

แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง



นาย ชัยรัตน์ ระตีพูน

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

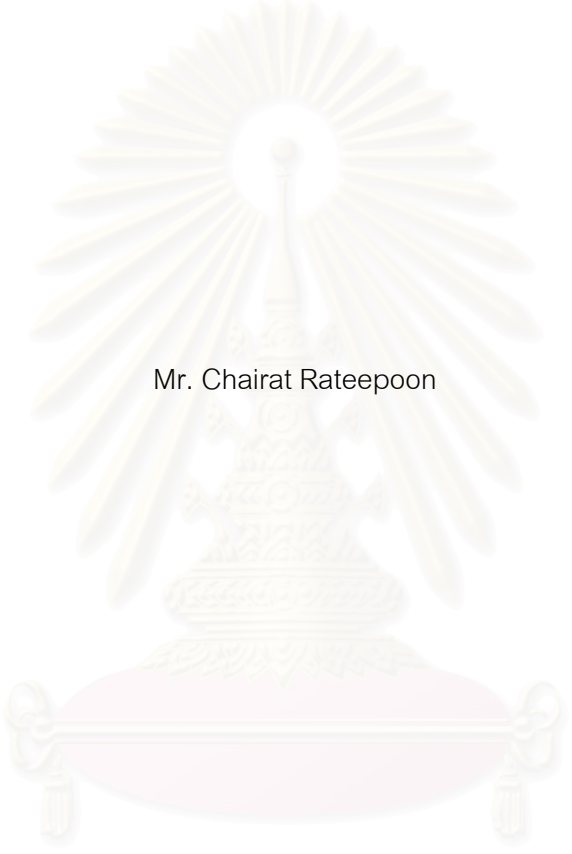
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0783-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INTERFACE FRICTION BETWEEN CLAY AND STRUCTURAL MATERIALS



Mr. Chairat Rateepoon

สถาบันวิทยบริการ  
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 2001

ISBN 974-03-0783-3

|                   |  |
|-------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง |
| โดย               | นายชัยรัตน์ รัตติพูน                                     |
| สาขาวิชา          | วิศวกรรมโยธา   |
| อาจารย์ที่ปรึกษา  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล                |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชัยรัตน์ ระตีพูน: แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง.

(INTERFACE FRICTION BETWEEN CLAY AND STRUCTURAL MATERIALS)

อ. ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 95 หน้า. ISBN 974-03-0783-3.

งานศึกษานี้เป็นการทดสอบเพื่อหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานศึกษานี้เป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนซึ่งมีต้นกำเนิดบริเวณกรุงเทพฯ โดยเก็บที่ระดับความลึก 1-3 เมตรจากผิวดิน แล้วนำมาอบแห้งและบดให้ละเอียดเป็นผงก่อนนำไปเตรียมตัวอย่างในกระบอกเตรียมตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นมา วัสดุโครงสร้างที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ คอนกรีตผิวหยาบ คอนกรีตผิวเรียบ เหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบ โดยวัสดุโครงสร้างจะมีการฉาบผิวด้วยสารหล่อลื่นต่าง ๆ ซึ่งสารหล่อลื่นที่นำมาใช้ทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ได้แก่ สารละลายเบนโทไนต์ น้ำมันหล่อลื่น จาระบี ซิลิโคนกรีส และสีอีพ็อกซี

จากการทดสอบพบว่าค่าแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียว โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 0.33 ถึง 0.40 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กมีค่าอยู่ระหว่าง 0.28 ถึง 0.33 เมื่อมีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสพบว่า จาระบีและซิลิโคนกรีสสามารถลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้มากที่สุด คือ ลดแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสได้ถึง 80% ส่วนสารละลายเบนโทไนต์ลดแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสได้ประมาณ 25% เมื่อพิจารณาถึงการหลุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนพบว่าค่าการหลุดตัวในการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีค่ามากกว่าค่าการหลุดตัวในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส และเมื่อมีการใช้สารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสจะช่วยให้ค่าการหลุดตัวขณะทำการเฉือนมีค่าน้อยลง

|            |              |                                 |
|------------|--------------|---------------------------------|
| ภาควิชา    | วิศวกรรมโยธา | ลายมือชื่อนิสิต.....            |
| สาขาวิชา   | วิศวกรรมโยธา | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... |
| ปีการศึกษา | 2544         |                                 |

## 4270284721: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: INTERFACE FRICTION / CLAY / CONCRETE/ STEEL / LUBRICANT

CHAIRAT RATEEPOON: THESIS TITLE. (INTERFACE FRICTION BETWEEN CLAY AND STUCTURAL MATERIALS)

THESIS ADVISOR: ASST.PROF.DR.SUPOT TEACHAVORASINSKUN, 95 pp.  
ISBN 974-03-0783-3.

The study aims to explore the interface friction test between the reconstituted clay and structural materials. The reconstituted clay used in this experiment was originally Bangkok Clay, collected at the depth of 1-3 m below the ground surface. After oven dried, it was thoroughly mixed to form batches of clay powder. The clay powder was then mixed with water to form clay slurry which was re-consolidated in a one-dimensional cell at  $\sigma'_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ . The structural materials considered were rough concrete, smooth concrete, rough steel and smooth steel. The lubricants, which were used to reduce interface friction, were the bentonite slurry, coal tar epoxy, lubricant oil and grease.

It was found that the maximum coefficient values of interface friction ( $\tan \delta$ ) between clay and concretes range between 0.33 to 0.40, and the values at interface between clay and steel are between 0.28 to 0.33. The maximum friction coefficient of interface between clay and structural materials are 12–85% less than that obtained from the drained shear strength of clay. Using the lubricants to reduce the interface friction, the grease could reduce the maximum interface friction to 80% of which was not lubricated; the bentonite slurry could reduce to about 25%. The vertical displacement value occurred during clay-clay shearing is larger than the value obtained during interface shearing.

Department Civil Engineering

Student's signature.....

Field of study Civil Engineering

Advisor's signature.....

Academic year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง” ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำต่างๆในการทำวิจัยมาด้วยดีตลอด และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏาชน ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณก้องเกียรติ วิเศษรัตน์ นิสิตปริญญาเอก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ และแนวคิดต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณฉัตรชัย ลีวรพันธ์ชัย, คุณพิชัย ภัทรวัตถกุล และเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดมา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนผู้เขียนจนได้สำเร็จการศึกษา

ชัยรัตน์ ระตีพูน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

|                         |   |
|-------------------------|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....    | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ.....    | ฉ |
| สารบัญ.....             | ช |
| สารบัญตาราง.....        | ญ |
| สารบัญรูป.....          | ฎ |

## บทที่

|   |   |
|---|---|
| บทที่ 1 บทนำ.....                       | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....        | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....              | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....      | 3 |

## บทที่ 2 ทฤษฎีและการศึกษาในอดีต

|   |    |
|---|----|
| .....   | 4  |
| 2.1 คำกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว<br>.....             | 4  |
| 2.2 แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส.....                        | 8  |
| 2.2.1 หลักการพื้นฐานของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส<br>..... | 8  |
| 2.2.2 ชนิดของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส.....               | 11 |
| 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส.....      | 13 |
| 2.3 การลดแรงเสียดทาน.....                               | 18 |

|   |    |
|---|----|
| 2.4 การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุในห้องปฏิบัติการ |    |
| .....   | 22 |
| 2.4.1 การทดสอบโดยใช้เครื่อง direct shear apparatus.....                 | 22 |
| 2.4.2 การทดสอบโดยใช้เครื่อง simple shear apparatus.....                 | 22 |
| 2.4.3 การทดสอบโดยใช้ เครื่อง ring torsion apparatus.....                | 2  |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  |    |
|   | 23 |





| บทที่   | หน้า      |
|---|-----------|
| <b>บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....</b>                                | <b>25</b> |
| <b>3.1 ที่มาของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ.....</b>                     | <b>25</b> |
| <b>3.2 วัสดุโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบ.....</b>                          | <b>26</b> |
| 3.2.1 คอนกรีตที่ใช้ทดสอบ.....   | 26        |
| 3.2.2 แผ่นเหล็กที่ใช้ทดสอบ.....   | 27        |
| <b>3.3 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบการลดแรงเสียดทาน.....</b>             | <b>27</b> |
| <b>3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....</b>                              | <b>27</b> |
| 3.4.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ.....            | 28        |
| 3.4.2 เครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส.....                     | 29        |
| <b>3.5 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>                                | <b>31</b> |
| <b>3.5.1 การทดสอบหาคคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน</b>                  |           |
| .....   | 31        |
| <b>3.5.2 การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส.....</b>                     | <b>31</b> |
| <b>3.5.3 การทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยใช้สารหล่อลื่น</b>      |           |
| .....   | 32        |
| <b>3.5.4 การทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียว</b>          |           |
| .....   | 33        |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ</b>                      | <b>39</b> |
| <b>4.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ</b>      |           |
| .....   | 39        |
| 4.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว.....                                | 40        |
| 4.3 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต.....           | 41        |
| 4.3.1 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ.....  | 41        |
| 4.3.2 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ..... | 43        |
| 4.4 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก.....             | 46        |

| บทที่   | หน้า |
|---|------|
| 4.4.1 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ.....                    | 46   |
| 4.4.2 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ<br>.....               | 49   |
| 4.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวกับ<br>ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส..... | 51   |
| 4.6 ผลของสารหล่อลื่นต่อแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส.....                                     | 52   |
| 4.6.1 ผลของการใช้สารละลายเบนโทไนต์เป็นสารหล่อลื่น.....                                  | 53   |
| 4.6.2 ผลของการใช้ซิลิโคนกรีตและจาระบีเป็นสารหล่อลื่น.....                               | 54   |
| 4.6.3 ผลของการใช้น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารหล่อลื่น.....                                     | 54   |
| 4.6.4 ผลของการทาสีที่ผิว.....   | 55   |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....  | 72   |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....   | 72   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป.....   | 73   |
| รายการอ้างอิง.....  | 74   |
| ภาคผนวก.....  | 76   |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....   | 95   |

| ตารางที่ | หน้า   |
|----------|--|
| 4.1      | คุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ..... 39  |
| 4.2      | ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแบบเนื้อตรง.....<br>40  |
| 4.3      | ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ.....41  |
| 4.4      | ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัส<br>ระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ.....42                             |
| 4.5      | ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ.....44   |
| 4.6      | ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัส<br>ระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ.....45                            |
| 4.7      | ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ..... 47   |
| 4.8      | ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัส<br>ระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ.....47                               |
| 4.9      | ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ..... 49  |
| 4.10     | ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัส<br>ระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ..... 50                             |
| 4.11     | อัตราส่วนของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่น<br>ต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดของการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างดินกับคอนกรีต....53 |
| 4.12     | อัตราส่วนของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่น<br>ต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดของการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างดินกับเหล็ก.....53  |

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 เครื่องมือการทดสอบ Direct shear.....   | 4    |
| 2.2 วงกลมเมอร์แสดงจุดวิบัติจากการทดสอบ Direct shear.....                                 | 5    |
| 2.3 การเปรียบเทียบค่า $K_s$ กับ $K_p$ ตามค่ามุมแรงเสียดทานภายใน.....                     | 6    |
| 2.4 ลักษณะตัวอย่างดินเมื่อ ได้รับแรงเฉือน.....   | 7    |
| 2.5 พื้นที่ผิวสัมผัสของวัตถุ.....  | 9    |
| 2.6 พื้นที่ผิวสัมผัสจริงของวัตถุที่มีความเรียบ.....                                      | 9    |
| 2.7 การเกิดการเฉือนขึ้นในวัตถุที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น.... | 10   |
| 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานและค่าน้ำหนักกดทับ.....                             | 10   |
| 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์กับเวลาที่เกิดการสัมผัสกันของวัตถุ.....           | 12   |
| 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์กับอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุ.....          | 12   |
| 2.11 ค่า roughness curve ในการหาค่า $R_a$ .....  | 14   |
| 2.12 การหาค่า Maximum height ( $R_y$ ) .....   | 14   |
| 2.13 เครื่องมือวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี profile meter.....                        | 15   |
| 2.14 แผ่นผังการวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี profile meter.....                        | 16   |
| 2.15 การวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี Optical techniques.....                          | 16   |
| 2.16 การวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี Electron microscopy.....                         | 17   |
| 2.17 แบบจำลองการครูดที่ผิววัตถุ.....   | 18   |
| 2.18 การเฉือนเกิดที่บริเวณชั้น solid film.....   | 20   |
| 2.19 การเฉือนเกิดบริเวณผิวของชั้น solid film กับผิววัตถุ.....                            | 20   |
| 2.20 การซึมของชั้นของเหลวบริเวณผิวสัมผัสของวัตถุ.....                                    | 21   |
| 3.1 แผ่นคอนกรีตผิวหยาบที่ใช้ในการทดสอบ.....  | 34   |
| 3.2 แผ่นคอนกรีตผิวเรียบที่ใช้ในการทดสอบ.....   | 34   |
| 3.3 แผ่นเหล็กผิวหยาบที่ใช้ในการทดสอบ.....  | 35   |

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 3.4    | แผ่นเหล็กผิวเรียบที่ใช้ในการทดสอบ ..... 35   |
| 3.5    | กระบอกเซลล์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ..... 36  |
| 3.6    | เครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส..... 36   |
| 3.7    | การเตรียมการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับคอนกรีต..... 37   |
| 3.8    | ชุดมอเตอร์สำหรับทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส..... 37   |
| 3.9    | การเตรียมการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยใช้สารละลายเบนโทไนต์..... 38                                      |
| 3.10   | แผ่นคอนกรีตทาสี epoxy..... 38  |
| 4.1    | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเนื่องกับระยะการเลื่อนของดินเหนียว..... 56                                      |
| 4.2    | การทรุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเลื่อนของดินเหนียว..... 56  |
| 4.3    | หน่วยแรงเนื่องกับระยะการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc..... 57       |
| 4.4    | หน่วยแรงเนื่องกับระยะการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc..... 57       |
| 4.5    | หน่วยแรงเนื่องกับระยะการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc..... 58       |
| 4.6    | การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc..... 58 |
| 4.7    | การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc..... 59 |
| 4.8    | การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc..... 59 |
| 4.9    | หน่วยแรงเนื่องกับระยะการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc..... 60      |
| 4.10   | หน่วยแรงเนื่องกับระยะการเลื่อนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc..... 60      |

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.11 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc.....               | 61   |
| 4.12 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับระยะทำการเฉือนระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc..... | 61   |
| 4.13 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับระยะทำการเฉือนระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc..... | 62   |
| 4.14 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับระยะทำการเฉือนระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc..... | 62   |
| 4.15 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc.....                  | 63   |
| 4.16 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc.....                  | 63   |
| 4.17 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc.....                  | 64   |
| 4.18 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc.....           | 64   |
| 4.19 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc.....           | 65   |
| 4.20 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc.....           | 65   |
| 4.21 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc.....                 | 66   |
| 4.22 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc.....                 | 66   |
| 4.23 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ<br>แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc.....                 | 67   |
| 4.24 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ  |      |

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 1 ksc.....  | 67   |
| 4.25 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ        |      |
| แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 2 ksc.....  | 68   |
| 4.26 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ        |      |
| แบบต่างๆที่ $\sigma'_n$ 3 ksc.....  | 68   |
| 4.27 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ $\sigma'_n$ 1 ksc.....        | 69   |
| 4.28 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ $\sigma'_n$ 2 ksc.....        | 69   |
| 4.29 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ $\sigma'_n$ 3 ksc.....        | 70   |
| 4.30 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ $\sigma'_n$ 1 ksc..... | 70   |
| 4.31 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ $\sigma'_n$ 2 ksc..... | 71   |
| 4.32 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ $\sigma'_n$ 3 ksc..... | 71   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันบริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ได้มีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินขนาดเล็ก (micro-tunnelling) ในชั้นดินเหนียวเป็นจำนวนมาก เช่น อุโมงค์ส่งน้ำ อุโมงค์ระบายน้ำเสีย เป็นต้น การก่อสร้างอุโมงค์ดังกล่าวโดยทั่วไปมักจะก่อสร้างโดยวิธี Pipe jacking เพราะเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างในบริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล

ในการก่อสร้างอุโมงค์แบบ Pipe jacking นั้น ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ คือ ปัญหาเนื่องจากแรงต้านทานที่ใช้ในการดันท่อ กล่าวคือ แรงต้านทานที่เกิดขึ้นที่ผิวท่อในขณะที่ทำการดันท่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะความยาวของท่อ จนบางครั้งแม่แรง (Hydraulic jack) ไม่สามารถดันท่อให้เคลื่อนที่ไปได้ วิธีการแก้ปัญหาโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ การติดตั้ง Intermediate Jack และการใช้สารหล่อลื่นช่วยลดแรงเสียดทาน สารหล่อลื่นที่ใช้ได้แก่ เช่น เบนโทไนต์ น้ำ หรือ โพลีเมอร์ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีจึงควรมีการศึกษาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้าง รวมถึงศึกษาผลกระทบจากการใช้สารหล่อลื่นในการลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้แล้วค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้าง (Interface friction) เป็นค่าที่จำเป็นค่าหนึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างใต้ดินอื่นๆอีก เช่น เสาเข็ม กำแพงกันดิน เป็นต้น ซึ่งค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้างนั้นสามารถหาได้ 2 วิธี คือ จากการวัดค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม และจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยในอดีตนั้นการหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้างในห้องปฏิบัติการจะทำการศึกษาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุต่างๆ รวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาถึงผลของการนำสารหล่อลื่นมาช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุต่างๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็ก ฯลฯ และผลของสารหล่อลื่นที่มีผลต่อแรงเสียดทานในห้องปฏิบัติการเพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์และใช้ในการออกแบบการก่อสร้างต่างๆได้



งานวิจัยนี้จะเป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของสารหล่อลื่นต่างๆต่อแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ โดยจะทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่างๆ เช่น ชนิดของวัสดุโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิวของวัสดุโครงสร้าง หน่วยแรงในแนวตั้ง เป็นต้น รวมทั้งศึกษาถึงผลกระทบของการใช้สารหล่อลื่น เช่น สารละลายเบนโทไนด์ น้ำมันหล่อลื่น ซิลิโคนกรีส จาระบี และการทาสีที่ผิวมาช่วยในการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะนำมาวิเคราะห์หาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้จะทำการศึกษาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ โดยใช้เครื่องมือทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) พัฒนาเครื่องทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างในห้องปฏิบัติการทางปฐพีกลศาสตร์
- 2) ทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง ดังนี้
  - 2.1 คอนกรีตผิวหยาบ
  - 2.2 คอนกรีตผิวเรียบ
  - 2.3 เหล็กผิวหยาบ
  - 2.4 เหล็กผิวเรียบ

โดยทำการทดสอบที่หน่วยแรงในแนวตั้ง 1, 2 และ 3 ksc ที่อัตราความเร็วขึ้น 0.03 มิลลิเมตรต่อนาที

- 3) ทดสอบหาแรงเสียดทานเมื่อใช้สารหล่อลื่นกับวัสดุโครงสร้าง โดยสารหล่อลื่นที่นำมาใช้ทดสอบมีดังนี้
  - 3.1 สารละลายเบนโทไนด์
  - 3.2 น้ำมันหล่อลื่น
  - 3.3 จาระบี
  - 3.4 ซิลิโคนกรีส
  - 3.5 สี epoxy
- 4) ทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวโดยเครื่อง Direct shear test
- 5) ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส และผลของการใช้สารหล่อลื่น โดยจะเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาวิจัยที่ได้คาดว่าจะมีประโยชน์ ดังนี้

- 1) สามารถทราบถึงพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิววัสดุโครงสร้างต่างๆเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างได้ดินได้
- 2) สามารถทราบถึงผลกระทบของการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง
- 3) พัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างในห้องปฏิบัติการทางปฐพีกลศาสตร์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการศึกษาในอดีต

#### 2.1 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

การทดสอบแบบ Direct shear เป็นการทดสอบที่ให้แต่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเท่านั้น โดยการทดสอบจะบังคับให้ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติตามแนวที่กำหนดโดยเครื่องมือทดสอบซึ่งอยู่ในระนาบแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการทดสอบ ตัวอย่างดินจะถูกหน่วยแรงสองชนิดกระทำจากภายนอก คือ หน่วยแรงที่อยู่ในแนวตั้งฉาก ( $\sigma_n$ ) ซึ่งมักจะเป็นค่าคงที่ตลอดในการทดสอบและหน่วยแรงเฉือนในแนวราบ ( $\tau_h$ ) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad (2.1)$$

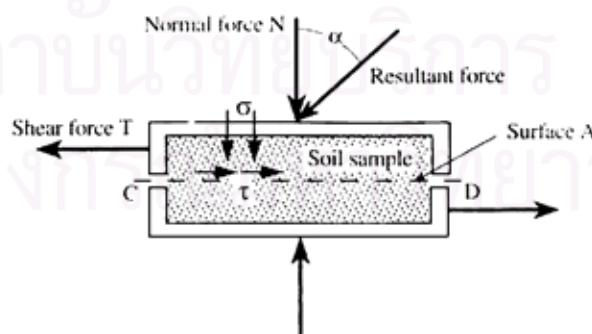
$$\tau_h = \frac{T}{A} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$N$  = แรงกดทับในแนวตั้งฉาก

$T$  = แรงเฉือนในแนวราบ

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง



รูปที่ 2.1 เครื่องมือการทดสอบ Direct shear (Bardet, 1997)

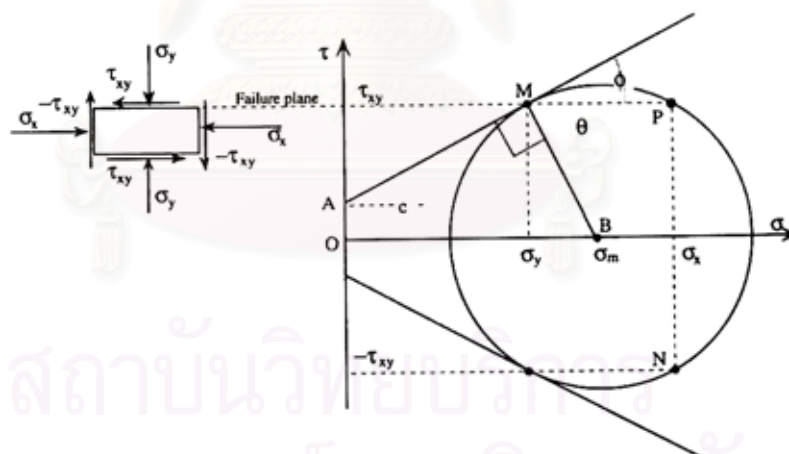
ในขณะทำการทดสอบแบบ Direct shear นั้น สภาพหน่วยแรงและการกระจายของหน่วยแรงมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหน่วยแรงในระนาบอื่น ( $\sigma_x, \tau_{xy}$ ) นั้นไม่สามารถหาค่าได้ ส่วนการเขียนวงกลมมอร์ (Mohr's circle) สำหรับตัวอย่างดินภายใต้การทดสอบแบบ Direct shear นั้น จำเป็นต้องมีสมมติฐานอื่นๆเข้ามาประกอบ เช่น การสมมติค่า  $k_0$  (coefficient of at rest earth pressure) การสมมติให้ทิศทางของ stress และ strain มีทิศทางเดียวกัน (Co-axiality) และการสมมติระนาบของการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นต้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วมักจะไม่ใช่เขียนวงกลมมอร์ในการทดสอบ Direct shear แต่จะเลยไปใช้สมการของ Mohr-Coulomb ในการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยตรง ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.3)$$

เมื่อ

$c$  = cohesion intercept

$\phi$  = friction angle



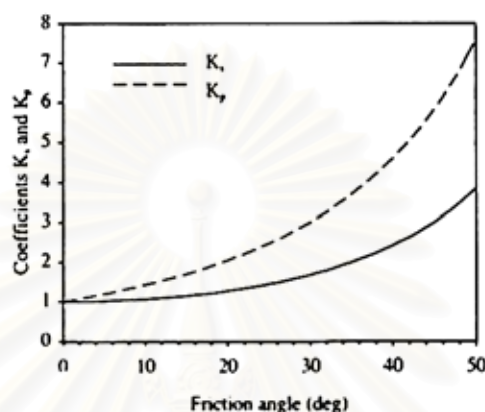
รูปที่ 2.2 วงกลมมอร์แสดงจุดวิบัติจากการทดสอบ Direct shear (Bardet, 1997)

จากรูปที่ 2.2 เมื่อเขียนวงกลมมอร์ได้แล้วสามารถหาค่าหน่วยแรงตั้งฉากที่กระทำในระนาบแนวตั้ง  $\sigma_x$  และค่าหน่วยแรงตั้งฉากที่กระทำในระนาบแนวนอน  $\sigma_y$  ดังความสัมพันธ์

$$\sigma_x = 2c \tan \phi + K_s \sigma_y \quad (2.4)$$

$$K_s = 1 + 2 \tan^2 \phi \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 พบว่าค่า  $K_s$  มีค่ามากกว่า 1 และมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของมุม  $\phi$  แต่มีค่าน้อยกว่าค่า  $K_p$  (coefficient of passive earth pressure) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่า  $K_s$  กับ  $K_p$  ตามค่ามุมแรงเสียดทานภายใน (Bardet, 1997)

สำหรับปัญหาในการทดสอบ Direct shear ของดินเหนียวนั้นมาจากเครื่องมือทดสอบไม่สามารถควบคุมการระบายน้ำระหว่างการทดสอบ การทดสอบจึงต้องจำแนกเป็นการทดสอบแบบเร็ว (Undrained test) กับการทดสอบแบบช้า (Drained test) เท่านั้น

การทดสอบแบบเร็ว (Undrained test) สามารถทำได้โดยการทำให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำ (Consolidated Quick Test) หรือแบบที่ไม่ให้ตัวอย่างถูกอัดตัวคายน้ำก่อน (Unconsolidated Quick Test)

การทดสอบแบบช้า (Drained test) จะทำโดยให้ตัวอย่างดินถูกอัดตัวคายน้ำก่อน แล้วจึงทำการทดสอบด้วยหน่วยแรงเฉือนในสภาพที่ระบายน้ำ (Consolidated Drained Direct Shear Test) ในสภาพนี้ น้ำจะสามารถระบายออกจากดินได้ทัน และค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (excess pore water pressure)  $\Delta u = 0$  ตลอดเวลา การทดสอบนี้มักใช้กับดินเหนียวแข็ง ส่วนหลักเกณฑ์ในการเลือกอัตราเร็วในการเฉือนนั้นสามารถหาได้จาก ASTM D3080 ซึ่งจะพิจารณาหาเวลาที่น้อยที่สุดที่ดินจะเกิดการวิบัติ ( $t_f$ ) ดังนี้

$$t_f = 50t_{50} \quad (2.6)$$

หรือ

$$t_f = 11.7t_{90} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$t_{50}$  = เวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ 50%

$t_{90}$  = เวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ 90%

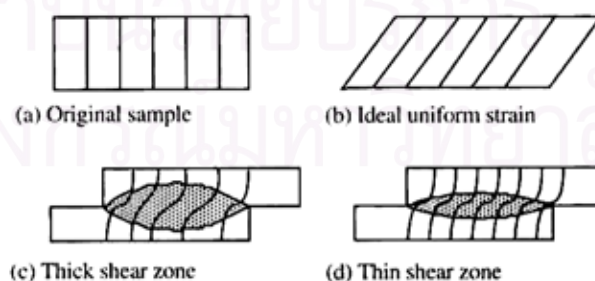
จากสมการ (2.6) และ (2.7) จะได้อัตราเร็วในการเขื่อน ( $v$ ) ดังนี้

$$v = \frac{\delta}{t_f} \quad (2.8)$$

เมื่อ

$\delta$  = ระยะการเขื่อนที่คาดว่าตัวอย่างดินจะเกิดการวิบัติ สำหรับดินในสภาวะอัดแน่นปกติ (NC) มีค่าเท่ากับ 12 มิลลิเมตร ส่วนดินในสภาวะอัดแน่นเกินตัว (OC) มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร

ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของการทดสอบ direct shear คือ ไม่สามารถศึกษาถึงพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของตัวอย่าง (stress-strain relationships) เนื่องจากไม่สามารถหาค่า shear strain ในการทดสอบ หาได้เพียงแต่ค่าการเคลื่อนที่ในแนวการเขื่อนเท่านั้น ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.4 คือ เมื่อดินได้รับแรงเขื่อนแล้ว หากค่า shear strain มีค่าสม่ำเสมอทั้งตัวอย่างแล้ว ตัวอย่างดินจะเป็นดังรูป (b) แต่เนื่องจากในการทดสอบ direct shear นั้นค่า shear strain มีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดตัวอย่าง ตัวอย่างดินเมื่อได้รับแรงเขื่อนจะกลายเป็นดังรูป (c) หรือ (d)



รูปที่ 2.4 ลักษณะตัวอย่างดินเมื่อได้รับแรงเขื่อน (Bardet, 1997)

## 2.2 แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

## 2.2.1 หลักการพื้นฐานของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

ในการหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องทราบ คือ พื้นที่ผิวสัมผัส กล่าวคือ เมื่อวัตถุสัมผัสกัน บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัส (Apparent area of contact,  $A_a$ ) ประกอบด้วย ส่วนที่พื้นที่ผิวของวัตถุสัมผัสกันจริง (real area of contact,  $A_r$ ) กับส่วนที่พื้นที่ผิวของวัตถุไม่ได้สัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.5 ในส่วนที่พื้นที่ผิววัตถุสัมผัสกันจริงจะเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญในการพิจารณาผลกระทบต่อกันระหว่างวัตถุ ในการหาค่าของส่วนที่พื้นที่ผิววัตถุสัมผัสกันจริง ( $A_r$ ) สามารถหาได้ดังนี้

- กรณีที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกันมีความหยาบ (Rabinowicz, 1965)

$$A_r = \frac{L}{P} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$L$  = น้ำหนักกดทับ

$P$  = ค่า penetration hardness

- กรณีที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกันมีความหยาบน้อยหรือเรียบ ดังรูปที่ 2.6 ในกรณีนี้สามารถใช้ Hertz's equation (Rabinowicz, 1965) ได้ โดยสมมติให้อัตราส่วนบัวของของวัตถุทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.3 ดังสมการ

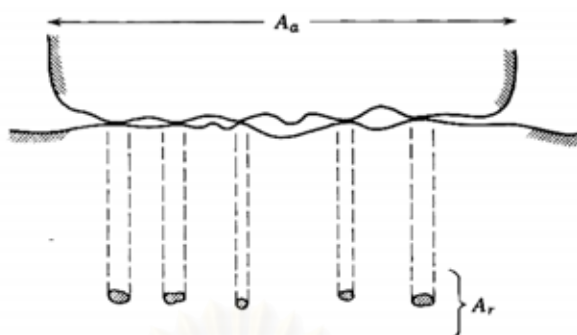
$$A_r = 2.9 \left[ Lr \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{2/3} \quad (2.10)$$

เมื่อ

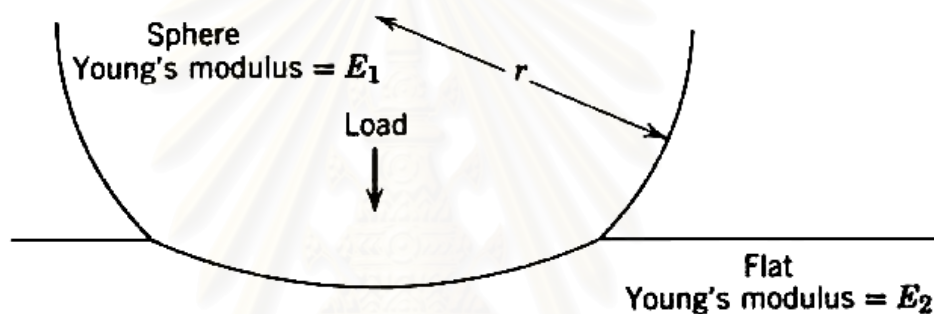
$L$  = น้ำหนักกดทับ

$r$  = รัศมีความโค้งของวัตถุ

$E_1, E_2$  = Young's modulus ของวัตถุ



รูปที่ 2.5 พื้นที่ผิวสัมผัสของวัตถุ (Rabinowicz, 1965)



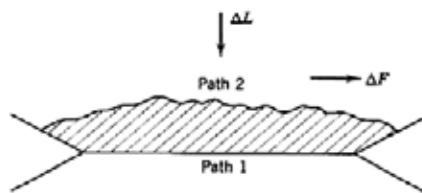
รูปที่ 2.6 พื้นที่ผิวสัมผัสจริงของวัตถุที่มีความเรียบ (Rabinowicz, 1965)

เมื่อทราบพื้นที่ผิวสัมผัสจริงแล้ว สามารถคำนวณหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้ โดยพิจารณากรณีที่ผิววัตถุสัมผัสกันโดยมีแรงกดทับ ( $L$ ) และมีค่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสจริง ( $\tau_{av}$ ) ได้ดังนี้

$$F = \tau_{av} A_r \quad (2.11)$$

ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นต้องมีค่าไม่มากกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัตถุที่สัมผัสกัน หากค่าแรงเสียดทานมีค่ามากกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัตถุ จะเกิดการเฉือนขึ้นที่วัตถุแทน ดังรูปที่ 2.7





รูปที่ 2.7 การเกิดการเฉือนขึ้นในวัตถุที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนน้อยกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

(Rabinowicz, 1965)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction,  $f$ ) สามารถหาได้หลายกรณีดังนี้

- โดยพิจารณาจากสมการที่ (2.9) และ (2.11)

$$f = \frac{F}{L} = \frac{\tau_{av}}{P} \tag{2.12}$$

เมื่อ

$F$  = แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

$L$  = น้ำหนักกดทับ

$\tau_{av}$  = ค่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสจริง

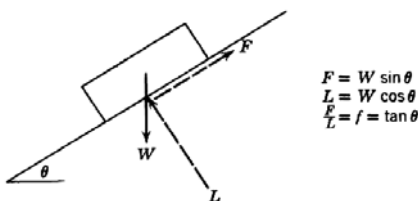
$P$  = ค่า penetration hardness

- โดยพิจารณาถึงแรงลัพธ์ที่เกิดกับวัตถุ (ดังรูปที่ 2.8) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ ผิวสัมผัสหาได้โดยสมการ

$$f = \tan \theta \tag{2.13}$$

เมื่อ

$\theta$  = ค่ามุมของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานและแรงกดทับวัตถุ



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานและค่าน้ำหนักกดทับ (Rabinowicz, 1965)

## 2.2.2 ชนิดของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสสามารถแยกได้เป็น 2 ชนิด โดยการพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุที่สัมผัสกัน คือ

- แรงเสียดทานสถิตย์
- แรงเสียดทานจลน์

แรงเสียดทานสถิตย์ (static friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุอยู่กับที่หรือกำลังจะเคลื่อนที่ ค่าแรงเสียดทานสถิตย์เป็นค่าแรงเสียดทานที่มากที่สุดระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์ (static friction coefficient,  $\mu_s$ ) นั้นเป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่ กับเวลาของการสัมผัสกันของวัตถุ (Rabinowicz, 1965) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_s = \mu_0 + kt^{1/10} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$\mu_s$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์

$\mu_0$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์เมื่อวัตถุเริ่มสัมผัสกัน

k = ค่าคงที่

t = เวลาที่วัตถุสัมผัสกัน

ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาเพียงเล็กน้อย นับจากการเริ่มสัมผัสกัน คือ ประมาณ 0.1 วินาที หลังจากนั้นเมื่อเวลาของการสัมผัสกันมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์จะเป็นฟังก์ชันลอการิทึมของเวลาที่สัมผัส โดยมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป (Rabinowicz, 1965) ดังรูปที่ 2.9

แรงเสียดทานจลน์ (kinetic friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ระหว่างกัน ค่าแรงเสียดทานจลน์จะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงเสียดทานสถิตย์เสมอ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์ (kinetic friction coefficient,  $\mu_k$ ) เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความเร็วของการเคลื่อนที่ (sliding speed) (Rabinowicz, 1965) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_k = cv^{-1/10} \quad (2.15)$$

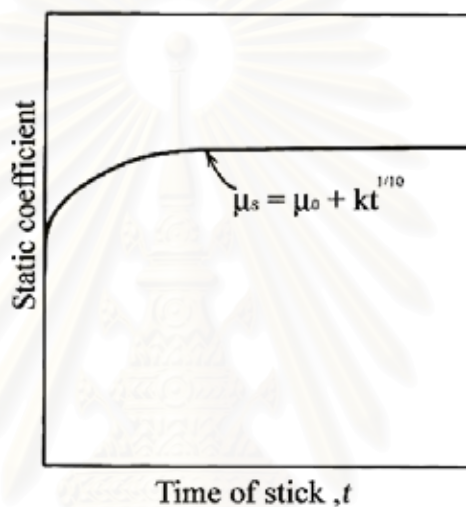
เมื่อ

$\mu_k$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์

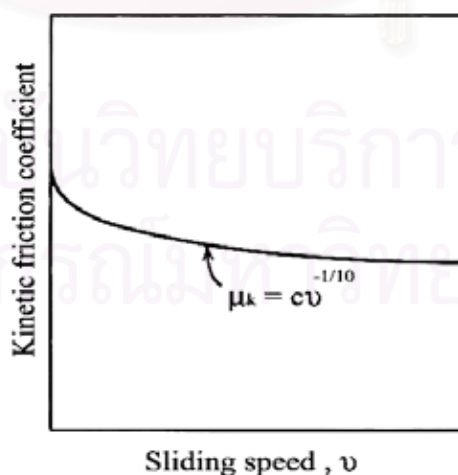
$c$  = ค่าคงที่

$v$  = ความเร็วของการเคลื่อนที่

จากสมการที่ (2.15) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์จะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตยกับเวลาที่เกิดการสัมผัสกันของวัตถุ  
(Rabinowicz,1965)



รูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์กับอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุ  
(Rabinowicz,1965)

### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน (Rabinowicz, 1965) เช่น

- The roughness component
- The plowing component
- The electrical component

#### The roughness component

ค่าความหยาบของพื้นผิว (surface roughness) เป็นค่าที่มีความสำคัญที่สุดในการพิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุ กล่าวคือ ถ้าผิวสัมผัสของวัตถุมีความหยาบมาก ค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีความมาก หากผิวสัมผัสของวัตถุมีความหยาบน้อย ค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าพื้นผิวสัมผัสนั้นมีสารหล่อลื่นจำพวกของเหลวหล่อลื่นอยู่ค่าความหยาบของพื้นผิวจะมีผลไม่มากต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ค่าความหยาบของพื้นผิวสามารถแบ่งได้ดังนี้

1) ค่า  $R_a$  (average roughness) (JIS B0601-1994) เป็นค่าที่นิยมใช้มากที่สุดในการวัดลักษณะพื้นผิวของวัตถุมีหน่วยเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ซึ่งหาได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.11 และมีความสัมพันธ์ คือ

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (2.16)$$

โดย

$L$  = ความยาวอ้างอิง

$f(x)$  = roughness curve ดังรูปที่ 2.11

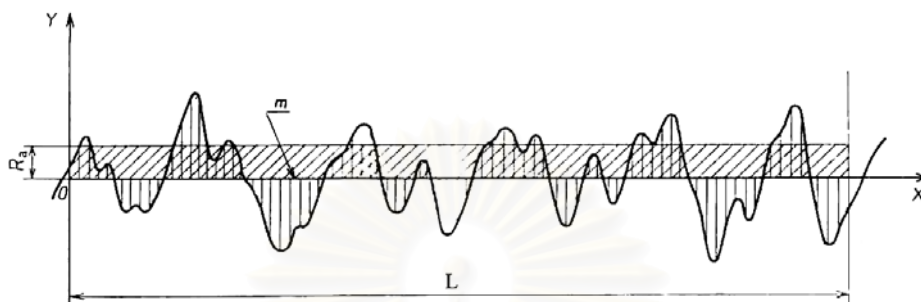
2) ค่า  $R_q$  (root mean square roughness) หาได้ดังความสัมพันธ์

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L f^2(x) dx} \quad (2.17)$$

โดย

L = ความยาวอ้างอิง

f(x) = roughness curve ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ค่า roughness curve ในการหาค่า  $R_a$  (JIS B0601-1994)

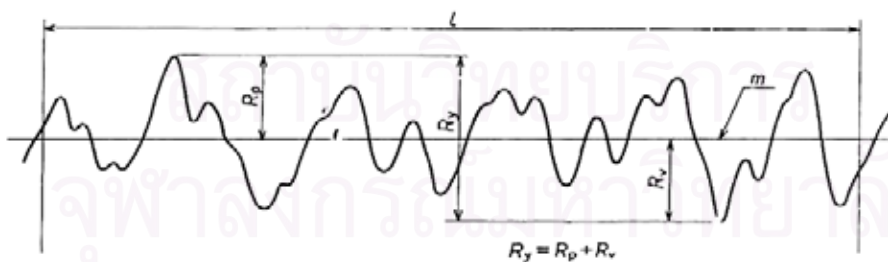
3) ค่า Maximum height ( $R_y$ ) เป็นผลรวมของความสูงจากจุดยอดที่ต่ำที่สุดถึงจุดยอดที่สูงที่สุดในความยาวอ้างอิง ดังรูปที่ 2.12 มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_y = R_p + R_v \tag{2.18}$$

เมื่อ

$R_p$  = ค่าความสูงที่สูงที่สุดของจุดยอดของความหยาบในระยะความยาวที่พิจารณา

$R_v$  = ค่าความสูงที่ต่ำที่สุดของจุดยอดของความหยาบในระยะความยาวที่พิจารณา



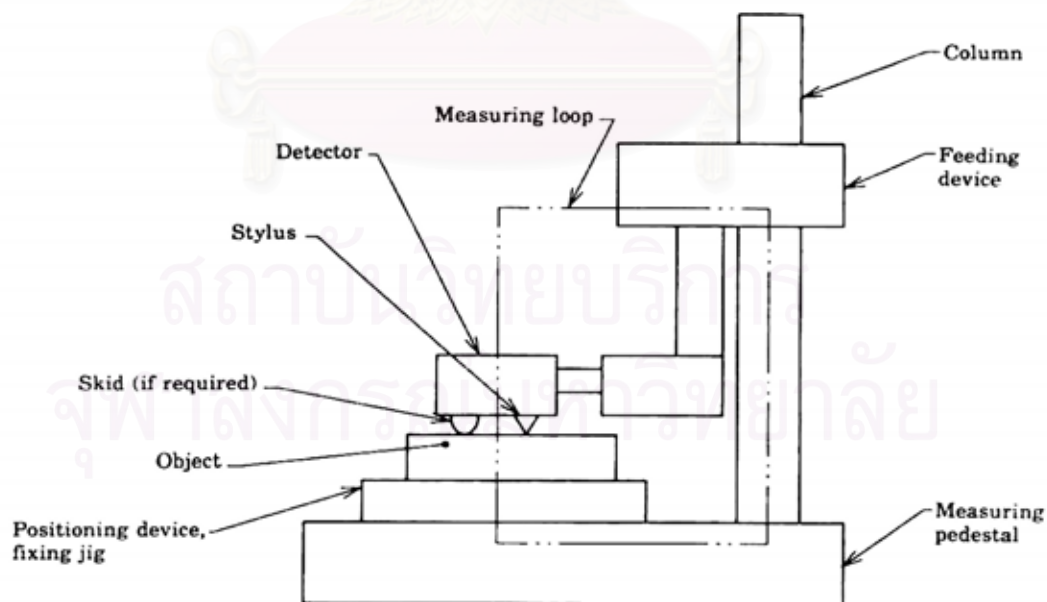
รูปที่ 2.12 การหาค่า Maximum height ( $R_y$ ) (JIS B0601-1994)

สำหรับวิธีการวัดค่า surface roughness สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

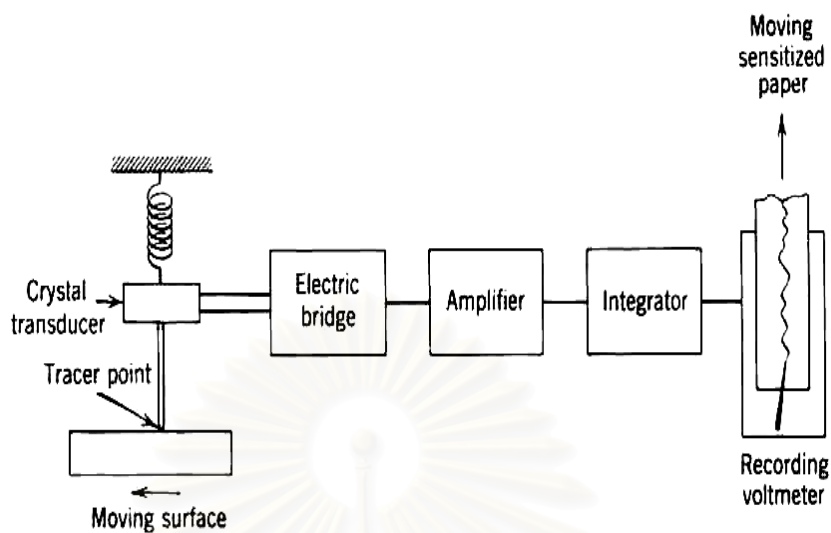
1. The profile meter (Rabinowicz,1965) วิธี profile meter นี้เป็นวิธีการที่นิยมใช้วัดหาค่า surface roughness มากที่สุด สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว อุปกรณ์ที่ใช้ คือ stylus ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งปลายเป็นวัสดุที่แข็งกลม (เช่น เพชร) ติดอยู่ ดังรูปที่ 2.13 ในการวัดจะใช้ stylus เคลื่อนไปมาบริเวณพื้นผิวของวัตถุ โดยค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นค่าของ surface roughness ดังรูปที่ 2.14

2. Optical techniques (Rabinowicz,1965) วิธี Optical techniques เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับวัตถุที่ผิวค่อนข้างเรียบ หลักการของวิธีนี้ คือ การฉายแสงไปที่ผิววัตถุ แล้วนำผลที่ได้จากแสงสะท้อนมาวิเคราะห์หาค่า surface roughness ดังรูปที่ 2.15

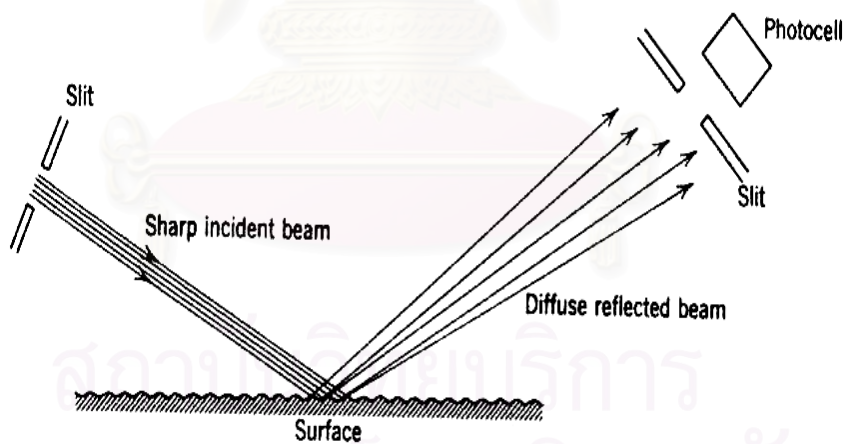
3. Electron microscopy (Bowden and Tabor ,1967) วิธีการนี้จะให้รายละเอียดของลักษณะพื้นผิวในแนวราบและแนวดิ่งได้ดีที่สุด วิธีนี้ใช้หลักการของการสะท้อน โดยการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนยิงไปที่ผิววัตถุแล้วบันทึกผลของรังสีสะท้อน ซึ่งจะได้อภาพของลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ดังรูปที่ 2.16



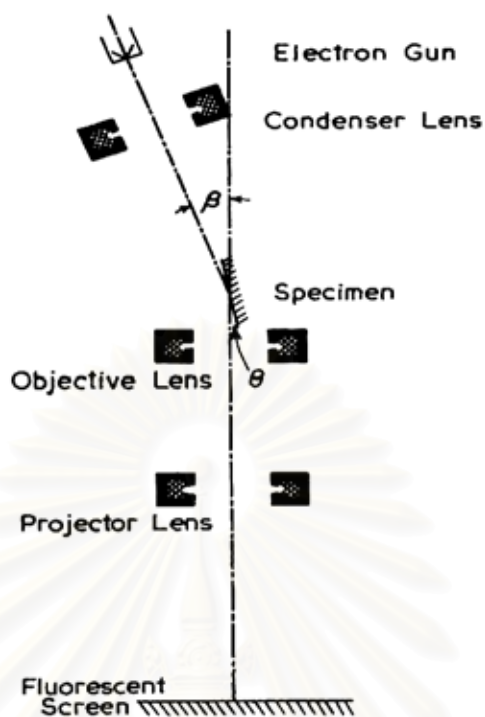
รูปที่ 2.13 เครื่องมือวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี profile meter (JIS B0651-1996)



รูปที่ 2.14 แผนผังการวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี profile meter (Rabinowicz,1965)



รูปที่ 2.15 การวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี Optical techniques (Rabinowicz,1965)



รูปที่ 2.16 การวัดค่าความหยาบของพื้นผิวโดยวิธี Electron microscopy  
(Bowden and Tabor ,1967)

### The plowing component

เมื่อวัตถุที่หยาบและแข็งเคลื่อนไถลไปบนวัตถุที่มีผิวอ่อนกว่าจะเกิดการครูดที่ผิวของวัตถุที่อ่อนกว่า ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบพฤติกรรมดังกล่าวโดยให้ผิววัตถุที่หยาบและแข็งกว่ามีลักษณะเป็นโคน (Rabinowicz,1965) ดังรูปที่ 2.17 โดยพื้นที่ที่เกิดการครูด (penetrated area,  $A_p$ ) สามารถหาได้ดังความสัมพันธ์

$$A_p = \frac{1}{2} (2r) (r \tan \theta) = r^2 \tan \theta \quad (2.19)$$

เมื่อ

$\tan \theta = 0.2$  สำหรับผิววัตถุที่หยาบ

$r$  = รัศมีของปลายโคนที่ครูดอยู่ในผิววัตถุที่อ่อนกว่า

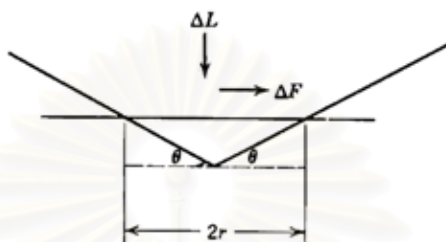


แรงต้านทานที่เกิดขึ้นในรอยครูดหาโดยความสัมพันธ์

$$F_p = A_p P \quad (2.20)$$

เมื่อ

$P$  = ค่า penetration hardness ของวัตถุที่ผิวอ่อนกว่า



รูปที่ 2.17 แบบจำลองการครูดที่ผิววัตถุ (Rabinowicz, 1965)

The electrical component

เมื่อวางวัตถุสัมผัสกัน จะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical double – layer) ณ จุดที่สัมผัสกัน เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จึงต้องใช้แรงจำนวนหนึ่งไปทำลายแรงดึงดูดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีผลทำให้แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสมีค่ามากขึ้น แต่ผลเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าต่อแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสนั้นมีน้อยกว่าค่าปัจจัยอื่นๆที่กล่าวมา (Rabinowicz, 1965)

## 2.3 การลดแรงเสียดทาน

การลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสสามารถทำได้โดยการนำสารหล่อลื่น (Lubricants) มาใช้ในบริเวณผิวสัมผัสของวัตถุ สารหล่อลื่นจะทำหน้าที่ ดังนี้

- ลดขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น
- ลดขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุ
- ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัส
- ลดอุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัส

สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ประเภท (Rabinowicz, 1965) คือ

1. Solid film lubrication
2. Fluid lubrication

1. Solid film lubrication เกิดจากชั้นของแข็งบางๆแทรกอยู่ระหว่างกลางของผิวสัมผัส โดยทั่วไปแล้วลักษณะพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากความแข็งแรงของชั้นฟิล์ม คือ

- กรณีที่ชั้นของ solid film มีความแข็งแรงมาก เมื่อเกิดการเลื่อนไถลจะทำให้เกิดการเฉือนขึ้นในเนื้อวัตถุ ไม่เกิดการเฉือนในชั้น solid film ดังนั้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อพฤติกรรมของแรงเสียดทานระหว่างวัตถุนั้น
- กรณีชั้นของ solid film มีความแข็งแรงไม่มาก กรณีนี้จะมีผลต่อพฤติกรรมของแรงเสียดทานระหว่างวัตถุ คือ เมื่อเกิดการเลื่อนไถลจะทำให้เกิดการเฉือนขึ้นที่ชั้น solid film ดังรูปที่ 2.18 หรือเกิดการเฉือนที่บริเวณผิวของ solid film กับผิวของวัตถุ ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งในกรณีที่เกิดการเฉือนขึ้นที่ชั้น solid film สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานได้ดังนี้

$$\mu_1 = \frac{s_1}{P_m} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$\mu_1$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเมื่อเกิดการเฉือนที่ชั้น solid film

$s_1$  = ค่ากำลังรับแรงของชั้น solid film

$P_m$  = ค่าความแข็ง (hardness) ของวัตถุ

ส่วนในกรณีที่เกิดการเฉือนที่บริเวณผิวของชั้น solid film กับผิวของวัตถุ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ได้จากสมการ 2.21

สำหรับอัตราส่วนการลดลงของแรงเสียดทานโดยใช้ชั้น solid film เป็นชั้นหล่อลื่นหาได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{\mu_1}{\mu_m} = \frac{S_1}{S_m} \quad (2.22)$$

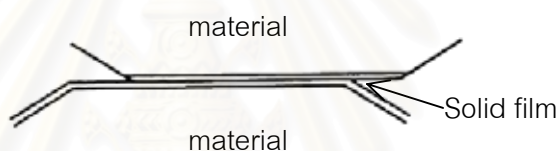
เมื่อ

$\mu_1$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเมื่อใช้ solid film เป็นชั้นหล่อลื่น

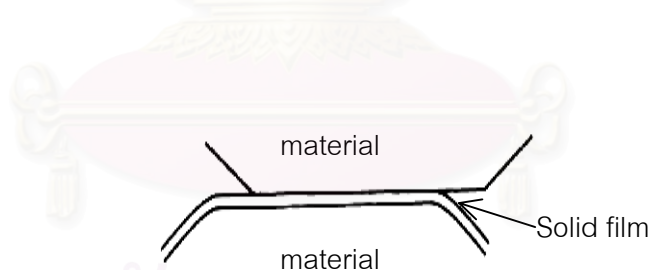
$\mu_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานเมื่อไม่มีการใช้สารหล่อลื่น

$S_1$  = ค่ากำลังรับแรงเฉือนของชั้น solid film

$S_m$  = ค่ากำลังรับแรงเฉือนของวัตถุ



รูปที่ 2.18 การเฉือนเกิดที่บริเวณชั้น solid film (Rabinowicz, 1965)



รูปที่ 2.19 การเฉือนเกิดบริเวณผิวของชั้น solid film กับผิววัตถุ (Rabinowicz, 1965)

2. Fluid lubrication หรือ Boundary lubrication เกิดจากชั้นฟิล์มของของเหลวหรือก๊าซ แทรกตัวอยู่ระหว่างผิวของวัตถุ ซึ่งในการพิจารณาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะพิจารณาจากการแทรกซึมของชั้นของเหลว โดยแบ่งได้ 2 กรณี คือ

- กรณีชั้นฟิล์มของเหลวแทรกซึมเพียงจุดเดียว (single penetration) กรณีนี้พื้นที่ที่สัมผัสกันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พื้นที่ที่วัตถุสัมผัสกัน และพื้นที่ที่เป็นชั้นฟิล์ม ดังรูปที่ 2.20 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะหาได้ดังนี้

$$\mu = \alpha\mu_m + (1-\alpha)\mu_l \tag{2.23}$$

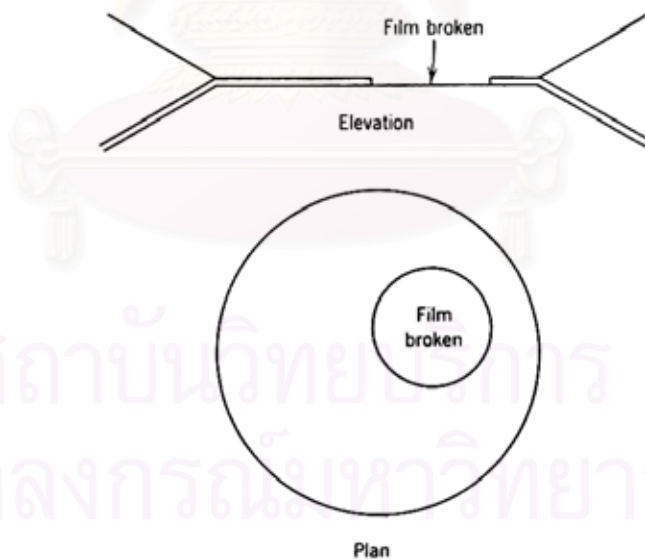
เมื่อ

$\alpha$  = อัตราส่วนของพื้นที่ผิววัตถุสัมผัสกันต่อพื้นที่ผิวทั้งหมด

$\mu_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของผิววัตถุ

$\mu_l$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่ชั้นฟิล์มของเหลว

- กรณีชั้นฟิล์มของเหลวแทรกซึมหลายจุด (multiple penetration) ในกรณีนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ยังเป็นไปตามความสัมพันธ์ (2.23)



รูปที่ 2.20 การซึมของชั้นของเหลวบริเวณผิวสัมผัสของวัตถุ (Rabinowicz, 1965)

## 2.4 การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุต่างๆในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสต่างๆที่นิยมใช้ทดสอบโดยแบ่งตามลักษณะของเครื่องมือทดสอบแล้ว สามารถทดสอบได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ

1. การทดสอบโดยใช้เครื่อง direct shear apparatus
2. การทดสอบโดยใช้เครื่อง simple shear apparatus
3. การทดสอบโดยใช้ เครื่อง ring torsion apparatus

### 2.4.1 การทดสอบโดยใช้เครื่อง direct shear apparatus

ข้อดีของการทดสอบโดยใช้เครื่อง direct shear apparatus คือ เป็นระบบที่ง่ายต่อการทดสอบ เตรียมตัวอย่างได้ง่ายและมีวิธีการทดสอบไม่ซับซ้อน

ข้อจำกัดของการทดสอบโดยใช้เครื่อง direct shear apparatus คือ ไม่สามารถแยกการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน (shear displacement) ว่าเป็นการเคลื่อนที่เนื่องจากการไถล (sliding displacement) หรือการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนในตัวอย่างดิน (displacement due to shear deformation)

### 2.4.2 การทดสอบโดยใช้เครื่อง simple shear apparatus

ข้อดีของการทดสอบโดยใช้เครื่อง simple shear apparatus คือ สามารถแยกการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ออกเป็น การเคลื่อนที่เนื่องจากการไถลและการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนในตัวอย่างดิน

ส่วนข้อจำกัดของการทดสอบโดยใช้เครื่อง simple shear apparatus คือ เกิด stress concentration ที่บริเวณขอบของตัวอย่าง (ends of sample)

### 2.4.3 การทดสอบโดยใช้ เครื่อง ring torsion apparatus

ข้อดีของการทดสอบโดยใช้ เครื่อง ring torsion apparatus คือ ไม่มีปัญหาเรื่อง stress concentration ที่บริเวณขอบของตัวอย่าง (ends of sample) และสามารถใช้ X-ray photography เพื่อวัดการเคลื่อนที่เนื่องจากการไถล และการเคลื่อนที่เนื่องจากรวมแรงเฉือนในตัวอย่างดิน

ส่วนข้อจำกัดของการทดสอบโดยใช้ เครื่อง ring torsion apparatus คือ เป็นระบบที่ยากต่อการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการศึกษาและทดลองหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของดินกับวัสดุต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ ผลงานที่เคยมีผู้ที่ศึกษาและทดลองทำในอดีตมีดังนี้

J.G. Potyondy (1961) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างทราย ดินเหนียวกับเหล็ก ไม้ และคอนกรีต โดยใช้เครื่อง direct shear test apparatus แบบ shear box type ผลการศึกษาพบว่าค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในดิน การกระจายของขนาดของเม็ดดิน ลักษณะของผิววัสดุโครงสร้าง โดยค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน

Littleton I. (1976) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก ในสภาวะการเฉือนแบบระบายน้ำ และไม่ระบายน้ำ โดยใช้เครื่อง direct shear test apparatus แบบ shear box type ผลการศึกษาพบว่า ในสภาวะการเฉือนแบบระบายน้ำค่าแรงเสียดทานที่จุดวิกฤติของดินเหนียวกับเหล็กมีค่าเป็น 0.9 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแบบระบายน้ำ ส่วนสภาวะการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำค่าแรงเสียดทานที่จุดวิกฤติของดินเหนียวกับเหล็กมีค่าเป็น 0.91 เท่าของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ

Tsubakihara Y. and Kishida H.(1993) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับเหล็กโดยใช้เครื่อง direct shear test apparatus แบบ shear box type และ แบบ simple shear type ผลการศึกษาพบว่า ค่ามุมแรงเสียดทาน ( $\delta'$ ) จะขึ้นอยู่กับความหยาบของพื้นผิวสัมผัส (surface roughness) กล่าวคือ ค่ามุมแรงเสียดทานมีค่ามากขึ้นเมื่อความหยาบของพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น จนกระทั่งมีค่าคงที่เมื่อถึงค่าความหยาบของผิวสัมผัสวิกฤต (critical surface roughness) ที่ทำให้ค่ามุมแรงเสียดทานมีค่าเท่ากับค่ามุมแรงเสียดทานภายในของดินเหนียว ( $\phi'$ )

Tsubakihara Y. and Kishida H.and Nishiyama T. (1993) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับเหล็กโดยใช้เครื่อง direct shear test apparatus แบบ simple shear type ผลการศึกษาได้จำแนกพฤติกรรมการวิบัติของดินเนื่องจากแรงเสียดทานโดยใช้ความหยาบของพื้นผิวสัมผัสเป็นเกณฑ์ออกเป็น 3 แบบ คือ การวิบัติเนื่องจากการไถลที่บริเวณผิวสัมผัส การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในดิน และการวิบัติเนื่องจากการลื่นไถลที่ผิวและแรงเฉือนในดินพร้อมกัน

Miligan G. W. E. and Norris P. (1999) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต เพื่อจำลองสภาพการก่อสร้างอุโมงค์แบบ Pipe jacking โดยใช้เครื่องทดสอบ direct shear test apparatus แบบ shear box type ผลการศึกษาพบว่าค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

L.J.L.Lemos (2000) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับเหล็กและแก้ว โดยใช้เครื่อง ring shear apparatus โดยทำการทดสอบถึงผลกระทบของการขึ้นสนิมที่ผิวเหล็กต่อแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก ผลการศึกษาพบว่า เมื่อพื้นผิวเรียบมาก ค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับค่า residual strength ของดินเหนียว

Rao et.al. (2000) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต เหล็ก โดยใช้เครื่อง direct shear test apparatus แบบ shear box type ในสภาวะการเฉือนเป็นแบบระบายน้ำ ผลการศึกษาพบว่า ค่ามุมแรงเสียดทานของดินอัดแน่นปกติ ( $\delta'_{nc}$ ) มีค่าเป็น 0.95 เท่าของค่ามุมแรงเสียดทานภายในของดินอัดแน่นปกติ ( $\phi'_{nc}$ ) และอัตราส่วนของมุมแรงเสียดทานกับมุมแรงเสียดทานภายในของดินนั้นไม่ขึ้นกับสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (OCR) แต่ขึ้นกับความหยาบของพื้นผิวสัมผัส (surface roughness)

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

#### 3.1 ที่มาของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้เป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบ Disturbed sample ซึ่งทำการเก็บมาจากบริเวณ กระทรวงสาธารณสุข จังหวัดนนทบุรี ที่ระดับความลึกจากผิวดิน ประมาณ 1-3 เมตร โดยใช้รถตักดินทำการเปิดหน้าดินเป็นบริเวณกว้าง แล้วเก็บตัวอย่างดินขึ้นมา หลังจากเก็บตัวอย่างดินมาแล้วจะนำดินมาทำการอบแห้งเพื่อจะได้นำดินที่ได้ไปใช้ทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับวัสดุโครงสร้าง หรือทดสอบหากลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวต่อไป

#### การเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

1. นำตัวอย่างดินที่ผ่านการอบมาทำการบดโดยเครื่อง Los Angeles Test จากนั้นนำดินที่ผ่านการบดแล้วมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200
2. ทำการผสมดินกับน้ำ ซึ่งมีปริมาณความชื้นในดิน (water content) มากกว่า liquid limit (LL.) โดยใช้เครื่องผสมขนาดเล็กกวนผสมให้เข้ากัน
3. นำดินเหลว (slurry) ใส่ในกระบอกเตรียมตัวอย่าง ทำการ reconstitute ตัวอย่างดิน โดยใช้น้ำหนักกดทับที่ 1 ksc
4. หลังจากตัวอย่างดินเสร็จสิ้นขบวนการอัดตัวคายน้ำแล้ว จึงทำการเก็บตัวอย่างดิน โดยใช้กระดาษฟอยล์ห่อ และเคลือบด้วยขี้ผึ้ง (wax)



### 3.2 วัสดุโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับดินเหนียว ได้แก่ คอนกรีต และเหล็ก โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 คอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้ คือ คอนกรีตผิวหยาบ คอนกรีตผิวเรียบ โดยแผ่นคอนกรีตที่ใช้มีขนาด 10x13x2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 การเตรียมแผ่นคอนกรีตนั้นได้ทำการเตรียมตามมาตรฐานการทดสอบของ American Society for Testing and Materials (ASTM C305-94) ซึ่งมีอัตราส่วนผสมดังนี้

อัตราส่วนผสม

ทราย : ปูนซีเมนต์ = 2.75 : 1

น้ำ : ปูนซีเมนต์ = 0.485 : 1

#### วิธีการเตรียมแผ่นคอนกรีต

1. ใส่ปูนซีเมนต์และน้ำลงในเครื่องผสมขนาดเล็ก จากนั้นทำการผสมโดยใช้อัตราการกวน 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
2. ใส่ทราย แล้วผสมโดยใช้อัตราการกวน 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
3. จากนั้นใช้อัตราการกวน 285 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
4. ทำการหยุดกวนเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที
5. จากนั้นใช้อัตราการกวน 285 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
6. เทคอนกรีตที่ได้ลงในแบบหล่อ ในที่นี้คือ รถที่ใช้สำหรับใส่แผ่นวัสดุที่ใช้ทดสอบหาแรงเสียดทาน
7. ทำการปาดผิวหน้าคอนกรีต โดยคอนกรีตผิวหยาบทำการปาดหน้าเพียงครั้งเดียว ส่วนคอนกรีตผิวเรียบ ต้องปล่อยให้คอนกรีตมีการแข็งตัวก่อนประมาณ 30 นาที จากนั้นโรยปูนซีเมนต์บนผิวหน้าคอนกรีต แล้วใช้เกรียงขัดผิวคอนกรีตขัดผิวให้เรียบ

### 3.2.2 แผ่นเหล็กที่ใช้ทดสอบ

แผ่นเหล็กที่ใช้ในการทดสอบนี้มี 2 แบบ คือ เหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบ โดยมีขนาด 17x15x2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4

### 3.3 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบการลดแรงเสียดทาน

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส มีดังนี้

1. สารละลายเบนโทไนต์ สารละลายเบนโทไนต์จะนำมาทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวคอนกรีต และที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวเหล็ก
2. น้ำมันหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ คือ น้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ โดย การทดสอบจะนำน้ำมันมาลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวเหล็ก
3. ซิลิโคนกรีส ซิลิโคนกรีสที่ใช้มีชื่อว่า MOLYKOTE ซึ่งมีส่วนผสมของน้ำมันซิลิโคน (silicone oil) การทดสอบจะนำซิลิโคนกรีสมาลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวเหล็ก
4. จาระบี จะนำมาทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวคอนกรีต
5. สี epoxy จะนำมาทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวคอนกรีต

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาทั้งหมดเพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบ โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีดังนี้ เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ และเครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทาน

### 3.4.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่างดินเป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทดสอบหาแรงเสียดทานและกำลังรับแรงเฉือน ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมือมีดังนี้

1. ครอบใส่ตัวอย่างดิน เป็นครอบพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร มีแผ่นเหล็กเพลทขนาด 22x22x1 เซนติเมตร ปิดตัวครอบทั้งด้านบนและด้านล่างโดยมีเสาเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร 4 ต้น ยึดอยู่ที่แผ่นเพลทด้านล่างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เซนติเมตร 12 รู เพื่อใช้ระบายน้ำออก แผ่นเพลทด้านบนเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร เพื่อเป็นรูสำหรับให้แกนกดน้ำหนักลอดผ่าน ที่แผ่นเพลททั้งแผ่นบนและแผ่นล่างจะเจาะร่องตามขนาดของครอบพลาสติก ขนาดความกว้างของร่องประมาณ 0.5 เซนติเมตร เพื่อสวมเส้นยางกันรั่ว (O-ring) ในขณะที่เตรียมตัวอย่าง
2. แกนสำหรับกดตัวอย่างดิน เป็นแผ่นโลหะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 16.8 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เจาะร่องตรงกลางตามแนวแกน กว้างประมาณ 0.5 เซนติเมตร เพื่อสวมเส้นยางกันรั่ว ตรงกลางแผ่นเชื่อมติดกับแท่งโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตรเพื่อใช้รองรับชุดวางก้อนน้ำหนักกดทับ และต่อเข้ากับ Dial Gauge เพื่อใช้วัดการทรุดตัวของตัวอย่าง
3. ชุดวางน้ำหนักกดทับ เป็นแผ่นเหล็กขนาด 30x30x1 เซนติเมตร ที่กลางแผ่นเชื่อมติดกับท่อเหล็กกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เซนติเมตร โดยมีหน้าที่ไว้สวมเข้ากับก้านของแกนกดตัวอย่างดินเพื่อถ่วงน้ำหนักกดทับสู่ตัวอย่างดิน ในการเตรียมตัวอย่างดินจะนำก้อนน้ำหนักขนาดประมาณ 230 กิโลกรัม (หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc) วางลงบนชุดวางน้ำหนักนี้

### 3.4.2 เครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

เครื่องมือทดสอบนี้เป็นการพัฒนาเครื่องมือขึ้นใหม่หมด เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบที่เตรียมขึ้นมา ดังรูปที่ 3.6 รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ทดสอบที่สำคัญมีดังนี้

1. ชุดกล่องใส่ตัวอย่างดินในการทดสอบ ประกอบด้วย กล่องใส่ตัวอย่างดินมีลักษณะเป็นกล่องเหล็กสี่เหลี่ยมกลางขนาด 12x12x5 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เซาะร่องตรงกลางที่ด้านข้างของกล่อง 2 ด้านตามแนวยาวของกล่อง กว้าง 0.5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร เพื่อให้แผ่นเหล็กปึกขนาด 10x7x1.5 เซนติเมตร รองรับตัวอย่างดิน โดยที่แผ่นเหล็กปึกแต่ละแผ่นจะยึดเข้ากับเสาเหล็กกลม 2 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร ซึ่งเสาเหล็กแต่ละต้นจะยึดกับแผ่นพื้นของโครงเฟรมหลักเพื่อไม่ให้ชุดกล่องใส่ตัวอย่างดินเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการทดสอบ
2. ชุดรถใส่แผ่นวัสดุทดสอบ รถใส่แผ่นวัสดุทดสอบมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กขนาด 17x15x3 เซนติเมตร เซาะร่องที่ด้านล่างของรถ 2 ร่องขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ลึก 0.5 เซนติเมตร ตามแนวความยาวของรถ ซึ่งแต่ละร่องห่างกัน 8 เซนติเมตร โดยร่องดังกล่าวมีไว้ใส่ลูกเหล็กขนาด 0.9 เซนติเมตร ร่องละ 10 ลูก เพื่อทำหน้าที่ช่วยในการเคลื่อนที่ในแนวราบของระบบการทดสอบ ส่วนที่ด้านบนของรถมีหน้าที่ไว้ใส่แผ่นวัสดุทดสอบ คือ เมื่อทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับผิวเหล็กจะนำแผ่นเหล็กทดสอบประกอบเข้ากับตัวรถโดยใช้สกรูยึด ส่วนการทดสอบระหว่างดินเหนียวกับผิวคอนกรีตจะใช้ท่อนเหล็กขนาด 17x2.5x2 เซนติเมตร 2 ท่อนและขนาด 10x1x2 เซนติเมตร 2 ท่อน มาวางประกอบเข้าตัวรถโดยสกรูยึดเพื่อไม่ให้แผ่นคอนกรีตเคลื่อนที่ออกด้านข้างในขณะที่ทดสอบ ดังรูปที่ 3.7
3. ระบบการเคลื่อนที่ในแนวราบ สำหรับในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสนี้เป็นการทดสอบแบบอัตราการเคลื่อนที่ในแนวราบคงที่ (displacement controlled) คือ 0.03 มิลลิเมตรต่อนาที การให้อัตราการเคลื่อนที่มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบจึง

ต้องใช้ระบบมอเตอร์ในระบบประกอบด้วย มอเตอร์ อินเวอร์เตอร์ และชุดเกียร์ ที่ประกอบอยู่บนแผ่นฐานเหล็ก ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

- มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ (Motor and inverter) มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 220 โวลต์ ขนาด  $1/2$  แรงม้า 4 pole ความเร็วรอบ 1440 รอบต่อนาที ส่วนอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทำหน้าที่ควบคุมและปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์
  - เกียร์ลดรอบ เกียร์ที่ใช้เป็นเกียร์แบบ worm gear มีอัตราการลดรอบเป็น 60 ต่อ 1 (60:1) ทำหน้าที่ลดความเร็วรอบจากมอเตอร์ สำหรับการต่อ worm gear เข้ากับมอเตอร์ทำได้โดยใช้ชื่อยเป็นตัวต่อแกนหมุนของมอเตอร์กับแกนหมุนของ worm gear เข้าด้วยกัน
  - ชุดกล่องเกียร์ (gear box) มีหน้าที่ลดความเร็วในการหมุนที่มาจาก worm gear ลงอีก 40 เท่า และเปลี่ยนการหมุนเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นโดยแกนของกล่องเกียร์จะเคลื่อนที่เข้าออกในแนวราบซึ่งทำให้ระบบในการทดสอบหาแรงเสียดทานเคลื่อนที่ได้ โดยกล่องเกียร์ต่อจาก worm gear โดยใช้ชื่อยเป็นตัวต่อแกนหมุนของ worm gear กับแกนหมุนของกล่องเกียร์เข้าด้วยกัน
4. ระบบให้แรงในแนวดิ่ง ในการทดสอบนี้ค่าหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง (vertical stress) มีค่าคงที่ตลอดเวลาทดสอบ คือ 1, 2 และ 3 ksc การให้หน่วยแรงในแนวดิ่ง แก่ตัวอย่างดินทำโดยใช้หลักการของโมเมนต์ โดยการถ่วงตุ้มน้ำหนักที่คานเหล็ก ขนาด  $110 \times 4 \times 1.5$  เซนติเมตร ที่ระยะห่างจากจุดหมุนเป็นระยะสลิปเท้าของระยะห่างที่แกนกดตัวอย่างที่ทดสอบห่างจากจุดหมุน สำหรับจุดหมุนนั้นทำจากเหล็กฉากยึดติดกับโครงเฟรมหลักด้านบน ส่วนแกนกดตัวอย่างจะเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กขนาด  $10 \times 10 \times 1$  เซนติเมตร ซึ่งทำหน้าที่ถ่ายแรงลงสู่ตัวอย่างดิน ที่แผ่นเหล็กมีการเจาะรูขนาด 0.2 เซนติเมตร 20 รู เพื่อให้สามารถซึมผ่านสู่ตัวอย่างดินได้
5. โครงเฟรมหลัก ประกอบด้วยแผ่นเหล็กขนาด  $40 \times 40 \times 2$  เซนติเมตร 2 แผ่นต่อเข้ากับเสาเหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร 4 ต้น โครงเฟรมหลักจะยึดกับแผ่นฐานเหล็กรองรับชุดมอเตอร์โดยใช้สกรูหกเหลี่ยม ที่ด้านบนของโครงเฟรมมีจุดหมุนของคานรับแรงในแนวดิ่งยึดติดอยู่ ส่วนที่แผ่นพื้นด้านล่างมีการเจาะรู 2 รู

ที่ผิวด้านบนขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ลึก 0.5 เซนติเมตร ห่างกัน 8 เซนติเมตร เพื่อให้ใส่ลูกเหล็กกลมขนาด 0.9 เซนติเมตร ร่องละ 10 ลูก ให้เคลื่อนที่ตามแนวการเคลื่อนที่ของรถใส่แผ่นวัสดุทดสอบ

### 3.5 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 3.5.1 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน

ในการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินจะทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบของ American Society for Testing and Materials (ASTM) ซึ่งจะประกอบด้วย

1. การทดสอบหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างดิน (Water Content)
2. การทดสอบหาปริมาณความชื้น ณ จุดที่มวลดินเปลี่ยนสถานะ (Atterberg's Limit)
3. การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight)
4. การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดิน (Specific Gravity)

#### 3.5.2 การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างนั้นจะทำการทดสอบโดยใช้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1, 2 และ 3 ksc ที่อัตราการเลื่อน 0.03 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

- นำตัวอย่างดินมาตัดใส่กล่องใส่ตัวอย่าง จากนั้นประกอบกล่องเข้ากับโครงเฟรมหลัก
- ใส่กระดาษกรองและแผ่น geotextile ที่ผิวด้านบนของตัวอย่างดินเพื่อช่วยในการซึมของน้ำ จากนั้นเติมน้ำลงในกล่อง
- ให้นำหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง (vertical stress) แก่ตัวอย่าง เพื่อให้ตัวอย่างดินเกิดการอัดตัวคายน้ำ โดยจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง สำหรับการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 และ 3 ksc นั้นจะให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งแก่ตัวอย่างเพิ่มทีละ 1 ksc โดยเริ่มจากให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc เพื่อป้องกันการทะลักออกของดินจากกล่องใส่ตัวอย่าง

- ทำการเจียนตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้าง
- เปลี่ยนหน่วยแรงในแนวดิ่ง และชนิดของวัสดุโครงสร้าง

### 3.5.3 การทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยใช้สารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้แก่ สารละลายเบนโทไนด์ น้ำมันหล่อลื่น สี epoxy จาระบี และซิลิโคนกรีต สำหรับวิธีการทดสอบของแต่ละสารหล่อลื่นมีรายละเอียดดังนี้

- การทดสอบโดยใช้สารละลายเบนโทไนด์ สารละลายเบนโทไนด์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีค่าขีดจำกัดเหลว 400 % ในการทดสอบจะผสมผงเบนโทไนด์กับน้ำที่ปริมาณความชื้น 550% โดยใช้เครื่องผสม (mixer) เพื่อให้ส่วนผสมระหว่างเบนโทไนด์กับน้ำเข้ากันได้ดี เมื่อผสมเสร็จแล้วจะทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายเบนโทไนด์อิ่มตัว สำหรับการเตรียมวัสดุที่ใช้ทดสอบทำได้นี้ เมื่อประกอบแผ่นวัสดุกับรถแล้วจะใช้ดินน้ำมันติดรอบขอบรถเพื่อกันไม่ให้สารละลายเบนโทไนด์ไหลออกในขณะทำการทดสอบ ดังรูปที่ 3.9 จากนั้นทาสารละลายเบนโทไนด์ลงบนผิววัสดุแล้วใช้เกรียงปาดให้เรียบ โดยมีความหนาของชั้นสารละลายเบนโทไนด์ประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นจึงประกอบกล่องใส่ตัวอย่างดินแล้วจึงทำการทดสอบ
- การทดสอบโดยใช้จาระบีและซิลิโคนกรีต ในการทดสอบจะใช้ความหนาของชั้นซิลิโคนกรีตและจาระบีประมาณ 1 มิลลิเมตร เมื่อประกอบแผ่นเหล็กหรือแผ่นคอนกรีตแล้ว จะใช้เทปกาชขนาดความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร แปะรอบพื้นที่ที่ทดสอบโดยแปะ 2 ชั้นเพื่อให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นทาสีซิลิโคนกรีตหรือจาระบีลงบนแผ่นวัสดุแล้วใช้ท่อนเหล็กกลมผิวเรียบปาดซิลิโคนกรีตหรือจาระบีให้มีความหนาเท่ากันตลอดพื้นที่ในการทดสอบ แล้วจึงทำการทดสอบแรงเสียดทาน
- การทดสอบโดยใช้น้ำมันหล่อลื่น ในการทดสอบจะทดสอบกับผิวเหล็กเท่านั้น ในการเตรียมแผ่นเหล็กก่อนการทดสอบต้องใช้อะซิโตนเช็ดทำความสะอาดผิวเหล็กก่อน จากนั้นใช้น้ำมันหล่อลื่นปริมาณ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อพื้นที่ 180 ตารางเซนติเมตร ทาที่ผิวเหล็กโดยใช้แปรงขนอ่อนทาให้สม่ำเสมอ จากนั้นจึงทำการทดสอบแรงเสียดทานได้

- การทดสอบโดยใช้การทาสีepoxy ในการทดสอบจะทดสอบกับผิวคอนกรีตเท่านั้น การเตรียมแผ่นคอนกรีตก่อนการทดสอบต้องทำความสะอาดผิวก่อนโดยใช้ผงซักฟอกล้างแล้วตากแดดให้แห้ง ส่วนการเตรียมสีepoxy ทำโดยใช้อัตราส่วนของส่วนผสมสีดำต่อส่วนผสมสีขาวเท่ากัน เมื่อผสมเข้ากันแล้วจะใช้แปรงขนอ่อนทาสีลงบนแผ่นคอนกรีตให้มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นปล่อยให้แห้งโดยตากลมประมาณ 24 ชั่วโมง จึงสามารถนำไปทำการทดสอบได้ เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบแล้วจะทำให้ผิวของชั้นสีepoxy เกิดการสึกด้านจึงต้องมีการทาสีใหม่ทุกครั้งก่อนทำการทดสอบ โดยต้องใช้สารละลายทินเนอร์ล้างสีออกก่อนแล้วทำความสะอาดจึงสามารถทาสีใหม่ได้

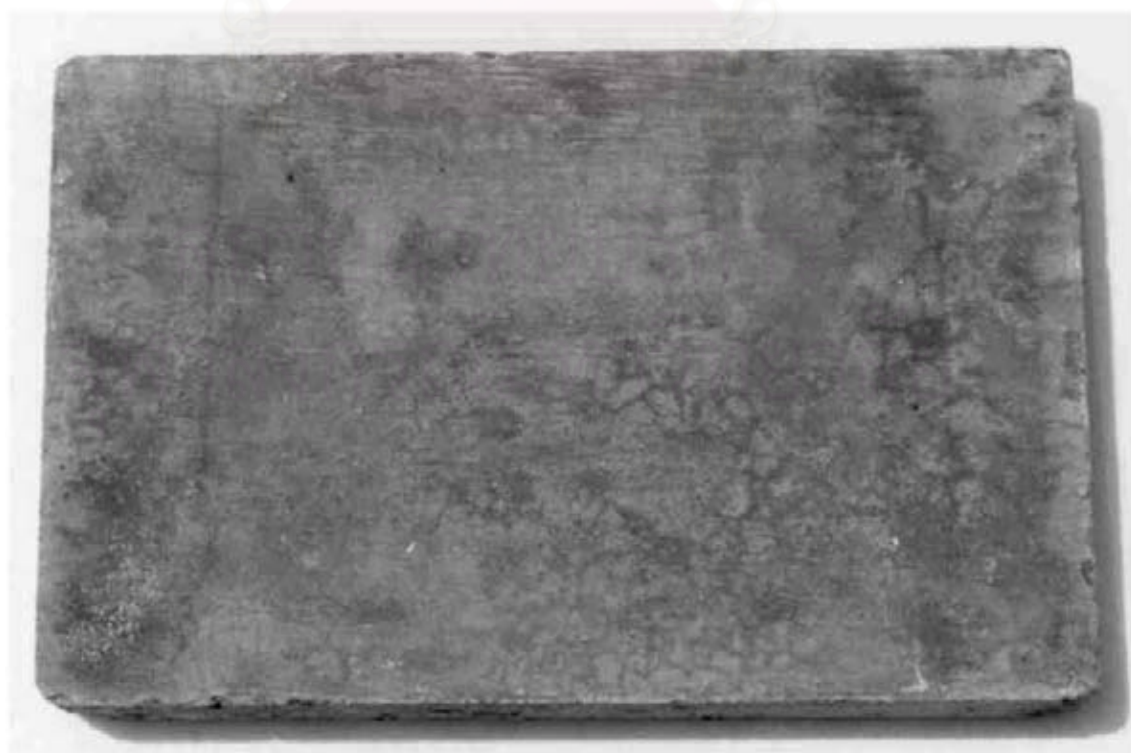
#### 3.5.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียว

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแบบเฉือนตรง โดยใช้เครื่อง Direct shear test นั้นจะทำการทดสอบโดยใช้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1, 2 และ 3 ksc ที่อัตราการเฉือน 0.03 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง





รูปที่ 3.1 แผ่นคอนกรีตผิวหยาบที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 แผ่นคอนกรีตผิวเรียบที่ใช้ในการทดสอบ



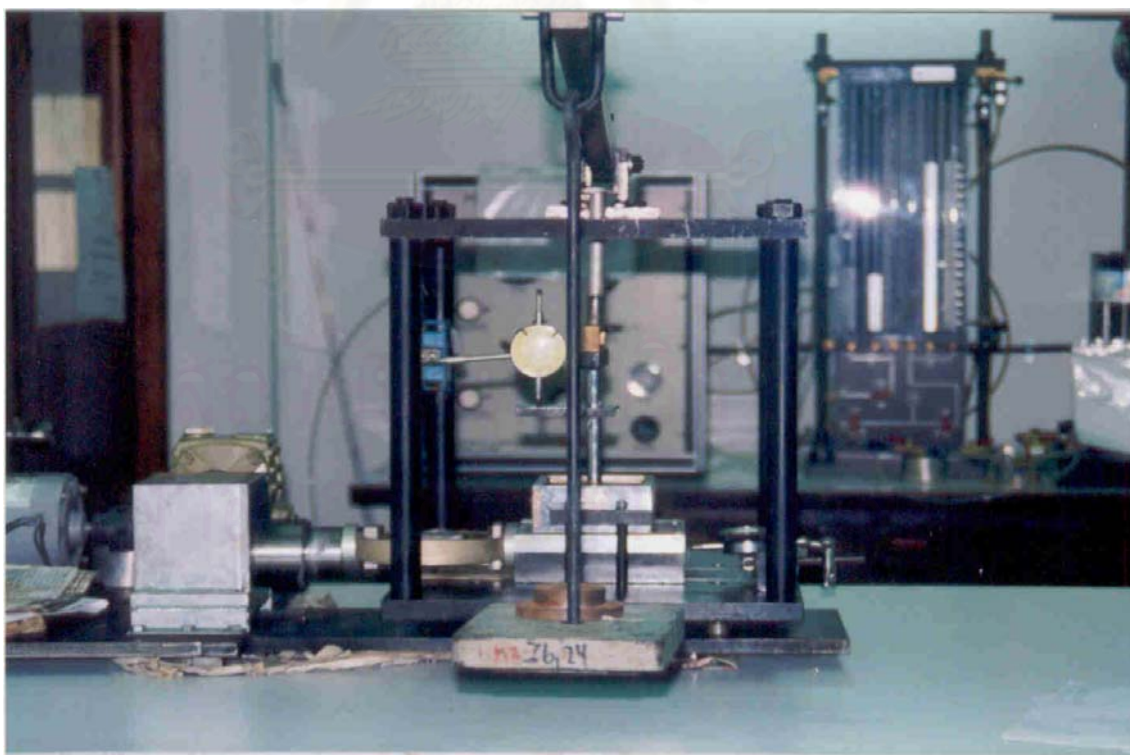
รูปที่ 3.3 แผ่นเหล็กผิวหยาบที่ใช้ในการทดสอบ



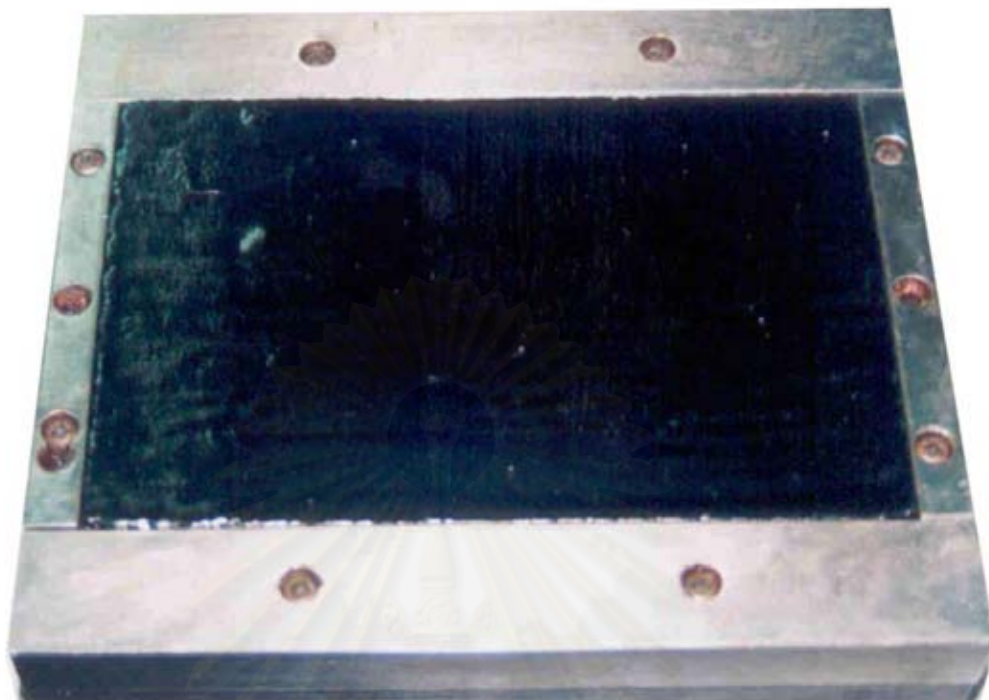
รูปที่ 3.4 แผ่นเหล็กผิวเรียบที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.5 กระบอกล้อที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ



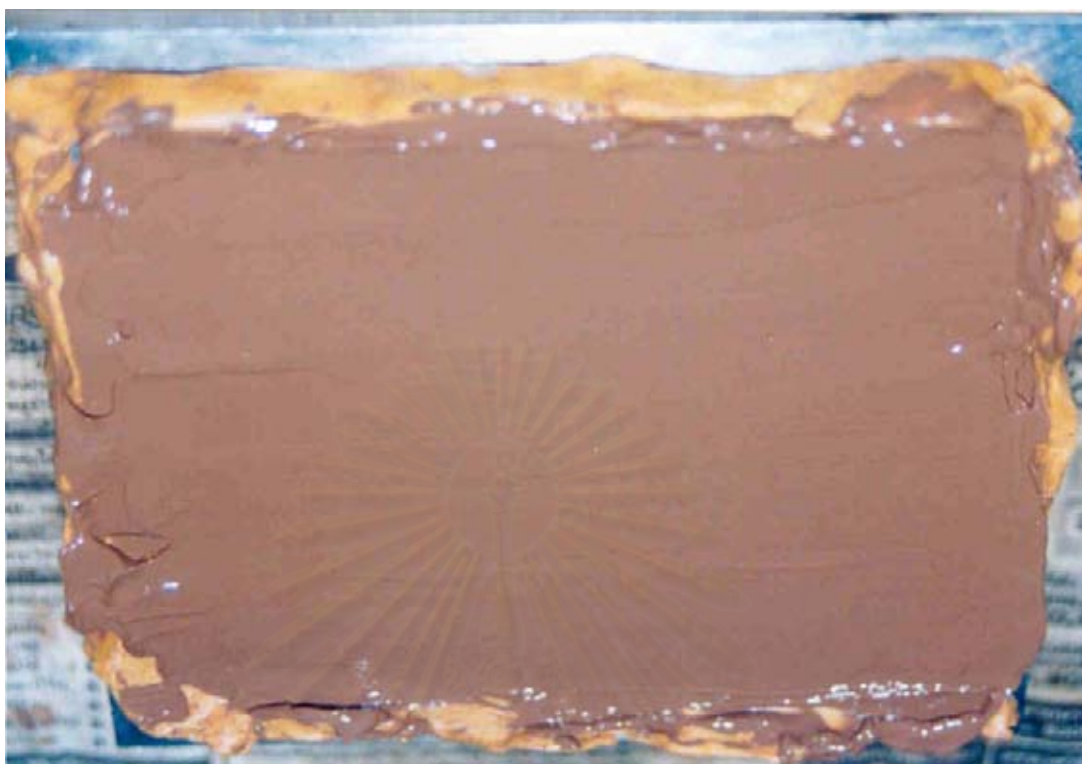
รูปที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.7 การเตรียมการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับคอนกรีต



รูปที่ 3.8 ชุดมอเตอร์สำหรับทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.9 การเตรียมการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยใช้สารละลายเบนโทไนต์



รูปที่ 3.10 แผ่นคอนกรีตทาสี epoxy

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ

ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ เป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบ Disturbed sample หลังจากเก็บตัวอย่างดินมาแล้วจะนำดินมาทำการอบแห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จากนั้นนำไปกวนผสมกับน้ำแล้วทำการ reconstitue โดยใช้น้ำหนักกดทับที่ 1 ksc ซึ่งคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

#### ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ

|   |                       |
|---|-----------------------|
| คุณสมบัติทางกายภาพ : ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Disturbed Sample) |                       |
| - สีเทาถึงเทาเข้ม (Grey to Dark grey)                         |                       |
| - ปริมาณความชื้น, w (%) :                                     | 33-37 %               |
| - ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) :                         | 2.64                  |
| - ชีดเหลว (Liquid Limit) :                                    | 64.2 %                |
| - ชีดพลาสติก (Plastic Limit) :                                | 22.9 %                |
| - ดัชนีพลาสติกซิตี , (Plasticity Index) :                     | 41.3 %                |
| - หน่วยน้ำหนักรวม , (Total Unit Weight) :                     | 1.88 t/m <sup>2</sup> |

## 4.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียวโดยเครื่อง direct shear เพื่อที่จะนำค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมาเปรียบเทียบกับค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของดินเหนียวกับวัสดุต่างๆ ในการทดสอบจะทดสอบที่อัตราการเฉือนที่เท่ากับการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส คือ 0.03 มิลลิเมตรต่อนาที ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง ( $\sigma'_n$ ) 1, 2 และ 3 ksc โดยในรูปที่ 4.1 แสดงค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือน รูปที่ 4.2 แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งขณะการเฉือน ส่วนค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

จากการคำนวณหาอัตราการเฉือนแบบระบายน้ำ โดยใช้ค่า  $t_{50}$  และค่า  $t_{90}$  ในขบวนการอัดตัวคายน้ำ และใช้สมการ (2.6) และ (2.7) ตามมาตรฐาน ASTM D3080 พบว่าการเฉือนด้วยอัตราเร็ว 0.035 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นการเฉือนแบบระบายน้ำได้ทัน (drained test) ดังนั้นการทดสอบที่อัตราการเฉือน 0.03 มิลลิเมตรต่อนาที จึงเป็นการทดสอบแบบระบายน้ำได้ทัน

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งของดินเหนียวจะได้  $\tau_{max} = 0.47\sigma'_n$  ค่ามุม  $\phi'$  ของดินเหนียว มีค่า  $25^\circ$  ค่า cohesion intercept เท่ากับ 0

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแบบเฉือนตรง

|  | ค่าหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง ( $\sigma'_n$ ) |       |       |
|--|---|-------|-------|
|  | 1 ksc                                     | 2 ksc | 3 ksc |
| ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด, $\tau_{max}$ (ksc) | 0.51                                      | 0.95  | 1.41  |

### 4.3 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต

#### 4.3.1 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบได้ทำการทดสอบ 5 กรณี คือ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสี และการทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสีและสารละลายเบนโทไนด์ โดยผลการทดสอบในกรณีต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

| การทดสอบ                                       | ค่าหน่วยแรงกดทับ<br>ในแนวตั้ง, $\sigma_n$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เสียดทานสูงสุด, $\tau_{max}$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เสียดทานที่ระยะการ<br>เฉือน 6 มม., $\tau_r$ (ksc) |
|--|--|--|--|
| คอนกรีตผิวหยาบ                                 | 1  | 0.43   | 0.38   |
|  | 2  | 0.84   | 0.79   |
|  | 3  | 1.16   | 1.10   |
| คอนกรีตผิวหยาบ<br>ทาสารละลาย<br>เบนโทไนด์      | 1  | 0.30   | 0.26   |
|  | 2  | 0.60   | 0.56   |
|  | 3  | 0.88   | 0.85   |
| คอนกรีตผิวหยาบ<br>ทาสี                         | 1  | 0.19   | 0.18   |
|  | 2  | 0.39   | 0.37   |
|  | 3  | 0.56   | 0.54   |
| คอนกรีตผิวหยาบ<br>ทาสีและสารละลาย<br>เบนโทไนด์ | 1  | 0.13   | 0.10   |
|  | 2  | 0.27   | 0.17   |
|  | 3  | 0.39   | 0.25   |
| คอนกรีตผิวหยาบ<br>ทาสารละลาย                   | 1  | 0.07   | 0.06   |
|  | 2  | 0.19   | 0.12   |
|  | 3  | 0.22   | 0.17   |



**ตารางที่ 4.4** ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

| การทดสอบ                               | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุด | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มม. | ค่ามุมแรงเสียดทาน ( $\delta$ ) |
|--|----------------------------------|---|--------------------------------|
| คอนกรีตผิวหยาบ                         | 0.40                             | 0.38  | 21°                            |
| คอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์      | 0.30                             | 0.27  | 16°                            |
| คอนกรีตผิวหยาบทาสี                     | 0.19                             | 0.18  | 10°                            |
| คอนกรีตผิวหยาบทาสีและสารละลายเบนโทไนด์ | 0.13                             | 0.09  | 7°                             |
| คอนกรีตผิวหยาบทาสี                     | 0.07                             | 0.06  | 4°                             |

จากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1, 2 และ 3 ksc พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบมีค่าสูงสุดที่ระยะการเฉือนประมาณ 1.5 ถึง 2.0 มิลลิเมตร เมื่อนำสารหล่อลื่นมาใช้ที่ผิวคอนกรีตผิวหยาบแล้วพบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าสูงสุดที่ระยะการเฉือนประมาณ 0.2 ถึง 0.75 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากสารหล่อลื่นที่นำมาใช้จะช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวคอนกรีตกับดินเหนียวจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณารูปและตารางที่ 4.2 พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนทุกผิวสัมผัสเมื่อถึงค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดแล้วจะมีค่าลดลงไม่มากเมื่อมีระยะการเฉือนเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1, 2 และ 3 ksc พบว่าค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบมีค่ามากที่สุด ส่วนค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเมื่อทาสีที่ผิวและสารละลายเบนโทไนด์มีค่าใกล้เคียงกับค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเมื่อทาสี โดยมิต้าน้อยมากที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 และ 2 ksc ประมาณ 0.03 มิลลิเมตร และมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะการเฉือนมีค่ามากขึ้น ส่วนที่ผิวคอนกรีตผิวหยาบ ผิวคอนกรีตผิวหยาบทาสี และ

เมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์ ค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทำการฉีดจะมีแนวโน้มที่ทรุดตัวมากขึ้น เมื่อระยะเวลาการฉีดมากขึ้น

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ จึงสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อมีการนำสารหล่อลื่นมาใช้ที่สัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบจะช่วยลดค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้

#### 4.3.2 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ

การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบได้ทำการทดสอบ 5 กรณี คือ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสี และการทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสีและสารละลายเบนโทไนด์ โดยผลการทดสอบในกรณีต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ

| การทดสอบ  | ค่าหน่วยแรงกดทับ<br>ในแนวตั้ง, $\sigma'_n$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เฉียดทานสูงสุด, $\tau_{max}$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เฉียดทานที่ระยะการ<br>เฉือน 6 มม., $\tau_r$ (ksc) |
|---|---|--|--|
| คอนกรีตผิวเรียบ                                 | 1   | 0.34   | 0.32   |
|   | 2   | 0.66   | 0.63   |
|   | 3   | 1.00   | 0.96   |
| คอนกรีตผิวเรียบทา<br>สารละลาย<br>เบนโทไนต์      | 1   | 0.26   | 0.22   |
|   | 2   | 0.52   | 0.48   |
|   | 3   | 0.71   | 0.68   |
| คอนกรีตผิวเรียบ<br>ทาสี                         | 1   | 0.16   | 0.14   |
|   | 2   | 0.34   | 0.25   |
|   | 3   | 0.48   | 0.46   |
| คอนกรีตผิวเรียบ<br>ทาสีและสารละลาย<br>เบนโทไนต์ | 1   | 0.11   | 0.10   |
|   | 2   | 0.22   | 0.17   |
|   | 3   | 0.32   | 0.25   |
| คอนกรีตผิวเรียบทา<br>จาระบี                     | 1   | 0.06   | 0.04   |
|   | 2   | 0.12   | 0.10   |
|   | 3   | 0.20   | 0.15   |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 4.6** ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ

| การทดสอบ                                | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุด | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มม. | ค่ามุมแรงเสียดทาน ( $\delta$ ) |
|---|----------------------------------|---|--------------------------------|
| คอนกรีตผิวเรียบ                         | 0.33                             | 0.32  | 18°                            |
| คอนกรีตผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์      | 0.24                             | 0.23  | 13°                            |
| คอนกรีตผิวเรียบทาสี                     | 0.16                             | 0.14  | 9°                             |
| คอนกรีตผิวเรียบทาสีและสารละลายเบนโทไนด์ | 0.11                             | 0.10  | 6°                             |
| คอนกรีตผิวเรียบทาจาระบี                 | 0.06                             | 0.05  | 3°                             |

