

พฤติกรรมการณ์ปรับตัวคายน้ําของดินเหนียวกรุงเทพฯสร้างใหม่ จากสถานะเหลวถึงสถานะพลาสติก



นายวิโรจน์ บุญผลากร

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3974-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONSOLIDATION BEHAVIOR OF RECONSTITUTED BANGKOK CLAY FROM LIQUID STATE TO  
PLASTIC STATE



Mr. Virote Budsayaplakorn

คุณยวิทย์วิทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3974-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวกรุงเทพฯสร้างใหม่ จาก  
สถานะเหลวถึงสถานะพลาสติก

โดย

นายวิโรจน์ บุศยพลากร

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เทพรักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)

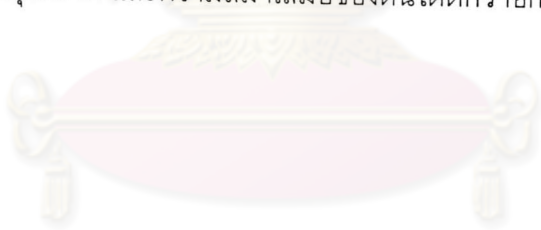
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(Dr. Tian Ho Seah)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุวิตร บุญญะฐิติ)

วิไลจน์ บุศยพลากร : พฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวกรุงเทพฯสร้างใหม่ จากสถานะ  
เหลว ถึงสถานะพลาสติก (CONSOLIDATION BEHAVIOR OF RECONSTITUTED BANGKOK CLAY  
FROM LIQUID STATE TO PLASTIC STATE) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย  
อุกฤษฏชน, 170 หน้า. ISBN : 974-17-3974-5.

งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯสร้างใหม่ เพื่อใช้ในการทดสอบ  
ขั้นสูง เทคนิคการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่จากสถานะดินเหลว ให้เป็นดินในสถานะ  
พลาสติกจากการอัดตัวคายนํ้าในสภาพ 1 มิติ ด้วยเครื่องมือ Large Consolidometer ได้แสดงไว้ใน  
การวิจัยนี้ ความสม่ำเสมอของขบวนการเตรียมตัวอย่างจะตรวจสอบจากตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่  
ที่ได้ เปรียบเทียบกันในแต่ละรุ่นผสม โดยทดสอบการอัดตัวคายนํ้า ด้วยอัตราเครียดคงที่แบบการ  
ระบายนํ้าในแนวตั้ง (CRS-V) และแบบการระบายนํ้าในแนวราบ (CRS-R) รวมทั้งทดสอบ  
Conventional Oedometer ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ที่ได้ มีความสม่ำเสมอ  
ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทดสอบอื่นๆ ที่ต้องการตัวอย่างทดสอบที่มีคุณภาพสูง  
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวสร้างใหม่ และดินเหนียวคง  
สภาพจากในสนามพบว่า กราฟการอัดตัวมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยดินเหนียวธรรมชาติจะมี  
ค่าอัตราส่วนช่องว่างที่สูงกว่าของดินเหนียวสร้างใหม่ ที่หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งเดียวกัน ทั้งนี้  
เป็นผลเนื่องจาก Thixotropic, Aging และ Natural Cementation เป็นต้น โดยสรุปแล้วดินเหนียว  
สร้างใหม่มีพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าที่ใกล้เคียงกับของดินเหนียวธรรมชาติ ดังนั้นวิธีการเตรียม  
ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง นอกเหนือไปจากการเก็บตัวอย่างดินในสนาม  
และยังสามารถควบคุมคุณภาพ และความสม่ำเสมอของดินได้ดีกว่าอีกด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิติ.....  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา..... 2546.....



## 4470544021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: CLAYS / COMPRESSIBILITY / CONSOLIDATION / SOIL STRUCTURE / RECONSTITUTED

VIROTE BUDSAYAPLAKORN : CONSOLIDATION BEHAVIOR OF RECONSTITUTED BANGKOK

CLAY FROM LIQUID STATE TO PLASTIC STATE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONCHAI

UKRITCHON, Sc.D., 170 pp. ISBN : 974-17-3974-5.

This thesis provides the method of preparing reconstituted Bangkok clay for advanced testing purpose. Techniques of preparing reconstituted clay from slurry to semi-solid states under one-dimensional consolidation condition in a large consolidometer are presented. The uniformity of the preparation process has been verified through a series of consolidation tests after the soil cake has been formed in the consolidometer. The constant rate of strain (CRS) consolidation under vertical and radial drainage conditions along with conventional oedometer tests were adopted for confirming the consistency of each sample batch. The results indicated that good uniformity of soil has been achieved, which can be adopted for other types of testing requiring high quality samples. The consolidation behavior of the reconstituted clay was compared with undisturbed clay obtained from the field, indicating small differences in the compression curves. The undisturbed clay has slightly higher void ratio than the reconstituted clay at the same vertical stress, due to the effect of thixotropic, aging, natural cementation, etc. In summary, the reconstituted clay exhibits consolidation behavior close to that of the natural clay, hence the method of reconstitution provides an alternative to field sampling, and it also provides a better control in soil uniformity.

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ..... Civil Engineering ..... Student's signature.....

Field of study ..... Civil Engineering ..... Advisor's signature.....

Academic year ..... 2003.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้

Dr. Tian Ho Seah ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำชี้แนะวิธีการทดสอบ และให้ยืมเครื่องมือทดสอบ CRS-R ตลอดจนได้ปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาใช้เวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

มูลนิธิเมธีวิจัยอาวุโส และ กองทุนสนับสนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่วิจัยปฏิบัติการภาค วิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

คุณจันทร์เพ็ญ มนต์ทรงธรรม ที่ช่วยพิมพ์ เรียบเรียง ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีในยามที่ผู้เขียนท้อ เสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนปรารถนาที่จะแสดงความรำลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดา ที่ได้ให้ความสนับสนุน และเป็นกำลังใจแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษาในระดับนี้

วิโรจน์ บุศยพลากร

ศูนย์วิทยุโทรคมนาคม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

|   |    |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....   | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....  | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ  |
| สารบัญ .....  | ช  |
| สารบัญรูป .....   | ฎ  |
| สารบัญตาราง .....   | ณ  |
| <br>  |    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1  |
| 1.1 คำนำ .....  | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....  | 3  |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....   | 3  |
| 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย .....   | 4  |
| <br>  |    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                    | 5  |
| 2.1 กำเนิดและลักษณะของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ .....                         | 5  |
| 2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ .....                 | 5  |
| 2.2.1 ขบวนการอัดตัวคายน้ำ .....   | 5  |
| 2.2.2 การยุบตัวของดิน (Soil Compressibility).....                             | 6  |
| 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ .....                           | 8  |
| 2.2.4 ครีพแบบระบายน้ำ (Drained Creep).....                                    | 12 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยอัตราความเครียดคงที่ ..... | 15 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับดินเหนียวสร้างใหม่ .....                              | 18 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวเหลว .....         | 21 |
| 2.6 ทฤษฎีในการวิเคราะห์ CRS.....  | 27 |
| 2.7 การเลือกอัตราความเครียดทดสอบ (Strain Rate Selection) .....                | 34 |
| 2.8 การหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต .....                              | 36 |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 วิธีการทดสอบและวิจัย .....  | 38   |
| 3.1 ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ .....   | 38   |
| 3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของดิน.....   | 38   |
| 3.3 โปรแกรมการทดสอบ .....   | 40   |
| 3.4 การทดสอบอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียว ในสถานะดินเหลว<br>(Reconstituted Consolidation Test) .....  | 43   |
| 3.4.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ.....  | 43   |
| 3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....  | 44   |
| 3.5 การทดสอบอัดตัวคายนํ้าในแนวตั้ง ด้วยอัตราความเครียดคงที่<br>(Constant Rate of Strain Consolidation Test with Vertical Drainage,<br>CRS-V)..... | 49   |
| 3.5.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ.....  | 49   |
| 3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....  | 51   |
| 3.6 การทดสอบอัดตัวคายนํ้าในแนวราบ ด้วยอัตราความเครียดคงที่<br>(Constant Rate of Strain Consolidation Test with Radial Drainage,<br>CRS-R).....    | 54   |
| 3.6.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ.....  | 54   |
| 3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....  | 55   |
| 3.7 การปรับแก้แรงลอยตัว และแรงเสียดทาน<br>(Uplift and Friction Force Correction) .....  | 57   |
| 3.8 การทดสอบอัดตัวคายนํ้าแบบ 1 มิติ<br>(Conventional Oedometer Test).....   | 58   |
| 3.8.1 ลักษณะเครื่องมือทดสอบ.....  | 58   |
| 3.8.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....  | 58   |
| 3.9 การกำหนดหมายเลขตัวอย่างทดสอบ .....  | 58   |



## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล .....  | 59   |
| 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางเคมีของดิน .....                                   | 59   |
| 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน .....  | 59   |
| 4.1.2 ผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมี .....   | 59   |
| 4.2 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของดินเหนียวสร้างใหม่<br>(Uniformity of Reconstituted Clay) .....     | 62   |
| 4.3 ผลทดสอบการอัดตัวคายนํ้า ในสถานะดินเหลว .....  | 71   |
| 4.3.1 พฤติกรรมการอัดตัว (Compression Curve) .....   | 71   |
| 4.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวในแนวตั้ง<br>(Vertial Coeff. of Consolidation, $c_v$ ) .....      | 71   |
| 4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวตั้ง<br>(Vertial Coefficient of Permeability, $k_v$ ) ..... | 78   |
| 4.4 ผลทดสอบการอัดตัวคายนํ้า ของดินเหนียวสร้างใหม่ .....   | 80   |
| 4.4.1 ความแม่นยำของการทดสอบ (Consistency of Test Results) .....                                 | 80   |
| 4.4.2 กราฟการอัดตัว (Compression Curve) .....   | 80   |
| 4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of Consolidation, $c$ ) .....                       | 96   |
| 4.4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, $k$ ) .....                       | 96   |
| 4.4.5 พฤติกรรม Anisotropic ของการอัดตัวคายนํ้า .....  | 96   |
| 4.5 เปรียบเทียบผลทดสอบการอัดตัวคายนํ้า ของดินเหนียวสร้างใหม่<br>และดินเหนียวธรรมชาติ .....      | 100  |
| 4.5.1 กราฟการอัดตัว (Compression Curve) .....   | 100  |
| 4.5.2 สมการความสัมพันธ์ของกราฟการอัดตัวระหว่างดินเหนียวธรรมชาติ<br>และดินเหนียวสร้างใหม่ .....  | 113  |
| 4.5.3 สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้า (Coefficient of Consolidation) .....                         | 116  |
| 4.5.4 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) .....                                | 116  |
| 4.5.5 พฤติกรรม Anisotropic ของการอัดตัวคายนํ้า .....  | 116  |
| 4.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับงานวิจัยอื่น .....  | 123  |
| 4.6.1 การเปรียบเทียบผลกับตัวอย่างดินบริเวณรังสิต .....  | 123  |

สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.6.2 การเปรียบเทียบผลกับตัวอย่างดินจากงานวิจัยอื่น .....  | 125  |
| 4.7. การหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีตจากการทดสอบ CRS .....   | 128  |
| 4.8 แรงดันน้ำจากการทดสอบ CRS .....   | 129  |
| <br>   |      |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....   | 132  |
| 5.1 สรุปผลการทดสอบ.....  | 132  |
| 5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม .....  | 134  |
| <br>   |      |
| รายการอ้างอิง.....   | 135  |
| <br>   |      |
| ภาคผนวก.....   | 139  |
| ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบ Reconstituted Consolidation Test.....  | 140  |
| ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่<br>ด้วยเครื่องมือ Conventional Oedometer, CRS-V และ CRS-R ..... | 145  |
| ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ ของตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ<br>ด้วยเครื่องมือ Conventional Oedometer, CRS-V และ CRS-R .....  | 159  |
| <br>   |      |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....  | 170  |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e - \text{LOG } \sigma'_v$ ของดินเหนียวอ่อนลึดาซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีความไว (จาก Mitchell, 1993) .....  | 7    |
| 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_c$ และ $\text{LOG } \sigma'_v$ ของดินเหนียวอ่อนลึดาและดินเหนียวอ่อนเม็กซิโกซิติซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีความไว (จาก Ladd, 1977) .....                      | 7    |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $C_v$ กับค่า Liquid Limit (Das, 1999) .....   | 9    |
| 2.4 ผลของการรบกวนตัวอย่าง (สุรฉัตร, 2540) .....  | 10   |
| 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ กับ LOG Time เนื่องจากผลของอัตราส่วนการเพิ่มน้ำหนัก (จาก สุรฉัตร, 2540) .....  | 11   |
| 2.6 สมมุติฐาน A และสมมุติฐาน B (Jamolkowski, 1985) .....   | 13   |
| 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e - \text{LOG } \sigma'_v$ ที่ได้จากการทดสอบ Isotropic Consolidation ซึ่งความยาวของเส้นทางน้ำไหลแตกต่างกัน (Mesri, 1985 a) .....                              | 14   |
| 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและหน่วยแรงประสิทธิผลจากตัวอย่างดินอ่อน 10 ชนิด (อ้างอิงจาก Fox and Baxter, 1997) .....   | 22   |
| 2.9a ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log k_v$ และ $\log \sigma'_v$ จาก Step Loading และ Hydraulic Consolidation Test ของ Southern Panther Creek Clay (อ้างอิงจาก Fox and Baxter, 1997) .....     | 22   |
| 2.9b ความสัมพันธ์ของ $e - \log \sigma'_v$ และ $e - \log k_v$ จาก Step Loading และ Hydraulic Consolidation Test ของ Southern Panther Creek Clay (อ้างอิงจาก Fox and Baxter, 1997) ..... | 23   |
| 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e - \log \sigma'_v$ จากการทดสอบ Slurry Consolidation Test (อ้างอิงจาก Kumbasar and Ozagdin, 1985) .....  | 24   |
| 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e, c_v, m_v$ กับ $\log \sigma'_v$ ของดินเหนียวสร้างใหม่ (อ้างอิงจาก Kumbasar and Ozagdin, 1985) .....  | 25   |
| 2.12 ผลการตกตะกอน และการอัดตัวคายน้ำของ Phosphatic Clay (อ้างอิงจาก Keshian et al., 1977) .....  | 26   |
| 2.13 ตำแหน่งวัดแรงดันน้ำ จากการทดสอบ CRS-R .....   | 30   |



| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.14 ความแตกต่างระหว่างทฤษฎี Linear และ Non-Linear กับอัตราส่วนแรงดัน<br>(อ้างอิงจาก Seah et al., 2002)..... | 35   |
| 2.15 ความแตกต่างระหว่างทฤษฎี Linear และ Non-Linear กับอัตราส่วนแรงดัน<br>(อ้างอิงจาก Gonzalez, 2000) .....   | 35   |
| 2.16 การหาค่า $\sigma'_p$ จากการทดสอบ CRS (อ้างอิงจาก Sinat, 1997).....                                      | 37   |
| 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งหลุมเจาะ.....   | 39   |
| 3.2 เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหลว (Reconstituted Consolidometer).....                             | 43   |
| 3.3 ขั้นตอนการผสมตัวอย่างดินเหลว.....  | 45   |
| 3.4 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำของดินเหลว .....   | 46   |
| 3.5 การดันตัวอย่างออกจาก Cell Chamber .....  | 47   |
| 3.6 การตัดแบ่งตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่.....  | 48   |
| 3.7 เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยอัตราเครียดคงที่ (แบบการระบายน้ำในแนวตั้ง) ..                          | 50   |
| 3.8 เครื่องมือตัดแต่งตัวอย่าง (Trimming Frame).....  | 52   |
| 3.9 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง.....  | 53   |
| 3.10 เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำด้วยอัตราเครียดคงที่ (แบบการระบายน้ำในแนวราบ).56                          | 56   |
| 3.11 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบอัดตัวคายน้ำในแนวราบ.....  | 57   |
| 4.1 พิกัดตัดตะเบีร์กของดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวสร้างใหม่ .....   | 61   |
| 4.2a การกระจายตัวของอนุภาคดินจากตัวอย่างด้านบน – ล่าง ของ Batch 2.....                                       | 65   |
| 4.2b การกระจายตัวของอนุภาคดินจากตัวอย่างด้านบน – ล่าง ของ Batch 3.....                                       | 65   |
| 4.2c การกระจายตัวของอนุภาคดินจากตัวอย่างด้านบน – ล่าง ของ Batch 4.....                                       | 66   |
| 4.2d การกระจายตัวของอนุภาคดินจากตัวอย่างด้านบน – ล่าง ของ Batch 5.....                                       | 66   |
| 4.2e การกระจายตัวของอนุภาคดินจากตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ.....   | 67   |
| 4.2f เปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคดิน จากดินเหนียวสร้างใหม่ในแต่ละรุ่นผสม .....                           | 68   |
| 4.2g เปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคดิน ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติ<br>กับดินเหนียวสร้างใหม่ .....             | 68   |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e-\log \sigma'_v$ จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำในสถานะดินเหลว.....                        | 69   |
| 4.4a ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ<br>ในสถานะดินเหลว (Batch 2) .....          | 72   |



| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.4b ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายนํ้า<br>ในสถานะดินเหลว (Batch 3) .....        | 73   |
| 4.4c ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายนํ้า<br>ในสถานะดินเหลว (Batch 4) .....        | 74   |
| 4.4d ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จากการทดสอบอัดตัวคายนํ้า<br>ในสถานะดินเหลว (Batch 5) .....        | 75   |
| 4.4e การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลา จาก Batch 2 ถึง 4 .....                             | 76   |
| 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การอัดตัวในแนวดิ่ง กับหน่วยแรงประสิทธิผล .....                           | 77   |
| 4.6a การเปรียบเทียบระหว่าง $c_{v(190)}$ และ $c_{v(150)}$ .....  | 77   |
| 4.6b ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $c_{v(190)}/c_{v(150)}$ กับหน่วยแรงประสิทธิผล .....                       | 77   |
| 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวดิ่งกับหน่วยแรงประสิทธิผล .....                           | 79   |
| 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวดิ่งกับอัตราส่วนช่องว่าง .....                            | 79   |
| 4.9a การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัว ของดินเหนียวสร้างใหม่ จากการทดสอบ Oedometer .....                          | 81   |
| 4.9b การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัว ของดินเหนียวสร้างใหม่ จากการทดสอบ CRS-V .....                              | 82   |
| 4.9c การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัว ของดินเหนียวสร้างใหม่ จากการทดสอบ CRS-R .....                              | 83   |
| 4.9d การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัว ของดินเหนียวสร้างใหม่ จากการทดสอบ<br>Oedometer และ CRS-V .....             | 84   |
| 4.9e การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัว ของดินเหนียวสร้างใหม่ จากการทดสอบ<br>Oedometer และ CRS-R .....             | 85   |
| 4.9f การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัว ของดินเหนียวสร้างใหม่ จากการทดสอบ<br>CRS-V และ CRS-R .....                 | 86   |
| 4.9g การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัว จากการทดสอบ Oedometer, CRS-V และ CRS-R .....                               | 87   |
| 4.9h การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ $\epsilon - \log \sigma'_v$ จากการทดสอบ Oedometer, CRS-V<br>และ CRS-R ..... | 88   |
| 4.10a พฤติกรรมอัดตัวคายนํ้าด้วยวิธีทดสอบต่างๆ ของดินเหนียวสร้างใหม่ Batch 2 .....                           | 92   |
| 4.10b พฤติกรรมอัดตัวคายนํ้าด้วยวิธีทดสอบต่างๆ ของดินเหนียวสร้างใหม่ Batch 3 .....                           | 93   |
| 4.10c พฤติกรรมอัดตัวคายนํ้าด้วยวิธีทดสอบต่างๆ ของดินเหนียวสร้างใหม่ Batch 4 .....                           | 94   |
| 4.10d พฤติกรรมอัดตัวคายนํ้าด้วยวิธีทดสอบต่างๆ ของดินเหนียวสร้างใหม่ Batch 5 .....                           | 95   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

๗

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.11 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวในแนวดิ่ง ( $c_v$ ) จากการทดสอบ Oedometer และ CRS-V .....                              | 97   |
| 4.12 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแนวดิ่ง ( $k_v$ ) จากการทดสอบ Oedometer และ CRS-V .....                                | 98   |
| 4.13 พฤติกรรม Anisotropic จากการอัดตัวคายน้ำ ของดินเหนียวสร้างใหม่.....   | 99   |
| 4.14a พฤติกรรมอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีทดสอบต่างๆ ของดินเหนียวธรรมชาติ (ลึก 5.5 ม.) .....  | 104  |
| 4.14b พฤติกรรมอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีทดสอบต่างๆ ของดินเหนียวธรรมชาติ (ลึก 6.5 ม.) .....  | 105  |
| 4.14c พฤติกรรมอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีทดสอบต่างๆ ของดินเหนียวธรรมชาติ (ลึก 7.5 ม.) .....  | 106  |
| 4.15a เปรียบเทียบกราฟการอัดตัวระหว่างดินเหนียวสร้างใหม่ และดินเหนียวธรรมชาติ (ความลึก 5.5 เมตร) .....                             | 108  |
| 4.15b เปรียบเทียบกราฟการอัดตัวระหว่างดินเหนียวสร้างใหม่ และดินเหนียวธรรมชาติ (ความลึก 6.5 เมตร) .....                             | 109  |
| 4.15c เปรียบเทียบกราฟการอัดตัวระหว่างดินเหนียวสร้างใหม่ และดินเหนียวธรรมชาติ (ความลึก 7.5 เมตร) .....                             | 110  |
| 4.15d เปรียบเทียบกราฟการอัดตัวระหว่างดินเหนียวสร้างใหม่ และดินเหนียวธรรมชาติ (ความลึกเฉลี่ย 6.5 เมตร จากการทดสอบ Oedometer) ..... | 111  |
| 4.16 ความสัมพันธ์ $e$ -log $\sigma'_v$ ระหว่าง Reconstituted Young Clay และ Natural Aged Clay (Tsuchida, 2001).....               | 111  |
| 4.17a ความสัมพันธ์ $C_r$ or $C_c$ -log $\sigma'_v$ .....  | 112  |
| 4.17b ความสัมพันธ์ $C_s$ -log $\sigma'_v$ .....   | 112  |
| 4.18a ความสัมพันธ์ $e$ -log $\sigma'_v$ ของดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวสร้างใหม่ (Liu and Carter, 2000).....                    | 114  |
| 4.18b การทำลายโครงสร้างดินในช่วงการอัดตัวคายน้ำ (Liu and Carter, 2000).....   | 114  |
| 4.18c เปรียบเทียบ Virgin Compression Line ของดินเหนียวธรรมชาติ กับสมการ 4.6 .....   | 115  |
| 4.19 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวสร้างใหม่ .....                               | 117  |
| 4.20 อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติ  |      |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| และดินเหนียวสร้างใหม่ .....  | 118  |
| 4.21a เปรียบเทียบค่า $k_v$ ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวสร้างใหม่ .....  | 119  |
| 4.21b เปรียบเทียบค่า $k_h$ ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวสร้างใหม่ .....  | 119  |
| 4.21c ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{v (Reconstituted)}/k_{v (Natural)}$ vs $\sigma'/\sigma'_p$ .....                                     | 120  |
| 4.21d ความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{h (Reconstituted)}/k_{h (Natural)}$ vs $\sigma'/\sigma'_p$ .....                                     | 120  |
| 4.22 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ $e - \log k$ ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติ<br>และดินเหนียวสร้างใหม่ .....                                  | 121  |
| 4.23 พฤติกรรม Anisotropic จากการอัดตัวคายนํ้า ของดินเหนียวธรรมชาติ .....   | 122  |
| 4.24 การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัวของดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวสร้างใหม่<br>กับผลการวิจัยของ Brand and Tsai (1973).....          | 124  |
| 4.25 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การอัดตัวของดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียว<br>สร้างใหม่ กับผลการวิจัยของ Brand and Tsai (1973)..... | 125  |
| 4.26 การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัวของดินเหนียวสร้างใหม่กรุงเทพฯกับ<br>ดินเหนียวแหล่งอื่นๆ (Burland, 1990) .....                      | 126  |
| 4.27 การเปรียบเทียบกราฟการอัดตัวของดินเหนียวสร้างใหม่กรุงเทพฯกับ<br>Osaka Bay Clays (Matsui, 1994) .....                           | 126  |
| 4.28 ผลของอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Tsuchida, 1999) .....   | 127  |
| 4.29 การเปรียบเทียบ Normalize Compression Curves กับ Intrinsic Compression Line<br>ของBurland (1990).....                          | 128  |
| 4.30 การเปรียบเทียบหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีตจากอัตราส่วนแรงดันต่ำสุด<br>กับวิธี Casagrande Method .....                       | 129  |
| 4.31 การเปรียบเทียบหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีตจากการทดสอบ CRS<br>กับ Oedometer .....  | 130  |
| 4.32 การเปรียบเทียบหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีตจากการทดสอบ CRS-V<br>กับ CRS-R.....   | 130  |
| 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันน้ำส่วนเกิน กับหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดใน<br>อดีตจากการทดสอบ CRS-R.....                     | 131  |



## สารบัญตาราง

| ตาราง   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $e - \text{LOG } \sigma'_v$ ของดินเหนียวอ่อนลึดาซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีความไว (จาก Mitchell, 1993) .....    | 9    |
| ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนแรงดันที่แนะนำสำหรับการทดสอบ CRS.....   | 16   |
| ตารางที่ 2.3 สูตรการหาพารามิเตอร์จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำด้วยอัตราเครียดคงที่แบบการระบายน้ำในแนวตั้ง (CRS-V) (อ้างอิงจาก Wissa, 1971).....       | 32   |
| ตารางที่ 2.4 สูตรการหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำด้วยอัตราเครียดคงที่แบบการระบายน้ำในแนวราบ (CRS-R) (อ้างอิงจาก Teerawut, 1995) ..... | 33   |
| ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบ.....   | 42   |
| ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวธรรมชาติ .....   | 60   |
| ตารางที่ 4.2a ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวสร้างใหม่.....  | 63   |
| ตารางที่ 4.2b การเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐาน และเคมีของดินเหนียวธรรมชาติ กับดินเหนียวสร้างใหม่ .....  | 64   |
| ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ในสถานะดินเหลว .....  | 70   |
| ตารางที่ 4.4a ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ด้วย Oedometer กับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่.....  | 89   |
| ตารางที่ 4.4b ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง ด้วยอัตราเครียดคงที่ กับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ .....  | 90   |
| ตารางที่ 4.4c ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำในแนวราบ ด้วยอัตราเครียดคงที่ กับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ .....   | 91   |
| ตารางที่ 4.5a ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ด้วย Oedometer กับตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ.....   | 101  |
| ตารางที่ 4.5b ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง ด้วยอัตราเครียดคงที่ กับตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ.....  | 102  |
| ตารางที่ 4.5c ผลการทดสอบอัดตัวคายน้ำในแนวราบ ด้วยอัตราเครียดคงที่ กับตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ.....   | 103  |
| ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติ และดินเหนียวสร้างใหม่บริเวณรังสิต .....  | 123  |