

พฤติกรรมฐานรากชนิดเสาเข็มดินซีเมนต์ชั้นลึกภายใต้แรงกระทำ  
แบบซ้ำไปซ้ำมา

BEHAVIOR OF STIFFENED DEEP CEMENT MIXING COLUMN  
UNDER CYCLIC LOAD

ภิรมย์ พงษ์คำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พฤติกรรมฐานรากชนิดเสาเข็มดินซีเมนต์ชั้นลึกภายใต้แรงกระทำ  
แบบซ้ำไปซ้ำมา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมฐานรากชนิดเสาเข็มดินซีเมนต์ชั้นลึกภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา Behavior of Stiffened Deep Cement Mixing Column Under Cyclic Load
ชื่อ - นามสกุล	นายภิรมย์ พงษ์คำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์
ปีการศึกษา	2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศักดิ์ กร้ามาตร)

..... กรรมการ  
(ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ)

..... กรรมการ  
(ดร.หมิง จิ่ง)

..... กรรมการ  
(ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสอาด)

วันที่ 9 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมฐานรากชนิดเสาเข็มดินซีเมนต์ชั้นลึกภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา
ชื่อ – นามสกุล	นายภิรมย์ พงษ์คำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วีระศักดิ์ ละออจันทร์
ปีการศึกษา	2554

## บทคัดย่อ

การปรับปรุงคุณภาพดินได้มีการนำเอาเสาเข็มดินซีเมนต์มาใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่การก่อสร้างจะออกแบบเพื่อรับแรงทางแนวดิ่งเท่านั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาโดยการนำเอาวัสดุประเภทต่างๆที่มีความแข็งแรงสูง มาเสริมเป็นแกนกลางตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์

เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 8 ต้น แบ่งเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ (DCM Column) จำนวน 2 ต้น และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน (SDCM Column) จำนวน 6 ต้น ก่อสร้างอย่างละ 2 ต้น ตามประเภทของแกนโดยจะเสริมแกนด้วยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เหล็ก H-Beam และท่อเหล็กกลม ความยาวของวัสดุเสริมแกนที่ใช้จะสั้นกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ประมาณร้อยละ 15 เสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งหมดจะฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนตลอดช่วงความยาว และมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ การทดสอบจะใช้ตามมาตรฐาน ASTM D3966

จากการทดสอบพบว่า เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนที่เสริมแกนเหล็ก H-Beam สามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาได้ประมาณ 3-4 เท่า และการเคลื่อนตัวด้านข้างได้ประมาณ 6-7 เท่าของเสาเข็มดินซีเมนต์ การเปรียบเทียบแรงต้านทานแรงด้านข้าง เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนที่เสริมแกนเหล็ก H-Beam มีอัตราการเสียกำลังน้อยที่สุด ลักษณะการแอ่นตัวในแนวดิ่งของเสาเข็มดินซีเมนต์ และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนทุกต้น จะเป็นแบบเสาเข็มยาวหัวอิสระ ส่วนลักษณะการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนจะอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดประมาณ 0.40-0.50 เมตร แล้วแต่ประเภทแกนที่เสริมซึ่งมากกว่าทฤษฎีประมาณร้อยละ 10 งานวิจัยนี้จึงบอกได้ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนประเภทต่างๆ สามารถเพิ่มการรับแรงกำลังทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา เพิ่มการต้านทานการเคลื่อนตัวด้านข้าง มีการกระจายพลังงานได้ดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** เสาเข็มดินซีเมนต์ วัสดุเสริมแกนเสาเข็ม แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา การกระจายพลังงาน

<b>Thesis Title</b>	Behavior of Stiffened Deep Cement Mixing Column Under Cyclic Load
<b>Name – Surname</b>	Mr. Pirom Pongkum
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Werasake Raongjant
<b>Academic Year</b>	2010

## ABSTRACT

Soil-cement piles are widely used for improving soil quality. However, the construction is always designed for the vertical load only. This work is interested to improving the ability under lateral cyclic loading by bringing high-strength materials into the core through the depth of the soil-cement.

Eight soil cement piles were used in this study. Two piles were deep cement mixed columns (DCM Column). Other six piles were stiffened deep cement mixed columns (SDCM Column). Each two Piles were constructed with the core of pre-stress concrete pile, steel H-Beam steel pipes, which only about 15% shorter than the length of the pile. All piles were embedded into the soft clay layer throughout the length and were equipped to measure the flow in vertical and horizontal movement. The test method was in accordance with ASTM D3966.

The test results demonstrate that SCDM Column with H-Beam cores can resist the lateral cyclic loading at approximately three to four times greater than that of DCM columns and the lateral displacement has increased by six to seven times of DCM Columns. In comparison, the lateral loading of SDCM Column with H-Beam cores is lost at the lowest minimum rate, and the vertical deflection for all DCM and SDCM Columns construes as the long pile with independent head. It was also noted that the failure mode of DCM and SDCM Columns is lower than the trend level, at approximately 0.40-0.50 meters depending on the material cores determined, which should be greater than 10% from the theory outline. This research indicate that stiffening the soil-cement columns with steel of different types can improve their strengths to resist cyclic lateral load and movement. The energy distribution capacity can also be improved. This research will guide the development and application of SDCM Column in the future.

**Keywords:** Cement Column, Core pile, Cyclic Load, Energy dissipation capacity

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานวิจัยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดต่างๆ ในการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของการทำการวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ามาตร ประธานกรรมการหลักสูตร ดร.ภักวิวัฒน์ แสนเจริญ และดร.หิมิง จิ่ง ที่ได้กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำสิ่งที่มีประโยชน์แก่การเขียนวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ต้องพบอุปสรรคหลายประการ แต่ด้วยความช่วยเหลือเอื้อเฟื้ออย่างดีจากหลายๆ ฝ่าย ทำให้ผู้วิจัยฝ่าฟันอุปสรรคจนประสบความสำเร็จได้ จึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่กล่าวนามมา ดังนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยเทนน็อกซ์ จำกัด และบริษัท บันจันไทย จำกัด เป็นอย่างยิ่งที่ให้การสนับสนุนในด้านสถานที่ วัสดุ เครื่องจักร แรงงาน และข้อมูลต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส ที เอส อินสตรูमेंท์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน (Digital Inclinator) บุคลากร และข้อมูลต่าง ๆ

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจอันยิ่งใหญ่ด้วยดีตลอดมา และที่ลืมไม่ได้คือผู้เกี่ยวข้องหลายๆ ท่านที่หากมิได้กล่าวนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ภิรมย์ พงษ์คำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 การปรับปรุงคุณภาพดินชั้นลึก (Soft Ground with Deep Mixing Method) .....	6
2.2 กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน โดยผสมซีเมนต์ .....	6
2.3 การออกแบบและการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	8
2.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Cement Column .....	11
2.5 Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM) Method .....	12
2.6 การออกแบบ Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM Column).....	12
2.7 การก่อสร้าง Stiffness Deep Cement Mixed Column (SDCM Column) .....	13
2.8 การวิเคราะห์หาค่าการรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มคอนกรีตในดินเหนียว (Laterally Load Concrete Pile in Cohesive Soil) .....	14
2.9 แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา .....	26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	28

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	35
3.1 ออกแบบวิธีการทดสอบ ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์ .....	35
3.2 จัดหาและสำรวจพื้นที่ .....	36
3.3 เจาะสำรวจ เก็บตัวอย่างดิน และหาคูณสมบัติพื้นฐานของดิน .....	36
3.4 ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ .....	39
3.5 การออกแบบส่วนผสมของ SDCM Column .....	39
3.6 การก่อสร้าง SDCM Column ด้วยระบบเป็ยกความดันต่ำ .....	40
3.7 การเตรียมพื้นที่และเครื่องมือ .....	44
3.8 การทดสอบ SDCM Column การรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load)...	55
3.9 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ .....	59
4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	60
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ .....	60
4.2 ผลการเจาะแก่นเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	61
4.3 ผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาในสนาม .....	64
4.4 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Broms .....	73
4.5 ค่า Rigidity attenuation .....	76
4.6 การกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity) .....	77
4.7 ลักษณะการวิบัติของ DCM และ SDCM .....	78
5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	83
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	84
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก .....	88
ก การคำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยทางด้านข้างตามทฤษฎีของ Broms.....	89
ข ผลการเจาะสำรวจทางปฐพีกลศาสตร์ .....	104
ค รายการคำนวณการออกแบบปริมาณส่วนผสมดินซีเมนต์ .....	113



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ง ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของเสาเข็มดินซีเมนต์.....	116
จ ผลการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	119
ฉ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์.....	122
ช ค่า Rigidity attenuation .....	170
ซ ค่าการกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity) .....	173
ฌ ภาพบรรยายประกอบขั้นตอนการทำวิจัย .....	176
ญ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	190
ประวัติผู้เขียน .....	201



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Lin et al., 1982) .....	26
2.2 ค่า $\alpha$ .....	27
2.3 ค่า $RH = H_{min}/H_{max}$ .....	28
2.4 ค่า Interface shear strength ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 10%, 15% และ 20% .....	29
2.5 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
2.6 รายละเอียดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
2.7 ผลการทดสอบในสนามของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	33
3.1 ก่อสร้าง DCM,SDCM Column ในแปลงทดสอบ .....	40
4.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C1) .....	62
4.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C4) .....	63
4.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C5) .....	63
4.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C8) .....	63
4.5 การทดสอบ ค่าแรงสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัว DCM,SDCM Column ในสนาม....	64
4.6 อิทธิพลของขนาดแกนเสาเข็มต่อกำลังรับแรงดัดข้าง .....	65
4.7 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 1..	73
4.8 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 2..	74
4.9 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 3..	74

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ออกแบบตามความหนาของชั้นดินอ่อน.....	8
2.2 กระบวนการเจาะ Cement Column วิธี Low Pressure Mechanical Mixing .....	11
2.3 Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM) ดัดแปลงจาก Wu,et al .....	12
2.4 ขั้นตอนการก่อสร้าง SDCM Column .....	14
2.5 Concrete – Cored DCM Pile .....	14
2.6 ลักษณะการแอนตัวของเสาเข็มและการกระจายความดันของดินทางด้านข้าง.....	16
2.7 ลักษณะการแอนตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายโมเมนต์คดของเสาเข็มสั้นหัวอิสระ.....	17
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานประลัยกับความยาวจวมลิกของเสาเข็มสั้น.....	17
2.9 ลักษณะการแอนตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายโมเมนต์คดของเสาเข็มยาวหัวอิสระ.....	18
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานด้านข้างประลัยกับโมเมนต์ครากของหน้าตัดเสาเข็ม.....	18
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวจวมลิกและระยะแอนตัวด้านข้างที่ผิวดินของเสาเข็ม.....	19
2.12 พฤติกรรมของเสาเข็มตามสมมุติฐานของ (Winkler, 1867) Winkler’s model (1867) .....	21
2.13 ค่าสัมประสิทธิ์ $A_y, B_y, A_m$ และ $B_m$ กับความลึก $Z$ .....	24
2.14 ค่าสัมประสิทธิ์ $A_x, B_x, A'_m$ และ $B'_m$ กับความลึก $Z$ .....	25
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength กับการเคลื่อนตัว .....	29
2.16 การทดสอบ Direct Shear Test ระหว่าง Soil Cement กับ Mortar .....	30
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ปริมาณปูนซีเมนต์กับ 10 % .....	30
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ปริมาณปูนซีเมนต์กับ 15 % .....	30
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ปริมาณปูนซีเมนต์กับ 20 % .....	31

## สารบัญภาพ (ต่อ)

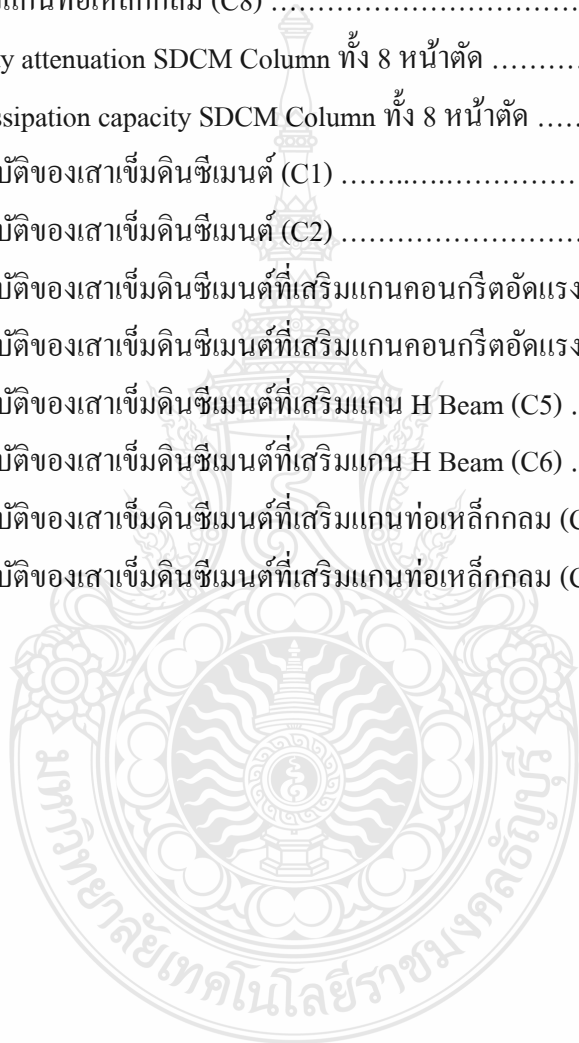
ภาพที่	หน้า	
2.20	แบบแปลนการทดสอบ Reinforced DCM retaining wall .....	31
2.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load-displacements .....	32
3.1	แผนที่และสถานที่ตั้งหน้างานเพื่อทดสอบงานวิจัย .....	36
3.2	การเจาะสำรวจดินและเก็บตัวอย่างดิน .....	38
3.3	แปลงการก่อสร้าง DCM,SDCM Column .....	40
3.4	การก่อสร้าง DCM,SDCM Column ในแปลงทดสอบ .....	41
3.5	เหล็กกลม ขนาด $\phi$ 4 นิ้ว หนา 4.0 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร .....	41
3.6	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I ขนาด $0.18 \times 0.18$ ยาว 6 เมตร .....	42
3.7	เหล็ก H-Beam ขนาด $0.175 \times 0.175 \times 7.5 \times 11$ ยาว 6 เมตร .....	42
3.8	ตำแหน่งการเจาะเก็บตัวอย่าง .....	43
3.9	LVDT พร้อมอุปกรณ์เสริมเพื่อการติดตั้ง .....	44
3.10	เซ็นเซอร์ ที่ใช้ทำการทดสอบ .....	45
3.11	ดิจิตอลอินดิเคเตอร์ .....	45
3.12	อิเล็กทรอนิกส์ .....	46
3.13	Inclinometer Casing ที่ใช้ทำการทดสอบ .....	47
3.14	หลักการของเครื่องมือ Inclinometer .....	48
3.15	ลักษณะการวาง Reference Beam .....	48
3.16	Hydraulic Jack ที่ใช้ทำการทดสอบ .....	49
3.17	Tools and Pump ที่ใช้ทำการทดสอบ .....	49
3.18	Load Cell ที่ใช้ทำการทดสอบ .....	50
3.19	Data Logger ที่ใช้ทำการทดสอบ .....	50
3.20	การขุดเปิดหัวเสาเข็มและเตรียมพื้นที่ .....	51
3.21	การฝังท่อ Inclinometer Casing .....	52
3.22	การหล่อคอนกรีตครอบหัวเสาเข็ม .....	52
3.23	ลักษณะของ Reaction Wall ที่ใช้ทำการทดสอบ .....	53
3.24	ลักษณะ Bearing Plate ที่จะกระจายแรงไปยัง Reaction Wall .....	53
3.25	ลักษณะ Struts ที่ใช้ต่อเชื่อมอุปกรณ์และถ่ายแรง .....	54

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3.26	ยึดหัวเสาเข็มเข้ากับอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบ .....	54
3.27	ระบบแรงปฏิกิริยา DEADMAN ตามมาตรฐาน ASTM D 3966 .....	55
3.28	ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ .....	56
3.29	ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตอัดแรง .....	57
3.30	ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนท่อเหล็กกลม .....	58
3.31	ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน H – Beam .....	59
4.1	การฝังตัวของเสาเข็มในชั้นดินที่ระดับต่างๆ .....	61
4.2	ค่าปรับแก้กำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบ .....	62
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำเฉลี่ยแต่ละรอบกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ DCM, SDCM ทั้ง 8 หน้าตัด .....	65
4.4	การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มดินซีเมนต์ C1...	66
4.5	การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มดินซีเมนต์ C4...	66
4.6	การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มดินซีเมนต์ C5...	67
4.7	การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มดินซีเมนต์ C8...	67
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C1) .....	69
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C2) .....	70
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (C3) .....	70
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(C4) .....	71
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนเหล็ก H-BEAM (C5) .....	71
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนเหล็ก H-BEAM (C6) .....	72

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C7) .....	72
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C8) .....	73
4.16 ค่า The rigidity attenuation SDCM Column ทั้ง 8 หน้าตัด .....	77
4.17 ค่า Energy dissipation capacity SDCM Column ทั้ง 8 หน้าตัด .....	78
4.18 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C1) .....	79
4.19 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C2) .....	79
4.20 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(C3) .....	80
4.21 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(C4) .....	80
4.22 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกน H Beam (C5) .....	81
4.23 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกน H Beam (C6) .....	81
4.24 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C7) .....	82
4.25 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C8) .....	82



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการก่อสร้างโครงการต่างๆบนชั้นดินเหนียวอ่อนมีมากขึ้นเช่น บ้านพักอาศัย สนามบิน คั่นดินถม เป็นต้น เพราะการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจโดยเฉพาะในเขตกรุงเทพและปริมณฑล โดยดินเหนียวอ่อนในบริเวณนี้จะเรียกว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ(Soft Bangkok Clay)[1] การก่อสร้างบนชั้นดินประเภทนี้ประสบปัญหาเรื่องการรับน้ำหนักของโครงสร้าง ความมีเสถียรภาพของโครงสร้าง และปัญหาเรื่องการทรุดตัว การใช้ซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มสำหรับดินเหนียวอ่อน ร่วมกับรูปแบบวิธีการผสมลึก (Deep Mixing Method) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ (Cement Column) เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันมากเพราะ จะทำให้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มการรับน้ำหนัก และลดปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี

Cement Column ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมักจะพบปัญหาอยู่บ่อยครั้งเนื่องจากการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างให้ได้ตามที่ออกแบบอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินเดิมในบริเวณนั้นและกรรมวิธีการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างยากส่งผลให้ค่า Compressive Strength ค่า Shear Strength และค่า Stiffness ต่ำทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการวิบัติได้ง่าย [2] การเพิ่มค่าความแข็งของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Stiffened Deep Cement Mixed Column,SDCM Column) ซึ่งเริ่มมีการศึกษาในประเทศจีน[3] โดยนำเสาเข็มดินซีเมนต์กับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Stiffer Concrete Core Pile) มาประกอบเข้าด้วยกัน เป็น Composite Structure of cement mixed เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้สม่ำเสมอตลอดความยาวของเสาเข็มทำให้เสาเข็มมีความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) การรับแรงเสียดทาน (Friction Resistance) และรับน้ำหนักแบกทาน (Bearing Capacity) ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยจึงได้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) ของ SDCM Column เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาออกแบบและพัฒนา ในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี SDCM Column ในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติพื้นฐานของดินบริเวณที่ทำการทดสอบกับความสามารถในการรับแรงกำลังแบบซ้ำไปซ้ำมา

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์กับการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา

1.2.3 ศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาด้านข้างประลักษ์ของ DCM และ SDCM Column ทดสอบที่เสริมแกนต่าง ๆ ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา

1.2.4 ศึกษาพฤติกรรมการกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity) และค่า Rigidity attenuation ของเสาเข็มดินซีเมนต์ทดสอบที่เสริมแกนต่าง ๆ อันเนื่องจากแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา

1.2.5 ศึกษารูปแบบการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์กับการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ในแปลงทดสอบ ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด 8 ต้น แบ่งเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ (DCM) จำนวน 2 ต้น และอีก 6 ต้น เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน (SDCM) โดยวัสดุเสริมแกนจะใช้วัสดุที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดในส่วนของขนาดวัสดุเสริมแกนจะเลือกใช้ในขนาดที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยจะแบ่งเป็น

- เสาเข็มดินซีเมนต์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ความยาว 7 เมตร จำนวน 2 ต้น (C1,C2)
- เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I ขนาด 0.18×0.18 ยาว 6 เมตร เป็นเสาแกน จำนวน 2 ต้น (C3,C4)
- เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้เหล็กกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 4.0 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร เป็นเสา จำนวน 2 ต้น (C5,C6)
- เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้เหล็ก H-Beam ขนาด 0.175×0.175×7.5×11 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร เป็นเสาแกน จำนวน 2 ต้น (C7,C8)

ทดสอบการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) ในแนวราบของ SDCM Column โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีทดสอบแบบ Standard Loading Procedures ตามมาตรฐาน ASTM D 3966 จะให้แรงจนเสาเข็มจะวิบัติ หรือรับกำลังได้ลดลงโดยประมาณ 15-20% จึงหยุดทำการทดสอบ



เมื่อได้ผลการทดสอบแบบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) จากในแปลงทดสอบแล้ว จะนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมการแอ่นตัวทางด้านข้าง รวมถึงประเมินค่าน้ำหนักประลัยจาก ทฤษฎีของ Brom's Method ซึ่งเป็นทฤษฎีที่เป็นที่รู้จักกันทั่วไป และสามารถใช้งานได้ง่าย

#### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

##### 1.4.1 การสำรวจพื้นที่

แปลงทดสอบที่หน่วยซ่อมบำรุงและเก็บเครื่องจักรของ บริษัท บันจันไทย จำกัด และ บริษัท ไทย เทน็อกซ์ จำกัด แขวงลำต้อยติ่ง เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร เป็นสถานที่ทำงานวิจัย

##### 1.4.2 เจาะสำรวจชั้นดิน เก็บตัวอย่างดิน และหาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ใช้วิธีการเจาะสำรวจแบบฉีดล้าง (Wash Boring) โดยทำการเจาะสำรวจทั้งหมด 2 หลุม บริเวณในตำแหน่งที่ใกล้กับพื้นที่ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์และทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อหา คุณสมบัติของดินจากตัวอย่างดินที่ทำการเจาะสำรวจ

##### 1.4.3 การออกแบบส่วนผสมของ Cement Column

การออกแบบส่วนผสมของ Cement Column ได้พิจารณาจากผลการเจาะสำรวจทางปฐพี กลศาสตร์ ส่วนการก่อสร้าง SDCM Column ในแปลงทดสอบงานวิจัยนี้จะใช้วิธีระบบเปียก (Wet Process) การผสมแบบ Mechanical Mixing ความดันต่ำ (Low Pressure)

##### 1.4.4 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

- 1) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของเสาเข็มดิน ซีเมนต์
- 2) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load)
- 3) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการ เคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์
- 4) วิเคราะห์และสรุปผลกราฟ The rigidity attenuation SDCM Column, กราฟ Energy dissipation capacity SDCM Column
- 5) นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีต่างๆ ในบทที่ 2 เพื่อหาทฤษฎีที่มีความเหมาะสมใน การทำนายพฤติกรรมของ SDCM Column

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 การศึกษาทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแกนกลางแบบต่าง ๆ บนชั้นดินเหนียวอ่อน

1.5.2 การศึกษาทำให้ทราบพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแกนกลางแบบต่าง ๆ กับการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา

1.5.3 การศึกษาทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการกระจายพลังและค่า Rigidity attenuation ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแกนกลางแบบต่าง ๆ ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา

1.5.4 เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจได้นำเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนประเภทต่างๆ ไปออกแบบโครงสร้างที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง เช่น งานกำแพงกันดิน การรับแรงสั่นสะเทือน การรับแรงแผ่นดินไหว และงานเสถียรภาพเชิงลาดต่าง ๆ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดินเหนียวอ่อน (Soft Clayey Soil) ที่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ มักจะมีขนาดดินเม็ดละเอียด ปนอยู่ในปริมาณที่มาก มีปริมาณความชื้นสูง และมีปริมาณสารอินทรีย์สูงด้วย ดินเหนียวอ่อนโดยทั่วไปเป็นดินที่ตกตะกอนอยู่บริเวณปากแม่น้ำ โดยลักษณะการเกิดของ ดินเหนียวอ่อนบริเวณนี้ เมื่อดินจะถูกพัดพาจากแม่น้ำลงสู่ทะเล และน้ำทะเลก็หนุนกลับเข้ามาตกตะกอนทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนนั้นมีทั้งแบบตกตะกอนในแม่น้ำ และในทะเลซึ่งเป็นลักษณะการเกิดของ ดินเหนียวอ่อนบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง หรือ ที่เรียกว่า ดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) โดยมีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10-15 เมตร ชั้นถัดไปจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง และชั้นทรายสลับกันไป

เมื่อพิจารณาทางด้านวิศวกรรมดินเหนียวอ่อนเป็นดินที่มีกำลังต่ำ (Low Strength) ปกติจะมีค่ากำลังอัดน้อยกว่า 0.25 กก./ซม. มีการยุบอัดตัวได้สูง (High Compressibility) ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาสำคัญทางวิศวกรรมเมื่อมีการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน อันได้แก่ ปัญหาด้านการทรุดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการรับน้ำหนักของดินเหนียว ทำให้ดินเหนียวเกิดการยุบตัวคายน้ำ (Consolidation) ส่งผลให้มีปริมาณการทรุดตัวที่สูง และกินเวลายาวนานในการทรุดทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านเสถียรภาพความมั่นคง เช่นงานก่อสร้างถนน หรืองานขุดและถมดิน ซึ่งอาจเกิดการเลื่อนพังได้ เนื่องจากกำลังของดินมีค่าต่ำไม่เพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้น หลักเกณฑ์การเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินในเบื้องต้น จะเริ่มจากการพิจารณาสภาพทั่วไปของดิน และลักษณะทางโครงสร้างว่าจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินหรือไม่ ในบางโครงการไม่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงชั้นดินก็สามารถทำการก่อสร้างได้เลย แต่สำหรับโครงการที่พิจารณาแล้วพบว่าคุณสมบัติของดินและสภาพบริเวณก่อสร้างไม่ดีพอที่จะทำการก่อสร้างได้โดยตรง และมีความเป็นไปได้ของโครงการสูง ก็จำเป็นต้องพิจารณาต่อไปว่าจะเลือกใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินหรือใช้วิธีการก่อสร้างอื่นๆ เช่น เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยเสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นต้น [4] โดยการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์จะแบ่งแยกเป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังนี้

## 2.1 การปรับปรุงคุณภาพดินชั้นลึก (Soft Ground with Deep Mixing Method)

ในประเทศไทยโดยเฉพาะในกรุงเทพฯซึ่งประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนา มากซึ่งคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนจะมีความแข็งแรงต่ำมีค่าการยุบตัวสูงและความสามารถในการซึม ผ่านน้ำต่ำ การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีก็มีหลักการพื้นฐานคือ พยายาม เพิ่มความหนาแน่นของดินโดยการอัดแน่น (Compaction) การใช้น้ำหนักกดทับล่วงหน้า (Preloading) การระบายน้ำออกจากดิน (Dewatering) เพื่อเพิ่มกำลังของดิน โดยใช้วัสดุชนิด Sand Drained และ Prefabricate Vertical Drained (PVD) การเสริมแรงในดิน (Soil Reinforcement) โดยใช้ Geogrid หรือ Geotextile การเติมหรือฉีดสารเคมี (Admixture) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินให้คงตัวมากขึ้น โดยใช้ซีเมนต์ในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับดิน[5]

การปรับปรุงคุณภาพดินชั้นลึกด้วย Cement Coloum เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่จะทำให้ดินฐานราก แข็งตัวและมีกำลังสูงขึ้น โดยไม่ต้องรอเวลาทำการ Preload หรือใช้ PVD เร่งให้ดินทรุดตัว การพัฒนา นี้เริ่มขึ้น Ports and Harbor Research Institute ในปี 1960 ประเทศญี่ปุ่นเป็นการใช้ปูนขาวชนิดเม็ด และผงเป็นสารผสม (Stabilizing Agent) เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน In-site Deep Mixing สำหรับรองรับ โครงสร้างของท่าเรือใน ขณะเดียวกันประเทศสวีเดนโดย Broms และ Boman ได้พัฒนาการใช้ Lime Cement เพื่อปรับปรุงคุณภาพ Soft Clay [6]

ในปัจจุบัน Deep Mixing Method (DMM) ได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานต่างๆโดย มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการทรุดตัวและเพิ่ม Strength ของ Embankment และโครงสร้างอื่นๆป้องกันการ เกิด Slope Failure เพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคันดินและทำหน้าที่เสมือนฐานราก เพิ่ม Horizontal Resistance ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการก่อสร้างบริเวณข้างเคียงที่เชื่อมต่อกัน ตลอดจนป้องกันการทรุดตัวและเลื่อนตัวของโครงสร้างใต้พื้นดินเช่น อุโมงค์ เป็นต้น [6]

## 2.2 กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยผสมซีเมนต์

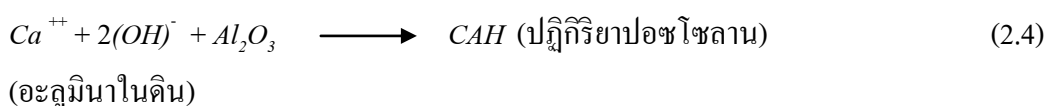
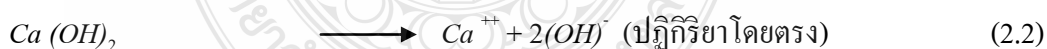
การปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Stabilization) ที่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยการเพิ่มสารผสม (Stabilizing Agent) โดยการหาปริมาณและชนิดของสารผสมเพิ่มให้เหมาะสม กับประเภทของดิน เช่น ซีเมนต์ โดยจะทำการ ผสมซีเมนต์กับดิน

Soil Cement เป็นดินผสมที่ออกแบบให้มีกำลังอัดหรือความแข็งแรงตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA) หรือ AASHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ผสมกับดินจะต้อง สูงพอที่จะทำให้กำลังรับแรงอัด หรือกำลังแบกทาน ได้ตามที่กำหนด ปริมาณซีเมนต์จะสูงร้อยละ 5-7% สำหรับดินที่มีขนาดละเอียด และปริมาณซีเมนต์จะสูงขึ้นอีกถ้าดินมีขนาดละเอียด กรณีดินที่มี

Plasticity Index (PI) สูง การทำ Soil Cement อาจจะต้องผสมปูนขาวลงไปก่อนเพื่อลดค่า (PI) ของดินลง สาเหตุที่ใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเพราะว่าซีเมนต์หาได้ง่ายมีการผลิตจำนวนมากทำให้ราคาถูก สามารถนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินได้ทุกประเภทหากมีการใช้ปูนซีเมนต์ น้ำ การบดอัด และระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม [7]

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ทำให้ดินมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีการแลกเปลี่ยนหรือรวมตัวกันของประจุไฟฟ้ารอบอนุภาคของเม็ดดินทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดินจึงจับตัวกันเป็นก้อนและสามารถรับแรงอัดได้การยึดเกาะกันนี้เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์ และซีเมนต์กับซีเมนต์เอง มีทั้งเม็ดละเอียดและเม็ดหยาบ [6]

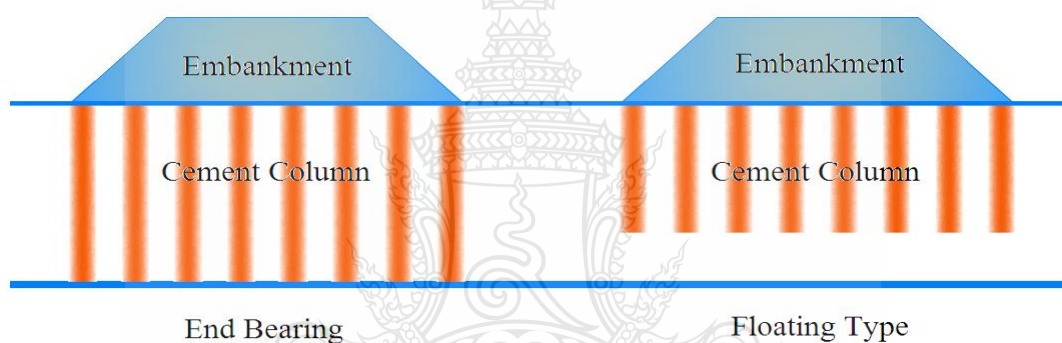
การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดละเอียด Clayey และ Silty Soil ต้องใช้ซีเมนต์สูงกว่าดินชนิดเม็ดหยาบ เนื่องจากดินชนิดเม็ดละเอียดมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่าเม็ดหยาบ ลักษณะการยึดเกาะแบบ Mechanical Interlock และ Chemical Cementation โดยซีเมนต์จะช่วยในการเกาะตัวของเม็ดดินให้แข็งแรงขึ้น ดังสมการที่ 2.1  $CSH$  และ  $CAH$  ช่วยลดค่าความเหนียว (Plasticity) เพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ของดิน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนโดย  $Ca^{++}$  จาก Cement เข้าไปแทนที่  $Na^+$  และ  $H_2O$  รอบๆ อนุภาคของ Clay ทำให้มีขนาดเล็กลงเสมือนไล่น้ำออกจากอนุภาค Clay จากนั้นจะจับตัวอยู่ในรูป Flocculate ซึ่งเรียกขบวนการนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) นอกจากนั้น  $Si^{4+}$  และ  $Al^{3+}$  ทำปฏิกิริยา  $Ca^{++}$  ในขบวนการปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ตามรายงานดังนี้ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4 [6]



## 2.3 การออกแบบและการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

### 2.3.1 หลักการออกแบบ Cement Column

การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนด้วย Cement Column มักจะก่อสร้างให้มีความยาวตลอดชั้นดินอ่อน เสาเข็มดินซีเมนต์ทำหน้าที่คล้ายกับเสาเข็มกลุ่มรองรับน้ำหนักของโครงสร้างสำหรับถนน Cement Column จะช่วยลดการทรุดตัวของคันทางโดยการแทนที่ดินอ่อนใต้ฐานรากด้วยวัสดุที่แข็งกว่าซึ่งสามารถต้านทานการยุบตัวได้มากซึ่งมี 2 ลักษณะ คือเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเสาตาย (End Bearing Type) เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินอ่อนโดยให้ปลายของเสาเข็มดินซีเมนต์วางอยู่ที่ชั้นดินแข็ง และ เสาเข็มดินซีเมนต์แบบเสาสั้น (Floating Type) เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ใช้ปรับปรุงดินอ่อน โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่ยาวตลอดความหนาของชั้นดินอ่อน และปลายเสาเข็มดินซีเมนต์ยังวางอยู่บนชั้นดินอ่อนดังนี้ดังภาพที่ 2.1 Broms and Boman [8] เสนอวิธีการคำนวณและการออกแบบไว้



ภาพที่ 2.1 รูปแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ออกแบบตามความหนาของชั้นดินอ่อน

การวิเคราะห์ด้านกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Bearing Capacity) กรณีเกิดการวิบัติของดินรอบๆ Column (Soil Failure) เนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวของ Column (Skin Friction Resistance) ตลอดความยาว ซึ่งมีค่าเท่ากับ Undrained Shear Strength ( $S_u$ ) ของดินรอบๆ Column และที่ End Bearing มีค่าประมาณ 6 ถึง 9 เท่าของ Undrained Shear Strength ของดินที่รองรับปลาย Column ก็คือ Bearing Capacity Factor ( $N_c$ ) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดินรอบๆ Column สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 [6]

$$Q_{ult, soil} = \left( \pi D H_{col} + 6t \cdot 9 \frac{\pi D^2}{4} \right) S_u \quad (2.5)$$

เมื่อ	$Q_{ult, soil}$	=	กำลังน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์
	$D$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์
	$H_{col}$	=	ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์
	$S_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินรอบๆ

กรณีเกิดการวิบัติที่ Soil Cement Column เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุในแท่ง Column และแรงต้านทานเนื่องจากแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อ Column ไม่สามารถต้านทานน้ำหนักที่แบกรับได้กำลังน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยคำนวณได้จากสมการ Mohr-Coulomb ดังสมการที่ 2.6, 2.7, 2.8 ดังนี้

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2C \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.6)$$

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

$$\text{ดังนั้น} \quad \sigma_1 = 3.5C_{col} + 3\sigma_h \quad (2.7)$$

$$Q_{ult, col} = A_{col} (3.5C_{col} + 3\sigma_h) \quad (2.8)$$

เมื่อ	$Q_{ult, soil}$	=	กำลังน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของดินรอบเสาเข็มดินซีเมนต์
	$\sigma_3$	=	Minor Principal Stress
	$\sigma_1$	=	Major Principal Stress
	$C_{col}$	=	Cohesion of Cement Column
	$\sigma_h$	=	Total Lateral Stress
		=	$\sigma_v + 5S_u$
	$\sigma_v$	=	Total Vertical Stress
	$A_{col}$	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์

เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Bearing Capacity,  $Q_{ult, col}$ ) จะลดลงเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุในเสาเข็มเกิดการล้า (Creep) ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มมีค่า 0.65 – 0.80 ของ  $Q_{ult, soil}$  ดังสมการที่ 2.9 [6]

$$Q_{ult, creep, col} = (0.65 \text{ to } 0.80) Q_{ult, soil} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $Q_{ult, creep, col} =$  กำลังน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเมื่อเกิดการล้า (Creep)

### 2.3.2 หลักการก่อสร้าง Cement Column

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายรูปแบบซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันออกไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือแบบ Mechanical Mixing Method ซึ่งสามารถแบ่งตามสถานะของสารผสมเพิ่มได้สองแบบ คือ Dry Jet Mixing Method (DJM) และ Wet Jet Mixing (WJM) ส่วนวิธีที่สอง คือ Jet Grouting Method [9] ในส่วนของงานวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยเลือกใช้แบบ Mechanical Mixing Method ระบบเปียก (Wet Process) จึงจะอธิบายวิธีที่ทำวิจัยวิธีเดียว

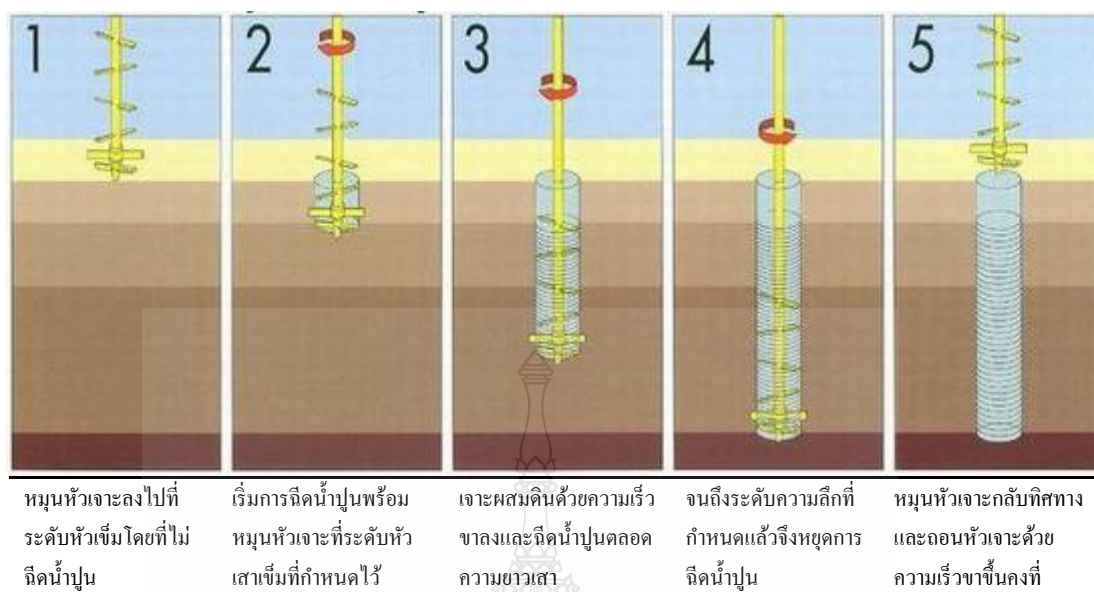
#### *แบบ Mechanical Mixing Method*

วิธีการนี้เป็นการใช้ใบพัดที่อยู่ตามแนวแกนก้านชุดช่วยในการผสมระหว่างดินกับสารผสมเพิ่มที่ประกอบไปด้วยสองสถานะของสารผสมเพิ่มคือ แบบซีเมนต์ผง (Cement Powder) โดยทั่วไปจะเรียกวิธีการนี้ว่า Dry Jet Mixing Method (DJM Method) และ แบบน้ำปูน Cement Slurry หรือ Cement Milk เรียกว่า Wet Jet Mixing Method (WJM Method)

#### *วิธี Wet Jet Mixing*

รูปแบบของวิธี Wet Jet Mixing เป็นการใช้น้ำปูน (Cement Slurry) ในการปรับปรุงหลักการผสมวัสดุปรับปรุงดิน โดยวิธีนี้สามารถทำได้ 2 แบบคือ แบบ Mechanical Mixing Method หรือ Rotary Mixed Low Pressure Grout นี้ และ แบบ High Pressure Grout Mixing โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวในส่วนของ Mechanical Mixing Method ซึ่งขบวนการก่อสร้างจะมีลักษณะคล้ายกับวิธี DJM โดยอาจมีรูปแบบปลีกย่อยที่แตกต่างอยู่บ้าง วิธีการนี้จะทำการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันขนาด 10-15 บาร์ แล้วทำการตีควนด้วยใบพัดผสมไปพร้อมๆ กันทำให้ดินและน้ำปูนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ได้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีกำลังสูงและมีความยืดหยุ่นน้อยลง โดยในขณะที่ชก้านผสมขึ้นใบพัดผสมจะทำการตีควนอีกครั้ง โดยเป็นการหมุนกลับทางกันจากการกดลงในตอนแรกเครื่องจักรที่ใช้จะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องเจาะเข็ม เพื่อเจาะดินลงไปฉีดน้ำปูนและตีควนที่ความลึกต่างๆ ด้วยใบมีดผสมที่เหมาะสมสำหรับการตีควนดินอ่อนรวมถึงตำแหน่งและรูฉีดน้ำปูนที่เหมาะสมเช่นกัน วิธีแตกต่างจากกรณีเสาเข็มเจาะตรงที่ไม่มีการขุดดินขึ้นมาจากหลุมเจาะทำให้ไม่เกิดปัญหาการพังทลาย หรือ ตัวดินซีเมนต์คอดกั้ว ขนาดของเข็มตามปกติมักจะกว้างกว่าขนาดของใบมีดตีควนเล็กน้อย ลำดับวิธีการก่อสร้างสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 [9]





ภาพที่ 2.2 กระบวนการเจาะ Cement Column วิธี Low Pressure Mechanical Mixing [10]

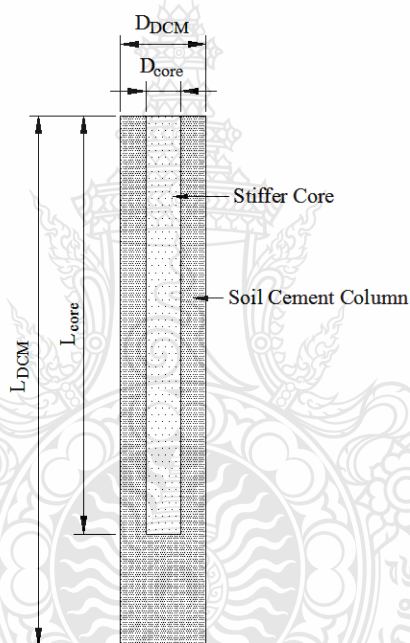
#### 2.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของ Cement Column

การควบคุมคุณภาพของ Cement Column ให้มีคุณภาพมาตรฐานใกล้เคียงกัน ควรพิจารณาองค์ประกอบดังนี้

1. ชนิดของดินที่ทำการปรับปรุงแร่ธาตุองค์ประกอบในดินความชื้นและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในการเลือกสารผสม
2. ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้จะต้องสัมพันธ์กับระบบการปรับปรุงดินจะกำหนดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และการทำ Cement Column ทดสอบในสนาม
3. ชนิดของใบกวนผสมในระบบ Mechanical mixing ต้องเหมาะสมที่จะผสมดินให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน Cement Slurry หรือ Cement Powder
4. การหมุนและอัตราการดึงขึ้นของหัวเจาะที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องจักร ชนิดของดินและกรรมวิธีการก่อสร้าง เช่น การทำ Pre Cut ก่อนทำการผสมซีเมนต์
5. แรงดันของ Cement Slurry หรือ Cement Powder หรือน้ำ/อากาศ ในการทำ Pre Cut โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ Slurry Jet Mixing Column ซึ่งจะมีผลต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง Column และการผสมให้เนื้อดินมีความสม่ำเสมอ [6]

## 2.5 Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM) Method

SDCM Column เป็นเสาประกอบซึ่งมี Precast Concreat Stiffer core ฝังอยู่ตรงกลาง Cement Column ดังภาพที่ 2.3 เพื่อเพิ่มน้ำหนักแบกทานและเพิ่มความแข็งแรงให้กับ Cement Column โครงสร้างของ SDCM Column ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Cement Soil และ Stiff Core pile เมื่อมี น้ำหนักมากกระทำต่อโครงสร้าง Stiff Core Pile จะเป็นตัวรับและถ่ายน้ำหนักไปที่ Cement Soil Column ผิวสัมผัสภายในระหว่างเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงกับ Cement Column ถ่ายแรงไปยังดินรอบๆ ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของ SDCM Column เพิ่มมากขึ้น ในประเทศจีนใช้วิธีนี้ในการปรับปรุง คุณภาพดินอ่อนและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ [3]



ภาพที่ 2.3 Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM) ดัดแปลงจาก Wu, et al [3]

## 2.6 การออกแบบ Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM Column)

SDCM column สามารถก่อสร้างโดยวิธีทั่วไปที่ปฏิบัติกันมาและส่วนเสาเข็มแกน (Stiffer core) ควรจะมีพื้นที่ทั้งหมดของเสาเข็มแกน (Stiffer Core) ประมาณ  $1/4 - 1/3$  ของ SDCM และ อัตราส่วนความยาวระหว่างเสาเข็มแกน (Stiffer Core) กับเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) ไม่ควรจะน้อยกว่า 0.8 และมีพื้นที่หน้าตัดลดลงตามความลึกของเสาเข็ม แกน (Stiffer core) ควรจะ น้อยกว่า 1.0 % ในกรณีเกิดรอยแตกร้าวของดินซีเมนต์

จากการทดสอบ Full-Scale Load Test การรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มจะเหมือนกับเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ (Bored and Cast-in-Place Concrete Pile) การประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 คือกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มบวกด้วยแรงเสียดทานที่ผิวระหว่างดินกับเสาเข็ม ดังนั้นการหาลำดับรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) ของ SDCM Column อ้างอิงจากการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะและเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มจะมีค่าประมาณ 0.4 ถึง 0.6 เท่าของเสาเข็มคอนกรีต ลำดับรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) ของ SDCM column สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$Q_u = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha q_p A_p \quad (2.10)$$

