การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน

LABORATORY TESTING FOR INVESTIGATING THE SETTLEMENT-TIME CURVE OF FLOATING SOIL-CEMENT COLUMN IMPROVING SOFT CLAYEY DEPOSIT

สมพร มั่นใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน

สมพร มั่นใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน Laboratory Testing for Investigating the Settlement-Time Curve of Floating Soil-Cement Column Improving Soft Clayey Deposit
ชื่อ - นามสกุล	นายสมพร มั่นใจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีระศักดิ์ ละอองจันทร์, Dr.-Ing.)

.... กรรมการ
(อาจารย์สุธาสินี อาทิตย์เที่ยง, Ph.D.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์ดำ, Dr.-Ing.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 16 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน
ชื่อ – นามสกุล	นายสมพร มั่นใจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อน ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก กับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่วางบนผิวดินโดยการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โมลด์ทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 เมตร และที่ความสูง 0.95 เมตร ทำด้วยวัสดุพีวีซี ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบคือดินเหนียวกรุงเทพ ส่วนปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบทำเสาเข็มดินซีเมนต์คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1

การทดสอบมี 4 กรณีถูกออกแบบมาเพื่อตรวจสอบ ผลกระทบของความหนาและค่าแรงกดอัดแกนเดียวของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ทำการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำและอัตราการทรุดตัว ได้ผลการทดสอบดังนี้ การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นพื้นดินซีเมนต์และค่าแรงกดอัดแกนเดียว สามารถลดค่าการทรุดตัวได้อย่างมีนัยสำคัญ

สุดท้ายประยุกต์ใช้วิธีที่มีอยู่ในปัจจุบันจำนวน 2 วิธีเพื่อหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลากับกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณี ประสิทธิภาพของทั้ง 2 วิธีนี้ได้ถูกแสดงโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก แผ่นพื้นดินซีเมนต์ พฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำ

Thesis Title	Laboratory Testing for Investigating the Settlement-Time Curve of Floating Soil-Cement Column Improving Soft Clayey Deposit
Name – Surname	Mr. Somphorn Manchai
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Supasit Pongsivasathit, Ph.D.
Academic Year	2016

ABSTRACT

The aim of this research was to investigate the consolidation behavior of soft clayey deposit improved by the floating soil-cement column with a cement stabilized slab on the ground surface by conducting large scale laboratory model tests. The cylinder mold is 0.45 m in diameter and 0.95 m in height and made of PVC. The soil sample used was reconstituted Bangkok clay and the cement used for making the model column was Portland cement Type I.

The four cases of laboratory model test were designed for investigating the effect of slab thickness and unconfined compressive strength of slab. The comparing of the consolidation settlement and the rate of consolidation were calculated. As a result, the increase of slab thickness and the unconfined compressive strength reduce the settlement significantly.

Finally, the two existing methods for predicting the settlement - time curve have been applied to four cases of laboratory testing. The effectiveness of these two methods has been illustrated by comparing them with the measurement results.

Keywords: floating soil-cement column, cement stabilized slab, consolidation behavior

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ศุภสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดต่างๆ ในการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของการทำการวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.พุทธพล ทองอินทร์ดำและดร.สุธาสินี อาทิตย์เที่ยง ที่ได้กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำสิ่งที่มีประโยชน์แก่การเขียนวิทยานิพนธ์ การปฏิบัติการทดสอบต้องพบอุปสรรคหลายประการ แต่ด้วยความช่วยเหลือเอื้อเฟื้ออย่างดีจากหลายๆ ฝ่าย ทำให้ผู้วิจัยฝ่าฟันอุปสรรคจนประสบความสำเร็จได้ จึงขอขอบพระคุณทุกๆท่าน

ท้ายที่สุดนี้ ประโยชน์ และคุณค่าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ บิดา มารดา และครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจ และหากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัย ขอน้อมรับไว้เพื่อการแก้ไขต่อไป

สมพร มั่นใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(9)
บทที่ 1 บทนำ	12
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	12
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	13
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	13
1.4 ขั้นตอนงานวิจัย	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 บทนำ	16
2.2 ความเป็นมาของการใช้งานเสาเข็มดินซีเมนต์	16
2.3 รูปแบบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์	18
2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์	20
2.5 ประโยชน์ของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์	20
2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์	21
2.7 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นในประเทศไทย	24
2.8 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการอัดตัวคายน้ำ	24
2.9 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก	27
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 46

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน 46

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ วัสดุและเครื่องมือทดสอบ แบบจำลองยูนิตเซลล์ 46

3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ 51

3.4 ขั้นตอนการทดสอบการอัดยุบตัวคายน้ำ ในห้องปฏิบัติการ ทั้ง 4 กรณีศึกษา 54

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ 58

บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดสอบ 59

4.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน 59

4.2 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ 59

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ 62

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 70

5.1 สรุปผลการศึกษา 70

5.2 ข้อเสนอแนะ 71

บรรณานุกรม 72

ภาคผนวก 77

ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัสดุ 78

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว 83

ภาคผนวก ค ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ 87

ภาคผนวก ง รูปถ่ายการทดสอบ 92

ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 102

ประวัติผู้เขียน 121

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงการปฏิบัติการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่หยั่งลึก 14

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) q_u 53

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่นำมาทดสอบ 59

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตามวิธีของ Pongsivasathit และคณะ[3]................ 62

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตามวิธีของ Pongsivasathit และคณะ[4]................ 63

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์สำหรับคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลา.. 63

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ 68

ตารางที่ ก1 ผลการทดสอบ Atterberg's Limit 79

ตารางที่ ก2 กราฟแสดงผลกาดทดสอบ Atterberg's Limit.. 80

ตารางที่ ก3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ 81

ตารางที่ ก4 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ 82

ตารางที่ ข1 ความสัมพันธ์ของ unconfined compressive strength กับเปอร์เซ็นต์ปริมาณ
ปูนซีเมนต์ 86

ตารางที่ ค1 ตารางบันทึกผลการทรุดตัวหลังการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียว........................ .. 88

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงรายละเอียดรูปแบบใบมีดผสมของวิธี Dry Jet Mixing 19

รูปที่ 2.2 วิธีการผสมลึกแบบ Jet Grouting.. 19

รูปที่ 2.3 การอัดตัวคายน้ำของดิน 25

รูปที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ 29

รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบระหว่างมีระบบพื้นกับไม่มีระบบพื้นกรณีพิจารณาผลกระทบของ β.... 32

รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบระหว่างมีระบบพื้นกับไม่มีระบบพื้นกรณีพิจารณาผลกระทบของ α.... 32

รูปที่ 2.7 ผลกระทบของน้ำหนักกระทำกับค่า LR 34

รูปที่ 2.8 ผลกระทบของค่า s_u กับค่า LR 34

รูปที่ 2.9 ชั้นดินเหนียวที่นำมาพิจารณาเพื่อหาอัตราการทรุดตัว……….. 36

รูปที่ 2.10 หน่วยแรงที่มากระทำต่อชั้นดินขึ้นกับความลึกของชั้นดินและระยะเวลา…................... 36

รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(H_{c(FEA)}/H_c)'/(H_{c(FEA)}/H_c)_{1m}$ กับค่า ω... 40

รูปที่ 3.1 เก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบถูกรบกวน.. 47

รูปที่ 3.2 เก็บตัวอย่างดินใส่ภาชนะพลาสติก.. 47

รูปที่ 3.3 แบบจำลองหนึ่งหน่วย Unit Cell Model... 48

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เจาะดินทำเสาเข็มดินซีเมนต์... 48

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดค่าการทรุดตัวในแนวดิ่ง Dial Gauge 49

รูปที่ 3.6 ปั๊มความดันลม อุปกรณ์ปรับค่าความดันลม.. 50

รูปที่ 3.7 แผ่น Mini PVD 51

รูปที่ 3.8 Unconfined Compression Test.. 52

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของ unconfined compressive strength กับปริมาณปูน 53

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างในดินกับแรงดันประสิทธิผล 54

รูปที่ 3.11 แบบจำลองทดสอบหนึ่งหน่วยสมมาตร 55

รูปที่ 3.12 การใส่ Mini-PVD.. 56

รูปที่ 3.13 การเจาะดินเพื่อทำเสาเข็มดินซีเมนต์ 56

รูปที่ 3.14 แบบจำลองหนึ่งหน่วยระหว่างทดสอบ 57

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่า H_s ต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาในกรณีที่แผ่นพื้นมีค่า q_u เท่ากับ 400 kPa 60
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของค่า H_s ต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา ในกรณีที่แผ่นพื้นมีค่า q_u เท่ากับ 600 kPa 61
รูปที่ 4.3 ผลกระทบของค่า q_u ต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา ในกรณีที่แผ่นพื้นมีค่า H_s เท่ากับ 0.1 m 62
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 1 64
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 2 65
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 3 66
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 4 67
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 5 % 84
รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10 % 84
รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15 % 85
รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20 % 85
รูปที่ ค.1 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 1 90
รูปที่ ค.2 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 2 90
รูปที่ ค.3 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 3 91
รูปที่ ค.4 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 4 91
รูปที่ ง.1 การประกอบแบบ Unit Cell Model 93
รูปที่ ง.2 การประกอบชุดอุปกรณ์ piton พร้อมฝาปิด 93
รูปที่ ง.3 การทาจาระบีบางๆที่ผนังเซลล์และวางแผ่นแผ่นใยสังเคราะห์ 94
รูปที่ ง.4 เตรียมวัสดุทดสอบโดยการชั่งน้ำหนัก 94
รูปที่ ง.5 การผสมดินด้วยเครื่องกวน 95
รูปที่ ง.6 การผสมดินกับน้ำให้เข้ากัน 95

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ง.7 การบรรจุดินที่ผสมแล้วลงโมลด์... 96

รูปที่ ง.8 การใส่ Mini PVD.. 96

รูปที่ ง.9 การใส่ Mini PVD และ geotextile.. 97

รูปที่ ง.10 การประกอบชุดอุปกรณ์ piton ลูกสูบด้านใน….. 97

รูปที่ ง.11 ขั้นตอน Pre-consolidation stage... 98

รูปที่ ง.12 ระดับการยุบอัดตัวคายน้ำที่ 90 % หรือเริ่มไม่มีการทรุดตัวเปิดฝาออก............................ 98

รูปที่ ง.13 ดึง mini-PVD ออกแล้วทำการเจาะดินด้วยสว่าน.. 99

รูปที่ ง.14 ใส่ดินซีเมนต์ตามที่ออกแบบตามกรณีศึกษา ลงไปในรูเจาะ.. 99

รูปที่ ง.15 การบ่มเสาเข็มดินซีเมนต์..100

รูปที่ ง.16 การปิดแผ่น geotextile 3 ชั้นเพื่อการระบายน้ำ.. 100

รูปที่ ง.17 การประกอบชุดอุปกรณ์ piton ลูกสูบด้านใน.. 101

รูปที่ ง.18 ขั้นตอน Consolidation test stage วัดค่าการทรุดตัวกับเวลา... 101

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เทคนิคการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของชั้นดินเหนียวถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทำให้ชั้นดินที่ถูกปรับปรุงมีค่าการทรุดตัวลดลงสามารถรับน้ำหนักสิ่งก่อสร้างได้มากขึ้น Bergado et al 1994 [1] ปัจจุบันการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก (Floating Soil-Cement Column) ร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (Cement Stabilized Slab) บนผิวดินที่ทำจากดินที่ผสมซีเมนต์แล้วนำมาบดอัดเพื่อเป็นแผ่นพื้นได้ถูกนำมาใช้แทนที่เสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดิมหรือแบบหยั่งลึก เนื่องจากเสาเข็มแบบไม่หยั่งลึกจะไม่รบกวนชั้นน้ำใต้ดินและมีมลพิษจากการก่อสร้างน้อยกว่าแบบเดิม แต่ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณหาค่าการทรุดตัวขั้นปฐมภูมิ ซึ่งพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มประเภทนี้ค่อนข้างมีความซับซ้อนกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความยาวแบบหยั่งลึก Chai และคณะ [2] จากนั้น Chai และคณะได้เสนอวิธีการคำนวณค่าการทรุดตัวโดยสามารถพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ ($\alpha = A_c/A_e$, A_c คือพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ A_e คือพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกหนึ่งหน่วยของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์) และอัตราส่วนการปรับปรุงความลึก ($\beta = H_L/H$, H_L คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ H คือความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน)

ต่อมา Pongsivasathit และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกด้วยแบบจำลองทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อดูผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำ (p) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) ของดินบริเวณปลายเสาเข็ม จากนั้นเสนอสมการปรับปรุงสมการของ Chai และคณะ [2] โดยสามารถพิจารณาผลกระทบ เนื่องจากค่า (p) และค่า (s_u) ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้เมื่อนำมาประมาณค่าการทรุดตัวของกรณีศึกษาในอดีตกลับพบว่า ในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่หนา 2.5 m หรือมีอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้น (H_s) กับความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไป เท่ากับร้อยละ 0.40 ซึ่งสูงมากกว่าทุกกรณี จะให้ผลการคำนวณเกินกว่าค่าที่วัดได้ในภาคสนามอยู่มาก นั่นหมายความว่าความหนาของแผ่นพื้นมีผลทำให้คุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำไม่เป็นไปตามสมมุติฐานของการศึกษาที่ผ่านมา

ดังนั้นโครงงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกด้วยแบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit Cell Model) ในห้องปฏิบัติการทดสอบ โดยใช้ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (บริเวณสถานที่ก่อสร้างไบเทคบางนา) นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของความแข็งแรงของแผ่นพื้นดินซีเมนต์เพิ่มเติมด้วย เพื่อหาข้อสรุปในการปรับปรุงสมการการคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลาของ Pongsivasathit et al. 2014 [4] ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก กรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน

1.2.3 ศึกษาถึงวิธีการคำนวณเส้นโค้งการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ ไม่หยั่งลึก ด้วยสูตรที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.2.4 เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของสูตรการคำนวณเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินและปูนซีเมนต์ ที่ใช้ในการทดสอบ

1.3.2 ใช้ตัวอย่างดินเหนียวบริเวณดินกรุงเทพฯ(บริเวณสถานที่ก่อสร้างไบเทคบางนา) โดยเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed Soft Clay)

1.3.3 ทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเสาเข็มดินซีเมนต์สั้นกับดินเหนียวอ่อนโดยใช้แบบจำลองยูนิตเซลล์(Unit Cell Model)แบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา มีรายละเอียดตามตารางที่ 1.1

1.3.4 การคำนวณตามวิธี settlement-time curve, Consolidation calculation และวิเคราะห์ผลทดสอบ

ตารางที่ 1.1 แสดงการปฏิบัติการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่หยั่งลึก

กรณีศึกษาที่	Soil	ค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (q_u)	ความหนาแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (เมตร)	α (%)	β (%)	Cement (%)
1	Bangkok Clay	400 kPa	0.00	20	70	16.47
2	Bangkok Clay	400 kPa	0.10	20	70	16.47
3	Bangkok Clay	600 kPa	0.10	20	70	23.40
4	Bangkok Clay	600 kPa	0.25	20	70	23.40

1.4 ขั้นตอนงานวิจัย

1.4.1 รวบรวมข้อมูลทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้

1.4.1.1 ทฤษฎี การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์

1.4.1.2 ทฤษฎี การทรุดตัว Settlement ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

1.4.1.3 ทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ และทฤษฎี งานวิจัย ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้

1.4.2 ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ซึ่งดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จะต้องนำมาทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม

1.4.3 การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบ Unit Cell Model จำลองหนึ่งหน่วย

1.4.4 วิเคราะห์ผลทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก โดยพิจารณาถึงผลกระทบของความแข็งแกร่งของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (Slab) และความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ด้วยเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา

1.4.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ โดยใช้สูตรการคำนวณที่มีอยู่เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของสูตรที่ใช้ในการทำนายเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา

1.4.6 สรุปผลการศึกษาที่ได้ เพื่อนำมาเป็นข้อสรุปในงานวิจัยอนาคตต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงวิธีการคำนวณเส้นโค้งการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ด้วยสูตรที่มีอยู่ในปัจจุบัน ผลการคำนวณการทรุดตัวและระยะเวลาการทรุดตัวของการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่หยั่งลึก กับดินเหนียวอ่อนโดยใช้แบบจำลองยูนิตเซลล์ (Unit Cell Model)

1.5.2 ทราบพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่หยั่งลึก กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯโดยใช้แบบจำลองแกนสมมาตรยูนิตเซลล์ (Unit Cell Model)โดยคำนึงถึงความ แข็งแกร่งของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (Slab) และผลกระทบอื่นๆ ของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

1.5.3 ทราบค่าผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณกับสูตรที่มีอยู่เพื่อดูผลเฉลยความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของสูตรแล้วนำมาปรับปรุงงานวิจัยในอนาคตต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เทคนิคการใช้ผงปูนซีเมนต์หรือน้ำปูนซีเมนต์ฉีดลงไปในชั้นดินเพื่อให้ก่อตัวเป็นลักษณะของเสาเข็มหรือที่เรียกว่าวิธีผสมลึก (Deep Mixing Method) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนให้ดีขึ้น [2] ในปัจจุบันเทคนิคนี้ถูกพัฒนาต่อ ให้สามารถลดผลกระทบกับระดับน้ำใต้ดินและลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างก่อสร้าง [5] ด้วยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ควบคู่กับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่วางบนหัวเสาเข็ม แต่เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกมีพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำที่ซับซ้อนกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบหยั่งลึกปกติ จึงได้มีนักวิจัยพยายามศึกษาค้นคว้าเพื่อหาข้อสรุปที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ประเภทนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลและทฤษฎีการคำนวณต่างๆที่เกี่ยวข้องดังที่จะถูกนำเสนอต่อไปนี้

2.2 ความเป็นมาของการใช้งานเสาเข็มดินซีเมนต์

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการใช้ปูนขาวและซีเมนต์ วิวัฒนาการของการใช้ DDM (Deep Mixing Method) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1954-ปัจจุบัน เริ่มใช้ในประเทศสวีเดนและประเทศญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2513 วิธีการผสมแบบลึกเริ่มใช้ในประเทศญี่ปุ่น เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อนของโครงสร้างบริเวณท่าเรือ และในปัจจุบันได้นำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้บนแผ่นดิน เช่น คันทางอาคารและถังเก็บน้ำ การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์/ปูนขาว (Cement/lime Column) ในการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน สำหรับดินอ่อน สำหรับรับคันถนน หรือในงานดินขุด เริ่มต้นในประเทศแถบสแกนดิเนเวีย เช่น สวีเดน ฟินแลนด์ นอร์เวย์ ดังนั้นองค์ความรู้ ทฤษฎีการออกแบบ จึงพัฒนามาจากประเทศในแถบนี้เป็นส่วนใหญ่ ในประเทศญี่ปุ่นก็มีการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่เรียกว่า DDM (Deep Mixing Method) อย่างแพร่หลาย แต่ใช้ในลักษณะของการเพิ่มเสถียรภาพของคันดินเป็นส่วนใหญ่

Bergado และคณะ [1] การทำเสาเข็มโดยการผสมแบบลึกนั้นกระทำโดยการผสมปูนขาวหรือซีเมนต์ลงไปในดิน แล้วกวนด้วยใบพัดกดลงไปในดินด้วยเครื่องจักร ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ เช่น ปริมาณของปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ ประเภทของดิน ระยะเวลาการบ่ม

และปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในดินเป็นต้น บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ นิยมใช้มากกว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาวเพราะเหตุผลดังต่อไปนี้

Broms [6] ประการแรก ซีเมนต์มีราคาถูกกว่า ปูนขาว ประการที่สอง สำหรับดินที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์จะก่อให้เกิดกำลังที่มากกว่าการปรับปรุงดินด้วยปูนขาว วิธีการนี้เริ่มนิยมใช้ในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 และนำไปประยุกต์ใช้กับคันทางของถนน ฐานรากของอาคารต่างๆ การซ่อมแซมฐานรากเพื่อที่จะลดการเกิดการทรุดตัว เป็นต้น

Mills [7] ได้รายงานว่าในปี ค.ศ. 1932 งานวิจัยของ South Carolina State Highway Department โดย Dr. C.H. Moorefield ได้ทำการศึกษาส่วนผสมของดินกับซีเมนต์ที่ใช้ก่อสร้างถนนหลายสายในปี ค.ศ. 1933 และปีค.ศ. 1934 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนได้และมีราคาถูก ทำให้เกิดการค้นคว้าเกี่ยวกับดินซีเมนต์กันอย่างกว้างขวางมากขึ้น

Davidson [8] รายงานว่า ในปี ค.ศ. 1941-1944 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ดินซีเมนต์ได้เริ่มนำมาใช้ในการสร้างสนามบินมากถึง 22 ล้านตารางหลา แต่ในขณะเดียวกันการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นอีก นอกจากดินซีเมนต์จะถูกใช้ทำถนนแล้วยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้ารวมทั้งใช้เป็นวัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำและคูคลองอีกด้วย

กลไกในการพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ [9] เกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์ผสมเข้ากับดินและน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ได้สารประกอบ Hydrated Calcium Silicate (CSH), Hydrated Calcium Aluminate (CAH) และ Hydrated Lime ที่แยกตัวออกมาระหว่างเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.1 ซึ่งสารประกอบ CSH และ CAH เป็นสารประกอบเชื่อมยึดหลักเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Cement Hydration ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะมวลดินเข้ากันเป็นมวลดินขนาดใหญ่และมีกำลังสูงขึ้นแล้วยังก่อให้เกิด สารเคมีชนิด Calcium Hydroxide ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดดินบางส่วนที่มีสารจำพวกซิลิกาและอลูมินาได้ต่อไปอีกโดย Calcium Hydroxide หรือ Hydrate Lime จะ แตกตัวออกมาเป็นอิออนของ Ca^{+} และ $(OH)^{-}$ ดังสมการที่ 2.2 ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina เกิดเป็นสารประกอบ CSH และ CAH ได้อีก ดัง สมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\text{Cement} + H_2O \longrightarrow CSH + CAH + Ca(OH)_2 \quad (2.1)$$

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^{-} \quad (2.2)$$

$$Ca^{2+} + 2(OH)^{-} + SiO_2 \text{ (Soil Silica)} \longrightarrow CSH \quad (2.3)$$

$$Ca^{2+} + 2(OH)^{-} + Al_2O_3 \text{ (Soil Alumina)} \longrightarrow CAH \quad (2.4)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากสมการ 2.1 และสมการ 2.2 จะเรียกว่า Primary Reaction และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากสมการ 2.3 และสมการ 2.4 จะเรียกว่า Secondary Reaction

2.3 รูปแบบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

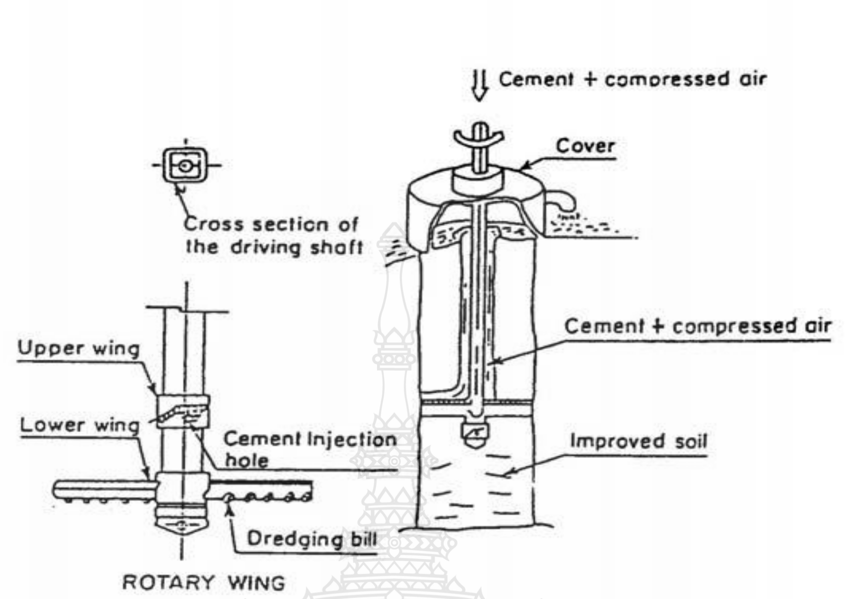
รูปแบบวิธีในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีอยู่หลายรูปแบบ โดยในแต่ละวิธี ก็จะมีลักษณะและจุดเด่นที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท โดยรูปแบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 Mechanical Mixing เป็นการใช้ใบพัดที่อยู่ตามแนวก้านเจาะ ช่วยในการผสมระหว่างดินกับสารผสมเพิ่ม ที่ประกอบไปด้วยสองสถานะของสารผสมเพิ่ม คือ สถานะที่มีลักษณะเป็นซีเมนต์ผง(Cement Powder) โดยทั่วไปจะเรียกวิธีการที่ใช้สารเพิ่มลักษณะนี้ว่า Dry Jet Mixing Method (DJM Method) และสถานะที่มีลักษณะเป็นน้ำปูน(Cement Slurry หรือ Cement Milk) หรือเรียกว่า Wet Mixing Method(WJM Method)

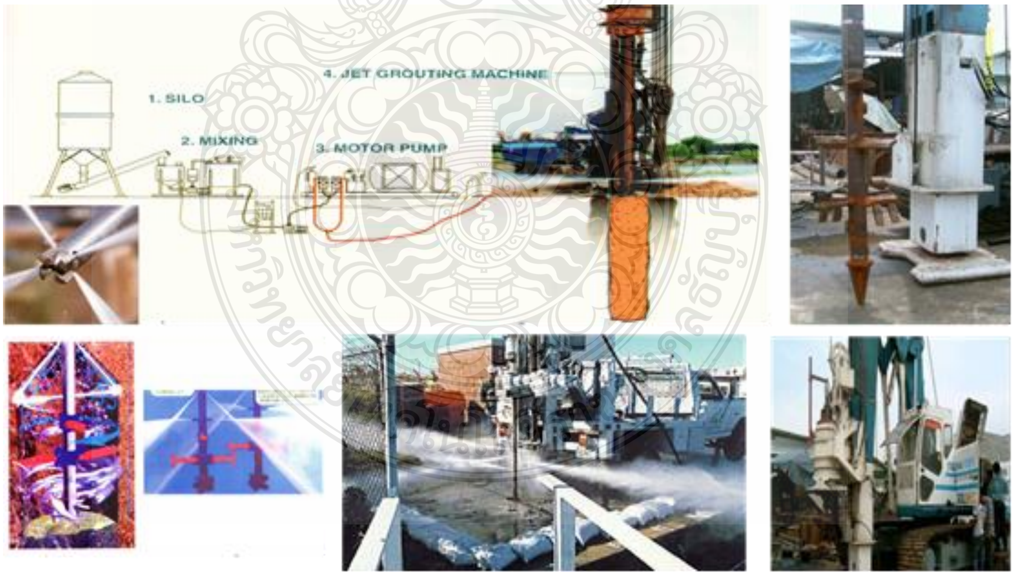
Chida [10] นำซีเมนต์ผง (Cement Powder) มาใช้ในการผสมแทนที่น้ำปูน (Cement Slurry) วิธีการผสมคือ Deep Mixing Machine จะทำการตัดย่อยดินในขณะที่ใบพัดเคลื่อนที่ลงโดยทั่วไปใบพัดผสมจะเป็นคนละขนาดกับใบพัดที่ตัดย่อยดิน เมื่อถึงความลึกที่ปลายของเสาเข็มดินซีเมนต์ ก้านเจาะจะทำการฉีดผงปูนตลอดความลึกชั้นดินโดยผ่านท่อกระบอกฉีด (Nozzle Pipe) ที่ถูกอัดด้วยอากาศ จากนั้นผงซีเมนต์จะถูกผสมโดยใบพัดผสมซึ่งจะเป็นการหมุนกลับทางของใบพัดในลงพร้อมกับการชักก้านผสมขึ้นสู่ผิวดินในอัตราคงที่ โดยลักษณะของใบพัดและขั้นตอนการผสม

2.3.2 Jet Grouting Method เป็นวิธีการปรับปรุงดินฐานรากโดยใช้สารเคมีผสมในที่แบบผสมลึก โดยการฉีดน้ำปูน (Cement Slurry) เข้าไปผสมรวมกับดินด้วยความดันในระดับที่สูงมากผ่านรูเล็กๆ (Nozzle)ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.00-4.00 มิลลิเมตร ที่เรียงตัวอยู่ในแนวรอบส่วนปลายของก้านเจาะ ในขณะทำงานเครื่องเจาะฉีดน้ำปูนแล้วหมุนกดก้านเจาะที่มีปลายล่างปิดเจาะแหวกดินลงไปช้าๆ พร้อมทั้งฉีดน้ำหรือน้ำปูน (ใช้แรงดันประมาณ 15 บาร์ ขึ้นอยู่กับความแข็งของดิน) ตัดดินลงไปด้วยความดันสูงเพื่อทำลายโครงสร้างดิน เมื่อถึงความลึกที่ต้องการปรับปรุงจะหมุนก้านเจาะพร้อมทั้งดึงก้านเจาะขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะเดียวกันจะฉีดน้ำปูนด้วยความดันสูงในระดับ 200-400 บาร์ ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของดินเช่นเดียวกัน เกษม เพชรเกตุ [11] ได้แนะนำว่าแรงดันที่ใช้ตัดย่อยดินควรจะต้องน้อยกว่าแรงดันที่ใช้ Grout ผ่านรูเล็กๆ ออกไปกวนผสมกับดินกระแสน้ำปูนที่ความเร็วประมาณ200 เมตร/วินาที หรือสูงกว่า จะทำงานคล้ายๆ ใบพัดของเหลวที่มีกำลังทะลุ

ทะลวงสูงตัดย่อยดินทั้งอ่อนและแข็งให้ผสมรวมกับน้ำปูนเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่หมุนและดึงก้านเจาะขึ้นอย่างช้าๆ



รูปที่ 2.1 แสดงรายละเอียดรูปแบบใบมีดผสมของวิธี Dry Jet Mixing [12]



รูปที่ 2.2 วิธีการผสมลึกแบบ Jet Grouting[11]

2.4 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์

Pendola, Kennady และ Hutson [13] ได้สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินซึ่งประกอบด้วยกลไก 4 ชนิด คือ

1.Hydration of Cement คือกระบวนการที่สำคัญโดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน ก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการคละขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้ว ยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดินทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ

2. Cation Exchange การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภทมีความเชื่อมแน่นที่มีความชื้น เชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cation หรือการรวมตัวกันของ Cation บนผิวของเม็ดดิน ปฏิกิริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์

3. Carbonation คือขบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้เกิด Calcium Carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น

4. Pozzolanic Reaction คือขบวนการระหว่าง Free Lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลานานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

2.5 ประโยชน์ของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์

Kamon [14] ได้สรุปไว้ว่า แนวความคิดโดยทั่วไปของการปรับปรุงคุณภาพดินคือ การทำให้มีกำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น มีค่าความปลอดภัยเพียงพอและมีเสถียรภาพ ปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินมีหลายประการตั้งแต่ชนิดและการนำมาใช้ประโยชน์กับโครงสร้าง เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปปัญหาเหล่านี้สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. การปรับปรุงคุณภาพทางด้านปัญหาเชิงกล เช่น การทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น การป้องกันการเปลี่ยนรูป ลดแรงดันดินที่เกิดขึ้น และความมีเสถียรภาพความลาดของดิน เป็นต้น

2. การปรับปรุงคุณภาพทางด้านปัญหาเชิงอุทก เช่น ป้องกันการเกิด Liquefaction ใช้เป็นกำแพงกั้นน้ำและป้องกันการสึกกร่อนเนื่องจากการไหลซึมของน้ำและการไหลผ่านของ น้ำใต้ดิน เป็นต้น

3. การแก้ปัญหาทางด้านสุขาภิบาลและสิ่งแวดล้อม เช่น การรักษาสิ่งแวดล้อมและการจัดการกับของเสีย เป็นต้น

การทำเสาเข็มดินซีเมนต์รองรับคันทางถนน เพื่อลดปริมาณการทรุดตัวและป้องกันปัญหาเสถียรภาพของคันทางบริเวณลาดด้านข้างเนื่องจากการเลื่อนตัว การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์จะทำให้ดินฐานรากแข็งตัวและมีกำลังสูงขึ้น การก่อสร้างคันทางและผิวถนนสามารถทำได้ทันทีหลังจากก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แล้วเสร็จ ไม่ต้องรอเวลาทำการ Preload ให้ดินเกิดการทรุดตัวเหมือนการก่อสร้างแบบเดิมหรือใช้ PVD ช่วยเร่งการทรุดตัวต่อเนื่องเป็นเวลานานหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ เนื่องจากความหนาของชั้นดินเกิดการทรุดตัวลดลง ในปัจจุบัน Deep Mixing method ได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานปรับปรุงคุณภาพดินหลายลักษณะ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1) ลดการทรุดตัวของ Embankment, ฐานรากอาคาร และโครงสร้างอื่นๆ
2) ป้องกันการเกิด Slope Failure
3) เพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคันดินและทำหน้าที่เปรียบเสมือนฐานรากได้อย่างดี
4) ป้องกันการเกิด Heaving และลดความยาวของ Sheet Pile ในการขุดลึก
5) ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการก่อสร้างบริเวณข้างเคียงและบริเวณที่เชื่อมต่อกัน

2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์

2.6.1 ปริมาณและประเภทของซีเมนต์

Felt (1955) [15] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy Sand, Medium Clay และ Silty clay loam มาทดสอบผสมซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6 – 30 โดยปริมาตร ที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วัน จนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบ คือ Wet-dry และ Freeze – thaw ตั้งแต่ 12 รอบ ถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำ และค่าความแข็งแกร่งของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ นอกจากนั้น Felt (1955) ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์

โดยนำดินสองชนิดคือ Silty Clay Loam และ Sandy Loam มาผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 พบว่าดินที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังที่สูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่ซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะไม่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินทุกชนิด เช่น ดิน Sandy Loam ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังอัดเป็นสองเท่าของดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน และเป็น 1.4 เท่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty Clay Loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะให้กำลังสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Horpibulsuk 2001, Miura et al. 2001 [16],[17] แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรนี้เรียกว่า Clay – water/Cement Ratio (Wc/C) และถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนักผึ่งแห้งและ Horpibulsuk (2001) ยังได้สร้างสมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ปริมาณความชื้น ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยได้ผลจากการทดสอบ

2.6.2 ชนิดของดิน

Moh et al. 1967 [18] รายงานว่า ดินลูกรังในประเทศไทย ที่มีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า 852 กิโลปาสคาล ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่มีประสบการณ์ในการทดลองใช้ในแอฟริกาและยังเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการบดอัด ว่าถ้าค่าร้อยละของการบดอัดลดลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงอย่างเห็นเด่นชัด

Bell 1976 [19] พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาว จะทำให้ Aqueous phase ลดลง ทำให้สาร Cementitious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวไม่เพียงพอต่อการแข็งตัว การแก้ไขคือ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free lime ให้มากขึ้นโดยปกติการเพิ่มซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

2.6.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

Felt 1955 และ Davidson et al. 1962 [15],[20] ศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัดและความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียจากการทำ Wet-Dry และ Freeze –Thaw ได้ผลตรงกันว่า ปริมาณความชื้น และความหนาแน่นมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดดินที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จึงจะให้กำลังอัดสูงสุด

Ruenkrairergsa 1982 [21]ได้อธิบายว่าการนำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของพร็อกเตอร์ (Proctor) มาใช้ในงานดินซีเมนต์นั้นพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากจะให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ที่สมบูรณ์อีกด้วย สำหรับดินซีเมนต์ ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนมากที่สุดเสมอไป จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze –Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์พบว่า ความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย การบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความแข็งแกร่งลดลง สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ ความแข็งแรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 3-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จะให้ความแข็งแรงสูงสุด

2.6.4 การบ่มดินซีเมนต์

Shackel and Lee 1974 [22]ทำการศึกษาเรื่องการบ่มดินซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่าง Artificial Soil ซึ่งได้จากการนำ Uniform Sand จากเมือง Botany รัฐ New South Wales ประเทศออสเตรเลียมาผสมกับ Commercial Air-floated China Clay (Kaolin) ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนักและผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0 , 3 และ 8 ทำการบ่ม 2 ลักษณะ คือบ่มในอากาศที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส และบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส โดยการบ่ม 0, 1, 3 , 9 , 23 , 44 และ 81 วัน จากนั้นทดสอบหาค่าการหดตัว หรือค่าการขยายตัว ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึง และวัดการกระจายตัวของโพรง (Pore Size Distribution) ของดินซีเมนต์จากการจำลองแท่งตัวอย่างโดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Mercury Intrusion Porosimeter พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มจะทำให้กำลังอัด และกำลังดึงเพิ่มขึ้น การบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้น และยังเพิ่มขนาดโพรง (Pore Size) และปริมาตร (Pore Volume) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดโพรงลดลง

Clare and Pollard [23] สรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของดินซีเมนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้น 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่อากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50-100

2.6.5 สารผสมเพิ่ม

Lambe and Moh (1957) [24] ได้รายงานผลการทดสอบการใช้สารผสมเพิ่มจำนวน 29 ชนิดในกลุ่ม Dispersants , Synthetic resins, Waterproofing agents, Alkalis และเกลือ ในดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 และปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 ดินที่ใช้ทำการทดสอบได้แก่ดินตะกอนจากรัฐ New Hamshire ดินเหนียวปนดินตะกอนจากรัฐ Massachusetts และดินฝุ่นแข็งพรุนจากเมือง Vicksburg พบว่ามีสารผสมเพิ่ม 4 ชนิด ที่เพิ่มความแข็งแรงถึงร้อยละ 100-150 ได้แก่โซเดียมคาร์บอเนต , โซเดียมไฮดรอกไซด์, โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซัลเฟต

Pinto และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาดินที่มีแร่มอนโมริลโอไนท์ผสมอยู่ 5 ชนิด โดยแปรผันปริมาณปูนขาว ซีเมนต์ที่ผสม และอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยทำการแช่น้ำ 1 วัน ก่อนทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว พบว่าการผสมปูนขาวจะช่วยให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในกรณีที่ดินตัวอย่างมีปริมาณดินเหนียวสูง และถ้าดินไม่มีหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่จะยิ่งทำให้ความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น

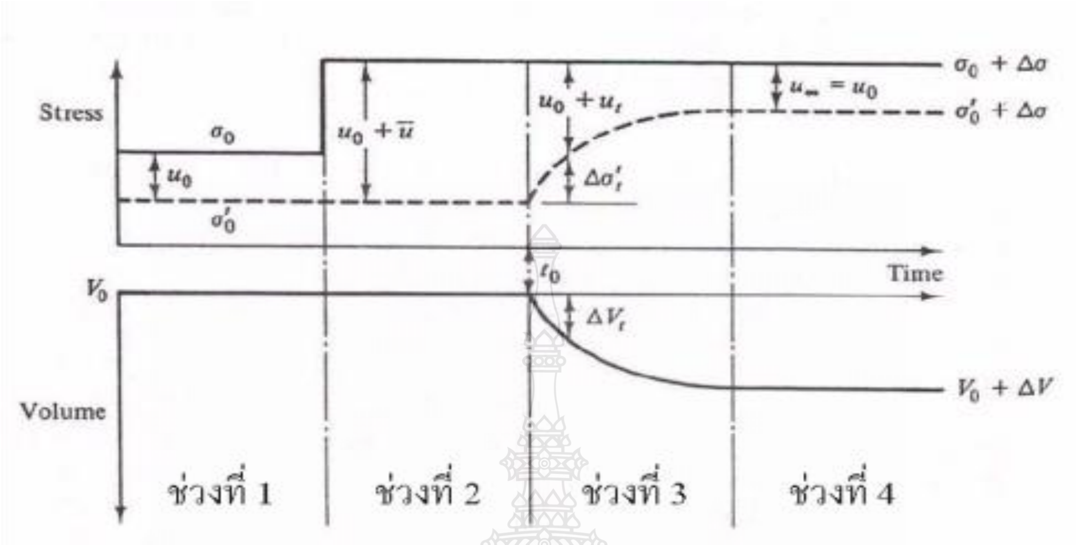
2.7 การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทยเรานั้นได้มีการนำมาใช้ในงานทางหลวงแผ่นดินสายบางนา- บางปะกง เป็นงานแรก ปี 2537 โดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตรยาว 17 .00 เมตร ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 เมตร จากภาพการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น สามารรถประหยัดต้นทุนการก่อสร้าง ลด Cost ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ไม่รบกวนระดับน้ำใต้ดิน ลดการสั่นสะเทือนของดินบริเวณใกล้เคียงโดยมีการใช้อย่างแพร่หลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น ถนนภายในสนามบินสุวรรณภูมิ ถนนเส้นวัดกิ่งแก้ว เขตลาดกระบัง คลองระบายน้ำคลองลัดโพธิ์ และการไฟฟ้าวังน้อย

2.8 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการอัดตัวคายน้ำ

มวลดินจะประกอบไปด้วยเม็ดดินและช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งในช่องว่างระหว่างเม็ดดินนั้นจะประกอบ ด้วยน้ำและอากาศ โดยมีสมมุติฐานว่า ภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกเม็ดดินและน้ำไม่สามารถยุบตัวได้ (Incompressible) เมื่อมวลดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำถูกกระทำด้วยน้ำหนักบรรทุกภายนอกแบบทันทีทันใด น้ำหนักทั้งหมดจะถูกรองรับด้วยความดันน้ำโพรงเพิ่ม (Pore Water Pressure) ด้วยสาเหตุที่ดินเหนียวมีค่าความสามารถในการซึมผ่านต่ำและเมื่อเวลาผ่านไปความดันน้ำโพรงเพิ่มนี้จะเกิดการกระจายออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Dissipation) ในลักษณะการไหลของน้ำเนื่องมาจากแรงดันที่สูงกว่ามวลดินภายนอก น้ำหนักทั้งหมดที่รองรับด้วยน้ำหนักโพรงเพิ่มในระยะแรกนั้นจะถูก

ถ่ายไปยังเม็ดดินซึ่งมีผลให้ปริมาณช่องว่างในเม็ดดินลดลง ซึ่งเรียก ปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า กระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Process) [26] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การอัดตัวคายน้ำของดิน [26]

จากรูปที่ 2.3 ช่วงที่ 1 นั้น คือ สภาพของดินปกติ ซึ่งจะมีค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) และค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) คงที่ค่าหนึ่ง ต่อมาช่วงที่ 2 เมื่อมีน้ำหนักภายนอกเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ดินเหนียวอ่อนซึ่งมีค่าความซึมผ่านของน้ำต่ำจึงสมมุติว่า ปริมาตรของดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจึงถูกรองรับ ด้วยแรงดันน้ำทำให้แรงดันน้ำส่วนเกิน เพิ่มขึ้น ในช่วงที่ 3 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินก็จะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเท่ากับสภาพปกติ และค่าความเค้นประสิทธิผลก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเท่ากับน้ำหนัก ภายนอกรวมกับความเค้นประสิทธิผลในสภาพปกติ หมายความว่า น้ำหนักภายนอกที่เพิ่มขึ้นแต่เดิม ถูกรองรับด้วยแรงดันน้ำแต่เกิดการ เปลี่ยนแปลง โดยมวลดินทำหน้าที่รับน้ำหนักแทน ซึ่งก็คือ ช่วงที่ 4 นั่นเอง ในสภาพความเป็นจริงแล้ว ช่วงที่ 2 นั้นจะไม่เกิดขึ้นแต่เพื่อความเข้าใจในทฤษฎีจึง แยกช่วงที่ 2 ออกมา การทรุดตัวจะทำให้เกิดความเครียด ลักษณะความเครียดที่เกิดขึ้นอาจเป็นแบบ 1 หรือ 2 หรือ 3 มิติก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของน้ำหนักที่มากระทำและความหนาของชั้นดิน การทรุดตัวของ มวลดินแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. การทรุดตัวทันทีหรือแบบไม่เกิดการระบายน้ำ (Immediate or Undrained Settlement)การทรุดตัวลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้ทั้งในดินเหนียวและดินทราย สำหรับการทรุดตัวแบบทันทีซึ่งเกิดกับดินเม็ดใหญ่ (Coarse Grained Soil)หรือดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil) เช่น กรวด ทราย เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกภายนอกมากระทำต่อมวลดิน จะทำให้เกิดการทรุดตัวทันที การ

ทรุดตัวลักษณะนี้จะเป็นการทรุดตัวเกือบทั้งหมด เนื่องจากดินมีค่าความสามารถในการซึมผ่านสูง (High Permeability) ดังนั้นน้ำ สามารถไหลออกจากมวลดินได้สะดวก เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและเกิดการทรุดตัวทันที เมื่อดินได้รับน้ำหนักบรรทุก (การทรุดตัวของดินประเภทนี้จะมีที่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาอยู่บ้าง เนื่องจากผลของ Creep แต่ปริมาณการทรุดตัวจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันที) การทรุดตัวแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Settlement) จะเกิดขึ้นกับดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) เช่น ดินเหนียวและดินจำพวกตะกอน เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำ ต่อดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยสาเหตุที่ดินเหนียวมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ (Low Permeability)ในทันทีทันใดที่ดินเหนียวรับน้ำหนักบรรทุก น้ำไม่สามารถที่จะไหลออกจากมวลดินได้ทันทีจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ดังนั้นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีทันใดภายใต้น้ำหนักบรรทุกจะเกิดการยุบตัวในแนวดิ่งและขยายออกไปในแนวนอนโดยที่ปริมาตรของมวลดินคงที่

2. การทรุดตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time Dependent Settlement)

การทรุดตัวลักษณะนี้เป็นลักษณะการทรุดตัวที่สำคัญของดินเหนียวและดินตะกอนเป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากการทรุดตัวทันทีได้สิ้นสุดลง สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาพการระบายน้ำ (Drain Condition) และสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) และสามารถ แบ่งตามกลไก (Mechanism) ของการเกิดการทรุดตัวได้ดังนี้

2.1 การทรุดตัวเนื่องจากวิบัติเป็นที่ (Local Yield or Plastic Flow) และ การคืบโดยไม่ระบายน้ำ (Undrained Creep) การทรุดตัวลักษณะนี้เป็นการทรุดตัวที่เป็นฟังก์ชัน กับเวลา เกิดขึ้นเมื่อดินได้รับหน่วยแรงเฉือนจาก ภายนอกในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน จะเกิดมากในดินจำพวก High Plastic และ Organic Clay

2.2 การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำขั้นแรก (Primary Consolidation)เป็นการทรุดตัวในสภาวะการระบายน้ำ (Drain Condition) เกิดจากที่มวลดินได้รับบรรทุก จากภายนอก ทำให้เกิดความดันโพรงเพิ่ม (Excess Pore Pressure)ขึ้น ดินในส่วนที่อยู่ ภายใต้อิทธิพลของความเค้นจากแรงภายนอกที่มากระทำนี้จะมีแรงดันที่มากกว่าดินภายนอกในส่วนที่ ไม่ได้รับอิทธิพลจากความเค้นดังกล่าว เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะไหลจากมวลดินที่มีแรงดันที่สูงกว่าไป ยังมวลดินที่มีแรงดันที่ต่ำกว่าผลของการระบายน้ำออกจากมวลดินจะทำให้ปริมาตรของมวลดิน ลดลง และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของมวลดินเพิ่มขึ้น อัตราการทรุดตัวจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำการทรุดตัวลักษณะนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อในมวลดินไม่มี Excess Pore Pressure เหลืออยู่ หรืออีกนัยหนึ่งคือ แรงดันของน้ำทุกจุดในมวลดินเท่ากัน

2.3 การทรุดตัวเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำขั้นที่สอง (Secondary Consolidation)เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำขั้นแรก(Primary Consolidation) การทรุดตัวลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับเวลาและไม่เกี่ยวกับอัตราการระบายน้ำออก ของน้ำในโพรง การทรุดตัวเกิดจากการที่น้ำไหลออกจากมวลดินทั้งๆที่ไม่มี Excess Pore Pressure เหลืออยู่ในมวลดินเลย ซึ่งเป็นผลจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดินในขณะที่ Effective Stress ในมวลดินคงที่ บางครั้งเรียกการทรุดตัวลักษณะนี้ว่า การคืบโดยการระบาย น้ำ (Drained Creep) ซึ่งในดินทั่วไปจะเกิดการทรุดตัวลักษณะนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำขั้นแรก

2.9 ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

Chai และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลการทรุดตัวของถนนสายซูเลียน (Xu-Lian Expressway) ประเทศจีน ที่ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นในการปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อนก่อนการก่อสร้างถนนเพื่อหาข้อสรุปในการหาวิธีคำนวณค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งการออกแบบถนนจะถูกควบคุมและกำหนดด้วยค่าการทรุดตัวที่ยอมของถนนแต่ละสาย และจากผลการวิเคราะห์ในภาคสนามพบว่ายิ่งระยะห่างระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นห่างมากเท่าไรค่าการทรุดตัวจะยิ่งมาก ซึ่งแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็มแบบสั้น 3 กลุ่ม ที่มีความยาวของเสาเข็ม 8 – 10 เมตร และยังพบอีกว่า สำหรับค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยระบบเสาเข็มดินซีเมนต์ชนิดลอย (Floating type) วางใต้ชั้นดินที่ผสมซีเมนต์ก่อตัวเป็นแผ่นพื้นที่หรือที่เรียกว่า Column-Slab System นั้นเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนความเค้นหนาแน่น (Stress Concentration Ratio) หรือค่า n ที่กระทำต่อหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งการประมาณค่า n ที่ถูกต้องเหมาะสม ยังคงเป็นสิ่งที่ท้าทายต่อวิศกรออกแบบอยู่

Chai และคณะ [2] ได้ทำการศึกษากลไกที่กระทำซึ่งกันและกันระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ชนิดสั้นกับดินเหนียวที่อยู่รอบๆ เสาเข็มด้วยวิธีวิเคราะห์แบบไฟไนต์อิเลเมนต์โดยใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit Cell Model) ในการวิเคราะห์ Chai และคณะ [2] ได้กำหนดให้สำหรับดินเหนียวอ่อนใช้ Modified Cam Clay Model (MCC) ถูก นำเสนอโดย Roscoe และ Burland (1968) ในการจำลองพฤติกรรมในขณะรับแรงส่วนเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้นบนเสาเข็มดินซีเมนต์รวมทั้งดินทรายใช้ถูกจำลองให้เป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic material) สำหรับคุณสมบัติของดินที่นำมาจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักนั้น เป็นดิน 2 ชนิดคือ ดินเหนียวอ่อนในจังหวัดซากะ ประเทศญี่ปุ่นหรือที่ถูกเรียกว่า Ariake clay เพื่อใช้การจำลองชั้นดินเหนียวอ่อน Model Ground-1และอีกชนิดหนึ่งคือดินเหนียวจากเมืองเซียงไฮ้ ประเทศจีน เพื่อใช้ในการจำลองชั้นดินเหนียวอ่อน Model Ground-2

วัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์นี้ก็คือเพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมการปฏิสัมพันธ์ของระบบระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวอ่อนที่อยู่รอบๆ เสาเข็ม ซึ่งการวิเคราะห์ผลการศึกษาด้วยแบบจำลองดังที่กล่าวมาข้างต้น จะแสดงผลมาในรูปแบบของค่าการทรุดตัวสัมพันธ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์เทียบกับดินเหนียวที่อยู่รอบๆ เสาเข็มนั้น ทั้งนี้ Chai และคณะ[2] ได้นำเสนอค่าพารามิเตอร์ใหม่สำหรับอธิบายพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

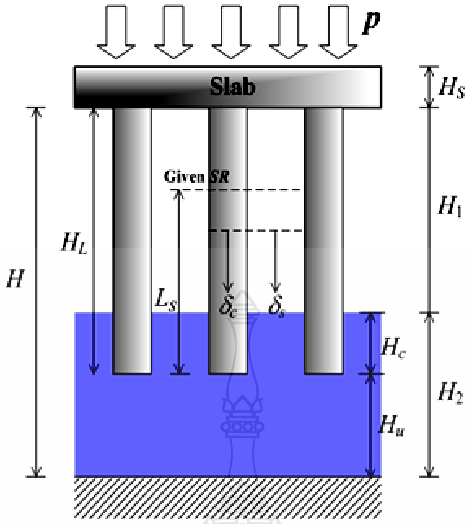
$$\beta = \frac{H_L}{H} \tag{2.5}$$

$$SR = \frac{\delta_s}{\delta_c} \tag{2.6}$$

$$RS = \delta_c - \delta_s \tag{2.7}$$

$$LR = \frac{L_s}{H_L} \tag{2.8}$$

เมื่อ β คืออัตราส่วนการปรับปรุงความลึก (Depth Improvement Ratio), SR คืออัตราส่วนการทรุดตัว (Settlement Ratio), RS คือค่าการทรุดตัวสัมพัทธ์ (Relative Settlement), LR คืออัตราส่วนความยาว (Length Ratio), H คือความหนาของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์โดยไม่รวมความหนาของแผ่นพื้น, H_L คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์, L_s คือความยาวจากปลายเสาเข็มถึงจุดที่ทำให้ค่า SR หรือค่า RS มีค่าเท่ากับที่ถูกกำหนดไว้เพื่อการวิเคราะห์, δ_c คือค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ณ จุดที่ถูกกำหนดไว้เพื่อการวิเคราะห์, δ_s คือค่าการทรุดตัวของดินเหนียว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสองเสาเข็มที่อยู่ติดกันที่ระดับความลึกเดียวกับตำแหน่งที่พิจารณาค่า δ_c และสำหรับค่า LR เป็นดรรชนีที่บ่งบอกถึงระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของเสาเข็มกับดินที่อยู่บริเวณรอบๆ เสาเข็ม ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ [2]

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าอัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ หรือค่า α เป็นค่าที่มีอิทธิพลต่อค่า LR มาก นั้นหมายถึงมีอิทธิพลต่อค่าการทรุดตัวสัมพัทธ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อดินที่อยู่รอบๆ เสาเข็มนั้น โดยมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) โดยพบว่าอัตราการลดลงของค่า LR จะเพิ่มขึ้นสูงขึ้นถ้าค่า α เกินกว่าร้อยละ 20

Japanese Institute of Construction Engineering หรือ JICE [28] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น ซึ่งสามารถพิจารณาจากความสัมพันธ์ของตัวเสาเข็ม โดยค่าการทรุดตัวสามารถหาได้จากการให้ชั้นดินหนา H_c ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เสมือนเป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็ม เมื่อระยะ H_c วัดจากปลายเสาเข็มขึ้นมา และสามารถคำนวณหาค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงรวมกับระยะ H_c ดังกล่าวด้วยสมการที่เสนอโดย Terzaghi และ Peck [29] ส่วนชั้นดินด้านบนที่เหลือ (หรือส่วนของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์) ไม่ต้องนำมาคิด ใช้คุณสมบัติของ ดินเหนียวใต้เสาเข็มดินซีเมนต์ในการคำนวณเท่านั้น และ JICE [28] ยังเสนอว่าถ้าค่า $\alpha \geq 30\%$ ให้ใช้ชั้นดินที่มีความหนาเท่ากับชั้นดินที่ไม่ถูกปรับปรุงในการคำนวณค่าการทรุดตัว ส่วนที่เหลือไม่ต้องนำมาคิด แต่ถ้า $\alpha < 30\%$ ให้ถือว่าชั้นดินที่ไม่ถูกปรับปรุงหนาขึ้นเท่ากับความหนาเดิมบวกความหนา 1 ใน 3 ของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงแล้วจึงหาค่าการทรุดตัวจากชั้นดินดังกล่าว ส่วนที่เหลือไม่ต้องนำมาคิด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีของ JICE [28] จะค่อนข้างหยาบในการประมาณค่าระยะ H_c และยังพบอีกว่าบ่อยครั้งผลที่ได้จากการคำนวณในหลายๆ กรณีศึกษาด้วยวิธีของ JICE [28] ให้ค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดในภาคสนามอยู่มาก

ต่อมา Chai และคณะ [2] ได้เสนอสมการในการประมาณค่าระยะ H_c เพื่อใช้ในการคำนวณค่าการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น ซึ่งได้จากผลการศึกษาดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยที่ค่าระยะ H_c จะเป็นฟังก์ชั่นของค่า α และค่า β และมีสมการดังต่อไปนี้

$$f(\alpha) = \begin{cases} 0.53 - 0.013(\alpha) & , (10\% \leq \alpha \leq 40\%) \\ 0 & , (\alpha > 40\%) \end{cases} \tag{2.9}$$

$$g(\beta) = \begin{cases} 1.62 - 0.016(\beta) & , (20\% \leq \beta \leq 70\%) \\ 0.5 & , (70\% \leq \beta \leq 90\%) \end{cases} \tag{2.10}$$

จากสมการด้านบน การแทนค่า α และค่า β ลงในสมการให้แทนด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของ α = 20% ให้ใช้ 20 แทนลงในสมการไม่ใช่ค่า 0.2 แทนลงในสมการ สำหรับการคำนวณค่าการทรุดตัว Chai และคณะ [2]ได้เสนอว่า การทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือค่าการทรุดตัว(S_1) ของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มหักออกด้วยชั้นดินเหนียวที่มีความหนา H_c ดังนั้นความหนารวมของชั้นดินส่วนที่ 1 จะเท่ากับ (H_L–H_c)และส่วนที่ 2 คือค่าการทรุดตัว (S_2) ของชั้นดินเหนียวที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงรวมกับความหนา H_c และใช้สมการต่อไปนี้ในการหาค่าการทรุดตัว

