแบบ Solid ทำการจำลองให้หน้าตัดของ SCC เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เทียบเท่าที่มีความกว้างเป็น 600 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 9a ส่วนแบบจำลองแบบ Discrete ทำการจำลอง SCC โดยใช้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการกลมมุมให้เป็นรูปแปดเหลี่ยม โดยรูปแปดเหลี่ยมอยู่ภายในเส้นรอบวงของหน้าตัด SCC ดังรูปที่ 9b ระยะเหลี่ยมเป็นเส้นคอร์ทเช่นเดียวกับการจำลองรูปแบบ Solid โดยทั้งสองรูปแบบใช้ลักษณะการขบเหลี่ยมแบบเดียวกันและใช้ Interface element โดยใช้ค่า Interface element reduction factor ( $R_{inter}$ ) = 0.75 กรณีรอยต่อระหว่าง SCC กับ SCC และกรณีรอยต่อระหว่าง SCC กับดิน ตามที่รายงานในงานวิจัยของ [3], [11] โดยในแต่ละรูปแบบ Solid และ Discrete มีการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของดินหลังก้ำแพงในแต่ละรูปแบบ

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 ผลที่ได้จากการตรวจวัด

##### 3.1.1 การเคลื่อนตัวของด้านข้างของดินหลังก้ำแพง

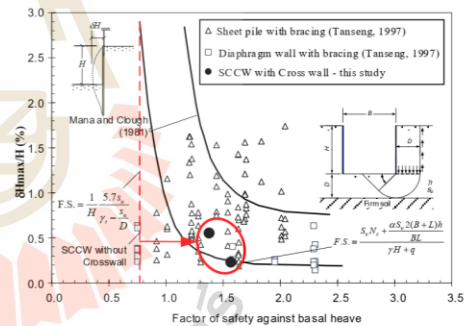
รูปที่ 12 เป็นผลการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCCW ที่ทำการตรวจวัดโดยเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เริ่มตรวจวัดหลังจากผ่านไป 1, 15, 30, 40, 45 และ 60 วัน ตั้งแต่เริ่มมีการขุดดิน โดยพิจารณาที่ก้ำแพง SCC-Villa เห็นได้ว่าพฤติกรรมของดินหลัง SCCW ในช่วง 1 ถึง 40 วัน การเคลื่อนตัวของดินหลังก้ำแพงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับในการขุดดิน เมื่อถึงช่วง 45 วันที่ขุดถึงระดับลึกที่สุดของโครงการระดับ 7.4 เมตร พบว่า การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นสูงสุด 41 มิลลิเมตรที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร ซึ่งอยู่ในตำแหน่งชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก โดยที่ปลายก้ำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 2 มิลลิเมตร การเคลื่อนตัวคล้ายกับพฤติกรรมของคานยื่นที่มีการดัดกลับเล็กน้อย ส่วนก้ำแพง SCC-Hotel เห็นได้ว่าในช่วง 1 ถึง 30 วัน การเคลื่อนตัวของดิน



รูปที่ 12 ผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มขุดดินจนถึงขุดถึงระดับสุดท้าย

หลังกำแพงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับในการขุดดินเมื่อขุดถึงระดับ 6.5 เมตร พบว่า การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นสูงสุด 15 มิลลิเมตรที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากโดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 2 มิลลิเมตร ในช่วงเวลาที่ตรวจวัด 45 ถึง 60 วันที่ขุดถึงระดับที่ต้องการ การเคลื่อนตัวของดินไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญ

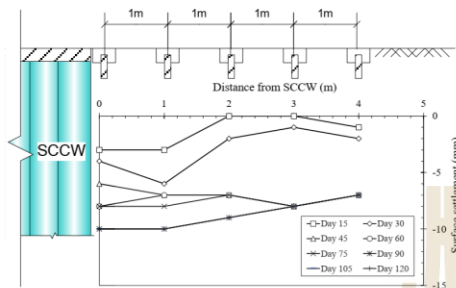
จากผลการเคลื่อนตัวเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประจักษ์ในการขุดดินในชั้นเหนียวดินกรุงเทพฯ ที่เสนอโดย [12] ซึ่งอ้างอิงงานวิจัยของ [13] ที่ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุด (Factor of safety against base heave,  $F.S.$ ) กับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด ( $\delta H_{max} / H$ ) ดังรูปที่ 13 พบว่า  $\delta H_{max} / H$  ที่ได้จากโครงการนี้เมื่อใช้การปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กั้นบ่อด้วย Cross wall มีค่าที่ต่ำและทำให้  $F.S.$  เป็น 1.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ  $F.S. = 0.75$  กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงเสถียรภาพที่กั้นบ่อด้วย Cross wall พบว่า มี  $F.S.$  ที่เพิ่มขึ้นจนมีความปลอดภัย อีกทั้งการเคลื่อนตัว  $\delta H_{max} / H$  ได้ลดลงจนอยู่ในช่วงที่เสนอโดย [13]



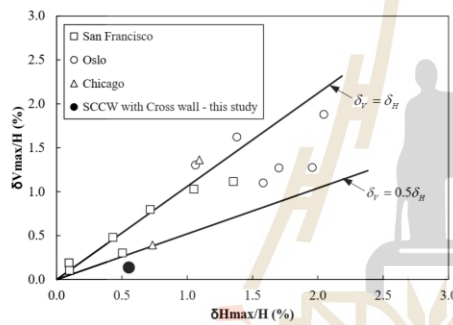
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด [12]

### 3.1.2 การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง

รูปที่ 14 เป็นผลการทรุดตัวที่ผิวดินบริเวณหลังกำแพงกันดินของโครงการ โดยเริ่มตรวจวัดหลังจากผ่านไป 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน ตั้งแต่เริ่มมีการขุดดินโดยมีการทรุดตัวสูงสุด 10 มิลลิเมตร โดยบริเวณที่ทรุดตัวสูงสุดอยู่บริเวณกำแพง และลดลงเมื่อมีระยะห่างจากกำแพงมากขึ้น เห็นได้ว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงแรกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการขุดดิน



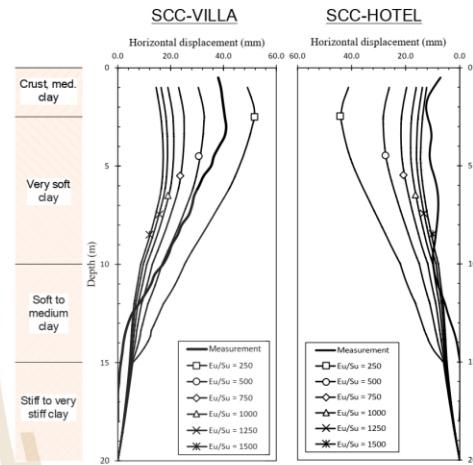
รูปที่ 14 ผลการทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพง



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุดของกำแพงกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด [13]

จากผลการทรุดตัวของดินหลังกำแพงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์ในการขุดดินในต่างประเทศ ที่นำเสนอโดย [13] ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุดของกำแพง ( $\delta V_{max} / H$ ) กับ  $\delta H_{max} / H$  ดังรูปที่ 15 พบว่า  $\delta V_{max} / H$  มีค่าที่ต่ำกว่าเส้นตรง  $\delta V_r = 0.5 \delta H_r$  แสดงให้เห็นถึงทรุดตัวที่ผิวดินที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงถึง 2 เท่า

จากผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงและการเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SCCW ที่มีการปรับปรุงเสถียรภาพของกันบ่อด้วย Cross wall และ Buttress สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและการทรุดตัวที่ผิวดิน นอกจากนี้เมื่อมีการขุดดินถึงระดับ



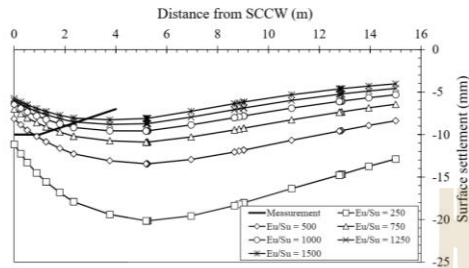
รูปที่ 16 ค่าการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแปรผัน  $E_u / S_u$  ของดินเหนียวอ่อน

สุดท้าย การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างมีนัยสำคัญ

### 3.2 การวิเคราะห์ทกลับ

ผลการวิเคราะห์ทกลับเพื่อหาค่า Young's modulus ของดินเหนียวอ่อนโดยเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนามของดินหลังกำแพงแต่ละฝั่ง มีผลการวิเคราะห์ทกลับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงดังรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ

3.2.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพง ตามที่ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ในหัวข้อ 2.4 พบว่า  $E_u / S_u$  ที่มีผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากที่สุดคือ  $E_u / S_u = 500$  และ 1500 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ผลการวิเคราะห์ทกลับของกำแพงในแต่ละฝั่งพบว่า ค่า Young's modulus ที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเท่ากับ  $500 S_u$  เนื่องจากแบบจำลอง Mohr-Coulomb สามารถใช้ค่า Young's modulus ได้เพียงค่าเดียวซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรม



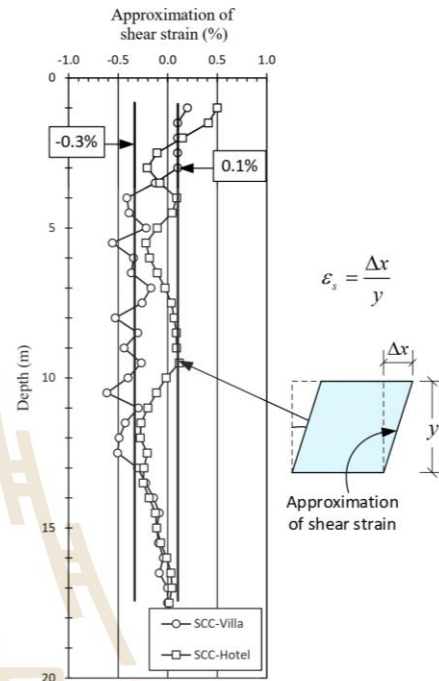
รูปที่ 17 ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแปรผัน  $E_u/S_u$  ของดินเหนียวอ่อน

การเคลื่อนตัวของดินที่สติฟเนสขึ้นกับหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไปของดินได้ แต่ในด้านการออกแบบยังเป็นค่าที่ยังอยู่ในด้านปลอดภัย

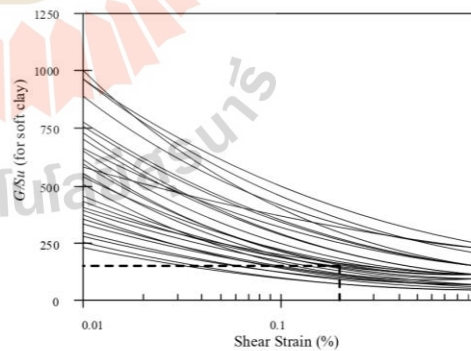
3.2.3 การทรุดตัวของดินหลังกำแพง

รูปที่ 17 ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแปรผัน  $E_u/S_u$  ของดินเหนียวอ่อนใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากที่สุดคือ  $E_u/S_u = 750$  เพียงแต่ลักษณะของการทรุดตัวไม่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดในภาคสนาม เนื่องจากผลการตรวจวัดที่มีการทรุดตัวมากที่สุดอยู่บริเวณกำแพง แต่การทรุดตัวที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นเกิดการทรุดตัวสูงสุดที่บริเวณหลังกำแพงมีระยะห่างออกไปจากกำแพงประมาณ 5 เมตร เห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ไม่สอดคล้องกัน อาจมีสาเหตุมาจากแบบจำลองที่ใช้ยังไม่สามารถทำนายการทรุดตัวได้แม่นยำ โดยค่า Young's modulus ที่เหมาะสมในการทำนายการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงเท่ากับ  $750 S_u$

เมื่อพิจารณาจากความเครียดเฉือน (Shear strain,  $\epsilon_s$ ) ที่ได้จากการประมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงที่เกิดขึ้นจริงในชั้นดินเหนียวอ่อนพบว่า ความเครียดเฉือนของกำแพง SCC-Villa มีค่าประมาณ 0.3% และกำแพง SCC-Hotel มีค่าประมาณ 0.1% ดังรูปที่ 18 จากนั้นทำการนำค่าความเครียดเฉือนไปพิจารณาหาโมดูลัสเฉือนจากความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการทดสอบ Self-boring pressure meter [14] ดังรูปที่ 19 ที่ได้จากวิธี Empirical พบว่า

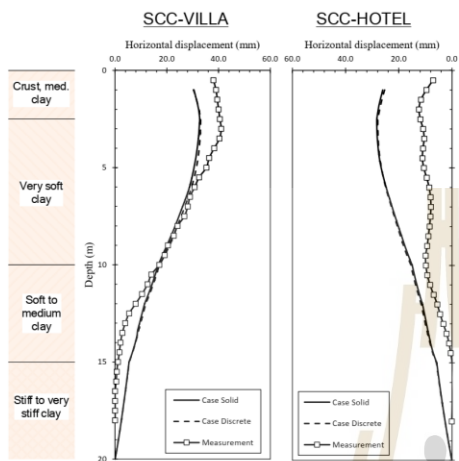


รูปที่ 18 ความเครียดเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นในสนามของกำแพงทั้งสองฝั่ง



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการทดสอบ Self-boring pressure meter [14]

โมดูลัสเฉือนมีค่าประมาณ  $150 S_u$  โดยมีค่า Young's modulus อยู่ที่  $450 S_u$  ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่กลับด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์



รูปที่ 20 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงแต่ละรูปแบบ

### 3.3 การเปรียบเทียบรูปแบบการจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

เมื่อทราบค่า Young's modulus ที่เหมาะสมดินเหนียวอ่อนในการทำนายการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงทำการจำลองการขุดดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง SCC แต่ละรูปแบบโดยผลการวิเคราะห์เป็นดังรูปที่ 19 การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa มีลักษณะการเคลื่อนตัวที่คล้ายกันทั้งสองรูปแบบ โดยที่การเคลื่อนตัวสูงสุดของรูปแบบ Discrete อยู่ที่ 33 มิลลิเมตร และรูปแบบ Solid อยู่ที่ 32 มิลลิเมตร ในส่วนของการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Hotel ลักษณะการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงมีลักษณะเช่นเดียวกับกำแพง SCC-Villa โดยการเคลื่อนตัวสูงสุดของรูปแบบ Discrete อยู่ที่ 28 มิลลิเมตร และรูปแบบ Solid อยู่ที่ 29 มิลลิเมตร

จากการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพงแต่ละรูปแบบพบว่า การจำลอง SCC รูปแบบ Discrete มีการเคลื่อนตัวที่สูงกว่า เพียงแต่การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละรูปแบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความแตกต่างกันมาก โดยที่รูปแบบ Solid ใช้เวลาในการวิเคราะห์

ประมาณ 15 นาทีในส่วนของรูปแบบ Discrete ใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 120 นาที ที่ใช้ CPU intel core i7 7820x 8core เนื่องจากการแบ่ง Mesh element รูปแบบ Discrete มี Element ที่มากกว่ารูปแบบ Solid ประมาณ 6-7 เท่า

### 4. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 จากการเปรียบเทียบข้อมูลเชิงประสบการณ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SCCW ที่มีการเพิ่มเสถียรภาพที่กันบ่อด้วย Cross wall สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพง การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงและเพิ่มสัดส่วนปลอดภัยต่อการอุดของดินใต้บ่อดูดเนื่องจากการขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนได้เป็นอย่างดี

4.2 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพง SCC-Villa มีการเคลื่อนตัวสูงกว่ากำแพง SCC-Hotel ประมาณ 3 เท่า แสดงให้เห็นว่า Buttress ที่เสริมไว้ด้านหน้าของกำแพง SCC-Hotel สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กำแพงได้ดี

4.3 ค่า Young's modulus ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงคือ  $500 S_u$  และ  $750 S_u$  ตามลำดับ

4.4 การวิเคราะห์ด้วยการจำลอง SCC โดยใช้รูปแบบ Discrete มีการเคลื่อนตัวของกำแพงที่สูงกว่ารูปแบบ Solid เพียงเล็กน้อยโดยไม่ได้มีการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบ Discrete ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่ารูปแบบ Solid อยู่มาก

### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณอัญธิกา คิมเม, คุณณัฐดนัย ป้อมบุญมี, คุณศุภตาภรณ์ ทรงศรี, คุณกชกร ไมตรีจร และคุณชุตินธ์ ธีัญญาหาร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการตรวจทานบทความงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์



## เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Phemphorn, "Stability analysis of excavated slope stabilized by DCM column: case study and parametric analysis," Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng., Kasetsart University, Bangkok, 2014.
- [2] W. Nutthakit, "Movement behavior of deep cement mixing column for retaining structure," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Chulalongkorn University, Bangkok, 2005. (in Thai)
- [3] N. Vichit, "Behavior of soil cement column wall used for deep excavation with top-down system in Bangkok soft clay," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 2014. (in Thai)
- [4] S. Thanakorn and T. Pornpot, "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," *Technical Education Journal*, vol.10, no. 3, pp. 33-47. 2019. (in Thai)
- [5] H. Ueki, S. Moue, S. Kobayshai and K. Sekiya, "In-situ monitoring and analysis of a cut-and-cover tunnel on the bay-shore route," *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [6] N. Kubota, H. Sako, M. Morota and K. Kojima, "Measure to prevent heaving during the excavation of soft ground," *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, 2000.
- [7] R. Ignat, S. Baker, S. Liedberg and S. Larsson, "Behavior of braced excavation supported by panels of deep mixing columns" *Can. Geotech. J.*, vol. 53, pp. 1671-1687. 2016.
- [8] O. Eide, G. Aas and T. Jøsang, "Special Application of Cast-in-Place Slurry Trench Walls for Tunnel in Soft Clay in Oslo," in *Proceeding of 5th ECSMFE*, Madrid, vol. 1, pp. 485-498. 1972.
- [9] C.Y. Ou, Y.L. Lin and P.G. Hsieh, "Case record of an excavation with cross walls and buttress walls," *Journal of GeoEngineering*, vol. 1, no. 2, pp. 79-86. 2006.
- [10] P. Narit, "Lateral movement analysis of cement column in excavation work," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Chulalongkorn University, Bangkok, 2003. (in Thai)
- [11] H. Yoshizawa, R. Okumura, Y. Hosoya, M. Sumi and T. Yamada, "JGS TC Report: Factor affecting the quality of treated soil during excavation of DMM," *Grouting and Deep mixing*, Balkema, Rotterdam, 1997.
- [12] T. Pornpot, "Instrument deep excavation in Bangkok subsoils," M.S. thesis, Dept. Civil Eng., Asian institute of technology, Thailand, 1997.
- [13] Abdulaziz I. Mana and G. Wayne Clough, "Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol.107, Issue 6, pp.759 – 777. 1981.
- [14] W. Teparaksa, "Analysis of lateral wall movement for deep excavation in Bangkok subsoils," in *Proceedings of the civil and environmental engineering conference*, Bangkok, pp. II-67-II-76, 1999.

## ประสิทธิภาพของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับอุโมงค์ทางลอดในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ Performance of Soil Cement Column Wall for a Tunnel Construction in Bangkok Soft Clay

พรพจน์ ต้นเส็ง<sup>1</sup>, บุญญฤทธิ์ บุญเกิด<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา

Corresponding author; E-mail address: <sup>1</sup>pompot@sut.ac.th, <sup>2</sup>boonyaritboonkert@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงประสิทธิภาพของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (soil cement column wall, SCC wall) ของการขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ใช้กำแพงขวาง (cross wall) ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อขุดแทนการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว การศึกษาใช้โครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์สำหรับอาคารชุดพักอาศัย ที่ฝั่งอุโมงค์อยู่ใกล้กับอาคารคอนโดมิเนียม ในงานวิจัยนี้ได้มีการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงกันดินในระหว่างการก่อสร้าง และนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกำแพงกันดินและเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่ไม่มีการเพิ่มเสถียรภาพกันบ่อขุดด้วยกำแพงขวาง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการปรับปรุงเสถียรภาพด้วยผนังขวางที่กันบ่อขุดมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพงที่ต่ำและยังสามารถใช้งานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, การขุดดินลึก, ดินเหนียวอ่อน, กำแพงขวาง, วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

### Abstract

This paper research presents the performance of soil cement column wall (SCC wall) associated with base stability improvement by cross wall in soft clay. The field observation on the behavior of the SCC wall for a tunnel construction was extremely close to the existing structure in Bangkok subsoils, presented. The behavior of wall is observed by measurement of wall moments during construction. The research studied the behavior of wall with cross wall compared to SCC wall without cross wall by 3D finite element method. The results show that the SCC wall associated with base stability improvement by cross wall provides low lateral movement and deep excavation in soft clay significantly.

Keywords: soil cement column, deep excavation, soft clay, cross wall, 3D finite element method

### 1. บทนำ

ความต้องการในการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินเริ่มเป็นที่นิยมมากยิ่งขึ้นในกรุงเทพมหานคร ที่เป็นเมืองที่มีพื้นที่ใช้สอยอย่างจำกัดได้แก่ อาคารจอดรถใต้ดิน ศูนย์การค้า อุโมงค์ทางลอด รถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น โดยในการก่อสร้างมีความจำเป็นต้องใช้กำแพงกันดินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพังทลายของดิน และในหลายกรณีกำแพงกันดินจำเป็นต้องมีความแกร่งที่เพียงพอต่อการต้านแรงดันดินที่กระทำเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง กำแพงกันดินที่นิยมใช้ได้แก่ กำแพงกันดินแบบ sheet pile wall, pile wall, และ diaphragm wall (D-wall) เนื่องจากเป็นระบบกำแพงที่วิศวกรไทยได้มีการใช้งานและมีประสบการณ์ในการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน กำแพงที่กล่าวมานั้น เป็นกำแพงกันดินแบบ flexural wall ที่ต้องใช้ระบบค้ำยันทางด้านข้างเพื่อไม่ให้แรงที่เกิดขึ้นในกำแพงสูงจนทำให้ต้องใช้หน้าตัดกำแพงใหญ่หรือใช้เหล็กเสริมในปริมาณที่สูง การที่ต้องใช้ค้ำยันชั่วคราวทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการติดตั้งและการรื้อถอนค้ำยัน อีกทั้งการก่อสร้างกำแพงที่จำเป็นต้องติดตั้งโดยใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการติดตั้งทำให้เกิดความสิ้นเปลืองและเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่ออาคารและพื้นที่ข้างเคียง ในปัจจุบันเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำเช่นดินเหนียวอ่อนให้มีความแข็งแรงเฉือนสูงขึ้นที่รู้จักกันในชื่อ เสาเข็มดินซีเมนต์ (soil cement column, SCC) โดยการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินมีความนิยมแพร่หลายและวิศวกรไทยมีประสบการณ์ในการใช้งานมากขึ้น ในหลายโครงการจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนให้มีความแข็งแรงและใช้เป็นกำแพงกันดิน โดยวิธีการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมักใช้การจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เนื่องจากในการก่อสร้าง SCC ใช้วิธีการผสมโดยการกวนดินให้เข้ากับปูนซีเมนต์ที่ฉีดลงในดินที่มีลักษณะเป็นต้นเหมือนกับเสาเข็ม จึงมีความไม่ต่อเนื่องในระหว่างต้นที่ผสม และมีกำลังต้านทานบริเวณรอยต่อที่ไม่เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินผสมซีเมนต์ การคำนวณโดยวิธีอื่น เช่น limit equilibrium ไม่สามารถพิจารณาถึงปัจจัยนี้ได้ ดังนั้นการออกแบบโดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์จึงให้ผลการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (finite element method, FEM) ของกำแพงที่ใช้ SCC เป็นกำแพงกันดิน โดยอาศัยการศึกษาจากการตรวจวัดพฤติกรรมของ

โครงสร้างจริงจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์เพื่อใช้เป็นทางเข้าชั้นจอดรถใต้ดินของอาคารคอนโดมิเนียม ตั้งอยู่ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร โดยโครงการนี้อยู่ในพื้นที่ของโรงแรมสุโขทัย จึงเลือกใช้การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนให้เป็นกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (soil-cement column wall, SCC wall) เพื่อใช้ในการขุดดินลึก เนื่องจากมีเสียงและความสั่นสะเทือนรบกวนผู้ใช้โรงแรมที่ต่ำกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีอื่น ลักษณะอุโมงค์วางตัวตามแนวอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยมีระยะห่างจากฐานราก 2.5 เมตร รูปที่ 1 การใช้ SCC wall เพียงอย่างเดียวทำให้กำแพงมีการเคลื่อนตัวที่สูงที่อาจส่งผลกระทบต่ออาคารโรงแรม จึงได้มีการปรับปรุงเสถียรภาพของกันบ่อชุดโดยใช้ SCC ในแนวขวางกับ SCC wall โดยก่อสร้างไว้เฉพาะที่กันบ่อชุดเป็นแนวกำแพงทุกระยะ 2.4 เมตร ซึ่งกำแพงชนิดนี้เรียกว่ากำแพงขวาง (cross wall) ซึ่งนำมาใช้เพื่อลด base heave และลดการเคลื่อนตัวของกำแพงแทนการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว โดยมีงานวิจัยในงานขุดเพื่อก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อนที่กรุงฮาลัน ประเทศนอร์เวย์ [1] ในญี่ปุ่นมีการวิจัยการใช้ SCC ปรับปรุงดินทั้งกันบ่อเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกันบ่อชุดและลดการเคลื่อนตัว โดยปรับปรุงดินทั้งกันบ่อ ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการขุดมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นและมีการเคลื่อนตัวที่ลดลง [2], [3] การวิจัยที่นำเอา SCC cross wall มาปรับปรุงกันบ่อชุดที่ใช้ sheet pile เหล็ก และค้ำยันชั่วคราว โดยสร้างแปลงทดสอบขนาดจริงในสนามและให้นำนักกวดขันวินด์ โดย [4] พบว่าการใช้ cross wall สามารถเพิ่มเสถียรภาพของกันบ่อชุดได้ ในประเทศไทยมีการปรับปรุง SCC กันบ่อที่โครงการคลองสัดโพธิ์ โดยใช้ cross wall แบบไม่มีการขบกัน (tangent wall) ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อที่ใช้ SCC wall และ tangent wall แต่กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวที่ค่อนข้างสูง [5] และใช้ในโครงการคลองส่งน้ำสุวรรณภูมิ [6] ในไต้หวันมีการใช้ D-wall ร่วมกับกำแพงขวางที่เป็น D-wall ในการขุดดินลึกมากในชั้นดินเหนียวอ่อน [7] โดยกำแพงขวางที่เป็น D-wall มีระยะห่างมากกว่ากรณีที่ใช้ SCC เป็นกำแพงขวางอยู่ 8 เท่า โดยกำแพง D-wall ได้ออกแบบให้เหล็กเสริมระหว่าง D-wall แต่ละ panel มีความต่อเนื่องกัน ทำให้ D-wall มี flexural rigidity ในแนวราบ จึงทำให้สามารถใช้ประสิทธิภาพของกำแพงขวาง ที่มีระยะห่าง 20 ถึง 30 เมตร ได้อย่างเต็มที่ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่เคยมีการศึกษาถึง cross wall ที่เป็น SCC ที่ใช้ร่วมกับกำแพงกันดินแบบ SCC ที่ใช้ระบบค้ำยันเลย



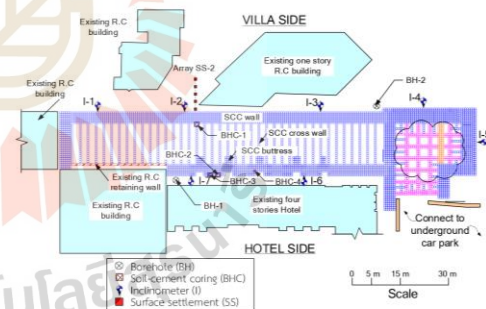
รูปที่ 1 รูปตัดขวางของโครงการและรูปตัดชั้นดิน

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของ SCC wall ที่ไม่ใช้ค้ำยันในงานขุดดินก่อสร้างอุโมงค์ทางลอด ที่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อแทนการใช้ค้ำยันชั่วคราว ในแง่ของพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงในระหว่างการก่อสร้างและเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวของดินที่ใช้ cross wall ในงานก่อสร้างด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

## 2. ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยและการติดตั้งเครื่องมือวัด

### 2.1 ข้อมูลโครงการ

พื้นที่ที่เก็บข้อมูลเพื่อการศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์กว้าง 13.8 เมตร ยาว 96 เมตร เพื่อใช้เป็นทางเข้าชั้นจอดรถใต้ดินของอาคารคอนโดมิเนียม ตั้งอยู่ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร โดยโครงการนี้ตั้งขุดดินในชั้นดินเหนียวอ่อนลึก 7.4 เมตร ฝั่งที่ติดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กหนึ่งชั้น (villa side) และขุดดินลึก 6.5 เมตร ฝั่งที่ติดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสี่ชั้น (hotel side) ที่มีลักษณะของอุโมงค์วางตัวตามแนวอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงการนี้ใช้วิธี open cut and cover ในการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อลดระยะเวลาในการก่อสร้างจึงไม่มีการติดตั้งค้ำยันในระหว่างการก่อสร้าง จึงได้มีการใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อชุดที่ก่อสร้างไว้เฉพาะที่กันบ่อชุดเป็นแนวกำแพงทุกระยะ 2.4 เมตร เพื่อลดการเคลื่อนตัวของ SCC wall นอกจากนี้มีการใช้ buttress ในการเพิ่มเสถียรภาพบริเวณด้านหน้าของ SCC wall เพื่อหลีกเลี่ยงสาธารณูปโภคที่ทำให้ไม่สามารถก่อสร้าง SCC wall ได้ตลอดทั้งแนวตั้งรูปที่ 2 โดยที่จะทำการรื้อถอนเมื่อมีการก่อสร้างโครงสร้างของอุโมงค์

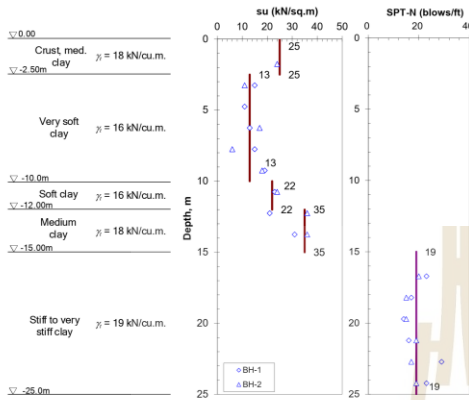


รูปที่ 2 ฝั่งตำแหน่งกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

### 2.2 ข้อมูลชั้นดิน

ลักษณะของชั้นดินในโครงการที่ได้จากการเจาะสำรวจดินจำนวน 2 หลุม มีลักษณะและข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินเป็นดังรูปที่ 3 โดยมีส่วนบนสุดเป็นชั้นเปลือกดินและดินหนา 2.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงชั้นหนา 7.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 2 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 3 เมตร ชั้นดินล่างสุดเป็นชั้นดินเหนียวแข็งหนา 10 เมตร

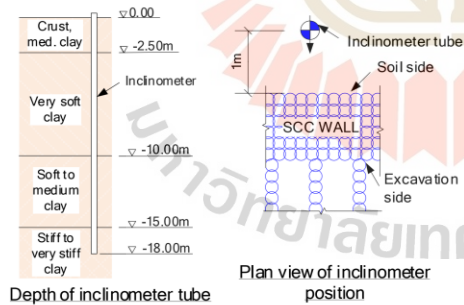




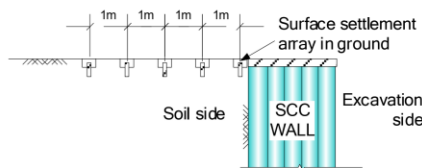
รูปที่ 3 รุปลัดชั้นดินของโครงการที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน

2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด

ในการก่อสร้างได้ติดตั้งเครื่องมือวัด inclinometer ทั้งหมด 7 ตำแหน่งไว้โดยรอบบ่อขุดและ surface settlement ไว้ที่หลัง SCC wall ทั้งหมด 5 หมด ดังรูปที่ 2 โดยที่ inclinometer จะทำการติดตั้งไว้ด้านหลังของ SCC wall เป็นระยะ 1 เมตร โดยติดตั้งไว้ที่ความลึก 18 เมตรจากผิวดิน ที่ปลายของท่อ inclinometer ฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวของปลายท่อดังรูปที่ 4 และติดตั้ง surface settlement ให้มีระยะห่างระหว่างหมุดอยู่ที่ 1 เมตรดังรูปที่ 5 ที่ทำการวัดการทรุดตัวของผิวดินเพื่อสังเกตพฤติกรรมของดินหลังกำแพง โดยการตรวจวัดจะดำเนินการทุกๆ ช่วงเวลาที่มีการขุดดินด้านหน้ากำแพงต่างระดับกัน



รูปที่ 4 การติดตั้ง inclinometer

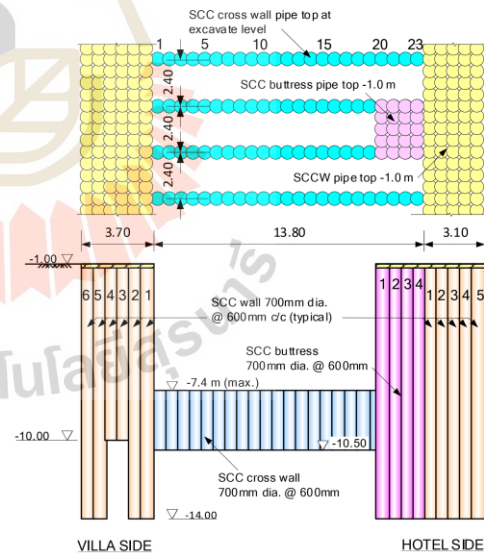


รูปที่ 5 การติดตั้ง surface settlement

3. เสาค้ำดินซีเมนต์

3.1 ข้อมูลกำหนดเสาค้ำดินซีเมนต์

ในโครงการที่เลือกใช้เป็นที่ศึกษาใช้กำแพงกันดินเป็น SCC ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกัน (overlap) เป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เรียงกัน 6 แถวที่มีปลาย SCC ไม่เท่ากันโดยที่แถวที่ 3 และ 4 เป็นแถวที่ SCC มีความลึกอยู่ที่ 10 เมตร และแถวที่เหลือมีความลึกอยู่ที่ 14 เมตรเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง โดยมีระดับหัวเสาอยู่ที่ความลึก 1 เมตร ในฝั่ง villa และกำแพงฝั่ง hotel เป็น SCC เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เรียงกัน 5 แถวที่มีปลาย SCC ที่เท่ากันอยู่ที่ความลึก 14 เมตรเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง โดยมีระดับหัวเสาอยู่ที่ความลึก 1 เมตร ที่มีการเรียงตัวของ SCC เป็นรูปสี่เหลี่ยม (square pattern) และใช้ buttress ที่เป็น SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร เรียงกัน 4 แถวที่มีปลาย SCC และระดับหัวเสาอยู่ระดับเดียวกันกับ SCC wall ในส่วนของ cross wall เป็น SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร โดยเรียงกันเป็นระยะ 13.8 เมตร ตามความกว้างของบ่อขุด มีระดับหัวเสาอยู่ที่ระดับขุดดิน และปลายเสาของ SCC cross wall อยู่ที่ความลึก 10.5 เมตร จากระดับขุดดินดังรูปที่ 6

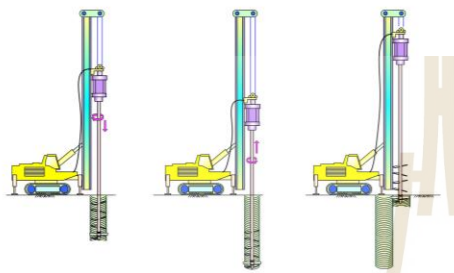


รูปที่ 6 รูปลัดขวางของกำแพงเสาค้ำดินซีเมนต์

3.2 การก่อสร้างกำแพงเสาค้ำดินซีเมนต์

การก่อสร้าง SCC สำหรับโครงการนี้ใช้วิธีการผสมเชิงกลโดยระบบใบกวนและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ (low pressure mechanically mixing method) มีขั้นตอนการก่อสร้างดังรูปที่ 7 โดยน้ำปูนที่ใช้มีอัตราส่วนน้ำต่อ

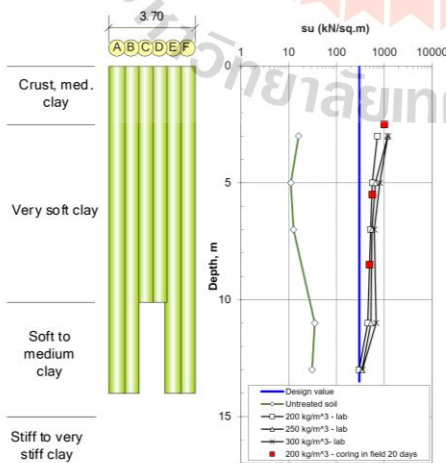
ซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณปูนเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินที่ยังไม่ผสม การผสมและการกวนจะใช้ความเร็วในการหมุนก้านเจาะประมาณ 30 ถึง 40 รอบต่อนาที ความเร็วในการกดก้านเจาะประมาณ 1 เมตรต่อนาที โดยจะสัมพันธ์กับอัตราการฉีดน้ำปูนที่ 100 ถึง 200 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 7 ขั้นตอนการสร้าง SCC โดยใช้วิธีการผสมเชิงกลโดยระบบใบกวนและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ

3.3 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์

หลังจากก่อสร้าง SCC wall แล้วเสร็จ ก่อนที่จะเริ่มการขุดดินได้ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างของ SCC เพื่อทดสอบรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (unconfined compressive strength test) ตามตำแหน่งดังรูปที่ 2 โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดของ SCC ที่ออกแบบไว้อยู่ที่ 300 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร พบว่าผลทดสอบที่ได้มีค่ากำลังสูงกว่ากำลังของดินเดิมอยู่ที่ประมาณ 30 เท่า ดังรูปที่ 8 หากพิจารณาเฉพาะกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบจะมีค่ากำลังที่สูงกว่าที่ออกแบบไว้มาก แต่ตัวอย่างทดสอบนั้นเป็นก้อนตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกหรือความไม่ต่อเนื่องของเนื้อวัสดุ (intact sample) ซึ่ง SCC ที่ใช้จริงนั้นจะมีเนื้อวัสดุไม่สม่ำเสมอโดยมักจะพบรอยแยกในเนื้อวัสดุเสมอ



รูปที่ 8 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 9 ภาพถ่ายขณะขุดดินที่ระดับความลึกสูงสุด 7.4 เมตร

4. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PLAXIS 3D โดยใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb ที่สมมุติให้ดินเหนียวอ่อนตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำเนื่องจากการขุดดินในโครงการนี้ไม่ต้องติดตั้งค้ำยันทำให้เวลาในการขุดดินจนเสร็จไม่เกิน 3 เดือน แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขุดดินส่วนใหญ่จึงยังอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และข้อมูลที่ได้การเจาะสำรวจดินของโครงการมีผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength,  $S_u$ ) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน (standard penetration test, SPT-N) ดังนั้น จึงใช้สถิติเนสหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ (undrained total stress) และกำลังรับแรงเฉือนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำสำหรับดินเหนียว ซึ่งเป็น undrained type C โดยขอบเขตในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากซึ่งอิทธิพลเนื่องจากการขุดดินไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพง โดยค่าพารามิเตอร์ของดินมีความสัมพันธ์กันระหว่างค่า undrained young's modulus,  $E_u$  ของดินกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่ได้มาจากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์การเคลื่อนตัว (empirical relationship) [8], [9] โดยเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดในสนามจริง มีข้อมูลระดับของชั้นดิน, คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

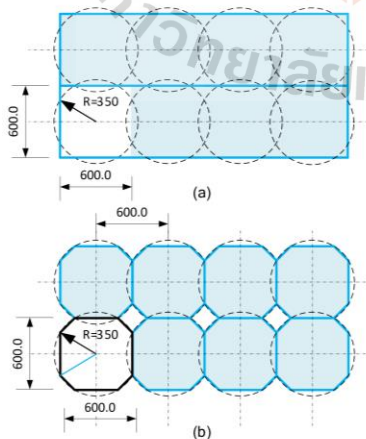
Soil layer	Depth (m)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$V_u$
Crust	0.0-2.5	18	25	$250S_u$	0.495
Very soft clay	2.5-10.0	16	13	$250S_u$	0.495
Soft clay	10.0-12.0	16	22	$250S_u$	0.495
Medium clay	12.0-15.0	18	35	$250S_u$	0.495
Very stiff clay	15.0-25.0	19	98	$500S_u$	0.495
SCC	1.0-14.0	16	300	$500S_u$	0.495

ในงานวิจัยใช้การจำลอง SCC สองรูปแบบได้แก่ การจำลอง SCC โดยให้ SCC มีความต่อเนื่องระหว่างต้น SCC ตามแนวตั้งฉากกับระนาบตัด ในงานวิจัยนี้เรียกว่ารูปแบบ solid และการจำลอง SCC ให้แต่ละต้นไม่ต่อเนื่องกันซึ่งจะเรียกว่ารูปแบบ discrete ในการจำลองแบบ discrete นี้เพื่อจำลองรอยต่อระหว่าง SCC ที่ไม่เชื่อมติดกันเมื่อก่อสร้างต้นชิดกัน หลังจากที่ใช้เมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว ความไม่เชื่อมติดกันนั้นพบได้อย่างชัดเจนในกรณี SCC wall เกิดการวิบัติดังรูปที่ 10

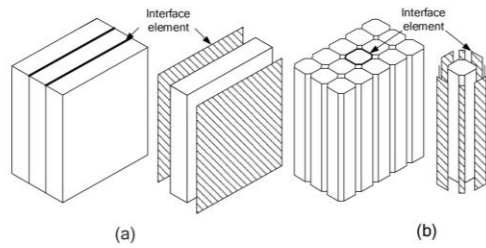


รูปที่ 10 การแยกจากกันของ SCC บริเวณรอยต่อระหว่างต้นเมื่อเกิดการวิบัติ

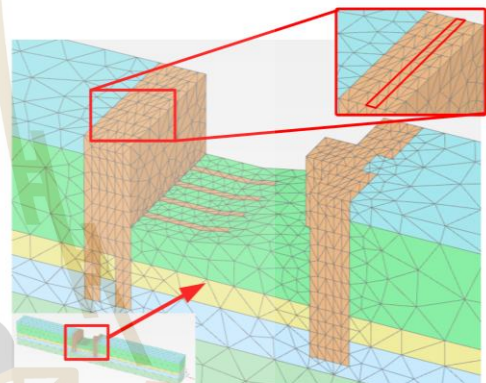
โดยรูปแบบ solid ทำการจำลองให้ SCC เป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างขนาด 600 มิลลิเมตร ความยาวตามกำแพง SCC wall ที่ใช้ในโครงการ ดังรูปที่ 11a ที่บริเวณรอยต่อระหว่างแถวของ SCC wall แต่ละแถวจะใช้ interface element เพียงสองด้านในการจำลองการแยกและการเลื่อนตามยาวบริเวณรอยต่อระหว่าง SCC ดังรูปที่ 12a ในส่วนของรูปแบบ discrete ทำการจำลอง SCC โดยใช้หน้าตัดรูปแปดเหลี่ยมที่อยู่ภายในเส้นรอบวงของหน้าตัด SCC ดังรูปที่ 11b มีการใช้ interface element ทั้งแปดด้านในการจำลองการขบเหลี่ยมกันของ SCC ดังรูป 12b โดยทั้งสองรูปแบบใช้ interface reduction factor ( $R_{inter}$ ) = 0.75 ที่ได้เสนอโดย [9], [10]



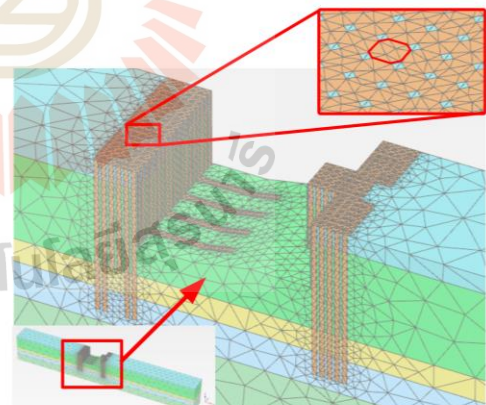
รูปที่ 11 การจำลองหน้าตัดของ SCC (a) solid และ (b) discrete



รูปที่ 12 การจำลองการขบเหลี่ยมกันของ SCC wall ที่ใช้ interface element (a) solid และ (b) discrete

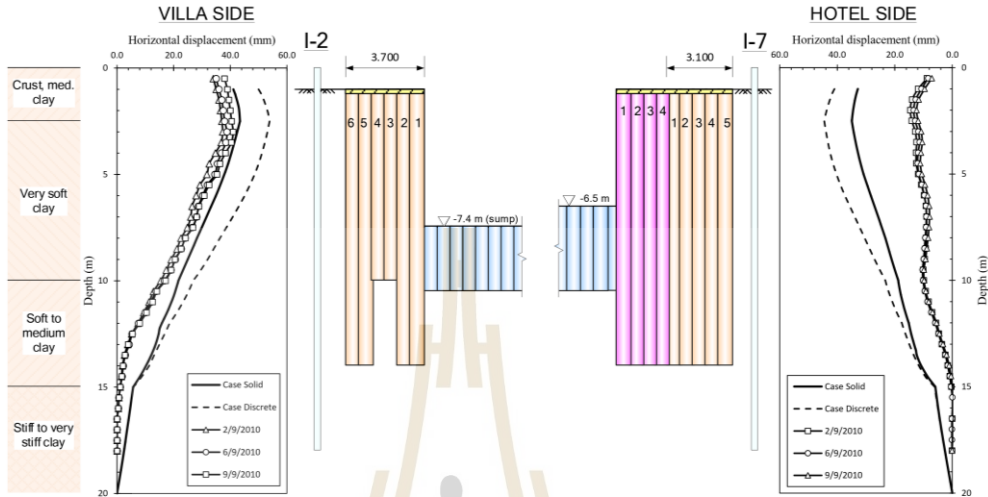


รูปที่ 13 FEM mesh ที่ใช้ในจำลอง SCC wall รูปแบบ solid



รูปที่ 14 FEM mesh ที่ใช้ในจำลอง SCC wall รูปแบบ discrete

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการเคลื่อนตัวของดินและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงของ SCC wall ที่ไม่มีการใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อโดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินและการทรุดตัวของดินหลังกำแพงที่มีการใช้ cross wall เพื่อศึกษาพฤติกรรมของ SCC wall และประสิทธิภาพของการใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อแทนการใช้ค้ำยันชั่วคราว



รูปที่ 15 ผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพงที่ได้จากการตรวจวัดในสนามกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่จำลอง SCC wall แต่ละรูปแบบ

5. ผลการวิจัย

5.1 การเปรียบเทียบรูปแบบการจำลอง SCC wall ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

รูปที่ 15 เป็นผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และผลการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม โดยมีการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall ฝั่ง villa ที่ได้จากการตรวจวัด inclinometer ตำแหน่ง I-2 ที่มีการขุดดินลึก 7.4 เมตร มีการเคลื่อนตัวสูงสุด 41 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร โดยมีพฤติกรรมเคลื่อนตัวคล้ายกับพฤติกรรมของคานยื่น (cantilever) ที่มีการดัดกลับเล็กน้อย โดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 2 มิลลิเมตร เห็นได้ว่าเมื่อขุดดินถึงระดับลึกสุดแล้ว การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์พบว่า การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าที่ต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุด 12 มิลลิเมตรซึ่งมากกว่าผลที่ได้จากการตรวจวัดอย่างมีนัยสำคัญ

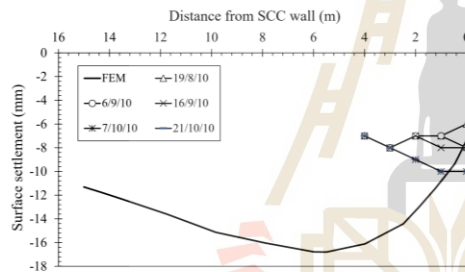
การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลัง SCC wall ฝั่ง hotel ได้จากการตรวจวัด inclinometer ตำแหน่ง I-7 ที่มีการขุดดินลึก 6.5 เมตร เห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall มีการเคลื่อนตัวสูงสุด 15 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร เห็นได้ว่าเมื่อขุดดินถึงระดับลึกสุดแล้วการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์พบว่า การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นมีค่าที่ต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุด 12 มิลลิเมตรซึ่งมากกว่าผลที่ได้จากการตรวจวัดอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาในประเด็นของรูปแบบการจำลองของทั้งสองรูปแบบพบว่า กำแพงฝั่ง villa การเคลื่อนตัวสูงสุดของรูปแบบ solid มีค่า 44 มิลลิเมตร และรูปแบบ discrete ที่มีค่า 54 มิลลิเมตร ในส่วนของกำแพงฝั่ง hotel การเคลื่อนตัวสูงสุดของรูปแบบ solid มีค่า 35 มิลลิเมตรและรูปแบบ discrete ที่มีค่า 45 มิลลิเมตร ซึ่งรูปแบบ solid มีค่าที่น้อยกว่ารูปแบบ discrete อาจเป็นผลมาจากการที่จำลองว่า SCC wall เป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งแนว ไม่มีการแยกตัวระหว่างด้านข้างเคียง ทำให้สลิปในสองกำแพงมีสูงกว่ารูปแบบ discrete ที่มีการจำลองให้ SCC แต่ละต้นแยกกันโดยมี interface element คั่น เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบ solid ใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 1 นาที ในส่วนของรูปแบบ discrete ใช้เวลาประมาณ 120 นาที เห็นได้ว่ารูปแบบ discrete ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่ารูปแบบ solid โดยที่ใช้ CPU intel core i7 7820x 8core เนื่องมาจากการจำลองพื้นที่หน้าตัดของ SCC ที่ต่างกันโดยคำนึงถึงพื้นที่หน้าตัดให้มีความใกล้เคียงกับหน้าตัดของ SCC ในโครงการ โดยที่รูปแบบ solid ใช้หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่เมื่อ mesh element แล้วพบว่า มี element ที่น้อยกว่ารูปแบบ discrete ที่ใช้หน้าตัดของ SCC เป็นรูปคล้ายรูปแปดเหลี่ยมด้านไม่เท่า โดยรูปแบบ discrete มี element ที่มากกว่ารูปแบบ solid ประมาณ 8 เท่า เมื่อคำนึงถึงผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการเคลื่อนที่ได้จากการตรวจวัด รูปแบบ solid มีความเหมาะสมมากกว่ารูปแบบ discrete ทั้งในด้านของผลการวิเคราะห์และระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์มีประเด็นที่การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลัง SCC wall ฝั่ง hotel ที่มีการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดและการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ที่มีค่าต่างกันสูงกว่าฝั่ง villa เหตุผลเนื่องจาก SCC wall ฝั่ง hotel มีการเสริมกำแพงไว้ด้วย buttress และมีระดับของการขุดที่ตื้นกว่า ทำให้กำแพงมีสลิปในสที่สูงสุดส่งผลให้มีการเคลื่อนตัวที่ลดลง การเคลื่อนตัวที่ลดลงนี้สัมพันธ์กับ shear strain ที่น้อยลงด้วย ดังนั้นการจำลอง

โดยใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb ที่ต้องใช้ค่า  $E_u$  ที่คงที่ทั้งความหนา  
ชั้นดินทำให้ การเคลื่อนตัวของ villa นั้นใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด  
แต่ค่า  $E_u$  นี้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว  
สูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดอย่างน้อยมีนัยสำคัญ ประเด็นนี้ต้องมีการ  
ศึกษาวิจัยต่อไปโดยต้องใช้แบบจำลองดินที่สตีฟเนสแปรผันตามหน่วยแรงใน  
มวลดิน หรืออาจใช้แบบจำลองดินที่แปรผันสตีฟเนสตามความลึก

รูปที่ 16 เป็นการทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพงที่ได้จากการตรวจวัดด้วย  
surface settlement พบว่ามีค่าการทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร ที่  
ตำแหน่งหลังกำแพง เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิ  
เมนต์ พบว่าค่าการทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ 17 มิลลิเมตร ที่ห่างจากกำแพงออกไป  
เป็นระยะประมาณ 6 เมตรซึ่งมีค่าสูงกว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริง มีลักษณะ  
การทรุดตัวที่แตกต่างกันและตำแหน่งที่เกิดการทรุดตัวสูงสุดไม่สอดคล้องกัน  
โดยที่ในตำแหน่งหลังกำแพงการทรุดตัวที่ผิวดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี  
ไฟไนท์อีลิเมนต์มีค่าที่ต่ำกว่าผลการตรวจวัดในสนาม และตั้งแต่ระยะ 2  
เมตรวัดจากหลังกำแพงการทรุดตัวจึงมีค่าที่สูงกว่าผลที่ได้จากการตรวจวัด

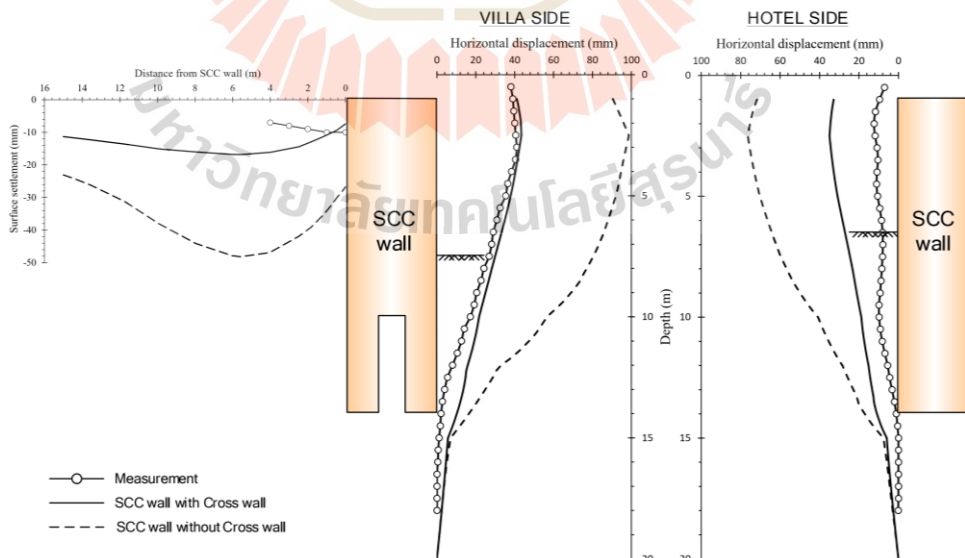


รูปที่ 16 ผลการทรุดตัวของผิวดินโดยเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์  
ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

5.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ใช้ cross wall และ ไม่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพที่กันบ่อ

รูปที่ 17 เป็นผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ใน  
กรณีที่ใช้ SCC wall ไม่ใช้ cross wall และใช้ cross wall ในการปรับปรุง  
เสถียรภาพกันบ่อ พบว่า มีการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall ฝั่ง villa ที่  
ไม่ใช้ cross wall ประมาณ 100 มิลลิเมตร และ SCC wall ฝั่ง hotel ที่ไม่  
ใช้ cross wall ประมาณ 80 มิลลิเมตร โดยการเคลื่อนตัวของดินหลัง  
กำแพงทั้งสองฝั่งมีพฤติกรรมเคลื่อนตัวที่คล้ายกันแบบพฤติกรรมของ  
คานยื่นที่มีการดัดกลับเล็กน้อย และผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์การ  
ทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพงที่ไม่ใช้ cross wall และใช้ cross wall ในการ  
ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อกับการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม  
พบว่า มีการทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพงที่ไม่ใช้ cross wall ประมาณ 50  
มิลลิเมตร โดยที่มีพฤติกรรมทรุดตัวและตำแหน่งการทรุดตัวสูงสุดที่  
เหมือนกันกับผลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ของกำแพงที่ใช้ cross wall  
ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อ โดยที่ไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการ  
ตรวจวัดในสนามจริง

เมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall ฝั่ง hotel เห็นได้  
ว่ามีค่าที่น้อยกว่าฝั่ง villa ประมาณ 2 เท่า อาจเป็นผลมาจากการขุดดินที่  
ระดับความลึกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า buttress สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพ  
ให้กับ SCC wall ที่ไม่มีความต่อเนื่องกันตลอดทั้งแนวของอุโมงค์ และเมื่อ  
เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ในกรณีที่ใช้ SCC wall ไม่ใช้  
cross wall และใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อแสดงให้เห็น  
ถึงประสิทธิภาพของการใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกัน  
บ่อที่สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินและการทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพง



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของ SCC wall ที่ใช้ cross wall และ ไม่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อกับผลที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม

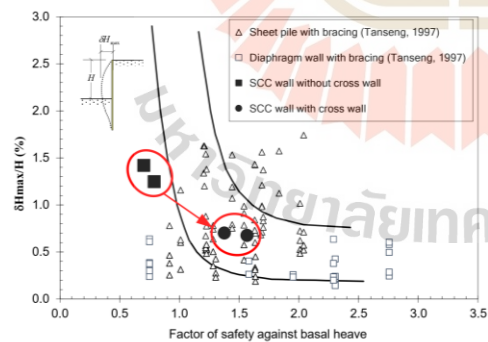
จากผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประจักษ์ (empirical) ในการขุดดินในชั้นดินกรุงเทพฯ [11] ซึ่งอ้างอิงงานวิจัยของ Mana and Clough (1981) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงสูงสุดกับความลึกในการขุด ( $\delta H_{max} / H$ ) และอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการอูดของดินใต้บ่อขุด (factor of safety against base heave, F.S.) ดังรูปที่ 18 พบว่า เมื่อพิจารณา SCC wall ที่ไม่ใช่ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพที่กันบ่อมี F.S. = 0.7 ที่เสนอโดย Terzaghi (1943) ดังสมการที่ (1)

$$F.S. = \frac{1}{H} \frac{5.7 S_u}{\gamma - \frac{S_u}{D}} \quad (1)$$

เมื่อ  $H$  คือความลึกในการขุด และ  $D$  คือความลึกจากระดับขุดดินถึงชั้นดินแข็ง เมื่อเทียบกับ SCC wall ที่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพที่กันบ่อมี F.S. = 1.4 ที่เสนอโดย [1] ดังสมการที่ (2)

$$F.S. = \frac{S_u N_c + \frac{\alpha S_u 2(B+L)h}{BL}}{\gamma H + q} \quad (2)$$

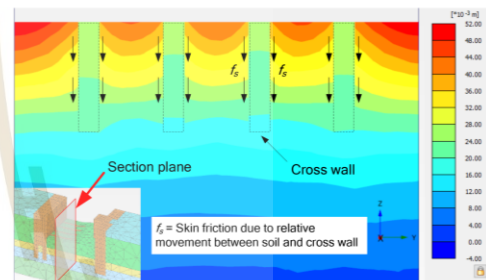
เมื่อ  $N_c = 9.0$ ,  $\alpha = 0.9$ ,  $B$  คือความกว้างของบ่อขุด,  $L$  คือระยะห่างของ cross wall,  $h$  คือความลึกของ cross wall และ  $q$  คือน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นระหว่างก่อสร้างแต่เนื่องจากก่อสร้างใช้วิธี open cut and cover ทำให้  $q = 0$  พบว่ามีค่า F.S. ที่เพิ่มขึ้นจนมีความปลอดภัย เมื่อพิจารณาที่ค่า  $\delta H_{max} / H$  ทำให้อัตราส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่เสนอโดย [12] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของกำแพงกันดินที่เป็น sheet pile และ D-wall พบว่า SCC wall มีค่าน้อยมาก



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุดกับอัตราส่วนของเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด [11]

รูปที่ 19 เป็นการเคลื่อนตัวของดินกันบ่อบริเวณที่เป็นตำแหน่ง cross wall ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เห็นได้ว่าดินกันบ่อมีการอูดขึ้นในแนวตั้งประมาณ 45 มิลลิเมตร โดยที่ cross wall ถูกดันขึ้นประมาณ 25 มิลลิเมตร การอูดขึ้นของดินที่สูงกว่าการถูกดันขึ้นของ cross wall เป็นการเคลื่อนตัวแบบสัมพัทธ์ ซึ่งทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ผิวของ

cross wall และมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวของ cross wall ทำให้เกิดแรงต้านทานต่อการอูดขึ้นโดยรวมของดินกันบ่อ ส่งผลให้สัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณโดยใช้สมการ (2) ซึ่งได้พิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวของ cross wall ให้เป็นแรงต้านทานต่อการอูดขึ้นของดินใต้บ่อขุดไว้ด้วย และผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์นี้ยังสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ที่เสนอโดย [11] ที่แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแปรผกผันกับสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุด



รูปที่ 19 เส้นชั้นการเคลื่อนตัวของดินในระนาบที่ตั้งฉากกับ cross wall แสดงถึงการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างดินกันบ่อกับ cross wall ทำให้เกิดแรงต้านทานการอูดของดินกันบ่อ

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า SCC cross wall ที่ใช้เพิ่มเสถียรภาพการอูดของดินใต้บ่อขุด สำหรับงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ นั้นมีประสิทธิภาพแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนจากการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ต่ำ และเมื่อใช้ร่วมกับ SCC wall ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ค้ำยันด้านข้างทำให้การก่อสร้างเป็นไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากไม่จำเป็นต้องเสียเวลากับการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว และ SCC wall ที่ใช้ร่วมกับ SCC cross wall นั้นสามารถจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติที่ให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงและสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ของกำแพงกันดินที่ก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

## 6. สรุปผลการวิจัย

ผลสรุปของงานวิจัยนี้ได้แก่

1. ประสิทธิภาพของ SCC wall ที่มีการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วย SCC cross wall ทำให้สัดส่วนความปลอดภัยต่อการอูดของดินใต้บ่อขุดเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ได้โดยไม่ต้องใช้ค้ำยันชั่วคราว และยังลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวทางด้านข้างของงานขุดในอดีตจากข้อมูลเชิงประจักษ์พบว่ามีความต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ
2. การใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อจำลอง SCC wall ที่มีการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วย SCC cross wall โดยใช้แบบจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb ให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัด กรณีที่จำลองกำแพงแบบ solid ให้ผลการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ต่ำกว่ากรณีที่จำลอง

กำแพงแบบ discrete เนื่องจากการลดทอนความต่อเนื่องระหว่าง SCC ด้วย interface element ทำให้สติเฟนของกำแพงโดยรวมลดต่ำลงจากการที่ SCC ที่อยู่ติดกันสามารถไหลหรือแยกออกจากกันได้ ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงที่ SCC แต่ละต้นไม่ได้ถูกก่อสร้างให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3. ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของ cross wall ที่ทำให้เสถียรภาพกันบ่อขุดเพิ่มขึ้นนั้นเป็นการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างดินที่สัมผัสกับผิว cross wall กับตัว cross wall ทำให้เกิดแรงเสียดทานผิว ที่ทำให้แรงต้านการรูดของดินใต้บ่อขุดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ใช้คำนวณสัดส่วนความปลอดภัยต่อการรูดของดินใต้บ่อขุดที่ได้คิดผลของแรงเสียดทานผิวนี้ไว้แล้ว และยังสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประสบการณ์ของงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณณัฐณัย ป้อมบุญมี, คุณอัญจิกา คิมเม , คุณศรุตภรณ์ ทรงศรี, คุณอรยา คำหนองไผ่ และคุณกาญจนา หิรัญวัฒน์ ที่ได้ช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Eide, O., Aas, G. and Jøsang, T. (1972). Special Application of Cast-in-Place Slurry Trench Walls for Tunnel in Soft Clay in Oslo. Proc. 5 ECSMFE, Madrid 1972, Vol.1, pp 485-498.
- [2] Kubota, N., Sako, H., Morota, M. and Kojima, K. (2000). Measure to prevent heaving during the excavation of soft ground, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam.
- [3] Ueki H., Moue S., Kobayashi, S. and Sekiya, K. (1996). In-situ monitoring and analysis of a cut-and-cover tunnel on the bay-shore route, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam.
- [4] Ignat, R. and Baker, S. and Larsson, S. (2016). Behavior of braced excavation supported by panels of deep mixing columns. *Can. Geotech. J.* 53: 1671-1687.
- [5] ณัฏกฤต วิสุทธิแพทย์ (2548). *พฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ลึกสำหรับงานโครงสร้างกับดิน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร
- [6] Buathong, P. (2014). Stability analysis of excavated slope stabilized by DCM column: case study and parametric analysis. Ph.D. Dissertation, Kasetsart University. Bangkok.
- [7] Ou, C.Y., Lin, Y.L. and Hsieh, P.G. (2008). Case record of an excavation with cross walls and buttress walls. *Journal of GeoEngineering*, Vol. 1. No. 2, pp. 79-86.
- [8] ธนกร สุขุมามาศ และพรพจน์ ต้นเส็ง (2561). การหาสติเฟนของดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อใช้ในการทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงเสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึก. *วารสารวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, หน้า 33-47.
- [9] วิชิต นามวิเศษ (2556). *พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กับงานขุดดินลึกด้วยระบบ top-down ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- [10] Yoshizawa, H., Okumura, R., Hosoya, Y., Sumi, M. and Yamada, T. (1997). JGS TC Report: Factor affecting the quality of treated soil during excavation of DMM, *Grouting and Deep mixing*, Balkema, Rotterdam.
- [11] Tanseng, P. (1997). *Instrument deep excavation in Bangkok subsoils*, Master thesis, Asian institute of technology, Thailand
- [12] Abdulaziz Mana, I. and Wayne Clough, G. (1981). Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol.107, Issue 6, pp.759 – 777.

## ประวัติผู้เขียน

นายบุญญฤทธิ์ บุญเกิด เกิดวันเสาร์ที่ 3 เมษายน พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย เพชรบูรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ในปีการศึกษา 2563 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้เข้าร่วมทำกิจกรรมนักศึกษาด้วยการดำรงตำแหน่งรองประธานนักศึกษาวิชาวิศวกรรมโยธา รุ่นที่ 24 และเข้าร่วมกิจกรรมต่างๆของมหาวิทยาลัย โดยในภาคการศึกษาสุดท้ายได้ร่วมสหกิจกับ บริษัท เนวรัตน์พัฒนาการ จำกัด (มหาชน) เป็นระยะเวลา 4 เดือน และในปีการศึกษา 2564 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 2 เรื่อง ได้แก่ วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 35 ฉบับที่ 1 และการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 28 (The 28<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering).

GTE36

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี