

อิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อกำลังของ
กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซีแคนท์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**INFLUENCE OF SHEAR STRENGTH ALONG SOIL-
CEMENT COLUMN ON STRENGTH OF SECANT
SOIL-CEMENT COLUMN WALL**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2015**

อิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อกำลังของ
กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซีแคนท์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ทิมปีงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิทยุ คงสมพจน์ : อิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อ
กำลังของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซีแคนท์ (INFLUENCE OF SHEAR
STRENGTH ALONG SOIL-CEMENT COLUMN ON STRENGTH OF SECANT
SOIL- CEMENT COLUMN WALL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์
ตันเส็ง, 84 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาแบบจำลองย่อส่วนของเสาเข็มดินซีเมนต์จัดเรียงแบบซี
แคนท์ ที่ผสมโดยใช้วิธีผสมเชิงกลระบบเปียก เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนว
ยาวของรอยต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีต่อกำลังของหน้าตัด โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดิน
ซีเมนต์สองต้นเรียงหล้อมกันด้วยมาตราส่วน 1 ต่อ 10 ในแปลงดินเหนียวอ่อนมากคงสภาพด้วย
เครื่องผสมขนาดเล็ก ในการก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์ได้เว้นระยะเวลาการก่อสร้างเป็น 0 ชั่วโมงและ
24 ชั่วโมง การทดสอบแบบจำลองใช้วิธีการเหือนตรงด้วยกล้องเหือนตรงขนาดใหญ่ซึ่งครอบ
แบบจำลองและดินรอบแบบจำลองบางส่วนไว้ การทดสอบกระทำเมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์มีอายุ 28
วัน ในงานวิจัยได้ทดสอบหาเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ และทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ
รอยต่อของดินซีเมนต์ที่เว้นระยะเวลาก่อสร้าง ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีทดสอบแบบเหือนตรง ผล
การทดสอบแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เว้นระยะเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมงมีรูปแบบการ
วิบัติเป็นแบบเหือนขวางแนวดินซีเมนต์ และมีกำลังต้านทานแรงเหือนสูงกว่าแบบจำลองที่เว้น
ระยะเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมงที่มีรูปแบบการวิบัติเป็นแบบเหือนตรงรอยต่อตามยาวและหักแบบมี
จุดหมุนพลาสติกในเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้น ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการก่อตัวของดินซีเมนต์
เพสต์ที่มีการก่อตัวสุดท้ายเป็น 13 ชั่วโมง ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อพบว่ากำลัง
รับแรงเฉือนของรอยต่อแปรผกผันกับเวลาทิ้งช่วงการก่อสร้าง งานวิจัยยังได้เสนอวิธีการหยุดการ
ก่อสร้างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อให้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์มีกำลังต้านทานต่อแรงดันดิน
สูงสุด

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

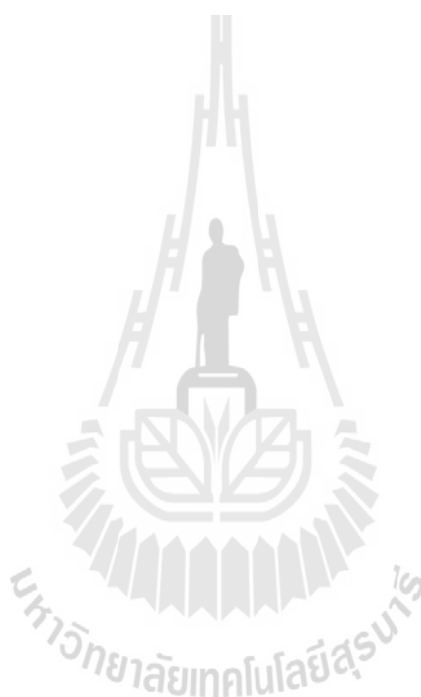
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WISSANU KONGSOMPOJ : INFLUENCE OF SHEAR STRENGTH
ALONG SOIL-CEMENT COLUMN ON STRENGTH OF SECANT SOIL-
CEMENT COLUMN WALL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
PORNPOT TANSENG, Ph.D., 84 PP.

SOIL SEMENT COLUME/ SECANT /WET MIXING / SOFT CLAY

The thesis presents the study of a reduced scale model test of the secant soil cement column row constructed with wet process mechanical mix to study the influence of shear strength along soil cement column on strength of column wall. The model consists of two soil cement column constructed with overlapping. The model is constructed with 1 to 10 scale in very soft soil plot. The construction times between the first column and the second column are 0 hours and 24 hours. The model is tested with a large direct shear box which cover the model and some untreated soil. The test was done when the age of soil-cement column is 28 days. The research also determine setting time of soil-cement paste and determine strength at the construction interface by using laboratory direct shear test. The results show that the shear resistance of the model with continuous construction is higher than the model with 24 hours discrete construction. The mode of failure of the model with continuous construction is shear across the soil cement column row while the flexure failure occurs after shear failure along column for discontinuous construction. The plastic hinges are observed in the column in the discontinuous construction model. The results coincide with the setting time of soil cement paste which is xxxx hours. The strength of interface between soil-cements vary inversely with discrete construction time. The research also proposed

construction termination method for soil cement column wall to obtain the most effective earth pressure resistance.



School of Civil Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

วิษณุ คงสมพจน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 บริบทรสนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความเป็นมาเสาเข็มดินซีเมนต์.....	4
2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์.....	5
2.3 ปฏิกริยาของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์.....	6
2.4 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน	7
2.4.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์	7
2.4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์	9
2.4.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์.....	10
2.4.4 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีผสมลึก	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.5	วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์.....	13
2.5	การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก	17
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึก	20
2.7	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม	25
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์	29
2.9	ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (Setting time of cement paste).....	38
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.1	บทนำ.....	39
3.2	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน	40
3.3	การเลือกบริเวณทดสอบ	40
3.4	เครื่องมือผสมขนาดเล็ก	40
3.5	การผสมเสาเข็มดินซีเมนต์จำลองในสนาม	41
3.6	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามโดยใช้เครื่อง Large Scale Direct shear Test	43
3.7	ขั้นตอนการทดสอบ.....	44
3.8	การทดสอบ Setting Time ของดินซีเมนต์เพสต์โดยวิธีไวแคท.....	47
3.9	การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อ ระหว่างดินซีเมนต์โดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test)	47
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1	คุณสมบัติของดินที่ใช้ในงานวิจัย	49
4.2	ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ผสมในสนาม	50
4.3	ผลทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์.....	50
4.4	เปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบจำลองที่ไม่ได้หล่อในที่	54
4.5	การก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6	กำลังต้านทานแรงเฉือนระหว่างรอยต่อคินซีเมนต์เพสต์ในห้องปฏิบัติการ.....	57
4.7	รูปแบบการวิบัติของรอยต่อของคินซีเมนต์เพสต์.....	60
4.8	เปรียบเทียบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อกับ (Yoshida 1996).....	64
4.9	แนวทางการหยุดการก่อสร้างที่เหมาะสม.....	67
5	บทสรุป	
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	69
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	74
ประวัติผู้เขียน	84



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โมดูลัสคินเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังก่อสร้าง SCC.....	22
2.2 ค่า Interface shear strength ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 10%, 15%, 20%.....	36
4.1 เปรียบเทียบ Area ratio ของงานวิจัยนี้กับ นิธิ (2554).....	56
4.2 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของคินซีเมนต์ที่ระยะเวลาก่อสร้าง ที่ช่วงก่อสร้างต่างๆจากการเคื่อนตรง.....	63
4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติในงานวิจัยนี้กับ Yoshida.....	65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	SCC หลุดออกจากกันทำให้เห็นรอยต่อที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเสาเข็มดินซีเมนต์..... 2
1.2	SCC ที่ก่อสร้างต่อเนื่องกัน เห็นรอยต่อระหว่าง SCC แต่ไม่หลุดแยกจากกัน..... 2
2.1	ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ..... 5
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ%สารผสมเพิ่ม..... 7
2.3	แสดงรูปแบบต่างๆ ในการประยุกต์ใช้ Cement Column..... 12
2.4	วิธีการผสมแบบ Wet Mixing Method..... 14
2.5	วิธีการผสมแบบ Dry Jet Mixing Method..... 15
2.6	ใบพัดผสมของ Dry Jet Mixing Method..... 16
2.7	ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์..... 18
2.8	ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน..... 19
2.9	รูปแสดงการเคลื่อนตัวของหลังคาออกหมด..... 20
2.10	การใช้การผสมเชิงกลแบบล็อกป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Diaphragm wall..... 21
2.11	การใช้การผสมเชิงกลแบบล็อกเพื่อก่อสร้างกำแพงป้องกันคลื่น..... 22
2.12	รูปตัดตามยาวของโครงการ โดยแสดงระดับของการขุด ระบบกำแพงกันดิน และตำแหน่งพื้นชั้นใต้ดิน..... 23
2.13	รูปตัดขวางและการจัดเรียงกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ของการขุดดินลึก 8.5 m แบบไม่เหลื่อม(Tangent) เพื่อก่อสร้างประตูระบายน้ำ..... 24
2.14	กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ secant สำหรับการขุดดินลึก 7.65 m เปรียบเทียบกับการเคลื่อนตัวของกำแพง SCC แบบ สำหรับขุด ดินลึก 8.5 m..... 25
2.15	รูปแบบการวิบัติของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์..... 26
2.16	กำลังรับแรงเฉือนบริเวณรอยต่อ..... 27
2.17	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก..... 28
2.18	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน..... 28
2.19	รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก..... 29
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่าง Compressive Strength กับ Total mixing work..... 30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและจำนวนรอบหมุน.....	30
2.22 วิธีการผสมตัวอย่างทดสอบด้วยวิธี Dry Mix.....	31
2.23 รูปแบบการทดสอบของกล่องเฉือน.....	32
2.24 รูปแบบการวัดของ Lissan.....	32
2.25 รูปแบบกล่องเฉือนขนาดใหญ่ของนิธิ.....	33
2.26 รูปแบบการวัดของวัสดุผสม.....	33
2.27 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับความลึกเสาเข็ม.....	34
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength กับการเคลื่อนตัว.....	35
2.29 รูปที่ 2.28 การทดสอบ Direct shear Test ระหว่าง Soil cement กับ Mortar.....	36
2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ ปริมาณปูนซีเมนต์กับ 10 %.....	37
2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ปริมาณ ปูนซีเมนต์กับ 15 %.....	37
2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ปริมาณ ปูนซีเมนต์กับ 20%.....	38
3.1 ผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.2 แบบของหัวเจาะเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเล็ก.....	40
3.3 หัวเจาะเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเล็ก.....	41
3.4 ขั้นตอนสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม.....	42
3.5 แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ในพื้นที่ทดสอบเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ.....	42
3.6 แบบกล่องเฉือนทางด้าน Side view.....	43
3.7 รูปที่แบบกล่องเฉือนทางด้าน Top view.....	43
3.8 เครื่องมือทดสอบ.....	44
3.9 นำกล่องมาไว้ด้านบนให้คร่อมตัวอย่าง.....	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 หัวเสาเข็มดินซีเมนต์มีระยะเดียวกับปลายกล่องด้านบน.....	45
3.11 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์	
Top view.....	45
3.12 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดในเครื่องทดสอบ.....	46
3.13 เครื่องมือทดสอบ Setting time by vicat.....	47
3.14 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างรอยต่อ.....	48
4.1 ผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะบริเวณทดสอบ.....	49
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างด้วยเครื่องผสมขนาดเล็ก.....	50
4.3 ผลการทดสอบเนื้อตรงด้วยกล่องเนื้อตรงขนาดใหญ่ในสนาม.....	51
4.4 การวิบัติของเสาเข็มที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับโหมดการวิบัติแบบขวางแนว SCC ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสนอ โดย Broms (2004).....	52
4.5 การวิบัติของเสาเข็มที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 24 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับโหมดการวิบัติเนื้อตามแนวยาว SCC ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสนอ โดย (Broms, 2004).....	52
4.6 แบบจำลองหลังการวิบัติ , (a) กรณีทิ้งช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง ไม่เกิดการแยกตัวตามแนวยาว, (b) กรณีทิ้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมง เกิดการแยกตัวตามแนวยาว.....	53
4.7 ภาพถ่ายการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเว้นระยะห่าง 1.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปรากฏจุดหมุนพลาสติกในแบบจำลอง นิธิ.....	54
4.8 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับนิธิ.....	55
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับระยะจมของเข็ม.....	57
4.10 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ผสมในห้องปฏิบัติการ.....	58
4.11 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างของหน่วยแรงกดทับ 64.5 กิโลปาสคาล.....	59
4.12 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง ของหน่วยแรงกดทับ 129 กิโลปาสคาล.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 0 ชั่วโมง.....	61
4.14 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 3 ชั่วโมง.....	61
4.15 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 12 ชั่วโมง.....	61
4.16 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 24 ชั่วโมง.....	62
4.17 ความสัมพันธ์หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อกับหน่วยแรงกดทับ.....	62
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อระหว่าง SCC กับระยะเวลาที่ช่วงก่อสร้าง.....	64
4.19 เปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเกาะแต่ละเวลาในงานวิจัยนี้กับ (Yoshida 1996).....	65
4.20 ตัวอย่างบริเวณรอยต่อที่วิบัติ Yoshida (1996).....	66
4.21 ตัวอย่างวิบัติของรอยต่อ งานวิจัยนี้.....	66
4.22 กำแพงกันดินที่มีความหนา b.....	67
4.23 กำแพงเมื่อเกิดการเลื่อนตามยาวระหว่างแกนสะเทิน.....	67
4.24 แนวทางการกำหนดรอยต่อเพื่อการหยุดการก่อสร้างกรณีที่ระยะเวลาก่อสร้าง เกินกว่าระยะก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์.....	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

W_n	=	ปริมาณความชื้น
LL	=	ขีดจำกัดเหลว
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก
PI	=	ดัชนีความเหนียวของดิน
E_u	=	โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ
S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
q_u	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ถูกจำกัด
ϵ	=	อัตราส่วนปัวซอง
w'	=	ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน
τ'_{vo}	=	หน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวตั้ง
x	=	หน่วยน้ำหนักดิน
M	=	Modulus multiplier
P	=	แรงที่กระทำในทิศทางตั้งฉาก
A	=	พื้นที่หน้าตัด
\dagger	=	ความเค้นตั้งฉาก
v	=	ความเครียดตั้งฉาก
U	=	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาด
L_0	=	ความยาวเริ่มต้น
E	=	โมดูลัสของยังส์
G_s	=	ความถ่วงจำเพาะของดิน
SCC	=	เสาเข็มดินซีเมนต์
TSCC	=	Tangent Soil-cement column
SSCC	=	Secant soil-cement column
DMM	=	Deep Mixing Method
DCM	=	การปรับปรุงดินโดยวิธีผสมลึก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในประเทศไทยมีการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์มาปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนเพื่อให้สามารถต้านทานแรงด้านข้าง ได้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 ในการออกแบบมีความแตกต่างของการจัดเรียง ซึ่งแบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่การจัดเรียงแบบแท่นเจนท์ (ไม่มีการซ้อนทับ) และการจัดแบบซีแคนต์ (มีการซ้อนทับ) โดยส่วนใหญ่การออกแบบให้ SCCW เป็นระบบ T-SCCW (ไม่มีการซ้อนทับ) มักจะเกิดการวิบัติ เนื่องจากการไม่ซ้อนทับกันทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์แยกเป็นอิสระ จึงมีกำลังต้านทานต่อโมเมนต์ดัดที่ต่ำ การออกแบบให้ SCCW เป็นระบบ S-SCCW (มีการซ้อนทับ) ทำให้กำแพงมีกำลังรับ แรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการประสานของ SCC ในระหว่างการก่อสร้าง ทำให้มีกำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดที่สูงขึ้น

การออกแบบให้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ซีแคนต์ สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาได้แก่กำลังต้านทาน ต่อโมเมนต์ดัดของกำแพง ในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการศาสตร์วัสดุ นั้นได้ พิจารณาสมมุติให้เนื้อ SCCW เป็นเนื้อเดียว ในบางกรณีการเหลื่อมกัน เสาเข็มดินซีเมนต์อาจไม่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ สาเหตุหลักเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของการก่อสร้าง การก่อสร้างเสาเข็มต้นที่อยู่ติดกันจะทำลายเนื้อเสาเข็มเดิมที่มีการก่อตัวแล้วบางส่วนเพื่อให้เกิดระยะเหลื่อม ดินซีเมนต์เพสต์ต้นใหม่จะไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกับเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นที่สร้างไว้ก่อน รูปที่ 1.1 เป็นร่องที่เสาเข็มดินซีเมนต์แยกตัวโดยที่ไม่มีการประสานระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์สองต้น กำลังต้านทานการเฉือนส่วนใหญ่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มดินซีเมนต์ สาเหตุเกิดจากการก่อสร้างที่เว้นระยะก่อสร้างเป็นเวลานานเกินกว่าเวลาที่ก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ รูปที่ 1.2 รูปตัดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของ SCC เห็นได้ว่าเนื้อ SCC มีการประสานเป็นเนื้อเดียวกัน



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาเครื่องผสมเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเล็กและพัฒนาเครื่องตรงขนาดใหญ่สำหรับใช้ก่อสร้างและทดสอบแบบจำลองย่อส่วนของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม
2. ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ (Secant-SCCW) ที่ก่อสร้างแบบต่อเนื่องและก่อสร้างแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้การทดสอบแบบเดือนตรงกับแบบจำลองย่อส่วนในสนาม
3. เพื่อศึกษาปัจจัยเนื่องจากระยะเวลาก่อสร้างที่ส่งผลต่อกำลังแรงเฉือนของรอยต่อระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วนขนาด 1:10 ที่มีระยะทิ้งช่วงเวลา 0 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง กับดินตัวอย่างในสนามด้วยการผสมเชิงกลแบบเปียกและทดสอบในสนาม
2. ใช้ดินเหนียวอ่อนในอำเภอ บางปะอิน จังหวัด สมุทรปราการ ในการสร้างแบบจำลอง
3. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบพฤติกรรมของการจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีระยะเหลื่อมกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นำพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์มาวิเคราะห์นำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและก่อสร้างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ให้มีค่ากำลังต้านทานสูงสุด

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

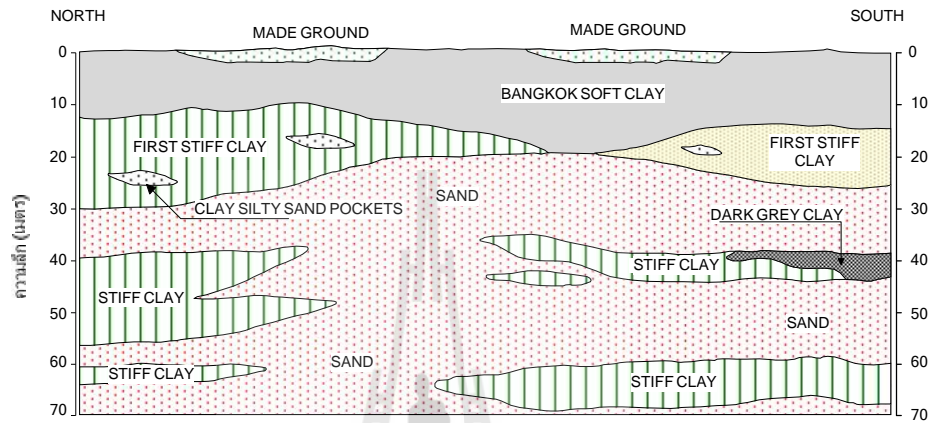
2.1 ความเป็นมาเสาเข็มดินซีเมนต์

สมโชค ประเสริฐวิจิตรกุล (2545) กล่าวว่า เสาเข็มดินซีเมนต์เริ่มใช้ในประเทศสวีเดนและประเทศญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2513 เป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการใช้ปูนขาวและซีเมนต์ โดยประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกที่ใช้วิธีการผสมแบบลึกเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนของโครงสร้างบริเวณท่าเรือ และปัจจุบันได้นำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับงานคันทาง งานฐานรากอาคารและถังเก็บน้ำ โดยในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์เป็นที่นิยมมากกว่าการปรับปรุงด้วยปูนขาว เช่นเดียวกับประเทศไทย จากที่ปรากฏหลักฐานเริ่มมีการใช้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 และจากนั้นก็มีการนำมาประยุกต์ใช้กับคันทางของถนน งานฐานรากอาคารต่างๆ และงานซ่อมแซมฐานรากเพื่อที่จะลดการเกิดการทรุดตัว

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

จากข้อมูลของ ว.ส.ท. (2520) ระบุว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ เป็นดินที่มีความลึกประมาณ 10-18 เมตร เป็นดินที่มีขนาดเม็ดเล็กมาก ถูกพัฒนาจากทางตอนเหนือของกรุงเทพมหานคร เมื่อกระแสน้ำมาปะทะกับน้ำทะเลในอ่าวไทย ทำให้เกิดกระแสน้ำลดความเร็วลง ดินที่ถูกพัดพามาจึงตกตะกอนเป็นบริเวณกว้าง บางส่วนถูกน้ำพัดพาลงสู่อ่าวไทย เมื่อน้ำขึ้นดินส่วนที่ตกตะกอนบริเวณอ่าวไทยไม่หมดก็จะถูกน้ำพัดพามาตกตะกอนบริเวณปากอ่าว เช่น บริเวณกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม ชลบุรี และฉะเชิงเทรา เป็นต้น ดังนั้นดินบริเวณนี้จึงเป็นดินที่มีขนาดเม็ดเล็กมาก โดยมีคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น มีปริมาณความชื้น (Water content) ที่สูง

Tonyagate, (1978) ได้รายงานปริมาณความชื้นโดยประมาณของชั้นดินเหนียวอ่อน เท่ากับ 65-90% ชิดจำกัดเหลว (Liquid limit) มีค่าสูงโดยมีค่าใกล้เคียงกับ Water content คือมีค่าระหว่าง

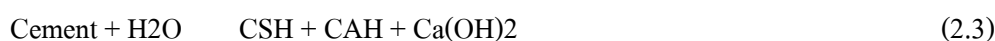


2.3 ปฏิกริยาของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์

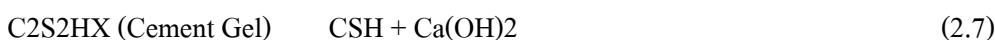
Lambe, Mitchell และ Moh (1959) และ Moh (1962) ได้อธิบายไว้ว่าสารประกอบ 4 อย่างที่มีอยู่ในซีเมนต์อันได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S), ไดแคลเซียม (C2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C3A) และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C4AF) เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH), และรีลีสไฮเดรทโลม (ปูนขาว) ประบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับเชื่อมยึด นอกจากนี้ รีลีสไฮเดรทโลม (ปูนขาว) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ความเป็นด่าง (pH) ของ Pore Water เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เกิด Colloidal Gel หรือ Cement Gel เกิดการรวมตัวแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุของการบ่มในมวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบเมื่อเกิด ซีเมนต์ไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดดินจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่อุดเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน โดยแรงเชื่อมยึดติดกัน จะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical ของ CSH และ CAH ที่อนุภาคดินส่วนดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบทั้งด้าน Mechanic Interlock และ ChemicalCementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical Cementation นั้น เกิดปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับซิลิกาและอะลูมินา ที่อยู่ตามผิวเม็ดดิน ส่วนสารประกอบ CSH และ CAH ที่อยู่รอบเม็ดดินจะทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน

Herzog และ Mitchell (1963) ได้กล่าวถึงถึงการเกิดซีเมนต์ไฮเดรชันว่าในช่วงแรกจะมีการเกิด CSH และ CAH ขึ้นมาก่อน หลังจากนั้น ปฏิกริยา ซิลิกาและ อะลูมินา ที่มีอยู่ในเม็ดดินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจาก รีลีสไฮเดรทโลม (ปูนขาว) จะเป็นกระบวนการที่สองที่ทำให้เกิด CSH และ CAH ตามมาซึ่งต้องใช้ระยะเวลายาวนานกว่า จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะสูงตามอายุการบ่ม ที่เพิ่มขึ้น

Moh (1965) ได้เขียนปฏิกริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 12.6 จะมีปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดขึ้นดังนี้

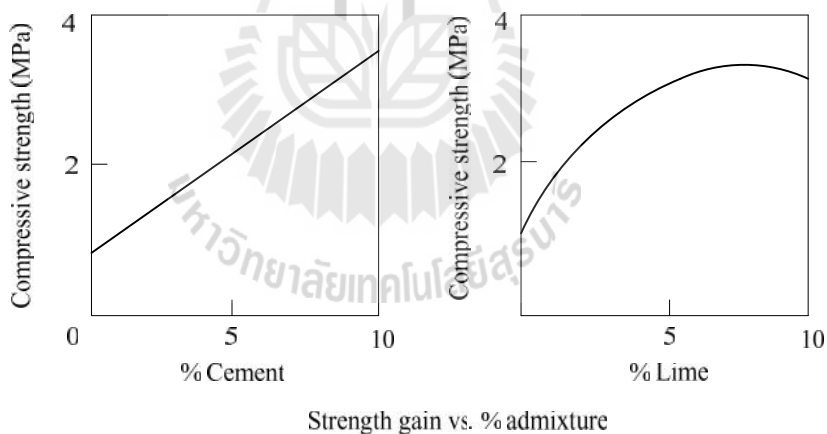


2.4 การใช้เสาะเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน

การปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อนต้องมีการควบคุมคุณภาพเสาะเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วยหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบต่างๆที่ส่งผลต่อกำลัง รูปแบบการก่อสร้างตามแต่ละวิธี เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์

ก. ปริมาณซีเมนต์ (Cement content) การพัฒนากำลังของดินผสมซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ Metcalf (1977) พบว่าค่า Unconfined compressive strength, q_u ของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ จะแปรผันเชิงเส้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต่างกับปูนขาวที่มีความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยเมื่อผสมปูนขาวเกินกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ กำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.2



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

ข. ชนิดของปูนซีเมนต์ (Type of Cement) จากประเภทของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้มีการศึกษาและทดลองใช้ปูนซีเมนต์แต่ละชนิดผสมกับดินปรากฏว่าปูนซีเมนต์ประเภท 3 มีการพัฒนากำลังได้ดีกว่าประเภท 1 Felt, (1955) แต่อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ประเภท 1

ยังเป็นที่ยอมรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินมากกว่า เนื่องจากจัดหาง่ายและมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น

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

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

จ. ชนิดของแร่ในดิน (Soil Minerals) Saitoh (1985) ได้ศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการนำดินต่างชนิดกันมาทำการทดสอบด้วยวิธีเดียวกัน ปรากฏว่าผลที่ออกมามีความแตกต่างกัน โดยดินชนิดที่มีความสามารถทำปฏิกิริยา Pozzolanic สูงความแข็งแรงของดินซีเมนต์จะเกิดจากการรวมตัวของดินซีเมนต์ด้วยตัวเอง ในขณะที่ดินที่มีความสามารถทำปฏิกิริยา Pozzolanic ต่ำกว่าความแข็งแรงของดินซีเมนต์จะเกิดจากความแข็งแรงของเม็ดดินเอง ดังนั้นวิธีและเงื่อนไขในการปรับปรุงคุณภาพดินเดียวกัน ดินที่มีความสามารถมีปฏิกิริยา Pozzolanic สูงกว่าจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า Wissa (1964) ได้อธิบายไว้เช่นกันว่า ปริมาณของ Secondary Cementitious ของวัสดุเกิดขึ้นในช่วงปฏิกิริยา Pozzolanic ของอนุภาคดินเหนียวและ Hydrated Lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนและองค์ประกอบของแร่ในดินเหนียว แร่ในดินเหนียวประเภท Montmorillonite จะทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือซีเมนต์ ได้ดีกว่า Illite และ Kaolinite เพราะมีขนาดเล็กและจำนวนมากกว่า