จากรูปที่ 4.9 ,4.10 และ 4.11 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1,2 และ 3 ksc พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบมีค่าสูงสุดที่ระยะการเฉือนประมาณ 1.5 ถึง 2.0 มิลลิเมตร เมื่อนำสารหล่อลื่นมาใช้พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าลดลงและค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดจะอยู่ที่ระยะการเฉือนประมาณ 0.2 ถึง 0.75 มิลลิเมตร ซึ่งมีระยะการเฉือนใกล้เคียงกับการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวเรียบ

รูปที่ 4.12 ,4.13 และ 4.14 แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1,2 และ 3 ksc พบว่าค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบมีค่ามากที่สุด ค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเมื่อทาสีที่ผิวและสารละลายเบนโทไนด์ กับค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเมื่อทาจาระบีมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะการเฉือนมีค่ามากขึ้น ส่วนที่ผิวคอนกรีตหยาบ ผิวคอนกรีตหยาบทาสี และเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์ ค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทำการเฉือนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.4 และ 4.6 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มิลลิเมตร ของคอนกรีตผิวหยาบจะมีค่ามากกว่าคอนกรีตผิวเรียบ จึงสามารถกล่าวได้ว่า ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสนั้นขึ้นอยู่กับค่าความหยาบของพื้นที่ผิวสัมผัส ส่วนในกรณีที่มีการใช้สารหล่อลื่นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสารหล่อลื่นจะช่วยลดผลของความหยาบของพื้นผิวที่มีต่อแรงเสียดทาน

#### 4.4 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก

##### 4.4.1 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ

การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบได้ทำการทดสอบ 4 กรณี คือ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาน้ำมันหล่อลื่น และการทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาสิลิโคนกรีส โดยค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบในกรณีต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และ 4.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ค่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ

| การทดสอบ                                | ค่าหน่วยแรงกดทับ<br>ในแนวตั้ง, $\sigma'_n$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เฉียดทานสูงสุด, $\tau_{max}$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เฉียดทานที่ระยะการ<br>เฉือน 6 มม., $\tau_r$ (ksc) |
|---|---|--|--|
| เหล็กผิวหยาบ                            | 1   | 0.34   | 0.25   |
|   | 2   | 0.64   | 0.47   |
|   | 3   | 0.97   | 0.73   |
| เหล็กผิวหยาบ<br>ทาสารละลาย<br>เบนโทไนต์ | 1   | 0.25   | 0.22   |
|   | 2   | 0.54   | 0.44   |
|   | 3   | 0.72   | 0.65   |
| เหล็กผิวหยาบทา<br>น้ำมันหล่อลื่น        | 1   | 0.19   | 0.12   |
|   | 2   | 0.36   | 0.23   |
|   | 3   | 0.60   | 0.34   |
| เหล็กผิวหยาบ<br>ทาสิลิโคนกรีต           | 1   | 0.11   | 0.03   |
|   | 2   | 0.21   | 0.08   |
|   | 3   | 0.31   | 0.12   |

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเฉียดทานและมุมแรงเฉียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ

| การทดสอบ                            | ค่าสัมประสิทธิ์แรง<br>เฉียดทานสูงสุด | ค่าสัมประสิทธิ์แรง<br>เฉียดทานที่ระยะ<br>การเฉือน 6 มม. | ค่ามุมแรง<br>เฉียดทาน ( $\delta$ ) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| เหล็กผิวหยาบ                        | 0.32                                 | 0.24  | 17°                                |
| เหล็กผิวหยาบทาสาร<br>ละลายเบนโทไนต์ | 0.25                                 | 0.22  | 14°                                |
| เหล็กผิวหยาบทา<br>น้ำมันหล่อลื่น    | 0.15                                 | 0.12  | 8°                                 |
| เหล็กผิวหยาบทาสิลิโคนกรีต           | 0.06                                 | 0.04  | 3°                                 |

จากรูปที่ 4.15 ,4.16 และ 4.17 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1,2 และ 3 ksc พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบมีค่ามากที่สุดที่ระยะการเฉือนอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 มิลลิเมตร เมื่อใช้สารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสจะทำให้ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสมีค่าลดลงโดยมีค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ระยะการเฉือนอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.5 มิลลิเมตร คือ เมื่อใช้ซิลิโคนกรีตเป็นสารหล่อลื่น ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดอยู่ที่ระยะการเฉือนประมาณ 0.2 มิลลิเมตร เมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นหรือสารละลายเบนโทไนด์เป็นสารหล่อลื่น ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดอยู่ที่ระยะการเฉือนประมาณ 0.5 มิลลิเมตร

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนของผิวสัมผัสดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทุกแบบจะมีลักษณะดังนี้ คือ เมื่อค่าหน่วยแรงเฉือนถึงค่าสูงสุดแล้วจะเกิดการลดลงของหน่วยแรงเฉือนอย่างมากภายในระยะการเฉือนประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร จากนั้นค่าหน่วยแรงเฉือนจะมีค่าค่อนข้างคงที่ จากผลดังกล่าวจึงทำให้ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดกับค่าหน่วยแรงเฉือนที่ระยะการเฉือน 6 มิลลิเมตร มีค่าต่างกันอย่างมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.8

จากรูปที่ 4.18 ,4.19 และ 4.20 แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1,2 และ 3 ksc ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนของผิวสัมผัสดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบมีค่ามากที่สุดโดยมีอัตราการทรุดตัวช่วงระยะการเฉือน 0 ถึง 1.5 มิลลิเมตรมากที่สุดและมีแนวโน้มที่จะทรุดตัวต่อไปเมื่อระยะการเฉือนมากขึ้น เมื่อใช้สารหล่อลื่นจะทำให้การทรุดตัวมีค่าลดลง คือ เมื่อใช้ซิลิโคนกรีตแล้วค่าการทรุดตัวมีค่าน้อยลงอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 และ 2 ksc ค่าการทรุดตัวขณะทำการเฉือนมีค่าน้อยมากและค่อนข้างคงที่โดยมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.03 มิลลิเมตร ส่วนเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์ และน้ำมันหล่อลื่นเป็นสารหล่อลื่น ค่าการทรุดตัวในขณะทำการเฉือนมีค่าลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิโคนกรีต และค่าการทรุดตัวยังคงมีแนวโน้มที่จะทรุดตัวต่อไปเมื่อระยะการเฉือนมากขึ้น

#### 4.4.2 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ

การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบได้ทำการทดสอบ 4 กรณี คือ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ การทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาน้ำมันหล่อลื่น และการทดสอบผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสิลิโคนกรีส โดยค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบในกรณีต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.9 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ

| การทดสอบ                             | ค่าหน่วยแรงกดทับ<br>ในแนวตั้ง, $\sigma'_n$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เสียดทานสูงสุด, $\tau_{max}$<br>(ksc) | ค่าหน่วยแรง<br>เสียดทานที่ระยะการ<br>เฉือน 6 มม., $\tau_r$ (ksc) |
|--------------------------------------|---|--|--|
| เหล็กผิวเรียบ                        | 1   | 0.28   | 0.16   |
|                                      | 2   | 0.56   | 0.38   |
|                                      | 3   | 0.85   | 0.56   |
| เหล็กผิวเรียบทาสาร<br>ละลายเบนโทไนด์ | 1   | 0.21   | 0.15   |
|                                      | 2   | 0.43   | 0.34   |
|                                      | 3   | 0.68   | 0.52   |
| เหล็กผิวเรียบทา<br>น้ำมันหล่อลื่น    | 1   | 0.13   | 0.06   |
|                                      | 2   | 0.28   | 0.15   |
|                                      | 3   | 0.37   | 0.25   |
| เหล็กผิวเรียบทา<br>ซิลิโคนกรีส       | 1   | 0.10   | 0.02   |
|                                      | 2   | 0.19   | 0.07   |
|                                      | 3   | 0.31   | 0.09   |



**ตารางที่ 4.10** ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานและมุมแรงเสียดทานของผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ

| การทดสอบ                         | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุด | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ระยะการเฉือน 6 มม. | ค่ามุมแรงเสียดทาน ( $\delta$ ) |
|----------------------------------|----------------------------------|---|--------------------------------|
| เหล็กผิวเรียบ                    | 0.28                             | 0.18  | 15°                            |
| เหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ | 0.22                             | 0.16  | 12°                            |
| เหล็กผิวเรียบทาน้ำมันหล่อลื่น    | 0.13                             | 0.07  | 7°                             |
| เหล็กผิวเรียบทาสีลิโคเนกรีส      | 0.06                             | 0.03  | 3°                             |

จากรูปที่ 4.21 ,4.22 และ 4.23 ซึ่งแสดงค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1,2 และ 3 ksc พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบมีค่ามากที่สุดที่ระยะการเฉือน 0.5 ถึง 0.75 มิลลิเมตร เมื่อใช้สารหล่อลื่นทำให้ค่าหน่วยแรงเฉือนลดลง คือ เมื่อใช้สีลิโคเนกรีสเป็นสารหล่อลื่นจะทำให้ค่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าลดลงมากที่สุด และค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดจะอยู่ที่ระยะการเฉือนประมาณ 0.05 ถึง 0.15 มิลลิเมตร เมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์เป็นสารหล่อลื่นพบว่าค่าหน่วยแรงเสียดทานมีค่าลดลงไม่มาก

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนของผิวสัมผัสดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทุกแบบจะมีลักษณะเหมือนกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนของผิวสัมผัสดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบดังนี้ คือ เมื่อค่าหน่วยแรงเฉือนถึงค่าสูงสุดจะเกิดการลดลงของหน่วยแรงเฉือนอย่างมากภายในระยะการเฉือนประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร จากนั้นค่าหน่วยแรงเฉือนจะมีค่าค่อนข้างคงที่

จากรูปที่ 4.24 ,4.25 และ 4.26 แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1,2 และ 3 ksc พบว่าค่าการ

ทรุดตัวในขณะที่ทำการเขื่อนดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบมีค่ามากที่สุดและมีแนวโน้มทรุดตัวลงมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการเขื่อนมากขึ้น ส่วนเมื่อใช้ซิลิโคนกรีตเป็นสารหล่อลื่นจะทำให้ค่าการทรุดตัวมีค่าน้อยลงและมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่เมื่อระยะเวลาการเขื่อนมากขึ้น

#### 4.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวกับค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

จากรูปที่ 4.27 ,4.28 และ 4.29 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะเวลาของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว กับการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวคอนกรีตหยาบ คอนกรีตผิวเรียบ เหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1,2 และ 3 ksc พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในช่วงระยะเวลาการเขื่อน 0 ถึง 1.5 มิลลิเมตร มีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยแรงเฉือนในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส แต่เมื่อระยะเวลาการเขื่อนเพิ่มมากขึ้นค่าหน่วยแรงเฉือนในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจะมีค่ามากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดแล้วค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีค่ามากกว่าค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงเฉือนกับระยะเวลาการเขื่อนของผิวสัมผัสดินเหนียวกับผิวเหล็ก และผิวสัมผัสดินเหนียวกับคอนกรีต พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก และดินเหนียวกับคอนกรีตในช่วงระยะเวลาการเขื่อน 0 ถึง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าใกล้เคียงกัน แต่หลังจากนั้นมีความแตกต่างกันคือ ที่ผิวสัมผัสของดินเหนียวกับเหล็กเมื่อค่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าสูงสุดแล้วจะเกิดการลดลงของค่าหน่วยแรงเฉือนอย่างมากเมื่อระยะเวลาการเขื่อนมากขึ้น ส่วนที่ผิวสัมผัสของดินเหนียวกับผิวคอนกรีตค่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าลดลงไม่มากนักจากค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด ซึ่งเป็นเพราะค่าการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กกับดินเหนียวมีความแตกต่างกับค่าการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคอนกรีตกับดินเหนียว

จากรูปที่ 4.30 ,4.31 และ 4.32 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเขื่อนของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว กับการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับผิวคอนกรีตหยาบ คอนกรีตผิวเรียบ เหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบที่

หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง  $\sigma'_n$  1, 2 และ 3 ksc พบว่าค่าการทรุดตัวขณะทำการเฉือนของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีค่ามากกว่าการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสทุกประเภทตั้งแต่เริ่มทำการเฉือน และมีแนวโน้มที่จะทรุดตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะการเฉือนเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเป็นการทดสอบที่ทำให้ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติตามระนาบแนวนอนจึงทำให้เมื่อตัวอย่างดินถึงค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดแล้วจึงเกิดการวิบัติทำให้ค่าการทรุดตัวยังคงมีค่ามากขึ้น ส่วนการทดสอบแรงเสียดทานเป็นการทดสอบที่ไม่ได้ทำให้ตัวอย่างดินเกิดการวิบัติเพียงแต่ให้ตัวอย่างดินและแผ่นวัสดุเคลื่อนที่ระหว่างกันจึงทำให้ค่าการทรุดตัวในระหว่างการเฉือนมีค่าน้อยกว่าการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

เมื่อเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวในขณะทำการเฉือนระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีต และผิวดินเหนียวกับเหล็ก พบว่า อัตราการทรุดตัวของการทดสอบผิวดินเหนียวกับผิวเหล็กนั้นเมื่อมีระยะการเฉือน 0 ถึง 1.5 มิลลิเมตร มีค่ามาก แต่หลังจากนั้นอัตราการทรุดตัวจะมีค่าน้อยลง และมีแนวโน้มที่จะทรุดตัวน้อยลงเมื่อระยะการเฉือนมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการทรุดตัวระหว่างการเฉือนของการทดสอบผิวดินเหนียวกับคอนกรีตกับดินเหนียวที่มีค่าการทรุดตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะการเฉือนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของการลดลงของหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสหลังจากการเกิดค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด คือ ที่ระยะการการเฉือนประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ของที่ผิวสัมผัสดินเหนียวกับเหล็กจะเป็นระยะการเฉือนที่เกิดค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่ผิวสัมผัส ซึ่งหลังจากนั้นค่าหน่วยแรงเฉือนมีค่าลดลงจึงทำให้อัตราการทรุดตัวมีค่าน้อยลง ส่วนที่ผิวสัมผัสของดินเหนียวกับคอนกรีตนั้นเมื่อเกิดค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดแล้วค่าหน่วยแรงเฉือนค่อนข้างคงที่จึงทำให้อัตราการทรุดตัวยังคงเป็นไปเท่าเดิม คือ มีการทรุดตัวเพิ่มมากขึ้นตามระยะการเฉือน

#### 4.6 ผลของสารหล่อลื่นต่อแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

จากการนำสารหล่อลื่นมาใช้ลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุที่ทดสอบ คือ ที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต ได้นำสารละลายเบนโทไนต์ จาระบี การทาสีที่ผิว และใช้สารละลายเบนโทไนต์รวมทั้งทาสีที่ผิว อัตราส่วนของการลดลงของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดต่อหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสดินเหนียวกับคอนกรีตเมื่อไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 ส่วนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กนั้น ได้นำสารละลายเบนโทไนต์ น้ำมันหล่อลื่น และซิลิโคนกรีต มาใช้ลดแรงเสียดทาน อัตราส่วนของการลดลงของ

หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดต่อหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสดินเหนียวกับเหล็กเมื่อไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12

**ตารางที่ 4.11** อัตราส่วนของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดของการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างดินกับคอนกรีต

| สารหล่อลื่น                  | คอนกรีตผิวหยาบ | คอนกรีตผิวเรียบ |
|------------------------------|----------------|-----------------|
| สารละลายเบนโทไนต์            | 0.68 – 0.76    | 0.70-0.78       |
| สี epoxy                     | 0.44 – 0.48    | 0.46 – 0.50     |
| สารละลายเบนโทไนต์และสี epoxy | 0.29 – 0.33    | 0.32 – 0.33     |
| จาระบี                       | 0.16 – 0.21    | 0.17 – 0.20     |

**ตารางที่ 4.12** อัตราส่วนของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อใช้สารหล่อลื่นต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดของการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างดินกับเหล็ก

| สารหล่อลื่น       | เหล็กผิวหยาบ | เหล็กผิวเรียบ |
|-------------------|--------------|---------------|
| สารละลายเบนโทไนต์ | 0.75 – 0.84  | 0.73 – 0.80   |
| น้ำมันหล่อลื่น    | 0.43 – 0.47  | 0.44 - 0.50   |
| ซิลิโคนกรีต       | 0.19         | 0.20 – 0.21   |

#### 4.6.1 ผลของการใช้สารละลายเบนโทไนต์เป็นสารหล่อลื่น

จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าเมื่อนำสารละลายเบนโทไนต์มาใช้เป็นสารหล่อลื่น ค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดจะลดลงมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างผิวสัมผัสดินเหนียวกับคอนกรีต และดินเหนียวกับเหล็ก คือ ลดลงเหลือประมาณ 0.7 ถึง 0.8 เท่าจากค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น และเมื่อนำสารละลายเบนโทไนต์มาใช้ร่วมกับการทำสีที่ผิวคอนกรีตค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดมีค่าลดลงเหลือประมาณ 0.7 เท่าจากค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่

มีการทาสีที่ผิวเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า เมื่อนำสารละลายเบนโทไนด์มาใช้เป็นสารหล่อลื่นค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงจะลดลงเหลือประมาณ 0.7 ถึง 0.8 เท่า

ส่วนผลของเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์เป็นสารหล่อลื่นต่อการหลุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือน พบว่า ค่าการหลุดตัวขณะทำการเฉือนมีค่าลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับการใช้สารหล่อลื่นประเภทอื่น

#### 4.6.2 ผลของการใช้ซิลิโคนกรีสและจาระบีเป็นสารหล่อลื่น

จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าเมื่อนำมาซิลิโคนกรีสใช้เป็นสารหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสดินเหนียวกับคอนกรีต ค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่ลดลงมีค่าใกล้เคียงกันกับการใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่นที่ผิวดินเหนียวกับเหล็ก คือ ลดลงเหลือประมาณ 0.16 ถึง 0.21 เท่าจากค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น ทั้งนี้เนื่องจากซิลิโคนกรีสกับจาระบีเป็นสารหล่อลื่นจำพวกกรีสเหมือนกัน จึงมีอัตราส่วนการลดลงที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นชนิดอื่นแล้วซิลิโคนกรีสกับจาระบีช่วยลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้มากที่สุด

ผลของการใช้ซิลิโคนกรีสและจาระบีเป็นสารหล่อลื่นต่อการหลุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนพบว่า ค่าการหลุดตัวมีการลดลงอย่างมากจากค่าการหลุดตัวของการทดสอบที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น และมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้สารหล่อลื่นชนิดอื่นทั้งนี้เนื่องจากค่าหน่วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ใช้สารหล่อลื่นชนิดอื่นจึงทำให้ค่าการหลุดตัวขณะทำการเฉือนมีค่าน้อย

#### 4.6.3 ผลของการใช้น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารหล่อลื่น

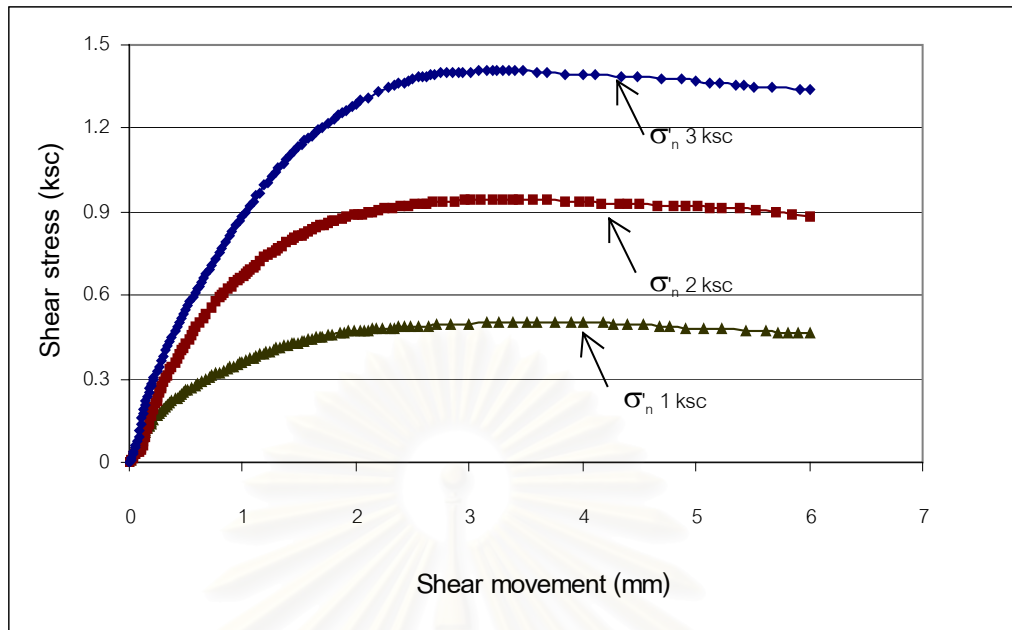
การทดสอบโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารหล่อลื่นได้ทดสอบเฉพาะที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กเท่านั้น จากตารางที่ 4.12 ค่าการลดลงของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดมีค่าเกือบเท่ากัน คือ ลดลงเหลือ 0.43 ถึง 0.47 เท่าของผิวสัมผัสเหล็กผิวหยาบ และลดลงเหลือ 0.44 ถึง 0.5 เท่าของผิวสัมผัสเหล็กผิวเรียบ

ผลของการใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ผิวต่อการหลุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนนั้น พบว่าค่าการหลุดตัวมีค่าลดลงไม่มากเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิโคนกรีสเป็นสารหล่อลื่น และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายเบนโทไนด์ ค่าการหลุดตัวโดยการใช้้ำมันหล่อลื่นจะมีการลดลงมากกว่า

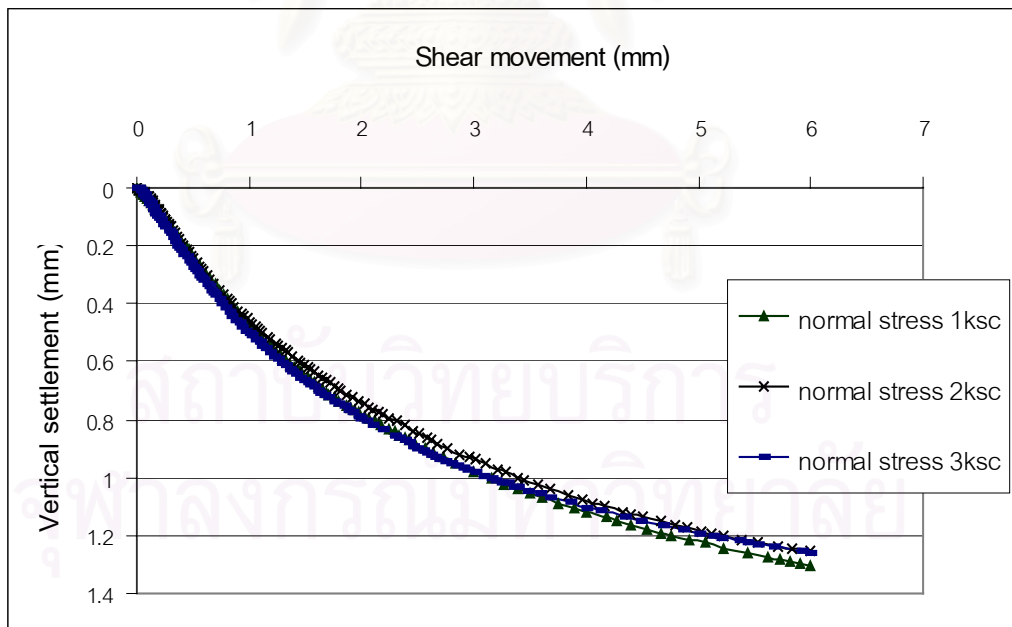
#### 4.6.4 ผลของการทาสีที่ผิว

การทดสอบโดยการทาสีที่ผิวได้ทดสอบเฉพาะที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตเท่านั้น จากตารางที่ 4.11 ค่าการลดลงของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อทาสีที่ผิวคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบมีค่าเกือบเท่ากัน คือ ลดลงเหลือ 0.47 เท่าของผิวสัมผัสคอนกรีตผิวหยาบ และลดลงเหลือ 0.48 เท่าของผิวสัมผัสคอนกรีตผิวเรียบ

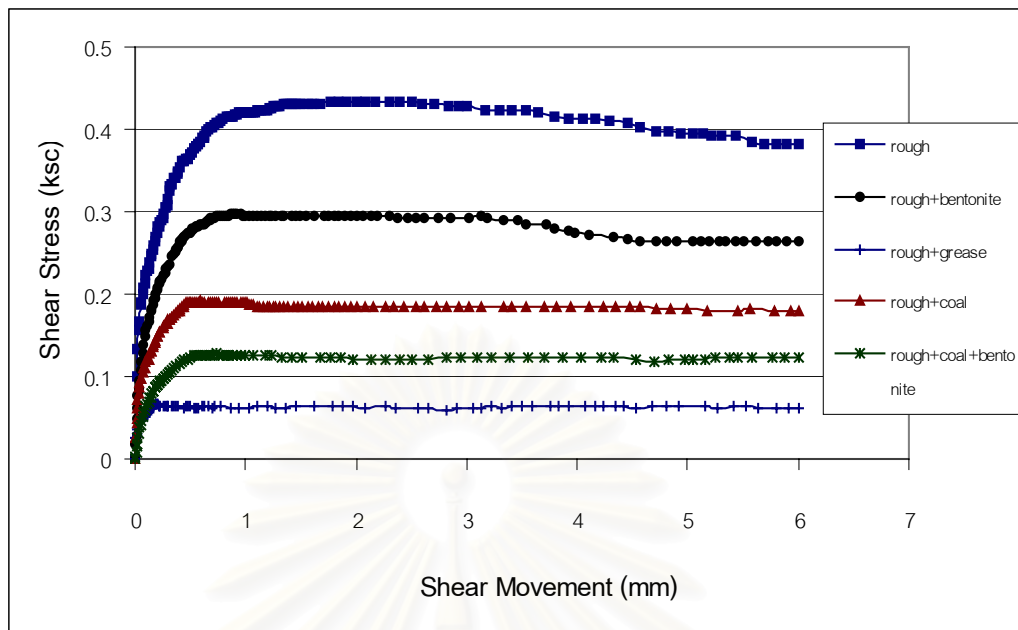
ผลของการทาสีที่ผิวต่อการหลุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือน พบว่าค่าการหลุดตัวมีค่าลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับการใช้จาระบีทาสีที่ผิว และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายเบนโทไนด์ค่าการหลุดตัวโดยการทาสีที่ผิวจะมีการลดลงมากกว่า แต่เมื่อมีการใช้สารละลายเบนโทไนด์ร่วมกับการทาสีที่ผิวด้วยจะทำให้ค่าการหลุดตัวลดลงได้อีกจนมีค่าการหลุดตัวใกล้เคียงกับการใช้จาระบีเป็นสารหล่อลื่น



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนของดินเหนียว

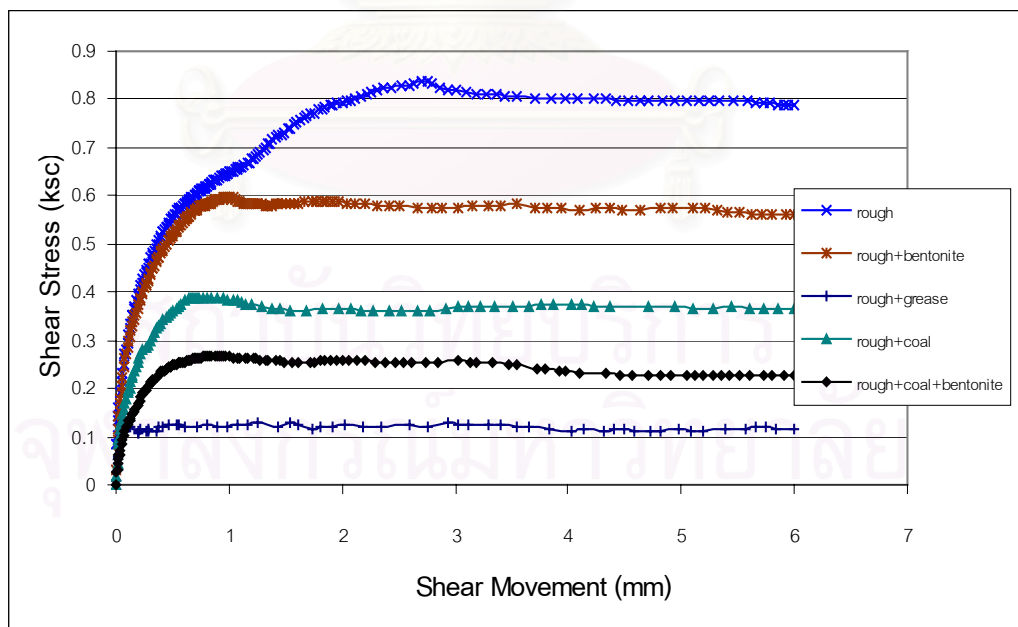


รูปที่ 4.2 การทรุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนของดินเหนียว



รูปที่ 4.3 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบแบบต่างๆที่

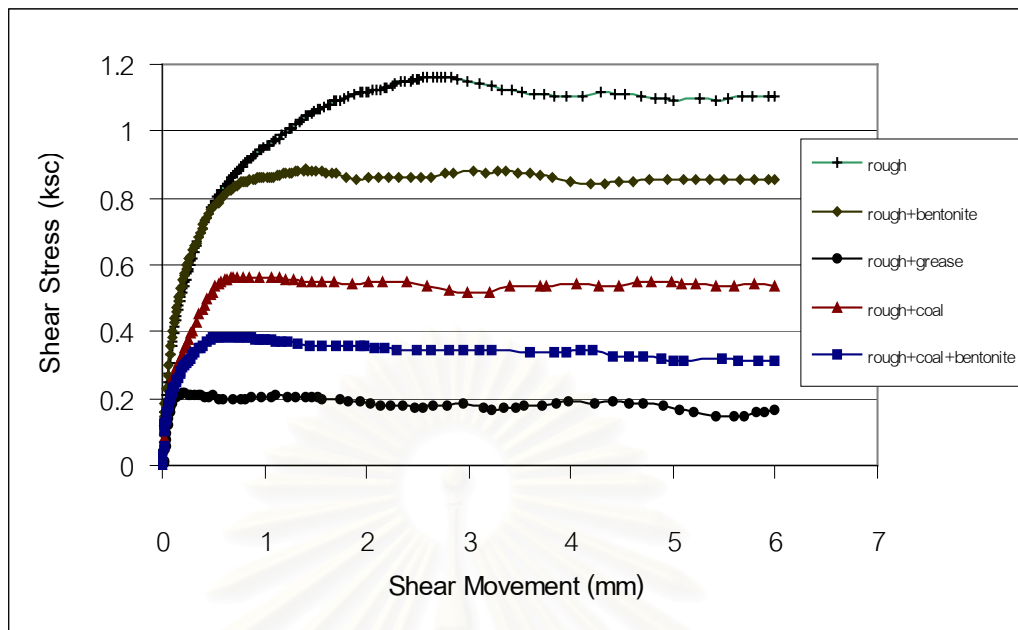
$$\sigma'_n 1 \text{ ksc}$$



รูปที่ 4.4 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบแบบต่างๆที่

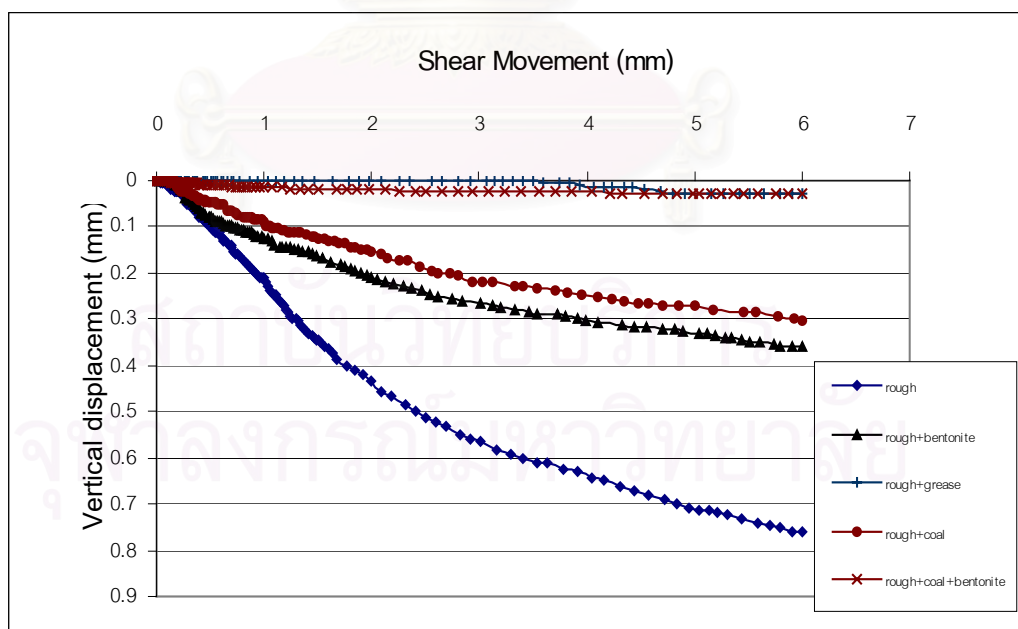
$$\sigma'_n 2 \text{ ksc}$$





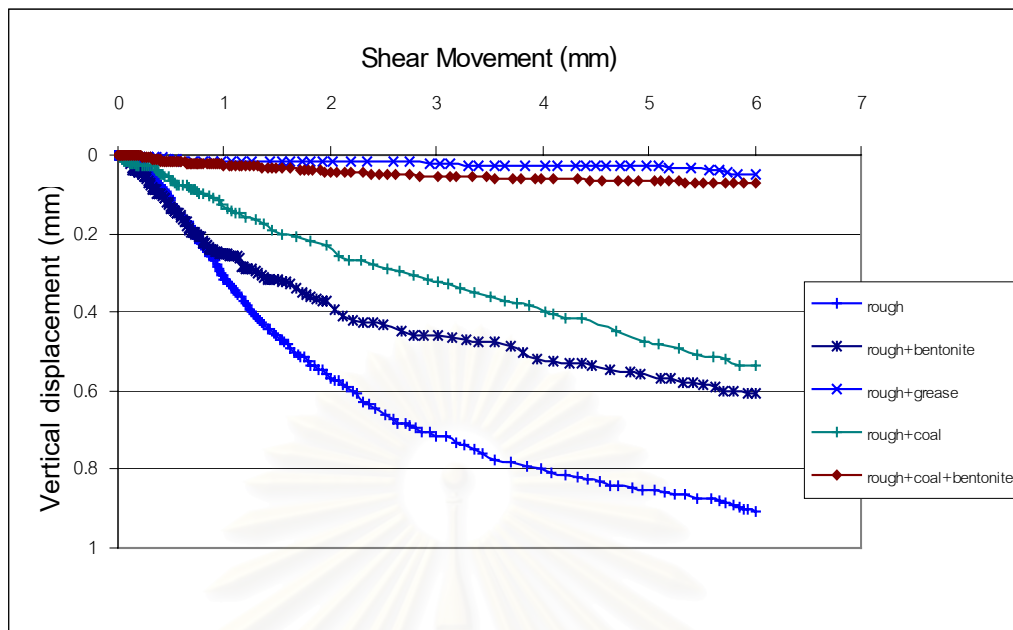
รูปที่ 4.5 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบแบบต่างๆที่

$$\sigma'_n 3 \text{ ksc}$$

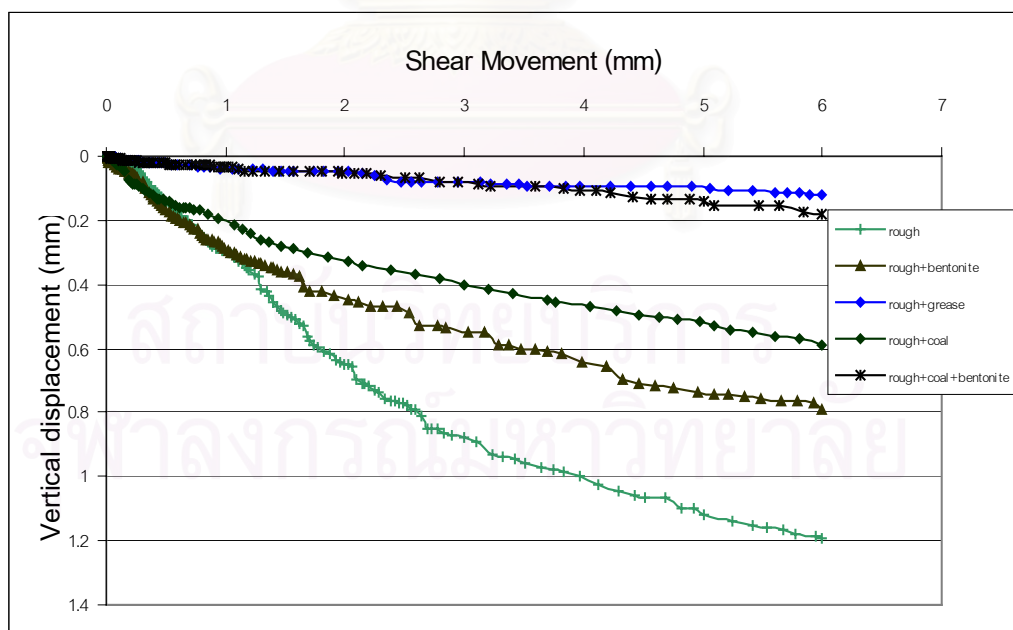


รูปที่ 4.6 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

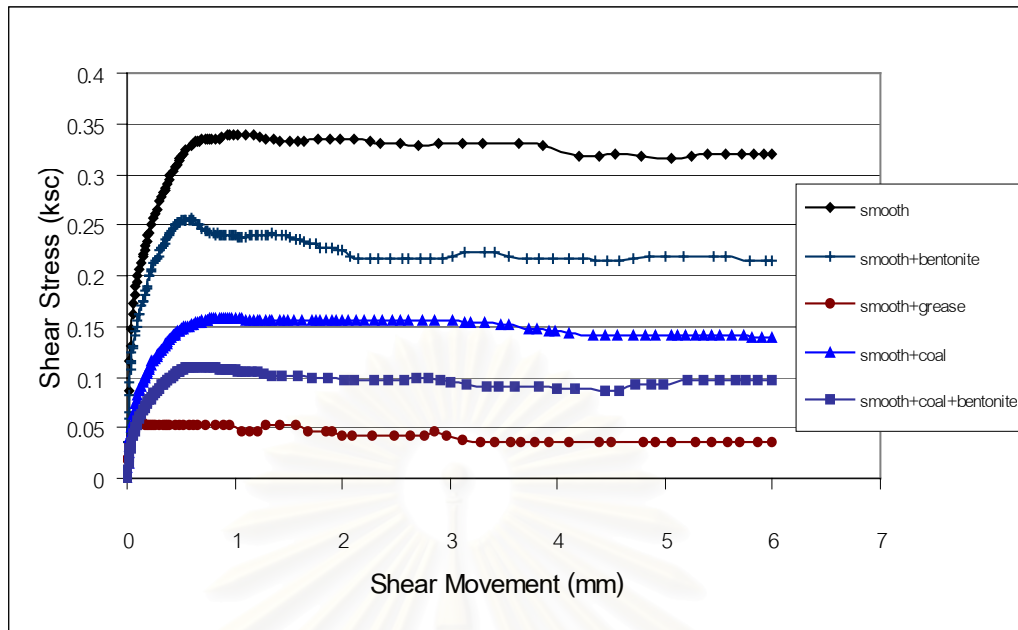
$$\text{แบบต่างๆที่ } \sigma'_n 1 \text{ ksc}$$



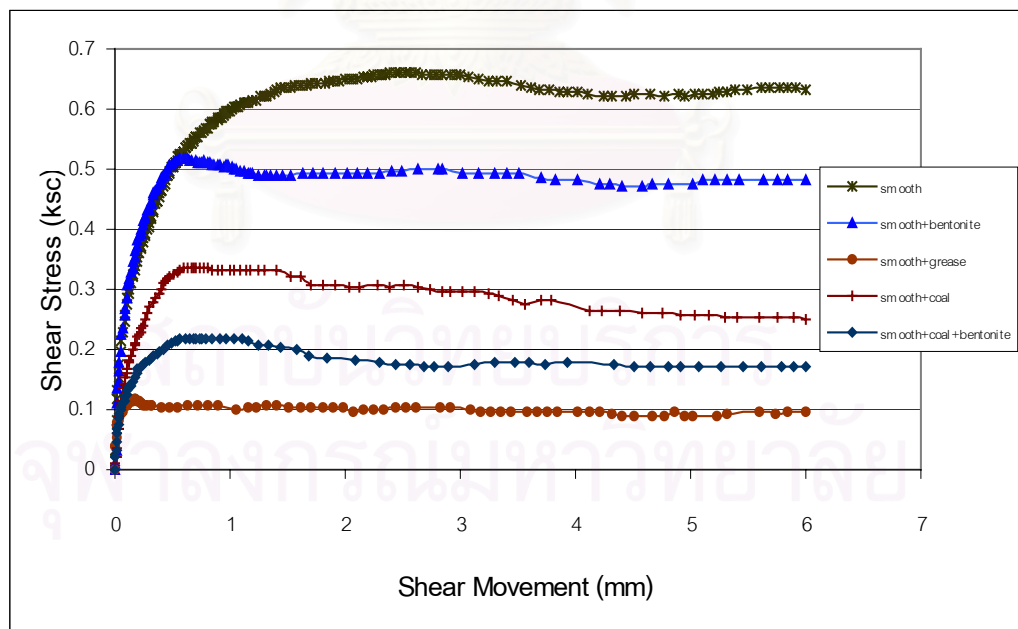
รูปที่ 4.7 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ  
แบบต่างๆที่  $\sigma'_n$  2 ksc



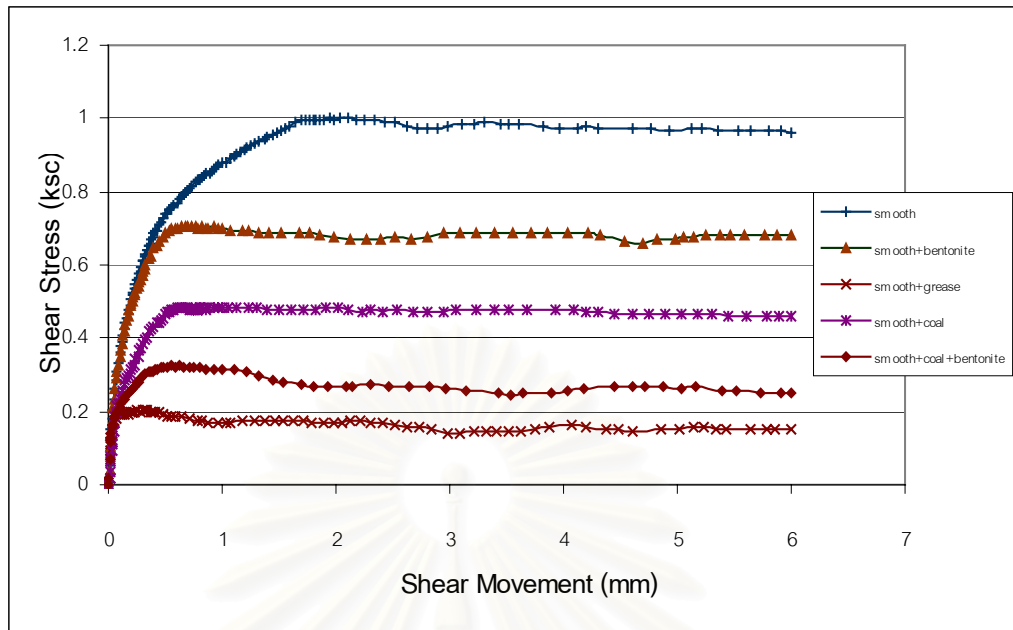
รูปที่ 4.8 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ  
แบบต่างๆที่  $\sigma'_n$  3 ksc



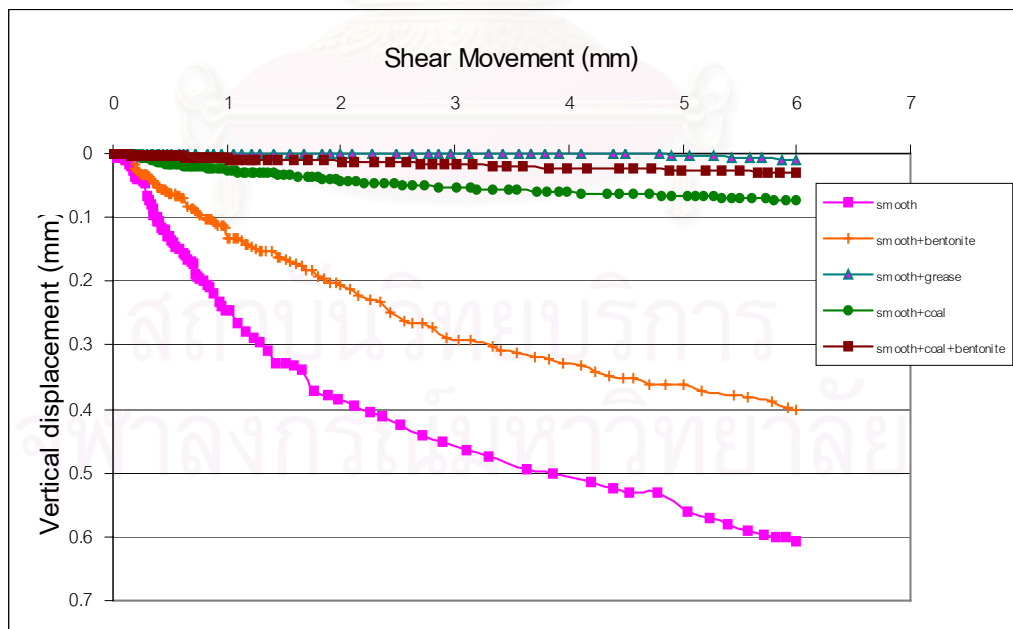
รูปที่ 4.9 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n = 1$  ksc



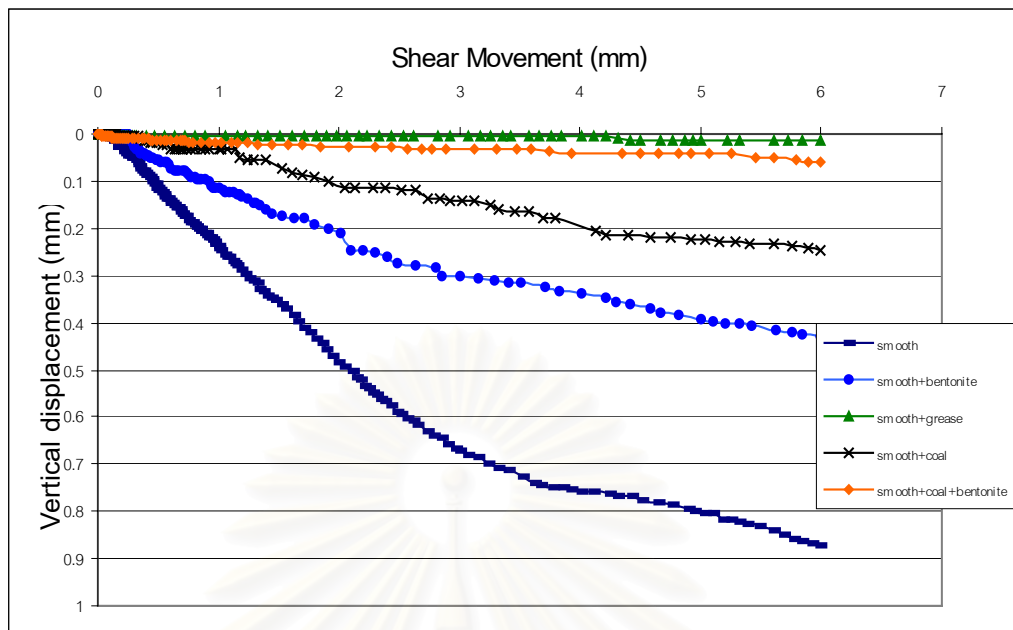
รูปที่ 4.10 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n = 2$  ksc



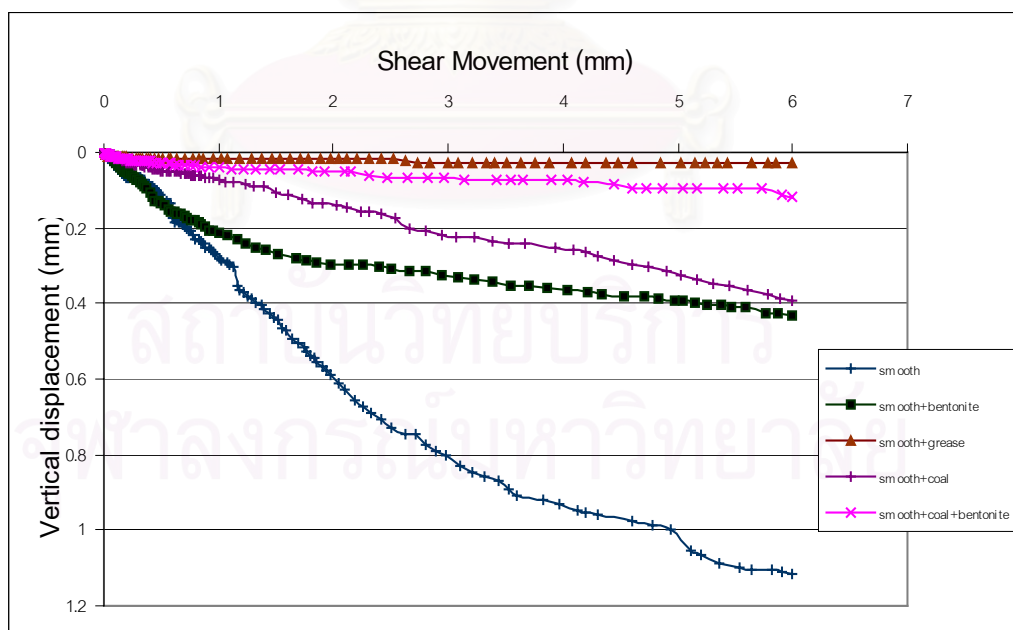
รูปที่ 4.11 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n$  3 ksc



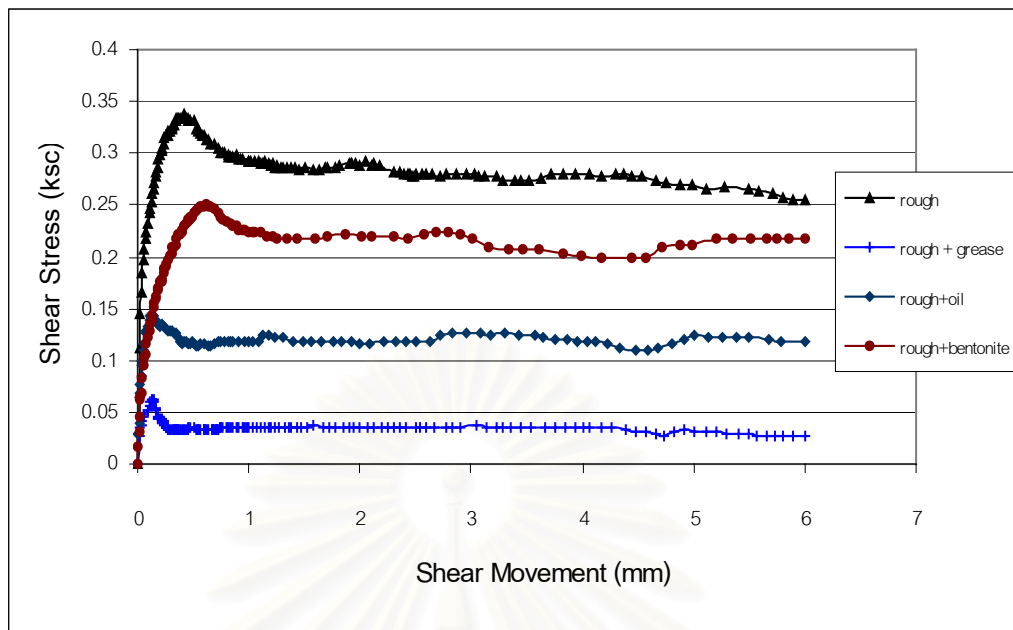
รูปที่ 4.12 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับระยะทำการเฉือนระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ  
แบบต่างๆที่  $\sigma'_n$  1 ksc



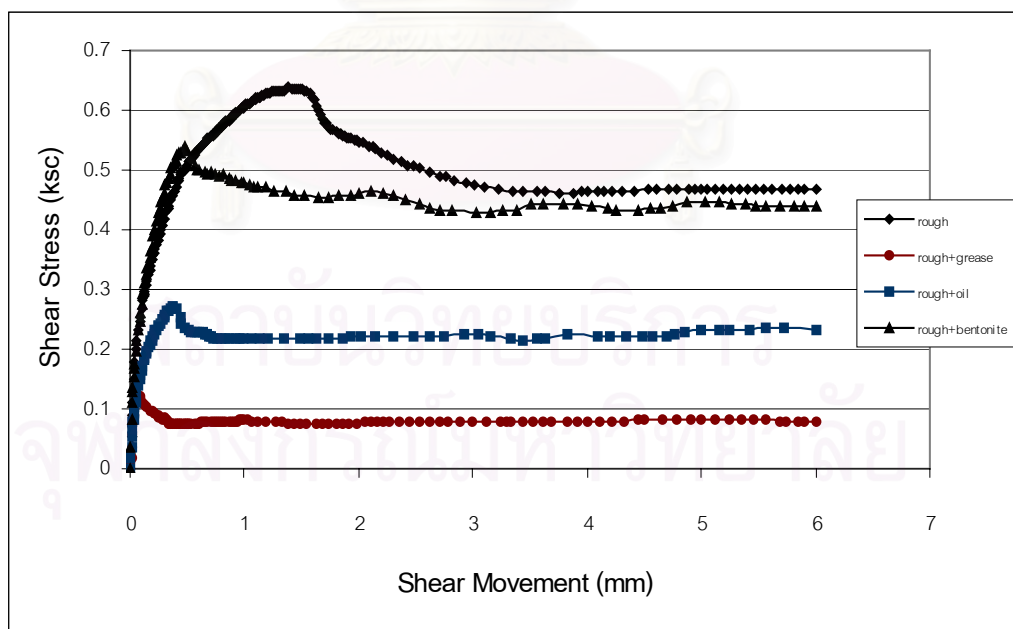
รูปที่ 4.13 การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งกับขณะทำการเฉือนระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ  
แบบต่างๆที่  $\sigma'_n = 2 \text{ ksc}$



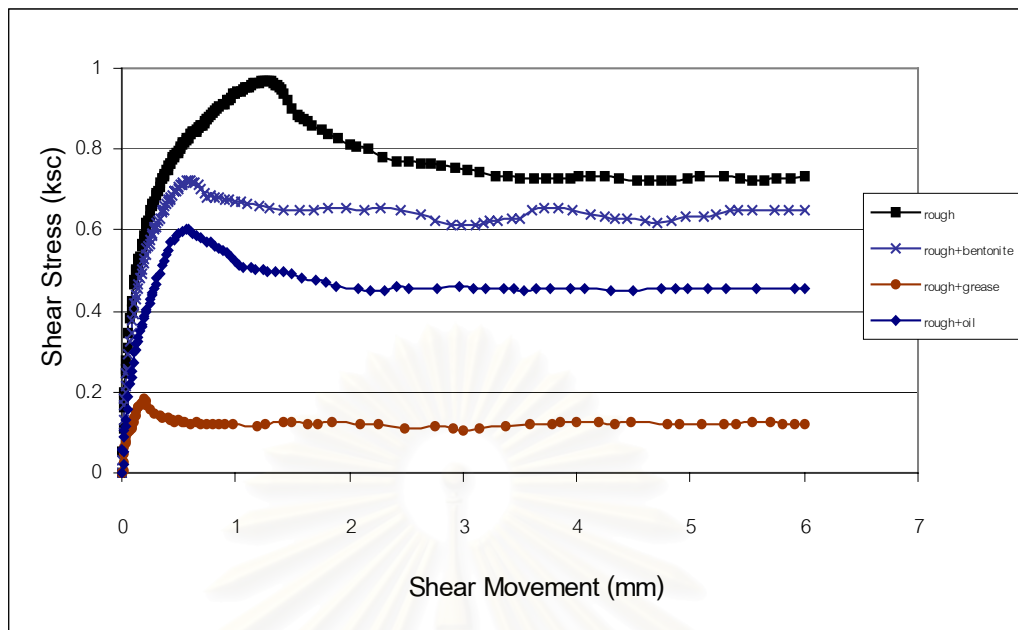
รูปที่ 4.14 การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งกับขณะทำการเฉือนระหว่างผิวดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ  
แบบต่างๆที่  $\sigma'_n = 3 \text{ ksc}$



รูปที่ 4.15 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n$  1 ksc

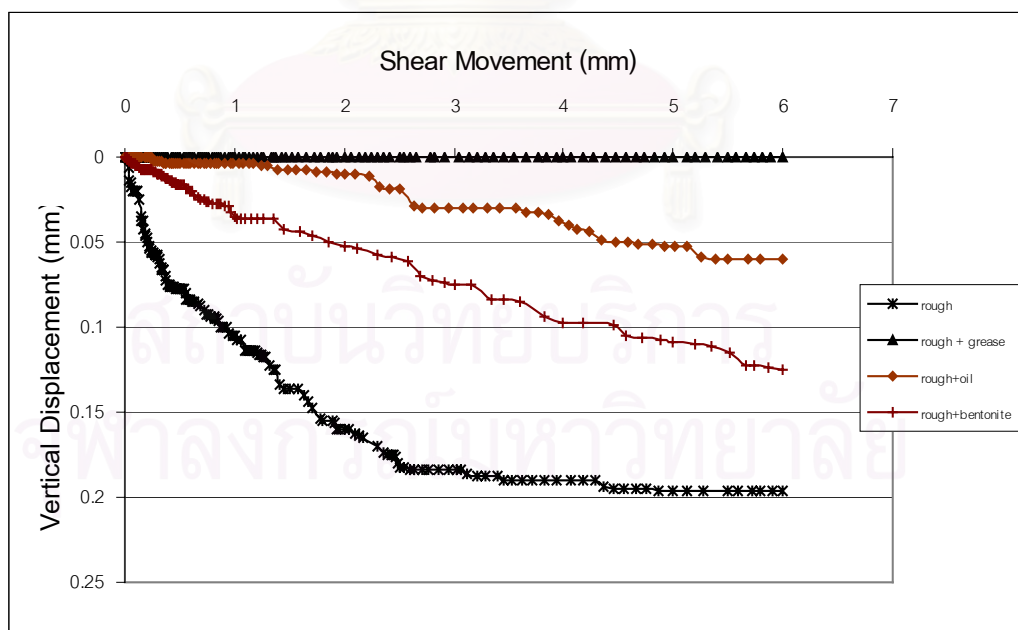


รูปที่ 4.16 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n$  2 ksc



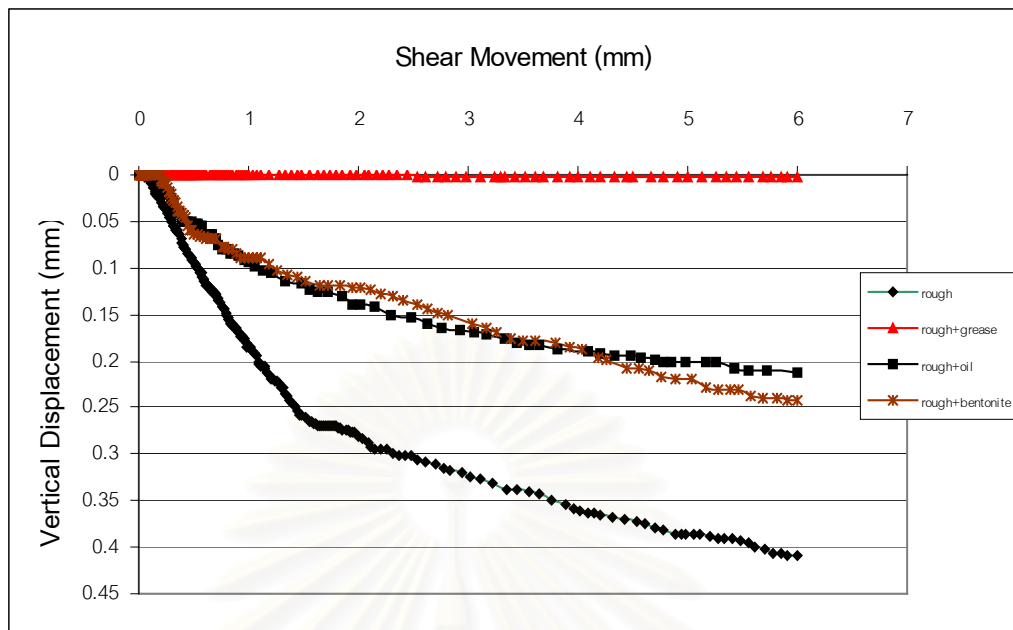
รูปที่ 4.17 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบแบบต่างๆ

ที่  $\sigma'_n$  3 ksc

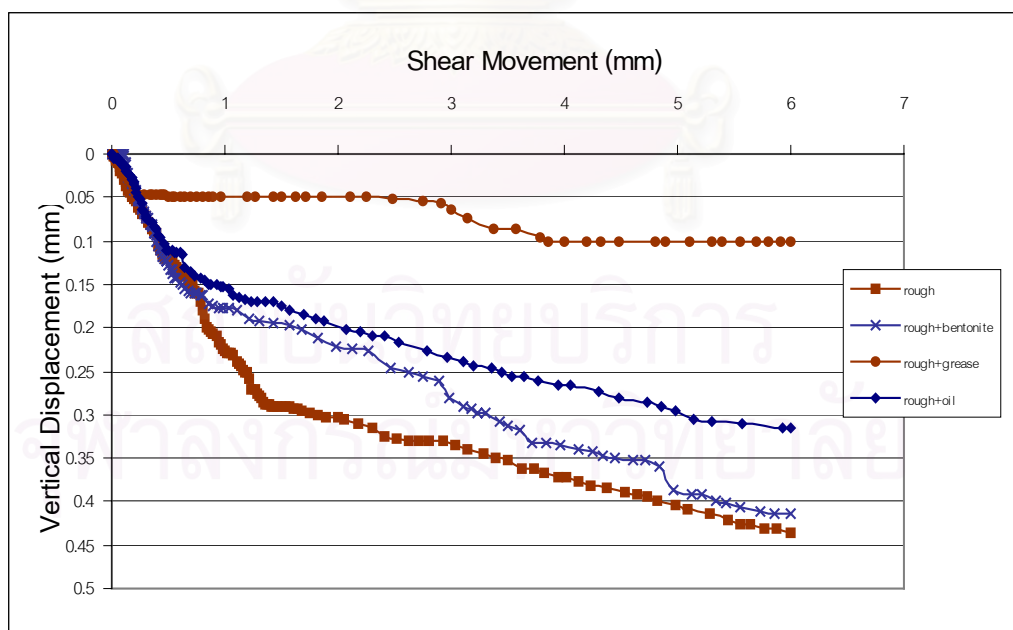


รูปที่ 4.18 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ

แบบต่างๆที่  $\sigma'_n$  1 ksc

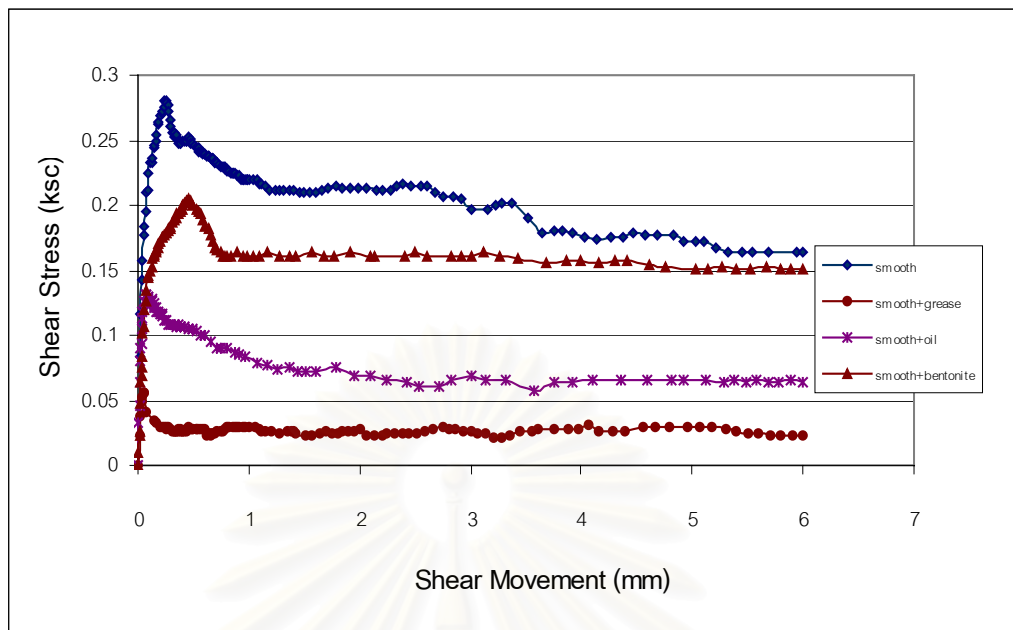


รูปที่ 4.19 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n$  2 ksc



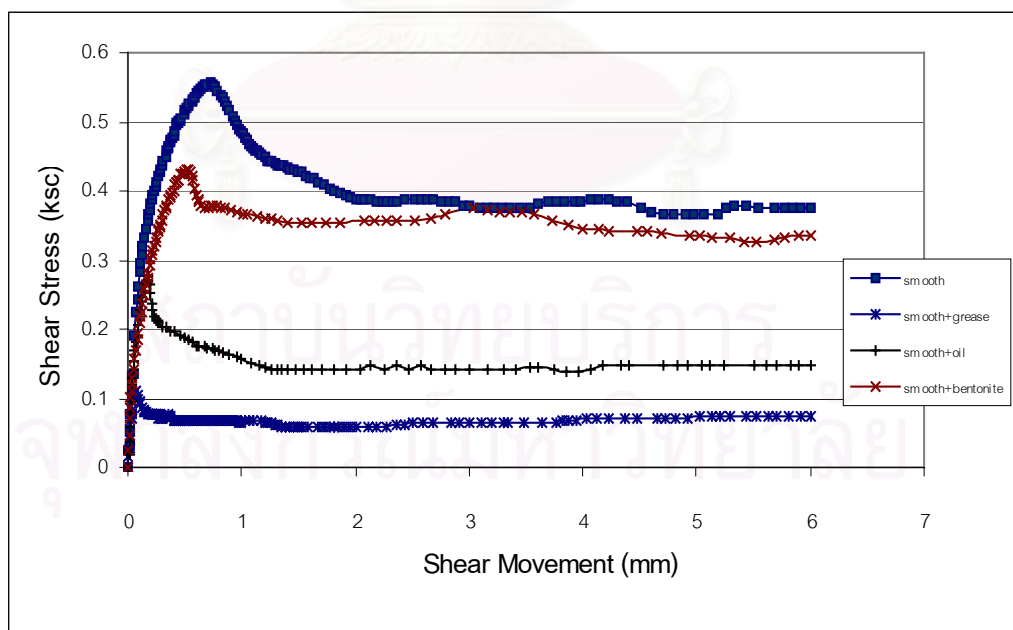
รูปที่ 4.20 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n$  3 ksc





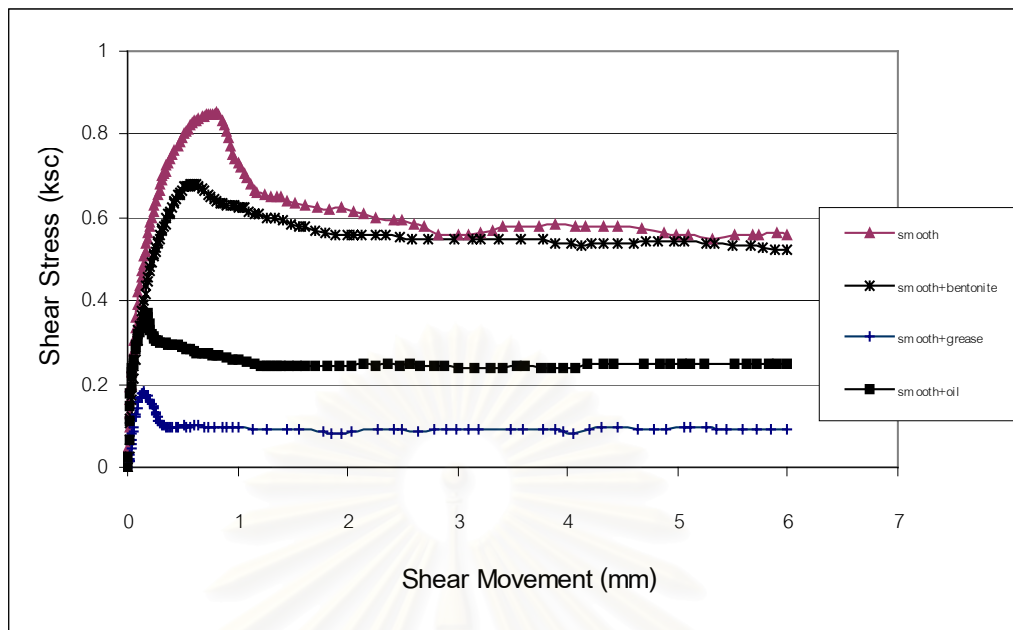
รูปที่ 4.21 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆ

ที่  $\sigma'_n$  1 ksc



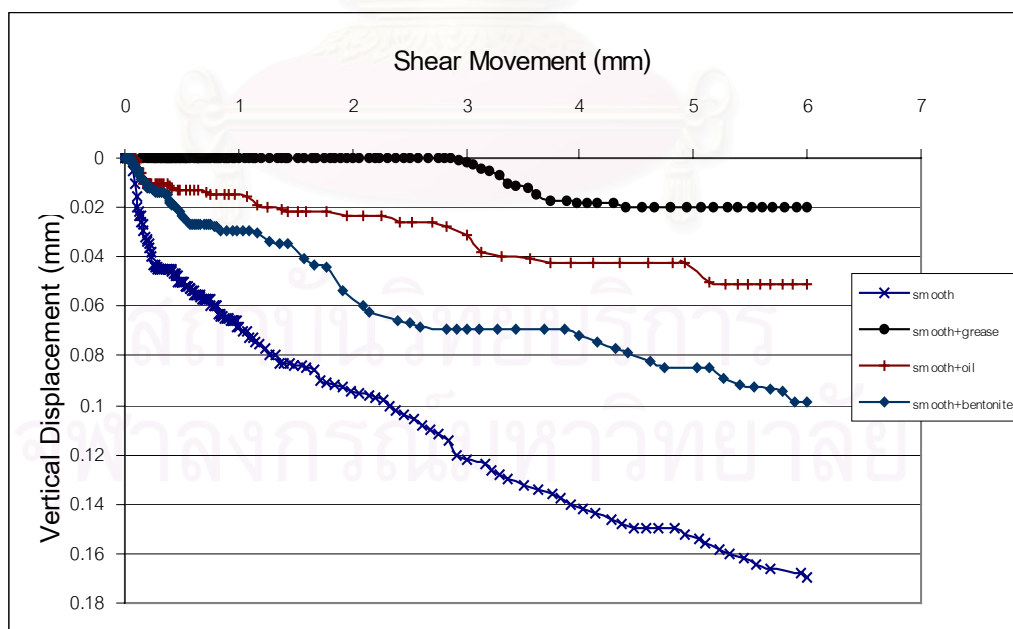
รูปที่ 4.22 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆ

ที่  $\sigma'_n$  2 ksc



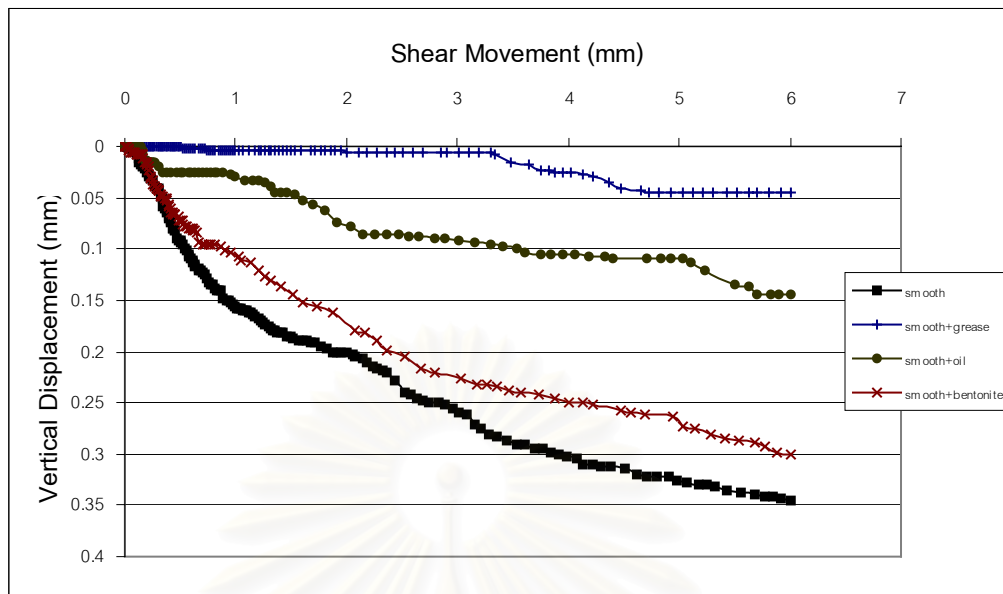
รูปที่ 4.23 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆ

ที่  $\sigma'_n$  3 ksc

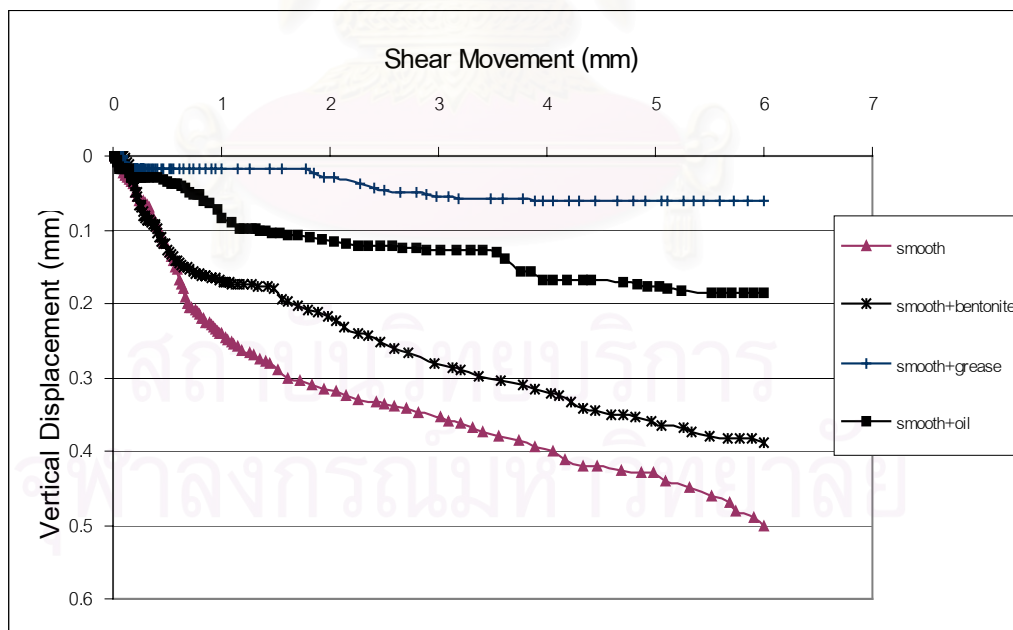


รูปที่ 4.24 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆ

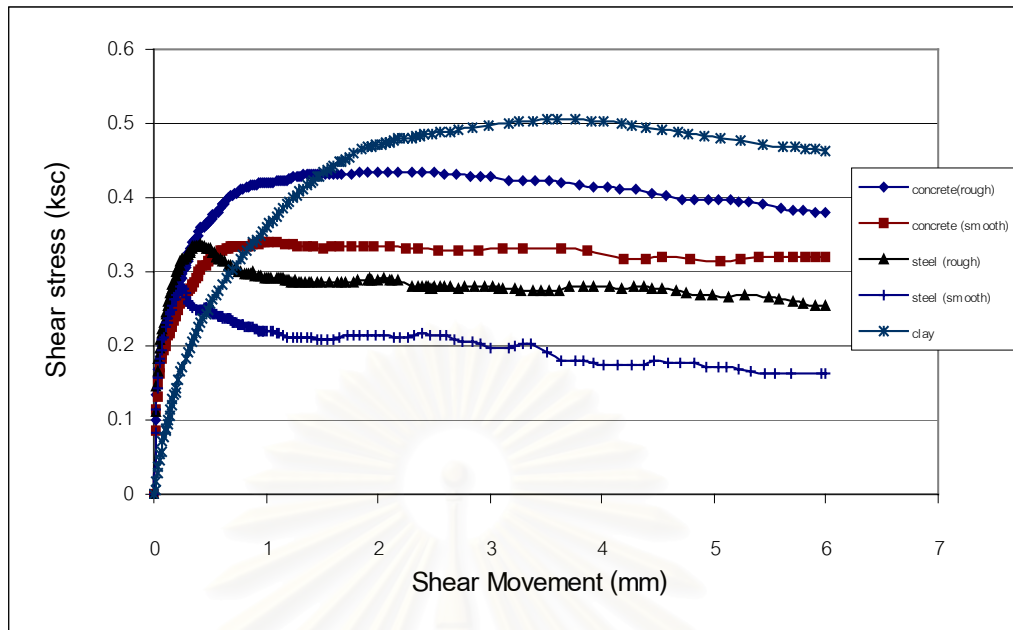
ที่  $\sigma'_n$  1 ksc



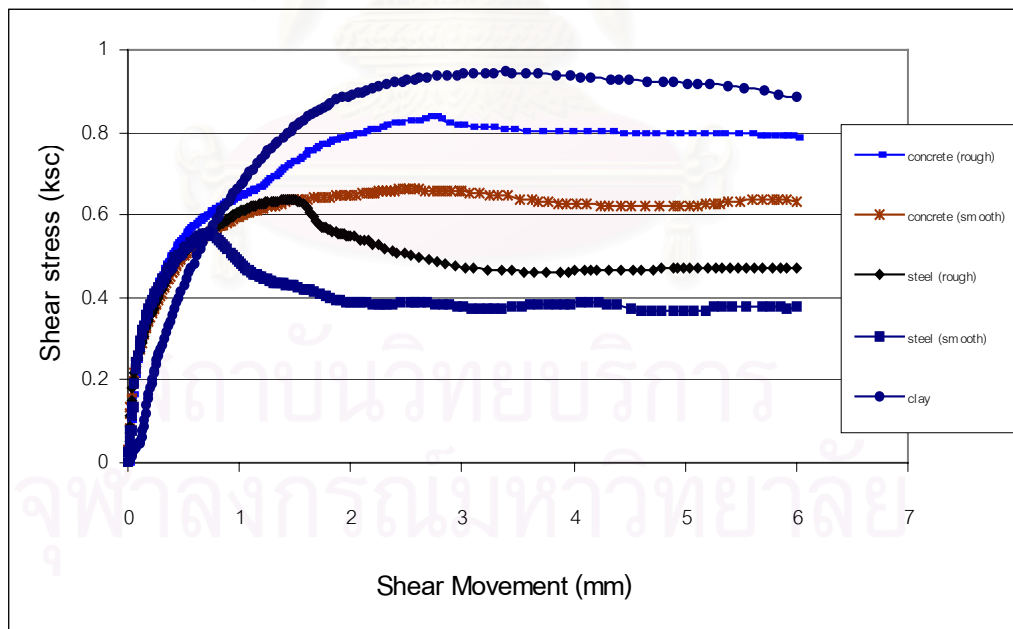
รูปที่ 4.25 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n$  2 ksc



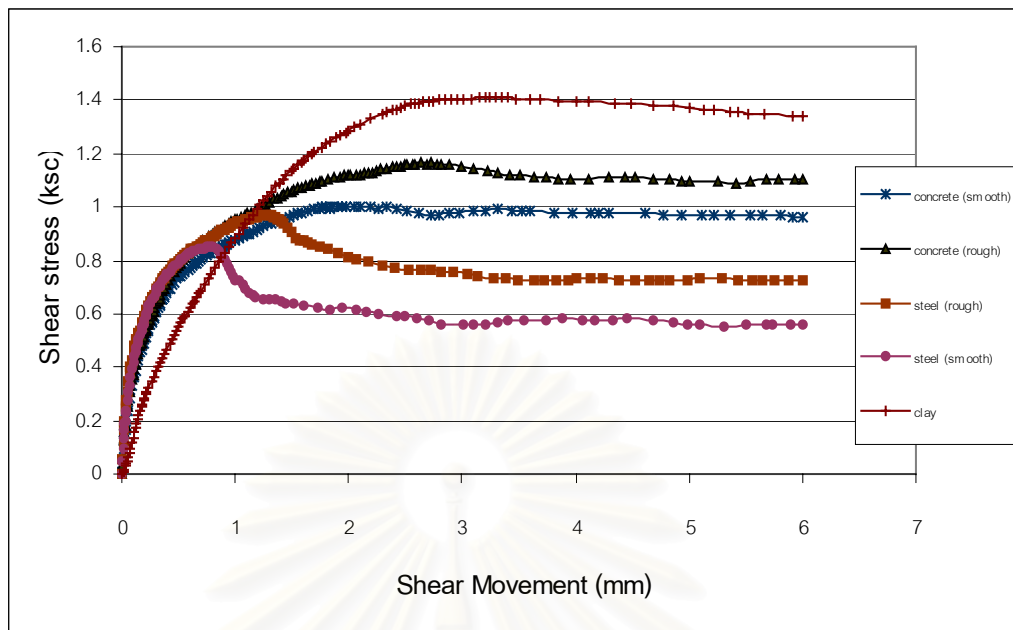
รูปที่ 4.26 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบแบบต่างๆ  
ที่  $\sigma'_n$  3 ksc



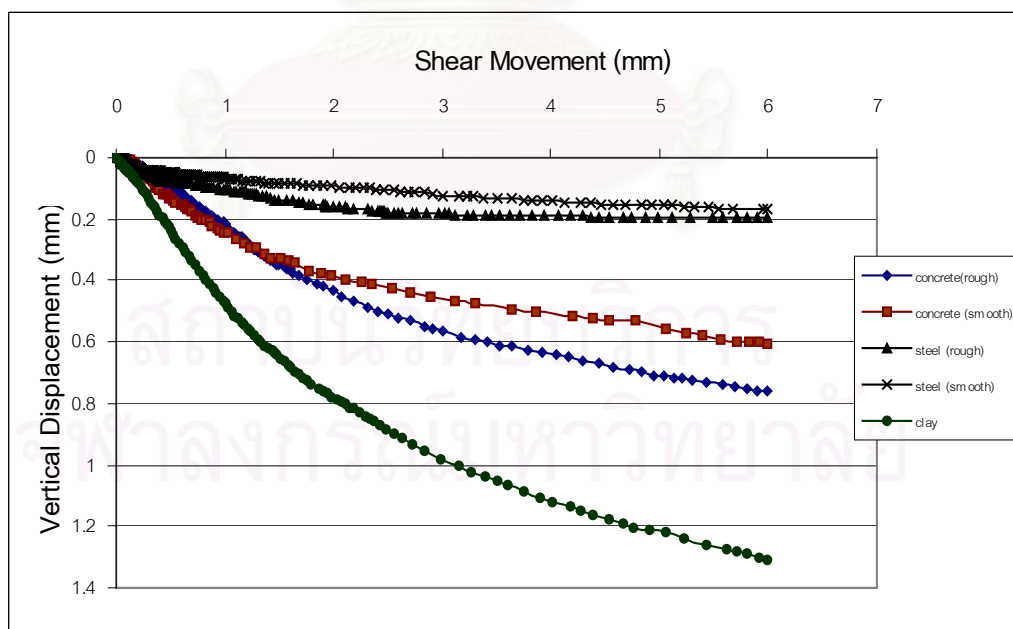
รูปที่ 4.27 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ  $\sigma'_n$  1 ksc



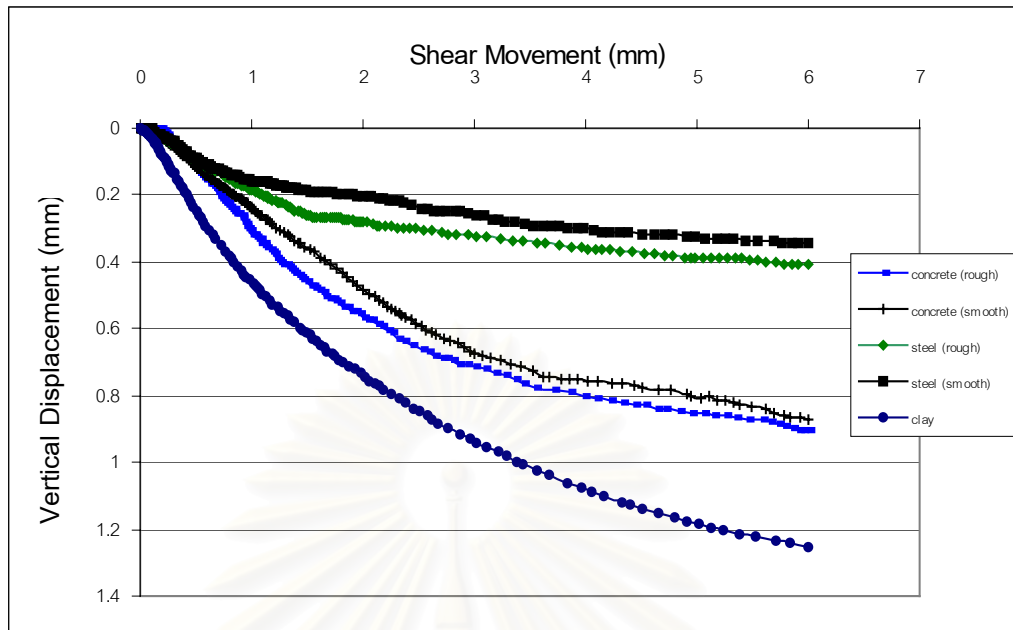
รูปที่ 4.28 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ  $\sigma'_n$  2 ksc



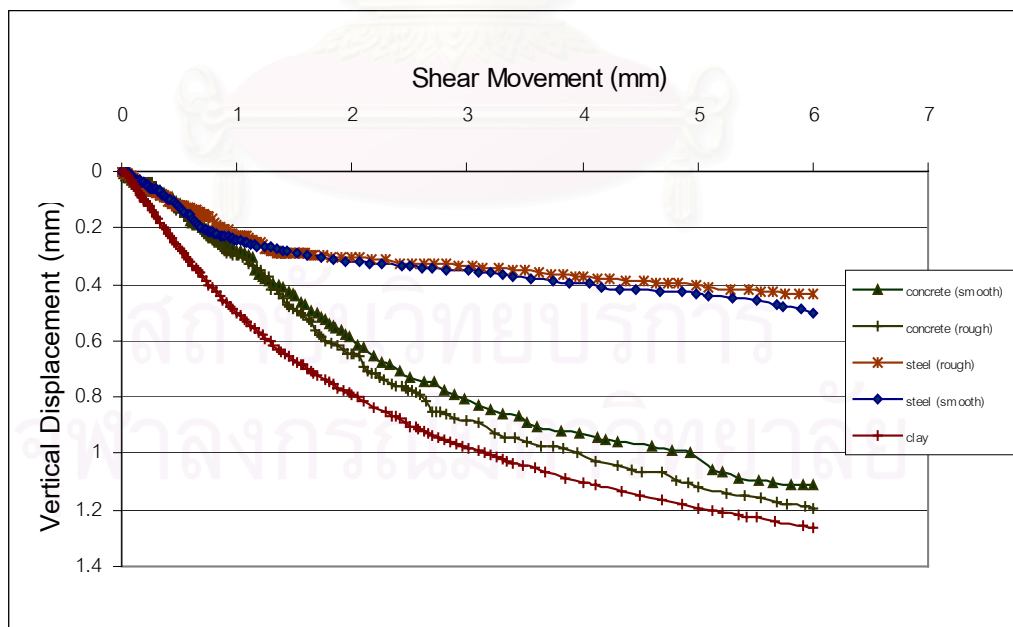
รูปที่ 4.29 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ  $\sigma'_n$  3 ksc



รูปที่ 4.30 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ  $\sigma'_n$  1 ksc



รูปที่ 4.31 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ  $\sigma'_n$  2 ksc



รูปที่ 4.32 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับ  $\sigma'_n$  3 ksc

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง ซึ่งวัสดุโครงสร้างที่นำมาทดสอบ ได้แก่ คอนกรีตผิวหยาบ คอนกรีตผิวเรียบ เหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบ โดยมีการศึกษาผลของการนำสารหล่อลื่น ได้แก่ สารละลายเบนโทไนต์ สีepoxy น้ำมันหล่อลื่น ซิลิโคนกรีต และจาระบี มาใช้ในการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างนั้น สามารถสรุปผลการศึกษาค้นคว้าได้ดังต่อไปนี้

1. ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวสัมผัสและขนาดของหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง กล่าวคือ ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสมีค่ามากขึ้นเมื่อลักษณะพื้นผิวสัมผัสมีความหยาบมากขึ้น และเมื่อหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งมากขึ้นค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะมีค่ามากขึ้นด้วย โดยค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างทุกประเภทจะมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งเดียวกัน
2. ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งในขณะที่ทำการเฉือนตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้างขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวสัมผัสและขนาดของหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งในขณะที่ทำการเฉือนจะมีค่ามากเมื่อขนาดของหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งมากขึ้น และลักษณะพื้นผิวสัมผัสมีความหยาบมากขึ้น โดยค่าการทรุดตัวในแนวตั้งในขณะที่ทำการเฉือนตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้างนั้นมีค่าน้อยกว่าการทรุดตัวในแนวตั้งในขณะที่ทำการเฉือนเพื่อหา กำลังรับแรงเฉือนแบบเฉือนตรงของดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งเดียวกัน
3. การนำสารหล่อลื่นมาใช้ในการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างนั้น พบว่า สารหล่อลื่นจะช่วยลดขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น และช่วยลดขนาดการทรุดตัวในแนวตั้งขณะที่ทำการเฉือนตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้าง

4. ในการศึกษาการลดแรงเสียดทานสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต โดยสารหล่อลื่นที่นำมาทดสอบ คือ สารละลายเบนโทไนด์ สี และจาระบี พบว่าจาระบีจะช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด คือ ลดลงเหลือประมาณ 0.2 เท่าของค่าแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น รวมทั้งช่วยลดขนาดการทรุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเข็นตัวอย่างดินกับคอนกรีตได้มากที่สุดด้วย
5. ในการศึกษาการลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก โดยสารหล่อลื่นที่นำมาทดสอบ คือ สารละลายเบนโทไนด์ ซิลิโคนกรีส และน้ำมันหล่อลื่น พบว่า ซิลิโคนกรีสช่วยลดแรงเสียดทานได้มากที่สุด คือ ลดลงเหลือประมาณ 0.2 เท่าของค่าแรงเสียดทานสูงสุดเมื่อไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น และลดขนาดการทรุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเข็นตัวอย่างดินกับเหล็กได้มากที่สุดด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

ในการศึกษาวิจัยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างนี้ ปัจจุบันน่าจะมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไป ได้แก่

1. ชนิดของดินที่นำมาทดสอบ ควรมีการนำตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมาจากสถานที่ต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาถึงค่าแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างวัสดุโครงสร้างกับดินเหนียวจากสถานที่ต่าง ๆ กัน
2. ผลของอัตราการเข็น ควรมีการศึกษาอัตราการเข็นที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของอัตราการเข็นที่มีต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น
3. ปริมาณของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ ควรมีการศึกษาถึงปริมาณของสารหล่อลื่นที่เหมาะสมต่อการลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น รวมทั้งศึกษาสารหล่อลื่นชนิดอื่นอีก เช่น โพลีเมอร์ ที่สามารถนำมาใช้ได้
4. ขนาดพื้นที่หน้าตัดและความหนาของตัวอย่างดิน ควรมีการศึกษาถึงผลของขนาดหน้าตัดและขนาดของความหนาของตัวอย่างดินว่ามีผลต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นอย่างไร



## รายการอ้างอิง

1. American Society for Testing and Materials.1991.Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. ASTM C305-94.
2. American Society for Testing and Materials.1991. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM D3080-90.
3. Bardet, J.P. 1997. Experimental soil mechanics.New Jersey : Prentice Hall,
4. Bowden, F.P. and Tabor, D. 1967. Friction and lubrication. London : Methuen,
5. Gibson, R.E. and Henkel, D.J. 1954. Influence of duration of tests at constant rate of strain on measured drained strength. Geotechnique 4 No.1 : 6-15.
6. Japanese Standards Association. 1996. Surface texture-Instruments for the assessment of surface texture. Japanese Industrial Standard B0651-1996.
7. Japanese Standards Association. 1994. Surface roughness-Definitions and designation. Japanese Industrial Standard B0601-1994.
8. Kishida ,H. and Uesugi, M. 1987. Tests on the interface between sand and steel in the simple shear apparatus. Geotechnique 37 No.1 : 45-52.
9. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. 1969. Soil mechanics. New York : John Wiley & Sons,
10. Lemos ,L. J. L. and Vaughan, P. R. 2000.Clay - interface shear resistance. Geotechnique 50 No.1 : 55-64.
11. Littleton, I. 1976. An experimental study of the adhesion between clay and steel. Journal of Terramechanics 13 No.3 : 141-152.
12. Miligan,G. W. E. and Norris, P. 1999. Pipe-soil interaction during pipe jacking. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 137 (Jan) : 27-44.
13. Potyondy, J. G. 1961. Skin friction between various soils and construction materials. Geotechnique 11 No.4 : 339-353.
14. Rabinowicz, E. 1965. Friction and wear of materials. New York : John Wiley & Sons,
15. Subba Rao, K. S., Allam, M. M. and Robinson, R. G. 1998. Interfacial friction

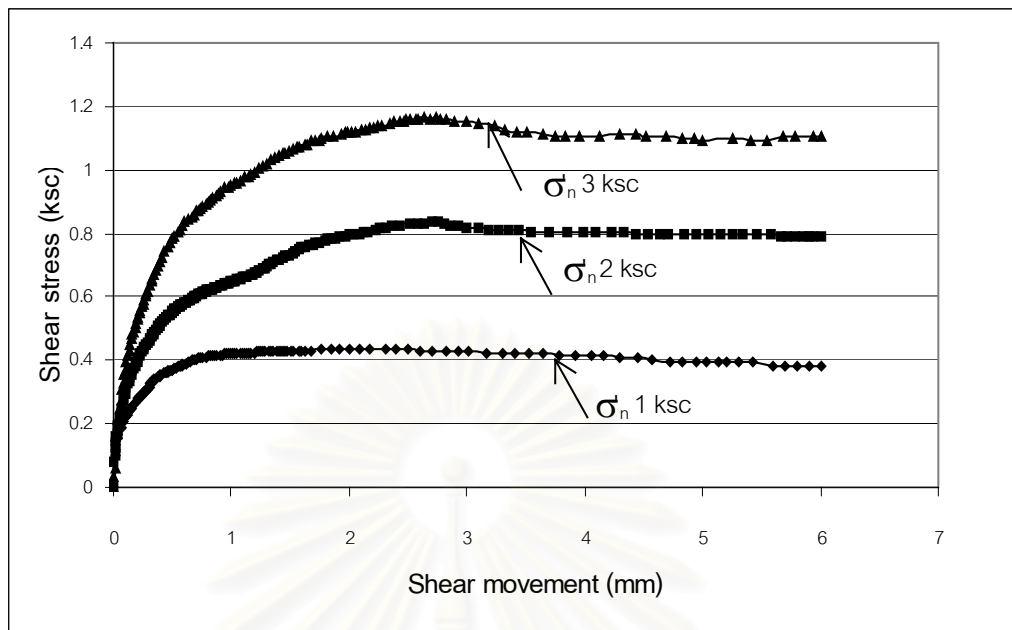
- between sands and solid surfaces. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 131 (April) : 75-82.
16. Subba Rao, K. S., Allam, M. M. and Robinson, R. G. 2000. Drained shear strength of fine-grained soil-solid surface interfaces. Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 143 (April) : 75-81.
17. Tatsuoka, F. and Haibara, O. 1985. Shear resistance between sand and smooth or lubricated surfaces. Soils and Foundations 25 No. 1 :89-98.
18. Tsubakihara, Y. and Kishida, H. 1993. Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses. Soils and Foundations 33 No. 2 :1-13.
19. Tsubakihara, Y. , Kishida, H. and Nishiyama, T. 1993. Frictional behaviour between cohesive soils and steel . Soils and Foundations 33 No. 2 : 145-156.
20. Yoshimi, Y. and Kishida, T. 1981. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces. Geotechnical Testing Journal 4 No. 4 :145-152.

## ภาคผนวก

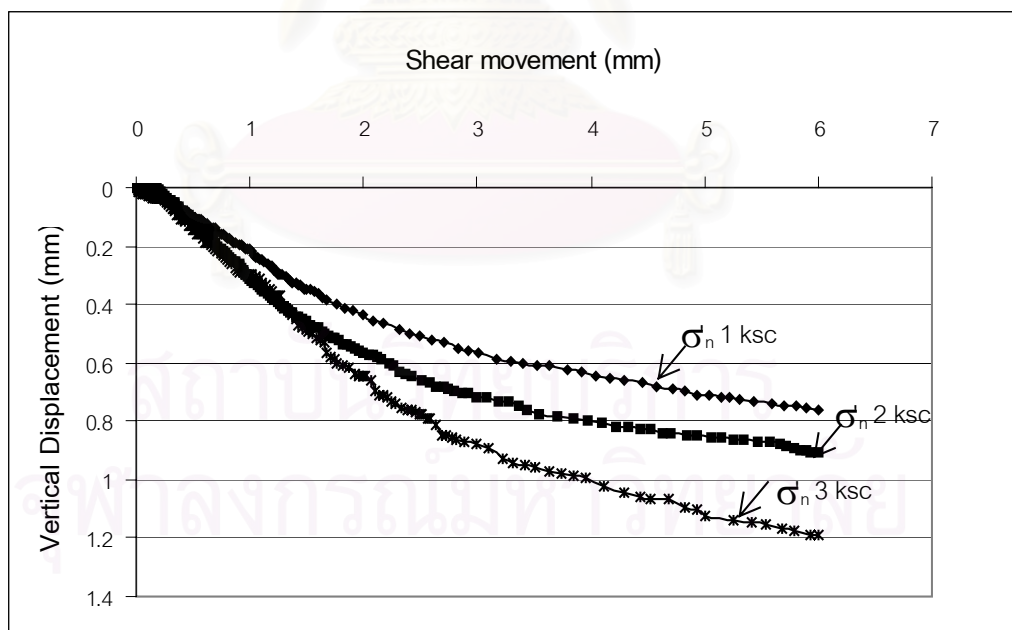
- ผลการทดสอบค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ
- ผลการทดสอบค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ
- ผลการทดสอบค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ
- ผลการทดสอบค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ



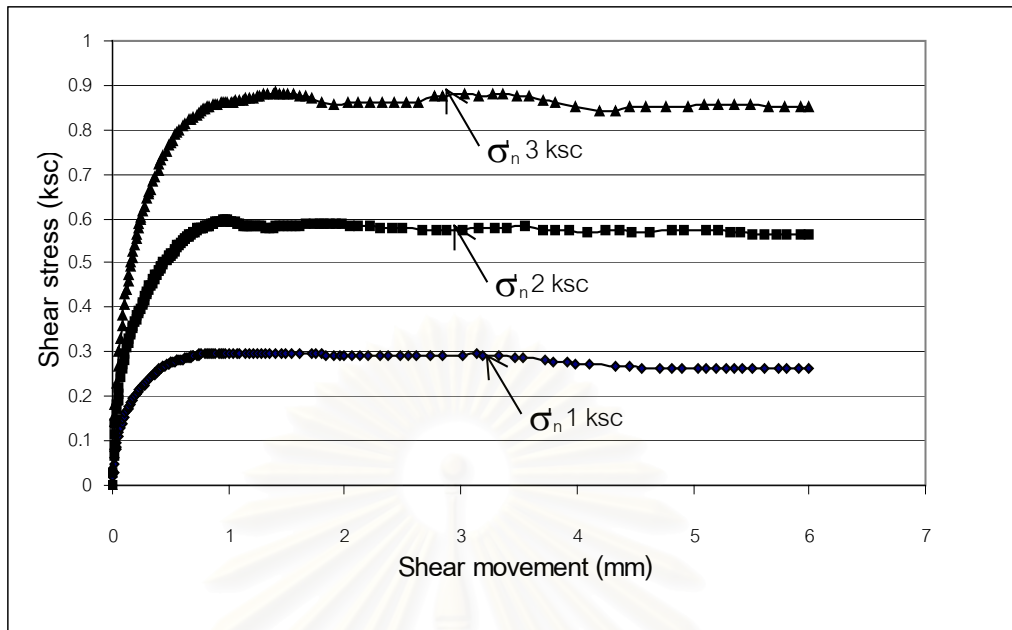
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



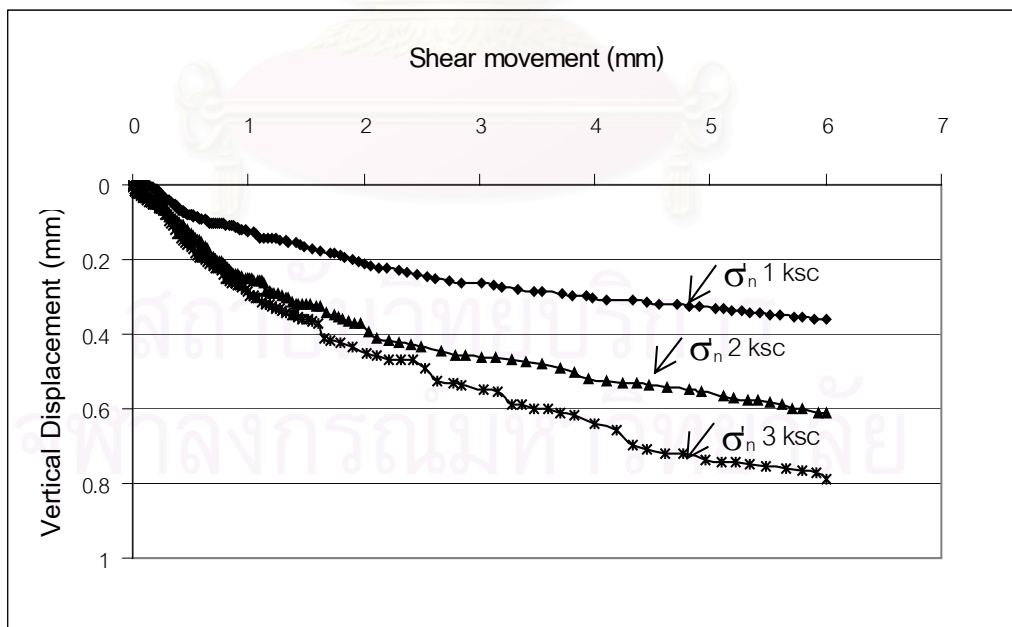
รูปที่ ๘1 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ



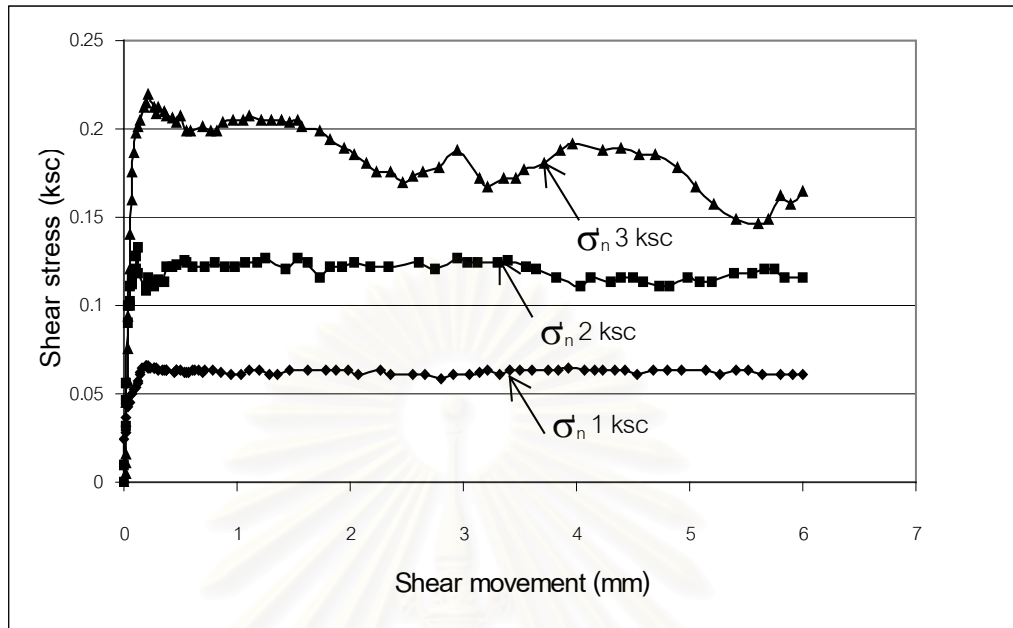
รูปที่ ๘2 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ



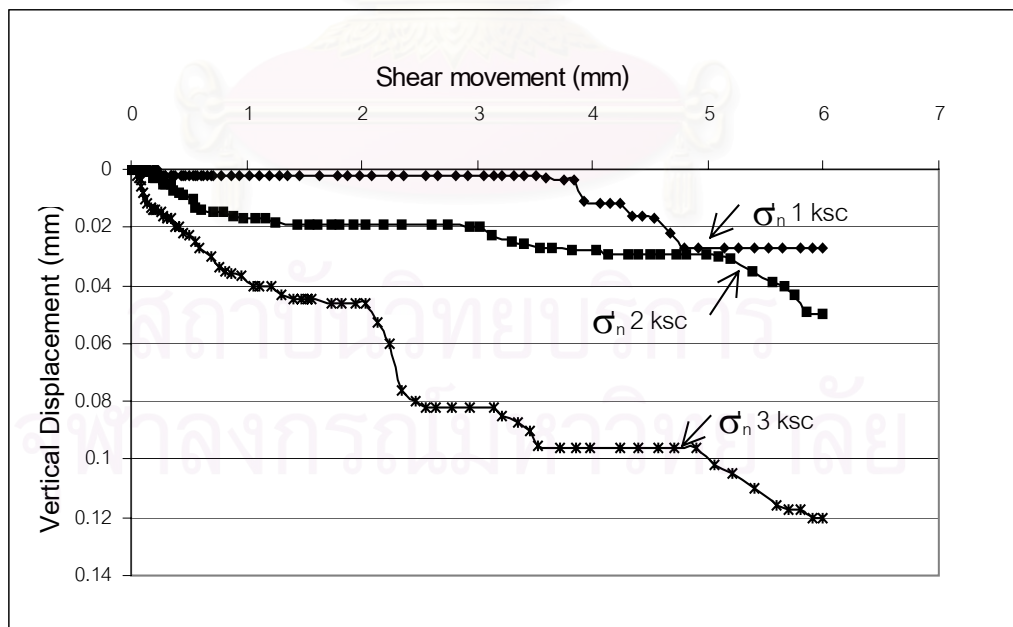
รูปที่ ๓3 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์



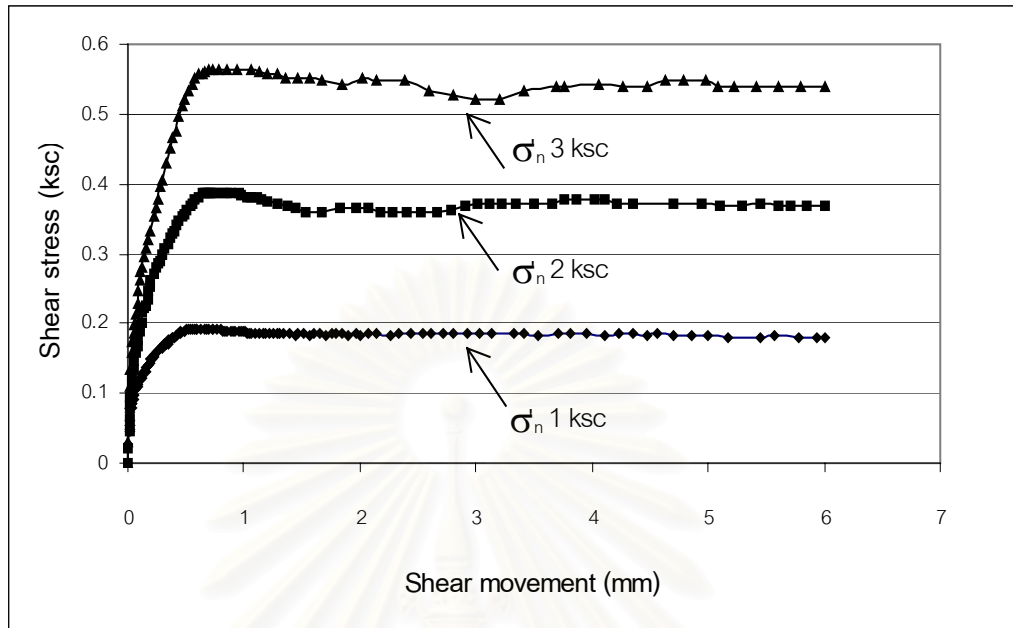
รูปที่ ๓4 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์



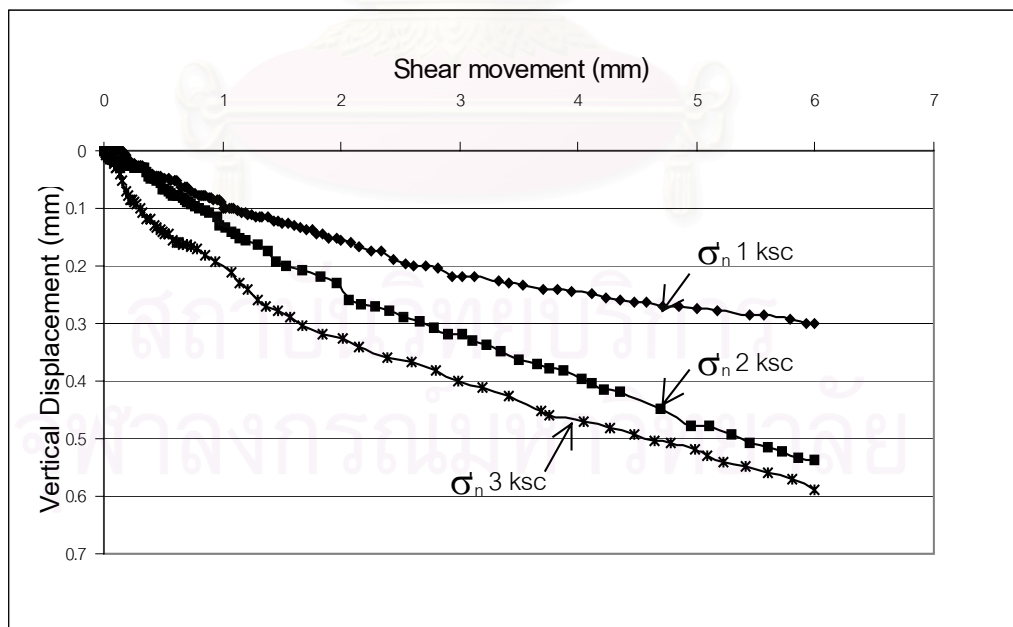
รูปที่ ๗5 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทางาระบี



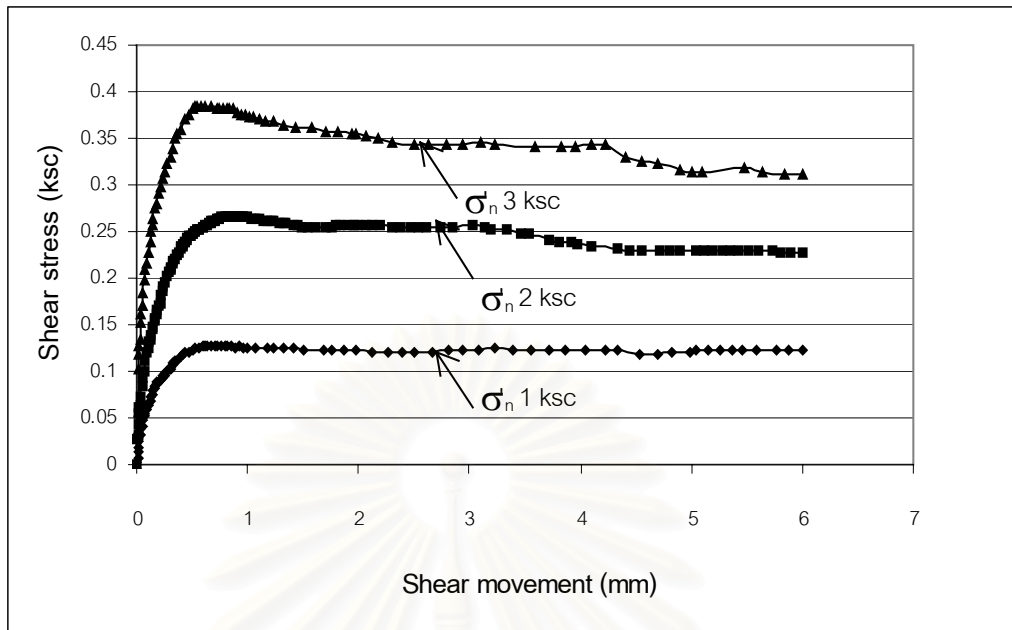
รูปที่ ๗6 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทางาระบี



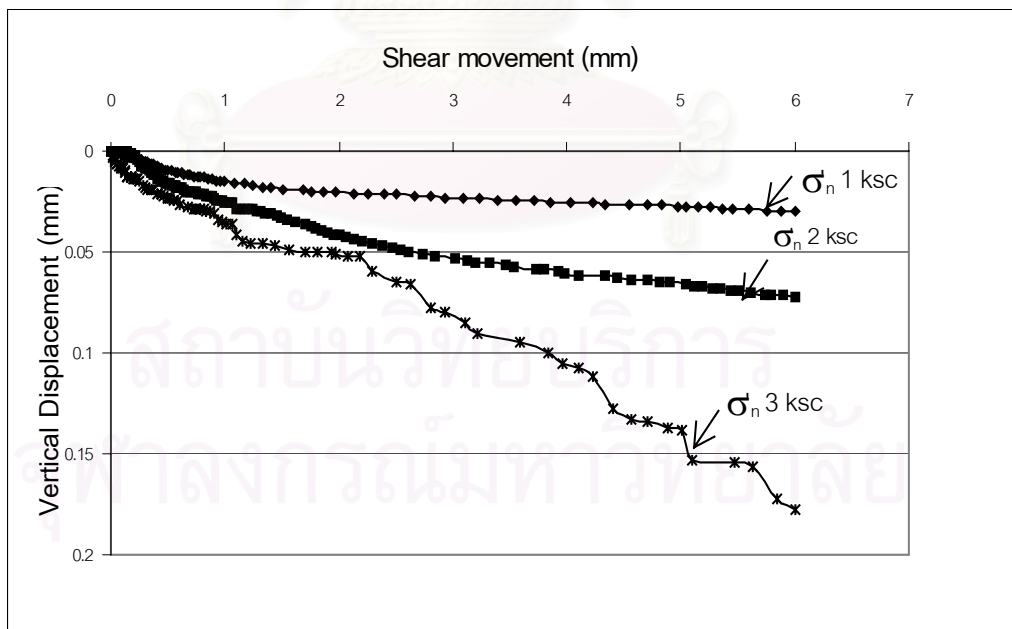
รูปที่ ๗7 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสี



รูปที่ ๗8 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสี

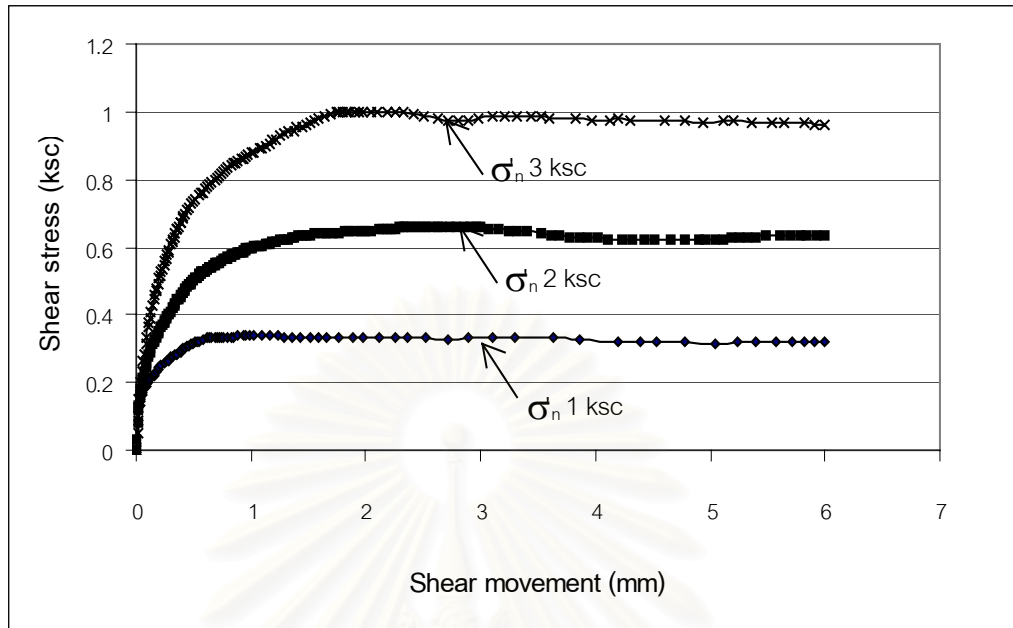


รูปที่ ๘9 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสีและสารละลายเบนโทไนต์

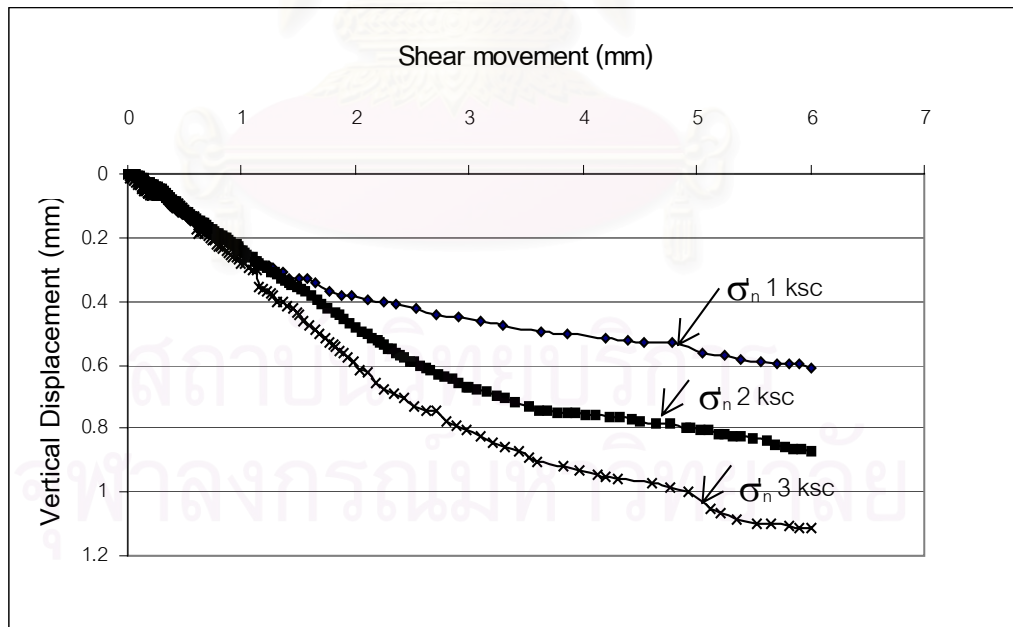


รูปที่ ๘10 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสีและสารละลายเบนโทไนต์

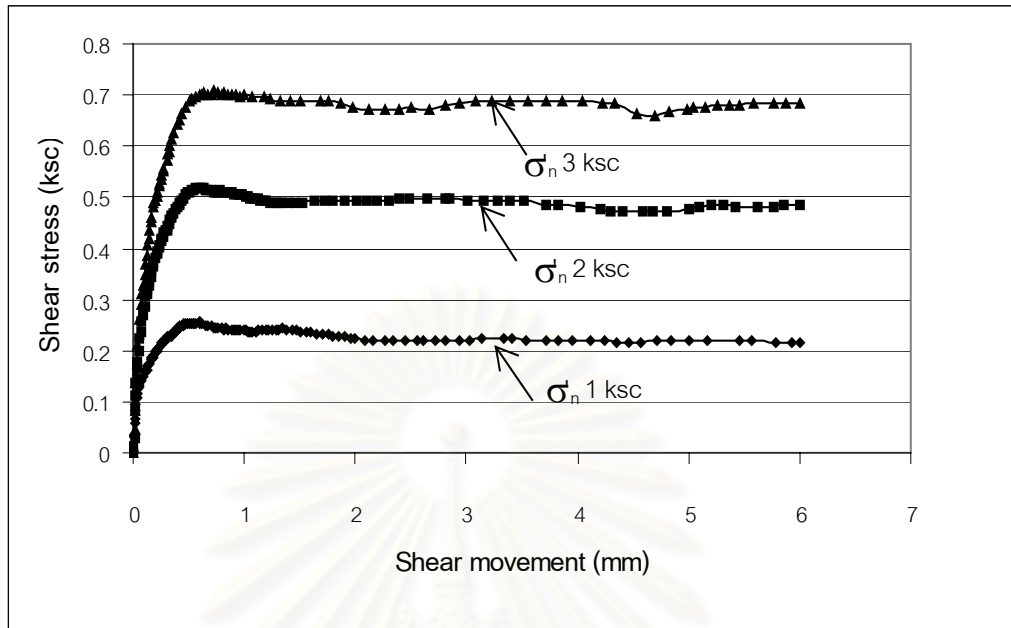




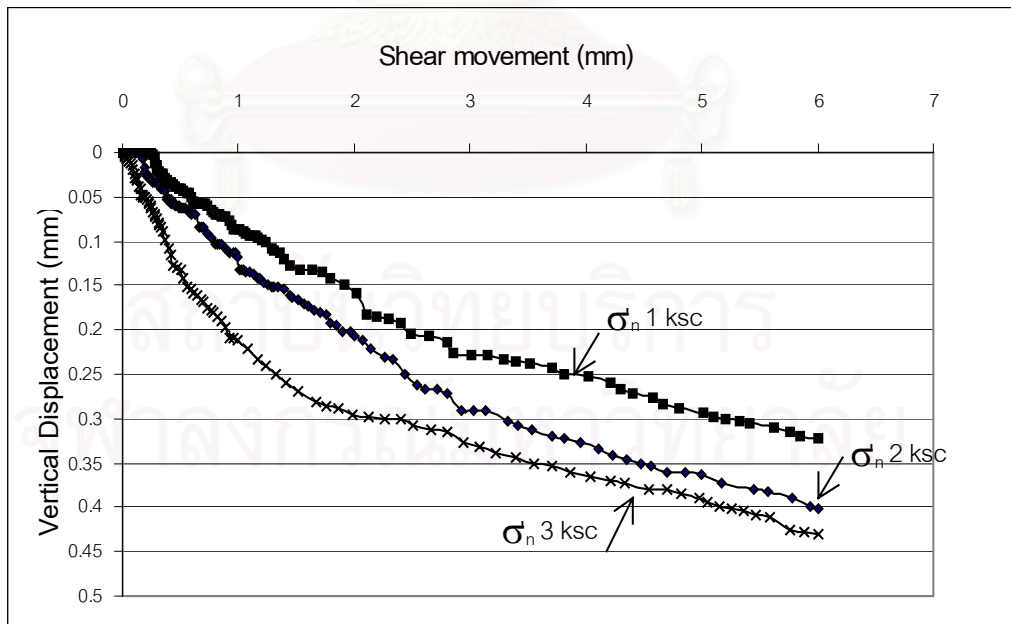
รูปที่ ๘11 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ



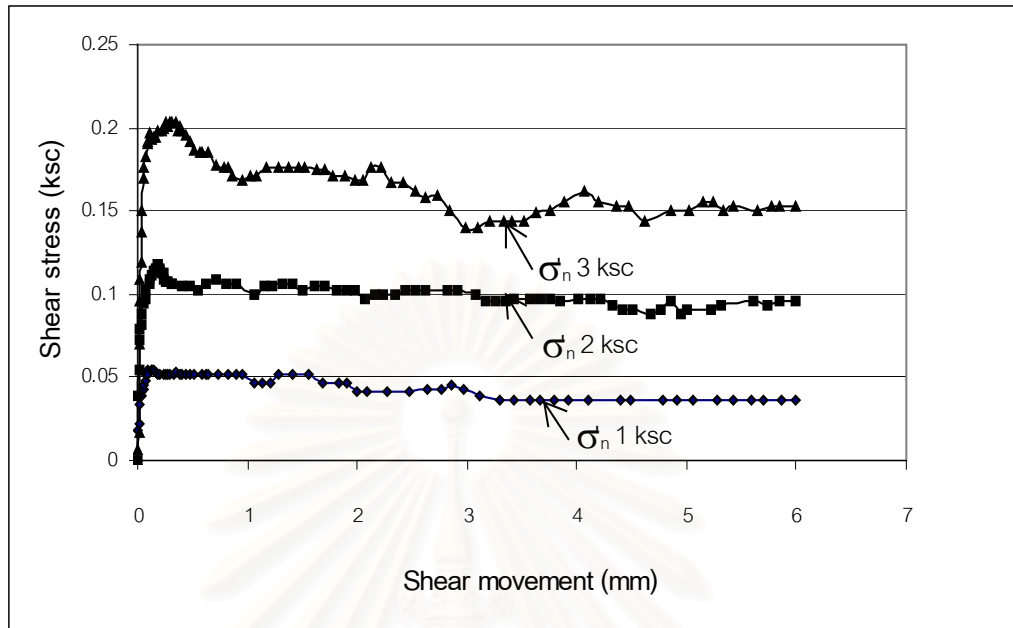
รูปที่ ๘12 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ



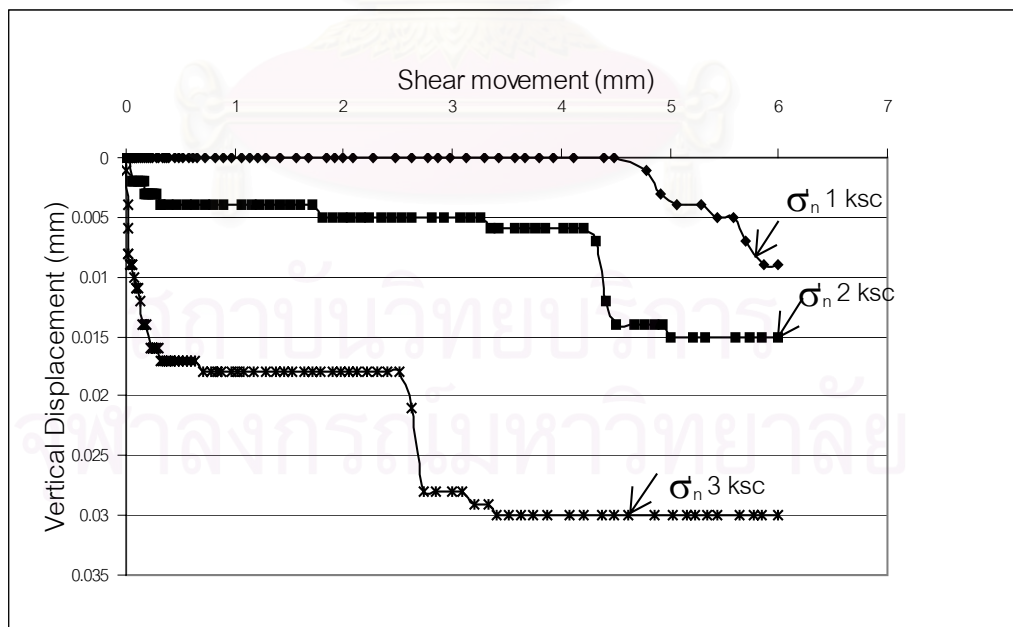
รูปที่ ๑13 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์



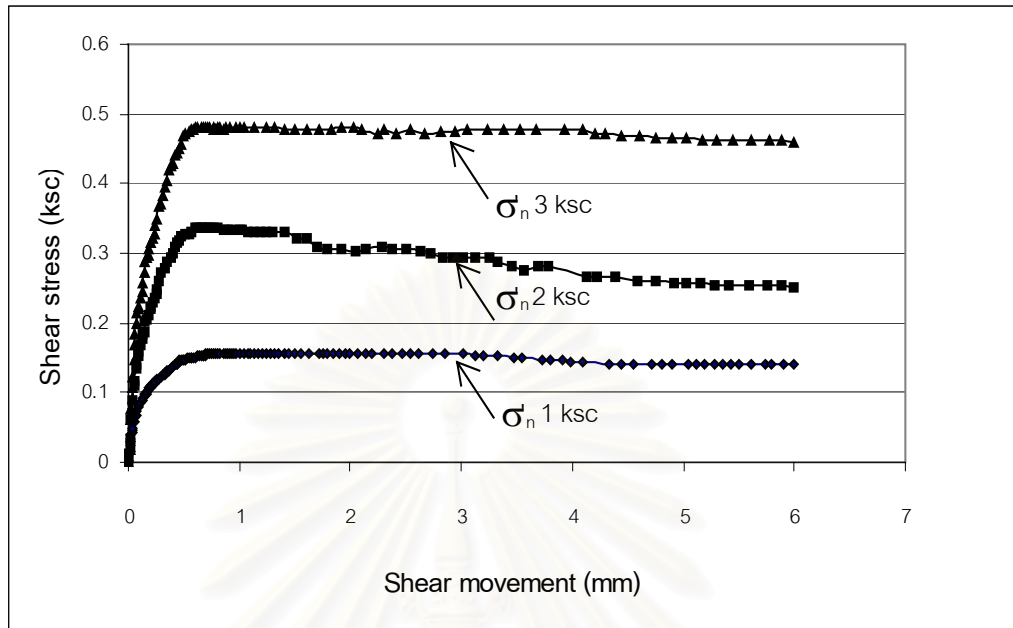
รูปที่ ๑14 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์



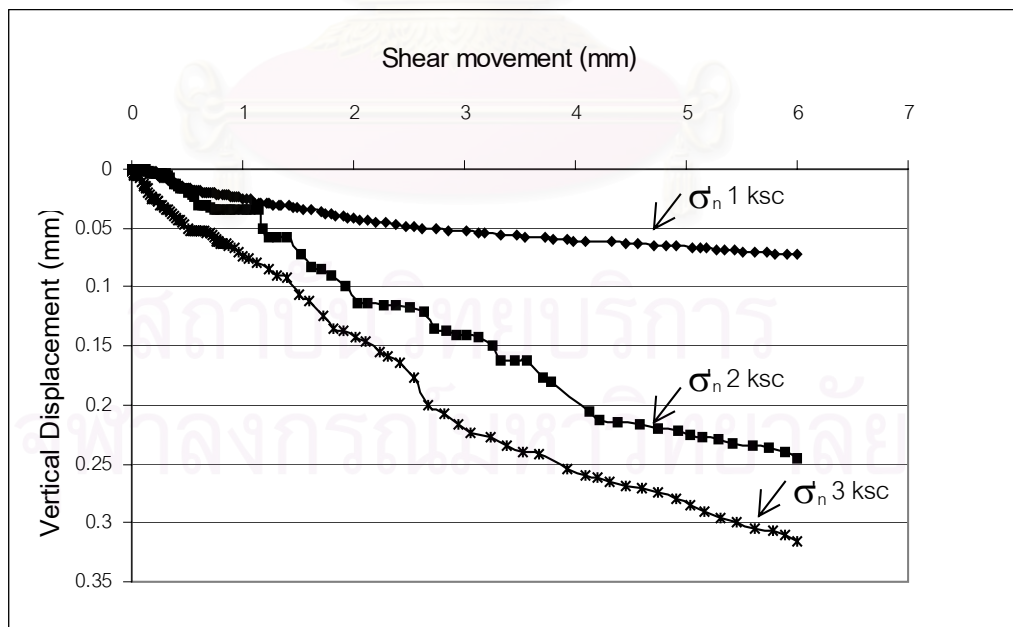
รูปที่ ๑๕ หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาจระบี



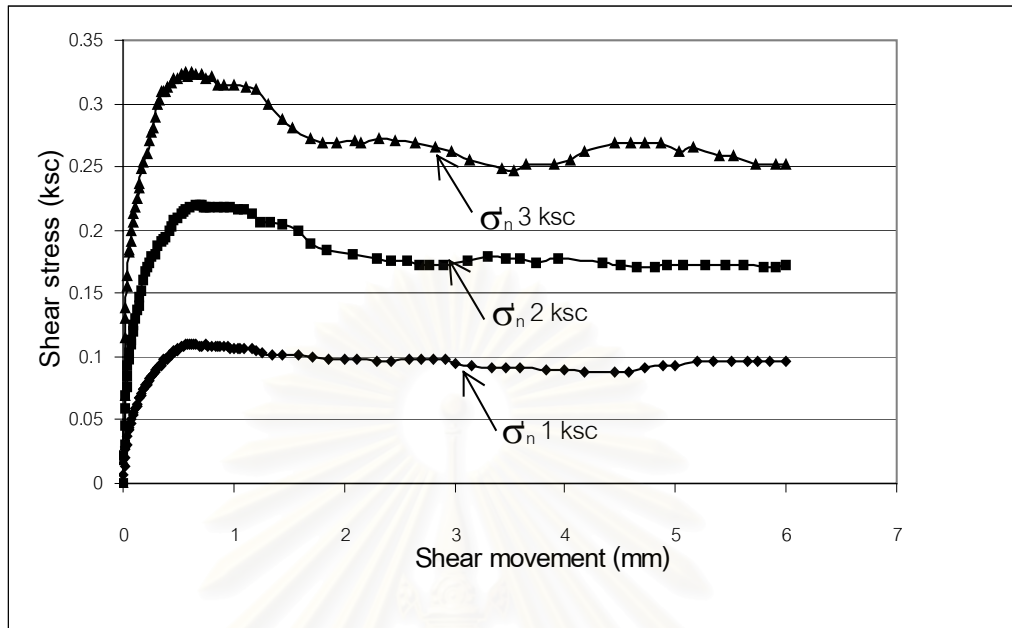
รูปที่ ๑๖ การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาจระบี



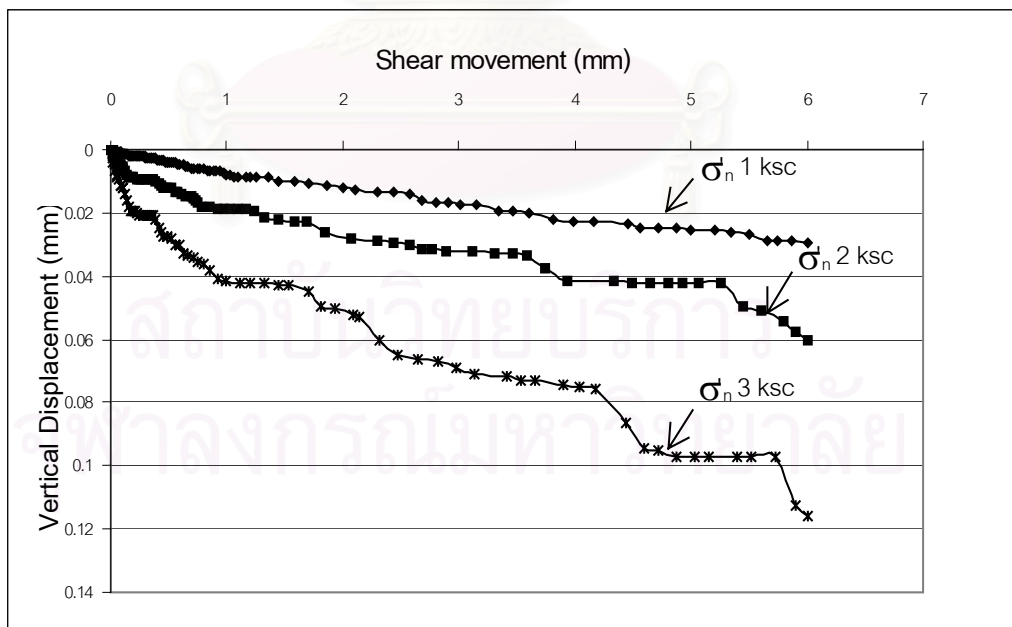
รูปที่ ๗17 การเคลื่อนตัวแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสี



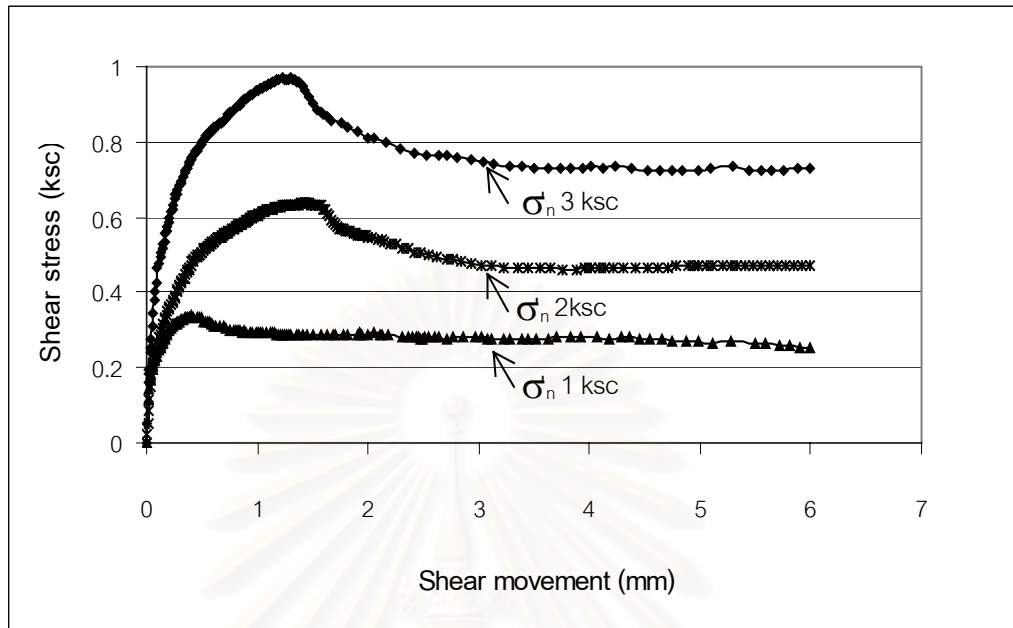
รูปที่ ๗18 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสี



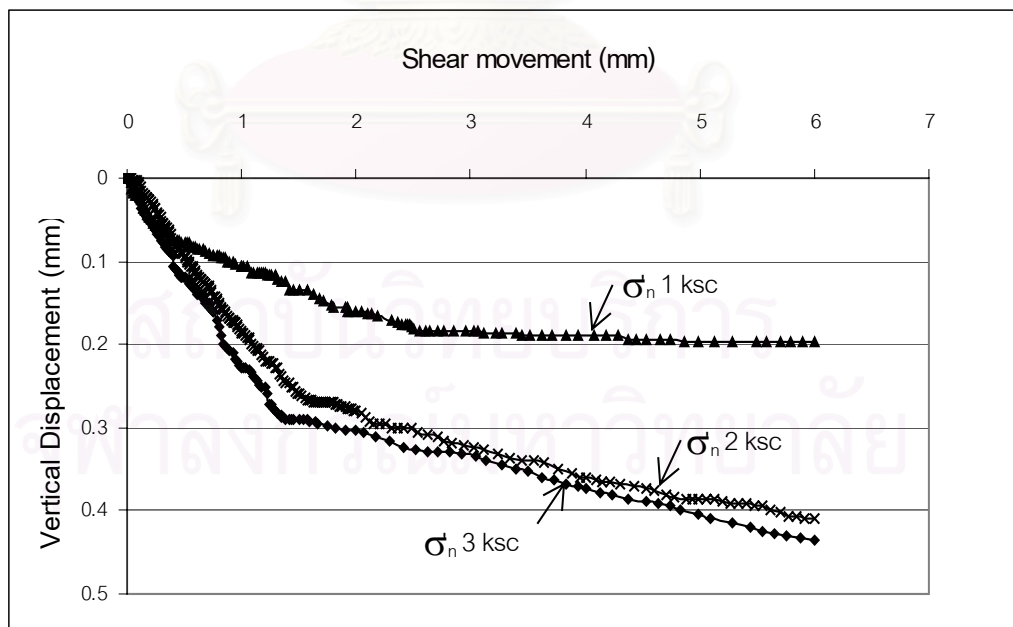
รูปที่ ๑๙ การเคลื่อนตัวแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสีและสารละลายเบนโทไนต์



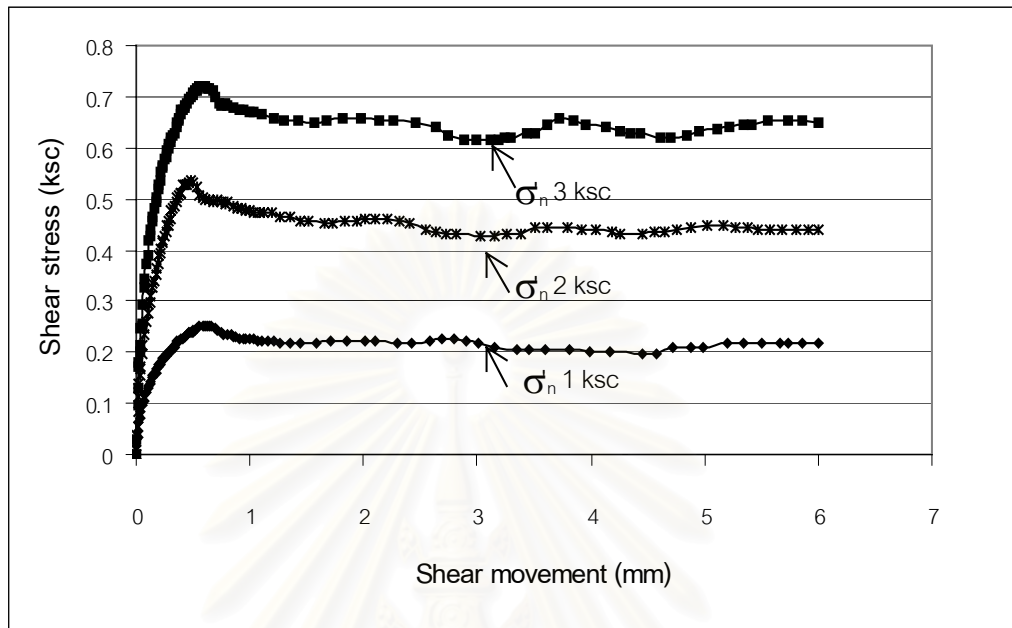
รูปที่ ๒๐ การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบทาสีและสารละลายเบนโทไนต์



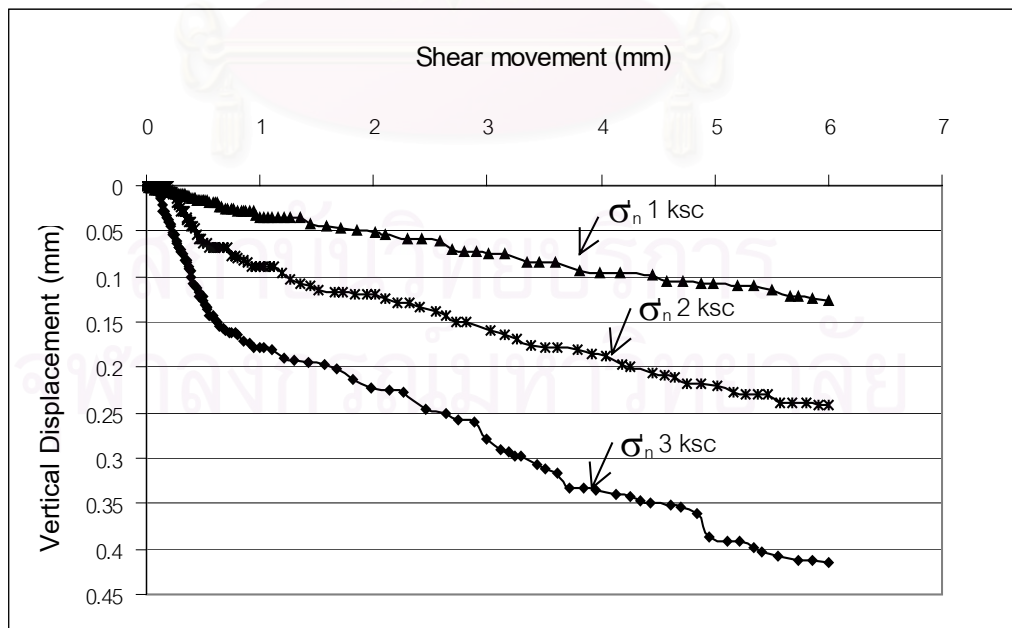
รูปที่ ๒๒๑ หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ



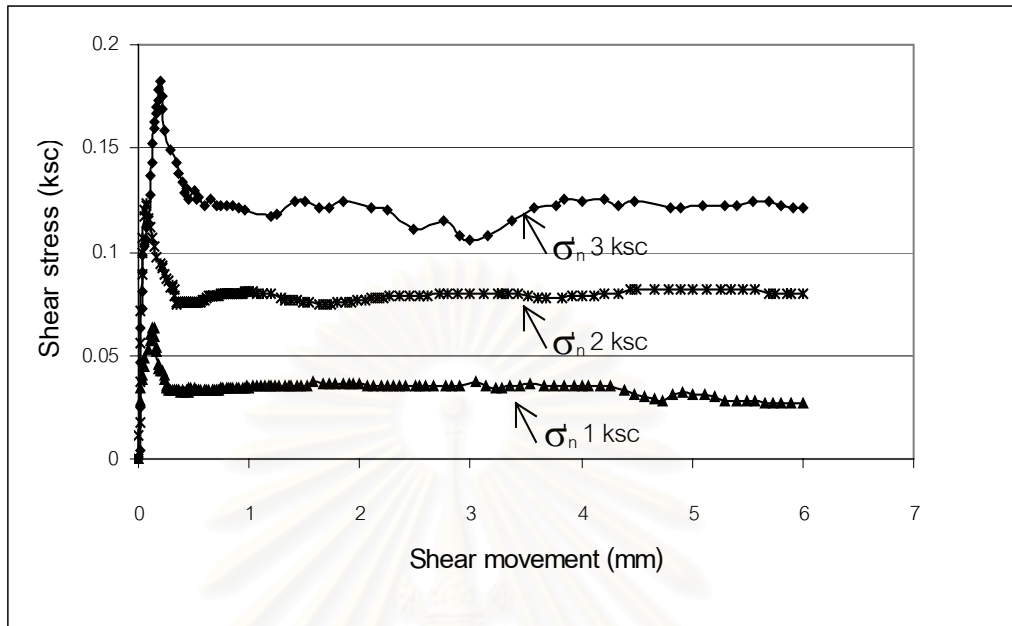
รูปที่ ๒๒๒ การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ



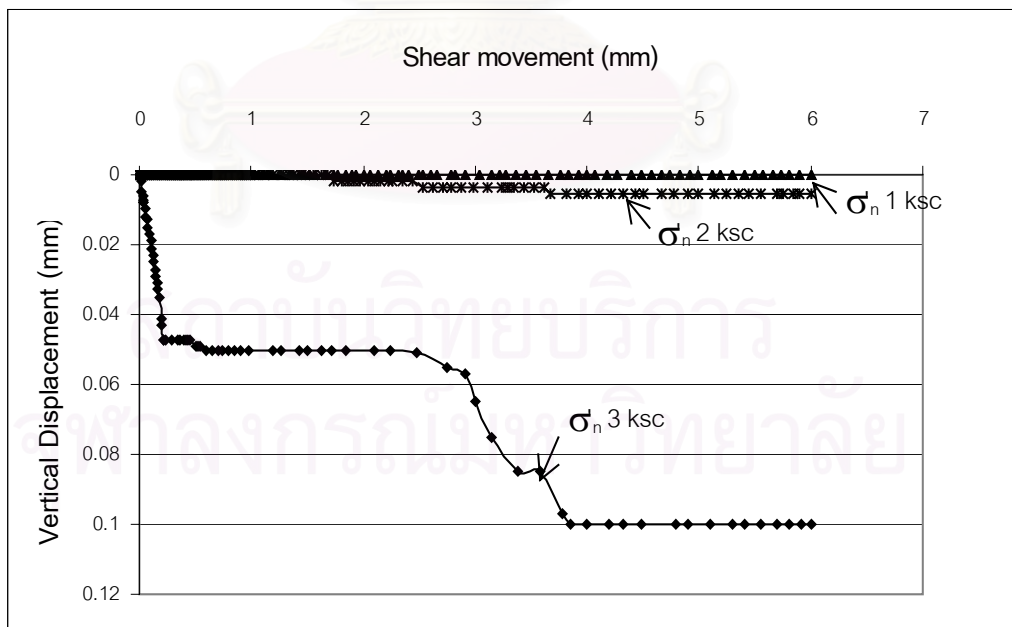
รูปที่ ๘๒๓ หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์



รูปที่ ๘๒๔ การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์

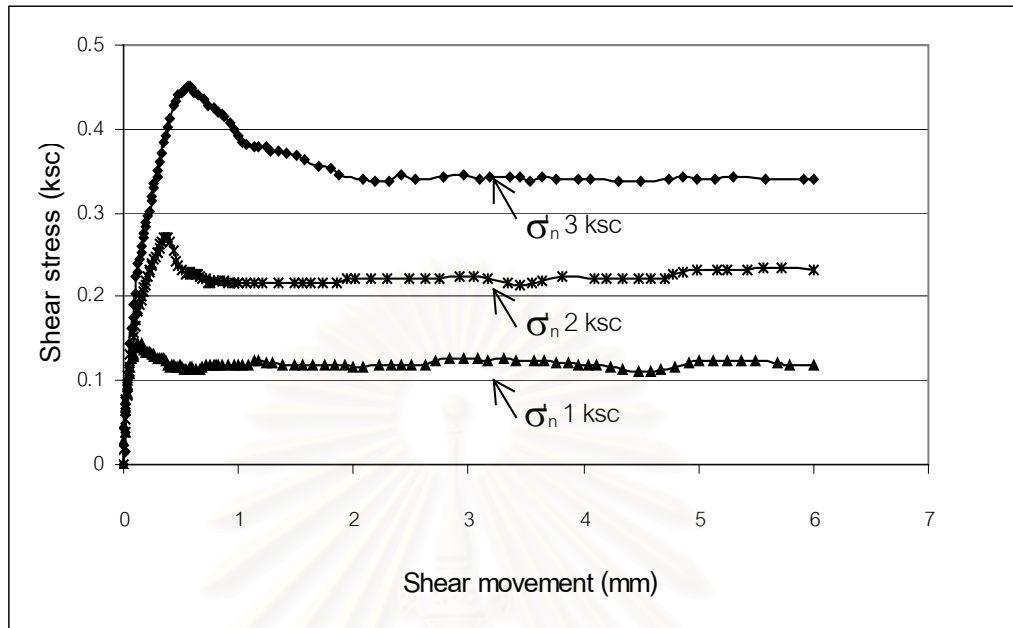


รูปที่ ๒๕ หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาซิลิโคนกรีต

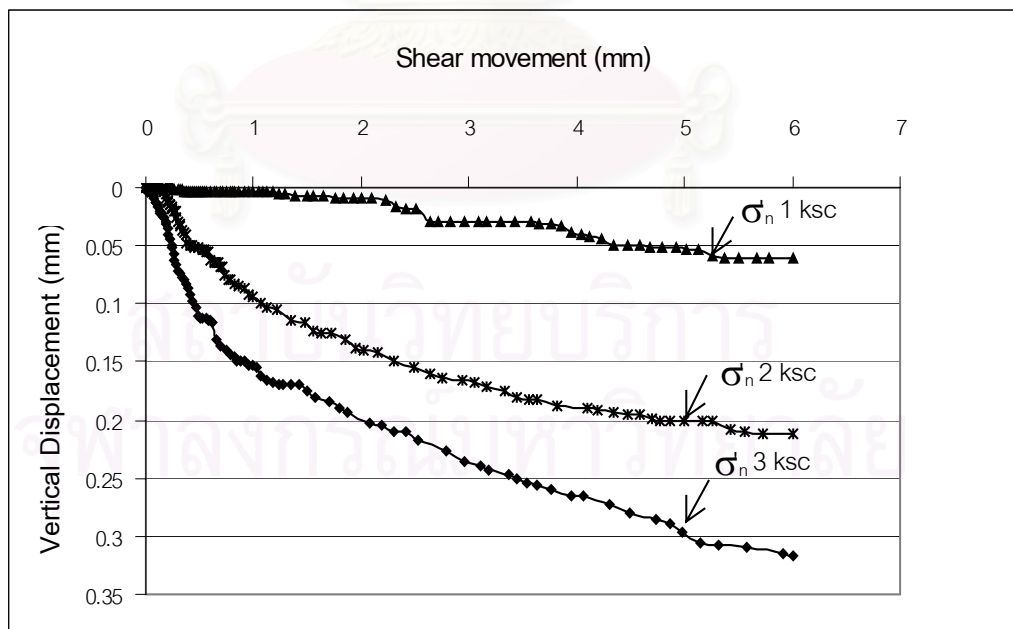


รูปที่ ๒๖ การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาซิลิโคนกรีต

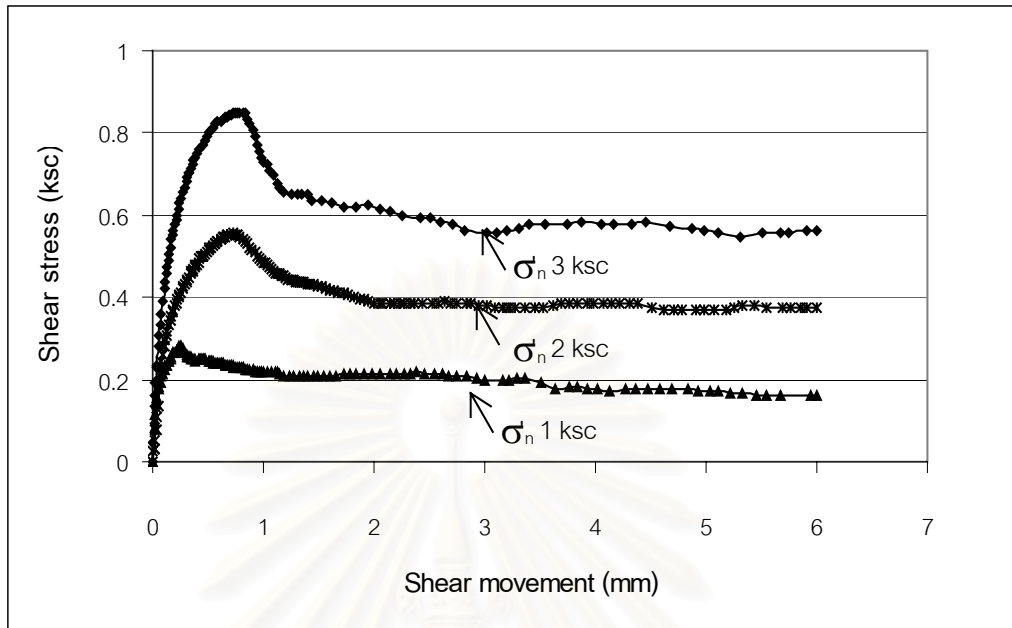




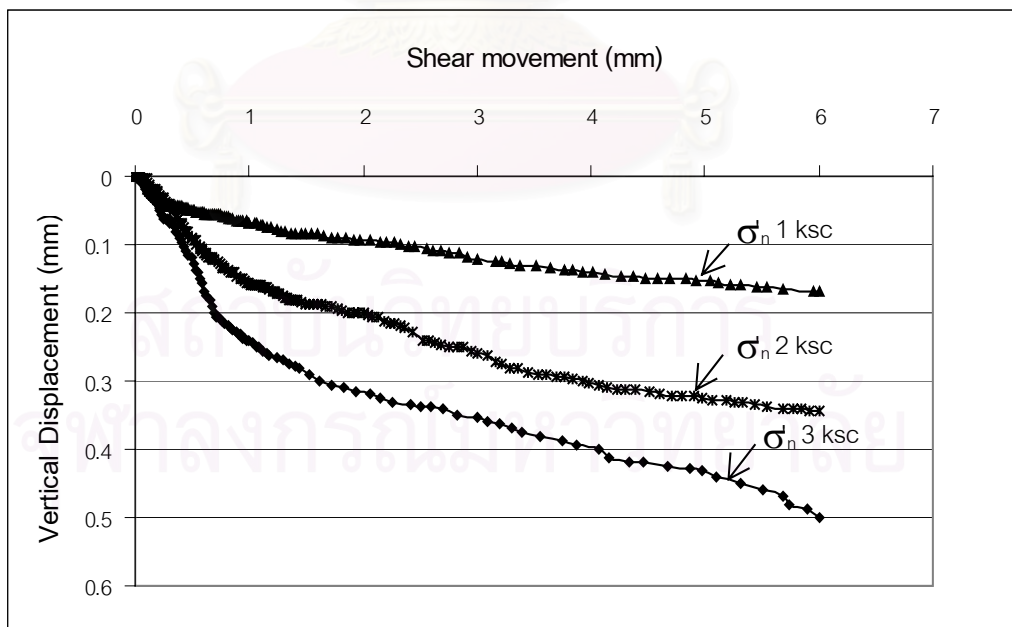
รูปที่ ๒๗ หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาน้ำมันหล่อลื่น



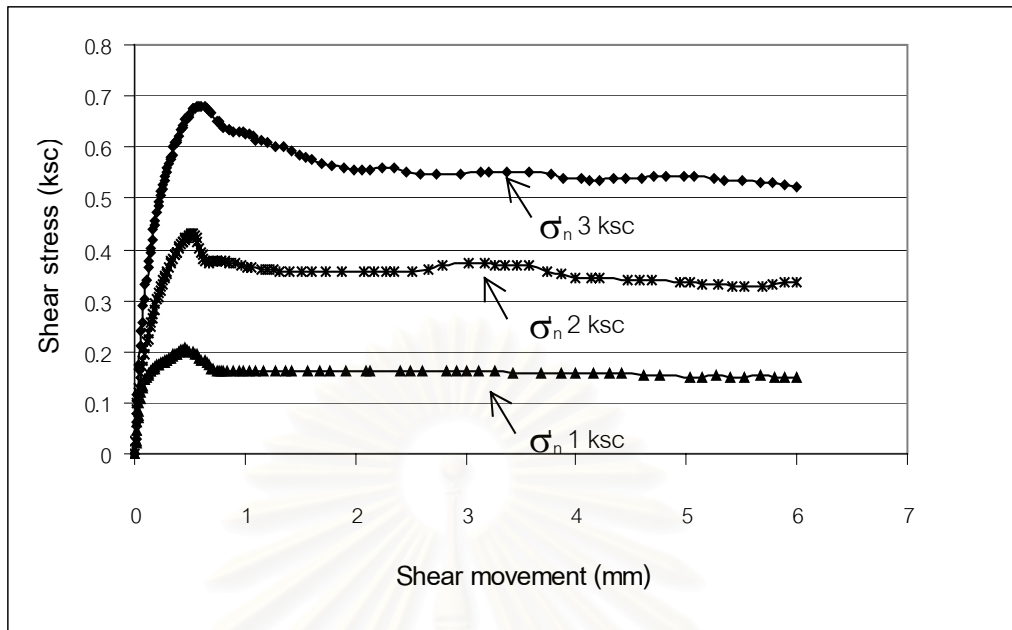
รูปที่ ๒๘ การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบทาน้ำมันหล่อลื่น



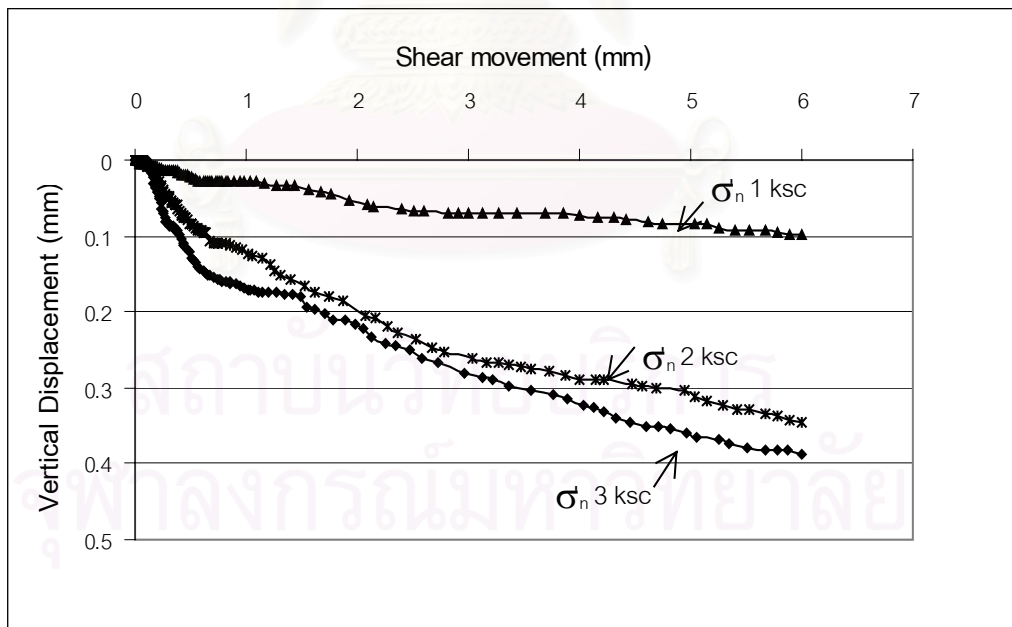
รูปที่ ๒๒๙ หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ



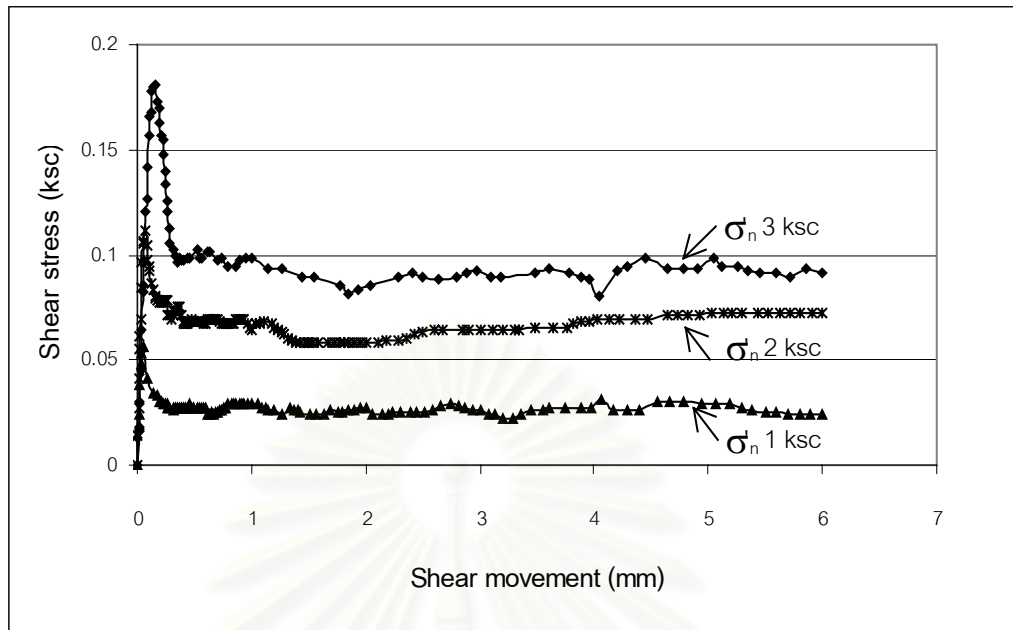
รูปที่ ๒๓๐ การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ



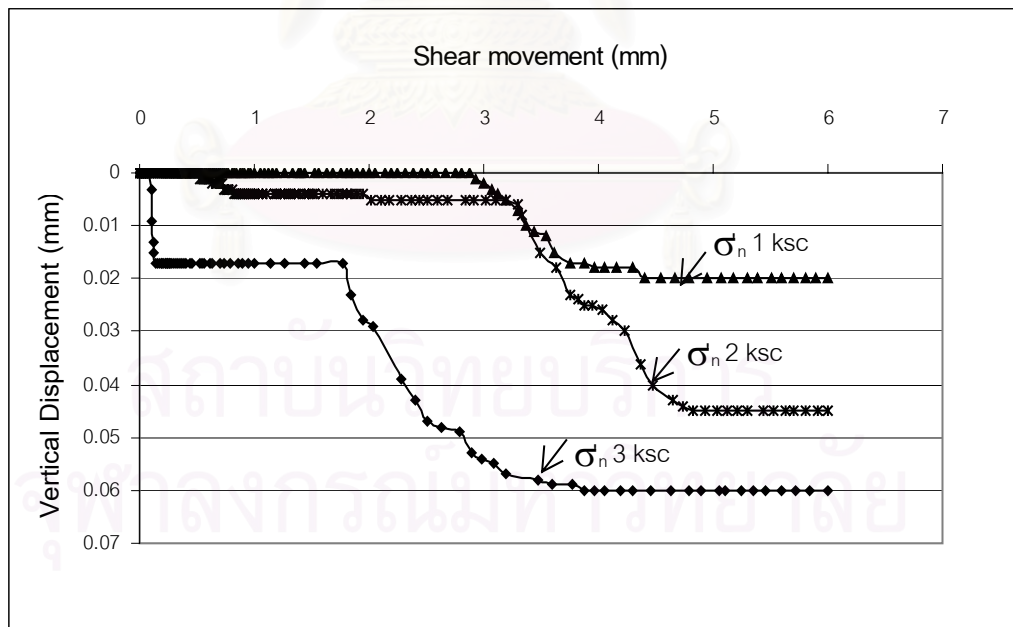
รูปที่ ๘31 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนต์



รูปที่ ๘32 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนต์



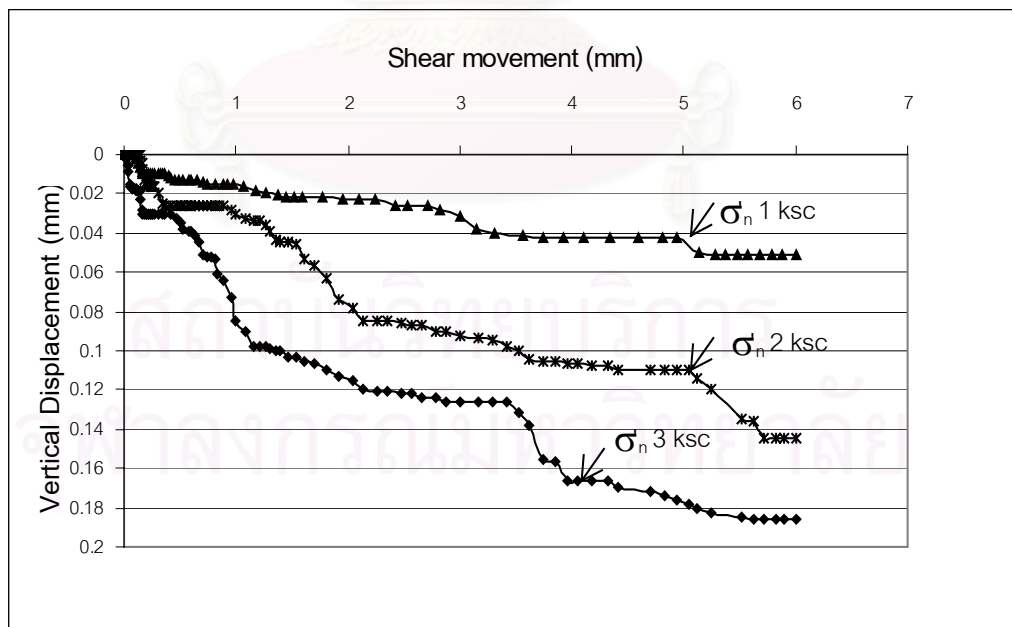
รูปที่ ๘33 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสีลิโคไนท์



รูปที่ ๘34 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสีลิโคไนท์



รูปที่ ๓35 หน่วยแรงเฉือนกับระยะการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ ๓36 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาน้ำมันหล่อลื่น

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัยรัตน์ ระตีพูน เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม 2520 สำเร็จการศึกษาปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และ  
เข้าศึกษาต่อในสาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย