



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบ
การเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่

Stress-Strain Behavior of Soil Cement Column by Large Direct Simple Shear Test

นามผู้วิจัย นายอริจิต สุขปัญญา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบการเฉือนตรง
อย่างง่ายขนาดใหญ่

Stress-Strain Behavior of Soil Cement Column by Large Direct Simple Shear Test

โดย

นายอรจิต สุขปัญญา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อริจิต สุขปัญญา 2557: การศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของเสาเข็มดิน
ซีเมนต์ด้วยการทดสอบ การเค้นตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ ปรินญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังาศ, Ph.D. 234 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวอ่อน
สร้างใหม่ที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ด้วยการทดสอบการเค้นตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ เพื่อ
ปรับปรุงสมมติฐานการบีบอัดของดินเสริมกำลังด้วยดินซีเมนต์ในสภาวะรับแรงด้านข้าง ให้มีความ
ความถูกต้องมากยิ่งขึ้น รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับปรุงในแต่ละแบบได้แก่ Square
Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column กับดินเหนียว
สร้างใหม่ซึ่งไม่เสริมกำลัง และเสนอวิธีเอ็มพริกอลเพื่อประมาณค่ากำลังเฉือนของดินที่ปรับปรุง
ด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

ผลการวิจัยพบว่า ดินเหนียวซึ่งปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ มีลักษณะการบีบอัดร่วมกัน
สองรูปแบบ คือ การคด (Bending Failure) และการเอียง (Tilting Failure) ของเสาเข็มดินซีเมนต์
โดยการปรับปรุงคุณภาพในแบบ Longitudinal Column จะพบการคดและเอียงของเสาเข็มมาก
ที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพ การปรับปรุงคุณภาพแบบ Longitudinal Wall Column จะ
ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ค่าความเครียดเฉือน (Shear Strain) ประมาณ 10-12 % แต่ที่ความเครียด
เฉือนต่ำกว่า การปรับปรุงคุณภาพแบบ Square Single Column ให้ผลดีที่สุด ซึ่งการปรับปรุง
คุณภาพแบบ Longitudinal Column จะมีแนวโน้มกำลังเฉือนทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ
(Drained and Undrained Strength Parameter) ที่เพิ่มสูงขึ้นจากดินเดิมที่ไม่ถูกการปรับปรุง รวมทั้ง
มีแรงดันน้ำส่วนเกินที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการปรับปรุงในแบบอื่นๆ และในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ
สมการเอ็มพริกอลเพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ
เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบต่อไป

Atijit Sukpunya 2014: Stress-Strain Behavior of Soil Cement Column by Large Direct Simple Shear Test. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Apiniti Jotisankasa, Ph.D. 234 pages.

This research is aimed at studying stress-strain behavior of soft clay stabilized with soil cement column (SCC) in a newly developed large direct simple shear apparatus. This study is also intended to improve the understanding of failure mechanism assumption of SCC-stabilised soil, subject to lateral loading condition. Another aim is to compare the efficiency of different SCC-stabilization patterns, namely, Square Single Column, Longitudinal Wall Column, and Transverse Wall Column, with reconstituted soft clay without SCC-stabilization. This study also proposed empirical relationships to estimate shear strength of soft clay with SCC-stabilization.

Results of this study indicate that soft clay with all SCC-stabilization patterns has two failure mechanisms of the SCC in common, namely, bending failure and tilting failure. With Longitudinal Wall Column (LWC) pattern, bending failure of SCC was more frequently observed and, if considering the efficiency of stabilization, LWC pattern shows tendency of higher shear strength compared with other patterns, for shear strain about 10-12%. On the other hand, for smaller values of shear strain, Square Single Column (SSC) pattern showed higher shear strength. By and large, LWC pattern tended to have greater shear strength than soil without SCC stabilization both in drained and undrained conditions. LWC pattern also exhibited lower excess pore water pressure during shearing than other patterns of stabilization. In addition, empirical relationships were proposed to estimate the shear strength of soft clay with different SCC-stabilization patterns which can be used as a guideline for design and analysis of SCC stabilized soil in the future.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ดูแลเอาใจใส่และให้ คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จ สมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ชวเลข วนิชเวทิน และ รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ ที่ได้ ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบคุณอาจารย์ภาควิชา วิศวกรรมปฐพีทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการ นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ Geotech และพี่ๆ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานรากทุกท่าน ที่ ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ขอขอบคุณ นายณรินทร์ หารัช ชัยนันท์ ที่ช่วยให้คำแนะนำเรื่องเครื่องมือตรวจวัดต่างๆ และช่วยลงมือลงแรงเพื่อให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพ่อแม่และครอบครัว ที่ได้อบรม สั่งสอน ให้กำลังใจ และ บรูพาจารย์ทุกท่านที่สอนให้ตระหนักถึงความสำคัญของการเรียนมาโดยตลอด ด้วยความดีหรือ ประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่สาธุชนเพื่อเป็นประโยชน์ต่อวงการทาง การศึกษาสืบไป

อธิจิต สุขปัญญา

มิถุนายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	103
อุปกรณ์	103
วิธีการ	105
ผลการวิจัย	158
สรุปและข้อเสนอแนะ	211
สรุป	211
ข้อเสนอแนะ	214
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	215
ภาคผนวก	225
ภาคผนวก ก การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของแท่งดินซีเมนต์ (Unconfined Compression Test)	226
ภาคผนวก ข การทดสอบแรงค้ำของแท่งดินซีเมนต์ (Flexural Strength Test)	229
ภาคผนวก ข ผลทดสอบการเนียนตรงแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ตัวอย่างแบบ Remold (Direct Shear Test)	232
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	234

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง S_u และคุณสมบัติทางกายภาพ	14
2 คุณสมบัติทางกายภาพของ Soft Clay บริเวณกรุงเทพฯ	15
3 คุณสมบัติทางกายภาพของ Medium to Stiff Clay บริเวณกรุงเทพฯ	15
4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay Layer)	21
5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay Layer)	22
6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็ง (Very Stiff Clay Layer)	22
7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Poisson's Ratio สำหรับดินเหนียวชนิดต่างๆ	23
8 ปริมาณของสารประกอบและคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)	37
9 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิในช่วงความลึก 1.00-3.00 เมตร	132
10 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิในช่วงความลึก 3.00-14.00 เมตร	133
11 การเปรียบเทียบปริมาณความชื้นในเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน	136
12 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน	137
13 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน	138
14 การเปรียบเทียบค่าความเครียดที่กำลังต้านทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน	138
15 การเปรียบเทียบค่าความเครียดที่กำลังต้านทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน	139
16 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงของดินซีเมนต์ในแต่ละวิธี (Strength Index)	139
17 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความชื้นของดินซีเมนต์ในแต่ละวิธี (Water Content Index)	140

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	คุณสมบัติทางการกายภาพของดินเหนียวอ่อนคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ	160
19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Shear Modulus กับรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์	195
20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Shear Stress at 20 % Shear Strain กับรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบต่างๆ	199
21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Shear Stress at 10 % Shear Strain กับรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบต่างๆ	200
22	การเปรียบเทียบค่ากำลังที่เพิ่มขึ้นจากดินเดิมของการปรับปรุงคุณภาพในแต่ละแบบ	202
23	ค่า Cohesion ของรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	205
24	ค่า Friction Angle ของรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	206
25	แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการกับค่ากำลังรับแรงเฉือนการทดสอบ ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (20 % Shear Strain)	207
26	แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นระหว่างค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดสอบ ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (20 % Shear Strain)	208
27	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของกำลังรับแรงเฉือนตามค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ (20 % Shear Strain) ที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	209

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างและภูมิศาสตร์กายภาพตามภาคต่างๆ	6
2 ภาพตัดชั้นดินตะกอนของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง	8
3 ลักษณะการตกตะกอนในช่วง Transgression Sediments เมื่อระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น	9
4 ลักษณะการตกตะกอนในช่วง Regression Sediments เมื่อระดับน้ำทะเลลดลง	10
5 องค์ประกอบของชั้นดิน Bangkok Clay	12
6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและความลึกของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ	13
7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและความลึกของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ	13
8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Field Vane Correction Factor และ Plasticity Index	19
9 การยุบตัวและขยายตัวของดินตามนิยามของ Young's Modulus	20
10 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างในงานคันทาง	26
11 รูปแบบและวิธีการก่อสร้าง Cement/Lime Column	28
12 กระบวนการเจาะผลิต Cement Column วิธี Pressure Grout Mixing Jet Grouting	29
13 กระบวนการผลิตสารผสมของ Cement Column วิธีผสมเปียก (Wet Mixing)	30
14 กระบวนการเจาะผลิต Cement Column วิธี ผสมเปียก (Wet Mixing)	31
15 กระบวนการใช้สารผสมวิธีผสมแห้ง (Dry Mixing)	32
16 กระบวนการก่อสร้าง Cement Column วิธีผสมแห้ง (Dry Mixing)	33
17 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	35
18 การเปลี่ยนแปลงกำลังของดินซีเมนต์ภายหลังการก่อสร้าง	48
19 ความสัมพันธ์ของ Initial Tangent Modulus กับ Cement Content	49
20 ความสัมพันธ์ของ Initial Tangent Modulus กับ Curing Time	49
21 ความสัมพันธ์ของ Secant Modulus กับ Cement Content	50
22 ความสัมพันธ์ของ Secant Modulus กับ Curing Time	50
23 ความสัมพันธ์ของ $(e-\log \sigma_v)$ ของดินซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 เดือน	52
24 ความสัมพันธ์ของ $(e-\log \sigma_v)$ ของดินซีเมนต์ ที่ปริมาณ Cement Content 10%	53
25 ความสัมพันธ์ของ Coefficient of Consolidation ของดินซีเมนต์ ที่ระยะการบ่ม 1 เดือน	53
26 ความสัมพันธ์ของ Coefficient of Consolidation ที่ปริมาณ Cement Content 10%	54
27 การเปลี่ยนแปลงของค่า Total Unit Weight กับ Cement Content	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
28 การเปลี่ยนแปลงของค่า Total Unit Weight กับ Curing Time	55
29 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อ Index Properties ของดินซีเมนต์	56
30 ทิทธิพลของปริมาณ Cement Content ที่มีผลต่อ Index Properties ของดินซีเมนต์	57
31 การเปลี่ยนแปลงค่า Specific Gravity ของดินซีเมนต์ ที่ปริมาณ Cement Content ต่างๆ	58
32 การเปลี่ยนแปลงค่า Gravity ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ	58
33 การเปลี่ยนแปลงค่า Physical Properties ของดินซีเมนต์ ภายหลังจากก่อสร้างในสนาม	59
34 การเปลี่ยนแปลงค่า Water Content ที่ปริมาณ Cement Content ต่างๆ	60
35 การเปลี่ยนแปลงค่า Water Content ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ	60
36 สมมติฐานของลักษณะการพิบัติของ Cement Stabilized Soil	64
37 สมมติฐานของสัมพันธ Stress-Strain ของ Pile Stabilized Soil	65
38 การพิบัติแบบ Block Failure ของ Cement Pile Foundation	66
39 การพิบัติแบบ Local Shear Failure ของ Cement Pile Foundation	67
40 การคำนวณการทรุดตัวเมื่อ Creep Strength ของ Cement Pile ยังไม่เกินกำหนด	68
41 การคำนวณการทรุดตัวเมื่อ Creep Strength ของ Cement Pile ยังเกินกำหนด	71
42 การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์	75
43 การทดสอบ Centrifuge Tests ของดินเข็มซีเมนต์	77
44 รูปแบบการพิบัติในลักษณะต่างๆของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยว	79
45 รูปแบบการพิบัติในลักษณะ Soil Failure (a, b, และ c) และ Pile Failure (d, e, และ f) ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงเสาเข็ม	81
46 การพิบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องการแยกตัวออก (Separation)	82
47 การพิบัติของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องการแยกตัวออก (Separation)	82
48 การพิบัติแบบเฉือน (Shear Failure) ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์	83
49 การพิบัติแบบล้มคว่ำ (Overturning Failure) ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์	84
50 แนวการเคลื่อนพิบัติแบบวงกลม (Circular Slip Surface)	85
51 สมมติฐานของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยโดยวิธีถ่วงน้ำหนัก	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเดิม (Stress-Strain Curves)	88
53 สมมติฐานของลักษณะการบีบอัดของการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนในระดับลึกที่ใช้ในการออกแบบในปัจจุบัน	89
54 การบีบอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ในรูปแบบการคด (Bending Failure Mode)	91
55 ลีการบีบอัดของคันดินถมในแบบการยุบตัว (Collapse Failure Pattern) ของการปรับปรุงคุณภาพดินในระดับลึก (DM)	91
56 เครื่องมือและลักษณะการทดสอบ Shear Box Test	92
57 แรงต้านทานที่ได้จากการทดสอบ Shear Box Test ในรูปแบบต่างๆ	93
58 แปลนและรูปตัดขวางของคันดินถมทดสอบที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์	94
59 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและไม่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ 71 วัน	95
60 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ 71 วัน	96
61 เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DDS) ที่คิดค้น โดย Kjellman	99
62 เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DDS) ที่คิดค้น โดย Roscoe	100
63 แผนผังขั้นตอนการวิจัย	104
64 รูปร่างและอุปกรณ์โดยทั่วไปของเครื่องมือการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (Conventional Direct Simple Shear Machine)	106
65 ลักษณะการเฉือนตรงอย่างง่ายของตัวอย่างทดสอบ (Simple Shear Mode)	106
66 ลักษณะของการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายในขณะขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ และขั้นตอนการเฉือนตัวอย่าง	108
67 พฤติกรรมของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของดินชนิด OC Clay และ NC Clay เมื่อทดสอบด้วยวิธีการเฉือนตรงอย่างง่าย	108
68 พฤติกรรมของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดเฉือนของดินชนิด OC Clay และ NC Clay เมื่อทดสอบด้วยวิธีการเฉือนตรงอย่างง่าย	109
69 การกระจายความเค้นของตัวอย่างและความสัมพันธ์ของแรงกระทำภายนอก	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
70	แบบร่างของเครื่องมือการทดสอบการเหือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่	115
71	เครื่องมือการทดสอบการเหือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่เมื่อประดิษฐ์เสร็จสิ้นแล้ว	115
72	อุปกรณ์สำหรับการควบคุมและมอเตอร์ข้อมูลระหว่างการทดสอบ	117
73	อุปกรณ์สำหรับการควบคุมอัตราการเหือนตัวอย่างทดสอบ	117
74	อุปกรณ์สำหรับการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ	118
75	อุปกรณ์สำหรับการควบคุมการให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างทดสอบ	118
76	กระบอกลม (Pressure Cylinder) สำหรับการให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างทดสอบ	119
77	ลักษณะของอุปกรณ์หุ้มตัวอย่างที่ติดตั้งพร้อมกับแผ่นยางและแผ่นใยสังเคราะห์	120
78	ลักษณะการติดตั้งส่วนของ Top Cap และอุปกรณ์รางลูกปืนสำหรับการทดสอบ	121
79	อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดค่าแรงและการเคลื่อนที่ทั้งทางแนวราบและแนวตั้ง	122
80	อุปกรณ์สำหรับการเก็บข้อมูลทดสอบ (Data Logger) และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ	122
81	การสอบเทียบค่าแรงด้านของเครื่องมือที่เกิดขึ้นระหว่างการเหือน	124
82	การสอบเทียบการยุบตัวของเครื่องมือที่เกิดขึ้นระหว่างการให้น้ำหนักบรรทุก	125
83	ลักษณะสภาพชั้นดินในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ	127
84	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติกับความลึก	128
85	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิคคัลกับความลึก	128
86	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิคคัลพลาสติกกับความลึก	129
87	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีสภาพพลาสติกกับความลึก	129
88	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักรวมกับความลึก	130
89	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำ, Su_c กับความลึก	131
90	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำ, Su_{FV} กับความลึก	131
91	การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์โครงการคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ	134
92	รูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยวชนิดสี่เหลี่ยม (Square Single Pattern)	134
93	รูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยวชนิดสามเหลี่ยม (Triangular Single Pattern)	135

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
94 รูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงชนิดขนานตามแนวการเคลื่อนที่ของดิน (Longitudinal Wall Column)	135
95 รูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงชนิดไม่ขนานตามแนวการเคลื่อนที่ของดิน (Transvers Wall Column)	135
96 การเตรียมแบบหล่อแท่งดินซีเมนต์เพื่อใช้ในการทดสอบ	143
97 การผสมดินและปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องผสม	143
98 การติดตั้ง Strain Gauge ลงบนผิวของตัวอย่างดินซีเมนต์	144
99 การนำตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์มาบ่มในน้ำ	144
100 การหาค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของตัวอย่างดิน	145
101 การชั่งน้ำหนักดินเพื่อเตรียมการทำตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่	146
102 การเพิ่มน้ำเข้าไปเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นที่ต้องการ	146
103 ตัวอย่างดินเหนียวแบบสร้างใหม่เมื่อผสมเสร็จสิ้นแล้ว	147
104 การตั้งระยะการเคลื่อนที่ของกล่องเลื่อนให้อยู่ในตำแหน่งที่ศูนย์	148
105 การประกอบชิ้นส่วนของ Rigid Stack Ring ในชั้นแรก	148
106 การประกอบชิ้นส่วนของ Rigid Stack Ring ในส่วนหมายเลข 1-10	149
107 ลักษณะของ Rigid Stack Ring ที่ติดตั้งเสร็จสิ้นแล้ว	149
108 การติดตั้งแผ่นยางหุ้มตัวอย่าง (Rubber Membrane) และแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile)	150
109 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ลงไปนชั้น Rigid Stack Ring	150
110 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดันน้ำในตัวอย่างทดสอบ	152
111 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในตัวอย่างทดสอบ	152
112 การทดสอบตัวอย่างในระหว่างขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ	154
113 ลักษณะตัวอย่างทดสอบเมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการเลื่อน	154
114 ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ภายหลังการอัดตัวคายน้ำ	155
115 การติดตั้งแท่งดินซีเมนต์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อทำการทดสอบ	155
116 การวางแผ่นใยสังเคราะห์เพื่อวางแนวการเจาะ	156
117 การเจาะตัวอย่างดินเหนียวและการติดตั้งแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ลงในตัวอย่างดิน	156

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
118 การปรับระดับของตัวอย่างด้วยทรายละเอียด	157
119 การให้น้ำหนักบรรทุก 48 ชั่วโมง ก่อนทำการเลื่อนตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์	157
120 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านของ Shear Box กับการเคลื่อนตัว	158
121 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของเครื่องมือกับน้ำหนักบรรทุก	159
122 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index และ Liquid Limit ของดินเหนียวตัวอย่าง	161
123 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compression Stress และ Axial Displacement ของการ ทดสอบ Unconfined Compression Test ของตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุการ บ่ม 7 วัน	162
124 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bending Stress และ Deformation ของการทดสอบ Flexural Strength Test ของตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน	163
125 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ของดินเหนียวสร้างใหม่	164
126 ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Stain ของตัวอย่าง ดินเหนียวสร้างใหม่	165
127 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ที่ Normal Stress = 5.9 kPa ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่	166
128 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ที่ Normal Stress = 11.8 kPa ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่	166
129 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ที่ Normal Stress = 23.6 kPa ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่	167
130 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Stain ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่	168
131 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่	169
132 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ของตัวอย่างดิน เหนียวสร้างใหม่ ที่ใช้ทดสอบการปรับปรุงคุณภาพแบบ SSC ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	170

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
133 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ของดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC	171
134 ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Stain ของตัวอย่างดิน เหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC	172
135 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Stain ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC	173
136 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC	174
137 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC ที่น้ำหนักรรทุก 5.9 kPa	175
138 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC ที่น้ำหนักรรทุก 11.8 kPa	175
139 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC ที่น้ำหนักรรทุก 23.6 kPa	176
140 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ที่ใช้ทดสอบการปรับปรุงคุณภาพแบบ LWC ที่น้ำหนักรรทุกต่างๆ	177
141 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC	178
142 ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Stain ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC	179
143 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Stain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้าง ใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC	180
144 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC	181

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
145	ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 kPa	182
146	ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC ที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 kPa	182
147	ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC ที่น้ำหนักบรรทุก 23.6 kPa	183
148	ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ ที่ใช้ทดสอบการปรับปรุงคุณภาพแบบ TWC ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	184
149	ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC	185
150	ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Stain ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC	186
151	ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Stain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้าง ใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC	187
152	ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC	188
153	ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 kPa	189
154	ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC ที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 kPa	189
155	ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC ที่น้ำหนักบรรทุก 23.6 kPa	190
156	ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 kPa ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	191
157	ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 kPa ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	192

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
158 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 23.6 kPa ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	193
159 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus กับ Shear Stain ของดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	194
160 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Stain ของตัวอย่าง ดินเหนียวสร้างใหม่	196
161 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Stain ของตัวอย่าง ดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC	196
162 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Stain ของตัวอย่าง ดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC	197
163 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Stain ของตัวอย่าง ดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC	197
164 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stain ที่น้ำหนักบรรทุกทุกต่างๆ ของดินเหนียวสร้างใหม่และดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ	198
165 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Normal Stress ที่ความเครียดเฉือน 20 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่และดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ	200
166 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Normal Stress ที่ความเครียดเฉือน 10 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่และดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ	201
167 การเปรียบเทียบค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	203
168 ลักษณะแรงน้ำดันน้ำส่วนเกินที่เกิดของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ	204
169 ความสัมพันธ์ระหว่าง Constant Factor กับ Undrained Shear Strength, C_u ของดิน สำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ	210

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 การติดตั้งแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเตรียมการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด	227
ก2 ลักษณะการพิบัติของแท่งดินซีเมนต์เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบแรงอัด	228
ข1 การติดตั้งแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเตรียมการทดสอบแรงดัด	230
ข2 ลักษณะการพิบัติของแท่งดินซีเมนต์เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบแรงดัด	231
ค1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Displacement ของดินเหนียว ตัวอย่าง	233
ค2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Shear Stress กับ Normal Stress ของดินเหนียว ตัวอย่าง	233

การศึกษาพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบ การเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่

Stress-Strain Behavior of Soil Cement Column by Large Direct Simple Shear Test

คำนำ

การก่อสร้างโครงสร้างหรือถนนบริเวณพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มักจะประสบปัญหาเรื่องการทรุดตัวของอาคารหรือดินคันทางในอัตราที่สูงและมีการพิบัติอยู่เป็นประจำ เนื่องจากดินฐานรากของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีคุณสมบัติเป็นดินเหนียวที่มีกำลังรับน้ำหนักค่อนข้างต่ำและทรุดตัวได้สูง ส่งผลให้เมื่อทำการก่อสร้างโครงสร้างต่างๆ บนพื้นที่ชั้นดินอ่อนเหล่านี้มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการพิบัติ

การปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่ช่วยให้สามารถก่อสร้างอาคารหรือถนนในพื้นที่เหล่านี้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินก็มีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี ซึ่งแบ่งออกเป็นวิธีหลักอยู่ 2 ประเภทคือ การปรับปรุงทางเคมี (Chemical Improvement) และการปรับปรุงคุณภาพทางกล (Mechanical Improvement) การปรับปรุงทางเคมี ก็ได้แก่ การผสมด้วยปูนขาว, การผสมด้วยขี้เถ้า (Fly Ash), หรือการผสมด้วยซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งหลักของการปรับปรุงทางเคมีคือ เป็นการปรับปรุงชั้นดินทั้งพื้นที่ เพื่อให้ดินที่มีคุณสมบัติที่ไม่ดี สามารถรับน้ำหนักบรรทุกและสามารถลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้ แต่ในทางกลับกันการที่จะปรับปรุงให้ได้ทั้งพื้นที่นั้น เป็นเรื่องที่ยากและต้องใช้เวลาซึ่งทำให้รวมถึงเงินที่ต้องเสียไป ส่วนการปรับปรุงคุณภาพทางกลนั้น ก็ได้แก่ การบดอัดดิน, การถ่ายน้ำหนักด้วยฐานรากเสาเข็ม, หรือการทำ Pre-Loading เป็นต้น ซึ่งบางวิธีมีราคาที่ถูกแต่ต้องแลกกับเวลาก่อสร้างที่นาน แต่บางวิธีใช้เวลาก่อสร้างที่ไม่นานแต่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นจึงเป็นความลำบากของวิศวกรผู้ออกแบบและวางแผนงานที่จะต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสมและคุ้มค่าต่อการปรับปรุงมากที่สุด

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นวิธีการหนึ่ง ที่รวมเอาทั้งการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมีและทางกลเข้ามารวมไว้ด้วยกัน กล่าวคือ จะมีการเพิ่มซีเมนต์เข้าไปผสมในดินเหนียวอ่อนเพื่อให้ดินเหนียวอ่อนมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้นรวมถึงช่วยให้การทรุดตัวมีค่าลดลง

และในเวลาเดียวกันการผสมดินซีเมนต์ก็จะทำเป็นลักษณะของแท่งเสาเข็มตามความลึกของชั้นดิน เพื่อช่วยในการถ่ายแรงหรือน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่า หรือเพื่อเป็นตัวค้ำยันการพังทลายและลดการเคลื่อนตัวของดินเมื่อมีการขุดหรือถมดิน รวมถึงการเสริมเสถียรภาพของลาดดินให้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

เทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เริ่มมีการนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 เป็นต้นมา ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยเริ่มนิยมนำการปรับปรุงด้วยวิธีนี้มาใช้มากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในถนนสายบางนา-บางพระก หรือ การปรับปรุงคุณภาพดินและลาดคันคลองด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์โครงการระบายน้ำบริเวณ สนามบินสุวรรณภูมิ เป็นต้น ซึ่งก็สามารถปรับปรุงคุณภาพดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถึงอย่างไรก็ตามในบางโครงการหรือบางพื้นที่ จะมีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีนี้ แต่ก็มักจะเกิดการเคลื่อนตัวหรือการพิบัติของโครงสร้างต่างๆ อยู่บ่อยครั้ง ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวหรือการพิบัตินี้ อาจเกิดจากหลายสาเหตุเช่น ความแปรปรวนของชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้าง, คุณภาพและการควบคุมงานระหว่างการก่อสร้าง, หรือใช้วิธีการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น

ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ในประเทศไทยที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพลาดดิน มักนิยมใช้การออกแบบและวิเคราะห์แบบวิธีจำกัด (Limit Equilibrium Analysis) ข้อดีคือเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งมักจะคำนึงถึงกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุเป็นหลัก กล่าวคือ ไม่คำนึงถึงความเครียดที่เกิดขึ้น โดยใช้สมการในลักษณะกำลังเฉลี่ย (Weight Ratio) ของสองวัสดุ และใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินโดยทั่วไปในการคำนวณ แต่ในทางกลับกัน ก็จะไม่สามารถทราบถึงการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นได้เลย ซึ่งถือเป็นข้อเสียของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ แต่ในปัจจุบันได้มีวิธีการอื่นๆ เพื่อแก้ไขและลดข้อจำกัดของวิธีการดังกล่าว นั่นก็คือวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ซึ่งวิธีการนี้จะวิเคราะห์ครอบคลุมถึงเสถียรภาพของลาดดินและลักษณะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ออกแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิศวกรทั่วไป ยังคงเป็นเรื่องที่ยากที่จะทำความเข้าใจและใช้งาน ดังนั้นโดยส่วนใหญ่จึงหันกลับไปหาการวิเคราะห์ด้วยวิธีดั้งเดิมคือ วิธี Limit Equilibrium Analysis แต่จะทำการเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) ให้สูงมากขึ้นกว่าปกติ ซึ่งทำให้ต้องเสียค่าก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุและพฤติกรรมความเค้นความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ด้วยการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Test) ซึ่งมีความจำเป็นต้องทำการคิดค้นและประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบขึ้นมาใหม่ หลังจากประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบเสร็จแล้ว ก็จะกำหนดรูปแบบการทดสอบ โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการวางเสาเข็มที่นิยมก่อสร้างในประเทศไทย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบเสาเข็มเดี่ยว (Single Pile) และ กำแพงเสาเข็ม (Wall Pile) โดยทำการติดตั้ง Strain Gage และ Pressure Sensor เพื่อตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ และวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการคิดค้นและประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Machine) และนำมาใช้ในการทดสอบ รวมถึงทำการสอบเทียบเครื่องมือและทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสุวรรณภูมิที่เตรียมตัวอย่างแบบสร้างใหม่ (Reconstituted) เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้กับงานวิจัยอื่นๆ
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดที่เกิดขึ้นของการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ในแต่ละรูปแบบ
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติและเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ระหว่างการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเสาเข็มเดี่ยว (Single Column), แบบกำแพงตามยาว (Longitudinal Wall Column), และแบบกำแพงตามขวาง (Transverse Wall Column) ด้วยการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่
4. เพื่อศึกษาและพิจารณาหาสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แทนที่สมการในรูปแบบเดิม ของทั้งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเสาเข็มเดี่ยว (Square Single Column), แบบกำแพงตามยาว (Longitudinal Wall Column), และแบบกำแพงตามขวาง (Transverse Wall Column) ด้วยการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่

ขอบเขตการวิจัย

1. ตัวอย่างดินที่นำมาทำการทดสอบและศึกษาอยู่ในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิตั้งอยู่ในเขตตำบลบางปลา อำเภอบางพลี และตำบลบางปู อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ โดยเก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบถูกรบกวนที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตร
2. การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวจะใช้การเตรียมแบบสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) ตามวิธีของ Burland (1990) และทำการทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D6528

3. เครื่องมือที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องมือที่คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่ โดยทำการสอบเทียบเครื่องมือให้ได้ความละเอียดที่เหมาะสมในทางปฏิบัติและตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีขนาดใหญ่กว่าปกติ เพื่อให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ เข้าไปได้

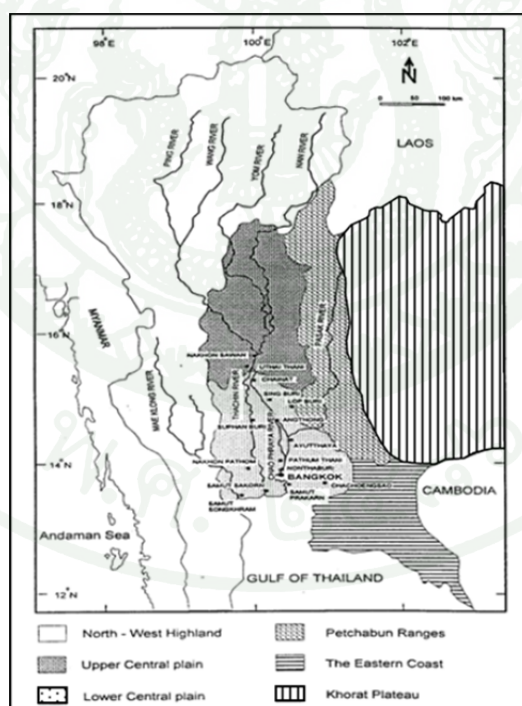
4. ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของทั้งสภาพดินที่ยังไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพ, การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แบบเสาเข็มเดี่ยว (Square Single Column), แบบกำแพงตามยาว (Longitudinal Wall Column), และแบบกำแพงตามขวาง (Transverse Wall Column)

5. เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ใช้เป็นเสาเข็มที่ทำขึ้นมาในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้สามารถควบคุมคุณสมบัติต่างๆ ได้โดยง่าย โดยใช้เครื่องมือ ที่อัตราส่วนของการผสมเพียงค่าเดียว (220 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) และทำการบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลาประมาณ 7 วัน

การตรวจเอกสาร

สภาพทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การศึกษาสภาพโดยทั่วไปของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ควรพิจารณาถึงสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ราบภาคกลางซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ พื้นที่ส่วนแรก ได้แก่ พื้นที่ราบภาคกลางตอนบนมีลักษณะเป็นพื้นที่ราบมีภูเขากระจายเป็นหย่อมๆ อยู่ในอิทธิพลของแม่น้ำที่สำคัญ 4 สาย ได้แก่ แม่น้ำปิง แม่น้ำวัง แม่น้ำยม และแม่น้ำน่าน นอกจากนี้ยังครอบคลุมพื้นที่ถึงบางส่วนของแม่น้ำเจ้าพระยาและสิ้นสุดที่ปากน้ำโพจังหวัดนครสวรรค์ พื้นที่ส่วนที่สอง ได้แก่ พื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างมีอาณาเขตเริ่มตั้งแต่จังหวัดชัยนาทเรื่อยลงมาตามแม่น้ำเจ้าพระยาจนถึงปากอ่าวไทย เนื่องจากพื้นที่ส่วนนี้ได้รับอิทธิพลจากการพัดพาตะกอนแม่น้ำเจ้าพระยา จึงทำให้เกิดเป็นสามเหลี่ยมปากแม่น้ำผืนใหญ่ที่สุดของประเทศและนิยมเรียกพื้นที่ส่วนนี้ว่า “ที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่าง” แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างและภูมิศาสตร์กายภาพตามภาคต่างๆ

ที่มา: Sinsakul (1997)

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) เป็นดินตะกอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำที่เกิดในสมัย Recent หรือ Holocene ที่ได้รับอิทธิพลของแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำท่าจีนเป็นส่วนใหญ่ มีแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำบางปะกงเสริมอยู่ที่ตะวันตกและทิศตะวันออกตามลำดับ ดินตะกอนผิวนี้อุดมด้วยพื้นที่และบางส่วนของ 14 จังหวัด (ราชบุรี, สมุทรสาคร, สมุทรสงคราม, ชลบุรี, กรุงเทพมหานคร, สมุทรปราการ นครปฐม, นนทบุรี, ปทุมธานี, ฉะเชิงเทรา, สุพรรณบุรี, นครนายก, พระนครศรีอยุธยา, และปราจีนบุรี) รวมพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 14,000 ตารางกิโลเมตร วัดความกว้างจากบริเวณปากอ่าวไทย (จากราชบุรีไปชลบุรี) ได้ระยะทางประมาณ 140 กิโลเมตร และวัดขึ้นไปทางเหนือสิ้นสุดที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยาได้ระยะทางประมาณ 100 กิโลเมตร (วิชาญ และคณะ, 2519)

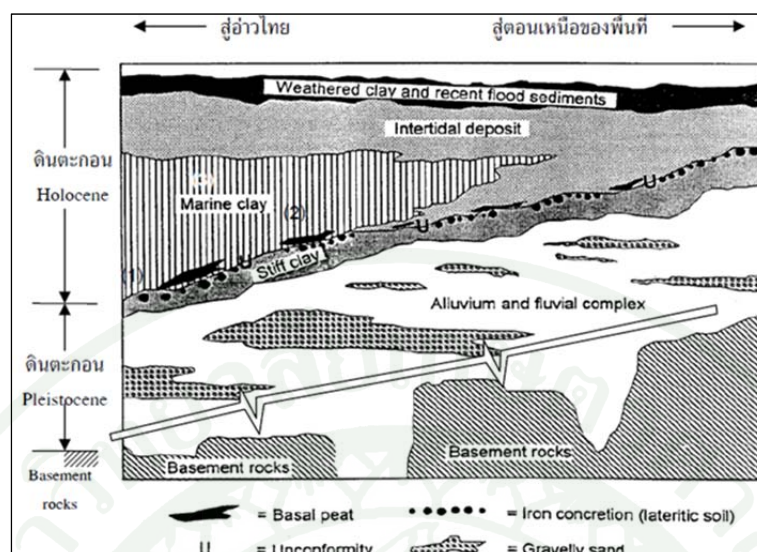
1. การเกิดชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

จากข้อมูลสภาพชั้นดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาคอนล่างพบว่าการกำเนิดชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จะอยู่ในการสะสมตัวของตะกอนในช่วงยุค Late Quaternary Period ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 การสะสมของตะกอนในช่วงยุค Late Quaternary Period

ในช่วงนี้ลักษณะการสะสมของตะกอนได้เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของโลกอย่างรุนแรง ทำให้เกิดการจับตัวกันของตะกอนและเกิดการละลายของน้ำแข็งทั่วโลก ส่งผลให้ระดับน้ำทะเลทั่วโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงก่อให้เกิดการสะสมตัวของตะกอนชายฝั่ง รวมทั้งบริเวณที่ราบลุ่มเจ้าพระยาคอนล่าง ทำให้ตอนปลายของช่วง Late Quaternary Period มีชั้นดินที่สำคัญเกิดขึ้น คือ ชั้นดินในช่วงยุค Late Pleistocene Epoch และชั้นดินในช่วงยุค Holocene Epoch (วิชาญ, 2545)

1.1.1 สำหรับชั้นดินในช่วง Late Pleistocene Epoch มีการตกตะกอนของดินทรายเป็นส่วนใหญ่โดยมีดินเหนียวและกรวดแทรกอยู่ ตอนบนสุดของดินตะกอนช่วงนี้เป็นชั้นดิน Stiff Clay ในตอนบนพบแร่เหล็กและแมงกานีสเป็นจุดสีเหลืองและสีแดงเคลือบปิดทับอยู่บริเวณผิวบน ซึ่งหลักฐานทางธรณีวิทยาระบุว่าชั้นดินนี้เป็นดินตะกอนประเภท Fluvium ตกอยู่บนที่ราบน้ำท่วมถึงเป็นส่วนใหญ่และมี Alluvial Fan รวมถึง Terrace เกิดอยู่บนบริเวณขอบของพื้นที่นี้ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ภาพตัดชั้นดินตะกอนของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง

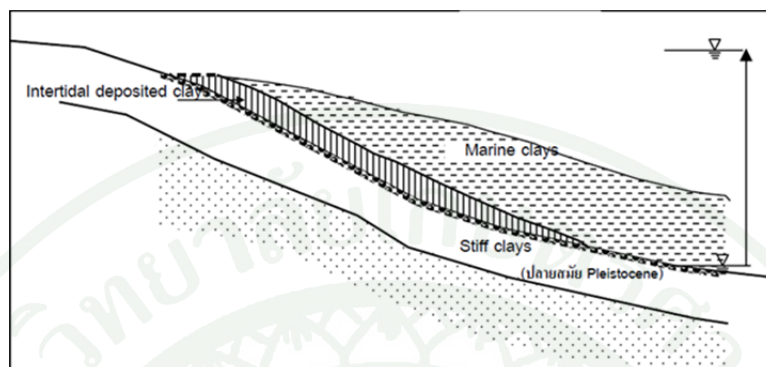
ที่มา: Sinsakul (1997)

1.1.2 สำหรับชั้นดินในช่วง Holocene Epoch ผลจากการละลายตัวของภูเขาน้ำแข็ง ในช่วง 20,000 ถึง 50,000 ปีที่ผ่านมา ทำให้ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยสูงขึ้นและมีการยกตัวของเปลือกโลกทำให้พื้นดินมีความสูงต่ำเหมาะสมที่จะเป็นแหล่งสะสมตะกอนดิน ประกอบกับช่วงตั้งแต่ตอนต้นของ Holocene Epoch ได้เกิดการแกว่งตัวขึ้นลงของระดับน้ำทะเลอย่างรวดเร็วติดต่อกันอยู่ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ทำให้เกิดการตกตะกอนของดินเหนียวตามชายฝั่งทะเลโดยทั่วไป ในช่วงระยะเวลานี้คาดว่าชั้นดินเหนียวอ่อนสำคัญๆ ของโลกได้กำเนิดขึ้น ซึ่งรวมไปถึงชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำ (Soft Deltaic Clay) แห่งลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างอีกด้วย รายละเอียดของชั้นดินในช่วงนี้สามารถแบ่งช่วงระยะเวลาออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

1.2 Transgression Sediments ในช่วงระยะเวลา 8,000–6,000 ปีก่อนปัจจุบัน

ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระดับน้ำทะเลยกตัวสูงขึ้นและรุกเข้าไปในแผ่นดิน ทำให้เกิดการสะสมตัวของดินเหนียวอ่อน 2 ส่วน คือ Marine clay หรือตะกอนดินเหนียวที่ตกนอกชายฝั่งในสภาวะน้ำเต็ม และ Intertidal Deposited Clay หรือตะกอนดินเหนียวที่ตกบริเวณในสภาวะน้ำกร่อย วางตัวอยู่ใต้ Marine Clay แต่ดินส่วนนี้จะพบได้เพียงบางบริเวณเท่านั้น เนื่องจากขณะที่

ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นแรงกระทำจากคลื่นส่งผลให้ดินส่วนนี้ในบางแห่งถูกคลื่นกัดเซาะออกไป แสดงดังภาพที่ 3

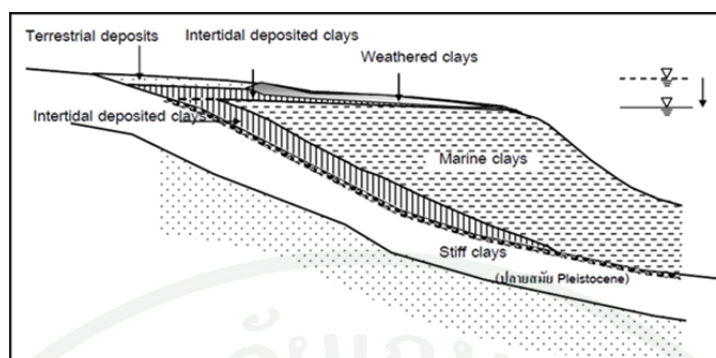


ภาพที่ 3 ลักษณะการตกตะกอนในช่วง Transgression Sediments เมื่อระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น

ที่มา: วิชาญ (2545)

1.3 Regression Sediments หลังจาก 6,000 ปีก่อนถึงปัจจุบัน

ระดับน้ำทะเลได้ลดระดับและถดถอยออกจากแผ่นดิน ทำให้เกิดดินเหนียวประเภท Intertidal Deposited Clay หรือดินเหนียวที่ตกตามชายฝั่งที่มีน้ำตื้นซึ่งมีสภาพเป็นน้ำกร่อย ดินชั้นนี้จะวางตัวปิดทับอยู่ตอนบนของ Marine Clay เมื่อเวลาผ่านไป ส่วนบนของชั้นดิน Intertidal Deposited Clay จะถูกแปรสภาพเนื่องจากธรรมชาติทำให้เกิดชั้น Weathered Clay นอกจากนี้ระดับของผิวดินของชั้นนี้จะอยู่ไม่สูงมากนัก ในช่วงน้ำหลากมักมีดินตะกอนน้ำจืดจากน้ำท่วมมาสะสมตัวอยู่ตอนบน โดยมากจะพบในบริเวณตอนเหนือของกรุงเทพฯ แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะการตกตะกอนในช่วง Regression Sediments เมื่อระดับน้ำทะเลลดลง

ที่มา: วิชาญ (2545)

2. ลักษณะของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

จากหลักฐานทางธรณีวิทยาพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน โดยแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่สภาพแวดล้อมและอายุการทับถม (วิชาญ, 2545) ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ชั้นดิน Weathered Clay

เป็นชั้นดินตอนบนสุดของ Marine Clay หนาประมาณ 2-5 เมตร ดินส่วนนี้ถูกกระบวนการทางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินต้นกำเนิดไปมาก โดยที่ผิวดินด้านบนจะถูกแดดเผาและ Capillary Action ทำให้เกิด Drying Crust และส่วนใต้ Drying Crust เกิดกระบวนการผุกร่อนทางเคมี (Chemical Weathering) และเนื้อดินได้รับการชะล้างจากน้ำที่ซึมลงไปดิน (Leaching) ทำให้เกิด Weathering Zone ดังนั้น ในชั้นดินนี้จะกลายเป็นชั้นดินที่มีสองส่วนประกอบกันคือ Drying Crust และ Weathering Zone ซึ่งถูกเรียกกันต่อมาว่า Crust (วิชาญ, 2545)

นิพนธ์ (2544) กล่าวว่า ดินช่วงความลึกประมาณ 0-4 เมตรแรกจากผิวดินได้ถูกสภาวะแวดล้อมทั้งความร้อนและความชื้นทำให้ดินช่วงนี้มีคุณสมบัติเปลี่ยนไปทำให้ดินมีลักษณะ

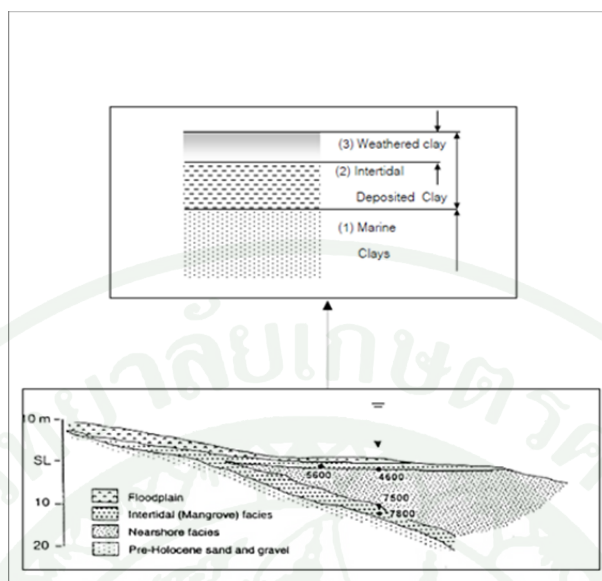
แข็งขึ้นความชื้นในดินต่ำ และชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดจากการตกตะกอนในสภาวะทางทะเลแบบ ทะเลระดับตื้นและป่าชายเลนทำให้ดินส่วนนี้มีสีเทาดำ มีความสม่ำเสมอในการตกตะกอน อุ้มน้ำ สูง มีความแข็งแรงต่ำ มักพบซากสิ่งมีชีวิตจำพวกหอย โดยเฉพาะบริเวณใกล้ปากอ่าวไทยจะมีค่า เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินสูงมาก และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายมีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อ เทียบกับบริเวณอื่นๆ เนื่องจากเป็นดินที่ตกตะกอนใหม่และได้รับอิทธิพลจากระดับน้ำทะเล

2.2 ชั้นดิน Marine Clay

เป็นชั้นดินที่มีตะกอนจากปากแม่น้ำไปตกในทะเลลึกนอกชายฝั่งซึ่งเม็ดดินมีส่วน ละเอียดมากกว่าส่วนหยาบ ส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวมีดินแป้งปนอยู่บ้าง พบชั้นทรายละเอียด บางๆแทรกอยู่ และมีซากพืช เปลือกหอยกระจัดกระจายอยู่ทั่วไป ชั้นดิน Marine Clay เกิดในช่วง ที่น้ำทะเลยกกระดึ้นรุกเข้าไปในแผ่นดินในตอนต้นของสมัย Recent หรือ Holocene เมื่อประมาณ 8,000-6,000 ปี ก่อนปัจจุบัน ดินตะกอนส่วนนี้จะมีเกลือแร่ในดินสูงกว่า เนื่องจากเป็นดินตะกอน น้ำเค็มและมักจะมีโครงสร้างของดินเป็นลักษณะแบบระเกะระกะมากกว่า แร่ในดินเหนียวที่สำคัญ คือ Montmorillonite (60%), Kaolinite (25%) และ Illite (15%) (วิชาญ, 2545)

2.3 ชั้นดิน Intertidal Deposited Clay

เป็นดินตะกอนปากแม่น้ำแต่การตกตะกอนนั้นมักจะตกอยู่ตามชายฝั่งทะเลซึ่งมีการ เปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลขึ้นลง ลักษณะของเม็ดดินคล้ายกับดิน Marine Clay แต่เนื่องจากดิน ตะกอนชายฝั่งจะเกิดในสภาวะน้ำกร่อย ปริมาณเกลือแร่ในดินจะต่ำกว่า และโครงสร้างของดิน เหนียวจะมีลักษณะ Flocculation น้อยกว่า กำลังของดินจะมีกำลังต่ำกว่าด้วยทั้งๆที่มีความ หนาแน่นและปริมาณน้ำในมวลดินใกล้เคียงกัน แต่เพราะโครงสร้างของดินต่างกัน กำลังของดิน จึงต่างกัน (วิชาญ, 2545)



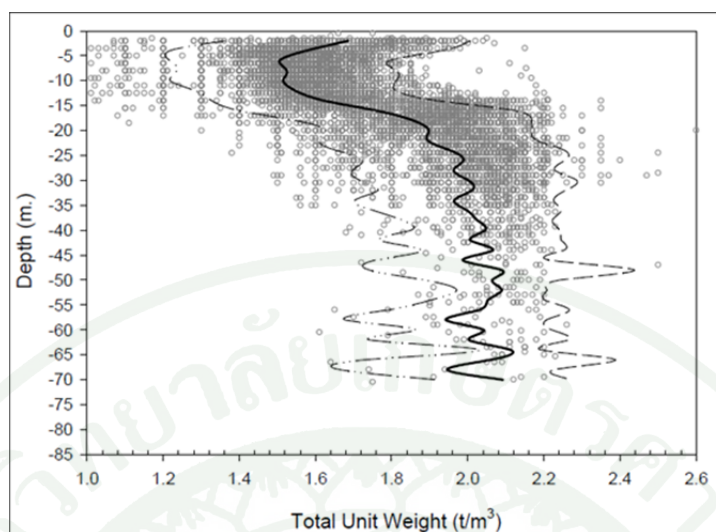
ภาพที่ 5 องค์ประกอบของชั้นดิน Bangkok Clay

ที่มา: วิชาญ (2545)

3. คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

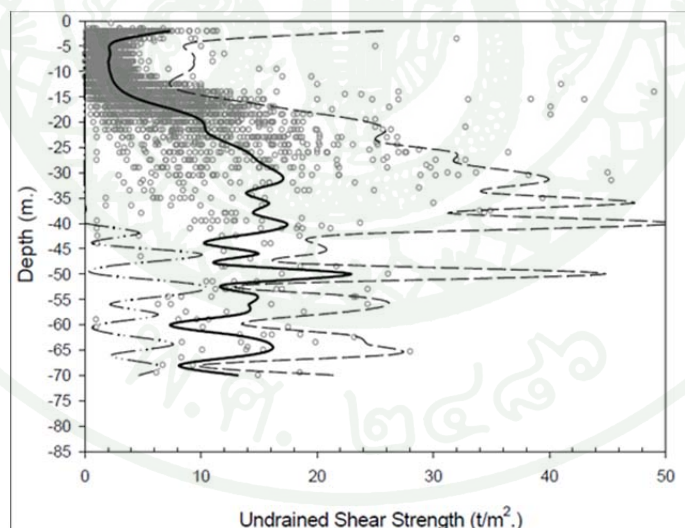
คุณสมบัติทางกายภาพจะเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะของดิน ชนิดของดิน และสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่เกิดขึ้นกับดินชนิดต่างๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางกายภาพหลักๆที่ใช้ในทางวิศวกรรมปฐพีอยู่เป็นประจำ

จากการศึกษาของ ปณูฑ (2545) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของดินกับความลึกของชั้นดินและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินกับความลึกของชั้นดิน จะเป็นดังภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดินในเขตพื้นที่กรุงเทพฯและบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและความลึกของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

ที่มา: ปญฺฑ (2545)



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและความลึกของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

ที่มา: ปญฺฑ (2545)

ต่อมา ปญฺท (2545) ได้ทำการศึกษาถึงความเกี่ยวเนื่องของลักษณะทางกายภาพและทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในการประเมินคุณสมบัติของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านกำลังอย่างคร่าวๆ ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลทางกายภาพ เช่น ความชื้นตามธรรมชาติ, จีดีจำกัดความเหลว, จีดีจำกัดพลาสติก, Plasticity Index, Liquidity Index, หน่วยน้ำหนักรวม, และหน่วยน้ำหนักก่ดทับประสิทธิผล เป็นต้น โดยใช้กระบวนการทางสถิติและพิจารณาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และลักษณะกราฟความสัมพันธ์ สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นได้กำหนดขอบเขตจากระดับผิวดินถึงความลึก 40 เมตร เท่านั้น เนื่องจากเป็นระยะที่มีข้อมูลจำนวนมากและเหมาะสมกับการใช้งานในหลายๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและคุณสมบัติทางกายภาพที่ได้จากการศึกษานี้ พบว่า มีความสัมพันธ์ปานกลางกับความชื้นตามธรรมชาติ, Liquidity Index, หน่วยน้ำหนักรวม, และหน่วยน้ำหนักก่ดทับประสิทธิผล โดยที่ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.47, 0.48, 0.54, และ 0.54 ตามลำดับ แต่จะมีความสัมพันธ์น้อยกับจีดีจำกัดความเหลว, จีดีจำกัดพลาสติก, และ Plasticity Index ดังสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมการความสัมพันธ์ระหว่าง S_u และคุณสมบัติทางกายภาพ

Properties	Undrained Shear Strength (t/m^2)	R^2
W_n	$S_u = 6.26 - 0.58 * W_n^{0.5}$	0.47
LL	$S_u = 31.22 - 6.54 \ln(LL)$	0.18
PL	$S_u = 22.45 - 5.56 \ln(PL)$	0.11
PI	$S_u = 18.22 - 3.98 \ln(PI)$	0.14
LI	$S_u = -1.52 + 9.08 * e^{-(LI)}$	0.48
γ_t	$S_u = -5.81 + 1.95 * \gamma_t^3$	0.54
σ'_v	$S_u = 0.51 * \sigma'_v$	0.54

ที่มา: ปญฺท (2545)

สำหรับตารางที่ 2 และ 3 ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการวิจัยจากผู้ศึกษาในด้านคุณสมบัติทางกายภาพในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ และบริเวณข้างเคียง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นประเภทของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของ Soft Clay บริเวณกรุงเทพฯ

Properties	Report by			
	Balasubramaniam (1981)	กำธร (2529)	นิพนธ์ (2544)	ปณฺฑ (2545)
Natural water content	112 - 130	60.35 ± 9.33	46 - 78	68.14 ± 18.74
Liquid limit %	118.5 ± 0.1	63.61 ± 6.75	37 - 63	74.79 ± 16.78
Plastic limit %	43.1 ± 0.3	28.20 ± 2.62	20 - 26	30.68 ± 6.36
Plasticity index %	75.4 ± 1.3	28.20 ± 2.62	11 - 32	-
Specific Gravity	2.75 ± 0.1	2.654 ± 0.03	-	-
Unit Weight(t/m^2)	-	1.65 ± 0.07	1.4 - 1.7	1.56 ± 0.16
$S_u(t/m^2)$	-	2.85 ± 1.22	-	1.55 ± 1.33

ที่มา: ก้องรัฐ (2547)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของ Medium to Stiff Clay บริเวณกรุงเทพฯ

Properties	Report by		
	กำธร (2529)	นิพนธ์ (2544)	ปณฺฑ (2545)
Natural water content	30.28 ± 6.78	19 - 36	68.14 ± 18.74
Liquid limit %	55.16 ± 10.36	36 - 61	79.80 ± 16.78
Plastic limit %	24.06 ± 2.87	19 - 31	30.68 ± 6.36
Plasticity index %	-	15 - 33	-

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Properties	Report by		
	กำธร (2529)	นิพนธ์ (2544)	ปณัฐ (2545)
Specific Gravity	2.672 ± 0.02	-	-
Unit Weight(t/m^3)	1.77 ± 0.16	1.8 - 2.2	1.56 ± 0.16
$S_u(t/m^2)$	6.93 ± 2.4	-	1.55 ± 1.33

ที่มา: ก้องรัฐ (2547)

4. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

4.1 คุณสมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนักของดิน

คุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักของดินในที่นี้จะหมายถึง ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของดินซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินเมื่อน้ำหนักภายนอกกระทำ ในทางวิศวกรรมปฐพีได้นำทฤษฎีของ Mohr-Coulomb มาช่วยในการอธิบายและวิเคราะห์ปัญหา รวมไปถึงการคำนวณออกแบบโครงสร้างต่างๆ ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนตามนิยามของ Mohr-Coulomb Failure เขียนได้เป็นสมการดังนี้คือ

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (1)$$

เมื่อ τ = หน่วยแรงเฉือนที่จุดพังทลาย, ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
 σ = หน่วยแรงกดหรือแรงตั้งฉากทั้งหมดบนระนาบแรงเฉือน
 ϕ = มุมเสียดทานภายใน
 c = แรงยึดเหนี่ยวหรือแรงเชื่อมแน่น

สูตร (2540) บรรยายว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ

รูปแบบที่หนึ่ง กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) คือ กำลังรับน้ำหนักหรือกำลังรับหน่วยแรงเฉือนของดินที่อิ่มตัวในลักษณะที่ดินถูกหน่วยแรงมากระทำจนเกิดการวิบัติในมวลดินในขณะที่ปริมาณความชื้นของดินไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อความชื้นไม่เปลี่ยนแปลงด้วยผลของหน่วยแรงที่กระทำทำให้ความดันน้ำในโพรง (Void) ของดินเปลี่ยนแปลง กำลังรับแรงเฉือนชนิดนี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียว หรือดินที่มีแรงเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) เพราะทันทีที่มีหน่วยแรงมากระทำดินแล้ว น้ำจะไหลออกจากดินได้ลำบาก เนื่องจากดินชนิดนี้เป็นดินเม็ดละเอียด การไหลซึมของน้ำเกิดขึ้นได้ช้ามาก

รูปแบบที่สอง กำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำ (Drained Shear Strength) คือ กำลังรับน้ำหนัก หรือกำลังรับหน่วยแรงเฉือนของดินในลักษณะที่เมื่อดินถูกหน่วยแรงมากระทำจนกระทั่งเกิดการวิบัติปริมาณความชื้นและปริมาตรของดินจะเปลี่ยนแปลง แต่ความดันน้ำในโพรงของดินจะมีค่าคงที่ กำลังรับแรงเฉือนชนิดนี้เป็นคุณสมบัติของดินเม็ดหยาบหรือดินที่มีการไหลซึมของน้ำได้รวดเร็วเป็นส่วนใหญ่ ตลอดจนเป็นคุณสมบัติของดินเม็ดละเอียดที่ได้รับหน่วยแรงเฉือนในอัตราที่ช้า

4.1.1 ค่า Shear Strength ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ก. การทดสอบแบบ Unconfined Compression Test (UC Test) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการทดสอบเมื่อเทียบกับวิธีอื่น โดยการนำเอาตัวอย่างดินมากดด้วยแรงในแนวตั้งจนพังทลาย ซึ่งจะได้ค่า Vertical Strength โดย $S_u = q_u/2$ เมื่อ q_u = Unconfined Compression Strength

ข. การทดสอบแบบ Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test (UU Test) การทดสอบวิธีนี้ใช้ได้ทั้งในรูปของ Effective Stress และ Total Stress สำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่มีทรายปน วิธีนี้จะให้ผลเท่ากับ UC Test ทุกประการ แต่ในกรณีที่มีดินทรายปนจะทำให้ค่าความเค้น (σ_v) และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) เพิ่มขึ้นด้วย

ค. การทดสอบแบบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test (CU Test) วิธีนี้เป็นการ Reconsolidation ตัวอย่าง ช่วยให้ Stress Condition ในตัวอย่างดินใกล้เคียงความจริงมากขึ้น แต่ความชื้นในตัวอย่างดินจะลดลงกว่าธรรมชาติ ทำให้แรงเฉือนที่ได้จากการ

ทดสอบชนิดนี้มีค่าสูงเกินไป เมื่อเทียบกับค่าในสนามในลักษณะ Vertical Loading ด้วยกัน ดังนั้นแรงเฉือนจากการทดสอบชนิดนี้จึงไม่ควรใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งในทางปฏิบัติการทดสอบวิธีนี้มักใช้ในการหาค่า ϕ และ c ของดินมากกว่า

4.1.2 ค่า Shear Strength ที่ได้จากการทดสอบในสนาม

In Situ Field Vane Shear เป็นการทดสอบในสนามเพื่อหาความแข็งแรงแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนและปานกลาง การทดสอบนี้เป็น Index Strength Test โดยคิดมวลดินเป็นรูปทรงกระบอกที่ถูกเฉือนด้วยใบมีดจนพังทลายและสมมติว่าดินมีคุณสมบัติ Isotropic ด้วยสมมติฐานข้างต้นค่าแรงเฉือนของดินเหนียวจากการทดสอบนี้หาได้สมการที่ 2

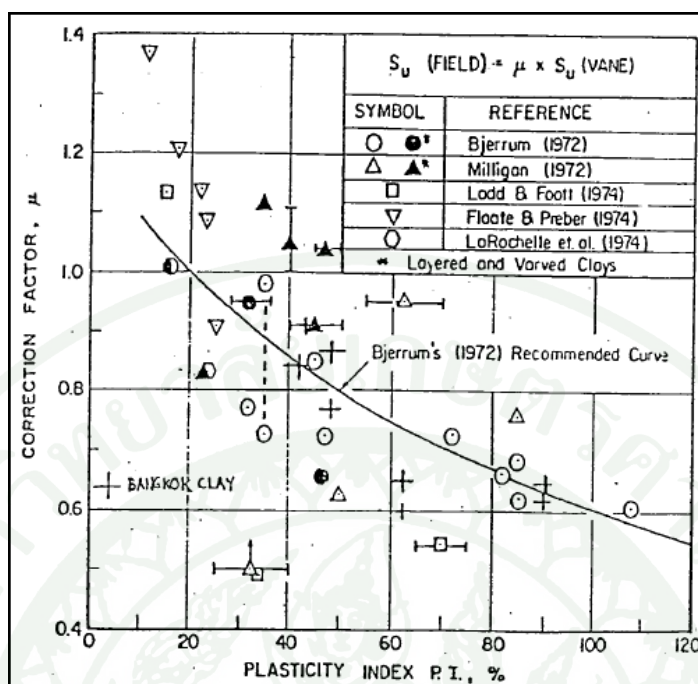
$$S_{u(fv)} = \tau_{\max} / \pi[(d^2) \cdot h/2 + (d^3)/6] \quad (2)$$

เมื่อ $\tau_{\max}$ = แรงบิดสูงสุดในการทดสอบ
 d = ความกว้างและความสูงของใบมีดตามลำดับ

การปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจาก Field Vane Shear Test ซึ่ง Bjerrum (1972) พบว่า สำหรับดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง $S_{u(fv)}$ จะมีค่าสูงเกินไป สำหรับดินเหนียวที่มี $PI > 20\%$ เมื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบปัญหาทางด้านเสถียรภาพของคันดินและคันทางที่ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนพังจะเกิดการพังทลายที่ค่า F.S. มากกว่า 1 เมื่อคำนวณจากผลที่ได้จากการทดสอบ Vane Shear ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก Vane Test มักจะทำให้ Height Strain Rate เป็นผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงและอิทธิพลของ Anisotropic ของใบมีดใน Vane Shear ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแตกต่างจากความเป็นจริง ดังนั้นค่า S_u เป็นค่าแรงเฉือนเพื่อใช้งานการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางต้องเอาค่า Correction Factor (μ) ของ Bjerrum (1972) มาคูณเสียก่อนดังสมการ 3 จะได้

$$S_{u(fv)} = \mu \cdot S_u \quad (3)$$

เมื่อ S_u = ค่าแรงเฉือนที่ทำการสำรวจ
 μ = ตัวแปรที่ได้จากการทำ Embankment Test ที่ดินเกิดการพัง ดังภาพที่ 8
 $S_{u(fv)}$ = ค่าแรงเฉือนที่ทำการปรับแก้แล้ว



ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Field Vane Correction Factor และ Plasticity Index

ที่มา: Bjerrum (1972)

4.2 คุณสมบัติทางการเคลื่อนตัวของมวลดิน

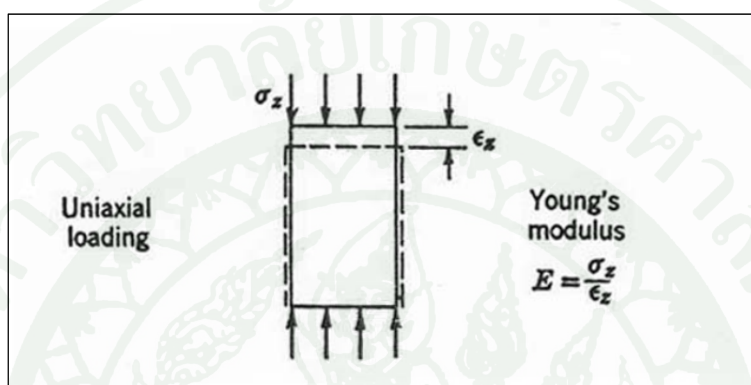
เมื่อมวลดินถูกหน่วยแรงมากระทำจะทำให้เกิดขบวนการเคลื่อนตัวของมวลดินเกิดขึ้น การที่มวลดินมีการเคลื่อนตัวมากบางครั้งอาจจะกล่าวได้ว่าดินมีค่ากำลังในการรับน้ำหนักค่อนข้างต่ำซึ่งในทางวิศวกรรมปฐพีจะมีดัชนีที่จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติในด้านนี้ ซึ่งได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น (E) และค่า Poisson's Ratio (V) ซึ่งสามารถรวบรวมไว้ดังตารางที่ 4-7

Lambe and Whitman (1979) ได้กล่าวว่า เมื่อมีแรงแนวตั้งมากระทำต่อมวลดินที่มีคุณสมบัติเป็น Elastic Cylinder จะพบว่ามวลดินจะถูกยุบตัวในแนวดิ่งและมีการขยายออกไปทางด้านข้าง ดังภาพที่ 9 โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงและยึดหดของแนวแรงได้ดังสมการที่ 4 และ 5

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu \varepsilon_z \quad (5)$$

เมื่อ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ แทน ค่า Strain ในแนวแกน x, y, และ z ตามลำดับ
 E แทน ค่า Young's Modulus of Elasticity
 ν แทน ค่า Poisson's Ratio



ภาพที่ 9 การยวบตัวและขยายตัวของดินตามนิยามของ Young's Modulus

ที่มา: Lambe and Whitman (1979)

Das (1993) กล่าวว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) กับค่า Undrained Shear Strength สามารถจัดอยู่ในรูปดังสมการที่ 6

$$E = \beta^* S_u \quad (6)$$

โดยที่ β จะมีค่าประมาณ 500-1,500 (Bjerrum, 1972)

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay Layer)

Formula	Reference	Remark
$E_u = 500S_u$	Cox (1973)	จากการทดสอบการทรุดตัวของดินในถนนบนรูปรีปากท่อ โดย S_u คัดจากค่าเฉลี่ยของชั้นดินอ่อนที่สุด
$E_u = 131S_u$	Parnpoy (1985)	จากการทดสอบ C_{kou} - T_c ตัวอย่างของถนนบางนาบางปะกง
$E_u = 125-300S_u$	NAVFAC.DM.71 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ PI=40-63% (Tonyagate, 1978) โดยนำคุณสมบัติของดิน OCR<3 (Obchittikul, 1989) ค่า PI<50% Test or Vane Shear Test
$E_u = 100-500S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ PI=40-63% OCR<3 (Tonyagate, 1978)
$E_u = 70-250S_u$	Balasubramaniam	$S_{u(FV1)}$ = Uncorrected Field Vane Shear Strength
$E_u = 42-162S_u$	and Brenner (1987)	เมื่อ $S_{u(FV2)}$ = Field Vane Correction ที่ปรับแก้ (Bejerum, 1972) เมื่อ PI=85 %
$E_u = 100-500S_u$	Bowel (1996)	สำหรับ Normally Consolidated and Lightly Overconsolidate Clay When PI>30 Organic
$E_u = 80-256S_u$	Das (1983)	
$E_u = 150S_u$	Bergado <i>et al.</i> (1990)	Bangkok Clay เมื่อ PI>50% จากการศึกษการทรุดตัวของถนนสายบางนาบางปะกงจากหน้าตัด 30 จุดสายทาง 55 กม.
$E_u = 250-500S_u$	Bjerrum (1964)	S_u = Undrained Shear Strength Unconfined Compression Test or Vane Shear Test

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

ตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay Layer)

Formula	Reference	Remark
$E_u = 300-600S_u$	NAVFAC.DM.7.1 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ PI=40-63% (Tonyagate,1978) โดยนำคุณสมบัติของดิน OCR<3 (Obchittikul, 1989) ค่า 30<PI<50% และ PI<50%
$E_u = 240-1200S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ PI=40-63%, OCR<3 (Tonyagate,1978)

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

ตารางที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็ง (Very Stiff Clay Layer)

Formula	Reference	Remark
$E_u = 150-1250S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ PI=40-63%, OCR<3 (Tonyagate,1978)
$E_u = 200-600S_u$	NAVFAC.DM.7.1 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนแข็งถึงแข็งมาก จากการทดสอบ PI=10-50%ค่าประมาณ OCR=1-5 (Oonchinikul)
$E_u = 100S_u$ ที่ FS = 1	Kristanto (1986)	ผลการทดสอบ CAU FS = 1 ตัวอย่างดินเหนียวแข็งชั้นแรก
$E_u = 500S_u$ ที่ FS = 2		บริเวณหนองงูเห่า
$E_u = 1500-2000S_u$	Bowels (1988)	สำหรับ Heavily Overconsolidate Clay

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

ตารางที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Poisson's Ratio สำหรับดินเหนียวชนิดต่างๆ

Soil Type	Reference	Poisson's Ratio, ν	Remark
Very Soft Clay	Das	0.20 - 0.40	-
Soft Clay	Parnpoy (1984)	0.30 - 0.39	ข้อมูลถนนบางนา-บางปะกง
	Poulos (1975)	0.35 - 0.45	-
	Bowl	0.35 - 0.45	-
Medium Clay	Bowl	0.30 - 0.35	-
	Das	0.20 - 0.50	-
Stiff Clay	Poulos (1975)	0.30 - 0.35	-
	Bowl	0.10 - 0.30	-

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

1. ประวัติความเป็นมาของเสาเข็มดินซีเมนต์

Leroueil et al. (1990) ทำการเก็บและรวบรวมประวัติ รวมทั้งความเป็นมาทางด้านวิศวกรรมการก่อสร้างของคันทางถนนที่ก่อสร้างอยู่บนชั้นดินอ่อนและได้ทำการแบ่งการพัฒนารวมทั้งเทคโนโลยีของการก่อสร้างออกเป็น 3 ช่วง คือ

1.1 การพัฒนาในช่วงแรก

ช่วงปี ค.ศ. 1923 ในส่วนของงานก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนนั้น ได้ใช้ท่อนไม้รองเพื่อเสริมแรงให้กับฐานรากเป็นที่ยอมรับกันมาก ซึ่ง Flodin กับ Broms ก็ได้กล่าวอ้างถึงประโยชน์ของวิธีการนี้ ก่อนที่การเริ่มต้นในช่วงของทศวรรษนี้ จะมีการใช้ขานทางมาเพิ่มเสถียรภาพของคันทางถนนหรือการที่ต้องแบ่งการก่อสร้างออกเป็นช่วง ๆ หรือการใช้วัสดุน้ำหนักเบามาเป็นวัสดุก่อสร้างเป็นคันทางถนนในประเทศไทย เป็นต้น

ในประเทศสวีเดน จะใช้เสาเข็มไม้เพื่อทำการรองรับน้ำหนักคันทาง เพื่อที่จะถ่ายน้ำหนักลงชั้นดินที่ดีกว่า รวมทั้งยังใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางถนนด้วยและยังมีคำแนะนำในการใช้ Swedish Road Board ด้วย ขณะที่ Moreau ได้แนะนำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยการเร่งระบายน้ำออก ซึ่งเป็นวิธีการพัฒนาเสถียรภาพวิธีหนึ่งคือการใช้ Sand Drain โดย Moran และ Barron ก็ได้มีส่วนในการพัฒนาทฤษฎีที่จำเป็นในการวิเคราะห์การระบายน้ำขึ้นมาด้วย

1.2 การพัฒนาช่วงปี ค.ศ. 1948–1970

ในช่วงนี้เป็นการพัฒนาเรื่อยๆ จะไม่มีความชัดเจนมากนัก โดยที่นิยมใช้จะเป็นวิธี Lime Column Method ซึ่งจะอยู่ในปี ค.ศ. 1960 แต่พัฒนาการช่วงสำคัญจะเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีแบบ Finite Element Method ซึ่งใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวระนาบภายใต้แรงกดได้

1.3 การพัฒนาช่วงปี ค.ศ. 1970–ปัจจุบัน

ในช่วงปีต้น ค.ศ. 1970 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ Lime/Cement Column ได้มีการศึกษาค้นคว้ากันแพร่หลายในประเทศสวีเดนและประเทศญี่ปุ่น โดย Linden–Alimak AB และ Professor Bengt Broms จาก The Swedish Geotechnical Institute ได้มุ่งมั่นและทำการวิจัยแล้วจึงนำเทคนิค Lime Column มาใช้ในงานฐานรากบนดินเหนียวอ่อน เช่น งานคันทาง งานขุดดิน เป็นต้น

ในช่วงปลายปี ค.ศ. 1970 ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาวิธีปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้การผสมลึกในที่ (Deep Mixing of in-situ) โดยผู้ที่เริ่มพัฒนาได้แก่ Terashi et al. (1979), Kawasaki et al. (1981), Suzuki (1982) เรื่อยมา ซึ่งเริ่มต้นของงาน Deep Mixing Method ถูกนำมาใช้ในงานอุโมงค์เรือและโครงสร้างต่าง ๆ บริเวณอ่าวริมทะเล

ในช่วงปี ค.ศ. 1975 ได้เริ่มทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเปียกมาใช้ในการก่อสร้างและ ช่วงปี ค.ศ. 1980 ได้พัฒนาเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแห้งมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างอีกมากมาย

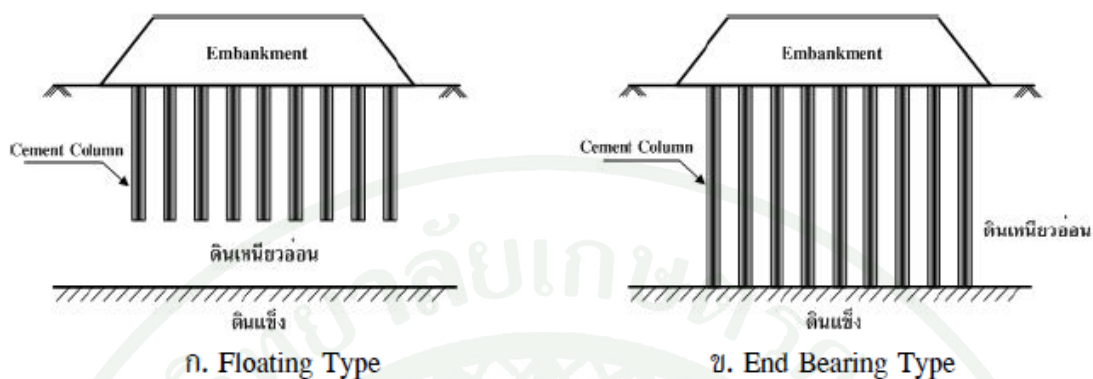
ปัจจุบันวิธีนี้ถูกนำมาใช้ในงาน โครงสร้างของฐานรากต่าง ๆ เช่น งานคันทางถนน งานตึกอาคาร และงานฐานรากของถังเก็บน้ำ โดยที่ประเทศไทยนิยมใช้การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แบบเปียกมาใช้ในการก่อสร้างถนนบนดินอ่อน

2. ประโยชน์ของการใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์

การทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์รองรับคันทางถนนเพื่อลดปริมาณการทรุดตัวและป้องกันปัญหาเสถียรภาพของคันทางบริเวณบริเวณลาดด้านข้างเนื่องจากการเลื่อนตัว การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะทำให้ดินฐานรากแข็งตัวและมีกำลังสูงขึ้น การก่อสร้างคันทางและผิวถนนสามารถทำได้ทันทีหลังจากก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แล้วเสร็จ ไม่ต้องรอเวลาทำการ Preload ให้ดินเกิดการทรุดตัวเหมือนการก่อสร้างแบบเดิมหรือใช้ PVD ช่วยเร่งการทรุดตัว นอกจากนั้นเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ยังลดปัญหาการทรุดตัวต่อเนื่องเป็นเวลานานหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ เนื่องจากความหนาของชั้นดินที่เกิดการทรุดตัวลดลงในปัจจุบัน Deep Mixing Method ได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานปรับปรุงคุณภาพดินหลายลักษณะ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ลดการทรุดตัวของ Embankment, ฐานรากอาคาร และโครงสร้างอื่นๆ
- ป้องกันการเกิด Slope Failure
- เพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของคันดินและทำหน้าที่เสมือนฐานรากได้อย่างดี
- เพิ่ม Horizontal Resistance ของโครงสร้าง
- ป้องกันการเกิด Heaving และลดความยาวของ Sheet Pile ในการขุดลึก
- ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการก่อสร้างบริเวณข้างเคียงและที่เชื่อมต่อกัน ป้องกันการทรุดตัวและเลื่อนตัวของโครงสร้างใต้พื้นดิน เช่น อุโมงค์ เป็นต้น

3. รูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในงานคันทาง



ภาพที่ 10 รูปแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างในงานคันทาง

ที่มา: JICA (1998)

Broms and Boman (1975) เสนอวิธีการคำนวณการทรุดตัวของโครงสร้างที่รับน้ำหนัก โดยฐานรากที่ปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วย Cement Column ดังนั้นรูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ จึงแบ่งตามลักษณะการก่อสร้างเป็น 2 ประเภท ดังนี้

3.1 Cement Column แบบเสาสั้น (Floating Type) เป็นชนิดการปรับปรุงดินอ่อนโดยใช้ Cement Column ไม่ตลอดความหนาของชั้นดินอ่อน จะใช้ความยาวของ Column สั้นกว่าความลึกของ Soft Clay ทั้งนี้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นต้องไม่มากจนทำให้โครงสร้างข้างบนเสียหาย ซึ่งแสดงดังภาพที่ 12 ก

3.2 Cement Column แบบเสายาว (End Bearing Type) เป็นชนิดที่ใช้ปรับปรุงตลอดชั้นดินอ่อนปลายของ Cement Column จะวางตัวบนชั้นดินแข็ง การทรุดตัวทั้งหมดประมาณได้จาก น้ำหนักที่กระทำต่อมวลดินระหว่าง Column โดยวิธีของ Miki (1997) ซึ่งได้ทำการศึกษาพบว่า น้ำหนักของ Embankment ที่กระทำต่อมวลดินระหว่าง Column แบบ End Bearing จะแสดงดังภาพที่ 12 ข

4. วิธีการก่อสร้าง Cement Column

วิธีการก่อสร้าง Cement Column สามารถจำแนกออกได้ตามวิธีการก่อสร้างเป็น 2 แบบ คือ High Pressure Jet Type กับ Mechanical Mixing Type ดังภาพที่ 11 การก่อสร้างทั้งสองแบบมีลักษณะแตกต่างกันที่เครื่องจักรหลักแต่ให้ผลที่ใกล้เคียงกันขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้

4.1 วิธี High Pressure Jet Type หรือ Slurry Jet Mixing Method

Chida (1982) กล่าวว่า การปรับปรุงวิธีนี้จะใช้สารผสมในรูป Slurry พ่นด้วยแรงดันสูงประมาณ 200-500 บาร์ ผ่านรูเล็กๆ (Nozzles) ที่ปลายหัวเจาะพร้อมกับหมุนก้านเจาะเพื่อให้การผสมในรูป Slurry ผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อสารผสมที่เป็น Slurry ทำปฏิกิริยากับดินโดยรอบแล้วจะกลายเป็นแท่ง Column ในการก่อสร้างยังมีเทคนิคแยกย่อยออกไปอีก เช่น การกดหัวเจาะไปพร้อมการทำ Pre Cut ดินจนถึงระดับปลายเข็ม อาจทำได้โดยการใช้น้ำฉีดหรือใช้น้ำและอากาศอัดลงไปพร้อมกันเพื่อทำการกวาดดินให้เหลวก่อน เพื่อง่ายต่อการฉีด Slurry ผสมกับดินขณะดึงก้านเจาะขึ้น ระบบของการทำ Column วิธีนี้แสดงดังภาพที่ 12

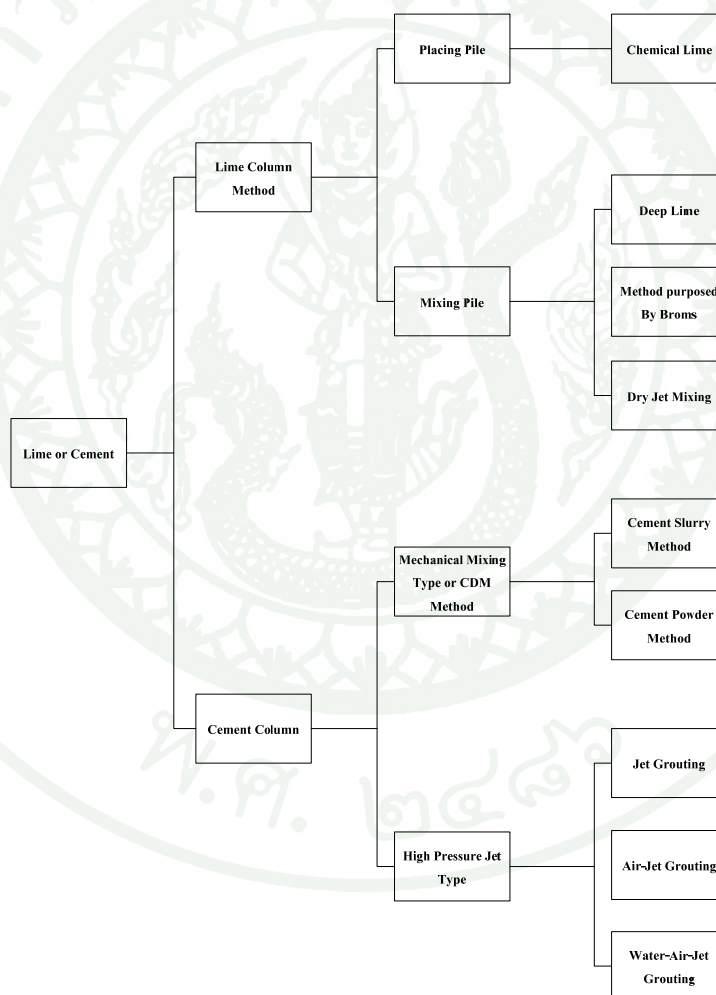
การก่อสร้าง Column วิธีนี้มีข้อดีในส่วนของชุดเครื่องจักรที่มีจำนวนน้อยกว่าวิธีอื่นขนย้ายสะดวกและสามารถก่อสร้าง Column ขนาดใหญ่ได้ง่ายกว่า แต่มีข้อเสียในด้านควบคุมคุณภาพ เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง อาจจะมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของดิน การผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างยากและอาจจะมีผลกระทบต่อดินข้างเคียงขณะอัดด้วยแรงดันสูง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินอ่อนมากๆ

4.2 วิธี Mechanical Mixing Type

สามารถแยกออกได้เป็น 2 รูปแบบตามลักษณะของสารผสมที่ใช้ผสมลงในดิน ซึ่งรายละเอียดดังนี้

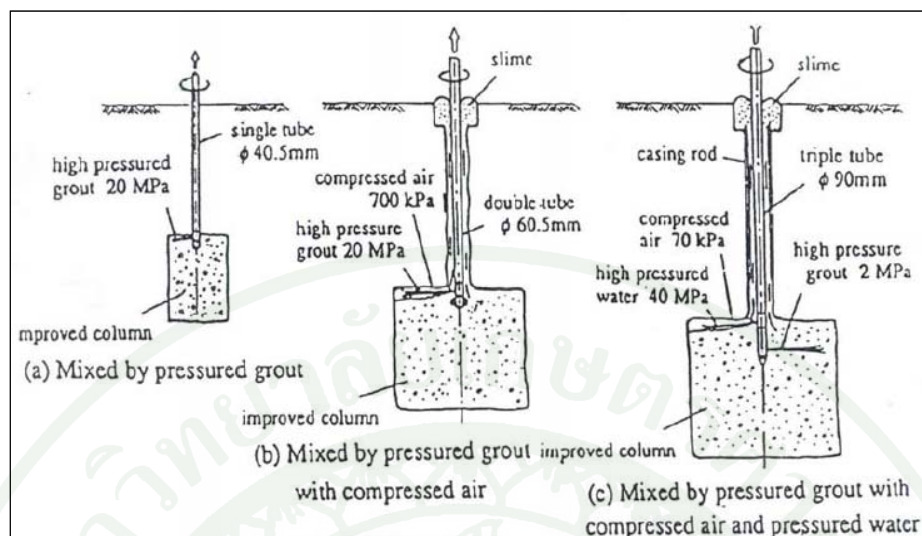
4.2.1 แบบ Wet Mixing หรือ Rotary Mixing Low Pressure (ผสมเปียก) ใช้หลักการปรับปรุงคุณสมบัติดินอ่อนตลอดชั้นความหนา ด้วยการฉีดสารผสมซึ่งเป็นน้ำปูนซีเมนต์ลงไปผสมกับดินและทำการตีกวาดผสมเพื่อให้ดินและปูนซีเมนต์เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ดังนั้น จึงต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีลักษณะคล้ายกับเครื่องทำเสาเข็มเจาะเพื่อเจาะดินลงไปฉีดน้ำปูนและตีกวาด

ผสมที่ความลึกต่างๆด้วยไพบีคที่มีลักษณะเฉพาะและขนาดช่องฉีดน้ำปูนที่เหมาะสม โดยไม่มีการเจาะดินขึ้นมาจากหลุมเหมือนงานเข็มเจาะ ซึ่งจะผสมติกลงอยู่กับที่ หลุมเจาะจึงไม่มีปัญหาพังทลายหรือเข็มเกิดขดก๊ว ขนาดของ Column จะเท่ากับขนาดของไพบีคตีคอน Cement Slurry จากการผสมซีเมนต์ผงกับน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้มีสภาพความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการทำงาน หากเข้มข้นเกินไปจะเกิดปัญหาอุดตันง่ายหรือเหลวเกินไปจะทำให้ได้กำลังต่ำ โดยปกติอัตราที่ใช้ W/C Ratio คือ 0.6-1.0 การผสมน้ำปูนจะต้องทำอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เพียงพอสำหรับการเจาะทำ Cement Column แต่ละครั้งไม่ขาดตอน ด้วยความดันที่ไม่สูงมาก (<5 บาร์) ตัวอย่างกระบวนการผลิตสารผสมของ Cement Column วิธีผสมแยกแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 11 รูปแบบและวิธีการก่อสร้าง Cement/Lime Column

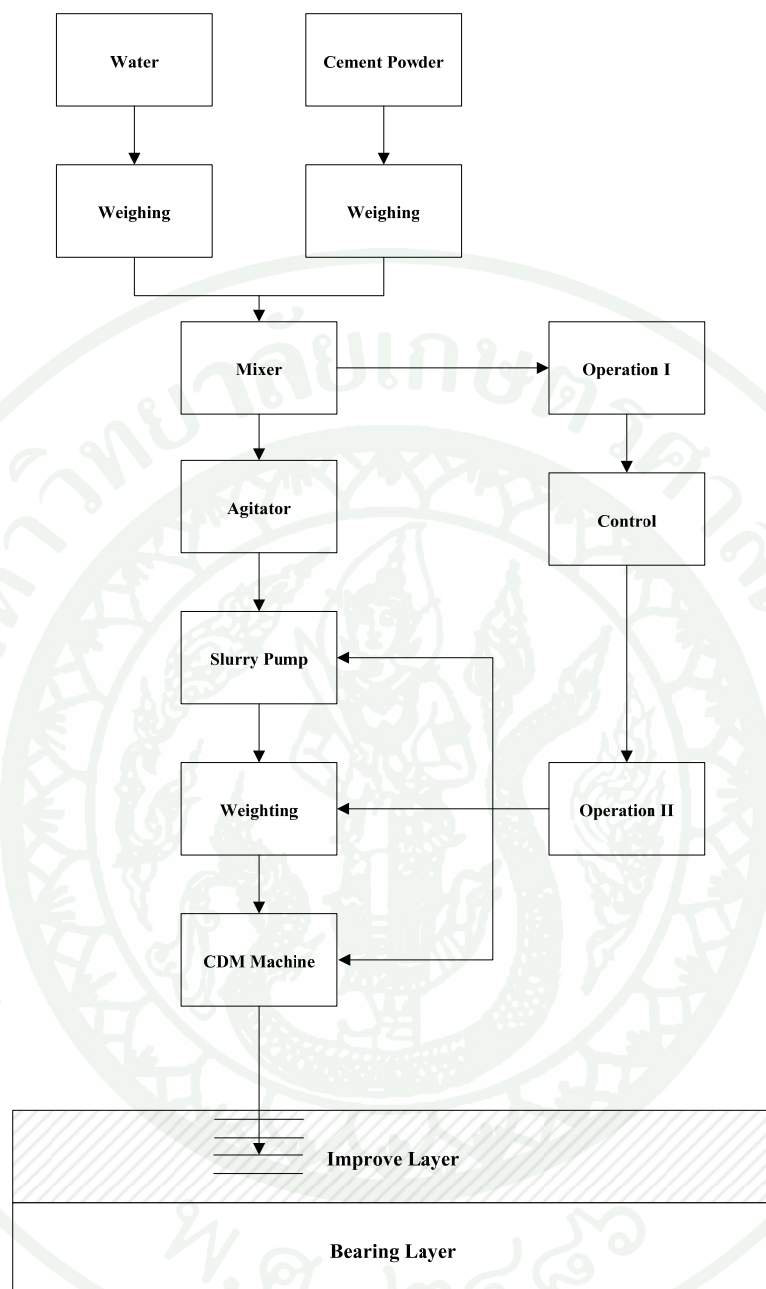
ที่มา: JICA (1998)



ภาพที่ 12 กระบวนการเจาะผลิต Cement Column วิธี Pressure Grout Mixing Jet Grouting

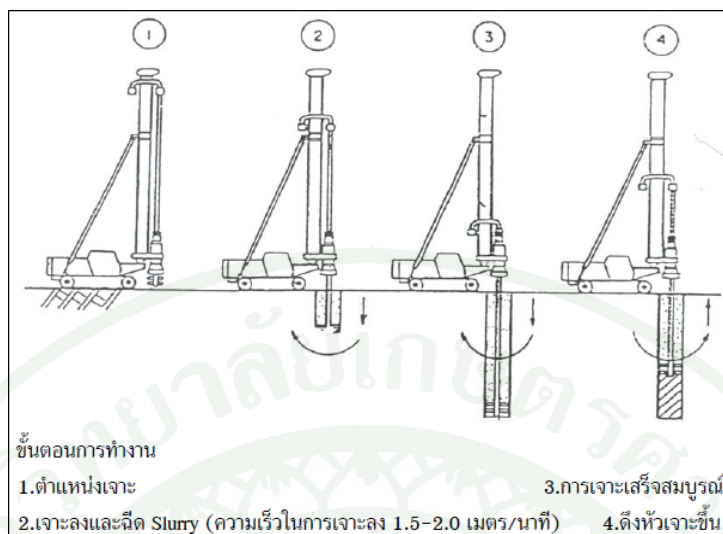
ที่มา: JICA (1998)

ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีตามต้องการในการก่อสร้าง จึงต้องควบคุมตัวแปรหลักได้แก่ อัตราการฉีดน้ำปูน (ลิตร/นาท) สัดส่วนในการผสมน้ำปูน (W/C Ratio) ความเร็วในการเจาะขึ้นและเจาะลง (เมตร/นาท) ความเร็วในการหมุนของก้านเจาะ (<50 รอบ/นาท) ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมปริมาณสารผสมที่ฉีดลงดินและจำนวนครั้งของการตีกวนดินในแต่ละชั้นความลึก ดังนั้นในการเจาะทำ Cement Column ที่มีความลึกหนึ่งๆ ระยะเวลาที่ใช้จะกำหนดโดยความเร็วในการเคลื่อนก้านเจาะขึ้นลงและความเร็วรอบในการหมุนของใบมีดกวนดินที่เหมาะสม เพื่อให้การผสมเข้ากันดี (โดยเฉลี่ยประมาณ 0.5-1.0 เมตร/นาท) ดังนั้นถ้าเครื่องจักรมีแกนเจาะมากกว่าหนึ่งแกนสามารถทำ Cement Column ได้พร้อมกันหลายต้นเป็นการลดเวลาในการก่อสร้าง การฉีดน้ำปูนนั้นโดยปกติถ้าดินเดิมดีให้แยกจากกันยาก จะฉีด Cement ช่วงการเจาะขาขึ้น เนื่องจากต้องตีดินให้แตกกระจายก่อนในการเจาะขาลง ในกรณีของดินเหนียวอ่อน เช่น ดินกรุงเทพฯ สามารถฉีดน้ำปูนช่วงการเจาะขาลงจะเป็นการเพิ่มจำนวนรอบในการกวนผสมให้มากขึ้น ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 กระบวนการผลิตสารผสมของ Cement Column วิธีผสมเปียก (Wet Mixing)

ที่มา: JICA (1998)

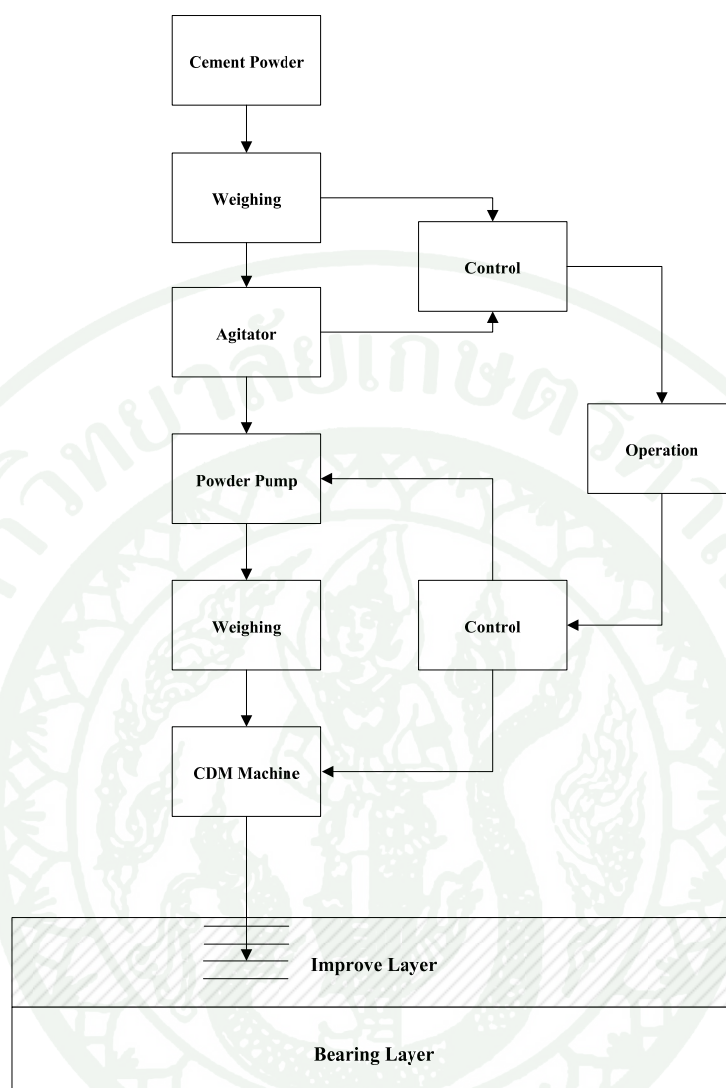


ภาพที่ 14 กระบวนการเจาะผลิต Cement Column วิธี ผสมเปียก (Wet Mixing)

ที่มา: JICA (1998)

4.2.2 แบบ Dry mixing (ผสมแห้ง) วิธีนี้ต่างกับผสมเปียก (Wet Mix) ที่สถานะของสารผสม คือ ใชผงซีเมนต์ (Cement Powder) ลงไปผสมกับชั้นดินที่ต้องการปรับปรุง นิดพ่นด้วยความดันสูงประมาณ 5 บาร์และผสมตีจนให้เข้ากันด้วยใบมีดผสมที่ได้ออกแบบมาโดยเฉพาะวิธีนี้โดยปกติใช้ Ordinary Portland Cement เป็น Hardening Agent แต่บางครั้งก็ใช้ปูนขาวเป็นผงหรือเป็นเม็ดขึ้นอยู่กับลักษณะของดินที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพนิดพ่นผ่านท่อลงไปในชั้นดิน

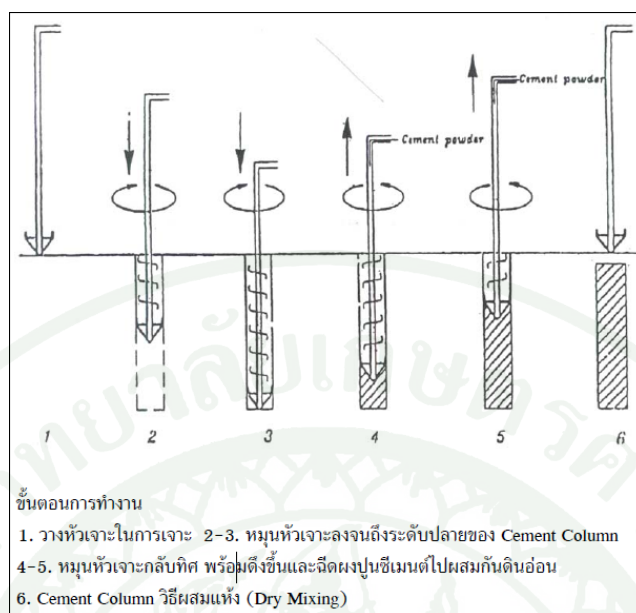
ซึ่งวิธีนี้ Mixing Plant เป็น Silo สำหรับเก็บ Hardening Agent ซึ่งติดกับตัวเครื่องเจาะเทคนิคนี้เหมาะสำหรับดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำ ดินมีค่า Water Content ที่สูง สัดส่วน Stabilizing Agent ที่ใช้น้อยกว่าในวิธีที่ใช้ Slurry ในสภาพดินลักษณะเดียวกันและดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะไม่มีกรพุด (Heave) ขึ้นมาในภายหลัง กระบวนการใช้สารผสมวิธีผสมแห้ง (Dry Mixing) แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 กระบวนการใช้สารผสมวิธีผสมแห้ง (Dry Mixing)

ที่มา: JICA (1998)

สำหรับในขั้นตอนการก่อสร้างวิธีนี้แสดงในภาพที่ 16 เนื่องจากการผสมด้วยระบบสารผสมแห้ง จึงต้องทำการ Pre-Cut ดินเดิมเพื่อให้แยกตัวออกจากกันทำให้ปูนซีเมนต์สามารถกระจายได้ทั่วถึงตลอดหน้าตัด ในขั้นตอนที่ 2-3 หากเป็นดินเหนียวควรทำซ้ำก่อนที่จะผสมปูนซีเมนต์เพื่อให้ดินแยกตัวมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 16 กระบวนการก่อสร้าง Cement Column วิธีผสมแห้ง (Dry Mixing)

ที่มา: JICA (1998)

ลักษณะโดยพื้นฐานของการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

1. ปฏิกริยาของการผสมระหว่างดินและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

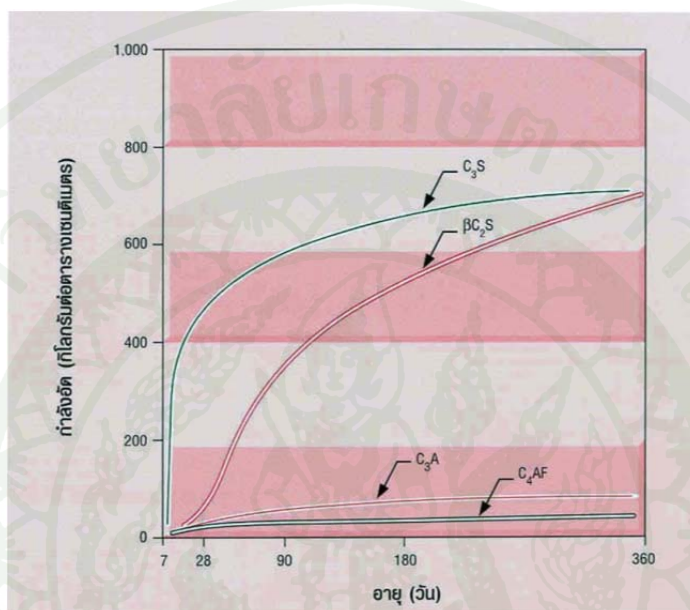
ส่วนประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ก็คือ ปูนขาว (Lime) ซิลิกา (Silica) และอะลูมินา (Alumina) ซึ่งทั้งหมดนี้จะถูกผสมรวมกันกับหินปูน (Chalk or Limestone) และดินเหนียว (Clay or Shale) ซึ่งขบวนการผลิตโดยพื้นฐานก็คือ การเพิ่มอุณหภูมิของส่วนประกอบทั้งหมดให้สูงถึงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะกำจัดโครงสร้างของน้ำออกไป (น้ำในระดับโมเลกุลซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ) ผงแป้งถือเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากขบวนการผลิตนี้ โดยเกิดขึ้นจากการรวมกันของแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมอะลูมิเนตและส่วนประกอบอื่นๆอีกเล็กน้อย ซึ่งก็คือสิ่งที่เรียกกันทั่วไปว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เปรอร์เซ็นต์สารประกอบเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดประเภทและคุณสมบัติของซีเมนต์ปูนปอร์ตแลนด์ ซึ่งสารประกอบอย่างแรกในสี่สารประกอบหลักก็คือ Tri-Calcium Silicate ($3CaO.SiO_2$), C_3S อย่างที่สองคือ Dicalcium Silicate ($2CaO.SiO_2$), C_2S อย่างที่สามคือ Tri-Calcium Alminate

($3CaO \cdot Al_2O_3$), C_3A และสารประกอบอย่างสุดท้ายคือ Tetra-Calcium Alumino-Ferrite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$), C_4AF โดยมีปริมาณรวมกันมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด และทั้งหมดนี้เป็นส่วนประกอบที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของโครงสร้างดินเมื่อน้ำในช่องว่างของดินผสมเข้ากับส่วนประกอบของซีเมนต์ ก็จะเกิดขบวนการที่เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารประกอบเหล่านี้จะมีคุณสมบัติและปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 17 คือ

1. C_3S เป็นสารประกอบที่ทำให้ความแข็งแรงแก่ปูนซีเมนต์ในระยะแรกสูง และให้ความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ
2. C_2S เป็นสารประกอบที่ทำให้ความแข็งแรงแก่ปูนซีเมนต์ในระยะแรกต่ำ แต่จะให้กำลังค่อยๆ สูงขึ้นในภายหลัง และให้ความร้อนต่ำเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ
3. C_3A เป็นสารประกอบที่ให้กำลังรับแรงอัดในตอนแรกเพียงเล็กน้อย และเป็นตัวทำให้ซีเมนต์มีค่า Plasticity สูง แต่ซีเมนต์ที่มีสารประกอบ C_3A มากจะไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตในดินหรือน้ำได้ นอกจากนั้นยังทำให้การก่อตัวของปูนซีเมนต์มีค่าแรงตัวเร็วขึ้น
4. C_4AF เป็นส่วนที่ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีดำ สารละลายที่แข็งของแคลเซียม อะลูมินาเพอร์ไรด์ จะช่วยในด้านความอยู่ตัว (Soundness) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติช่วยป้องกันปฏิกิริยาทางเคมีจากสิ่งต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงด้วย

เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่จะได้จากปฏิกิริยานี้ก็ได้แก่ Hydrated Calcium Silicates ($C_2SH_x, C_3S_2H_x$), Hydrated Calcium Aluminates (C_3AH_x, C_4AH_x), Hydrated Lime $Ca(OH)_2$, Silicate (SiO_2), Aluminate (Al_2O_3), และน้ำ (H_2O) ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์สองอย่างแรกของปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ช่วยให้ความแข็งแรงของโครงสร้างโดยหลักๆ ขณะที่ไฮเดรทลัม (Hydrated Lime), $Ca(OH)_2$ จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่แยกออกมาเกิดปฏิกิริยาใหม่อีกครั้ง ซึ่งจะสร้างผลึกของแข็งขึ้นมา กล่าวคืออนุภาคของผลึกเหล่านี้จะรวมตัวกันเป็นเม็ดๆ ขณะที่กำลังแข็งตัว และจะเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของอนุภาคขึ้นซึ่งปิดล้อมอนุภาคของเม็ดดิน นอกจากนี้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะช่วยเพิ่มค่า pH ของน้ำให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้เกิดการแยกออกของแคลเซียมไอออน (Calcium Ions) จาก Hydrated Lime (Hydrolysis) (สมการที่ 9) ซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในแร่ดินเหนียวซึ่งเป็นกรด จะเกิดการละลายและเชื่อมประสานเข้ากับสารประกอบของซีเมนต์รอบอนุภาคดินเหนียว ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกรดอ่อนและเบสแก่ สารละลายซิลิกาและอะลูมินาจะ

ค่อยๆทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ปล่อยมาจากขบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของซีเมนต์ กลายเป็นสารประกอบใหม่ที่ละลายน้ำ (ผลิตภัณฑ์สารเชื่อมประสานลำดับที่สอง) ซึ่งจะมีความแข็งแรงเมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จและดินจะมีเสถียรภาพมากขึ้น ปฏิกิริยาลำดับที่สองนี้ถูกเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิ (Pozzolanic Reaction)



ภาพที่ 17 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

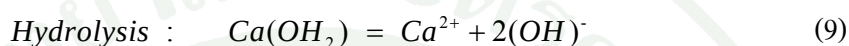
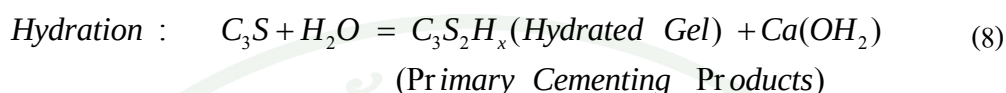
ที่มา: ชัยและปริญญา (2549)

ไตรแคลเซียมอัลูมิเนต, (C₃A) จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับน้ำมากกว่าส่วนประกอบอื่น ดังนั้นปฏิกิริยาแรกที่จะเริ่มเกิดขึ้นก่อน จะเป็นตามสมการด้านล่างคือ (Higgins, 1994)

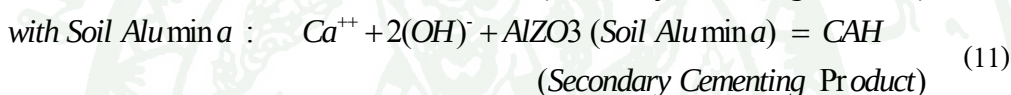
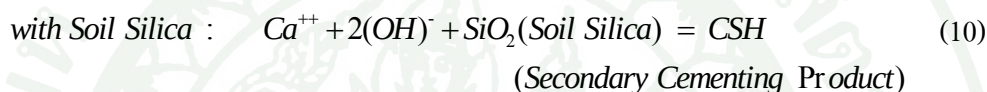


ปฏิกิริยาจากสมการด้านบนนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วมาก ซึ่งจะให้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้จะถูกทำให้เกิดขึ้นอย่างช้าๆได้ โดยการเพิ่มปริมาณของเปอร์เซ็นต์ยิปซัมลงไปเล็กน้อย โดยสารประกอบยิปซัมนี้จะเข้าไปปกคลุมสารประกอบ C₃A และจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าลง ในทางกลับกัน สารประกอบ C₃S ที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งทำให้ความ

แข็งแรงของซีเมนต์ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม โดยเรียกสารประกอบนี้ว่า ไตร-แคลเซียม ซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญและมีมากที่สุด เมื่อเทียบเป็นปริมาณ เปอร์เซ็นต์กับสารประกอบอื่นๆที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ทำให้เกิดความมีเสถียรภาพของ ดิน-ซีเมนต์ โดยสามารถแสดงได้ตามสมการของปฏิกิริยาทั้งหมดได้ดังนี้คือ



Pozzolanic Reactions :



เมื่อค่า $pH < 12.6$ แล้ว ดังนั้นจะเกิดปฏิกิริยาตามสมการด้านล่างคือ



เพื่อให้มีการเชื่อมแน่นที่มากขึ้นระหว่างส่วนผสมของซีเมนต์และดินเหนียว สารประกอบ ซิลิเกตและอะลูมิเนตซึ่งอยู่ในส่วนประกอบนี้จำเป็นต้องเกิดการละลายน้ำเสียก่อน ซึ่งการละลายของ แร่ดินเหนียวนี้มีผลเป็นอย่างมากต่อความแข็งแรงของดินซีเมนต์ กล่าวคือ การเชื่อมแน่นจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณผลึกของสารประกอบ, ขนาดของเม็ดผลึกและปัจจัยอื่นๆรวมด้วย ซึ่งปฏิกิริยาของ Cement Hydration และ Pozzolanic Reaction นี้สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา โดยอาจกิน ระยะเวลาเป็นเดือนหรือเป็นปีภายหลังจากการผสม ด้วยเหตุนี้ความแข็งแรงของดินที่ปรับปรุงด้วย ซีเมนต์มีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา นอกจากนี้การเชื่อมแน่นของอนุภาคที่เกิดขึ้นจาก ปฏิกิริยาลำดับที่สอง สารประกอบต่างๆจะถูกสร้างขึ้นมาเรื่อยๆ ซึ่งจะช่วยเสริมความแข็งแรงของ จุดเชื่อมประสานของอนุภาคแร่ดินเหนียวอีกทางหนึ่ง ทำให้ความแข็งแรงและความทนทานของ ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้นตามเวลาเช่นเดียวกัน

2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

มีปัจจัยอยู่หลายส่วนที่มีผลต่อพฤติกรรมของกำลังรับแรงเฉือน, การยุบตัว, และการซึมน้ำของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น ประเภทและปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ปริมาณน้ำในมวลดิน, ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดิน, ประเภทของแร่ดินเหนียว (Kaolinite, Illite, หรือ Montmorillonite), ลักษณะการแลกเปลี่ยนประจุของดิน, ปริมาณสารละลายซิลิกาและอลูมินา, ค่า pH ของน้ำในมวลดิน, ปริมาณสารอินทรีย์, ค่า Plastic Limits และค่า Liquid Limits, และค่า Plasticity Index ซึ่งคุณสมบัติของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์จะลักษณะคล้ายดินเหนียวจำพวก Overconsolidated Clay

2.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะจำแนกได้โดยปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบในแต่ละส่วน แต่เนื่องจากปฏิกิริยาการเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นจากไอออนของแร่ดินเหนียวนั้นจะขึ้นอยู่กับสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเพื่อให้ดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพมีความแข็งแรงและเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์จึงต้องอาศัยประเภทของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเช่นกัน เนื่องจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type 1) มีความเหมาะสมและมีราคาถูกหาได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไปเมื่อเปรียบเทียบกับประเภทอื่นๆ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน โดยปริมาณสารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) เป็นตามตารางที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 8 ปริมาณของสารประกอบและคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)

สารประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	21.63
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.09
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.92
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.91
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	1.68
ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)	58.30

ตารางที่ 8 (ต่อ)

สารประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	8.60
คุณสมบัติ	
กากที่ไม่ละลาย	0.11
Loss on Ignition	0.82
ความละเอียดจำเพาะเมื่อจัดเรียง (Blaine)	3000 ตารางเซนติเมตร/กรัม

ที่มา: บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด กรุงเทพฯ

2.2 ปริมาณปูนซีเมนต์

โดยทั่วไปแล้ว เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์สูงขึ้น ดินเหนียวที่ถูกผสมและปรับปรุงคุณภาพนี้ ก็จะมีกำลังที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (Broms, 1982; Uddin et al., 1997; etc) แต่สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนขาว (Lime-Treated) แม้ว่าจะมีการผสมด้วยปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมแล้ว การเพิ่มปริมาณปูนขาวขึ้นไปอีก ก็จะไม่ทำให้กำลังหรือความแข็งแรงของดินเหนียวนั้น เพิ่มขึ้น

2.3 ปริมาณน้ำในส่วนผสมดิน-ซีเมนต์

จากการศึกษาในปัจจุบันพบว่า ดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณของน้ำที่อยู่ในส่วนผสมจะมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อคุณสมบัติของดินซีเมนต์เช่นเดียวกันกับ ปริมาณของปูนซีเมนต์ ดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพจะพัฒนากำลังได้ดีขึ้นในปริมาณน้ำที่เหมาะสม เมื่อมีปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มากเกินไป จะทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลาการบ่มเดียวกัน (Miura et al., 2001; Lorenzo et al., 2003a) ดินเหนียวที่มีปริมาณน้ำในดินสูงจะทำให้ความเค้น ณ จุด Yield Stress มีค่าต่ำ ที่ปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาของการบ่มเดียวกัน (Lorenzo, 2001; Lorenzo and Bergado, 2004) การลดลงของปริมาณน้ำในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะมีผลต่อทั้งค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าการหยุดตัวของดินซีเมนต์ ปริมาณน้ำที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันจะอยู่ที่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งของปูนซีเมนต์ โดยค่าเฉลี่ยของ

ปริมาณน้ำในมวลดินจะลดลง 2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า Plasticity Index ของดินมีค่าต่ำ แต่ในทางกลับกัน การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนจะต่ำ เมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าต่ำเช่นกัน ดังนั้น ถ้าดินเหนียวมีปริมาณน้ำในมวลดินไม่พอเหมาะ จะต้องมีการเพิ่มน้ำเข้าไปในระหว่างผสมดินซีเมนต์ด้วย นอกจากนี้ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์สามารถที่จะลดลงได้อีกจากการระเหย เมื่อเกิดอุณหภูมิที่สูงในระหว่างการทำปฏิกิริยาและการอัดตัวคายน้ำของดิน Ekstrom และ Trank (1979) ได้ทำการศึกษาไว้ว่า ปริมาณน้ำจะลดลงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดินเหนียว 10 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้นมีค่า 60 เปอร์เซ็นต์

2.4 ระยะเวลาของการบ่ม

กำลังจากการปรับปรุงคุณภาพดิน ทั้งวิธีผสมด้วยซีเมนต์หรือด้วยปูนขาว จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาของการบ่มที่มากขึ้นด้วย (Uddin, 1995 ; Buensuceso, 1990) ซึ่งอัตราการพัฒนากำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ในช่วงระยะเวลาแรกของการบ่มสำหรับดินที่ผสมด้วยซีเมนต์คือ ประมาณ 28 วัน ในปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม 10 % หรือมากกว่า แต่เมื่อระยะเวลาในการบ่มเกินกว่า 28 วันไปแล้ว โดยทั่วไปอัตราการเพิ่มของกำลังจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว การพัฒนากำลังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในช่วงเริ่มต้นของการบ่ม (28 วันหรือน้อยกว่า) และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาการบ่มเกิน 28 วันขึ้นไป ในปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม 5 % หรือมากกว่าและจะหยุดลงเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา นอกจากนี้ระยะเวลาในการบ่มที่มีประสิทธิภาพของวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยปูนขาวจะอยู่ที่ระยะเวลาอย่างน้อย 2 สัปดาห์ แต่ไม่เกิน 12 สัปดาห์ (Buensuceso, 1990) ขณะที่ดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะอยู่ที่ระยะเวลาอย่างน้อย 4 สัปดาห์ (28 วัน)

2.5 อุณหภูมิของการบ่ม

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะช่วยให้การละลายของสารประกอบซิลิเกตและอะลูมิเนตที่อยู่ในดินมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นมันจึงเป็นการเร่งและเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ปฏิกิริยาปอซโซรอนิก (Pozzolanic Reaction) ซึ่งผลก็คือการเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังของดินผสมซีเมนต์ให้ดียิ่งขึ้นนั่นเอง

2.6 ความเค้นในระหว่างการบ่ม

จากการศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ของ Rotta et al. (2003) ซึ่งทำการศึกษาในรูปแบบของ Isotropic Yielding ของดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ภายใต้ความเค้นรอบด้าน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ความเค้นรอบด้านนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อค่า Yielding Strength ของดินซีเมนต์ โดยพบว่า ดินจำพวกทรายแป้ง (SM, Silty Sand) ที่ผสมกับปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แบบแข็งตัวเร็ว (Rapid-Hardening) ที่ปริมาณซีเมนต์ 0 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ ค่า Primary Yield Stress ในแบบ Isotropic Compression จะมีผลต่ออัตราส่วนช่องว่างและปริมาณซีเมนต์ (Void Ratio และ Cement Content) ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ Bergado และ Lorenzo (2002) ซึ่งศึกษาจากตัวอย่างดินเหนียวที่ผสมกับซีเมนต์ โดยหลักๆก็คือ ค่า Primary Yield Stress จะได้รับผลจากค่าความเค้นสะสม (Curing Stress) และค่าความเค้นในทุกทิศทุกทาง (Confining Stress) ซึ่งจะทำให้ อัตราส่วนช่องว่างของดินซีเมนต์ลดลง เพราะฉะนั้นจึงทำให้ค่า Primary Yield Stress เพิ่มขึ้นและช่วยขยายพื้นที่ Primary Yield Surface ให้มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ Lorenzo และ Bergado (2004) ยังพบว่า อัตราส่วนระหว่าง After-Curing Void Ratio ต่อ Cement Content (e_{0c} / A_w) ที่เท่ากัน จะให้ค่าความแข็งแรงของทั้งการผสมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและการผสมตัวอย่างในสนาม (Field Coring) เท่ากันด้วย トラบเท่าที่อัตราส่วน e_{0c} / A_w ยังมีค่าเหมือนกันอยู่ ซึ่งการผสมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการจะไม่มีอิทธิพลจากแรงอัดในทุกทิศทุกทาง (Confining Stress) ในขณะที่การผสมในสนาม ตัวอย่างจะอยู่ภายใต้ความเค้นกดทับของดิน (Overburdened Stress) ด้วยเหตุนี้ความแข็งแรงของดินเหนียวที่ผสมด้วยซีเมนต์จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงแรงอัดรอบทิศทาง (Confinement Pressure) ที่มากระทำ โดยมีข้อแม้ว่า อัตราส่วน e_{0c} / A_w ยังต้องมีค่าเท่ากัน

2.7 ชนิดของดิน

ชนิดของดินจะมีผลต่ออุณหภูมิของดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ในสถานการณ์และเวลาที่แตกต่างกันภายหลังจากการก่อสร้าง ดังนั้นจึงส่งผลต่อพฤติกรรมของการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ด้วย ประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์และปูนขาว (Cement และ Lime) จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Content) หรือประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่า Plasticity Index, หรือค่า Activity ของดินเหนียว (Brom, 1986) ซึ่งกำลังของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นได้ดี เมื่อผสมปูนขาวหรือปูนซีเมนต์เข้ากับดินเหนียวอินทรีย์สาร (Organic Clay) ที่มีปริมาณสารอินทรีย์ที่ไม่สูงมากนัก โดยการผสมด้วยปูนซีเมนต์จะให้ประสิทธิภาพที่มากกว่าเมื่อเทียบกับการผสมด้วยปูนขาว (Miura et al., 1987)

2.8 ปริมาณของแร่ดิน

โดยปกติดินจะมีคุณสมบัติของปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่สูงอยู่แล้ว (Pozzolanic Reactivity) ลักษณะกำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะถูกควบคุมโดยพฤติกรรมทางแข็งตัวของโครงสร้างซีเมนต์ แต่ถ้าดินที่นำมาผสมมีปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ต่ำ ลักษณะกำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับลักษณะกำลังของโครงสร้างดินเอง (Soitoh et al., 1985) เพราะฉะนั้น ถ้าเงื่อนไขในการปรับปรุงคุณภาพดินเหมือนกัน กำลังที่มากที่สุดน่าจะมาจากดินที่มีปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่สูง ดินจำพวกดินเหนียวที่ประกอบด้วยแร่ Montmorillonitic และ Kaolinitic จะพบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกเมื่อเทียบกับดินเหนียวที่ประกอบด้วยแร่ Illitic และ Chloritic (Hilt และ Davidson, 1960) Wissa และ Ladd (1965) ได้อธิบายถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเชื่อมแน่นลำดับที่สองนี้ (Secondary Cementing Materials) ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเหนียวและปฏิกิริยาไฮเดรตของปูนขาว (Hydrated Lime) จะอาศัยปริมาณและส่วนประกอบของแร่ดินเหนียว รวมถึงลักษณะรูปร่างของแร่ซิลิกาและอะลูมินาด้วย

2.9 ค่า pH ของดิน

ในระยะยาว ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะมีประสิทธิภาพในการเกิดมากยิ่งขึ้น เมื่อค่า pH ในดินมีค่าสูง (อาจเป็นผลจาก Alkaline Soil) โดยค่า pH จะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายของสารประกอบซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง แต่ถ้าเมื่อใดค่า pH ของดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์นั้นน้อยกว่า 12.6 ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.6 ก็จะเกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเชื่อมแน่นลำดับที่หนึ่ง ($C_3S_2H_6$) จะถูกนำไปใช้เพื่อทำปฏิกิริยาจนได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเชื่อมแน่นลำดับที่สอง ซึ่งก็คือสารประกอบ (CSH) และ $[(Ca(OH_2)]$ โดยจะมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4 และ 2.5 ซึ่งต่อมาจะทำให้กำลังของดินซีเมนต์มีค่าลดลง

2.10 Liquid และ Plastic Limits, Plasticity Index

ค่า Plastic Limit จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อผสมดินเหนียวเข้ากับปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นเพราะปฏิกิริยาของการแลกเปลี่ยนประจุ ขณะที่ค่า Plasticity Index จะลดลง แต่

เมื่อดินเหนียวมีค่า Plasticity Index น้อยกว่า 10 เปอร์เซนต์ การเพิ่มปูนขาวอาจจะไม่มีผลต่อค่า PI และทำให้การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนมีค่าต่ำ

เมื่อผสมดินเหนียวกับปริมาณปูนขาวที่มีปริมาณไม่น้อยกว่า 2 เปอร์เซนต์ลงไป จะทำให้เกิดผลกับค่า PL และ PI ทันที (Bell และ Tyrer, 1989) ซึ่ง Sherwood (1967) ได้ทำการศึกษา และพบว่า ค่า PL ของดิน London Clay จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 24 % ไปเป็น 43 % ด้วยปริมาณปูนขาว เพียง 4 % ซึ่งค่า PL จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เข้าไป ทั้งยังทำให้ค่า LL มีค่า เพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นนี้จะน้อยกว่าการเพิ่มของค่า PL

ปริมาณของปูนขาวมีความจำเป็นต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของปริมาณการแลกเปลี่ยนประจุและชนิดของแร่ดินเหนียว การแลกเปลี่ยนประจุจะมีปริมาณที่สูงเมื่อแร่ดินเหนียวเป็นชนิด Montmorillonite รองลงมาจะเป็นแร่ Illite และน้อยสุดเมื่อเป็นแร่ Kaolinite

2.11 การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน

การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน สามารถหาได้จากการทดสอบ Hydrometer Test โดยขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินภายหลังการผสมด้วยซีเมนต์จะมีขนาดที่เพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างดินเกิดการก่อตัวเป็นแบบระเกะระกะ (Flocculation) และยังทำให้ค่า Clay Content มีค่าลดลงอีกด้วย (e.g. Assarson, 1972, Wilhelmsson และ Brorsson, 1987) โดยดินซีเมนต์จะมีโครงสร้างแบบ Grainy, Crumbly หรือ Blocky

2.12 หน่วยน้ำหนัก

ค่าหน่วยน้ำหนักของดินอินทรีย์ (Organic Soil), ดินเหนียว (Quick Clay) และดินพีท (Peat) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของปูนขาวและปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม แต่ถ้าพอว่าปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นมีค่าที่สูง ค่าหน่วยน้ำหนักของดินจำพวก ดินอนินทรีย์ (Inorganic Soils), ดินเหนียว (Clay) และดินแป้ง (Silt) มักจะมีค่าที่ลดลงหลังจากการผสม

2.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร

เสาเข็มดินปูนขาวหรือซีเมนต์ (Lime-Cement Column) จะมีการขยายตัวออกในระหว่างการทำปฏิกิริยา (Slaking) โดยน้ำที่มีผลต่อปฏิกิริยานี้ จะถูกดูดออกมาจากดินเดิมรอบๆ เสาเข็มดินซีเมนต์ โดยปริมาตรจะเพิ่มขึ้นประมาณ 85 % ของน้ำหนักแห้งของปูนขาว (Quicklime) ผลก็คือ จะทำให้เกิดแรงดันด้านข้างรอบเสาเข็มที่สูง ซึ่งดินเหนียวอ่อนที่อยู่รอบๆ เสาเข็มจะเกิดการอัดตัวคายน้ำ (Consolidated) เกิดขึ้น และจากนั้นไม่กี่วันหลังจากการผสม ปริมาตรของเสาเข็มดินซีเมนต์จะลดลง โดยการลดลงนี้จะมีผลค่อนข้างมากคือ จะทำให้ค่าความชื้นน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์นั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะการเกิดลอยแตกและรอยแยกภายในเสาเข็ม

Ahnberg et al. (1995a) ได้ศึกษาและรายงานไว้ว่า การหดตัว (Shrinkage) ของดินทรายแป้ง (Silty Soils) ที่ผสมด้วยปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ จะมีมากกว่าดินชนิดอื่นๆ โดยมีข้อสังเกตว่าค่าการไหลซึมของน้ำผ่านเสาเข็มดินปูนขาวหรือซีเมนต์ในสนาม จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจเกิดขึ้นเพราะ การแตกระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (Slaking) ของปูนขาว (Quicklime) ในเสาเข็ม ซึ่งตัวเสาเข็มอาจจะเกิดการแยกตัวออกมาจากดินเดิม ตลอดผิวสัมผัสที่ติดกันระหว่างเสาเข็มและดินหลังจากที่ตัวเสาเข็มเองเกิดขยายตัวมาก่อนหน้านี้จากปฏิกิริยา Slaking ซึ่งรู้กันคืออยู่แล้วว่า คอนกรีตปกตินั้นมักจะเกิดการหดตัวในระหว่างการบ่ม รอยแตกที่เปิดออกทั้งในและรอบๆ เสาเข็มดินซีเมนต์มีแนวโน้มที่จะปิดลงได้ หลังจากระยะเวลาการบ่มผ่านไปไม่กี่เดือน โดยจะสังเกตได้ว่าค่าการซึมน้ำโดยเฉลี่ยของเสาเข็มนั้นจะค่อยๆ ลดลงตามเวลา

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะสังเกตได้จากการทดสอบ Triaxial Test ทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ (Drained and Undrained Test) ในช่วงแรกจะเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาตรในบางส่วนของตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำเนื่องจากการขยายตัว (Dilatancy) ของดินซีเมนต์ก่อน ซึ่งการขยายตัวนี้จะลดลงด้วยการเพิ่มค่าแรงดันรอบทิศทาง (Confining Pressure) จากการทดสอบ Triaxial Test และ Direct Shear Test พบว่าการขยายตัวนี้จะทำให้ค่ามุมเสียดทานทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำมีค่าสูง

2.14 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินซีเมนต์

ดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการผสมด้วยปูนขาว การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยา Pozzolan Reaction ในดินเป็นหลัก ขณะที่กำลังจากปฏิกิริยาของ Quicklime จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่อยู่ในมวลดิน ซึ่งจะก่อตัวเป็นโครงสร้างดินแบบระเกะระกะ (Flocculation Structure) และลดค่า Plasticity Index รวมถึงการเพิ่มค่า Plastic Limit ของดินที่ผสมด้วยซีเมนต์อีกด้วย ซึ่งเกิดขึ้นเพราะการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างการทำปฏิกิริยานั่นเอง

ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นได้จากการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์และลดค่า Liquid Limit ของดินลง (Nagaraj et al, 1996) ซึ่งสามารถมีค่าได้มากถึงกว่า 500 kPa ในจำพวกดินเม็ดหยาบ (Granular Soil) ปูนซีเมนต์จะเชื่อมแน่นเม็ดดินแต่ละเม็ดเข้าด้วยกัน ขณะที่ในดินเม็ดละเอียด ปูนซีเมนต์จะทำการเชื่อมแน่นดินในระดับอนุภาคให้เป็นกลุ่มก้อนเดียวกัน

Ahnberg et al. (1994) ได้ทำการศึกษาและสรุปว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นได้ ด้วยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในช่วงปริมาณระหว่าง 6 % ถึง 16 % ประเภทของดินก็เช่นกัน ค่าปริมาณน้ำของดินเริ่มต้นและค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c-Ratio) ร่วนแต่มีผลกับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ ซึ่งประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์จะลดลงถ้าค่า Plasticity Index และค่า Clay Content เพิ่มขึ้น รวมถึงกำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มได้น้อยเมื่อค่า Activity Ratio ที่สูง ซึ่งมักจะเกิดกับดินที่มีแร่ Montmorillonite เป็นส่วนประกอบ

การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ผสมด้วยซีเมนต์มักจะมีค่าต่ำ เมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมีค่ามากถึงกว่า 200 % (Babasaki et al, 1996) รวมถึงการเพิ่มขึ้นนี้จะต่ำลงได้อีกถ้า ดินมีปริมาณสารอินทรีย์เกินกว่า 15 % นอกจากนี้การลดลงของค่า pH ก็มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อการลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ด้วยเช่นกัน

ประเภทของปูนซีเมนต์ก็มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนเช่นเดียวกัน Ahnberg et al (1995a) ได้ทำการศึกษาถึงความแตกต่างของการใช้ปูนซีเมนต์ในแต่ละประเภท ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าโมดูลัสการหยุบตัว (Compression Modulus) ของดินซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ชนิดแข็งตัวเร็วจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่ากำลังแบกทานที่สูงกว่าปูนซีเมนต์แบบปกติ (Ahnberg

et al, 1995a) โดยได้ผลเหมือนกันกับ Bergado et al (1996) ซึ่งได้ทำการศึกษาในลักษณะนี้เช่นเดียวกัน

วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเปียก (Wet Method) เป็นที่นิยมมากในประเทศญี่ปุ่น ขณะที่ประเทศสวีเดนและฟินแลนด์ จะนิยมใช้วิธีการก่อสร้างในแบบแห้งมากกว่า (Dry Method) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ค่ากำลังรับแรงเฉือนของวิธีการก่อสร้างแบบแห้งจะให้ค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการก่อสร้างแบบเปียก (Chida, 1981) เนื่องจากการก่อสร้างแบบเปียกจะมีปริมาณน้ำและอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น (w/c-Ratio) ซึ่งค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ในซีเมนต์เหลว (Cement Slurry) ที่ใช้ก่อสร้างในประเทศญี่ปุ่นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.3 (Okumura, 1996) โดยปกติมักจะนิยมใช้ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1.0

Sandros และ Holm (1996) ได้ศึกษาถึงเรื่องนี้และสรุปว่า กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปนทรายแข็งในวิธีการก่อสร้างแบบแห้ง จะมีค่ามากเป็น 1.70 ถึง 3.2 เท่าของในวิธีแบบเปียก ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ 60 วัน หลังจากการผสมจะมีค่าประมาณ 1.0 ถึง 1.6 MPa ที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 200 ถึง 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าประมาณ 10 % ของกำลังรับแรงเฉือนที่ 180 วัน

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าของปูนขาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อซีเมนต์ที่ใช้มีความละเอียดมากๆ ปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายเดือนหรือหลายปี รวมถึงจะทำให้ชั้นดินเกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยปูนซีเมนต์จะให้ความร้อนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับปูนขาว ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์จะค่อยๆ ลดลงตามเวลา

เนื่องจากอาจจะเกิดความยากในการผสมปูนซีเมนต์แห้งกับดินชั้น เมื่อปูนซีเมนต์ที่ใช้มีปริมาณสูง ความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่า Stiffness ของเสาเข็มดินซีเมนต์มักจะน้อยกว่าเมื่อทำการก่อสร้างในแบบเปียกเมื่อเทียบกับการก่อสร้างในแบบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมีค่าต่ำและค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าสูง รวมถึงความแปรปรวนของค่ากำลังรับแรงเฉือนตลอดความยาวของเสาเข็มเมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการผสมปูนขาว

Asano et al. (1996) ได้ทำการศึกษาและพบว่า กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการจะมีค่าเป็น 2 ถึง 5 เท่าของค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่อยู่ในสนาม ซึ่งความแตกต่างของค่ากำลังรับแรงเฉือนนี้มีสาเหตุก็คือ การผสมในห้องปฏิบัติการจะสามารถควบคุมคุณภาพได้ง่ายกว่าการผสมในสนาม

2.15 กำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำของดินซีเมนต์

ค่ามุมเสียดทานของเสาเข็มดินซีเมนต์, ϕ'_{col} สามารถหาได้จากการทดสอบ Triaxial Test แบบระบายน้ำ (Drained Test) ซึ่งดินเหนียวที่มีอินทรีย์สาร (Organic Clay) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 34 - 36 องศา, ดินเหนียวทั่วไป (Clay) จะมีค่าอยู่ที่ 34 - 39 องศา และทรายแป้งปนดินเหนียว (Clayey Silt) จะมีค่าอยู่ที่ 40 - 44 องศา เมื่อทำการผสมด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ Ahnberg (1996) พบว่าจากการทดสอบ Triaxial Test แบบระบายน้ำ ค่ามุมเสียดทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 34 - 44 องศา ซึ่งค่ามุมเสียดทานนี้จะมีค่าสูงเมื่อผสมปูนซีเมนต์เข้ากับทรายแป้งปนดินเหนียว

Bjorkman และ Ryding (1996) ได้พบว่าค่ามุมเสียดทานจากตัวอย่างในสนามของเสาเข็มดินปูนขาวซีเมนต์ ที่ทำการทดสอบด้วย Triaxial Test จะมีค่าเท่ากับ 40 องศา จากการทดสอบ Triaxial Test ด้วยตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร โดย Steensen-Bach et al. (1996) และ Rogbeck (1995) ระบุว่าดินซีเมนต์มีค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 37.5 – 39.3 องศา Ekstrom (1992) พบว่าค่า ϕ'_{col} จะมีค่าเท่ากับ 40 องศาเมื่อดินเป็นแบบดินเหนียวปนทรายแป้ง และจะมีค่าเท่ากับ 25 – 29 องศาเมื่อเป็นดินเหนียว ซึ่งปรับปรุงด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์อย่างเดียว Bergwell และ Falksund (1996) สามารถทดสอบได้ค่า ϕ'_{col} เท่ากับ 57 องศา ด้วยการผสมด้วยปูนขาวและปูนซีเมนต์ Ekstrom (1994b) พบว่าค่า ϕ'_{col} จะมีค่าเท่ากับ 38 – 40 องศา เมื่อทดสอบด้วย Triaxial Test แบบไม่ระบายน้ำ (CU-Test) และการศึกษาของ Wada et al (1991) พบว่า ϕ'_{col} ของเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีค่าเท่ากับ 40 – 45 องศา

ค่ามุมเสียดทานของเสาเข็มดินปูนขาว/ปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามเวลา (Ahnberg et al., 1995a, 1995b) ซึ่งค่ามุมเสียดทานจะมีค่าคงที่เมื่ออยู่ภายใต้แรงดัน (Confining Pressure) ไม่น้อยกว่า 500 kPa

อิทธิพลของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ของดินซีเมนต์มักจะหาได้โดยการทดสอบ Unconfined Compression Test, Undrained Triaxial และ Direct Shear Test (UU-Test) จากการศึกษาของ Uddin et al. (1995) พบว่าได้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาของ Mitchell et al. (1974) โดยได้อธิบายว่า ค่า q_{u0} จะเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรงตามปริมาณเปอร์เซ็นต์ของซีเมนต์ (A_w) ที่ใช้ผสม ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้จะเห็นอย่างเด่นชัดกับดินประเภทดินเม็ดหยาบ (Coarse-Grained) มากกว่าดินแบบเม็ดละเอียด ส่วนปัจจัยอื่นๆ เช่น ค่าความเหนียว (Cohesion Intercept) และค่ามุมเสียดทาน (Friction Angle) ก็จะเพิ่มขึ้นตามค่า (A_w) เช่นเดียวกันกับระยะเวลาการบ่ม ซึ่ง Mitchell et al. (1974) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาการบ่มและค่า q_{u0} ตามสมการด้านล่างดังนี้

$$q_u(t) = q_u(t_0) + K \log(t/t_0) \quad (13)$$

เมื่อ	$q_u(t)$	=	Unconfined Compressive Strength at Time, t, (in day), kPa
	$q_u(t_0)$	=	Unconfined Compressive Strength at To Day, kPa
	A_w	=	Cement Content, % by Mass
	K	=	$480 A_w$ for Granular Soil และ $70 A_w$ for Fine Grained Soil

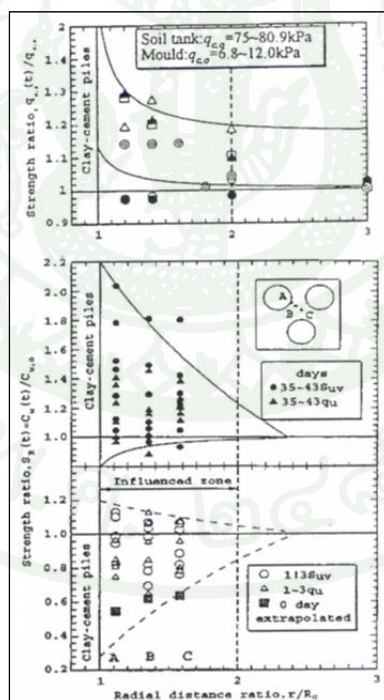
ปริมาณซีเมนต์จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน โดยความแข็งแรงจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังที่ 7 วัน และ 28 วัน จะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมมีค่ามากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์, (A_w) ดังนั้นในแง่มูลค่าด้านราคาและการออกแบบความแข็งแรงของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ที่ 10% A_w จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ก่อสร้าง Law (1989) ได้สรุปผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกันและได้เสนอว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ คือ 10 เปอร์เซ็นต์

Miura et al. (1997) ได้ทำการศึกษาและวิจัยถึงการปรับสภาพและการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวรอบๆเสาเข็มดินซีเมนต์ภายหลังการก่อสร้าง โดยทำการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม ซึ่งจะสังเกตได้ถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเหนียวใน

ระหว่างและหลังการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil-Cement Pile) ที่ก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อน Ariake (Soft Ariake Clay) จากการศึกษาทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการพบว่า ภายหลังจากติดตั้งเสาเข็ม 10 วัน การลดลงของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนรอบๆเสาเข็มดินซีเมนต์ขณะติดตั้งจะกลับคืนสู่สภาพเดิมและหลังจากนั้นอีก 30 วัน กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนรอบๆเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย ดังภาพที่ 18

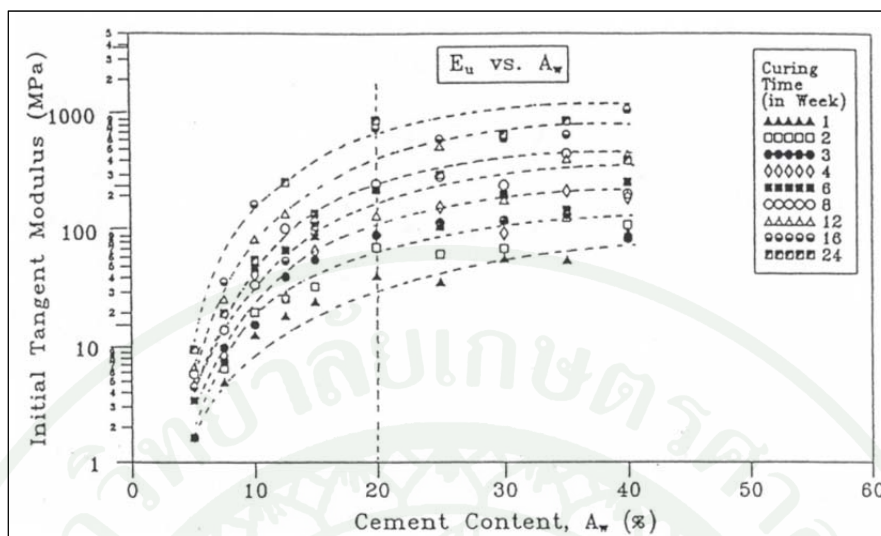
1. คุณสมบัติ Compressibility Modulus และ Modulus of Elasticity ของดินซีเมนต์

คุณสมบัติสำคัญของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ก็คือ คุณสมบัติทางด้านกำลังและโมดูลัสของการเสียรูป ซึ่งดินเหนียวที่ผสมด้วยซีเมนต์จะเปลี่ยนสถานะของวัสดุที่อ่อนไปเป็นวัสดุที่แข็งแต่มีความเปราะหรือกึ่งเปราะ (Uddin, 1995) ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus, Cement Content และระยะเวลาการบ่ม แสดงในดั่งภาพที่ 19 และ 20 และสำหรับ Secant modulus (ที่ 50% ของ Deviator stress, q_u) จะแสดงดั่งภาพที่ 21 และ 22 ตามลำดับ



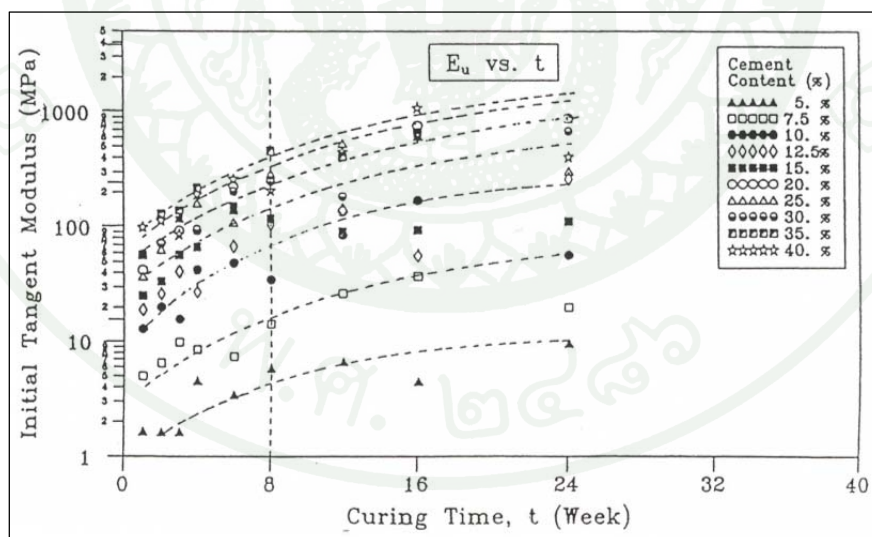
ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงกำลังของดินซีเมนต์ภายหลังการก่อสร้าง

ที่มา: Miura et al. (1997)



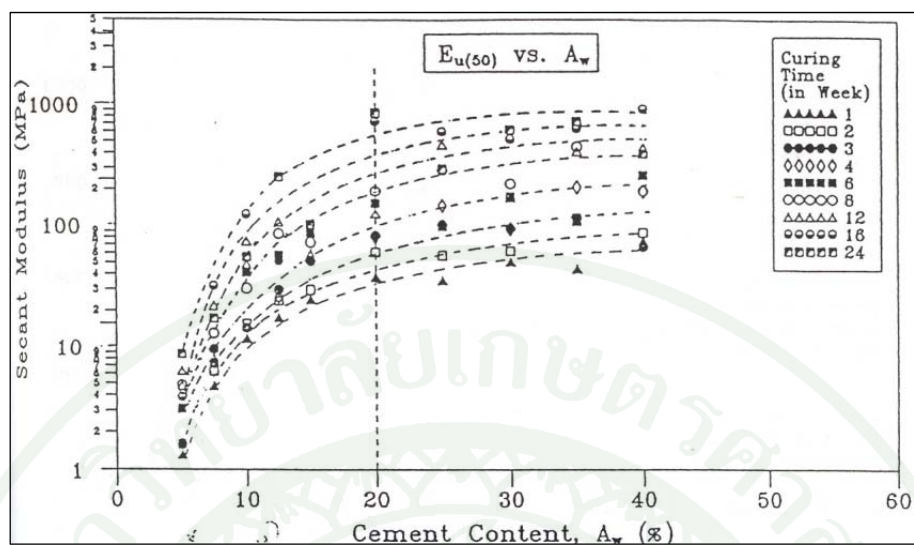
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ของ Initial Tangent Modulus กับ Cement Content

ที่มา: Uddin (1995)



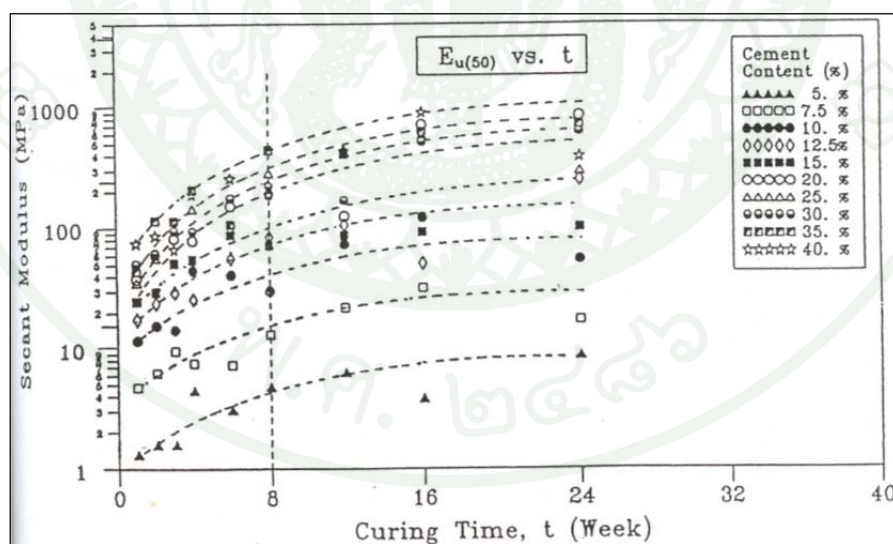
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ของ Initial Tangent Modulus กับ Curing Time

ที่มา: Uddin (1995)



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ของ Secant Modulus กับ Cement Content

ที่มา: Uddin (1995)



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ของ Secant Modulus กับ Curing Time

ที่มา: Uddin (1995)

2. คุณสมบัติ Modulus of Elasticity, E_{col} ของดินซีเมนต์

อัตราส่วนระหว่างค่า $E_{col} / C_{u,soil}$ ของเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถประมาณได้ โดยจะมีค่าเท่ากับ 250 ถึง 300 ตามการศึกษาของ Carlsten และ Ekstrom (1995, 1997)

3. คุณสมบัติ Compressibility Modulus, M_{col} ของดินซีเมนต์

ในกรณีการศึกษาของถนนบางนา-บางพระก (Bangna– Bangpakong Highway), Lorenzo (2001) ได้พบว่าค่าโมดูลัสแรงอัด (Compression Modulus) ของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าเป็น 70 เท่าของค่า $C_{u,plie}$ เมื่อ $C_{u,plie}$ คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ 28 วัน ที่ได้จากการทดสอบ VC Test โดย Bergado et al. (1996) ได้ให้สมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $M_{col} = 150C_u$ เมื่อ C_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินรอบๆเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test

4. คุณสมบัติ Permeability, k_{col} ของดินซีเมนต์

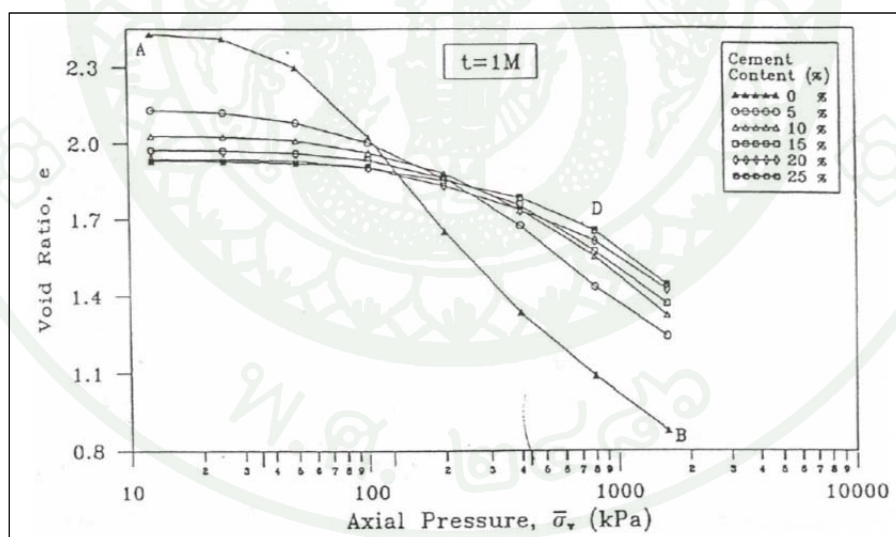
คุณสมบัติการไหลซึมของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบได้ทั้งการทำ Permeability Test ในแบบ Falling Head หรือ Constant Head และการทำ Triaxial Test หรือ Oedometer Test ซึ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดเล็ก โดยสามารถเก็บได้จากเสาเข็มดินซีเมนต์จริงๆในสนามหรือได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ค่าการไหลซึมที่หาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการนี้โดยทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่าการไหลซึมที่ได้จากเครื่องมือวัดในสนาม เพราะอาจมาจากการเกิดรอยแยกและรอยแตกในเสาเข็ม Lorenzo (2000) ได้พบว่า อัตราส่วนของค่าการไหลซึมของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อดินเดิมจะมีค่าเท่ากับ 30 เท่าโดยประมาณ

5. พฤติกรรมด้านการทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มดินซีเมนต์

ค่าการทรุดตัวสูงสุดของระบบเสาเข็มเดี่ยว (Single Pile) หรือเสาเข็มกลุ่ม (Group Pile) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาว (Lime), ปูนขาวซีเมนต์ (Lime/Cement) และซีเมนต์ (Cement) นั้นสามารถคำนวณได้ โดยการสมมติให้การทรุดตัวในแนวดิ่งของเสาเข็มเหมือนกับการทรุดตัวของดินที่ไม่ได้ปรับปรุงรอบๆเสาเข็ม ซึ่งจะยกเว้นเฉพาะส่วนหัวเสาเข็มถึงส่วนปลายเสาเข็ม เมื่อแรง

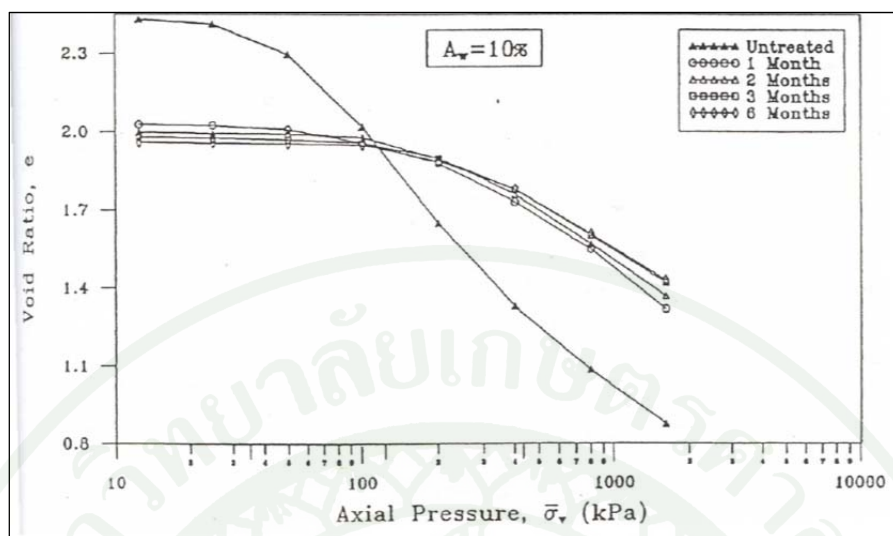
กระทำ (Load) ถูกส่งผ่านและเข้าสู่เสาเข็ม เสาเข็มเหล่านี้จะถูกสมมติว่าเป็นดินที่เสริมกำลังโดยมีพฤติกรรมเป็นวัสดุประกอบ (Composite Material) ซึ่งจะมีคุณสมบัติคล้ายกับดินเหนียว Overconsolidated Clay โดยการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มจะถูกกำหนดโดยค่าโมดูลัสอีลาสติก (Modulus of Elastic) ของเสาเข็มดินซีเมนต์และค่าโมดูลัสแรงอัด (Compression Modulus) ของดินเดิมรอบๆเสาเข็ม Broms (1999)

โดยทั่วไปพฤติกรรมการอัดตัวในหนึ่งมิติ (One Dimensional Compression) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Bangkok Clay) จะแสดงดังภาพที่ 23 และ 24 (Uddin et al. 1997) ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นถึงปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการอัดตัวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ โดยจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์จะมีผลมากกว่าระยะเวลาการบ่ม ขณะที่อิทธิพลของซีเมนต์จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ, (Coefficient of Consolidation) ด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มจะแสดงในภาพที่ 25 และ 26 (Uddin et al., 1997) ซึ่งโดยทั่วไปค่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น



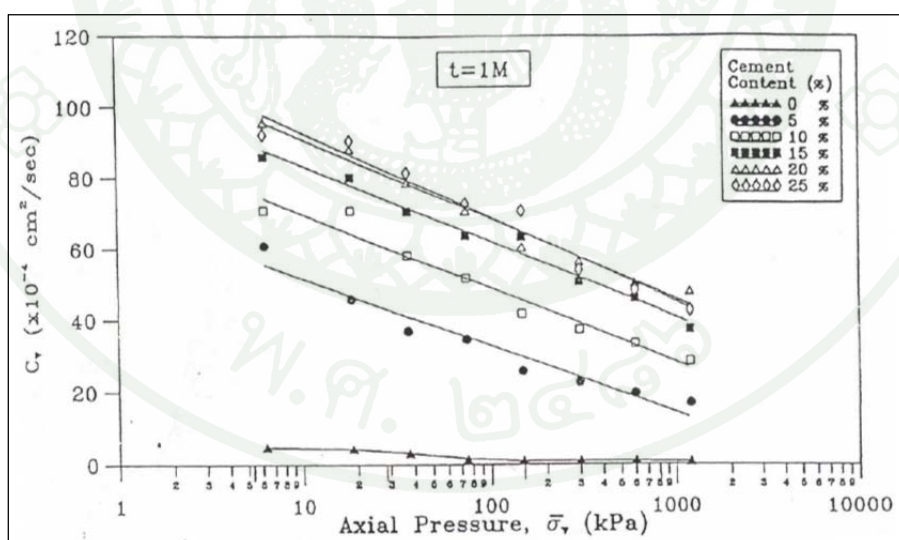
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ของ (e - $\log \sigma_v$) ของดินซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 เดือน

ที่มา: Uddin et al. (1997)



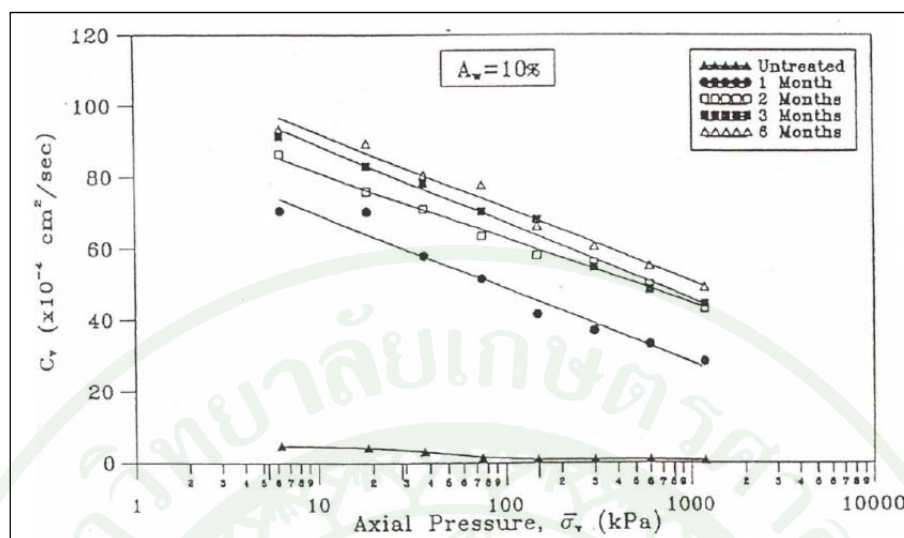
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ของ (e - $\log \sigma_v$) ของดินซีเมนต์ ที่ปริมาณ Cement Content 10%

ที่มา: Uddin et al. (1997)



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ของ Coefficient of Consolidation ของดินซีเมนต์ ที่ระยะการบ่ม 1 เดือน

ที่มา: Uddin et al. (1997)



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ของ Coefficient of Consolidation ที่ปริมาณ Cement Content 10%

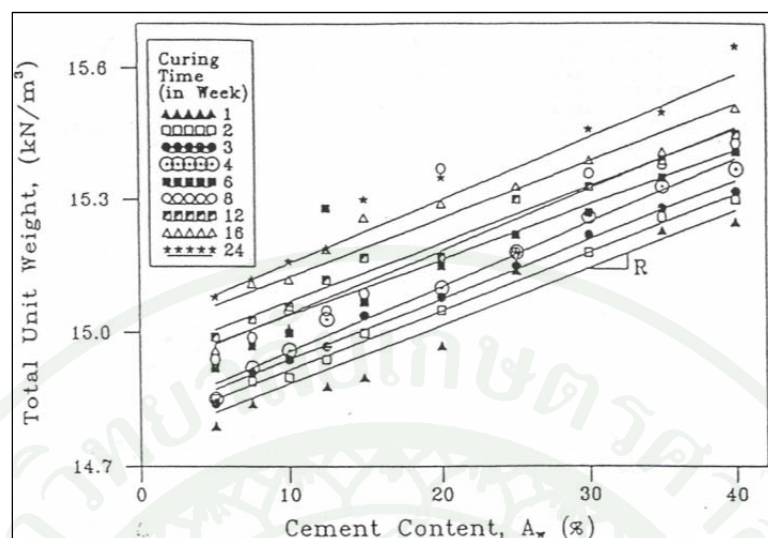
ที่มา: Uddin et al. (1997)

6. ปริมาณความเค้นในมวลดิน

ค่า Concentration Ratio (n) จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของค่า Stiffness ของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินที่อยู่รอบๆ รวมถึงค่า Stiffness, ความหนา (Thickness) ของดินถมที่อยู่เหนือเสาเข็มดินซีเมนต์ (Composite Subsoil), ค่า Degree of Penetration ของเสาเข็มที่เจาะผ่านชั้นดินเหนียวอ่อนและค่าของอัตราส่วนพื้นที่ที่ถูกแทนด้วยเสาเข็ม

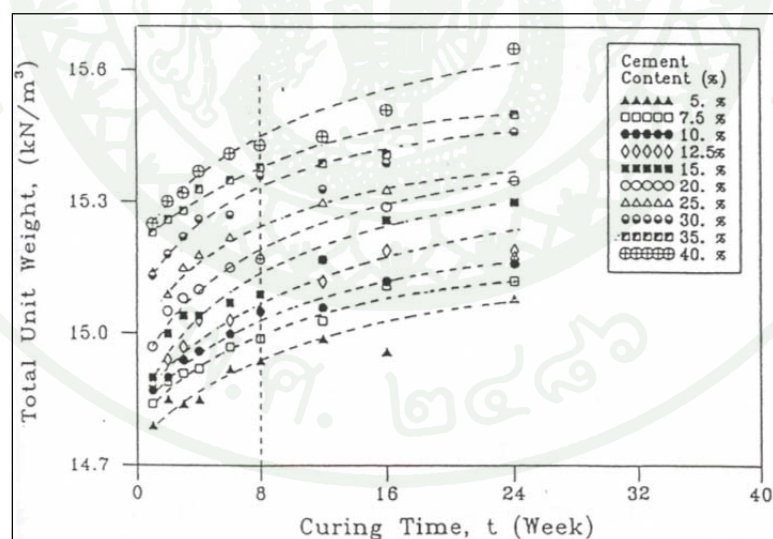
7. ค่าหน่วยน้ำหนัก

การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เข้าไปผสมกับดินเหนียวอ่อนจะส่งผลให้ค่า Unit Weight ภายหลังจากการผสมเพิ่มขึ้น ในบางช่วงเวลาของการบ่มดินซีเมนต์ ค่าหน่วยน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ (Cement Content) ซึ่งแสดงในภาพที่ 27 แต่ในขณะเดียวกันในบางปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม ค่าหน่วยน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างเป็นเส้นโค้งตามระยะเวลาการบ่มซึ่งแสดงในภาพที่ 28 (Uddin et al., 1997)



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงของค่า Total Unit Weight กับ Cement Content

ที่มา: Uddin et al. (1997)

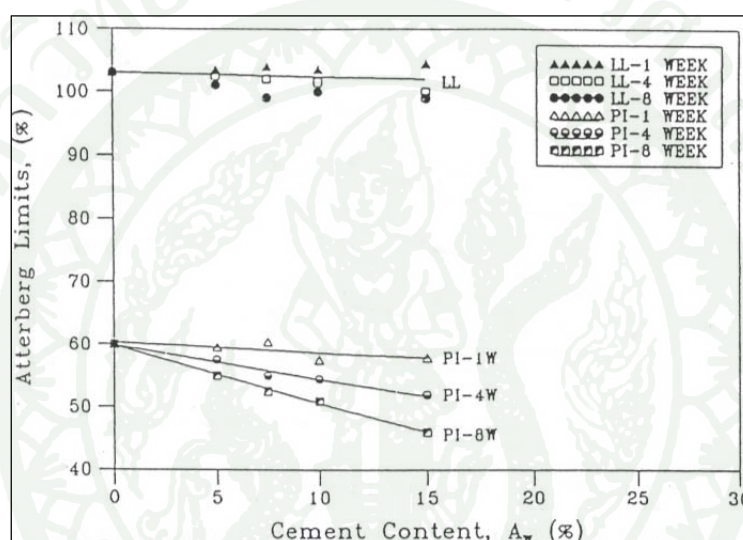


ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงของค่า Total Unit Weight กับ Curing Time

ที่มา: Uddin et al. (1997)

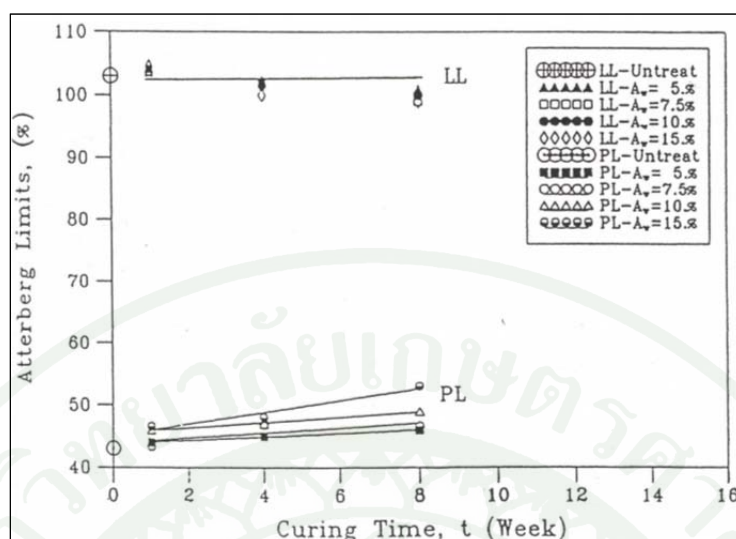
8. คุณสมบัติทางดัชนีชี้วัดต่างๆ

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อค่า Atterberg's Limits แสดงดังภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ จากภาพจะเห็นได้ว่า ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงจะส่งผลเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Liquid Limit ของดิน แต่ค่า Plastic Limit จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาของการบ่ม ดังนั้นค่า Plasticity Index จึงลดลง (ภาพที่ 29) ซึ่งการเพิ่มทั้งปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มจะส่งผลให้ค่า Plastic Index ลดลงเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 29 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อ Index Properties ของดินซีเมนต์

ที่มา: Uddin et al. (1997)

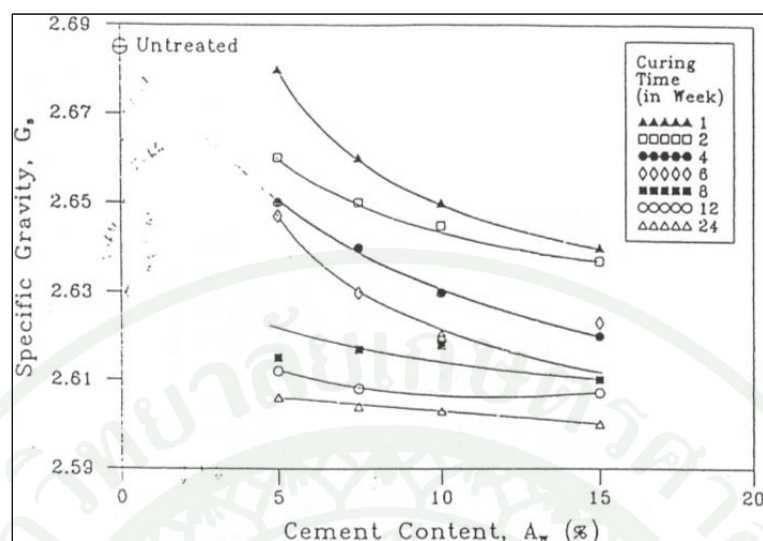


ภาพที่ 30 อิทธิพลของปริมาณ Cement Content ที่มีผลต่อ Index Properties ของดินซีเมนต์

ที่มา: Uddin et al. (1997)

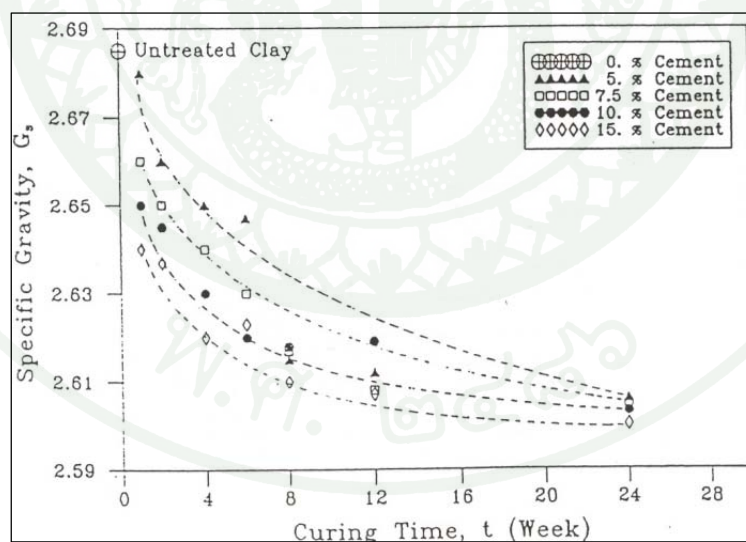
9. ค่าความถ่วงจำเพาะของดินซีเมนต์

ในภาพที่ 31 และ 32 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มที่มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ในบางระยะเวลาของการบ่ม ค่าความถ่วงจำเพาะของดินจะลดลงค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ ซึ่งจะคงที่ในช่วงประมาณ 20% (ภาพที่ 31) ขณะที่ในบางปริมาณซีเมนต์ ค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลงค่อนข้างเป็นเส้นโค้ง (Semi-Hyperbora) ตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่ม (ภาพที่ 32) จากผลการศึกษาข้างต้นของ Uddin et al. (1998) ซึ่งให้ให้เห็นว่ามีความขัดแย้งกับการศึกษาของ Miara et al. (1997) ซึ่งภายหลังจากนั้น ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยการพัฒนากำลังโดยทดสอบแบบ Full Scale DMM Column ที่ติดตั้งในดินเหนียว Ariake Clay ในประเทศญี่ปุ่น พบว่าขณะที่ปริมาณน้ำในมวลดิน (Water Content) ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่ม ค่าความถ่วงจำเพาะก็จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มด้วย ผลการศึกษานี้แสดงในภาพที่ 33



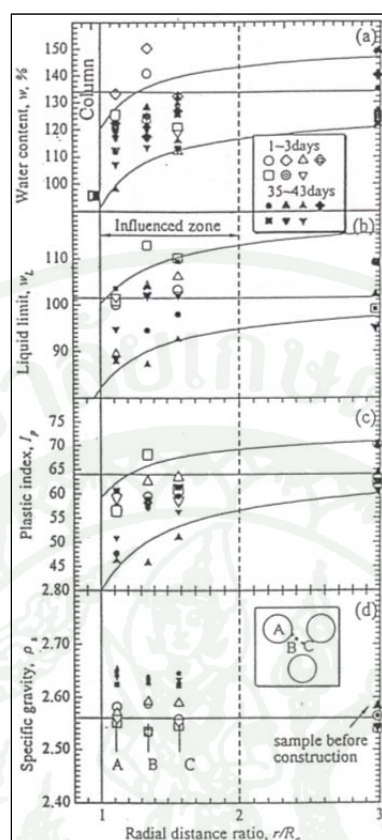
ภาพที่ 31 การเปลี่ยนแปลงค่า Specific Gravity ของดินซีเมนต์ ที่ปริมาณ Cement Content ต่างๆ

ที่มา: Uddin et al. (1997)



ภาพที่ 32 การเปลี่ยนแปลงค่า Gravity ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ

ที่มา: Uddin et al. (1997)



ภาพที่ 33 การเปลี่ยนแปลงค่า Physical Properties ของดินซีเมนต์ ภายหลังการก่อสร้างในสนาม

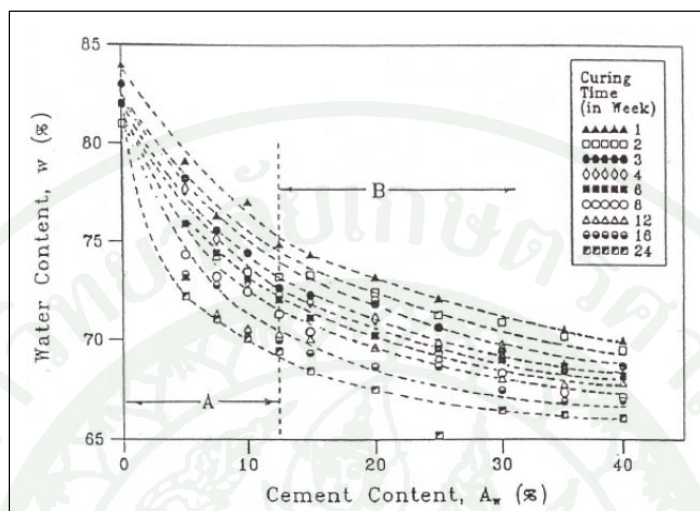
ที่มา: Miura et al. (1997)

10. ปริมาณน้ำของดินซีเมนต์

ปริมาณซีเมนต์ (Cement Content) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าปริมาณน้ำของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพลดลง (ภาพที่ 34) การลดลงของปริมาณน้ำในมวลดินจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม ภายในบริเวณพื้นที่ที่ปรับปรุงด้วยเสาซีเมนต์ก็จะมี การลดลงของปริมาณน้ำเกิดขึ้นเล็กน้อย ในช่วงของปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ต่ำกว่า 12.5 % อย่างไรก็ตาม การลดลงของปริมาณน้ำในมวลดินจะสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณซีเมนต์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 35 %

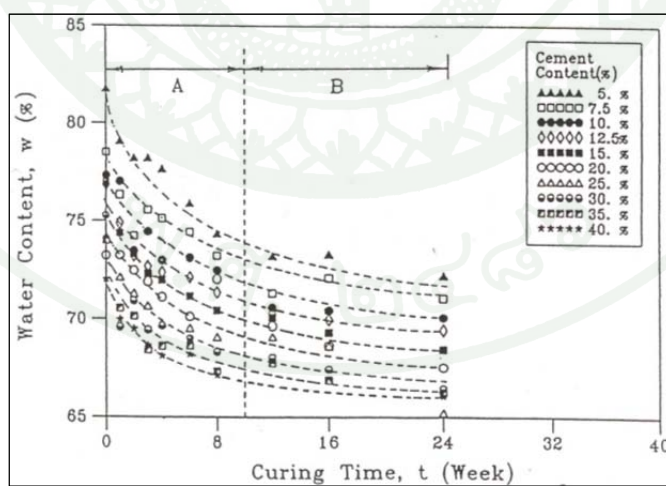
อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มจะส่งผลต่อปริมาณน้ำในมวลดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 35 โดยจากภาพจะเห็นได้ว่า เกิดการลดลงของปริมาณน้ำภายในมวลดิน

อย่างรวดเร็วในช่วง 10 สัปดาห์แรกของการบ่ม อย่างไรก็ตาม เมื่อผ่าน 10 สัปดาห์ไปแล้ว การลดลงของปริมาณน้ำในมวลดินก็จะค่อยๆหายไปอย่างช้าๆตามระยะเวลา



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงค่า Water Content ที่ปริมาณ Cement Content ต่างๆ

ที่มา: Uddin (1995)



ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงค่า Water Content ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ

ที่มา: Uddin (1995)

11. อัตราส่วนช่องว่างและความอิ่มตัวด้วยน้ำของดินซีเมนต์

ตัวอย่างดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะมีค่า Degree of Saturation ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับดินที่ยังไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพในช่วงระยะการบ่มน้อยกว่า 2 เดือน ขณะที่มันจะมีค่าสูงกว่าเมื่อผ่านระยะเวลาการบ่มเกินกว่า 2 เดือนไปแล้ว โดยทั่วไป ดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ ค่า Degree of Saturation จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์ (Cement Content) เพราะฉะนั้นจากสมการพื้นฐานความสัมพันธ์ของค่า Void Ratio, $e = wG_s / S$ จึงทำให้ค่าอัตราส่วนช่องว่างของดินซีเมนต์ลดลง อันเนื่องมาจากทั้งปริมาณน้ำ (Water Content), $w\%$ และความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity), G_s เกิดการลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์นั่นเอง (Uddin et al. 1997)

ทฤษฎีการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์

Broms and Boman (1975) กล่าวว่า การใช้ Cement Column ช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อนมักจะก่อสร้างให้มีความยาวตลอดชั้นดินอ่อน ซึ่งเสาเข็มดินซีเมนต์ทำหน้าที่คล้ายกับเข็มกลุ่มรองรับน้ำหนักของโครงสร้าง สำหรับงานถนน Cement Column จะช่วยลดการทรุดตัวของคันทาง โดยการแทนที่ดินอ่อนฐานรากด้วยวัสดุที่แข็งแรงกว่า ซึ่งสามารถต้านทานการยุบตัวได้มากปริมาณการทรุดตัวยังคงเกิดจากการหดตัวของ Cement Column และชั้นดินที่อยู่ใต้ Cement Column แต่จะมีปริมาณเหลือน้อยและสิ้นสุดไม่นานหลังการก่อสร้าง สามารถเลือกใช้ในรูปแบบต่างๆ กันขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงาน เช่น เป็นแถว เป็นกลุ่ม เป็น Block ในลักษณะการทับซ้อนกันของ Column เป็นต้น โดยได้เสนอวิธีการคำนวณออกแบบดังนี้

1. ลักษณะการรับแรงในแนวตั้งของเสาเข็มดินซีเมนต์

1.1 Ultimate Bearing Capacity of Single Deep Mixing Pile

กำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยว (Single Pile) แต่ละต้นจะขึ้นอยู่กับทั้งค่าของกำลังรับแรงเฉือนของดินอ่อนรอบเสาเข็ม (Soil Failure) หรือค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุเสาเข็ม (Pile Failure) ซึ่งในช่วงแรก รูปแบบของการพิบัติจะขึ้นอยู่กับทั้งค่าแรงเสียดทานที่ผิวตามพื้นที่สัมผัสของเสาเข็ม (Skin Friction Resistance) และแรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม ขณะที่หลังจากนั้น การพิบัติจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุของเสาเข็ม

1.1.1 Soil Failure

ในช่วงระยะแรก (Short-Term) กำลังแบกทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยวนั้นในชั้นดินเหนียวอ่อนที่การบีบอัดแบบ Soil Failure สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่างคือ

$$Q_{ult, soil} = (\pi d H_{col} + 2.25 \pi d^2) C_u \quad (14)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเสาเข็มดินซีเมนต์, H_{col} คือ ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์และ C_u คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนรอบๆเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งหาได้จากการทดสอบในสนาม เช่น Fall Cone หรือ Vane Shear Test โดยจะสมมติว่า ค่าแรงต้านที่ผิวของเสาเข็ม (Skin Resistance) มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Undrained Shear Strength) และแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (Point Resistance) ก็มีลักษณะเดียวกันคือมีค่าเท่ากับ $9C_u$ จากการก่อสร้างเสาเข็มแบบตอก (Driver Pile) พบว่า ค่าแรงเสียดทานที่ผิวด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวนั้นจะมีค่าเท่ากับค่าของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนรอบๆเสาเข็ม เมื่อ C_u มีค่าน้อยกว่า 30 kPa แต่ถ้าค่า C_u , Undrained Shear Strength มีค่าเกินกว่า 30 kPa กำลังรับแรงเฉือนจะต้องถูกลดทอนลง เช่นอาจมีค่าเท่ากับ $0.5C_u$ เพื่อใช้คำนวณหาค่าของ Skin Resistance ของเสาเข็ม เป็นต้น กำลังรับแรงที่ปลายของเสาเข็มในแบบเข็มลอย (Floating Pile) ที่ไม่ได้ทะลุเข้าไปในชั้นดินแข็ง โดยปกติแล้วจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม โดยค่ากำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็มจะมีค่าสูง ก็ต่อเมื่อเสาเข็มนั้นทะลุผ่านเข้าไปในชั้นดินแข็งด้านล่าง ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นดินที่มีกำลังแบกทานที่สูง โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อมีแรงมากระทำ แรงก็จะส่งผ่านไปยังชั้นดินแข็งด้านล่างของปลายเสาเข็มโดยตรง อย่างไรก็ตาม กำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็มจะต้องมีค่าไม่เกินค่า Compressive Strength ของเสาเข็มดินซีเมนต์

1.1.2 Pile Failure

สำหรับกรณีที่เมื่อกำลังแบกทานของเสาเข็ม (Bearing Capacity) ขึ้นอยู่กับการพิบัติของเสาเข็ม (Pile Failure) พฤติกรรมของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกพิจารณาเหมือนกับว่าเป็นดินเหนียวแข็ง (Stiff Fissured Clay) จากการสังเกตการทดสอบ Load Test บนเสาเข็มเดี่ยวที่ใช้กับงานขุด (Excavated Pile) บ่งชี้ได้ว่าการพิบัติจะเกิดขึ้นตามระนาบรอยต่อ (Joint Planes) ของเสาเข็มดินซีเมนต์และกำลังรับแรงเฉือนตามจุดต่อ (Joints) หรือรอยแยก (Fissures) จะขึ้นอยู่กับค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) มากกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์สามารถหาได้จากการทดสอบ Fall-Cone หรือ Van Shear Tests โดยจะมีค่าเป็น 2 หรือ 4 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนตรงจุดต่อ (Joints) ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบ Unconfined Compression Test โดยแสดงในภาพที่ 36 ในช่วงระยะแรก (Short-Term) กำลังแบกทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์โดยการพิบัติที่เสาเข็ม (Column Failure) ที่ความลึก z สามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ของ Mohr-Coulomb ตามสมการดังนี้

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2C \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad (15)$$

กำหนดให้ Cement Column $\phi = 30^\circ$, $\sigma_1 = \sigma_v$, $\sigma_3 = \sigma_h$

$$\text{ดังนั้น} \quad \sigma_1 = 3.5C_{col} + 3\sigma_h \quad (16)$$

$$Q_{ult, soil} = A_{col} (3.5C_{col} + 3.5\sigma_h) \quad (17)$$

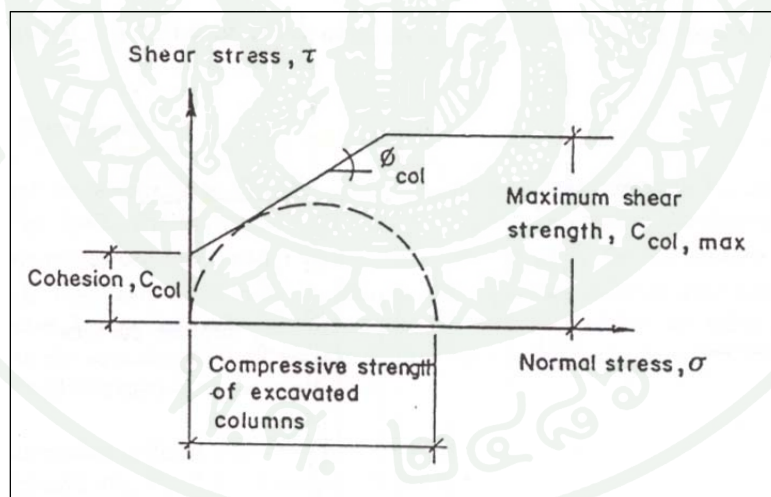
เมื่อ C_{col} คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Cohesion) ของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์ และ σ_h คือ ค่าแรงดันดินด้านข้าง (Total Lateral Pressure) ที่กระทำกับเสาเข็มดินซีเมนต์ในตำแหน่งที่วิกฤติที่สุด โดยจะสมมติให้ค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction) ของดินซีเมนต์เท่า 30° ซึ่งจะได้ค่าตัวคูณเท่ากับ 3 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง K_p (Coefficient of Passive Pressure) ที่ $\phi_{u, col} = 30^\circ$ โดยสมมติให้ $\sigma_h = \sigma_v + 5C_u$ เมื่อ σ_v คือ ค่าแรงดันดินตามความลึกของชั้นดิน (Overburden Pressure) และค่า C_u คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ของดินรอบๆ เสาเข็มดินซีเมนต์ โดยจะมีเฉพาะค่าของ Overburden Pressure เท่านั้นที่ใช้สำหรับการออกแบบ เนื่องจากการเคลื่อนตัวด้านข้างโดยส่วนใหญ่ เกิดจากแรงดันดินด้านข้างในแบบ Passive Earth Pressure, K_p

ในช่วงระยะยาว (Long-Term) กำลังแบกทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์จะลดลงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับช่วงระยะแรก (Short-Term) เนื่องจากการเกิด Creep กำลังรับแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เกิดการ Creep, $Q_{\text{creep, col}}$ จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 65% ถึง 85% ของค่า $Q_{\text{ult, col}}$ ดังสมการคือ

$$Q_{\text{ult, creep, col}} = (0.65 \text{ to } 0.80) Q_{\text{ult, col}} \quad (18)$$

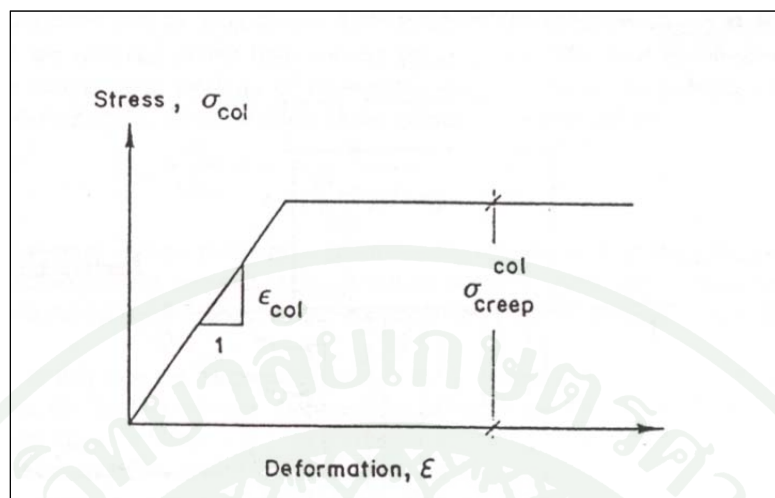
เมื่อ $Q_{\text{ult, creep, col}}$ = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ Column เมื่อเกิดการ Creep

โดยค่าแรงกระทำและการเคลื่อนตัวจะมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในภาพที่ 37 ซึ่งปกติจะใช้คำนวณการกระจายตัวของแรงกระทำ โดยสมมุติว่าค่า Load-Deformation มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงไปถึงช่วงการเกิด Creep กล่าวคือ ค่า $Q_{\text{creep, col}}$ ของเสาเข็มดินซีเมนต์ และความชันของกราฟจะสอดคล้องกับค่า Compression Modulus ของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์ เมื่อกำลังที่จุด Creep มีค่าสูงมากๆ ค่าแรงที่กระทำในเสาเข็มจะสมมุติว่ามีค่าคงที่



ภาพที่ 36 สมมติฐานของลักษณะการบีบตัวของ Cement Stabilized Soil

ที่มา: Broms (1984)



ภาพที่ 37 สมมติฐานของสัมพันธ์ Stress-Strain ของ Pile Stabilized Soil

ที่มา: Broms (1984)

1.2 Ultimate Bearing Capacity of Soil–Cement Column Groups

กำลังแบกทานสูงสุดของเสาเข็มแบบกลุ่ม (Group Piles) จะขึ้นอยู่กับทั้งค่าของกำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และค่าของกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์ รูปแบบของการพังทลายสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งการพังทลายในแบบกล่อ่ง (Block Failure) ที่มีเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ภายใน (ภาพที่ 38) หรือพังทลายในลักษณะ Local Shear Failure (ภาพที่ 39) เมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าสูง ในบางกรณีการต้านทานแรงเฉือนตามผิวสัมผัส (Failure Surface) อาจถูกตัดผ่านเข้าไปในพื้นที่ของ Block ที่สมมติขึ้น โดยกำลังแบกทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่มที่การพังทลายแบบ Block Failure เป็นดังสมการด้านล่างคือ

$$Q_{ult, group} = 2C_u H(B + L) + (6 \text{ to } 9)C_u BL \quad (19)$$

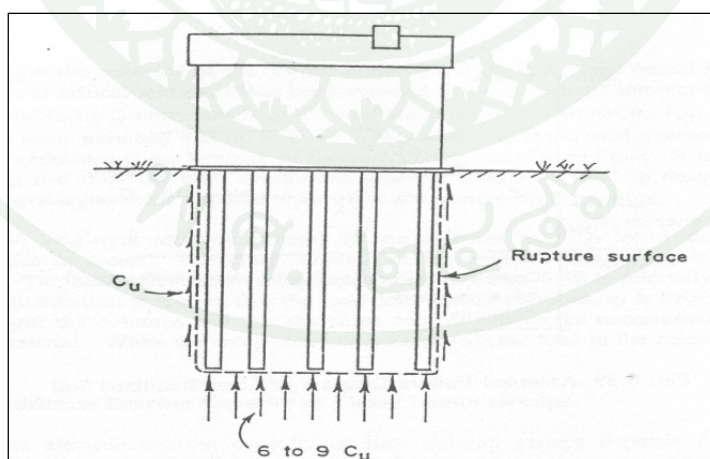
เมื่อ B , L , และ H คือ ความกว้าง, ความยาวและความลึกของเสาเข็มกลุ่มตามลำดับ ค่าตัวคูณเท่ากับ 6 สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อความยาวของฐานรากยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง ($L \gg B$) และค่าตัวคูณเท่ากับ 9 สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีข้อแนะนำว่า แรงต้านทานที่ปลายฐานรากเสาเข็ม (End Bearing Resistance) จะไม่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบ

เนื่องจากการเคลื่อนตัวจะต้องมีค่ามากถึงประมาณ 5%–10% ของความกว้างของพื้นที่แรงกระทำ เพื่อให้เกิดค่าความต้านทานที่ปลายเสาเข็มสูงสุดเกิดขึ้น

กำลังแบกทานสูงสุดจะพิจารณาถึงในส่วนการบีบอัดแบบ Local Shear Failure ตามมุมหรือขอบของ Block เสาเข็มดินซีเมนต์ที่สมมติขึ้นด้วย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนของดินตามการวิเคราะห์การบีบอัดในแบบวงกลม (Circular Failure Surface) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 39 ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนนั้น สามารถคำนวณได้เหมือนกับการคำนวณเสถียรภาพความลาดชันของดิน (Slope Stability) แบบปกติ โดยกำลังแบกทานสูงสุดที่พิจารณาจาก Local Shear Failure สามารถประมาณได้จากสมการดังนี้คือ

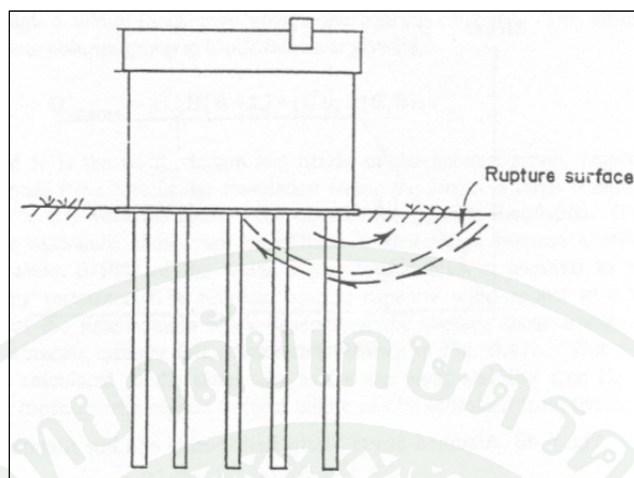
$$q_{ult} = 5.5C_{av}(1 + 0.2\frac{b}{l}) \quad (20)$$

เมื่อ b และ l คือ ความกว้างและความยาวของพื้นที่แรงกระทำ (Locally Loaded Area) ตามลำดับและค่า C_{av} คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยตามแนวการบีบอัดที่สมมติขึ้น ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Column Area), a , ($b \times l$) และค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) จะต้องมีค่าน้อยเท่ากับ 2.5 ซึ่งเป็นค่าที่เสนอให้ใช้ในการคำนวณออกแบบ



ภาพที่ 38 การบีบอัดแบบ Block Failure ของ Cement Pile Foundation

ที่มา: Broms (1984)



ภาพที่ 39 การพินดีแบบ Local Shear Failure ของ Cement Pile Foundation

ที่มา: Broms (1984)

2. การทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

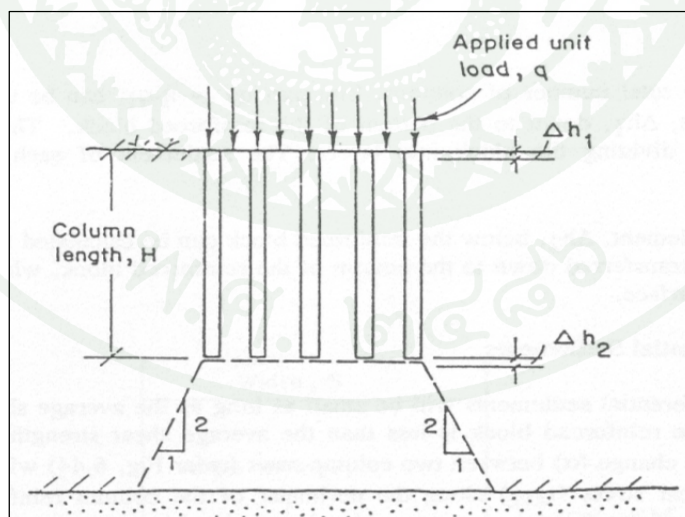
การทรุดตัวทั้งหมดของโครงสร้างหรืออาคารที่ก่อสร้างอยู่บนเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถที่จะคำนวณได้จากตัวอย่างในภาพที่ 40 การทรุดตัวสูงสุดที่ได้จะเท่ากับผลรวมของ Local Settlement ของพื้นที่ที่ถูกเสริมความแข็งแรงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (Reinforced Block, (Δk_1)) และ Local Settlement ของดินที่ไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพได้พื้นที่ Block ของเสาเข็ม, (Δk_2) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 กรณีที่จะต้องคำนึงถึงสำหรับการวิเคราะห์คือ ในกรณีที่หนึ่ง (Case A) เมื่อแรงที่กระทำมีค่าค่อนข้างต่ำและแรงที่เกิดขึ้นภายในเสาเข็มดินซีเมนต์ ไม่ทำให้เกิดการ Creep และในกรณีที่สอง (Case B) เมื่อแรงกระทำมีค่าค่อนข้างมากและแรงกระทำภายในเสาเข็มทำให้เกิด Creep (Creep Limit) ขึ้น

การศึกษาในอดีตอธิบายได้ว่า เสาเข็มดินซีเมนต์และดินระหว่างเสาเข็มจะมีการทรุดตัวที่น้อยมากและตัวเสาเข็มดินซีเมนต์เองจะมีลักษณะการทรุดตัวที่สอดคล้องกับการทรุดตัวของดิน โดยรอบเสาเข็มมากกว่า อย่างไรก็ตามจากรายงานการศึกษาพบว่า การทรุดตัวในแนวตั้งของดินรอบๆเสาเข็มตลอดความลึกถึงผิวดินจะมีค่าค่อนข้างสูงกว่าการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Axial Deformation) เล็กน้อย ซึ่งมีความแตกต่างกันมากที่สุดเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ของการทรุดตัว

ทั้งหมดที่เกิดขึ้น แม้ว่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มจะมีค่าเท่ากับ 3–4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (1.5–2 เมตร) เมื่อการทรุดตัวของเสาเข็มมีความสอดคล้องกับการทรุดตัวของดินรอบๆ การกระจายของแรง (Load Distribution) ก็จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของค่า Stiffness ของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบเสาเข็ม ตรงที่ค่า Axial Stress ในเสาเข็ม (σ_{col}) ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่า Creep Limit ของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์ ($\sigma_{col, creep}$) โดยการกระจายของแรงจะขึ้นอยู่กับค่า Compression Modulus ของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์และดินรอบเสาเข็ม จากความสัมพันธ์ของการทรุดตัวและ Axial Stress ในเสาเข็มจะได้สมการดังนี้คือ

$$\sigma_{col} = \frac{Q_{col}}{A_{col}} = \frac{q}{\alpha + \left(\frac{M_{soil}}{M_{col}} \right) (1 - \alpha)} \quad (21)$$

เมื่อ q คือ ค่าเฉลี่ยของ Contact Pressure, α คือ ค่าความสัมพันธ์ของพื้นที่เสาเข็ม (NA_{col} / BL) ซึ่งก็คืออัตราส่วนของพื้นที่เสาเข็ม (NA_{col}) ต่อพื้นที่ของทั้งหมดที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ (BL), M_{soil} และ M_{col} คือ ค่า Compression Modulus ของดินรอบเสาเข็มและวัสดุเสาเข็ม ตามลำดับ



ภาพที่ 40 การคำนวณการทรุดตัวเมื่อ Creep Strength ของ Cement Pile ยังไม่เกินกำหนด

ที่มา: Broms (1984)

2.1 แรงกระทำน้อยกว่า Creep Limit

ในกรณีนี้ ความสัมพันธ์ของค่า Stiffness ของเสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกพิจารณา ร่วมกับดินรอบๆเสาเข็มด้วย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การกระจายของแรงที่เข้าไประหว่างเสาเข็มและดิน โดยรอบ ความสัมพันธ์ของค่า M_{col} จะเท่ากับ 50 ถึง 100 เท่าของค่า C_{col} ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้ในการประมาณการทรุดตัว เมื่อ M_{col} คือค่า Compression Modulus และ C_{col} คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ของวัสดุเสาเข็มดินซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การประเมินค่า M_{col} สามารถหาได้จากการทดสอบ Oedometer Tests ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าโมดูลัสจะอยู่ที่ประมาณ 15 ถึง 25 MPa แต่สำหรับการคำนวณอย่างคร่าวๆ ค่าโมดูลัสที่ 20 MPa ถือเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะใช้คำนวณ ค่าเฉลี่ยของ Axial Stress ในเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับค่า Compression Modulus ($M = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$) ของดินเหนียวที่อยู่รอบๆเสาเข็ม เมื่อดินเหนียวอยู่ไม่เกินช่วง Overconsolidated และ Preconsolidation Pressure ค่า Compression Modulus จะสามารถประเมินได้จากความสัมพันธ์ (Empirical Relationship) $M_{soil} = 250C_u$ เมื่อ C_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ของดินเหนียวรอบๆเสาเข็ม ซึ่งหาได้โดยการทดสอบ Field Vane Tests แต่เมื่อดินเหนียวอยู่ในช่วง Normally Consolidated หรือ Slightly Overconsolidated การหาค่า Compression Modulus จะต้องประมาณมาจากการทดสอบ Oedometer Tests แต่สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ความสัมพันธ์ (Empirical Relationship) ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของข้อมูล (Back-Analyzed Data) พบว่าค่า Compression Modulus ของดินเหนียวมีค่าประมาณ $M_{soil} = 150C_u$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัว

การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ, q เกิดขึ้นได้จากโครงสร้างด้านบนหรือเกิดจากน้ำหนักดินถมซึ่งส่วนหนึ่งถ่ายลงไปสู่เสาเข็มดินซีเมนต์, (q_1) และอีกส่วนหนึ่งจะถ่ายลงไปสู่ดินรอบๆเสาเข็ม, (q_2) โดยการทรุดตัวของทั้งสองวัสดุ (Relative Displacement) จะสอดคล้องกัน ซึ่งจะให้ความสัมพันธ์ตามสมการด้านล่างคือ

$$\frac{q_1(BL)}{NA_{col}(M_{col})} = \frac{q_2(BL)}{(BL - NA_{col})(M_{soil})} \quad (22)$$

ซึ่งลดรูปได้เป็น

$$\frac{q_1}{aM_{col}} = \frac{q_2}{(1-a)M_{soil}} \quad (23)$$

ค่า Local Settlement, Δh (ภาพที่ 40) สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง คือ

$$\Delta h_1 = \frac{qH}{aM_{col} + (1-a)M_{soil}} \quad (24)$$

การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ, q จะถูกสมมติว่ามีประมาณคงที่ (Constant) ตลอดความสูงของ พื้นที่เสาเข็ม (Block) และแรงกระทำที่เกิดขึ้นจะไม่ลดลงตามเส้นรอบรูป (Perimeter) ของความเค้นเฉือน ซึ่งเป็นสมมติฐานที่ปลอดภัยในการออกแบบที่สุด

ค่าของ Local Settlement, Δh_2 ของดินเหนียวที่อยู่ใต้พื้นที่เสาเข็มดินซีเมนต์ (Block) สามารถที่จะคำนวณได้เหมือนกับการคำนวณการทรุดตัวตามปกติทั่วไป การเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก (Stress) ที่ตำแหน่งต่างๆใต้เสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถประมาณได้โดยวิธี 2:1 (2:1 Method) ซึ่งแสดงในภาพที่ 40 ค่าอัตราส่วนการลดทอนการทรุดตัว, (β) เป็นอัตราส่วนของการทรุดตัวทั้งหมดใต้พื้นที่ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (Reinforced Block) แบบมีเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อแบบที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งสามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ คือ

$$\beta = \frac{M_{soil}}{aM_{col} + (1-a)M_{soil}} \quad (25)$$

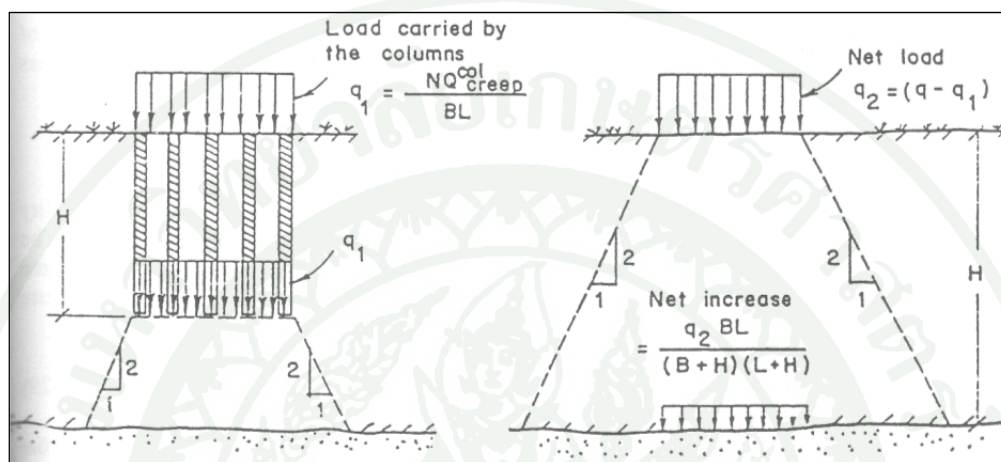
2.2 แรงกระทำมากกว่า Creep Limit

ในกรณีนี้แรงที่กระทำจะมีค่าสูง ดังนั้น หน่วยแรงในวัสดุเสาเข็มจะมีลักษณะอยู่ในช่วง Creep Limit ซึ่งการทรุดตัว, Δh_1 สามารถคำนวณได้ดังแสดงในภาพที่ 41 แรงที่กระทำจะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่หนึ่ง, q_1 ซึ่งจะเกิดขึ้นที่เสาเข็ม และส่วนที่สอง, q_2 จะเกิดขึ้นกับดินเหนียวรอบๆเสาเข็ม โดยสมมติฐานจะเป็นเช่นเดียวกับกรณีแรก แต่ในส่วนของ q_1 การวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับค่า Creep Load ของเสาเข็มซึ่งจะได้เป็น

$$q_1 = \frac{NQ_{creep,col}}{BL} \quad (26)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเสาเข็มทั้งหมด ในส่วนของ q_2 , ($q_2 = q - q_1$) สามารถใช้วิธีการนี้คำนวณค่า Local Settlement, Δh_1 ของ q_1 ที่อยู่ในส่วนบนถึงล่างของ Reinforced Block ได้

เช่นกัน ซึ่งการทรุดตัวจากส่วนที่สองนี้ สามารถคำนวณได้โดยแบ่ง Block ออกเป็นชั้นๆ ซึ่งการทรุดตัวในแต่ละชั้นจะคำนวณแยกจากกัน การทรุดตัว Δh_2 ได้พื้นที่ Reinforced Block คำนวณได้จากสมมติฐานที่ว่า แรงกระทำ q_1 จะส่งผ่านลงมายังส่วนล่างสุดของตัว Reinforced Block ขณะที่แรงกระทำ q_2 ก็จะกระทำที่ตำแหน่งของผิวดินดังแสดงในภาพที่ 41



(a) Load carried by the cement piles

(b) Load carried by the unstabilized clay between piles

ภาพที่ 41 การคำนวณการทรุดตัวเมื่อ Creep Strength ของ Cement Pile ยังเกินกำหนด

ที่มา: Broms (1984)

2.3 อัตราการทรุดตัวของเสาเข็ม

Broms (1984) ได้แนะนำวิธีการประมาณค่ากำลัง (Strength) และการทรุดตัวทั้งหมด (Total Settlement) ของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว (Lime-Treated) และ Alamgir et al. (1996) ได้แนะนำวิธีการของการประมาณค่าการทรุดตัวแบบอีลาสติก (Elastic Settlement) ของชั้นดินที่เสริมกำลังโดยการเพิ่มเสาเสริมเสาเข็มชนิดต่างๆ ซึ่งยังไม่มีวิธีการใดที่พัฒนาไปถึงการประมาณการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็ม นั่นก็คือ การทรุดตัวตามระยะเวลานี้เนื่องจากการปรับปรุงฐานรากด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จึงได้มีความพยายามใช้การคำนวณจากเทคนิค Sand Drain โดย Barron (1948) และเทคนิค PVD (Prefabricated Vertical Drain) ที่พัฒนาโดย Hansbo (1979) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์

ในกรณีของ Radial Drainage วิธีการคำนวณของ Barron (1948) จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขในอุดมคติ คือ ไม่มี Smear Zone และไม่มี Well Resistance ซึ่งจะเป็นดังสมการข้างล่างคือ

$$U_h = 1 - \exp \left[\frac{-8T_h}{F(n)} \right] \quad (27)$$

เมื่อ T_h มีค่าดังสมการด้านล่างคือ

$$T_h = \frac{C_h t}{D_e^2} \quad (28)$$

U_h	=	Degree of Consolidation ซึ่งพิจารณาถึง Radial Flow
C_h	=	สัมประสิทธิ์การทรุดตัวในแนวราบ ($k_h / m_v \rho_w g$)
t	=	ระยะเวลาของการทรุดตัว
D_e	=	เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของ Unit Cell
n	=	D_e/d_p (d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม)

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (29)$$

อัตราการทรุดตัวจะเป็นฟังก์ชันกับการไหลซึมของน้ำผ่านดินซีเมนต์ที่อยู่ในแนวราบ, k_h และค่า Compressibility ของดินในแนวดิ่ง, m_v โดยค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำสามารถหาได้จากค่าแรงดันน้ำที่ได้จากการทดสอบ Triaxial Test (Tortensson, 1975) ที่สามารถวัดการไหลของน้ำแบบ Radial Drainage ได้ ซึ่งโดยปกติแล้วดินเหนียวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวนอน, C_h เท่ากับ 1 ถึง 1.5 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวดิ่ง, C_v ที่ได้จากการทดสอบ Conventional Oedometer Test

Hansbo (1989) ได้ปรับปรุงสมการที่ได้มาจากการพัฒนาของ Barron (1948) เพื่อใช้วิเคราะห์อัตราการอัดตัวคายน้ำโดยวิธีการปรับปรุงคุณภาพด้วย PVD (Prefabricated Drain) ซึ่งจะปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของ Degree of Consolidation ตามสมการด้านล่างคือ

$$U_h = 1 - \exp \left[\frac{-8T_h}{F} \right] \quad (30)$$

เมื่อ T_h มีค่าดังสมการด้านล่างคือ

$$T_h = \frac{C_h t}{D_e^2} \quad (31)$$

และ
$$F = F(n) + F_s + F_r \quad (32)$$

$$F(n) = \text{Drain spacing Effect} = \ln \frac{D_e}{d_p} - 0.75 \quad (33)$$

$$F_s = \text{Smear Effect} = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{d_s}{d_p} \quad (34)$$

$$F_r = \text{Well Resistance effect} = \frac{2}{3} \pi H_{col}^2 \frac{k_h}{q_w} \quad (35)$$

$$q_w = k_{col} \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \quad (36)$$

K_h = The Radial Permeability of Surrounding Soil

q_w = The Discharge Capacity of the Pile

k_{col} = Permeability of the Cement Pile Material

D_e = The Equivalent Diameter of the Unit Cell, $D_e = 1.03S$ หรือ

1.13S ซึ่งหมายถึงลักษณะการวางตำแหน่งแบบสามเหลี่ยม (Triangular Pattern) และสี่เหลี่ยม (Square Pattern) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ ตามลำดับ (Hansbo, 1979) S คือตำแหน่งศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (Center to Center) และ d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

ค่า Degree of Consolidation ของดินที่อยู่ใต้พื้นที่ที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (Treated Zone) หาได้จากการคำนวณตามสมการดังนี้คือ

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \quad (37)$$

เมื่อ

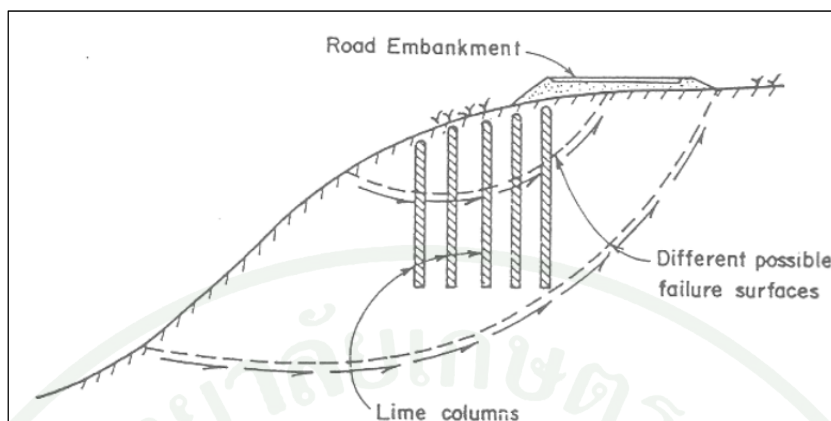
U_v = Degree of Radial Consolidation ซึ่งคำนวณได้จาก Terzaght's Theory

U_h = Degree of Radial Consolidation ซึ่งใช้การคำนวณจาก Hansbo's Theory

3. ลักษณะการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์

เสาเข็มดินซีเมนต์ที่อยู่ใต้ลาดดิน (Embankment) (ภาพที่ 42) อาจเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างได้โดยแรงดันดินด้านข้างที่มีค่าสูง แต่อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนที่ของดินอ่อนและเสาเข็มดินซีเมนต์ใต้ลาดดินนี้ มักจะมีค่าที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งการเคลื่อนตัวด้านข้างที่มากก็อาจจะสามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน โดยอาจเกิดจากเสถียรภาพของลาดดินมีค่าที่ต่ำและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Global Factor of Safety) มีค่าน้อยกว่า 1.5 ซึ่งการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มอาจจะมีมากถึง 0.5 เมตร จากตำแหน่งของลาดดินหรือบ่อดินเดิม (Slope or Deep Excavation) (Broms, 1972)

Miyake et al. (1991a, b) พบว่า ผลจากการทดสอบ Centrifuge Test ค่ากำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) และกำลังรับแรงดันด้านข้าง (Lateral Resistance) ของเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีค่าลดลง ซึ่งการลดลงนี้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความเครียดที่จุดพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นหลัก



ภาพที่ 42 การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

ที่มา: Broms (1984)

3.1 ลักษณะการพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยว (Single Pile)

Kitazume et al. (1996b) ได้ทำการทดสอบโดยวิธี Centrifuge Test เพื่อหารูปแบบของการพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Failure Mechanisms) โดยเสาเข็มจะเกิดการพิบัติแบบคันต่อนั้นเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ซึ่งค่าแรงกระทำทางด้านข้างนี้จะอยู่ที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ Miyake et al. (1991a, b) ได้ทำการศึกษาในเรื่องนี้และได้ผลเช่นเดียวกัน กล่าวคือ เสาเข็มที่อยู่ในตำแหน่งท้ายของลาดดินจะมีค่าหน่วยแรงกระทำในแนวตั้งที่ต่ำ ซึ่งทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการพิบัติแบบการคดขึ้นมา (Bending Failure)

เสาเข็มดินซีเมนต์ที่อยู่ได้คันดินถมจะเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง เนื่องจากแรงดันด้านข้างของน้ำหนักดินถม ซึ่งการเคลื่อนที่นี้สามารถเกิดได้ทั้งในตำแหน่งใต้หรือด้านนอกของลาดดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเสถียรภาพของลาดดินมีค่าต่ำและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) มีค่าน้อยกว่า 1.5

การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์จะทำให้ค่าการต้านแรงเฉือนรวมถึงค่ากำลังแบกทานของเสาเข็มลดลง เมื่อกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มมีค่าสูงและความเครียดที่จุดพิบัติมีค่าต่ำ Miyake et al (1991) ได้ทำการทดสอบ Centrifuge Test และพบว่าค่ากำลังรับแรงแบก

ทานและแรงต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์จะลดลงเมื่อเกิดการเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยกำลังรับแรงแบกทานจะลดลงโดยการพิบัติในรูปแบบ Progressive Failure ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเสาเข็มที่อยู่ใกล้กับปลายของลาดดิน โดยกำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม

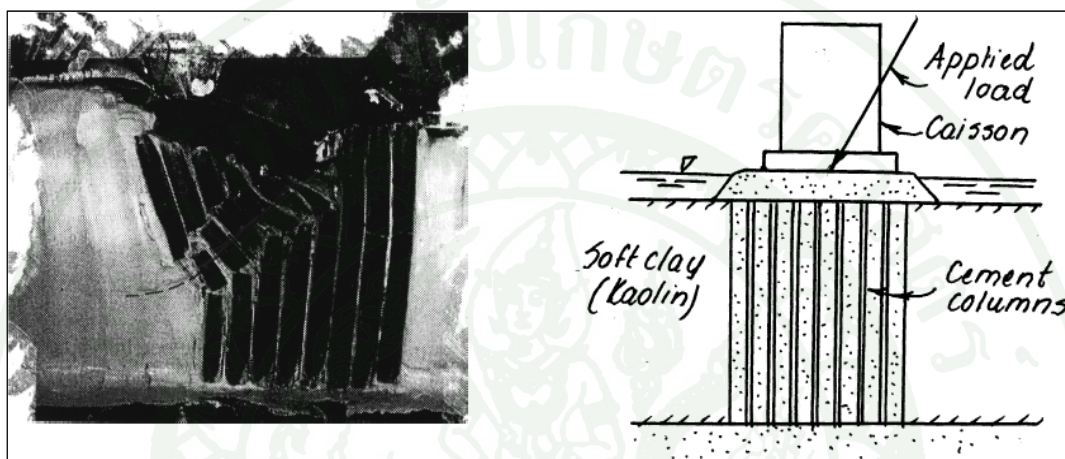
ขนาดของการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาเข็มที่ได้จากการศึกษาโดย Hirai et al (1996) พบว่ามีขนาดประมาณ 400 ถึง 500 มิลลิเมตร เมื่อทำการขุดลงไปในระยะความลึก 0.8L โดยที่ L คือ ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งคาดว่า การเคลื่อนตัวนี้สามารถลดลงได้ประมาณ 65 – 85 % เมื่อขุดดินที่อยู่เหนือเสาเข็มดินออกไป

Kakihara et al. (1996) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงการเคลื่อนที่ของเสาเข็มดินซีเมนต์ระหว่างการก่อสร้างด้วยวิธี Wet Method และ Dry Method ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาเข็มจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนเสาเข็มเพิ่มขึ้น ในวิธีการก่อสร้างแบบ Dry Method จะเคลื่อนตัวได้มากที่สุดประมาณ 40 มิลลิเมตร ที่ความลึก 3 เมตรจากเสาเข็ม โดยที่เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร, ความยาวเสาเข็มเท่ากับ 27.3 เมตร และอัตราส่วน Area Ratio เท่ากับ 0.785 ในลักษณะเสาเข็มแบบแถว การเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการขุดลงไปที่มีความลึก 1.5L ในส่วนวิธีการก่อสร้างแบบ Wet Method จะเกิดการเคลื่อนตัวได้มากที่สุดประมาณ 400 มิลลิเมตร

Miyake et al. (1991) ได้มีการศึกษาถึงแรงต้านทานการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาเข็มแบบเดี่ยวไว้ว่า เสาเข็มในตำแหน่งท้ายของลาดดินจะเกิดการพิบัติโดยสาเหตุจากการดัด (Bending Failure) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม ซึ่งจากการวิเคราะห์กลับ (Back-Calculated) พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์มีค่าต่ำมาก โดยมีสาเหตุมาจากเสาเข็มเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเกินไป ในระหว่างรับน้ำหนักบรรทุกทุกและดินซีเมนต์เองก็มีกำลังรับแรงดิ่งที่ต่ำ ค่ากำลังรับแรงดัดของเสาเข็มจะมีค่าต่ำ เมื่ออยู่ในตำแหน่งท้ายลาดดิน เนื่องจากแรงแนวตั้งที่กระทำภายในเสาเข็มนั้นมีค่าต่ำ

เช่นเดียวกัน Kitazume et al. (1996b) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้และสรุปว่า เสาเข็มดินซีเมนต์จะเกิดการพิบัติโดยการดัด ซึ่งทดสอบโดยวิธี Centrifuge Test ดังแสดงในภาพที่ 43 เพื่อศึกษาถึงรูปแบบการพิบัติของเสาเข็มแบบกลุ่ม (Column Group) และมีค่าอัตราส่วนของพื้นที่เสาเข็มดินซีเมนต์ต่อพื้นที่ทั้งหมด (Area Ratio) เท่ากับ 0.56 และ 0.79 โดยพฤติกรรมของเสาเข็ม

ดินซีเมนต์ ที่มีค่า Unconfined Compressive Strength 213 -750 kPa จะเกิดการแตก ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเสาเข็มจะเกิดการพิบัติแบบต้นตอตันและเป็นการพิบัติแบบ Progressive จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์เกิดขึ้นเพียง 10 % เท่านั้น ซึ่งกำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มจะถึงค่าสูงสุด เมื่อแรง Axial Load ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มมีค่าเป็น 75 % ของกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) ที่รับได้



ภาพที่ 43 การทดสอบ Centrifuge Tests ของดินเข็มซีเมนต์

ที่มา: Kitazume (1999)

ความแตกต่างของลักษณะการพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยว จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแนวการพิบัติที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 44 สำหรับแนวการพิบัติในระดับต้น ดินเหนียวจะเกิดการไหลผ่านเสาเข็มที่แข็ง ดังแสดงในภาพที่ 44a ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็มจะมีความสำคัญต่อการต้านแรงคั่นดินด้านข้างเป็นอย่างมาก กำลังต้านทานการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินอ่อนจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของดินกับเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งจะต้องมีการเคลื่อนที่เล็กน้อย (หน่วยมิลลิเมตร) เพื่อให้กำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มและดินเกิดขึ้นได้เต็มที่ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ที่ประมาณ 0.05d ถึง 0.10d

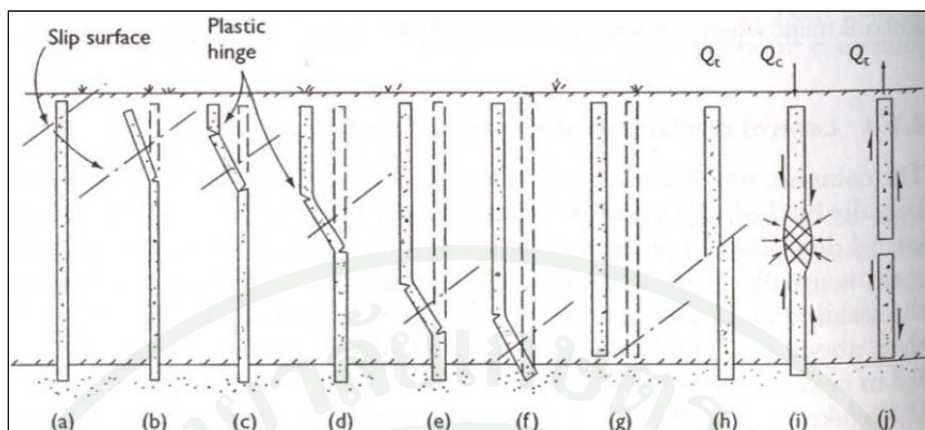
ลักษณะการพิบัติเมื่อแนวการเคลื่อนที่ของดินลึกขึ้นจะแสดงดังภาพที่ 43b การพิบัติในรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ มีการเกิด Plastic Hinge หนึ่งจุดในบริเวณที่มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม โดยแรงต้านโมเมนต์ดัดของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับปริมาณแรงแนวตั้ง (Axial Load) ภายใน

เสาเข็ม ซึ่งในกรณีนี้มีมากเกินไป โดยการพิบัตินี้เกิดมาจากสาเหตุที่เสาเข็มดินซีเมนต์เคลื่อนตัวมากเกินไป

การพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์อีกรูปแบบหนึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมี Plastic Hinge เกิดขึ้นสองจุดที่ตำแหน่งโมเมนต์ดัดสูงสุดในเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 44c, 44d, และ 44e เสาเข็มจะเกิดการพิบัติเมื่อ โมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานโมเมนต์ของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งการพิบัตินี้สามารถขยายเข้าไปในชั้นดินแน่นข้างล่างได้ ดังภาพที่ 44f โดยการพิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อ แนวการเคลื่อนตัวอยู่ในตำแหน่งใกล้กับส่วนปลายของเสาเข็ม เสาเข็มจะเคลื่อนที่โดยในกรณีนี้จะเคลื่อนผ่านชั้นดินอ่อน ซึ่งเสาเข็มจะทำตัวเป็นวัสดุแข็งแรง กำลังต้านทานแรงเฉือนจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินและแรงต้านการเฉือนของเสาเข็มจะต้องมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับในกรณีภาพ 44a

การพิบัติในดังภาพที่ 44h จะเกิดขึ้นเมื่อกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่สามารถต้านแรงเฉือนตามแนวการเคลื่อนตัวได้ ซึ่งแรงต้านทานในกรณีนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์โดยตรง

การพิบัติเนื่องการแรงอัดที่มากเกินไป (Compression Failure) ของเสาเข็มดินซีเมนต์แสดงดังภาพที่ 44i กำลังรับแรงแบกทานของตำแหน่งที่พิบัติจะขึ้นอยู่กับทั้งค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มตลอดจนถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินโดยรอบเสาเข็มด้วย, รวมถึงความลึกของเสาเข็มใต้ชั้นดิน, และน้ำหนักบรรทุกที่ส่งผ่านเข้ามาสู่ดิน เสาเข็มที่อยู่ในบริเวณของ Passive Zone แสดงดังภาพที่ 44j ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังรับแรงดึงของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Tensile Strength) ซึ่งมักจะมีค่าต่ำ



ภาพที่ 44 รูปแบบการพิบัติในลักษณะต่างๆของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยว

ที่มา: Kitazume et al. (1996)

3.2 ลักษณะการพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่ม (Group Pile)

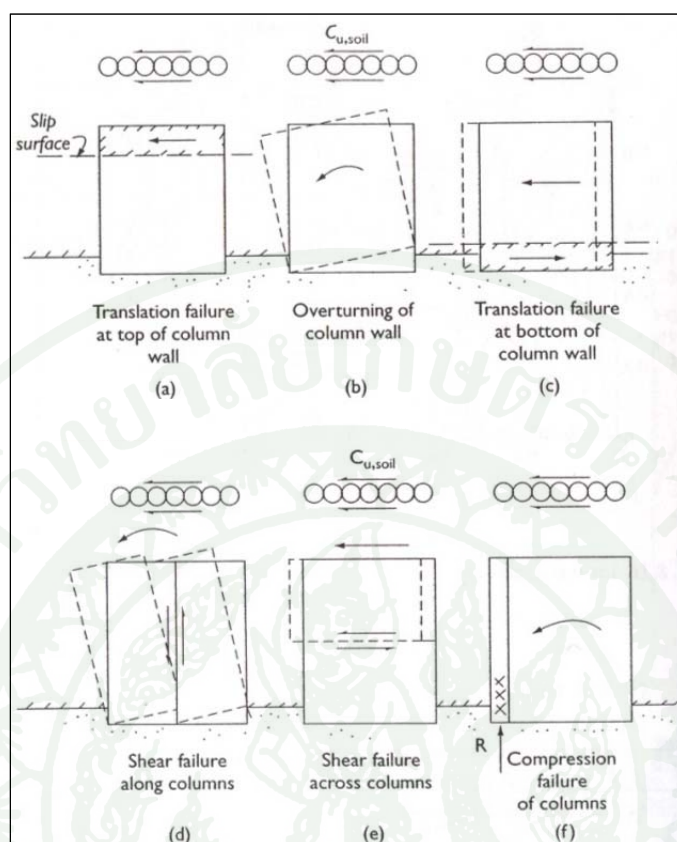
โดยทั่วไปแล้วการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกลุ่มหนึ่งแถวหรือสองแถว (Single or Double Row) ตามความยาวของลาดดินหรือตั้งฉากกับบ่อขุดหรือคันดินถม จะทำให้ประสิทธิภาพเสาเข็มนั้นเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพของเสาเข็มในแบบเดี่ยว ดังผลงานวิจัยของ Terashi และ Tanaka (1983), Kitazume และ Terashi (1991), และ Kitazume et al (1996b) อย่างไรก็ตาม เสาเข็มที่อยู่ในตำแหน่งของ Shear Zone จะถูกสมมติให้แนวการพิบัติจะมีผลกระทบจากการทรุดตัวและเสถียรภาพที่น้อยกว่าเสาเข็มที่อยู่ในตำแหน่ง Active Zone ได้คันดินถม

โดยปกติจะต้องให้เสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้นในเสาเข็มแบบกลุ่มนี้ ถูกฝังลึกลงไป ในชั้นดินที่มีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่สูง เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้นแนวการพิบัติเคลื่อนผ่านไปใต้เสาเข็ม การขบกันของเสาเข็ม (Overlap) ควรจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 50 มิลลิเมตร เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบกลุ่มนั้นมีค่าเท่ากับ 0.6 เมตร ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะสมมติว่าแนวการพิบัติที่เกิดขึ้นเป็นแบบวงกลมซึ่งผ่านเข้าไปในเสาเข็ม โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำของดินซีเมนต์จะถูกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

Bergado et al. (1996) ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพของคันดินถมทดสอบที่มีความสูง 5 เมตร โดยปรับปรุงเสถียรภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยวและแถวแบบวางตัวขนกัน (Single and Row Column) ซึ่งใช้วิธีการก่อสร้างเสาเข็มแบบแห้ง (Dry Method) ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 10 % โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าเป็น 20 เท่าของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิม จากการทดสอบในสนามพบว่าค่ากำลังรับแรงของดินซีเมนต์จะเป็นครึ่งหนึ่งของการทดสอบในแห้งปฏิบัติการ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 5 kPa ที่ผิวดินจนไปถึง 20 kPa ที่ความลึก 10 เมตร จากการทดสอบพบว่าค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและค่าการทรุดตัวเมื่อก่อสร้างด้วยเสาเข็มแบบกลุ่มแถว (Column Rows) จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเสาเข็มเดี่ยว ซึ่งเสาเข็มแบบกลุ่มแถวของพิบัติโดยการลื่นไถล (Sliding Failure)

Terashi et al. (1983b) ได้ใช้การทดสอบแบบ Centrifuge Test เพื่อทำการศึกษาค่าแรงต้านทานของดินที่อัดตัวอยู่ระหว่างกำแพงเสาเข็ม 2 กำแพงที่อยู่ชิดกัน ซึ่งพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินตลอดแนวของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์จะสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ของดินเดิมเหนือแนวการพิบัติ กล่าวคือค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนตามแนวเสาเข็มจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเกิดการเคลื่อนที่เล็กน้อย (หน่วยมิลลิเมตร) ซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างตลอดแนวเสาเข็ม (Shaft Resistance) ที่ติดตั้งลงไป

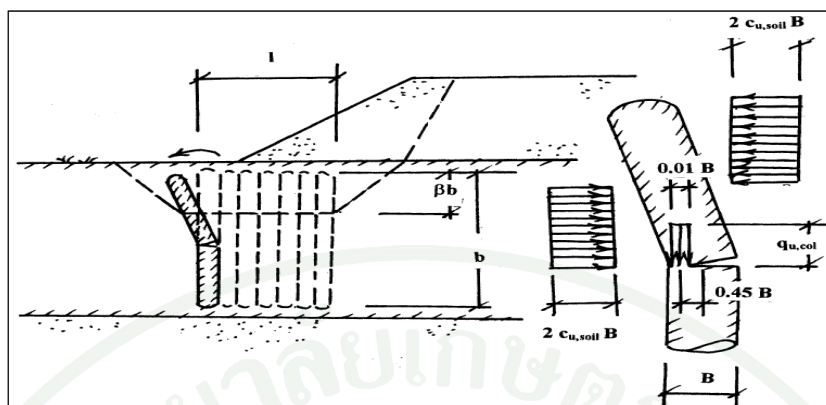
เสาเข็มดินซีเมนต์ที่อยู่ในตำแหน่งท้ายแถวหรือท้ายของกำแพงเสาเข็มจะได้รับแรงกระทำมากที่สุด เมื่อแถวหรือกำแพงของเสาเข็มนั้นเกิดการหมุนหรือเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ซึ่งความแตกต่างของลักษณะการพิบัติแสดงดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 รูปแบบการพิบัติในลักษณะ Soil Failure (a, b, และ c) และ Pile Failure (d, e, และ f) ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงเสาเข็ม

ที่มา: Kitazume et al. (1996b)

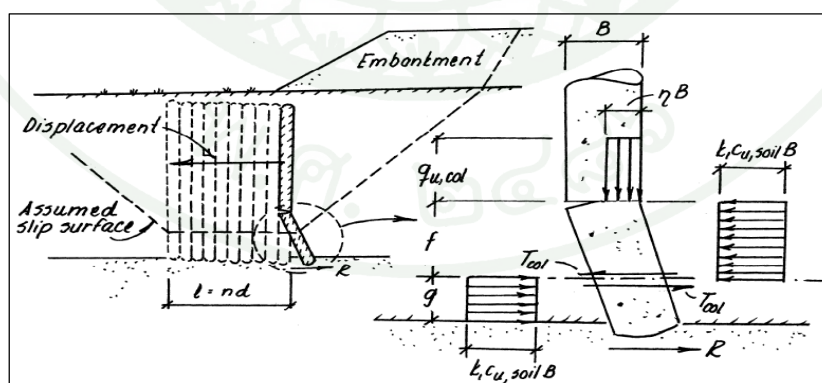
Terashi et al. (1983b) ได้ศึกษาโดย Centrifuge Test เพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่อัดกันอยู่ระหว่างกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อดินเกิดการเคลื่อนที่ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนตลอดแนวเสาเข็มเหนือแนวการพิบัติสมมติมีความสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน



ภาพที่ 46 การพืดของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องการแยกตัวออก (Separation)

ที่มา: Terashi et al. (1983b)

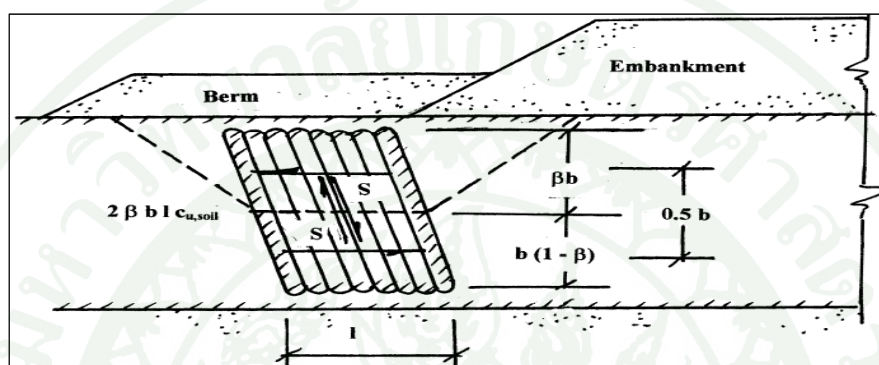
ซึ่งเกิดมาจากสาเหตุที่ เสาเข็มหักและแยกตัวออกจากกลุ่มเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 46 และ 47 ลักษณะการพืดนี้จะปรากฏขึ้นกับแถวเสาเข็มที่อยู่ในตำแหน่งของ Shear Zone โดยที่แนวการเคลื่อนพืดอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับส่วนบนหรือส่วนล่างของเสาเข็ม การหักและแยกตัวออกจากกลุ่มเสาเข็มมาจากสาเหตุที่ ค่ากำลังรับแรงดึงของเสาเข็มที่ขบกัน (Overlapping Zone) นั้นมีค่าต่ำหรือมาจากการลดลงของขนาดความกว้างของพื้นที่ที่เสาเข็มขบกัน



ภาพที่ 47 การพืดของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องการแยกตัวออก (Separation)

ที่มา: Terashi et al. (1983b)

แรงเฉือนที่มีค่าสูงจะเกิดขึ้นในบริเวณ Overlapping Zone ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ ค่าแรงเฉือนสูงสุดอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของกลุ่มเสาเข็ม มันเป็นสิ่งสำคัญที่ว่า กำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ในตำแหน่ง Overlapping Zone และความกว้างของการขบกันของเสาเข็มนั้นจะต้องมีค่าที่เพียงพอด้วย ดังแสดงในภาพที่ 48

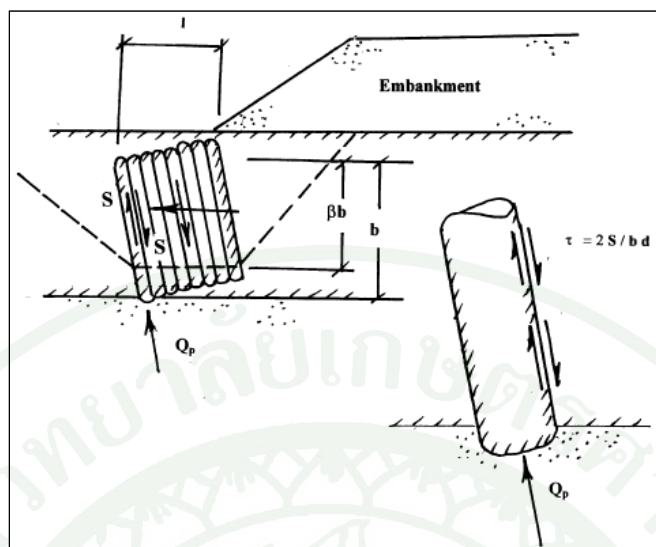


ภาพที่ 48 การพิบัติแบบเฉือน (Shear Failure) ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

ที่มา: Terashi et al. (1983b)

Yoshida (1996) ได้ทำศึกษาและพบว่า กำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ในบริเวณ Overlapping Zone จะมีค่าที่ต่ำ, ซึ่งมีค่า 2 ใน 3 ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ Wada et al (1991) พบว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ในบริเวณเสาเข็มที่ขบกัน จะมีค่าประมาณ 40% - 70% ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มโดยเฉลี่ย จากการทดสอบ Cone Penetration Test ที่ Norrala แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ในบริเวณที่เสาเข็มขบกันมักจะมีค่าต่ำ เนื่องจากการผสมดินที่ไม่ละเอียดหรือจากการขบกันของเสาเข็มไม่เพียงพอ

การต้านทานโมเมนต์ของเสาเข็มแบบแถว จะพิจารณาการพิบัติให้เป็นแบบพลิกคว่ำ (Overturning Failure) ซึ่งพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มขนาดความกว้างของแถวเสาเข็มและจำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์ลงไปในแต่ละแถว ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ว่า กำลังต้านทานโมเมนต์ของเสาเข็มจะต้องเพียงพอที่จะให้สมมติฐานของแนวการเคลื่อนพิบัติสามารถที่จะเคลื่อนผ่านเข้าไปในเสาเข็มได้นั้นเกิดขึ้น กล่าวคือ จะพิจารณาความสำคัญของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มมากกว่ากำลังรับโมเมนต์ของเสาเข็ม (ดังภาพที่ 49)



ภาพที่ 49 การพินดีแบบล้มคว่ำ (Overturning Failure) ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์

ที่มา: Terashi et al. (1983b)

4. เสถียรภาพของลาดดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

วิธีการออกแบบที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ คือการวิเคราะห์การพินดีในรูปแบบวงกลม (Circular Slip Method) ซึ่งจะใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินแบบรวม กล่าวคือ จะรวมค่ากำลังรับแรงเฉือนของทั้งดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพและดินที่ไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพเข้าด้วยกัน โดยสรุปได้ดังนี้คือ

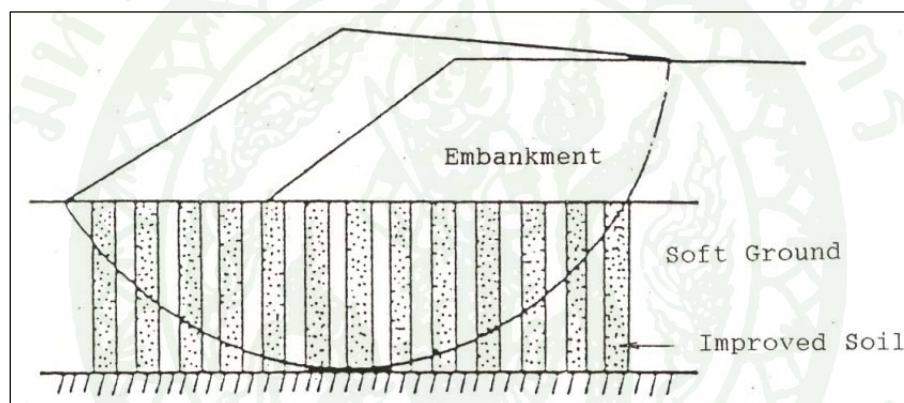
Terashi et al (1983) ได้แนะนำถึงข้อแตกต่างของการใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับการออกแบบเป็น 2 เงื่อนไขดังนี้คือ

1. ถ้าอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรับปรุงคุณภาพกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมีค่าที่สูง ให้ใช้ค่าเฉลี่ยของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ, C_{avg} เพียงอย่างเดียว โดยจะมีค่าเท่ากับ $q_u / 2$

2. ถ้าอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรับปรุงคุณภาพกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมีค่าที่ต่ำ เส้นการพินิจในแบบวงกลม (Circle Slip) (ภาพที่ 50) จะถูกพิจารณาว่า ดินเดิมมีการช่วยรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นด้วย โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของทั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ และดินเดิม จะมีค่าดังสมการด้านล่างคือ

$$C_{avg} = C_u (1 - a) + S_{col} a \quad (38)$$

เมื่อ S_{col} และ C_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของเสาเข็มดินซีเมนต์และกำลังรับแรงเฉือนเริ่มต้นของดินเหนียวรอบๆเสาเข็ม ตามลำดับ



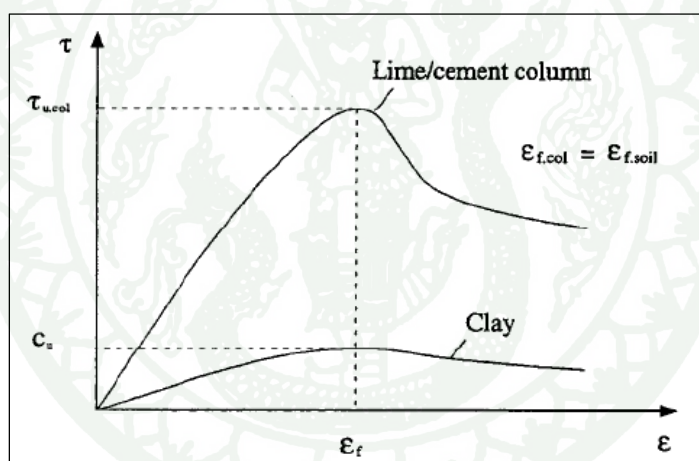
ภาพที่ 50 แนวการเคลื่อนที่แบบวงกลม (Circular Slip Surface)

ที่มา: Terashi et al. (1983)

ทั้งนี้ควรพิจารณาด้วยว่า ถ้าการปรับปรุงชั้นดินด้วยวิธีนี้ ถูกนำมาใช้เป็นฐานรากของ ดินถม (Embankment) และเป็นชนิดแบบกำแพงเสาเข็มที่ก่อสร้างด้วยวิธี DMM การวิเคราะห์ เสถียรภาพของชั้นดินจะต้องให้ความสำคัญของกำลังรับแรงต้านทานด้านข้างด้วย อย่างไรก็ตาม ในสถานการณ์นี้ การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จะมีแนวโน้มของราคาก่อสร้างที่สูง เพราะจะต้องมีปริมาณการปรับปรุงที่สูงตามด้วย เนื่องจากจำเป็นต้องมีการออกแบบเสาเข็ม เพื่อใช้สำหรับกรณีนี้โดยเฉพาะ

ยังมีรูปแบบและวิธีการที่หลากหลาย ที่นำมาใช้สำหรับการออกแบบเสาเข็มในแต่ละชนิด เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพชั้นดินอ่อน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงด้วยวิธีอื่นๆนี้ อาจจะมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร

การออกแบบในปัจจุบันตามวิธีของ Swedish Design Method จะพิจารณาว่าตัวเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นวัสดุประกอบ (Composite Material) (SGF, 2000; Vagrerket, 2009) กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Peak Shear Strength) ของเสาเข็มดินซีเมนต์จะรับแรงได้มากที่สุด ณ เวลาเดียวกันกับกำลังรับแรงเฉือนของดินที่อยู่รอบๆ ที่ยังไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพ ดังภาพที่ 51 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าความเครียด (Stress and Strain) ระหว่างดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยการบีบอัดจะสมมติให้เกิดขึ้นไปพร้อมกันตามแนวเส้นพิบัติที่เคลื่อนผ่านทั้งเสาเข็มดินซีเมนต์และดินโดยรอบ



ภาพที่ 51 สมมติฐานของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยโดยวิธีถ่วงน้ำหนัก

ที่มา: Kivelo (1998)

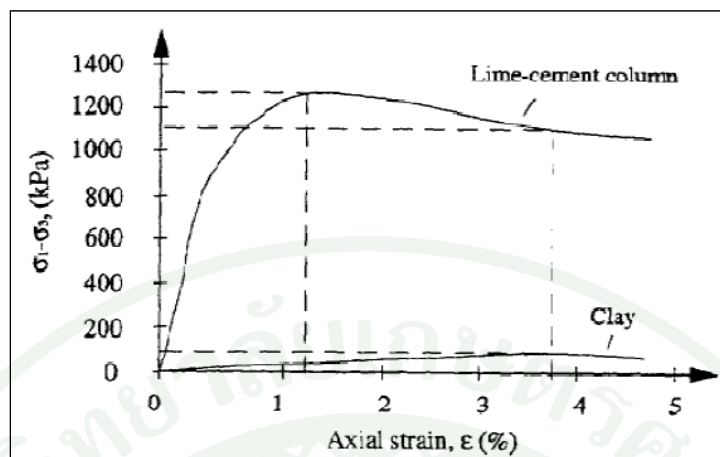
การออกแบบในประเทศญี่ปุ่น (CDIT, 2002) ก็เช่นเดียวกัน จะเหมือนกับการออกแบบของ Swedish Design Code ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ก็จะพิจารณาว่าดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพหรือเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นวัสดุประกอบ (Composite Material) อย่างไรก็ตาม ก็มีข้อแตกต่างจากวิธีของ Swedish Design Code คือ จะสมมติให้กำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเดิม

ไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน (ความเครียดที่จุดพิบัติไม่เท่ากัน) ความเครียดที่จุดสูงสุดของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Lime/Cement Column) จะมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความเครียดที่จุดพิบัติของดินเดิม ดังภาพที่ 52 เมื่อกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินเดิมเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ก็จะลดลงจนถึงค่าคงที่ ซึ่งที่ตำแหน่งของค่าความเครียดต่ำๆ (Small Failure Strain) เสาเข็มดินซีเมนต์จะไม่ค่อยมีผลต่อดินเดิมมากนัก กล่าวคือ เสาเข็มดินซีเมนต์จะเป็นตัวรับกำลังเป็นส่วนใหญ่ โดยที่ดินเดิมยังไม่ได้รับกำลังจนถึงจุดสูงสุดของตัวเอง

วิธีการออกแบบในแถบ Scandinavia, Japan และ US จะประมาณค่าเสถียรภาพของคันดินถมที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Limit Equilibrium ซึ่งมีรูปแบบการพิบัติอยู่ 2 ลักษณะดังที่กล่าวมาแล้วคือ การพิบัติภายใน (Internal Stability) และการพิบัติภายนอก (External Stability) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 53

1. สำหรับการพิบัติภายใน (Internal Stability) เสาเข็มดินซีเมนต์จะถูกสมมติให้พิบัติโดยการเฉือนขาด เสถียรภาพจะวิเคราะห์ผ่านรูปแบบการพิบัติแบบวงกลม (Slip Circle) ซึ่งหมายความว่าเสาเข็มดินทั้งหมดจะพิบัติพร้อมกันโดยไม่คำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ

2. สำหรับการพิบัติภายนอก (External Stability) เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเดิมจะถูกสมมติให้พิบัติในรูปแบบของการสไลด์ (Sliding Failure) เสาเข็มดินซีเมนต์และดินเดิมจะเคลื่อนไปทางด้านข้าง โดยที่เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่มีการล้มเอียงหรือพิบัติแต่อย่างใด

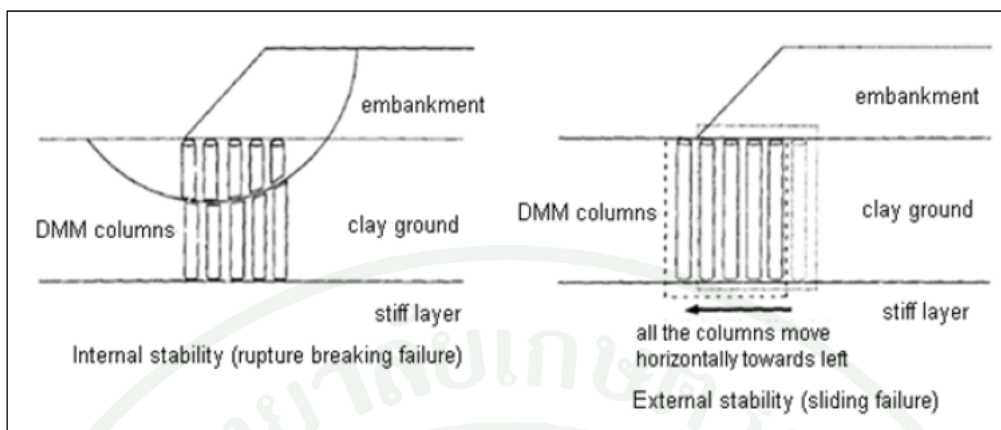


ภาพที่ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเดิม (Stress-Strain Curves)

ที่มา: Kivelo (1998)

โดยพื้นฐานแล้วการวิเคราะห์เสถียรของลาดดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์จะใช้วิธีการของ Bishop (Bishop's Method) เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์กับลาดดินทั่วไป โดยจะสมมติให้การพังทลายของลาดดินเป็นแบบวงกลม (Slip Circle Failure) ซึ่งเมื่อค่า Shear Stress มีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน (ที่ทำการเฉลี่ยระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเดิม โดยวิธีการถ่วงน้ำหนัก) แล้วจะทำให้เกิดการพังทลาย โดยทั่วไปค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่จะทำให้ไม่เกิดการพังทลาย ควรจะมีอย่างน้อยเท่ากับหนึ่ง

Adams et al. (2009) ได้ใช้โปรแกรม FLAC ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณทางไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Program) (Itasca Consulting Group, 2002) ในการศึกษาการพังทลายแบบภายในของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Internal Stability) ภายใต้น้ำหนักของดินถม ซึ่งศึกษาทั้งเสาเข็มแบบเดี่ยวและแบบกำแพงเสาเข็ม (Single Column and Shear Wall) ซึ่งสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้ คือ



ภาพที่ 53 สมมติฐานของลักษณะการพังทลายของการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนในระดับลึกที่ใช้ในการออกแบบในปัจจุบัน

ที่มา: Kitazume and Maruyama (2006)

1. ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยกว่าการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ (Limit Equilibrium Slope) ซึ่งการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ จะพิจารณาเฉพาะกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินถม ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากจนเกินไป (การวิเคราะห์แบบเดิมโน้มเอียงไปในทางที่ไม่ปลอดภัย)

2. เสาค้ำดินซีเมนต์แบบเดี่ยวจะเกิดการพังทลายในแบบการดัด (Bending Mode) ซึ่งการพังทลายถูกเสนอขึ้นโดย Kivelo, (1998) และถูกสนับสนุนในแนวคิดนี้โดยการทดสอบของ Larsson, (1999 และ 2008) และ Larsson and Broms, (2000)

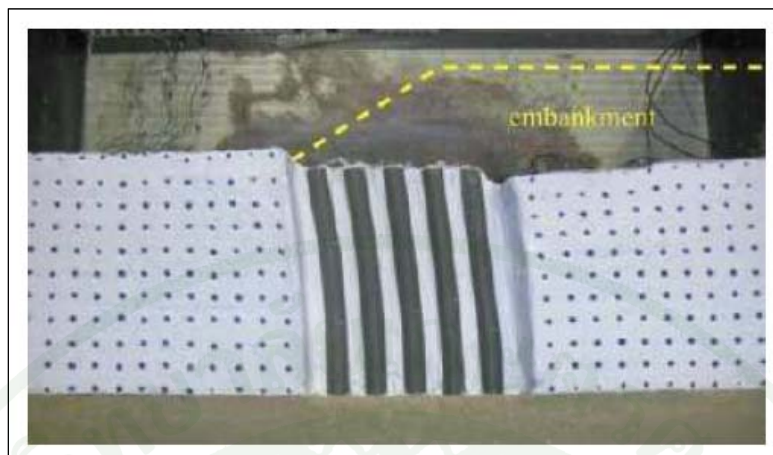
3. การปรับปรุงคุณภาพโดย DMM แบบ Shear Wall จะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ Single Column ในปริมาณอัตราส่วนพื้นที่ที่เท่ากัน ที่ราคาและคุณภาพของวัสดุที่เหมือนกัน ซึ่งข้อสรุปนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยถูกเสนอโดย Larsson, (2008) กล่าวคือ

4. ลักษณะการพังทลายของ Shear Wall จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของเสาค้ำดินซีเมนต์ที่วางตัวซ้อนทับกันเป็นแถวเรียงตามความยาว ถ้าเสาค้ำดินซีเมนต์ที่ถูกลวางซ้อนทับตัวกันนี้ ถูกสมมติว่ามี

ความสมบูรณ์และเป็นเนื้อเดียวกัน (นั่นคือ ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ 2 ต้น จะเท่ากับค่ากำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบเดียว) แล้ว Shear Wall ก็จะเกิดการพิบัติในแบบการสไลด์และการเฉือนขาด แต่ในความเป็นจริงแล้ว ด้วยขบวนการผสมเพื่อให้ได้เสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นมา เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ซ้อนทับกันอยู่นั้น ย่อมที่จะมีจุดที่เปราะหรืออ่อนแออยู่ เมื่อจุดที่เปราะหรืออ่อนแอมีประสิทธิภาพในการรับแรงน้อยกว่า 30% ของกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ ตัวกำแพง Shear Wall ก็จะพิบัติโดยลักษณะแบบการคัง (Racking) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการพิบัติที่เหมือนกันกับการทดสอบของ Larsson, (2008) ที่ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของการซ้อนทับกันระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์

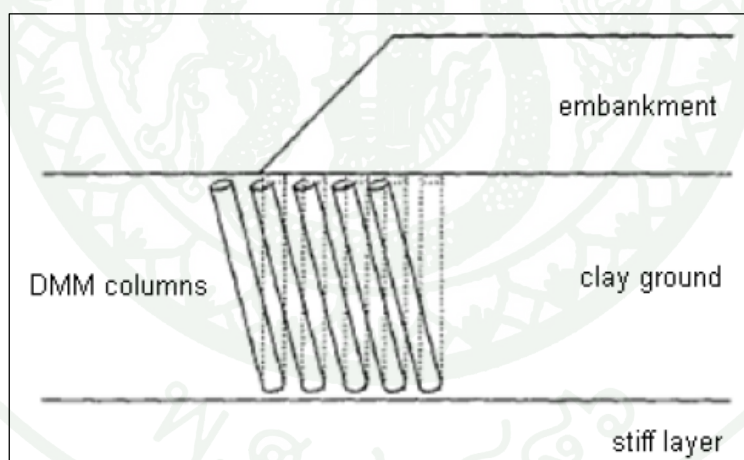
Hen et al. (2005) ได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม FLAS ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analyses) กับวิธีการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ (Limit Equilibrium) โดยวิธีของ Bishop ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆหลายๆอย่าง เช่น ขนาดและกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์, ระยะห่างระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์, ความหนาของชั้นดินที่อยู่ข้างใต้ เสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งจากองค์ประกอบและคุณสมบัติทั้งหมด วิธีของ Bishop จะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) มากกว่าการวิเคราะห์โดยโปรแกรม FLAS ซึ่งข้อสรุปก็จะเหมือนกับงานวิจัยที่กล่าวมา คือ การพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ จะมีโอกาสที่จะเกิดการพิบัติในแบบการคังและการหมุนหรือค้ม (Bending and Rotation) มากกว่าที่จะเป็นการพิบัติในแบบการเฉือนขาดของตัวเสาเข็มดินซีเมนต์ (Shearing)

Kitazume et al. (2006 and 2009) ได้ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพทางภายนอกและภายในของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยว (Single Column) โดยใช้การทดสอบ Centrifuge Model Test และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม PLAXIS (PLAXIS BV, 2008) ซึ่งผลจากการศึกษาและวิเคราะห์พบว่าเสถียรภาพภายใน (Internal Stability) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ จะให้ผลที่เป็นไปในทางเดียวกันกับการศึกษาของ Adams et al. (2009) กล่าวคือเสาเข็มดินซีเมนต์จะพิบัติต่อไปกันไปเป็นทอดๆ ในแบบการพิบัติแบบค้ม (Bending Failure) จากค่อนหน้าสุดไปด้านหลังสุด ดังภาพที่ 54 สำหรับเสถียรภาพแบบภายนอกนั้น (External Stability) จะเกิดการพิบัติโดยการสไลด์ (Sliding Failure) ซึ่งสมมติให้การออกแบบ เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขโดยเฉพาะเท่านั้น (กล่าวคือ ในกรณีเมื่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนลดลงไปตามความลึกของชั้นดิน หรือเมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์ก่อสร้างในบริเวณชั้นดินเหนียวอ่อนมากๆ) และอีกประการหนึ่งคือ ในส่วนของดินถมก็จะเกิดการพิบัติด้านในรูปแบบของการยุบ (Collapse Failure Mode) กล่าวคือ ตัวเสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการเอียงคล้ายกับโดมิโน ดังแสดงในภาพที่ 55



ภาพที่ 54 การพังทลายของเสาเข็มดินซีเมนต์ในรูปแบบการคด (Bending Failure Mode)

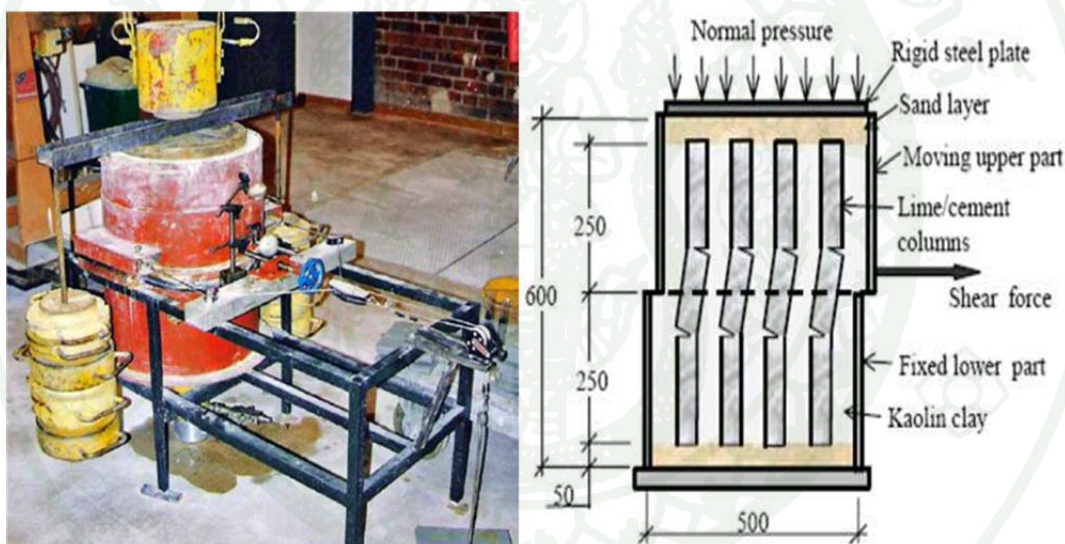
ที่มา: Kitazume et al. (2009)



ภาพที่ 55 การพังทลายของคันดินถมในแบบการยุบตัว (Collapse Failure Pattern) ของการปรับปรุงคุณภาพดินในระดับลึก (DM)

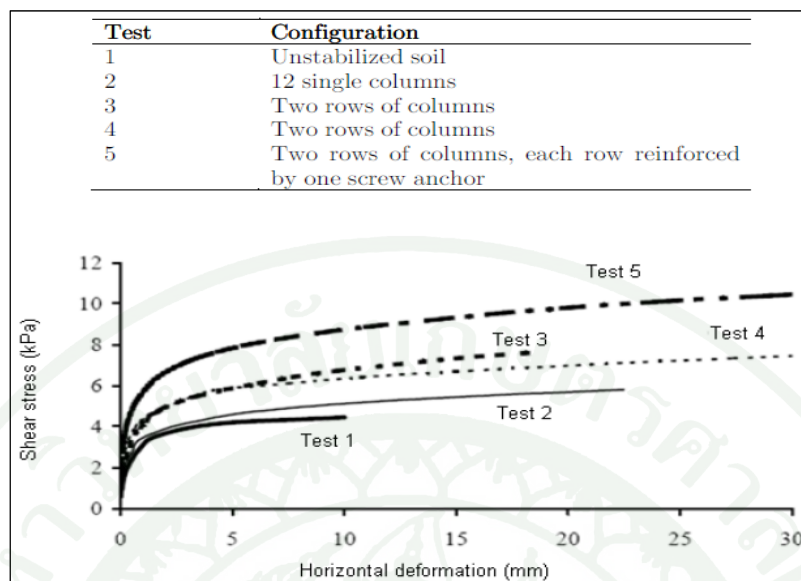
ที่มา: Kitazume et al. (2009)

Larsson and Broms (2000) ได้ทำการทดสอบ Direct Shear Box Model ของการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวคาโอลิน (Kaolin Clay) เพื่อศึกษากลไกและรูปแบบของการบีบอัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มระหว่างการให้แรงเฉือนแก่ตัวอย่าง ดังภาพที่ 56 โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็นการทดสอบดินเดิมและดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 60 กิโลปาสกาล และใช้พื้นที่ดินซีเมนต์ต่อพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ในทุกรูปแบบ จากการทดสอบพบว่า ดินเดิมมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดบีบอัดเท่ากับ 4.4 กิโลปาสกาล เมื่อทำการคำนวณตามสมการที่ 38 พบว่าจะได้กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉลี่ยเท่ากับ 11 กิโลปาสกาล ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบใน Shear Box Model ดังภาพที่ 57 พบว่าการใช้สมการจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยที่มากกว่าความเป็นจริง



ภาพที่ 56 เครื่องมือและลักษณะการทดสอบ Shear Box Test

ที่มา: Larsson (2008)

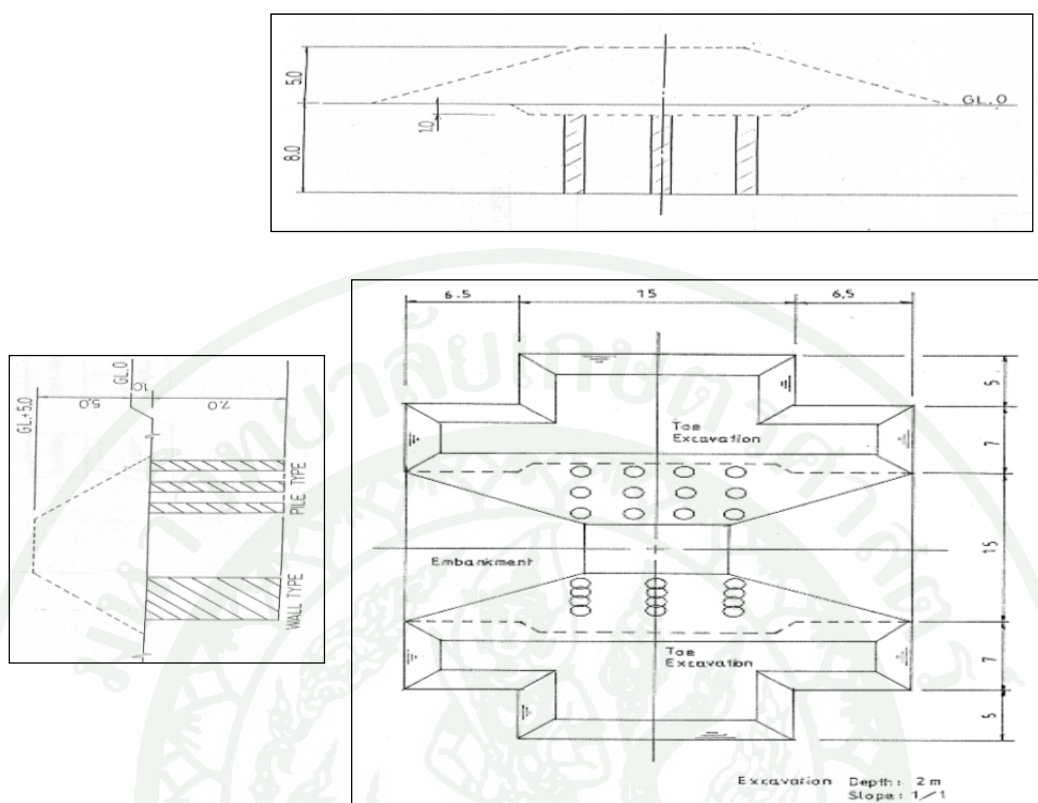


ภาพที่ 57 แรงต้านทานที่ได้จากการทดสอบ Shear Box Test ในรูปแบบต่างๆ

ที่มา: Larsson and Broms (2000)

5. การทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์

ได้มีการทดสอบในแบบ Full-Scale Test ของดินถมที่มีความสูง 5 เมตร ที่ก่อสร้างบนดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok) และทำการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยวิธี Deep Mixing Method (Dry Method) โดยใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม ซึ่งศึกษาโดย Honjo et al (1991) แบบแปลนและรูปตัดของการทดสอบชั้นดินถมนี้ แสดงดังภาพที่ 58 เสาเข็มดินซีเมนต์จะก่อสร้างในสองรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยทิศใต้จะก่อสร้างในแบบกำแพงเสาเข็ม (Wall Type) และทิศเหนือจะก่อสร้างเป็นแบบเสาเข็มเดี่ยว (Pile Type) ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconfined Compressive Strength) ของดินซีเมนต์ที่ผสมและทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีค่ามากถึง 20 เท่าของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเดิม ณ ระยะเวลาการบ่มที่ 28 และที่ปริมาณซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์ (100 kg ของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ต่อดินเหนียว 1 ลูกบาศก์เมตร) จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์เมื่ออยู่ในสนามพบว่า ดินซีเมนต์จะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนเป็นครึ่งหนึ่งของผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจากภาพที่ 59 และ 60 สามารถสรุปได้ดังนี้คือ



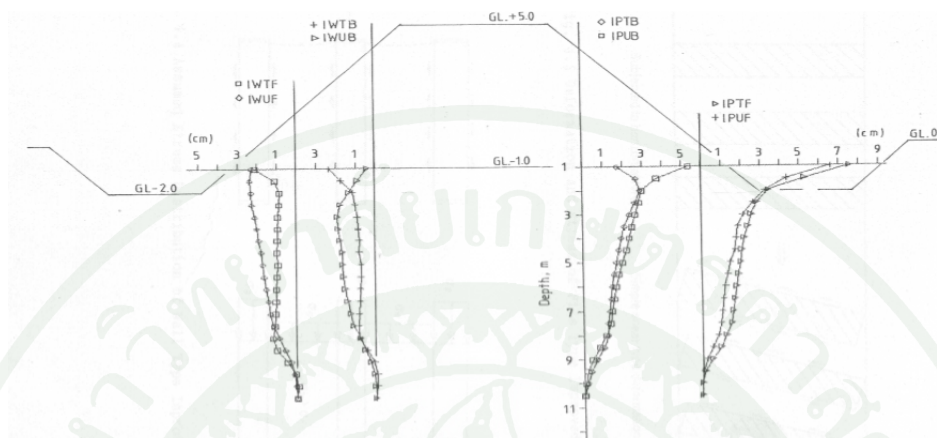
ภาพที่ 58 แผนและรูปตัดขวางของคันดินถมทดสอบที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

ที่มา: Chen (1989)

6. การเคลื่อนที่ด้านข้างและการทรุดตัว

จากภาพที่ 59 และ 60 การเคลื่อนที่ทางด้านข้างและการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพง (Wall Pile) ที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อน จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเสาเข็มเดี่ยว (Single Pile) ภายใต้แรงกระทำเดียวกัน และนอกจากนี้ยังไม่เห็นความแตกต่างของปริมาณการเคลื่อนที่ทางด้านข้างและการเสียรูปของเสาเข็มดินซีเมนต์ระหว่างพื้นที่ที่ปรับปรุงคุณภาพและพื้นที่ที่ไม่ได้ปรับปรุงรอบๆเสาเข็ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยวที่ใช้ จะมีการเคลื่อนตัวไปพร้อมกันกับดินรอบๆเสาเข็มเมื่ออยู่ภายใต้แรงดันด้านข้างของดินถม ในทางกลับกัน การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพง จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเสาเข็มแบบเดี่ยว และยังน้อยกว่าเมื่อเทียบกับดินเดิมในพื้นที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย

กำแพงเสาเข็มเดียวกัน ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า อาจเกิดขึ้นจากค่า Stiffness ของกำแพงเสาเข็มที่ช่วยด้านการเคลื่อนที่ ซึ่งมีผลทั้งกับพื้นที่ที่มีเสาเข็มและไม่มีเสาเข็ม

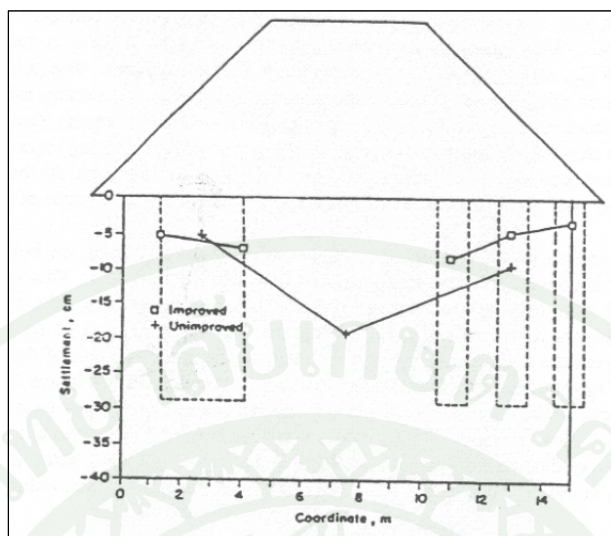


ภาพที่ 59 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและไม้ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ 71 วัน

ที่มา: Chen (1989)

7. รูปแบบของการเคลื่อนตัวและยุบตัว

ลักษณะการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียวอ่อนในแบบเดี่ยว (Single Pile Type) จะมีรูปแบบที่แตกต่างออกไปจากแบบกำแพงเสาเข็ม (Wall Type) ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปก็คือ เสาเข็มแบบเดี่ยวจะเกิดการเอียงและต่อมาก็จะเกิดการสไลด์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า อาจเกิดการเสีรูปร่างในลักษณะของ Simple Shear เกิดขึ้นที่เสาเข็มดินซีเมนต์ เพราะลักษณะการเสีรูปร่างแบบการเอียงนี้ เสี่ยงต่อการทำให้เกิดความเค้นดัด (Bending Stress) เกิดขึ้นกับเสาเข็มดินซีเมนต์ได้ ซึ่งถ้าเกิดการเสีรูปร่างแบบ Simple Shear เกิดขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนของพื้นที่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงเสาเข็ม จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า ซึ่งช่วยลดการเสีรูปร่างทั้งทางด้านข้างและทางด้านแนวตั้งไปพร้อมๆกัน



ภาพที่ 60 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของดินที่ปรับปรุงคุณภาพและไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ 71 วัน

ที่มา: Chen (1989)

8. ปัญหาของการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

วิธีการก่อสร้างแบบ Deep mixing เริ่มมีการนำมาใช้ในแถบ Nordic Countries และประเทศญี่ปุ่น มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ซึ่งการพิบัติโดยทั่วไปของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์จะเกิดขึ้นโดยการพิบัติของดิน (Failure of Soil) ก่อนเป็นอันดับแรก แต่ในบางกรณีค่ากำลังแบกทานสูงสุด มักจะถูกควบคุมโดยการพิบัติของเสาเข็ม (Failure of Column) ด้วยเช่นกัน โดยประสบการณ์ที่ได้จากการก่อสร้างในเมืองหรือประเทศต่างๆ เหล่านี้ ได้แสดงให้เห็นถึงปัญหาดังนี้คือ

8.1 ความแปรปรวนของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์

ใบมีดที่ใช้ผสมและสว่านเจาะ (Mixing Blades and Augers) สามารถทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีเนื้อและเส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตาม ความสม่ำเสมอของเสาเข็มดินซีเมนต์จะเกี่ยวข้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มเอง ซึ่งความสม่ำเสมอถือเป็นตัวแปรที่

สำคัญอย่างมาก ซึ่งรวมไปถึงระบบกลไกของเครื่องมือติดตั้งและชุดเจาะเสาเข็ม, ลักษณะของชั้นดินอ่อนและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรับแรงเฉือน ดังนั้นความพิถีพิถันในการก่อสร้างอาจจะไม่ช่วยรับประกันถึงความสม่ำเสมอของกำลังรับแรงเฉือนของเสาเข็มดินซีเมนต์ นอกจากนี้เสาเข็มดินซีเมนต์อาจจะอยู่ในบริเวณชั้นดินที่วิกฤติมาก เช่น ชั้นดินอาจมีรอยต่อหรือรอยแยกในจุดนั้น เป็นต้น

8.2 แนวทางการเคลื่อนตัวที่อาจเกิดขึ้นได้

ความเป็นไปได้ของการพิบัติของคันดินถมสามารถที่จะลดลงได้ด้วยการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (DCM) เพื่อปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน เพราะว่าเสาเข็มดินซีเมนต์จะช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิม ซึ่งเสาเข็มจะทำตัวเหมือนกับ Dowel Bar ตามเส้นแนวการเคลื่อนตัวและถ้าเกิดมีรอยต่อและรอยแยกเกิดขึ้นบนเสาเข็ม รอยต่อและรอยแยกเหล่านี้จะเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพของระบบทันที แม้ว่าการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีความสมบูรณ์ แต่ก็มีแนวโน้มที่ดินเหนียวอ่อนจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างได้ เนื่องจากการเสียรูปแบบ Shear Deformation ดังนั้นถ้าดินในชั้น Top Crust ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมเพื่อรับแรงทางด้านข้างของเสา มีความหนาไม่พอหรือวิกฤติเกินไป อาจจะต้องเลือกวิธีการอื่นเพื่อใช้เสริมความแข็งแรงของชั้นดินเพิ่มเติม

8.3 การทรุดตัวที่แตกต่างระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเดิม

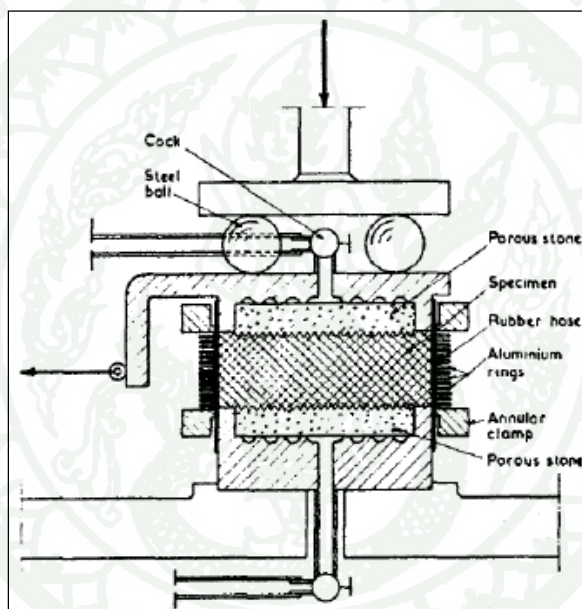
แรงกระทำจะถูกส่งผ่านลงมาจากชั้นดิน Top Crust มาสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งในที่สุดก็จะส่งผ่านลงมาถึงดินผ่านปลายสุดของเสาเข็ม ระบบเสถียรภาพของดินจะทำหน้าที่รับแรงและส่งผ่านไปตามชั้นดินทั้งทางแนวดิ่งและแนวราบซึ่งแรงกระทำนั้นส่งผ่านมาอย่างเต็มที่ แต่ถ้าชั้นดิน Top Crust ที่ส่งผ่านน้ำหนักของคันดินถมและน้ำหนักจรมีประสิทธิภาพต่ำ วัสดุดินถมเหล่านั้นก็จะสามารถทรุดตัวเข้าไปในดินเหนียวอ่อนที่อยู่ระหว่างเสาเข็มได้ เพราะฉะนั้นเสาเข็มจึงเกิดการปูดและทะลุเข้าไปในคันดินถม จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างดินเดิมกับเสาเข็ม ส่งผลให้พื้นทางเป็นลูกคลื่น โดยเฉพาะเมื่อคันดินถมมีความสูงไม่มากนัก

การพัฒนาวิธีการทดสอบการเคียนตรงอย่างง่าย

Kjellman (1951) ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเคียนตรงอย่างง่ายขึ้นมา (Direct Simple Shear Apparatus) ซึ่งดินตัวอย่างมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร และมีความสูง 20 มิลลิเมตร ซึ่งถูกหุ้มด้วยแผ่นยาง (Rubber Membrane) และล้อมรอบด้วยวงแหวนอลูมิเนียม (Aluminium Ring) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 61 มีการประกบด้วยหินปูนทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง เพื่อช่วยในการระบายออกจากตัวอย่างระหว่างขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งคล้ายกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบทั่วไป (Oedometer One Dimensional Compression) ตัวอย่างดินจะถูกเคียนจากส่วนบนของตัวอย่างด้วยการรักษาค่าแรงกระทำหรือค่าความสูงของตัวอย่างให้คงที่ ซึ่งมักจะให้ส่วนฐานรองตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่างมีลักษณะเป็นพื้นเล็กๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเคียนไถระหว่างฐานรองกับตัวอย่างดิน เช่น เซอร์ตรวจวัดค่าแรง (Load Cell) ทั้งแนวตั้งและแนวราบ รวมถึงเซ็นเซอร์วัดค่าการเคลื่อนตัว (LVDT) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจวัดค่าความเค้นในแนวตั้ง, ค่าความเค้นเฉือน, ค่าความเครียดในแนวตั้ง, และค่าความเครียดเฉือนตามลำดับ ซึ่งข้อดีโดยหลักๆ ของเครื่องมือการทดสอบนี้คือ การบังคับให้การเคลื่อนของตัวอย่างดินมีพื้นที่หน้าตัดที่คงที่ (เมื่อเทียบกับการทดสอบการเคียนตรงแบบธรรมดา) และยังสามารถสมมุติของความเค้นที่กระจายสู่ตัวอย่างดินอีกด้วย ซึ่งในทางเปรียบเทียบกับ การทดสอบการเคียนตรงแบบธรรมดานั้น ทิศทางของความเค้นหลัก (Major Principal Stress) นั้น ก็คือน้ำหนักกดทับแนวตั้งในช่วงการอัดตัวคายน้ำ (ความเค้นรองอยู่ในแนวราบ) เมื่อทำการเคียนตัวอย่าง ปริมาณและทิศทางของความเค้นหลักภายในตัวอย่างจะไม่สมมุติระหว่างการเคียน หรือการเคลื่อนที่ตามเครื่องมือทดสอบการเคียนตรงแบบธรรมดา

เครื่องมือทดสอบที่คิดค้นโดย Kjellman ได้รับการพัฒนาต่อยอดโดย Landva แห่งมหาวิทยาลัย Norwegian Geotechnical Institute (NGI) (Bjerrum และ Landva, 1966) ซึ่งคุณลักษณะใหม่ที่สำคัญของเครื่องมือนี้ก็คือ มีการใช้แผ่นยางเสริมแรง (Reinforce Membrane) หุ้มรอบผิวด้านข้างของดินตัวอย่างเพื่อบังคับให้เกิดความคงที่ของพื้นที่หน้าตัด โดยแผ่นยางเสริมแรงนี้จะประกอบไปด้วย ลวดที่มีลักษณะเป็นขดเกลียวซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเท่า 0.15 มิลลิเมตร และพันเป็น 25 รอบต่อความหนา 1 เซนติเมตร ตัวแผ่นยางเสริมแรงนี้จะถูกนำไปใช้กับตัวอย่างดินด้วยวิธีทางสุญญากาศเพื่อห่อหุ้มผิวด้านข้างเพื่อให้เกิดความพอดี ซึ่งจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะทำให้สามารถทำขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำและรักษาปริมาตรของดินตัวอย่างให้คงที่ระหว่างการเคียนตัวอย่างได้ โดยเครื่องมือที่พัฒนาโดย NGI นี้ ตัวอย่างจะมีความสูงเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 80 มิลลิเมตร

ได้มีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายในรูปแบบอื่นๆออกมาเพิ่มเติม อย่างเช่น การพัฒนาที่ทำโดยมหาวิทยาลัย Cambridge University ซึ่งแสดงดังภาพที่ 62 เครื่องมือ จะใช้ตัวอย่างดินที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Sample) ที่มีขนาดความกว้าง 60x60 มิลลิเมตรและสูง 20 มิลลิเมตร ซึ่งได้รับการออกแบบให้ลักษณะด้านข้างของตัวอย่างมีความ แตกต่างจากเครื่องมือในรูปแบบเดิม คือผิวด้านข้างที่สัมผัสกับตัวอย่างดินจะมีความฝืดที่น้อย มากๆ แต่ว่าบริเวณฐานทั้งด้านบนและด้านล่างจะมีความขรุขระ ซึ่งอุปกรณ์การทดสอบนี้ถือเป็น อุปกรณ์ชุดแรกๆที่พัฒนาในมหาวิทยาลัย Cambridge University และผ่านการศึกษาอย่างถี่ถ้วน โดยนักวิจัยหลายคน

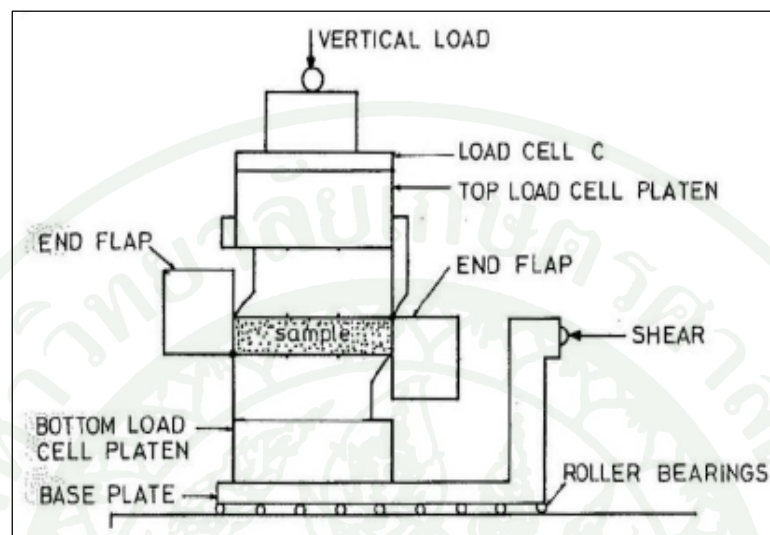


ภาพที่ 61 เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DDS) ที่คิดค้น โดย Kjellman

ที่มา: Kjellman (1951)

ด้วยที่เครื่องมือทดสอบนี้ไม่สามารถทำการทดสอบการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำได้สมบูรณ์ แบบ เนื่องจากไม่มีการใส่ Back Pressure ซึ่งจะช่วยให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำจริงๆ (Full Saturation) ต่อมาจึงมีการทำให้ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายนี้อยู่ในหม้อที่มีแรงดันน้ำ อยู่โดยรอบ ซึ่งพัฒนาโดย Franke, 1979 และ Dyvik, 1987 โดยจุดประสงค์หลักก็เพื่อให้

ตัวอย่างดินเกิดการอิ่มตัวด้วยน้ำและทำให้การวัดค่าแรงดันน้ำในตัวอย่างดินมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 62 เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DDS) ที่คิดค้นโดย Roscoe

ที่มา: Roscoe (1951)

ได้มีเครื่องมือในรูปแบบอื่นๆ ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบกับตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยม และใช้ลักษณะของแผ่นเหล็ก (Rigid Steel Wall) เพื่อช่วยรักษาพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างให้คงที่ (Roscoe, 1953) ซึ่งจุดมุ่งหมายของทุกเครื่องมือการทดสอบด้วยวิธีนี้ คือทำให้การเสียรูปตามโหมดการเฉือนตรงอย่างง่ายเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ แต่จำเป็นที่จะต้องให้มุมของตัวอย่างดินเคลื่อนขยายออกไประหว่างการเฉือน กล่าวคือ ความเค้นเฉือนจะไม่เกิดขึ้นที่มุมใดๆ ของตัวอย่างดิน

ผลจากการที่ความเค้นเฉือนที่ไม่สม่ำเสมอทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างดิน ทำให้ที่มุมของตัวอย่างดินมีความเค้นเป็นศูนย์ ส่งผลต่อความไม่สมดุลระหว่างบนและล่าง ซึ่งจะต้องทราบถึงความไม่สม่ำเสมอของการกระจายความเค้นทั้งด้านบนและด้านล่างที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวอย่างดิน เพื่อให้ผลที่ถูกต้อง (Airey et al., 1985)

หน้าที่หลักของเครื่องมือการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย (DSS devices) คือการหาค่าของความเค้นเฉือนรวมในแนวราบ (Total Horizontal Shear Stress, τ_h) และค่าความเค้นในแนวตั้ง (Total Vertical Stress, σ_v) ตลอดจนการหาค่าความเครียดเฉือน (Shear Strain, γ) ซึ่งวัดได้ในระหว่างการเฉือนตัวอย่าง

นักวิชาการอื่นๆ ได้วิเคราะห์และวิจารณ์เครื่องมือทดสอบนี้ ต่างให้ความเห็นว่า การวัดเฉพาะค่าความเค้นในแนวตั้งและค่าของความเค้นเฉือนรวมในแนวราบระหว่างการเฉือนตัวอย่างดินนั้น จะรู้ได้อย่างไรว่า มีความสม่ำเสมอของความเค้นและเป็นความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในตัวอย่างดิน เพื่อที่จะกำจัดข้อสงสัยเหล่านี้ ได้มีนักวิจัยคือ Budhu, (1979) และ Airey, (1984) ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือซึ่งตัวอย่างดินจะถูกรวมด้วยเซ็นเซอร์วัดแรง (Load Cell) เพื่อที่จะวัดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงรอบตัวอย่าง เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีถูกนำมาใช้เพื่อการตรวจวัด โดยการยิงรังสีทะลุเข้าไปในตัวอย่างดินแล้วทำการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง ซึ่งพบว่าความเครียดมีความสม่ำเสมอและช่วยให้เห็นรอยการพังในตัวอย่างดินอีกด้วย (Budhu, 1984)

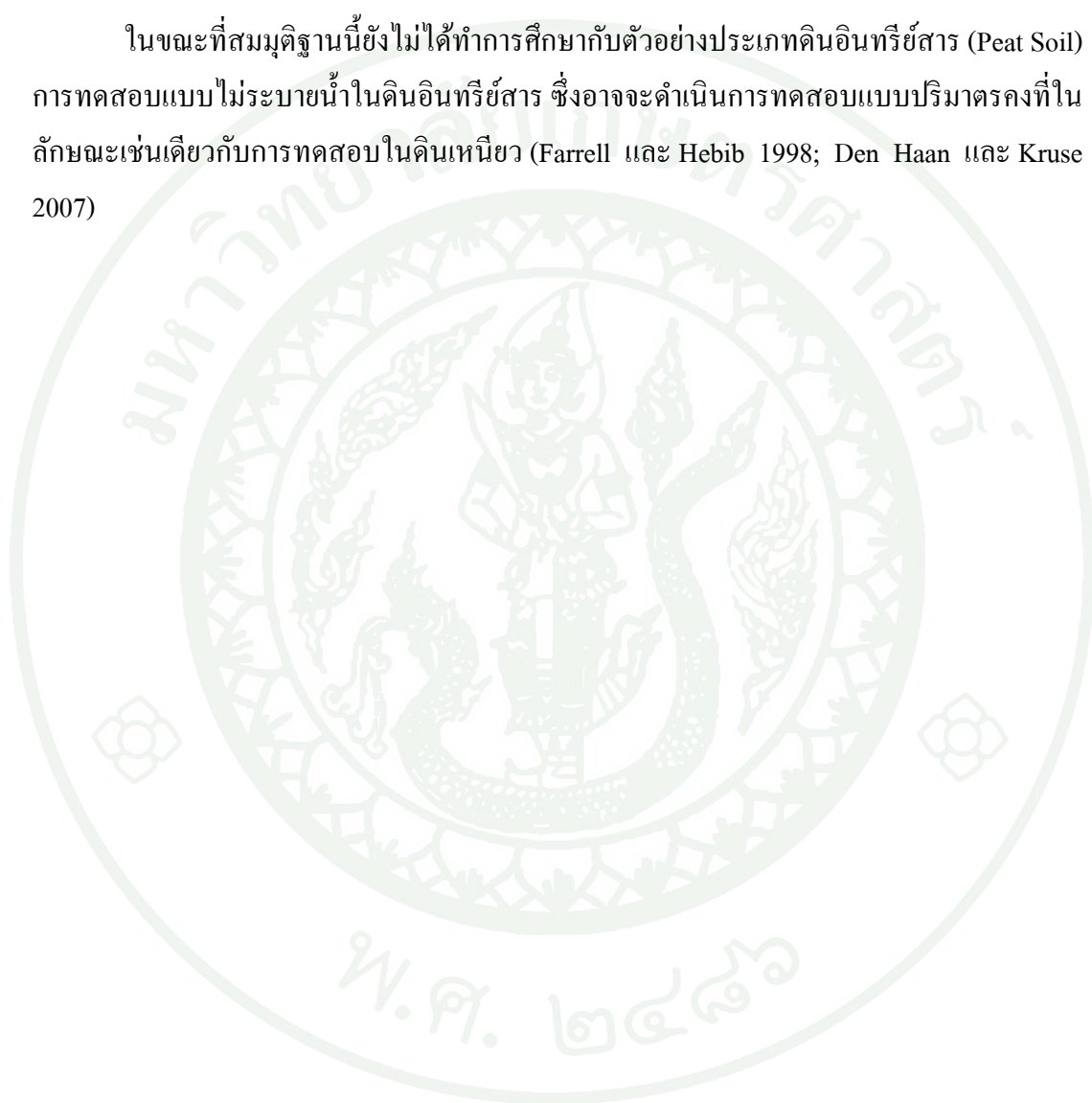
การศึกษาของ Airey และ Wood (1987) ในดินตัวอย่างเหนียวคาโอลิน (Kaolin) แสดงให้เห็นว่า การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายแบบดั้งเดิมที่มีการตรวจวัดแค่เฉพาะค่าความเค้นในแนวตั้งและค่าของความเค้นเฉือนรวมนั้น มีการประมาณของค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำกว่าเครื่องมือที่วัดอย่างละเอียดแค่ 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และยังให้ความเห็นอีกว่าผลการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายที่ได้จากตัวอย่างดินเหนียว สามารถให้ผลที่เหมือนจริงมากกว่าตัวอย่างดินทราย

ในตัวอย่างประเภทดินเหนียวจะทำการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำ (Static Undrained DDS) ก็จะทำให้การทดสอบมีปริมาตรของดินตัวอย่างที่คงที่ เนื่องการป้องกันไม่ให้น้ำระบายออกจากตัวอย่างนั้นเป็นไปได้ยาก การทดสอบจะทำด้วยอัตราการเฉือนที่ช้าเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันน้ำขึ้น ขณะที่แรงกดในแนวตั้งบนตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของการเฉือนเพื่อรักษาความสูงของตัวอย่างให้คงที่และในทางกลับกันก็ทำให้ปริมาตรของตัวอย่างดินคงที่อีกด้วย การเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวตั้งซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเฉือนนั้นถูกสมมุติว่าให้เท่ากับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในตัวอย่าง ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ถ้าการทดสอบนั้นอยู่ในสภาพไม่ระบายน้ำจริงๆ

Dyvik et al. (1987) ได้ยืนยันถึงสมมติฐานนี้จากการศึกษาเปรียบเทียบที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายแบบปริมาตรคงที่ (Constant Volume DDS) กับการทดสอบการ

เงื่อนไขตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำ (Truly Undrained DSS) ที่ทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียว Drammen clay (Normally Consolidated Drammen clay) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความเค้น-ความเครียด และค่าความเค้นประสิทธิผลที่ตรวจวัดได้จากทั้งสองวิธี ให้ผลการทดสอบที่เหมือนกัน

ในขณะที่สมมุติฐานนี้ยังไม่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวอย่างประเภทดินอินทรีย์สาร (Peat Soil) การทดสอบแบบไม่ระบายน้ำในดินอินทรีย์สาร ซึ่งอาจจะดำเนินการทดสอบแบบปริมาตรคงที่ในลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบในดินเหนียว (Farrell และ Hebib 1998; Den Haan และ Kruse 2007)



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบการเค้นตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Machine)

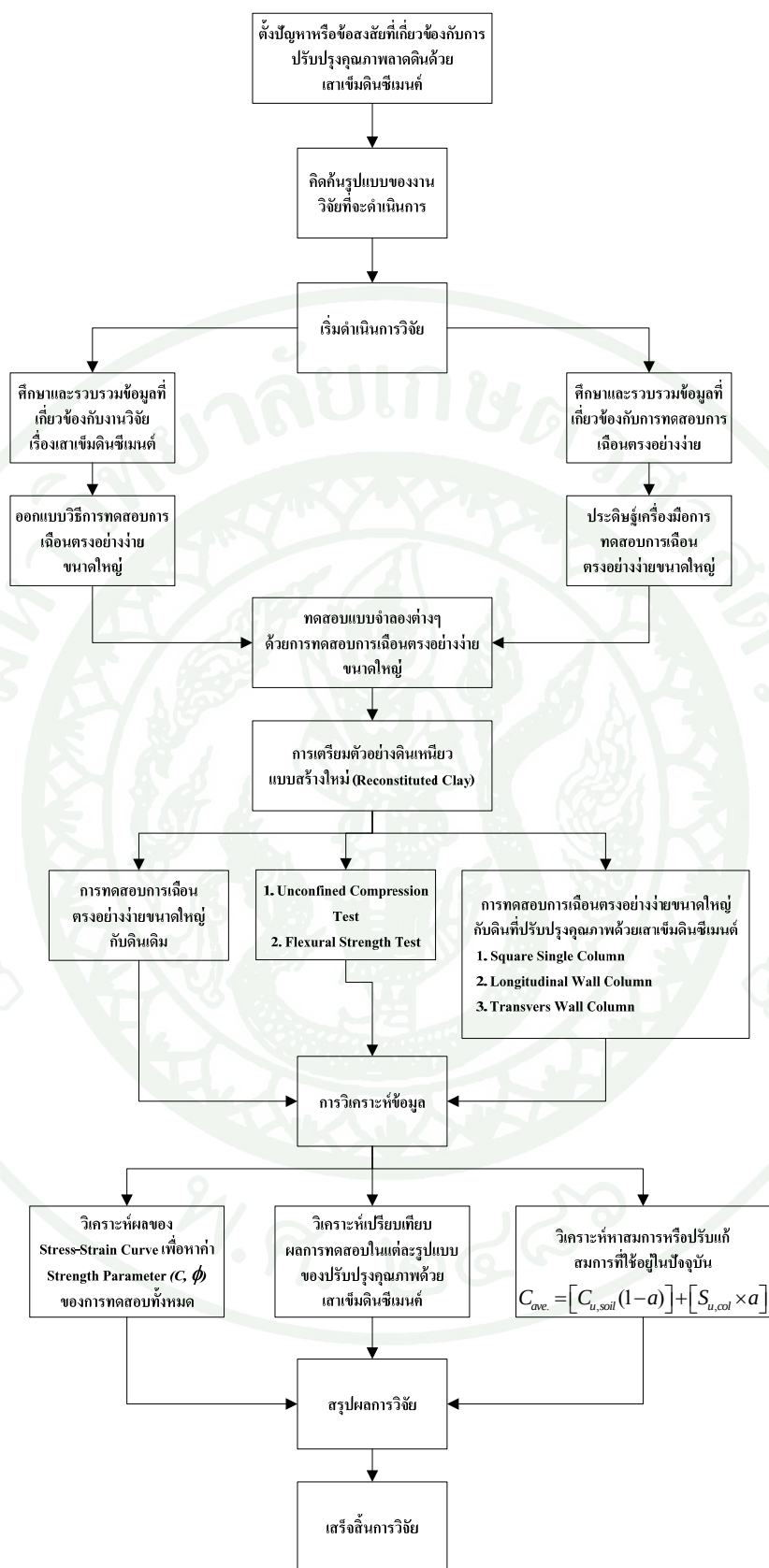
- 1.1 กรอบเหล็กกรอบตัวอย่าง (Regular Rigid Stack Ring) ลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50x50 เซนติเมตร หนา 0.9 เซนติเมตร จำนวน 10 ชิ้น และ หนา 1.8 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น
- 1.2 ฝาปิดตัวอย่าง (Top Cap) และระบบเคลื่อนที่อิสระ (Ball Bearing)
- 1.3 แผ่นยางหุ้มตัวอย่าง (Rubber Membrane) และแผ่น Geotextile ขนาด 50x50 ซม.
- 1.4 ปั๊มลม (Pressure Pump), วาล์วลม (Pressure Gauge), ตัวควบคุมแรงดันลม (Digital Regulator), กระบอกลม (Air Pressure Cylinder) 4 กระบอก, ถังลม (Pressure Tank) และอุปกรณ์อื่นๆ สำหรับระบบลมต่างๆ

2. เครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมและจัดเก็บข้อมูล

- 2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Linear Variable Displacement Transducer, LVDT) จำนวน 2 ตัว เพื่อตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างและแนวตั้ง
- 2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Load Cell) จำนวน 2 ตัว เพื่อตรวจวัดค่าแรงในแนวด้านข้างและแนวตั้ง
- 2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของวัสดุ (Strain Gauge) เพื่อวัดการเสียรูปของเสาเข็มดินซีเมนต์
- 2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำ (Water Pressure Sensor) เพื่อวัดค่าแรงดันน้ำขณะทดสอบ
- 2.5 อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลทดสอบ (Data Logger) และคอมพิวเตอร์ (Personal Computer) เพื่อมอนิเตอร์ผลการทดสอบ

3. เครื่องมือในการทำแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์

- 3.1 เครื่องผสมดิน (Mixing Machine) เพื่อใช้ผสมดินกับซีเมนต์
- 3.2 แบบหล่อ (Mold) สำหรับใช้ในการขึ้นรูปดิน-ซีเมนต์รูปแบบต่างๆ



ภาพที่ 63 แผนผังขั้นตอนการวิจัย

วิธีการ

วิธีการวิจัยมีอยู่หลายขั้นตอนด้วยกัน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1. การศึกษา, การรวบรวมข้อมูล, และลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย
2. การประดิษฐ์เครื่องมือและการสอบเทียบเครื่องมือในส่วนต่างๆ
3. การศึกษาและการรวบรวมผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในประเทศไทย (กรณีศึกษาโครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ)
4. การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ในลักษณะต่างๆและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

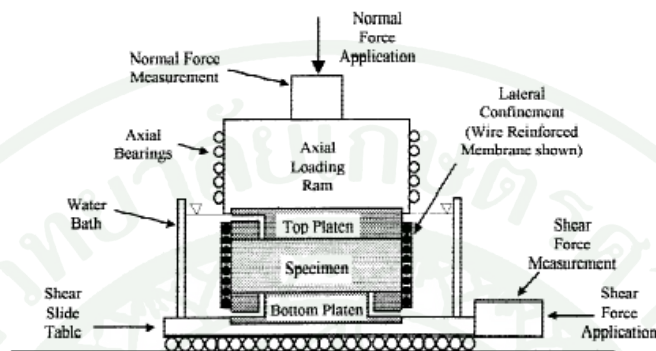
1. การศึกษา, รวบรวมข้อมูล, และลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย

1.1 รูปแบบการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย

เครื่องมือเฉือนโดยตรงอย่างง่าย (DSS) ดังแสดงในภาพที่ 64 ได้พัฒนามาจากกล่องเฉือนโดยตรง (DSB) โดยปรับปรุงข้อบกพร่องบางประการเช่น การที่พยายามบังคับให้ระนาบวิบัติเกิดขึ้นในแนวราบของกร่องเฉือนโดยตรง (DBS) ซึ่งอาจจะไม่ใช่ระนาบวิบัติ (ระนาบวิบัติจริง) ก็ได้ เครื่องมือ DSS ที่แพร่หลายมีด้วยกัน 2 ประเภทคือ ประเภทแรกเป็นแบบแท่นทดสอบที่ทำจากแผ่นโลหะที่เหลื่อมกลวงวางซ้อนทับกันในแนวตั้งซึ่งสามารถเลื่อนไถลระหว่างกันแนวราบโดยเงื่อนไขการทดสอบเป็นแบบระนาบความเครียด (Plane Strain) อีกประเภทเป็นแบบตัวอย่างดินทดสอบรูปทรงกระบอกถูกหุ้มด้วยแผ่นยางชนิดพิเศษที่เสริมลวดเพื่อให้ตัวอย่างดินอยู่ในสภาพการเฉือนอย่างง่าย (Simple Shear Mode) ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 65

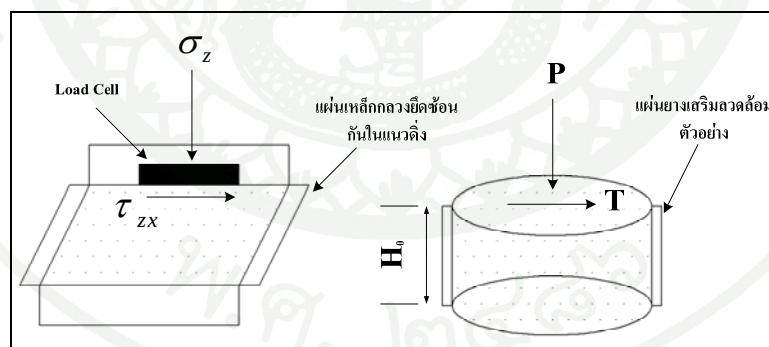
เครื่องมือจะทำการให้แรงในแนวตั้ง (P) และแรงเฉือนในแนวราบ (T) โดยใช้เซลล์ให้แรง (Load Cell) มีการวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (Δz) และแนวราบ (Δx) ด้วยมาตรวัดการ

เคลื่อนที่ (Displacement Transducer) อุปกรณ์การให้แรงและการวัดทั้งหมดเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยจะบันทึกผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์แบบเวลาจริง (Real Time Record) เงื่อนไขความเค้นและความเครียดของตัวอย่างแสดงในภาพที่ 66 ซึ่งการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน



ภาพที่ 64 รูปร่างและอุปกรณ์โดยทั่วไปของเครื่องมือการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่าย
(Conventional Direct Simple Shear Machine)

ที่มา: ASTM D6528-00



ภาพที่ 65 ลักษณะการเฉือนตรงอย่างง่ายของตัวอย่างทดสอบ (Simple Shear Mode)

ที่มา: สุเชษฐ์ (2551)

1.1.1 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Stage) เป็นขั้นตอนการจำลองสถานะความเค้นในเงื่อนไขปราศจากการเคลื่อนตัวในแนวราบ (K_0 -Consolidation) ให้เหมือนกับสภาพจริงในสนาม และเราเรียกความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งในขั้นตอนนี้ว่า ความดันอัดตัวคายน้ำแนวตั้ง (Vertical Consolidation Pressure, σ'_{vc})

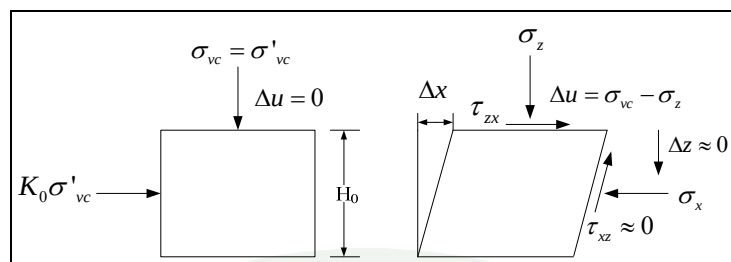
1.1.2 ขั้นตอนการเฉือน (Shearing Stage) เป็นขั้นตอนการให้แรงเฉือนในเงื่อนไขปริมาตรคงที่ (Constant Volume) นั่นคือ ในระหว่างการเฉือนแบบควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวราบ (Displacement Control) มักจะควบคุมอัตราการเฉือนที่ $\dot{\gamma} = 5\% / \text{Hour}$ ตัวอย่างดินจะมีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ซึ่ง Load Cell จะส่งสัญญาณเพิ่มหรือลดแรงอย่างอัตโนมัติเพื่อให้ปริมาตรของดินมีค่าคงตัว และความเค้นแนวดิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะสมมูลมีค่าเท่ากับแรงดันน้ำโพรงส่วนเกิน (Excess Pore Pressure, Δu) นั่นคือ

$$\Delta u = \sigma_{vc} - \sigma_z \quad (39)$$

การทดสอบ DSS-Test เป็นการทดสอบที่ระนาบวิถีที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับสภาพการวิบัติจริง ถึงแม้ว่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างดินไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform) โดยเฉพาะที่บริเวณขอบและมุมของตัวอย่าง อย่างไรก็ตามตัวอย่างดินบริเวณตรงกลางอาจจะประมาณว่าความเค้นและความเครียดมีค่าสม่ำเสมอได้ โดยตัวอย่างสมมติว่าไม่มีความเครียดในแนวราบเกิดขึ้น $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ความเครียดในแนวดิ่งมีค่าเท่ากับการยุบตัวในแนวดิ่ง (Δz)หารด้วยความสูงของตัวอย่างเริ่มต้น (H_0) นั่นคือ $\varepsilon_z = (\Delta z / H_0)$ และความเครียดเฉือน $\gamma_{xz} = (\Delta x / H_0)$ เมื่อ Δx คือการเคลื่อนที่ในแนวราบ การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดนั้นทำโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเฉือน ($\tau : \gamma$ - Curve) ดังภาพที่ 67 เพื่อนิยามค่าแรงเฉือนสูงสุดว่าเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ นั่นคือ

$$S_{uDSS} = \tau_{zx \max} \quad (40)$$

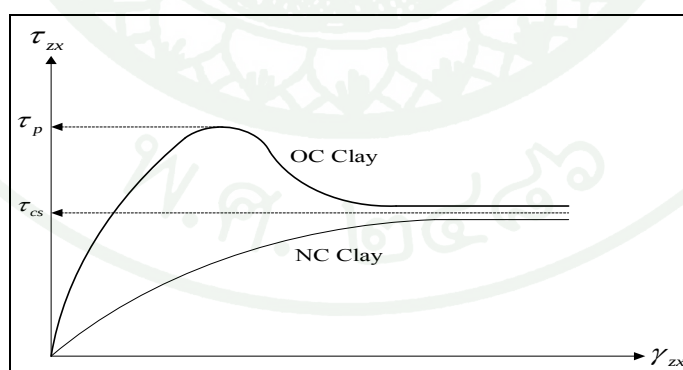
รวมถึงการหาค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus, G) ซึ่งได้ทราบแล้วว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำขึ้นอยู่กับเงื่อนไขสถานะความเค้น โดยที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ DSS-Test จะมีค่าอยู่ระหว่างการทดสอบแรงอัดสามแกน (TC) และแรงดึงสามแกน (TE) นั่นคือ $S_{uTE} \leq S_{uDSS} \leq S_{uTC}$



ภาพที่ 66 ลักษณะของการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายในขณะขั้นตอนการอัดตัวน้ำและขั้นตอนการเฉือนตัวอย่าง

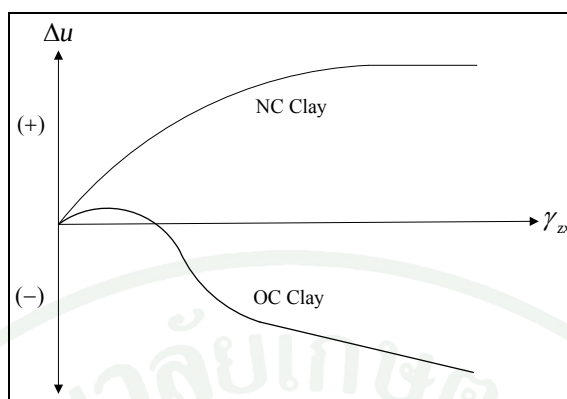
ที่มา: สุเชษฐ์ (2551)

เมื่อเขียนกราฟระหว่างแรงดันน้ำโพรงส่วนเกินกับความเครียดเฉือน ดังภาพที่ 68 โดยถ้าเป็นตัวอย่างดินเหนียวอัดตัวแน่นกว่าปกติมาก (OC-Clay) ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเป็นลบเพราะว่าความเค้นแนวดิ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาตรของดินจะพยายามเกิดการพองตัว (ตรงกับตัวอย่างดินชนิดที่ 2) ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นตัวอย่างดินเหนียวอัดตัวแน่นปกติ (NC-Clay) ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเป็นบวก เพราะความเค้นแนวดิ่งมีค่าลดลงเนื่องจากดินจะพยายามยุบตัว (ตรงกับตัวอย่างดินชนิดที่ 1)



ภาพที่ 67 พฤติกรรมของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของดินชนิด OC Clay และ NC Clay เมื่อทดสอบด้วยวิธีการเฉือนตรงอย่างง่าย

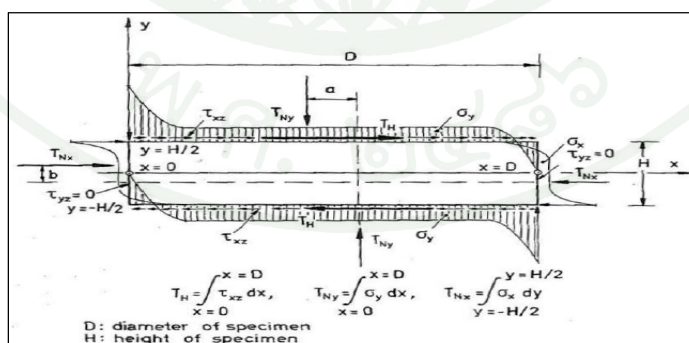
ที่มา: สุเชษฐ์ (2551)



ภาพที่ 68 พฤติกรรมของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดเฉือนของดินชนิด OC Clay และ NC Clay เมื่อทดสอบด้วยวิธีการเฉือนตรงอย่างง่าย

ที่มา: สุเชษฐ์ (2551)

ความเค้น (Stress) ที่ไม่สม่ำเสมอจะเกิดขึ้นที่บริเวณมุมหรือขอบของตัวอย่างทดสอบ รูปร่างของตัวอย่างทดสอบจะมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่าง ในเชิงทฤษฎีการกระจายตัวของความเค้นจะเป็นไปตามภาพที่ 69 ซึ่งสมมติว่าการเฉือนเกิดขึ้นตลอดความหนาของตัวอย่าง ซึ่งจากกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบตามทิศทางของการเฉือนจะได้สมมูลของโมเมนต์ซึ่งจะนำไปสู่สมการที่ 40



ภาพที่ 69 การกระจายความเค้นของตัวอย่างและความสัมพันธ์ของแรงกระทำภายนอก

ที่มา: Vucetic and Lacasse (1982)

$$\sum M = (T_h \times H) - (T_{ny} \times a) + (T_{nx} \times b) = 0 \quad (41)$$

ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลาง, D เพิ่มขึ้น ขณะที่ความสูง H, τ_{xy} , และ σ_y คงที่ แรง T_h และ T_{ny} เพิ่มขึ้นและ T_{nx} ยังคงมีค่าคงที่ จากสมการที่ 40 สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของความยาวแขน (a) จะมีค่าน้อยกว่าการเพิ่มของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ดังนั้นการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) จะเป็นช่วยลดผลกระทบของโมเมนต์บนการกระจายของความเค้นและจะทำให้อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (H/D Ratio) ของตัวอย่างมีค่าลดลง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของความเค้นให้สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น และความหนาแน่นของความเค้นที่ขอบหรือมุมของตัวอย่างจะมีปริมาณที่ลดลง

1.2 อุปกรณ์ตามมาตรฐานของเครื่องมือทดสอบการเค้นตรงอย่างง่าย

1.2.1 DSS Machine ดังภาพที่ 64 แสดงถึงแผนภาพของส่วนประกอบที่จำเป็นของเครื่องมือทดสอบการเค้นตรงอย่างง่าย ตามข้อความที่ระบุตามส่วนต่างๆ

1.2.2 Normal Loading Device อุปกรณ์ที่ให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินที่เหมาะสมจะต้องสามารถรักษาแรงกระทำไว้ได้อย่างคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดสอบ รวมถึงสามารถตอบสนองการเพิ่มของน้ำหนักและปรับค่าน้ำหนักบรรทุกได้เมื่อต้องการควบคุมความสูงของตัวอย่าง

1.2.3 Shear Loading Device อุปกรณ์ในการให้แรงเฉือนแก่ตัวอย่างดินจะต้องมีกำลังที่มากพอและสามารถควบคุมการเสียรูปของตัวอย่างตามการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่จะต้องมีความราบเรียบและต่อเนื่องตลอดเวลา โดยอย่างน้อยที่สุดอัตราการเค้นต้องอยู่ภายใน ± 15 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของกำลังเฉือนสูงสุดถึงกำลังเฉือนสุดท้ายของการทดสอบ และเครื่องมือทดสอบจะต้องมีการสันสะเทือนที่น้อยมากๆเมื่อทำการทดสอบ เพื่อให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

1.2.4 Force Measuring Devices อุปกรณ์ตรวจวัดแรงจะต้องมีด้วยกัน 2 ตัว ตัวแรกใช้สำหรับวัดค่าแรงกระทำในแนวตั้ง (Normal Force) และตัวที่สองใช้สำหรับวัดค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ซึ่งแต่ละตัวจะต้องสามารถวัดค่าได้อย่างเพียงพอและมีความแม่นยำในช่วง ± 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงสุดที่ให้แกตัวอย่าง อุปกรณ์ตรวจวัดนี้ต้องไม่อ่อนไหวต่อแรงแบบเยื้องศูนย์กลางหรือการ

ติดตั้งในลักษณะไม่มีการการเยื้องศูนย์ การหยุดตัวของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ไม่ควรทำให้อัตราการเคลื่อนตัวมีความแปรปรวนเกินกว่า ± 15 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการเคลื่อนตัวโดยเฉลี่ย เมื่อมีการใช้ระบบควบคุมความสูงตัวอย่าง การหยุดตัวของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงกระทำในแนวดิ่งจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด

1.2.5 Axial Loading Ram แท่งเหล็ก (Piston) ที่ให้แรงกระทำในแนวดิ่งจะต้องยึดอยู่กับลูกปืนในขณะเดียวกันก็ยังทำให้การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของตัวอย่างดินสามารถเกิดขึ้นได้ ถ้าตัวแท่งเหล็กมีการต้านแรงเฉือนจะต้องทำให้ตัวแท่งเหล็กนี้สามารถหมุนตัวได้เล็กน้อย

1.2.6 Shear Slide Table โต๊ะเลื่อนตัวอย่างจะต้องยึดติดอยู่กับลูกปืนและในขณะเดียวกันก็สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในขณะเลื่อนตัวอย่างได้ เมื่อมีการใช้ระบบการควบคุมความสูงตัวอย่างและโต๊ะเลื่อน ค่าการหยุดตัวของระบบจะต้องเป็นไปตามข้อ 6.9 รวมถึงโต๊ะเลื่อนจะต้องสามารถเคลื่อนตัวได้อย่างเพียงพอ ที่จะให้เกิดค่าความเครียดเฉือน (Shear Strain) อย่างน้อย 30 เปอร์เซ็นต์

1.2.7 Lateral Confinement Device อุปกรณ์ที่ใช้หุ้มตัวอย่างจะต้องจำกัดการเคลื่อนตัวออกทางด้านข้างที่อาจเกิดขึ้น กล่าวคือ ปริมาณพื้นที่หน้าตัดในทุกๆตำแหน่งของตัวอย่างต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างการเฉือน นอกจากนี้ ส่วนที่ใช้ห่อหุ้มตัวอย่างต้องสามารถทำให้เกิดเสีรูปร่างแบบเฉือนอย่างสม่เสมอ สำหรับตัวอย่างทรงกลมโดยทั่วไปแล้วใช้วัสดุหุ้มในลักษณะแผ่นยางลวดเสริมแรง (Wire Reinforced Membrane) หรือ ชั้นโลหะวงแหวน (Stacked Rigid Rings) ส่วนในตัวอย่างทรงสี่เหลี่ยมโดยทั่วไปจะใช้วัสดุหุ้มเป็น ชั้นแผ่นเหล็กกลวง (Stack Hollow Plates) หรือ แผ่นโลหะที่สามารถพับได้ (Hinged Solid Plates) ซึ่งความหนาของชั้นวงแหวนแต่ละชั้นหรือแผ่นโลหะต้องมีค่าน้อยกว่า 1/10 ของความสูงรวมของตัวอย่าง เพื่อให้เกิดความสม่เสมอเมื่อเกิดการเสีรูปร่างแบบเฉือนและต้องไม่ก่อให้เกิดสนิม เมื่ออุปกรณ์หุ้มตัวอย่างนี้แช่อยู่ในอ่างน้ำ

1.2.8 Specimen Size Requirements

- ตัวอย่างทดสอบต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 45 มิลลิเมตร
- ตัวอย่างทดสอบต้องมีความสูงอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร
- อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของตัวอย่างทดสอบต้องมีค่าไม่เกิน 0.4
- ความสูงตัวอย่างจะต้องไม่น้อยกว่า 10 เท่าของขนาดเม็ดดินที่ใหญ่ที่สุด

1.2.9 Platens แท่นปิดตัวอย่างทั้งส่วนบนและส่วนล่างของเครื่องมือทดสอบต้องถูกสร้างมาจากวัสดุทนต่อการเกิดสนิม ซึ่งต้องถูกออกแบบให้ยึดอยู่กับแผ่นหินพรุน (Porous Disks) และต้องสามารถทำให้เกิดการระบายน้ำออกจากตัวอย่างได้อย่างนุ่มนวลได้ รวมถึงสามารถส่งผ่านแรงเฉือนเข้าไปในตัวอย่างได้โดยปราศจากคลื่นไกล

1.2.10 Porous Disks แผ่นหินพรุนต้องทำมาจากทองเหลือง, ซิลิคอนคาร์ไบด์, อะลูมิเนียมออกไซด์, หรือโลหะที่ด้านการเกิดสนิม ซึ่งจะต้องเรียบแบน, มีความละเอียดพอที่จะป้องกันเม็ดดินไม่ให้เข้าไปอุดตันในโพรงของหินพรุน, ขณะเดียวกันก็ต้องมีความขรุขระพอที่จะส่งผ่านแรงเฉือนเข้าไปในตัวอย่างได้ ซึ่งแผ่นหินพรุนต้องมีความพรุนมากเป็นอย่างน้อย 10 เท่าของค่าความชื้นน้ำของดินตัวอย่างและต้องมีพื้นที่ครอบคลุมอย่างน้อย 90 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง ดังนั้นเมื่อมันมีขนาดน้อยกว่าตัวอย่างดินก็จะต้องฝังลงไปในแท่นปิดตัวอย่าง และต้องมีความอึดตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลา

1.2.11 Displacement Indicators อุปกรณ์เพื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของความสูงและการเสียรูปแบบเฉือนของตัวอย่าง (การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบ) ซึ่งต้องมีความละเอียดในการอ่านอยู่ที่ 0.0025 มิลลิเมตร

1.2.12 Volume Control Equipment ในวิธีการทดสอบการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shearing Test) ระหว่างการทดสอบการเฉือนอาจจะต้องมีการใช้ระบบการควบคุมความสูงเพื่อที่จะให้ปริมาตรของตัวอย่างมีความคงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยตัวอย่างดินจะมีการระบายน้ำอย่างอิสระและจะมีการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกระทำ (Normal Total Stress) ในระหว่างการเฉือน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกระทำนี้จะสมมติว่ามีค่าเท่ากับแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน การควบคุมความสูงจะต้องไม่ให้ตัวอย่างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงความสูงเกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์

1.2.13 Normal Force Adjustment Device ระบบควบคุมความสูงของตัวอย่าง จะต้องใช้กลไกที่มีความต่อเนื่องและราบเรียบในการปรับค่าน้ำหนักบรรทุกบนตัวอย่าง เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความสูงในระหว่างขั้นตอนการเงื่อนไขตัวอย่าง

1.2.14 Axial Displacement Clamp แท่นกดเพื่อให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดิน จะต้องถูกยึดอยู่กับที่ในระหว่างขั้นตอนการเงื่อนไขตัวอย่างเมื่อไม่ได้เปิดระบบควบคุมความสูง อุปกรณ์วัดค่าและให้แรงในแนวดิ่งจะต้องไม่มีการทำงานและเคลื่อนตัวระหว่างตัวอย่างดินและตัวยึดแท่นกดหรือตัวอย่างดินและโต๊ะเลื่อน

1.2.15 Specimen Trimming Device การตัดแต่งตัวอย่างอาจจะใช้ลักษณะของจานหมุนหรือวงแหวนตัดตัวอย่าง (Cylindrical Cutting Ring) สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก ซึ่งจะต้องใช้ในการตัดตัวอย่างดินให้เป็นทรงกลมและให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสม หรือใช้ลวด (Wire Saw) และกล่องตัด (Miter Box) หรือกล่องตัดสี่เหลี่ยม (Cutting Shoe) สำหรับตัวอย่างดินแบบสี่เหลี่ยม ที่ส่วนบนและท้ายของตัวอย่างดินจะต้องมีพื้นผิวที่หยาบโดยการใช่ลวด (Wire Saw) ซึ่งเมื่อตัดแต่งตัวอย่างดินเสร็จแล้ว พื้นผิวทั้งหมดของตัวอย่างต้องมีความเรียบและต้องมีความคลาดเคลื่อนของขนาดอยู่ในช่วง ± 0.05 มิลลิเมตร

1.2.16 Specimen Setup Frame โครงสร้างเสาของอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างต้องอยู่ในแนวเดียวกันกับส่วนล่างของแท่นวางตัวอย่าง, รวมถึงอุปกรณ์ตัดแต่งตัวอย่างและอุปกรณ์สำหรับการใส่ที่หุ้มตัวอย่างก็ต้องอยู่ในแนวเดียวกัน โครงสร้างเสาต้องสามารถทำให้ตัวอย่างที่ถูกตัดแต่งแล้วจากอุปกรณ์ตัดแต่งตัวอย่างลงสู่อุปกรณ์หุ้มตัวอย่างได้ โดยให้การรบกวนตัวอย่างดินเกิดขึ้นให้น้อยที่สุด

1.2.17 Water Bath ในวิธีการนี้จะทำให้ตัวอย่างดินมีความอิสระที่จะรับน้ำเข้าไปในตัวอย่างที่สถานะแรงดันบรรยากาศ และเพื่อป้องกันการแห้งของตัวอย่างเนื่องจากการระเหยของน้ำในตัวอย่างดิน โดยทั้งตัวอย่างดินและอุปกรณ์หุ้มตัวอย่างจะต้องนำมาทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำในอ่างน้ำหรืออาจจะใช้เป็นท่อที่มีความยืดหยุ่นต่อเข้ากับแท่นวางตัวอย่าง แล้วเติมน้ำเข้าไปเพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำก็ได้ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ ระดับของน้ำจะต้องท่วมถึงทั้งด้านบนและด้านใต้ของตัวอย่างซึ่งก็คือระดับของหินปูนนั่นเอง

1.2.18 Miscellaneous Equipment อุปกรณ์อื่นๆก็อย่างเช่น นาฬิกาจับเวลาสำหรับอ่านข้อมูลตามเวลา, เวอร์เนียคาลิเปอร์, ไดอัลเกจ, น้ำกลั่น, ที่ปาดดิน (Spatulas), มีด, มีดตัดดิน และลวดตัดแต่งดิน เป็นต้น

1.2.19 Balances ตาชั่งตามมาตรฐาน ASTM D2216

1.2.20 Drying Oven เตาอบตามมาตรฐาน ASTM D2216

1.2.21 Water Content Container กระป๋องใส่ตัวอย่างดินตามมาตรฐาน

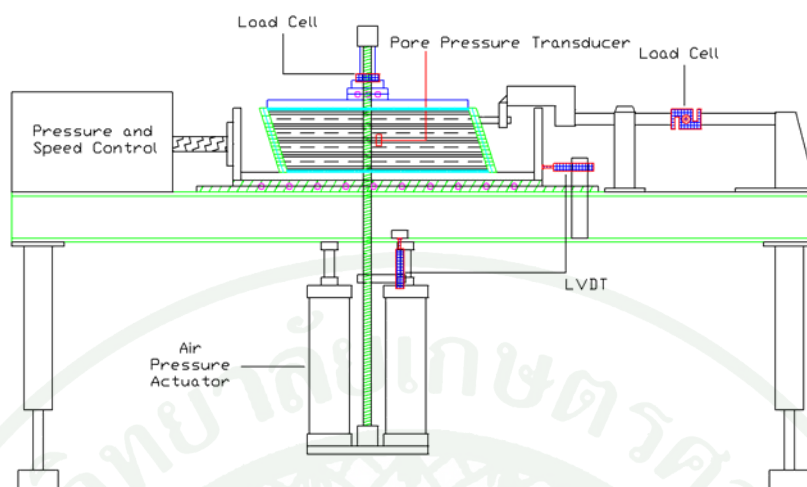
1.2.22 Environment การทดสอบจะต้องทำในอุณหภูมิที่แปรปรวนน้อยกว่า ± 2 เปอร์เซ็นต์ ในระหว่างการเนื้อมตัวอย่างดินและไม่มีการสัมผัสโดยตรงกับแสงแดด

1.2.23 Trimming Environment การตัดแต่งตัวอย่างต้องทำในกล่องหรือห้องที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงพอที่จะป้องกันการเปลี่ยนแปลงของน้ำในตัวอย่างดิน

2. การประดิษฐ์เครื่องมือและการสอบเทียบเครื่องมือในส่วนต่างๆ

2.1 การประดิษฐ์เครื่องมือการทดสอบการเนื้อมตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่

ในขั้นตอนของการออกแบบเครื่องมือการเนื้อมตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Machine) จะพยายามออกแบบให้ได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการทดสอบการเนื้อมตรงอย่างง่ายแบบ Consolidated Undrained Test (ASTM D6528-00) ซึ่งลักษณะของเครื่องมือทดสอบโดยรวมจะเป็นดังภาพที่ 70 และ 71



ภาพที่ 70 แบบร่างของเครื่องมือการทดสอบการเคียนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่

ที่มา: อธิจิตและอภินิติ (2556)



ภาพที่ 71 เครื่องมือการทดสอบการเคียนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่เมื่อประดิษฐ์เสร็จสิ้นแล้ว

ที่มา: อธิจิตและอภินิติ (2556)

2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องมือ

- ขนาดโดยรวมของเครื่องทดสอบจะมีความกว้าง 0.9 เมตร ยาว 2 เมตรและสูง 1.1 เมตร โดยประมาณ
- วัสดุทั้งหมดทำมาจากเหล็กกล้า โดยทำการตัดให้ได้รูปแบบและขนาดตามที่ออกแบบไว้
- เครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดสามารถถอดประกอบและดัดแปลงเพิ่มเติมได้ เพื่อให้รองรับกับงานทดสอบการในหลายๆแบบ
- โตะและอ่างเลื่อนใช้ระบบรางเลื่อนแบบลูกปืน (Ball Bearing) ซึ่งให้แรงเสียดทานที่น้อยและรับน้ำหนักบรรทุกได้สูง
- ใช้มอเตอร์และ Linear Actuator ในการขับเคลื่อน ซึ่งให้การเคลื่อนที่ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและราบเรียบ โดยให้กำลังการเคลื่อนได้มากที่สุด 1300-1500 กิโลกรัม

2.1.2 ระบบการควบคุม การมอนิเตอร์ และการเก็บค่าผลการทดสอบ

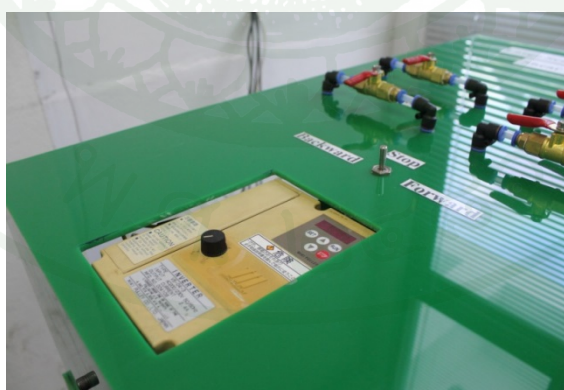
- ใช้การควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ โดยโปรแกรม Lab-View และ DS7
- บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบแบบตลอดเวลา (Real Time) ด้วย Data Logger (ADU)
- ใช้ระบบควบคุมแรงดันลมด้วย Digital Regulator และ Manual Regulator โดยสามารถปรับแต่งแรงดันลมได้อย่างคงที่ ซึ่งสามารถสลับใช้ได้ทั้งระบบ Auto และ Manual (ภาพที่ 72)
- มีระบบสำรองแรงดันลมเมื่อเกิดเหตุขัดข้องหรือไฟฟ้าดับ



ภาพที่ 72 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมและมอนิเตอร์ข้อมูลระหว่างการทดสอบ

2.1.3 ระบบการควบคุมการเฉือนและให้น้ำหนัก (Shearing and Pressure Control)

- การควบคุมอัตราการเฉือนตัวอย่างดินจะใช้ระบบ Inverter ดังภาพที่ 73 เพื่อปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ซึ่งเข้าได้สุดถึง 1.2 รอบต่อนาที ซึ่งเมื่อนำไปต่อเข้ากับ Linear Actuator จะสามารถเฉือนตัวอย่างได้ช้าสุดประมาณที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 73 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมอัตราการเฉือนตัวอย่างทดสอบ

- สามารถใช้ปุ่ม Toggle Switch ในการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่หรือหยุดการเคลื่อนที่ของตัวอย่างดินได้ ดังแสดงในภาพที่ 74



ภาพที่ 74 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ

- การเริ่มให้หรือถอนน้ำหนักบรรทุกออกจากตัวอย่างดิน (Loading or Unloading) จะใช้วิธีการเปิดและปิดวาล์ว ซึ่งจากภาพที่ 75 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทดสอบนั้นยังไม่ถูกให้น้ำหนักบรรทุก (วาล์วฝั่ง Unloading เปิด แต่วาล์วฝั่ง Loading ปิด)

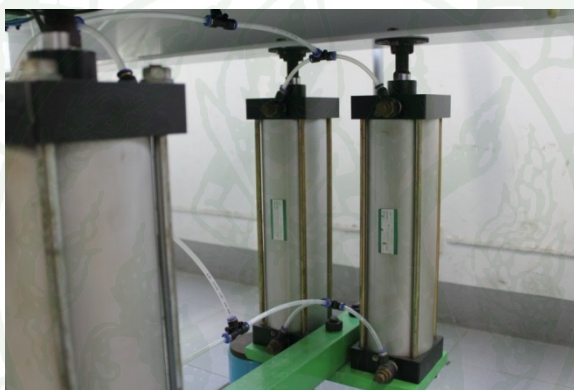


ภาพที่ 75 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมการให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างทดสอบ

2.1.4 ระบบการให้น้ำหนัก (Apply Normal Load System)

- การให้และถอนน้ำหนักบรรทุกออกจากตัวอย่างจะอาศัยแรงดันลมผ่านกระบอก (Pressure Cylinder) จำนวน 4 ตัวกระบอก ซึ่งแต่ละกระบอกให้แรงได้ 350 กิโลกรัม (ภาพที่ 76)

- สามารถให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างได้สูงสุด 1400 กิโลกรัม ในระบบ Auto และ Manual (หรือมากกว่า 1400 กิโลกรัม เฉพาะระบบ Manual ซึ่งสามารถปล่อยแรงดันลมได้สูงสุด 9 บาร์)



ภาพที่ 76 กระบอกลม (Pressure Cylinder) สำหรับการให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างทดสอบ

2.1.5 ลักษณะของอุปกรณ์หุ้มตัวอย่าง

- อุปกรณ์หุ้มตัวอย่าง (Stack Hollow Rigid Plate) มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีขนาดภายในเท่ากับ 50x50 เซนติเมตรและ สูง 16.5 เซนติเมตร โดยจะแบ่งชั้นๆเรียงต่อกัน ซึ่งแต่ละชั้นจะมีระบบลูกปืน (Ball Bearing) เป็นของตัวเองเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างกัน และจะมีความหนาเท่ากับ 0.9 เซนติเมตร จำนวน 10 ชั้น ในตำแหน่งกึ่งกลาง และ 1.9 เซนติเมตร จำนวน 3 ชั้น ในตำแหน่งบนและล่างของตัวอย่างดิน ดังภาพที่ 77

- ตัวอย่างดินจะถูกหุ้มด้วยแผ่นยาง (Rubber Membrane) อีกหนึ่งชั้นเพื่อไม่ให้ตัวอย่างดินไหลออกนอกอุปกรณ์หุ้มตัวอย่าง และทำให้แรงดันน้ำไม่ไหลออกทางด้านข้างของตัวอย่าง ตามสมมติฐานของการทดสอบ

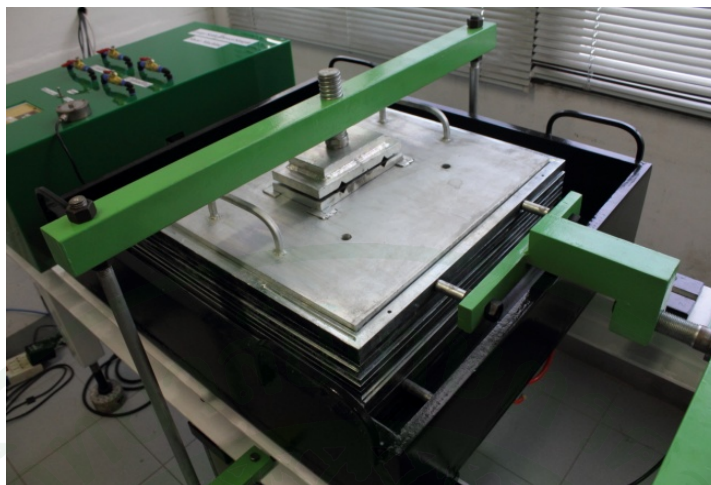
- ตัวอย่างดินจะถูกลองและปิดด้วยแผ่นกรองสังเคราะห์ (Geotextile) จำนวนสองชั้น ซึ่งจะทำได้เหมือนกับหินพรุน (Porous Disks) โดยแผ่นกรองสังเคราะห์นี้จะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและเป็นตัวกรองได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 77 ลักษณะของอุปกรณ์หุ้มตัวอย่างที่ติดตั้งพร้อมกับแผ่นยางและแผ่นใยสังเคราะห์

- Top Cap มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาด 49.8 x 49.8 เซนติเมตร ซึ่งจะมีช่องว่างอยู่ 4 จุดไว้เพื่อที่จะติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดต่างๆ เช่น Stain gage และ Piezometer หรือเครื่องมืออื่นๆเพิ่มเติมได้

- ในส่วนของ Top Cap จะมีอุปกรณ์รางลูกปืน (Ball Bearing Base) เพื่อช่วยไม่ให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่าง Top Cap และอุปกรณ์ให้น้ำหนักบรรทุก ในช่วงขั้นตอนการทดสอบการเลื่อนตัวอย่างดิน ดังภาพที่ 78



ภาพที่ 78 ลักษณะการติดตั้งส่วนของ Top Cap และอุปกรณ์รางลูกปืนสำหรับการทดสอบ

2.1.6 ลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดค่าต่าง (Sensor Equipment)

- เครื่องมือตรวจวัดจะมีอยู่ด้วยกัน 4 ประเภทซึ่งประกอบด้วย เครื่องมือวัดทางด้านแรง (Load Cell), เครื่องวัดทางด้านการเคลื่อนตัว (Linear Variable Displacement Transducer), เครื่องมือวัดด้านการเสียรูป (Strain Gage), และเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Pressure Transducer) ดังภาพที่ 79

- เครื่องมือวัดทางด้านแรงจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ตัว คือ เครื่องมือวัดแรงในแนวราบ (Shear Force) และ เครื่องมือวัดแรงในแนวตั้ง (Normal Force) ซึ่งสามารถวัดค่าแรงได้สูงสุด 1000 และ 10000 กิโลกรัม ตามลำดับ

- เครื่องมือวัดทางด้านการเคลื่อนตัวจะมีสองตัวเช่นกัน คือ เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้าง (Horizontal Displacement) และเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (Vertical Displacement) ซึ่งทั้งสองตัวมีความละเอียดในการอ่านอยู่ที่ 0.001 มิลลิเมตรและสามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวได้สูงสุด 25 มิลลิเมตร

- เครื่องมือวัดด้านการเสียรูปจะฝังอยู่ในเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งมีระยะในการอ่านอยู่ที่ 120 มิลลิเมตร และมีความละเอียดอยู่ที่ 0.001 มิลลิเมตร

- เครื่องมือวัดแรงดันน้ำจะมียู่ด้วยกัน 3-4 ตัว ซึ่งจะติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างซึ่งมีความละเอียดในการอ่านอยู่ที่ 0.01 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 79 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดค่าแรงและการเคลื่อนที่ทั้งทางแนวราบและแนวตั้ง

2.1.7 ลักษณะของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลและผลการทดสอบ (Data Logger)

- อุปกรณ์สำหรับการจัดเก็บข้อมูลและผลการทดสอบจะใช้คอมพิวเตอร์ (Personal Computer) และเครื่องบันทึกค่าอัตโนมัติ (Automatic Data Logger Unit) ร่วมกัน โดยเครื่องบันทึกค่าอัตโนมัติจะมียู่ด้วยกัน 3 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งใช้เก็บค่าจากเครื่องมือวัดทางด้านแรงและการเคลื่อนตัว, ส่วนที่สองใช้เก็บค่าจากเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ, และส่วนที่สามใช้เก็บค่าจากเครื่องมือวัดด้านการเสียรูป ดังภาพที่ 80



ภาพที่ 80 อุปกรณ์สำหรับการเก็บข้อมูลทดสอบ (Data Logger) และอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ

2.2 การสอบเทียบเครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ

2.2.1 การสอบเทียบแรงต้านของเครื่องมือที่เกิดขึ้นระหว่างการเนียน

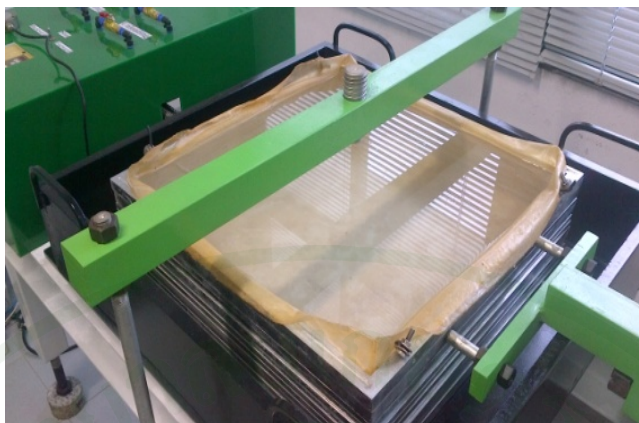
- ในการสอบเทียบจะทำการเนียนตัวอย่างผ่านน้ำ โดยจะสมมติว่าน้ำไม่มี
ความสามารถในการต้านทานแรงเนียน ซึ่งจะทำให้ทราบค่าแรงเสียดทาน (Friction) ที่เกิดขึ้นใน
อุปกรณ์

- ขั้นแรกจะเริ่มจากการเตรียมเครื่องมือทดสอบ โดยตั้งระยะการเคลื่อนตัว,
เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบและเครื่องมือวัดแรงในแนวราบให้ได้ค่าการอ่านที่ศูนย์

- ติดตั้งกรอบหุ้มตัวอย่าง (Stack Hollow Rigid Plate) รวมถึงอุปกรณ์ที่
เกี่ยวข้องให้เรียบร้อย และใส่แผ่นยางหุ้มตัวอย่าง (Rubber Membrane) ลงไปในอ่างเนียนตัวอย่าง
จากนั้นเติมน้ำเข้าไปใน Rubber Membrane ให้เต็ม (ภาพที่ 81)

- ตั้งความเร็วในการเนียนตามอัตราที่จะใช้ทดสอบจริง ซึ่งในครั้งนี้จะใช้
อัตราการเนียนอยู่ที่ 0.14 มิลลิเมตรต่อนาที และทำการตั้งค่าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้พร้อม
สำหรับการสอบเทียบ รวมถึงตั้งค่าในการอ่านให้ได้ค่าศูนย์อีกครั้งก่อนสั่งให้โปรแกรมเริ่มบันทึก
ค่า

- เริ่มทำการสอบเทียบโดยการปรับ Toggle Switch ของเครื่องมือทดสอบ
ไปที่ตำแหน่ง Forward เครื่องมือทดสอบจะเริ่มเคลื่อนที่ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเครื่องมือ
บันทึกค่าอัตโนมัติจะเริ่มทำการเก็บค่า โดยจะได้ผลเป็นค่าแรงเสียดทานกับระยะการเคลื่อนตัว
ตามที่กำหนดไว้ในโปรแกรม ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปหาค่าปรับแก้ของเครื่องมือต่อไป



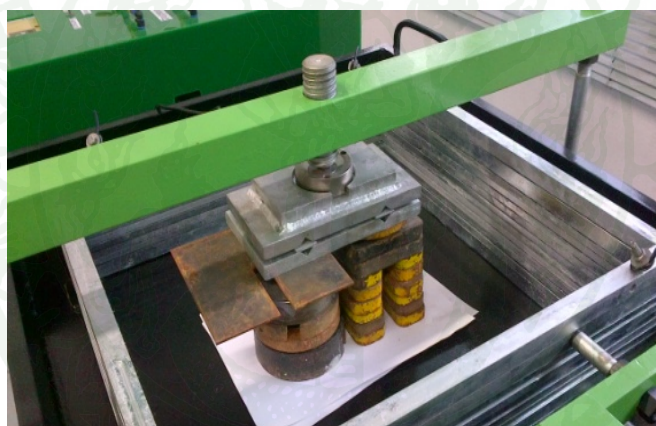
ภาพที่ 81 การสอบเทียบค่าแรงต้านของเครื่องมือที่เกิดขึ้นระหว่างการเลื่อน

2.2.1 การสอบเทียบการยุบตัวของเครื่องมือที่เกิดขึ้นระหว่างการให้น้ำหนักบรรทุก

- ในการสอบเทียบจะใช้การให้น้ำหนักบรรทุกแก่เครื่องมือทดสอบ โดยจะเริ่มจากค่าน้ำหนักบรรทุกน้อยไปหาค่าน้ำหนักบรรทุกมากที่สุดที่ใช้งาน ซึ่งในงานทดสอบครั้งนี้จะสอบเทียบค่าน้ำหนักมากที่สุดที่ 1400 กิโลกรัม (ภาพที่ 82)
- ขั้นแรกจะเริ่มจากการเตรียมเครื่องมือทดสอบ โดยตรวจสอบระบบว่าตัวทุกส่วนให้อยู่ในตำแหน่งปิดไว้ก่อนและปรับอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งให้อยู่ตำแหน่งที่ต่ำที่สุดเพื่อไม่ให้คานเคลื่อนตัวขึ้นจนทำให้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ชนกับแผ่นเหล็กอ้างอิงจนเกิดความเสียหาย
- ทำการเปิดระบบให้แรงดันลมและปรับค่าแรงดันลมที่ Digital Regulator ให้ได้เท่ากับ 0.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ต่อมาทำการเปิดวาล์วในตำแหน่ง Unloading จากนั้นทำการติดตั้งระบบคานให้น้ำหนักบรรทุกให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของอ่างเลื่อน
- นำเหล็กต้นมาวางไว้ในตำแหน่งตรงกลางเพื่อค้ำยันระหว่างคานให้น้ำหนักกับอ่างเลื่อนไว้ โดยที่ให้ความสูงพอที่จะติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงในแนวดิ่งได้ จากนั้นทำการปรับแรงดันลมให้เหลือ 0.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำการปิดวาล์ว Unloading ซึ่งคานให้น้ำหนักบรรทุกจะเลื่อนลงมาติดกับแผ่นเหล็ก

- ทำการปรับอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งให้ชนกับแผ่นเหล็กอ้างอิง จากนั้นทำการตั้งค่าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้พร้อมสำหรับการสอบเทียบ รวมถึงตั้งค่าในการอ่านให้ได้ค่าศูนย์ ทั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและอุปกรณ์วัดแรงในแนวดิ่ง ก่อนสั่งให้โปรแกรมเริ่มทำการบันทึกค่า

- เริ่มทำการสอบเทียบค่าการยุบตัวของเครื่องมือ โดยการปรับค่าแรงดันลมให้ได้ปริมาณน้ำหนักรรทุกจากค่าน้อยไปหาค่ามาก ซึ่งการทดสอบในที่นี้จะเริ่มจากแรงดันลมที่ 0.50 ไปจนถึง 4.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะได้ค่าน้ำหนักรรทุกสูงสุดประมาณ 1400 กิโลกรัม โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเครื่องมือบันทึกค่าอัตโนมัติจะเริ่มทำการเก็บค่า โดยจะได้ผลเป็นค่าน้ำหนักรรทุกกับระยะการยุบตัวตามแรงดันลมที่ใส่เข้าไป ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปหาค่าปรับแก้ของเครื่องมือต่อไป



ภาพที่ 82 การสอบเทียบการยุบตัวของเครื่องมือที่เกิดขึ้นระหว่างการให้น้ำหนักรรทุก

3. การศึกษาและการรวบรวมผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในประเทศไทย (กรณีศึกษาโครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ)

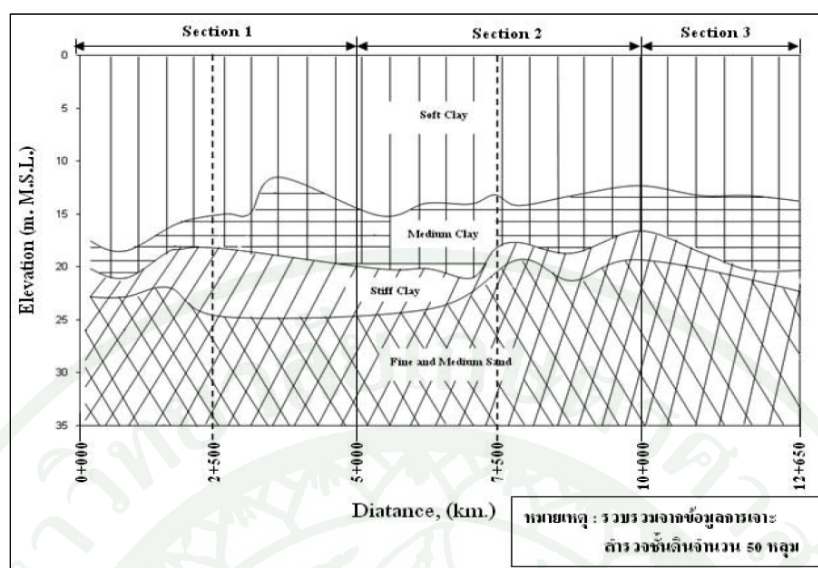
ในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาถึงรูปแบบการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่นิยมใช้ในประเทศไทย เพื่อนำมาเป็นแบบจำลองในการทดสอบการเสียดทานตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ ซึ่งการรวบรวมข้อมูลจะประกอบไปด้วย

3.1 ลักษณะสภาพชั้นดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นตัวอย่างที่เก็บมาจากโครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed Sample) ซึ่งจะต้องมีการนำมาเตรียมตัวอย่างแบบสร้างใหม่ (Reconstituted Sample) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาและรวบรวมคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนสุวรรณภูมิเพื่อใช้เปรียบเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ โดยให้ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่นี้มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างที่อยู่ในสนามซึ่งสภาพชั้นดินในสนามมีลักษณะดังนี้

3.1.1 ระดับความลึกของชั้นดิน

- ชั้น Soft Clay จะมีความลึกอยู่ที่ 0 ถึง 15 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวปนตะกอน ความเหนียวสูง (CH) มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำถึงต่ำมาก (ภาพที่ 83)
- ชั้น Medium Clay จะมีความลึกอยู่ที่ 15 ถึง 20 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวปนตะกอนความเหนียวต่ำ (CL) มีความแข็งปานกลาง
- ชั้น Stiff Clay จะมีความลึกอยู่ที่ 20 ถึง 25 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวปนตะกอนความเหนียวต่ำ (CL) มีความแข็งปานกลางถึงแข็งแรง
- ชั้น Medium Dense Sand จะมีความลึกอยู่ 25 เมตรเป็นต้นไป เป็นชั้นทรายปนดินเหนียว (SC) มีความหนาแน่นปานกลาง

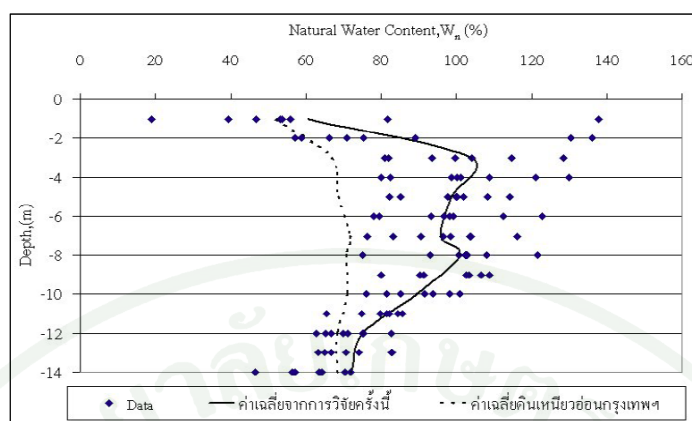


ภาพที่ 83 ลักษณะสภาพชั้นดินในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

3.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดิน

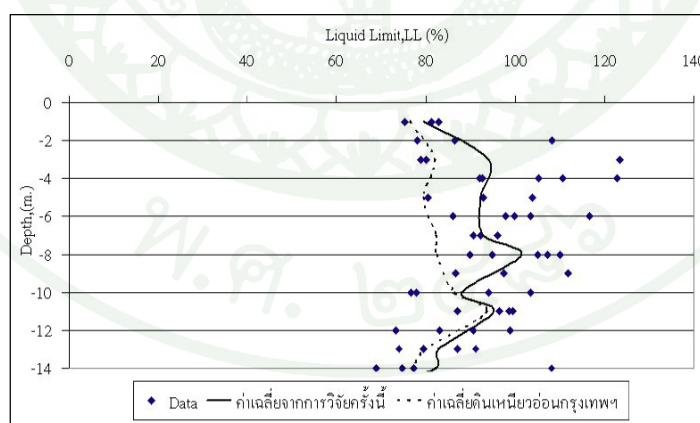
- ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติในมวลดิน (Natural Water Content, W_n) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.84 % และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 83.21 % ซึ่งจากข้อมูลพบว่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติในมวลดินมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 140 % ดังภาพที่ 84



ภาพที่ 84 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติกับความลึก

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

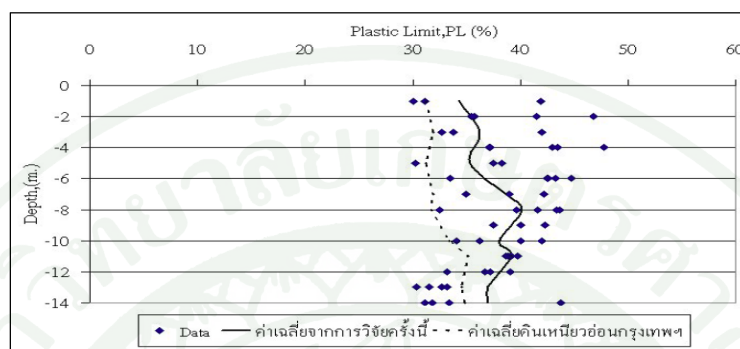
- ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ของชั้นดินในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.70 % และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 93.11 % ซึ่งจากข้อมูลพบว่าค่าพิกัดเหลวมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 120 % ดังภาพที่ 85



ภาพที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดเหลวกับความลึก

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

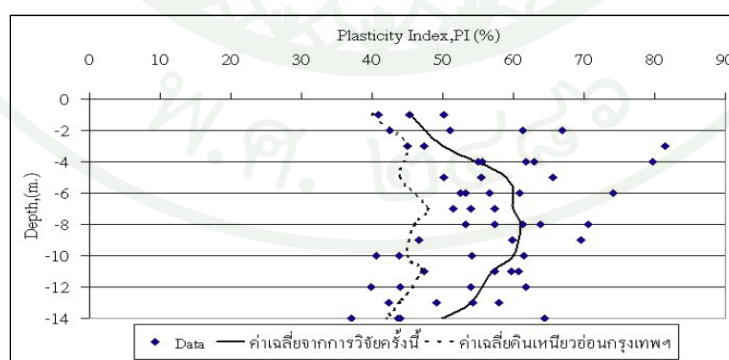
- พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.22 % และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.51 % เมื่อพิจารณาค่าพิกัด ซึ่งจากข้อมูลพบว่าค่าพิกัดพลาสติกมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 45 % ดังภาพที่ 86



ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดพลาสติกกับความลึก

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

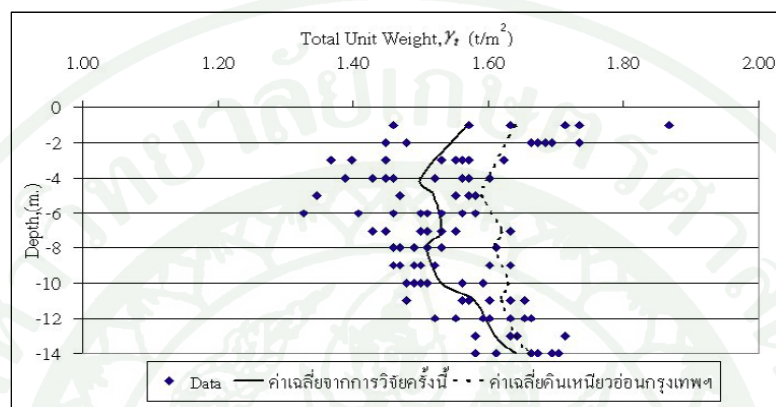
- ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51.26 % และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.47 % ซึ่งจากข้อมูลพบว่าค่าดัชนีสภาพพลาสติก มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 80 % ดังภาพที่ 87



ภาพที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีสภาพพลาสติกกับความลึก

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

- หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight, γ_t) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.60 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.54 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจากข้อมูลพบว่าค่าดัชนีสภาพพลาสติก มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 1.70 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ดังภาพที่ 88

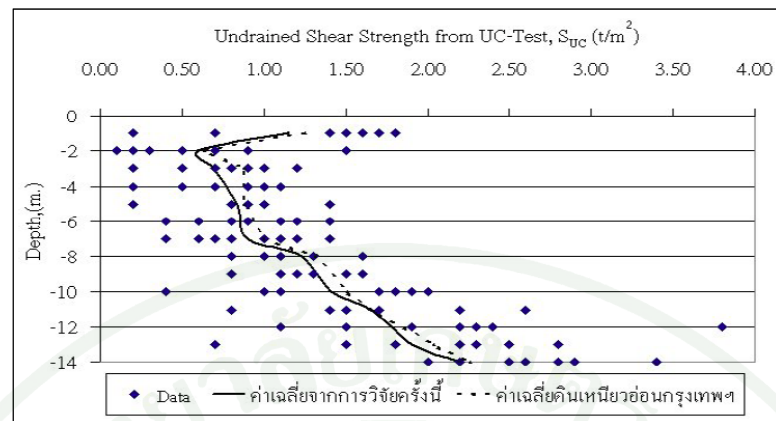


ภาพที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักรวมกับความลึก

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

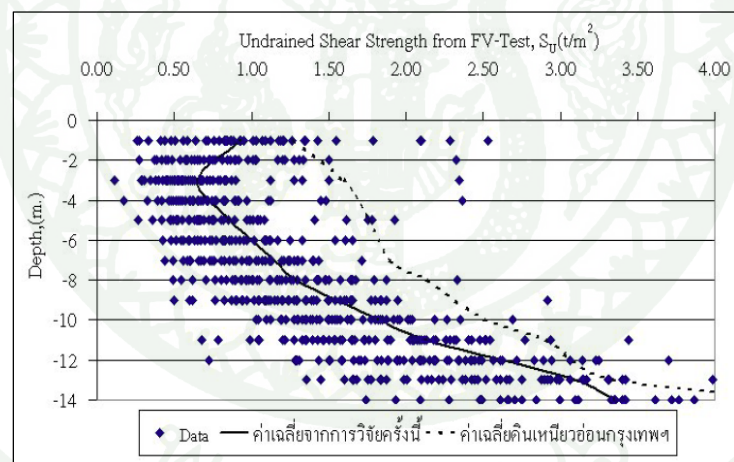
3.1.3 คุณสมบัติทางด้านกำลังของชั้นดิน

- กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Unconfined Compression Test (S_u) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.37 ตันต่อตารางเมตร และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.18 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งจากข้อมูลพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าน้อยกว่า 1.25 ตันต่อตารางเมตร จัดได้ว่าเป็นดินเหนียวอ่อนมาก (Very Soft Clay) ดังภาพที่ 89



ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, S_{uc} กับความลึก

ที่มา: สมพงษ์ (2552)



ภาพที่ 90 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, S_{fv} กับความลึก

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

- กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Field Vane Shear Test (Su_{FV}) เป็นการทดสอบที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตรมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.78 ตันต่อตารางเมตร และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.39 ตันต่อตารางเมตร ดังภาพที่ 90

3.1.4 สรุปข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินในเชิงสถิติ

จากข้อมูลการศึกษาของสมพงษ์ (2552) ทำให้สามารถสรุปคุณสมบัติทางด้านกายภาพและกำลังของชั้นดินในเชิงสถิติได้ดังตารางที่ 9 และ 10 เพื่อเป็นข้อเปรียบเทียบและขอบเขตในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเป็นตัวอย่างดินแบบสร้างใหม่ (Reconstituted Sample) โดยให้ตัวอย่างดินแบบสร้างใหม่นี้มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างดินในสนามมากที่สุด

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิในช่วงความลึก 1.00-3.00 เมตร

พารามิเตอร์	หน่วย	จำนวนข้อมูล	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
W_n	%	75	137.80	35.76	71.84	26.11
LL	%	49	123.40	52.38	86.70	15.29
PL	%	49	48.48	26.90	36.22	5.17
PI	%	50	81.40	27.85	51.26	11.76
γ_t	t/m^3	74	1.89	1.37	1.60	0.12
Su_c	t/m^2	46	3.45	0.37	1.37	0.81
Su_{FV}	t/m^2	240	2.53	0.31	0.78	0.35

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

ตารางที่ 10 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนในบริเวณ
โครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิในช่วงความลึก 3.00-14.00 เมตร

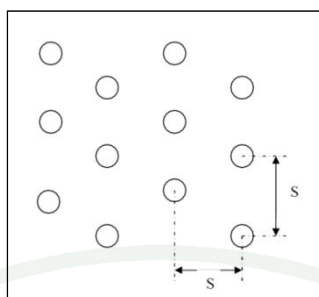
พารามิเตอร์	หน่วย	จำนวน ข้อมูล	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
W_n	%	176	129.90	46.23	83.21	18.22
LL	%	106	122.70	57.44	93.11	12.81
PL	%	111	51.04	17.43	36.51	5.63
PI	%	107	79.70	27.79	55.47	10.05
γ_t	t/m ³	171	1.86	1.33	1.54	0.09
Su_c	t/m ²	141	2.80	0.29	1.18	0.59
Su_{FV}	t/m ²	938	3.96	0.32	1.39	0.72

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

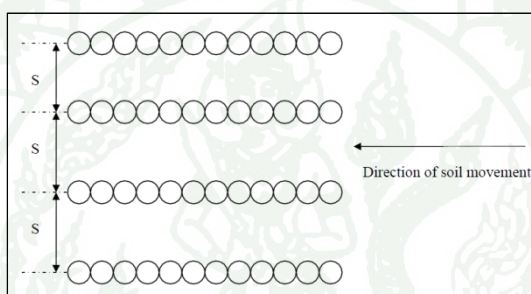
3.2 ลักษณะของการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

3.2.1 ขนาดความยาว, เส้นผ่านศูนย์กลาง, และรูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์

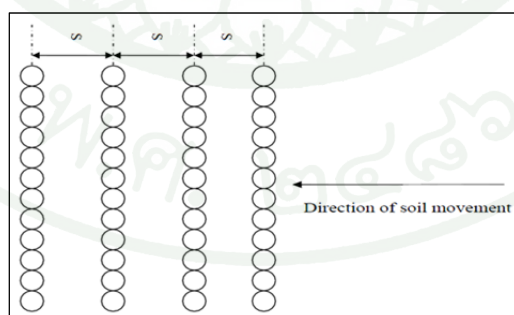
สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในประเทศไทย นั้น มักจะใช้ความยาวของเสาเข็มตั้งแต่ 8 เมตร จนถึง 15 เมตร (แล้วแต่สภาพชั้นดิน) โดยปลายของเสาเข็มจะวางอยู่ในชั้นดินที่ค่อนข้างมีความแข็งแรงกว่าเช่น ชั้นดินเหนียวปานกลางถึงแข็ง และเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์มักจะใช้ที่ขนาด 0.6 เมตร ถึง 1.0 ดังภาพที่ 91



ภาพที่ 93 รูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดี่ยวชนิดสามเหลี่ยม (Triangular Single Pattern)



ภาพที่ 94 รูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงชนิดขนานตามแนวการเคลื่อนที่ของดิน (Longitudinal Wall Column)



ภาพที่ 95 รูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบกำแพงชนิดไม่ขนานตามแนวการเคลื่อนที่ของดิน (Transvers Wall Column)

3.2.2 คุณสมบัติและการเปรียบเทียบเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละวิธี

วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่นิยมใช้ในประเทศไทยมีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่ วิธี Low Pressure Mechanical Mixing (LP), วิธี Jet Grouting (JG), วิธี Modified Dry Mixing (MDM), และวิธี High Pressure Mechanical Mixing (HP) ซึ่งแต่ละวิธีก็จะให้คุณสมบัติทั้งด้านกายภาพและทางด้านวิศวกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

- ปริมาณความชื้นในเสาเข็มดินซีเมนต์: จากข้อมูลตามตารางที่ 11 พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นในเสาเข็มดินซีเมนต์ของวิธี Jet Grouting ให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากปริมาณน้ำปูนที่ใช้ในการผสมมีอัตราการไหลของน้ำปูนค่อนข้างมากกว่าวิธีอื่น

- กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ: จากข้อมูลตามตารางที่ 12 พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของวิธี Modified Dry Mixing ให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากการเพิ่มน้ำเข้าไปในมวลดินอย่างเหมาะสมโดยคำนึงถึงปริมาณน้ำของดินเดิมที่มีอยู่แล้ว ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพที่ดี

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบปริมาณความชื้นในเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Section	Method	N	Natural Water Content, (%)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	578	105.80	13.00	67.71	20.40
2	Low Pressure	463	106.50	14.40	67.86	14.53
2	Jet Grouting	183	244.14	26.90	101.34	19.71
2	Modified Dry Mixing	131	106.06	10.20	57.83	11.48
3	High Pressure	519	88.40	20.10	53.55	13.36

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Section	Method	N	Undrained Shear Strength, (t/m ²)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	524	147.00	27.00	63.22	23.79
2	Low Pressure	463	168.00	31.00	76.74	27.19
2	Jet Grouting	226	209.00	31.00	87.58	44.55
2	Modified Dry Mixing	116	229.00	18.00	104.73	32.82
3	High Pressure	492	147.00	13.00	71.95	25.35

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น: จากข้อมูลตามตารางที่ 13 พบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัสความยืดหยุ่นของวิธี Modified Dry Mixing ให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น หากพิจารณาถึงค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติและค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของวิธี Modified Dry Mixing ร่วมด้วยพบว่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์กัน เมื่อค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดินซีเมนต์น้อย ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้เนื้อของวัสดุมีความแข็งแต่ค่อนข้างเปราะ แต่วิธี High Pressure Mechanical Mixing มีพารามิเตอร์ที่ตรงข้ามกันคือ เนื้อของวัสดุที่ได้จะมีความแข็งปานกลางแต่มีความยืดหยุ่นที่ดีกว่า

- ค่าความเครียดที่กำลังต้านทานสูงสุด (Strain at Failure): จากข้อมูลตามตารางที่ 14 พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความเครียดที่กำลังต้านทานสูงสุดของวิธี High Pressure Mechanical Mixing ให้ค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น และยังสามารถหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นแบบ Secant Modulus at 50 % (q_u) ของแต่ละวิธีได้ ซึ่งแสดงออกมาเป็นสมการความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Section	Method	N	Modulus of Elasticity, (t/m ²)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	564	195755	2926	22979	14905
2	Low Pressure	463	78204	6094	26211	10860
2	Jet Grouting	226	75300	8571	30209	15312
2	Modified Dry Mixing	131	95666	10000	31401	12931
3	High Pressure	547	145100	2583	16194	14771

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบค่าความเครียดที่กำลังต้านทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Section	Method	N	Strain at Failure, (%)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	298	2.60	0.07	0.96	0.37
2	Low Pressure	417	2.00	0.30	0.83	0.30
2	Jet Grouting	226	1.60	0.30	0.62	0.20
2	Modified Dry Mixing	131	1.61	0.30	0.66	0.18
3	High Pressure	489	2.00	0.20	1.02	0.27

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบค่าความเครียดที่กำลังต้านทานสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ของแต่ละวิธี: ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Method	สมการถดถอย	r^2	N
Low Pressure	$E_{50} = 319Su$	0.613	1974
Jet Grouting	$E_{50} = 320Su$	0.419	452
Modified Dry Mixing	$E_{50} = 281Su$	0.734	232

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

- การเปรียบเทียบดัชนีความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Strength Index): เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ เพื่อให้ทราบถึงการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในแต่ละวิธีการทดสอบ โดยแบ่งออกเป็น การเปรียบเทียบเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม, การเปรียบเทียบเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการต่อดินเดิม, และการเปรียบเทียบเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามต่อตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงของดินซีเมนต์ในแต่ละวิธี (Strength Index)

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)		
เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Low Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,LP}$	36
Jet Grouting	$I_{S,JG}$	43
Modified Dry Mixing	$I_{S,MDM}$	53
High Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,HP}$	38
ตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการต่อดินเดิม		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Wet Mixed	$I_{S,L}$	54

ตารางที่ 16 (ต่อ)

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)		
เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Low Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,F\&L,LP}$	0.7
Jet Grouting	$I_{S,F\&L,JG}$	0.8
Modified Dry Mixing	$I_{S,F\&L,MDM}$	0.9
High Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,F\&L,HP}$	0.7

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

- การเปรียบเทียบดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index): เป็นการเปรียบเทียบค่าปริมาณความชื้นของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามต่อปริมาณความชื้นของดินเดิม เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในมวลดินในแต่ละวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบค่าดัชนีความชื้นของดินซีเมนต์ในแต่ละวิธี (Water Content Index)

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index)		
เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Low Pressure Mechanical Mixing	$I_{W,LP}$	0.8
Jet Grouting	$I_{W,JG}$	1.2
Modified Dry Mixing	$I_{W,MDM}$	0.6
High Pressure Mechanical Mixing	$I_{W,HP}$	0.7

ที่มา: สมพงษ์ (2552)

4. การทดสอบการเนื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ในลักษณะต่างๆและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

หลังจากขั้นตอนการศึกษารวบรวมข้อมูลของทั้งลักษณะการทดสอบการเนื่อนตรงอย่างง่าย และการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ รวมถึงการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบการเนื่อนตรงขนาดใหญ่เสร็จสิ้นแล้ว จะเริ่มในส่วนของการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง

การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่างนี้ จะประกอบไปด้วยการทดสอบ 2 ส่วนหลักๆคือ การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพและการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม โดยเป็นตัวอย่างดินที่เก็บมาจากบริเวณโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นตัวอย่างดินแบบถูกรบกวน (Disturbed Sample) ที่ระดับความลึก 3 เมตร ซึ่งการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพ

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพของดิน เป็นการทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติและชนิดของดินในเบื้องต้น รวมถึงการคาดเดาถึงพฤติกรรมทั้งทางด้านกำลัง และการยุบตัวของดินว่าจะไปในทิศทางใด ซึ่งมีการทดสอบอยู่ 3 อย่างคือ

- การทดสอบ Atterberg's Limits: เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL), พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL), และพิกัดกึ่งของแข็ง (Shrinkage Limit, SL) ของดิน ซึ่งการทดสอบนี้นอกจากจะเป็นตัวบอกชนิดและแร่ธาตุของดินแล้ว ยังสามารถใช้ประเมินพฤติกรรมเบื้องต้นของดินได้อีกด้วย

- การทดสอบหาค่าความชื้นของดินตามธรรมชาติ (Natural Water Content): เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าปริมาณความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติ และใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Atterberg's Limits หรือผลการทดสอบอื่นๆต่อไป

- การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักรวมของดิน (Total Unit Weight): เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักรวมของตัวอย่างดิน ซึ่งค่าหน่วยหนักนี้จะถูกนำไปใช้ในการกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างดินในระหว่างขั้นตอนการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Stage) และการทดสอบการเฉือนตัวอย่าง (Shearing Stage)

4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน เป็นการทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติทางด้านกำลัง (Shear Strength) และการยุบตัว (Compressibility) ของดิน ซึ่งวิธีการทดสอบก็จะมียู่ด้วยกันหลากหลายวิธี สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เลือกที่จะใช้การทดสอบการเฉือนตรงแบบปกติ (Direct Shear Test) เนื่องจากมีความคล้ายคลึงกับการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายและสามารถเตรียมตัวอย่างได้ไม่ยาก ซึ่งตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ Remold Sample โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การทดสอบหาค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) และมุมเฉียดทาน (Friction Angle): เป็นการทดสอบและวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังของดินโดยจะได้เป็นพารามิเตอร์ 2 ตัวคือค่า Cohesion, (c) และค่า Friction Angle, (ϕ) ซึ่งผลจากการทดสอบการเฉือนตรงแบบปกตินี้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่

- การทดสอบการยุบตัวและการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation Test): เป็นการทดสอบหาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินตามระยะเวลา โดยผลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์และคาดคะเนระยะเวลาในอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสร้างใหม่ในขั้นตอน Consolidation Stage ของการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ เพื่อใช้ออกแบบการทดสอบต่อไป

4.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil-Cement Column Sample)

ตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.0 เซนติเมตร มีความยาวเท่ากับ 14.0 เซนติเมตร โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ (Cement Content) เท่ากับ 220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรดินเปียก ซึ่งจะใช้เวลาบ่มเป็นเวลา 7 วัน ก่อนการนำมาทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ทำการเตรียมแบบ PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.0 เซนติเมตร และมีความยาวเท่ากับ 14.0 เซนติเมตร จำนวน 36-40 ชิ้น มาทำความสะอาดและทำการทาวาสลินเพื่อป้องกันการติดระหว่างดินซีเมนต์และแบบ PVC ดังภาพที่ 96



ภาพที่ 96 การเตรียมแบบหล่อแท่งดินซีเมนต์เพื่อใช้ในการทดสอบ

- ทำการชั่งดินให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ (ในที่นี้ใช้น้ำหนักดิน 6 กิโลกรัม และปูนซีเมนต์ 0.77 กิโลกรัม ต่อ 1 การทดสอบ) และเนื่องจากดินเหนียวตัวอย่างนี้มีความชื้นตามธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ 130 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการเติมน้ำเข้าไป จากนั้นทำการผสมดินและปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องผสมดังภาพที่ 97



ภาพที่ 97 การผสมดินและปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องผสม

- เมื่อส่วนผสมต่างๆเข้ากันดีแล้ว ให้ทำการใส่ดินซีเมนต์เข้าไปในแบบหล่อ PVC ซึ่งในการทดสอบหนึ่งครั้งจะใช้แท่งดินซีเมนต์ทั้งหมด 36 ตัวอย่าง ในการใส่ดินซีเมนต์ในทำการเคาะแบบหล่อ PVC เพื่อให้ดินซีเมนต์อัดตัวกันแน่นและไม่เกิดเป็นโพรงหรือช่องว่างในแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ โดยในแต่ละครั้งของการทดสอบต้องมีการติดตั้ง Strain Gauge เข้าไปด้วย 4 ตัว ซึ่งจะถูกติดลงบนผิวของแท่งดินซีเมนต์ ดังภาพที่ 98



ภาพที่ 98 การติดตั้ง Strain Gauge ลงบนผิวของตัวอย่างดินซีเมนต์

- เมื่อทำการหล่อดินซีเมนต์ในแบบ PVC เสร็จสิ้นทั้งหมดแล้ว ให้ทำการนำตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์มาบ่มในน้ำ ดังภาพที่ 99 ซึ่งจะใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน ก่อนการนำมาทดสอบ



ภาพที่ 99 การนำตัวอย่างแท่งดินซีเมนต์มาบ่มในน้ำ

4.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay Sample)

ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวแบบสร้างใหม่ จะยึดหลักการตามวิธีของ Burland (1990) กล่าวคือจะทำการผสมน้ำกับดินตัวอย่างให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเพื่อให้โครงสร้างเดิมของดินนั้นแตกตัวออกจากกัน ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ผสมจะมีค่าเป็น 1.25-1.50 ของค่าพิกัดเหลว ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ปริมาณน้ำที่ 1.25 เท่าของค่าพิกัดเหลว เพื่อให้ง่ายต่อทำและตัวอย่างดินไม่เหลวจนเกินไป จากการทดสอบหาค่าพิกัดเหลวจากตัวอย่างที่เก็บมาได้ พบว่าตัวอย่างดินเหนียวสุวรรณภูมิมีค่าพิกัดเหลวเฉลี่ยอยู่ที่ 112.11 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มน้ำเข้าไปให้ตัวอย่างดินได้ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1.25 เท่าของค่าพิกัดเหลวซึ่งก็คือ 140.14 เปอร์เซ็นต์ โดยการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่มีรายละเอียดดังนี้

- ทำการหาค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของตัวอย่างดินตามมาตรฐาน ASTM D2216 เพื่อให้ทราบถึงปริมาณน้ำในตัวอย่างดินเริ่มต้น สำหรับนำไปคำนวณหาน้ำหนักของน้ำที่ต้องใส่เข้าไปในระหว่างการผสมดิน ดังภาพที่ 100



ภาพที่ 100 การหาค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของตัวอย่างดิน

- ทำการชั่งน้ำหนักดินให้ได้ปริมาณที่สามารถทดสอบได้ต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ดินตัวอย่างหนัก 60 กิโลกรัมต่อหนึ่งตัวอย่าง ดังภาพที่ 101



ภาพที่ 101 การชั่งน้ำหนักดินเพื่อเตรียมการทำตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

- ทำการคำนวณน้ำหนักของน้ำในมวลดินเริ่มต้น (ที่น้ำหนักดิน 60 กิโลกรัม) และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องใส่เพิ่มเข้าไปในดินให้ได้ปริมาณน้ำที่ 1.25 เท่าของค่าพิกคัลเลว หลังจากนั้นทำการผสมน้ำเพิ่มเข้าไปในตัวอย่างตามปริมาณที่คำนวณได้ ดังภาพที่ 102



ภาพที่ 102 การเพิ่มน้ำเข้าไปเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นที่ต้องการ

- ทำการผสมดินกับน้ำด้วยเครื่องผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ไม่ให้ดินตัวอย่างจับตัวกันเป็นก้อน เมื่อผสมเสร็จจะได้ตัวอย่างดินแบบสร้างใหม่ ดังภาพที่ 103



ภาพที่ 103 ตัวอย่างดินเหนียวแบบสร้างใหม่เมื่อผสมเสร็จสิ้นแล้ว

- ทำการหาค่าปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินในตำแหน่งต่างๆของภาชนะ เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณน้ำและความเป็นเนื้อเดียวกันของดินตัวอย่างหลังการผสม

4.4 ขั้นตอนการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Test)

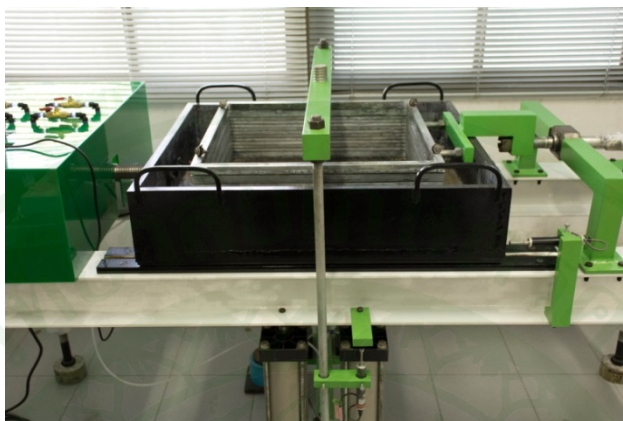
การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่จะมีอยู่ 3 ขั้นตอนหลักๆ โดยจะประกอบไปด้วยการเตรียมเครื่องมือทดสอบและการเตรียมตัวอย่างดิน, การติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมต่างๆ, และการทดสอบตัวอย่างในลักษณะต่างๆ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การเตรียมเครื่องมือทดสอบและการเตรียมตัวอย่างดิน

การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเดิม และการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ขั้นแรกจะเริ่มจากการเตรียมเครื่องมือทดสอบโดยตั้งระยะการเคลื่อนที่ของกล่องเฉือนให้อยู่ในตำแหน่งที่ศูนย์ พร้อมทั้งปรับคานสำหรับให้น้ำหนักบรรทุกให้อยู่ในตำแหน่งสูงสุด (ปรับอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งให้อยู่ตำแหน่งที่ต่ำที่สุดเพื่อไม่ให้

การเคลื่อนตัวขึ้นจนทำให้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ชนกับแผ่นเหล็กอ้างอิงจนเกิดความเสียหาย) ดังภาพที่ 104



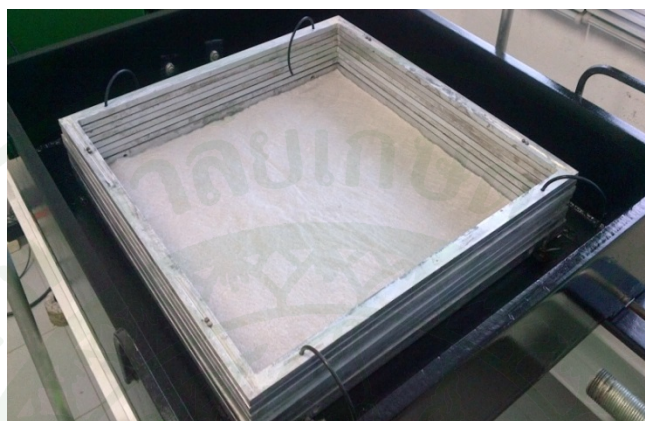
ภาพที่ 104 การตั้งระยะการเคลื่อนที่ของกล่องเงื่อนไขให้อยู่ในตำแหน่งที่ศูนย์

- ประกอบชิ้นส่วนของ Rigid Stack Ring ตามลำดับหมายเลขบนแผ่นเหล็ก กล่าวคือชิ้นที่มีความหนา 1.80 เซนติเมตร หมายเลข 1 อยู่ในตำแหน่งล่างสุด พร้อมทั้งร้อย Rubber O Ring และใส่ลูกปืน (Ball Bearing) เข้าไปทั้ง 4 ด้านของ Rigid Stack Ring ดังในภาพที่ 105



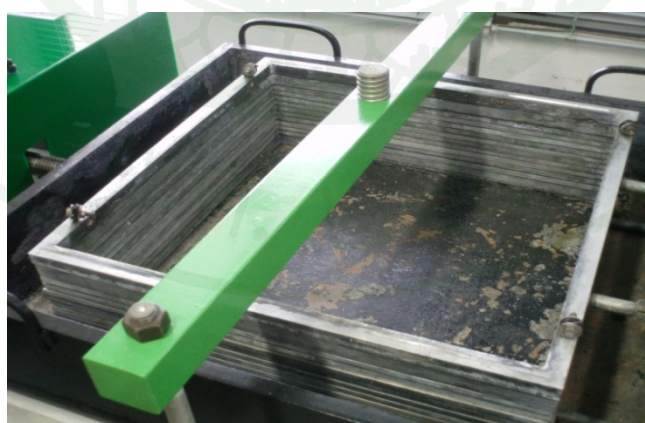
ภาพที่ 105 การประกอบชิ้นส่วนของ Rigid Stack Ring ในขั้นแรก

- จากนั้นใส่ชิ้นส่วนของ Rigid Stack Ring ที่มีความหนา 0.9 เซนติเมตร หมายเลข 1 ตามลงไปโดยทำการร้อย Rubber O Ring และใส่ลูกปัดไปเช่นเดียวกัน ซึ่งจะทำการลักษณะนี้ซ้ำกันไปจนถึงหมายเลข 10 ดังภาพที่ 106



ภาพที่ 106 การประกอบชิ้นส่วนของ Rigid Stack Ring ในส่วนหมายเลข 1-10

- ใส่ Rigid Stack Ring มีความหนา 1.80 เซนติเมตร หมายเลข 2 และ 3 ลงไปตามลำดับ จากนั้นทำการยึดปลาย Rubber O Ring ทั้ง 4 ด้าน ด้วยที่จับยึดและประกอบ Rigid Stack Ring ให้ยึดอยู่กับระบบถ่ายน้ำหนักเลื่อน ดังภาพที่ 107



ภาพที่ 107 ลักษณะของ Rigid Stack Ring ที่ติดตั้งเสร็จสิ้นแล้ว

- ใส่แผ่นยางหุ้มตัวอย่าง (Rubber Membrane) และแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) 2 แผ่นลงไปบนชั้น Rigid Stack Ring สำหรับแผ่นยางหุ้มตัวอย่างให้ใช้คลิปหนีบกระดาษหนีบไว้กับตัว Rigid Stack Ring ดังภาพที่ 108



ภาพที่ 108 การติดตั้งแผ่นยางหุ้มตัวอย่าง (Rubber Membrane) และแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile)

- ใส่ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ลงไปบนชั้น Rigid Stack Ring ให้เต็ม ซึ่งเมื่อเต็มแล้วให้นำแผ่นใยสังเคราะห์มาวางทับบนตัวอย่างและใช้ท่อพีวีซีกลิ้งไปมาให้ทั่วตัวอย่างดิน เพื่อให้ดินตัวอย่างเกิดการอัดตัวกันอย่างสม่ำเสมอและมีผิวหน้าที่เรียบ ดังภาพที่ 109 แต่ถ้าตัวอย่างดินยังไม่มีควมสม่ำเสมอก็ให้เติมตัวอย่างดินเพิ่มหรือปาดตัวอย่างดินที่เกินออกไป



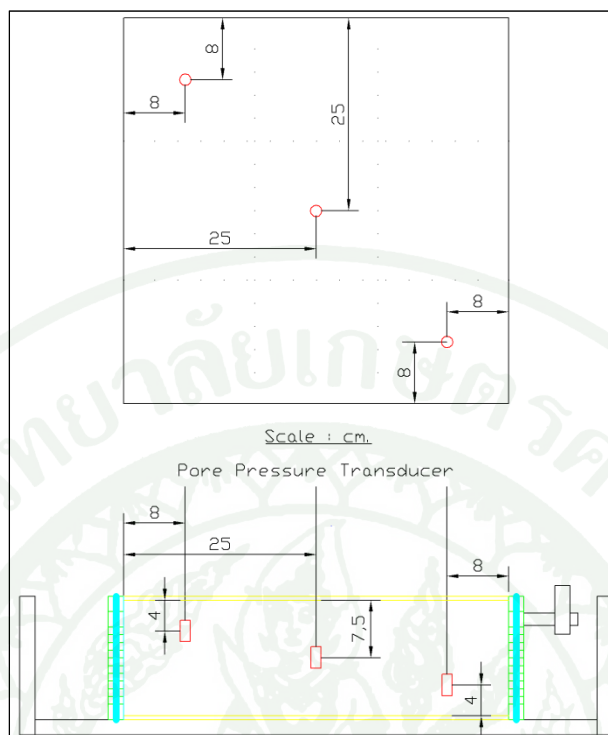
ภาพที่ 109 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ลงไปบนชั้น Rigid Stack Ring

4.4.2 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมต่างๆ

เครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เครื่องมือตรวจวัดที่ฝังเข้าไปในตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือตรวจภายนอกตัวอย่างทดสอบ ซึ่งเครื่องมือตรวจวัดที่ฝังเข้าไปในตัวอย่างทดสอบจะประกอบไปด้วย เครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Water Pressure Sensor) และ เครื่องมือวัดการเสียรูปของวัสดุ (Strain Gauge) ส่วนเครื่องมือตรวจภายนอกตัวอย่างทดสอบจะประกอบไปด้วย เครื่องมือตรวจวัดแรง (Load Cell) และเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ซึ่งมีรายละเอียดการติดตั้งดังนี้

- การติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Water Pressure Sensor): สำหรับเครื่องมือนี้จะเริ่มทำการติดตั้งหลังจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน (ก่อนขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ) ซึ่งเซ็นเซอร์แต่ละตัวจะอยู่ในตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 110 โดยทำการเจาะตัวอย่างดินลงไปให้ได้ความลึกตามที่ต้องการ จากนั้นทำการฝังลงไปตามตำแหน่งต่างๆก่อนที่จะปิดโดยแผ่นใหญ่สังเคราะห์และฝาปิดตัวอย่าง (Top Cap) ตามลำดับ ดังภาพที่ 111

- เครื่องมือวัดการเสียรูปของวัสดุ (Strain Gauge): ตัวเครื่องมือจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางยาว 12 มิลลิเมตร ประกอบด้วยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์อยู่ภายใน ซึ่งจะถูกฝังลงในแท่งดินซีเมนต์ในช่วงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยจะใช้ทั้งหมด 2 ตัวต่อการทดสอบหนึ่งตัวอย่างและจะอยู่ในตำแหน่งต่างๆตามรูปแบบการวางของเสาเข็มดินซีเมนต์



ภาพที่ 110 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ตรวจวัดค่าแรงดันน้ำในตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 111 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันน้ำในตัวอย่างทดสอบ

- เครื่องมือตรวจวัดแรง (Load Cell): เครื่องมือตรวจวัดแรงจะถูกติดตั้งไว้ 2 ตำแหน่ง (แรงในแนวดิ่งและแรงในแนวราบ) นอกตัวอย่างเพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้นทั้งหมดขณะทำการทดสอบ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

- เครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่ (LVDT): เครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่จะถูกติดตั้งไว้ 2 ตำแหน่ง (แรงในแนวดิ่งและแรงในแนวราบ) นอกตัวอย่างเพื่อวัดการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดขณะทำการทดสอบ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.4.3 การทดสอบตัวอย่างดินและดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

ในขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างดินจะมีอยู่ 2 ขั้นตอนหลักๆ โดยจะอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6528-00 ซึ่งจะประกอบไปด้วย ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำและขั้นตอนการเนียนตัวอย่าง ตามลำดับ และลักษณะการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การทดสอบดินเหนียวสร้างใหม่และการทดสอบดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในรูปแบบต่างๆ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดิน (Consolidating Specimen): หลังการเตรียมเครื่องมือทดสอบและการเตรียมตัวอย่างดินในขั้นตอนแรกเสร็จสิ้นแล้ว ต่อไปก็จะเริ่มทำการให้น้ำหนักบรรทุกเพื่อให้ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่เกิดการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองชั้นดินที่มีความลึก 1.5, 3, และ 6 เมตรตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการควบคุมก็จะคล้ายกับการสอบเทียบค่าการยุบตัวของเครื่องมือ ดังภาพที่ 112 ซึ่งในขั้นตอนการอัดตัวคายจะสิ้นสุดลงเมื่อค่าการทรุดตัวหรือค่าการระบายออกของน้ำของตัวอย่างมีค่ามากกว่า 90 % Degree of Consolidation (ASTM D6528-00)



ภาพที่ 112 การทดสอบตัวอย่างในระหว่างขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ

- ขั้นตอนทดสอบการเฉือนตัวอย่างดิน (Shearing Specimen): เมื่อการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่เสร็จสิ้น ก็จะเริ่มทำการเฉือนตัวอย่าง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินเดิม (Unstabilised Soil) และการทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column Improved) โดยจะทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ตามวิธีการทดสอบใน ASTM D6528-00 โดยรักษาปริมาตรของตัวอย่างดินให้คงที่ตลอดเวลาการเฉือน (ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราในการเฉือนที่ความเร็ว 0.14 มิลลิเมตรต่อนาที) ซึ่งตัวอย่างดินหลังจากการเฉือนจะมีลักษณะดังภาพที่ 113

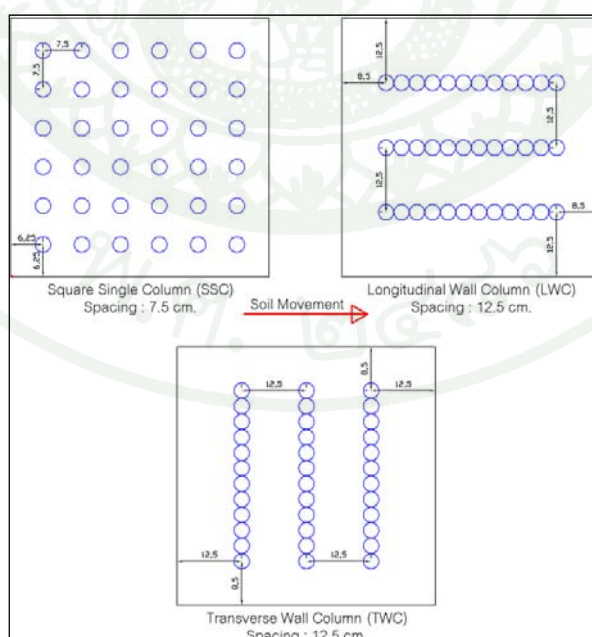


ภาพที่ 113 ลักษณะตัวอย่างทดสอบเมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการเฉือน

สำหรับการทดสอบการเนื่อนตัวอย่างดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จะต้องมีการติดตั้งแท่งดินซีเมนต์ลงไปภายหลังจากการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นแล้ว โดยจะทำการยก ส่วนของ Top Cap ออกมาซึ่งแสดงดังภาพที่ 114 เพื่อทำการติดตั้งแท่งดินซีเมนต์ตามรูปแบบต่างๆ (ภาพที่ 115) จากนั้นในส่วนบนจะถูกปิดด้วยแผ่นใยสังเคราะห์และโรยทรายละเอียดลงไป ตามลำดับเพื่อให้น้ำหนักบรรทุกกระจายสู่ตัวอย่างดินอย่างสม่ำเสมอ โดยมีขั้นตอนดังนี้

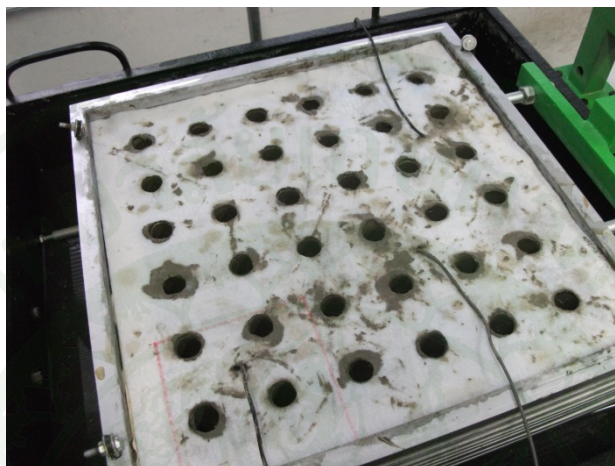


ภาพที่ 114 ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ภายหลังการอัดตัวคายน้ำ



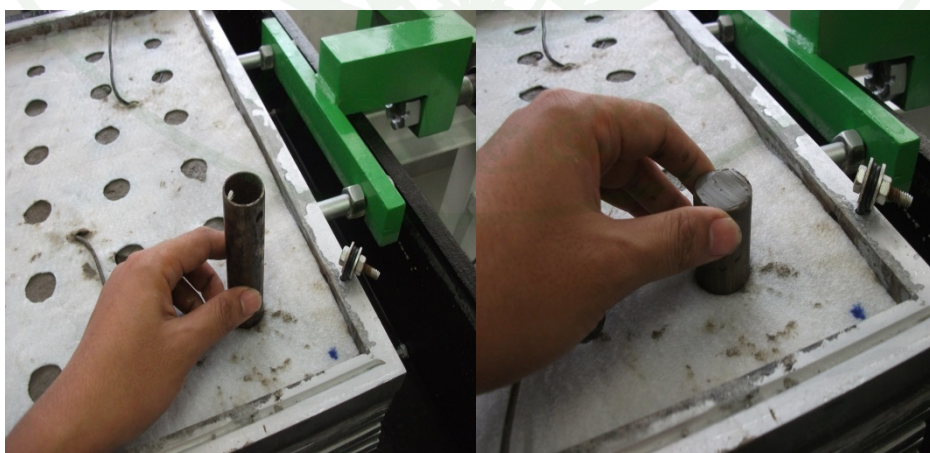
ภาพที่ 115 การติดตั้งแท่งดินซีเมนต์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อทำการทดสอบ

- เมื่อผ่านขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำแล้ว ให้ทำการถอนน้ำหนักบรรทุกและยกส่วนของ Top Cap ออกมา จากนั้นทำการวางแผนไขสักระยะที่ทำการเจาะรูตามรูปแบบต่างๆ มาวางทาบบนตัวอย่างดิน เพื่อใช้เป็นแนวสำหรับการเจาะดินขึ้นมา ดังภาพที่ 116



ภาพที่ 116 การวางแผนไขสักระยะเพื่อวางแผนการเจาะ

- จากนั้นทำการกดตัวอย่างดินด้วยแท่งเหล็กกลวงขนาด 2.8 เซนติเมตร ลงไปให้สุด แล้วค่อยๆ ถอนแท่งเหล็กกลวงขึ้นเพื่อนำตัวอย่างดินที่อยู่ข้างในขึ้นมา จากนั้นจึงนำแท่งดินซีเมนต์ ใสลงไปแทนที่ ดังภาพที่ 117

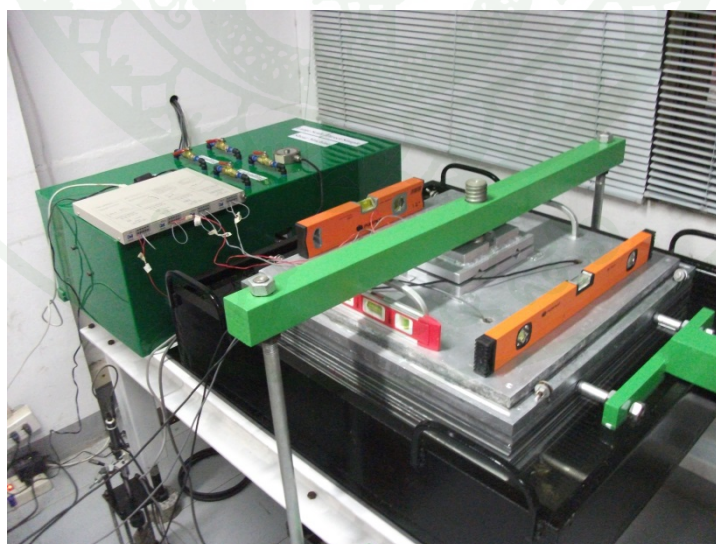


ภาพที่ 117 การเจาะตัวอย่างดินเหนียวและการติดตั้งแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ลงในตัวอย่างดิน

- หลังจากการติดตั้งแท่งดินซีเมนต์ครบทั้งหมดแล้ว จะทำการปรับระดับของแท่งดินซีเมนต์กับดินตัวอย่างให้เท่ากัน ด้วยการโรยทรายละเอียดลงไป ดังภาพที่ 118 โดยให้ความแน่นและระดับความสูงของทรายมีความเท่ากันทั่วทั้งตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการปิดตัวอย่างด้วย Top Cap และทำการให้น้ำหนักบรรทุกที่จะใช้ทดสอบ โดยให้ทั้งน้ำหนักบรรทุกนี้ไว้ประมาณ 48 ชั่วโมง ก่อนทำการเนียนตัวอย่าง ดังภาพที่ 119



ภาพที่ 118 การปรับระดับของตัวอย่างด้วยทรายละเอียด



ภาพที่ 119 การให้น้ำหนักบรรทุก 48 ชั่วโมง ก่อนทำการเนียนตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

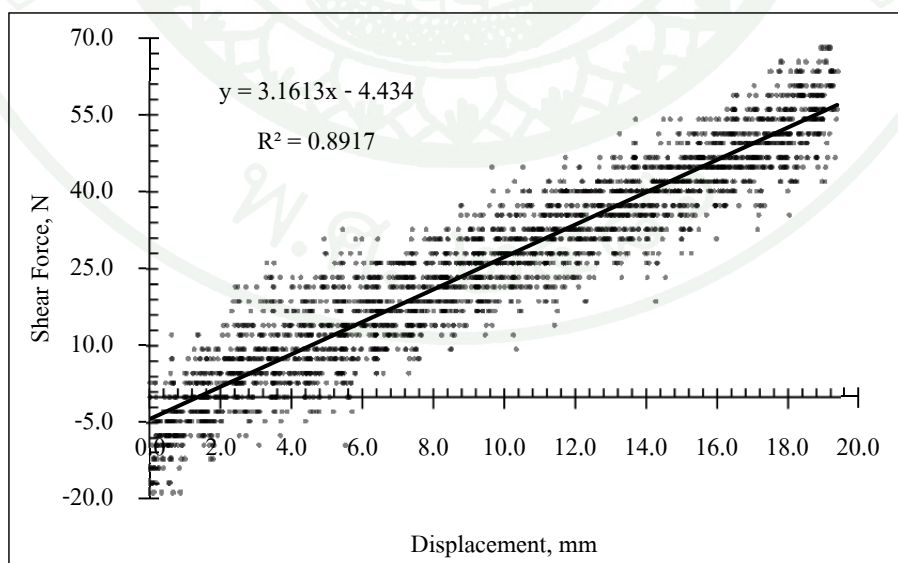
ผลการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้จะนำเสนอข้อมูลต่างๆ ซึ่งได้แก่ผลการสอบเทียบเครื่องมือทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่, ผลการทดสอบทางกายภาพของดินตัวอย่างและตัวอย่างดินซีเมนต์, ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของตัวอย่างทดสอบแบบต่าง, ผลการวิเคราะห์เชิงพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ, การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์หาสมการซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลการสอบเทียบเครื่องมือทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่

1.1 ผลการสอบเทียบค่าแรงเสียดทานของ Shear Box, Membrane และยางซีด Shear Box

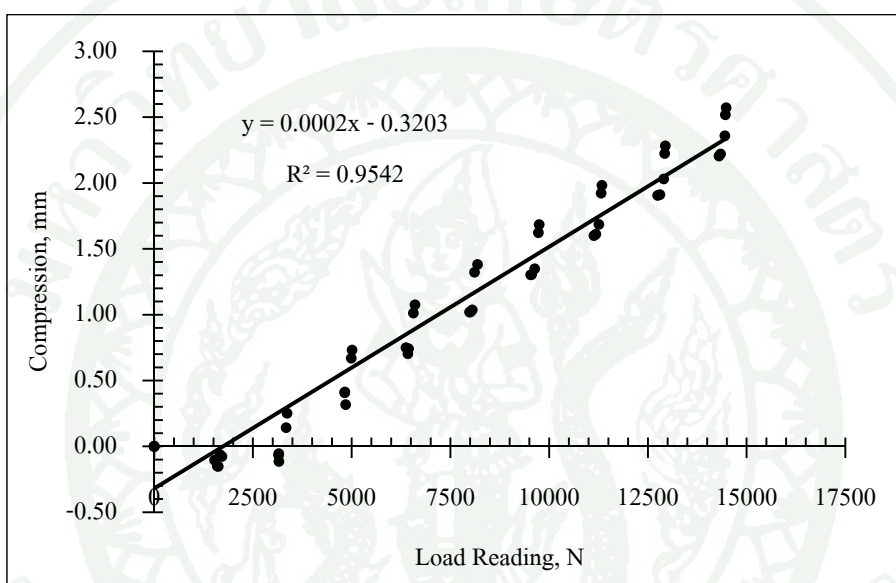
ผลจากการสอบเทียบค่าแรงเสียดทานของ Shear Box, Membrane และยางซีด Shear Box ระหว่างการเลื่อนตัวอย่างโดยการใส่น้ำแทนที่ตัวอย่างดิน พบว่าเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของ Shear Box ในระหว่างการเลื่อนค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นตามการเคลื่อนที่ โดยจะมีค่าติดลบเมื่อเริ่มการเลื่อนอยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากกลไกของ Screw Jack ตอนเริ่มการเคลื่อนที่ แต่หลังจากนั้นก็ทำงานตามปกติ และผลการสอบเทียบแสดงดังภาพที่ 120



ภาพที่ 120 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านของ Shear Box กับการเคลื่อนตัว

1.2 ผลการสอบเทียบค่าน้ำหนักกดทับและค่าการยุบตัวของเครื่องมือทดสอบ

ผลจากการสอบเทียบค่าน้ำหนักกดทับและค่าการยุบตัวของเครื่องมือทดสอบ โดยการให้แรงกระทำต่อเครื่องมือจากค่าน้อยไปหาค่ามาก แล้วทำการวัดค่าการยุบตัวด้วย LVDT พบว่าเมื่อเริ่มใส่น้ำหนักอยู่ในช่วง 0 ถึง 3000 นิวตันการยุบตัวของเครื่องมือจะยังไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อน้ำหนักมีค่ามากกว่า 3000 นิวตันขึ้นไปการยุบตัวของเครื่องมือจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 121



ภาพที่ 121 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวของเครื่องมือกับน้ำหนักบรรทุก

2. ผลการทดสอบทางกายภาพของดินตัวอย่างและการทดสอบกำลังของตัวอย่างดินซีเมนต์

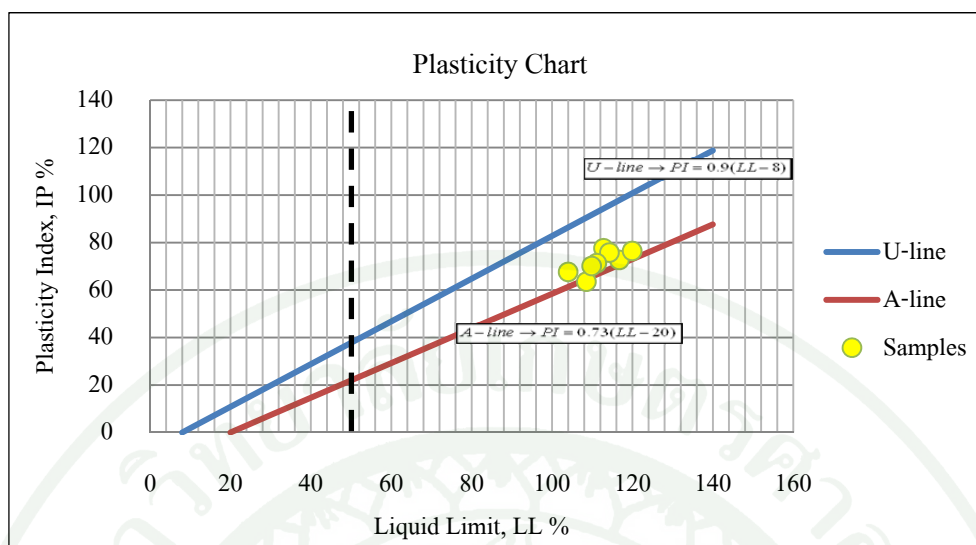
2.1 ผลการทดสอบทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสุวรรณภูมิ

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนถูกเก็บขึ้นมาที่ระดับความลึกประมาณ 3 เมตรซึ่งเป็นตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturb Sample) โดยตัวอย่างดินเหนียวอ่อนนี้จะถูกนำมาทดสอบในแบบต่างๆ ได้แก่ การทดสอบหาค่าความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content), การทดสอบ Atterberg's Limit, การทดสอบการหาค่าความหนาแน่นของดิน, และการวิเคราะห์เพื่อหาค่าดัชนีชี้วัดต่างๆ โดยจะทำการทดสอบทั้งหมด 8 ตัวอย่าง แล้วนำผลที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อเป็นค่าตัวแทนของดินต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 19 ดังนี้

ตารางที่ 18 คุณสมบัติทางการกายภาพของดินเหนียวอ่อนคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ

คุณสมบัติทางการกายภาพ	ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ
ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (%)	130.37
Liquid's Limit (%)	112.11
Plastic's Limit (%)	40.17
Shrinkage's Limit	23.64
Plasticity Index	71.94
Flow Index	0.59
Toughness Index	1.25
Liquidity Index	1.26
Unit Weight(kN/m^3)	1.39

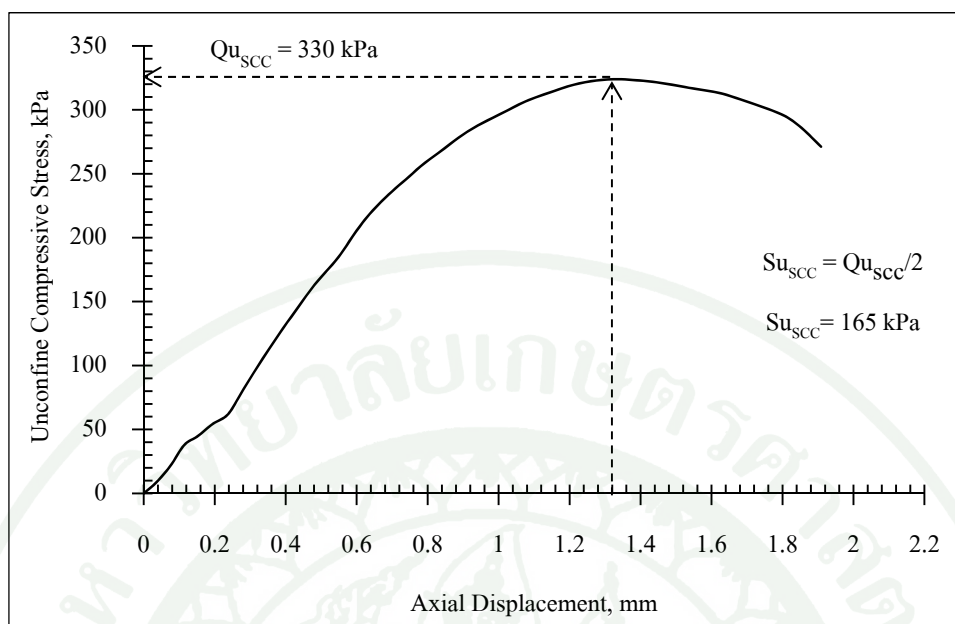
จากผลการทดสอบตามตารางพบว่า ดินเหนียวอ่อนสุวรรณภูมิมีค่าความชื้นตามธรรมชาติที่สูงมากและสูงเกินกว่าค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid's Limit) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าดินเหนียวอ่อนสุวรรณภูมินี้มีแนวโน้มที่จะมีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ สามารถเกิดการทรุดตัวได้สูงเมื่อน้ำหนักภายนอกมากระทำ รวมถึงมีความไวต่อน้ำหนักกระทำ (Sensitivity) ค่อนข้างสูงและจากข้อมูลการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสุวรรณภูมิอยู่ในกลุ่มดินประเภท CH ตามมาตรฐาน USCS (Unified Soil Classification System) ดังภาพที่ 122



ภาพที่ 122 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index และ Liquid Limit ของดินเหนียวตัวอย่าง

2.2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของเสาเข็มดินซีเมนต์

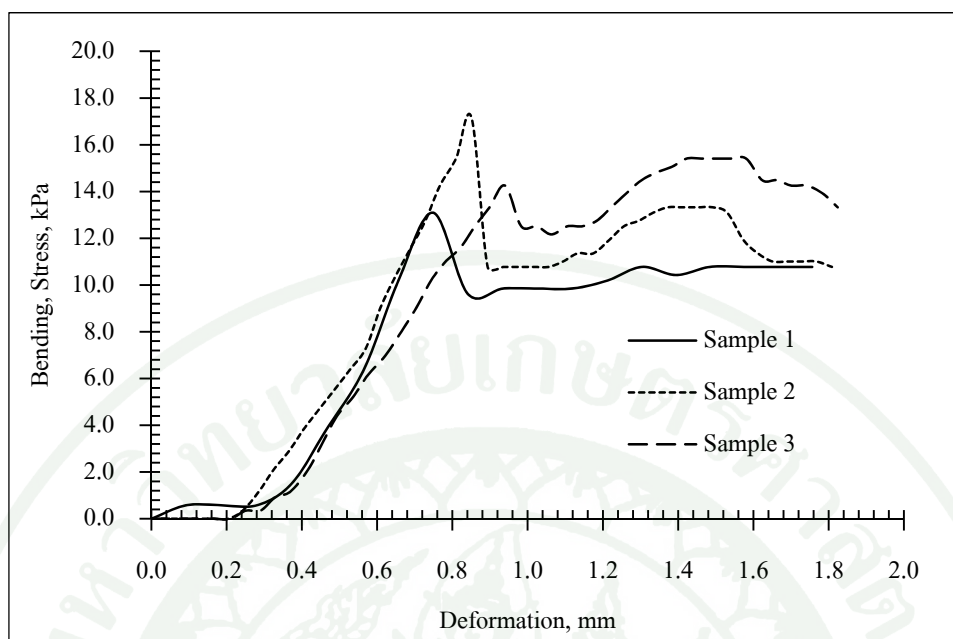
ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ แสดงดังภาพที่ 123 ซึ่งแท่งดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตรและมีความสูง 6 เซนติเมตร ผสมด้วยอัตราส่วนของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ปริมาณ 220 กิโลกรัมต่อดินเปียกหนึ่ง ลูกบาศก์เมตร แต่อัตราน้ำต่อซีเมนต์เท่า 2 ต่อ 1 และทำการบ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ระยะเวลา 7 วัน โดยผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Su_{scc}) เท่ากับ 165 กิโลปาสกาล



ภาพที่ 123 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compression Stress และ Axial Displacement ของการทดสอบ Unconfined Compression Test ของตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน

2.3 ผลการทดสอบ Flexural Strength Test ของเสาเข็มดินซีเมนต์

ผลการทดสอบ Flexural Strength Test ของแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ แสดงดังภาพที่ 124 ซึ่งแท่งดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตรและมีความสูง 18 เซนติเมตร ผสมด้วยอัตราส่วนของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ปริมาณ 220 กิโลกรัมต่อดินเปียกหนึ่งลูกบาศก์เมตร แต่อัตราน้ำต่อซีเมนต์เท่า 2 ต่อ 1 และทำการบ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ระยะเวลา 7 วัน โดยผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงดัด ($Q_{f_{scc}}$) เท่ากับ 14.2 กิโลปาสคาล

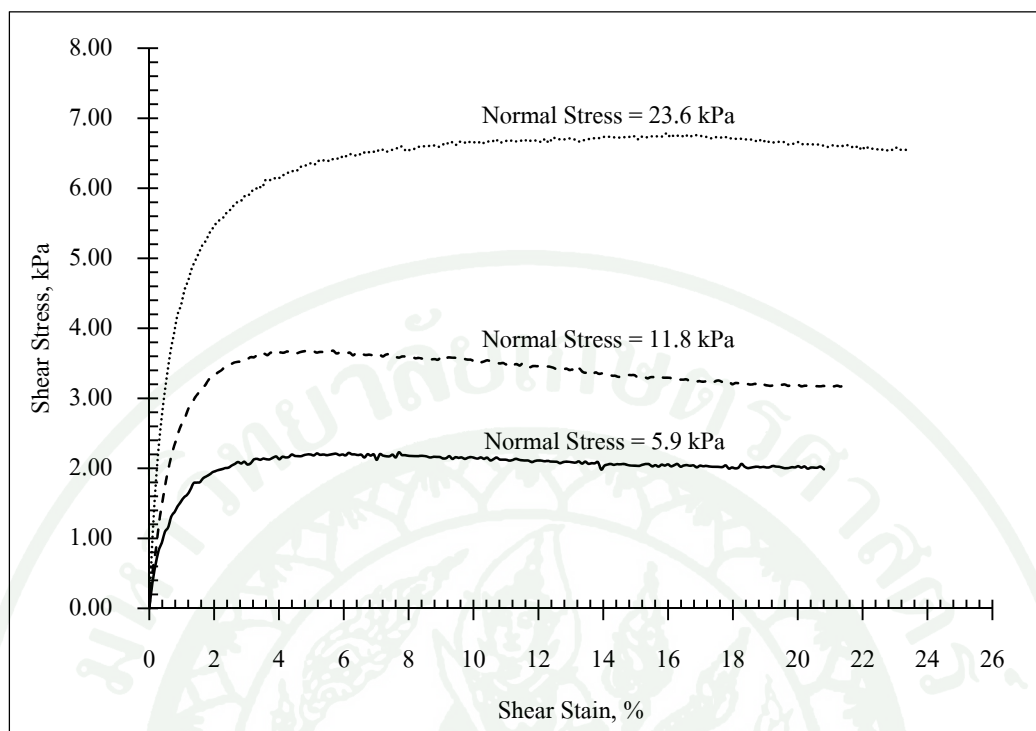


ภาพที่ 124 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bending Stress และ Deformation ของการทดสอบ Flexural Strength Test ของตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน

3. ผลการทดสอบการเอียงตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเหนียวสร้างใหม่

3.1 ลักษณะความเค้น-ความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

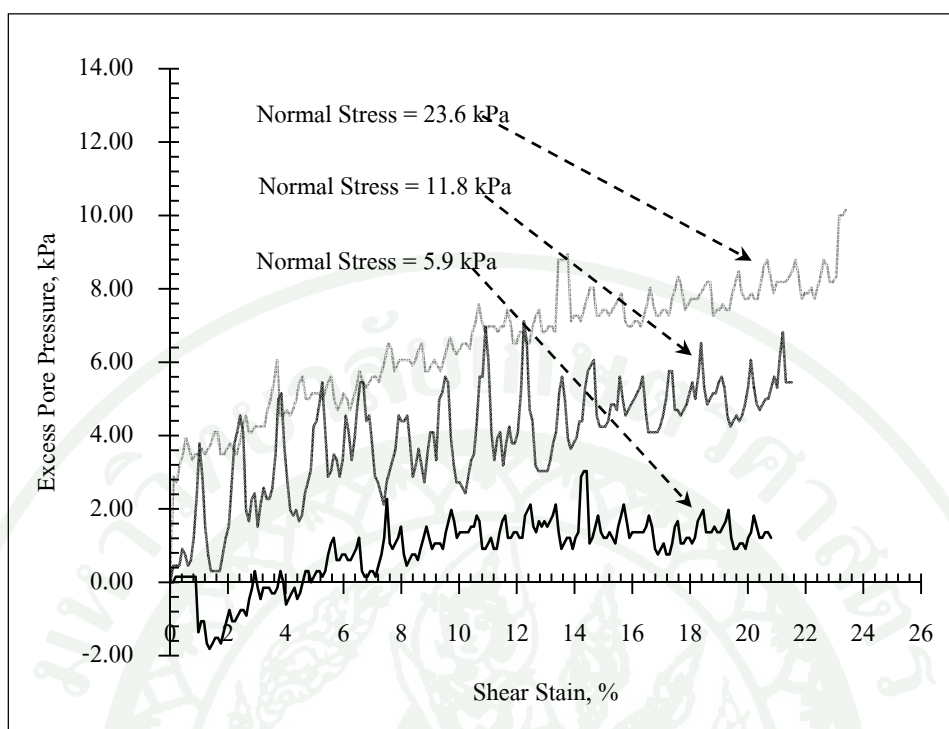
ผลจากการทดสอบการเอียงตรงอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแก็ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเอียงตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเอียง 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่าสูงขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุก โดยตัวอย่างดินที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 2.2, 3.7 และ 6.8 กิโลปาสคาลตามลำดับดังภาพที่ 125



ภาพที่ 125 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ของดินเหนียวสร้างใหม่

3.2 ลักษณะแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

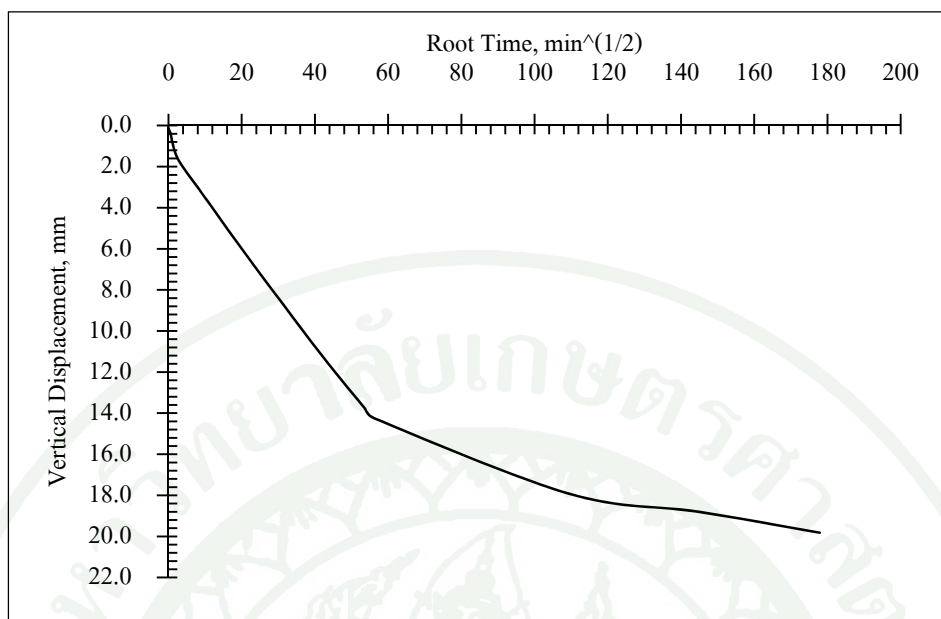
ผลจากการทดสอบการวัดแรงดันส่วนเกินระหว่างการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาทีพบว่า เมื่อเริ่มทำการเฉือนตัวอย่างดินค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามค่า Shear Strain และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่ามากที่สุด ที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด โดยมีค่าแรงดันน้ำสูงสุดที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล ประมาณ 1.8, 5.5, และ 9.7 กิโลปาสคาลตามลำดับ ดังแสดงภาพที่ 126



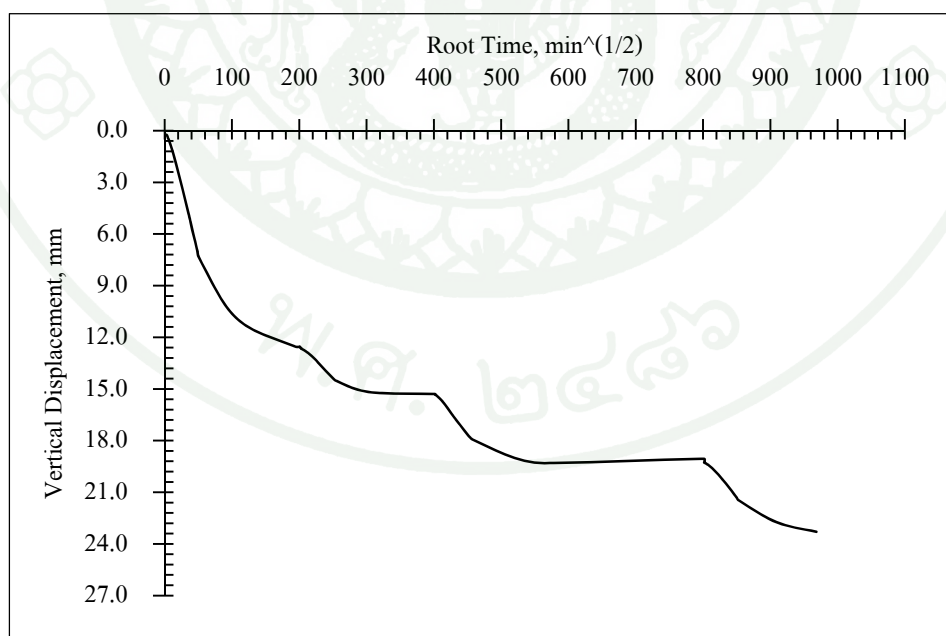
ภาพที่ 126 ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

3.3 ลักษณะการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในช่วงการอัดตัวคายน้ำ

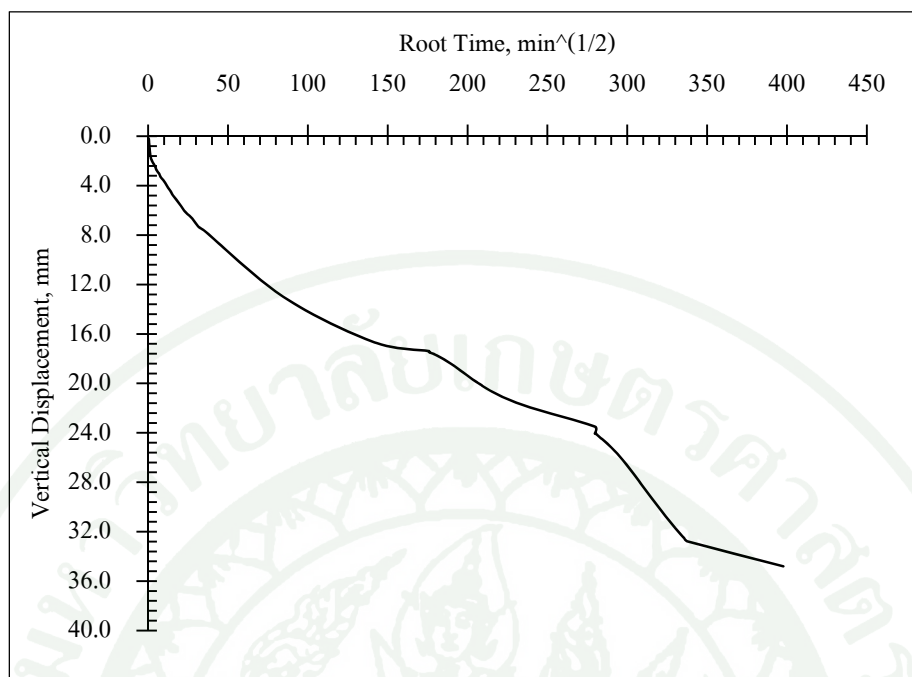
ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสร้างใหม่ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับพบว่า ดินเหนียวสร้างใหม่ค่อยๆเกิดการทรุดตัวเรื่อยๆตามระยะเวลา โดยจะมีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 19.8 มิลลิเมตร, 23.3 มิลลิเมตร, และ 34.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบได้ปรับ Stage ของการให้น้ำหนักบรรทุกทีละน้อยเพื่อให้เกิดความเหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 127, 128, และ 129 ตามลำดับ



ภาพที่ 127 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ที่ Normal Stress = 5.9 kPa ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่



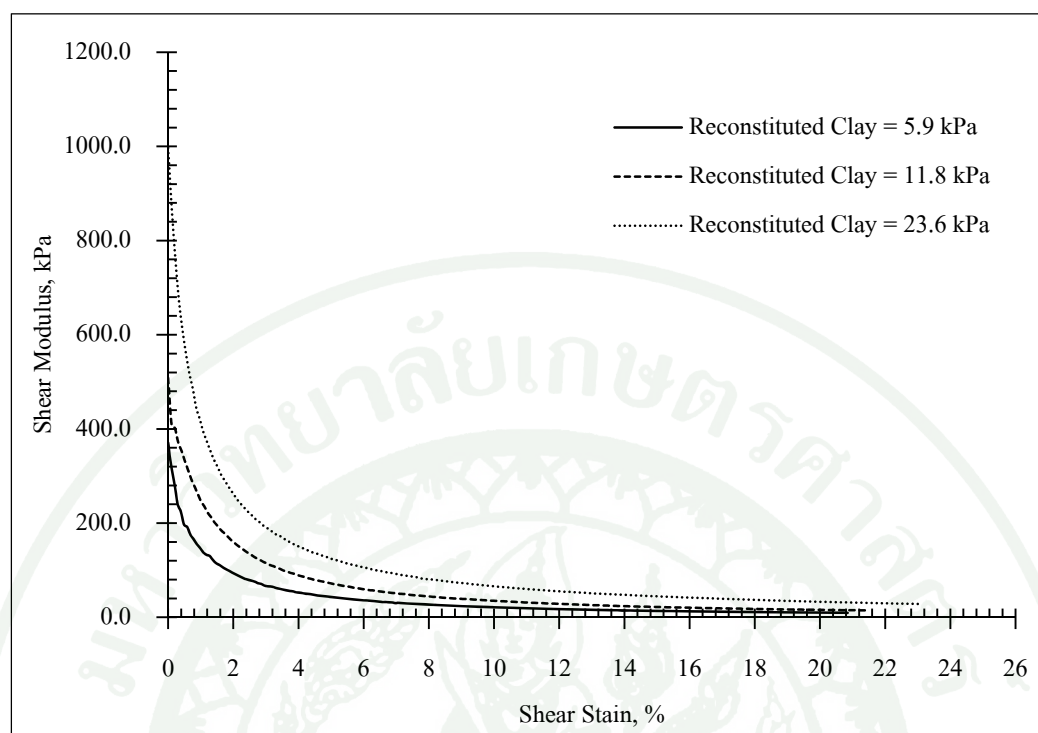
ภาพที่ 128 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ที่ Normal Stress = 11.8 kPa ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่



ภาพที่ 129 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ที่ Normal Stress = 23.6 kPa ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

3.4 ลักษณะโมดูลัสแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

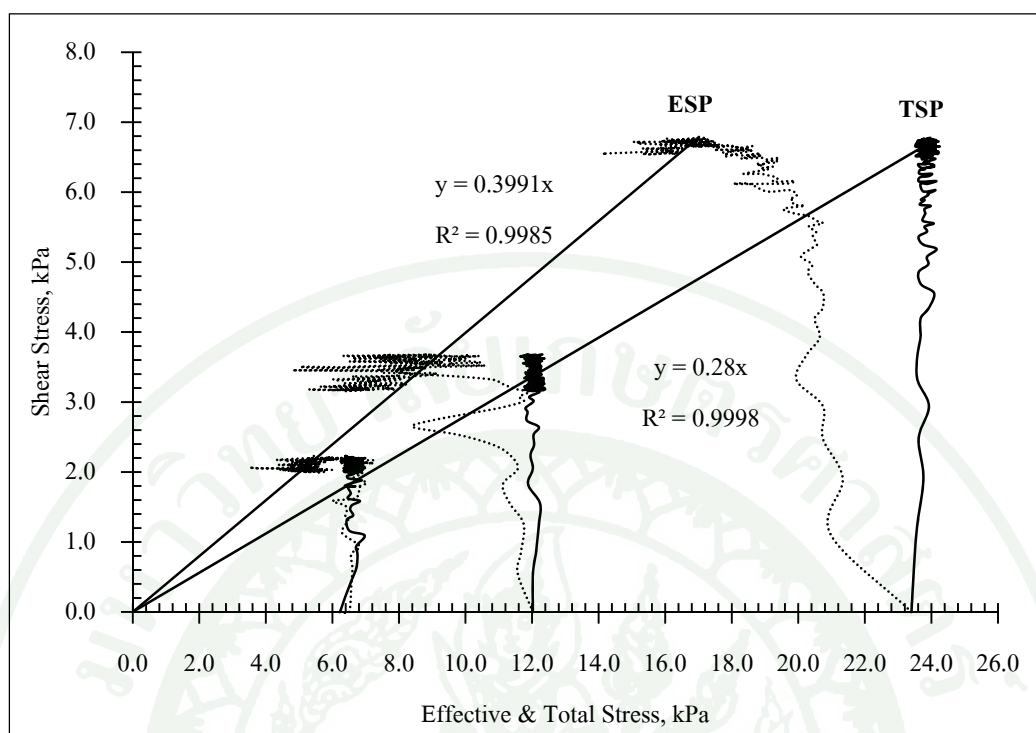
ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่พบว่า ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ของตัวอย่างมีค่าลดลงตามค่า Shear Stain ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ค่าน้ำหนักรรทุกสูงสุดจะให้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่มากที่สุด โดยโมดูลัสแรงเฉือนของทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีค่าเข้าหากันเมื่อค่า Shear Stain ค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Modulus) ที่น้ำหนักรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล ประมาณ 0.37, 0.51, และ 0.99 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 130



ภาพที่ 130 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

3.5 ลักษณะ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมด 3 ตัวอย่างพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแบบ Effective Stress และ Total Stress จะมีค่ามากขึ้นตามค่าน้ำหนักรรทุก ซึ่งสามารถหาค่ามุมเสียดทานในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล เท่ากับ 21.8 องศา และค่ามุมเสียดทานแบบหน่วยแรงรวม เท่ากับ 15.6 องศา ดังภาพที่ 131 โดยค่า Strength Parameter ของตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Shibuya & Tamrakar (2003) ซึ่งได้ทำการทดสอบการเฉือนตรงแบบปกติ (Direct Shear Box Test) กับตัวอย่างดินแบบ Reconstituted ที่เก็บมาจากพื้นที่คลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิเช่นเดียวกัน โดยพบว่ามีค่ามุมเสียดทานในหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากับ 25.5 องศา และค่าแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 5 กิโลปาสกาล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องมือนี้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

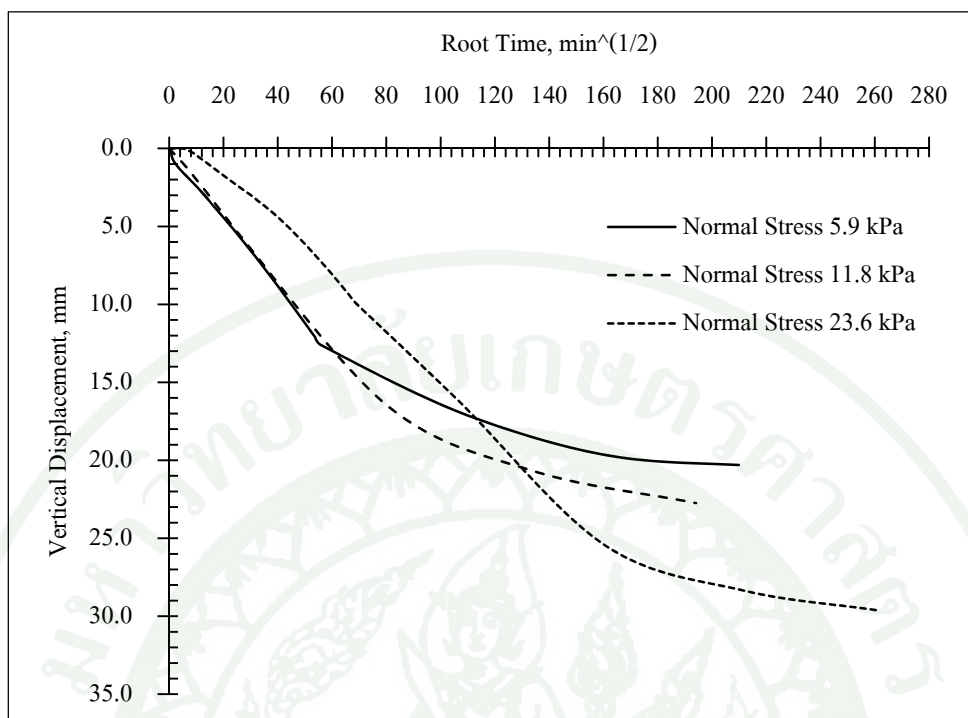


รูปภาพที่ 131 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่

4. ผลการทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column (SSC)

4.1 ลักษณะการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในช่วงการอัดตัวคายน้ำที่ใช้สำหรับการทดสอบการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column

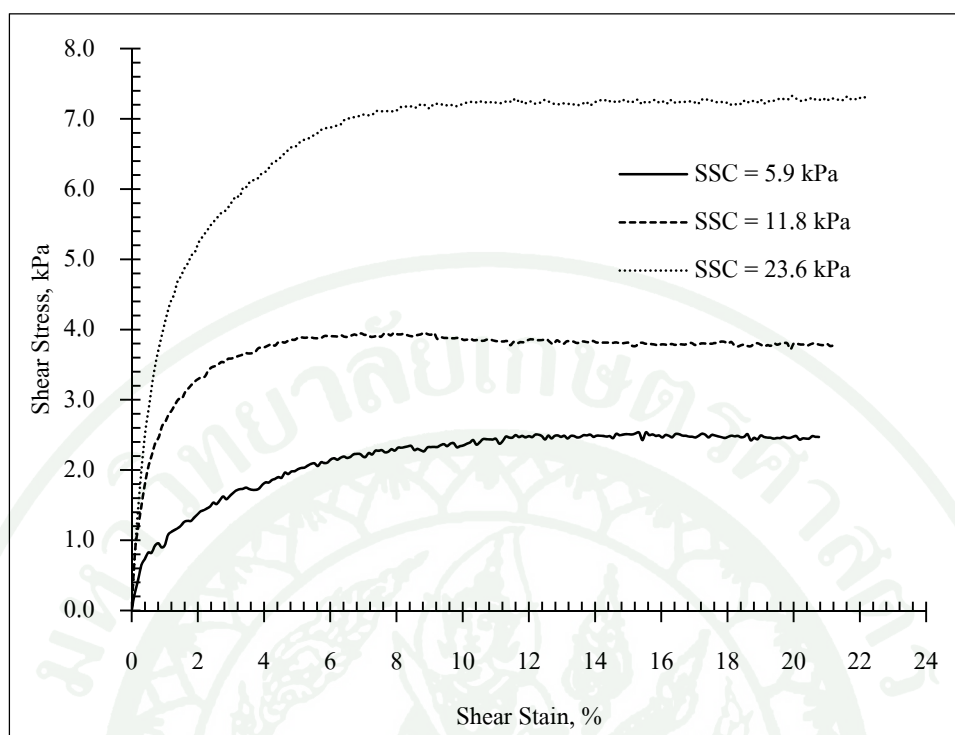
ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสร้างใหม่ของการทดสอบการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแ่งตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ พบว่า ดินเหนียวสร้างใหม่ค่อยๆเกิดการทรุดตัวเรื่อยๆตามระยะเวลา โดยจะมีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 20.3 มิลลิเมตร, 22.4 มิลลิเมตร, และ 29.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 132



ภาพที่ 132 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ใช้ทดสอบการปรับปรุงคุณภาพแบบ SSC ที่น้ำหนักรรทุกต่างๆ

4.2 ลักษณะความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column

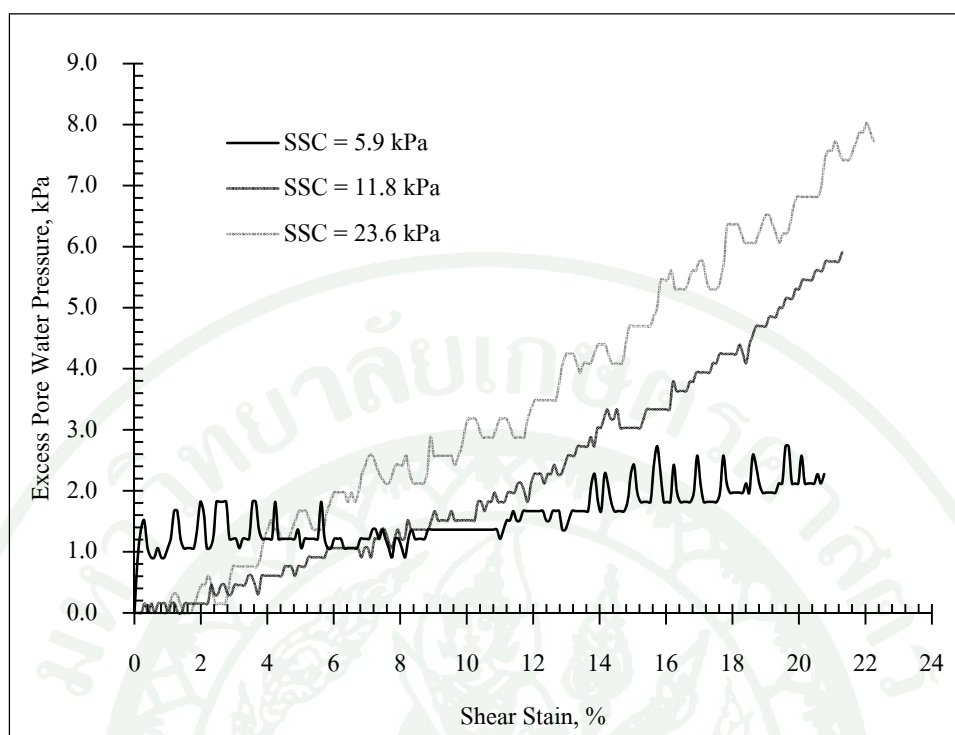
ผลจากการทดสอบการเค้นตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเค้นตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเค้น 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า ค่ากำลังรับแรงเค้นของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่าสูงขึ้นตามค่าน้ำหนักรรทุก โดยตัวอย่างดินที่น้ำหนักรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล มีค่ากำลังรับแรงเค้นสูงสุดที่ความเครียด 20 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 2.45, 3.80 และ 7.20 กิโลปาสคาลตามลำดับ ดังภาพที่ 133



ภาพที่ 133 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC

4.3 ลักษณะแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column

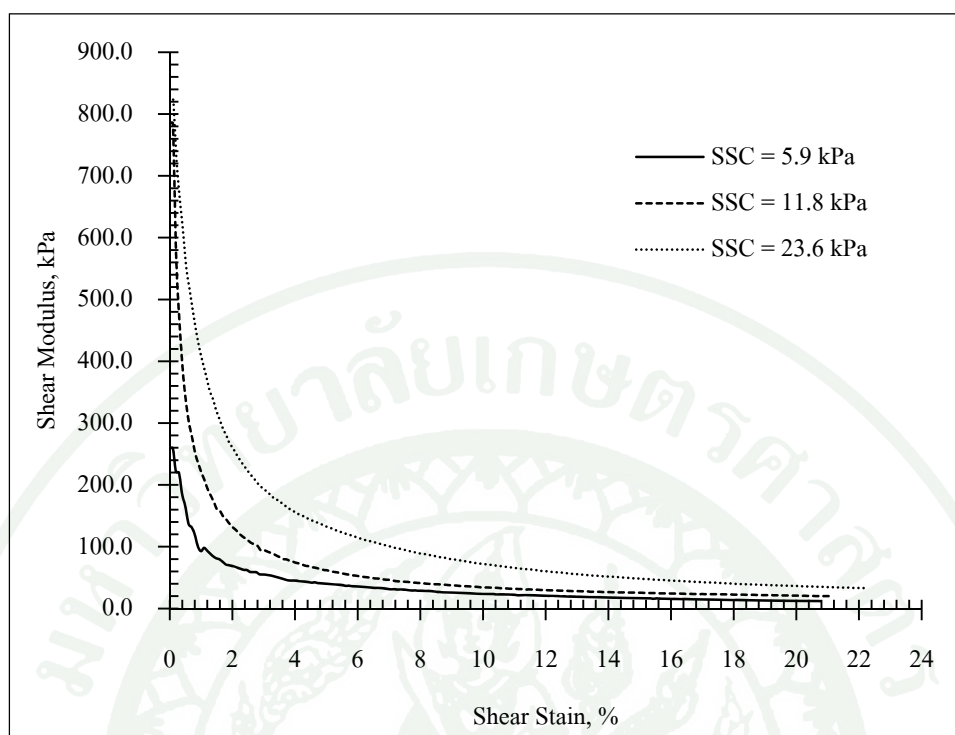
ผลจากการทดสอบการวัดแรงดันส่วนเกินระหว่างการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า เมื่อเริ่มทำการเฉือนตัวอย่างดินค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามค่า Shear Strain และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่ามากที่สุด ที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด สูงสุด โดยมีค่าแรงดันน้ำสูงสุดที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล ประมาณ 2.1, 5.7, และ 8.0 กิโลปาสคาลตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 134



ภาพที่ 134 ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียว
สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC

4.4 ลักษณะโมดูลัสแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column

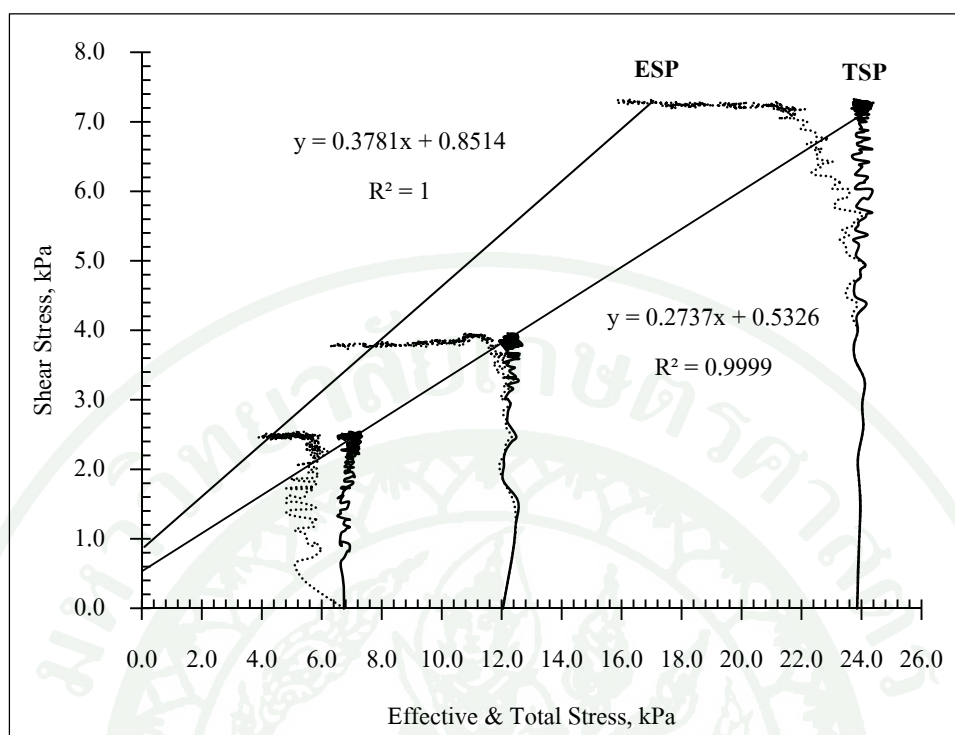
ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่พบว่า ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ของตัวอย่างมีค่าลดลงตามค่า Shear Strain ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะให้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่มากที่สุด โดยโมดูลัสแรงเฉือนของทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีค่าเข้าหากันเมื่อค่า Shear Strain ค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีค่าโมดูลัสแรงเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Modulus) ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล ประมาณ 0.26, 0.83, และ 0.83 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 135



ภาพที่ 135 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียว
สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC

4.5 ลักษณะ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเหนียวตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column โดยเครื่องมือทดสอบการเหนียวตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมด 3 ตัวอย่างพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแบบ Effective Stress และ Total Stress จะมีค่ามากขึ้นตามค่าน้ำหนักรับน้ำหนัก ซึ่งสามารถหาค่ามุมเสียดทานและค่าแรงยึดเหนี่ยวในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล เท่ากับ 20.71 องศา และ 0.85 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ส่วนค่ามุมเสียดทานและค่าแรงยึดเหนี่ยวแบบหน่วยแรงรวม จะได้เท่ากับ 15.31 องศา และ 0.53 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ดังภาพที่ 136



ภาพที่ 136 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC

4.6 ลักษณะการบีบตัวของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column

ผลจากการทดสอบการเอนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเอนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเอน 0.14 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 กิโลปาสคาล แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการเอียงเล็กน้อยและมีการหักเกิดขึ้นในบางต้น ดังแสดงในภาพที่ 137 ส่วนที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 กิโลปาสคาลแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์จะเกิดการเอียงมากกว่าและมีการหักของแท่งดินซีเมนต์มากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกแรก ดังแสดงในภาพที่ 138 และที่น้ำหนักบรรทุก 23.6 กิโลปาสคาลแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีการเอียงที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุก 11.8 กิโลปาสคาล แต่จะมีการหักของแท่งเสาเข็มในทุกๆต้น ดังแสดงในรูปที่ 139 โดยการ

เอียงและการหักของแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ที่แตกต่างกันนี้ มีผลมาจากกำลังของดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ยิ่งกำลังของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่าสูงขึ้นมากเท่าไร การเอียงและการหักของแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ก็จะเกิดขึ้นได้มากเท่านั้น ดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนน้อย ดินจะเกิดการเคลื่อนตัวผ่านเสาเข็มดินซีเมนต์ไป โดยที่เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่ได้เคลื่อนตัวไปพร้อมกับดิน ในทางกลับกันดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนมาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างดินและเสาเข็มมีมาก ทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เคลื่อนตัวไปพร้อมๆ กับดิน (ความเข้ากันได้ของดินและเสาเข็มดินซีเมนต์มีมากขึ้น)



ภาพที่ 137 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 5.9 kPa



ภาพที่ 138 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 11.8 kPa

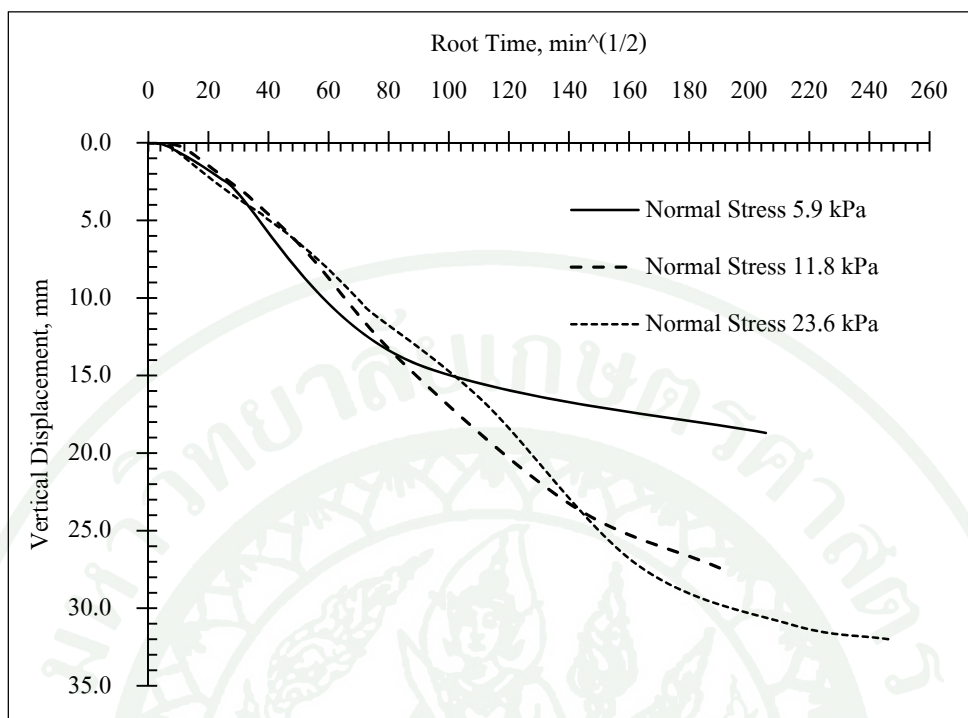


ภาพที่ 139 ลักษณะการบีบตัวของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 23.6 kPa

5. ผลการทดสอบการเนื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column (LWC)

5.1 ลักษณะการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในช่วงการอัดตัวคายน้ำที่ใช้สำหรับการทดสอบการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column

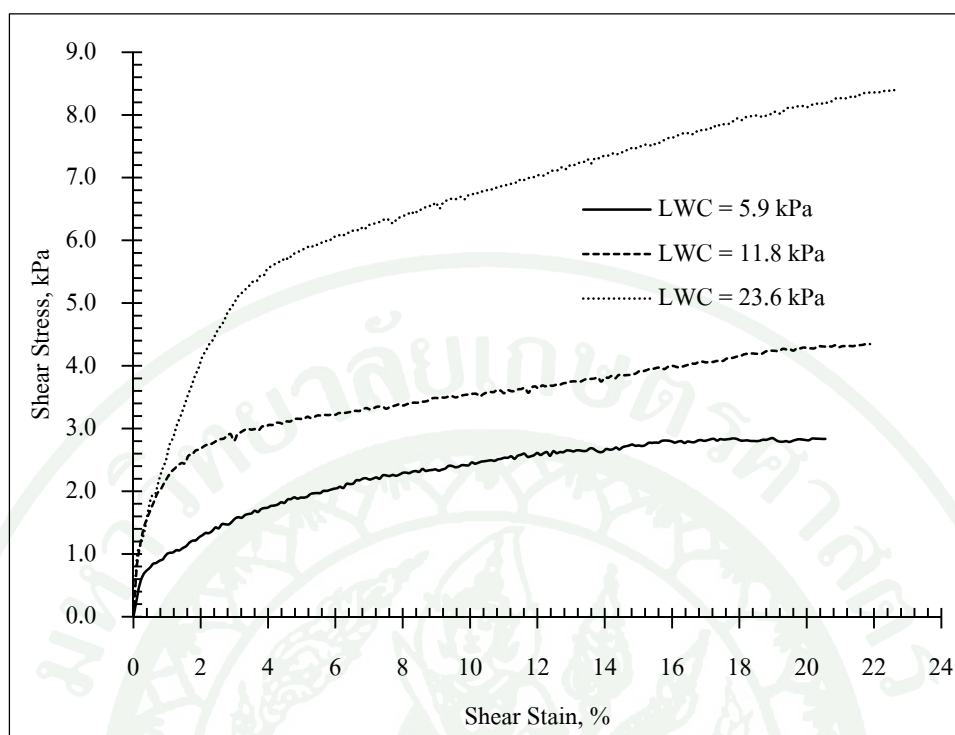
ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสร้างใหม่ของการทดสอบการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ พบว่า ดินเหนียวสร้างใหม่ก่อเกิดการทรุดตัวเรื่อยๆตามระยะเวลา โดยจะมีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 18.7 มิลลิเมตร, 27.4 มิลลิเมตร, และ 32.0 มิลลิเมตร ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 140



ภาพที่ 140 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ใช้ทดสอบการปรับปรุงคุณภาพแบบ LWC ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

5.2 ลักษณะความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column

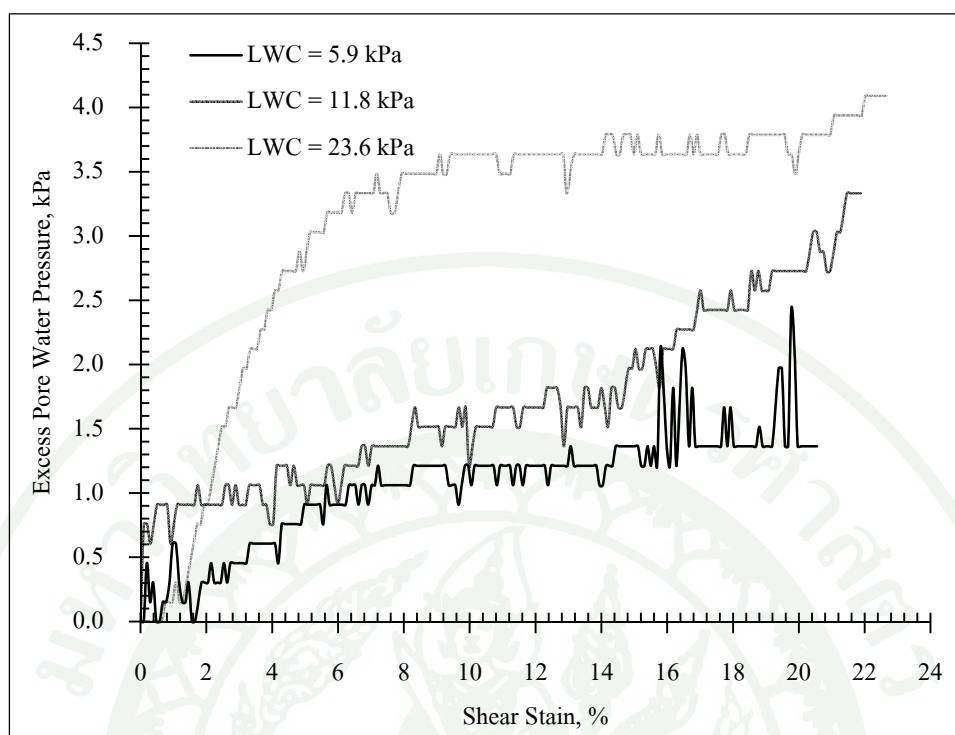
ผลจากการทดสอบการเอนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเอนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเอน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า ค่ากำลังรับแรงเอนของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่าสูงขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุก โดยตัวอย่างดินที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล มีค่ากำลังรับแรงเอนสูงสุดที่ความเครียด 20 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 2.80, 4.30 และ 8.20 กิโลปาสคาลตามลำดับ ดังภาพที่ 141



ภาพที่ 141 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC

5.3 ลักษณะแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column

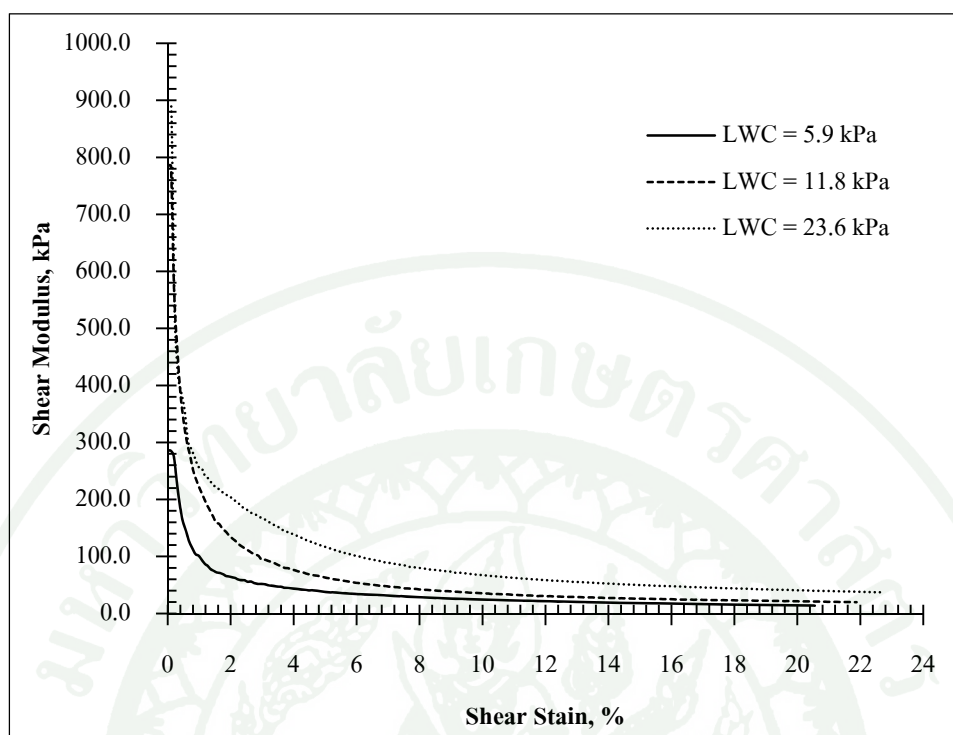
ผลจากการทดสอบการวัดแรงดันส่วนเกินระหว่างการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแ่งตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสกาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า เมื่อเริ่มทำการเฉือนตัวอย่างดินค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามค่า Shear Strain และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่ามากที่สุด ที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด โดยมีค่าแรงดันน้ำสูงสุดที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสกาล ประมาณ 1.3, 3.2, และ 4.0 กิโลปาสกาลตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 142



ภาพที่ 142 ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียว
สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC

5.4 ลักษณะโมดูลัสแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column

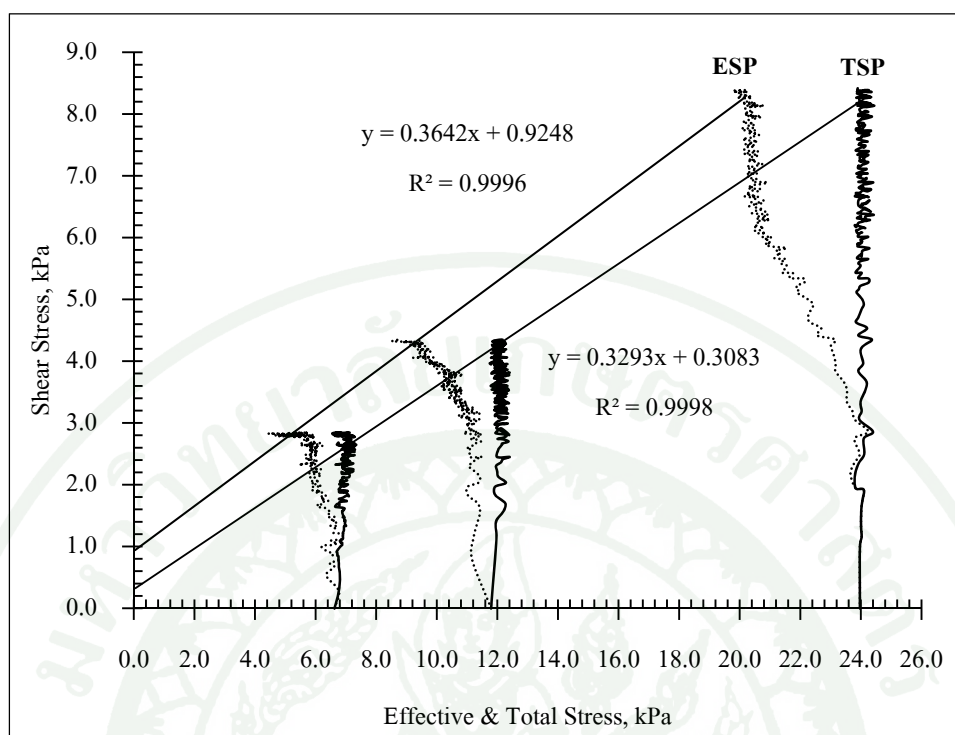
ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่พบว่า ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ของตัวอย่างมีค่าลดลงตามค่า Shear Strain ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะให้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่มากที่สุด โดยโมดูลัสแรงเฉือนของทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีค่าเข้าหากันเมื่อค่า Shear Strain ค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Modulus) ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสกาล ประมาณ 0.29, 0.79, และ 0.89 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 143



ภาพที่ 143 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียว
สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC

5.5 ลักษณะ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมด 3 ตัวอย่างพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแบบ Effective Stress และ Total Stress จะมีค่ามากขึ้นตามค่าน้ำหนักรับน้ำหนัก ซึ่งสามารถหาค่ามุมเสียดทานและค่าแรงยึดเหนี่ยวในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล เท่ากับ 20.01 องศา และ 0.93 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ส่วนค่ามุมเสียดทานและค่าแรงยึดเหนี่ยวแบบหน่วยแรงรวม จะได้เท่ากับ 18.23 องศา และ 0.31 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ดังภาพที่ 144



ภาพที่ 144 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC

5.6 ลักษณะการบีบอัดของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column

ผลจากการทดสอบการเค้นตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเค้นตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเค้น 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 กิโลปาสคาล แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการเอียงเล็กน้อย แต่จะมีการหักเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 145 ส่วนที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 กิโลปาสคาลแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์จะเกิดการเอียงมากกว่าและมีการหักของแท่งดินซีเมนต์ตรงช่วงล่างของบางต้นในช่วงแถวหน้า ดังแสดงในภาพที่ 146 และที่น้ำหนักบรรทุก 23.6 กิโลปาสคาลแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีการเอียงและจะเกิดการหักของแท่งเสาเข็มในทุกๆต้นซึ่งแสดงแนวการบีบอัดอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 147 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะเห็น

ได้ว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column ที่กำลังรับแรงเฉือนของดินต่ำ (น้ำหนักบรรทุก 5.9 กิโลปาสกาล) ดินจะเกิดการเคลื่อนผ่านแท่งซีเมนต์ โดยทำให้แท่งดินซีเมนต์เกิดการเอียงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มสูงขึ้น (น้ำหนักบรรทุก 11.8 และ 23.6 กิโลปาสกาล) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างดินและเสาเข็มซีเมนต์มีมากขึ้น จึงส่งผลให้แท่งดินซีเมนต์เกิดการเอียงมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 145 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 kPa



ภาพที่ 146 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC ที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 kPa

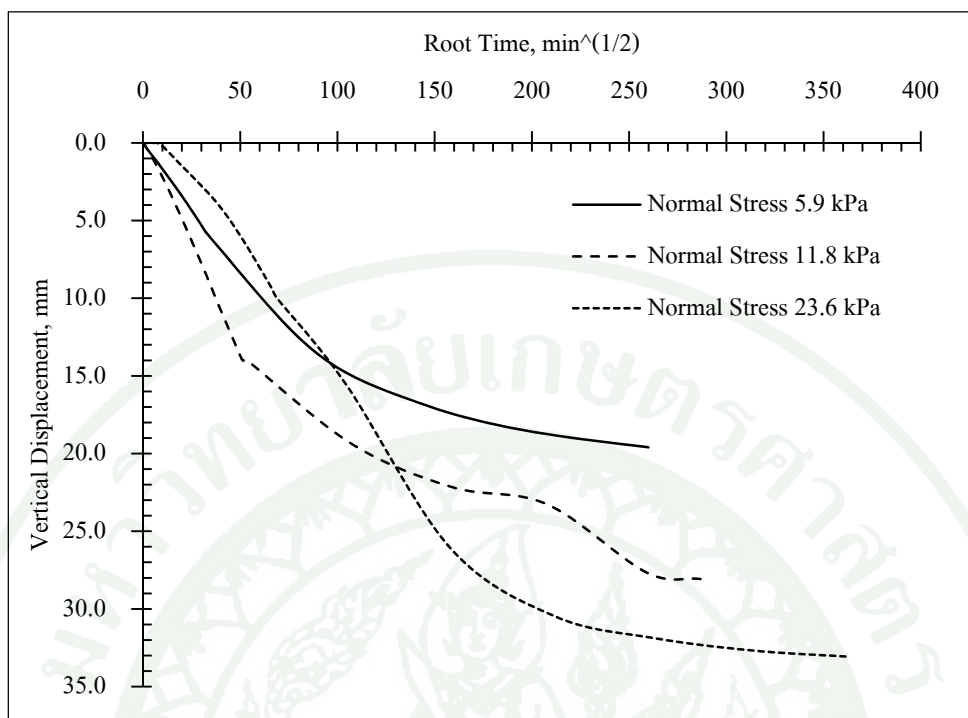


ภาพที่ 147 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC ที่น้ำหนักบรรทุก 23.6 kPa

6. ผลการทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column (TWC)

6.1 ลักษณะการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในช่วงการอัดตัวคายน้ำที่ใช้สำหรับการทดสอบการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column

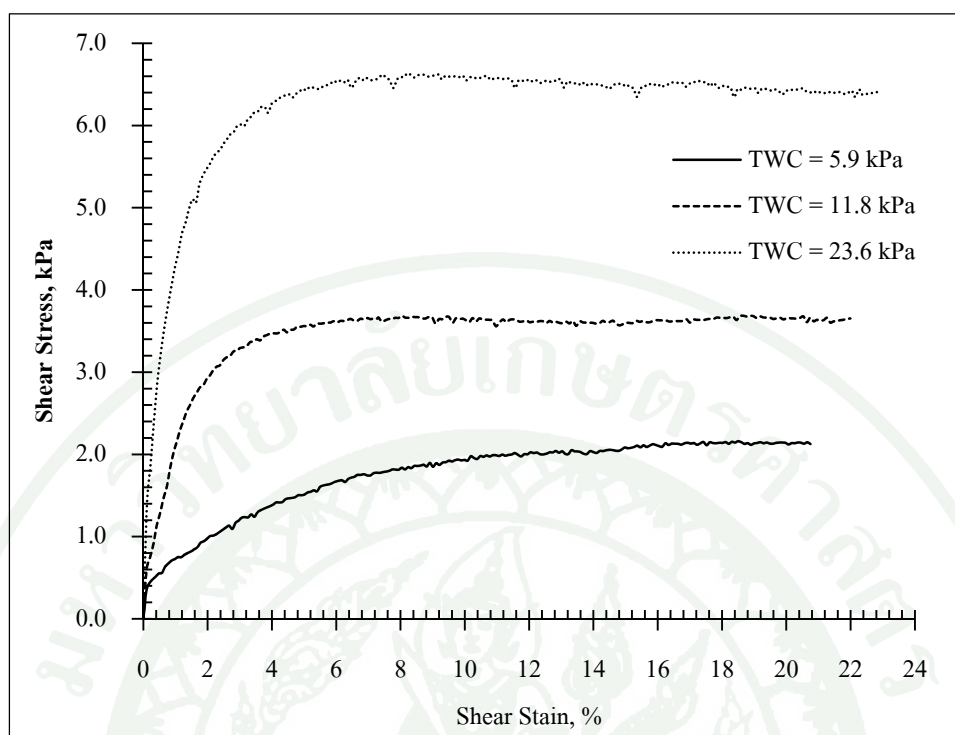
ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสร้างใหม่ของการทดสอบการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ พบว่า ดินเหนียวสร้างใหม่ค่อยๆเกิดการทรุดตัวเรื่อยๆตามระยะเวลา โดยจะมีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 19.6 มิลลิเมตร, 28.1 มิลลิเมตร, และ 33.1 มิลลิเมตร ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 148



ภาพที่ 148 ความสัมพันธ์ระหว่าง Root Time กับ Vertical Displacement ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ใช้ทดสอบการปรับปรุงคุณภาพแบบ TWC ที่น้ำหนักรทุกต่างๆ

6.2 ลักษณะความเค้นเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column

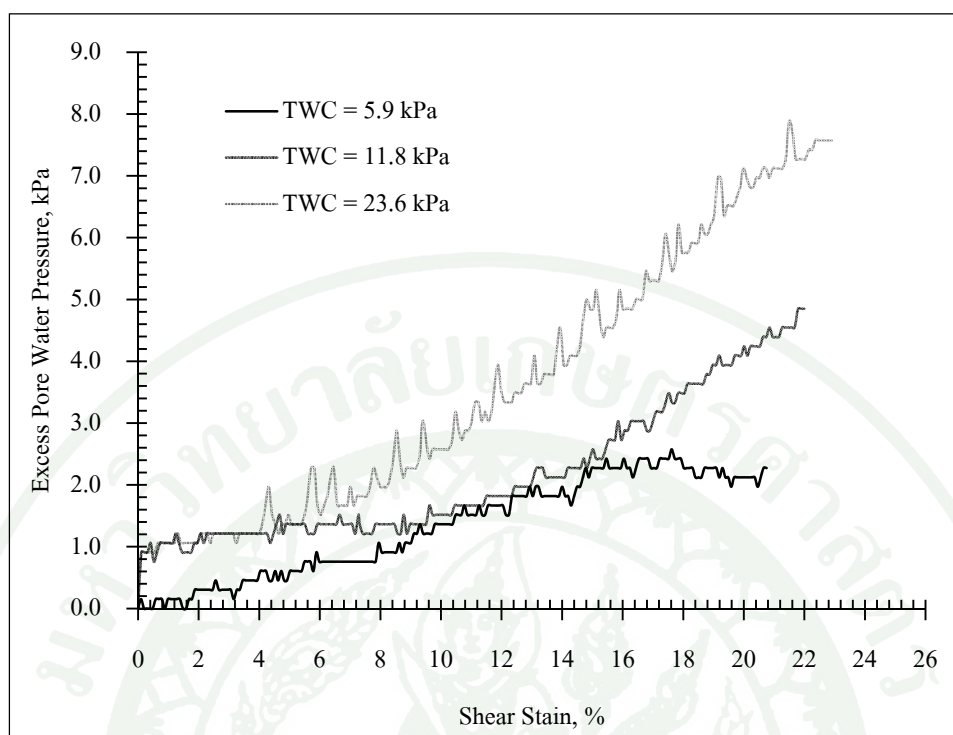
ผลจากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่าสูงขึ้นตามค่าน้ำหนักรทุก โดยตัวอย่างดินที่น้ำหนักรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่ความเครียดเฉือน 20 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 2.15, 3.70 และ 6.40 กิโลปาสคาลตามลำดับ ดังภาพที่ 149



ภาพที่ 149 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC

6.3 ลักษณะแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column

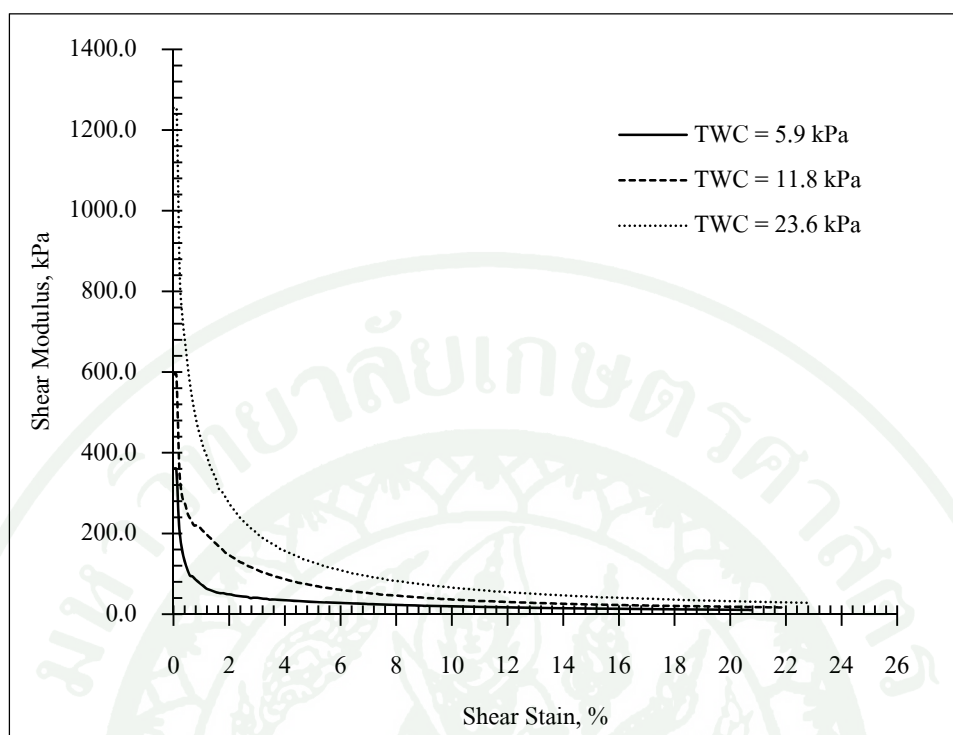
ผลจากการทดสอบการวัดแรงดันส่วนเกินระหว่างการเฉือนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแ่งตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า เมื่อเริ่มทำการเฉือนตัวอย่างดินค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามค่า Shear Strain และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะมีค่ามากที่สุด ที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด โดยมีค่าแรงดันน้ำสูงสุดที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาล ประมาณ 2.1, 4.8, และ 7.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 150



ภาพที่ 150 ความสัมพันธ์ระหว่าง Excess Pore Pressure กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียว
สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC

6.4 ลักษณะโมดูลัสแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column

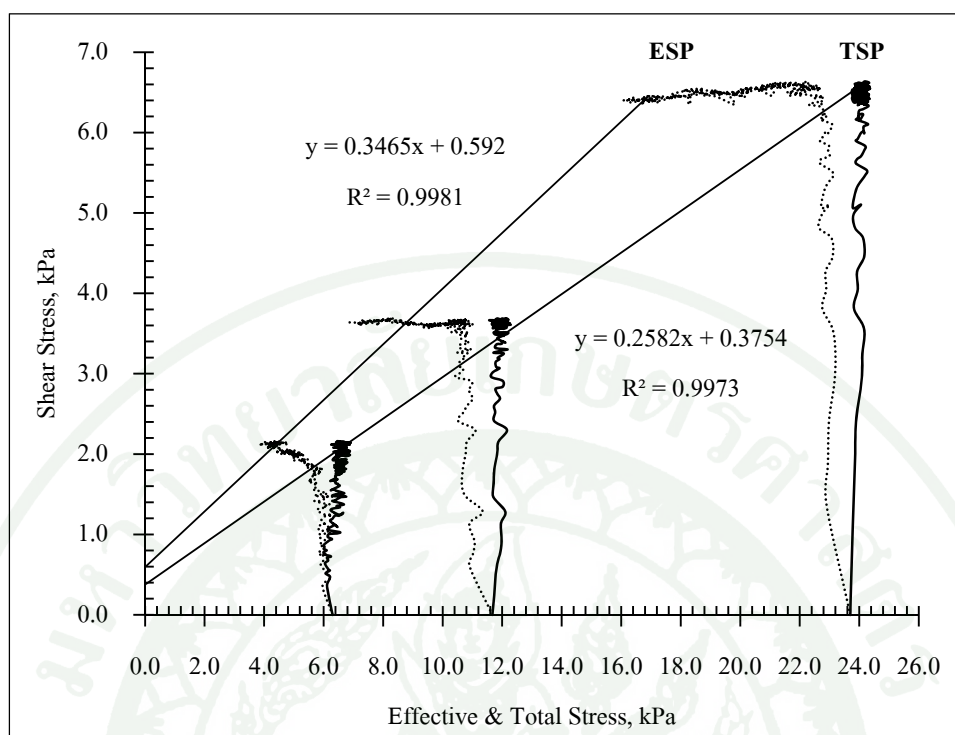
ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำ
ของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall
Column โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่พบว่า ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear
Modulus) ของตัวอย่างมีค่าลดลงตามค่า Shear Strain ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะให้
ค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่มากที่สุด โดยโมดูลัสแรงเฉือนของทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีค่าเข้าหากันเมื่อค่า
Shear Strain ค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Modulus)
ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสกาล ประมาณ 0.36, 0.59, และ 1.25 เมกะปาสกาล
ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 151



ภาพที่ 151 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus และ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียว
สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC

6.5 ลักษณะ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียว สร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแบบสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column โดยเครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมด 3 ตัวอย่างพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแบบ Effective Stress และ Total Stress จะมีค่ามากขึ้นตามค่าน้ำหนักรบรทุก ซึ่งสามารถหาค่ามุมเสียดทานและค่าแรงยึดเหนี่ยวในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล เท่ากับ 19.11 องศา และ 0.59 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ส่วนค่ามุมเสียดทานและค่าแรงยึดเหนี่ยวแบบหน่วยแรงรวม จะได้เท่ากับ 14.78 องศา และ 0.38 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ดังภาพที่ 152



ภาพที่ 152 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Vertical Stress ในแบบ Effective Stress Path และ Total Stress Path ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC

6.6 ลักษณะการบีบอัดของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column

ผลจากการทดสอบการเอนตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเอนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเอน 0.14 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 กิโลปาสคาล แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการเอียงเล็กน้อย แต่ไม่เกิดการหักของแท่งดินซีเมนต์แต่อย่างใด ดังแสดงในภาพที่ 153 ส่วนที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 กิโลปาสคาลแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์จะเกิดการเอียงเพิ่มมากขึ้นและมีการหักของแท่งดินซีเมนต์บริเวณช่วงล่างของแท่งดินซีเมนต์บางส่วน ดังแสดงในภาพที่ 154 และ ที่น้ำหนักบรรทุก 23.6 กิโลปาสคาลแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีการเอียงและจะเกิดการหักบริเวณช่วงล่างของแท่งเสาเข็มในทุกต้น ดังแสดงในภาพที่ 155 ซึ่งเมื่อ

พิจารณาร่วมกับผลการวิเคราะห์ความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ได้ จะเห็นพบว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column นี้ไม่ได้ช่วยทำให้กำลังของดินเหนียวเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ทั้งนี้เกิดจากการที่ จำนวนพื้นที่ของเสาเข็มดินซีเมนต์ในหน้าตัดที่พิจารณามีปริมาณน้อย ทำให้การส่งผ่านแรงระหว่างดินซีเมนต์และดินน้อยตามไปด้วยเมื่อเทียบกับแบบอื่น รวมไปถึงรูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column นี้ไม่มีส่วนของ Shape Resistance ที่จะทำให้กำลังของดินเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการเคลื่อนตัว



ภาพที่ 153 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC ที่น้ำหนักรบรรทุก 5.9 kPa



ภาพที่ 154 ลักษณะการพิบัติของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC ที่น้ำหนักรบรรทุก 11.8 kPa



ภาพที่ 155 ลักษณะการบีบอัดของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC ที่น้ำหนักรบรรทุก 23.6 kPa

7. การวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ

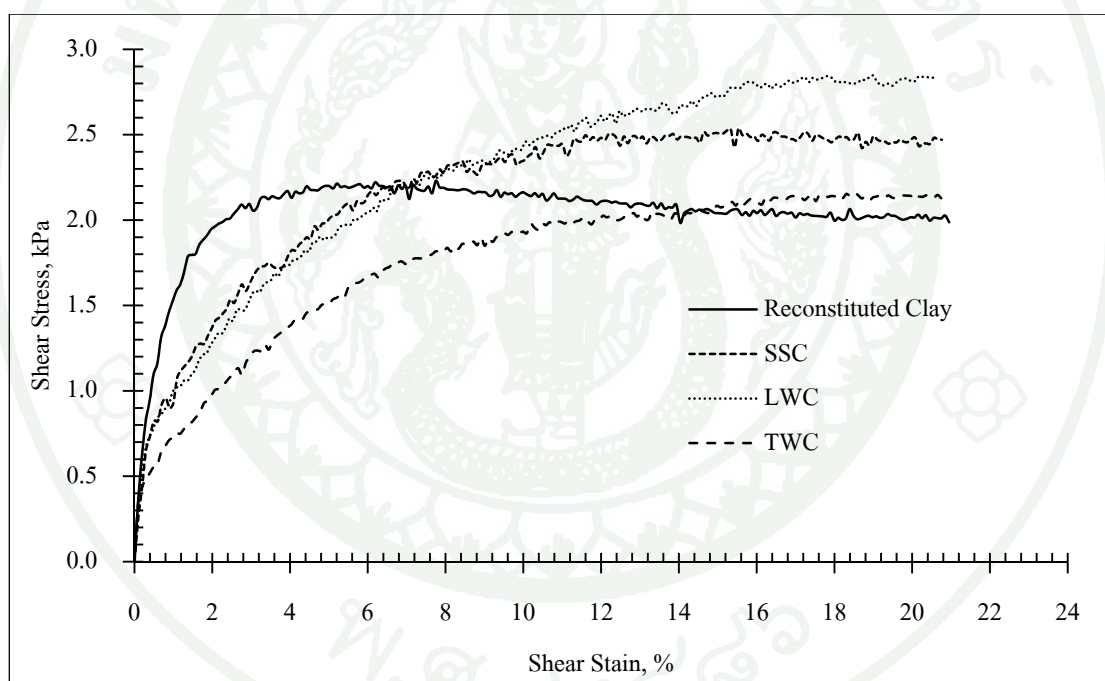
จากการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column ด้วยเครื่องทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมดแบบละ 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักรบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเลื่อนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเลื่อน 0.14 มิลลิเมตรต่ออนาที ซึ่งผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาคุณสมบัติของแต่ละแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

7.1 การศึกษาและวิเคราะห์เปรียบเทียบพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดที่เกิดขึ้นของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

7.1.1 ที่น้ำหนักรบรรทุก 5.9 กิโลปาสคาล

จากรูปที่ 156 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นเลื่อน ในช่วงความเครียดที่ 0 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ ของดินเหนียวสร้างใหม่จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ แต่เมื่อเลยผ่านช่วงความเครียดที่ 7 เปอร์เซ็นต์ไปแล้ว ความ

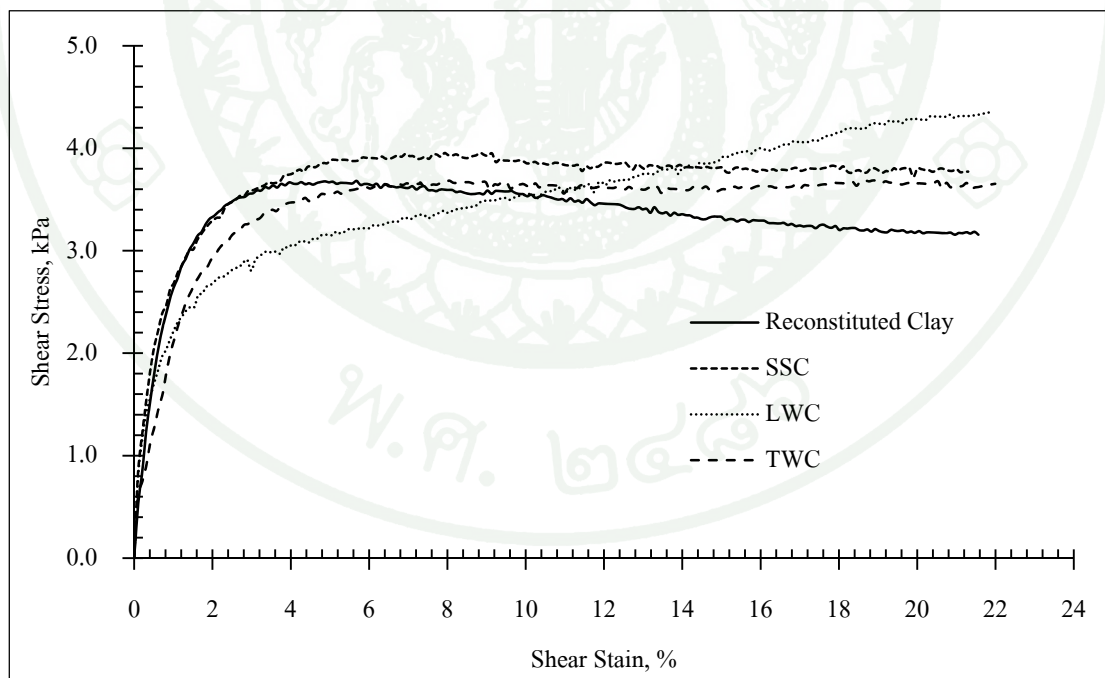
เค้นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยและคงที่ตลอดระยะความเครียดเฉือน แต่ในทางกลับกัน ความเค้นเฉือนของการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column และ Longitudinal Wall Column กลับมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งความเค้นเฉือนของรูปแบบ Longitudinal Wall Column จะให้ค่าที่มากกว่า Square Single Column ส่วนในรูปแบบ Transvers Wall Column การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเฉือนจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้าและจะมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ที่มีความเครียดเฉือนประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพอจะประเมินได้ว่าการรับแรงร่วมกันระหว่างดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column และ Longitudinal Wall Column จะเกิดขึ้นที่ความเครียดเฉือนประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้นไปโดยจะให้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ความเครียดประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ Square Single Column และประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ Longitudinal Wall Column



ภาพที่ 156 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 kPa ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

7.1.2 ที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 กิโลปาสกาล

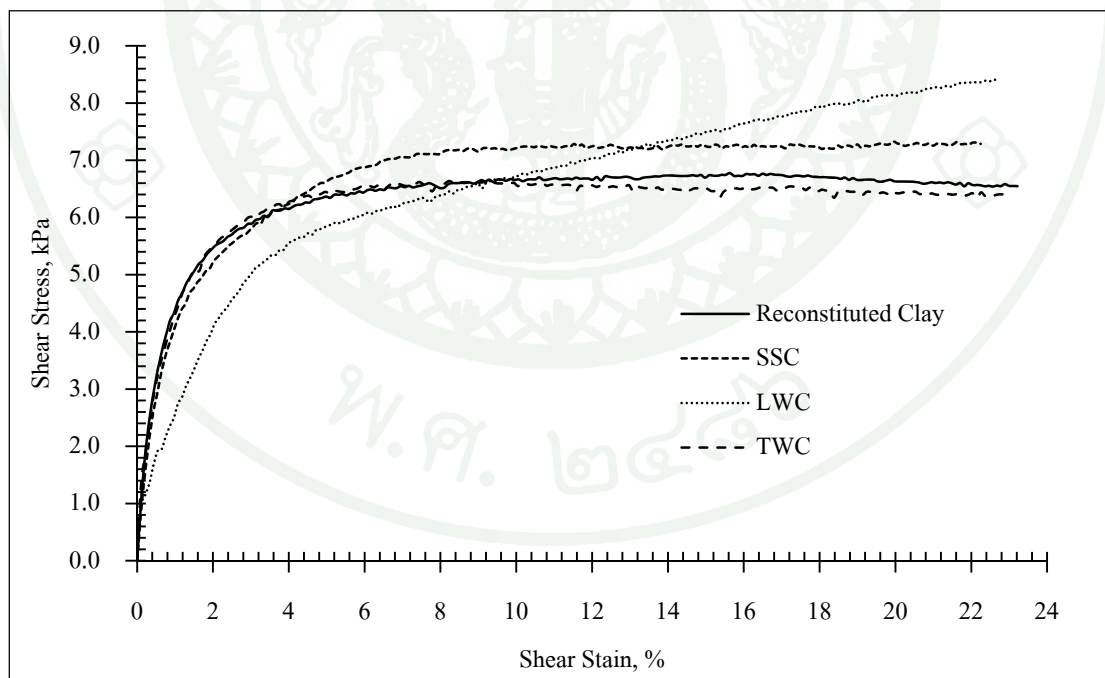
จากรูปที่ 157 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นเฉือน ในช่วงความเครียดที่ 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ของดินเหนียวสร้างใหม่และเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบ Longitudinal Wall Column และ Transvers Wall Column ซึ่งในแบบ Square Single Column จะให้ค่าความเค้นที่สูงกว่าดินเหนียวสร้างใหม่ แต่เมื่อเลยผ่านช่วงความเครียดที่ 5 เปอร์เซ็นต์ไปแล้ว เสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column จะมีค่าความเค้นเฉือนคงที่และดินเหนียวสร้างใหม่จะมีค่าความเค้นเฉือนลดลง ส่วนการปรับปรุงคุณภาพในแบบ Transvers Wall Column จะมีความเค้นที่สูงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเช่นเดียวกัน แต่ก็ไม่ได้ให้ค่าความเค้นเฉือนที่สูงกว่าดินเหนียวสร้างใหม่ โดย Transvers Wall Column จะให้ค่าความเค้นที่เท่ากับค่าความเค้นของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ค่าความเครียดประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกันข้ามกับการปรับปรุงคุณภาพในแบบ Longitudinal Wall Column ที่เมื่อเลยช่วงความเครียดประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ไปแล้ว ค่าความเค้นเฉือนจะมีค่ามากกว่าดินเหนียวสร้างใหม่และให้ค่าที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 157 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 kPa ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

7.1.3 ที่น้ำหนักรรทุก 23.6 กิโลปาสกาล

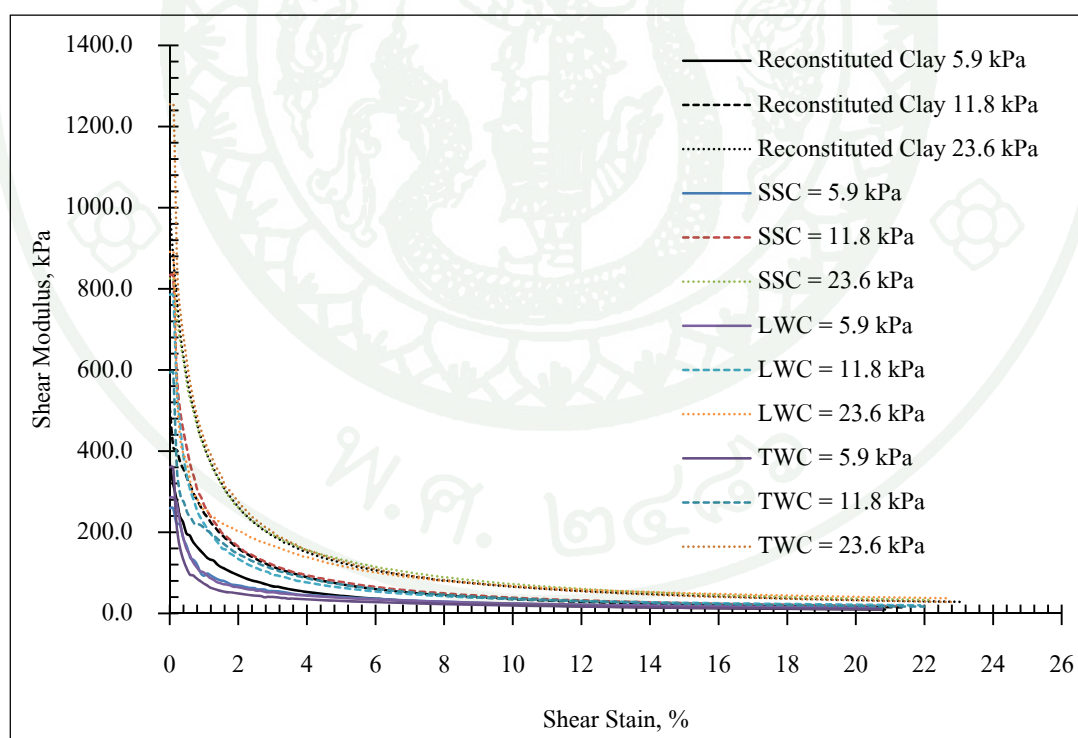
ที่น้ำหนักรรทุก 23.6 กิโลปาสกาลนี้ จะมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำหนักรรทุกที่ 11.8 กิโลปาสกาล กล่าวคือค่าความเค้นเฉือน ในช่วงความเครียดที่ 0 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ ของดินเหนียวสร้างใหม่และเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column และ Transvers Wall Column จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบ Longitudinal Wall Column ซึ่งในแบบ Square Single Column จะให้ค่าความเค้นที่สูงกว่าดินเหนียวสร้างใหม่ ส่วนแบบ Transvers Wall Column จะให้ค่าความเค้นเท่ากับดินเหนียวสร้างใหม่ โดยเมื่อเลยผ่านช่วงความเครียดที่ 6 เปอร์เซ็นต์ไปแล้ว ตัวอย่างทดสอบทั้งสามแบบจะมีค่าความเค้นเฉือนลงที่ ส่วนการปรับปรุงคุณภาพแบบ Longitudinal Wall Column นั้น ค่าความเค้นเฉือน จะมีค่าเท่ากับค่าความเค้นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ ที่ความเครียดเฉือนประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อความเครียดเลยผ่านช่วง 9 เปอร์เซ็นต์ไปแล้ว ค่าความเค้นเฉือนของ Longitudinal Wall Column จะเพิ่มสูงขึ้นกว่าดินเหนียวสร้างใหม่และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะความเครียดที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 158



ภาพที่ 158 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ที่น้ำหนักรรทุก 23.6 kPa ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

7.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติด้าน Shear Modulus ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในแต่ละแบบ

จากการวิเคราะห์หาค่า Shear Modulus ของตัวอย่างทดสอบทั้งตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสร้างใหม่และตัวอย่างดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column พบว่าเมื่อนำผลมาวิเคราะห์รวมกัน ดังรูปที่ 159 ค่า Shear Modulus ของตัวอย่างในแต่ละน้ำหนักรรทุก (ที่ 5.9, 11.8, และ 23.6 กิโลปาสกาล) มีค่าที่จับกลุ่มและใกล้เคียงกัน โดยจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าโมดูลัสแรงเฉือนที่ความเครียดน้อยๆ (Small Strain) ที่น้ำหนักรรทุก 5.9, 11.8, และ 23.6 kPa สรุปลำดับดังตารางที่ 19 ซึ่งตัวอย่างทดสอบแบบ Reconstituted Clay และ Transverse Wall Column ค่า Maximum Shear Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าน้ำหนักรรทุกที่เพิ่มขึ้น ส่วนตัวอย่างทดสอบแบบ Square Single Column และ Longitudinal Wall Column ค่า Maximum Shear Modulus ที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามค่าน้ำหนักรรทุกที่เพิ่มขึ้น

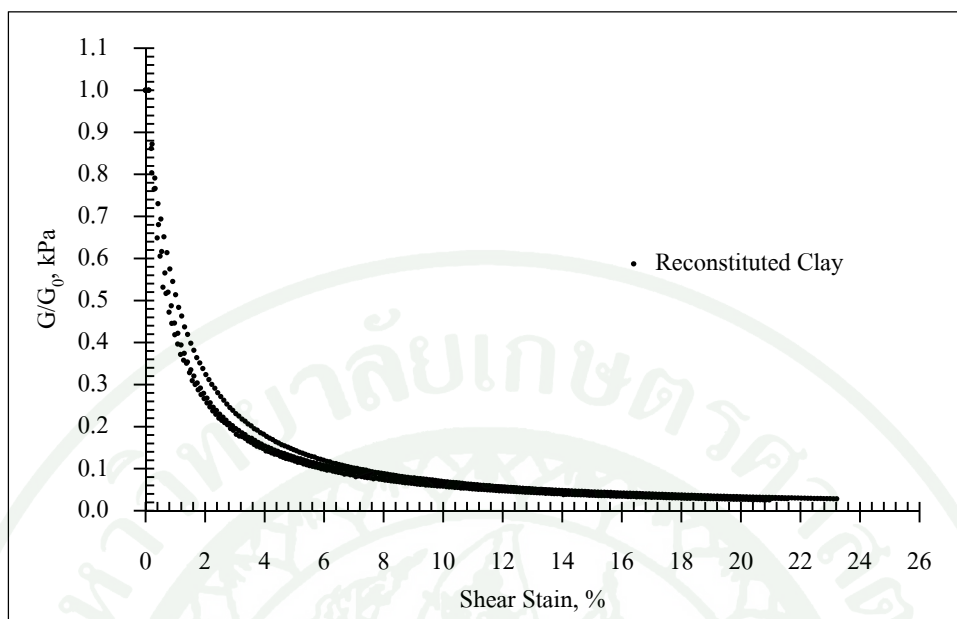


ภาพที่ 159 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus กับ Shear Strain ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

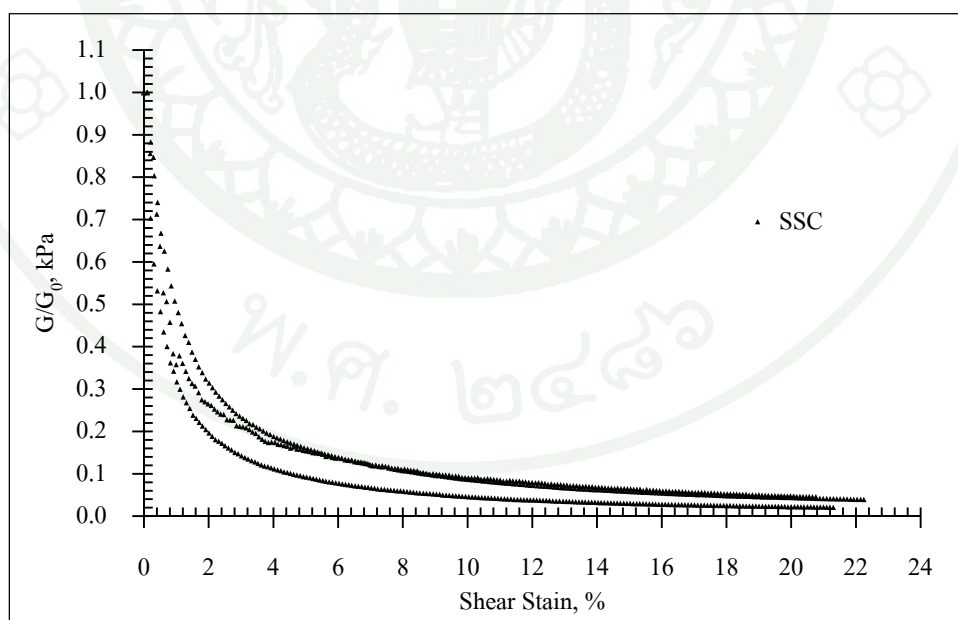
ตารางที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Shear Modulus กับรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

Normal Stress Type	Maximum Shear Modulus, MPa		
	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa
Reconstituted Clay	0.37	0.51	0.99
Square Single Column	0.26	0.83	0.83
Longitudinal Wall Column	0.29	0.79	0.89
Transverse Wall Column	0.36	0.59	1.25

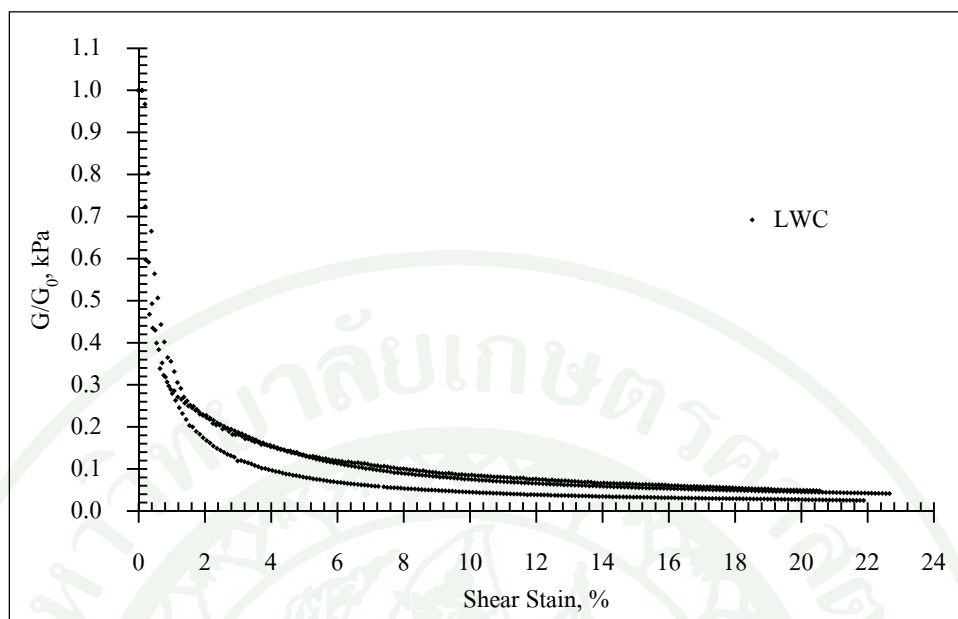
เมื่อนำค่า Maximum Shear Modulus มาทำการ Normalized ค่า Shear Modulus ตามความเครียดที่เพิ่มขึ้น ณ น้ำหนักบรรทุกต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ พบว่า ลักษณะกราฟของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ค่อนข้างมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 160 แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างแบบ SSC, LWC, และ TWC จะเห็นได้จะมีช่วงความกว้างของกราฟที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ กล่าวคือ ที่กำลังเฉือนของดินต่ำๆ (น้ำหนักบรรทุก 5.9 kPa) ความ Compatibility ของดินกับดินซีเมนต์จะยังไม่ดีมาก แต่เมื่อกำลังเฉือนของดินสูงขึ้น (น้ำหนักบรรทุก 11.8 และ 23.6 kPa) ความ Compatibility ของดินกับดินซีเมนต์จะมีดีมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากกราฟที่มีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 161, 162, และ 163



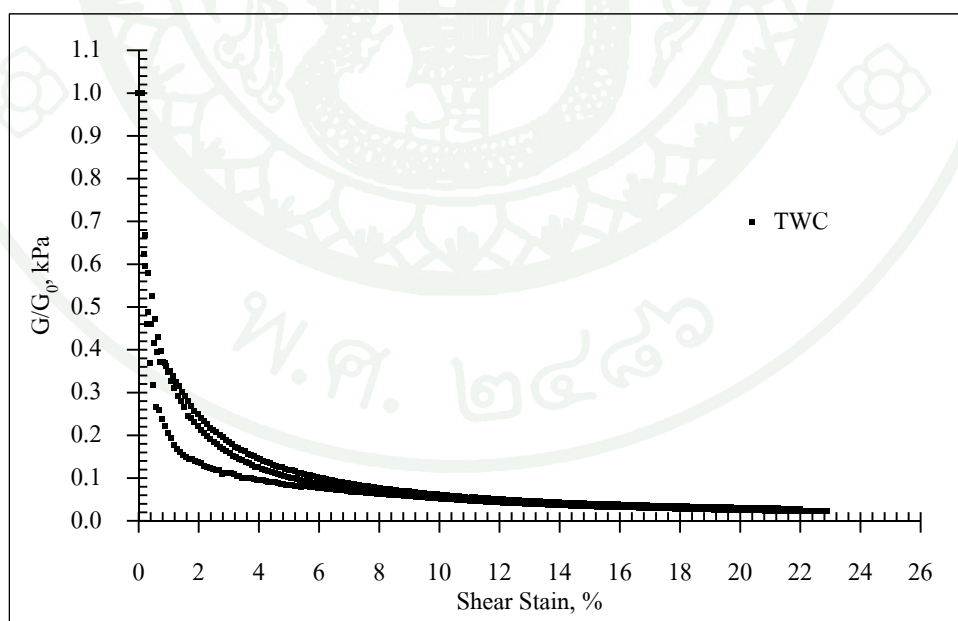
ภาพที่ 160 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่



ภาพที่ 161 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ SSC



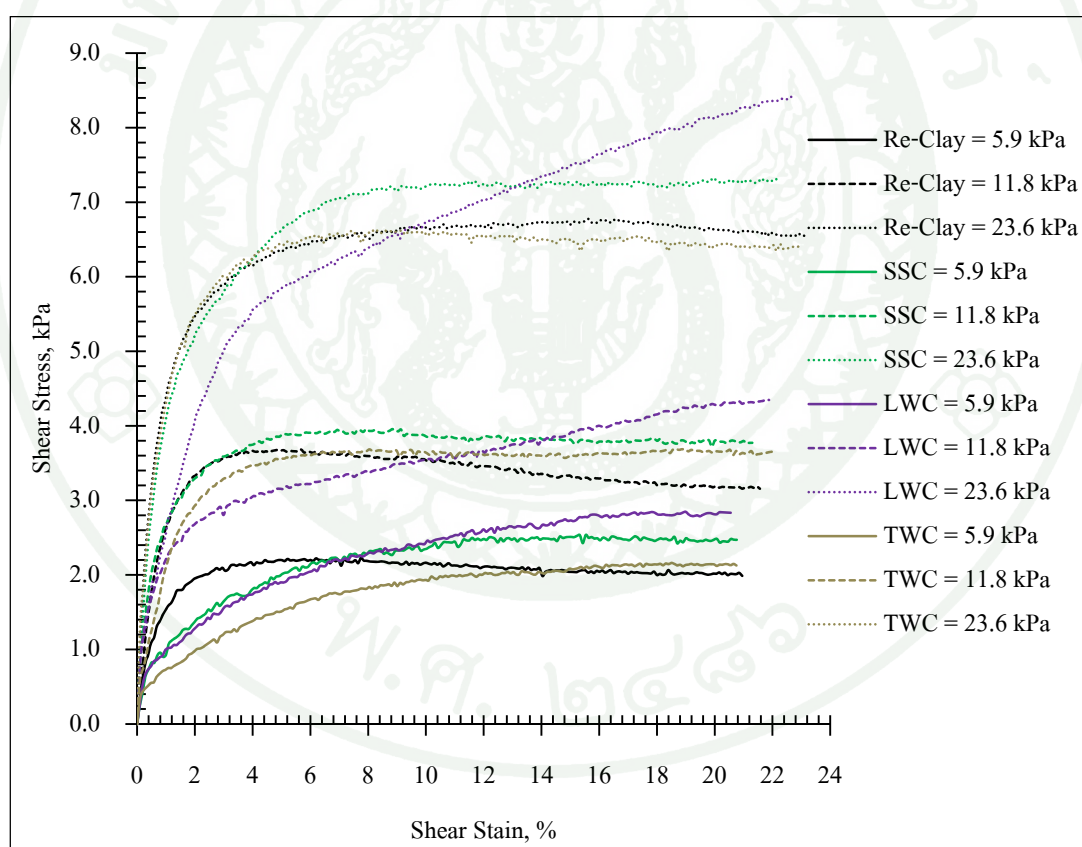
ภาพที่ 162 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ LWC



ภาพที่ 163 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized Shear Modulus กับ Shear Strain ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ TWC

8. การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในแต่ละแบบ

จากการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column ด้วยเครื่องทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมดแบบละ 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสกาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราความเร็วการเฉือน 0.14 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำให้ได้ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 164 โดยจะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 164 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Strain ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ ของดินเหนียวสร้างใหม่และดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ

จากการทดสอบการเนื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่และตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบพบว่า ที่ความเครียดเนื่อน 20 เปอร์เซ็นต์ การพัฒนาความเค้นของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด ก่อนข้างจะมีความคงที่ โดยค่าความเค้นที่ความเครียดเนื่อน 20 เปอร์เซ็นต์ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column จะให้ค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงโดยวิธีอื่นๆ ส่วนการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column จะให้ค่าความเค้นเนื่อนสูงสุดที่รองลงมาและเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Transvers Wall Column จะให้ค่าความเค้นเนื่อนที่น้อยที่สุด ซึ่งค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละแบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 20 ดังนี้

ตารางที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Shear Stress at 20 % Shear Strain กับรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบต่างๆ

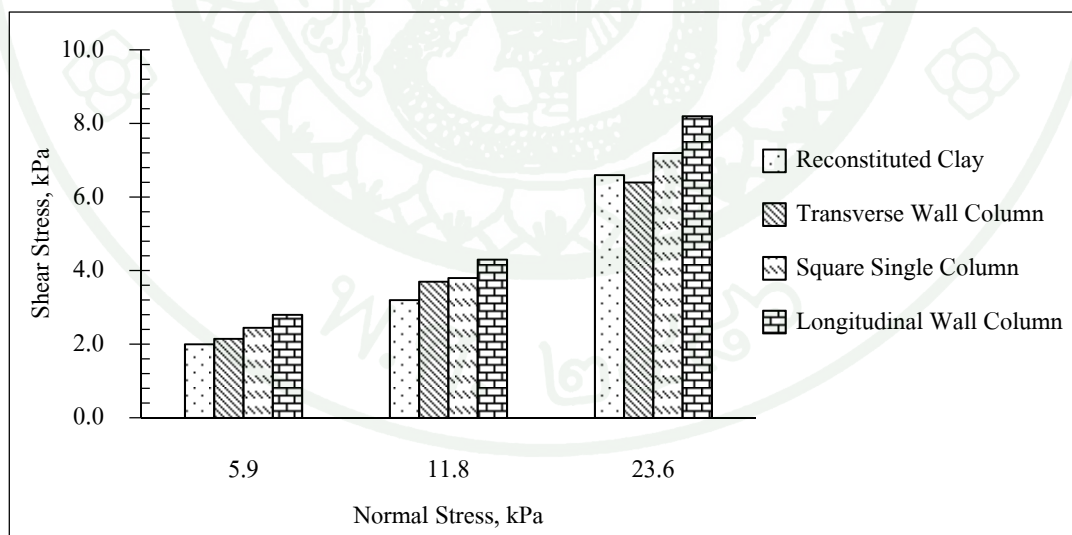
Normal Stress Type	Peak Shear Stress at 20 % Shear Strain, kPa		
	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa
Reconstituted Clay	2.00	3.20	6.60
Square Single Column	2.45	3.80	7.20
Longitudinal Wall Column	2.80	4.30	8.20
Transvers Wall Column	2.15	3.70	6.40

เมื่อพิจารณาความเครียดเนื่อนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าความเค้นเนื่อนของการปรับปรุงคุณภาพด้วยดินซีเมนต์ทั้งแบบ Longitudinal Wall Column และ Transvers Wall Column นั้น ยังไม่มีการพัฒนากำลังให้สูงไปกว่าดินเหนียวที่ยังไม่ถูกปรับปรุง กล่าวคือความเค้นเนื่อนจะมีค่าประมาณความเค้นเนื่อนสูงสุดของดินเดิม แต่ในทางกลับกัน การปรับปรุงคุณภาพด้วยดินซีเมนต์แบบ Square Single Column นั้นจะมีการพัฒนากำลังที่สูงกว่าและยังมีแนวโน้มของพฤติกรรมความเค้นความเครียดที่คล้ายกับดินเดิม เมื่อน้ำบรทุกที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งค่าความเค้นสูงสุด ณ ความเครียดเนื่อนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ของแต่ละการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 21 ดังนี้

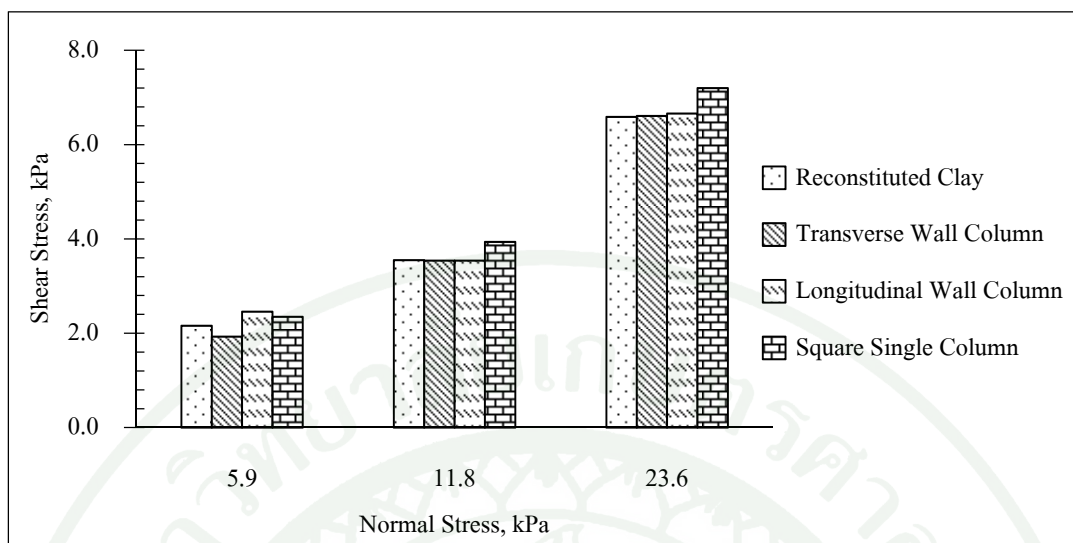
ตารางที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Shear Stress at 10 % Shear Strain กับรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบต่างๆ

Normal Stress Type	Peak Shear Stress at 10 % Shear Strain, kPa		
	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa
Reconstituted Clay	2.16	3.55	6.59
Square Single Column	2.35	3.94	7.20
Longitudinal Wall Column	2.46	3.54	6.66
Transvers Wall Column	1.93	3.54	6.61

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์จากน้อยไปมาก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 165 และรูปที่ 166 ตามลำดับ



ภาพที่ 165 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Normal Stress ที่ความเครียดเฉือน 20 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่และดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ



ภาพที่ 166 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Normal Stress ที่ความเครียดเฉือน 10 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่และดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ

9. การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดของเสาเข็มดินซีเมนต์และกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Test) ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแก่ตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 5.9, 11.8, และ 23.6 กิโลปาสกาลตามลำดับ พบว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นจากดินเดิม มีค่าดังตารางที่ 22 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการทดสอบ Flexural Strength เมื่อกำลังรับแรงดัดของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่า 14.2 กิโลปาสกาล ดังนั้นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีพื้นที่ 6.15 ตารางเซนติเมตรต่อต้น และมีจำนวนของเสาเข็มเท่ากับ 36 ต้นต่อการทดสอบแต่ละแบบ (Area Ratio = 0.1) เพราะฉะนั้นเสาเข็มดินซีเมนต์จะรับแรงดัดได้สุทธิเท่ากับ 314.6 นิวตัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบจะเห็นว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column จะให้กำลังที่เพิ่มขึ้นประมาณ 112.5-150 นิวตัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ที่จะรับได้ ซึ่งเมื่อดูจากภาพการพิบัติแล้วจะเห็นได้ว่า เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่ได้หักหมดทุกต้น โดยเกิดจากการส่งผ่านของแรงระหว่างดินและดินซีเมนต์นั้นเกิดขึ้นไม่ดันทัน

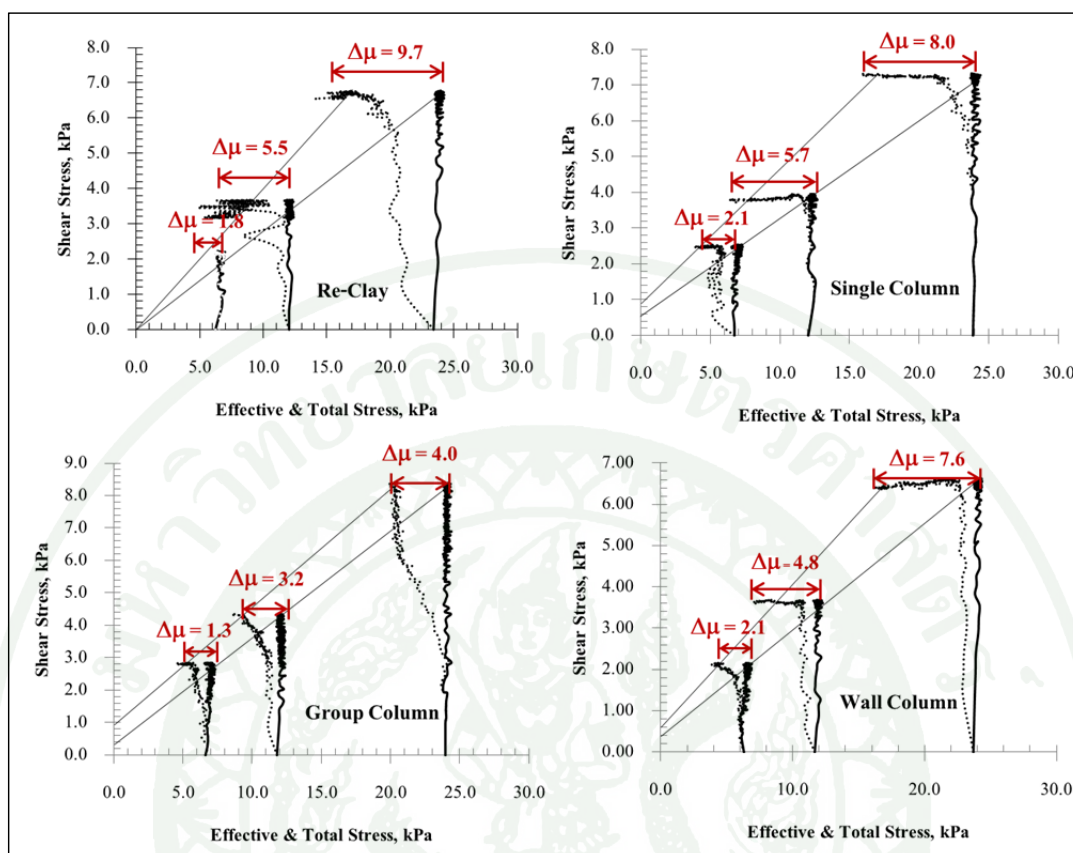
ซึ่งแตกต่างจากการปรับปรุงคุณภาพแบบ Longitudinal Wall Column ที่ให้กำลังที่เพิ่มขึ้น 200-400 นิวตัน ตามค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิม โดยเมื่อพิจารณาตามภาพการพิบัติแล้วพบว่า มีการหักของดินซีเมนต์เกือบทุกต้นที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด นั้นแสดงให้เห็นว่าการส่งผ่านของแรงเกิดขึ้นได้ดี (ส่งผ่านแรงจากต้นสู่ต้น) รวมถึงการมีรูปร่างที่ต้านการเฉือน (Shape Resistant) ทำให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นได้มากกว่าแบบอื่น ส่วนการปรับปรุงแบบ Transvers Wall Column จะมีการเพิ่มขึ้นของแรงอยู่บ้าง แต่โดยเฉลี่ยแล้วเกิดขึ้นไม่มากนัก จึงถือว่าการปรับปรุงแบบนี้ไม่ได้ช่วยให้เพิ่มกำลังของดินแต่อย่างไร

ตารางที่ 22 การเปรียบเทียบค่ากำลังที่เพิ่มขึ้นจากดินเดิมของการปรับปรุงคุณภาพในแต่ละแบบ

Type	การเพิ่มขึ้นของกำลังจากดินเดิม, นิวตัน			หมายเหตุ
	Re-Clay, kPa Cu = 2.00 ($\sigma_v = 5.9$ kPa)	Cu = 3.20 ($\sigma_v = 11.8$ kPa)	Cu = 6.59 ($\sigma_v = 23.6$ kPa)	
Square Single Column	112.5	150	150	กำลังรับแรง ดัด ข อง เสาเข็มดิน ซีเมนต์ที่ 36 ต้น เท่ากับ 314.6 นิวตัน
Longitudinal Wall Column	200	275	400	
Transvers Wall Column	37.5	125	-50	

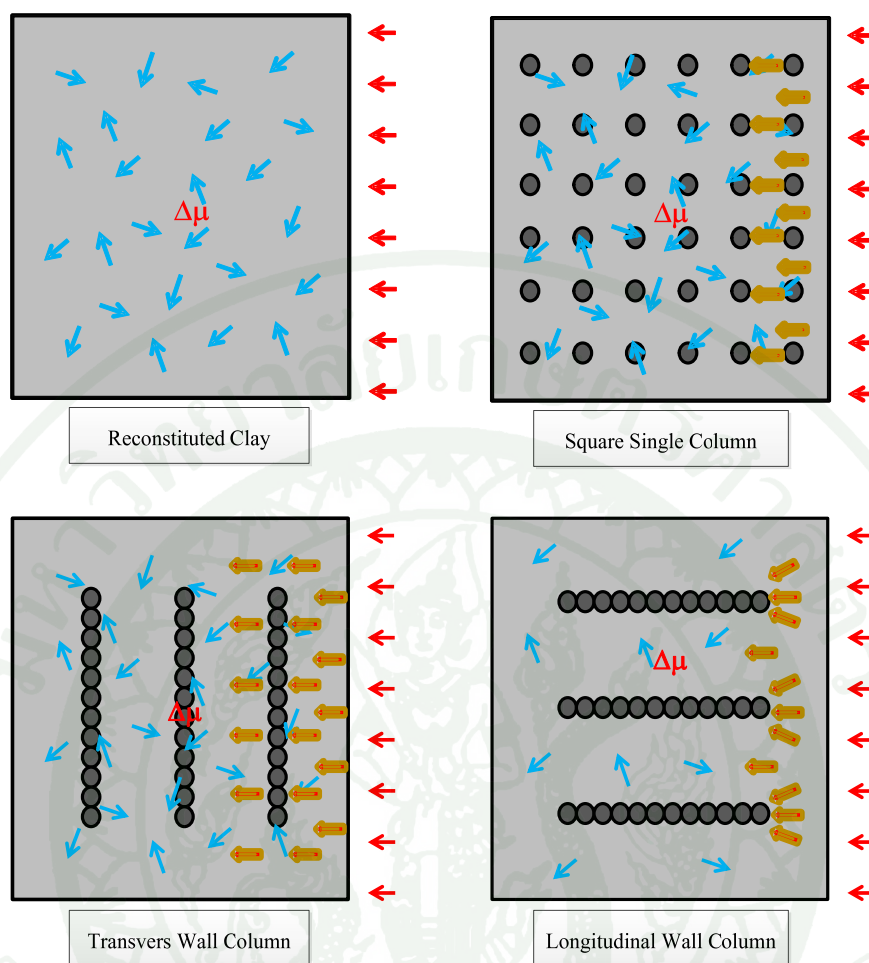
10. การวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่าง

จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Test) ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแก็ตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 5.9, 11.8, และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ พบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของดินเดิมและการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column และ Transvers Wall Column มีแนวโน้มที่เท่ากันในแต่ละน้ำหนักบรรทุก ซึ่งที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่สูงสุด แต่เมื่อพิจารณาการปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าแบบอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 167



ภาพที่ 167 การเปรียบเทียบค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

การที่แรงดันน้ำส่วนเกินของการปรับปรุงแบบ Longitudinal Wall Column มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแบบอื่น ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นมาจากการที่ เมื่อเริ่มเกิดความเค้นภายในตัวอย่างดิน ความเค้นโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเข้าหาเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เรียงตัวกันอยู่เป็นแถวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวอย่าง ซึ่งการจัดเรียงในลักษณะนี้มีผลทำให้ Stiffness ของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าที่ดีขึ้น การส่งผ่านของแรงมีมากขึ้นเพราะเป็นการส่งผ่านระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยกัน ซึ่งแตกต่างจากแบบอื่นที่การส่งผ่านของแรงจะเป็นการส่งผ่านจากดินซีเมนต์สู่ดินหรือจากดินสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ ทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินตัวอย่างสามารถเกิดขึ้นได้มาก ดังแสดงในรูปที่ 168



ภาพที่ 168 ลักษณะแรงน้ำดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย
แท่งเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

11. การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า Strength Parameter ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน ด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในแต่ละแบบ

จากการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง
แบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column ด้วย
เครื่องทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ทั้งหมดแบบละ 3 ตัวอย่าง โดยให้น้ำหนัก
บรรทุกทุกแก็ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ และทำการเฉือนตัวอย่าง
ดินแบบไม่ระบายน้ำ ทำให้สามารถเขียนเส้นทางเดินของความเค้น ณ น้ำหนักบรรทุกต่างๆ ได้
(Mohr's Coulomb Envelope) ซึ่งการวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์หาค่า Strength Parameter ของ

ตัวอย่างทดสอบได้ทั้งค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, C) และค่ามุมเสียดทาน (Friction Angle, ϕ) โดยสามารถหาได้ทั้ง Strength Parameter ในแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) และแบบระบายน้ำ (Drained Shear Strength) เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าแรงดันน้ำขณะเหนียวตัวอย่างทดสอบไว้ด้วย จากผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างทดสอบที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column จะมีค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, C) เกิดขึ้น ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Square Single Column จะให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวแบบไม่ระบายน้ำ (Cohesion, C) มากที่สุดและการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column จะให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวแบบระบายน้ำ (Cohesion, C') มากที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับปรุงในแบบอื่นโดยค่าต่างๆแสดงดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ค่า Cohesion ของรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

Type	C	C'
Reconstituted Clay	0	0
Square Single Column	0.53	0.85
Longitudinal Wall Column	0.31	0.92
Transvers Wall Column	0.38	0.59

และเมื่อพิจารณาที่ค่ามุมเสียดทาน (Friction Angle, ϕ) พบว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Longitudinal Wall Column จะให้ค่ามุมเสียดทานแบบไม่ระบายน้ำมากกว่าแบบอื่น ส่วนค่ามุมเสียดทานแบบระบายน้ำนั้น จะให้ผลที่ใกล้เคียงกันในทุกแบบ โดยค่าต่างๆแสดงดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ค่า Friction Angle ของรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

Type	ϕ	ϕ'
Reconstituted Clay	15.64	21.76
Square Single Column	15.31	20.71
Longitudinal Wall Column	18.23	20.01
Transvers Wall Column	14.48	19.11

ซึ่งจากผลการทดสอบและวิเคราะห์ที่ได้นั้น ทำให้ทราบว่าการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งแบบ Square Single Column และ Longitudinal Wall Column จะทำให้ Strength Parameter ของดินมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนแบบ Transvers Wall Column ถึงแม้จะช่วยเพิ่มค่าแรงยึดเหนี่ยว แต่ก็เป็นการลดค่ามุมเสียดทานของดิน เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว การปรับปรุงคุณภาพแบบ Transvers Wall Column จึงไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ดินเดิมแต่อย่างใด

12. การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการและที่ได้จากการทดสอบ

จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Test) ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 12 ตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วย ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่, ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแก็ตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 5.9, 11.8, และ 23.6 กิโลปาสคาลตามลำดับ โดยจากการทดสอบนี้พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบนั้น ไม่ได้ตรงตามสมการด้านล่างคือ

$$C_{avg} = C_u (1 - a) + S_{col} a \quad (42)$$

เมื่อ S_{col} คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งได้มาจากการทดสอบ Unconfined Compression Test และ C_u คือค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวรอบๆเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าที่ได้จากสมการมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยผลการ

เปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 25 และผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นกับกำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 26 ตามลำดับ

ตารางที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากสมการกับค่ากำลังรับแรงเฉือนการทดสอบ ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (20 % Shear Strain)

		กำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ย, kPa						
		$C_{avg} = C_u (1 - a) + S_{col} a$			Lab Test		Remark	
Normal Stress	Type	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa	Cu = ได้จาก การทดสอบ LDSS ดิน เหนียว สร้างใหม่
Reconstituted Clay		-	-	-	2	3.2	6.6	Scol = ได้จาก
Square Single Column		18.3	19.38	22.44	2.45	3.8	7.2	การทดสอบ UC ของ เสาเข็มดิน
Longitudinal Wall Column					2.8	4.3	8.2	ซีเมนต์เท่ากับ 165 kPa
Transvers Wall Column					2.15	3.7	6.4	a = พื้นที่ของ SCC ต่อพื้นที่ ที่ดิน = 0.1

ตารางที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นระหว่างค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดสอบ ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ (20 % Shear Strain)

		การเพิ่มขึ้นของกำลัง, % เมื่อเทียบกับดินเดิม					
		$C_{avg} = C_u(1 - a) + S_{col}a$			Lab Test		
Type	Normal Stress	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa
	Reconstituted Clay	-	-	-	0	0	0
	Square Single Column	815	505.63	240	22.5	18.8	9.1
	Longitudinal Wall Column				40.0	34.4	24.2
	Transvers Wall Column				7.5	15.625	0

จากตารางการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าค่ากำลังเฉือนที่ได้จากสมการมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเป็นอย่างมาก รวมไปถึงสมการที่ใช้ยังไม่รวมปัจจัยของรูปแบบการวางแนวของเสาเข็มดินซีเมนต์ว่าเป็นรูปแบบใด ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละรูปแบบให้ผลของค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้น สมการที่ใช้นี้ควรจะมีการปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมที่จะใช้งาน ซึ่งจากข้อมูลการทดสอบจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (Constant Factor, F) เพื่อปรับแก้สมการดั้งเดิม เพื่อให้สมการสามารถใช้ได้ตามรูปแบบการวางเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ ได้ โดยผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 27 ดังนี้

ตารางที่ 27 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของกำลังรับแรงเฉือนตามค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ (20 % Shear Strain) ที่ได้จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ

Normal Stress Type	Factor, F		
	5.9 kPa	11.8 kPa	23.6 kPa
Square Single Column	0.04	0.06	0.08
Longitudinal Wall Column	0.06	0.09	0.14
Transvers Wall Column	0.02	0.05	0.03

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของกำลังรับแรงเฉือนที่ได้มาพล็อตกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ จะได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณที่ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของดินเดิม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 169 จะสามารถจัดรูปแบบของสมการดั้งเดิม (สมการที่ 42) ให้เป็นสมการการเฉลี่ยของกำลังระหว่างดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + [(0.0076C_u + 0.0273) \times S_{col} \times a] \quad (43)$$

สำหรับ SSC (@20%γ)

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + [(0.0162C_u + 0.0307) \times S_{col} \times a] \quad (44)$$

สำหรับ LWC (@20%γ)

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + 0.034S_{col} \times a \quad (45)$$

สำหรับ TWC (@20%γ)

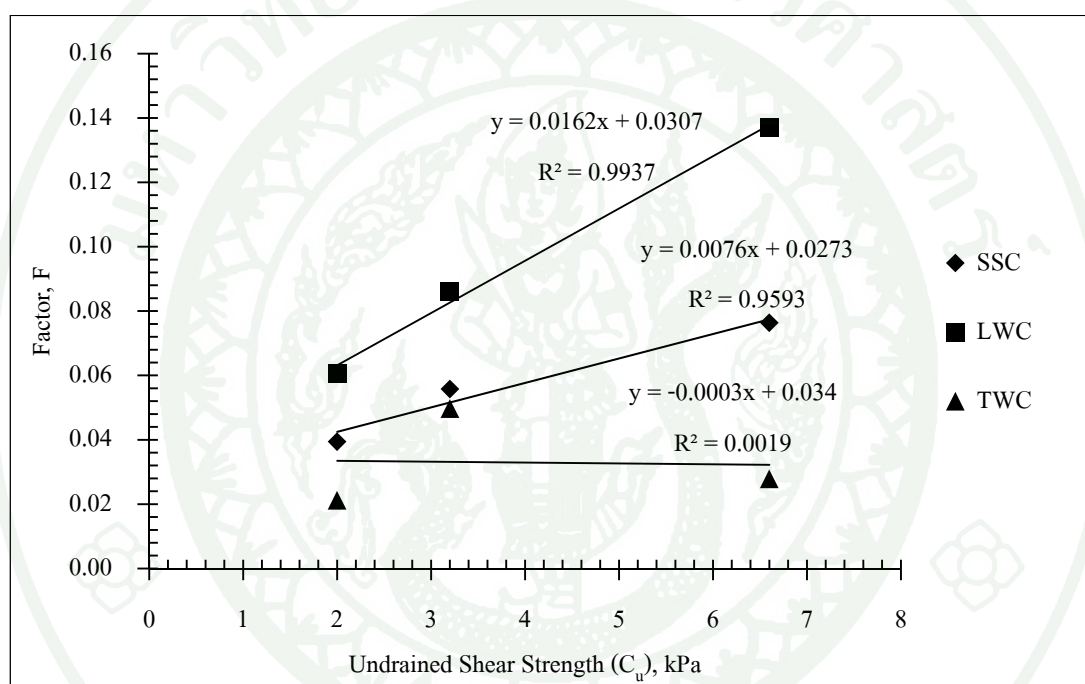
และเมื่อพิจารณา ณ ความเครียดเฉือน 14 เปอร์เซ็นต์ (@14%γ) จะได้สมการของการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของทั้ง Square Single Column และ Longitudinal Wall Column ซึ่งมีความใกล้เคียง ณ จุดนี้เท่ากัน ได้ดังนี้คือ

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + [(0.0076C_u + 0.0273) \times S_{col} \times a] \quad (46)$$

สำหรับ SSC & TWC (@14%)

เมื่อ S_{col} คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งได้มาจากการทดสอบ Unconfined Compression Test

C_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวรอบๆเสาเข็มดินซีเมนต์



ภาพที่ 169 ความสัมพันธ์ระหว่าง Constant Factor กับ Undrained Shear Strength, C_u ของดิน สำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละแบบ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากการคิดค้นและประดิษฐ์เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ (Large Direct Simple Shear Machine) เพื่อนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่ากำลังของตัวอย่างรวมถึงศึกษาลักษณะความเค้น-เครียด, โมดูลัสแรงเฉือน, หรือการติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆเข้าไปในตัวอย่างทดสอบได้อีกด้วย และยังใช้ประโยชน์จากเครื่องมือนี้ในการศึกษาและทดสอบลักษณะงานวิจัยแบบอื่นๆได้เป็นอย่างดี

2. จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเหนียวสร้างใหม่ ที่เป็นตัวอย่างแบบถูกรบกวนที่เก็บมาจากคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ พบว่าค่า Strength Parameter ของตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Shibuya & Tamrakar (2003) และเนื่องจากการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำขนาดเล็ก จึงทำให้ทราบถึงค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนตัวอย่าง ซึ่งสามารถสร้างเส้นการพิบัติหรือ Mohr Coulomb Envelope ที่หาค่ามุมเสียดทานได้ทั้งรูปหน่วยแรงประสิทธิผลและแบบหน่วยแรงรวม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 21.8 และ 15.6 องศาตามลำดับ โดยงานวิจัย Shibuya & Tamrakar (2003) ได้ทำการทดสอบการเฉือนตรงแบบปกติ (Direct Shear Box Test) กับตัวอย่างดินแบบ Reconstituted ที่เก็บมาจากพื้นที่คลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิเช่นเดียวกัน โดยพบว่ามีค่ามุมเสียดทานในหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากับ 25.5 องศา และค่าแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 5 กิโลปาสกาล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องมือนี้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. จากการทดสอบ Unconfined Compression Test และ Flexural Strength Test ของแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Su_{col}) ของตัวอย่างดินซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 165 kPa และมีค่ากำลังรับแรงดัดเฉื่อยอยู่ที่ 14.2 kPa ตามลำดับ

4. จากการทดสอบการเฉือนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเหนียวสร้างใหม่ ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำพบว่า ตัวอย่างดินจะค่อยๆเกิดการทรุดตัวตามระยะเวลาในแต่ละน้ำหนักบรรทุก ซึ่งให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสกาล และดินจะเกิดการทรุดตัวที่ 90 % ของการอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 19.8, 23.3, และ 34.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ

5. จากการทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของดินเหนียวสร้างใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำเพื่อเตรียมการติดตั้งแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์พบว่า ตัวอย่างดินจะค่อยๆเกิดการทรุดตัวตามระยะเวลาในแต่ละน้ำหนักบรรทุกเช่นเดียวกัน ซึ่งจะให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างดินเท่ากับ 5.9, 11.8 และ 23.6 กิโลปาสคาลในทั้งตัวอย่างแบบ Square Single Column, Longitudinal Wall Column, และ Transvers Wall Column โดยจะมีค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุก 5.9 กิโลปาสคาล เท่ากับ 18.5-20.5 มิลลิเมตร, ที่น้ำหนักบรรทุก 11.8 กิโลปาสคาล เท่ากับ 23.0-28.0 มิลลิเมตร, และที่น้ำหนักบรรทุก 23.6 กิโลปาสคาล เท่ากับ 29.5-33.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ

6. ลักษณะการบีบตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์จะเกิดขึ้นจากการเอียง (Tilting Failure) ร่วมกับการหัก (Bending Failure) มากกว่าที่จะเกิดการเฉือนขาด (Shearing Failure) โดยเมื่อกำลังรับแรงเฉือนของดินสูงมากขึ้น การเอียงและหักก็จะเกิดมากขึ้นด้วย โดยการหักของเสาเข็มดินซีเมนต์ในรูปแบบ Longitudinal Wall Column จะเกิดขึ้นมากที่สุด เนื่องจากลักษณะการวางตัวของเสาเข็มที่ชิดกันทำให้เกิดการส่งผ่านของแรงเกิดขึ้นได้มาก

7. จากการวิจัยพบว่า ยิ่งกำลังรับแรงเฉือนของดินรอบๆเสาเข็มมีค่าสูงขึ้นมากเท่าไร ความ Compatibility ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์กับดิน ก็ยิ่งดีขึ้น

8. จากการทดสอบพบว่าพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มซีเมนต์จะมีลักษณะความแตกต่างกันในแต่ละแบบ กล่าวคือ การปรับปรุงแบบ Square Single Column และ Transvers Wall Column จะมีลักษณะความเค้น-ความเครียดที่คล้ายกับดินเดิม โดยความเค้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่หลังจากนั้นจะค่อยๆคงที่ตามความเครียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากการปรับปรุงแบบ Longitudinal Wall Column ที่ความเค้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แต่จะมีความเค้นสูงที่ความเครียดสูงด้วย

9. จากการทดสอบการเลื่อนตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่ของปรับปรุงคุณภาพโดยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่าง พบว่าประสิทธิภาพการปรับปรุงในแต่ละแบบให้ผลที่ไม่เหมือนกัน โดยพบว่าที่ความเครียดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ การปรับปรุงแบบ Square Single Column จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด แต่เมื่อพิจารณาที่ความเครียดมากกว่า 14 เปอร์เซ็นต์ การปรับปรุงแบบ Longitudinal Wall Column จะให้ผลที่ดีที่สุด

10. ตัวอย่างทดสอบแบบ Reconstituted Clay และ Transverse Wall Column ค่า Maximum Shear Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่เพิ่มขึ้น ส่วนตัวอย่างทดสอบแบบ Square Single Column และ Longitudinal Wall Column ค่า Maximum Shear Modulus ที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่เพิ่มขึ้น

11. ลักษณะการวางของเสาเข็มดินซีเมนต์มีผลต่อค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น ซึ่งการวางแบบ Longitudinal Wall Column จะให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่น้อยเมื่อเทียบกับแบบอื่น

12. จากการวิเคราะห์หาเส้น Mohr Coulomb Envelope ของตัวอย่างทดสอบทั้งดินเหนียวสร้างใหม่และดินเหนียวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบต่างๆ พบว่าค่า Strength Parameter ทั้ง Undrained และ Drained ของตัวอย่างมีค่าที่แตกต่างกันโดยมีค่าต่างๆดังตารางด้านล่าง ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ทำให้ดินที่ปรับปรุงมีค่า Cohesion ที่เพิ่มขึ้น

Type	c, ϕ	c', ϕ'
Reconstituted Clay	0.00 kPa, 15.64°	0.00 kPa, 21.76°
Square Single Column	0.53 kPa, 15.31°	0.85 kPa, 20.71°
Longitudinal Wall Column	0.31 kPa, 18.23°	0.92 kPa, 20.01°
Transvers Wall Column	0.38 kPa, 14.48°	0.59 kPa, 19.11°

13. ผลจากการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียด ที่ได้จากการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบต่างๆ ทำให้สามารถหาสมการปรับแก้ การคำนวณการหาค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนตามรูปแบบการปรุงและกับกำลังรับแรงเฉือนของดินเดิม (Undrained Shear Strength) ได้เป็นสมการดังนี้

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + [(0.0076C_u + 0.0273) \times S_{col} \times a] \quad \text{For SSC (@20\% \gamma)}$$

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + [(0.0162C_u + 0.0307) \times S_{col} \times a] \quad \text{For LWC (@20\% \gamma)}$$

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + 0.034S_{col} \times a \quad \text{For TWC (@20\% \gamma)}$$

$$C_{avg} = [C_u(1-a)] + [(0.0076C_u + 0.0273) \times S_{col} \times a] \quad \text{For SSC\&LWC (@14\% \gamma)}$$

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากตัวอย่างดินที่ใช้เป็นตัวอย่างดินที่เก็บได้จากตำแหน่งๆเดียว ดังนั้นผลการทดสอบอาจจะไม่ใช่ตัวแทนของพื้นที่ทั้งหมด ดังนั้นอาจจะต้องมีการศึกษาจากตัวอย่างตำแหน่งอื่นๆเพิ่มเติม
2. ผลการทดสอบอาจจะไม่เหมือนในสภาพหน้างานจริง อันเป็นผลมาจากเรื่องของขนาดตัวอย่าง (Scaling Effect) ดังนั้นอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมจากการทดสอบอื่นๆ หรือจากโปรแกรมการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Finite Element)
3. ผลการทดสอบนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดพื้นที่หน้าตัด, ความยาว, ระยะห่าง (Spacing) ของเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้น, ระยะเวลาของการบ่ม, รวมถึงปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม ซึ่งอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
4. ตัวอย่างแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์ ถูกผสมและเตรียมในห้องปฏิบัติการ โดยเตรียมแยกจากดินเหนียวสร้างใหม่ ไม่ได้ถูกผสมเหมือนกับในหน้างานจริง ที่มีเครื่องจักรในการปั่นและผสม ดังนั้นอาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติที่แตกต่างระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อยู่ในสนามและในห้องปฏิบัติการ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ก้องรัฐ นกแก้ว. 2547. การศึกษาพฤติกรรมทางกลในระหว่างการก่อสร้างคันทางบนดินเหนียว
อ่อนกรุงเทพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2549. **Cement Pozzolan and Concrete**. สมาคม
คอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ชีระชัยกุลพานิช. 2544. **สภาพธรณีเทคนิคของกลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง**. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปณูฯ สุวรรณวิวัฒนา. 2545. **ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์
GRASS**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงษ์ศิลป์ เดชะคนูวงศ์. 2544. **การศึกษาพฤติกรรมความเค้นความเครียดของกำแพงกันดิน
ชนิดเรียงต่อเนื่อง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชาญ ภูพัฒน์, ศรีสุข จันทรางศุ, วิจิตอัจฉรา สรรพกิจจานง, เรืองวิทย์ โชติวิทยานันท์, ธิติ
ปวีณธนา และ สุรินทร์ กาญจนภาส. 2519. **ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา
ตอนล่าง**. กองวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง.

วิชาญ ภูพัฒน์. 2517. **ถนนบนดินอ่อน**. กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ ฯ.

วิชาญ ภูพัฒน์. 2545. **การออกแบบฐานรากบนดินอ่อน**. ในเอกสารประกอบการสอนวิชาฐานราก
บนดินอ่อน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ฯ.

วิชาญ ภูพัฒน์. 2545. **ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง**. วิศวกรรมสถานแห่ง
ประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ ฯ.

- สมพงศ์ โรจน์กั้งสดล. 2552. การคุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์:
กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2551. **ปฐพีกลศาสตร์: หลักการพื้นฐาน** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2540. **วิศวกรรมปฐพี**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรม
ราชูปถัมภ์, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อธิจิต สุขปัญญา และ อภินิติ โชติสังกาศ. 2556, พฤษภาคม 8-10. การพัฒนาการทดสอบการเฉือน
ตรงอย่างง่ายขนาดใหญ่และพฤติกรรมของการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว
กรุงเทพฯสร้างใหม่ การประชุม วิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, จ.เชียงใหม่.
- Adams, T., G.M. Filz., and M.P Navin., 2009. **Stability of embankments and levees on deep-
mixed foundations. International Symposium on Deep Mixing and Admixture
Stabilization**, Okinawa, 19-21 May. Paper DI-1.
- Åhnberg, H, 1996. Stress Dependent Parameters of Cement Stabilised Soil. **Proc. 2nd Int. Conf.
on Ground Improvement Geosystems**, IS-Tokyo '96, Tokyo, 14-17 May, 1996, Vol.
1: 387-392. 155.
- Åhnberg, H. and Pihl, H., 1996. Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet (The Influence
of Lime Type on Soil Stabilization). **Swedish Deep Stabilization Research Centre,
Preliminary Study, Report No 2**, 1996-11-26, Linköping, 24: + 7 Appendices.
- Åhnberg, H., Holm, G., Holmqvist, L. and Ljungkrantz, C., 1994. The Use of Different
Additives in Deep Stabilisation of Soft Soils. **Proc. 13th Int. Conf. Soil Mech. a.
Found. Engng.**, New Delhi, India, Vol. 3: 1191-1194.

Åhnberg, H., Johansson, S.-E, Retelius, A, Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. and Holm, G., 1995a.

Cement och kalk för djupstabilisering av jord - En kemisk fysikalisk studie av stabiliseringseffekter (**Cement and Lime for Stabilisation of Soil at Depth—A Chemical Physical Investigation of Soil Improvement Effects**). Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden, Report No 48: 213

Åhnberg, H., Ljungkrantz, C. and Holmqvist, L., 1995b. Deep Stabilization of Different Types of Soft Soils, **Proc. XI European Conf. on Soil Mech. a. Found. Engineering**, Copenhagen, 28 May - 1 June, 1995, Vol. 7: 7.167- 7.172.

Asano, J., Ban, K., Azuma, K. and Takahashi, K., 1996. Deep Mixing Method of Soil Stabilization Using Coal Ash. **Proc. 2nd Int. Conf on Ground Improvement Geosystems**, 14-17 May, 1996, IS-Tokyo 96, Vol. 1: 393-398.

Assarson, K.G. 1972. Stabilisering och jordförstärkning med kalk (**Stabilization and Soil Improvement Using Lime**) Cement och Betong, No 1: 19

ASTM D 6528 – 00 **Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils**

Babasaki, R., Terashi, M., Suzuki, T., Maekawa, A., Kawamura, M. and Fukazawa, E., 1996. JGS TC Report: Factors Influencing the Strength of Improved Soil. Committee Report, Japanese Geotechnical Society, **Proc. Int. Conf. on Soil Improvement Geosystems**, IS-Tokyo '96, Tokyo, Japan, Vol. 2: 913-918.

Bell, F.G. and Tyrer, M.J., 1989. The Enhancement of the Properties of Clay Soils by the Addition of Cement or Lime. **Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng.**, Rio de Janeiro., Brazil, Vol. 2: 1339-1341.

Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N. and Balasubramaniam, A.S. (1996). **Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments**, American Society of Civil Engineers (ASCE) Press, New York, U.S.A.

Bergado, D.T., Ruenkairergsa, T., Taesiri, Y. and Balasubramaniam, A.S. 1999. Deep soil mixing used to reduced embankment settlement. **Ground Improvement**. 3: 145-162.

Bergwall, M. and Falksund, M., 1996. Permeabilitetens och styvhetens inverkan på konsolideringsförloppet i kalkcementpelarförstärkt lera (**Consolidation of Lime/Cement Columns, Effects on Permeability and Stiffness**). Final Year Project, 1996:1, Chalmers Technological University, Department of Geotechnical Engineering, Gothenburg, Sweden: 105

Bjerrum L. and Landva A. 1966. **Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay**, Géotechnique, Vol.16 No.1: 1-20.

Bjerrum, L. 1972. Embankment on Soft Ground, **Proc. ASCE Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures**. Perdue University, Indiana.

Björkman, J. and Ryding, J., 1996. Kalkcementpelares mekaniska egenskaper (**Mechanical Properties of Lime/Cement Columns**). Final Year Project 96/1, Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Broms, B.B., 1972. **Stabilization of slope with pile, Proceeding of the 1st International Symposium on Landslide Control**, Kyoto, Vol.1: 115-123.

Broms, B.B., 1984. 'Stabilization of soft clay with lime columns'. **Proc. Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground**, Nanyang Technological Institute, Singapore.

Broms, B.B. and Boman, P. 1975. Lime Stabilized Column. **Asian Regional Conference 1.**

Bangladore: 227-234

Broms, B.B., Boman, P. 1978. **Stabilization of Soil with Lime Columns (2nd edition),**

Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology. Burland J. B.

(1990), On the compressibility and shear strength of natural soils. *Géotechnique*, 40,

No. 3: 329-378.

CDIT, 2002. **Deep Mixing Method – Principle, Design and Construction. Edited by Coastal**

Development Institute of Technology (CDIT), Japan. Balkema Publishers: 123

Chen, C.H. (1989). **Behavior of Improved Ground by Deep Mixing Method under**

Embankment Loading, AIT Thesis No.GT-89-17, Asian Institute of Technology,

Bangkok, Thailand.

Chida, S. 1982. **State-of-the-Art on Improvement Methods for Soft Ground.** JSSMFE,

Tokyo.

Chida, S., 1981. **Development of Dry Jet Mixing Methods.** Public Works Research Institute,

Ministry of Construction, Japan: 29-35.

Das, B.M. 1985. **Advance Soil Mechanics.** McGraw-Hill Book-Co Singapore, Singapore.

Das, B.M. 1993. **Principles of soil dynamics.** Boston: PWS-KENT. Boston.

Das, B.M. 1999. **Principles of foundation engineering.** Forth Edition. Pacific Grove, Calif.:

PWS. California.

Dyvik, R., Berre, T., Lacasse, S. and Raadim, B. 1987. **"Comparison of truly undrained and**

constant volume direct simple shear tests," *Géotechnique*, Vol.37, No. 1: 3-10.

- Ekström, J.C., 1992. Kalk och kalkcementpelare - Metod under utveckling, (Lime and Lime/Cement Columns - A Method under Development). **Swedish Geotechnical Society (SGF), Foundation Engineering Day**, 1992: 15
- Ekström, J.C., 1994b. Kontroll av kalkcementpelare, Slutrapport med redovisning av fältförsök i Ljungkile (**Checking of Lime/cement Columns, Final Report with Reference to Field Tests at Ljungkile**), Chalmers Technical University, Gothenburg, Report B 1994: 3: 1:1-8:4 +7 Appendices.
- Franke E., Kiekbusch M. and Schuppener B. (1979), **A new Direct Simple Shear device**, Geotechnical testing journal, Vol.2 No.4, 190-199.
- Han, J., Parsons, R.L., & Huang, J., and Sheth, A.R. 2005. Factors of safety against deep-seated failure of embankments over deep mixed columns. **Proceedings of the International Conference on Deep Mixing, Best Practice and Recent Advances**, Stockholm, Vol. 1: 231–236.
- Hirai, T., Ise, J., Kusakari, T., Gotou, M. and Hibi, Y., 1996. Development and Application of Deep Mixing Soil Stabilization Methods to Control Displacement of Adjacent Ground. **Proc. 2nd Int. Conf. Ground Improvement Geosystems**, 14-17 May, 1996, IS-Tokyo 96, Vol. 1: 485-490.
- Itasca Consulting Group, 2002. **FLAC2D Fast Lagrangian Analysis of Continua**. Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN, USA.
- Japan International Cooperation Agency. 1998. **Manual for Design and Construction of Cement Column Method**. 75.
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y. 1981. Deep Mixing Method Using Cement Hardening Agent, **Proc 10th ICSMFE**. Japan.

- Kitazume, M., Ikeda, T., Miyajima S. and Karastanev, D. (1996b) Bearing Capacity of Column Ground Improved with Column Type DMM, **Proceeding of The International Conference on Ground Improvement Geostems**, Tokyo, 14-17 May, Vol. 1: 503-508.
- Kitazume, M., Maruyama, K., 2006. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading. **Soils and Foundations**, Vol. 46, No. 3: 323-340.
- Kitazume, M., Maruyama, K., Hashizume, H., 2009. Centrifuge model tests on failure modes of deep mixing columns. **Proceedings of the International Symposium on Deep Mixing and Admixture Stabilization**, Okinawa, 19-21 May. Paper DI-7.
- Kitazume, M., Tabata, T., Ishiyama, S. and Ishikawa, Y., (1996a) Model Tests on Failure Pattern of Cement Treated Retaining Wall. **Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems**, Tokyo, 14-17 May, 1996, Vol. 1: 509-514.
- Kivelö, M., 1998. **Stabilization of embankments on soft soil with lime/cement columns**. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Kjellman W. (1951), Testing the shear strength of clay in Sweden, **Géotechnique**, Vol.2, No. 3: 225-235.
- Lambe, T.W. and Whitman, Robert V. 1979. **Soil Mechanics, SI Version**. John Wiley & Son, Inc. Singapore.
- Larsson, S., 1999. Shear box apparatus for modeling chemical stabilized soil–Introductory tests. **Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization**, Stockholm, 13-15 October: 115-121.

Larsson, S., 2008. Skjuvboxförsök på jordförstärkt kaolinlera med kalkcementpelare (**shear box tests on lime-cement column improved kaolin**). Arbetsrapport, Swedish Deep Stabilization Research Centre (in Swedish).

Larsson, S., Broms, B.B., 2000. Shear box model tests with lime/cement columns—some observations of failure mechanisms. **Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods, Melbourne**, 19-24 November.

Lorenzo, G.A. (2001). **A New Compressibility Model and Finite Element Simulation on Deep Mixing Method (DMM) Application**. M. Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

Miura, N., Horpibulsok, S. and Nagaraj, T. S., (1997). **Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content**. Soils and Foundations. Vol. 41. No. 5. pp. 3345.

Miyake, M., Akamoto, H. and Wada, M., 1991. **Deformation Characteristics of Ground Improved by a Group of Treated Soil, Centrifuge 91**, Balkema, Rotterdam: 295-302.

Miyake, M., Wada, M. and Satoh, T., 1991. Deformation and Strength of Ground Improved by Cement Treated Soil Columns. Proc. Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development, **Geo-Coast 96**, Yokohama, Japan, Vol. 1: 369-372.

Okumura, T., 1996. Deep Mixing Method in Japan. **Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems**, May 15-17, 1996, **IS-Tokyo 96 Tokyo Japan**, Vol. 2: 879-887.

- Rogbeck Y. and Tränk, R., 1995. Funktionsuppföljning av kalk- och kalkcementpelare, E4, Delen Lövstad-Norrköping, Östergötlands Län (**Behaviour of Lime and Lime/Cement Columns, E4, Lövstad - Norrköping Östergötland County**). Swedish Geotechnical Institute, Varia 426, 15: + 24 Appendixes.
- Rogbeck, Y., 1995. Stora triaxialförsök på kalkcementpelarprover (Large Triaxial Tests with Lime/Cement Column Samples). **Väg och Vattenbyggaren**, No 5: 34-36.
- Roscoe K.H. (1953), An apparatus for the application of simple shear to soil samples, **Proceedings third ICSMFE** 1: 186-191.
- Sandros, C. and Holm, G., 1996. Deep Stabilisation with the Wet Cement Mixing Method. **Proc. 12th Nordic Geotechnical Conference**, Reykjavik, 26-28 June, 1996: 129-134. SGF (2000). Lime and lime cement columns. Guide for design, construction and control. Report 2:2000, Swedish Geotechnical Society, Linköping: 111 (in Swedish).
- Sherwood, P.T., 1967. Views of the Road Research Laboratory on Soil Stabilisation in the United Kingdom, **Lime and Gravel**, Vol. 42, No. 9: 277-280.
- Shibuya & Tamrakar 2003, Engineering properties of Bangkok clay, Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils – Tan et al. (eds.), **ISBN 90 5809 537 1**: 662-665.
- Sinsakul Sin. 1997. Late Quaternary Geology of The Lower Central Plain, Thailand. In **International Symposium on Quaternary Environmental Change in The Asia and Western Pacific Region**. University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- Steensen Bach, J.O., Bengtsson P.-E., and Rogbeck, Y., 1996. Large Scale Triaxial Tests on Samples from Lime-Cement Columns. **Proc. 12th Nordic Geotechnical Meeting in Reykjavik, Iceland**: 135-146.

Suzuki, Y. 1985. **DCM Foundation Design Methodology**. Seabed Strengthening Symp, Colorado.

Terashi, M. and H. Tanaka, 1983. Ground improved by deep mixing method. **Proc. of the 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering**, vol.3: 777-780.

Terashi, M., Tanaka, H. and Kitazume, M., 1983. Extrusion Failure of the Ground Improved by the Deep Mixing Method. Proc. 7th Asian Regional Conf. on Soil Mech. **a. Found. Engng., Haifa, Israel**, Vol. 1: 313-318.

Terashi, M., Tanaka, H., and Okumura, T., 1979. **Engineering Properties of Lime-Treated Marine Soils and Deep Mixing Method**, Proc. 6th Asia Regional Conf. SMFE. Stokeholm.

Uddin, M. K., Balasubramaniam, A.S. and Bergado, D.T. (1997). Engineering behavior of cement- treated Bangkok soft clay. **Geotechnical Engineering**. Vol 28. No. 1: 89119

Uddin, M. K. (1995). **Strength and deformation characteristics of cement-treated Bangkok clay**. D. Eng. Dissertation No. GT-94-1, Asian Institute of Technology. Bangkok. Thailand.

Vägverket, 2009. **Tekniska kravdokument Geo**. VV Publ 2009:46. Vägverket, Borlänge, (in Swedish)

Vucetic M. and Lacasse S. (1982), Specimen size effect in simple shear test, Journal of Geotechnical Engineering Division, **ASCE** Vol.108 GT12: 1567-1585

Yoshida, S., 1996. Shear Strength of Improved Soils at Lap-Joint-Face. **Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems**, 14-17 May 1996, ISD-Tokyo 96 Vol. 1: 461-466.





ภาคผนวก ก

การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของแท่งดินซีเมนต์
(Unconfined Compression Test)

การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของแท่งดินซีเมนต์
(Unconfined Compression Test)

1. นำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้ผสมและบ่มที่เวลา 7 วัน ออกจากแบบหล่อ PVC
2. ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแท่งดินซีเมนต์
3. นำแท่งดินซีเมนต์ติดตั้งกับแท่งกดตัวอย่าง ดังภาพผนวกที่ ก1



ภาพผนวกที่ ก1 การติดตั้งแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเตรียมการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

4. ตั้งค่าการบันทึกข้อมูลและปรับค่าศูนย์ที่อุปกรณ์ตรวจวัดแรงและการยุบตัว
5. เริ่มทำการกดตัวอย่าง โดยใช้อัตราการกดตัวอย่างที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาทีและกดจนตัวอย่างจนเกิดการพิบัติ ดังภาพผนวกที่ ก2
6. นำผลการทดสอบไปวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดินซีเมนต์ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก2 ลักษณะการพบัติของแท่งดินซีเมนต์เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบแรงอัด



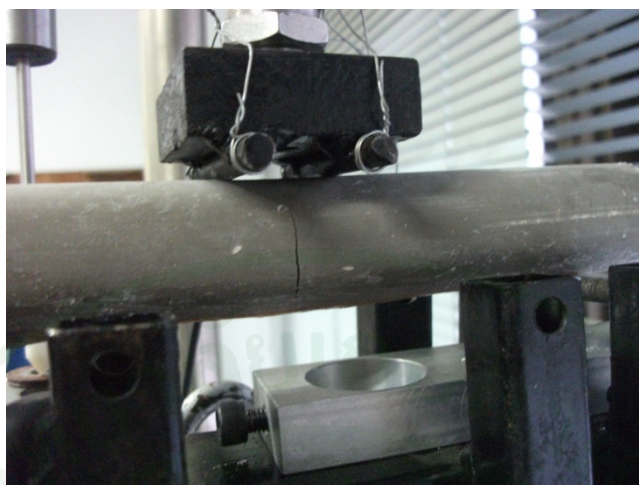
การทดสอบแรงดัดของแท่งดินซีเมนต์ (Flexural Strength Test)

1. นำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้ผสมและบ่มที่เวลา 7 วัน ออกจากแบบหล่อ PVC
2. ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแท่งดินซีเมนต์
3. นำแท่งดินซีเมนต์ติดตั้งกับแท่งกดตัวอย่าง ดังภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 การติดตั้งแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเตรียมการทดสอบแรงดัด

4. ตั้งค่าการบันทึกข้อมูลและปรับค่าศูนย์ที่อุปกรณ์ตรวจวัดแรงและการดัดตัว
5. เริ่มทำการกดตัวอย่าง โดยใช้อัตราการกดตัวอย่างที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาทีและกดจนตัวอย่างจนเกิดการพิบัติ ดังภาพผนวกที่ ข2
6. นำผลการทดสอบไปวิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ต่อไป



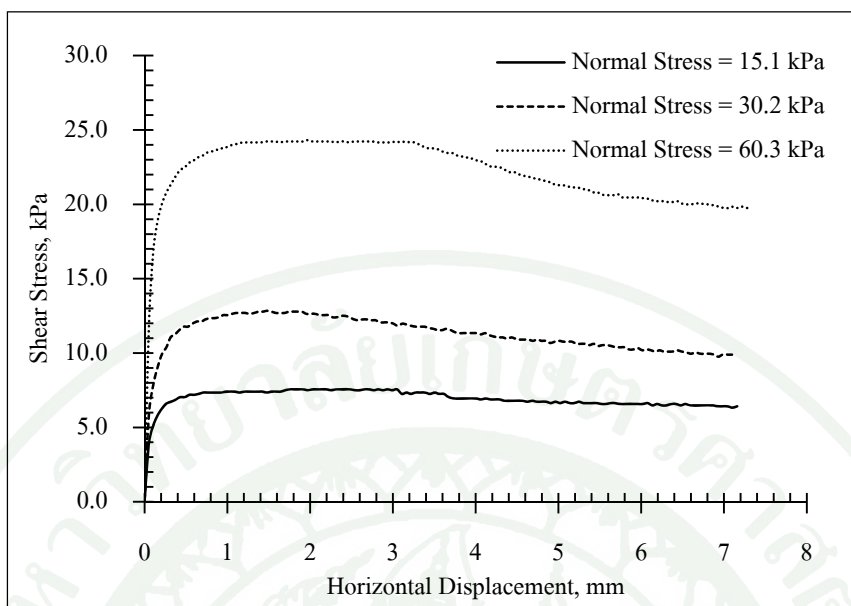
ภาพผนวกที่ ข2 ลักษณะการบีบอัดของแท่งดินซีเมนต์เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบแรงอัด

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

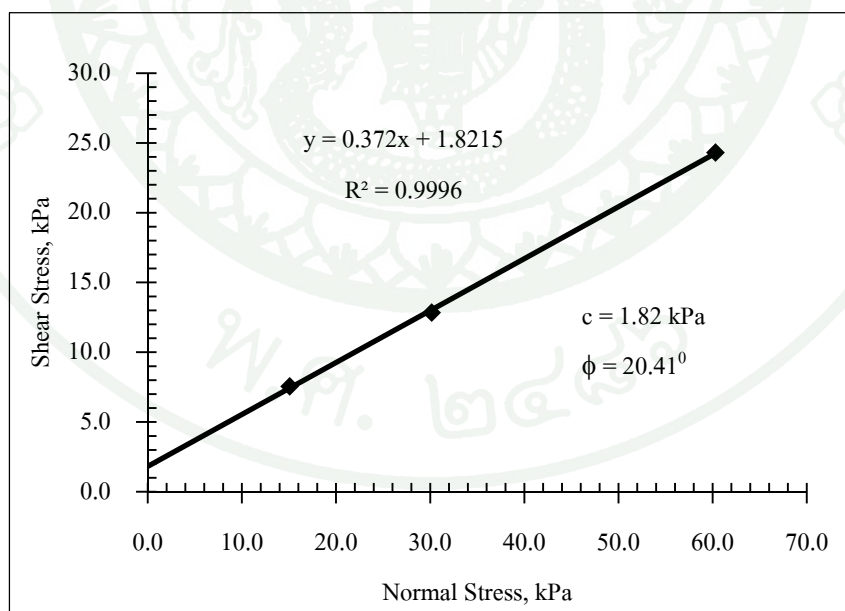
ภาคผนวก ค

ผลทดสอบการเฉือนตรงแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวตัวอย่างแบบ Remold
(Direct Shear Test)

พ.ศ. ๒๕๕๖



ภาพผนวกที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Displacement ของดินเหนียว
ตัวอย่าง



ภาพผนวกที่ ค2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Shear Stress กับ Normal Stress ของดินเหนียว
ตัวอย่าง

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อสกุล	นายอริจิต สุขปัญญา
เกิดวันที่	วันที่ 19 ธันวาคม 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-