



## การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด\* และ พรพจน์ ต้นเส็ง

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 4740 6014 อีเมล: boonyaritboonkert@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.009

รับเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2566 แก้ไขเมื่อ 12 พฤษภาคม 2566 ตอรับเมื่อ 6 มิถุนายน 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 11 กันยายน 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนองานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column Wall; SCCW) ที่ไม่ใช่ค้ำยันในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และใช้การปรับปรุงเสถียรภาพของบ่อชุดเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินด้วยกำแพงขวาง (Cross Wall) และครีบบยัน (Buttress) ในงานวิจัยได้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของ SCCW และการทรุดตัวที่ผิวดินในระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดเพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ใช้ Interface element เพื่อจำลองความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อระหว่าง SCC ผลการวิจัยบ่งชี้ว่า SCCW ที่ใช้ Cross wall และ Buttress มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นและมีการเคลื่อนตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์ ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าค่า Young's Modulus ของดินเหนียวอ่อนเท่ากับ  $500 S_u$  ให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด ซึ่งสอดคล้องกับค่า Shear Modulus ที่ได้จากผลทดสอบของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบ SCCW ที่ปรับปรุงเสถียรภาพของบ่อชุดด้วย Cross wall และ Buttress

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

การอ้างอิงบทความ: บุญญฤทธิ์ บุญเกิด และ พรพจน์ ต้นเส็ง, “การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, หน้า 1–13, เลขที่บทความ 251-066803, ม.ค.-มี.ค. 2568.



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

Boonyarit Boonkert\* and Pornpot Tanseng

School of Civil Engineering, Faculty Institute of Engineering Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 09 4740 6014, E-mail: boonyaritboonkert@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.009

Received 24 February 2023; Revised 12 May 2023; Accepted 6 June 2023; Published online: 11 September 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### 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  $500 S_{uv}$ , 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

Please cite this article as: B. Boonkert and P. Tanseng, "Analysis of behavior of soil cement column wall associated with base improvement by cross wall with 3D finite element method ," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 1, pp. 1–13, ID. 251-066803, Jan.–Mar. 2025 (in Thai).

## 1. บทนำ

ปัจจุบันกรุงเทพมหานคร เป็นเมืองที่กำลังพัฒนาซึ่งมีการริเริ่มขุดใต้ดินเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะใช้สอยพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์มากที่สุด เช่น อาคารจอดรถใต้ดิน ศูนย์การค้าขนาดใหญ่ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น โดยในงานก่อสร้างจำเป็นต้องใช้กำแพงกันดินเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพังทลายของดิน และในหลายกรณีกำแพงกันดินต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะลดการเคลื่อนตัวของดินที่อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียง เนื่องจากชั้นดินในกรุงเทพฯ มีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน โดยกำแพงกันดินที่นิยมใช้ได้แก่ กำแพงกันดินแบบ Sheet Pile Wall, Pile Wall, และ Diaphragm Wall (D-wall) เนื่องจากเป็นระบบกำแพงกันดินที่วิศวกรไทยได้มีการใช้งานและมีประสบการณ์ในการใช้งานมาเป็นระยะเวลานานกว่า 30 ปี กำแพงที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกำแพงกันดินแบบ Flexural Wall ที่ต้องใช้ระบบค้ำยันทางด้านข้างเพื่อให้แรงที่เกิดในกำแพงไม่สูงจนทำให้ต้องใช้หน้าตัดกำแพงใหญ่หรือใช้เหล็กเสริมในปริมาณที่สูงเกินไป การที่ต้องใช้ระบบค้ำยันชั่วคราวทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการติดตั้งและการรื้อถอนค้ำยัน อีกทั้งการก่อสร้างกำแพงที่ต้องมีการติดตั้งโดยใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการติดตั้งทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและเสียงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ออาคารใกล้เคียง ในปัจจุบันเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ เช่น ดินเหนียวอ่อนให้มีกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น โดยการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินมีความนิยมแพร่หลายซึ่งรู้จักกันในชื่อ เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column; SCC) และวิศวกรไทยมีประสบการณ์ในการใช้งานมากขึ้น ในหลายโครงการจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนให้มีกำลังสูงขึ้นและใช้เป็นกำแพงกันดิน โดยมีงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่ใช้ในงานขุดดินลึก [1]–[4] ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำแพงกันดินสามารถใช้ร่วมกับงานขุดดินลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ SCC ยังถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อกรณีที่ใช้ Sheet Pile เป็นกำแพงกันดินกับงานวิจัยของ [5], [6] ซึ่งใช้ SCC ปรับปรุง