เมื่อ	$Q_u$	=	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ SDCM column (kN)
	$u_p$	=	เส้นรอบวงหน้าตัดของ SDCM column (m)
	$q_{si}$	=	แรงเสียดทานของเสาเข็มคอนกรีตที่ความลึก $i^{th}$ (kPa)
	$l_i$	=	ความลึกของชั้นดิน (m)
	$\alpha$	=	สัมประสิทธิ์ลดกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม 0.4 ถึง 0.6
	$q_p$	=	กำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ปลายเสาเข็มคอนกรีต
	$A_p$	=	พื้นที่หน้าตัด

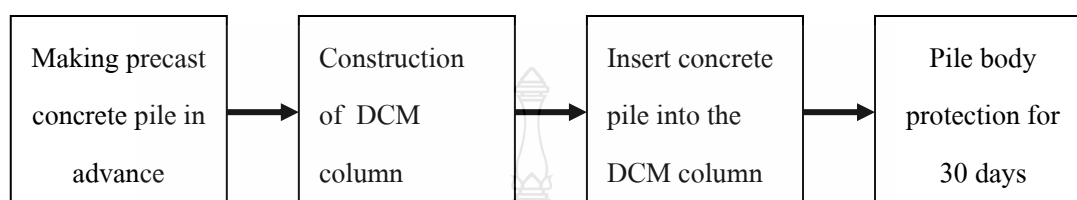
## 2.7 การก่อสร้าง Stiffness Deep Cement Mixed Column (SDCM Column) [11]

ในการก่อสร้าง Stiffness Deep Cement Mixed Column (SDCM Column) จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วน คือ Precast Concrete Pile ซึ่งจะอยู่ด้านใน และ Cement Column จะอยู่ด้านนอก ดังแสดงในภาพที่ 2.4

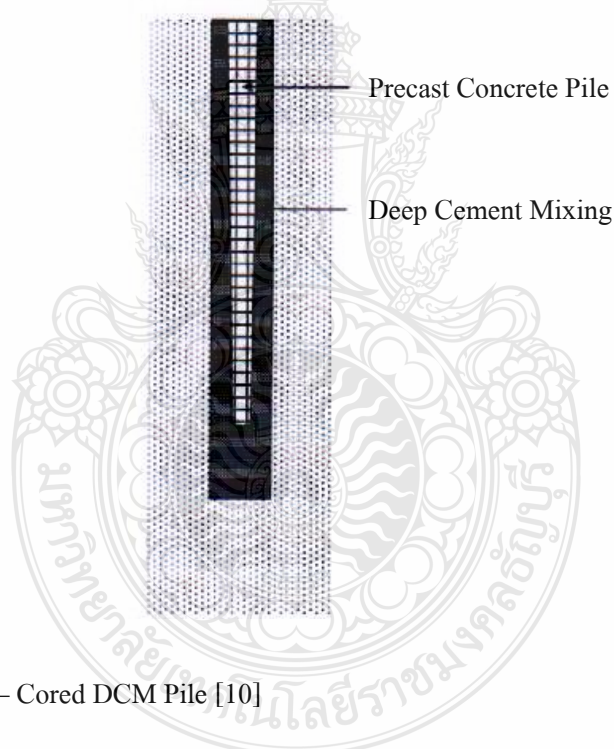
2.7.1 Precast Concrete Pile จะมี Strength และ Compression Modulus ที่สูง นอกจากนี้ราคายังถูกกว่าท่อเหล็กหรือเหล็กแท่ง และง่ายต่อการกำหนดรูปร่าง และความยาวของเสาเข็มซึ่งความยาวของ Precast Concrete Pile ที่ใช้จะน้อยกว่า DCM Pile อยู่ประมาณ 5–10 % ของความยาว DCM Pile

2.7.2 Deep Cement Mixing Pile (DCM Pile) จะใช้เป็นตัวถ่ายผ่านแรงจากโครงสร้างไปยังดินรอบ ๆ ผ่านทางผิวสัมผัส และ Skin Friction ในการทดสอบ Unconfined Compressive Strength พบว่า Strength ของ DCM Pile จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม

การก่อสร้าง Concrete – Core DCM Pile นั้น จะใช้ Precast Concrete Pile ที่หล่อจากโรงงาน ส่วน DCM Pile จะก่อสร้างในที่ด้วยวิธี Mechanical Mixing Type แบบเปียก (Wet Mixing) เมื่อทำการก่อสร้างเสร็จแล้วจะทำการใส่เข็ม Precast Concrete Pile เข้าไปที่กึ่งกลาง โดยทันทีก่อนที่ DCM Pile จะแข็งตัวและจัดให้ระดับหัวเข็มและตำแหน่งให้ได้ตามที่ออกแบบไว้



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการก่อสร้าง SDCM Column [11]



ภาพที่ 2.5 Concrete – Cored DCM Pile [10]

## 2.8 การวิเคราะห์หาค่าการรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มคอนกรีตในดินเหนียว (Laterally Load Concrete Pile in Cohesive Soil)

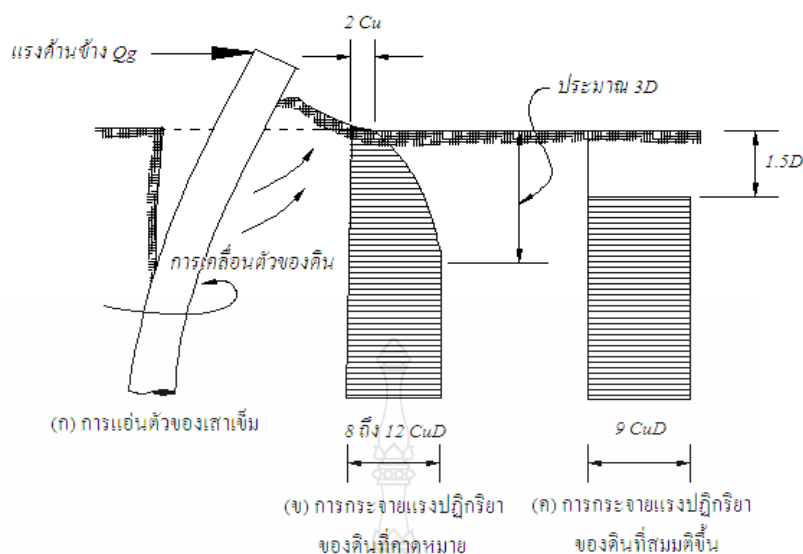
การออกแบบเสาเข็มให้รับแรงทางด้านข้างจำเป็นจะต้องคำนึงถึงปัญหา 2 ประการ คือการแอ่นตัวของเสาเข็มภายใต้แรงในช่วงใช้งานจะต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายกับการใช้

งานของฐานรากหรือโครงสร้างอื่นๆ และกำลังประลัยของวัสดุเสาเข็มจะต้องมากเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการพังทลายของตัวเสาเข็มเองได้

ความต้านทานประลัย และการแอนตัวด้านข้างภายใต้แรงในช่วงใช้งานของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่มขึ้นอยู่กับขนาด กำลังต้านทาน และการแอนตัวของเสาเข็ม รวมทั้งลักษณะการยุบตัวของดินรอบๆ เสาเข็ม การพิจารณาความต้านทานด้านข้างประลัยขึ้นอยู่กับระยะจมลึกของเสาเข็ม หากเสาเข็มจมลงในดินไม่ลึกความต้านทานด้านข้างประลัยจะถูกควบคุมด้วยความต้านทานของดินรอบๆ เสาเข็ม แต่ถ้าเสาเข็มจมลงในดินลึก ความต้านทานด้านข้างประลัยจะถูกควบคุมด้วยกำลังประลัยหรือกำลังครากของหน้าตัดเสาเข็ม ส่วนการพังทลายของเสาเข็มรับแรงด้านข้างอาจจะเกิดขึ้นได้ ถ้าแรงด้านข้างที่มากระทำต่อเสาเข็มมีค่ามากกว่าที่ออกแบบไว้การประเมินกำลังของดินและวัสดุเสาเข็มมีค่ามากกว่าความเป็นจริงและวิธีที่ใช้ในการออกแบบให้ค่าความต้านทานประลัยมากเกินไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างกับการแอนตัวของเสาเข็มที่ตอกลงในดินเหนียวนั้นการแอนตัวจะเพิ่มขึ้นโดยประมาณเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับการเพิ่มแรงด้านข้างจนกระทั่งแรงที่กระทำเกิน 30-50% ของความต้านทานประลัยของเสาเข็มหลังจากนั้นการแอนตัวของเสาเข็มจะมากกว่าอัตราการเพิ่มแรงในการวิเคราะห์การแอนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจะใช้ทฤษฎีของ Subgrade Reaction ซึ่งมีสมการสำหรับการคาดคะเนการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง, โมเมนต์สูงสุด, และความต้านทานด้านข้างประลัยทั้งเสาเข็มสั้นและเสาเข็มยาวนำเสนอโดย Brom [8]

#### 2.8.1 พิจารณาความต้านทานด้านข้างประลัยและ โมเมนต์สูงสุด

ลักษณะการเคลื่อนตัวของดินขณะพังทลายที่ความลึก 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มจะเคลื่อนตัวปูดขึ้นที่ผิวดินหน้าเสาเข็มและช่วงที่ต่ำกว่าจะเคลื่อนตัวไปทางด้านหลัง เสาเข็มดังภาพที่ 2.3 (ก) แรงปฏิกริยาของดินที่ผิวดินขณะที่ดินพังทลายมีค่าประมาณ 2 เท่าของ Undrained Shear Strength ( $C_u$ ) ซึ่งได้จากการทดสอบ Triaxial, Direct Shear, Unconfined Compression หรือ Vane Shear Test แรงปฏิกริยานี้ จะเพิ่มขึ้นตามความลึกจนถึงค่าสูงสุดประมาณ 8 ถึง 12 เท่าของ  $C_u$  ดังภาพที่ 2.3 (ข) ซึ่งจะสมมุติให้แรงปฏิกริยาของดินมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ผิวดินและมีค่าเท่ากับ  $9C_u D$  ที่ระดับจากผิวดินลงไป 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังภาพที่ 2.3 (ค)



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการเอนตัวของเสาเข็มและการกระจายความดันของดินทางด้านข้าง [8]

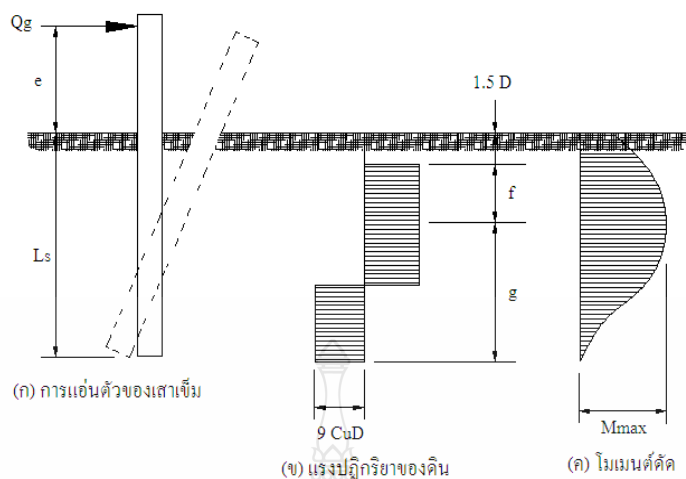
เสาเข็มสั้นหัวอิสระ การเอนตัวด้านข้างการกระจายแรงด้านข้างของดินและการกระจายโมเมนต์ตัดตามความลึกของเสาเข็ม ดังภาพที่ 2.7 การพังทลายจะเกิดขึ้น เมื่อดินไม่สามารถต้านทานแรงด้านข้างได้โมเมนต์สูงสุดจะเกิดขึ้นตรงที่แรงเฉือนเท่ากับศูนย์ คือ ที่ความลึก  $f+1.5D$  จากผิวดินแรงต้านทานด้านข้างประลัย ( $P_{ult}$ ) คำนวณได้จากสมการ 2.11, 2.12, 2.13

$$f = \frac{P_{ult}}{9C_u D} \quad (2.11)$$

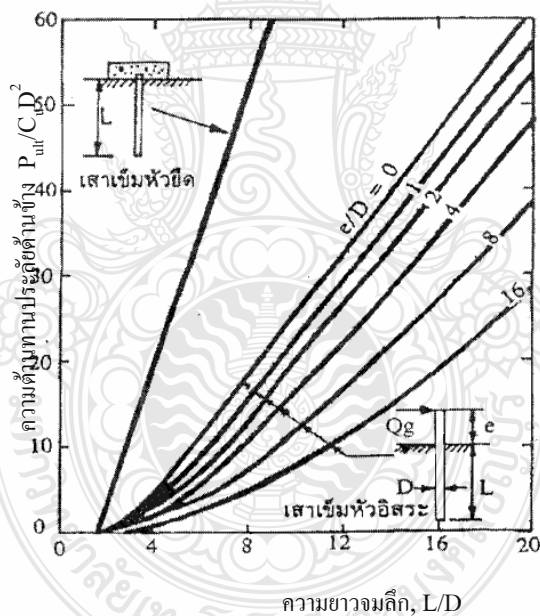
$$M_{max}^+ = P_{ult}(e + 1.5D + 0.5f) \quad (2.12)$$

$$M_{max}^+ = 2.25C_u g^2 \quad (2.13)$$

- เมื่อ  $M_{max}^+$  = โมเมนต์ตัดบวกสูงสุด
- $P_{ult}$  = แรงต้านทานด้านข้างประลัย
- $C_u$  = Untrained shear strength
- $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็มด้านตรงข้ามกับแรงที่กระทำ
- $f$  = ระยะที่เกิดโมเมนต์ตัดสูงสุด
- $e$  = ระยะที่แรงกระทำจากหัวเสาเข็มถึงระดับผิวดิน
- $g$  = ระยะที่เกิดโมเมนต์ตัดสูงสุดถึงระดับปลายเสาเข็ม



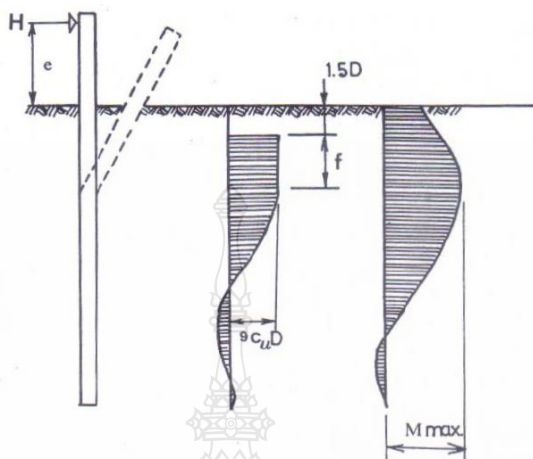
ภาพที่ 2.7 ลักษณะการแอ่นตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายโมเมนต์ค้ดของเสาเข็มสั้นหัวอิสระ[8]



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานประลัยกับความยาวจลิกของเสาเข็มสั้น[8]

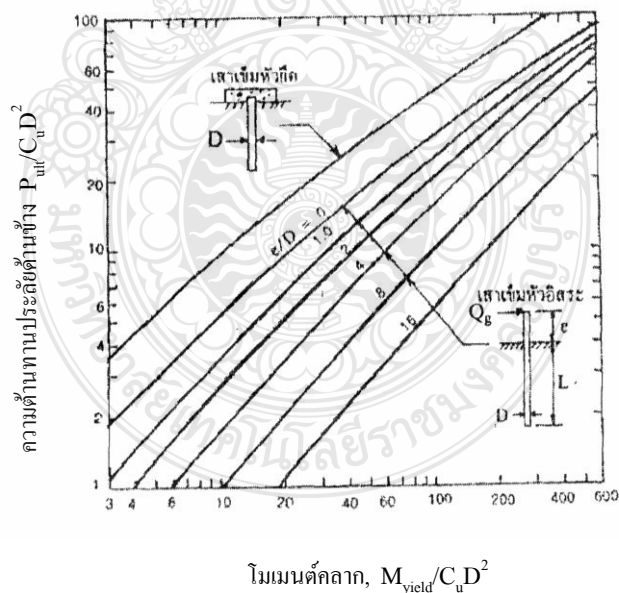
เสาเข็มยาวหัวอิสระ การแอ่นตัวทางด้านข้าง การกระจายแรงปฏิกิริยาของดินและการกระจายโมเมนต์ค้ดตลอดความลิกของเสาเข็มการพังทลายจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดโมเมนต์ค้ดมากกว่าความต้านทานประลัย หรือความต้านทานคลากของเสาเข็มจะรับได้ที่ระยะ  $f + 1.5D$  ต่ำจากผิวดิน

โมเมนต์ตัดที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.12 จะเท่ากับ โมเมนต์ต้านทานของหน้าตัดเสาเข็มนั้นๆ หรือ ความต้านทานประลัย สามารถคำนวณได้จากภาพที่ 2.9



(ก) การแอนตัวของเสาเข็ม (ข) แรงปฏิกิริยาของดิน (ค) โมเมนต์ตัด

ภาพที่ 2.9 การแอนตัวด้านข้าง แรงปฏิกิริยาของดิน และการกระจายโมเมนต์ตัดของเสาเข็มยาวหัวอิสระ[8]



ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานด้านข้างประลัยกับ โมเมนต์ค้ลลากของหน้าตัดเสาเข็ม[8]

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเฉพาะเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ฝังอยู่ในดินเหนียวดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะพฤติกรรมของเสาเข็มหัวอิสระและไม่มีการยึดรั้ง

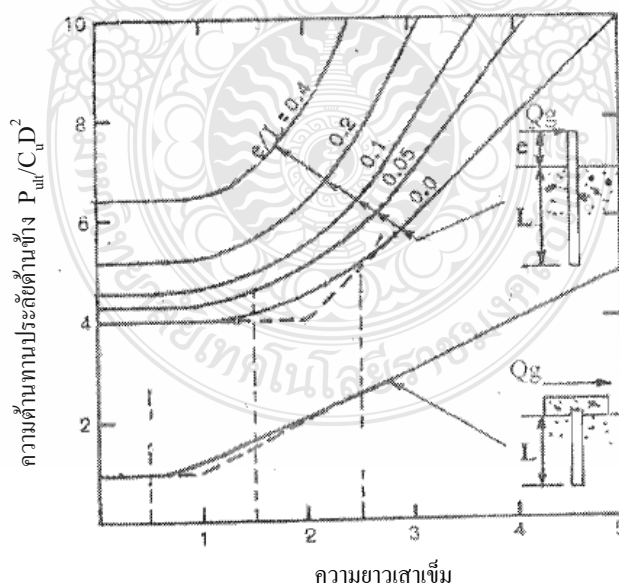


## 2.8.2 พิจารณาการแอ่นตัวทางด้านข้างเสาเข็มฝังในดินเชื่อมแน่น

การออกแบบเสาเข็มรับแรงด้านข้าง กำหนดด้วยการแอ่นตัวด้านข้างที่แรงในช่วงใช้งาน (ประมาณ 30-50% ของความต้านทานประลัย) เพราะการแอ่นตัวภายใต้แรงต้านทานสูงสุดของเสาเข็ม นั้น มักจะมีค่ามากกว่าโครงสร้างส่วนบนจะทนได้ การแอ่นตัวด้านข้างของเสาเข็มมีผลเนื่องจาก Stiffness และระยะจมลึกของเสาเข็มเสาเข็มที่ตอกในดินเหนียวจะมีการแอ่นตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นพร้อมกับเวลาเนื่องจาก Consolidation และ Creep การเปลี่ยนแปลง Stiffness ของเสาเข็มยาว จะมีผลอย่างมากต่อการแอ่นตัวด้านข้าง และจะมีผลน้อยมากหากเป็นเสาเข็มสั้น หากกำหนดให้ระยะจมลึกของเสาเข็มมีค่าเท่ากับ  $\beta L$  ซึ่งไม่มีหน่วยโดย  $\beta L$  เป็นความยาวของเสาเข็มที่จมลงไปดิน และ  $\beta L$  สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้ ดังภาพที่ 2.11 [8]

$$\beta L = \left( \frac{kD}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (2.14)$$

- เมื่อ  $k$  = สัมประสิทธิ์ของ Subgrade Reaction  
 $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม หรือความกว้างของเสาเข็มด้านตรงข้าม กับแรงที่กระทำ  
 $E_p I_p$  = Stiffness ของเสาเข็ม



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวจมลึกและระยะแอ่นตัวด้านข้างที่ผิวดินของเสาเข็ม[8]

จะเห็นได้ว่าการแอนตัวด้านข้างและ โมเมนต์คัตของเสาเข็มรวมทั้งแรงปฏิกิริยาของดิน ขึ้นอยู่กับค่า  $\beta L$  การแอนตัวด้านข้างที่ผิวดินสามารถคำนวณได้โดยใช้สัมประสิทธิ์ Subgrade Reaction เสาเข็มสั้นหัวอิสระ จะต้องสมมติว่า เสาเข็มมีความแข็งมากโดย  $\beta L$  มีค่าน้อยกว่า 1.5 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

$$y_o = \frac{4P \left(1 - 1.5 \frac{e}{L}\right)}{kDL} \quad (2.15)$$

โดย $y_o$	=	การแอนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากระดับผิวดิน
$P$	=	แรงกระทำด้านข้าง
$e$	=	ระยะเยื้องศูนย์
$L$	=	ระยะจวมลึกของเสาเข็ม
$k$	=	สัมประสิทธิ์ของ Subgrade Reaction
$D$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเสาเข็ม

เสาเข็มยาวหัวอิสระกรณีนี้ต้องสมมติว่าเสาเข็มยาวมีความยาวมาก เมื่อ  $\beta L$  มีค่ามากกว่า 2.5 การแอนตัวทางด้านข้างคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$y_o = \frac{2P\beta(e\beta + 1)}{k_\infty D} \quad (2.16)$$

โดย  $k_\infty$  = สัมประสิทธิ์ Subgrade Reaction เนื่องจากเสาเข็มมีความยาวมาก

สัมประสิทธิ์ของ Subgrade Reaction ( $k$ ) คือ อัตราส่วนของความดันที่จุดสัมผัสระหว่าง โครงสร้างกับดิน ณ จุดใดจุดหนึ่ง ( $q$ ) ต่อการแอนตัวหรือการทรุดตัว ( $y$ ) ณ จุดนั้นคือ

$$k = \frac{q}{y} \quad (2.17)$$

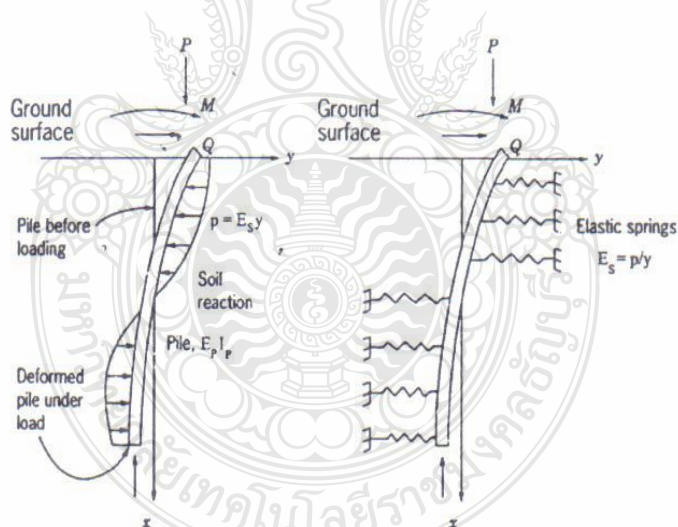
ค่า  $k$  ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความยืดหยุ่นของดิน ขนาดของพื้นที่ที่ถ่ายน้ำหนัก Stiffness ของเสาเข็ม และไม่ใช่ค่าคงที่ของดิน ข้อสมมุติฐานของทฤษฎีนี้กล่าวว่า ค่า  $k$  ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของ  $q$  และจะมีค่าเหมือนกันตลอดทุกจุดตลอดความลึก และข้อสมมุติฐานนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง เมื่อ

ขนาดของน้ำหนักหรือแรงไม่มากกว่า 50% ของกำลังประลัยของดินและดินเป็นดินเหนียวแข็ง แต่อย่างไรก็ตามค่า  $k$  จะน้อยลงเมื่อเกิด Consolidation และ Creep

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Subgrade Reaction ในแนวราบ ( $k_h$ ) สามารถคำนวณได้จาก Plate Load Test โดยสมมติว่าสัมประสิทธิ์ของ Subgrade Reaction ในแนวตั้งและในแนวราบมีค่าเท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์ของ Subgrade Reaction ในแนวราบสำหรับเสาเข็มยาว ( $\beta L > 2.25$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$k_h = \frac{0.4k}{D} \quad (2.18)$$

การหาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวจากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวโดยวิธีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on elastic foundation) โดยมีการสมมติฐานว่า แรงปฏิกิริยาของดินที่มีต่อเสาเข็มเสมือนแถวของสปริงยืดหยุ่นจำนวนอนันต์เรียงกันอยู่ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของเสาเข็ม โดยสปริงเหล่านี้จะเกิดการยุบตัวเมื่อมีแรงมากระทำบนมันโดยตรงเท่านั้นไม่ว่าสปริงนี้จะยุบตัวไปเท่าใดก็จะไม่ส่งผลต่อสปริงที่อยู่รอบๆ มัน และตัวของเสาเข็มเองก็เหมือนคานยืดหยุ่น (Elastic Beam) Winkler (1867) ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 พฤติกรรมของเสาเข็มตามสมมติฐานของ (Winkler, 1867) Winkler's model (1867) เสนอความสัมพันธ์ไว้ดังนี้

$$k = \frac{p'}{x} \quad (2.19)$$

เมื่อ $k$	=	modulus of subgrade reaction [kN/m <sup>2</sup> ]
$p'$	=	pressure on soil [kN/m]
$x$	=	deflection [m]

จากคังสมการที่ 2.20

$$k_z = n_h z \quad (2.20)$$

สำหรับชั้นทราย subgrade modulus สามารถหาได้

เมื่อ $z$	=	ระยะความลึกใดๆ ณ จุดที่พิจารณา
$n_h$	=	constant of modulus of horizontal subgrade reaction

จากทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on elastic foundation) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} = p' \quad (2.21)$$

เมื่อ $E_p$	=	modulus of elasticity in the pile material
$I_p$	=	moment of inertia of the pile section

จากสมมติฐาน Winkler's model (1867)

$$p' = -kx \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 ค่า  $p'$  เนื่องมาจากทิศทางแรงดันของดินจะมีทิศทางตรงข้ามกับค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม และเมื่อนำสมการ 2.41 และ 2.42 มารวมกันจะได้ก็จะได้สมการพื้นฐานสำหรับคานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on elastic foundation) ดังนี้

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} + kx = 0 \quad (2.23)$$

ในกรณีที่แรงกระทำอยู่ในช่วงยืดหยุ่นของดินหรือแรงที่มากกระทำยังอยู่ในช่วงหน่วยแรงใช้งาน ค่าการโก่งของเสาเข็มจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับขนาดเข็ม ดังนั้นพฤติกรรมของเสาเข็มจะต้องอยู่ในช่วงยืดหยุ่นด้วย จากทฤษฎี Superposition เราจะพิจารณาแยกกันระหว่างแรงค้ำข้าง ( $Q_g$ ) และโมเมนต์ค้ำ ( $M_g$ )

สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Non-cohesive Soil) Matlock and Reese (1960)[12] ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ดังนี้

$$X_z(z) = A_x \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_x \frac{M_g T^2}{E_p I_p} \quad (\text{Deflection}) \quad (2.24)$$

$$\phi_z(z) = A_\phi \frac{Q_g T^2}{E_p I_p} + B_\phi \frac{M_g T}{E_p I_p} \quad (\text{Slope}) \quad (2.25)$$

$$M_z(z) = A_m Q_g T + B_m M_g \quad (\text{Moment}) \quad (2.26)$$

$$V_z(z) = A_v Q_g + B_v \frac{M_g}{T} \quad (\text{Shear}) \quad (2.27)$$

$$p'_z(z) = A_p \frac{Q_g}{T} + B_p \frac{M_g}{T^2} \quad (\text{Soil Reaction}) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $A_x, B_x, A_\phi, B_\phi, A_m, B_m, A_v, B_v, A_p, B_p$  คือ สัมประสิทธิ์ของค่า Deflection, Slope, Moment, Shear, Soil Reaction ดังตารางที่ 2.1 กรณีที่  $k_z = n_h z$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $T$  = characteristic length of the soil-pile system

$Q_g$  = แรงทางด้นข้างในแนวราบที่กระทำกับเสาเข็ม

$M_g$  = แรงดัดที่กระทำกับเสาเข็ม

เมื่อ  $L \geq 5T$  เราจะพิจารณาเป็นเสาเข็มยาว (Long Pile) หรือเสาเข็มแบบยืดหยุ่น (Flexible Pile)

$L \geq 2T$  เราจะพิจารณาเป็นเสาเข็มยาว (short Pile) หรือเสาเข็มแบบแข็งเกร็ง (Rigid Pile)

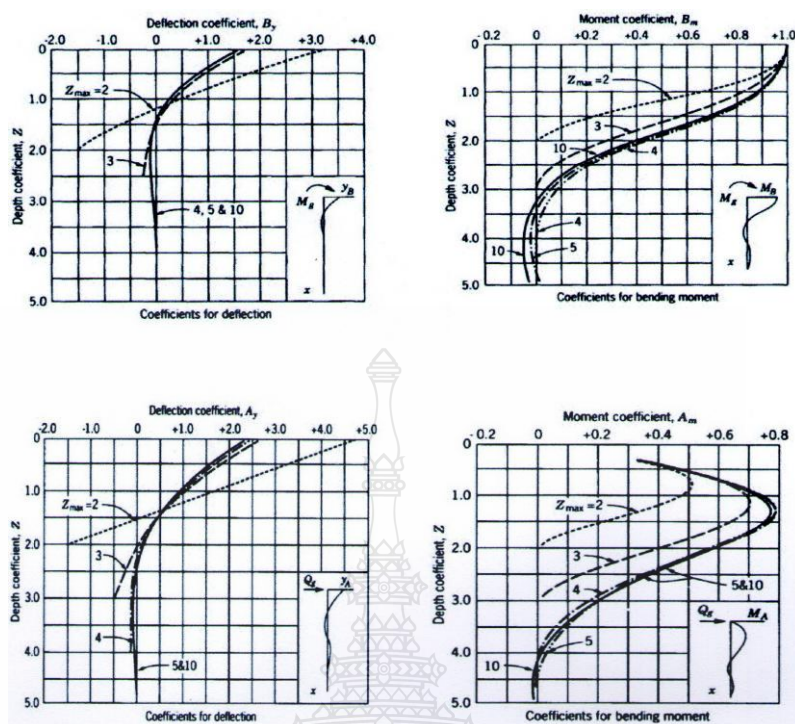
Matlock and Reese (1960)[9] ได้เสนอชาร์ตไร้มิติ (Nondimension) กรณีที่ดินมีค่า  $E_s = kx$  ดังภาพที่ 2.13 โดยกำหนดให้

$$\text{Depth coefficient} \quad Z = \frac{z}{T} \quad (2.30)$$

$$\text{Max depth coefficient} \quad Z_{\max} = \frac{L}{T} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $z$  = ระดับความลึกของเสาเข็ม ณ จุดที่พิจารณา

$L$  = ระยะจมลึกของเสาเข็มที่ฝังลงไปในดิน



ภาพที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์  $A_y$ ,  $B_y$ ,  $A_m$ ,  $B_m$  กับความลึก  $Z$  [12]

สำหรับเสาเข็มที่ฝังอยู่ในดินเหนียวกรณีแบ่งดินเป็นสองชั้น ค่าความแข็งแรงแรงของดินชั้นบนและดินชั้นล่าง ใช้สัญลักษณ์  $k_1$  และ  $k_2$  กรณีที่ดินเป็นเนื้อเดียวกัน หรือเป็นดินชั้นเดียวกัน ค่า  $k_1 = k_2$  Davission, M.T. and Gill, H.L., [10] ได้เสนอไว้ดังนี้

$$x_z(z) = A'_x \frac{Q_g R^3}{E_p I_p} + B'_x \frac{M_g R^2}{E_p I_p} \quad (\text{Deflection}) \quad (2.32)$$

$$M_z(z) = A'_m Q_g T + B'_m M_g \quad (\text{Moment}) \quad (2.33)$$

เมื่อ  $A'_x$ ,  $B'_x$ ,  $A'_m$ ,  $B'_m$  คือ สัมประสิทธิ์ของค่า Deflection, Moment

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k}} \quad (2.34)$$

$$\text{Depth coefficient} \quad Z = \frac{z}{R} \quad (2.35)$$

$$\text{Max depth coefficient} \quad Z_{\max} = \frac{L}{R} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $R$  = Characteristic length of the soil-pile system  
 $k$  = Modulus of subgrade reaction

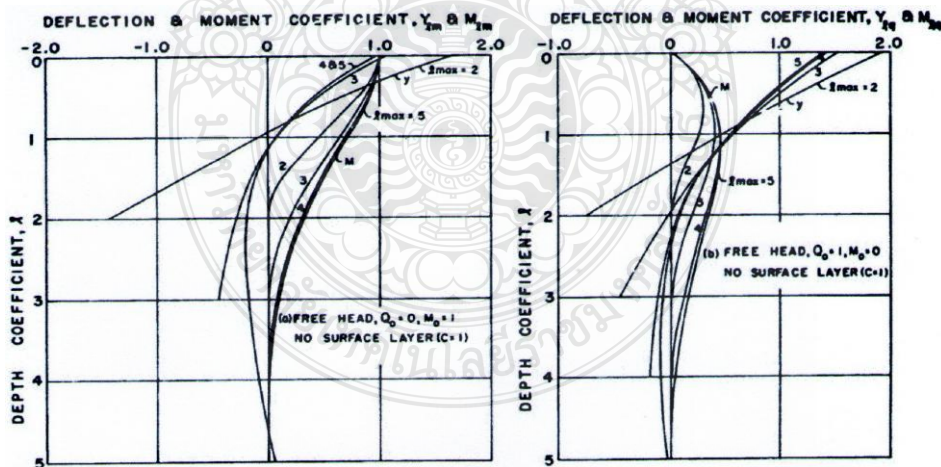
สำหรับดินเหนียวสามารถหาค่า Modulus of subgrade reaction ได้ดังนี้

$$k = 0.6512 \sqrt{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \frac{E_s}{1 - \mu_s^2} \tag{2.37}$$

เมื่อ  $E_s$  = Modulus of elasticity of soil [kN/m<sup>2</sup>]  
 $D$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม [m]  
 $\mu_s$  = Poisson's ratio ของดิน

จากกราฟ ภาพที่ 2.14 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ได้ และค่า  $k$  ที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าคงที่ตลอดความลึกของเสาเข็ม หากเราสังเกตกราฟดังแสดงในรูปจะพบว่า ในกรณีที่ว่า  $Z_{max} = 2$  กราฟที่ได้เกือบจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นเราจะแยกพิจารณา

เมื่อ  $Z_{max} = 2$  พิจารณาเป็นเสาเข็มสั้นหรือเสาเข็มแบบแข็งแกร่ง (Rigid Pile)  
 $Z_{max} > 2$  พิจารณาเป็นเสาเข็มสั้นหรือเสาเข็มแบบยืดหยุ่น (Flexible)



ภาพที่ 2.14 ค่าสัมประสิทธิ์  $A_x, B_x, A'_m, A''_m$  กับความลึก  $Z$  [13]

### 2.8.3 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

คอนกรีตอัดแรงโดยทั่วไปมีกำลังรับน้ำหนักประมาณ  $28 \text{ MN/m}^2$  ถึง  $34 \text{ MN/m}^2$  และค่า Poisson's Ratio,  $\nu$  มีค่าประมาณ 0.15 ถึง 0.22 ส่วนค่า Young's Modulus,  $E_c$  มีค่าประมาณ  $25 \text{ GN/m}^2$  ถึง  $28 \text{ GN/m}^2$  หรือสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.59 รายละเอียดคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมแสดงในตารางที่ 2.1

$$E_c = 12,420 + (460 f'_c) \quad (2.38)$$

เมื่อ  $E_c$  = Young's Modulus ของคอนกรีตอัดแรง  
 $f'_c$  = กำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตอัดแรง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Lin et al., 1982)

$f'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
28,000 – 34,000	25,000,000 - 28,000,000	0.15 - 0.22

### 2.9 แรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามา

โดยปกติเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินบริเวณชายฝั่งทะเลได้มีแรงกระทำเข้าไปเข้ามาซึ่งแรงที่แตกต่างและแรงที่ต่อเนื่องกันมีกำเนิดมาจากคลื่นโดยในปัจจุบันปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นแรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามาจากทางเดียวหรือสองทางพฤติกรรมการตอบสนองของเสาเข็มในแนวตั้งและปฏิกิริยาต่อเสาเข็มที่ผิวดินมีตัวแปรจำนวนมากและการออกแบบของเสาเข็มนั้นไม่ง่าย ค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่มาประยุกต์ใช้เพื่อพิจารณาผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกต่อเสาเข็ม การวิจัยจำนวนหนึ่งมีแรงกระทำด้านข้างแบบเข้าไปเข้ามาของเสาเข็มในหาดทรายเพื่อให้ทราบและเข้าใจผลกระทบต่อเสาเข็ม ผลลัพธ์เกี่ยวกับงานวิจัยโดย Chang C.S and Whitman(1988) [14] และ Little and Briaud(1988) [15] และ Kramer and Heaver (1988) [16] แสดงพฤติกรรมที่แตกต่างนำมาประยุกต์เป็นประเภทของแรงทางเดียวและสองทาง สำหรับแรงทางเดียวทำให้ความเครียดที่เกิดเพิ่มขึ้นสูงมากและทำให้เสียรูป ผู้เขียนทั้งหมดกล่าวถึงอิทธิพลที่มีต่อเสาเข็มเพิ่มเติมแรงในแนวราบทำให้เสียรูปและการงอชั่วคราวลักษณะของผิวดินและความเครียดที่เพิ่มมากขึ้น การวิเคราะห์จำแนกแบบจำลองในกรณีที่ยึดหยุ่น ได้สมการเชิงเส้นความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาดินฐานรากที่มีความยืดหยุ่น  $K_h$  และ ความลึก  $Z$  ที่ถูกสร้างขึ้นจากน้ำหนักบรรทุก by Reese and Matlock



(1956)[17] or more recently by Long and Vanneste (1994)[18] ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีปฏิริยานำไปสู่  $n_h$  เพื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่แรงกระทำเข้าไปเข้ามา ผู้แต่งมากมายเสนอแนะเพื่อเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์นี้  $n_h$  แสดงในตาราง 2.2 ในความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.39

$$K_h = \alpha n_h Z \quad (2.39)$$

ตารางที่ 2.2 ค่า  $\alpha$  [18]

Authors	$\alpha$	Number of cycles	Sand density
Prakash (1962), Davision	0.70	>50	-
Broms (1964)	0.75	40	Loose sand
Broms (1964)	0.50	40	Dense sand

สำหรับวิธีการใช้เส้นโค้งปฏิริยา P-y และการพิจารณาระยะยาวของผลตอบสนองเสาเข็ม การตรวจแก้ได้ถูกเสนอบนเส้นโค้ง P-Y ได้มาจากทดลองแรงที่กระทำด้านข้างเสาเข็มสถิตโดยประยุกต์ใช้ปัจจัยการลด [18], [19] ผลลัพธ์ของเลขต่อรอบสามารถเห็นเป็นการทรุดลงของปฏิริยาการยึดหยุ่นความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.40

$$K_{hN} = K_{hl} N^{-\delta} \quad (2.40)$$

ที่  $K_{h1}$  และ  $K_{hN}$  คือปฏิริยาค่าความยึดหยุ่นแต่ละค่าจากรอบลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ N และ  $\beta$  คือตัวแปรการทรุดตัว หรือตัวแปร  $\beta$  จากตัวอย่างที่หามาได้จากเครื่องวัดหน่วยแรงและคุณสมบัติของดินการทดสอบของ Little and Briaud (1988)[15] ความสัมพันธ์ที่แตกต่างให้รายละเอียดอื่นๆ ในแง่ของแรงที่กระแบบเข้าไปเข้ามา

ผลลัพธ์ของตัวเลขของรอบ N พิจารณาระหว่างอัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์ปฏิริยาที่รอบลำดับ N และที่ลำดับ 1 ดังสมการที่ 2.41

$$R_{nN} = \frac{n_{hN}}{n_{h1}} = N^{-\delta} \quad (2.41)$$

ซึ่ง  $\delta$  แทนผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องของแรงที่กระทำเข้าไปเข้ามาการทำให้ทรุดลงของ  $n_h$  ตัวแปร  $\delta$  เพื่อกำหนดอัตราส่วนแรงสถิตมาตั้งแต่ได้ข้อสรุป  $R_{nN}$  กำหนดโดยสมการที่ 2.42 แสดงข้างล่างวิธีการคิดตั้งเสาเข็มบนความหนาแน่นผิวดินและแรงกระทำเสาเข็ม

ผลลัพธ์ของแรงที่กระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาพิจารณาลักษณะ  $R_H$  (พิจารณาอัตราแรง) อัตรา  
ระหว่างสิ่งน้อยมาก  $H_{min}$  และสูงที่สุด  $H_{max}$  แรงต้านข้างประยุคต์ระหว่างรอบ

$$R_H = \frac{n_{min}}{n_{max}} \quad (2.42)$$

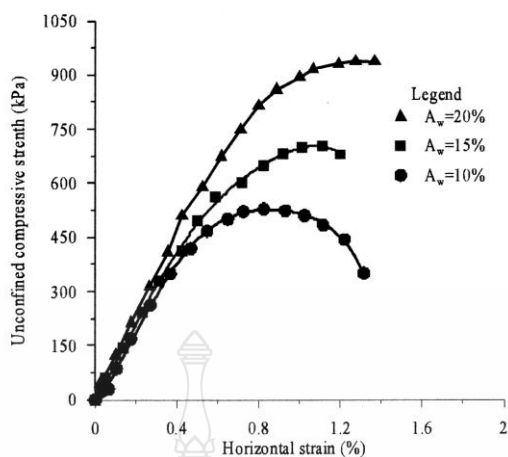
เป็นตัวอย่างของแรงที่กระทำซ้ำไปซ้ำมาทางเดียวโดยแรงผันแปรตาม  $H_{min} = 0$  ถึง  $H_{max}$   
อัตราส่วนแรงสอดคล้องกัน  $R_H = 0$  ตารางที่ 2.3 ที่มีค่าของอัตราส่วนแรงตรวจสอบจากผู้เขียนที่  
หลากหลาย

ตารางที่ 2.3 ค่า  $R_H = H_{min}/H_{max}$  [19]

Loding type	$R_H$	Authors
Static	1	Various studies listed in Mezazigh (1995) and Remaud (1999)
Cyclic (one-way)	0.50	Little & Briaud (1988),
Cyclic (two-way)	-1	Morrisson (1986), Kotthaus et al. (1994)
Cyclic (two-way)	-0.25	Reese al. (1974)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

*Bhandari*. [20] ได้ทำการทดสอบ Unconfined Compression Test โดยใช้ปริมาณซีเมนต์  
แตกต่างกันที่ 10%, 15 % และ 20 % ของน้ำหนักดินเหนียวแห้ง ในการเตรียมก้อนตัวอย่าง จากผล  
การทดสอบค่า Unconfined compressive strength เท่ากับ 527 kPa, 702 kPa และ 937 kPa ตามลำดับ  
ดังแสดงในภาพที่ 2.15

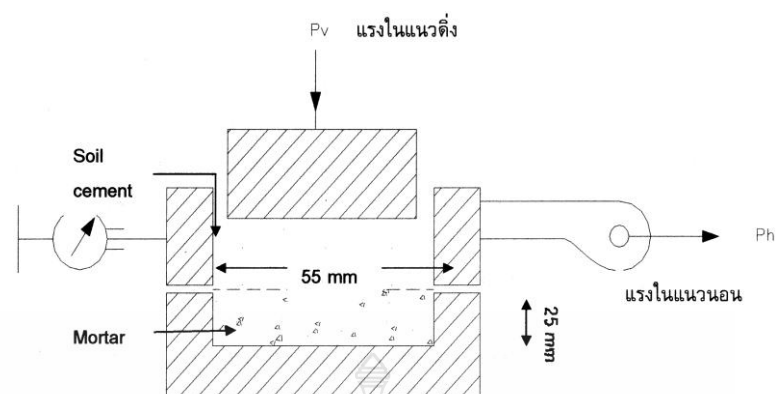


ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength กับการเคลื่อนตัว

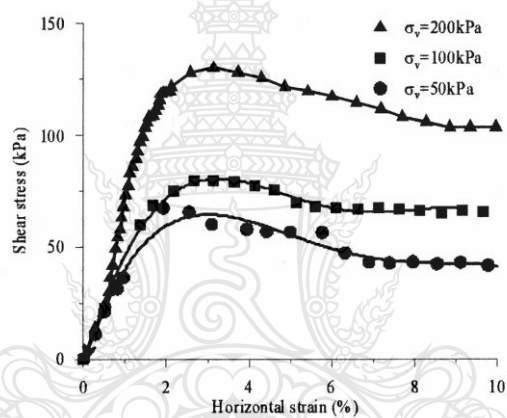
การทดสอบ Direct shear Test โดยใช้แรงในการทดสอบที่ 50 kPa, 100 kPa, และ 200 kPa จากการทดสอบใช้ปริมาณซีเมนต์ 10 %, 15 % และ 20 % เทียบกับน้ำหนักรีดดินแห้ง จะเห็นได้ว่าการวิบัติจะเกิดที่ผิวสัมผัสระหว่าง mortar และ clay cement ที่ 3%, 1.5 %, 1.0 % ของ horizontal strain ตามลำดับ จากภาพที่ 2.17, 2.18, 2.19 [20]

ตารางที่ 2.4 ค่า Interface shear strength ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 10%, 15%, 20% [20]

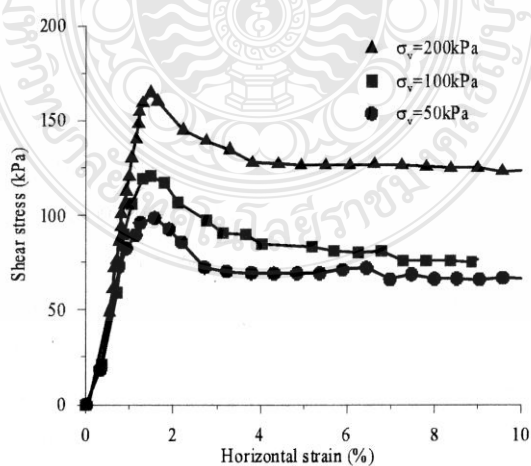
Cement content	Peak friction angle ( $\delta$ ) <sub>peak</sub>	Peak adhesion (Ca) <sub>peak</sub> kPa	Residual friction angle ( $\delta$ ) <sub>residual</sub>	Residual adhesion (Ca) <sub>residual</sub> kPa
10%	22.8°	45.75	22.2°	20.14
15%	23.7°	76.53	20.8°	46.04
20%	25.2°	79.43	23.2°	31.19



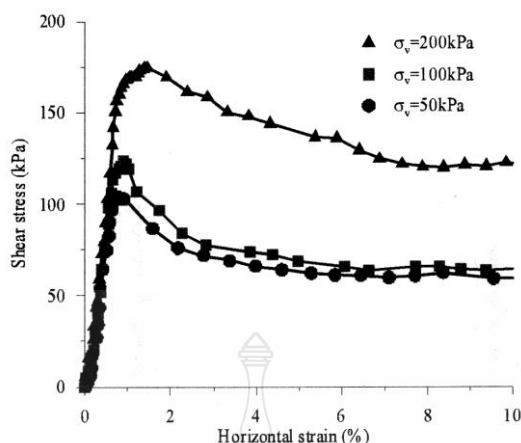
ภาพที่ 2.16 การทดสอบ Direct shear Test ระหว่าง Soil cement กับ Mortar [20]



ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ปริมาณปูนซีเมนต์กับ 10 % [20]



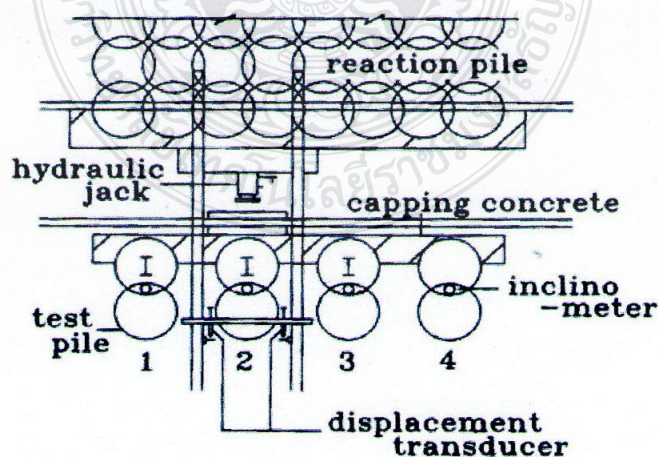
ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ปริมาณปูนซีเมนต์กับ 15 % [20]



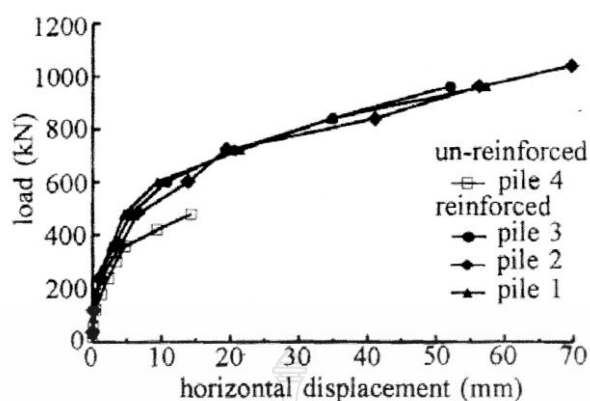
ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวอนที่ปริมาณปูนซีเมนต์กับ 20% [20]

Kiazume et al [21] ได้เสนองานวิจัยโดยการนำเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเหล็กไปใช้ในงานก่อสร้างกำแพงกันดินเพื่อเป็นฐานรองรับแรงดันดินทางด้านข้าง ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 1.5 ตารางเมตร ความยาว 17 เมตร เสริมด้วยเหล็กตัว ไอ (H x350 mm x 175 x 17.00 m) ดังภาพที่ 2.19 ซึ่งทำการทดสอบทั้งหมด 4 ต้น ด้วยกัน ต้นที่ 1, 2, 3 เสริมเหล็กตัวไอ ส่วนต้นที่ 4 ไม่มีการเสริมเหล็กทดสอบการรับแรงทางด้านข้างโดยการติดตั้งแนวแรงที่สูงจากระดับผิวดิน 1.2 เมตร

ผลการทดสอบจะเห็นได้จากภาพที่ 2.20 เสาเข็มต้นที่ 4 ซึ่งไม่เสริมเหล็กเมื่อรับน้ำหนักได้ 470 KN ก็เกิดการวิบัติ ส่วนต้นที่ 1, 2, 3 สามารถรับน้ำหนักได้ 800, 900, 1000 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.20 แบบแปลนการทดสอบ Reinforced DCM retaining wall [21]



ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load-displacements[21]

พินิต ตั้งบุญเติม [22] ได้ทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง Full Scale Test on Single Piles and Pile Groups โดยใช้บริเวณด้านหลังของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ในการทดสอบภาคสนามได้ทำการทดสอบ Field Vane Test ตัวอย่างดินที่ทดสอบจากหลุมเจาะซึ่งหลุมเจาะมีความลึก 8 เมตร จากระดับผิวดิน โดย Soil Profile ของชั้นดินจะแบ่งออกเป็น 3 ชั้น โดยชั้นดินชั้นที่ 1 จากระดับผิวดินถึงความลึก 2 เมตร ดินชั้นที่ 2 (2-7 เมตร) โดยวัดจากระดับผิวดินและดินชั้นที่ 3 (7-8 เมตร) วัดจากระดับผิวดิน โดยค่า Moisture Content (55%) , Liquid Limit (68%) และ Plastic limit (82%) ก่อนข้างจะคงที่ตามความลึก ส่วนค่า Unit Weight จะมีค่าประมาณ 1.6 ตัน/ม<sup>3</sup> ค่า Undrained Shear Strength ของการทดสอบโดยวิธี Unconfined Compression Test และ Field Vane Shear Test ได้แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังของดินจะลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึกในช่วงดินชั้นแรกและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในดินชั้นที่ 2 ส่วนค่า Modulus of Elasticity  $E_s$  ได้จาก Unconfined Compression Test เสาค้ำที่ใช้ในการศึกษาในการวิจัยเป็นเสาค้ำคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยได้มีรายละเอียดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และ 2.6

โดยจากผลการทดสอบตามตารางที่ 2.7 [22] อธิบายว่า เสาค้ำเกิดการวิบัติขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีค่าเกิน โมเมนต์คัลลาจ ของหน้าตัดเสาค้ำ โดยจะเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวของเสาค้ำ ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการถอนเสาค้ำขึ้นมาตรวจสอบพบว่าตำแหน่งที่เกิดการวิบัติ หรือจุดที่เกิดรอยแตกร้าว นั้นต่ำกว่าผิวดินประมาณ 0.70-0.90 ม.