ฉ. ค่า pH ในดิน (Soil pH) ดินที่มีค่า pH น้อยกว่า 12 ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง (Sherwood, 1968) เมื่อ $\text{C}_3\text{S}_2\text{HX}$ (Cement Gel) ได้ใช้ไปผลิต CSH และ Hydrates Lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จะมีส่วนทำให้กำลังของดินซีเมนต์ลดลงในจุดที่ได้ใช้วัสดุเชื่อมประสานที่แข็งแรงกว่า

(C3S2HX) ในการผลิตวัสดุในการเชื่อมประสานที่มีความอ่อนแอกว่า (CSH) ในระยะหลัง ดินที่มีค่า pH สูงจะมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic จากการที่เป็นตัวช่วยทำลายซิลิเกตและอลูมิเนตจากอนุภาคดินเหนียว

2.4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเมื่อผสมด้วยซีเมนต์

จากกลไกคุณสมบัติของดินเมื่อได้รับการผสมซีเมนต์ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น การเพิ่มปริมาณซีเมนต์จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพของดินดังต่อไปนี้

การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution) ผลผลิตจากการทำลายของ Hydration ของซีเมนต์ เป็นเหตุให้มีการจับกลุ่มของประจุไฟฟ้าในส่วนของช่องว่างแรงดันในช่องว่าง (Pore Pressure) และค่า pH จะเพิ่มขึ้น ประจุไฟฟ้า แคลเซียม (Ca^{++}) เข้าแทนที่ Monovalent Ions ที่มีแรงดึงดูดประจุลบที่ผิวของอนุภาคเม็ดดิน (Assarson, 1974) การจับกลุ่มของ Ca^{++} ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวทำให้ดินเหนียวมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculation) มีกำลังมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุมาจากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ เป็นผลให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน

ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในดินเหนียวทำให้เพิ่มความสามารถการซึมผ่านของน้ำในดิน เนื่องจากการก่อตัวของดินที่เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculated) ของอนุภาคดิน ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวผสมซีเมนต์จะลดเมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่ม ทั้งนี้เนื่องมาจากดินที่ไม่ได้ผสมซีเมนต์มาก่อน

ช่องว่างของน้ำ (Pore Water) รอบอนุภาคดิน อย่างไรก็ตามความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวผสมปูนขาวมีค่าเพิ่มขึ้นจากการที่เพิ่มขึ้นปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นค่า

ความเหนียวของดิน (Plasticity) โดยทั่วไปค่าขีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) ของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ ในขณะที่ทำให้ค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) มีค่าลดลง หรืออีกทางหนึ่งสามารถสรุปได้ว่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) ไม่ได้มีผลกระทบหรือมีบ้างเป็นส่วนน้อย ดังผลสรุปที่กล่าวว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการยุบอัดตัวของดินลดลง (Broms, 1986)

ความสามารถในการยุบอัดตัว (Compressibility) ค่าหน่วยแรงกดของดินจากการทดสอบ Consolidation Test ของดินซีเมนต์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ การยุบอัดตัวของดินชี้ให้เห็นว่า Stress Condition ของการยุบอัดตัวมีค่าน้อยกว่า Yield Stress ของการยุบอัดตัวเล็กน้อย

ในช่วงปลายขณะที่การยุบอัดตัวที่ Stress Condition ของการยุบอัดตัวมีค่ามากกว่า Yield Stress ที่เหมือนกัน (Suzuki,1982)

กำลังของดิน (Strength) การเพิ่มค่ากำลังการรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนส่วนหนึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าในดิน เมื่อ Monovalent Ions (เช่น Na^{++} และ K^{+}) ได้ถูกแทนที่โดย Multivalent Ions (Ca^{++}) ในส่วนนี้ทำให้เพิ่มค่ากำลังขึ้นทันทีทันใด จากการที่ดินมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculated) และการลดลงของปริมาณน้ำในดิน (Broms, 1984)

(Herzog,1963) ได้อธิบายการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินซีเมนต์ทั้งค่ามุมแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน (Friction Resistance) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ว่ามี 2 กระบวนการคือ ประการแรก เกิดจากการรวมตัวของซีเมนต์ระหว่างช่องว่างรอบๆ เม็ดดิน ซึ่งเป็นตัวหลักที่ทำให้มีการยึดประสานระหว่างเม็ดดิน (Interlocking) เรียกว่ามุมแรงเสียดทาน () ของดินซีเมนต์ ประการที่สองเกิดจากการลดลงของปริมาณน้ำในดิน ทำให้ขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดลดลงจากการที่มีการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคดิน ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน แรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดดินนี้ยังเกิดจาก การเชื่อมประสานต่อเนื่องของดินซีเมนต์ (Secondary Cementitious Material) ซึ่งในส่วนนี้เรียกว่าแรงยึดเหนี่ยวของดินซีเมนต์ (Cohesive Component, c) การก่อตัวของดินซีเมนต์ในระยะหลังเป็นไปอย่างช้าๆ อาจจะเป็นเดือนเป็นปี ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากำลังของดินซีเมนต์โดยทั่วไปแล้วจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและหยุดเมื่อกระบวนการเชื่อมประสานของดินซีเมนต์มีความสมบูรณ์

2.4.3 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพดินทางวิศวกรรมโดยใช้วิธีการทางเคมีได้มีการประยุกต์ใช้งานกันมานานแล้วทั้งการปรับปรุงคุณภาพดินแบบดินและแบบลิก เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเบื้องต้นของดินให้ดีขึ้นเช่นดินที่มีกำลังแรงเฉือนต่ำและการยุบตัวสูง เป็นต้น ในการปรับปรุงคุณภาพดินมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ดิน มีความสามารถในการรับแรงเฉือนได้สูง อัตราการยุบตัวต่ำ ลดการบวมตัวและมีความคงทนมากขึ้น ปูนขาว (Lime) และ ปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นวัสดุเคมีที่นิยมใช้กันในการผสมมาเป็นเวลานานแล้วตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 ในประเทศสวีเดนและญี่ปุ่น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ผงซีเมนต์ในการผสมทั้งแบบแห้งเพียงจะมีรายงานว่าสามารถใช้งานได้เยี่ยมเมื่อปี ค.ศ.1980 วิธีการนี้เรียกว่าการผสมแบบแห้ง (DJM, Dry Jet Mixing) การนำเอาปูนซีเมนต์และปูนขาวมาทำการผสมแบบลิกในลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ ได้เริ่มขึ้นเมื่อกลางปี ค.ศ.1980 โดยได้เริ่มมีการศึกษาวิจัยในประเทศสวีเดน, ญี่ปุ่น และประเทศอื่นๆ มาเป็นเวลานานแล้ว สถาบันวิศวกรรมเทคนิคธรณีของประเทศสวีเดนและศาสตราจารย์ Bengt Broms ได้นำเอาเทคนิคดินซีเมนต์ปูนขาว (Lime Column) มาใช้งานปรับปรุงฐานราก รวมทั้งกันทางและงานขุดบนดินเหนียว

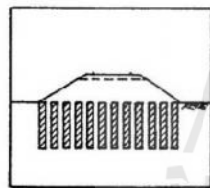
อ่อน ส่วนในประเทศญี่ปุ่นได้ประยุกต์ใช้วิธีการดังกล่าวในช่วงปลายปี ค.ศ.1970 โดยได้ริเริ่มและ พัฒนาใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินแบบลึก (Deep Mixing Method, DMM) มาใช้กับงานท่าเรือ และงานพัฒนาพื้นที่ชายฝั่ง ในปัจจุบันวิธีการ DMM ได้ประยุกต์ใช้ปรับปรุงงานฐานรากของ สิ่งก่อสร้างที่งานบนชั้นดินเหนียวอ่อน เช่น ดินคันทาง, อาคารและถังเก็บน้ำมัน สำหรับพื้นที่ใน เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้แนะนำไว้โดย (Broms,1986) ให้ใช้ปูนซีเมนต์เหมาะสมกว่าปูนขาว เนื่องจากมีราคาถูกกว่า การทำงานที่ง่ายกว่าเนื่องจากปูนขาวมี Slaked มากสำหรับพื้นที่ที่มีสภาพ อากาศร้อนและชื้น อีกทั้งปูนซีเมนต์ได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนได้สูงกว่าในขณะที่ปูนขาวให้ค่ากำลัง รับแรงเฉือนสูงสุดที่ปริมาณปูนขาวจำนวนหนึ่งเท่านั้น

2.4.4 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีผสมลึก

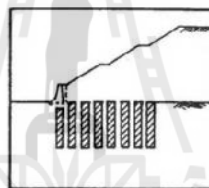
การใช้สารผสมเพิ่มเป็นที่นิยมใช้กันอย่างมากในการปรับปรุงคุณภาพดินทั้งใน บริเวณลึกและตื้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดิน เช่น กำลั้งและตลอดจนพฤติกรรมการเสีรูปกำลั้ง ที่เพิ่มขึ้น การยุบอัดตัวที่ลดลงหรือการเพิ่มความทนทานให้แก่ดินคุณสมบัติเหล่านี้ล้วนแต่เป็น วัตถุประสงค์หลักในการใช้สารผสมเพิ่มวิธีการผสมโดยใช้ซีเมนต์เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กัน อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ในเวลาต่อมา Cement Column ซึ่งเป็นการใช้ Cement Powder เป็นสารผสมเพิ่มได้ถูกพัฒนาขึ้นและมีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานจริงในปี ค.ศ. 1980 และ 1982 โดยกลุ่มของ (DJM Research Group,1984) ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.3 ในช่วงกลางปี ค.ศ. 1980 ซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการใช้ป็นสารผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินในบริเวณลึกของดิน เหนียวอ่อนโดยใช้เทคโนโลยีการก่อสร้างแบบใหม่ที่เรียกว่า Deep Mixing Method (DMM) ซึ่งถูก พัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่น โดยเริ่มแรก DMM ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการปรับปรุง Soft Ground ของท่าเทียบเรือ และในปัจจุบัน DMM ได้ถูกนำมาใช้ในงานฐานรากของโครงสร้างอาคาร เช่น Embankment, Building และ Storage Tank เป็นต้น Bruce (1998) ได้สรุปผลความเหมาะสมและ การนำไปประยุกต์ใช้ของวิธีการผสมลึกสามารถแบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม พื้นฐานในการนำไปใช้ได้ ดังต่อไปนี้

1. กำแพงทางชลศาสตร์ (Hydraulic Cutoffs) กำแพงจากวิธีการผสมลึกสามารถใช้ ป้องกันการซึมผ่านของน้ำโดยตลอดและได้กำแพงกันดิน เช่น เขื่อนหรือคันดินกันน้ำท่วม และการ ขุดทำชั้นใต้ดินในระดับลึกที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน

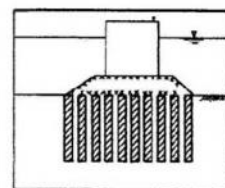
2. กำแพงโครงสร้าง (Structural Walls) กำแพงจากวิธีการผสมลึกที่มีการใส่เหล็ก เสริมกำลั้งสามารถใช้ป้องกันแรงดันดินที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างเนื่องจากการขุดที่ลึก เช่น ในการ เจาะหรือป้องกันอุโมงค์และชั้นใต้ดินระดับลึก



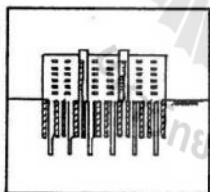
Prevent slope failures and reduce settlement in embankments and structures



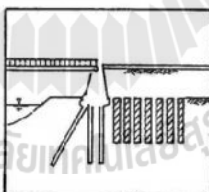
Increase the stability of slopes



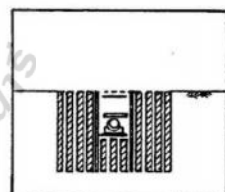
Increase the bearing capacity of soils and used as foundation to structures



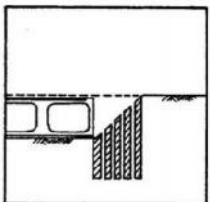
Increase the horizontal resistance of structures



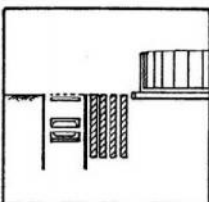
Reduce settlement and prevent slope failure of the abutments bridges



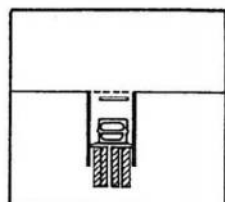
Prevent heaving and reduce the penetration length of sheet piles in excavations



Stabilize cut slopes



Prevent damage to the adjacent structures of construction sites



Prevent settlement of underground embedded structures

2.4.5 วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี โดยในแต่ละวิธีก็จะมีลักษณะและข้อได้เปรียบที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท โดยรูปแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

1. รูปแบบ Mechanical mixing method ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

- Wet mixing method

- Dry mixing method

2. รูปแบบ Jet grouting method โดยลักษณะของหัวฉีดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- ระบบท่อเดี่ยว (Single system)

- ระบบท่อกู่ (Double system)

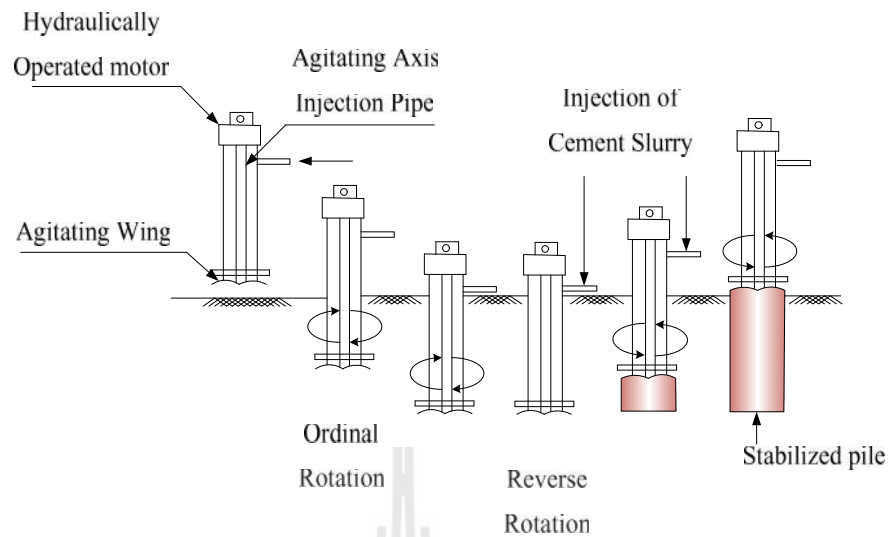
- ระบบสามท่อ (Triple system)

ในประเทศไทยนั้นวิธีผสมแบบเปียกได้รับความนิยมมากกว่าวิธีอื่นเนื่องจากขั้นตอนและเครื่องมือไม่มีความยุ่งยากดั่งนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเป้าไปยังการผสมเชิงกลแบบเปียกเท่านั้น โดยขั้นตอนผสมเป็นดังนี้

Mechanical mixing method วิธีนี้เป็นการใช้ใบพัดที่อยู่ตามแนวแกนเจาะ ช่วยในการผสมดินให้เข้ากันกับสารผสมเพิ่มที่ประกอบไปด้วย 2 สถานะของสารผสมเพิ่มคือ สถานะที่มีลักษณะเป็นน้ำปูน (Cement slurry หรือ Cement milk) จะเรียกว่า Wet mixing method และสถานะที่มีลักษณะเป็นซีเมนต์ผง (Cement powder) โดยทั่วไปจะเรียกวิธีการที่ใช้สารผสมเพิ่มลักษณะนี้ว่า Dry jet mixing method ซึ่งรายละเอียดของวิธีการต่างๆ อธิบายได้ดังนี้

ก) Wet mixing method

รูปแบบของวิธี Wet mixing จะเป็นการใช้น้ำปูนนำเข้าไปปรับปรุงดิน ซึ่งขบวนการก่อสร้างจะมีลักษณะคล้ายกันกับวิธี Dry jet mixing โดยอาจมีรูปแบบปลีกย่อยที่แตกต่างกันอยู่บ้าง โดยวิธีการนี้จะทำการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันขนาด 10-15 บาร์ ในขณะที่ก้านเจาะลง แล้วทำการตีควนด้วยใบพัดผสมไปพร้อมๆกันทำให้ดินและน้ำปูนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และในระหว่างชักก้านผสมขึ้น ใบพัดผสมจะทำการตีควนอีกครั้ง โดยเป็นการหมุนทวนกับการกดลงในตอนแรก ดังรูปที่ 2.4 เป็นลำดับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธี Wet mixing method



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผสมแบบ Wet mixing method (Miki,1985)

ข้อได้เปรียบของการผสมด้วยวิธี Wet mixing method

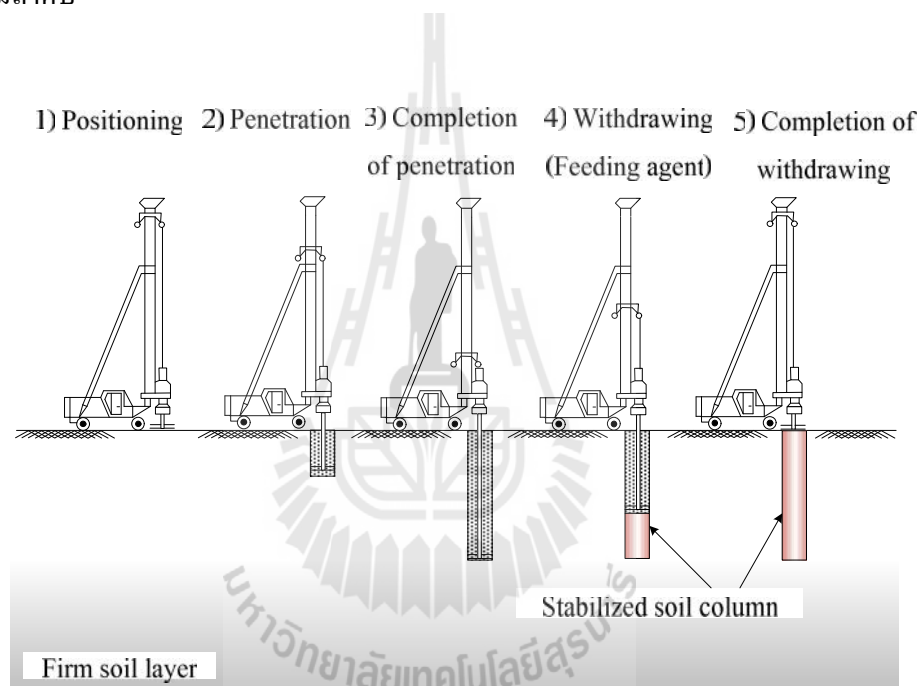
- ก) การกวนผสมให้ดินเข้ากับสารผสมทำได้ง่ายกว่าวิธีผสมแห้ง จึงทำให้เนื้อดินผสมซีเมนต์ที่ได้มีความสม่ำเสมอกว่า
- ข) สามารถใช้ผสมได้กับดินทุกชนิดโดยไม่ต้องปรับสัดส่วนผสม และขบวนการกวนผสมให้เหมาะสมกับดินแต่ละชนิด
- ค) การควบคุมคุณภาพทำได้ง่ายกว่าการผสมแห้ง เพราะสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่ได้

ข้อด้อยของการผสมด้วยวิธี Wet mixing method

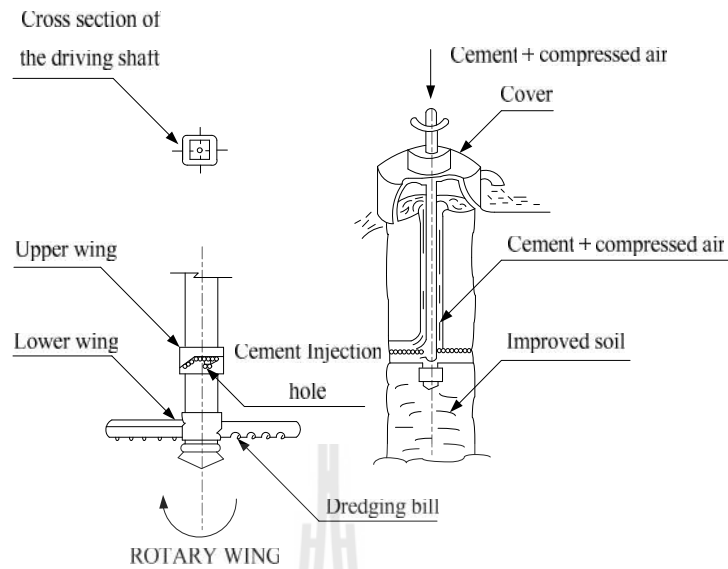
- ก) ในกรณีที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันจะมีกำลังต่ำกว่าระบบแห้ง เนื่องจากมีการเพิ่มน้ำให้เนื้อดินทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง และที่กำล้งของเสาเข็มเดียวกันจะใช้ปูนซีเมนต์มากกว่าวิธีผสมแห้ง
- ข) โดยปกติพื้นที่ก่อสร้างจะสกปรกกว่า เนื่องจากจะมีเศษน้ำปูนบริเวณปากหลุมเจาะ โดยเฉพาะวิธีการผสมเปียกที่ใช้ระบบความดันสูง ส่วนระบบความดันต่ำจะมีปัญหาน้อยกว่า
- ค) โดยทั่วไปแล้วจะมีอัตราการก่อสร้างช้ากว่าวิธีการผสมแห้ง

ข) Dry jet mixing method

(Chida,1982) นำซีเมนต์ผง (Cement powder) มาใช้ในการผสมแทนการใช้น้ำปูน โดยวิธีการ Deep mixing machine จะทำการตัดย่อยดินในขณะที่ใบพัดเคลื่อนที่ลง ใบพัดผสมจะมีลักษณะแตกต่างจากใบพัดตัดย่อยดิน เมื่อถึงความลึกที่เป็นปลายของเสาเข็มดินซีเมนต์ก้านเจาะจะทำการฉีดผงปูนตลอดความลึกชั้นดิน โดยผ่านท่อกระบอกฉีดที่ถูกอัดด้วยอากาศจากนั้นผงซีเมนต์จะถูกผสมโดยใบพัดผสมซึ่งจะเป็นการหมุนกลับทางของใบพัดในขาลง พร้อมกับการชักก้านผสมขึ้นสู่ผิวดินในอัตราคงที่ โดยขั้นตอนการผสมและลักษณะของใบพัดแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 วิธีการผสมลึกแบบ Dry jet mixing method (Miki, 1985)



รูปที่ 2.6 ใบพัดผสมของ Dry jet mixing method (DJM Research Group, 1984)

ข้อได้เปรียบของการผสมด้วยวิธี Dry jet mixing method

ก) ในกรณีที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน กำลังของเสาเข็มระบบแห้งจะสูงกว่า เพราะไม่มีการเติมน้ำในระหว่างการผสมทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ หรือในกรณีที่กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากัน วิธีการผสมแบบแห้งจะใช้ปูนซีเมนต์น้อยกว่าวิธีผสมแบบเปียก โดยแบบผสมแห้งจะใช้ปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่แบบผสมเปียกจะใช้ปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ข) ในสภาพหน้างานปกติเครื่องจักรจะทำงานได้ในอัตราที่เร็วกว่าวิธี Wet mixing method

ค) ไม่จำเป็นต้องจัดหาน้ำในการผสม และเหมาะสำหรับชั้นดินเหนียวที่มีเนื้อสม่ำเสมอ และมีความชื้นในดินสูงกว่า 60-70% ตลอดชั้นดิน

ง) พื้นที่ก่อสร้างสะอาดกว่า เนื่องจากไม่มีเศษน้ำปูนหลงเหลือบริเวณปากหลุมเจาะ

ข้อด้อยของการผสมด้วยวิธี Dry jet mixing method

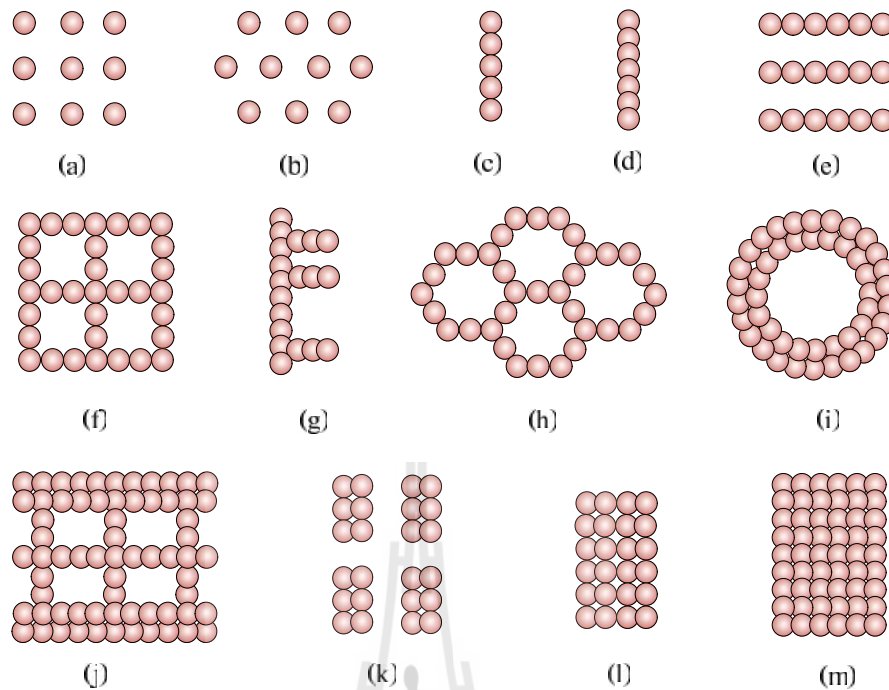
ก) การควบคุมปริมาณซีเมนต์ให้เข้ากับเนื้อดินทำได้ยากกว่าซึ่งอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของเสาเข็ม

ข) การควบคุมปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่ทำได้ยากกว่า ซึ่งอาจส่งผลต่อกำลังของเสาเข็ม

ค) เหมาะสมกับการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีปริมาณความชื้นในดินสูง

2.5 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก

(Topolnicki, 2004) ได้เสนอการเลือกรูปแบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับงานต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการประยุกต์ใช้งาน สภาพของสถานที่ก่อสร้าง อัตราส่วนปลอดภัยที่ต้องการ และราคาก่อสร้าง รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์มีลักษณะที่แตกต่างกัน รูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.7 โดยเสาเข็มดินซีเมนต์เดี่ยวที่มีรูปแบบการก่อสร้างแบบตาข่ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสามเหลี่ยม หรือแบบรวมกันเป็นกลุ่ม ดังรูปที่ 2.7a และ 2.7b มักนำไปใช้ในงานที่ต้องการลดการทรุดตัวของดินฐานราก หรืองานปรับปรุงเสถียรภาพ เช่น งานคันทางถนน เป็นต้น รูปที่ 2.7c, 2.7d, 2.7e และ 2.7g ใช้ในการควบคุมงานขุดดิน เพื่อรักษาเสถียรภาพและป้องกันโครงสร้างที่ใช้ฐานรากดินรอบพื้นที่ขุด เพื่อใช้ต้านทานแรงแนวราบหรือแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถล ด้วยการใช้รูปแบบเสาเข็มแบบแถวที่มีทิศทางเดียวกันกับน้ำหนักรับในแนวราบหรือตั้งฉากกับผิววัตถุที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ซึ่งเสาเข็มแบบกำแพงสามารถสร้างได้ทั้งแบบสัมผัสกันแบบซ้อนกันใช้ในงานป้องกันน้ำไหลผ่าน รูปแบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่มสามารถใช้รองรับคันทางและฐานรากเพื่อลดการทรุดตัว และการเพิ่มกำลังแบกทานเสาเข็มดินซีเมนต์ชนิดกลุ่มมีหลายรูปแบบด้วยกันได้แก่ แบบตาข่ายสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.7f แบบรวงผึ้งสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.7h แบบวงแหวนซ้อนทับกัน ดังรูปที่ 2.7i แบบช่องตาข่าย ดังรูปที่ 2.7j ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพและประหยัดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบกำแพงและแบบกลุ่มก้อน ดังรูปที่ 2.7m แบบเสาเข็มกลุ่ม ดังรูปที่ 2.7k และแบบเสาเข็มกลุ่มสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.7l



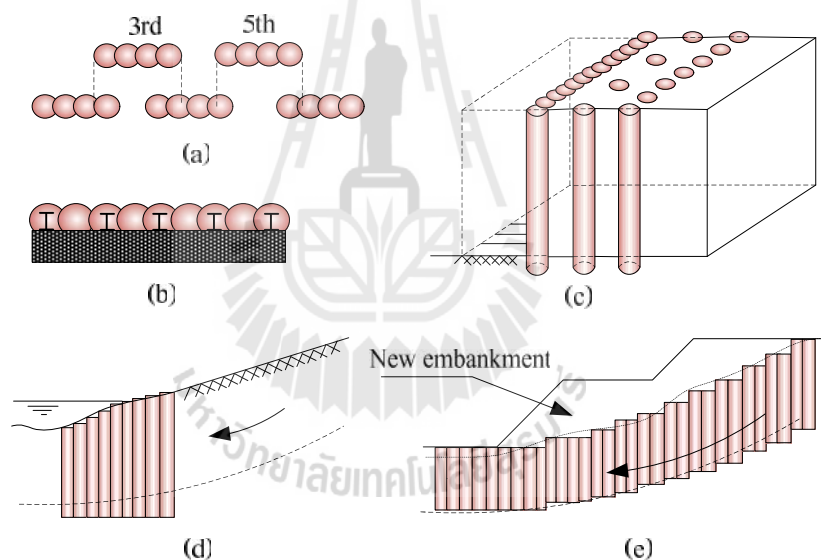
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ (a) และ (b) แบบเสาเข็ม (จัดเรียงแบบจุดรัศ และสาม เหลี่ยม) (c) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกัน (d) กำแพงซ้อนกัน (e) กำแพง หลายแถวสัมผัสกัน (f) ตาข่ายสัมผัสกัน (g) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกันแบบมีค้ำ ยัน (h) รวงผึ้งสัมผัสกัน (i) วงแหวน (j) ช่องตาข่าย (k) เสาเข็มกลุ่ม (l) เสาเข็มกลุ่ม สัมผัสกัน (m) กลุ่มก้อน (Topolnicki,2004)

งานระบบกันดิน เป็นการยึดรั้งแรงดันดินที่เกิดขึ้นระหว่างการขุดลึกและงานขุดค้ำในดิน อ่อนด้วยการป้องกันโครงสร้างรอบๆ บริเวณที่ขุด การป้องกันดินฮูด (Heave) การป้องกันดินถล่ม และการวิบัติของลาด (รูปที่ 2.8) สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบกันดินนั้นมักนิยมใช้รูปแบบ กำแพงและตาข่าย การผสมดินกับซีเมนต์ต้องการกำลังและความแข็งแรงที่สูงเนื่องจากต้องรับ แรงดันดินและแรงดันน้ำด้านข้าง ตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องการสำหรับงานป้องกันงานขุดได้แก่ ความ เป็นเนื้อเดียวกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ในระดับสูงและเสาเข็มดินซีเมนต์ต้องอยู่ในแนวตั้งเพื่อ ได้ ความหนาของเสาเข็มที่ต้องการและเพื่อให้ได้การซ้อนกันของเสาเข็มอย่างต่อเนื่อง

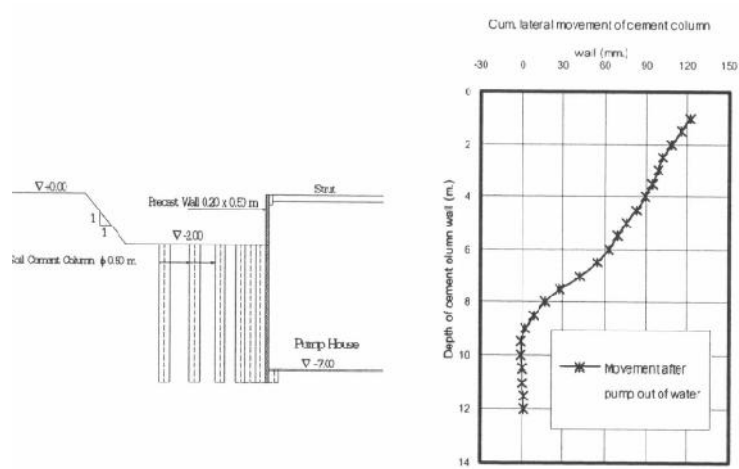
รูปที่ 2.8c เป็นระบบที่ใช้รองรับงานขุดค้ำมีลักษณะเป็นกำแพงกันดิน ประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงในแถวหน้าตามด้วยแถวหลังอีกหนึ่งแถวหรือมากกว่า เสาเข็มแถวหลังถูกกำหนดให้มีระยะห่างและขนาดที่ทำให้มั่นใจได้ว่าได้เกิดเป็นระบบเชิงประกอบ ระหว่างกำแพงและเพื่อรักษาเสถียรภาพภายนอกให้กับกำแพงโดยมีการใช้ดินผสมปูนซีเมนต์สร้าง

เป็นแผ่นเพื่อยึดกำแพงและกลุ่มเสาเข็มเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดการถ่ายน้ำหนักด้านบนลงมาสู่ด้านล่างของเสาเข็ม ระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบไม่ควรเกิน 1.2-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์

การป้องกันดินถุดในงานขุด ทำได้โดยก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในบริเวณที่ทำการขุดเพื่อทำหน้าที่เป็นแกนยึดฝังผ่านระนาบวิบัติ ในบางครั้งด้านข้างของงานขุดอาจมีการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มแรงดันดินแบบแพชซีฟ (Passive earth pressure) และลดระยะฝังของเสาเข็มพีคหรือเสาเข็มเจาะ เสาเข็มดินซีเมนต์ยังประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อป้องกันดินถล่มและการวิบัติของลาด โดยทั่วไปมักใช้รูปแบบของกำแพง รูปแบบกริด (grid) หรือแบบก้อน (block) ซึ่งความยาวต้องเพียงพอที่จะตัดกับระนาบวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (รูปที่ 2.8d และ 2.8e) ทำให้กำลังเฉือนรวมของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้น

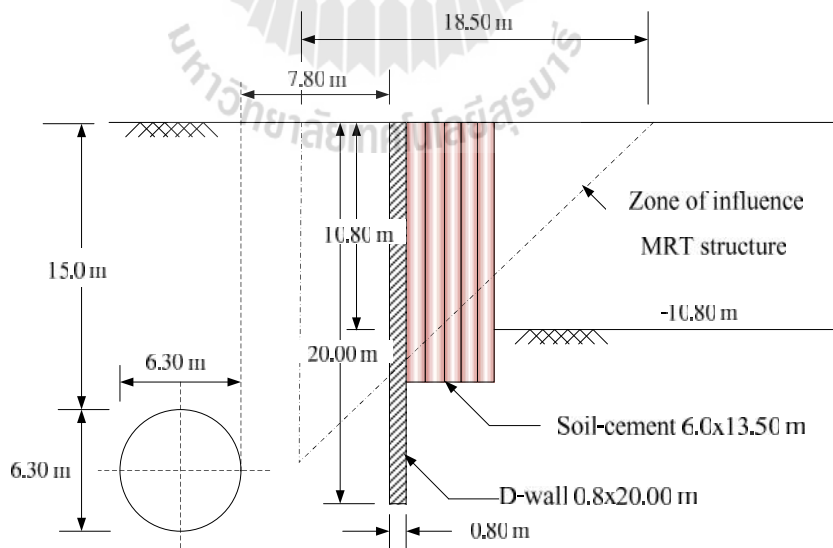


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน (a) ลักษณะทั่วไปของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (b) กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเหล็กรูปพรรณใช้ร่วมกับผนังคอนกรีต (c) กำแพงกันดินเชิงประกอบ (d) งานป้องกันดินถล่ม (e) งานปรับปรุงเสถียรภาพของลาด (Topolnicki,2004)



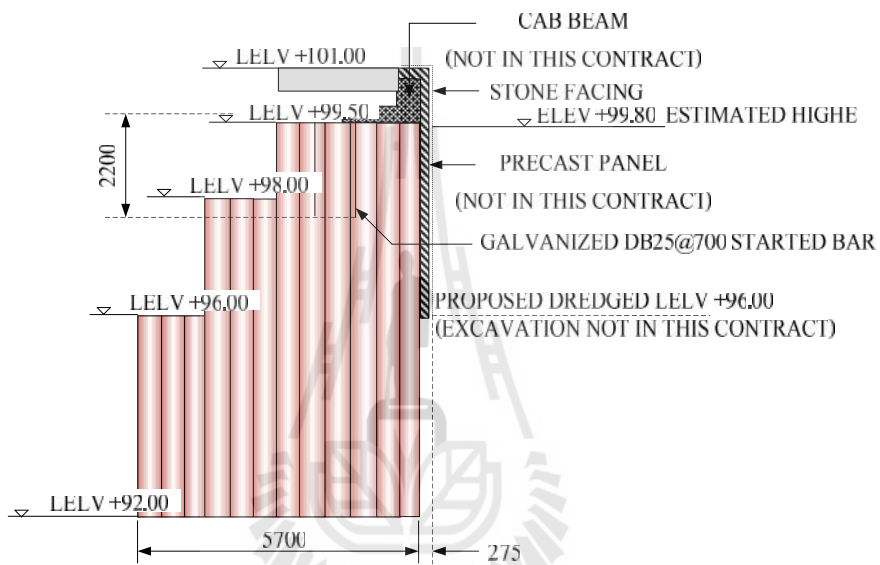
(ณรงค์ และคณะ, 2550) ได้รายงานกรณีศึกษาการปรับปรุงกำลังของดินด้วยการผสมดินเชิงกลแบบลึกเพื่อลดการเคลื่อนตัวด้านข้างของ 2 โครงการ ได้แก่

กรณีศึกษาที่ 1 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเมื่อก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินในแนวเขตป้องกันของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) โดยใช้ Diaphragm wall เป็นกำแพงกันดิน ระดับความลึกที่ทำการขุดดินทั่วไปสำหรับโครงการนี้กำหนดไว้ที่ -10.80 เมตรจากระดับดินเดิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ 6.30 เมตร ระยะห่างจากขอบอุโมงค์ถึงขอบกำแพงกันดินที่ใกล้ที่สุดประมาณ 7.80 ม. ความลึกจากผิวดินถึงขอบอุโมงค์ประมาณ 15.0 เมตร ซึ่งเป็นแนวแสดงการขุดดินที่อาจมีผลกระทบต่ออุโมงค์ นอกจากใช้กำแพงกันดินระบบ Stiff wall แล้ว การปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของดินด้วยวิธีผสมลึกระยะด้านที่มีการขุดดินหน้ากำแพง (Excavation side) โดยทำการปรับปรุงดินแบบบล็อก ซึ่งมีความกว้างของการปรับปรุงดินรวม 6.0 เมตร มีระดับปลายของการปรับปรุงกำลังอยู่ที่ -13.5 เมตรจากผิวดิน ดังรูปที่ 2.9 จากรายงานผลการเคลื่อนตัวพบว่า กำแพงกันดินด้านที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงกำลังมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 20-27 มิลลิเมตร ในขณะที่กำแพงด้านที่มีการปรับปรุงดินมีการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดอยู่ในช่วง 15-18 มิลลิเมตร ซึ่งบล็อกเสาเข็มดินซีเมนต์นอกจากจะช่วยลดการเคลื่อนตัวด้านข้างแล้ว ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพงานขุดดิน และป้องกันการเกิดการอูคของดินในบริเวณกำแพงกันดิน



รูปที่ 2.10 การใช้การผสมเชิงกลแบบลึกป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ Diaphragm wall (ณรงค์ และคณะ, 2550)

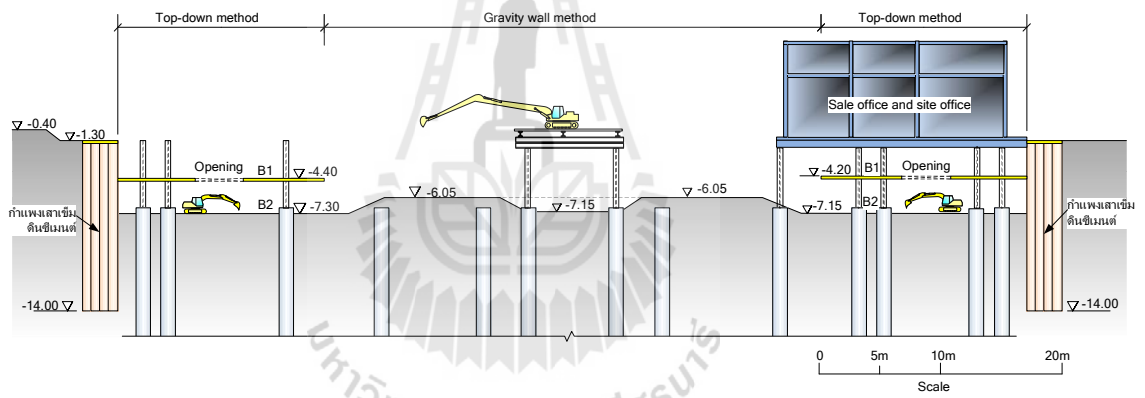
กรณีศึกษาที่ 2 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ก่อสร้างแบบบล็อกเป็นกำแพงกันดิน เพื่อใช้ในการขุดดินลึกประมาณ 4 เมตร ลักษณะดินเป็นทรายหลวม เสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการนี้มี ความลึก 8 เมตร ก่อสร้างแบบบล็อกกว้าง 5.70 เมตร ดังรูปที่ 2.13 อย่างไรก็ตามไม่ได้มีการติดตั้ง เครื่องมือวัดในโครงการนี้ ค่าการเคลื่อนตัวของดินจึงได้มาจากการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยพบว่า ค่าโมดูลัสของดินเพิ่มขึ้นมากกว่า 200% และดินทรายที่ผ่านการ ผสมมีลักษณะเป็นบล็อกขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของงานขุดดินให้มีเสถียรภาพ



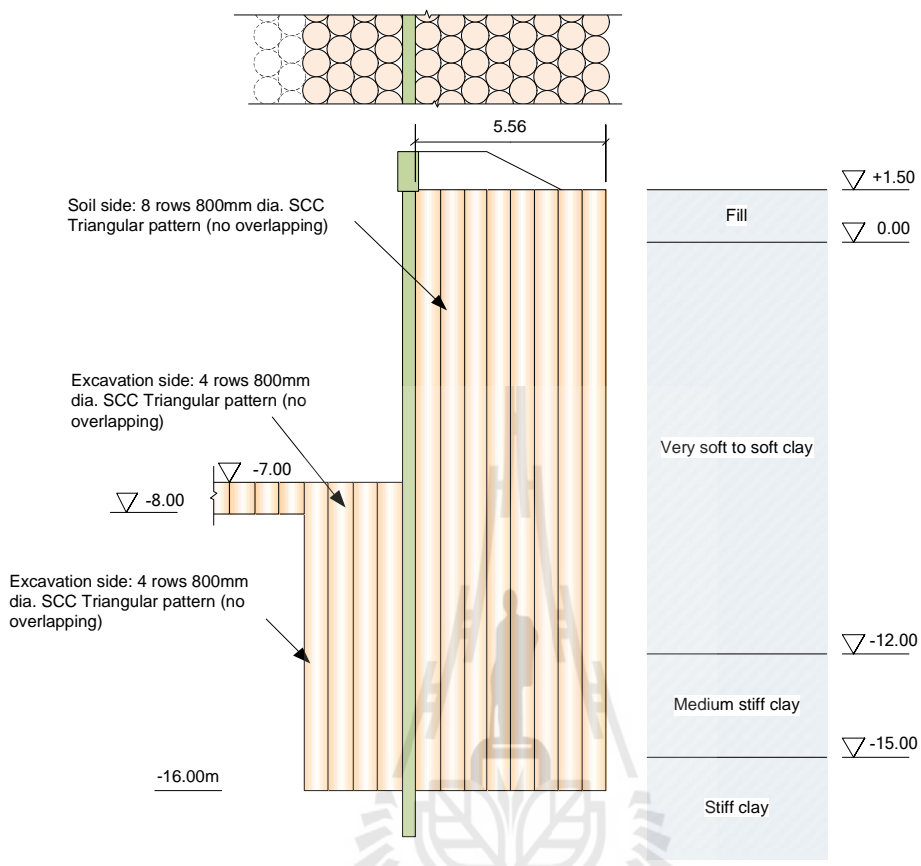
รูปที่ 2.11 การใช้การผสมเชิงกลแบบบล็อกเพื่อก่อสร้างกำแพงป้องกันตลิ่ง (ณรงค์ และคณะ, 2550)

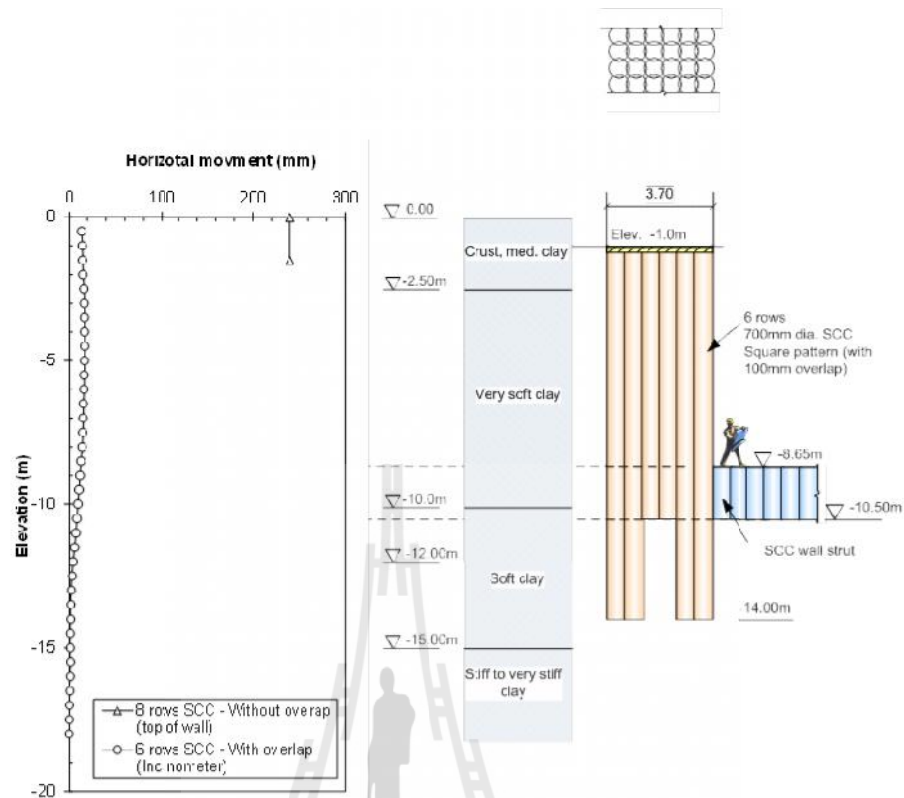
ตารางที่ 2.1 ค่าโมดูลัสดินเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังก่อสร้าง SCC (ณรงค์ และคณะ, 2550)

รายการ	ทรายหลวม	ดินซีเมนต์
กำลังรับแรงเฉือน (T/m^2)	N/A	30 - 110
SPT-N (blow/ft)	3 - 12	N/A
ค่าโมดูลัสของดิน (T/m^2)	2000-4000	7000-15000
วิธีการทดสอบ	SPT-N	UCS-cored sample
Young's modulus	$E_{sand} = 300 N$	E_{50} from UCS



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

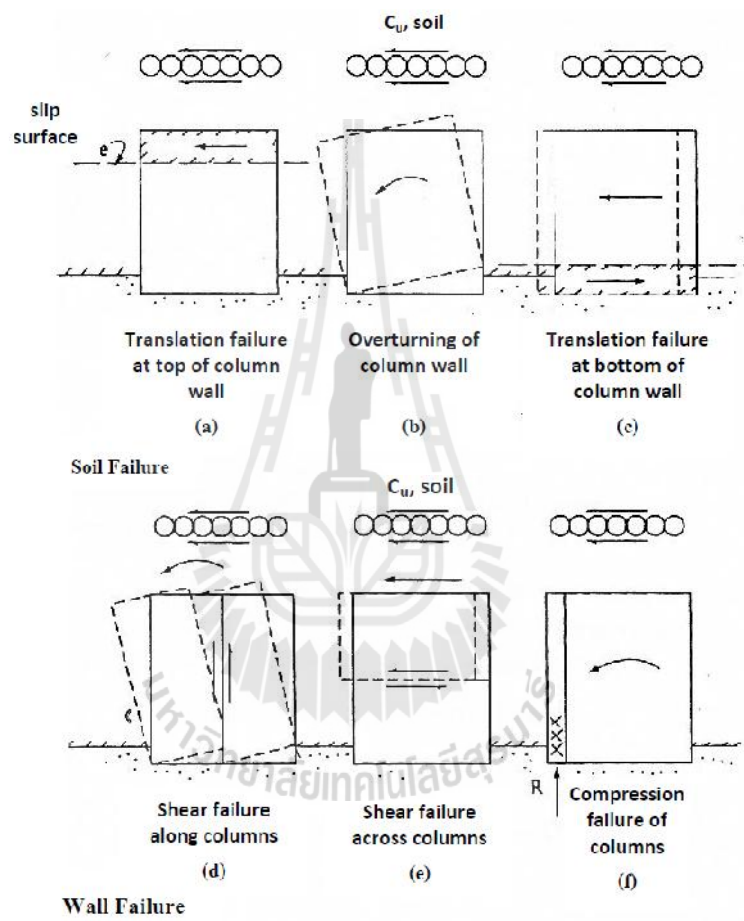


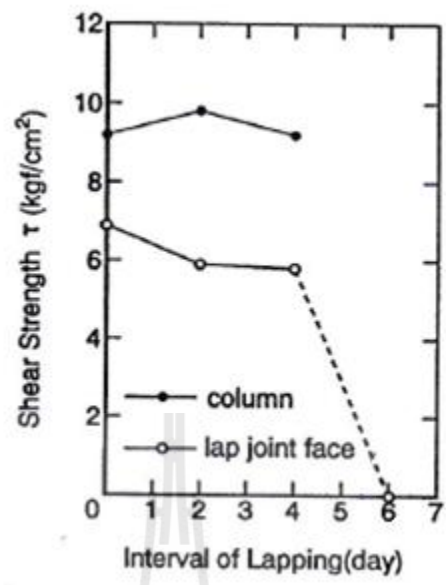


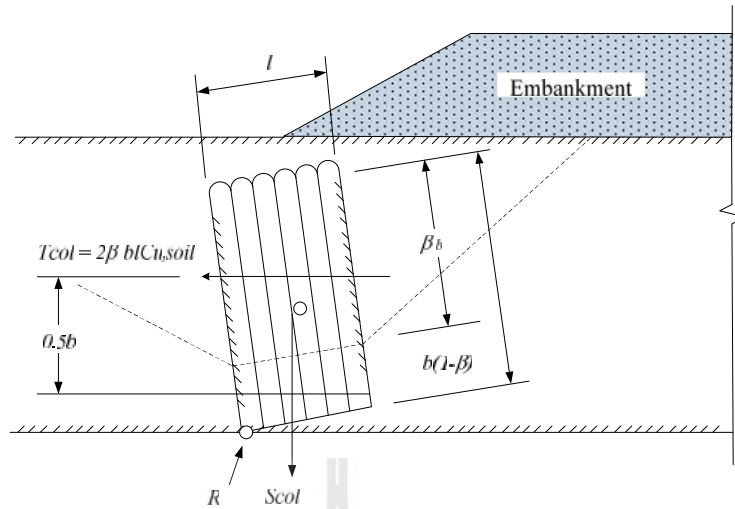
รูปที่ 2.14 กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ secant สำหรับการขุดดินลึก 7.65 m (Tanseng, 2012) เปรียบเทียบกับการเคลื่อนตัวของกำแพง SCC แบบ สำหรับขุดดินลึก 8.5 m (ณัฐฤกษ์ วิสุทธิแพทย์, 2548) (พรพจน์และคณะ, 2557)

เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงทั้งสองกรณีที่มีความลึกของการขุดใกล้เคียงกัน พบว่ากำแพง SCC แบบ secant ที่ใช้ความหนาของกำแพงน้อยกว่าและมีระยะฝังของกำแพงสั้นกว่า กำแพง SCC แบบ tangent มีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างต่ำกว่าถึง 12 เท่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการประสานกันระหว่าง SCC โดยการจัดให้มี overlap นั้นช่วยให้กำแพงมีสติฟเนสสูงขึ้นทำให้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างลดลง การออกแบบให้กำแพง SCC มีระยะ overlap ทำให้มวลกำแพงมีกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น แตกต่างจากกรณีเสาเข็มที่ไม่มีการเหลื่อมซึ่งกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวมีเพียงดินที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มนั้นๆ เเข็มแต่ละต้นจึงแยกตัวเป็นอิสระต่อกันสติฟเนสจึงลดลง

2.7 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม

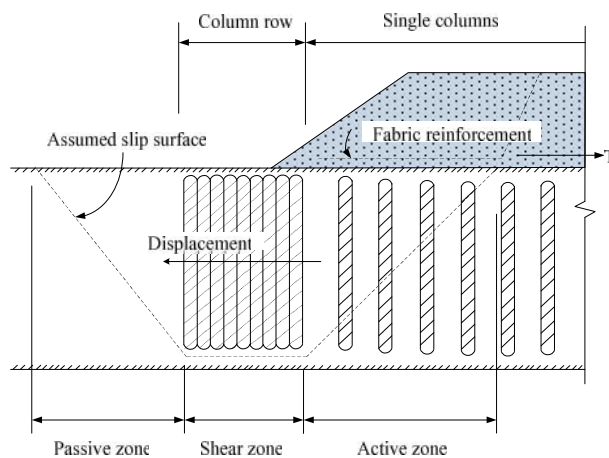






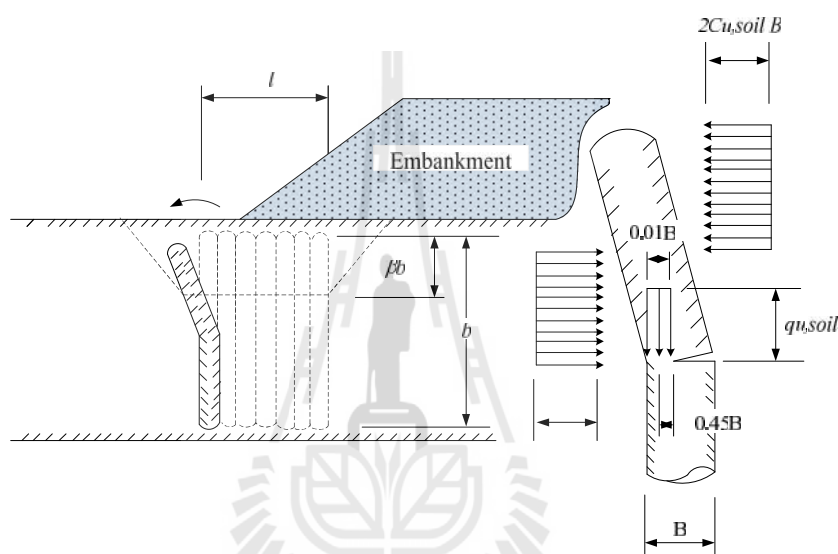
รูปที่ 2.17 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก (Yoshida, 1996)

ข) การวิบัติเนื่องจากการเลื่อน (Failure by translation) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน การเลื่อนของโครงสร้างเกิดจากความต้านทานแรงเฉือนใต้ฐานรากของโครงสร้างเสาไม่เพียงพอในการรับแรงดันดินด้านข้าง สาเหตุหนึ่งเกิดจากการรบกวนดินใต้โครงสร้างทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงจึงเกิดการเลื่อนของโครงสร้างที่อยู่เหนือระนาบการรบกวน โดยแนวทางในการป้องกันคือ โครงสร้างจะต้องใหญ่พอที่จะต้านแรงดันด้านข้างได้ระนาบการเลื่อนด้วยการเพิ่มจำนวนแถวของเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน (Yoshida, 1996)

ค) การวิบัติเนื่องจากการแยก (Failure by separate) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน การแยกกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน มักเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในตำแหน่งใกล้ส่วนบนของโครงสร้างเสา โดยแรงดันด้านข้างที่แยกสามารถประมาณจากสมมุติฐานที่ว่าความต้านทานแรงเฉือนทั้ง 2 ข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ปรับปรุง โดยเสาจะแยกออกจากกันเมื่อความกว้างของส่วนทับซ้อนระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์มีกำลังรับแรงดึงของช่วงทับซ้อนมีค่าน้อยมากๆ ซึ่งความต่อเนื่องหรือความเป็นเนื้อเดียวกันของดินซีเมนต์สามารถกระทำได้จากระยะซ้อนทับของเสาเข็มดินซีเมนต์จากขั้นตอนการก่อสร้าง ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก (Yoshida, 1996)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

Larsson (2003) ได้ศึกษาพลังงานการผสมผลกระทบของพลังงานของการผสมบนการทดสอบ Unconfine compressive strength เมื่อทำการผสมของซีเมนต์และปูนขาว โดยได้เปรียบเทียบรูปแบบหัวเจาะสองแบบที่ทำมุมกัน 45° และ 20° ในการผสม และใช้การทดสอบ Unconfine compressive strength เป็นตัววัดคุณภาพของการผสมซึ่งพลังงานในการผสมมีความสำคัญที่ทำให้แรงอัดสูงขึ้น และจากกราฟจะเห็นได้ว่าในพัตที่มุม 20° จะมีกำลังอัดที่มากกว่า 45° แสดงในรูปที่ 2.20

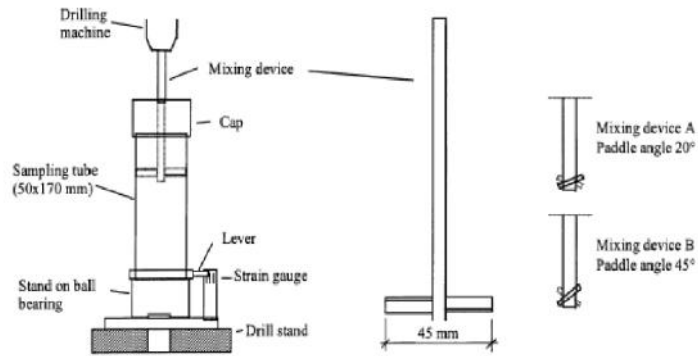
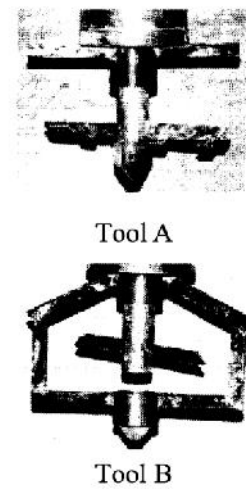
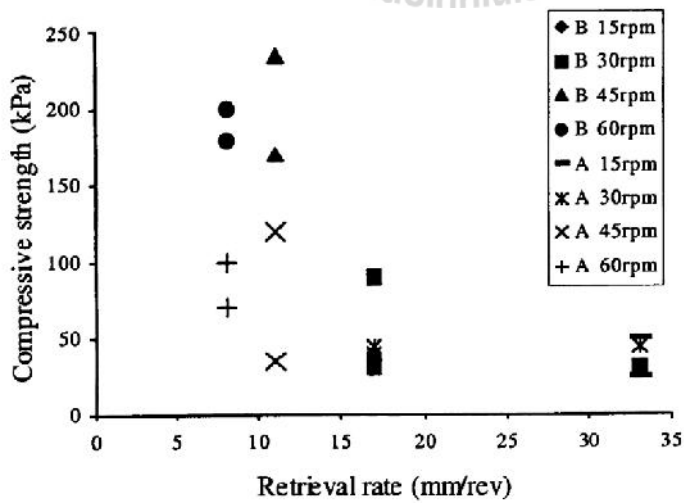
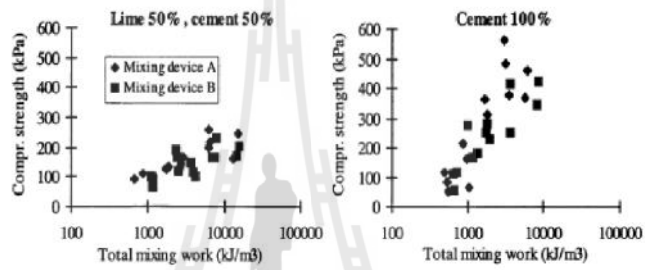
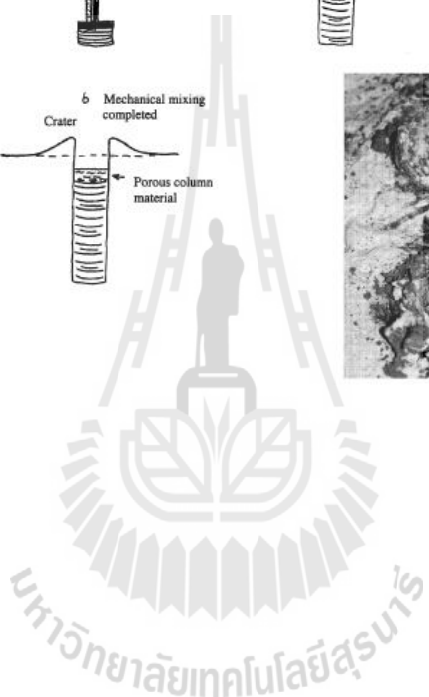
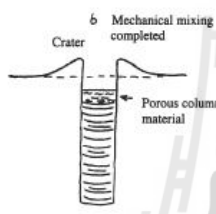
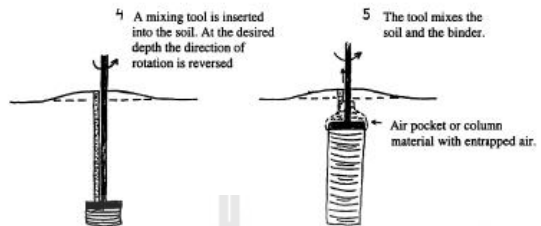
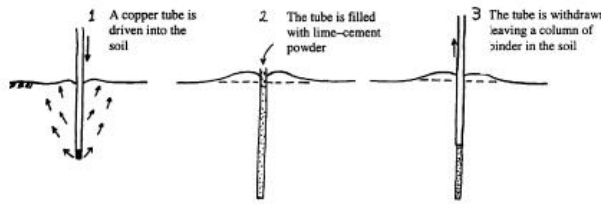


Fig 6.13 Laboratory set up and the two mixing devices A and B (Larsson et al. 1999)





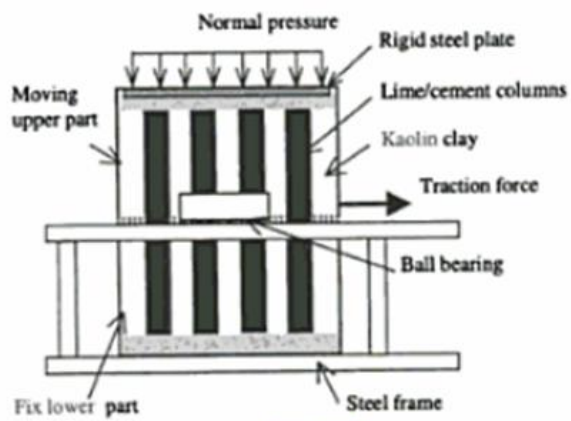


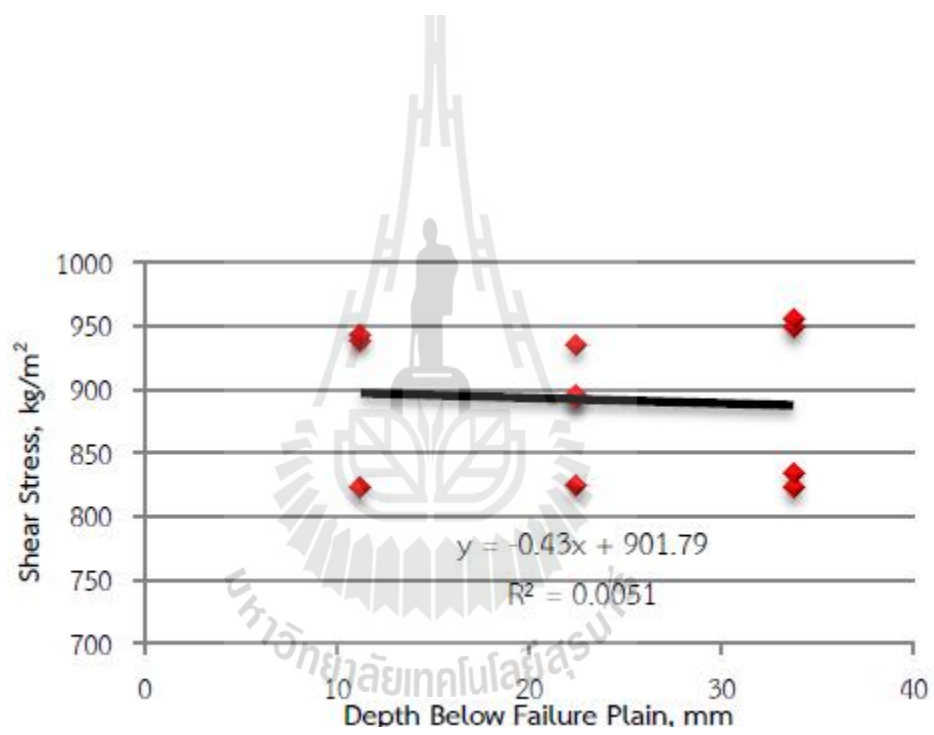
Figure 6. Schematic of the shear box test.

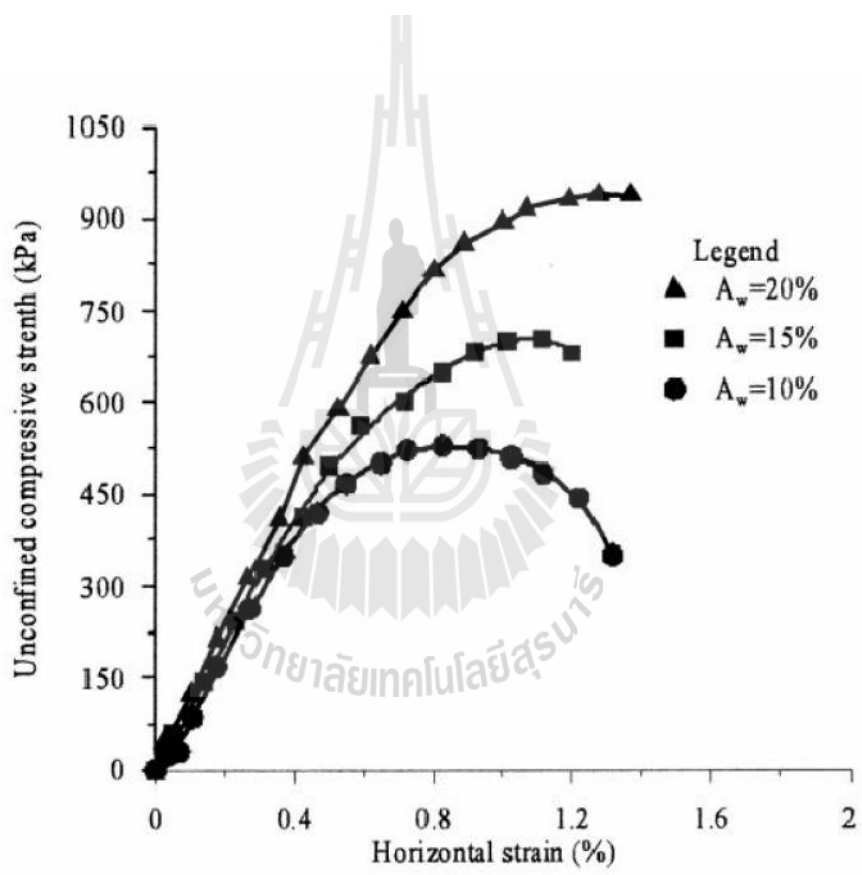




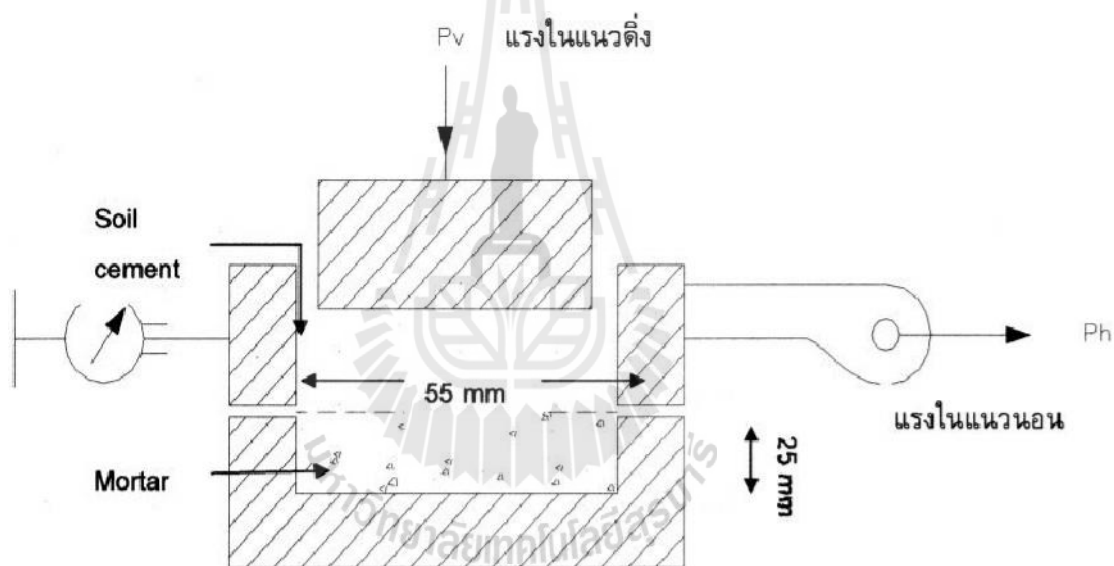
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

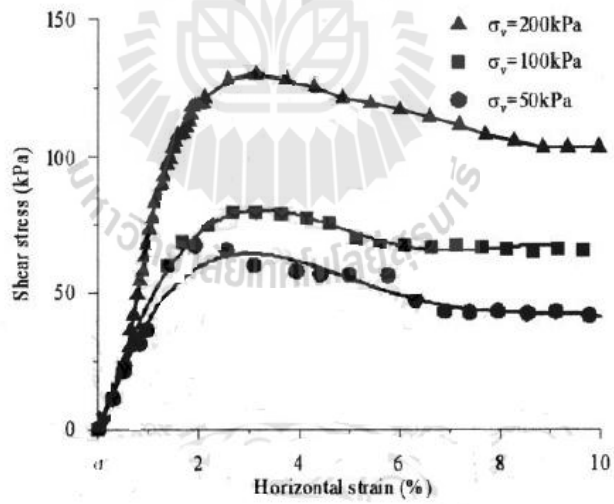
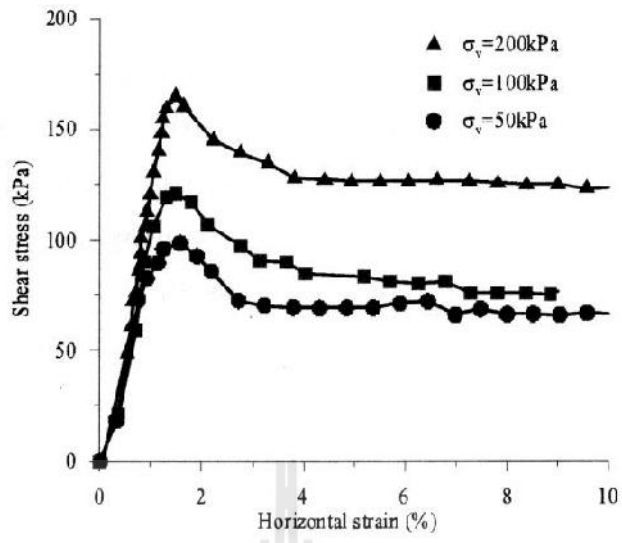


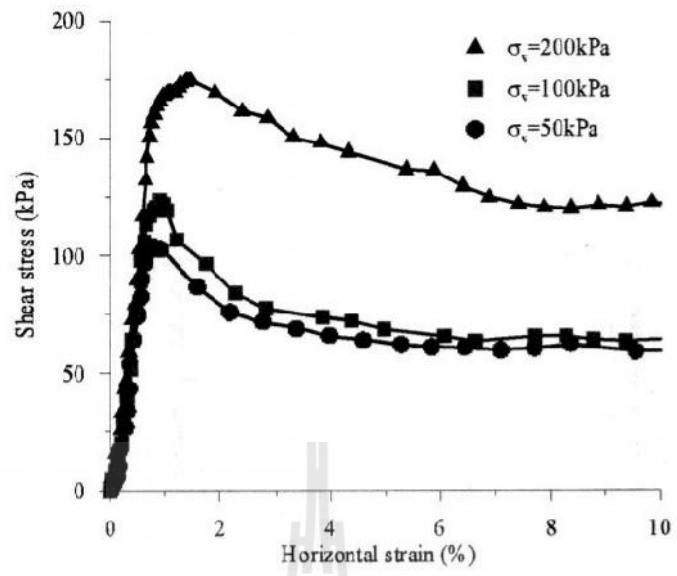




Cement content	Peak friction angle (Γ) _{peak}	Peak adhesion (Ca) _{peak} kPa	Residual friction Angle (Γ) _{residual}	Residual adhesion (Ca) _{residual} kPa
10%	22.80	45.75	22.20	20.14
15%	23.70	76.53	20.80	46.04
20%	25.20	79.43	23.20	31.19





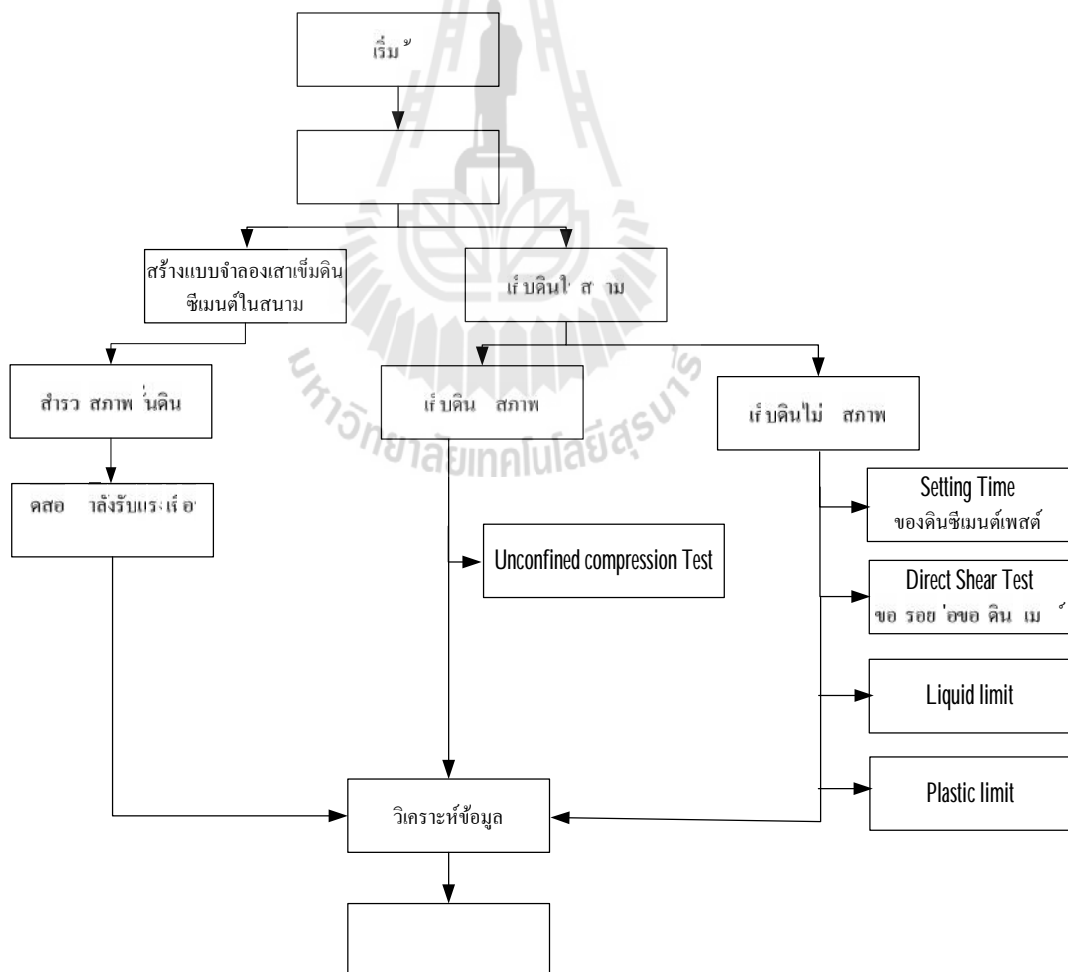


บทที่ 3

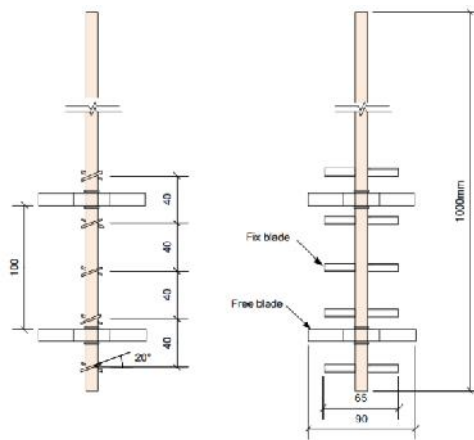
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

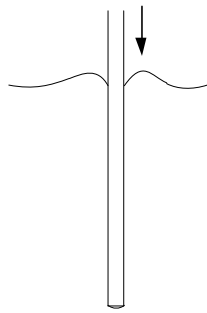
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ซีแคนท์ (มีการเชื่อมกัน) ในบางกรณี การเชื่อมกันของ SCC อาจไม่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบผสมเชิงกลด้วยใบกวาดดิน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองทางกายภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์สองต้นที่มีระยะเชื่อมกันขึ้นมาในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติด้วยเครื่องมือกลขนาดเล็กเพื่อหาความแตกต่างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เจาะต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง



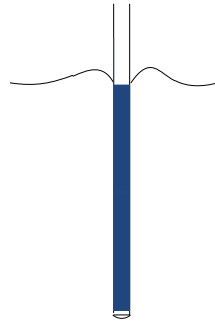
รูปที่ 3.1



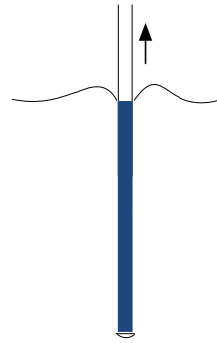




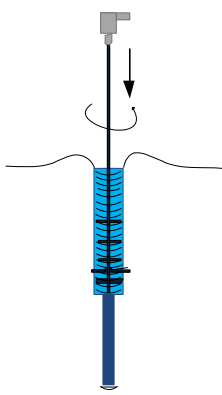
1. กดท่อPVC กดลงในดินเป็นระยะ 800mm



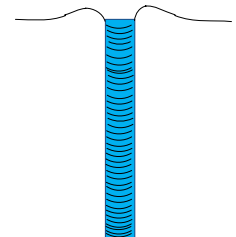
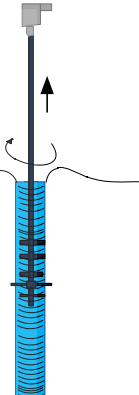
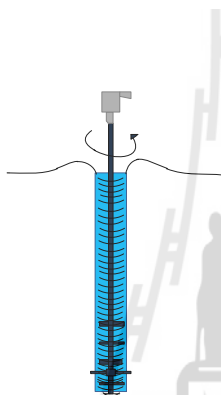
2. บรรจุน้ำป้อนลงในท่อ



