

ผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและ
กำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ผสมทราย

EFFECT OF SAND MIXTURE ON SHEAR STRENGTH AND
FLEXURAL STRENGTH OF SOIL CEMENT MIXED WITH SAND

อนิรุทธิ โปธิสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและ
กำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ผสมทราย

อนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

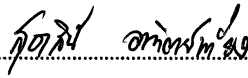
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและ
กำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ผสมทราย
Effect of Sand Mixture on Shear Strength and Flexural Strength of
Soil Cement Mixed with Sand
ชื่อ - นามสกุล นายอนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัชสถิตย์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2559

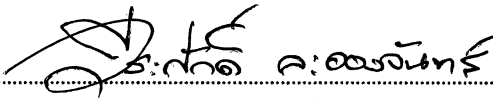
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



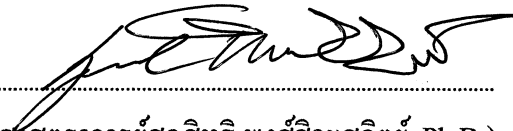
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินดารัตน์ มณีเจริญ, Ph.D.)



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



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



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัชสถิตย์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 11 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

| | |
|-------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงค้ำของดินซีเมนต์ผสมทราย |
| ชื่อ-นามสกุล | นายอนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัชสถิตย์, Ph.D. |
| ปีการศึกษา | 2559 |

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณทรายผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงค้ำของดินเหนียวผสมซีเมนต์ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ทำการทดสอบคือดินเหนียวกรุงเทพ ส่วนทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายกาญจนบุรีที่ผ่านการร่อนตะแกรงเบอร์ 4 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 10 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตลอดการทดลอง ขึ้นแรกนำดินเหนียวมาผสมกับทรายที่ 0, 20 และ 40% โดยน้ำหนักแห้งของดินเหนียว ส่วนผสมที่ได้จะถูกผสมกับซีเมนต์ที่ 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม ปริมาณความชื้นของส่วนผสมถูกปรับให้มีค่าสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลวของส่วนผสมประมาณ 5%

จากนั้นนำส่วนผสมที่ผสมซีเมนต์แล้วมาบรรจุในโมลด์ 2 ชนิด ได้แก่ 1) โมลด์ทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm และสูง 7 cm สำหรับการทดสอบแรงกดแกนเดียว และการทดสอบแรงอัดสามแกน และ 2) โมลด์รูปคาน ขนาด 7.5×7.5×35 cm³ สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงค้ำโดยวิธีคานสองจุดจากการแบ่งคานออกเป็นสามส่วนเท่า ๆ กัน หลังจากทำการบ่ม 28 วันจึงเริ่มทำการทดสอบ ได้ผลดังนี้ การเพิ่มปริมาณทรายในดินเหนียวทำให้ค่าแรงกดแกนเดียว ค่าองศาความเสียดทานภายใน และค่าโมดูลัสการแตกร้าวสูงขึ้น สุดท้ายความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลการทดสอบของทั้ง 3 ชนิด ได้ถูกนำเสนอ

คำสำคัญ: กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงค้ำ การทดสอบแรงเฉือนแบบยวบอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ โมดูลัสการแตกร้าว

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis Title | Effect of Sand Mixture on Shear Strength and Flexural Strength of Soil Cement Mixed with Sand |
| Name - Surname | Mr. Aniruth Phosuwan |
| Program | Civil Engineering |
| Thesis Advisor | Assistant Professor Supasit Pongsivasathit, Ph.D. |
| Academic Year | 2016 |

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the shear and flexural strengths of clay-soil cement mixed with different portions of sand. The testing was conducted in the laboratory.

The soil sample was soft Bangkok clay deposit and the sand was Kanchanaburi sand deposit. The particle size of sand was the one passing through sieve No. 4 but retained on sieve No. 10. The cement used was a Portland Cement Type 1. Firstly, the clay sample was mixed with sand of 0, 20 and 40% by dry weight of clay. Then the aggregate of clay and sand was mixed with cement of 10, 15 and 20% by dry weight. The water content of the aggregate was adjusted to approximately 5% above its liquid limit.

After that, the second aggregate was put into 2 molds: 1) a cylinder mold with a diameter of 3.5 cm X 7 cm for the unconfined compression test and the CU test, and 2) a beam mold with the size of 7.5×7.5×35 cm³ for the third point loading test. After 28 curing days, the prepared specimens were tested. It was found that the more amount of sand, the higher unconfined compressive strength (q_u), angle of internal friction and modulus of rupture. Finally, the correlations of the 3 testing results were presented.

Keywords: flexural strength, shear strength, CU test, modulus of rupture

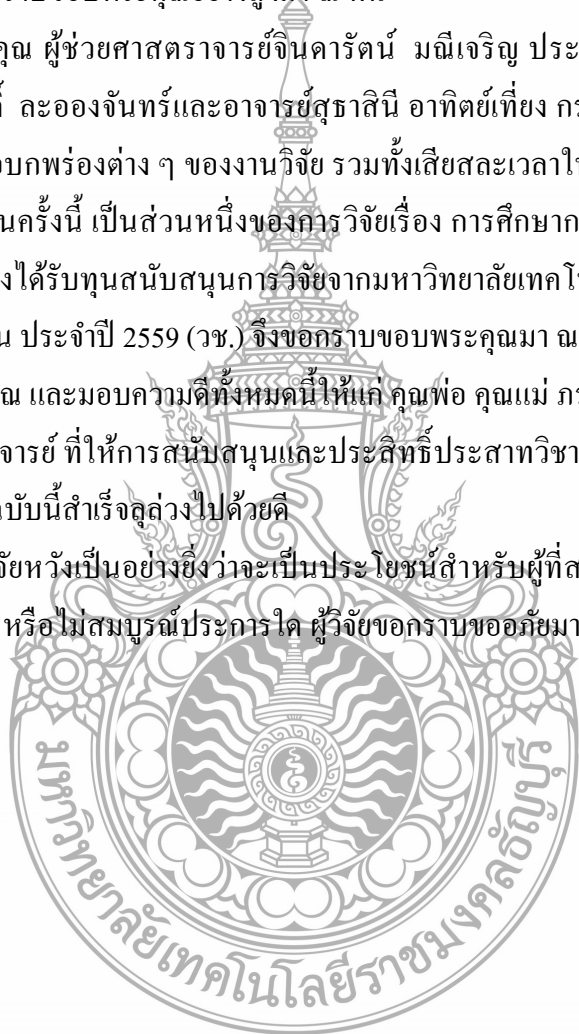
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภสิทธิ พงศ์วิเศษสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินดารัตน์ มณีเจริญ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีระศักดิ์ ละอองจันทร์และอาจารย์สุธาสิณี อาทิตย์เที่ยง กรรมการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นส่วนหนึ่งของกรวิจัยเรื่อง การศึกษาการพัฒนากำลังของวัสดุชั้นพื้นที่ทางผสมซีเมนต์ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 (วช.) จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยาและลูก พี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเป็นกำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย



อนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | (3) |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (5) |
| สารบัญ..... | (6) |
| สารบัญตาราง..... | (9) |
| สารบัญรูป..... | (10) |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 15 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 15 |
| 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย..... | 16 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 16 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 17 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 18 |
| 2.1 บทนำ..... | 18 |
| 2.2 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์..... | 18 |
| 2.3 ประเภทของดินซีเมนต์..... | 19 |
| 2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์..... | 20 |
| 2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์..... | 23 |
| 2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์..... | 24 |
| 2.6.1 ปริมาณและประเภทของซีเมนต์..... | 24 |
| 2.6.2 คุณสมบัติของดินซีเมนต์..... | 26 |
| 2.6.3 ปริมาณดินเหนียวและแร่ประกอบดินเหนียวที่มีอยู่ในดินซีเมนต์..... | 27 |
| 2.6.4 ปริมาณความชื้นขณะบดอัด..... | 32 |
| 2.6.5 การบ่มดินซีเมนต์..... | 33 |
| 2.6.6 ระยะเวลาในการผสม..... | 35 |
| 2.6.7 สารผสมเพิ่ม..... | 36 |
| 2.7 กำลังของดินซีเมนต์..... | 38 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.8 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์..... | 40 |
| 2.9 โครงสร้างของดิน | 42 |
| 2.9.1 โครงสร้างของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว..... | 42 |
| 2.9.2 โครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว | 43 |
| 2.10 กำลังรับแรงเฉือนของดิน..... | 44 |
| 2.11 กำลังรับแรงค้ำของดินซีเมนต์..... | 54 |
| 2.12 ปริมาณทรายในส่วนผสม | 59 |
| 2.13 กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์ | 59 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 61 |
| 3.1 การเตรียมวัสดุ..... | 61 |
| 3.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ..... | 62 |
| 3.3 การทดสอบ..... | 64 |
| 3.4 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล | 68 |
| บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล..... | 70 |
| 4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อน..... | 70 |
| 4.2 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว..... | 70 |
| 4.2.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า Unconfined Compressive Strength .. | 70 |
| 4.2.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า Modulus Of Elasticity (E_{50})..... | 71 |
| 4.3 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน..... | 72 |
| 4.3.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะ..... | 72 |
| 4.3.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่ามุมเสียดทานภายใน | 73 |
| 4.4 ผลการทดสอบแรงค้ำ..... | 74 |
| 4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ | 75 |
| 4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u , E_{50} และปริมาณทราย | 75 |
| 4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า c' , q_u และปริมาณทราย..... | 77 |
| 4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u | 78 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u | 78 |
| บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ | 80 |
| 5.1 สรุปผลการศึกษา | 80 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 80 |
| บรรณานุกรม | 82 |
| ภาคผนวก | 89 |
| ภาคผนวก ก ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว | 90 |
| ภาคผนวก ข ผลการทดสอบแรงอัดตามแกน | 96 |
| ภาคผนวก ค ผลการทดสอบแรงคด | 102 |
| ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ | 112 |
| ประวัติผู้เขียน | 127 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO | 30 |
| ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่างๆ | 31 |
| ตารางที่ 2.3 แนวทางเลือกวัสดุผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิด | 38 |
| ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ, A_f | 50 |
| ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Modulus of Rupture ของดินลูกรังผสมซีเมนต์และดินลูกรังผสมซีเมนต์ กับสารผสมเพิ่ม | 58 |
| ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว..... | 62 |
| ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของปริมาณทรายและซีเมนต์ในกรณีต่างๆ..... | 63 |
| ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างของการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม..... | 64 |



สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ | 24 |
| รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา | 27 |
| รูปที่ 2.3 ค่าพิคต์อัตราเตอร์เบอร์กของดินไอ โอวา หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง | 28 |
| รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8%.... | 29 |
| รูปที่ 2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12%.. | 29 |
| รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16%.. | 30 |
| รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างผสมขึ้น และการบดอัดที่มีต่อกำลังอัดของ ดินซีเมนต์ | 35 |
| รูปที่ 2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น..... | 36 |
| รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของ ดินซีเมนต์ | 39 |
| รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์ | 39 |
| รูปที่ 2.11 การเพิ่มของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ | 41 |
| รูปที่ 2.12 โครงสร้างแบบ Single-Grained: (ก) แบบหลวม, (ข) แบบแน่น | 42 |
| รูปที่ 2.13 โครงสร้างแบบ Honeycombed | 43 |
| รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (a) Dispersion (b) Non-salt Flocculent และ (c) Salt Flocculent..... | 44 |
| รูปที่ 2.15 เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test)..... | 45 |
| รูปที่ 2.16 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบต่างๆ | 46 |
| รูปที่ 2.17 ลักษณะรูปร่างต่างๆ ของอนุภาคของเม็ดดิน | 47 |
| รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของกำลังรับแรงเฉือน | 47 |
| รูปที่ 2.19 ขอบเขตการพิบัติของมอร์-คูลอมบ์ ในการทดสอบแรงอัดสามแกน 3 ตัวอย่างที่ Confining Pressure ต่างกัน..... | 49 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.20 เส้นกำลัง (Strength Envelope) จากทางเดินหน่วยแรง และจากวงกลมมอร์..... | 52 |
| รูปที่ 2.21 ทางเดินหน่วยแรง (Stress Part, p-q) ของดินประเภท NCC และดินประเภท OCC..... | 52 |
| รูปที่ 2.22 แสดงทางเดินความเค้นประสิทธิผลแบบต่างๆ (Effective Stress paths) ตามชนิดของ ดินซึ่งเปรียบเทียบกันโดยใช้ทางเดินความเค้นรวม (Total Stress paths) ของการทดสอบ Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test | 54 |
| รูปที่ 2.23 เครื่องมือการทดสอบหาค่ากำลังความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Strength) โดยวิธี Third-Point Loading | 55 |
| รูปที่ 2.24 แสดงการทดสอบกำลังดัดของ Beam โดยวิธี Third-Point Loading..... | 56 |
| รูปที่ 3.1 เก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบถูกรบกวน..... | 61 |
| รูปที่ 3.2 การจัดทำตัวอย่างการทดสอบ..... | 63 |
| รูปที่ 3.3 ตัวอย่างที่พร้อมทำการทดสอบการรับแรงอัดทิศทางเดียว..... | 67 |
| รูปที่ 3.4 ตัวอย่างที่พร้อมทำการทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Test..... | 67 |
| รูปที่ 3.5 ตัวอย่างที่พร้อมทำการทดสอบ Flexural Test..... | 68 |
| รูปที่ 3.6 แผนภูมิขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล..... | 69 |
| รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณทราย ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... | 71 |
| รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) กับปริมาณทรายที่ปริมาณ ซีเมนต์ต่างๆ..... | 72 |
| รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effective Cohesion Intercept (c') กับปริมาณทราย ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... | 73 |
| รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effective Angle of Shearing Resistance (ϕ') กับปริมาณทราย ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... | 74 |
| รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Rupture (M_R) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วน ผสมต่างๆ..... | 75 |
| รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ a | 76 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ q_u | 77 |
| รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ $(c'/c'_0)^a$ | 78 |
| รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u | 79 |
| รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u | 79 |
| รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%..... | 91 |
| รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% กับปริมาณทราย 20%..... | 91 |
| รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% กับปริมาณทราย 40%..... | 92 |
| รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%..... | 92 |
| รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% กับปริมาณทราย 20%..... | 93 |
| รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% กับปริมาณทราย 40%..... | 93 |
| รูปที่ ก.7 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20%..... | 94 |
| รูปที่ ก.8 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% กับปริมาณทราย 20%..... | 94 |
| รูปที่ ก.9 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% กับปริมาณทราย 40%..... | 95 |
| รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%..... | 97 |
| รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 20%..... | 97 |
| รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 40%..... | 98 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | |
|---|-----|
| รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%..... | 98 |
| รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 20%..... | 99 |
| รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 40%..... | 99 |
| รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20%..... | 100 |
| รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 20%..... | 100 |
| รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 40%..... | 101 |
| รูปที่ ค.1 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%..... | 103 |
| รูปที่ ค.2 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 20%..... | 104 |
| รูปที่ ค.3 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 40%..... | 105 |
| รูปที่ ค.4 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%..... | 106 |
| รูปที่ ค.5 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 20%..... | 107 |
| รูปที่ ค.6 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 40%..... | 108 |
| รูปที่ ค.7 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20%..... | 109 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | |
|---|-----|
| รูปที่ ค.8 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างคินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 20%..... | 110 |
| รูปที่ ค.9 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างคินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 40%..... | 111 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินเหนียว โดยการใช้ปูนซีเมนต์เข้ามาผสมลึกลับดินเหนียวให้มีรูปร่างเป็นลักษณะของเสาเข็มในชั้นดินหรือที่เรียกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil – Cement Column) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธา [1,2] ซึ่งปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำและดินเหนียว ทำให้คุณสมบัติด้านกำลังของชั้นดินเหนียวดีขึ้น ปัจจุบันเทคนิคดังกล่าว ได้มีการพัฒนาต่อยอดโดยมุ่งเน้นในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านมลภาวะทางเสียง เนื่องจากการก่อสร้าง และลดผลกระทบต่อชั้นน้ำบาดาลอันเนื่องมาจากความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์เข้าไปรบกวนชั้นน้ำบาดาลด้วยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นร่วมกับดินซีเมนต์ที่ผสมในลักษณะเป็นแผ่นพื้น (Slab) ที่วางอยู่บนเสาเข็มกลุ่ม เพื่อลดหน่วยแรงที่กระทบต่อหัวเสาเข็ม [3,4] ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณหัวเสาเข็ม จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าถ้าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นมีค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงแรงสูง (Strength and Stiffness) ทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงมีค่าน้อยลง [5]

ดังนั้นแนวคิดในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ให้ดีขึ้น โดยใช้ทรายผสมเพิ่ม ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและราคาถูก เพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงแรงของดินซีเมนต์ จึงเป็นแนวความคิดที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่มีทรายผสมยังคงน้อยอยู่ และในทางปฏิบัติยังคงต้องศึกษาค้นคว้าเพื่อหาเทคนิคการผสมทรายในระหว่างการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ผสมทราย เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และกำลังรับแรงดัดของดินเหนียวปนทรายผสมซีเมนต์ ในอัตราส่วนของซีเมนต์และทรายต่างๆ เพื่อดูผลกระทบของทรายที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน และเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ขั้นสูงในงานวิศวกรรมปฐพีต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายและซีเมนต์ ที่มีผลต่อค่า แรงกดอัดทิศทางเดียวของดินซีเมนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณ ทรายและซีเมนต์ ที่มีผลต่อค่า พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินซีเมนต์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณ ทรายและซีเมนต์ ที่มีผลต่อ ค่าโมดูลัสการตัดของดินซีเมนต์

1.2.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ กับค่าแรงกดอัดทิศทางเดียวของดินซีเมนต์ ที่อัตราส่วนของซีเมนต์และทรายต่างๆ

1.2.4 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าโมดูลัสการตัด กับ ค่าแรงกดอัดทิศทางเดียวของดินซีเมนต์ ที่อัตราส่วนของซีเมนต์และทรายต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินเหนียวอ่อน บริเวณไบเทคบางนา แขวงบางนา เขตบางนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ระดับความลึก 4-5 เมตร เก็บตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ส่วนทรายเป็นตัวอย่างทรายแม่น้ำจากอำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี โดยวิธีร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 10

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว และสมบัติทางวิศวกรรมเมื่อมีการผสมทราย และซีเมนต์ลงไปดิน โดยทำการศึกษาที่ปริมาณทรายเท่ากับ 0, 20, 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งของดินเหนียว ในปริมาณความชื้นมากกว่าค่าพิกคความเหลว (Liquid limit) ของส่วนผสมประมาณ 5% และปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 10, 15, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม อายุการบ่ม 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ

1.3.3 ทำการทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ ทดสอบหาค่าแรงกดแกนเดียวและทดสอบแรงอัดสามแกนแบบชุกอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ (CU test) และทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดด้วยวิธี Third point loading test โดยทดสอบอย่างละ 3 ชุดตัวอย่างแล้วนำค่าของ 3 ชุดตัวอย่างมาเฉลี่ย

1.3.4 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงผลกระทบของปริมาณทรายและซีเมนต์ ต่อ พฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์

1.4.2 ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัด เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์

1.4.3 เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ให้ดีขึ้น ด้วยการผสมทราย ซึ่งมีราคาถูกโดยหวังว่าจะมีการพัฒนาต่อยอดให้สามารถประยุกต์วิธีนี้ในการปฏิบัติภาคสนามต่อไป

1.4.4 สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยระดับสูงต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของดินให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น สามารถปรับปรุงได้หลายวิธี เช่น การลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยการบดอัด การลดความสามารถในการซึมผ่านน้ำของดิน การทำให้อนุภาคดินเป็นก้อนใหญ่ (Flocculation) หรือการทำให้ดินมีขนาดคละที่ดีขึ้น และการนำสารเคมีมาผสมลงในดิน ซึ่งแต่ละวิธีก็มีประโยชน์ในการนำมาใช้งานแตกต่างกัน การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เข้ามาผสมเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและโครงสร้างของดิน ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย

2.2 ประวัติความเป็นมาของดินซีเมนต์

Davidson [6] ได้บันทึกเกี่ยวกับวิวัฒนาการของดินซีเมนต์ ว่าได้เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1915 เมื่อการก่อสร้างถนน Oak ในเมือง Sarasota รัฐ Florida ถูกสร้างโดยการชูดเอาดิน Shell จากอ่าว ขึ้นมาผสมกับทรายและซีเมนต์แล้วทำการบดอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน แทนการทำถนนด้วยคอนกรีต แต่การก่อสร้างไม่เป็นไปตามแผนที่กำหนดไว้ เนื่องจากประสบปัญหาเครื่องผสมคอนกรีตเสียราวๆปี ค.ศ. 1920 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับถนนในประเทศสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วยรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้เริ่มทดลองก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ แต่ผลการทดลองไม่สามารถคาดการณ์ผลลัพธ์ได้ เนื่องจากความรู้ความเข้าใจเรื่องคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในขณะนั้นยังมีน้อยมาก

Mills [7,8] 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 [6], Terrel และคณะ [9] ได้บันทึกตรงกันว่าในปี ค.ศ. 1935 South Carolina State Highway Department, Bureau of Public Roads และ Portland Cement Association ได้ร่วมกันก่อสร้างถนนซีเมนต์ยาว 1.5 ไมล์ ใกล้ๆ กับเมือง Johnsonville และเป็นที่รู้จักว่าเป็นโครงการแรกเกี่ยวกับวิศวกรรมถนนดินซีเมนต์ เนื่องจากความสำเร็จของโครงการนี้ ทำให้มีการทดลองขึ้นในอีกหลายรัฐ โดย Portland Cement Association

Davidson [6] รายงานว่า ในปี ค.ศ. 1941-1944 ระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง ดินซีเมนต์ได้เริ่มนำมาใช้ในการสร้างสนามบินมากถึง 22 ด้านตารางหลา แต่ในขณะเดียวกันการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นอีก นอกจากดินซีเมนต์จะถูกใช้ทำถนนแล้วยังมีการใช้ดินผสมซีเมนต์เป็นวัสดุรองพื้นทางของถนนคอนกรีต ที่จอดรถ คลังเก็บสินค้ารวมทั้งใช้เป็นวัสดุรองพื้นอ่างเก็บน้ำ และอุโมงค์อีกด้วย

The Siam Cement Company Ltd [10] ได้ทดลองนำดินผสมซีเมนต์มาใช้เป็นพื้นทางของถนนสายวารินชำราบ-เดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี เป็นสายแรกในประเทศไทยซึ่งมีความยาว 5 กิโลเมตร โดยดินลูกรังที่กำหนดค่า CRB ของดินซีเมนต์ไว้ไม่น้อยกว่า 120 สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรต่ำ และกำหนดค่ากำลังอัดไม่น้อยกว่า 852 กิโลปาสกาล สำหรับถนนประเภทที่ต่ำกว่ามาตรฐาน

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และสมบัติกระแสน จรัสกร [11] ได้ทำการวิจัยโดยนำดินลูกรังและดินทรายปนดินตะกอนมาผสมซีเมนต์ พบว่าพลังงานในการบดอัดมีผลอย่างมากต่อกำลังของดินซีเมนต์ โดยมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm model) โดยที่ค่าแรงอัดแกนเดียว จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงพลังงานบดอัดต่ำ และจะช้าลงเมื่อพลังงานบดอัดสูง

2.3 ประเภทของดินซีเมนต์

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization [12] ได้ให้คำจำกัดความของ Cement-Treated soil ว่าเป็นการนำเอาดินและซีเมนต์มาผสมกับน้ำในปริมาณที่ต้องการแล้วทำการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด ป้องกันความชื้นไม่ให้สูญเสียบนระหว่างการบ่ม จากลักษณะการใช้งานและปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

2.3.1 Soil-Cement เป็นดินที่ผสมซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดตามมาตรฐานของ Portland Cement Association (PCA), ASSHTO หรือ ASTM ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้มีกำลังอัดหรือแรงแบกทานตามที่กำหนด สำหรับดินที่มีขนาดคละดีจะใช้ปูนซีเมนต์ประมาณ 5-7 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง และจะสูงกว่านี้หากดินมีขนาดคละไม่ดีหรือมีค่าดัชนีพลาสติกสูง

(Plasticity Index) กรณีที่ค่าดัชนีพลาสติกสูงควรทำการผสมปูนขาวเพื่อลดค่าดัชนีพลาสติกลง

2.3.2 Cement Modified Silty Clay Soil มักจะใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงของผิวหน้าดินเดิมที่เป็นดินเหนียว ที่มีลักษณะเปียกแฉะและมีความอ่อนตัวมากให้มีความแข็งแรงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการบวมตัวและหดตัวของดิน โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง

2.3.3 Cement Modified Granular Soil จะใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเป็นพลาสติก และการดูดซึมน้ำของดิน มักจะใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางและชั้นพื้นทางของถนนที่มีผิวทางทั้งแบบยึดหยุ่นและมีผิวทางเป็นคอนกรีต โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง

2.3.4 Plastic Soil-Cement มักใช้ในงานลาดปูนบนพื้นที่ลาดเอียง เช่น ปูด้านข้างถนน เพื่อการระบายน้ำ ดาดท้องคลองชลประทานและกันอ่างเก็บน้ำ ดังนั้น Plastic Soil-Cement จะต้องมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.5 Cement Treated Soil Slurry and Grouts เป็นซีเมนต์ที่ผสมกับวัสดุประเภททรายและน้ำ โดยมีปริมาณน้ำสูงมาก อาจมีส่วนผสมเพิ่มอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มีค่า Workability สูง โดยปกติวัสดุประเภทนี้จะใช้เป็น Mud Jacking Material ในงานซ่อมบำรุงถนนที่เกิดปัญหาการทรุดตัวของคันทางหรือถูกน้ำกัดเซาะ และใช้เป็น Grouting Material สำหรับยาหรืออุดรอยรั่วที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ส่งน้ำ

2.4 กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินซีเมนต์

Lambe, Michaels และ Moh [13] อธิบายว่าซีเมนต์เป็นวัสดุประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate (C_3S), Dicalcium Silicate (C_2S), Tricalcium Aluminate (C_3A), Tetracalcium Alumino Ferrite (C_4AF) เมื่อผสมกับน้ำและดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Released Hydrate Lime ที่แยกตัวออกมาขณะเกิดปฏิกิริยา สารประกอบ CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อน้ำระเหยออกไป นอกจากนั้น Released Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นในขบวนการดังกล่าวยังทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้ Colloid gel หรือ Cement Gel ที่ประกอบไปด้วย CSH และ CAH เกิดการรวมตัวแล้วยึดเกาะกันเป็นมวลที่มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอายุการบ่ม

ในดินเม็ดหยาบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การยึดเกาะกันของเม็ดจะคล้ายกับในคอนกรีต แต่ว่า Cement Paste จะไม่อุดเต็มช่องว่างอนุภาคของเม็ดดิน แรงเชื่อมยึดติดจะเกิดแรงยึดเหนี่ยว

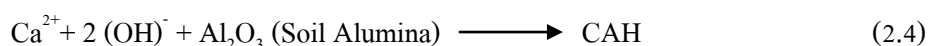
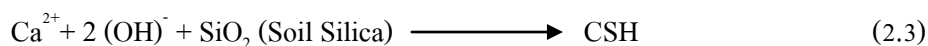
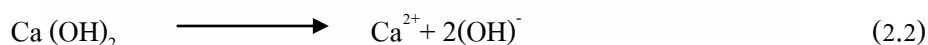
ทางด้าน Mechanical Interlock และ Chemical Cementation มวลดินที่มีขนาดเดียวกันตลอด (Uniform Grade) จะมีพื้นที่สัมผัสน้อย การใช้ซีเมนต์จะต้องมีปริมาณมากขึ้นกว่าดินที่มีขนาดแตกต่างกันดี (Well Grade)

ในดินเม็ดละเอียด แรงยึดเกาะกันจะประกอบไปด้วยแรงทางด้าน Mechanical Interlock และ Chemical Cementation การยึดเกาะทางด้าน Chemical Cementation นั้นเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์กับ Silica และ Alumina จะเกิดขึ้นตามผิวของเม็ดดิน โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง การเกิดปฏิกิริยาทำให้สารประกอบ CSH, CAH เพิ่มขึ้น และทำให้เม็ดดินเกิดการเชื่อมกัน

Davidson [6] กล่าวว่า หลังการผสมซีเมนต์กับดินเหนียวขึ้น จะทำให้ค่าพลาสติก (Plasticity) ลดลง เหตุผลน่าจะมาจากการแยกตัวของ Calcium Ions ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไกที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจาก Cation Exchange ก็น่าจะมาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cation ในดินเหนียว กระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณรอบๆของอนุภาคดินเหนียว ส่งผลให้อนุภาคของดินเหนียวรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนี้ทำให้ดินเหนียวมีคุณสมบัติคล้ายกับดินตะกอนคือมีค่าพลาสติก (Plasticity) ต่ำ หรือมีค่าความยึดเหนี่ยวต่ำ

Herzog และ Mitchell [14] กล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันว่าเป็นการเกิดสารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในช่วงแรก ส่วนปฏิกิริยาช่วงที่สองซึ่งต้องใช้เวลาานกว่าเป็นปฏิกิริยาระหว่าง Calcium Ion ที่เกิดจาก Released Hydrated Lime ของปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica และ Alumina ที่มีอยู่ในเม็ดดิน มีผลทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่นานขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวรู้จักกันว่าปฏิกิริยาพอสโซลานิก

Moh [15] ได้ศึกษาเรื่องปฏิกิริยาของแร่ประกอบของดินเหนียว (Clay Minerals) กับซีเมนต์และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม พบว่าการเกิดปฏิกิริยาของดินซีเมนต์สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมี ได้ดังต่อไปนี้



ดังนั้น จะเห็นได้ว่าผลของปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์จะก่อให้เกิดสาร CSH และ CAH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด ดังแสดงในสมการ 2.1, 2.3 และ 2.4

สมการที่ 2.1 CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration โดยตรง ดังนั้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Hydration Reaction หรือ Primary Reaction

สมการที่ 2.3 และ 2.4 CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง Ca อีออน กับ ซิลิกาและอลูมินาในดิน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Pozzolanic Reaction หรือ Secondary Reaction

Hausmann [16] กล่าวว่า Hydration Reaction จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำ แต่ Pozzolanic Reaction จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆและต่อเนื่องไปหลายเดือน เหมือนกับปฏิกิริยาระหว่างดินกับปูนขาว จะเห็นได้ว่า Hydration Reaction ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ทำให้การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์จึงสามารถใช้ได้กับดินเกือบทุกประเภท

Pendola, Kennady และ Hutson [17] ได้สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์นั้น เป็นกระบวนการร่วมกันของปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำและดินซึ่งประกอบด้วย กลไก 4 ชนิด คือ

Hydration of Cement คือกระบวนการที่สำคัญโดยขณะที่ซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน ก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องมากบ้างน้อยบ้างตามการกระจายขนาดของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน โครงข่ายที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ถูกปรับปรุงแล้ว ยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดินทำให้ลดการซึมผ่านและการบวมตัวของมวลดิน รวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ อีกด้วย

Cation Exchange การลดลงของค่าพลาสติกของดินหลังจากการผสมซีเมนต์กับดินประเภท มีความเชื่อมแน่นที่มีความชื้น เชื่อว่าเกิดจากการเปลี่ยน Cation หรือการรวมตัวกันของ Cation บนผิวของเม็ดดิน ปฏิกิริยาที่ว่าจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่วันหลังการผสมซีเมนต์

Carbonation คือขบวนการเชื่อมแน่นจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอน ไดออกไซด์ในอากาศกับ Lime ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด Calcium Carbonate ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มมากขึ้น

Pozzolanic Reaction คือขบวนการระหว่าง Free Lime ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ Silica หรือ Alumina ที่มีอยู่ในดิน ทำให้เกิดสารเชื่อมแน่นเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยระยะเวลาอันนานและมีผลทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้น

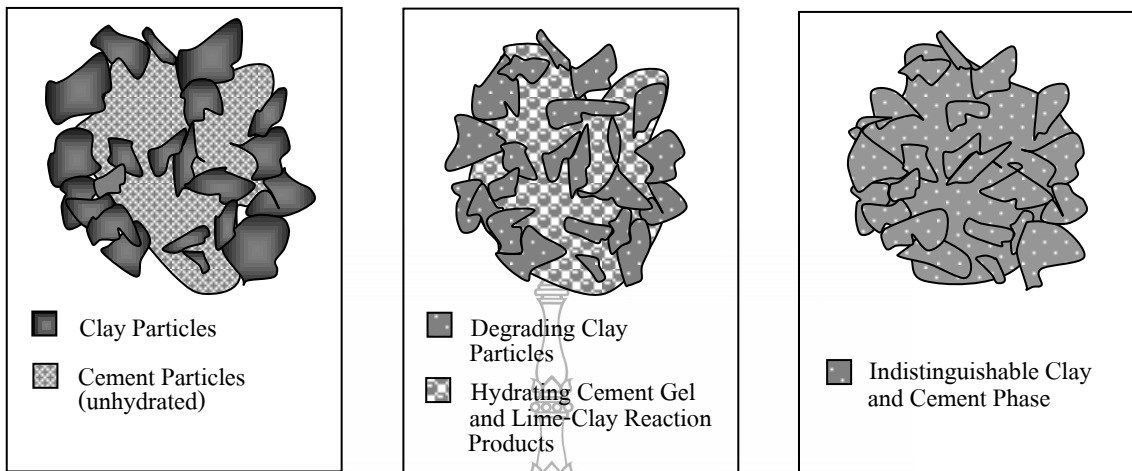
Terrel และคณะ [9] กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ว่า การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดหยาบ ซีเมนต์เฟส จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคเม็ดดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่างซีเมนต์เจล และผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียด แร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูง จะทำปฏิกิริยากับ Free Lime หรือ Hydrate Lime ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิด CSH และ CAH

2.5 โครงสร้างของดินซีเมนต์

Czernin [18] กล่าวว่าหลังจากที่ผสมซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันทำให้เกิดสารประกอบ CSH ในรูปของเจลขึ้นในส่วนผสมของซีเมนต์และน้ำ ดังนั้นจึงสามารถที่จะเข้าใจได้ว่าภายใต้การบดอัดอนุภาคของปูนซีเมนต์มิได้ผสมกับดินเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันด้วย

Mitchell และ El Jack [19] ได้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.1 โดยแบ่งเป็น 3 ระยะดังนี้

1. ภายใต้การบดอัด ช่วงนี้เป็นช่วงที่อนุภาคของปูนซีเมนต์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน แต่อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเข้าผสมกับอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1 (a)
2. ภายใต้การบ่มในระยะเวลาสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมาทำปฏิกิริยา Soil Silica และ Soil Alumina ที่มีอยู่ในดินทำให้เกิดการแยกตัวของสารทั้งสอง จากนั้นซีเมนต์เจลและสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาจะแทรกซึมไปตามอนุภาคของดิน ดังรูปที่ 2.1 (b)
3. ภายใต้การบ่มในระยะเวลายาว จะเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์อันมีผลทำให้ซีเมนต์เจลและขอบเขตของการแทรกซึมกระจายไปทั่วก้อนดินซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ดังรูปที่ 2.1 (c)



(a) หลังบดอัดเสร็จ

(b) หลังระยะบ่มสั้นๆ

(c) หลังระยะบ่มนานๆ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดินซีเมนต์ (Mitchell และ El Jack [19])

2.6 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังของดินซีเมนต์

2.6.1 ปริมาณและประเภทของซีเมนต์

Felt [20] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์โดยนำดินสามชนิดคือ Loamy Sand, Medium Clay และ Silty Clay Loam มาทดสอบผสมซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 6-30 โดยปริมาตรที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วัน จนถึง 1 ปี และผ่านสภาพภูมิอากาศ 2 แบบ คือ Wet-Dry และ Freeze-Thaw ตั้งแต่ 12 รอบ ถึง 96 รอบ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่มีขนาดเม็ดเล็ก ดินที่มีปริมาณดินเหนียวผสมอยู่สูงจะมีกำลังอัดน้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำกว่า และค่าความคงทนของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้

นอกจากนั้น Felt [20] ได้ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดินสองชนิดคือ 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 เท่าที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่สำหรับดิน Silty Clay Loam เมื่อผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะทำให้กำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินซีเมนต์ถูกศึกษาอย่างจริงจัง โดย Terashi, Tanaka และ Okumura [21] และต่อมาก็มีการศึกษาด้านนี้มากขึ้นเรื่อยๆ เช่น Kawasaki และคณะ [22], Nontananandh และ Yupakorn [23] ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ คือ ปริมาณน้ำ และปริมาณซีเมนต์

Ruenkrairergsa [24,25] พบว่าปริมาณซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ อัตราการเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน พันธะเชื่อมประสาน ในดินเม็ดหยาบจะแข็งแรงกว่าในดินเม็ดละเอียด ดินที่มีดินเหนียวมาก จะให้กำลังอัดต่ำ ดังนั้นปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมจึงควรหาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

Lade และ Overton [26] ได้ศึกษาผลของพันธะเชื่อมประสาน (Cementation) ในดินเม็ดหยาบ ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นที่เท่ากัน ปริมาณน้ำที่ผสมเท่ากัน และแรงดันรอบข้างต่ำ แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซีเมนต์ที่ผสม พบว่าเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังดึง และค่ามุมของแรงเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) จะเพิ่มขึ้น

Clare และ Pollard [27] ศึกษาอิทธิพลของประเภทซีเมนต์โดยนำดิน 3 ชนิด ในประเทศอังกฤษมาผสมกับซีเมนต์ พบว่ามีอายุบ่ม 24 ชั่วโมง ดินซีเมนต์จะมีกำลังอัดสูงมาก เมื่อผสมดินกับซีเมนต์ประเภท High-Alumina ขณะที่ซีเมนต์ประเภทอื่นต้องมีอายุการบ่ม 5 วัน และถ้าใช้ซีเมนต์ประเภท British Rapid Hardening ซึ่งเทียบได้กับซีเมนต์ประเภทที่ 3 พบว่าที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่ากำลังคราก (Yield Strength) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 มาก

Massachusetts Institute of Technology [28] ได้นำดินตะกอนปนทราย และดินเหนียว (Clayey Sandy Silt) ในรัฐไอโอวา มาผสมกับซีเมนต์และพบว่าดินที่ผสมกับซีเมนต์ประเภทที่สามจะมีกำลังอัดสูงกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง 1.5 เท่า และ 1.3 เท่า ที่ระยะบ่ม 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ

Davidson และ Bruns [29] ได้รายงานผลเกี่ยวกับกำลังอัด โดยวิธีทดสอบ Freeze-Thaw ของดินทราย ดินตะกอน และดินเหนียว บริเวณรัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา และสรุปว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทสาม ในการก่อสร้างถนนจะประหยัดกว่าใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เพราะว่าการใช้ซีเมนต์ประเภทที่หนึ่งต้องใช้เวลาในการบ่มอย่างน้อย 7 วัน แต่การใช้ซีเมนต์ประเภทที่สามจะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่า ทำให้ได้เปรียบเรื่องระยะเวลาในการก่อสร้าง

Horpibulsuk และ Miura [30], Miura และคณะ [31] แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์สามารถรวมไว้ในตัวแปรตัวเดียวได้ ตัวแปรนี้เรียกว่า Clay-Water/Cement Ratio

(W_c/C) ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก ผึ้งแห้งและ Horpibulsuk และ Miura [30] ยังได้สร้างสมการที่สามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณความชื้น ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยอาศัยผลการทดสอบเพียงค่าเดียว

2.6.2 คุณสมบัติของดินซีเมนต์

Davidson [6] พบว่าส่วนประกอบทางเคมีของดินจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับ Cation ที่มีอยู่ในเม็ดดิน โดยดินที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่จะทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนไป เช่นดินที่มี Sulphate ผสมอยู่จะก่อให้เกิดการแข็งตัวช้าและเกิดการบวมตัว

Ruenkairergsa [24,25] พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของดินจะมีอิทธิพลมากต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินพวกดินเหนียวและดินตะกอน ส่วนดินที่มีขนาดใหญ่ เช่น ทรายจะมีผลไม่มากนักในดินเหนียวเมื่อผสมด้วยซีเมนต์จะมีการดูดซึม Cation กัน ดินที่มี Calcium Ion จะปรับปรุงได้ยากมาก สำหรับดินที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ก็จะมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์นั้นว่ามีมากน้อยเพียงใด เช่น พวกเศษไม้ ฟาง หรือ Cellulose นี้จะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วน Glucose, Tartaric Acid มีอิทธิพลมากต่อการเกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ทำให้เกิดการแข็งตัวช้า ดินที่มี Sulphate เมื่อผสมกับซีเมนต์ในช่วงปฏิกิริยา Hydration เกิดขึ้นจะไม่มีผลแต่อย่างไร จะมีผลเมื่อหลังจากปฏิกิริยา Hydration เกิดแล้ว ดังนั้นการปรับปรุงดินที่มีสาร Sulphate อยู่จึงต้องใช้ซีเมนต์ชนิดที่มีสารต่อต้าน Sulphate ผสมอยู่มาปรับปรุงจึงจะได้ผล

Terrel และคณะ [9] ได้อธิบายเรื่องดินที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติ กล่าวคือดินที่มีสถานะความเป็นกรด, ด่าง และกลาง ยังคงมีการตอบสนองที่ดีต่อการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติ การมีอยู่ของ Organic Matter ที่มีอยู่ในดินจำพวกที่ย่อยสลายจากพืชอาจจะไม่มียผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์ แต่ถ้าเป็นประเภท Organic Compounds เช่น Nucleic Acid และ Dextrose Acid จะทำให้หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันและกำลังที่ได้จะลดลง กล่าวคือ Organic จะดูดซับ Calcium Ions ไว้ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นผลทำให้ค่า pH ของดินลดลง และยังไปยับยั้งขบวนการแข็งตัวของดินผสมซีเมนต์

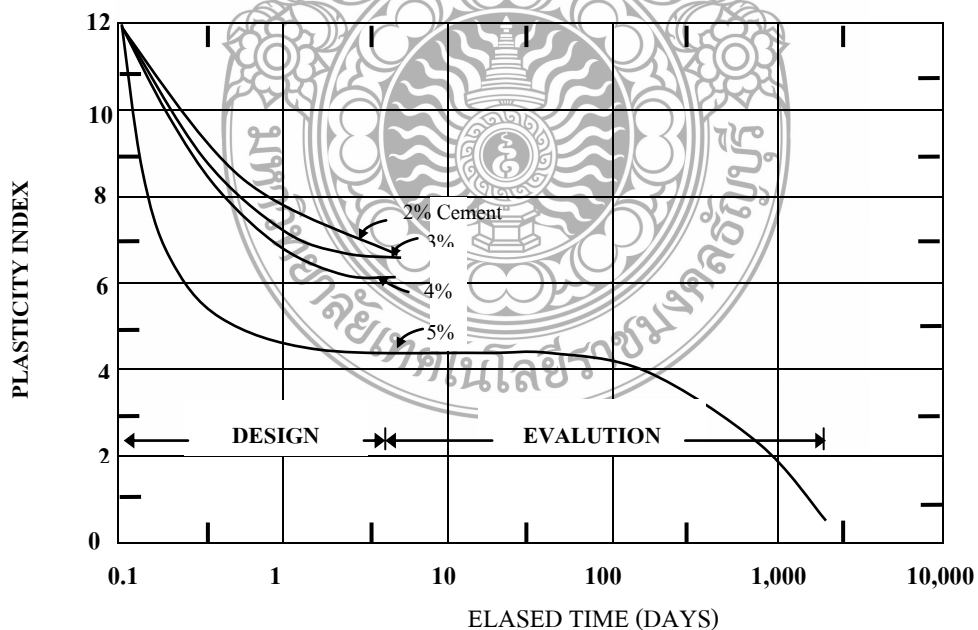
Felt [20] ได้กล่าวไว้ว่าคุณสมบัติที่ได้จากการบดอัดดินซีเมนต์ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่นำมาใช้ ความแตกต่างในด้านคุณสมบัติและปฏิกิริยาของซีเมนต์จะแปรผันเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมีของดิน ตัวอย่างความแตกต่างที่เห็นได้ชัดคือการใช้ซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณสมบัติดิน จะมีประสิทธิภาพน้อยเมื่อใช้กับดินชั้นบน (Topsoil) แต่เมื่อใช้กับดินชั้นกำเนิด (Parent Material) จะมีประสิทธิภาพมากในแหล่งดินเดียวกัน

Ng [32] ได้สรุปเรื่องผลกระทบต่อคุณสมบัติของดินที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติ โดยใช้ปูนซีเมนต์ พบว่าค่า Activity ของดินจะแปรผันตรงต่อปริมาณความต้องการซีเมนต์ที่ใช้ กล่าวคือดินที่มีค่า Activity สูงๆ จะมีความต้องการใช้ซีเมนต์ในปริมาณที่สูงกว่าดินที่มีค่า Activity ต่ำกว่าในระดับของกำลังที่ต้องการเดียวกัน

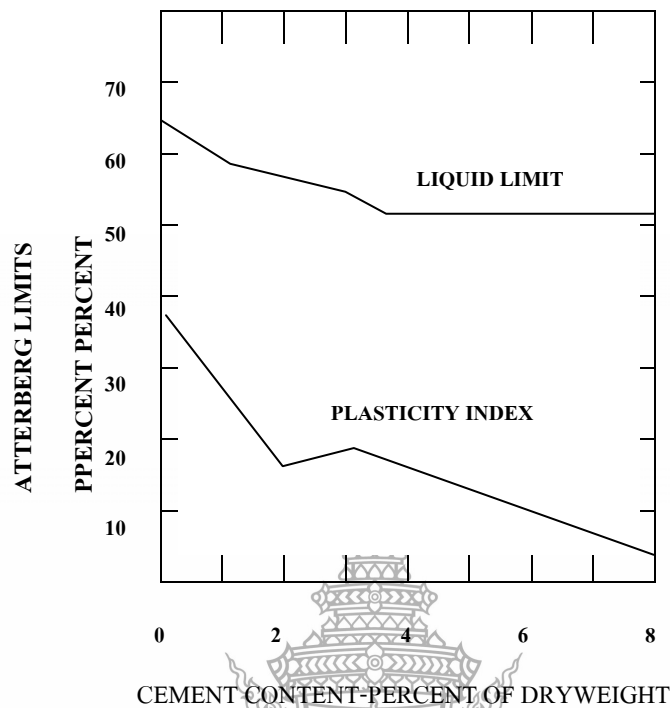
2.6.3 ปริมาณดินเหนียวและแร่ประกอบดินเหนียวที่มีอยู่ในดินซีเมนต์

Reinhold [33] ได้นำทรายมาผสมกับดินเหนียว โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเหนียวที่ใช้ผสมตั้งแต่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดกับปริมาณดินเหนียว พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลง

Redus, [34] ได้นำดินซีเมนต์ชั้นพื้นทาง (Base course) ของสนามบินต่างๆ ซึ่งมีอายุการใช้งานนานหลายปี มาทำการทดสอบค่าพิกัดอัตราเบอร์เกอร์ (Atterberg's Limits) พบว่าปริมาณซีเมนต์ มีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของดัชนีพลาสติก ดังรูปที่ 2.2 กล่าวคือถ้าปริมาณซีเมนต์ที่ผสมมาก ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าปริมาณซีเมนต์ผสมน้อย ดัชนีพลาสติกจะลดลงอย่างช้าๆ นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก็มีผลต่อการลดลงของค่าดัชนีพลาสติก ผลการศึกษานี้ตรงกับผลการวิจัยของ Spangler และ Patel [35] ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพลาสติกกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันใน 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.3



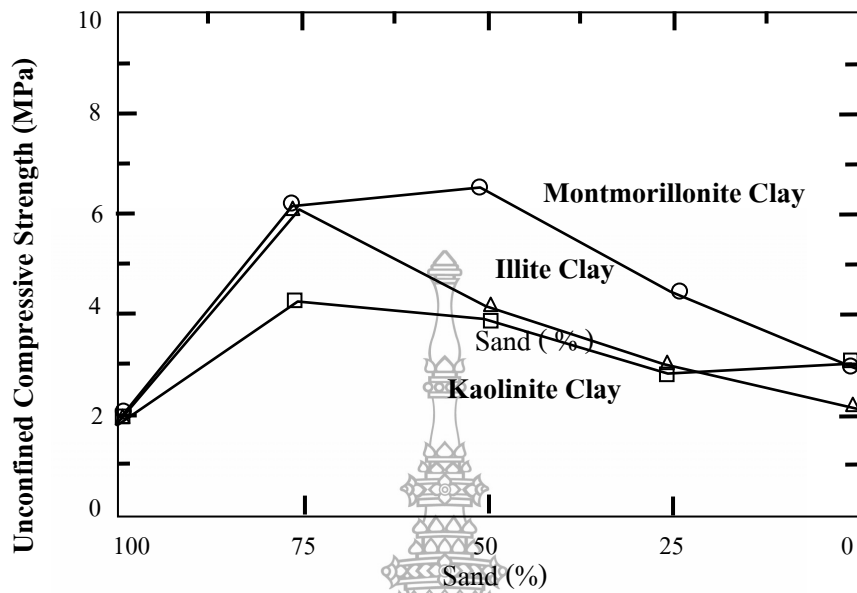
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพลาสติกกับเวลา (Redus [34])



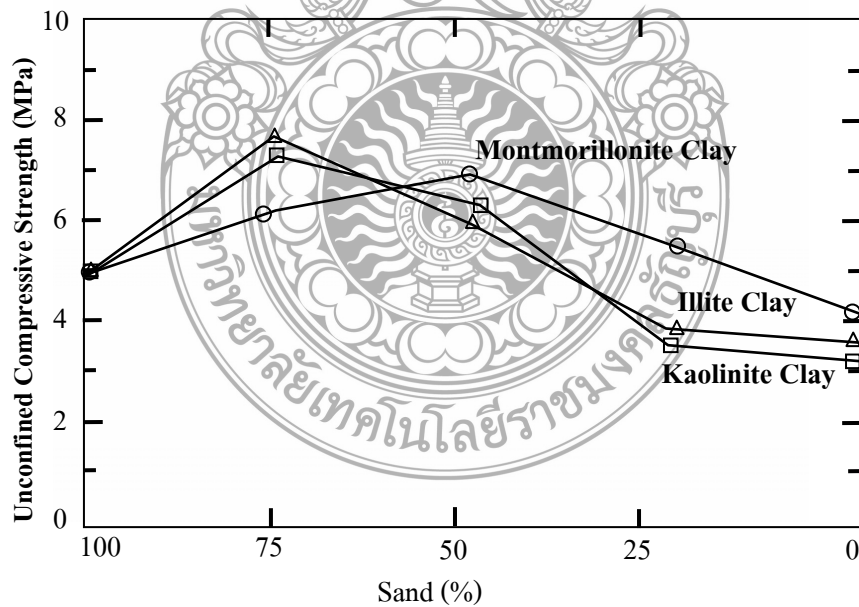
รูปที่ 2.3 ค่าพิกัดอัตราเบอร์กของดินไอโอวา (Iowa) หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง (Spangler และ Patel [35])

Norling และ Peckard [36] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณมวลรวมหยาบที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ดิน 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ ทรายละเอียด และดินเหนียวผสมซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากัน แต่แปรผันมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 แล้วทำการทดสอบหาค่าลิ่มที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่า Loamy Sand และ Fine Sand Loam จะมีค่าลิ่มลดลง เมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มมากขึ้นเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

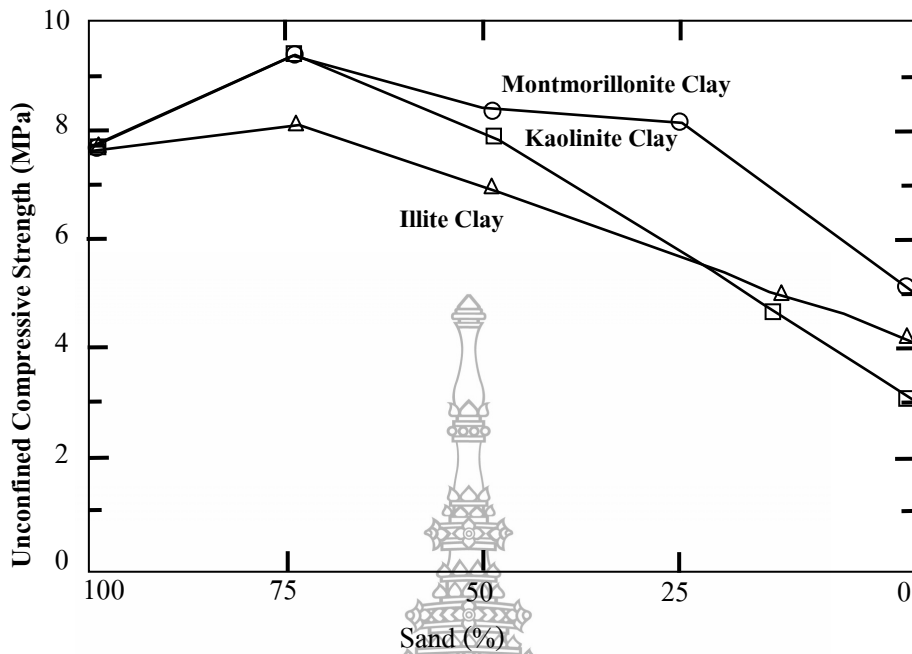
Davidson และคณะ [37] ทำการทดลองโดยใช้ทรายผสมกับดินเหนียวในอัตราส่วนทรายต่อดินเหนียว 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ดินเหนียวที่ใช้เป็นดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ (Kaolinite), อิลไลท์ (Illite) และมอนโมริลโลไนท์ (Montmorillonite) ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.4, 2.5 และ 2.6 สรุปว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวมากไป (เกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์) จะทำให้ค่าลิ่มอัดของดินซีเมนต์ลดลงอย่างเด่นชัด โดยที่ดินเหนียวจำพวกมอนโมริลโลไนท์ มีแนวโน้มว่าจะมีค่าลิ่มสูงกว่าดินเหนียวจำพวกคาโอลิไนท์ และจำพวกอิลไลท์



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 8% (Davidson และคณะ [37])



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 12% (Davidson และคณะ [37])



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของแร่ดินเหนียวที่มีต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ 16% (Davidson และคณะ [37])

Portland Cement Association [38] ได้จำแนกความต้องการปริมาณซีเมนต์ของกลุ่มต่างๆ ตามระบบ ASSHTO ไว้ในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO (ข้อมูลจาก Portland Cement Association [38])

| ASSHTO SOIL GROUP | Usual range in cement Requirement | | Estimated cement content And that used in the Moisture-density test | | Cement content for wet-dry and freeze-thaw test |
|-------------------|-----------------------------------|------------|---|------------|---|
| | (% by vol.) | (% by wt.) | (% by wt.) | (% by wt.) | |
| A-1-a | 5-7 | 3-5 | 5 | | 3-5-7 |
| A-1-b | 7-9 | 5-8 | 6 | | 4-6-8 |
| A-2 | 7-10 | 5-9 | 7 | | 5-7-9 |
| A-3 | 8-12 | 7-11 | 9 | | 7-9-11 |
| A-4 | 8-12 | 7-12 | 10 | | 8-10-12 |

ตารางที่ 2.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุง ตามการจำแนกแบบ ASSHTO
(ข้อมูลจาก Portland Cement Association [38]) (ต่อ)

| ASSHTO SOIL GROUP | Usual range in cement Requirement (% by vol.) (% by wt.) | | Estimated cement content And that used in the Moisture-density test (% by wt.) | Cement content for wet-dry and freeze-thaw test (% by wt.) |
|-------------------------|--|-------|---|--|
| | A-5 | 8-12 | 8-13 | 10 |
| A-6 | 10-14 | 9-15 | 12 | 10-12-14 |
| A-7 | 10-14 | 10-16 | 13 | 10-13-15 |

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่าง ๆ
(ข้อมูลจาก Portland cement Association [38])

| Type of miscellaneous material | Estimated cement contented and That used in moisture – density test (% by vol.) (% by wt.) | | Cement contented for Wet-dry and Freeze-thaw Test (% by wt.) |
|----------------------------------|--|----|---|
| Shell Soil | 8 | 7 | 5-7-9 |
| Limestone screening | 7 | 5 | 3-5-7 |
| Red-dog | 9 | 8 | 6-8-10 |
| Shale or disinte grated Shale | 11 | 10 | 8-10-12 |
| Callche | 8 | 7 | 5-7-9 |
| Cinders | 8 | 8 | 6-8-10 |
| Chert | 9 | 8 | 6-8-10 |
| Chat | 8 | 7 | 5-7-9 |
| Marl | 11 | 11 | 9-11-13 |
| Scoria (Retaining No.4 material) | 12 | 11 | 9-11-13 |

ตารางที่ 2.2 ปริมาณซีเมนต์โดยประมาณในการผสม สำหรับวัสดุต่าง ๆ

(ข้อมูลจาก Portland cement Association [38]) (ต่อ)

| Type of miscellaneous material | Estimated cement contented and That used in moisture – density test | | Cement contented for Wet-dry and Freeze-thaw Test (% by wt.) |
|-------------------------------------|--|------------|---|
| | (% by vol.) | (% by wt.) | |
| Scoria (Passing No.4 material only) | 8 | 7 | 5-7-9 |
| Air-Cooled slag | 9 | 7 | 5-7-9 |
| Water-cooled slag | 10 | 12 | 10-12-14 |

Moh, Chin และ Ng [39] รายงานว่า ดินลูกรังในประเทศไทย ที่มีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า 852 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่มีประสบการณ์ในการทดลองใช้ในแอฟริกาและยังเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการบดอัดว่าถ้าการบดอัดลดลงเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้กำลังอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด

Bell [40] พบว่าแร่ดินเหนียว Montmorillonite เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาว จะทำให้ Aqueous Phase ลดลง ทำให้สาร Cementitious ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะอยู่ในปูนขาวไม่เพียงพอต่อการแข็งตัว การแก้ไขคือ การเพิ่มปริมาณซีเมนต์ลงไปเพื่อเพิ่ม Free Lime ให้มากขึ้นโดยปกติการเพิ่มซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ดินจำพวก Montmorillonite มีคุณภาพดีสามารถนำมาใช้งานได้

2.6.4 ปริมาณความชื้นขณะบดอัด

Felt [20] และ Davidson และคณะ [37] ศึกษาอิทธิพลของความชื้นต่อกำลังอัดและความชื้นกับน้ำหนักที่สูญเสียจากการทำ Wet-Dry และ Freeze-Thaw ได้ผลตรงกันว่าปริมาณความชื้น และความหนาแน่นมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ สำหรับดินทรายควรทำการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม ส่วนดินเหนียวควรบดอัดดินที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จึงจะทำให้กำลังอัดสูงสุด

Ruenkairergsa [24,25] ได้อธิบายว่าการนำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่บดอัดตามวิธีการของ พร็อกเตอร์ (Proctor) มาใช้ในงานดินซีเมนต์นั้นพบว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม นอกจากจะให้ความหนาแน่นสูงสุดแล้ว ยังทำให้ซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์อีกด้วย สำหรับดินซีเมนต์ความหนาแน่นสูงสุดไม่จำเป็นว่าจะทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงและความคงทนมากที่สุดเสมอไป จากการทดลองหาความคงทนด้วยวิธี Freeze-Thaw ของดินตะกอนและดินเหนียวผสมซีเมนต์พบว่า ความคงทนจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย ทำการบดอัดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม จะทำให้ค่าความคงทนลดลง สำหรับดินทรายผสมซีเมนต์ความแข็งแรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อบดอัดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 3-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินเหนียวเมื่อบดอัดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเล็กน้อย จะให้ความแข็งแรงสูงสุด

Lightsey และคณะ [41] ได้รายงานไว้ว่าบางครั้งการบดอัดดินซีเมนต์ให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry-Density, MDD) ก็ไม่ได้ทำให้ดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากที่สุดเสมอไป เนื่องจากการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด จากการศึกษาดินตัวอย่าง 4 ชนิด ได้แก่ Silty Loam, Sandy Loam, Silt และ Silty Clay Loam บดอัดด้วยวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าและสูงกว่าปริมาณความชื้นเหมาะสม เมื่อผสมเสร็จทิ้งไว้เป็นเวลา 0, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ก่อนทำการบดอัด พบว่าปริมาณน้ำส่วนเกินที่ต้องการเพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความคงทนของดินซีเมนต์สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเวลาระหว่างการผสมควบคู่กับการบดอัด สำหรับดินเม็ดหยาบปริมาณน้ำที่เพิ่มในการบดอัดจะเพิ่มการหล่อลื่นระหว่างเม็ดดิน ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความแข็งแรงและความคงทนเมื่อมีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด ส่วนดินเม็ดละเอียด การเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสมบูรณ์ขึ้น เป็นผลทำให้คุณสมบัติของดินซีเมนต์ดีขึ้น โดยไม่ต้องมีการหน่วงเวลาก่อนการบดอัด

2.6.5 การบ่มดินซีเมนต์

Highway Research Board [42] ได้รายงานเกี่ยวกับการรักษาความชื้นของดินผสมซีเมนต์ในสนามโดยการฉาบผิวทางใน 4 รัฐด้วย Bituminous Seal 4 ชนิด คือ MC-2, RC-1, MC-3 และ Asphalt Emulsion ว่าวัสดุฉาบผิวทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการเก็บรักษาความชื้นระหว่างการบ่ม 7 วันในสนามได้เป็นอย่างดี

Clare and Pollard [27] สรุปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของดินซีเมนต์ว่า ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 25 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วันจะสูงขึ้น 2-2.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส การก่อสร้างที่ใช้ดินซีเมนต์ในพื้นที่ที่อากาศอบอุ่นจะให้กำลังอัดที่อายุ 3 เดือนแรกหลังการก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอากาศหนาวกว่าร้อยละ 50-100

Maner [43] ได้ทดลองใช้วัสดุต่างๆ ได้แก่ Waterproof Paper, Calcium Chloride, RC-2 Asphalt, Tar และ Asphalt Emulsion ในการบ่มพื้นทางดินซีเมนต์พบว่าวัสดุ Bituminous Asphalt ทั้ง 3 ชนิด และ Waterproof paper ใช้งานได้ผลดี นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นในอากาศมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณความชื้นในดินซีเมนต์

Leadabrand [44] นำดิน 2 ชนิด คือ Clayey Sandy Soil และ Silty Soil มาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วทำการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่ากำลังอัดที่อายุการบ่มตั้งแต่ 2 วันจนถึง 5 ปี พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะคล้ายกับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือ กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุของดินซีเมนต์ และยังสามารถเจาะตัดดินซีเมนต์ในสนามจากโครงการก่อสร้างของรัฐต่าง ๆ 4 รัฐ ในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยมีช่วงอายุตั้งแต่ 1 ปีถึง 20 ปี มาทดสอบหาค่ากำลังอัดพบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์ในสนามจะสอดคล้องกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

Wang และ Huston [45] รายงานว่าการลดอุณหภูมิในการบ่มจะทำให้กำลังอัดลดลง แต่จะเพิ่มความเครียดที่จุดวิกฤติ ไม่ว่าจะทดสอบแรงดึงหรือแรงอัด

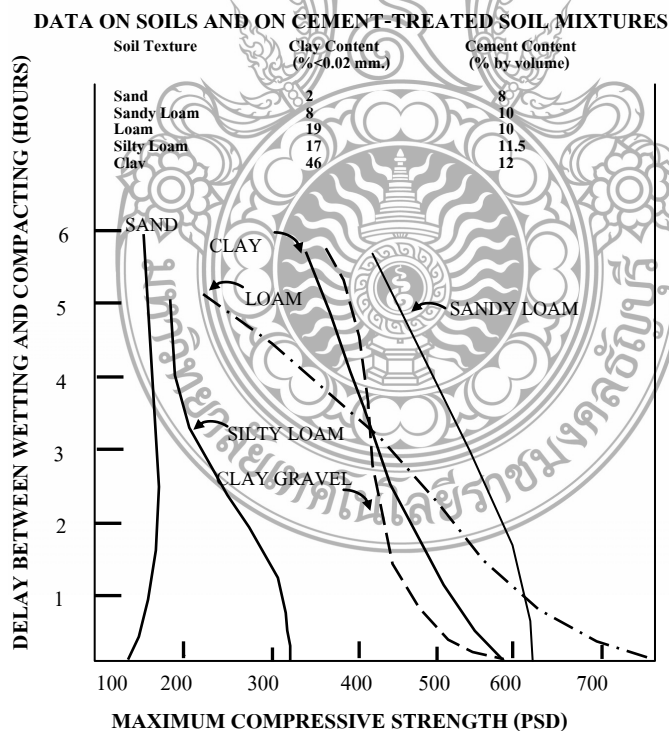
Shackel และ Lee [46] ทำการศึกษาการบ่มดินซีเมนต์โดยใช้ตัวอย่าง Artificial Soil ซึ่งได้จากการนำ Uniform Sand จากเมือง Botany รัฐ New South Wales ประเทศออสเตรเลียมาผสมกับ Commercial Air-Floated China Clay (Kaolin) ในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก และผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 3 และ 8 ทำการบ่ม 2 ลักษณะ คือบ่มในอากาศที่อุณหภูมิ 20°C และบ่มในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 20°C โดยการบ่ม 0, 1, 3, 9, 23, 44 และ 81 วัน จากนั้นทดสอบหาค่าการหดตัว หรือค่าการขยายตัว ค่ากำลังอัด ค่ากำลังดึง และวัดการกระจายตัวของโพรง (Pore Size Distribution) ของดินซีเมนต์ จากการจำลองแท่งตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Mercury Intrusion Porosimeter พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มจะทำให้กำลังอัดและกำลังดึงเพิ่มขึ้น การบ่มในอากาศจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการบ่มแบบชื้น และยังเพิ่มขนาดโพรง (Pore Size) และปริมาตร (Pore Volume) เมื่อมีอายุการบ่มมากขึ้นด้วย ส่วนการบ่มแบบชื้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นจะทำให้ขนาดโพรงลดลง

2.6.6 ระยะเวลาในการผสม

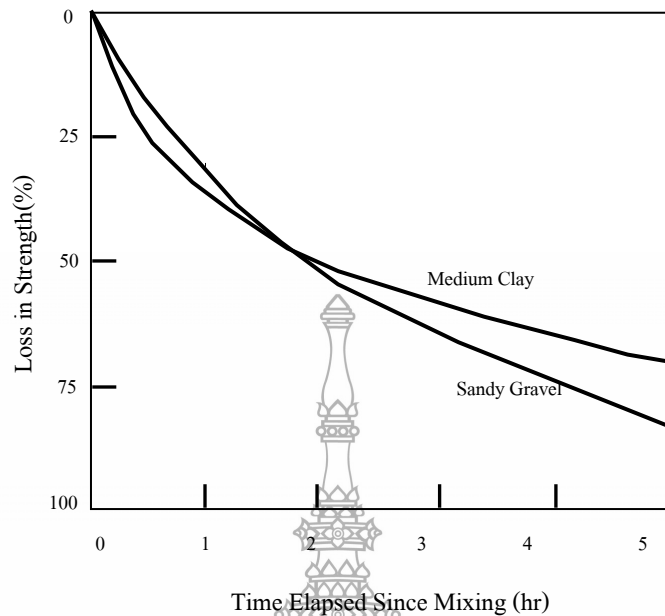
Marshall [47] ศึกษาผลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชั้น และการบดอัดที่มีผลต่อกำลังอัดของดินชนิดต่างๆ พบว่ากำลังอัดจะลดลงเมื่อเวลาการผสมนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7

Felt [20] ศึกษาอิทธิพลของการหน่วงเวลาต่อกำลังอัด และความคงทน โดยผสมให้นานขึ้น แล้วทิ้งไว้ก่อนบดอัด ได้ศึกษาดิน 3 ชนิด คือ ดินกลุ่ม A-2 (LL=26, PI=11), ดินกลุ่ม A-4 (LL=35, PI=12), ดินกลุ่ม A-6-7 (LL=47, PI=26) พบว่าดินทุกชนิดจะมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อหน่วงเวลาการผสมให้นานขึ้น การหน่วงเวลาการผสมแบบหยุดเป็นครั้งคราว จะมีผลเสียน้อยกว่าแบบหยุดผสมเลย

Ingles และ Metcalf [48] ทำการทดสอบดิน 2 ชนิด คือ Medium clay และ Sandy Gravel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาที่ใช้ในการผสมดินซีเมนต์ พบว่าเวลาการผสมที่นานขึ้น 1-2 ชั่วโมงกำลังอัดจะลดลงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเวลาในการผสมนานเกินกว่า 2 ชั่วโมง กำลังอัดของ Sandy Gravel จะน้อยกว่า Medium clay เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของการหน่วงเวลาการผสมระหว่างการผสมชั้น และการบดอัดที่มีต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Marshall [47])



รูปที่ 2.8 การสูญเสียกำลังอัดของดินซีเมนต์เนื่องจากการใช้เวลาในการบดอัดนานขึ้น (Ingles และ Metcalf [48])

Horpibulsuk [49] กล่าวว่า การที่ กำลังของดินซีเมนต์ในสนามมีค่าต่ำกว่ากำลังของดินซีเมนต์ที่หาได้จากห้องทดลอง มีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินซีเมนต์ในสนาม

2.6.7 สารผสมเพิ่ม

Clare and Pollard [27] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผสมเพิ่ม โดยการทำการทดสอบดินทรายที่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่ร้อยละ 0.3 พบว่าสารผสมเพิ่มจำพวกปูนขาว (Lime) มีส่วนช่วยให้ดินซีเมนต์แข็งตัวในระยะแรก ดินชนิดนี้เมื่อผสมด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียวจะก่อตัวเมื่ออายุ 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มปูนขาวประมาณร้อยละ 2 จะช่วยให้ดินซีเมนต์ดังกล่าวแข็งตัวเร็วขึ้น 2 วัน

Fuller และ Dabney [50] ได้อธิบายว่าการใส่ปูนขาวกับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง จะทำให้การผสมและการบดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

Maclean และคณะ [51] ได้นำดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวระหว่าง 70-75 และมีค่าดัชนีพลาสติกประมาณ 45-53 มาทำการทดลอง โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 15-30 โดยที่เพิ่มปูนขาวลงไปร้อยละ 2 พบว่า กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานการเสียดสีเมื่อแช่น้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าผสมปูนขาว (Lime) เกินกว่าร้อยละ 2 ผลการทดลองอาจไม่เป็นตามที่กล่าวมาข้างต้น

Lambe และ Moh [52] ได้รายงานผลการทดสอบการใช้สารผสมจำนวน 29 ชนิด ในกลุ่ม Dispersants, Synthetic resins, Waterproofing agents, Alkalis และเกลือ ในดินซีเมนต์ ที่ ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 และปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 ดินที่ใช้ทำการทดสอบได้แก่ ดินตะกอนจากรัฐ New Hampshire ดินเหนียวปนดินตะกอนจากรัฐ Massachusetts และดินฝุ่นแข็งพูน จากเมือง Vicksburg พบว่ามีสารผสม 4 ชนิด ที่เพิ่มความแข็งแรงถึงร้อยละ 100-150 ได้แก่ โซเดียม คาร์บอเนต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซัลเฟต

Davidson และคณะ [53] ได้ศึกษาการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) ในการปรับปรุงคุณภาพของดินพบว่า การผสมเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดินจะทำให้กำลังรับน้ำหนักของทรายผสมซีเมนต์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าในดินเหนียวผสมซีเมนต์ถ้าใส่เถ้าลอยลิกไนต์ ลงไป จะทำให้รอยแตกเนื่องจากการหดตัวลดลง แต่ไม่ช่วยเพิ่มความคงทน

Pinto และคณะ [54] ได้ทำการศึกษาดินที่มีแร่มอนโมริลไอโนท์ผสมอยู่ 5 ชนิด โดยแปรผันปริมาณปูนขาว ซีเมนต์ที่ผสม และอายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยทำการแช่น้ำ 1 วัน ก่อนทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียว พบว่าการผสมปูนขาวจะช่วยให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในกรณี ที่ดินตัวอย่างมีปริมาณดินเหนียวสูง และถ้าดินไม่มีหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่ จะยังทำให้ความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นอีก

Wilmot [55] กล่าวว่าตั้งแต่ปี 1950 ในประเทศออสเตรเลียวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ในงาน Pavement Recycling มีเพียง Cement, Cement/fly-Ash, Bitumen และ Hydrate lime เท่านั้น ต่อมาในปี 1980 มีการนำซีเมนต์ผสม มาใช้เพิ่มระยะเวลาใช้งานให้นานขึ้น โดยที่ความแข็งแรง ในระยะยาวยังคงเท่าเดิม ซีเมนต์ผสมดังกล่าว ได้แก่ Cement + Slag, Cement + Fly-Ash, Cement + Lime และได้ให้แนวทางการเลือกใช้สารผสมเพิ่มกับวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แนวทางการเลือกวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) กับวัสดุแต่ละชนิด (Wilmot [55])

| | Crushed rock | Well graded gravel | Silty- clay gravel | Sand* | Sandy silty clay | Heavy clay |
|---------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|-------|------------------------|---------------|
| Cement | A | A | A | B | B | N |
| Blend | A | A | A | A | A | N |
| Cementations | B | B | A | N | B | A |
| Hydrate Lime | N | N | B | N | B | A |
| Hydrate Lime+ | B | A | A | B | A | B |
| Cement | N | N | B | N | B | A |
| Polymeric | B | A | A | B | A | B |
| Bitumen | A | A | B | B | B | N |

Usually very suitable

A

Usually satisfactory

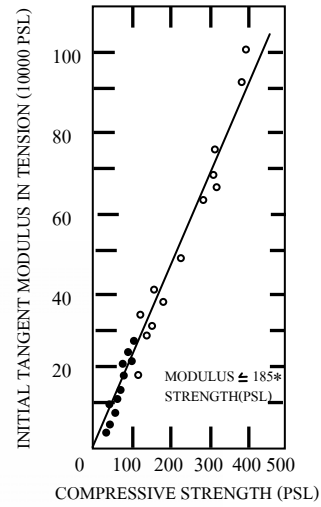
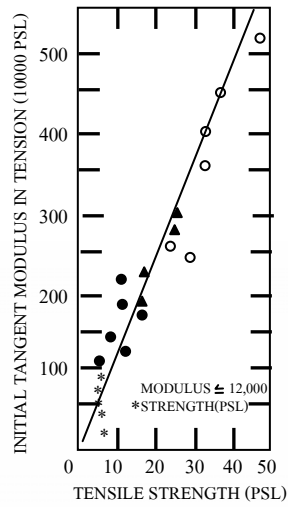
B

Usually very suitable N

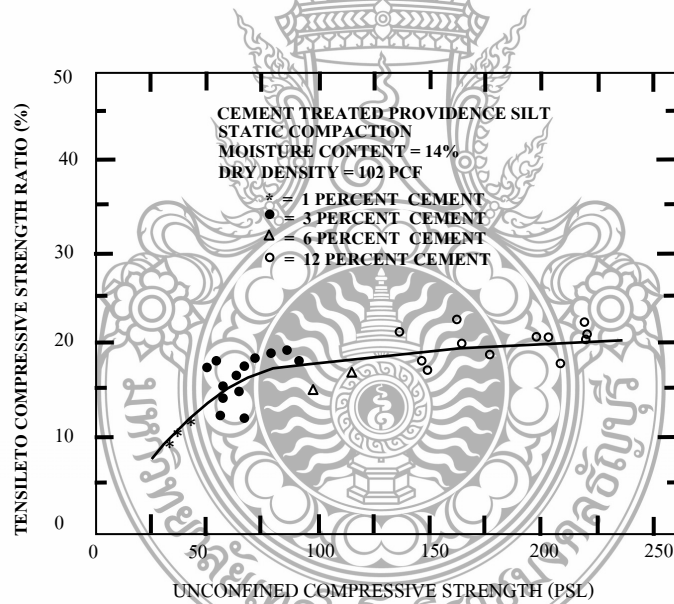
*Depend Upon Grading (Single size sand require higher additive content)

2.7 กำลังของดินซีเมนต์

Wang และ Huston [45] ทำการทดสอบหาค่ากำลังดึงและกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งกับดินตะกอนที่ได้จาก Glacial Deposit ใน Rhode Island พบว่าการเสีรูปร่างที่จุดวิบัติจากการทดสอบทั้งแบบรับแรงอัดและรับแรงดึง จะมีค่าคงที่เสมอ ถ้าหากค่าความหนาแน่นแห้ง ปริมาณความชื้น และสภาพการบ่มเหมือนกัน ค่ากำลังและค่าการเสีรูปร่างที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงดึงจะมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบแบบรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึงจะอยู่ระหว่างร้อยละ 10-20 ของค่ากำลังรับแรงอัด ส่วนค่าการเสีรูปร่างที่จุดวิบัติเนื่องจากแรงดึงจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.0-2.5 ของค่าการเสีรูปร่างที่จุดวิบัติ เนื่องจากแรงอัดสำหรับทุกอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่ศึกษาและยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแรงดึง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลัง ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Tangent Modulus in Tension กับกำลังดึงและกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Wang และ Huston [45])



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Direct tensile strength กับ Unconfined compressive strength ของดินซีเมนต์ (Wang และ Huston [45])

2.8 สมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์

Horpibulsuk และคณะ [56] ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของดินซีเมนต์โดยละเอียด โดยอาศัยสมมุติฐาน Clay-Water/Cement Ratio Hypothesis (Horpibulsuk และ Miura [30], Miura และคณะ [31]) พบว่า กำลังของดินแต่ละชนิดที่ผสมกับซีเมนต์ขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวเดียว คือ Clay – Water / Cement Ratio

$$q_u = \frac{A}{B^{(W/C)}} \quad (2.5)$$

เมื่อ q_u คือ กำลังต้านแรงอัดแกนเดียวที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง

A คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

B คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

W/C คือ Clay-Water/Cement Ratio และนิยามว่า เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์

นอกจากนี้ Horpibulsuk และคณะ [56] ยังพบว่า อัตราการเพิ่มของกำลังของดินซีเมนต์เป็นฟังก์ชันของล็อกกาลีทึมของอายุการบ่ม ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ รูปที่ 2.11

$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.038 + 0.281 \ln D \quad (2.6)$$

เมื่อ q_D คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม D วัน

q_{28} คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน

D คือ อายุบ่ม, วัน

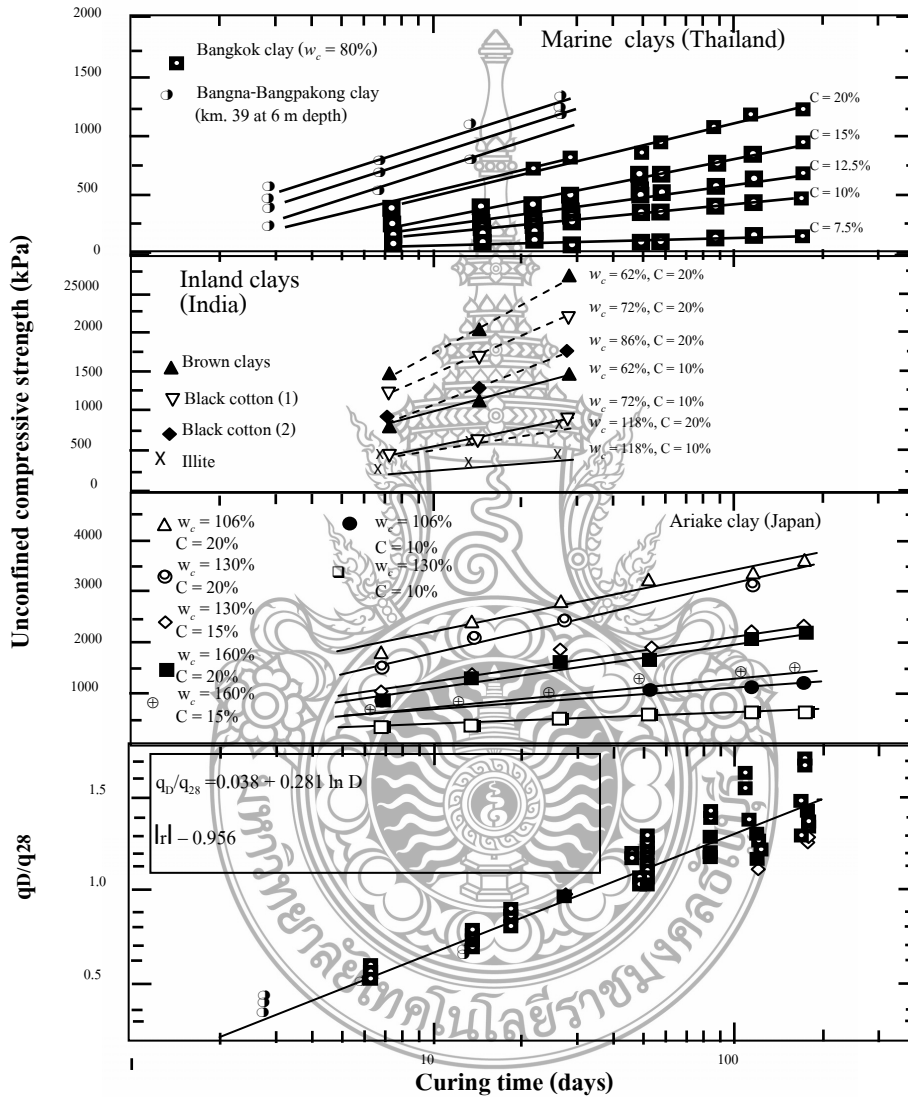
เมื่อรวมสมการที่ 2.5 และ 2.6 และแทนค่า B เท่ากับ 1.24 จะได้สมการที่ 2.7 ซึ่งสามารถทำนายกำลังของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่มใด ๆ โดยอาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบเดี่ยวที่อายุการบ่ม 28 วัน

$$\left[\frac{q_{(W/C)_{1,D}}}{q_{(W/C)_{28}}} \right] = 1.24^{\left\{ \frac{(W/C)_{28}}{c} - \frac{(W/C)_D}{c} \right\}} (0.038 + 0.281 \ln D) \quad (2.7)$$

เมื่อ $q (w_c/C)_{1,D}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบที่ w_c/C

หลังจากระยะเวลาบ่ม D วัน

$q (w_c/C)_{28}$ คือ กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน



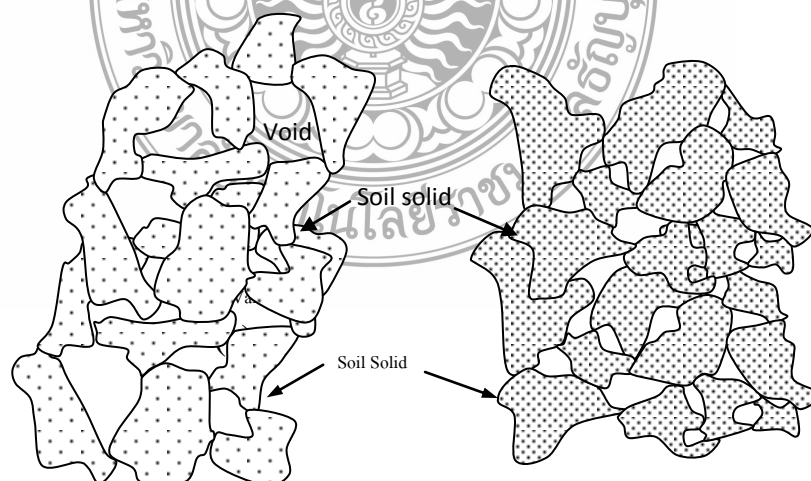
รูปที่ 2.11 การเพิ่มของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ (Horpibulsuk และคณะ [56])

2.9 โครงสร้างของดิน (Soil Structure)

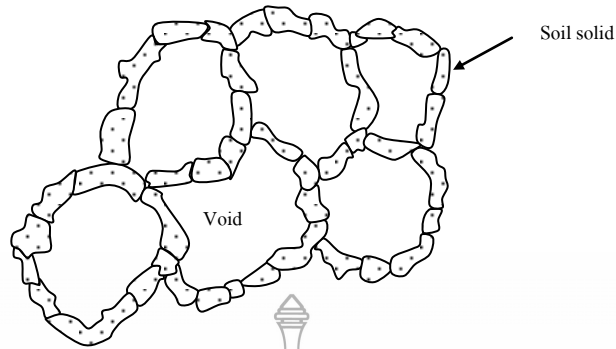
โครงสร้างของดินจำแนกออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ ด้วยกันคือ โครงสร้างของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) และโครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ อนุภาคของเม็ดดิน น้ำ และอากาศ ในส่วนของเม็ดดิน การจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน ลักษณะของเม็ดดิน และองค์ประกอบแร่ธาตุในดิน ซึ่งลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันนี้จะทำให้สมบัติทางวิศวกรรมแตกต่างกันไปด้วย

2.9.1 โครงสร้างของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil)

ดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) เช่นกรวดทรายต่างๆซึ่งมีลักษณะอนุภาคเป็นก้อนมีเหลี่ยมมุมหรือกลมมนนั้น สามารถที่จะจัดเรียงอนุภาคได้ 2 แบบคือ Single-Grained และ Honeycombed ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ โครงสร้างแบบ Single-Grained นั้นอนุภาคของเม็ดดินจะอยู่ในสถานะที่มีเสถียรภาพ แต่ละอนุภาคจะสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่โดยรอบและความหนาแน่นของมวลดินจะขึ้นอยู่กับขนาด ลักษณะ และการกระจายของอนุภาคเม็ดดินเป็นหลัก ส่วนในโครงสร้างแบบ Honeycombed จะพบเมื่ออนุภาคของเม็ดดินเป็นพวกทรายละเอียดหรือทรายแป้ง โครงสร้างแบบนี้อนุภาคเม็ดดินจะจัดเรียงตัวเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่มาก ดังนั้น เมื่อมวลดินรับน้ำหนักมาก ๆ จนโครงสร้างดินรับไม่ได้ก็จะทำให้เกิดการทรุดตัวค่อนข้างสูง โครงสร้างในลักษณะนี้ก่อให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพมวลดิน



รูปที่ 2.12 โครงสร้างแบบ Single-Grained: (ก) แบบหลวม, (ข) แบบแน่น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างแบบ Honeycombed

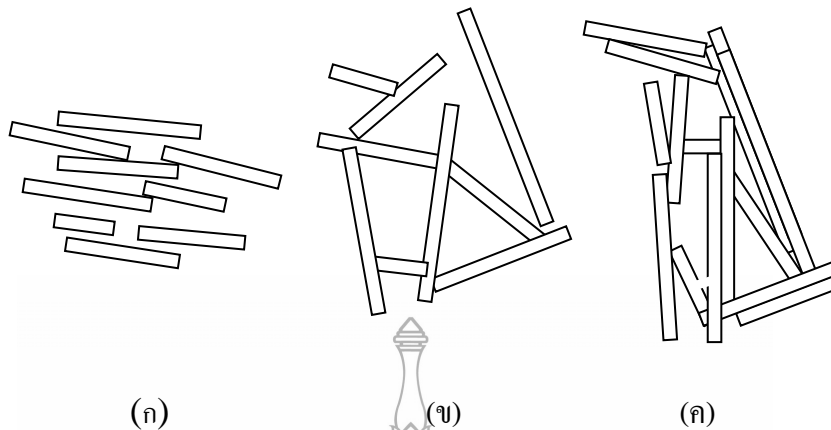
2.9.2 โครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil)

สำหรับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil) โครงสร้างของดินจะขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงของอนุภาคของเม็ดดินซึ่งจัดได้ 3 แบบคือ

1) แบบ Dispersion การจัดเรียงตัวของโครงสร้างลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคของเม็ดดินอยู่ห่างกันมาก ซึ่งจะทำให้แรงระหว่างอนุภาคของเม็ดดินเป็นแรงดึงดูด (Vander Waal's Forces) น้อยกว่าแรงผลักร้อน อนุภาคจึงจัดเรียงตัวแบบกระจายและมีแนวโน้มที่อนุภาคจะวางตัวขนานกันเมื่อตกตะกอน โดยอิสระดังรูปที่ 2.14 (ก)

2) แบบ Non-Salt Flocculation ลักษณะการจัดเรียงตัวแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคของเม็ดดินเริ่มเข้ามาชิดกันมากขึ้นและอาจทำให้เกิดการชนกันระหว่างปลายกับผิวของอนุภาค 2 อนุภาค ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกันขึ้น และเมื่อเกิดลักษณะนี้มากขึ้นๆ อนุภาคเหล่านี้ก็จะตกตะกอนเป็นแบบ Non-Salt Flocculation ดังรูปที่ 2.14 (ข)

3) แบบ Salt Flocculation โครงสร้างลักษณะนี้จะคล้ายกับแบบ Non-Salt Flocculation แต่จะแตกต่างกันตรงที่อนุภาคของดินจะมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวขนานกันและชิดกันมากกว่าที่จะเรียงตัวแบบ Flocculent ทั่วไป เนื่องจากประจุจากเกลือจะมีผลไปลดแรงผลักระหว่างอนุภาคของเม็ดดินลักษณะของโครงสร้างแบบนี้แสดงดังรูปที่ 2.14 (ค)



รูปที่ 2.14 ลักษณะ โครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (a) Dispersion (b) Non-Salt Flocculent และ (c) Salt Flocculent

ที่มา : ดัดแปลงจาก Lambe [57]

อนุภาคดินเหนียวที่ตกตะกอนในน้ำ ทั่วไปจะมีโครงสร้างก้ำกึ่งระหว่างแบบ Dispersion และ Flocculent แต่ถ้าอนุภาคตกตะกอนในน้ำทะเลซึ่งมีประจุบวก แนวนอนของ โครงสร้างของดินนี้ จะมีลักษณะที่เป็น Flocculent มากจะมีช่องว่าง (Void) มาก ทำให้มวลดินมี น้ำหนักเบา

2.10 กำลังรับแรงเฉือนของดิน

การศึกษา กำลังรับแรงเฉือนของดิน มีทั้งการทดสอบในสนามและการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการซึ่งในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีวิธีการทดสอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น

- 1) การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)
- 2) การทดสอบแรงเฉือน โดยตรง (Direct Shear Test)
- 3) การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test)

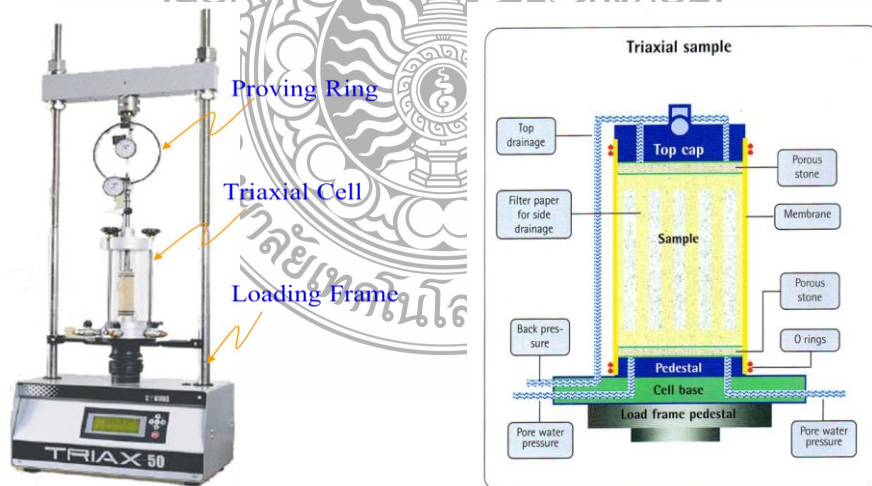
การทดสอบทั้งสามให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ยังไม่สามารถดัดแปลงการทดสอบให้มีสภาพได้ตามแรงกดทับ ของดินตามธรรมชาติ จึงทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบไม่ตรงกับความเป็นจริงเท่าที่ควร

การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) นับได้ว่าเป็นการทดสอบที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของดินในธรรมชาติมากที่สุด สามารถทำการทดสอบได้ 3 แบบ ซึ่งแต่ละแบบให้ประโยชน์และหลักการที่แตกต่างกัน การทดสอบทั้งสามชนิดมีดังต่อไปนี้

1) การทดสอบแบบ Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test การทดสอบนี้ตัวอย่างจะถูกอัดด้วยความดันรอบตัวอย่าง จากนั้นเพิ่มหน่วยแรงในแนวตั้งขึ้นขณะที่ความดันอัดรอบตัวอย่างคงที่ จนกว่าตัวอย่างดินพินดี ค่าที่ได้จากการทดสอบคือ ค่า C หรือ S_u ไม่สามารถหาค่าแรงดันน้ำในมวลดินได้

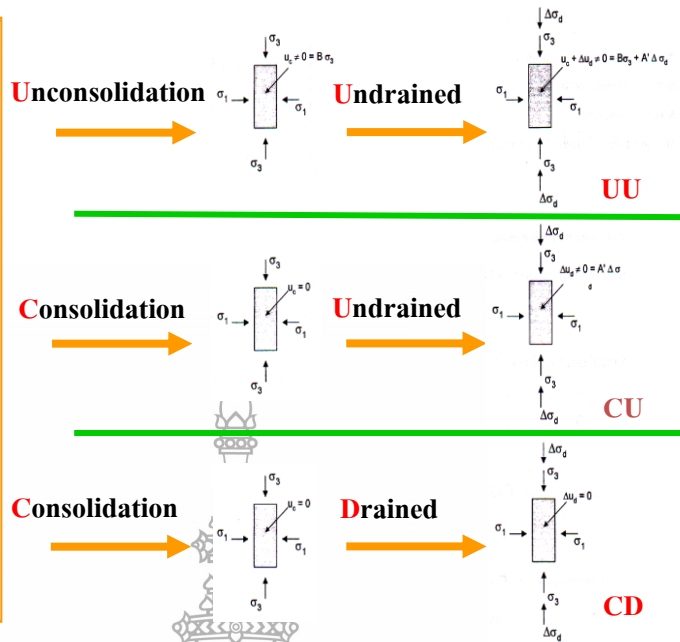
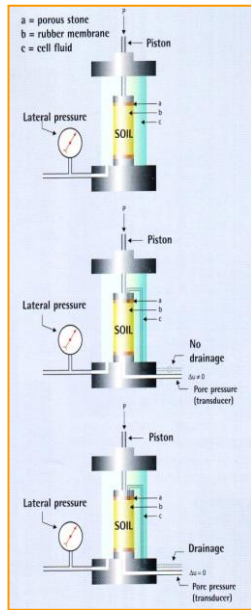
2) การทดสอบแบบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test ในการทดสอบจะต้องทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นเพิ่มความดันอัดรอบตัวอย่างเพื่ออัดตัวคายน้ำ ขณะกดตัวอย่างจะต้องวัดแรงดันน้ำตลอดเวลาการทดสอบและต้องใช้อัตราเร็วการกดตัวอย่างที่ต่ำ ค่าที่ได้จากการทดสอบที่สำคัญในการออกแบบ คือ มุมเสียดทาน (ϕ , ϕ) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (C', C) ค่าพารามิเตอร์ A ที่ใช้วิเคราะห์ความดันน้ำในโพรงดิน และค่า S_u ซึ่งครอบคลุมพฤติกรรมการออกแบบทั้งหมดและเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาวิจัยในเชิงลึก

3) การทดสอบแบบ Consolidated drained Triaxial Compression Test ขั้นตอนการทดสอบใกล้เคียงกับวิธีที่ 2 แต่ขณะเลื่อนตัวอย่างต้องปล่อยให้น้ำระบายออก (Δu ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา) จึงต้องใช้เวลานานในการทดสอบมาก ผลที่ได้จากการทดสอบจะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบประสิทธิผล (C', ϕ) เนื่องจากต้องใช้เวลาในการทดสอบที่นาน จึงไม่นิยมใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.15 เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test)

ที่มา : www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html



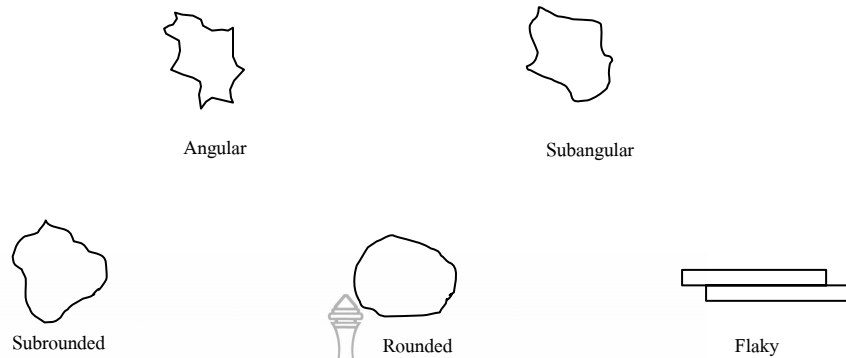
รูปที่ 2.16 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบต่างๆ

ที่มา : www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html

Lambe [58] ได้อธิบายว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soil) นั้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ 3 ส่วนคือ

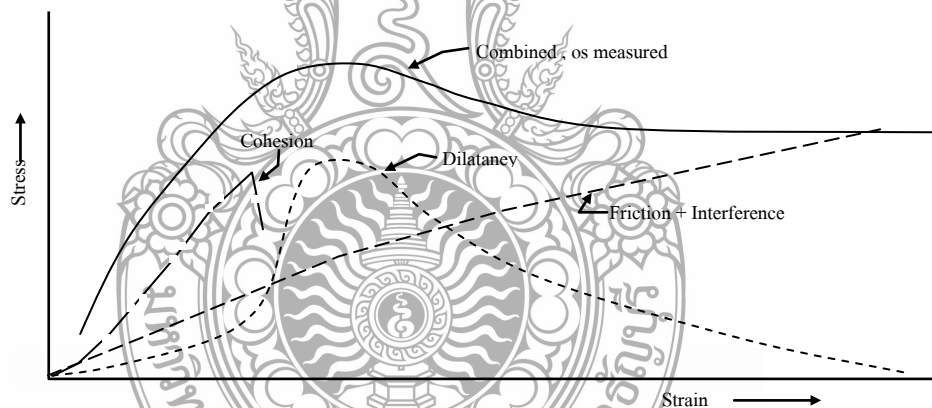
1) แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) เป็นส่วนประกอบหนึ่งของกำลังรับแรงเฉือนของดินกำลังรับแรงเกิด จากการที่อนุภาคสองอนุภาคที่ถูกยึดติดกันด้วยแรงระหว่างอนุภาค แรงนี้ไม่เกี่ยวกับแรงภายนอกใดๆ แต่ขึ้นกับขนาดของอนุภาค ลักษณะการยึดเกาะ และปริมาณน้ำรอบๆอนุภาคนั้น

2) แรงเสียดทาน (Friction) คือ ส่วนที่เกิดจากแรงเสียดทานที่ผิวของอนุภาคหนึ่งกับอนุภาคหนึ่ง เมื่อมีแรงภายนอกมาพยายามทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านั้น แรงเสียดทานนี้ขึ้นกับลักษณะของอนุภาคของเม็ดดินซึ่งมีลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะรูปร่างต่างๆของอนุภาคของเม็ดดิน

3) Dilatancy เป็นลักษณะทางกายภาพของอนุภาคของเม็ดดิน ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น ปริมาณของมวลดินที่มีความหนาแน่นสูงมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเป็นผลทำให้เกิดแรงดันภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นลบ (Negative Pore Pressure) ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของกำลังรับแรงเฉือน

ที่มา : After Lambe [58]

Bishop และ Henkel [59] ได้อธิบายทฤษฎีการวัดสมบัติของดินในการทดสอบแบบสามแกน (Triaxial Test) ในกรณีที่ทำกรทดสอบแบบให้น้ำไหลออกจากดินได้ (Drained Test) และในกรณีที่ไม่ให้น้ำไหลออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Undrained Test) ได้เสนอสมการในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำชนิดไม่มีการระบายน้ำ

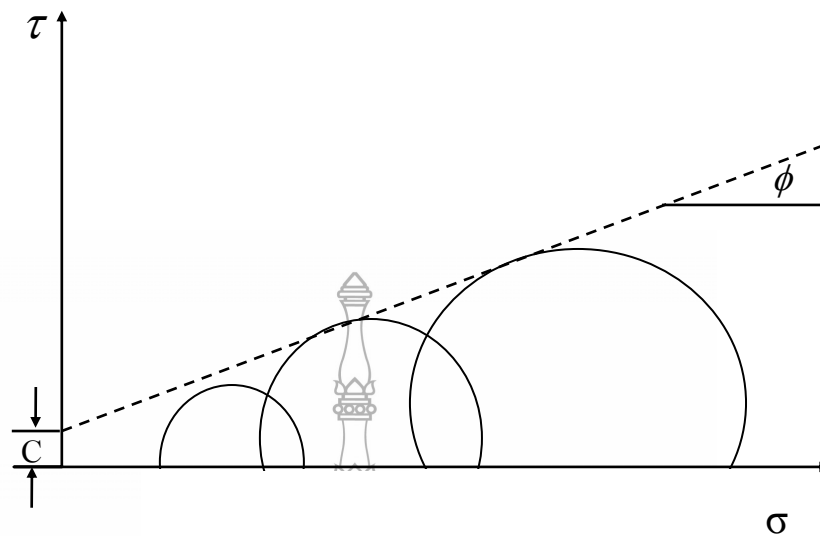
$$\tau_f = C + \sigma_{ff} \tan \phi \quad (2.8)$$

โดยที่ τ_f = Undrained Shear Strength
 C = Cohesion
 σ_{ff} = Total Normal Stress at Failure
 ϕ = Angle of Shearing Resistance

กำลังรับแรงเฉือนของดินจะถูกแสดงด้วยขอบเขตการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Strength Envelope) เป็นเส้นตรงที่แสดงถึงขอบเขตของกำลังดังรูปที่ 2.19 โดยที่ความเค้นประสิทธิผลเป็นตัวสำคัญในการควบคุมพฤติกรรมทางด้านกำลังของดิน (Soil Shear Strength) ดังนั้นการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criteria) ที่ถูกต้องที่สุดเมื่อแสดงในเทอมของความเค้นประสิทธิผล

$$\tau_{ff} = C' + \sigma'_{ff} \times \tan \phi \quad (2.9)$$

โดยที่ τ_{ff} = กำลังรับแรงเฉือนบนผิวรอบพังทลายขณะพังทลาย (Shear Strength on Failure Plane at Failure)
 σ'_{ff} = ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่อยู่ในระนาบของการพังทลายขณะพังทลายเกิดขึ้น (Effective Normal Stress on Failure Plane at Failure)
 C' = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective Cohesion Intercept)
 ϕ = มุมเสียดทานประสิทธิผล (Effective Angle of Shearing Resistance)



รูปที่ 2.19 ขอบเขตการพิบัติของมอร์-คูลอมบ์ ในการทดสอบแรงอัดสามแกน 3 ตัวอย่างที่ Confining Pressure ต่างกัน

พารามิเตอร์แรงดันน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test ตัวอย่างดินจะต้องอิมด้าด้วยน้ำภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจึงเต็มไปด้วยน้ำ ในขณะที่ทำการทดสอบจะมีแรงดันรอบตัวอย่าง (Confining Pressure) คงที่ และมีการเพิ่มหน่วยแรงในแนวตั้งเรื่อยๆจึงทำให้เกิดแรงดันน้ำภายในมวลดิน เมื่อค่าหน่วยแรงในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น

Skempton [60] พบว่า ความดันน้ำที่เปลี่ยนแปลง (Δu) เนื่องจาก Normal และ Shear Stress พิจารณาเพียงสภาพของหน่วยแรงอยู่ในสภาพการณ์ของการทดสอบ Triaxial กล่าวคือ ระนาบทางแนวนอนและแนวตั้งเป็นระนาบที่ Principle Stress มากหรือน้อย นั่นคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาด (Magnitude) ของ Principle Stress ($\Delta \sigma_1, \Delta \sigma_3$) Skempton และ Bishop ได้แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (Excess Pore Pressure, Δu) กับการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงรวม (Total Stress) ในการทดสอบ Triaxial แบบ Undrained ดังนี้

$$\Delta u = B \Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (2.10)$$

โดยที่ A,B = Skempton พารามิเตอร์ของความดันน้ำในโพรงดิน (Pore Pressure Parameter)

Δu = ความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (Excess Pore Pressure)

$\Delta \sigma_1$ = การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงรวม (Magnitude) ของ Major Principle Stress

$\Delta \sigma_3$ = การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงรวม (Magnitude) ของ Minor Principle Stress

พารามิเตอร์ A เป็นตัวบอกความสัมพันธ์ของความดันน้ำระหว่างเม็ดดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ระหว่างการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ มวลดินจะมีปริมาตรคงที่ ถ้าแรงเฉือน นั้นกระทำต่อดิน Normally Consolidated Clay เม็ดดินมีแนวโน้มที่จะกดเข้าหากัน ความดันน้ำระหว่างเม็ดดินจะเพิ่มขึ้นและพารามิเตอร์ A จะมีค่าเป็นบวกและสามารถมีค่าประมาณ 1.0 หรืออาจจะสูงกว่า 1.0 สำหรับดินที่มีความไวสูง (Highly Sensitive Soil) เพราะเกิดการแตกหักของแรงยึดเหนี่ยวที่บริเวณสัมผัสของเม็ดดิน โครงสร้างเม็ดดินจะมีการเปลี่ยนแปลงในรูปร่าง ส่วนดิน Over Consolidated (Highly Sensitive Soil) เมื่อถูกหน่วยแรงเฉือนมากกระทำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรมวลดินนั้น ($\Delta V = 0$) ความดันน้ำระหว่างเม็ดดินจะลดลง (Δu ติดลบ) จึงทำให้พารามิเตอร์ A มีค่าเป็นลบได้ การได้ค่า A เป็นค่าลบแสดงว่าดินเหนียวพยายามขยายตัวขึ้นเพื่อพยายามให้อัตราส่วนช่องว่างเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวได้ถูกหน่วยแรงที่ถูกกดมากในอดีต ($OCR \gg 1.0$)

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ, A_f

| ชนิดของดิน | ค่า A_f |
|--------------------------------|-------------------|
| Highly Sensitive Clay | + 0.75 ถึง + 1.50 |
| Normally Consolidated Clay | + 0.50 ถึง + 1.00 |
| Compacted sandy Clay | + 0.25 ถึง + 0.75 |
| Lightly Over consolidated Clay | 0.00 ถึง + 0.50 |
| Compacted Clayey Gravel | - 0.25 ถึง + 0.25 |
| Highly Over consolidated Clay | - 0.50 ถึง 0.00 |

ที่มา : Skempton [60]

ทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) เป็นผลที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถสื่อถึงประวัติของดินได้ Lambe และ Whitman [61] ได้เสนอแนะวิธีการใช้ทางเดินของความเค้นประสิทธิผล แสดงสถานะของความเค้นบนระนาบผิวที่มีค่าแรงเฉือนสูงสุดในการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ทางเดินของหน่วยแรงเป็นเส้นแสดงสภาวะการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลดินแสดงให้เห็นอย่างต่อเนื่องในทุกๆ สภาพของหน่วยแรงที่อยู่ในระนาบเดียวกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ทั้งในเทอมของความเค้นรวม (Total stress) สมการที่ 2.11 และ 2.12 และความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) สมการที่ 2.13 และ 2.14

$$\text{แกน Y: } q = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (2.11)$$

$$\text{แกน X: } p = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 \quad (2.12)$$

$$\text{แกน Y: } q, q' = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2 \quad (2.13)$$

$$\text{แกน X: } p' = (\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2 \quad (2.14)$$

โดยจะเขียนอยู่ในรูปไดอะแกรม ของ p หรือ p' (แกนนอน) และ q (แกนตั้ง) ใช้ Scale เดียวกันในการทดสอบ Triaxial โดยการกกดตัวอย่างแบบอันเดรน ทางเดินของความเค้นรวมจะเป็นเส้นตรงทำมุม 45 องศา กับแกนนอน (p) และทางเดินของความเค้นประสิทธิผลสำหรับดินเหนียวที่ทดสอบอยู่ในสภาพที่ไม่ระบายน้ำเมื่อนำมาพิจารณาในรูปของถาวพล็อต $p' - q'$ ค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) จะเห็นผลต่างของดินที่เป็นดิน NCC และดิน OCC ได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21

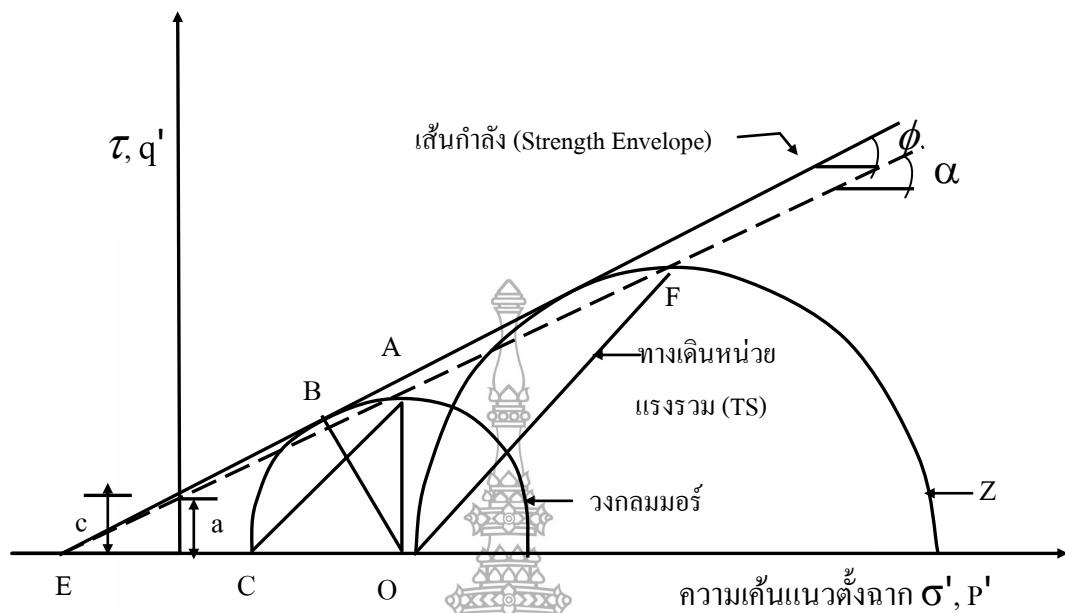
จากความสัมพันธ์ค่าคงที่ระหว่างวงกลมมอร์ (Mohr) และทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) จากเส้นขอบเขตการพิบัติของกำลังรับแรงเฉือนสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.15 และ 2.16

$$\phi' = \sin^{-1} (\tan \alpha') \quad (2.15)$$

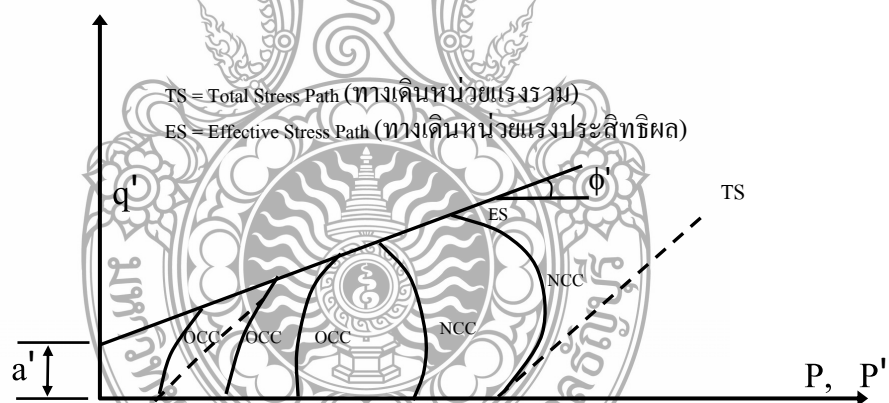
$$c' = \frac{\alpha'}{\cos \phi} \quad (2.16)$$

โดยที่ α' = ค่าของจุดตัดบนแกน (q) ประสิทธิผล

α' = มุมลาดเอียงของเส้นขอบเขตการพิบัติประสิทธิผลของ Stress Path



รูปที่ 2.20 เส้นกำลัง (Strength Envelope) จากทางเดินหน่วยแรง และจากวงกลมมอร์



รูปที่ 2.21 ทางเดินหน่วยแรง (Stress Path, p-q) ของดินประเภท NCC และดินประเภท OCC

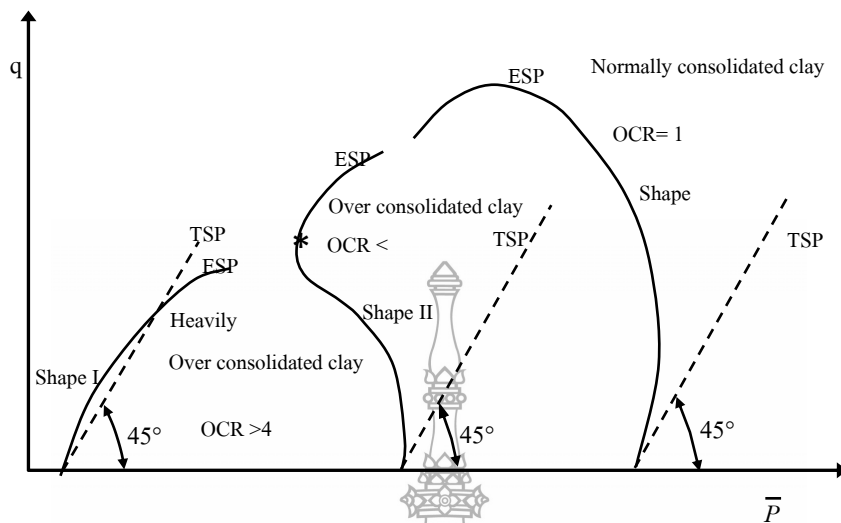
Stress History มีอิทธิพลต่อรูปร่างของทางเดินความเค้นประสิทธิผลมาก จากการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) แบบ Consolidated Undrained Triaxial Test ความดันน้ำระหว่างเม็ดดินที่ตอบสนองต่อการกระทำของแรงเฉือน (Δu) จะต่างกันตามสัดส่วนของ Over Consolidation Ratio, (OCR) ของดิน ความดันน้ำดังกล่าวจะทำให้ทางเดินของความเค้นประสิทธิผลหันเหออกจากทางเดินของความเค้นรวมมากน้อยต่างกัน

รูปที่ 2.22 แสดงทางเดินของความเค้นประสิทธิผลแบบต่างๆ ตามชนิดของดิน ซึ่งเปรียบเทียบกันโดยใช้ทางเดินของความเค้นรวม (TSP) ของการทดสอบ Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test เป็นตัวเปรียบเทียบรูปแบบทางเดินประสิทธิผลที่ได้จากการทดสอบจะออกมาในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

แบบที่ 1 (Shape I) พบมากในดินประเภทโอเวอร์คอนโซลิดेटมาก (Heavily Over Consolidated Clay) ที่ Strain น้อยๆ (Δu) จะเปลี่ยนไปเป็นลบเนื่องจากดินมีแนวโน้มที่จะขยายตัวออก (Dilate) ESP จะวกกลับไปอยู่ทางขวามือของ TSP

แบบที่ 2 (Shape II) เป็น ESP ของดินโอเวอร์คอนโซลิดेटเล็กน้อย (Slightly Over Consolidated Clay) ซึ่งจะแสดงลักษณะของดินนอร์มัลลีสคอนโซลิดेटและดินโอเวอร์คอนโซลิดेटร่วมกันในช่วงแรกที่ดินรับแรงเฉือน โครงสร้างเม็ดดินมีแนวโน้มที่จะหดตัว ทำให้เกิดค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu , Excess Pore Pressure) เป็นบวก (Positive) เมื่อความเครียด (Strain) มากขึ้นจนถึงจุดที่เกิดการแตกหักของโครงสร้างเม็ดดิน และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดดินทำให้ดินมีแนวโน้มที่จะขยายตัวและทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเป็นลบ (Negative) และผลคือแรงดันน้ำส่วนเกินลดลง ทำให้เส้นทางเดินประสิทธิผล (ESP, Effective Stress Path) โค้งกลับมาทางขวาอย่างรวดเร็ว

แบบที่ 3 (Shape III) พบได้ในดินนอร์มัลลีสคอนโซลิดेट (Normally Consolidated Clay) เนื่องจากโครงสร้างของดินมีแนวโน้มที่จะแตกหัก ดังนั้น Δu จะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Strain มากขึ้น เพราะฉะนั้น ESP จึงเบี่ยงเบนออกไปทางซ้ายของ TSP เรื่อยๆ



รูปที่ 2.22 แสดงทางเดินความเค้นประสิทธิภาพผลแบบต่างๆ (Effective Stress paths) ตามชนิดของดิน ซึ่งเปรียบเทียบกับโดยใช้ทางเดินความเค้นรวม (Total Stress paths) ของการทดสอบ Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test

ที่มา : Wissa และ Ladd [62]

2.11 กำลังรับแรงคัดของดินซีเมนต์

โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นพื้น เช่น ถนน สะพาน ทางวิ่งของสนามบิน ต้องมีการทดสอบหาค่าหน่วยแรงคัดของแผ่นพื้น เนื่องด้วยหน่วยแรงคัดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นมี 4 ประเภท คือน้ำหนักบรรทุก อุณหภูมิของแผ่นพื้น การขยายตัวและการบวมตัวของดินเดิม แต่หน่วยแรงคัดที่มีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นพื้น คือน้ำหนักคัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกมีตำแหน่งวิกฤต 3 จุด คือน้ำหนักกระทำที่มุมแผ่นพื้นห่างจากขอบ น้ำหนักกระทำที่ขอบของแผ่นพื้นห่างจากมุม น้ำหนักที่กระทำทั้ง 3 จุด ก่อให้เกิดหน่วยแรงคัด ซึ่งหน่วยแรงเนื่องจากอุณหภูมิของแผ่นพื้น เนื่องจากการรับอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างกลางวัน และกลางคืน ก่อให้เกิดการขยายตัวและการหดตัวด้านบน และด้านล่างของแผ่นพื้นในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้แผ่นพื้น โกงงอ ก่อให้เกิดหน่วยแรงคัด

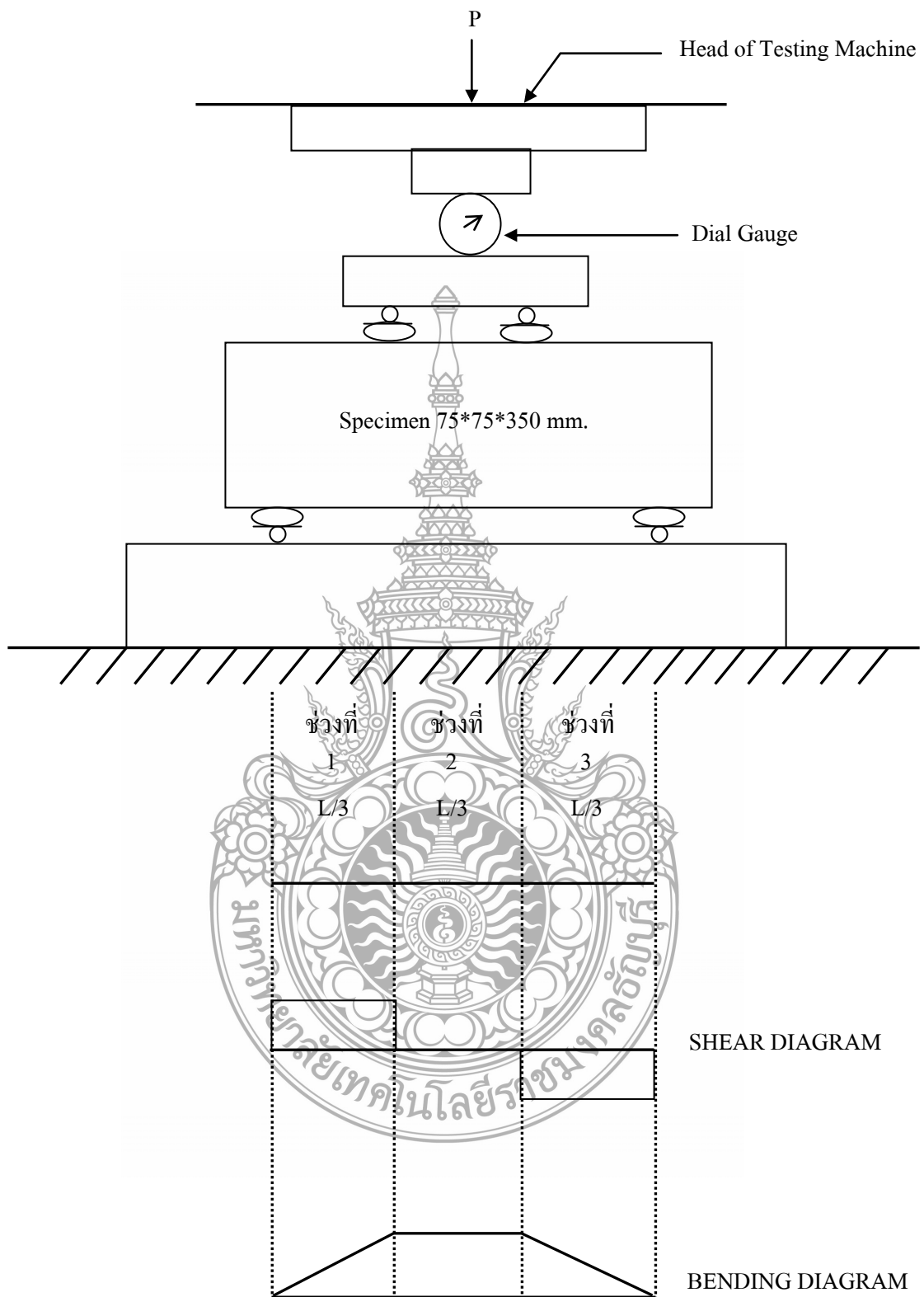
วิธีการทดสอบการรับแรงคัดของแผ่นพื้น สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลาง (Center-Point Loading) และวิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกัน (Third-Point Loading)

การศึกษาค่ากำลังความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Strength) ทำการทดสอบ โดยวิธี Third-Point Loading ใ้หน้าหนักกระทำบนคานช่วงเดียว (Simple Beam) เป็นจุด ที่ระยะ 1/3 ของความยาวประสิทธิผล เพื่อหาค่าโมดูลัสแตกร้าว (R) ของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 2.23 เครื่องมือการทดสอบหาค่ากำลังความสามารถในการรับแรงดัด (Flexural Strength) โดยวิธี Third-Point Loading





รูปที่ 2.24 แสดงการทดสอบกำลังดัดของ Beam โดยวิธี Third-Point Loading

ถ้ารอยแตกของคานตัวอย่างอยู่ในช่วงกลางหรือช่วงที่ 2 ค่า R คำนวณได้จาก

$$R = PL/(bd^2)$$

ถ้ารอยแตกของคานตัวอย่างอยู่นอกช่วงที่ 2 วัดระยะได้ไม่มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวคาน ค่า R คำนวณได้จาก

$$R = 3Pa/(bd^2)$$

ถ้ารอยแตกของคานตัวอย่างอยู่นอกช่วงที่ 2 วัดระยะได้มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวคาน จะไม่นำค่า Applied Load ที่ได้มาคำนวณค่า R

- เมื่อ
- R = Modulus of Rupture (kg/cm^2)
 - P = Maximum Applied Load (kg)
 - L = Span Length (cm)
 - b = Average Width of Specimen (cm)
 - d = Average Depth of Specimen (cm)
 - a = Distance between line of fracture and the nearest support, measured along the center line of the bottom surface of the beam. (cm)

อุดม มาตรฐาน และคณะ [63] ศึกษาพฤติกรรมของดินปรับปรุงคุณภาพ โดยชนิดของดินเป็นดินเหนียวอ่อนของโครงการปรับปรุงชายฝั่งทะเลถนนบางบอนชายทะเล โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 200, 300 และ 400 กก/ม³ ของดินเหนียวเปียก พบว่าแรงอัดของดินภายใต้อายุการบ่ม 28 วัน มีความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 213 เท่า และมีค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ประมาณ 35 ถึง 45% ของกำลังรับแรงอัด

ธีรยุทธ สุจริตตานันท์ [64] ศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ผสมสารผสมเพิ่ม พบว่าปริมาณซีเมนต์ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อค่า Modulus of Rupture เท่าใดนักในช่วง 7 วันแรก แต่เมื่ออายุบ่มมากขึ้นค่า Modulus of Rupture จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มและปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้น ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Modulus of Rupture ของดินลูกรังผสมซีเมนต์และดินลูกรังผสมซีเมนต์กับ สารผสมเพิ่ม (ธีรยุทธ [64])

| Cement Content (%) | Modulus of Rupture (ksc) | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------|---------|---------|
| | 3 days | 7 days | 14 days | 28 days |
| Soil – Cement 5% | 5.41 | 10.5 | 8.58 | 11.18 |
| Soil – Cement 10 % | 5.43 | 11.07 | 11.76 | 17.01 |
| Soil - Cement 5% + Renolit | 7.35 | 7.61 | 8.96 | 8.76 |
| Soil – Cement 10% + Renolit | 6.48 | 8.22 | 7.98 | 11.78 |

ศุภสิทธิ์ พงศ์วิระสถิตย์ [65] ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อน โดยใช้ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 และ Quicklime โดยมีอัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อปูนขาวต่อดินเหนียว 250 : 0 : 1, 150 : 100 : 1, 125 : 125 : 1, 100 : 150 : 1 และ 0 : 250 : 1 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ค่า Liquid Limit และค่า Plastic Index ลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Plastic Limit มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้น ส่วนค่า Modulus of Rupture พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีค่ามากกว่า 150 kg/m³ ทำให้ค่า Modulus of Rupture เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนความคงทนต่อการแตกสลาย พบว่าค่าความคงทนต่อการแตกสลายมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นของตัวอย่าง ในทุกๆอัตราส่วนผสม และจากผลของ Consolidation Test พบว่า ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักในอดีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสม

ไพวรรณ เขียวอ่อน [66] ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงค้ำของวัสดุมวลรวมพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และสารโพลีเมอร์เคมีโรด พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดที่ปริมาณน้ำเหมาะสม เท่ากับร้อยละ 3.5 ปริมาณสารโพลีเมอร์เคมีโรดที่เหมาะสม เท่ากับร้อยละ 5 สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้มากขึ้นถึงร้อยละ 18 เพิ่มกำลังรับแรงค้ำได้มากขึ้นถึงร้อยละ 13 และเพิ่มค่าการโก่งตัวได้มากขึ้นถึง 176 คุณสมบัติที่ได้รับการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัดคือการ โก่งตัว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สารโพลีเมอร์เคมีโรดช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความคืนตัวของวัสดุ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ

2.12 ปริมาณทรายในส่วนผสม

สารา เอียดเนียม [67] ศึกษาผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนโดยวิธีผสมเหลว พบว่าปริมาณทรายที่ผสมอยู่ในดินเหนียว จะทำให้ค่าการยุบตัวลดลง และดินที่ผสมทรายขนาดกลางจะมีค่าการยุบตัวน้อยกว่าดินที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด ค่าความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านของดินผสมที่ปริมาณทรายผสมตั้งแต่ 0% ถึง 70% จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณของทรายที่ผสมตั้งแต่ 70% ขึ้นไป และในส่วนของค่าความสามารถในการรับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินผสมเมื่อมีปริมาณทรายผสมอยู่ ค่าแรงยึดหน่วงระหว่างเม็ดดินจะลดลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้น ค่ามุมเสียดทานภายในจะมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณทรายมากกว่า 30% นอกจากนี้ขนาดของเม็ดทรายที่ผสมในดินเหนียวยังมีผลต่อค่าคุณสมบัติการรับกำลังของดินด้วย

ธนกร นาเชียงใต้ [68] ได้ศึกษาพฤติกรรมของแรงดันน้ำในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างที่ทำการบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Max Dry Density) และที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) โดยที่ดินเหนียวผสมจะมีทรายที่ 0, 20, 40, 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดสอบพบว่าการใช้ทรายเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีผลทำให้แรงดันน้ำในดินผสมลดลง และทำให้กำลังรับแรงเฉือน (C, ϕ) เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณทรายน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดันน้ำมีผลน้อยมาก ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย และที่ปริมาณทรายตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ค่ากำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงเห็นได้อย่างชัดเจน ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดพิบัติเพิ่มขึ้น 1.8 ถึง 3.7 เท่าของดินเหนียวบดอัด

2.13 กำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์

อนุวัตร ทองคำ [69] ได้ทดลองผสมดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ กับซีเมนต์และสารผสมเพิ่มต่างๆ ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลเฟต โซเดียมเมตาซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีเมนต์และอายุการบ่ม โดยโซเดียมเมตาซิลิเกต จะช่วยเพิ่มกำลังของดินผสมซีเมนต์ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารผสมเพิ่มอื่นๆ

บันเทิง ทองนิจ [70] ได้ทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยจัดแบ่งดินออกเป็น 2 กลุ่มตามระดับความลึก ทั้งการผสมแบบแห้งและแบบเปียก พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะเพิ่มขึ้นตามค่าปริมาณซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่ม ปริมาณซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 และ 12.5 เป็นปริมาณ

ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ อัตราการพัฒนากำลังของดินผสมซีเมนต์จากการผสมแบบแห้งมีสูงกว่าการผสมแบบเปียกประมาณร้อยละ 70 โดยเฉลี่ยที่ทุกปริมาณซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นตัวอย่างดินซีเมนต์จากการผสมแบบเปียกมีแนวโน้มที่จะพัฒนากำลังได้เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับความลึกของดินในแต่ละชั้น อาจเนื่องมาจากดินเหนียวชั้นล่างมีปริมาณน้ำในดินน้อยกว่าทำให้ผสมเข้ากันได้ยาก ผลการทดสอบการยุบอัดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัว (C_u) มีค่าเพิ่มขึ้น 12-19 เท่า และค่าดัชนีการอัดตัว (C_c) มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 30 โดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับดินเดิม ในการผสมทั้ง 2 วิธี พบว่าในการผสมแบบแห้งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยุบอัดตัว (C_u) มากกว่าแบบเปียกประมาณร้อยละ 20 และค่าดัชนีการอัดตัว (C_c) จากการผสมแบบแห้งมีค่าลดลงได้มากกว่าการผสมแบบเปียกประมาณร้อยละ 15 ดังนั้น จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำและค่ายุบอัดตัวสูงได้ โดยวิธีการผสมแบบแห้งดินเหนียวที่มีสภาพอ่อนมาก ส่วนวิธีการผสมแบบเปียกเหมาะสำหรับดินเหนียวอ่อนปานกลางถึงดินเหนียวแข็ง



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุ

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินเหนียวอ่อน บริเวณไบทะบางนา แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ใช้วิธีการเปิดหน้าดินกว้าง มีระดับความลึก 4-5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แล้วเก็บตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิดตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเหนียว ส่วนทรายเป็นตัวอย่างทรายแม่น้ำจากอำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 10



รูปที่ 3.1 เก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบถูกรบกวน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

| คุณสมบัติของดินทางกายภาพ | |
|---------------------------|-------|
| Natural Water Content (%) | 56.73 |
| Specific Gravity, Gs | 2.69 |
| Liquid Limit, LL (%) | 40.00 |
| Plastic Limit, PL (%) | 25.48 |
| Plastic Index, PI (%) | 14.52 |

3.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ

ชั้นแรกนำดินเหนียวมาผสมกับทรายที่ 0, 20 และ 40% โดยน้ำหนักแห้งของดินเหนียว เติมน้ำในส่วนผสมให้มีปริมาณความชื้นมากกว่าค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ของส่วนผสม ประมาณ 5 % เพื่อป้องกันการผสม จากนั้นทำการผสมซีเมนต์เพสต์ที่ 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) เท่ากับ 1:1 แล้วนำซีเมนต์เพสต์ที่ได้ ผสมเข้ากับส่วนผสมของดินเหนียวบนทรายที่เตรียมไว้ ด้วยเครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็กให้เข้ากัน ตารางที่ 3.2 แสดงถึงปริมาณซีเมนต์และทรายสำหรับกรณีศึกษาในครั้งนี้ จากนั้นนำตัวอย่าง ดินซีเมนต์ที่ผสมเข้ากันดีแล้วใส่ในแบบหล่อเตรียมตัวอย่าง 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งได้แก่

3.2.1 แบบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm สูง 7 cm เพื่อทดสอบหาค่าแรงกด แกนเดียว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 และทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยุบอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ (CU test) ตามมาตรฐาน ASTM D 4767-95

3.2.2 แบบคานขนาด $7.5 \times 7.5 \times 35 \text{ cm}^3$ สำหรับทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดด้วยวิธี Third point loading test ตามมาตรฐาน ASTM D 1635

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของปริมาณทรายและซีเมนต์ในกรณีต่างๆ

| กรณี | ส่วนผสมในดินเหนียว | | |
|------|---|---|---|
| | ปริมาณทราย (% ของน้ำหนักดิน เหนียวแห้ง) | ปริมาณน้ำ (% ของน้ำหนักดิน เหนียวแห้ง+ทราย) | ปริมาณซีเมนต์ (% ของน้ำหนักดิน เหนียวแห้ง+ทราย) |
| 1 | 0 | 45.00 | 10 |
| | | | 15 |
| | | | 20 |
| 2 | 20 | 35.20 | 10 |
| | | | 15 |
| | | | 20 |
| 3 | 40 | 31.35 | 10 |
| | | | 15 |
| | | | 20 |



รูปที่ 3.2 การจัดทำตัวอย่างการทดสอบ

จากนั้นนำดินซีเมนต์ออกจากแบบหล่อเตรียมตัวอย่างในขณะที่ดินซีเมนต์เริ่มแข็งตัวแล้วห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกป้องกันความชื้นไม่ให้ระเหยออกไป เก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 28 วันก่อนนำไปทดสอบ ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ 1 ชุดตัวอย่างเท่ากับ 3 ตัวอย่าง โดยนำค่าทั้ง 3 ตัวอย่าง มาเฉลี่ยเป็น 1 ตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างของการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างของการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม

| การทดสอบ | ตัวอย่าง | จำนวนตัวอย่างทดสอบ | | | รวม |
|--------------------|--------------|--------------------------|---|----|-----|
| | | ปริมาณทรายหยาบที่ผสม (%) | 0 | 20 | |
| Unconfined Test | ซีเมนต์ 10 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | ซีเมนต์ 15 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | ซีเมนต์ 20 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Triaxial Test | ซีเมนต์ 10 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | ซีเมนต์ 15 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | ซีเมนต์ 20 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Modulus of Rupture | ซีเมนต์ 10 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | ซีเมนต์ 15 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | ซีเมนต์ 20 % | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | รวม | | | | 81 |

3.3 การทดสอบ

3.3.1 ทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, G_s) ตามมาตรฐาน ASTM D 854-00

3.3.2 ทดสอบหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, γ) ทดสอบหาปริมาณความชื้น (Water Content) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216-98

3.3.3 ทดสอบขีดพิคต์แอดเตอร์เบอร์รี่ (Atterberg's Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93

3.3.4 ทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 เพื่อหาค่าความสามารถในการรับแรงของดินตัวอย่าง ซึ่งจากการทดสอบสามารถหาค่าสมบัติ

ทางวิศวกรรมต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) ค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength , UCS , q_u)
- 2) ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength , S_u)
- 3) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained modulus of elasticity, E_u)

3.3.5 ทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test (CU Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 4767-95

ในการทดสอบ CU-Test ใช้ค่าความดันอัดน้ำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัว (Back Pressure) เท่ากับ 30 ตันต่อตารางเมตร จนตัวอย่างดินอิ่มตัวและใช้ค่าความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure, σ_3) ที่ 15 , 25 และ 35 ตันต่อตารางเมตร จนตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ นำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test ด้วยอัตราการเฉือน (Shear Rate) เท่ากับ 0.07 ม.ม./นาที จนตัวอย่างดินพิบัติหรือการทดสอบที่ค่าความเครียดมากกว่า 20% ตามมาตรฐานASTM จากการทดสอบสามารถหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) Total Shear Strength Parameter , (c, ϕ)
- 2) Effective Shear Strength Parameter , (c', ϕ')
- 3) Pore Water Pressure at Failure , (Δu_f)
- 4) Strain at Failure , (ϵ_f)
- 5) q / p' at Failure
- 6) Deviator Stress at Failure, (q_f)
- 7) A_f Parameter , (A_f)

ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test

- 1) นำตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างมาขึ้นรูปตัวอย่างให้มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 วัตถุประสงค์และชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณต่อไปติดตั้งตัวอย่างเข้า Cell หุ้มด้วยพลาสติกยาง (Rubber Membrane) 2 ชั้นเพื่อป้องกันการรั่ว หัวท้ายตัวอย่างเป็นแผ่นหินพรุน (Porous Stone) เพื่อระบายน้ำ รอบตัวอย่างดินใช้แผ่นกระดาษกรองฉลุพันรอบก่อนตัวอย่างเพื่อช่วยในการระบายน้ำและใช้ยางกลม (O - ring) 2 เส้น รัศมีและใต้ตัวอย่าง เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ จากนั้นติดตั้งระบบเครื่องมือให้ถูกต้องเติมน้ำเข้า Cell จนเต็มแล้วตรวจสอบฟองอากาศในสายยางของ U_b ถ้ามีฟองอากาศจะต้องไล่ฟองอากาศออกจนหมด

- 2) ทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Sample) เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว อัดความดันน้ำในส่วนของความดันภายใน (Back Pressure) เท่ากับ 4 ตันต่อตารางเมตร ความดัน

เซลล์ (Cell Pressure) เท่ากับ 5 ตันต่อตารางเมตร อัตราความดันทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ให้ความดันน้ำอัดเข้าไปในตัวอย่างเพื่อสลายฟองอากาศ หลังจากนั้นทำการปรับความดันเพิ่มทีละ 5 ตันต่อตารางเมตร ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง จนถึงค่าความดันเท่ากับ 35 ตันต่อตารางเมตร พร้อมกันนี้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ (B Value Check) ให้ค่า B มีค่าเท่ากับ 1 ($\frac{\Delta u}{\Delta \sigma} = 1$)

3) อัดตัวคายน้ำตัวอย่างดิน (Consolidated) ในการศึกษาได้ทำการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างดินภายใต้ความดันดิน (Confining Pressure) เท่ากับ 15, 25, และ 35 ตันต่อตารางเมตร จนตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ

4) การเฉือนตัวอย่างดิน (Shearing) หลังจากตัวอย่างดินสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำเรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่างทดสอบเข้าสู่เครื่องเพิ่มแรงเฉือนเป็นเครื่องอัดสามแกน ปิดวาล์วน้ำ U_b เลื่อนแกนกดตัวอย่าง (Piston) ให้สัมผัสกับตัวอย่างโดยสังเกตจากเข็มของมาตรวัดแรง (Proving Ring) ติดตั้ง Dial Gauge วัดการทรุดตัว และตรวจสอบระบบวัดแรงดันน้ำ ในการทดสอบใช้อัตราเร็วของการเฉือนก่อนตัวอย่าง (Strain Rate) เท่ากับ 0.07 มม./นาที จนกว่าตัวอย่างดินเกิดการพิบัติหรือที่ความเครียดมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน ASTM

3.3.6 การทดสอบกำลังรับแรงคัต (Modulus of Rupture) ตามมาตรฐาน ASTM D 1635

เป็นการหาค่า Modulus of Rupture (R) หรือค่ากำลังความสามารถในการรับแรงคัตของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ โดยใช้แท่งตัวอย่างวางในลักษณะเป็น Simple Beam แล้วทำการให้แรงกดในลักษณะ Third Point Loading สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แบบหล่อที่หน้าตัดภายในเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 7.5 x 7.5 ตารางเซนติเมตร และมีความยาวเท่ากับ 35 เซนติเมตร

ขั้นตอนการทดสอบ นำแท่งตัวอย่างทดสอบมาทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก จากนั้นเข้าเครื่องทดสอบโดยการแบ่งแท่งตัวอย่างตามยาวเหลือบริเวณปลายไว้ 2 ส่วน ส่วนภายในที่เหลือแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่ากันๆ วางแท่งตัวอย่างให้ 3 ส่วนที่แบ่งไว้อยู่ตรงฐานของแท่น เลื่อนเครื่องกดให้แท่นกดด้านบนสัมผัสตรงที่แบ่งไว้ ทำการกดตัวอย่างทดสอบโดยใช้อัตรากดเท่ากับ 0.7 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วบันทึกน้ำหนักสูงสุดเพื่อไปคำนวณหาค่ากำลังรับแรงคัต



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างที่พร้อมทำการทดสอบการรับแรงอัดทิศทางเดียว



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างที่พร้อมทำการทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Test

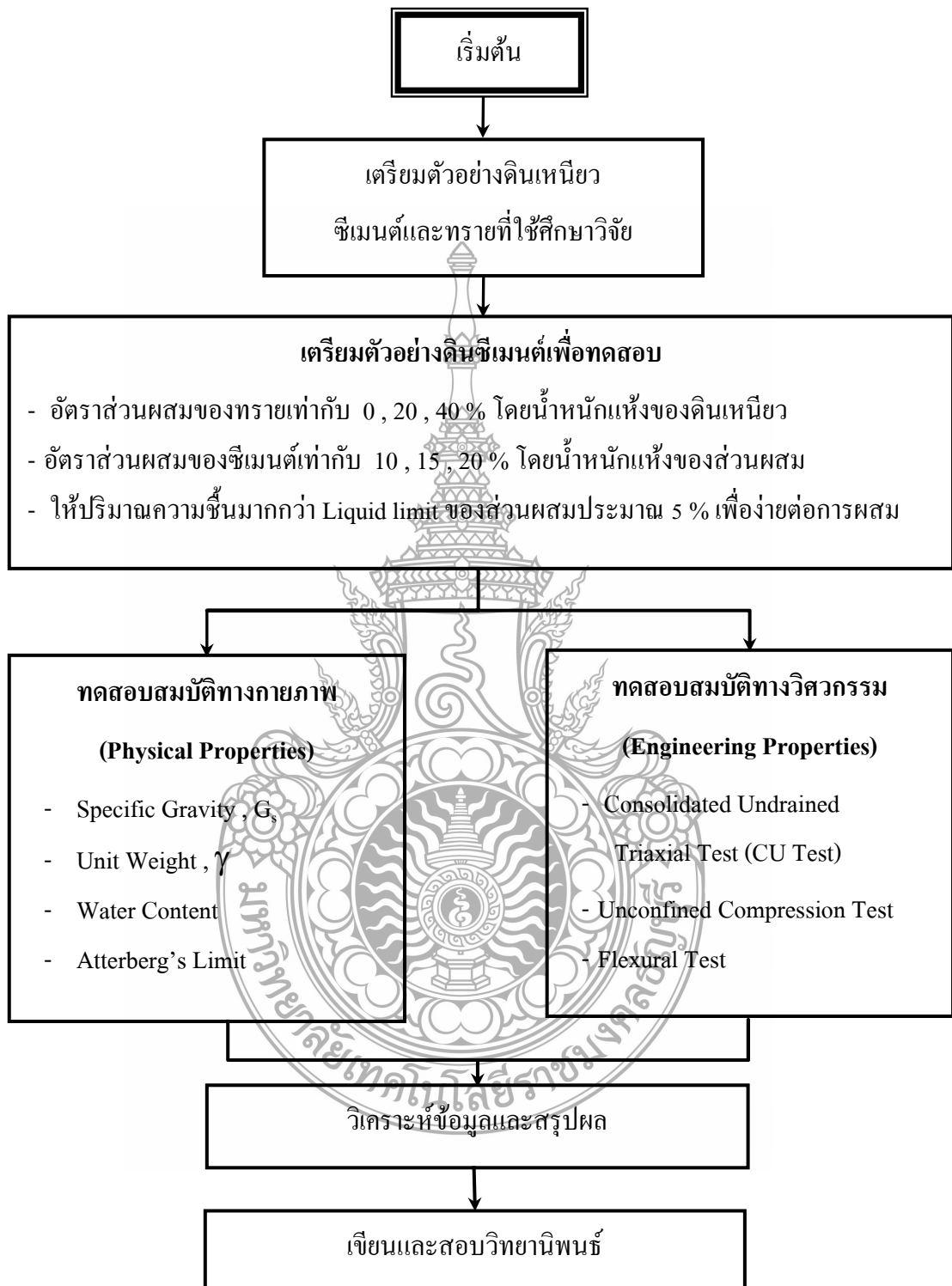


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างที่พร้อมทำการทดสอบ Flexural Test

3.4 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล

หลังจากทำการทดสอบตัวอย่างคานซีเมนต์ผสมเรียบร้อยแล้ว ผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมดจะนำมาทำการวิเคราะห์และสรุปผลดังต่อไปนี้

- 1) วิเคราะห์และสรุปผลถึงผลกระทบของปริมาณทรายและซีเมนต์ ต่อ พฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงเฉือน (c' , ϕ , c , ϕ) ของคานซีเมนต์
- 2) วิเคราะห์และสรุปผลถึงผลกระทบของปริมาณทรายและซีเมนต์ ต่อ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของคานซีเมนต์ ซึ่งแผนภูมิขั้นตอนการทดสอบการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภูมิขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อน

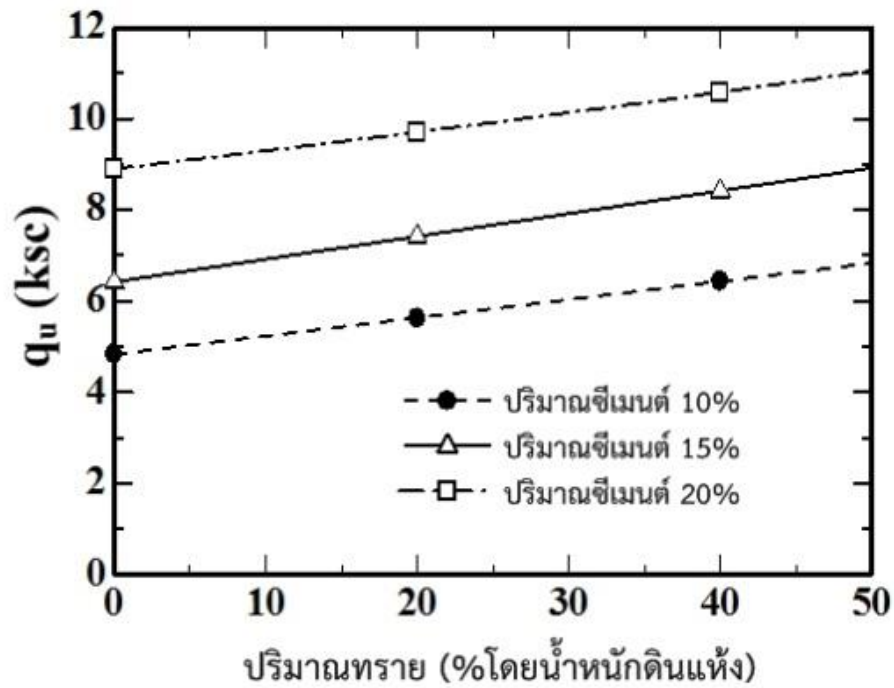
ตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินเหนียวอ่อน บริเวณไบทลบางนา แขวงบางนา เขตบางนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ใช้วิธีการเปิดหน้าดินกว้าง มีระดับความลึก 4-5 เมตร แล้วเก็บตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิด

การทดสอบสมบัติทางกายภาพดินเหนียวอ่อน พบว่าค่าปริมาณความชื้นในธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 56.73% ค่าพิกัดเหลวมีค่าเท่ากับ 40% ค่าพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 25.48% และค่าดัชนีพลาสติกมีค่าเท่ากับ 14.52% ซึ่งกรณีที่ค่าปริมาณความชื้นมีค่ามากกว่าค่าพิกัดเหลวแสดงว่าดินมีค่าความแข็งแรงต่ำ เพราะอยู่ในสภาพเหลว

4.2 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว

4.2.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า Unconfined Compressive Strength (q_u)

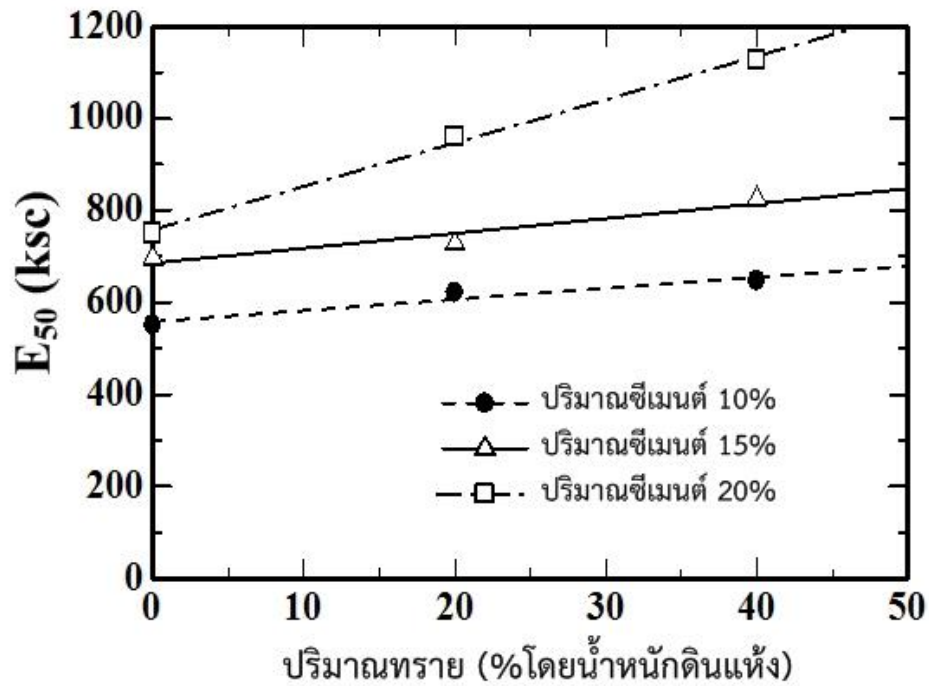
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับปริมาณทราย ที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ พบว่าค่า q_u มีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ และมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับปริมาณทรายเป็นลักษณะสมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เนื่องจากดินทรายซึ่งเป็นดินเม็ดหยาบที่ผสมเพิ่มลงไป ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของดินซีเมนต์ ทำให้มีการส่งถ่ายแรงระหว่างเม็ดดินดีขึ้นกว่ากรณีมีเม็ดดินเหนียวเพียงอย่างเดียว ซึ่งโดยปกติดินทรายนั้นสามารถรับน้ำหนักได้ดีกว่าดินเหนียวอยู่แล้ว



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.2.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า Modulus of Elasticity (E_{50})

ผลของค่า E_{50} มีแนวโน้มที่คล้ายกับค่า q_u พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 20% พบว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E_{50} สูงที่สุด นั่นแสดงว่าปริมาณทรายที่ผสมมีผลทำให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ



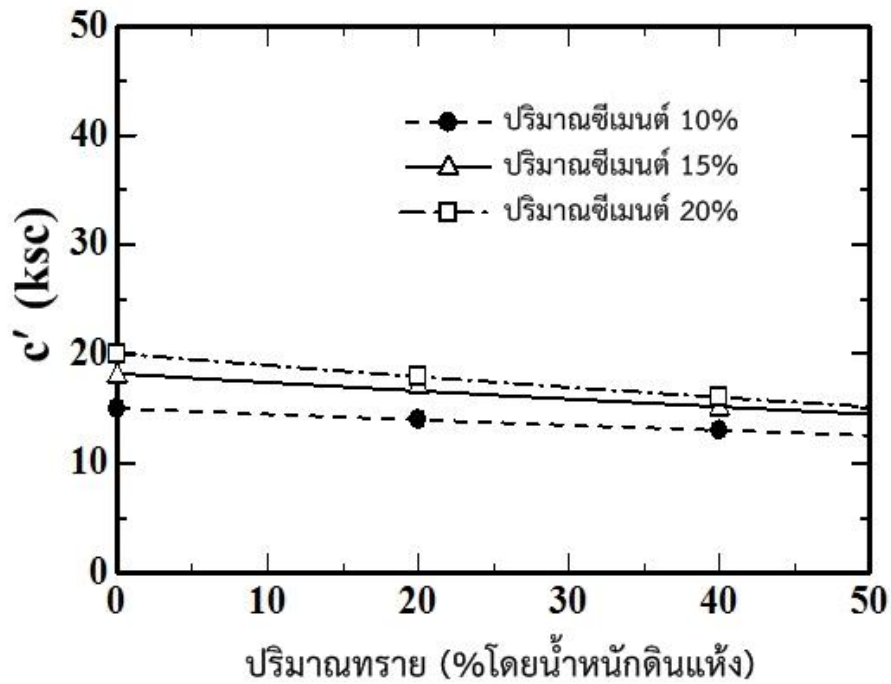
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) กับปริมาณทรายที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน

การศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวปนทรายผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยุบอัดตัวไม่ระบายน้ำ หรือ CU test โดยใช้ค่าความดันรอบด้าน (Confining pressure) ที่ 150, 250 และ 350 กิโลปาสกาล จากนั้นทำการกดตัวอย่างจนวิบัติ นำค่าหน่วยแรงตามแนวแกนสูงสุด (Maximum deviator stress) ที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ได้ผลดังต่อไปนี้

4.3.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะ

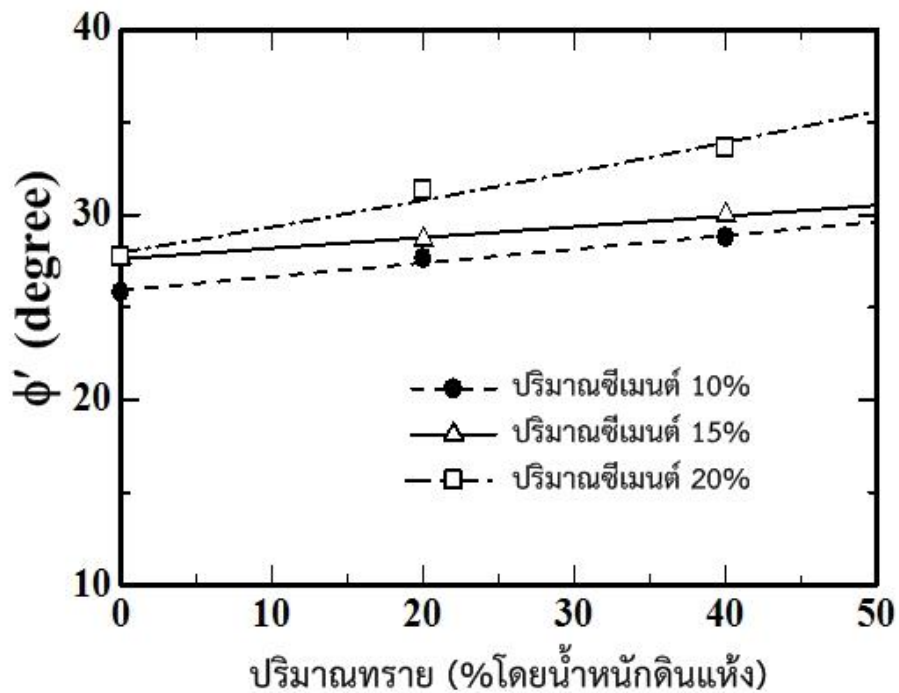
จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงอิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะประสิทธิผล (c') พบว่าปริมาณทรายที่ผสมในส่วนผสมมีผลทำให้ค่า c' เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ค่า c' ที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มาผสมมากกว่าจากการเติมทรายเข้ามาในส่วนผสม



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effective Cohesion Intercept (c') กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.3.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่ามุมเสียดทานภายใน

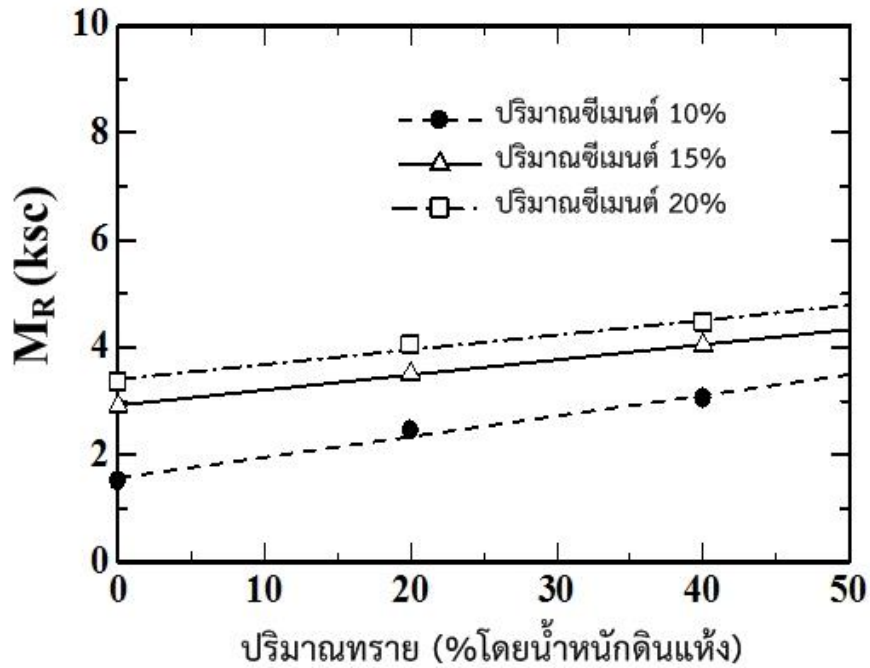
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายในส่วนผสมมีผลทำให้ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') เพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าทรายมีส่วนทำให้แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินมีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างดินซีเมนต์ถูกเจือปน โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และปริมาณทรายเป็นลักษณะของสมการเชิงเส้น



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effective Angle of Shearing Resistance (ϕ') กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.4 ผลการทดสอบแรงดัด

การทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดัด แบบวิธีทดสอบ Third point loading ค่ากำลังรับแรงดัดถูกคำนวณออกมาในเทอมของค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, M_R) สำหรับอิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า M_R ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 พบว่าค่า M_R มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณทรายเข้ามาผสมมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเติมทรายเข้าไปทำให้การจับของซีเมนต์กับมวลรวมดีขึ้นเป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และปริมาณทรายเป็นลักษณะเชิงเส้น นอกจากนี้ค่า M_R เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสุภสิทธิ [65]



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Rupture (M_R) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

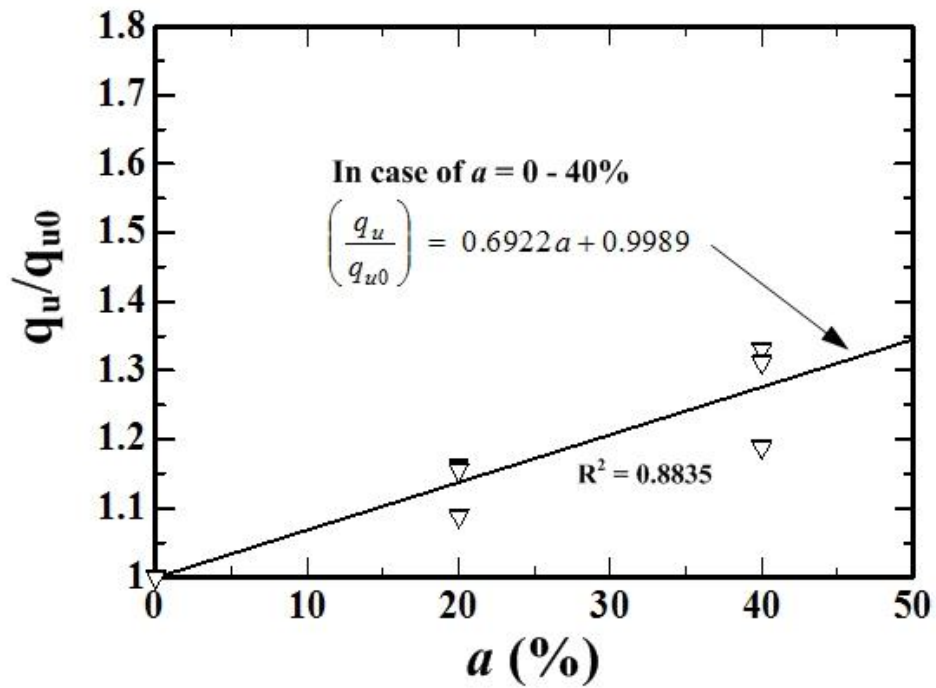
4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u , E_{50} และปริมาณทราย

กำหนดให้ค่า q_{u0} และ q_u คือค่าแรงกดแกนเดียวในหน่วย ksc ของดินซีเมนต์ที่ไม่มีทรายผสมและมีทรายผสมตามลำดับ และค่า a คือปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักดินเหนียวแห้ง จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ โดยนำมาเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง (q_u/q_{u0}) และ a ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่มีค่า $R^2 = 0.8835$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\left(\frac{q_u}{q_{u0}} \right) = 0.6922a + 0.9989 \quad (1)$$

เมื่อค่า a มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 40 %

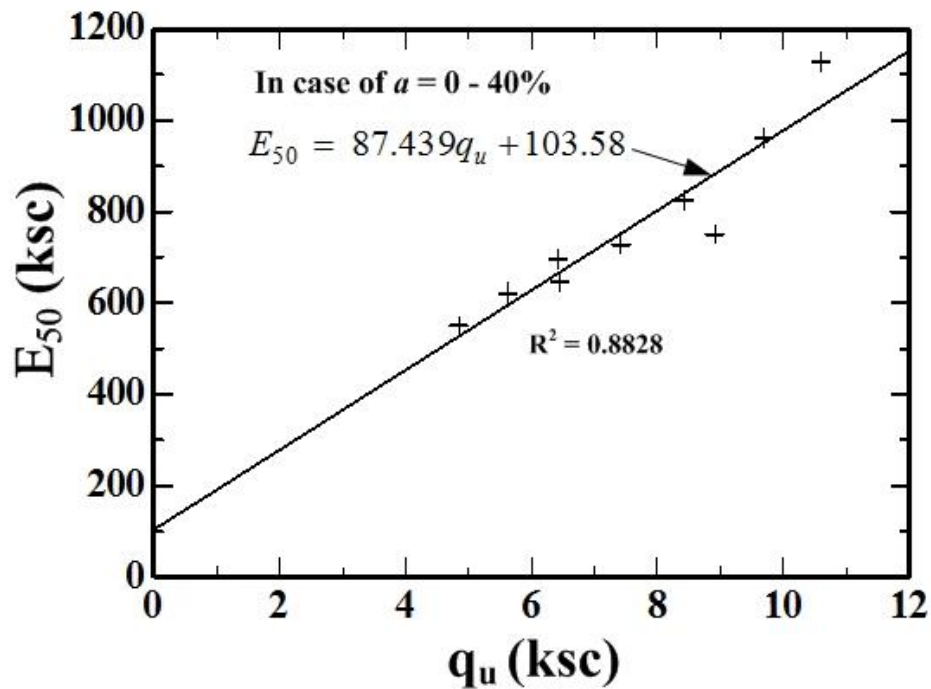
โดยปกติเราจะรู้ค่า q_{u0} แต่เราไม่รู้ค่า q_u ที่มีทรายผสม a % ดังนั้นสมการนี้เอาไว้หาค่า q_u นั้นเอง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ a

จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ q_u ของดินซีเมนต์ผสมทรายระหว่าง 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยนำน้ำหนักดินเหนียวแห้ง ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.8828$ พบว่าค่า q_u เพิ่มขึ้นทำให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นตาม ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{50} = 87.439q_u + 103.58 \quad (2)$$

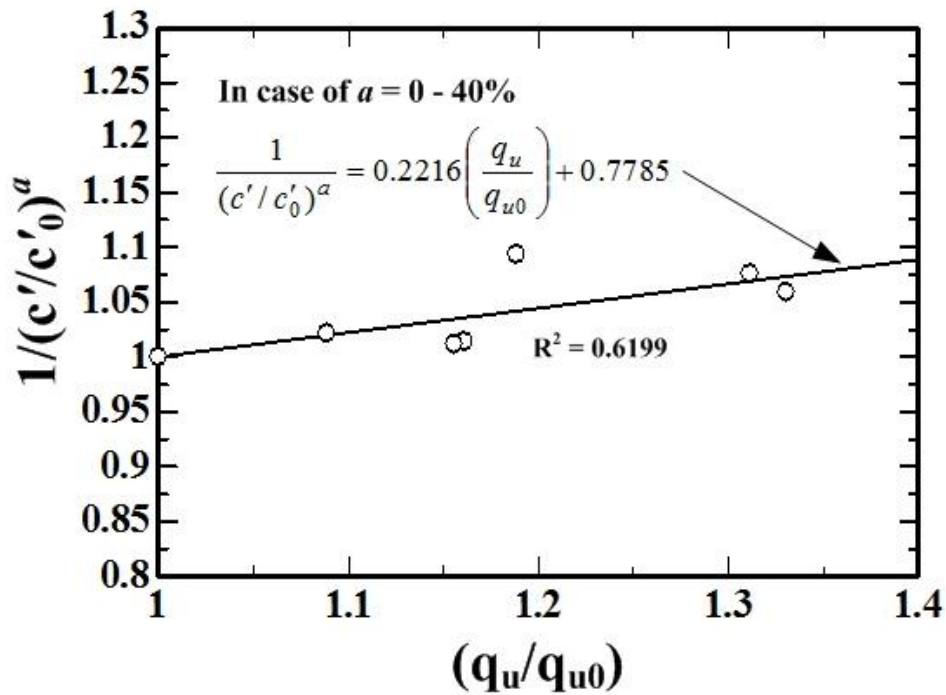


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ q_u

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า c' , q_u และปริมาณทราย

กำหนดให้ ค่า c'_0 และ c' คือค่าแรงยึดเกาะในหน่วย ksc ของดินซีเมนต์ที่ไม่มีทรายผสมและมีทรายผสมตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ โดยนำมาเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง (q_u/q_{u0}) และ $(c'/c'_0)^a$ ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.6199$ และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{(c'/c'_0)^a} = 0.2216 \left(\frac{q_u}{q_{u0}} \right) + 0.7785 \quad (3)$$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ $(c'/c'_0)^a$

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u

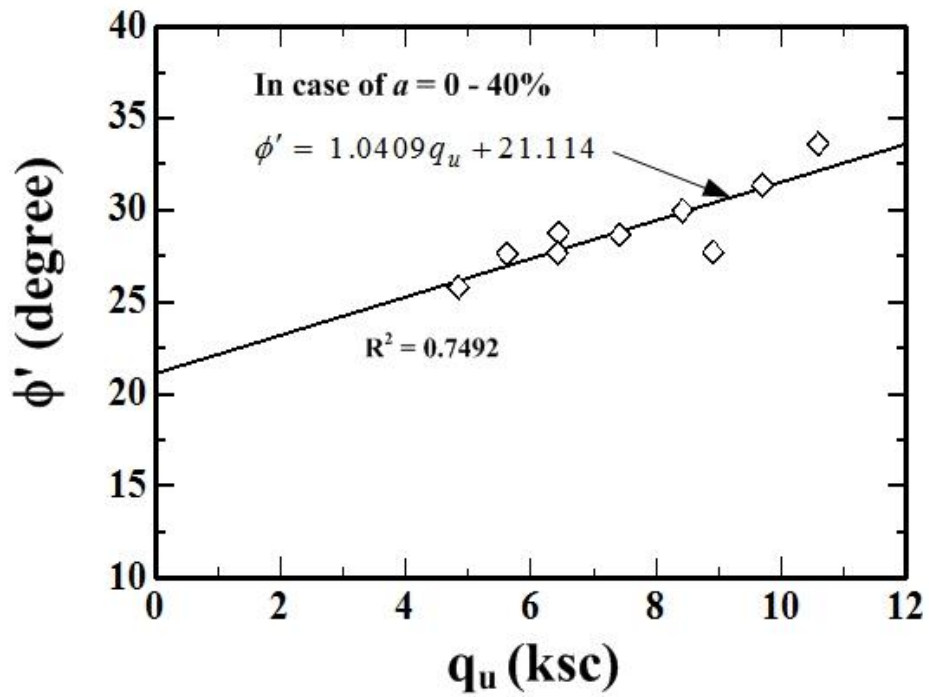
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u สามารถหาได้จากรูปที่ 4.9 พบว่ามีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น มีค่า $R^2 = 0.7492$ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า q_u ทำให้ค่า ϕ' เพิ่มขึ้นตามเป็นลักษณะสมการเชิงเส้น มีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\phi' = 1.0409q_u + 21.114 \quad (4)$$

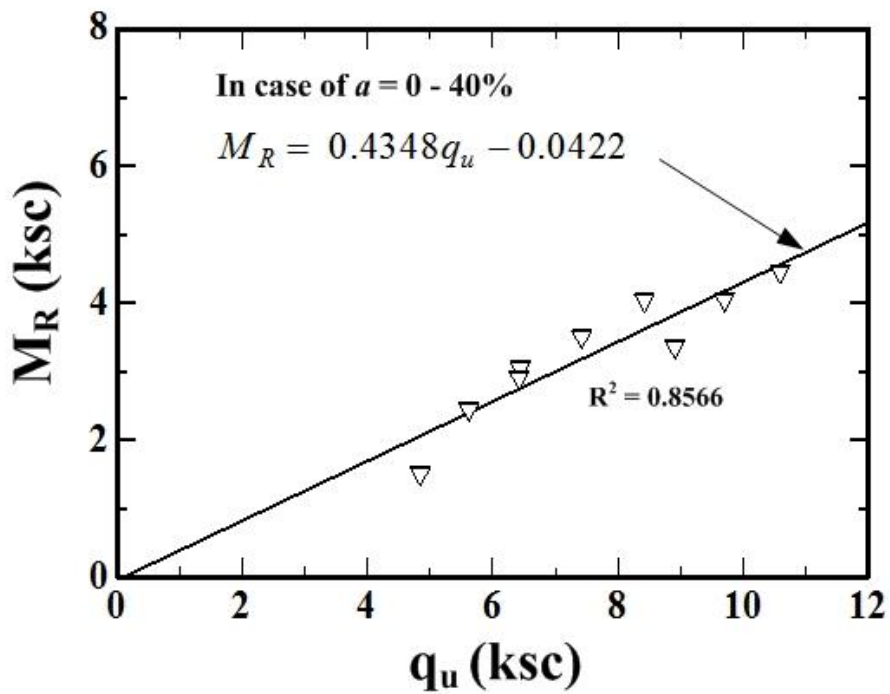
4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u

ในรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u ของดินซีเมนต์ผสมทรายในปริมาณ 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง มีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.8566$ การเพิ่มขึ้นของค่า q_u ส่งผลให้ค่า M_R สูงขึ้นตาม และสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$M_R = 0.4348q_u - 0.0422 \quad (5)$$



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษากำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงคดของคานเหินขื่ออ่อนปนทรายผสมซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายในส่วนผสม เป็นผลทำให้คุณสมบัติด้านการรับแรงของคานซีเมนต์ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การเพิ่มปริมาณทรายในส่วนผสมของคานซีเมนต์มีผลทำให้ค่า q_u , ϕ' และ M_R เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามทำให้ค่า c' เปลี่ยนแปลงจากส่วนผสมคานซีเมนต์ที่ไม่ได้ใส่ทรายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} , ϕ' และ M_R กับค่า q_u มีลักษณะเป็นแบบสมการเชิงเส้น

5.1.3 โครงการนี้ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า c' , q_u และปริมาณทราย เพื่อใช้ในการหาค่า q_u และ c' คานซีเมนต์ เมื่อทราบค่า q_{u0} ของคานซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทรายเพิ่ม และค่า a ในกรณีมีทรายผสมอยู่ในปริมาณไม่เกิน 40 % โดยน้ำหนักคานเหินขื่อแห้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาทดสอบเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการวิเคราะห์เพียงด้านเดียว ซึ่งผลที่ได้ อาจไม่ตรงกับพฤติกรรมจริงเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 อาจจะนำข้อมูลไปใช้งานจริงในภาคสนาม แล้วนำผลข้อมูลมาเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการ หาค่าเปรียบเทียบปรับแก้เพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องกับค่างานจริงในสนาม

5.2.2 ควรจะมีการเพิ่มตัวอย่างทดสอบมากกว่านี้ เพื่อให้การศึกษามีผลของข้อมูล มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ควรจะมีการศึกษาดินเหนียวที่ผสมด้วยทรายประเภทเม็ดละเอียด เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานได้กว้างขวางขึ้น

5.2.4 ควรจะศึกษาคุณสมบัติของดินชนิดอื่นๆที่ผสมกับซีเมนต์และทราย เช่น กรณีที่ดินมีลักษณะเป็นกรด อาจจะต้องมีการศึกษาถึงสารที่นำมาทำการปรับแก้คุณภาพดินเสียก่อนที่จะนำมาปรับปรุง เพื่อหาคุณสมบัติต่างๆ หรืออาจจะนำดินที่อยู่ริมทะเลมาทำการศึกษาค้ด้วย เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, 2012, pp. 44-58.
- [6] Davidson, D. T., "Soil Stabilization with Portland Cement," Highway Research Board, Bulletin 292, 1961, pp. 45-151.
- [7] Mills, W. H., Jr., "Road Base Stabilization with Portland Cement," Engineering News-Record, vol. 115, No. 22, 1935, pp. 751-753.
- [8] 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.
- [9] Terrel, R. J., Barenberg, E. J., Mitchell, J. M. and Thomson, M. R., Soil Stabilization in Pavement Structure, A User's Manual Mixture Design Consideration, vol. 2, Washington D.C.: Government Printing Office, 1979.
- [10] The Siam Cement Company Ltd, "Demonstration Road Using Local Soil with Cement Stabilization," Bangkok: Siam Cement, 1965, pp. 25-26.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] ชีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สมบัติกระแสน์ จรัสกร, “กำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน,” รายงานการวิจัยฉบับที่ วพ.188, กรุงเทพฯ, ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, หน้า 160-163, 2544.
- [12] Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization, “Definition of Term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization,” Highway Research Abstracts, vol. 29, No. 6, 1959, pp. 28-29.
- [13] Lambe, T. W., Michaels, A. S. and Moh, Z. C., “Improvement of Soil Cement with Alkali Metal Compounds,” Highway Research Board, Bulletin 241, 1959, pp. 67-103.
- [14] Herzog, A. and Mitchell, J. K., “Reaction Accompanying the Stabilization of Clay with Cement,” Highway Research Record, vol. 36, 1963, pp. 146-171.
- [15] Moh, Z. C., “Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals,” Highway Research Record, vol. 86, 1965, pp. 39-61.
- [16] Hausmann, M.R., “Engineering Principles of Ground Modification,” McGraw-Hill Publ, Co, Sydney, 1990, p. 632.
- [17] 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.
- [18] Czernin, W., “Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers,” New York Chemical Publishing, 1962, pp. 36-50.
- [19] Mitchell, J. K. and El Jack, S. A., “The fabric of soil-cement and its formation,” In Proceedings of 14th National Conference Clay and Clay Minerals, vol. 26, 1966, pp. 297-305.
- [20] Felt, E. J., “Factors Influencing Physical Properties of Soil-Cement Mixtures,” Highway Research Board, Bulletin 108, 1955, pp. 138-163.
- [21] Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T., “Engineering Properties of lime treated marine soils and DMM,” in Proceedings of 6th Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, 1979, pp. 191-194.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y., "Deep mixing method using cement hardening agent," in Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 1981, pp. 721-724.
- [23] Nontananandh, S., Yupakorn, A. and Jirathanathaworn, T., "Influence of Delay Compaction on Strength of Lateritic Soil Cement" in Proceedings of the 8th National Convention on Civil Engineering (NCCE), Khon Kean, p. 6, 23-25 October 2002.
- [24] Ruenkraitersa, T., "Principle of Soil Stabilization," Group Training in Road Construction, Bangkok, 1982, pp. 17-26.
- [25] Ruenkraitersa, T., "Principle of Soil Stabilization," Highways Department, Bangkok, 1982, pp. 17-27.
- [26] Lade, P.V. and Overton, D.D., "Cementation Effects in Frictional Material," Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, No. 9, pp. 1373-1387, 1989.
- [27] 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.
- [28] Massachusetts Institute of Technology, "Soil Stabilization for Highways," Massachusetts Department of Public Works and Joint, Highway Research Project, Massachusetts, vol. 81, 1954.
- [29] Davidson, D. T. and Bruns, B. W., "Comparison of Type I and Type III Portland Cement for Soil Stabilization," Highway Research Board, Bulletin 267, 1960, pp. 28-45.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Ng, S. C., "Cement Stabilization of Lateritic Soils," Master of Engineering Thesis. Civil Engineering Program, No. 125, Seato Graduate School of Engineering, 1966, pp. 55-65.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] Reinhold, F., "Elastic Behavior of Soil-Cement Mixtures," Highway Research Board, Bulletin 108, 1955, pp. 128-137.
- [34] Redus, J. F., "Study of Soil-Cement Base Courses on Military Airfields, Highway Research Board, Bulletin 198, 1958, pp. 13-19.
- [35] Spangler, M.G. and Patel, O.H., "Modification of a Gumbotil Soil by Lime and Portland Cement Admixtures," Highway Research Board, Proceed 29, 1949, pp. 561-566.
- [36] Norling, L. T. and Packard, R. G., "Expanded Short-Cut Test Method for Determining Cement Factors for Sandy Soil," Highway Research Board, Bulletin 198, 1958, pp. 20-31.
- [37] 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.
- [38] Portland Cement Association, Soil-Cement Laboratory Handbook, Illinois: Skokie, 1959.
- [39] 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.
- [40] Bell, F. G., "The influence of the mineral content of clay on their stabilization with cement," Association of Engineering Geologists, pp. 267-278, 1976.
- [41] Lightsey, G. R., Arman, A. and Callihan, C. D., "Change in Characteristics of Cement Stabilize Soils By Addition of Excess Compaction Moisture," Highway Research Record, vol. 315, 1970, pp. 36-45.
- [42] Highway Research Board, "Prevention of Moisture Loss in Soil-Cement with Bitumious Material," Highway Research Board, Research Report, 1949, p. 353.
- [43] Maner, A. W., "Curing Soil Cement Base," In Proceeding of Highway Research Board. Washington, DC: National Research Council, vol. 31, 1952, pp. 540-558.
- [44] Leadabrand, J. A., "Some Engineering Aspects of Soils-Cement Mixture," Mid-South Section, ASCE, pp.64-69, 27 April 1956.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [45] Wang, M. C. and Huston, M. T., "Direct-Tensile Stress and Strain of Cement Stabilize Soil," Highway Research Record, vol. 351, 1972, pp. 19-24.
- [46] 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.
- [47] Marshall, T. J., "Some Properties of Soil Treated with Portland Cement," Symposium on Soil Stabilization, Australia, 1954, pp. 28-34.
- [48] Ingles, O.G. and Metcalf, J.B., "Soil Stabilization," Sydney, Butterworths, 1972, pp. 64-69.
- [49] Horpibulsuk, S., Miura, N., Nagaraj, T.S. and Koga, H., "Improvement of soft marine clays by deep mixing technique," in Proceeding of 12th International Conference offshore and Polar Engineering, Kitakyushu, Japan, 2002, pp. 584-591.
- [50] Fuller, M. G. and Dabney, G. W., "Stabilizing Weak and Defective Bases with Hydrated Lime," in Roads and Streets, vol. 95, 1952, pp. 64-69.
- [51] Maclean, D. J., Robinson, P. J. M. and Webb, S. B., "An Investigation of the Stabilization of Heavy Clay Soil with Cement for Road Base Construction," Roads and Road Construction, vol. 3, No. 358, 1952, pp. 287-292.
- [52] Lambe, T. W. and Moh, Z. C., "Improvement of Strength of Soil-Cement with Additives," Highway Research Board, Bulletin 183, 1957, pp. 38-47.
- [53] Davidson, D. T., Katti, R. K. and Welch, D. E., "Use of Fly Ash with Portland Cement for Stabilization of Soil," Highway Research Board, Bulletin 198, 1958, pp. 1-11.
- [54] 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.
- [55] Wilmot, T. D., "Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement," Pavement Rehabilitation Workshop, Queensland, pp. 1-14, 24-25 August 1995.
- [56] Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T. S., "Assessment of strength development in cement admixed clays," in Geotechnique, vol. 53, No. 4, 2003, pp. 439-444.
- [57] Lambe, T.W., "The structure of compacted clay", Journal of Soil Mechanics and Foundation, Vol. 84, 1958, pp. 55-70.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [58] Lambe, T. W., "Compacted clay: structure: Trans. Am. Soc.," Civil Engineers, vol. 125, No. 1, 1960, pp. 681-705.
- [59] Bishop, A.W. and Hankel, D.C., The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, The English Language Book Society and Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 1976.
- [60] Skempton, A.W., "The Pore Pressure Coefficients A and B", Geotechnique, Vol. 4, No. 4, 1954, pp. 143-147.
- [61] Lambe, T.W. and Whitman, R.V., "Soil Mechanics," SI Version, New York, John Wiley & Sons, 1979, p. 553.
- [62] Wissa, A. E. and Charles Cushing Ladd, "Effective stress-strength behavior of compacted stabilized soils," No. R 64-32 Res. Rept., 1964.
- [63] อุดม มาศสุวรรณ และ โรจนกร เลิศปิยะนันท์กุล, "การศึกษาพฤติกรรมของดินปรับปรุงคุณภาพ," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536.
- [64] ชีรยุทธ สุจริตตานันท์, "การศึกษาคุณสมบัติของดินซีเมนต์ที่ผสมสารผสมเพิ่ม," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.
- [65] ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิต, "การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมซีเมนต์และปูนขาว," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
- [66] ไพวรรณ เขียวอ่อน, "กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และสารผสมเพิ่ม," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [67] สารา เอียดเนียม, "ผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [68] ธนากร นาเซียงใต้, “พฤติกรรมของแรงคั้นน้ำในดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย,”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [69] อนุวัตร ทองคำ, “การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯโดยวิธีผสมซีเมนต์,”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.
- [70] บันเทิง ทองฉืด, “การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยซีเมนต์ โดยวิธีผสมแห้งและ
ผสมเปียก,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.



ภาคผนวก

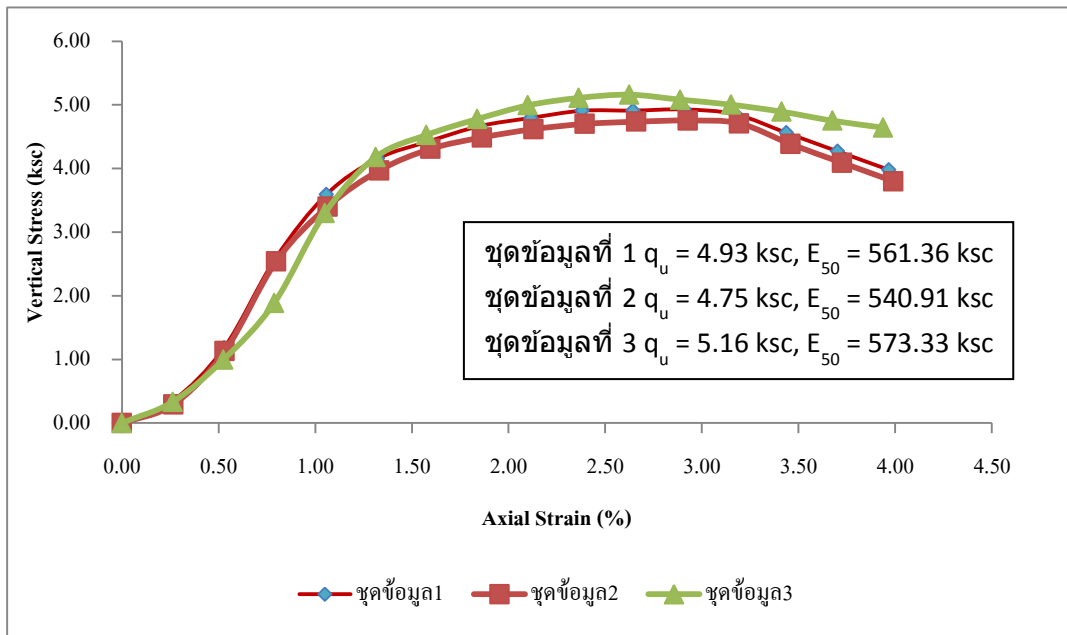




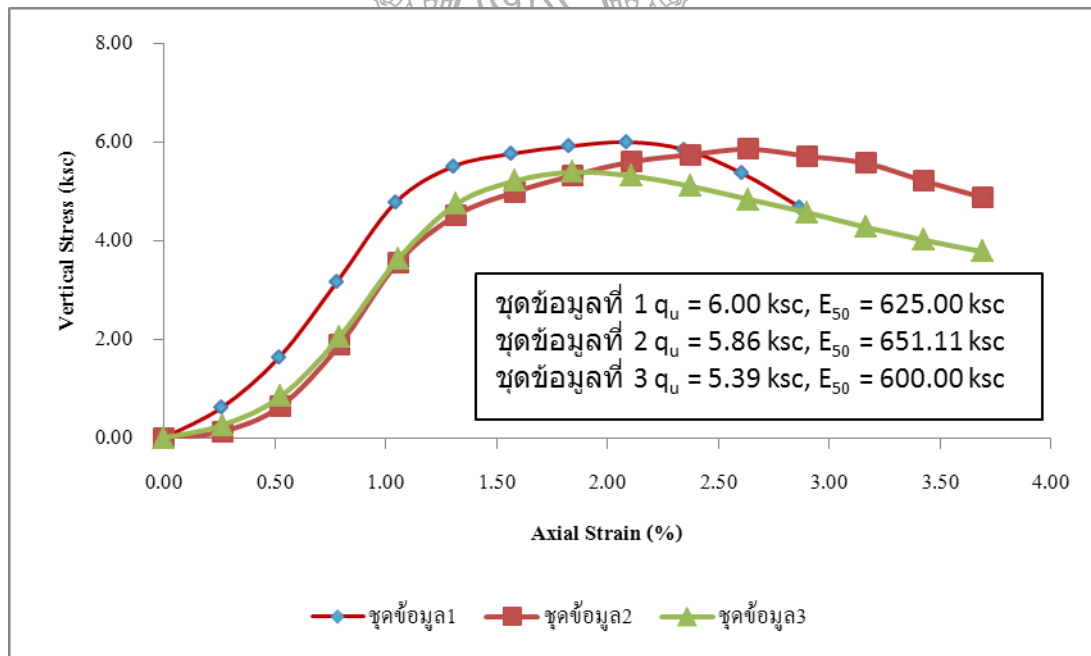
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว

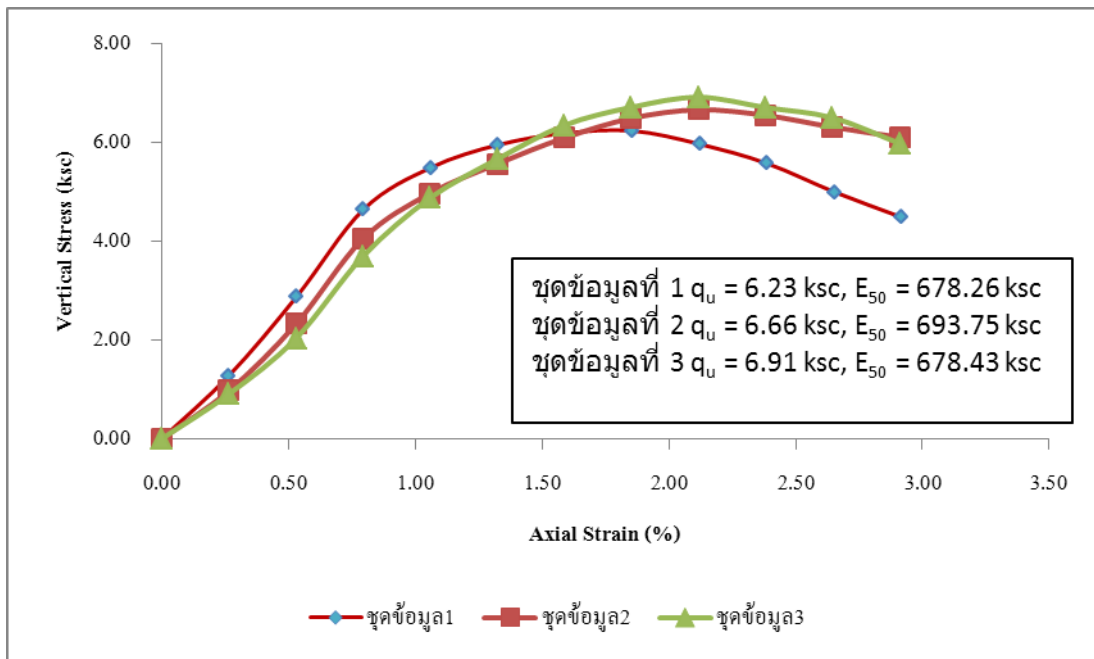
(UNCONFINED COMPRESSION TEST)



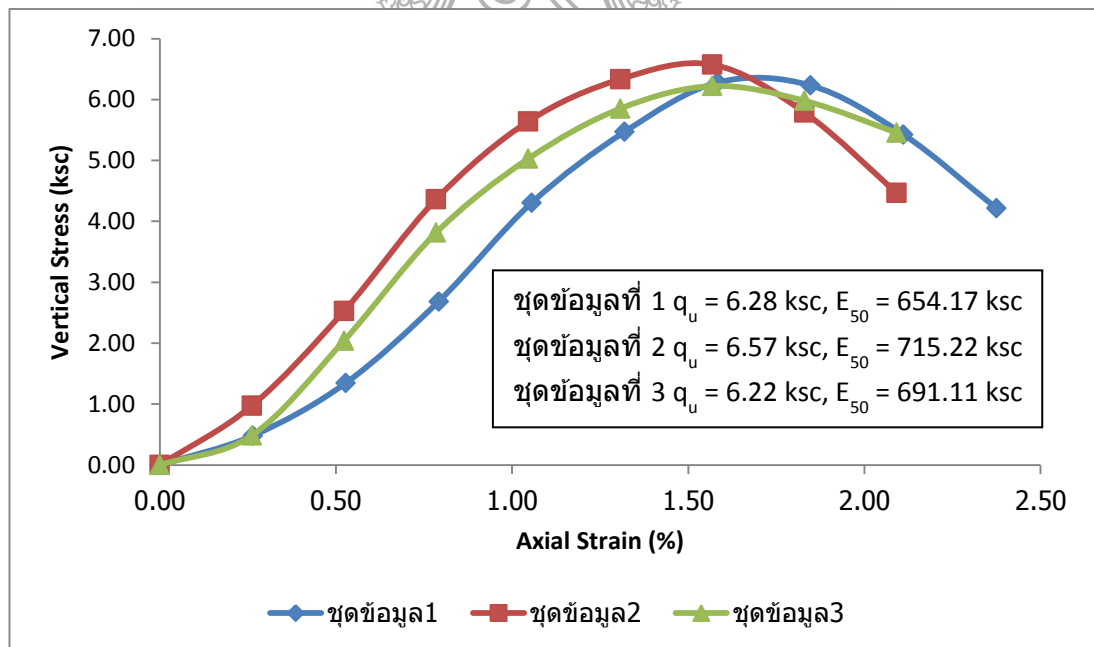
รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%



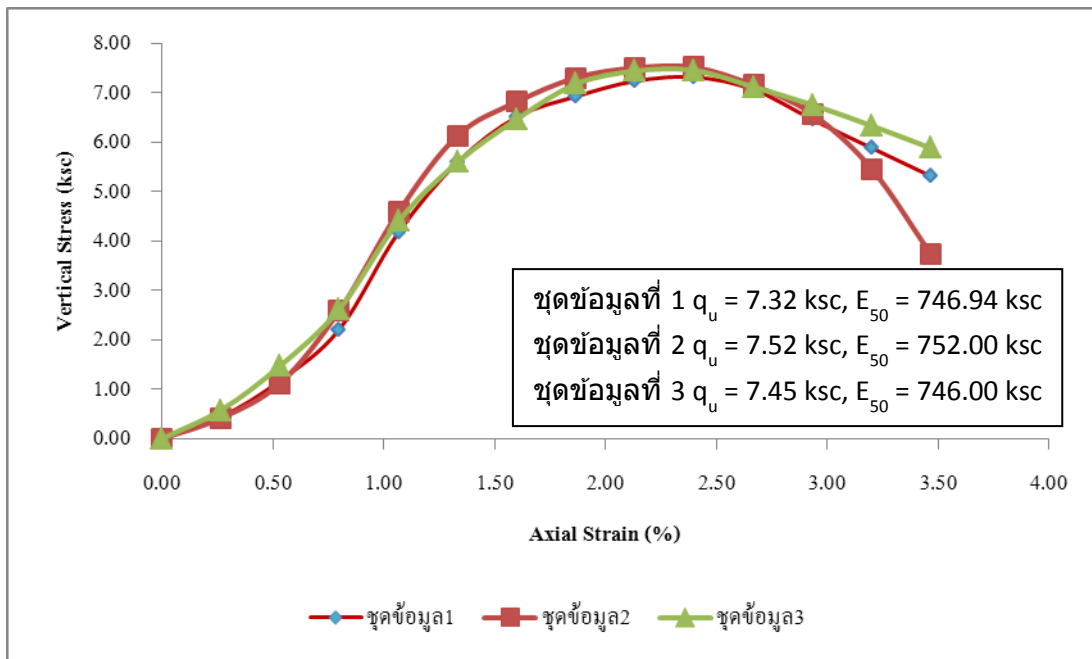
รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% กับปริมาณทราย 20%



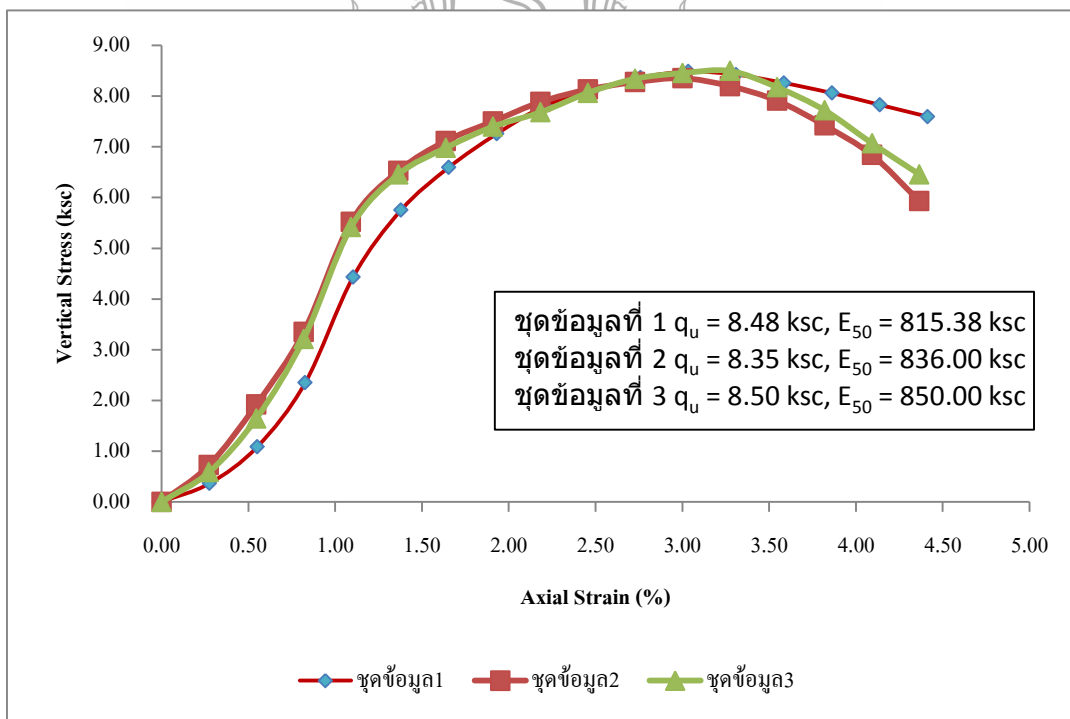
รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% กับปริมาณทราย 40%



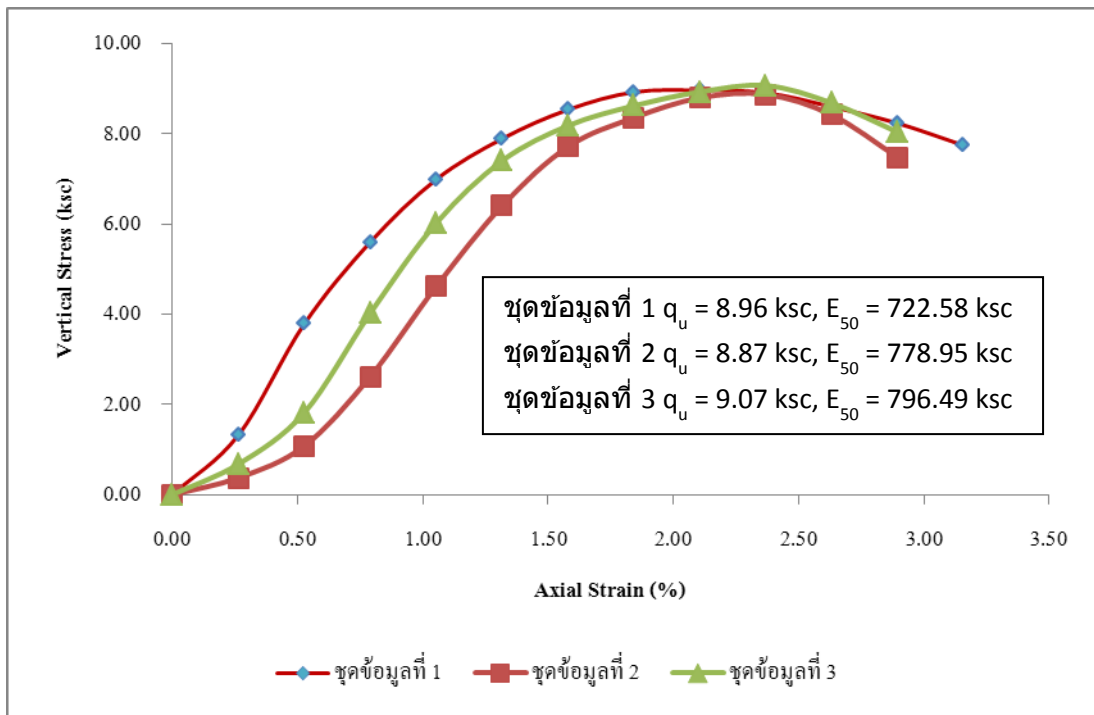
รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%



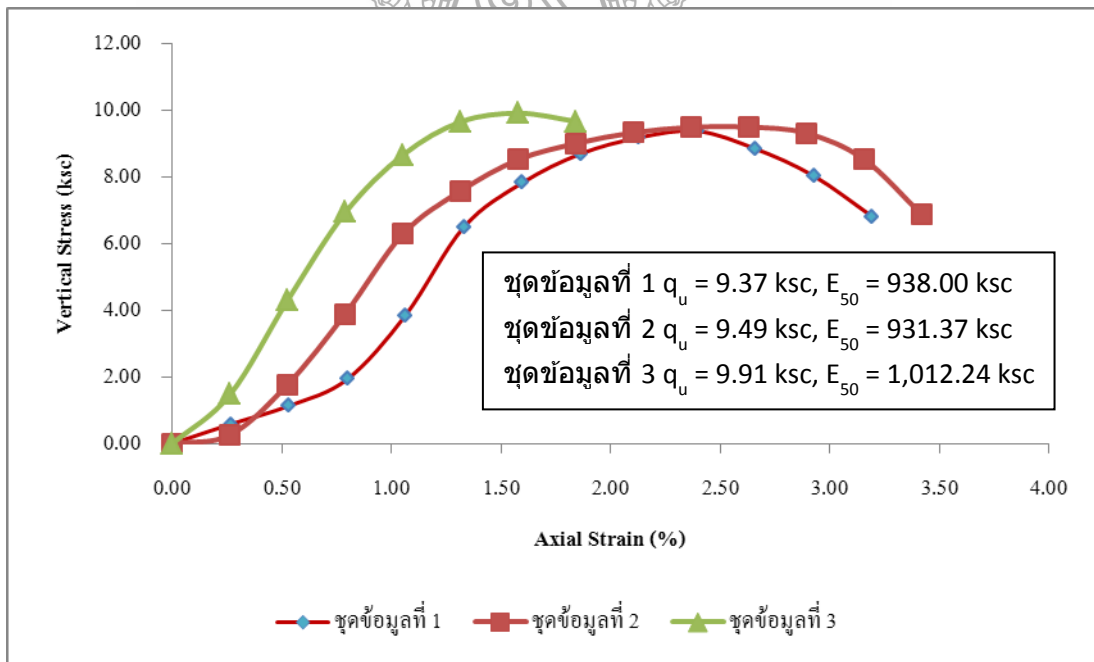
รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% กับปริมาณทราย 20%



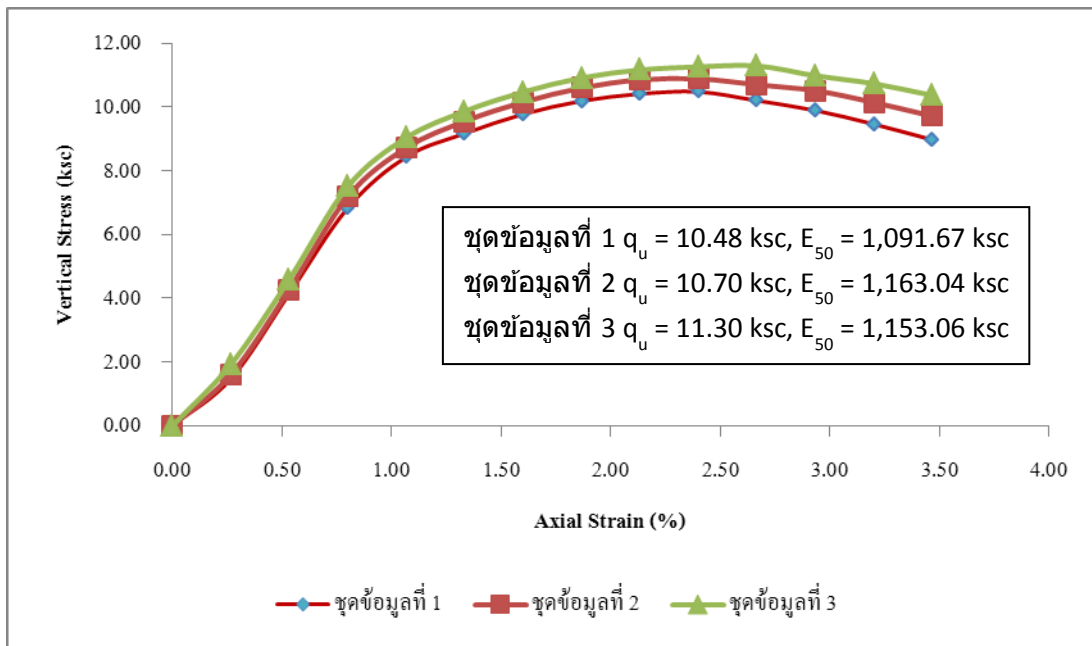
รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% กับปริมาณทราย 40%



รูปที่ ก.7 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20%



รูปที่ ก.8 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% กับปริมาณทราย 20%



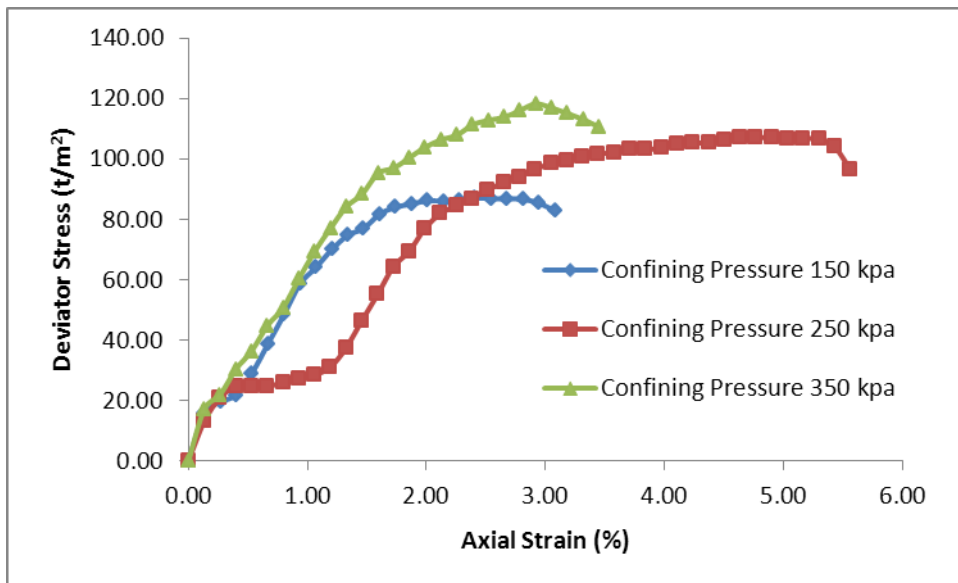
รูปที่ ก.9 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% กับปริมาณทราย 40%



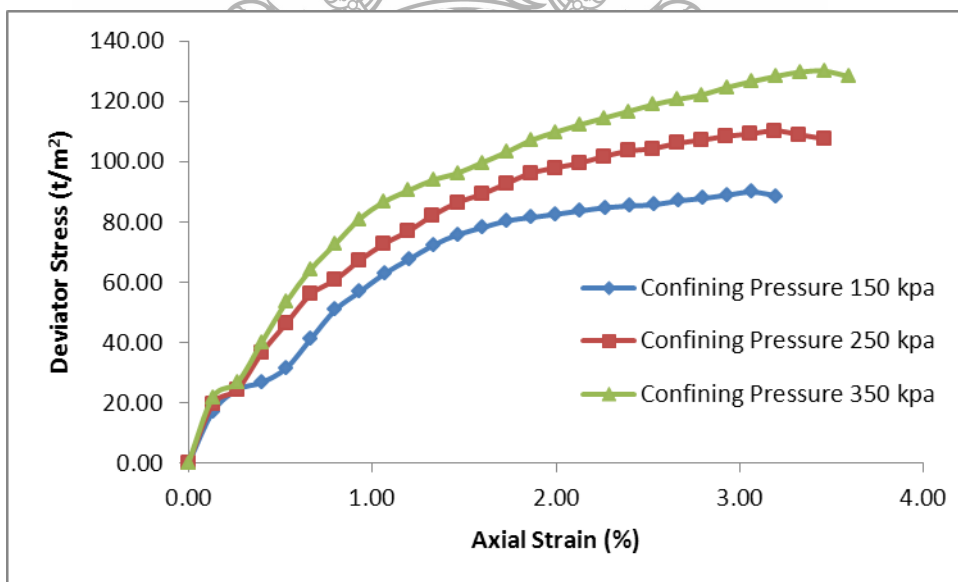


ภาคผนวก ข

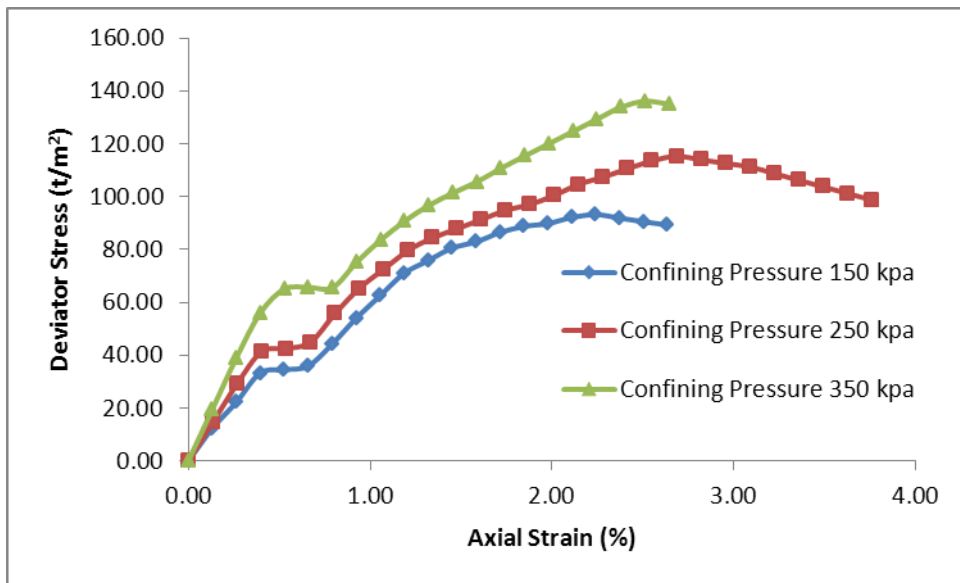
ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน



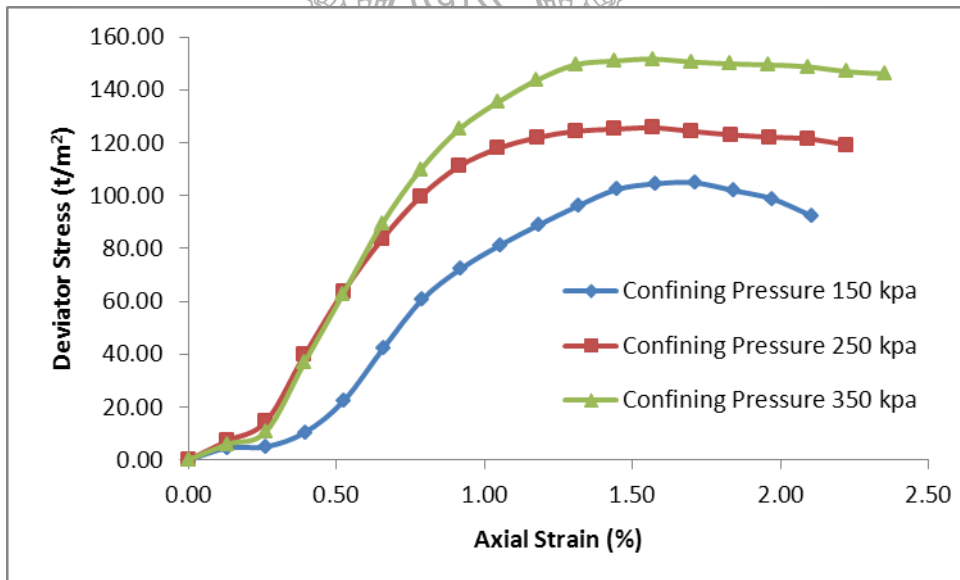
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์
ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%



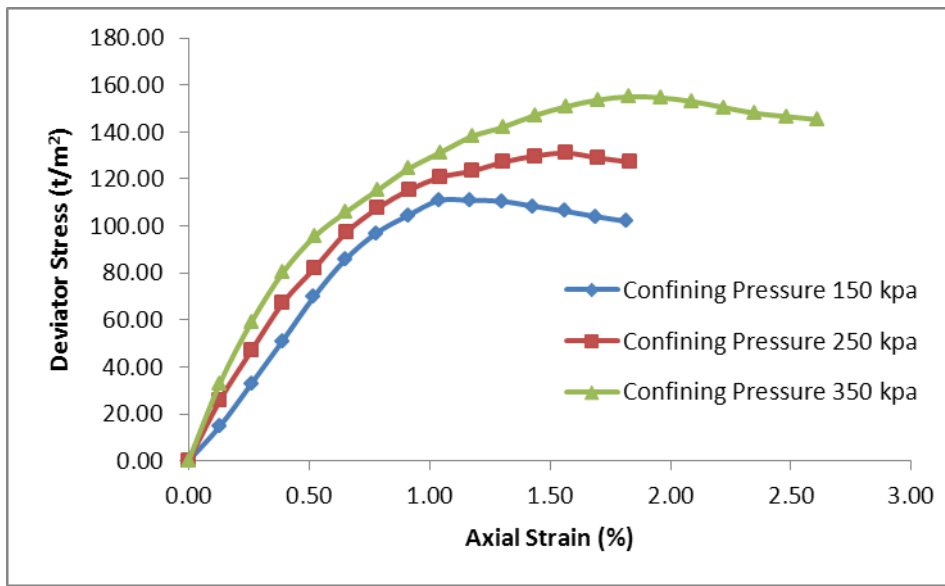
รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์
ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 20%



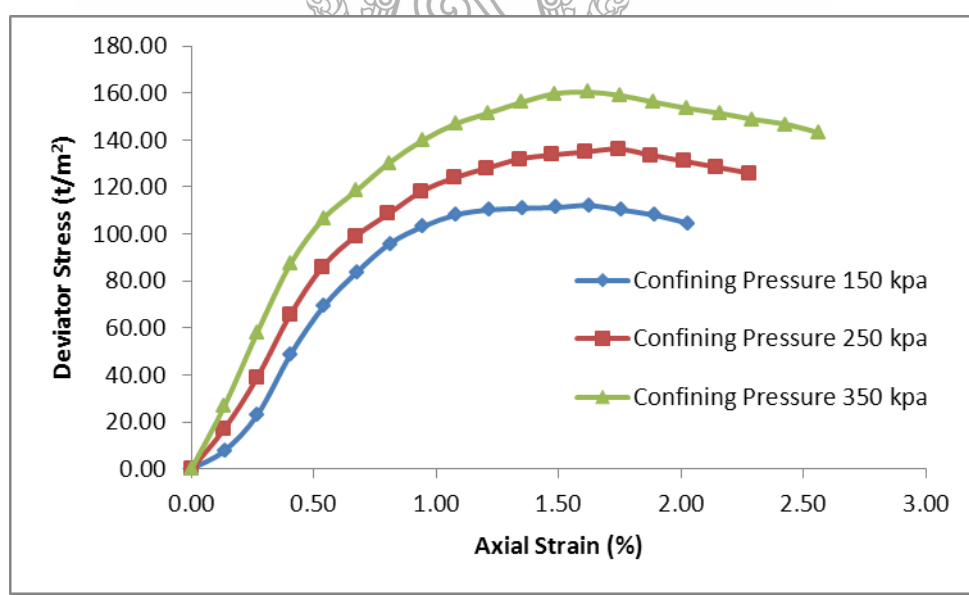
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์
ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 40%



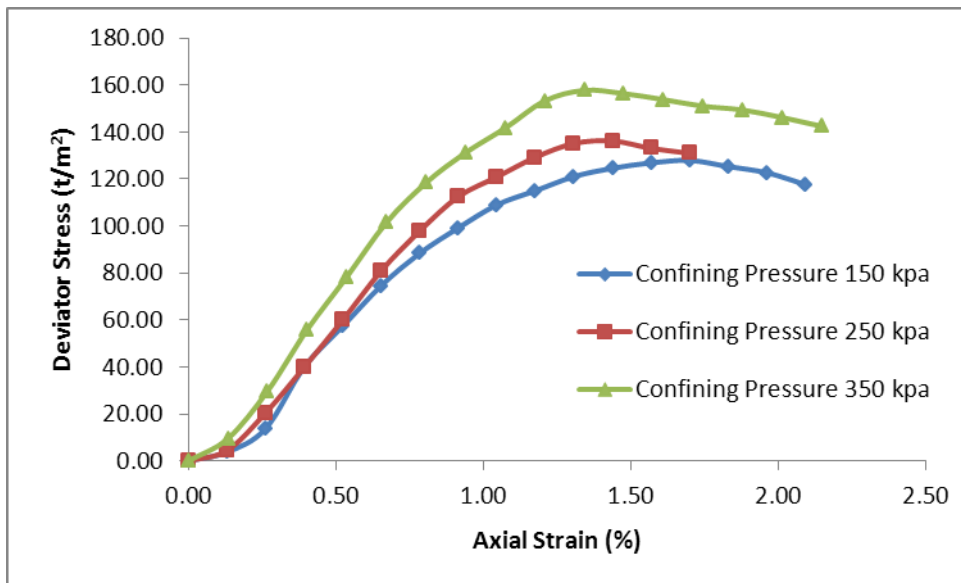
รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์
ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%



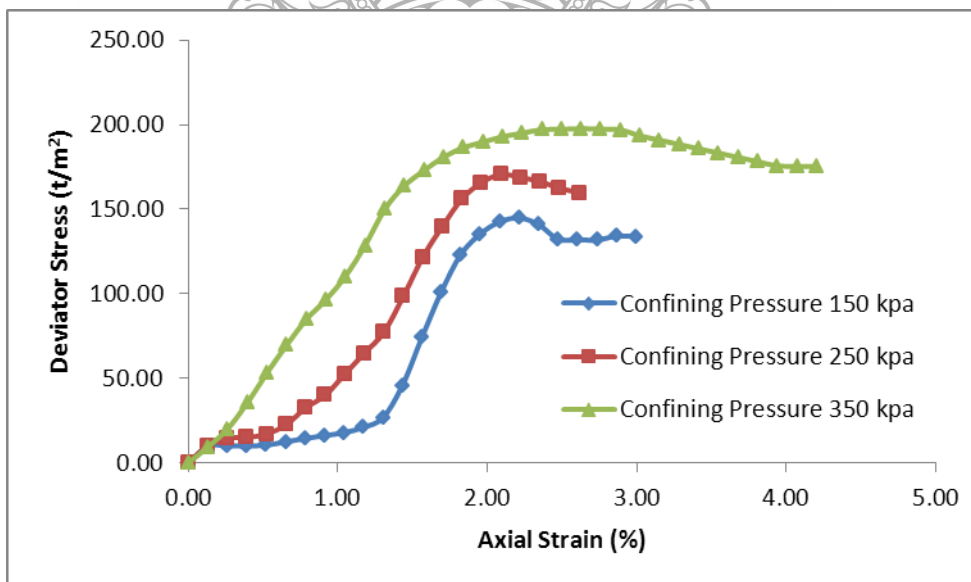
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 20%



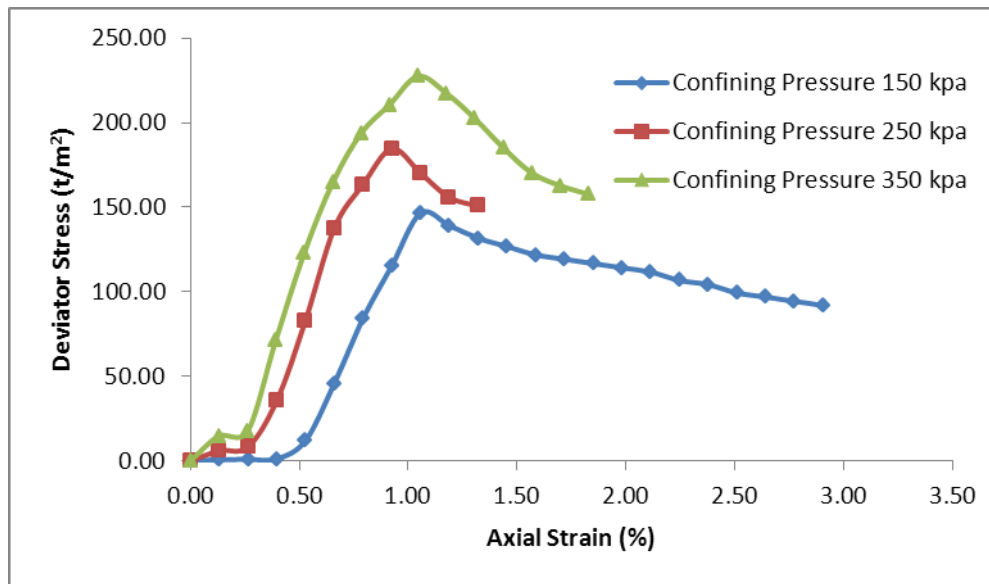
รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 40%



รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์
ที่ปริมาณซีเมนต์ 20%



รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์
ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 20%



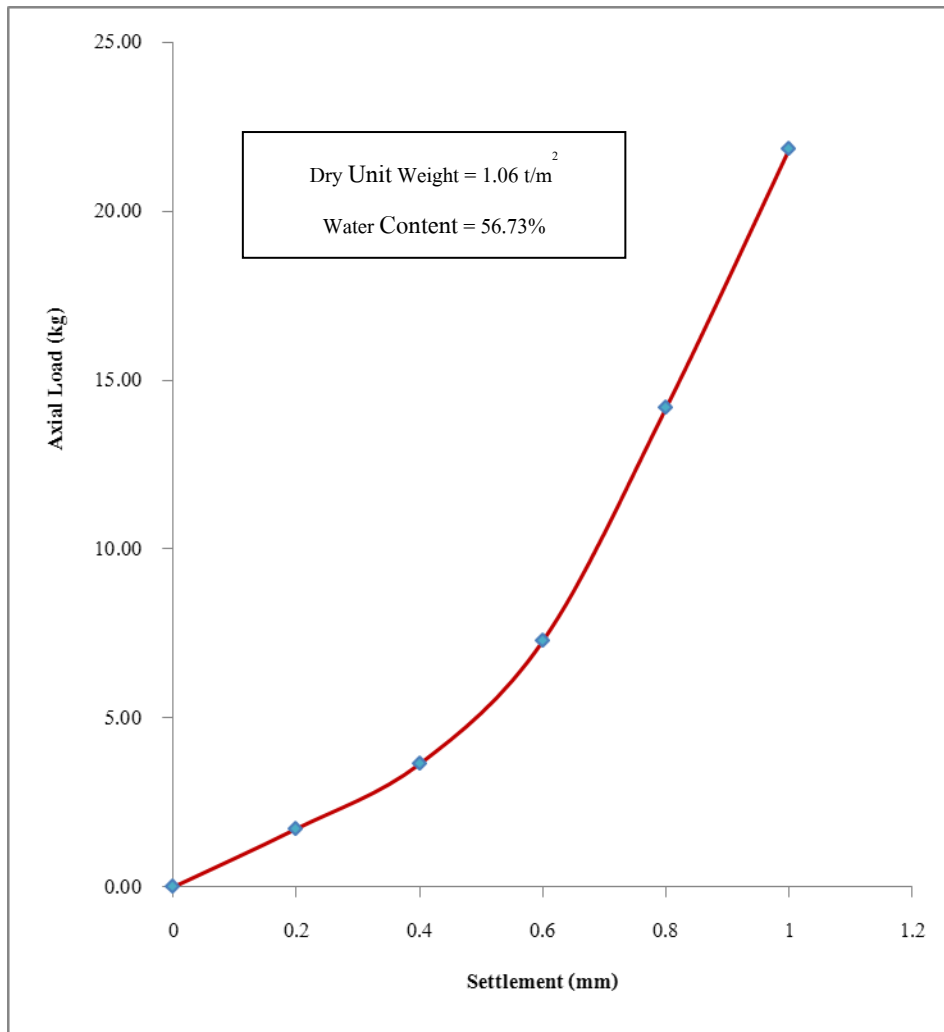
รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินซีเมนต์
ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 40%



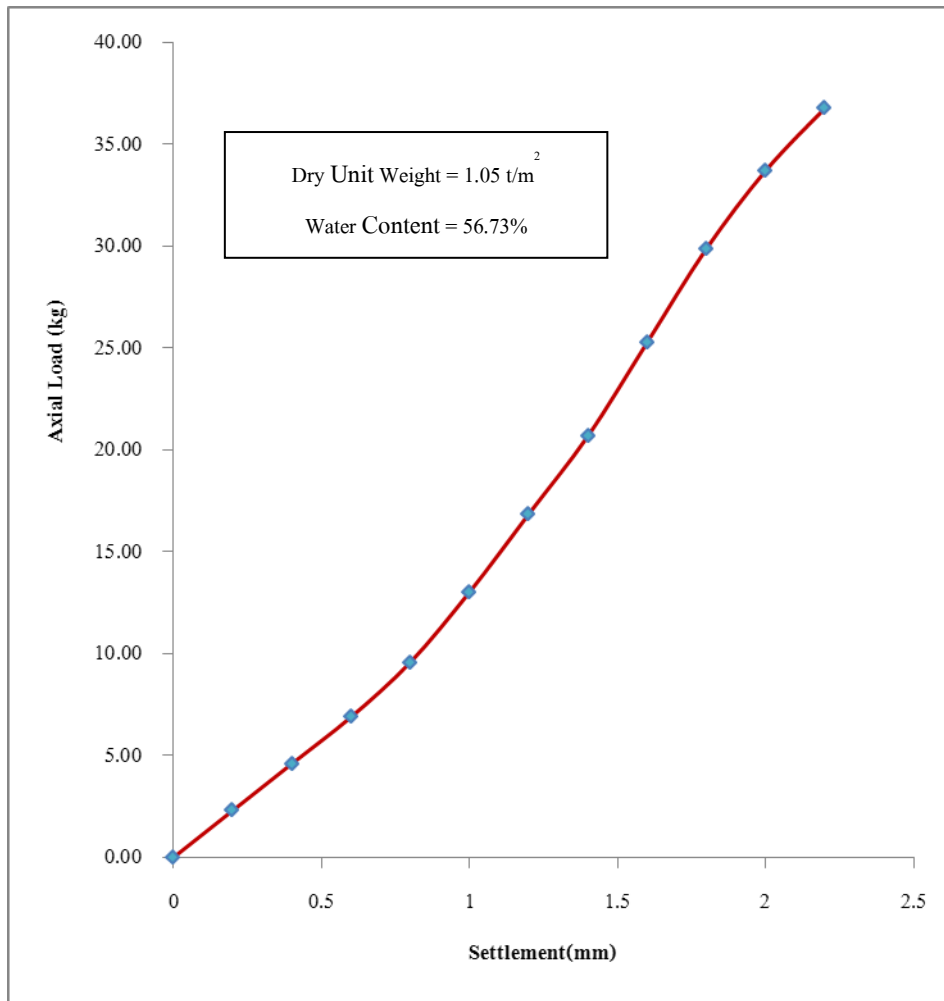
ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบแรงดัด

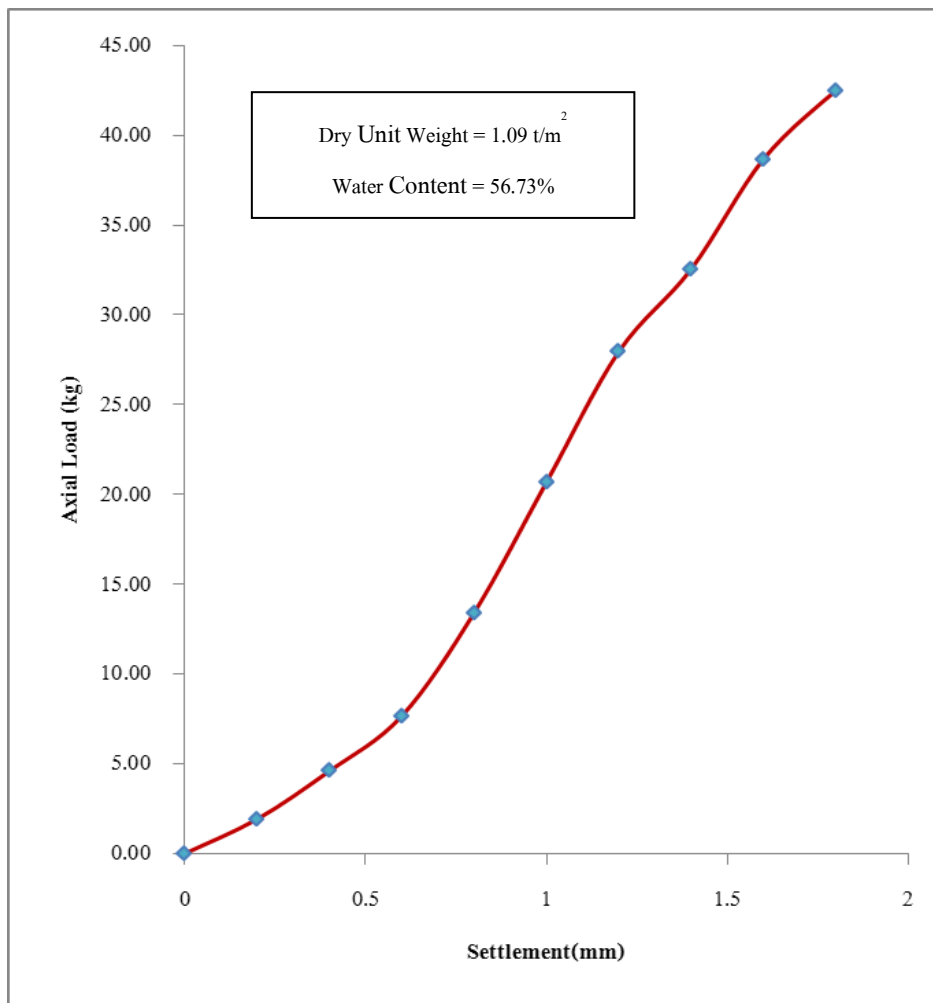




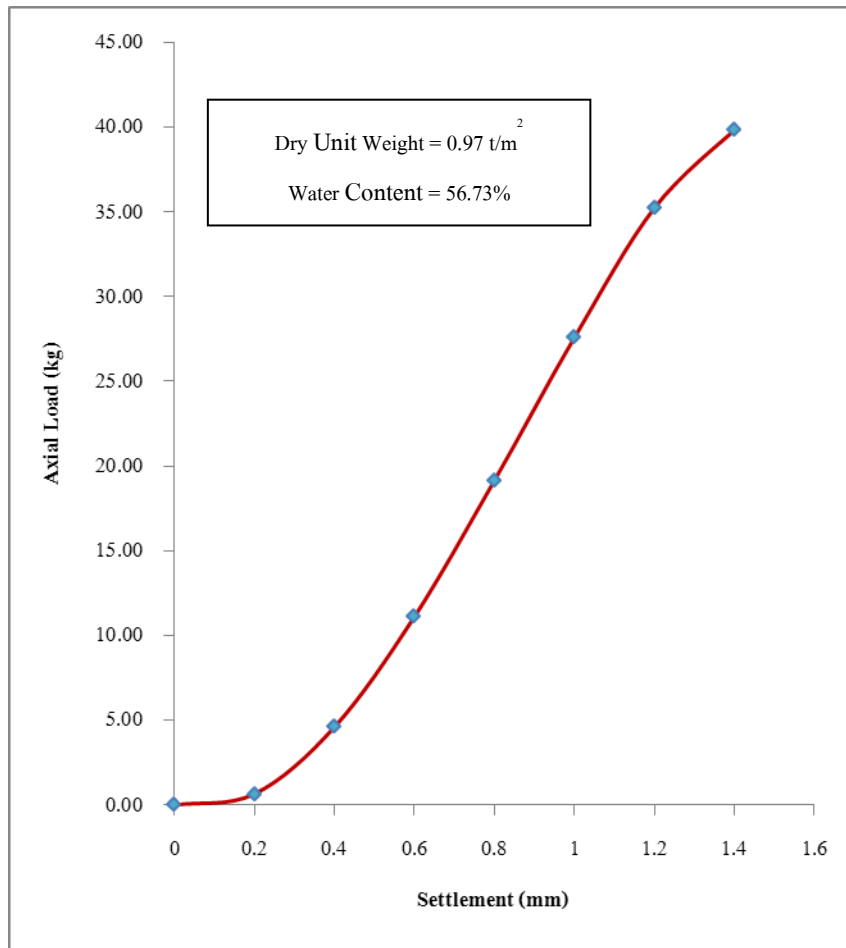
รูปที่ ค.1 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างคินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10%



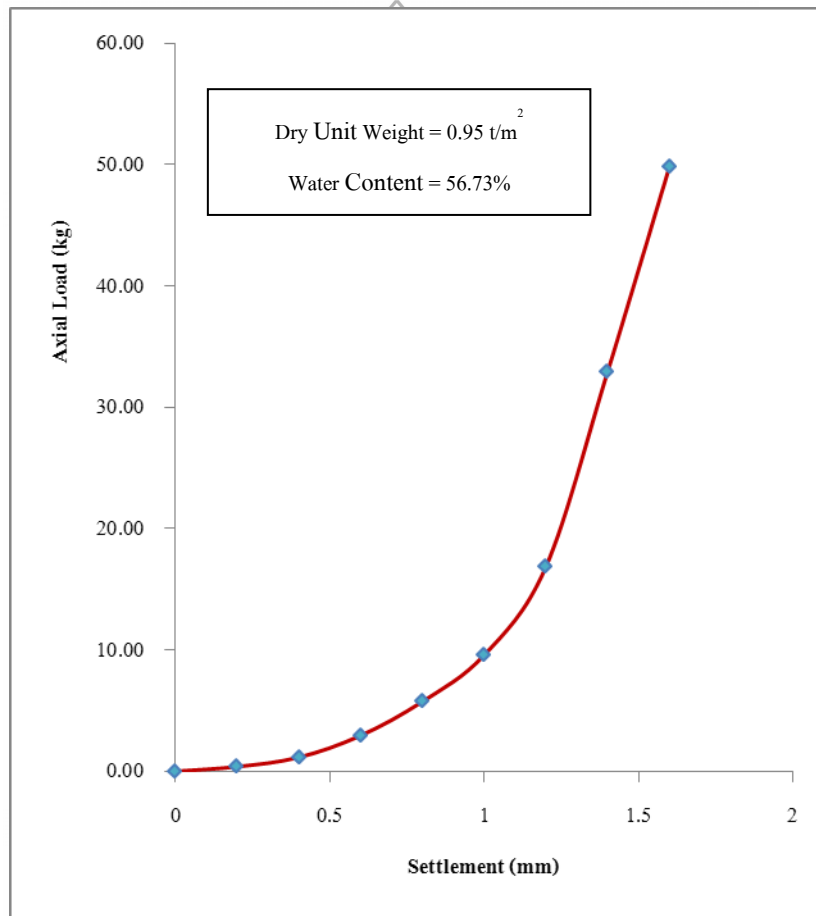
รูปที่ ค.2 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 20%



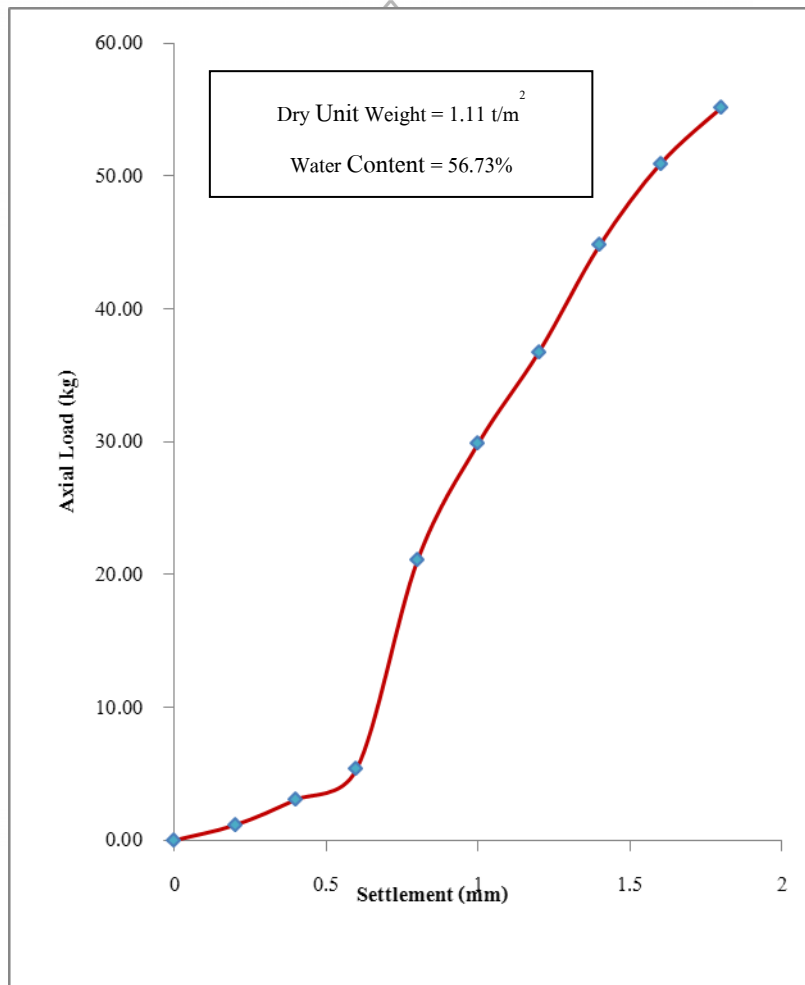
รูปที่ ค.3 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 10% และปริมาณทราย 40%



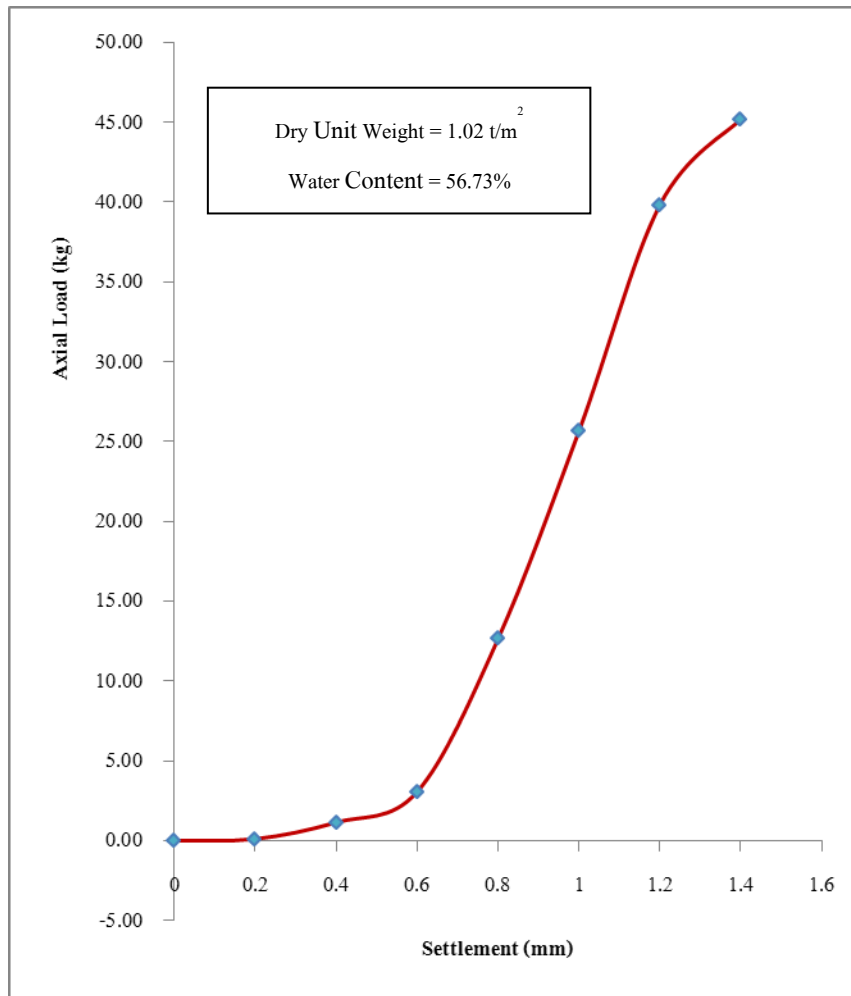
รูปที่ ค.4 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างคินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15%



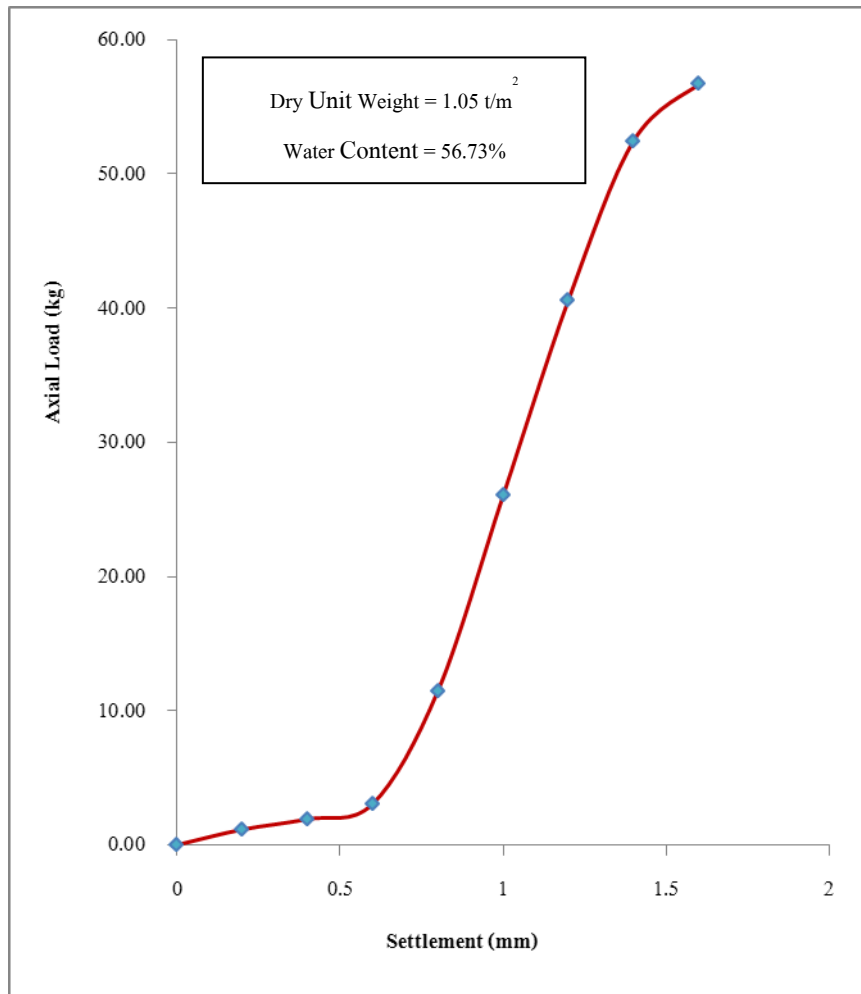
รูปที่ ค.5 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 20%



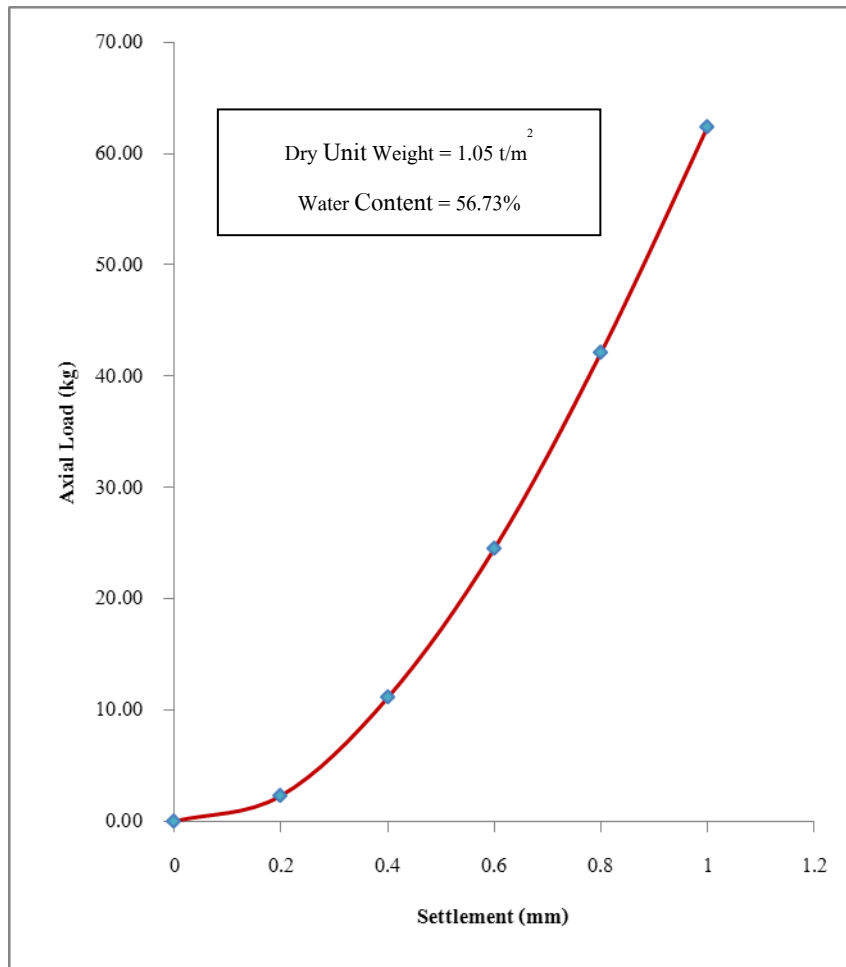
รูปที่ ค.6 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 15% และปริมาณทราย 40%



รูปที่ ค.7 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20%

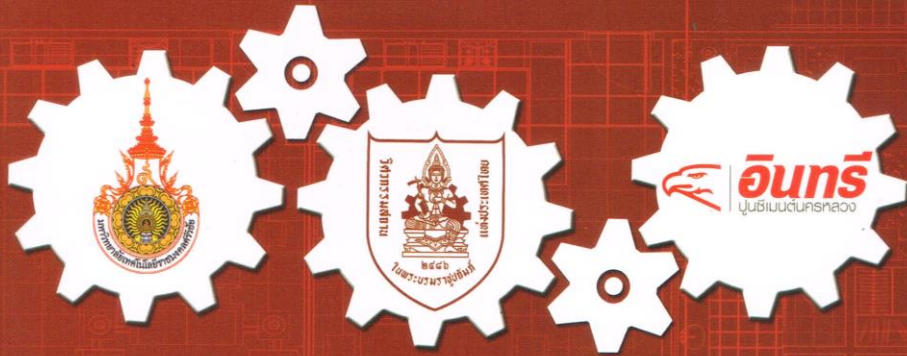


รูปที่ ค.8 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 20%



รูปที่ ค.9 แสดงผลการทดสอบ Third Point Loading ระหว่างน้ำหนักที่กระทำ กับ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ 20% และปริมาณทราย 40%

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

The 21st National Convention on Civil Engineering

“วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต”
“Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers”

www.ncce21.org



28-30 มิถุนายน 2559

โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา

28 - 30 June 2016

BP Samila Beach Hotel, Songkhla



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21st National Convention on Civil Engineering
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สถิระพจน์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. ศ.ดร.ทักษิณ เทพชาติตรี | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. ศ.ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ดีไชย | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. ศ.ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 5. รศ.ดร.เกษม ชูจารุกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. รศ.ดร.จรรยา รุ่งอมรรัตน์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 7. รศ.ดร.จิตติชัย รุจนกนกนาฏ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 8. รศ.ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 9. รศ.ดร.บรรเจิด พละการ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 10. รศ.ดร.ศักดิ์สิทธิ์ เฉลิมพงศ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 11. รศ.ดร.สรวิศ นฤปิติ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 12. รศ.ดร.อัศวินทร์ เล่นวารี | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 13. ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 14. ผศ.ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 15. ผศ.ดร.นพดล จอกแก้ว | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 16. อ.ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 17. อ.ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 18. รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 19. ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิตักุณพงศ์สุข | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 20. ผศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 21. ผศ.ดร.สุนิรัตน์ กุศลาคัย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 22. อ.ดร.สุรียน เปรมปราโมทย์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 23. อ.ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 24. ผศ.ดร.นันทวัฒน์ ชมหวาน | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน |
| 25. อ.ดร.ปนัดดา กลกิจวิวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน |
| 26. ผศ.ต่อศักดิ์ ประเสริฐสังข์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ |
| 27. อ.ทศพล จตุระบูล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ |
| 28. รศ.ดร.ชวลิต วณิชเวทิน | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 29. รศ.ดร.วิชรินทร์ วิทยกุล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 30. รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 31. รศ.ดร.สุธารินทร์ สถาปัตตานนท์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 32. ผศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรรณ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 33. ผศ.ดร.วีระเกษตร สนวนภา | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 34. ผศ.ดร.อดิษฐ์ พรพรหมินทร์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 35. ผศ.ดร.เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กุล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 36. อ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |

วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต "Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers"
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21st National Convention on Civil Engineering
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND

| | |
|---------------------------------------|---|
| 37. อ.ดร.สุภาพร แก้วก้อ เลี้ยวโพโรจน์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน |
| 38. ผศ.ดร.วิจันวงศ์ กรีพละ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สกลนคร |
| 39. รศ.ดร.พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 40. รศ.ดร.วันชัย สะตะ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 41. ผศ.ดร.กิตติเวช ชันติยวิชัย | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 42. ผศ.ดร.ดลฤดี หอมดี | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 43. ผศ.ดร.ธเนศ เสถียรนาม | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 44. ผศ.ดร.ลัดดา ตันวานิชกุล | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 45. ผศ.ดร.วิชุดา เสถียรนาม | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 46. รศ.ดร.ธนพร สุปรีย์ศิลป์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 47. ผศ.ดร.ธวัชชัย ตันชัยสวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 48. อ.ดร.เกรียงไกร อรุโณทยานันท์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 49. อ.ดร.ปรีดา พิทยาพันธ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 50. อ.ดร.อรรถวิทย์ อุบโยคิน | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 51. ผศ.ดร.อุมา สีบุญเรือง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 52. รศ.ดร.ทวิช พูลเงิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 53. รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 54. รศ.ดร.วรัช ก้องกิจกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 55. รศ.ดร.วิโรจน์ ศรีสุรภานนท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 56. ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 57. ผศ.ดร.ธิดารัตน์ บุญศรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 58. ผศ.ดร.พิชญ์ สุธีวรธรนา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 59. ผศ.ดร.วีระชาติ ตั้งจิรภัทร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 60. ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 61. อ.ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 62. อ.ดร.ทรงเกียรติ ภัทรปัทมาวงศ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 63. อ.ดร.นงลักษณ์ บุญรัตน์กิจ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 64. ศ.ดร.ปิติ สุนทรสุขกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 65. รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 66. รศ.ดร.กิตติชัย ธนทรัพย์สิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 67. รศ.ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 68. รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 69. รศ.ดร.สุพรชัย อุทัยนฤมล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 70. ผศ.ดร.กวิน ตันติเสวี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 71. ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 72. ผศ.ดร.ชัยศาสตร์ สกฤตศักดิ์ศรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 73. ผศ.ดร.มานิช สรรพกิจทิพากร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 74. ผศ.ดร.ศักดิ์ดา กตเวทวารักษ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 75. ผศ.ดร.สุชัยญา โปษะนันทน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 76. อ.สุรัตน์ ศรีจันทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต "Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers"
ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีช สงขลา จังหวัดสงขลา

| | | |
|------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 77. | รศ.ดร.สายสุนีย์ พุทธาคุณเจริญ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 78. | ผศ.ดร.ปิติศานต์ กร้ามาตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 79. | อ.ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 80. | อ.ดร.สนธยา ทองอรุณศรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก |
| 81. | รศ.จรรยา เจริญเนตรกุล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 82. | รศ.มนัส อนุศิริ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 83. | ผศ.จำรูญ สมบูรณ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 84. | ผศ.จุฑามาศ ลักษณะกิจ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 85. | ผศ.ดร.นันทชัย ชูศิลป์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 86. | ผศ.ดร.ภาณุ พร้อมพุทธานุกร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 87. | ผศ.พรนรายณ์ บุญราศรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 88. | อ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 89. | ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมานา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 90. | อ.ดร.รัฐพล สมานา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 91. | รศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 92. | ผศ.ดร.ฉัตรชัย โชติชูรูยางกูร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 93. | ผศ.ดร.ปรียาพร โภษา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 94. | ผศ.ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 95. | ผศ.ดร.รัฐพล ภูบุบผาพันธ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 96. | รศ.ดร.ชวลิต ชาลสิริภัษตรระกุล | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 97. | รศ.ดร.บุรฉัตร ฉัตรวิระ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 98. | รศ.ดร.สายันต์ ศิริมนตรี | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 99. | ผศ.ดร.สลักรณณ์ เหลืองวิเศษเจริญ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 100. | อ.ดร.กำพล ทรัพย์สมบูรณ์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 101. | อ.ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 102. | อ.ดร.ศิริชัย ต้นรัตนวงศ์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 103. | อ.ภาคพงศ์ หอมเนียม | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 104. | ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 105. | ผศ.ดร.ธรรมบุญ รัศมีมาสเมือง | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 106. | ผศ.ดร.สมบูรณ์ เชียงฉิน | มหาวิทยาลัยพะเยา |
| 107. | ผศ.ดร.สยาม ยัมศิริ | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 108. | อ.ดร.ฐิติมา วงศ์อินตา | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 109. | อ.ดร.ปิติ โรจน์วรรณสินธุ์ | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 110. | อ.ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 111. | อ.ดร.เพชรรัตน์ ลิ้มสุปรีyaratน์ | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 112. | อ.ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 113. | ผศ.ดร.สมชาย ปฐมศิริ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 114. | อ.ดร.ชลลดา เลาะฟอ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 115. | อ.ดร.วศพร เตชะพีรพานิช | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 116. | ผศ.ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21st National Convention on Civil Engineering
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND

| | |
|------------------------------------|--|
| 117. อ.ดร.ปรเมศวร์ เหลือเทพ | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 118. ผศ.ดร.รัฐภูมิ รุ่งแทนคุณ | มหาวิทยาลัยสยาม |
| 119. อ.ดร.ธกมลพัศ เงินจิวัฒน์กุล | มหาวิทยาลัยสยาม |
| 120. รศ.ดร. สถาพร โภคา | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 121. ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 122. ผศ.ดร.สิทธา เงินศิริศักดิ์ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 123. ผศ.ดร.วรางคณา แสงสร้อย | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 124. รศ.ดร.จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 125. รศ.แหลมทอง เหล่าคงถาวร | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 126. ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 127. รศ.ดร.โชติชัย เจริญงาม | สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) |

หมายเหตุ รายชื่อเรียงตามสถาบันการศึกษา (ก-ฮ)



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21
วันที่ 28-30 มิถุนายน 2559 จ.สงขลา

The 21st National Convention on Civil Engineering
28-30 June 2016, Songkhla, THAILAND

| สาขาวิศวกรรมการเทคนิคธรณี (GTE) | | หน้า |
|---------------------------------|---|------|
| GTE 428 | การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินริมคลองและการแก้ไข วันชัย เทพรักษ์, พงศธร สนธิประสาธ, สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ | 238 |
| GTE 429 | พฤติกรรมกำแพงโคจรมวลโคลล์สำหรับการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกมากในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ วันชัย เทพรักษ์, พงศธร สนธิประสาธ, สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ | 239 |
| GTE 430 | สาเหตุของการแตกร้าวของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องสำหรับการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกในกรุงเทพ วันชัย เทพรักษ์, สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์, นิธิ ปรัชญาเศรษฐ์ | 240 |
| GTE 431 | การทดสอบทางกายภาพโดยใช้ขนาดเท่าของจริงของชิ้นส่วนคานาอู๋มิ่ง วันชัย เทพรักษ์, หัตถ์นัย แสงยอด, สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ | 241 |
| GTE 449 | การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของดินซีเมนต์บดอัดภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง จิระยุทธ สิบสุข, อัครเดช ศิริพันธุ์, เขาวลิต ประณีตพลกรัง, หฤชฎี รวงผึ้ง, ชูดาภักดิ์ เดชพันธ์ | 242 |
| GTE 478 | ผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและ กำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ผสมทราย อนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ, ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิต, สุธี ปิยะพิพัฒน์ | 242 |
| GTE 528 | ผลกระทบของวัฏจักรเปียกและแห้งของชั้นดินลูกรังผสมซีโอไฟลิเมอร์ รัฐติเทพ เต้าทอง, สมิตร สงพิริยะกิจ, ชัยรัตน์ ชีระวัฒน์สุข, เจนจิต เอี่ยมจตุรภัทร | 244 |
| GTE 532 | Seepage under a Dam with Sheet Pile Phanuwat Suriyachat | 245 |

GTE 478

ผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและ
กำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ผสมทราย
Effect of Sand Mixture on Shear Strength and Flexural
Strength of Soil Cement Mixed Sand

อนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ^{1,*} ศุภลิตี พงศ์ศิวัชสถิตย์² และ สุธี ปิยะพิพัฒน์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

E-mail address: i-yod@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณทรายผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ทำการทดสอบคือดินเหนียวกรุงเทพฯ ส่วนทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายกาญจนบุรีที่ผ่านการร่อนตะแกรงเบอร์ 4 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 10 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตลอดการทดลอง ชั้นแรกนำดินเหนียวมาผสมกับทรายที่ 0, 20 และ 40% โดยน้ำหนักแห้งของดินเหนียว ส่วนผสมที่ได้จะถูกผสมกับซีเมนต์ที่ 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม ปริมาณความชื้นของส่วนผสมถูกปรับให้มีค่าสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลวของส่วนผสมประมาณ 5% จากนั้นนำส่วนผสมที่ผสมซีเมนต์แล้วมาบรรจุในโมลด์ 2 ชนิด ได้แก่ 1) โมลด์ทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm และสูง 7 cm สำหรับการทดสอบแรงกดแกนเดียวและการทดสอบแรงอัดสามแกน และ 2) โมลด์รูปคาน ขนาด 7.5×7.5×35 cm³ สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดโดยวิธีกีดคานสองจุดจากการแบ่งคานออกเป็นสามส่วนเท่าๆ กัน หลังจากทำการบ่ม 28 วันจึงเริ่มทำการทดสอบ ได้ผลดังนี้ การเพิ่มปริมาณทรายในดินเหนียวทำให้ค่าแรงกดแกนเดียว ค่าองศาความเสียดทานภายใน และค่าโมดูลัสการแตกร้าวสูงขึ้น สุดท้ายความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลการทดสอบของทั้ง 3 ชนิด ได้ถูกนำเสนอ คำสำคัญ: กำลังรับแรงเฉือน, กำลังรับแรงดัด, การทดสอบแรงเฉือนแบบยูนิอิตตัว-ไม่ระบายน้ำ, โมดูลัสการแตกร้าว

Abstract

The aim of this study is to investigate the shear strength and the flexural strength of cement-and-sand mixed clay on the effect of amount of mixed sand by conducting the laboratory testing. The soil sample is Bangkok clay and the sand used is Kanchanaburi sand. The particle size of sand used is the sand passing through sieve No. 4 but retained on sieve No. 10. The cement used is a portland cement type 1. Firstly, the clay sample was mixed by sand of 0, 20 and 40% by dry weight of clay respectively. Then the aggregate as clay-sand mixer was mixed with cement of 10, 15 and 20% by dry weight. The water content of aggregate was adjusted to higher than the liquid limit of aggregate about 5%. Then the aggregate was mixed by cement and put it into 2 kinds of mould as 1) the cylinder mould with a diameter of 3.5 cm and a high of 7 cm for the unconfined compression test and the CU test and 2) the beam mould with the size of 7.5×7.5×35 cm³ for the third point loading test. After 28 curing days, the prepared specimens were tested. As results, it was found that the higher amount of sand, the higher unconfined compressive strength (q_u), angle of internal friction and modulus of rupture. Finally, the relationships among the results of 3 types of testing were demonstrated.

Keywords: flexural strength, shear strength, CU test, modulus of rupture



The 21st National Convention on Civil Engineering

This is to certify that

ANIRUTH PHOSUWAN

has successfully participated in the 21st NCCE for the paper titled

*Effect of Sand Mixture on Shear Strength and Flexural Strength
of Soil Cement Mixed Sand*

BP Samila Beach Hotel, Songkhla, Thailand

June 28-30, 2016

Prof. Dr. Suchatvee Suwansawat
President of EIT

Assoc. Prof. Charoon Charoennatkul
Dean of Engineering Faculty, RMUTSV

Assist. Prof. Pornarai Boonrasi
Chairperson of 21st NCCE Committee



ผลกระทบของการผสมทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและ
กำลังรับแรงดัดของดินซีเมนต์ผสมทราย

EFFECT OF SAND MIXTURE ON SHEAR STRENGTH AND
FLEXURAL STRENGTH OF SOIL CEMENT MIXED SAND

อนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ^{1*} ศุภสิทธิ์ พงศ์วิเศษสถิตย์² และ สุธี ปิยะพิพัฒน์³

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

^{2,3} อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณทรายผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์ด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ทำการทดสอบคือดินเหนียวกรุงเทพ ส่วนทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายกาญจนบุรีที่ผ่านการร่อนตะแกรงเบอร์ 4 แต่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 10 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตลอดจนการทดลอง ชั้นแรกนำดินเหนียวมาผสมกับทรายที่ 0, 20 และ 40% โดยน้ำหนักแห้งของดินเหนียว ส่วนผสมที่ได้จะถูกผสมกับซีเมนต์ที่ 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม ปริมาณความชื้นของส่วนผสมถูกปรับให้มีค่าสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลวของส่วนผสมประมาณ 5% จากนั้นนำส่วนผสมที่ผสมซีเมนต์แล้วมาบรรจุในโมลด์ 2 ชนิด ได้แก่ 1) โมลด์ทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm และสูง 7 cm สำหรับการทดสอบแรงกดแกนเดียวและการทดสอบแรงอัดสามแกน และ 2) โมลด์รูปคานขนาด 7.5×7.5×35 cm³ สำหรับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัด โดยวิธีกดคานสองจุดจากการแบ่งคานออกเป็นสามส่วนเท่าๆ กัน หลังจากทำการบ่ม 28 วันจึงเริ่มทำการทดสอบ ได้ผลดังนี้ การเพิ่มปริมาณทรายในดินเหนียวทำให้ค่าแรงกดแกนเดียว ค่าองศาความเสียดทานภายใน และค่าโมดูลัสการแตกร้าวสูงขึ้น สุดท้ายความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลการทดสอบของทั้ง 3 ชนิด ได้ถูกนำเสนอ

คำสำคัญ: กำลังรับแรงเฉือน, กำลังรับแรงดัด, การทดสอบแรงเฉือนแบบยุบอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ, โมดูลัสการแตกร้าว

Abstract

The aim of this study is to investigate the shear strength and the flexural strength of cement-and-sand mixed clay on the effect of amount of mixed sand by conducting the laboratory testing. The soil sample is Bangkok clay and the sand used is Kanchanaburi sand. The particle size of sand used is the sand passing through sieve No. 4 but retained on sieve No. 10. The cement used is a portland cement type 1. Firstly, the clay sample was mixed by sand of 0, 20 and 40% by dry weight of clay respectively. Then the aggregate as clay-sand mixer was mixed with cement of 10, 15 and 20% by dry weight. The water content of aggregate was adjusted to higher than the liquid limit of aggregate about 5%. Then the aggregate was mixed by cement and put it into 2 kinds of mould as 1) the cylinder mould with a diameter of 3.5 cm and a high of 7 cm for the unconfined compression test and the CU test and 2) the beam mould with the size of 7.5×7.5×35 cm³ for the third point loading test. After 28 curing days, the prepared specimens were tested. As results, it was found that the higher amount of sand, the higher unconfined compressive strength (q_u), angle of internal friction and modulus of rupture. Finally, the relationships among the results of 3 types of testing were demonstrated.

Keywords: flexural strength, shear strength, CU test, modulus of rupture

1. บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินเหนียว โดยการใช้ปูนซีเมนต์เข้ามาผสมลึกลงกับดินเหนียว ให้มีรูปร่างเป็นลักษณะของเสาเข็มในชั้นดินหรือที่เรียกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ เป็นเทคนิคที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธา [1-2] ปัจจุบันวิธีนี้ได้ถูกปรับปรุงเพื่อให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านมลภาวะทางเสียง เนื่องจากการก่อสร้าง และลดผลกระทบต่อชั้นน้ำบาดาลอันเนื่องมาจากความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ เข้าไปรบกวนชั้นบาดาลด้วยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นร่วมกับดินซีเมนต์ที่ผสมในลักษณะเป็นแผ่นพื้นที่วางอยู่บนเสาเข็ม เพื่อลดหน่วยแรงที่กระทบต่อหัวเสาเข็ม [3-4] จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าถ้าเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นมีค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงสูง ทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงมีค่าน้อยลง [5]

ดังนั้นแนวความคิดในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินซีเมนต์ให้ดีขึ้น โดยใช้ทรายผสมเพิ่ม ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและราคาถูก เพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงของดินซีเมนต์ยังมีความน่าสนใจอยู่ เนื่องจากปัจจุบันยังขาดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเด็นนี้อยู่ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และกำลังรับแรงดัดของดินเหนียวปนทรายผสมซีเมนต์ในอัตราส่วนของซีเมนต์และทรายต่างๆ เพื่อดูผลกระทบของทรายที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมทราย และเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ขั้นสูงในงานวิศวกรรมปฐพีต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุ

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการวิจัยเป็นดินเหนียวอ่อน บริเวณไบทะบางนา แขวงบางนา เขตบางนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ใช้วิธีการเปิดหน้าดินกว้าง มีระดับความลึก 4-5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วเก็บตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิด ในตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของดินเหนียว ส่วนทรายเป็นตัวอย่างทรายแม่น้ำจากอำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี โดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 10



รูปที่ 1 เก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบถูกรบกวน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

| คุณสมบัติของดินทางกายภาพ | |
|----------------------------------|-------|
| Natural Water Content (%) | 56.73 |
| Specific Gravity, G _s | 2.69 |
| Liquid Limit, LL (%) | 40.00 |
| Plastic Limit, PL (%) | 25.48 |
| Plastic Index, PI (%) | 14.52 |

2.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ

นำดินเหนียวมาผสมกับทรายหยาบ จากนั้นเติมน้ำในส่วนผสมให้มีปริมาณความชื้น มากกว่าค่าพิกัดความเหลว (Liquid limit) ของส่วนผสมประมาณ 5 % เพื่ออำนวยความสะดวก จากนั้นทำการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) เท่ากับ 1:1 แล้วนำซีเมนต์เพสต์ที่ได้ผสมเข้ากับส่วนผสมของดินเหนียวปนทรายที่เตรียมไว้ ด้วยเครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็กให้เข้ากัน ในตารางที่ 2 แสดงถึงปริมาณซีเมนต์และทรายสำหรับกรณีศึกษาในครั้งนี้

จากนั้นนำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมเข้ากันดีแล้วใส่ในแบบหล่อเตรียมตัวอย่าง 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งได้แก่ แบบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 cm สูง 7 cm เพื่อทดสอบหาค่าแรงกดแกนเดียว ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 และทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยุบอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ (CU test) ตามมาตรฐาน ASTM D 4767-95 และแบบคานขนาด 7.5×7.5×35 cm³ สำหรับทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดด้วยวิธี Third point loading test ตามมาตรฐาน ASTM D 1635 จากนั้นเมื่อนำดินซีเมนต์ออกจากแบบหล่อเตรียมตัวอย่างในขณะที่ดินซีเมนต์เริ่มแข็งตัว แล้วห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกป้องกันความชื้นไม่ให้ระเหยออกไป เก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ

* อนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ (Corresponding author)

E-mail address: i-yod@hotmail.com

ตารางที่ 2 สัดส่วนของปริมาณทรายและซีเมนต์ในกรณีต่างๆ

| กรณี | ส่วนผสมในดินเหนียว | | ปริมาณซีเมนต์ (% โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง+ทราย) |
|------|--|--|--|
| | ปริมาณทราย (% ของน้ำหนักดินเหนียวแห้ง) | ปริมาณน้ำ (% ของน้ำหนักดินเหนียวแห้ง+ทราย) | |
| 1 | 0 | 45.00 | 10 |
| | | | 15 |
| | | | 20 |
| 2 | 20 | 35.20 | 10 |
| | | | 15 |
| | | | 20 |
| 3 | 40 | 31.35 | 10 |
| | | | 15 |
| | | | 20 |



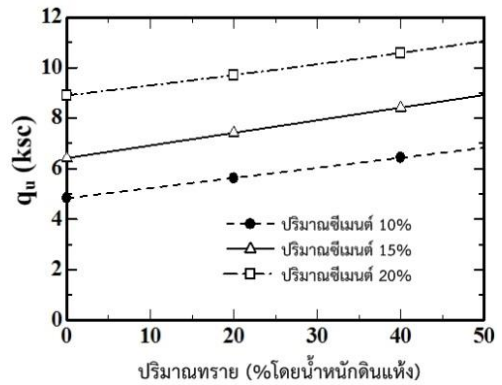
รูปที่ 2 การจัดทำตัวอย่างการทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบแรงกดแกนเดียว

3.1.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า q_u

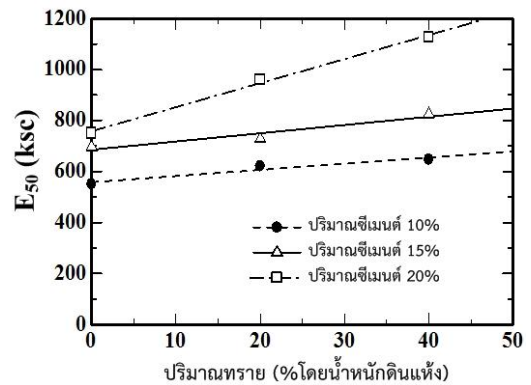
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับปริมาณทรายที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ พบว่าค่า q_u มีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ และมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับปริมาณทรายเป็นลักษณะสมการเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากดินทรายซึ่งเป็นดินเม็ดหยาบที่ผสมเพิ่มลงไป ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของดินซีเมนต์ ทำให้มีการส่งถ่ายแรงระหว่างเม็ดดินดีขึ้นกว่ากรณีมีเม็ดดินเหนียวเพียงอย่างเดียว ซึ่งโดยปกติดินทรายนั้นสามารถรับน้ำหนักได้ดีกว่าดินเหนียวอยู่แล้ว



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

3.1.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า E_{50}

ผลของค่า E_{50} มีแนวโน้มที่คล้ายกับค่า q_u พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 20% พบว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E_{50} สูงที่สุด นั่นแสดงว่าปริมาณทรายที่ผสมมีผลทำให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) กับปริมาณทรายที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ

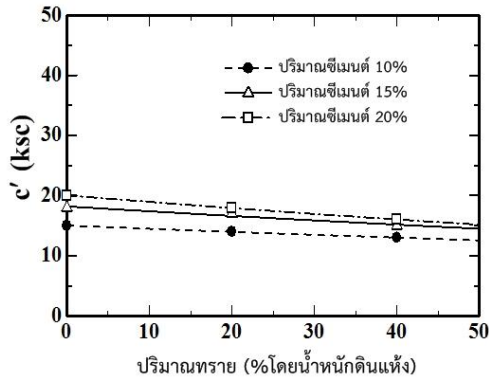
3.2 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน

การศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวปนทรายผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีทดสอบแรงอัดสามแกนแบบยุบอัดตัว-ไม่ระบายน้ำ หรือ CU test โดยใช้ค่าความดันรอบด้าน (Confining pressure) ที่ 150, 250 และ 350 กิโลปาสกาล จากนั้นทำการทดสอบอย่างจวนวิบัติ นำค่าหน่วยแรงตามแนวแกนสูงสุด (Maximum deviator stress) ที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ได้ผลดังต่อไปนี้

3.2.1 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะ

จากรูปที่ 5 แสดงถึงอิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะประสิทธิผล (c') พบว่าปริมาณทรายที่ผสมในส่วนผสมมีผล

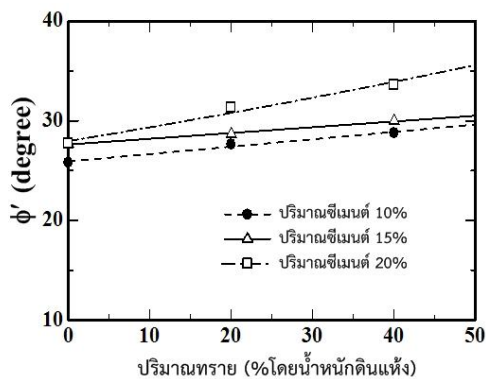
ทำให้ค่า c' เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ค่า c' ที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลมากกว่าจากการเติมทรายเข้ามาในส่วนผสม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effective Cohesion Intercept (c') กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

3.2.2 อิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่ามุมเสียดทานภายใน

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายในส่วนผสมมีผลทำให้ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') เพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าทรายมีส่วนทำให้แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินมีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างดินซีเมนต์ถูกเฉือน โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และปริมาณทรายเป็นลักษณะของสมการเชิงเส้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effective Angle of Shearing Resistance (ϕ') กับปริมาณทรายที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

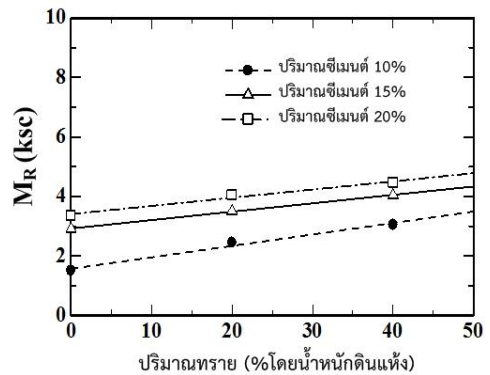
3.3 ผลการทดสอบแรงดัด

ในรูปที่ 7 แสดงการทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อหาค่ารับแรงดัด แบบวิธีทดสอบ Third point loading ค่ากำลังรับแรงดัดถูกคำนวณออกมาในเทอมของค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of rupture, M_R)



รูปที่ 7 การทดสอบแรงดัดแบบ Third point loading

สำหรับอิทธิพลของปริมาณทรายที่มีผลต่อค่า M_R ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 8 พบว่าค่า M_R มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณทรายเข้ามามีผลมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเติมทรายเข้าไปทำให้การจับของซีเมนต์กับมวลรวมดีขึ้นเป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และปริมาณทรายเป็นลักษณะเชิงเส้น นอกจากนี้ค่า M_R เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ศุภสิทธิ์ [6]



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Rupture (M_R) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

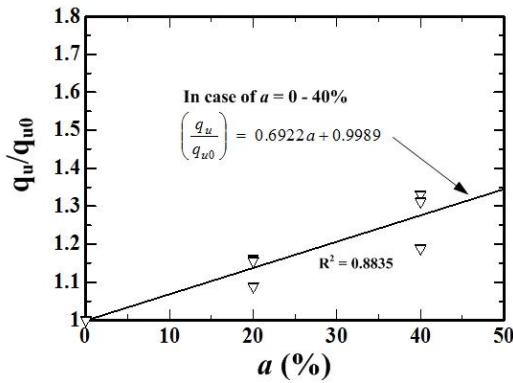
4. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u , E_{50} และปริมาณทราย

กำหนดให้ค่า q_{u0} และ q_u คือค่าแรงกดแกนเดียวในหน่วย ksc ของดินซีเมนต์ที่ไม่มีทรายผสมและมีทรายผสมตามลำดับ และค่า a คือปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักดินเหนียวแห้ง จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ โดยนำมาเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง (q_u/q_{u0}) และ a ได้ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่มีค่า $R^2 = 0.8835$ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\left(\frac{q_u}{q_{u0}} \right) = 0.6922a + 0.9989 \quad (1)$$

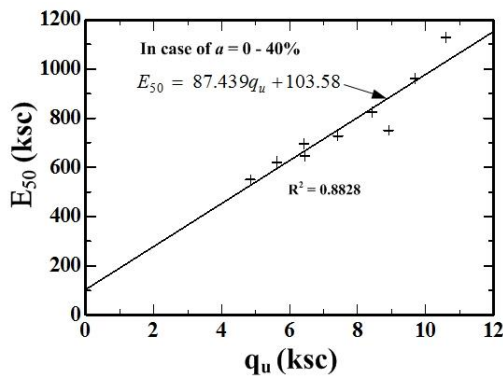
เมื่อค่า a มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 40 %



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ a

จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ q_u ของดินซีเมนต์ผสมทรายระหว่าง 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง ได้ดังแสดงในรูปที่ 10 ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.8828$ พบว่าค่า q_u เพิ่มขึ้นตาม E_{50} เพิ่มขึ้นตาม ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{50} = 87.439q_u + 103.58 \quad (2)$$

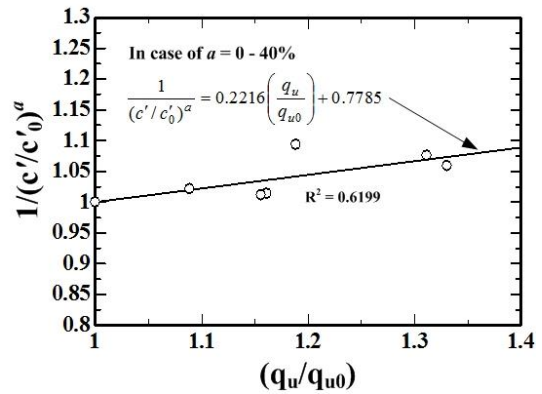


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ q_u

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า c' , q_u และปริมาณทราย

กำหนดให้ ค่า c'_0 และ c' คือค่าแรงยึดเกาะในหน่วย ksc ของดินซีเมนต์ที่ไม่มีทรายผสมและมีทรายผสมตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ โดยนำมาเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง (q_u/q_{u0}) และ $(c'/c'_0)^a$ ได้ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.6199$ และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{(c'/c'_0)^a} = 0.2216\left(\frac{q_u}{q_{u0}}\right) + 0.7785 \quad (3)$$



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า (q_u/q_{u0}) และ $(c'/c'_0)^a$

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u

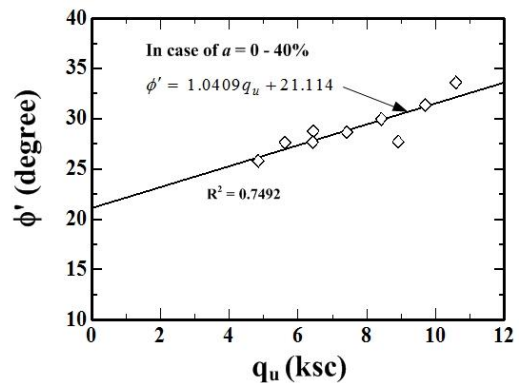
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u สามารถหาได้จากรูปที่ 12 พบว่ามีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.7492$ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า q_u ทำให้ค่า ϕ' เพิ่มขึ้นตามเป็นลักษณะสมการเชิงเส้น มีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\phi' = 1.0409q_u + 21.114 \quad (4)$$

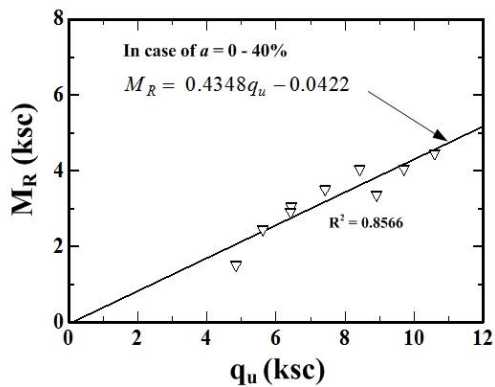
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u

ในรูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u ของดินซีเมนต์ผสมทรายในปริมาณ 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง มีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น ที่มีค่า $R^2 = 0.8566$ การเพิ่มขึ้นของค่า q_u ส่งผลให้ค่า M_R สูงขึ้นตาม และสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$M_R = 0.4348q_u - 0.0422 \quad (5)$$



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ' และ q_u



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า M_R และ q_u

5. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษากำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดของดินเหนียวอ่อนปนทรายผสมซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายในส่วนผสม เป็นผลทำให้คุณสมบัติด้านการรับแรงของดินซีเมนต์ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเพิ่มปริมาณทรายในส่วนผสมของดินซีเมนต์มีผลทำให้ค่า q_u , ϕ' และ M_R เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามทำให้ค่า c' เปลี่ยนแปลงจากส่วนผสมดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ใส่ทรายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- 2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} , ϕ' และ M_R กับค่า q_u มีลักษณะเป็นแบบสมการเชิงเส้น
- 3) โครงการนี้ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า c' , q_u และปริมาณทราย เพื่อใช้ในการหาค่า q_u และ c' ดินซีเมนต์เมื่อทราบค่า q_u ของดินซีเมนต์ที่ไม่ได้ผสมทรายเพิ่มหรือค่า q_{u0} ในกรณีมีทรายผสมอยู่ในปริมาณไม่เกิน 40 % โดยน้ำหนักดินเหนียวแห้ง

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การศึกษาการพัฒนา กำลังของวัสดุชั้นพื้นทางผสมซีเมนต์ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 (วช.) จึงขอขอบคุณมา ณ.โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Broms, B. B., and Boman, P. O., 1979. "Lime column a new foundation method". *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(GT4), pp. 539-556.
- [2] 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.
- [3] 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., pp. 485-490.
- [4] 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*.
- [5] 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, pp. 44-58*.
- [6] ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวัชสถิตย์, "การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสมซีเมนต์และปูนขาว", วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ.2543, หน้า 152-156.

ประวัติผู้เขียน

| | |
|--------------------|---|
| ชื่อ-สกุล | นายอนิรุทธิ์ โพธิ์สุวรรณ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 6 มกราคม 2506 |
| ที่อยู่ | 109/15 หมู่ 11 ตำบลปากแรต อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี 70110 |
| การศึกษา | ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยฉะเชิงเทรา |
| ประสบการณ์การทำงาน | นายช่างสำรวจ ระดับ 2 เทศบาลเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม นายช่างสำรวจ ระดับ 3 เทศบาลเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม นายช่างสำรวจ ระดับ 4 เทศบาลเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม นายช่างสำรวจ ระดับ 5 เทศบาลเมืองบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี นายช่างสำรวจ ระดับ 6 เทศบาลเมืองบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี นายช่างสำรวจ ระดับ 7 เทศบาลเมืองบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี หัวหน้ากองช่าง ระดับ 6 เทศบาลตำบลโพหัก จังหวัดราชบุรี หัวหน้าฝ่ายแบบแผนและก่อสร้าง ระดับ 7 เทศบาลตำบลกระเจ็ด จังหวัดราชบุรี ผู้อำนวยการกองช่าง ระดับ 8 เทศบาลตำบลกระเจ็ด จังหวัดราชบุรี พ.ศ. 2552 ถึงปัจจุบัน |
| เบอร์โทรศัพท์ | 06-3195-6594 |
| อีเมลล์ | i-yod2506@hotmail.com |