**ตารางที่ 2.5** คุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

Test Pile No.	Cross Section Area (m <sup>2</sup> )	Moment of Inertia (Ip) (m <sup>4</sup> )	Modulus of Elasticity (m <sup>2</sup> )	EpIp (t-m <sup>2</sup> )	Myield (t-m)
SC - 1	0.0123	3.22x10 <sup>-5</sup>	6.70x10 <sup>-5</sup>	21.57	0.59
SC - 2	0.0098	2.49 x10 <sup>-5</sup>	6.61x10 <sup>-5</sup>	16.46	0.59

**ตารางที่ 2.6** รายละเอียดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

Test Pile No.	Diameter (D) (m)	Pile Length (L) (m)	Penetration Depth (Ls) (m)	Eccentricity (e) (m)
SC - 1	0.16 (ภายนอก) 0.10 (ภายใน)	6	4.45	1.55
SC - 2	0.15 (ภายนอก) 0.10 (ภายใน)	6	4.10	1.90

**ตารางที่ 2.7** ผลการทดสอบในสนามของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก

Test Pile No.	ตำแหน่งที่เกิดการวิบัติ (m)	Quilt (ton)	Type of Failure
SC - 1	0.70 - 0.90	0.30	Pile Failure
SC - 2	0.70 - 0.90	0.20	Pile Failure

สมหวัง ขจรเกียรติพัฒนา [23] ได้ทำการวิเคราะห์เสาเข็มคอนกรีตรับแรงด้านข้างฝังในดินเหนียว โดยได้นำผลของระยะแอนตัวด้านข้างที่ทดสอบจากในสนามมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีต่างๆ พบว่าระยะแอนตัวด้านข้างที่ได้จากการคำนวณในทุกๆ วิธีการให้ผลต่างที่วัดได้จากในสนามค่อนข้างมากกล่าวคือ ระยะแอนตัวที่ได้จากสนามมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมาก สมหวัง ขจรเกียรติพัฒนา [23] ได้กล่าวต่อไปอีกว่า ควรมีการปรับเปลี่ยนค่า  $E_s$  โดยใช้อัตราส่วน  $E_u / S_u$  เป็นการปรับค่า [23] ได้ปรับค่า  $E_s$  เป็น  $E_u = 400S_u$  แล้วนำมาใช้คำนวณใหม่ปรากฏว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากในสนามมากยิ่งขึ้น

เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพการรับแรงทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้เพิ่มขึ้นจากเดิมและยังสามารถนำเสาเข็มดินซีเมนต์ไปใช้ในงานต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาวิจัยหน้าตัดของ Core Pile ประเภทต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการรับกำลังทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) และระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยจะทำให้มีการนำเสาเข็มดินซีเมนต์ไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้นเช่นก่อสร้างกำแพงกันดิน โครงสร้างชายฝั่งทะเล ฯลฯ





## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยการศึกษาพฤติกรรมฐานรากเสาเข็มชนิดดินซีเมนต์แบบชั้นลึก Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM Column) ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) วิธีการดำเนินการวิจัยจะเริ่มจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบชั้นลึก (DCM Column) ด้วยวิธีระบบเปียก (Wet Process) เป็นการผสมดินกับน้ำปูน (Cement milk) แบบใช้ใบเหล็กตีกวน (Mechanical Mixing) และฉีดน้ำปูนด้วยความดันต่ำ (Low Pressure) หลังการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แล้วเสร็จจะทำการเสริมวัสดุแกนประเภทต่างๆในเสาเข็มดินซีเมนต์ และจะทำการบ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยที่อายุการบ่ม 140 วัน หลังจากนั้นจะทำการเจาะแก่นเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อทดสอบค่า Unconfined Compression Test และใช้ฝังท่อ Inclinator Casing เพื่อใช้วัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของเสาเข็มดินซีเมนต์

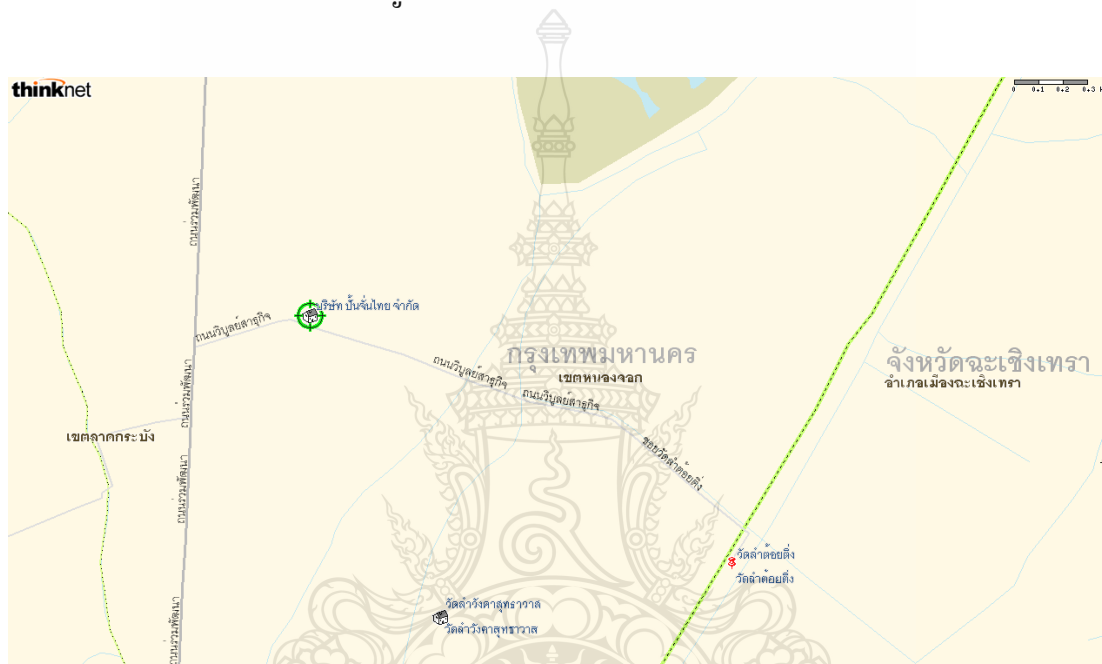
การทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์จะทดสอบทั้งหมด 4 ประเภทได้แก่ เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เสริมแกนกลาง เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนกลางเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนกลางเป็นท่อเหล็กกลม และเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนเป็นเหล็ก H-Beam การทดสอบจะใช้พื้นที่หน่วยซ่อมบำรุงและเก็บเครื่องจักรของ บริษัท ปันจัน ไทย จำกัด และบริษัท ไทยเทเนอ็กซ์ จำกัด เป็นที่ทำการทดสอบ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยสามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลักๆดังนี้

#### 3.1 ออกแบบวิธีการทดสอบ ศึกษาเครื่องมือและอุปกรณ์

การออกแบบวิธีการทดสอบได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นแนวทางเพื่อใช้ในการอ้างอิง แล้วนำวิธีการทดสอบดังกล่าวมาออกแบบแก้ไขให้เหมาะสม เพราะวิธีการทดสอบที่ศึกษานั้นไม่สามารถใช้กับการทดสอบนี้ได้ทั้งหมด โดยต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้เวลาที่จะทำการทดสอบจริง การศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือที่มีหรืออาจหาได้ ความสะดวกในการเก็บข้อมูลของเครื่องมือ ความถูกต้องของข้อมูล งบประมาณที่อาจหาได้และวิธีการทดสอบจะต้องเป็นที่ยอมรับในทางวิศวกรรม

### 3.2 จัดหาและสำรวจพื้นที่

การศึกษาพฤติกรรมเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงทางด้านข้างแบบกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) ใช้พื้นที่หน่วยซ่อมบำรุงและเก็บเครื่องจักรของบริษัท ปันจันไทย จำกัด และบริษัท ไทยเทเนอ็กซ์ จำกัด แขวงลำต้อยติ่ง เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ดังภาพที่ 3.1 เนื่องจากมีความพร้อมทั้งทางด้านวัสดุ เครื่องจักรกล แรงงาน และยังมีพื้นที่ที่เหมาะสมในการที่จะทำการทดสอบ ซึ่งมีความสะดวกในการที่จะแก้ไขปัญหาหน้างาน



ภาพที่ 3.1 แผนที่และสถานที่ตั้งหน่วยงานเพื่อทดสอบงานวิจัย

### 3.3 เจาะสำรวจ เก็บตัวอย่างดิน และหาคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

#### 3.3.1 ลักษณะพื้นที่

การทดสอบนี้ได้ใช้พื้นที่หน้างานซึ่งอยู่ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร พื้นที่โดยทั่วไปอยู่บนพื้นที่ราบ ตามทางธรณีสัณฐานกำหนดให้อยู่ในพื้นที่ ดินปากแม่น้ำของประเทศไทย ดังแสดงที่ภาคผนวก ก ในภาพที่ ก.1 สสำรวจพบชั้นดินถมหนาสูงสุด 1.20 เมตรจากผิวดินขณะเจาะ สสำรวจบริเวณหลุมเจาะ

### 3.3.2 การเจาะสำรวจดิน

การเจาะสำรวจดิน(Soil Boring) ดังภาพที่ 3.2 ได้ทำการเจาะสำรวจทั้งหมด 2 หลุม (BH1 และ BH2) จนถึงความลึก 30.45 เมตร จากระดับผิวดินบริเวณในตำแหน่งที่ใกล้กับพื้นที่ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ การเจาะสำรวจดินกระทำโดยใช้เครื่องเจาะชนิด Skit-Mounted Types เจาะโดยใช้ส่วนชนิด Post-Hole ดัดที่ปลายก้านเหล็ก หมุนด้วยกำลังเครื่องยนต์เพื่อเจาะหลุม และก้านเหล็กจะขยักขึ้นลงโดยใช้ระบบ Hydraulics หรือ Winch หากการเจาะทำบริเวณที่มีชั้นดินอ่อน เช่น กรุงเทพฯ จะต้องให้ปลอกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ตอกนำก้านเจาะลงไปด้วย เพื่อป้องกันผนังหลุมเจาะพังและเพื่อความสะดวกในการหมุนเวียนน้ำโคลนในการเจาะล้างหลุม (Wash Boring)

### 3.3.3 การเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินในการทดสอบนี้จะเก็บทุกระยะความลึก 1.50 เมตร แต่ในบางโอกาส หากชั้นดินเปลี่ยนแปลงมากจะเก็บทุกระยะ 1.00 เมตร โดยเฉพาะในระยะต้นๆบริเวณระดับฐานราก เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ได้ทำการการเจาะเก็บตัวอย่างดินโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามอุปกรณ์การเก็บดังนี้

#### 1) การเก็บด้วยกระบอกบาง (Shelby Tube)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาว 75 เซนติเมตร สามารถเก็บตัวอย่างได้ประมาณ 50 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D1587 ที่ชั้นดิน Clay ด้วยระบบ Hydraulics มีค่า Consistency อยู่ในช่วง Very Soft ถึง Stiff ตัวอย่างดินลักษณะนี้เรียกว่า ตัวอย่างดินคงสภาพ คือ ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Samples) หลังจากเก็บตัวอย่างดินได้แล้วต้องปิดหัวและท้ายกระบอกด้วยเทียไนซ์ เพื่อป้องกันความชื้นระเหยแล้วขนย้ายไปห้องปฏิบัติการด้วยความระมัดระวัง และเก็บตัวอย่างไว้ในที่ควบคุมความชื้น เพื่อทดสอบหาค่าแรงเฉือน (Shear Strength) และคุณสมบัติพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมของดิน (Soil Properties)

#### 2) การเก็บด้วยกระบอกผ่า (Split Spoon Sampler)

ใช้เก็บตัวอย่างดินในส่วนชั้นดินแข็งและชั้นทราย ตามมาตรฐาน ASTM D1586-84(90) หรือเรียกว่า Standard Penetration Test (SPT) คือ ใช้กระบอกผ่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.8 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 35 มิลลิเมตร ทำการตอกลงไปในชั้นดินที่ทำการทดสอบ ด้วยลูกตุ้มเหล็กที่มีน้ำหนัก 63.5 กิโลกรัม และระยะตกกระทบ 760 มิลลิเมตร แล้วนับจำนวนครั้งในการตอกเป็น 3 ช่วงๆ ละ 150 มิลลิเมตร แล้วนำค่าที่นับได้ใน 2 ช่วงสุดท้าย รวมกันเป็นจำนวนครั้งในการตอกในช่วง 300 มิลลิเมตร เป็นค่า Standard Penetration Number (N-Value) ซึ่งจะ

นำไปวิเคราะห์หาค่าความต้านทานดินเพื่อตรวจสอบกับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ สำหรับดินที่ได้จากกระบอกผ่าจะตัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วนๆละ 15 เซนติเมตร (วัดจากปลายปากกระบอก) บรรจุภาชนะให้แน่นหนา แล้วส่งกลับไปยังห้องปฏิบัติการ เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ และแมค แคนิกส์ และจำแนกประเภทดินตามมาตรฐาน ASTM D2487-93

#### 3.3.4 การตรวจวัดระดับน้ำใต้ดิน (Water Table Observation)

ระดับน้ำใต้ดินจะมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ความต้านทานดิน เพราะระดับน้ำใต้ดินทำให้ค่าของน้ำหนักดิน (Overburden Pressure) ที่กดอยู่บนตัวอย่างดินที่ระดับต่างๆแตกต่างกัน ดังนั้นการตรวจวัดค่าระดับน้ำใต้ดินที่ความลึกของหลุมเจาะต่างๆกัน จึงจำเป็นต้องกระทำทุกหลุมเจาะ ในการวัดระดับน้ำในหลุมเจาะควรทำทุกๆ เย็นทุกๆ วัน และเติมน้ำให้เต็มถึงปากหลุม เวลาเข้าก่อนเจาะสำรวจก็ให้ทำการวัดระดับน้ำในหลุมเจาะ วันสุดท้ายของการเจาะ ทำเช่นนี้และกลับมาวัดระดับน้ำในหลุมเจาะอีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.2 การเจาะสำรวจดินและเก็บตัวอย่างดิน

### 3.4 ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบคุณสมบัติของดินเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มและการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมปฐพี โดยได้ทำการทดสอบเฉพาะคุณสมบัติที่จำเป็นต้องใช้ประกอบการคำนวณออกแบบ หรือทดสอบเสาเข็มงานในการวิจัยนี้ โดยเลือกการทดสอบต่างๆทางด้านฟิสิกส์ และแมคแคนิกส์ดังนี้

#### 3.4.1 คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์

คุณสมบัติพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของดินได้ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานดังนี้

- ให้น้ำหนักของดิน (Unit Weight) (ASTM D4254-910) สำหรับดินทราย คำนวณจากค่าของการตอกทดลองมาตรฐาน (SPT)
- ปริมาณน้ำในดินตามธรรมชาติ (Natural Water Content) (ASTM D2216-92)
- Atterberg's Limit (ASTM D4318-95)
- ชีดจำกัดเหลวของดิน (Liquid Limit)
- ชีดจำกัดพลาสติกของดิน (Plastic Limit)
- ดัชนีความชื้นเหลวของดิน (Plastic Index)
- ความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity) (ASTM D854-92<sup>F1</sup>)

#### 3.4.2 คุณสมบัติทางด้านแมคแคนิกส์

คุณสมบัติพื้นฐานทางด้านแมคแคนิกส์ของดินได้ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานดังนี้

- Unconfined Compression Test (ASTM D2938-95)
- Direct Shear Test (ASTM D3080-95)

### 3.5 การออกแบบส่วนผสมของ SDCM Column

การออกแบบส่วนผสมของ Cement Column ได้พิจารณาจากผลการเจาะสำรวจทางปฐพีกลศาสตร์ดังแสดงในภาคผนวก ข. ภาพที่ ข1 ถึง ข8 โดยออกแบบใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณต่ำสุด (น้ำหนักปูนซีเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรดิน) ที่ใช้ผสมกับดินเหนียวอ่อนและนำไปทดลอง Trial Mix ในห้องปฏิบัติการ และทำการทดสอบ Cement Column ในสนามสำหรับดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯ ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 10% ถึง 15% Uddin (1994) ซึ่งในการทำ wet mixing ใช้ปริมาณซีเมนต์ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่า water - cement ratio เท่ากับ 1:1 Bergado et al. (1999) ทำการ Design strength SCC ที่ 60 ตัน/ตารางเมตร โดยจากการคำนวณออกแบบได้ใช้ Cement Milk ปริมาณ 521.5 ลิตรต่อเสาเข็มดินซีเมนต์หนึ่งต้น ดังรายการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค

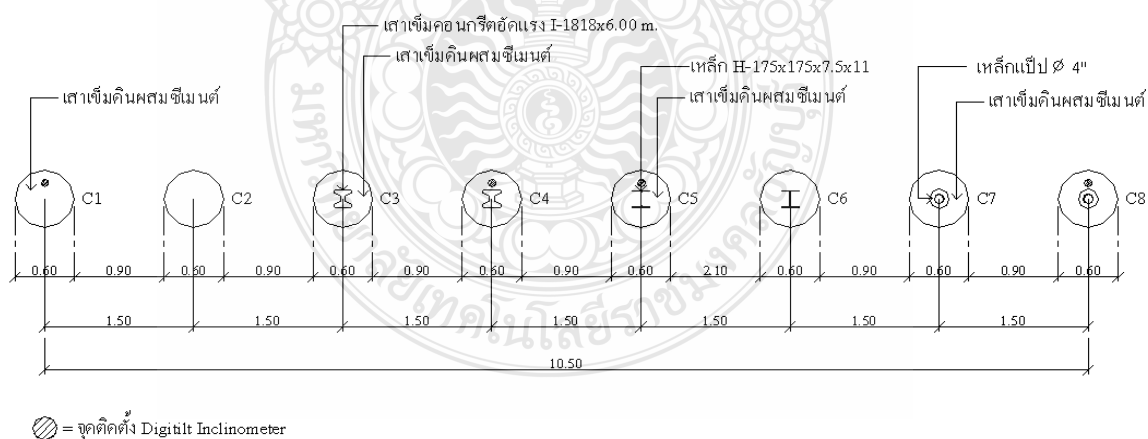
### 3.6 การก่อสร้าง SDCM Column ด้วยระบบเป็ยกความดันต่ำ

#### 3.6.1 รายการ SDCM Column ที่จะทำการก่อสร้าง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ก่อสร้าง DCM และ SDCM Column จำนวน 8 ต้น โดยแบ่งเป็น SDCM Column จำนวน 6 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ยาว 7 เมตร และ DCM จำนวน 2 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ยาว 7 เมตรดังตารางที่ 3.1 และการก่อสร้างตามภาพที่ 3.3 และ 3.4 รายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 ก่อสร้าง DCM, SDCM Column ในแปลงทดสอบ

เสาเข็ม	ยาว (เมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง กลาง (เมตร)	วัสดุเสริมแกน		ความยาววัสดุแกน ความยาวเสาเข็ม	พื้นที่หน้าตัด แกน (ตร.ซม.)
			ประเภทวัสดุ	ความยาว (เมตร)		
C1	7.00	0.60	ไม่เสริมแกนกลาง (DCM)		-	-
C2	7.00	0.60	ไม่เสริมแกนกลาง (DCM)		-	-
C3	7.00	0.60	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ 0.18x0.18 (SDCM)		6.00	0.86
C4	7.00	0.60	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ 0.18x0.18 (SDCM)		6.00	0.86
C5	7.00	0.60	เหล็ก H-BEAM 175x175 มม. หน้า 40.2 กก./ม. (SDCM)		6.00	0.86
C6	7.00	0.60	เหล็ก H-BEAM 175x175 มม. หน้า 40.2 กก./ม. (SDCM)		6.00	0.86
C7	7.00	0.60	ท่อเหล็กกลม $\varnothing$ 0.10 ม. (SDCM)		6.00	0.86
C8	7.00	0.60	ท่อเหล็กกลม $\varnothing$ 0.10 ม. (SDCM)		6.00	0.86



ภาพที่ 3.3 แปลนการก่อสร้าง DCM และ SDCM Column



ภาพที่ 3.4 การก่อสร้าง DCM และ SDCM Column ในแปลงทดสอบ

### 3.6.2 วัสดุที่ใช้ก่อสร้าง SDCM Column

#### 1) ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้ผสมกับดินจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ตราอินทรี) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 อัตราส่วนระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ 1 : 1 โดยใช้ปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัมต่อดินเหนียวเปียก 1 ลูกบาศก์เมตร

#### 2) เสาแกนกลาง (Core Stiffness Pile)

- เหล็กกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 4.0 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร ภาพที่ 3.5
- เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I ขนาด  $0.18 \times 0.18$  ยาว 6 เมตร ภาพที่ 3.6
- เหล็ก H-Beam ขนาด  $0.175 \times 0.175 \times 7.5 \times 11$  มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร ภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.5 เหล็กกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 4.0 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร



ภาพที่ 3.6 เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัว I ขนาด  $0.180 \times 0.18$  ยาว 6 เมตร



ภาพที่ 3.7 เหล็ก H-Beam ขนาด  $0.175 \times 0.175 \times 7.5 \times 11$  มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร

### 3.6.3 การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ จะก่อสร้างด้วยระบบเปียกความดันต่ำ โดยเมื่อติดตั้งระบบต่างๆเรียบร้อยแล้วจะทำการปล่อยน้ำปูนเข้าสู่ระบบเพื่อตรวจสอบการไหลเวียนภายในส่วนต่างๆ รวมทั้งรูที่ปลายก้านเจาะด้วย ต้องทำการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันการอุดตันและต้องทำการสอบเทียบตาชั่งและเครื่องมือต่างๆเพื่อให้อัตราส่วนผสมมีความถูกต้อง เมื่อระบบดังกล่าวเสร็จสมบูรณ์แล้วจะทำการผสมปูน โดยรถเจาะจะเคลื่อนเข้ามาในตำแหน่งที่จะทำการก่อสร้าง DCM และ SDCM Column ต่อไป การก่อสร้างจะก่อสร้างด้วยระบบเปียกความดันต่ำ



### 3.6.4 ทดสอบ Unconfined Compression Test

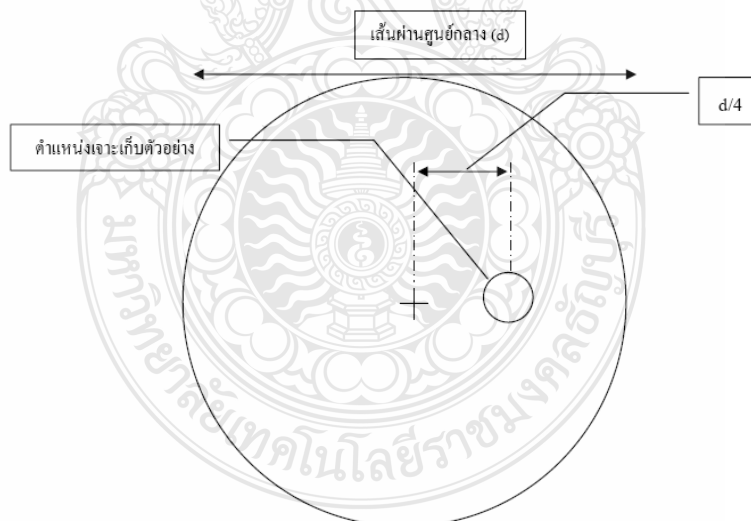
ทดสอบ Unconfined Compression Test ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำการก่อสร้างจริงมีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบคุณภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำการก่อสร้างแล้วเสร็จให้มีคุณภาพเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ โดยมีวิธีและอุปกรณ์ดังนี้

#### 1) อุปกรณ์

- เครื่องเจาะเก็บตัวอย่าง (rotary drilling machine)
- ท่อ PVC เก็บตัวอย่าง
- เครื่องตัดตัวอย่าง (Cutting machine)
- อุปกรณ์ทดสอบ Unconfined Compression Test

#### 2) การเจาะเก็บตัวอย่าง

เมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำการก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วมีอายุบ่มตามข้อกำหนดที่ 28 วัน ทำการเจาะเก็บตัวอย่าง (Coring) ตัวอย่างเสาเข็มด้วยหัวเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.5 เซนติเมตร ต่อเนื่องตลอดความยาว 7 เมตร โดยทั่วไปตำแหน่งที่ทำการเจาะจะอยู่ห่างจากศูนย์กลางของเสาเข็มประมาณ 10 – 15 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งการเจาะเก็บตัวอย่าง

### 3.7 การเตรียมพื้นที่และเครื่องมือ

#### 3.7.1 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว

##### 1) Linear variable differential transformer (LVDT)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของเสาเข็มที่เหนือระดับผิวดินขึ้นมา จำเป็นต้องติดตั้งให้ตรงกับแนวแกนของแรงกระทำ ปลายของ LVDT จะติดอยู่กับหัวเสาเข็ม เป็นเครื่องมือที่วัดค่าได้ละเอียด 0.001 เซนติเมตร และจะแสดงผลออกทาง Data Logger ในการทดสอบนี้เลือกใช้ LVDT ที่มีความยาวซึ่งสามารถวัดค่าได้ 10 เซนติเมตรดังภาพที่ 3.9 แต่จะเลือกใช้ขนาดเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับระยะเคลื่อนตัวทางราบของเสาเข็มแต่ละประเภท



ภาพที่ 3.9 LVDT พร้อมอุปกรณ์เสริมเพื่อการติดตั้ง

##### 2) Digitilt Incliner

เป็นเครื่องมือสำรวจที่มีความละเอียดสูง ใช้สำรวจวัดการเคลื่อนตัวใต้ดิน หรือการเปลี่ยนแปลง การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดการไหล, เขื่อนดินและเชิงลาด เป็นต้น ในการวัดการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ระดับผิวดิน โดยปลายด้านของ Dial Gage จะติดกับผิวของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งอยู่สูงจากผิวดินประมาณ 0.10 เมตร

ชุดเครื่องมือวัด เสาเข็มดินซีเมนต์เครื่องมือวัด Digitilt Incliner ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ 4 ชิ้นด้วยกัน คือ เซ็นเซอร์ (Sensor) ดิจิตอลอินดิเคเตอร์ (Digital indicator) อิเล็กทริกเคเบิล (Electric Cable) Incliner Casing

- เซ็นเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่จะทำให้เกิดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสัมพันธ์กับมุมเอียงจากแนวตั้งของตัวเซ็นเซอร์เอง เซ็นเซอร์จะถูกติดตั้งกับปลายด้านหนึ่งของอิลคตริกเคเบิล และจะถูกหย่อนลงใน Inclinomter Casing อลูมิเนียมหรือพลาสติก ซึ่งInclinomter Casing จะถูกติดตั้งในหลุมที่เจาะลงไปในดิน หรือ ติดกับโครงสร้าง เซ็นเตอร์จะถูกควบคุมการเดินทางด้วยร่องด้านในท่อค้ำกันเรียกว่า Casing Grove 4 ช่องที่เท่า ๆ กัน อยู่ภายในท่อค้ำกัน เพื่อจะควบคุมทิศทางการวางตัวของเซ็นเตอร์ ที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ ภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เซ็นเซอร์ ที่ใช้ทำการทดสอบ

- ดิจิตอลอินดิเคเตอร์ เป็นอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่รีชาร์จได้ขนาด 6 โวลต์ , ควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ และแสดงผลเป็นระบบดิจิตอล จากแนวตั้งของเซ็นเตอร์ตามแนว Inclinomter Casing ในทิศทางของ A และ B ภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ดิจิตอลอินดิเคเตอร์

- อิเล็กตริกเคเบิล มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 10.7 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย เชือกป็นเป็นเกลียว 6 เส้น ตัวนำทองแดง และมียางหุ้ม ยังมีเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร อยู่ระหว่างตัวนำแกนกลาง และยางหุ้ม เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงความยาวน้อยที่สุด สีของ ยางเทียมที่ถูกทำขึ้นมาจะติดกับसानเคเบิลในแต่ละช่วง ๆ ละ 0.5 เมตร ตลอดความยาวสีแดงแสดงช่วง ละ 1 เมตร สีเหลืองเป็นช่วงละ 0.5 เมตร โดยแต่ละจุดกำหนดระยะทางไปถึงจุดกึ่งกลางระหว่างล้อของ เซ็นเซอร์อิเล็กตริกเคเบิลติดกับเซ็นเซอร์ โดยตัวท่อที่กันน้ำได้ ภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 อิเล็กตริกเคเบิล

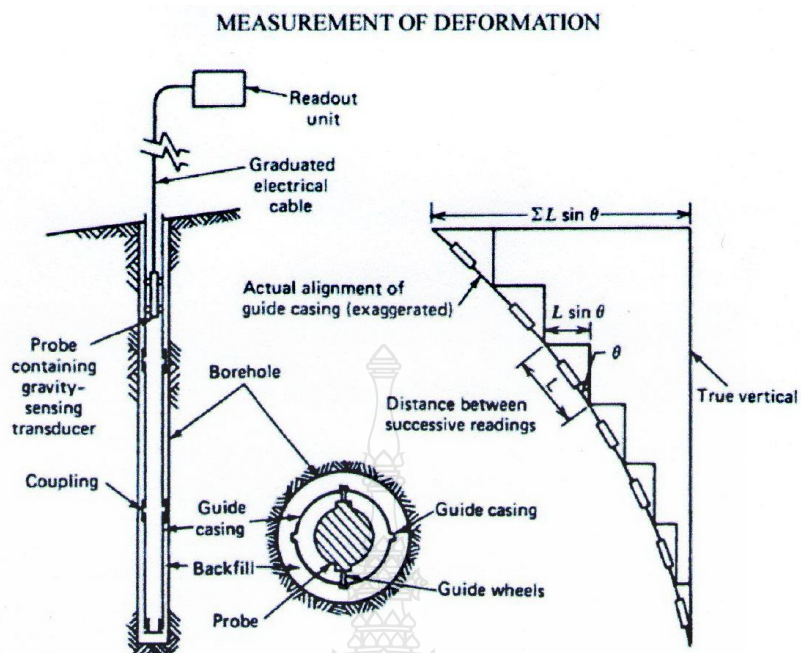
- Inclinomenter Casing จะเป็นท่อกันดินบีบตัว และภายในมีร่องสำหรับให้ เซ็นเซอร์วิ่ง Inclinomenter Casing มีอยู่ 2 ชนิด คือ Inclinomenter Casing ที่ทำจากอลูมิเนียม และ พลาสติก แล้วแต่ละชนิดก็จะมีหลายขนาดแล้วแต่จะเลือกใช้งาน งานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ Inclinomenter Casing ที่เป็นพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก 70 มิลลิเมตร ภายใน 59 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็น เส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่ เหมาะกับงานวัดการเคลื่อนตัวที่ต้องการความละเอียดสูง ภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.13 Inclinometer Casing ที่ใช้ทำการทดสอบ

ตารางสำหรับบันทึกข้อมูล ข้อมูลที่อ่านจะถูกบันทึกบนตารางนี้ในตารางบันทึกข้อมูลจะมี 2 สดมภ์ ชื่อ A สำหรับส่วนประกอบของค่า A และ B สำหรับส่วนประกอบของค่า B ก่อนที่ค่าแต่ละค่าจะถูกบันทึก ต้องเติมค่าระยะทางแต่ละช่วงที่จะวัดซึ่งจะเป็นตัวควบคุมระยะที่จะหยุดของเซ็นเซอร์ ที่สดมภ์ Depth โดยมีช่วงระยะห่างกัน 0.5 เมตร การอ่านข้อมูลครั้งแรกต้องหย่อนสายเคเบิลที่ติดตั้งเซ็นเซอร์แล้วลงไปในที่กุ่มกันในที่ทางที่ถูกต้องให้ได้ความลึกที่ต้องการจากนั้นก็เริ่มอ่านค่าจากดิจิตอลอินดิเคเตอร์ ได้ข้อมูลช่องซ้ายมือของสดมภ์ A และ B ใช้สำหรับบันทึกค่าที่อ่านได้ครั้งแรกของเซ็นเซอร์จะเป็นค่า  $A_0$  และ  $B_0$  (เมื่อสับสวิชต์บนดิจิตอลอินดิเคเตอร์มาที่ B) บันทึกจากล่างขึ้นบน ช่องขวามือจะเป็น  $A_{180}$  และ  $B_{180}$  และใช้สำหรับบันทึกค่าที่ได้จากการกลับทิศทางของเซ็นเตอร์

การอ่านข้อมูลที่ระดับเดิม 2 ครั้ง ใช้ด้วยการหมุนเซ็นเซอร์เป็นมุม  $180^\circ$  เพื่อที่จะไม่ให้มีหรือลดความผิดพลาดจากความไม่เรียบร้อยของท่อคุ่มกัน ตำแหน่งของเซ็นเซอร์และทบทวนค่าที่อ่านได้ว่าบันทึกถูกต้องหรือไม่ การตรวจสอบข้อมูลสามารถสอบถามโดยบวกค่าที่อ่านได้ที่ตรงข้ามกัน ( $180^\circ$ ) ในแต่ละความลึก ผลลัพธ์ที่ได้คือผลรวม ต้องอยู่ในช่วง  $\pm 10$  หรือ  $\pm 20$  หน่วยของค่าเฉลี่ยของผลรวมทั้งหมด ซึ่งดีที่สุดผลรวมได้คือ 0



ภาพที่ 3.14 หลักการของเครื่องมือ Inclinometer

- คานอ้างอิง (Reference Beam) ใช้เป็นเหล็กรูปพรรณตัว H 300 x 300 วางพาดทับบนเสาเข็ม I 25x25 จำนวน 4 ท่อน ใช้เป็นฐานอ้างอิงเพื่อติดตั้ง LVDT วัดการเคลื่อนตัว ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 ลักษณะการวาง Reference Beam

### 3.7.2 ระบบให้แรงและวัดค่าแรง

#### 1) Hydraulic Jack

ในการให้แรงกระทำเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นการให้แรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามาในการทดสอบนี้ใช้ Hydraulic Jack ขนาด 100 ตัน ระยะชัก 20 เซนติเมตรดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 Hydraulic Jack ที่ใช้ทำการทดสอบ

#### 2) Tools and Pump

ปั๊มไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมการให้แรงดังภาพที่ 3.17 จะทำหน้าที่ขับเคลื่อนน้ำมันให้แก่ Hydraulic Jack



ภาพที่ 3.17 Tools and Pump ที่ใช้ทำการทดสอบ

### 3) Load Cell

ในการให้แรงกระทำเสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นการให้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา จึงต้องใช้ Load Cell ที่สามารถอ่านค่าได้ทั้งแรงดึงและแรงอัด ในการทดสอบนี้ใช้ Load Cell ขนาด 100 ตัน ดังภาพที่ 3.18 เป็นตัวอ่านค่าและควบคุมการให้แรง โดยต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์เพื่อหาค่าปรับแก้คงที่ C ก่อนที่จะนำมาใช้งานร่วมกับ Data Logger โดยผลการทดสอบ Load Cell ที่ใช้ทำการทดสอบได้ค่า C เท่ากับ 5



ภาพที่ 3.18 Load Cell ที่ใช้ทำการทดสอบ

### 4) Data Logger

ค่าแรงและการเคลื่อนตัวจะพิมพ์ออกมาผ่าน Data Logger ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 Data Logger ที่ใช้ทำการทดสอบ



### 3.7.3 ระบบแรงปฏิกิริยา (Reaction System)

#### 1) การจัดพื้นที่

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการให้แรงกระทำเข้าไปเข้ามาแก่เสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนกลางด้วยวัสดุประเภทต่างๆ ซึ่งได้ออกแบบลักษณะการให้แรงกระทำโดย Hydraulic Jack จากทางด้านเดียวของเสาเข็ม ระบบแรงปฏิกิริยาที่ใช้จะแตกต่างกับการทดสอบในแนวดิ่ง โดยน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบการรับแรงทางด้านข้างจะน้อยกว่าแรงที่กระทำในแนวดิ่งมาก แต่ถึงอย่างไรฐาน Reaction Wall ที่จะรองรับ Hydraulic Jack ดังกล่าวจะต้องมีความมั่นคง สามารถรับแรงอัดและแรงดึงได้ โดยที่ไม่มีการเคลื่อนตัว การทดสอบในสนามนี้ขุดเปิดพื้นที่บริเวณหัวของเสาเข็มทั้ง 8 ต้น เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 การขุดเปิดหัวเสาเข็มและเตรียมพื้นที่

#### 2) การฝังท่อ Inclinerter Casing

เพื่อใช้วัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยในการทดสอบนี้จะทำการฝังท่อ Inclinerter Casing จำนวน 4 ต้น โดยแต่ละต้นจะทำการฝัง Inclinerter Casing ลึก 7 เมตร ดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 การฝังท่อ Incliner Casing

### 3) การหล่อคอนกรีตกรอบหัวเสาเข็ม

เพื่อความสะดวกในการที่จะต่ออุปกรณ์ทดสอบยึดติดกับหัวเสาเข็ม จึงต้องทำการเทคอนกรีตกรอบบริเวณหัวเสาเข็มเอาไว้ ในการทดสอบนี้ได้ทำการหล่อคอนกรีตกรอบหัวเสาเข็มเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $0.80 \times 0.80$  เมตร และสูง  $0.60$  เมตร ดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 การหล่อคอนกรีตกรอบหัวเสาเข็ม

### 4) Reaction Wall

ออกแบบโดยนำเสาเข็มขนาด  $0.30 \times 0.30$  เมตร มาวางซ้อนกัน 3 ชั้นเป็นลักษณะของ Reaction Wall และปิดผิวกำแพงด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา  $1$  นิ้ว ดังภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 ลักษณะของ Reaction Wall ที่ใช้ทำการทดสอบ

#### 5) Bearing Plate

เป็นแผ่นเหล็กที่ใช้ในการกระจายแรงจากฐานกระบอกร Hydraulic Jack ไปยัง Reaction Wall ฐานของ Hydraulic Jack ใช้ Bearing Plates หนา 1 นิ้วดังภาพที่ 3.24 ซึ่งจะเชื่อมติดกับ Reaction Wall ผิวหน้าเหล็กที่ได้เตรียมไว้ในขั้นตอนของการเตรียมพื้นที่แล้ว โดยใช้ Bolt และ Nut ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{3}{4}$  นิ้ว จำนวน 4 ชุด



ภาพที่ 3.24 ลักษณะ Bearing Plate ที่จะกระจายแรงไปยัง Reaction Wall

#### 6) Struts

เป็นท่อนเหล็กที่ใช้ถ่ายแรงจาก Hydraulic Jack ไปยัง Load Cell ไปในทิศทางกรให้แรงไปยังเสาเข็มดินซีเมนต์ดังภาพที่ 3.25 โดยจะต้องมีขนาดและความแข็งแรงที่เพียงพอ เพื่อป้องกันการแตกหักหรือเกิดการบิดตัวขณะให้แรงกระทำเข้าไปเข้ามา ซึ่งการทดสอบนี้ได้ใช้แท่งเหล็กเหล็กทำเกลียวลดขนาด ซึ่งได้ออกแบบให้รับกำลังในการทดสอบได้อย่างปลอดภัย



ภาพที่ 3.25 ลักษณะ Struts ที่ใช้ต่อเชื่อมอุปกรณ์และถ่ายแรง

#### 7) การติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบกับเสาเข็ม

ใช้เหล็กทรงรางน้ำชนิดผลิตรีออน(Channel) ขนาด 200 × 90 มิลลิเมตร รััดหัวเสาเข็มด้วยท่อนเหล็กเกลียวขนาดผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น ดังภาพที่ 3.26

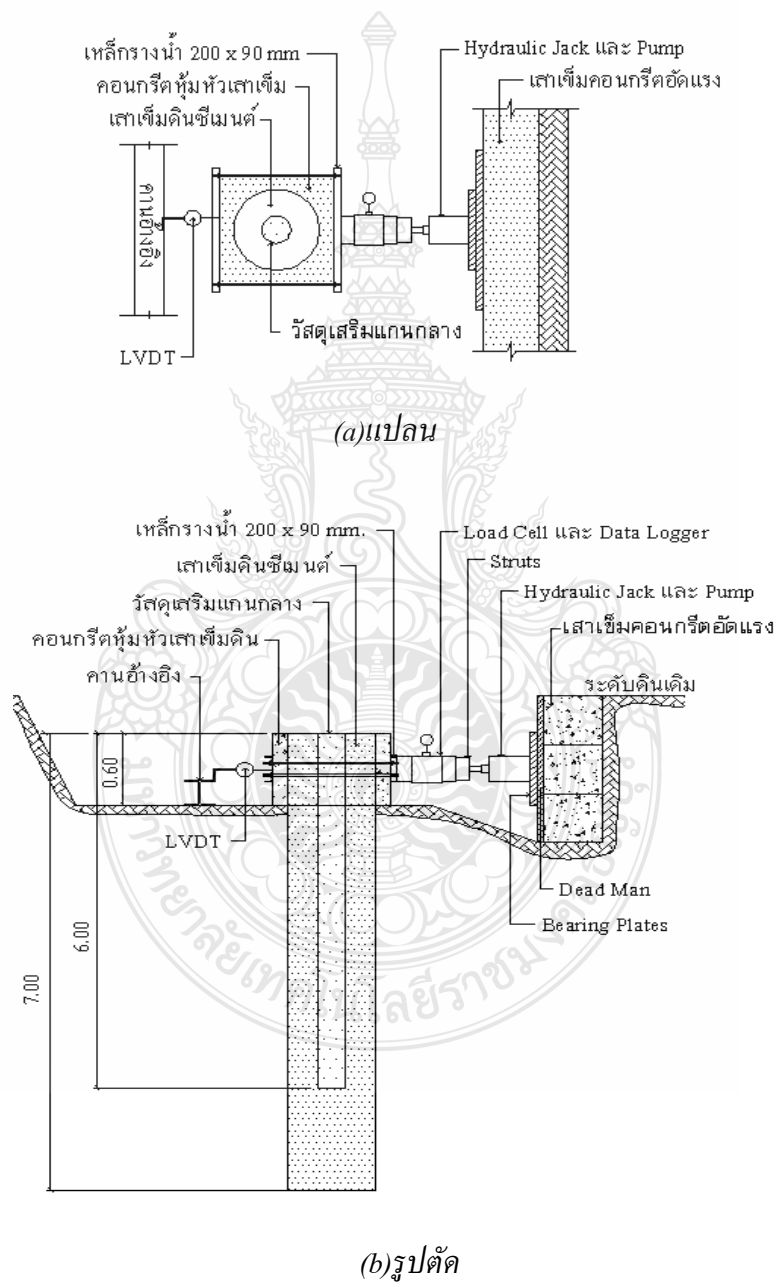


ภาพที่ 3.26 ยึดหัวเสาเข็มเข้ากับอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบ

### 3.8 การทดสอบ SDCM Column การรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา(Cyclic Load)

#### 3.8.1 ระบบแรง

การทดสอบการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา Cyclic Load ในแนวราบของ SDCM Column โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีทดสอบแบบ Standard Loading Procedures ตามมาตรฐาน ASTM D 3966 ดังภาพที่ 3.27



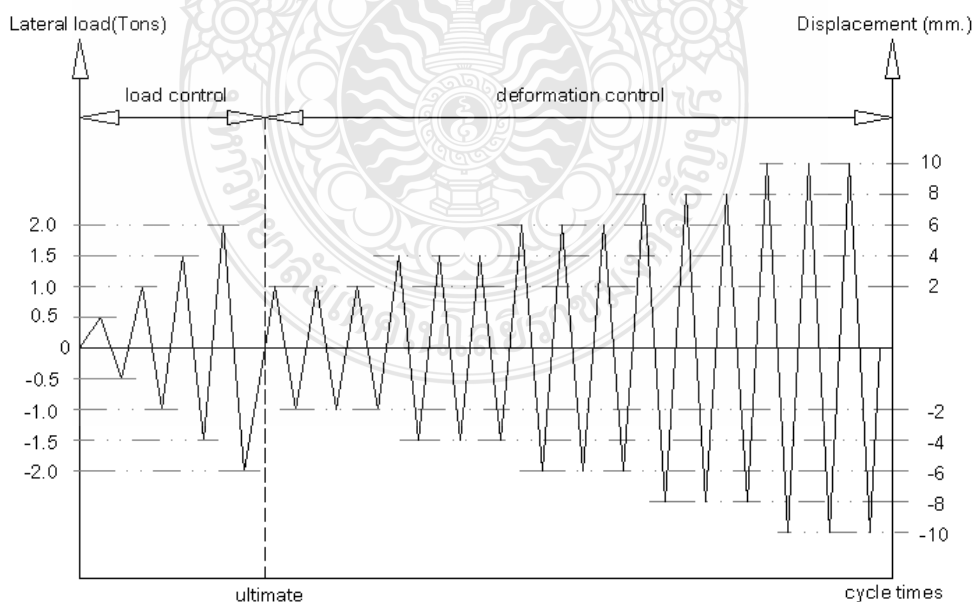
ภาพที่ 3.27 ระบบแรงปฏิบัติการ DEADMAN ตามมาตรฐาน ASTM D 3966

### 3.8.2 การให้แรง

การทดสอบจะให้น้ำหนักเป็นรอบๆ ซึ่งแต่ละรอบจะมีการเพิ่มน้ำหนักเป็นอัตราคงที่ โดยการประมาณพิจารณาจากความแข็งแรงของแกนเสาเข็มในแต่ละแบบที่ใช้ทำการทดสอบ ในการทดสอบช่วงแรกๆ จะใช้แรงเป็นตัวกำหนดทางด้านบวกและทางด้านลบเท่าๆกันในแต่ละรอบ และเพิ่มอัตราการให้แรงทั้งสองด้านเท่าๆกันในรอบต่อไป ให้แรงควบคุมไปจนถึงประมาณเข้าใกล้จุดครากของเสาเข็ม จากนั้นจะใช้ระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเป็นตัวควบคุมในแต่ละรอบ โดยที่ระยะทางด้านบวกและทางด้านลบจะใช้ระยะควบคุมเท่าๆกัน และจะเพิ่มขึ้นในอัตราเท่าๆกันในรอบต่อไป โดยที่ระยะเคลื่อนตัวหนึ่งค่าจะทดสอบสามรอบ ทำจนกว่าเสาเข็มจะวิบัติ และรับกำลังลดลง 15 – 20 เปอร์เซ็นต์ของรอบที่เสาเข็มรับกำลังสูงสุด จึงหยุดทำการทดสอบ การให้แรงในการทดสอบเสาเข็มในแต่ละแบบ ได้ทำการให้แรงดังนี้

#### 1) เสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column)

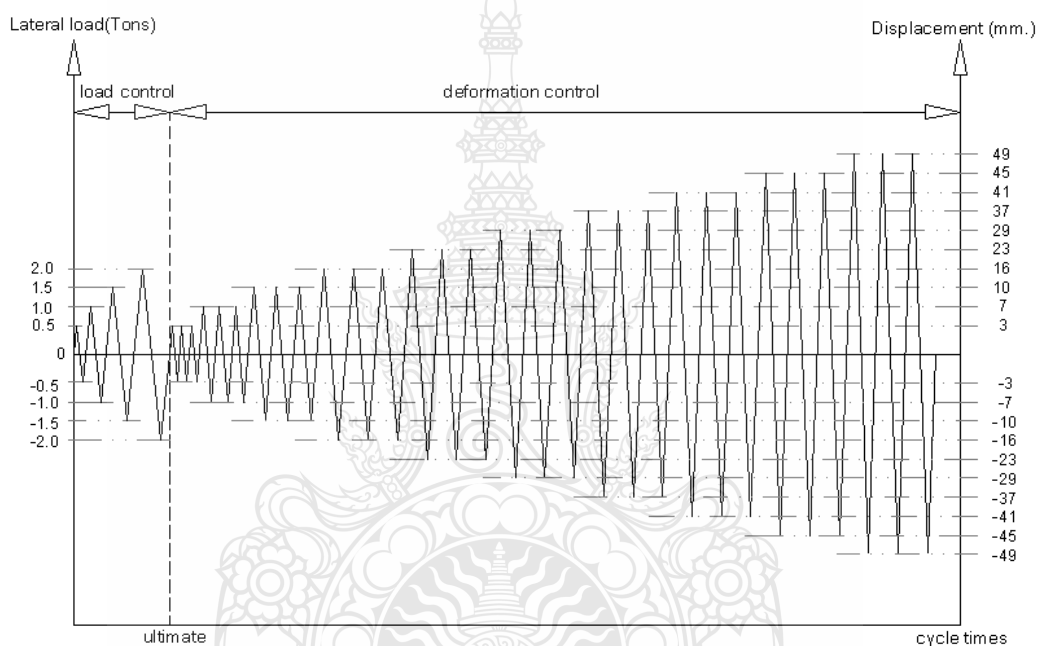
สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) ซึ่งไม่มีแกนเพื่อการเสริมกำลังใดๆ ได้ทำการประมาณค่ากำลังที่จุดครากของเสาเข็มจากการออกแบบเสาเข็มได้ที่ 2 ตัน ในการทดสอบช่วงแรงจึงพิจารณาการให้แรงเพิ่มขึ้นรอบละ 0.5 ตัน ทั้งทางด้านบวกและลบไปจนถึง 1.5 ตันซึ่งเข้าใกล้จุดคราก จากนั้นได้พิจารณากำหนดรอบด้วยระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้นช่วงละ 2 มิลลิเมตร เพื่อการกระจายพลังงาน โดยหนึ่งช่วงระยะเคลื่อนตัวจะให้แรง 3 รอบ ในการทดสอบเสาเข็มชนิดนี้ได้เริ่มทดสอบที่ 2 ไปจนถึงระยะเคลื่อนตัวที่ 10 มิลลิเมตรดังภาพที่ 3.28 จึงหยุดทำการทดสอบ



ภาพที่ 3.28 ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์

### 2) เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตอัดแรง (SDCM Column)

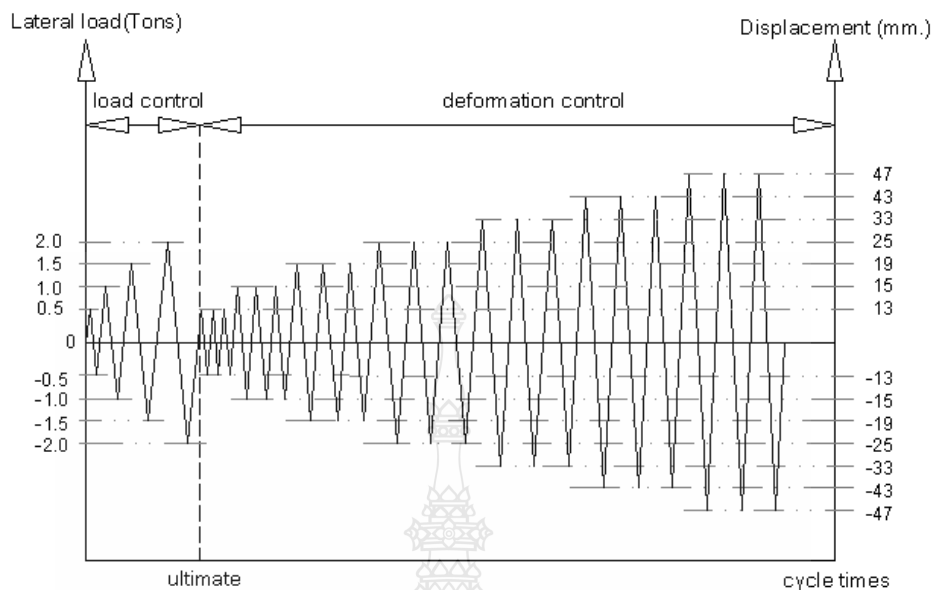
สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ (SDCM Column) ซึ่งได้ทำการเสริมแกนเสาด้วยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเพื่อการเสริมกำลังนั้น ผู้วิจัยได้ทำการประมาณค่ากำลังที่จุดครากของเสาเข็มที่ 2.5 ตัน ในการทดสอบช่วงแรงจึงพิจารณาการให้แรงเพิ่มขึ้นรอบละ 0.5 ตัน ทั้งทางด้านบวกและลบไปจนถึง 2 ตัน ซึ่งเข้าใกล้จุดคราก จากนั้นได้พิจารณากำหนดรอบด้วยระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3.29 ซึ่งหนึ่งช่วงระยะเคลื่อนตัวจะให้แรง 3 รอบ ในการทดสอบเสาเข็มชนิดนี้ได้ทดสอบโดยเริ่มต้นที่ 3 มิลลิเมตร ไปจนถึงระยะเคลื่อนตัวที่ 49 มิลลิเมตร จึงหยุดทำการทดสอบ



ภาพที่ 3.29 ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตอัดแรง

### 3) เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนท่อเหล็กกลม (SDCM Column)

สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ (SDCM Column) ซึ่งได้ทำการเสริมแกนเสาด้วยท่อเหล็กกลมเพื่อการเสริมกำลังนั้น เนื่องจากเป็นงานวิจัยใหม่จึงไม่มีทฤษฎีในการออกแบบใดๆที่จะรองรับ ผู้วิจัยจึงได้ทำการประมาณค่ากำลังที่จุดครากของเสาเข็ม จากการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ธรรมดาที่ 2.5 ตัน ในการทดสอบช่วงแรงจึงพิจารณาการให้แรงเพิ่มขึ้นรอบละ 0.5 ตัน ทั้งทางด้านบวกและลบไปจนถึง 2.5 ตัน ซึ่งน่าจะถึงจุดคราก จากนั้นได้พิจารณากำหนดรอบด้วยระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 3.30 ซึ่งหนึ่งช่วงระยะเคลื่อนตัวจะให้แรง 3 รอบ ในการทดสอบเสาเข็มชนิดนี้ได้ทดสอบโดยเริ่มต้นที่ 13 มิลลิเมตร ไปจนถึงระยะเคลื่อนตัวที่ 47 มิลลิเมตร จึงหยุดทำการทดสอบ

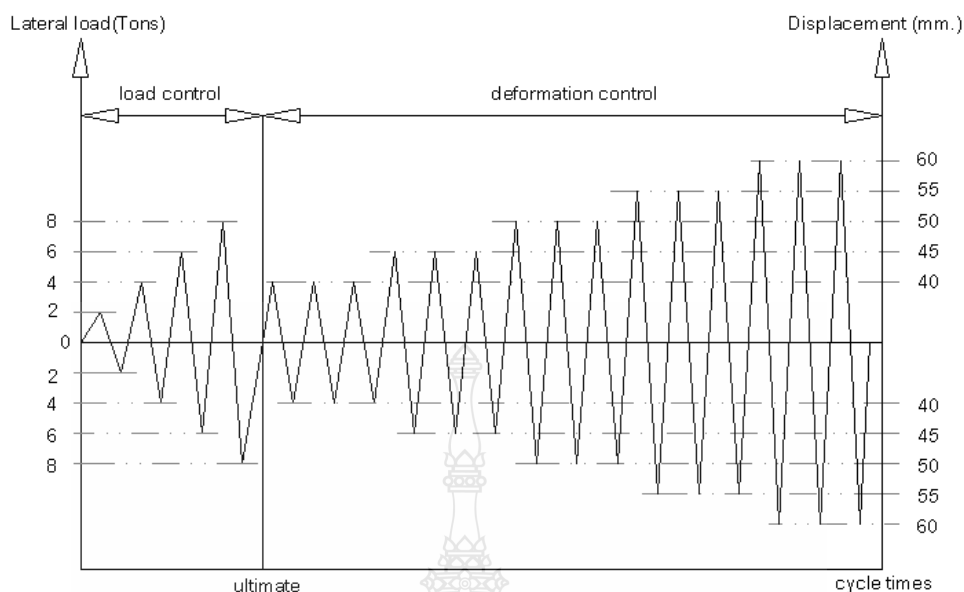


ภาพที่ 3.30 ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนท่อเหล็กกลม

#### 4) เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน H - Beam (SDCM Column)

สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ (SDCM Column) ซึ่งได้ทำการเสริมแกนเสาด้วย H - Beam เพื่อการเสริมกำลังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการประมาณค่ากำลังที่จุดครากของเสาเข็ม จากหัวข้อ 2.2.6 การนำเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมเหล็กไปใช้ในงานก่อสร้างกำแพงกันดิน ได้การวิบัติต่ำสุดที่ 8 ตัน ในการทดสอบช่วงแรงจึงพิจารณาการให้แรงเพิ่มขึ้นรอบละ 0.5 ตันทั้งทางด้านบวกและลบไปจนถึง 8 ตัน ซึ่งเข้าใกล้จุดคราก จากนั้นได้พิจารณากำหนดรอบด้วยระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้นช่วงละ 5 มิลลิเมตรดังภาพที่ 3.31 เพื่อดูการกระจายพลังงาน ซึ่งหนึ่งช่วงระยะเคลื่อนตัวจะให้แรง 3 รอบ ในการทดสอบเสาเข็มชนิดนี้ได้ทดสอบโดยเริ่มต้นที่ 40 มิลลิเมตรไปจนถึงระยะเคลื่อนตัวที่ 55 มิลลิเมตร จึงหยุดทำการทดสอบ





ภาพที่ 3.31 ระบบการให้แรงต่อเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน H – Beam

### 3.9 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

เมื่อทดสอบการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบเข้าไปเข้ามาใน DCM และ SDCM Column จากแปลงทดสอบแล้วเสร็จจะนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์และสรุปผลในกรณีเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีเสริมแกนและเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนประเภทต่างๆ โดยจะเปรียบเทียบการรับกำลังทางด้านข้าง , ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและนำผลการทดสอบทั้งหมดมาวิเคราะห์หาค่า The rigidity attenuation และค่า Energy dissipation capacity ส่วนค่าที่ได้จาก LVDT และ Digital Inclinator จะนำมาวิเคราะห์ผลการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้งต่อไป สุดท้ายจะสรุปผลการทดสอบเป็นภาพรวมของ DCM และ SDCM ที่มีการเสริมแกนประเภทต่างๆว่าเสริมแกนประเภทไหนรับแรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามาได้มากที่สุดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานลักษณะไหนเพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุนและประโยชน์ที่ได้รับต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนกลางด้วยวัสดุประเภทต่างๆ เพื่อเพิ่มการรับแรงทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา ให้เสาเข็มดินซีเมนต์ โดยใช้บริเวณหน่วยซ่อมบำรุงและเก็บเครื่องจักรของบริษัท ปันจันไทย จำกัด และบริษัท ไทย เทน็อกซ์ จำกัด เป็นสถานที่ทำการทดสอบ ในการทดสอบได้ทำการก่อสร้าง SDCM Column จำนวน 8 ต้น โดยแบ่งเป็น SDCM Column จำนวน 6 ต้น และ DCM จำนวน 2 ต้น โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ทุกต้นจะฝังอยู่ในชั้นดินอ่อน (Soft Clay) ที่ความลึก 7.00 เมตร และหลังจากดำเนินการก่อสร้างเสร็จ จะทำการเปิดหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ลึกประมาณ 0.60 เมตร เพื่อทำการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ โดยผลการทดสอบสามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินในห้องปฏิบัติการ

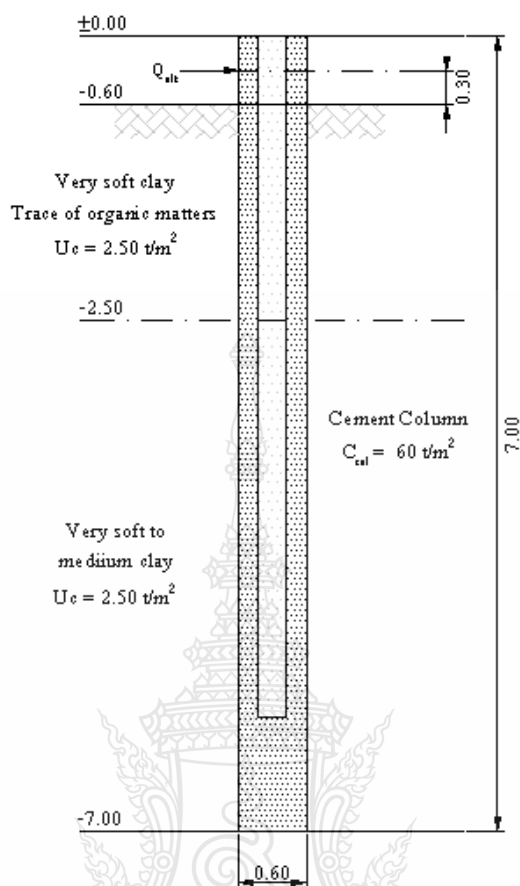
การเจาะสำรวจชั้นดินได้ทำการสำรวจจำนวน 2 หลุม โดยเปิดหน้าลึกลงไปทีละระดับ 1.20 เมตร สามารถแบ่งชั้นดินได้ 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะแบ่งดังนี้

ชั้น A ช่วง 1.20-14.00 เมตร ลักษณะชั้นดินที่ระดับความลึก 2.50 เมตร เป็นชั้นดินตะกอน (very soft dark grey silty clay) ถัดลงมาเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ลึกประมาณ 11.50 เมตร ได้ค่า  $U_c$  (Unconfined Compressive Strength) เฉลี่ยเท่ากับ 0.25 ksc

ชั้น B ช่วง 14.00-25.00 เมตร จะเป็นชั้นดิน Very soft to medium clay ลึกประมาณ 11 เมตร ได้ค่า  $U_c$  (Unconfined Compressive Strength) เฉลี่ยเท่ากับ 2.22 ksc

ชั้น C ช่วง 25.00-30.50 เมตร จะเป็นชั้นดิน Very stiff clay ลึกประมาณ 5.50 เมตร ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานได้แสดงอยู่ในภาพภาคผนวก ค

จากการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนกลางพบเสาเข็มฝังอยู่ในชั้น A ค่า Unconfined Compressive Strength ( $U_c$ ) มีค่าประมาณ 0.25 ksc และค่า Unconfined Compressive Test ของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าประมาณ  $60 \text{ t/m}^2$  การพิจารณาความต้านทานด้านข้างประลัยสูงสุดพบว่าการเคลื่อนตัวของดินขณะพังทลายจะอยู่ที่ความลึกประมาณ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มดินซีเมนต์ เพราะเสาเข็มเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทดสอบเป็นเสาเข็มยาวความต้านทานด้านข้างประลัยจะถูกควบคุมด้วยกำลังครากของหน้าตัดเสาเข็มเสาเข็มดินซีเมนต์ ภาพที่ 4.1

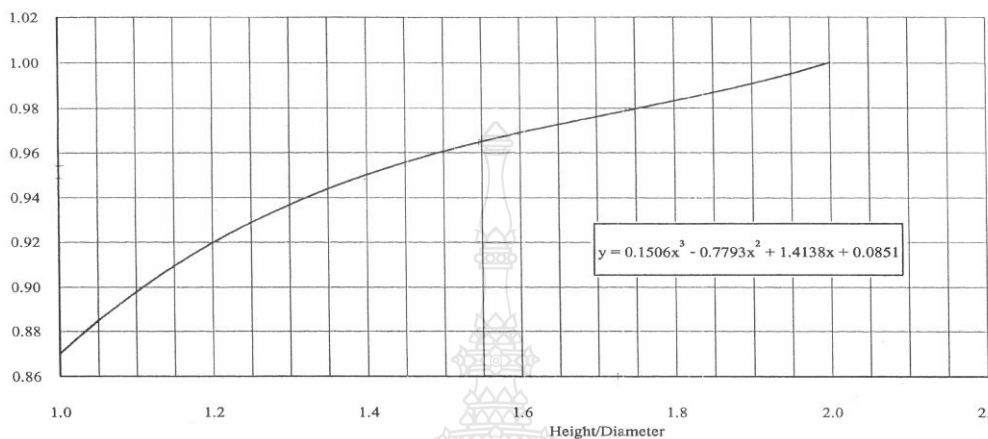


ภาพที่ 4.1 การฝังตัวของเสาเข็มในชั้นดินที่ระดับต่างๆ

#### 4.2 ผลการเจาะแก่นเสาเข็มดินซีเมนต์

สำหรับการทดสอบ Unconfined Compression Test ทำตามมาตรฐาน ASTM D 2166 – 85 เพื่อหาค่ากำลังต้านทานและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของตัวอย่าง งานวิจัยนี้ได้เจาะเก็บมา 3 ตัวอย่าง/เมตร และสุ่มเก็บตัวอย่างเสา 4 ใน 8 ต้น ได้แก่ C1, C4, C5 และ C8 ได้จำนวน 84 ตัวอย่าง โดยเลือกทดสอบเมตรละ 1 ตัวอย่าง จากตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละเมตร จะถูกนำมาตัดหัวท้ายให้เรียบโดยมีความยาวเป็น (ประมาณ) 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง และวัดขนาดพร้อมกับชั่งน้ำหนัก กรณีที่ความยาวของตัวอย่างน้อยกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจะใช้ค่าปรับแก้ตามอัตราส่วนดังแสดงในภาพที่ 4.2 จากนั้นตัวอย่างจะถูกเชื่อมด้วยแรงกดพร้อมกับการวัดการเคลื่อนที่ในแนวแกนและแรงกดในแนวตั้งด้วย LVDT และ Load Cell โดยใช้อัตราเร็วในการกดประมาณ 1.5% ต่อนาที หรือ 2.0 มม./นาที

หลังจากทดสอบเสร็จจะนำตัวอย่างไปอบอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหาความชื้น เพื่อนำมาทดสอบหาค่า Undrained Shear Strength โดยวิธี Unconfined Compression Test รวมตัวอย่างที่ทดสอบทั้งสิ้น 28 ตัวอย่างซึ่งได้ค่าแสดงในตารางที่ 4.1-4.4



ภาพที่ 4.2 ค่าปรับแก้กำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C1)

Depth (m)		Test No.	Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Unconfined Compressive Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)
From	To				Before Height Corrected	After Height Corrected			
0	1	C1 - 1	53.54	1663.9	7.83	5.59	0.713	1.10	652.5
1	2	C1 - 2	131.47	1375.39	11.13	7.82	0.702	1.45	856
2	3	C1 - 3	135.21	1363.03	10.55	7.44	0.705	1.15	879
3	4	C1 - 4	132.18	1358.26	11.72	8.09	0.690	1.88	689
4	5	C1 - 5	120.09	1402.43	16.48	11.79	0.715	0.80	2354
5	6	C1 - 6	118.33	1402.29	13.15	9.24	0.703	1.93	597
6	7	C1 - 7	108.33	1488.57	11.46	8.11	0.708	1.42	1041

**ตารางที่ 4.2** ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตอัดแรง (C4)

Curing Time 28 days									
Depth (m)		Test No.	Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Unconfined Compressive Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)
From	To				Before Height	After Height			
					Corrected	Corrected			
0	1	C4 - 1	114.49	1380.28	10.2	7.22	0.708	1.04	728
1	2	C4 - 2	129.82	1359.97	9.0	6.22	0.689	1.13	645
2	3	C4 - 3	135.32	1361.78	12.7	8.84	0.695	1.14	1060
3	4	C4 - 4	137.43	1355.63	8.2	5.76	0.701	1.35	632
4	5	C4 - 5	140.64	1352.27	11.3	7.90	0.7	2.13	376
5	6	C4 - 6	104.78	1435.57	8.5	5.96	0.701	0.77	1064
6	7	C4 - 7	133.33	1361.81	13.0	9.19	0.708	1.30	927

**ตารางที่ 4.3** ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน H – Beam (C5)

Curing Time 28 days									
Depth (m)		Test No.	Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Unconfined Compressive Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)
From	To				Before Height	After Height			
					Corrected	Corrected			
0	1	C5 - 1	57.55	1618.91	15.4	10.97	0.712	1.19	1400
1	2	C5 - 2	136.19	1352.05	9.71	6.80	0.700	1.55	539
2	3	C5 - 3	134.09	1345.21	7.55	5.37	0.711	1.19	770
3	4	C5 - 4	126.34	1384.96	10.95	7.56	0.690	1.87	391
4	5	C5 - 5	130.88	1346.65	10.71	7.56	0.705	0.95	939
5	6	C5 - 6	134.83	1364.78	15.43	10.78	0.698	0.96	1455
6	7	C5 - 7	116.26	1385.54	15	10.53	0.702	0.68	2142

**ตารางที่ 4.4** ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C8)

Curing Time 28 days									
Depth (m)		Test No.	Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Unconfined Compressive Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)
From	To				Before Height	After Height			
					Corrected	Corrected			
0	1	C8 - 1	69.91	1575.45	7.81	5.55	0.710	0.79	1115
1	2	C8 - 2	140.11	1352.62	10.69	7.59	0.710	0.52	3340
2	3	C8 - 3	136.22	1344.67	10.16	6.93	0.682	0.85	1154

#### ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Curing Time 28 days									
Depth (m)		Test No.	Water Content (%)	Unconfined Compressive			Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50% $q_u$ (ksc)
From	To			Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength (ksc) Before Height Corrected	Strength (ksc) After Height Corrected			
3	4	C8-4	133.00	1352.46	9.63	6.63	0.708	1.09	1040
4	5	C8-5	122.93	1378.98	7.98	5.58	0.699	1.54	752
5	6	C8-6	105.53	1429.79	7.47	5.24	0.702	0.97	933
6	7	C8-7	129.13	1351.43	17.2	12.06	0.701	0.90	1720

ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test จากตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยค่า Strain ที่กำลังแรงต้านทานสูงสุดมีค่าประมาณ 0.52 – 2.13% สำหรับค่ากำหนดกำลังแรงต้านทาน 6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ทดสอบในสนาม แต่ลดต้นแสดงรายละเอียดในตารางประกอบด้วย อายุของเสาเข็มทดสอบ ความลึก หนอยน้ำหนัก ปริมาณความชื้น ค่ากำลังต้านทาน ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น และ Strain ที่กำลังแรงต้านทานสูงสุด (ภาคผนวก ง) ในการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มทดสอบในสนามจำนวน 4 ต้น ซึ่งเป็นตัวอย่าง สำหรับค่ากำลังแรงต้านทานที่ต้องการ 6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร จำนวน 28 ตัวอย่าง พบว่าทุกตัวอย่างมีค่ากำลังต้านทานสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งจากการทดสอบนี้ถือว่าเป็นไปตามข้อกำหนด

#### 4.3 ผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงด้านข้างแบบเข้าไปขำในสนาม

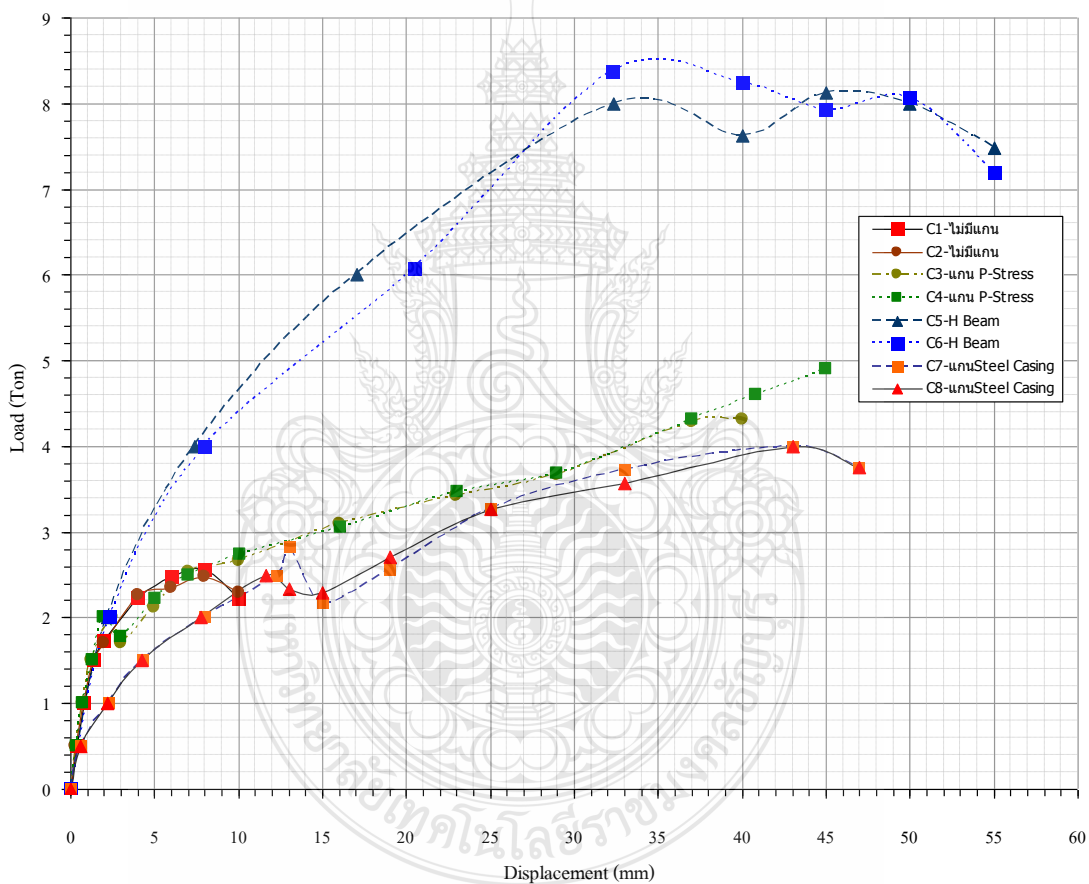
##### 4.3.1 การรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ (SDCM Column)

#### ตารางที่ 4.5 การทดสอบ ค่าแรงสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัว DCM, SDCM Column ในสนาม

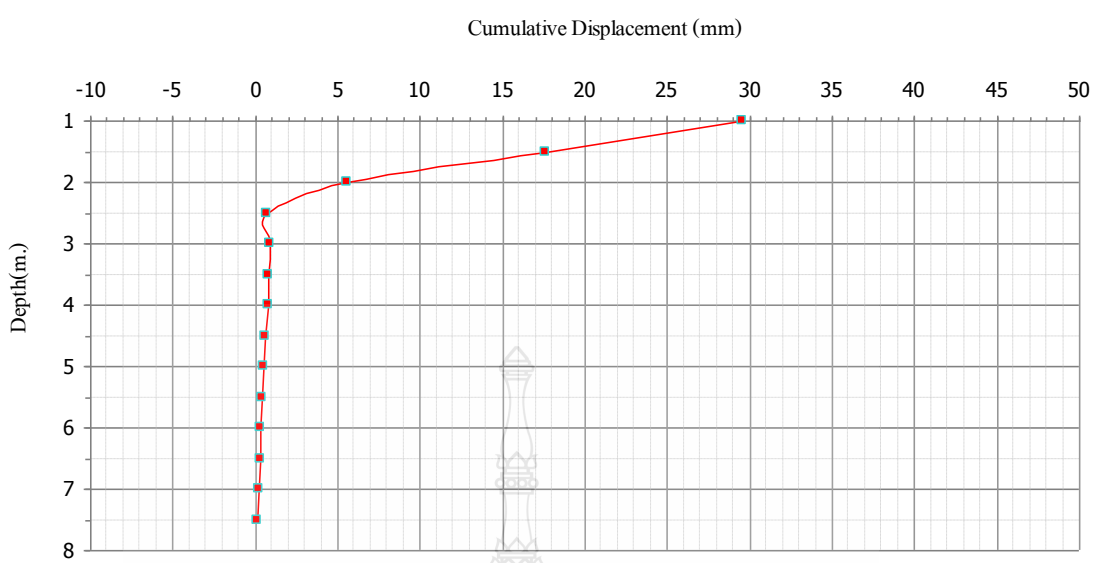
เสาเข็ม	ยาว (เมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	วัสดุเสริมแกน		ความยาววัสดุแกน (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าแรงสูงสุด (ตัน)	ระยะการเคลื่อนตัว (มม.)
			ประเภทวัสดุ	ความยาว (เมตร)				
C1	7.00	0.60	ไม่เสริมแกนกลาง (DCM)	-	-	-	2.57	8.00
C2	7.00	0.60	ไม่เสริมแกนกลาง (DCM)	-	-	-	2.48	8.00
C3	7.00	0.60	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ 0.18x0.18 (SDCM)	6.00	0.86	210.00	4.31	40.00
C4	7.00	0.60	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ 0.18x0.18 (SDCM)	6.00	0.86	210.00	4.91	45.03
C5	7.00	0.60	เหล็ก H-BEAM 175x175 มม. หน้า 40.2 กก./ม. (SDCM)	6.00	0.86	51.21	8.13	45.00
C6	7.00	0.60	เหล็ก H-BEAM 175x175 มม. หน้า 40.2 กก./ม. (SDCM)	6.00	0.86	51.21	8.37	32.27
C7	7.00	0.60	ท่อเหล็กกลม Ø 0.10 ม. (SDCM)	6.00	0.86	31.26	4.00	43.00
C8	7.00	0.60	ท่อเหล็กกลม Ø 0.10 ม. (SDCM)	6.00	0.86	31.26	4.00	43.00

ตารางที่ 4.6 อิทธิพลของขนาดแกนเสาเข็มต่อกำลังรับแรงดัดข้าง

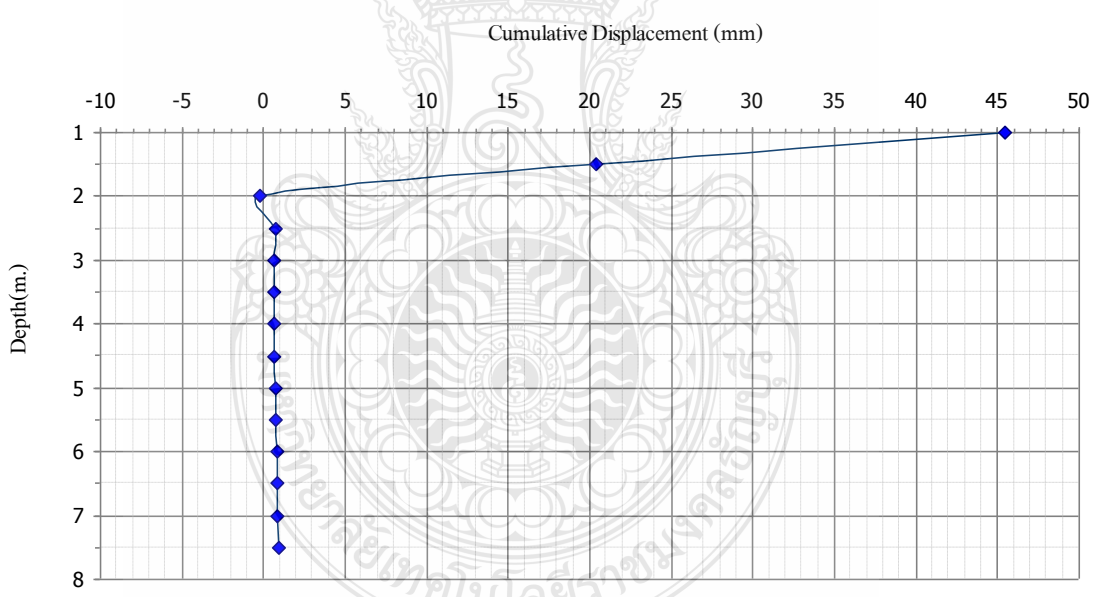
เลขเข็ม	ยาว (เมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	วัสดุเสริมแกน		ความยาววัสดุแกน		ค่าแรงสูงสุด (ตัน)	ค่าแรง SDCM
			ประเภทวัสดุ	ความยาว(เมตร)	ความยาวเลขเข็ม			
C1-C2	7.00	0.60	ไม่เสริมแกนกลาง (DCM)	-	-	2.52	-	
C3-C4	7.00	0.60	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ 0.18x0.18 (SDCM)	6.00	0.86	4.61	1.83	
C5-C6	7.00	0.60	เหล็ก H-BEAM 175x175 มม.หนัก 40.2 กก./ม. (SDCM)	6.00	0.86	8.25	3.27	
C7-C8	7.00	0.60	ท่อเหล็กกลม Ø 0.10 ม. (SDCM)	6.00	0.86	4.00	1.54	



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำเฉลี่ยแต่ละรอบกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ DCM,SDCM ทั้ง 8 หน้าตัด

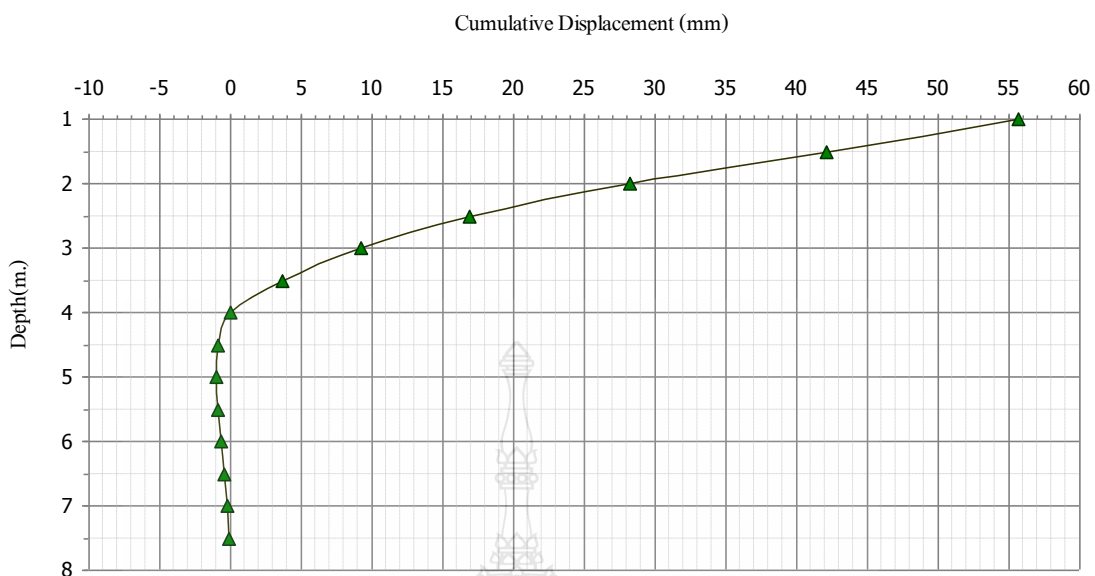


ภาพที่ 4.4 การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มคินซีเมนต์ C1

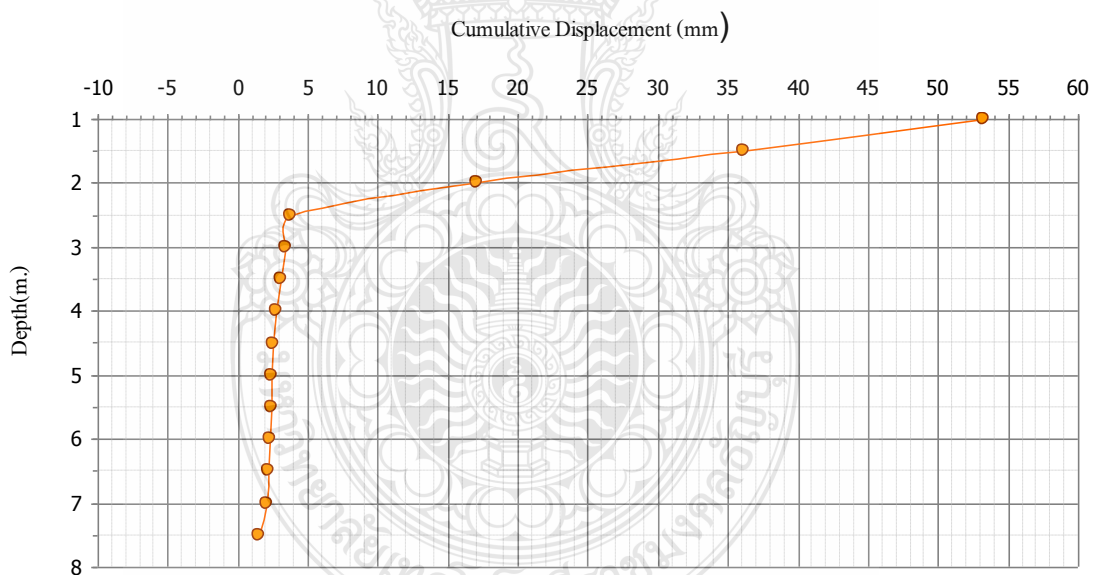


ภาพที่ 4.5 การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มคินซีเมนต์ C4





ภาพที่ 4.6 การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มดินซีเมนต์ C5



ภาพที่ 4.7 การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinator ของเสาเข็มดินซีเมนต์ C8

จากการทดสอบการรับแรงทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาของเสาเข็มดินซีเมนต์ C1 และ C2 ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าค่าแรงกระทำเฉลี่ยแต่ละรอบสูงสุดที่ 2.57 ตันและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเนื่องจากแรงกระทำสูงสุดที่ 8 มม. จากค่าแรงกระทำและการเคลื่อนตัวดังกล่าวทำให้ทราบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์นั้นออกแบบมาเพื่อการรับแรงในแนวตั้ง การรับแรงทางด้านข้างได้น้อย

เพราะเสาเข็มดินซีเมนต์มีความเปราะไม่สามารถรับโมเมนต์ดัดได้เมื่อมีแรงทางด้านข้างมากกระทำมากเกินไปเสาเข็มดินซีเมนต์จึงวิบัติในที่สุด

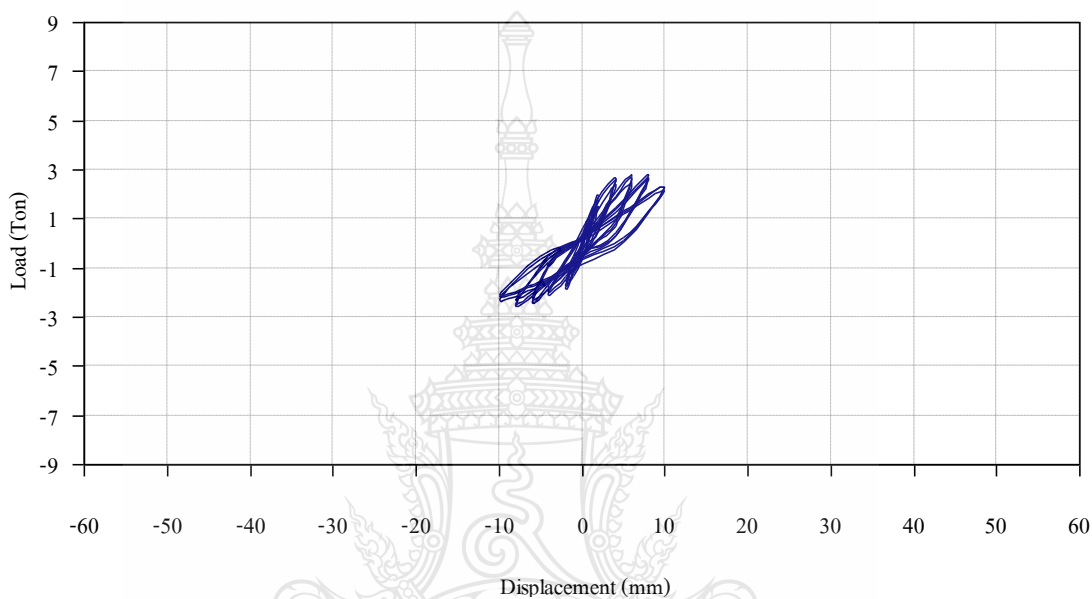
ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์โดยการนำวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงมาประยุกต์ร่วมกัน โดยการแทรกเป็นแกนกลางในเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มการรับแรงทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเนื่องจากแรงกระทำ ดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.3 พบว่า SDCM Column ที่เสริมแกนเหล็ก H-Beam มีค่าแรงกระทำเฉลี่ยแต่ละรอบสูงสุดที่ 8.15 ตันและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเนื่องจากแรงกระทำสูงสุดที่ 45 มม. โดยจะขึ้นอยู่กับวัสดุแกนที่เสริมในเสาเข็มดินซีเมนต์จากผลการทดสอบจะพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนกลางนั้นถ่ายแรงจากเสาเข็มดินซีเมนต์ไปยังแกนที่เสริมทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์

จากภาพที่ 4.4-4.7 การวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย Digital Inclinometer ของ C1,C4,C5 และ C8 พบว่าพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของ DCM และ SDCM Column อันเนื่องมาจากแรงกระทำทางด้านข้างแบบเข้าไปเข้ามา ทำให้ทราบว่าพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งหมดเป็นแบบเสาเข็มยาวหัวอิสระ(Long Free-Headed Pile) การเคลื่อนตัวของ DCM และ SDCM Column จะอยู่ต่ำกว่าระดับหัวเข็มประมาณ 1.50 เมตร โดย SDCM Column ที่เสริมแกนเหล็ก H-BEAM ระยะการเคลื่อนตัวจะอยู่ต่ำกว่าระดับหัวเข็มประมาณ 3.00 เมตร ซึ่งค่า Unconfined Compressive Strength ( $U_c$ )ของดินบริเวณรอบๆที่ทดสอบก็มีผลกับการเคลื่อนตัวของ DCM และ SDCM Column ด้วยเพราะดินบริเวณที่ทำการทดสอบ มีค่า Unconfined Compressive Strength ( $U_c$ ) ประมาณ 2.50 t/m

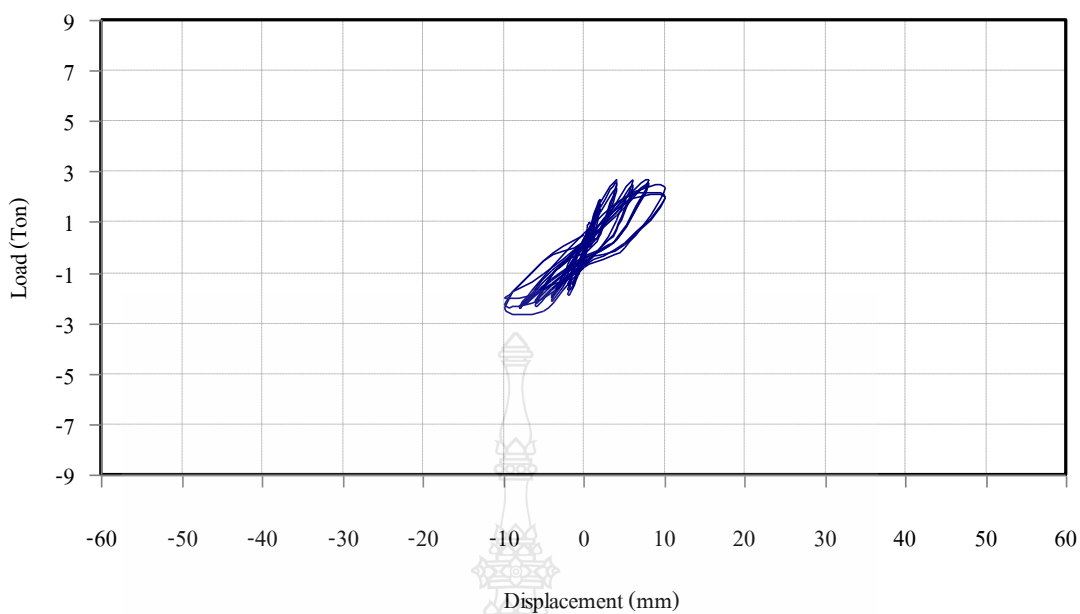
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์กับการรับแรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามา

จากการทดสอบการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดแบบเข้าไปเข้ามาของเสาเข็มดินซีเมนต์ C1และC2 จากภาพพบว่าเส้นวงมีลักษณะแคบและสั้นมีพื้นที่กราฟน้อยจำนวนเส้นวงรอบน้อย ซึ่งทำให้ทราบว่าเสาเข็มสามารถรับแรงได้น้อยและการเคลื่อนตัวได้ต่ำ และเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนกลาง C3 ถึง C8 ภาพที่ 4.8 ถึง 4.15 จากภาพพบว่าเส้นวงมีลักษณะแคบและยาวมีพื้นที่กราฟมากจำนวนเส้นวงรอบมากมีเพียง C5และC6 เท่านั้นที่เส้นวงมีลักษณะกว้างและยาวทำให้ทราบว่า C5 และC6 สามารถรับแรงได้มากและการเคลื่อนตัวมีมากตามไปด้วย เมื่อนำผลการทดสอบมาสรุปจะพบว่า การรับแรงทางด้านข้างแบบเข้าไปเข้ามาที่ระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนด้วยวัสดุต่างๆอย่างชัดเจน โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ C1-C2 เมื่อเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์ C3-C8 พบว่าระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยกว่าประมาณ 5 เท่า

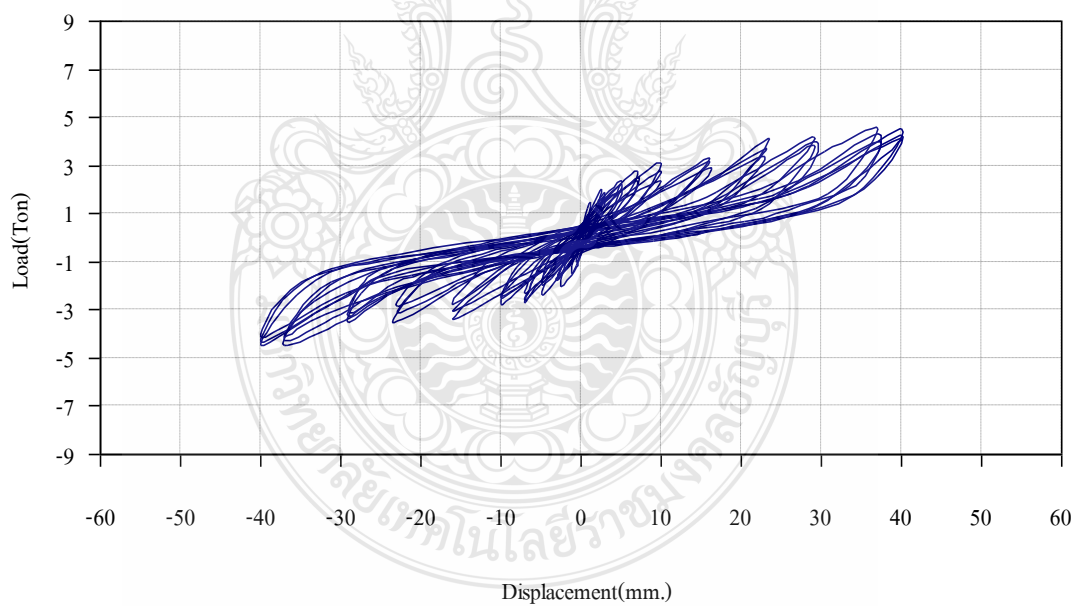
เพราะเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนจะมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มดินซีเมนต์ไปยังวัสดุแกนของเสาเข็ม ทำให้มีการกระจายพลังงานได้ดีกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมแกน โดยความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับวัสดุแกนประเภทต่างๆที่เสริมในเสาเข็มดินซีเมนต์ การเสริมแกนกลางทำให้สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างและมีระยะการเคลื่อนตัวให้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย



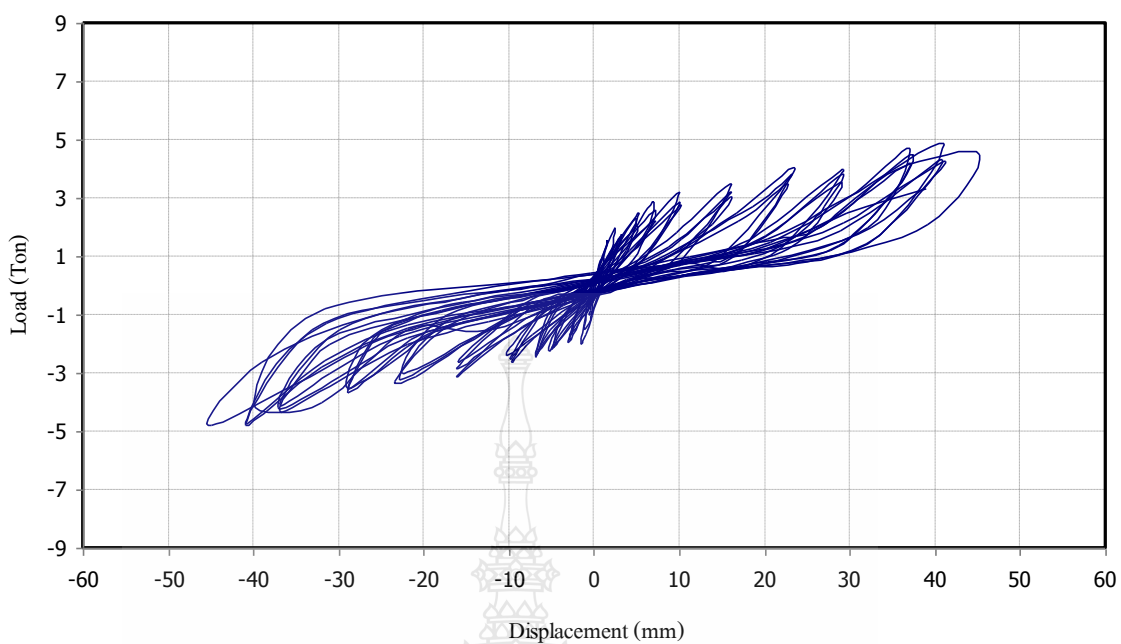
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C1)



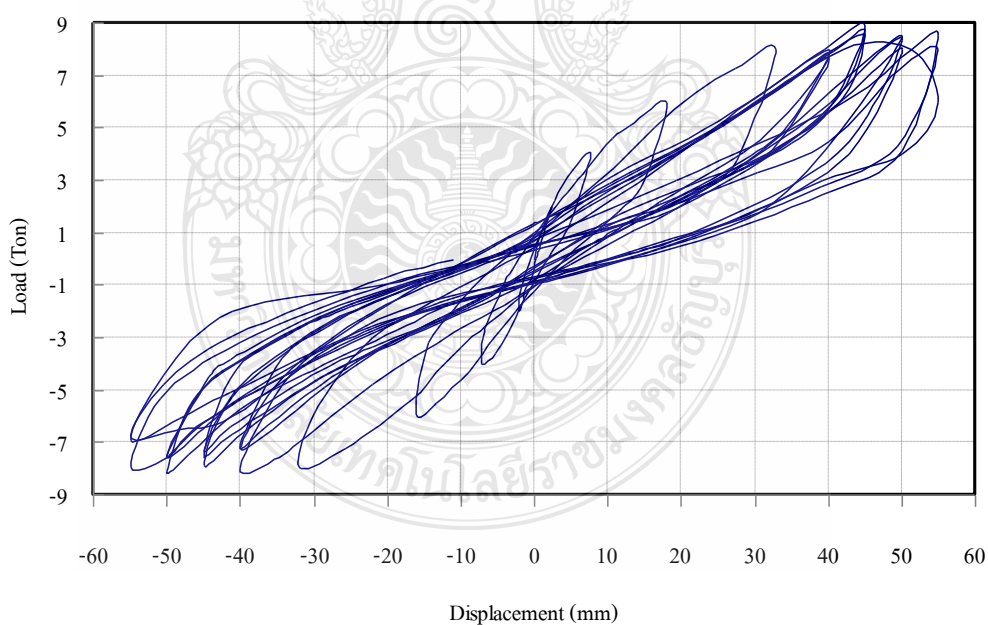
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีเสริมแกน (C2)



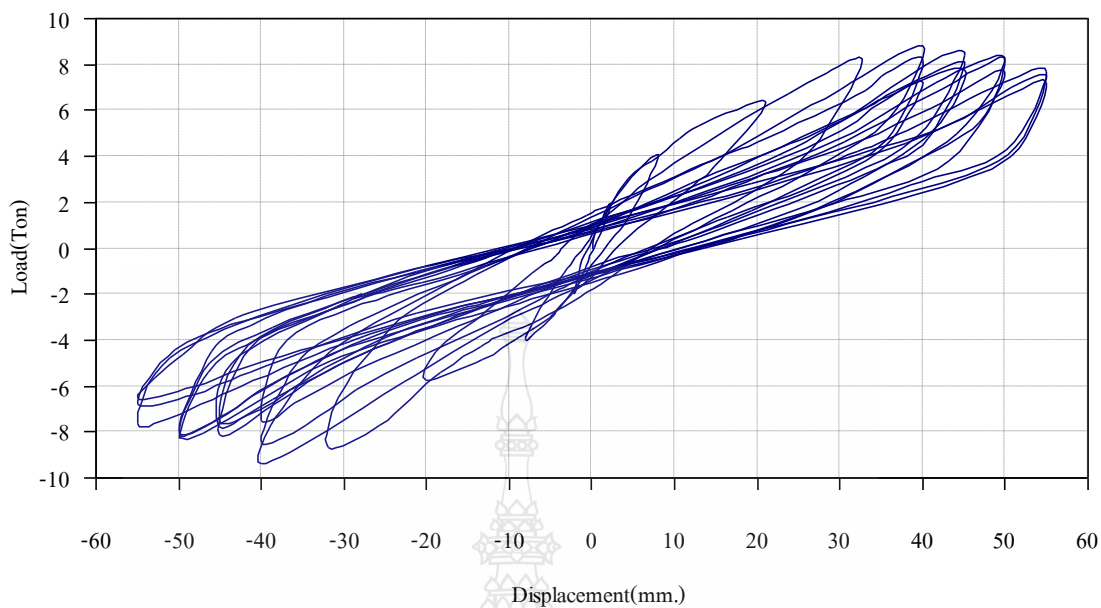
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C3)



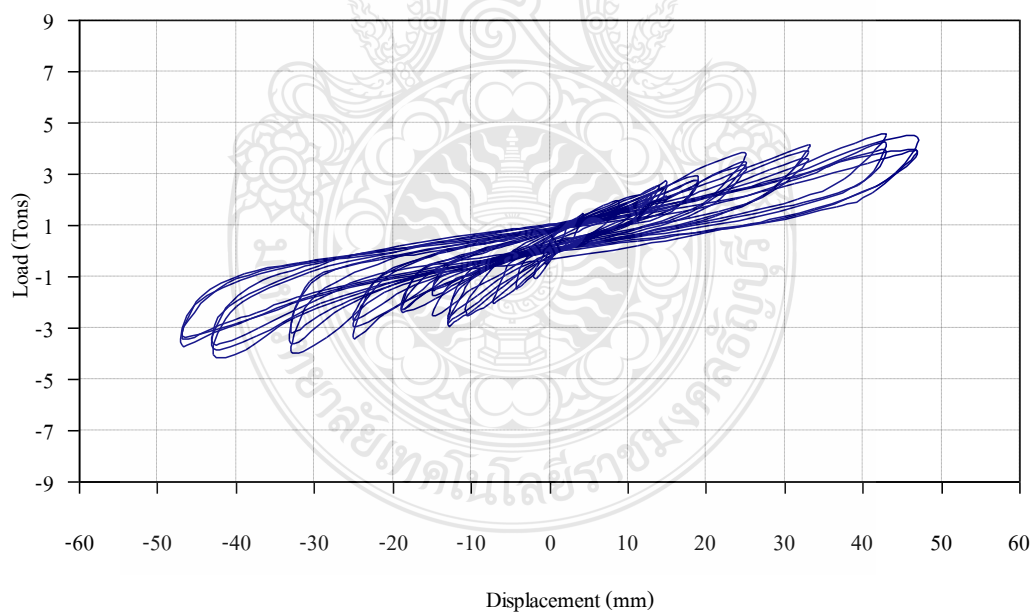
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดิน  
ซีเมนต์ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4)



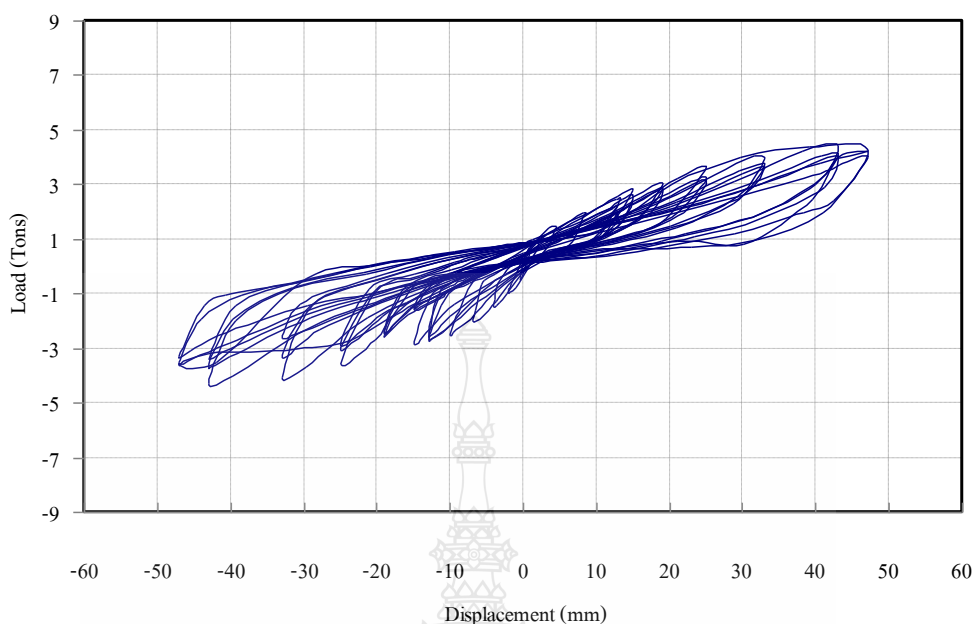
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดิน  
ซีเมนต์ที่เสริมแกนเหล็ก H-Beam (C5)



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดิน  
ซีเมนต์ที่เสริมแกนเหล็ก H-Beam (C6)



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดิน  
ซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C7)



ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C8)

#### 4.4 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Brom

ตารางที่ 4.7 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 1\*

เสาเข็ม	ยาว (เมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	พื้นที่หน้าตัดแกน (ตร.ซม.)	ค่าแรงสูงสุด(Field) (ตัน)	ค่าแรงสูงสุด(Broms) (ตัน)	ระยะแนวแรง f+1.5D	ระยะแนวแรง e+f+1.5D	$M_{yield}$ (t-m)	$\Delta$ %
C1	7.00	0.60	-	2.57	1.67	0.52	0.82	2.11	36
C2	7.00	0.60	-	2.48	1.62	0.53	0.83	2.05	35
C3	7.00	0.60	210.00	4.31	2.80	0.55	0.85	3.66	36
C4	7.00	0.60	210.00	4.91	2.28	0.30	0.60	2.94	54
C5	7.00	0.60	51.21	8.13	3.20	0.22	0.52	4.22	61
C6	7.00	0.60	51.21	8.37	3.74	0.30	0.60	5.02	56
C7	7.00	0.60	31.26	4.00	1.88	0.30	0.60	0.50	53
C8	7.00	0.60	31.26	4.00	2.18	0.40	0.70	2.80	46

สมมติฐานที่ 1 คือกำหนดเสาเข็มมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.60 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน ( $C_u$ ) ของดินเท่ากับ 2.50 ตันต่อตารางเมตร อ้างอิงจากภาคผนวก ข ดังรายการคำนวณในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.8 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 2\*

เลขซีม	ยาว (เมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด แกน (ตร.ซม.)	ค่าแรงสูงสุด(Field) (ตัน)	ค่าแรงสูงสุด (Broms) (ตัน)	ระยะแนวแรง f+1.5D	ระยะแนวแรง e+f+1.5D	M <sub>yield</sub> (Kg-m)	Δ %
C1	7.00	0.60	-	2.57	1.75	0.52	0.82	2.11	32
C2	7.00	0.60	-	2.48	1.70	0.53	0.83	2.05	31
C3	7.00	0.18	210.00	4.31	5.82	0.55	0.85	3.66	35
C4	7.00	0.18	210.00	4.91	4.75	0.30	0.60	2.94	3
C5	7.00	0.18	51.21	8.13	6.63	0.22	0.52	4.22	18
C6	7.00	0.18	51.21	8.37	7.75	0.30	0.60	5.02	7
C7	7.00	0.10	31.26	4.00	4.51	0.30	0.60	0.50	13
C8	7.00	0.10	31.26	4.00	5.15	0.40	0.70	2.80	29

สมมติฐานที่ 2 คือกำหนดเสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.6, 0.18, 0.10 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน (S<sub>v</sub>) ของดินซีเมนต์เท่ากับ 30 ตันต่อตารางเมตร (S<sub>v</sub> เฉลี่ยระหว่างดินซีเมนต์และดินที่อยู่บริเวณรอบๆ เสาเข็ม) อ้างอิงจากภาคผนวก ข จากรูปที่ ก.1

ตารางที่ 4.9 การทำนายการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบตามวิธีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 3\*

เลขซีม	ยาว (เมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	พื้นที่หน้าตัด แกน (ตร.ซม.)	ค่าแรงสูงสุด(Field) (ตัน)	ค่าแรงสูงสุด (Broms) (ตัน)	ระยะแนวแรง f+1.5D	ระยะแนวแรง e+f+1.5D	M <sub>yield</sub> (Kg-m)	Δ %
C1	7.00	0.60	-	2.57	1.75	0.52	0.82	2.11	32
C2	7.00	0.60	-	2.48	1.70	0.53	0.83	2.05	31
C3	7.00	0.18	210.00	4.31	6.31	0.55	0.85	3.66	46
C4	7.00	0.18	210.00	4.91	5.08	0.30	0.60	2.94	4
C5	7.00	0.18	51.21	8.13	7.26	0.22	0.52	4.22	11
C6	7.00	0.18	51.21	8.37	8.60	0.30	0.60	5.02	3
C7	7.00	0.10	31.26	4.00	5.23	0.30	0.60	0.50	31
C8	7.00	0.10	31.26	4.00	6.09	0.40	0.70	2.80	52

สมมติฐานที่ 3 คือกำหนดเสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60, 0.18, 0.10 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน (C<sub>v</sub>) ของดินซีเมนต์เท่ากับ 60 ตันต่อตารางเมตร อ้างอิงจากภาคผนวก ข ดังรายการคำนวณในภาคผนวก ก



จากการทดสอบการรับกำลังทางด้นข้างสูงสุดแบบเข้าไปเข้ามาของเสาเข็มดินซีเมนต์ C1-C8 นำค่าที่มาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าแรงตามทฤษฎีของ Brom โดยตั้งสมมติฐานไว้ 3 ข้อได้ผลการคำนวณ ตามตารางที่ 4.7-4.9

สมมติฐานที่ 1 กำหนดให้เสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน (Cu) ของดินเท่ากับ 2.5 ตันต่อตารางเมตร ตามรายการคำนวณตามภาคผนวก ก พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบและค่าที่ได้จากการคำนวณเฉลี่ยประมาณ 47 % โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ C1,C2 มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยสุดเนื่องจากสมมติฐานที่ 1 กำหนดกำหนดให้เสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ไม่ได้คิดแกนที่เสริมค่าแรงที่ได้จึงเป็นค่าแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์อย่างเดียวกันทางกลับกันเสาเข็มดินซีเมนต์ C5,C6 ที่มีความคลาดเคลื่อนมากเพราะมีวัสดุแกนที่เสริมมาช่วยรับแรงแรงที่ได้จึงมีความคลาดเคลื่อนมากตามไปด้วยและค่า Unconfined Compressive Strength (Uc) ของดินบริเวณรอบๆ ที่ทำการทดสอบก็มีผลกระทบเนื่องจากดินบริเวณที่ทำการทดสอบสามารถรับแรงทางด้านข้างได้น้อยเมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์กระจายแรงไปยังดินรอบๆ ดินไม่สามารถต้านทางแรงทางด้านข้างได้ทำให้การวิบัติของเสาเข็มมีระดับที่ลึก

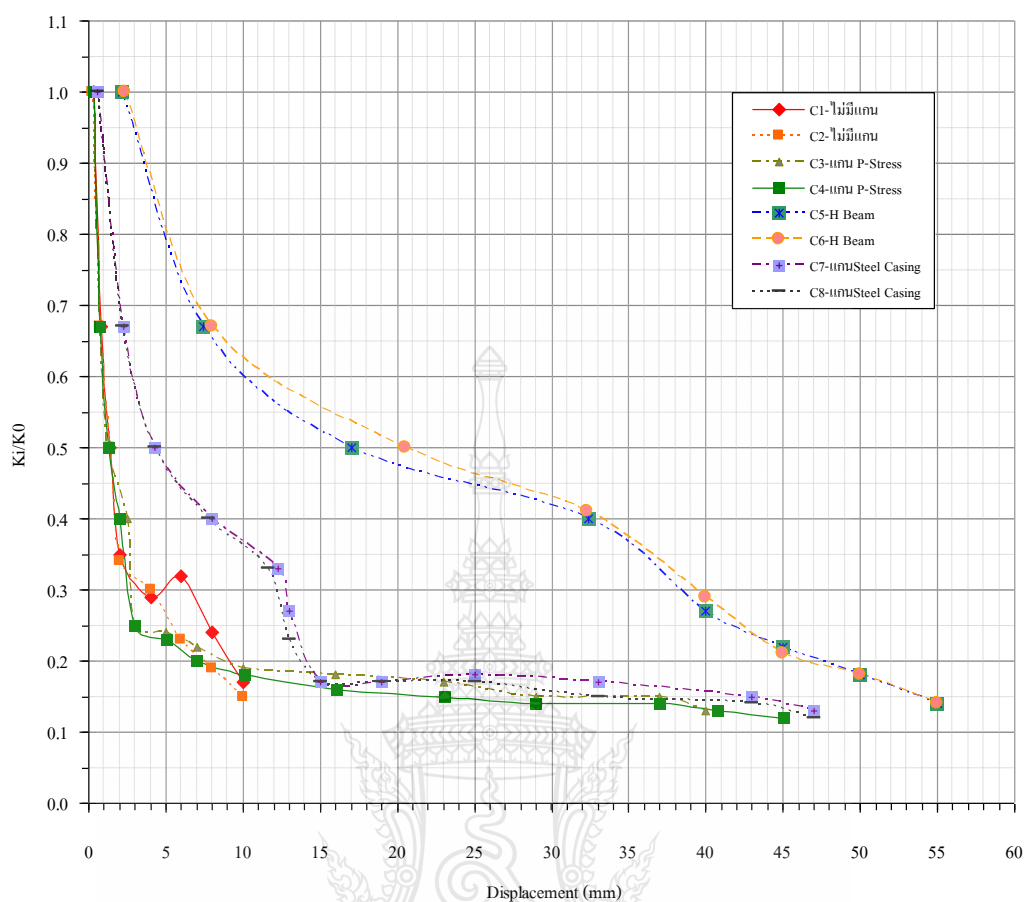
สมมติฐานที่ 2 กำหนดให้เสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.6,0.18 และ 0.10 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน (Su) ของดินซีเมนต์เท่ากับ 30 ตันต่อตารางเมตร (Su เฉลี่ยระหว่างดินซีเมนต์ดินซีเมนต์และดินที่อยู่บริเวณรอบๆ เสาเข็ม) ตามรายการคำนวณตามภาคผนวก ก เมื่อนำมาคำนวณพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความต่างเฉลี่ยประมาณ 21 % โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ C4 และ C6 มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยสุดและเสาเข็มดินซีเมนต์ C1,C2 และ C3 มีเปอร์เซ็นต์ ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด เนื่องจากการตั้งสมมติฐานให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเล็กในเสาเข็มดินซีเมนต์ C2-C8 และเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ (Su) ทำให้เสาเข็มที่รับแรงทางด้านข้างมากเมื่อนำมาเทียบกับขนาดแกนค่าความผิดพลาดจึงลดลง

สมมติฐานที่ 3 กำหนดเสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60,0.18 และ 0.10 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน (Cu) ของดินซีเมนต์เท่ากับ 60 ตันต่อตารางเมตร ตามรายการคำนวณตามภาคผนวก ก เมื่อนำมาคำนวณพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความต่างเฉลี่ยประมาณ 26 % โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ C4 และ C6 มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยสุดและเสาเข็มดินซีเมนต์ C8 มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด จากการตั้งสมมติฐานใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ 2 ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนมีความผิดพลาดลดลงในเสาเข็มดินซีเมนต์ C3-C8

จากการตั้งสมมติฐานหาค่าการรับน้ำหนักประลัยในแนวราบเทียบกับการทดสอบในสนาม ทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในสนามเมื่อนำมาคิดย้อนกลับหาค่าแรงตามทฤษฎีของ Brom ได้ค่ามาไม่เท่ากันเมื่อนำมาเทียบกันจะได้ค่าความต่าง ( $\Delta$ ) โดยค่าความต่างที่ได้จะแตกต่างกันตามประเภทของวัสดุเสริมแกนและตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ การจะนำค่าจากการคำนวณไปใช้งานจึงจะต้องมีการปรับค่าที่คำนวณได้เพื่อให้ค่าคำนวณหาค่าตามทฤษฎีมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบในสนาม โดยการนำค่าความต่างไปเป็นตัวคูณปรับค่าซึ่งจะทำให้สามารถนำค่าจากการทดสอบนำไปใช้ในงานได้อย่างถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริง

#### 4.5 ค่า Rigidity attenuation

ความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างภาพที่ 4.15 คือการรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้งค่าบวกและค่าลบของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละวง โดยที่ไม่นับเครื่องหมาย ผลที่ได้คือความแข็งแรงที่ต้านการกระทำของแรงทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา  $K_r$  ค่าเฉลี่ยของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละวง  $K_0$  ค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดสอบนั้นๆ  $K_r/K_0$  คือการเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นต่อแรงสูงสุดและลักษณะการเคลื่อนที่ของเสาเข็มที่เกิดขึ้นของแต่ละรอบการเคลื่อนที่ การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างที่ลดลงของเสาเข็มดินซีเมนต์ พบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนจะมีการถ่ายแรงไปยังวัสดุเสริมแกนนั้นๆ โดยอัตราการเสียกำลังของวัสดุแกนกลุ่มเหล็กเหนียวจะน้อยกว่าแบบวัสดุเปราะ เพราะวัสดุเหล็ก เมื่อถูกแรงกระทำจนเปลี่ยนรูปแล้ว แต่ยังไม่ถึงจุดครากก็จะยังคงรูปนั้นไว้ และยังสามารถในการรับกำลังต่อไปได้ โดยเฉพาะแกนที่เป็น H-Beam ซึ่งมีความสามารถในการรับกำลังได้ดีมากกว่าแกนแบบทอกลม แต่แกนที่เป็นวัสดุเปราะเช่นคอนกรีตอัดแรง เมื่อถูกแรงกระทำไปเปลี่ยนรูปจนเกิดการ Crack แล้ว ก็จะเสียกำลังลงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุเปราะที่ไม่มีการเสริมแกนช่วยรับกำลัง ซึ่งมีอัตราการเสียกำลังในช่วงแรกๆ ใกล้เคียงกับเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแกนเป็นคอนกรีตอัดแรง แต่เมื่อมีระยะการเคลื่อนตัวมากขึ้น ก็จะมีอัตราการเสียกำลังมากกว่าแกนที่เป็นคอนกรีตอัดแรง เพราะวัสดุแกนที่เป็นคอนกรีตอัดแรงเริ่มมีอัตราการเสียกำลังน้อยลง เนื่องจากเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตอัดแรงเริ่มทำงาน

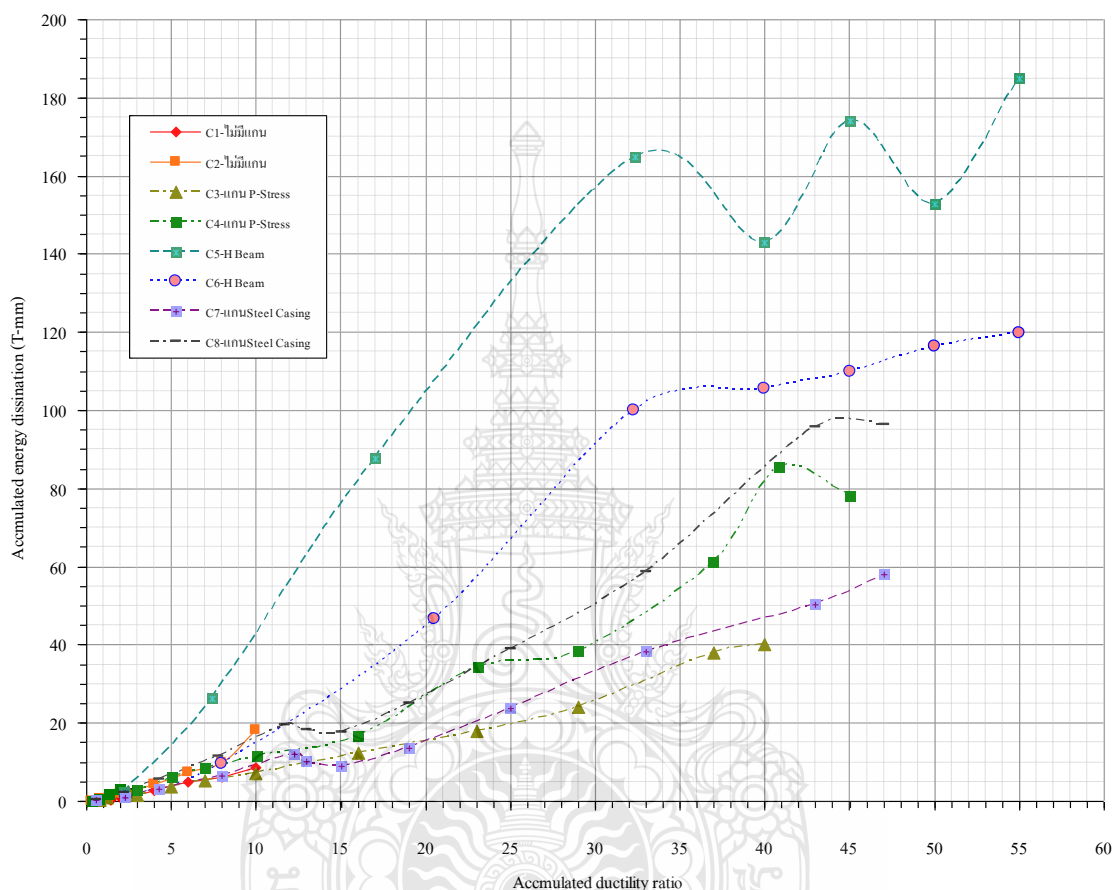


ภาพที่ 4.16 The rigidity attenuation SDCM Column ทั้ง 8 หน้าตัด

#### 4.6 การกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity)

การเปรียบเทียบผลการกระจายพลังงานดังภาพที่ 4.16 ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน H Beam มีการกระจายพลังงานมากที่สุด เนื่องจากแกน H Beam เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น แต่ก็มีแข็งแรงกว่าดินซีเมนต์ที่เป็นวัสดุห่อหุ้มมาก เสาต้นนี้จึงมีพฤติกรรมรับกำลังตัดจากแกนกลางเป็นหลัก ดังนั้น กำลังส่วนมากจึงไปตกอยู่กับวัสดุแกนซึ่งมีความแข็งแรงและเป็นเนื้อเดียวกัน จึงมีการกระจายพลังงานได้ดีที่สุด มากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีวัสดุเสริมแกนเป็นท่อเหล็กกลมและเสาเข็มที่ไม่มีแกนเสริมกำลัง ซึ่งมีความสามารถในการกระจายพลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากวิธีการก่อสร้าง ทำให้ภายในแกนกลางที่เป็นท่อเหล็กกลมไม่มีเนื้อของดินซีเมนต์ จึงทำให้โครงสร้างของเสาต้นนี้มีลักษณะเป็นโพรงตรงแกนกลาง การกระจายพลังงานจึงต่ำลงมาใกล้เคียงกับเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีแกนเสริมแกน ซึ่งมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ส่วนเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแกนเสริมกำลังเป็นคอนกรีตอัดแรง ซึ่งมีการกระจายพลังงานน้อยที่สุด

เนื่องมาจากการก่อสร้างที่ผิดพลาด คือใช้วิธีการตอกแกนกลางลงไปในขณะที่ดินซีเมนต์ใกล้ที่จะแข็งตัว จึงทำให้แกนคอนกรีตอัดแรงกับดินซีเมนต์ที่ห่อหุ้มยึดติดกันน้อย มีลักษณะเป็นช่องว่าง และไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงส่งผลให้การกระจายพลังงานน้อยลงจากความน่าจะเป็น



ภาพที่ 4.17 Energy dissipation capacity SDCM Column ทั้ง 8 หน้าตัด

#### 4.7 ลักษณะการวิบัติของ DCM และ SDCM

จากการทดสอบในสนามพบว่า การวิบัติที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง 8 ต้นมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เสาเข็มจะเกิดรอยแตกร้าว เนื่องจากโมเมนต์ดัดจากภาพที่ 4.19 ลักษณะการวิบัติของ DCM Column จะเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดประมาณ 0.30 เมตร หรือวัดจากหัวเข็มอยู่ที่ระดับประมาณ 0.90-1.00 เมตร ส่วนการวิบัติของ SDCM Column เมื่อเสาเข็มดินซีเมนต์รับด้านข้างสูงสุด จะเกิดการแตกร้าวที่เสาเข็มดินซีเมนต์ก่อน และแรงที่เหลือจะส่งไปยังวัสดุแกน โดยเมื่อเสาเข็มเริ่มรับแรงลดลงประมาณ 20% จึงเลิกทำการทดสอบ ซึ่งตำแหน่งที่เกิดจะอยู่ต่ำกว่าระดับบ่อขุดประมาณ 0.40-0.50 เมตร หรือวัดจากหัวเข็มอยู่ที่ระดับประมาณ 1.00-1.10 เมตร

และมีเสาเข็มดินซีเมนต์ C5 ที่เสริมแกนเหล็ก H-BEAM เกิดรอยแตกร้าว 2 จุด ที่ระดับวัดจากหัวเข็มที่ 0.82 และ 1.22 เมตรเพราะเข็มดินซีเมนต์มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงทำให้สามารถกระจายพลังงานได้ดีส่งผลเสาเข็มสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงตามไปด้วยภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.18 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C1)



ภาพที่ 4.19 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C2)



ภาพที่ 4.20 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C3)



ภาพที่ 4.21 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C4)



ภาพที่ 4.22 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกน H Beam (C5)



ภาพที่ 4.23 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกน H Beam (C6)



ภาพที่ 4.24 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C7)



ภาพที่ 4.25 ร่องรอยการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C8)



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างประเภทต่างๆ ระยะเวลาเคลื่อนตัวและ ความสามารถในการรับแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทราบ ดังนั้นการศึกษา พฤติกรรมของเสาเข็มดินชั้นลึกภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับ กำลังทางด้านข้างสูงสุด ค่าความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้าง การกระจายพลังงานและรูปแบบ การวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยสามารถสรุปผลแยกตามหัวข้อได้ดังนี้

##### 5.1.1 การรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์

ความสามารถในการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของ DCM Column ที่ไม่เสริมแกนกลาง สามารถรับแรงด้านข้างได้สูงสุดประมาณ 2.50 ตันและระยะเวลาเคลื่อนตัวทางด้านข้างเนื่องจากแรง กระทำสูงสุดที่ 8 มม.และในกรณี SDCM Column เสริมด้วยแกนประเภทต่างๆ สามารถรับแรง ด้านข้างได้สูงสุดประมาณ 4 – 8 ตันแล้วแต่ประเภทแกนที่เสริมและระยะเวลาเคลื่อนตัวทางด้านข้าง เนื่องจากแรงกระทำสูงสุดที่ 45 มม. โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกน H-BEAM สามารถรับแรงทาง ด้านข้างและการกระจายพลังงานได้สูงที่สุด จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของวัสดุแกน ประเภทต่างๆที่นำมาทดสอบช่วยเพิ่มการรับแรงทางด้านข้างสูงสุดให้เสาเข็มดินซีเมนต์

##### 5.1.2 ค่า Rigidity attenuation

จากการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างของ SDCM Column มีค่า ลดลงเมื่อเทียบกับ DCM Column โดย SDCM Column ที่เสริมแกนเหล็ก H-BEAM มีค่าการลดลง มากที่สุดประมาณ 5 เท่าเมื่อเทียบกับ DCM Column ในส่วน SDCM Column ที่เสริมแกนเสาเข็ม คอนกรีตอัดแรงมีความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างใกล้เคียงกับ SDCM Column ที่เสริมแกนท่อ เหล็กกลมการนำ SDCM Column ไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆควรเลือกวัสดุแกนที่เหมาะสมต่อไป

##### 5.1.3 การกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity)

การกระจายพลังของ DCM Column สามารถกระจายพลังงานได้ดีกว่า SDCM Column ที่เสริมแกนเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเนื่องจากการเสริมแกนในขณะที่เสาเข็มดินซีเมนต์ใกล้จะแข็งตัว ส่วนในกรณีของ SDCM Column ที่เสริมแกนเหล็ก H-Beam สามารถกระจายพลังงานได้ดีที่สุดโดย SDCM Column ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม สามารถกระจายพลังงานได้ดีใกล้เคียงกับ DCM Column

#### 5.1.4 การเสียรูป

ลักษณะการวิบัติของ DCM Column และSDCM Column อันเนื่องมาจากการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบเข้าไปเข้ามาเกิดขึ้นในรูปแบบเดียวกันคือ เกิดการแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์คดสูงสุด จากการขูดสำรวจรอยแตกร้าวหลังจากการวิบัติ พบว่า DCM Column รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นอยู่ต่ำกว่าพื้นบ่อขุดประมาณ 0.52-0.53 เมตร ในกรณีของ SDCM Column พบว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นอยู่ต่ำกว่าพื้นบ่อขุดประมาณ 0.22-0.55 เมตรแล้วแต่ประเภทแกนที่เสริม ซึ่งเมื่อเฉลี่ยค่าระยะยัดดังกล่าวที่เสาเข็มแตกร้าวแต่ละต้นแล้วพบว่ามากกว่าทฤษฎี ประมาณ 10%

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่รับแรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามา มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่รับแรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามาสำหรับการศึกษารั้งต่อไปควรทำการศึกษาดังอัตราส่วนความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อความยาวของแกนที่นำมาเสริม

5.2.2 ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่รับแรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามาในการศึกษารั้งต่อไปควรทำการศึกษาเป็นแบบเสาเข็มกลุ่ม

5.2.3 ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่รับแรงกระทำแบบเข้าไปเข้ามาสำหรับการศึกษารั้งต่อไปอาจทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนชนิดเดียวกัน แต่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดหน้าตัด ขนาดความยาว ตำแหน่งการรับแรง เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

- [1] พิทยา แจ่มสว่าง, การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์รับแรงด้านข้าง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [2] Zheng G. and Gu X.L. , “Development and practice of composite DMM column in China.”, **Proceeding 16<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Vol. 3, Osaka Japan, 2005, pp.1295 – 1300.
- [3] Wu M., Zhao X. and Dou Y.M. “Application of stiffened deep cement mixedcolumn in ground improvement.”, **Proceedings International Conference on Deep Mixing Best Practices and Recent Advances**, Stockhol, Sweden. , 2005.
- [4] ศุภกิจ นนทนานันท์, “คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนผสมซีเมนต์”, **สัมมนาวิชาการเรื่องการปรับปรุงคุณภาพดินและการใช้วัสดุเสริมแรงชนิดยั้งเคราะห์**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2545, หน้า 7-19.
- [5] ยงยุทธ เต้ศิริ และ ไพฑูรย์ พงษ์ชวลิต (2542). “การปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากด้วยวิธี PVD และ Cement Column.”, เอกสารประกอบการอบรมหลักสูตร งานออกแบบทางหลักสูตร์ที่ 2 Motorway, ศูนย์พัฒนาบุคลากรงานทาง ศรีราชา ชลบุรี.
- [6] ชีระชาติ รื่นไกรฤกษ์. “การวิเคราะห์พฤติกรรมของถนนบนดินอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย Cement Column ทางหลวงหมายเลข 34 ตอน บางนา – ชลบุรี”, **รายงานฉบับที่ วพ. 197 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม กรุงเทพฯ , 2545.**
- [7] จุฑา สุนิตย์สกุล ศุภกร วชิราภรณ์ (2549). **คุณสมบัติของดินซีเมนต์**, **รายงานฉบับที่ วพ. 229 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคมกรุงเทพฯ . 2549.**
- [8] Broms, B.B.,”Design of laterally loaded pile.”, **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Vol.91, No. SM3, 1965, pp.79-99.
- [9] Miki, G., 1985, “Soil Improvement by Jet Grouting”, **Third International Geotechnical Seminar Soil Improvement Method**, November, Singapore, pp. 45-52.

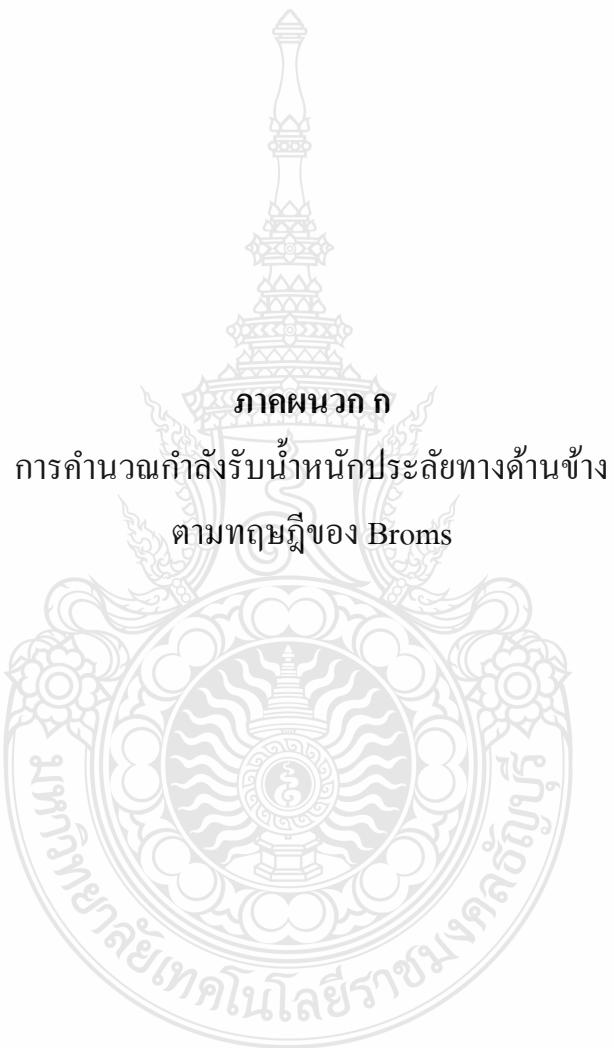
- [10] “โครงการก่อสร้างทางยกระดับทางทิศใต้สนามบินสุวรรณภูมิเชื่อมทางพิเศษบูรพาวิถี”, วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column), เอกสารส่งงาน, บริษัท ไทยเทนน็อกซ์ จำกัดและบริษัท ปูนจันไทย จำกัด.
- [11] Dong P., Qin R. and Chen Z. (2004). **Bearing capacity and settlement of concrete cored DCM pile in soft ground.**, Geotechnical and Geological Engineering, 22,105 – 119.
- [12] Matlock, H. and Reese, L.C., (1960). ”Generalized Solution of Laterally Loaded Pile.”, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.86, No. SM5, pp.63-91.
- [13] Davission, M.T. and Gill. H.L., ”Laterally Loaded Pile in Layered Soil System.”, **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, Vol.89, No. SM3,1963, pp.63-94.
- [14] Chang C.S and Whitman R.V.(1988), **Drained permanent deformation of sand due to cyclic loading** Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 96, No. 5, pp. 104-112.
- [15] Little R.L. and Briaud J.L. (1988) : **Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand.** Paper GL-88-27, Geotechnical Div., Texas A & M Univ., College Station, Texas, 3p.
- [16] Kramer S.L. and Heavey E.J.(1988), **Lateral load analysis of nonlinear piles.** Jour. Geotech. Eng.,ASCE, Vol. 114,No.9, pp. 1045-1049.
- [17] Reese L.C. and Matlock H. (1956). **Non-dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth:** 8<sup>th</sup> Texas Conf. On soil Mech. And Foundation Eng., Sept.14.
- [18] Long J.H. and Vanneste G. (1994). **Effects of cyclic lateral loads on piles in sand.** Journal of Geotechnical Engineering,ASCE,Vol.120, No. 1, January, pp. 225-244.
- [19] Das,B. M. **Principles of Foundation Engineering.** 4<sup>th</sup> ed. United States of America: Col Publishing Company, 1999.
- [20] Bhandari. (2006). **Laboratory Investigation of Stiffened Cement Mixed (SDCM) pile,** M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- [21] Kiazume, M., Tabata, T., and Ishikawa., Y. (1996) **Model tests on failure pattern of cement treated retaining wall.** Proceedings of IS-TOKYO’96/The Second International Conference on Ground Improvement Geosystems. Tokyo,Japan.Vol. 1, pp. 509- 514.