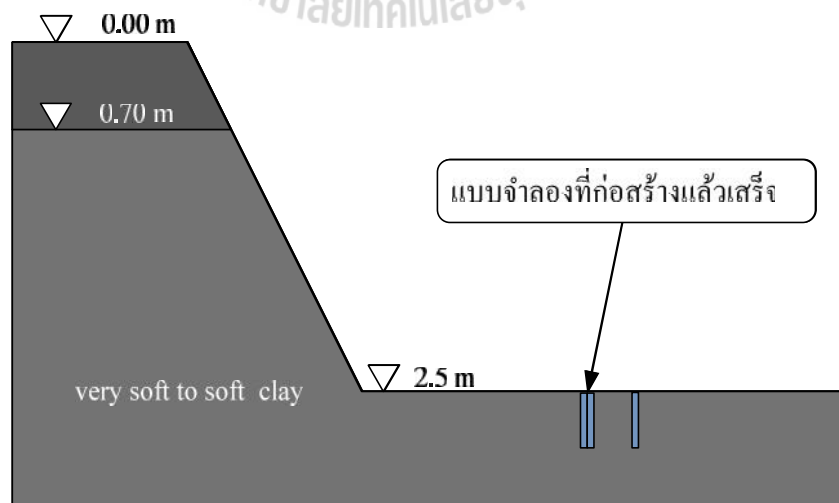
3. ถอนท่อ PVC ให้น้ำป้อนบรรจุในหลุม



4. ผสมดินโดยหมุนก้านเจาะตามเข็มนาฬิกาพร้อมกับกดก้านลงในแนวดิ่ง



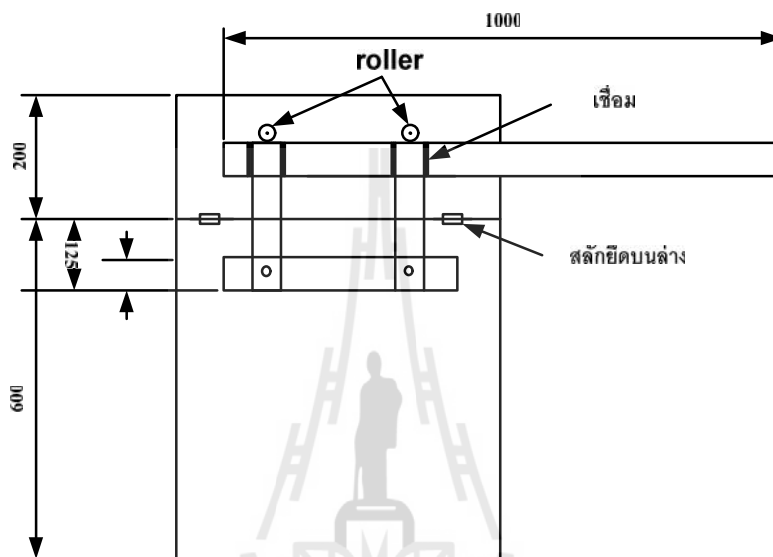
5. เมื่อผสมถึงปลายเสาเข็มแล้วถอนก้านผสมขึ้นโดยหมุนก้านเจาะทวนเข็มนาฬิกา



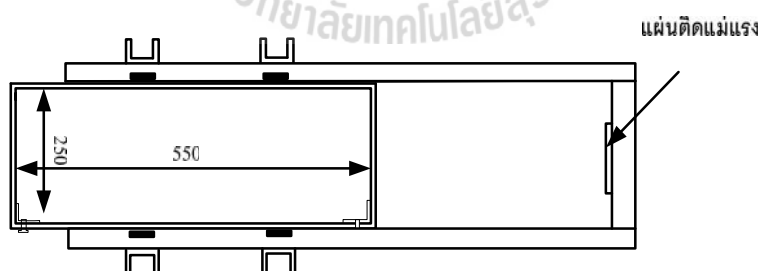
3.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามโดยใช้เครื่อง Large Scale Direct shear Test

(2554) 3.7

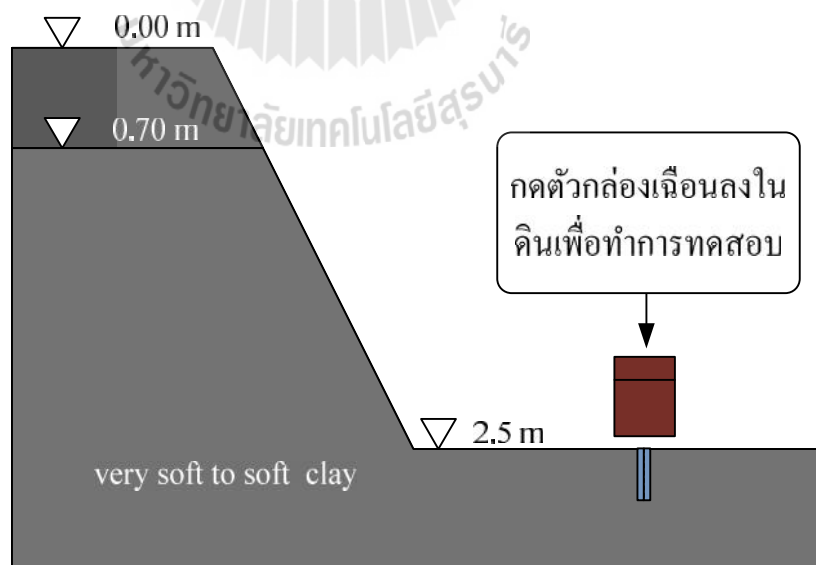
เครื่องมือประกอบด้วยกล่องเหล็กหนา 8 มิลลิเมตรสองส่วน ส่วนบนสูง 200 และส่วนล่างสูง 600

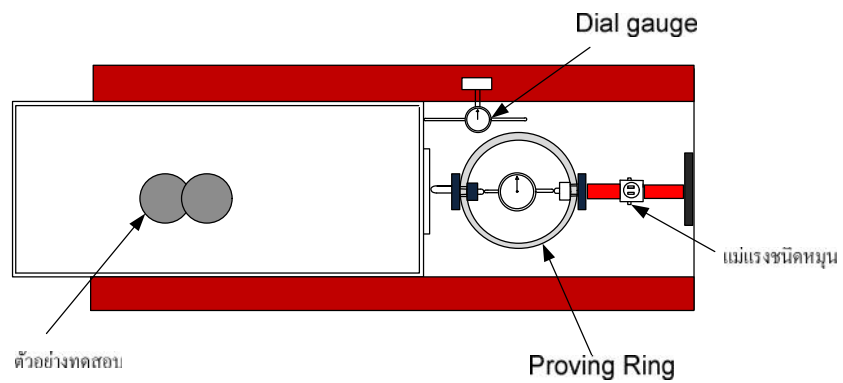
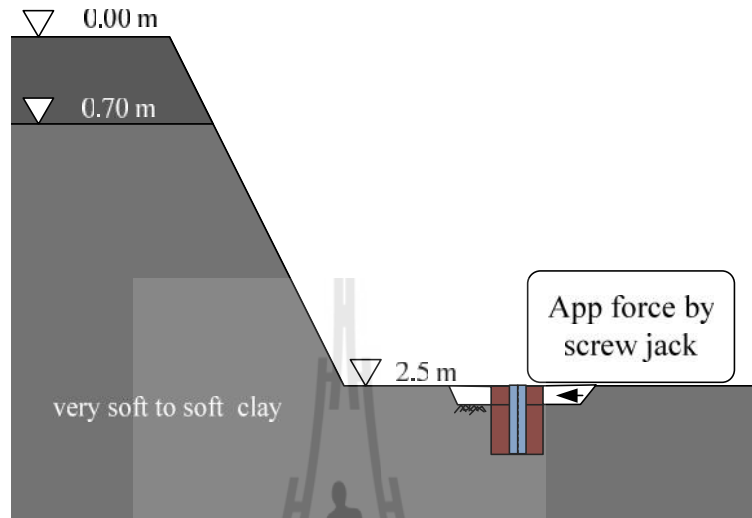


รูปที่ 3.6 รูปที่แบบกล่องเฉือนทางด้าน Side view



รูปที่ 3.7 รูปที่แบบกล่องเฉือนทางด้าน Top view







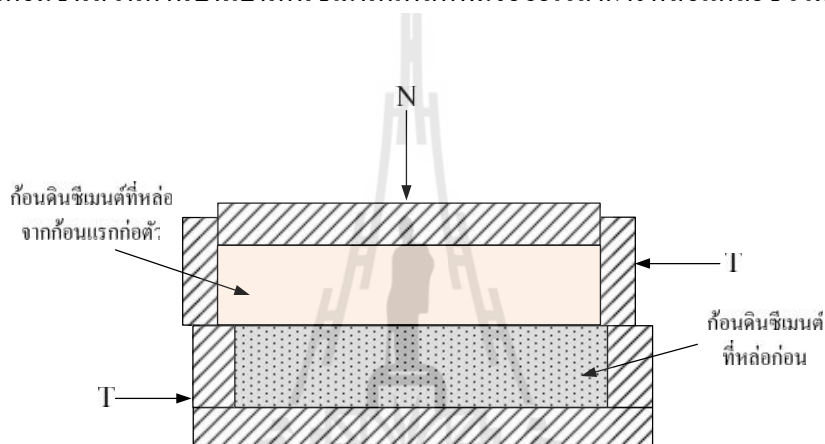


r

ซีเมนต์เพสต์ที่ยังไม่ได้ก่อตัว และดินซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้ว ให้ได้ค่าที่ตรงกับเวลา การก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ตัวอย่างแบบจำลองทางกายภาพ และนำไปใช้หาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น จึงทำการทดสอบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างซีเมนต์เพสต์ การทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบกำลังดัด

(direct shear test) โดยหล่อคอนกรีตขนาดเท่ากับขนาดของ

(direct shear test) โดยแบ่งระยะเวลาหล่อของชั้นต่อไปเท่ากับ 0 (ต่อเนื่อง) 3 (ก่อตัวเริ่มต้น) 13 (ระยะก่อตัวสุดท้าย) 24 จากนั้นนำมาประกอบในอุปกรณ์ทดสอบโดยมีชั้นส่วนด้านบนเป็นดินซีเมนต์เพสต์ที่มีระยะเวลาการหล่อแต่ละชั่วโมง



รูปที่ 3.14

ประสิทธิภาพความเสียดทานระหว่างรอยต่อ

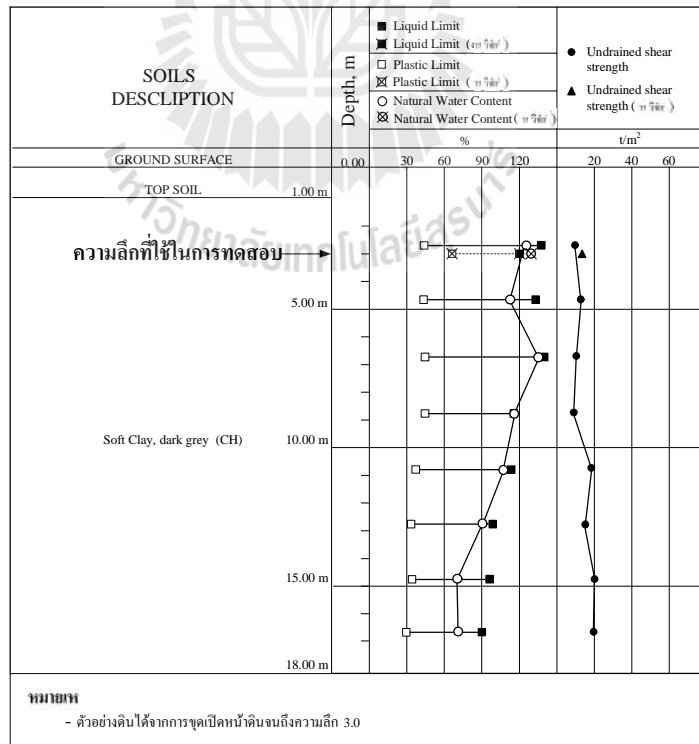
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างแบบจำลองในบริเวณ ตำบลบางบ่อ อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งลักษณะของชั้นดินในบริเวณดังกล่าวเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมากสีเทา (very soft to soft dark grey clay) โดยมีปริมาณน้ำในดิน (water content) เท่ากับ 129 เปอร์เซ็นต์, กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength) เท่ากับ 14.7 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร มีค่าพิกัดเหลวเท่ากับ 120 เปอร์เซ็นต์ พิกัดพลาสติกเท่ากับ 65.7 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีพลาสติกเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติดินที่ได้ทดสอบในงานวิจัยนี้กับข้อมูลของหลุมเจาะในบริเวณพื้นที่ทดสอบ พบว่าคุณสมบัติของดินทั้งสองกรณีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

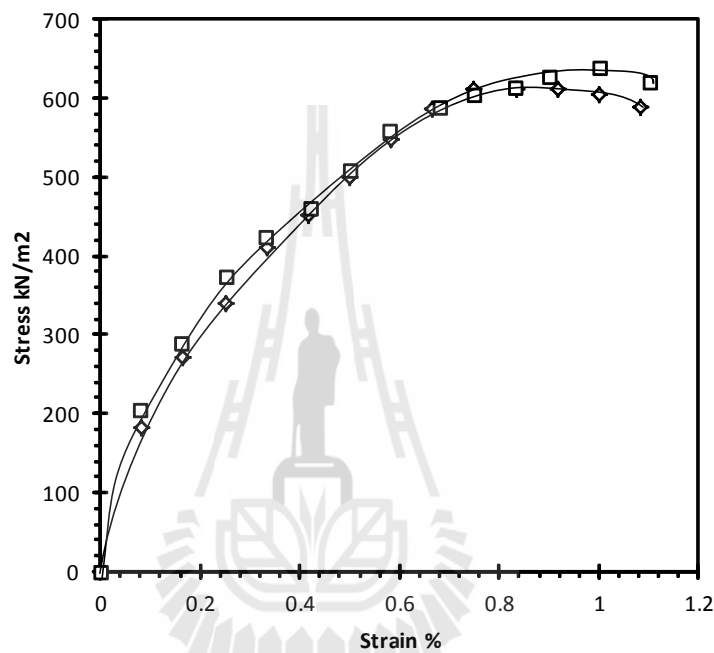


รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะ

4.2

เสาเข็มดินซีเมนต์

ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามด้วยเครื่องมือผสมขนาดเล็ก โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรดินเป็น 175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อมีอายุครบ 28 วัน ได้ขุดแต่งตัวอย่างขึ้นมาทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียด ดังรูปที่ 4.2 (Unconfined compressive strength) มีค่า 650



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างด้วย

4.3

เสาเข็มดินซีเมนต์

รทดสอบการเนื่อนตรงด้วยเครื่องเนื่อนตรงขนาดใหญ่กับดินไม่เสริมเสาเข็มดินซีเมนต์ ได้กำลังรับแรงเนื่อน เท่ากับ 4.5

เสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดย่อส่วนในสนาม

เสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนต์ ที่ทำการก่อสร้าง ทั้งช่วงเวลา 0

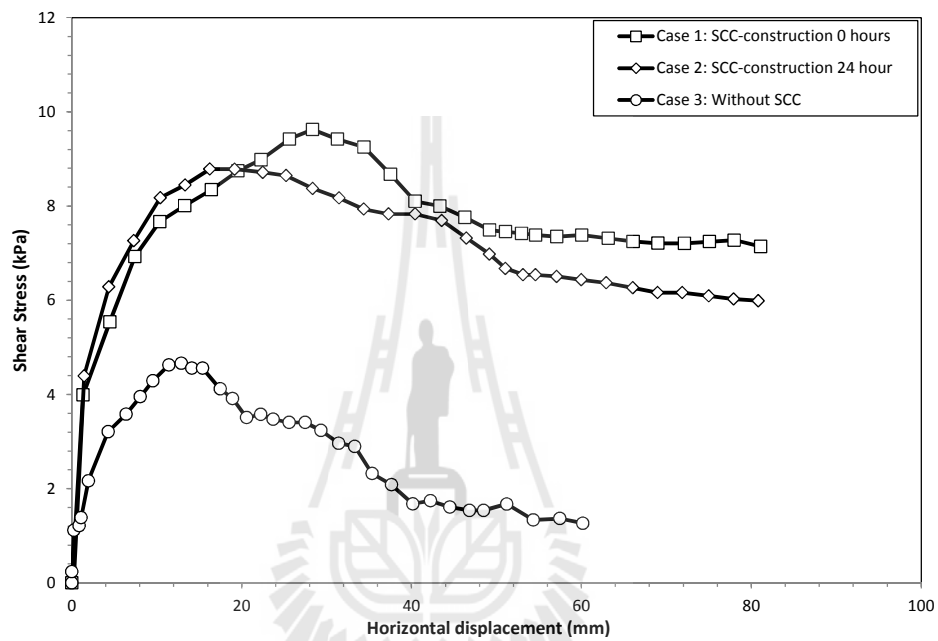
ทั้งช่วงเวลา 24 ได้กราฟดัง 4.3 ในการให้แรงเนื่อนทดสอบช่วงแรกจนถึงแรงเนื่อน

ที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ 20 มิลลิเมตร หน่วยแรงเนื่อน ด้านทานของเสาเข็มทั้งสอง

ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน และเริ่มแตกต่างกัน

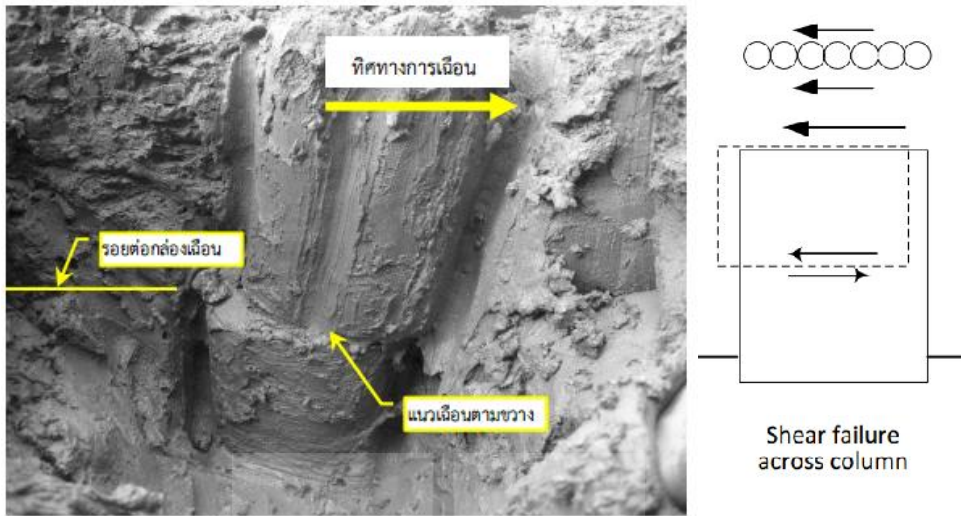
เป็น 20

ซีเมนต์ที่ก่อสร้างทิ้งช่วง 0 ชั่วโมง จะมีหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดที่ 9.6
 หน่วยแรงเฉือน 7.2
 28 หน่วย
 50 คสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 24
 หน่วย สูงสุดเท่ากับ 8.8 72 16
 6.1



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยกล้องเอนโดสโคปขนาดใหญ่

4.4 เป็นภาพถ่ายการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 เห็นได้
 ว่าการวิบัติของ เป็น SCC ังเป็นการวิบัติที่
 ไว้โดย Broms (2004)

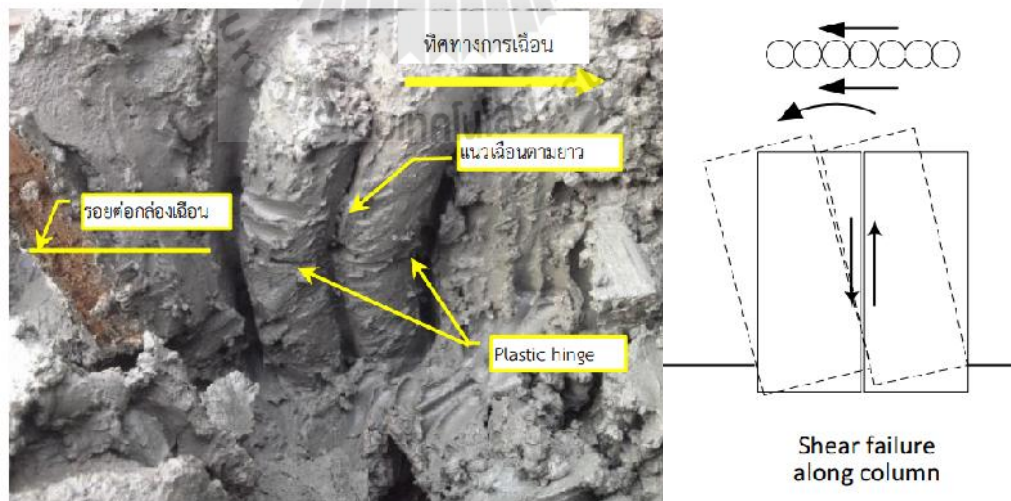


รูปที่ 4.4 การวิบัติของเสาเข็มที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเว

0 SCC

ดินซีเมนต์ Broms (2004)

4.5 ภาพถ่ายการวิบัติของ SCC ก่อสร้างทิ้งช่วง 24 เห็นได้ว่ารูปแบบการ เป็นการวิบัติ เฉือนตามแนวยาวของ รอยต่อ ระหว่าง SCC SCC เกิดการวิบัติด้วยโมเมนต์คดโดยเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นใน SCC แต่ละต้น



รูปที่ 4.5 การวิบัติของเสาเข็มที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 24

SCC ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

(Broms, 2004)

จากผลการทดสอบแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่ต่ำกว่า 20
 เท่ากันทั้งสอง ต่อแบบจำ
 ยังไม่ก่อให้เกิดโมเมนต์ค้ำสูงพอที่ทำให้เกิด รอยต่อเสاء
 ดินซีเมนต์ โมเมนต์ความเฉื่อย จึงยังเท่ากัน ให้กำลังต้านทานต่อการเฉือนไม่
 แตกต่าง ทำให้การเคลื่อนตัวในแนวราบเกิน 20
 ช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ได้เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามแนวยาวทำให้
 ระหว่างรอยต่อเป็นอิสระต่อกัน 4.6 (b) SCC โมเมนต์ความเฉื่อยของ
 มีค่า ลงอย่างมาก ให้เกิดกำลังต้านทานโมเมนต์ค้ำและสติฟเนสของหน้าตัด
 จนทำให้เกิดการวิบัติแบบหัก โดยมีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้น ในเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละดี
 ส่วนในกรณี ที่ทั้งช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง รอยต่อ ไม่เกิดการแยกตัว
 ตามรอยต่อ เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อแบบจำ โมเมนต์ความเฉื่อยจึงไม่ลดลงเหมือนกรณี SCC
 ก่อสร้างทั้งช่วงเวลา 24 ทำให้กรณีทั้งช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ดี โมเมนต์
 ค้ำได้ต่อเนื่อง โดยไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือนทางยาวก่อน และสามารถต้านทานแรงเฉือนได้จนถึง
 4.6 (a)



รูปที่ 4.6 (a) , (a) ช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ไม่
 , (b) ทั้งช่วงก่อสร้าง 24

เมื่อกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยพัฒนาจนสูงสุดแล้วทั้งสองกรณี
หน่วยแรงเฉือนต้านทานจะลดลงเหลือเป็นหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) ซึ่งหน่วยแรงคงค้าง
ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 ชั่วโมงนั้นมีค่าสูงกว่า กรณีที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 24
รอยต่อ ทำให้
เป็นผลให้โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าน้อยกว่า หน้าตัดที่ ไม่เกิดการ

4.4

ที่ไม่ได้หล่อในที่

เนียนตรงระหว่าง

เสาเข็มดินซีเมนต์

ลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่หล่อสำเร็จแล้วนำมาทดลองในดินเหนียวอ่อน

(2554) พบว่าการ

เป็นการหักแบบมีจุดหมุนพลาสติก

4.7

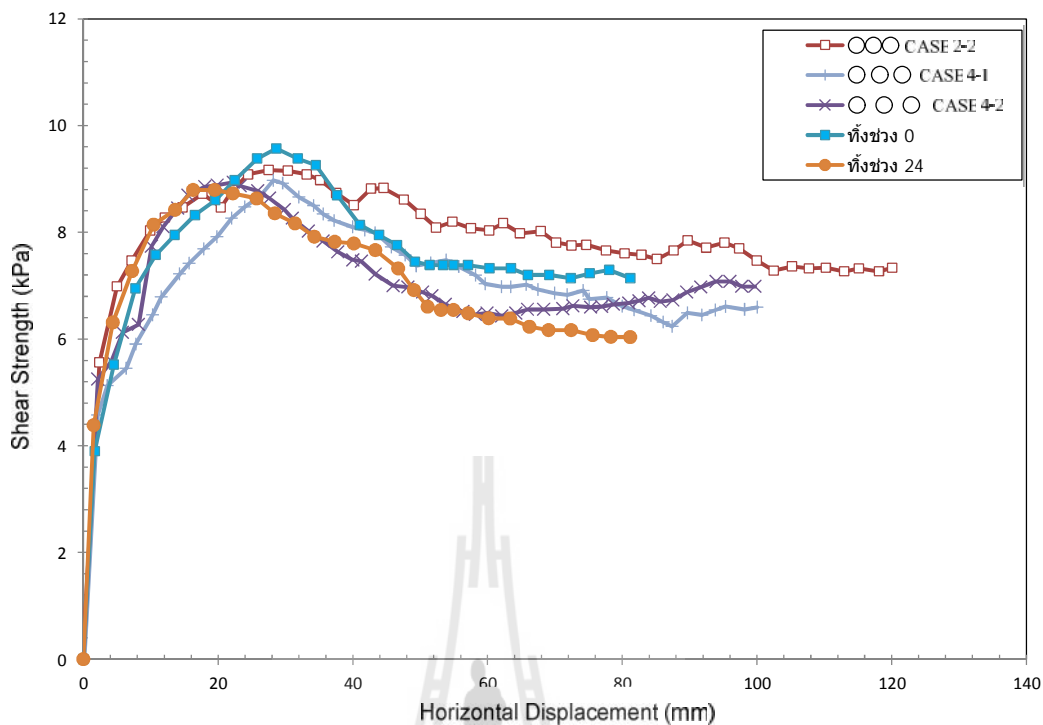
แบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ทิ้งช่วงเวลาก่อสร้าง 24

4.5 ที่คล้ายกับแบบจำลอง

(2554)



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเว้นระยะห่าง 1.5 เท่าของ
เส้นผ่าศูนย์กลางที่ปรากฏ (2554)



รูปที่ 4.8

(2554)

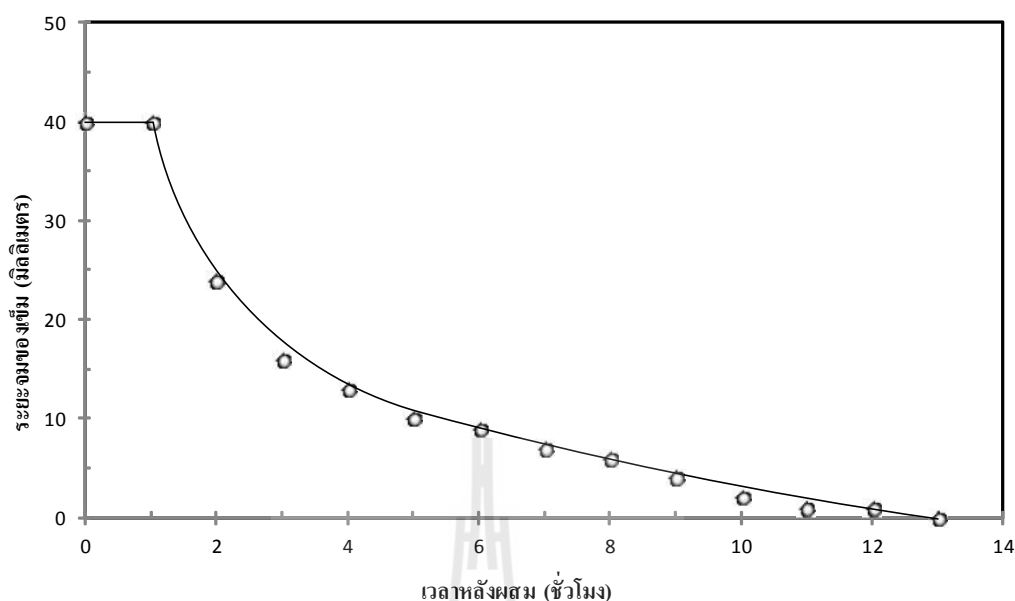
(2554) ได้ทำการทดสอบ เสาเข็มดินซีเมนต์หล่อสำเร็จ
 ดียวเท่ากับ 850 แล้วเสียบลงในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติ โดยมี หน้าตัด
 เสาเข็มต่อพื้นที่หน้าตัดกล่องเงื่อนไขเท่ากับ 2.761% case 1-2 , case 2-2 ,
 case 2-3 ห่างกัน 1.0 D, 1.5D case 4-1, case 4-2 ได้ว่า
 มีความลึกที่ระนาบเงื่อนไขเท่ากับ 3 เท่า 6 เท่าและ 9 เท่า พบว่า
 เงื่อนไขที่ใกล้เคียงกันตามที่ นิธิได้กล่าว ว่าระยะความลึกไม่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดิน
 ซีเมนต์ และเมื่อทำการทดสอบใน case 4-1 case 4-2 เท่ากับ 6
 เท่า มีกำลัง ใกล้เคียง กว่าเสาเข็มดินซีเมนต์
 case 2-2
 ดินซีเมนต์ ซีเมนต์ 4.9 โดยมีพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มต่อพื้นที่หน้าตัดกล่อง
 เท่ากับ 7% เห็นว่ากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 ชั่วโมง มีค่ากำลังรับ
 9.6 ทิ้งช่วงเวลาก่อสร้าง 24 เท่ากับ 8.8
 (2554) ค่า case 2-2 เท่ากับ 9.1 case 4-1 เท่ากับ
 8.97 case 4-2 เท่ากับ 8.92 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของ

ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 มีค่าสูงกว่า (2554)
 ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 24 ชั่วโมง มีกำลังรับแรงเฉือนที่ใกล้กับของนิธิ (2554)
 area ratio (2554) ต่ำกว่า Area ratio ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังตาราง
 4.1 แต่ก็ยังมีกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยไม่แตกต่างจากกำลังรับแรงเฉือนในงานวิจัยนี้เนื่องจาก
 (2554) ได้ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบหล่อสำเร็จแล้วกดลงในดิน ไม่เหมือนกับสถานะ
 ก่อสร้างในงานจริง ซึ่งแตกต่างจากเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ผสมใน
 ดินซีเมนต์ที่ได้จากการก่อสร้างจากเครื่องผสมเชิงกลขนาดย่อมส่วน
 งานก่อสร้างจริง

4.1	Area ratio	(2554)
รูปแบบการก่อสร้าง		Area ratio
	CASE 2-2	2.761 %
	CASE 4-1	2.761 %
	CASE 4-2	2.761 %
		7 %

4.5 การก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์โดยใช้การทดสอบไวแคท (vicat)
 ASTM C191 โดยใช้ดินซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินเท่ากับ 200
 ต่อลูกบาศก์เมตร ได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจมน้ำกับเวลาหลังจากการผสม ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งได้
 เวลาก่อตัวเริ่มต้นของดินซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 2 ชั่วโมง และเวลาก่อตัวสุดท้ายของ ดินซีเมนต์เพสต์
 เท่ากับ 13

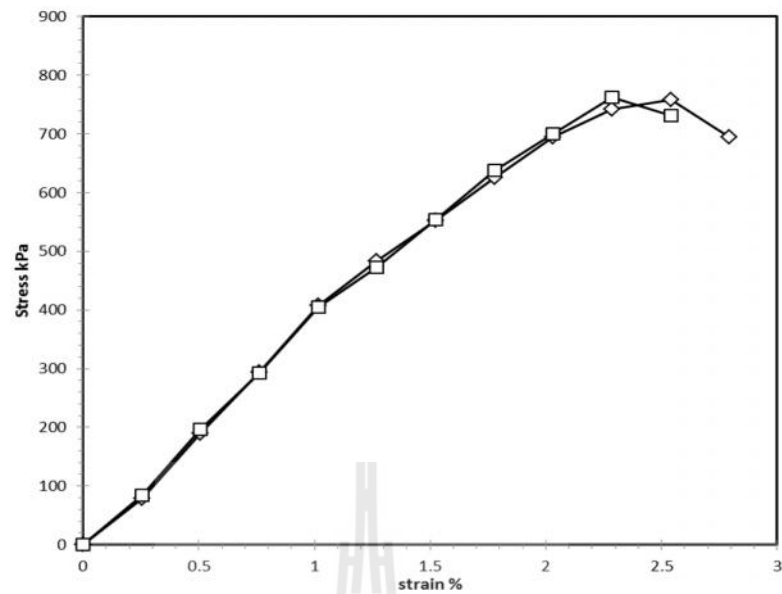


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ

การก่อตัวสุดท้ายของ ซีเมนต์เพสต์ จะมีเวลาก่อตัวนานกว่าการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่
 . 15-2547 ว่าการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ต้องไม่เกิน 6
 15 แต่การก่อสร้าง SCCW ด้วยระบบผสมเชิงกลด้วยใบกวนดิน ในการก่อสร้างใน
 ความเป็นจริงสาเหตุที่ก่อสร้าง SCCW ไม่ต่อเนื่อง การก่อสร้างหรือการขัดข้อง
 ของเครื่องจักร ทำให้ ดินซีเมนต์ต้นที่ก่อสร้างไว้แล้วสิ้นสุดการก่อตัว ทำให้รอยต่อ
 ดินซีเมนต์ต้นต่อไปไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับต้นที่สร้างไว้แล้ว ทำให้กำลังของรอยต่อระหว่างเสาเข็ม
 ดินซีเมนต์ลดลง

4.6 กำลังต้านทานแรงเฉือนระหว่างรอยต่อดินซีเมนต์เพสต์ในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างดินซีเมนต์เพสต์ ห้องปฏิบัติการมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50
 100 โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตร เท่ากัน 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน ได้นำตัวอย่างมาทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง
 หน่วยแรงอัดกับความเครียด 4.10 ค่า (Unconfined
 compressive strength) เท่ากับ 730



รูปที่ 4.10 ดัชนีของดินซีเมนต์ที่ผสมในห้องปฏิบัติการ

ข้อมูล ของรอยต่อดินซีเมนต์เพสต์ ที่ตั้งช่วงระยะเวลาต่างๆ โดยนำ และการเคลื่อนตัวมาวิเคราะห์ ของรอยต่อจะ แล้วเกิดการอ่อนตัว (softening) ในช่วงแรก

ระหว่างรอยต่อ แล้วพัฒนาเหลือแต่แรงเสียดทานบริเวณรอยต่อดินซีเมนต์เพสต์

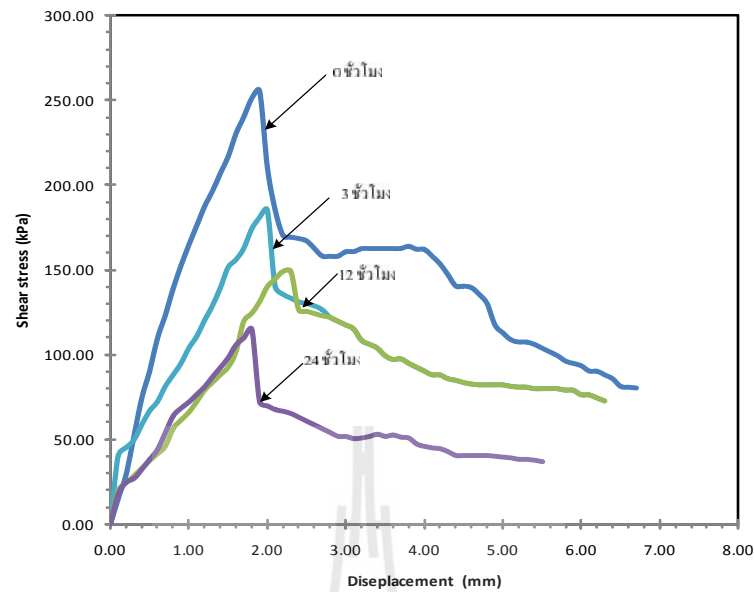
4.11 เป็นผลการทดสอบการเหนือน ดินซีเมนต์เพสต์กับการตั้งช่วงระยะเวลา

ต่างๆ เท่ากับ 64.5 พบว่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุด 0

เท่ากับ 255 2 ชั่วโมง เท่ากับ 185 13 เท่ากับ 155

24 ชั่วโมง เท่ากับ 111 ซึ่งเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเหนือน ระหว่างรอยต่อ

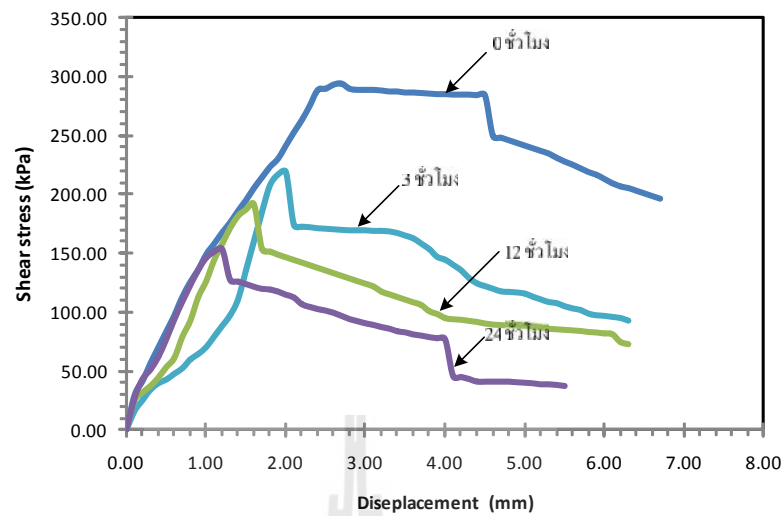
มีค่าลดลงตาม ที่ตั้งช่วงก่อสร้าง



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง
หน่วยแรงกดทับ 64.5

4.12 เป็น ของรอยต่อดินซีเมนต์เพสต์กับการทิ้งช่วง
ระยะเวลาต่างๆ หน่วยแรงกดทับ 129 พบว่า 0
เท่ากับ 294 2 ชั่วโมง เท่ากับ 219 13 ชั่วโมง เท่ากับ 191
24 ชั่วโมง เท่ากับ 153

ซึ่งเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของรอยต่อมีค่าลดลงตามระยะเวลาทิ้งช่วงก่อสร้าง
ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 มีค่าแรงเฉือนเฉลี่ยสูงกว่ากรณีอื่นๆ เป็นผลมาจาก
ดินซีเมนต์เพสต์ในก้อนแรกยังไม่มีการก่อตัวทำให้รอยต่อเป็นเนื้อ
ช่วงเวลาเกินการก่อตัวเริ่มต้น จะทำให้ดินซีเมนต์เพสต์ในก้อนแรกมีการก่อตัว เป็นผลให้รอยต่อ
ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ให้แรงเฉือนเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า ทิ้งช่วงเวลาก่อสร้าง 0



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง ของหน่วยแรง

129

4.7

บัติของรอยต่อของดินซีเมนต์เพสต์

ของรอยต่อดินซีเมนต์เพสต์ทำให้ได้รูปแบบการวิบัติของ รอยต่อดินซีเมนต์เพสต์ เห็นว่ารอยต่อของดินซีเมนต์เพสต์ ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0

รอยต่อ เป็นเนื้อเดียวกัน การวิบัติของ รอยต่อเป็นผิวขรุขระมาก ซีเมนต์เพสต์ที่ทำการก่อสร้างช่วงแรกยังไม่มีการก่อตัว ทำให้รอยต่อมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

4.14 เป็นผลให้ รอยต่อดินซีเมนต์เพสต์ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 มากกว่ากรณีอื่นๆ

ก่อสร้างดินซีเมนต์เพสต์ที่ทิ้งช่วงเวลา 13

รอยต่อมีลักษณะ เกิดจากรอยต่อของดินซีเมนต์เพสต์ก้อนแรกทิ้งช่วงไว้ ก่อตัวสุดท้าย ทำให้รอยต่อมี อกก้อนดินซีเมนต์ทั้งสอง

4.15 ทำให้แรงเฉือน รอยต่อมีค่า น้อยกว่า ทิ้งช่วงเวลาก่อสร้าง 0

ลักษณะการวิบัติของรอยต่อ 24 ชั่วโมง มีลักษณะคล้ายกับการวิบัติของรอยต่อดิน นต์เพสต์ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 13



รูปที่ 4.13 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 0



รูปที่ 4.14 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 2

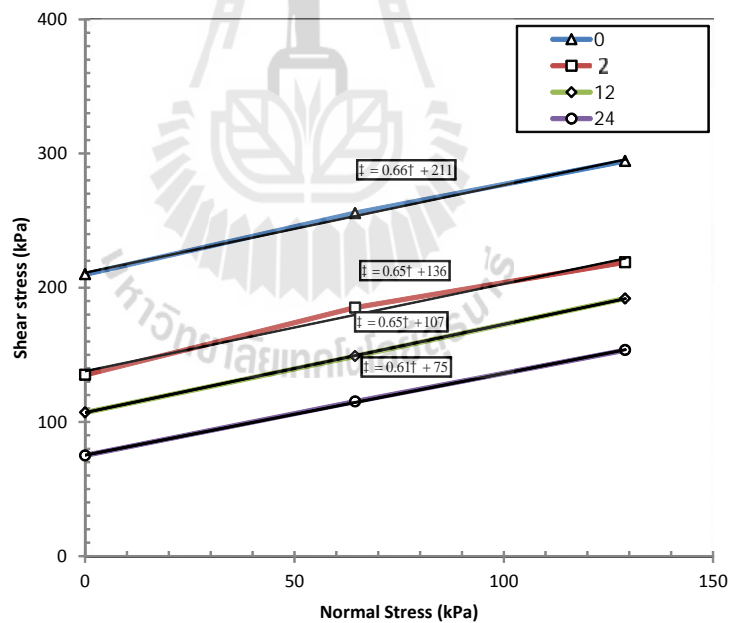


รูปที่ 4.15 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 13



รูปที่ 4.16 รูปแบบการวิบัติของรอยต่อ 24

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดทับกับแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุด ได้ค่าหน่วยแรงยึดเกาะ
 ก่อสร้างที่ช่วงเวลา 0 ชั่วโมง เท่ากับ 211 2 (ระยะก่อดั้วเริ่มต้น) เท่ากับ 136
 13 (ระยะเวลาก่อดั้วสุดท้าย) เท่ากับ 107 24 ชั่วโมง เท่ากับ
 75 4.17



รูปที่ 4.17 น้หน่วยแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อ หน่วยแรงกดทับ

4.2 เป็นผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์เพสต์ด้วย
 วิธีการทดสอบแบบเฉือนตรง จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์เพสต์บริเวณรอยต่อ
 ขึ้นอยู่กับกำลังยึดเกาะและมุมเสียดทานภายใน โดยมีมุมเสียดทานภายใน มีค่า 33.1 34.9

เมื่อตัวอย่างดินซีเมนต์เพสต์ทิ้งช่วงเวลาไม่กินเวลาก่อนทดสอบ และมุมเสียดทานภายในมีค่า 30.5
เมื่อตัวอย่างทิ้งช่วงเวลาเกินเวลาก่อนทดสอบ จะเห็นได้ว่ามุมเสียดทานภายในไม่ขึ้นกับเวลา
ทิ้งช่วงก่อสร้างอย่างมีนัยยะสำคัญ

4.2 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาก่อสร้างทิ้งช่วงก่อสร้างต่างๆ

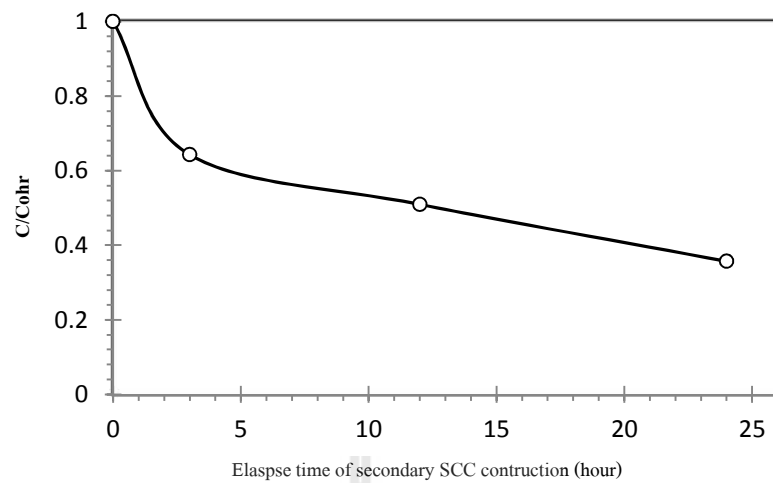
เวลาทิ้งช่วงก่อสร้าง	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (degree)
0	211	34.9
2 *	136	33.1
13 **	107	33.1
24	75	30.5

* เวลาทดสอบเริ่มต้น ** เวลาทดสอบสุดท้าย

เห็นว่าหน่วยแรงยึดเกาะ (cohesion) ผกผันกับเวลาทิ้งช่วงการก่อสร้างอย่างชัดเจน
หน่วยแรงยึดเกาะลดลงจาก 210 (เวลาทิ้งช่วง 0) 75
(เวลาทิ้งช่วง 24) หน่วยแรงยึดเกาะ นี้จะเป็นกำลังต้านทานแรงเฉือนที่สำคัญ
SCCW เนื่องจากการใช้ SCCW เป็นกำแพงกันดิน เมื่อทำการขุดเปิดหน้าดินจะเห็นว่าด้าน
หนึ่งของกำแพงไม่มีหน่วยแรงตั้งฉากกับกำแพง เพราะเป็นอากาศดังนั้นกำลังต้านทานต่อการเฉือน
ก็น้อยมาก

4.18 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของหน่วยแรงยึดเกาะ (cohesion)

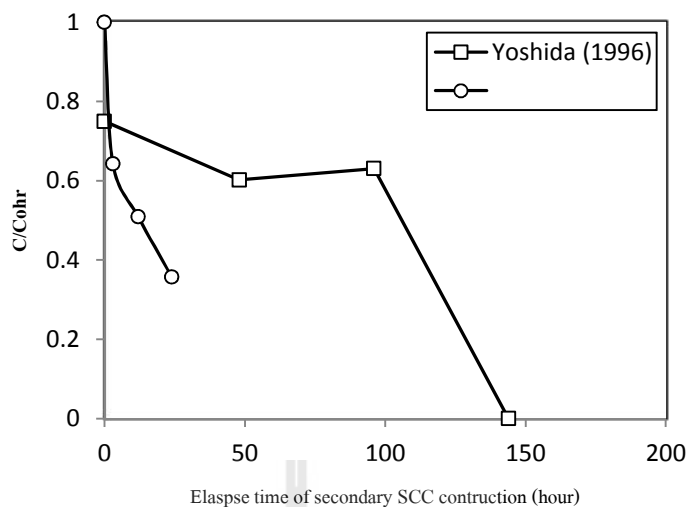
ช่วงเวลาก่อสร้างต่างๆ ต่อหน่วยแรงยึดเกาะที่ทิ้งช่วงเวลา 0 (C/C_{0hr}) จะเห็นได้ว่า
(C/C_{0hr}) แปรผกผันกับเวลาทิ้งช่วงก่อสร้าง เมื่อเวลาทิ้งช่วงก่อสร้างเท่ากับเวลาก่อนทดสอบของ
ดินซีเมนต์เพสต์ค่า (2) จะมีค่า (C_{2hr}/C_{0hr}) เท่ากับ 0.64 เมื่อเวลาทิ้งช่วงก่อสร้างเท่ากับ
เวลาก่อนทดสอบของดินซีเมนต์เพสต์ (13) มีค่า (C_{13hr}/C_{0hr}) เท่ากับ 0.51 ทิ้งช่วง
ก่อสร้างเป็น 24 (C_{24hr}/C_{0hr}) 0.36 กำลังรับแรงเฉือนส่วนที่เป็น
รอยต่อกันนั้นขึ้นกับเวลาทิ้งช่วงก่อสร้างอย่างมาก



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อระหว่าง SCC ช่วงก่อสร้าง

4.8 เปรียบเทียบแรงเฉือนบริเวณรอยต่อกับ (Yoshida 1996)

Yoshida (1996) รายงานความต้านทานแรงเฉือนของคันทับที่ปรับปรุง ชั้น มีค่า
 2 3 ของกำลังต้านทานเสาเข็มดินซีเมนต์ ไม่มี
 6 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนของส่วนที่ซ้อนทับ ทิ้งช่วง
 ก่อสร้างเป็นอย่างมาก ความต้านทานแรงเฉือนส่วนที่ซ้อนทับอยู่ในช่วง ร้อยละ 40
 70 รอยต่อของเสาเข็มดินซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่ารอยต่อของเสาเข็มดิน
 ซีเมนต์ที่ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง ทิ้งช่วงเกิน การก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ ทำให้รอยต่อของ
 ดินซีเมนต์เพสต์ มีค่าหน่วยแรงยึดเกาะลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์
 เพสต์ (13) ที่ทิ้งช่วงเวลา 24 36 ร์ ต่ การทิ้งช่วงเวลาก่อสร้าง
 ส่งผล อย่างมากกับแรงเฉือนระหว่างรอยต่อ ซีเมนต์ ซึ่งอาจทำให้รอยต่อของ SCCW
 ทำให้กำแพง SCCW แยกออกจากกัน เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการลดลงของ



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเกาะแต่ละเวลา
(Yoshida 1996)

Yoshida (1996) เป็นการ ดินที่เป็นซิลต์ การผสมกับดินซิลต์ทำให้
มีค่าเป็น 3470 ซึ่งสูงกว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์
ดินซีเมนต์ที่บ่มในสนามและผสมในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 600-730

งในงานจริงดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯส่วนใหญ่ก็ได้กำลังอัดแกนเดียวประมาณนี้ ด้วยกำลังของดิน
ซีเมนต์โดย Yoshida ที่สูงก็ทำให้ดินซีเมนต์เปราะขึ้น การผสมที่ทั้งช่วงเวลา 6
ของรอยต่อจึงไม่มีเลย

4.3

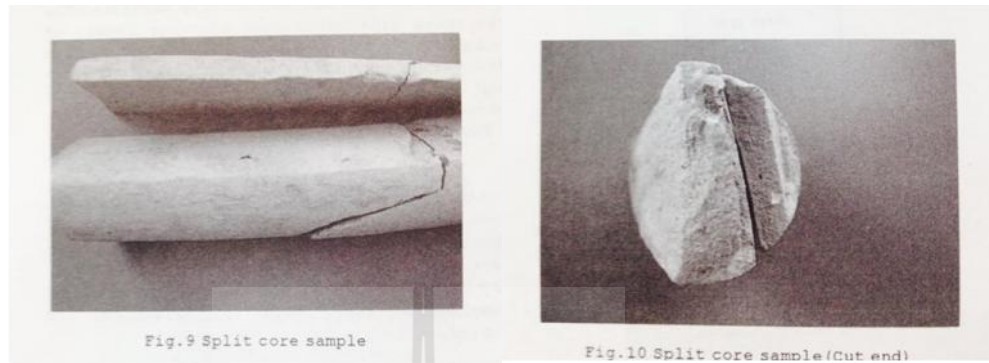
Yoshida

	Yoshida	
ดินที่ใช้ผสม	Soft Silt	Soft clay
water content	106 %	129%
W/C	1.0	1.0
อัตราส่วนผสม (kg/m ³)	169	175
(kPa)	3470	730

4.20 ภาพถ่ายการวิบัติบริเวณรอยต่อ (Yoshida, 1996)

ภาพถ้

บริเวณรอยต่อ 4.21 เห็นพบว่ารอยต่อของดินซีเมนต์เพสต์มีลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันมีลักษณะเป็นผิวเรียบ

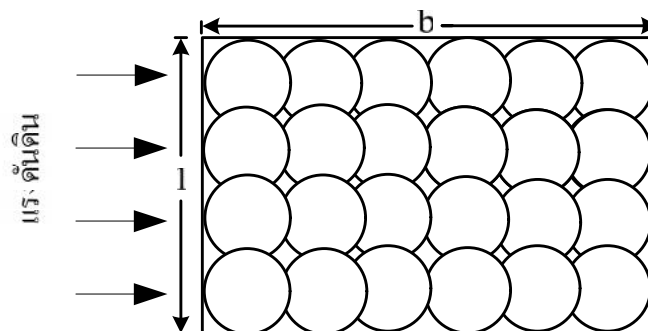


รูปที่ 4.20 ตัวอย่างบริเวณรอยต่อที่วิบัติ Yoshida (1996)



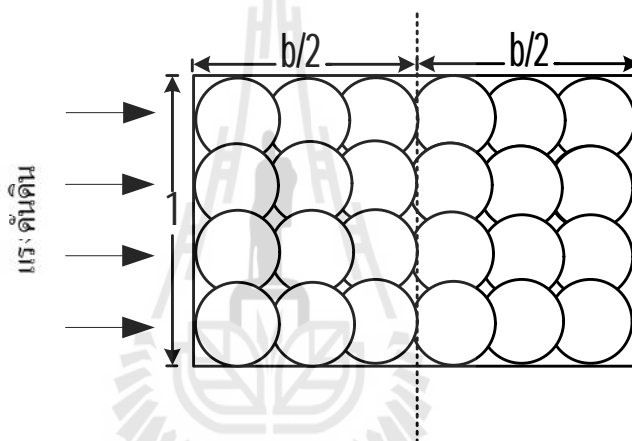
รูปที่ 4.21 ตัวอย่างวิบัติของรอยต่อ งานวิจัยนี้

ในการใช้งาน SCCW ส่วนไม่ต่อเนื่องในบริเวณแกนสะเทินที่ทำให้เกิดแรงเฉือนเมื่อกำแพงรับโมเมนต์คดขณะที่ใช้งาน สะเทินได้ การวิบัติแบบเฉือนตามยาวนี้ทำให้หน้าตัดของ SCCW ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้กำแพง b มีโมเมนต์ความเฉี เท่ากับ $b^3/12$ b/2 ทำให้โมเมนต์ความเฉียลดลงเหลือ $b^3/96$ มเมนต์ความเฉียลดลง 8 เท่า โมเมนต์ความเฉียลดลงนี้ทำให้กำลังต้านทานโมเมนต์คดและสติเฟนสของ SCCW ลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ SCCW แยกเป็นต้นๆ และ SCC แยกเป็นอิสระต่อกัน SCC ได้ถูกยึดยันโดยการลองกายภาพข้อส่วนที่กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ ซึ่งจากที่กล่าวมาเมื่อทำการก่อสร้าง SCCW ารหยุดงานก่อสร้างที่จุดไม่เหมาะสม



รูปที่ 4.22

b

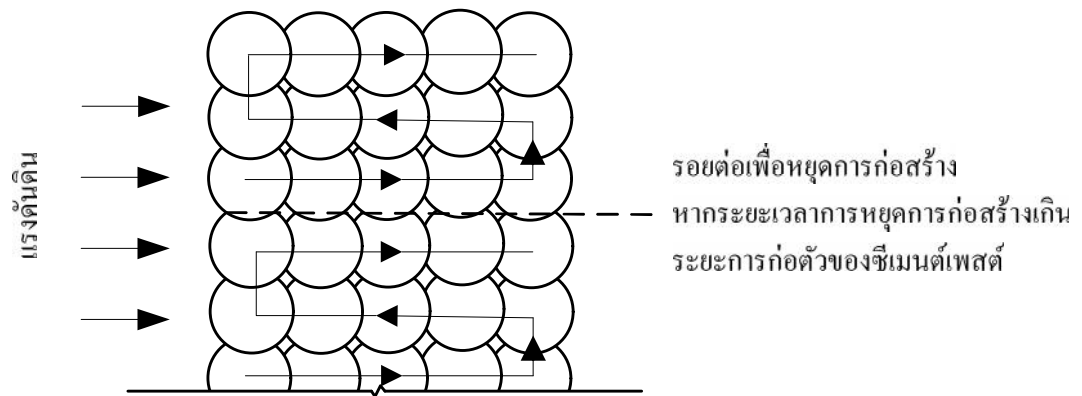


รูปที่ 4.23

ระหว่างแกนสะเทิน

4.9 แนวทางการหยุดการก่อสร้างที่เหมาะสม

จากข้อมูลจากงานวิจัยที่กล่าวมา จึงได้เสนอวิธีการหยุดการก่อสร้าง SCCW ก่อสร้างบริเวณรอยต่อทั้งช่วงเกินระยะเวลาก่อสร้างสุดท้ายของดินซีเมนต์พิเศษดังรูปที่ 4.24 หยุดก่อสร้างในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของ SCCW เนื่องจากเมื่อเกิดโมเมนต์ดัดขึ้นในกำแพงอันก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือนทางยาว SCC ที่ก่อสร้างในแนวตั้งฉากกับแรงดันดินจะมีหน่วยแรงเกาะที่สูงกว่าหากก่อสร้างต่อเนื่องกัน ส่วนแนวที่เป็นรอยต่อกำแพง SCC หน่วยแรงเฉือนทางยาวนั้นส่งอิทธิพลน้อยกว่า



รูปที่ 4.24 แนวทางการกำหนดรอยต่อเพื่อการหยุดการก่อสร้างกรณีที่
ระยะเวลาการก่อสร้างเกินกว่าระยะก่อสร้างของดินซีเมนต์เพสต์



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัย พฤติกรรมของแบบจำลองกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีเมนต์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและทิ้งช่วงเวลา 24 ชั่วโมง โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) จากผลการทดลองแบบจำลอง SCCW ที่ก่อสร้างด้วยเครื่องผสมเชิงกลแบบเปียกขนาดเล็กในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติด้วยวิธีการเลื่อนตรงพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของ S-SCCW ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 ชั่วโมงสูงกว่ากรณีก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

2) โหมดการวิบัติจากแบบจำลองพบว่ากรณีการวิบัติของ S-SCCW ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 ชั่วโมง ไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามยาวซึ่งแตกต่างจาก กรณีทิ้งช่วงเวลา 24 ชั่วโมงที่เกิดการวิบัติตามแนวยาวและ SCC วิบัติแบบหักโดยการคัดและเกิดจุดหมุนพลาสติกในเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสองต้น

3) การวิบัติของแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีเมนต์ที่เกิดการวิบัติตามแนวยาวของรอยต่อ หลังจาก SCC แยกออกจากกัน ทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยของ SCCW มีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งทำให้เกิดกำลังต้านทานโมเมนต์คัดและสติเฟนสของหน้าตัดลดลง

4) จากการทดสอบการก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ มีการก่อตัวเริ่มต้นที่ 2 ชั่วโมง และการก่อตัวสุดท้ายที่ 13 ชั่วโมง

5) จากการทดสอบเลื่อนตรงระหว่างรอยต่อในห้องปฏิบัติการ หน่วยแรงยึดเกาะแปรผกผันกับระยะเวลาการก่อสร้างเป็นอย่างมาก โดยที่เวลาก่อตัวสุดท้ายที่ 13 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง โดยมีหน่วยแรงยึดเกาะมีค่าเหลือเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ และ 36 เปอร์เซ็นต์ ของหน่วยแรงยึดเกาะแบบก่อสร้างทิ้งช่วงเวลา 0 ชั่วโมง และมุมเสียดทานภายในแปรผันตามระยะเวลาการก่อสร้างน้อยมาก

6) ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการหยุดการก่อสร้าง SCCW ในกรณีที่เป็นโดยการหยุดเป็นการหยุดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของกำแพงเพื่อให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่าง SCC และมีสติเฟนสของกำแพงสูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการศึกษาต่อในอนาคตแนะนำให้ศึกษาในลักษณะของเสาเข็มที่มีขนาดจริงในงานก่อสร้างที่มีระยะก่อสร้างทั้งช่วงเวลาต่างๆ
- 2) ศึกษาการเคลื่อนตัวเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับวิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนท์อิเลเมนต์



รายการอ้างอิง

- เกษม เพชรเกตุ. (2536). การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การประชุมทางวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจธ. ครั้งที่ 1, ประจำปี 2536 ณ ห้องประชุมจรัส ภาชะพงศ์, วันที่ 8-9 มิถุนายน 2536, หน้า 99-115.
- ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์. (2548). พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ลึกสำหรับงานโครงสร้างกันดิน.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 335 น.
- นฤทธิ ประกอบบุญ. (2546). การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 142 น.
- พงษ์ศิลป์ เดชะคนูวงศ์. (2544). การศึกษาพฤติกรรมความเค้นความเครียดของกำแพงกันดินชนิดเรียงต่อเนื่องด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 156 น.
- พรพจน์ ต้นเส็ง. (2555). การก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบ top-down โดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน. การสัมมนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก 2555
- วสท.2520. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- นิธิ ปรัชญาเศรษฐ. (2524). เสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของเชิงลาดดินเหนียวอ่อนมากที่เสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมโชค ประเสริฐวินิจกุล. (2545). การจำลองคันทางบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อนโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 131 น.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ, กระทรวงอุตสาหกรรม

สรารุช จริตงาม, 2542, “การใช้ Jet Grouting เป็นกำแพงกันดินในงานขุดห้องใต้ดิน”, การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 5, 24-26 มีนาคม 2542 โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้ จอมเทียน, หน้า GTE 30-37.

Broms, B.B., 1984, “**Stabilization of Soft Clay with Lime Column**”, Seminar on Soil Improvement Technics in Soft Ground, Singapore, pp. 120-133.

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.

Bhandari. (2006). **Laboratory Investigation of Stiffened Cement Mixed (SDCM) pile**, M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

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

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

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

Metcalf, J.C., 1977, “Principal and Application of Cement and Lime Stabilization”, Australian Road Research Board, No. 49, 20 p.

Moh, Z.C., 1962, “**Soil Stabilization with cement and sodium additives**”, Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering Division, No. 88, pp. 81-105.

Miki, G., (1985). **Soil Improvement by Jet Grouting**. Third International Geotechnical Seminar Soil Improvement Method, November, Singapore, pp. 45 - 52.

Larsson S. (1991), Shear box apparatus for modeling chemical stabilized soil - introductory tests . Dry mix method for deep soil stabilized , Balkema

Larsson S. Broms B.B. (2000) ,Shear box model tests with lime/cement columns –some observations for failure mechanisms,Geoeng 2000 , Melbourne,Australia.

Larsson S., Malm R., Charbit B., Ansell A. (2012) Finite element modeling of laterally loaded lime-cement columns using a damage plasticity, Computers and Geotechnics, 44 pp .48-57,Elsevier.

Stefan Larsson (2003), Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing, Doctoral thess, KTB Royal institute of Technology, Stockholm, Sweden.

- Tanseng P.(2012), Soil-cement column wall with wall-strut to minimize ground movement for road tunnel construction in Bangkok subsoils, World Tunnel Congress(WTC2021). Bangkok.
- Teparaksa, W., Thasananipan, N. and M.A.Anwar. (1999). **Based Grouting of Wet Process Bored Pile in Bangkok Subsoil, Pile in Bangkok subsoil.** 11th Asian Conference in Soil mech. & Geo.Eng., Korea.
- Tepasaksa W., Thasananipan N. and Tanseng 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
- Tonyagate, Werapong. (1978). **Geotechnical properties of Bangkok Subsoils for Subsidence Analysis.** Master' Thesis, AIT.
- Topolnicki, M. (2004). **In situ soil mixing (SM).** Ground Improvement 2nd edition, pp. 331-423.
- Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomsom, M.R., 1979, **Soil Stabilization in Pavement Structures** A User's Manual Mixture Design Consideration, US Government Printing Offices, Washington D.C., Vol. 2, 120 p.
- 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

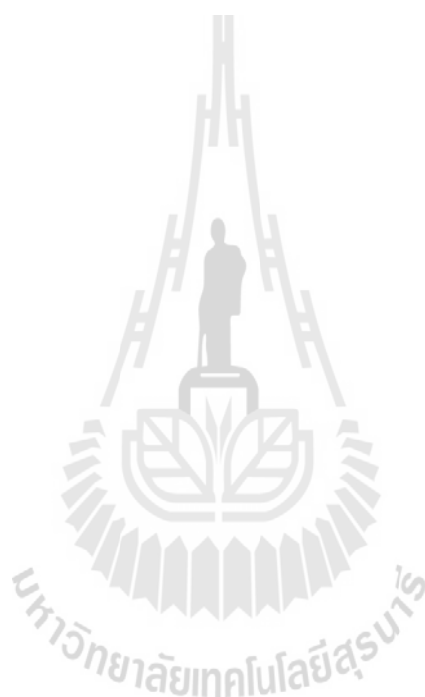
The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a central figure of a person stands on a pedestal. The entire emblem is surrounded by a decorative border. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in Thai script along the bottom curve of the emblem.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

พรพจน์ ดันเส็ง, วิษณุ คงสมพจน์ , และวรายุทธ ไชยสุข 2558. อิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตาม
แนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อ กำลังของกาแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซี
แคนท .การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 (The 20th National
Convention on Civil Engineering), GTE 095, วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558 จ.ชลบุรี





อิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อ
กำลังของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซีแคนท์

Influence of shear strength along soil-cement column on
strength of secant soil-cement column wall

พรพจน์ ดั้นเต็ง¹, วิชญ์ คงสมพงษ์², และวราวุธ ไชยสุข³

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้กล่าวถึงอิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อกำลังของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซีแคนท์ (Secant-Soil Cement Column, S-SCCW) ที่ผสมด้วยวิธีเชิงกลระบบเปียก งานวิจัยได้สร้างแบบจำลองกายภาพย่อส่วนโดยใช้เครื่องผสมขนาดเล็กกับดินเหนียวธรรมชาติในที่ และทดสอบเฉือนด้วยเครื่องทดสอบแบบเฉือนตรงขนาดใหญ่ในที่ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่ากำลังต้านทานของ S-SCCW ที่ก่อสร้างต่อเนื่องสูงกว่ากำลังต้านทานของ S-SCCW ที่เว้นระยะเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง เนื่องจากกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวที่สูงกว่า การวิจัยของ S-SCCW ที่ก่อสร้างเกินเวลาก่อสร้างด้วยแบบเฉือนตามแนวยาวทำให้กำแพงแยกเป็นสองส่วนทำให้สติเฟื่องลดลง การทดสอบแบบเฉือนตรงกับรอยต่อของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการที่ระยะเวลาทั้งช่วงก่อสร้างตั้งแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมงพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อเกิดขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงยึดเกาะเป็นส่วนใหญ่ โดยกำลังยึดเกาะแปรผกผันกับระยะเวลาทั้งช่วงก่อสร้างอย่างมีนัยยะสำคัญ

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, กำแพงกันดิน, งานขุดดินลึก, ดินเหนียวอ่อน, แบบจำลองกายภาพ

Abstract

This research paper presents the influence of the shear strength along soil-cement column on the strength of secant soil-cement column wall (S-SCCW). The research develop a miniature mixing tool to construct wet process mechanical mix S-SCCW.

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: pormpot@yahoo.com

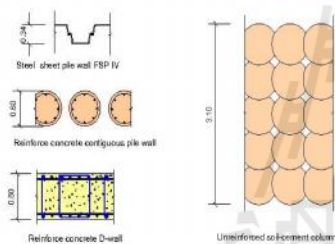
The research results indicated that the strength of S-SCCW with continuous construction is higher than the S-SCCW with 24 hours delay construction. The failure mode of S-SCCW with construction time exceed final setting time is shear failure along column which split the wall into two portion and reduce the stiffness of the wall. The direct shear tests on the soil-cement samples with variation of delay construction time from 0 to 24 hours show that the major shear strength comes from cohesion. The cohesion reduces significantly as the construction time increase.

Keywords: Soil cement column, retaining wall, deep excavation, soft clay, physical model test

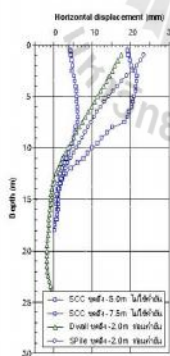
1. คำนำ

การก่อสร้างอาคารในเมืองใหญ่ปัจจุบันนี้ได้เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยอาคารส่วนใหญ่ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ซึ่งมีการพัฒนาแล้วเนื่องจากความเหมาะสมทางด้านตำแหน่งที่ตั้งและการคมนาคม ซึ่งพื้นที่ใช้สอยของอาคารนั้นถูกกำหนดโดยข้อกำหนดจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ให้เป็นประโยชน์มากที่สุด ทางออกในการเพิ่มพื้นที่ใช้สอยที่นิยมใช้ได้แก่การออกแบบให้มีชั้นจอดรถใต้ดิน ซึ่งทำให้พื้นที่ของอาคารเพิ่มขึ้น ในทางวิศวกรรมการก่อสร้างชั้นใต้ดินโดยเฉพาะการก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนนั้นจำเป็นต้องเลือกใช้ระบบป้องกันดินทั้งที่มีความปลอดภัยและเหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์ ระบบป้องกันดินทั้งที่วิศวกรเลือกใช้ส่วนใหญ่มักเป็นระบบที่วิศวกรมีความคุ้นเคย ซึ่งได้แก่ระบบกำแพงกันดินเข็มตีด (sheet pile wall), ระบบกำแพงกันดินโคอะแฟรม (diaphragm wall, D-wall), และระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) ดังรูปที่ 1 ซึ่ง

กำแพงดังกล่าวต้องคำนวณโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากแรงดันดินข้างที่กระทำต่อกำแพง กำแพงเหล่านี้จำเป็นต้องมีค้ำยันด้านข้างเพื่อลดโมเมนต์ดัดในกำแพงและยังเพิ่มสติเฟส ของกำแพงให้การอ่อนของกำแพงลดลง ระบบกำแพงกันดินที่จำเป็นต้องใช้ค้ำยันด้านข้างนี้ให้ขั้นตอนการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการขุดหน้าดินในพื้นที่ขนาดใหญ่ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นจากระบบค้ำยันที่ต้องใช้พื้นที่ที่ ด้วยเหตุนี้ระบบกำแพงกันดินที่สามารถต้านทานแรงดันดินโดยไม่ต้องใช้ค้ำยันจึงเป็นทางเลือกที่เป็นที่สนใจในการก่อสร้างชั้นดิน ระบบกำแพงกันดินที่ไม่ต้องใช้ค้ำยันจำเป็นต้องมีกำลังและสติเฟสในสภาพที่จะต้านทานแรงดันดินได้ โดยการเคลื่อนตัวไม่มากจนทำให้โครงสร้างในบ่อขุดและโครงสร้างข้างเคียงได้รับผลกระทบจนเกิดความเสียหาย ระบบกำแพงกันดินที่มีคุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (SCCW) ดังรูปที่ 1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินแล้วพบว่า SCCW นั้นหากมีการออกแบบและก่อสร้างเป็นอย่างดีแล้วการเคลื่อนตัวของกำแพงนั้นค่อนข้างต่ำดังรูปที่ 2



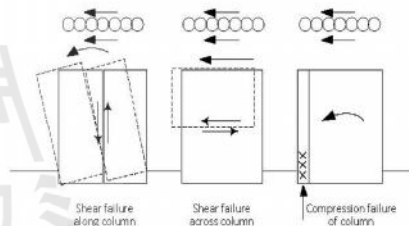
รูปที่ 1 เปรียบเทียบขนาดของกำแพงกันดินที่นิยมใช้กับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์โดยใช้มาตราส่วนเดียวกัน



รูปที่ 2 การเคลื่อนตัวของแนบคานยื่นของเสาเข็มดินซีเมนต์เปรียบเทียบกับเคลื่อนตัวของกำแพงเข็มดินและกำแพงโพะแฟรม

ในการออกแบบ SCCW นั้นสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาได้แก่กำลังต้านทานต่อโมเมนต์ดัดของกำแพง ในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการศาสตร์วัสดุนั้นได้พิจารณาสมมติให้น้ำหนัก SCCW เป็นเนื้อเดียว แต่ในความเป็นจริงแล้ว SCCW นั้นก่อสร้างโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (SCC) หลายต้นมาเรียงกัน โดยการจัดเรียงนั้นจะมีทั้งแบบเรียงแบบผิว SCC ตะกั้น (Tangent SCCW, T-

SCCW) และเรียงแบบมีการซ้อนทับ (Secant SCCW, S-SCCW) การเรียงตัวลักษณะนี้ก่อให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของ SCCW ทำให้สมมติฐานให้ SCCW มีเนื้อเดียวนั้นผิดไปจากความเป็นจริงมาก ความไม่ต่อเนื่องของ SCCW ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดัดของ SCCW เป็นอย่างมาก โดย [5] เสนอโหมดการวิบัติของ SCCW ที่เกิดจากการพังของ SCC ได้ดังรูปที่ 3 โดยโหมดการวิบัติที่สำคัญได้แก่การวิบัติแบบเฉือนตามแนวยาวของ SCC (Shear failure along column) และการเฉือนขาดขวาง SCC (shear failure across column) โหมดการวิบัติเหล่านี้ขึ้นกับกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวระหว่าง SCC โดยกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของ Tangent-SCCW นั้นขึ้นกับกำลังรับแรงเฉือนของดินเนื่องจาก SCC ไม่มีการซ้อนทับกัน ส่วนกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของ Secant-SCCW นั้นขึ้นอยู่กับกำลังของ SCC หากการก่อสร้างเป็นไปอย่างต่อเนื่อง แต่หากการก่อสร้างมีความไม่ต่อเนื่องในแนวที่เกิดหน่วยแรงเฉือนตามแนวยาว กำแพงอาจเกิดการวิบัติแบบแตกตามยาวซึ่งทำให้กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและสติเฟสของกำแพงลดลงอย่างมากและอาจทำให้กำแพงวิบัติหรืออาจเกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงที่สูงมากได้



รูปที่ 3 โหมดการวิบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ [5]

เพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความไม่ต่อเนื่องของ SCCW ต่อสติเฟสของกำแพงจึงได้เลือกโครงการที่ใช้ SCCW เป็นกำแพงป้องกันดินพังในการขุดดินลึกสองโครงการที่ใช้ระบบกำแพงกันดินแบบ T-SCCW และแบบ S-SCCW ที่มีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวมาเปรียบเทียบกัน โดยโครงการแรกเป็นโครงการที่ใช้ T-SCCW เป็นระบบป้องกันดินพังระหว่างการขุดดิน โดย [1] ได้รายงานถึงการขุดดินลึกประมาณ 8.5 เมตรเพื่อก่อสร้างคลองระบายน้ำ การขุดใช้ SCC เป็นกำแพงกันดินยาวตั้งรูปที่ 4 กำแพงกันดินประกอบด้วย SCC เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตรเรียงแบบผิวชนกัน 8 แถว คิดเป็นความหนาของกำแพงเท่ากับ 5.56 เมตร และมี SCC ด้านหน้ากำแพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร เรียงแบบผิวชนกันอีก 4 แถว ปลายกำแพงกันดินฝังในชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับ -16.0 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ที่ระดับพื้นบ่อมี SCCW แบบปูพรมหนา 1 เมตรทั่วทั้งบ่อ เมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงส่วนที่เป็นคานหัวกำแพงมีค่าประมาณ 240 มิลลิเมตร

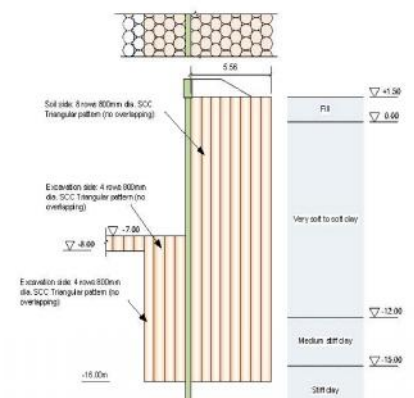
โครงการที่สองเป็นโครงการที่ใช้ S-SCCW เป็นระบบป้องกันดินพังระหว่างการขุดดิน [10] ได้รายงานถึงการขุดดินลึก 7.65 เมตร โดยใช้ SCCW เป็นกำแพงกันชั่วคราว กำแพงกันดินประกอบด้วย SCC เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร จำนวน 6 แถว เรียงเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นความหนากำแพง 3.7 เมตร และใช้เสาเข็มดินซีเมนต์

เรียงเป็นกำแพงค้ำยัน (SCC wall strut) ทุกระยะ 2.35 เมตร ที่กันบ่อชุด เพื่อเป็นกำแพงค้ำยันที่กันบ่อตั้งรูปที่ 5 เมื่อชุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัว ด้านข้างสูงสุดวัดโดย inclinometer คือ 20 มิลลิเมตร

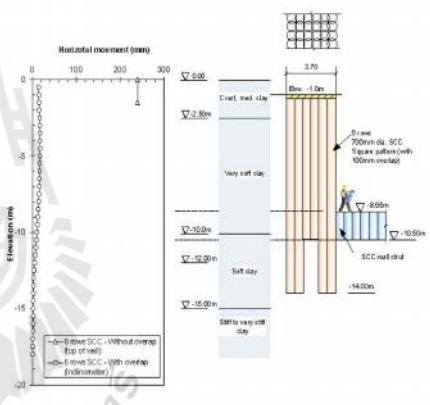
เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงทั้งสองกรณีที่มีความลึกของการขุดใกล้เคียงกันพบว่า S-SCCW ที่ใช้ความหนาของกำแพงน้อยกว่าและมีระยะห่างของกำแพงสั้นกว่า T-SCCW มีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างต่ำกว่าถึง 12 เท่า ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าการประสานกันระหว่าง SCC โดยการจัดให้มี overlap นั้นช่วยให้กำแพงมีสติเฟ้นสูงซึ่งทำให้การเคลื่อนตัวของกำแพงลดลง การออกแบบให้ SCCW เป็นระบบ S-SCCW ทำให้กำแพงมีกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการประสานของ SCC ในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งแตกต่างจากกรณี S-SCCW ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวมีเพียงดินที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มดังนั้นเข็มแต่ละต้นจึงแยกตัวเป็นอิสระต่อกันสติเฟ้นจึงลดลง ลักษณะการเคลื่อนตัวของ T-SCCW ยังได้รายงานไว้โดย [2] อีกด้วย

ถึงแม้ว่าจะออกแบบให้ SCCW มีระยะเหลื่อมแล้วก็ตาม ในบางกรณีการเหลื่อมกันของ SCC อาจไม่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบผสมเชิงกลด้วยใบกวาดดิน สาเหตุหลักเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของการก่อสร้าง กล่าวคือหากขั้นตอนการก่อสร้างมีการทิ้งช่วงเวลา ซึ่งอาจเกิดจากการหยุดการก่อสร้างประจำวัน หรือความขัดข้องของเครื่องจักร ทำให้ดินซีเมนต์เพสต์ดินที่ก่อสร้างไว้แล้วก่อตัว การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ขุดด้วยวิธีผสมเชิงกลจะทำลายเนื้อเสาเข็มเดิมบางส่วนเพื่อให้เกิดระยะเหลื่อม ดินซีเมนต์เพสต์ดินใหม่จะไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกับ SCC ต้นที่สร้างไว้ก่อนหน้า ลักษณะการไม่ประสานของ SCCW เนื่องจากรอยต่อของการก่อสร้างเป็นดังรูปที่ 6 ซึ่งเห็นเป็นร่องที่ SCC แยกตัวโดยที่ไม่มีการประสานระหว่าง SCC สองต้น กำลังต้านทานการเลื่อนส่วนใหญ่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของ SCC โดยไม่เกิดจากหน่วยแรงยึดเกาะ (cohesion) สาเหตุเกิดจากการก่อสร้างที่เว้นระยะก่อสร้างเป็นเวลานานเกินกว่าเวลาที่ตัวของดินซีเมนต์เพสต์ลักษณะของ SCCW ที่ก่อสร้างต่อเนื่องเป็นดังรูปที่ 7 ซึ่งรูปตัดตามขวางตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของ SCC เห็นได้ว่า SCC ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ถึงแม้จะเห็นแนวรอยต่อระหว่าง SCC แต่กำลังต้านทานต่อการเลื่อนตามยาวมีมากพอที่จะต้านการเลื่อนทางยาวได้โดยไม่เกิดการวิบัติ

ดังนั้นการพัฒนาทำลิ่งต้านทานต่อการเลื่อนทางยาวบริเวณที่เหลื่อมกัน จึงมีความสำคัญกับการออกแบบ SCCW ที่ก่อสร้างด้วยวิธีผสมเชิงกลอันจะทำให้ SCCW ยึดเป็นก้อนเดียวกัน แต่ปัจจัยจากขั้นตอนการก่อสร้างอาจทำให้กำลังรับแรงเฉือนบริเวณที่เหลื่อมกันลดลงเนื่องจากการก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเป้าไปยังการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างแบบต่อเนื่อง และเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างทิ้งช่วงเวลานานกว่าเวลาที่ตัวของซีเมนต์เพสต์ เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและก่อสร้างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ให้สามารถต้านทานแรงดันดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4 รูปตัดขวางและการจัดเรียงกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นเหนือของการขุดดินลึก 8.5 เมตร แบบไม่เหลื่อม (tangent) เพื่อการสร้างประตูระบาย [1]



รูปที่ 5 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของ S-SCCW สำหรับการขุดดินลึก 7.65m [10] กับการเคลื่อนตัวของ T-SCCW สำหรับการขุดดินลึก 8.5 เมตร [1]



รูปที่ 6 SCC หลุดออกจากกันทำให้เห็นรอยต่อที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกับของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 7 SCC ที่ก่อสร้างต่อเนื่องกัน เห็นรอยต่อระหว่าง SCC แต่ไม่หลุดแยกจากกัน

2. วิธีการวิจัย

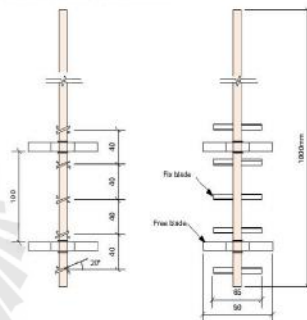
ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องอัดแรงกับแบบจำลอง SCC จากงานวิจัยของ Larsson [6, 7, 8] ซึ่งได้พัฒนาเครื่องอัดแรงดินซีเมนต์ปูนขาว (Soil-cement-lime column, SCLC ซึ่งใช้เสาเข็ม SCLC ขนาด 50 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร เปรียบเทียบ SCLC โดยใช้เครื่องอัดแรงดินขนาดเล็กที่กดดินเข้ากับผงปูนซีเมนต์และผงปูนขาวที่บรรจุไว้ล่วงหน้าโดยอาศัยท่อทองแดงดันลงในดินเหนียวเกาหลี ดินเหนียวเกาหลีนี้ได้สร้างขึ้นในห้องทดลอง กล้องอัดแรงเป็นกล่องกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5m และดินเหนียวเกาหลีมีปริมาณน้ำในดินเป็น 48-50% การอัดแรงดินอัดลงโดยใช้วิธีควบคุมแรงกระทำต่อแบบจำลอง (load control) เป็นลำดับขั้น ซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงตั้งจาก 0.64kPa จนถึง 4 kPa จากนั้นลดแรงตั้งลงจนทำให้หน่วยแรงเหลือ 0.32 kPa การทดสอบนี้ได้สร้างดินเหนียวเกาหลีขึ้นในห้องทดลองจึงอาจไม่สามารถเป็นตัวแทนของดินธรรมชาติได้

ซึ่งการทดลองแบบจำลองดินเหนียวอ่อนในสนามได้ดำเนินการโดย [3] ซึ่งได้พัฒนาเครื่องอัดแรงกับแบบจำลอง (Large direct shear box) โดยกล่องที่ใช้เป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าและใช้แม่แรงให้แรงกระทำต่อตัวอย่าง แบบจำลอง SCC ที่ใช้เป็นแท่งทรงกระบอกที่ผสมจากภายนอกแล้วเสียบลงในดินเหนียวคงสภาพในสนามจากนั้นฉีดดินเหนียวที่เสียบแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ไว้จนจบ

จากงานวิจัยของ [6, 7, 8] ได้ทำการทดสอบเฉพาะการผสมเชิงกลแบบฉีดปูนผงซึ่งเป็นระบบผสมแบบแห้ง และไม่ได้อาศัยการทดสอบกับการผสมแบบผสมเชิงกลระบบเปียกซึ่งเป็นที่ยอมรับในประเทศไทยมากกว่า อีกทั้งในงานวิจัยได้ทดสอบกับดินเหนียวเทียมซึ่งสร้างจากดินเกาหลี ส่วนที่นำมาเป็นต้นแบบของงานวิจัยนี้คือวิธีการผสมดินในที่ตั้งด้วยเครื่องมือผสมขนาดเล็ก ซึ่งทำให้การปรับปรุงคุณภาพดินมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์จริง ส่วนงานวิจัยของ [3] นั้นได้ทดสอบกับดินธรรมชาติในสนาม แต่ยังไม่ได้รับการทดสอบโดยใช้การผสมดินตัวอย่างในที่ตั้งด้วยเครื่องมือผสมขนาดเล็ก ซึ่งผลทำให้เสาเข็มที่ได้มีค่าเสถียรซึ่งแตกต่างจากเสาเข็มในธรรมชาติ และทำให้การยึดเกาะระหว่างดินกับเสาเข็มแตกต่างไปจากสภาพการ

ก่อสร้างจริงเนื่องจากเสาเข็มที่ก่อสร้างจริงมีผิวที่ขรุขระเนื่องจากการหมุนของใบกวาดดิน ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกข้อดีของงานวิจัยทั้งสองมาเป็นต้นแบบเพื่อออกแบบการทดสอบ โดยใช้กล้องอัดแรงขนาดใหญ่กับดินเหนียวคงสภาพในสนามและผสมดินด้วยระบบเปียกในที่โดยใช้ใบกวาดดินขนาดเล็กซึ่งทำให้สภาวะการทดสอบใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับแบบจำลอง SCC สัดส่วน 1:10 โดยใช้วิธีการผสมเชิงกลแบบเปียก และทดสอบกำลังของแบบจำลอง SCC กับดินธรรมชาติในสนาม โดยใช้แปลงทดสอบที่ ตำบลเป็ริง อำเภอบางป่อง จังหวัดสมุทรปราการ ชั้นดินที่เลือกใช้ศึกษาเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมาก ที่มีความไวตัวสูง ลึก 2.5 เมตรจากผิวดิน การขุดเปิดหน้าดินช่วงแรกใช้รถดักดินและขุดโดยใช้แรงงานคนเมื่อใกล้ระดับทดสอบเพื่อลดการรบกวนดิน เครื่องผสมดินที่ใช้จำลองจากเครื่องผสมดินแบบเชิงกล โดยมีใบกวาดดิน 5 ชุดตามแนวตั้ง ดังรูปที่ 8 ใบกวาดดินกว้าง 65 มิลลิเมตรวัดจากปลายใบกวาดและปิดท้ายมุม 20 องศาตามผลการวิจัยของ [6] ก้านผสมได้คิดในแบบอิสระ (free blade) เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมความตั้งของก้านผสมเมื่อใบผสมต้องตัด SCC ที่ก่อตัวแล้ว รูปที่ 9 เป็นภาพถ่ายของก้านผสมดิน



รูปที่ 8 ก้านผสมเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเล็ก มีใบกวาดดิน 5 ชุดและมีใบอิสระสำหรับควบคุมความตั้งของก้าน 2 ชุด (ระยะเป็นมิลลิเมตร)



รูปที่ 9 ภาพถ่ายก้านผสมเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเล็ก

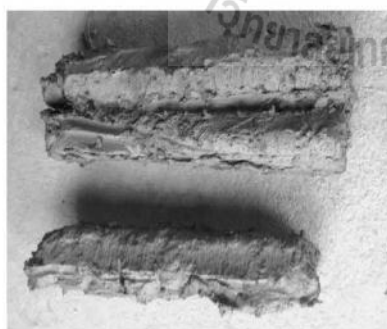
ในการผสมดินด้วยเครื่องมือผสมขนาดเล็กใช้วิธีส่งน้ำปูนโดยใช้วิธีของ [7] ดังรูปที่ 10 ทำโดยการกดท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ววัดลงไปดินตรงศูนย์กลางตำแหน่ง SCC เป็นระยะ 800 มิลลิเมตร จากนั้นกรอกน้ำปูนที่มี

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.0 จากนั้นตั้งท่อพีวีซีขึ้นเพื่อปล่อยน้ำปูนให้อยู่ในดิน จากนั้นควนดินด้วยเครื่องผสมขนาดเล็กที่ติดกับส่วนมือ โดยรอบของการหมุนส่วนอยู่ที่ 40 รอบต่อนาที ในขั้นตอนการทดลองหมุนก้านตามเข็มนาฬิกาและก้านลงด้วยอัตรา 1 เมตรต่อนาที เมื่อกลก้านลงไป 800 มิลลิเมตรแล้วกลับทิศทางการหมุนแล้วถอนก้านขึ้นด้วยอัตรา 1 เมตรต่อนาที อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเสาเข็มเท่ากับ 175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขั้นตอนการพัฒนาเครื่องมือได้ทดลองตั้งตัวอย่าง SCC ที่ผสมและก่อตัวแล้วขึ้นมาเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการผสมได้ดังรูปที่ 11

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสามารถใช้ได้แก่ ผสมดินเดี่ยวเพื่อใช้ทดสอบกำลังอัดแกนเดียว, ผสมสองดินโดยดินที่สองเหมือนกับต้นแรกเป็นระยะ 10 มิลลิเมตรก่อสร้างต่อเนื่องกันทันที, และผสมสองดินโดยดินที่สองก่อสร้างหลังจากเสร็จต้นแรกแล้ว 24 ชั่วโมง เมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วบ่มโดยการคลุมส่วนบนด้วยดินเหนียวเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ



รูปที่ 10 ขั้นตอนการก่อสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม

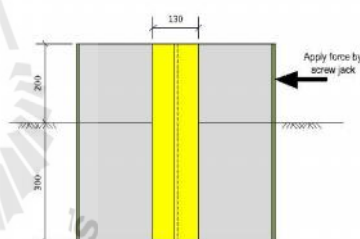
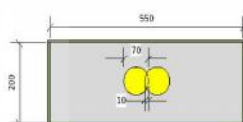


รูปที่ 11 ลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ผสมโดยใช้เครื่องผสมขนาดเล็กในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติ

หลังจากตัวอย่างมีอายุ 28 วัน ทำการทดสอบเมื่อนแบบจำลองโดยใช้วิธีทดสอบแบบเมื่อนตรง โดยเครื่องมือตัดแปลงจากเครื่องมือของ [3] ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 เครื่องมือประกอบด้วยยกกล่องเหล็กหนา 8 มิลลิเมตรสองส่วน ส่วนบนสูง 200 มิลลิเมตรและส่วนล่างสูง 600 มิลลิเมตร การเตรียม

ทดสอบทำโดยยกกล่องเหล็กลงในดินให้แนว SCC อยู่กึ่งกลางกล่องและยกกล่องส่วนล่างลงลงในดิน จากนั้นออกแรงดันกล่องส่วนบนโดยใช้แม่แรงแบบหมุนเพื่อเป็นการเลื่อนตัวอย่าง วัดแรงเมื่อนโดยใช้แหวนวัดแรงและวัดการเคลื่อนตัวแนวราบโดยใช้ dial gauge เมื่อทดสอบจนตัวอย่างวิบัติแล้วชุดดินด้านข้างเพื่อเปิดด้านหนึ่งของกล่องเหล็กออก จากนั้นลอกดินหุ้ม SCC ออกอย่างระมัดระวังเพื่อบันทึกลักษณะการวิบัติของ SCC สำหรับตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ดินเดี่ยวได้ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเมื่ออายุได้ 28 วัน

เพื่อศึกษาถึงเวลาที่เหมาะสมในการก่อสร้าง SCC ให้มีความต่อเนื่องกันจึงใช้วิธีทดสอบการก่อตัวของดินซีเมนต์พิเศษด้วยการทดสอบโดยพิมพ์ในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์พิเศษแบ่งเป็นสองระยะ ได้แก่ เวลาก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และเวลาก่อตัวสุดท้าย (final setting time) อัตราส่วนผสมดินซีเมนต์เป็น 200 กิโลกรัมต่อดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ w/c เท่ากับ 1.0 ดินเหนียวที่ใช้เป็นดินจากแปลงทดสอบแบบจำลองส่วนปูนซีเมนต์เป็นปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 12 มิติของกล่องทดสอบเมื่อนตรงที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง SCC



รูปที่ 13 ภาพถ่ายเครื่องมือทดสอบ

3. ผลการวิจัย

คุณสมบัติทางกายภาพและกำลังของดินเหนียวอ่อนมากในแปลงทดสอบมีปริมาณน้ำในดินเป็น 129 เปอร์เซ็นต์, พิกัดพลาสติกเป็น 65 เปอร์เซ็นต์, พิกัดเหลวเป็น 120 เปอร์เซ็นต์, และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนมากซึ่งทดสอบโดยวิธี unconfined compression test เป็น 14.7 kPa ความไวของดินอยู่ที่ 10

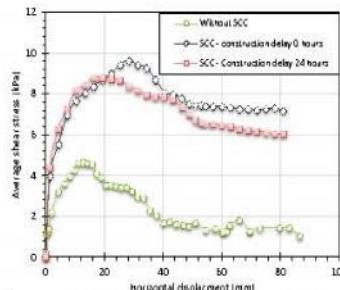
กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวที่ผสมโดยใช้เครื่องผสมขนาดเล็กในแปลงทดสอบแล้วชุบน้ำทดสอบเป็น 650 kPa

รูปที่ 14 เป็นกราฟหน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวแนวราบจากการทดสอบเฉือนตรงต่อแบบจำลอง ของดินที่ไม่เสริม SCC, ดินเสริม SCC ไม่ที่ช่วงก่อสร้าง, และดินเสริม SCC ที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากรณีทั้งช่วงก่อสร้าง 0 ชั่วโมง (ก่อสร้างต่อเนื่อง) หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเป็น 9.62 kPa ที่ระยะเคลื่อนตัว 28 มิลลิเมตร จากนั้นลดลงจนเหลือ 7.2 kPa ซึ่งคงที่ที่การเคลื่อนตัว 50 มิลลิเมตร กรณีที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมง หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 8.8 kPa ที่การเคลื่อนตัว 16.3 มิลลิเมตร จากนั้นลดลงจนเหลือ 6.1 kPa ที่การเคลื่อนตัว 72mm รูปที่ 16 เป็นภาพถ่ายการวิบัติของ SCC ที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 0 ชั่วโมง เห็นได้ว่าการวิบัติเป็นแบบเฉือนทางขวางกับแนว SCC รูปที่ 16 เป็นภาพถ่ายการวิบัติของ SCC ที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมง เห็นได้ว่าการเกิดการเฉือนตามแนวยาวของ SCC ตรงรอยต่อและ SCC ทัดคู่กับโมเมนต์คดและเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นตรงตำแหน่งเดียวกันทั้งสองต้น

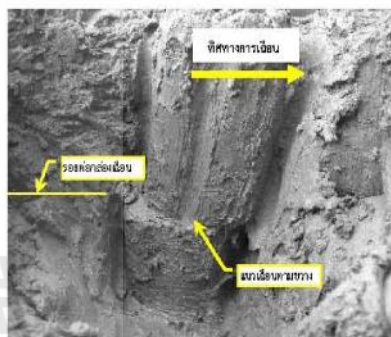
ผลการทดสอบแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงการเคลื่อนตัวต่ำกว่า 20 มิลลิเมตร SCCW มีกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยเท่ากับทั้งสองกรณีเนื่องจากแรงเฉือนที่กระทำต่อแบบจำลองยังไม่ก่อให้เกิดการวิบัติบนเฉือนตามแนวยาวของ SCCW คุณสมบัติหน้าตัดของ SCCW จึงยังเท่ากัน ทำให้กำลังต้านทานต่อการเฉือนทั้งสองกรณียังเท่ากันอยู่ แต่เมื่อเพิ่มแรงเฉือนทำให้การเคลื่อนตัวในแนวราบเกินกว่า 20 มิลลิเมตร SCCW ที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมงเกิดการวิบัติบนเฉือนตามแนวยาวทำให้ SCC แยกจากกันเป็นสองต้นดังรูปที่ 17a หลังจาก SCC แยกจากกันโมเมนต์ความเฉื่อยลดลงเป็นอย่างมากซึ่งทำให้กำลังต้านทานโมเมนต์คดลดลงจน SCC เกิดการวิบัติแบบหักโดยมีจุดหมุนพลาสติกเกิดขึ้นตรงรอยต่อของร่องเฉือนตรง ส่วนกรณี SCCW ที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 0 ชั่วโมง รอยต่อไม่เกิดการแยกตัวเมื่อเพิ่มแรงเฉือนกระทำต่อแบบจำลอง โมเมนต์ความเฉื่อยจึงไม่ลดลงเหมือนกับกรณีทั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมง ทำให้กรณีทั้งช่วงก่อสร้าง 0 ชั่วโมงสามารถต้านทานโมเมนต์คดได้ต่อเนื่องโดยไม่วิบัติแบบหักโดยการคดเสียก่อน และเมื่อเพิ่มแรงเฉือนต่อแบบจำลองจนแบบจำลองวิบัติการวิบัติเป็นใหม่ดเฉือนทางขวางกับ SCCW ดังรูปที่ 17b

การเกิดการวิบัติแบบหักโดยการคดของกรณีทั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมงนี้ มีรูปแบบเหมือนกับการวิบัติของแบบจำลอง SCC ที่เว้นระยะห่าง 1.5 เท่าที่ทดสอบโดย [3] ซึ่งการวิบัติเกิดจากการหักแบบถูกคดดังรูปที่ 18

เมื่อกำลังต้านทานแรงเฉือนพัฒนาจนสูงสุดแล้วเมื่อให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้น หน่วยแรงเฉือนต้านลดลงเหลือเป็นหน่วยแรงค้าง (residual stress) ซึ่งหน่วยแรงค้างกึ่งคดที่หน้าตัดไม่แยกจากกันนั้นสูงกว่ากรณีหน้าตัดแยกจากกันเนื่องจากการเฉือนตามยาว



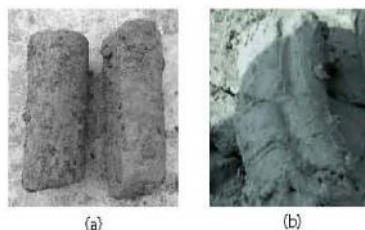
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง



รูปที่ 15 การวิบัติของเสาเข็มที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 0 ชั่วโมง (ก่อสร้างต่อเนื่อง)



รูปที่ 16 การวิบัติของเสาเข็มที่ก่อสร้างเสร็จที่ระยะห่างกัน 24 ชั่วโมง



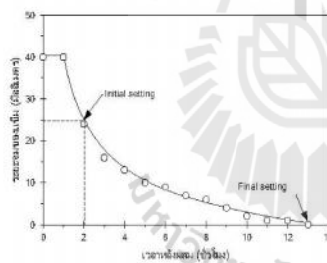
รูปที่ 17 SCCW หลังการวิบัติ; (a) SCCW ที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมง ไม่แยกตัวตามแนวยาว, (b) SCCW ที่ทั้งช่วงก่อสร้าง 0 ชั่วโมง ไม่แยกตัวตามแนวยาว



รูปที่ 18 การวางตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบวันระยะห่าง 3 ดัน ที่เห็นจุดหลุมพลาสติกใน SCC [3]

ผลการทดสอบเพื่อยืนยันกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ลดลงเนื่องจากการทิ้งช่วงก่อสร้างแบ่งเป็นสองส่วนได้แก่ผลการทดสอบหาเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เฟสดี และผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธีเฉือนตรงในห้องปฏิบัติการกับตัวอย่างที่ทิ้งช่วงก่อสร้างที่ 0, 2, 13, และ 24 ชั่วโมง

รูปที่ 19 เป็นการประจักษ์ของเข็มโวกะกับเวลาหลังผสม เห็นได้ว่าเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เฟสดีเริ่มต้นเป็น 2 ชั่วโมง ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของดินซีเมนต์เฟสดีเป็น 13 ชั่วโมง ก่อตัวสุดท้ายของดินซีเมนต์เฟสดีนั้นนานกว่าการก่อตัวของซีเมนต์เฟสดีที่กำหนดในมาตรฐาน มอก. 15-2547 ซึ่งระบุให้การก่อตัวของซีเมนต์เฟสดีสุดท้ายต้องไม่เกิน 6 ชั่วโมง 15 นาที



รูปที่ 19 เวลาก่อตัวเริ่มต้นและเวลาก่อตัวสุดท้ายของดินซีเมนต์เฟสดี

ตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อระหว่างดินซีเมนต์ด้วยวิธีทดสอบแบบเฉือนตรง เห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์บริเวณรอยต่อขึ้นกับทั้งกำลังยึดเกาะและมุมเสียดทานภายใน โดยมีมุมเสียดทานภายในมีค่า 33.1 ถึง 34.9 องศาเมื่อตัวอย่างที่ทิ้งช่วงก่อสร้างไม่เกินเวลาก่อตัวสุดท้าย และมีมุมเสียดทานภายในมีค่าเป็น 30.5 องศาเมื่อตัวอย่างที่ทิ้งช่วงก่อสร้างเกินเวลาก่อตัวสุดท้าย เห็นได้ว่ามุมเสียดทานภายในไม่ขึ้นกับเวลาทิ้งช่วงก่อสร้างอย่างมีนัยยะสำคัญ

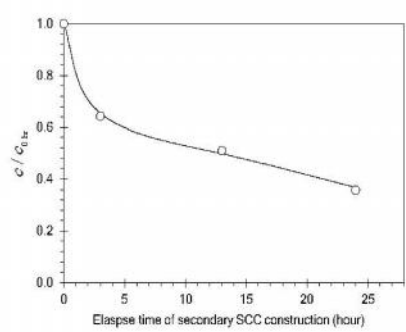
ในทางกลับกันหน่วยแรงยึดเกาะ (cohesion,) แปรผกผันกับเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้างอย่างชัดเจน ดังเห็นได้จากหน่วยแรงยึดเกาะลดลงจาก 210 kPa (เวลาที่ทิ้งช่วง 0 ชั่วโมง) เหลือเพียง 75 kPa (เวลาที่ทิ้งช่วง 24 ชั่วโมง) ซึ่งหน่วยแรงยึดเกาะนี้เป็นกำลังต้านทานแรงเฉือนที่สำคัญสำหรับ SCC เนื่องจากการใช้ SCC เป็นกำแพงกันดินนั้น ด้านหนึ่งของกำแพงไม่มีหน่วยแรงตั้งฉากเนื่องจากเป็นอากาศดังนั้นกำลังต้านทานต่อการเฉือนตามยาวที่เกิดจากมุมเสียดทานภายในจึงเกิดขึ้นน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงเสนอ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของหน่วยแรงยึดเกาะที่การทิ้งช่วงก่อสร้างต่างๆ คือหน่วยแรงยึดเกาะที่การทิ้งช่วง 0 ชั่วโมง (c/c_{0hr}) กับเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 20 จากรูปเห็นได้ว่า c/c_{0hr} แปรผกผันกับเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้าง โดยเมื่อเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้างเท่ากับเวลาก่อตัวเริ่มต้นของดินซีเมนต์เฟสดีค่า c/c_{0hr} มีค่าเป็น 0.64, เมื่อเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้างเท่ากับเวลาก่อตัวสุดท้ายของดินซีเมนต์เฟสดีค่า c/c_{0hr} ลดลงจนเหลือ 0.51, และเมื่อเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้างเป็น 24 ชั่วโมง c/c_{0hr} มีค่าเท่ากับ 0.36 ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่าง SCC นั้นขึ้นกับเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้างอย่างมาก หาก SCC มีส่วนไม่ต่อเนื่องในบริเวณแกนเสทของกำแพงซึ่งเกิดหน่วยแรงเฉือนสูงสุด เมื่อกำแพงรับโมเมนต์คดขณะใช้งานอาจเกิดการวิบัติแบบเฉือนตามยาวในแนวแกนเสทเห็นได้ การวิบัติแบบเฉือนตามยาวนี้ทำให้หน้าตัดของ SCCW ไม่เป็นเนื้อเดียวและทำให้โมเมนต์ความเคี้ยวของกำแพงที่มีความหนา b ลดลงจาก $b^3/12$ เหลือเพียง $b^3/192$ กำแพงที่โมเมนต์ความเคี้ยวลดลงนี้ทำให้กำลังต้านทานโมเมนต์คดและสติฟเนสของ SCCW ลดลงอย่างมาก ทำให้ SCCW อาจเกิดการวิบัติแบบหักแบบแยกเป็นต้นๆ และการเคลื่อนตัวของกำแพงเพิ่มขึ้นเนื่องจาก SCC แยกเป็นอิสระต่อกันได้ ซึ่งรูปแบบการวิบัติของกำแพง SCC ได้ถูกยืนยันโดยการทดสอบกับแบบจำลองกายภาพของส่วนที่กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ที่ระยะเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้างต่างๆ จากการทดสอบเฉือนตรง

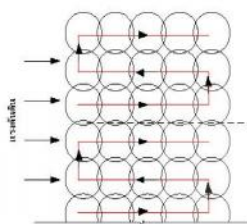
เวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้าง	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (degree)
0 ชั่วโมง	210	34.9
2 ชั่วโมง	135	33.1
13 ชั่วโมง	107	33.1
24 ชั่วโมง	75	30.5

* เวลาก่อตัวเริ่มต้น, ** เวลาก่อตัวสุดท้าย



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อระหว่าง SCC กับระยะเวลาที่ทิ้งช่วงก่อสร้าง

จากข้อมูลการวิจัยข้างต้น ผู้เขียนจึงได้เสนอวิธีการหยุดการก่อสร้าง SCCW หากการก่อสร้างบริเวณรอยต่อที่ซึ่งเกินระยะเวลาที่กำหนดด้วยของดินซีเมนต์เฟสที่ 21 โดยควรหยุดก่อสร้างในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของ SCCW เนื่องจากเมื่อเกิดโมเมนต์คดขึ้นในกำแพงอันก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือนทางยาว SCC ที่ก่อสร้างในแนวตั้งฉากกับแรงดันดินจะมีหน่วยแรงยึดเกาะที่สูงกว่าหากก่อสร้างต่อเนื่องกัน ส่วนแนวที่เป็นรอยต่อกำแพง SCC หน่วยแรงเฉือนทางยาวนั้นส่งอิทธิพลน้อยกว่า



รูปที่ 21 แนวทางการกำหนดรอยต่อเพื่อหยุดการก่อสร้างกรณีที่มีระยะเวลาก่อสร้างเกินกว่าระยะที่กำหนดของดินซีเมนต์เฟสที่ 21

4. สรุป

งานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบแบบจำลอง S-SCCW ที่ก่อสร้างด้วยเครื่องผสมเชิงกลแบบเปียกขนาดเล็กในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติด้วยวิธีเดือนตรงพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของ S-SCCW ที่ก่อสร้างต่อเนื่องสูงกว่ากรณีที่ตั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมง
2. โหมดการวิบัติจากการทดสอบแบบจำลองพบว่ากรณีที่ตั้งช่วง S-SCCW ที่ก่อสร้างต่อเนื่องกันไม่เกิดการวิบัติแบบเลื่อนตามแนวยาว ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่ตั้งช่วงก่อสร้าง 24 ชั่วโมงที่การวิบัติเป็นแบบเลื่อนตามแนวยาวและ SCC วิบัติแบบหักโดยการคดและเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นในเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสองต้น
3. จากการทดสอบแบบเดือนตรงในห้องปฏิบัติการ หน่วยแรงยึดเกาะแปรผกผันกับระยะเวลาที่ตั้งช่วงก่อสร้างอย่างมาก โดยที่เวลาที่ช่วงเท่ากับเวลาก่อสร้างสุดท้ายที่ 13 ชั่วโมง หน่วยแรงยึดเกาะมีค่าเฉลี่ยเพียง 64 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงยึดเกาะแบบก่อสร้างต่อเนื่อง มุมเสียดทานภายในแปรผันตามระยะเวลาที่ตั้งช่วงก่อสร้างน้อยมาก
4. ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการหยุดการก่อสร้าง S-SCCW ในกรณีที่จำเป็น โดยการหยุดเป็นการหยุดในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของกำแพงเพื่อให้หน่วยแรงยึดเกาะระหว่าง SCC มีค่าสูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณพ่อดอร์ พรยามณี ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาแปลงที่ดินสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐฤกษ์ วิสุทธิแพทย์ (2548), พฤติกรรมเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ลึกสำหรับงานโครงสร้างกันดิน, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] นฤทธิ์ ประกอบบุญ (2546), การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของคันข้างในงานขุด, วิทยานิพนธ์, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] นิธิ ปรัชญาเศรษฐ (2554), เสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของเชิงลาดดินเหนียวอ่อนมากที่เสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2547 (2547): มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ, กระทรวงอุตสาหกรรม
- [5] Broms B. B. (2004), Lime and lime/cement columns, Ground improvement 2nd edition, Spon press.
- [6] Larsson S. (1999), Shear box apparatus for modelling chemical stabilized soil - introductory tests, Dry mix methods for deep soil stabilization, Balkema.
- [7] Larsson S. and Broms B. B. (2000), Shear box model tests with lime/cement columns - some observations for failure mechanisms, Geoen 2000, Melbourne, Australia.
- [8] 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.
- [9] Stefan Larsson (2003), Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing, Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [10] Tanseng P. (2012), Soil-cement column wall with wall-strut to minimize ground movement for a road tunnel construction in Bangkok subsoils, World Tunnel Congress (WTC2012), Bangkok.

ประวัติผู้เขียน

นายวิษณุ คงสมพจน์ เกิดวันพุธที่ 24 ตุลาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนดำรงราษฎร์สงเคราะห์ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ในปีการศึกษา 2555 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา ในปีการศึกษา 2555 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษา กับ บริษัท เพาเวอร์โลเอนจิเนียริง จำกัด (มหาชน) เป็นระยะเวลา 4 เดือนและเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2556 และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่องในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 (the 20th national convention on civil engineering), GTE 095