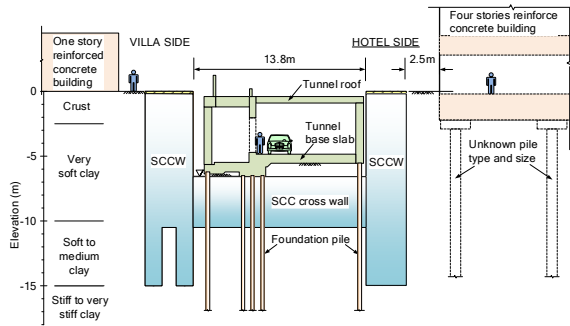
ดินอ่อนทั่วทั้งกันบ่อและมีงานวิจัยของ [7] ในการใช้ SCC เป็นกำแพงที่ปรับปรุงคุณภาพดินที่กันบ่อแบบขวางตั้งฉากกับแนวกำแพง Sheet Pile ที่นำมาใช้ในการค้ำยันจากการขุดดินซึ่งเรียกกำแพงชนิดนี้ว่า Cross Wall โดย [8] ได้รายงานพฤติกรรมของ Cross Wall ที่เป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก (D-wall) ในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อนที่กรุงออสโล 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 มีความต่อเนื่องกันทำให้ D-wall มี Flexural Rigidity ในแนวราบ จึงสามารถใช้ประสิทธิภาพของ Cross Wall ได้อย่างเต็มที่

จากงานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้นยังไม่พบว่า มีงานวิจัยที่กล่าวถึงการใช้ SCC เป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุดดินลึกโดยไม่ใช้ค้ำยัน และใช้ร่วมกับการปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กันบ่อ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil-cement Column Wall; SCCW) ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กันบ่อขุดด้วย Cross wall และนำเสนอผลการวิเคราะห์หาค่าด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติเพื่อหาสัณฐานที่ทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของ SCCW เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบ SCCW ที่ใช้ร่วมกับการปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กันบ่อ

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 พื้นที่วิจัยและข้อมูลชั้นดิน

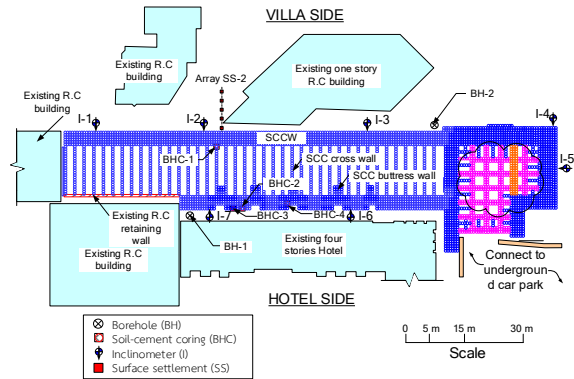
พื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเพื่อการศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์กว้าง 13.8 เมตร ยาว 96 เมตร ที่ใช้เป็นทางเข้าชั้นจอดรถใต้ดินของอาคารคอนโดมิเนียม ตั้งอยู่ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร มีลักษณะอุโมงค์วางตัวตามแนวอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีระยะห่างจากฐานราก 2.5 เมตร ดังรูปที่ 1 การออกแบบ



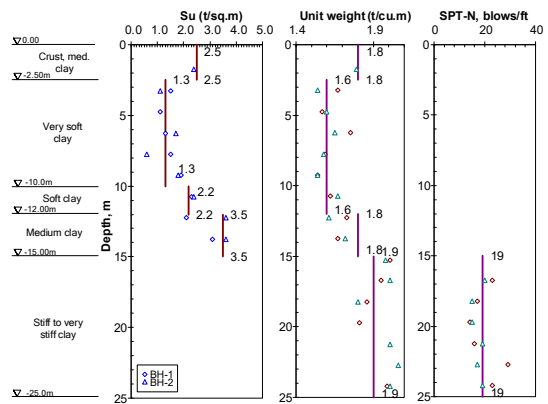
รูปที่ 1 รูปตัดขวางของโครงการและรูปตัดชั้นดิน

กำแพงกันดินจึงเลือกใช้เป็น 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 เพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน นอกจากนี้ กำแพงฝั่ง Hotel ได้มีการเพิ่มเสถียรภาพด้วย Buttress บริเวณด้านหน้าของ SCCW เพื่อหลีกเลี่ยงสาธารณูปโภคที่ทำให้ไม่สามารถก่อสร้าง SCCW ได้ตลอดทั้งแนวตั้งรูปที่ 2 เพื่อลดการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ได้รายงานโดย [9]

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



รูปที่ 2 ฝั่งตำแหน่งกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์



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

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด และ พรพจน์ ต้นเลี้ยง, “การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ.”

(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 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

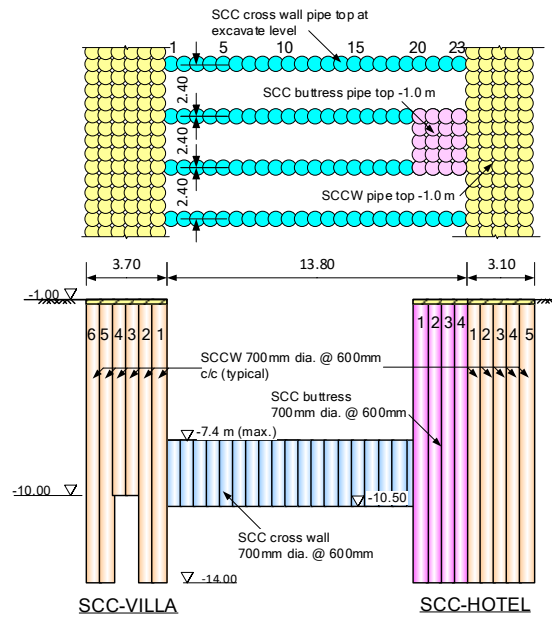
Cross Wall เป็น SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร เรียงขบเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร มีระดับหัวเสาอยู่ที่ระดับขุดดิน เรียงตัวกันเป็นระยะ 13.8 เมตร ตามความกว้างของบ่อขุดมีระยะห่างของ Cross Wall อยู่ที่ 2.4 เมตร ตามแนวยาวของกำแพง โดยปลายของ Cross Wall อยู่ที่ความลึก 10.5 เมตร ดังรูปที่ 4

### 2.2.2 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

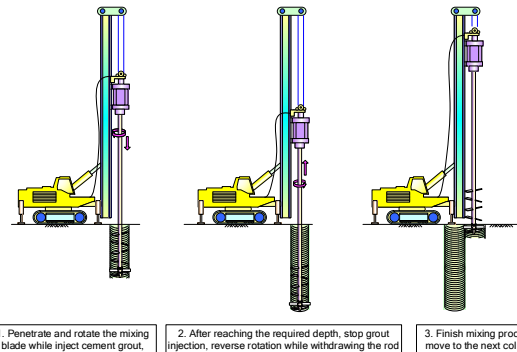
การก่อสร้าง SCC สำหรับโครงการนี้ใช้วิธีการผสมเชิงกลด้วยระบบใบกวนและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ (Low-pressure Mechanically Mixing Method) โดยน้ำปูนที่ใช้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณปูนเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของดินที่ยังไม่ผสม การผสมและการกวนจะใช้ความเร็วในการหมุนก้านเจาะประมาณ 30 ถึง 40 รอบต่อนาที ความเร็วในการกดก้านเจาะประมาณ 1 เมตรต่อนาที โดยสัมพันธ์กับอัตราการฉีดน้ำปูนที่ 100 ถึง 200 ลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 5

### 2.2.3 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์

หลังจากก่อสร้าง SCCW แล้วเสร็จ ก่อนเริ่มการขุดดินได้ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างของ SCC เพื่อทดสอบปรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Test) ตามตำแหน่งดังรูปที่ 2 โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนของ SCC



รูปที่ 4 รูปแบบการเรียงตัวและรูปตัดขวางของกำแพง

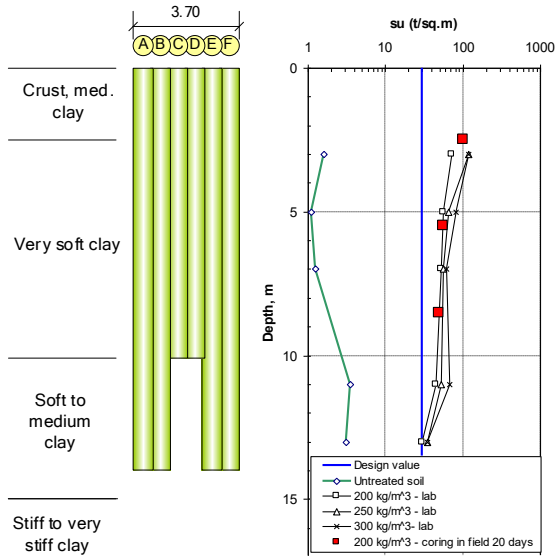


รูปที่ 5 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมเชิงกลโดยระบบใบกวนและฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำ

ที่ออกแบบไว้อยู่ที่ 30 ตันต่อตารางเมตร พบว่า กำลังรับแรงเฉือนของ SCC สูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมอยู่ที่ประมาณ 30 เท่า ดังรูปที่ 6

## 2.3 เครื่องมือวัด

ในการก่อสร้างได้ติดตั้งเครื่องมือวัด Inclinerometer ทั้งหมด 7 ตำแหน่ง และ Surface Settlement Marker ไว้ที่หลัง SCCW ทั้งหมด 5 หมุด ดังรูปที่ 2 โดยติดตั้ง

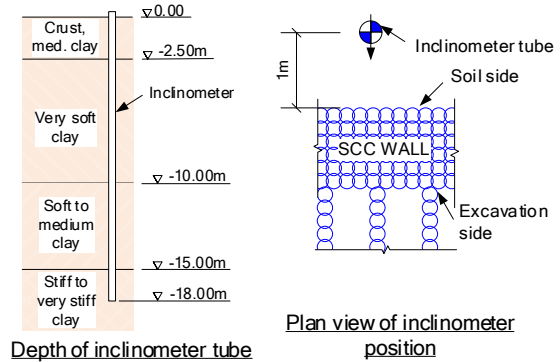


รูปที่ 6 กำลั้งของเสาเข็มดินซีเมนต์

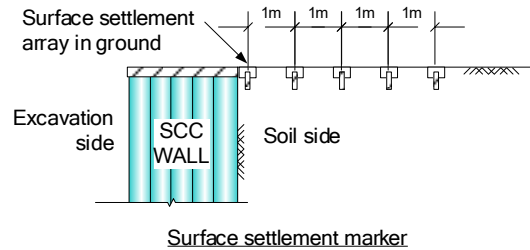
Inclinometer ไว้ด้านหลังของ SCCW เป็นระยะ 1 เมตร ที่ความลึก 18 เมตรจากผิวดิน โดยที่ปลายของท่อ Inclinometer ฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งดังรูปที่ 7 และ Surface Settlement Marker จะติดตั้งไว้ด้านหลังกำแพง โดยมีระยะห่างระหว่างหมุดอยู่ที่ 1 เมตร ดังรูปที่ 8

### 2.4 การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PLAXIS 3D ทำการจำลองการขุดดินและใช้คุณสมบัติของดินและดินซีเมนต์โดยใช้แบบจำลองดิน (Linear Elastic-perfectly Plastic with Mohr-Coulomb Failure Criteria) โดยสมมุติให้ดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำเนื่องจากโครงการนี้ใช้เวลาในการขุดดิน 3 เดือน แรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขุดดินส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และข้อมูลที่ได้การเจาะสำรวจดินของโครงการมีผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายที่ได้จากการทดสอบตอกแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test; SPT-N) ดังนั้นจึงใช้สถิติหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Total Stress)



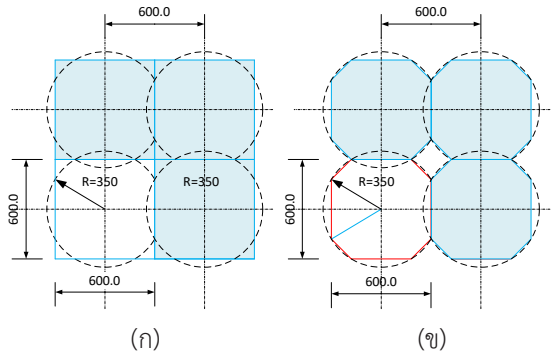
รูปที่ 7 การติดตั้ง Inclinometer



รูปที่ 8 การติดตั้ง Surface settlement

และกำลังรับแรงเฉือนหน่วยแรงรวมแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) สำหรับดินเหนียว ซึ่งเป็น Undrained Type C โดยขอบเขตในการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงความลึก 20 เมตรที่เป็นชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากซึ่งอิทธิพลเนื่องจากการขุดดินไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพง ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่า 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 1,000 1,250 และ 1,500 โดยคง  $E_u/S_u$  ของดินเหนียวแข็งไว้ที่ 500 และเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจวัดจริงในสนาม โดยในการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ ดังตารางที่ 2

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด และ พรพจน์ ต้นเลี้ยง, “การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ.”

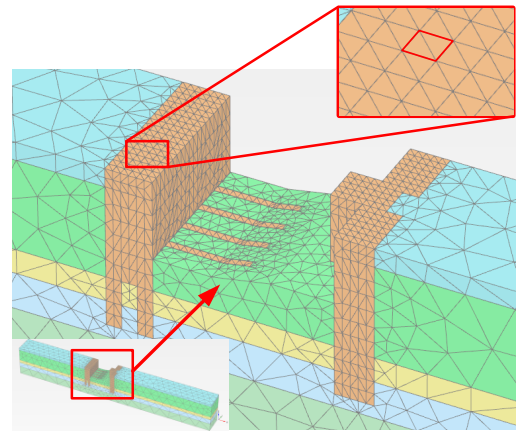


รูปที่ 9 การจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ (ก) รูปแบบ Solid และ (ข) รูปแบบ Discrete

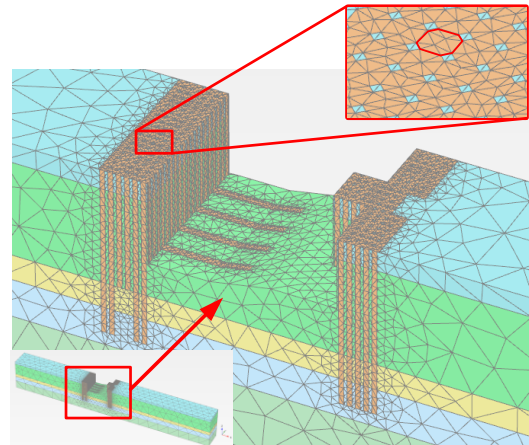
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของชั้นดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

Soil Layer	$\gamma_i$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$S_u$ (kPa)	$\nu_u$
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

ในงานวิจัยทำการจำลอง SCC สองรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบ Solid และรูปแบบ Discrete โดยรูปแบบ Solid ทำการจำลองให้หน้าตัดของ SCC เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเทียบเท่าที่มีความกว้างเป็น 600 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 9(ก) ส่วนแบบจำลองแบบ Discrete ทำการจำลอง SCC โดยใช้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการลบมุมให้เป็นรูปแปดเหลี่ยม โดยรูปแปดเหลี่ยมอยู่ภายในเส้นรอบวงของหน้าตัด SCC ดังรูปที่ 9(ข) 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 มีการจำลองด้วย



รูปที่ 10 FEM Mesh ที่ใช้ในการจำลอง SCCW รูปแบบ Solid



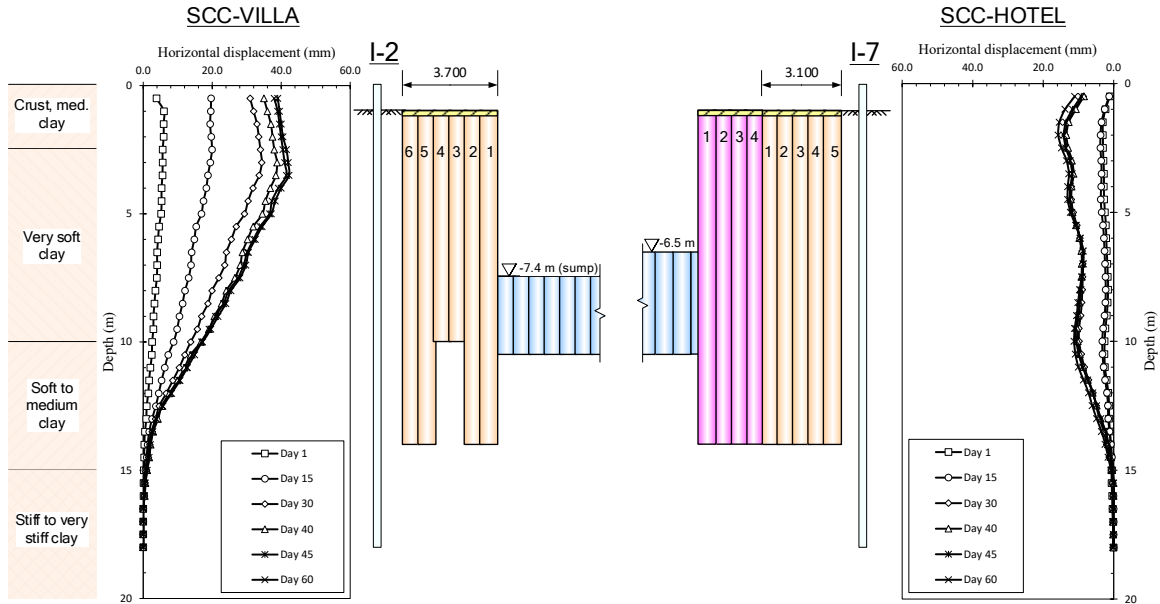
รูปที่ 11 FEM Mesh ที่ใช้ในการจำลอง SCCW รูปแบบ Discrete

วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงในแต่ละรูปแบบ

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลที่ได้จากการตรวจวัด

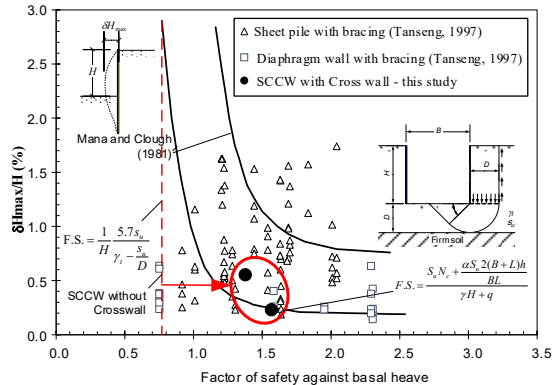
3.1.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพงรูปที่ 12 เป็นผลการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCCW ที่ทำการตรวจวัดโดยเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เริ่มตรวจวัดหลังจากผ่านไป 1 15 30 40 45 และ 60 วัน ตั้งแต่เริ่มมีการขุดดิน โดยพิจารณาที่กำแพง SCC-Villa เห็นได้ว่าพฤติกรรมของดิน



รูปที่ 12 ผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มขุดดินจนถึงขุดถึงระดับสุดท้าย

หลัง SCCW ในช่วง 1 ถึง 40 วัน การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับในการขุดดิน เมื่อถึงช่วง 45 วัน ที่ขุดถึงระดับลึกที่สุดของโครงการระดับ 7.4 เมตร พบว่า การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นสูงสุด 41 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร ซึ่งอยู่ในตำแหน่งชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก โดยที่ปลายกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 2 มิลลิเมตร การเคลื่อนตัวคล้ายกับพฤติกรรมของคานยื่นที่มีการดัดกลับเล็กน้อย ส่วนกำแพง SCC-Hotel เห็นได้ว่าในช่วง 1 ถึง 30 วัน การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับในการขุดดินเมื่อขุดถึงระดับ 6.5 เมตร พบว่า การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นสูงสุด 15 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากโดยที่ปลายของกำแพงมีการเคลื่อนตัวเข้ามาในบ่อขุดประมาณ 2 มิลลิเมตร ในช่วงเวลาที่ตรวจวัด 45 ถึง 60 วัน ที่ขุดถึงระดับที่ต้องการ การเคลื่อนตัวของดินไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการเคลื่อนตัวเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์ในการขุดดินในชั้นเหนียวดินกรุงเทพฯ

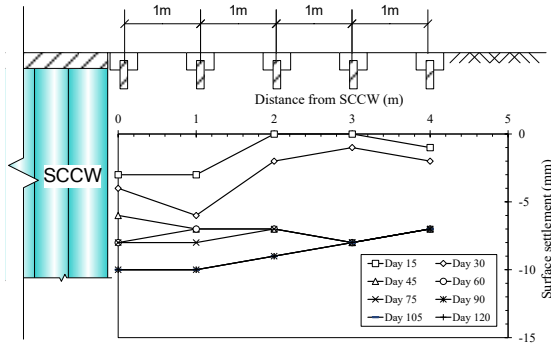


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด [12]

ที่เสนอโดย [12] ซึ่งอ้างอิงงานวิจัยของ [13] ที่ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปลอดภัยต่อการเกิดการอูดของดินใต้บ่อขุด (Factor of Safety Against Base Heave; F.S.) กับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด ( $\delta H_{max}/H$ ) ดังรูปที่ 13 พบว่า ( $\delta H_{max}/H$ ) ที่ได้จากโครงการนี้เมื่อใช้การปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่กั้นบ่อ

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด และ พรพจน์ ต้นเส็ง, “การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ.”





รูปที่ 14 ผลการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง

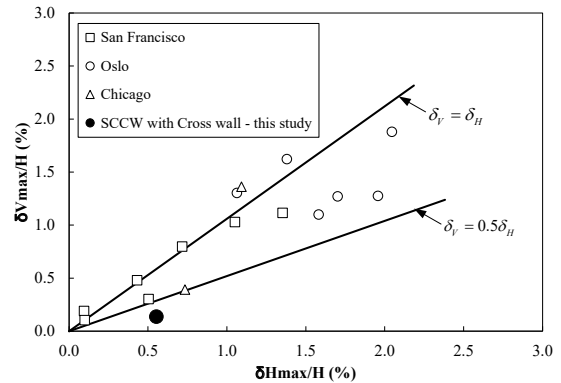
ด้วย Cross Wall มีค่าที่ต่ำและทำให้  $F.S.$  เป็น 1.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ  $F.S. = 0.75$  กรณีที่ไม่มีการปรับปรุง เสถียรภาพที่กันบ่อด้วย Cross Wall พบว่า มี  $F.S.$  ที่เพิ่มขึ้นจนมีความปลอดภัย อีกทั้งการเคลื่อนตัว ( $\delta H_{max}/H$ ) ได้ลดลงจนอยู่ในช่วงที่เสนอโดย [13]

### 3.1.2 การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง

รูปที่ 14 เป็นผลการทรุดตัวที่ผิวดินบริเวณหลังกำแพงกันดินของโครงการ โดยเริ่มตรวจวัดหลังจากรูปที่ 14 เป็นผลการทรุดตัวที่ผิวดินบริเวณหลังกำแพงผ่านไป 15 30 45 60 75 90 105 และ 120 วัน ตั้งแต่เริ่มมีการขุดดินโดยมีค่าการทรุดตัวสูงสุด 10 มิลลิเมตร โดยบริเวณที่ทรุดตัวสูงสุดอยู่บริเวณกำแพง และลดลงเมื่อมีระยะห่างจากกำแพงมากขึ้น เห็นได้ว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงแรกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการขุดดิน

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

จากผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงและการเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประสบการณ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SCCW ที่มี



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการทรุดตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุดของกำแพงกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด [13]

การปรับปรุงเสถียรภาพของกันบ่อด้วย Cross Wall และ Buttress สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและการทรุดตัวที่ผิวดิน นอกจากนี้เมื่อมีการขุดดินถึงระดับสุดท้าย การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างมีนัยสำคัญ

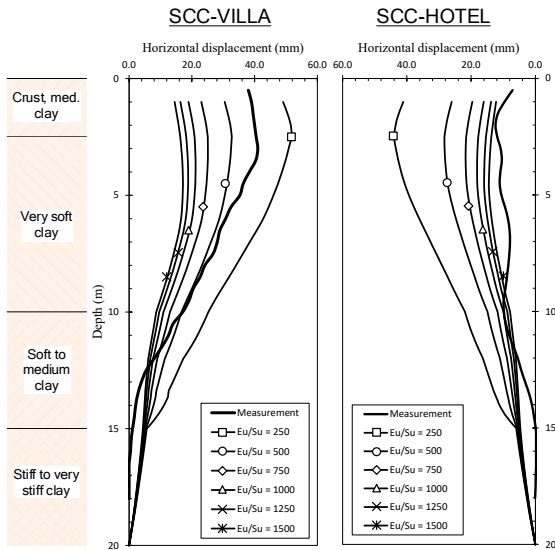
### 3.2 การวิเคราะห์กลับ

ผลการวิเคราะห์กลับเพื่อหาค่า Young's Modulus ของดินเหนียวอ่อนโดยเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงในสนามของดินหลังกำแพงแต่ละฝั่ง มีผลการวิเคราะห์กลับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงดังรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ

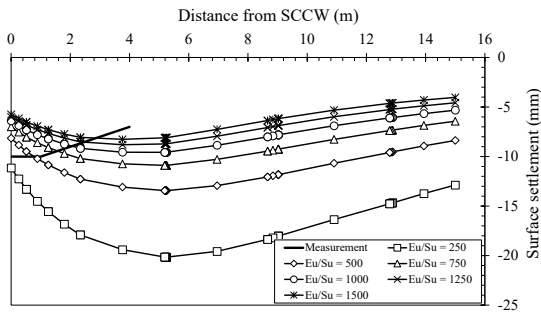
#### 3.2.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพง

ตามที่ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ในหัวข้อ 2.4 พบว่า  $E_u/S_u$  ที่มีผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa และ SCC-Hotel ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากที่สุดคือ  $E_u/S_u = 500$  และ 1,500 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ผลการวิเคราะห์กลับของกำแพงในแต่ละฝั่งพบว่า ค่า Young's Modulus ที่เหมาะสมในการทำนายการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเท่ากับ  $500 S_u$  เนื่องจากแบบ

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด และ พรพจน์ ต้นแสง, “การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์สามมิติ.”



รูปที่ 16 ค่าการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแปรผัน  $E_u/S_u$  ของดินเหนียวอ่อน

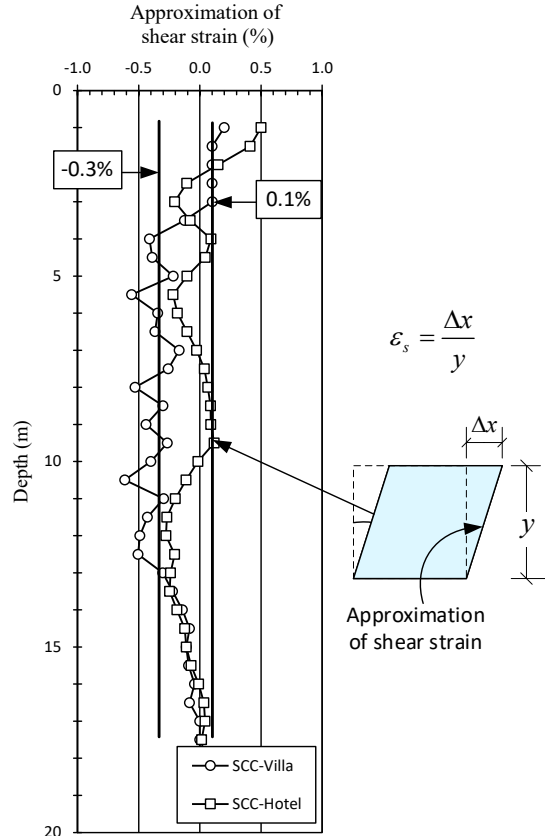


รูปที่ 17 ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแปรผัน  $E_u/S_u$  ของดินเหนียวอ่อน

จำลอง Mohr-Coulomb สามารถใช้ค่า Young's Modulus ได้เพียงค่าเดียวซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวของดินที่สตีเฟนชันกับหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไปของดินได้ แต่ในด้านการออกแบบยังเป็นค่าที่ยังอยู่ในด้านปลอดภัย

3.2.2 การทรุดตัวของดินหลังกำแพง

รูปที่ 17 ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแปรผัน  $E_u/S_u$  ของดินเหนียวอ่อนใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดในสนามมากที่สุด คือ  $E_u/S_u = 750$  เพียงแต่ลักษณะของการทรุดตัวไม่สอดคล้องกับผลการตรวจวัด

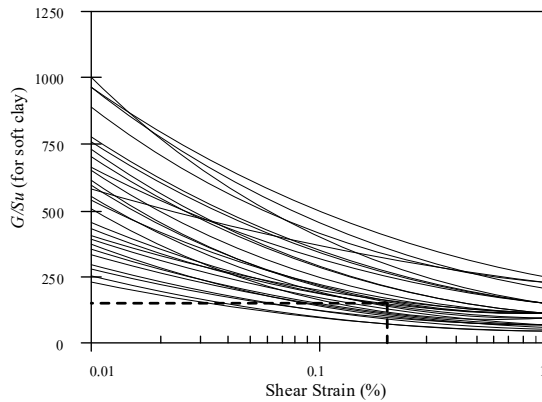


รูปที่ 18 ความเครียดเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดขึ้นในสนามของกำแพงทั้งสองฝั่ง

ในภาคสนาม 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 จากนั้นทำการนำค่าความเครียด

บุญญฤทธิ์ บุญเกิด และ พรพจน์ ต้นเส็ง, “การวิเคราะห์พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อด้วยกำแพงขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ.”



