

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

พรพจน์ ตันเส็ง¹, บุญญฤทธิ์ บุญเกิด²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา
Corresponding author; E-mail address: ¹pompot@sut.ac.th, ²boonyaritboonkert@gmail.com

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, การขุดดินลึก, ดินเหนียวอ่อน, กำแพงขวาง, วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

Abstract

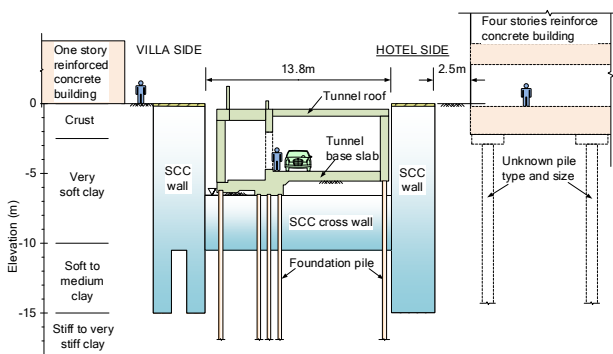
This paper research presents the performance of soil cement column wall (SCC wall) associated with base stability improvement by cross wall in soft clay. The field observation on the behavior of the SCC wall for a tunnel construction was extremely close to the existing structure in Bangkok subsoils, 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) เนื่องจากเป็นระบบกำแพงที่วิศวกรไทยได้มีการใช้งานและมีประสบการณ์ในการใช้งานมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน กำแพงที่กล่าวมานั้น เป็นกำแพงกันดินแบบ flexural wall ที่ต้องใช้ระบบค้ำยันทางด้านข้างเพื่อไม่ให้แรงที่เกิดขึ้นในกำแพงสูงจนทำให้ต้องใช้หน้าตัดกำแพงใหญ่หรือใช้เหล็กเสริมในปริมาณที่สูง การที่ต้องใช้ค้ำยันชั่วคราวทำให้ระยะเวลาในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการติดตั้งและการรื้อถอนค้ำยัน อีกทั้งการก่อสร้างกำแพงที่จำเป็นต้องมีการติดตั้งโดยใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการติดตั้งทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและเสียงที่ส่งผลกระทบต่ออาคารและพื้นที่ข้างเคียง ในปัจจุบันเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำเช่นดินเหนียวอ่อนให้มีความแข็งแรงสูงซึ่งรู้จักกันในชื่อ เสาเข็มดินซีเมนต์ (soil cement column, SCC) โดยการผสมปูนซีเมนต์ลงในดินมีความนิยมแพร่หลายและวิศวกรไทยมีประสบการณ์ในการใช้งานมากขึ้น ในหลายโครงการจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนให้มีความแข็งแรงสูงและใช้เป็นกำแพงกันดิน โดยวิธีการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมักใช้การจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เนื่องจากในการก่อสร้าง SCC ใช้วิธีการผสมโดยการกวนดินให้เข้ากับปูนซีเมนต์ที่ฉีดลงในดินที่มีลักษณะเป็นต้นเหมือนกันกับเสาเข็ม 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 จึงได้มีการปรับปรุงเสถียรภาพของกันบ่อขุดโดยใช้ SCC ในแนวขวางกับ SCC wall โดยก่อสร้างไว้เฉพาะที่กันบ่อขุดเป็นแนวกำแพงทุกระยะ 2.4 เมตร ซึ่งกำแพงชนิดนี้เรียกว่ากำแพงขวาง (cross wall) ซึ่งนำมาใช้เพื่อลด base heave และลดการเคลื่อนตัวของกำแพงการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว โดยมีงานวิจัยในงานขุดเพื่อก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อนที่กรุงออสโล ประเทศนอร์เวย์ [1] ในญี่ปุ่นมีการวิจัยการใช้ SCC ปรับปรุงดินทั้งกันบ่อเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกันบ่อขุดและลดการเคลื่อนตัว โดยปรับปรุงดินทั้งกันบ่อ ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการขุดมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นและมีการเคลื่อนตัวที่ลดลง [2], [3] การวิจัยที่นำเอา SCC cross wall มาปรับปรุงกันบ่อขุดที่ใช้ sheet pile เหล็ก และค้ำยันชั่วคราว โดยสร้างแปลงทดสอบขนาดจริงในสนามและให้นำหนักกดจนวิบัติ โดย [4] พบว่าการใช้ cross wall สามารถเพิ่มเสถียรภาพของบ่อขุดได้ ในประเทศไทยมีการปรับปรุง SCC กันบ่อที่โครงการคลองลัดโพธิ์ 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 ที่ไม่ใช้ระบบค้ำยันเลย



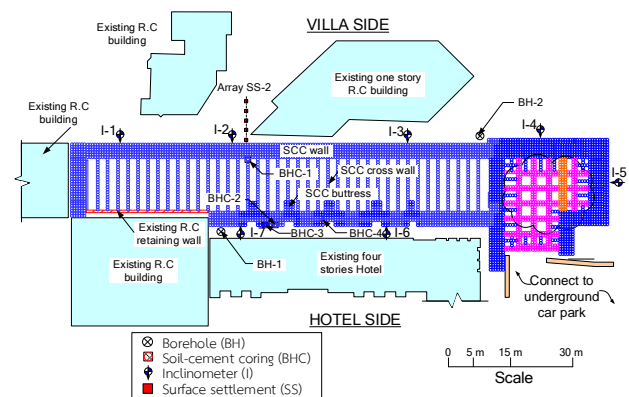
รูปที่ 1 รูปตัดขวางของโครงการและรูปตัดชั้นดิน

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของ SCC wall ที่ไม่ใช้ค้ำยันในงานขุดดินก่อสร้างอุโมงค์ทางลอด ที่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกันบ่อแทนการใช้ค้ำยันชั่วคราว ในแง่ของพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงในระหว่างการก่อสร้างและเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวที่ไม่ใช้ cross wall ในงานก่อสร้างด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ

2. ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยและการติดตั้งเครื่องมือวัด

2.1 ข้อมูลโครงการ

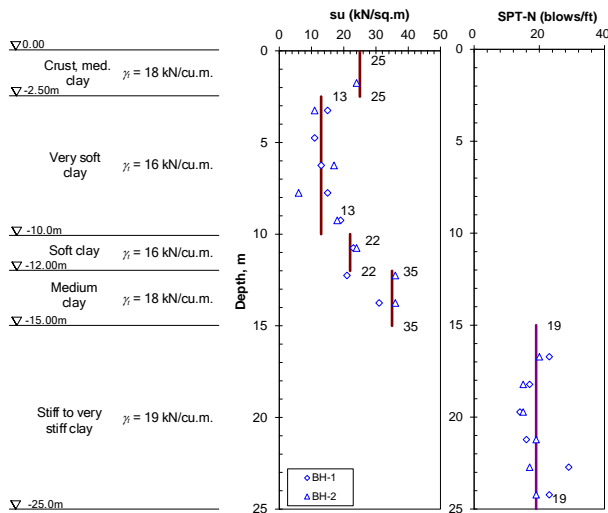
พื้นที่ที่ใช้เก็บข้อมูลเพื่อการศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ทางลอดของรถยนต์กว้าง 13.8 เมตร ยาว 96 เมตร เพื่อใช้เป็นทางเข้าชั้นจอดรถใต้ดินของอาคารคอนโดมิเนียม ตั้งอยู่ในเขตสาทร กรุงเทพมหานคร โดยโครงการนี้ตั้งขุดดินในชั้นดินเหนียวอ่อนลึก 7.4 เมตร ฝั่งที่ติดกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กหนึ่งชั้น (villa side)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



รูปที่ 2 ฝั่งตำแหน่งกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

2.2 ข้อมูลชั้นดิน

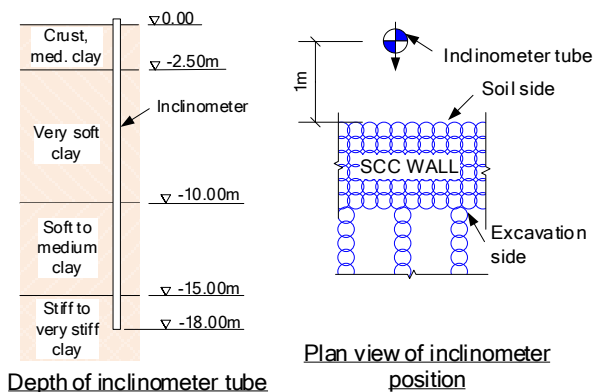
ลักษณะของชั้นดินในโครงการที่ได้จากการเจาะสำรวจดินจำนวน 2 หลุม มีลักษณะและข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินเป็นดังรูปที่ 3 โดยมีส่วนบนสุดเป็นชั้นเปลือกดินและดินถมหนา 2.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงอ่อนหนา 7.5 เมตร วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 2 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนา 3 เมตร ชั้นดินล่างสุดเป็นชั้นดินเหนียวแข็งหนา 10 เมตร



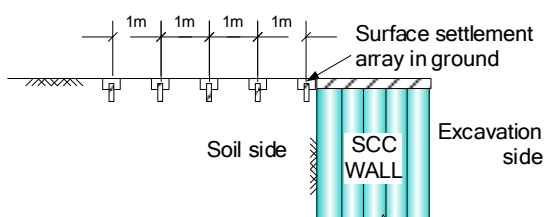
รูปที่ 3 รูปตัดชั้นดินของโครงการที่ได้จากการเจาะสำรวจดิน

2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด

ในการก่อสร้างได้ติดตั้งเครื่องมือวัด inclinometer ทั้งหมด 7 ตำแหน่ง ไว้โดยรอบบ่อขุดและ surface settlement ไว้ที่หลัง SCC wall ทั้งหมด 5 หมุด 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

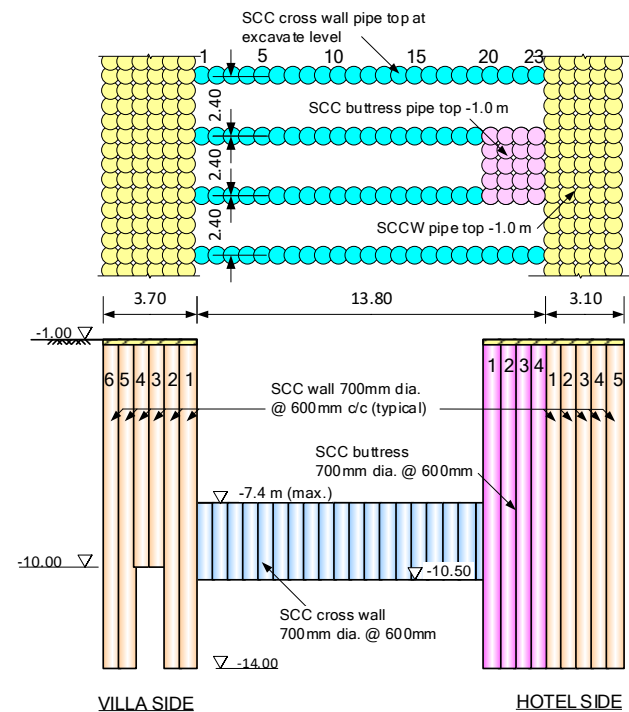


รูปที่ 5 การติดตั้ง surface settlement

3. เสาเข็มดินซีเมนต์

3.1 ข้อมูลกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

ในโครงการที่เลือกใช้เป็นพื้นที่ศึกษาใช้กำแพงกันดินเป็น 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

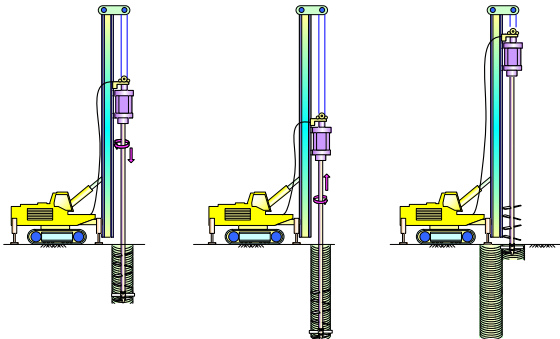


รูปที่ 6 รูปตัดขวางของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

3.2 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

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

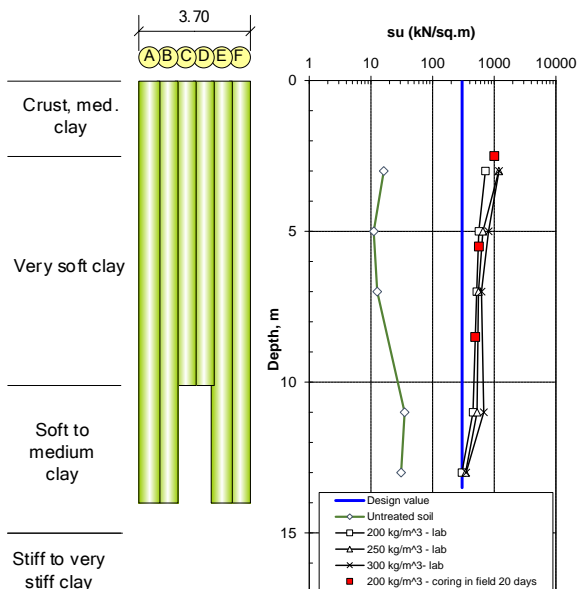
ซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณปูนเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินที่ยังไม่ผสม การผสมและการกวาดจะใช้ความเร็วในการหมุนก้านเจาะประมาณ 30 ถึง 40 รอบต่อนาที ความเร็วในการกดก้านเจาะประมาณ 1 เมตรต่อนาที โดยจะสัมพันธ์กับอัตราการฉีดน้ำปูนที่ 100 ถึง 200 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 7 ขั้นตอนการก่อสร้าง 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 ที่ใช้จริงนั้นจะมีเนื้อวัสดุไม่สม่ำเสมอ มักจะพบรอยแยกในเนื้อวัสดุเสมอ



รูปที่ 8 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 9 ภาพถ่ายขณะขุดดินที่ระดับความลึกสูงสุด 7.4 เมตร

4. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สามมิติ ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PLAXIS 3D โดยใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb ที่สมมุติให้ดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำและมีพฤติกรรมแบบไม่ระบายน้ำเนื่องจากการขุดดินในโครงการนี้ไม่ต้องติดตั้งค้ำยันทำให้เวลาในการขุดดินจนเสร็จไม่เกิน 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 ที่ได้มาจากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์การณ (empirical relationship) [8], [9] โดยเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวของกำแพงจากการตรวจวัดในสนามจริง มีข้อมูลระดับของชั้นดิน, คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของดินและดินซีเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

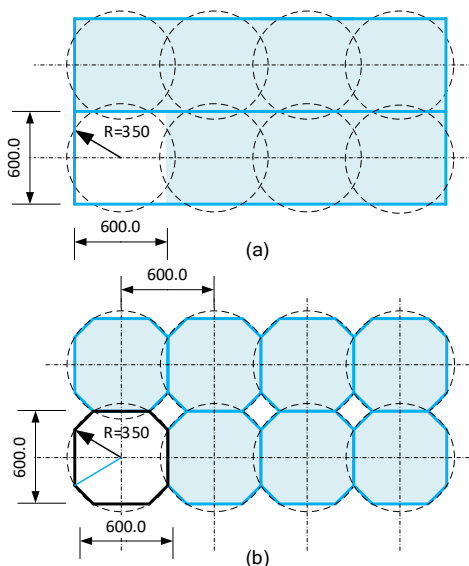
Soil layer	Depth (m)	γ_t (kN/m ³)	S_u (kN/m ²)	E_u (kN/m ²)	V_u
Crust	0.0-2.5	18	25	$250S_u$	0.495
Very soft clay	2.5-10.0	16	13	$250S_u$	0.495
Soft clay	10.0-12.0	16	22	$250S_u$	0.495
Medium clay	12.0-15.0	18	35	$250S_u$	0.495
Very stiff clay	15.0-25.0	19	98	$500S_u$	0.495
SCC	1.0-14.0	16	300	$500S_u$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

ในงานวิจัยนี้ใช้การจำลอง SCC สองรูปแบบได้แก่ การจำลอง SCC โดยให้ SCC มีความต่อเนื่องระหว่างต้น SCC ตามแนวตั้งฉากกับระนาบตัด ในงานวิจัยนี้เรียกว่ารูปแบบ solid และการจำลอง SCC ให้แต่ละต้นไม่ต่อเนื่องกันซึ่งจะเรียกว่ารูปแบบ discrete ในการจำลองแบบ discrete นี้เพื่อจำลองรอยต่อระหว่าง SCC ที่ไม่เชื่อมติดกันเมื่อก่อสร้างต้นชิดกันหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว ความไม่เชื่อมติดกันนี้พบเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณี SCC wall เกิดการร่วบิตดังรูปที่ 10

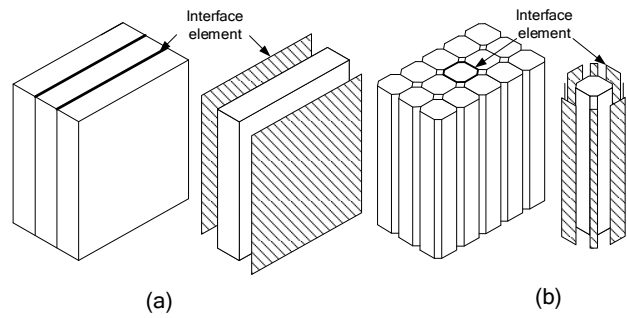


รูปที่ 10 การแยกจากกันของ SCC บริเวณรอยต่อระหว่างต้นเมื่อเกิดการร่วบิต

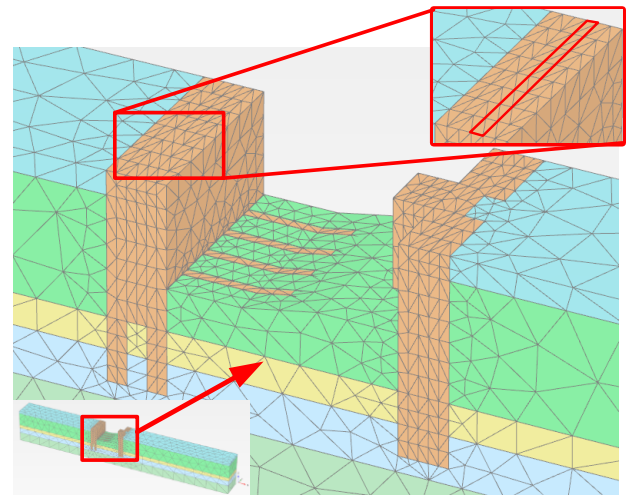
โดยรูปแบบ solid ทำการจำลองให้ SCC เป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างขนาด 600 มิลลิเมตร ความยาวตามกำแพง SCC wall ที่ใช้ในโครงการ ดังรูปที่ 11a ที่บริเวณรอยต่อระหว่างแถวของ SCC wall แต่ละแถวจะใช้ interface element เพียงสองด้านในการจำลองการแยกและการเชื่อมตามยาวบริเวณรอยต่อระหว่าง SCC ดังรูปที่ 12a ในส่วนของรูปแบบ 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]



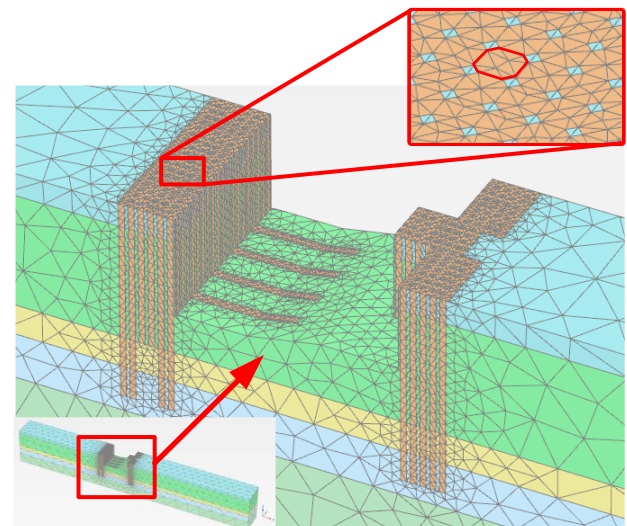
รูปที่ 11 การจำลองหน้าตัดของ SCC (a) solid และ (b) discrete



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

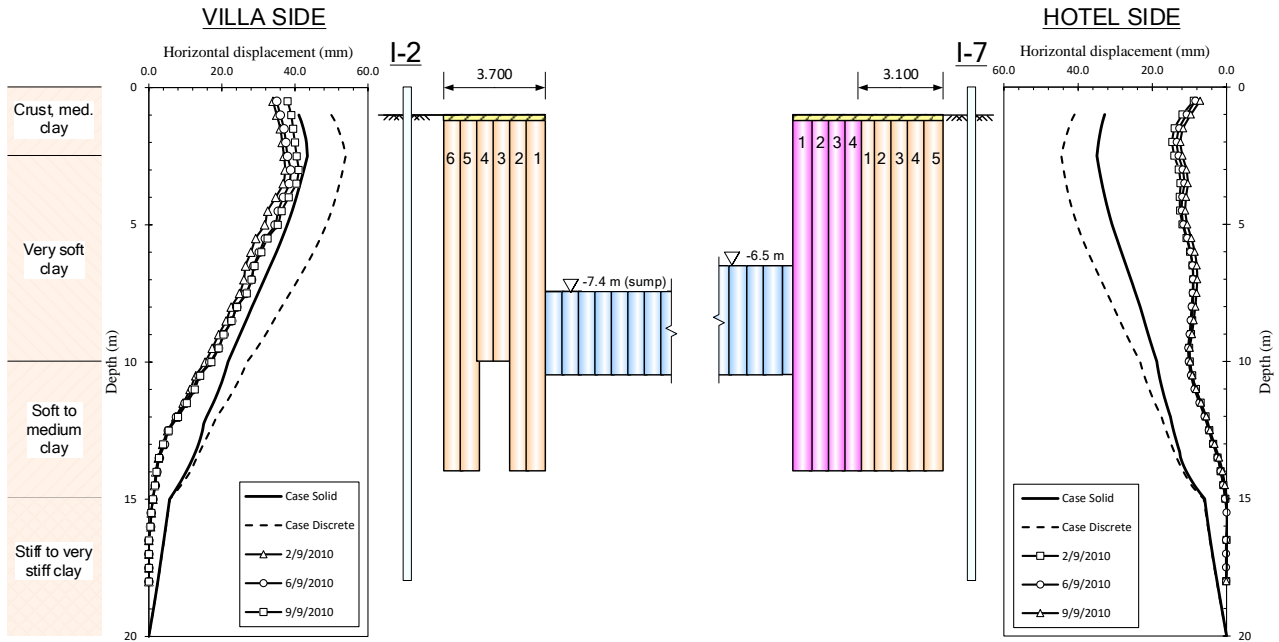


รูปที่ 13 FEM mesh ที่ใช้ในจำลอง SCC wall รูปแบบ solid



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

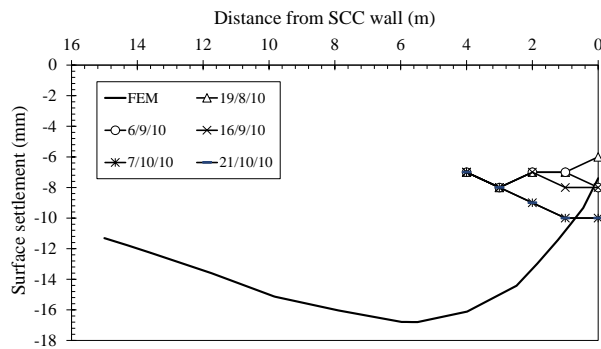
การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินหลัง SCC wall ฝั่ง hotel ได้จากการตรวจวัด inclinometer ตำแหน่ง I-7 ที่มีการขุดดินลึก 6.5 เมตร เห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall มีการเคลื่อนตัวสูงสุด 15 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร เห็นได้ว่าเมื่อขุดดินถึงระดับลึกสุดแล้วการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างมีนัยสำคัญ 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 ไม่มีการแยกตัวระหว่างต้นข้างเคียง ทำให้สตีฟเนสของกำแพงมีสูงกว่ารูปแบบ 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 ทำให้กำแพงมีสตีฟเนสที่สูงซึ่งส่งผลให้มีการเคลื่อนตัวที่ลดลง การเคลื่อนตัวที่ลดลงนี้สัมพันธ์กับ shear strain ที่น้อยลงด้วย ดังนั้นการจำลอง

โดยใช้แบบจำลองดิน Mohr-Coulomb ที่ต้องใช้ค่า E_u ที่คงที่ทั้งความหนา ชั้นดินทำให้ การเคลื่อนตัวของดิน villa นั้นใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่ค่า E_u นี้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดอย่างมีนัยสำคัญ ประเด็นนี้ต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไปโดยต้องใช้แบบจำลองดินที่สตีเฟนตามหน่วยแรงในมวลดิน หรืออาจใช้แบบจำลองดินที่แปรผันสตีเฟนตามความลึก

รูปที่ 16 เป็นการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่ได้จากการตรวจวัดด้วย surface settlement พบว่ามีค่าการทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งหลังกำแพง เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ พบว่าค่าการทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ 17 มิลลิเมตร ที่ห่างจากกำแพงออกไปเป็นระยะประมาณ 6 เมตรซึ่งมีค่าสูงกว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริง มีลักษณะการทรุดตัวที่แตกต่างกันและตำแหน่งที่เกิดการทรุดตัวสูงสุดไม่สอดคล้องกัน โดยที่ในตำแหน่งหลังกำแพงการทรุดตัวที่ผิวดินที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มีค่าที่ต่ำกว่าผลการตรวจวัดในสนาม และตั้งแต่ระยะ 2 เมตรวัดจากหลังกำแพงการทรุดตัวจึงมีค่าที่สูงกว่าผลที่ได้จากการตรวจวัด

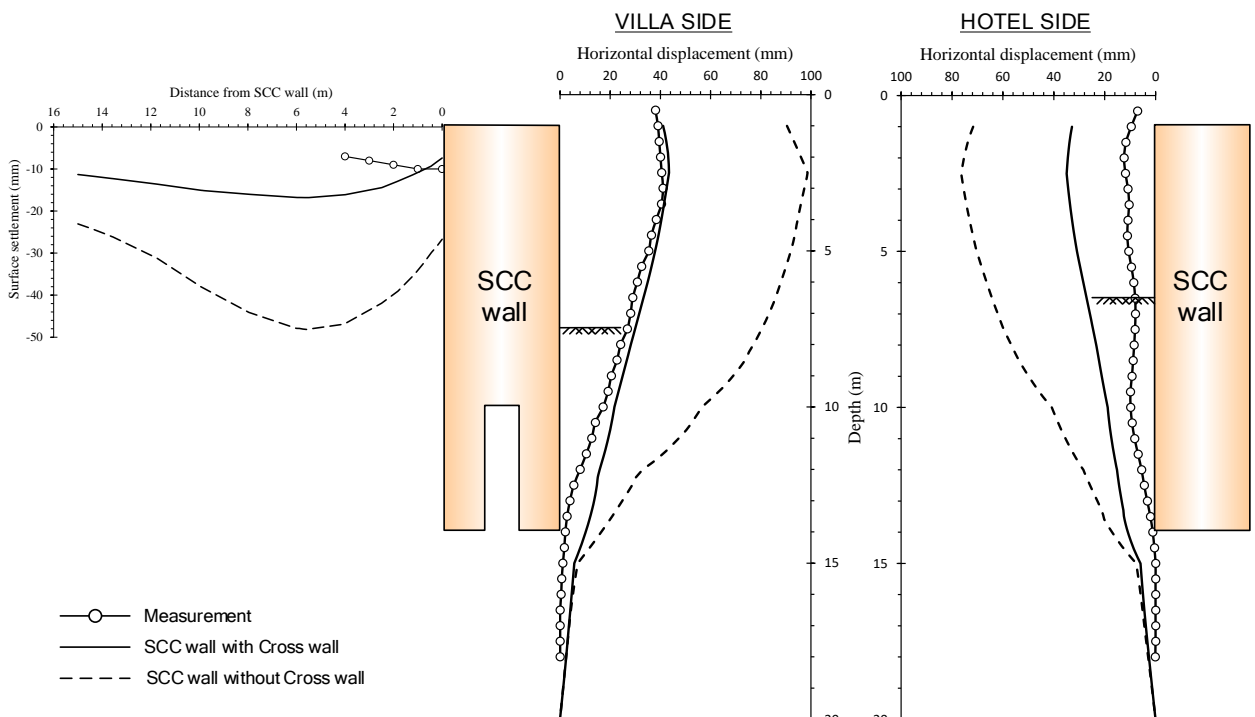


รูปที่ 16 ผลการทรุดตัวที่ผิวดินโดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

5.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ใช้ cross wall และ ไม่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพที่กั้นบ่อ

รูปที่ 17 เป็นผลการเปรียบเทียบการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ในกรณีที่ใช้ SCC wall ไม่ใช้ cross wall และใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกั้นบ่อ พบว่า มีการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall ฝั่ง villa ที่ไม่ใช้ cross wall ประมาณ 100 มิลลิเมตร และ SCC wall ฝั่ง hotel ที่ไม่ใช้ cross wall ประมาณ 80 มิลลิเมตร โดยการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงทั้งสองฝั่งมีพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่คล้ายกันแบบพฤติกรรมของคานยื่นที่มีการดัดกลับเล็กน้อย และผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์การทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่ไม่ใช้ cross wall และใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกั้นบ่อกับผลการทรุดตัวที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม พบว่า มีการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพงที่ไม่ใช้ cross wall ประมาณ 50 มิลลิเมตร โดยที่มีพฤติกรรมการทรุดตัวและตำแหน่งการทรุดตัวสูงสุดที่เหมือนกันกับผลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ของกำแพงที่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกั้นบ่อ โดยที่ไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจวัดในสนามจริง

เมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนตัวของดินหลัง SCC wall ฝั่ง hotel เห็นได้ว่ามีค่าที่น้อยกว่าฝั่ง villa ประมาณ 2 เท่า อาจเป็นผลมาจากการขุดดินที่ระดับความลึกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า buttress สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับ SCC wall ที่ไม่มีความต่อเนื่องกันตลอดทั้งแนวของอุโมงค์ และเมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ในกรณีที่ใช้ SCC wall ไม่ใช้ cross wall และใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกั้นบ่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกั้นบ่อที่สามารถช่วยลดการเคลื่อนตัวของดินและการทรุดตัวที่ผิวดินหลังกำแพง



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของ SCC wall ที่ใช้ cross wall และไม่ใช้ cross wall ในการปรับปรุงเสถียรภาพกั้นบ่อกับผลที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม

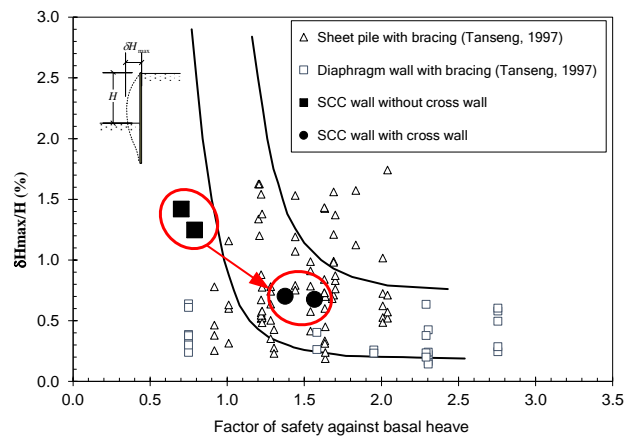
จากผลการเคลื่อนตัวของดินหลังกำแพงเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลเชิงประจักษ์ (empirical) ในการขุดดินในชั้นดินกรุงเทพฯ [11] ซึ่งอ้างอิงงานวิจัยของ Mana and Clough (1981) ที่เป็นการสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงสูงสุดกับความลึกในการขุด ($\delta H_{max} / H$) และอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการรูดของดินใต้บ่อขุด (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)

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

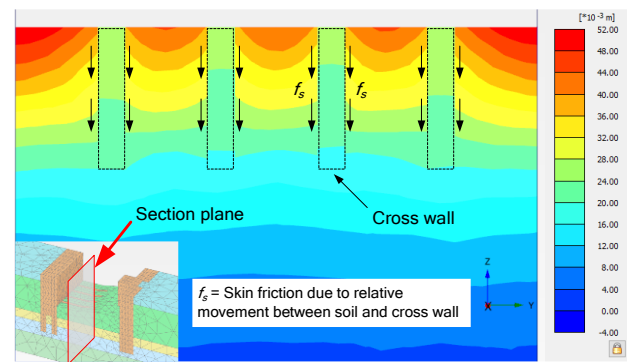
เมื่อ $N_c = 9.0$, $\alpha = 0.9$, B คือความกว้างของบ่อขุด, L คือระยะห่างของ cross wall, h คือความลึกของ cross wall และ q คือน้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดขึ้นระหว่างก่อสร้างแต่เนื่องจากการก่อสร้างใช้วิธี open cut and cover ทำให้ $q = 0$ พบว่ามีค่า F.S. ที่เพิ่มขึ้นจนมีความปลอดภัย เมื่อพิจารณาที่ค่า $\delta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



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการรูดของดินใต้บ่อขุดกับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกในการขุด [11]

รูปที่ 19 เป็นการเคลื่อนตัวของดินกันบ่อบริเวณที่เป็นตำแหน่ง cross wall ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เห็นได้ว่าดินกันบ่อมีการรูดขึ้นในแนวตั้งประมาณ 45 มิลลิเมตร โดยที่ cross wall ถูกดันขึ้นประมาณ 25 มิลลิเมตร การรูดขึ้นของดินที่สูงกว่าการถูกดันขึ้นของ cross wall เป็นการเคลื่อนตัวแบบสัมพัทธ์ ซึ่งทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ผิวของ

cross wall และมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวของ cross wall ทำให้เกิดแรงต้านทานต่อการรูดขึ้นโดยรวมของดินกันบ่อ ส่งผลให้สัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการรูดของดินใต้บ่อขุดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณโดยใช้สมการ (2) ซึ่งได้พิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวของ cross wall ให้เป็นแรงต้านทานต่อการรูดขึ้นของดินใต้บ่อขุดไว้ด้วย และผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ยังสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ที่เสนอโดย [11] ที่แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแปรผกผันกับสัดส่วนความปลอดภัยต่อการเกิดการรูดของดินใต้บ่อขุด



รูปที่ 19 เส้นชั้นการเคลื่อนตัวของดินในระนาบที่ตั้งฉากกับ cross wall แสดงถึงการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างดินกันบ่อกับ cross wall ทำให้เกิดแรงต้านทานการรูดของดินกันบ่อ

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า SCC cross wall ที่ใช้เพิ่มเสถียรภาพการรูดของดินใต้บ่อขุด สำหรับงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ นั้นมีประสิทธิภาพแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนจากการเคลื่อนตัวของกำแพงที่ต่ำและเมื่อใช้ร่วมกับ SCC wall ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ค้ำยันด้านข้างทำการก่อสร้างเป็นไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากไม่จำเป็นต้องเสียเวลากับการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว และ SCC wall ที่ใช้ร่วมกับ SCC cross wall นั้นสามารถจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติที่แสดงผลการจำลองที่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงและสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ของกำแพงกันดินที่ก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

6. สรุปผลการวิจัย

ผลสรุปของงานวิจัยนี้ได้แก่

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

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

3. ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของ cross wall ที่ทำให้เสถียรภาพกันบ่อขุดเพิ่มขึ้นนั้นเป็นการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างดินที่สัมผัสกับผิว cross wall กับตัว cross wall ทำให้เกิดแรงเสียดทานผิว ที่ทำให้แรงต้านการรูดของดินใต้บ่อขุดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ใช้คำนวณสัดส่วนความปลอดภัยต่อการรูดของดินใต้บ่อขุดที่ได้คิดผลของแรงเสียดทานผิวนี้ไว้แล้ว และยังสามารถใช้ข้อมูลเชิงประสบการณ์ของงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณณัฐดนัย ป้อมบุญมี, คุณอัญจิกา คิมเม , คุณศุภราภรณ์ ทรงศรี, คุณอรยา คำหนองไม้ 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, Vol1, 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., Kobayshai, 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). *พฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มซีเมนต์ลึกสำหรับงานโครงสร้างกันดิน*. 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 สุขูมาภาค และพรพจน์ ดันเส็ง (2561). การหาสตีฟเนสของดินเหนียวด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อใช้ในการทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงเสาเข็มเจาะเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึก. *วารสารวิชาการวิศวกรรมอุตสาหการ พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, หน้า 33-47.
- [9] วิจิต นามวิเศษ (2556). *พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กับงานขุดดินลึกด้วยระบบ top-down ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา 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.