



**ผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม**  
**Effect of Sand Contents on Engineering Properties of Soft Sakorn Clay**

**ศารา เอียดเนียม**

**Sara Aiedniem**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา**  
**วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)**  
**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**  
**Master of Engineering in Civil Engineering (Geotechnical Engineering)**

**Prince of Songkla University**

**2553**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม  
ผู้เขียน นายสรา יעבדניעם  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

---

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตัญญ)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)

.....  
(ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)

.....กรรมการ  
(ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม)

.....กรรมการ  
(ดร.อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

|                 |  |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | ผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม |
| ผู้เขียน        | นายสารา เอียดเนียม   |
| สาขาวิชา        | วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)                          |
| ปีการศึกษา      | 2552   |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของทรายต่อสมบัติของดินเหนียวอ่อนโดยเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม อ.จะนะ จ.สงขลา นำมาผสมกับทรายที่อัตราส่วนผสม 0, 10, 20, 30, และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างทรายที่นำมาผสมมี 2 ขนาด คือทรายขนาดกลาง และทรายละเอียด สร้างตัวอย่างขึ้นใหม่ (Reconstitute) แบบผสมเหลวที่ปริมาณน้ำในดินมากกว่าค่าพิกัดเหลว ใช้ น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร เป็นเวลา 4 วัน และนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติด้าน พิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น การอัดตัวคายน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

ผลการศึกษาพบว่า ค่าพิกัดอัตราเตอร์เบอร์กของตัวอย่างดินมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ ทรายที่ผสมมีมากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งของดินตัวอย่างมีค่ามากขึ้นตามปริมาณทรายที่ผสม และมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณทรายเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ ค่าดัชนีอัดตัวและค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำมีค่า ลดลง ค่าหน่วยแรงขีดเหนียวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่ามากขึ้น ค่ามุมเสียดทาน ประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่ามากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ และค่า สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่าน้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์

ผลของขนาดเม็ดทรายต่อสมบัติของดินเหนียวอ่อนสะกอม พบว่าส่วนผสมของ ทรายขนาดกลางจะทำให้ค่าพิกัดอัตราเตอร์เบอร์ก ค่าดัชนีการอัดตัว และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ ลดลง มากกว่าส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน สำหรับปริมาณทรายตั้งแต่ 30 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ทรายขนาดกลางจะให้ค่ามุมเสียดทานภายในที่สูงกว่า

**คำหลัก :** ดินเหนียวอ่อน, การสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว, ทรายผสมดินเหนียว

**Thesis Title** Effect of Sands Content on Engineering Properties of Soft Sakorm Clay  
**Author** Mr. Sara Aiedniem  
**Major Program** Civil Engineering (Geotechnical Engineering)  
**Academic Year** 2009

### **ABSTRACT**

This research aims to study effects of sand contents on engineering properties of a soft Sakorm clay. The clay samples were taken from Sakorm, Chana district in Songkhla province and mixed with sand using sand content of 0, 10, 20, 30 and 40 %. Two sizes of sand used namely : medium sand and fine sand. The reconstituted specimen were prepared by adding water to clay-sand mixtures until their water contents greater than their liquid limits and consolidating using pressure of  $8 \text{ t/m}^2$  for four days. A series of experiments were performed to determine Atterberg's limit, specific gravity, density, consolidation parameters, hydraulic conductivity and undrained shear strength.

Experimental results showed that Atterberg's limit of the specimen decreased with increasing sand content. Dry densities of the specimen increased with increasing the sand content and maximum dry density values were found when sand content of 60% were used. Compression index, recompression index and cohesion values of the specimen decreased with increasing sand content. Effective internal friction angle increased significantly when the sand contents used were greater than 30%. The hydraulic conductivity values were relatively unchanged when sand contents were less than 60%.

For the effect of sand size, experimental results showed that the medium sand had more effect on the decrease of Atterberg's limit, compression index, recompression index than that of the fine sand. For sand content greater than 30%, the medium sand yielded greater internal friction angle.

**Key Word** : Soft clay, Reconstitute by slurry , Sand Clay Mixing

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาให้คำปรึกษาเสนอแนะแนวทางและตรวจสอบแก้ไขจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เถлимยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.พิพัฒน์ ทองฉิม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำแนะนำแนวทาง วิธีการและขั้นตอนการศึกษาวิจัย และคอยติดตามความก้าวหน้าอย่างใกล้ชิดจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุชาติ ลิ้มกัตัญญู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. อัครพัฒน์ สว่างสุริย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามขอบเขตของการศึกษา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานภาควิชาวิศวกรรมโยธา คุณพลวัฒน์ คงสม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ เจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำในการเขียนและตรวจสอบเอกสารตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการศึกษา ขอขอบคุณน้ำใจจากนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คุณชัยเจริญ มางัดสาระ คุณเจริญพล อินขัน คุณณรงค์ อุทัยรัตน์ คุณศุภวิศว์ จริยะเลอพงษ์ คุณอรุณ ลูกจันทร์ คุณอรุณ สุวรรณสุนทร และอีกหลายท่านที่ยังไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการจนเสร็จด้วยดี

ขอขอบคุณคณะครูแผนกวิชาช่างโยธา วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ที่เปรียบเสมือนพี่และเพื่อนร่วมงานที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและกำลังใจตลอดมา จนผู้เขียนสามารถผ่านอุปสรรคต่างๆ มาได้จนสามารถสำเร็จการศึกษาตามที่ตนได้ตั้งใจ

สारा เอียดเนียม

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| สารบัญ   | (6)  |
| รายการตาราง  | (8)  |
| รายการภาพประกอบ  | (10) |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ  | (14) |
| บทที่  |      |
| <b>1. บทนำ</b>   |      |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการ   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย  | 3    |
| 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ  | 3    |
| 1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย   | 3    |
| <b>2. ทบทวนเอกสารและเอกสารที่เกี่ยวข้อง</b>                            | 5    |
| 2.1 โครงสร้างของดิน  | 5    |
| 2.1.1 โครงสร้างของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว                             | 5    |
| 2.1.2 โครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว                                | 6    |
| 2.2 สมบัติทางกายภาพของดิน  | 8    |
| 2.3 สมบัติทางวิศวกรรมของดิน  | 9    |
| 2.3.1 กำลังรับแรงเฉือนของดิน   | 9    |
| 2.3.2 ความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำในดิน                                  | 19   |
| 2.3.3 การทรุดตัวของดิน   | 24   |
| 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของดินเหนียว             | 28   |
| 2.4.1 Plasticity Index กับ Liquid Limit                                | 28   |
| 2.4.2 Compression Index และ Recompression Index กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ | 29   |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 32   |
| <b>3. วิธีดำเนินการวิจัย</b>   | 40   |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย  | 40   |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้เตรียมตัวอย่างการวิจัย                             | 43   |
|  | (6)  |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.3 การเตรียมตัวอย่างการวิจัย   | 46        |
| 3.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ  | 49        |
| 3.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)  | 49        |
| 3.4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties)   | 50        |
| 3.5 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล   | 54        |
| <b>4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษา</b>  | <b>56</b> |
| 4.1 ผลการทดสอบดินเหนียวสะกอม  | 56        |
| 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวสะกอม  | 56        |
| 4.1.2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวสะกอม  | 56        |
| 4.2 สมบัติทางกายภาพของทราย  | 59        |
| 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาด<br>กลางและทรายเม็ดละเอียด   | 59        |
| 4.3.1 ผลการทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์ก์   | 60        |
| 4.3.2 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ  | 61        |
| 4.3.3 ผลของปริมาณทรายต่อความหนาแน่นและปริมาณความชื้นในมวลดิน                                      | 62        |
| 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาด<br>กลางและทรายเม็ดละเอียด | 65        |
| 4.4.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ   | 65        |
| 4.4.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน  | 71        |
| 4.4.3 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน  | 74        |
| 4.4.3.1 ผลของทรายต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบน  | 79        |
| 4.4.3.2 อิทธิพลของทรายต่อค่าแรงดันน้ำ   | 80        |
| 4.4.3.3 อิทธิพลของทรายต่อค่าความเครียดที่จุดพิบัติ  | 86        |
| 4.4.3.4 อิทธิพลของทรายต่อค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน  | 87        |
| 4.4.3.5 อิทธิพลของทรายต่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน   | 87        |
| 4.4.3.6 อิทธิพลของทรายต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น   | 89        |
| 4.4.3.6 อิทธิพลของทรายต่อค่าพารามิเตอร์เอ   | 91        |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า       |
|---|------------|
| 4.4.6.7 อิทธิพลของทรายต่อทางเดินประสิทธิผล  | 94         |
| <b>5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>   | <b>99</b>  |
| 5.1 สรุปผลการศึกษา  | 99         |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ  | 101        |
| <b>บรรณานุกรม</b>   | <b>102</b> |
| <b>ภาคผนวก</b>  |            |
| ก. ข้อมูลการทดสอบ แรงอัดสามแกนตัวอย่างดินเหนียวสะกอมและกรณีของดินเหนียว<br>ที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว | 106        |
| ข. ผลการทดสอบ Consolidation   | 116        |
| ค. ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน   | 141        |
| <b>การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์</b>   | <b>151</b> |
| <b>ประวัติผู้เขียน</b>  | <b>160</b> |



## รายการตาราง

| ตารางที่ | หน้า  |     |
|----------|---|-----|
| 2.1      | ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ, $A_r$ ของดินเหนียวชนิดต่างๆ (Skempton, 1954)                               | 15  |
| 2.2      | ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินประเภทต่างๆ                                    | 20  |
| 2.3      | ค่า $C_r/C_c$ จำแนกตามชนิดของดิน  | 27  |
| 2.4      | ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index กับ Liquid Limit ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ                                    | 29  |
| 2.5      | ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index และ Recompression Index กับพารามิเตอร์ต่างๆ                                 | 29  |
| 3.1      | สัญลักษณ์แสดงส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัย  | 48  |
| 3.2      | จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม   | 53  |
| 3.3      | มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ   | 54  |
| 4.1      | สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม  | 57  |
| 4.2      | สมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้ศึกษาวิจัย  | 59  |
| 4.3      | สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสะกอมกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยทรายจากการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลว                      | 60  |
| 4.4      | ผลของปริมาณทรายต่อค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในมวลดินของดินผสมกรณีสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว                 | 63  |
| 4.5      | ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินอ่อนสะกอม  | 67  |
| 4.6      | แสดงผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินผสมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดและทรายขนาดกลาง โดยสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว | 68  |
| 4.6      | ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวอ่อนสะกอมและกรณีที่ดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทราย  | 72  |
| 4.8      | แสดงผลการทดสอบ CIU Test กรณีปรับปรุงด้วยทรายขนาดกลาง  | 76  |
| 4.9      | แสดงผลการทดสอบ CIU Test กรณีปรับปรุงด้วยทรายละเอียด   | 77  |
| 4.10     | แสดงค่า $S_u$ จากผลการทดสอบ CIU Test ของตัวอย่างดินผสม  | 78  |
| 5.1      | เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนที่จุดวิบัติของดินผสม   | 100 |

## รายการภาพประกอบ

| รูปที่ | หน้า  |    |
|--------|---|----|
| 1.1    | การทรุดตัวของโครงสร้างถนนที่สร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน  | 2  |
| 2.1    | โครงสร้างดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวแบบ Single-Grained   | 6  |
| 2.2    | โครงสร้างดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวแบบ Honeycombed  | 6  |
| 2.3    | ลักษณะโครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว   | 7  |
| 2.4    | เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test)  | 10 |
| 2.5    | การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบต่างๆ  | 11 |
| 2.6    | ลักษณะรูปร่างต่างๆของอนุภาคของเม็ดดิน   | 12 |
| 2.7    | ส่วนประกอบของกำลังรับแรงเฉือน   | 12 |
| 2.8    | ขอบเขตการพิบัติของมอร์-คูลอมป์ในการทดสอบแรงอัดสามแกน  | 16 |
| 2.9    | เส้นกำลัง (Strength Envelope) จากทางเดินหน่วยแรง และจากวงกลมมอร์  | 17 |
| 2.10   | ทางเดินหน่วยแรง (Stress Part , $p' - q$ ) ของดินประเภท NCC และดินประเภท OCC                             | 17 |
| 2.11   | ทางเดินความเค้นประสิทธิผลแบบต่างๆ (Effective Stress paths) ตามชนิดของดิน                                | 19 |
| 2.12   | การไหลของน้ำผ่านมวลดิน  | 21 |
| 2.13   | ความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio กับ Effective Overburden Pressure สำหรับดิน Normally Consolidated Clay   | 25 |
| 2.14   | ความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio กับ Effective Overburden Pressure สำหรับดิน Over Consolidated Clay       | 26 |
| 2.15   | การหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยรับในอดีต  | 28 |
| 2.16   | ความสัมพันธ์อัตราการอัดตัว (Compression Ratio) กับค่าความชื้นตามธรรมชาติของดินลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา       | 31 |
| 2.17   | ความสัมพันธ์อัตราการอัดตัว (Compression Ratio) กับค่าพิกิดเหลว (Liquid Limit) ของดินลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา | 32 |
| 2.18   | ค่า CBR. ของดินผสมกับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต   | 34 |
| 2.19   | Particle Size Distribution of Experimental Sands  | 36 |
| 2.20   | ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress - Strain ของ ตะกอนทรายผสมดินเม็ดละเอียด                                      | 36 |

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและอัตราส่วนผสมของทราย<br>ในดินเหนียว                 | 37   |
| 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลรวมที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 กับค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์                         | 38   |
| 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับค่า Modulus of Elasticity                                    | 39   |
| 3.1 ตัวอย่างดินเหนียวแบบเสียสภาพ   | 40   |
| 3.2 ตัวอย่างดินเหนียวสะกอมที่ใช้ศึกษา  | 41   |
| 3.3 ตัวอย่างทรายที่ใช้ศึกษา  | 41   |
| 3.4 ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการวิจัย  | 42   |
| 3.5 แบบจำลองเครื่องมือที่ใช้เตรียมตัวอย่าง   | 44   |
| 3.6 การ Consolidated ตัวอย่าง โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อให้ตัวอย่างสามารถขึ้นรูปได้                | 44   |
| 3.7 อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างสำหรับการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว  | 45   |
| 3.8 ตัวอย่างดินผสมที่ปริมาณน้ำมากกว่าขีดจำกัดเหลวที่ใช้สร้างตัวอย่าง                                   | 47   |
| 3.9 ตัวอย่างที่ได้จากการสร้างตัวอย่างขึ้นใหม่โดยวิธีการผสมเหลว   | 47   |
| 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement กับระยะเวลาจากการสร้างตัวอย่างที่ดินสิ้นสุด<br>การอัดตัวคายน้ำ     | 49   |
| 3.11 เครื่องมือทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแบบความดันคงที่โดยใช้ความดันอากาศ<br>เป็นตัวควบคุมความดัน | 53   |
| 3.12 แผนภูมิขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล  | 55   |
| 4.1 การกระจายตัวของดินเหนียวอ่อนสะกอม  | 58   |
| 4.2 การกระจายตัวของทราย  | 58   |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดพิคคแอดเตอร์เบอร์กับอัตราส่วนผสม   | 61   |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับอัตราส่วนผสม   | 62   |
| 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับปริมาณทรายที่ผสม   | 64   |
| 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณทรายที่ผสม  | 65   |

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความดันของดินเหนียวอ่อนสะกอมกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสม 40%                                       | 69   |
| 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความดันของดินเหนียวสะกอมและกรณีของดินเหนียวสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลาง   | 69   |
| 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความดันของดินเหนียวสะกอมและกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด  | 70   |
| 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวกับความดันของดินเหนียวสะกอม, ดินเหนียวสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางที่ 40% และกรณีของดินเหนียวสะกอม ที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 40 % | 70   |
| 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านกับเวลาของดินเหนียวสะกอม   | 73   |
| 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน   | 73   |
| 4.13 วงกลมมอร์จากผลการทดสอบ CIU Triaxial Test ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม   | 75   |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Stress กับค่า $S_u$ ของดินเหนียวอ่อนสะกอม กรณีทดสอบ CIU Test  | 78   |
| 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับ Normalized Deviator stress at failure กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง   | 82   |
| 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับ Normalized Deviator stress at failure กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด  | 82   |
| 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวแกนกับ ความเค้นเบี่ยงเบน ของตัวอย่างดินผสมด้วยทรายขนาดกลางที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว  | 83   |
| 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวแกนกับ ความเค้นเบี่ยงเบน ของตัวอย่างดินผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว   | 84   |
| 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับความดันน้ำกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง  | 85   |

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับความดันน้ำกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด  | 85   |
| 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับมุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินของตัวอย่างดินผสมกรณีผสมด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด                 | 88   |
| 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายกับแรงยึดเหนี่ยวกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลางและกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด | 89   |
| 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับปริมาณทรายผสมกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง  | 90   |
| 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับปริมาณทรายผสมกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด   | 91   |
| 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำที่จุดพิบัติกับปริมาณทรายผสมกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง                            | 93   |
| 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันน้ำที่จุดพิบัติกับปริมาณทรายผสมกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด                         | 93   |
| 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P$ กับ $q$ ของตัวอย่างดินผสมกรณีผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด   | 95   |
| 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง $P$ กับ $q$ ของตัวอย่างดินผสมกรณีผสมด้วยทรายขนาดกลาง  | 97   |

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

|                 |   |  |
|-----------------|---|--|
| CH              | = | ดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง                              |
| SW              | = | ทรายที่มีขนาดคละกันดี  |
| LL              | = | ค่าพิกต์เหลว (Liquid Limit)                                      |
| PL              | = | ค่าพิกต์พลาสติก (Plastic Limit)                                  |
| USCS            | = | ระบบจำแนกดินเอกภาพ (Unified Soil Classification System)          |
| G <sub>s</sub>  | = | ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity)                       |
| $\epsilon_f$    | = | ความเครียดที่จุดพิบัติ (Strain at Failure)                       |
| $\omega$        | = | ปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water Content)                           |
| E <sub>50</sub> | = | ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ร้อยละ 50 (Modulus of Elasticity)           |
| k               | = | ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) |
| C <sub>c</sub>  | = | ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index)                            |
| C <sub>r</sub>  | = | ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index)                       |
| C <sub>v</sub>  | = | ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of Consolidation)          |
| $p'_c$          | = | ค่าความดันดินที่เคยอัดตัวมาก่อน (Preconsolidation Pressure)      |
| C               | = | ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)                   |
| C'              | = | ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective Cohesion)             |
| $\phi$          | = | ค่ามุมเสียดทานภายใน (Total Friction Angle)                       |
| $\phi'$         | = | ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Effective Friction Angle)         |
| $\gamma_d$      | = | ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density)                      |
| $\gamma_t$      | = | ความหนาแน่นรวม (Total Density)                                   |
| u               | = | ความดันน้ำระหว่างเม็ดดิน (Pore Water Pressure)                   |
| n               | = | ค่าความพรุนของดิน (Porosity of Soil)                             |
| A <sub>r</sub>  | = | สัมประสิทธิ์แรงดันน้ำที่จุดพิบัติ (A Parameter at Failure)       |
| e               | = | อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio)                                   |
| $\gamma_w$      | = | หน่วยน้ำหนักของน้ำ   |
| $\sigma'_3$     | = | ความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure)                       |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ดินในธรรมชาติโดยทั่วไปโครงสร้างของดินจะประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ อนุภาคเม็ดดิน (Soil solid) น้ำและอากาศ ในส่วนที่เป็นอนุภาคเม็ดดินจะมีการจัดเรียงตัวของ โครงสร้างดินได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะของเม็ดดิน ขนาดของเม็ดดิน และองค์ประกอบของ แร่ธาตุต่างๆ ในเม็ดดินนั้น รวมทั้งน้ำในดินด้วย โครงสร้างของดินที่แตกต่างกันจะทำให้สมบัติ ทางวิศวกรรมของดินแตกต่างกัน เช่น สมบัติทางด้าน การรับน้ำหนัก การระบายน้ำและการทรุดตัว เป็นต้น สำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธา ดินได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในหลายๆ ส่วน เช่น งานถนน งานชลประทาน หรืองานเขื่อน เป็นต้น รวมทั้งยังใช้สำหรับรองรับองค์อาคารต่างๆ ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาสมบัติต่างๆของเม็ดดิน ลักษณะและขนาดเม็ดดินการกระจายตัวของเม็ด ดินที่มีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรม เช่น กำลังรับแรงของดิน สมบัติด้านการระบายน้ำ และ สมบัติ ด้านการยุบอัดตัว เป็นต้น เพื่อประโยชน์ในด้านการออกแบบและตัดสินใจแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

ดินในทางวิศวกรรมถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) และ ดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil) และในส่วนของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว โดยเฉพาะดินเหนียวอ่อนจะมีปัญหาในทางการก่อสร้าง เนื่องจากการรับน้ำหนักได้น้อย และการ ทรุดตัว เช่นตัวอย่างการทรุดตัวของอาคารเนื่องจากสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน รวมทั้งการทรุดตัว ของถนนบนชั้นดินเหนียวอ่อน ดังรูปที่ 1.1

แนวคิดในการออกแบบสำหรับดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว จะวิเคราะห์แบบหน่วย แรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) ทั้งระยะสั้น (Short Term) และระยะยาว (Long Term) ส่วนดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวจะวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) ในระยะสั้น และ หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) ในระยะยาว โดยไม่คำนึงถึงผลของปริมาณของ ทรายที่ผสมในดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (ดินเหนียว) การศึกษาในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมและ สมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนผสมทราย เมื่อมีปริมาณของทรายผสมอยู่ในอัตราส่วน ต่างๆ และขนาดของเม็ดทรายที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการตัดสินใจออกแบบในกรณีที่ชั้นดินเป็นดินเหนียวปนทราย และจะเป็นข้อมูลในการเลือกใช้

ทรายในการปรับปรุงคุณภาพได้อย่างเหมาะสมในกรณีต้องการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน และปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย การใช้ทรายในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้านพฤติกรรมมารับแรงเฉือน และการเร่งการทรุดตัวเพราะว่าทรายเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและราคาถูก



(ก)



(ข)

**รูปที่ 1.1** การทรุดตัวของโครงสร้างถนนที่สร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน (ก) ถนนสายเลียบทะเลสาบสงขลา และ (ข) ถนนสายหลังโรงพยาบาลสงขลา



## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน
- 2) เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้าน การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน
- 3) เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้านความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำผ่านมวลดิน

## 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน
- 2) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้าน การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน
- 3) ทำให้ทราบถึงผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้านความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำผ่านมวลดิน
- 4) ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนที่ทำการผสม ด้วยทราย
- 5) เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกใช้ปริมาณทรายและขนาดของเม็ดทรายที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

- 1) เก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ระดับความลึก 1-3 เมตร บริเวณปากแม่น้ำ ตำบลสะกอม อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา โดยวิธีเปิดหน้าดินกว้าง เก็บตัวอย่างมาอบแห้ง และบดเป็นผง

2) ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมเมื่อมีการผสมทรายลงไปดินเหนียวอ่อนที่ 10, 20, 30, และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และขนาดของทรายผสมคือทรายขนาดกลาง (Medium Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค้างตะแกรงเบอร์ 40 และทรายเม็ดละเอียด (Fine Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างตะแกรงเบอร์ 200

3) ตัวอย่างดินที่ศึกษาเป็นตัวอย่างดินที่สร้างขึ้นใหม่ (Reconstitute) โดยวิธีผสมเหลว (Slurry) และใช้น้ำหนักกดทับ 8 ตันต่อตารางเมตร เป็นเวลา 4 วัน

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสารและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ดินในทางวิศวกรรม หมายถึง เม็ดของแร่ธาตุและสารอินทรีย์ที่ผูกพันมารวมกัน โดยมีส่วนที่เป็นของเหลวและอากาศแทรกอยู่ในเม็ดดิน ดินได้ถูกนำมาใช้ในทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคอย่างกว้างขวางจึงต้องศึกษาสมบัติของดิน เช่น แหล่งกำเนิด แร่ธาตุในดิน การกระจายตัวของเม็ดดิน ความสามารถในการรับน้ำหนักด้านทานแรงเฉือน การระบายน้ำ การยุบตัว และความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานของดิน ในทางวิศวกรรมดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) หมายถึงดินที่มีขนาดดินเม็ดละเอียดผสมอยู่ในปริมาณที่มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณความชื้นที่สูงและเป็นดินที่มีสมบัติทางวิศวกรรมที่เลว (Cennica, 1995) แร่ดินเหนียวประกอบด้วย 3 กลุ่มหลักโดยแยกตามโครงสร้างการจับตัวของแร่ธาตุประกอบด้วย Montmorillonite, Kaolinite และ Illite ซึ่งเป็นแร่ประเภท Hydrus Aluminum Silicate ดินเหนียวแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างการรวมตัวของเม็ดดิน และปริมาณน้ำในมวลดินด้วย ดินเหนียวโดยทั่วไปเป็นดินที่เกิดจากการตกตะกอนบริเวณปากแม่น้ำ

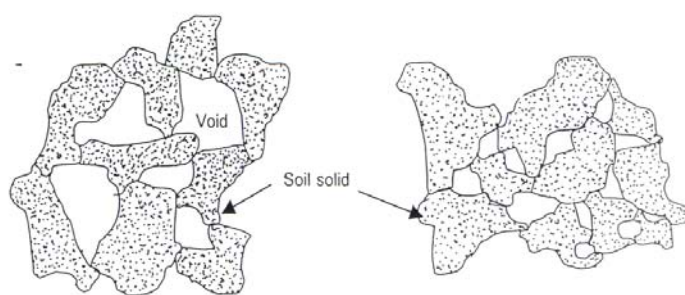
#### 2.1 โครงสร้างของดิน (Soil Structure)

โครงสร้างของดินจำแนกออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆด้วยกันคือ โครงสร้างของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) และโครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ อนุภาคของเม็ดดิน น้ำ และอากาศ ในส่วนของเม็ดดิน การจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดิน ลักษณะของเม็ดดิน และองค์ประกอบแร่ธาตุในดิน ซึ่งลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันนี้จะทำให้สมบัติทางทางวิศวกรรมแตกต่างกันไปด้วย

##### 2.1.1 โครงสร้างของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil)

ดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) เช่นกรวดทรายต่างๆ ซึ่งมีลักษณะอนุภาคเป็นก้อนมีเหลี่ยมมุมหรือกลมมนนั้น สามารถที่จะจัดเรียงอนุภาคได้ 2 แบบคือ Single-Grained และ Honeycombed ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 ตามลำดับ โครงสร้างแบบ

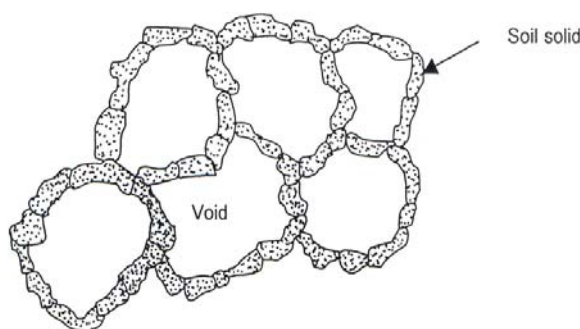
Single-Grained นั้นอนุภาคของเม็ดดินจะอยู่ในสถานะที่มีเสถียรภาพ แต่ละอนุภาคจะสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่โดยรอบ และความหนาแน่นของมวลดินจะขึ้นอยู่กับขนาด ลักษณะ และการกระจายของอนุภาคเม็ดดินเป็นหลัก ส่วนในโครงสร้างแบบ Honeycombed จะพบเมื่ออนุภาคของเม็ดดินเป็นพวกทรายละเอียดหรือทรายแป้ง โครงสร้างแบบนี้อนุภาคเม็ดดินจะจัดเรียงตัวเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.2 เป็นผลทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่มาก ดังนั้นเมื่อมวลดินรับน้ำหนักมากๆ จนโครงสร้างดินรับไม่ได้ก็จะทำให้เกิดการทรุดตัวค่อนข้างสูง โครงสร้างในลักษณะนี้ก่อให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพมวลดิน



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบ Single-Grained: (ก) แบบหลวม, (ข) แบบแน่น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบ Honeycombed

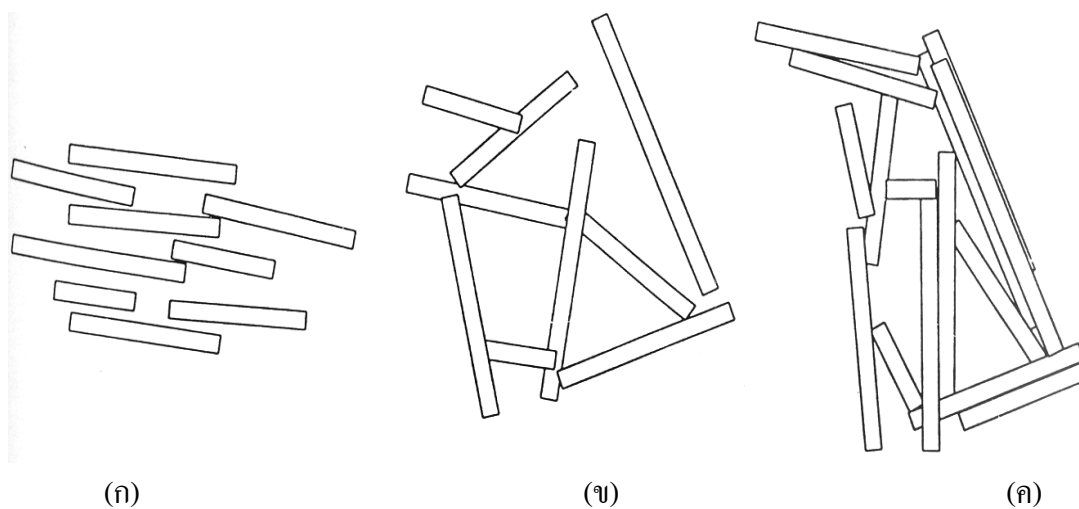
### 2.1.2 โครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil)

สำหรับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil) โครงสร้างของดินจะขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงของอนุภาคของเม็ดดินซึ่งจัดได้ 3 แบบคือ

1) แบบ Dispersion การจัดเรียงตัวของโครงสร้างลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคของเม็ดดินอยู่ห่างกันมาก ซึ่งจะทำให้แรงระหว่างอนุภาคของเม็ดดินเป็นแรงดึงดูด (Vander Waal's Forces) น้อยกว่าแรงผลัก อนุภาคจึงจัดเรียงตัวแบบกระจายและมีแนวโน้มที่อนุภาคจะวางตัวขนานกันเมื่อตกตะกอน โดยอิสระดังรูปที่ 2.3 (ก)

2) แบบ Non-Salt Flocculation ลักษณะการจัดเรียงตัวแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคของเม็ดดินเริ่มเข้ามาชิดกันมากขึ้นและอาจทำให้เกิดการชนกันระหว่างปลายกับผิวคินของอนุภาค 2 อนุภาค ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกันขึ้น และเมื่อเกิดลักษณะนี้มากขึ้นๆ อนุภาคเหล่านี้ก็จะตกตะกอนเป็นแบบ Non-Salt Flocculation ดังรูปที่ 2.3 (ข)

3) แบบ Salt Flocculation โครงสร้างลักษณะนี้จะคล้ายกับ แบบ Non-Salt Flocculation แต่จะแตกต่างกันตรงที่อนุภาคของดินจะมีแนวโน้มที่จะเรียงตัวขนานกันและชิดกันมากกว่าที่จะเรียงตัวแบบ Flocculent ทั่วไป เนื่องจากประจุจากเกลือจะมีผลไปลดแรงผลักระหว่างอนุภาคของเม็ดดินลักษณะของโครงสร้างแบบนี้แสดงดังรูปที่ 2.3 (ค)



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (a) Dispersion (b) Non-Salt Flocculent และ (c) Salt Flocculent

ที่มา : ดัดแปลงจาก Lambe (1958)

อนุภาคดินเหนียวที่ตกตะกอนในน้ำทั่วไปจะมีโครงสร้างก้ำกึ่งระหว่างแบบ Dispersion และ Flocculent แต่ถ้าอนุภาคตกตะกอนในน้ำทะเลซึ่งมีประจุมาก แนวโน้มของโครงสร้างของดินนี้จะมีลักษณะที่เป็น Flocculent มากจะมีช่องว่าง (Void) มากทำให้มวลดินมีน้ำหนักเบา

## 2.2 สมบัติทางกายภาพของดิน

สมบัติทางกายภาพของดินมีความสำคัญในงานวิศวกรรมและมีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดิน สามารถทำนายสมบัติทางวิศวกรรมของดินได้คร่าวๆ จากข้อมูลสถิติทางการศึกษาของนักวิชาการมักจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินแต่ละชนิด สมบัติของดินจะมีลักษณะแตกต่างกัน ตามลักษณะการกำเนิดของดิน และองค์ประกอบของแร่ธาตุภายในมวลดิน สมบัติทางกายภาพของดินที่สำคัญต่อสมบัติทางวิศวกรรมสามารถแบ่งได้ดังนี้

ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content) เป็นค่าอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของมวลดิน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)

การกระจายตัวของเม็ดดิน (Grain Size Distribution) เป็นสมบัติที่สำคัญที่จะต้องทราบเพื่อนำไปจำแนกประเภทของดิน และสามารถบอกถึงความสามารถในการบดอัดแน่น ซึ่งเป็นค่าที่ต้องทราบในกรณีการนำดินจากแหล่งอื่นมาทำการก่อสร้าง เช่น งานถนน งานเขื่อน และงานที่ต้องถมบดอัดทุกชนิด

หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของดินต่อปริมาณของดินซึ่งค่าหน่วยน้ำหนักของดินจะบอกถึงค่าความแข็งแรงของดินด้วย

พิกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg Limit) เป็นการอธิบายปริมาณความชื้นในมวลดินต่อสถานะของดิน ค่าพิกัดแอตเตอร์เบิร์ก เป็นค่าที่นำไปจำแนกประเภทของดินและสามารถบอกถึงความแข็งแรงของดินได้ ประกอบด้วย

- 1) จีดพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) คือปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนจากสถานะยืดหยุ่นเป็นของเหลว เป็นค่าที่นำไปจำแนกประเภทของดิน
- 2) จีดพิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) คือปริมาณความชื้นของมวลดินเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นสภาพกึ่งของแข็ง
- 3) ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) คือช่วงความแตกต่างระหว่างค่าพิกัดเหลวกับค่าพิกัดพลาสติก

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) คืออัตราส่วนหน่วยน้ำหนักของดินในอากาศกับน้ำหนักของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส

## 2.3 สมบัติทางวิศวกรรมของดิน

สมบัติทางวิศวกรรมมีความสำคัญในการคำนวณออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อให้องค์อาคารมีความมั่นคงแข็งแรง สมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญประกอบด้วย กำลังรับแรงเฉือน ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และสมบัติการยุบอัดตัว ดังมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 กำลังรับแรงเฉือนของดิน

กำลังรับแรงเฉือนของดิน คือ แรงสูงสุดที่ดินสามารถรับได้ที่จุดพิบัติ เป็นสมบัติที่สำคัญมากในงานวิศวกรรมฐานราก เพื่อที่จะสามารถออกแบบและแก้ปัญหาทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น การหาความสามารถด้านการรับน้ำหนักของฐานรากตื้นและเสาเข็ม เสถียรภาพของลาดชันในงานเขื่อนและเนินดิน หรือการวิเคราะห์แรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อกำแพงกันดิน เป็นต้น

การศึกษาสมบัติกำลังรับแรงเฉือนของดิน มีทั้งการทดสอบในสนามและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีวิธีการทดสอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น

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

การทดสอบทั้งสามให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดและการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ยังไม่สามารถดัดแปลงการทดสอบให้มีสภาพได้ตามแรงกดทับของดินตามธรรมชาติ จึงทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบไม่ตรงกับความเป็นจริงเท่าที่ควร

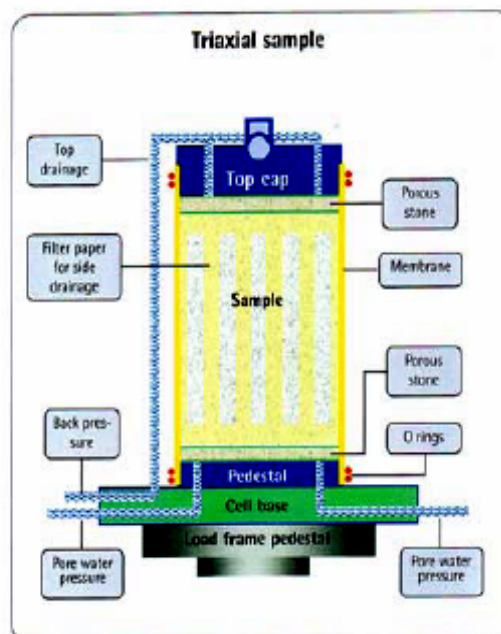
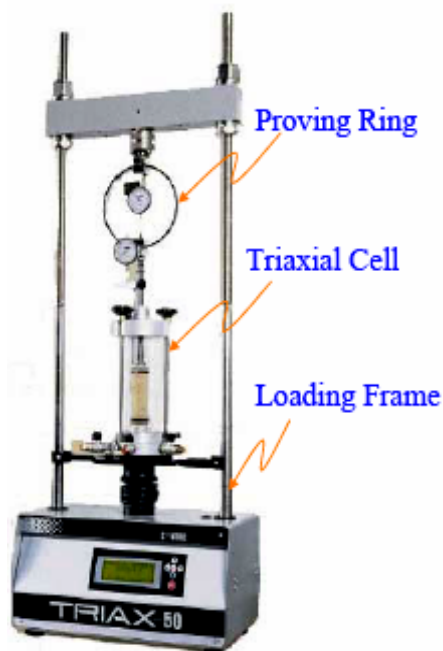
การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) นับได้ว่าเป็นการทดสอบที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของดินในธรรมชาติมากที่สุด สามารถทำการทดสอบได้ 3 แบบ ซึ่งแต่ละแบบให้ประโยชน์และหลักการที่แตกต่างกัน การทดสอบทั้งสามชนิดมีดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบแบบ Unconsolidated Undrained Triaxial Compression Test การทดสอบนี้ตัวอย่างจะถูกอัดด้วยความดันรอบตัวอย่าง จากนั้นเพิ่มหน่วยแรงในแนวตั้งขึ้นขณะที่

ความดันอัตรอบตัวอย่างคงที่ จนกว่าตัวอย่างดินพิบัติ ค่าที่ได้จากการทดสอบคือ ค่า  $C$  หรือ  $S_u$  ไม่สามารถหาค่าแรงดันน้ำในมวลดินได้

2) การทดสอบแบบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test ในการทดสอบจะต้องทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นเพิ่มความดันอัตรอบตัวอย่างเพื่ออัดตัวคายน้ำ ขณะกดตัวอย่างจะต้องวัดแรงดันน้ำตลอดเวลาการทดสอบ และต้องใช้อัตราเร็วการกดตัวอย่างที่ต่ำ ค่าที่ได้จากการทดสอบที่สำคัญในการออกแบบ คือ มุมเสียดทาน ( $\phi'$ ,  $\phi$ ) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน ( $C'$ ,  $C$ ) ค่าพารามิเตอร์  $A$  ที่ใช้วิเคราะห์ความดันน้ำในโพรงดิน และค่า  $S_u$  ซึ่งครอบคลุมพฤติกรรมการออกแบบทั้งหมด และเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการศึกษาวิจัยในเชิงลึก

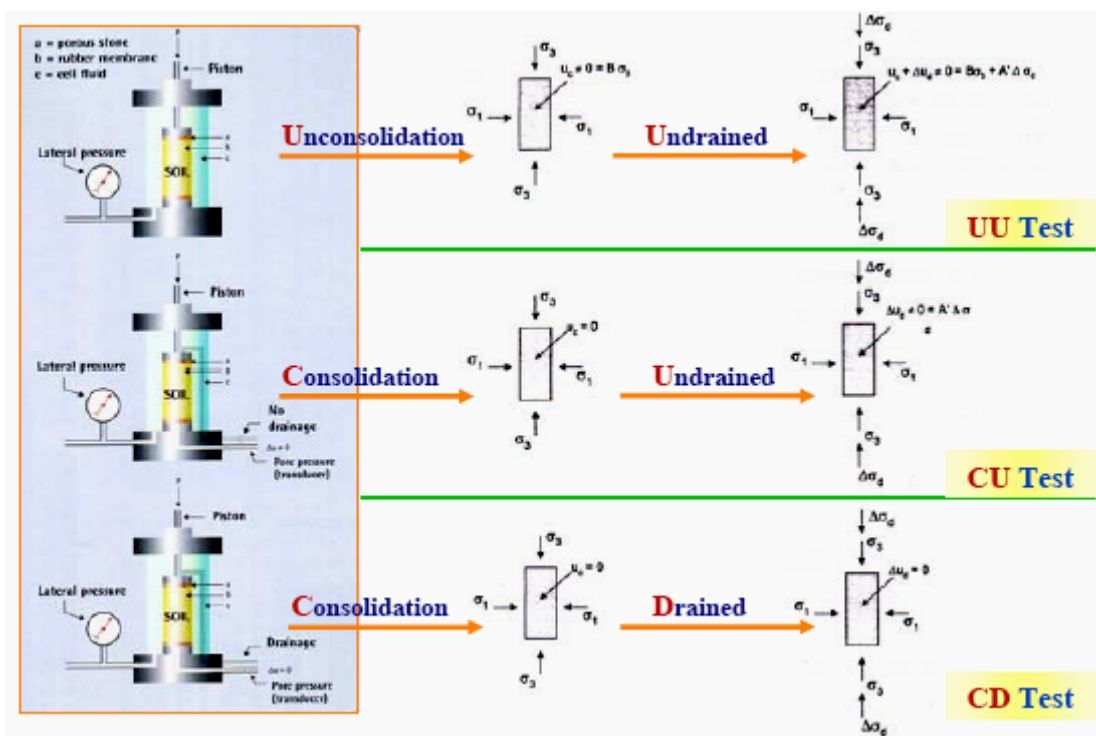
3) การทดสอบแบบ Consolidated drained Triaxial Compression Test ขั้นตอนการทดสอบใกล้เคียงกับวิธีที่ 2 แต่ขณะเงื่อนไขตัวอย่างต้องปล่อยให้ น้ำระบายออก ( $\Delta u$  ต้องมีค่าเท่ากับ ศูนย์ตลอดเวลา) จึงต้องใช้เวลาในการทดสอบมาก ผลที่ได้จากการทดสอบจะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบประสิทธิผล ( $C'$ ,  $\phi'$ ) เนื่องจากต้องใช้เวลาในการทดสอบที่นาน จึงไม่นิยมใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.4 เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test)

ที่มา : [www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html](http://www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html)





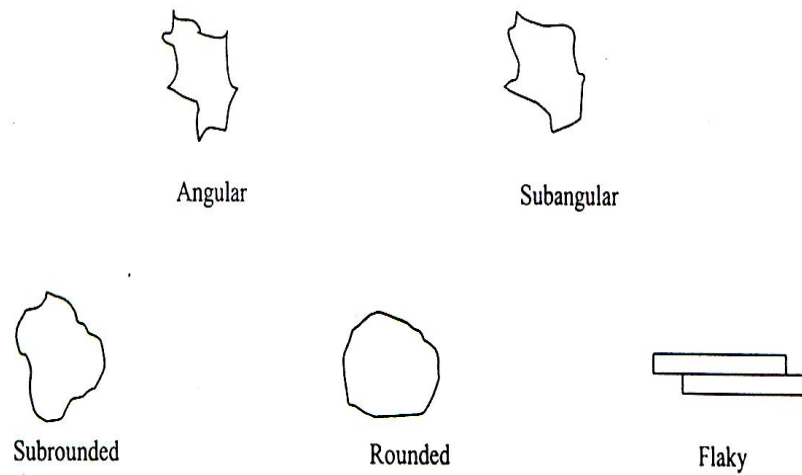
รูปที่ 2.5 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบต่างๆ

ที่มา : [www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html](http://www.gf.su.ac.yu/%7Ewus/wus07/web4/triaxial.html)

Lambe (1960) ได้อธิบายว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soil) นั้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ 3 ส่วนคือ

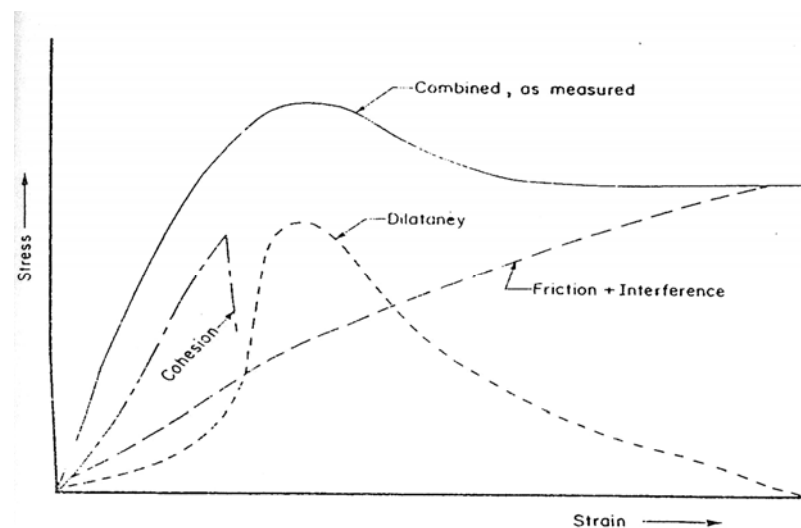
1) แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) เป็นส่วนประกอบหนึ่งของกำลังรับแรงเฉือนของดิน กำลังรับแรงเกิดจากการที่อนุภาคสองอนุภาคที่ถูกยึดติดกันด้วยแรงระหว่างอนุภาค แรงนี้ไม่เกี่ยวกับแรงภายนอกใดๆ แต่ขึ้นกับขนาดของอนุภาค, ลักษณะการยึดเกาะ และปริมาณน้ำรอบๆ อนุภาคนั้น

2) แรงเสียดทาน (Friction) คือ ส่วนที่เกิดจากแรงเสียดทานที่ผิวของอนุภาคหนึ่งกับอนุภาคหนึ่ง เมื่อมีแรงภายนอกมาพยายามให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านั้น แรงเสียดทานนี้ขึ้นกับลักษณะของอนุภาคของเม็ดดินซึ่งมีลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะรูปร่างต่างๆของอนุภาคของเม็ดดิน

3. Dilatancy เป็นลักษณะทางกายภาพของอนุภาคของเม็ดดิน ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น ปริมาณของมวลดินที่มีความหนาแน่นสูงมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเป็นผลทำให้เกิดแรงดันภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินเป็นลบ (Negative Pore Pressure) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของกำลังรับแรงเฉือน

ที่มา : After Lambe (1960)

Bishop and Henkel (1964) ได้อธิบายทฤษฎีการวัดสมบัติของดินในการทดสอบแบบสามแกน (Triaxial Test) ในกรณีที่ทำการทดสอบแบบให้น้ำไหลออกจากดินได้ (Drained Test) และในกรณีที่ไม่ให้ น้ำไหลออกจากช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Undrained Test) เสนอสมการในการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำชนิดไม่มีการระบายน้ำ

$$\tau_f = c + \sigma_{ff} \tan \phi \quad (2.1)$$

โดยที่

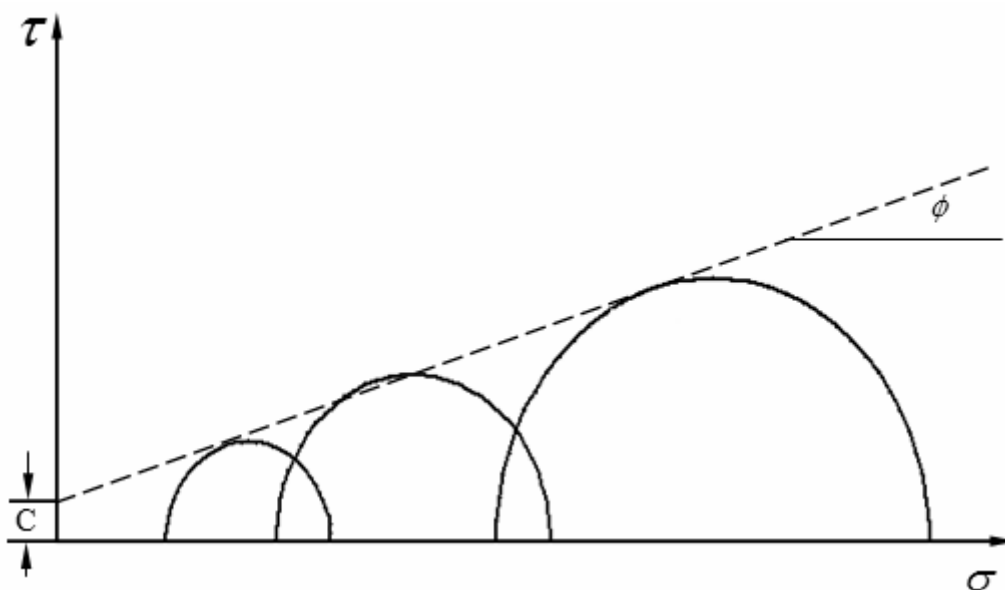
- $\tau_f$  = Undrained Shear Strength
- $c$  = Cohesion
- $\sigma_{ff}$  = Total Normal Stress at Failure
- $\phi$  = Angle of Shearing Resistance

กำลังรับแรงเฉือนของดินจะถูกแสดงด้วยขอบเขตการพิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Strength Envelope) เป็นเส้นตรงที่แสดงถึงขอบเขตของกำลังดังรูปที่ 2.8 โดยที่ความเค้นประสิทธิผลเป็นตัวสำคัญในการควบคุมพฤติกรรมทางด้านกำลังของดิน (Soil Shear Strength) ดังนั้น การพิบัติของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb Failure Criteria) ที่ถูกต้องที่สุดเมื่อแสดงในเทอมของความเค้นประสิทธิผล

$$\tau_{ff} = c' + \sigma'_{ff} \times \tan \phi' \quad (2.2)$$

โดยที่

- $\tau_{ff}$  = กำลังรับแรงเฉือนบนผิวรอบพิบัติขณะพิบัติ (Shear Strength on Failure Plane at Failure)
- $\sigma'_{ff}$  = ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งที่อยู่ในระนาบของการพิบัติขณะพิบัติเกิดขึ้น (Effective Normal Stress on Failure Plane at Failure)
- $c'$  = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (Effective Cohesion Intercept)
- $\phi'$  = มุมเสียดทานประสิทธิผล (Effective Angle of Shearing Resistance)



รูปที่ 2.8 ขอบเขตการพิบัติของมอร์-คูลอมบ์ ในการทดสอบแรงอัดสามแกน 3 ตัวอย่างที่ Confining Pressure ต่างกัน

พารามิเตอร์แรงดันน้ำจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test ตัวอย่างดินจะต้องอิมตัวด้วยน้ำภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจึงเต็มไปด้วยน้ำ ในขณะที่ทำการทดสอบจะมีแรงดันรอบตัวอย่าง (Confining Pressure) คงที่ และมีการเพิ่มหน่วยแรงในแนวตั้งเรื่อยๆ จึงทำให้เกิดแรงดันน้ำภายในมวลดิน เมื่อค่าหน่วยแรงในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น

Skempton (1954) พบว่า ความดันน้ำที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta u$ ) เนื่องจาก Normal และ Shear Stress พิจารณาเพียงสภาพของหน่วยแรงอยู่ในสภาพการณ์ของการทดสอบ Triaxial กล่าวคือ ระบายทางแนวนอนและแนวตั้งเป็นระนาบที่ Principle Stress มากระทำนั้นคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาด (Magnitude) ของ Principle Stress ( $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ ) Skempton and Bishop ได้แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (Excess Pore Pressure,  $\Delta u$ ) กับการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงรวม (Total Stress) ในการทดสอบ Triaxial แบบ Undrained ดังนี้

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)) \quad (2.3)$$

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

$\Delta u$  = ความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (Excess Pore Pressure)

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

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

A, B = คือ Skempton pore pressure parameter โดยที่ (Magnitude) ความดันน้ำในโพรง (Total Pore Pressure)

พารามิเตอร์ A เป็นตัวบอกความสัมพันธ์ของความดันน้ำระหว่างเม็ดดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ระหว่างการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ มวลดินจะมีปริมาตรคงที่ ถ้าแรงเฉือนนั้นกระทำต่อดิน Normally Consolidated Clay เมื่อดินมีแนวโน้มที่จะกดเข้าหากัน 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 ( $\Delta u$  ติดลบ) จึงทำให้พารามิเตอร์ A มีค่าเป็นลบได้ การได้ค่า A เป็นค่าลบแสดงว่าดินเหนียวพยายามขยายตัวขึ้น เพื่อพยายามให้อัตราส่วนช่องว่างเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวได้ถูกหน่วยแรงที่ถูกกดมามากในอดีต ( $OCR \gg 1.0$ )

ตารางที่ 2.1 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 (1954)

ทางเดินของหน่วยแรง (Stress Part) เป็นผลที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามแกนที่สามารถสื่อถึงประวัติของดินได้ Lamb and Whitman (1960) ได้เสนอแนะวิธีการใช้ทางเดินของความเค้นประสิทธิผล แสดงสถานะของความเค้นบนระนาบผิวที่มีค่าแรงเฉือนสูงสุดในการทดสอบแรงอัดสามแกน Triaxial Test ทางเดินของหน่วยแรงเป็นเส้นแสดงสภาวะการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลดิน แสดงให้เห็นอย่างต่อเนื่องในทุกๆสภาวะของหน่วยแรงที่อยู่ในระนาบเดียวกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ทั้งในเทอมของความเค้นรวม (Total stress) สมการที่ 2.4 และ 2.5 และความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) สมการที่ 2.6 และ 2.7

$$\text{แกน Y: } q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (2.4)$$

$$\text{แกน X: } p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (2.5)$$

$$\text{แกน Y: } q, q' = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 \quad (2.6)$$

$$\text{แกน X: } p' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 \quad (2.7)$$

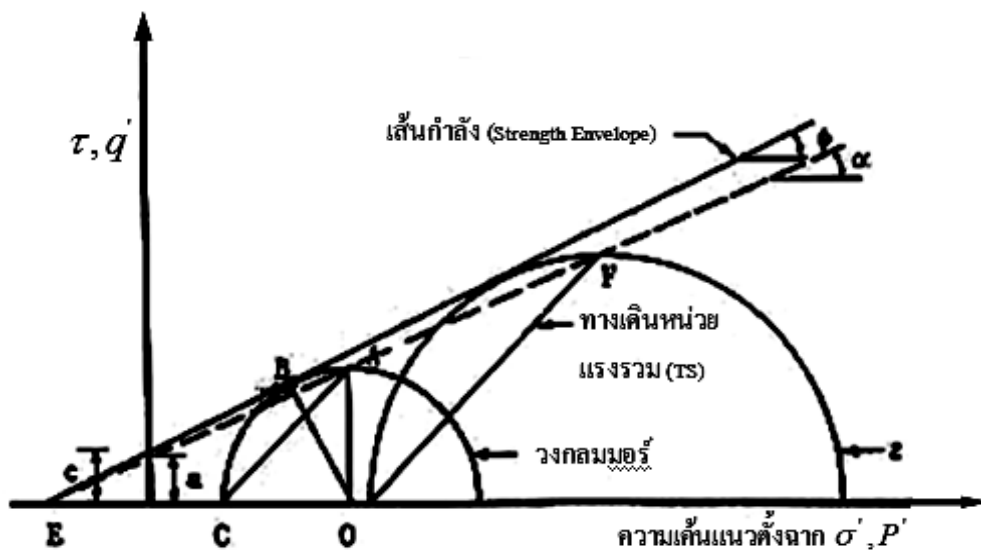
โดยจะเขียนอยู่ในรูปไคอะแกรม ของ  $p$  หรือ  $\bar{p}$  (แกนนอน) และ  $q$  (แกนตั้ง) ใช้ Scale เดียวกัน ในการทดสอบ Triaxial โดยการกดตัวอย่างแบบอันเดรน ทางเดินของความเค้นรวมจะเป็นเส้นตรงทำมุม 45 องศา กับแกนนอน ( $p$ ) และทางเดินของความเค้นประสิทธิผลสำหรับดินเหนียวที่ทดสอบอยู่ในสภาพที่ไม่ระบายน้ำเมื่อนำมาพิจารณาในรูปของการพล็อต  $p' - q$  ค่าความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) จะเห็นผลต่างของดินที่เป็นดิน NCC และดิน OCC ได้ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10

จากความสัมพันธ์ค่าคงที่ระหว่างวงกลมมอร์ (Mohr) และทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) จากเส้นขอบเขตการพิบัติของกำลังรับแรงเฉือน สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9