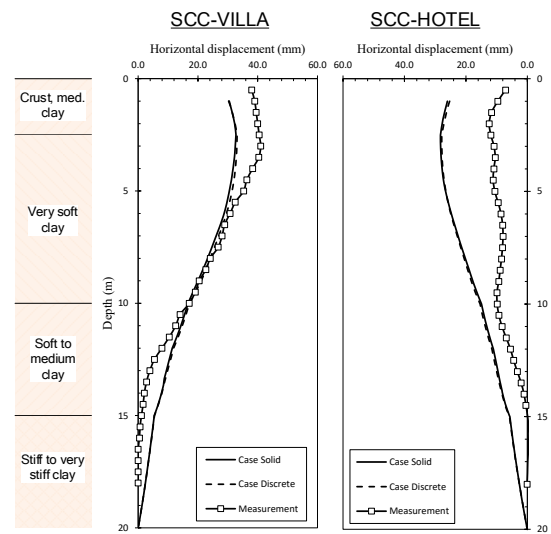
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการทดสอบ Self-boring Pressure Meter [14]

เดือนไปพิจารณาหาโมดูลัสเฉือนจากความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนกับความเครียดเฉือนของ ดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการทดสอบ Self-boring Pressure Meter [14] ดังรูปที่ 19 ที่ได้จากวิธี Empirical พบว่า โมดูลัสเฉือนมีค่าประมาณ 150 โดยมีค่า Young's Modulus อยู่ที่ 450 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่กลับด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

### 3.3 การเปรียบเทียบรูปแบบการจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

เมื่อทราบค่า Young's Modulus ที่เหมาะสมดินเหนียวอ่อนในการทำนายการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง ทำการจำลองการขุดดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง SCC แต่ละรูปแบบโดยผลการวิเคราะห์เป็นดังรูปที่ 20 การเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Villa มีลักษณะการเคลื่อนตัวที่คล้ายกันทั้งสองรูปแบบ โดยที่การเคลื่อนตัวสูงสุดของรูปแบบ Discrete อยู่ที่ 33 มิลลิเมตร และรูปแบบ Solid อยู่ที่ 32 มิลลิเมตรใน ส่วนของการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพง SCC-Hotel ลักษณะการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงมีลักษณะเช่นเดียวกับกำแพง SCC-Villa โดยการเคลื่อนตัวสูงสุดของรูปแบบ Discrete อยู่ที่ 28 มิลลิเมตร และรูปแบบ Solid อยู่ที่ 29 มิลลิเมตร

จากการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ



รูปที่ 20 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงแต่ละรูปแบบ

ดินหลังกำแพงแต่ละรูปแบบพบว่า การจำลอง SCC รูปแบบ Discrete มีการเคลื่อนตัวที่สูงกว่า เพียงแต่การเคลื่อนตัวของกำแพงในแต่ละรูปแบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความแตกต่างกันมาก โดยที่รูปแบบ Solid ใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 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. สรุป

ผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

1) จากการเปรียบเทียบข้อมูลเชิงประสบการณ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SCCW ที่มีการเพิ่มเสถียรภาพที่กั้นบ่อด้วย Cross Wall สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลังกำแพง การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง และเพิ่มสัดส่วนปลอดภัยต่อการขุดของดินใต้บ่อขุดเนื่องจากการขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนได้เป็นอย่างดี

2) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพง SCC-Villa มีการเคลื่อนตัวสูงกว่ากำแพง SCC-Hotel ประมาณ 3 เท่า



แสดงให้เห็นว่า Buttress ที่เสริมไว้ด้านหน้าของกำแพง SCC-Hotel สามารถช่วยเพิ่มความแกร่งให้กำแพงได้ดี

3) ค่า Young's Modulus ของดินเหนียวอ่อนที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงคือ  $500 S_u$  และ  $750 S_u$  ตามลำดับ

4) การวิเคราะห์ด้วยการจำลอง SCC โดยใช้รูปแบบ Discrete มีการเคลื่อนตัวของกำแพงที่สูงกว่ารูปแบบ Solid เพียงเล็กน้อยโดยไม่ได้มีการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบ Discrete ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่ารูปแบบ Solid อยู่มาก

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณอัญชิกา คิมเม คุณณัฐณีย์ บ่อมบุญมี คุณศรุตการณ์ ทรงศรี คุณกชกร ไมตรีจรงค์ และคุณชุตินันท์ ธีญาหาร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการตรวจทานบทความงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Phemphom, "Stability analysis of excavated slope stabilized by DCM column: case study and parametric analysis," Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2014 (in Thai).
- [2] W. Nutthakit, "Movement behavior of deep cement mixing column for retaining structure," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, 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, Department of Civil Engineering, 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," *Canadian geotechnical journal*, 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, Department of Civil Engineering, 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 (in Thai).
- [13] A. I. Mana and G. W. Clough, "Prediction of movements for braced cuts in Clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 107, no. 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.

