

การศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีต่อกำลังต้านทาน  
แรงด้านข้างในดินเหนียวอ่อน โดยใช้แบบจำลองเขื่อนตรงขนาดใหญ่ในสนาม



นางสาวศรุตตาภรณ์ ทรงศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ขนส่ง และทรัพยากรธรณี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2565

A STUDY OF INFLUENCE OF SOIL-CEMENT COLUMN  
ARRANGEMENT ON LATERAL RESISTANCE IN SOFT CLAY BY  
USING LARGE MODEL FIELD DIRECT SHEAR TEST

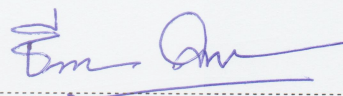


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Civil, Transportation and Geo-resources Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2022

การศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีต่อกำลังต้านทานแรงด้านข้าง  
ในดินเหนียวอ่อน โดยใช้แบบจำลองเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



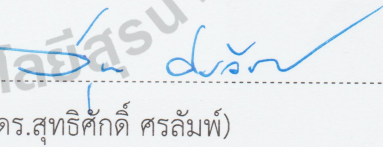
(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

ประธานกรรมการ



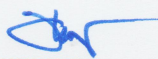
(ผศ. ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



ครุฑาภรณ์ ทรงศรี : การศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีต่อกำลังต้านทานแรง  
ด้านข้างในดินเหนียวอ่อน โดยใช้แบบจำลองเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม (A STUDY OF  
INFLUENCE OF SOIL-CEMENT COLUMN ARRANGEMENT ON LATERAL RESISTANCE IN  
SOFT CLAY BY USING LARGE MODEL FIELD DIRECT SHEAR TEST)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง, 65 หน้า.

คำสำคัญ : เสาเข็มดินซีเมนต์, ที่ดินเหนียวอ่อน, การผสมเชิงกลแบบเปียก, การเดือนตรงขนาดใหญ่

งานวิจัยนี้พฤติกรรมของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column, SCC) ที่มีต่อกำลัง  
ต้านทานแรงด้านข้างในดินเหนียวอ่อน โดยใช้แบบจำลองเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม ในการศึกษาได้  
ทำการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดย่อสัดส่วน 1:10 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70  
มิลลิเมตร ในชั้นดินเหนียวอ่อนธรรมชาติของแปลงทดสอบที่อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา  
การก่อสร้างใช้วิธีผสมเชิงกลแบบเปียกด้วยใบก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็กที่ควบคุมด้วยสว่านไฟฟ้า  
โดยศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแท่นจนทและแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่  
ต่อเนื่อง โดยใช้วิธีการเดือนตรงขนาดใหญ่ด้วยกลองเดือนที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อการศึกษา  
โดยเฉพาะและสามารถเปิดด้านข้างของกลองเพื่อศึกษารูปแบบการวิบัติของดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ได้  
เมื่อทดสอบจนถึงจุดวิบัติแล้ว การเดือนกระทำในสนามโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายดินเพื่อลดการรบกวน  
ตัวอย่างน้อยที่สุด นอกจากนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการรบกวนเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สิ้นสุดการก่อตัวของ  
ซีเมนต์เพสต์ด้วยการทดสอบกำลังรับแรงเดือนของรอยต่อดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีทดสอบ  
แบบเดือนตรงเพื่อใช้ในการพัฒนาวิธีการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อรับแรงด้านข้างใน  
ดินเหนียวอ่อน ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงเดือนของรอยต่อดินซีเมนต์ลดลงตามระยะเวลาเว้นการ  
ก่อสร้างที่นานขึ้น โดยที่ระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เว้นช่วงเวลา 0 ชั่วโมงมีค่ากำลังรับแรงเดือนของ  
ดินซีเมนต์สูงซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนามพบว่าการก่อสร้างเสาเข็มดิน  
ซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องสามารถต้านทานแรงด้านข้างในดินเหนียวอ่อนได้สูงและลักษณะ  
การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์สามารถต้านทานโมเมนต์ตัดได้สูงโดยไม่เกิดการวิบัติแบบหัก

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา ทรงหาภาวณิ ทศศักดิ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา พรพจน์ ต้นเส็ง

A STUDY OF INFLUENCE OF SOIL-CEMENT COLUMN ARRANGEMENT ON LATERAL RESISTANCE IN SOFT CLAY BY USING LARGE MODEL FIELD DIRECT SHEAR TEST  
THESIS ADVISOR : ASST. PROF PORNPOT TANSENG, Ph.D., 65 PP.

KEYWORD : SOIL-CEMENT COLUMN, SOFT CLAY, WET MIXING METHOD, LARGE DIRECT SHEAR TEST

This paper presents the studied of influence of soil-cement column arrangement on lateral resistance in soft clay by using large model field direct shear test. Which using the 1 to 10 scale of soil-cement with a diameter 70 millimeter in the soft clay at Bang Sai District, Phra Nakhon Si Ayutthaya. Using the wet mixing method with mixing tool by electric drill. Studies the influence of tangent and secant of continuous and non-continuous, which using the large direct shear test by shear box, there is designed and developed for this article, that can open side for studies of the result of soil and soil-cement failures. Direct shear test in the field without moving the soil. In this article, the influenced of soil-cement interference of cement paste at the final setting time of the cement paste with shear strength test of soil-cement interface in the laboratory by direct shear test for development of the design method and construction method for lateral loads. The result indicated that the shear strength of the joint of soil-cement with longer construction intervals, The construction 0 hour showed high shear strength, which corresponded to a Large direct shear box test in the field. It was found that the construction of continuous secant soil-cement column could high lateral resistance in soft clay and the failure mechanism of soil-cement column could high bending moment without fracture failure.

School of Civil Engineering  
Academic Year 2022

Student's Signature พรพศพร พรหม  
Advisor's Signature พ.ร.ศ. พ.ร.ศ.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุน และการให้ความร่วมมือจากบุคคลและกลุ่มบุคคลที่กรุณาให้คำปรึกษาในเชิงวิชาการและการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ ของการวิจัย ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ดังรายนามต่อไปนี้

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

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

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา และผู้ที่ผู้วิจัยให้ความเคารพทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

ศรุตการณ์ ทรงศรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ญ
บทที่ 1 .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 ปรัชญาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เสาคementซีเมนต์ .....	3
2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์ .....	4
2.2.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของดินผสมซีเมนต์ .....	5
2.3 ความเป็นมาของเสาคementซีเมนต์ .....	7
2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์ .....	8
2.5 ระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ (Setting time of cement paste) .....	12
2.6 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาคementซีเมนต์แบบกลุ่ม .....	13
2.7 การประยุกต์ใช้เสาคementซีเมนต์.....	16
2.8 การทดสอบแบบจำลองเสาคementซีเมนต์ในสนาม .....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	28
3.1 พื้นที่ทดสอบ .....	28
3.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์.....	30
3.3 การทดสอบ Direct shear test กำลังต้านทานแรงเฉือนระหว่างรอยต่อดินซีเมนต์ ใน ห้องปฏิบัติการ .....	30
3.4 การสร้างแบบจำลองเสาคementซีเมนต์.....	31
3.5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาคementซีเมนต์ในสนาม โดยใช้ Large direct shear test.....	35

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผล .....	39
4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์ .....	39
4.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือน โดยวิธี Direct shear test ในห้องปฏิบัติการ .....	40
4.3 ผลการทดสอบหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	44
4.4 ผลการทดสอบกลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	45
4.4.1 ผลเนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์ .....	47
4.5 เปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	48
4.5.1 เปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์กับของจริงและวิธีอื่น .....	48
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	52
5.1 สรุปผลงานวิจัย .....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	53
เอกสารอ้างอิง .....	54
ภาคผนวก ก .....	57
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	57
ประวัติผู้เขียน .....	65



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 พารามิเตอร์ของกำลังรับแรงเฉือนที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้างต่างๆ.....	42
2 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน.....	49



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 รูปแบบการจัดเรียงของเสาเข็มดินซีเมนต์ (a) Secant.....	1
2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ (Teparaksa et al., 1999).....	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength และระยะเวลาในการผสมสารยึดเกาะ .....	4
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ % สารผสมเพิ่ม (Metcalf, 1977) .....	5
2.4 วิธีการสร้าง Cement/Lime Column (JICA, 1998).....	9
2.5 ขั้นตอนการผสมแบบ Wet mixing method (Miki, 1985).....	10
2.6 วิธีการผสมลิกแบบ Dry jet mixing method (Miki, 1985).....	11
2.7 ใบพัดผสมของ Dry jet mixing method .....	11
2.8 รูปแบบการวิบัติของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ (Brom, 2004).....	13
2.9 โหมดการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นเดียว .....	14
2.10 กำลังรับแรงเฉือนบริเวณรอยต่อ (Yoshida, 1996).....	14
2.11 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก (Broms, 2004).....	15
2.12 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน (Broms, 2004).....	15
2.13 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก (Yoshida, 1996).....	16
2.14 ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	17
2.15 ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน .....	18
2.16 รายละเอียดการใช้ DCM ของโครงการหนึ่งในอำเภอพระประแดง .....	19
2.17 รูปตัดขวางและการจัดเรียงกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ของการขุด.....	20
2.18 กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ secant สำหรับการขุดดินลึก 7.65 m (Tanseng 2012) เปรียบเทียบกับ การเคลื่อนตัวของกำแพง SCC แบบ สำหรับการขุด ดินลึก 8.5 m (ณัฐฤกษ์ วิสุทธิ แพทย์ 2548) .....	21
2.19 ก้านเจาะผสมที่ทำมุม 20° และ 45° .....	22
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ Total mixing work .....	22
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ Total mixing work .....	22
2.22 (a)แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนและกำลังอัด .....	23
2.23 กำลังของรอยต่อดินซีเมนต์ .....	23
2.24 กระบวนการผสมแบบจำลองด้วยวิธี Dry Mixing.....	24
2.25 การทดสอบกล่องเฉือน (Larsson and Broms, 2000).....	25

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 รูปแบบการวิบัติ (Larsson and Broms, 2000) .....	25
2.27 ตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ .....	26
2.28 รูปแบบกล่องเฉือนของ (นิธิ,2554).....	26
2.29 การวิบัติของแท่งดินซีเมนต์ (นิธิ,2554).....	26
2.30 กล่องเฉือนของ (วิชญ,2558) .....	27
2.31 การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	27
3.1 ผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน .....	28
3.2 ตำแหน่งของพื้นที่ทดสอบ .....	29
3.3 ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน.....	30
3.4 ทดสอบเฉือนตรงด้วยวิธี Direct shear test ของรอยต่อดินซีเมนต์.....	31
3.5 ก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็ก .....	32
3.6 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์.....	32
3.7 ตำแหน่งทดสอบตามการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์.....	33
3.8 รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมตันเดียว.....	33
3.9 รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมสองต้น วางชิดกันโดยไม่.....	34
3.10 รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมสองต้น ต้นที่สองเหลื่อมกับต้นแรกเป็นระยะ	
10 มิลลิเมตร โดยต้นที่สองก่อสร้างหลังต้นแรกแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง.....	34
3.11รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมสองต้น .....	34
3.12 กล่องเฉือนตรงที่ใช้ทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงด้านข้าง .....	35
3.13 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การวัดแรง.....	36
3.14 นำกล่องเฉือนกดลงในดินเหนียวอ่อนครบตัวอย่างทดสอบ.....	36
3.15 ชุดเปิดดินรอบกล่องเฉือนที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตร .....	37
3.16 ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงและอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวที่ส่วนของของกล่องเฉือน .....	37
3.17 เริ่มให้แรงด้วยเครื่องกลแบบมือหมุน โดยควบคุมอัตราเร็วให้คงที่ .....	37
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังการผสมกับระยะจมนของเข็มไวกแคท.....	39
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง .....	40
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง .....	41
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อดินซีเมนต์กับหน่วยแรงกดทับ .....	42
4.5 การวิบัติของรอยต่อที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง .....	43

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 การวิบัติของรอยต่อที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมง.....	43
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อดินซีเมนต์.....	44
4.9 หน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวแนวราบของเสาเข็มดินซีเมนต์.....	45
4.10 รูปแบบการวิบัติของ 1SCC.....	46
4.11 รูปแบบการวิบัติของ 2SCC-T24.....	46
4.12 รูปแบบการวิบัติของ 2SCC-S24.....	46
4.13 รูปแบบการวิบัติแบบของ 2SCC-S24.....	47
4.14 ลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ 2SCC-S24 ที่ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง.....	47
4.15 ลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ 2SCC-S ที่ก่อสร้างต่อเนื่อง.....	48
4.16 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นเดียว.....	49
4.17 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง.....	50
4.18 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่อง.....	51



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SCC	=	เสาเข็มดินซีเมนต์
$S_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ
$q_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ถูกจำกัด
DCM	=	การปรับปรุงดินโดยวิธีผสมลิก
$v$	=	อัตราส่วนปัวซอง
$\phi'$	=	ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน
$\sigma_{vo}'$	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
$\gamma$	=	หน่วยน้ำหนักดิน
M	=	Modulus multiplier
$\sigma$	=	ความเค้นตั้งฉาก
$\varepsilon$	=	ความเครียดตั้งฉาก
$\tau$	=	กำลังรับแรงเฉือน
C	=	หน่วยแรงยึดเกาะ
$C/C_{0hr.}$	=	อัตราส่วนของหน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลาต่างๆต่อหน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลา 0 ชั่วโมง
$C_{9hr.}$	=	หน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลา 9 ชั่วโมง
$C_{24hr.}$	=	หน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

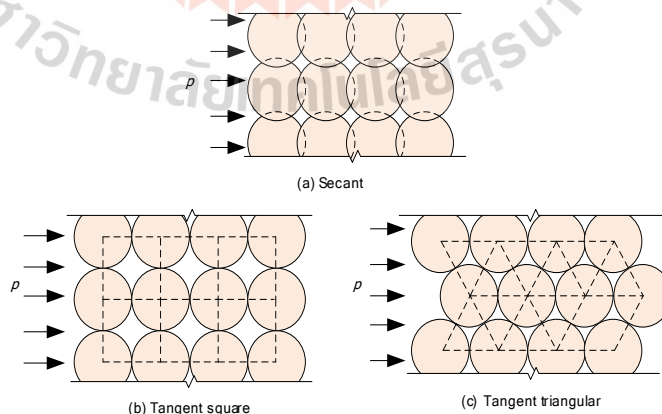
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การก่อสร้างชั้นใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อนอาจก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในปริมาณมาก และเกิดการทรุดตัวจากการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในดิน จึงจำเป็นต้องใช้ระบบป้องกันดินพังถูกลำนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ระบบกำแพงกันดิน เข็มพืดเหล็ก (Sheet pile) และระบบค้ำยันชั่วคราว ระบบกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Pile wall) และระบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Diaphragm wall) อีกทางเลือกหนึ่งคือ ระบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column, SCCW) มีการนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ให้สามารถต้านทานแรงด้ายข้างในดินเหนียวอ่อน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบ ได้แก่ ความแข็งแรงของกำแพงกันดิน (Wall stiffness) ความแข็งแรงของระบบค้ำยัน (Bracing stiffness)

ในการออกแบบการก่อสร้างที่มีความแตกต่างของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (SCC) หลายต้นมาเรียงกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักได้แก่ การจัดเรียงแบบซีแคนท์ (Secant) มีการซ้อนทับกัน การจัดเรียงแบบแทนเจนต์สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Tangent square) ไม่มีการซ้อนทับ การจัดเรียงแบบแทนเจนต์สามเหลี่ยม (Tangent triangular) ดังรูปที่ 1.1 โดยส่วนใหญ่ในการจัดเรียงแบบไม่มีการซ้อนทับมักจะเกิดการวิบัติทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์แยกอิสระออกจากกันเนื่องจากระยะเวลาในการก่อสร้างเว้นช่วงเวลานานเกินกว่าระยะการก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ทำให้รอยต่อระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีผลต่อต้านทานแรงเฉือนที่เกิดจากหน่วยแรงยึดเกาะและมุมเสียดทานภายในระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 0.1 รูปแบบการจัดเรียงของเสาเข็มดินซีเมนต์ (a) Secant (b) Tangent square (c) Tangent triangular

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างและวิเคราะห์กลไกการวิบัติของดินเหนียวอ่อนที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยแบบจำลองเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม โดยเพิ่มเสถียรภาพการรับแรงด้านข้างในดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ใช้วิธีผสมเชิงกลแบบเปียก (Wet mixing method) ด้วยก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็ก ในการศึกษานี้ได้ทดสอบระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์และกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการออกแบบการก่อสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์และการทดสอบเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม โดยการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์จัดเรียงแบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์และวิเคราะห์กลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่จัดเรียงแบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินเหนียวอ่อน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. 2. 1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวอ่อนที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยใช้วิธีเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม
1. 2. 2 เพื่อศึกษากลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยใช้วิธีเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม
1. 2. 3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระยะเวลาการก่อตัวของดินซีเมนต์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ ในห้องปฏิบัติการ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่พบใน ตำบลบางไทร อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยทำการทดสอบแบบจำลองย่อส่วน 1:10 ของเสาเข็มดินซีเมนต์กับดินตัวอย่างในสนาม โดยการผสมด้วยก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็กแบบระบบเปียกและทดสอบ โดยใช้วิธีการเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

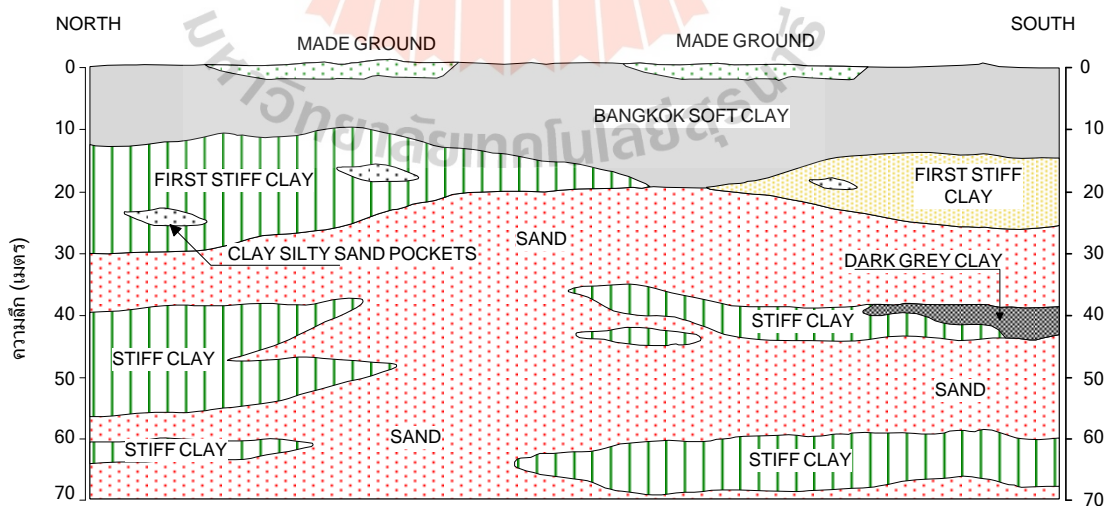
- 1.4.1 เพื่อทราบถึงพฤติกรรมของแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง
- 1.4.2 เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้ออกแบบและผู้ก่อสร้างในการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและกลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาในงานก่อสร้าง

## บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เสาค้ำดินซีเมนต์

ว.ส.ท. (2520) ได้รายงานลักษณะของ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีความลึกประมาณ 10-18 เมตร เป็นดินตะกอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำที่มีขนาดเม็ดเล็กมาก ถูกพัดมาจากทางตอนเหนือของ กรุงเทพมหานคร เมื่อกระแสน้ำมาปะทะกับน้ำทะเลในอ่าวไทย ทำให้เกิดกระแสน้ำลดความเร็วลง ดินที่ถูกพัดพามาจึงตกตะกอนเป็นบริเวณกว้าง บางส่วนถูกน้ำพัดพาลงสู่อ่าวไทย เมื่อน้ำขึ้นดินส่วนที่ตกตะกอนบริเวณอ่าวไทยไม่หมดก็จะถูกน้ำพัดพามาตกตะกอนบริเวณปากอ่าว ปกคลุม 14 จังหวัด บริเวณกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม ราชบุรี ชลบุรี นครปฐม นนทบุรี ฉะเชิงเทรา สุพรรณบุรี พระนครศรีอยุธยา นครนายก และปราจีนบุรี เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นดินที่มีขนาดเม็ดเล็กมากที่มีปริมาณความชื้น(Water content) สูง

Tonyagate, (1999) ได้รายงานลักษณะชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯซึ่งประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 13-16 เมตร โดยมีปริมาณความชื้น (Water content) ของชั้นดินเหนียวอ่อนประมาณ 65-90 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดเหลว (Liquid limit) มีค่าสูง โดยมีค่าใกล้เคียงกับ Water content คือมีค่าระหว่าง 60-140 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) เท่ากับ 2.0 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำประมาณ 0.4-1.5 ตันต่อตารางเมตรซึ่งมีค่าต่ำมากและความไวตัว (Sensitivity) อยู่ระหว่าง 8-10 โดยได้แสดงหน้าตัดความลึกชั้นดินของดินกรุงเทพฯบริเวณทางตอนเหนือถึงตอนล่างของเขตพื้นที่กรุงเทพฯที่ระดับความลึก -70 เมตรจากผิวดิน ดังรูปที่ 2.1



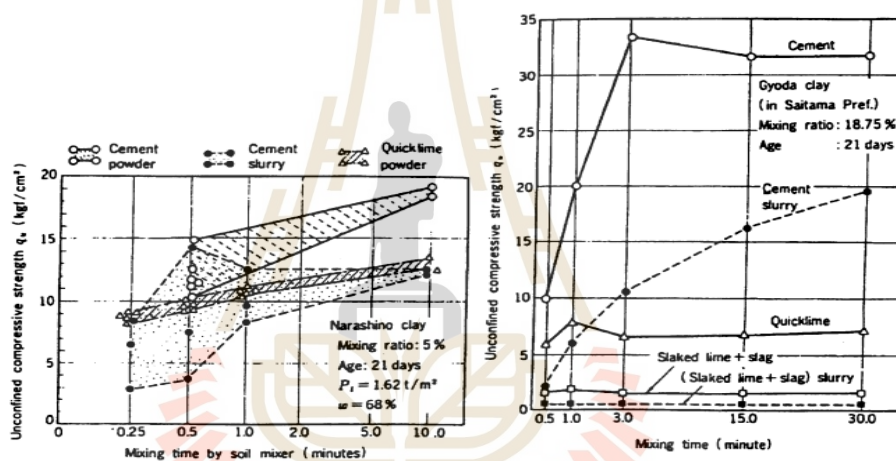
รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa et al., 1999)



## 2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์

การปรับปรุงดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้น โดยการใส่สารผสมเพิ่มที่มีกำลังสูง ซึ่งเป็นนิยมใช้กันอย่างมากในการปรับปรุงคุณภาพดินทั้งในบริเวณตื้นหรือลึก เช่น กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น กำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น การยึดเกาะระหว่างเม็ดดินมีความหนาแน่นมากขึ้น มีความทนทานต่อการกัดเซาะและมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น เป็นต้น

Chida (1982) ได้รายงานการศึกษาผลของสารยึดเกาะ ผง หรือสารละลายที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงานในห้องปฏิบัติการ พบว่าเมื่อใช้ผงซีเมนต์เป็นสารยึดเกาะ ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการผสมเตรียมชิ้นงาน และทำให้แรงอัดเพิ่มขึ้นที่เวลา 3 นาที เมื่อเวลาผสมนานขึ้นกำลังอัดค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 2.2 และ (Larsson, 1999) ได้รายงานการนำปูนขาวมาใช้เป็นสารยึดเกาะ ได้รายงานไว้ว่ากำลังรับแรงอัดจะน้อยลงตามเวลาในการผสม



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength และระยะเวลาในการผสมสารยึดเกาะ

Lambe, Mitchell และ Moh(1959) และ Moh (1962) ได้รายงานสารประกอบ 4 อย่างที่มีอยู่ในซีเมนต์ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S), ไดแคลเซียม (C2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C3A) และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C4AF) เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH), และรีลีสไฮเดรทไลม์ (ปูนขาว) ประบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับเชื่อมยึด นอกจากนี้ รีลีสไฮเดรทไลม์(ปูนขาว) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ความเป็นด่าง(pH) ของ Pore Water เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ Colloidal Gel หรือ Cement Gel เกิดการรวมตัวแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุของการบ่ม 9 ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบเมื่อเกิด ซีเมนต์ไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดดินจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะไม่อุดเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน โดยแรงเชื่อมยึดติดกัน จะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางด้าน Mechanical ของ CSH และ CAH ที่อนุภาคดินส่วนดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบทั้งด้าน Mechanic Interlock และ Chemical Cementation การยึด

เกาะทางด้าน Chemical Cementation นั้น เกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ตามผิวเม็ดดิน ส่วนสารประกอบ CSH และ CAH ที่อยู่รอบเม็ดดินจะทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน

Herzog และ Mitchell (1963) ได้กล่าวว่าถึงการเกิดซีเมนต์ไฮดรเจนในช่วงแรกจะมีการเกิด CSH และ CAH ขึ้นมาก่อน หลังจากนั้น ปฏิกิริยา ซิลิกาและ อะลูมินา ที่มีอยู่ในเม็ดดินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจาก รีลีสไฮดรทไลม์ (ปูนขาว) จะเป็นกระบวนการที่สองที่ทำให้เกิด CSH และ CAH ตามมาซึ่งต้องใช้ระยะเวลายาวนานกว่า จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์จะสูงตามอายุการบ่ม ที่เพิ่มขึ้น Moh (1965) ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้

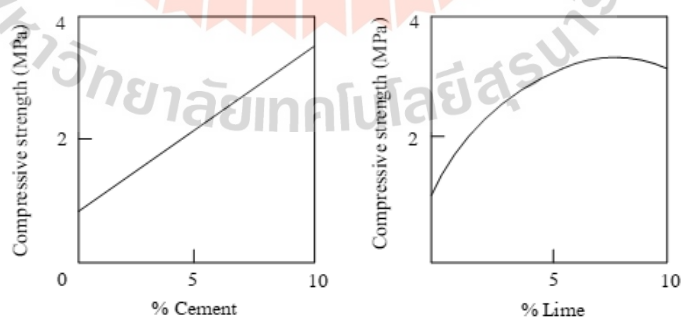


ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 12.6 จะมีปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดขึ้นดังนี้



### 2.2.1 องค์ประกอบที่มีผลต่อกำลังของดินผสมซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ (Cement content) การพัฒนา กำลังของดินผสมซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ (Metcalf, 1977) รายงานว่า Unconfined compressive strength,  $q_u$  ของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ มีค่าแปรผันเชิงเส้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต่างกับปูนขาวที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น โดยเมื่อผสมปูนขาวเกินกว่า 8% กำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive strength กับ % สารผสมเพิ่ม (Metcalf, 1977)

ชนิดของปูนซีเมนต์ (Type of Cement) ซึ่งประเภทของปูนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้มีการศึกษาและทดลองใช้ปูนซีเมนต์แต่ละชนิดผสมกับดินปรากฏว่าปูนซีเมนต์ประเภท 3 มีการพัฒนา กำลังได้ดีกว่าประเภท 1 รายงานโดย (Felt, 1955) แต่ปูนซีเมนต์ประเภท 1 ยังเป็นที่นิยมใช้

ในการปรับปรุงคุณภาพดินมากกว่าปูนซีเมนต์ประเภท 3 เนื่องจากมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นและจัดหาได้ง่าย

ชนิดของดิน (Type of Soil) โดยทั่วไปดินผสมซีเมนต์ ซึ่งในการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของเสาดินซีเมนต์จะมีค่าต่ำเมื่อดินมีสารอินทรีย์ปนอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งโดยทั่วไปจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณดินเหนียวในปูนซีเมนต์ แต่ดินที่ผสมปูนขาวจะมีค่ากลับกัน รายงานโดย (Terrel et al., 1979) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนอนุภาคของดินเหนียวในกระบวนการ Pozzolanic reaction แต่ในส่วนของดินผสมปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับกระบวนการการเชื่อมประสาน Cement hydration นอกจากนี้ (Broms, 1986) ได้รายงานว่าการเพิ่มปริมาณเกลือในดินประเภท Marine clay ซึ่งเป็นดินเหนียวที่เกิดจากการตกตะกอนบริเวณชายฝั่งที่มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบ Flocculate structure เมื่อเริ่มทำการผสมกับซีเมนต์ก็ทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้นได้

ระยะเวลาในการบ่ม (Curing time) โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเพิ่มขึ้นหลังการผสมซีเมนต์ตามระยะเวลาการบ่มเหมือนกับคอนกรีตและดินผสมปูนขาว อัตราการพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและลดลงในช่วงหลังตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ในช่วงแรกจะมีค่ามากกว่าดินผสมปูนขาว รายงานโดย (Herzog et al., 1963)

ชนิดของแร่ในดิน (Soil mineral) (Saitoh, 1985) ได้รายงานการปรับปรุงคุณภาพของดิน โดยการนำดินต่างชนิดกันมาทำการทดสอบด้วยวิธีเดียวกัน พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันโดยดินชนิดที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic สูง ความแข็งแรงของดินเกิดจากการรวมตัวของดินซีเมนต์ด้วยตัวเอง ในขณะที่ดินที่มีความสามารถทำปฏิกิริยา Pozzolanic ต่ำกว่า ความแข็งแรงของดินซีเมนต์จะเกิดจากความแข็งแรงของเม็ดดินเอง ดังนั้นวิธีและเงื่อนไขในการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งดินที่สามารถทำปฏิกิริยา Pozzolanic สูงกว่าจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่า (Wissa, 1964) ได้อธิบายไว้ว่า ปริมาณ Secondary Cementitious ของวัสดุเกิดขึ้นในช่วงปฏิกิริยา Pozzolanic ของอนุภาคดินเหนียวและ Hydrated Lime ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ขึ้นอยู่กับจำนวนและองค์ประกอบของแร่ในดินเหนียว ซึ่งแร่ในดินเหนียวประเภท Montmorillonite จะทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือซีเมนต์ได้ดีกว่า Illite และ Kaolinite เพราะมีขนาดเล็กและจำนวนมาก

ค่า pH ในดิน (Soil pH) ดินที่มีค่า pH น้อยกว่า 12 ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง (Sherwood, 1698) เมื่อ  $\text{C}_3\text{H}_2\text{HX}$  (Cement gel) ได้ใช้ผลิต CSH และ Hydrated Lime ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จะมีส่วนทำให้กำลังของดินซีเมนต์ลดลงในจุดที่ได้ใช้วัสดุเชื่อมประสานที่แข็งแรงกว่า ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{HX}$ ) ในการผลิตวัสดุเชื่อมประสานที่ความอ่อนแอกว่า (CSH) ในระยะหลัง ดินที่มีค่า pH สูง จะมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic จากการเป็นตัวช่วยทำลายซิลิเกตและอะลูมิเนตจากอนุภาคของดินเหนียว

จากคุณสมบัติของดินเมื่อผสมซีเมนต์ ซึ่งการเพิ่มปริมาณซีเมนต์จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพของดินดังนี้

การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution) ผลจากการทำละลายของ Hydration ของซีเมนต์ ทำให้มีการจับกลุ่มของประจุไฟฟ้าในส่วนแรงดันในช่องว่าง (Pore Pressure) และค่า pH จะเพิ่มขึ้น โดยที่ประจุไฟฟ้า แคลเซียม ( $Ca^{++}$ ) เข้าแทนที่ Monovalent Ions ที่มีแรงดึงดูดประจุลบที่ผิวของอนุภาคเม็ดดิน (Assarson, 1974) การจับกลุ่มของแคลเซียมที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculation) มีกำลังมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุมาจากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์ เป็นผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน

ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในดินเหนียวทำให้เพิ่มความสามารถการซึมผ่านของน้ำในดิน เนื่องจากการก่อตัวของดินที่เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculate) ของอนุภาคดิน ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวผสมซีเมนต์จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม

ช่องว่างของน้ำ (Pore Water) รอบอนุภาคของดิน ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวผสมปูนขาวมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

ความเหนียวของดิน (Plasticity) โดยทั่วไปค่าขีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) ของดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันทำให้ค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) มีค่าลดลง สรุปได้ว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการยุบอัดตัวของดินลดลง (Broms, 1986)

ความสามารถในการยุบอัดตัว (Compressibility) การยุบตัวในแนวตั้งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน เนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่านได้ การยุบอัดตัวของดินจึงเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นปีๆ และไม่สม่ำเสมอ จากการกระจายแรงดันไม่เท่ากันและการเปลี่ยนแปลงในดินชี้ให้เห็นว่า Stress Condition ของการยุบอัดตัวมีค่าน้อยกว่า Yield Stress ของการยุบอัดตัวเล็กน้อย ค่าหน่วยแรงกดจากการทดสอบ Consolidation Test ของดินซีเมนต์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ในช่วงปลายขณะที่การยุบอัดตัวที่ Stress Condition ของการยุบอัดตัวมีค่ามากกว่า Yield Stress ที่เหมือนกัน (Suzuki, 1982)

กำลังของดิน (Strength) การเพิ่มกำลังการรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนส่วนหนึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าในดิน เมื่อ Monovalent Ions ได้ถูกแทนที่ด้วย Multivalent Ions ( $Ca^{++}$ ) ทำให้เพิ่มค่ากำลังขึ้นทันทีทันใด จากการที่ดินมีโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculated) และการลดลงของปริมาณน้ำในดิน (Broms, 1984)

## 2.3 ความเป็นมาของเสาเข็มดินซีเมนต์

เกษม เพชรเกตต์ (2536) กล่าวว่า การปรับปรุงคุณภาพดิน โดยฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงกับดินเหนียวอ่อนบริเวณอำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเสาเข็มเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งดินมีค่าการซึมผ่านน้ำได้ต่ำ จะทำให้ดินเหนียวมี

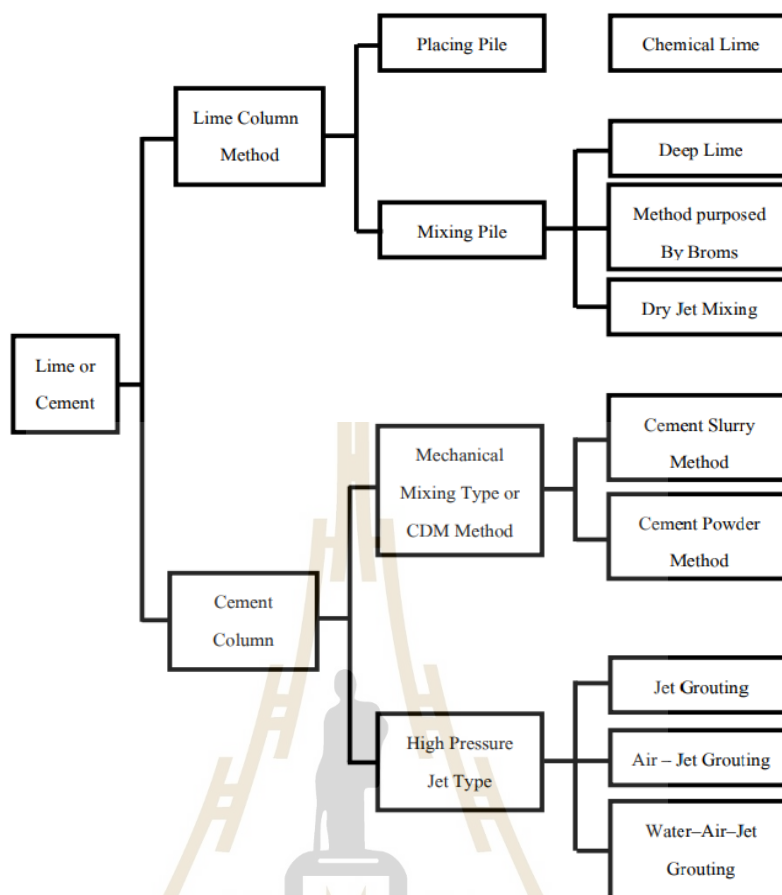


กำลังสูงขึ้นตามปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ผสม โดยพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสูงกว่าดินเดิมประมาณ 20 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถทำ Jet mixing ให้เป็นเสาหรือให้ติดกันเป็นพืดเพื่อทำเป็น Garvity wall ได้

สมโชค ประเสริฐวิจิตรกุล (2545) ได้รายงานการนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาเริ่มใช้ในประเทศสวีเดนและประเทศญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2513 ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการใช้ปูนขาวและซีเมนต์ โดยประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกที่ใช้วิธีการผสมแบบลึกเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนของโครงสร้างบริเวณท่าเรือ และปัจจุบันได้นำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับงานคันทาง งานฐานรากอาคารและถังเก็บน้ำ โดยในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์เป็นที่นิยมมากกว่าการปรับปรุงด้วยปูนขาว เช่นเดียวกับประเทศไทย จากที่ปรากฏหลักฐานเริ่มมีการใช้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 และจากนั้นมีการนำมาประยุกต์ใช้กับงานคันทางของถนน งานฐานรากอาคารต่างๆ และงานซ่อมแซมฐานรากเพื่อที่จะลดการเกิดการทรุดตัว

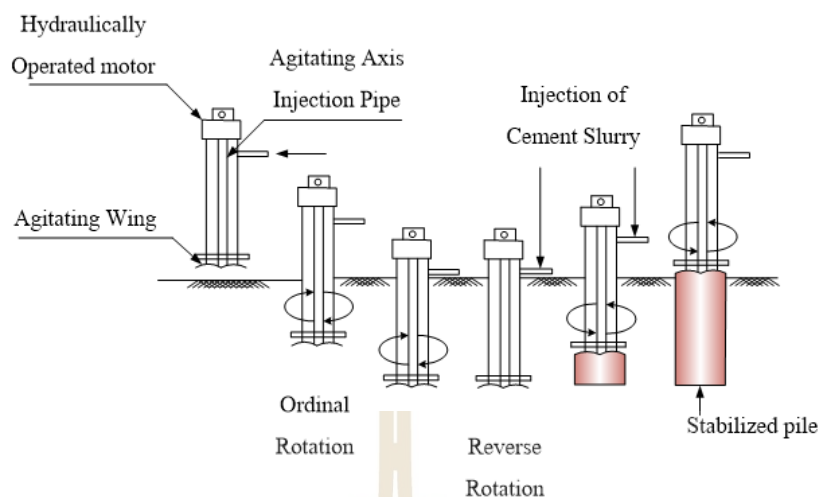
## 2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นการผสมดินเดิมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งนิยมเรียกว่า การผสมลึก (Deep cement mixing) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีโดยจำแนกวิธีการก่อสร้างได้เป็น 2 แบบ คือ การผสมแบบแรงดัน (High Pressure Jet Mixing) และการผสมแบบเชิงกล (Mechanical Mixing) ดังรูปที่ 2.4 การก่อสร้างทั้งสองแบบมีลักษณะแตกต่างกันที่เครื่องจักรหลักในการก่อสร้างตามลักษณะงานที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ทำการผสมเชิงกล (Mechanical Mixing) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 วิธีการสร้าง Cement/Lime Column (JICA, 1998)

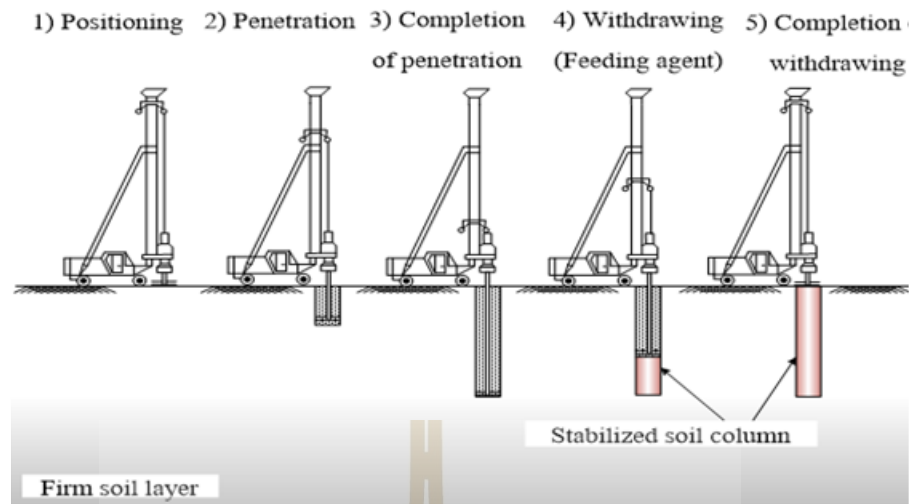
Mechanical mixing method วิธีนี้เป็นการผสมโดยใช้ใบพัดที่อยู่ตามแนวแกนเจาะช่วยในการผสมดินให้เข้ากันกับสารผสมเพิ่มที่ประกอบไปด้วย 2 สถานะคือ สถานะที่มีลักษณะเป็นน้ำปูน (Cement slurry หรือ Cement milk) จะเรียกว่า Wet mixing method และมีลักษณะเป็นซีเมนต์ผง (Cement powder) การก่อสร้างโดยใช้หลักการปรับปรุงคุณสมบัติดินอ่อนตลอดชั้นความหนา ด้วยอัตราส่วนผสมผสมซีเมนต์ผงกับน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้มีสภาพความเข้มข้นที่เหมาะสมกับงาน ซึ่งขบวนการก่อสร้าง โดยทำการฉีดสารผสมน้ำปูนซีเมนต์ด้วยความดันขนาด 10-15 บาร์ ในขณะที่กดแกนเจาะลง แล้วทำการตีทวนด้วยใบพัดผสมไปพร้อมกันทำให้ดินและน้ำปูนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และในระหว่างดึงแกนผสมขึ้น ใบพัดผสมจะทำการตีทวนอีกครั้งโดยเป็นการหมุนทวนกับการกดลงในตอนแรก ดังรูปที่ 2.5 โดยไม่มีการเจาะดินขึ้นมาจากหลุม โดยทำการผสมตีทวนอยู่กับที่ หลุมเจาะจึงไม่มีปัญหาพังทลายและขนาดของ Column จะเท่ากับขนาดของใบแกนเจาะ



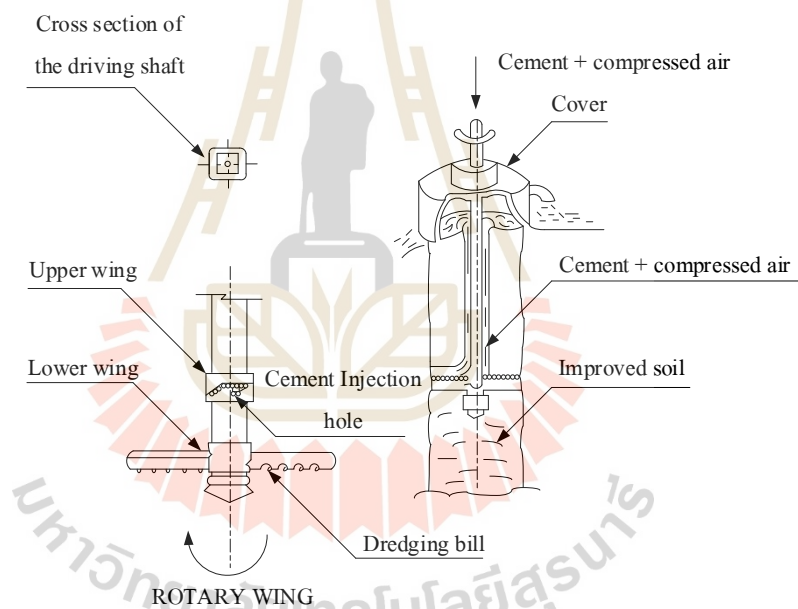
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผสมแบบ Wet mixing method (Miki, 1985)

เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการก่อสร้างตามความต้องการ จึงต้องควบคุมตัวแปรหลักได้แก่ อัตราการฉีดน้ำปูน (ลิตร/นาที) อัตราส่วนผสมน้ำ (W/C Ratio) ความเร็วในการเจาะขึ้นและเจาะลง (เมตร/นาที) ความเร็วในการหมุนก้านเจาะ (<math>< 50</math>/นาที) ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมปริมาณสารผสมที่ฉีดลงในดิน และจำนวนครั้งของการตีควนดินในแต่ละชั้นความลึก การฉีดน้ำปูนนั้นโดยปกติถ้าดินเดิมตีให้แยกจากกันยาก จะฉีด Cement ช่วงการเจาะขาขึ้น เนื่องจากต้องตีดินให้แตกกระจายก่อนในการเจาะขาลง ในกรณีของดินเหนียวอ่อน สามารถฉีดน้ำปูนช่วงการเจาะขาลงเป็นการเพิ่มจำนวนรอบในการควนผสมให้มากขึ้น

Dry jet mixing method ลักษณะของสารผสม คือ ผงซีเมนต์ (Cement Powder) ใช้ผสมกับดินที่ต้องการปรับปรุง โดย (Chida. S.,1982) นำซีเมนต์ผง (Cement powder) มาใช้ในการผสมแทนการใช้น้ำปูน ใช้วิธีการ Deep mixing machine ทำการตัดย่อยดินในขณะที่ใบพัดเคลื่อนที่ลง ใบพัดผสมจะมีลักษณะแตกต่างจากใบพัดตัดย่อยดิน เมื่อถึงความลึกที่เป็นปลายของเสาเข็มดินซีเมนต์ก้านเจาะจะทำการฉีดผงปูนตลอดความลึกชั้นดินโดยผ่านท่อกระบอกฉีดที่ถูกอัดด้วยอากาศ จากนั้นผงซีเมนต์จะถูกผสมโดยใบพัดผสมซึ่งจะเป็นการหมุนกลับทางของใบพัดในขาลง พร้อมกับการชักก้านผสมขึ้นสู่ผิวดินในอัตราคงที่ โดยขั้นตอนการผสมและลักษณะของใบพัดแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 วิธีการผสมลึกแบบ Dry jet mixing method (Miki, 1985)



รูปที่ 2.7 ใบพัดผสมของ Dry jet mixing method (DJM Research Group, 1984)

การปรับปรุงคุณภาพดินทางวิศวกรรมโดยใช้วิธีการทางเคมีได้มีการประยุกต์ใช้งานกันมานานแล้วทั้งการปรับปรุงคุณภาพดินแบบตื้นและแบบลึก เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินให้ดีขึ้น เช่นดินกำลังแรงเฉือนต่ำและการยุบตัวสูง เป็นต้น ในการปรับปรุงคุณภาพดินมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ดิน มีความสามารถในการรับแรงเฉือนได้สูง อัตราการยุบตัวต่ำ ลดการบวมตัวและมีความคงทนมากขึ้น ปูนขาว(Lime) และ ปูนซีเมนต์(Cement) เป็นวัสดุเคมีที่นิยมใช้กันในการผสมมาเป็นเวลานานแล้วตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 ในประเทศสวีเดนและญี่ปุ่น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ผงซีเมนต์ในการผสมทั้ง

แบบแห้งเพิ่งจะมีรายงานว่าสามารถใช้งานได้เยี่ยมเมื่อปี ค.ศ.1980 วิธีการนี้เรียกว่าการผสมแบบแห้ง (DJM, Dry Jet Mixing) การนำเอาปูนซีเมนต์และปูนขาวมาทำการผสมแบบลึกในลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ เริ่มขึ้นเมื่อกลางปี ค.ศ.1980 โดยเริ่มมีการศึกษาวิจัยในประเทศสวีเดน, ญี่ปุ่น และประเทศอื่นๆ มาเป็นเวลานานแล้ว สถาบันวิศวกรรมเทคนิคธรณีของประเทศสวีเดนและศาสตราจารย์ Bengt Broms นำเอาเทคนิคดินซีเมนต์ปูนขาว (Lime Column) มาใช้งานปรับปรุงฐานราก รวมทั้งคันทางและงานขุดบนดินเหนียวอ่อน ส่วนในประเทศญี่ปุ่นประยุกต์ใช้วิธีการดังกล่าวในช่วงปลายปี ค.ศ.1970 โดยริเริ่มและพัฒนาใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินแบบลึก (Deep Mixing Method, DMM) มาใช้กับงานท่าเรือและงานพัฒนาพื้นที่ชายฝั่ง ในปัจจุบันวิธีการ DMM ประยุกต์ใช้ปรับปรุงงานฐานรากของสิ่งก่อสร้างที่งานบนชั้นดินเหนียวอ่อน เช่น ดินคันทาง, อาคารและถังเก็บน้ำมัน

Broms (1986) รายงานการนำปูนซีเมนต์มาใช้ โดยปูนซีเมนต์เหมาะสมกว่าปูนขาว เนื่องจากมีราคาถูกกว่าการทำงานที่ง่ายกว่าเนื่องจากปูนขาวมี Slaked มากสำหรับพื้นที่ๆมีสภาพอากาศร้อนและชื้น อีกทั้งปูนซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าในขณะที่ปูนขาวให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่ปริมาณปูนขาวจำนวนหนึ่งเท่านั้น ปูนขาวและปูนซีเมนต์นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินมาเป็นเวลานานแล้ว วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังแบกทานของดิน (Bearing Capacity) ของดินรองรับคันทางที่มีสภาพอ่อนทำให้สามารถลดความหนาวัสดุรองพื้นทางของงานถนน การใช้ปูนขาวและปูนซีเมนต์ผสมแบบลึกในรูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยให้ปูนขาวและปูนซีเมนต์เป็นเสมือนวัสดุเสริมแรงในดิน ทำให้ดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนและมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงขึ้น สามารถวิเคราะห์ให้เป็นวัสดุที่มีความแข็ง (Rigid) การถ่ายแรงสามารถใช้ทฤษฎีมุมการกระจายของแรงลงสู่ชั้นดินที่ลึกกว่า การประยุกต์ใช้ปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถทำให้หลายกรณี เช่น เพิ่มเสถียรภาพความลาดของดิน, งานขุดวางท่อลึก เพิ่มแรงแบกทานและลดการทรุดตัวของอาคารขนาดเบา ลดค่า Negative Skin Friction ในงานโครงสร้างบนเสาเข็ม ป้องกันการพังของคันดินข้างทาง ลดการสั่นสะเทือนจากน้ำหนักรถบรรทุกจราจรในงานถนน, ป้องกันความเสียหายของดินจากการตอกเสาเข็ม นอกจากนี้ยังช่วยเร่งการทรุดตัวของดินที่รองรับคันทาง จากการประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้านของการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีการนี้ จึงมีการนำมาใช้งานในประเทศต่างๆ มากขึ้น

## 2.5 ระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ (Setting time of cement paste)

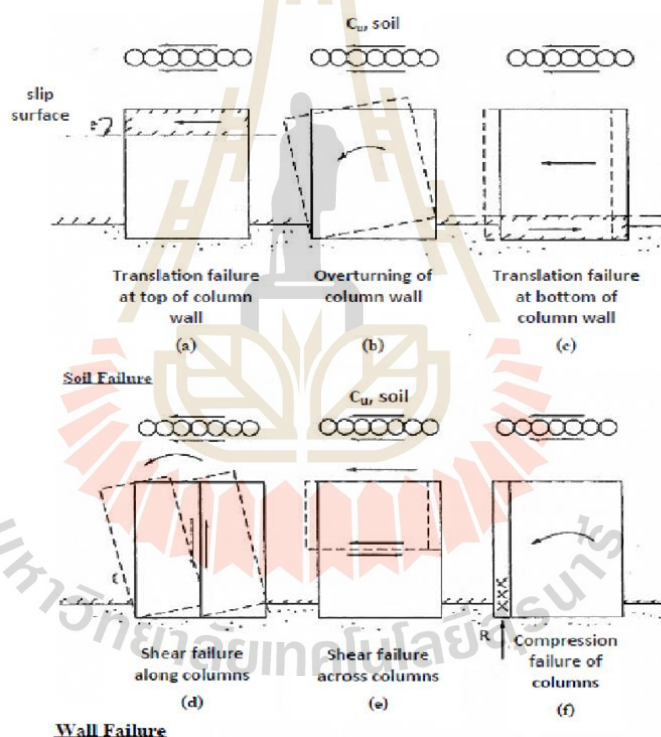
ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มอร์ต้าสดที่ที่อยู่ในสถานะเหลว(ยังไม่แข็งตัว)มีความสำคัญอย่างมากในขณะที่คอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ต้ายังอยู่ที่ในขณะก่อสร้างแต่เมื่อซีเมนต์มอร์ต้าอยู่ในสภาพที่แข็งตัวแล้วคุณสมบัติต่างๆจะอยู่ไปตลอดการใช้งาน ดังนั้นในการก่อสร้างโดยเฉพาะขั้นตอนของการเทคอนกรีตระยะเวลาก่อตัวมีผลอย่างมาก โดยระยะเวลาการก่อตัวที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ระยะเวลาคือ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) คือ เวลาที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วไม่สามารถเทลงแบบและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) คือเวลาที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวเป็นของแข็งหมด



และสามารถรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามเวลา ตามมาตรฐาน มอก. 15-2547 เล่ม 9 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซึ่งระบุให้ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เริ่มต้นต้องไม่เกิน 1 ชั่วโมง 30 นาที และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายสุดท้ายต้องไม่เกิน 6 ชั่วโมง 15 นาที

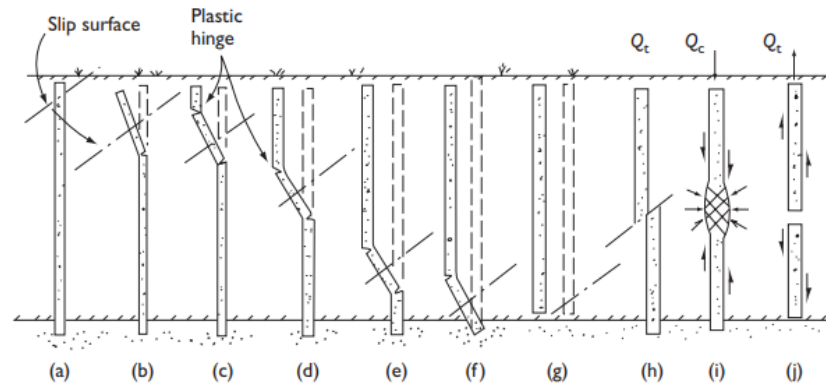
## 2.6 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม

Broms, 2004 เสนอโหมดการวิบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เกิดจากการพังของกำแพง ดังรูปที่ 2.8 โครงสร้างระบบกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ในการก่อสร้างส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบรวมกันของเสาเข็มดินซีเมนต์กับเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยโหมดการวิบัติที่สำคัญได้แก่การวิบัติแบบ Shear failure ตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ และการเฉือนขาดขวางเสาเข็มดินซีเมนต์ โหมดการวิบัติเหล่านี้เกิดจากปัจจัยสำคัญได้แก่สภาพการยึดเกาะของเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้นแบบ Tangent Soil-cement column, TSCC และแบบ Secant soil-cement column, SSCC



รูปที่ 2.8 รูปแบบการวิบัติของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ (Brom, 2004)

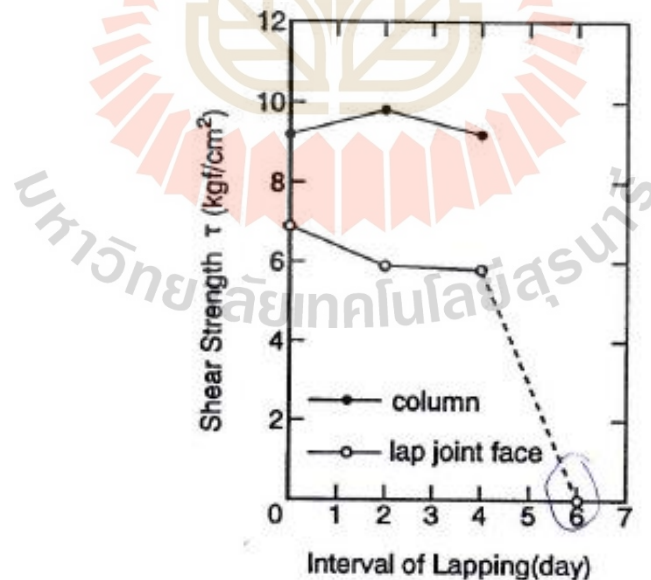
Kitazume et al. (2004) เสนอกลไกการวิบัติของเสาเข็มต้นเดียว ค่าที่ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการวิบัติคือประมาณร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่ากำลังอัดแกนเดียวประมาณ 213 ถึง 750 กิโลปาสคาล และ (Miyake et al, 1991) รายงานการวิบัติของเสาที่เกิดการวิบัติแบบหัก ดังรูปที่ 2.9 แสดงโหมดการวิบัติของเสาเข็มต้นเดียวจากกำลังต้านทานแรงต้านข้างของดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 2.9 โหมดการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นเดียว

Larsson and Hakannsson (1998) ทดสอบ Cone penetration test รายงานว่ากำลังต้านทานต่อการเฉือนบริเวณข้อต่อของ SCC อาจต่ำมากเนื่องจากการผสมที่ไม่สมบูรณ์หรือระยะข้อต่อน้อย

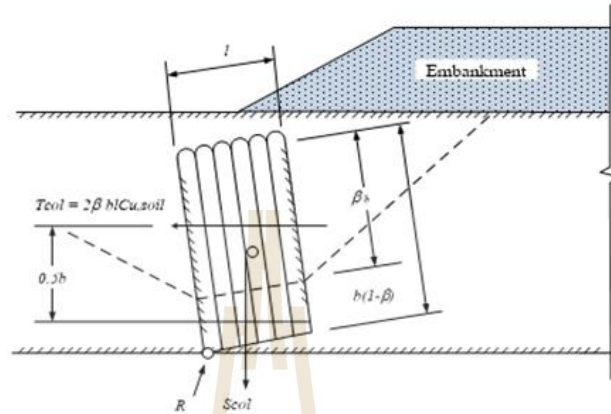
Yoshida (1996) รายงานความต้านทานแรงเฉือนของดินที่ปรับปรุง ในบริเวณที่ข้อต่อมีค่าเพียง 2 ใน 3 ของกำลังต้านทานของกำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ ความต้านทานแรงเฉือนส่วนที่ข้อต่ออยู่ในช่วงร้อยละ 40 และ 70 ของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ และกำลังรับแรงเฉือนลดลงจนไม่มีการยึดเกาะหลังจาก 6 วัน แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กำลังรับแรงเฉือนบริเวณรอยต่อ (Yoshida, 1996)

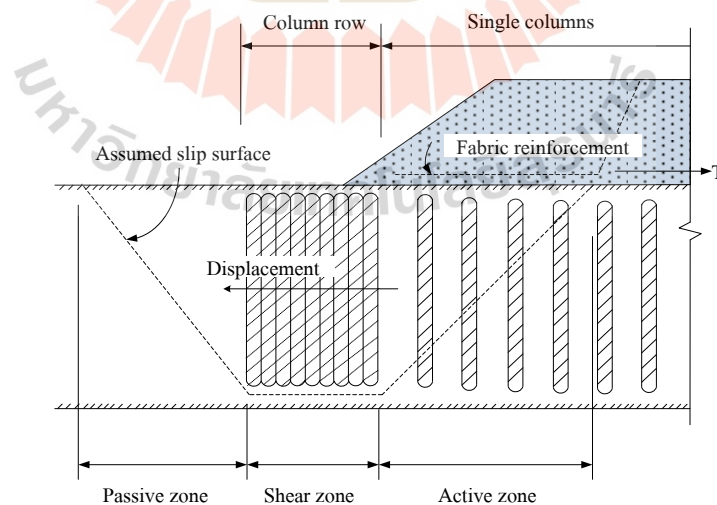
Yoshida (1996) เสนอรูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม โดยมีรูปแบบการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นกับกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานขุดดินลึกและแนวทางในการแก้ไข ดังนี้

การวิบัติเนื่องจากการพลิก (Failure by overturning) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน โดยความต้านทานโมเมนต์ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินจากการพลิกคว่ำสามารถป้องกันด้วยการเพิ่มความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์หรือจำนวนแถวของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน ดังรูปที่ 2.11



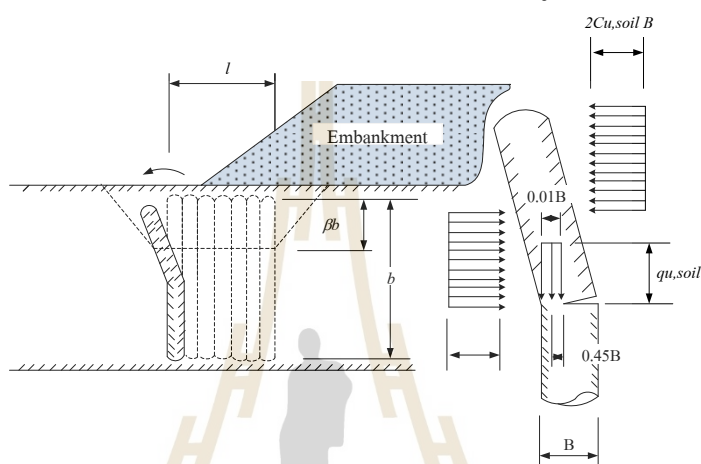
รูปที่ 2.11 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการพลิก (Broms, 2004)

การวิบัติเนื่องจากการเลื่อน (Failure by translation) ของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดิน การเลื่อนของโครงสร้างเกิดจากความต้านทานแรงเฉือนใต้ฐานรากของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินไม่เพียงพอในการรับแรงดันดินด้านข้าง สาเหตุหนึ่งเกิดจากการรบกวนดินใต้โครงสร้างทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงจึงเกิดการเลื่อนของโครงสร้างที่อยู่เหนือระนาบการรบกวน โดยแนวทางในการป้องกันคือโครงสร้างจะต้องใหญ่พอที่จะต้านแรงดันด้านข้างใต้ระนาบการเลื่อนด้วยการเพิ่มจำนวนแถวของเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการเลื่อน (Broms, 2004)

การวิบัติเนื่องจากการแยก (Failure by separate) โครงสร้างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ การแยกกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายในโครงสร้างกันดิน มักเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในตำแหน่งใกล้ส่วนบนของโครงสร้างเสา โดยแรงดันด้านข้างที่แยกสามารถประมาณจากสมมุติฐานที่ว่าความต้านทานแรงเฉือนทั้ง 2 ข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ปรับปรุง โดยเสาจะแยกออกจากกันเมื่อความกว้างของส่วนทับซ้อนระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์มีกำลังรับแรงดึงของช่วงทับซ้อนมีค่าน้อยมากๆ ซึ่งความต่อเนื่องหรือความเป็นเนื้อเดียวกันของดินซีเมนต์สามารถกระทำจากระยะซ้อนทับของเสาเข็มดินซีเมนต์จากขั้นตอนการก่อสร้าง ดังรูปที่ 2.13

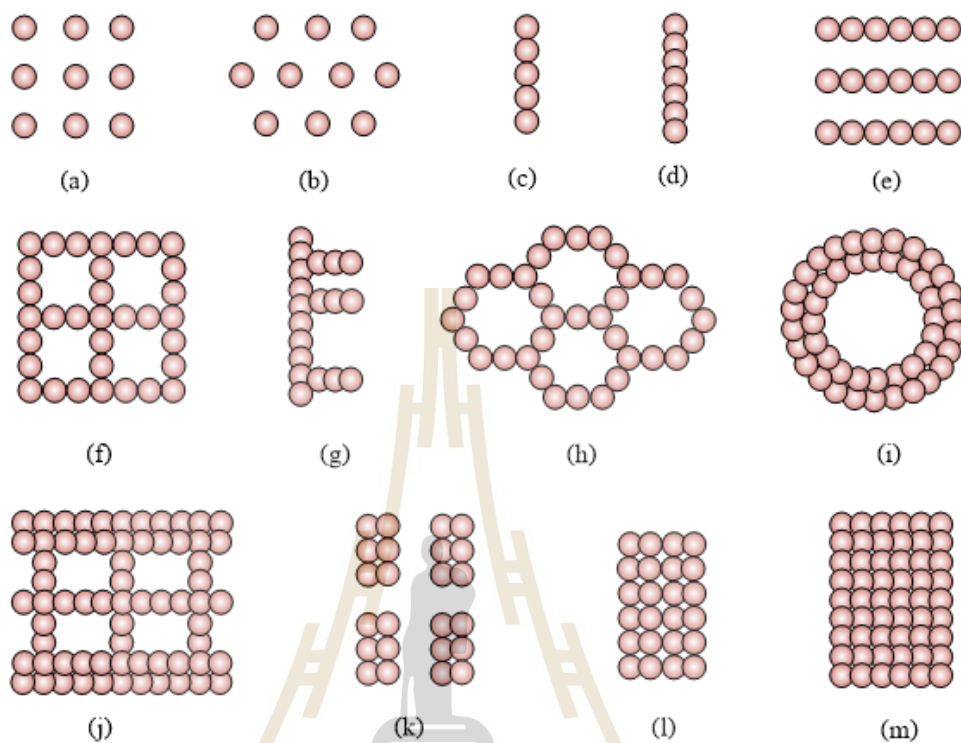


รูปที่ 2.13 รูปแบบการวิบัติของโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์กันดินเนื่องจากการแยก (Yoshida, 1996)

## 2.7 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์

Topolnicki, (2004) เสนอการเลือกรูปแบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับงานต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการประยุกต์ใช้งาน สภาพของสถานที่ก่อสร้าง อัตราส่วนปลอดภัยที่ต้องการ และราคาก่อสร้าง รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์มีลักษณะที่แตกต่างกัน รูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.14 โดยเสาเข็มดินซีเมนต์เดียวที่มีรูปแบบการก่อสร้างแบบตาข่ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสามเหลี่ยม หรือแบบรวมกันเป็นกลุ่ม ดังรูปที่ 2.14a และ 2.14b มักนำไปใช้ในงานที่ต้องการลดการทรุดตัวของดินฐานราก หรืองานปรับปรุงเสถียรภาพ เช่น งานคันทางถนน เป็นต้น รูปที่ 2.14c, 2.14d, 2.14e และ 2.14g ใช้ในการควบคุมงานขุดดินเพื่อรักษาเสถียรภาพและป้องกันโครงสร้างที่ใช้ฐานรากตั้งรอบพื้นที่ขุด เพื่อใช้ต้านทานแรงแนวราบหรือแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถล ด้วยการใช้รูปแบบเสาเข็มแบบแถวที่มีทิศทางเดียวกันกับน้ำหนักในแนวราบหรือตั้งฉากกับผิววิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ซึ่งเสาเข็มแบบกำแพงสามารถสร้างได้ทั้งแบบสัมผัสกันแบบซ้อนกันใช้ในงานป้องกันน้ำไหลผ่าน รูปแบบกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่มสามารถใช้รองรับคันทางและฐานรากเพื่อลดการทรุดตัว และการเพิ่มกำลังแบกทานเสาเข็มดินซีเมนต์ชนิดกลุ่มมีหลายรูปแบบด้วยกันได้แก่ แบบตาข่ายสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.14f แบบรวงผึ้งสัมผัสกัน รูปที่ 2.14h แบบวงแหวนซ้อนทับกัน รูปที่ 2.14i แบบช่องตาข่าย รูปที่ 2.14j ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิผลและ

ประหยัดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบกำแพงและแบบกลุ่มก้อน ดังรูปที่ 2.14m แบบเสาเข็มกลุ่ม ดังรูปที่ 2.14k และแบบเสาเข็มกลุ่มสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.14l



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างรูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์

- (a) และ (b) แบบเสาเข็ม (จัดเรียงแบบจตุรัสและสามเหลี่ยม)  
 (c) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกัน (d) กำแพงซ้อนกัน  
 (e) กำแพงหลายแถวสัมผัสกัน (f) ตาข่ายสัมผัสกัน  
 (g) กำแพงแถวเดียวสัมผัสกันแบบมีค้ำยัน (h) วงผึ้งสัมผัสกัน  
 (i) วงแหวน (j) ช่องตาข่าย (k) เสาเข็มกลุ่ม (l) เสาเข็มกลุ่มสัมผัสกัน  
 (m) กลุ่มก้อน (Topolnicki, 2004)

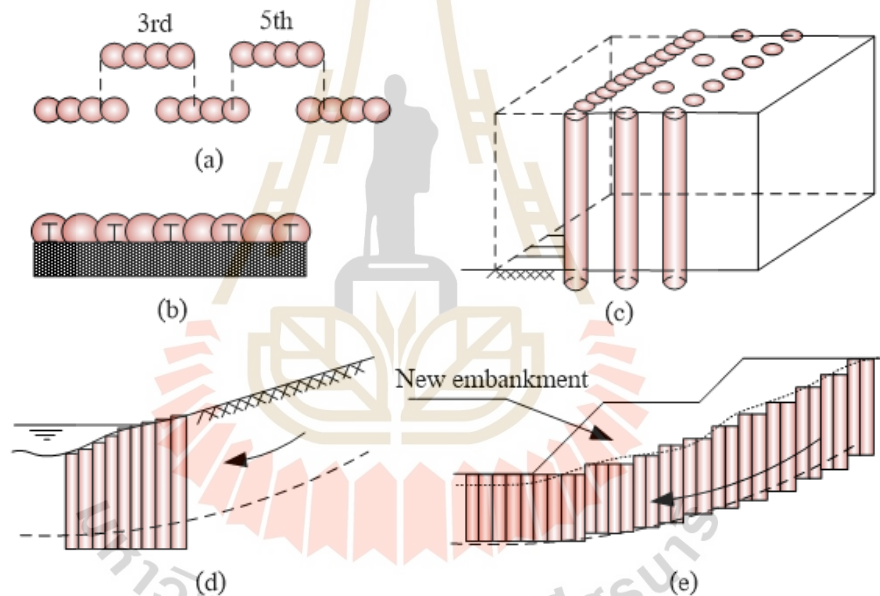
งานระบบกันดิน เป็นการยึดรั้งแรงดันดินที่เกิดขึ้นระหว่างการขุดลึกและงานขุดตั้งในดินอ่อน ด้วยการป้องกันโครงสร้างรอบๆ บริเวณที่ขุด การป้องกันดินอูด (Heave) การป้องกันดินถล่ม และการวิบัติของลาด ดังรูปที่ 2.15 สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบกันดินนั้นมักนิยมใช้รูปแบบกำแพงและตาข่าย การผสมดินกับซีเมนต์ต้องการกำลังและความแข็งแรงที่สูงเนื่องจากต้องรับแรงดันดินและแรงดันน้ำด้านข้าง ตัวแปรอื่นๆ ที่ต้องการสำหรับงานป้องกันงานขุดได้แก่ ความเป็นเนื้อเดียวกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ในระดับสูงและเสาเข็มดินซีเมนต์ต้องอยู่ในแนวตั้งเพื่อให้ความหนาของเสาเข็มที่ต้องการและเพื่อให้ได้การซ้อนกันของเสาเข็มอย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 2.15c เป็นระบบที่ใช้รองรับงานขุดตั้งมีลักษณะเป็นกำแพงกันดินประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงในแถวหน้าตามด้วยแถวหลังอีกหนึ่งแถวหรือมากกว่า เสาเข็มแถวหลังถูก



กำหนดให้มีระยะห่างและขนาดที่ทำให้มั่นใจได้ว่าได้เกิดเป็นระบบเชิงประกอบระหว่างกำแพงและเพื่อรักษาเสถียรภาพภายนอกให้กับกำแพงโดยมีการใช้ดินผสมปูนซีเมนต์สร้างเป็นแผ่นเพื่อยึดกำแพงและกลุ่มเสาเข็มเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดการถ่ายน้ำหนักด้านบนลงมาสู่ด้านล่างของเสาเข็ม ระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบไม่ควรเกิน 1.2-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์

การป้องกันดินอัดในงานชุด ทำได้โดยก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในบริเวณที่ทำการขุด เพื่อทำหน้าที่เป็นแกนยึดฝังผ่านระนาบวิบัติ ในบางครั้งด้านข้างของงานชุดอาจมีการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มแรงดันดินแบบ Passive earth pressure และลดระยะฝังของเสาเข็มพีตหรือเสาเข็มเจาะ เสาเข็มดินซีเมนต์ยังประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อป้องกันดินถล่มและการวิบัติของลาด โดยทั่วไปมักใช้รูปแบบของกำแพง รูปแบบกริด (grid) หรือแบบก้อน (block) ซึ่งความยาวต้องเพียงพอที่จะตัดกับระนาบวิบัติที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (รูปที่ 2.15d และ 2.15e) ทำให้กำลังเฉือนรวมของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและอัตราส่วนปลอดภัยมีค่าเพิ่มขึ้น

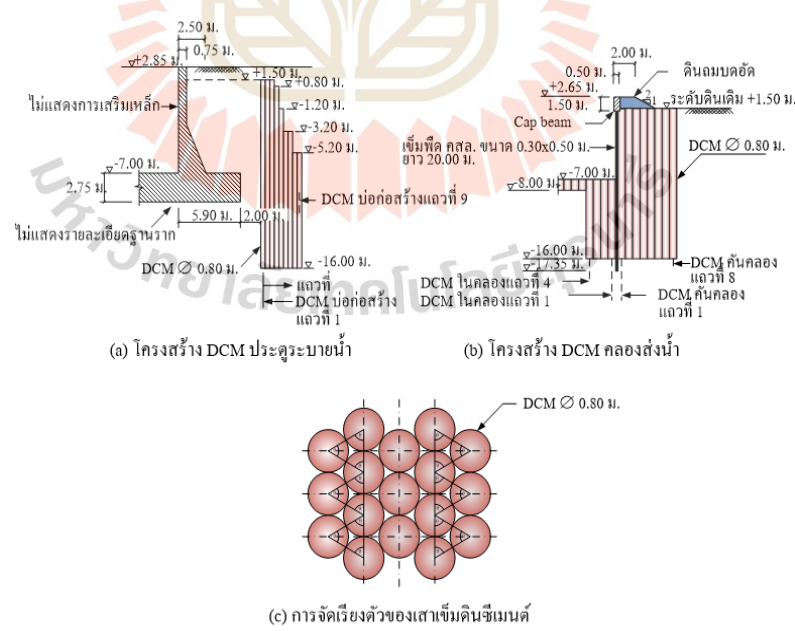


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบกันดิน

- (a) ลักษณะทั่วไปของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์
- (b) กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเหล็กรูปพรรณใช้ร่วมกับผนังคอนกรีต
- (c) กำแพงกันดินเชิงประกอบ (d) งานป้องกันดินถล่ม
- (e) งานปรับปรุงเสถียรภาพของลาด (Topolnicki, 2004)

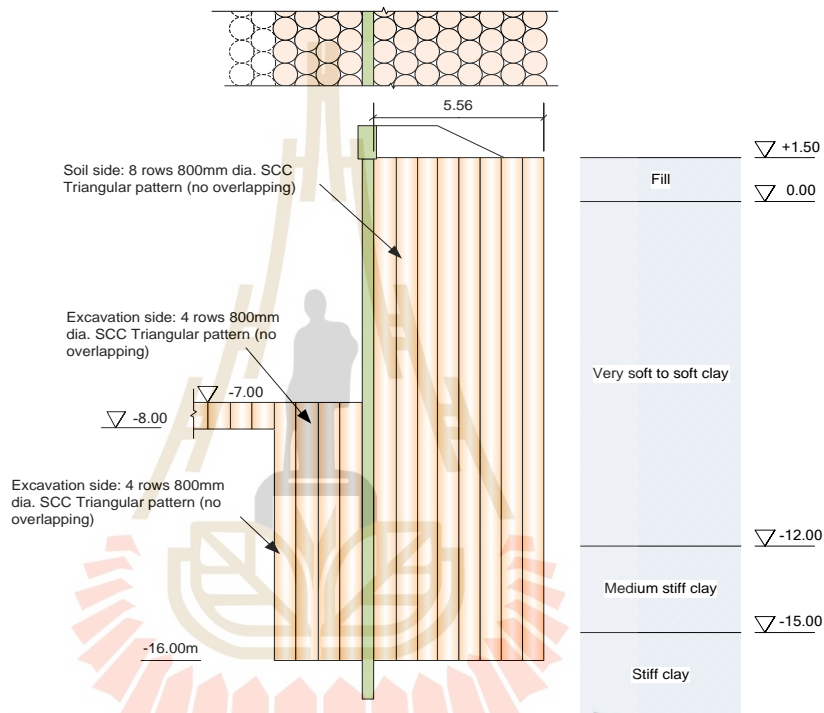
ณัฐกฤต (2548) รายงานพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ประยุกต์มาใช้สำหรับงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ดังรูปที่ 2.16 เพื่อก่อสร้างโครงสร้างกันดินใน 2 ส่วน คือ โครงสร้างประตูระบายน้ำและโครงสร้างกำแพงกันดินริมคลอง ของโครงการหนึ่งในอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ โดยโครงสร้างประตูระบายน้ำเป็นอาคารประตูระบายน้ำคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่ ที่มีการขุดดินลึกประมาณ 10 เมตร และมีระบบป้องกันดินชั่วคราวเป็นระบบ

กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร เรียงต่อเนื่องจำนวน 9 แถว เป็นความหนา 6.34 เมตร ความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์แปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 11.0-18.0 เมตร โดยออกแบบเป็นกำแพง Gravity wall ดังรูปที่ 2.17a ในส่วนโครงสร้างคลองเป็นโครงสร้างกำแพงที่ประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร เป็นกำแพงถาวร จำนวน 8 แถว หนา 5.60 เมตร ลึก 16 เมตร เพื่อขุดดินลึกประมาณ 8 เมตร โดยมีการเสริมด้านหน้ากำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการตอกเข็มพืดขนาดหน้าตัด 0.30×0.50 เมตร ยาว 20 เมตร ดังรูปที่ 2.17b จากรายงานพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ขณะทำการขุดดินที่ระดับสุดท้าย บริเวณประตูระบายน้ำ พบว่าการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นลักษณะคานยื่น เมื่อค่า Shear strain ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ระหว่าง 1-2% แต่เมื่อการเคลื่อนตัวสูงขึ้น มีค่า Shear strain มากกว่า 2% เกิดการวิบัติและเสาเข็มดินซีเมนต์แยกตัวจากกัน นอกจากนี้ยังเสนอค่ากำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยพบว่าค่ากำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าประมาณ 44-70% และ 20-43% ของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ สำหรับการเคลื่อนตัวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีค่า Shear strain อยู่ระหว่าง 1-2% และมากกว่า 2% ตามลำดับพฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณโครงสร้างคลองที่มีการขุดดินตื้นกว่าที่ออกแบบไว้ โดยขุดดินลึกเพียงประมาณ 4 เมตร จะมีการเคลื่อนตัวเป็นลักษณะคานยื่น แต่เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เกิดการแยกตัวจากกันและเกิดความเครียดเฉือนของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยกว่า 0.81% โดยมีค่ากำลังผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ใกล้เคียงกับกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์



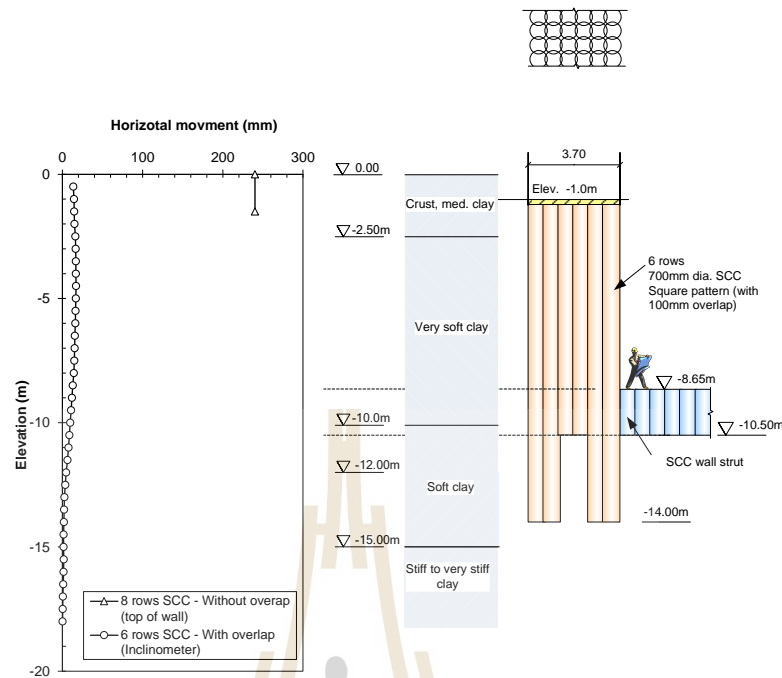
รูปที่ 2.16 รายละเอียดการใช้ DCM ของโครงการหนึ่งในอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ (ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์, 2548)

ณัฐกฤต (2548) รายงานถึงการขุดดินลึกประมาณ 8.5 เมตรเพื่อก่อสร้างคลองระบายน้ำ การขุดใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดินถาวรตั้ง รูปที่ 2.14 กำแพงกันดินประกอบด้วย SCC เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตรเรียงแบบไม่ซ้อนกัน 8 แถว ซึ่งคิดเป็นความหนาของกำแพงเท่ากับ 5.56 เมตร และมี SCC ด้านขุดหน้ากำแพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร เรียงไม่ซ้อนกันอีก 4 แถว ปลายกำแพงกันดินฝังในชั้นดินเหนียวแข็งที่ระดับ -16.0 เมตร รทก. จากระดับพื้นบ่อมี SCC แบบปูพรมหนา 1 เมตร ทัวทั้งกันบ่อ เมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงส่วนที่เป็น cap beam ค่าประมาณ 240 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.17 รูปตัดขวางและการจัดเรียงกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ของการขุดดินลึก 8.5 m. แบบไม่เหลื่อม(Tangent) เพื่อก่อสร้างประตูละบายน้ำ (ณัฐกฤต วิสุทธิ แพทย์ 2548)

Tanseng (2012) รายงานถึงการขุดดินลึก 7.65 เมตร ดังรูปที่ 2.15 โดยใช้กำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นโครงสร้างกันดินชั่วคราว กำแพงกันดินประกอบไปด้วย SCC เส้นผ่านศูนย์กลาง 700 มิลลิเมตร จำนวน 6 แถว เรียงเหลื่อมกันเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นความหนากำแพง 3.7 เมตร และใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เรียงเป็นกำแพงค้ำยัน (SCC wall strut) ทุกระยะ 2.35 เมตร ที่กันบ่อขุดเพื่อเป็นกำแพงค้ำยันที่กันบ่อ เมื่อขุดถึงระดับสุดท้ายการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเป็น 20 มิลลิเมตร

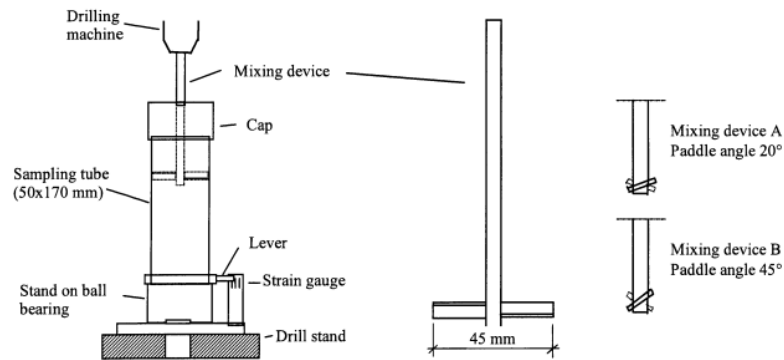


รูปที่ 2.18 กำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ secant สำหรับการขุดดินลึก 7.65 m (Tanseng 2012) เปรียบเทียบกับการเคลื่อนตัวของกำแพง SCC แบบ สำหรับขุดดินลึก 8.5 m (ณัฐฤกษ์ วิสุทธิแพทย์ 2548)

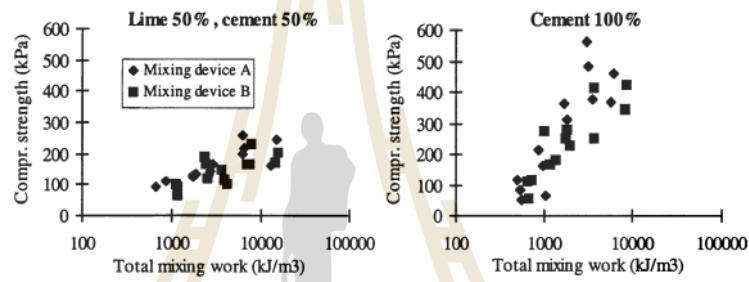
เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของกำแพงทั้งสองกรณีที่มีความลึกของการขุดใกล้เคียงกัน พบว่ากำแพง SCC แบบ secant ที่ใช้ความหนาของกำแพงน้อยกว่าและมีระยะฝังของกำแพงสั้นกว่า กำแพง SCC แบบ tangent มีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างต่ำกว่าถึง 12 เท่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการประสานกันระหว่าง SCC โดยการจัดให้มี overlap นั้นช่วยให้กำแพงมีสติฟเนสสูงขึ้นทำให้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างลดลง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

## 2.8 การทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม

Larsson (1999) และ Walter (1998) ศึกษาผลของพลังงานการผสมต่อการทดสอบกำลังอัด Unconfined compressive strength ในการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบอุปกรณ์ผสมสองแบบที่ทำมุม 20° และ 45° และค่าแรงอัดจากการทดสอบ Unconfined compressive strength แสดงในรูปที่ 2.19 เพื่อเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของการผสมจากการศึกษานี้ยังบ่งชี้ว่าพลังงานการผสมมีผลต่อกำลังอัด ดังรูปที่ 2.20

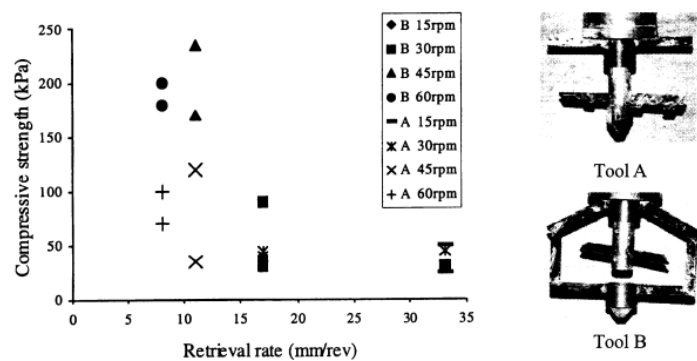


รูปที่ 2.19 ก้านเจาะผสมที่ทำมุม 20° และ 45°  
(Larsson and Walter ,1998)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ Total mixing work  
(Larsson and Walter ,1998)

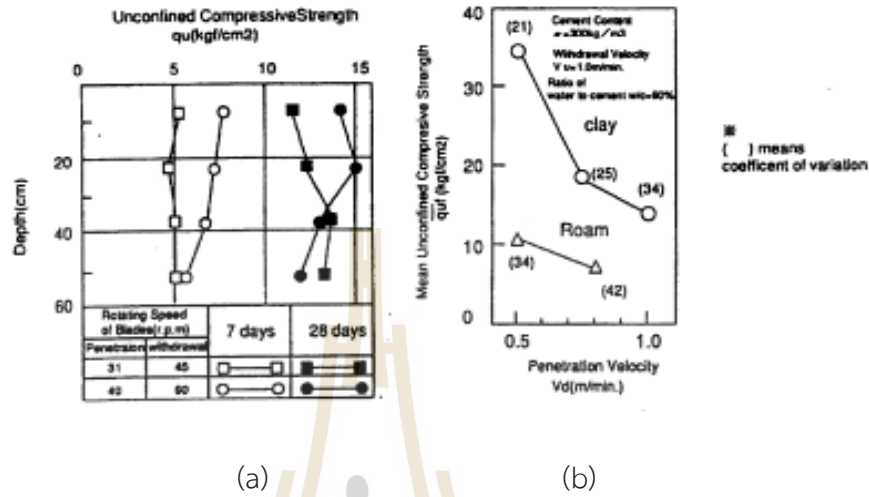
Larsson (1999) รายงานผลกระทบการใช้เครื่องมือผสมสองประเภทที่แตกต่างกัน โดยประเภท A มีพายสองระดับและ ประเภท B มีพายระดับเดียวและมีใบมีดแบบหมุนสวนทางกัน ดังรูปที่ 2.21 แสดงกำลังอัด 7 วันของแต่ละประเภท พบว่าจำนวนรอบมีผลต่อความแข็งแรง ในเครื่องมือผสมแต่ละประเภทจำนวนรอบปั่นที่ 45 รอบ และมีอัตราการกัดก้านที่ 12 mm/rev ให้ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compressive Strength กับ Total mixing work  
(Larsson ,1999)



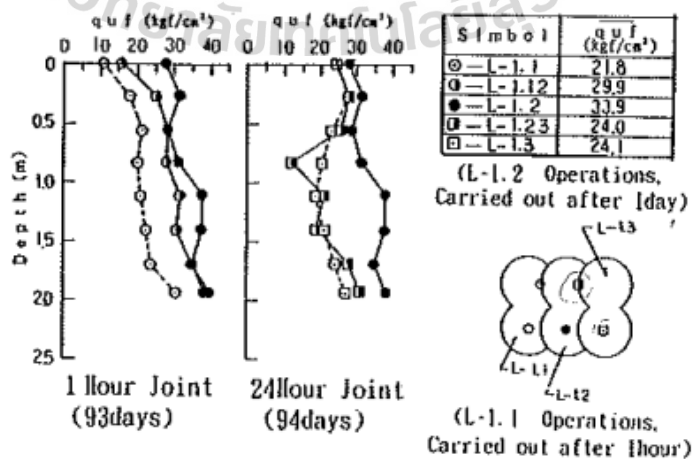
Yoshizawa (1997) รายงานการทดสอบอัตราเร็วในการหมุนก้านเจาะผสม โดยผลกระทบของความเร็วในการหมุนและความเร็วในการเจาะที่มีผลต่อกำลังอัดของดิน ดังรูปที่ 2.22(a) และรูปที่ 2.22(b) ซึ่งให้เห็นว่าเวลาในการผสมหรือจำนวนรอบในการผสมมีผลต่อกำลังอัดของดิน



รูปที่ 2.22 (a)แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนและกำลังอัด  
(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผสมและกำลังอัด

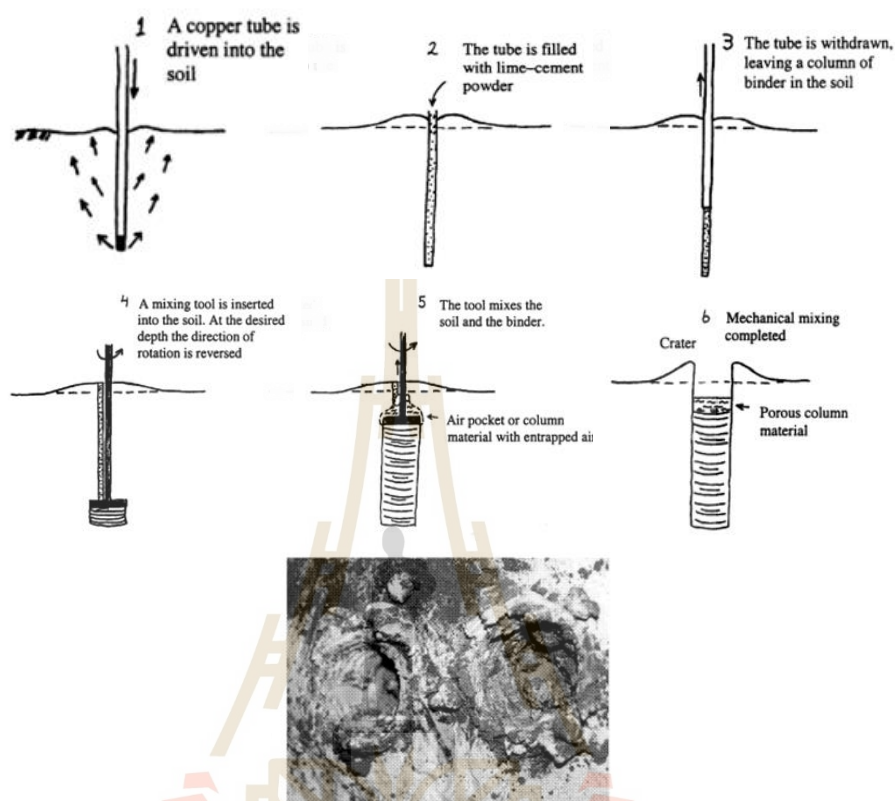
Yoshizawa (1997) รายงานผลของระยะเวลาต่อกำลังของพื้นที่ซ้อนทับกันของรอยต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.23 เมื่อทำการเว้นระยะเวลาก่อสร้างไม่นานเกินกว่า 1 ชั่วโมงทำให้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่เดียวกันที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง เห็นได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงอย่างมากเนื่องจากผลของรอยต่อดินซีเมนต์เพสต์ และรายงานไว้ว่าหากเว้นระยะเวลาก่อสร้างไม่เกินกว่า 48 ชั่วโมง แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q_{uf} \text{ (joint portion)} = 0.6 q_{uf} \text{ (general portion)}$$



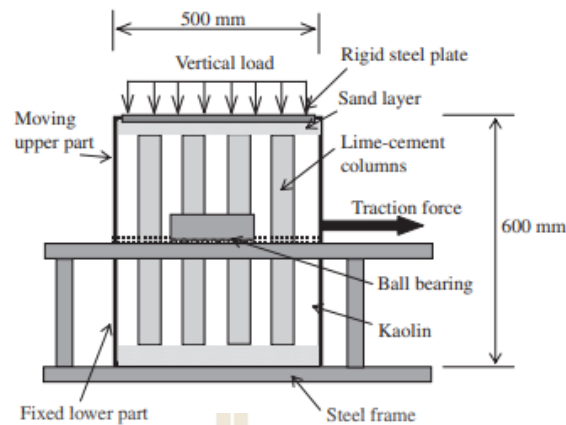
รูปที่ 2.23 กำลังของรอยต่อดินซีเมนต์

Larsson & Broms 2000 ศึกษามาตราส่วนของแบบจำลอง โดยกระบวนการสร้างแบบจำลอง ดังรูปที่ 2.24

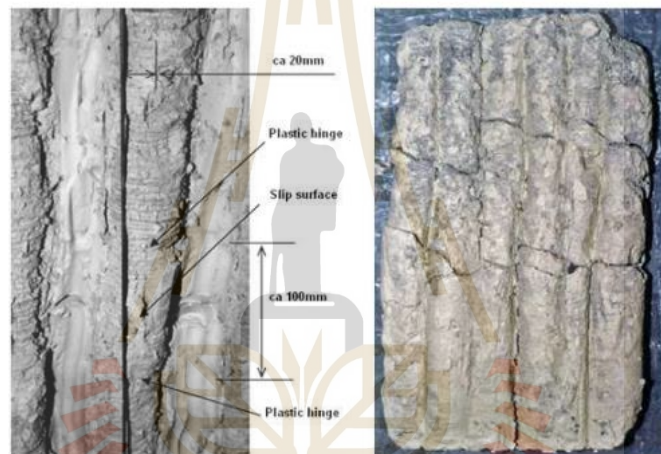


รูปที่ 2.24 กระบวนการผสมแบบจำลองด้วยวิธี Dry Mixing (Larsson and Broms, 2000)

Larsson and Broms (2000) พัฒนากล่องเขื่อนเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.25 โดยที่ส่วนบนของกล่องสามารถเลื่อนในแนวนอนได้อย่างอิสระ จากการใช้แรงดึงแนวนอนโดยตุ้มน้ำหนักและแรงที่เพิ่มขึ้น และหลังจากการทดสอบเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนตรงแล้ว ทำการตรวจสอบรูปแบบวิบัติของตัวอย่างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.26 เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ซ้อนทับกันจะมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเสาเข็มต้นเดียว จากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 2.25 การทดสอบกล่องเฉือน (Larsson and Broms, 2000)



รูปที่ 2.26 รูปแบบการวิบัติ (Larsson and Broms, 2000)

นิธิ (2555) ทดสอบแบบจำลองของวัสดุผสมในดินเหนียวอ่อน ดังรูปที่ 2.27 ขนาดแท่งดินซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 38 มิลลิเมตร ที่ระดับความลึกกระนาบเฉือนเท่ากับ 11.25 มิลลิเมตร (3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง), 22.50 มิลลิเมตร (6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) และ 33.75 มิลลิเมตร (9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) ซึ่งแบ่งเป็น 3 รูปแบบหลัก คือ แท่งดินซีเมนต์เรียงชิดติดกัน 3 ท่อน (3-11.25, 3-22.50, 3-33.75) แท่งดินซีเมนต์แท่งเดียว (1-11.25, 1-22.50, 1-33.75) และแท่งดินซีเมนต์ 3 ท่อนเรียงแบบมีช่องว่าง (3-1D, 3-1.5D) โดยทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุผสมด้วยกล่องเฉือนตรง (Large Scale Direct Shear Box Test) ดังรูปที่ 2.28 มีขนาด กว้าง 225 มิลลิเมตรยาว 600 มิลลิเมตร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนบนมีความสูง 220 มิลลิเมตร และส่วนล่างมีความสูง 67.50 เซนติเมตร ความหนาของกล่องทดสอบเท่ากับ 0.7 เซนติเมตร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนของแท่งดินซีเมนต์ต้นเดียวกับแท่งดินซีเมนต์ 3 ต้นมีค่าใกล้เคียงกัน และกำลังรับแรงเฉือนของแท่งดินซีเมนต์ 3 ต้นเรียงชิดกันที่ระดับความลึกกระนาบเฉือน

9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุดและเกิดการวิบัติในรูปแบบที่แท่งดินซีเมนต์ขาดที่รอยต่อแท่งดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

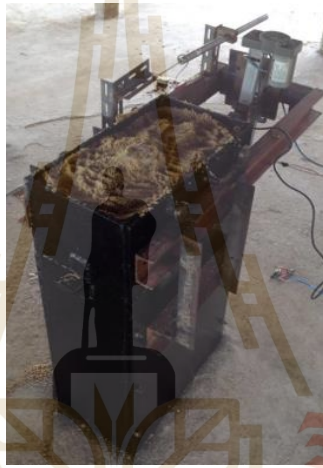


รูปที่ 2.28 รูปแบบกล่องฉนวนของ (นิธิ,2554)



รูปที่ 2.29 การวิบัติของแท่งดินซีเมนต์ (นิธิ,2554)

วิชญ์ (2558) ทดสอบแบบจำลอง SCC ก่อสร้างด้วยเครื่องผสมเชิงกลแบบเปียกขนาดเล็กในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติ ด้วยอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเสาเข็มเท่ากับ 175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่อง (SCC-S) และก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง (SCC-S24) ด้วยกล่องฉีดยาตรง ดังรูปที่ 2.30 ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนบนยาว 550 มิลลิเมตร กว้าง 200 มิลลิเมตร และสูง 200 มิลลิเมตร และส่วนล่างสูง 600 มิลลิเมตร เหล็กหนา 8 มิลลิเมตร ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 2.31(a) แสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงเฉือนของ SCC-S ที่ก่อสร้างต่อเนื่องสูงกว่า SCC-S24 ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง และ SCC-S ไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามแนวยาว ซึ่งแตกต่างจาก SCC-S24 ดังรูปที่ 2.31(b) เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามยาวที่ทำให้ SCC แยกออกจากกันและ SCC เกิดการวิบัติแบบหักในเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสองต้น



รูปที่ 2.30 กล่องฉีดยาของ (วิชญ์, 2558)



รูปที่ 2.31 การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์

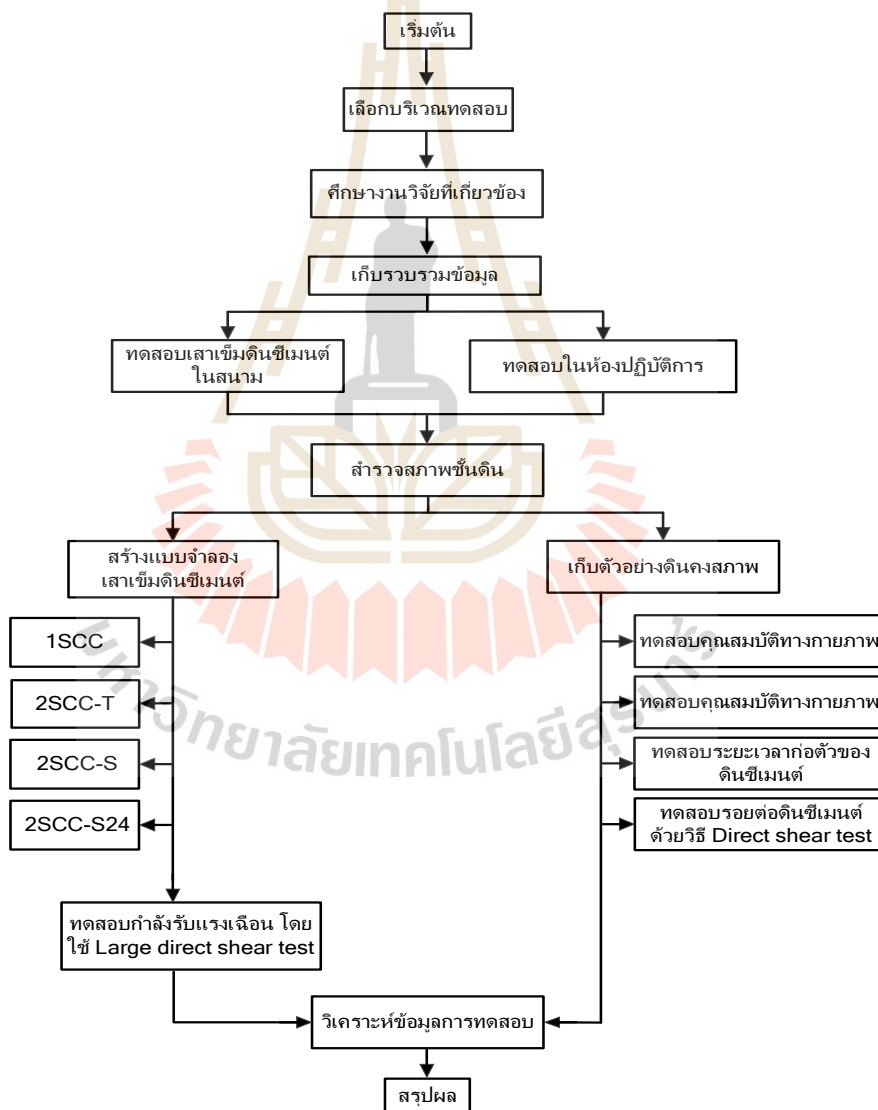
(a) SCC-S ก่อสร้างต่อเนื่อง

(b) SCC-S ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง (วิชญ์, 2558)



### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

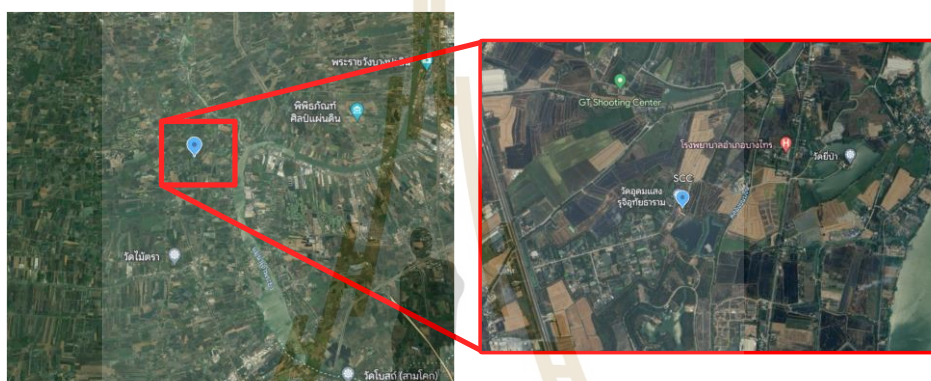
วิธีการดำเนินงานวิจัยนี้ประกอบด้วย พื้นที่ทดสอบ, การทดสอบระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์, การทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม โดยใช้ Large direct shear box test จากนั้นทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการรับแรงต้านข้างของดินเหนียวอ่อนที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแมนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องและกลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 3.1 ผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

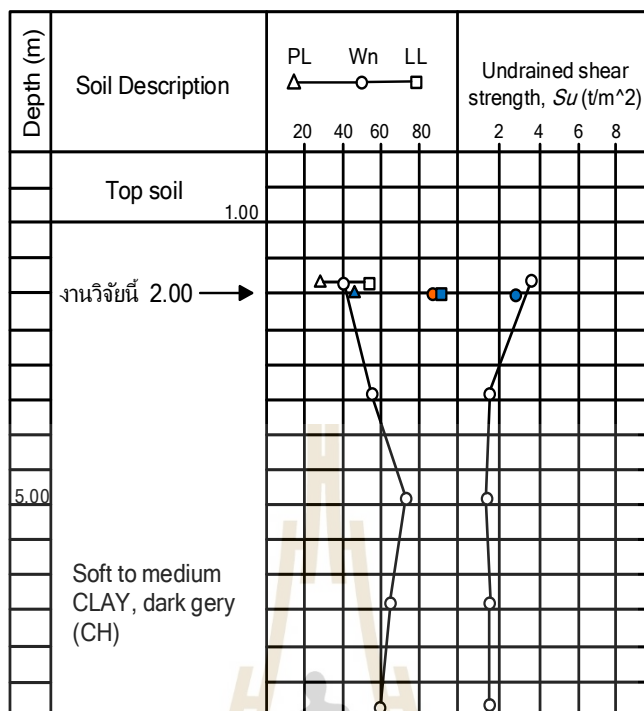
### 3.1 พื้นที่ทดสอบ

งานวิจัยต้องการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างในดินเหนียวที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์และเก็บตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ (undisturbed sample) ที่ระดับความลึก 2 เมตรจากผิวดินในพื้นที่ทดสอบตำบลบางไทร อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ดังรูปที่ 1 โดยมีพิกัด UTM อยู่ที่ E 660452.00 N 1569836.00 การเก็บตัวอย่างใช้วิธีการเก็บโดยใช้กระบอกลวดพลาสติกแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร ทำการทดสอบหาคคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวดังต่อไปนี้ โดยผลการเจาะสำรวจดินแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของพื้นที่ทดสอบ

การเก็บตัวอย่างใช้วิธีการใช้กระบอกลวดพลาสติกแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร นำดินเหนียวอ่อนมาทำการทดสอบหาคคุณสมบัติทางกายภาพ ในงานวิจัยนี้มีปริมาณน้ำในดินปริมาณน้ำในดินเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์, ชีตจำกัดเหลว 92 เปอร์เซ็นต์, ชีตจำกัดพลาสติก 42 เปอร์เซ็นต์, ดัชนีพลาสติก 50 เปอร์เซ็นต์ และค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ  $2.51 \text{ t/m}^2$  จำแนกเป็นดินประเภท CH ที่มีความเหนียวสูง ซึ่งดินในความลึกนี้อาจจะอยู่ในช่วงใกล้ผิวดินจึงมีปริมาณน้ำในดินต่ำ อีกทั้งยังเป็นดินอัดตัวแน่นเกินปกติเล็กน้อย (lightly over consolidated) จากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล เนื่องจากการลดลงของน้ำในดินส่วนใกล้กับผิวดิน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากดินที่อยู่ลึกลงไปใต้นดินปริมาณน้ำในดินมากกว่าที่ความลึก 2 เมตร ดินจึงยังคงเป็นดินเหนียวอ่อนอยู่ โดยแสดงข้อมูลการเจาะสำรวจดินดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน

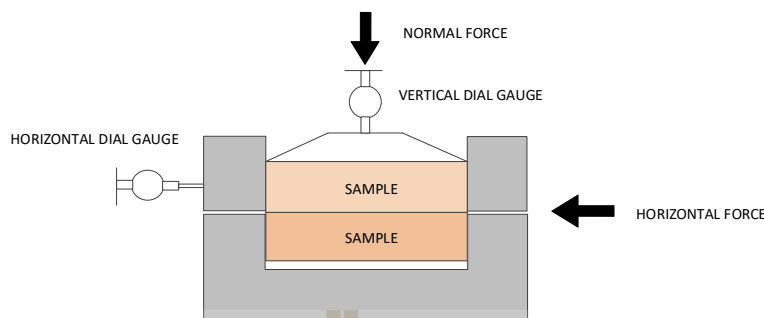
### 3.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ในห้องปฏิบัติการ ใช้วิธีการทดสอบโดยเข็มไวน้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ซึ่งแบ่งเป็นสองระยะ ได้แก่ เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ตัวอย่างทดสอบมีขนาด 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ทำการก่อสร้างที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเสาเข็มเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.0 จนตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน จากนั้นนำมาทดสอบ setting time by vicat

### 3.3 การทดสอบ Direct shear test กำลังต้านทานแรงเฉือนระหว่างรอยต่อดินซีเมนต์ ในห้องปฏิบัติการ

ในงานวิจัยนี้ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ด้วยวิธีเฉือนตรง (direct shear test) ดังรูปที่ 3.4 ตามมาตรฐาน ASTM D 3080 ทำการหล่อคอนกรีตให้มีขนาดเท่ากับกล่องตัวอย่าง (shear box) ที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนด้วยวิธีเฉือนตรง (direct shear test) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 63.5 มิลลิเมตร และมีความสูงเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาประกอบเข้ากับกล่องตัวอย่าง (shear box) ให้น้ำหนักกดทับในแนวตั้ง (Normal force) ที่ส่วนบนของตัวอย่างดิน น้ำหนักกดทับที่ใช้เท่ากับ 3.91 กิโลปาสกาลและ 15.48 กิโลปาสกาล จากนั้นให้แรงในแนวระนาบเฉือนของกล่องตัวอย่างเพื่อเฉือนตัวอย่างออกจากกัน ทำการคิดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) กับหน่วยแรงกดทับ (Normal stress) ของดินซีเมนต์ในรูปแบบของสมการ Mohr – Coulomb's equation หาค่าหน่วยแรงยึดเกาะ

(cohesion) และมุมเสียดทาน (internal friction) จากกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ที่จุดวิบัติ



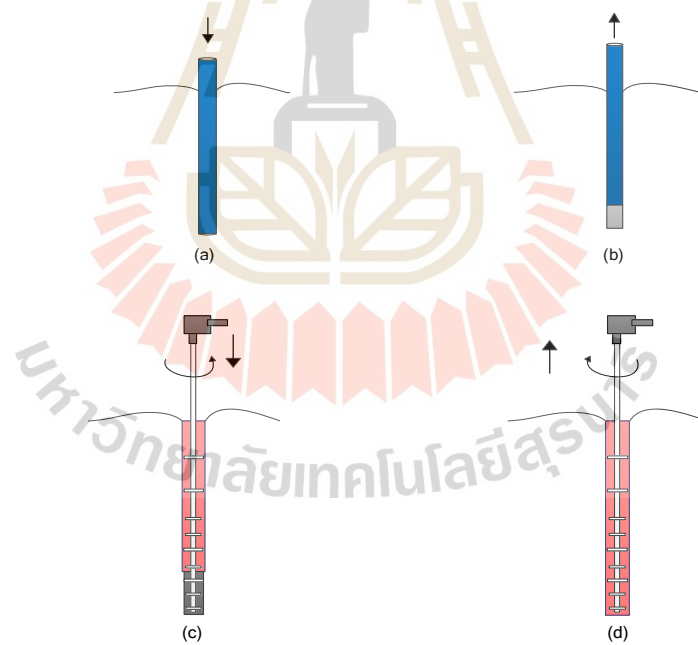
รูปที่ 3.4 ทดสอบเฉือนตรงด้วยวิธี Direct shear test ของรอยต่อดินซีเมนต์

### 3.4 การสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

ในการทดสอบนี้ทำการก่อสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างในสนามด้วยวิธีการผสมเชิงกลแบบเปียกโดยใช้ก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็ก ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วยใบกวาดดิน 5 ชุด ตามแนวดิ่ง ใบกวาดดินกว้าง 65 มิลลิเมตรและบิดทำมุม 20 องศา ก้านผสมติดใบหมุนอิสระ (free blade) เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมแนวดิ่งของก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็ก โดยทำการหมุนก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็กด้วยสว่านไฟฟ้า โดยควบคุมความเร็วในการหมุนก้านเจาะที่ 45/นาที เพื่อให้การผสมดินเข้ากับปูนซีเมนต์มีความสม่ำเสมอและมีผลต่อความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ ออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ใช้สัดส่วนย่อขนาดจริง 10:1 โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่มีอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเสาเข็มเท่ากับ 175 กิโลกรัมต่อปริมาตรและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.0 โดยขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 3.6a - 3.6c



รูปที่ 3.5 ก้านเจาะผสมเชิงกลขนาดเล็ก



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

(a) ทำการกดท่อ PVC ขนาด 1 นิ้วลงในดินที่ระดับความลึก 600 มิลลิเมตร

(b) ทำการถอนท่อ PVC ขึ้น จากนั้นกรอกน้ำปูนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

เท่ากับ 1.0 ลงในหลุม โดยที่อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเสาเข็มเท่ากับ 175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

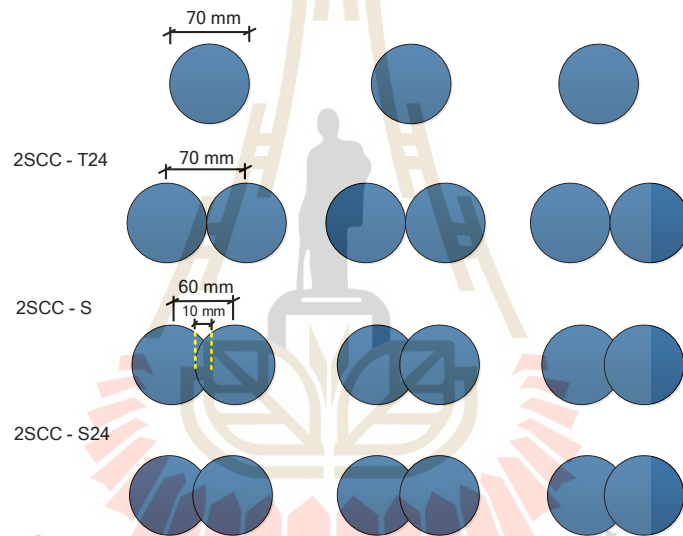
(c) กวนผสมดินเข้ากับปูนซีเมนต์ด้วยสว่านไฟฟ้า โดยรอบการหมุนอยู่ที่ 45



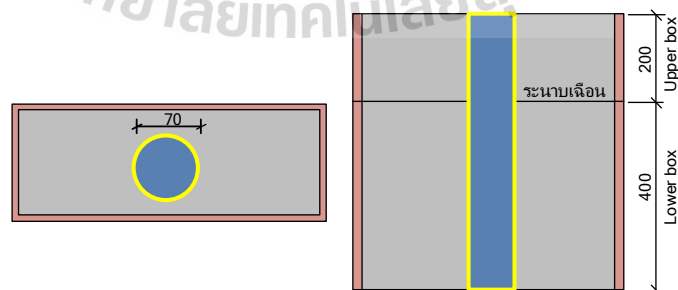
รอบ/นาที่ กดลงหมุนส่วานตามเข็มนาฬิกาด้วยอัตรา 1 เมตร/นาที่ กดก้าน  
เจาะลงหมุนส่วานทวนเข็มนาฬิกาจนถึงระดับความลึก 600 มิลลิเมตร ด้วย  
อัตรา 1 เมตร/นาที่

ในการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการจัดเรียงแบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์  
ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยแสดงตำแหน่งตามการจัดเรียง ดังรูปที่ 3.7 และรูปแบบการ  
ทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 3.8 ถึง 3.11 โดยแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ

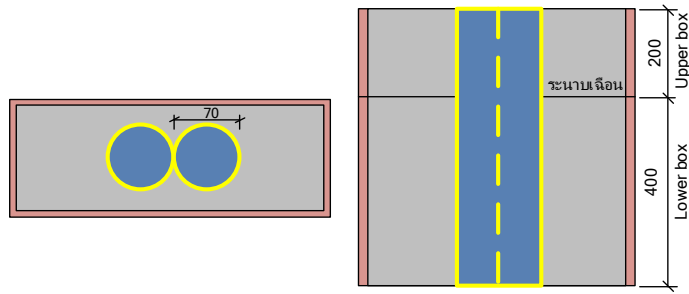
1. 1SCC เสาเข็มต้นเดียว
2. 2SCC-T24 เสาเข็ม 2 ต้นแบบซีแคนท์ เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง
3. 2SCC-S เสาเข็ม 2 ต้นแบบแทนเจนท์ ก่อสร้างต่อเนื่อง
4. 2SCC-S24 เสาเข็ม 2 ต้นแบบแทนเจนท์ เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง



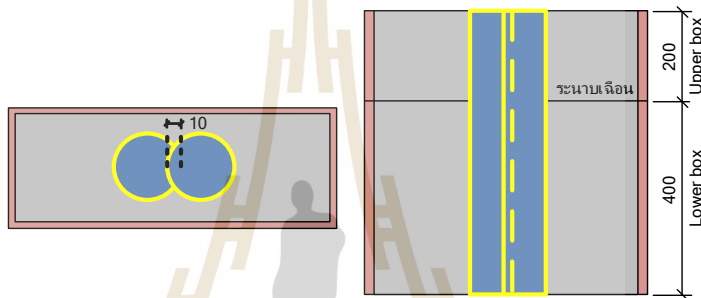
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งทดสอบตามการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์



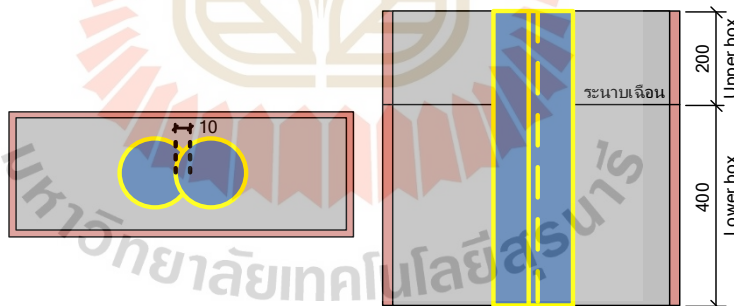
รูปที่ 3.8 รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมต้นเดียว



รูปที่ 3.9 รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมสองชั้น วางชิดกันโดยไม่  
ขบโดยชั้นที่สองก่อสร้างหลังชั้นแรกแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.10 รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมสองชั้น ชั้นที่สองเหลื่อมกับชั้นแรกเป็น  
ระยะ 10 มิลลิเมตร โดยชั้นที่สองก่อสร้างหลังชั้นแรกแล้วเสร็จ 24 ชั่วโมง



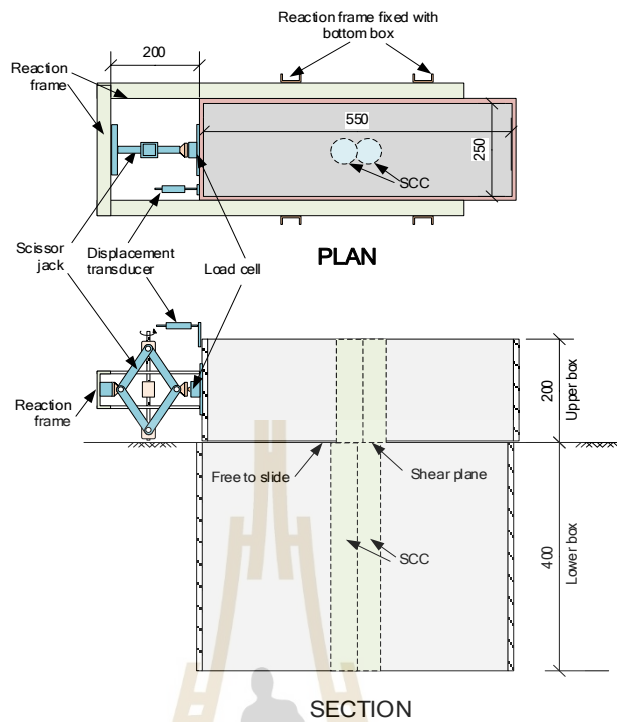
รูปที่ 3.11 รูปแบบการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ ผสมสองชั้น  
ชั้นที่สองเหลื่อมกับชั้นแรกเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร ก่อสร้างต่อเนื่องกัน

### 3.5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม โดยใช้ Large direct shear test

ในงานวิจัยนี้ ออกแบบเครื่องมือกล่องเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large direct box test) ดังรูปที่ 3.12 โดยประกอบด้วยกล่องเหล็กหนา 8 มิลลิเมตร โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนบนความกว้าง 200 มิลลิเมตร ความยาว 550 มิลลิเมตร และสูง 200 มิลลิเมตร และส่วนล่างสูง 400 มิลลิเมตร ในการทดสอบนำกล่องเฉือนตรงกดลงให้ครอบคลุมแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ถึงระดับความลึก 600 มิลลิเมตรและการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง ดังรูปที่ 3.13 โดยให้แรงในแนวราบด้วยเครื่องกลแบบมือหมุนและวัดกำลังรับแรงเฉือนด้วยอุปกรณ์วัดแรง (load cell) และวัดระยะการเคลื่อนตัวของกล่องเฉือนตรงขนาดใหญ่ด้วยเซ็นเซอร์วัดการเคลื่อนตัว (displacement transducer) โดยใช้ data acquisition unit ในการเก็บข้อมูล หน่วยแรงเฉือนคำนวณจากค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดต่อหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์และพื้นที่หน้าตัดต่อหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวที่หารด้วยพื้นที่กล่องเฉือนตรง



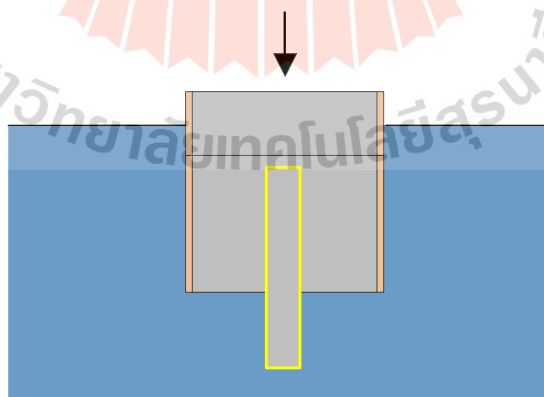
รูปที่ 3.12 กล่องเฉือนตรงที่ใช้ทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงด้านข้าง



รูปที่ 3.13 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การวัดแรง

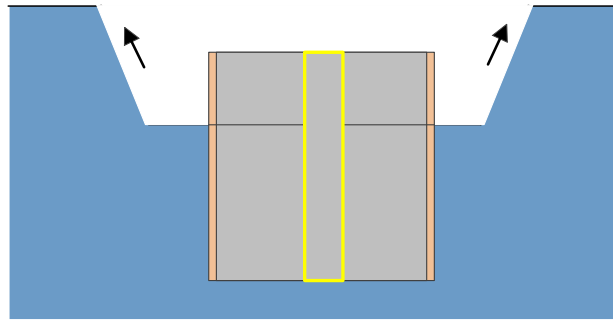
โดยมีขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ดังนี้

1. เตรียมกล่องฉีดยึดตรงประกอบส่วนบนเข้ากับส่วนล่าง จากนั้นกดลงในดินให้ครอบตัวอย่างทดสอบจนได้ระดับความลึก 600 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.14 โดยกดลงให้ดินเหนียวเต็มกล่องพอดีไม่เกิดช่องว่างและให้พอดีกับส่วนบนของตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากทำให้มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือน



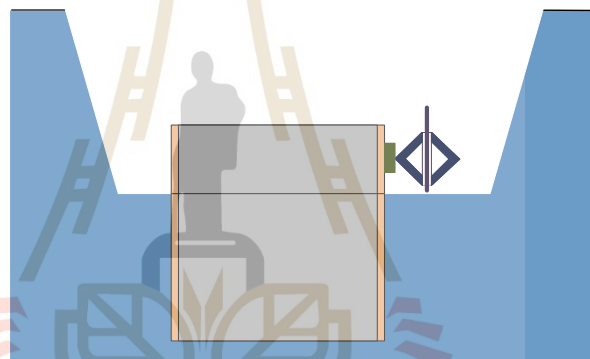
รูปที่ 3.14 นำกล่องฉีดยึดกดลงในดินเหนียวอ่อนครอบตัวอย่างทดสอบ

2. ขุดดินด้านข้างรอบกล่องฉีดยึดให้ได้ระดับเท่าส่วนบนกล่องฉีดยึด เพื่อใช้เป็นพื้นที่ในเตรียมการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ ดังรูปที่ 3.15



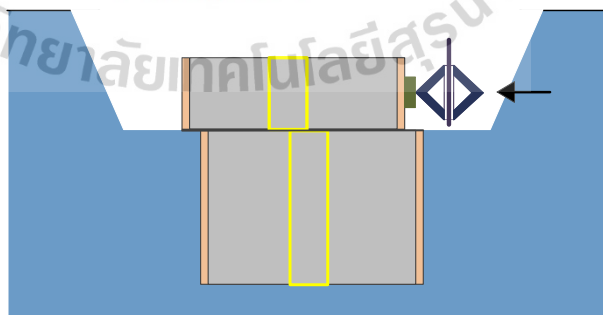
รูปที่ 3.15 ชุดเปิดดินรอกกล่องเนียนที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตร

3. ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงอุปกรณ์วัดแรง (load cell) และอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวบริเวณด้านบนของส่วนบนกล่องเนียนตรง ดังรูปที่ 3.16 โดยต้องตรวจสอบความสมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบและดินเหนียวในกล่องก่อนทำการติดตั้งเครื่องมือ



รูปที่ 3.16 ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงและอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวที่ส่วนของของกล่องเนียน

4. เริ่มต้นตัวอย่างทดสอบจากการเพิ่มแรงในแนวตั้งด้วยเครื่องกลแบบมือหมุน ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เริ่มให้แรงด้วยเครื่องกลแบบมือหมุน โดยควบคุมอัตราเร็วให้คงที่

5. บันทึกข้อมูลกำลังรับแรงเฉือน (Load cell) และการเคลื่อนตัวด้วยเซนเซอร์วัดการเคลื่อนตัว (displacement transducer) เมื่อแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วลดลงแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ จากนั้นอ่านผลต่อไประยะประมาณ 10 มิลลิเมตร



- เมื่อทดสอบจนตัวอย่างวิบัติ ทำการขุดดินรอบกล่องเลื่อนเพื่อเปิดกล่องเลื่อนด้านหนึ่งออก แล้วลอกดินหุ้มตัวอย่างทดสอบออกอย่างระมัดระวัง เพื่อบันทึกกลไกการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



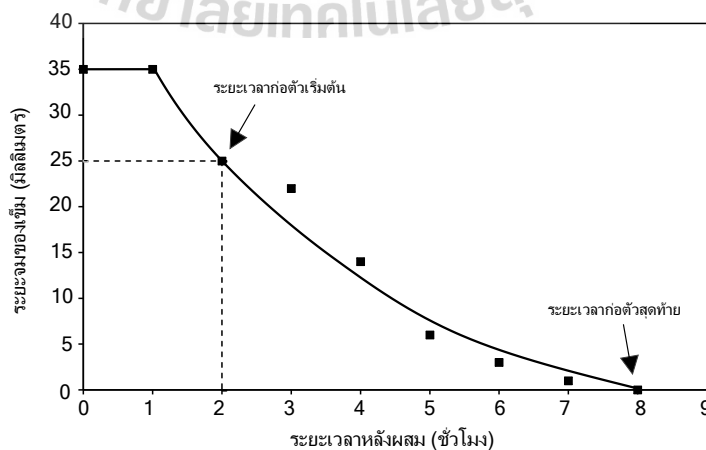
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้รายงานผลการทดสอบ ระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์, กำลังต้านทานแรงเฉือนโดยวิธี Direct shear test ในห้องปฏิบัติการ, หน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ และกลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์โดยการทดสอบเฉือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม จากนั้นวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของดินเดิมและดินที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์จัดเรียงแบบแทนเจนต์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยเปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองหล่อสำเร็จของนิตีและแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ของวิชณ

#### 4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์

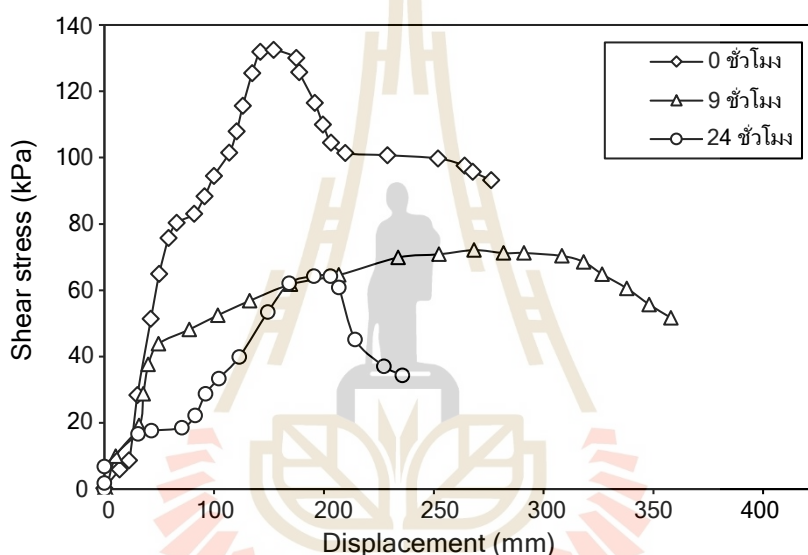
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์ (Setting time by vicat) เพื่อหา ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) พบว่า ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นคือ 2 ชั่วโมง และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายคือ 8 ชั่วโมง โดยที่ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของดินซีเมนต์เพสต์นั้นนานกว่าการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่กำหนดในมาตรฐาน มอก. 15-2547 ซึ่งระบุให้ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์สุดท้ายต้องไม่เกิน 6 ชั่วโมง 15 นาที สาเหตุเนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีส่วนผสมของดินเหนียวและมีปริมาณน้ำที่อยู่ในดินเหนียวเพิ่มขึ้นจากปริมาณน้ำที่ผสมกับปูนซีเมนต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะเวลาเว้นช่วงก่อสร้างระหว่างต้นของกรณี 2SCC-T24 และ 2SCC-S24 เป็น 24 ชั่วโมง ซึ่งเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ เป็นระยะเวลาที่ดินซีเมนต์มีการก่อตัวแล้วอย่างแน่นอน ในช่วงเวลาก่อสร้างที่น้อยกว่าเวลาการก่อตัว มักไม่พบในงานก่อสร้างจริง เนื่องจากการก่อสร้าง SCC หากไม่ก่อสร้างต่อเนื่องกันในการเว้นช่วงก่อสร้างทำให้ SCC ต้นถัดมาที่ก่อสร้างหลังจาก SCC ต้นที่สร้างไว้แล้วมีอายุเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังการผสมกับระยะเวลาของเข็มไวแคท

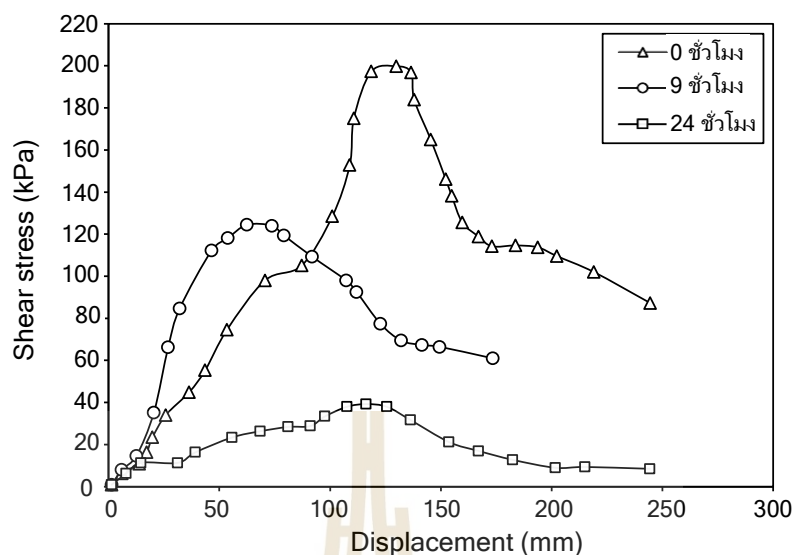
## 4.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือน โดยวิธี Direct shear test ในห้องปฏิบัติการ

เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 28 วัน นำมาทดสอบกำลังต้านทานการเฉือนโดยใช้วิธี Direct shear test ซึ่งกำหนดช่วงเวลาการก่อสร้างที่ระยะการก่อตัวเริ่มต้นและระยะการก่อตัวสุดท้ายเป็น 0 ชั่วโมง 9 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ข้อมูลกำลังรับแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของรอยต่อดินซีเมนต์ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (Shear stress) กับหน่วยแรงกดทับ (Normal stress) ดังรูปที่ 4.2 พบว่าที่น้ำหนักกดทับ 3.9 กิโลปาสคาล เว้นช่วงเวลา 0 ชั่วโมง มีค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 133 กิโลปาสคาล, เว้นช่วงเวลา 9 ชั่วโมง หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 72 กิโลปาสคาล และที่ เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 64 กิโลปาสคาล



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง ที่หน่วยแรงกดทับ 3.9 กิโลปาสคาล

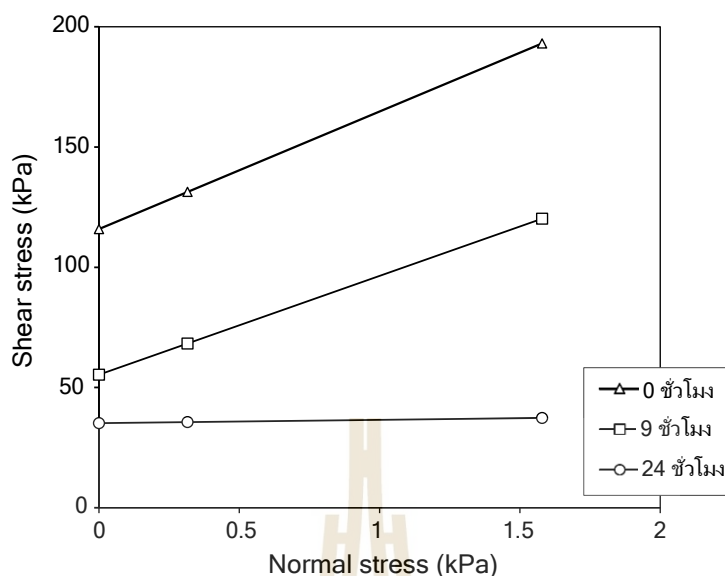
จากผลการทดสอบกำลังต้านทานการเฉือน ที่หน่วยแรงกดทับ 15.48 กิโลปาสคาล ดังรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง พบว่าที่เว้นช่วงเวลา 0 ชั่วโมง มีค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 133 กิโลปาสคาล ที่เว้นช่วงเวลา 9 ชั่วโมง หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 72 กิโลปาสคาล และที่เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 64 กิโลปาสคาล



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง  
ที่หน่วยแรงกดทับ 15.48 กิโลปาสคาล

เปรียบเทียบกำลังต้านทานการเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง, 9 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ซึ่งให้เห็นว่ากำลังต้านทานการเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ลดลงตามระยะเวลาเว้นการก่อสร้างที่นานขึ้น เนื่องจากดินซีเมนต์เว้นช่วงการก่อสร้าง 9 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงเป็นช่วงเวลาที่นานเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์ จึงทำให้ดินซีเมนต์ที่สร้างไว้ก่อนหน้าก่อตัวแล้วส่งผลให้กำลังต้านทานการเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์มีค่าลดลง

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อดินซีเมนต์กับหน่วยแรงกดทับ จากผลการทดสอบเฉือนตรงของรอยต่อดินซีเมนต์ของดินซีเมนต์ที่หน่วยแรงกดทับ 3.9 กิโลปาสคาลและที่หน่วยแรงกดทับ 15.48 กิโลปาสคาลเว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง, 9 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.4 พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินซีเมนต์ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง กำลังต้านทานแรงเฉือนมีค่าสูงกว่าที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์แปรผกผันกับเวลาที่เว้นการก่อสร้าง ดังตารางที่ 1 แสดงหน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมงไปจนถึงที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมง หน่วยแรงยึดเกาะจาก 116 กิโลปาสคาลลดลงเหลือ 52 กิโลปาสคาลและที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมงหน่วยแรงยึดเกาะลดลงเหลือเพียง 35 กิโลปาสคาล ซึ่งเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงกำลังต้านทานการเฉือนของดินซีเมนต์เพสต์ เมื่อตัวอย่างดินซีเมนต์ทิ้งช่วงเวลาก่อสร้างนานเกินกว่าระยะก่อตัวสุดท้ายส่งผลให้กำลังของรอยต่อดินซีเมนต์มีค่าลดลงตามช่วงเวลาเว้นการก่อสร้างที่นานขึ้น โดยเว้นช่วงเวลา 0 ชั่วโมงไปจนถึง 24 ชั่วโมง เห็นได้ว่ามูมเสียทานภายในแปรผกผันกับกำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อดินซีเมนต์กับหน่วยแรงกดทับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของกำลังรับแรงเฉือนที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้างต่างๆ

ช่วงเวลาก่อสร้าง	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (degree)
0 ชั่วโมง	116	16
9 ชั่วโมง	52	15
24 ชั่วโมง	35	1

กลไกการวิบัติของรอยต่อดินซีเมนต์ที่ทดสอบด้วยวิธีเฉือนตรงในห้องปฏิบัติการที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง 9 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าดินซีเมนต์ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง รอยต่อดินซีเมนต์ที่มีกำลังต้านแรงเฉือนและหน่วยแรงยึดเกาะสูงที่สุดและการวิบัติรอยต่อดินซีเมนต์มีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวตลอดแนวรอยต่อ ดังรูปที่ 4.5 ในส่วนของดินซีเมนต์เพสต์ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมง ลักษณะการวิบัติของรอยต่อดินซีเมนต์ผิวขรุขระ เนื่องจากดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างในช่วงแรกเกิดการก่อตัวแล้วจึงทำให้รอยต่อดินซีเมนต์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 4.6 และการวิบัติของรอยต่อของดินซีเมนต์เพสต์ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง มีลักษณะการวิบัติของรอยต่อดินซีเมนต์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดรอยขรุขระที่เกิดจากการก่อตัวแล้วของดินซีเมนต์ที่ก่อสร้าง



ช่วงแรก จึงทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ที่ค่าต่ำกว่าที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง ซึ่งมีลักษณะคล้ายที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 การวิบัติของรอยต่อที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 0 ชั่วโมง



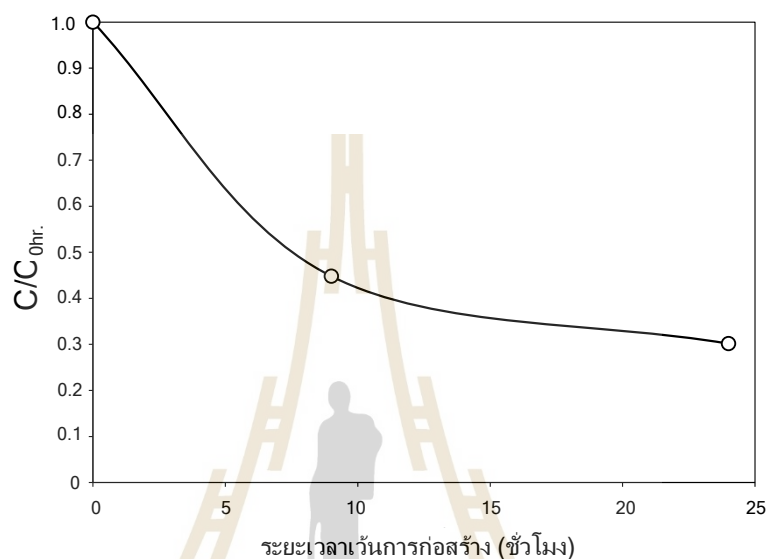
รูปที่ 4.6 การวิบัติของรอยต่อที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 การวิบัติของรอยต่อที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อดินซีเมนต์กับระยะเวลาเว้นการก่อสร้าง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของหน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลาต่างๆต่อหน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลา 0 ชั่วโมง ( $C/C_{0hr.}$ ) พบว่า ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมงมีค่า

$C_{9hr.}/C_{0hr.}$  เท่ากับ 0.45 และที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมงมีค่า  $C_{24hr.}/C_{0hr.}$  เท่ากับ 0.30 ซึ่งให้เห็นว่า อัตราส่วนของหน่วยแรงยึดเกาะที่เว้นช่วงเวลาต่างๆแปรผกผันกับที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง ซึ่งที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 9 ชั่วโมงมีค่าต่ำกว่าที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง และกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์แปรผกผันกับระยะเวลาเว้นการก่อสร้าง เห็นได้ว่าที่เว้นระยะเวลาก่อสร้างนานขึ้นทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์มีค่าต่ำลง



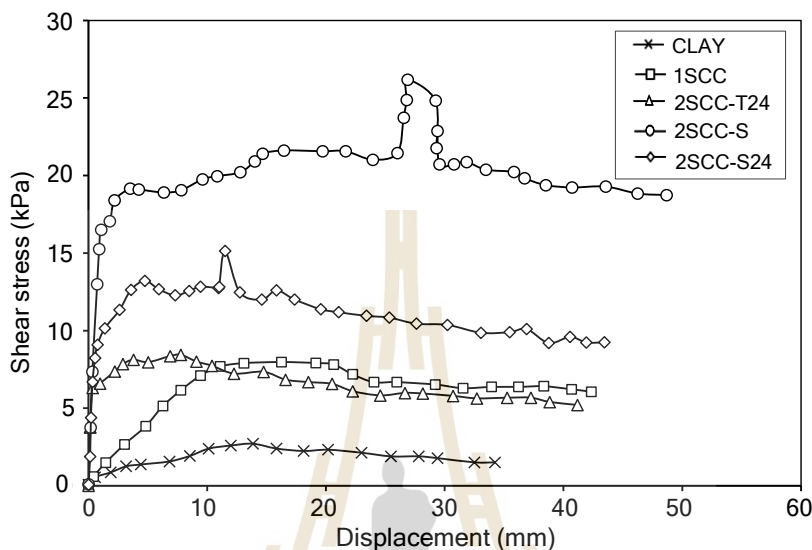
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยต่อดินซีเมนต์กับระยะเวลาเว้นการก่อสร้าง

### 4.3 ผลการทดสอบหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

ผลการทดสอบเฉือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม ดังรูปที่ 4.9 ข้อมูลหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวราบของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยอัตราเฉือนของการทดสอบมีค่าอยู่ในช่วง 4-8 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมหน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 2.71 กิโลปาสคาลและดินที่เสริมด้วย SCC ทั้ง 4 รูปแบบ คือ 1SCC , 2SCC-T24, 2SCC-S24 และ 2SCC-S มีค่าหน่วยแรงเฉือนเท่ากับ 8.29 กิโลปาสคาล , 8.45 กิโลปาสคาล, กิโลปาสคาล, 13.22 กิโลปาสคาล และเท่ากับ 21.79 กิโลปาสคาล ตามลำดับ เมื่อเพิ่มแรงเฉือนในแนวราบช่วงการเคลื่อนตัวของดินเดิมเท่ากับ 15 มิลลิเมตรและดินที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ 1SCC, 2SCC-T24, 2SCC-S24 และ 2SCC-S มีค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากับเท่ากับ 20 มิลลิเมตร, 12 มิลลิเมตร, 12 มิลลิเมตร, และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือน พบว่า 1SCC สูงกว่าดินเดิมเป็น 3 เท่าและดินที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เห็นได้ว่า 1SCC, 2SCC-T24, 2SCC-S24 และ 2SCC-S มีกำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าดินเดิม 3 เท่า, 3 เท่า, 4. เท่า และ 8 เท่า ตามลำดับ โดยที่ 2SCC-T24 กับ 1SCC ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกันมากและมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำกว่า 2SCC-S24 เป็น 2 เท่า เนื่องจากกรณี 2SCC-T24 ก่อสร้างโดยเสาเข็มดินซีเมนต์เรียง

กันแบบผิวสัมผัสกันและก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง แรงที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสและใน 2SCC-S แรงที่เกิดขึ้นเกิดจากหน่วยแรงยึดเกาะในแนวรอยต่อซ้อนทับกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการ เชื่อมประสานเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้มีกำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุด โดยสูงเป็น 3, 3 และ 2 ของ 1SCC, 2SCC-T24 และ 2SCC-S24 ตามลำดับ

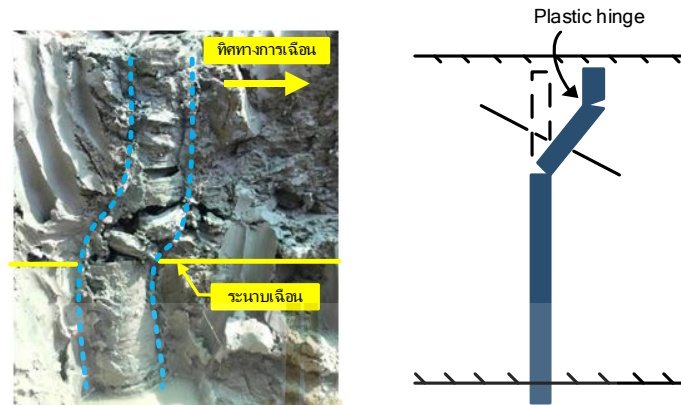


รูปที่ 4.9 หน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวแนวราบของเสาเข็มดินซีเมนต์

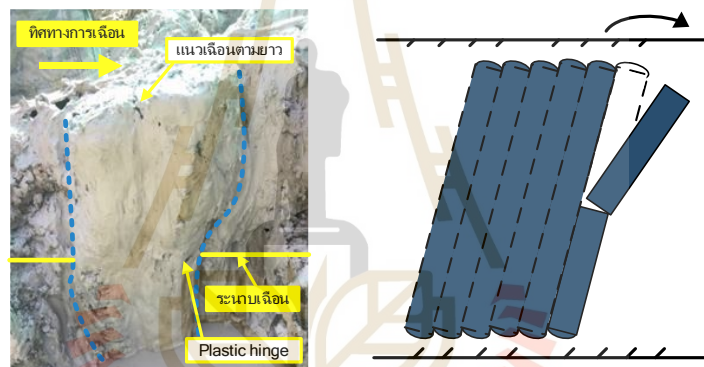
#### 4.4 ผลการทดสอบกลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์

ผลการทดสอบแสดงลักษณะการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ จากการเปิดด้านข้างของกล่อง เฌือนตรงขนาดใหญ่ เพื่อศึกษาลักษณะและกลไกการวิบัติของดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการวิบัติของ 1SCC พบว่าเกิดการวิบัติแบบหักเนื่องจากโมเมนต์ตัดจากการเฉือน รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการวิบัติของ 2SCC-T24 พบว่า เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อกล่องเฌือนทำให้เกิดกำลัง ต้านทานแรงเฉือนภายในเสาเข็มดินซีเมนต์ลดลงจนเกิดการวิบัติแบบแนวเฌือนตามยาว (shear failure along column) ตามแนวระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์สองต้น ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์แยกอิสระ ออกจากกันเนื่องจากความกว้างส่วนซ้อนทับกันระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยมากเป็นเพียงการเรียง ขีดสัมผัสกัน ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่ปรับปรุงและกำลัง ต้านทานต่อโมเมนต์ตัดต่ำ จึงทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) ที่ทำให้ เสาเข็มดินซีเมนต์วิบัติแบบหักในแนวระนาบเฌือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสองต้น รูปที่ 4.12 แสดง ลักษณะการวิบัติของ 2SCC-S24 พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนภายใน SCC เมื่อแรงกระทำสูงเกินกว่า ที่เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถรับได้ทำให้เกิดแนวเฌือนตามยาว (shear failure along column) ตาม แนวระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์สองต้นและโมเมนต์ตัดที่เฌือนให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) ที่ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์วิบัติแบบหักในแนวระนาบเฌือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง สองต้น และลักษณะการวิบัติของ 2SCC-S ดังรูปที่ 4.13 พบว่าเกิดการวิบัติแบบเฌือนตามขวาง (shear across along column) ตามแนวระนาบเฌือน เนื่องจากกำลังรับแรงเฉือนที่เกิดจากหน่วย

แรงยึดเกาะของรอยต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีค่าสูง และเสาเข็มดินซีเมนต์มีกำลังต้านโมเมนต์ดัดที่สูง จึงทำให้ไม่เกิดการวิบัติแบบหัก

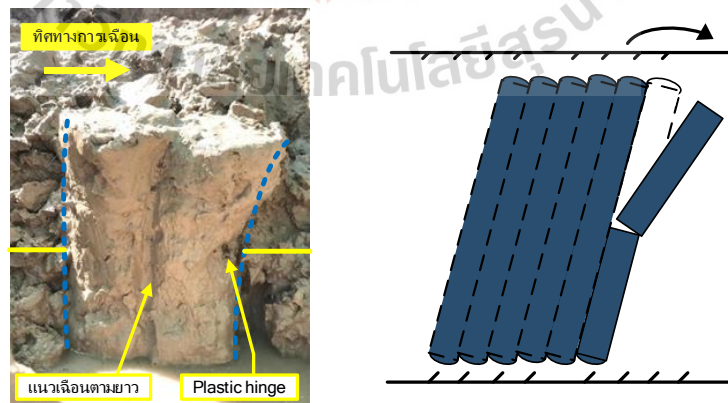


รูปที่ 4.10 รูปแบบการวิบัติของ 1SCC



รูปที่ 4.11 รูปแบบการวิบัติของ 2SCC-T24

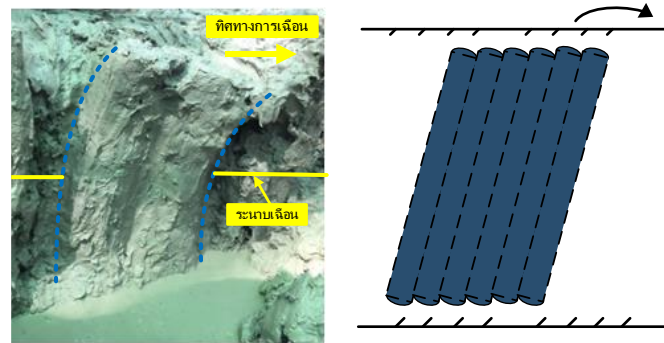
เกิดการวิบัติแบบ shear failure along column และเสาเข็มแยกออกจากกัน



รูปที่ 4.12 รูปแบบการวิบัติของ 2SCC-S24

เกิดการวิบัติแบบ shear failure along column

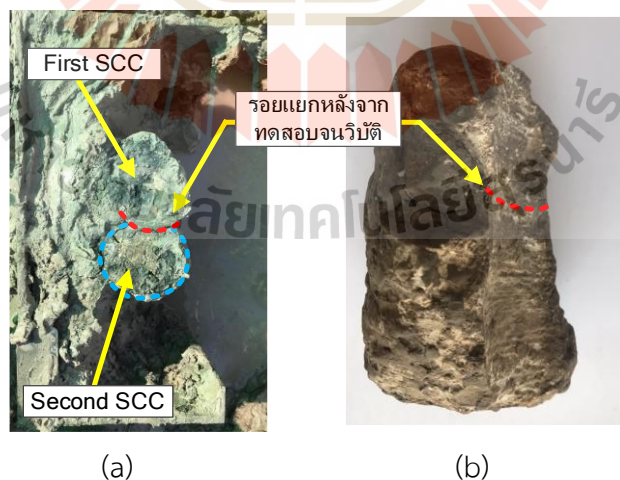




รูปที่ 4.13 รูปแบบการวิบัติแบบของ 2SCC-S24  
เกิดการวิบัติแบบ shear failure across column

#### 4.4.1. ผลเนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ 2SCC-S24 เกิดจากการวิบัติแบบเฉือนตามแนวยาวที่ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์แยกอิสระออกจากกันเป็นสองต้น ในแนวรอยต่อระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์สองต้น ดังรูปที่ 4.14a เนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ เว้นช่วงเวลาก่อสร้างนานเกินกว่าระยะก่อตัวสุดท้าย จึงทำให้รอยต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน มีเพียงดินที่เป็นส่วนยึดเกาะประสานกันที่ผิวสัมผัสเสาเข็มดินซีเมนต์ เห็นได้จากรอยหมุนของใบก้านเจาะผสมบริเวณรอยต่อของเสาเข็มดินซีเมนต์ของต้นที่ก่อสร้างขึ้นก่อนและเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างช่วงแรกซีเมนต์ก่อตัวแล้วอย่างแน่นอน ดังรูปที่ 4.14b ซึ่งส่งผลต่อกำลังของรอยต่อที่ซ้อนทับกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ลดลง

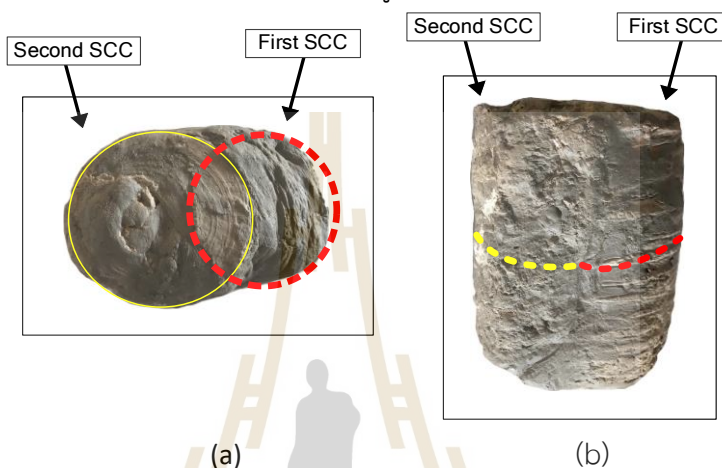


รูปที่ 4.14 ลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ 2SCC-S24 ที่ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง

- (a) ลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์แยกอิสระออกจากกัน
- (b) ลักษณะรอบใบก้านเจาะเชิงกลขนาดเล็ก



รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ 2SCC-S ในการก่อสร้าง SCC ต้นถัดไปที่ก่อสร้างต่อเนื่องกัน จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ 2SCC-S ที่ก่อสร้างต่อเนื่องกัน ดังรูปที่ 4.15a พบว่ารอยต่อที่ซ้อนทับกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างต้นแรก ยังไม่มีการก่อตัว เห็นได้ว่ารอยต่อระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ประสานเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแนว รอยต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.15b เมื่อเกิดการวิบัติไม่เกิดรอยแยกระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าสูง



รูปที่ 4.15 ลักษณะของเสาเข็มดินซีเมนต์ 2SCC-S ที่ก่อสร้างต่อเนื่อง

- (a) Top view แสดงลักษณะของรอยต่อที่ซ้อนทับกันของเสาเข็มดินซีเมนต์  
 (b) Side view แสดงลักษณะความต่อเนื่องในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการวิบัติในแนวรอยต่อของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ ซึ่งเป็นเหตุผลที่เลือกทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์และกลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้างแตกต่างกัน ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและสติเฟนสของเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อให้สามารถต้านทานโมเมนต์ดัด

## 4.5 เปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์

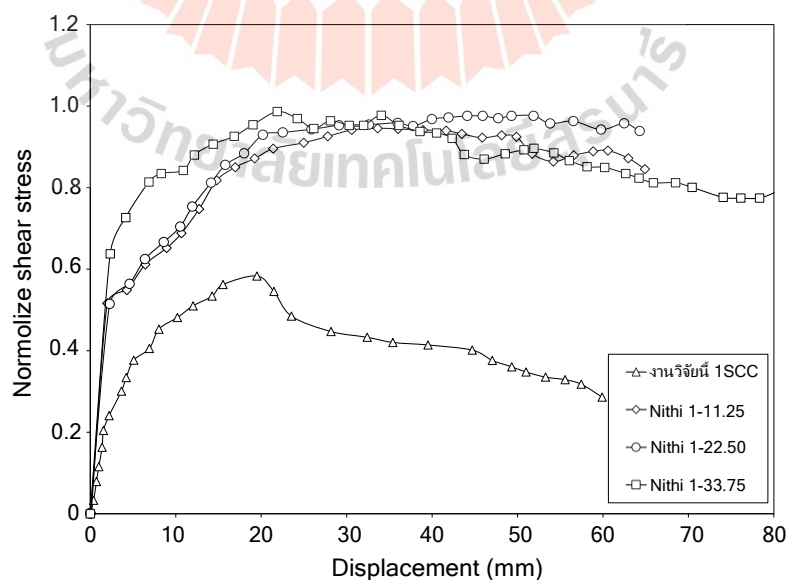
### 4.5.1 เปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์กับของนิธิและวิษณุ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการทดสอบ Unconfined compression test ของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดย(นิธิ,2554) ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์หล่อสำเร็จ มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เท่ากับ 877 กิโลปาสคาล ในส่วนของ(วิษณุ,2558) และในงานวิจัยนี้ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างในสนาม เมื่อมีอายุครบ 28 วัน นำมาทดสอบพบว่ามีความค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 730 กิโลปาสคาลและ 738 กิโลปาสคาล ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ดังตารางที่ 2 ในงานวิจัยนี้สูงกว่าของวิษณุ(2558) โดยแท่งดินซีเมนต์แบบหล่อสำเร็จของ (นิธิ,2554) มีค่าสูงที่สุดเนื่องจากการก่อสร้าง SCC จากก่อสร้างจากภายนอก แล้วเสียบลงในดินธรรมชาติจนมีอายุครบ 28 วัน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน

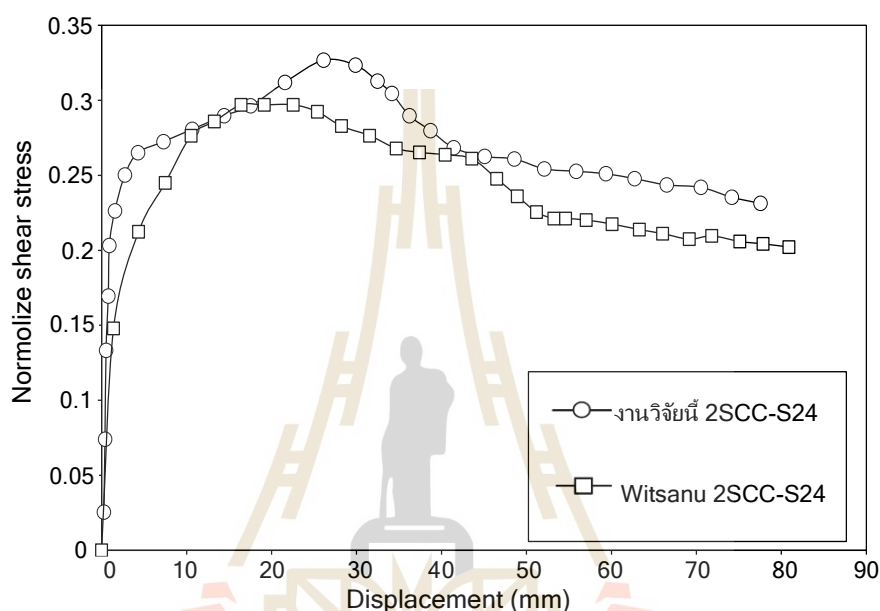
คุณสมบัติ	นิธิ (2554)	วิษณุ (2558)	งานวิจัยนี้
ดินที่ใช้ผสมเสาเข็มดินซีเมนต์	Soft clay	Soft clay	Soft to medium clay
W/C	1.0	1.0	1.0
อัตราส่วนผสม (kg/m <sup>3</sup> )	169	175	175
Unconfined compressive strength (kPa)	877	730	738

โดยทดสอบเฉือนตรงกับดินเหนียวอ่อนธรรมชาติในสนาม พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของ (นิธิ,2554) และของ(วิษณุ,2558) เท่ากับ 11 กิโลปาสคาลและ 14 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่ากำลังรับแรงเฉือน 25 กิโลปาสคาล เมื่อนำเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดต่อหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์และพื้นที่หน้าตัดต่อหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวที่หารด้วยพื้นที่กล่องเฉือนตรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นเดียวกับของ (นิธิ,2554) ทดสอบที่ระดับความลึกกระนาบเฉือนเท่ากับ 11.25 มิลลิเมตร 22.50 มิลลิเมตร และ 33.75 มิลลิเมตร พบว่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 7.98 กิโลปาสคาล 8.24 กิโลปาสคาล และ 8.33 กิโลปาสคาล ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 8.29 กิโลปาสคาล เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับของ(นิธิ,2554) ที่ระดับความลึกกระนาบเฉือน 11.25 มิลลิเมตรและ 22.50 มิลลิเมตรมีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่างานวิจัยนี้ 1.6 เท่า เนื่องจากงานวิจัยของ(นิธิ,2554)ใช้แท่งดินซีเมนต์หล่อสำเร็จซึ่งมีประสิทธิภาพในการก่อสร้างจากภายนอกสูงกว่าในงานวิจัยนี้ที่ทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม



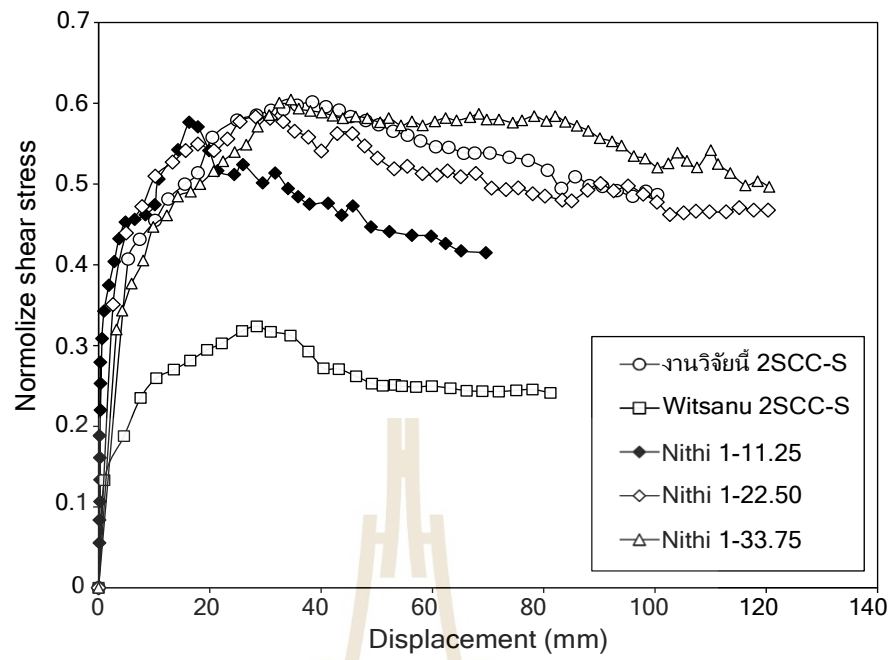
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นเดียวกับ

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างไม่ต่อเนื่องกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ของ(วิษณุ,2558) มีหน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 8.79 กิโลปาสคาลและในงานวิจัยนี้หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 13.29 กิโลปาสคาล เมื่อนำมาเปรียบเทียบพบว่าในงานวิจัยนี้กำลังรับแรงเฉือนมีค่าสูงกว่า(วิษณุ,2558) 1.5 เท่า ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนเกิดจากประสิทธิภาพในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าสูงขึ้นและเกิดความต่อเนื่องในการก่อสร้าง



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ของ(วิษณุ,2558)และของ(นิธิ,2554) โดย(นิธิ,2554) ทำการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ 3 ต้นที่มีระดับความลึกกระนาบเฉือนที่ 11.25 มิลลิเมตร 22.50 มิลลิเมตร และ 33.75 มิลลิเมตร หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 9.46 กิโลปาสคาล 9.17 กิโลปาสคาล และ 9.51 กิโลปาสคาล ตามลำดับและ(วิษณุ,2558) มีค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 9.59 กิโลปาสคาล ซึ่งในงานวิจัยนี้หน่วยแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 21.79 กิโลปาสคาล เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าของ(นิธิ,2554)และของ(วิษณุ,2558)เท่ากับ 2 เท่า ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะก่อสร้างเดียวกันกับของ(วิษณุ,2558)เนื่องจากประสิทธิภาพในการก่อสร้างดีกว่าจึงทำให้กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าสูงและของ(นิธิ,2554) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีสภาวะการก่อสร้างเสมือนจริงมากกว่าของนิธิ จึงอธิบายได้ว่าการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องในสนามเหมาะสมนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริงมากกว่า



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์ที่ต่อสร้างต่อเนื่อง

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษา พฤติกรรมการรับแรงของแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์แบบซีแคนท์และแบบแทนเจนท์ และศึกษากลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ก่อสร้างในสนาม ทดสอบโดยใช้วิธีเดือนตรงขนาดใหญ่ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียวอ่อนที่เสริมด้วย SCC จากการเพิ่มแรงด้วยเครื่องมือเชิงกลแบบมือหมุน กำลังรับแรงเดือนสูงกว่าดินเดิม 3 เท่าและกำลังรับแรงเดือนของดินที่เสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแทนเจนท์และแบบซีแคนท์ที่ก่อสร้างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เห็นได้ว่า 1SCC, 2SCC-T24, 2SCC-S และ 2SCC-S24 หน่วยแรงเดือนสูงสุดมีค่ามากกว่าดินเดิม 3 เท่า, 3 เท่า, 4 เท่า และ 8 เท่า ตามลำดับ โดยที่ 2SCC-T24 กับ 1SCC มีค่าใกล้เคียงกันมากและมีหน่วยแรงเดือนสูงสูดน้อยกว่า 2SCC-S24 เป็น 2 เท่า เนื่องจากกรณี 2SCC-T24 ก่อสร้างโดยเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงกันแบบผิวสัมผัสกันและก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง แรงที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส และใน 2SCC-S เกิดจากหน่วยแรงยึดเกาะในการเชื่อมประสานในแนวรอยต่อบริเวณข้อทับกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ จึงทำให้มีค่าหน่วยแรงเดือนสูงที่สุดโดยมากกว่าเป็น 3, 3, 2 เท่าของ 1SCC, 2SCC-T24 และ 2SCC-S24 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการก่อสร้างแบบ 2SCC-S เป็นรูปแบบการจัดเรียงและระยะเว้นช่วงเวลาก่อสร้างที่สามารถรับกำลังรับแรงเดือนได้ดีที่สุด

2. กลไกการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์จากการทดสอบเดือนตรงขนาดใหญ่ที่ก่อสร้างในสนามของ 1SCC เกิดการวิบัติแบบหักเนื่องจากโมเมนต์ตัดจากการเดือน ในส่วนของแบบแทนเจนท์ 2SCC-T24 ที่ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง เกิดแนวเดือนตามยาว (shear failure along column) ตามแนวระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์สองต้น ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์แยกอิสระออกจากกันเนื่องจากไม่มีส่วนข้อทับกันทำส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงเดือนเท่ากับกำลังรับแรงเดือนของดินที่ไม่ปรับปรุงและกำลังต้านทานต่อโมเมนต์ตัดต่ำ จึงทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) ที่ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์วิบัติแบบหักในแนวระนาบเดือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งสองต้น และแบบซีแคนท์ 2SCC-S24 ก่อสร้างไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีลักษณะการวิบัติคล้าย SCC-T24 และ 2SCC-S ก่อสร้างต่อเนื่องเกิดการวิบัติแบบ shear failure across column ตามแนวระนาบเดือน เนื่องจากกำลังรับแรงเดือนที่เกิดจากหน่วยแรงยึดเกาะของรอยต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีค่าสูงและเสาเข็มดินซีเมนต์มีกำลังต้านโมเมนต์ตัดที่สูง จึงทำให้ไม่เกิดการวิบัติแบบหักการวิเคราะห์ SCC wall ที่เพิ่มเสถียรภาพกันบ่อชุดด้วยผนังขวางโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลองดิน HS model มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการหลุดตัวที่ผิวดินของ SCC wall ในสนามมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลอง MC-VE model สามารถจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง



ของดินใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง HS model โดยใช้ค่า Young's modulus ที่เสนอไว้ตามข้อที่ 2

3. พฤติกรรมของระยะการก่อตัวของดินซีเมนต์ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ กำลังต้านทานการเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ที่เว้นช่วงเวลา 0 ชั่วโมง, 9 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ชี้ให้เห็นว่ากำลังต้านทานการเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์ลดลงตามระยะเวลาเว้นการก่อสร้างที่นานขึ้น เนื่องจากดินซีเมนต์เว้นช่วงการก่อสร้าง 9 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงเป็นช่วงเวลาที่นานเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์ จึงทำให้ดินซีเมนต์ที่สร้างไว้ช่วงแรกก่อตัวแล้ว ส่งผลให้กำลังต้านทานการเฉือนของรอยต่อดินซีเมนต์มีค่าลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่จัดเรียงแบบแทนเจนท์แบบซีแคนท์ ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการจัดเรียงแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางและ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง



## เอกสารอ้างอิง

- เกษม เพชรเกต. (2536). การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, การประชุมทางวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจธ. ครั้งที่ 1, ประจำปี 2536 ณ ห้องประชุมจรัสฉายะพงศ์, วันที่ 8-9 มิถุนายน 2536, หน้า 99-115.
- ณัฐกฤต วิสุทธิแพทย์. (2548). พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ลึกสำหรับงานโครงสร้างกันดิน.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 335 น.
- พรพจน์ ต้นเส็ง. (2555). การก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกด้วยระบบ top-down โดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน. การสัมมนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก 2555
- ธนากร สุขุมาศ. (2561). พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์และกำแพงกันดินเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเสริมด้วยกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นฤทธิ์ ประกอบบุญ. (2546). การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานชุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 142 น.
- นิตี ปรัชญาเศรษฐ. (2554). เสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของเชิงลาดดินเหนียวอ่อนมากที่เสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วสท.2520. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- วิชญ์ คงสมพงษ์. (2548). อิทธิพลของกำลังรับแรงเฉือนตามแนวยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์เรียงแบบซีแคนท์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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.

- 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.
- 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.
- Laesson 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.
- 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
- Yoshizawa, H., Okumura, R., Hosoya, Y., Sumi, M. and Yamada, T. (1997). JGS TC Report: Factor affecting the quality of treated soil during excavation of DMM. Grouting and Deep mixing, Balkema, Rotterdam, Netherlands.



ภาคผนวก ก  
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



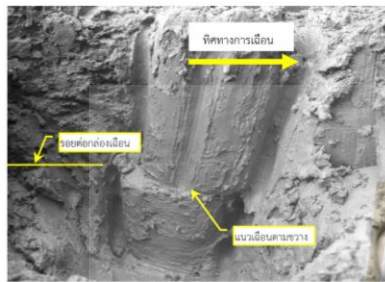


## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ศรุตาภรณ์ ทรงศรี และ พรพจน์ ต้นเส็ง. (2566). การศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงดัดในดินเหนียวอ่อน โดยใช้กล่องเนียนตรงขนาดใหญ่ในสนาม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 (The 28<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering), GTE35, โรงแรมภูเก็ต เกรซแลนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา, ภูเก็ต, วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566.



(plastic hinge) ตรงรอยต่อกล่องเดือยทั้งสองต้น ทั้งกรณีของ SCC ก่อสร้างต่อเนื่องและก่อสร้างเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง



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



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

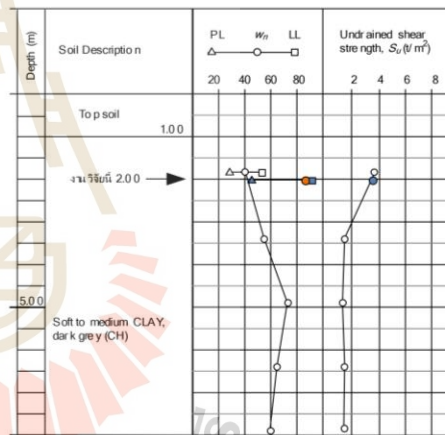
ในโครงการก่อสร้างจากการขุดดินลึกโอกาสที่จะเกิดการเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนมีสูงมาก ดังนั้นในการขุดดินลึกในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนจึงเลือกใช้ SCCW เป็นกำแพงกันดินเพื่อป้องกันการไหลของดินและป้องกันการทรุดตัวของโครงสร้าง โดยใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยซีเมนต์ ซึ่งในการก่อสร้าง จากรูปที่ 7 เป็นการก่อสร้าง SCC-W ที่ใช้ในการก่อสร้างต้องมีการหยุดพักเครื่องจักรหรือทิ้งระยะการก่อสร้างนานเกินกว่าระยะก่อดินของดินซีเมนต์เฟสดี เห็นได้ชัดจากรอยต่อที่เกิดระหว่าง SCC ของโบกวนดิน จากการแยกกันบริเวณส่วนขบกันระหว่าง SCC



รูปที่ 7 การแยกจากกันบริเวณส่วนขบกันระหว่าง SCC แบบ secant ทำให้ SCC แยกเป็นต้นเดี่ยว (SCC ก่อสร้างด้วยวิธี jet grouting ที่เว้นระยะเวลาก่อสร้างระหว่างต้นเกินกว่าเวลาของตัวซีเมนต์เฟสดี)

## 2. พื้นที่วิจัย สภาพชั้นดินและคุณสมบัติของชั้นดิน

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



รูปที่ 8 รูปตัดชั้นดินและคุณสมบัติของดินในพื้นที่วิจัย

## 3. วิธีการวิจัย

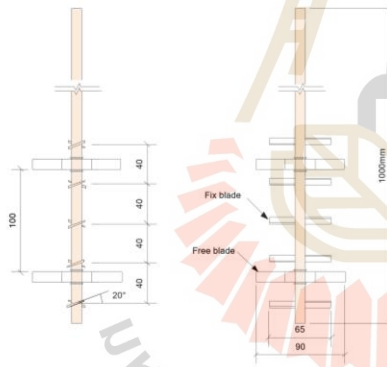
การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการผสมเชิงกลด้วยเครื่องผสมขนาดเล็ก โดยใช้วิธีของ [8] ในการส่งน้ำปูนซึ่งเครื่องผสมดินที่ใช้จำลองจากเครื่องผสมดินเชิงกล ดังรูปที่ 9 ประกอบด้วยโบกวนดิน 5 ชุดตามแนวตั้ง โบกวนดินกว้าง 65 มิลลิเมตรและบิดทามุม 20 องศาผสมติดใบหมุนอิสระ (free blade) เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมแนวตั้งของก้านผสม

จากงานวิจัยของ [7, 8,9] ได้ทำการทดสอบเฉพาะการผสมเชิงกลแบบแห้งโดยการฉีดปูนฉีดปูนผง ทดสอบกับชั้นดินเหนียวที่เตรียมที่สร้างจากดินเกล็ดจากการสร้างชั้นในท้องทดลองที่มีปริมาณน้ำในดินเป็น 48-50% ไม่สามารถเทียบเท่าดินธรรมชาติได้ เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวที่ให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์จึงด้วยวิธีการผสมดินด้วยเครื่องผสมขนาดเล็ก และได้พัฒนากล่องเดือยตรงเสาเข็มดินซีเมนต์-ปูนขาว (soil-cement-lime- column, SCLC) โดยกล่องเดือยตรงเป็นกล่องกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5m ซึ่งใช้เสาเข็ม SCLC ขนาด 50 มิลลิเมตรยาว 500 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องกวาดดินขนาดเล็กเพื่อกวาดดินเข้ากับผงปูนซีเมนต์และปูนขาวโดยอาศัยท่อทองแดงดันลงในดินเหนียวเกล็ด ในการเพิ่มแรงเฉือนต่อกล่องใช้วิธีควบคุมแรงกระทำต่อแบบจำลอง (load

control) เป็นลำดับขั้น ทำให้เกิดหน่วยแรงตั้งจาก 0.64 kPa จนถึง 4 kPa จากนั้นลดแรงตั้งลงจนทำให้หน่วยแรงเหลือ 0.32 kPa

การทดลองแบบจำลองกับดินเหนียวอ่อนในสนาม [4] ได้รายงานการพัฒนากล่องเฉือนตรงกับแบบจำลอง (large direct shear box) กล่องที่ใช้เป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพิ่มแรงเฉือนโดยการใช้แม่แรงให้แรงกระทำต่อแบบจำลอง SCC ที่ใช้เป็นแท่งทรงกระบอกที่ผสมจากภายนอกแล้วเสียบลงในดินเหนียวคงสภาพในสนาม จากนั้นเฉือนดินเหนียวที่เสียบแท่งเสียบดินซีเมนต์ไว้จนวัชิต ซึ่งทำให้เนื้อเสียบที่ได้รับความสม่ำเสมอซึ่งแตกต่างจากเนื้อเสียบที่สร้างจากดินธรรมชาติและทำให้การยึดเกาะระหว่างดินกับเสียบซีเมนต์มีสภาพแตกต่างจากสภาพก่อสร้างจริง

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



รูปที่ 9 เครื่องผสมดินเชิงกลแบบย่อส่วน 1:10 ในงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับแบบจำลอง SCC จากข้อดีของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น โดยการทดสอบด้วยวิธีการผสมเชิงกลแบบเปียกในระดับลึกโดยใช้ใบกวนหมุนด้วยส่วนไฟฟ้าและในทดสอบกำลังของแบบจำลอง SCC กับดินธรรมชาติในสนาม การศึกษาใช้แบบจำลองเสียบดินซีเมนต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ซึ่งใช้สัดส่วนย่อขนาดจริง 10 ต่อ 1 อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อดิน (cement-soil ratio) ไม่น้อยกว่า 8-12% โดยน้ำหนักดินที่ทำให้ปริมาณซีเมนต์ในดินไม่น้อยกว่า 5-15% โดยน้ำหนักดิน ที่ให้อัตราส่วนผสมเพียงพอต่อโครงสร้างกันดินและไม่มากไปจนเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ที่อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อปริมาณเสียบเท่ากับ 175 กิโลกรัมต่อปริมาณเสียบ ในแปลงทดสอบที่ ตำบลบางไทร อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ชั้นดินเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ลึก 2 เมตรจากผิวดิน การขุดเปิดหน้าดินโดยใช้รถดักดิน ผสมดินด้วยเครื่องผสมขนาดเล็กโดยใช้วิธีสูบน้ำปูน ดังรูปที่ 10 เพื่อหาความแตกต่างของกำลังรับแรงเฉือนและรูปแบบการวิบัติของเสียบดินซีเมนต์ โดยการกดท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วลงไปในดินที่ศูนย์กลางตำแหน่ง SCC เป็นระยะ 600 มิลลิเมตร จากนั้นกรอน้ำปูนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.0 แล้วดึงท่อขึ้นเพื่อปล่อยน้ำปูนให้อยู่ในดิน จากนั้นกรอนดินด้วยเครื่องผสมดินเชิงกลขนาดเล็ก

ด้วยส่วนไฟฟ้า โดยรอบการหมุนส่วนอยู่ที่ 45 รอบต่อนาที กดลงด้วยการหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยอัตรา 1 เมตรต่อนาที จนถึงระยะ 600 มิลลิเมตร จากนั้นดึงขึ้นด้วยการหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยอัตรา 1 เมตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสียบดินซีเมนต์มีขนาด 70 มิลลิเมตร



1. กดท่อ PVC ลงในดิน บรรจุน้ำปูนแล้วเทออกจากนั้นถอดท่อ PVC ทิ้งเพื่อให้น้ำปูนบรรจุในหลุม



2. ผสมดินโดยกดก้านและจุ่มในแนวตั้ง หมุนก้านจะตามเข็มนาฬิกาจากนั้น ถอดก้านจะซีโดยหมุนก้านเข็มนาฬิกา



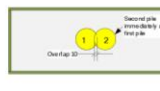



แบบจำลองเสียบดินซีเมนต์

รูปที่ 10 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเสียบดินซีเมนต์

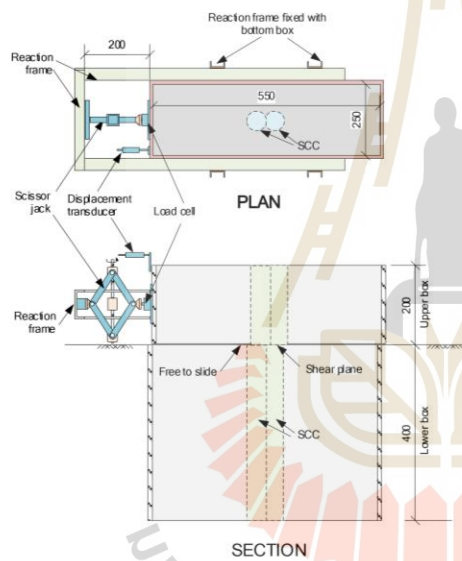
ในการศึกษาใช้รูปแบบการจัดเรียงเสียบดินซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 1 โดยแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบได้แก่ 1SCC (SCC 1 ต้น), 2SCC-T24 (SCC 2 ต้นเรียงแบบสลับเส้นในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง, 2SCC-S (SCC 2 ต้นเรียงแบบขบก่อสร้างต่อเนื่อง) และ 2SCC-S24 (SCC 2 ต้นเรียงแบบขบเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 รูปแบบการจัดเรียงเสียบดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบในสนาม

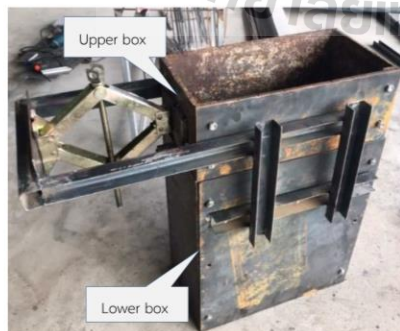
ชื่อเรียก	รูปแบบการจัดเรียง	วิธีการติดตั้ง SCC
1SCC		SCC 1 ต้น
2SCC-T24		SCC 2 ต้นเรียงแบบสลับเส้นในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง
2SCC-S		SCC 2 ต้นเรียงแบบขบก่อสร้างต่อเนื่อง
2SCC-S24		SCC 2 ต้นเรียงแบบขบเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง



หลังจากทำการสร้างแบบจำลองเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง 4 รูปแบบ บ่มจนตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน ทำการทดสอบเฉือนดินที่เสริมด้วย SCC ที่ได้จากการตัดแปลงเครื่องมือของ [5] ดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ซึ่งประกอบด้วยเหล็กหนา 8 มิลลิเมตร กว้าง 200 มิลลิเมตร ยาว 550 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนบนสูง 200 มิลลิเมตร และส่วนล่างสูง 400 มิลลิเมตร ทำการทดสอบโดยกดกล่องเฉือนตรงลงในดินให้แนว SCC อยู่กึ่งกลางกล่อง จากนั้นใช้แม่แรงแบบมือหมุนในออกแรงดันกล่องส่วนบนเพื่อเฉือนตัวอย่าง ทำการวัดแรงด้วย load cell และวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย displacement transducer เมื่อทำการทดสอบจนตัวอย่างวิบัติแล้วจากนั้นชุดดินด้านข้างเพื่อเปิดด้านหนึ่งของกล่องเฉือนออก ลอกดินออกจาก SCC ออกอย่างระมัดระวังเพื่อบันทึกลักษณะการวิบัติของ SCC



รูปที่ 11 กล่องทดสอบเฉือนตรงสำหรับใช้ทดสอบเฉือนดินเสริมด้วย SCC ในสนามในงานวิจัยนี้



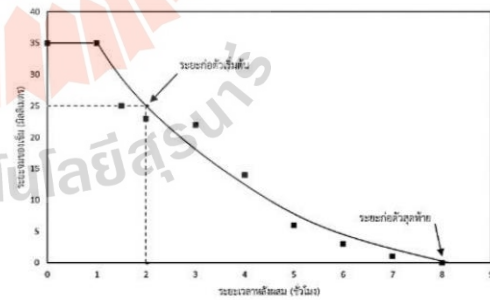
รูปที่ 12 ภาพถ่ายเครื่องมือทดสอบเฉือนตรง

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

#### 4. ผลการทดสอบ

##### 4.1 ผลเนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์

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



รูปที่ 13 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เพสต์ ของงานวิจัยนี้

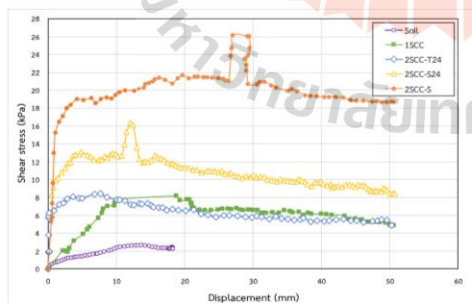
##### 4.2 หน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

การทดสอบหน่วยแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์จากการสร้างแบบจำลอง SCC ในแปลงทดสอบที่ทำการผสมเชิงกลแบบเปียกระหว่างดินเข้ากับผลปูนซีเมนต์ที่ทำการบ่มไว้จนมีอายุ 28 วัน โดยใช้กล่องเฉือนตรงขนาดใหญ่ทดสอบระดับที่ระนาบเฉือนเดียวกัน จากการทดสอบเฉือนตรงขนาดใหญ่ของดินเดิม และดินที่เสริม SCC ทั้ง 4 รูปแบบคือ 1SCC , 2SCC-T24, 2SCC-S24, 2SCC-S หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวของแนวราบ พบว่า ดินธรรมชาติ หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเป็น 2.68 kPa, กรณี 1SCC หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดเป็น 8.18 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 19 มิลลิเมตรจากนั้นลดลงเหลือ 6.48 kPa ที่ระยะการเคลื่อนตัว 24

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

หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวราบ จากการเพิ่มแรงต่อแบบจำลอง SCC โดยใช้แม่แรง เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดข้างของ SCC เห็นได้ว่า 1SCC กำลังรับแรงดัดข้างเป็น 10 เท่าของดินเดิม ซึ่งในกรณี 2SCC-T24 กำลังรับแรงดัดข้างสูงกว่า 1SCC เนื่องด้วยพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้น แต่มีกำลังรับแรงดัดข้างน้อยกว่า 2SCC-S24 เป็น 2 เท่าที่เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากกรณี 2SCC-T24 ก่อสร้างโดย SCC เรียงกันแบบผิวสัมผัสกัน แรงที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งใน 2SCC-S ก่อสร้างด้วย SCC สองชั้นเรียงแบบขบกัน เกิดจากหน่วยแรงยึดเกาะในการเชื่อมประสานในแนวรอยต่อของ SCC กำลังรับแรงดัดข้างสูงสุดโดยสูงเป็น 4, 3, 2 เท่าของ 1SCC, 2SCC-T24, 2SCC-S24

จากรูปที่ 14 กราฟแสดงพฤติกรรมของหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นใน SCCW จากการใช้แม่แรงให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยที่ 1SCC อัตราเฉือนที่ 14 มม/นาที, 2SCC-T24 อัตราเฉือนที่ 10 มม/นาที, 2SCC-S24 อัตราเฉือนที่ 8 มม/นาที และ 2SCC-S อัตราเฉือนที่ 7 มม/นาที เนื่องจากเวลาเฉลี่ยในการเฉือนเท่ากันแต่อัตราการเฉือนต่างกัน ทำให้จุดวิบัติมีระยะการเคลื่อนตัวต่างกัน ช่วงการเคลื่อนตัวต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร SCCW มีกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยเท่ากันทั้ง 2 รูปแบบ 1SCC และ 2SCC-T24 เนื่องจากแรงเฉือนที่กระทำต่อแบบจำลองยังไม่ก่อให้เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามแนวรอยของ SCCW แต่เมื่อเพิ่มแรงเฉือนการเคลื่อนตัวในแนวราบเกินกว่า 10 มิลลิเมตร กำลังต้านทานโมเมนต์ตัดลดลงจน SCC เกิดการวิบัติ และในส่วนของ 2SCC-S24 และ 2SCC-S หน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยของ SCCW มีค่าสูงขึ้น จนถึงจุดครากหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยของ SCCW จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากสามารถต้านทานโมเมนต์ตัดได้ต่อเนื่อง จนถึงค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดแล้ว SCCW จึงเกิดการวิบัติ

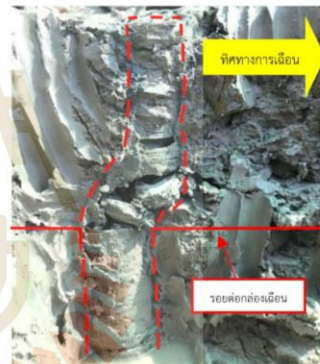


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับระยะเคลื่อนตัวแนวราบของการทดสอบเฉือนตรงกับตัวอย่างดินเหนียวที่เสริมด้วย SCC

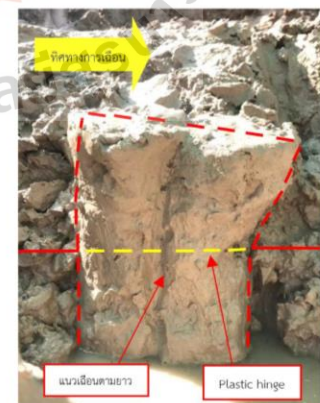
#### 4.3 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์

จากการเปิดด้านข้างของกล่องเฉือนขนาดใหญ่เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของดินและของ SCCW ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า 1SCC ดังรูปที่ 15 กำลังต้านทานแรงดัดข้างของดินสูงกว่าที่ SCC รับได้ ทำให้เกิดการวิบัติ

แบบหัก จากรูปที่ 16 2SCC-T24 จัดเรียงแบบ SCC 2 ชั้นเรียงแบบสัมผัส เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากเพิ่มแรงกระทำต่อกล่องเฉือนทำให้เกิดแรงดัดภายใน SCCW เมื่อแรงดัดข้างในดินเหนียวอ่อนที่มีแรงกระทำต่อ SCCW สูงเกินกว่าที่ SCCW สามารถรับได้ทำให้เกิดโมเมนต์ตัดที่เฉือนให้ SCC แยกออกจากกันเป็นแนวเฉือนตามยาว (shear failure along column) และทำให้สตีฟในสกรวมของ SCC ลดลงจนเกิดการวิบัติแบบหัก (plastic hinge) บริเวณระนาบเฉือน ในการก่อสร้าง SCC แบบ 2SCC-S24 ดังรูปที่ 17 เป็นการก่อสร้าง SCC 2 ชั้นเรียงแบบขบกันเว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เกิดเป็นการวิบัติแบบเฉือนตามแนวรอยจากลักษณะการไม่ประสานกันของรอยต่อของ SCC ที่เกิดจากโมเมนต์ตัดถึงแม้จะมีระยะขบกันของ SCC แต่ไม่เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ และในส่วนของ 2SCC-S ดังรูปที่ 18 ก่อสร้างแบบ SCC 2 ชั้นเรียงแบบขบกันก่อสร้างต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าในแนวรอยต่อ SCCW ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการวิบัติแบบเฉือนตามขวาง (shear failure across column) เนื่องจากกำลังต้านทานแรงดัดข้างใน SCC มีมากพอที่สามารถต้านทานโมเมนต์ตัดได้โดยไม่เกิดการวิบัติแบบหัก



รูปที่ 15 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มรับแรงดัดข้าง แบบ 1SCC เป็นแบบ shear failure along column

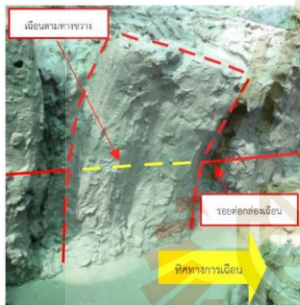


รูปที่ 16 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงดัดข้างแบบ 2SCC-T24 เป็นแบบ shear failure along column และเกิด plastic hinge



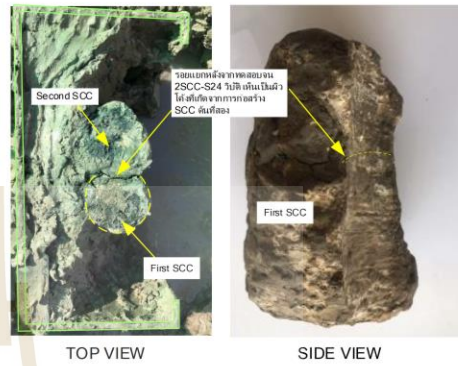


รูปที่ 17 รูปแบบการวิบัติแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงดันข้าง แบบ 2SCC-S24 เป็นแบบ shear failure along column และเกิด plastic hinge



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

รูปที่ 19 จากการศึกษาผลเนื่องจากระยะเวลาก่อตัวของ SCC พิจารณาช่วงเวลาที่ตั้งช่วงเวลาก่อสร้างนานเกินกว่าระยะก่อตัวสุดท้าย SCC ยึดเกาะประสานกันอย่างไม่สมบูรณ์และเกิดโมเมนต์คดที่ ทำให้ SCC แยกออกจากกันเป็นรอยต่อระหว่าง SCC เห็นได้ชัดจากรอยหมุนของใบกวนดิน บริเวณรอยต่อของ SCC เนื่องจาก SCC ที่ก่อสร้างก่อนเกิดการแข็งตัวแล้ว เวลาที่เหมาะสมต่อการก่อสร้าง SCC อยู่ในช่วงไม่เกินกว่าระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เฟส



รูปที่ 19 การวิบัติจากการก่อสร้างนานเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เฟส

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในการทดสอบเดือนตรงขนาดใหญ่ในสนาม การก่อสร้าง SCC 1 ต้นกำลังรับแรงด้านข้างสูงเป็น 10 เท่าของดินเดิม
2. ในทดสอบแบบจำลอง SCCW ที่ก่อสร้างด้วยเครื่องผสมเชิงกลขนาดเล็กแบบเปียกในดินเหนียวอ่อนธรรมชาติด้วยวิธีเดือนตรงพบว่ากำลังรับแรงด้านข้างของ 2SCC-S ที่ก่อสร้างต่อเนื่องสูงขึ้นไปเป็น 2 เท่าของ 2SCC-S24 และเป็น 4 เท่าของ 2SCC-T24 ที่เว้นช่วงเวลาก่อสร้าง 24 ชั่วโมง
3. รูปแบบการวิบัติจากการทดสอบแบบจำลองเห็นได้ว่ารูปแบบการวิบัติของ 2SCC-T24 และ 2SCC-S24 ที่เว้นช่วงเวลา 24 ชั่วโมงเกิดการวิบัติแบบแนวเอียงตามยาวจากการเกิดโมเมนต์คดที่เอียงให้ SCC แยกออกจากกัน ในส่วนของ 2SCC-S เกิดการวิบัติแบบเอียงทางขวาง ในแนวรอยต่อระหว่าง SCC ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน
4. ระยะเวลาก่อตัวของดินซีเมนต์เฟส โดยที่ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นคือ 2 ชั่วโมง และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายคือ 8 ชั่วโมง ซึ่งในการหยุดการก่อสร้างหรือที่ช่วงเวลาก่อสร้างไม่นานเกินกว่าระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เฟส

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณโสภณ โหมหุ้มแก้ว ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ใช้แปลงที่ดินทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณบุญญฤทธิ์ บุญเกิด และคุณณัฐณีย์ บัณฑิตบุญมี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

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

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

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวศรุตตาภรณ์ ทรงศรี เกิดวันเสาร์ที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนชุมชน อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในปีการศึกษา 2563 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยในภาคการศึกษาสุดท้ายได้ร่วมสหกิจกับ บริษัท ฤทธา จำกัด เป็นระยะเวลา 4 เดือนและในปีการศึกษา 2564 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่อง ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 28 (The 28<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering). GTE36