- [22] พินิต ตั้งบุญเติม, 2521, **Full Scale Test on Single Piles and Pile Groups**, วิทยานิพนธ์  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี คณะวิศวกรรมโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, หน้า. 225
- [23] สมหวัง ขจรเกียรติพัฒนา, 2544, **การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวรับแรงด้านข้าง**,  
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า. 337



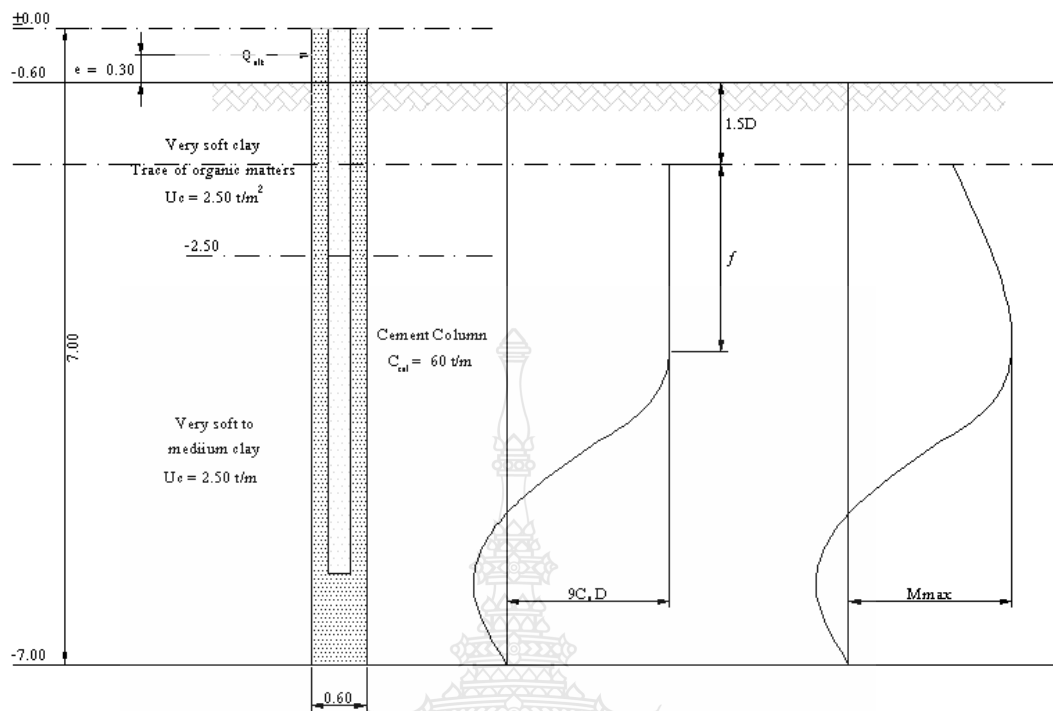
ภาคผนวก





**ภาคผนวก ก**

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยทางด้านข้าง  
ตามทฤษฎีของ Broms



ภาพที่ ก.1 การแอนตัวค้ำข้าง แรงปฏิกริยาของดิน และการกระจายโมเมนต์ค้ำของเสาเข็มยาว หัวอิสระ





### การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างโดยทฤษฎีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 1

กำหนดเสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.6 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน ( $C_u$ ) ของดินเท่ากับ 2 ตัน ต่อตารางเมตร อ้างอิงจากภาคผนวก ข

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \quad (1)$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9xC_u \times D}$$

เมื่อ  $M_{yiled}$  = น้ำหนักกระทำในแนวราบ x ระยะทางที่ตั้งฉากกับแนวแรง  
(คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบในสนาม)

$Q_{ult}$  = แรงต้านทานด้านข้างประลัย

$C_u$  = Untrained shear strength

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็มด้านตรง  
ข้ามกับแรงที่กระทำ

$F$  = ระยะที่เกิด โมเมนต์ค้ดสูงสุด

$E$  = ระยะที่แรงกระทำจากหัวเสาเข็มถึงระดับผิวดิน

### การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C1

$$M_{yiled} = 2.57 \times 0.82$$

$$= 2.11 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.60 \text{ m}$$

$$C_u = 2.50 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60}$$

$$= 0.074 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f)$$

$$2.11 = Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )]$$

$$Q_{ult} = 1.67 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C2

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 2.475 \times 0.83 \\
 &= 2.05 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 2.50 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60} \\
 &= 0.074 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 2.05 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 1.62 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C3

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.31 \times 0.85 \\
 &= 3.66 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 2.50 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60} \\
 &= 0.074 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 3.66 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 2.80 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C4

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.908 \times 0.60 \\
 &= 2.94 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 2.50 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60} \\
 &= 0.074 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 2.94 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 2.28 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C5

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 8.125 \times 0.52 \\
 &= 4.22 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 2.50 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60} \\
 &= 0.074 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 4.22 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 3.20 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C6

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 8.37 \times 0.60 \\
 &= 5.02 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 2.50 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60} \\
 &= 0.074 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 5.02 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 3.74 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C7

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.0 \times 0.60 \\
 &= 2.40 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 2.50 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60} \\
 &= 0.074 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 2.40 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 1.88 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C8

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.0 \times 0.70 \\
 &= 2.80 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 2.50 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 2.50 \times 0.60} \\
 &= 0.074 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+0.5f) \\
 2.80 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.074 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 2.18 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างโดยทฤษฎีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 2

กำหนดเสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.6,0.18,0.10 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน ( $S_u$ ) ของดินซีเมนต์เท่ากับ 30 ตัน ต่อตารางเมตร ( $S_u$  เฉลี่ยระหว่างดินซีเมนต์และดินที่อยู่บริเวณรอบๆ เสาเข็ม) อ้างอิงจากภาคผนวก ข

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C1

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 2.57 \times 0.82 \\
 &= 2.11 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.60} \\
 &= 0.0061 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 2.11 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.0061 Q_{ult})] \\
 Q_{ult} &= 1.75 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C2

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 2.475 \times 0.83 \\
 &= 2.05 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.60} \\
 &= 0.0061 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 2.05 &= Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.0061 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 1.70 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C3

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.31 \times 0.85 \\
 &= 3.66 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.18 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.18} \\
 &= 0.020 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+0.5f) \\
 3.66 &= Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.020 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 5.82 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C4

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.908 \times 0.60 \\
 &= 2.94 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.18 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.18} \\
 &= 0.020 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+0.5f) \\
 2.94 &= Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.020 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 4.76 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C5

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 8.125 \times 0.52 \\
 &= 4.225 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.18 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.18} \\
 &= 0.020 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+0.5f) \\
 4.225 &= Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.020 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 6.63 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C6

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 8.37 \times 0.60 \\
 &= 5.022 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.18 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.18} \\
 &= 0.020 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+0.5f) \\
 5.022 &= Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.020 Q_{ult} )] \\
 Q_{ult} &= 7.75 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C7

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.0 \times 0.60 \\
 &= 2.40 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.10 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.10} \\
 &= 0.037 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)



$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 2.40 &= Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.10) + (0.5 \times 0.037 Q_{ult})] \\
 Q_{ult} &= 4.51 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C8

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 4.0 \times 0.70 \\
 &= 2.80 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.10 \text{ m} \\
 C u &= 30 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 30 \times 0.10} \\
 &= 0.037 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f) \\
 2.80 &= Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.10) + (0.5 \times 0.037 Q_{ult})] \\
 Q_{ult} &= 5.15 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างโดยทฤษฎีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 3

กำหนดเสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.6,0.18,0.10 เมตร และค่ากำลังรับแรงเฉือน (Su) ของดินซีเมนต์เท่ากับ 60 ตัน ต่อตารางเมตร อ้างอิงจากภาคผนวก ข

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C1

$$\begin{aligned}
 M_{yiled} &= 2.57 \times 0.82 \\
 &= 2.11 \text{ t-m} \\
 E &= 0.30 \text{ m} \\
 D &= 0.60 \text{ m} \\
 C u &= 60 \text{ t/m}^2 \\
 f &= \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60} \\
 &= 0.0031 Q_{ult}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f)$$

$$2.11 = Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.0031 Q_{ult})]$$

$$Q_{ult} = 1.75 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C2

$$M_{yiled} = 2.475 \times 0.83$$

$$= 2.05 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.60 \text{ m}$$

$$C u = 60 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60}$$

$$= 0.0031 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f)$$

$$2.05 = Q_{ul} [0.30+ (1.5 \times 0.60) + (0.5 \times 0.0031 Q_{ult} )]$$

$$Q_{ult} = 1.70 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C3

$$M_{yiled} = 4.31 \times 0.85$$

$$= 3.66 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.18 \text{ m}$$

$$C u = 60 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60}$$

$$= 0.0031 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5f)$$

$$3.66 = Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.0031 Q_{ult})]$$

$$Q_{ult} = 6.31 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C4

$$M_{yiled} = 4.908 \times 0.60$$

$$= 2.94 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.18 \text{ m}$$

$$C u = 60 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60}$$

$$= 0.0031 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5f)$$

$$2.94 = Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.0031 Q_{ult})]$$

$$Q_{ult} = 5.08 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C5

$$M_{yiled} = 8.125 \times 0.52$$

$$= 4.225 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.18 \text{ m}$$

$$C u = 60 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60}$$

$$= 0.0031 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5.f)$$

$$4.225 = Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.0031Q_{ult} )]$$

$$Q_{ult} = 7.26 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C6

$$M_{yiled} = 8.37 \times 0.60$$

$$= 5.022 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.18 \text{ m}$$

$$C u = 60 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60}$$

$$= 0.0031 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5.f)$$

$$5.022 = Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.18) + (0.5 \times 0.0031Q_{ult} )]$$

$$Q_{ult} = 8.60 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C7

$$M_{yiled} = 4.0 \times 0.60$$

$$= 2.40 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.10 \text{ m}$$

$$C u = 60 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60}$$

$$= 0.0031 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f)$$

$$2.40 = Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.10) + (0.5 \times 0.0031 Q_{ult} )]$$

$$Q_{ult} = 5.23 \text{ ton}$$

การหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างของ C8

$$M_{yiled} = 4.0 \times 0.70$$

$$= 2.80 \text{ t-m}$$

$$E = 0.30 \text{ m}$$

$$D = 0.10 \text{ m}$$

$$C u = 60 \text{ t/m}^2$$

$$f = \frac{Q_{ult}}{9 \times 60 \times 0.60}$$

$$= 0.0031 Q_{ult}$$

แทนค่าในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_{yiled} = Q_{ult}(e+1.5D+ 0.5 f)$$

$$2.80 = Q_{ul} [0.30 + (1.5 \times 0.10) + (0.5 \times 0.0031 Q_{ult} )]$$

$$Q_{ult} = 6.09 \text{ ton}$$

ตัวอย่างการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความต่าง ( $\Delta$ )

$$\Delta = \frac{\text{Brom-Field} \times 100\%}{\text{Field}}$$

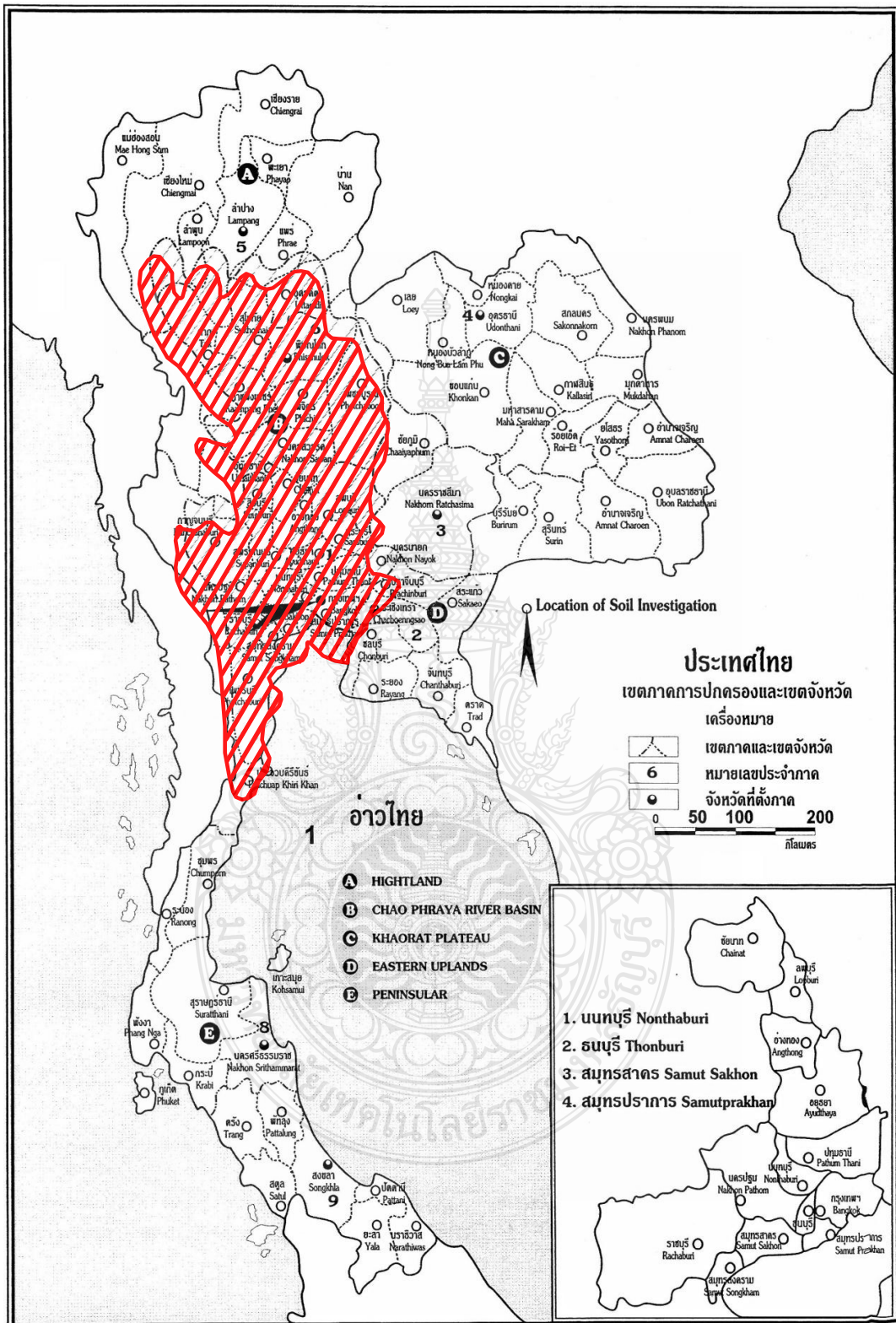
Brom = ค่าจากทฤษฎีของ Brom สมการที่ 2.11, 2.12

Field = ค่าจากการทดสอบ

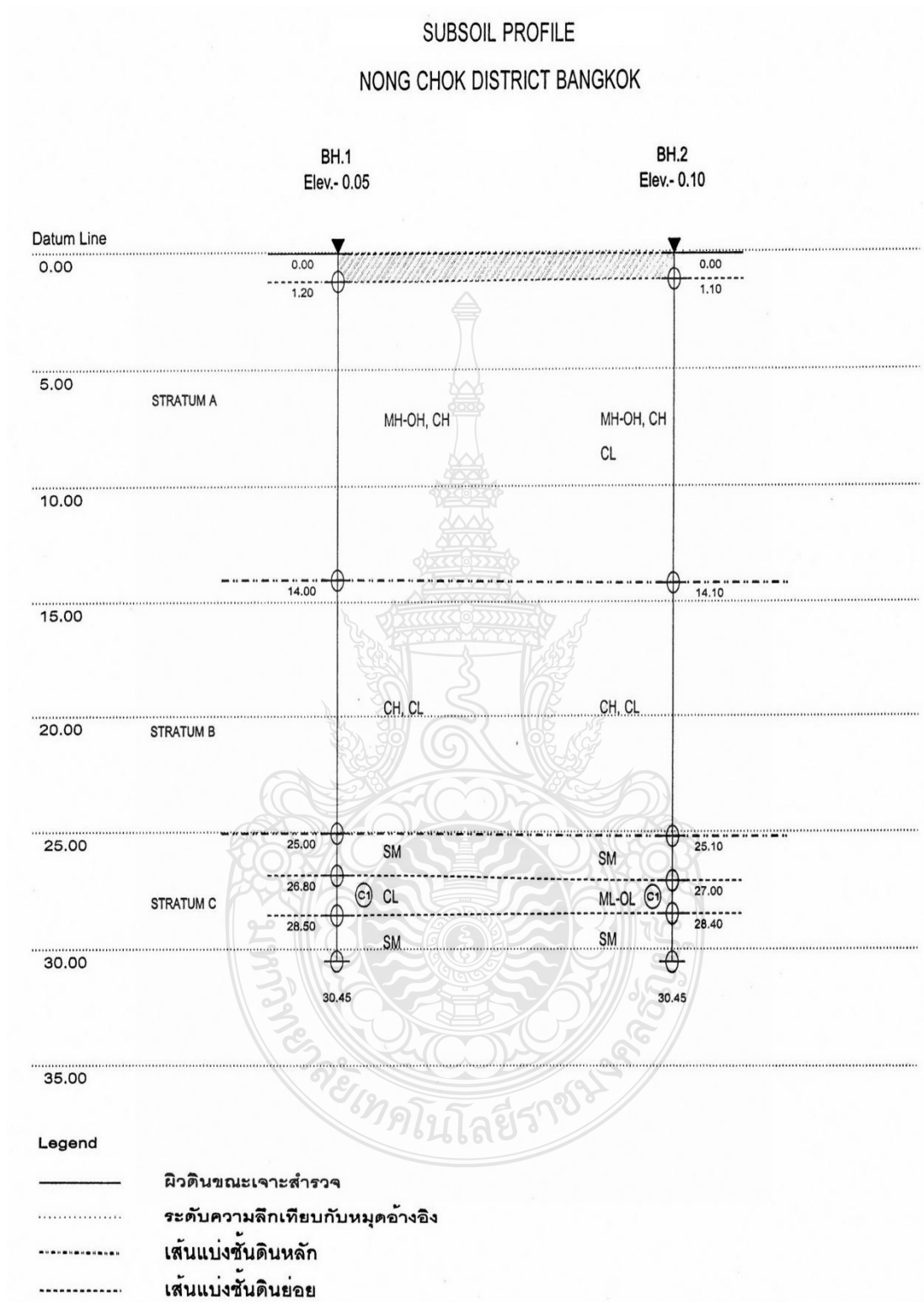
แทนค่าจากการหาน้ำหนักประลัยทางด้านข้างโดยทฤษฎีของ Brom ตามสมมติฐานที่ 3 เส้าเข็ม C8 ได้ดังนี้

$$\Delta = \frac{6.09-4.0}{4.0} \times 100\% = 52 \%$$



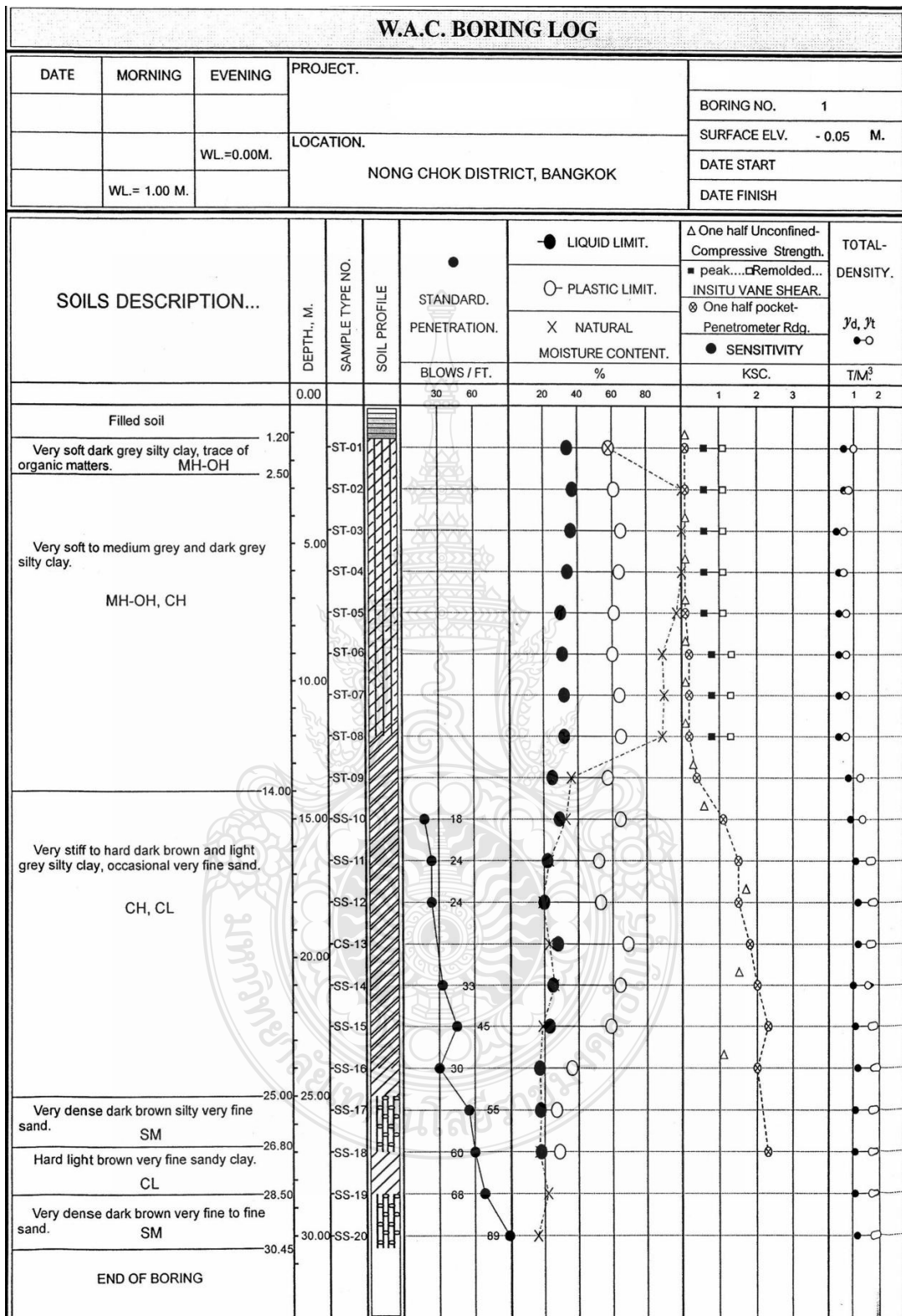


ภาพที่ ข.1 แผนที่ลักษณะพื้นที่บริเวณที่ทำการวิจัย

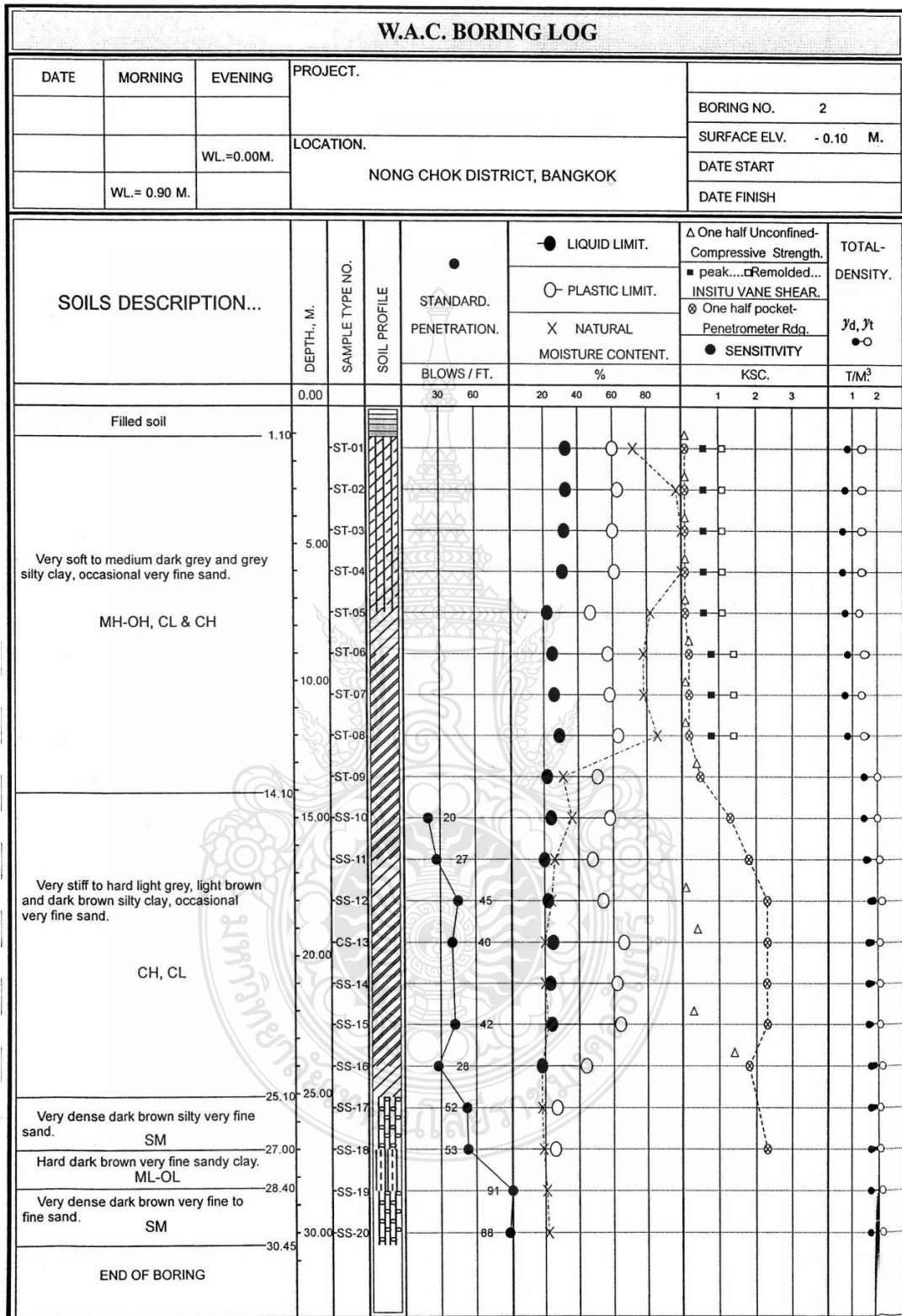


ภาพที่ ข.2 การแบ่งลักษณะชั้นดินจากการเจาะสำรวจ





ภาพที่ ๓.3 Boring Log BH.1



ภาพที่ ๓.4 Boring Log BH.2

**คุณสมบัติของชั้นดิน**

คุณสมบัติของชั้นดินแต่ละชั้นสามารถจะสรุปรวมกันได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

**Natural Water Content (%)**

ชั้น	Range	Average
A	31.85-118.32	86.48
B	17.65-36.01	23.77
C	16.92-22.09	20.00
C1	17.75-19.29	18.52

**Atterberg Limits (%)**

ชั้น	Range		Average	
	Liquid Limit	Plastic Limit	Liquid Limit	Plastic Limit
A	47.15-65.32	22.05-37.88	60.15	30.69
B	36.83-69.88	17.31-29.46	57.33	23.40
C	27.09-27.79	N.P.	27.44	N.P.
C1	26.26-29.70	18.51	27.98	18.51

**Specific Gravity**

ชั้น	Range	Average
A	2.44-2.66	2.53
B	2.46-2.67	2.55
C	2.44-2.62	2.54
C1	2.50-2.53	2.52

**Bulk Density ( $t/m^3$ )**

ชั้น	Range	Average
A	1.37-2.02	1.53
B	1.99-2.24	2.15
C	2.16-2.24	2.21
C1	2.18-2.19	2.19

**Strength Parameters**

ภาพที่ ข.5 ผลสรุปคุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของดิน

	Range	Average
ชั้น A:		
N, Blows/30 cm.	-	-
Vp, tsm.	1.220-1.460	1.310
Uc, ksc.	0.110-0.770	0.250
ชั้น B:		
N, Blows/30 cm.	18-45	31.3
Up, ksc.	2.250-4.500	3.700
Uc, ksc.	0.520-3.330	2.220
ชั้น C:		
N, Blows/30 cm.	52-91	73.8
*C, tsm.	0.00	0.00
* $\phi$ , Degree	37.42-38.54	37.98
C1:		
N, Blows/30 cm.	53-60	56.5
Up, ksc.	4.500	4.500
Uc, ksc.	-	-

\* Direct Shear Test

Consolidation Test Result

การทดสอบ Consolidation Test โดยใช้ตัวอย่างคงสภาพจำนวน 2 ตัวอย่าง และ คำนวณหาค่า  $C_r$ ,  $C_c$ ,  $P_c$  และ  $e_0$  ที่ค่าแรงอัดต่างๆ กันได้ดังนี้

Locations & Depths	$C_r$	$C_c$	$P_c$ , ksc.	$e_0$
BH1 19.50-20.00	0.0075	0.0997	1.10	0.73
BH2 21.00-21.50	0.0058	0.0923	1.20	0.65

ภาพที่ ข.6 ผลสรุปคุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของดิน

PROJECT:  
PROVINCE: BANGKOK

LOCATION: NONG CHOK DISTRICT  
BOREHOLE NO.: 1

SUMMARY OF RESULTS

Depth From / To	Sample Type	SPT	Group			LL	PL	PI	Mc	LI	e	Gs	Shear Strength				Seive Size		
			Rt	Rd	Sym								Up	Uc	Vp	Vd	No.10	No.200	
1.50	2.00	ST01	-	1.66	1.05	MH-OH	58.32	34.84	23.48	58.61	101.24	1.427	2.54	0.20	0.28	1.22	0.61		
3.00	3.50	ST02	-	1.66	0.80	MH-OH	61.41	37.88	23.53	108.78	301.32	2.195	2.54	0.20	-	1.22	0.61		
4.50	5.00	ST03	-	1.38	0.63	MH-OH	65.19	36.71	28.48	118.29	286.45	3.097	2.59	0.20	0.14	1.22	0.61		
6.00	6.50	ST04	-	1.45	0.66	MH-OH	64.74	34.23	30.51	118.32	275.61	2.885	2.58	0.20	0.20	1.22	0.61		
7.50	8.00	ST05	-	1.46	0.74	MH-OH	61.53	30.67	30.86	97.65	217.04	2.533	2.61	0.20	0.15	1.22	0.61		
9.00	9.50	ST06	-	1.48	0.78	MH-OH	60.26	31.36	28.90	89.24	200.28	2.350	2.62	0.30	0.22	1.46	0.85		
10.50	11.00	ST07	-	1.48	0.78	MH-OH	64.23	32.03	32.20	90.23	180.75	2.380	2.63	0.30	0.15	1.46	0.85		
12.00	12.50	ST08	-	1.45	0.77	MH-OH	65.32	32.13	33.19	89.44	172.67	2.475	2.66	0.30	0.22	1.46	0.85		
13.50	14.00	ST09	-	1.83	1.34	CH	57.04	25.54	31.50	36.22	33.90	0.943	2.61	0.75	0.67	-	-		
15.00	15.45	SS10	18	1.99	1.49	CH	67.05	29.46	37.59	33.91	11.84	0.790	2.66	2.25	1.14				
10.50	10.95	SS11	24	2.11	1.72	CH	52.35	22.54	29.81	23.09	1.85	0.432	2.46	3.00	-				
18.00	18.45	SS12	24	2.21	1.84	CH	53.16	20.97	32.19	19.88	-	0.448	2.67	3.00	3.33				
19.50	19.80	CS13	-	2.21	1.79	CH	69.28	28.25	41.03	23.75	-	0.400	2.50	3.50	-				
21.00	21.45	SS14	33	2.07	1.64	CH	64.83	25.47	39.36	26.11	1.63	0.608	2.64	4.00	3.06				
22.50	22.95	SS15	45	2.17	1.82	CH	59.49	23.68	35.81	19.17	-	0.373	2.50	4.50	-				
24.00	24.45	SS16	30	2.23	1.90	CL	36.83	17.31	19.52	17.65	1.74	0.382	2.62	4.00	2.15				
25.50	25.95	SS17	55	2.17	1.83	SM	27.79	N.P.	-	18.53	-	0.339	2.45	-	-			100.00	41.34
27.00	27.45	SS18	60	2.19	1.86	CL	29.70	18.51	11.19	17.75	-	0.343	2.50	4.50	-				
28.50	28.95	SS19	68	2.19	1.80	SM	-	-	-	22.02	-	0.357	2.44	-	-			100.00	22.06
30.00	30.45	SS20	89	2.23	1.91	SM	-	-	-	16.92	-	0.371	2.62	-	-			100.00	17.96

DATE: SURFACE ELEV.: WATER TABLE: 1 24 Hr. After Boring

Remarks:

LL	Liquid Limit	(%)	Up	Penetrometer Test	(Ksc.)
PL	Plastic Limit	(%)	Uc	Unconfined Compressive Strength	(Ksc.)
PI	Plasticity Index	(%)	Rt	Wet Unit Weight	(gm/cc)
LI	Liquidity Index	(%)	Rd	Dry Unit Weight	(gm/cc)
Mc	Moisture Content	(%)	V	Vane Shear Strength	(Tsm.)
Gs	Specific Gravity		Vp	Peak Vane Shear Strength	(Tsm.)
ST	Thin Wall Sample		Vs	Residual Vane Shear Strength	(Tsm.)
SS	Split Spoon Sample		Vd	Remolded Vane Shear Strength	(Tsm.)
CS	Cored Sample		N	Standard Penetration Test	Blows/30 cm.
RS	Cored Rock Sample		>150	Blows/30 cm. Hardpan Layer	
Hr.	Hour		e	Void Ratio	

ภาพที่ ข.7 คุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของ BH

PROJECT:  
PROVINCE: BANGKOK

LOCATION: NONG CHOK DISTRICT  
BOREHOLE NO.: 2

SUMMARY OF RESULTS

Depth From / To	Sample Type	SPT	Rt	Rd	Group Sym	LL	PL	PI	Mc	LI	e	Gs	Shear Strength				Seive Size		
													Up	Uc	Vp	Vd	No.10	No.200	
1.50	2.00	ST01	-	1.41	0.82	MH-OH	60.35	33.32	27.03	72.64	145.47	2.012	2.46	0.20	0.17	1.22	0.61		
3.00	3.50	ST02	-	1.47	0.75	MH-OH	63.48	33.50	29.98	97.02	211.87	2.270	2.44	0.20	0.11	1.22	0.61		
4.50	5.00	ST03	-	1.42	0.68	MH-OH	60.96	32.31	28.65	107.48	262.37	2.624	2.48	0.20	0.13	1.22	0.61		
6.00	6.50	ST04	-	1.48	0.69	MH-OH	61.72	31.97	29.75	114.84	278.55	2.556	2.45	0.20	0.17	1.22	0.61		
7.50	8.00	ST05	-	1.37	0.75	CL	47.15	22.05	25.10	82.28	239.96	2.286	2.47	0.20	0.17	1.22	0.61		
9.00	9.50	ST06	-	1.54	0.86	CH	57.66	25.08	32.58	78.25	163.20	1.847	2.46	0.30	0.31	1.46	0.85		
10.50	11.00	ST07	-	1.42	0.79	CH	58.92	26.82	32.10	78.62	161.37	2.107	2.47	0.30	0.16	1.46	0.85		
12.00	12.50	ST08	-	1.58	0.85	CH	63.07	29.67	33.40	86.82	171.11	1.932	2.48	0.35	0.24	1.46	0.85		
13.50	14.00	ST09	-	2.02	1.53	CH	51.38	22.26	29.12	31.85	32.93	0.619	2.48	1.00	0.77	-	-		
15.00	15.45	SS10	20	2.09	1.54	CH	58.63	24.20	34.43	36.01	34.30	0.633	2.51	2.50	-	-	-	-	
16.50	16.95	SS11	27	2.13	1.68	CL	48.28	20.34	27.94	26.83	23.23	0.521	2.55	3.50	-	-	-	-	
18.00	18.45	SS12	45	2.24	1.80	CH	54.70	22.31	32.39	24.44	6.58	0.411	2.54	4.50	2.00	-	-	-	
19.50	19.95	SS13	40	2.10	1.74	CH	66.35	25.88	40.47	20.94	-	0.446	2.51	4.50	2.88	-	-	-	
21.00	21.30	CS14	-	2.10	1.74	CH	62.59	23.85	38.74	20.45	-	0.440	2.51	4.50	-	-	-	-	
22.50	22.95	SS15	42	2.19	1.79	CH	64.23	24.57	39.66	22.07	-	0.421	2.55	4.50	0.52	-	-	-	
24.00	24.45	SS16	28	2.24	1.89	CL	44.81	18.78	26.03	18.53	-	0.339	2.53	3.50	2.71	-	-	-	
25.50	25.95	SS17	52	2.16	1.83	SM	27.09	N.P.	-	18.56	-	0.403	2.56	-	-	-	-	100.00	46.54
27.00	27.45	SS18	53	2.18	1.83	ML-OL	26.26	N.P.	-	19.29	-	0.382	2.53	4.50	-	-	-	-	
28.50	28.95	SS19	91	2.24	1.84	SM	-	-	-	21.88	-	0.394	2.56	-	-	-	-	100.00	18.02
30.00	30.45	SS20	88	2.23	1.83	SM	-	-	-	22.09	-	0.411	2.58	-	-	-	-	100.00	16.94

DATE: SURFACE ELEV.: WATER TABLE: .9 24 Hr. After Boring

Remarks:

LL	Liquid Limit	(%)	Up	Penetrometer Test	(Ksc.)
PL	Plastic Limit	(%)	Uc	Unconfined Compressive Strength	(Ksc.)
PI	Plasticity Index	(%)	Rt	Wet Unit Weight	(gm/cc)
LI	Liquidity Index	(%)	Rd	Dry Unit Weight	(gm/cc)
Mc	Moisture Content	(%)	V	Vane Shear Strength	(Tsm.)
Gs	Specific Gravity		Vp	Peak Vane Shear Strength	(Tsm.)
ST	Thin Wall Sample		Vs	Residual Vane Shear Strength	(Tsm.)
SS	Split Spoon Sample		Vd	Remolded Vane Shear Strength	(Tsm.)
CS	Cored Sample		N	Standard Penetration Test	Blows/30 cm.
RS	Cored Rock Sample		>150	Blows/30 cm. Hardpan Layer	
Hr.	Hour		e	Void Ratio	

ภาพที่ ข.8 คุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของ BH.2

ภาคผนวก ค

รายการคำนวณการออกแบบปริมาณส่วนผสมดินซีเมนต์



รายการคำนวณปริมาณการผสมดิน-ซีเมนต์

Cement content = 200 กก./ม<sup>3</sup>

Design strength SCC = 60 ตัน/ตร.ม.

กำหนดอัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ = 100% (1:1 โดยน้ำหนัก)

สมมุติในการผสมซีเมนต์-น้ำ

ใช้ซีเมนต์(C) = 500 กก.

จะได้น้ำ(W) = 500X1 = 500 กก.

หาความถ่วงจำเพาะซีเมนต์-น้ำ = (น้ำหนัก/ปริมาตร)

ความถ่วงจำเพาะซีเมนต์ = 3.15 ตัน/ลบ.ม. = 3.15 กก./ลิตร

ความถ่วงจำเพาะน้ำ = 1.00 ตัน/ลบ.ม. = 1.00 กก./ลิตร

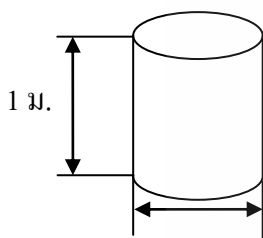
จะได้ปริมาณซีเมนต์ =  $\frac{500 \text{ กก.}}{3.15 \text{ กก./ลิตร}} = 158.73 \text{ ลิตร}$

จะได้ปริมาณน้ำ =  $\frac{500 \text{ กก.}}{1.00 \text{ กก./ลิตร}} = 500 \text{ ลิตร}$

หาความถ่วงจำเพาะซีเมนต์-น้ำ =  $\frac{\text{น้ำหนัก}}{\text{ปริมาตร}} = \frac{500 \text{ กก.} + 500 \text{ กก.}}{158.73 \text{ ลิตร} + 500 \text{ ลิตร}} = \frac{1000 \text{ กก.}}{658.73 \text{ ลิตร}}$

หาความถ่วงจำเพาะซีเมนต์-น้ำ = 1.518 กก./ลิตร

หาปริมาณการใช้ซีเมนต์-น้ำ ในเสาเข็มดิน 1.0 ม.



A:พื้นที่หน้าตัด

D:เส้นผ่าศูนย์กลาง

V:ปริมาตรของดิน

L:ความยาวของเสาเข็ม

$$A = \frac{3.14D^2}{4} = \frac{3.14(0.6)^2}{4} = 0.2827 \text{ ตร.ม.}$$

$$V = 0.2827 \times 1.0 = 0.2827 \text{ ลบ.ม. / ความยาวเสาเข็ม 1.0 ม.}$$

เส้นผ่าศูนย์กลาง 600 มม.

สมมุติกำหนดอัตราการใช้ซีเมนต์ 200 กก.ต่อ1.0 ลบ.ม.ของเสาเข็มดิน

ปริมาณการใช้ซีเมนต์-น้ำ = ปริมาตรของซีเมนต์+ปริมาตรของน้ำ

$$= \frac{(0.2827 \text{ ตร.ม.} \times 200 \text{ กก./ลบ.ม.})}{3.15 \text{ กก./ลิตร}} + \frac{(0.2827 \text{ ตร.ม.} \times 200 \text{ กก./ลบ.ม.}) \times 1.00}{1.00 \text{ กก./ลิตร}}$$

$$= 74.5 \text{ ลิตร}$$



อัตราการใช้ซีเมนต์	ความยาวเสาเข็ม	ปริมาตรการใช้ซีเมนต์-น้ำ	ปริมาตรการใช้ซีเมนต์-น้ำ
กก./ลบ.ม.	ม.	ลิตร/ม.	เสาเข็มยาว 7.00 ม.
200	1.00	74.5	521.5



ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test

ของเสาเข็มดินซีเมนต์



ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์ (C1)

Curing Time 28 days										
Depth (m)			Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Unconfined Compressive Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)	
From	To	Test No.			Before Height Corrected	After Height Corrected				
0	1	C1 - 1			53.54	1663.9				7.83
1	2	C1 - 2	131.47	1375.39	11.13	7.82	0.702	1.45	856	
2	3	C1 - 3	135.21	1363.03	10.55	7.44	0.705	1.15	879	
3	4	C1 - 4	132.18	1358.26	11.72	8.09	0.690	1.88	689	
4	5	C1 - 5	120.09	1402.43	16.48	11.79	0.715	0.80	2354	
5	6	C1 - 6	118.33	1402.29	13.15	9.24	0.703	1.93	597	
6	7	C1 - 7	108.33	1488.57	11.46	8.11	0.708	1.42	1041	

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตอัดแรง (C4)

Curing Time 28 days										
Depth (m)			Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Unconfined Compressive Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)	
From	To	Test No.			Before Height Corrected	After Height Corrected				
0	1	C2 - 1			114.49	1380.28				10.2
1	2	C2 - 2	129.82	1359.97	9.0	6.22	0.689	1.13	645	
2	3	C2 - 3	135.32	1361.78	12.7	8.84	0.695	1.14	1060	
3	4	C2 - 4	137.43	1355.63	8.2	5.76	0.701	1.35	632	
4	5	C2 - 5	140.64	1352.27	11.3	7.90	0.7	2.13	376	
5	6	C2 - 6	104.78	1435.57	8.5	5.96	0.701	0.77	1064	
6	7	C2 - 7	133.33	1361.81	13.0	9.19	0.708	1.30	927	

ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน H – Beam (C5)

Curing Time 28 days									
Depth (m)		Test No.	Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)
From	To				Before Height Corrected	After Height Corrected			
0	1	C4 -1	57.55	1618.91	15.4	10.97	0.712	1.19	1400
1	2	C4 -2	136.19	1352.05	9.71	6.80	0.700	1.55	539
2	3	C4 -2	134.09	1345.21	7.55	5.37	0.711	1.19	770
3	4	C4 -2	126.34	1384.96	10.95	7.56	0.690	1.87	391
4	5	C4 -2	130.88	1346.65	10.71	7.56	0.705	0.95	939
5	6	C4 -2	134.83	1364.78	15.43	10.78	0.698	0.96	1455
6	7	C4 -2	116.26	1385.54	15	10.53	0.702	0.68	2142

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C8)

Curing Time 28 days									
Depth (m)		Test No.	Water Content (%)	Total Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength (ksc)		Corrected Factor	Strain at Failure (%)	Modulus at 50%q <sub>u</sub> (ksc)
From	To				Before Height Corrected	After Height Corrected			
0	1	C3 -1	69.91	1575.45	7.81	5.55	0.710	0.79	1115
1	2	C3 -2	140.11	1352.62	10.69	7.59	0.710	0.52	3340
2	3	C3 -3	136.22	1344.67	10.16	6.93	0.682	0.85	1154
3	4	C3 -4	133.00	1352.46	9.63	6.63	0.708	1.09	1040
4	5	C3 -5	122.93	1378.98	7.98	5.58	0.699	1.54	752
5	6	C3 -6	105.53	1429.79	7.47	5.24	0.702	0.97	933
6	7	C3 -7	129.13	1351.43	17.2	12.06	0.701	0.90	1720

ภาคผนวก จ

ผลการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์



ตารางที่ จ.1 ผลการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์

ไม่มีแกน (C1)		ไม่มีแกน (C2)		อัดแรง (C3)		อัดแรง (C4)	
Disp.	$K_i/K_o$	Disp.	$K_i/K_o$	Disp.	$K_i/K_o$	Disp.	$K_i/K_o$
0.33	1.00	0.27	1.00	0.35	1.00	0.34	1.00
0.805	0.67	0.76	0.67	0.75	0.67	0.76	0.67
1.39	0.50	1.35	0.50	1.24	0.50	1.33	0.50
2.00	0.35	2.00	0.34	2.51	0.40	2.00	0.40
4.00	0.29	4.00	0.30	3.00	0.25	3.03	0.25
6.00	0.32	6.00	0.23	5.00	0.23	5.08	0.23
8.00	0.24	8.00	0.19	7.00	0.20	7.00	0.20
10.00	0.17	10.00	0.15	10.00	0.18	10.08	0.18
				16.00	0.16	16.07	0.16
				23.00	0.15	23.08	0.15
				29.00	0.14	29.01	0.14
				37.00	0.14	37	0.14
				40.00	0.13	40.81	0.13
						45.03	0.12

ตารางที่ จ.2 ผลการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์

H Beam (C5)		H Beam (C6)		ท่อกลม (C7)		H Beam (C8)	
Disp.	Disp.	Disp.	$K_1/K_0$	Disp.	$K_1/K_0$	Disp.	$K_1/K_0$
2.19	1.00	2.35	1.00	0.60	1.00	0.60	1.00
7.42	0.67	8.00	0.67	2.25	0.67	2.18	0.67
17.06	0.50	20.50	0.5	4.30	0.50	4.25	0.50
32.35	0.40	32.27	0.41	7.98	0.40	7.79	0.40
40.00	0.27	40.00	0.29	12.27	0.33	11.66	0.33
45.00	0.22	45.00	0.21	13.00	0.27	13.00	0.23
50.00	0.18	50.00	0.18	15.00	0.17	15.00	0.17
55.00	0.14	55.00	0.14	19.00	0.17	19.00	0.17
				25.00	0.18	25.00	0.17
				33.00	0.17	33.00	0.15
				43.00	0.15	43.00	0.14
				47.00	0.13	47.00	0.12



ภาคผนวก ฉ

ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์





ตารางที่ จ.1 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่ไม่มีเสริมแกน (C1)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0	0	0.25	0.3	0	0.41	0.88	1
0.25	0.15	0	0.06	-0.5	-0.25	1.81	2
0.35	0.24	-0.25	-0.19	-1	-0.85	0.45	1
0.5	0.38	-0.5	-0.45	-1.5	-1.42	-0.5	0
0.25	0.29	-0.75	-0.65	-1	-1.08	-1.2	-1
-0.25	-0.06	-1	-0.86	-0.5	-0.65	-1.71	-2
-0.5	-0.28	-0.75	-0.34	0	-0.08	-0.61	-1
-0.25	-0.23	-0.5	-0.18	1.3	1	0.03	0
0	-0.08	-0.25	0.03	1.98	2	0.74	1
0.25	0.04	0	0.26	0.71	1	1.55	2
0.5	0.2	0.5	0.56	-0.58	0	0.2	0.93
0.75	0.42	1	0.95	-1.33	-1	-0.45	0
1	0.75	1.5	1.36	-1.88	-2	-1.1	-1
0.9	0.78	1	1.25	-0.7	-1	-1.52	-2
0.5	0.54	0.5	0.9	0.05	0	-0.49	-1

ตารางที่ จ.1 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่ไม่มีการเสริมแกน (C1) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.45	0	-0.79	-2	-0.43	0	-2.42	-6
1.76	1.83	0.4	0	-1.2	-2	-0.85	-4
2.65	4	1.4	2	-1.88	-4	-0.18	-2
0.69	2	2.4	4	-2.4	-6	0.35	0
-0.42	0	0.5	2	-0.98	-4	0.88	2
-1.48	-2	-0.15	0	-0.34	-2	1.83	4
-2.12	-4	-1.18	-2	0.22	0	2.44	6
-0.69	-2	-1.78	-4	0.95	2	0.72	4
0.61	0	-0.61	-2	1.93	4	0.11	2
1.73	2	0.3	0	2.68	6	-0.5	0
2.53	4	1.06	2	0.83	4	-1.09	-2
0.35	1.66	2.09	4	0.22	2	-1.86	-4
-0.37	0	2.73	6	-0.37	0	-2.23	-6
-1.35	-2	0.93	4	-0.98	-2	-0.88	-4
-1.97	-4	0.18	2	-1.67	-4	-0.27	-2

ตารางที่ จ.1 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่ไม่มีการเสริมแกน (C1) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.32	0	-0.64	-4	-2.15	-10	-1.53	-5
1.49	4	0.24	0	-0.83	-5	-2.12	-10
2.78	8	1.28	4	0.25	0	-0.51	-5
0.32	4	2.62	8	1.3	5	0.22	0
-0.48	0	0.35	4	2.3	10		
-1.62	-4	-0.4	0	0.05	5		
-2.57	-8	-1.46	-4	-0.8	0		
-0.5	-4	-2.31	-8	-1.7	-5		
0.26	0	-0.75	-4	-2.3	-10		
1.4	4	0.2	0	-0.66	-5		
2.7	8	1.35	5	0.13	0		
0.42	4	2.29	10	1.24	5		
-0.37	0	0.11	5	2.18	10		
-1.54	-4	-0.67	0	0.26	5		
-2.47	-8	-1.59	-5	-0.6	0		

ตารางที่ จ.2 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่ไม่มีการเสริมแกน (C2)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0	0	0.25	0.28	0	0.38	0.9	1
0.25	0.15	0	0.06	-0.5	-0.22	1.75	2
0.5	0.37	-0.25	-0.16	-1	-0.82	0.48	1
0.25	0.25	-0.5	-0.4	-1.5	-1.38	-0.3	0
0	0.13	-0.75	-0.62	-1	-1.03	-1.2	-1
-0.25	0	-1	-0.82	-0.5	-0.6	-1.65	-2
-0.5	-0.17	-0.75	-0.3	0	-0.07	-0.4	-1
-0.25	-0.17	-0.5	-0.15	1.1	1	-0.18	0
0	-0.08	-0.25	0.05	1.95	2	0.7	1
0.25	0.04	0	0.2	0.68	1	1.55	2
0.5	0.17	0.5	0.55	-0.5	0	0.2	1
0.75	0.38	1	0.93	-1.3	-1	-0.1	0
1	0.7	1.5	1.32	-1.85	-2	-1.1	-1
0.9	0.71	1	1.2	-0.5	-1	-1.45	-2
0.5	0.5	0.5	0.88	0.05	0	-0.3	-1

ตารางที่ จ.2 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่ไม่มีเสริมแกน (C2) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.2	0	-0.9	-2	-0.6	0	-2.2	-6
1.8	2	0.4	0	-1.1	-2	-1.1	-4
2.65	4	1.4	2	-1.7	-4	-0.45	-2
0.7	2	2.4	4	-2.3	-6	0.3	0
-0.18	0	0.5	2	-1.1	-4	0.8	2
-1.2	-2	0.2	0	-0.5	-2	1.4	4
-2.1	-4	-0.8	-2	-0.1	0	2.3	6
-0.65	-2	-1.9	-4	0.8	2	0.7	4
0.4	0	-1	-2	1.6	4	0	2
1.6	2	0.2	0	2.5	6	-0.7	0
2.55	4	0.8	2	0.8	4	-1.2	-2
0.6	2	1.8	4	0	2	-1.5	-4
-0.3	0	2.7	6	-0.65	0	-2.1	-6
-1.15	-2	1.1	4	-1.15	-2	-1.1	-4
-2	-4	0	2	-1.6	-4	-0.4	-2

ตารางที่ จ.2 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่ไม่มีการเสริมแกน (C2) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.25	0	-0.9	-4	-2.35	-10	-1.65	-5
1.6	4	0.1	0	-0.8	-5	-2.25	-10
2.7	8	1.3	4	0.25	0	-0.85	-5
0.4	4	2.5	8	1.3	5	0.1	0
-0.35	0	0.3	4	2.3	10		
-1.25	-4	-0.45	0	0.05	5		
-2.4	-8	-1.4	-4	-0.8	0		
-1	-4	-2.3	-8	-1.7	-5		
0.1	0	-0.8	-4	-2.3	-10		
1.4	4	0.2	0	-0.75	-5		
2.6	8	1.5	5	0.25	0		
0.35	4	2.4	10	1.1	5		
-0.4	0	0.1	5	2.2	10		
-1.3	-4	-0.75	0	0	5		
-2.35	-8	-1.75	-5	-0.7	0		

ตารางที่ ๓.3 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C3)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.227	0.302	-1	-0.52	1.13	1.081	-1.58	-3
0.5	0.398	-0.767	-0.489	2	2.544	-0.54	-1.38
0.44	0.204	-0.622	-0.444	1.06	1.959	1.01	1.5
0.069	-0.06	-0.369	-0.346	0.05	0.91	1.74	3
-0.231	-0.24	0.067	-0.163	-0.86	-0.11	0.52	1.59
-0.5	-0.286	0.272	-0.042	-1.34	-0.815	-0.83	-0.87
-0.35	-0.144	1.225	0.8	-2	-2.48	-1.74	-3.06
0.027	0.106	1.5	1.271	-1.29	-2.14	-0.61	-1.49
0.79	0.615	0.486	0.853	-0.44	-1.22	-0.09	-0.32
1	0.967	-0.093	0.407	0.09	-0.06	0.94	1.2
0.851	0.97	-1.15	-0.559	0.74	0.8	1.87	3
0.416	0.741	-1.5	-1.207	1.65	3	0.75	1.74
0.042	0.435	-1.13	-1.104	0.98	2.33	-0.47	-0.25
-0.286	0.099	-0.26	-0.622	-0.56	-0.25	-1.11	-1.52
-0.813	-0.238	0.16	-0.02	-1.25	-1.67	-1.66	-3

ตารางที่ จ.3 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C3) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-0.36	-1.4	-0.25	-1.45	-0.93	-4.77	-2.310	-7
1.11	1.11	1.2	1.72	-0.24	-1.51	-0.980	-5.01
2.37	5	1.98	5	1.090	2.44	-0.050	-1.66
0.5	1.78	0.91	3.29	2.500	7	2.130	5.52
-1.44	-2.43	-0.44	-0.64	1.470	5.79	3.130	10
-2.36	-5	-1.48	-3.31	0.040	0.85	1.350	6.92
-1.18	-3.53	-1.76	-4.965	-1.500	-3.78	-0.030	1.45
0.05	-0.7	-0.49	-3.24	-2.540	-7	-1.500	-5.32
1.29	1.87	0.81	0.88	-0.940	-4.44	-2.750	-10
2.25	5	2.18	4.76	0.070	-1.45	-1.000	-7.43
1.11	3.44	2.78	7	1.400	2.77	0.620	0.88
-0.77	-1.18	1.81	5.94	2.360	7	1.420	4.13
-1.7	-3.69	0.26	2	1.100	4.92	2.780	10
-1.98	-5	-1.72	-4.65	-0.420	-0.94	0.830	5.21
-1.09	-3.89	-2.68	-7	-1.780	-4.95	-0.100	1.22



ตารางที่ จ.3 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C3) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-1.290	-4.7	3.290	16	-1.980	-9.58	2.340	16.12
-2.500	-10	1.150	10.135	-3.060	-16	4.150	23.5
-0.880	-6.46	-0.150	3.695	-0.800	-8.21	1.380	16.8
0.350	-0.03	-0.950	-2.335	0.170	-2.89	0.370	8.7
1.270	3.61	-2.070	-8.82	0.580	0.68	-0.700	-4.8
2.400	10	-3.390	-16	1.460	7.53	-1.410	-12
0.300	3.67	-0.910	-7.83	2.900	16	-2.900	-19.7
-0.830	-2.45	0.110	-2	1.900	13.75	-3.430	-23.445
-2.040	-7.66	0.600	1.29	0.760	7.47	-1.570	-18.4
-2.380	-10	1.130	5.97	-0.110	-0.38	-0.340	-7.59
-0.900	-5.38	2.130	10.42	-1.040	-7.91	0.050	-2.6
-0.200	-1.8	3.150	16	-2.780	-16	0.400	1.47
0.400	1.285	0.990	9.73	-0.890	-10.95	0.830	6.5
1.150	5.425	-0.150	1.9	0.150	-2.13	2.700	17.6
2.060	9.69	-1.000	-4.18	1.060	7.47	3.670	23.19

ตารางที่ ๓.3 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C3) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
1.310	15.3	-0.640	-5.9	-1.640	-18.300	-0.200	2.900
0.200	5.2	-1.250	-11.7	-2.380	-24.200	-0.450	-1.900
-0.180	-0.2	-2.860	-23	-3.540	-29.000	-0.730	-6.900
-0.860	-7.5	-1.110	-17.7	-2.300	-27.400	-0.980	-11.800
-1.780	-14.4	-0.090	-6.5	-1.270	-23.600	-1.400	-18.600
-3.110	-23	0.340	-0.100	-0.730	-16.900	-1.890	-23.400
-1.180	-16.9	1.020	9.200	0.050	-4.300	-3.270	-29.050
-0.060	-4.8	1.910	16.800	0.630	6.700	-1.600	-26.600
0.170	-0.6	4.220	29.000	1.540	16.700	-1.000	-22.200
1.030	7.8	1.800	22.600	4.000	29.000	-0.520	-14.700
2.250	15.4	0.630	11.500	2.920	28.700	0.000	-4.900
3.350	23	-0.130	1.600	2.110	26.300	0.540	7.000
1.370	17.5	-0.450	-3.000	1.240	21.800	1.500	17.200
0.460	7.9	-0.730	-6.900	0.670	16.400	3.830	29.000
-0.150	-0.5	-1.030	-11.300	0.100	9.400	1.750	24.500

ตารางที่ ๓.3 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C3) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.800	19.600	4.520	37.000	2.380	27.100	0.200	-0.395
0.000	8.100	1.820	30.800	4.360	37.000	0.900	12.075
-0.430	-1.000	0.850	19.100	2.400	34.900	1.600	22.095
-0.840	-10.400	0.320	10.600	1.360	27.500	2.050	25.700
-1.300	-16.600	-0.090	2.700	0.700	20.300	4.000	37.000
-1.850	-20.700	-0.780	-8.400	-0.040	5.800	2.500	34.500
-2.530	-25.200	-1.340	-16.300	-0.170	3.500	1.360	29.500
-3.130	-28.960	-2.330	-23.700	-0.370	0.000	0.570	19.700
-2.030	-27.400	-3.450	-29.700	-1.160	-11.600	0.200	12.755
-0.950	-21.000	-4.440	-37.000	-2.180	-24.100	-0.470	-0.450
-0.360	-14.000	-2.630	-33.300	-3.170	-30.000	-1.170	-10.800
0.380	-1.400	-1.110	-22.700	-4.250	-37.000	-2.330	-24.500
1.110	10.900	0.220	-4.200	-1.850	-31.100	-3.200	-31.900
2.000	22.400	0.980	11.600	-0.700	-15.000	-4.080	-37.000
3.600	30.300	1.460	18.700	-0.060	-4.500	-1.670	-30.000

ตารางที่ จ.3 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C3) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-0.620	-16.000	-4.490	-40.000	-2.720	-31.000	-4.160	-40.000
-0.220	-6.000	-2.350	-35.500	-4.300	-40.000	-1.540	-33.100
0.140	1.200	-1.160	-29.100	-1.400	-32.300	0.200	0.000
0.730	11.800	0.110	-1.800	0.240	-3.800		
1.490	22.500	0.850	11.600	0.880	11.200		
2.170	28.500	1.440	21.500	1.360	20.300		
4.520	40.000	2.480	29.900	2.120	28.300		
1.840	34.300	4.130	40.000	4.240	40.000		
0.750	23.700	1.280	29.300	1.770	34.000		
-0.140	9.000	0.400	18.300	0.370	17.055		
-0.370	3.000	-0.040	7.600	-0.040	9.000		
-0.570	-0.400	-0.330	2.000	-0.320	2.565		
-0.870	-10.500	-0.500	-1.200	-0.910	-9.400		
-1.450	-23.100	-0.970	-14.000	-1.550	-21.100		
-2.890	-32.000	-1.690	-24.600	-2.330	-29.500		

ตารางที่ ๑.๔ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0	0	-0.95	-0.525	0	-0.33	-1.35	-2.035
0.4	0.32	-1	-0.58	1	0.94	-1.6	-2.825
0.5	0.375	-0.85	-0.55	2	2.46	-0.5	-1.38
0.4	0.17	-0.65	-0.49	0.75	1.57	1.15	1.96
0	-0.08	-0.4	-0.39	0	0.87	1.8	3.09
-0.35	-0.245	0	-0.18	-1	-0.3	0.7	1.66
-0.5	-0.305	0.15	-0.025	-1.65	-1.05	-0.65	-0.84
-0.4	-0.18	1.1	0.975	-2	-1.53	-1.95	-3.06
0	0.07	1.5	1.505	-1.75	-1.6	-0.45	-1.365
0.9	0.725	0	0.57	-1.25	-1.3	0	-0.27
1	0.94	-0.15	0.47	0	-0.12	0.8	1.215
0.9	0.97	-1.25	-0.63	0.6	0.66	1.8	3.165
0.5	0.77	-1.5	-1.155	1.7	3.1	0.7	2.025
0	0.42	-1.4	-1.155	0.9	2.165	-0.65	-0.46
-0.3	0.155	-0.35	-0.58	-0.65	-0.52	-1.2	-1.965

ตารางที่ จ.4 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-1.8	-2.92	-1.2	-4.18	-2.45	-6.97	-1.70	-5.42
-0.25	-1.16	-0.1	-1.08	-0.85	-4.49	-2.40	-7.03
0.95	1.43	1.05	2.075	-0.05	-1.37	-0.80	-5.03
2.5	5.28	2.05	5.05	0.95	1.90	-0.10	-1.31
0.25	1.40	0.85	3.08	2.25	6.90	2.00	6.01
-1.15	-2.14	-0.65	-1	1.45	5.30	3.25	10.07
-2.2	-5.43	-1.9	-4.31	-0.15	0.03	1.00	6.01
-1.05	-3.71	-2.1	-4.97	-1.45	-4.67	-0.20	0.45
0.05	-0.7	-0.5	-2.43	-2.40	-7.00	-1.20	-4.72
1.15	2.22	0.55	0.475	-0.80	-4.58	-2.40	-10.43
2.35	4.92	1.8	4.15	-0.05	-1.03	-1.20	-7.34
1.2	3.62	2.9	7.02	1.05	2.35	0.35	0.27
-0.55	-0.81	1.65	5.65	2.60	7.09	1.20	4.16
-1.65	-4.05	-0.1	0.36	0.90	4.46	2.90	10.01
-2.1	-4.81	-1.5	-5.15	-0.45	-0.57	0.95	5.78

ตารางที่ จ.4 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-0.10	0.17	1.85	9.69	-0.65	-3.68	0.95	7.99
-1.65	-7.24	3.50	16.03	-1.70	-10.25	2.50	16.74
-2.50	-10.08	0.90	10.14	-2.85	-16.18	4.05	23.50
-0.70	-5.88	0.25	3.70	-0.75	-8.69	1.20	17.04
0.35	0.65	-0.60	-2.34	-0.40	-3.88	0.60	10.04
1.15	4.19	-1.40	-8.44	0.10	0.23	-0.45	-3.03
2.80	10.13	-3.10	-16.30	1.35	8.73	-1.00	-9.83
0.40	3.45	-0.55	-6.60	3.05	15.87	-3.10	-20.97
-0.60	-1.99	-0.20	-2.44	2.10	13.79	-3.25	-23.45
-1.80	-7.23	0.40	1.62	0.40	5.29	-1.40	-17.34
-2.60	-9.80	0.85	5.97	-0.40	-0.67	-0.40	-7.59
-0.90	-6.04	1.60	10.15	-0.95	-6.87	-0.10	-2.85
-0.15	-1.80	3.20	16.06	-2.60	-15.98	0.40	1.47
0.35	1.29	0.70	8.69	-0.60	-8.36	0.70	5.80
0.95	5.43	0.05	2.24	0.05	-1.12	2.70	18.60

ตารางที่ จ.4 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
3.80	23.19	0.05	2.34	-0.90	-10.00	0.45	9.90
0.90	14.22	-0.50	-4.10	-1.50	-18.00	0.00	3.77
0.45	7.18	-1.30	-11.11	-2.10	-22.25	-0.27	-0.46
-0.10	0.72	-3.00	-22.59	-3.65	-29.00	-0.55	-4.50
-0.60	-6.05	-1.00	-17.43	-1.80	-26.00	-0.87	-9.60
-1.60	-13.10	-0.15	-4.34	-1.50	-24.50	-1.40	-17.50
-3.20	-23.00	0.00	-1.10	-0.86	-18.00	-1.85	-21.50
-1.20	-17.43	0.80	8.93	0.00	-2.00	-3.55	-29.05
-0.30	-5.92	1.60	18.41	0.85	10.56	-1.80	-25.50
0.05	-1.25	4.00	29.26	1.70	20.08	-1.20	-22.50
0.85	7.58	1.05	20.56	3.85	28.93	-0.60	-14.20
2.20	16.79	0.45	9.40	2.70	27.00	0.00	-3.50
3.50	22.79	0.00	3.50	2.05	25.00	0.70	8.29
1.00	16.24	-0.25	0.00	1.40	22.00	1.45	18.64
0.55	9.04	-0.55	-5.00	0.90	17.27	3.55	28.87



ตารางที่ ๑.๔ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.00	25.50	3.00	29.57	1.20	18.55	0.00	-4.50
1.05	20.98	4.70	36.99	2.30	27.71	0.20	-0.40
0.12	6.58	2.00	32.12	4.50	36.95	0.85	12.08
-0.30	-0.20	0.75	17.96	3.20	35.00	1.45	22.10
-0.80	-8.75	0.35	10.51	1.40	28.68	2.05	26.64
-1.40	-17.00	-0.05	3.57	0.85	21.37	4.20	36.99
-1.75	-20.00	-0.40	-0.45	0.20	6.78	2.50	33.00
-2.65	-24.00	-1.20	-12.50	0.00	3.50	1.25	27.64
-3.50	-28.96	-2.00	-22.00	-0.25	0.00	0.85	20.21
-2.00	-27.20	-3.30	-30.05	-1.00	-11.05	0.50	12.76
-1.10	-22.00	-4.30	-37.02	-1.80	-22.00	-0.25	-0.45
-0.55	-15.50	-2.00	-31.00	-3.10	-30.00	-0.95	-12.00
0.05	-0.44	-1.00	-20.00	-4.15	-37.10	-1.70	-23.00
0.80	10.78	0.00	-2.75	-1.85	-31.56	-3.00	-31.00
1.50	20.55	0.75	8.54	-0.55	-15.00	-4.05	-37.00

ตารางที่ จ.4 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-1.50	-30.00	-2.75	-32.00	-1.35	-22.00	-2.45	-32.00
-0.45	-16.00	-4.75	-41.05	-2.55	-31.68	-4.60	-40.00
0.00	-6.00	-1.50	-33.25	-4.70	-41.03	-1.10	-31.58
0.25	0.27	-0.50	-20.00	-1.25	-31.50	0.40	-0.46
0.75	10.14	0.25	-0.45	0.45	-0.45	0.80	11.21
1.30	20.21	0.75	9.35	0.75	8.55	1.25	21.49
2.40	29.36	1.20	19.76	1.10	18.82	1.70	26.27
4.90	40.91	2.15	29.15	1.90	28.81	3.00	35.56
1.45	32.01	4.30	41.08	4.35	40.82	5.10	45.11
0.60	17.18	1.50	32.39	1.45	31.89	2.10	39.14
0.40	10.70	0.60	17.50	0.60	17.06	0.85	25.07
0.00	3.00	0.35	9.94	0.35	9.44	0.60	17.57
-0.20	0.00	0.05	3.01	0.05	2.57	0.35	9.97
-0.80	-10.50	-0.10	0.00	-0.70	-12.35	0.05	2.74
-1.45	-22.00	-0.75	-11.58	-1.20	-22.05	-0.10	0.00

ตารางที่ ๓.4 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C4) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-0.85	-12.00						
-1.55	-22.36						
-2.00	-26.55						
-5.00	-45.05						
-2.60	-39.00						
-1.00	-25.68						
0.00	-7.00						
0.40	-0.44						
0.85	11.43						
1.25	19.70						
1.95	29.66						
3.35	38.95						

ตารางที่ น.5 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C5)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.00	0.00	2.74	2.20	7.18	3.50	-14.34	-3.20
0.40	0.60	5.03	3.35	10.62	4.60	-11.61	-2.15
1.17	1.30	7.62	4.00	12.96	5.10	-8.54	-1.10
1.79	1.65	4.87	1.40	18.11	6.00	-5.47	-0.30
2.28	2.00	2.25	0.25	14.84	2.95	-2.76	0.30
1.33	1.00	-2.03	-1.95	11.42	1.80	0.00	0.80
0.68	0.35	-3.57	-2.80	7.66	0.85	5.38	2.15
0.23	0.05	-5.30	-3.60	3.59	-0.15	10.75	3.45
-0.46	-0.75	-7.21	-4.00	0.05	-1.20	16.27	5.00
-0.99	-1.05	-6.90	-3.00	-2.44	-2.00	21.92	6.30
-1.72	-1.70	-6.62	-2.55	-6.26	-3.30	27.27	7.25
-2.09	-2.00	-4.52	-1.10	-8.88	-4.30	32.80	8.00
-1.87	-1.20	-3.03	-0.40	-13.33	-5.50	27.64	3.80
-0.78	-0.25	-0.77	0.55	-16.00	-6.00	22.79	2.60
1.40	1.35	4.40	2.55	-15.92	-4.95	18.22	1.75

ตารางที่ จ.5 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C5) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
13.65	1.10	10.63	2.30	-20.42	-1.80	-12.76	-2.25
8.99	0.40	16.86	3.45	-10.05	-0.15	-21.19	-3.50
4.84	-0.20	23.18	4.75	-0.63	1.25	-28.67	-4.90
0.81	-0.85	29.56	6.05	0.83	1.45	-35.72	-6.50
-6.42	-2.45	40.00	8.00	11.33	2.85	-40.00	-7.20
-10.07	-3.35	36.00	6.10	20.05	4.15	-35.67	-4.95
-13.46	-4.30	28.50	4.05	31.48	6.15	-29.80	-3.45
-16.80	-5.40	17.00	2.15	34.27	6.70	-20.25	-1.75
-25.69	-7.20	-2.70	-1.50	40.00	7.80	-9.82	-0.50
-31.90	-8.00	-10.85	-2.75	34.61	5.15	-4.15	0.10
-31.00	-6.50	-21.98	-4.80	29.37	3.95	-0.50	0.60
-27.35	-4.75	-31.93	-7.00	19.38	2.35	9.34	2.45
-22.00	-3.00	-34.82	-7.55	9.59	1.20	20.99	4.30
-14.00	-1.65	-40.00	-8.00	0.00	-0.25	29.57	5.80
1.64	0.70	-32.90	-4.30	-4.73	-1.10	35.16	6.85

ตารางที่ จ.5 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C5) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
40.00	7.60	21.82	4.55	-29.02	-2.65	-12.82	-2.40
33.04	4.40	30.23	6.00	-18.98	-1.35	-21.25	-3.45
28.02	3.40	41.36	8.10	-8.87	0.00	-29.71	-4.60
18.01	2.00	45.00	8.50	1.70	1.60	-41.10	-6.70
-8.82	-1.75	40.66	5.95	10.23	2.90	-45.00	-7.50
-21.51	-3.50	30.66	3.80	21.68	4.55	-40.77	-5.00
-29.16	-4.85	20.71	2.50	29.83	5.95	-29.05	-2.60
-36.22	-6.30	10.92	1.00	40.67	7.95	-19.08	-1.35
-40.00	-7.10	1.57	-0.20	45.00	8.70	-4.00	0.25
-34.32	-3.80	-12.59	-2.30	40.60	5.90	10.05	3.05
-28.12	-2.60	-21.43	-3.40	35.00	4.40	20.95	4.60
-21.50	-1.55	-31.20	-4.90	21.70	2.55	29.05	5.95
-11.18	-0.50	-39.61	-6.60	12.08	1.25	39.46	8.00
-1.93	0.60	-45.00	-7.85	8.00	0.65	45.00	8.95
10.44	2.80	-41.11	-5.25	-0.80	-0.90	41.94	6.15

ตารางที่ จ.5 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C5) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
31.56	4.00	21.32	2.50	-46.51	-5.40	19.19	0.75
21.11	2.80	31.17	4.20	-40.74	-4.00	9.73	-0.05
11.52	1.70	40.75	6.50	-30.98	-2.45	-8.79	-1.25
1.79	0.00	50.00	8.50	-20.69	-1.30	-23.04	-2.75
-9.08	-1.85	42.03	5.00	-10.16	-0.30	-31.37	-3.85
-22.05	-3.35	31.82	2.00	-0.96	0.50	-39.25	-5.15
-30.25	-4.45	21.74	0.80	11.16	1.30	-46.68	-6.65
-41.31	-6.40	12.31	0.00	20.78	2.30	-50.00	-7.50
-45.00	-7.25	3.27	-0.75	30.53	4.00	-45.13	-4.95
-40.54	-4.20	-10.45	-1.65	40.33	6.00	-39.26	-3.70
-31.59	-2.60	-18.68	-2.70	46.84	7.85	-29.46	-2.20
-28.76	-2.20	-31.60	-4.40	50.00	8.35	-19.11	-1.15
-10.15	-0.30	-39.98	-5.75	45.32	5.50	-11.89	-0.50
-5.25	-0.05	-47.03	-7.45	39.74	3.65	-2.69	0.35
11.58	1.30	-50.00	-8.10	29.33	2.00	9.56	1.15

ตารางที่ จ.5 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C5) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
19.31	1.95	-44.35	-4.50	18.68	0.70	55.00	7.80
32.10	3.95	-41.36	-3.85	9.39	-0.10	50.05	4.30
42.04	6.10	-31.59	-2.35	0.13	-0.85	39.31	2.65
50.00	8.00	-21.31	-1.30	-17.32	-2.20	19.88	0.70
42.85	4.00	-10.86	-0.35	-29.62	-3.80	1.60	-0.80
29.02	1.70	-1.51	0.40	-44.86	-6.20	-21.30	-2.45
18.94	0.80	10.73	1.40	-50.00	-7.55	-41.30	-5.10
9.64	-0.05	20.46	2.25	-55.00	-7.95	-48.26	-6.10
0.70	-0.80	30.37	3.30	-50.84	-5.30	-55.00	-6.90
-12.73	-1.75	40.08	4.50	-40.07	-3.15	-50.44	-4.40
-20.67	-2.65	49.65	7.20	-19.65	-0.95	-41.23	-3.05
-29.23	-3.80	55.00	8.00	-3.25	0.40	-20.57	-1.00
-40.49	-5.45	49.34	4.30	19.29	2.10	-3.79	0.35
-44.38	-6.25	39.02	2.75	41.96	4.65	19.29	1.90
-50.00	-7.50	28.61	1.60	51.24	7.10	41.96	4.35



ตารางที่ จ.5 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C5) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
51.24	6.7						
55	7.55						
50.05	4.15						
39.31	2.45						
19.88	0.5						
1.6	-0.6						
-21.3	-2.3						
-41.3	-4.85						
-48.26	-5.85						
-55	-6.65						
-50.44	-4.3						
-41.23	-2.95						
-20.57	-0.75						
-11.05	0						

ตารางที่ ๑.6 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C6)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0	0	2.2	2.9	3.8	7.18	-2.73	-12.8
0.6	0.3	3.35	5.5	4.8	10.62	-1.87	-9.7
1.3	1.3	4	8	5.36	12.96	-1.1	-7.3
1.65	1.6	1.4	4.5	6.4	21	-0.3	-4.4
2	2.4	0.25	2	3.62	14.84	0.3	-2.76
1	1.5	-1.95	-2	2.48	11.42	1.6	2.2
0.35	0.6	-2.8	-4	1.41	7.66	2.95	6.8
0.05	0.3	-3.6	-5	0.23	3.59	4.4	13
-0.75	-0.6	-4	-8	-1.2	0.05	5.7	18.5
-1.05	-1.1	-3	-7	-2	-2.44	6.74	23.8
-1.7	-1.9	-2.55	-6.5	-3	-5.2	7.64	28.4
-2	-2.3	-1.1	-4	-3.86	-8.88	8.1	32.65
-1.2	-1.6	-0.4	-2.73	-4.87	-13.3	4.37	26.6
-0.25	-0.9	0.92	-0.77	-5.75	-20	2.45	19.5
1.35	1.9	3	4.4	-4.48	-18.9	1.66	15.3

ตารางที่ ๑.6 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C6) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
1.1	12.2	3.2	10.63	-2.11	-20.42	-3.39	-12.76
0.08	7.6	4.25	16.86	-0.1	-10.05	-4.76	-21.19
-1.04	3.2	5.55	23.18	1.45	-0.63	-6.17	-28.67
-1.77	0	6.96	30.1	1.7	0.83	-7.69	-34.6
-3.24	-7	8.85	40	3.68	13.2	-8.4	-40
-3.86	-11.5	5.66	36	4.61	20.05	-5.03	-35.7
-4.3	-13.46	3.6	27.5	6.84	33	-3.41	-29.3
-5.4	-18.3	1.66	17	7.46	35	-1.55	-18
-7.69	-25.69	-1.84	-2.7	8.2	40	0.2	-6
-8.65	-31.9	-3.26	-10.85	4.73	35.5	0.75	-2
-6.5	-30.7	-5.8	-22.8	3	27.5	1.2	1.3
-4.31	-26.3	-7.91	-31.93	1.63	19.38	2.56	11.2
-2.73	-22	-9.34	-40	0.2	9.59	4.4	22.9
-1.15	-14	-7.72	-38.8	-1.15	0	5.8	31.3
1.66	1.64	-4.51	-31.7	-1.9	-4.73	6.88	37.4

ตารางที่ ๑.๖ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C6) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
7.13	40	4.55	24	-2.45	-30.1	-2.73	-14.8
4.35	35.2	5.77	31.2	-0.7	-15.6	-3.86	-23
2.57	25.6	8.1	41	0.31	-7.1	-4.93	-29.71
1.36	16.4	8.4	45	1.55	3.7	-6.56	-38.6
-2.29	-8.82	4.93	39.4	2.68	13.2	-7.75	-45
-4.2	-21.51	3.07	30.7	4.37	24.3	-5	-43.6
-5.38	-29.16	1.72	20.71	6.85	36.7	-2.51	-30.9
-6.62	-35.2	0.4	10.92	7.63	41.2	-0.87	-19.08
-7.5	-40	-0.7	0.5	8	45	0.54	-4
-4.03	-37	-2.45	-12.59	4.76	40.7	2.23	10.05
-2.06	-24.7	-3.69	-21.43	3.46	34.4	3.69	20.95
-1.13	-15.9	-5.1	-30.9	1.49	20.4	5.1	30.1
-0.26	-9.3	-6.62	-37.5	0.31	11.4	6.9	37.5
0.95	0.2	-8.14	-45	-0.2	6.9	7.8	45
2.8	12	-4.31	-41.11	-1.04	-0.8	5.1	41.2

ตารางที่ ๑.๖ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C6) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.51	29.9	3.46	21.32	-5.4	-46.51	0.65	19.19
1.1	20	5.04	31.7	-4	-40.74	-0.31	9.73
0.08	11.52	7.2	41.5	-2.11	-27.5	-2.11	-8.79
-0.93	1.79	8.35	50	-1.49	-20.69	-3.6	-23.04
-2.06	-9.08	5	44.1	-0.37	-10.16	-4.59	-31.37
-3.46	-22.05	2.45	31.82	0.8	1.6	-6.11	-39.4
-5.2	-32.2	1.04	21.74	2	12.2	-7.46	-45.5
-7.01	-40	0	12.31	3.24	20.78	-8.03	-50
-7.46	-45	-1.15	3.27	4.65	30.53	-4.95	-46.3
-4.2	-41.5	-2.56	-10.45	6.56	40.33	-3.46	-38.6
-2	-27.8	-3.41	-18.68	7.85	46.84	-2.17	-29.46
-2.2	-28.76	-4.93	-31.6	8.2	50	-0.99	-19.11
-0.3	-12.2	-6.56	-39.98	5.5	46.8	-0.25	-11.89
0.59	-1.9	-8.03	-47.03	3.65	38.3	0.65	-2.69
2.17	11.58	-8.14	-50	2	29.33	1.94	9.56

ตารางที่ จ.6 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C6) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
3.01	19.31	-4.5	-46	0.65	18.68	7.41	55
4.65	32.1	-3.35	-41.36	-0.2	10	4.08	50.4
6.1	41	-2.06	-32	-1.27	-1.4	2.45	38.4
7.69	50	-0.99	-21.31	-2.68	-17.32	0.59	18.7
3.8	43.1	-0.03	-10.86	-4.14	-30	-0.99	0.7
1.94	29.02	0.7	-1.51	-6.23	-44	-2.8	-21.3
0.8	18.2	1.77	10.73	-7.2	-49.7	-5.38	-41.3
-0.05	10.3	2.85	21.4	-7.6	-55	-6.4	-48.26
-1.04	0.7	4.2	32	-4.76	-51.1	-6.8	-55
-2.34	-12.73	5.1	38.1	-2.45	-36.3	-4.4	-50.44
-3.13	-20.67	7.2	49.65	-0.7	-19.65	-3.15	-42.23
-4.25	-29.23	7.69	55	0.76	-3.25	-1	-20.57
-5.89	-38.6	4.31	50.1	2.8	19.29	0.35	-3.79
-7.2	-44.38	2.73	38.4	5.2	41.96	2.45	19.3
-8	-50	1.6	28.61	7.01	50.7	4.59	37.96

ตารางที่ จ.6 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนเหล็ก H Beam (C6) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
6.65	50.24						
7.2	55						
4	50.7						
2.32	39.1						
0.65	20.8						
-1.04	1.65						
-3.07	-21.8						
-5.15	-41.3						
-6.06	-48.26						
-6.5	-55						
-4.6	-49.45						
-3.01	-43.13						
-0.85	-21.2						
0	-10.01						

ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C7)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.00	0.00	0.64	1.90	-0.94	-2.05	0.54	4.32
0.23	0.17	0.20	1.12	-1.25	-3.37	0.05	1.30
0.50	0.69	-0.70	-0.73	-1.37	-3.72	-0.57	-1.16
0.26	0.63	-1.03	-1.72	-1.50	-4.23	-1.32	-3.87
-0.07	0.24	-1.00	-2.18	-1.26	-4.23	-1.66	-5.20
-0.36	-0.18	-0.89	-1.95	-0.69	-3.85	-1.86	-6.18
-0.47	-0.37	-0.65	-1.63	-0.14	-2.67	-2.00	-7.15
-0.50	-0.51	0.28	-0.17	0.36	-0.85	-1.68	-6.87
-0.43	-0.49	0.92	1.23	1.06	2.86	-0.77	-5.60
-0.38	-0.46	1.31	3.40	1.50	5.11	-0.44	-4.97
0.22	-0.04	1.50	4.36	1.77	6.80	-0.15	-3.75
0.72	0.83	1.28	4.28	1.89	7.77	0.30	-1.65
0.80	1.28	0.94	3.75	2.00	8.80	1.16	3.10
0.89	1.92	0.39	2.62	1.81	8.74	1.95	8.82
1.00	2.32	-0.23	0.17	1.00	6.87	2.23	11.77



ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C7) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.40	13.07	1.27	4.76	0.12	-4.18	-0.07	-3.84
2.50	13.92	1.77	9.21	0.62	-0.85	0.88	3.37
1.33	11.15	2.09	11.67	1.78	10.31	1.17	6.00
0.75	7.23	2.13	13.00	1.96	12.07	1.79	10.85
0.13	3.04	1.11	9.13	2.03	13.00	1.94	11.73
-0.29	-0.59	0.70	5.87	1.34	11.60	2.13	13.00
-0.85	-3.10	0.19	2.14	0.85	8.95	1.17	10.37
-2.03	-7.70	-0.36	-1.53	0.30	3.10	0.73	7.38
-2.29	-9.05	-1.05	-4.59	-1.39	-6.70	0.20	2.82
-2.50	-10.63	-2.28	-9.69	-2.10	-9.69	-0.10	0.03
-1.80	-10.16	-2.68	-11.87	-2.59	-12.07	-0.42	-2.07
-0.38	-6.43	-2.87	-13.00	-2.73	-13.00	-0.94	-5.75
0.00	-4.29	-1.83	-12.35	-1.24	-10.44	-1.73	-9.22
0.20	-2.38	-1.17	-10.51	-0.74	-8.67	-2.29	-11.73
0.67	0.79	-0.28	-5.54	-0.35	-5.95	-2.60	-13.00

ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-1.39	-11.80	-1.49	-10.00	-0.11	-3.85	1.06	9.48
-0.54	-9.49	-2.01	-12.29	-0.52	-7.39	0.63	4.76
-0.19	-6.63	-2.49	-15.00	-0.95	-10.66	0.38	0.95
0.04	-3.91	-1.25	-12.56	-1.36	-13.47	-0.44	-6.12
0.59	1.80	-0.79	-9.75	-1.48	-15.00	-0.87	-9.00
0.99	5.20	0.02	-4.40	-0.49	-12.83	-1.27	-11.75
1.59	10.31	0.31	-2.31	-0.07	-8.66	-1.74	-15.00
1.91	13.10	1.42	5.31	0.14	-6.30	-0.59	-13.29
2.13	15.00	2.10	10.66	0.74	0.32	0.07	-7.48
1.57	13.41	2.50	13.47	0.97	2.18	0.36	-4.31
0.93	8.73	2.69	15.00	1.60	7.21	0.90	0.80
0.45	4.37	1.70	12.74	2.05	11.13	1.40	6.60
0.18	1.75	1.13	8.48	2.37	13.83	2.57	15.10
-0.18	-2.00	0.56	4.22	2.54	15.00	2.96	19.00
-0.91	-6.43	0.21	-0.05	1.70	13.47	2.00	17.10

ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
1.35	13.10	1.33	13.80	2.76	19.00	2.46	14.50
0.92	8.50	0.97	9.20	1.82	16.70	3.36	20.20
0.36	2.30	0.62	4.60	1.12	10.80	3.81	25.00
-0.23	-4.00	0.33	0.40	0.71	6.00	2.07	20.50
-0.57	-7.20	-0.03	-3.50	0.29	1.20	1.42	16.40
-1.82	-14.60	-0.92	-12.10	-0.08	-2.90	1.00	12.20
-2.36	-19.00	-1.71	-16.40	-0.85	-10.10	0.54	7.00
-0.98	-16.00	-2.28	-19.00	-1.60	-15.70	0.14	1.00
-0.06	-9.70	-0.90	-17.00	-2.28	-19.00	-0.39	-5.20
0.56	-2.60	-0.14	-11.50	-0.74	-16.60	-0.82	-9.30
1.31	5.50	0.37	-4.10	-0.15	-10.70	-1.75	-16.80
1.83	10.90	0.85	1.60	0.37	-3.80	-2.46	-21.20
2.34	15.10	1.39	7.70	0.92	2.20	-3.36	-25.00
2.78	19.00	1.67	10.30	1.37	7.00	-1.03	-21.70
1.91	17.00	2.25	14.80	1.82	10.70	-0.06	-13.10

ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C7) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.33	-7.40	-1.05	-14.40	0.50	7.30	4.17	33.00
0.70	-2.40	-1.89	-18.20	0.30	4.00	3.95	33.00
0.93	0.70	-2.96	-25.00	0.03	-0.50	2.35	28.00
1.39	6.70	-1.14	-21.40	-0.26	-5.20	1.57	21.60
1.82	12.30	-0.17	-14.90	-0.89	-12.90	1.04	13.30
2.12	15.30	0.32	-7.80	-1.30	-17.10	0.06	-2.40
3.00	21.00	0.46	-5.20	-1.87	-20.30	-0.63	-10.80
3.48	25.00	0.79	0.30	-2.71	-25.00	-1.62	-21.10
2.31	22.10	1.30	7.30	-1.14	-22.20	-3.36	-28.40
1.57	18.20	1.85	12.60	-0.09	-14.60	-3.90	-33.00
1.07	13.70	2.18	15.60	0.36	-9.30	-1.68	-29.70
0.52	5.90	2.92	20.70	0.56	-5.90	-0.24	-19.30
0.13	-1.30	3.30	25.00	0.90	0.10	0.35	-10.40
-0.13	-5.40	1.83	21.00	1.85	11.70	0.91	-0.80
-0.42	-8.90	1.00	14.20	2.45	18.40	1.85	13.30

ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C7) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.40	19.90	1.43	10.80	0.93	1.80	-4.03	-43.00
3.57	28.80	2.05	19.00	1.62	12.40	-2.14	-40.00
3.87	33.00	3.20	28.00	2.35	22.00	-0.83	-30.60
2.03	26.40	3.62	33.00	3.27	30.80	-0.09	-20.50
1.16	18.40	2.38	28.60	4.20	39.00	0.55	-10.27
0.58	9.50	1.34	21.10	4.49	43.00	1.00	-0.70
0.17	1.94	0.79	13.30	2.81	37.60	1.60	11.00
-0.37	-9.00	0.13	2.60	2.03	31.60	2.19	21.90
-1.21	-19.00	-0.46	-8.40	1.40	23.90	3.18	34.10
-2.19	-26.40	-1.08	-17.30	0.64	11.60	4.05	40.40
-3.62	-33.00	-2.20	-27.70	-0.01	-1.60	4.23	43.00
-1.21	-30.60	-3.16	-33.00	-0.57	-11.20	2.75	40.10
-0.32	-21.70	-1.26	-30.40	-1.20	-19.80	1.93	32.50
0.06	-14.00	-0.34	-22.80	-2.57	-32.50	1.11	20.50
0.93	1.90	0.44	-7.70	-3.85	-38.80	0.63	12.00

ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C7) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.17	3.10	3.62	38.00	0.83	-5.90	-2.65	-38.20
-0.58	-11.00	3.90	43.00	1.09	1.80	-3.20	-42.90
-1.11	-19.20	2.60	39.30	1.60	13.20	-3.64	-47.00
-2.06	-29.30	1.55	29.30	2.42	23.80	-2.11	-45.30
-3.30	-37.40	0.91	19.20	3.02	30.60	-0.86	-36.90
-3.77	-43.00	0.52	10.50	4.16	40.70	-0.27	-26.80
-2.14	-41.00	0.17	1.00	4.47	47.00	0.10	-19.20
-0.42	-28.00	-0.50	-14.80	3.08	44.20	0.52	-9.40
0.06	-20.50	-1.08	-23.80	2.11	38.20	0.88	0.10
0.60	-9.40	-2.00	-30.60	1.32	30.10	1.06	6.10
0.98	-1.07	-3.03	-37.10	0.68	17.80	1.52	17.00
1.11	2.90	-3.59	-43.00	0.00	-1.50	2.03	23.80
1.70	13.20	-2.02	-40.70	-0.63	-12.90	2.88	32.20
2.24	21.90	-0.85	-34.40	-1.14	-21.90	3.62	38.50
3.00	32.50	0.21	-19.20	-1.80	-30.90	3.90	47.00

ตารางที่ จ.7 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C7) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.60	42.00	1.00	2.90	-1.05	-22.20		
1.68	33.90	1.57	13.70	-1.80	-32.20		
1.06	25.40	2.05	23.00	-2.37	-37.40		
0.22	11.30	2.63	31.20	-2.83	-41.50		
-0.35	-0.33	3.40	40.47	-3.42	-47.00		
-0.62	-8.00	3.73	44.00	-1.77	-44.50		
-1.08	-20.00	3.83	47.00	-0.89	-39.00		
-1.84	-30.90	2.26	41.20	-0.46	-32.00		
-2.64	-38.20	1.75	36.60	0.00	-19.50		
-3.31	-47.00	1.13	27.60				
-1.24	-41.20	0.70	18.10				
-0.29	-28.20	0.40	11.30				
0.14	-17.60	0.03	1.63				
0.42	-10.20	-0.25	-5.30				
0.80	-1.20	-0.60	-13.70				

ตารางที่ ๘.๘ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.00	0.00	0.60	1.86	-1.00	-2.21	0.45	3.73
0.25	0.16	0.15	0.95	-1.30	-3.32	0.10	1.10
0.50	0.72	-0.75	-0.96	-1.40	-3.71	-0.50	-1.50
0.25	0.61	-0.95	-1.85	-1.50	-4.00	-1.25	-3.72
-0.05	0.25	-1.00	-2.10	-1.20	-3.90	-1.60	-4.74
-0.40	-0.20	-0.85	-2.00	-0.75	-3.73	-1.95	-6.39
-0.45	-0.36	-0.60	-1.73	-0.10	-2.30	-2.00	-6.95
-0.50	-0.49	0.35	0.07	0.30	-0.46	-1.60	-6.50
-0.45	-0.46	0.85	1.38	1.15	3.17	-0.65	-5.67
-0.40	-0.45	1.40	3.56	1.45	4.90	-0.50	-5.30
0.20	-0.06	1.50	4.50	1.70	6.46	-0.25	-3.90
0.70	0.79	1.35	4.40	1.95	8.17	0.20	-1.11
0.80	1.31	1.00	3.95	2.00	8.63	1.05	3.46
0.90	2.05	0.45	2.52	1.85	8.23	2.05	9.48
1.00	2.26	-0.15	0.00	0.95	6.71	2.30	11.24



ตารางที่ ๘.๘ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.45	12.78	1.15	5.33	0.00	-4.60	0.00	-3.48
2.50	13.30	1.85	10.20	0.50	0.00	0.80	3.68
1.15	10.35	2.15	12.23	1.70	11.68	1.10	6.32
0.65	6.41	2.25	13.00	1.80	12.48	1.70	10.90
0.20	2.69	1.05	9.55	1.90	13.00	1.85	11.91
-0.35	-1.11	0.65	5.37	1.50	12.19	2.00	13.00
-1.05	-4.32	0.25	1.85	0.95	9.58	1.10	10.70
-1.90	-7.15	-0.25	-2.17	0.55	3.78	0.65	6.98
-2.40	-9.68	-0.90	-5.45	-1.25	-6.09	0.30	3.16
-2.50	-10.02	-2.40	-10.96	-1.95	-9.30	0.00	0.38
-2.00	-9.52	-2.70	-12.79	-2.50	-11.89	-0.50	-2.58
-0.50	-6.84	-2.75	-13.00	-2.65	-13.00	-1.05	-6.11
0.00	-3.85	-2.00	-12.61	-1.40	-11.21	-1.80	-9.99
0.10	-2.86	-1.00	-10.95	-0.70	-9.08	-2.40	-12.05
0.50	0.31	-0.15	-5.76	-0.40	-6.20	-2.50	-13.00

ตารางที่ จ.8 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
-1.15	-11.86	-1.35	-9.46	0.00	-4.34	0.95	8.81
-0.65	-10.16	-2.20	-12.52	-0.55	-7.79	0.65	4.49
-0.30	-7.31	-2.85	-15.00	-1.00	-11.28	0.30	0.43
-0.05	-4.42	-1.30	-13.09	-1.40	-14.27	-0.60	-7.38
0.70	2.97	-0.70	-10.90	-1.55	-15.00	-0.90	-9.94
1.05	5.54	-0.10	-5.08	-0.55	-12.06	-1.15	-11.25
1.70	10.86	0.15	-2.65	-0.25	-9.22	-1.60	-15.00
2.10	13.76	1.45	4.71	0.05	-6.79	-0.70	-13.12
2.35	15.00	2.15	10.11	0.85	0.00	-0.05	-7.68
1.40	12.76	2.60	12.92	1.00	1.20	0.20	-4.95
0.90	8.98	2.80	15.00	1.50	6.31	0.80	0.56
0.55	5.03	1.55	11.58	2.05	11.13	1.35	6.12
0.20	1.23	1.05	7.56	2.45	13.46	2.50	14.70
-0.30	-2.37	0.70	3.39	2.60	15.00	3.10	19.00
-0.80	-5.84	0.35	-0.53	1.50	12.96	1.90	16.12

ตารางที่ ๘.๘ ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
1.25	12.36	1.25	12.72	2.85	19.00	2.35	15.43
0.85	7.73	0.85	8.25	1.95	17.39	3.25	21.05
0.25	0.49	0.55	3.83	0.85	9.25	3.60	25.00
-0.15	-4.65	0.25	0.41	0.60	4.75	1.75	19.41
-0.65	-8.32	-0.05	-4.40	0.35	0.67	1.25	15.42
-1.75	-15.67	-1.05	-11.76	-0.05	-3.53	0.95	10.98
-2.55	-19.00	-1.55	-15.55	-1.00	-10.91	0.65	6.42
-0.70	-14.90	-2.45	-19.00	-1.45	-14.67	0.40	2.03
-0.15	-8.95	-0.90	-16.18	-2.40	-19.00	-0.25	-6.31
0.35	-3.81	-0.25	-10.19	-0.70	-15.94	-0.70	-10.07
1.15	4.48	0.25	-4.99	-0.10	-9.89	-1.75	-17.49
1.75	10.26	0.80	0.90	0.40	-4.67	-2.70	-20.24
2.50	15.99	1.30	6.67	0.80	1.02	-3.55	-25.00
2.90	19.00	1.60	9.52	1.30	6.76	-0.90	-19.98
1.90	16.45	2.30	15.19	1.60	9.63	-0.35	-14.20

ตารางที่ จ.8 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.15	-8.59	-1.30	-15.90	0.75	9.13	4.05	31.53
0.55	-3.11	-1.80	-19.34	0.45	4.54	3.95	33.00
0.70	-0.11	-3.05	-25.00	0.25	0.15	2.60	29.34
1.15	5.70	-0.90	-20.25	0.00	-4.14	1.45	20.86
1.70	11.45	-0.40	-14.19	-0.85	-11.87	0.85	12.11
2.00	14.24	0.15	-8.59	-1.30	-15.79	0.15	-1.37
2.70	19.90	0.35	-5.96	-1.75	-19.37	-0.50	-9.73
3.30	25.00	0.70	-0.22	-2.90	-25.00	-1.85	-21.31
2.05	21.23	1.20	5.62	-0.85	-21.00	-3.65	-29.69
1.45	17.33	1.65	11.40	-0.30	-15.03	-4.05	-33.00
1.05	12.82	1.95	14.35	0.15	-9.50	-1.45	-28.91
0.50	4.05	2.60	20.00	0.40	-6.84	-0.50	-20.16
0.25	-0.22	3.20	25.00	0.70	-0.91	0.15	-11.63
0.00	-4.52	1.95	21.90	1.60	10.96	0.80	-0.09
-0.40	-8.31	1.05	13.69	2.45	19.43	1.65	11.86

ตารางที่ จ.8 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

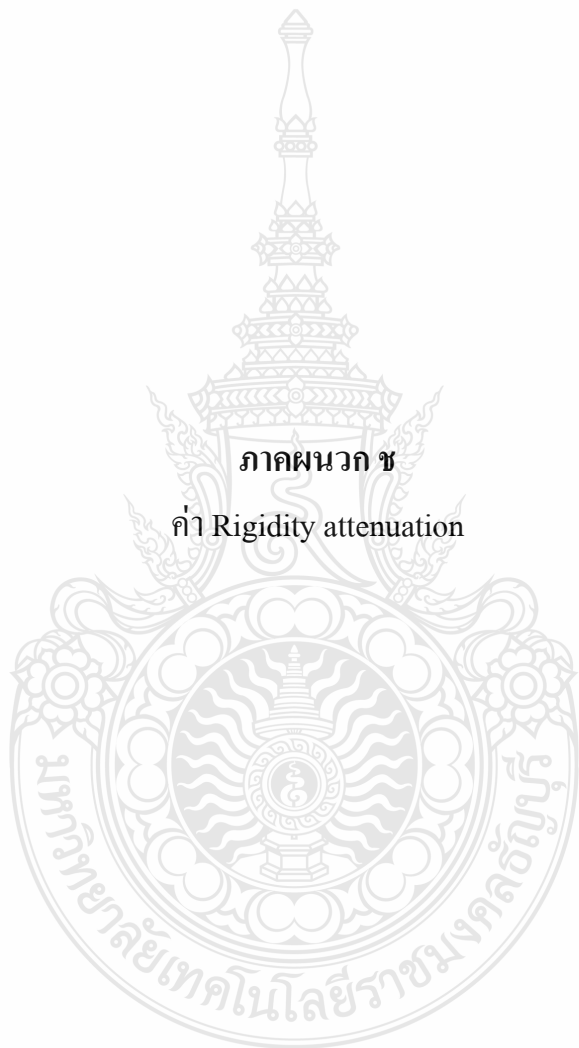
Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.40	20.60	1.40	9.01	0.75	-1.36	-4.30	-43.00
3.50	29.50	2.35	20.97	1.50	10.81	-1.95	-39.33
3.75	33.00	3.40	29.81	2.20	20.03	-0.75	-31.17
2.30	28.64	3.65	33.00	3.15	28.85	-0.25	-21.44
1.40	19.99	2.65	30.00	4.20	38.07	0.45	-10.27
0.80	11.14	1.50	20.00	4.45	43.00	0.80	-0.22
0.30	1.94	0.90	11.05	3.00	39.90	1.45	9.67
-0.50	-10.65	0.25	0.05	1.80	31.38	2.05	19.06
-1.60	-21.87	-0.35	-9.85	1.20	22.19	3.10	31.41
-2.30	-27.80	-1.30	-19.84	0.45	8.45	4.05	40.67
-3.35	-33.00	-2.45	-31.05	0.10	-0.64	4.15	43.00
-1.40	-29.14	-2.65	-33.00	-0.40	-9.54	3.35	41.16
-0.50	-20.27	-1.35	-30.58	-1.40	-21.68	2.00	32.71
0.15	-11.64	-0.50	-21.75	-2.30	-29.78	0.95	18.84
0.75	0.07	0.35	-10.44	-4.00	-39.63	0.50	9.95

ตารางที่ จ.8 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
0.20	0.61	3.75	39.12	0.55	-9.49	-2.80	-40.05
-0.20	-8.48	4.05	43.00	0.90	0.21	-3.35	-45.02
-1.15	-20.75	2.90	41.18	1.35	9.29	-3.50	-47.00
-1.85	-29.17	1.75	32.40	2.15	21.72	-1.90	-44.11
-3.30	-40.21	1.10	23.39	2.90	31.17	-1.05	-38.59
-3.65	-43.00	0.40	9.80	3.80	40.59	-0.45	-29.30
-1.90	-39.74	0.15	0.17	4.25	47.00	0.10	-19.85
-0.75	-31.46	-0.50	-12.77	3.10	43.00	0.45	-11.34
-0.20	-21.88	-1.10	-21.16	2.45	39.54	0.75	-1.05
0.45	-10.65	-1.75	-29.75	1.55	30.05	0.90	1.51
0.80	-1.07	-3.15	-41.19	0.95	21.02	1.35	10.80
0.95	1.98	-3.40	-43.00	0.15	0.04	1.95	20.21
1.50	11.11	-1.40	-39.38	-0.40	-10.03	2.65	29.68
2.10	20.57	-0.55	-30.47	-1.00	-20.95	3.40	39.13
2.80	29.88	0.00	-20.80	-1.65	-29.85	4.10	47.00

ตารางที่ จ.8 ค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์  
ที่เสริมแกนด้วยท่อเหล็กกลม (C8) (ต่อ)

Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)	Load (ton)	Disp. (mm)
2.45	41.03	0.90	0.91	-0.85	-20.57		
1.60	32.04	1.25	10.49	-1.45	-29.39		
0.95	22.99	1.90	20.00	-2.50	-41.83		
0.40	9.22	2.60	29.54	-3.05	-45.36		
0.15	-0.33	3.40	40.47	-3.30	-47.00		
-0.25	-9.32	3.75	43.12	-1.45	-43.58		
-1.00	-22.33	4.00	47.00	-1.05	-40.77		
-1.55	-31.11	2.40	42.38	-0.45	-31.16		
-2.75	-43.00	1.95	38.28	0.00	-21.42		
-3.40	-47.00	1.20	28.94				
-1.45	-41.99	0.75	19.86				
-0.45	-29.66	0.40	11.30				
0.05	-20.20	0.15	1.63				
0.40	-11.99	0.00	-2.75				
0.80	-2.28	-0.40	-11.64				



**ภาคผนวก ข**

ค่า Rigidity attenuation



ตารางที่ ข.1 Rigidity attenuation

ไม่มีแกน (C1)		ไม่มีแกน (C2)		อัดแรง (C3)		อัดแรง (C4)	
Disp.	$K_1/K_0$	Disp.	$K_1/K_0$	Disp.	$K_1/K_0$	Disp.	$K_1/K_0$
0.33	1.00	0.27	1.00	0.35	1.00	0.34	1.00
0.805	0.67	0.76	0.67	0.75	0.67	0.76	0.67
1.39	0.50	1.35	0.50	1.24	0.50	1.33	0.50
2.00	0.35	2.00	0.34	2.51	0.40	2.00	0.40
4.00	0.29	4.00	0.30	3.00	0.25	3.03	0.25
6.00	0.32	6.00	0.23	5.00	0.23	5.08	0.23
8.00	0.24	8.00	0.19	7.00	0.20	7.00	0.20
10.00	0.17	10.00	0.15	10.00	0.18	10.08	0.18
				16.00	0.16	16.07	0.16
				23.00	0.15	23.08	0.15
				29.00	0.14	29.01	0.14
				37.00	0.14	37	0.14
				40.00	0.13	40.81	0.13
						45.03	0.12

ตารางที่ ข.2 Rigidity attenuation

H Beam (C5)		H Beam (C6)		ท่อกลม (C7)		H Beam (C8)	
Disp.	Disp.	Disp.	$K_1/K_0$	Disp.	$K_1/K_0$	Disp.	$K_1/K_0$
2.19	1.00	2.35	1.00	0.60	1.00	0.60	1.00
7.42	0.67	8.00	0.67	2.25	0.67	2.18	0.67
17.06	0.50	20.50	0.5	4.30	0.50	4.25	0.50
32.35	0.40	32.27	0.41	7.98	0.40	7.79	0.40
40.00	0.27	40.00	0.29	12.27	0.33	11.66	0.33
45.00	0.22	45.00	0.21	13.00	0.27	13.00	0.23
50.00	0.18	50.00	0.18	15.00	0.17	15.00	0.17
55.00	0.14	55.00	0.14	19.00	0.17	19.00	0.17
				25.00	0.18	25.00	0.17
				33.00	0.17	33.00	0.15
				43.00	0.15	43.00	0.14
				47.00	0.13	47.00	0.12





ภาคผนวก ข

ค่าการกระจายพลังงาน

(Energy dissipation capacity)

ตารางที่ ข.1 ค่าการกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity)

ไม่มีแกน (C1)		ไม่มีแกน (C2)		อัดแรง (C3)		อัดแรง (C4)	
Disp.	Energy	Disp.	Energy	Disp.	Energy	Disp.	Energy
0.33	0.07	0.27	0.12	0.35	0.10	0.34	0.13
0.805	0.26	0.76	0.5	0.75	0.36	0.76	0.72
1.39	0.43	1.35	0.8	1.24	1.00	1.33	1.84
2	0.98	2	1.97	2.51	2.24	2	3.04
4	2.92	4	4.33	3	1.55	3.03	2.82
6	4.86	6	7.36	5	3.69	5.08	6.03
8	6.11	8	9.75	7	5.28	7	8.28
10	8.54	10	18.13	10	7.00	10.08	11.39
				16	12.35	16.07	16.78
				23	18.03	23.08	34.28
				29	24.22	29.01	38.15
				37	38.02	37	61.14
				40	40.10	40.81	85.37
						45.03	77.96

ตารางที่ ข.2 ค่าการกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity)

H Beam (C5)		H Beam (C6)		ท่อกลม (C7)		ท่อกลม (C8)	
Disp.	Energy	Disp.	Energy	Disp.	Energy	Disp.	Energy
2.19	2.31	2.35	1.03	0.6	0.18	0.61	0.39
7.42	26.14	8	9.56	2.25	1.08	2.18	2.06
17.06	87.72	20.5	46.56	4.3	3.17	4.25	5.49
32.35	164.93	32.27	99.99	7.98	6.60	7.79	11.42
40	143	40	105.60	12.27	12.09	11.66	19.47
45	174.14	45	109.74	13	10.05	13	18.19
50	152.8	50	116.33	15	8.85	15	17.5
55	184.78	55	119.85	19	13.65	19	24.96
				25	23.77	25	38.89
				33	38.12	33	58.61
				43	50.17	43	95.56
				47	58.09	47	96.16



ภาคผนวก ฅ

ภาพบรรยายประกอบขั้นตอนการทำวิจัย



ภาพที่ ฅ.1 การวางเตรียมพื้นที่และกำหนดตำแหน่งก่อสร้าง



ภาพที่ ฅ.2 การซ้ังอัตราส่วนผสมด้วยเครื่องซ้ัง



ภาพที่ ฅ.3 การเทปูนซีเมนต์ลงเข้า Silo



ภาพที่ ฅ.4 ถังผสมทำการผสมน้ำและปูนผงเข้าด้วยกัน





ภาพที่ ฉ.5 การตรวจสอบคุณภาพของส่วนน้ำปูนก่อนส่งเข้าไปที่ก้านเจาะ



ภาพที่ ฉ.6 รถเจาะเข้าไปยังตำแหน่งก่อสร้างที่กำหนด



ภาพที่ ฅ.7 ทำการเจาะก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ตามทีออกแบบ



ภาพที่ ฅ.8 หน้าจอจะแสดงข้อมูลหน้างานเพื่อให้สามารถควบคุมได้



ภาพที่ ๗.๙ ใช้เครื่องจักรในการใส่แกนกลางลงในเสาเข็มซีเมนต์



ภาพที่ ๗.๑๐ เมื่อเสาเข็มอายุ 28 วันทำการเจาะเก็บตัวอย่างเนื้อเสาเข็ม



ภาพที่ ฌ.11 การนำตัวอย่างเนื้อเสาเข็มดินซีเมนต์ออกจากกระบอกละ



ภาพที่ ฌ.12 ลักษณะการขนย้ายตัวอย่างออกจากหน้างาน



ภาพที่ ฌ.13 ตัวอย่างของเนื้อเสาเข็มที่นำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ ฌ.14 ดิจิตอลอินดิเคเตอร์และอิเล็กทริกเคบิต ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ ฉ.15 Inclinometer Casing ที่ใช้ทำการทดสอบ



ภาพที่ ฉ.16 การฝังท่อ Inclinometer Casing ที่ใช้ทำการทดสอบ



ภาพที่ ฉ.17 การขุดเปิดหัวเสาเข็ม



ภาพที่ ฉ.18 การเตรียมพื้นที่และตีแบบหล่อคอนกรีตครอบหัวเสาเข็ม



ภาพที่ ฌ.19 ลักษณะ Reaction Wall และ คานอ้ำงอิง



ภาพที่ ฌ.20 ภาพรวมการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบทั้งหมด





ภาพที่ ฌ.21 ลักษณะการติดตั้งระบบให้แรงในการทดสอบ



ภาพที่ ฌ.22 การติดตั้ง LVDT เพื่อวัดการเคลื่อนตัว



ภาพที่ ฌ.23 การติดตั้ง Digitilt Inclinometer เพื่อวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง

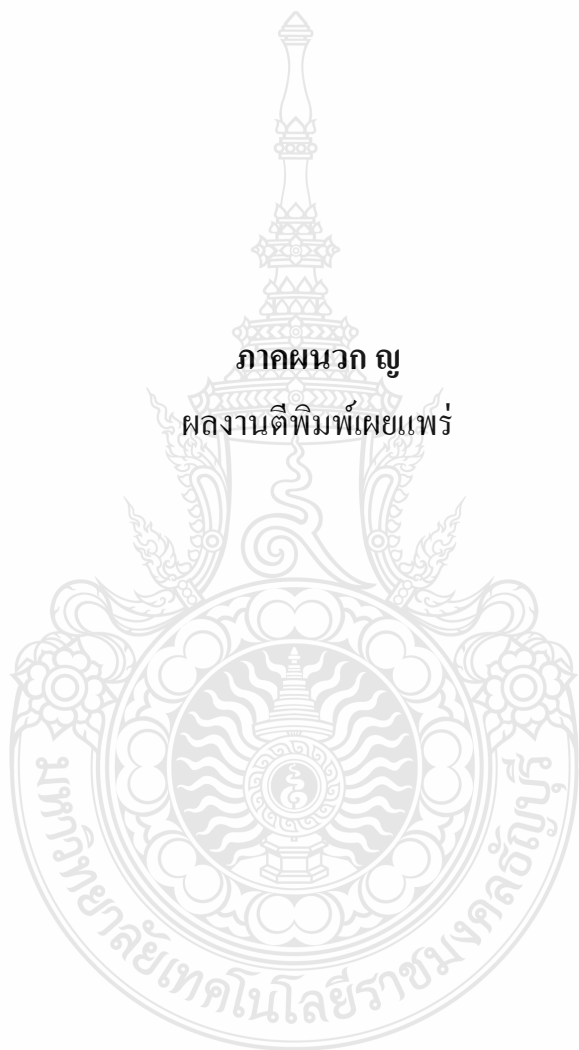


ภาพที่ ฌ.24 การจัดวางอุปกรณ์ควบคุมการให้แรงและอ่านค่าต่างๆ



ภาพที่ ฅ.25 การวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งด้วยเครื่อง Digitilt Inclinometer

ภาคผนวก ๑  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



# การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่

## ANNUAL CONCRETE CONFERENCE (ACC6) 6

ในวาระครบรอบ 50 ปี แห่งการสถาปนา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

20 - 22 ตุลาคม 2553  
Grand Pacific Sovereign Resort & Spa  
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

- ร่วมกับ
- o ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และ ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
  - o ACI Thailand Chapter
  - o ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ  
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6  
Annual Concrete Conference 6 (ACC6)

บทความ

- ❖ บทความโดยองค์ปาฐก (Keynote)
- ❖ บทความวิจัยรับเชิญ (IVT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาคอนกรีตและวัสดุ (MAT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาโครงสร้างคอนกรีต (STR)
- ❖ บทความวิจัย สาขามารูรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต (REP)
- ❖ บทความวิจัย สาขาคอนกรีตเพื่อสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน (ENV)

20-22 ตุลาคม 2553

โรงแรมแกรนด์ แปซิฟิก ซอฟเฟอร์นิ รีสอร์ท แอนด์ สปา  
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

จัดทำโดย

- ❖ สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ

- ❖ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาครุศาสตร์โยธา และ ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ❖ ACI Thailand Chapter
- ❖ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

สงวนลิขสิทธิ์ © 2553 ตาม พรบ.ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521 โดยสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ.2553

- MAT-73 การพัฒนา Ultra High Strength Mortar: อิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียด  
เอกพล บุญมาเลิศ บุรณัตร์ ฉัตรวีระ และ ภัฏฐ์ มากุล
- MAT-74 ผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสีย  
น้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต  
พร้อมพงษ์ ฉลาดธัญญกิจ ปิติศานต์ กร้ามาตร กฤติยา แก้วมณี และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล
- MAT-75 การขยายตัวของมอร์ตาร์เถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต  
นพคุณ ผลโพธิ์ ปิติศานต์ กร้ามาตร อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล
- MAT-76 EFFECT OF LIMESTONE POWDER ON PROPERTIES OF SELF-COMPACTING  
CONCRETE CONTAINING POLYCARBOXYLATE BASED SUPERPLASTICIZER  
*Wittawat Pattaranawic, Chalermchai Wanichlamlert, and Somnuk Tangtermsirikul*
- MAT-78 การบำบัดออกไซด์ของไนโตรเจนในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสโดยใช้  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมลงในคอนกรีตบล็อกปูพื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา  
ธีระวุฒิ มูฮำหมัด รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์ ศรีษฐา เกษดำนกลาง และ ภาพพนธ์ ศรนคร
- MAT-79 บล็อกซีเมนต์ประสานที่ใช้เถ้ากลบดำ เถ้ากลบขาว หรือเถ้าซันอ้อยเป็นส่วนผสม  
ชูชัย สุจิวรกุล และ พินัยศักดิ์ พรหมศร
- MAT-80 การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงเร็วและคอนกรีตกำลังสูงสำหรับใช้งานในภาค  
ตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน  
ธนบดี อินทรเพชร และ ชูชัย สุจิวรกุล
- MAT-81 การศึกษาการใช้เปลือกหอยแมลงภูแทนที่หินปูนในการผลิตปูนซีเมนต์เม็ด  
รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์ ธีระวุฒิ มูฮำหมัด กนกพร ผืนพรหมมินทร์ และ กิรติ ชูสิน
- MAT-82 พฤติกรรมฐานรากชนิดเสาเข็มดินซีเมนต์ชั้นลึกภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา  
ภิรมย์ พงษ์คำ วีระศักดิ์ สะอองจันทร์ และ หมิง จิ่ง

## พฤติกรรมฐานรากชนิดเสาเข็มดินซีเมนต์ชั้นลึกภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา

## BEHAVIOR OF STIFFENED DEEP CEMENT MIXING COLUMN UNDER CYCLIC LOAD

ภิรมย์ พงษ์คำ (Pirom Pongkum)<sup>1</sup>วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ (Werasak Raongjant)<sup>2</sup>หมิง จิ่ง (Meng Jing)<sup>3</sup><sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี[pirom\\_pongkum@yahoo.com](mailto:pirom_pongkum@yahoo.com)<sup>2</sup>อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี[werasakr@yahoo.com](mailto:werasakr@yahoo.com)

**บทคัดย่อ :** การก่อสร้างโครงสร้างชายฝั่งทะเลและงานกำแพงกันดิน ได้มีการนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานลักษณะนี้แต่จะต้องทำแบบเสริมเสาเข็มดินซีเมนต์หลายชั้นเพื่อที่จะสามารถรับแรงในด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์โดยนำวัสดุประเภทต่างๆที่มีความแข็งแรงสูงมาเสริมเป็นแกนกลางตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อเพิ่มการรับกำลังทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้มากขึ้น ซึ่งความยาวของวัสดุเสริมแกนที่ใช้จะน้อยกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ประมาณ 20 % ของความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด 4 ต้นแบ่งเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เสริมแกน (DCM) จำนวน 1 ต้น และอีก 3 ต้น เป็นเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนด้วยวัสดุประเภทต่างๆ (SDCM) เสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งหมดจะฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางตลอดช่วงความยาวในพื้นที่เขตหนองจอกและมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวด้านข้างในเสาเข็มดินซีเมนต์ทุกต้น การทดสอบความสามารถในการรับกำลังทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาของเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนกลางด้วยวิธี Standard Loading Procedures ตามมาตรฐาน ASTM D3966 ทดสอบการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) ใช้ระบบแรงปฏิกิริยาแบบ Dead man ผลการศึกษพฤติกรรมเสาเข็มดินซีเมนต์ในการรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาของได้ว่า SDCM ที่เสริมแกนเหล็ก II-Beam สามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาได้ประมาณ 3-4 เท่า และการเคลื่อนตัวด้านข้างได้ประมาณ 6-7 เท่า ของ DCM งานวิจัยนี้สามารถบอกได้ว่า SDCM ที่เสริมแกนเหล็ก II-Beam สามารถเพิ่มการรับแรงกำลังทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา การต้านทานการเคลื่อนตัวด้านข้าง การกระจายพลังงานได้ดีขึ้น

**ABSTRACT :** The construction work executed for the seaside and underground wall bracing has been applied using the deep cement mixed columns. However, it was, noted that additional several layers of such deep cement mixed columns were required so that the stake can be proof against the cyclical horizontal loading pursuant to the design requirements. Hence, consideration was given to this research that, increasing strength of the stiffened deep cement mixed columns to against cyclical horizontal loading via various types of high strength materials being installed in the core of stake,



consistent with the depth of the stake. The length of the core materials to be installed was 20% of its stake shorter than its stake. Four column specimens, one cement column and three stiffened deep cement mixed columns (SDCM), were embedded through soft clay to medium-hard clay on site of Nongchok area. The test loading was performed according to the standard loading procedure in ASTM D3966, with both cyclic horizontal loading and dead-man action systems. The results demonstrated that the maximum cyclic loading for SDCM with H-Beam were increased by 3-4 times of the maximum value of cement column, and the maximum horizontal displacement by 6-7 times. This research displays that using H-beam steel as stiffer core of SDCM was a very good method to improve its strength, ductility and energy dissipation capacity under cyclic horizontal loading.

**KEYWORDS:** Stiffened , Pile, Cement Column, Cyclic Load , Cement Mixing

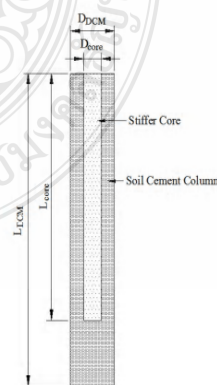
## 1. บทนำ

การนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานประเภทต่างๆ มักจะพบปัญหาอยู่บ่อยครั้งเนื่องจากการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างให้ได้ตามที่ออกแบบ อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินเดิมบริเวณนั้นและกรรมวิธีการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างยากส่งผลให้ค่า Compressive Strength ค่า Shear Strength และค่า Stiffness ต่ำทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดการวิบัติได้ง่าย[1] ซึ่งการเพิ่มค่าความแข็งของเสาเข็มดินซีเมนต์ (Stiffened Deep Cement Mixed Column ,SDCM Column) จึงมีการศึกษาในประเทศจีน โดยนำเสาเข็มดินซีเมนต์กับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (Stiffer Concrete Core Pile) มาประกอบเข้าด้วยกันเป็น Composite Structure of Cement Mixed Column เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้สัมพันธ์ตลอดความยาวของเสาเข็ม[2] แต่งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเฉพาะแรงกระทำทางด้านข้าง งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาของเสาเข็มดินซีเมนต์โดยการนำวัสดุประเภทต่างๆ ที่มีความแข็งแรงสูง สามารถหาซื้อได้ทั่วไปและมีขนาดหน้าตัดที่ใกล้เคียงกันมาเสริมเป็นแกนกลางในเสาเข็มดินซีเมนต์

ในระดับที่เท่ากัน เพื่อนำไปใช้ในงานประเภทต่างๆ ที่มีแรงกระทำด้านข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาต่อไป

## 2. การออกแบบและก่อสร้าง Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM) Method

ส่วนประกอบของ SDCM Column ในงานวิจัยนี้เป็นเสาประกอบซึ่งมี แกนเสาเข็ม (Stiffer Core) ซึ่งจะใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง, ท่อเหล็กกลม และเหล็ก H-Beam ฝังอยู่ตรงกลาง Cement Column ดังรูปที่ 1 เพื่อเพิ่มน้ำหนักแกนกลางและเพิ่มความแข็งแรงให้กับ Cement Column [3]



รูปที่ 1 Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM)  
คัดแปลงจาก Wu, et al [1]

การออกแบบส่วนผสมของ Cement Column ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาจากผลการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์ โดยออกแบบใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯ ใช้ปริมาณซีเมนต์ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในการทำ Wet Mixing และมีค่า Water-Cement Ratio เท่ากับ 1:1 ทำการ Design Strength SCC ที่ 60 ตัน/ตารางเมตร โดยจากการคำนวณออกแบบได้ใช้ Cement Milk ปริมาณ 521.5 ลิตรต่อเสาเข็มดินซีเมนต์หนึ่งต้น

**3. ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ**

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีระบบเปียก (Wet Process) การผสมแบบ Mechanical Mixing วิธีการนี้คือการนี้ค้ำปูนด้วยความดันต่ำ (Low Pressure) ทำให้การสูญเสียกำลังของดินในแนวราบมีน้อยและการผสมโคลนใช้ใบพัดเหล็กตามขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์ ตักผสมแบบ (Mechanical Mixing) ทำให้ดินเข้ากับน้ำปูนได้ดี สม่ำเสมอตลอดความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์

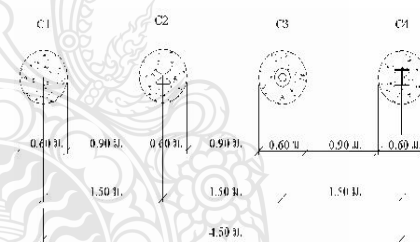
การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ก่อสร้าง SDCM Column จำนวน 4 ต้นโดยแบ่งเป็น SDCM Column จำนวน 3 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ยาว 7 เมตร และ DCM จำนวน 1 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ยาว 7 เมตร ดังตารางที่ 1 และการก่อสร้างตามรูปที่ 2 และ 3 รายละเอียดดังนี้

- เสาเข็มดินซีเมนต์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ความยาว 7 เมตร จำนวน 1 ต้น (C1)
- เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ขนาด 0.18x0.18 เมตร ยาว 6 เมตร เป็นเสาแกน (Core Stiffness Pile) จำนวน 1 ต้น (C2)

- เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ท่อเหล็กกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร หนา 4.0 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร เป็นเสาแกน (Core Stiffness Pile) จำนวน 1 ต้น (C3)
- เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้เหล็ก II-Beam ขนาด 175x175 มิลลิเมตร หนัก 40.2 กิโลกรัม/เมตร ยาว 6 เมตร เป็นเสาแกน (Core Stiffness Pile) จำนวน 1 ต้น (C4)

**ตารางที่ 1** ก่อสร้าง DCM,SDCM Column ในแปลงทดสอบ

เลขที่ต้นเข็มดินซีเมนต์/เลขที่ต้นเสาแกน	ต้นที่	ประเภทวัสดุเสริมแรงเสาแกน	ความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์	LVDFT (จุด)
0.00/7.00	C1	ไม่เสริมเสาแกน	-	1
0.00/7.00	C2	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง 18x18x6.0 ม.	6	-
0.00/7.00	C3	ท่อเหล็กกลม Ø 0.10 ม.	6	1
0.00/7.00	C4	เหล็ก II-Beam 175x175 มม.หนัก 40.2 กก./ม.	6	-



**รูปที่ 2** แปลนการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

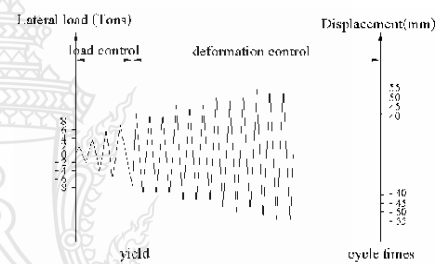


**รูปที่ 3** SDCM Column ในแปลงทดสอบ

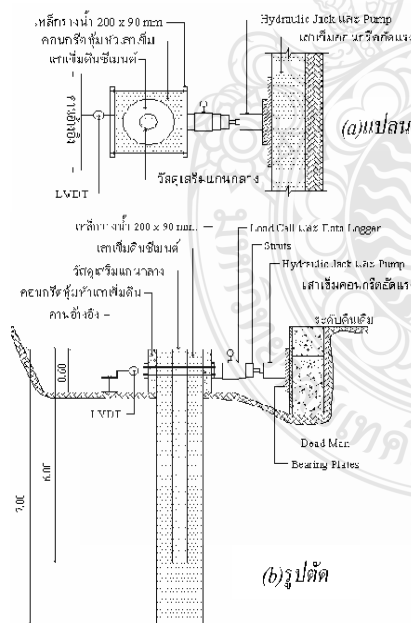
สำหรับภาระให้แรงในการทดสอบการรับแรงดัดข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic Load) ของเสาเข็ม SDCM ใช้วิธี Standard Loading Procedures ตามมาตรฐาน ASTM D 3966 ใช้ระบบแรงปฏิกิริยาแบบ Dead man มีการเปิดหน้าดินรอบเสาเข็มลึกไปประมาณ 1.20 เมตรเพื่อทำการติดตั้งเครื่องมือรูปที่ 4 และ 5 การให้แรงกระทำดัดข้างแบบซ้ำไปซ้ำมารูปที่ 6 ในงานวิจัยนี้จะให้น้ำหนักเป็นรอบๆซึ่งแต่ละรอบจะมีการเพิ่มน้ำหนักเป็นอัตราคงที่ โดยการประมาณพิจารณาจากความแข็งแรงของแกนเสาเข็ม การให้แรงช่วงแรกๆจะใช้แรงเป็นตัวกำหนดไปจนถึงประมาณเข้าใกล้จุดครากของเสาเข็มจากนั้นจะใช้ระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างเป็นตัวควบคุม โดยที่ระยะเคลื่อนตัวหนึ่งก็จะทดสอบสามรอบ ทำจนกว่าจะวิบัติ และ เมื่อเสาเข็มรับกำลังลดลง 15 - 20 เปอร์เซ็นต์ของรอบที่เสาเข็มรับกำลังสูงสุด จึงหยุดทำการทดสอบ



รูปที่ 5 รูปการติดตั้งระบบแรงปฏิกิริยา DEADMAN ตามมาตรฐาน (ASTM D3966)



รูปที่ 6 ระบบการให้แรงดัดเสาเข็มดินซีเมนต์



รูปที่ 4 ระบบแรงปฏิกิริยา DEADMAN ตามมาตรฐาน (ASTM D3966)

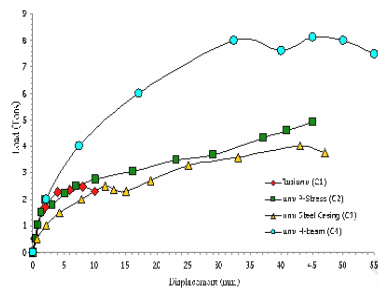
4. การวิเคราะห์และผลการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบรับแรงกระทำดัดข้างแบบซ้ำไปซ้ำมาใน Stiffened Deep Cement Mixed Column (SDCM Column) จากแปลงทดสอบแล้วเสร็จจะนำผลการทดสอบ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังนี้

4.1 การรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ (SDCM Column)

จากการทดสอบการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดแบบซ้ำไปซ้ำมาของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมแกน, เสริมแกนคอนกรีตอัดแรง, เสริมแกนท่อเหล็กกลมและเสริมแกนด้วย H-Beam ได้ค่าแรงสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวเรียงตามลำดับดังนี้ 2.475 ตันที่ 8 มิลลิเมตร, 4.908 ตันที่ 45.03 มิลลิเมตร, 4 ตันที่ 43 มิลลิเมตร และ 8.125 ตันที่ 45 มิลลิเมตร จะสังเกตได้ว่าเมื่อให้แรงกระทำเพิ่มขึ้น

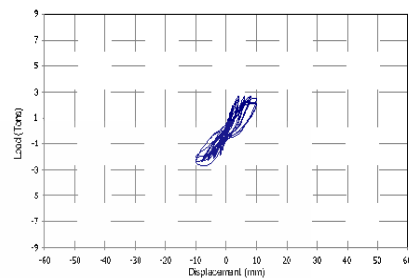
เรื่อยๆ ระยะเวลาการเคลื่อนตัวต่อแรงกระทำแต่ละหน่วยจะมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่เกิดการวิบัติ โดยเมื่อเฉลี่ยผลการทดสอบจากเส้นแนวโน้มแล้วมีความหนาเชื่อถืออยู่ที่ 79.8 ซึ่งถือว่ามีความน่าเชื่อถือถึงรูปที่ 7



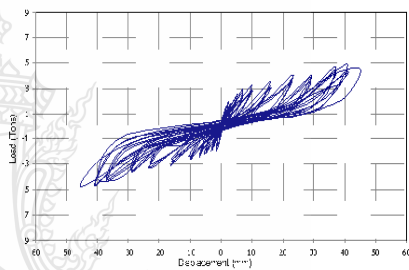
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำเฉลี่ยแต่ละรอบกับระยะเวลาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดินซีเมนต์ซีเมนต์

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์กับการรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา

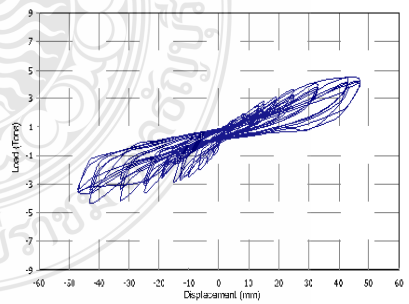
จากการทดสอบการรับกำลังทางด้านข้างสูงสุดแบบซ้ำไปซ้ำมาของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมแกน, เสริมแกนคอนกรีตอัดแรง, เสริมแกนท่อเหล็กกลมและเสริมแกนด้วย H-Beam ได้ค่าแรงสูงสุดที่ระยะเวลาการเคลื่อนตัวเรียงตามลำดับดังนี้ 2.475 ตันที่ 8 มิลลิเมตร, 4.908 ตันที่ 45.03 มิลลิเมตร, 4 ตันที่ 43 มิลลิเมตร และ 8.125 ตันที่ 45 มิลลิเมตร ค่าแรงและระยะเวลาการเคลื่อนตัวที่ต่างกันเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ทำแกนของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยเหล็กรูปพรรณ H-Beam สามารถต้านการรับกำลังได้ดีมากที่สุด รองลงมาเป็นคอนกรีตอัดแรงและท่อเหล็กกลมตามลำดับ ส่วนเสาเข็มดินซีเมนต์ธรรมดาเนื่องจากไม่มีวัสดุแกนช่วยเสริมการรับกำลังจึงรับกำลังได้น้อยที่สุดดังรูปที่ 8 ถึง 11



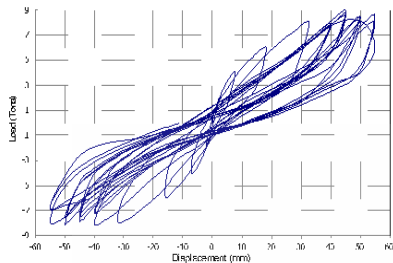
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะเวลาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน (C1)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะเวลาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนด้วยคอนกรีตอัดแรง (C2)



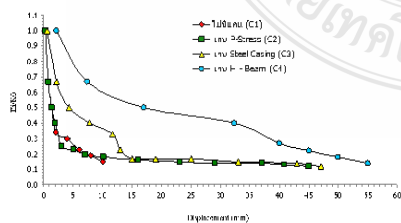
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะเวลาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนท่อเหล็กกลม (C3)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนที่ทางดัดข้างของ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่เสริมแกนเหล็ก H-Beam (C4)

4.3 Rigidity attenuation

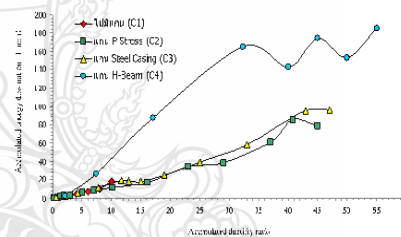
ความต้านทานแรงกระทำทางดัดข้างรูปที่ 12 คือ การรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นทั้งค่าบวกและค่าลบของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละวง โดยที่ไม่นับเครื่องหมาย ผลที่ได้คือ ความแข็งแรงที่ต้านการกระทำของแรงทางดัดข้างแบบซ้ำไปซ้ำมา  $K_1$  ค่าเฉลี่ยของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละวง  $K_0$  ค่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดสอบนั้นๆ  $K_1/K_0$  คือการเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นต่อแรงสูงสุดและลักษณะการเคลื่อนที่ของเสาเข็มที่เกิดขึ้นของแต่ละรอบการเคลื่อนที่ จากผลการทดสอบพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน II-Beam มีอัตราการเสียกำลังที่น้อยกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนท่อเหล็กกลมเสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนคอนกรีตอัดแรงและเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกนตามลำดับ เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนจะมีการถ่ายแรงไปยังวัสดุเสริมแกนนั้นๆ



รูปที่ 12 The rigidity attenuation SDCM Column ทั้ง 4 หน้าตัด

4.4 การกระจายพลังงาน (Energy dissipation capacity)

การเปรียบเทียบผลการกระจายพลังงานดังรูป 13 ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำการทดสอบพบว่า เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกน H-Beam เสาเข็มดินซีเมนต์เสริมแกนเป็นท่อเหล็กกลม เสาเข็มที่ไม่มีแกนเสริมและเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีแกนเสริมกำลังเป็นคอนกรีตอัดแรงมีการกระจายพลังงานจากมากถึงน้อยตามลำดับ เนื่องจากแกน II-Beam เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น แต่มีความแข็งแรงกว่าดินซีเมนต์ที่เป็นวัสดุห่อหุ้มมาก เสาต้นนี้จึงมีพฤติกรรมรับกำลังดัดจากแกนกลางเป็นหลัก ดังนั้นกำลังส่วนมากจึงไปตกอยู่กับวัสดุแกนซึ่งมีความแข็งแรงและเป็นเนื้อเดียวกัน จึงมีการกระจายพลังงานได้ดีที่สุด



รูปที่ 13 Energy dissipation capacity SDCM Column ทั้ง 4 หน้าตัด

4.5 ลักษณะการวิบัติของ SDCM

ลักษณะการวิบัติเสาเข็มดินซีเมนต์รูปที่ 14 ภายใต้อันตรกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีการเสริมแกน เสริมแกนคอนกรีตอัดแรงและเสริมแกนท่อเหล็กกลม ตามลำดับมีการแตกหักที่ระยะ 1.02, 0.90, 1.04 ส่วนแกน H-Beam มีการหัก 2 ตำแหน่งคือที่ระยะ 0.82 และ 1.22 เซนติเมตรจากหัวเสาเข็ม เนื่องจาก II-Beam มีการกระจายพลังงานได้ดีกว่าวัสดุเสริมแกนประเภทอื่น ซึ่งลักษณะการวิบัติของ SDCM เหลือแล้วจะอยู่ที่ แก้วระดับพื้นดินเดิมประมาณ 3 เท่าของ

เส้นค่าศูนย์กลางเสาเข็มดินซีเมนต์พบว่ามากกว่าทฤษฎีอยู่ประมาณ 10%[6] เนื่องจากการก่อสร้างด้วยวิธีระบบเปียกความดันต่ำที่ใช้ในงานวิจัยทำให้เสาเข็มมีความเป็นเนื้อเดียวกันและแข็งแรงมากกว่าแบบระบบเปียกความดันสูงจึงส่งผลให้ระยะการแตกหักจากหัวเสาเข็มนี้มากกว่าที่ทฤษฎีระบุไว้ดังกล่าว



รูปที่ 14 รอยการร้าวของเสาเข็มดินซีเมนต์

##### 5. สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ในการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบเข้าไปข้างหน้าสามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลของประเภทวัสดุเสริมแกนมีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างแบบเข้าไปข้างหน้า โมเมนต์คดสูงสุด และระยะความลึกก่อนการร้าว โดยเสาเข็มเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการเสริมแกนมีความสามารถในการรับกำลังทางด้านข้างเข้าไปข้างหน้า Rigidity attenuation และ Energy dissipation capacity ได้ดีกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่เสริมแกน

##### 6. บรรณานุกรม

- [1] Zheng G. and Gu X.L. , 2005. Development and practice of composite DMM column in China. Proceeding 16th International Conference on Soil

Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 3, Osaka Japan : pp.1295 – 1300.

- [2] Wu M., Zhao X. and Dou Y.M., 2005. Application of stiffened deep cement mixed column in ground improvement. Proceedings International Conference on Deep Mixing Best Practices and Recent Advances, Stockholm, Sweden.,
- [3] ชนาสิน ไชยละมุล, 2550. พฤติกรรมของฐานรากชนิดเสาเข็มในดินซีเมนต์ชั้นลึกกับการรับแรงในแนวนอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] Bergado, D.T., Ruenkairergsa, T., Taesiri, Y. & Balasubramaniam, A.S. 1999. Deep soil mixing to reduce embankment settlement. Ground Improvement Journal 3[1]:1-18
- [5] บริษัท ไทยเทเนกซ์ จำกัดและบริษัท ปันจันไทย จำกัด. โครงการก่อสร้างทางยกระดับทางทิศใต้ สนามบินสุวรรณภูมิเชื่อมทางพิเศษบูรพาวิถี. วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column), เอกสารส่งงาน
- [6] พนิต ตั้งบุญเดิม, 2523. การออกแบบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในดินเหนียว, เสาเข็มและระบบพื้นสำเร็จรูป, ชมรมวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:33-45.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายภิรมย์ พงษ์คำ
วัน เดือน ปีเกิด	24 กันยายน 2520
ที่อยู่	54/4 หมู่ที่ 3 ตำบลวังยาง อำเภอ ศรีประจันต์ จังหวัดสุพรรณบุรี 72140
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมก่อสร้าง จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม ปี พ.ศ. 2543
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2545 - 2547 วิศวกรโยธา บริษัท โซคณาชัย ออโต้ เพรสซิ่ง จำกัด พ.ศ. 2547 - 2554 นายช่างโยธา องค์การบริหารส่วนตำบลหลักแก้ว ตำบลหลักแก้ว อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง พ.ศ. 2554 – ปัจจุบัน วิศวกรโยธา องค์การบริหารส่วนตำบลหน้าพระลาน ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี