

กลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง



นาย วีระพล กิติพงศ์ไพโรจน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3734-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CLAY - STRUCTURES INTERFACE FRICTION MECHANISM



Mr. Weeraphon Kitipongpairoj

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 2003

ISBN 974-17-3734-3

วีระพล กิติพงษ์ไพโรจน์ : กลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุ
โครงสร้าง. (CLAY – STRUCTURES INTERFACE FRICTION MECHANISM)
อ.ที่ปรึกษา: ผศ. ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 131 หน้า. ISBN 974-17-3734-3.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง รวมถึงผล
ของการลดแรงเสียดทานด้วยสารหล่อลื่น โดยทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือทดสอบที่ดัดแปลง
มาจากเครื่องมือทดสอบ Direct Shear ทำการทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำเดียนแบบไม่ระบายน้ำ ที่หน่วย
แรงกดทับในแนวตั้ง 1, 2 และ 3 ksc ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างดินเหนียวที่ทำขึ้นเองด้วย
วิธี Reconstituted ให้นำหนักกดทับในแนวตั้ง 1 ksc โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนบริเวณกรุงเทพฯ แบบ
แปลงสภาพ ที่ระดับความลึก 1-3 เมตรจากผิวดิน วัสดุโครงสร้างที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ คอนกรีตและเหล็ก
ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดแบ่งออกเป็นผิวหยาบและผิวเรียบ สำหรับการทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสด้วย
สารหล่อลื่นนั้น จะใช้สารละลายเบนโทไนต์เป็นสารหล่อลื่นโดยทดสอบกับคอนกรีตผิวหยาบและเหล็ก
ผิวเรียบ ทุกการทดสอบจะเสียบแท่งดินสอดลงไปในตัวอย่างดินก่อนทำการเขื่อนเพื่อศึกษาถึงขอบเขต
และเส้นทางการวิบัติที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน

ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุ
โครงสร้าง ได้แก่ หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, ชนิดของวัสดุโครงสร้าง และสภาพความขรุขระของพื้นผิว
สัมผัส ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ, คอนกรีตผิวเรียบ และเหล็กผิว
หยาบนั้นเกิดการเขื่อนขึ้นในตัวอย่างดินแทนการเขื่อนที่ผิวสัมผัส ทำให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับกำลังรับแรง
เขื่อนของดินเหนียว แต่ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบนั้นจะเกิดการเขื่อนขึ้นที่
ผิวสัมผัส หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจึงมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงเขื่อนของดินเหนียว ซึ่งสอดคล้อง
กับสภาพภายหลังการเขื่อนของแท่งดินสอดที่เสียบอยู่ภายในตัวอย่างดิน คือถ้าการทดสอบนั้นเกิดการ
เขื่อนขึ้นในตัวอย่างดินจะทำให้แท่งดินสอดเกิดการงอขึ้น แต่ถ้าการทดสอบนั้นเกิดการเขื่อนขึ้นที่ผิวสัมผัส
แล้วแท่งดินสอดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทำ
การเขื่อนพบว่า ในตอนแรกตัวอย่างดินจะค่อนข้างคงที่หรือขยายตัวขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นตัวอย่างดิน
จะเกิดการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง โดยระยะการทรุดตัวจะแปรผันตามหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง ชนิดและ
ความหยาบของพื้นผิววัสดุ

สำหรับการทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสด้วยสารหล่อลื่นพบว่า สารละลายเบนโทไนต์
สามารถช่วยลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง รวมทั้งระยะการทรุดตัวของ
ตัวอย่างดินขณะทำการเขื่อนได้ประมาณ 30%

ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2546	

4470550821: MAJOR CIVIL ENGINEERING

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

WEERAPHON KITIPONGPAIROJ : CLAY - STRUCTURES INTERFACE FRICTION MECHANISM. THESIS ADVISOR: ASSISTANCE.PROFESSOR. DR.SUPOT TEACHAVORASINSKUN, 131 pp. ISBN 974-17-3734-3.

This thesis aims to study interface friction between clay and underground structural materials, including influence of reduced interface friction by lubricant. The experimental study has been conducted based on the direct shear test apparatus with a specific modification. Whereas, the experiment condition were under consolidated undrained test. Additionally, clay samples were manually made by the reconstituted method and applying 1-ksc normal stress. Remolded clay samples were collected around Bangkok area at the level 1 to 3 meters from ground surface. The materials representing the underground structures are selected to be concrete and steel, in which, each of them were classified into two categories, smooth and rough surfaces. Moreover, bentonite slurry was chosen to be lubricant for the study on influence of reduced friction, however, in this regard, only rough concrete and smooth steel are carried out. On every test, to understand the failure zone and failure profile occurring in the soil samples, many pieces of pencil lead were used as an experimental tool to initially penetrate into the soil samples before shearing.

The normal stress, type of materials, surface roughness and shear rate are found to have an influence to interface friction. During the tests of interface friction under the conditions of rough surface concrete, smooth surface concrete and rough surface steel, the shear occurred inside the soil sample instead of at the interface, therefore the values of interface friction are very closed to the shear strength of clay. While, in the case of smooth surface steel shear occurred at the interface, then the interface friction is comparatively less than the shear strength. The two types of shear occurrence, inside the soil sample and at the interface, can be understood easily by the movement of pencil leads penetrated into the soil sampler, if the shear occurred inside the soil, the pencil will bent. The experimental observation is also found that the vertical displacement during shearing is initially no change or little dilated, and then settlement will start. The order of magnitude of settlement depends on normal stress, type of structural materials, surface roughness and shear rate.

For the experiment about the reduced interface friction by lubricant, it is found that bentonite slurry can reduce the interface friction between soil and structural materials and settlement during shearing can be shorten approximately 30 percents, as well.

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

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

Academic year...2003...

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “กลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง” ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิจัยมาด้วยดีมาตลอด และขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธนะเจริญกิจ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน และ อาจารย์ ดร.สิริวัตร บุญญะสู ที่ได้ให้เกียรติร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณชัยรัตน์ ระตีพูน ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดมา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในกองปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนผู้เขียนจนได้สำเร็จการศึกษา

วีระพล กิตติพงศ์ไพโรจน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง	ณ

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การวิบัติของดิน	5
2.1.1 การวิบัติแบบจุดสูงสุด (Peak) และจุดคงค้าง (Residual) ของดิน	5
2.1.2 กฎแรงเสียดทานของ Coulomb	6
2.2.3 กฎการวิบัติของ Mohr-Coulomb	7
2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยวิธีทดสอบ Direct Shear	8
2.2.1 หน่วยแรงในการทดสอบ Direct Shear.....	9
2.2.2 ความเครียดในการทดสอบ Direct Shear	11
2.2.3 ความเหมาะสมในการทดสอบ Direct Shear	12
2.2.4 วิธีและชนิดของการทดสอบ	12
2.2.5 ค่าที่วัดและการแสดงผล	15
2.2.6 ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบ Direct Shear	16
2.3 แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส.....	16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3.1	16
2.3.2	17
วัสดุโครงสร้าง	17
2.3.2.1	17
2.3.2.2	17
2.4	19
2.4.1	19
2.4.2	20
2.5	20
บทที่ 3	23
3.1	23
3.1.1	23
3.1.2	23
3.2	27
3.2.1	27
3.2.2	28
3.3	28
3.4	31
3.4.1	31
3.4.2	33
3.4.3	43
3.5	43
3.5.1	43
3.5.2	43
3.5.3	44
3.5.4	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.6	ขั้นตอนในการทดสอบ..... 45
3.6.1	การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน..... 45
3.6.2	การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส 46
3.6.3	การทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยใช้สารหล่อลื่น..... 48
3.6.4	การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว..... 50
บทที่ 4	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ..... 51
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของตัวอย่างดิน 51
4.2	ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว 52
4.3	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต 59
4.3.1	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต ผิวหยาบ..... 59
4.3.2	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต ผิวเรียบ 65
4.4	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก..... 71
4.4.1	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ 71
4.4.2	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ 76
4.5	ผลการลดแรงเสียดทานด้วยสารหล่อลื่น 83
4.5.1	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต ผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์..... 83
4.5.2	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิว เรียบทาสารละลายเบนโทไนด์..... 88
4.6	เปรียบเทียบผลการทดสอบ 94
4.6.1	เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างพื้นผิววัสดุ..... 94
4.6.1.1	เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตผิวหยาบกับคอนกรีตผิวเรียบ..... 94
4.6.1.2	เปรียบเทียบระหว่างเหล็กผิวหยาบกับเหล็กผิวเรียบ..... 98
4.6.2	เปรียบเทียบผลการทดสอบลดแรงเสียดทานด้วยสารหล่อลื่น..... 104

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.6.2.1	
เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตผิวหยาบกับคอนกรีตผิวหยาบ ทาสารละลายเบนโทไนด์	104
4.6.2.2	
เปรียบเทียบระหว่างเหล็กผิวหยาบกับเหล็กผิวหยาบทาสาร ละลายเบนโทไนด์	109
4.6.3	
เปรียบเทียบผลจากอัตราเร็วในการฉีกร	114
4.6.4	
เปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งหมด	118
บทที่ 5	
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	126
5.1	
สรุปผลการวิจัย	126
5.2	
ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยต่อไป	128
รายการอ้างอิง	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	131

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

ฉ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงขอบเขตการวิบัติที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Direct Shear.....	4
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง - ความเครียด	5
2.2 กฎแรงเสียดทานของ Coulomb.....	6
2.3 กฎการวิบัติของ Mohr - Coulomb.....	7
2.4 แสดงแนววิบัติ การวิบัติเลื่อน (Slide) ของคันทันดินถม	8
2.5 หลักการของการทดสอบ Direct Shear	9
2.6 สภาพของความเค้นและวงกลม Mohr ที่จุดวิบัติ ในการทดสอบ Direct Shear	10
2.7 พื้นผิวสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการเฉือน	11
2.8 การเคลื่อนที่ในทางทฤษฎีและที่เกิดขึ้นจริงของการทดสอบ Direct Shear	12
2.9 ผลการทดสอบไม่อัดตัวคายนํ้าเฉือนแบบไม่ระบายนํ้า ในตัวอย่างดินเหนียว.....	13
2.10 ผลการทดสอบแบบอัดตัวคายนํ้าเฉือนแบบไม่ระบายนํ้า ในตัวอย่างดินเหนียว	14
2.11 ผลการทดสอบแบบอัดตัวคายนํ้าเฉือนแบบระบายนํ้า ในตัวอย่างดินเหนียว	15
2.12 การเฉือนเกิดที่บริเวณชั้น Solid Film (Rabinowicz, 1965).....	19
2.13 การเฉือนเกิดบริเวณผิวของชั้น Solid Film กับผิววัตถุ (Rabinowicz, 1965)	20
2.14 การซึมของชั้นของเหลวบริเวณผิวสัมผัสของวัตถุ (Rabinowicz, 1965).....	20
3.1 ขั้นตอนการกวนดิน	24
3.2 ดินเหลว (Slurry) ที่ได้ภายหลังการกวน.....	25
3.3 การเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธี Reconstituted	26
3.4 ตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธี Reconstituted.....	27
3.5 แผ่นคอนกรีตผิวหยาบ.....	29
3.6 แผ่นคอนกรีตผิวเรียบ	29
3.7 แผ่นเหล็กผิวหยาบ.....	30
3.8 แผ่นเหล็กผิวเรียบ	30
3.9 รูปตัดเครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน.....	33
3.10 รูปด้านหน้าเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส	38
3.11 รูปด้านข้างเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส	39
3.12 รูปด้านบนเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส	40
3.13 เครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส	41

สารบัญรูป (ต่อ)

ฎ

รูปที่	หน้า
3.14 เครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส	41
3.15 ชุดมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์	42
3.16 ผังแรงที่กระทำต่อวงแหวนวัดแรง	45
3.17 ภาพการเสียบแท่งดินสอในตัวอย่างดินก่อนทำการเฉือน	47
3.18 การทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสด้วยสารละลายเบนโทไนด์	48
3.19 การเตรียมแผ่นวัสดุโครงสร้างเคลือบด้วยสารละลายเบนโทไนด์	49
4.1 การกระจายขนาดเม็ดดินของตัวอย่างดิน ด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์	52
4.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	54
4.3 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	54
4.4 ค่า Normalized ของกำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	55
4.5 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	55
4.6 กำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	56
4.7 ตัวอย่างการหักของแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินหลังการทดสอบ	57
4.8 ลักษณะแท่งดินสอในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว	58
4.9 หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ	60
4.10 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ	60
4.11 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ	61
4.12 หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังจากทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ	75
4.28 หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ	78
4.29 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ	78
4.30 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ	79
4.31 หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ	79
4.32 หน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ	80
4.33 ตัวอย่างแท่งดินสอในตัวอย่างดินที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากทดสอบ	81
4.34 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังจากทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ	82
4.35 หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	84
4.36 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	85
4.37 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	85
4.38 หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	86
4.39 หน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	86
4.40 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังจากทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์	87

สารบัญรูป (ต่อ)

ค

รูปที่	หน้า
4.68 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบและเหล็กผิวเรียบทา สารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc	110
4.69 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบและเหล็กผิวเรียบทา สารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc	110
4.70 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบและเหล็กผิวเรียบทา สารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc	111
4.71 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc	111
4.72 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc	112
4.73 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc	112
4.74 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์	113
4.75 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวเรียบที่อัตราเร็วในการ เฉือนต่างกัน	115
4.76 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบที่อัตราเร็วในการ เฉือนต่างกัน	116
4.77 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทำการเฉือน ในการทดสอบ แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ ที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน	116
4.78 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทำการเฉือน ในการทดสอบ แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบ ที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน	117
4.79 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc รวมทุกการทดสอบ	120
4.80 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc รวมทุกการทดสอบ	120
4.81 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc รวมทุกการทดสอบ	121

สารบัญรูป (ต่อ)

ต

รูปที่	หน้า
4.82 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc รวมทุกการทดสอบ	121
4.83 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc รวมทุกการทดสอบ	122
4.80 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc รวมทุกการทดสอบ	122
4.85 หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง รวมทุกการทดสอบ	123



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ถ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของตัวอย่างดิน..... 51
ตารางที่ 4.2	ค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกด ทับในแนวตั้งต่างๆ 53
ตารางที่ 4.3	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบและ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ..... 59
ตารางที่ 4.4	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบและ ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ..... 66
ตารางที่ 4.5	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบและค่า การทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่าง 71
ตารางที่ 4.6	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบและค่า การทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ..... 77
ตารางที่ 4.7	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทา สารละลายเบนโทไนต์และค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรง กดทับในแนวตั้งต่างๆ..... 83
ตารางที่ 4.8	ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสาร ละลายเบนโทไนต์และค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกด ทับในแนวตั้งต่างๆ 89
ตารางที่ 4.9	อัตราส่วนระหว่างค่าจากการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลาย เบนโทไนต์ต่อค่าจากการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบ 104
ตารางที่ 4.10	อัตราส่วนระหว่างค่าจากการทดสอบของเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโท ไนต์ต่อค่าจากการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ 113
ตารางที่ 4.11	อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน 115
ตารางที่ 4.12	หน่วยแรงเฉือนสูงสุดและพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบรวมทุกการทดสอบ เทียบอัตราส่วนกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว 119

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินขนาดเล็ก (Micro-Tunneling) ในชั้นดินเหนียว บริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล กำลังเป็นที่นิยมมาก เช่น อุโมงค์ส่งน้ำ อุโมงค์ระบายน้ำเสีย และอุโมงค์วางสายไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น โดยทั่วไป การก่อสร้างจะใช้ระบบดันท่อ (Pipe Jacking System) เนื่องจากสามารถลดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม การจราจร ทัศนียภาพ และมลภาวะได้ดี อีกทั้งสภาพดินของกรุงเทพมหานครมีความเหมาะสมกับระบบการดันท่อ ซึ่งเป็นเทคนิคการก่อสร้างโดยใช้แม่แรง (Hydraulic Jack) ในการดันท่อจากบ่อต้น (Driving Pit) ไปยังบ่อรับ (Receiving Pit) ที่เตรียมไว้ โดยไม่ต้องเปิดหน้าดิน ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในระบบดันท่อคือ เกิดแรงเสียดทานระหว่างดินกับผิวท่อในขณะดันท่อ โดยขนาดของแรงเสียดทานจะส่งผลกระทบต่อระบบก่อสร้างหลายอย่าง เช่น กำลังของชุดแม่แรง ระยะในการดันท่อ จำนวนบ่อต้น บ่อรับ การออกแบบผนังกำแพงบ่อต้นบ่อรับ เป็นต้น ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ด้วยวิธีอัดฉีดสารหล่อลื่น เช่น สารละลายเบนโทไนต์ (Bentonite Slurry) และสารละลายโพลีเมอร์ (Polymer Slurry) ระหว่างทำการดันท่อเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานที่ผิวท่อ จากที่กล่าวมาจะพบว่าข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยระบบดันท่อ คือ ข้อมูลแรงเสียดทานระหว่างดินกับผิวท่อ การคาดคะเนแรงเสียดทานที่แม่นยำจึงเป็นสิ่งสำคัญมากในการ ก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบดันท่อ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส (Skin Friction) ระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างและผลของสารหล่อลื่น เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและวางแผนการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินระบบดันท่อ

นอกจากนี้แล้วค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้างยังเป็นค่าที่สำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีที่มีความเกี่ยวข้องกันระหว่างดินกับโครงสร้างใต้ดินอื่นๆ อีก เช่น เสาเข็ม กำแพงกันดิน และเคซอน (Caisson) เป็นต้น การแก้ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องมีความรู้ในความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับวัสดุโครงสร้างเมื่อมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด ไม่ว่าจะเป็นค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส กลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ตลอดจนพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุ

การศึกษาหาเรื่องแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสในอดีตนั้น มักจะเป็นการศึกษาจากการทดสอบในสนามเป็นหลัก ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยโดยรวม ไม่สามารถแยกแยะปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลได้ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาหาเรื่องเสียดทานระหว่างดินทรายกับวัสดุโครงสร้าง สำหรับการศึกษหาเรื่องเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง และผลของการนำสารหล่อลื่นมาช่วยลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสนั้นยังมีน้อย จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงพฤติกรรมและค่าของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง รวมถึงผลของสารหล่อลื่น เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินต่างๆ โดยเฉพาะอุโมงค์ใต้ดิน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ทำการศึกษาเรื่องแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างรวมทั้งผลของสารหล่อลื่นมาใช้ลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส เพื่อนำไปใช้ออกแบบและแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพในงานวิศวกรรมปฐพีสำหรับโครงสร้างใต้ดินต่างๆ โดยเน้นไปที่งานอุโมงค์ใต้ดินที่ก่อสร้างด้วยระบบดันท่อ

สามารถแบ่งวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ได้ดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาค่าแรงเสียดทาน, พฤติกรรมของแรงเสียดทาน รวมทั้งกลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง
- 2) เพื่อศึกษาค่าแรงเสียดทาน, พฤติกรรมของแรงเสียดทาน รวมทั้งกลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างที่มีสารหล่อลื่นช่วยลดแรงเสียดทาน
- 3) เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมและค่าของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง
- 4) เพื่อศึกษาขอบเขตและเส้นทางการวิบัติ (Failure Zone and Failure Profile) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินหลังจากถูกเฉือน

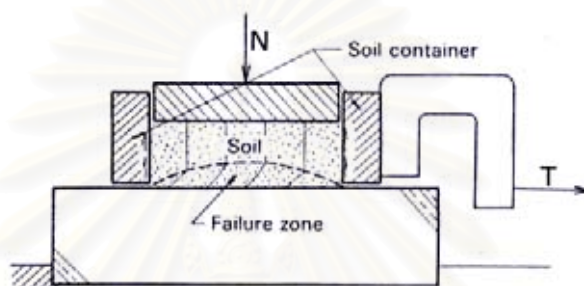
1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้ ทำการศึกษาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวและวัสดุโครงสร้างรวมทั้งผลของสารหล่อลื่น โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ด้วยวิธีทดสอบ Direct Shear ภายใต้สภาวะอัดตัวคายน้ำแบบไม่ระบายน้ำ (Consolidated Undrained Condition) ที่ความเร็วในการเฉือน 2 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ คือ เครื่องมือ Direct Shear แบบ Shear Box Type ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาให้เหมาะสมกับการศึกษาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างโดยเฉพาะ

ขอบเขตของการวิจัยมีรายละเอียด ดังนี้

- 1) ทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่างๆ โดยแปรเปลี่ยนชนิดและสภาพพื้นผิวของวัสดุโครงสร้าง ดังนี้
 - คอนกรีตผิวหยาบ
 - คอนกรีตผิวเรียบ
 - เหล็กผิวหยาบ
 - เหล็กผิวเรียบ
- 2) ทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง โดยแปรเปลี่ยนค่าหน่วยแรงในแนวดิ่งที่กระทำต่อดินและวัสดุโครงสร้าง ดังนี้
 - ที่ 1 ksc
 - ที่ 2 ksc
 - ที่ 3 ksc
- 3) ทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างที่มีสารหล่อลื่นช่วยลดแรงเสียดทาน โดยสารหล่อลื่นที่ใช้ ได้แก่ สารละลายเบนโทไนด์
- 4) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสที่ได้จากการทดสอบ Direct Shear ภายใต้สภาวะอัดตัวคายน้ำแบบระบายน้ำ (Consolidated Drained Condition) ที่ความเร็วในการเฉือน 0.03 มิลลิเมตรต่อนาที (ชัยรัตน์ รัตติพูน, 2544)

- 5) ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบ Direct Shear เพื่อเปรียบเทียบกับแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง
- 6) ศึกษาขอบเขตและเส้นทางการวิบัติ (Failure Zone and Failure Profile) ที่เกิดขึ้นจริงในตัวอย่างดินหลังการเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงขอบเขตการวิบัติที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Direct Shear

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาวิจัยที่ได้ คาดว่าจะมีประโยชน์ดังนี้

- 1) ทราบถึงพฤติกรรมและค่าของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างใต้ดินได้อย่างถูกต้อง
- 2) ทราบถึงผลกระทบของการใช้สารหล่อลื่นในการลดแรงเสียดทานที่มีผลต่อพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน
- 3) ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเสียดทานและพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง
- 4) ทราบถึงลักษณะของขอบเขตและเส้นทางการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงในตัวอย่างดินหลังจากถูกเฉือน

บทที่ 2

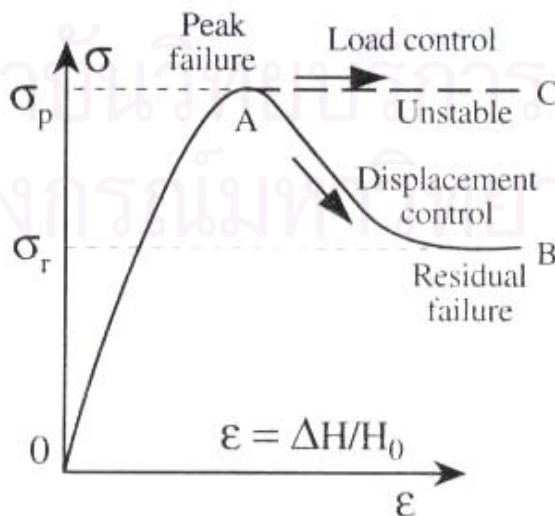
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิบัติของดิน

การวิบัติของดินมีลักษณะเหมือนกับวัสดุอื่นๆ คือ เกิดการวิบัติในจุดซึ่ง เมื่อให้หน่วยแรงเฉือนกระทำต่อดินเพิ่มขึ้นแต่ดินไม่สามารถต้านทานหน่วยแรงเฉือนได้มากกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเอง และดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างต่อเนื่องเมื่อให้หน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อดินเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดิน กำลังรับแรงเฉือนของดินเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในการวิเคราะห์เสถียรภาพของฐานราก, กำแพงกันดิน และคันดินถม เป็นต้น

2.1.1 การวิบัติแบบจุดสูงสุด (Peak) และจุดคงค้าง (Residual) ของดิน

เมื่อตัวอย่างดินถูกกระทำด้วยแรงในลักษณะวิธีควบคุมความเครียด (Strain Control) คือ ให้หน่วยแรงกระทำต่อตัวอย่างในอัตราเร็วที่กำหนดนั้น ในตอนแรกเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น หน่วยแรงก็จะเพิ่มขึ้นตามจนกระทั่งถึงจุดหน่วยแรงสูงสุด จากนั้นหน่วยแรงจะลดลงสู่ค่าหน่วยแรงคงค้าง (Residual Strength) จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดนี้ สามารถนิยามการวิบัติออกได้เป็น 2 แบบ คือ การวิบัติที่จุดสูงสุด (Peak Failure) และการวิบัติที่จุดคงค้าง (Residual Failure) โดยการวิบัติที่จุดสูงสุดจะสัมพันธ์กับค่ากำลังสูงสุด (Peak Strength, σ_p) ที่จุด A ส่วนการวิบัติที่จุดคงค้างจะสัมพันธ์กับค่ากำลังคงค้าง (Residual Strength, σ_r) ที่จุด B ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง-ความเครียด

2.1.2 กฎแรงเสียดทานของ Coulomb

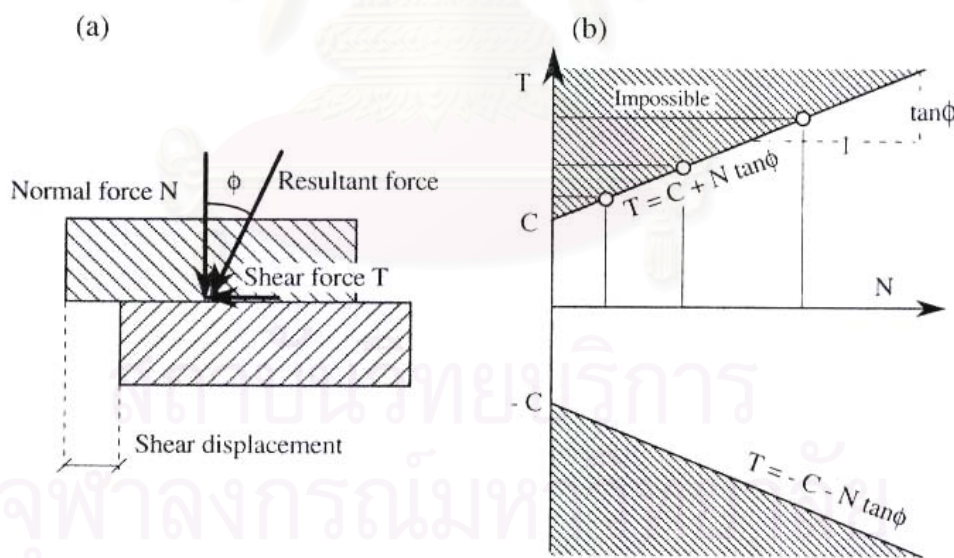
รูปที่ 2.2(a) แสดงกฎแรงเสียดทานของ Coulomb โดยพิจารณาจากแผ่นไม้ 2 ชั้น ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงกดทับในแนวตั้ง N และแรงเฉือน T โดยแรง N เป็นค่าคงที่จากน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ ส่วนแรง T จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เริ่มแรกแผ่นไม้ชั้นบนจะไม่เคลื่อนที่เมื่อแรง T มีค่าน้อย โดยแผ่นไม้ชั้นบนจะเริ่มเกิดการเลื่อนไถลเมื่อแรง T มีค่าเกินค่า T_{max} ทำซ้ำโดยการเปลี่ยนค่า N จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ T_{max} เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ตามรูปที่ 2.2(b) โดยเส้นตรงจะตัดแกน T ที่จุด C และมีความชันเท่ากับ μ เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$T_{max} = C + \mu N \quad (2.1)$$

เมื่อ T_{max} = ค่าแรงเฉือนสูงสุด

C = แรงเชื่อมแน่น (Cohesion Force)

μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน = $\tan \phi$



รูปที่ 2.2 กฎแรงเสียดทานของ Coulomb

ค่า Cohesion Force คือ ค่าแรงเฉือน T ที่ต้องการเพื่อให้เกิดการไถลเมื่อ $N = 0$, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นไม่มีหน่วย และเป็นค่าที่แสดงลักษณะการเพิ่มขึ้นของ T_{max} ตามค่า N ที่เพิ่มขึ้น, ตัวแปร C และ ϕ จะขึ้นกับชนิดวัสดุและสภาพผิวสัมผัส โดยทั่วไปวัสดุที่มีความแข็งและ

พื้นผิวหยาบจะมีค่า C และ ϕ สูง ส่วนวัสดุที่มีความอ่อนและพื้นผิวเรียบจะมีค่า C และ ϕ ต่ำ พิกัดจุด (N,T) จะอยู่ภายในพื้นที่ที่ไม่ได้แรเงาในรูปที่ 2.2(b) เท่านั้น เมื่อค่า $C = 0$ แรงรวมทั้งหมดที่กระทำต่อแผ่นวัสดุจะกระทำมุมกับแนวตั้งน้อยกว่าหรือเท่ากับ ϕ

2.1.3 กฎการวิบัติของ Mohr-Coulomb

กฎการวิบัติของ Mohr-Coulomb ใช้หลักการของกฎแรงเสียดทานของ Coulomb ในระนาบ σ - τ

$$\tau_{\max} = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.2)$$

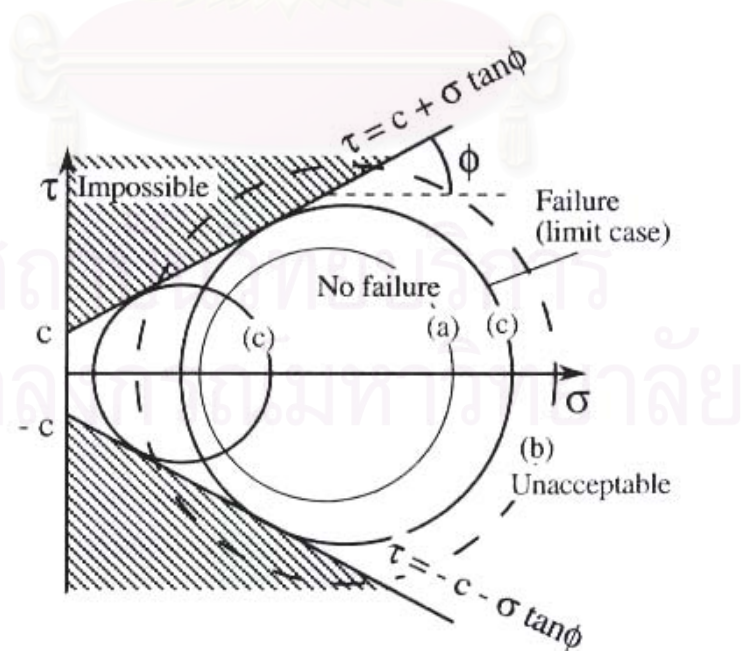
โดยที่ $\tau = \frac{T}{A}$ = หน่วยแรงเฉือน, ksc

$c = \frac{C}{A}$ = Cohesion, ksc

$\sigma_n = \frac{N}{A}$ = หน่วยแรงตั้งฉาก, ksc

ϕ = Angle of Internal Friction, degree

A = พื้นที่ผิวสัมผัส, ตร.ซม.

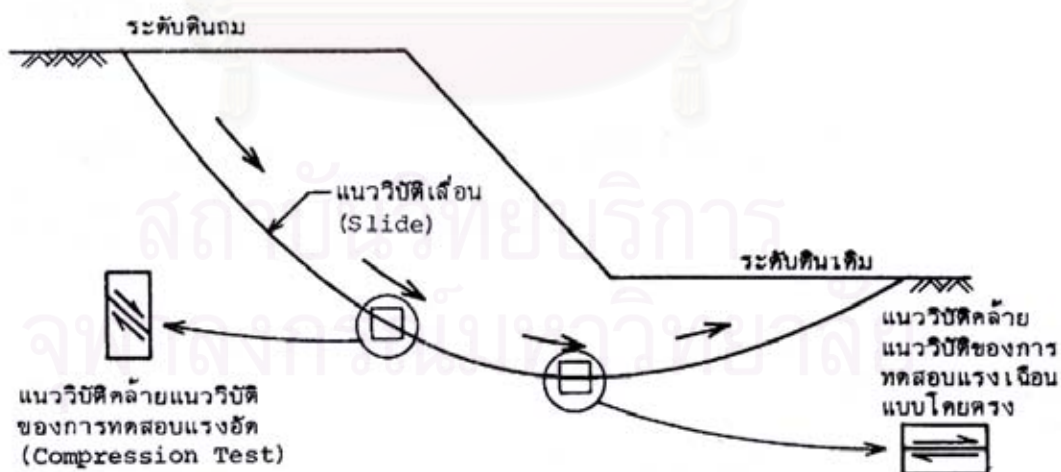


รูปที่ 2.3 กฎการวิบัติของ Mohr-Coulomb

วงกลม Mohr ซึ่งเกิดจากจุด (σ, τ) ซึ่งเปลี่ยนไปตามระนาบวิบัติที่เปลี่ยนไปนั้น จะอยู่ภายในระหว่างเส้น $\tau = \pm(c + \sigma \tan \phi)$ เสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อวงกลม Mohr อยู่ในเส้นวิบัติดังวงกลม (a) จะไม่เกิดการวิบัติขึ้นในตัวอย่างดิน, วงกลม (b) ซึ่งเกินจากเส้นวิบัติจะไม่มีทางเกิดขึ้นได้ตามกฎการวิบัติของ Mohr-Coulomb ส่วนวงกลม (c) ซึ่งสัมผัสกับเส้นวิบัตินั้น ตัวอย่างดินจะเกิดการวิบัติพอดี

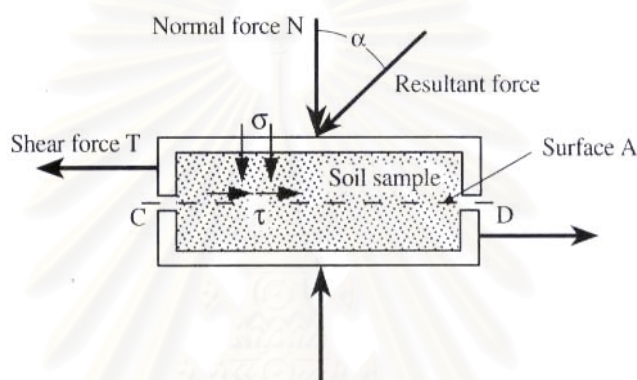
2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยวิธีทดสอบ Direct Shear

การทดสอบ Direct Shear เป็นวิธีการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยตัวอย่างดินจะถูกบังคับให้วิบัติในแนวที่กำหนด โดยจะเป็นแนวนอนที่ประมาณครึ่งความสูงตัวอย่าง ซึ่งในความเป็นจริงการวิบัติของดินเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้นโดยทั่วไป ยกเว้นในบางกรณี เช่น การวิบัติเลื่อน (Slide) ของคันดินถม ในบางส่วนของแนววิบัตินั้นการวิบัติจะมีลักษณะคล้ายการวิบัติของการทดสอบ Direct Shear ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่การกำหนดแนวของการวิบัติให้อยู่ในระนาบคงที่ระหว่างการทดสอบก็มีประโยชน์สำหรับการหากำลังต้านทานแรงเฉือนตามแนว Weak Plane ที่พอจะทราบในตัวอย่างดิน และยังมีประโยชน์สำหรับการทดสอบที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุต่างชนิดกัน



รูปที่ 2.4 แสดงแนววิบัติ การวิบัติเลื่อน (Slide) ของคันดินถม

หลักการของการทดสอบ Direct Shear แสดงอยู่ในรูปที่ 2.5 ตัวอย่างดินอยู่ภายในกล่องใส่ตัวอย่างบนและล่างที่มีแรงตั้งฉาก N กระทำ และถูกเฉือนด้วยแรงเฉือน T ถ้า A คือพื้นที่ของระนาบ CD จะได้หน่วยแรงเฉือน τ ที่กระทำบนระนาบ CD มีค่าเท่ากับ T/A และหน่วยแรงในแนวตั้ง σ มีค่าเท่ากับ N/A กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินคือ ค่าหน่วยแรงเฉือน τ เนื่องจากการเลื่อนไถลตามแนวระนาบ CD ซึ่งมีความสัมพันธ์เหมือนในสมการที่ (2.2)

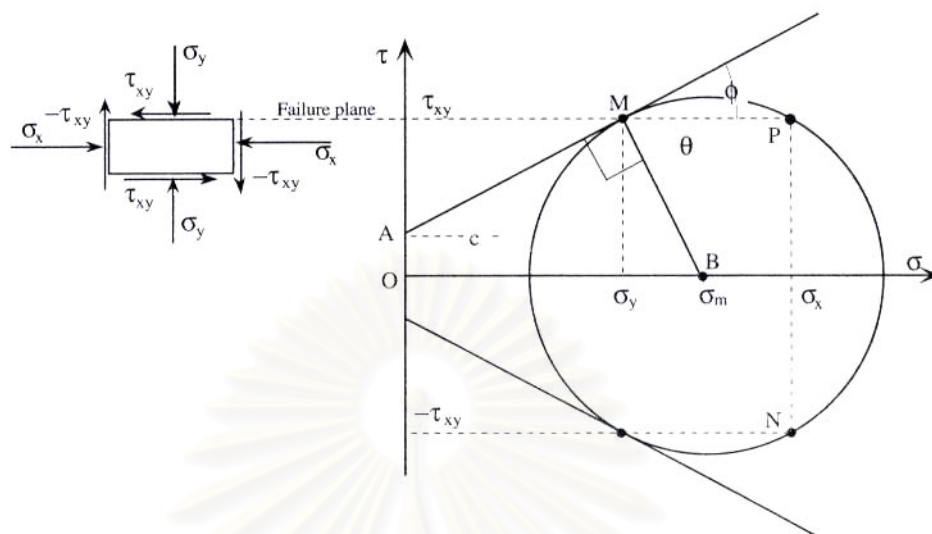


รูปที่ 2.5 หลักการของการทดสอบ Direct Shear

2.2.1 หน่วยแรงในการทดสอบ Direct Shear

ระหว่างการทดลอง Direct Shear สภาพของหน่วยแรงไม่สามารถนิยามได้อย่างสมบูรณ์ชัดเจน σ และ τ จะหาได้เฉพาะบนระนาบแนวนอน แต่ไม่สามารถหาบนระนาบอื่นๆ ได้ ดังนั้น ทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) จะไม่สามารถแสดงในระนาบ $p-q$ ได้ อย่างไรก็ตามยังสามารถเขียนวงกลม Mohr ที่สภาพวิบัติได้โดยมีสมมติฐานว่า ระนาบวิบัติอยู่ในแนวนอนและสภาพของหน่วยแรงสม่ำเสมอ ตามรูปที่ 2.6

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินก้อนบนและก้อนล่างนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะการเฉือน (δ) ดังนั้นจะต้องปรับแก้ค่าพื้นที่ใหม่ โดยค่าพื้นที่ปรับแก้ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสกันระหว่างตัวอย่างดินพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสความยาว a หาได้จาก



รูปที่ 2.6 สภาพของความเค้นและวงกลม Mohr ที่จุดวิบัติ ในการทดสอบ Direct Shear

$$A_c = a(a - \delta) \quad (2.3)$$

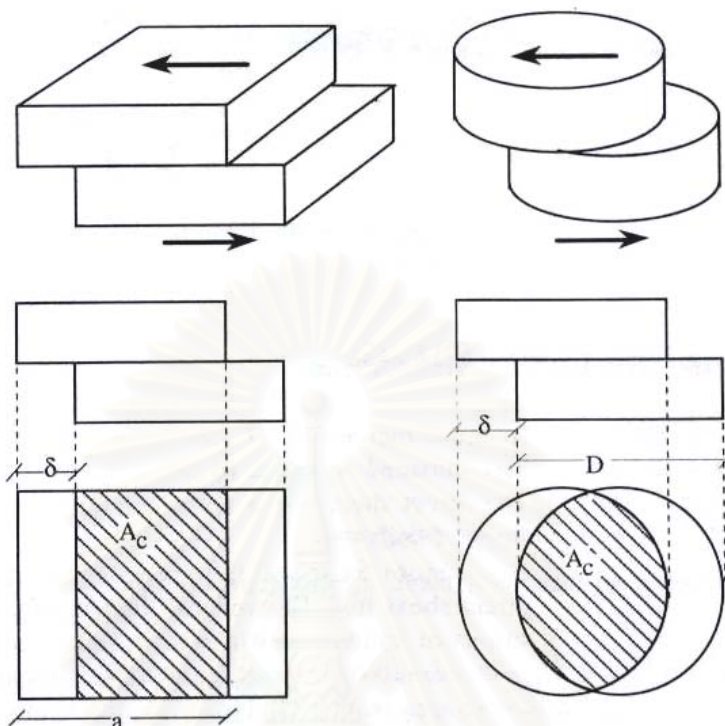
สำหรับตัวอย่างที่มีพื้นที่เป็นรูปวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง D สามารถหาค่าพื้นที่ที่รับ
แก้ได้จาก

$$A_c = \frac{D^2}{2} \left(\theta - \frac{\delta}{D} \sin \theta \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ $\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right)$, เรเดียน

ดังนั้น ค่าหน่วยแรงเฉือน τ และหน่วยแรงแนวตั้ง σ ที่กระทำบนพื้นผิวสัมผัสใน
แนวราบ จะต้องคำนวณจากพื้นที่ที่รับแก้ A_c

$$\tau = \frac{T}{A_c} \quad \text{และ} \quad \sigma = \frac{N}{A_c} \quad (2.5)$$

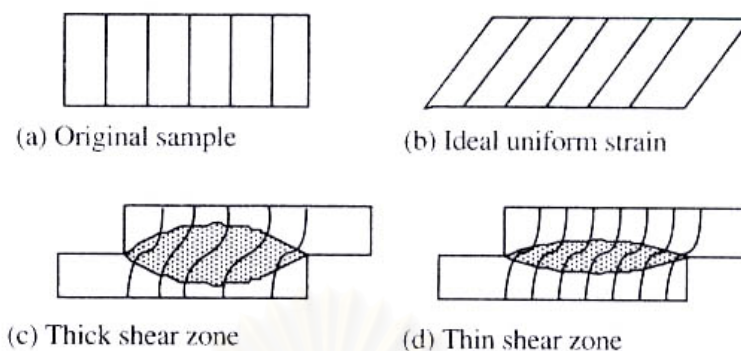


รูปที่ 2.7 พื้นผิวสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการเฉือน

2.2.2 ความเครียดในการทดสอบ Direct Shear

ในการทดสอบ Direct Shear ผลการทดสอบจะถูกแสดงโดยใช้ระยะการเคลื่อนที่ของการเฉือน (Shear Displacement) แทนที่ความเครียดเฉือน (Shear Strain) เพราะหาไม่สามารถหาความเครียดเฉือนได้ ดังนั้นการทดสอบ Direct Shear จึงมีประโยชน์สำหรับการหา กำลังรับแรงเฉือน แต่ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือนได้ (Stress-Strain Relationship) ได้

รูปที่ 2.8(a) แสดงตัวอย่างดินในสภาพเริ่มต้นก่อนจะถูกเฉือนในการทดลอง Direct Shear เส้นแนวตั้งในรูปที่ 2.8 นี้ แสดงตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของเม็ดดิน ถ้า Shear Strain สม่่าเสมอ ตัวอย่างที่ถูกเฉือนจะเอียงสม่่าเสมอตามรูปที่ 2.8(b) แต่เนื่องจากในการทดลอง Direct Shear นั้น Shear Strain มีค่าไม่สม่่าเสมอ ทำให้ตัวอย่างดินที่ถูกเฉือนจะเป็นดังรูป 2.8(c) และ 2.8(d) การเปลี่ยนรูปร่างจะเกิดภายใน Shear Zone ที่ผิวสัมผัส โดยดินจะเริ่มวิบัติที่ขอบของกล่องก่อนที่จะวิบัติที่ตรงกลาง



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ในทางทฤษฎีและที่เกิดขึ้นจริง
ของการทดสอบ Direct Shear (Lambe 1951)

2.2.3 ความเหมาะสมในการทดสอบ Direct Shear

การทดสอบ Direct Shear เป็นวิธีการทดสอบที่ปฏิบัติได้ง่าย สามารถทดสอบตัวอย่างดินได้ทุกชนิดและได้หลายขนาด สำหรับตัวอย่างดินเหนียวสามารถทำการทดสอบได้ทั้งตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) และตัวอย่างดินแปลงสภาพ (Remolded Sample) การทดสอบ Direct Shear ในดินเหนียวมีข้อดีพิเศษที่สามารถทดสอบหาค่ากำลังคงค้าง (Residual Strength) ของดินได้โดยง่าย อีกทั้งยังสามารถทำการทดสอบดินแบบเฉือนกลับทาง (Reversed Shear) ได้อีกด้วย

2.2.4 วิธีและชนิดของการทดสอบ

การทดสอบ Direct Shear ก็เหมือนการทดสอบแรงเฉือนชนิดอื่น ที่อัตราความเร็วกระทำแรงเฉือน (Shear Rate) และระยะเวลาที่ปล่อยให้ตัวอย่างดินทรุดตัว (Consolidation) ระหว่างกดน้ำหนักก่อนการกระทำแรงเฉือน มีผลต่อผลการทดสอบ ตามชนิดของดินที่ทดสอบและค่าคงตัวแรงเฉือนของดิน (ϕ , c หรือ ϕ' , c') ที่ได้ ตามหลักการแล้วดินเหนียวจะมีผลต่อระยะเวลาที่ปล่อยให้ดินทรุดตัวเพียงพอหรือไม่ก่อนการกระทำแรงเฉือน และอัตราความเร็วในการกระทำแรงเฉือนจะมีผลทำให้เกิดความดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) ในตัวอย่าง ทำให้มีผลต่อผลการทดสอบที่ได้

วิธีการทดสอบหลักมี 2 ชนิด คือ

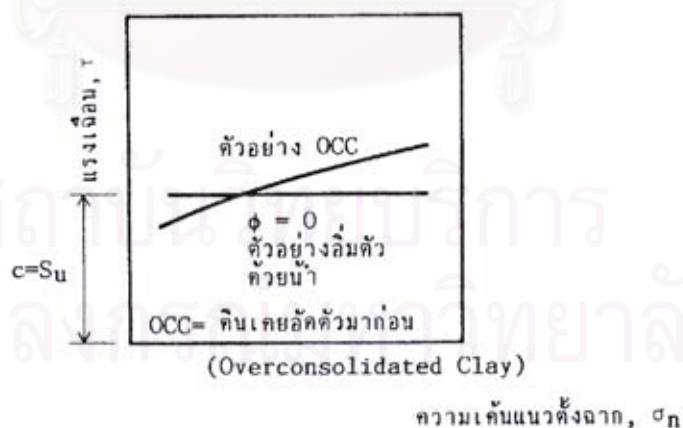
1) แบบควบคุมความเค้น (Stress Control) เพิ่มกระทำแรงเฉือนต่อตัวอย่างด้วยอัตราที่ต้องการ วิธีนี้ปฏิบัติยากโดยเฉพาะการทดสอบที่ต้องเพิ่มอัตราแรงเฉือนครั้งละน้อยๆ และใช้การทดสอบเวลานาน จึงไม่เป็นที่นิยมในทางปฏิบัติ

2) แบบควบคุมความเครียด (Strain Control) กระทำแรงเฉือนต่อตัวอย่างในอัตราความเร็วที่กำหนด แรงต้านของตัวอย่างจะวัดด้วยวงแหวนวัดแรง (Proving Ring) จนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมปฏิบัติกันทั่วไป

ชนิดของการทดสอบสามารถจัดเป็นประเภทหลักๆ ได้ คือ

1) การทดสอบไม่อัดตัวคายน้ำเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Test)

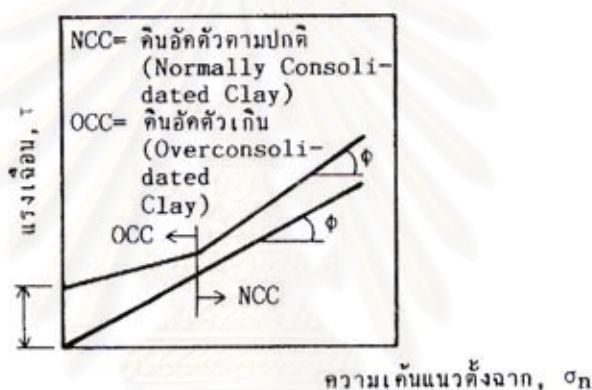
หลังจากใส่น้ำหนักแนวตั้งฉาก (Normal Load) แล้วทำการทดสอบทันทีโดยไม่ปล่อยให้ดินอัดตัวคายน้ำ สำหรับการกระทำแรงเฉือนต่อตัวอย่างดิน สามารถใช้อัตราความเร็วได้พอสมควร ประมาณ 1 – 2.5 มิลลิเมตรต่ออนาที บางครั้งเรียกการทดสอบชนิดนี้ว่าการทดสอบแบบเร็ว (Quick Test) ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลการทดสอบไม่อัดตัวคายน้ำเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ในตัวอย่างดินเหนียว

2) การทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Consolidated Undrained Test)

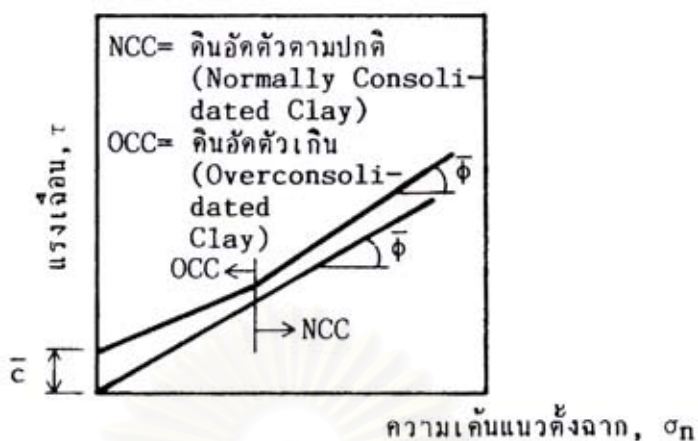
เมื่อเพิ่มน้ำหนักดันทั้งฉากแล้ว ทิ้งไว้ให้ความดันน้ำคายตัวออกจนหมด (หยุดการทรุดตัว) แล้วจึงกระทำแรงเฉือนตัวอย่างด้วยอัตราที่เร็ว จะมีความดันน้ำเกิดขึ้นในระหว่างทดสอบเนื่องจากน้ำระบายออกจากตัวอย่างดินไม่ทัน แต่การทดสอบชนิดนี้ก็ไม่สามารถจะควบคุมให้ตัวอย่างดินผิวกความดันน้ำไว้ได้ทั้งหมดเลยทีเดียว ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลการทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ในตัวอย่างดินเหนียว

3) การทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำเฉือนแบบระบายน้ำ (Consolidated Drained Test)

หลังจากเพิ่มน้ำหนักในแนวตั้งฉากและทิ้งไว้ให้ความดันน้ำคายตัวออกหมดแล้ว จึงเริ่มกระทำแรงเฉือนตัวอย่าง อัตราการกระทำแรงเฉือนต่อตัวอย่างต้องใช้อัตราช้ามากพอที่จะไม่เกิดความดันน้ำในระหว่างการกระทำแรงเฉือนตัวอย่าง โดยอัตราความเร็วที่ใช้ควรอยู่ระหว่าง 0.0025 ถึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว ASTM D3080 ได้แนะนำสมการสำหรับหาเวลาในการเฉือนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ดินเกิดการวิบัติ ดังแสดงในสมการที่ (2.6) และ (2.7) จากนั้นหาอัตราเร็วในการเฉือนได้ตามสมการที่ (2.8) สำหรับตัวอย่างผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ผลการทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำเฉือนแบบระบายน้ำ ในตัวอย่างดินเหนียว

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

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

โดยที่ t_f = เวลาที่ดินจะเกิดการวิบัติ, นาที

t_{50} = เวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ 50 %, นาที

t_{90} = เวลาที่เกิดการอัดตัวคายน้ำ 90 %, นาที

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

โดยที่ v = อัตราเร็วในการเฉือน, มิลลิเมตรต่อนาที

d_f = ระยะการเฉือนในแนวราบที่คาดว่าดินจะเกิดการวิบัติ, มิลลิเมตร

2.2.5 ค่าที่วัดและการแสดงผล

การทดสอบ Direct Shear จะวัดค่าแรงต้านของตัวอย่างต่อแรงเฉือนที่กระทำแล้ว คำนวณเป็นค่าแรงเฉือน (Shear Strength) ของดิน โดยปกติจะเขียนจุดค่าแรงเฉือน (แกนตั้ง) ต่อค่าระยะการเฉือน (Shear Displacement) การทดสอบยังต้องอ่านค่าการทรุดตัวหรือขยายตัวของตัวอย่างระหว่างการกระทำแรงเฉือนด้วย แล้วนำมาเขียนจุดให้ค่าการทรุดตัวอยู่ในแกนตั้งต่อค่าระยะการเฉือนในแกนนอน

2.2.6 ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบ Direct Shear

ข้อดี ได้แก่

- 1) ทำการทดสอบได้ง่าย วิธีการทดสอบไม่ซับซ้อน
- 2) สามารถทดสอบได้กับดินทุกชนิดและทุกสภาพ ทั้งดินคงสภาพและดินแปลงสภาพ
- 3) สามารถทดสอบได้กับตัวอย่างดินหลายขนาด และตัวอย่างที่ตัดแต่งได้ยาก
- 4) สามารถทดสอบหาค่ากำลังคงค้าง (Residue Strength)
- 5) ค่าผลการทดสอบได้โดยตรง

ข้อเสีย ได้แก่

- 1) แนววิบัติถูกกำหนดด้วยลักษณะของเครื่องมือ คือ แนวนอนกลางตัวอย่าง
- 2) Shear Stress และ Shear Strain แผ่กระจายไม่สม่ำเสมอในตัวอย่างดิน เนื่องจาก Progressive Failure เริ่มเกิดที่ริมตัวอย่างก่อน
- 3) ไม่สามารถวัดความดันน้ำในตัวอย่างในระหว่างกระทำแรงเฉือนได้
- 4) ไม่สามารถทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) ได้

2.3 แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

2.3.1 ชนิดของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกันระหว่างดินกับวัตถุ สามารถแยกได้เป็น 2 ชนิด โดยพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุที่สัมผัสกัน คือ

- 1) แรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction)

เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุอยู่กับที่หรือกำลังจะเคลื่อนที่ ค่าแรงเสียดทานสถิตย์เป็นค่าแรงเสียดทานที่มากที่สุดระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction Coefficient, μ_s) นั้นเป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กัเวลาของการสัมผัสกันของวัตถุ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาเพียงเล็กน้อยนับจากเริ่มสัมผัสกัน คือ ประมาณ 0.1 วินาที หลังจากนั้นเมื่อเวลาของการสัมผัสกันมากขึ้นค่า

สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตย์จะเป็นฟังก์ชันลอการิทึมของเวลาที่สัมผัส โดยมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป (Rabinowicz, 1965)

2) แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction)

เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ระหว่างกัน ค่าแรงเสียดทานจลน์จะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงเสียดทานสถิตย์เสมอ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction Coefficient, μ_k) เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่ (Sliding Speed) คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์จะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่ามากขึ้น (Rabinowicz, 1965)

2.3.2 การหาค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง

การหาค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่างๆ นั้น มีวิธีหลักๆ 2 วิธี คือ

2.3.2.1 การทดสอบในสนาม (Field Test)

การหาค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสในวิธีนี้ จะได้จากการคำนวณจากแรงต้านในการตอกเข็ม หรือการจมเคของ ที่วัดได้จากในสนาม เป็นต้น วิธีนี้มีข้อจำกัดบางประการคือ ไม่สามารถที่จะควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าและพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้ เช่น ชนิดและคุณสมบัติของดิน และสภาพพื้นผิวของวัสดุโครงสร้าง เป็นต้น

2.3.2.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory test)

สามารถศึกษาค่าแรงเสียดทานได้จากการทดสอบโดยใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ วิธีนี้สามารถกำหนดขอบเขตที่ชัดเจน โดยแปรเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ในการทดสอบได้ เพื่อที่จะหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าและพฤติกรรมของแรงเสียดทาน

เครื่องมือที่นิยมใช้ในการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการปฐพี แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1) การทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Direct Shear

เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับความนิยม เพราะสามารถปฏิบัติได้ง่าย ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดบางประการทำให้เกิด Progressive Failure ที่ตัวอย่างดินทำให้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด (Stress – Strain Relationship) ได้ และข้อจำกัดอีกประการคือ ไม่สามารถวัดแยกการเคลื่อนที่ในแนวเฉือน (Shear Displacement) ว่าเป็นการเคลื่อนที่เนื่องจากการไถล (Sliding Displacement) หรือการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนในตัวอย่างดิน (Displacement due to Shear Deformation)

2) การทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Simple Shear

การทดสอบชนิดนี้สามารถกำจัดข้อจำกัดบางประการที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบ Direct Shear ได้ และสามารถวัดแยกการเคลื่อนที่ในแนวเฉือนออกเป็นการเคลื่อนที่เนื่องจากการไถล (Sliding Displacement) และการเคลื่อนที่เนื่องจากการเฉือนในตัวอย่างดิน (Displacement due to Shear Deformation) แต่วิธีการทดสอบนี้ค่อนข้างปฏิบัติได้ยาก

3) การทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Ring Torsion

เป็นการทดสอบด้วยการกระทำแรงบิด (Torque) ให้ตัวอย่างดินวิบัติในรูปวงแหวน วิธีนี้ได้รูปแบบการทดสอบในลักษณะที่ตัวอย่างดินจะยังคงมีพื้นที่สัมผัสคงที่ตลอดเวลา การทดสอบชนิดนี้สามารถกำจัดข้อจำกัดบางประการที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Direct Shear ได้เช่นกัน แต่มีข้อเสียที่วิธีการทดสอบนี้มีความซับซ้อนในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินและขั้นตอนระหว่างทำการทดสอบ

ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$f = c_a + \sigma_n \tan \delta \quad (2.1)$$

โดยที่ f = หน่วยแรงเสียดทาน, ksc

c_a = Adhesion, ksc

σ_n = หน่วยแรงตั้งฉาก, ksc

δ = Angle of Skin Friction, degree

2.4 การลดแรงเสียดทาน

การลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสสามารถทำได้โดยการนำสารหล่อลื่น (Lubricants) มาใช้ในบริเวณผิวสัมผัสของวัตถุ สารหล่อลื่นจะทำหน้าที่ ดังนี้

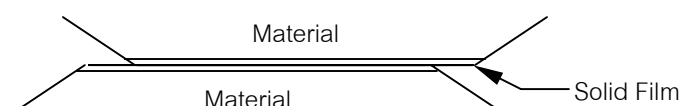
- 1) ลดขนาดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น
- 2) ลดขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุ
- 3) ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัส
- 4) ลดอุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัส

สารหล่อลื่นที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ประเภทหลัก (Rabinowicz, 1965) คือ

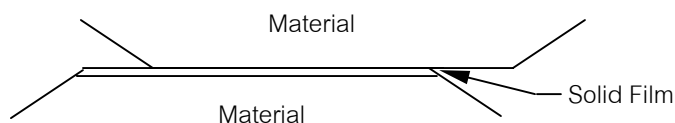
- 1) Solid Film Lubrication
- 2) Fluid Lubrication

2.4.1 Solid Film Lubrication

เกิดจากชั้นของแข็งบางๆ แทรกอยู่ระหว่างกลางของผิวสัมผัส โดยทั่วไปแล้วลักษณะพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากความแข็งแรงของชั้นฟิล์ม ดังนั้นชั้นของ Solid Film ที่ใช้จะต้องมีความแข็งแรงไม่มาก เพราะถ้ากรณีชั้นของ Solid Film มีความแข็งแรงมาก เมื่อเกิดการเลื่อนไถลจะทำให้เกิดการที่เฉือนขึ้นที่เนื้อวัตถุ ไม่เกิดการเฉือนในชั้น Solid Film ซึ่งไม่มีประโยชน์ในการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสเลย ถ้ากรณีที่ Solid Film มีความแข็งแรงไม่มาก กรณีนี้จะมีผลต่อพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุ คือ เมื่อเกิดการเลื่อนไถลจะทำให้เกิดการเฉือนขึ้นที่ชั้นของ Solid Film ดังแสดงในรูป 2.12 หรือจะเกิดการเฉือนที่บริเวณผิวของ Solid Film กับผิวของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

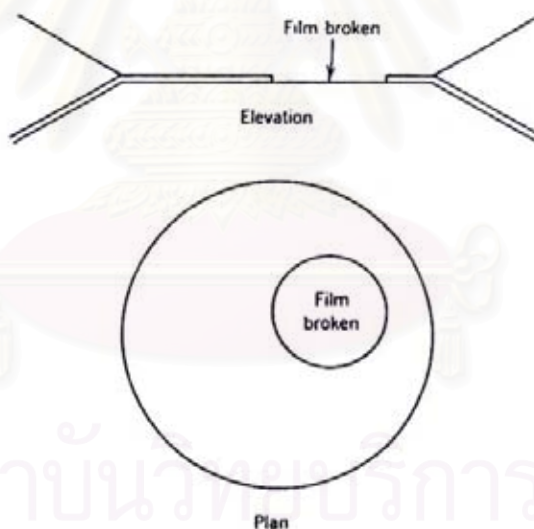


รูปที่ 2.12 การเฉือนเกิดที่บริเวณชั้น Solid Film (Rabinowicz, 1965)



รูปที่ 2.13 การฉีกเกิดบริเวณผิวของชั้น Solid Film กับผิววัตถุ (Rabinowicz, 1965)

2.4.2 Fluid Lubrication หรือ Boundary Lubrication เกิดจากชั้นฟิล์มของของเหลวหรือก๊าซ แทรกตัวอยู่ระหว่างผิวของวัตถุ ซึ่งในการพิจารณาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะพิจารณาจากการแทรกซึมของชั้นของเหลว โดยแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีชั้นฟิล์มของเหลวแทรกซึมเพียงจุดเดียว (Single Penetration) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และกรณีชั้นฟิล์มของเหลวแทรกซึมหลายจุด (Multiple Penetration)



รูปที่ 2.14 การซึมของชั้นของเหลวบริเวณผิวสัมผัสของวัตถุ (Rabinowicz, 1965)

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีต ได้มีผู้ทำการศึกษาและทำการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุต่างๆ ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ดังนี้

- Potyondy, J.G. (1961) ได้ทำการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างทราย ดินเหนียว และดินเหนียวผสมทราย กับเหล็ก ไม้ และคอนกรีต โดยแบ่งเป็นผิวหยาบและเรียบ ด้วยเครื่องมือ Direct Shear แบบ Shear Box type จากผลการทดสอบพบว่า ค่าแรงเสียดทานขึ้นกับ 4 ปัจจัยหลัก คือ ปริมาณความชื้นในดิน, ความขรุขระของพื้นผิววัสดุ, ส่วนประกอบของดิน และปริมาณของหน่วยแรงตั้งฉาก และผลที่ได้จากการทดสอบของดินเหนียวผสมทราย จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าของดินเหนียวและทราย

- Littleton, I. (1976) ได้ทำการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียว (2 ชนิด) กับเหล็กผิวเรียบ ภายใต้สภาพ Quick Test, Consolidated Quick Test และ Consolidated Slow Test โดยใช้เครื่องมือ Direct Shear แบบ Shear Box Type จากผลการทดสอบพบว่า ทั้งในสภาพระบายน้ำและสภาพไม่ระบายน้ำ ในช่วงเริ่มต้นค่าแรงเสียดทานของดินเหนียวกับเหล็กจะมีค่าสูงกว่ากำลังเฉือนของดินเหนียว (กราฟมีความชันกว่า)

- Goh, A.T.C. and Donald, I.B. (1984) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างทราย, ดินเหนียวปนทราย และทรายปนดินเหนียว กับคอนกรีต (ผิวหยาบและผิวเรียบ) โดยใช้เครื่องมือ Direct Shear แบบ NGI Simple Shear Apparatus จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Deformation สามารถ Normalized ด้วยหน่วยแรงในแนวตั้งได้ และค่าความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสขึ้นกับสภาพพื้นผิวของคอนกรีตและปริมาณดินเหนียวในดิน

- Tsubakihara, Y. and Kishida, H. (1993) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก (ที่สภาพพื้นผิวต่างๆ) โดยใช้เครื่องมือ Direct Shear แบบ Shear Box Type และแบบ Simple Shear Type ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเหล็กมีค่าความขรุขระ (Surface Roughness) น้อยกว่าค่าวิกฤต (เรียกว่า) จะเกิดการไถลขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก แต่ถ้าเหล็กมีค่าความขรุขระมากกว่าค่าวิกฤต จะเกิดการวิบัติภายในตัวอย่างดิน ดังนั้น แรงต้านการเสียดทานสูงสุดก็คือค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวนั่นเอง ความเร็วของการเฉือนจะมีอิทธิพลต่อแรงต้านการเสียดทานสูงสุด แต่มีอิทธิพลไม่มากต่อเหล็กที่มีพื้นผิวเรียบและต่อกำลังคงค้าง

- Tsubakihara, Y.; Kishida, H. and Nishiyama T. (1993) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวและดินเหนียวผสมทราย กับเหล็กที่มีสภาพพื้นผิวต่างๆ โดยใช้

เครื่องมือ Direct Shear แบบ Simple Shear Type ภายใต้สภาพ Consolidated Drained Test จากผลการทดสอบพบว่า ค่าวิกฤตของค่าความขรุขระจะเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าเกิดการไถลที่ผิวสัมผัสหรือไม่ โดยค่าวิกฤตจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของทรายที่เพิ่มขึ้น และผลการศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานสามารถแบ่งการวิบัติออกเป็น 3 ชนิด คือ การไถลที่ผิวสัมผัส การวิบัติจากแรงเฉือนในดิน และแบบผสมที่เกิดการไถลที่ผิวสัมผัสและแรงเฉือนในดินพร้อมกัน โดยขึ้นกับชนิดของดินและสภาพความขรุขระที่ผิวสัมผัส

- Lemos, L.J.L. and Vaughan, P.R. (2000) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวที่แปรเปลี่ยนสภาพพลาสติกซีดี กับแก้ว เหล็ก และสแตนเลส ที่ความขรุขระต่างๆ ด้วยเครื่องมือ Direct Shear แบบ Ring Shear Apparatus โดยให้ความสนใจในเรื่องกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ระยะการเคลื่อนที่มากๆ (Large Displacement) และอิทธิพลของผิวสัมผัสต่อการเปลี่ยนชนิดของการเฉือน รวมถึงผลของสนิมและผลจากการเฉือนแบบเร็ว

- Subba Rao; Allam, K.S. and Robinson, R.G. (1998) ได้ทำการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างดินเม็ดละเอียด 3 ชนิด กับสแตนเลส เหล็ก และคอนกรีต (ผิวหยาบและเรียบ) โดยเครื่องมือ Direct Shear แบบ Shear Box Type ภายใต้สภาพ Consolidated Drained Test ผลการทดสอบพบว่า ค่าความเสียดทานขึ้นกับสภาพความขรุขระของพื้นผิววัสดุ, ชนิดของดิน และค่า OCR อัตราส่วนของมุมเสียดทาน (Interfacial Friction Angle) กับมุมเสียดทานภายในของดิน (Angle of Internal Friction) จะไม่ขึ้นกับค่า OCR แต่จะขึ้นกับค่าความขรุขระของผิวสัมผัส โดยจะเพิ่มตามค่าความขรุขระของผิวสัมผัส และมีค่าได้มากที่สุดเท่ากับ 1

- ชัยรัตน์ รัตติพูน (2001) ได้ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตและเหล็ก (ผิวหยาบและเรียบ) รวมทั้งศึกษาผลกระทบของสารหล่อลื่นที่มีต่อแรงเสียดทาน ด้วยเครื่องมือ Direct Shear แบบ Shear Box Type จากผลการทดสอบพบว่า ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างและค่าการหลุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวสัมผัสและขนาดของหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง และพบว่าสารหล่อลื่นจะช่วยลดขนาดของแรงเสียดทานและลดขนาดของการหลุดตัวในแนวตั้งขณะทำการเฉือนตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้าง โดยสารหล่อลื่นที่ช่วยลดแรงเสียดทานและการหลุดตัวในแนวตั้งได้มากที่สุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ดินที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมขึ้นเอง ด้วยวิธี Reconstituted เพื่อจำลองสภาพดินในสนาม โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ

1) เนื่องจากขนาดของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดใหญ่ คือ 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร ซึ่งไม่สามารถที่จะเก็บตัวอย่างดินแบบดินคงสภาพ (Undisturbed Sample) โดยใช้กระบอกบาง (Shelby Tube) ได้ จึงต้องเตรียมตัวอย่างดินขึ้นเองจากกระบอกเตรียมตัวอย่างดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

2) เพื่อให้ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ทุกการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ง่ายในการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบ

3.1.1 ที่มาของตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัย

สถานที่ที่ใช้เก็บตัวอย่างดินขึ้นมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ในบริเวณกระทรวงสาธารณสุข จังหวัดนนทบุรี โดยเก็บที่ระดับความลึกจากผิวดิน ประมาณ 1-3 เมตร ทำการเก็บตัวอย่างดินโดยใช้รถตักดินเปิดหน้าดินเป็นบริเวณกว้าง แล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างดินขึ้นมา ตัวอย่างดินที่เก็บได้จะเป็น ดินเหนียวกรุงเทพฯ แบบแปลงสภาพ (Disturbed Sample) หลังจากนั้นจะนำดินเหนียวที่เก็บได้ไปผ่านขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธี Reconstituted เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง และการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวต่อไป

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธี Reconstituted เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบ มีรายละเอียด ดังนี้

1) นำดินเหนียวแปลงสภาพ (Undisturbed Sample) ที่เก็บได้จากในสนาม มาทำการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

- 2) ทำการบดดินที่ผ่านการอบแห้งมาแล้ว ด้วยเครื่อง Los Angeles Test โดยในหนึ่งโมใส่ลูกเหล็กประมาณ 10 ลูก จำนวนรอบที่ใช้ในการหมุนไม่ประมาณ 1,500 รอบต่อโม
- 3) หลังจากนั้นนำดินที่ผ่านการบดแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200 ซึ่งมีขนาดช่องลอดที่ 0.075 มิลลิเมตร ตามขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐานอเมริกัน (ASTM E-11)
- 4) ทำการผสมดินที่ร้อนผ่านตะแกรงกับน้ำกลั่น ให้ได้ปริมาณความชื้นในดิน (Water Content) มากกว่าค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ของดินประมาณ 1.2 เท่า ด้วยเครื่องกวนดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 กวนผสมให้เข้ากัน โดยค่อยๆ ใส่ปริมาณดินและน้ำเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนครบตามปริมาณที่ตวงไว้ ขณะทำการกวนควรใช้มีดปาดดิน (Spatula) ปาดดินที่ติดอยู่บริเวณใบกวนและรอบภาชนะกวนดินออกเป็นระยะๆ กวนทิ้งไว้จนกระทั่งดินกับน้ำรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งใช้เวลาประมาณ 45 นาที



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการกวนดิน



รูปที่ 3.2 ดินเหลว (Slurry) ที่ได้ภายหลังการกวน

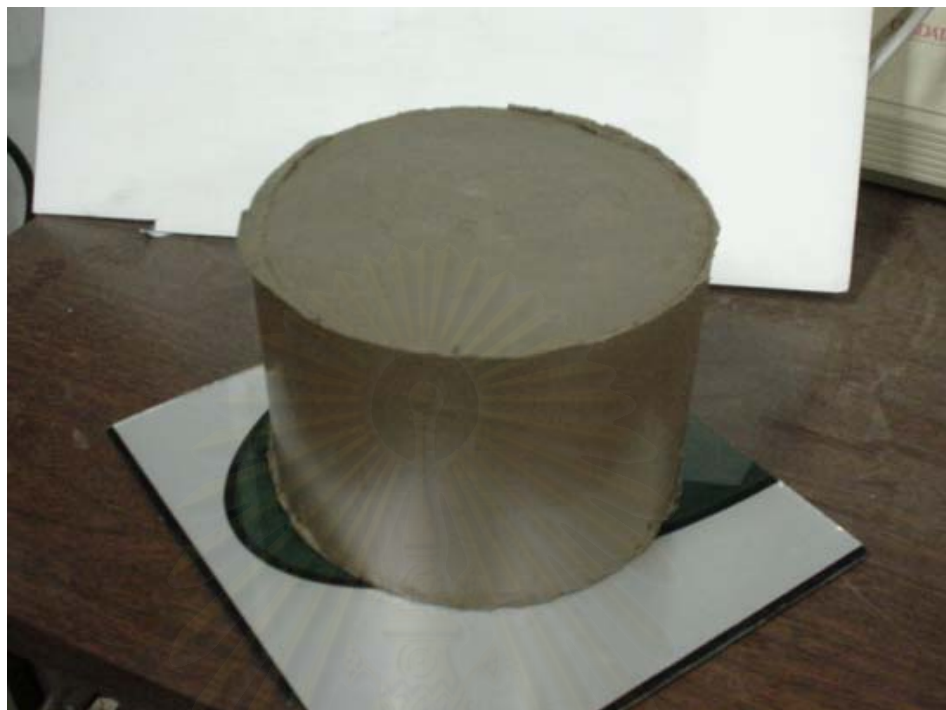
- 5) ทาซิลิโคนกรีสบางๆ รอบกระบอกลเตรียมตัวอย่างดินเพื่อลดแรงเสียดทานรอบกระบอกล จากนั้นวางกระบอกลเตรียมตัวอย่างดินบนฐานรอง ให้ขอบกระบอกลเตรียมตัวอย่างดินอยู่ในร่องของฐานรอง
- 6) ตักดินเหลว (Slurry) ที่ได้จากการกวนใส่ในกระบอกลเตรียมตัวอย่างดิน โดยมีกระดาษกรองและแผ่น Geotextile ปิดด้านบนและด้านล่างของดินเหลว เพื่อให้ น้ำไหลผ่านออกจากดินได้ โดยให้แผ่นกระดาษกรองอยู่ด้านในติดกับดินเหลว แล้วจึงปิดทับด้วยแผ่น Geotextile
- 7) ประกอบแกนกดตัวอย่างดิน, เหล็กแผ่นบน และชุดวางน้ำหนักกดทับเข้ากับกระบอกลเตรียมตัวอย่างดิน แล้วจึงใส่น้ำหนักบรรทุกกดทับโดยค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักกดทับเป็นลำดับขั้น (Step of Loading) เพื่อป้องกันการทะลักของดิน จนกระทั่งถึงน้ำหนักกดทับที่ 1 ksc ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- 8) ปล่อยให้ตัวอย่างดินอัดตัวคายน้ำ โดยอ่านค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเทียบกับระยะเวลา จนกระทั่งตัวอย่างดินเสร็จสิ้นขบวนการอัดตัวคายน้ำ (End of Primary Consolidation) โดยสามารถดูได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการ

ทรุดตัวกับลอการิทึมของเวลาด้วยวิธี t_{50} หรือจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับรากที่สองของเวลาด้วยวิธี t_{90}

- 9) ก่อนที่จะยกก้อนน้ำหนักกดทับออก ให้ดูข้อมูลที่ไหลออกจากตัวอย่างดินซึ่งค้างอยู่ในกระบอกลอกให้หมดก่อน จากนั้นทำการดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกลอกเตรียมตัวอย่างดิน แล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างดินโดยใช้กระดาษฟอยล์ห่อ และเคลือบทับด้วยขี้ผึ้ง (Wax) รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างดินหลังจากดันออกจากกระบอกลอกเตรียมตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.3 การเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธี Reconstituted



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธี Reconstituted

3.2 วัสดุโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับดินเหนียวนั้นมี 2 ชนิด ได้แก่ คอนกรีตและเหล็ก ซึ่งมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยด้านสั้นมีความยาวเท่ากับตัวอย่างดิน ส่วนด้านยาวจะยาวกว่าความยาวของตัวอย่างดิน ดังนั้นขณะทำการฉีกพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างจะคงที่ตลอดการทดสอบ แผ่นวัสดุโครงสร้างทั้งสองชนิดแบ่งสภาพความขรุขระของพื้นผิวของแต่ละวัสดุโครงสร้างออกเป็น ผิวหยาบและผิวเรียบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด 10 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็น คอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ สำหรับการเตรียมแผ่นคอนกรีตนั้นได้ทำการเตรียมตามมาตรฐาน ASTM C 305-94 โดยมีอัตราส่วนผสมดังนี้

ปูนซีเมนต์ : ทราย : น้ำ = 1 : 2.75 : 0.485 โดยปริมาตร

ขั้นตอนในการเตรียมแผ่นคอนกรีต มีรายละเอียดดังนี้

- 1) ใส่ปูนซีเมนต์และน้ำลงในเครื่องผสมขนาดเล็ก จากนั้นทำการผสมโดยใช้อัตราเร็วในการกวน 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- 2) ใส่ทรายตามลงไปเครื่องผสมขนาดเล็ก แล้วผสมโดยใช้อัตราเร็วในการกวน 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เช่นกัน
- 3) จากนั้นใช้อัตราเร็วในการกวนเพิ่มเป็น 285 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
- 4) หยุดกวนเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที
- 5) จากนั้นทำการกวนในอัตราเร็วในการกวน 285 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
- 6) เทคอนกรีตที่ผสมได้ลงในแบบหล่อ แล้วเคาะรอบๆ แบบหล่อเพื่อให้คอนกรีตอัดแน่น ไม่เป็นโพรงเป็นรูพรุน
- 7) ทำการปาดผิวหน้าคอนกรีต สำหรับคอนกรีตผิวหยาบทำการปาดหน้าเพียงครั้งเดียว ส่วนคอนกรีตผิวเรียบต้องรอให้คอนกรีตเริ่มแข็งตัวก่อนประมาณ 30 นาที จึงค่อยโรยปูนซีเมนต์บนผิวหน้าคอนกรีต แล้วใช้เกรียงขัดผิวคอนกรีตให้เรียบ

3.2.2 แผ่นเหล็ก

แผ่นเหล็กที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 17 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็นเหล็กผิวหยาบและเหล็กผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ สำหรับการเตรียมพื้นผิวของเหล็กผิวเรียบให้ทำการไล่ให้เรียบ แล้วขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ละเอียด ส่วนเหล็กผิวหยาบใช้วิธีการไล่ขึ้นลายทแยง โดยระยะใบมีดที่ตั้งไว้ให้กินเนื้อเหล็กประมาณ 0.5 มิลลิเมตร

3.3 สารหล่อลื่นที่ใช้ในงานวิจัย

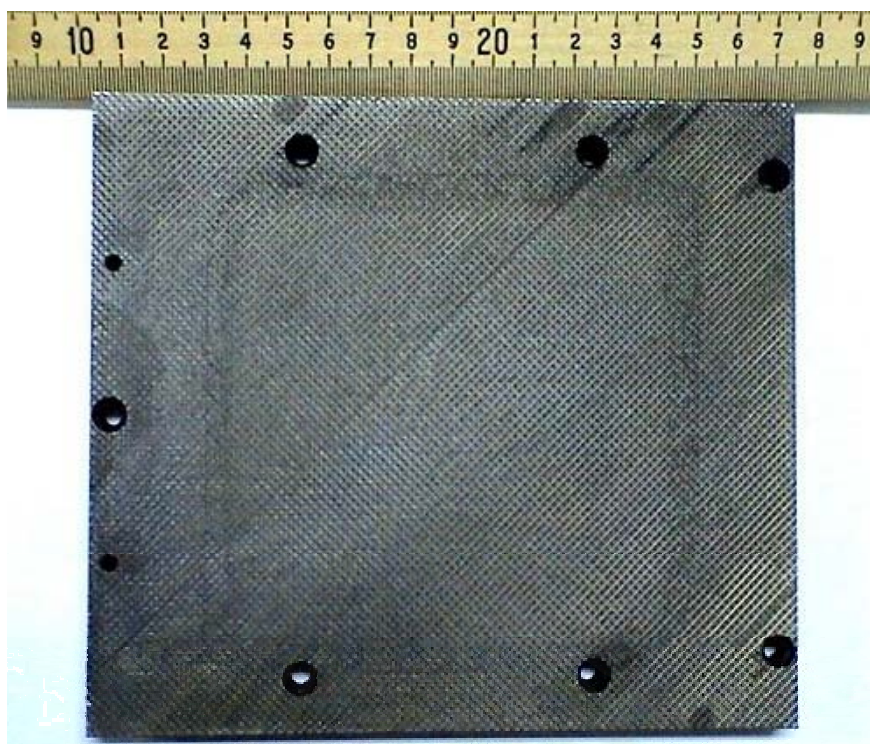
สารหล่อลื่นที่นำมาใช้ทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง คือ สารละลายเบนโทไนต์ โดยจะนำมาทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ และที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ ผงเบนโทไนต์ที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ที่ 400 %



รูปที่ 3.5 แผ่นคอนกรีตผิวหยาบ



รูปที่ 3.6 แผ่นคอนกรีตผิวเรียบ



รูปที่ 3.7 แผ่นเหล็กผิวหยาบ



รูปที่ 3.8 แผ่นเหล็กผิวเรียบ

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ มี 2 ชนิดหลักๆ คือ

1) เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธี Reconstituted ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาสำหรับเตรียมตัวอย่างดิน เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส และการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินต่อไป

2) เครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง เป็นเครื่องมือที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาให้เหมาะสมกับการศึกษาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยเฉพาะ โดยใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องมือทดสอบ Direct Shear แบบ Shear Box Type นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องมือเดียวกันนี้ หาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวได้อีก เพียงแค่ดัดแปลงกล่องใส่วัสดุโครงสร้างด้านล่างใหม่

3.4.1 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน

เครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่างดินเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง รวมทั้งการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว นั้น ใช้หลักการการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ (1-D Consolidation) ของดินเหลว โดยให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งสูงสุดที่ 1 ksc รูปที่ 3.9 แสดงรูปตัดด้านข้างของเครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องมือมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ครอบเตรียมตัวอย่างดิน เป็นครอบพลาสติกใสมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 17 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร
- 2) ฐานสำหรับรองครอบเตรียมตัวอย่างดิน
 - เป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมขนาด 22 เซนติเมตร x 22 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร โดยเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 เซนติเมตร จำนวน 12 รู เพื่อให้ระบายออกได้
 - ที่มุมทั้งสี่ด้านของแผ่นเหล็กมีเสาเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร อยู่มุมละต้นสำหรับยึดกับแผ่นเหล็กด้านบน
 - ที่ฐานของแผ่นเหล็กเจาะร่องตามขนาดของครอบเตรียมตัวอย่างดิน โดยมีความกว้างของร่องเท่ากับความหนาของครอบเตรียมตัวอย่างดินสำหรับ

วางกระบอกเตรียมตัวอย่างดิน ภายในร่องสวมยางกันรั่ว (O-Ring) เพื่อป้องกัน การไหลทะลักของดินและน้ำ

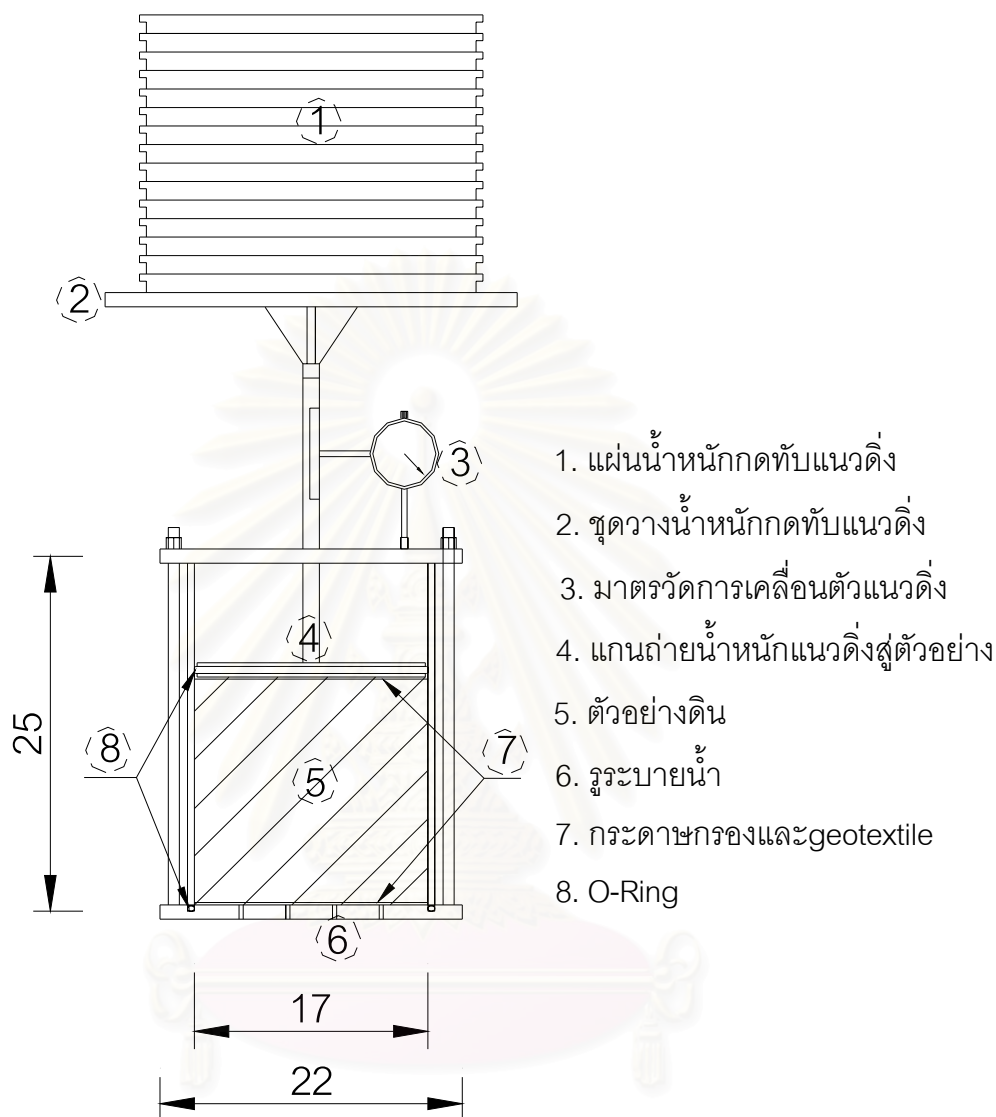
3) แผ่นเหล็กบน

- เป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมขนาด 22 เซนติเมตร x 22 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร ใช้สำหรับยึดกระบอกเตรียมตัวอย่างดินให้อยู่นิ่ง โดยเจาะร่องตามขนาดของกระบอกเตรียมตัวอย่างดินเช่นเดียวกับฐานรองกระบอก
- ที่ศูนย์กลางของแผ่นเหล็กเจาะรูขนาดเดียวกับแกนกดตัวอย่างดิน คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร เพื่อเป็นรูให้แกนกดตัวอย่างดินลอดผ่านและบังคับให้แกนกดตัวอย่างดินเคลื่อนที่ในแนวตั้ง
- ที่มุมทั้งสี่ของแผ่นเหล็กเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ในตำแหน่งเดียวกับเสาเหล็กเพื่อใช้สำหรับยึดเข้ากับเสาเหล็กกลมของฐานรองกระบอกเตรียมตัวอย่างดิน

4) แกนกดตัวอย่างดิน

- เป็นแผ่นเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 16.8 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เจาะร่องตรงกลางความหนาตลอดความยาวเส้นรอบวงสำหรับสวมยางกันรั่วโดยรอบ เพื่อป้องกันดินเหลวไหลทะลักขึ้นมาระหว่างถูกน้ำหนักกดทับ
- ตรงกลางของแผ่นเหล็กกลมเชื่อมต่อกับแท่งเหล็กกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นแกนสำหรับถ่ายแรงต่อจากชุดวางน้ำหนักกดทับ

5) ชุดวางน้ำหนักกดทับ เป็นแผ่นเหล็กขนาด 30 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร สำหรับวางก้อนน้ำหนักกดทับ ในงานวิจัยนี้ใช้ก้อนน้ำหนักประมาณ 227 กิโลกรัม หรือเท่ากับหน่วยแรงกดทับที่ 1 ksc ที่กลางแผ่นเชื่อมติดกับท่อเหล็กกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร สำหรับสวมต่อเข้ากับแกนกดตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.9 รูปตัดเครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน

3.4.2 เครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

เครื่องมือสำหรับทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องมือที่ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นเอง ดัดแปลงจากเครื่องมือทดสอบ Direct Shear ใช้หลักการที่ว่า เกิดการเฉือนขึ้นในแนวราบที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง โดยให้ส่วนล่างเป็นแผ่นวัสดุโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนที่จะเคลื่อนที่ ส่วนด้านบนจะเป็นกล่องสำหรับใส่ตัวอย่างดินซึ่งจะถูกยึดให้อยู่หนึ่งกับที่ รูปที่ 3.10 – 3.12 เป็นรูปแบบร่างแสดง

รายละเอียดต่างๆ ของเครื่องมือทดสอบ รูปที่ 3.13 และ 3.14 เป็นรูปภาพถ่ายของเครื่องมือทดสอบนี้ รายละเอียดเกี่ยวกับส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง มีดังนี้

1) โครงเฟรมหลัก

- ประกอบด้วยแผ่นเหล็กขนาด 40 เซนติเมตร x 40 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ต่อกันด้วยเสาเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร จำนวน 4 ต้น ด้านข้างของโครงเฟรมหลักจะต่อกับแผ่นฐานเหล็กซึ่งรองรับชุดมอเตอร์อยู่
- ที่ตรงกลางของแผ่นเหล็กแผ่นล่างซึ่งตรงกับตำแหน่งวางรถไฟใส่แผ่นวัสดุโครงสร้าง ทำการเจาะร่องตามแนวยาว 2 ร่อง ยาวประมาณ 35 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 8 เซนติเมตร โดยให้ร่องกว้าง 1 เซนติเมตร ลึก 0.5 เซนติเมตร เพื่อไว้เป็นรางสำหรับให้รถไฟใส่แผ่นวัสดุโครงสร้างวิ่งไปมาได้
- ที่ด้านข้างของรางทั้งสองด้านมีเสาเหล็กกลมเล็กๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร ด้านละ 2 ต้น รวมเป็น 4 ต้น สำหรับยึดกับเหล็กปีกซึ่งจะประกอบเข้ากับกล่องใส่ตัวอย่างดินอีกที
- ด้านบนของโครงเฟรมหลักจะประกอบเข้ากับคานงัด (Lever Arm) ซึ่งเป็นคานเหล็กขนาด 110 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร x 1.5 เซนติเมตร มีหน้าที่สำหรับให้หน่วยแรงในแนวตั้งกับตัวอย่างดินด้วยหลักการโมเมนต์ โดยที่ปลายคานจะมีที่สำหรับถ่วงก้อนน้ำหนัก สำหรับอัตราส่วนแขนโมเมนต์ (Moment Arm) ระหว่างจุดที่ถ่วงน้ำหนักกับจุดที่ต่อกับแกนกดตัวอย่างดิน เท่ากับ 1 ต่อ 10

2) ชุดรถสำหรับใส่แผ่นวัสดุโครงสร้าง

- เป็นแผ่นเหล็กขนาด 17 เซนติเมตร x 15 เซนติเมตร x 3 เซนติเมตร ด้านล่างเจาะร่องตามแนวยาวของรถขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ลึก 0.5 เซนติเมตร จำนวน 2 ร่อง แต่ละร่องห่างกัน 8 เซนติเมตร ร่องดังกล่าวมีไว้สำหรับใส่ลูกเหล็กกลมขนาด 0.9 เซนติเมตร ร่องละ 10 ลูก เพื่อให้รถไฟใส่แผ่นวัสดุทดสอบสามารถเคลื่อนที่ในแนวราบเป็นเส้นตรงตามแนวของร่องได้ โดยสามารถ

ลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลูกเหล็กกับรางได้ ด้วยการหยอดน้ำมันหล่อลื่นลงไป

- สำหรับด้านบนของรถ จะนำวัสดุโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบมาประกอบเข้ากันกับตัวรถ โดยถ้าวัสดุโครงสร้างที่ใช้ทดสอบเป็นแผ่นเหล็กนั้นจะสามารถทำการประกอบแผ่นเหล็กเข้ากับด้านบนของตัวรถด้วยสกรูยึดได้เลย แต่ถ้าวัสดุโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบเป็นคอนกรีตจะต้องใช้แผ่นเหล็กขนาด 17 เซนติเมตร x 2.5 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร จำนวน 2 ท่อน และขนาด 10 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร จำนวน 2 ท่อน มาวางประกอบเข้ากับด้านบนรถด้วยสกรูยึด เพื่อทำหน้าที่ยึดโดยรอบแผ่นคอนกรีตให้อยู่นิ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
 - ที่ด้านปลายของรถส่วนที่จะต่อกับวงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ซึ่งต่อเข้ากับชุดมอเตอร์อีกทีนั้น จะประกอบแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมขนาด 10 เซนติเมตร x 3 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร ซ้อนทับขึ้นมาต่อจากแผ่นเหล็กขนาด 10 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร ที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อก่อนหน้านี้อีกที สำหรับทำหน้าที่ถ่ายแรงโดยให้แนวที่วัดแรงตรงกับแนวเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโมเมนต์ซึ่งจะทำให้แรงที่วัดได้จากวงแหวนวัดแรงไม่ตรงกับแรงที่เกิดขึ้นจริง
- 3) กล่องใส่ตัวอย่างดินในการทดสอบ เป็นกล่องเหล็กสี่เหลี่ยมกลวงเคลือบผิวด้วยโครเมียม ขนาด 12 เซนติเมตร x 12 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร มีความหนา 1 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่ด้านในเท่ากับ 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร ข้างกล่องด้านนอกเจาะร่องตามแนวยาวของกล่อง 2 ด้าน สำหรับประกอบเข้ากับเหล็กปีก ขนาด 10 เซนติเมตร x 7 เซนติเมตร x 1.5 เซนติเมตร ทั้งสองด้านเหล็กปีกจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับกล่องใส่ตัวอย่างดิน โดยที่แผ่นเหล็กปีกแต่ละแผ่นจะยึดเข้ากับเสาเหล็กกลมที่ซึ่งยึดกับแผ่นพื้นโครงเฟรมหลัก เพื่อไม่ให้กล่องใส่ตัวอย่างดินเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการทดสอบ
- 4) แผ่นเหล็กกดตัวอย่าง มีพื้นที่หน้าตัด 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับแกนกดตัวอย่างดินซึ่งเป็นท่อนเหล็กกลม ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักในแนวตั้งลงสู่ตัวอย่างดินอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน

ที่แผ่นกดตัวอย่างดินมีการเจาะรูขนาด 0.2 เซนติเมตร จำนวน 20 รู เพื่อใช้เป็นทางให้น้ำเข้าออกจากตัวอย่างดินได้

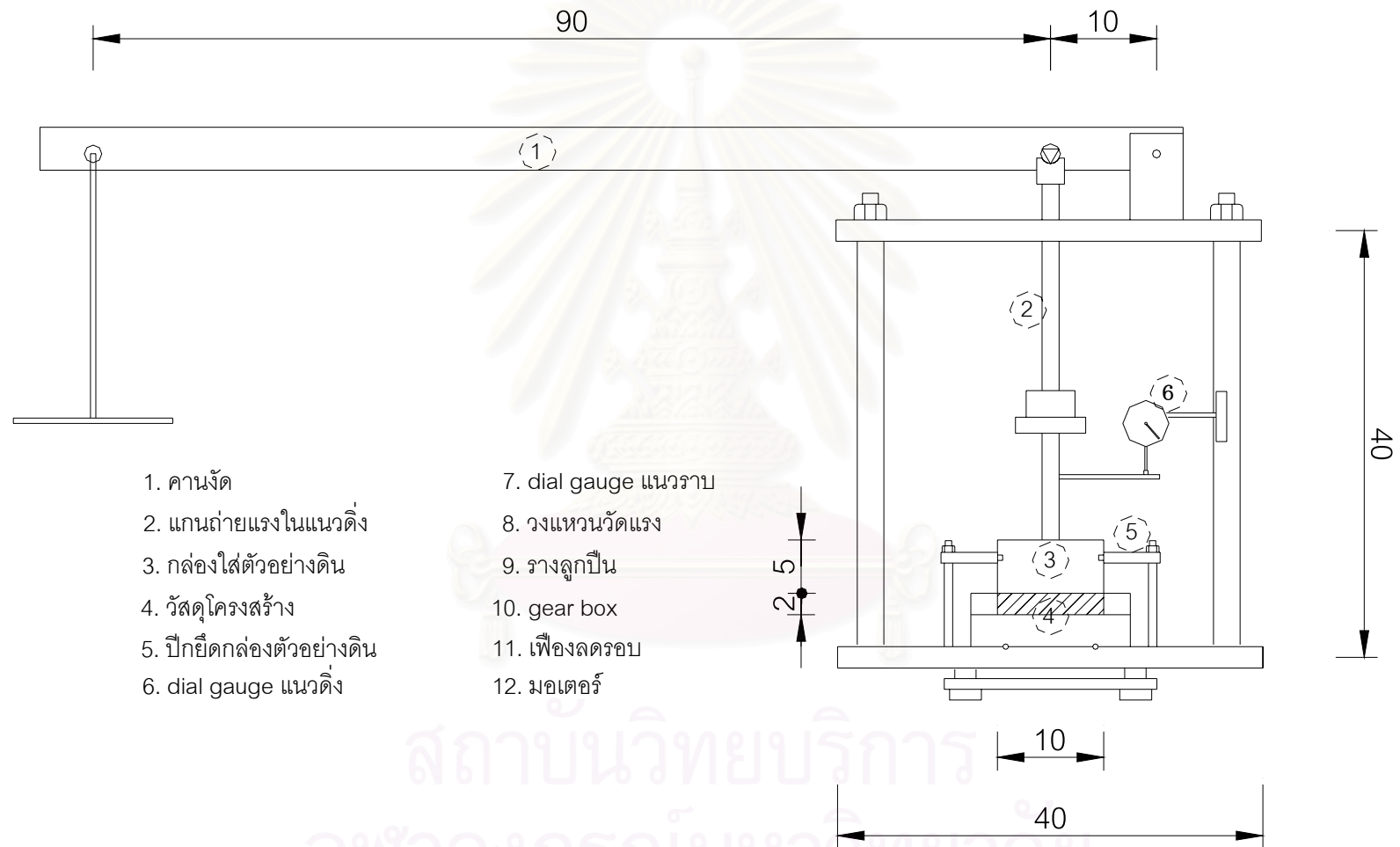
5) ระบบขับเคลื่อนในแนวราบ ประกอบด้วย มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ (Motor and Inverter), เฟืองลดรอบ และ Gear Box ต่อเข้าด้วยกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้รถใส่แผ่นวัสดุโครงสร้างเคลื่อนที่ในแนวราบได้ตามอัตราเร็วที่ต้องการและคงที่ตลอดการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ ใช้ความเร็วในการเคลื่อนเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อนาที รายละเอียดต่างๆ ของระบบการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้น มีดังนี้

- มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ (Motor and Inverter) มอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องมือทดสอบนี้ เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 220 โวลต์ ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า 4 Pole ความเร็วรอบ 1440 รอบต่อนาที สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทำหน้าที่ควบคุมและปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์
- เฟืองลดรอบ เกียร์ที่ใช้เป็นแบบ Worm Gear มีอัตราการลดรอบที่ 60 : 1 ทำหน้าที่ลดความเร็วรอบจากมอเตอร์ สำหรับการต่อ Worm Gear เข้ากับมอเตอร์ทำได้โดยให้ขั้วต่อแกนหมุนของมอเตอร์กับแกนหมุนของ Worm Gear เข้าด้วยกัน
- ชุดกล่องเกียร์ (Gear Box) มีหน้าที่ลดความเร็วในการหมุนที่ส่งมาจาก Worm Gear ลงอีก 40 เท่า และเปลี่ยนการหมุนให้เป็นการเคลื่อนที่ในแนวราบ ซึ่งทำให้ระบบในการทดสอบแรงเสียดทานเคลื่อนที่ในแนวราบได้ โดยให้ขั้วต่อเป็นขั้วต่อแกนหมุนของ Worm Gear กับแกนหมุนของ Gear Box เข้าด้วยกัน

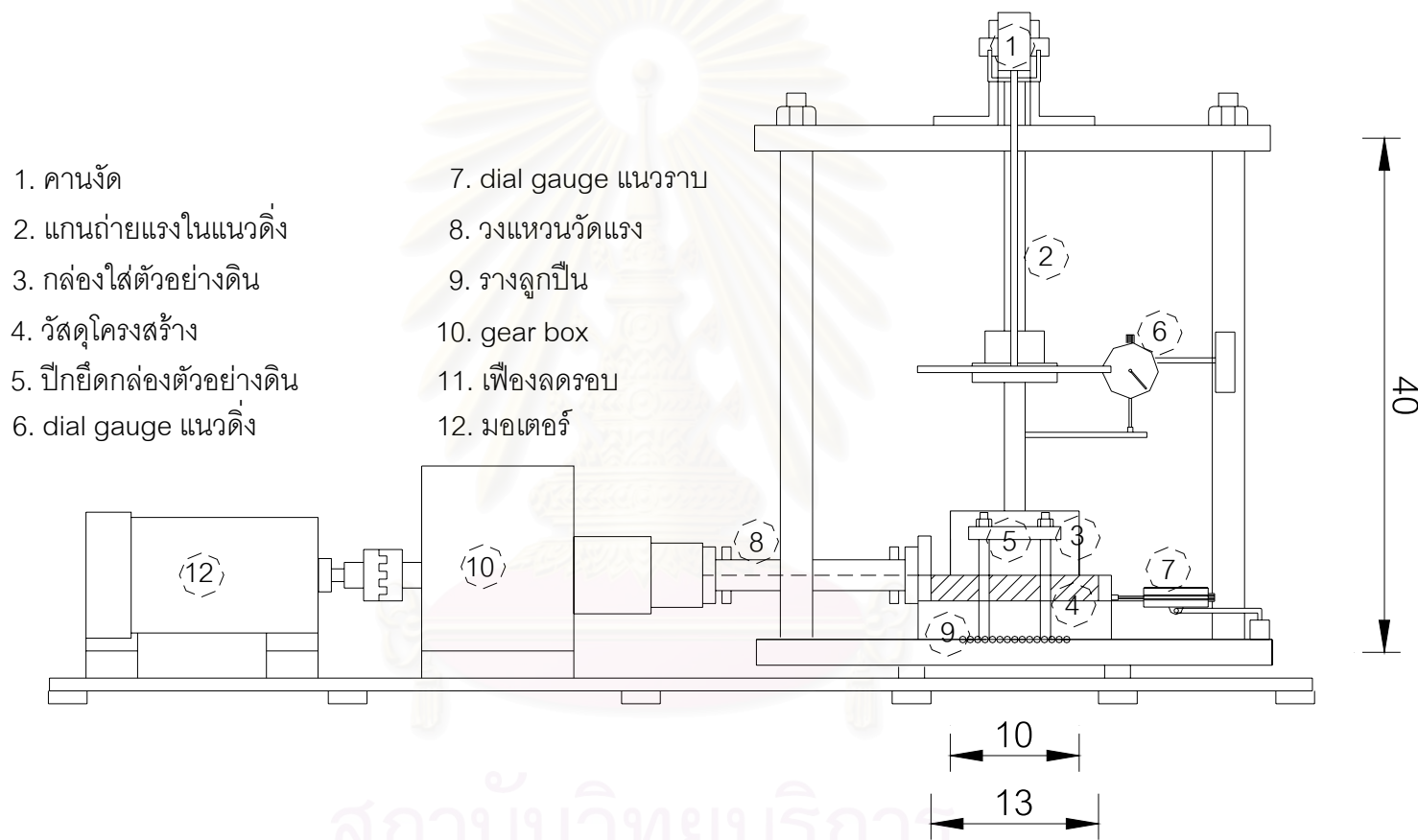
6) อุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างนี้ ได้แก่

- วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ทำหน้าที่วัดแรงเสียดทานที่กระทำให้ตัวอย่างดินเคลื่อนที่ออกจากวัสดุโครงสร้าง หรือวัดแรงเฉือนที่กระทำให้ตัวอย่างดินเคลื่อนที่ออกจากกัน โดยวงแหวนวัดแรงจะอยู่ระหว่างชุดมอเตอร์กับชุดรถใส่แผ่นวัสดุโครงสร้าง

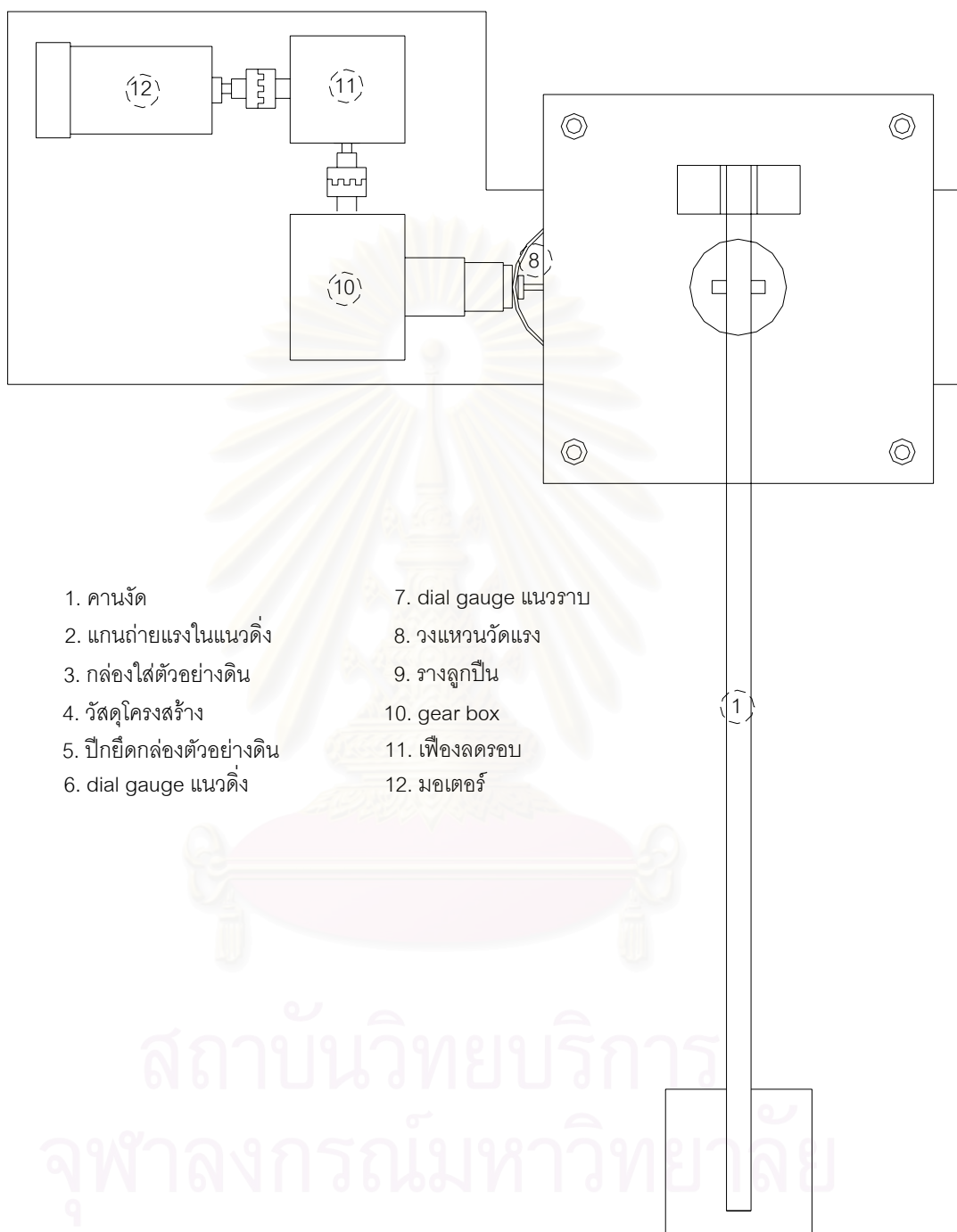
- มาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial Gauge) ทำหน้าที่วัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของรหัสแผ่นวัสดุโครงสร้าง และวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดิน โดยมาตรวัดการเคลื่อนตัวตัวแรกจะต่อเข้ากับรหัสแผ่นวัสดุโครงสร้าง ส่วนตัวหลังจะต่อเข้ากับแกนกดตัวอย่างดิน
- แผ่นหินพรุน (Porous Stone) และกระดาษกรอง (Filter Paper) ทำหน้าที่กระจายความดันน้ำให้สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตัวอย่างดิน โดยจะประกอบบนตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบทางด้านบนด้านเดียว ที่แผ่นหินพรุนเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จำนวน 2 แถวๆ ละ 5 รู แต่ละรูห่างกัน 2 เซนติเมตร สำหรับใช้เป็นรูระบายน้ำดินสอทดเพื่อศึกษาขอบเขตและเส้นทางการวิบัติ (Failure Zone and Failure Profile) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน
- แบบแต่งตัวอย่างดิน (Cutting Box) เป็นกล่องสี่เหลี่ยมกลวงมีขนาดเท่ากล่องใส่ตัวอย่างดิน แต่ขอบบางกว่า มีปลายคมด้านหนึ่ง (มุมเล็กน้อย) สำหรับกดลงบนตัวอย่างดินโดยให้รบกวน (Disturbed) ต่อตัวอย่างดินน้อยที่สุด ทำหน้าที่ช่วยในการตัดแต่งตัวอย่างให้มีขนาดพอดีกับกล่องใส่ตัวอย่างดิน
- ไม้ดันตัวอย่างดิน เป็นแผ่นไม้ขนาดเล็กกว่าแบบแต่งตัวอย่างดินเล็กน้อย ด้านบนของแผ่นไม้ต่อเข้ากับด้ามจับ ทำหน้าที่ดันตัวอย่างดินออกจากแบบแต่งตัวอย่างดินสู่กล่องใส่ตัวอย่างดิน
- ก้อนน้ำหนัก ทำหน้าที่ให้หน่วยแรงในแนวตั้งต่อตัวอย่างดิน ในงานวิจัยนี้จะให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่อตัวอย่างดินที่ 1, 2 และ 3 ksc ดังนั้นจากหลักการของแซนโม่เมนต์ (1 : 10) จะต้องใช้ก้อนน้ำหนักที่ 10, 20 และ 30 กิโลกรัม (รวมน้ำหนักของคานเหล็กแล้ว) ตามลำดับ
- นาฬิกาจับเวลา ใช้จับเวลาขณะอ่านค่าการทรุดตัวของดินในระหว่างขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation)



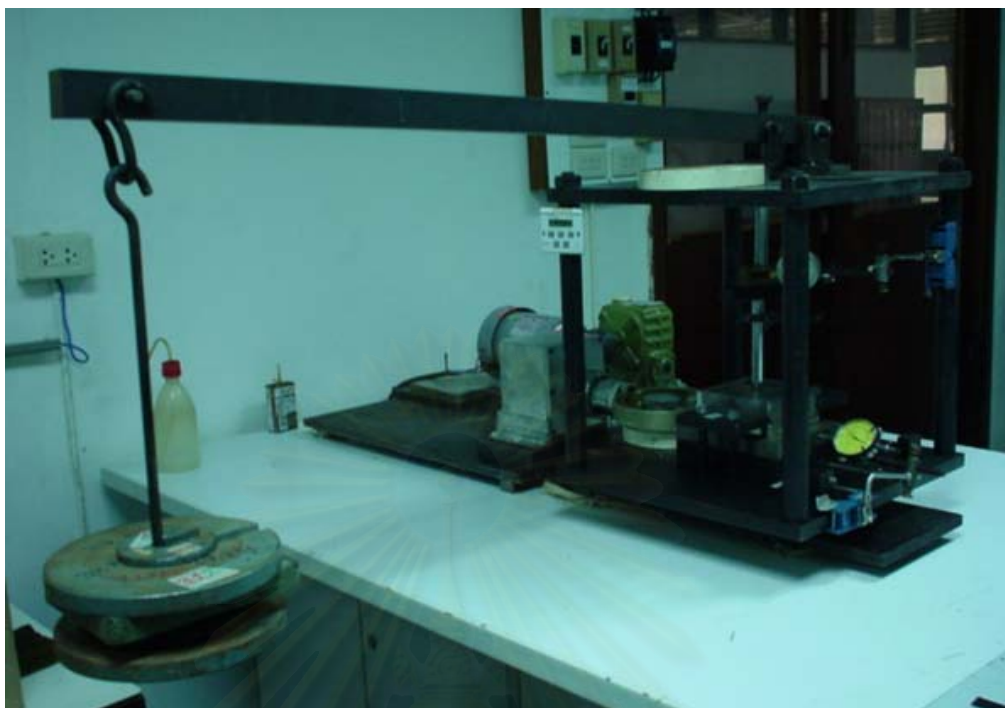
รูปที่ 3.10 รูปด้านหน้าเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส



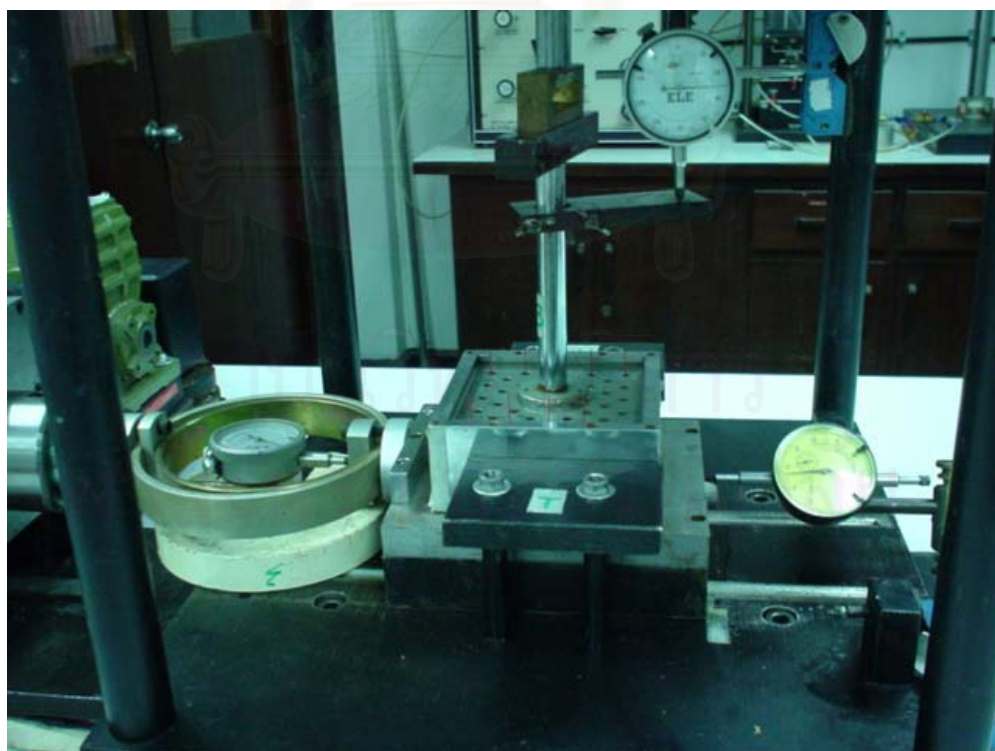
รูปที่ 3.11 รูปด้านข้างเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส



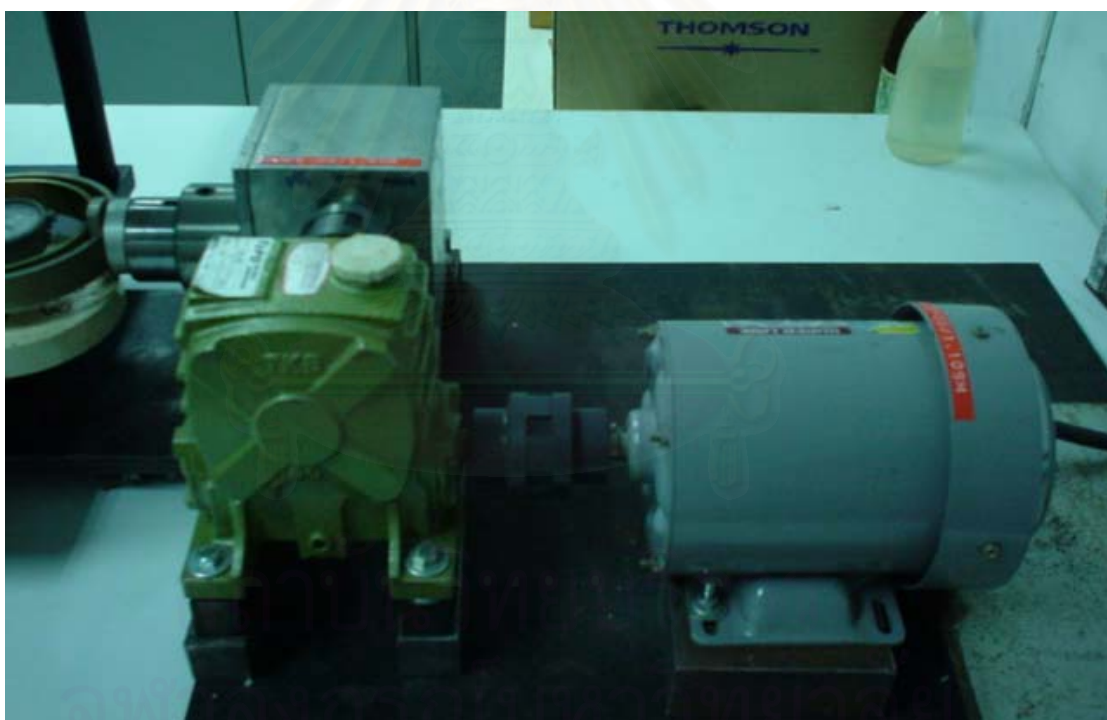
รูปที่ 3.12 รูปด้านบนบนเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.13 เครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.14 เครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.15 ชุดมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์

3.4.3 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

สำหรับการหาลำดับรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียว เพื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นเครื่องมือเดียวกันกับเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง โดยดัดแปลงส่วนของวัสดุแผ่นวัสดุโครงสร้างให้เป็นกล่องใส่ตัวอย่างดินเหนียว ด้วยการเลื่อนแผ่นเหล็กขนาด 10 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร ซึ่งเดิมใช้สำหรับยึดรอบแผ่นคอนกรีต ให้ขยับเข้ามาให้ได้ระยะห่างระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองเท่ากับ 10 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับขนาดหน้าตัดของตัวอย่างดินเหนียว จากนั้นทำการเสริมพื้นด้านล่างของกล่องใส่ตัวอย่างดินเหนียวด้วยแผ่นเหล็กขนาด 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร x 0.5 เซนติเมตร เพื่อให้ตัวอย่างดินเหนียวอยู่ในแนวราบที่ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างดินเหนียว สำหรับส่วนประกอบอื่นๆ นั้นเหมือนกับเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสทุกอย่าง

3.5 การสอบเทียบ (Calibration) เครื่องมือ

3.5.1 การสอบเทียบวงแหวนวัดแรง

วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นวงแหวนวัดแรงขนาด 5 กิโลนิวตัน ซึ่งได้ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาพอสมควร จึงควรทำการสอบเทียบวงแหวนวัดแรงนี้ขึ้นใหม่ เพื่อให้ได้ความแม่นยำในผลการทดสอบที่อ่านได้จากวงแหวนวัดแรง การสอบเทียบทำโดยการนำวงแหวนวัดแรงตัวที่ใช้ในการทดสอบไปสอบเทียบกับวงแหวนวัดแรงตัวแม่ ซึ่งเป็นวงแหวนวัดแรงที่มีสภาพใหม่ มีไว้สำหรับทำการสอบเทียบโดยเฉพาะ หลังจากสอบเทียบแล้วจะได้กราฟสอบเทียบ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรง (kN) กับจำนวนขีดที่อ่านได้ (Division)

3.5.2 การสอบเทียบน้ำหนักกดทับในแนวตั้ง

ระบบในการให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งของเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างนี้ใช้หลักการของโมเมนต์ โดยการถ่วงก้อนน้ำหนักที่คานเหล็ก การทดสอบนี้ใช้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งที่ 1, 2 และ 3 ksc และเมื่อตัวอย่างดินมีพื้นที่หน้าตัด 10 x 10 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นจะต้องมีน้ำหนักในแนวตั้งลงสู่ตัวอย่างดินเท่ากับ 100, 200 และ 300 กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อนำไปหารอัตราส่วนแกนโมเมนต์ซึ่งเท่ากับ 10 ก็จะได้ว่าต้องใช้ปริมาณก้อนน้ำหนักเท่ากับ 10, 20 และ 30 กิโลกรัม ตามลำดับ แต่เนื่องจากน้ำหนักใน

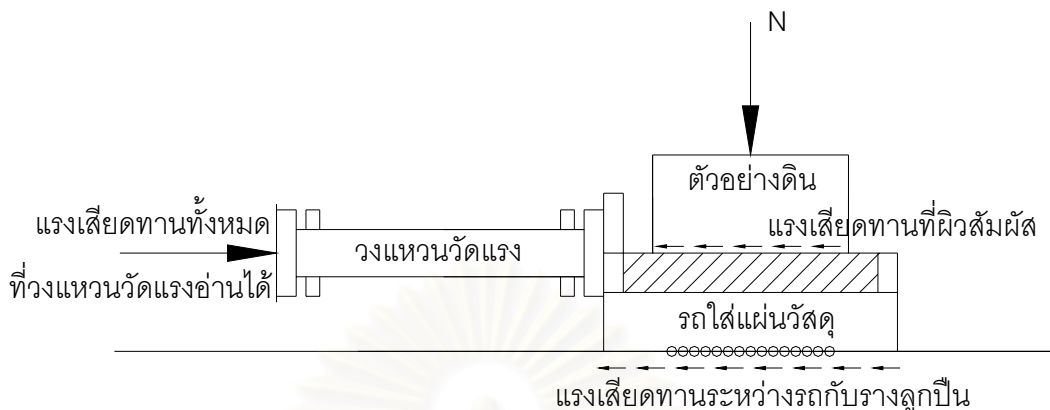
แนวตั้งที่ลงสู่ตัวอย่างดินจะมีน้ำหนักคานเหล็กเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจะต้องหักน้ำหนักคานเหล็กที่กระทำต่อตัวอย่างดิน ณ ตำแหน่งที่ต่อกับแกนกดตัวอย่างดิน ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบค่าจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity) ของคานเหล็ก แต่เพื่อให้ง่ายและได้ค่าที่แน่นอน จะใช้วงแหวนวัดแรงที่สอบเทียบมาแล้วมาวางที่ตำแหน่งเดียวกับตัวอย่างดินโดยต่อเข้ากับแกนกดตัวอย่างดินและคานเหล็ก เพื่อวัดปริมาณน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่ตัวอย่างดิน แล้วจึงทำการปรับเปลี่ยนก่อนน้ำหนักจนกระทั่งวงแหวนวัดแรงอ่านค่าได้ที่ 100, 200 และ 300 กิโลกรัม

3.5.3 การสอบเทียบอัตราเร็วในการเฉือน

ระบบในการขับเคลื่อนในแนวราบนั้นใช้ระบบของมอเตอร์ต่อเข้ากับชุดเกียร์โดยความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจะต้องทำการตั้งค่าความถี่ค่าหนึ่งที่อินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้อัตราความเร็วในแนวราบที่ต้องการและคงที่ตลอดการทดสอบ วิธีการหาค่าความถี่ทำได้โดยการนำมาตรวจวัดการเคลื่อนที่ในแนวราบมาต่อเข้ากับแกนซึ่งเคลื่อนที่เข้าออกจากชุด Gear Box จากนั้นเปิดเครื่องแล้วทำการวัดระยะทางที่เคลื่อนที่ได้พร้อมจับเวลา ปรับเปลี่ยนค่าความถี่จนกระทั่งได้อัตราเร็วที่ต้องการ สำหรับการทดสอบนี้ต้องการอัตราเร็วในการเฉือนที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาที สอบเทียบหาค่าความถี่ได้ที่ 44.5 Hz

3.5.4 การสอบเทียบหาค่าแรงเสียดทานของรถไถแผ่นวัสดุโครงสร้าง

การเคลื่อนที่ของรถไถแผ่นวัสดุโครงสร้างนั้นอาศัยรางลูกปืนที่ฐานของรถเป็นตัวช่วย และเนื่องจากเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้น ตัววงแหวนวัดแรงที่ใช้ในการวัดค่าแรงเสียดทานนั้นจะต่อเข้ากับรถไถแผ่นวัสดุโครงสร้างด้านล่าง ซึ่งทำให้ค่าแรงที่อ่านได้จากวงแหวนวัดแรงนั้นจะประกอบด้วยแรงสองส่วน คือ แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างและแรงที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างรถไถแผ่นวัสดุโครงสร้างกับรางลูกปืน ดังแสดงในรูป 3.16 ดังนั้นจำเป็นจะต้องหาค่าแรงเสียดทานของรถไถแผ่นวัสดุโครงสร้างกับรางลูกปืน เพื่อนำไปหักออกจากค่าที่อ่านได้ในขณะทำการทดสอบจากวงแหวนวัดแรง จึงจะได้แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างที่แท้จริง วิธีการหาค่าแรงเสียดทานของรถไถแผ่นวัสดุโครงสร้างนั้น ก็ปฏิบัติเหมือนทำการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสเพียงแต่ไม่ต้องใส่ตัวอย่างดิน ให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งที่ 1, 2 และ 3 ksc ทำการดันให้ตัวรถเคลื่อนที่ ค่าที่อ่านได้จากวงแหวนวัดแรงก็คือ ค่าแรงเสียดทานของตัวรถไถแผ่นวัสดุโครงสร้างกับรางลูกปืนนั่นเอง



รูปที่ 3.16 ผังแรงที่กระทำต่อวงแหวนวัดแรง

3.6 ขั้นตอนในการทดสอบ

3.6.1 การทดสอบหาคคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน

การทดสอบหาคคุณสมบัติพื้นฐาน (Basic Properties) ของตัวอย่างดิน จะทำการทดสอบโดยยึดตามมาตรฐานการทดสอบของ American Society for Testing and Material (ASTM) เป็นหลัก ซึ่งจะประกอบด้วยการทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน (Water Content) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-2216
- 2) การทดสอบหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic Limit) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-4318
- 3) การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total Unit Weight) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-4253
- 4) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific Gravity) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-854
- 5) การทดสอบหาขนาดเม็ดดินด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-422 สำหรับหาการกระจายตัวของเม็ดดิน เพื่อยืนยันว่าตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธี Reconstitute นั้น มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินที่ด้านบนและด้านล่างของกระบอกเตรียมตัวอย่างดินเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

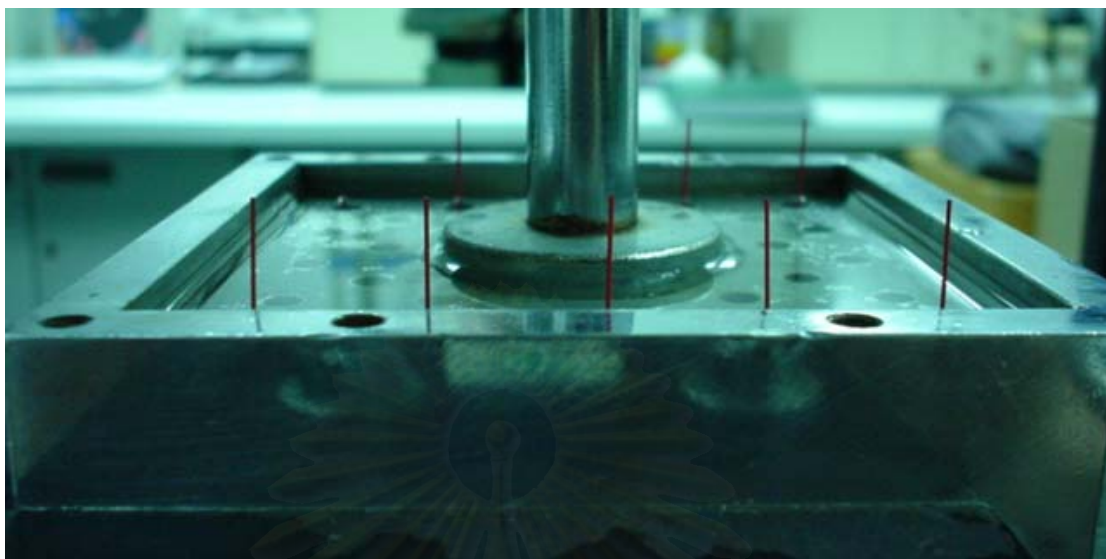
3.6.2 การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส

การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง จะทำการทดสอบโดยให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งที่ 1, 2 และ 3 ksc ใช้อัตราเร็วในการเฉือนที่ 2 มิลลิเมตร/นาที ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร สูง 2.25 เซนติเมตร มีขั้นตอนในการทดสอบ ดังนี้

- 1) ประกอบวัสดุโครงสร้างที่จะใช้ทดสอบเข้ากับรถไถวัสดุโครงสร้าง สำหรับแผ่นคอนกรีตให้แช่น้ำก่อนทำการทดสอบอย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้แผ่นคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำ ส่วนแผ่นเหล็กนั้นก่อนทำการทดสอบให้ทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นเหล็กก่อนด้วยน้ำยาอะซิโตน (Acetone) ที่ด้านล่างของรถไถหยอดน้ำมันหล่อลื่นที่วางลูกปืน เพื่อช่วยลดแรงเสียดทาน
- 2) นำตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธี Reconstituted มาตัดแต่ง โดยใช้แบบแต่งตัวอย่าง (Cutting Box) เริ่มจากทาซิลิโคนกรีส (Silicone Grease) บางๆ ด้านในโดยรอบแบบแต่งตัวอย่างดินเพื่อลดแรงเสียดทานด้านข้าง ซึ่งน้ำหนักและวัดขนาดภายในแบบแต่งตัวอย่างดิน จากนั้นทำการกดแบบแต่งตัวอย่างลงบนตัวอย่างดินซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ากล่องใส่ตัวอย่างดินในแนวตั้งที่ละน้อย แล้วใช้เลื่อยเส้นลวด (Wire Saw) ปาดดินที่อยู่ด้านข้างขอบแบบแต่งตัวอย่างดินออก ทำซ้ำในขั้นตอนที่กล่าวมาจนกระทั่งตัวอย่างดินอยู่พ้นจากขอบแบบแต่งตัวอย่างดินขึ้นมาเล็กน้อย จากนั้นนั้นใช้เลื่อยเส้นลวดตัดแต่งดินด้านบนและด้านล่างขอบแบบแต่งตัวอย่างดินให้เรียบพอดีขอบแบบ ทำความสะอาดเศษดินรอบๆ แบบแต่งตัวอย่างดินให้เรียบร้อย ซึ่งน้ำหนักแบบแต่งตัวอย่างดินพร้อมด้วยตัวอย่างดินสำหรับหาค่าหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight) ของตัวอย่างดิน สำหรับเศษดินที่เหลือจากการเตรียมตัวอย่างให้นำไปหาค่าปริมาณน้ำในดิน (Water Content)
- 3) ทำการดันตัวอย่างดินจากแบบแต่งตัวอย่างดินลงสู่กล่องใส่ตัวอย่างดินโดยใช้ไม้ดันตัวอย่างดิน จากนั้นนำกล่องใส่ตัวอย่างดินประกอบเข้ากับโครงเฟรมหลักวางกระดาษรองที่ด้านบนของตัวอย่างดินตามด้วยแผ่นหินปูนที่ตม่น้ำได้ฟองอากาศแล้ว ทำการประกอบแผ่นเหล็กกดตัวอย่างดินเข้ากับกล่องใส่

ตัวอย่างและต่อเข้ากับคานเหล็ก พร้อมติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนที่แนวตั้ง, มาตรวัดการเคลื่อนที่แนวราบ และวงแหวนวัดแรงเข้าที่

- 4) เติมน้ำกลั่นลงในกล่องตัวอย่างดินเพื่อให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ วางก้อนน้ำหนักที่ตุ้มถ่วงน้ำหนักตามหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งที่ต้องการ สำหรับการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งที่ 2 และ 3 ksc นั้น จะให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งแก่ตัวอย่างเป็นลำดับขั้น (Step of Loading) โดยเพิ่มหน่วยแรงกดทับทีละ 1 ksc เริ่มจากให้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งที่ 1 ksc ก่อน เพื่อป้องกันตัวอย่างดินทะลัก
- 5) ทำการอ่านค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินพร้อมกับระยะเวลาในการทรุดตัว
- 6) ทิ้งไว้จนกระทั่งตัวอย่างดินเสร็จสิ้นขบวนการอัดตัวคายน้ำ (End of Primary Consolidation) โดยดูจากกราฟความสัมพันธ์ของการทรุดตัวกับลอการิทึมของเวลาด้วยวิธี t_{50} หรือจากกราฟความสัมพันธ์ของการทรุดตัวกับรากที่สองของเวลาด้วยวิธี t_{90}
- 7) ใช้แท่งดินสอดัดแบบมีสี ขนาด 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะละเอียดลงในตัวอย่างดินในแนวตั้ง ตามรูระบายน้ำของแผ่นเหล็กกดตัวอย่างดิน โดยเสียบเป็น 2 แนวด้านข้างตามแนวการเฉือน แนวละ 5 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 2 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.17 เพื่อศึกษาขอบเขตการวิบัติ (Failure Zone) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดิน
- 8) ทำการเฉือนตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้าง ที่อัตราการเฉือน 2 มิลลิเมตรต่อนาที อ่านค่าแรงเสียดทานจากวงแหวนวัดแรง, ระยะเวลาการทรุดตัวหรือขยายตัวของตัวอย่างดิน และระยะเวลาการเคลื่อนที่ในแนวราบ จนกระทั่งแรงเสียดทานที่อ่านได้มีค่าคงที่หรือจนกระทั่งระยะทางในการเฉือนเท่ากับ 10 มิลลิเมตร
- 9) ถอดตัวอย่างดินออกจากกล่องใส่ตัวอย่าง แล้วใช้เลื่อยเส้นลวดและมีดปาดดิน (Spatula) ค่อยๆ ปาดดินด้านข้างตามแนวการเสียบของแท่งดินสอดัด เพื่อสังเกตลักษณะของแท่งดินสอดัดภายหลังการเฉือนว่าเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่อย่างไร



รูปที่ 3.17 เสาียบแทงดินสอในตัวอย่างดินก่อนทำการเจียน

3.6.3 การทดสอบการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยใช้สารหล่อลื่น

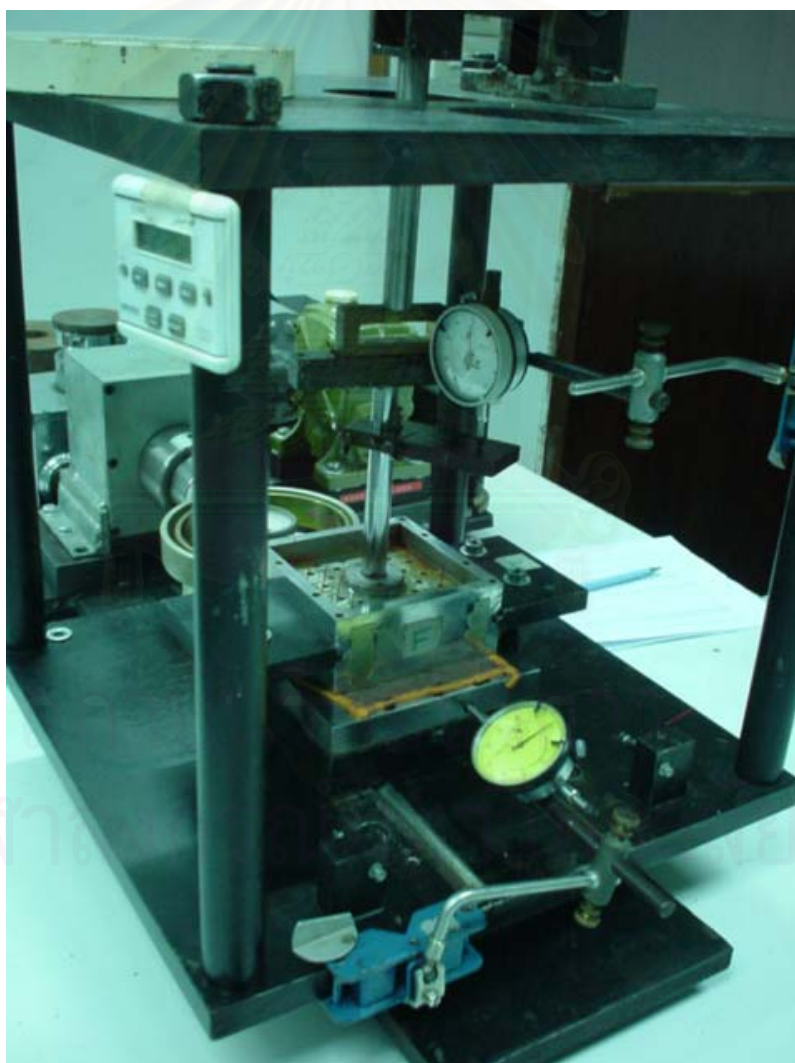
สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง คือ สารละลายเบนโทไนต์ โดยใช้เครื่องมือและวิธีการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างทุกประการ ยกเว้นเพียงแต่การเตรียมแผ่นวัสดุโครงสร้างที่จะต้องเคลือบด้วยสารหล่อลื่นซึ่งจะแตกต่างออกไป รูปที่ 3.18 แสดงการทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสด้วยสารละลายเบนโทไนต์

สำหรับวิธีการเตรียมแผ่นวัสดุโครงสร้างในการทดสอบลดแรงเสียดทานด้วยสารละลายเบนโทไนต์ มีวิธีการดังนี้

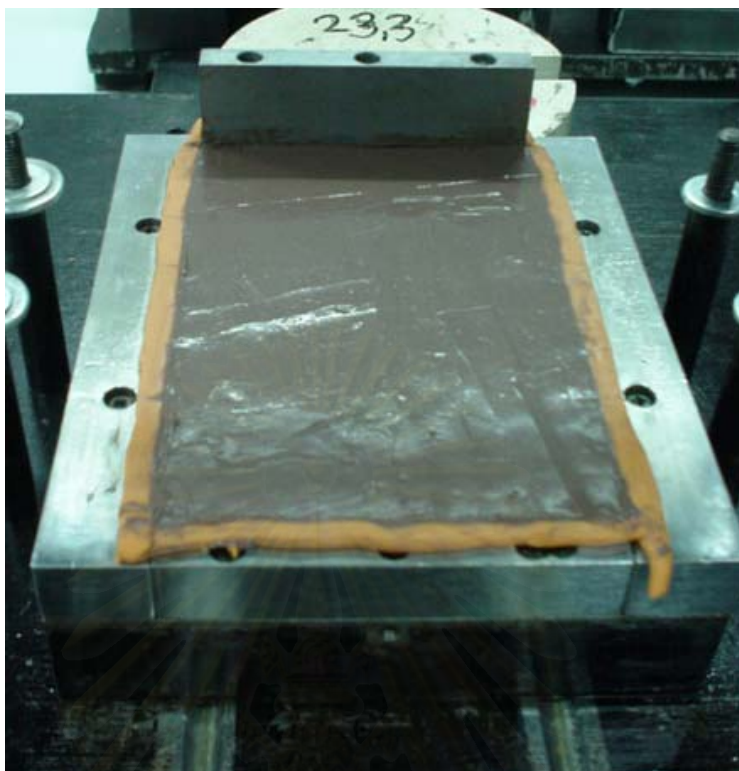
- 1) สารละลายเบนโทไนต์ที่ใช้ในการทดสอบนั้น จะมีค่าปริมาณความชื้นอยู่ที่ 550% โดยใช้ผงเบนโทไนต์ที่มีค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ที่ 400% มาผสมกับน้ำให้ได้ปริมาณความชื้นที่ต้องการด้วยเครื่องผสมขนาดเล็ก
- 2) ทำการปั่นจนกระทั่งส่วนผสมระหว่างเบนโทไนต์กับน้ำเข้ากันดี เมื่อผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง ให้สารละลายเบนโทไนต์อิ่มตัว
- 3) ประกอบแผ่นวัสดุโครงสร้างที่จะใช้ทดสอบเข้ากับรถไล่แผ่นวัสดุโครงสร้าง หลังจากนั้นนำดินน้ำมันมาติดที่ขอบรถโดยรอบแผ่นวัสดุโครงสร้างให้สูงเท่ากัน

ประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้อาหารละลายเบนโทไนด์ไหลออกขณะทำการทดสอบ

- 4) ทาอาหารละลายเบนโทไนด์ลงบนแผ่นวัสดุโครงสร้างแล้วใช้เกรียงปาดให้เรียบ โดยมีความหนาของชั้นสารละลายเบนโทไนด์ประมาณ 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.19
- 5) ขั้นตอนอื่นๆ ปฏิบัติเหมือนการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง



รูปที่ 3.18 การทดสอบลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสด้วยสารละลายเบนโทไนด์



รูปที่ 3.19 การเตรียมแผ่นวัสดุโครงสร้างเคลือบด้วยสารละลายเบนโทไนด์

3.6.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบด้วยวิธี Direct Shear ตามมาตรฐาน ASTM D-3080 โดยใช้หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งที่ 1, 2 และ 3 ksc ที่อัตราการเฉือน 2 มิลลิเมตรต่อนาที เหมือนกับการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส สำหรับเครื่องมือที่ใช้ทดสอบใช้เครื่องมือเดียวกับเครื่องมือทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง แต่ต้องปรับเปลี่ยนแผ่นเหล็กที่ยึดวัสดุโครงสร้างให้เป็นกล่องใส่ตัวอย่างดินกล่องล่างแทน

สำหรับวิธีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีวิธี ดังนี้

- 1) ประกอบกล่องใส่ตัวอย่างดินกล่องล่างและกล่องบนเข้ากับเครื่องมือทดสอบ ทำการยึดไม่ให้กล่องใส่ตัวอย่างดินกล่องล่างเคลื่อนที่ได้จนกว่าจะถึงขั้นตอนการเฉือน
- 2) ขั้นตอนอื่นๆ ปฏิบัติเหมือนกับการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของตัวอย่างดิน

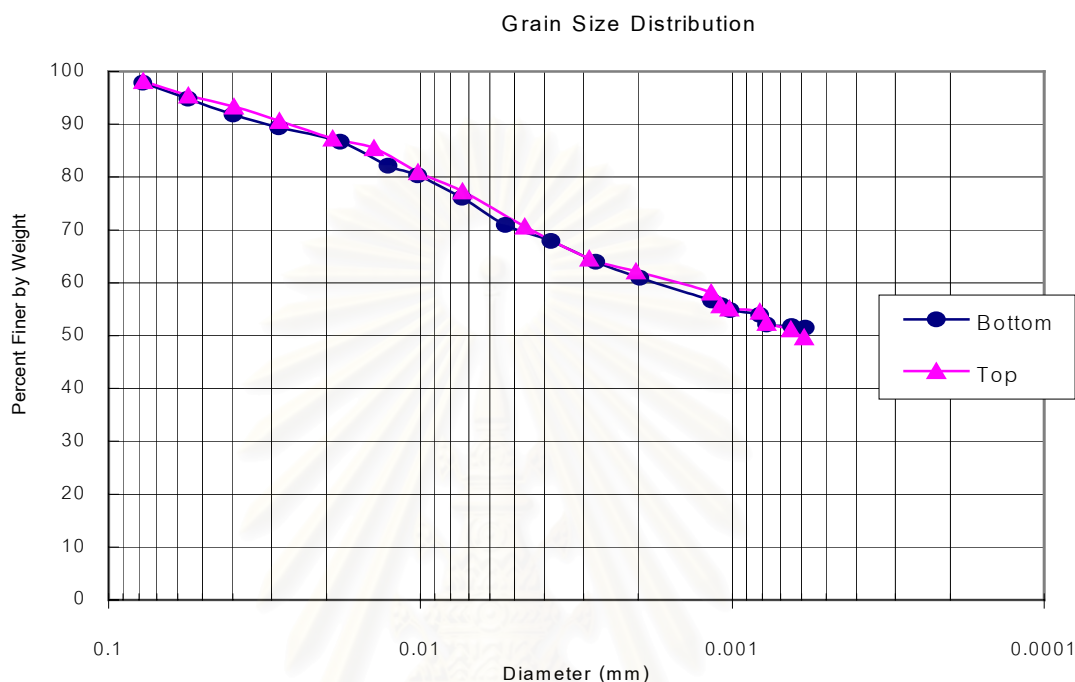
ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างดินขึ้นเองด้วยวิธี Reconstituted ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 1 ksc โดยดินที่เก็บมาเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบแปลงสภาพ (Disturbed Sample) ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม (Basic Properties) ของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของตัวอย่างดิน

คุณสมบัติพื้นฐาน	
ปริมาณความชื้นในดิน (Water Content)	36 - 38 %
ค่าขีดเหลว (Liquid Limit)	61.6 %
ค่าขีดพลาสติก (Plastic Limit)	27.2 %
ดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index)	34.4 %
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.61
หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight)	1.8
ขนาดเม็ดดินด้วยไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer Analysis)	แสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการกระจายขนาดของเม็ดดิน จากการทดสอบด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินที่ด้านบนกระบอกและด้านล่างของกระบอกเตรียมตัวอย่างดินที่เตรียมได้จากวิธี Reconstituted พบว่ากราฟของตัวอย่างดินทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะทับกัน โดยมีขนาดประมาณของเม็ดดินตั้งแต่ 0.08 มิลลิเมตรลงมา จากผลที่ได้ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่างดินที่ได้จากการเตรียมเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ มีคุณสมบัติเป็นเนื้อ

เดียวกัน (Homogeneous) ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์หลักที่ตั้งไว้ของการเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธี Reconstituted



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดเม็ดดินของตัวอย่างดิน ด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์

4.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องมือทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นเองซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องมือทดสอบ Direct Shear โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ด้วยวิธีอัดตัวคายน้ำเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Consolidated Undrained Test) ที่อัตราความเร็วในการเฉือน 2 มิลลิเมตรต่อนาที ให้น้ำหนักกดทับในแนวตั้งที่ 1, 2 และ 3 ksc

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized ของกำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าการหลุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งต่างๆ

	หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (ksc)	0.394	0.587	0.764
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ตำแหน่งกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (ม.ม.)	1.4	2.4	1.4
กำลังรับแรงเฉือนคงค้าง (ksc)	0.296	0.448	0.553
อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงเฉือนคงค้างต่อกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด	0.75	0.76	0.72
ค่าการหลุดตัวของตัวอย่างดินที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม. (ม.ม.)	0.32	0.34	0.35

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับแนวดิ่ง คือ

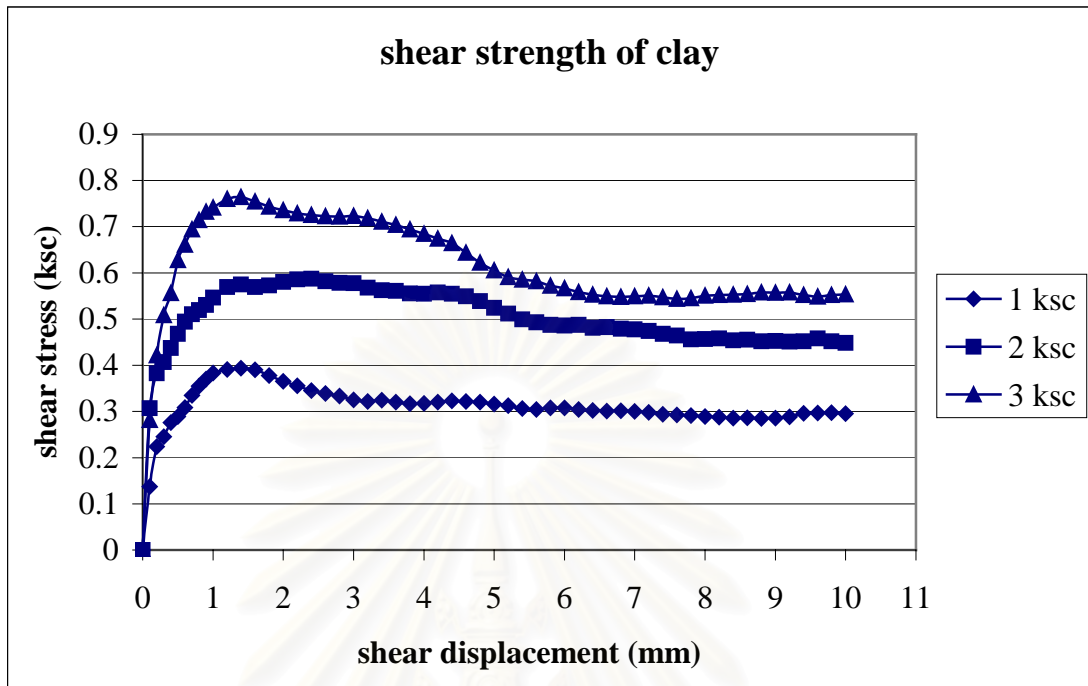
$$\tau_{\max} = 0.185\sigma_n + 0.212$$

ได้ค่า $c_{\max} = 0.212$, $\tan \phi_{\max} = 0.185$, $\phi_{\max} = 10.5^\circ$

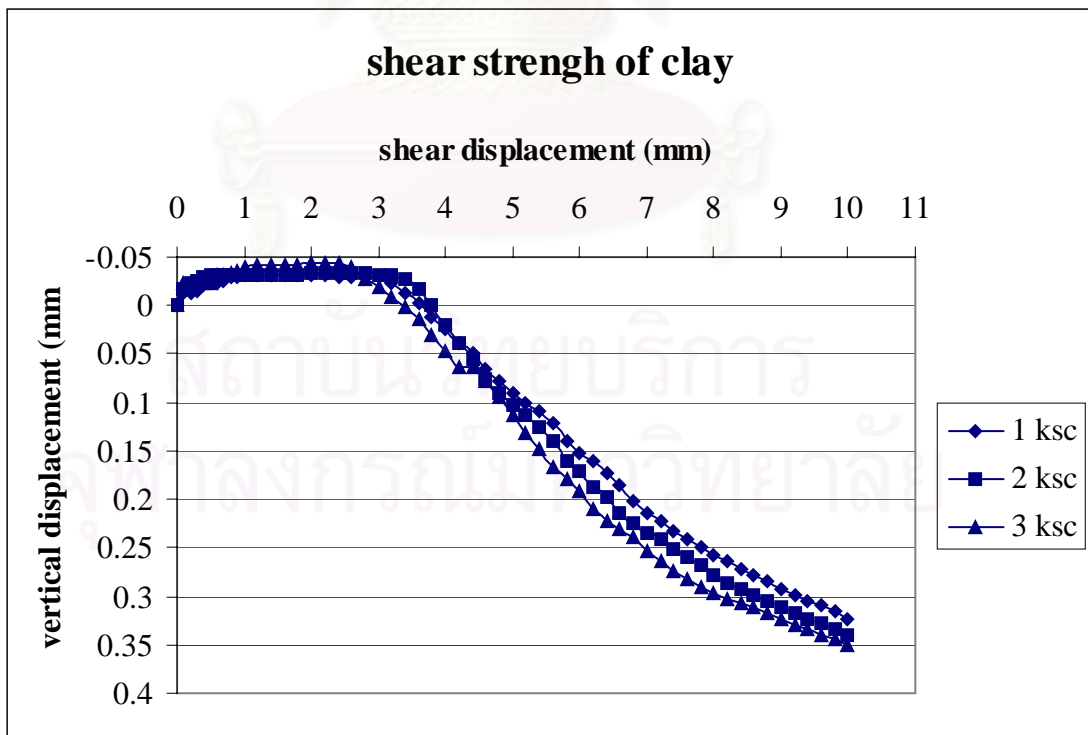
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับหน่วยแรงกดทับแนวดิ่ง คือ

$$\tau_r = 0.129\sigma_n + 0.175$$

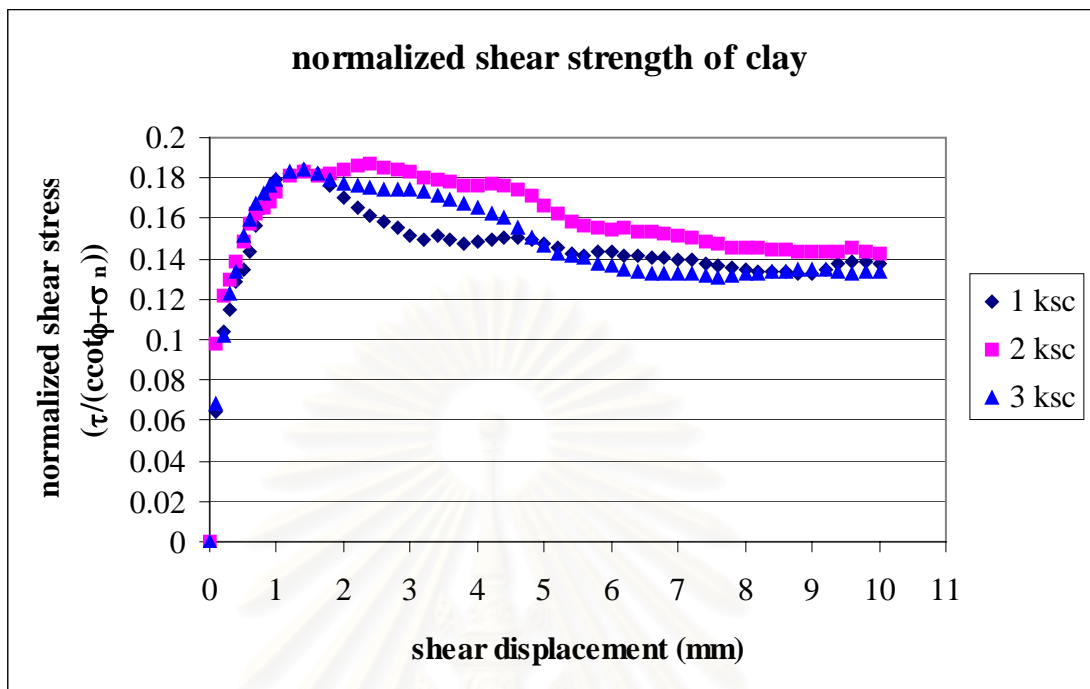
ได้ค่า $c_r = 0.175$, $\tan \phi_r = 0.129$, $\phi_r = 7.4^\circ$



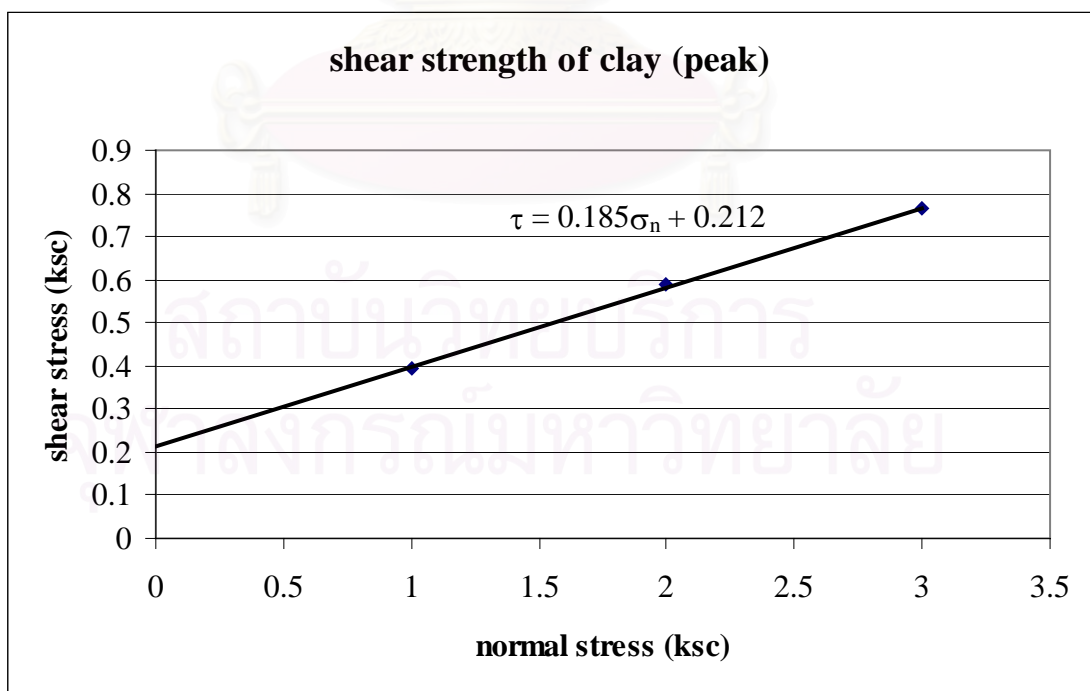
รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว



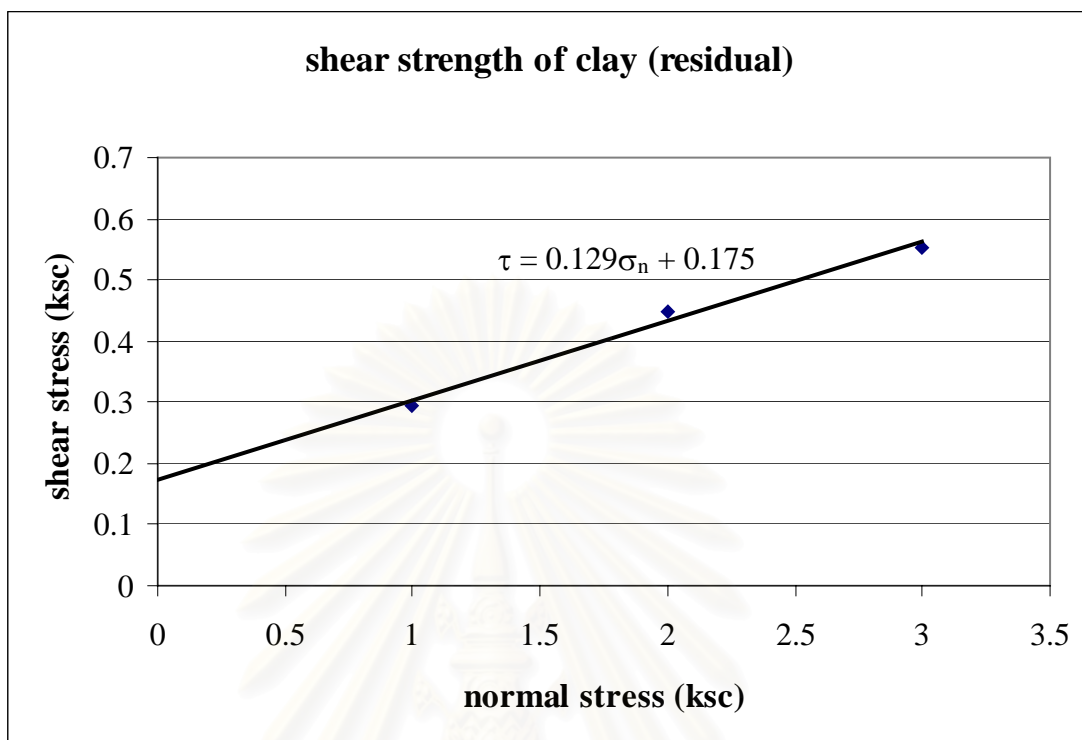
รูปที่ 4.3 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว



รูปที่ 4.4 ค่า Normalized กำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ในการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนของดินเหนียว



รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง ในการทดสอบ
กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว



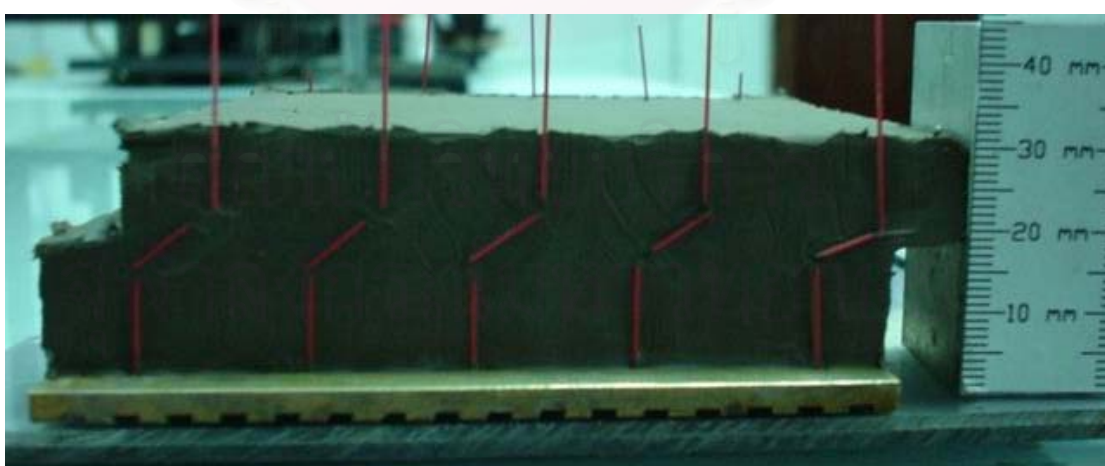
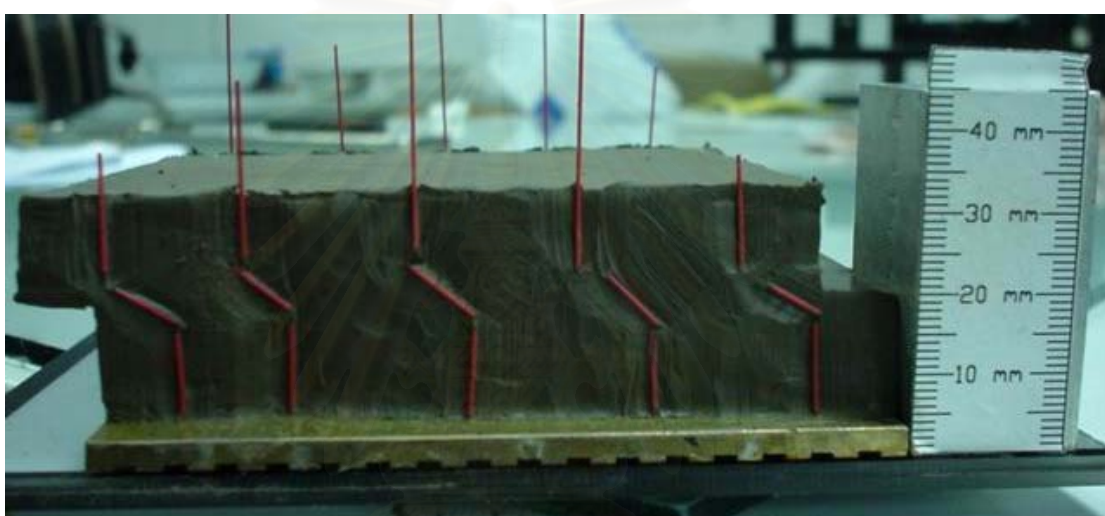
รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงเฉือนคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง ในการทดสอบ
กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

จากรูปที่ 4.2 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่ามากขึ้นตามหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น โดยในตอนแรกกำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด ซึ่งจะอยู่ที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณ 1.4 มิลลิเมตร หลังจากนั้นกำลังรับแรงเฉือนจะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเกือบจะคงที่แม้ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนจะเพิ่มขึ้นอีกก็ตาม โดยอัตราส่วนกำลังรับแรงเฉือนคงค้างต่อกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าประมาณ 0.75

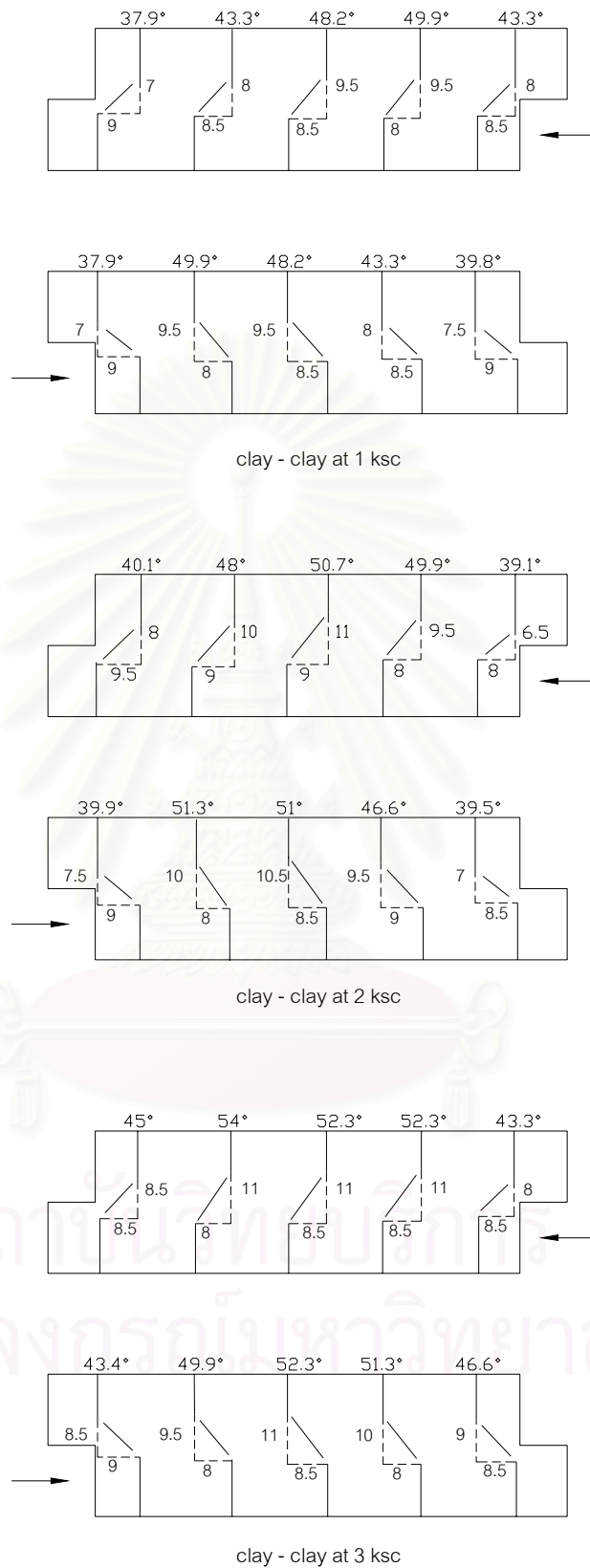
จากรูปที่ 4.3 พบว่าตัวอย่างดินจะขยายตัวขึ้นเล็กน้อยในตอนแรก จนถึงระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินจะเริ่มเกิดการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินขณะทำการเฉือนที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 1, 2 และ 3 ksc จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก

จากรูปที่ 4.8 พบว่าแท่งดินสอเกิดการหักขึ้นทุกแท่งบริเวณตรงกลางของแท่งดินสอทั้งในตัวอย่างดินส่วนบนและส่วนล่าง ซึ่งก็คือบริเวณที่เกิดการเฉือนในตัวอย่างดินนั่นเอง โดยแท่งดินสอที่อยู่บริเวณตรงกลางของตัวอย่างดินจะมีระยะการหักของแท่งดินสอและความชันในแนว

การหักของแท่งดินสอมากที่สุด ตรงข้ามกับแท่งดินสอที่อยู่บริเวณริมตัวอย่างดินจะมีระยะการหักและความชันในแนวการหักน้อยที่สุด นอกจากนี้ระยะการหักและความชันในแนวการหักของแท่งดินสอยังแปรผันตามหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งอีกด้วย ถ้าทำการเชื่อมต่อจุดที่แท่งดินสอเกิดการหักที่ตำแหน่งต่างๆ ในตัวอย่างดินจะได้เส้นทางการวิบัติ (Failure Profile) ของตัวอย่างดินเป็นเส้นโค้ง



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการหักของแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินหลังการทดสอบ



รูปที่ 4.8 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

4.3 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต

4.3.1 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

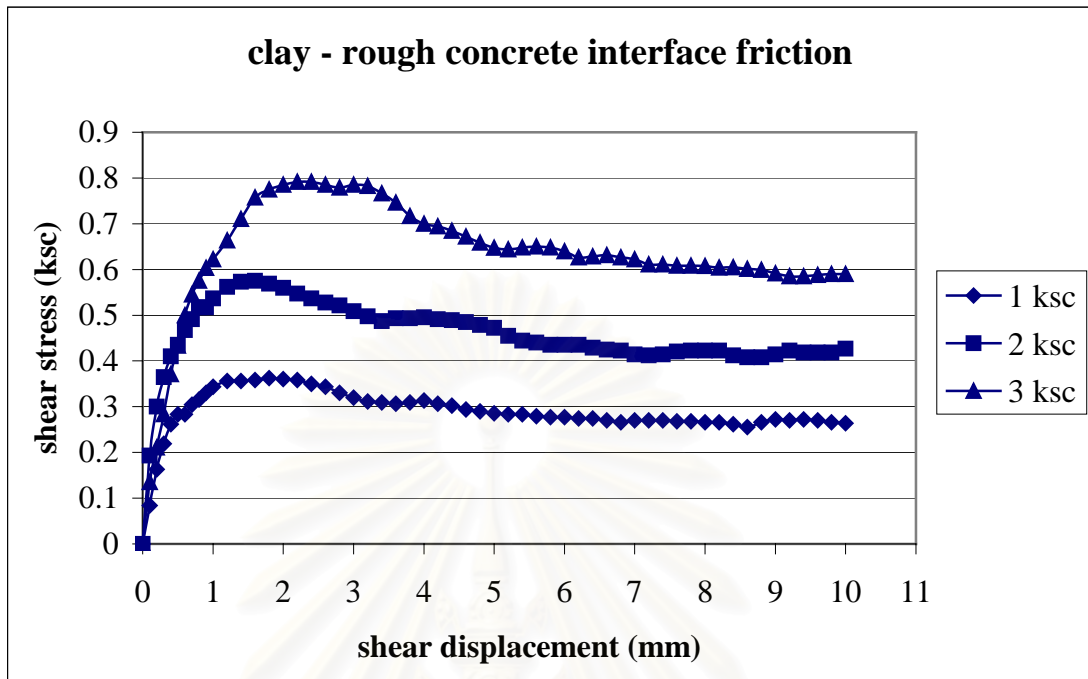
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

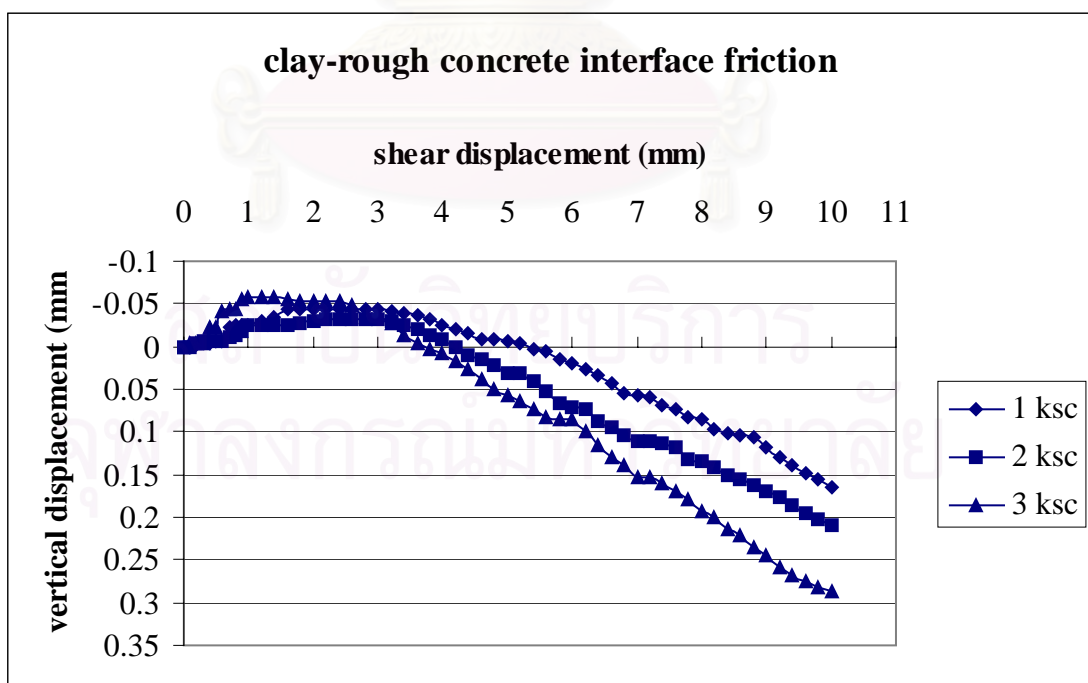
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบและค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ

	หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
หน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ksc)	0.363	0.575	0.792
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ตำแหน่งหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ม.ม.)	1.8	1.6	2.2
หน่วยแรงเสียดทานคงค้าง (ksc)	0.264	0.419	0.590
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด	0.73	0.73	0.75
ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม. (ม.ม.)	0.16	0.21	0.29

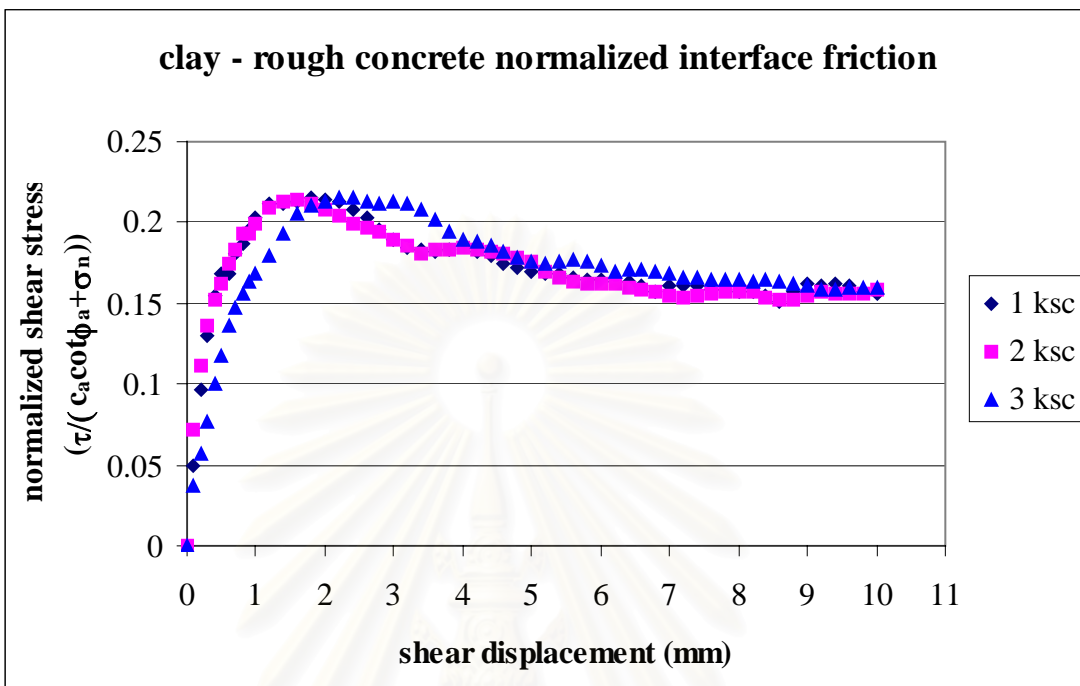


รูปที่ 4.9 หน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

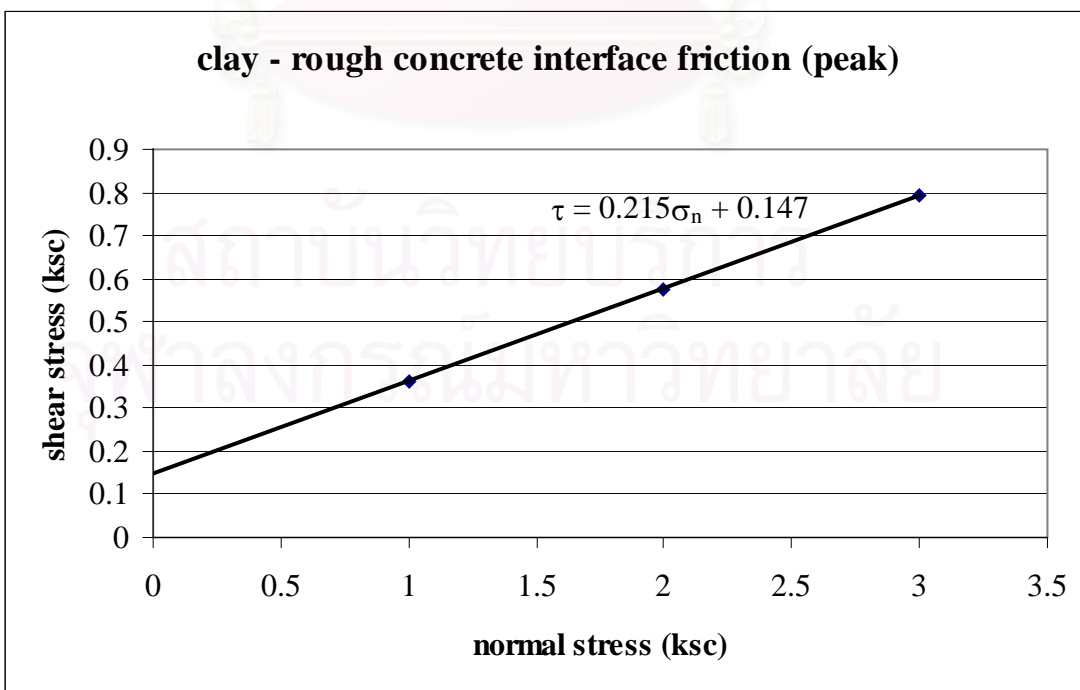


รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

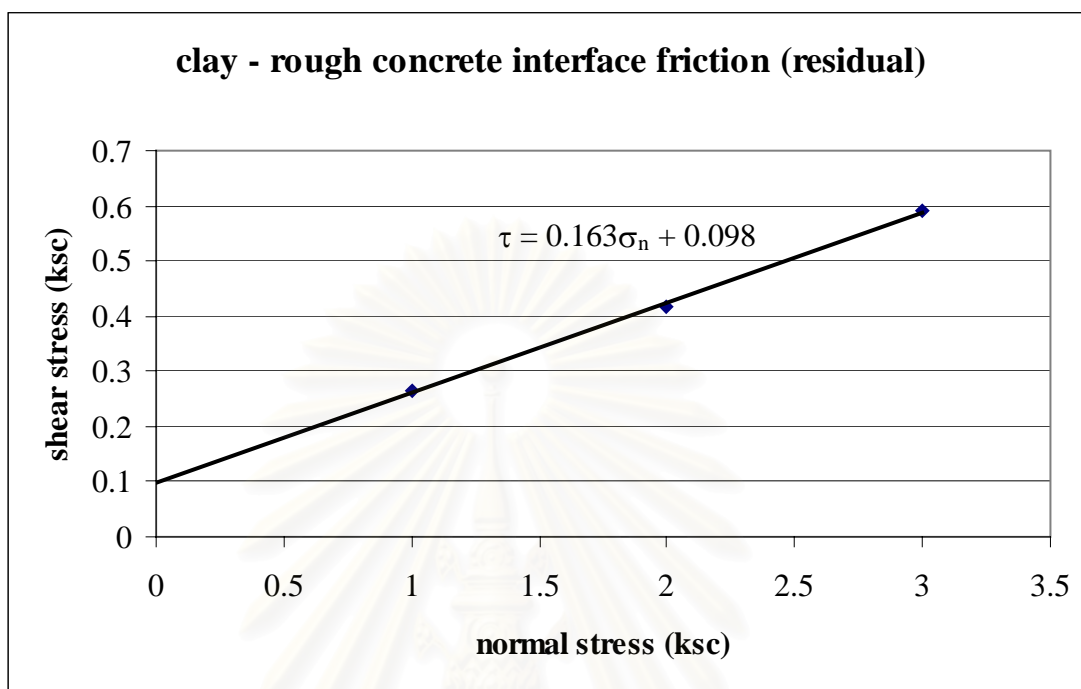


รูปที่ 4.11 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ



รูปที่ 4.12 หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ



รูปที่ 4.13 หน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง
ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับแนวตั้ง คือ

$$\tau_{\max} = 0.215\sigma_n + 0.147$$

ได้ค่า $c_{a(\max)} = 0.147$, $\tan \delta_{\max} = 0.215$, $\delta_{\max} = 12.1^\circ$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับแนวตั้ง คือ

$$\tau_r = 0.163\sigma_n + 0.098$$

ได้ค่า $c_{ar} = 0.098$, $\tan \delta_r = 0.163$, $\delta_r = 9.3^\circ$

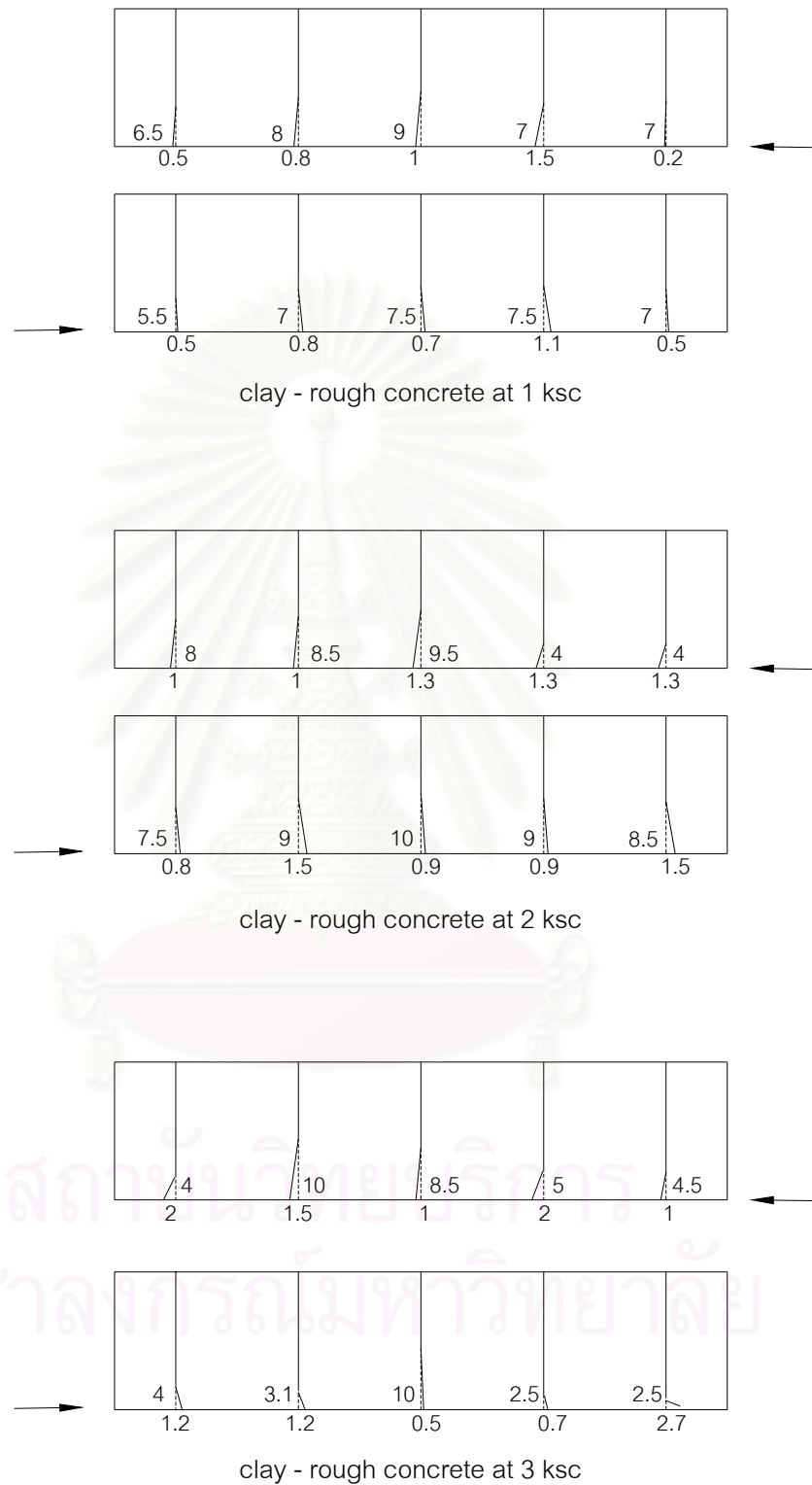
จากรูปที่ 4.9 พบว่าค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต
หยาบจะแปรผันตามค่าหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง โดยหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะมีค่าสูงสุด
ที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณ 1.8 - 2.2 มิลลิเมตร หลังจากผ่านจุดสูงสุดแล้ว

หน่วยแรงเสียดทานจะค่อยๆ ลดลงสู่หน่วยแรงเสียดทานคงค้างซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยอัตราส่วนหน่วยแรงเสียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด มีค่าประมาณ 0.74

จากรูปที่ 4.10 พบว่าในระยะแรกของการเฉือนตัวอย่างดินจะขยายตัวขึ้นเล็กน้อย และมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทุกค่าหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง จนถึงระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณ 2.5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นตัวอย่างดินจะเริ่มทรุดตัวลงเรื่อยๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ โดยระยะการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการงอของแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ



รูปที่ 4.15 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ

จากรูปที่ 4.15 พบว่าส่วนใหญ่แห่งดินสอเกิดการงอขึ้นบริเวณปลายของแห่งดินสอ ส่วนที่ติดกับแผ่นคอนกรีตผิวหยาบ และจะเกิดการหักขึ้นในบางแห่งสำหรับการทดสอบที่มีหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งสูง คือ ในการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 1 ksc แห่งดินสอทุกแห่งจะเกิดการงอขึ้น, การทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 2 ksc แห่งดินสอจะเกิดการงอเป็นส่วนใหญ่ มีเพียงบางแห่งที่แห่งดินสอมีการหักเกิดขึ้น สำหรับการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งที่ 3 ksc แห่งดินสอจะเกิดการงอและการหักขึ้นผสมกัน แสดงว่าในการทดสอบนี้มีการเฉือนเกิดขึ้นในตัวอย่างดิน โดยระยะการงอของแห่งดินสอในแนวดิ่งจะมากที่สุดที่ส่วนกลางของตัวอย่างดิน และน้อยที่สุดที่บริเวณริมของตัวอย่างดิน ระยะการงอจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง แต่ก็ไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

4.3.2 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะแห่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับแนวดิ่ง คือ

$$\tau_{\max} = 0.226\sigma_n + 0.122$$

$$\text{ได้ค่า } c_{a(\max)} = 0.122, \tan \delta_{\max} = 0.226, \delta_{\max} = 12.8^\circ$$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับแนวตั้ง คือ

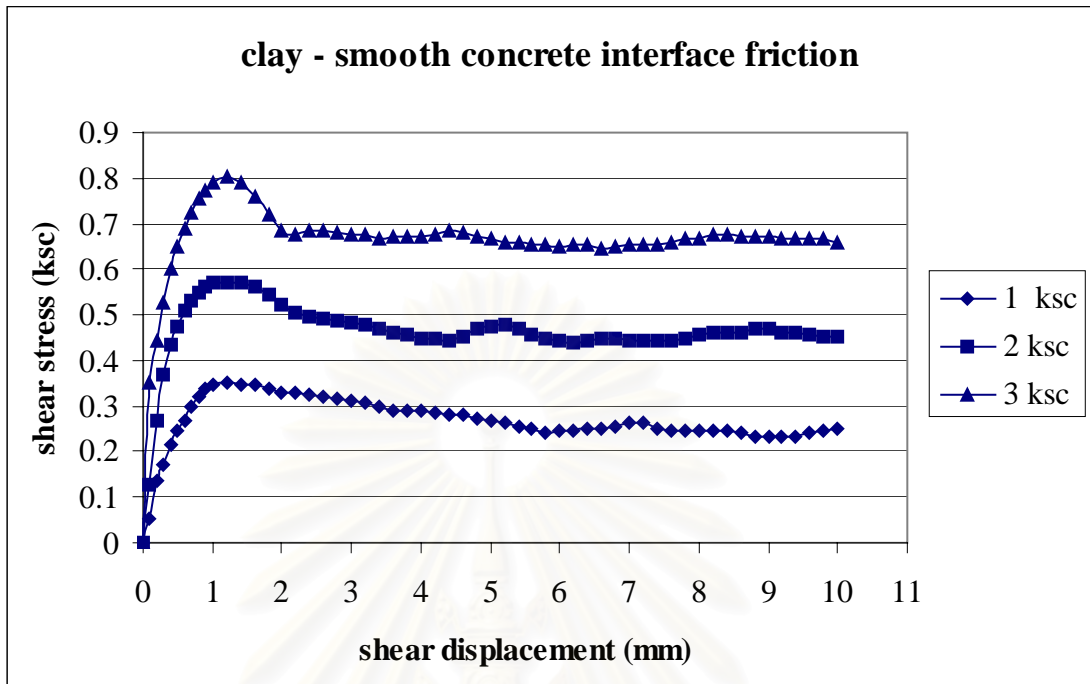
$$\tau_r = 0.205\sigma_n + 0.043$$

$$\text{ได้ค่า } c_{ar} = 0.043, \tan \delta_r = 0.205, \delta_r = 11.6^\circ$$

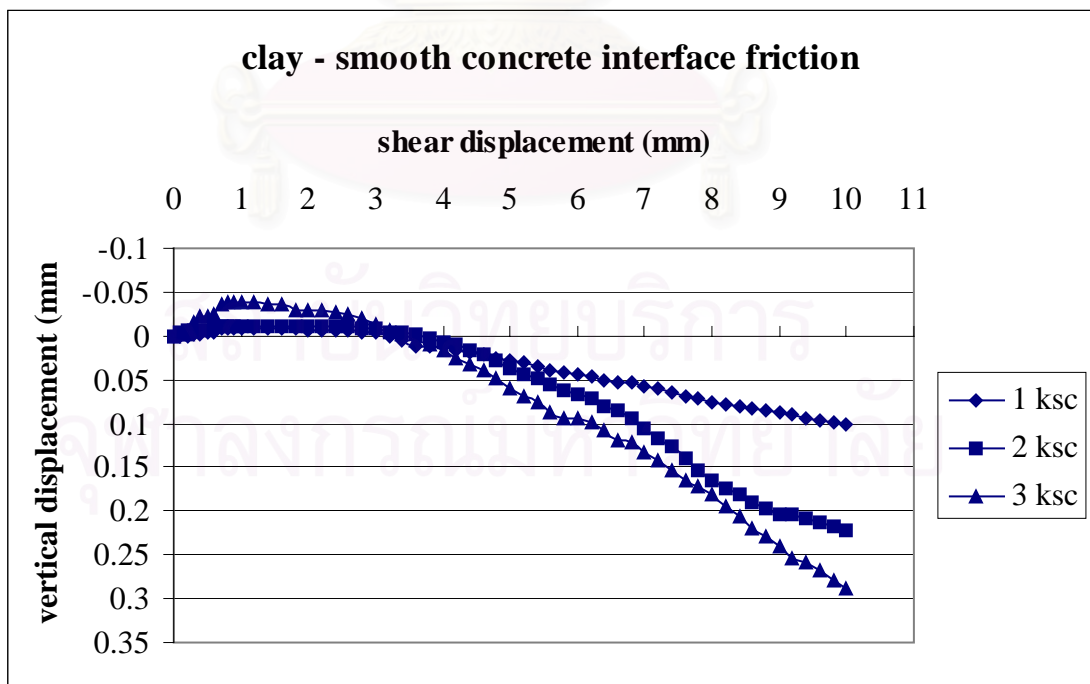
ตารางที่ 4.4 ค่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบและค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ

	หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
หน่วยแรงเฉียดทานสูงสุด (ksc)	0.35	0.571	0.803
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ตำแหน่งหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุด (ม.ม.)	1.2	1.2	1.2
หน่วยแรงเฉียดทานคงค้าง (ksc)	0.249	0.451	0.659
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุด	0.71	0.79	0.82
ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม. (ม.ม.)	0.10	0.22	0.29

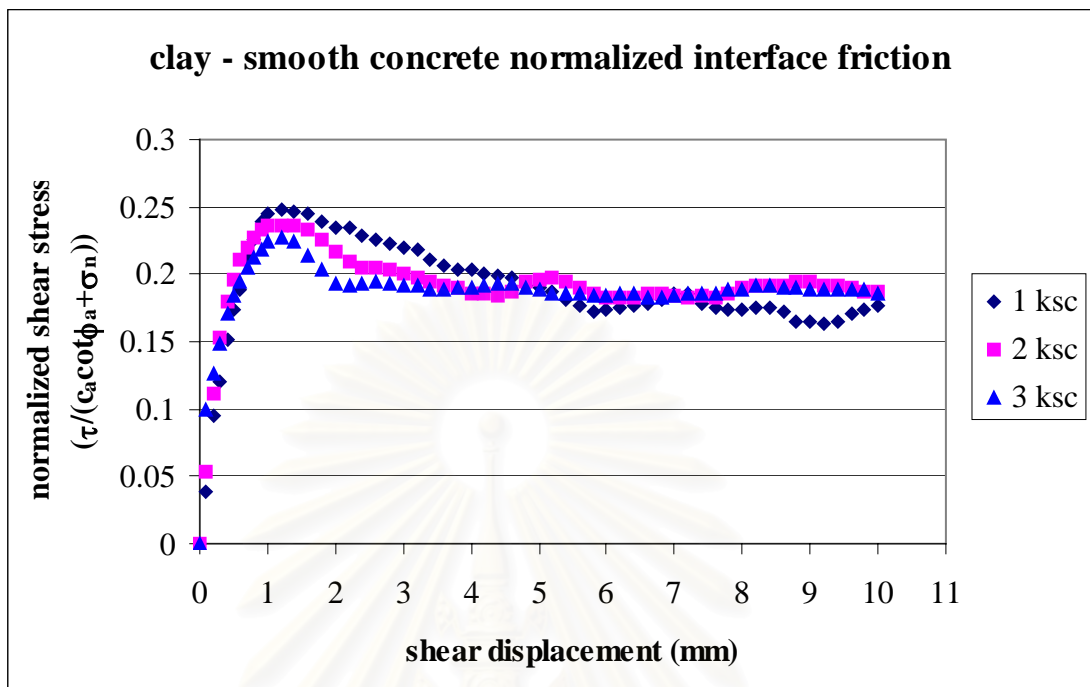
จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรก หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นจะค่อยๆ ลดลงจนหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนที่ในการเฉือนประมาณ 1.2 มิลลิเมตร หลังจากผ่านจุดสูงสุดมาแล้ว หน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสจะมีค่าลดลงไม่มากนักจนยับเข้าใกล้ค่าคงที่ แต่จะสังเกตได้ว่าที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc จะมีอัตราการลดลงที่รวดเร็วและชัดเจนกว่าที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งอื่นๆ โดยอัตราส่วนหน่วยแรงเฉียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดมีค่าประมาณ 0.79 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น



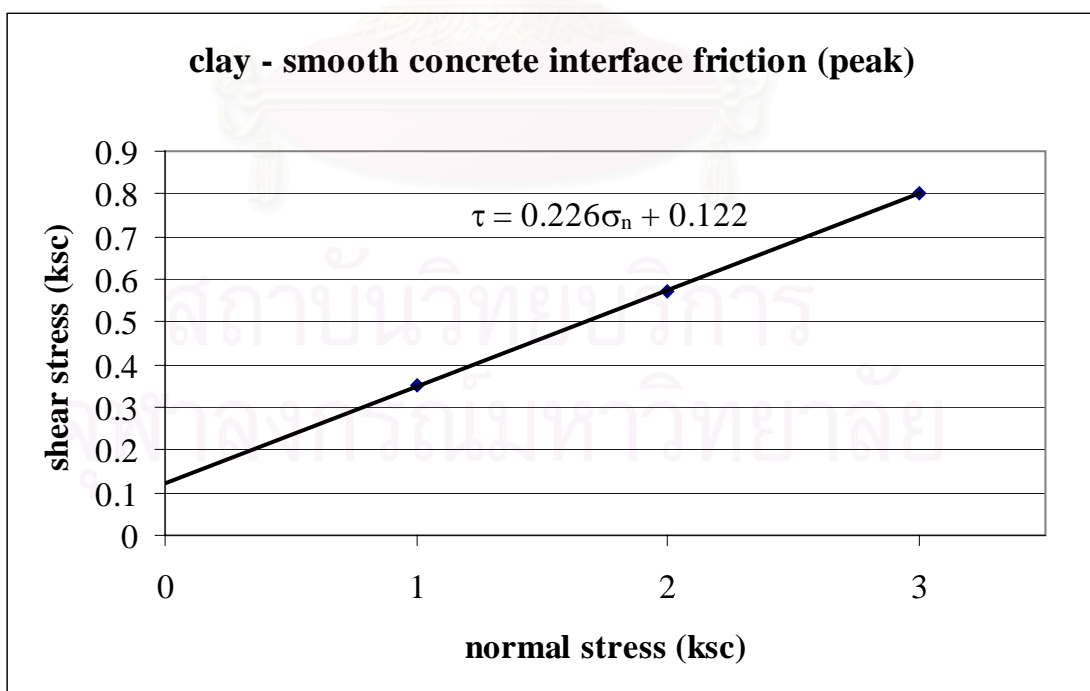
รูปที่ 4.16 หน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ



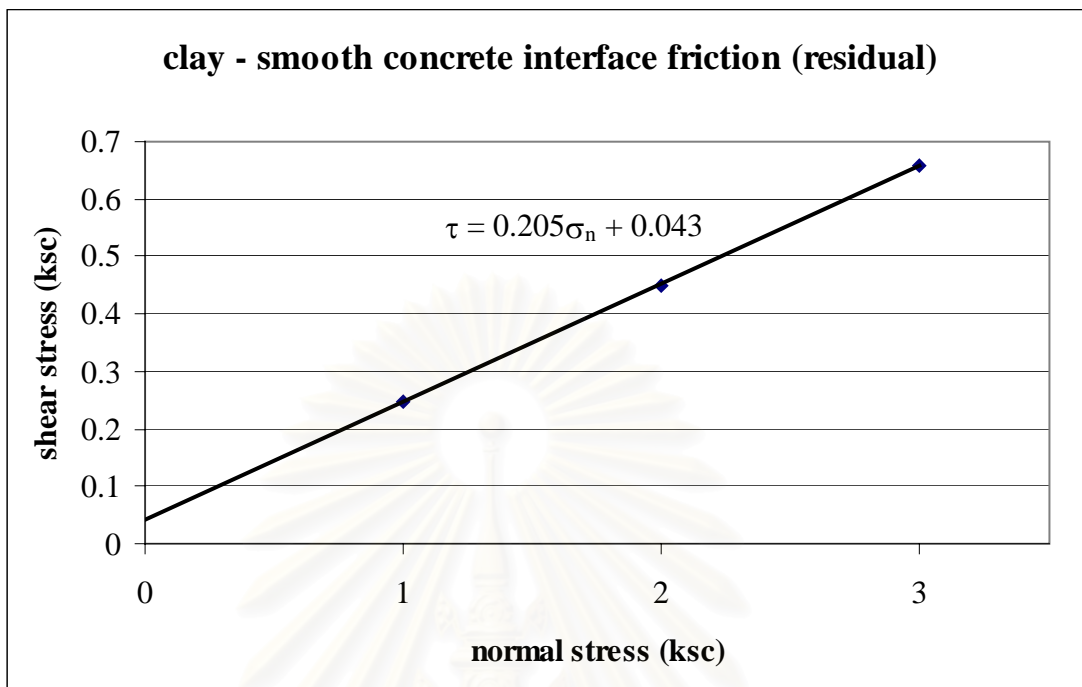
รูปที่ 4.17 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ



รูปที่ 4.18 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ



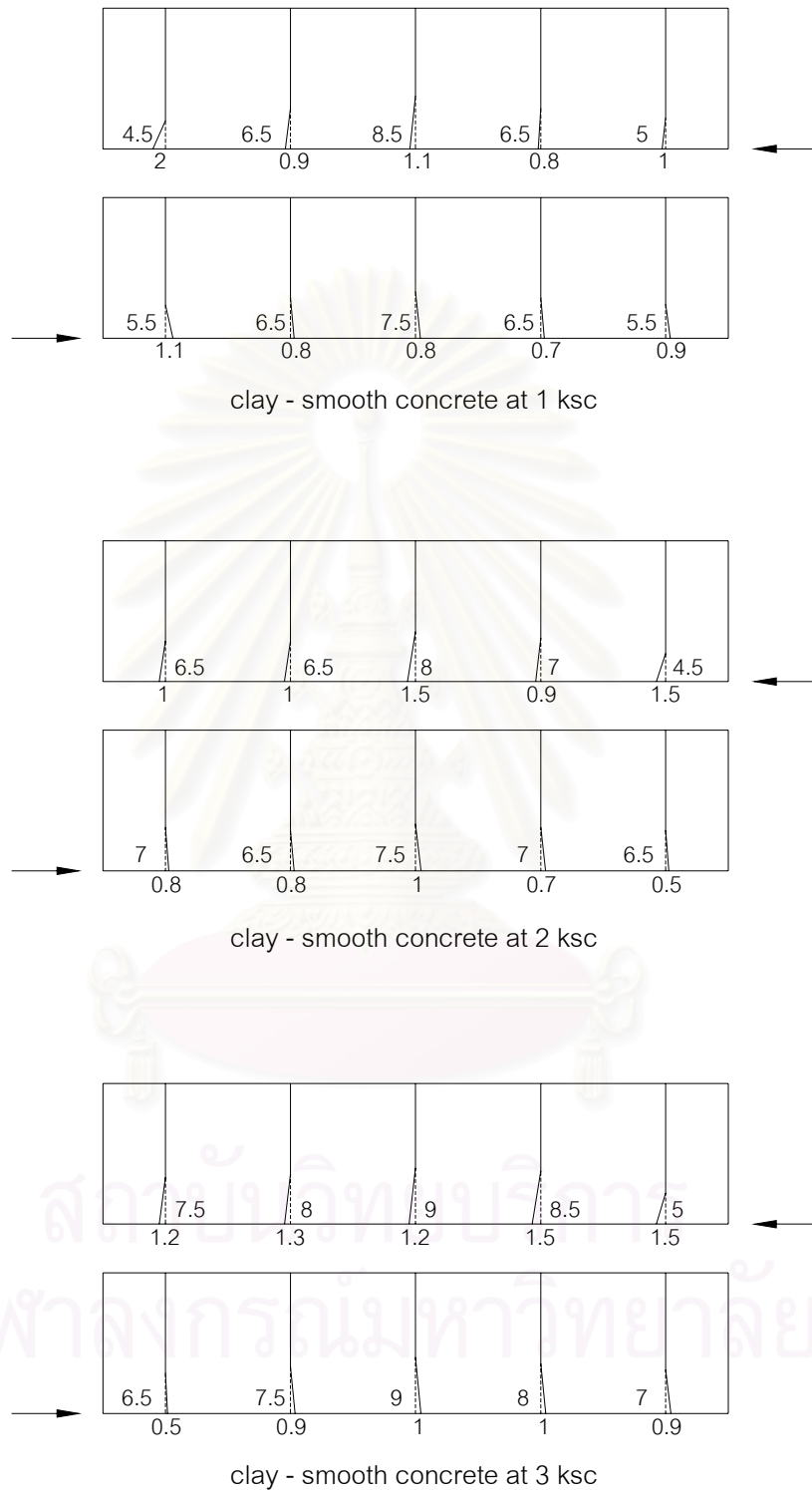
รูปที่ 4.19 หน่วยแรงเฉือนสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ



รูปที่ 4.20 หน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง
ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ

จากรูปที่ 4.17 พบว่าในช่วงแรกการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินเกือบจะคงที่มีการขยายตัวบางเพียงเล็กน้อย จนถึงระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินจะเริ่มเกิดการหลุดตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

จากรูปที่ 4.21 พบว่าแท่งดินสอที่เสียบในตัวอย่างดินเกิดการงอขึ้นทุกแท่งภายหลังการทดสอบ แสดงว่าขณะทำการทดสอบนั้นเกิดการเฉือนขึ้นในตัวอย่างดินบริเวณที่เกิดการงอของแท่งดินสอ โดยระยะการงอของแท่งดินสอในแนวตั้งของแต่ละการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่สังเกตได้ว่าระยะการงอจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.21 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบ

4.4 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก

4.4.1 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.5 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบและค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ

	หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
หน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ksc)	0.368	0.605	0.80
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ตำแหน่งหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ม.ม.)	1.2	1.6	2
หน่วยแรงเสียดทานคงค้าง (ksc)	0.277	0.436	0.571
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด	0.75	0.72	0.71
ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม. (ม.ม.)	0.11	0.18	0.28

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับแนวตั้ง คือ

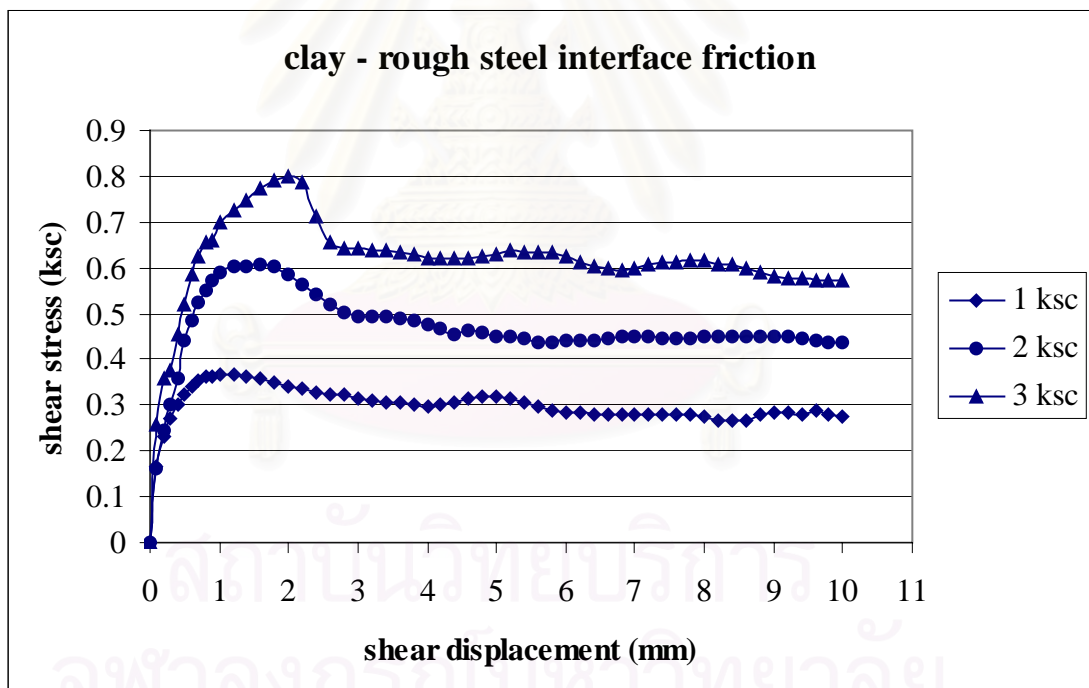
$$\tau_{\max} = 0.216\sigma_n + 0.159$$

ได้ค่า $c_{a(\max)} = 0.159$, $\tan \delta_{\max} = 0.216$, $\delta_{\max} = 12.2^\circ$

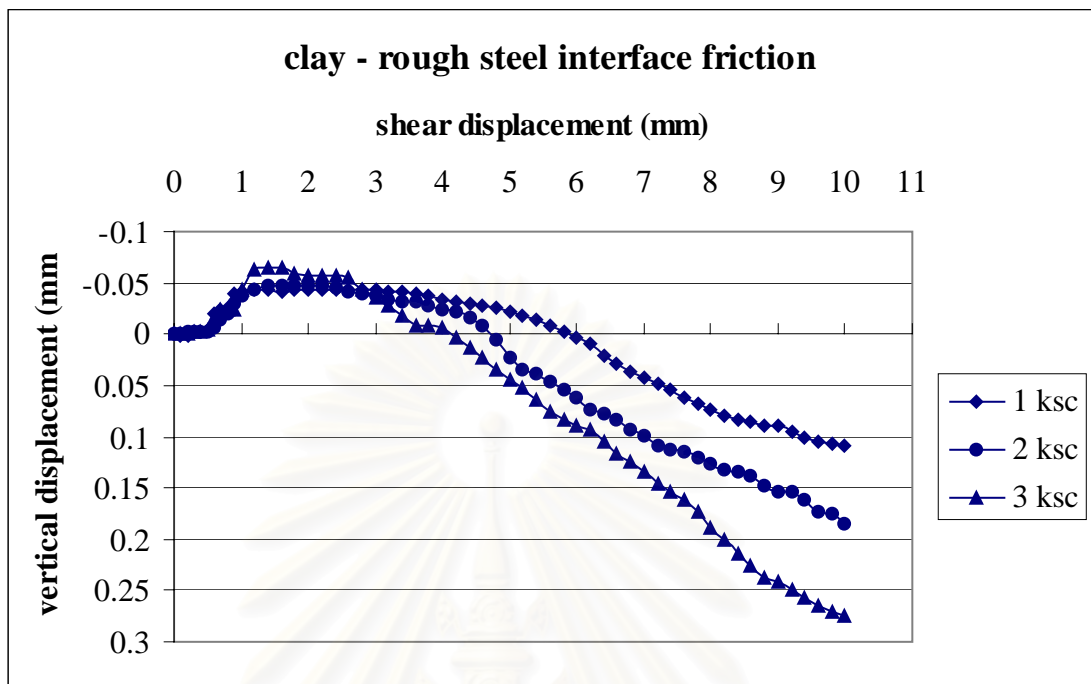
ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับแนวตั้ง คือ

$$\tau_r = 0.147\sigma_n + 0.134$$

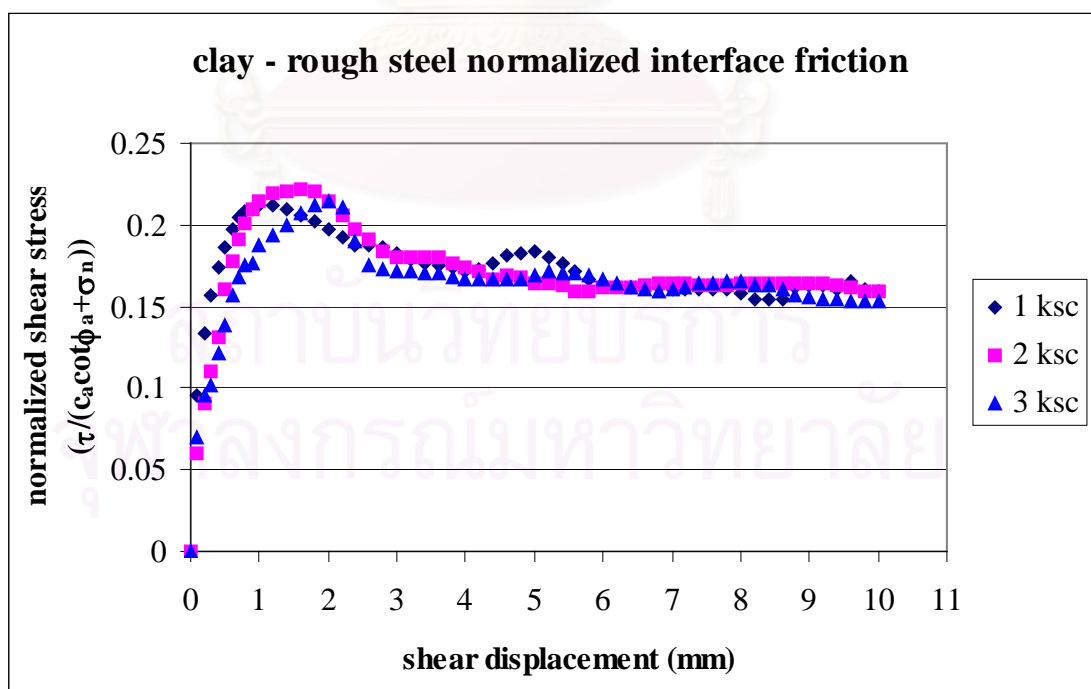
ได้ค่า $c_{ar} = 0.134$, $\tan \delta_r = 0.147$, $\delta_r = 8.4^\circ$



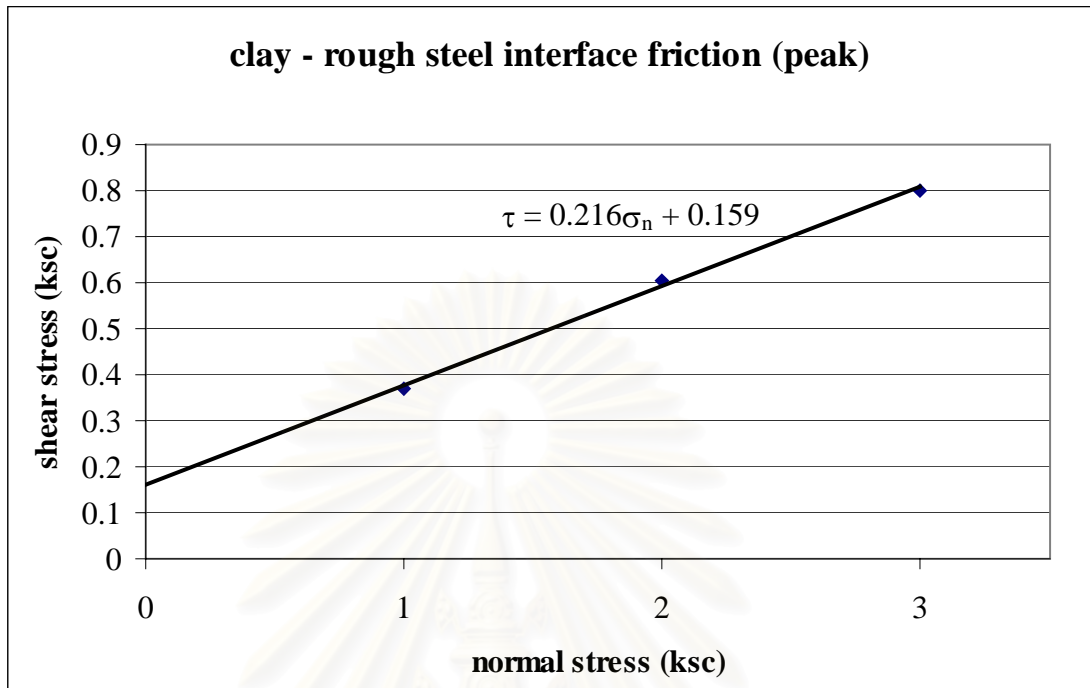
รูปที่ 4.22 หน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ



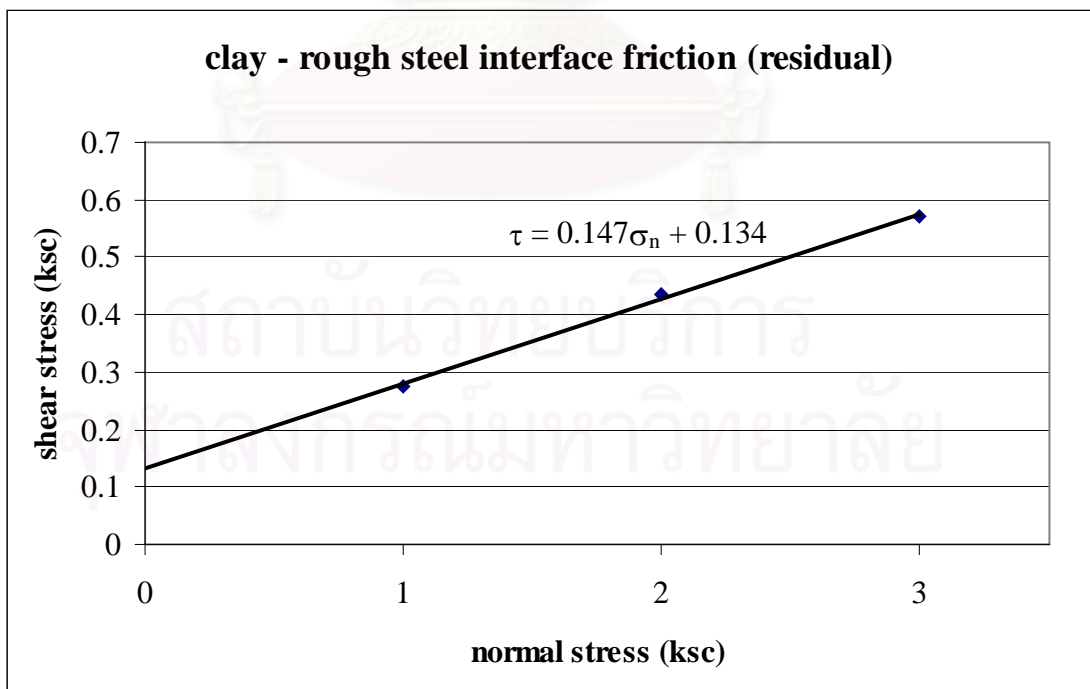
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ



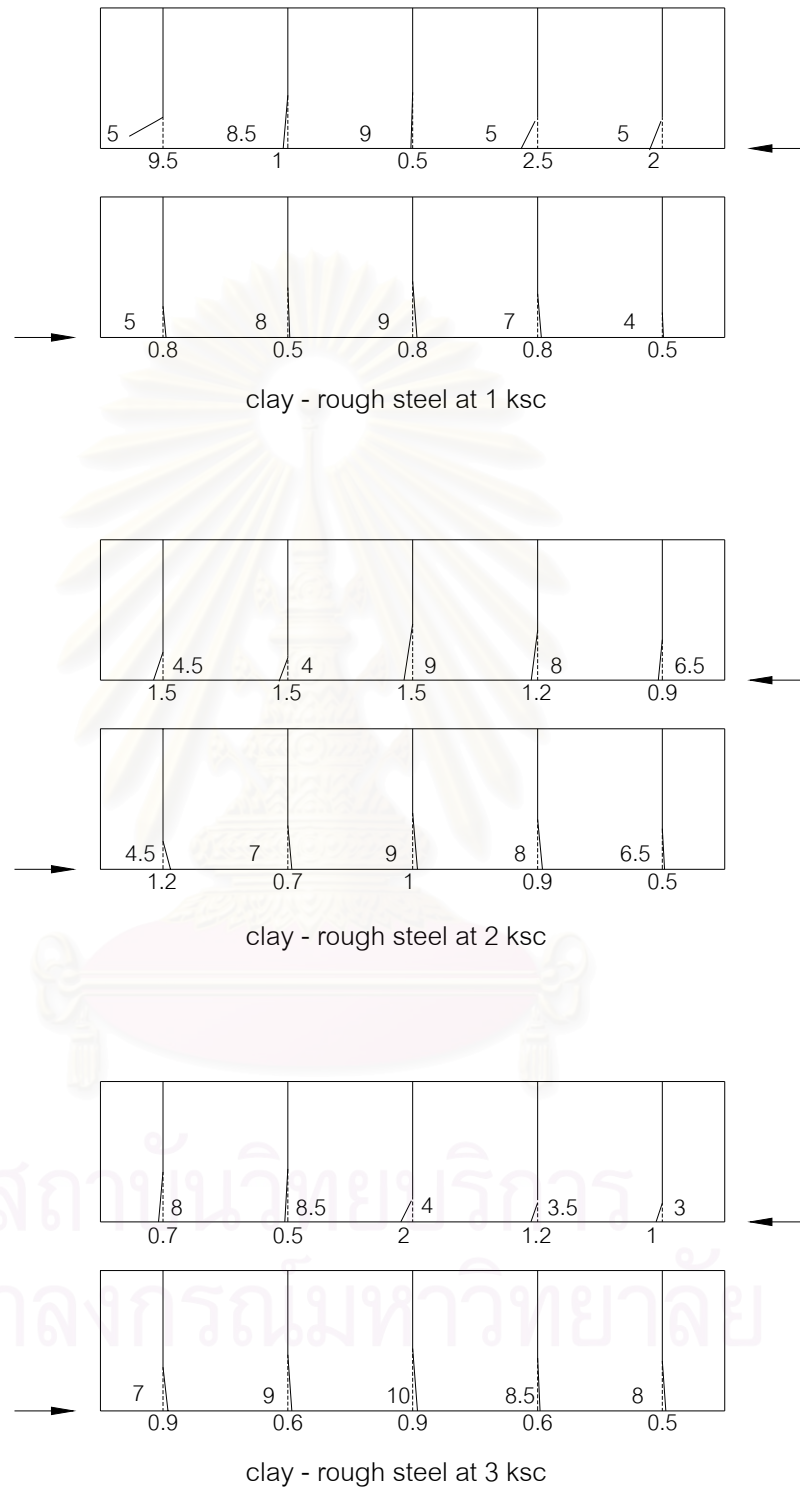
รูปที่ 4.24 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ



รูปที่ 4.25 หน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง
ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ



รูปที่ 4.26 หน่วยแรงเฉียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง
ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ



รูปที่ 4.27 ลักษณะแรงดันดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวหยาบ

จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยหน่วยแรงเสียดทานจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ระยะการเคลื่อนที่ในการเฉือนประมาณ 1.2 – 2 มิลลิเมตร ซึ่งระยะจะเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นหน่วยแรงเสียดทานจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเกือบจะคงที่ โดยที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 3 ksc จะมีการลดลงของหน่วยแรงเสียดทานหลังจากผ่านจุดสูงสุดชัดเจนที่สุด อัตราส่วนของหน่วยแรงเสียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดมีค่าประมาณ 0.73

จากรูปที่ 4.23 พบว่าเริ่มแรกตัวอย่างดินจะเกิดการขยายตัวขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งถึงที่ระยะการเคลื่อนที่ในการเฉือนประมาณ 3 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินจะเริ่มเกิดการหดตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งมากขึ้น ค่าการหดตัวของตัวอย่างดินก็จะมากขึ้นตาม

จากรูปที่ 4.27 พบว่าภายหลังการทดสอบแท่งดินสอที่เสียบในตัวอย่างดินเปลี่ยนแปลงไป คือมีการงอของแท่งดินสอเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ มีเพียงบางแท่งที่แท่งดินสอมีการหักเกิดขึ้น ในการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งมีค่าสูงแท่งดินสอจะมีระยะงอและเกิดการหักมากกว่าในการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งต่ำกว่า โดยมีระยะการงอของแท่งดินสอบริเวณกลางตัวอย่างดินมากกว่าบริเวณริมตัวอย่างดิน

4.4.2 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ

รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบและค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งต่างๆ

	หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
หน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ksc)	0.309	0.537	0.743
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ตำแหน่ง หน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ม.ม.)	0.4	0.5	0.7
หน่วยแรงเสียดทานคงค้าง (ksc)	0.187	0.31	0.412
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้าง ต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด	0.61	0.58	0.56
ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่ระยะการ เคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม. (ม.ม.)	0.05	0.07	0.10

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับแนวดิ่ง คือ

$$\tau_{\max} = 0.217\sigma_n + 0.096$$

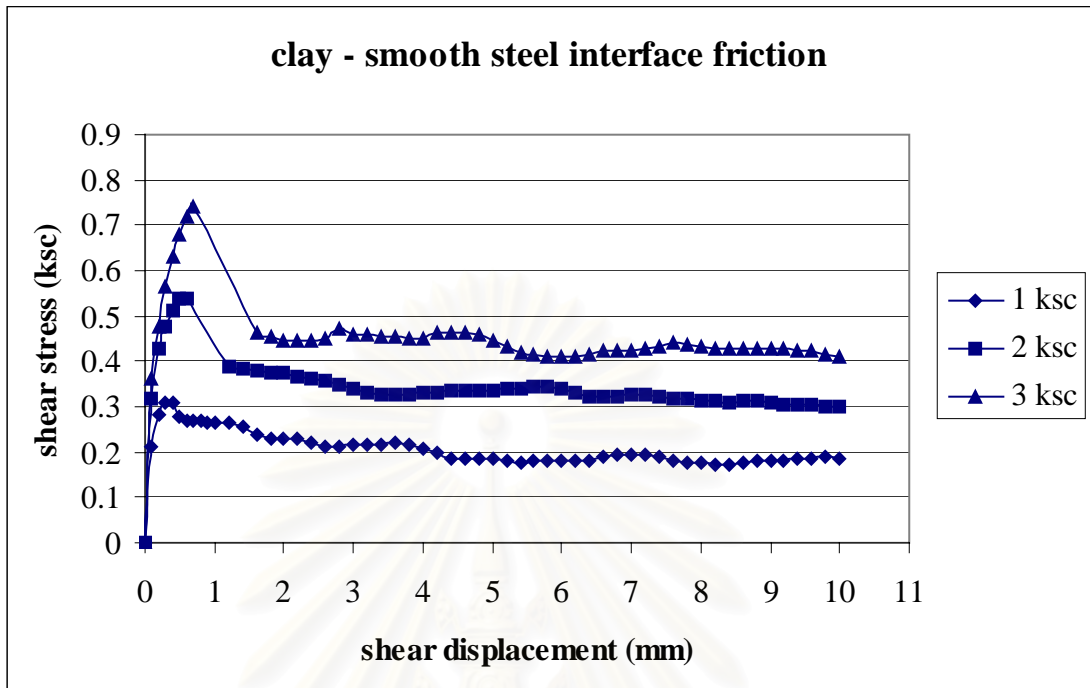
$$\text{ได้ค่า } c_{a(\max)} = 0.096, \tan \delta_{\max} = 0.217, \delta_{\max} = 12.2^\circ$$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับแนวดิ่ง คือ

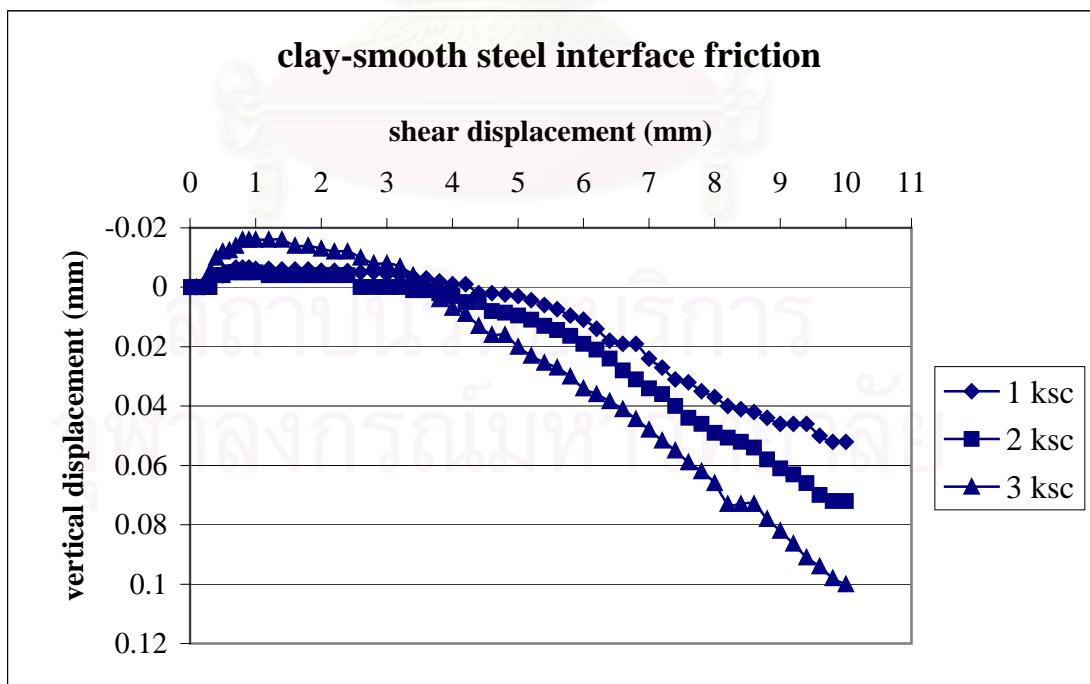
$$\tau_r = 0.113\sigma_n + 0.074$$

$$\text{ได้ค่า } c_{ar} = 0.074, \tan \delta_r = 0.113, \delta_r = 6.5^\circ$$

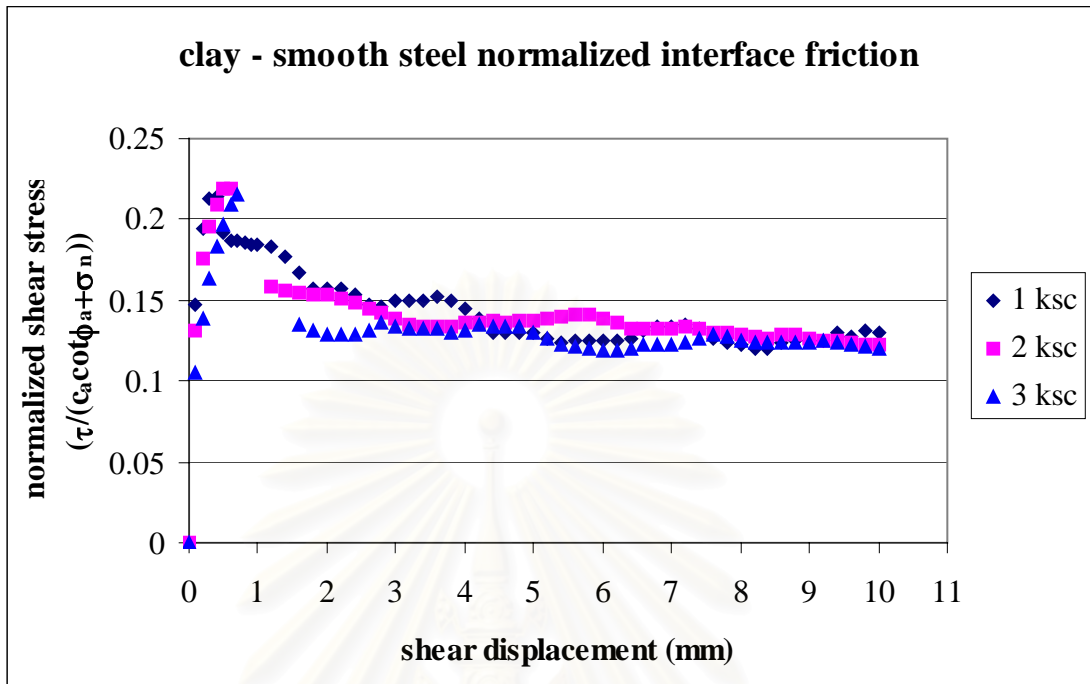
จากรูปที่ 4.28 พบว่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะแปรผันตามหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง โดยในตอนแรกหน่วยแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าใกล้เคียงกันทุกหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง จากนั้นจะเพิ่มขึ้นสู่หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดของแต่ละหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง ซึ่งระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ทำให้หน่วยแรงเสียดทานมีค่าสูงสุดนั้นมีค่าค่อนข้างน้อย คือที่ระยะ 0.4 - 0.7 มิลลิเมตร โดยเพิ่มขึ้นตามขนาดของหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง



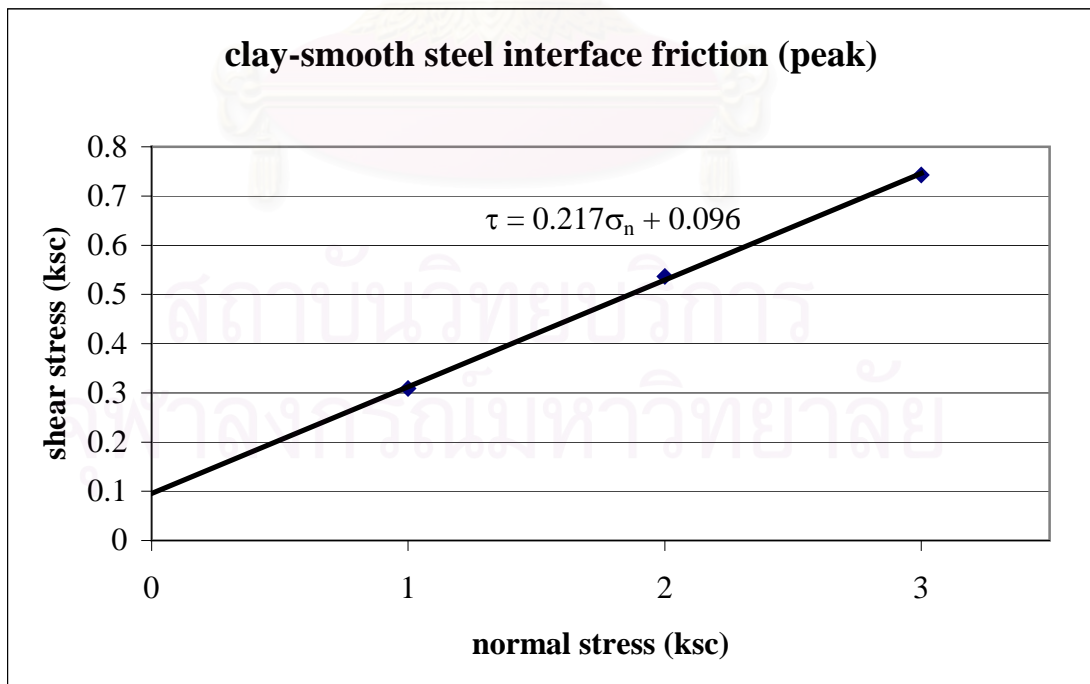
รูปที่ 4.28 หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ



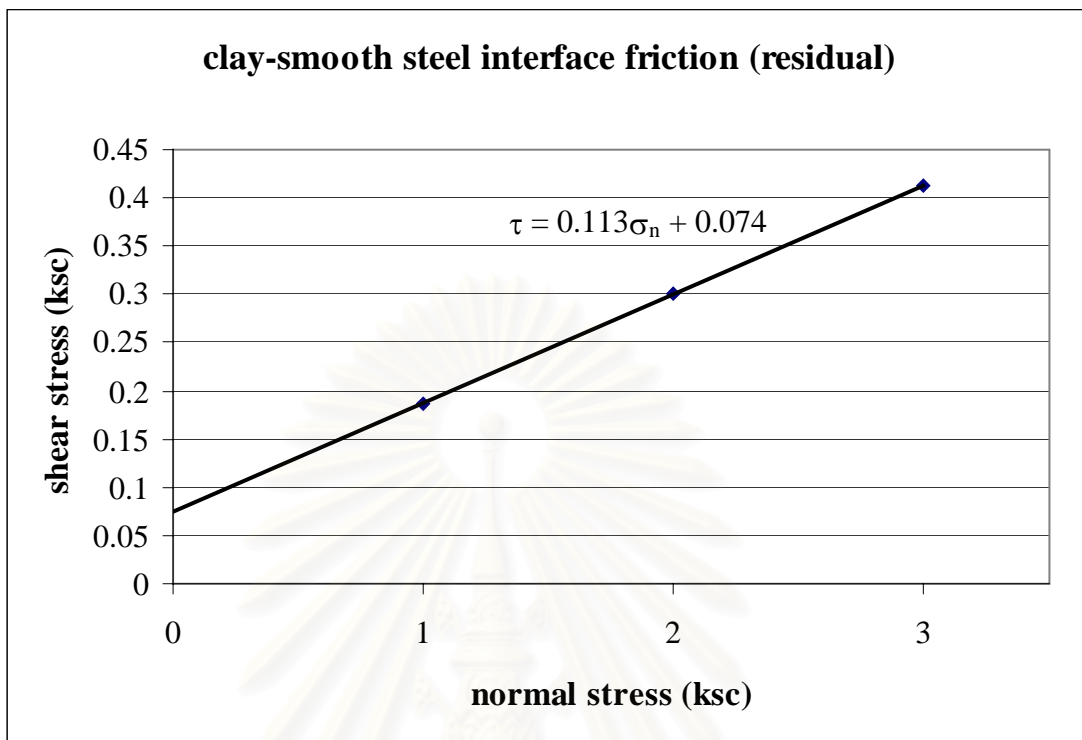
รูปที่ 4.29 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ



รูปที่ 4.30 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ



รูปที่ 4.31 หน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ

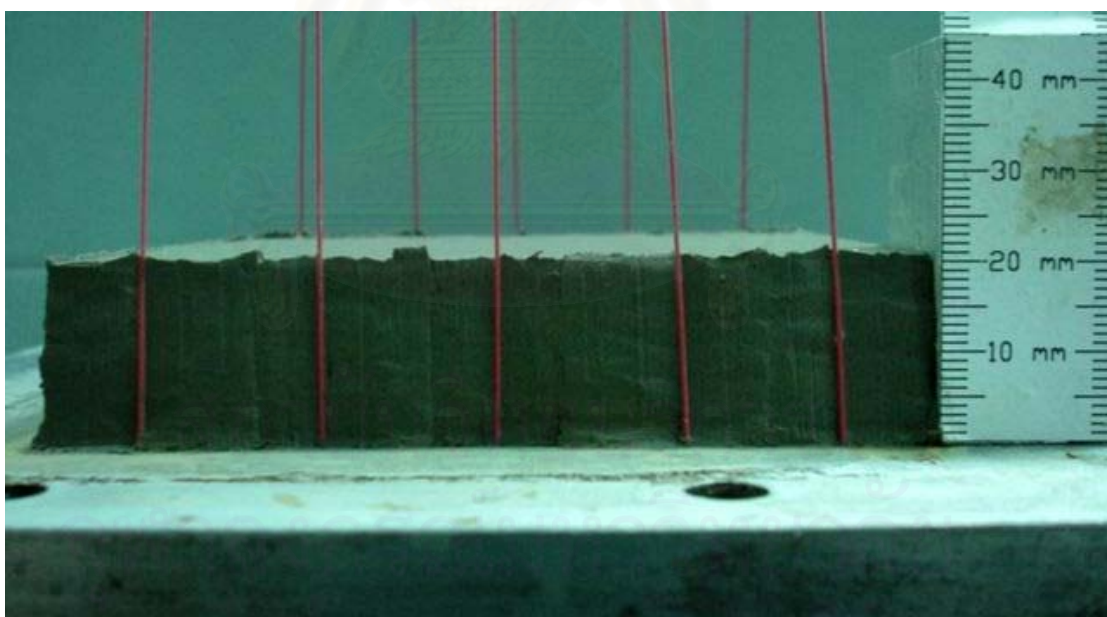
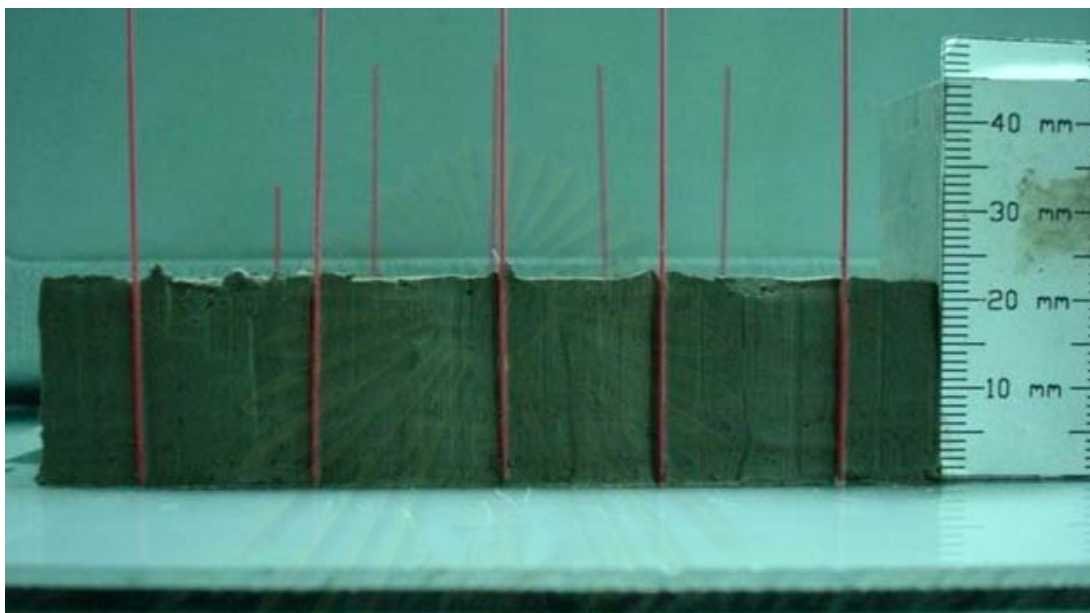


รูปที่ 4.32 หน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง
ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ

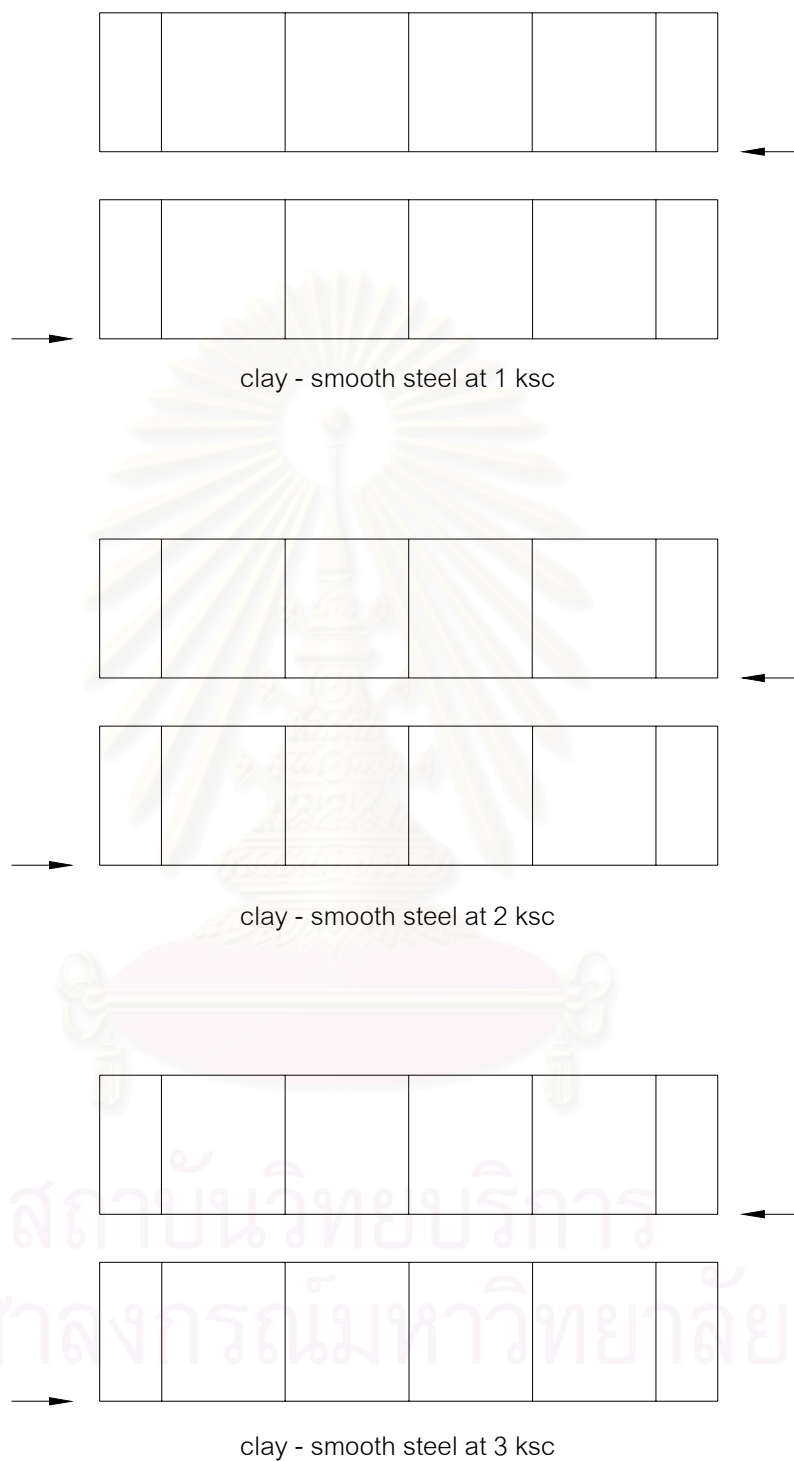
ผ่านจุดสูงสุดแล้วหน่วยแรงเสียดทานจะลดลงมากพอสมควรอย่างรวดเร็วสู่ค่าหน่วยแรงเสียดทานคงค้าง ซึ่งมีค่าประมาณ 0.57 เท่าของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด

จากรูปที่ 4.29 การหลุดตัวของตัวอย่างดินจะแปรผันตามค่าหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง โดยในตอนแรกตัวอย่างมีการขยายตัวแต่น้อยมากจนแทบจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง จนถึงระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณ 2 มิลลิเมตร ตัวอย่างดินจะเริ่มเกิดการหลุดตัวลงเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.34 พบว่าภายหลังการทดสอบแท่งดินสอยังคงสภาพเดิม คือไม่มีการหักหรือขยของแท่งดินสอยเกิดขึ้น แสดงว่าในการทดสอบนี้ไม่มีการเฉือนเกิดขึ้นในตัวอย่างดินเลย นั่นคือ เกิดการไถลที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบขึ้นอย่างแท้จริงขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 4.33 ตัวอย่างแท่งดินสอในตัวอย่างดินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการทดสอบ



รูปที่ 4.34 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ
แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบ

4.5 ผลการลดแรงเสียดทานด้วยสารหล่อลื่น

4.5.1 แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์

รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

รูปที่ 4.40 แสดงลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ตารางที่ 4.7 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์และค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ

	หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
หน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ksc)	0.294	0.47	0.575
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ตำแหน่งหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ม.ม.)	0.6	0.5	0.5
หน่วยแรงเสียดทานคงค้าง (ksc)	0.215	0.361	0.431
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด	0.73	0.77	0.75
ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม. (ม.ม.)	0.10	0.15	0.19

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับแนวตั้ง คือ

$$\tau_{\max} = 0.141\sigma_n + 0.165$$

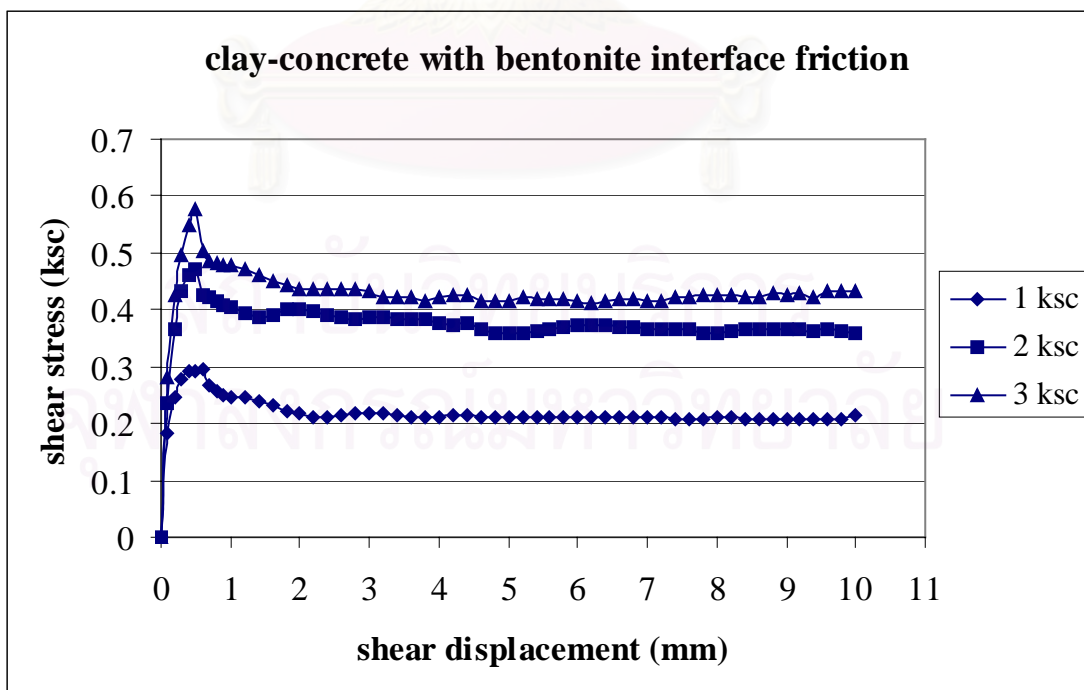
$$\text{ได้ค่า } c_{a(\max)} = 0.165, \tan \delta_{\max} = 0.141, \delta_{\max} = 8^\circ$$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับแนวตั้ง คือ

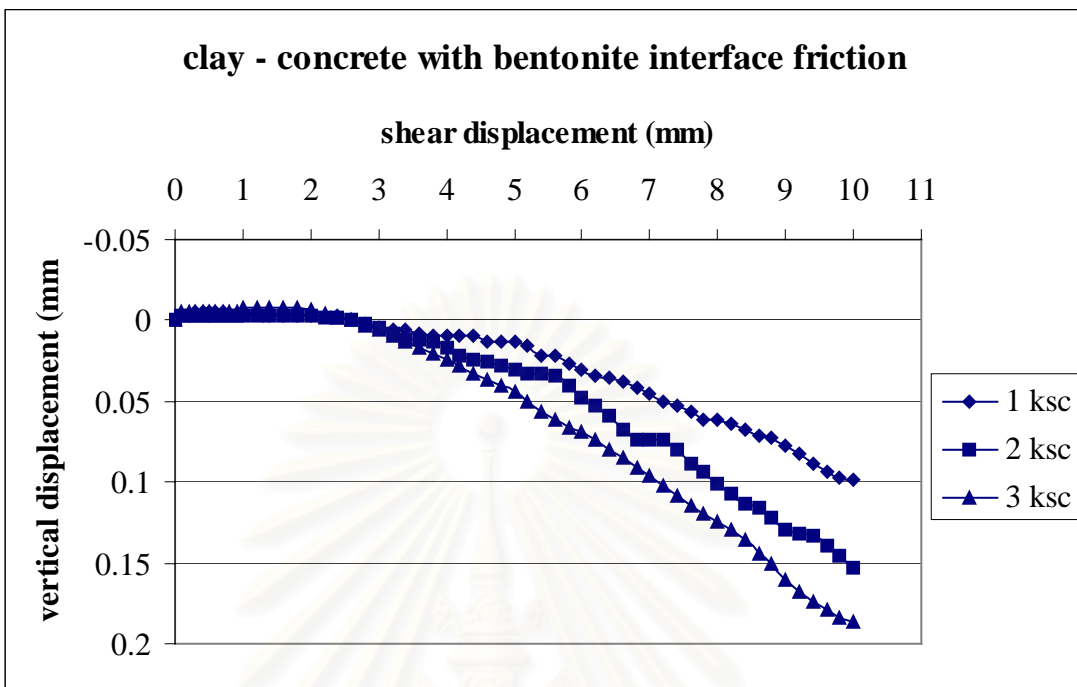
$$\tau_r = 0.108\sigma_n + 0.119$$

$$\text{ได้ค่า } c_{ar} = 0.119, \tan \delta_r = 0.108, \delta_r = 6.1^\circ$$

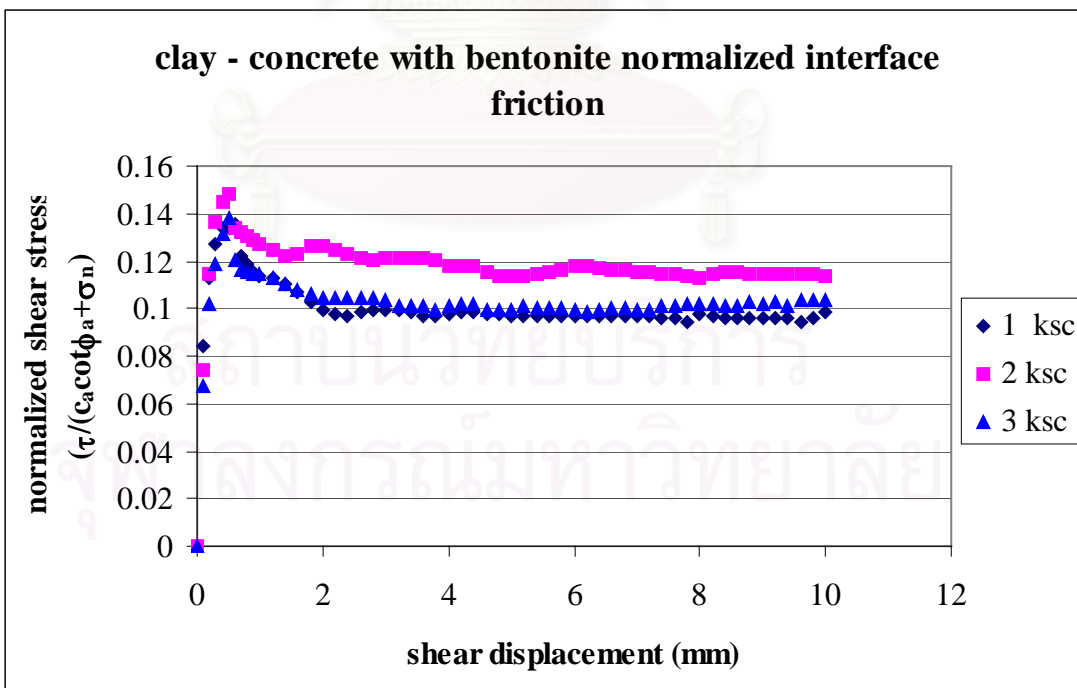
จากรูปที่ 4.35 พบว่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสจะแปรผันตามหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง ในช่วงแรกกราฟจะมีความชันสูงและทับกัน จากนั้นจะค่อยๆ แยกออกจากกันไปสู่อหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดของแต่ละหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง โดยใช้ระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ต่อจากนั้นหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าคงที่ ซึ่งอัตราส่วนหน่วยแรงคงค้างต่อหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดมีค่าประมาณ 0.75