สำหรับชั้นบนที่มีความหนา H_1,

$$S_1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta p_{1i} H_{1i}}{\alpha + (1-\alpha) D_{si}} \tag{2.11}$$

(ใต้เครื่องหมายผลรวมพิมพ์ว่า $i=1\ D_{ci}$)

สำหรับชั้นบนที่มีความหนา H_2,

$$S_2 = \sum_{i=1}^{n} H_{2i} \frac{\lambda_i}{1+e_{0i}} \ln\left(1 + \frac{\Delta p_{2i}}{\sigma'_{vi}}\right) \tag{2.12}$$

เมื่อ H_{1i} และ H_{2i} คือความหนาของชั้นดินเหนียวที่ถูกแบ่งย่อยจากชั้นดินเหนียวที่มีความหนา H_1 และ H_2 ตามลำดับ ทั้งนี้การแบ่งชั้นดินนี้เพื่อผลการคำนวณที่ละเอียดขึ้น, σ'_{vi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนมีน้ำหนักกระทำในชั้นดิน H_{2i}, e_{0i} คือค่าอัตราส่วนช่องว่างก่อนมีน้ำหนักมา

กระทำ, λ_i คือความชันของเส้น Virgin Compression ในกราฟความสัมพันธ์ e-lnp', Δp_{1i} และ Δp_{2i} คือหน่วยแรงรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งในชั้นดิน H_{1i} และชั้นดิน H_{2i} ตามลำดับ, D_{ci} และ D_{si} คือค่าโมดูลัสของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินที่อยู่รอบเสาเข็มนั้นในชั้นดิน H_{1i} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_{ci} = \frac{E_i(1-\nu_i)}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \tag{2.13}$$

$$D_{si} = \frac{(1+e_i)\sigma'_{avi}}{\lambda_i} \tag{2.14}$$

เมื่อ E_i คือค่าโมดูลัสของยังค์สำหรับเสาเข็ม, ν_i คือค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของเสาเข็ม, e_i คืออัตราส่วนช่องว่างของเสาเข็ม และ σ'_{avi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งเฉลี่ยของชั้นดินรวมกับหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องจากน้ำหนักที่เกิดจากคันดินถม (Embankment Loading) ในสมการที่ (2.13) และ (2.14) ให้ใช้ค่าความชันของเส้น unloading-reloading ในกราฟความสัมพันธ์ e-lnp' นั้นคือใช้ค่า κ_i แทนค่า λ_i ในกรณีที่ชั้นดินอยู่ในช่วงสภาวะการยุบอัดตัวเกินปกติ (Over-Consolidated State) ดังนั้น ค่าการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้น (S_f) สามารถหาได้จาก

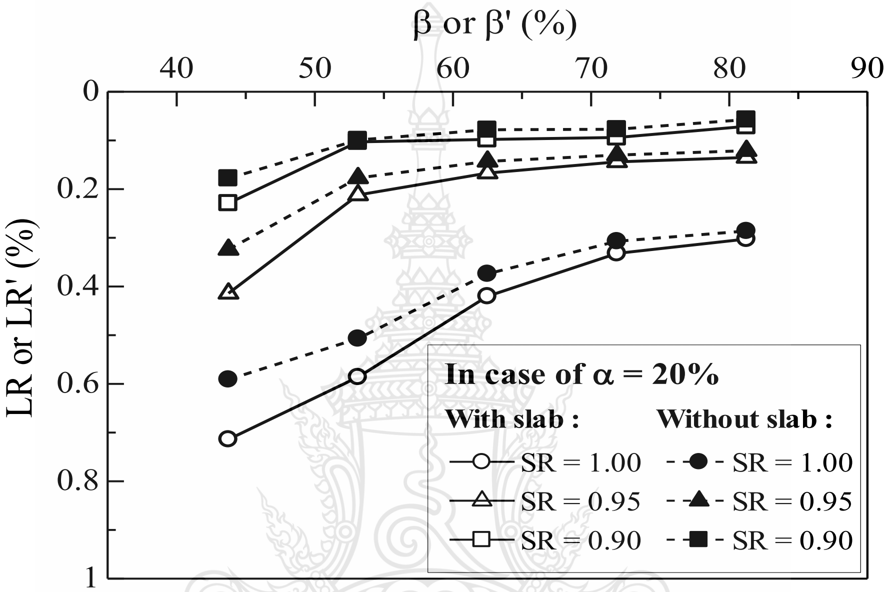
$$S_f = S_1 + S_2 \tag{2.15}$$

ต่อมา Pongsivasathit และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาผลกระทบอันเนื่องจาก น้ำหนักกดทับที่มากระทำอันเนื่องจากดินถม (Loading Intensity, p) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินบริเวณปลายเสาเข็ม (s_u) ที่มีต่อการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่ถูกปรับด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นในเทอมความสัมพันธ์ระหว่างค่า LR$'$ กับค่า α และค่า β' ในกรณีที่มีแผ่นพื้นและความสัมพันธ์ระหว่างค่า LR กับค่า α และค่า β สำหรับในกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นโดยที่

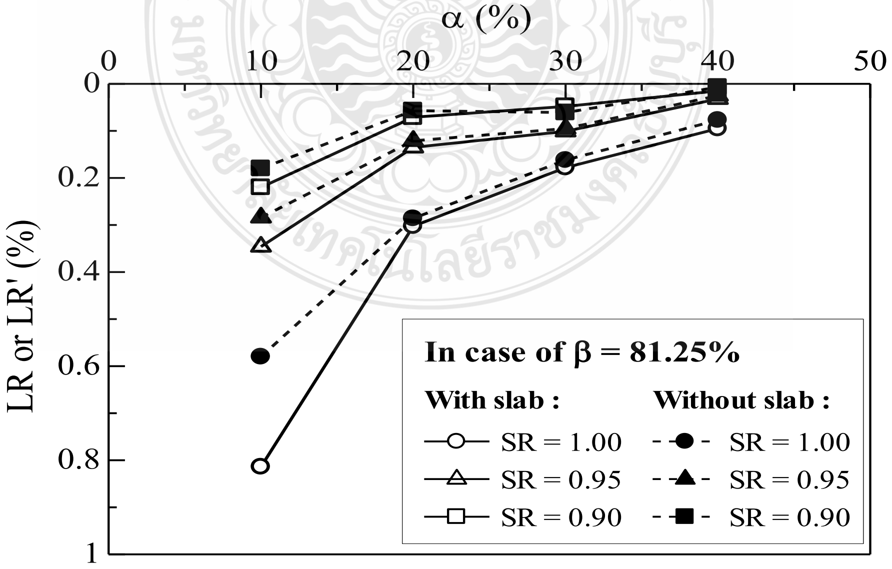
$$\mathrm{LR}' = \frac{L_S}{(H_L + H_S)} \tag{2.16}$$

$$\beta' = \frac{H_L + H_S}{H + H_S} \tag{2.17}$$

จากรูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LR หรือ LR$'$ กับค่า β หรือ β' พบว่าในกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้น จะมีค่า LR น้อยกว่าในกรณีที่มีแผ่นพื้น นั่นหมายถึงในกรณีไม่มีแผ่นพื้น ระยะการจมสัมพัทธ์ของเสาเข็มกับดินใต้เสาเข็มจะน้อยกว่ากรณีที่มีแผ่นพื้น ความแตกต่างของค่า LR หรือ LR$'$ ของพื้นสองกรณีจะน้อยถ้าค่า β หรือ β' ที่มีค่าเพิ่มขึ้นและรูปที่ 2.5 แสดงความ สัมพันธ์ระหว่างค่า LR หรือ LR$'$ กับค่า α พบว่า ค่า LR หรือ LR$'$ จะต่างกันไม่มากถ้าค่า α มีค่ามากกว่า 20%



รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบระหว่างมีระบบพื้นกับไม่มีระบบพื้นกรณีพิจารณาผลกระทบของ β [2]



รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบระหว่างมีระบบพื้นกับไม่มีระบบพื้นกรณีพิจารณาผลกระทบของ α [2]

จากนั้น Pongsivasathit และคณะ [3] ได้ปรับปรุงสมการเนื่องจากผลกระทบของอัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ (α) โดยอาศัยข้อมูลจากการศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มแบบสั้นเสริมชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ ดังที่กล่าวมาในข้างต้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f(\alpha)$ ใหม่ กับค่า α เมื่อ

$$f(\alpha) = \begin{cases} 0.75 - 2.5(\alpha) & (\alpha \geq 0.20) \\ 0.45 - 1.0(\alpha) & (0.20 < \alpha \leq 0.45) \\ 0 & (\alpha > 0.45) \end{cases} \tag{2.18}$$

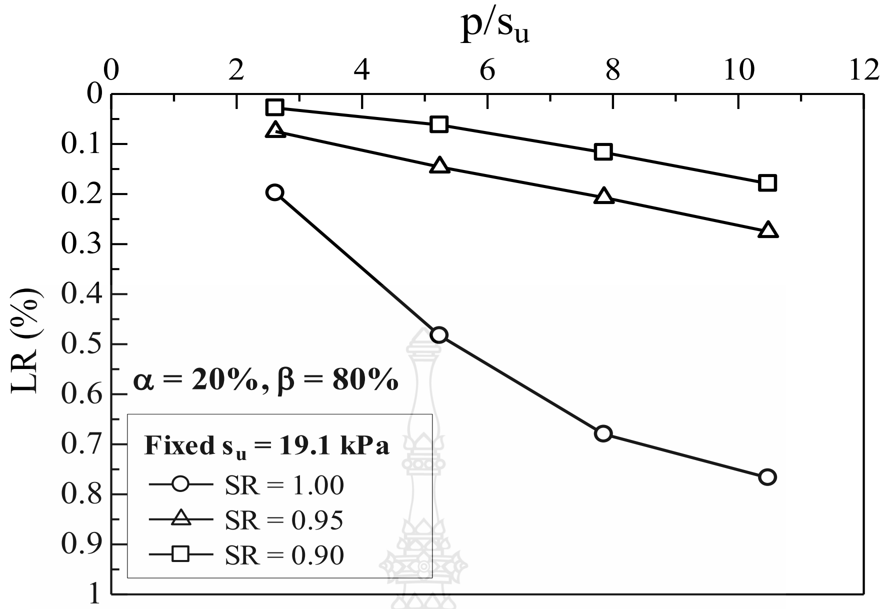
และจากผลการศึกษาผลกระทบอันเนื่องจากกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนเสาเข็ม ฟังก์ชั่นของ α ถูกกำหนดให้ใช้ค่า $f_1(\alpha)$ แทน $f(\alpha)$ เมื่อ

$$f_1(\alpha) = f(\alpha)\,(0.775 + 0.5\alpha)\,,\ (0.10 \leq \alpha \leq 0.45) \tag{2.19}$$

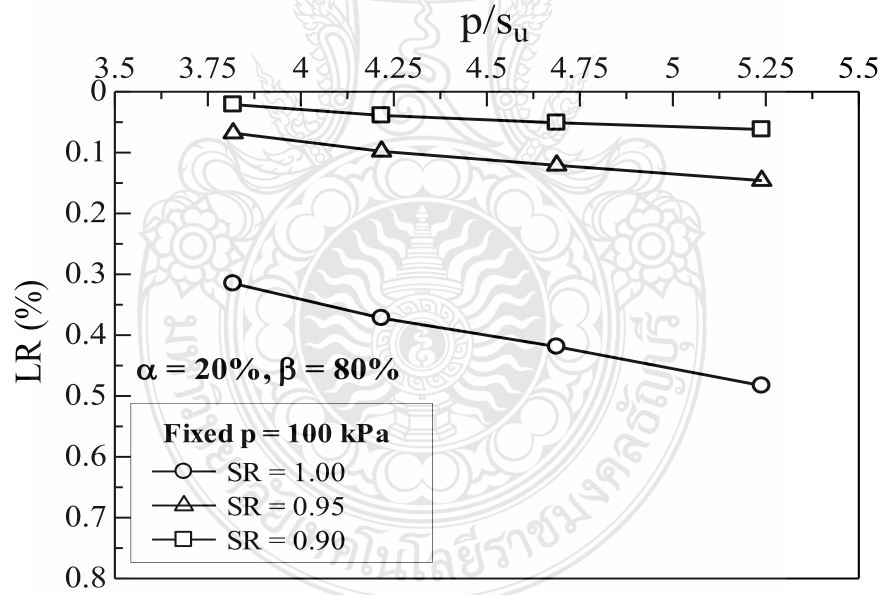
สำหรับผลกระทบเนื่องจาก p และ s_u ในการนี้ Pongsivasathit และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า (p/s_u) กับค่า LR ได้ผลดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบของ p ในกรณีนี้จะคงที่ค่า s_u ของดินบริเวณปลายเสาเข็ม ($s_u \approx 19.1$ kPa) และทำการแปรเปลี่ยนค่า p ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่า ค่า LR จะเพิ่มขึ้นตามค่า p/s_u ที่เพิ่มขึ้น

2) ผลกระทบของค่า s_u ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ สำหรับกรณีนี้จะทำการคงที่ค่า p (p = 100 kPa) และแปรเปลี่ยนค่า s_u เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงไปของค่า LR ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งการแปรเปลี่ยนค่า s_u ในการนี้จะเปลี่ยนค่า c' เพียงอย่างเดียว ส่วนค่าอื่น ๆ ให้คงไว้เหมือนเดิม พบว่าค่า LR ลดลงเมื่อค่า p/s_u ลดลง นั่นคือชั้นดินที่แข็งขึ้นจะลดระยะการจมสัมพันธ์ของเสาเข็มกับดินบริเวณใต้เสาเข็ม



รูปที่ 2.7 ผลกระทบของน้ำหนักกระทำกับค่า LR [2]



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของค่า s_u กับค่า LR [2]

ดังนั้น Pongsivasathit และคณะ [3] จึงได้เพิ่มฟังก์ชั่นหนึ่งเข้าไปในสมการเพื่อหาระยะ H_c เพื่อใช้ในการพิจารณาถึงผลกระทบอันเนื่องจากค่า p และ s_u ในที่นี้ได้กำหนดให้ฟังก์ชั่นใหม่นี้คือ h (γ) โดยที่

$$h(\gamma) = 0.27 \ln(\gamma) - 0.41 \quad (2.20)$$

เมื่อ $$\gamma = \frac{p \cdot p_a^{1.5}}{s_u^{2.5}} \quad (2.21)$$

โดยที่ p_a คือ ความดันบรรยากาศ

ในท้ายที่สุดสมการ H_c จึงถูกคำนวณจาก

$$H_c = H_L\, f(\alpha)\ .\ g(\beta).\ h(\gamma)$$ ในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (2.21)

$$H_c = H_L\, f_1(\alpha)\ .\ g(\beta).\ h(\gamma)$$ ในกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (2.22)

และ Pongsivasathit และคณะ [3] ยังได้เสนอสมการในการคำนวณหาค่าการทรุดตัวปฐมภูมิกับเวลาซึ่งอ้างอิงจากวิธีของ Chai และคณะ [2] โดยเสนอไว้ดังนี้

สำหรับดินชั้นบน H_1: $$s_1(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta p_{1i} H_{1i} U(t)}{D_{ci}\alpha + (1-\alpha) D_{si}} \quad (2.23)$$

สำหรับดินชั้นล่าง H_2: $$s_2(t) = \sum_{i=1}^{n} H_{2i} \frac{\lambda_i}{1+e_{0i}} \ln\left(1 + \frac{\Delta p_{2i}}{\sigma'_{vi}} U(t)\right) \quad (2.24)$$

ดังนั้นค่าการทรุดตัวรวมกับเวลาจึงหาได้จาก ; $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$ (2.25)

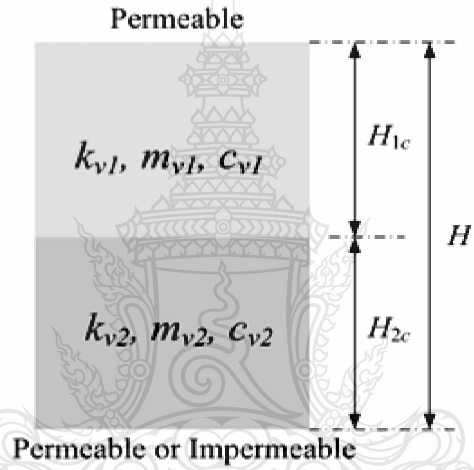
สำหรับค่า U (t) คำนวณได้โดยใช้วิธีของ Chai และ Pongsivasathit [30]ในการหาอัตราการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นสามารถพิจารณาชั้นดินออกเป็น 2 ชั้นใหญ่ๆ ได้แก่ ชั้นดินที่ถูกแทนที่ด้วยเสาเข็ม (ชั้นดินที่ถูกปรับปรุง) และชั้นดินที่อยู่ใต้เสาเข็ม (ชั้นดินที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง) และหน่วยแรงรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักกระทำต่อชั้นดินแปรเปลี่ยนไปตามความลึกและเวลา ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิธีการหาอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบยาว (Fully Penetration Column) มาใช้กับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นได้

ต่อมา Zhu และ Yin [31] ได้เสนอสมการในการประมาณค่าอัตราการทรุดตัวของชั้นดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้นภายใต้น้ำหนักที่แปรผันกับความลึกของชั้นดินเหนียวและเวลาการก่อสร้างดินถม (Embankment) โดยน้ำหนักที่มากระทำจะคงที่เมื่อเสร็จสิ้นการก่อสร้าง หรือเรียกลักษณะน้ำหนักกระทำแบบนี้ว่า Depth-Dependent Ramp Load โดยจะยังคงใช้สมมุติฐานเดียวกันกับทฤษฎีการยุบอัด

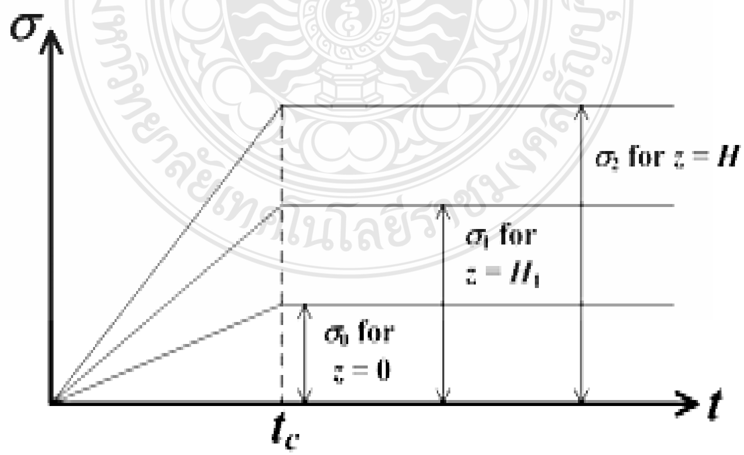
ตัวคายน้ำของ Terzaghi เว้นแต่ลักษณะของแรงที่มากระทำต่อชั้นดินเหนียว

จากรูปที่ 2.9 แสดงชั้นดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้น เมื่อ j คือตัวเลขที่แสดงลำดับของชั้นดิน, c_{vj} คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นดินชั้นที่ j, m_{vj} คือสัมประสิทธิ์ความสามารถในการยุบตัวของชั้นดินชั้นที่ j, k_{vj} สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินของชั้นดินชั้นที่ j และ H คือความหนารวมของชั้นดินเหนียวทั้งสองชั้น สำหรับลักษณะของหน่วยแรงในแนวดิ่งที่มากระทำต่อชั้นทั้งสองชั้นมีลักษณะดังในรูปที่ 2.10

วิธีการหาค่า $U_{(t)}$ ของระบบดิน 2 ชั้น โดยวิธีของ Zhu และ Yin



รูปที่ 2.9 ชั้นดินเหนียวที่นำมาพิจารณาเพื่อหาอัตราการทรุดตัว[31]



รูปที่ 2.10 หน่วยแรงที่มากระทำต่อชั้นดินขึ้นกับความลึกของชั้นดินและระยะเวลา[31]

$$\xi = \frac{\sqrt{(k_{v2}m_{v2})} - \sqrt{(k_{v1}m_{v1})}}{\sqrt{(k_{v2}m_{v2})} + \sqrt{(k_{v1}m_{v1})}} \tag{2.26}$$

$$\eta = \frac{H_{1c}\sqrt{c_{v2}} - H_{2c}\sqrt{c_{v1}}}{H_{1c}\sqrt{c_{v2}} + H_{2c}\sqrt{c_{v1}}} \tag{2.27}$$

$$T_V = \frac{C_{v1}C_{v2}t}{\left(H_{1c}\sqrt{C_{v2}} + H_{2c}\sqrt{C_{v1}}\right)^2} \tag{2.28}$$

$$T_c = \frac{C_{v1}C_{v2}t_c}{\left(H_{1c}\sqrt{C_{v2}} + H_{2c}\sqrt{C_{v1}}\right)^2} \tag{2.29}$$

$$X = \frac{1}{2}(1+n) \tag{2.30}$$

$$\psi = \frac{1}{2}(1-n) \tag{2.31}$$

เมื่อ t คือระยะเวลารวมและ t_c คือระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินถม

ดังนั้น ในกรณีที่น้ำสามารถไหลได้สองทาง(For Two-way Drainage Boundary Condition) ระดับการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้นหาได้จาก

$$U(T_v) = \min\left(1, \frac{T_v}{T_c}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\left[\left\{m_{v1}H_{1c} / X \sin(\lambda_n X)\right\} + \left\{m_{v2}H_{2c} / \psi \sin(\lambda_n \psi)\right\}\right] T_n(T_v)}{\lambda_n\left[m_{v1}H_{1c}(\sigma_o + \sigma_1) + m_{v2}H_{2c}(\sigma_1 + \sigma_2)\right]} \tag{2.32}$$

เมื่อ min หมายถึงใช้ค่าที่น้อยที่สุดระหว่างค่า 1 และ T_v / T_c.

$$T_n(T_v) = \begin{cases} \dfrac{b_n}{\lambda_n^3 T_c}\left[1 - \exp\left(-\lambda_n^2 T_v\right)\right] & , \quad T_v \le T_c \\ \dfrac{b_n}{\lambda_n^3 T_c}\left[1 - \exp\left(-\lambda_n^2 T_c\right)\right]\left[\exp\left(-\lambda_n^2\left(T_v - T_c\right)\right)\right] & , \quad T_v > T_c \end{cases} \tag{2.33}$$

และค่า b_n สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$b_n = \frac{\left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{X\sin(\lambda_n X)}\right]\sigma_0 + \left[\frac{m_{v2}H_{2c}}{\psi\sin(\lambda_n \psi)}\right]\sigma_2 + \left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{X^2\lambda_n}\right](\sigma_1 - \sigma_0)}{\left[m_{v1}H_{1c}/2\sin^2(\lambda_n X)\right] + \left[m_{v2}H_{2c}/2\sin^2(\lambda_n \psi)\right]} \tag{2.34}$$

$$+\frac{\left[\frac{m_{v2}H_{2c}}{\psi^2\lambda_n}\right](\sigma_1 - \sigma_2)}{\left[m_{v1}H_{1c}/2\sin^2(\lambda_n X)\right] + \left[m_{v2}H_{2c}/2\sin^2(\lambda_n \psi)\right]}$$

เมื่อค่า λ_n คือรากลำดับที่ n ของสมการต่อไปนี้

$$\sin\theta + \xi\sin(n\theta) = 0 \tag{2.35}$$

สำหรับกรณีที่น้ำสามารถไหลได้ด้านเดียว (For One-Way Drainage Boundary Condition) ค่าระดับการยุบตัวคายน้ำของชั้นดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$U(T_v) = \min\left(1, \frac{T_v}{T_c}\right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2m_{v1}H_{1c}T_n(T_v)}{\lambda_n\alpha\sin(\lambda_n\alpha)\left[m_{v1}H_{1c}(\sigma_o + \sigma_1) + m_{v2}H_{2c}(\sigma_1 + \sigma_2)\right]} \tag{2.36}$$

และค่า b_n สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$b_n = \frac{\left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{X\sin(\lambda_n X)}\right]\sigma_0 + \left[\frac{m_{v1}H_{1c}}{X^2\lambda_n}\right](\sigma_1 - \sigma_0)}{\left[m_{v1}H_{1c}/2\sin^2(\lambda_n X)\right] + \left[m_{v2}H_{2c}/2\cos^2(\lambda_n \psi)\right]} \tag{2.37}$$

$$+\frac{\left[\frac{m_{v2}H_{2c}\left[\cos(\lambda_n\psi) - 1\right]}{\psi^2\lambda_n\cos(\lambda_n\psi)}\right](\sigma_1 - \sigma_2)}{\left[m_{v1}H_{1c}/2\sin^2(\lambda_n X)\right] + \left[m_{v2}H_{2c}/2\cos^2(\lambda_n \psi)\right]}$$

เมื่อค่า λ_n คือรากลำดับที่ n ของสมการต่อไปนี้

$$\cos\theta - \xi\cos(n\theta) = 0 \tag{2.38}$$

ลำดับต่อมา Chai และ Pongsivasathit [30] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาอัตราการยุบตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นโดยอาศัยสมการของ Zhu และ Yin [31] เพราะเนื่องจากว่าชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มแบบสั้นสามารถแบ่งออกเป็นสองชั้นใหญ่ๆ ด้วยกันคือชั้นที่ถูกเสาเข็มแทนที่และชั้นที่ไม่ถูกเสาเข็มแทนที่ ดังในรูปที่ 2.9 ซึ่งวิธีการประมาณค่า k_{v1} และ m_{v1} ของชั้นดินที่อยู่ด้านบนสามารถกระทำได้โดยใช้สูตรดังนี้

$$m_{v1} = \frac{1}{\alpha D_c + (1-\alpha) D_s} \tag{2.39}$$

$$k_{v1} = \left(1 + \frac{2.5H_{1c}^2}{\mu d_e}\frac{k_h}{k_v}\right) \tag{2.40}$$

เมื่อ D_c และ D_s คือค่าโมดูลัสแบบถูกจำกัด (Constrained Modulus) ของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินเหนียวที่อยู่รอบๆ ดินซีเมนต์ตามลำดับ ซึ่งค่า μ สามารถหาได้จากสมการที่เสนอโดย Hansbo [32] ดังนี้

$$\mu = \ln\frac{a}{b} + \frac{k_n}{k_s}\ln(b) - \frac{3}{4} + \frac{8H_{1c}^2 k_h}{3d_c^2 k_c} \tag{2.41}$$

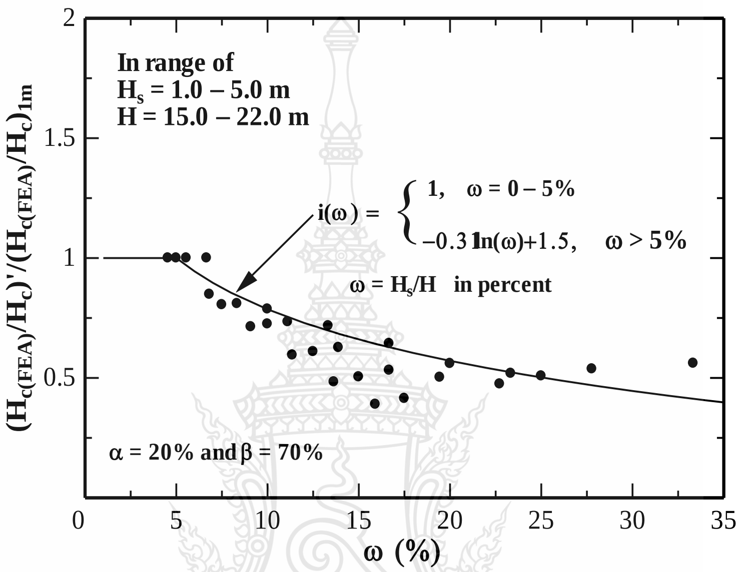
เมื่อ $a = d_e/d_c$, $b = d_s/d_c$ (d_c, d_s และ d_e คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม, Smear Zone และเซลล์หนึ่งหน่วย (Unit Cell) ที่แทนเสาเข็มดินซีเมนต์จำนวนหนึ่งต้นกับพื้นที่หน้าตัดที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็ม นั้น, k_c และ k_s คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในเสาเข็มและในดินบริเวณ Smear Zone ตามลำดับโดยที่ $k_c = k_v$ และค่า k_{v1} จะมากกว่า kv เนื่องจากสมมติฐานว่าน้ำบริเวณรอบ ๆ เสาจะไหลเข้าสู่ภายในตัวเสาเข็มดินซีเมนต์

โดยที่ค่า H_{C1} คือค่า $H_L - H_C/2$ และค่า H_{C2} คือ $H_{20} - S_f/2$ ซึ่งค่า S_f คือค่าการทรุดตัวสุดท้ายและค่า H_{20} คือค่าความหนาเริ่มต้นของดินชั้นล่าง (ดินที่ไม่ได้ถูกปรับปรุง) ส่วนค่า k_{V2} และ m_{V2} ได้มาจากคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ไม่ถูกปรับปรุง

ลำดับต่อมา Pongsivasathit et al. 2014 [4] ได้ปรับปรุงสมการหาค่า H_c ของ Pongsivasathit และคณะ [3] จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อิเลเมนต์ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นที่ใช้ปรับปรุงใช้ดินเหนียวอ่อน พบว่า ความหนาของแผ่นพื้นมีผลโดยตรงต่อระยะจมสัมพัทธ์ของเสาเข็มกับดินบริเวณรอบๆ ดังนั้นระยะ H_c ที่ถูกคำนวณจากสมการของ Pongsivasathit และคณะ [3] จึงควรถูกปรับปรุงโดยให้สามารถพิจารณาผลกระทบอันเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(H_{c(FEA)}/H_c)' / (H_{c(FEA)}/H_c)_{1m}$ กับค่า ω

จากผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $(H_{c(FEA)}/H_c)'/(H_{c(FEA)}/H_c)_{1m}$ กับค่า ω โครงงานวิจัยนี้ จึงขอเสนอสมการเพื่อหาค่า i (ω) ได้ดังนี้

$$i(\omega) = \begin{cases} 1 & (0 < \omega \leq 5\%) \\ -0.31\ln(\omega)+1.5 & (\omega > 5\%) \end{cases} \qquad (2.42)$$



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(H_{c(FEA)}/H_c)'/(H_{c(FEA)}/H_c)_{1m}$ กับค่า ω

สมการใหม่โดย Pongsivasathit และคณะ[4] ที่ใช้คำนวณหาค่า H_c โดยสามารถพิจารณาผลกระทบจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ได้ดังต่อไปนี้

$$H_c = H_L \cdot f(\alpha)\cdot g(\beta)\cdot h(\gamma).i(\omega) \qquad (2.43)$$

ดังนั้นเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นมีพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำที่ซับซ้อนเพราะเนื่องจากว่า มีลักษณะการจมสัมพัทธ์ ของเสาเข็มกับดินที่อยู่บริเวณรอบๆเสาเข็ม การจมสัมพัทธ์ขึ้นอยู่กับ อิทธิพลของ อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ ,อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก, น้ำหนักที่กระทำ, ความแข็งแกร่งของดิน Chai และคณะ [2] และจากการศึกษาของ Pongsivasathit และคณะ [3] พบว่า Slab เป็นวัสดุ Flexible ไม่มีการแตกหัก แต่ในหน้างานจริง พบรอยแตกของ Slab อีกทั้งความหนาของ Slab มีความหนามากๆ มีพฤติกรรมเป็น Rigid ผลการคำนวณด้วยสูตรที่มีอยู่ในปัจจุบัน ได้ผลการคำนวณแตกต่างกันหรือห่างไกลกับหน้างานมาก

การวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองสภาพการอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (บริเวณสถานที่ก่อสร้างไบเทคบางนา) โดยใช้แบบจำลองแกนสมมาตรยูนิตเซลล์ศึกษาพฤติกรรมความแข็งแรงของ Slab ว่ามีผลกระทบอย่างไรกับการคำนวณ การทรุดตัวของดินที่ถูกปรับปรุงด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น ด้วยวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ที่ปรับปรุงแล้ว

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกษม เพชรเกตุ และ พินิต ตั้งบุญเติม [33] ได้ศึกษาเรื่อง การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ พบว่า

1) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพสามารถปรับปรุงคุณภาพของดินชั้นลึก ๆ ได้ด้วยการอัดฉีดแรงดันสูง
2) การอัดฉีดแรงดันสูง สามารถทำเป็นเสาเข็มขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 0.60-1.00 เมตร หรือฉีดให้ติดกันเป็นพืด เป็น Gravity Wall ได้
3) ดินที่ปรับปรุงคุณภาพจะเบากว่าเดิมประมาณ 1.3 เท่า
4) ค่า Undrain Shear Strength ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วสูงกว่าเดิมประมาณ 20 เท่า ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำนวน 200 กก.ต่อลบ.ม. ของดินเปียก
5) จากการทำ Deep excavation ถึงระดับที่ต้องการแล้วพบว่า การเคลื่อนตัวในแนวราบบริเวณปากบ่อเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และไม่พบการลอยตัวของดินก้นบ่อ

คมกฤต ดีจังวิภาต [34] ได้ศึกษาเรื่อง พฤติกรรมของคันดินทดลองบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อน การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมคันดินทดลองแบบ Full Scale Load Test ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 12- 21 ตารางเมตร มีความสูงของคันดินถม 6 เมตร อัตราส่วนความลาดชันของคันดิน 1:1.25 (ดิ่ง:ราบ) ทำการปรังปรุงคุณภาพดินฐานรากด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์จำนวน 80 ต้น ส่วนของคันดินถมเสริมกำลังด้วย Hexagonal Wire mesh และใช้แผ่น Precast Concrete Facing Panel เป็นกำแพงกันดินด้านหน้า โดยมีการติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิคเพื่อติดตามพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างและภายหลังก่อสร้างเสร็จสิ้นเป็นระยะเวลา 230 วันนับจากเริ่มก่อสร้างแปลงคันดินทดลองเส้นแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการสังเกตค่าความเครียดในตะแกรงลวดหกเหลี่ยมเสริมแรงปรากฏว่าอยู่ระหว่าง Coulomb/ranking failure plane และ Coherete gravity failure plane การเคลื่อนตัวสูงสุดที่วัดได้จากลวดกำลังสูง (High Strength Wire Extensometer) แสดงผลสอดคล้องกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดที่ได้ดินฐานรากเกิดในช่วงความลึกประมาณ 3.5-4.5 เมตรจากผิว

ดิน ซึ่งเป็นบริเวณที่ดินอ่อนที่สุด ขณะที่ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากผลเครื่องมือวัดจะให้ค่าการทรุดตัวมากสุดที่บริเวณที่ดินใกล้กับด้านหน้ากำแพงมากที่สุดและมีค่าลดหลั่นลงมาตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า Excess Poessure ใต้คันดินเกิดขึ้นในช่วงแรกและค่อยๆ สลายระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน ผลจากการวิเคราะห์ทำนายค่าการทรุดตัวที่เกิดวิธีกราฟฟิกของ Asaoka จะให้ผลค่าทำนายการทรุดตัวที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับผลที่วัดได้จากในสนามมากที่สุด

จอม [35] สรุปว่า โครงการก่อสร้างทางหลวงบางนา – ชลบุรี ตอน 3 กม.28+000 – กม. 34+500 ดำเนินการโดยบริษัท อุบลสธรรม จำกัด ได้ทำการ Coring ตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์จากต้นทดลอง ซึ่งก่อสร้างโดยใช้วิธีผสมเปียก ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 150 กก./ลบ.ม แล้วทำการหาค่า Undrained Shear Strength (S_u) โดยวิธีการ Unconfined Compressive Strength ได้ผลที่อายุ 28 วัน พบว่า S_u มีค่ามากกว่า 300 กิโลปาสคาล ทุกความลึกเป็นเมตร ส่วนตอน 6 กม.50+200 – กม.56+855 บริษัท เพชรสยาม จำกัด ได้ทำการ Coring ตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์ 175 กก./ลบ.ม แล้วทำการหาค่า Undrained Shear Strength (S_u) โดยวิธีUnconfined Compressive Strength ได้ผลที่อายุ 28 วัน พบว่า S_u มีค่ามากกว่า 300 กิโลปาสคาล ทุกความลึกเป็นเมตร จะเห็นได้ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์วิธีผสมเปียกจะให้ค่า S_u สูงกว่าวิธีผสมแห้ง แม้ว่าจะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า หมายถึงสารผสมในวิธีผสมเปียกสามารถผสมกับดินเดิมทั่วถึงตลอดหน้าตัดได้ดีกว่าวิธีการผสมแห้ง

ชิดชัย และ วัฒนา [36]สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการผสมปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวแข็งและทรายปนดินเหนียว สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวแข็งและทรายปนดินเหนียว ค่ากำลังแรงเฉือนของตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการให้ค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดจากในสนามประมาณ 3 – 4 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนหลังการปรับปรุงคุณภาพสำหรับทรายผสมดินเหนียว (SC,SM,SP – SM) ให้ค่าสูงกว่าดินเหนียว (CH,CL) ที่ปริมาณปูนและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เดียวกัน

บันเทิง ทองฉีด [37] ได้ทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยจัดแบ่งดินออกเป็น 2 กลุ่มตามระดับความลึก ทั้งการผสมแบบแห้งและแบบเปียก พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะเพิ่มขึ้นตามค่าปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่ม ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 และ 12.5 เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ อัตราการพัฒนากำลังของดินผสมซีเมนต์จากการผสมแบบแห้งมีสูงกว่าการผสมแบบเปียกประมาณร้อยละ 70 โดยเฉลี่ยที่ทุกปริมาณซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นตัวอย่างดินซีเมนต์จากการผสมแบบเปียกมีแนวโน้มที่จะพัฒนากำลังได้เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับความลึกของดินในแต่ละชั้น อาจเนื่องมาจากดินเหนียวชั้นล่างมีปริมาณน้ำในดินน้อยกว่า

ทำให้ผสมเข้ากันได้ยาก ผลการทดสอบการยุบอัดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัว (C_v) มีค่าเพิ่มขึ้น 12-19 เท่า และค่าดัชนีการอัดตัว (C_c) มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 30 โดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับดินเดิม ในการผสมทั้ง 2 วิธี พบว่าในการผสมแบบแห้งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัว (C_v) มากกว่าแบบเปียกประมาณร้อยละ 20 และค่าดัชนีการอัดตัว (C_c) จากการผสมแบบแห้งมีค่าลดลงได้มากกว่าการผสมแบบเปียกประมาณร้อยละ 15 ดังนั้น จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำและค่ายุบอัดตัวสูงได้ โดยวิธีการผสมแบบแห้งดินเหนียวที่มีสภาพอ่อนมาก ส่วนวิธีการผสมแบบเปียกเหมาะสำหรับดินเหนียวอ่อนปานกลางถึงดินเหนียวแข็ง

ธีระชาติ [38] สรุปผลการทดสอบ Undrain Shear Strength โดยวิธีการ Unconfined Compression Test ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้รับการก่อสร้างของถนนสายบางนา – บางประกง ตอน 1-4 โดยก่อสร้างแบบ Wet Mixing Process ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 150 กก./ ลบ.ม จะเห็นได้ว่าค่า Undrain shear Strength ของเสาเข้มดินซีเมนต์จะแปรเปลี่ยนในช่วง 30 – 60 ตัน/ตร.ม โดยส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 30 – 40 ตัน /ตร.ม

พานิช วุฒพฤกษ์ และคณะ [39] ได้ศึกษาเรื่อง การจำลองคันทางบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อนโดยวิธีทางไฟไนต์อิเลเมนต์ งานวิจัยนี้เป็นการจำลองคันทางบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อน ด้วยวิธีการทางไฟไนต์อิเลเมนต์ แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลในสนาม คันดินทดลองดังกล่าวทำการก่อสร้างบริเวณโรงไฟฟ้า วังน้อย อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลง เพื่อทำให้ผลที่ได้มีความ สอดคล้องในสนาม คือค่าโมดูลัสของยัง ค่าความซึมผ่านของน้ำ และค่าแรงปฏิกิริยาของดินถมกับลวดตาข่าย หกเหลี่ยม ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบใน สนามมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าอาจจะมี ความแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้เพราะจากสมมุติฐานเบื้องต้น ความไม่สม่ำเสมอของกำลังและหน้าตัดของเสาเข็ม ดินซีเมนต์ จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวปรับเปลี่ยน(A) และสัมประสิทธิ์การบวมตัวปรับ เปลี่ยน (K*) ของแบบจำลองในชั้นดินอ่อนนั้น พบว่ามีผลต่อค่าการทรุดตัวน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงชั้นดินอ่อน ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผล การวิเคราะห์พฤติกรรมของคันดินทดลองบนฐานราก เสาเข็มดินซีเมนต์ คือแบบจำลองที่เลือกใช้ค่าตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลงในชั้นดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ ขั้นตอนในการถม คุณสมบัติของดินถม และค่า แรงปฏิกิริยาระหว่างดินถมกับวัสดุ เสริมกำลังพฤติกรรม ที่เกิดขึ้นในลวดตาข่ายหกเหลี่ยมและดินถมจะเป็นประเภทเกิดแรงเฉือนเป็นส่วนใหญ่

วรากร ไม้เรียง และ สมพงศ์ โรจน์กังสดาล [40] ได้กล่าวถึงเสาเข็มดินซีเมนต์ ไว้ดังนี้ เสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยใช้เครื่องจักรและเครื่องมือเจาะพิเศษที่มีแกนเจาะและใบกวน เป็นการผสมในแนวตั้ง(Deep Stabilization) ลักษณะคล้ายคลึงกับเสาเข็ม ซึ่งอาจต้องผสมเต็มทั้งพื้นที่หรือผสมเป็นจุดๆ เหมือนกับการเจาะเสาเข็มคอนกรีตปูพรม ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับดินอยู่ในช่วง 125-220 กก./ลบ.ม. ดินมีค่า Unconfined Compressive Strength ของเสาเข็มซีเมนต์จะอยู่ในช่วง 5-10 กก./ตร.ซม. ซึ่งจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เป็นเสาเข็มซึ่งให้ค่า Unconfined Compressive Strength ในช่วง 240-350 กก./ตร.ซม. ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่ต้องใช้ทรายและหินผสม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้กำลังรับแรงสูง เช่น คอนกรีต จึงลดปัญหาการขนส่งวัสดุ ราคาค่าก่อสร้าง และหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดจากเสาเข็มคอนกรีตแทงทะลุดินถมขึ้นมาปูดที่ผิวดินในภายหลัง เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่แข็งตัวเท่าเสาเข็มคอนกรีต

สมพงศ์ โรจน์กังสดาล [41] ได้ศึกษาเรื่อง คุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์:กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ มีส่วนของคันคลองที่เป็นงานปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์จำนวน 246,300 ต้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงบริเวณลาดคันคลองและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของชั้นฐานรากถนน ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลผลการทดสอบจำนวนจึงต้องมีการเก็บข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ระบบสารสนเทศทางภูติของคุณสมบัติดิน และเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างจากผลการทดสอบของเสาเข็มดินซีเมนต์ พบว่า ผลการจำแนกชั้นดินโดยอาศัยคุณสมบัติของดินและคุณลักษณะทางกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเรียงลำดับจากผิวดินได้ดังนี้คือชั้นดินเหนียวอ่อนอยู่ในช่วงระดับ 0.00-15.00 เมตร(ร.ท.ก) ถัดไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ช่วงระดับ15.00-20.00 เมตร(ร.ท.ก) และชั้นทรายปนดินเหนียวอยู่เหนือชั้นทรายชั้นแรก ในช่วงระดับ 20.00 เมตร (ร.ท.ก) เมื่อวิเคราะห์ถึงความแข็งแรงของชั้นดินจากกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกของชั้นดินนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ Soil Strength Line Pattern “c” (SSL“C”) เป็นกราฟที่ไม่มีชั้น Weathered Crustและ Soil Strength Line Patten “CC” (SSL “CC”)เป็นกราฟที่มีชั้น Weathered Crust ซึ่งดินเหนียวอ่อนในบริเวณความ ชื้นตามธรรมชาติ (Wn) ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยพิกัดเหลว (LL) เท่ากับ 83% และ93% ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉลี่ยที่ได้จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ พบว่าวิธี High Pressure Mechanical Mixing และ Low pressure Mechanical Mixing มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันทางด้านกำลังที่ดีและมีแรงยึดหยุ่น ส่วน วิธี Modified Dry Mixing และ Jet Grouting มีคุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงซึ่งเนื้อวัสดุมีความแข็งแต่เปราะ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ

พบว่า มีสภาพเป็น Normally Consolidated Clay ที่มีค่า Over consolidated Ratio ใกล้เคียง 1 และมีค่า S ประมาณ 0.25

สุวิทย์ พันธ์มานะเจริญผล [42] ได้ศึกษาเรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งทำการติดตั้งโดยวิธีการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูง ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ 225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินเปียก จำนวน 6 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร ที่มีความยาว 5.0 เมตร เสาเข็มดินซีเมนต์ทุกต้นฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนตลอดช่วงความยาว ในการทดสอบ การให้น้ำหนักจะกระทำเป็นลำดับขั้น โดยในแต่ละลำดับจะค้างน้ำหนักดังกล่าวไว้ ประมาณ 30 นาที เพื่อบันทึกค่าการเคลื่อนตัว ก่อนให้น้ำหนักในลำดับต่อไป ผลการศึกษาพบว่า ค่า Undrauned shear Strength ของเสาเข็มดินซีเมนต์ มีค่าอยู่ในช่วง 15.0-35.90 ตัน/ตร.ม และค่า Modulus of Elasticity ของเสาเข็มดินซีเมนต์ มีค่าอยู่ในช่วง 6,000-12,000 ตัน/ตร.ม E50= (372 to 463)S_u น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบในสนาม เป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากลักษณะการพิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งกรณีที่ตัวเสาเข็มพิบัติและกรณีที่ดินพิบัติ โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์ในกรณีที่ตัวเสาเข็มพิบัติจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ค่า Undrauned shear Strength ของเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้น และมีค่าใกล้เคียงกับค่า Compressive Strength ของเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ละต้น น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มซีเมนต์ในกรณีที่ดินพิบัติมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตามวิธี α-Method วิธีการทำนายน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในกรณีที่ดินพิบัติ วิธีของ DE Beer จะให้ค่าเหมาะสมที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำ ของเสาเข็มดินซีเมนต์สั้นโดยใช้แบบจำลองยูนิตเซลล์ ได้กำหนดแนวทางในการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวที่นำมาทดสอบ

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ วัสดุและเครื่องมือทดสอบ แบบจำลองยูนิตเซลล์

3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์

3.4 การทดสอบการอัดยุบตัวคายน้ำ ในห้องปฏิบัติการ ด้วยกรณีศึกษาทั้งหมด 4 กรณี

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ การเทียบเคียงผลการทดสอบกับการคำนวณจากสูตรที่มีอยู่และสรุปผล

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ซึ่งดินเหนียวที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ต้องถูกนำมาทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม ดังต่อไปนี้

3.1.1 การทดสอบหาค่าความชื้น (Water Content) พิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัด พลาสติก (Plastic Limit) ของดินตามมาตรฐาน ASTM D426-66,D424-59

3.1.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-58

3.1.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของดิน ตามมาตรฐาน ASTM D 2435

3.1.4 การจำแนกประเภทดินตาม USC ตามมาตรฐาน ASTM D 2487

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ วัสดุและเครื่องมือทดสอบ แบบจำลองยูนิตเซลล์

3.2.1 การเตรียมวัสดุตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ ตัวอย่างดินเหนียวที่ได้มาจากสถานที่ก่อสร้างไบเทคบางนา กรุงเทพฯ ที่ระดับความลึก 4.00 – 5.00 เมตรจากระดับผิวดิน ตัวอย่างดินเหนียวถูกเก็บแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) เก็บไว้ในภาชนะพลาสติก

บ่มด้วยน้ำในภาชนะพลาสติก ให้ดินเหนียวมีระดับการอิ่มตัว 100 % และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตราช้างในการทดสอบ

รูปที่ 3.1 เก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบถูกรบกวน

รูปที่ 3.2 เก็บตัวอย่างดินใส่ภาชนะพลาสติก

3.2.1 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ ของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก โดยใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit Cell Model) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ท่อสังเคราะห์แบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit Cell Model) เซลล์แบบจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.45 เมตร และความสูง 1.00 เมตร ดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 แบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit Cell Model)

2) อุปกรณ์เจาะดินสำหรับใส่ตัวอย่างดินซีเมนต์

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เจาะดินทำเสาเข็มดินซีเมนต์

3) เกจวัดค่าการทรุดตัวในแนวดิ่ง (Dial Gauge)

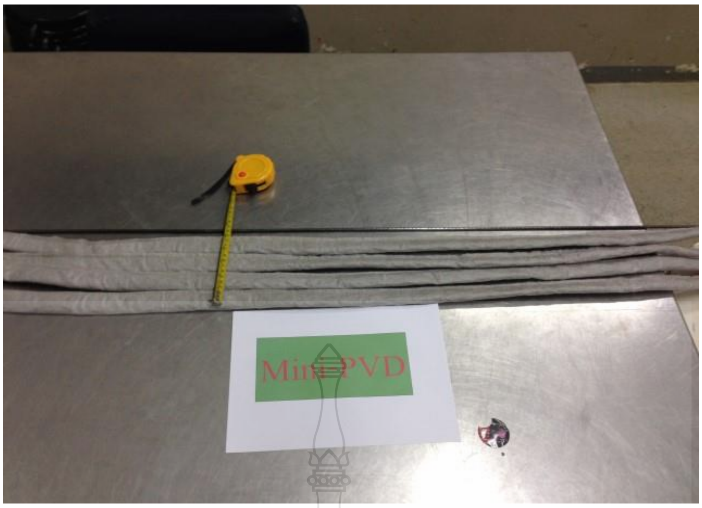
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดค่าการทรุดตัวในแนวดิ่ง (Dial Gauge)

4) ปั๊มความดันลม อุปกรณ์ปรับค่าความดันลมและ เกจวัดค่าความดันลม

รูปที่ 3.6 ปั๊มความดันลม อุปกรณ์ปรับค่าความดันลม

5) เครื่องผสมดิน (Soil Mixer) โดยใช้สว่าน พร้อมใบพัดกวนดิน

6) แผ่น Mini PVD ทำจากแผ่นใยสังเคราะห์ Geotextile ม้วนทับกัน 3 รอบมีความกว้างประมาณ 3-5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 95 เซนติเมตร



รูปที่ 3.7 แผ่น Mini PVD

3.3 การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์

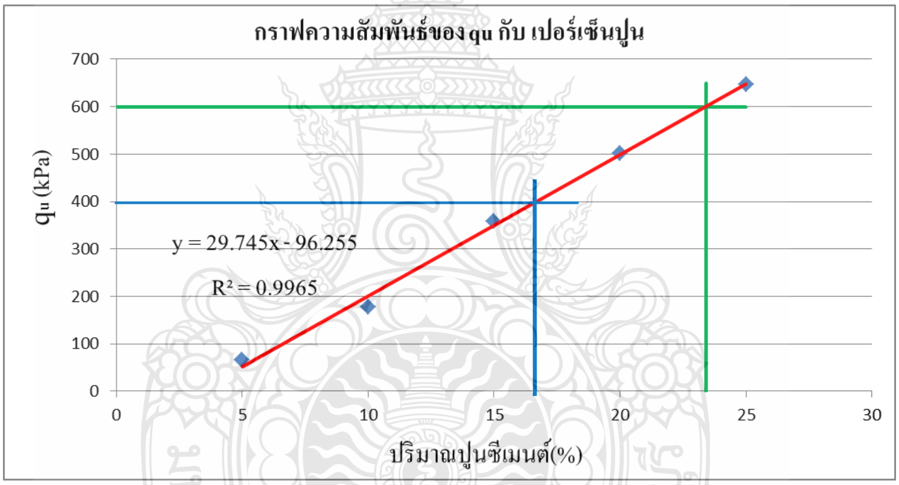
โครงงานวิจัยนี้ได้ออกแบบกรณีศึกษาโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีค่าแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test, q_u) เท่ากับ 400 kPa และ 600 kPa ตัวอย่างดินถูกนำมาผสมน้ำ เพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นสูงกว่าขีดจำกัดเหลว เพื่อให้ได้ค่า q_u ตามที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างดินถูกนำมาผสมกับปริมาณซีเมนต์ที่คิดเป็นเปอร์เซนต์ต่อน้ำหนักดินแห้ง โดยผสมน้ำเพิ่มในอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 จากนั้นทำการลองผิดลองถูกโดยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมตามที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.8 พบว่าถ้าต้องการค่า q_u เท่ากับ 400 kPa และ 600 kPa ตามลำดับ ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ เท่ากับร้อยละ 16.47 และ 23.40 โดยน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.9

สำหรับค่าโมคูลัสของยังค์ (E) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ สมมุติให้เท่ากับ 100 เท่าของ q_u ดังนั้นค่า E ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณ เท่ากับ 40,000 kPa และ 60,000 kPa ตามลำดับ

รูปที่ 3.8 Unconfined Compression Test

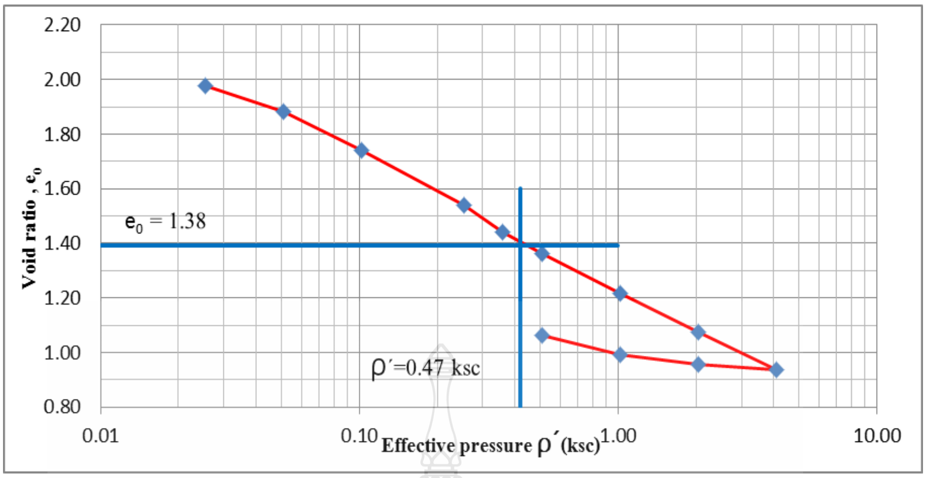
ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) q_u

เปอร์เซ็นปูนซีเมนต์	unconfined compressive strength , q_u (kPa)			Average
	1	2	3	
5	64.138	57.454	73.813	65.135
10	209.668	156.069	167.909	177.882
15	383.856	349.68	342.105	358.547
20	565.367	478.128	458.503	500.666



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของ *unconfined compressive strength* กับปริมาณปูน

จากการทดลองนำดินเหนียวที่มีปริมาณความชื้น 80 % มาทดสอบหาคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่องออดิโอมิเตอร์ (Oedometer) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.10 เนื่องจากตัวอย่างดินเหนียวในแบบจำลองแกนสมมาตราหนึ่งหน่วยถูกทำให้ยุบอัดตัวคายน้ำด้วยแรงดันประสิทธิผลเฉลี่ยเท่ากับ 40 kPa หรือ 0.47 ksc ดังนั้นชั้นดินเหนียวหลังจากที่สิ้นสุดการทรุดตัวในขั้นตอนนี้ จะมีค่าหน่วยน้ำหนักดินตัวอย่าง γ เท่ากับ 1.8 ตัน/ลบ.ม ซึ่งเป็นค่า ที่ใช้ในการคำนวณ และจากรูปที่ 3.10 ค่าความชันในช่วงให้น้ำหนักกระทำ (Loading) หรือค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index) มีค่าเท่ากับ 0.547 และสำหรับค่าอัตราส่วนช่องว่าง(void ratio, e)ที่ความดันประสิทธิผลเท่ากับ 0.47 ksc พบว่ามีค่าประมาณ 1.38



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างในดินกับแรงดันประสิทธิผล

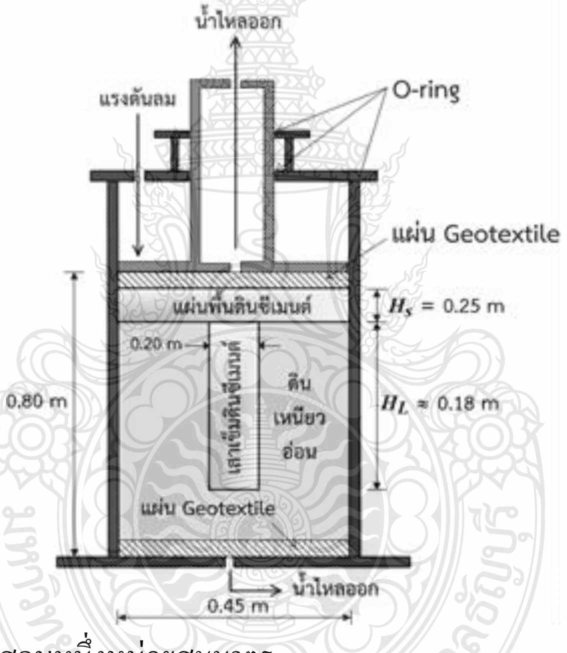
3.4 ขั้นตอนการทดสอบการอัดยุบตัวคายน้ำ ในห้องปฏิบัติการ ทั้ง 4 กรณีศึกษา

แบบจำลองการทดสอบหนึ่งหน่วยสมมาตรตามแนวแกนถูกทำจากท่อวัสดุ PVC ทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.45 เมตร สูง 1.00 เมตร การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแสดงในรูปที่ 3.11 ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบคือดินเหนียว ซึ่งถูกเก็บแบบถูกรบกวนจากบริเวณสถานที่ก่อสร้างไบเทคบางนา โดยก่อนเก็บตัวอย่างดินทำการขุดเปิดหน้าดินที่ระดับความลึก 4.00 – 5.00 m สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ได้ถูกกำหนดไว้ให้มีค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (q_u) เท่ากับ 400 kPa และ600 kPa ส่วนค่าโมดูลัสของยังค์ (Young's Modulus, E) เท่ากับ 40,000 kPa และ60,000 kPa สำหรับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 สำหรับค่า k_v ได้มาจากผลการทดสอบ Consolidation test ที่มีหน่วยแรงประสิทธิผลกดทับอยู่เท่ากับ 40 kPa และสมมติให้ค่า k_h มีค่าเท่ากับ k_v สำหรับค่าอัตราส่วนปัวค์ซองของดินเหนียวถูกสมมติเท่ากับ 0.2 และสำหรับแผ่น Geotextile ที่มีความหนาประมาณ 2.5 mm. ถูกใช้เป็นวัสดุในการระบายน้ำออกจากตัวอย่างที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ อ้างอิงจาก Chai and Pongsivasathit, 2010 [25] ดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการให้แรงดันกระทำกับชั้นดินเหนียวอ่อน ให้ดินยุบอัดตัวคายน้ำสมบูรณ์ เพื่อเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการทดสอบ เริ่มจากวางแผ่น Geotextile จำนวน 3 แผ่นที่ด้านล่างของแบบจำลองทดสอบ เพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายที่ไหลออกบริเวณด้านล่างดังแสดงใน

รูปที่ 3.11 ทาจาระบีที่บริเวณด้านในของแบบจำลองทดสอบให้ทั่ว เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวและแบบจำลองทดสอบที่อาจจะเกิดขึ้น ทำการบรรจุดินเหนียว (Reconstituted Soil) ที่ผสมน้ำให้มีปริมาณความชื้นสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลว(ประมาณ 68 %) เมื่อดินเหนียวมีความหนา 0.80 m วางแผ่น Geotextile ทับด้านบนเพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายน้ำออกจากตัวอย่างทดสอบที่ด้านบนจึงทำให้ชั้นดินเหนียวมีสภาพระบายน้ำแบบสองทาง(Two-ways drainage) จากนั้นบรรจุ Mini-PVD ที่ตรงกลางของแบบจำลองทดสอบ โดยการใช้แท่งเหล็กดันเข้าไปในชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับ Mini-PVD ทำจากแผ่น Geotextile ม้วนซ้อนกันจำนวน 3 รอบ โดยให้มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 30 mm x 9 mm จะทำหน้าที่ช่วยเร่งอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำให้สมบูรณ์เร็วขึ้น ประกอบลูกสูบและอุปกรณ์ฝาปิดด้านบนสุด จากนั้นทำการให้แรงดันลม 40 kPa กระทำในแบบจำลองทดสอบเพื่อให้ดินเหนียวยุบอัดตัวคายน้ำ ในระหว่างทดสอบทำการบันทึกค่าการทรุดตัวของชั้นดินกับเวลาการทรุดตัว



รูปที่ 3.11 แบบจำลองทดสอบหนึ่งหน่วยสมมาตร

3.4.2 ขั้นตอนการบรรจุเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้นดินซีเมนต์

เมื่อตัวอย่างดินเหนียวมีค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำประมาณ 95% (สังเกตจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว) ยุติการให้แรงดัน ถอดอุปกรณ์ฝาปิดด้านบนสุดและลูกสูบ พร้อมทั้งแผ่น Geotextile และ Mini-PVD ออก จากนั้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ทำการเจาะดินด้วยสว่านเจาะ (Hand augur) และแท่นยึดสว่าน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เนื่องจากค่า α = 20% ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะจึงเท่ากับ 20 cm. ส่วน

ความลึกได้ถูกออกแบบไว้ตามกรณีศึกษา ด้านล่างที่เกิดจากการฝัง Mini-PVD ให้ทำการอุดโดยใช้เศษดินเหนียวจนเต็มรู สำหรับกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน

รูปที่ 3.12 การใส่ Mini-PVD

รูปที่ 3.13 การเจาะดินเพื่อทำเสาเข็มดินซีเมนต์

ทำการขุดเอาหน้าดินออกให้มีความลึก (H_s) ประมาณเท่ากับ 0.10 และ 0.25 m ตามลำดับ จากนั้นนำดินที่ถูกขุดออกทั้งหมดมาผสมกับซีเมนต์ประมาณ 16.47 % และ 23.40 % ตามลำดับ ของน้ำหนักดินแห้ง แบบผสมเปียกด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 เพื่อให้เป็นซีเมนต์เพสท์ และเพื่อให้ง่ายต่อการผสม นำดินมาทำการผสมน้ำให้มีปริมาณความชื้นประมาณ 68%(ซึ่งเท่ากับปริมาณความชื้นของดินในขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว) ก่อนที่จะผสมกับซีเมนต์เพสท์จากนั้น นำดินซีเมนต์ที่ผสมเสร็จ แล้วเทกลับเข้าไปหลุม เมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่วนกรณีที่มีแผ่นพื้นทำการใส่ดินซีเมนต์ส่วนที่เหลือ แทนที่กลับลงไปในแบบจำลองทดสอบเท่ากับดินที่ถูกขุดหน้าดินออกมา บ่มดินซีเมนต์ประมาณ 28 วัน จากนั้นจึงเริ่มการทดสอบในขั้นถัดไป

รูปที่ 3.14 แบบจำลองหนึ่งหน่วยระหว่างทดสอบ

3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ

สำหรับขั้นตอนสุดท้าย เมื่ออายุการบ่มครบ 28 วัน ทำการใส่แผ่น Geotextile จำนวน 3 แผ่นกลับลงไปในโมลท์ทดสอบ พร้อมทั้งใส่ลูกสูบและประกอบอุปกรณ์ฝาปิดกลับที่ด้านบนของแบบจำลองทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ก่อนเริ่มทำการทดสอบแรงดัน 40 kPa ถูกให้กระทำตัวอย่างดินอีกครั้งเป็นเวลา 2 วัน เพื่อให้ชั้นดินมีสภาพการรับน้ำหนักเดียวกันกับขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียวและให้

แน่ใจว่าหน้าสัมผัสของลูกสูบสัมผัสกับผิวบนของตัวอย่างทดสอบอย่างสมบูรณ์ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบโดยปรับค่าความดันเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 120 kPa ซึ่งหมายความว่าจะมีแรงดันกระทำกับตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มขึ้น (Δp) เท่ากับ 80 kPa ในระหว่างการทดสอบบันทึกค่าการทรุดตัวของตัวอย่างกับเวลา เมื่ออัตราการยุบอัดตัวคายน้ำเกิน 95% การทดสอบจะยุติ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 32-40 วัน

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

โครงงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบหาค่าการทรุดตัวกับเวลา ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกโดยใช้ กรณีศึกษา 4 กรณีดังแสดงตารางที่ 1.1 ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกนเพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ จะใช้ผลการทดสอบกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่3 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 4 และสำหรับผลกระทบเนื่องจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะใช้ผลทดสอบของกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 3

โครงงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของทั้ง 4 กรณีศึกษา ผลการทำนายเส้นโค้งการทรุดตัวกันเวลา ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] และวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] เพื่อหาประสิทธิภาพของวิธีทั้งสอง เมื่อใช้ในการพิจาณาผลกระทบของความหนาและความแข็งแกร่งของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองตลอดโครงงานวิจัยนี้เป็นดินเหนียวอ่อน บริเวณไบเทคบางนา แขวงบางนา เขตบางนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นการเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) โดยการเปิดหน้าดินให้มีระดับความลึก 4-5 เมตร จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างดินใส่ในภาชนะปิด เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น นำมาทำการทดสอบทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นพบว่า ค่าขีดจำกัดความเหลว (w_L) เท่ากับ 47.64%, ค่าขีดจำกัดพลาสติก (w_p) เท่ากับ 34.15%, หน่วยน้ำหนักรวม (γ_t) เท่ากับ 16.321 kN/m^3, ค่าดัชนีการอัดตัว (C_C) เท่ากับ 0.547, ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (e_0) เท่ากับ 1.380, ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s) เท่ากับ 2.71, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินในแนวระนาบ (k_h) เท่ากับ 0.432 $\times$ 10^{-5} m/day และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินในแนวดิ่ง (k_v) เท่ากับ 0.432 $\times$10^{-5} m/day และในตารางที่ 4.1 เป็นตารางสรุปข้อมูลของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่นำมาทดสอบ

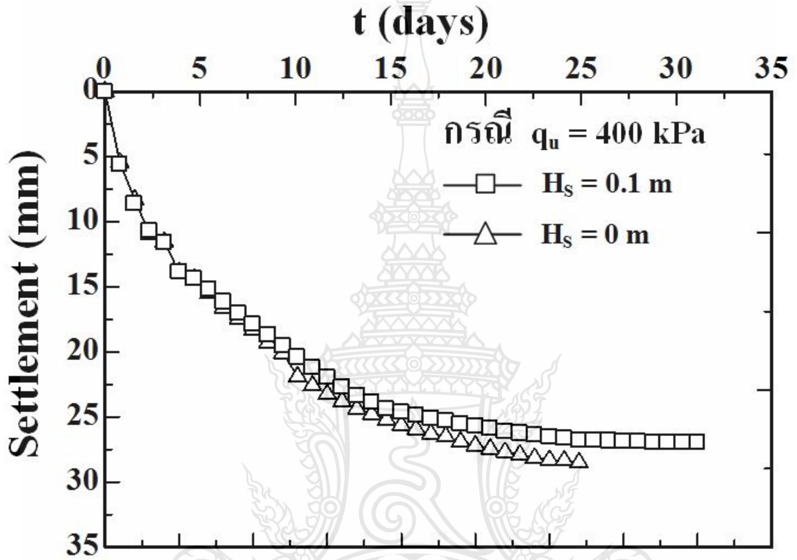
ประเภทดิน	w_L (%)	w_p (%)	γ_t (kN/m^3)	C_c	e_0	G_s	k_h ($\times$10^{-5} m/day)	k_v ($\times$10^{-5} m/day)
ดินเหนียวกรุงเทพฯ	46.64	35.15	16.321	0.547	1.38	2.71	0.432	0.432

4.2 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์

ในงานวิจัยนี้การปฏิบัติการในห้องทดสอบได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 กรณีศึกษา โดยการศึกษาได้ทำการทดสอบแบ่งตามค่าแรงอัดแกนเดียว (q_u) เท่ากับ 400 ksc. แบบไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ และแบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 0.10 เมตร และค่าแรงอัดแกนเดียว(q_u) เท่ากับ 600 ksc. แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 0.10 เมตร และแบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ หนา 0.25 เมตรได้ผลทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำดังต่อไปนี้

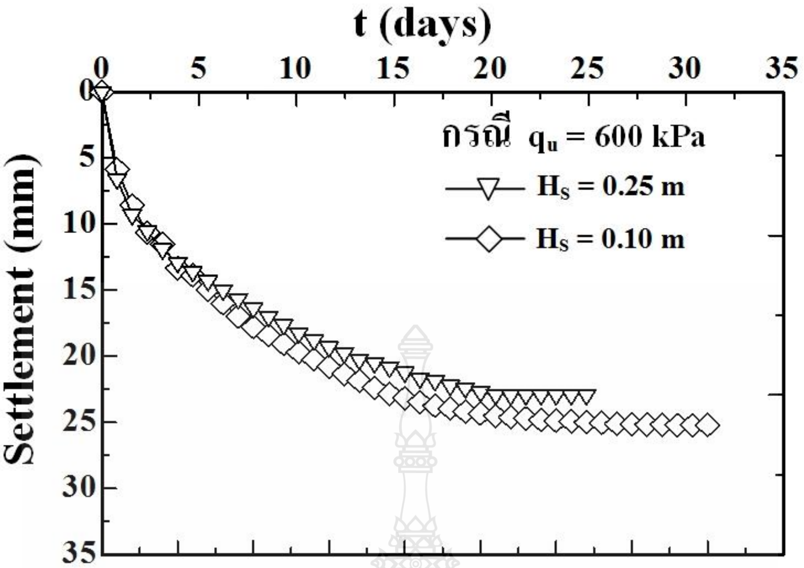
4.2.1 ผลการทดสอบพิจารณาผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้น

เมื่ออัตราการยุบอัดตัวคายน้ำเกิน 95% การทดสอบจะยุติ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 32-40 วัน โดยการบันทึกค่าทุกวัน แล้วสรุปผลการทดลองแต่ละกรณี และทำการเทียบเคียงผลทดสอบเพื่อดูผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก สำหรับผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ จะใช้ผลการทดสอบกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่3 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 4 ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของค่า H_s ต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาในกรณีที่แผ่นพื้นมีค่า q_uเท่ากับ 400 kPa

จากรูปที่ 4.1 ผลการศึกษาการยุบอัดตัวคายน้ำ ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยดินซีเมนต์ ผลการทดสอบที่วัดการทรุดตัวกับเวลาผลการทดสอบกรณีที่ 1 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 400 kPa. แบบ ไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 28.50 มม. เทียบเคียงการทรุดตัวกรณีที่ 2 แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.ที่ระยะเวลา 40 วันมีค่าทรุดตัวเท่ากับ 26.97 มม.มีผลต่างเท่ากับ 1.53 มม. ดังนั้นเมื่อพิจารณาจาค่าการทรุดตัวสุดท้ายพบว่าการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกมีค่าการทรุดตัวลดลง

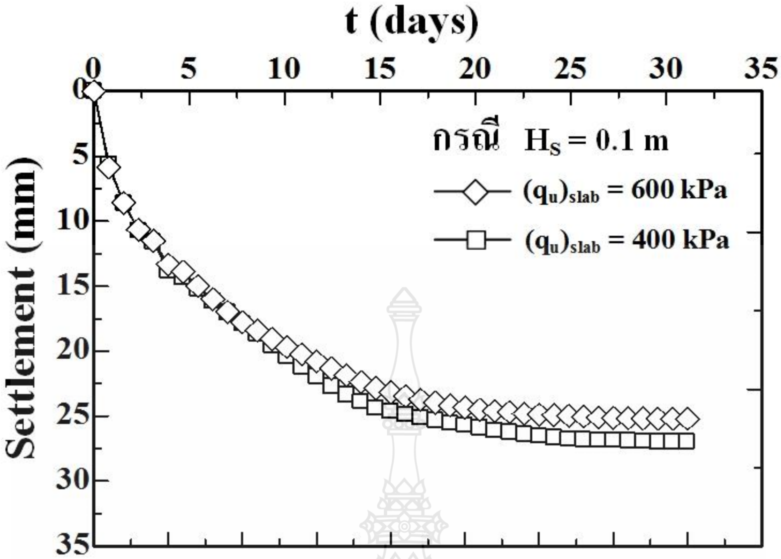


รูปที่ 4.2 ผลกระทบของค่า H_s ต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาในกรณีที่แผ่นพื้นมีค่า q_uเท่ากับ 600 kPa

จากรูปที่ 4.2 จากผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำชั้นดินเหนียวอ่อน ที่วัดได้จากการทดสอบกรณีศึกษาที่ 3 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 600 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 25.21 มม. เทียบเคียงการทรุดตัวกรณีศึกษาที่ 4 ค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 600 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 25 ซม.ที่ระยะเวลา 40 วันมีค่าทรุดตัวเท่ากับ 22.92 มม.มีผลต่างเท่ากับ 2.24 มม. จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2 ผลการทดสอบพิจารณาผลกระทบเนื่องจากค่าแรงอัดแกนเดียว q_uของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

จากรูปที่ 4.3 จากผลการทดสอบการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน ที่วัดได้จากการทดสอบ กรณีศึกษาที่ 2 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 400 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.มีค่าการทรุดตัวกับเวลาเท่ากับ 26.97 มม. เทียบเคียงการทรุดตัวกับเวลากรณีที่ 3 ค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 600 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.ที่ระยะเวลา 40 วันมีค่าทรุดตัวเท่ากับ 25.21 มม. มีผลต่างเท่ากับ 1.76 มม. พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า q_u มีผลทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกมีค่าลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของค่า q_u ต่อเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาในกรณีที่แผ่นพื้นมีค่า H_s เท่ากับ 0.1 m

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ

วิธีการคำนวณเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลาของ Pongsivasathit และคณะ [3] และของ Pongsivasathit และคณะ [4] ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับผลการทดสอบทั้ง 4 กรณีศึกษา เพื่อหาข้อสรุปถึงประสิทธิ์ภาพของสูตรที่มีอยู่ โดยใช้ผลการทดสอบค่าทรุดตัวเปรียบเทียบผลในการคำนวณเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลา โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการคำนวณค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำเฉลี่ย (U) ของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ตามวิธีของ Chai และคณะ[2] ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตามวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3]

กรณีศึกษา	k_1 ($\times 10^{-5}$ m/day)	k_2 ($\times 10^{-5}$ m/day)	c_{v1} ($\times 10^{-2}$ m/day)	c_{v2} ($\times 10^{-2}$ m/day)	H_{1L} m.	H_{2L} m.
1	1.0807	0.4320	1.0403	0.1087	0.4106	0.2004
2	1.0816	0.4320	1.015	0.1087	0.2982	0.1985
3	1.0814	0.4320	1.5049	0.1087	0.2982	0.2123
4	0.9742	0.4320	1.3554	0.1087	0.1624	0.1916

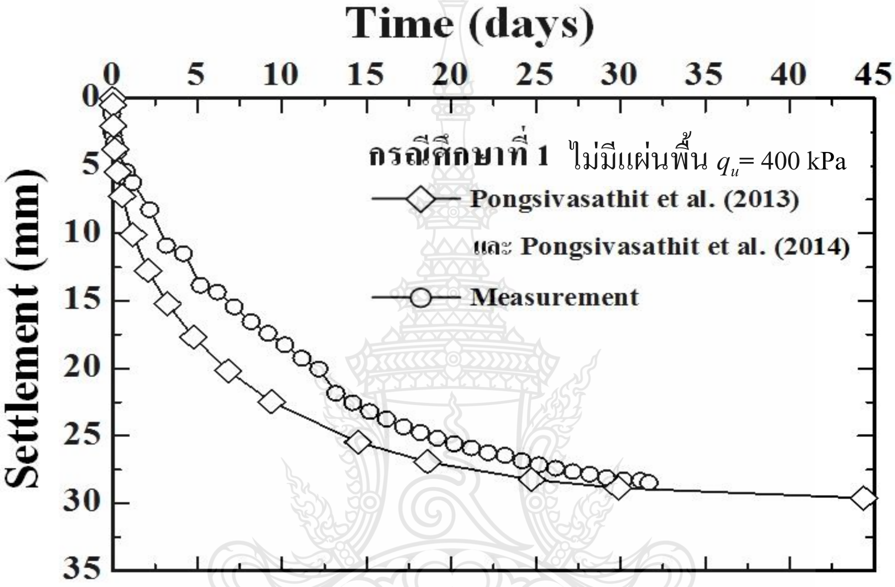
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตามวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4]

กรณีศึกษา	k_1 ($\times 10^{-5}$ m/day)	k_2 ($\times 10^{-5}$ m/day)	c_{v1} ($\times 10^{-2}$ m/day)	c_{v2} ($\times 10^{-2}$ m/day)	H_{1L} m.	H_{2L} m.
1	1.0807	0.4320	1.0403	0.1087	0.4106	0.2004
2	1.0855	0.4320	1.018	0.1087	0.3100	0.1886
3	1.0853	0.4320	1.5103	0.1087	0.3096	0.2021
4	0.9955	0.4320	0.9339	0.1087	0.1773	0.1735

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์สำหรับคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลา

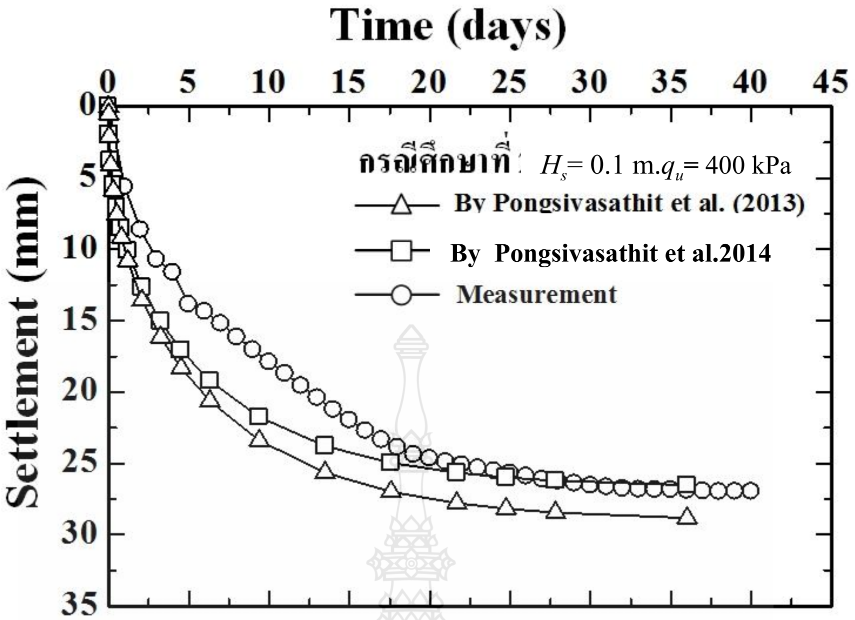
พารามิเตอร์	กรณีศึกษาที่			
	1	2	3	4
α %	20	20	20	20
β %	70	70	70	70
ω %	-	19.53	19.05	68.12
P (kPa)	80	80	80	80
H (cm)	62.60	61.20	62.5	61.70
H_L (cm)	43.90	35.80	36.8	18.20
λ	24.957	24.957	24.957	24.957
γ	220.812	220.812	220.812	220.812
S_U (kPa)	10.92	10.92	10.92	10.92
ปริมาณซีเมนต์ (%)	16.47	16.47	23.70	23.40

สำหรับค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่นำมาทดสอบในกรณีศึกษานั้นได้จากการทดสอบ Consolidation Test ด้วยเครื่อง Oedometer และ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณระดับการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ เมื่อดินเหนียวเป็นดินที่มีการยุบอัดตัวแบบปกติ โดยที่ค่า Δp_{1i} และ Δp_{2i} มีค่าเท่ากันคือ 80 kPa การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลากับผลทดสอบของแบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกนได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.7 ตามลำดับ



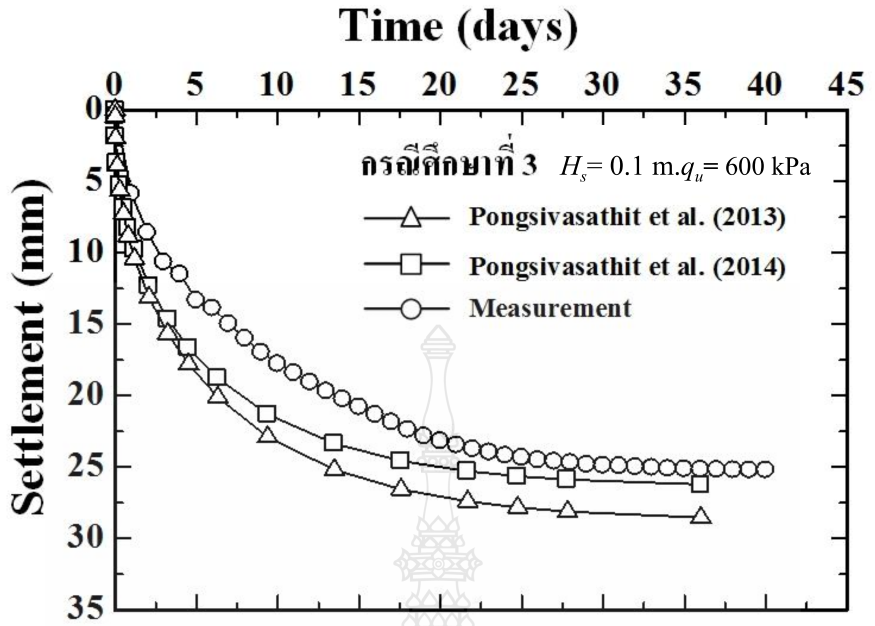
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลากรณีที่1

จากรูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลากรณีที่1 ในกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นพบว่า ผลการคำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] และ วิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ได้ผลลัพธ์เดียวกัน เนื่องจากเป็น กรณีที่1นี้ไม่มีพิจารณาผลของการมีแผ่นพื้นบนหัวเสาเข็มเนื่องจากอิทธิพลของค่า ω ดังนั้นในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าผลจากการทดสอบได้ผลการทดสอบที่ 32 วันค่าการทรุดตัวสุดท้ายวัดได้ 28.50 มม. และผลการทำนายเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลามีค่าเท่ากับ 29.60 มม. จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณใกล้กับผลการทดสอบในกรณีไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนหัวเสาเข็ม สำหรับกรณีค่า β เท่ากับ 70% และ α เท่ากับ 20% แสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณค่าการทรุดกับเวลาที่มีอยู่สามารถนำไปประยุกต์ได้จริง



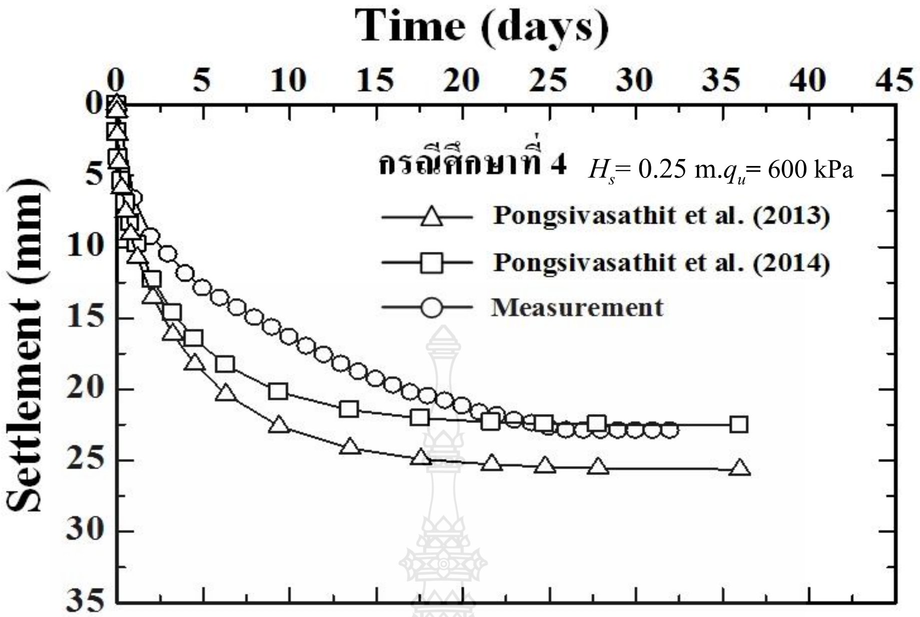
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 2

ในรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณด้วยวิธี Pongsivasathit และคณะ [3] และ วิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 พบว่าถูกออกแบบให้มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีความหนา 10 cm. วางอยู่บนผิวดินและหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ มีพิจารณาค่า ω เท่ากับ 19.53% (ตามตารางที่4.3) จากรูปที่ 4.5 พบว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ได้ค่าเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลา ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] นั้นสามารถพิจารณาผลของผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของค่า ω (สมการที่ 2.43) จึงทำให้ผลการคำนวณระยะ H_c เพื่อแบ่งชั้นดินออกเป็น 2 ส่วน มีค่าลดลงเป็นผลทำให้ชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์หรือชั้นดินด้านบนมีความหนามากขึ้น ค่าการทรุดตัวที่ได้จากสมการจึงมีค่าลดลง ค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.68 จึงมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] ซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของค่า ω ไว้ในสมการการคำนวณระยะ H_c



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 3

ในรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 3 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 600 kPa. แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 0.10 เมตร มีค่าการทรุดตัวจากผลการทดสอบเท่ากับ 25.21 มม. และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธี Pongsivasathit และคณะ [3] และ วิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] สำหรับกรณีศึกษาที่ 3 พบว่าถูกออกแบบให้มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีความหนา 10 cm. วางอยู่บนผิวดินและหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ มีพิจารณาค่า ω เท่ากับ 19.05 % (ตามตารางที่4.3) จากรูปที่ 4.6 พบว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ได้ค่าเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลา เท่ากับ 26.21 มม. ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] ค่าทรุดตัวที่คำนวณได้เท่ากับ 28.52 มม. เนื่องจากวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] นั้นสามารถพิจารณาผลของผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของค่า ω (สมการที่ 2.43) ค่าการทรุดตัวที่ได้จากสมการจึงมีค่าลดลง ค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ3.97 จึงมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] ซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของค่า ω ไว้ในสมการการคำนวณระยะ H_c เมื่อเพิ่มค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 600 kPa. ทำให้เสาเข็มและแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงมีความแข็งแกร่ง การพิจารณาผลกระทบด้วย วิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ผลคำนวณค่าทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 4

ในรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบผลทดสอบกับผลคำนวณของค่าการทรุดตัวกับเวลา กรณีที่ 4 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ ค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 600 kPa. แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 0.25 เมตร มีค่าการทรุดตัวจากผลการทดสอบเท่ากับ 22.92 มม. และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธี Pongsivasathit และคณะ [3] และ วิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] สำหรับกรณีศึกษาที่ 4 นี้ ถูกออกแบบให้มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีความหนา 25 cm.มีความหนามากกว่าทุกกรณี โดยมีค่า ω เท่ากับ 68.12 % (ตามตารางที่4.3) จากรูปที่ 4.7 พบว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ได้ค่าเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลา ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] เนื่องจากวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] นั้นสามารถพิจารณาผลของผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของค่า ω (สมการที่ 2.43) ค่าการทรุดตัวที่ได้จากสมการจึงมีค่าลดลง ค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.65 จึงมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] ซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของค่า ω ไว้ในสมการการคำนวณระยะ H_c เมื่อเพิ่มค่าแรงอัดแกนเดียว q_u = 600 kPa. ทำให้เสาเข็มและแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงมีความแข็งแกร่งมาก การพิจารณาผลกระทบด้วย วิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ผลคำนวณค่าทรุดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการคำนวณพิจารณาผลของค่า ω แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนและความน่าเชื่อถือของสูตรด้วยวิธี

วิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] มีค่าความความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.65 - 3.97 สามารถนำไปใช้ในงานภาคสนามได้จริง

ถ้ากำหนดให้ค่า ε คือค่าความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณเมื่อเทียบกันกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยที่

$$\varepsilon = \frac{s_{t(mea)} - s_{t(cal)}}{s_{t(mea)}} \tag{4.1}$$

เมื่อ $s_{t(mea)}$ คือ ค่าการทรุดตัวที่ได้จากผลการทดสอบ

$s_{t(cal)}$ คือ ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ

กรณีศึกษา	t (วัน)	ค่าการทรุดตัว (mm)			ε(%)	
		จากการทดสอบ	ทำนายโดยวิธี A	ทำนายโดยวิธี B	วิธี A	วิธี B
1	32	28.50	29.60	29.60	3.86	3.86
2	40	26.97	28.82	26.51	6.88	1.68
3	40	25.21	28.53	26.21	13.19	3.97
4	32	22.92	25.64	22.54	11.86	1.65

หมายเหตุ : t คือเวลาที่ใช้ในการทดสอบ Unit cell Model; A คือวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] และ B คือวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4]

จากตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลการคำนวณเส้นโค้งการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก การคำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3] ไม่พิจารณาผลกระทบของแผ่นพื้นนั้น เมื่อมีความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มากขึ้นเรื่อย ๆและการเพิ่มค่าแรงอัดแกนเดียว q_u ทำให้ชั้นดินเกิดความแข็งแกร่งมาก ผลที่ได้จาการคำนวณค่อนข้างห่างไกลกับค่าที่ได้จากการทดสอบมากมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 3.86 - 13.19 และจากผลการคำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ที่พิจารณาผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของค่า ω (สมการที่ 2.43) มีผลการคำนวณเข้าใกล้ผลทดสอบอย่างชัดเจนอย่างมีนัยยะสำคัญ มีค่าความคลาดเคลื่อนเป็นกลุ่มไม่กระจายตัว ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.65 - 3.97 แสดงให้เห็นว่าสูตรการ

คำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ผลเฉลยการคำนวณของสูตรมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของสูตรคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเกี่ยวกับการปฏิบัติการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน ได้สรุปผลและข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองหนึ่งหน่วยเพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก พบว่าการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์เป็นผลทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงมีค่าลดลงและการเพิ่มขึ้นของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.2 เมื่อพิจารณาผลกระทบของค่า q_u ของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ด้วยผลการทดสอบของแบบจำลองหนึ่งหน่วย สำหรับชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์โดยมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์วางบนหัวเสาเข็ม พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า q_uของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีผลทำให้การทรุดตัวลดลงเล็กน้อย

5.1.3 ผลการศึกษาด้วยการคำนวณเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาด้วยวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [4] ที่พิจารณาผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนที่ปรับปรุงสมการหาค่า H_c ตามสมการที่ 2.43 พิจารณาผลของผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของค่า ω โดยเพิ่มฟังก์ชั่นของผลกระทบอันเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์และในการประยุกต์ใช้สมการปรับปรุงหาค่า H_c ของกรณีศึกษาเพื่อหาค่าการทรุดตัวกับเวลา พบว่าในกรณีที่แผ่นพื้นมีความหนามาก ๆ เส้นโค้งการทรุดกับเวลาที่ได้จากการประยุกต์ใช้ ผลการคำนวณเข้าใกล้กับผลทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ผลเฉลยการคำนวณของสูตรมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของสูตรคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีของ Pongsivasathit และคณะ [3]

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการปฏิบัติการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน มีข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

5.2.1 การศึกษาทั้งในรูปแบบของการใช้แบบจำลองการทดสอบในห้องปฏิบัติการร่วมกับการศึกษาพฤติกรรมด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์โดยการเทียบตัวอย่างดินที่มีความหนาต่างๆ ระดับ

5.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ควรปรับเครื่องมือวัดค่าการทรุดตัวที่มีความแม่นยำสูงเช่น Data Logger ที่ทันสมัยเพื่อผลการทดลองกับการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

5.2.3 ควรมีการทำการทดสอบคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินอ่อนเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์เพิ่มเติมในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองโมเดลการทดสอบและศึกษาผลกระทบอันเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ที่ค่าแรงอัดแกนเดียว(q_u) แตกต่างกันรวมทั้งค่าพารามิเตอร์ α และ β

5.2.4 อาจจะนำข้อมูลไปใช้งานจริงในภาคสนาม แล้วนำผลข้อมูลมาเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการ หาค่าเปรียบเทียบปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องกับค่างานจริงในสนาม

บรรณานุกรม

[1] Bergado, D. T., Chai, J. C., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S. “Improvement Techniques of Soft Ground in subsiding and Lowland Environment,” Balkema, Rotterdam, p. 222, 1994.

[2] Chai, J. C., Miura, N., Kirekawa, T. and Hino, T., “Settlement prediction for soft ground improved by columns,” *Ground Improvement*, in Proceeding of Institute of Civil Engineers, UK, vol. 162, 2009.

[3] Pongsivasathit, S., Chai, J. C. and Ding W., “Consolidation settlement of floating-column-improved soft clayey deposit,” Ground Improvement, In Proceeding of Institute of Civil Engineers, UK, vol. 166, 2013, pp. 44-58.

[4] Pongsivasathit, S., Jitsuwan, P., Chai. J.C., and Hino. T (2014)., Methodology for calculating The Consolidation settlement of floating soil cement column improved soft clayey deposit. Proc.9th International Symposium on Lowland Technology. Japan. : 285-293.

[5] Shen, S. L., Chai, J. C. and Miura, N., “Stress distribution in composite ground of column-slab system under road pavement,” in Proc.1st Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, Elsevier Science Ltd, 2001, pp. 485-490.

[6] Broms, B. B. and Boman, P. O., “Lime column a new foundation method,” Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 105, GT4, pp. 539-556, 1979.

[7] Mills, W. H., Jr., “Stabilizing soils with Portland cement,” Experiments by South Carolina Highway Department, In Highway Research Board Proceedings, vol.16, 1936, pp. 322-347.

[8] Davidson, D. T., “Soil Stabilization with Portland Cement,” Highway Research Board, Bulletin 292, 1961, pp. 45-151.

[9] Moh, Z. C., “Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals,” Highway Research Record, vol. 86, 1965, pp. 39-61.

[10] Chida, S., 1982, “Dry Jet Mixing Method – State of the Art on Improvement Methods for Soft Ground”, Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 85, No. 2, pp. 69-76.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[11] เกษม เพชรเกตุ, 2541, “เทคนิคการใช้ Deep Soil Stabilization สำหรับงานดินอ่อนในประเทศไทย”, การสัมมนาทางวิชาการเรื่อง การปรับปรุงคุณภาพดิน’41, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 236-265.

[12] DJM Research Group, 1984, The Manual for the Dry Jet Mixing Method, Japan, pp. 20-31

[13] Pendola, H. J., Kennady, T. W. and Hutson, W. R., “Evaluation of Factors Affecting the Tensile Properties of Cement-Treated Materials,” University of Texas at Austin Research Report, vol. 98, No. 3, 1969.

[14] Kamon, M.(1996), Effective of Grouting and DMM on Big Construction Project in Japan the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake,Grouting and Deep Mixing, The Second International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo,Vol.2, pp. 807 – 823.

[15] Felt, E. J., “Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures,” Highway Research Board, Bulletin 108, 1955, pp. 138-163.

[16] Horpibulsuk, S. and Miura, N., “A new approach for studying behavior of cement stabilized clays,” in Proceeding of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Turkey, vol. 3, 2001, pp. 1759-1762.

[17] Miura, N., Horpibulsuk, S. and Nagaraj, T.S., “Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content,” Soil and Foundations, vol. 41, No. 5, 2001, pp. 33-45.

[18] Moh, Z. C., Chin, Y. P. and Ng, S. C., “Cement stabilization of lateritic soil,” In Proceeding 3rd Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1967, pp. 42-46.

[19] Bell, F. G., “The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement,” Association of Engineering Geologists, pp. 267-278, 1976.

[20] Davidson, D. T., Pitre, G. L., Matoes, M. and Kalankamary, P. G., “Moisture-Density, Moisture-strength and Compaction Characteristics of Cement Treated Soil Mixtures,” Highway Research Board, Bulletin 353, 1962, pp. 42-63.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[21] Ruenkrairergsa, T., “Principle of Soil Stabilization,” Highways Department, Bangkok, 1982, pp. 17-27.

[22] Shackle, B. and Lee, R. H. F., “Some Aspect of Curing of Soil-Cement,” in The 7th Conference of the Australian Road Research Board, vol. 7 No. 7, 1974, pp. 5-17.

[23] Clare, K. E. and Pollard, A. E, “The Relationship between Compressive Strength and Age for Soil Stabilized with Four Type of Cement,” Magazine of Concrete Research, vol. 3, No.8, pp. 57-64, 1951.

[24] Lambe, T. W. and Moh, Z. C., “Improvement of Strength of Soil-Cement with Additives,” Highway Research Board, Bulletin 183, 1957, pp. 38-47.

[25] Pinto, C. D. S., Davidson, D. T. and Leguros, J. G., “Effect of Lime on Cement Stabilization of Monmorillonitic Soils,” Highway Research Board, Bulletin 353, 1962, pp. 64-83.

[26] สมโชค ประเสริฐวินิจกุล, การจำลองคันทางบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อนโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

[27] Chai, J. C., Liu, S.Y. and Du, Y. J. (2002), Field Properties and Settlement Calculation of Soil-Cement Column Improved Soft Subsoil – A Case Study. 3rd International Symposium on Lowland Technology, Japan, pp. 51 – 58.

[28] Japanese Institute of Construction Engineering (JICE) (1999), Chapter 4, Flexible Foundation, Foundation Structure Part, Design Code for Flexible Box Culvert-II, San-Kai-Dou Press, Tokyo, pp. 233 – 248 (in Japanese).

[29] Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967), Soil Mechanics in Engineering Practice. A Wiley International Edition, 729 p.

[30] Chai, J. C., and Pongsivasathit S. (2010). A Method for Calculating Consolidation Settlements of Floating Column Improved Clayey Subsoil. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 4(2) : 241-251.

[31] Zhu, G. and Yin, J. H. (1999), Consolidation of Double Soil Layers Under Depth-Dependent Ramp Load. Geotechnique, Vol. 49, No. 3, pp. 415 – 421.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[32] Hansbo, S. (1981), Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains, Proceeding. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 3, pp. 677 – 682.

[33] เกษม เพรชเกตุ และ พินิต ตั้งบุญเติม(2536),การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, บทความทางวิชาการ, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536.

[34] คมกฤต ดีจังวิภาต, พฤติกรรมของคันดินทดลองบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

[35] จอม จันทร์หิรัญ, พฤติกรรมของถนนบนดินอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย Cement Column ทางหลวงหมายเลข 34 สายบางนา-ชลบุรี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

[36] ชิดชัย อนันตเศรษฐ และวัฒนา มกรโรจน์ฤทธิ์, การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวแข็งและทรายปนดินเหนียว, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8 ขอนแก่น , 2545.

[37] บันเทิง ทองฉีด, “การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยซีเมนต์ โดยวิธีผสมแห้งและผสมเปียก,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.

[38] ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ , “การปรับปรุงดินในงานทางหลวง,” สัมมนาเรื่องการปรับปรุงคุณภาพดิน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.

[39] พานิช วุฒพฤกษ์ เกษม เพชรเกตุ และ สมโชค ประเสริฐวินิจกุล “การจำลองคันทางบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อนโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ” วารสารวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547.

[40] วรากร ไม้เรียง และ สมพงศ์ โรจน์กังสดาล, คู่มือการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหาการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์, กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ,2553

บรรณานุกรม (ต่อ)

[41] สมพงศ์ โรจน์กังสดาล, คุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์, กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.

[42] สุวิทย์ พันธ์มานะเจริญผล, การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดิน เหนียวอ่อน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบวัสดุ

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบ Atterberg's Limit

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

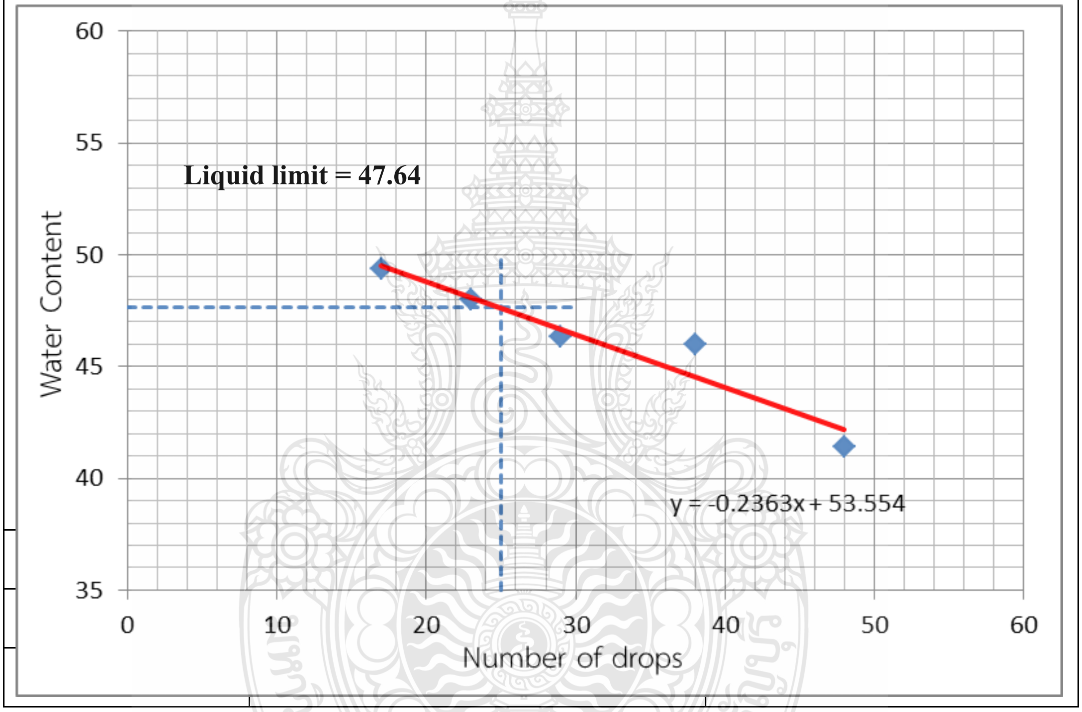
FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THUNYABURI

Water Content and Atterberg's Limit							
Liquid Limit Test							
Test No		1	2	3	4	5	6
Container No		1	2	3	4	5	6
Number of drops	N	48.00	38.00	36.00	29.00	23.00	17.00
Weight Wet Soil + Container	g	38.78	37.62	33.54	38.72	35.11	36.84
Weight Dry Soil + Container	g	35.70	34.40	30.40	35.10	29.90	33.70
Weight of Container	g	28.26	27.40	24.20	27.29	19.05	27.34
Weight of Water	g	3.08	3.22	3.14	3.62	5.21	3.14
Weight of Dry Soil	g	7.44	7.00	6.20	7.81	10.85	6.36
Water Content	%	41.40	46.00	50.65	46.35	48.02	49.37
Plastic Limit Test							
Test No		1	2	3	4	5	6
Container No		7	8	9			
Wet Soil + Container	g	21.44	31.50	22.55			
Dry Soil + Container	g	20.70	30.60	21.70			
Weight of Container	g	18.65	28.70	19.06			
Weight of Water	g	0.74	0.90	0.85			
Weight of Dry Soil	g	2.05	1.90	2.64			
Water Content	%	36.10	47.37	32.20			
Average		34.15					
Plastic Limit		34.15					

ตารางผนวกที่ ก2 กราฟแสดงผลกาดทดสอบ Atterberg’s Limit

	DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THUNYABURI
Atterberg’s Limit	



ตารางผนวกที่ ก3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

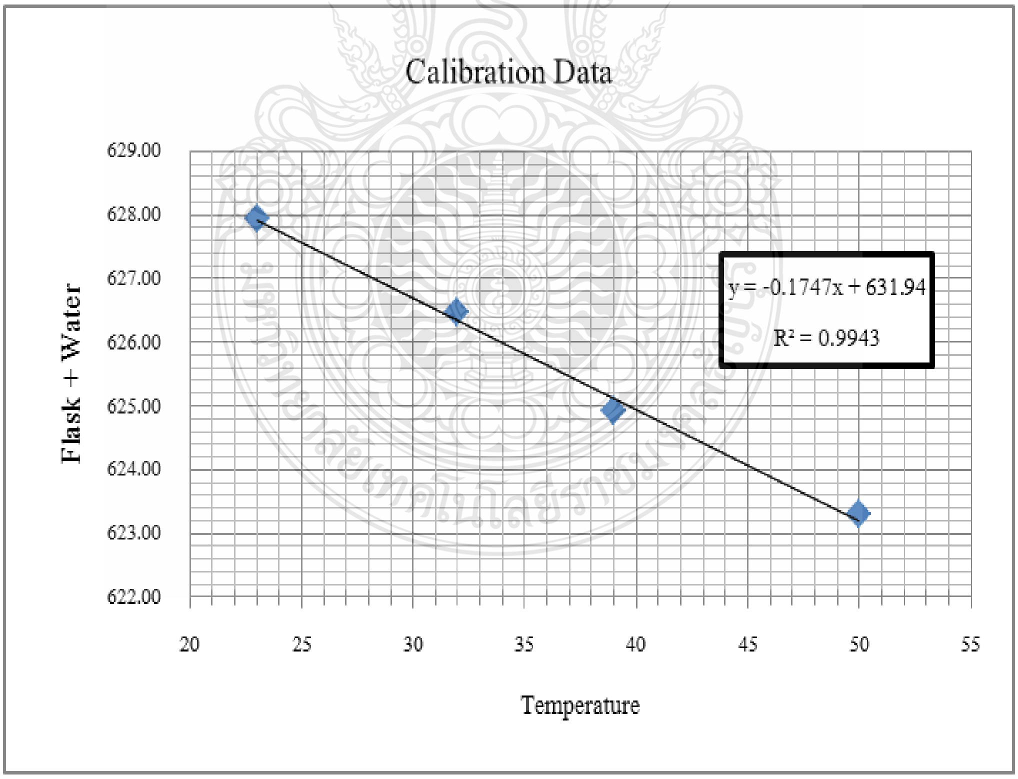
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THUNYABURI

Specific Gravity Test

Calibration Data		
No.	Flask + Water (g)	Temperature (°C)
1	623.30	50
2	624.91	39
3	626.46	32
4	627.94	23



ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

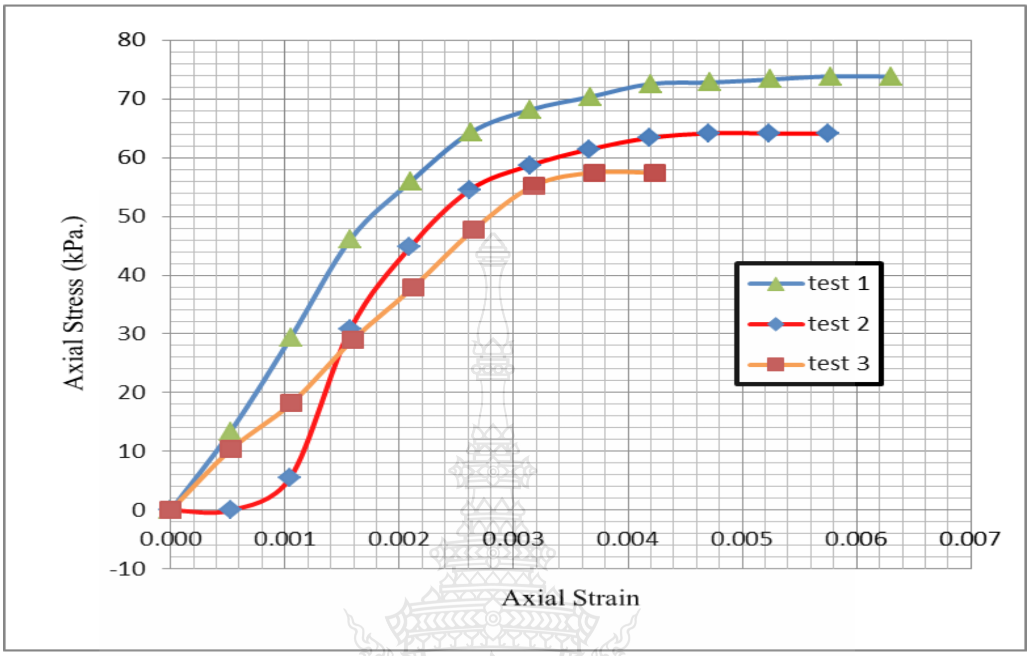
FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THUNYABURI

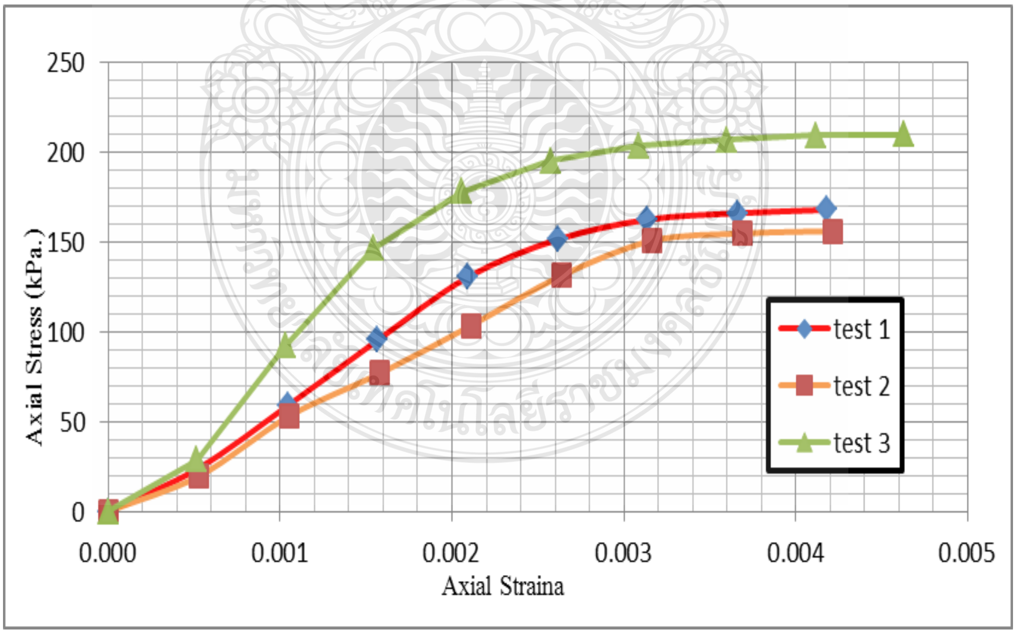
Specific Gravity Test

Trial No.			1	2
1	Temperature	°C	28	28
2	Flask + Water	g	627.00	627.00
3	Flask + Water + Soil	g	657.51	657.51
4	Container No.		1	3
5	Dry Soil + Container	g	179.8	174.08
6	Weight of Container	g	131.59	125.80
7	Dry Soil	g	48.21	48.28
8	G_T		0.9963	0.9963
9	Specific Gravity		2.71	2.71
10	Average Specific Gravity		2.71	

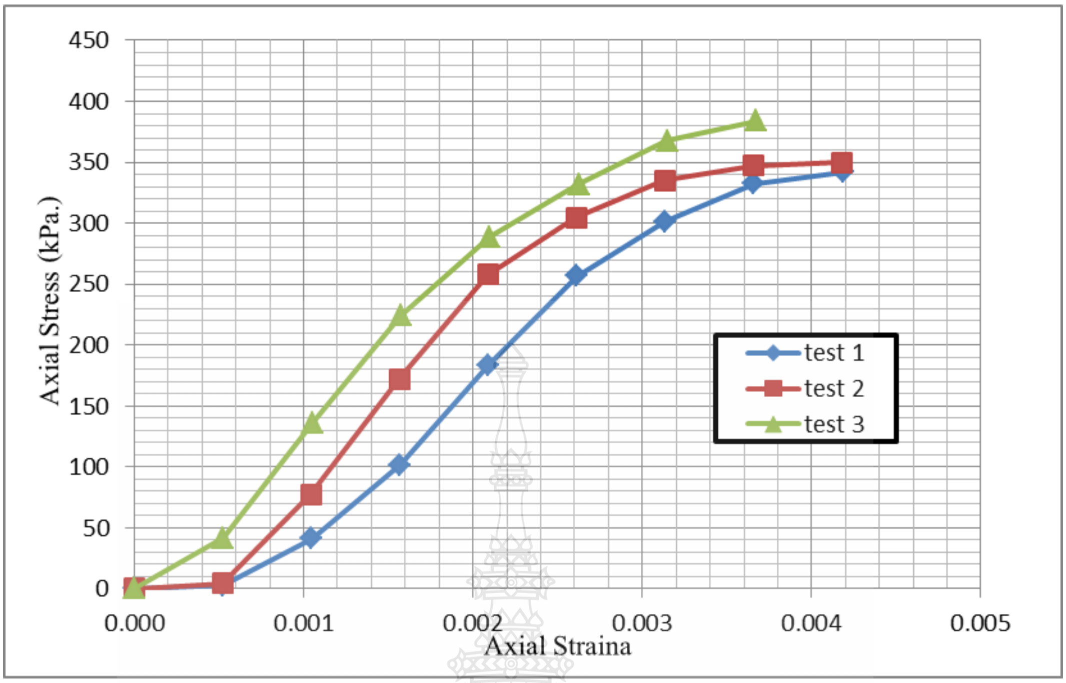
ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว
(UNCONFINED COMPRESSION TEST)



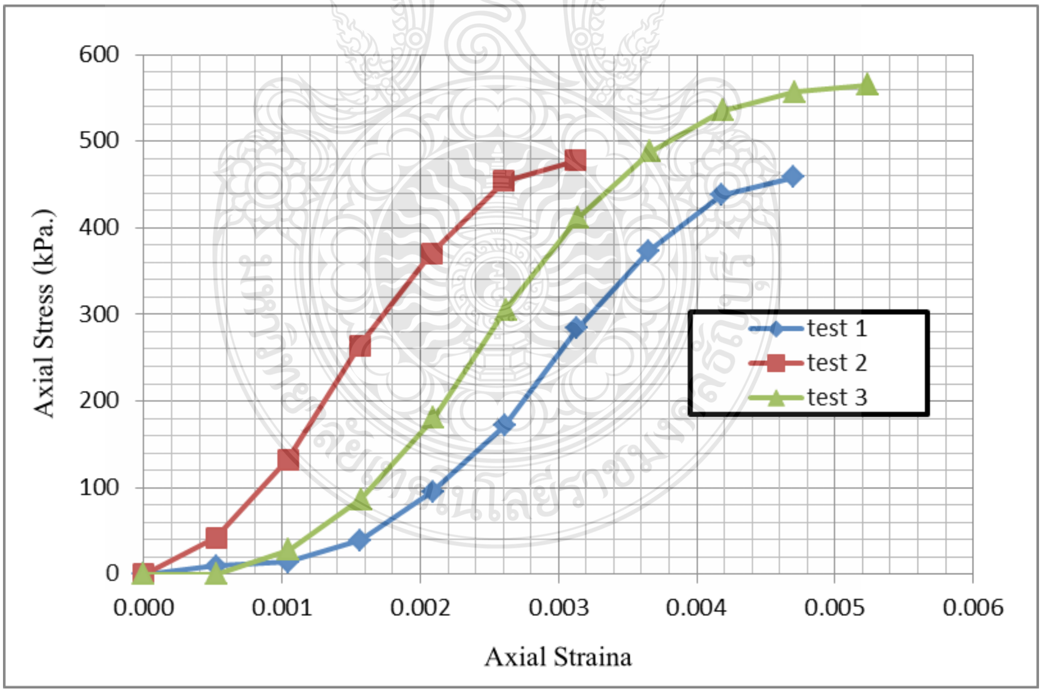
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 5 %



รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%



รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%



รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20%

ตารางผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ของ unconfined compressive strength กับ เปอร์เซ็นต์ปริมาณปูนซีเมนต์

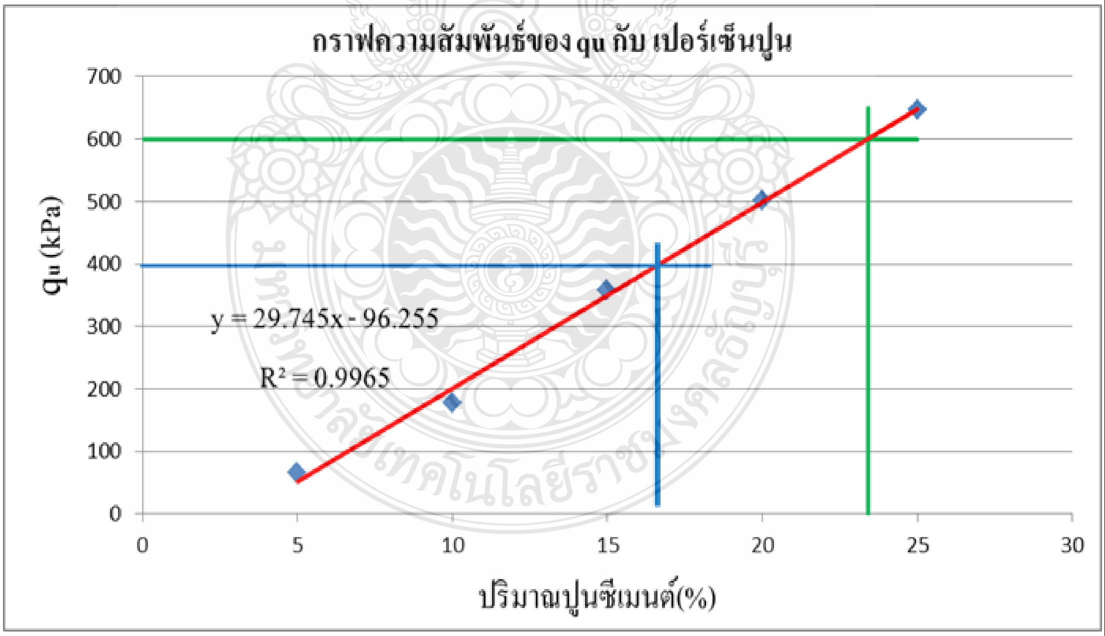
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THUNYABURI

Unconfined Compression test

เปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์	unconfined compressive strength , q_u (kg/m²)			เฉลี่ย
	1	2	3	
5	64.138	57.454	73.813	65.14
10	209.668	156.069	167.909	177.88
15	383.856	349.68	342.105	358.55
20	565.367	478.128	458.503	500.67



ค่าแรงอัดแกนเดียวที่ q_u 400 kpa และ q_u 600 kpa ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ เท่ากับร้อยละ 16.47 และ 23.40 ตามลำดับ

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ

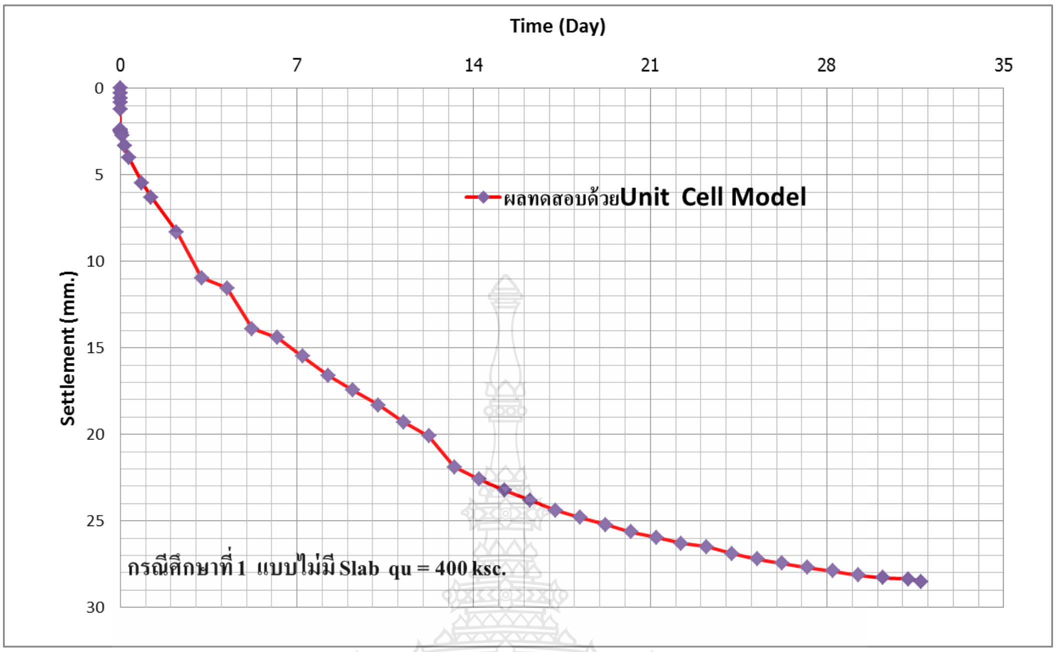
(CONSOLIDATION TEST)

ตารางผนวกที่ ค1 ตารางบันทึกผลการทรุดตัวหลังการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียว

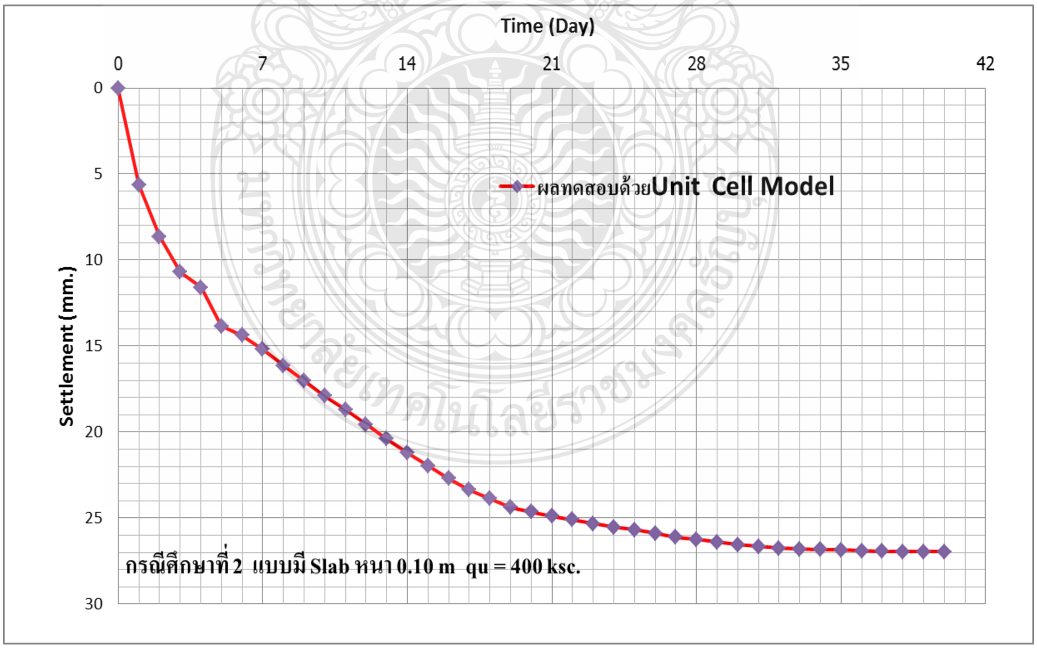
ระยะเวลา วัน	กรณีศึกษาที่ 1 q_u 400 kPa mm.	กรณีศึกษาที่ 2 q_u 400 kPa mm.	กรณีศึกษาที่ 3 q_u 600 kPa mm.	กรณีศึกษาที่ 4 q_u 600 kPa mm.
1	5.46	5.62	5.86	6.60
2	8.30	8.63	8.59	9.30
3	10.96	10.71	10.65	10.53
4	11.55	11.61	11.51	11.90
5	13.90	13.85	13.33	12.92
6	14.40	14.37	13.88	13.60
7	15.50	15.20	14.98	14.30
8	16.60	16.15	16.00	15.00
9	17.46	17.03	16.98	15.67
10	18.30	17.90	17.78	16.35
11	19.30	18.70	18.41	17.00
12	20.10	19.57	19.06	17.60
13	21.90	20.40	19.69	18.25
14	22.60	21.23	20.24	18.80
15	23.25	21.97	20.79	19.30
16	23.80	22.71	21.33	19.75
17	24.38	23.35	21.85	20.24
18	24.80	23.88	22.38	20.50
19	25.23	24.39	22.84	20.83
20	25.63	24.65	23.17	21.20
21	25.95	24.89	23.46	21.65
22	26.30	25.11	23.74	21.85
23	26.50	25.32	23.96	22.20
24	26.90	25.52	24.18	22.40
25	27.20	25.68	24.34	22.70
26	27.45	25.90	24.50	22.90

ตารางผนวกที่ ค1 ตารางบันทึกผลการทรุดตัวหลังการปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเหนียว (ต่อ)

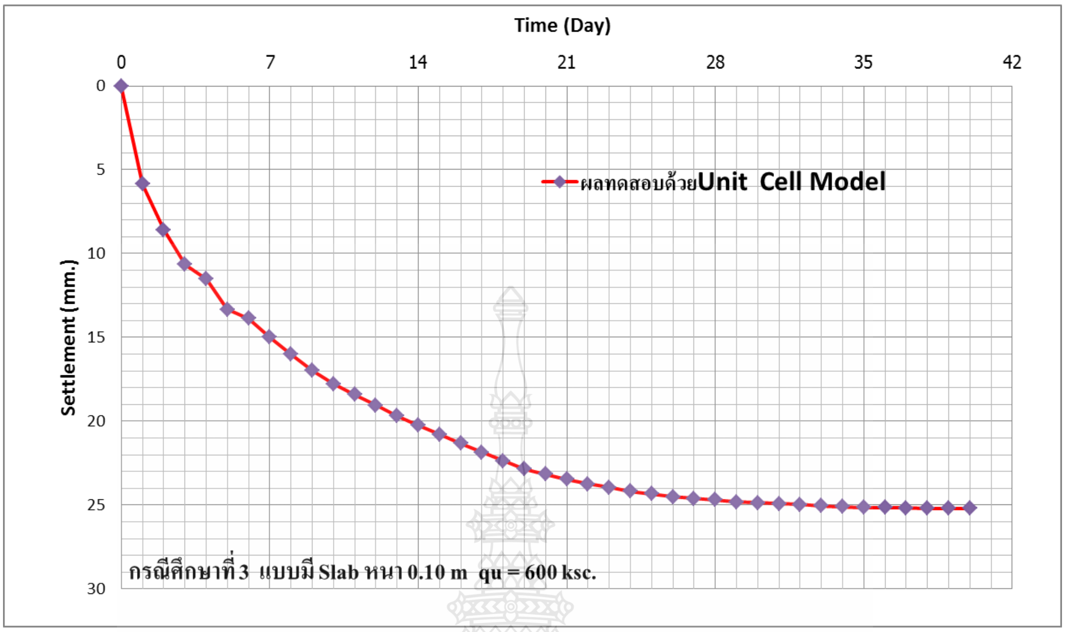
ระยะเวลา วัน	กรณีศึกษาที่ 1 q_u 400	กรณีศึกษาที่ 2 q_u 400	กรณีศึกษาที่ 3 q_u 600	กรณีศึกษาที่ 4 q_u 600
27	27.70	26.12	24.61	22.92
28	27.90	26.25	24.69	22.92
29	28.15	26.40	24.82	22.92
30	28.30	26.55	24.88	22.92
31	28.35	26.65	24.92	22.92
32	28.50	26.76	24.98	22.92
33		26.82	25.04	
34		26.84	25.11	
35		26.85	25.14	
36		26.90	25.16	
37		26.94	25.18	
38		26.97	25.20	
39		26.97	25.21	
40		26.97	25.21	



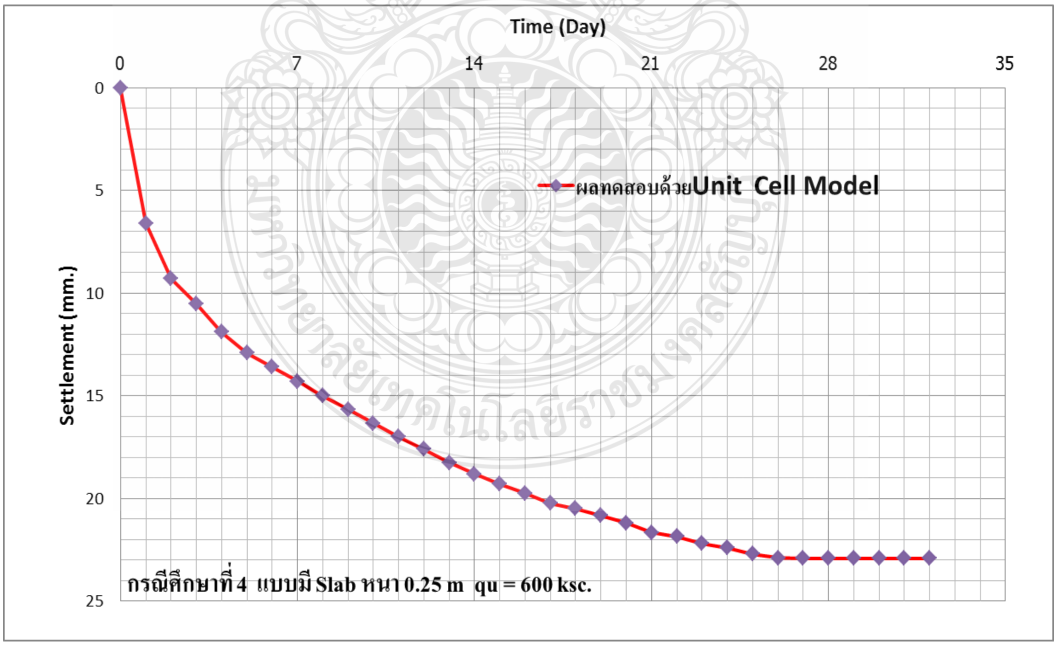
รูปที่ ค.1 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ ค.2 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ ค.3 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ ค.4 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ กรณีศึกษาที่ 4

ภาคผนวก ง

รูปถ่ายการทดสอบ

รูปที่ ง.1 การประกอบแบบ Unit Cell Model

รูปที่ ง.2 การประกอบชุดอุปกรณ์ piton พร้อมฝาปิด

รูปที่ ง.3 การทาจาระบีบางๆที่ผนังเซลล์และวางแผ่นแผ่นใยสังเคราะห์

รูปที่ ง.4 เตรียมวัสดุทดสอบโดยการชั่งน้ำหนัก

รูปที่ ง.5 การผสมดินด้วยเครื่องกวน

รูปที่ ง.6 การผสมดินกับน้ำให้เข้ากัน

รูปที่ ง.7 การบรรจุดินที่ผสมแล้วลงโมล

รูปที่ ง.8 การใส่ Mini PVD

รูปที่ ง.9 การใส่ Mini PVD และ geotextile

รูปที่ ง.10 การประกอบชุดอุปกรณ์ piton ลูกสูบด้านใน

รูปที่ ง.11 ขั้นตอน Pre-consolidation stage

รูปที่ ง.12 ระดับการยุบอัดตัวคายน้ำที่ 90 % หรือเริ่มไม่มีการทรุดตัวเปิดฝาออก

รูปที่ ง.13 ดึง mini-PVD ออกแล้วทำการเจาะดินด้วยสว่าน

รูปที่ ง.14 ใส่ดินซีเมนต์ตามที่ออกแบบตามกรณีศึกษา ลงไปในรูเจาะ

รูปที่ ง.15 การบ่มเสาเข็มดินซีเมนต์

รูปที่ ง.16 การปิดแผ่น geotextile 3 ชั้นเพื่อการระบายน้ำ

รูปที่ ง.17 การประกอบชุดอุปกรณ์ piton ลูกสูบด้านใน

รูปที่ ง.18 ขั้นตอน Consolidation test stage วัดค่าการทรุดตัวกับเวลา

ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ **ครั้งที่ 2**
และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ
ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา **ครั้งที่ 3**

*"วิจัยสหวิทยาการและนวัตกรรม
เพื่อสรรค์สร้างสังคม และชุมชนอย่างยั่งยืน"*

Proceedings

31 มีนาคม 2560

*ณ อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา*

ISBN : 978-974-625-761-9

www.ruscon.rmutsb.ac.th

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2
และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3
“วิจัยสหวิทยาการและนวัตกรรมเพื่อสรรค์สร้างสังคม และชุมชนอย่างยั่งยืน”
31 มีนาคม 2560 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

---

28 กุมภาพันธ์ 2560

เรื่อง ตอบรับการนำเสนอบทความวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2

เรียน นายสมพร มั่นใจ

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง **การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน** **(รหัสบทความ 60111103) เพื่อนำเสนอภาค ภาคบรรยาย** ในการประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2 และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3 หัวข้อ “วิจัยสหวิทยาการและนวัตกรรมเพื่อสรรค์สร้างสังคม และชุมชนอย่างยั่งยืน” กำหนดจัดขึ้นในวันที่ 31 มีนาคม 2560 ณ อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นั้น

ในการนี้ คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ ขอแจ้งให้ทราบว่า บทความวิจัยของท่านได้รับการตอบรับให้นำเสนอในการประชุมวิชาการดังกล่าว สำหรับตารางเวลาการนำเสนอ จะแจ้งให้ทราบในลำดับต่อไป ทั้งนี้ ผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการสามารถเข้าร่วมประชุมได้โดยไม่ถือเป็นวันลา และสามารถเบิกค่าใช้จ่ายต่างๆ จากต้นสังกัดได้ เมื่อได้รับอนุมัติจากผู้บังคับบัญชาแล้ว

ขอแสดงความนับถือ

รองศาสตราจารย์นภัทร วัจนเทพินทร์
ประธานคณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
โทรศัพท์ / โทรสาร 0 3570 9097
อีเมล: rdi@rmutsb.ac.th
http://www.ruscon.rmutsb.ac.th

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)

สาขาเกษตรศาสตร์และอุตสาหกรรมอาหาร	
รศ.ดร.รวีวรรณ เดื่อมขันมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.วันเพ็ญ จิตรเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รศ.ดร.ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.สุชาดา บุญเลิศนิรันดร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.อภิรักษ์ เพียรมงคล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.อัญชลี สงวนพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เจริญ เจริญชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ชูจิตร รินทะวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.นัยวิท เฉลิมนนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.นิพนธ์ ภูวเกียรติกำจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.พนิดา บุษปฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.อัญชลี สวาสดิ์ธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.วีระพล แจ่มสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผศ.สุดารัตน์ สกุลคู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.สมชาย จอมดวง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.ธีระพัศธ์ ศิลปสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.พิทยา ใจคำ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.วิจิตรา เหลียวตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ	
รศ.ดร.กิตติ บุญเลิศนิรันดร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.ดวงฤดี ศุภติมัสโร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สำเริง รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.สถาพร ดีบุญมี ณ ชุมแพ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.จตุพร เผ่าพงษ์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ชวลิต ศรีสถาพรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ธานินทร์ ปัจจุโส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.พิมพ์พรรณ อำพันธ์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.มนตรี สังข์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วรวัฒน์ มีวาสนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.ศุภฉัตร ศิริเธียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.สิงห์โต สกุลเขมฤทัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (ต่อ)	
ผศ.ดร.เสนีย์ พวงยาณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.อำนาจ จำรัสจรุงผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
พอ.ผศ.ดร.ปรัชญา อารีกุล	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ผศ.พินทุสร ปัสนะจะโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ราตรี เอี่ยมประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.วุฒิพงษ์ เขื่อนดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.เฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ชยาคมน์ ปุริมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.นุชรัตน์ นุชประยูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.รัฐศักดิ์ พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.วิระพงศ์ จันทร์สนาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
ดร.สรชัย ชวรางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สุนิษา เละเซ็น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สันติ ไทยยืนวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.เสาวคนธ์ ชูบัว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.แสงทอง บุญยิ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.อาณัติ รัตนถิรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.อังคณา ใสเกื้อ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.เอนก เจริญภักดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย	
ศ.ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศ.ดร.ปิติ สุคนธสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.วุฒิชัย อัศวินชัยโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย (ต่อ)

รศ.ดร.เสถียร ธัญญศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.นภัทร วัจนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.บรรจบ อรชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ประกาศิต ตันติอลงการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.อำนวยพศ ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เกรียงไกร อัศวมาศบันลือ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.นนทโชติ อุดมศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.นิพนธ์ ภูวเกียรติกำจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.พิชัย จันทร์มณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ไพบูลย์ เกียรติสุขคณาธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.มาหามะสูไฮมี มะแซ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วชิระ จงบุรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วัลลภ ภูผา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.คมสันต์ งามขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.นันทชัย ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ปรกช สิริสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วาณิช นิลนนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สายชล ชุดเจือจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

สาขาการศึกษา

ศ.ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ชานนท์	จันทรา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ศิริณา	จิตต์จรัส	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รศ.ดร.สำเริง	รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.เกรียติไกร	อายุวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ณัฐวุฒิ	ขวัญแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.นภัทร	วัจนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

สาขาการศึกษา (ต่อ)		
ผศ.ดร.กันต์พงษ์	ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.กิตติพงษ์	โสภณธรรมภาณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ชนสิทธิ์	สิทธิ์สูงเนิน	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร.ชวลิต	ศรีสถาพรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.ทักษิณา	เครือหงส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ธนวัต	ลิมป์พาณิชย์กุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.ประเสริฐ	วิโรจน์ชีวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.มนตรี	สังข์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วาสนา	บุญสม	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ดร.สาลินันท์	บุญมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.พินทุสร	ปัสนะจะโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ราตรี	เอี่ยมประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.วชิรา	ปูชตรีรัตน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ว่าที่ร้อยโทธนู	ทดแทนคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.สุพจน์	สุทธิศักดิ์	มหาวิทยาลัยคริสเตียน
ดร.ชิดชัย	สนั่นเสียง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.ธนภูมิ	ปองเสงี่ยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.นภา	แซ่เบ๊	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.บุญส่ง	กวยเงิน	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.เบญจพร	สว่างศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.พรเทพ	รู้แผน	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.พิมอร	แก้วแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.เพิ่มพูล	ร่มศรี	สำนักงานพื้นที่การศึกษาประถมศึกษา ร้อยเอ็ด
ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.รุจิรา	คงนุ้ย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.วรรณิกา	ชาญพิชญาพรวัฒน์	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย ชลบุรี
ดร.วารุณี	ลัภนโชคดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สมพร	ศรีวัฒนพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สรชัย	ชวรางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สุภัทรา	คงเรือง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.สุวนิตย์	รุ่งราตรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.สุวรรณี	จริยะพร	วิทยาลัยทองสุข
ดร.แสงทอง	บุญยิ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.อังคณา	อ่อนธานี	มหาวิทยาลัยนเรศวร

สาขาการศึกษา (ต่อ)

ดร.อมรรัตน์	สนั่นเสียง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.อาณัติ	รัตนถิรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.อุทาน	บูรณศักดิ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

สาขาบริหารธุรกิจและเศรษฐศาสตร์

ศ.ดร.สนม	ครุฑเมือง	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร.ชานนท์	จันทรา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.กิตติพงษ์	โสภณธรรมภาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ชุลีพร	ลักขณาพิพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผศ.ดร.ณภัทร	ทิพย์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผศ.ดร.ทักษิณา	เครือหงส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ธนวัต	ลิมป์พาณิชย์กุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.นวลฉวี	ประเสริฐสุข	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร.ลัดดาวัลย์	สำราญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วสุธิดา	นุริตมนต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วิโรจน์	เจษฎาลักษณ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร.ศิริมา	แก้วเกิด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.ศิวฤทธิ์	พงศกรรังศิลป์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ.ดร.สมยศ	วัฒนากมลชัย	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ผศ.ดร.เสนีย์	พวงยาณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.อมรรัตน์	สนั่นเสียง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ดร.อัควรรณ์	แสงวิภาค	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.นันทพรรดิ์	นิตยพงศ์ชัย	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ดร.จินณพัษ	ปทุมพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.ชิดชัย	สนั่นเสียง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.ธัญวรัตน์	สุวรรณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ธารนี	นวัสนธี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.นวพร	สังวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.นุชรัตน์	นุชประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
ดร.พิมอร	แก้วแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วารุณี	ลัภนโชคดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.ศุภรักษ์	อธิคมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สุภาวดี	สุขีชีพ มอสส์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.อาณัติ	รัตนถิรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

สาขาสังคมศาสตร์ มนุษยศาสตร์และวิจัยสถาบัน	
ศ.ดร.สนม ครุฑเมือง	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร.เกียรติศักดิ์ พันธ์ลำเจียก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.อภิญญา เลื่อนฉวี	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
รศ.อารีรัตน์ คูณดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ดร.จันทร์เพ็ญ คล้ายมุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ดร.ธนวัต ลิมป์พาณิชย์กุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.มนตรี สังข์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.วาสนา บุญสม	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ดร.ศิวฤทธิ์ พงศกรรังศิลป์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ.ดร.อดิศร ภู่สาระ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.ว่าที่ ร.ท.ธนู ทดแทนคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.จินดา นัยผ่องศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผศ.จันทร์เพ็ญ วรรณารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ดวงจันทร์ สินโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ธนาวุฒิ วงศ์อนันต์	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
ผศ.เนาวรัตน์ อินทรประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.ลัดดา แพรภัทรพิสุทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ.สายหยุด อุไรสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.จินณพัษ ปทุมพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.ชิดชัย สนั่นเสียง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.ธารนี นวัสนธี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ธัญวรัตน์ สุวรรณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ธวัชชัย สารวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.บุญส่ง กวยเงิน	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.บุญสมหญิง พลเมืองดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.พรเทพ รู้แผน	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.พิมอร แก้วแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วารุณี ลัภนโชคดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.ศุภรักษ์ อธิคมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.สรชัย ชวรางกูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.สุวรรณี จริยะพร	วิทยาลัยทองสุข
ดร.อมรรัตน์ สนั่นเสียง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ดร.อาณัติ รัตนถิรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.อังคณา อ่อนธานี	มหาวิทยาลัยนเรศวร

สารบัญ (ต่อ)

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย (ต่อ)

ความสัมพันธ์ของผลทดสอบ การรับแรงเฉือน และกำลังรับแรงดัด สำหรับดินลูกรังผสมซีเมนต์ 363
จักรพันธุ์ แก้วกัญหา และ ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวะสถิต

การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน 371
สมพร มั่นใจ และ ศุภสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์

ผลกระทบของมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตกำลังสูงใน 24 ชั่วโมง 379
อาทิมา ดวงจันทร์ และ ทวีศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์

ศึกษาความสามารถในการดูดซับสังกะสีและแมงกานีสจากแหล่งน้ำอุตสาหกรรมบริเวณนิคมอุตสาหกรรมโรจนะ 3 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ด้วยวัสดุชีวมวลจากกะลามะพร้าว โสน และแกลบข้าว 391
ปทิตตา นาควงษ์ และ ศิรประภา ดีประดิษฐ์

การแยกตะกอนน้ำขิงขุ่นโดยใช้ไฮโดรไซโคลนและการกรอง 398
ศิวกร รื่นพันธ์ พิชัย สร้อยสน ธนิต สวัสดิ์เสวี และ ประธาน วงศ์ศริเวช

การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นผู้รับเหมาก่อสร้างทางของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท 408
ลาวัลย์ ขันเกษตร

เครื่องรีไซเคิลน้ำมันเชื้อเพลิงจากการล้างชิ้นส่วนเครื่องกล 419
ณทพร จินดาประเสริฐ ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และสมใจ เพียรประสิทธิ์

เครื่องนวดยางพาราสำหรับเกษตรกรรายย่อยในจังหวัดเลย 425
กานต์ จันทระ

การออกแบบและสร้างเครื่องขยายตลับลูกปืนควบคุมด้วยไมโครคอนโทรเลอร์ 432
วิรัช กองสิน วีระพันธ์ ติยัพเสน ชูศักดิ์ ขำพิมพ์ และ จิระวัฒน์ ใจอ่อนน้อม

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ผสมเส้นใยจากธรรมชาติด้วยระบบสุญญากาศ 442
รำพึง เจริญยศ สุทธิสาร อนันตรัตนชัย และพิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล

Switching Losses of Power Transistors Improvement by Electron beam Irradiation 451
Pakorn Pakaiphuek Manit Jitpukdee and Apichate Maneewong

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อนำคลื่นโดยใช้วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ 458
วิทฤทธิ์ โคตรมณี

การประเมินผลการเรียนรู้ตามมาตรฐานคุณวุฒิ ระดับอุดมศึกษาในการเรียนการสอนแบบการบูรณาการของสาขาสถาปัตยกรรม กับการออกแบบลานปฏิบัติธรรม วัดไผ่เหลือง ตำบลบางรักพัฒนา จังหวัดนนทบุรี 464
พรชัย โลหะพิริยกุล วราภรณ์ บุตรจันทร์ ณัชชา โลหะพิริยกุล และ รุจ รัตนพาหุ

สาขาการศึกษา

การพัฒนาโรงเรียนพระปริยัติธรรม แผนกสามัญศึกษา สู่การเป็นองค์กรแห่งการเรียนรู้ 475
ชนันภรณ์ อารีกุล พระมหาสุดใจ คุนาพันธ์ พระทอง บุตรดี พระกิตติรัฐ หุ่นภู และ สุวิทย์ แซวรัมย์

2ER-O24 : การปฏิบัติการทดสอบเพื่อตรวจสอบเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน

Laboratory Testing for Investigating the Settlement-Time Curve of Floating Soil-Cement Column Improved Soft Clayey Deposit

สมพร มั่นใจ[1*] และ ศุภสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์[1]
Somphorn Manchai[1*] and Supasit Pongsivasathit[1]

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาและกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน เริ่มจากทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองหนึ่งหน่วยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 m และสูง 1.00 m ด้วยจำนวนกรณีศึกษา 4 กรณี โดยมีขั้นตอนการทดสอบ 3 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว 2) ขั้นตอนการบรรจุเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้น 3) ขั้นตอนการทดสอบหาค่าการยุบอัดตัวคายน้ำ ดินที่นำมาทดสอบเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ ใช้แรงดัน 120 kPa ระหว่างทำการทดสอบในทุกกรณีศึกษาใช้อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่(α)และอัตราส่วนการปรับปรุงความลึก(β) ถูกกำหนดให้คงที่ ที่ α=20% และ β =70% ตามลำดับ ให้ผลการทดสอบเป็นดังนี้ การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นพื้นดินซีเมนต์ สามารถลดค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุง การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้น ทำให้ค่าการทรุดตัวลดลงเล็กน้อย

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก แผ่นพื้นดินซีเมนต์ แบบจำลองหนึ่งหน่วย

Abstract

This research purposes to investigate the effect of slab thickness undrain of slab on the consolidation behavior of soft clayey deposit improved by floating soil with cement stabilized slab on the ground surface. Firstly the large scale laboratory model test as a unit cell with diameter of 0.45 m and height of 1 m were conducted of 4 cases of testing. There are 3 steps of testing 1) Making ground 2) soil-cement slab installation 3) Consolidation test. Bangkok clay was use as soft clayey deposit. The consolidation pressure was applied at 120 k Pa for whole cases. The area improvement ratio and depth improvement ratio were fired at α = 20% and β =70% , respectively. The results of testing were revealed that the increasing of slab thickness can reduce the settlement significantly. Increasing of undrain shear strength of slab reduce the settlement slightly.

Keywords: Floating Soil-Cement Column, Cement Stabilized Slab, Unit Cell Model .

---

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
* Corresponding author. E-mail: Somphorn_1@yahoo.co.th

บทนำ

เทคนิคการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของชั้นดินเหนียวถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ทำให้ชั้นดินที่ถูกปรับปรุงมีค่าการทรุดตัวลดลงสามารถรับน้ำหนักสิ่งก่อสร้างได้มากขึ้น Bergado et al 1994 [1] ปัจจุบันการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก (Floating Soil-Cement Column) ร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (Cement Stabilized Slab) บนผิวดินที่ทำจากดินที่ผสมซีเมนต์แล้วนำมาบดอัดเพื่อเป็นแผ่นพื้นได้ถูกนำมาใช้แทนที่เสาเข็มดินซีเมนต์แบบเดิมหรือแบบหยั่งลึก เนื่องจากเสาเข็มแบบไม่หยั่งลึกจะไม่รบกวนชั้นน้ำใต้ดินและมีมลพิษจากการก่อสร้างน้อยกว่าแบบเดิม แต่ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนวณหาค่าการทรุดตัวขั้นปฐมภูมิ ซึ่งพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มประเภทนี้ค่อนข้างมีความซับซ้อนกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความยาวแบบหยั่งลึก Chai et al., 2009 [2] จากนั้น Chai et al., 2009 ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าการทรุดตัวโดยสามารถพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ ($\alpha = A_c/A_e$, A_c คือพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ A_e คือพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกหนึ่งหน่วยของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์) และอัตราส่วนการปรับปรุงความลึก ($\beta = H_L/H$, H_L คือความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ และ H คือความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน)

ต่อมา Pongsivasathit et al. 2012 [4] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกด้วยแบบจำลองทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อดูผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำ (p) และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (s_u) ของดินบริเวณปลายเสาเข็ม จากนั้นเสนอสมการปรับปรุงสมการของ Chai et al., 2009 [2] โดยสามารถพิจารณาผลกระทบ เนื่องจากค่า (p) และค่า (s_u) ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้เมื่อนำมาประมาณค่าการทรุดตัวของกรณีศึกษาในอดีตกลับพบว่า ในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่หนา 2.5 m หรือมีอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้น (H_s) กับความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไป เท่ากับร้อยละ 0.40 ซึ่งสูงมากกว่าทุกกรณี จะให้ผลการคำนวณเกินกว่าค่าที่วัดได้ในภาคสนามอยู่มาก นั่นหมายความว่าความหนาของแผ่นพื้นมีผลทำให้คุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำไม่เป็นไปตามสมมุติฐานของการศึกษาที่ผ่านมา

ดังนั้นโครงงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ที่มีต่อคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ด้วยแบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit Cell Model) ในห้องปฏิบัติการทดสอบ นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของความแข็งแรงของแผ่นพื้นดินซีเมนต์เพิ่มเติมด้วย เพื่อหาข้อสรุปในการปรับปรุงสมการการคำนวณค่าการทรุดตัวกับเวลาของ Pongsivasathit et al. 2012 [4] ต่อไป

วิธีการศึกษา

โครงงานวิจัยนี้ จะทำการทดสอบหาค่าการทรุดตัวกับเวลา ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก กรณีศึกษา 4 กรณีดังแสดงตารางที่ 1 ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกน สำหรับผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ จะใช้ผลการทดสอบกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่3 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 4 สำหรับผลกระทบเนื่องจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะใช้ผลทดสอบของกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงการปฏิบัติการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของดินเสาเข็มดินซีเมนต์สั้น

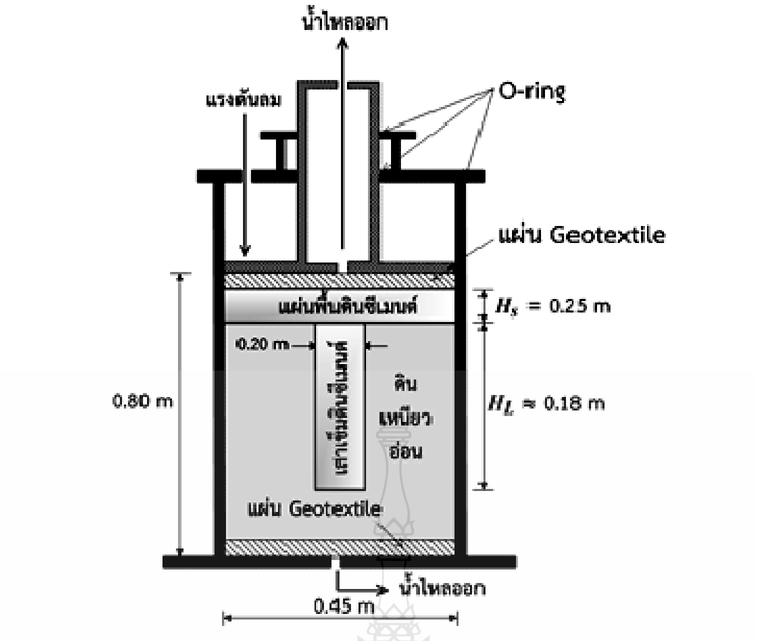
กรณีที่	Soil	ค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (qu) kPa	ความหนาแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (เมตร)	α (%)	β (%)	Cement %	p kPa
1	Bangkok Clay	400	0.00	20	70	16.47	120
2	Bangkok Clay	400	0.10	20	70	16.47	120
3	Bangkok Clay	600	0.10	20	70	23.40	120
4	Bangkok Clay	600	0.25	20	70	23.40	120

ขั้นตอนการทดสอบ

แบบจำลองการทดสอบหนึ่งหน่วยสมมาตรแนวแกน ทำจากท่อวัสดุ PVC ทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.45 m สูง 1.00 m การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแสดงในรูปที่ 1 ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบคือดินเหนียว ซึ่งถูกเก็บแบบถูกรบกวนจากบริเวณสถานที่ก่อสร้างไบเทค บางนา โดยก่อนเก็บตัวอย่างดินทำการขุดเปิดหน้าดิน ลึก 4 – 5 m คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเป็นดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ได้ถูกกำหนดไว้ให้มีค่าแรงกดอัดทิศทางเดียว (q_u) เท่ากับ 400 kPa และ600 kPa ส่วนค่าโมดูลัสของยังค์ (Young's Modulus, E) เท่ากับ 40,000 kPa และ60,000 kPa (อ้างอิงจากผลการทดสอบ Unconfined compression test) ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ในการผสม สำหรับค่า k_v ได้มาจากผลการทดสอบ Consolidation test ที่มีหน่วยแรงประสิทธิผลกดทับอยู่เท่ากับ 40 kPa และสมมติให้ค่า k_h มีค่าเท่ากับ k_v สำหรับค่าอัตราส่วนปัวค์ซองสมมติเท่ากับ 0.2 สำหรับแผ่น Geotextile มีความหนาประมาณ 2.5 mm. ใช้เป็นวัสดุในการระบายน้ำออกจากตัวอย่างที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ อ้างอิงจาก Chai and Pongsivasathit, 2010 [3,4] ดังนี้

1. ขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว

สำหรับขั้นตอนนี้จะเป็นการให้แรงดันกระทำกับดิน ให้ดินยุบอัดตัวคายน้ำสมบูรณ์ เพื่อเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการทดสอบ เริ่มจากวางแผ่น Geotextile จำนวน 3 แผ่นที่ด้านล่างของแบบจำลองทดสอบ เพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายน้ำโดยน้ำจะไหลออกที่บริเวณด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 1 ทาจาระบีที่บริเวณด้านในของแบบจำลองทดสอบให้ทั่ว เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวและแบบจำลองทดสอบที่อาจจะเกิดขึ้น จากนั้นบรรจุดินเหนียวที่ผสมน้ำให้มีปริมาณความชื้นสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลว (ประมาณ 68%) เมื่อดินเหนียวมีความหนา 0.80 m วางแผ่น Geotextile ทับด้านบนเพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายน้ำออกจากตัวอย่างทดสอบ จากนั้นบรรจุ Mini-PVD ที่ตรงกลางของแบบจำลองทดสอบ โดยการใช้แท่งเหล็กดันดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับ Mini-PVD ทำจากแผ่น Geotextile ม้วนซ้อนกันจำนวน 3 รอบ โดยให้มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 30 mm x 9 mm จะทำหน้าที่ช่วยเร่งอัตราการยุบอัดตัวคายน้ำให้สมบูรณ์เร็วขึ้น ประกอบลูกสูบและอุปกรณ์ฝาปิดด้านบนสุด จากนั้นทำการให้แรงดันลม 40 kPa กระทำในแบบจำลองทดสอบเพื่อให้ดินเหนียวยุบอัดตัวคายน้ำ แรงดันลมนี้จะถือว่าเป็น Pre-consolidation pressure (p_0) มีสภาพการไหลของน้ำออกจากตัวอย่างแบบสองทาง (Two-way drainage condition) ระหว่างทดสอบทำการบันทึกค่าการทรุดตัวของชั้นดิน



รูปที่ 1 แบบจำลองทดสอบหนึ่งหน่วยสมมาตร

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่นำมาทดสอบ

ประเภทดิน	w_L (%)	w_p (kN/m^3)	γ_t	ν	λ	e_0	G_s	k_h (×10^{-5} m/day)	k_v (×10^{-5} m/day)
ดินเหนียวกรุงเทพฯ	46.64	35.15	16.321	0.3	0.2496	1.38	2.71	0.432	0.432

** w_L คือค่าขีดจำกัดความเหลว, w_p คือค่าขีดจำกัดพลาสติก, γ_t คือหน่วยน้ำหนักรวม, ν คือค่าอัตราส่วนปัวซ์ซอง, λ คือความชันของเส้น virgin compression ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$, e คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง, G_s คือค่าความถ่วงจำเพาะ และ k_h และ k_v คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินในแนวระนาบและในแนวดิ่ง ตามลำดับ

2. ขั้นตอนการบรรจุเสาเข็มดินซีเมนต์และแผ่นพื้นดินซีเมนต์

เมื่อตัวอย่างดินเหนียวมีค่าระดับการยุบอัดตัวคายน้ำประมาณ 95% (สังเกตจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว)ยุติการให้แรงดัน ถอดอุปกรณ์ฝาปิดด้านบนสุดและลูกสูบ พร้อมทั้งแผ่น Geotextile และ Mini-PVD ออก จากนั้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ ทำการเจาะดินด้วยสว่านเจาะ (Hand augur) และแท่นยึดสว่านดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากค่า α = 20% ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะจึงเท่ากับ 20 cm ส่วนความลึกได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ด้านล่างที่เกิดจากการฝัง Mini-PVD ให้ทำการอุดโดยใช้เศษดินเหนียวจนเต็มรู สำหรับกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนผิวดิน เพื่อที่จะให้ค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นพื้นและความหนาของชั้นดินใต้แผ่นพื้นลงไปเท่ากับร้อยละ 0.40 จึงต้องทำการขุดเอาหน้าดินออกให้มีความลึก (H_s) ประมาณเท่ากับ 0.10 และ 0.25 m ตามกรณีศึกษา จากนั้นนำดินที่ถูกขุดออกทั้งหมดมาผสมกับซีเมนต์ประมาณ 16.47% ของน้ำหนักดินแห้ง แบบผสมเปียกด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และเพื่อให้ง่ายต่อการผสมจะนำดินมาทำการผสมน้ำให้มีปริมาณความชื้นประมาณ 68% ก่อนที่จะผสมกับซีเมนต์เพสท์ นำดินซีเมนต์ที่ผสมเสร็จแล้วเทกลับเข้าไปหลุม เมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่วนกรณีที่มีแผ่นพื้นจะใส่ดินซีเมนต์ส่วนที่เหลือ แทนที่กลับลงไปในแบบจำลองทดสอบเท่ากับดินที่ถูกขุดหน้าดินออกมา บ่มดินซีเมนต์ประมาณ 28 วัน จากนั้นจึงเริ่มการทดสอบในขั้นถัดไป

รูปที่ 2 การใส่ Mini-PVD

รูปที่ 3 การเจาะดินเพื่อทำเสาเข็มดินซีเมนต์

3. ขั้นตอนการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ

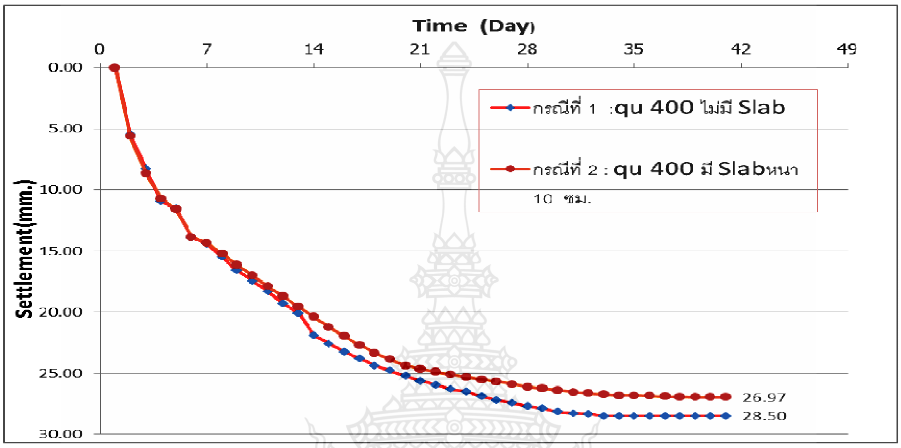
สำหรับขั้นตอนสุดท้าย เมื่ออายุการบ่มครบ 28 วัน ทำการใส่แผ่น Geotextile จำนวน 3 แผ่น พร้อมทั้งใส่ลูกสูบและประกอบอุปกรณ์ฝาปิดกลับที่ด้านบนของแบบจำลองทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ก่อนเริ่มทำการทดสอบจะให้แรงดัน 40 kPa ดังรูปที่ 5 เป็นเครื่องมือปรับและควบคุมแรงดันตามที่ต้องการได้ แรงดันกระทำแก่ตัวอย่างดินเป็นเวลา 2 วัน เพื่อให้แน่ใจว่าหน้าสัมผัสของลูกสูบสัมผัสกับผิวบนของตัวอย่างทดสอบอย่างสมบูรณ์และทำให้ตัวอย่างทดสอบเข้าสู่สภาวะการยุบอัดตัวแบบปกติ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบโดยปรับแรงดันเพิ่มจนมีค่าเท่ากับ 120 kPa ซึ่งหมายความว่าจะมีแรงดันกระทำกับตัวอย่างทดสอบ (Δp) เท่ากับ 80 kPa ในระหว่างการทดสอบบันทึกค่าการทรุดตัวของตัวอย่างกับเวลา และเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษากรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์กับกรณีที่ไม่แผ่นพื้นดินซีเมนต์ ด้วยค่าอัตราส่วนการปรับปรุงความลึกเดียวกัน

รูปที่ 4 แบบจำลองหนึ่งหน่วยระหว่างทดสอบ

รูปที่ 5 เกจวัด ปรับแรงดันลม

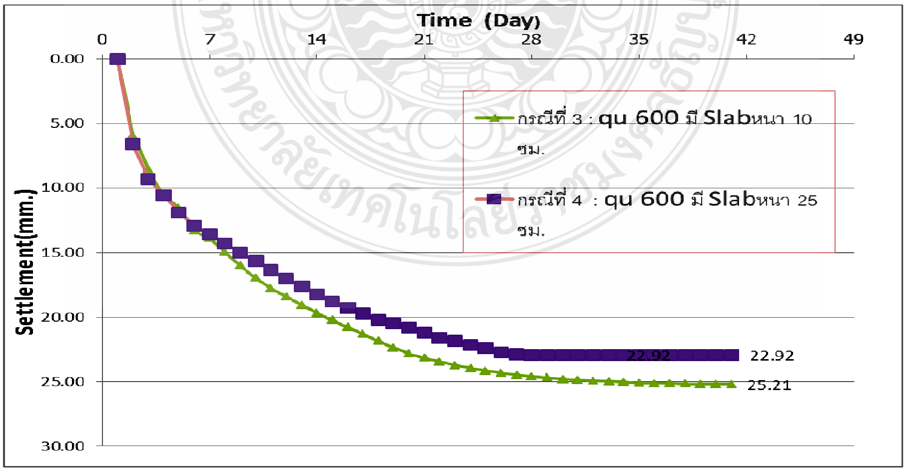
ผลการวิเคราะห์

เมื่ออัตราการยุบอัดตัวคายน้ำเกิน 95% การทดสอบจะยุติ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 32-40 วัน โดยการบันทึกค่าทุกวัน แล้วสรุปผลการทดลองแต่ละกรณี และทำการเทียบเคียงผลทดสอบเพื่อดูผลกระทบของการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก สำหรับผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะใช้ผลการทดสอบกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่3 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 4 ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 สำหรับผลกระทบเนื่องจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะใช้ผลทดสอบของกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 3 ดังรูปที่ 8



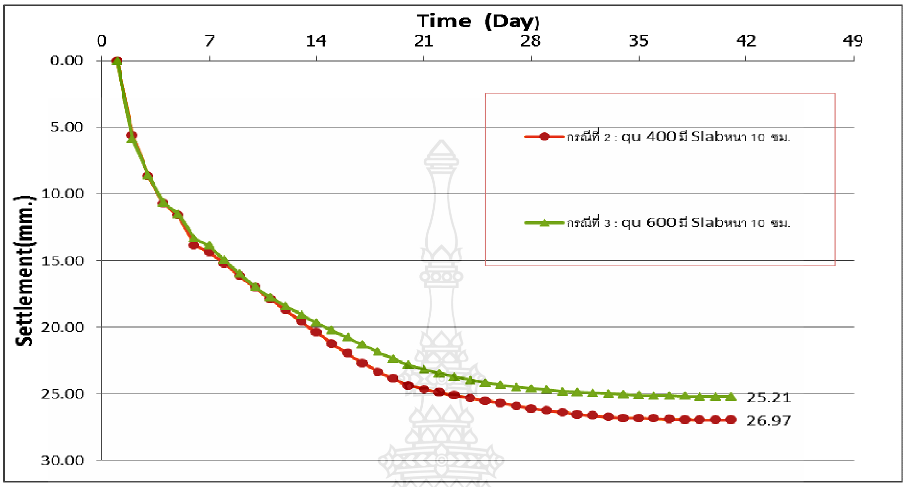
รูปที่ 6 การเทียบเคียงการทรุดตัวกรณีที่ 1 เทียบกับกรณีที่ 2

จากรูปที่ 6 จากการทดสอบชั้นดินเหนียวอ่อน ที่วัดได้จากการทดสอบชั้นดินเหนียวอ่อน กรณีที่ 1 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ q_u = 400 kPa. แบบไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 28.50 มม. เทียบเคียงการทรุดตัวกรณีที่ 2 แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.ที่ระยะเวลา 40 วันมีค่าทรุดตัวเท่ากับ 26.97 มม.มีผลต่างเท่ากับ 1.53 มม.เห็นได้ว่า ค่าการทรุดตัวมีค่าใกล้เคียงกันและค่าแรงอัดแกนเดียว q_u เท่ากันโดยพิจารณาผลกระทบจากแผ่นพื้นดินซีเมนต์น้อยมาก



รูปที่ 7 การเทียบเคียงการทรุดตัวกรณีที่ 3 เทียบกับกรณีที่ 4

จากรูปที่ 7 จากการทดสอบชั้นดินเหนียวอ่อน ที่วัดได้จากการทดสอบชั้นดินเหนียวอ่อน กรณีที่ 3 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ q_u = 600 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 25.21 มม. เทียบเคียงการทรุดตัวกรณีที่ 4 q_u = 600 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 25 ซม.ที่ระยะเวลา 40 วันมีค่าทรุดตัวเท่ากับ 22.92 มม.มีผลต่างเท่ากับ 2.24 มม.เห็นได้ว่า พิจารณาจากค่าแรงอัดแกนเดียว(q_u)ที่เท่ากันมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนามากๆมีผลกระทบต่อการทรุดตัวอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 8 การเทียบเคียงการทรุดตัวกรณีที่ 2 เทียบกับกรณีที่ 3

จากรูปที่ 8 จากการทดสอบชั้นดินเหนียวอ่อน ที่วัดได้จากการทดสอบชั้นดินเหนียวอ่อน กรณีที่ 2 ที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ q_u = 400 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.มีค่าการทรุดตัวเท่ากับ 26.97 มม. เทียบเคียงการทรุดตัวกรณีที่ 3 q_u = 600 kPa แบบมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.ที่ระยะเวลา 40 วันมีค่าทรุดตัวเท่ากับ 25.21 มม.มีผลต่างเท่ากับ 1.76 มม.เห็นได้ว่า ค่าการทรุดตัวมีค่าใกล้เคียงกันโดยพิจารณาจากค่าแรงอัดแกนเดียว(q_u) ที่ต่างกันมีผลกระทบกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์น้อยมากที่ความหนาแผ่นพื้นดินซีเมนต์เท่ากัน สำหรับผลกระทบเนื่องจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้นดินซีเมนต์จะใช้ผลทดสอบของกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 3 ทำให้ค่าการทรุดตัวลดลงเล็กน้อย

สรุปการศึกษา

จากผลการปฏิบัติการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อนด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยโมเดลจำลองหนึ่งหน่วยแกนสมมาตรของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก เพื่อพิจารณาผลกระทบของการมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์บนเสาเข็ม ในกรณี α, $\beta(\beta')$, p และ s_u เดียวกัน พบว่าค่าแรงอัดแกนเดียว(q_u)เท่ากับ 400 kPa เท่ากันมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนา 10 ซม.เทียบกับแบบไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ และพิจารณาจากค่าแรงอัดแกนเดียว(q_u) 400 kPa กับ 600 kPa พิจารณาจากค่าแรงอัดแกนเดียว(q_u)ที่เท่ากันมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์หนามากๆ การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นพื้นดินซีเมนต์ สามารถลดค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุง มีผลกระทบต่อการทรุดตัวอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้น ทำให้ค่าการทรุดตัวลดลง

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการปฏิบัติการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวคายน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้น ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน มีข้อเสนอแนะว่าการศึกษาทั้งในรูปแบบของการใช้แบบจำลองการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ร่วมกับการศึกษาพฤติกรรมด้วยวิธีไฟไนล์อิเลเมนต์โดยการเทียบตัวอย่างดินที่มีความหนาต่างๆ ระดับ แล้วพิจารณาผลการทรุดตัวเทียบเคียงผลการทดสอบต่อไป

คำขอบคุณ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การพัฒนาการใช้คันดินเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบลอยเพื่อป้องกันน้ำท่วม ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผนดิน ประจำปี 2557 (วช.) จึงขอขอบคุณมา ณ.โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Bergado, D. T., Chai, J. C., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S. (1994). Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment. Balkema, Rotterdam, 222 p.

[2] Chai, J. C., Miura, N., Kirekawa, T. and Hino, T. (2009). Settlement prediction for soft ground improved by columns. Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers. UK. Vol. 162 : 109-119.

[3] Chai, J. C., and Pongsivasathit S. (2010). A method for calculating consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil. Frontiers of Architecture and Civil engineering in China. 4(2) : 241-251.

[4] Pongsivasathit, S., Chai, J. C. and Ding W. (2012). Consolidation settlement of floating-column-improved soft clayey deposit. Ground Improvement, Proceeding of Institute of Civil Engineers. UK. Vol. 166 : 44-58.

[5] Pongsivasathit, S., Jitsuwan, P., Chai. J.C., and Hino. T (2014) Methodology for calculating the consolidation settlement of floating soil cement column improved soft clayey deposit. Proc.9th International Symposium on Lowland Technology. Japan. : 285-293.

[6] Zhu, G. and Yin, J. H. (1999). Consolidation of double soil layers under depth-dependent ramp load. Geotechnique. 49(3) : 415-421.

[7] Shen, S. L., Chai, J. C. and Miura, N. (2001). Stress distribution in composite ground of column-slab system under road pavement. Proc.1st Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics. Elsevier Science Ltd. : 485-490.

การประชุมวิชาการระดับชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 2

และการประชุมวิชาการระดับชาติ เครือข่ายสหวิทยาการ

ภาคกลาง สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ครั้งที่ 3

60 หมู่ 3 ถ.สายเอเชีย (กรุงเทพฯ - นครสวรรค์) ต.หันตรา

อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

โทรศัพท์ 035 709 097 แฟกซ์ 035 709 097

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายสมพร มั่นใจ
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤศจิกายน 2515
ที่อยู่	49 หมู่ 5 ตำบล พิหารแดง อำเภอเมือง จังหวัด สุพรรณบุรี 72000 โทร: 081-4010575 E-mail: Somphorn_1@yahoo.co.th
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาโท หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2552
รับราชการ	เทศบาลตำบลบ้านแหลมพัฒนา อำเภอบางปลาม้า จังหวัดสุพรรณบุรี ตำแหน่งปัจจุบันผู้อำนายการกองช่าง พ.ศ. 2554 - ปัจจุบัน ใบกอบวิชาชีพสามัยวิศวกรโยธา **สย. 7539**