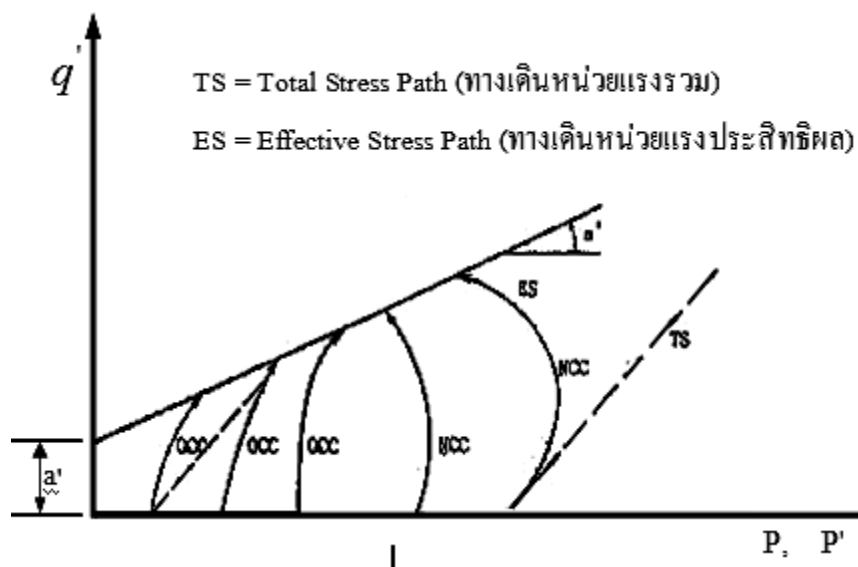
$$\phi' = \sin^{-1}(\tan \alpha') \quad (2.8)$$

$$C' = \frac{a'}{\cos \phi'} \tag{2.9}$$

โดยที่  $a'$  = ค่าของจุดตัดบนแกน ( $q$ ) ประสิทธิภาพ  
 $\alpha'$  = มุมลาดเอียงของเส้นขอบเขตการพิบัติประสิทธิภาพผลของ Stress Path



รูปที่ 2.9 เส้นกำลัง (Strength Envelope) จากทางเดินหน่วยแรง และจากวงกลมมอร์



รูปที่ 2.10 ทางเดินหน่วยแรง (Stress Part , p – q) ของดินประเภท NCC และดินประเภท OCC

Stress History มีอิทธิพลต่อรูปร่างของทางเดินความเค้นประสิทธิผลมาก จากการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) แบบ Consolidated Undrained Triaxial Test ความดันน้ำระหว่างเม็ดดินที่ตอบสนองต่อการกระทำของแรงเฉือน ( $\Delta u$ ) จะต่างกันตามสัดส่วนของ Over consolidation ratio, (OCR) ของดิน ความดันน้ำดังกล่าวจะทำให้ทางเดินของความเค้นประสิทธิผลหันเหออกจากทางเดินของความเค้นรวมมากน้อยต่างกัน

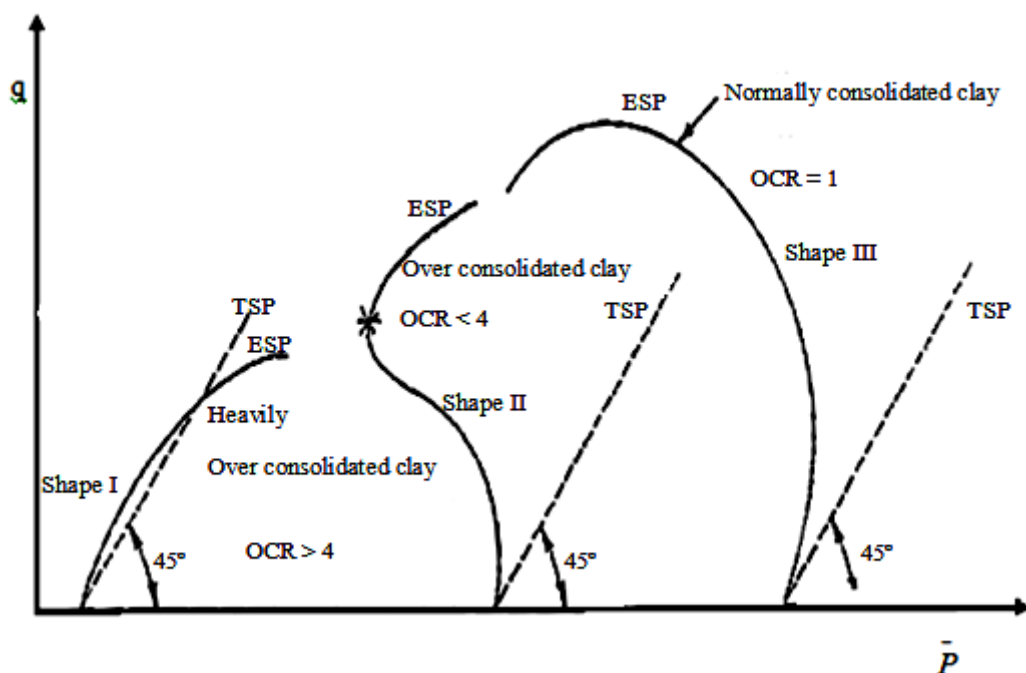
รูปที่ 2.11 แสดงทางเดินของความเค้นประสิทธิผลแบบต่างๆ ตามชนิดของดิน ซึ่งเปรียบเทียบกันโดยใช้ทางเดินของความเค้นรวม (TSP) ของการทดสอบ Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test เป็นตัวเปรียบเทียบรูปแบบทางเดินประสิทธิผลที่ได้จากการทดสอบจะออกมาในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

แบบที่ 1 (Shape I) พบมากในดินประเภทโอเวอร์คอนโซลิดเอทมาก ๆ (Heavily Over consolidated Clays) ที่ Strain น้อยๆ ( $\Delta u$ ) จะเปลี่ยนไปเป็นลบเนื่องจากดินมีแนวโน้มที่จะขยายตัวออก (Dilate) ESP จะวกกลับไปอยู่ทางขวามือของ TSP

แบบที่ 2 (Shape II) เป็น ESP ของดินโอเวอร์คอนโซลิดเอทเล็กน้อย (Slightly Over consolidated Clays) ซึ่งจะแสดงลักษณะของดินนอร์มัลลีสคอนโซลิดเอทและดินโอเวอร์คอนโซลิดเอทรวมกันในช่วงแรกที่ดินรับแรงเฉือน โครงสร้างเม็ดดินมีแนวโน้มที่จะหดตัว ทำให้เกิดค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน ( $\Delta u$ , Excess Pore Pressure) เป็นบวก (Positive) เมื่อความเครียด (Strain) มากขึ้นจนถึงจุดที่เกิดการแตกหักของโครงสร้างเม็ดดิน และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดดินทำให้ดินมีแนวโน้มที่จะขยายตัว และทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเป็นลบ (Negative) และผลคือแรงดันน้ำส่วนเกิน ลดลงทำให้ เส้นทางเดินประสิทธิผล (ESP, Effective Stress Path) โค้งกลับมาทางขวาอย่างรวดเร็ว

แบบที่ 3 (Shape III) พบได้ในดินนอร์มัลลีสคอนโซลิดเอท เนื่องจากโครงสร้างของดินมีแนวโน้มที่จะแตกหัก ดังนั้น  $\Delta u$  จะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Strain มากขึ้นเพราะฉะนั้น ESP จึงเบี่ยงเบนออกไปทางซ้ายของ TSP เรื่อยๆ





รูปที่ 2.11 แสดงทางเดินความเค้นประสิทธิภาพผลแบบต่างๆ (Effective Stress paths) ตามชนิดของดิน ซึ่งเปรียบเทียบกับโดยใช้ทางเดินความเค้นรวม (Total Stress paths) ของการทดสอบ Isotropically Consolidated Undrained Triaxial Compression Test

ที่มา : Wissa and Ladd (1964)

### 2.3.2 ความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำผ่านมวลดิน

ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถซึมผ่านของน้ำผ่านมวลดินมีความสำคัญในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical Engineering) การไหลของน้ำผ่านมวลดินธรรมชาติจะไหลเป็นทางคดเคี้ยวไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Void Channels) จากช่องว่างหนึ่งไปสู่อีกช่องว่างหนึ่งและธรรมชาติของการไหลของน้ำจะพยายามใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด ในการไหลจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งด้วยความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินนั้นที่น้ำไหลผ่าน แต่อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎีได้มีการสมมุติว่าน้ำไหลผ่านมวลดินใด ๆ ในแนวเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ระหว่างจุดสองจุดใดๆ โดยกำหนดให้ มวลดินที่น้ำไหลผ่านเป็นมวลดินที่เป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด (Homogeneous Soil) ในการไหลของน้ำผ่านมวลดินถ้าดินมีขนาดช่องว่างใหญ่ (Large Void) น้ำจะสามารถไหลซึมผ่านได้ง่ายกว่าดินที่มีช่องว่างเล็ก รูปทรงทางเลขาคณิตของช่องว่าง รูปร่าง

ช่องว่าง สภาพการอัดแน่น และการจัดเรียงตัวของเม็ดดินล้วนส่งผลต่อค่าการไหลของน้ำผ่านมวลดินทั้งสิ้น ดินเม็ดหยาบถึงแม้ว่าจะมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำกว่าดินเม็ดละเอียดแต่มีขนาดช่องว่างใหญ่กว่าดินเม็ดละเอียด น้ำจะสามารถไหลซึมผ่านในดินเม็ดหยาบ เช่นกรวด ทราย ได้ดีกว่าดินเม็ดละเอียด เช่นดินเหนียว ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านแยกตามชนิดของดินได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านตามชนิดของดินและหินประเภทต่างๆ

| Soil or rock formation          | k (cm/sec)             |
|---------------------------------|------------------------|
| Gravel                          | 1-5                    |
| Clean sand                      | $10^{-3}$ - $10^{-2}$  |
| Clean sand and gravel mixtures  | $10^{-3}$ - $10^{-1}$  |
| Medium to coarse sand           | $10^{-2}$ - $10^{-1}$  |
| Very fine to fine sand          | $10^{-4}$ - $10^{-3}$  |
| Silty sand                      | $10^{-5}$ - $10^{-2}$  |
| Glacial till                    | $10^{-10}$ - $10^{-4}$ |
| Homogeneous clays (unweathered) | $10^{-9}$ - $10^{-7}$  |
| Shale                           | $10^{-11}$ - $10^{-7}$ |
| Sandstone                       | $10^{-8}$ - $10^{-4}$  |
| Limestone                       | $10^{-7}$ - $10^{-4}$  |
| Fractured rocks                 | $10^{-6}$ - $10^{-2}$  |

ที่มา : Freeze and Cherry (1977); Peck et al., (1974)

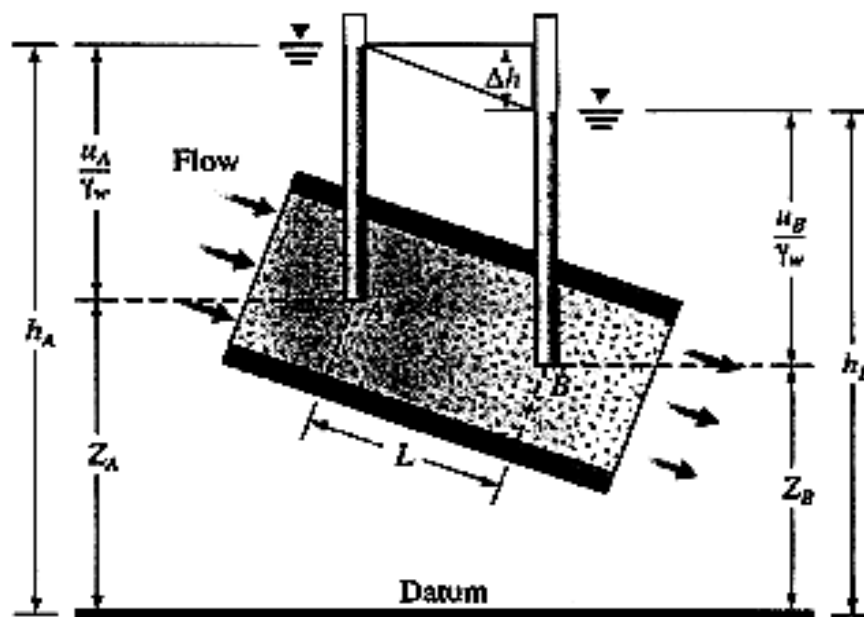
สมบัติของมวลดินที่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านได้เรียกว่า การซึมผ่าน (Permeability) ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงเรื่องการไหลซึมของน้ำผ่านมวลดิน เราสามารถแบ่งชนิดของมวลดินที่เกี่ยวข้องออกได้อย่างกว้าง ๆ เป็นสองประเภทคือ

1) ดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย (Permeable Soil) เป็นมวลดินที่มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดใหญ่ประกอบกันเป็นช่องการไหลระหว่างเม็ดดิน (Flow Channels) ที่ยอมให้

น้ำไหลผ่านมวลดินได้ง่ายและรวดเร็วทำให้มีอัตราการไหลของน้ำผ่านมวลดินสูง มวลดินประเภทนี้ ได้แก่ ทรายที่มีการกระจายขนาดละเอียด (Poorly Grades Sands) และกรวด (Gravels)

2) ดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ยาก (Impermeable Soil) เป็นมวลดินที่เม็ดดินจัดเรียงตัวใกล้ชิดกันมาก ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็ก แม้จะเชื่อมต่อถึงกันได้แต่ช่องการไหลระหว่างเม็ดดินภายในมวลดินก็จะมีพื้นที่หน้าตัดน้อยมากทำให้น้ำไหลผ่านไปได้ยาก และมีอัตราการไหลของน้ำผ่านมวลดินต่ำ มวลดินประเภทนี้ ได้แก่ ดินเหนียวเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Clay) เป็นต้น

การไหลของน้ำผ่านมวลดินเกิดขึ้นได้เมื่อมีพลังงานต่างกันระหว่างจุดสองจุดในดิน น้ำจะไหลจากจุดที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังจุดที่มีพลังงานต่ำกว่า ซึ่งพลังงานดังกล่าวในทางวิศวกรรมจะแสดงในรูปของความสูงหรือเฮด (Head) โดยอาศัยสมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's)



รูปที่ 2.12 การไหลของน้ำผ่านมวลดิน

$$h = \frac{u_a}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (2.10)$$

โดยที่  $h$  = เฮดรวม (Total Head)

$$\begin{aligned}
 u_a &= \text{ความดันน้ำในดิน} \\
 \gamma_w &= \text{ความหนาแน่นของน้ำ} \\
 V &= \text{อัตราเร็วในการไหลของน้ำในดิน} \\
 Z &= \text{เสาระดับ} \\
 g &= \text{อัตราเร่งระหว่างแรงโน้มถ่วงของโลก}
 \end{aligned}$$

ซึ่งการไหลของน้ำผ่านมวลดินมีลักษณะการไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow) คือการไหลด้วยอัตราเร็วที่ต่ำมากและค่อนข้างคงที่ (Steady State Flow) เทอมของอัตราเร็วจึงมีค่าน้อยมากจึงไม่ต้องนำมาคำนึงจึงสามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$h = \frac{u_a}{\gamma_w} + z \quad (2.11)$$

จากรูปที่ 2.12 ดินที่จุด A มีเสดสูงกว่าจุด B น้ำจึงเกิดการไหลผ่านจุด A ไปยังจุด B โดยมีความชันทางชลศาสตร์ คือ

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.12)$$

Darcy ชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาการไหลของน้ำผ่านมวลดินประเภททราย โดยให้น้ำไหลผ่านมวลดินภายใต้ความดันต่างกันและระยะทางการไหลภายในมวลดินต่างกันด้วย ทั้งนี้เพื่อบันทึกปริมาณน้ำที่ไหลผ่านมวลดินนั้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาในการไหลของน้ำแต่ละครั้งสามารถสรุปได้ว่า การที่น้ำไหลผ่านมวลดินในทิศทางเดียว (One-Dimensional Flow) และตัวอย่างมวลดินที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในสภาพอิ่มตัวตลอดเวลา ปริมาณการไหลของน้ำผ่านมวลดินจะแปรผันไปกับองค์ประกอบดังนี้

- ค่าแตกต่างระหว่างจุดสองจุดภายใต้การพิจารณา (Total Head Difference)
- พื้นที่หน้าตัดของมวลดินที่น้ำไหลผ่าน
- ระยะทางการไหลของน้ำในมวลดิน

ซึ่งคาร์ซี สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.13

$$q \propto \frac{\Delta h}{L} A \quad (2.13)$$

โดยที่  $q$  = Rate of Seepage  
 $A$  = Area of Specimen  
 $L$  = Length of Specimen  
 $\Delta h$  = The Loss of Head

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการการไหลได้ดังนี้

$$q = kiA \quad (2.14)$$

โดยที่  $i$  = Hydraulic Gradient  
 $k$  = Coefficient of Permeability

Hanzen (1930) ได้ให้ความสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์ของทรายขนาดสม่ำเสมอ

โดยเสนอสมการ

$$k = C \times D_{10}^2 \quad (2.15)$$

โดยที่  $k$  = ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน  
 $C$  = ค่าคงที่ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 15  
 $D_{10}$  = ขนาดเม็ดดินที่เปอร์เซ็นต์ผ่าน 10 เปอร์เซ็นต์

Tavenas และ คณะ (1983) ได้กำหนดความสัมพันธ์สำหรับดินเหนียว (Clayey Soil) ในสนามโดยเสนอสมการ

$$\text{Log } k = \text{log } k_0 - \frac{e_0 - e}{Ck} \quad (2.16)$$

โดยที่  $k$  = ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่อัตราส่วนช่องว่าง  $e$   
 $k_0$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในสนามที่อัตราส่วนช่องว่าง  $e_0$   
 $Ck$  = ดัชนีการซึมผ่านเปลี่ยนแปลง (Permeability Change Index)

### 2.3.3 การทรุดตัวของดิน

ดินตามธรรมชาติเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากค้ำจะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ในชั้นดิน ซึ่งส่งผลให้เกิดการยุบตัวของดินเกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคดิน การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคดิน และการที่น้ำหรืออากาศถูกบีบออกจากโพรงดิน โดยทั่วไปการทรุดตัวของดินที่มีสาเหตุมาจากน้ำหนักบรรทุกมากค้ำนั้น แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1) การทรุดตัวเกิดขึ้นในทันที (Immediately Settlement) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแบบอีลาสติกของดิน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นบรรจุ การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในทันทีที่ทันใดสามารถคำนวณหาจากสมการทฤษฎีอีลาสติก

2) การทรุดตัวที่เกิดจากการอัดตัวคายน้ำในเบื้องต้น (Primary Consolidation Settlement) เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวอิ่มตัว เนื่องจากน้ำที่อยู่ในโพรงดินถูกบีบให้ระบายออกไป

3) การทรุดตัวในระยะที่สอง (Secondary Compression Settlement) ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับตัวแบบอีลาสติกของเนื้อดิน ซึ่งจะเกิดขึ้นภายหลังจากการทรุดตัวในเบื้องต้น โดยมีค่าความเค้นประสิทธิผลคงที่ (Effective Stress)

สำหรับดินทรายจะเกิดการทรุดตัวในเฉพาะขั้นตอนแรก ส่วนในดินเหนียวจะเกิดการทรุดตัวทั้งสามขั้นตอน

Terzaghi (1925) เป็นผู้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับอัตราการทรุดตัวของการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอิ่มตัวแบบ 1 มิติ (Rate of One-Dimensional Consolidation) สำหรับดินเหนียวอิ่มตัว การคำนวณทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการที่ 2.17 อาศัยบนพื้นฐานสมมติฐานดังนี้

- ระบบน้ำ-ดินเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous)
- ดินเหนียวอิ่มตัวสมบูรณ์ 100%
- น้ำและดินเป็นวัสดุที่ไม่มีการยุบตัว (Incompressible)
- การไหลของน้ำอยู่ในทิศทางเดียว (ตามทิศทางการอัดตัว)
- การไหลของน้ำเป็นไปตามกฎของดาร์ซี (Darcy's Law)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.17)$$

โดยที่

$u$  = Excess Pore Water Pressure

$t$  = Time

$C_v$  = Coefficient of Consolidation

ค่าสมบัติการยุบอัดตัวของดินจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ Consolidation Test (ASTM D 2435 – 80) เป็นค่าที่พิจารณาจากการทดสอบมีค่าดังนี้

Compression Index,  $C_c$  เป็นค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio กับ Log Effective Overburden Pressure สำหรับดิน Normally Consolidated Clay แสดงใน รูป 2.13 ค่า Compression Index สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18

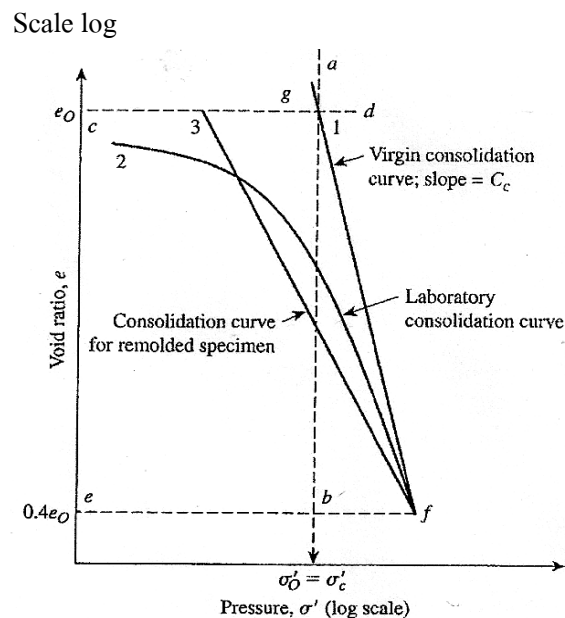
$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'_{vo} \quad (2.18)$$

โดยที่

$C_c$  = Compression Index

$\Delta e$  = ผลต่างของค่า Void Ratio ระหว่างจุดสองจุด

$\Delta \log \sigma'_{vo}$  = ผลต่างของ Log Effective Overburden Pressure ระหว่างจุดสองจุดใน



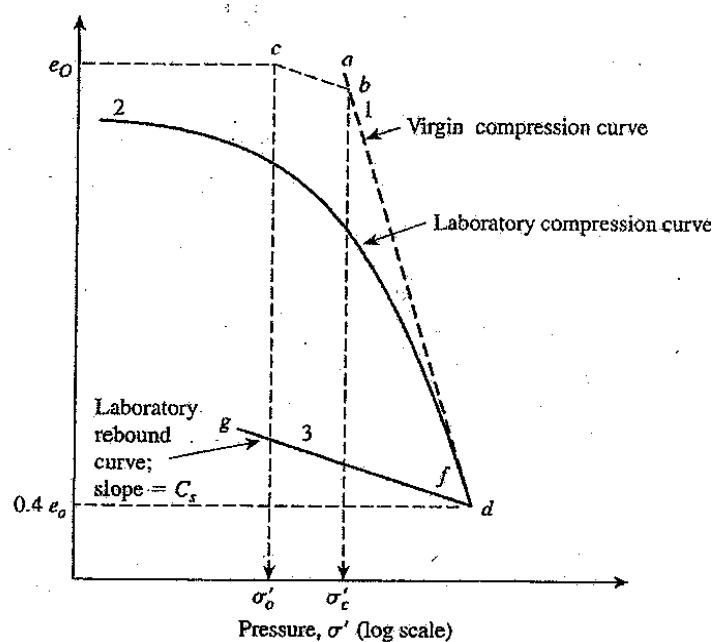
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio กับ Effective Overburden Pressure สำหรับ Normally Consolidated Clay

ที่มา : Das (1998)

Recompression Index,  $C_r$  เป็นค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio กับ Log Effective Overburden Pressure ในช่วง Reload สำหรับดิน Over Consolidated Clay ช่วงก่อนถึง Maximum past Pressure แสดงในรูปที่ 2.14 ค่า Recompression Index สามารถหาได้จากสมการที่ 2.19

$$C_r = \Delta e / \Delta \log \sigma'_{vo} \quad (2.19)$$

โดยที่  $C_r$  = Recompression Index  
 $\Delta e$  = ผลต่างของค่า Void Ratio ระหว่างจุดสองจุด  
 $\Delta \log \sigma'_{vo}$  = ผลต่างของ Log Effective Overburden Pressure ระหว่างจุดสองจุด  
 ใน Scale log



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio กับ Effective Overburden Pressure สำหรับ Over Consolidated Clay

ที่มา : Das (1998)

โดยทั่วไปแล้ว Recompression Index,  $C_r$  จะมีค่าประมาณ 1/4 ถึง 1/10 ของค่า Compression Index ซึ่งค่า  $C_r/C_c$  สำหรับดินชนิดต่างๆ แสดงได้ตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.3 ค่า  $C_r/C_c$  จำแนกตามชนิดของดิน

| ชนิดของดิน        | $C_r / C_c$ |
|-------------------|-------------|
| Boston Blue Clay  | 0.24 – 0.33 |
| Chicago Clay      | 0.15 – 0.30 |
| New Orleans Clay  | 0.15 – 0.38 |
| St. Lawrence Clay | 0.05 – 0.10 |

ที่มา: รสสุคนธ์ (2548)

Compression ratio คืออัตราส่วนระหว่าง Compression Index กับค่าอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial Void ratio) สำหรับดิน Normally Consolidated Clay โดยที่ค่า Compression ratio สามารถหาได้จากสมการที่ 2.20

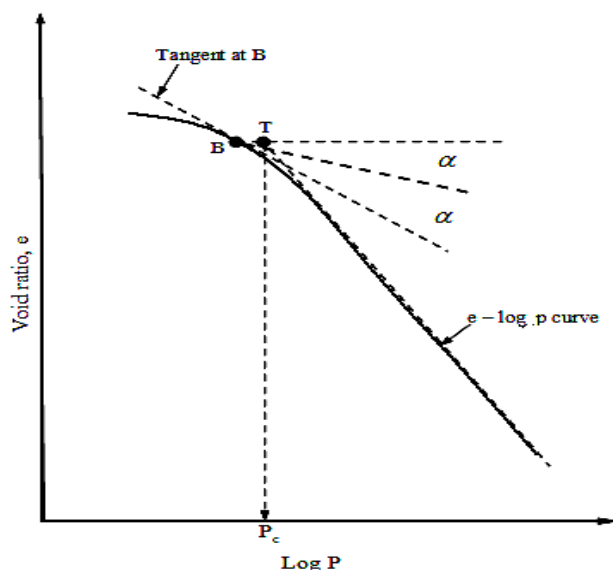
$$CR = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (2.20)$$

โดยที่

- CR = Compression ratio
- $C_c$  = Compression Index
- $e_0$  = Initial Void ratio

หน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยโดนกดทับในอดีต (Preconsolidation Pressure or Maximum Part Pressure)  $\sigma'_{v \max}$  หรือ  $\sigma'_c$  คือหน่วยแรงที่มากที่สุดที่ดินนั้นถูกกดทับมาในอดีต สำหรับดินที่มีการทับถมกันตามปกติ Normally Consolidated deposit หน่วยแรงสูงสุดจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ ( $\sigma'_{vo}$ ) เมื่อหน่วยแรงสูงสุดในอดีตมีค่ามากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ ดินนั้นเรียกว่า Over Consolidated Soil

วิธีการหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยโดนกดทับในอดีต (Maximum Part Pressure) โดยวิธีของ Casagrande (1936) แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การหาค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยถูกกดทับในอดีต (Maximum past pressure)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Casagrande (1963)

ผลจากค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยโดนกดทับในอดีตสามารถบอกถึงประวัติการรับแรงของดินซึ่งจะแสดงโดยค่าของ Over Consolidated ratio, OCR (หน่วยแรงสูงสุดที่ดินเคยโดนกดทับในอดีตต่อหน่วยแรงประสิทธิผลตามธรรมชาติ) ถ้าค่า Over Consolidated ratio มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าดินอยู่ในสภาพอัดแน่นเกินปกติ (Over Consolidated) ซึ่งค่า OCR ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1 และดินอยู่ในสภาวะอัดแน่นปกติ (Normally Consolidated)

## 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของดินเหนียว

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่างๆ ของดินได้มีผู้วิจัยไว้หลายท่าน โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และสมบัติทางกำลัง (Strength properties) และสมบัติการยุบตัว (Compressibility Characteristic) ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่างๆ ได้ดังนี้

### 2.4.1 Plasticity Index กับ Liquid Limit

ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ Plasticity Index กับ Liquid Limit ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ไว้หลายท่านดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index กับ Liquid Limit ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

| สมการถดถอย         | R <sup>2</sup> | ชนิดของดิน                      | ผู้ศึกษาวิจัย           |
|--------------------|----------------|---------------------------------|-------------------------|
| PI = 0.74LL-9.21   | -              | กรุงเทพฯ (Soft-Medium Clay)     | Muktabhant et al (1966) |
| PI = 0.805LL-11.48 | -              | รังสิต (Soft-Medium Stiff Clay) | Dumn Mus (1977)         |
| PI = 0.745LL-9.89  | 0.968          | เขตปทุมวัน (All Clay)           | Tongyagate (1978)       |
| PI = 0.74LL-11.47  | 0.934          | กรุงเทพฯ (Soft Clay)            | Kerdsuwan (1984)        |
| PI = 0.753LL-12.26 | 0.934          | กรุงเทพฯ (Soft Clay)            | กวีวงศ์ (2530)          |

#### 2.4.2 Compression Index และ Recompression Index กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression index และ Recompression index กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ Natural water content ( $W_n$ ), Liquid limit (LL), Plastic limit (PL), Plastic Index (PI), Specific gravity (Gs) และ Initial void ratio ( $e_0$ ) มีผู้วิจัยไว้หลายท่านแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index และ Recompression Index กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

| สมการถดถอย               | R <sup>2</sup> | ชนิดของดิน | ผู้ศึกษาวิจัย   |
|--------------------------|----------------|------------|-----------------|
| $C_c = -0.09+0.009LL$    | -              | All Clay   | Skempton (1944) |
| $C_c = 0.20+0.008W_n$    | 0.770          | Soft Clay  | Adikari (1977)  |
| $C_c = 0.21+0.008LL$     | 0.700          |            |                 |
| $C_c = 0.22+ 0.29e_0$    | 0.770          |            |                 |
| $C_c = -0.014+0.010 W_n$ | 0.870          | All Clay   | Adikari (1977)  |
| $C_c = -0.015+0.38 e_0$  | 0.870          |            |                 |
| $C_c = -0.28+0.012LL$    | 0.760          |            |                 |
| $C_c = -0.59+0.04PL$     | -              |            |                 |

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index และ Recompression Index กับ  
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

| สมการถดถอย                               | R <sup>2</sup> | ชนิดของดิน         | ผู้ศึกษาวิจัย             |
|--|----------------|--------------------|---------------------------|
| $C_c = 0.20 + 0.008W_n$                  | -              | Chicago Clay       | Azzouz and All (1976)     |
| $C_c = 0.0083 + 0.208 e_o$               |                |                    |                           |
| $C_c = -0.0414 + 0.04PL$                 | -              | Brazilian Clay     |                           |
| $C_c = 0.0020 W_n^2 + 0.0067W_n - 0.014$ | -              | All Clay           | Muktabhant et al (1977)   |
| $C_c = -0.091 + 0.013W_n$                | 0.768          | All Clay           | ศรัณยูฤทธิ์ (2520)        |
| $C_c = -0.1590 + 0.514e_o$               | 0.810          |                    |                           |
| $C_c = -0.005 + 0.01LL$                  | -              |                    |                           |
| $C_c = -0.965 + 0.029W_n$                | 0.890          | All Clay           | Tonyagate (1978)          |
| $C_c = -0.941 + 1.057e_o$                | 0.880          |                    |                           |
| $C_c = -0.847 + 0.024LL$                 | 0.680          |                    |                           |
| $C_c = 0.5 (PI/100) G_s$                 | -              | All Clay           | Wroth and Wood (1978)     |
| $C_c = 0.1882 + 0.3097 e_o$              | -              | Soft Clay          | Sivandran (1979)          |
| $C_c = -0.5876 + 0.0217 W_n$             | 0.802          | Soft Clay          | Kerdsuwan (1984)          |
| $C_c = -0.5960 + 0.8019e_o$              | 0.811          |                    |                           |
| $C_c = 0.1029 + 0.0087LL$                | 0.516          |                    |                           |
| $C_c = 0.2343 (LL/100) G_s$              | -              | All Clay           | Nagaraj and Murthy (1985) |
| $C_c = 0.007 + 0.011 W_n$                | 0.702          | Soft - Medium Clay | กวีวงษ์ (2530)            |
| $C_c = -0.100 + 0.464 e_o$               | 0.735          |                    |                           |
| $C_c = 0.6402 + 0.0202 W_n$              | 0.702          | ม.เกษตรศาสตร์      | สุพัฒน์ (2530)            |
| $C_c = 0.6554 + 0.7549 e_o$              | 0.735          | บางเขน กรุงเทพฯ    |                           |
| $C_c = 0.1486 + 0.0090LL$                | -              | Soft Clay          |                           |
| $C_c = -1.4148 + 0.0326LL$               | -              | Verginia Clay      | Martin et al. (1995)      |
| $C_r = 0.00045 + 0.00535LL$              | -              |                    |                           |
| $C_r = 0.0463 (LL/100) G_s$              | -              | All Clay           | Nagaraj and Murthy (1958) |

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2520) เสนอการอัดตัวได้ (Compressibility) ของดินที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนมาริน (Marine Clay) มีคุณสมบัติการอัดตัวปกติ (Normally Consolidated, NCC) ถึงสมบัติการอัดตัวเกินเล็กน้อย (Slightly Over Consolidated, OCC) ค่าอัตราส่วนอัดตัว (Compression Ratio) ซึ่งมีนิยาม  $\frac{C_c}{1+e_o}$  มีค่าระหว่าง 0.5-1.5 และเมื่อเปรียบกับค่าคงตัวอื่น ๆ มีความสัมพันธ์ดังนี้

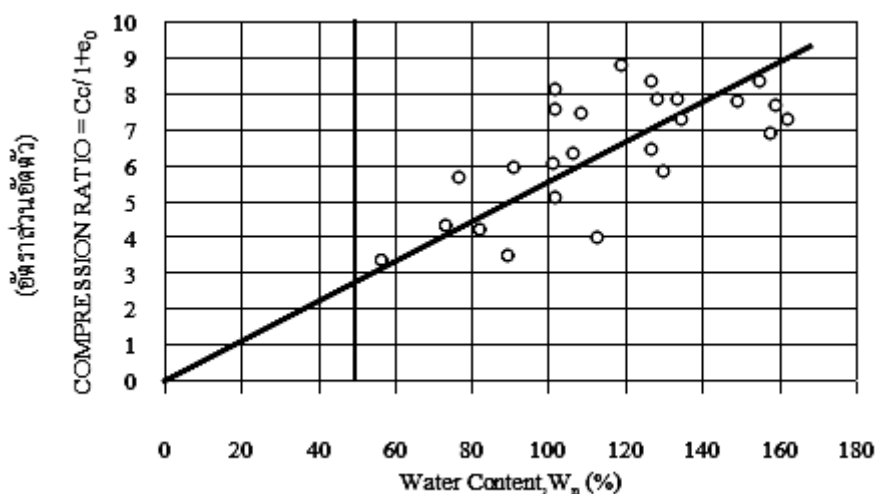
$$\frac{C_c}{1+e_o} = 0.0055W_L \quad (2.21)$$

$$\text{และ } \frac{C_c}{1+e_o} = 0.0056W_N \quad (2.22)$$

โดยที่

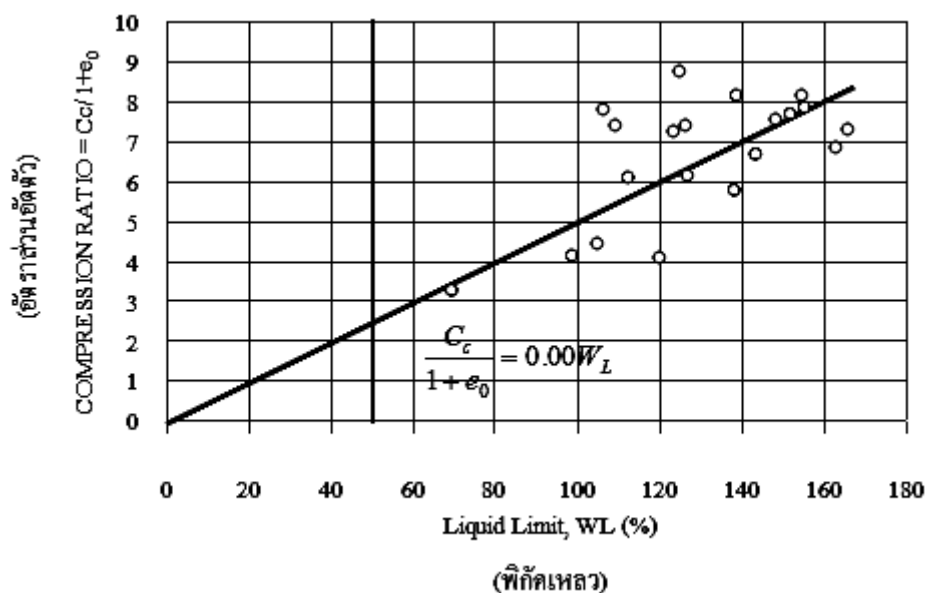
$W_L$  = ค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)

$W_N$  = ค่าความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content)



**รูปที่ 2.16** ความสัมพันธ์อัตราการอัดตัว (Compression Ratio) กับค่าความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content) ของดินลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา

ที่มา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2520)



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์อัตราการอัดตัว (Compression Ratio) กับค่าพิคัลเหลว (Liquid Limit) ของดินลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา

ที่มา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2520)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิชัย (2546) ได้เสนอข้อมูลทางธรณี และลักษณะของชั้นดินบริเวณภาคใต้ไว้ ดังนี้ ภาคใต้มีลักษณะเป็นแหลมยื่นลงไปในทะเล ด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทย ด้านตะวันตกติดทะเลอันดามัน ทางทิศเหนือเริ่มจากบริเวณอำเภอท่าชะงัดจังหวัดชุมพร ลงไปทางใต้สุดจรดประเทศมาเลเซีย ความยาวจากเหนือมาใต้ประมาณ 610 กิโลเมตร มีความกว้างระหว่าง 220 กิโลเมตรจากฝั่งตะวันออกของอำเภอปากพนังไปจนถึงฝั่งตะวันตกของอำเภอท้ายเหมืองจังหวัดพังงา ส่วนแคบสุดของคาบสมุทรอยู่ที่บริเวณคอคอดกระ มีความกว้างประมาณ 64 กิโลเมตร ภาคใต้ประกอบด้วยจังหวัดต่างๆ 14 จังหวัด ทางริมฝั่งตะวันออกได้แก่ จังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และนราธิวาส ริมฝั่งตะวันตกได้แก่จังหวัดระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง และสตูล ส่วนจังหวัดที่ไม่ได้ตั้งอยู่ติดกับทะเลได้แก่ จังหวัดพัทลุง และจังหวัดยะลา

การเปลี่ยนแปลงทางธรณีของชายฝั่งทางภาคใต้เริ่มในช่วงประมาณ 10,000 ปีที่แล้ว โดยคาบสมุทรทางใต้ได้มีการยกตัวเอียงไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้ชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกยกตัวขึ้นและชายฝั่งตะวันตกจมลง ประกอบกับการลดลงของระดับน้ำทะเล ฝั่งตะวันออกที่เคยจมอยู่ใต้น้ำถูกยกขึ้นสูงกว่าระดับน้ำทะเล เกิดเป็นที่ราบกว้างชายฝั่งที่มีระดับต่ำกว่า

ที่ราบเดิมเกิดเป็นตะพักน้ำทะเลขึ้นมาใหม่ แนวชายฝั่งทะเลบริเวณนี้จะมีลักษณะค่อนข้างราบเรียบ นอกจากนี้การยกตัวขึ้นของแผ่นดินทำให้แม่น้ำปรับการไหลและการกัดเซาะ โดยลำน้ำจะกัดเซาะบริเวณกลางและปลายน้ำให้ลึกลงไปทำให้มีตะพักแม่น้ำเกิดขึ้นใหม่ สภาพภูมิประเทศลำน้ำบริเวณนี้จึงมีการกัดเซาะในลักษณะรูปตัวยู

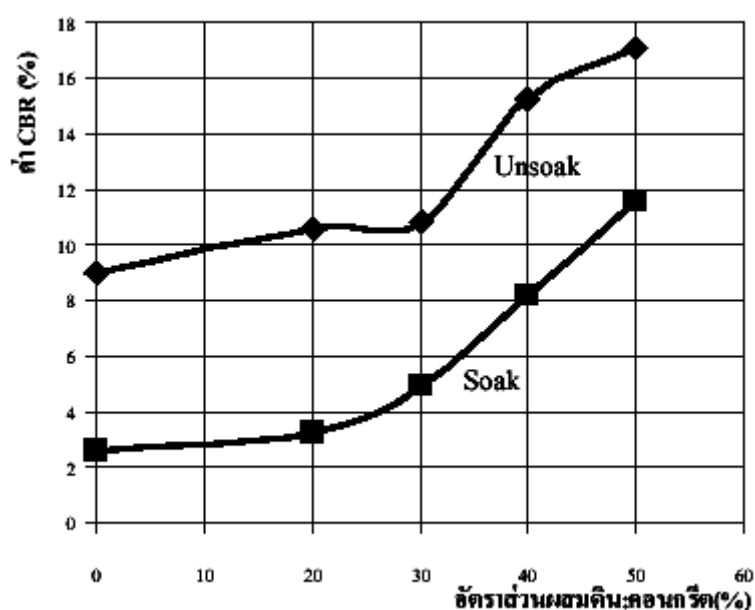
บริเวณที่ราบลุ่มชายทะเลจะมีขนาดแคบทางตอนเหนือของอ่าวบ้านดอนและขยายกว้างขึ้นระหว่างจังหวัดนครศรีธรรมราชจนถึงจังหวัดนราธิวาส ที่ราบในบริเวณนี้เกิดจากกระแสน้ำทะเลและคลื่นพัดพาทรายมากองก่อดัวเป็นสันทรายริมฝั่ง สันทรายนี้จะงอกเป็นแหลมออกไปในทะเล และก่อดัวเป็นสันทรายริมทะเลเป็นแหลมยื่นออกไปที่มีขนาดใหญ่และเห็นได้ชัดเจน คือ แหลมตะลุมพุกจังหวัดนครศรีธรรมราช แหลมสนอ่อนจังหวัดสงขลา และแหลมตาชีจังหวัดปัตตานี เมื่อถึงเวลาหนึ่งแหลมที่ยื่นไปก็จะปิดบริเวณที่เป็นอ่าว ทำให้เกิดแหล่งน้ำหลังสันทรายขึ้นเรียกว่าลากูน ทะเลสาบสงขลาที่เกิดจากกระบวนการนี้เช่นกัน ซึ่งลากูนเหล่านี้ต่อมาจะตื้นเขินและมีต้นโกงกางหรือไม้เนื้ออ่อนขึ้น กลายเป็นป่าพรุหลังแนวชายหาดในปัจจุบันและดินในบริเวณนี้จะเกิดจากการทับถมของต้นไม้อายุกลายเป็นป่าพรุ ซึ่งพบได้ทั่วไป หลังสันทรายในบริเวณจังหวัดปัตตานี และจังหวัดนราธิวาส ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปจะมีระดับความสูงน้อยกว่า 10 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล

การยกตัวของชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกทำให้ชายฝั่งด้านทิศตะวันตกจมลง บริเวณที่เป็นชายหาดเดิมจะจมลงได้ทะเลทำให้ที่ราบชายทะเลมีน้อยลงและผลอันนี้ยังทำให้ชายฝั่งมีรูปร่างเว้าแหว่งมาก มีลักษณะเป็นอ่าวสลับกับแหลมและมีเกาะต่างๆ อยู่นอกชายฝั่งเป็นจำนวนมากในบางบริเวณที่ภูเขาปิดล้อมชายหาด จากการที่ทิวเขาขนาดใหญ่อยู่ชิดชายฝั่ง เมื่อชายฝั่งจมลงลำน้ำบริเวณนี้ก็จะปรับตัวกัดเซาะบริเวณต้นน้ำลงเป็นร่องลึกลงไปอีก ทำให้บริเวณนี้นอกจากจะมีที่ราบชายฝั่งน้อยแล้ว สภาพร่องน้ำจะเป็นร่องลึกรูปตัววี ต่างจากร่องน้ำฝั่งตะวันออกซึ่งจะเป็นร่องกว้างตื้นและมีตะพักน้ำหลายระดับแทบจะไม่พบในชายฝั่งด้านนี้

ธนกร (2541) ได้ศึกษาพฤติกรรมของแรงดันน้ำในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างที่ทำการบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Max Dry Density) และที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) โดยที่ดินเหนียวผสมจะมีทรายที่ 0, 20, 40, 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดสอบพบว่าการใช้ทรายเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีผลทำให้แรงดันน้ำในดินผสมลดลง และทำให้กำลังรับแรงเฉือน ( $C', \phi'$ ) เพิ่มขึ้นโดยที่ปริมาณทรายน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดันน้ำมีผลน้อยมากทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยและที่ปริมาณทราย

ตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ค่ากำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงเห็นได้อย่างชัดเจน ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดพิบัติเพิ่มขึ้น 1.8 ถึง 3.7 เท่าของดินเหนียวบดอัด

นรินทร์และสยาม (2550) ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยคอนกรีตที่ใช้แล้ว นำมาย่อยให้มีขนาดละเอียดเท่ากับหินคลุก จากนั้นนำไปทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ จากการศึกษาพบว่าค่า CBR ของดินเหนียวผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคอนกรีตที่ผสมดังรายละเอียดรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ค่า CBR. ของดินผสมกับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ที่มา : นรินทร์และสยาม (2550)

ชัยรัตน์และคณะ (2550) ศึกษาอิทธิพลของทรายแป้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดของดินเหนียวอ่อน โดยใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างที่ค่าปริมาณความชื้นเท่ากับขีดพิคตเหลวก่อนผสมซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังอัดแบบไม่จำกัดของดินเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของทรายแป้งที่เพิ่มมากขึ้น แต่จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อปริมาณของทรายแป้งมีค่ามากกว่าร้อยละ 30

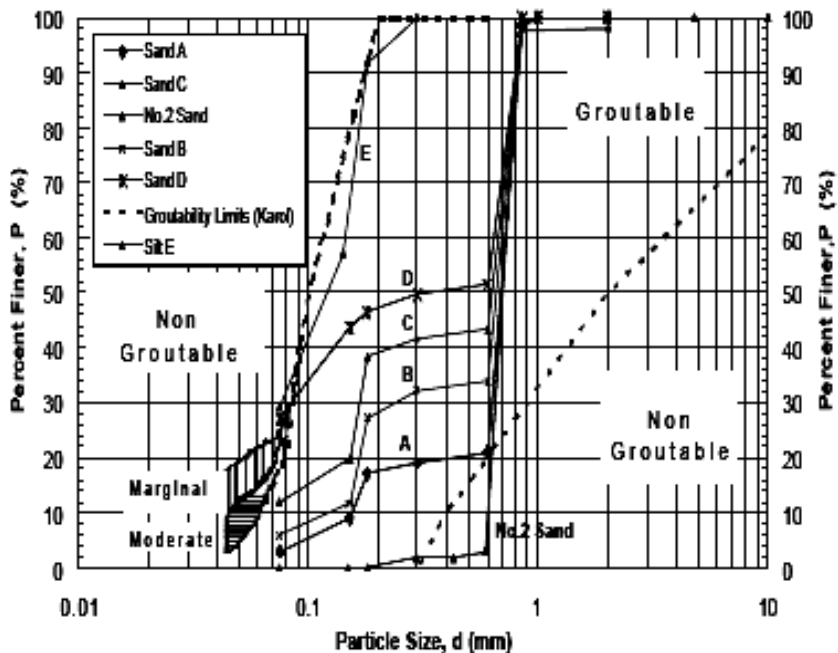
ธนิตและสุรพล (2548) ได้ศึกษาพฤติกรรมของทรายผสมเบนโทไนท์บดอัดสำหรับชั้นกันซึมในสถานที่เก็บน้ำ พบว่าการผสมทรายกับเบนโทไนท์ ในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วนำไปบดอัดทำให้ได้วัสดุผสมมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ และสามารถนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่กักเก็บน้ำและสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยได้ ซึ่งในการศึกษาได้ทำการทดสอบการบดอัดเพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของทรายผสมเบนโท



ไนท์ รวมทั้งการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงเพื่อหาค่ากำลังของดิน และทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านลดลงถึง 10,000 เท่าเมื่อผสมทรายกับเบนโทไนท์ปริมาณตั้งแต่ 5% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามการผสมทรายกับเบนโทไนท์จะทำให้กำลังของวัสดุผสมลดลง เนื่องจากการบวมตัวของวัสดุผสมจากการขยายตัวของเบนโทไนท์เมื่อผสมกับน้ำ การใช้ทรายผสมเบนโทไนท์เพียง 3% ก็เพียงพอที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยกว่า  $1 \times 10^{-7}$  ซม./วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการในการสร้างชั้นกันซึมและมีค่ากำลังเฉือนที่สูง

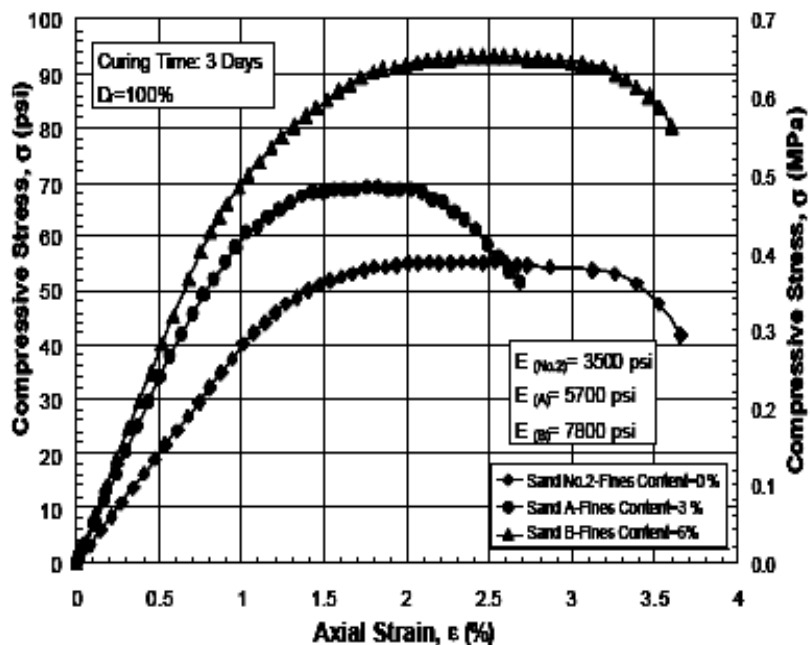
Cunningham, et al (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวผสมที่สร้างตัวอย่างขึ้นใหม่โดยวิธีการผสมเหลว (Slurry) โดยใช้การ Consolidation Pressure เท่ากับ 200 kpa ตัวอย่างดินผสมประกอบด้วยดินขาว (Pure Speswhite kaolin) 20% ดินเหนียว (London Clay) 10% และ Silica Silt 70% ในการศึกษานี้ได้มีการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบสามแกน (Triaxial Test) ของดินผสมที่อิ่มตัว 100 % และทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินผสมที่ไม่อิ่มตัว จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินผสมที่ไม่อิ่มตัวจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่าดินอิ่มตัว

Ozgurel and Vipulanandan (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของดินเม็ดละเอียดต่อพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรม เช่น การรับน้ำหนัก และค่าการซึมผ่าน (Permeability) ของทรายผสมดินเม็ดละเอียดโดยการนำดินเม็ดละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ผสมกับทราย ที่อัตราส่วนผสมของดินเม็ดละเอียดเท่ากับ 3, 6, 12 และ 27 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากทรายที่ไม่ผสมดินเม็ดละเอียด จากผลการศึกษาดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของดินเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่าน (Permeability) ลดลงประมาณ 100 เท่า เมื่อปริมาณดินเม็ดละเอียดตั้งแต่ 12 % ขึ้นไป



รูปที่ 2.19 Particle Size Distribution of Experimental Sands

ที่มา : Ozgurel and Vipulanandan (2003)

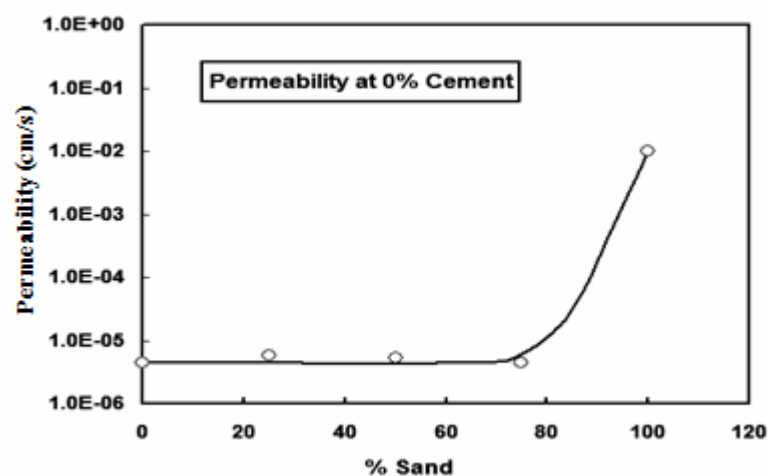


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress - Strain ของตะกอนทรายผสมดินเม็ดละเอียด

ที่มา : Ozgurel and Vipulanandan (2003)

Anagnostopoulos (2005) ได้ศึกษาผลกระทบของดินเหนียวผสมกับตะกอนทราย โดยการแช่แข็ง (Silty - Clay) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของตัวอย่างดินแช่แข็งที่ ปริมาณอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันภายใต้การ Consolidation Pressure ที่เท่ากัน และได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้นในดิน (Water Content) ที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของดินผสมที่แช่แข็ง ซึ่งในการศึกษาได้ใช้ตัวอย่าง Silty Clay ที่มีค่า  $LL = 43.54\%$  ,  $PI = 25.32\%$  ผสมกับตัวอย่างตะกอนทรายที่มีขนาด  $0.074 - 0.42\text{ mm}$  และมีค่า  $C_u = 2.2$  โดยใช้อัตราส่วนของตะกอนทรายที่ผสมเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วทำการสร้างตัวอย่างขึ้นใหม่โดยการ Consolidated Pressure ที่ 25 kpa, 50 kpa, 200 kpa, และ 400 kpa จากนั้นนำตัวอย่างดินไปแช่ที่อุณหภูมิ  $-14\text{ C}^\circ$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่าที่ค่าการ Consolidated Pressure ที่ 25 kpa Silty Clay 100% มีค่า Water Content เท่ากับ 36.66% และที่ปริมาณ Silty Clay ผสมกับ ตะกอนทราย 50% มีค่า Water Content เท่ากับ 27% ซึ่งจากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณ Silty Clay 100% จะมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดและค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อปริมาณตะกอนทรายที่ผสมมีปริมาณเพิ่มขึ้น

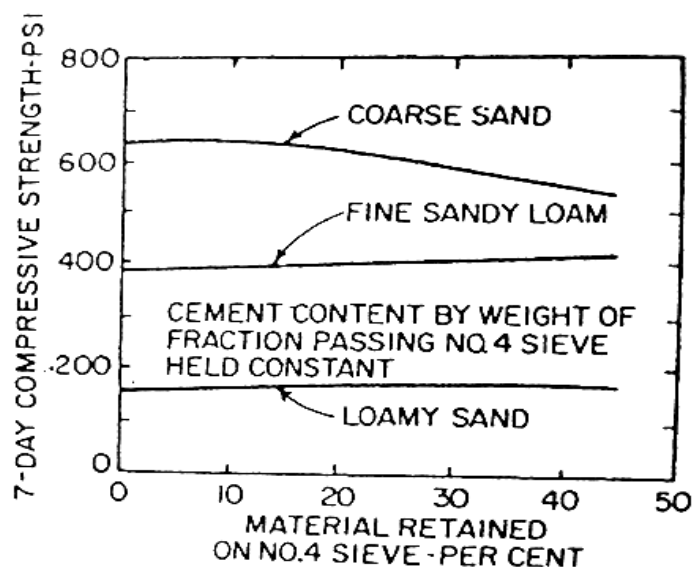
Mahasnes and Shawabkes (2005) ได้ศึกษาค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมซีเมนต์และดินเหนียว จากการศึกษพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินผสมที่ดินเหนียวผสมกับทรายโดยไม่มีซีเมนต์ผสม พบว่าที่ปริมาณทรายผสมจาก 0 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเปลี่ยนแปลงน้อยมากและที่ปริมาณทรายผสมตั้งแต่ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและอัตราส่วนผสมของทรายในดินเหนียว (Mahasnes and Ryyad A. Shawabkes,2005)

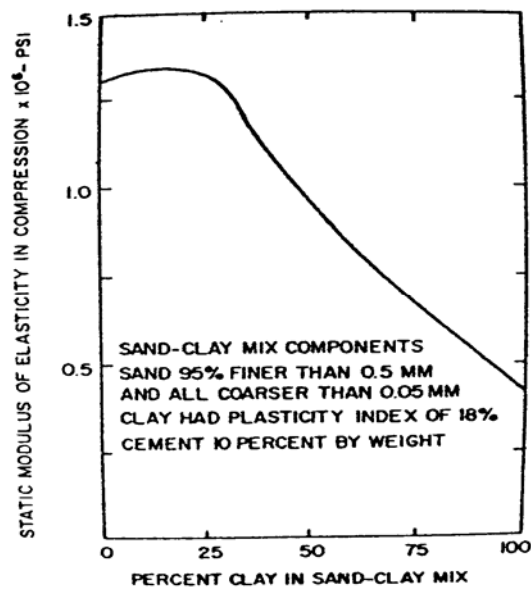
Norling and Packard (1958) กล่าวว่า การเพิ่มของปริมาณมวลรวมหยาบที่มีขนาด ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 จะทำให้ความสามารถรับแรงแบกทานของดินซีเมนต์สูงขึ้น โดยได้ทำการ ทดลองดินสามชนิด คือ Coarse Sand, Fine Sandy Loam และ Loam Sand ด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ที่ เท่ากัน และเมื่อเพิ่มมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ในปริมาณที่ต่างกันแล้วนำไปทดลองหาค่า กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วัน ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 2.19 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Fine Sandy Loam และ Loam Sand จะมีกำลังอัดที่สูงขึ้นเมื่อมีปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น ส่วนกรณีของ Coarse Sand จะมีกำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 เพิ่มขึ้น มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด

Reinhold (1955) ได้ทดลองนำเอาทรายมาผสมกับดินเหนียวโดยเปลี่ยนปริมาณ ของดินเหนียวตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ นำมาผสมกับปูนซีเมนต์ที่ปริมาณคงที่ จากนั้นนำไป ทดลองหาค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่าเมื่อปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัส ยืดหยุ่น ลดลง แสดงว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามไปด้วย เช่นเดียวกับการทดลองของ Road Research Laboratory (1952) ซึ่งได้ใช้ดินหลายชนิดผสมกับปูนซีเมนต์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ กำลังปูนซีเมนต์จะลดลงเมื่อปริมาณดินเหนียวมีมากขึ้น



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลรวมที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 กับค่ากำลังอัดของดินซีเมนต์

ที่มา : Norling and Packard (1958)



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเหนียวกับค่า Modulus of Elasticity

ที่มา : Reinhold (1955)

Felt (1955) ได้ทดลองนำดิน Sandy Clay , Silty Loam และ Silty Clay มาทดลองผสมกับปูนซีเมนต์ โดยเปลี่ยนปริมาณปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 6-30 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร แล้วนำมาทดสอบหาค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 5 แบบ ตั้งแต่ 2 วัน ถึง 1 ปี และทดสอบหาค่าความคงทนด้วยวิธี Wet - Dry และ Freeze - Thaw ตั้งแต่ 2 รอบ ถึง 96 รอบ ผลการทดลองพบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสม ดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่จะมีกำลังอัดสูงกว่าดินเม็ดเล็ก และดินที่มีปริมาณของดินเหนียวผสมอยู่สูงจะรับกำลังได้น้อยกว่าดินที่มีปริมาณดินเหนียวต่ำกว่า

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างดินที่ใช้ศึกษาวิจัยเป็นดินเหนียวอ่อน บริเวณปากแม่น้ำท่าบลสะกอม อำเภोजะนะ จังหวัดสงขลา แสดงรายละเอียดตำแหน่งในรูปที่ 3.4 ดินตัวอย่างมีลักษณะสีเทาเนื้อละเอียด และปริมาณความชื้นในมวลดินค่อนข้างสูง เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed Sample) ที่ระดับความลึก 1-3 เมตร ใช้วิธีการเปิดหน้าดินกว้างแล้วเก็บตัวอย่างดิน จากนั้นนำดินไปอบแห้ง บดละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อที่จะนำดินที่ได้ไปใช้ในการสร้างตัวอย่างทดสอบต่อไป ลักษณะดินตัวอย่างและขั้นตอนการบดแสดงรูปที่ 3.1, 3.2



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างดินเหนียวแบบเสียสภาพ



(ก)



(ข)

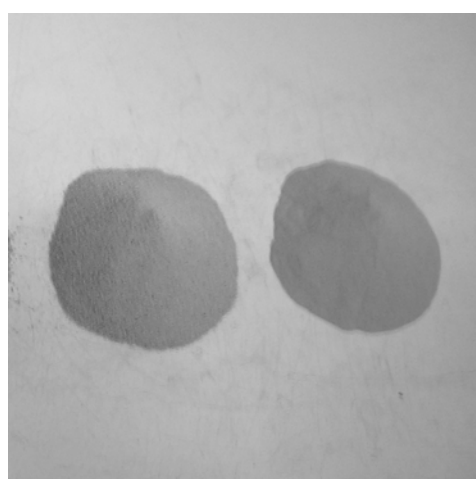
**รูปที่ 3.2** ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย (ก) ดินเหนียวอ่อนสะกอมอบแห้งก่อนบด, (ข) ดินเหนียวอ่อนสะกอมที่บดละเอียดโดยเครื่องบด

ตัวอย่างทรายที่ใช้ศึกษาวิจัยเป็นทรายแม่น้ำ จากท่าทรายอำเภอรัษฎา จังหวัดสงขลา นำมาร่อนแยกโดยตะแกรงมาตรฐานเพื่อแบ่งทรายออกเป็น 2 ขนาดคือ ทรายขนาดกลาง และทรายเม็ดละเอียดดังรูปที่ 3.3

- 1) ทรายขนาดกลาง (Medium Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค้างตะแกรงเบอร์ 40
- 2) ทรายเม็ดละเอียด (Fine Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างตะแกรงเบอร์ 200

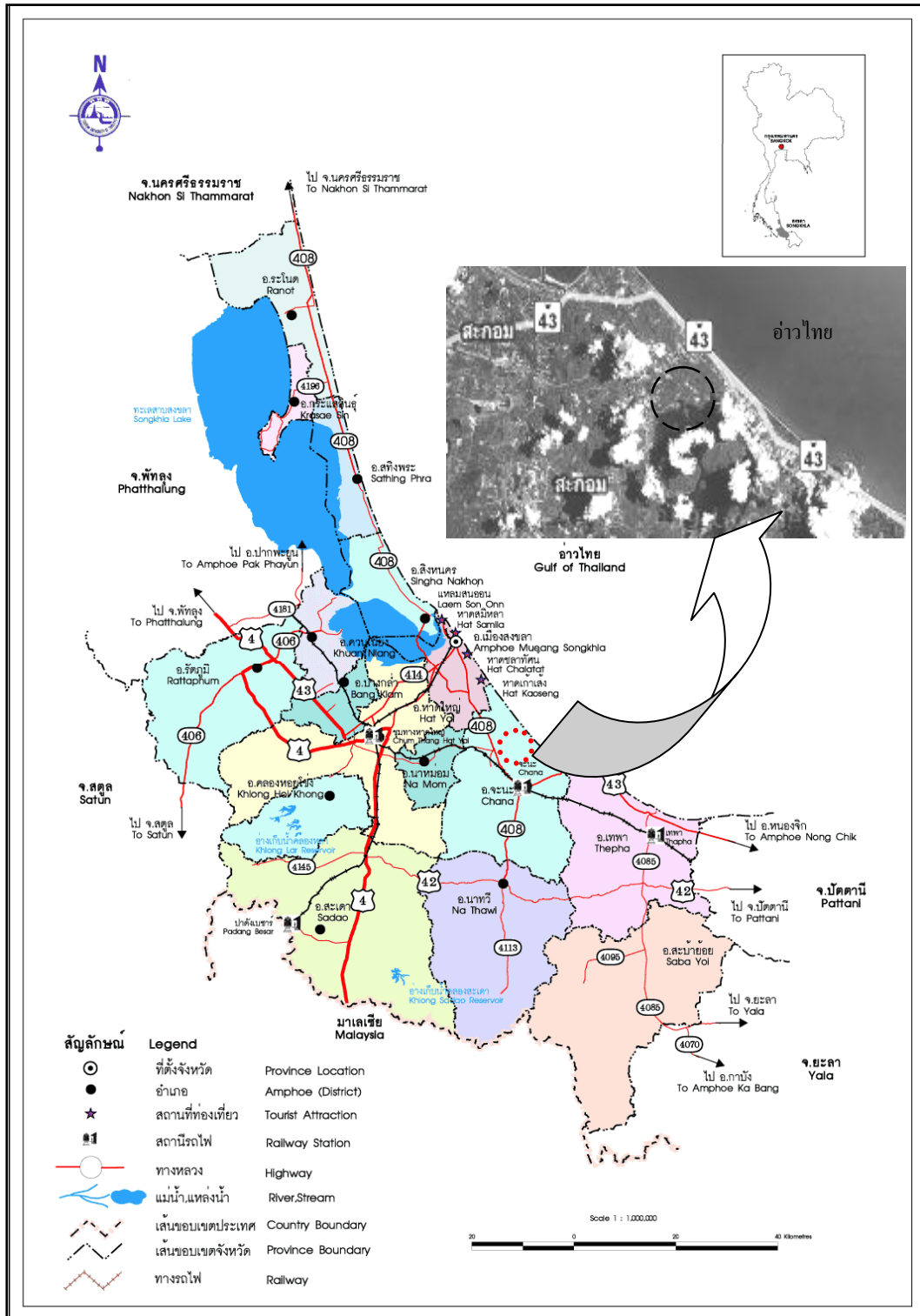


(ก)



(ข)

**รูปที่ 3.3** ตัวอย่างทรายที่ใช้ศึกษาวิจัย (ก) ทรายขนาดกลาง, (ข) ทรายละเอียด



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างดินที่นำมาศึกษาวิจัย  
ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี



### 3.2 เครื่องมือที่ใช้เตรียมตัวอย่าง

เครื่องมือที่ใช้เตรียมตัวอย่างเป็นเครื่องมือที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น ประกอบด้วย โครงเฟรม ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.5 เป็นแบบจำลองของเครื่องมือที่ใช้เตรียมตัวอย่าง เพื่อเตรียมตัวอย่างดินแบบผสมเหลว (Slurry) ในการเตรียมตัวอย่างต้องใช้แรงกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นค่าน้ำหนัก 143.37 กิโลกรัม และตลอดเวลาการ Consolidate ตัวอย่าง 4 วัน ตัวอย่างดินต้องอิมตัวตลอดเวลา โครงสร้างที่รับน้ำหนักต้องมั่นคงแข็งแรง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โครงเฟรมทดสอบ CBR มาประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างรับน้ำหนักขณะ Consolidate ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.6 สำหรับรายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างมีรายละเอียดดังนี้

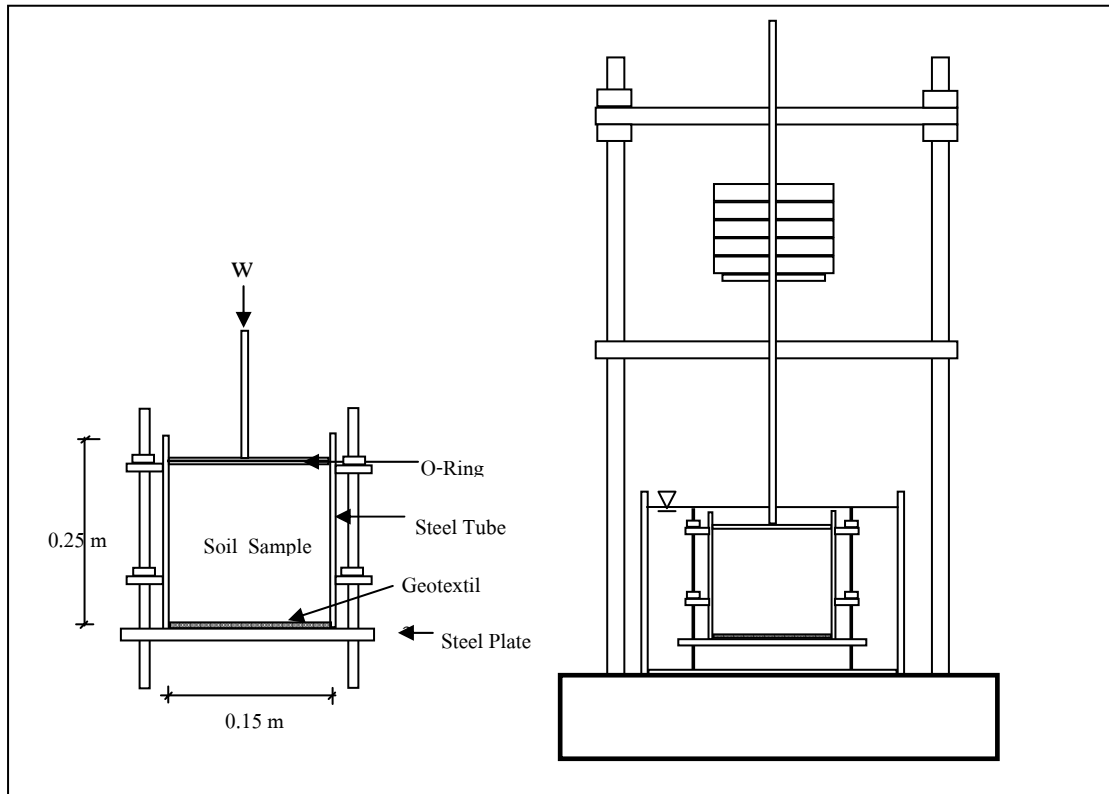
1) ครอบเตรียมตัวอย่างเป็นครอบเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร มีแผ่นเหล็กขนาด  $22 \times 22 \times 1$  เซนติเมตร ปิดด้านล่างโดยแผ่นเหล็กเจาะรูเล็กๆ เพื่อระบายน้ำออกเมื่อตัวอย่างเกิดการอัดตัวคายน้ำดังรูปที่ 3.7 ก

2) แผ่นสำหรับกดน้ำหนัก เป็นแผ่นโลหะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.9 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ที่แผ่นกดน้ำหนักเจาะรูเล็กๆ เพื่อให้ระบายน้ำเมื่อตัวอย่างอัดตัวคายน้ำ ตรงกลางตามแนวแผ่นเซาะร่องเพื่อสวมเส้นยางกันรั่ว ตรงกลางแผ่นเชื่อมติดกับแกนโลหะกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นแกนถ่าน้ำหนักลงสู่แผ่นกดเพื่อถ่าน้ำหนักลงสู่ดินตัวอย่างดังรูปที่ 3.7 ข

3) ชุดวางน้ำหนักกดทับเป็นโครงเฟรมเก่าที่นำมาประยุกต์ใช้ โดยนำเหล็กแกนกดน้ำหนักมาประกอบกับโครงเฟรม แกนกดน้ำหนักสามารถเคลื่อนตัวได้อิสระในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.6

4) รูปที่ 3.7 (ค) แผ่นจีโอเทคไทล์ ปิดหัวท้ายเพื่อช่วยในการระบายน้ำของตัวอย่างเมื่อเกิดการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่าง

5) รูปที่ 3.7 (ง) ยางกันซึม (O-Ring) เพื่อป้องกันการปลิ้นขึ้นของตัวอย่างดินเหนียวเมื่อมีน้ำหนักมากกดทับ



รูปที่ 3.5 แบบจำลองเครื่องมือเตรียมตัวอย่าง



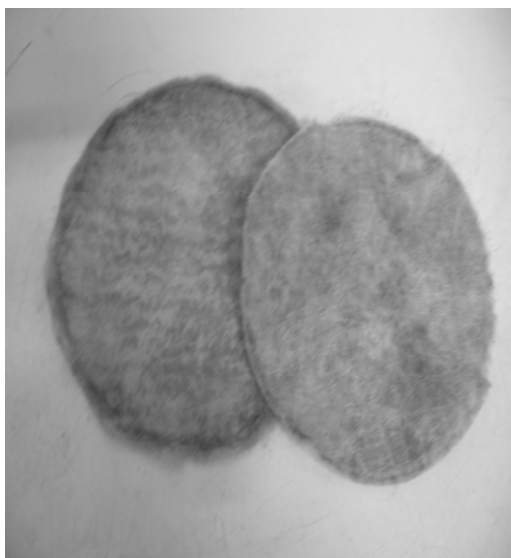
รูปที่ 3.6 การ Consolidate ตัวอย่าง โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อให้ดินตัวอย่างสามารถขึ้นรูปได้



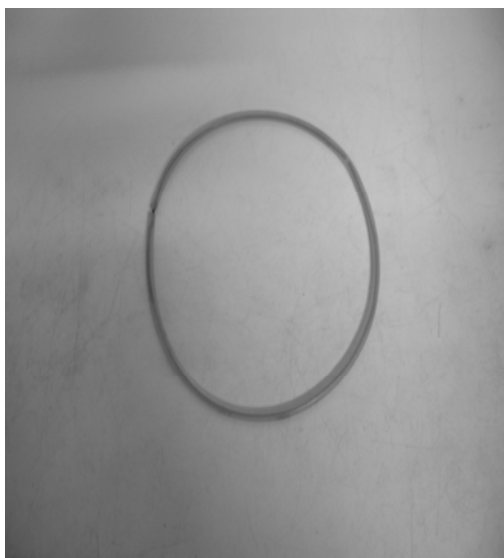
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

**รูปที่ 3.7** อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างสำหรับการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว (ก) ครอบอกเตรียมตัวอย่าง, (ข) แกนถ่าน้ำหนัก, (ค) แผ่นจีโอเทคไทล์, (ง) ยางกันซึม

### 3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาทดสอบใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลวจากการเก็บตัวอย่างดินแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) นำมาผสมกับทรายที่ปริมาณความชื้นในดินมากกว่าปริมาณความชื้นที่พิกัดเหลว ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร คงน้ำหนักไว้เป็นเวลา 4 วัน เป็นตัวควบคุมการเตรียมตัวอย่างแล้วทำการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมต่อไป ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังแสดงรายละเอียดข้างล่าง

1) นำตัวอย่างดินเหนียวที่เก็บตัวอย่างแบบรบกวนที่ระดับความลึก 1-3 เมตร มาอบแห้งบดให้ละเอียดจากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

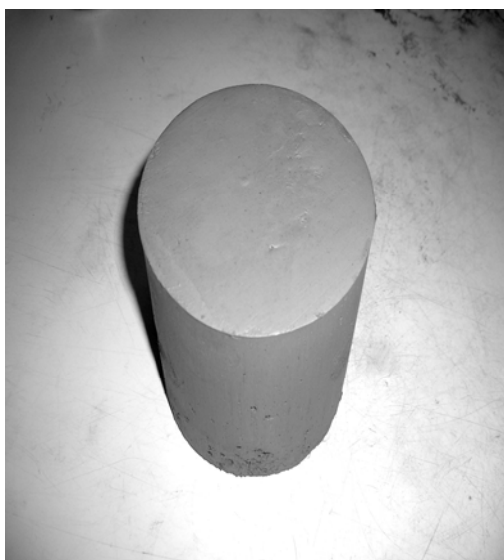
2) ผสมดินเหนียวกับทรายและน้ำที่ปริมาณความชื้นในดิน (Water Content) ที่มากกว่าปริมาณน้ำที่พิกัดเหลว (Liquid Limit) หรือ ที่ปริมาณน้ำที่ทำให้ทรายกับดินเหนียวผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็กกวนผสมให้เข้ากัน ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณทรายที่ผสมสองขนาดและหลายอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักดินแห้ง ดังนั้นจึงกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้เพื่อความชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 3.1

3) นำตัวอย่างดินผสมเหลว (Slurry) ที่ผสมกันดีแล้วใส่ในกระบอกเตรียมตัวอย่างเพื่อสร้างตัวอย่างขึ้นใหม่ (Reconstitute) ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลโดยประมาณของดินเหนียวที่ระดับความลึกเท่ากับ 8 เมตร ติดตั้ง Dial Gauge เพื่อวัดค่าการทรุดตัว จากการสร้างตัวอย่างพบว่าที่ระยะเวลา 3 วันทำให้ดินตัวอย่างเกิดการอัดตัวคายน้ำจนถึงจุด Primary Consolidation ดังรูปที่ 3.10 และสามารถสร้างเป็นตัวอย่างทดสอบได้ จึงคงน้ำหนักไว้ 4 วัน

4) ดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบสมบัติในห้องปฏิบัติการทดสอบต่อไป ลักษณะตัวอย่างหลังดันออกจากกระบอกเตรียมตัวอย่างมีลักษณะดังแสดงรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างดินผสมที่ปริมาณน้ำมากกว่าพิกัดเหลวที่ใช้สร้างตัวอย่าง



(ก)

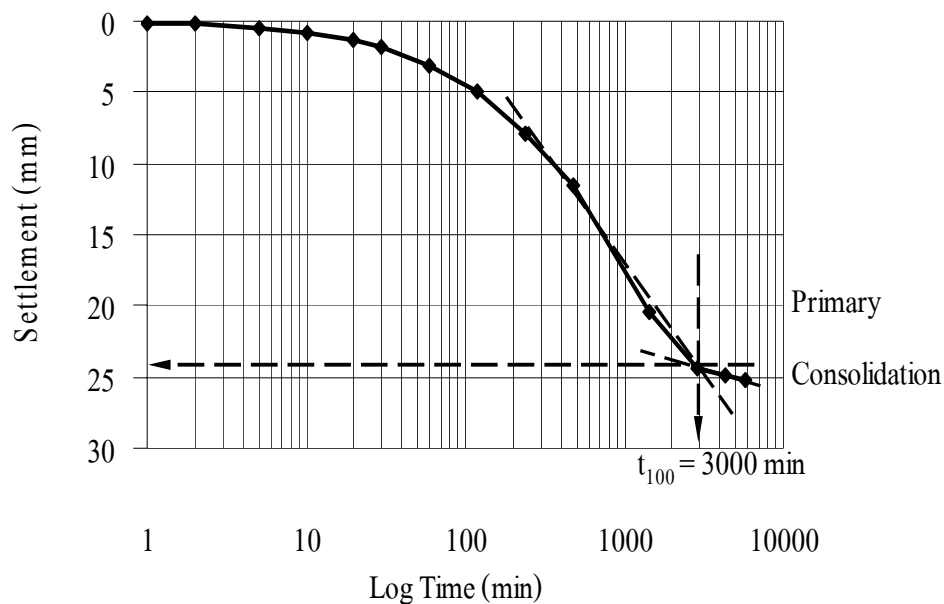


(ข)

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างที่ได้จากการสร้างตัวอย่างขึ้นใหม่โดยวิธีการผสมเหลว (ก) ก่อนตัวอย่างเมื่อค้นออกจากกระบอกรเตรียมตัวอย่าง, (ข) ก่อนตัวอย่างที่ผ่าดูด้านใน

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์แสดงส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

| ตัวอย่างดินผสม                    | สัญลักษณ์ |
|-----------------------------------|-----------|
| ดินเหนียวสะกอม 100 %              | Control   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 10%  | 10% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 20%  | 20% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 30%  | 30% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 40%  | 40% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 50%  | 50% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 60%  | 60% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 70%  | 70% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 80%  | 80% FIS   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 10% | 10% MES   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 20% | 20% MES   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 30% | 30% MES   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 40% | 40% MES   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 50% | 50% MES   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 60% | 60% MES   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 70% | 70% MES   |
| ดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 80% | 80% MES   |



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement กับ Log time จากการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวที่น้ำหนักก่ดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร

### 3.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาลักษณะของทรายต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม โดยใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลว จากนั้นนำตัวอย่างดินไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรม และสมบัติทางกายภาพของดินผสม โดยรายละเอียดจำนวน ตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 3.2 และมาตรฐานการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.3

#### 3.4.1 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- 1) ทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity,  $G_s$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D 854
- 2) ทดสอบหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight,  $\gamma$ )
- 3) ทดสอบหาปริมาณความชื้น (Water Content) ตามมาตรฐาน ASTM D 2216-92
- 4) วิเคราะห์ขนาดคละของเม็ดดิน (Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 421
- 5) ทดสอบขีดพิคัดแอดเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318-95

### 3.4.2 สมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดและทรายขนาดกลางที่สร้างตัวอย่างขึ้นใหม่แบบผสมเหลวที่อัตราส่วนผสมของทรายในดินเหนียวเท่ากับ 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดินเหนียวแห้ง โดยกำหนดรายการทดสอบดังนี้

#### 3.4.2.1 ทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test (CIU Test)

การทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Test ตามมาตรฐาน ASTM D - 4186 ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาเป็นตัวอย่างดินที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นใหม่โดยการผสมเหลว ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ดันต่อตารางเมตร เป็นเวลา 4 วัน เพื่อให้ดินตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ ในการทดสอบ CIU Test ใช้ค่าความดันอัดน้ำให้ตัวอย่างดินอิมตัว (Back Pressure) เท่ากับ 30 ดันต่อตารางเมตรจนตัวอย่างดินอิมตัวและใช้ค่าความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure,  $\sigma'_3$ ) ที่ 4, 8 และ 16 ดันต่อตารางเมตร จนตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ นำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Compression Test ด้วยอัตราการเฉือน (Shear Rate) เท่ากับ 0.07 มม./นาที จนตัวอย่างดินพิบัติ หรือการทดสอบที่ค่าความเครียดมากกว่า 20% ตามมาตรฐาน ASTM และหลังจากทำการทดสอบการรับแรงเฉือนสิ้นสุด นำตัวอย่างดินไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความชื้นหลังการทดสอบเพื่อประกอบข้อมูลอื่นต่อไป จากการทดสอบสามารถหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) Total Shear Strength Parameter  $(C, \phi)$
- 2) Effective Shear Strength Parameter  $(C', \phi')$
- 3) Pore Water Pressure at Failure  $(\Delta U_f)$
- 4) Strain at Failure  $(\epsilon_f)$
- 5)  $q/p'$  at Failure
- 6) Deviator Stress at Failure  $(q_f)$
- 7)  $A_f$  Parameter  $(A_f)$



### ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test

1) นำตัวอย่างดินที่ทำการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีผสมเหลวมาขึ้นรูปตัวอย่างให้มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 วดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป ติดตั้งตัวอย่างเข้า Cell หุ้มด้วยพลาสติกยาง (Rubber Membrane) 2 ชั้นเพื่อป้องกันการรั่ว หัวท้ายตัวอย่างเป็นแผ่นหินพรุน (Porous Stone) เพื่อระบายน้ำ รอบตัวอย่างดินใช้แผ่นกระดาษกรองลูปนรอบก่อนตัวอย่างเพื่อช่วยในการระบายน้ำและใช้ยางกลม (O - ring) 2 เส้น รััดเหนือและใต้ตัวอย่าง เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ จากนั้นติดตั้งระบบเครื่องมือให้ถูกต้องเติมน้ำเข้า Cell จนเต็มแล้วตรวจสอบฟองอากาศในสายยางของ  $U_b$  ถ้ามีฟองอากาศจะต้องไล่ฟองอากาศออกจนหมด

2) ทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Sample) ในการทดสอบเมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว อัดความดันน้ำในส่วนของความดันภายใน (Back Pressure) เท่ากับ 10 ตันต่อตารางเมตร ความดันเซลล์ (Cell Pressure) เท่ากับ 10 ตันต่อตารางเมตร อัดความดันทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ให้ความดันน้ำอัดเข้าไปในตัวอย่างเพื่อสลายฟองอากาศ หลังจากนั้นทำการปรับความดันเพิ่มทีละ 5 ตันต่อตารางเมตร ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง จนถึงค่าความดันเท่ากับ 30 ตันต่อตารางเมตร พร้อมกันนี้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ (B Value Check) ให้ค่า B มีค่าเท่ากับ  $1 \left( \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} = 1 \right)$

3) อัดตัวคายน้ำตัวอย่างดิน (Consolidated) ในการศึกษาได้ทำการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างดินภายใต้ความดันดิน (Confining Pressure) เท่ากับ 4, 8, และ 16 ตันต่อตารางเมตรจนตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ

4) การเฉือนตัวอย่างดิน (Shearing) การศึกษานี้เป็นการทดสอบแบบ CIU Test หลังจากที่ตัวอย่างดินสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำเรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่างทดสอบเข้าสู่เครื่องเพิ่มแรงเฉือนเป็นเครื่องอัดสามแกน ปิวาล์วน้ำ  $U_b$  เลื่อนแกนกดตัวอย่าง (Piston) ให้สัมผัสกับตัวอย่าง โดยสังเกตจากเข็มของมาตรวัดแรง (Proving Ring) ติดตั้ง Dial Gage วัดการทรุดตัว และตรวจสอบระบบวัดแรงดันน้ำ ในการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้เครื่องมือวัด 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นดิจิทัลโดยใช้ Digital Transducer และส่วนที่เป็นอนาล็อกเพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกัน ในการทดสอบใช้อัตราเร็วของการเฉือนก่อนตัวอย่าง (Strain Rate) เท่ากับ 0.07 มม./นาที จนกว่าตัวอย่างดินเกิดการพิบัติ หรือที่ความเครียดมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน ASTM

### 3.4.2.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) แบบ One-Dimensional Test ตามมาตรฐาน (ASTM D 2435 – 96) การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) มาผสมกับทรายและน้ำที่ปริมาณความชื้นในการผสม (Water Content) ที่มากกว่าปริมาณน้ำที่ขีดพิกต์เหลว (Liquid Limit) ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร คงน้ำหนักไว้ 4 วัน เพื่อวิเคราะห์ห้อิทธิพลของปริมาณทรายต่อสมบัติทางด้าน การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนสะกอมโดยค่าคงตัวของการอัดตัวคายน้ำประกอบด้วย

- 1) ค่าความดันดินเคยอัดตัวมาก่อน (Preconsolidation Pressure,  $p_c$ )
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of Consolidation,  $C_v$ )
- 3) ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,  $C_c$ )
- 4) ค่าดัชนีอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,  $C_r$ )

### 3.4.2.3 ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability , k)

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability , k) แบบ Constant Head Method ตามมาตรฐาน (ASTM D 2434 - 68) ใช้ความดันอากาศเป็นตัวควบคุมความดัน การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) มาผสมกับทรายและน้ำที่ปริมาณความชื้นในการผสมใน (Water Content) ที่มากกว่าปริมาณน้ำที่ขีดพิกต์เหลว (Liquid Limit) ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร คงน้ำหนักไว้ 4 วัน จากนั้นนำตัวอย่างดินมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ใช้ค่าความดันน้ำเท่ากับ 2 ตันต่อตารางเมตร โดยใช้ความดันอากาศเป็นตัวควบคุมแรงดันดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในการทดสอบนี้ได้วัดปริมาณน้ำออก ( $Q_{out}$ ) เทียบกับเวลา นำค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับเวลาจนกว่าเส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงในแนวราบและจนกว่าปริมาณน้ำไหลเข้าเท่ากับน้ำที่ไหลออกซึ่งในการทดสอบใช้เวลาประมาณ 1 เดือนต่อหนึ่งก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 เครื่องมือทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแบบความดันคงที่โดยใช้ความดันอากาศเป็นตัวควบคุมความดัน

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างของการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม

| จำนวนตัวอย่างที่ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวผสม |                                 |                      |   |    |    |   |    |    |   |    |    |   |    |     |    |    |    |
|---|---------------------------------|----------------------|---|----|----|---|----|----|---|----|----|---|----|-----|----|----|----|
| การทดสอบ  | ตัวอย่าง                        | ปริมาณทรายที่ผสม (%) |   |    |    |   |    |    |   |    |    |   |    | รวม |    |    |    |
|   |                                 | 0                    |   |    | 10 |   |    | 20 |   |    | 30 |   |    |     | 40 |    |    |
| Consolidation   | ทรายกลาง                        | 1                    |   |    | 1  |   |    | 1  |   |    | 1  |   |    | 1   |    |    | 5  |
|   | ทรายละเอียด                     | 1                    |   |    | 1  |   |    | 1  |   |    | 1  |   |    | 1   |    |    | 5  |
| Permeability  | ทรายกลาง                        | 1                    |   |    | 2  |   |    | 2  |   |    | 2  |   |    | 2   |    |    | 9  |
|   | ทรายละเอียด                     | 1                    |   |    | 2  |   |    | 2  |   |    | 2  |   |    | 2   |    |    | 9  |
| Triaxial  | $\sigma'_3$ (t/m <sup>2</sup> ) | 4                    | 8 | 16 | 4  | 8 | 16 | 4  | 8 | 16 | 4  | 8 | 16 | 4   | 8  | 16 |    |
|   | ทรายกลาง                        | 1                    | 1 | 1  | 1  | 1 | 1  | 1  | 1 | 1  | 1  | 1 | 1  | 1   | 1  | 1  | 15 |
|   | ทรายละเอียด                     | 1                    | 1 | 1  | 1  | 1 | 1  | 1  | 1 | 1  | 1  | 1 | 1  | 1   | 1  | 1  | 15 |

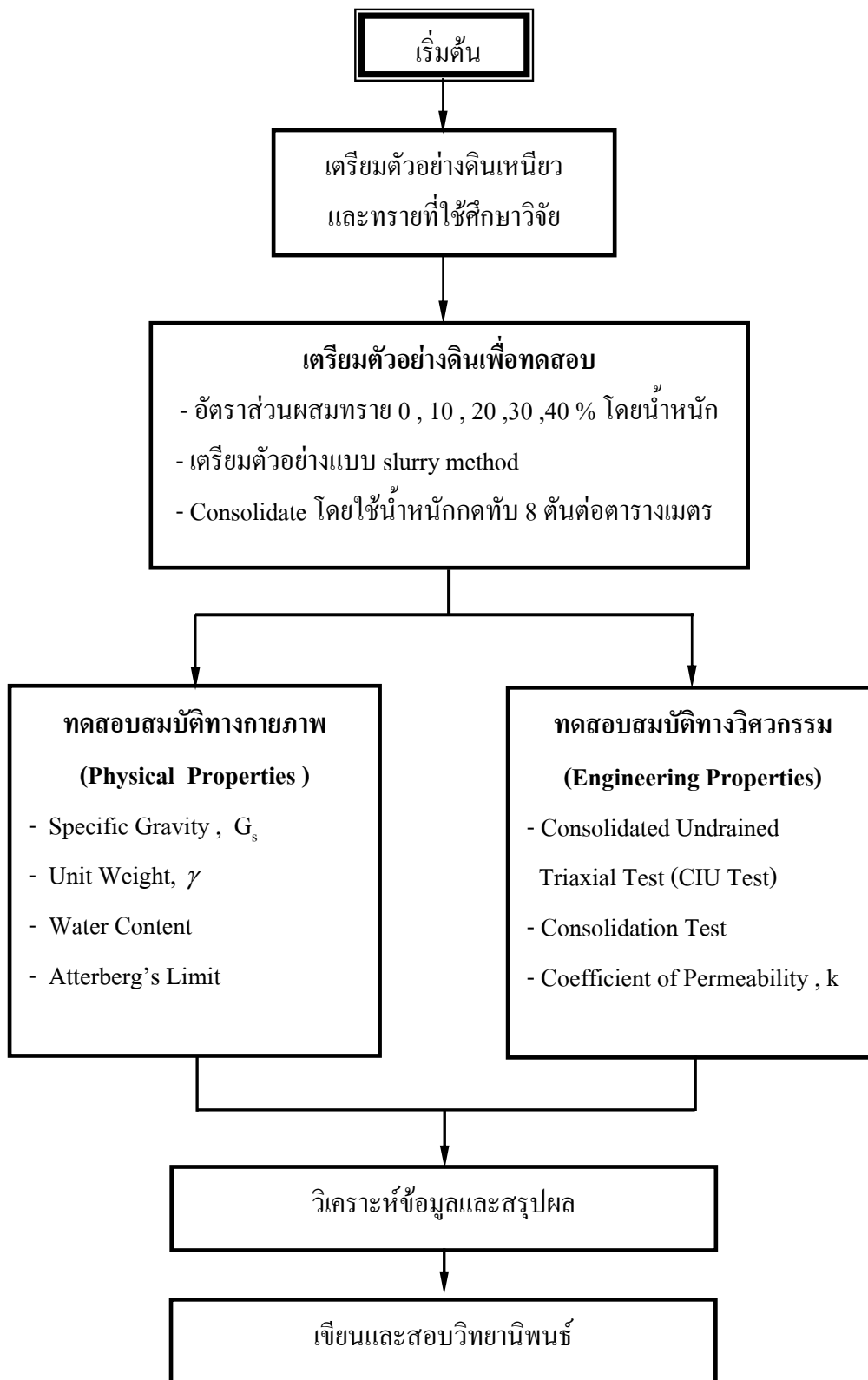
### ตารางที่ 3.3 มาตรฐานการทดสอบ

| การทดสอบ  | มาตรฐานการทดสอบ  |
|---|------------------|
| 1. สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)                                    |                  |
| 1.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, $G_s$ )                       | ASTM D 854-92    |
| 1.2 การทดสอบหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight, $\gamma$ )                           |                  |
| 1.3 การทดสอบหาปริมาณความชื้น (Water Content)                                | ASTM D 2216-92   |
| 1.4 การวิเคราะห์ขนาดคละของเม็ดดิน (Sieve Analysis)                          | ASTM D 421       |
| 1.5 การทดสอบค่าพิคคแอตเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit)                       | ASTM D 4318-95   |
| 2. สมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties)                               |                  |
| 2.1 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test (CIU Test) | ASTM D 4767-95   |
| 2.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)                            | ASTM D 2435 – 96 |
| 2.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, $k$ )   | ASTM D 2434-68   |

### 3.5 การวิเคราะห์ผลและสรุปผล

หลังจากทำการทดสอบตัวอย่างดินผสมเรียบร้อยแล้วจะนำผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์และสรุปผลดังต่อไปนี้

- 1) วิเคราะห์และสรุปผลถึงผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงเฉือน ( $C', \phi', C, \phi$ ) ของดินเหนียวอ่อน
- 2) วิเคราะห์และสรุปผลถึงผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้าน การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน
- 3) วิเคราะห์และสรุปผลถึงผลกระทบของปริมาณทรายต่อพฤติกรรมทางด้าน ความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำผ่านมวลดิน
- 4) วิเคราะห์และสรุปผลถึงผลกระทบของปริมาณทรายต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของดินเหนียวอ่อน ซึ่งขั้นตอนการเก็บและเตรียมตัวอย่าง ทดสอบ วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภูมิขั้นตอนการทดสอบ การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษา

#### 4.1 ผลการทดสอบดินเหนียวอ่อนสะกอม

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินเหนียวอ่อนบริเวณแม่น้ำ ตำบลสะกอม อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา ลักษณะเนื้อดินละเอียดมีสีเทา มีส่วนผสมของกราบเกลือผสมอยู่ ความลึกของตัวอย่างดินที่ศึกษาอยู่ที่ระดับ 1-3 เมตร จากระดับดินเดิม ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน โดยการขุดเปิดหน้าดินกว้างแล้วเก็บตัวอย่าง

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสะกอม

การทดสอบหาค่าสมบัติทางกายภาพดินเหนียวอ่อนสะกอม พบว่าค่าปริมาณความชื้นในธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 63% ค่าพิกัดเหลวมีค่าเท่ากับ 68.22% ค่าพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 39.15% และ ค่าดัชนีพลาสติกมีค่าเท่ากับ 29.07% ซึ่งกรณีที่ค่าปริมาณความชื้นมีค่าใกล้เคียงค่าพิกัดเหลวแสดงว่าดินมีค่าความแข็งแรงต่ำ เพราะอยู่ในสภาพเหลว ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 จากการทดสอบการกระจายตัวของดินเหนียวอ่อนสะกอม พบว่ามีทรายผสมในเนื้อดินเหนียวซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 99.97 % จากการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดินซึ่งอ้างตามระบบ MIT พบว่ามีขนาดของทราย (Sand) ขนาด 0.06-2 มม. เท่ากับ 4 % ดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002-0.06 มม. เท่ากับ 92.31 % และปริมาณของดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 มม. เท่ากับ 7.69 % ดังตารางที่ 4.1 การกระจายตัวของดินเหนียวอ่อนสะกอมดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำมาจำแนกแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification, USCS) จัดว่าเป็นดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง CH

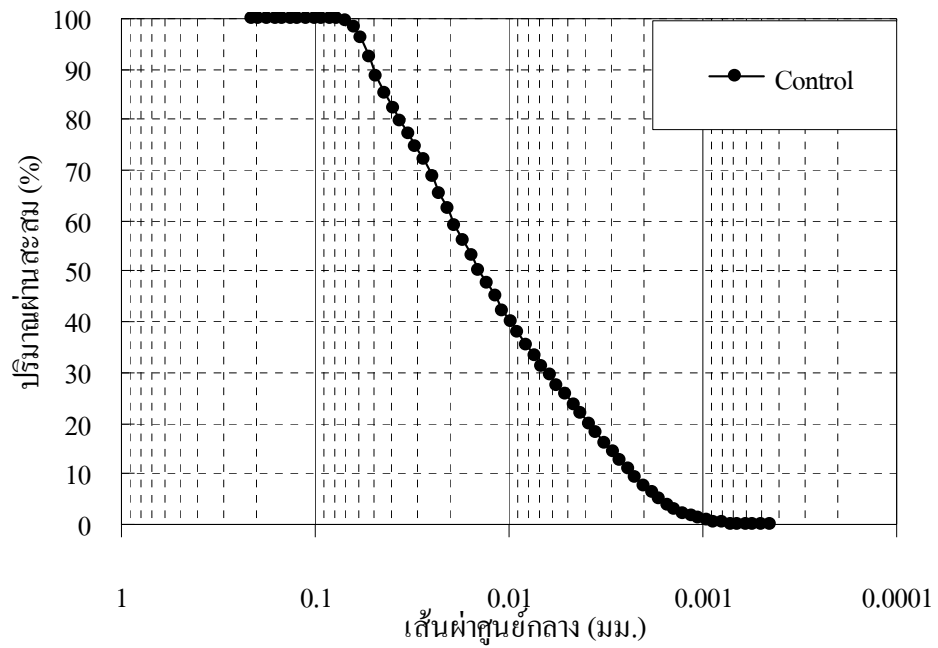
##### 4.1.2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม

ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม ที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว ใช้น้ำหนักกดทับ 8 ดันต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการคั่งน้ำหนัก 4 วัน จนตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าเท่ากับ 1.16 ดันต่อลูกบาศก์เมตร จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test พบว่าดินเหนียว

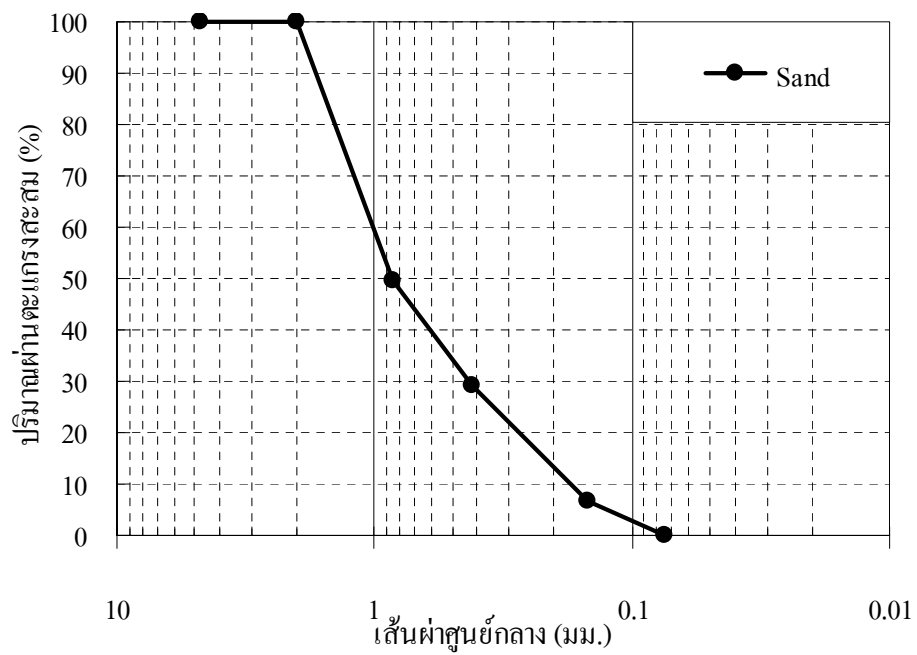
อ่อนสะกอมมีค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลเท่ากับ 1.20 ตันต่อตารางเมตร ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลเท่ากับ 30.25 องศา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, ( $E_{50}$ ) มีค่าเท่ากับ 700 ตันต่อตารางเมตร และค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าเท่ากับ  $2.99 \times 10^{-8}$  ซม./วินาที และจากผลการทดสอบค่าการอัดตัวคายน้ำ พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าการทรุดตัวที่สูง ดังข้อมูลตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม ที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

| สมบัติของดินเหนียวอ่อนสะกอม                           | ค่าแสดงหรือปริมาณ     |
|---|-----------------------|
| <b>สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสะกอม</b>           |                       |
| ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (NWC) (%)                   | 63.00                 |
| พิกัดเหลว (LL) (%)                                    | 68.22                 |
| พิกัดพลาสติก (PL) (%)                                 | 39.15                 |
| ดัชนีพลาสติก (PI) (%)                                 | 29.07                 |
| ความถ่วงจำเพาะ (Gs)                                   | 2.66                  |
| ปริมาณของเม็ดดินที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.) | 99.97                 |
| <b>Grain Size Distribution (ตามระบบ MIT)</b>          |                       |
| ทราย (Sand) ขนาด 0.06 – 2 มม.                         | 4.00                  |
| ดินตะกอนทราย (Silt) ขนาด 0.002 – 0.06 มม.             | 92.31                 |
| ดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 มม.                     | 7.69                  |
| ประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification       | <b>CH</b>             |
| <b>สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอม</b>         |                       |
| ความหนาแน่นแห้ง (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)                  | 1.16                  |
| ดัชนีการอัดตัว (Cc)                                   | 0.403                 |
| ดัชนีการอัดตัวช้า (Cs)                                | 0.085                 |
| สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, k (ซม./วินาที)       | $2.99 \times 10^{-8}$ |
| มุมเสียดทานประสิทธิผล ( $\phi'$ ) (องศา)              | 30.25                 |
| ค่าเชื่อมแน่นประสิทธิผล ( $c'$ ) (ตันต่อตารางเมตร)    | 1.20                  |
| โมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_{50}$ ) (ตันต่อตารางเมตร)        | 700                   |



รูปที่ 4.1 ผลการกระจายตัวของดินเหนียวอ่อนสะกอม



รูปที่ 4.2 ผลการกระจายตัวของทรายที่นำมาทำการศึกษาวิจัย



#### 4.2 ผลการทดสอบสมบัติของทราย

ตัวอย่างทรายที่ใช้ศึกษาวิจัยเป็นทรายแม่น้ำ จังหวัดสงขลาที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปจากท่าทรายรัษฎุมิ จากผลการทดสอบการกระจายตัวของเม็ดดินพบว่า มีค่า  $C_u = 6.00$  และค่า  $C_c = 1.67$  เมื่อจำแนกตามระบบเอกภาพ (Unified Classification) พบว่าเป็นพวก SW จากนั้นแยกทรายเป็นสองขนาด คือ ทรายขนาดกลาง (Medium Sand) และทรายเม็ดละเอียด (Fine Sand) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

- 1) ทรายขนาดกลาง (Medium Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค้างตะแกรงเบอร์ 40
- 2) ทรายเม็ดละเอียด (Fine Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างตะแกรงเบอร์ 200

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างทรายที่ใช้ศึกษาวิจัย

| สมบัติทางกายภาพ       | ค่าแสดงหรือปริมาณ |             |
|-----------------------|-------------------|-------------|
|                       | ทรายขนาดกลาง      | ทรายละเอียด |
| ความถ่วงจำเพาะ $G_s$  | 2.62              | 2.63        |
| % ค้างตะแกรงเบอร์ 20  | 71.00             | -           |
| % ค้างตะแกรงเบอร์ 40  | 29.00             | -           |
| % ค้างตะแกรงเบอร์ 100 | -                 | 77.00       |
| % ค้างตะแกรงเบอร์ 200 | -                 | 23.00       |

#### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลาง และทรายเม็ดละเอียด

การศึกษาผลของทรายต่อสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสะกอม และกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทราย ที่สร้างตัวอย่างขึ้นใหม่แบบผสมเหลว มาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลของปริมาณทรายและขนาดของเม็ดทรายต่อสมบัติของดินเหนียวอ่อนสะกอม จากการทดสอบได้ผลดังนี้

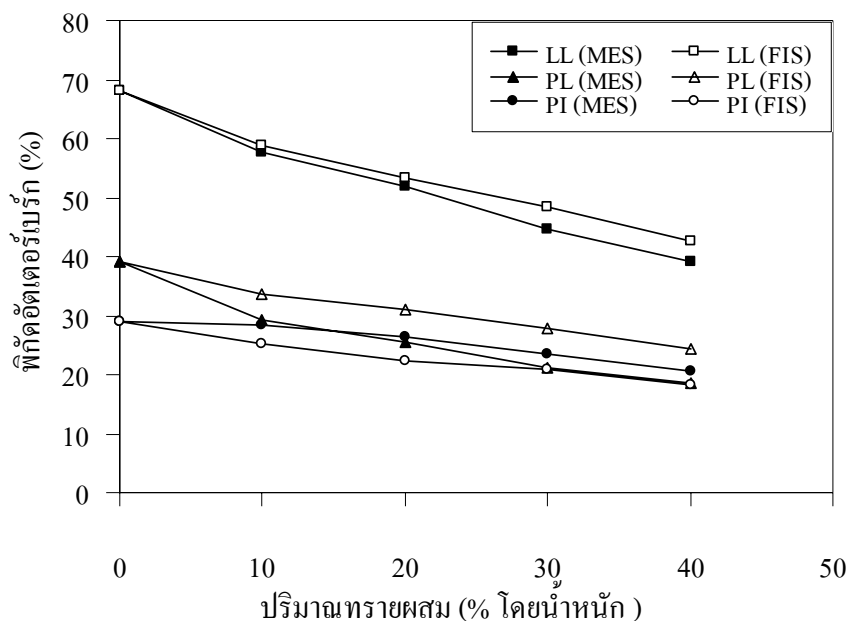
#### 4.3.1 ผลการทดสอบค่าพิกัดอัตราเบอร์รี่

ค่าการทดสอบพิกัดอัตราเบอร์รี่ (Atterberg Limit) พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าพิกัดเหลวเท่ากับ 68.22 % พิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับ 39.15 % และ ค่าดัชนีพลาสติกมีค่าเท่ากับ 29.07 % ทรายมีสมบัติเป็น Non Plastic , NP กรณีที่ดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด และ ทรายขนาดกลางมีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.3 และผังรูปที่ 4.3

ผลจากการทดสอบหาพิกัดอัตราเบอร์รี่ (Atterberg Limit) เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายต่อพิกัดอัตราเบอร์รี่ ของดินเหนียวผสม พบว่าพิกัดอัตราเบอร์รี่มีค่าลดลงตามปริมาณทรายที่มากขึ้น คือค่าพิกัดเหลวลดลง 37.40 % และ 42.70 % ค่าพิกัดพลาสติกลดลง 37.50 % และ 52.90 % เมื่อตัวอย่างดินผสมมีปริมาณทรายเม็ดละเอียด และทรายขนาดกลางเพิ่มขึ้นจาก 0 % เป็น 40 % ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนสะกอม กรณีมีส่วนผสมของทรายจากการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลว

| ตัวอย่างดินผสม | ความถ่วงจำเพาะ | ค่าพิกัดอัตราเบอร์รี่ |                     |                     |
|----------------|----------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
|                |                | ค่าพิกัดเหลว (%)      | ค่าพิกัดพลาสติก (%) | ค่าดัชนีพลาสติก (%) |
| Control        | 2.660          | 68.22                 | 39.15               | 29.07               |
| 10% FIS        | 2.658          | 58.84                 | 33.57               | 25.27               |
| 20% FIS        | 2.655          | 53.34                 | 31.11               | 22.23               |
| 30% FIS        | 2.651          | 48.49                 | 27.72               | 20.77               |
| 40% FIS        | 2.649          | 42.67                 | 24.46               | 18.21               |
| 10% MES        | 2.655          | 57.59                 | 29.15               | 28.44               |
| 20% MES        | 2.650          | 51.80                 | 25.41               | 26.39               |
| 30% MES        | 2.647          | 44.67                 | 21.16               | 23.51               |
| 40% MES        | 2.641          | 39.08                 | 18.41               | 20.06               |

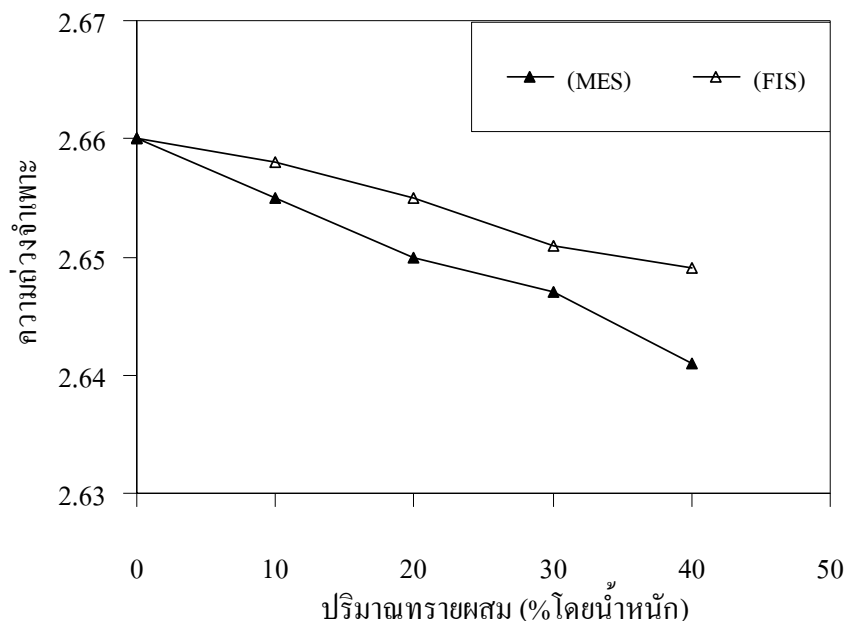


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดอัตราเบอร์กกับอัตราส่วนผสมของปริมาณทราย

#### 4.3.2 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมและกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอม มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 ทรายขนาดกลางมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ทรายเม็ดละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 และกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดแสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.3

จากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด พบว่าการผสมทรายลงไปดินเหนียวอ่อนสะกอม ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของดินลดลงเล็กน้อยตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มมากขึ้นของทราย เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดมีค่าน้อยกว่าดินเหนียวอ่อนสะกอม ดังแสดงรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้งจำเพาะกับอัตราส่วนผสมของปริมาณทราย

#### 4.3.3 ผลของปริมาณทรายที่ผสมต่อความหนาแน่นและปริมาณความชื้นในมวลดิน

จากการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด และทรายขนาดกลางโดยการใช้ น้ำหนักกดทับ 8 ตันต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการกดน้ำหนัก 4 วัน พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ 1.67 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณความชื้นในมวลดิน (Water Content) มีค่าเท่ากับ 43.7 เปอร์เซ็นต์ ภูมิของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4

การเตรียมตัวอย่างดินแบบผสมเหลว ภูมิของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด พบว่าการผสมทรายลงไปดินเหนียวอ่อนสะกอม จะทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่ผสม ภูมิของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางมีค่าความหนาแน่นแห่งสูงสุดที่ปริมาณทรายที่ผสมเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ และภูมิดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด ค่าความหนาแน่นแห่งสูงสุดที่ปริมาณทรายที่ผสมเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดทราย

พบว่า ฤทธิ์ของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางจะให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าฤทธิ์ของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด ที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน

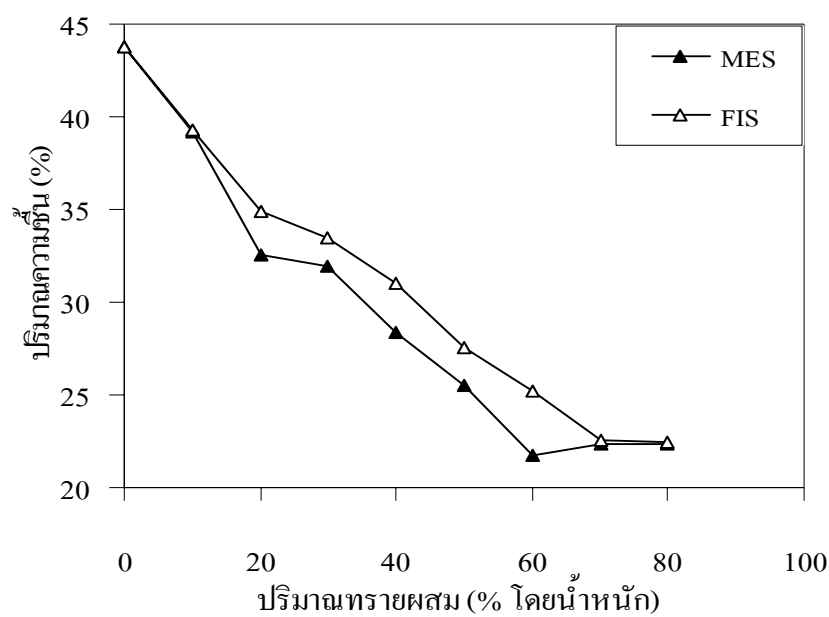
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของทรายต่อปริมาณความชื้นในมวลดิน พบว่าค่าปริมาณความชื้นในมวลดินจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่ามากขึ้นดังรูปที่ 4.5 เนื่องจากปริมาณทรายที่มีมากขึ้นเข้าไปแทนที่ในดินเหนียว ทำให้อัตราส่วนช่องว่างของดินผสมมีค่าลดลง และดินเหนียวที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางจะมีค่าปริมาณความชื้นในมวลดินที่ต่ำกว่าฤทธิ์ของดินเหนียวที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดเนื่องจากมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำกว่า

**ตารางที่ 4.4** ผลของปริมาณทรายต่อค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในมวลดิน ของดินผสมกรณีสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

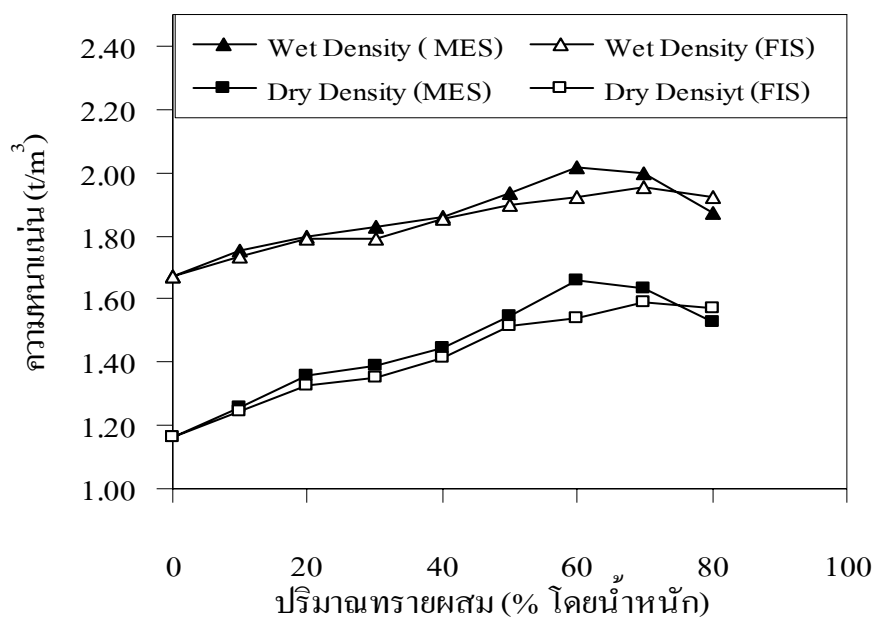
| ปริมาณทรายผสม (%) โดยน้ำหนัก | ความหนาแน่นแห้ง ( $t/m^3$ ) | ปริมาณความชื้น (%) |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Control                      | 1.163                       | 43.73              |
| 10% FIS                      | 1.245                       | 39.32              |
| 20% FIS                      | 1.326                       | 34.91              |
| 30% FIS                      | 1.350                       | 33.52              |
| 40% FIS                      | 1.416                       | 31.07              |
| 50% FIS                      | 1.514                       | 27.54              |
| 60% FIS                      | 1.537                       | 25.23              |
| 70% FIS                      | 1.593                       | 22.52              |
| 80% FIS                      | 1.571                       | 22.43              |

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลของปริมาณทรายต่อค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในมวลดิน  
ของดินผสมกรณีสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

| ปริมาณทรายผสม<br>(%) โดยน้ำหนัก | ความหนาแน่นแห้ง<br>( $t/m^3$ ) | ปริมาณความชื้น<br>(%) |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 10% MES                         | 1.259                          | 39.22                 |
| 20% MES                         | 1.356                          | 32.53                 |
| 30% MES                         | 1.388                          | 31.97                 |
| 40% MES                         | 1.447                          | 28.38                 |
| 50% MES                         | 1.544                          | 25.50                 |
| 60% MES                         | 1.656                          | 21.75                 |
| 70% MES                         | 1.633                          | 22.38                 |
| 80% MES                         | 1.530                          | 22.38                 |



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับปริมาณทรายที่ผสม



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณทรายที่ผสม

#### 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด

การศึกษาผลของทรายต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่สร้างตัวอย่างขึ้นใหม่แบบผสมเหลว ใช้น้ำหนักกกดทับ ( $P_c$ ) เท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร และคงค้ำน้ำหนัก 4 วัน เพื่อให้ตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาผลของปริมาณทรายและขนาดของเม็ดทรายต่อสมบัติของดินเหนียวอ่อนสะกอม จากการทดสอบได้ผลดังนี้

##### 4.4.1 ผลการทดสอบค่าการอัดตัวคายน้ำใน 1 มิติ (One Dimension Consolidation Test) ของดินเหนียวอ่อนสะกอม กรณีผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด และกรณีผสมด้วยทรายขนาดกลาง

ผลการทดสอบค่าการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) เพื่อหาค่าคงตัวของการอัดตัวได้ (Compressibility Parameter) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมและตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

สะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดและทรายขนาดกลาง โดยสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว ใช้น้ำหนักกดทับ 8 ตันต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการกึ่งน้ำหนัก 4 วัน ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบการอัดตัวคายน้ำประกอบไปด้วยดินเหนียวอ่อนสะกอม ดินผสมทรายขนาดกลาง และดินผสมทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, และ 40 ซึ่งค่าคงตัวการอัดตัวคายน้ำสามารถนำมาวิเคราะห์การทรุดตัวของดินได้ ซึ่งผลการทดสอบทั้งหมดจะแสดงในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ค่าคงตัวการอัดตัวได้ประกอบด้วย

- 1) ค่าความดันดินเคຍอัดตัวมาก่อน (Preconsolidation Pressure,  $P_c$ )
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ (Coefficient of Consolidation,  $C_v$ )
- 3) ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index,  $C_c$ )
- 4) ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression Index,  $C_r$ )

ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ Consolidation พบว่าปริมาณทรายที่ผสมมีผลให้การทรุดตัวของดินลดลง สังเกตได้จากค่าดัชนีการอัดตัวที่ลดลงจากเดิม เมื่อปริมาณทรายที่ผสมเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำก็มีแนวโน้มลดลง และการทรุดตัวลดลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่ามากขึ้น สังเกตจากความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pressure) กับค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ที่ลดลง จากรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 ในการทดสอบใช้ค่าความดันการทดสอบตัวอย่างระหว่าง 2.06 – 60.76 ตันต่อตารางเมตร จากผลการทดสอบ พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวมีค่าอัตราส่วนช่องว่างระหว่าง 1.19 – 0.74 ค่าดัชนีอัดตัวมีค่าเท่ากับ 0.403 และค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำ มีค่าเท่ากับ 0.085 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้มีค่าระหว่าง 0.0041 – 0.0167 ซม.<sup>2</sup>/วินาที และค่าความดันกดทับสูงสุดในอดีตมีค่าเท่ากับ 6.8 ตันต่อตารางเมตร กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมมีส่วนผสมของทรายขนาดกลางร้อยละ 40 พบว่าค่าดัชนีการอัดตัวมีค่าเท่ากับ 0.269 ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำมีค่าเท่ากับ 0.051 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้มีค่าระหว่าง 0.002 – 0.007 ซม.<sup>2</sup>/วินาที ค่าความดันอัดตัวในอดีตมีค่าเท่ากับ 6.9 ตันต่อตารางเมตร และค่าอัตราส่วนช่องว่างมีค่าระหว่าง 0.80-0.47 สำหรับกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดร้อยละ 40 พบว่าค่าดัชนีการอัดตัวมีค่าเท่ากับ 0.286 ค่าดัชนีการอัดตัวซ้ำมีค่าเท่ากับ 0.059 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้มีค่าระหว่าง 0.006 - 0.010 ซม.<sup>2</sup>/วินาที ค่าความดันสูงสุดกดทับในอดีตมีค่าเท่ากับ 6.5 ตันต่อตารางเมตร และค่าอัตราส่วนช่องว่างมีค่าระหว่าง 1.06 - 0.60 การผสมทรายลงไปดินเหนียวอ่อนสะกอมทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ลดลง จากรูปที่ 4.10 พบว่าปริมาณทรายขนาดกลางที่



ผสมในดินเหนียวอ่อนสะกอมทำให้ค่าการอัดตัวคายน้ำลดลงสูงกว่ากรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด

เมื่อพิจารณาถึงค่าความดันกดทับสูงสุดในอดีตจากการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลวโดยใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร ในระยะเวลา 4 วัน พบว่าค่าความดันกดทับสูงสุดของดินในอดีต จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำใน 1 มิติ มีค่าน้อยกว่าค่าความดันดินกดทับจริง ( $OCR < 1$ ) แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลา 4 วัน ตัวอย่างดินยังไม่สิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ ( $U < 100\%$ )

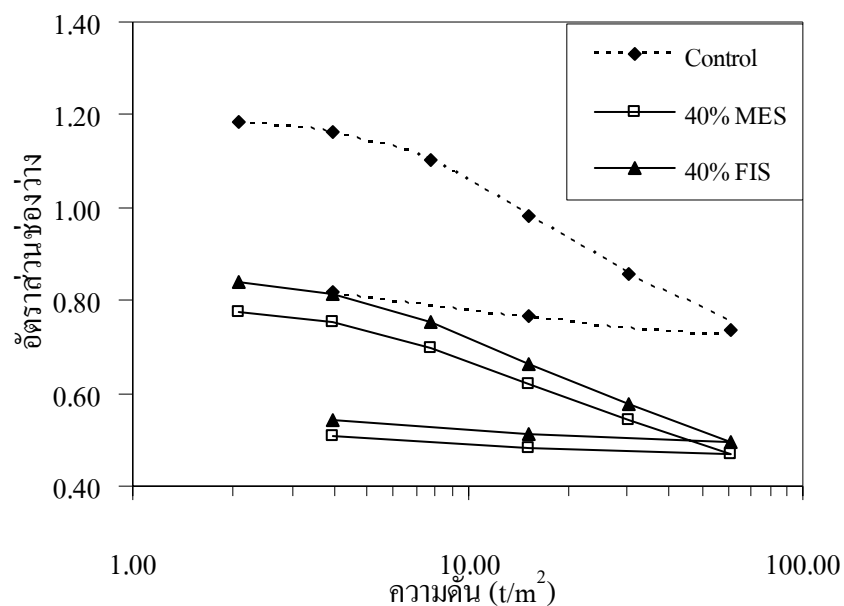
จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลาง และทรายเม็ดละเอียด พบว่าปริมาณทรายที่มีมากขึ้นทำให้ค่าการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าลดลง สืบเกิดได้จากค่าคงตัวของการอัดตัว และค่าอัตราส่วนช่องว่างที่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณทรายมีมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายพบว่า กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลางมีค่าการทรุดตัวน้อยกว่าดินที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด เนื่องจากทรายขนาดกลางมีค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำกว่าทรายเม็ดละเอียด ปริมาณน้ำในช่องว่างจึงมีน้อยกว่ากรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายละเอียด ทำให้เมื่อมีน้ำหนักมากกดทับเมื่อเกิดการ Consolidated ค่าการทรุดตัวจึงมีค่าน้อยกว่า จากผลการอัดตัวได้สามารถนำไปวิเคราะห์หาระยะเวลาและการทรุดตัวของดินได้

#### ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม

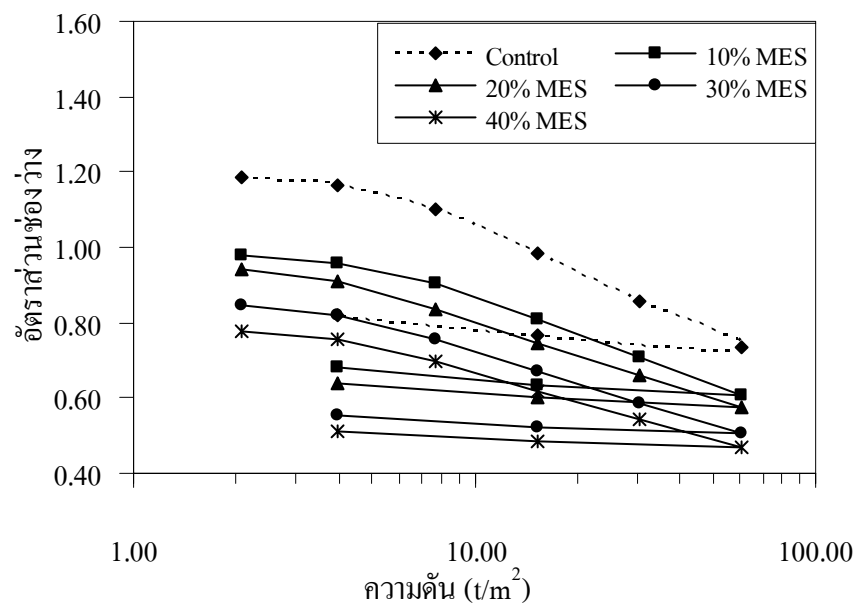
| พารามิเตอร์  | ค่าแสดงหรือปริมาณ |
|--|-------------------|
| ความดัน ( $t/m^2$ )  | 2.06 - 60.76      |
| อัตราส่วนช่องว่าง  | 1.190             |
| ความดันอัดตัวสูงสุดในอดีต ( $P_c$ ) ( $t/m^2$ )                  | 6.80              |
| ดัชนีการอัดตัว ( $C_c$ )   | 0.403             |
| ดัชนีการอัดตัวช้า ( $C_s$ )                                      | 0.085             |
| ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ ( $C_v$ ) (ชม. <sup>2</sup> /วินาที) | 0.0041 - 0.0167   |
| สัมประสิทธิ์การยุบตัว ( $a_v$ )                                  | 0.041 - 0.166     |
| สัมประสิทธิ์การยุบตัวของปริมาตร ( $m_v$ )                        | 0.023 - 0.078     |

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ของตัวอย่างดินผสมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด และทรายขนาดกลางเป็นตัวผสม โดยสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

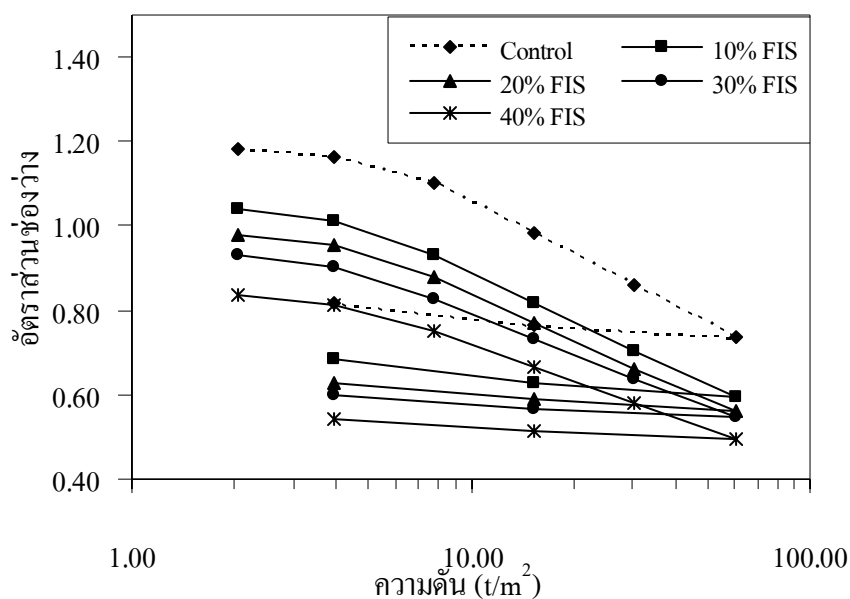
| พารามิเตอร์  | %  | ค่าแสดงหรือปริมาณ |               |
|--|----|-------------------|---------------|
|  |    | Sand              | FIS           |
| ความดัน ( $t/m^2$ )  | 10 | 2.06 - 60.76      | 2.06 - 60.76  |
| อัตราส่วนช่องว่าง  |    | 1.06 - 0.60       | 0.98 - 0.61   |
| ความดันอัดตัวสูงสุดในอดีต ( $P_c$ ) ( $t/m^2$ )                  |    | 6.3               | 6.8           |
| ดัชนีการอัดตัว ( $C_c$ )   |    | 0.387             | 0.335         |
| ดัชนีการอัดตัวช้า ( $C_s$ )                                      |    | 0.075             | 0.071         |
| ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ ( $C_v$ ) (ชม. <sup>2</sup> /วินาที) |    | 0.005 - 0.041     | 0.003 - 0.008 |
| ความดัน ( $t/m^2$ )  | 20 | 2.06 - 60.76      | 2.06 - 60.76  |
| อัตราส่วนช่องว่าง  |    | 1.00 - 0.56       | 0.98 - 0.58   |
| ความดันอัดตัวสูงสุดในอดีต ( $P_c$ ) ( $t/m^2$ )                  |    | 6.4               | 6.4           |
| ดัชนีการอัดตัว ( $C_c$ )   |    | 0.370             | 0.302         |
| ดัชนีการอัดตัวช้า ( $C_s$ )                                      |    | 0.068             | 0.063         |
| ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ ( $C_v$ ) (ชม. <sup>2</sup> /วินาที) |    | 0.007 - 0.010     | 0.007 - 0.024 |
| ความดัน ( $t/m^2$ )  | 30 | 2.06 - 60.76      | 2.06 - 60.76  |
| อัตราส่วนช่องว่าง  |    | 0.96 - 0.55       | 0.88 - 0.50   |
| ความดันอัดตัวสูงสุดในอดีต ( $P_c$ ) ( $t/m^2$ )                  |    | 6.0               | 6.5           |
| ดัชนีการอัดตัว ( $C_c$ )   |    | 0.319             | 0.286         |
| ดัชนีการอัดตัวช้า ( $C_s$ )                                      |    | 0.062             | 0.058         |
| ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ ( $C_v$ ) (ชม. <sup>2</sup> /วินาที) |    | 0.003 - 0.006     | 0.008 - 0.017 |
| ความดัน ( $t/m^2$ )  | 40 | 2.06 - 60.76      | 2.06 - 60.76  |
| อัตราส่วนช่องว่าง  |    | 0.85 - 0.49       | 0.80 - 0.47   |
| ความดันอัดตัวสูงสุดในอดีต ( $P_c$ ) ( $t/m^2$ )                  |    | 6.5               | 6.9           |
| ดัชนีการอัดตัว ( $C_c$ )   |    | 0.286             | 0.269         |
| ดัชนีการอัดตัวช้า ( $C_s$ )                                      |    | 0.059             | 0.051         |
| ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวได้ ( $C_v$ ) (ชม. <sup>2</sup> /วินาที) |    | 0.006 - 0.010     | 0.002 - 0.007 |



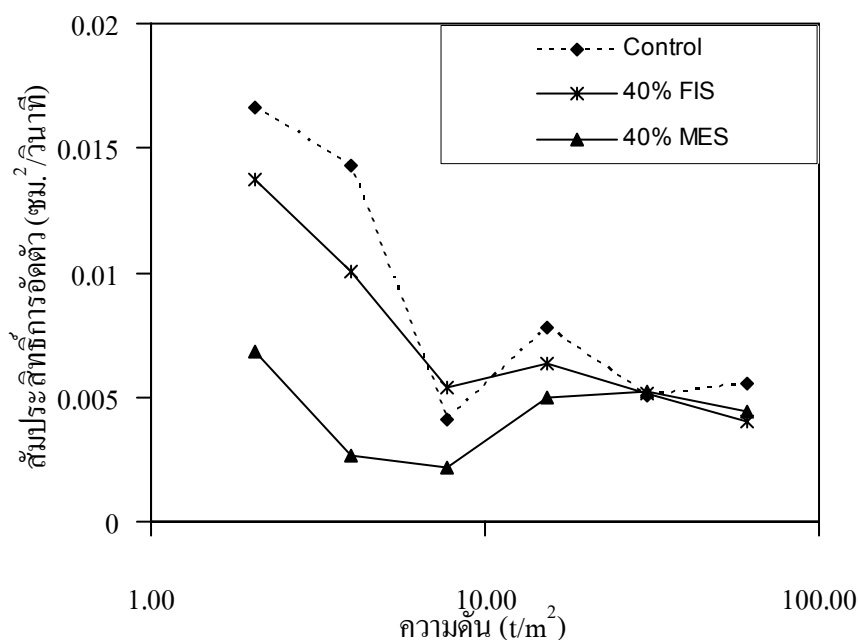
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความดัน ของดินเหนียวอ่อนสะกอมและกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมมีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสม 40 %



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความดัน ของดินเหนียวอ่อนสะกอมและกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับความดัน ของดินเหนียวอ่อนสะกอมและกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การหดตัวกับความดันของดินเหนียวอ่อนสะกอม, ดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 40% และกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 40%

#### 4.4.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Permeability Test)

จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Permeability Test) ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม และกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด และทรายขนาดกลางที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, และ 80 โดยน้ำหนักดินแห้ง สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร คงค้ำน้ำหนัก 4 วัน การทดสอบนี้ได้เลือกใช้วิธีการทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant Head) ใช้ความดัน (Pressure Head) เท่ากับ 2 ตันต่อตารางเมตร ผลการทดสอบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าเท่ากับ  $2.99 \times 10^{-8}$  ซม./วินาที

กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด พบว่าที่ปริมาณทรายผสมร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าระหว่าง  $2.69 \times 10^{-8}$  ถึง  $3.70 \times 10^{-8}$  ซม./วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีแนวโน้มคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณทรายที่ผสม ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12 เมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 60 และ 70 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าเท่ากับ  $3.81 \times 10^{-8}$  ซม./วินาที และ  $6.83 \times 10^{-8}$  ซม./วินาที มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่ผสม เมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าเท่ากับ  $3.01 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที เพิ่มขึ้น 100 เท่า เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mahasnes and Shawabkes (2005)

กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลาง พบว่าที่ปริมาณทรายผสมร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าระหว่าง  $3.13 \times 10^{-8}$  ถึง  $4.02 \times 10^{-8}$  ซม./วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีแนวโน้มคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณทรายที่ผสม สอดคล้องกับกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12 เมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 60 และ 70 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าเท่ากับ  $4.53 \times 10^{-8}$  และ  $1.07 \times 10^{-7}$  ซม./วินาที เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อประมาณทรายที่ผสมที่ร้อยละ 70 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่ผสม และเมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่าเท่ากับ  $8.92 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที เพิ่มขึ้น 300 เท่า เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม

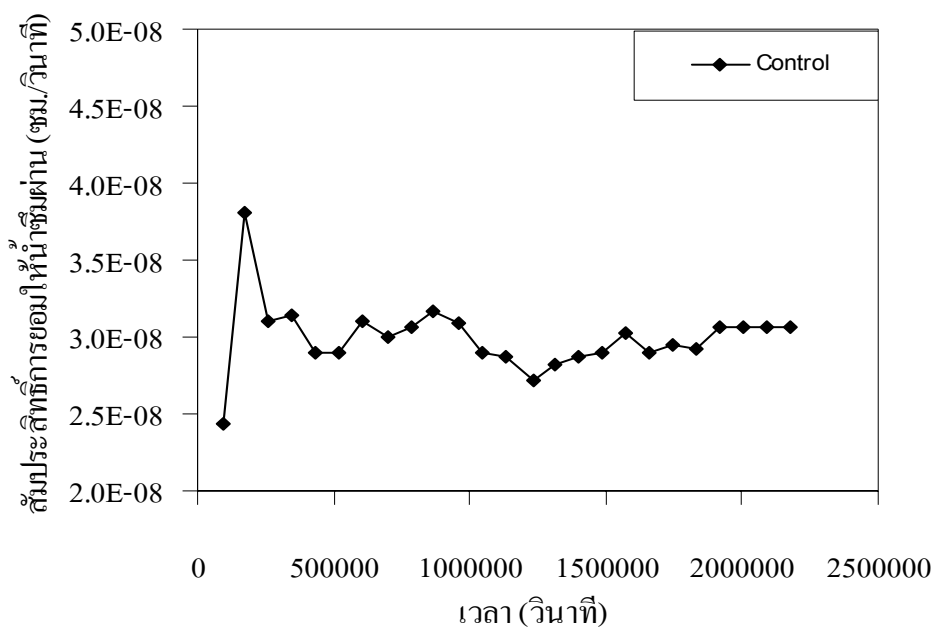
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดเมล็ดทรายที่ปริมาณอัตราส่วนผสมเดียวกันโดย น้ำหนักดินแห้ง พบว่าที่อัตราส่วนผสมของทรายที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 60 ขนาดของเมล็ดทรายมีผล ต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยมาก เนื่องจากปริมาณทรายที่ 10 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เม็ด ทรายถูกห่อหุ้มไปด้วยดินเหนียว ทำให้ช่องว่างของดินน้อย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจึง ไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่ผสม เมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่ามากกว่าร้อยละ 60 ดินเหนียวอ่อน สะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลาง มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงกว่ากรณีของดิน เหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดมาก เนื่องจากปริมาณทรายที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ดินผสมจะมีทรายเป็นส่วนประกอบหลัก ทำให้ขนาดของเม็ดดินมีขนาดใหญ่ และมีช่องว่างในเม็ด ดินที่ใหญ่และเชื่อมต่อกันมากกว่า ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ของดินเหนียว อ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลาง มีค่าสูงกว่ากรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วย ทรายละเอียด

**ตารางที่ 4.7** ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ของดินเหนียวอ่อนสะกอมและ กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด

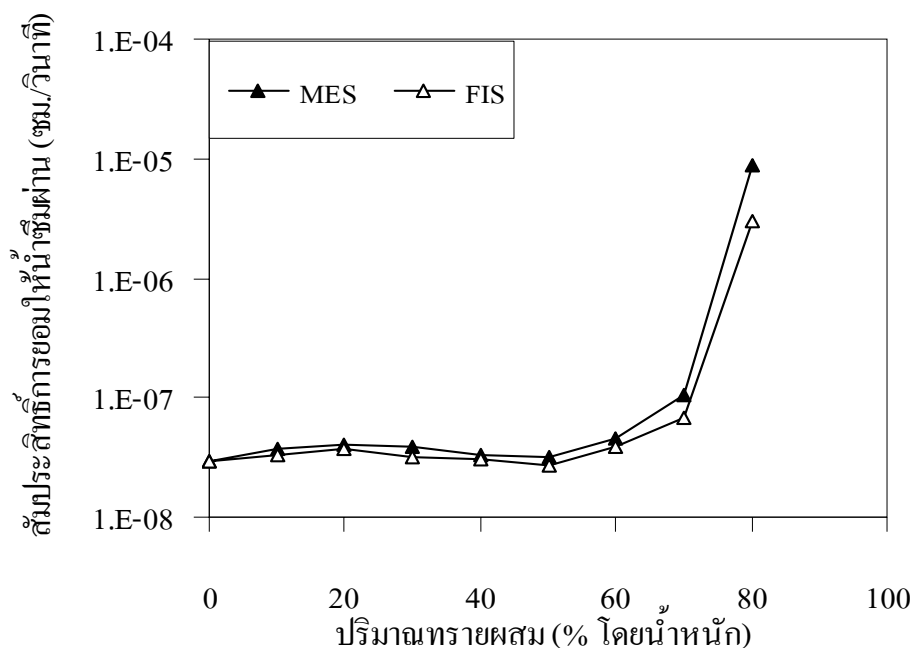
| อัตราส่วนผสม | สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (ซม./ วินาที) |
|--------------|---|
| Control      | $2.99 \times 10^{-8}$                         |
| 10% FIS      | $3.34 \times 10^{-8}$                         |
| 20% FIS      | $3.70 \times 10^{-8}$                         |
| 30% FIS      | $3.22 \times 10^{-8}$                         |
| 40% FIS      | $3.07 \times 10^{-8}$                         |
| 50% FIS      | $2.69 \times 10^{-8}$                         |
| 60% FIS      | $3.81 \times 10^{-8}$                         |
| 70% FIS      | $6.83 \times 10^{-8}$                         |
| 80% FIS      | $3.01 \times 10^{-6}$                         |

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ของดินเหนียวอ่อนสะกอม และกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลาง

| อัตราส่วนผสม | สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (ซม./วินาที) |
|--------------|--|
| 10% MES      | $3.70 \times 10^{-8}$                        |
| 20% MES      | $4.02 \times 10^{-8}$                        |
| 30% MES      | $3.89 \times 10^{-8}$                        |
| 40% MES      | $3.26 \times 10^{-8}$                        |
| 50% MES      | $3.13 \times 10^{-8}$                        |
| 60% MES      | $4.53 \times 10^{-8}$                        |
| 70% MES      | $1.07 \times 10^{-7}$                        |
| 80% MES      | $8.92 \times 10^{-6}$                        |



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านกับเวลา ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวโดยใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร และคงค้ำน้ำหนัก 4 วัน



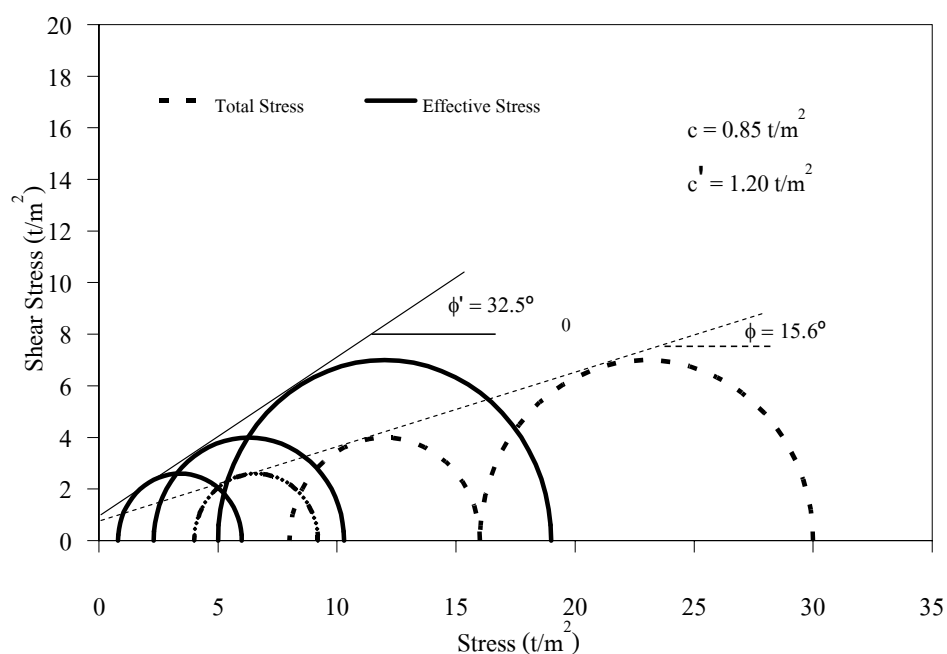
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านกับปริมาณทรายผสมของตัวอย่างดินผสมทรายขนาดกลางและทรายละเอียด

#### 4.4.3 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial (CIU Test)

ผลการศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว ทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test ในการศึกษาสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร และคงค้ำน้ำหนัก 4 วัน ค่าความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure,  $\sigma'_c$ ) เท่ากับ 4, 8 และ 16 ตันต่อตารางเมตร จากผลการทดสอบ พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลเท่ากับ 30.25 องศา ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่าเท่ากับ 1.20 ตันต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น,  $E_{50}$  มีค่าระหว่าง 228–700 ตันต่อตารางเมตร ค่าพารามิเตอร์เอมีค่าระหว่าง 0.60-0.92 และค่าความเครียดที่จุดพิบัติ (Stain at Failure) มีค่าระหว่าง 5.50 – 9.00 เปอร์เซ็นต์ กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลาง พบว่าปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวอ่อนที่มีมากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่ามากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 เมื่อพิจารณาแรงดันน้ำส่วนเกิน พบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมี



แนวโน้มลดลง แต่ค่อนข้างน้อยเมื่อปริมาณทรายที่ผสมน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ภูมิของดินเหนียว  
 สะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น  
 เช่นกัน แต่จะเพิ่มขึ้นน้อยกว่ากรณีที่ดินเหนียวอ่อนสะกอมมีส่วนผสมของทรายขนาดกลาง ดัง  
 ข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นกับค่า  $S_u$   
 จากการทดสอบ CIU Test พบว่าค่า  $S_u$  จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณทรายผสมมีค่ามากกว่า  
 30 เปอร์เซ็นต์ ดังข้อมูลตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14



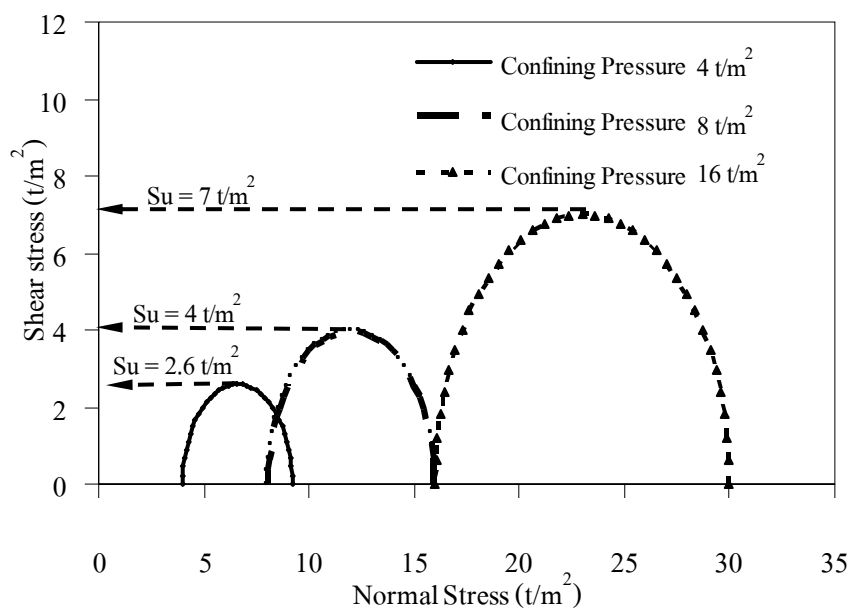
**รูปที่ 4.13** วงกลมมอร์ของผลการทดสอบ CIU Triaxial Test ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่  
 สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบ CIU Test กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมมีส่วนผสมของทรายขนาด  
กลาง

| ปริมาณ<br>ทราย<br>(%) | $\sigma'_3$<br>(t/m <sup>2</sup> ) | ณ จุดพิบัติ         |                           |                       |                           |  |                     |                |                                   |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|--|---------------------|----------------|-----------------------------------|
|                       |                                    | $\phi'$<br>(Degree) | C'<br>(t/m <sup>2</sup> ) | $\alpha'$<br>(Degree) | a'<br>(t/m <sup>2</sup> ) | E <sub>50</sub><br>(t/m <sup>2</sup> ) | $\epsilon_r$<br>(%) | A <sub>r</sub> | $\frac{\Delta\sigma_f}{\sigma_3}$ |
| 0                     | 4                                  | 30.25               | 1.20                      | 22.00                 | 1.30                      | 228                                    | 5.50                | 0.60           | 1.30                              |
| 0                     | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 410                                    | 8.00                | 0.92           | 0.98                              |
| 0                     | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 700                                    | 9.00                | 0.60           | 0.94                              |
| 10                    | 4                                  | 30.10               | 1.20                      | 24.00                 | 2.40                      | 231                                    | 4.50                | 0.64           | 1.33                              |
| 10                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 450                                    | 7.00                | 0.54           | 1.06                              |
| 10                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 733                                    | 8.00                | 0.48           | 0.94                              |
| 20                    | 4                                  | 33.69               | 0.75                      | 25.00                 | 1.60                      | 363                                    | 5.00                | 0.44           | 1.45                              |
| 20                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 563                                    | 7.50                | 0.65           | 1.09                              |
| 20                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 789                                    | 10.50               | 0.73           | 0.91                              |
| 30                    | 4                                  | 33.69               | 0.65                      | 29.00                 | 0.50                      | 372                                    | 8.50                | 0.42           | 1.40                              |
| 30                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 600                                    | 11.00               | 0.45           | 1.35                              |
| 30                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 800                                    | 13.00               | 0.50           | 1.13                              |
| 40                    | 4                                  | 36.87               | 0.50                      | 32.00                 | 0.40                      | 620                                    | 7.00                | 0.33           | 1.85                              |
| 40                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 750                                    | 8.00                | 0.29           | 1.90                              |
| 40                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 1044                                   | 9.00                | 0.28           | 1.70                              |

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบ CIU Test กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมมีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด

| ปริมาณ<br>ทราย<br>(%) | $\sigma'_3$<br>(t/m <sup>2</sup> ) | ณ จุดพิบัติ         |                           |                       |                           |  |                     |                |                                   |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|--|---------------------|----------------|-----------------------------------|
|                       |                                    | $\phi'$<br>(Degree) | C'<br>(t/m <sup>2</sup> ) | $\alpha'$<br>(Degree) | a'<br>(t/m <sup>2</sup> ) | E <sub>50</sub><br>(t/m <sup>2</sup> ) | $\epsilon_f$<br>(%) | A <sub>f</sub> | $\frac{\Delta\sigma_f}{\sigma_3}$ |
| 0                     | 4                                  | 30.25               | 1.20                      | 22.00                 | 1.30                      | 228                                    | 5.50                | 0.60           | 1.30                              |
| 0                     | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 410                                    | 8.00                | 0.92           | 0.98                              |
| 0                     | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 700                                    | 9.00                | 0.60           | 0.94                              |
| 10                    | 4                                  | 32.00               | 1.15                      | 23.00                 | 2.60                      | 270                                    | 8.00                | 0.57           | 1.25                              |
| 10                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 464                                    | 10.00               | 0.59           | 1.19                              |
| 10                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 557                                    | 12.00               | 0.70           | 0.99                              |
| 20                    | 4                                  | 32.00               | 1.00                      | 26.50                 | 1.50                      | 273                                    | 7.50                | 0.73           | 1.18                              |
| 20                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 420                                    | 9.50                | 0.69           | 1.10                              |
| 20                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 825                                    | 11.00               | 0.61           | 1.00                              |
| 30                    | 4                                  | 32.18               | 0.80                      | 26.50                 | 1.20                      | 564                                    | 6.00                | 0.65           | 1.33                              |
| 30                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 556                                    | 7.50                | 0.53           | 1.25                              |
| 30                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 923                                    | 10.00               | 0.62           | 1.04                              |
| 40                    | 4                                  | 32.73               | 0.70                      | 26.50                 | 1.30                      | 457                                    | 6.00                | 0.50           | 1.50                              |
| 40                    | 8                                  |                     |                           |                       |                           | 653                                    | 7.00                | 0.49           | 1.40                              |
| 40                    | 16                                 |                     |                           |                       |                           | 975                                    | 10.50               | 0.54           | 1.09                              |



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Stress กับค่า  $S_u$  ของดินเหนียวอ่อนสะกอม กรณีทดสอบ CIU Test

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า  $S_u$  จากผลการทดสอบ CIU Test ของตัวอย่างดินผสม

| Undrained Shear Strength ( $S_u$ , $t/m^2$ ) |                                |      |       |
|--|--------------------------------|------|-------|
| อัตราส่วนผสม                                 | Confining Pressure ( $t/m^2$ ) |      |       |
|  | 4.00                           | 8.00 | 16.00 |
| Control                                      | 2.60                           | 4.00 | 7.00  |
| 10 % MES                                     | 3.00                           | 4.35 | 7.30  |
| U20 % MES                                    | 2.85                           | 4.40 | 7.55  |
| 30 % MES                                     | 2.78                           | 5.40 | 9.35  |
| 40 % MES                                     | 3.65                           | 7.50 | 13.50 |
| 10 % FIS                                     | 3.00                           | 5.00 | 7.90  |
| 20 % FIS                                     | 2.40                           | 4.50 | 8.00  |
| 30 % FIS                                     | 2.60                           | 5.00 | 8.35  |
| 40 % FIS                                     | 2.90                           | 5.60 | 9.50  |

#### 4.4.3.1 ผลของทรายเป็นต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator Stress)

จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ CIU Test สามารถสรุปผลของปริมาณทรายเป็นต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบนของดินผสม พบว่าที่ค่าความดันอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 4 ตันต่อตารางเมตร ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะไม่แปรเปลี่ยนตามปริมาณทรายเป็นผสมที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการสร้างตัวอย่างได้ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งมากกว่าค่าความดันอัดรอบตัวอย่างเมื่อค่าความดันอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 8 และ 16 ตันต่อตารางเมตร ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะแปรเปลี่ยนตามปริมาณทรายเป็นผสม

จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidation Undrained Triaxial Test ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมและกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด ที่ค่าความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure) เท่ากับ 4, 8, และ 16 ตันต่อตารางเมตร พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าความเค้นเบี่ยงเบนเท่ากับ 5.20, 7.80, และ 15.00 ตันต่อตารางเมตร

กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางค่าความเค้นเบี่ยงเบนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการศึกษา พบว่าที่ปริมาณทรายเป็นร้อยละ 30 ค่าความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อปริมาณทรายเป็นที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 40 ค่าความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 42.00, 95.00, และ 81.00 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเทียบกับดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ไม่มีส่วนผสมของทราย

กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด พบว่าปริมาณทรายเป็นผสมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นเบี่ยงเบนน้อยมาก ที่ปริมาณทรายเป็นร้อยละ 40 ค่าความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 15.00, 43.00, และ 16.00 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเทียบกับดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ไม่มีส่วนผสมของทราย

จากการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณทรายเป็นและขนาดของเม็ดทรายเป็นต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบน ของดินเหนียวอ่อนสะกอม พบว่าปริมาณทรายเป็นที่เพิ่มขึ้นในดินเหนียวอ่อนสะกอมมีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนสะกอม โดยเฉพาะกรณีที่มีปริมาณทรายเป็นมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากกรณีที่มีปริมาณทรายเป็น

จาก 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ เม็ดทรายถูกห่อหุ้มด้วยดินเหนียว ผิวของเม็ดทรายไม่สัมผัสกัน ดินจึงรับน้ำหนักโดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเป็นหลัก ค่า Deviator Stress จึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อปริมาณทรายผสมมีมากขึ้น เม็ดทรายเริ่มมีผิวสัมผัสเชื่อมต่อกัน เมื่อมีน้ำหนักมากกดทับเม็ดทรายจะทำหน้าที่รับน้ำหนักรวมกับแรงยึดเหนี่ยวของดินเหนียว ทำให้ค่า Deviator Stress เพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจน และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงของดินเหนียวอ่อนสะกอมพบว่าที่ปริมาณทรายผสมดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของทรายมีผลต่อค่า Deviator Stress น้อยมาก แต่เมื่อปริมาณทรายผสมเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางจะมีค่า Deviator Stress สูงกว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด เนื่องจากกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลาง มีพื้นที่ผิวสัมผัสเม็ดต่อเม็ดของทรายมากกว่ากรณีของทรายเม็ดละเอียด เมื่อมีน้ำหนักมากกดทับจึงทำให้กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางมีค่า Deviator Stress ที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ธนากร นาเชียงใต้ (2541)

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณทรายที่ผสมกับ Normalized Deviator stress at failure ( $\Delta\sigma_f / \sigma'_3$ ) ของดินผสม พบว่าที่ปริมาณทรายผสมที่ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นน้อยมาก และจะเพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจนเมื่อปริมาณทรายผสมที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 จากรูปเห็นได้ว่า ที่ Confining pressure 4 t/m<sup>2</sup> ค่า ( $\Delta\sigma_f / \sigma'_3$ ) จะมีค่ามากที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อค่า Confining pressure มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎีแล้ว ค่า  $\Delta\sigma_f / \sigma'_3$  ของ NC clay ควรจะมีค่าเท่ากันทุกค่า Confining pressure ซึ่งอาจประเมินได้ว่าดินตัวอย่างที่ใช้ Confining pressure เท่ากับ 8 และ 16 ตันต่อตารางเมตร ยังไม่ Consolidate 100%

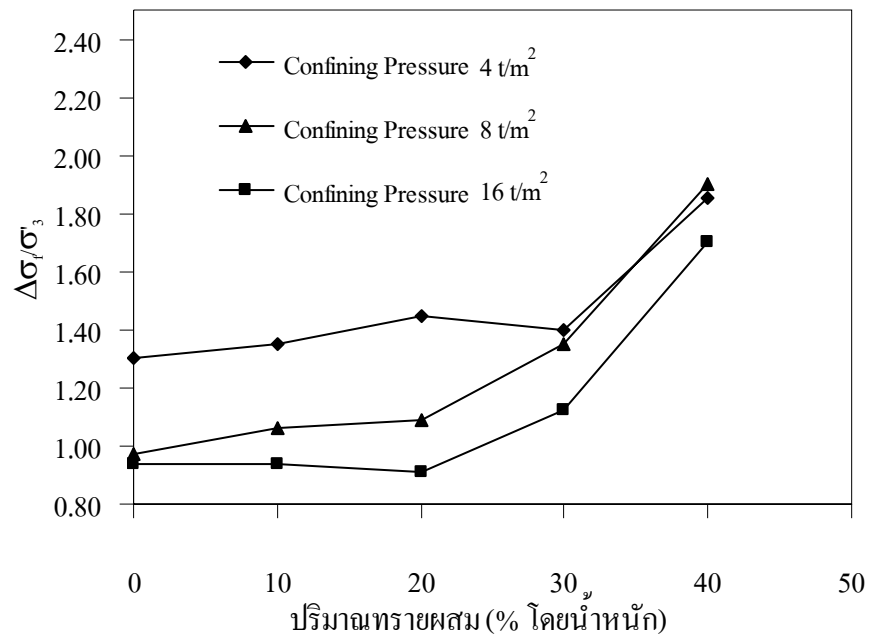
#### 4.4.3.2 อิทธิพลของปริมาณทรายต่อค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในมวลดิน (Excess Pore Water Pressure)

จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ CIU Test ของตัวอย่างที่สร้างแบบผสมเหลวใช้ความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure) เท่ากับ 4, 8, และ 16 ตันต่อตารางเมตร พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเท่ากับ 3.20, 5.70, และ 11.00 ตันต่อตารางเมตร

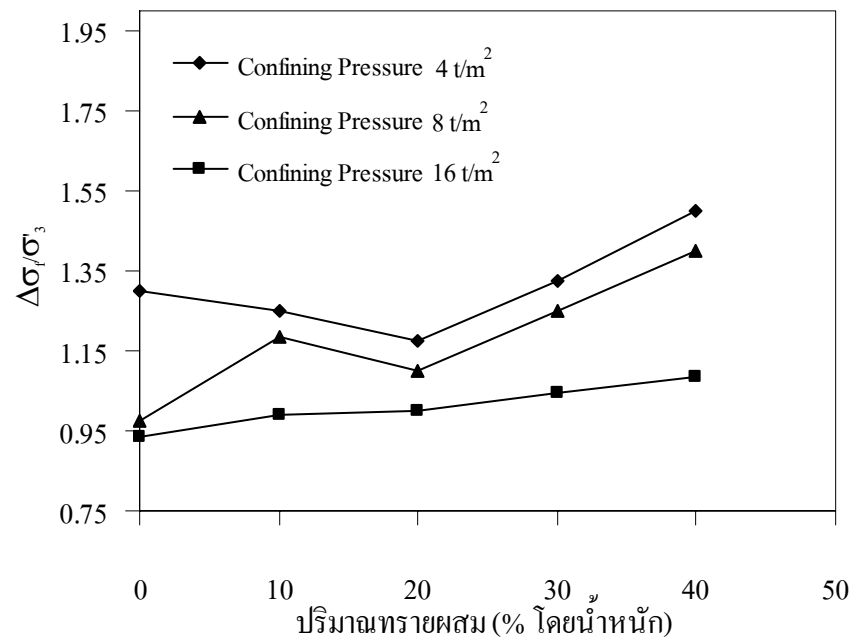
กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางร้อยละ 40 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเท่ากับ 2.45, 4.10, และ 8.00 ตันต่อตารางเมตร และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณทรายที่ผสม จากรูปที่ 4.19 พบว่าที่ปริมาณทรายผสมร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 40 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าลดลงเล็กน้อย

กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดเท่ากับร้อยละ 40 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าเท่ากับ 3.10, 4.90, และ 9.60 ตันต่อตารางเมตร ดังรูปที่ 4.20 จากผลการทดสอบ พบว่าค่าแรงดันน้ำมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้น สอดคล้องกับกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลาง เนื่องจากที่ปริมาณทรายผสมตั้งแต่ 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่ผสม การลดลงเล็กน้อยของค่าแรงดันน้ำส่วนเกินภายในมวลดินเกิดจากปริมาณทรายที่เข้าไปแทนที่ดินเหนียว ทำให้อัตราส่วนช่องว่างของมวลดินผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณทรายมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำภายในช่องว่างมีค่าลดลง แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) จึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดเม็ดทรายที่ผสมในดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ความดันอัดรอบตัวอย่างเดียวกัน จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดตั้งแต่ 0 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดันน้ำจะลดลงน้อยมากและค่าแรงดันน้ำของดินผสมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางจะมีค่าแรงดันน้ำน้อยกว่ากรณีของดินผสมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด แต่เมื่อปริมาณทรายผสมตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปค่าแรงดันน้ำของดินผสมจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และดินผสมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางจะมีค่าแรงดันน้ำลดลงสูงกว่ากรณีของดินผสมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน

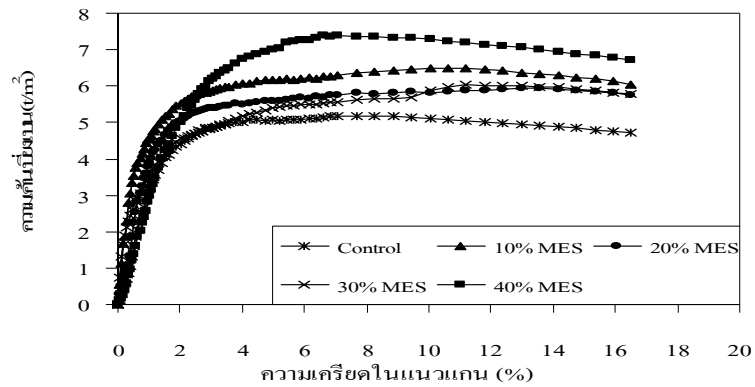


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับ Normalized Deviator stress at failure ( $\Delta\sigma_f / \sigma'_3$ ) กรณีของดินเหนียวสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง

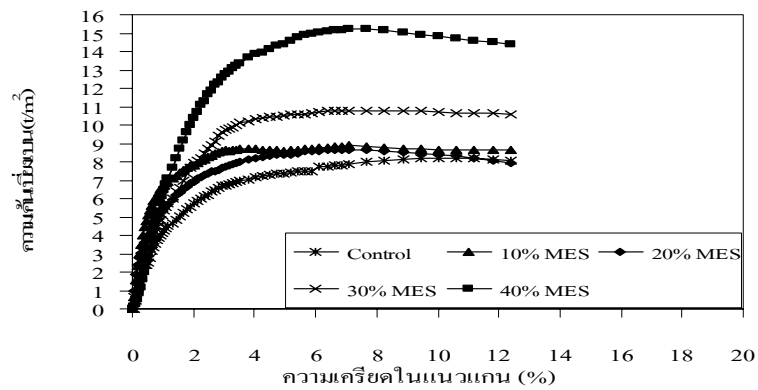


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายที่ผสมกับ Normalized Deviator stress at failure ( $\Delta\sigma_f / \sigma'_3$ ) กรณีของดินเหนียวสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด

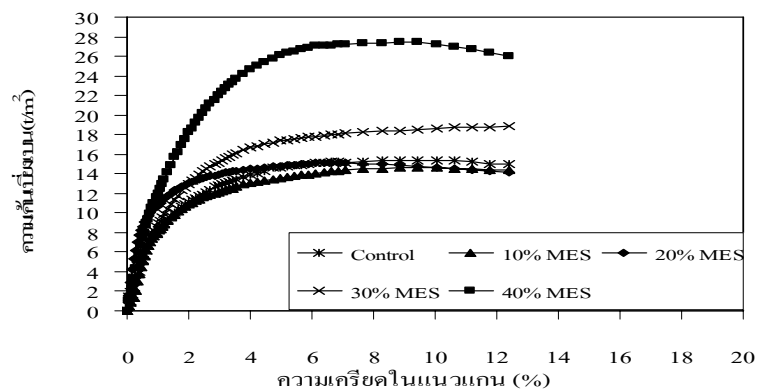




(ก)

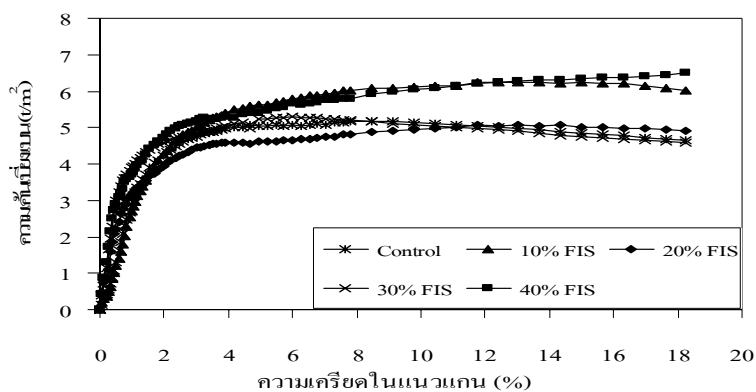


(ข)

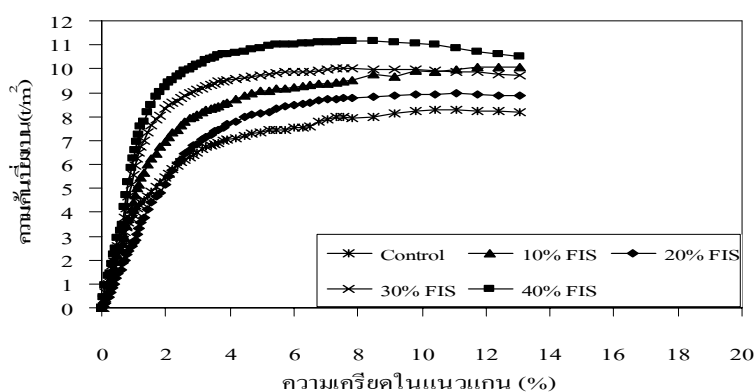


(ค)

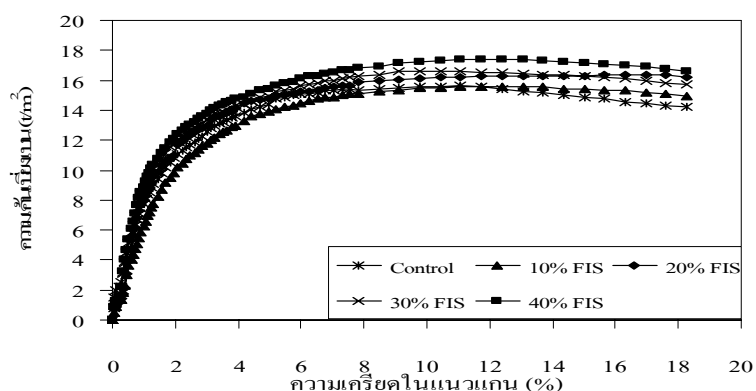
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวแกนกับ ความเค้นเบี่ยงเบน ของตัวอย่างดินผสมด้วย ทรายขนาดกลางที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว (ก) ความดันอัดตัวอย่างเท่ากับ 4 ตันต่อตารางเมตร, (ข) ความดันอัดตัวอย่างเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร, (ค) ความดันอัดตัวอย่างเท่ากับ 16 ตันต่อตารางเมตร



(ก)

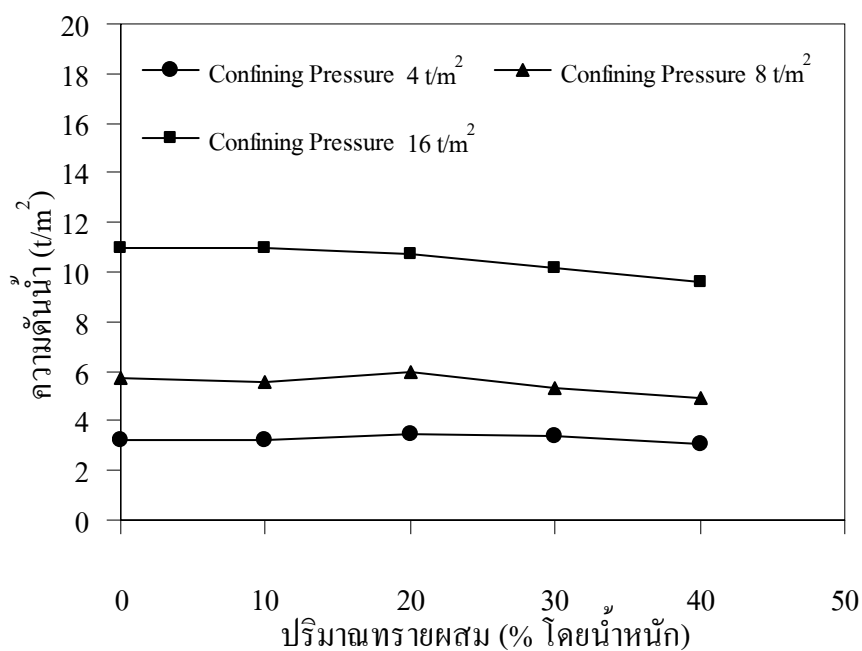


(ข)

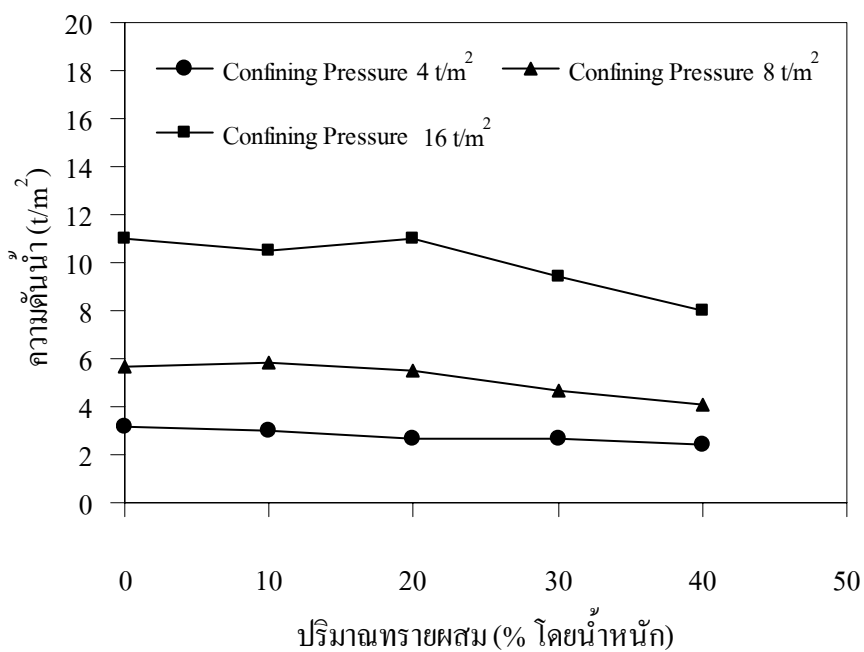


(ค)

**รูปที่ 4.18** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวแกน กับ ความชื้นเบี่ยงเบน ของตัวอย่างดินผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว (ก) ความดันอัดตัวอย่างเท่ากับ 4 ตันต่อตารางเมตร, (ข) ความดันอัดตัวอย่างเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร, (ค) ความดันอัดตัวอย่างเท่ากับ 16 ตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับความดันน้ำที่จุดพิบัติ ธรรมชาติของดินเหนียว  
สะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับความดันน้ำที่จุดพิบัติ ธรรมชาติของดินเหนียว  
สะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด

#### 4.4.3.3 อิทธิพลของปริมาณทรายต่อค่าความเครียดที่จุดพิบัติ (Strain at Failure)

ผลการทดสอบ CIU Test ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม และดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว ค่าความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure) เท่ากับ 4, 8, และ 16 ตันต่อตารางเมตร พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมไม่แสดงค่าการวิบัติออกมาอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนไม่แสดงค่าการพิบัติอย่างชัดเจนจึงไม่สามารถกำหนดค่าความเครียดที่จุดพิบัติได้

ผลการวิเคราะห์กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีอัตราส่วนผสมของทรายขนาดกลาง พบว่าที่ปริมาณทรายผสมที่ปริมาณร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 30 พฤติกรรมการพิบัติของดินผสมยังไม่แสดงจุดพิบัติออกมาอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับกับดินเหนียวอ่อนสะกอม 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่า 40 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบ พบว่าดินผสมเริ่มแสดงจุดการพิบัติออกมาให้เห็นชัดเจนมากขึ้น โดยมีค่าความเครียดที่จุดพิบัติ ( $\epsilon_f$ ) ในช่วง 5 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณทรายน้อยกว่าร้อยละ 40 ที่เข้าไปแทนที่ในดินเหนียวมีน้อยเกินไปทำให้เม็ดของทรายไม่เชื่อมต่อกัน ดินรับกำลังโดยค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเป็นหลัก พฤติกรรมของดินผสมจึงเป็นพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อน แต่เมื่อปริมาณทรายเข้าไปแทนในดินเหนียวเพิ่มมากขึ้น เม็ดทรายเริ่มเชื่อมต่อกันพฤติกรรมของดินเริ่มแสดงออกเหมือนทราย ทำให้ค่าจุดพิบัติของดินเห็นชัดเจนและมีค่าลดลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของทรายต่อค่าความเครียดที่จุดพิบัติ กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมมีอัตราส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด พบว่าที่ปริมาณทรายน้อยกว่า 10 ถึง 40 พฤติกรรมของดินไม่แสดงจุดพิบัติชัดเจน และมีพฤติกรรมเหมือนดินเหนียว จึงไม่สามารถกำหนดค่าความเครียดที่จุดพิบัติได้ แสดงให้เห็นว่าปริมาณทรายที่เข้าไปแทนที่ในดินเหนียวมีน้อยเกินไปทำให้เม็ดของทรายไม่เชื่อมต่อกัน ความเหนียวของดินผสมจึงไม่ลดลงเช่นเดียวกับกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลาง จึงส่งผลให้การรับกำลังของดินผสมนั้น รับกำลังโดยค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเป็นหลัก ค่าความเครียดที่จุดพิบัติจึงไม่ลดลง

#### 4.4.3.4 อิทธิพลของทรายต่อค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน (Friction Angle)

จากการวิเคราะห์ค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction Angle) ของดินเหนียวอ่อน สะกอมและกรณีที่ดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด จากการศึกษา พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่ามุมเสียดทานภายในแบบประสิทธิผลเท่ากับ 30.25 องศา เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณทรายที่ผสม พบว่าค่ามุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้น ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือที่ปริมาณทรายที่ผสมที่ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ค่ามุมเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังรูปที่ 4.21 และจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณทรายผสมที่ 40 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษา พบว่าค่ามุมเสียดทานรวมเพิ่มขึ้น 4.96 องศา กรณีผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด และ เพิ่มขึ้น 10.66 องศา กรณีผสมด้วยทรายขนาดกลาง ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลเพิ่มขึ้น 2.48 องศา กรณีผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด และเพิ่มขึ้น 6.62 องศา เมื่อตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลางที่ 40 เปอร์เซ็นต์

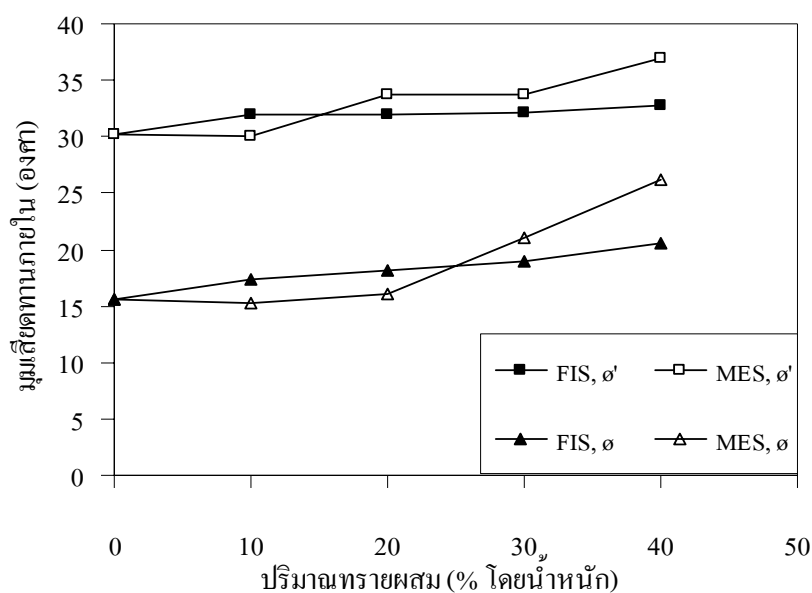
เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายต่อค่ามุมเสียดทาน ของตัวอย่างดินผสมที่มีปริมาณทรายเม็ดละเอียด และทรายขนาดกลาง จากรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมของทรายเดียวกันที่ปริมาณทรายผสมเท่ากับ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของเม็ดทรายส่งผลต่อค่ามุมเสียดทานน้อยมาก เมื่อปริมาณทรายที่ผสมที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ผลของทรายขนาดกลางจะให้ค่ามุมเสียดทานสูงกว่าทรายเม็ดละเอียดมาก เนื่องจากปริมาณทรายที่น้อยจะทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดทรายไม่สัมผัสกัน ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับเม็ดทรายโดนห่อหุ้มด้วยเนื้อดินเหนียว ทำให้ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเสียดทาน แต่เมื่อปริมาณทรายมีมากขึ้นทรายเข้าไปแทนที่ในดินเหนียวทำให้ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดทรายสัมผัสกันมากขึ้น ทรายขนาดกลางจะมีผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินที่มากกว่า จึงส่งผลให้ค่ามุมเสียดทานเพิ่มขึ้นมากกว่า ดินผสมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด

#### 4.4.3.5 อิทธิพลของทรายต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion)

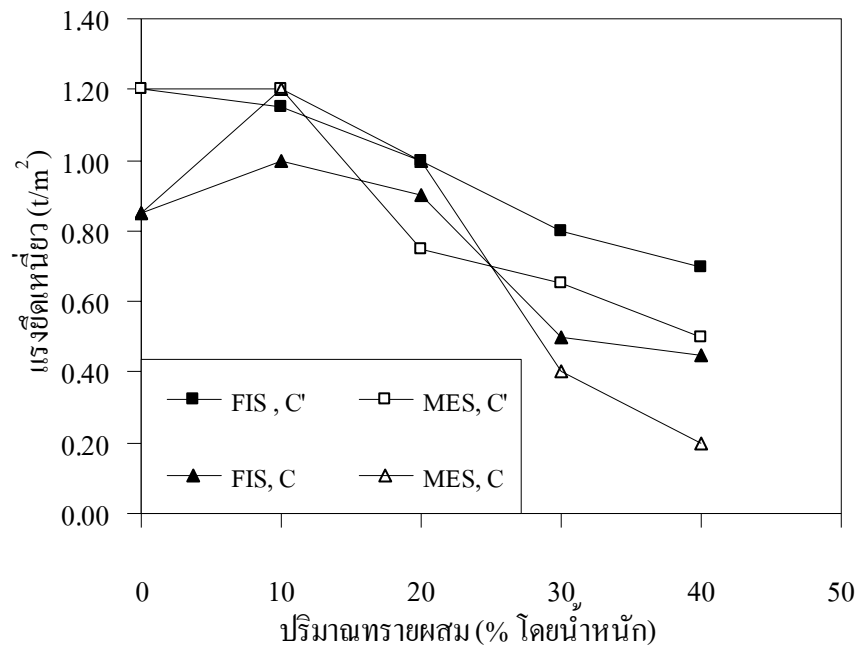
จากการวิเคราะห์ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินของดินเหนียวอ่อนสะกอมและกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 0, 10, 20, 30, และ 40 เปอร์เซ็นต์ จากกรณีทดสอบ CIU Test ใช้ค่าความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure,  $\sigma'_c$ ) ที่ 4, 8 และ 16 ตันต่อตารางเมตร จากการศึกษา พบว่าดินเหนียว

อ่อนสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวมี่ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินประสิทธิผลเท่ากับ 1.20 ตันต่อตารางเมตร กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด พบว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่าลดลงตามปริมาณทรายที่ผสมดังรูปที่ 4.22 เห็นได้ว่าอิทธิพลของปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวอ่อนสะกอมส่งผลให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินลดลงเห็นได้อย่างชัดเจน ตามปริมาณทรายที่ผสมที่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณทรายที่เข้าไปแทนที่ในดินเหนียวจะทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินลดลง

เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายต่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดและทรายขนาดกลาง พบว่าขนาดของเม็ดทรายส่งผลต่อค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน จากรูปที่ 4.22 เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายต่อค่ามูมเสียดทานระหว่างเม็ดดินที่ปริมาณทรายผสมเดียวกัน พบว่าทรายขนาดกลางส่งผลให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินลดลงสูงกว่ากรณีที่ดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด เห็นได้อย่างชัดเจน และมีแนวโน้มเหมือนกันทุกอัตราส่วนผสม



**รูปที่ 4.21** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับมูมเสียดทานภายใน ของตัวอย่างดินผสมกรณีผสมด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายกับแรงยึดเหนี่ยว กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลางและกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด

#### 4.4.3.6 อิทธิพลของทรายต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, $E_{50}$ )

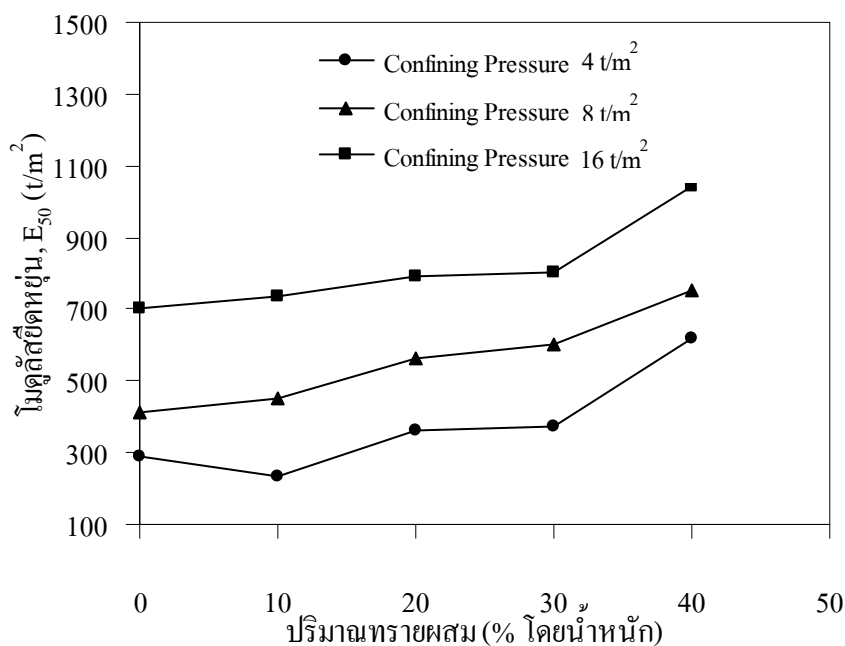
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยวิธีแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test ที่ค่าความดันอ้อมรอบตัวอย่าง (Confining Pressure) เท่ากับ 4, 8 และ 16 ตันต่อตารางเมตร พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, ( $E_{50}$ ) เท่ากับ 289, 410, และ 700 ตันต่อตารางเมตรตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณทรายต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมของทรายเป็นร้อยละ 10, 20, 30, และ 40 ที่ค่าความดันอ้อมรอบตัวอย่างเท่ากับ 4 ตันต่อตารางเมตร พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 270, 273, 573, และ 475 ตันต่อตารางเมตร ที่ค่าความดันอ้อมรอบตัวอย่างเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 463, 420, 555, และ 653 ตันต่อตารางเมตร ที่ค่าความดันอ้อมรอบตัวอย่างเท่ากับ 16 ตันต่อตารางเมตร มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 557, 825, 922, และ 975 ตันต่อตารางเมตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ การที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยนั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณทรายเม็ดละเอียดที่ผสมในดินเหนียวที่อัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 40 ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินน้อย

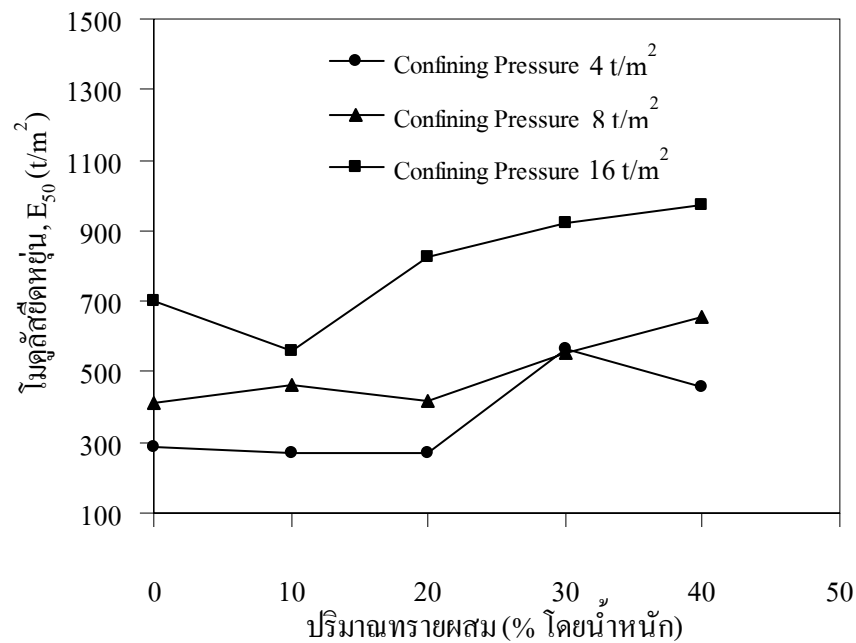
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณทรายต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น กรณีดินเหนียวอ่อนระกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางที่อัตราส่วนผสมของทรายร้อยละ 10, 20, 30, และ 40 ที่ค่าความดันอัตรอบตัวอย่างเท่ากับ 4 ตันต่อตารางเมตร พบว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 231, 264, 372, และ 620 ตันต่อตารางเมตร ที่ค่าความดันอัตรอบตัวอย่างเท่ากับ 8 ตันต่อตารางเมตร มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 450, 563, 600, และ 570 ตันต่อตารางเมตร ที่ค่าความดันอัตรอบตัวอย่างเท่ากับ 16 ตันต่อตารางเมตร มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 733, 789, 800, และ 1044 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่ผสมการที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณทรายขนาดกลางที่ผสมในดินเหนียวทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายต่อการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่าขนาดของเม็ดทรายส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินเหนียวอ่อนระกอมน้อยมากเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่าน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่าขนาดของเม็ดทรายไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีค่าน้อยกว่าร้อยละ

40



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับปริมาณทรายผสม กรณีของดินเหนียวระกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง



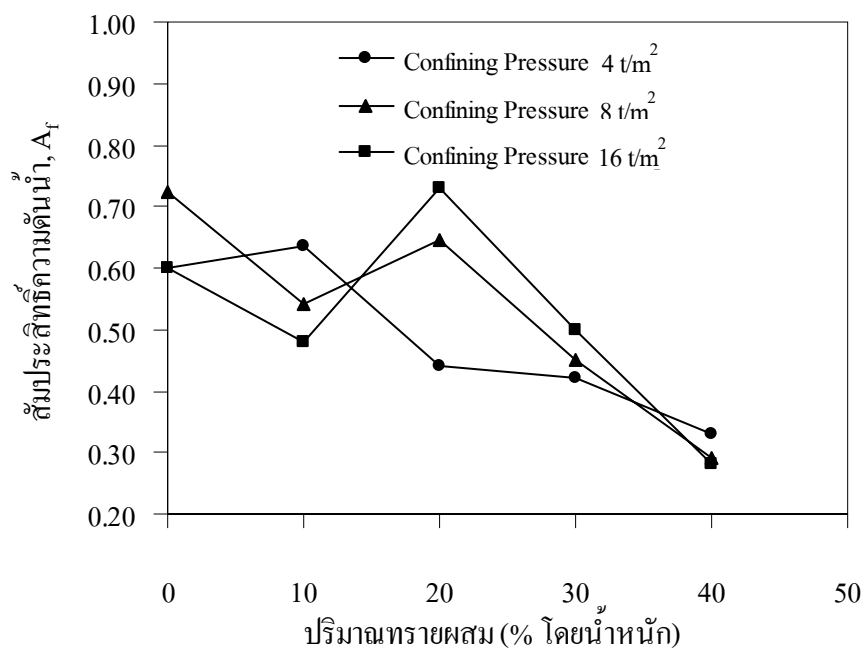


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับปริมาณทรายเป็นผลรวม กรณีของดินเหนียวอ่อน  
สะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด

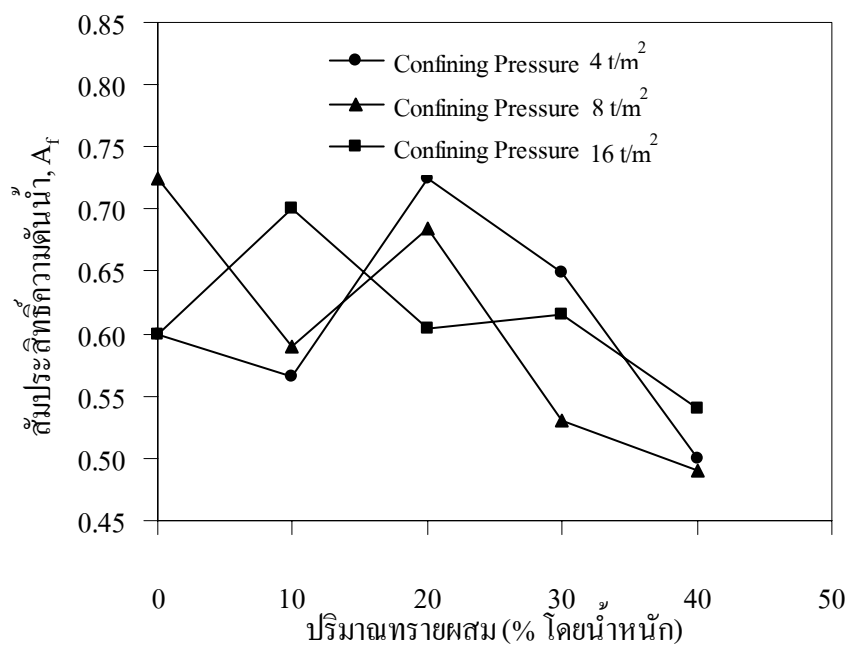
#### 4.4.3.7 อิทธิพลของปริมาณทรายเป็นผลรวมต่อค่าพารามิเตอร์ เอ (A parameter)

จากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial, CIU Test ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอม และกรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมด้วยทรายขนาดกลาง และทรายเม็ดละเอียด ที่ความดันล้อมรอบตัวอย่างเท่ากับ 4, 8 และ 16 ตันต่อตารางเมตร พบว่าดินเหนียวอ่อนสะกอมมีค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ, ( $A_p$ ) เท่ากับ 0.60, 0.73, และ 0.60 กรณีที่ดินเหนียวอ่อนสะกอมมีอัตราส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 40 มีค่า  $A_p$  ที่จุดพิบัติ เท่ากับ 0.50, 0.49, และ 0.54 และกรณีที่ดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีอัตราส่วนผสมของทรายขนาดกลางร้อยละ 40 ค่า  $A_p$  ที่จุดพิบัติมีค่าเท่ากับ 0.33, 0.29, และ 0.28 จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณทรายเป็นผลรวมมากขึ้นส่งผลให้ค่า  $A_p$  ที่จุดพิบัติมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณทรายที่มากขึ้นส่งผลให้ดินมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และอัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำภายในช่องว่างมีค่าลดลง และทำให้ค่า Deviator stress มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ ( $A_p$ ) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณทรายเป็นผลรวมมีมากขึ้น

จากผลการทดสอบดึงข้อมูลจากรูปที่ 4.25 เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณทรายขนาดกลางต่อค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ ที่ความดันอัดรอบตัวอย่าง (Confining Pressure) เดียวกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณทรายมีมากขึ้นและจะมีค่าเป็นบวก จากผลการทดสอบสามารถแบ่งพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ เมื่อปริมาณทรายที่ผสมที่ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเครียดตามแนวแกนมีมากขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของดินเหนียวและในส่วนที่อัตราส่วนผสมของทรายน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะมีค่าสูงสุดที่ค่าความเครียดในแนวแกนอยู่ในช่วง 2-4 เปอร์เซ็นต์ และค่อยๆ ลดลงเมื่อค่าปริมาณความเครียดในแนวแกนมีค่ามากขึ้น ซึ่งลักษณะพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าดินตัวอย่างเริ่มมีพฤติกรรมเป็นดินเหนียวประเภท OCR หรือประเภททรายอัดแน่น และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ ที่อัตราส่วนผสมของทรายน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความดันอัดรอบตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณทรายมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ พฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ ของตัวอย่างดินผสมจะลดลง เมื่อความดันอัดตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของทรายออกมาให้เห็นแต่ไม่ชัดเจนมากเท่าที่ควร และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของเม็ดทรายต่อค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ พบว่าที่ปริมาณทรายน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของเม็ดทรายไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ แต่เมื่อปริมาณของทรายมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ กรณีดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมทรายขนาดกลางจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ ลดลงสูงกว่ากรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติกับปริมาณทรายที่ผสมโดยน้ำหนักกรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายขนาดกลาง

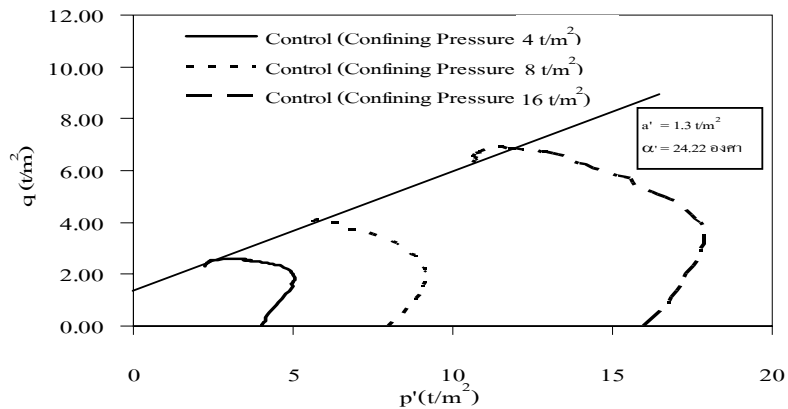


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความดันน้ำที่จุดพิบัติ กับปริมาณทรายผสมโดยน้ำหนัก กรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด

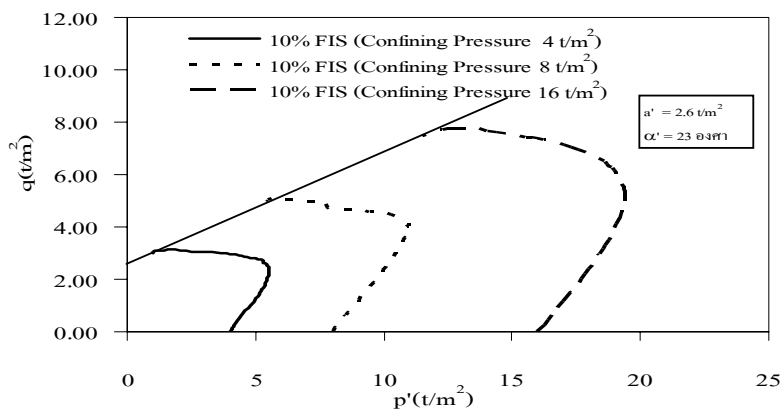
#### 4.4.3.8 อิทธิพลของปริมาณทรายต่อทางเดินประสิทธิผล

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณทรายต่อทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผลของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว จากการศึกษาพบว่าที่ค่าความดันอัดรอบตัวอย่างเท่ากับ 4 ตันต่อตารางเมตร ดินตัวอย่างแสดงพฤติกรรมของ NC Clay ออกมาอย่างชัดเจน เนื่องจากผลของตัวอย่างดินเหนียวต้องใช้เวลาในการจัดเรียงตัว ซึ่งต้องใช้เวลาานาน และเมื่อเพิ่มค่าความดันอัดตัวอย่างเป็น 8 และ 16 ตันต่อตารางเมตร ทำให้ OCR ของดินลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผลรายละเอียดรูปที่ 4.27 (ก) และกรณีที่ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดในปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ พฤติกรรมของทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Parts) ดังรูปที่ 4.27 (จ) ยังคงไม่แสดงผลของทรายออกมา เนื่องจากที่ระยะเวลา 4 วันตัวอย่างดินอาจไม่ถึงสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ ทำให้ค่า  $P_c$  มีค่าน้อยตัวอย่างดินจึงแสดงผลเป็น NC Clay

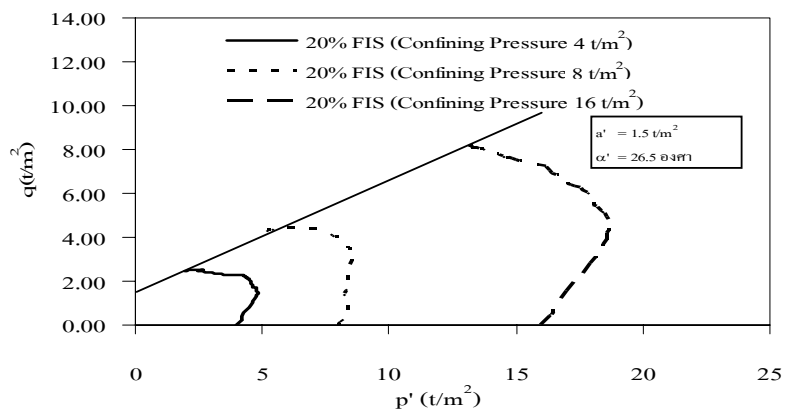
กรณีตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลาง พบว่าปริมาณทรายที่ผสมเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ รายละเอียดรูปที่ 4.28 (ค) ดินผสมเริ่มแสดงพฤติกรรมของทรายออกมาอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณทรายที่มากขึ้น ที่ค่าความดันอัดตัวอย่างเท่ากับ 4 และ 8 ตันต่อตารางเมตร พฤติกรรมของทางเดินหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Parts) ของดินตัวอย่างเป็นแบบ OC Clay ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า  $\alpha'$  สูงขึ้นเมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงกรณีที่ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด และกรณีที่ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน พบว่าดินตัวอย่างที่มีส่วนผสมทรายขนาดกลางส่งผลให้ค่ามุมลาดประสิทธิผลสูงกว่ากรณีของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน



(ก)

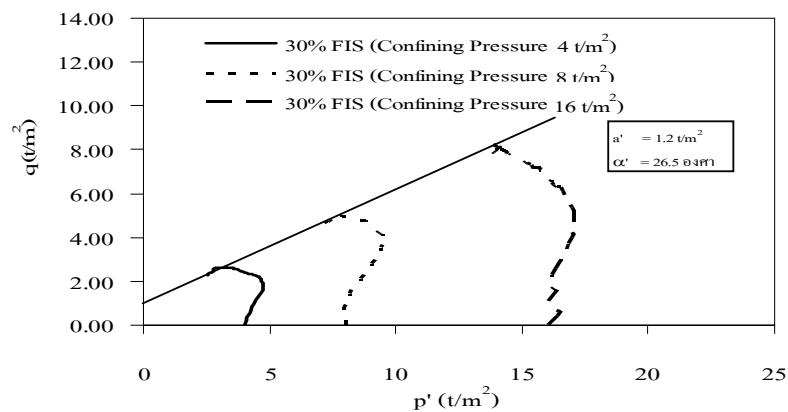


(ข)

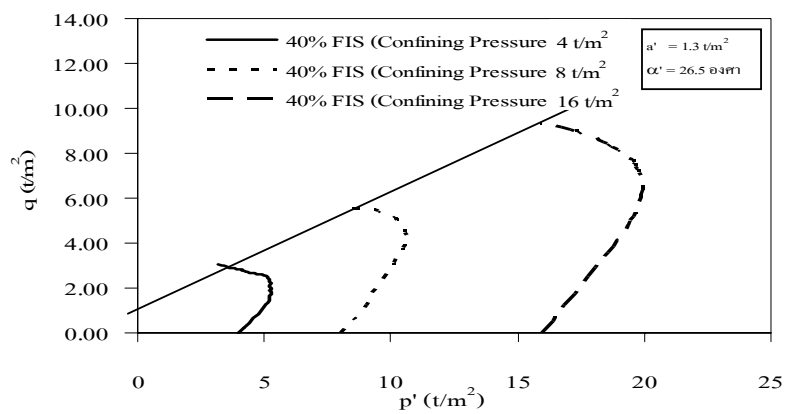


(ค)

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ q ของตัวอย่างดินผสม (ก) ดินเหนียวสะกอม 100%, (ข) ปริมาณทรายผสมเท่ากับ 10%, (ค) ปริมาณทรายผสมเท่ากับ 20%

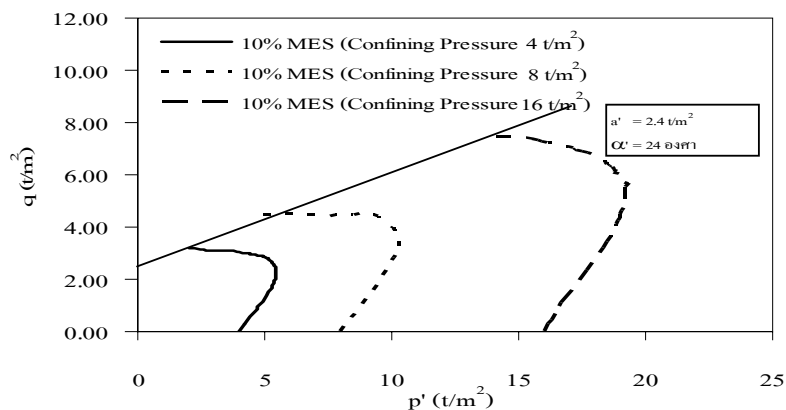


(ง)

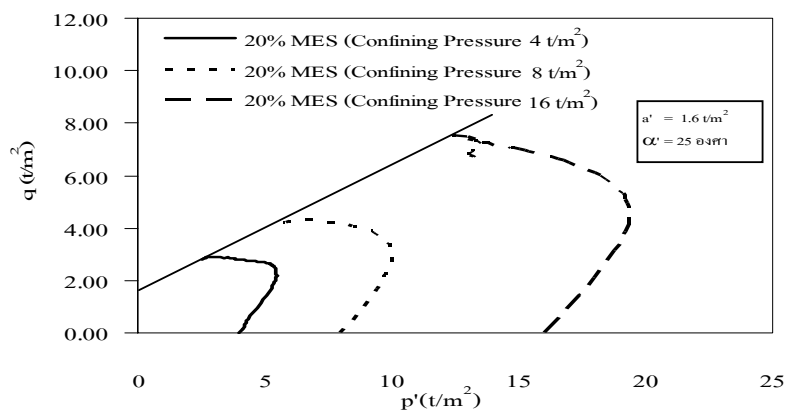


(จ)

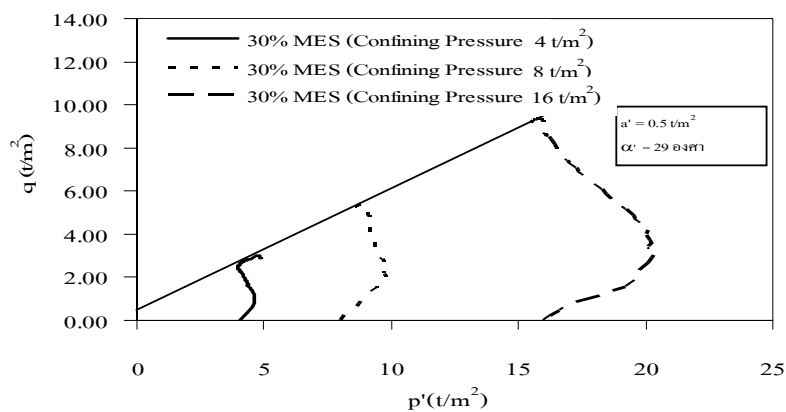
รูปที่ 4.27 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P$  กับ  $q$  ของตัวอย่างดินผสม (ง) ปริมาณทรายละเอียด 30 %, (จ) ปริมาณทรายละเอียด 40 %



(ก)

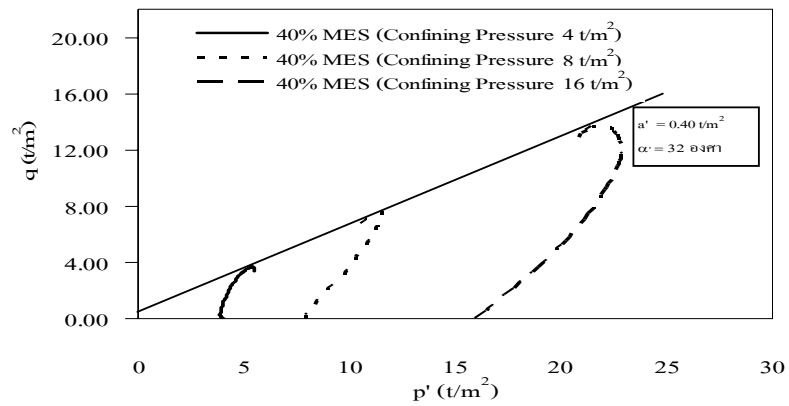


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P$  กับ  $q$  ของตัวอย่างดินผสม (ก) ปริมาณทรายขนาดกลาง 10%,  
(ข) ปริมาณทรายขนาดกลาง 20%, (ค) ปริมาณทรายขนาดกลาง 30%



(จ)

รูปที่ 4.28 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ q ของตัวอย่างดินผสม (จ) ปริมาณทรายขนาดกลาง 40%



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาทดลองผลของทรายต่อสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเติมทรายลงไปดินเหนียวอ่อนสะกอมจะทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น แต่ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่าลดลง
- 2) ปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 30 ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นน้อยมาก และจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณทรายเท่ากับร้อยละ 40
- 3) ทรายขนาดกลางจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้นสูงกว่ากรณีที่ดินเหนียวมีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด ในกรณีที่ปริมาณทรายเท่ากันโดยน้ำหนัก
- 4) ปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวอ่อนส่งผลให้ค่าการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้นจะทำให้อัตราส่วนช่องว่างลดลง และค่าดัชนีการอัดตัวที่ลดลงทำให้ค่าการทรุดตัวลดลง และขนาดของทรายขนาดกลางที่ผสมในดินเหนียวอ่อนจะทำให้ค่าการทรุดตัวน้อยกว่าดินเหนียวอ่อนที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียด
- 5) ปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวอ่อนที่ปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 70 จะไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณทรายที่ผสมปริมาณร้อยละ 80
- 6) ปริมาณทรายที่ผสมน้อยกว่าร้อยละ 70 ขนาดของเม็ดทรายไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน แต่เมื่อปริมาณทรายเท่ากับร้อยละ 80 ทรายขนาดกลางที่ผสมในดินเหนียวจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงกว่ากรณีของดินเหนียวมีส่วนผสมของทรายละเอียด
- 7) ทรายสามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพของดินได้ แต่ต้องมีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป และขนาดของเม็ดทรายขนาดกลางขึ้นไปจะให้ผลดีกว่าทรายเม็ดละเอียด

8) คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอมที่ผสมด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียด โดยวิธีการผสมเหลว เมื่อเทียบกับดินเหนียวอ่อนสะกอม 100 เปอร์เซ็นต์แสดงรายละเอียดตารางที่ 5.1

**ตารางที่ 5.1** แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินผสมเมื่อเทียบกับค่าของดินเหนียวอ่อนสะกอม 100 เปอร์เซ็นต์

| ปริมาณทราย<br>ที่ผสม | เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เมื่อเทียบกับค่าของดิน<br>เหนียวอ่อนสะกอม 100 เปอร์เซ็นต์ (Control) |                           |                    |                     |  |                |                |                             |
|----------------------|---|---------------------------|--------------------|---------------------|--|----------------|----------------|-----------------------------|
|                      | C<br>(t/m <sup>2</sup> )  | C'<br>(t/m <sup>2</sup> ) | $\phi$<br>(Degree) | $\phi'$<br>(Degree) | E <sub>50</sub><br>(t/m <sup>2</sup> ) | C <sub>c</sub> | C <sub>s</sub> | k<br>(cm/sec)               |
| <b>ค่า Control</b>   | <b>0.85</b>   | <b>1.20</b>               | <b>15.60</b>       | <b>30.25</b>        | <b>228-700</b>                         | <b>0.403</b>   | <b>0.085</b>   | <b>2.99×10<sup>-8</sup></b> |
| 10% FIS              | 18  | -4                        | 11                 | 6                   | 18-20                                  | -4             | -17            | 12                          |
| 20% FIS              | 6   | -17                       | 17                 | 6                   | 17-19                                  | -8             | -29            | 24                          |
| 30% FIS              | -41   | -33                       | 22                 | 6                   | 32-147                                 | -21            | -40            | 8                           |
| 40% FIS              | -47   | -42                       | 32                 | 8                   | 39-100                                 | -29            | -45            | 3                           |
| 50% FIS              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 1                           |
| 60% FIS              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 27                          |
| 70% FIS              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 128                         |
| 80% FIS              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 9967                        |
| 10% MES              | 41  | 0                         | 0                  | 0                   | 1-5                                    | -17            | -24            | 24                          |
| 20% MES              | 18  | -37                       | 3                  | 11                  | 13-40                                  | -25            | -38            | 33                          |
| 30% MES              | -5  | -46                       | 35                 | 11                  | 14-61                                  | -29            | -47            | 30                          |
| 40% MES              | -8  | -58                       | 68                 | 12                  | 49-172                                 | -33            | -59            | 9                           |
| 50% MES              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 5                           |
| 60% MES              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 52                          |
| 70% MES              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 258                         |
| 80% MES              | -   | -                         | -                  | -                   | -                                      | -              | -              | 29732                       |

หมายเหตุ : เครื่องหมายเป็นลบ (-) หมายถึง ไม่มีการศึกษาวิจัย  
ตัวเลขติดลบ หมายถึง ค่าลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การศึกษาผลของทรายต่อค่าสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนสะกอมในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาทดสอบเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการวิเคราะห์เพียงด้านเดียว ซึ่งผลที่ได้อาจไม่ตรงกับพฤติกรรมจริงเท่าที่ควร จึงควรมีการศึกษาตรวจวัดในงานสนาม หรือแบบจำลองเป็นตัวเปรียบเทียบกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ แล้วหาค่าเปรียบเทียบปรับแก้ให้ค่าที่ได้จากการทดสอบให้สอดคล้องกับค่างานจริงในสนาม

2) จากการศึกษาวิจัยพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้นสูงมากในการศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาที่ปริมาณทรายตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปและควรศึกษาถึงขนาดละเอียด (Gradation) ของทรายที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน รวมถึงศึกษาถึงจุดคุ้มทุนในกรณีเลือกใช้ทรายในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน

3) เนื่องจากที่ปริมาณทรายน้อยกว่าร้อยละ 70 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้นน้อยมากและค่ากำลังรับน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น ในการศึกษาครั้งต่อไปน่าจะทำการศึกษาปริมาณทรายต่อดินเหนียวที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึม

4) จากการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลวของดินตัวอย่างหนา 25 เซนติเมตรการใช้แรงกดเท่ากับ 8 ดันต่อตารางเมตร คงค้างน้ำหนัก 4 วันตัวอย่างดินยังไม่ Consolidated 100 เปอร์เซ็นต์ ( $U < 100$ ) สังเกตได้จากผลการทดสอบ ในการศึกษาครั้งต่อไปจำเป็นต้องศึกษาถึงเวลาที่ตัวอย่างดินตัวอย่าง Consolidated 100 เปอร์เซ็นต์

5) การศึกษาผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนโดยวิธีการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลว ในการเตรียมตัวอย่างจะต้องควบคุมปริมาณน้ำให้เหมาะสมเพื่อให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากเมื่อปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้เม็ดทรายและดินเหนียวแยกตัวออกจากกัน แต่เมื่อปริมาณน้ำที่ผสมมีน้อยเกินไปจะทำให้เนื้อดินผสมไม่สม่ำเสมอ ในการเตรียมตัวอย่างนี้ผู้วิจัยใช้ปริมาณน้ำที่ซัดพิกัดเหลวบวกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดิน จึงได้ก้อนตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน

## บรรณานุกรม

- กวีวงษ์ ฤสุวรรณ (2530). การประเมินค่าทางสถิติสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- จิตชัย อนันต์เศรษฐ์. (2550). การหาค่าตัวแปรกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่จากการทดสอบแรงอัดสามแกนโดยใช้ดินตัวอย่างเดียว. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ ลา구나. จังหวัดพิษณุโลก
- ชัยรัตน์ ชีรวัดนสุข, พาณิชย์ วุฒิปุณย์ และ เชิดชนินทร์ หมดมลทิน. (2550). อิทธิพลของทรายแป็งต่อกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ ลา구나. จังหวัดพิษณุโลก
- เชิดชนินทร์ หมดมลทิน และ คณะ. (2550). อิทธิพลของสัดส่วนดินเหนียวต่อขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ ลา구나. จังหวัดพิษณุโลก
- ชนากร นาเชียงใหม่. (2541). พฤติกรรมของแรงดันน้ำในดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ชนิด เกลิมยานนท์ และ สุรพล อารีย์กุล. (2548). ทรายผสมเบนโทไนท์บดอัดสำหรับชั้นกันซึมในสถานที่เก็บน้ำ. วารสารสงขลานครินทร์ วทท. 27 (2) หน้า 313-323.
- นรินทร์ ศรีดอกไม้ และ สยาม แกมขุนทด. (2550). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวด้วยคอนกรีตใช้แล้ว. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12. 2-4 พฤษภาคม 2550. โรงแรมอมรินทร์ ลา구나. จังหวัดพิษณุโลก
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. (2520). ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. ข้อมูล วสท. 1001-20. กรุงเทพฯ.
- ศรัญยุทธ์ สุธรรมนาทพงษ์ (2552). คุณสมบัติและพฤติกรรมทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพัฒน์ แสวงเดช (2530). การทรุดตัวของชั้นดินอ่อนในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาพร คูวิจิตรจาร์. ปฏิพิภคศาสตร์. กรุงเทพฯ. ไลบรารี นายพัลลขซ่ง. 2542

สถาพร คูวิจิตรจาร์. การทดสอบปฏิพิภคศาสตร์. กรุงเทพฯ. ไลบรารี นายพัลลขซ่ง. 2542

อภิชัย จุฑาศิริวงศ. (2546). สภาพธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

American Society for Testing and Materials (ASTM) (1989) Annual Book of ASTM Standards. Section 4, Construction, Vol. 04.08, Soil and Rock Building Stone, Geotextiles, Philadelphia, Pa.

Designation D 421 : Standard Practice for Dry Preparation of Soil Sample for Particle Size. Analysis and Determination of Soil Contents.

Designation D 854 : Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer

Designation D 2435 : Standard Test Method for Consolidation Undrained Triaxial Compression Test Cohesive Soil

Designation D 4318 : Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

Designation D 2435 : Standard Test Method for Ome -Dimensional Consolidation Properties of Soils.

Designation D 2435 : Standard Test Method for Consolidation Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive soil.

Adikari, G.S.N. (1977). Statistical Evaluation of Strength and Deformation Characteristic of Bangkok Clay M. Eng Thesis, AIT

Azzouz, A.S. (1976). Regression Analysis of Soil Compressibility. Soil and Foundation 16 (2) pp.19-29

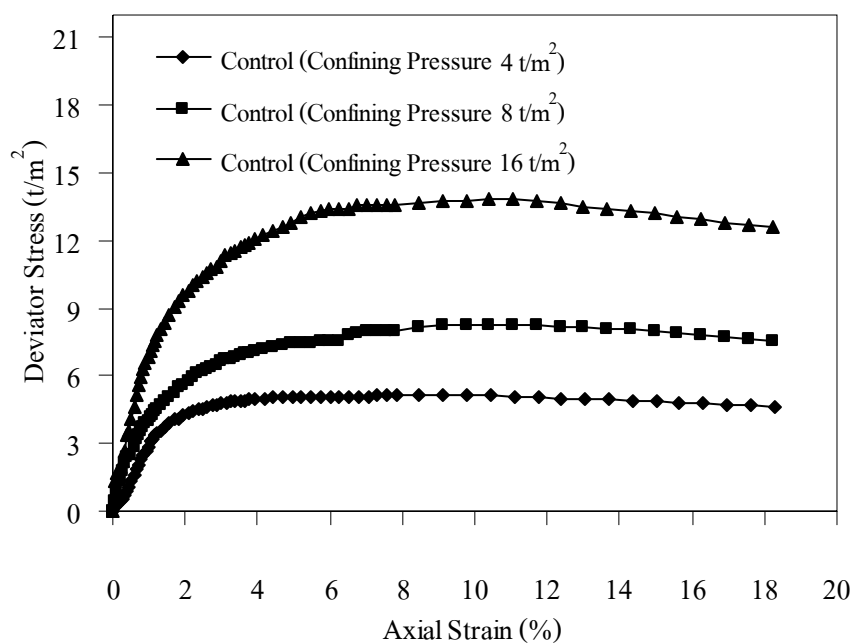
Bassam Z Mahasnes and Reyad A. Shawabkes. (2005). Compressive Strength and Permeability of Sand – Cement – Clay Composite and Application for Heavy Metals Stabilization Department of Civil Engineering, Mutas University, Al-Karak, 61710, Jordan, 2005

Berland, J.B. (1985). Compressibility and Shear Strength of Natural Clay. Geotechnique,40

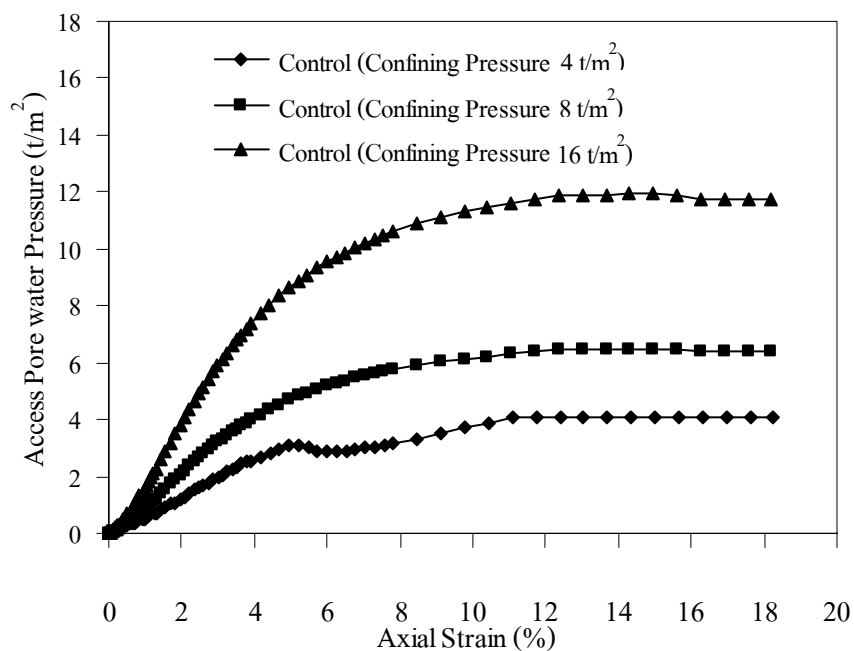
Bishop, A.W. and Hankel, D.C. (1976). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. The English Language Book Society and Edward Arnold (Publishers) Ltd. Lodon.

ภาคผนวก ก.

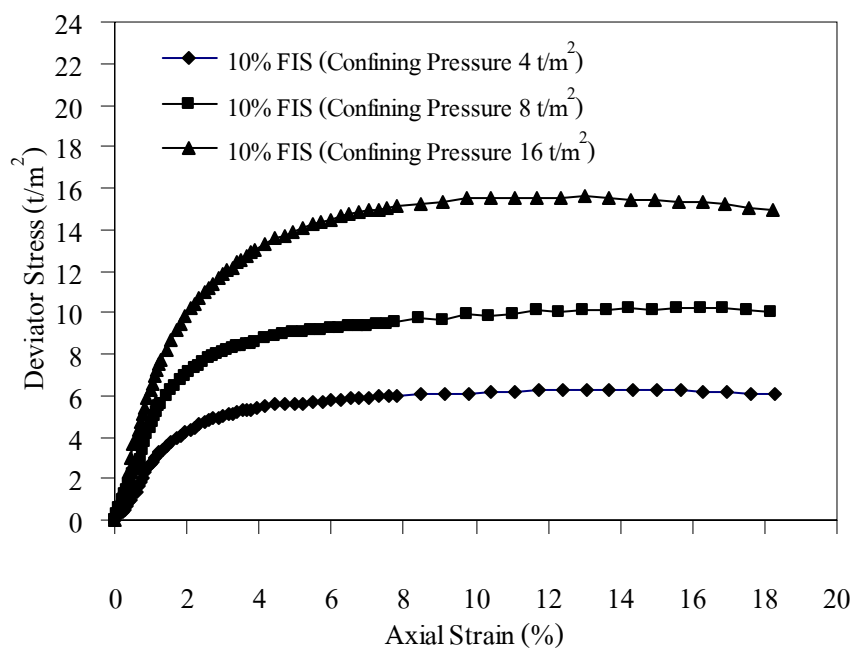
ข้อมูลการทดสอบ แรงอัดสามแกนตัวอย่างดินเหนียวสะกอมและกรณีของดินเหนียวสะกอมที่ผสม  
ด้วยทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



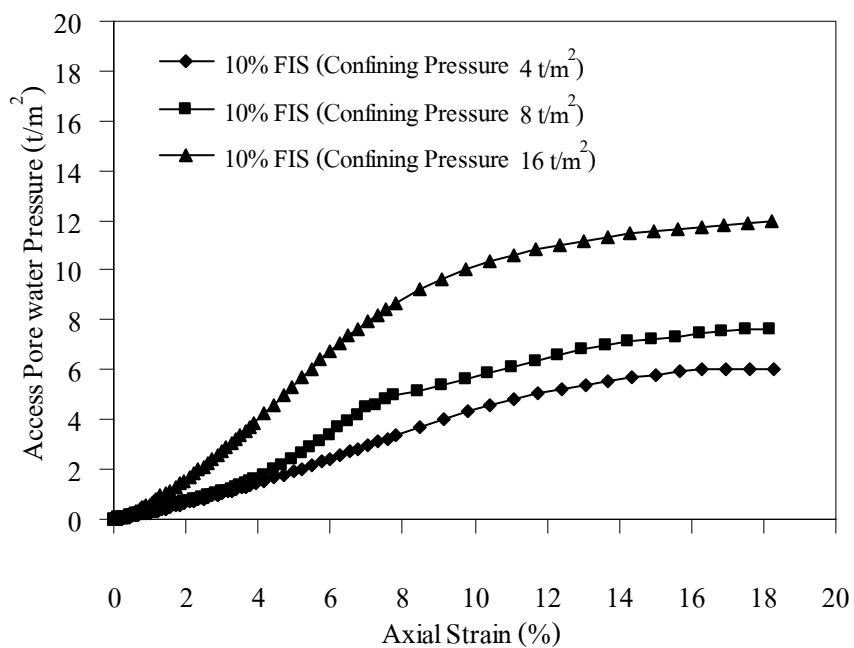
รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียว 100 %



รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียว 100 %

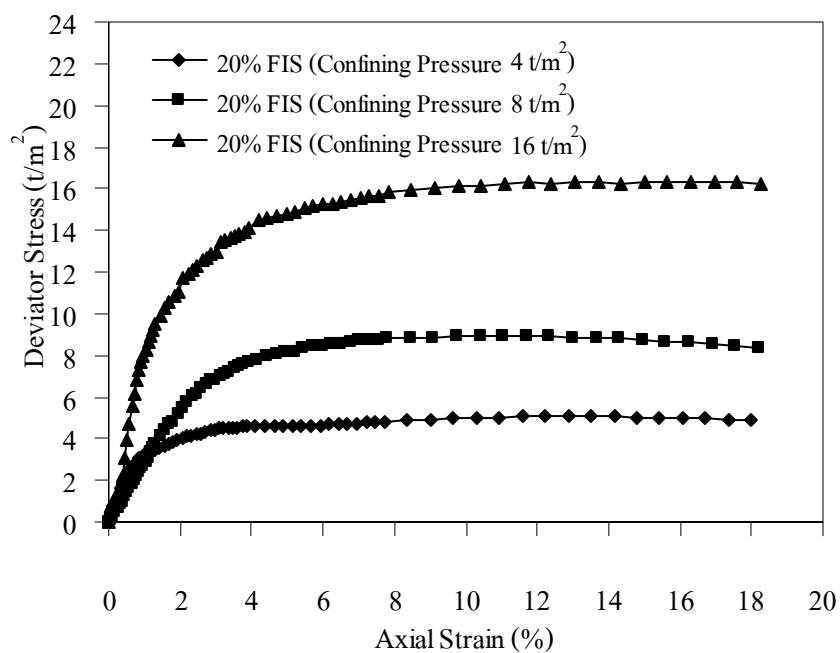


รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 10%

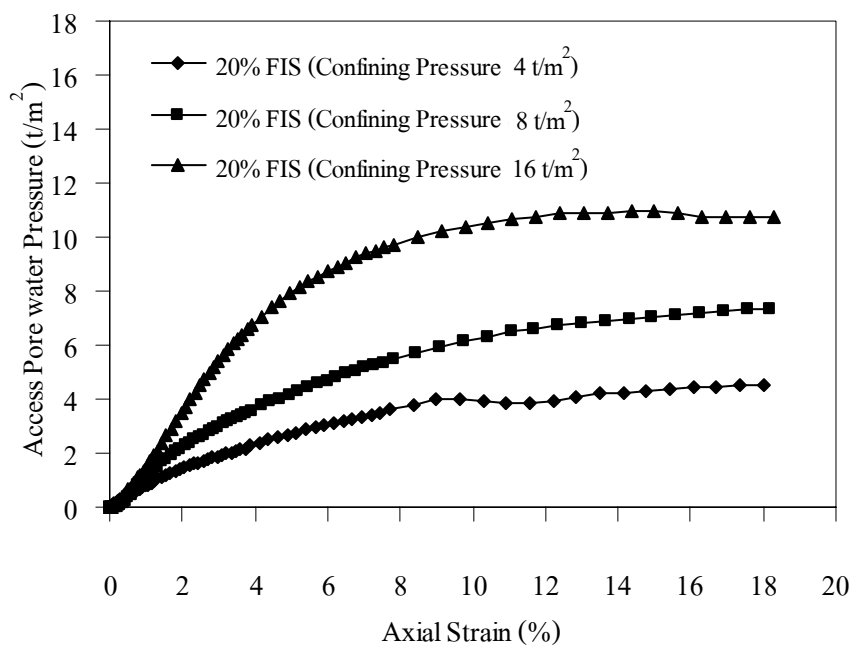


รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 10%

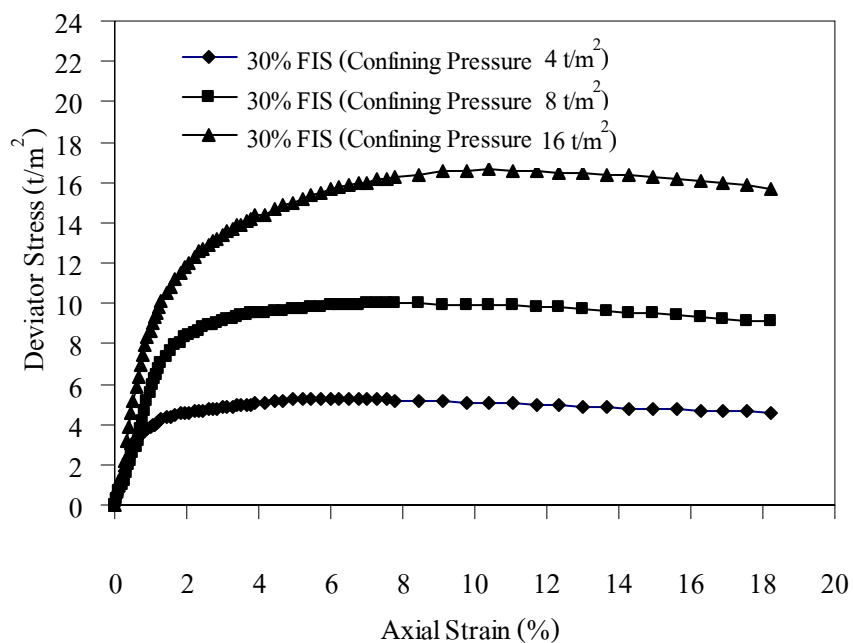




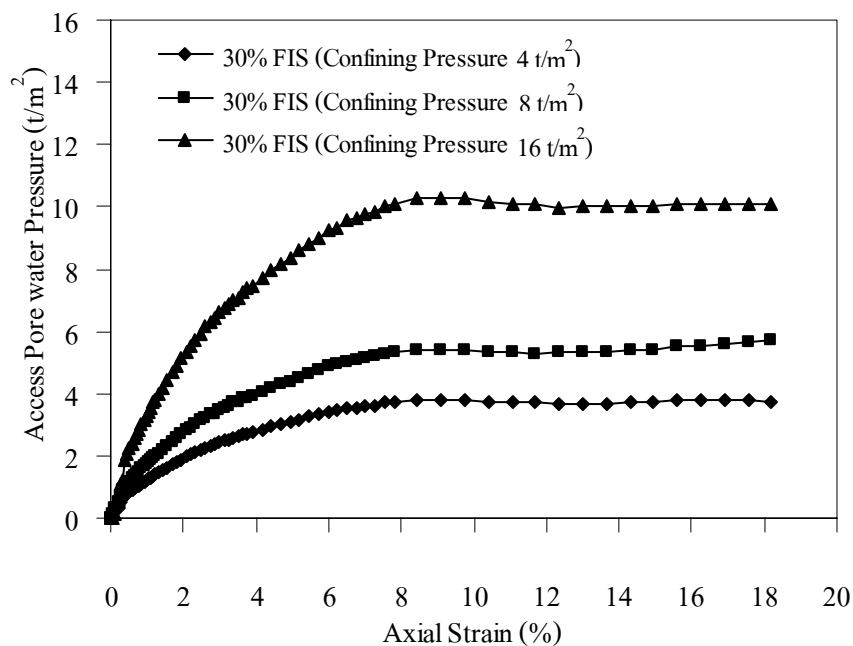
รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 20%



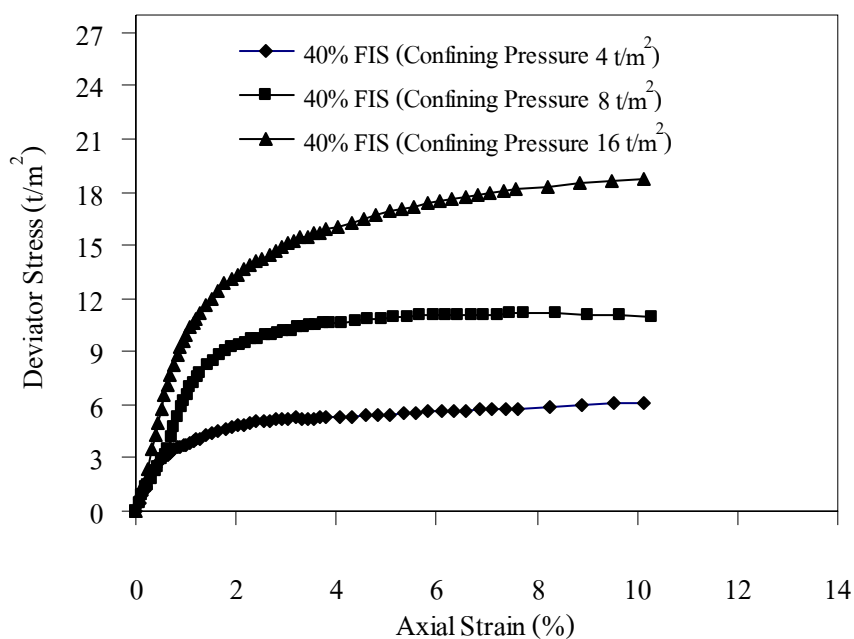
รูปที่ ก - 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 20%



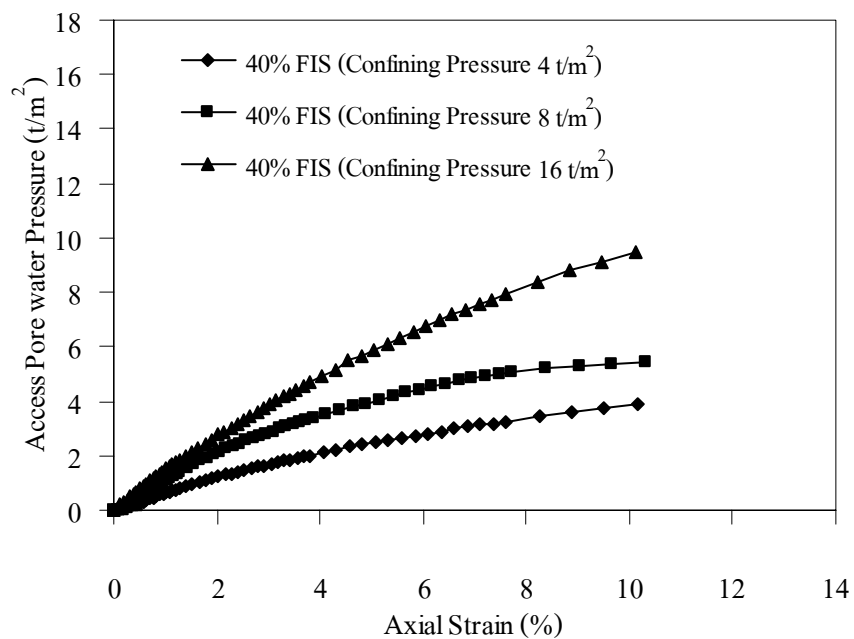
รูปที่ ก -7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทราย  
ละเอียด 30%



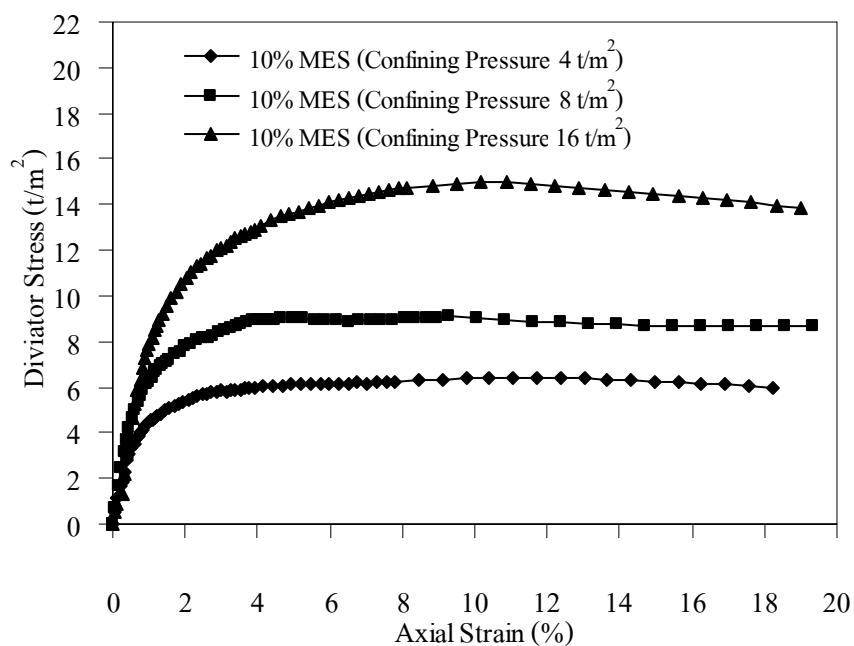
รูปที่ ก - 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดิน  
เหนียวผสมทรายละเอียด 30%



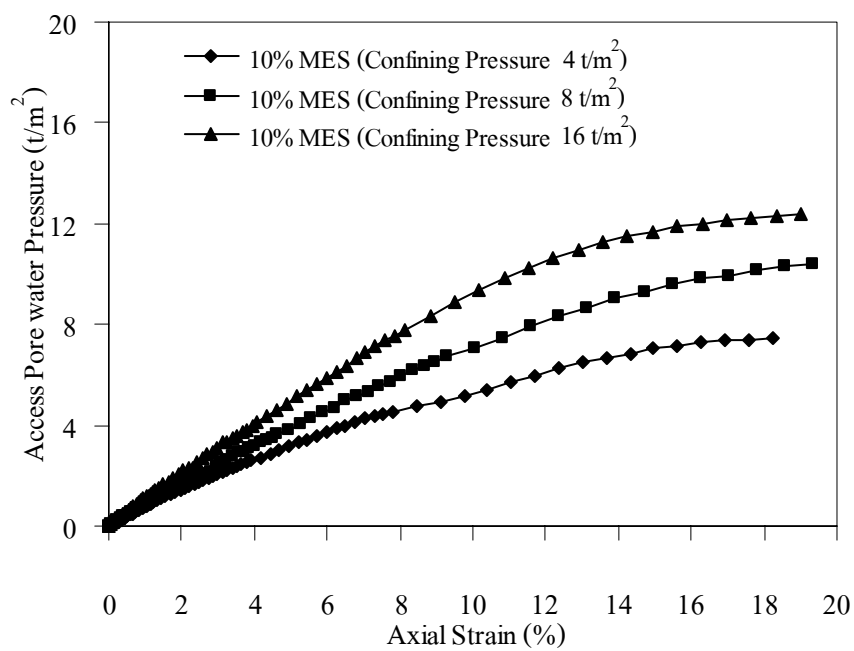
รูปที่ ก - 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40%



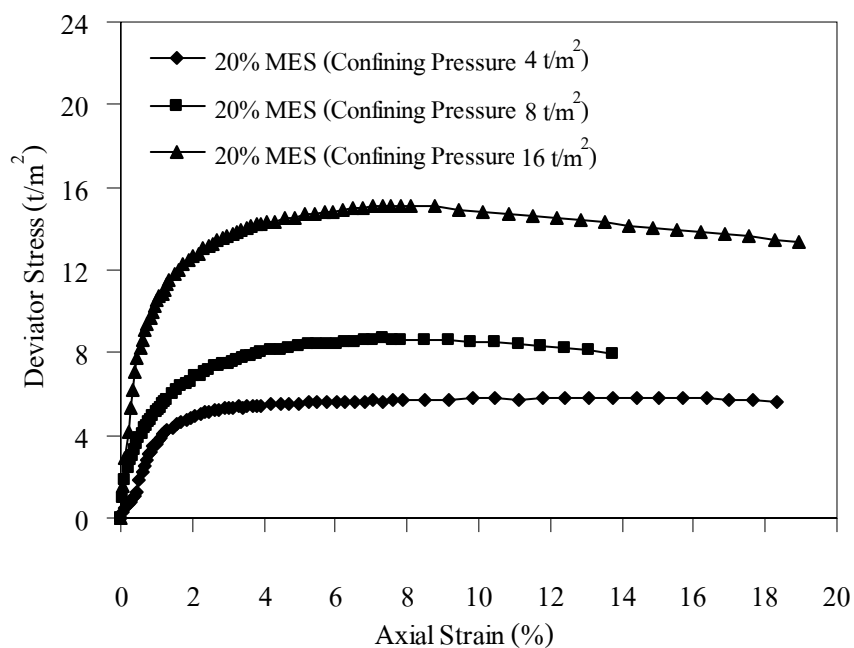
รูปที่ ก - 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40%



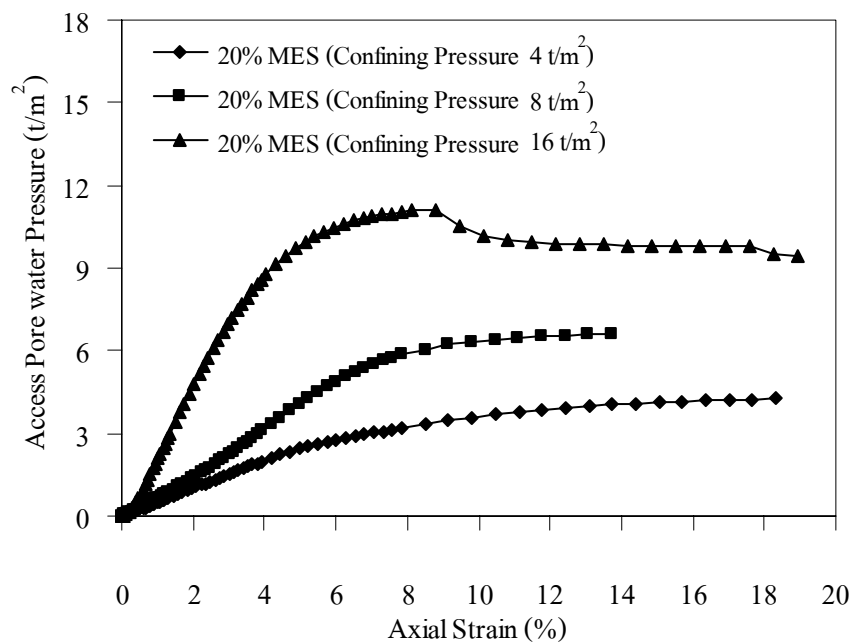
รูปที่ ก - 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 10%



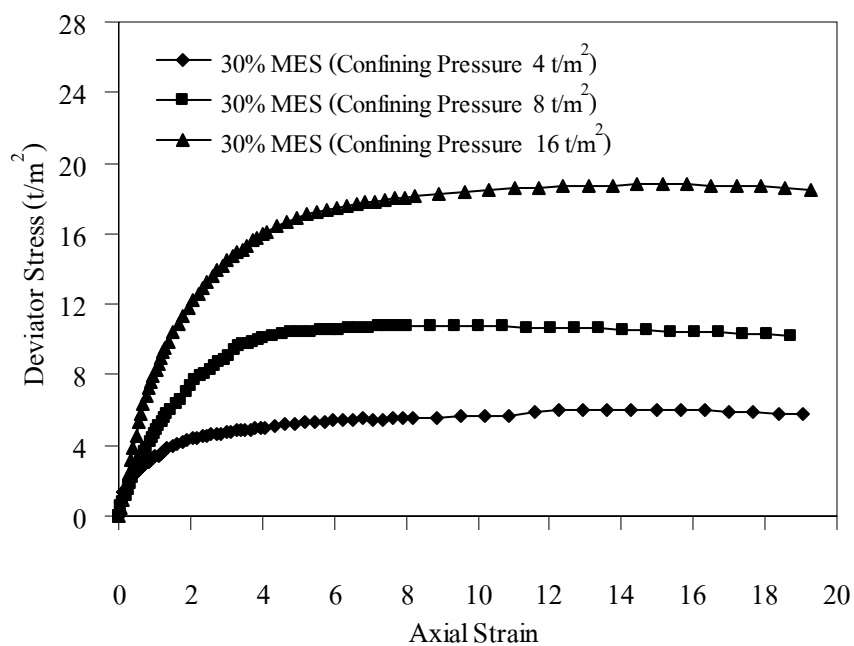
รูปที่ ก - 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 10%



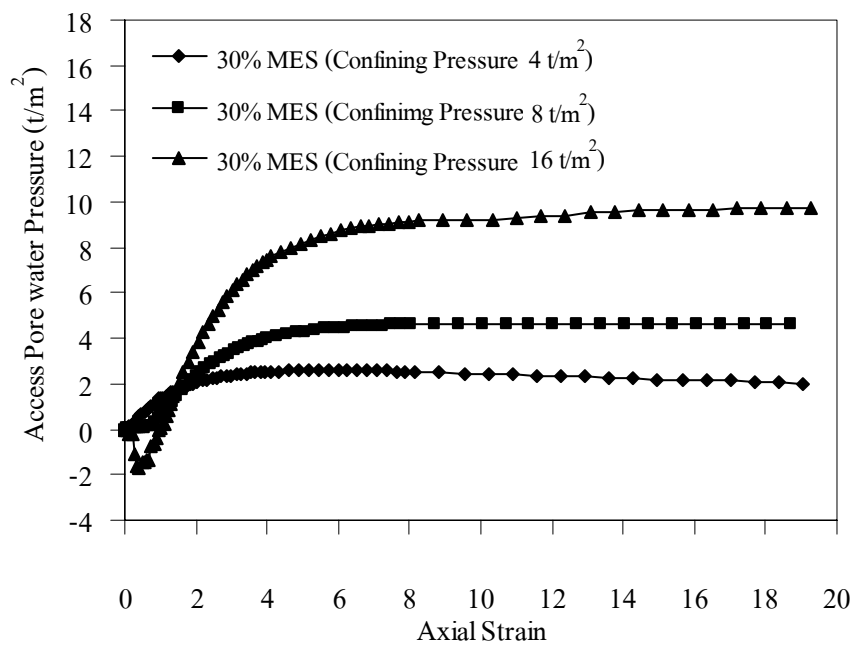
รูปที่ ก - 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 20%



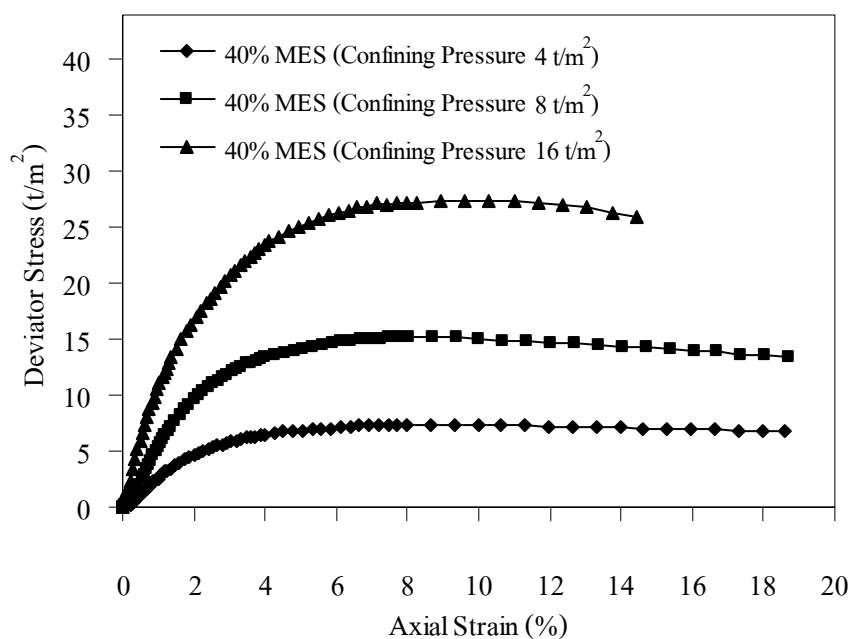
รูปที่ ก - 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 20%



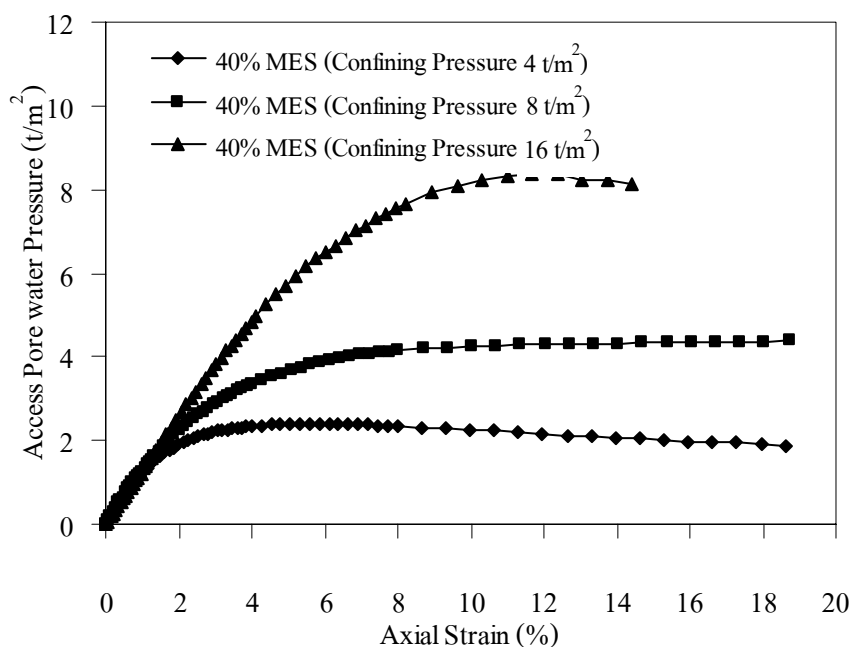
รูปที่ ก - 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 30 %



รูปที่ ก - 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 30%



รูปที่ ก - 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายเม็ดหยาบ 40%

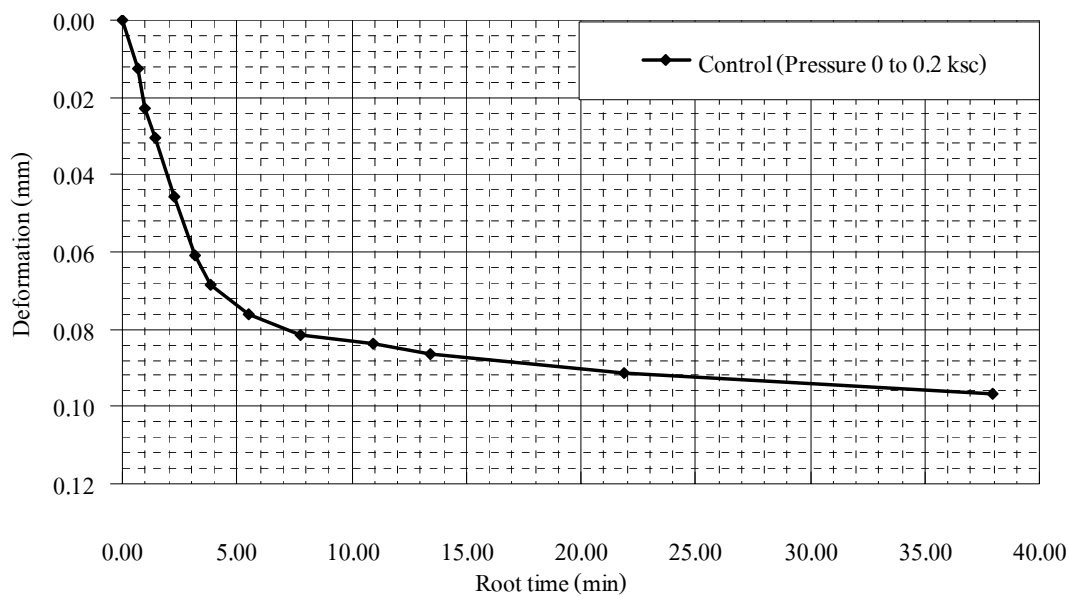


รูปที่ ก - 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Access Pore Water Pressure กับ Axial Strain ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายเม็ดหยาบ 40%

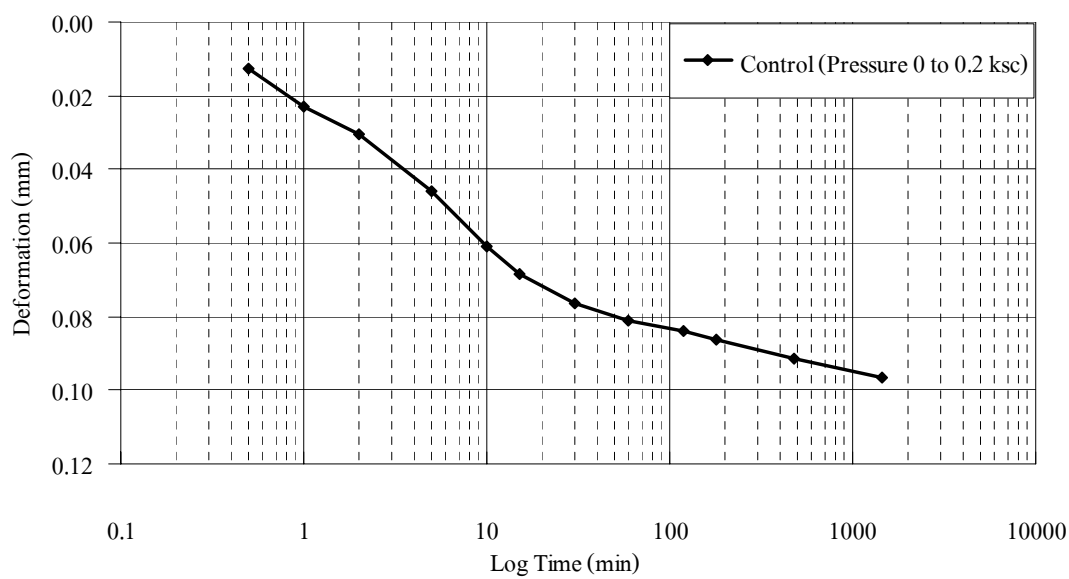
**ภาคผนวก ข.**

**ผลการทดสอบ Consolidation**

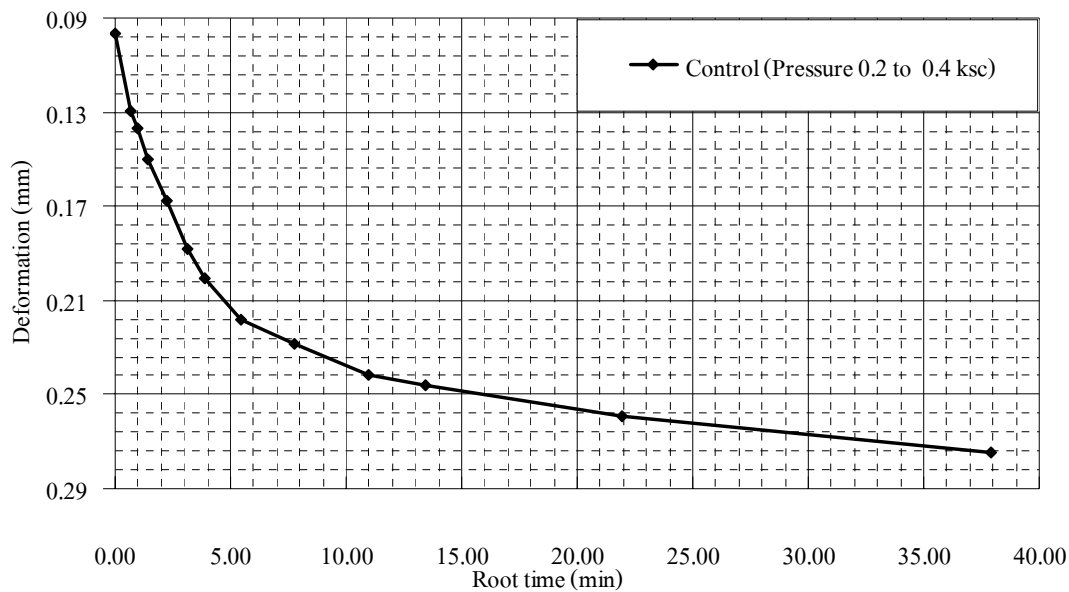




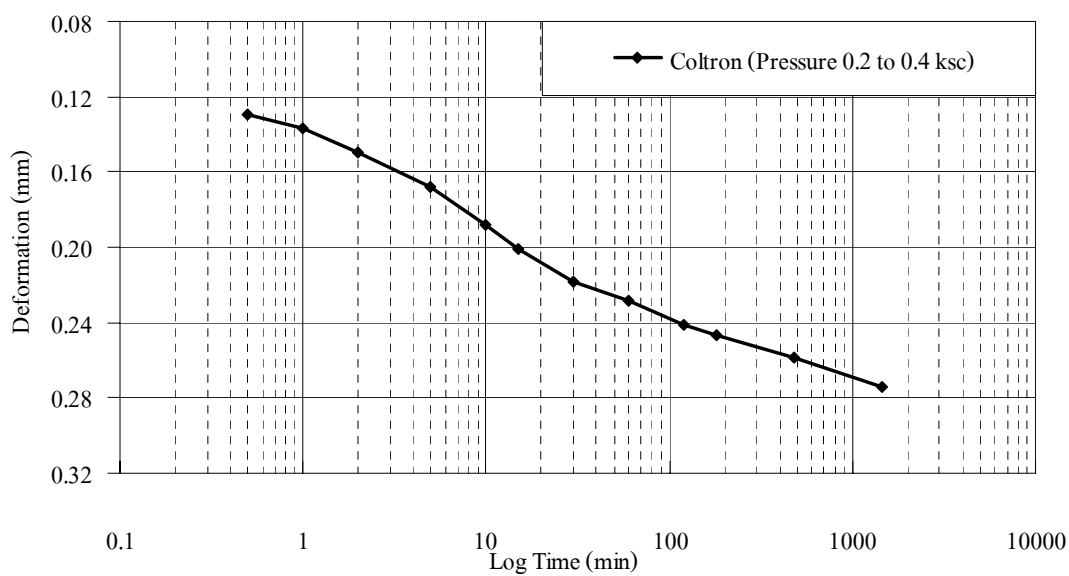
รูปที่ ข – 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100% Pressure 0 to 0.2 ksc



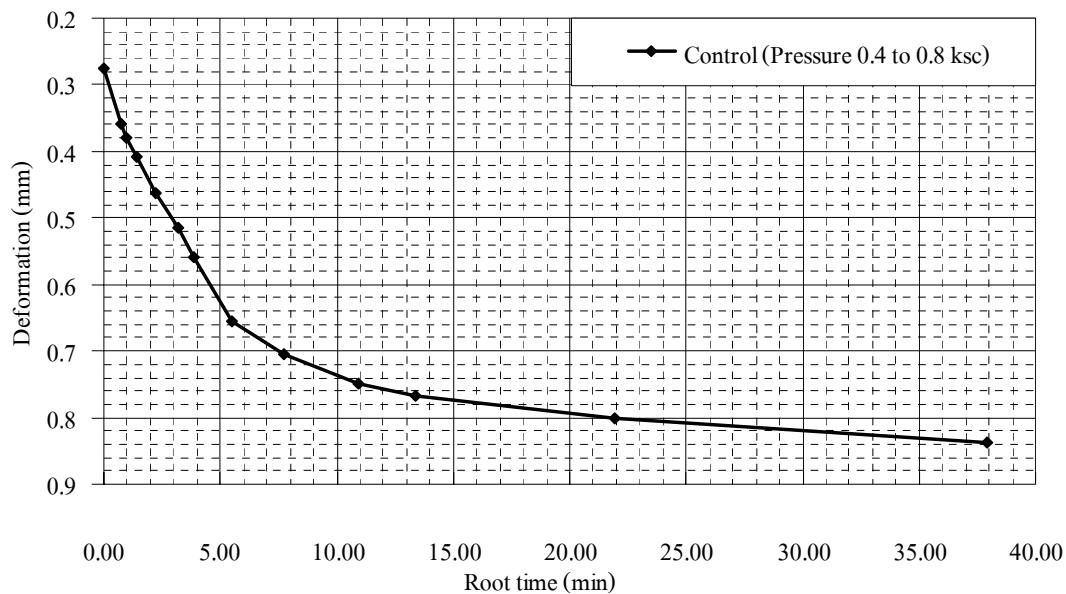
รูปที่ ข – 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100% Pressure 0 to 0.2 ksc



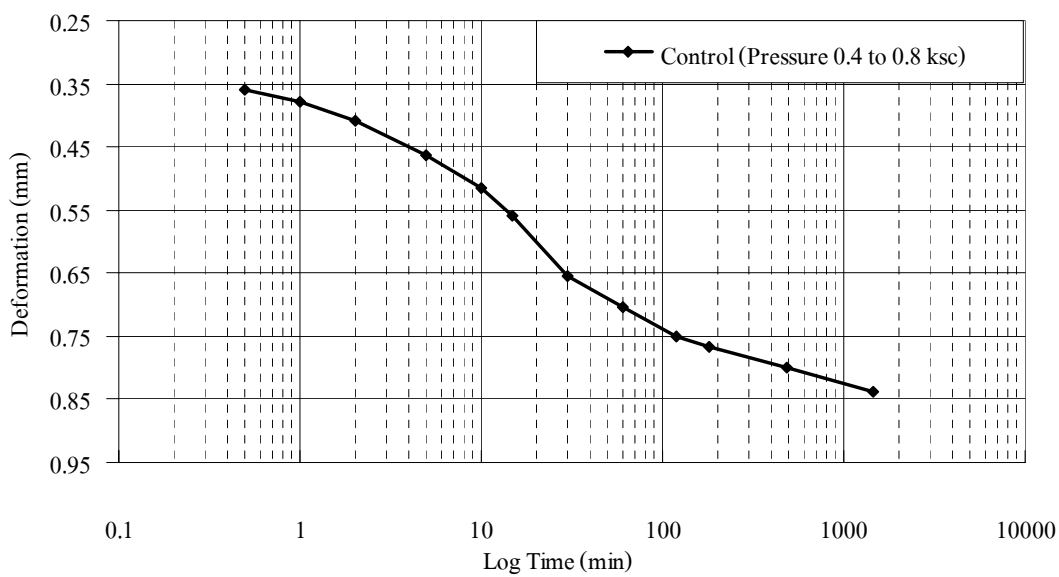
รูปที่ ข - 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Pressure 0.2 to 0.4 ksc



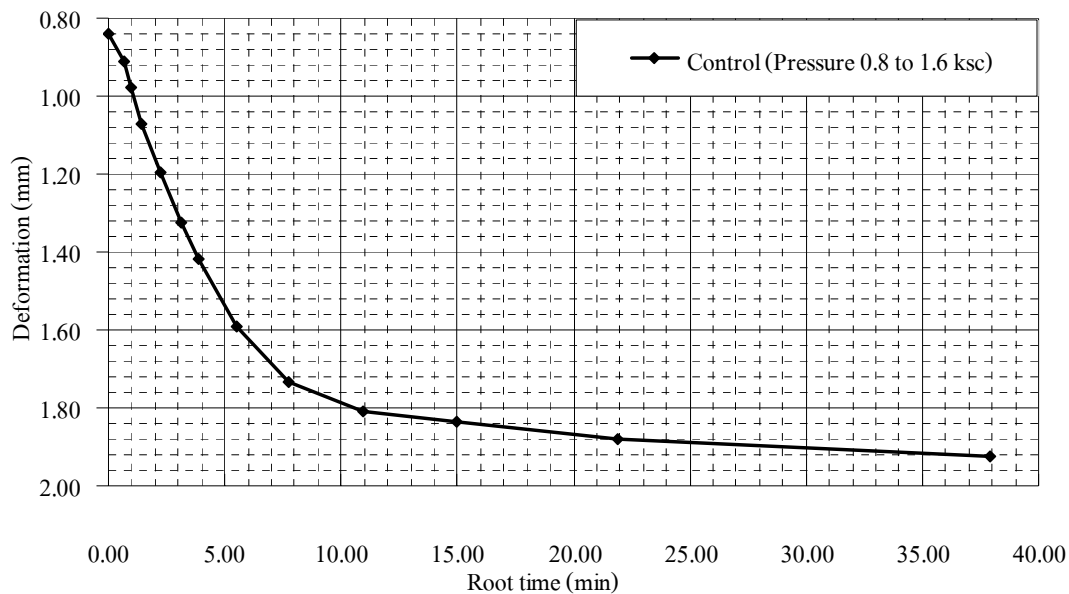
รูปที่ ข - 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Pressure 0.2 to 0.4 ksc



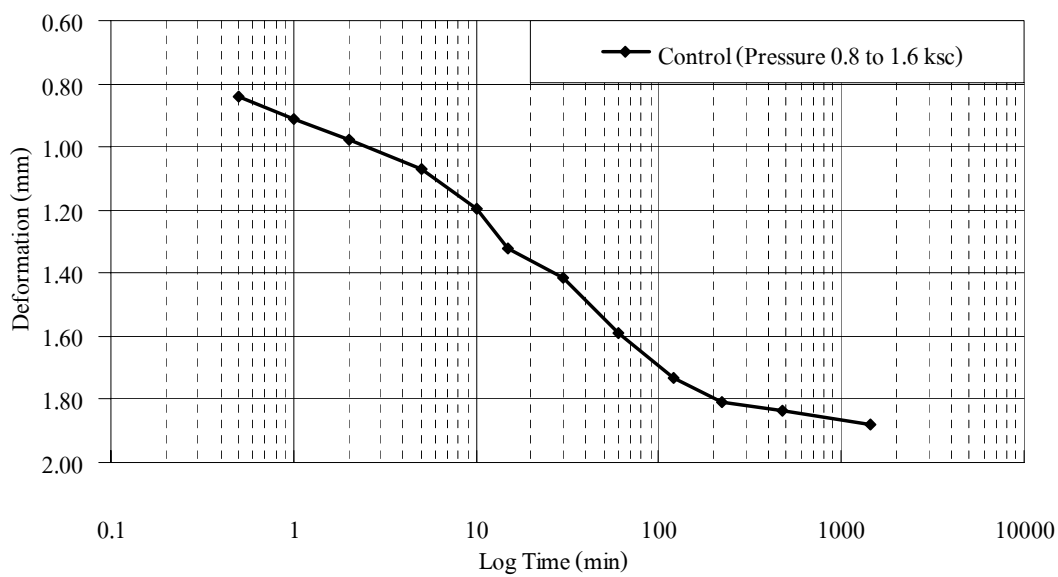
รูปที่ ข-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100% Pressure 0.4 to 0.8 ksc



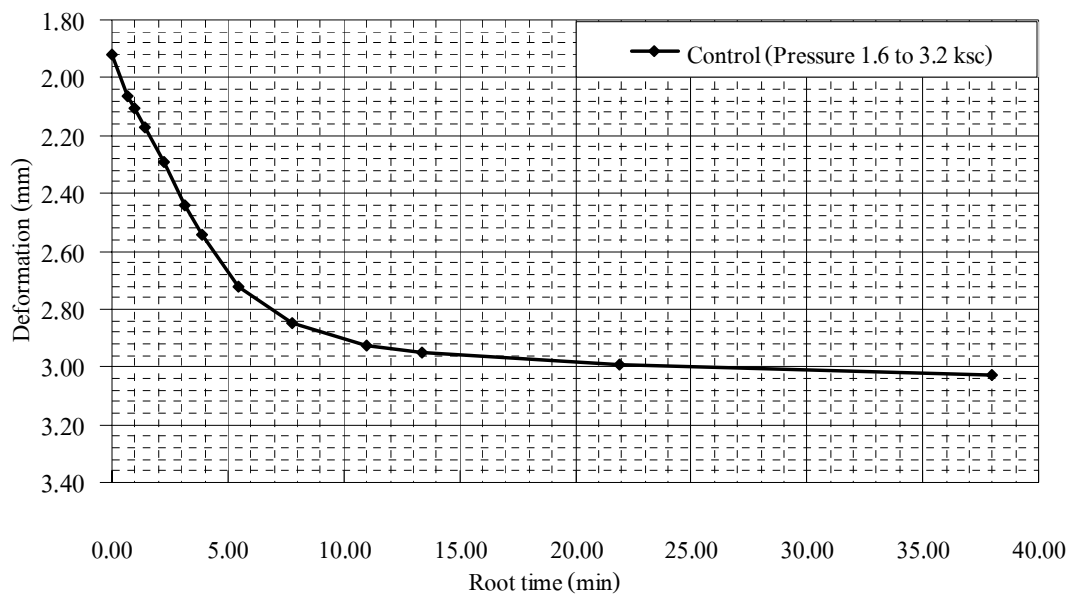
รูปที่ ข-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100% Pressure 0.4 to 0.8 ksc



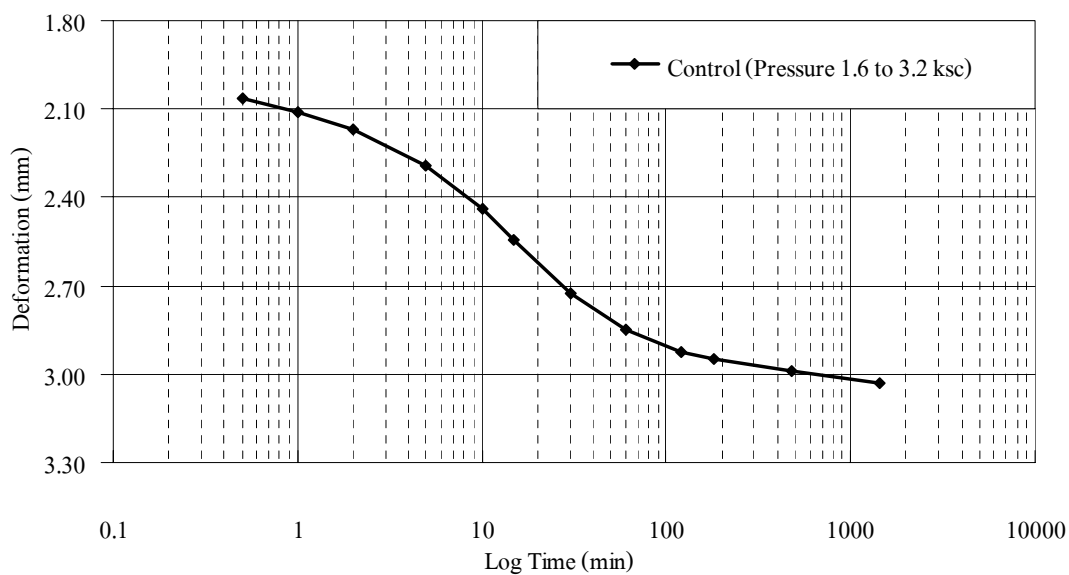
รูปที่ ข-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100% Pressure 0.8 to 1.6 ksc



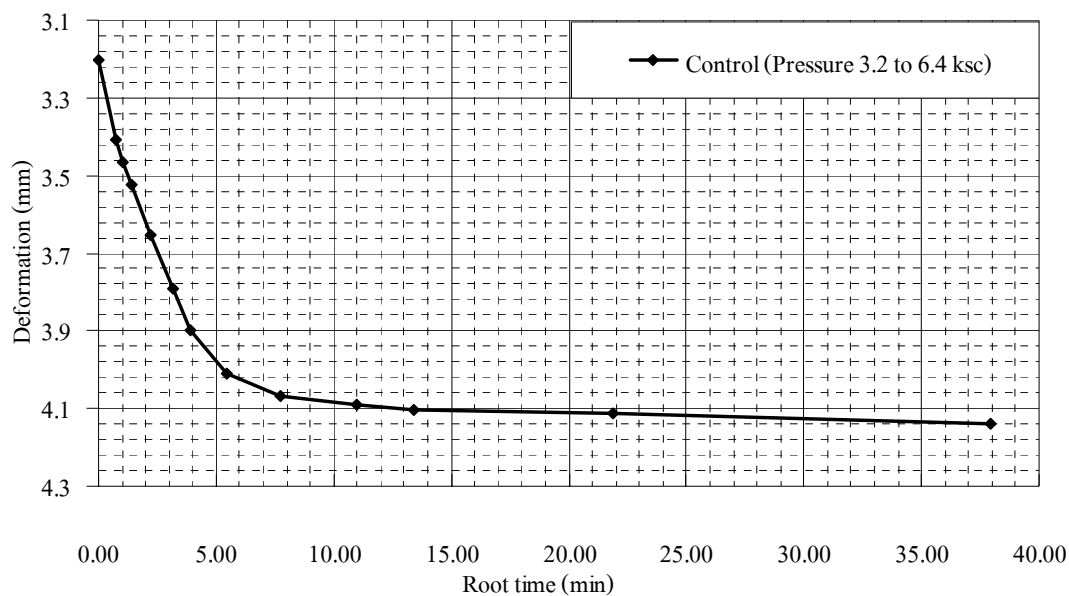
รูปที่ ข-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100% Pressure 0.8 to 1.6 ksc



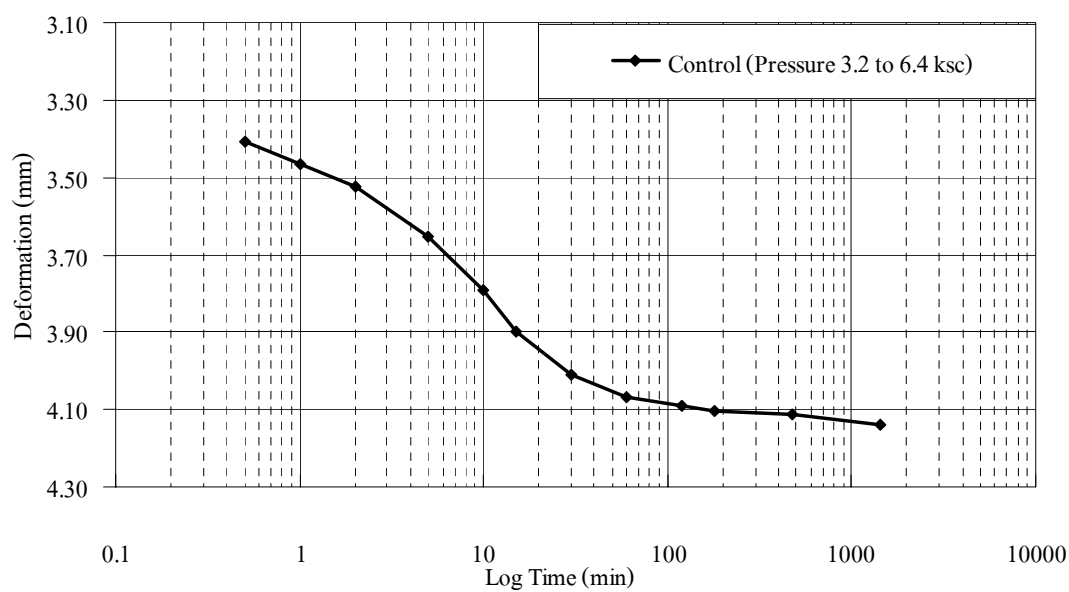
รูปที่ ข - 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Pressure 1.6 to 3.2 ksc



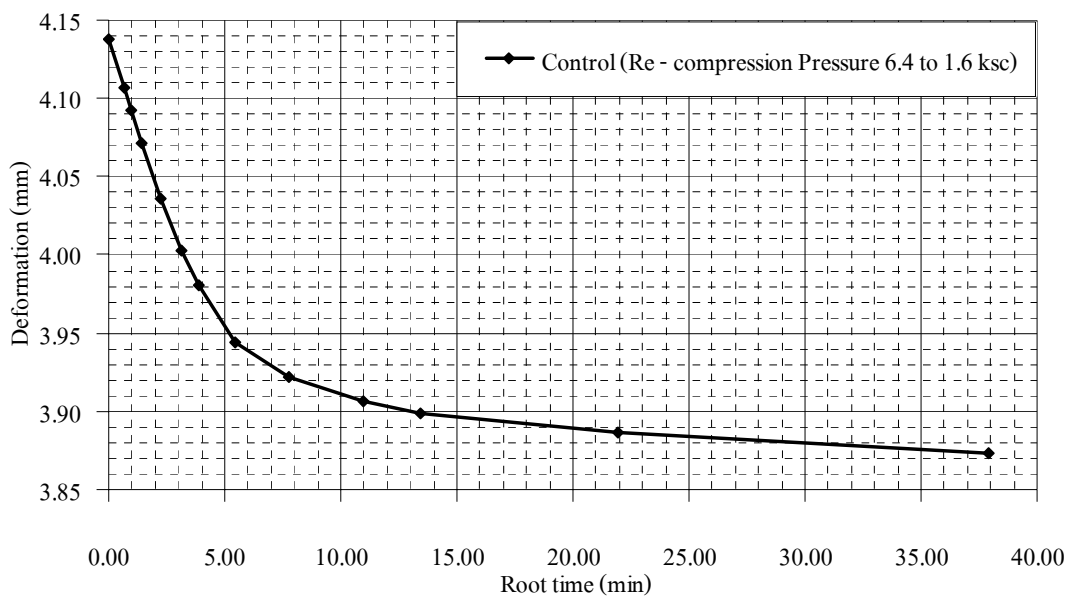
รูปที่ ข - 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Pressure 1.6 to 3.2 ksc



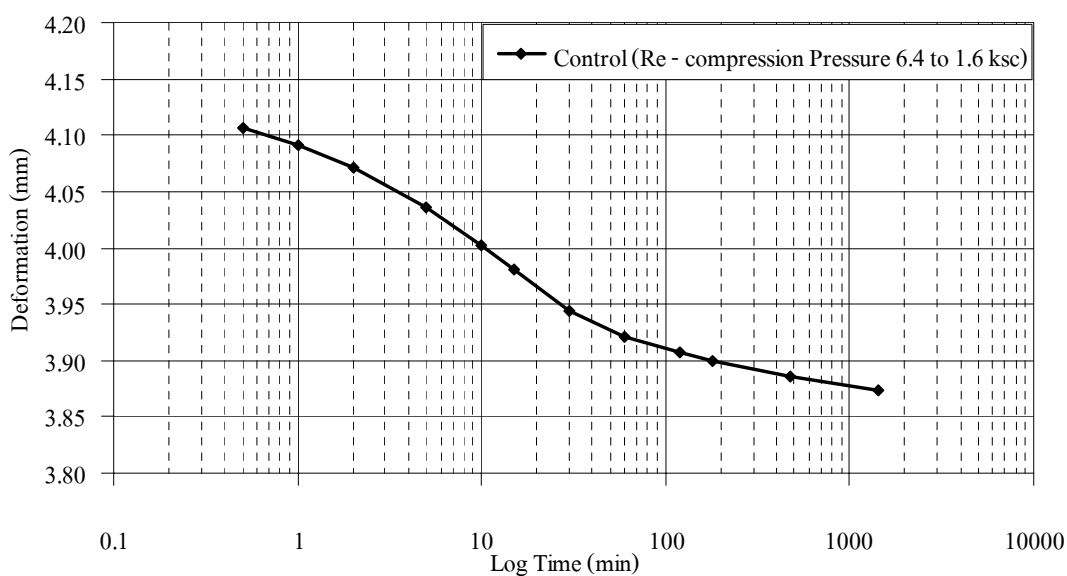
รูปที่ ข – 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Pressure 3.2 to 6.4 ksc



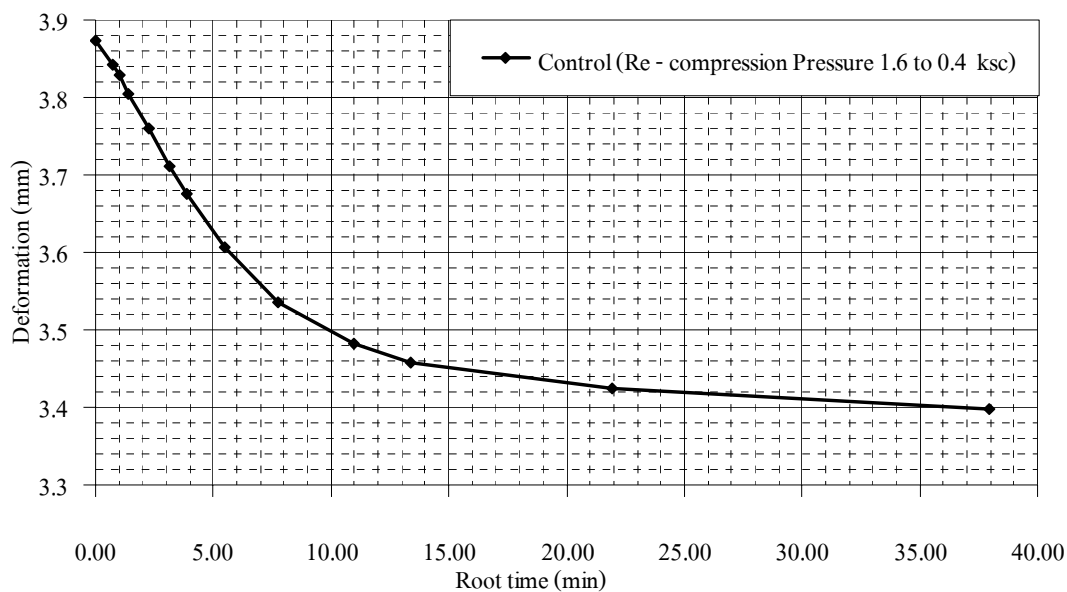
รูปที่ ข – 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Pressure 3.2 to 6.4 ksc



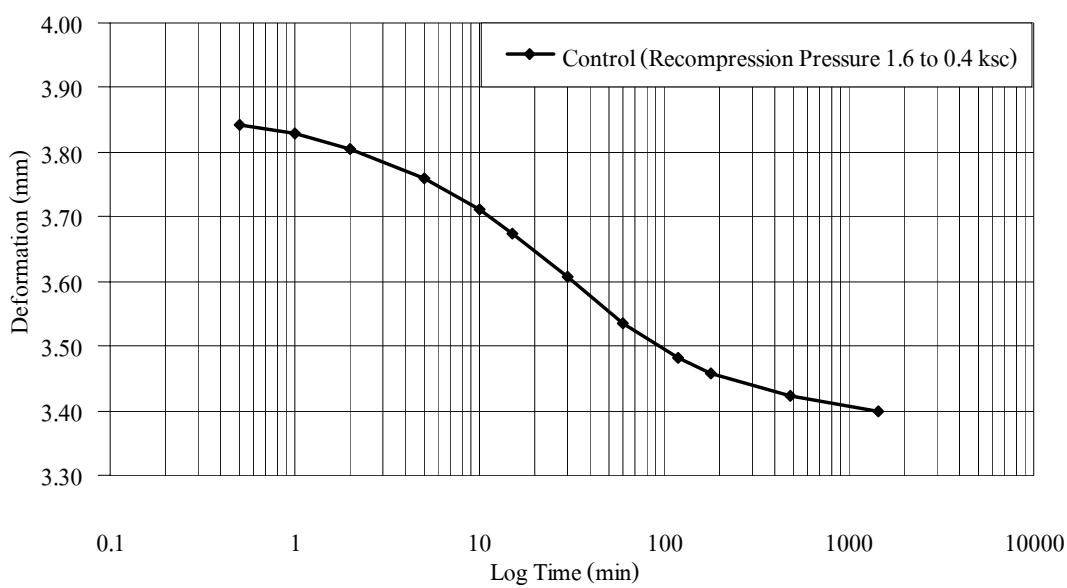
รูปที่ ข - 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Re - Compression Pressure 6.4 to 1.6 ksc



รูปที่ ข - 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Re - Compression Pressure 6.4 to 1.6 ksc

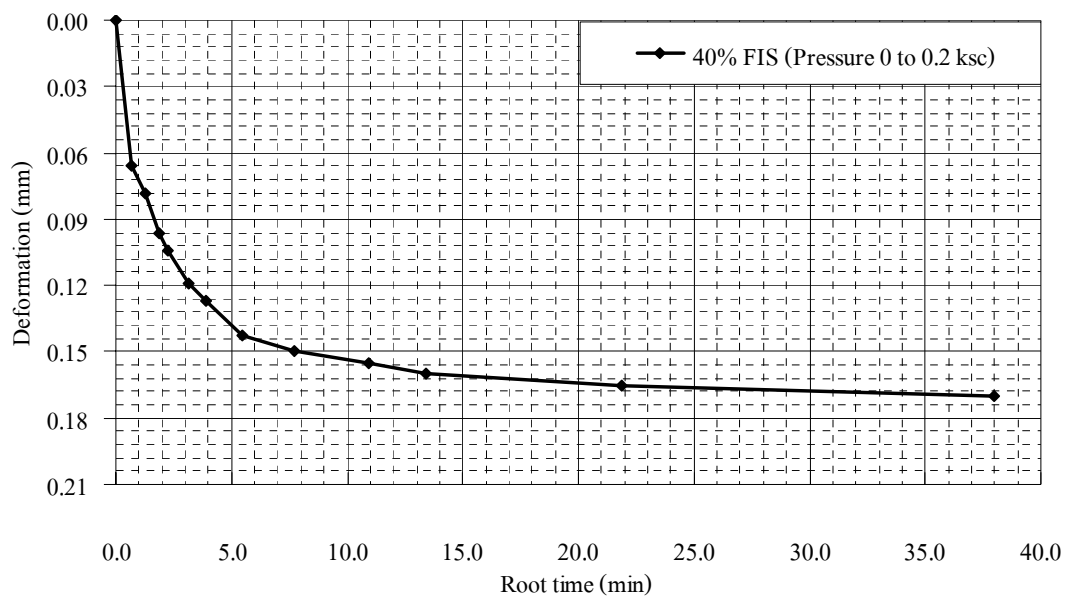


รูปที่ ข - 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Re - Compression Pressure 1.6 to 0.4 ksc

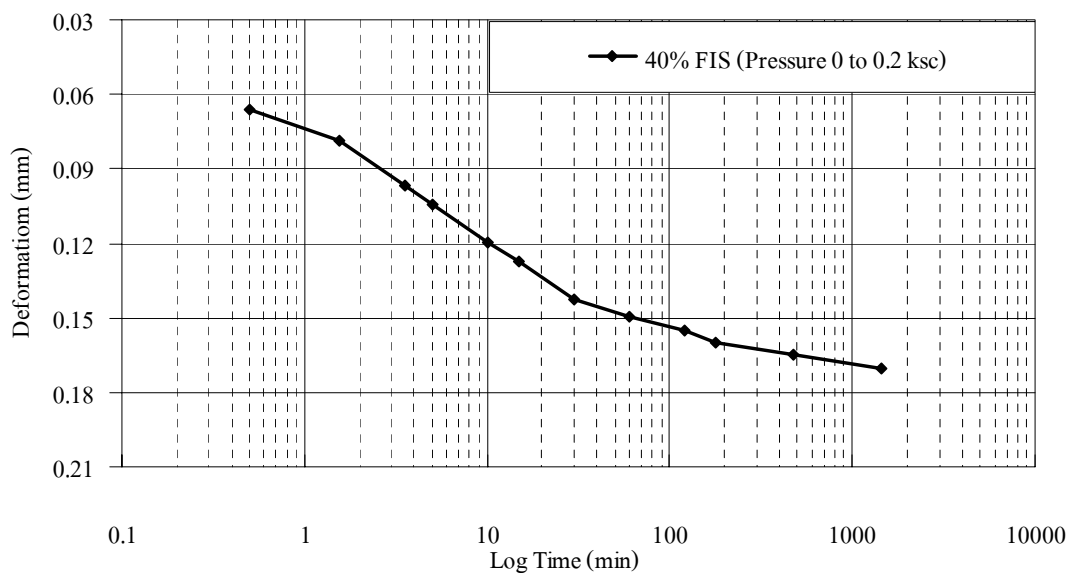


รูปที่ ข - 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียว 100%  
Re - Compression Pressure 1.6 to 0.4 ksc

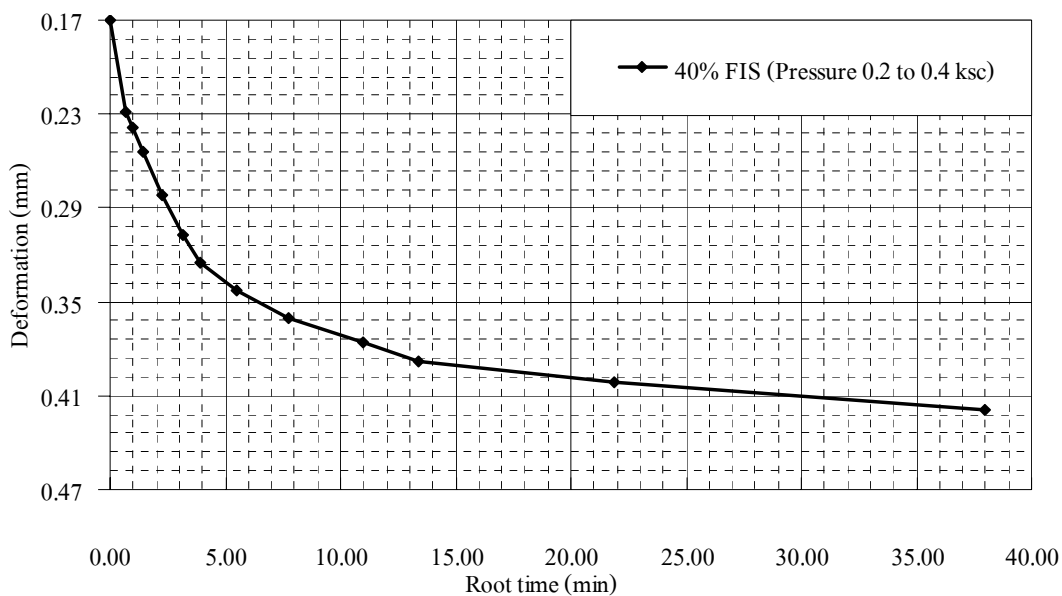




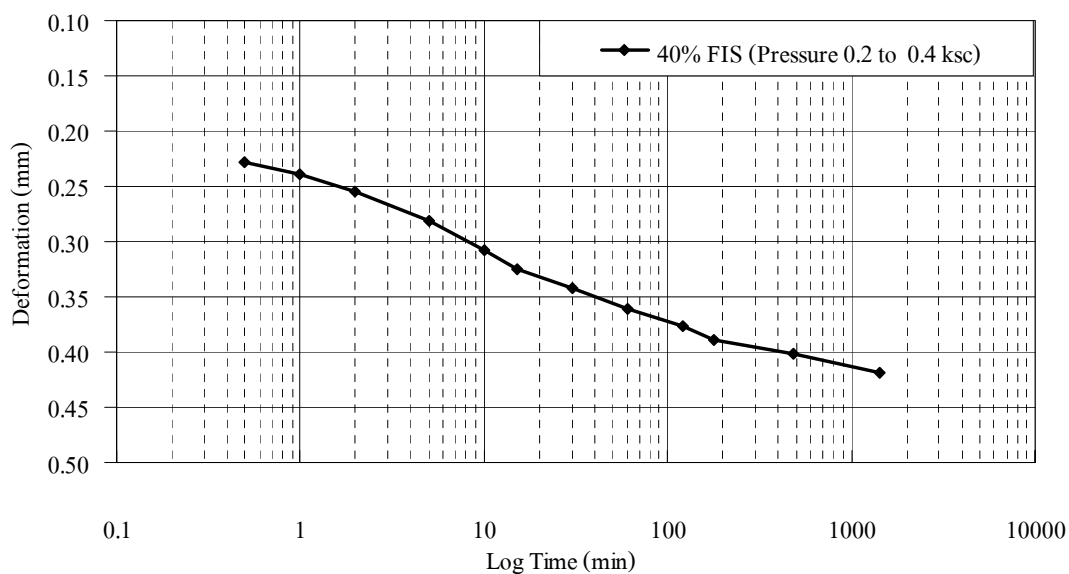
รูปที่ ข – 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0 to 0.2 ksc



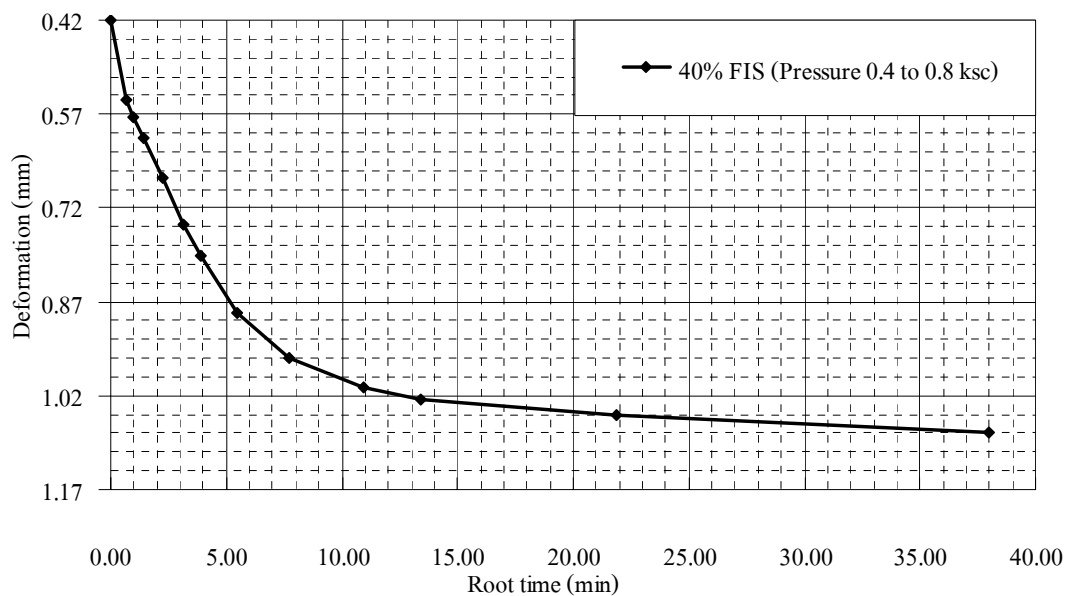
รูปที่ ข – 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0 to 0.2 ksc



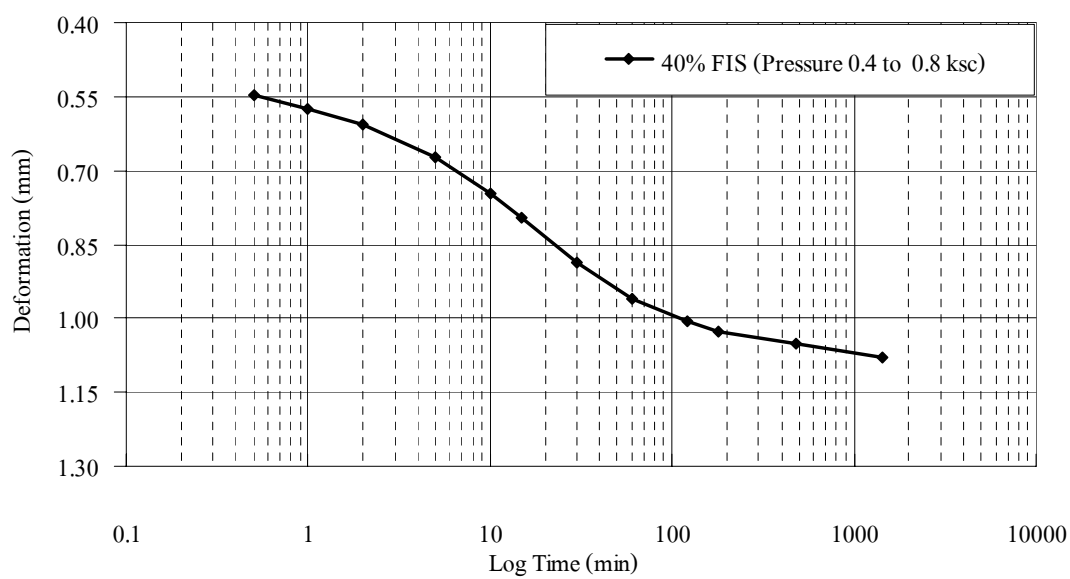
รูปที่ ข – 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0.2 to 0.4 ksc



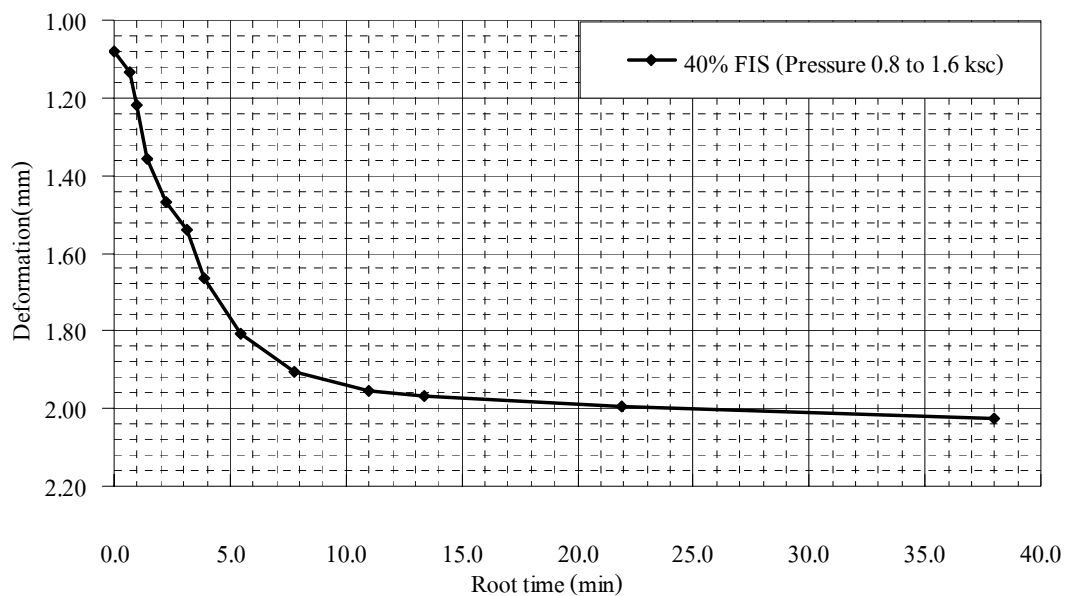
รูปที่ ข – 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0.2 to 0.4 ksc



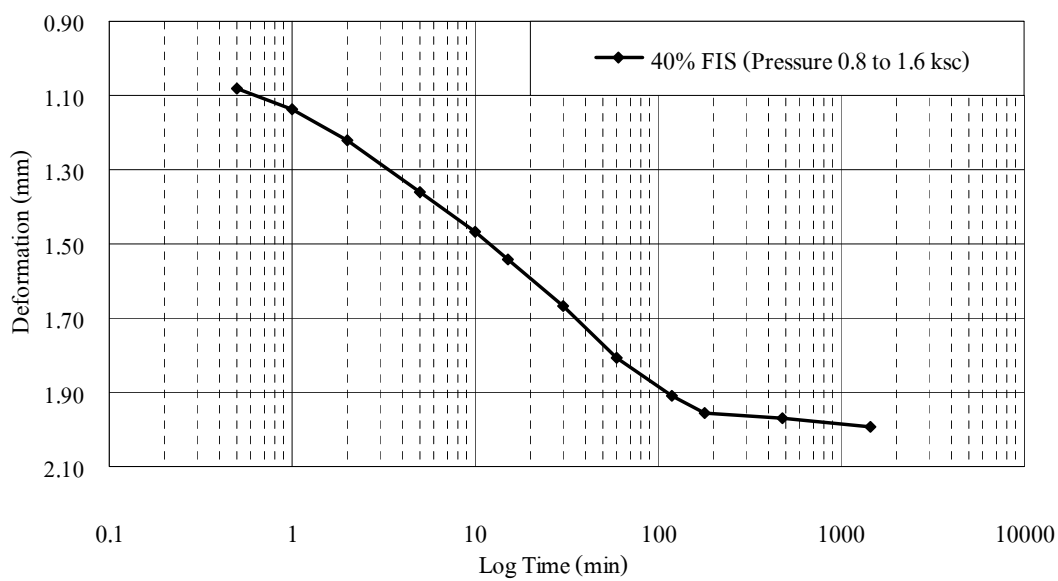
รูปที่ ข – 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0.4 to 0.8 ksc



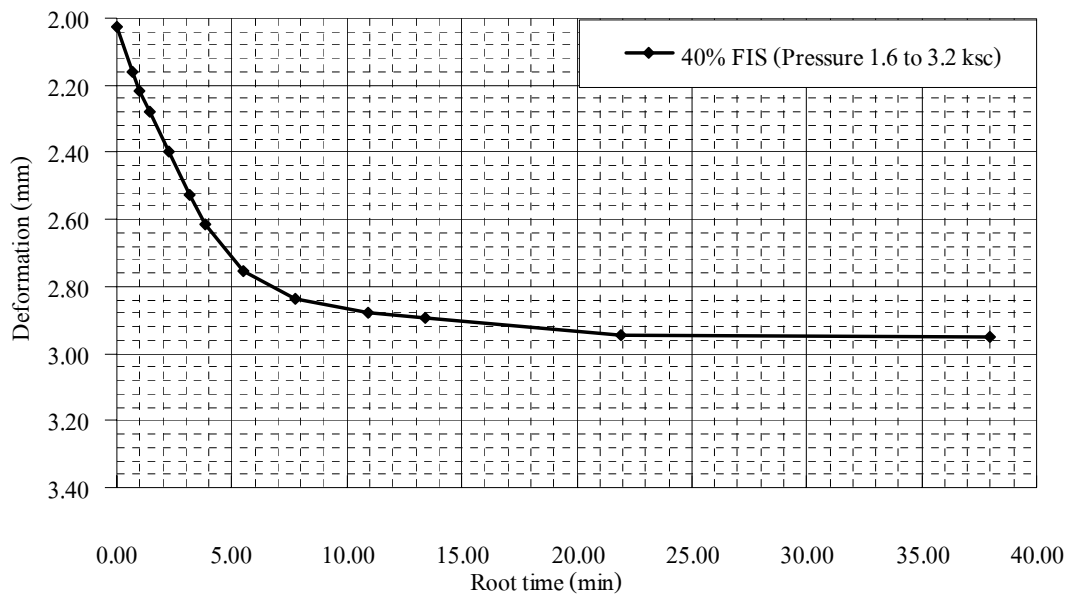
รูปที่ ข – 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0.4 to 0.8 ksc



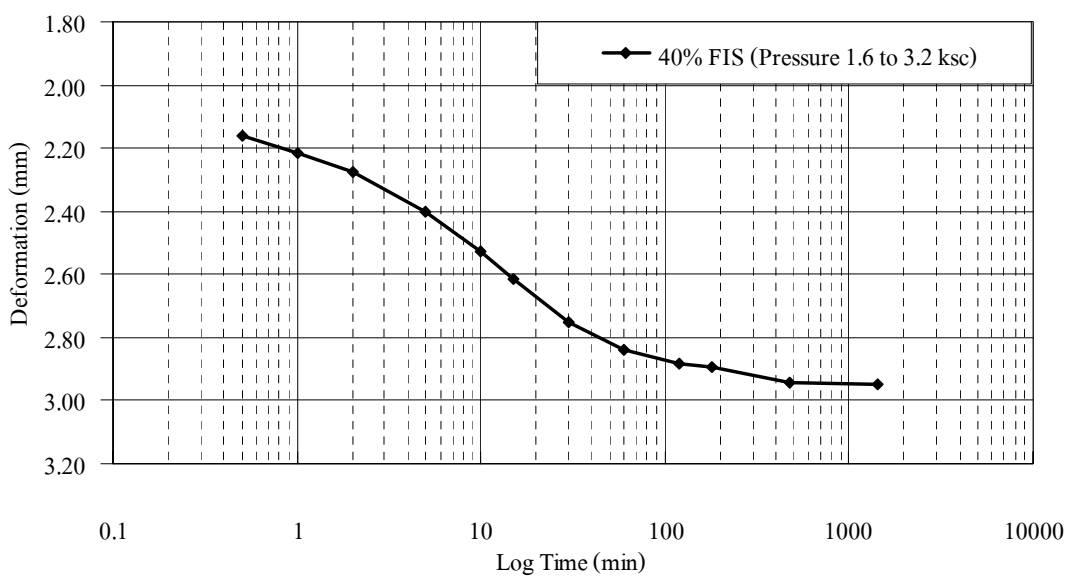
รูปที่ ข – 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0.8 to 1.6 ksc



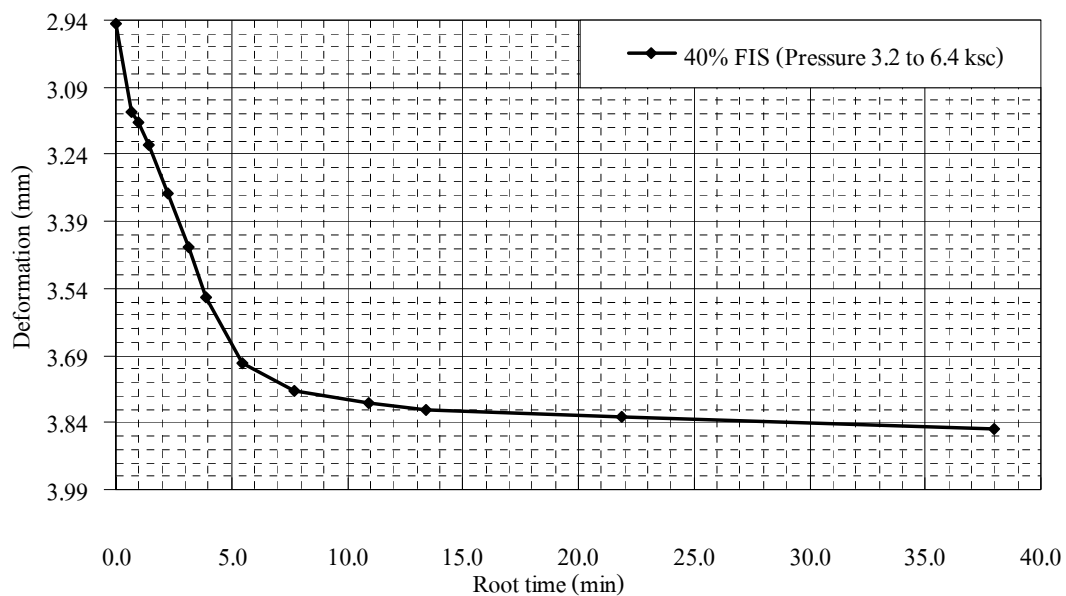
รูปที่ ข – 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 0.8 to 1.6 ksc



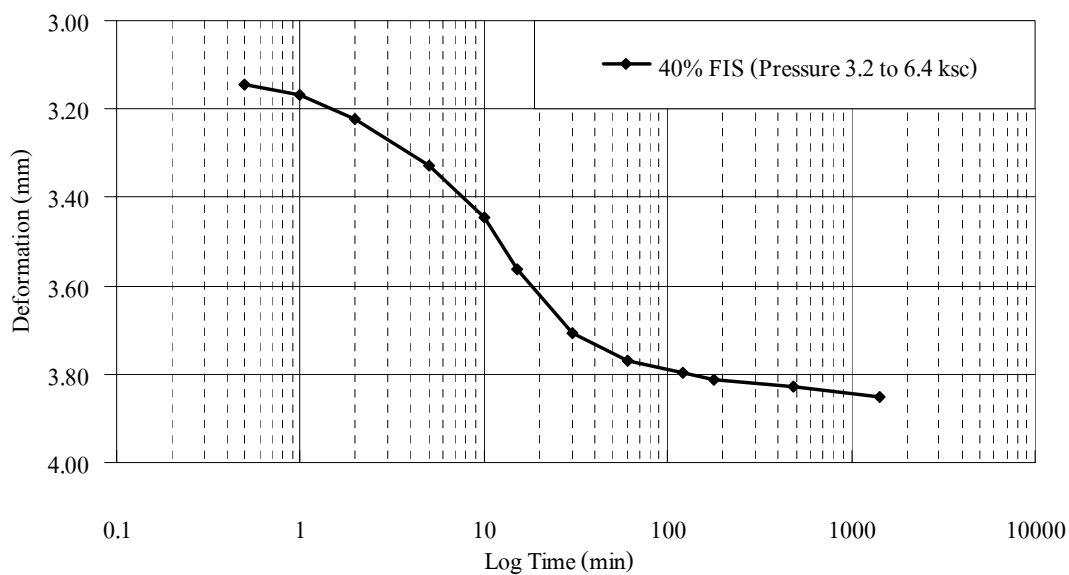
รูปที่ ข – 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 1.6 to 3.2 ksc



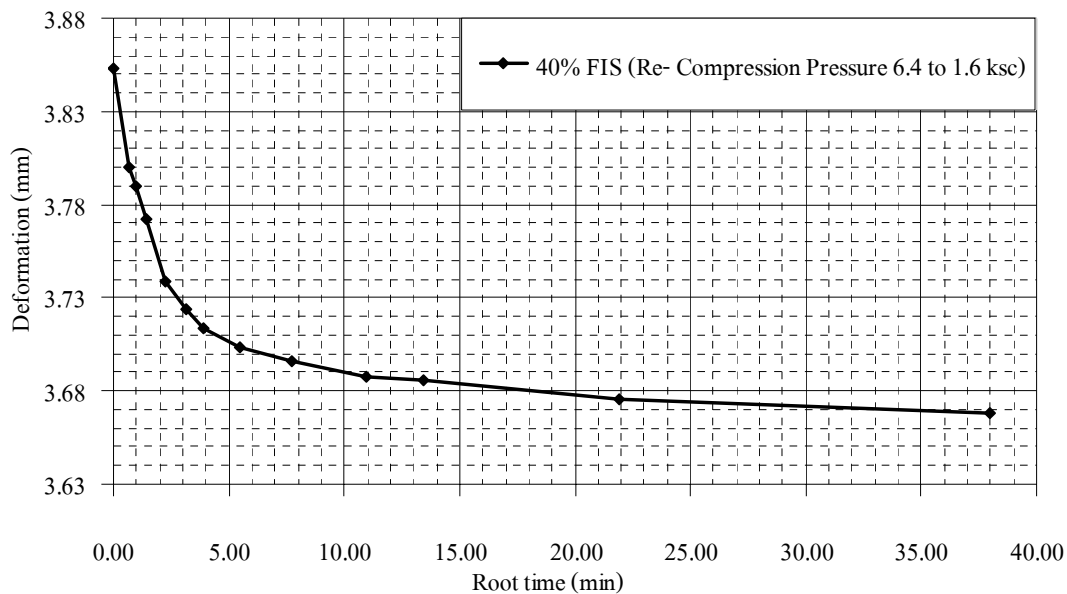
รูปที่ ข – 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 1.6 to 3.2 ksc



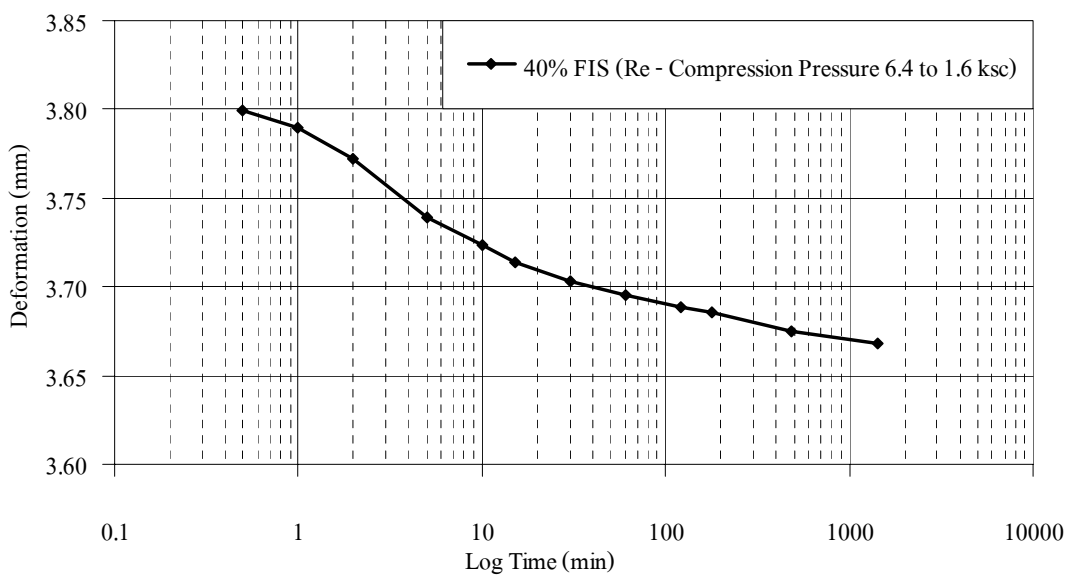
รูปที่ ข – 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 3.2 to 6.4 ksc



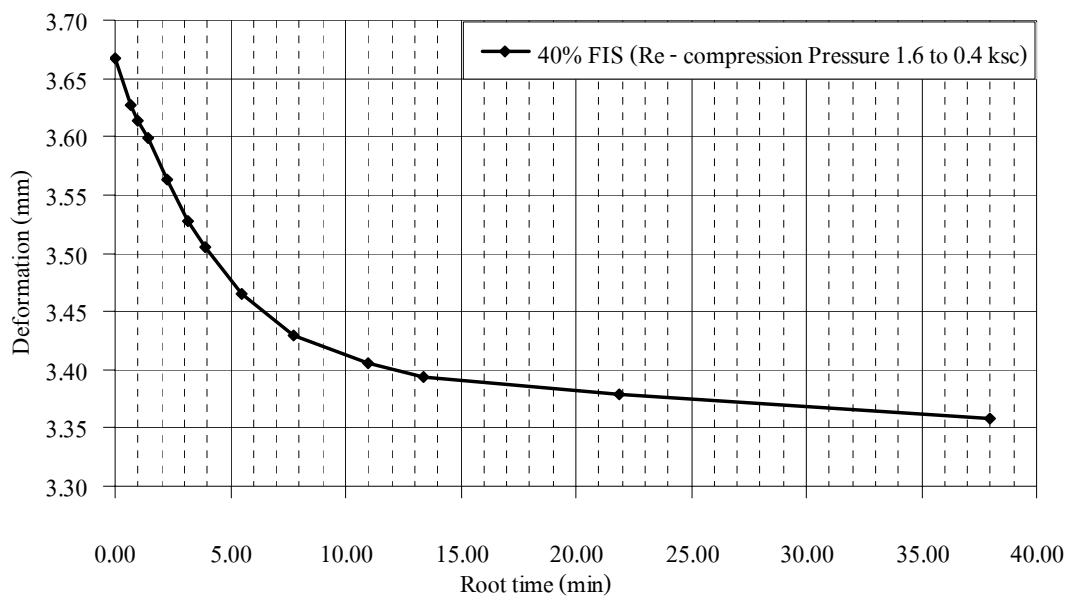
รูปที่ ข – 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Pressure 3.2 to 6.4 ksc



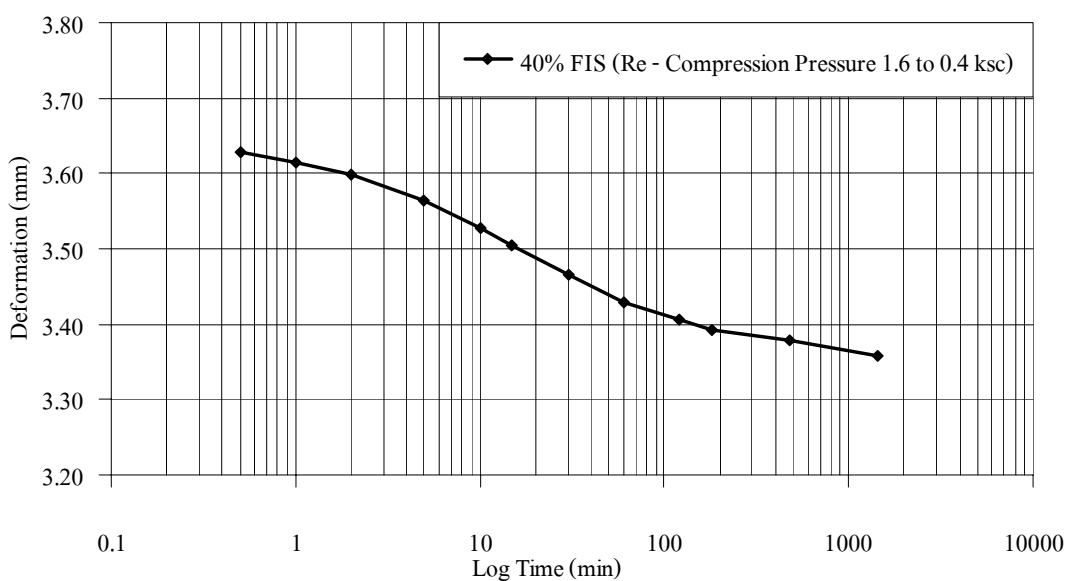
รูปที่ ๒๙ - กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Re - Compression Pressure 6.4 to 1.6 ksc



รูปที่ ๓๐ - กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log time ของตัวอย่างดินผสมทรายละเอียด 40% Re - Compression Pressure 6.4 to 1.6 ksc

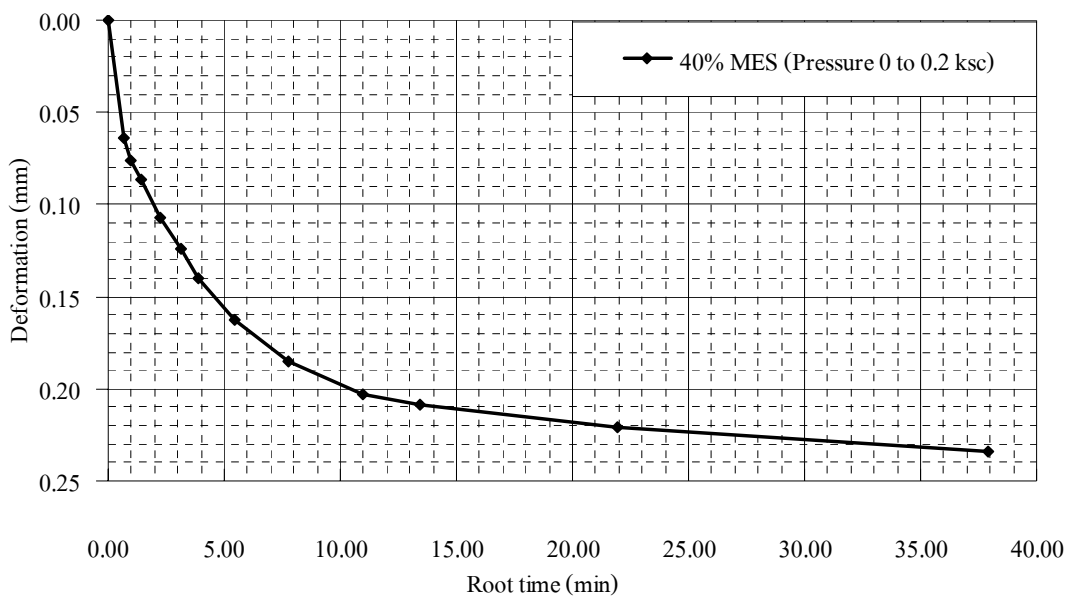


รูปที่ ข – 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Re - Compression Pressure 1.6 to 0.4 ksc

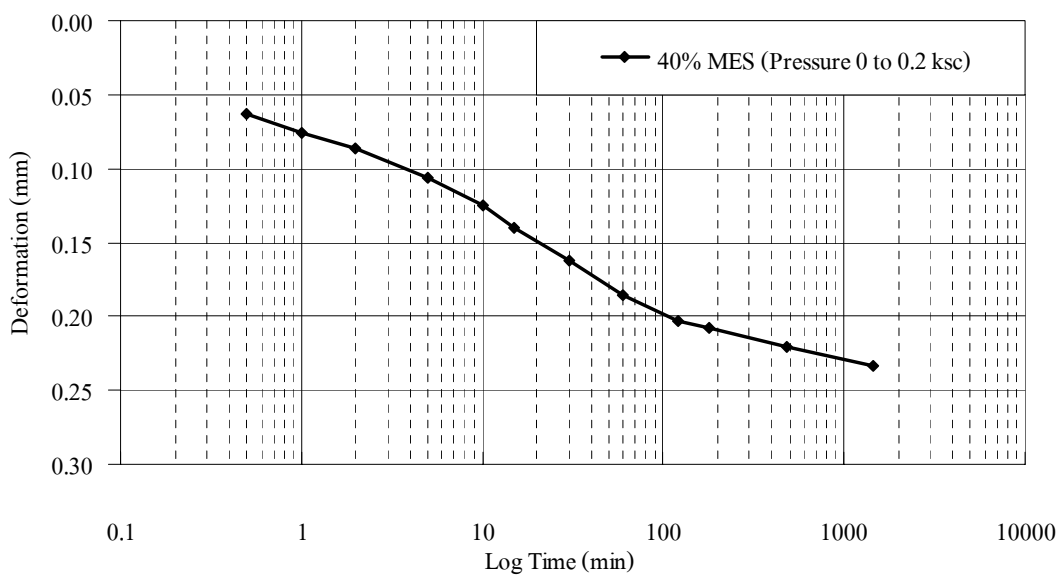


รูปที่ ข – 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 40% Re - Compression Pressure 1.6 to 0.4 ksc

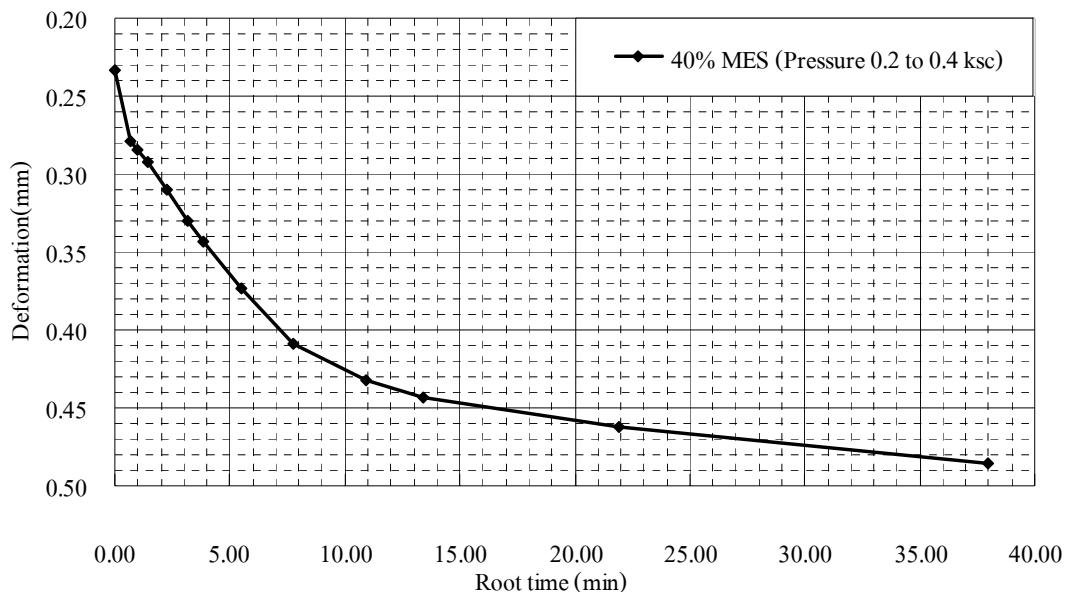




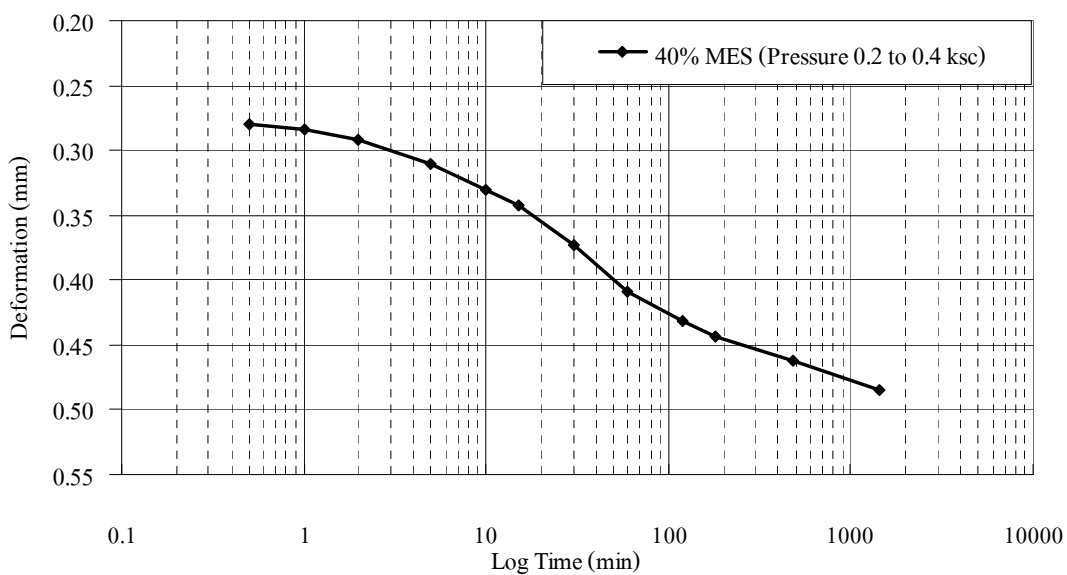
รูปที่ ๓ – 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0 to 0.2 ksc



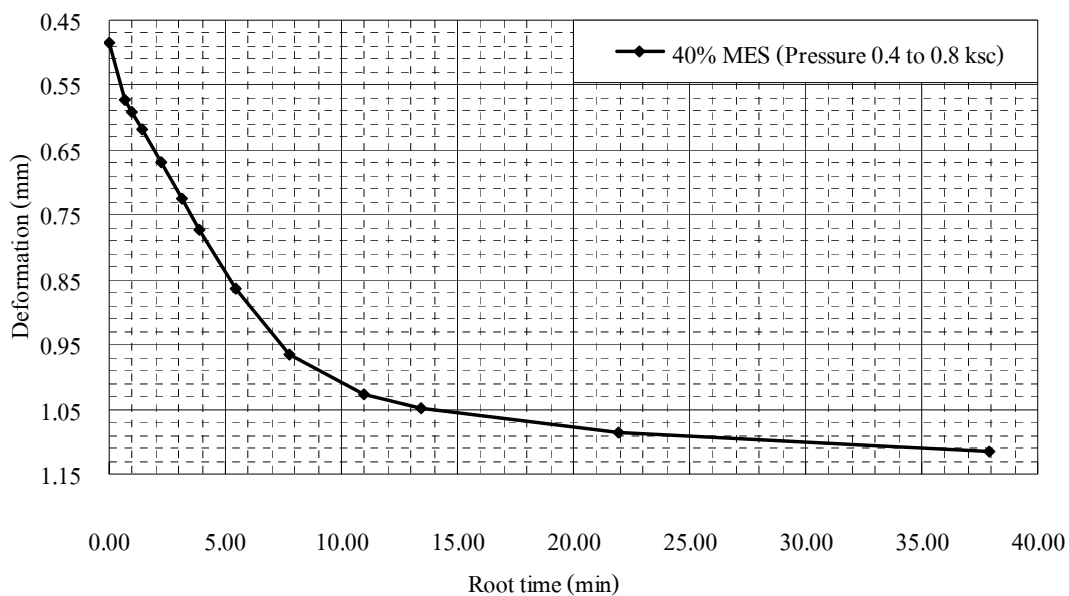
รูปที่ ๓ – 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0 to 0.2 ksc



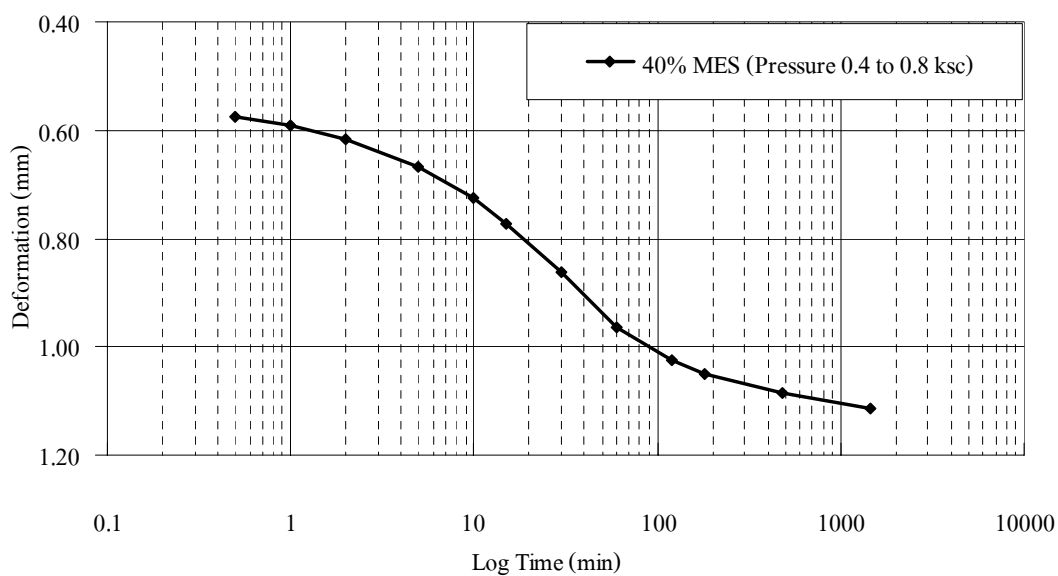
รูปที่ ๓ - 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0.2 to 0.4 ksc



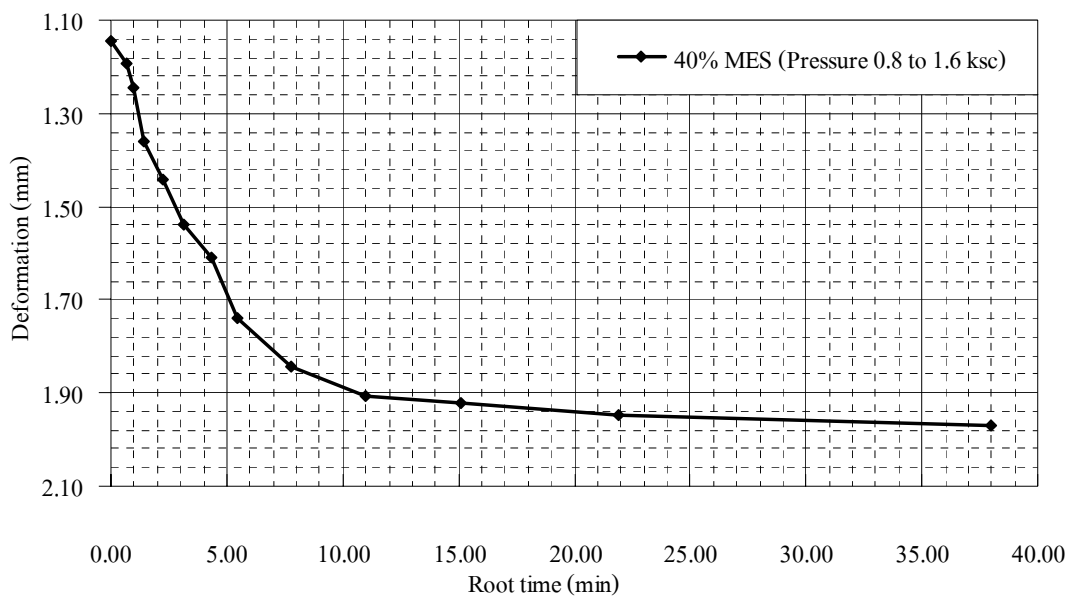
รูปที่ ๓ - 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0.2 to 0.4 ksc



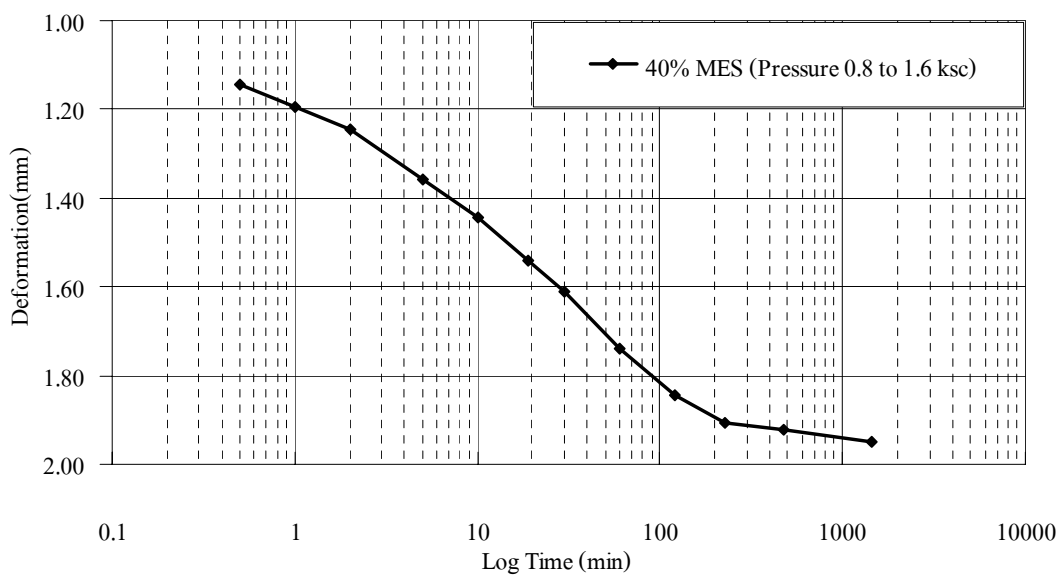
รูปที่ ข - 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0.4 to 0.8 ksc



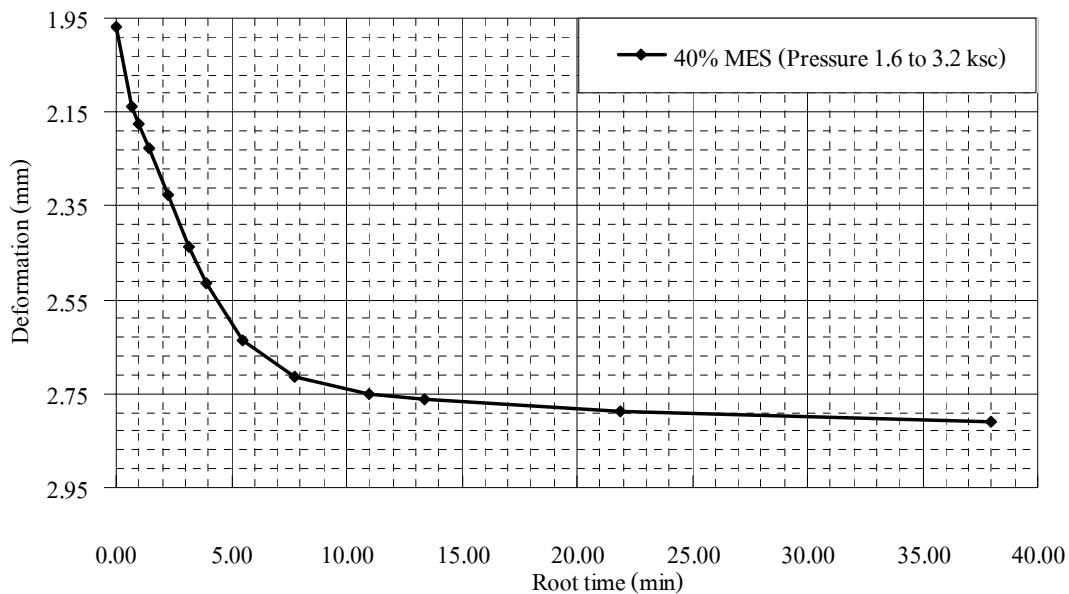
รูปที่ ข - 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0.4 to 0.8 ksc



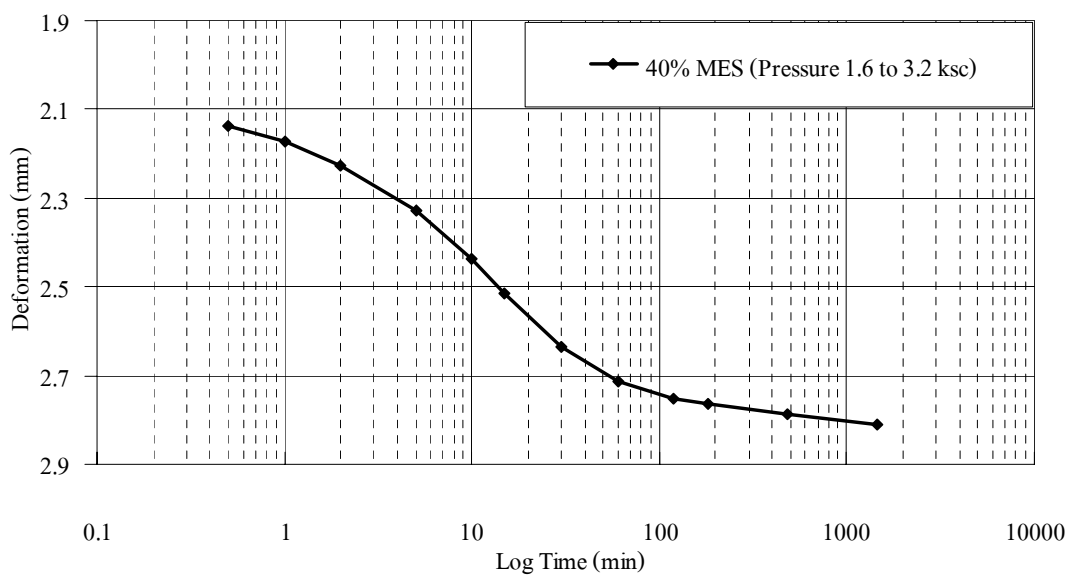
รูปที่ ๓ - 39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0.8 to 1.6 ksc



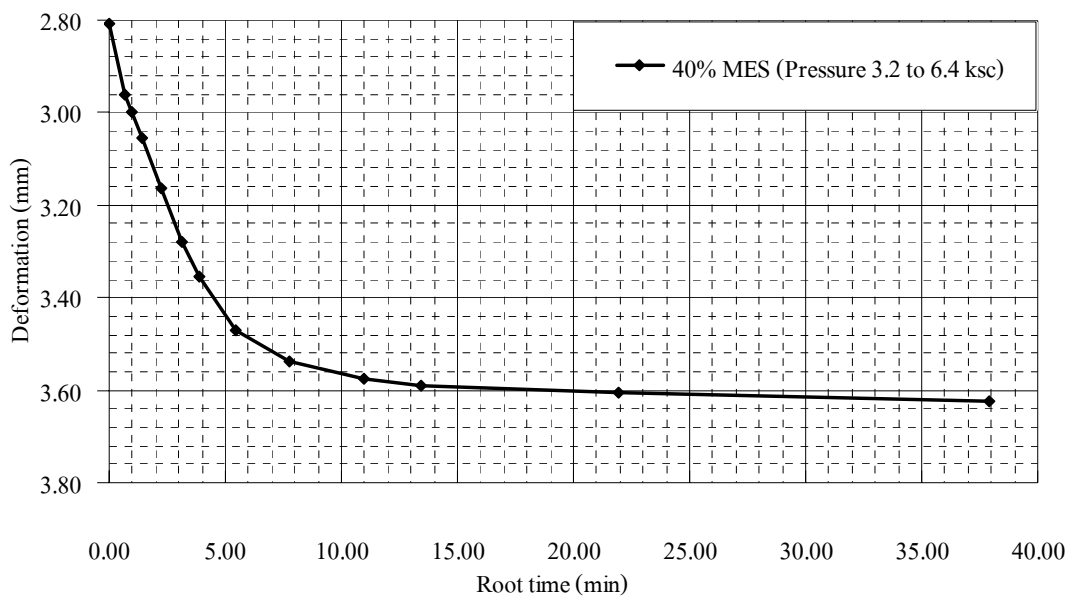
รูปที่ ๓ - 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 0.8 to 1.6 ksc



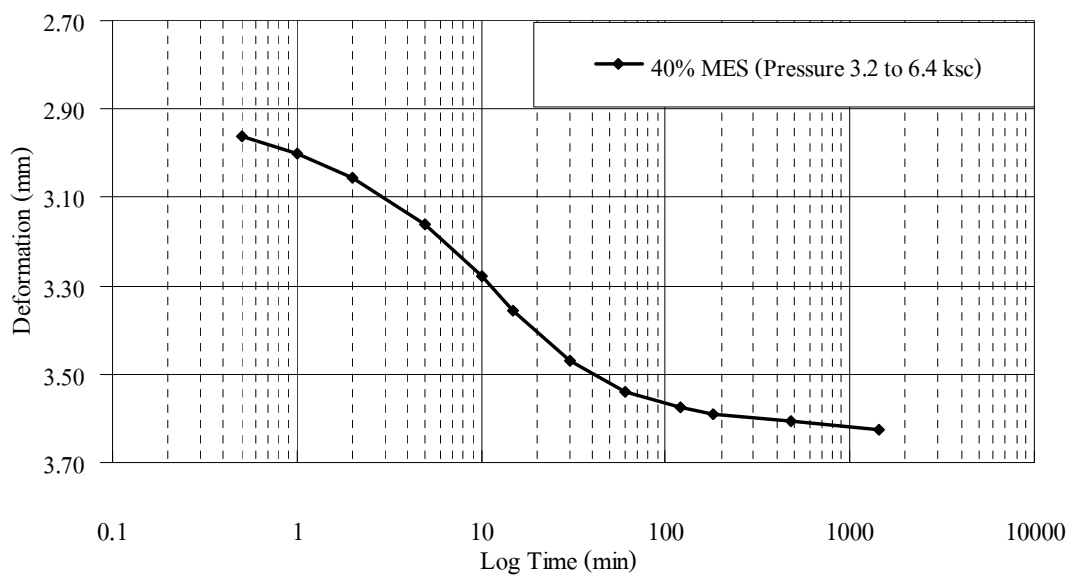
รูปที่ ข – 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 1.6 to 3.2 ksc



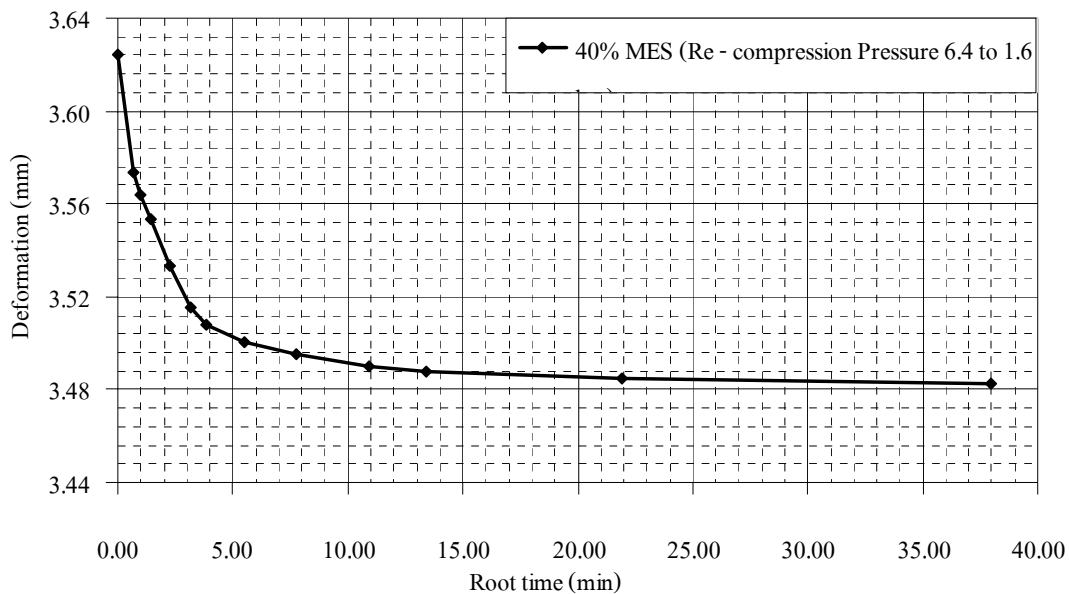
รูปที่ ข – 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 1.6 to 3.2 ksc



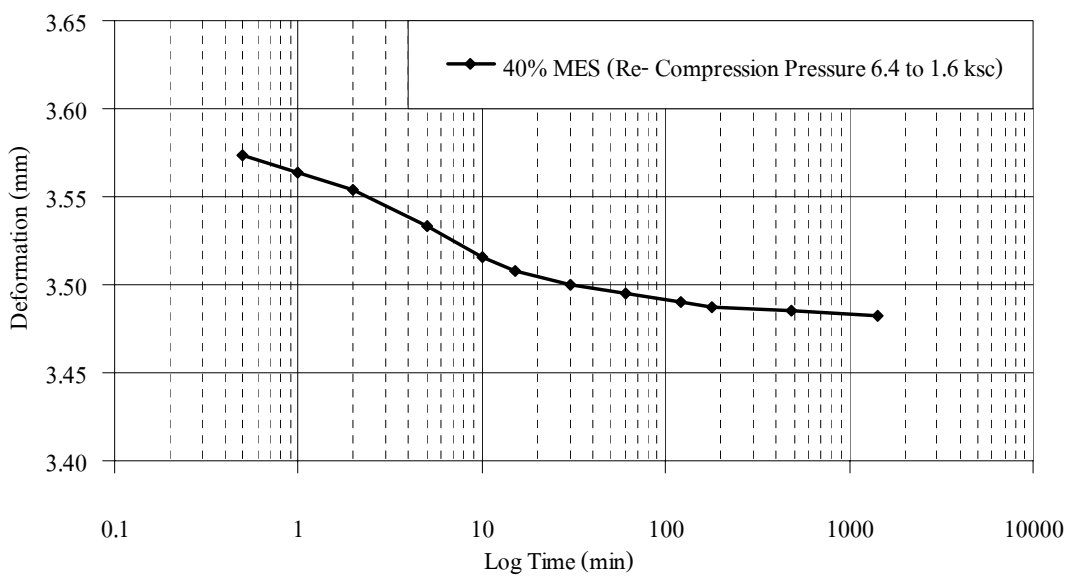
รูปที่ ข – 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 3.2 to 6.4 ksc



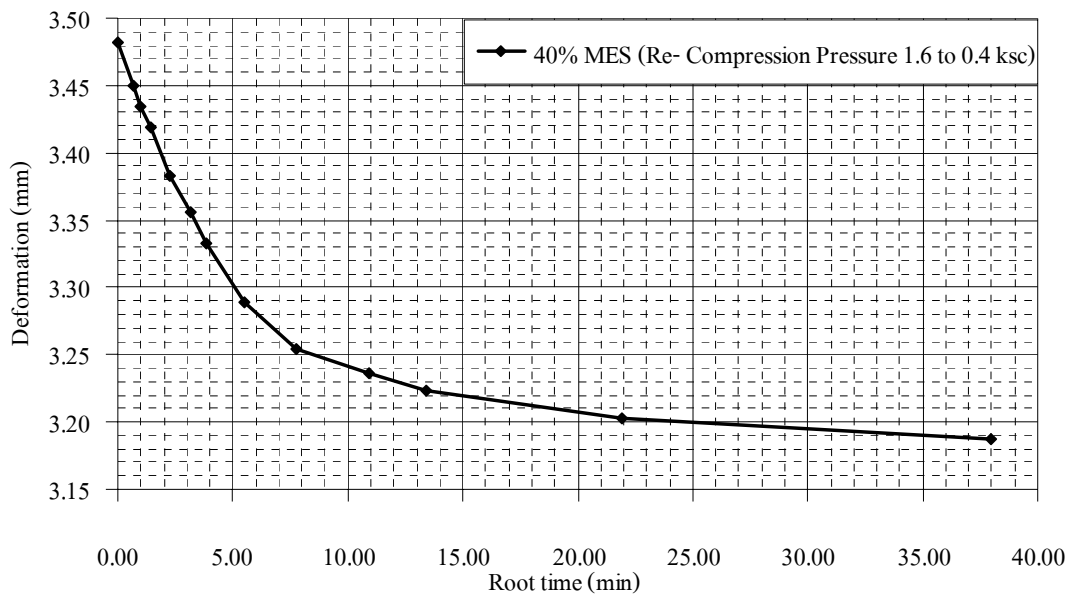
รูปที่ ข – 44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายทรายขนาดกลาง 40% Pressure 3.2 to 6.4 ksc



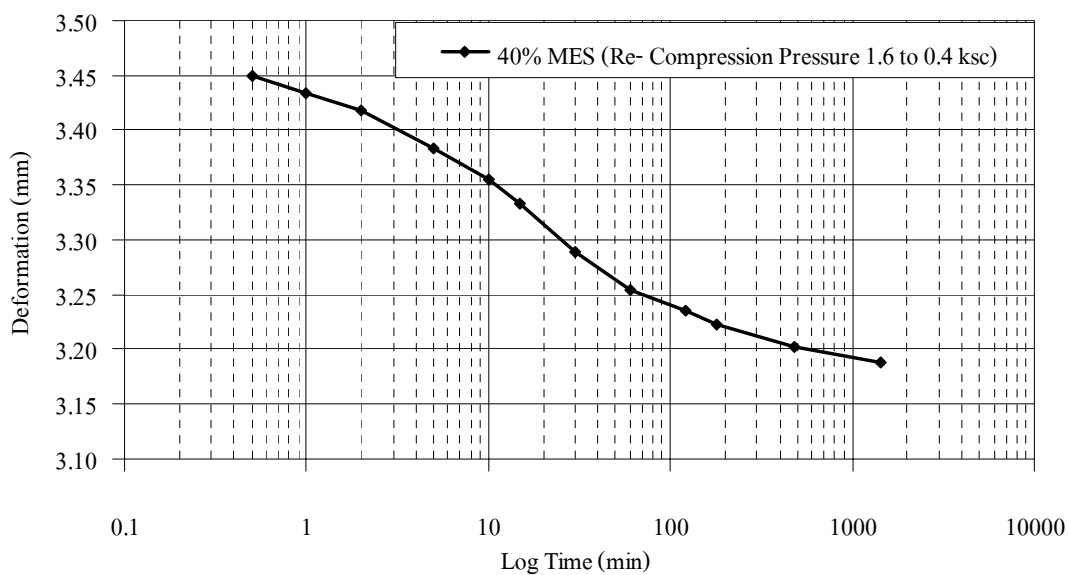
รูปที่ ข – 45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 40% Re – Compression Pressure 6.4 to 1.6 ksc



รูปที่ ข – 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 40% Re – Compression Pressure 6.4 to 1.6 ksc



รูปที่ ข – 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Root Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 40% Re – Compression Pressure 1.6 to 0.4 ksc

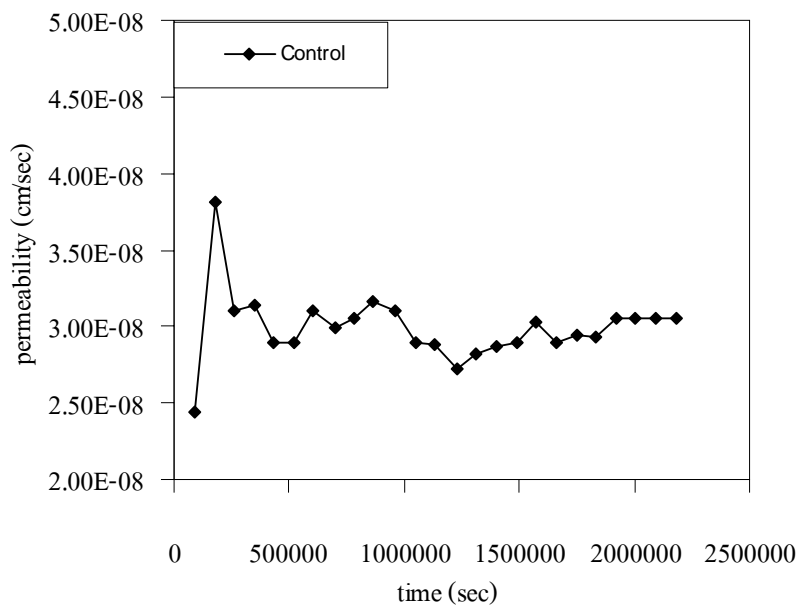


รูปที่ ข – 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deformation กับ Log Time ของตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายขนาดกลาง 40% Re – Compression Pressure 1.6 to 0.4 ksc

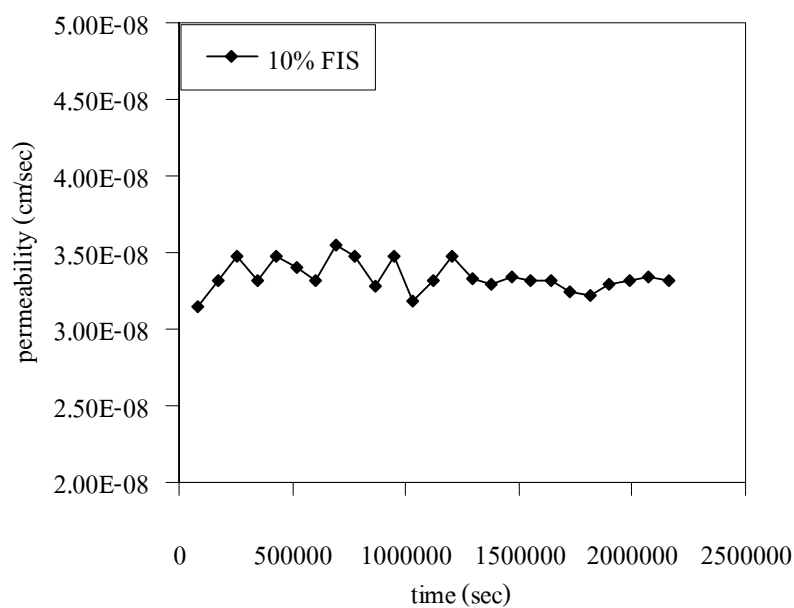


ภาคผนวก ค.

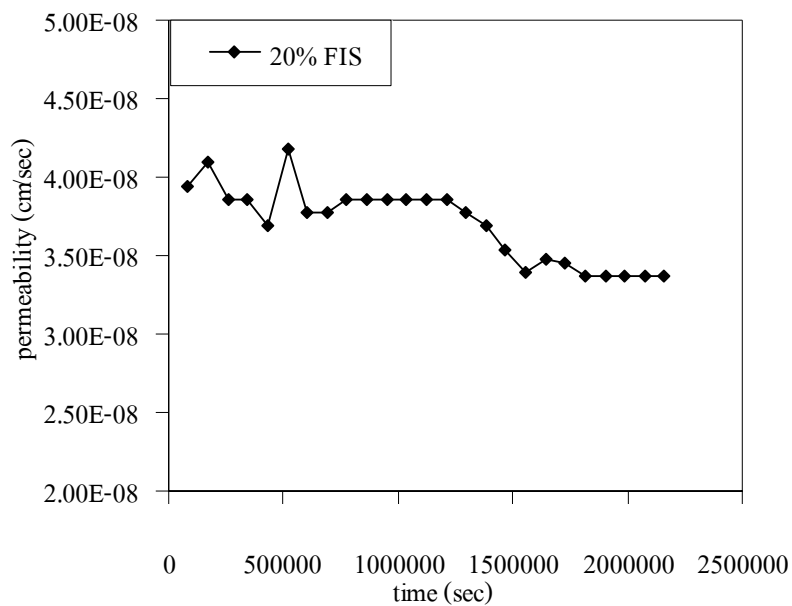
ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้นำข้ามผ่าน



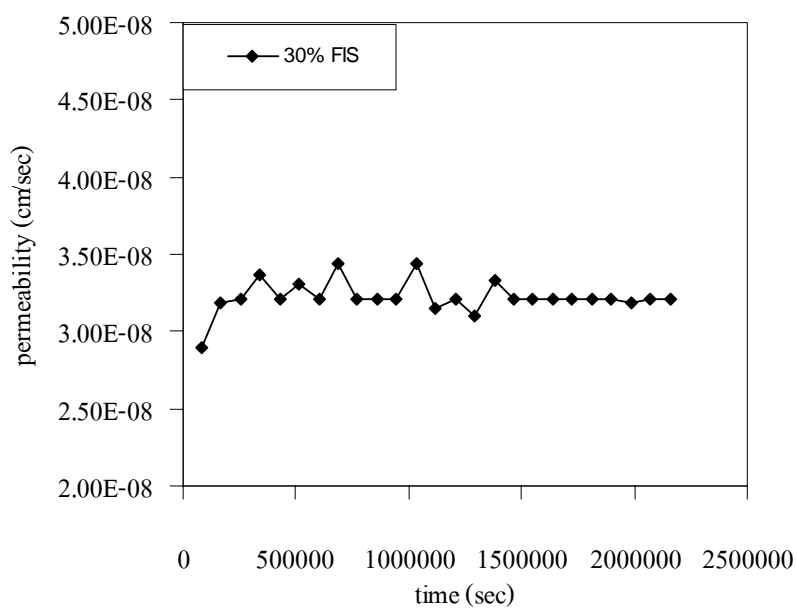
รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอม 100% ที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



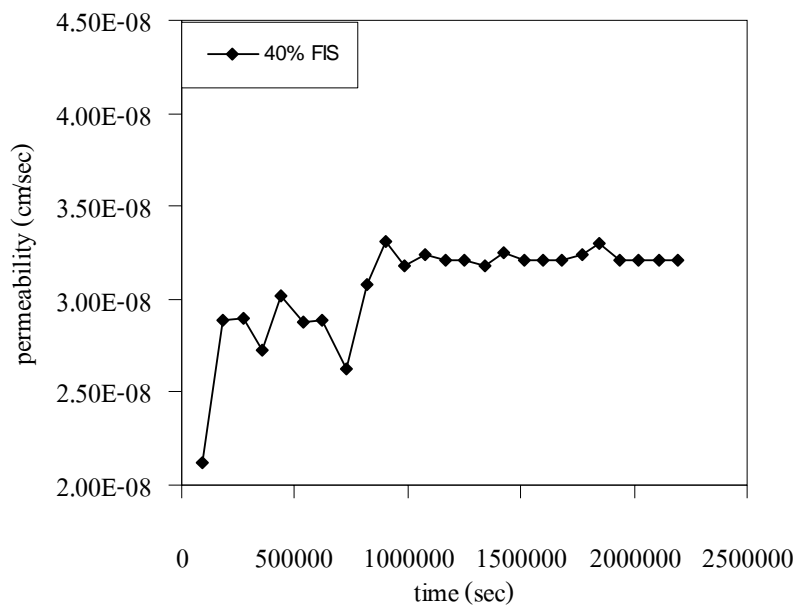
รูปที่ ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 10% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



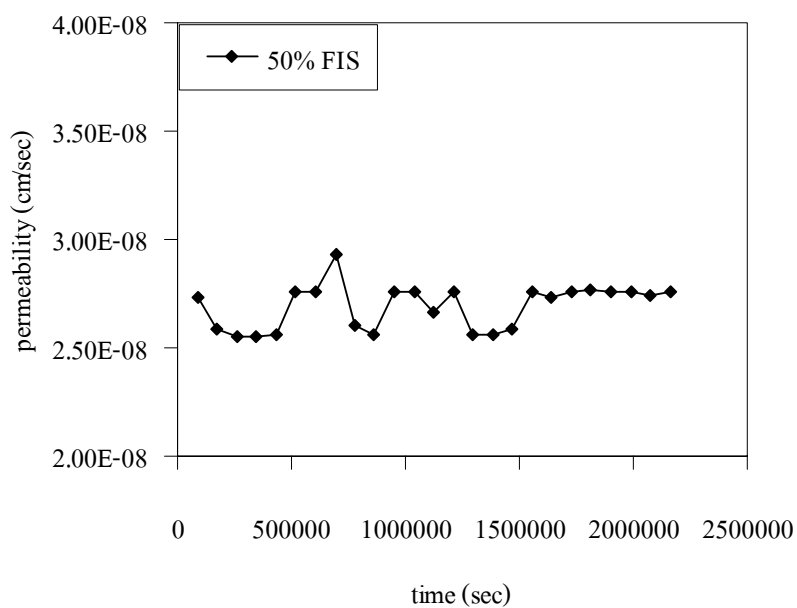
รูปที่ ค – 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 20% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



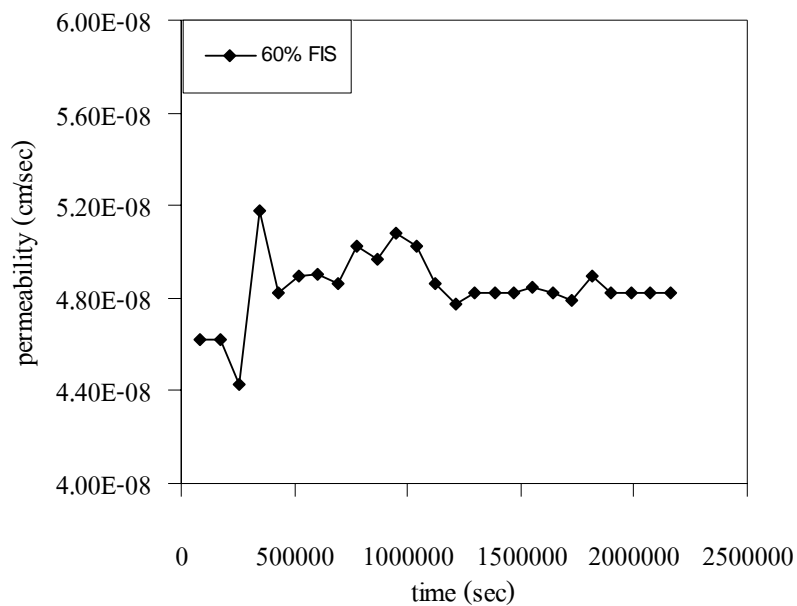
รูปที่ ค – 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 30% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



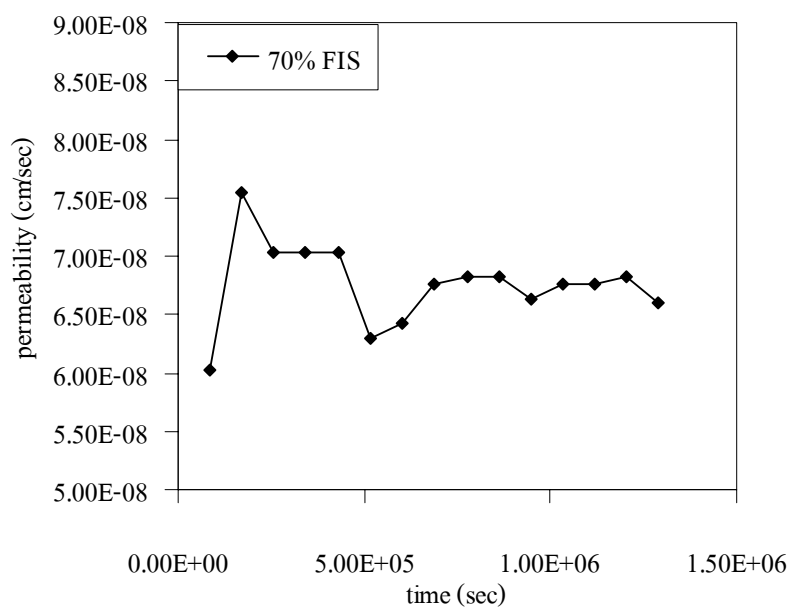
รูปที่ ค – 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 40% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



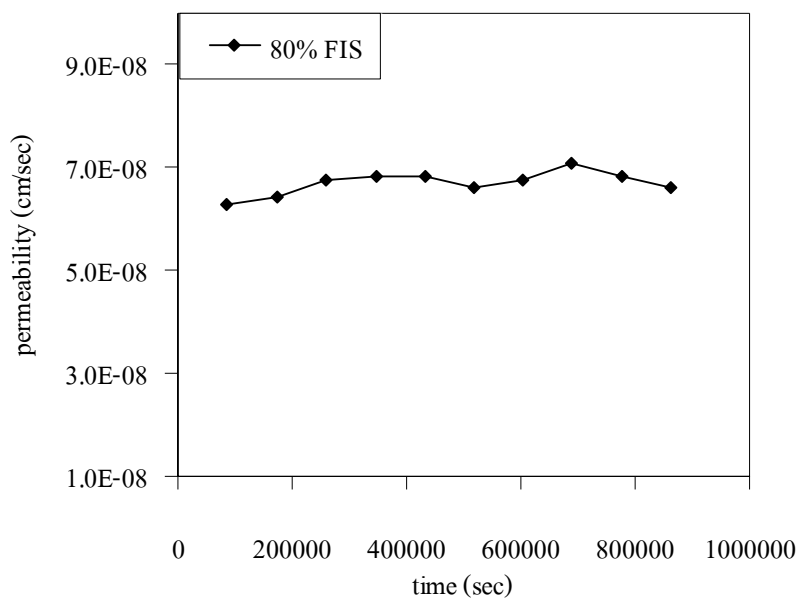
รูปที่ ค – 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 50% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



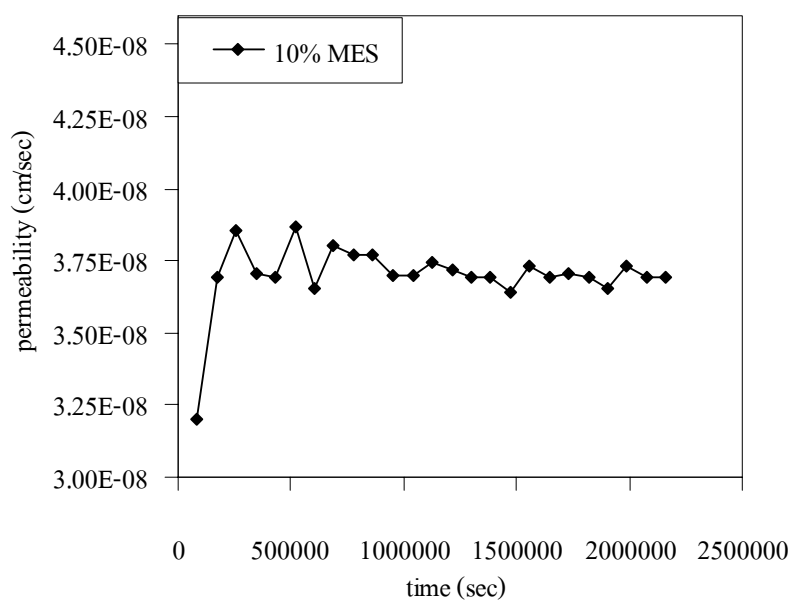
รูปที่ ค – 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 60% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



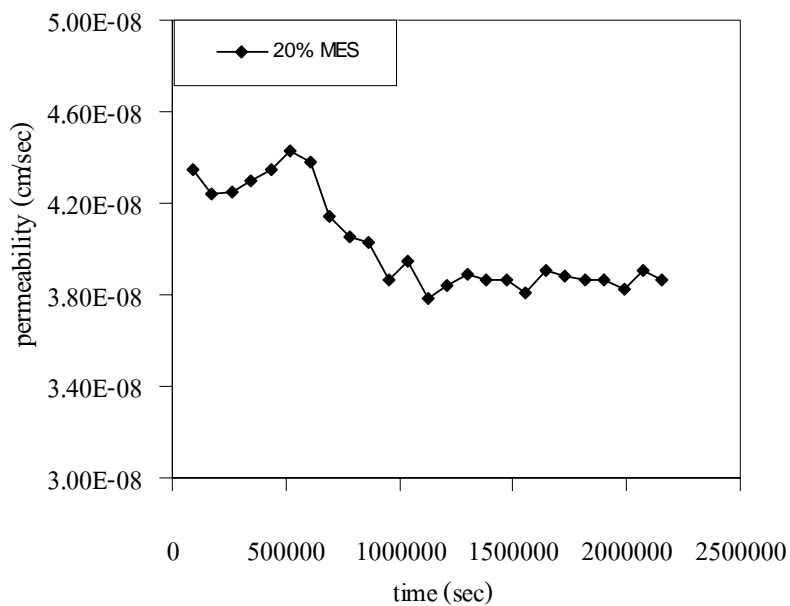
รูปที่ ค – 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 70% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



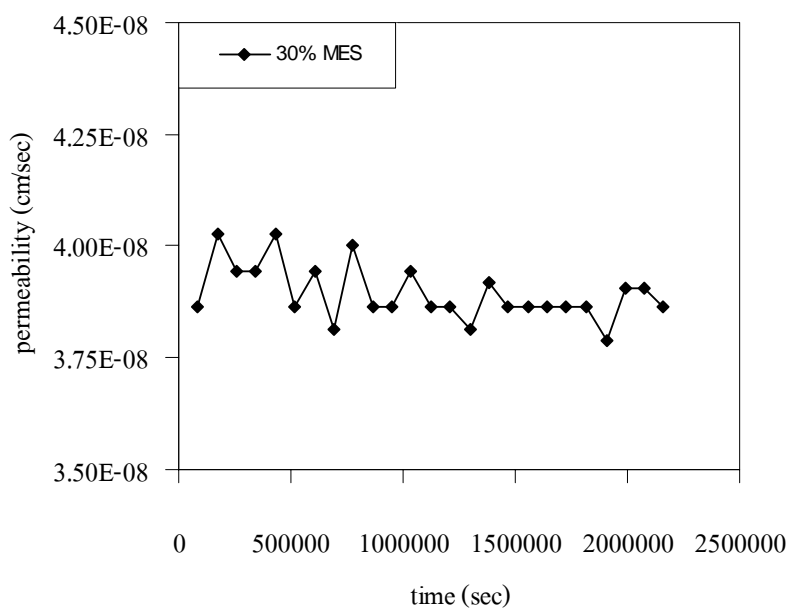
รูปที่ ค – 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายละเอียด 80% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



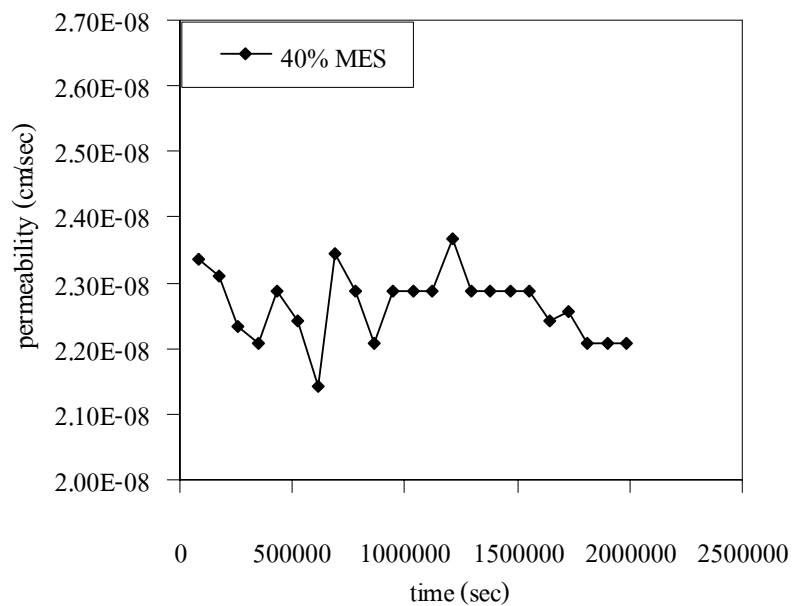
รูปที่ ค – 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทรายขนาดกลาง 10% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



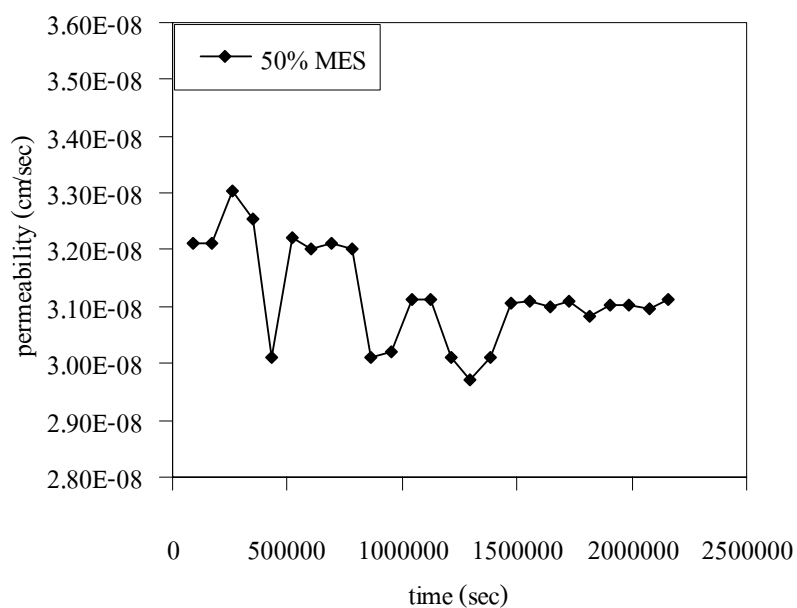
รูปที่ ค – 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทราย  
ขนาดกลาง 20% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



รูปที่ ค – 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทราย  
ขนาดกลาง 30% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

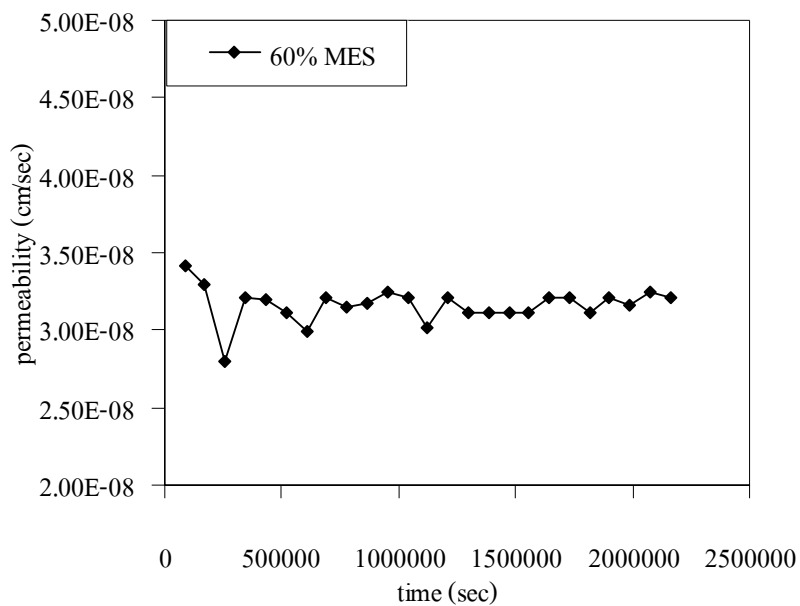


รูปที่ ค – 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทราย  
ขนาดกลาง 40% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

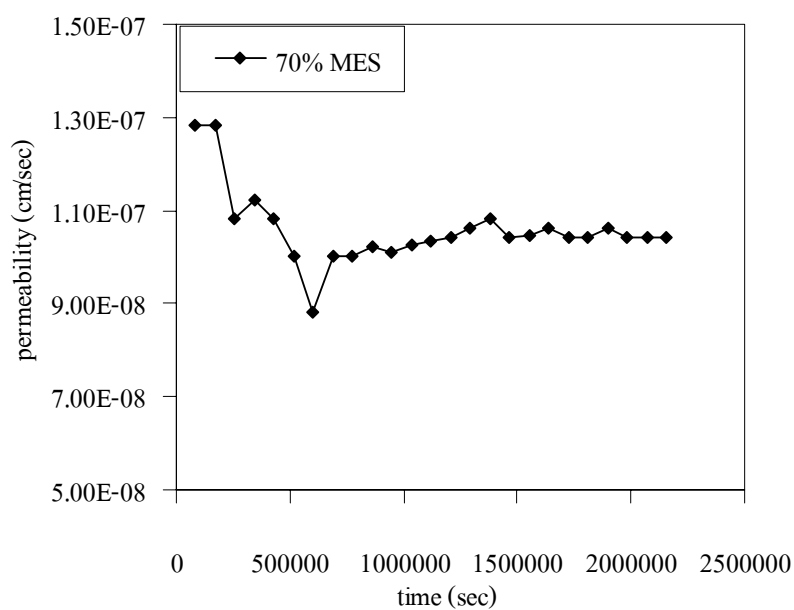


รูปที่ ค – 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทราย  
ขนาดกลาง 50% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

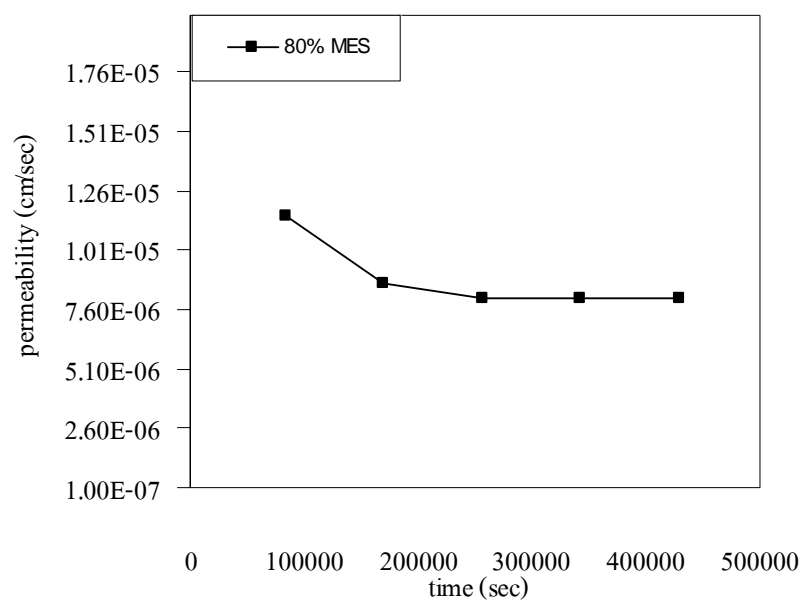




รูปที่ ค – 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทราย ขนาดกลาง 60% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



รูปที่ ค – 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทราย ขนาดกลาง 70% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



รูปที่ ค - 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability กับ time ของตัวอย่างดินเหนียวสะกอมผสมทราย  
ขนาดกลาง 80% สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

ภาคผนวก ง.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552



## ผลของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน

### EFFECTS OF SAND CONTENTS ON ENGINEERING PROPERTIES OF A SOFT CLAY

สारा เอียดเนียม (Sara Aiedniem)<sup>1</sup>

ธนิต เฉลิมยานนท์ (Tanit Chalermyanont)<sup>2</sup>

พิพัฒน์ ทองฉิม (Pipat Thongchim)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

*Sara\_geo2@hotmail.com*

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

*tanit.c@Psu.ac.th*

<sup>3</sup>อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

*Pipat\_thongchim@yahoo.com*

**บทคัดย่อ :** การศึกษาผลกระทบของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน โดยวิธีการผสมเหลว (Slurry) ตัวอย่างทรายที่ใส่ผสมแบ่งออกเป็นทรายขนาดกลาง และ ทรายเม็ดละเอียดในอัตราส่วนผสมทราย เท่ากับ 0 % 10% 20 % 30% และ 40% ต่อน้ำหนักดินเหนียวแห้ง จากนั้นนำไปทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้าน ค่าพิกัดแอดเตอร์เบอร์ก การอัดตัวคายน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยวิธีแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณทรายเพิ่มจาก 0% เป็น 40% ค่าพิกัดแอดเตอร์เบอร์ก ของดินผสมมีค่าลดลง คือ ค่าพิกัดลดลงจาก 58.48 % เป็น 42.67% ค่าดัชนีพลาสติกลดลงจาก 25.27% เป็น 18.21% ค่าดัชนีอัดตัวมีค่าลดลงจาก 0.43 เหลือเท่ากับ 0.27 ค่าดัชนีการบวมตัวลดลงจาก 0.085 เหลือ 0.051 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมากกว่า 70% ขึ้นไป และจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (CIU Triaxial Test) ค่ามุมเสียดทานภายในแบบหน่วยแรงรวมเพิ่มขึ้นจาก 15.6 องศา เป็น 26.25 องศา ค่ามุมเสียดทานภายในแบบหน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้นจาก 30.25 องศา เป็น 36.87 องศา การใช้ทรายผสมในดินเหนียวทำให้ค่ามุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทรายมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

**ABSTRACT :** This paper studies effects of sand contents on engineering properties of a soft clay. The soil samples were reconstituted by slurry method. Two sizes of sand were used, namely, medium sand and fine

sand. The portion of sand to dried weight soft clay are 0%, 10%, 20%, 30% and 40%. A series of Laboratory testing were conducted in ctively Atterberg's limits, consolidation , permeability and consolidated undrained triaxial tests. Results Testing shoring that, when sand content increased from 0% to 40% liquid limit decreased from 58.48% to 42.67%, plasticity index decreased from 25.27% to 18.21%, compression index decreased from 0.43 to 0.27, swell index decreased from 0.085 to 0.051, total friction angle increased from 15.6 degree to 26.25 degree, and effective friction angle increased from 30.25 degree to 36.87 degree. For sand content was greater than 70%, the coefficient of permeability of the samples increased significantly

**KEYWORDS :** Soft clay, Slurry sample, Sand clay mixing

**สาขาของบทความ :** วิศวกรรมปฐพี (GTE)

## 1. บทนำ

ปัญหาสำหรับในงานก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน คือความสามารถในการรับน้ำหนักของดินต่ำ และการทรุดตัวค่อนข้างสูง เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำและค่าดัชนีการอัดตัวสูงตามลำดับ ดังนั้นถ้าหากไม่สามารถหลีกเลี่ยงการก่อสร้างบนชั้นดินอ่อนได้ จำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้ดีขึ้นก่อนที่จะมีการก่อสร้าง เช่นการเติมสารลงไปชั้นดิน การใช้พลังงานในการบดอัดดิน และวิธีการเร่งการทรุดตัวของทรายเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาถูกและมีคุณสมบัติในการรับแรงได้ดี การทรุดตัวต่ำ และน้ำซึมผ่านได้ง่าย และมักจะผสมอยู่ในเนื้อดินเหนียวอ่อนเสมอ จึงมีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำทรายมาทำการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียว ตัวอย่างการศึกษาพฤติกรรมของแรงดันน้ำในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ บดอัดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย [1] พบว่าที่ปริมาณทรายน้อยกว่า 40% ค่าแรงดันน้ำมีผลน้อยมากทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย [2] ได้ศึกษาค่ากำลังรับแรงและค่า

สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมซีเมนต์ และดินเหนียว จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินผสมที่ดินเหนียวผสมกับทรายโดยที่ปริมาณทรายน้อยกว่า 80% ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

บทความนี้จะเสนอผลของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวสะกอม ที่สร้างตัวอย่างขึ้นใหม่แบบผสมเหลว ที่อัตราส่วนผสมของทรายในปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30%, และ 40% ต่อน้ำหนักดินเหนียวแห้ง

## 2. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ได้แบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลว และ การทดสอบคุณสมบัติของดินในห้องทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 การจัดเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลว

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลวแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัสดุ และขั้นตอนการสร้างตัวอย่าง

### 2.1.1 การเตรียมวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ที่ระดับความลึก 1-3 เมตรจากพื้นที่บริเวณปากแม่น้ำ ตำบลสะกอม อำเภोजะนะ จังหวัดสงขลา โดยการเก็บตัวอย่างแบบรบกวน (Disturbed Sample) ใช้วิธีการเปิดหน้าดินกว้างแล้วเก็บตัวอย่างดินมาอบแห้ง จากนั้นบดจนละเอียดเป็นผง ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อให้สามารถนำมาผสมกับทรายได้ และทรายเป็นตัวอย่างทรายแม่น้ำจากอำเภอรัตภูมิ จังหวัดสงขลา โดยวิธีการร้อนตะแกรงแบ่งออกเป็น 2 ขนาดคือทรายขนาดกลาง (Medium Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค้างตะแกรงเบอร์ 40 และ ทรายเม็ดละเอียด (Fine Sand) ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างตะแกรงเบอร์ 200

### 2.1.2 การสร้างตัวอย่าง

การศึกษาในครั้งนี้ใช้วิธีการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว (Slurry) ใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 80 กิโลปาสกาล ระยะเวลา 4 วัน เป็นตัวควบคุมให้หน่วยแรงกดทับในอดีต (Preconsolidation Pressure,  $P'_c$ ) ของดินตัวอย่างให้มีค่าเท่ากัน และเป็นระยะเวลาที่ตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวหลักดังแสดงในภาพที่ 1 และสามารถขึ้นรูปตัวอย่างได้

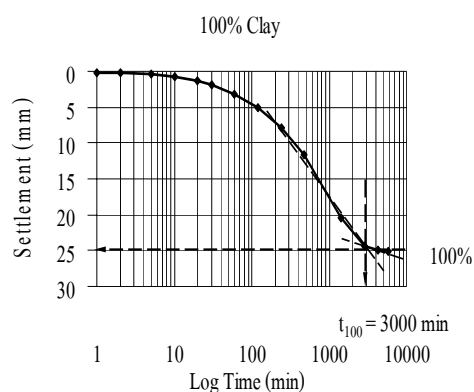
เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างผู้วิจัยดำเนินการสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวโดยมีรายละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 2 มีขั้นตอนในการสร้างตัวอย่างดังนี้

2.1.2.1 ผสมดินเหนียวบดกับทรายและน้ำที่ปริมาณความชื้นในดิน (Water Content) ที่มากกว่า Liquid Limit หรือ ที่ปริมาณน้ำที่ทำให้ทรายและดินเหนียวผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็กกวนผสมให้เข้ากัน

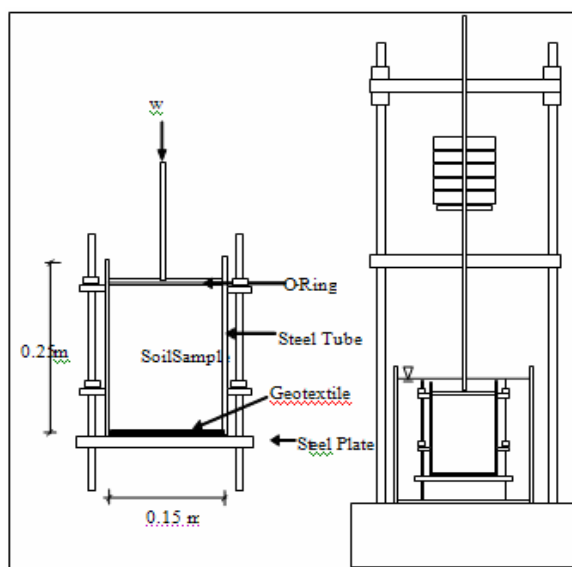
2.1.2.2 นำตัวอย่างดินผสมเหลว (Slurry) ที่ผสมกันดีแล้วใส่ในกระบอกเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการ

สร้างตัวอย่างขึ้นใหม่ (Reconstitute) โดยใช้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 80 กิโลปาสกาล คงน้ำหนักไว้ 4 วัน ให้ดินตัวอย่างสิ้นสุดการอัดตัวหลักของตัวอย่างดินเหนียวเป็นขึ้นตัวอย่างทดสอบได้

2.1.2.3 ดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกเตรียมตัวอย่างสำหรับจะนำไปทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่อไป



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement กับระยะเวลาในการสร้างตัวอย่างที่สิ้นสุดการอัดตัวหลักของตัวอย่างดินเหนียว 100%



ภาพที่ 2 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดินโดยวิธีการผสมเหลว

2.2 การทดสอบคุณสมบัติของดิน

ในการศึกษาได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของดินเหนียวและดินเหนียวที่ผสมทราย โดยมีรายละเอียดการทดสอบคุณสมบัติทางดัชนีและคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังนี้

2.2.1 คุณสมบัติทางดัชนี (Index Properties)

- การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity,  $G_s$ ) ตามมาตรฐาน ASTM : D 854-92
- การทดสอบหาปริมาณความชื้น (Water Content) ASTM : D 2216-92
- การวิเคราะห์ขนาดผลของเม็ดดิน (Sieve Analysis) ASTM : D 421
- การทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limit) ASTM : D 4318-95

2.2.2 คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม (Engineering Properties)

- ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability,  $k$ ) ASTM : D 2434-68
- การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ (Consolidated Undrained Triaxial Test, CIU) ตามมาตรฐาน ASTM : D 4767-95
- ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ตามมาตรฐาน ASTM : D 2435 – 96

3. ผลการวิจัย

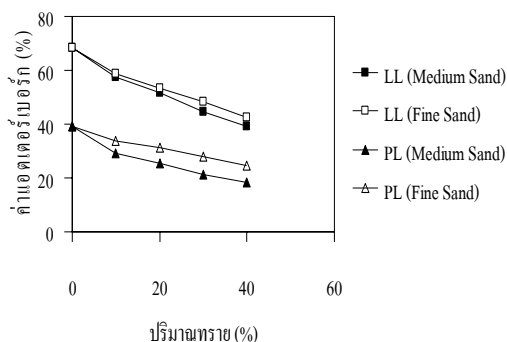
ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินเหนียวสะกอมจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวสะกอมและเมื่อจำแนกโดยระบบ USCS พบว่าเป็นดินเหนียวที่มีสภาพความเป็นพลาสติกสูง (CH) และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวสะกอม

| คุณสมบัติของดินทางกายภาพ             |       |
|--------------------------------------|-------|
| Dry Unit Weight Of Soil ( $g/cm^3$ ) | 1.163 |
| Natural Water Content (%)            | 43.73 |
| Specific Gravity, $G_s$              | 2.66  |
| Liquid Limit, LL (%)                 | 68.22 |
| Plastic Limit, PL (%)                | 39.15 |
| Plastic Index, PI (%)                | 29.07 |
| % Finer No. 40                       | 100   |
| % Finer No. 100                      | 99.85 |
| % Finer No. 200                      | 98.92 |

3.1 ผลการทดสอบค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์กของดินผสม

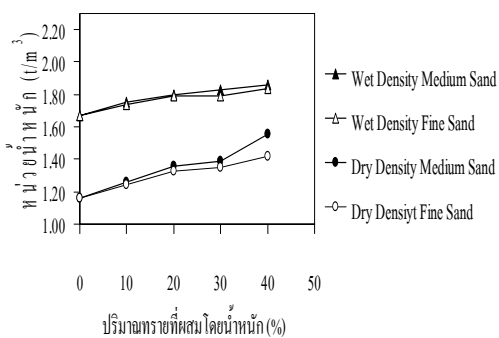
ค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์กของดินเหนียวสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด และ ทรายขนาดกลางจะมีค่าลดลงตามปริมาณทรายที่มากขึ้น ดังภาพที่3 ค่าพิกัดเหลวลดลง 37.4% และ 42.7 % ค่าพิกัดพลาสติกลดลง 37.5% และ 52.9 % เมื่อตัวอย่างดินผสมมีปริมาณทรายเม็ดละเอียด และทรายขนาดกลางเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดแอดเตอร์เบอร์กกับปริมาณทรายผสม

### 3.2 ผลของปริมาณทรายต่อค่าหน่วยน้ำหนักของดินตัวอย่าง

จากการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดและทรายขนาดกลางโดยการใช้น้ำหนักกวด 80 กิโลปาสกาลใช้ระยะเวลาในการคกน้ำหนัก 4 วัน ค่าหน่วยน้ำหนักของดินเหนียวผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่มากขึ้น และปริมาณความชื้นในดินลดลง เนื่องจากทรายมีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าดินเหนียว และหน่วยน้ำหนักของทรายที่มากกว่าดินเหนียวและน้ำเมื่อเข้าไปแทนที่จะทำให้หน่วยน้ำหนักของดินผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4 ค่าหน่วยน้ำหนักเปียกของดินผสมเพิ่มขึ้น 12% และ 11.1 % ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น 24.4% และ 21.75% เมื่อตัวอย่างดินผสมมีปริมาณทรายขนาดกลาง และทรายเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักกับปริมาณทรายที่ผสมจากการเตรียมตัวอย่างแบบผสมเหลว

### 3.3 ผลการทดสอบค่าการอัดตัวของน้ำ

จากผลการทดสอบค่าการอัดตัวของน้ำของดินเหนียว สะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดและทรายขนาดกลางโดยการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวพบว่าเมื่อผสมทรายลงไปในตัวอย่งดินเหนียวทำให้ค่าดัชนีอัดตัว (Compression index ,C<sub>c</sub>)

และค่าดัชนีการบวมตัว (Swell index ,C<sub>s</sub>) ลดลงตามอัตราส่วนของทรายที่ผสมดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าดัชนีอัดตัว (C<sub>c</sub>) ลดลง 33.25% และ 29.03% ค่าดัชนีการบวมตัว (C<sub>s</sub>) ลดลง 40% และ 30.58% เมื่อตัวอย่างดินผสมมีปริมาณทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% ตามลำดับ

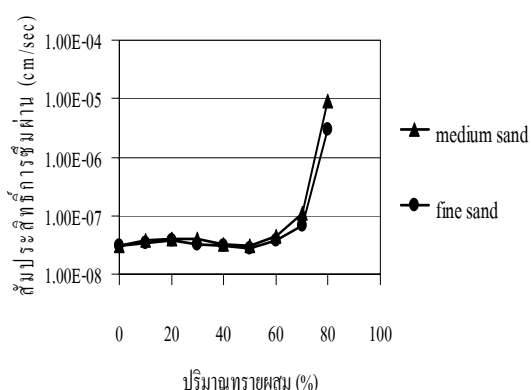
ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบการอัดตัวของน้ำของตัวอย่างดินผสมที่ใช้ทรายเป็นตัวผสม

| Medium    | ปริมาณทรายที่ใช้ผสมโดยน้ำหนัก |       |       |       |       |
|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|           | 0%                            | 10%   | 20%   | 30%   | 40%   |
| Sand      |                               |       |       |       |       |
| Cc        | 0.403                         | 0.335 | 0.302 | 0.286 | 0.269 |
| Cs        | 0.085                         | 0.071 | 0.063 | 0.058 | 0.051 |
| Fine Sand | ปริมาณทรายที่ใช้ผสมโดยน้ำหนัก |       |       |       |       |
|           | 0%                            | 10%   | 20%   | 30%   | 40%   |
| Cc        | 0.403                         | 0.387 | 0.370 | 0.319 | 0.286 |
| Cs        | 0.085                         | 0.075 | 0.068 | 0.062 | 0.059 |

### 3.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวสะกอมที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียดและทรายขนาดกลางโดยการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวที่แรงดันหรือระดับความลึกของน้ำเดียวกัน ดังภาพที่ 6 พบว่าที่ปริมาณทรายผสมจาก 0% ถึง 70% โดยน้ำหนักค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $2.99 \times 10^{-8}$  cm/s ถึง  $6.83 \times 10^{-8}$  cm/s และจะเพิ่มขึ้นเป็น  $6.83 \times 10^{-6}$  cm/s และ  $3.01 \times 10^{-6}$  cm/s เมื่อมีปริมาณทรายขนาดกลางและทรายละเอียดผสมที่ 80 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mahasnes and Shawabkes [2] และ Ozgurel, and Vipulanandan [4]





ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายผสมกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

### 3.5 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกน

การศึกษาผลกระทบของปริมาณทรายต่อค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวโดยวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ Consolidated Undrained Triaxial Test, CIU โดยใช้ค่าความดันอัดตัวคายนํ้า (Effective Consolidation Pressure,  $\sigma'_c$ ) ที่ 40, 80 และ 160 กิโลปาสกาล

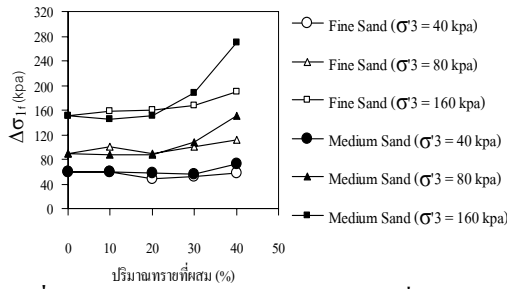
ค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ค่าความดันอัดตัวคายนํ้าเท่ากับ 40 กิโลปาสกาล ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะไม่แปรเปลี่ยนตามปริมาณทรายที่ผสมเพิ่มมากขึ้น แต่ในส่วนของค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ค่าความดันอัดตัวคายนํ้าเท่ากับ 80 และ 160 กิโลปาสกาล ค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะแปรเปลี่ยนตามปริมาณทรายที่ผสม โดยค่าความเค้นเบี่ยงเบนที่ค่าความดันอัดตัวคายนํ้าเท่ากับ 160 กิโลปาสกาลจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 150 กิโลปาสกาล เป็น 167 กิโลปาสกาล และ 187 กิโลปาสกาล เมื่อตัวอย่างดินผสมมีปริมาณทราย 0% เป็น 30% และค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะเพิ่มเป็น 190 กิโลปาสกาล และ 270 กิโลปาสกาล เมื่อมีปริมาณทรายละเอียดและทรายขนาดกลางผสมที่ 40% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ธนากร [1] และจากการศึกษาพบว่าดินที่มีส่วนผสมของ

ทรายขนาดกลางจะมีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงกว่าดินที่มีอัตราส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดที่ค่าความดันอัดตัวคายนํ้าเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าขนาดของเม็ดทรายมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อน ดังภาพที่ 7

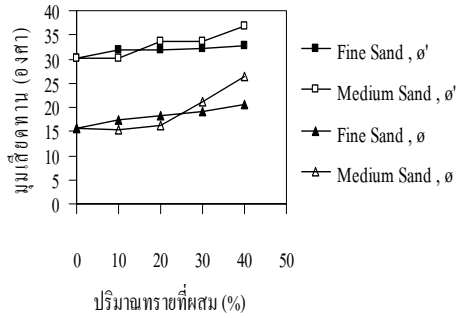
ผลกระทบของปริมาณทรายต่อค่าแรงดันนํ้า (Excess Pore Pressure) ที่ปริมาณอัตราส่วนผสมของทรายต่างกันเมื่อค่าความดันอัดตัวคายนํ้าเท่ากัน ที่อัตราส่วนผสมของทรายตั้งแต่ 0% ถึง 20% จะลดลงน้อยมาก แต่ที่ปริมาณทรายตั้งแต่ 20 % ขึ้นไปค่าแรงดันนํ้าจะลดลงตามปริมาณทรายที่ผสม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ธนากร [1] โดยดินที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางจะมีค่าแรงดันนํ้าลดลงมากกว่าดินที่มีส่วนผสมของทรายเม็ดละเอียดที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน และที่ค่าความดันอัดตัวคายนํ้าเดียวกัน ดังภาพที่ 8

ปริมาณทรายที่ผสมในดินเหนียวในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ของดินที่มีส่วนผสมของทรายขนาดกลางและทรายเม็ดละเอียดลดลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้นดังภาพที่ 9

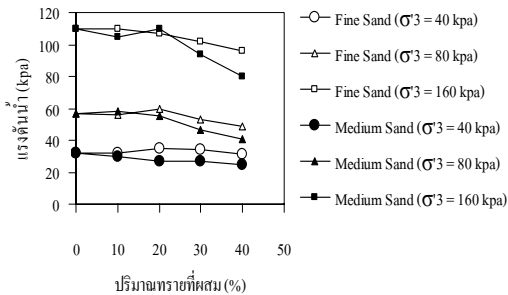
ค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction Angle) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้นดังภาพที่ 10 และ ค่ามุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้นจาก 15.6 องศา เป็น 20.56 องศา และ 26.26 องศา ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลเพิ่มขึ้นจาก 30.25 องศา เป็น 32.73 องศา และ 36.87 องศาเมื่อตัวอย่างดินผสมมีปริมาณทรายเม็ดละเอียด และทรายขนาดกลางเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% ตามลำดับ



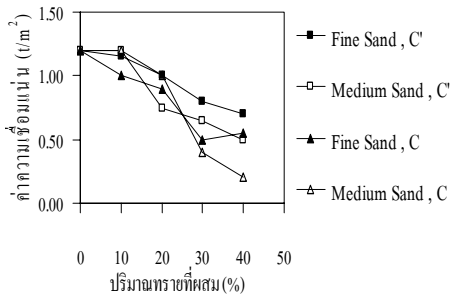
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเบี่ยงเบนกับปริมาณทรายที่ผสมจากการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานและปริมาณทรายที่ผสมจากการสร้างตัวอย่างดินแบบผสมเหลว



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำกับปริมาณทรายที่ผสมจากการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเชื่อมแน่นและปริมาณทรายที่ผสมจากการสร้างตัวอย่างแบบผสมเหลว

#### 4. สรุปผลการทดสอบ

ผลการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวสะกอมที่สร้างตัวอย่างแบบผสมเหลวพบว่าปริมาณทรายที่ผสมอยู่ในดินเหนียวจะทำให้ค่าการยุบตัวลดลงและดินที่ผสมทรายขนาดกลางจะมีค่าการยุบอัดตัวน้อยกว่าดินที่ผสมด้วยทรายเม็ดละเอียด ค่าความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านของดินผสมที่ปริมาณทรายผสมตั้งแต่ 0 % ถึง 70 % จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากและจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณของทรายที่ผสมมีค่าตั้งแต่ 70 % ขึ้นไป และในส่วนของค่าความสามารถในการรับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินผสมเมื่อมีปริมาณทรายผสมอยู่ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินจะลดลงเมื่อปริมาณทรายที่ผสมมีมากขึ้น ค่ามุมเสียดทานภายในจะมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณทรายมากกว่า 30 % นอกจากนี้ขนาดของเม็ดทรายที่ผสมในดินเหนียวยังมีผลต่อค่าคุณสมบัติการรับกำลังของดินด้วย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คณะครูอาจารย์ที่คอยให้คำปรึกษา

## 6. บรรณานุกรม

- [1] ชนากร นาเซียงใต้ ;2541.พฤติกรรมของแรงดันน้ำในดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยทราย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] Bassam Z Mahasnes and Reyad A. Shawabkes. 2005. Compressive Strength and Permeability of Sand – Ceent – Clay Composite and Application for Heavy Metals Stabilization, Journal, 2005-0528
- [3] Chalermyanont, T. and Arrykul, S. 2005. Compacted sand bentonite mixtures for hydraulic containment liners. Songklanakarin J. Sci. Technol., 2005, 27 (2) : 313-323
- [4] H.G Ozgurel, and C. Vipulanandan, 2005. Effect of Fines Content on the Mechanical Behavior and Groutability of Acrylamide Grouted Sands, Journal, 2005

## ประวัติผู้เขียน

|   |   |                     |
|---|---|---------------------|
| ชื่อ สกุล                                   | นายสรา יעדניעם                            |                     |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา                        | 4910120048                                |                     |
| วุฒิการศึกษา                                |   |                     |
| วุฒิ  | ชื่อสถาบัน                                | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต<br>(วิศวกรรมโยธา) | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ<br>จอมเกล้าธนบุรี | 2547                |

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนผู้ช่วยสอน (Teaching Assistantship) ปีการศึกษา 2549

## ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

อาจารย์พิเศษสอน

แผนกวิชาช่างโยธา วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

## การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

สรา יעדניעם, ธนิต เฉลิมยานนท์ และ พิพัฒน์ ทองนิม. (2552). ผลของทรายต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา. หน้า 57-62.