

การศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้างในดินเหนียวอ่อน โดยใช้แบบจำลองเฉือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม A Study of Influence of Soil-Cement Column Arrangement on Lateral Resistance in Soft Clay by Using Large Model Field Direct Shear Test

ศรุตการณ์ ทรงศรี¹, * พรพจน์ ตันเล็ง¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: pompot@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้างในดินเหนียวอ่อน โดยใช้แบบจำลองเฉือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม การทดสอบใช้การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสัดส่วนย่อขนาดจริง 10 ต่อ 1 ใช้การผสมเชิงกลแบบเปียก ผลการทดสอบดินซีเมนต์เพสต์ พบว่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นคือ 2 ชั่วโมงและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายคือ 8 ชั่วโมง จากการทดสอบแบบจำลองชี้ให้เห็นว่า กรณี SCC 1 ต้นกำลังรับแรงด้านข้างของ SCC สูงขึ้นเป็น 10 เท่าของดินเดิม และในกรณี SCC 2 ต้นเรียงแบบขบกันก่อสร้างต่อเนื่องกำลังรับแรงด้านข้างของ SCC สูงที่สุดโดยสูงเป็น 4 เท่าของ SCC 1 ต้น ซึ่งสูงกว่าเป็น 3 เท่าของ SCC 2 ต้นเรียงแบบสัมผัสกันช่วงเวลา 24 ชั่วโมง และสูงกว่าเป็น 2 เท่า ของ SCC 2 ต้นเรียงแบบขบกันเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง สาเหตุเนื่องจากก่อสร้างเกินระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายทำให้ SCCW เกิดโมเมนต์ดัดที่ต่อเนื่องให้ SCC แยกออกจากกันเป็นแนวเฉือนตามยาวซึ่งทำให้สลิปเฟสรวมของ SCC ลดลงจึงมีกำลังที่ต่ำกว่ากรณีที่ SCC 2 ต้นที่ก่อสร้างโดยระยะเวลาไม่เกินเวลาก่อตัวของดิน-ซีเมนต์เพสต์

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, ที่ดินเหนียวอ่อน, การผสมเชิงกลแบบเปียก, การเฉือนตรงขนาดใหญ่

Abstract

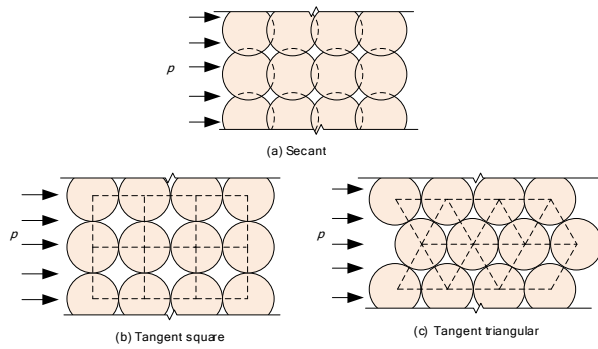
This paper presents the study of influence of soil-cement column arrangement on lateral resistance in soft clay by using large model field direct shear test. The test uses the 10 to 1 scale soil-cement columns which are constructed in natural soft clay in test field. Using the wet deep mixing method with mixing tool. Result of setting time of soil-cement paste test shows that the initial setting time 2 hours and final setting time 8 hours. The large direct shear tests on soft clay reinforced with soil-cement column in the field show that the bonding between soil-cement column has strong influence on lateral resistance in the case of 1SCC, 10 times higher than that the untreated soil and SCCW-S has the highest resistance. Additionally, for the secant arrangement, the bonding between SCC reduces if the time of construction of the adjacent column exceed the final setting time of the primary SCC that has been constructed.

Keywords: soil-cement column, soft clay, wet mixing method, large direct shear test

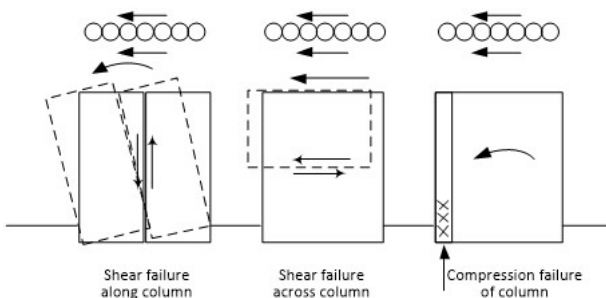
1. บทนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างอาคารสูงนิยมออกแบบให้มีการก่อสร้างชั้นใต้ดินเพื่อเพิ่มที่ใช้สอยให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ซึ่งการก่อสร้างต้องทำการขุดดินลึก จึงจำเป็นต้องใช้ระบบป้องกันดินพังเพื่อให้การขุดมีเสถียรภาพ ป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นและกระทบพื้นที่ข้างเคียง ระบบป้องกันดินที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น ระบบกำแพงกันดินเข็มพืดเหล็ก (sheet pile) ระบบกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (pile wall) และระบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (diaphragm wall) ซึ่งระบบกำแพงกันดินที่ไม่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายจำเป็นต้องมีกำลังและสติเฟ้นสมาทพอที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างในดินเหนียวอ่อนได้ ส่วนใหญ่การก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวจากการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในดิน เนื่องด้วยต้นทุนและระยะเวลาในการก่อสร้างจึงมีการนำระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ (soil-cement column, SCCW) มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ [1] รายงานการก่อสร้างและทดสอบคุณสมบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์มีอายุปูนซีเมนต์ 28 วัน กำลังรับแรงเฉือนและหน่วยแรงของดินที่ปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้น 10-20 เท่าของดินเดิม ในการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน เพื่อลดการแอ่นของกำแพงกันดินที่เกิดขึ้นจากแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อกำแพงจากความแข็งแรงของกำแพงกันดิน (wall stiffness)

การออกแบบระบบกำแพงกันดินที่ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (SCC) ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้าง SCCW ซึ่งในการก่อสร้าง SCCW นั้นก่อสร้างโดยใช้ SCC หลายต้นมาเรียงกัน โดยการจัดเรียงนั้นมีการจัดเรียงแบบขบกัน (secant SCCW, SCCW-S) ดังรูปที่ 1a และการจัดเรียงแบบ SCC สัมผัสกัน (tangent SCCW, SCCW-T) แบบเรียงสลับเหลี่ยมจัตุรัส ดังรูปที่ 1b และการจัดเรียงแบบ SCC สัมผัสกัน (tangent SCCW, SCCW-T) แบบเรียงสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 1c โดย [6] รายงานโหมดการวิบัติของ SCCW จากการวิบัติของ SCC ดังรูปที่ 2 ได้แก่ การวิบัติแบบเฉือนตามแนวยาวของ SCC (shear failure along column) และการเฉือนตามขวาง SCC (shear failure across SCC) ที่ขึ้นกับกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวระหว่าง SCC โดยกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของ SCCW-T นั้นขึ้นกับกำลังรับแรงเฉือนของดิน ส่วนกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของ SCCW-S นั้นขึ้นกับกำลังของ SCC หากก่อสร้างต่อเนื่องกัน แต่หากก่อสร้างไม่ต่อเนื่องกัน อาจเกิดการวิบัติในแนวยาว



รูปที่ 1 รูปแบบการจัดเรียง SCC ที่ใช้เป็นกำแพงกันดิน (a) แบบ secant, (b) แบบ tangent เรียงแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ (c) แบบ tangent เรียงแบบสามเหลี่ยม



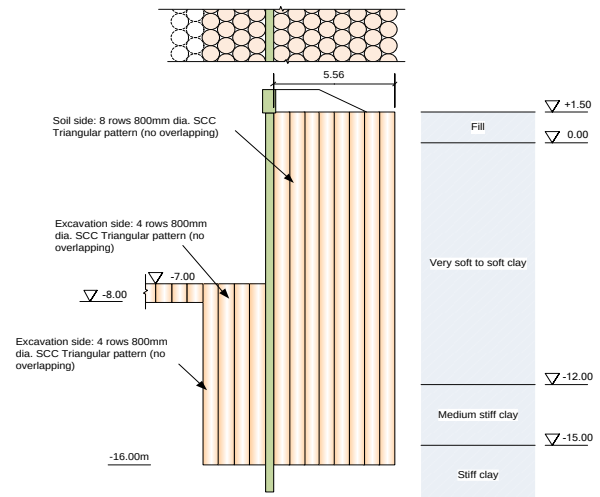
รูปที่ 2 โหมดการวิบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ [6]

เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของด้านข้างของ SCCW ของความไม่ต่อเนื่องในการก่อสร้างกำแพงของโครงการที่ใช้ระบบป้องกันดินแบบ SCCW-T และแบบ SCCW-S เป็นกำแพงป้องกันดินทั้งในการขุดดินลึกสองโครงการ จากการตรวจวัดการเคลื่อนตัวโดยโครงการแรก [1] รายงานระบบป้องกันดินทั้งระหว่างการขุดดินลึกประมาณ 8.5 เมตรที่ใช้ SCCW-T เรียงแบบสามเหลี่ยมเป็นกำแพงกันดินถาวร เพื่อก่อสร้างคลองระบายน้ำ ดังรูปที่ 3 โดยใช้ SCC เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตรเรียงแบบสัมผัสประกอบด้วยด้านที่ขุด SCC 4 แถว ความหนากำแพง 5.56 เมตร และด้านระดับดินเดิม SCC 8 แถว ที่มีระยะห่างของปลายกำแพงอยู่ที่ระดับ -16.0 เมตร การเคลื่อนตัวของด้านข้างของกำแพงเมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายที่ตำแหน่งสูงสุดมีค่าประมาณ 240 มิลลิเมตร

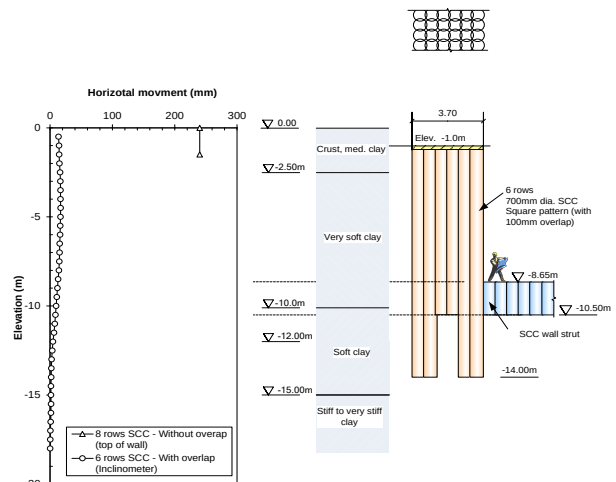
โครงการที่สอง [10] รายงานระบบป้องกันดินทั้งระหว่างการขุดลึก 7.65 เมตร ที่ใช้ SCCW-S เรียงแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวกับงานขุดลึกเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน ประกอบด้วย SCC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร จำนวน 8 แถวจัดเรียงแบบ secant เป็นระยะ 100 มิลลิเมตร โดยเรียงเป็นรูปสี่เหลี่ยม (square pattern) ความหนากำแพง 3.70 เมตร และใช้ SCC เรียงเป็นกำแพงค้ำยัน (SCC wall strut) การเคลื่อนตัวของด้านข้างสูงสุดเมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายที่วัดโดย inclinometer มีค่าประมาณ 20 มิลลิเมตร

จากการรายงาน [1, 10] เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินที่มีความลึกของการขุดลึกใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4 พบว่ากรณี SCCW-T ที่มีความหนาของกำแพงมากกว่าและมีระยะห่างของกำแพงมากกว่ากรณี SCCW-S ซึ่งมีการเคลื่อนตัวต่ำกว่าถึง 12 เท่า เห็นได้ว่าการประสานกันของเนื้อ SCC ระหว่างการก่อสร้าง จากการจัดเรียงแบบขบกัน ที่มีการ overlap กันนั้นช่วยให้กำแพงมีเสถียรภาพสูงขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินลดลง และยังทำให้กำแพงกันดินมีกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณี SCCW-T ได้รายงานไว้โดย [3] กำลังรับแรงเฉือนตาม

แนวยาวมีเพียงดินที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มทำให้เสถียรภาพลดลงและยังทำให้เกิดการเคลื่อนตัวสูง



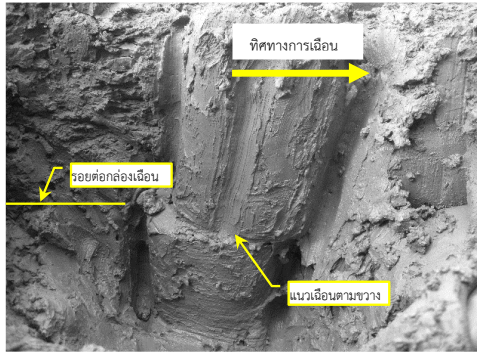
รูปที่ 3 รูปตัดขวางและการจัดเรียงกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ของ การขุดลึก 8.5 เมตร แบบสัมผัส (tangent) เพื่อก่อสร้างคลองระบายน้ำ [1]



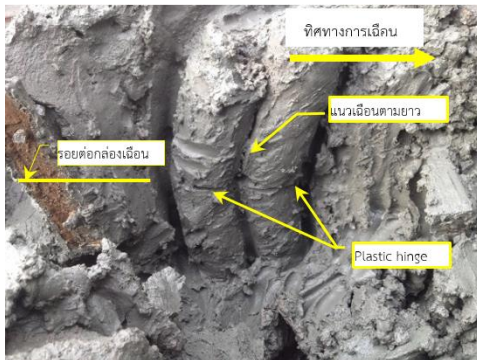
รูปที่ 4 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของ SCCW-S สำหรับการขุดดินลึก 7.65 เมตร [10] กับการเคลื่อนตัวของ SCCW-T สำหรับการขุดลึก 8.5 เมตร [1]

จาก [5] ยังได้รายงานการเกิดกรณีวิบัติจากการจัดเรียงแบบ SCCW-S ซึ่งกรณีก่อสร้างต่อเนื่อง หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเป็น 9.62 kPa ระยะการเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร จากนั้นลดลงเหลือ 7.2 kPa คงที่ที่ระยะการเคลื่อนตัว 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 เห็นได้ว่าการวิบัติเกิดการเฉือนทางขวางกับแนว SCC ไม่เกิดรอยต่อระหว่าง SCC ทำให้ไม่เกิดความเฉื่อยไม่ลดลงและสามารถต้านทานโมเมนต์ดัดได้โดยไม่เกิดการวิบัติ เมื่อเพิ่มแรงเฉือนจนเกิดการวิบัติแบบทางขวาง (shear failure across SCC) และกรณีเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมงเกินกว่าระยะเวลาต่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเป็น 8.8 kPa ระยะการเคลื่อนตัว 16.3 มิลลิเมตร จากนั้นลดลงเหลือ 6.1 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 72 มิลลิเมตร ซึ่งจากการก่อสร้างที่เว้นช่วงเวลาเพื่อหลีกเลี่ยงจากการหยุดการก่อสร้างหรือความขัดข้องของเครื่องจักร ดังรูปที่ 6 เห็นได้ว่าการเฉือนตามแนวยาวของ SCC ตรงรอยต่อระหว่าง SCC ทำให้ SCC แยกออกจากกันเป็นสองต้น จากนั้นทำให้ไม่เกิดความเฉื่อยลดลงและกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดลดลงจนทำให้เกิดการวิบัติแบบหักด้วยโมเมนต์ดัดโดยเกิดจุดหมุนพลาสติก

(plastic hinge) ตรงรอยต่อกล่องเดือยทั้งสองต้น ทั้งกรณีของ SCC ก่อสร้างต่อเนื่องและก่อสร้างเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5 รูปแบบการวิบัติของ SCC ที่ทิ้งช่วงเวลาก่อสร้างต่อเนื่อง เป็นแบบ shear failure across column [5]



รูปที่ 6 รูปแบบการวิบัติของ SCC ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง เป็นแบบ shear failure along column [5]

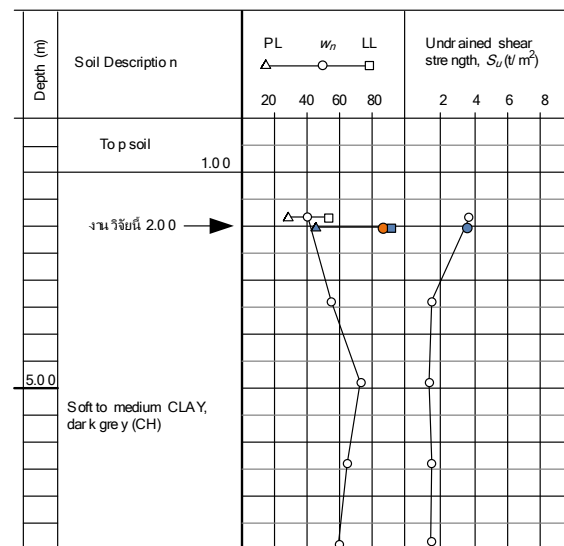
ในโครงการก่อสร้างจากการขุดดินลึกโอกาสที่จะเกิดการเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนมีสูงมาก ดังนั้นในการขุดดินลึกในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนจึงเลือกใช้ SCCW เป็นกำแพงกันดินเพื่อป้องกันการไหลของดินและป้องกันการทรุดตัวของโครงสร้าง โดยใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์ ซึ่งในการก่อสร้าง จากรูปที่ 7 เป็นการก่อสร้าง SCCW-T ซึ่งในการก่อสร้างต้องมีการหยุดพักเครื่องจักรหรือทั้งระยะการก่อสร้างนานเกินกว่าระยะก่อตัวของดินซีเมนต์เฟส 2 เห็นได้ชัดจากการรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่าง SCC ของใบบนดิน จากการแยกกันบริเวณส่วนขบกันระหว่าง SCC



รูปที่ 7 การแยกจากกันบริเวณส่วนขบกันระหว่าง SCC แบบ secant ทำให้ SCC แยกเป็นต้นเดียว (SCC ก่อสร้างด้วยวิธี jet grouting ที่เว้นระยะเวลาก่อสร้างระหว่างต้นเกินกว่าเวลาก่อตัวของซีเมนต์เฟส 2)

2. พื้นที่วิจัย สภาพชั้นดินและคุณสมบัติของชั้นดิน

บริเวณที่ใช้สร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์และใช้ตัวอย่างดินในตำบลบางไทร อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยมีพิกัด UTM อยู่ที่ E 660452.00 N 1569836.00 รูปที่ 8 ในการทดสอบใช้ความลึกที่ 2 เมตร โดยทำการขุดเก็บตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample) เพื่อทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังของดินเหนียว ซึ่งมีปริมาณน้ำในดินเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์, พิกัดเหลว 92 เปอร์เซ็นต์, พิกัดพลาสติก 42 เปอร์เซ็นต์, ดัชนีพลาสติก 50 เปอร์เซ็นต์ และจำแนกเป็นดินเหนียวประเภท CH ที่มีความหนืดสูง กำลังรับแรงเฉือน 3.8 t/m^2 ซึ่งดินในความลึกนี้อาจจะอยู่ในช่วงใกล้ผิวดินจึงมีปริมาณน้ำในดินต่ำ อีกทั้งยังเป็นดินอัดตัวแน่นเกินปกติเล็กน้อย (lightly overconsolidated) จากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล เนื่องจากการลดลงของน้ำในดินส่วนใกล้กับผิวดิน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากดินที่อยู่ลึกลงไปดินไประมาณน้ำในดินมากกว่าที่ความลึก 2 เมตร ดินจึงยังคงเป็นดินเหนียวอยู่



รูปที่ 8 รูปตัดชั้นดินและคุณสมบัติของดินในพื้นที่วิจัย

3. วิธีการวิจัย

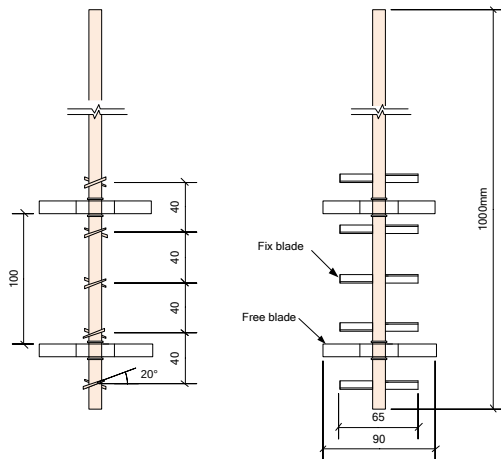
การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการผสมเชิงกลด้วยเครื่องผสมขนาดเล็ก โดยใช้วิธีของ [8] ในการส่งน้ำปูนซึ่งเครื่องผสมดินที่ใช้จำลองจากเครื่องผสมดินเชิงกล ดังรูปที่ 9 ประกอบด้วยใบบนดิน 5 ชุดตามแนวตั้ง ใบบนดินกว้าง 65 มิลลิเมตรและบิดทำมุม 20 องศาแกนผสมติดใบหมุนอิสระ (free blade) เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมแนวตั้งของก้านผสม

จากงานวิจัยของ [7, 8, 9] ได้ทำการทดสอบเฉพาะการผสมเชิงกลแบบแห้งโดยการฉีดปูนผงฉีดปูนผง ทดสอบกับชั้นดินเหนียวเทียมที่สร้างจากดินเกล็ดจากการสร้างขึ้นในห้องทดลองที่มีปริมาณน้ำในดินเป็น 48-50% ไม่สามารถเทียบเท่าดินธรรมชาติได้ เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวเทียมให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์จริงด้วยวิธีการผสมดินด้วยเครื่องผสมขนาดเล็ก และได้พัฒนากล่องเดือยตรงเสาเข็มดินซีเมนต์-ปูนขาว (soil-cement-lime-column, SCLC) โดยกล่องเดือยตรงเป็นกล่องกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5m ซึ่งใช้เสาเข็ม SCLC ขนาด 50 มิลลิเมตรยาว 500 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องกวาดดินขนาดเล็กเพื่อกวาดดินเข้ากับผงปูนซีเมนต์และปูนขาวโดยอาศัยท่อทองแดงดันลงไปในดินเหนียวเกล็ด ในการเพิ่มแรงเฉือนต่อกล่องใช้วิธีควบคุมแรงกระทำต่อแบบจำลอง (load

control) เป็นลำดับขั้น ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงจาก 0.64 kPa จนถึง 4 kPa จากนั้นลดแรงดึงลงจนทำให้หน่วยแรงเหลือ 0.32 kPa

การทดลองแบบจำลองกับดินเหนียวอ่อนในสนาม [4] ได้รายงานการพัฒนากล่องเฉือนตรงกับแบบจำลอง (large direct shear box) กล่องที่ใช้เป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพิ่มแรงเฉือนโดยใช้แม่แรงให้แรงกระทำต่อแบบจำลอง SCC ที่ใช้เป็นแท่งทรงกระบอกที่ผสมจากภายนอกแล้วเสียบลงในดินเหนียวคงสภาพในสนาม จากนั้นเขี่ยดินเหนียวที่เสียบแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ไว้จนวิบัติ ซึ่งทำให้เนื้อเสาเข็มที่มีความสม่ำเสมอซึ่งแตกต่างจากเนื้อเสาเข็มที่สร้างจากดินธรรมชาติและทำให้การยึดเกาะระหว่างดินกับเสาเข็มมีสภาพแตกต่างจากสภาพก่อสร้างจริง

ซึ่งจากงานวิจัยของ [2] ได้ทำการทดสอบกับแบบจำลอง SCC โดยมีสัดส่วน 1:10 ใช้วิธีเชิงกลแบบเปียกและทดสอบกำลังของแบบจำลอง SCC กับดินเหนียวอ่อนมากในสนาม ที่มีความไวตัวสูง ลึก 2.5 เมตร จากผิวดินโดยเสาเข็มก่อสร้างจริงจากดินในธรรมชาติซึ่งมีผิวขรุขระเนื่องจากการหมุนของใบกวาดดิน โดยแบบจำลอง SCC ทำการทดสอบสามกรณีได้แก่ ผสมต้นเดียว, ผสมสองต้นโดยต้นที่สองเหลื่อมกับต้นแรกเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร ก่อสร้างต่อเนื่องกัน และผสมสองต้นโดยต้นที่สองก่อสร้างหลังจากต้นแรกแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 9 เครื่องผสมดินเชิงกลแบบย่อส่วน 1:10 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับแบบจำลอง SCC จากข้อดีของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น โดยการทดสอบด้วยวิธีการผสมเชิงกลแบบเปียกในระดับลึกโดยใช้ใบกวาดดินด้วยสว่านไฟฟ้าและในทดสอบกำลังของแบบจำลอง SCC กับดินธรรมชาติในสนาม การศึกษาใช้แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ซึ่งใช้สัดส่วนย่อขนาดจริง 10 ต่อ 1 อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อดิน (cement-soil ratio) ไม่น้อยกว่า 8-12% โดยน้ำหนักดินที่ทำให้ปริมาณซีเมนต์ในดินไม่น้อยกว่า 5-15% โดยน้ำหนักดิน ที่ให้อัตราส่วนผสมเพียงพอต่อโครงสร้างกันดินและไม่มากเกินไปจนเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ที่ให้อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อปริมาณเสาเข็มเท่ากับ 180 กิโลกรัมต่อปริมาณเสาเข็ม ในแปลงทดสอบที่ ตำบลบางไทร อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ชั้นดินเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ลึก 2 เมตรจากผิวดิน การขุดเปิดหน้าดินโดยใช้รถตักดิน ผสมดินด้วยเครื่องผสมขนาดเล็กโดยใช้วิธีส่งน้ำปูน ดังรูปที่ 10 เพื่อหาความแตกต่างของกำลังรับแรงเฉือนและรูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยการกดท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วลงในดินที่ศูนย์กลางตำแหน่ง SCC เป็นระยะ 600 มิลลิเมตร จากนั้นกรอกน้ำปูนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.0 แล้วดึงท่อขึ้นเพื่อปล่อยน้ำปูนให้อยู่ในดิน จากนั้นกวาดดินด้วยเครื่องผสมดินเชิงกลขนาดเล็ก

ด้วยสว่านไฟฟ้า โดยรอบการหมุนสว่านอยู่ที่ 45 รอบต่อนาที กดลงด้วยการหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยอัตรา 1 เมตรต่อนาที จนถึงระยะ 600 มิลลิเมตร จากนั้นดึงขึ้นด้วยการหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยอัตรา 1 เมตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาด 70 มิลลิเมตร



1. กดท่อ PVC ลงในดิน
บรรจุน้ำปูนลงในท่อจากนั้นถอนท่อ
PVC ขึ้นเพื่อให้มีน้ำปูนบรรจุในหลุม



2. ผลมดินโดยกดแท่งลงในแนวตั้ง
หมุนแท่งตามเข็มนาฬิกาจากนั้น
ถอนแท่งและขึ้นโดยหมุนทวนเข็มนาฬิกา



แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

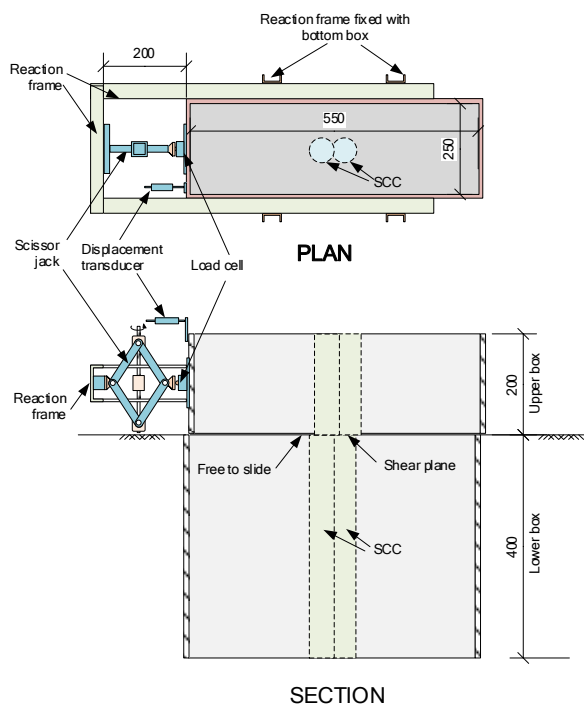
รูปที่ 10 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

ในการศึกษาใช้รูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 1 โดยแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบได้แก่ 1SCC (SCC 1 ต้น), 2SCC-T24 (SCC 2 ต้นเรียงแบบสัมผัสเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง, 2SCC-S (SCC 2 ต้นเรียงแบบขบก่อสร้างต่อเนื่อง) และ 2SCC-S24 (SCC 2 ต้นเรียงแบบขบเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

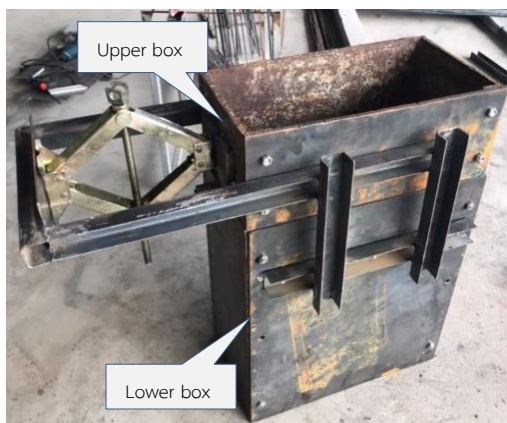
ตารางที่ 1 รูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบในสนาม

ชื่อเรียก	รูปแบบการจัดเรียง	วิธีการติดตั้ง SCC
1SCC		SCC 1 ต้น
2SCC-T24		SCC 2 ต้นเรียงแบบสัมผัสเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง
2SCC-S		SCC 2 ต้นเรียงแบบขบก่อสร้างต่อเนื่อง
2SCC-S24		SCC เรียงแบบขบเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

หลังจากทำการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง 4 รูปแบบ บ่มจนตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน ทำการทดสอบเงื่อนไขดินที่เสริมด้วย SCC ที่ได้จากการดัดแปลงเครื่องมือของ [5] ดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ซึ่งประกอบด้วยเหล็กหนา 8 มิลลิเมตร กว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 550 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนบนสูง 200 มิลลิเมตร และส่วนล่างสูง 400 มิลลิเมตร ทำการทดสอบโดยกดกล่องเลื่อนตรงลงในดินให้แนว SCC อยู่กึ่งกลางกล่อง จากนั้นใช้แม่แรงแบบมือหมุนในออกแรงดันกล่องส่วนบนเพื่อเลื่อนตัวอย่างทำการวัดแรงด้วย load cell และวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย displacement transducer เมื่อทำการทดสอบจนตัวอย่างวิบัติแล้วจากนั้นขุดดินด้านข้างเพื่อเปิดด้านหนึ่งของกล่องเลื่อนออก ลอกดินออกจาก SCC ออกอย่างระมัดระวังเพื่อบันทึกลักษณะการวิบัติของ SCC



รูปที่ 11 กล่องทดสอบเลื่อนตรงสำหรับใช้ทดสอบเงื่อนไขดินเสริมด้วย SCC ในสนามในงานวิจัยนี้



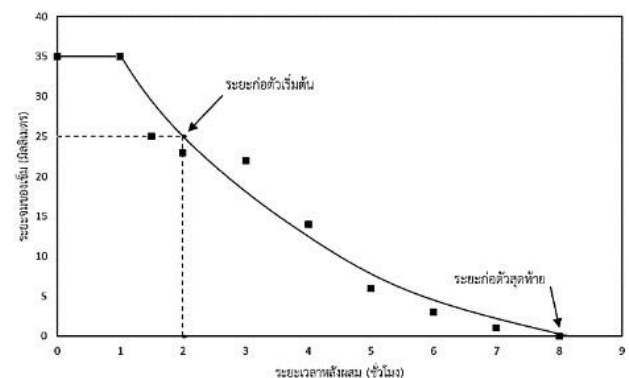
รูปที่ 12 ภาพถ่ายเครื่องมือทดสอบเลื่อนตรง

การสร้างแบบจำลอง SCC จากการจัดเรียงแบบ tangent และแบบ secant ที่ส่งผลต่อความต่อเนื่องของ SCC นั้น โดยใช้วิธีการทดสอบโดยเพิ่มไวกแคท เพื่อหาระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการวางแผนเวลาให้เหมาะสมในการก่อสร้าง ดินเหนียวที่ใช้ได้จากแปลงทดสอบแบบจำลอง SCC โดยมีอัตราส่วนผสมดินซีเมนต์เป็น 180 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ w/c เท่ากับ 1.0 และปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซึ่งเพิ่มไวกแคทมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 2 ระยะได้แก่ เวลาก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และเวลาก่อตัวสุดท้าย (final setting time)

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลเนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 13 ผลการทดสอบเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์โดยใช้เข็มไวกแคท พบว่าเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์เริ่มต้นคือ 2 ชั่วโมง ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของดินซีเมนต์เพสต์คือ 8 ชั่วโมง โดยระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของดินซีเมนต์เพสต์นั้นนานกว่าการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่กำหนดในมาตรฐาน มอก. 15-2547 ซึ่งระบุให้การก่อตัวของซีเมนต์เพสต์สุดท้ายต้องไม่เกิน 6 ชั่วโมง 15 นาที สาเหตุเนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีส่วนผสมของดินเหนียวและมีปริมาณน้ำที่อยู่ในดินเหนียวเพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำที่ผสมกับปูนซีเมนต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ระยะเวลาเว้นช่วงก่อสร้างระหว่างต้นของกรณี 2SCC-T24 และ 2SCC-S24 เป็น 24 ชั่วโมง ซึ่งเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่ดินซีเมนต์มีการก่อตัวแล้วอย่างแน่นอน ซึ่งเวลาก่อสร้างที่น้อยกว่าเวลาการก่อตัวมักไม่พบในงานก่อสร้างจริง เนื่องจากการก่อสร้าง SCC หากไม่ก่อสร้างต่อเนื่องกัน ในการเว้นช่วงก่อสร้างทำให้ SCC ต้นถัดมาที่ก่อสร้างหลังจาก SCC ต้นที่สร้างไว้แล้วมีอายุเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 13 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของดิน-ซีเมนต์เพสต์ ของงานวิจัยนี้

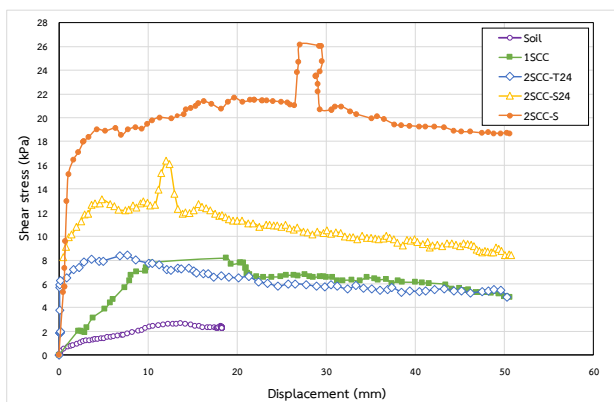
4.2 หน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

การทดสอบหน่วยแรงเฉือนแรงการเคลื่อนตัวในแนวราบของ SCCW จากการสร้างแบบจำลอง SCC ในแปลงทดสอบที่ทำการผสมเชิงกลแบบเปียกระหว่างดินเข้ากับผลปูนซีเมนต์ที่ทำการบ่มไว้จนมีอายุ 28 วัน โดยใช้กล่องเลื่อนตรงขนาดใหญ่ทดสอบระดับที่ระนาบเลื่อนเดียวกัน จากการทดสอบเลื่อนตรงขนาดใหญ่ของดินเดิม และดินที่เสริม SCC ทั้ง 4 รูปแบบ คือ 1SCC , 2SCC-T24, 2SCC-S24, 2SCC-S หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวราบ พบว่า ดินธรรมชาติ หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเป็น 2.68 kPa, กรณี 1SCC หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเป็น 8.18 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 19 มิลลิเมตรจากนั้นลดลงเหลือ 6.48 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 24

มิลลิเมตร, กรณี 2SCC-T24 หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเป็น 8.48 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 8 มิลลิเมตรจากนั้นลดลงเหลือ 5.78 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 34 มิลลิเมตร, กรณี 2SCC-S24 หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเป็น 16.50 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 12 มิลลิเมตรจากนั้นลดลงเหลือ 11.97 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 14 มิลลิเมตร, กรณี 2SCC-S หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเป็น 26.06 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 29 มิลลิเมตรจากนั้นลดลงเหลือ 20.71 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 29.4 มิลลิเมตร

หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวราบ จากการเพิ่มแรงต่อแบบจำลอง SCC โดยใช้แม่แรง เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของ SCC เห็นได้ว่า 1SCC กำลังรับแรงดัดสูงกว่า 1SCC เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้น แต่มีกำลังรับแรงดัดน้อยกว่า 2SCC-S24 เป็น 2 เท่าที่เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากกรณี 2SCC-T24 ก่อสร้างโดย SCC เรียงกันแบบผิวสัมผัสกัน แรงที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งใน 2SCC-S ก่อสร้างด้วย SCC สองชั้นเรียงแบบขบกัน เกิดจากหน่วยแรงยึดเกาะในการเชื่อมประสานในแนวรอยต่อของ SCC กำลังรับแรงดัดของ SCC ที่สุดโดยสูงเป็น 4, 3, 2 เท่าของ 1SCC, 2SCC-T24, 2SCC-S24

จากรูปที่ 14 กราฟแสดงพฤติกรรมของหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นใน SCCW จากการใช้แม่แรงให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยที่ 1SCC อัตราเฉือนที่ 14 mm/นาทีก, 2SCC-T24 อัตราเฉือนที่ 10 mm/นาทีก, 2SCC-S24 อัตราเฉือนที่ 8 mm/นาทีก และ 2SCC-S อัตราเฉือนที่ 7 mm/นาทีก เนื่องจากเวลาเฉลี่ยในการเฉือนเท่ากันแต่อัตราการเฉือนต่างกัน ทำให้จุดวิบัติมีระยะการเคลื่อนตัวต่างกัน ช่วงการเคลื่อนตัวต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร SCCW มีกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยเท่ากันทั้ง 2 รูปแบบ 1SCC และ 2SCC-T24 เนื่องจากแรงเฉือนที่กระทำต่อแบบจำลองยังไม่ก่อให้เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามแนวยาวของ SCCW แต่เมื่อเพิ่มแรงเฉือนการเคลื่อนตัวในแนวราบเกินกว่า 10 มิลลิเมตร กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดลดลงจน SCC เกิดการวิบัติ และในส่วนของ 2SCC-S24 และ 2SCC-S หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยของ SCCW มีค่าสูงขึ้น จนถึงจุดครากหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยของ SCCW จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากสามารถต้านทานโมเมนต์ดัดได้ต่อเนื่อง จนถึงค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดแล้ว SCCW จึงเกิดการวิบัติ

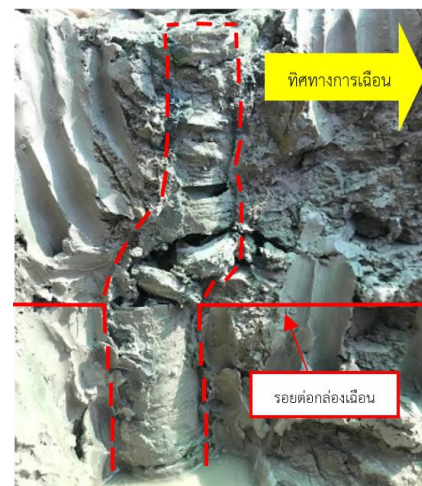


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับระยะเคลื่อนตัวแนวราบของการทดสอบเฉือนตรงกับตัวอย่างดินเหนียวที่เสริมด้วย SCC

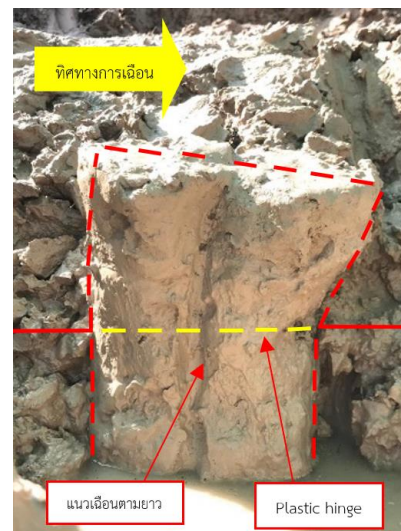
4.3 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์

จากการเปิดด้านข้างของกล่องเฉือนขนาดใหญ่เพื่อศึกษารูปแบบการวิบัติของดินและของ SCCW ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า 1SCC ดังรูปที่ 15 กำลังต้านทานแรงดัดของดินสูงกว่าที่ SCC รับได้ ทำให้เกิดการวิบัติ

แบบหัก จากรูปที่ 16 2SCC-T24 จัดเรียงแบบ SCC 2 ชั้นเรียงแบบสัมผัส เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากเพิ่มแรงกระทำต่อกล่องเฉือนทำให้เกิดแรงดัดภายใน SCCW เมื่อแรงดัดภายในดินเหนียวอ่อนที่มีแรงกระทำต่อ SCCW สูงเกินกว่าที่ SCCW สามารถรับได้ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่เฉือนให้ SCC แยกออกจากกันเป็นแนวเฉือนตามยาว (shear failure along column) และทำให้เสถียรภาพของ SCC ลดลงจนเกิดการวิบัติแบบหัก (plastic hinge) บริเวณหน้าเบื่อน ในการก่อสร้าง SCC แบบ 2SCC-S24 ดังรูปที่ 17 เป็นการก่อสร้าง SCC 2 ชั้นเรียงแบบขบกันเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เกิดเป็นการวิบัติแบบเฉือนตามแนวยาวจากลักษณะการไม่ประสานกันของรอยต่อของ SCC ที่เกิดจากโมเมนต์ดัดถึงแม้จะมีระยะขบกันของ SCC แต่ไม่เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ และในส่วนของ 2SCC-S ดังรูปที่ 18 ก่อสร้างแบบ SCC 2 ชั้นเรียงแบบขบกันก่อสร้างต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าในแนวรอยต่อ SCCW ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามขวาง (shear failure across column) เนื่องจากกำลังต้านทานแรงดัดภายใน SCC มีมากพอที่สามารถต้านทานโมเมนต์ดัดได้โดยไม่เกิดการวิบัติแบบหัก



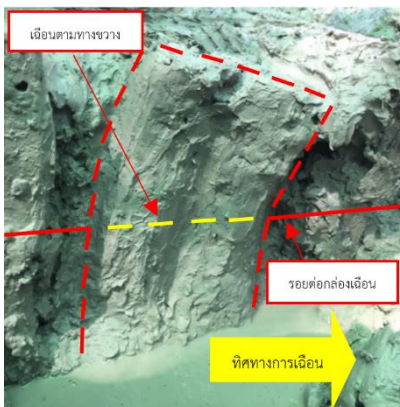
รูปที่ 15 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มรับแรงดัดแบบ 1SCC เป็นแบบ shear failure along column



รูปที่ 16 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงดัดแบบ 2SCC-T24 เป็นแบบ shear failure along column และเกิด plastic hinge

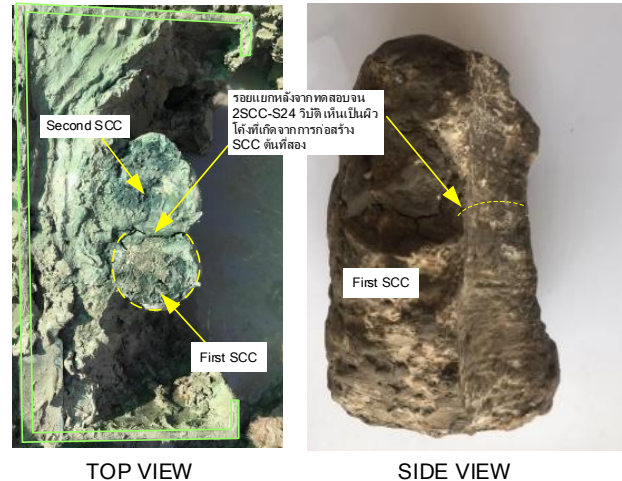


รูปที่ 17 รูปแบบการวิบัติแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงด้านข้าง แบบ 2SCC-S24 เป็นแบบ shear failure along column และเกิด plastic hinge



รูปที่ 18 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงด้านข้าง แบบ 2SCC-S เป็นแบบ shear failure across column

รูปที่ 19 จากการศึกษาค้นคว้าผลเนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของ SCC พิจารณาช่วงเวลาทั้งช่วงเวลาก่อสร้างนานเกินกว่าระยะก่อก่อตัวสุดท้าย SCC ยึดเกาะประสานกันอย่างไม่สมบูรณ์และเกิดโมเมนต์ดัดที่ทำให้ SCC แยกออกจากกันเป็นรอยต่อระหว่าง SCC เห็นได้ชัดจากรอยหมุนของใบกวนดิน บริเวณรอยต่อของ SCC เนื่องจาก SCC ที่ก่อสร้างก่อนเกิดการแข็งตัวแล้ว เวลาที่เหมาะสมต่อการก่อสร้าง SCC อยู่ในช่วงไม่เกินกว่าระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 19 การวิบัติจากการก่อสร้างนานเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของ ดินซีเมนต์เพสต์

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในการทดสอบเฉือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม การก่อสร้าง SCC 1 ต้นกำลังรับแรงด้านข้างสูงเป็น 10 เท่าของดินเดิม
2. ในทดสอบแบบจำลอง SCCW ที่ก่อสร้างด้วยเครื่องผสมเชิงกลขนาดเล็กแบบเปียกในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติด้วยวิธีเฉือนตรงพบว่ากำลังรับแรงด้านข้างของ 2SCC-S ที่ก่อสร้างต่อเนื่องสูงขึ้นไปเป็น 2 เท่าของ 2SCC-S24 และเป็น 4 เท่าของ 2SCC-T24 ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง
3. รูปแบบการวิบัติจากการทดสอบแบบจำลองเห็นได้ว่ารูปแบบการวิบัติของ 2SCC-T24 และ 2SCC-S24 ที่เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมงเกิดการวิบัติแบบแนวเฉือนตามยาวจากการเกิดโมเมนต์ดัดที่เฉือนให้ SCC แยกออกจากกัน ในส่วนของ 2SCC-S เกิดการวิบัติแบบเฉือนทางขวาง ในแนวรอยต่อระหว่าง SCC ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน
4. ระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ โดยที่ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นคือ 2 ชั่วโมง และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายคือ 8 ชั่วโมง ซึ่งในการหยุดการก่อสร้างหรือทั้งช่วงเวลาก่อสร้างไม่นานเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณโสภณ โสมหุ้มแก้ว ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ใช้แปลงที่ดินทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณบุญญฤทธิ์ บุญเกิด และคุณณัฐดนัย ป้อมบุญมี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์ (2548), พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ลึกสำหรับงานโครงสร้างกันดิน, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] ณรงค์ ทศนนิพันธ์, อ่อง วิน เมือง, ธยานันท์ บุญรักษณ์, (2550), การลดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้วิธีการปรับปรุงกำลังโดยวิธีผสมเชิงกลแบบลึก, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, จ.พิษณุโลก

- [3] นฤทธิ์ ประกอบบุญ (2546), *วิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างในงานชุด*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] นิธิ ปรัชญาเศรษฐ (2554), *เสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของเชิงลาดดินเหนียวอ่อนมากที่เสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์*, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [5] พรพจน์ ต้นแสง, วิษณุ คงสมพจน์, วรายุทธ ไชยสุข, (2558), อิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อกำลังของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซีแคนท์, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 20*, จ.ชลบุรี
- [6] Brom B.B. (2004), *Lime and lime/cement columns, Ground improvement 2nd edition*, Spon press.
- [7] Larsson S. (1999), *Shear box apparatus for modelling chemical stabilized soil – introductory tests, Dry mix methods for deep soil stabilization*, Balkema.
- [8] Larson S. and Broms B. B. (2000), *Shear box model tests with lime/cement columns – some observations for failure mechanism*, Geoeng 2000, Melbourne, Australia.
- [9] Larsson S., Malm R., Charbit B., Ansell A. (2012) *Finite element modelling of laterally loaded lime-cement columns using a damage plasticity*, Computers and Geotechnics, 44 pp. 48-57, Elsevier
- [10] Tanseng P. (2012), *Soil-cement column wall with wall-strut to minimize ground movement for a road tunnel construction in Bangkok subsoil*, *World Tunnel Congress (WTC2012)*, Bangkok.