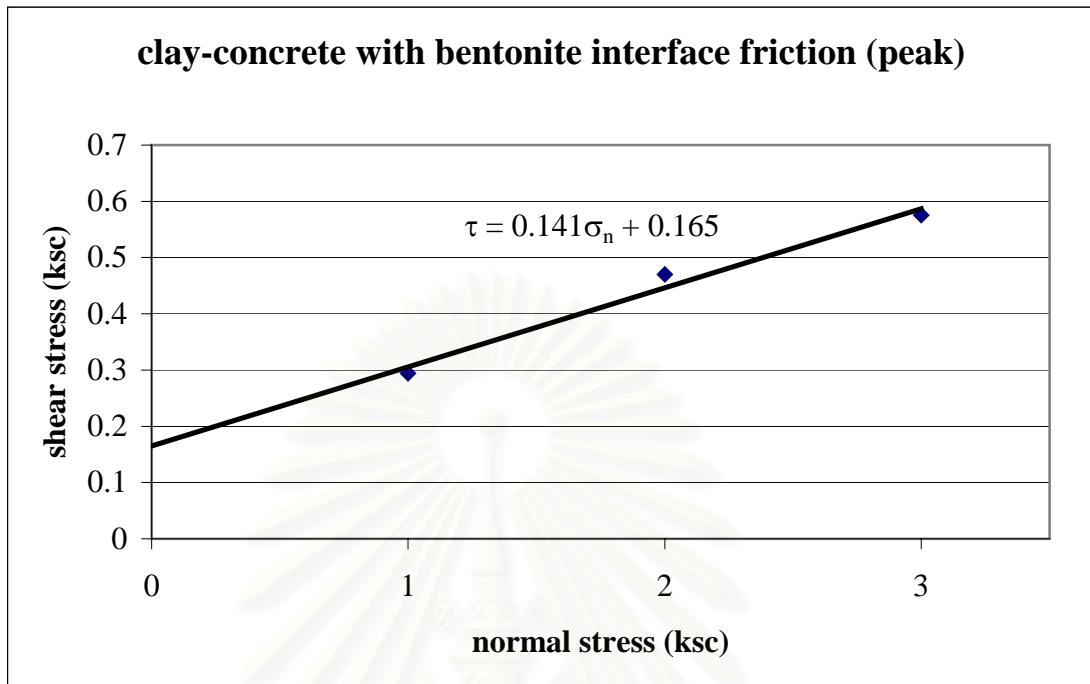
รูปที่ 4.35 หน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์



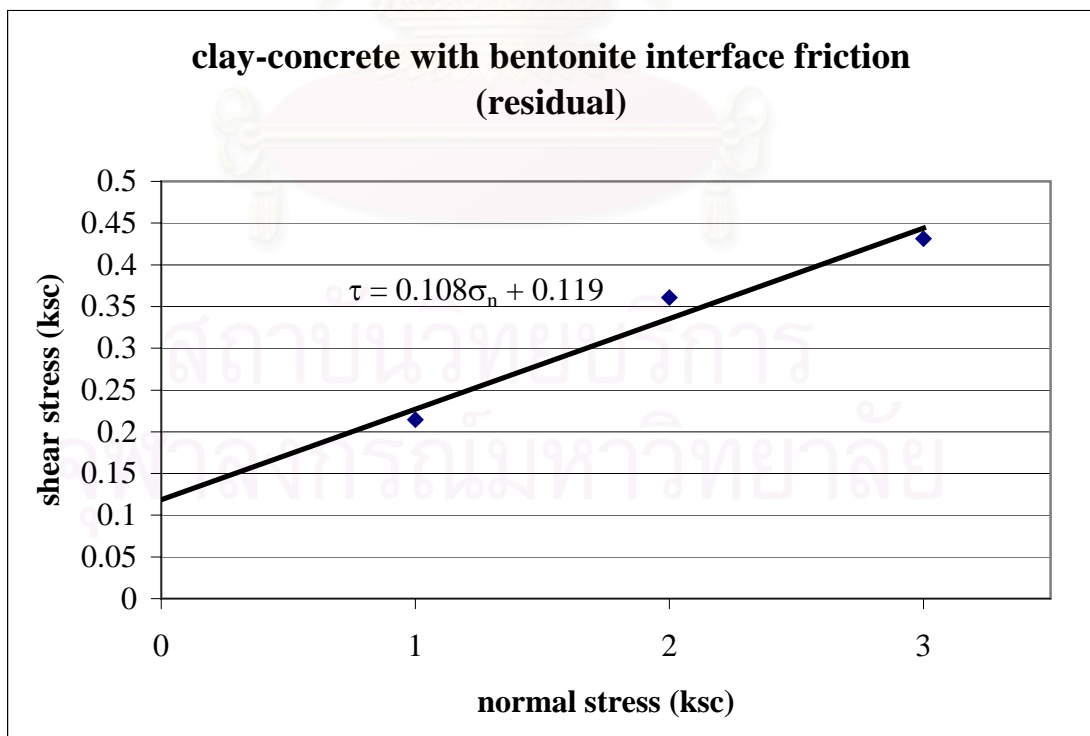
รูปที่ 4.36 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์



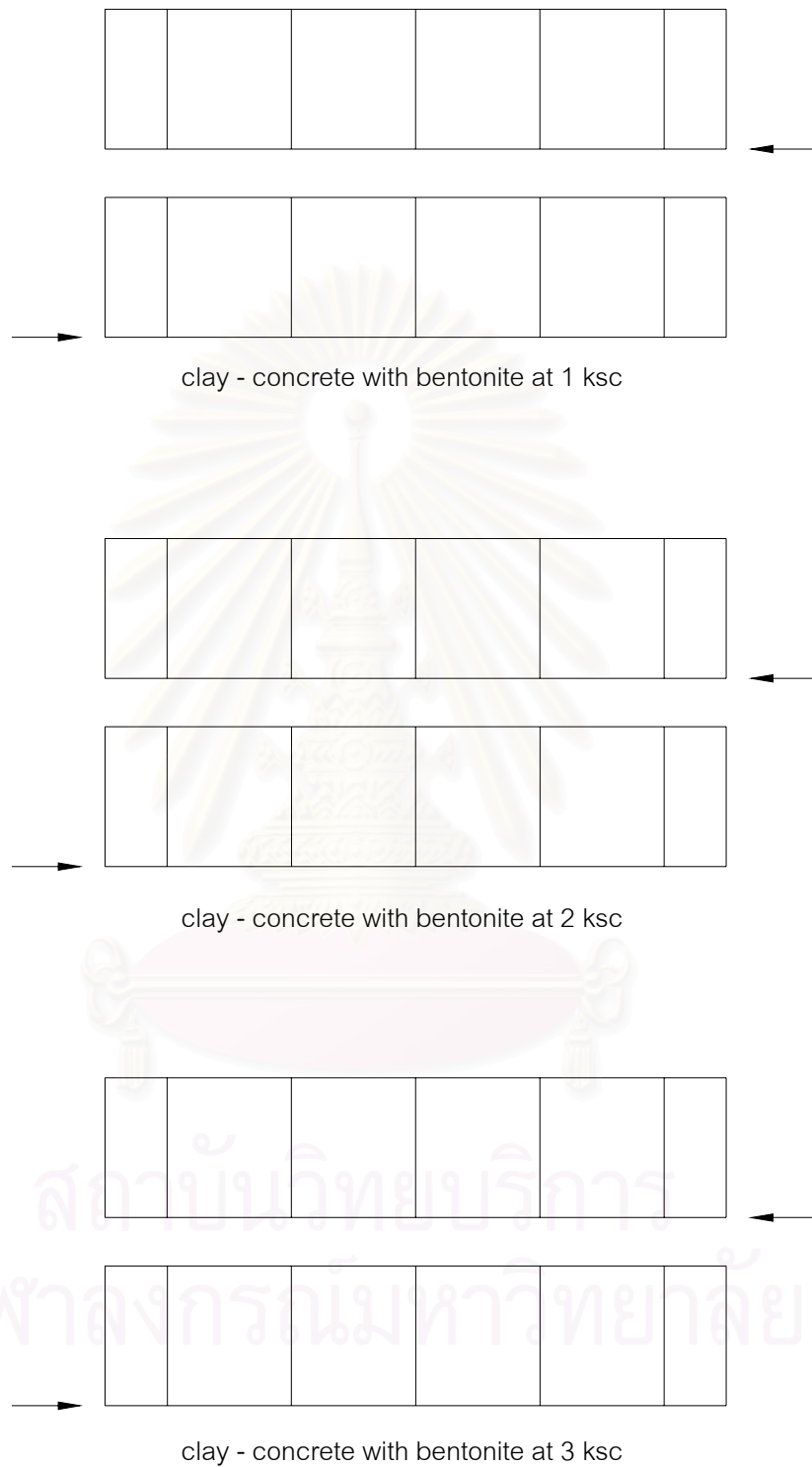
รูปที่ 4.37 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนต์



รูปที่ 4.38 หน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์



รูปที่ 4.39 หน่วยแรงเฉียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์



รูปที่ 4.40 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบแรงเสียดทาน
ที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์

จากรูปที่ 4.36 พบว่าในช่วงแรกตัวอย่างดินจะไม่มี การเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง จนกระทั่งระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนมีค่าประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นตัวอย่างดินจะเกิดการหลุดตัวอย่างต่อเนื่อง โดยการหลุดตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.40 พบว่าแท่งดินสอที่เสียบในตัวอย่างดินไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แสดงว่าเกิดการไถลขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบที่ทาผิวด้วยสารละลายเบนโทไนต์ขณะทำการทดสอบ

4.5.2 แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนต์

รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized ของหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน

รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.46 แสดงลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับแนวดิ่ง คือ

$$\tau_{\max} = 0.164\sigma_n + 0.035$$

$$\text{ได้ค่า } c_{a(\max)} = 0.035, \tan \delta_{\max} = 0.164, \delta_{\max} = 9.3^\circ$$

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับแนวดิ่ง คือ

$$\tau_r = 0.131\sigma_n + 0.032$$

$$\text{ได้ค่า } c_{ar} = 0.032, \tan \delta_r = 0.131, \delta_r = 7.5^\circ$$

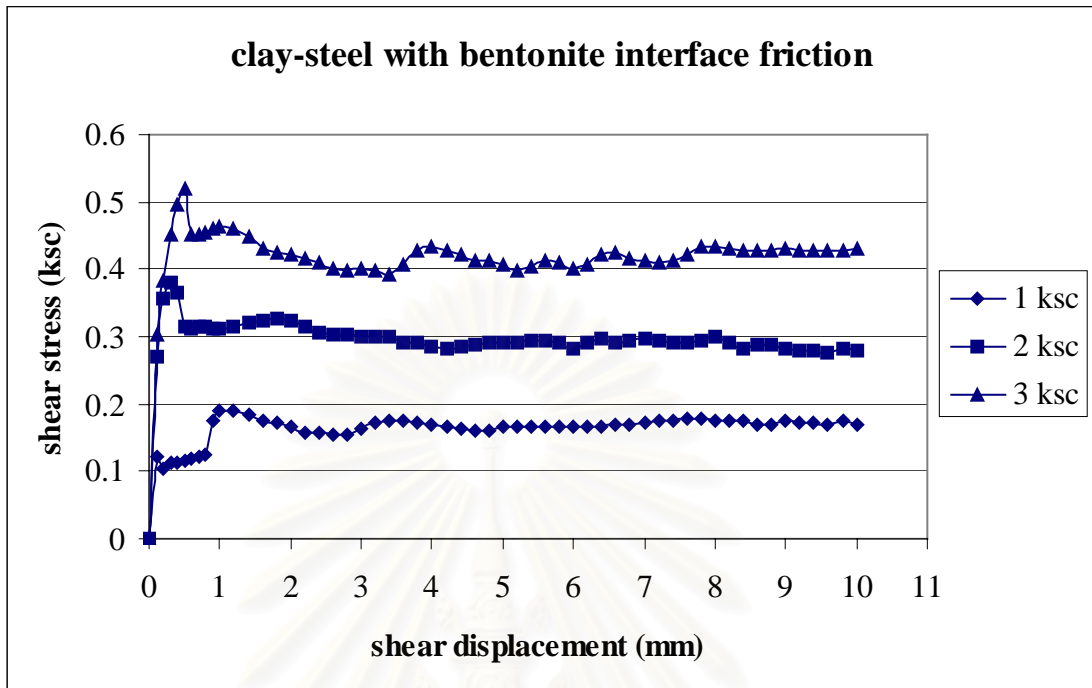
ตารางที่ 4.8 ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์และค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินเหนียวที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งต่างๆ

	หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
หน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ksc)	0.191	0.38	0.519
ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ตำแหน่งหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (ม.ม.)	1.0	0.3	0.5
หน่วยแรงเสียดทานคงค้าง (ksc)	0.170	0.279	0.431
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานคงค้างต่อหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด	0.89	0.74	0.83
ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม. (ม.ม.)	0.03	0.05	0.08

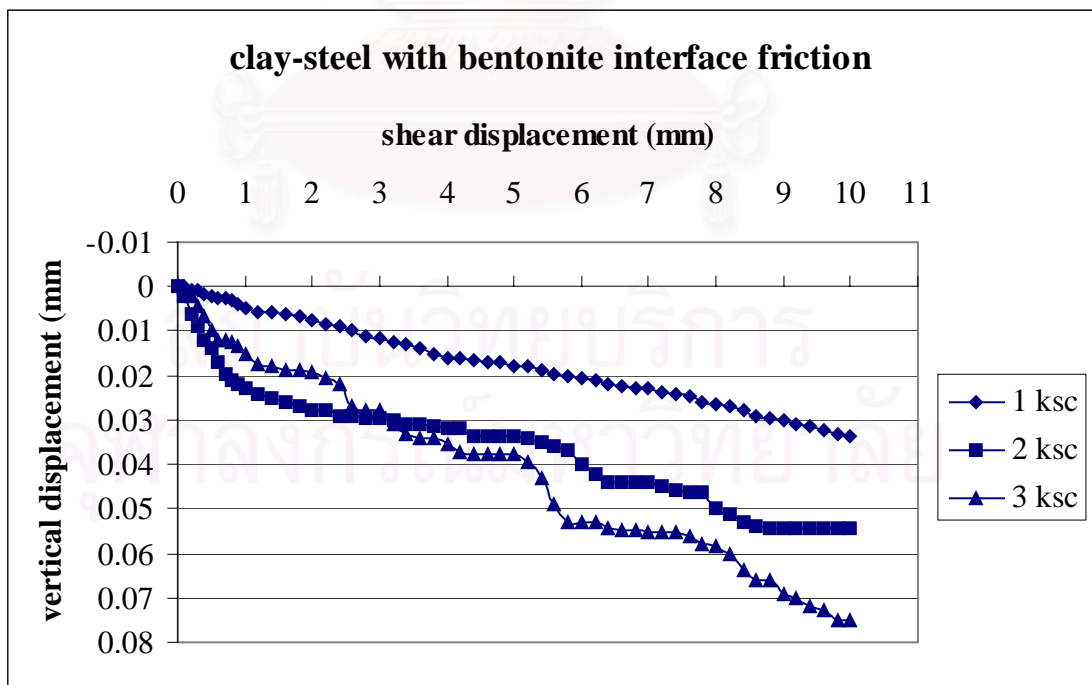
จากรูปที่ 4.41 พบว่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง เมื่อเริ่มทำการเฉือน ค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ทำให้กราฟมีความชันสูงและทับกันในช่วงแรกจนถึงค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดของแต่ละหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนประมาณแค่ 0.5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะลดลงในทันทีจนถึงค่าหน่วยแรงเสียดทานคงค้าง

จากรูปที่ 4.42 พบว่าตัวอย่างดินจะเกิดการทรุดตัวขึ้นเมื่อเริ่มทำการเฉือน และจะแปรผันตามหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

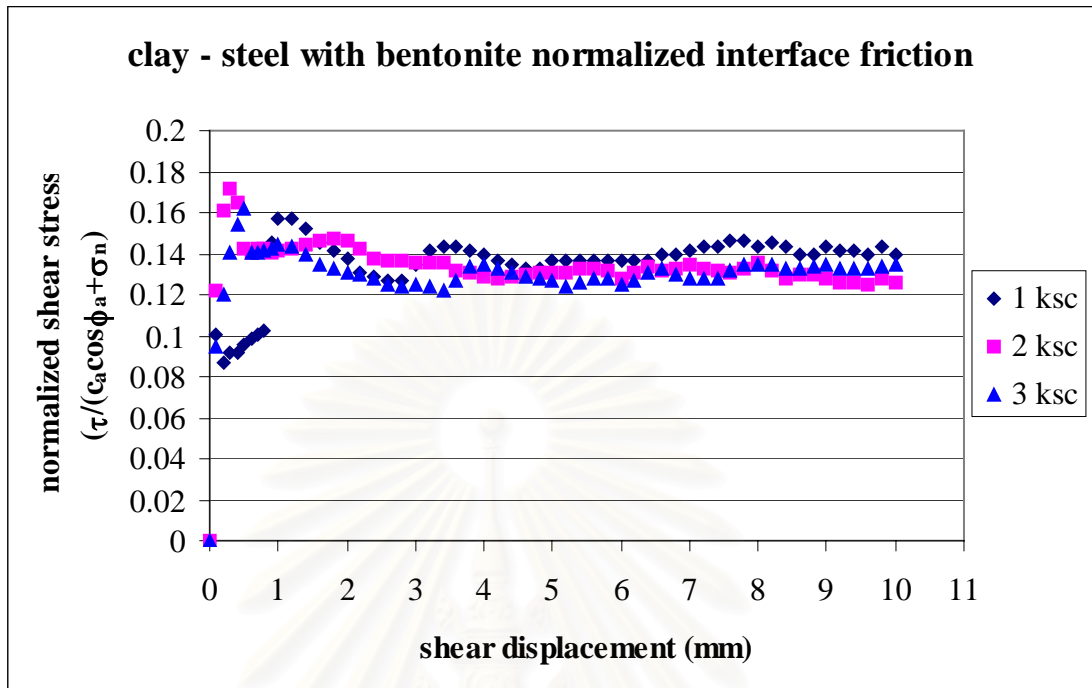
จากรูปที่ 4.46 พบว่า ภายหลังจากทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับแท่งดินสอที่เสียบอยู่ภายในตัวอย่างดิน แสดงว่าเกิดการไถลขึ้นที่ผิวสัมผัส โดยไม่มีการเฉือนเกิดขึ้นภายในตัวอย่างดิน



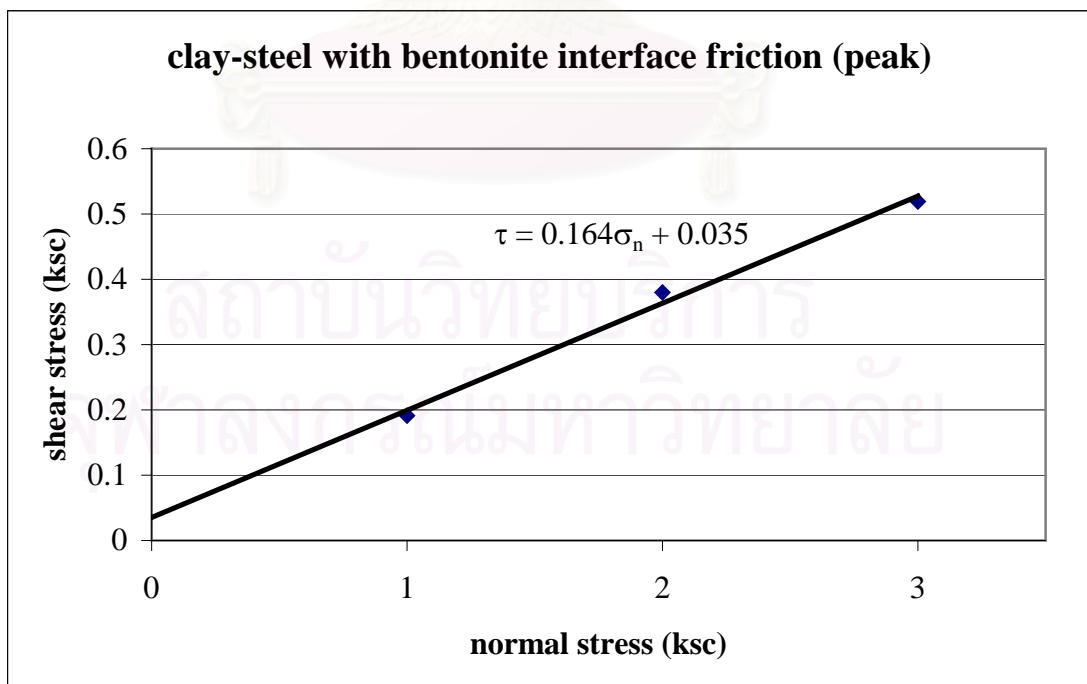
รูปที่ 4.41 หน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์



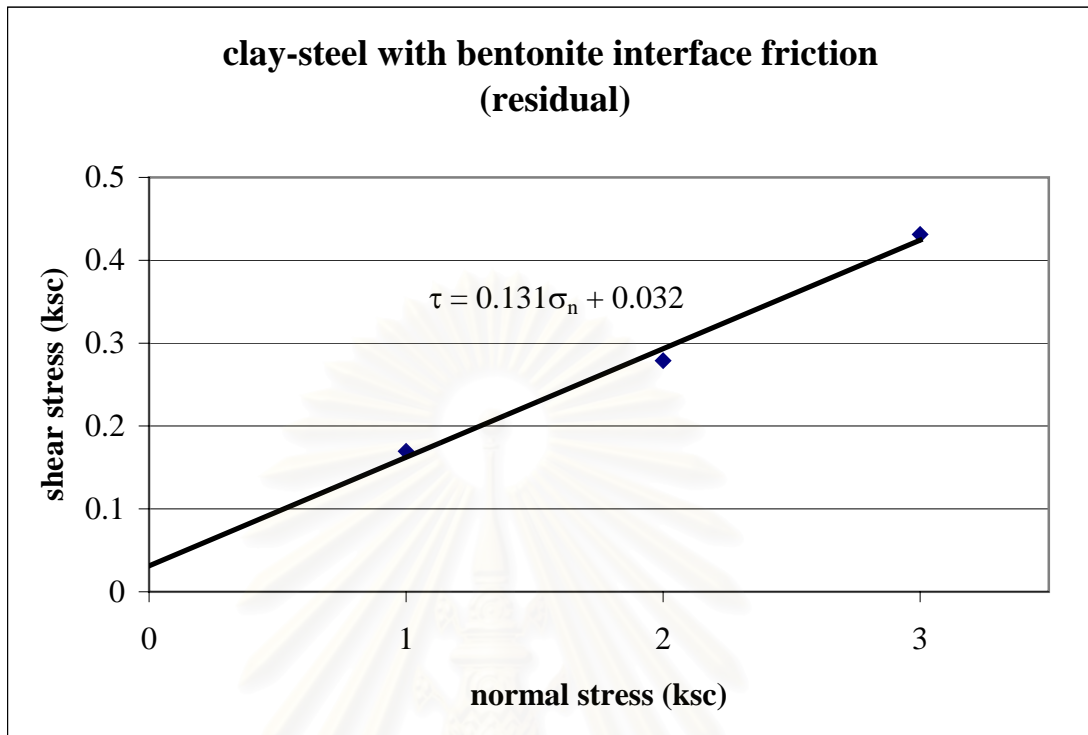
รูปที่ 4.42 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์



รูปที่ 4.43 ค่า Normalized ของหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับ เหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์

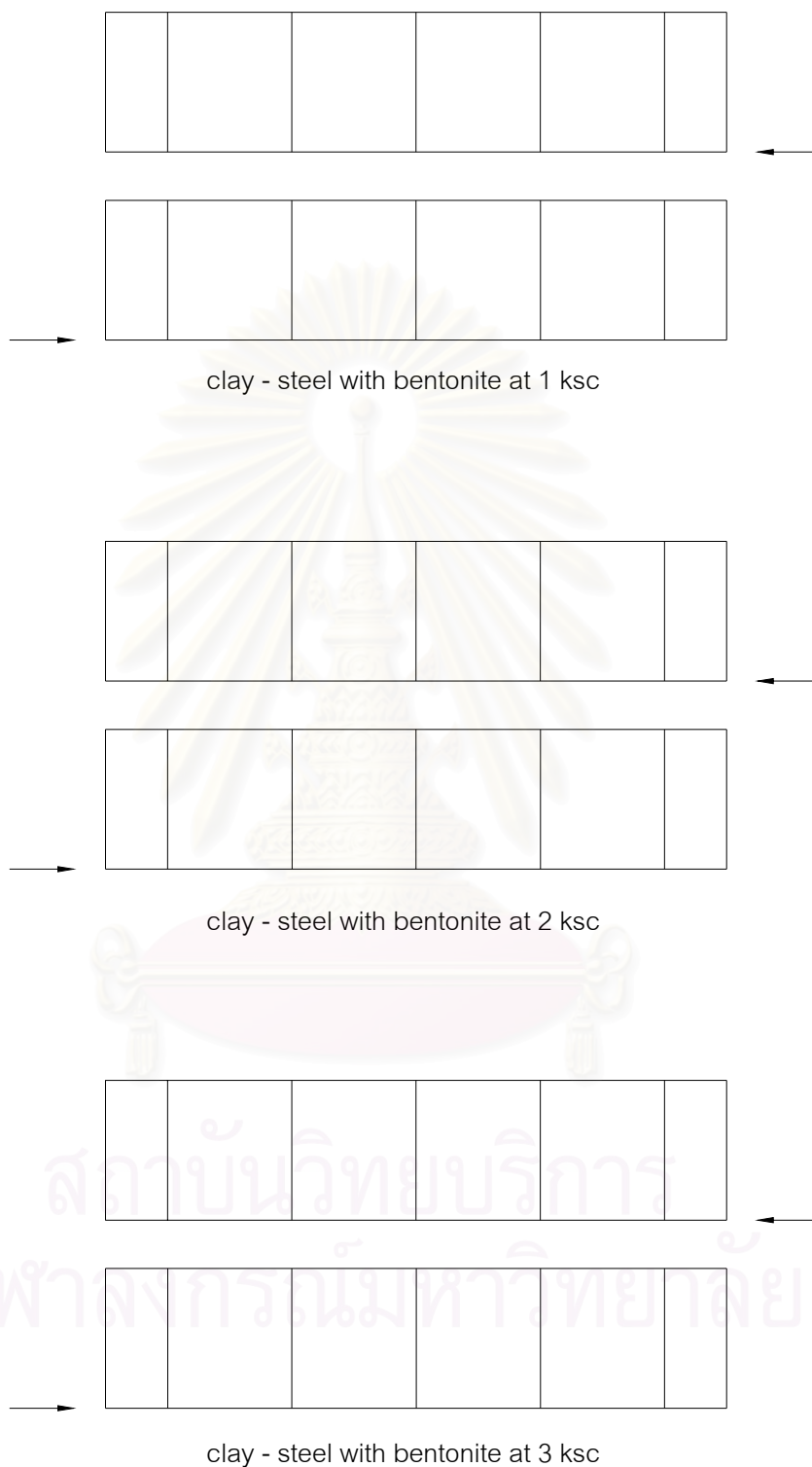


รูปที่ 4.44 หน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบ แรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์



รูปที่ 4.45 หน่วยแรงเฉือนทานคงค้างกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งในการทดสอบ
แรงเฉือนทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.46 ลักษณะแท่งดินสอภายในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบแรงเสียดทาน
ที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์

4.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบ

4.6.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างพื้นผิววัสดุ

4.6.1.1 เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตผิวหยาบกับคอนกรีตผิวเรียบ

รูปที่ 4.47 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc

รูปที่ 4.48 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc

รูปที่ 4.49 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc

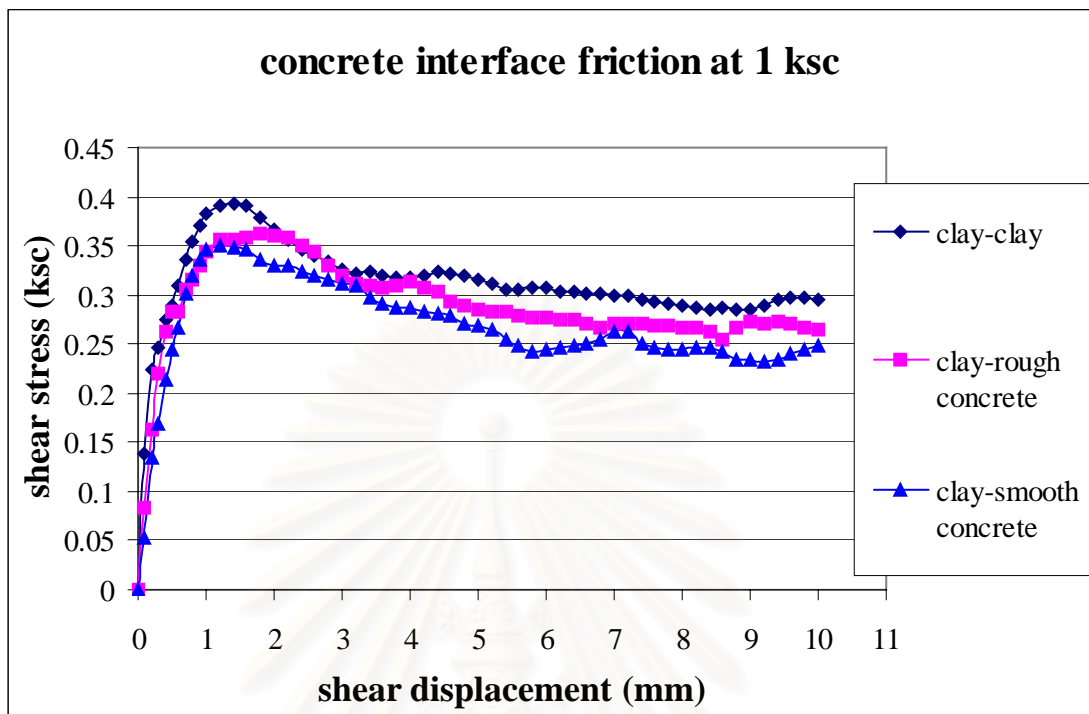
รูปที่ 4.50 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc

รูปที่ 4.51 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc

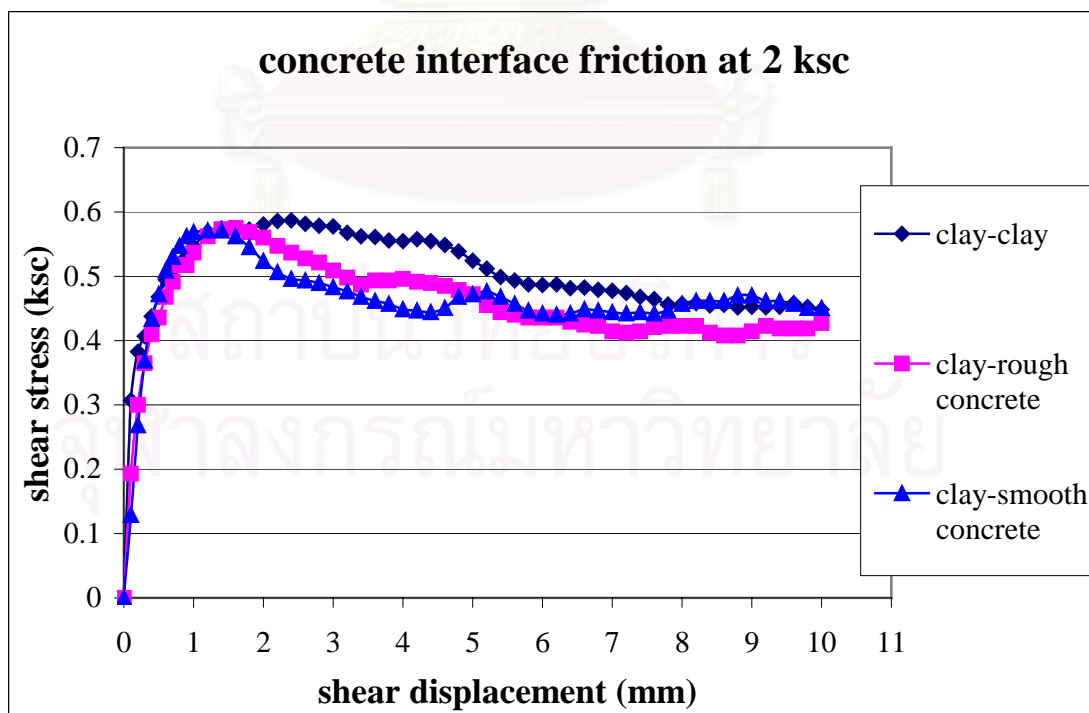
รูปที่ 4.52 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc

รูปที่ 4.53 แสดงหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

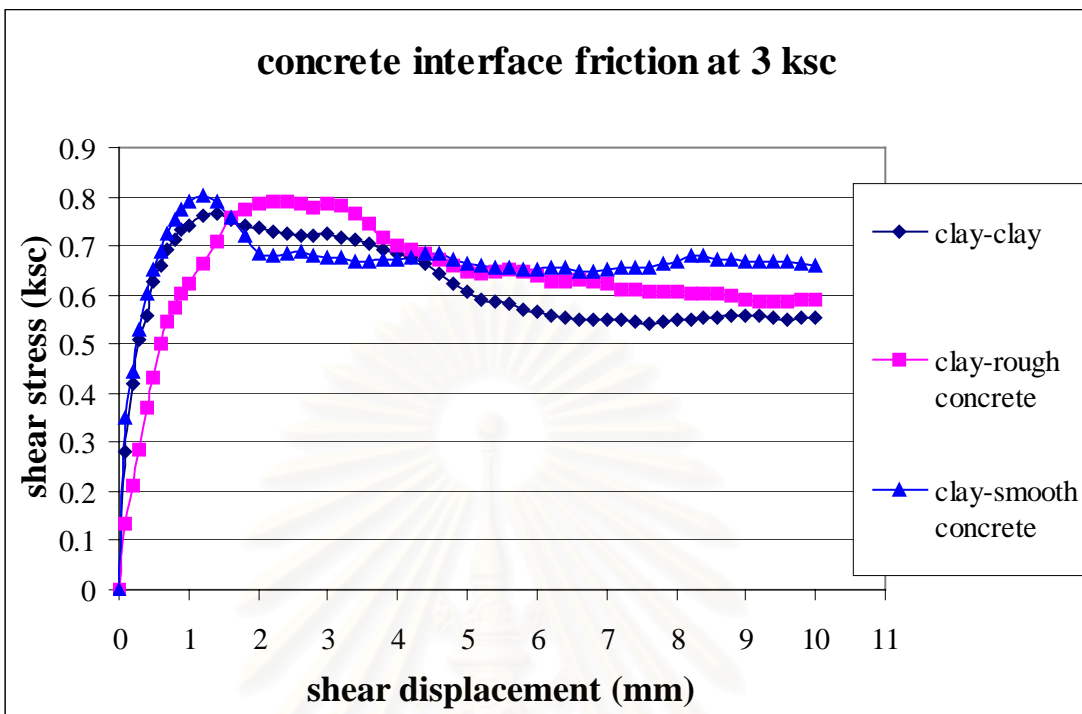
จากกราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งค่าต่างๆ พบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนทั้ง 3 ค่า คือ กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว, หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวหยาบ และดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อดูจากรูปที่ 4.53 จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนว่า กราฟของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดของคอนกรีตผิวหยาบกับคอนกรีตผิวเรียบเกือบจะทับกันพอดี และมีค่าใกล้เคียงกันกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว โดยกราฟเกาะกลุ่มรวมไปด้วยกัน แสดงว่าในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบนั้น เกิดการเฉือนขึ้นที่ตัวอย่างดินแทนการเฉือนที่ผิวสัมผัส เนื่องจากกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสที่แท้จริง ดังนั้นในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตจะไม่สามารถนำผลมาวิเคราะห์ถึงอิทธิพลสภาพความขรุขระของพื้นผิววัสดุที่มีผลต่อค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้



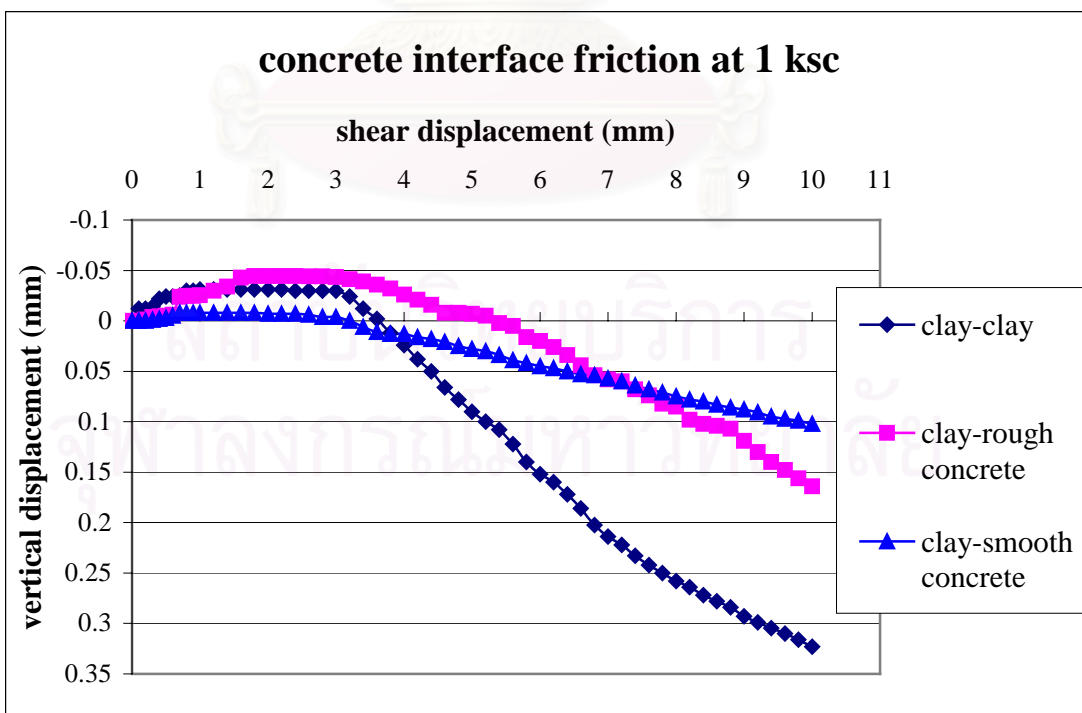
รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



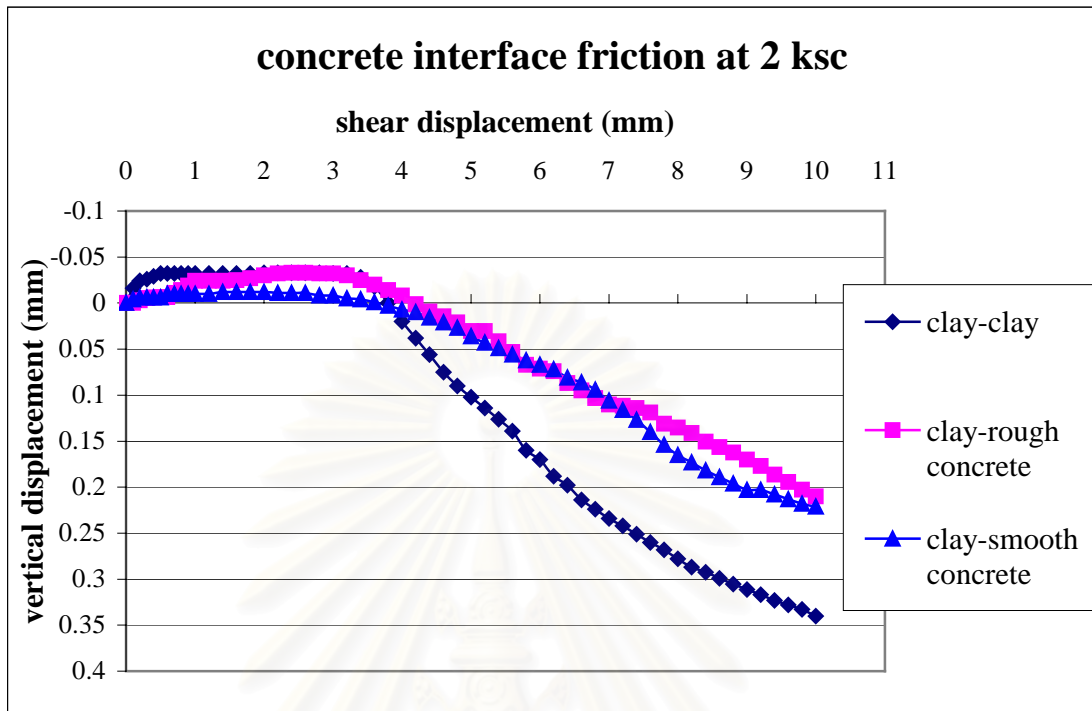
รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc



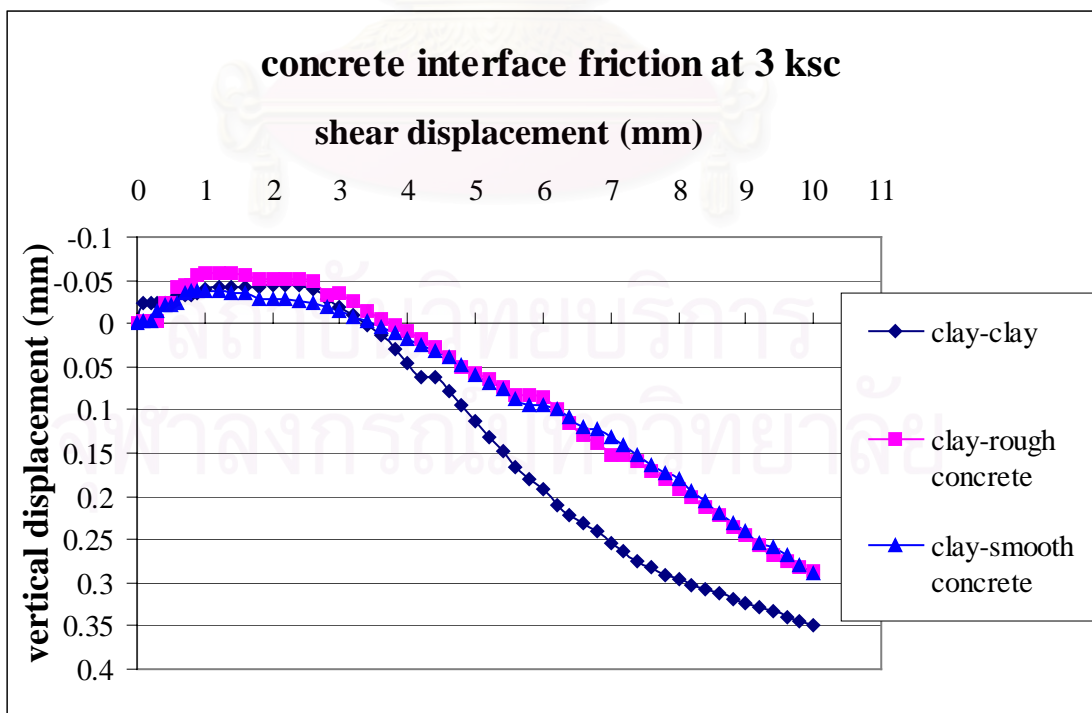
รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc



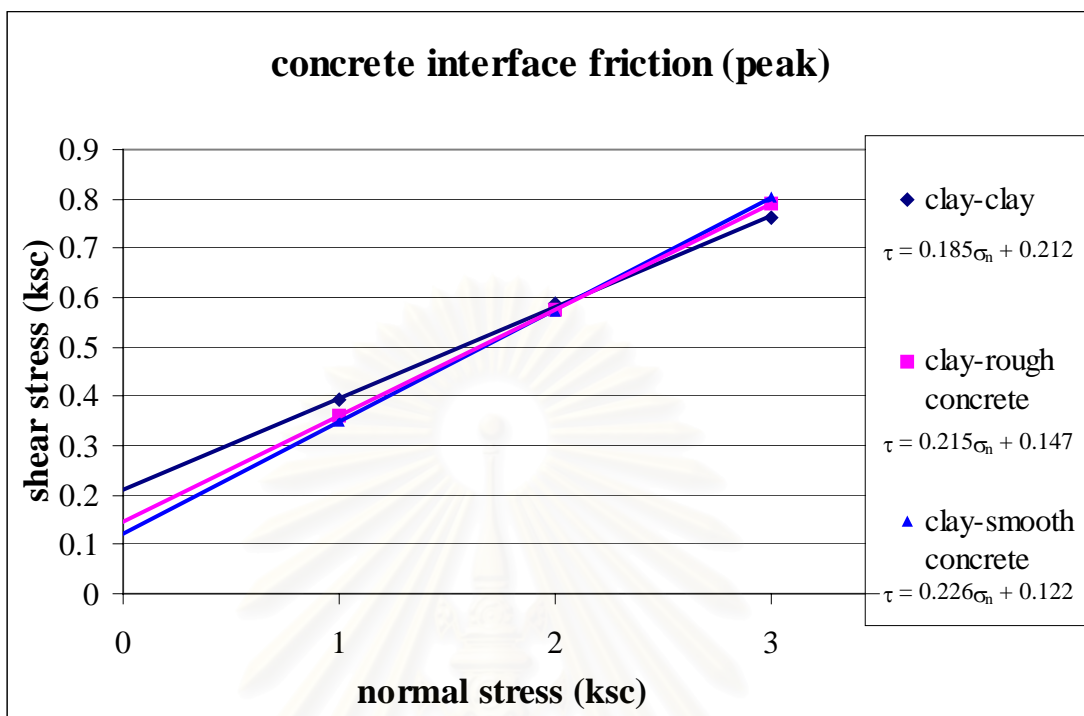
รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc



รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc



รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบ

จากกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว, การทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวเรียบ พบว่า การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวมีค่าการหลุดตัวของตัวอย่างดินมากที่สุด ส่วนค่าการหลุดตัวของตัวอย่างดินในการทดสอบหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวเรียบนั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตทั้ง 2 ชนิดนั้น เกิดการเฉือนขึ้นที่ตัวอย่างดินแทนการเฉือนที่ผิวสัมผัส

4.6.1.2 เปรียบเทียบระหว่างเหล็กผิวหยาบกับเหล็กผิวเรียบ

รูปที่ 4.54 แสดงหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc

รูปที่ 4.55 แสดงหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc

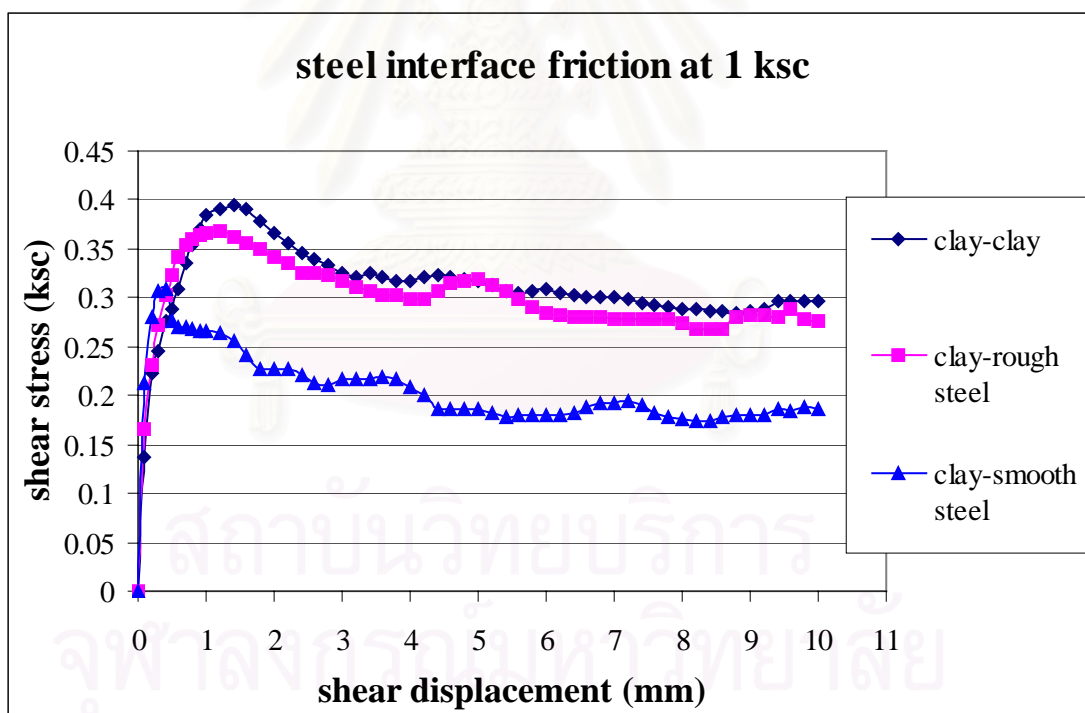
รูปที่ 4.56 แสดงหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc

รูปที่ 4.57 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc

รูปที่ 4.58 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc

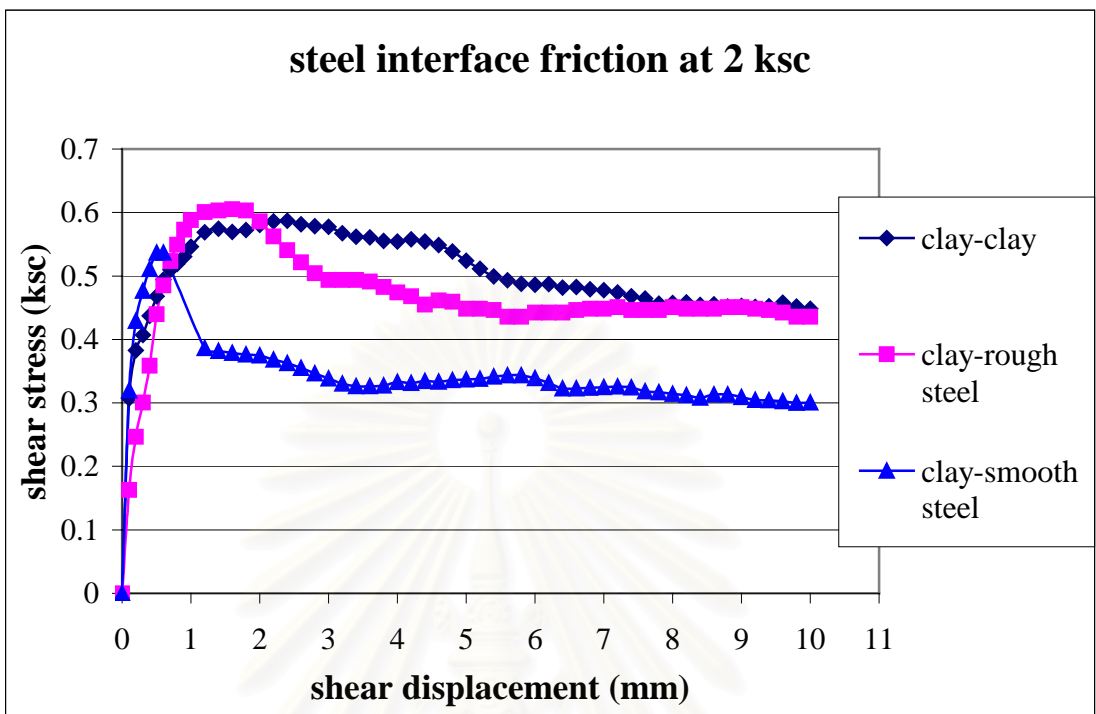
รูปที่ 4.59 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc

รูปที่ 4.60 แสดงหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง

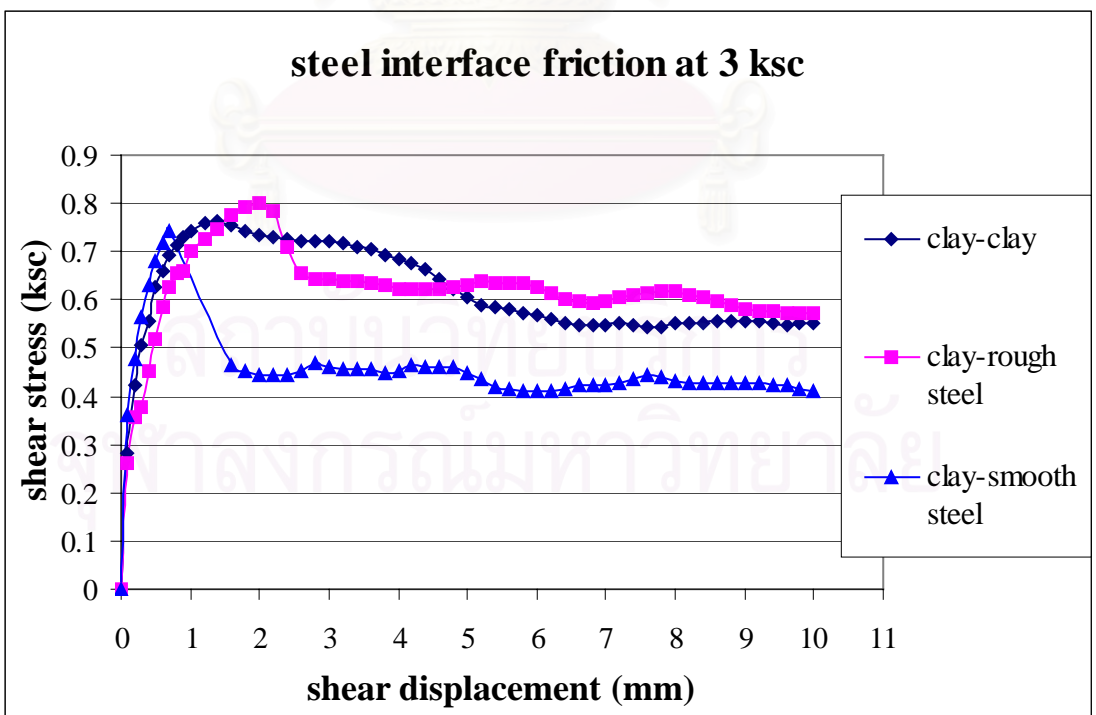


รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบ

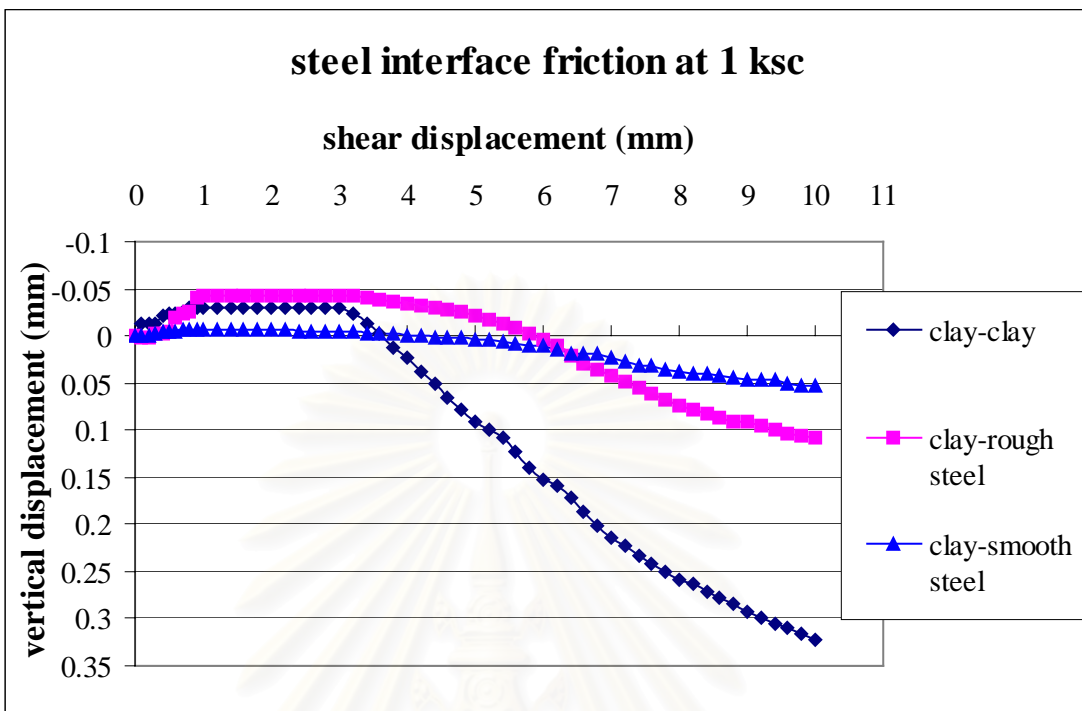
และเหล็กผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



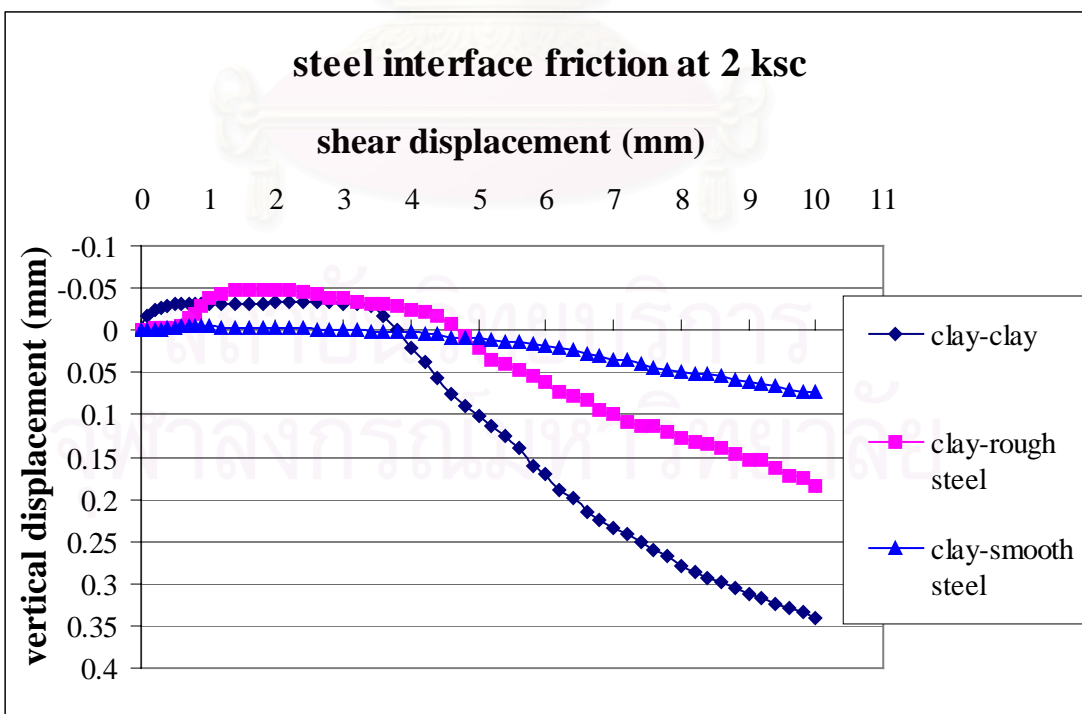
รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc



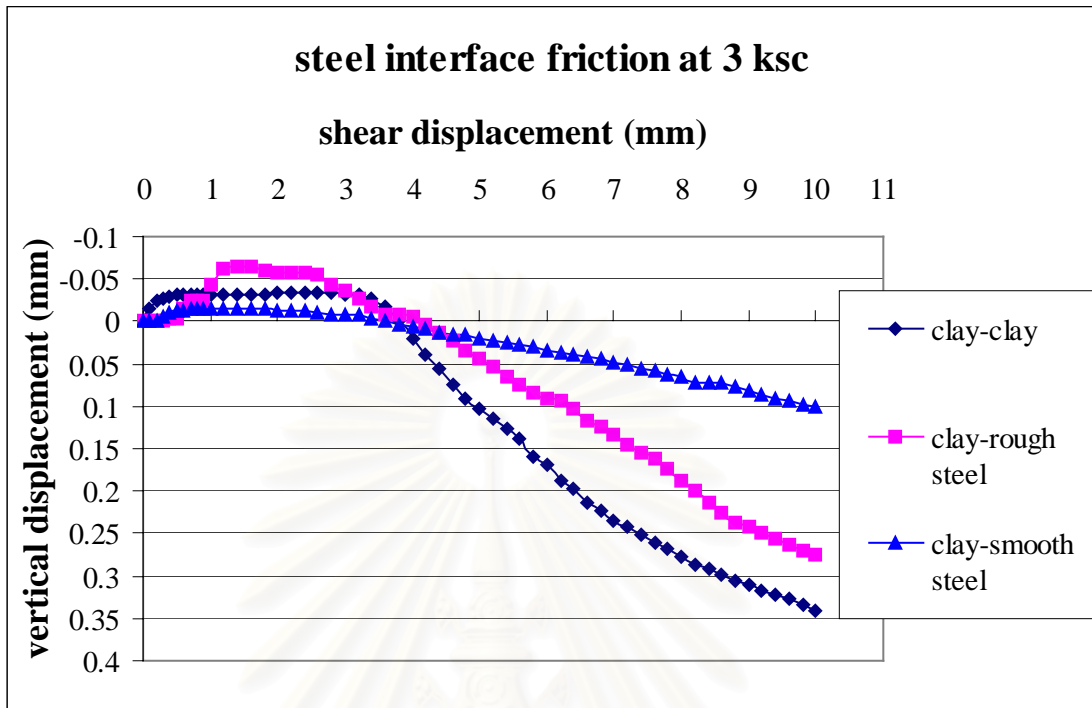
รูปที่ 4.56 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc



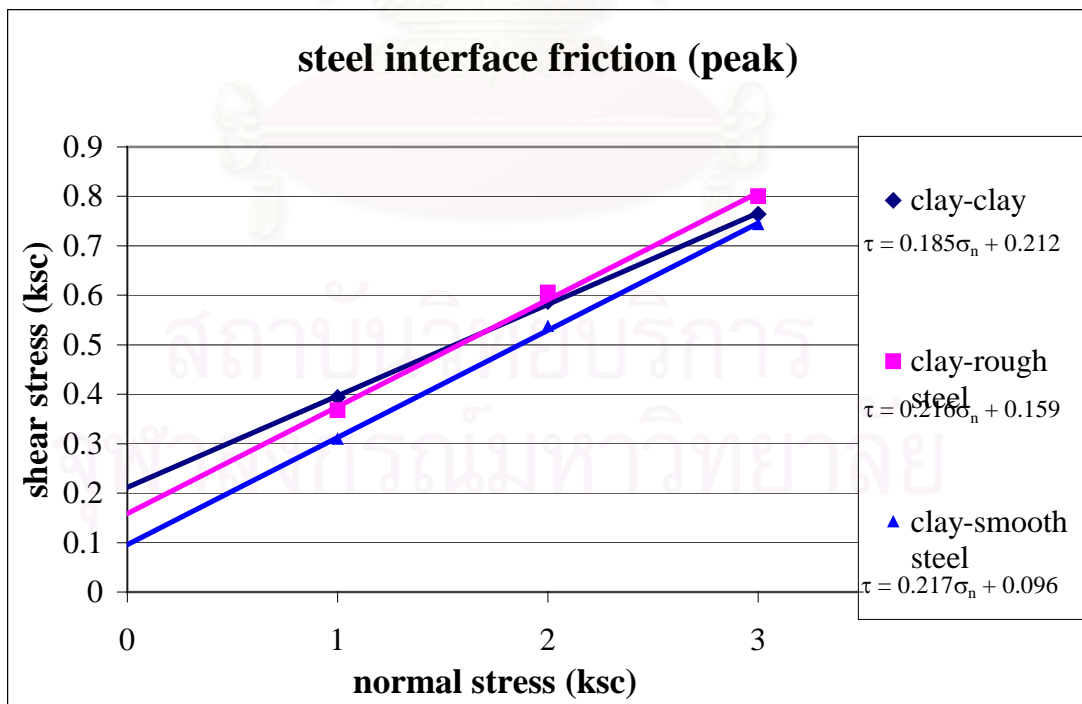
รูปที่ 4.57 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบและเหล็กผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



รูปที่ 4.58 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบและเหล็กผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc



รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบและเหล็กผิวเรียบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc



รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งของเหล็กผิวหยาบและเหล็กผิวเรียบ

จากกราฟเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว, หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบ และเหล็กผิวเรียบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้งค่าต่างๆ พบว่า หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบมีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินเหนียวมาก แสดงว่าในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบนั้นมีการเฉือนเกิดขึ้นในตัวอย่างดินแทนการเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับวัสดุ ทำให้ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับในการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบนั้นพบว่ามีความต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียวและต่ำกว่าค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบ แสดงว่าในการทดสอบของเหล็กผิวเรียบนั้นเกิดการเฉือนที่ผิวสัมผัสขึ้นจริง และแสดงว่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นตามสภาพความหยาบของพื้นผิววัสดุที่เพิ่มขึ้น แต่จะสังเกตเห็นว่าในช่วงต้นหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบจะมีค่ามากกว่า (กราฟมีความชันมากกว่า) ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว จนถึงระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนที่ประมาณ 0.5-0.7 มิลลิเมตร กำลังรับแรงเฉือนถึงจะเพิ่มขึ้นต่อไปจนมีค่าสูงกว่าค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าการทดสอบของเหล็กผิวเรียบจะมีค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสถึงจุดสูงสุดเร็วกว่าในการทดสอบของเหล็กผิวหยาบ และเมื่อถึงจุดสูงสุดแล้วค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบจะลดลงโดยทันทีทันใด (เกิด peak) ขณะที่ในการทดสอบของเหล็กผิวหยาบค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะค่อยๆ ลดลง

จากกราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ พบว่า การทรุดตัวของตัวอย่างดินจากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจะมีค่ามากที่สุด การทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวหยาบจะมีค่าการทรุดตัวมากกว่าการทดสอบหาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ แสดงว่าค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินขณะทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามสภาพความหยาบของพื้นผิววัสดุที่เพิ่มขึ้น

4.6.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบลดแรงเสียดทานด้วยสารหล่อลื่น

4.6.2.1 เปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตผิวหยาบกับคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์

รูปที่ 4.61 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ที่หน่วยแรงกดทับในแนว

รูปที่ 4.62 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ที่หน่วยแรงกดทับในแนว
ดิ่ง 2 ksc

รูปที่ 4.63 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ที่หน่วยแรงกดทับในแนว
ดิ่ง 3 ksc

รูปที่ 4.64 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่
หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc

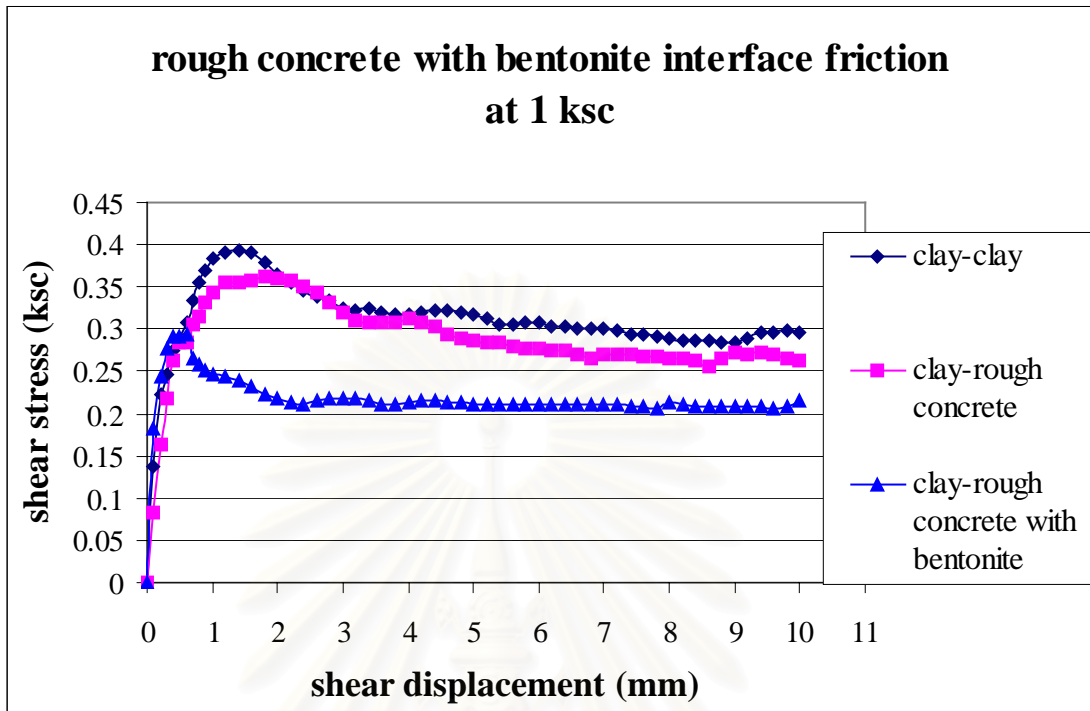
รูปที่ 4.65 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่
หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc

รูปที่ 4.66 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่
หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc

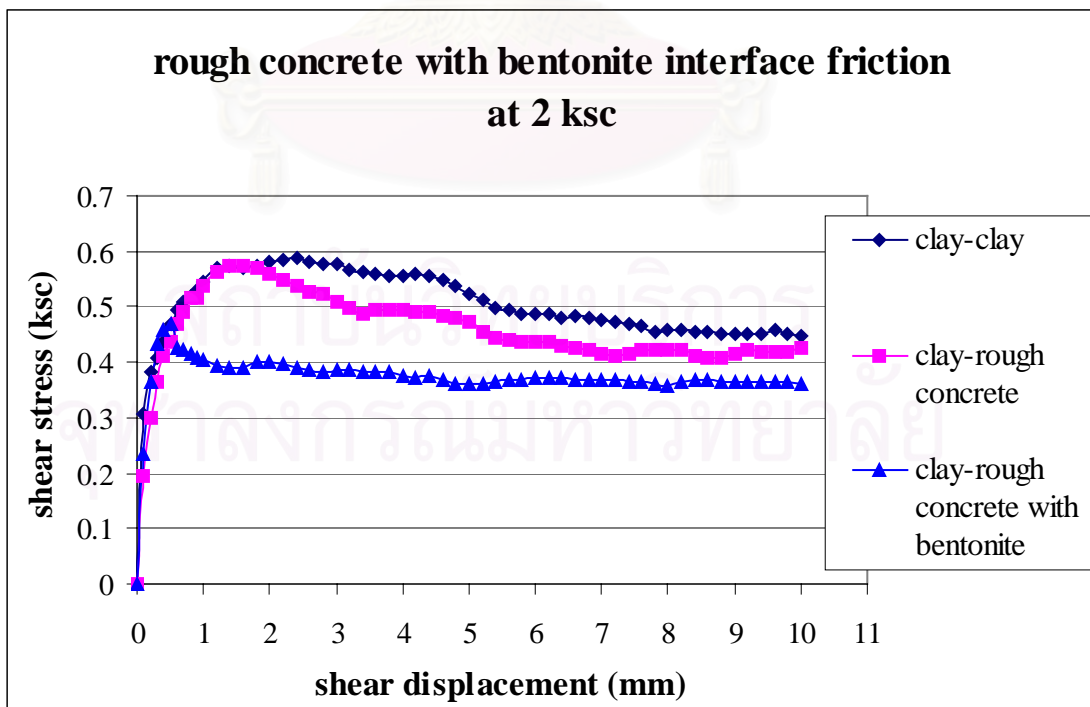
รูปที่ 4.67 แสดงหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสกับหน่วยแรงกดทับ
ในแนวตั้ง

ตารางที่ 4.9 อัตราส่วนระหว่างค่าจากการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์
ต่อค่าจากการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบ

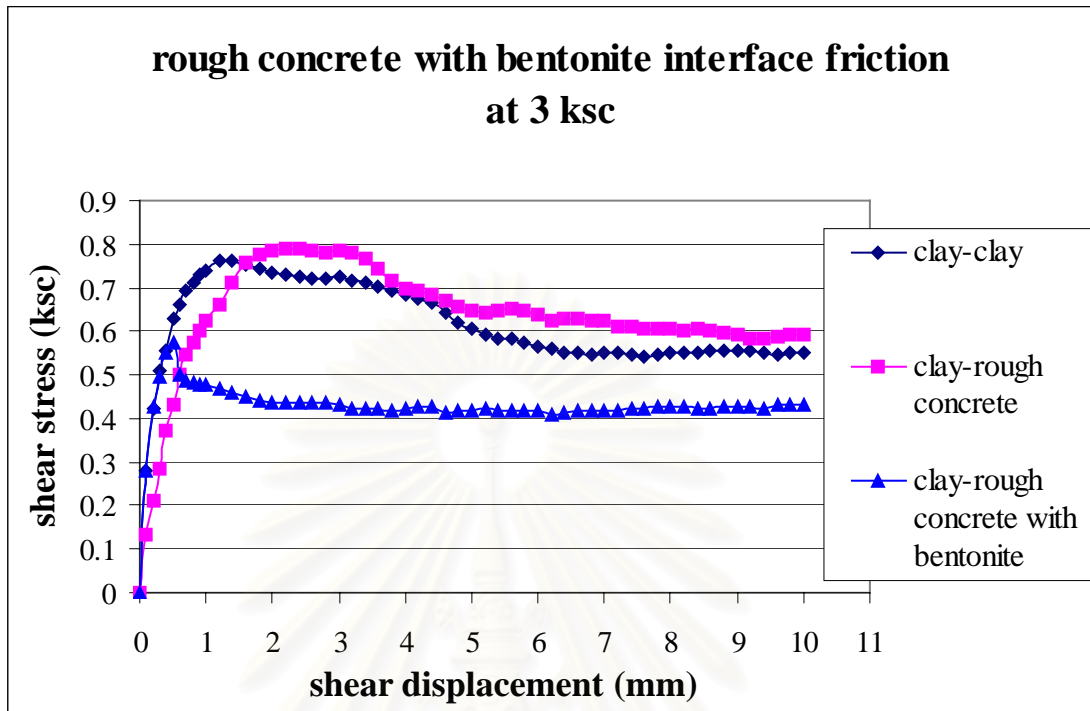
	หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด	0.81	0.82	0.73
อัตราส่วนการหลุดตัวที่ระยะการเคลื่อนที่ใน แนวการเฉือน 10 ม.ม.	0.63	0.71	0.66
อัตราส่วนระหว่างค่า c_a	1.12		
อัตราส่วนระหว่างค่า $\tan \delta$	0.66		



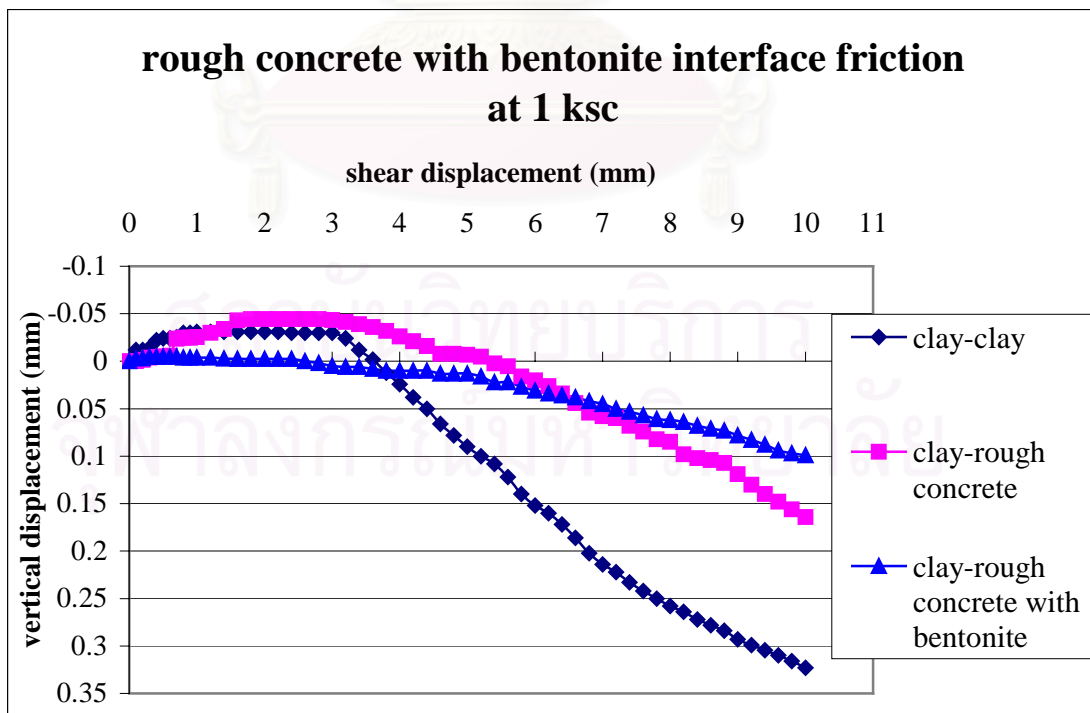
รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



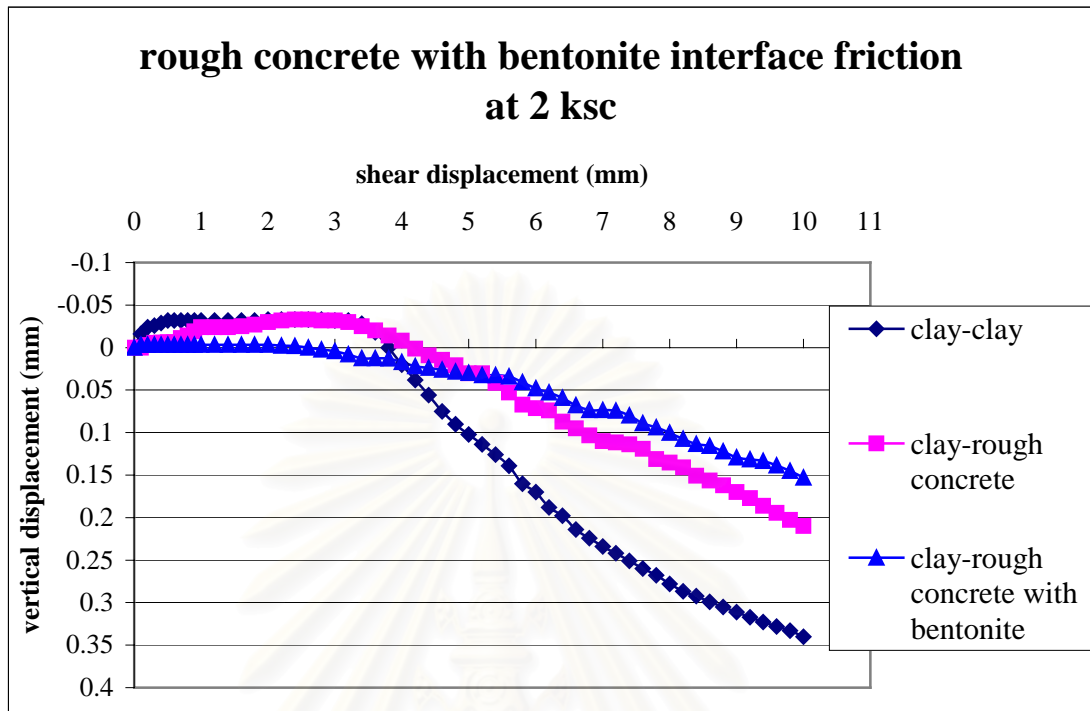
รูปที่ 4.62 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc



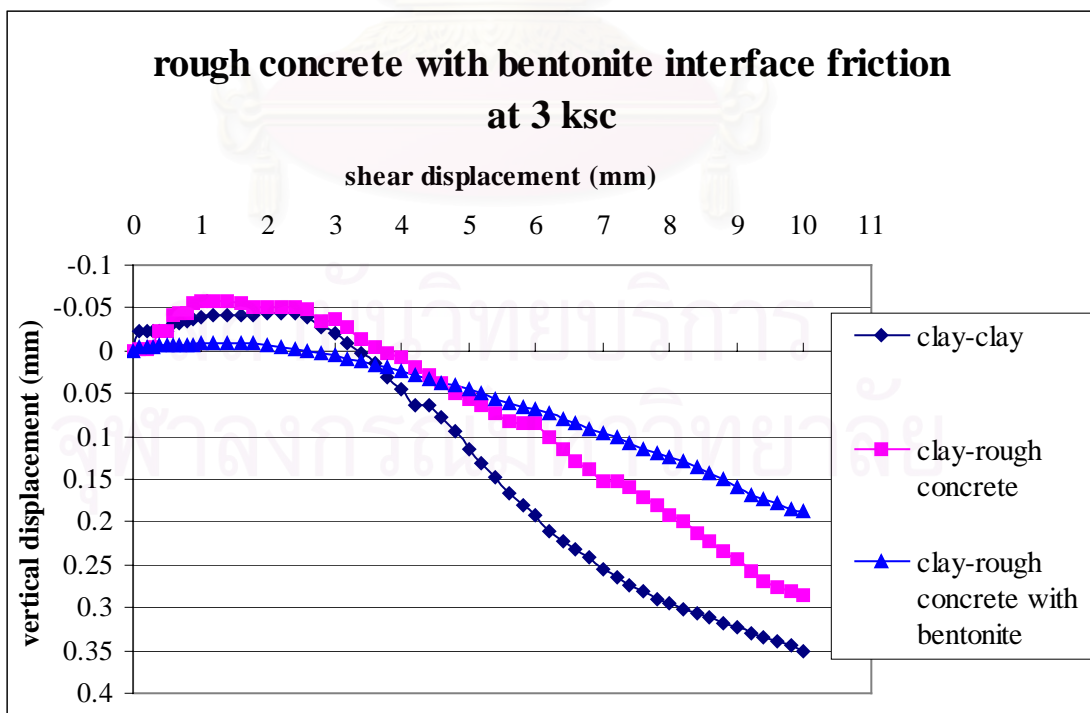
รูปที่ 4.63 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc



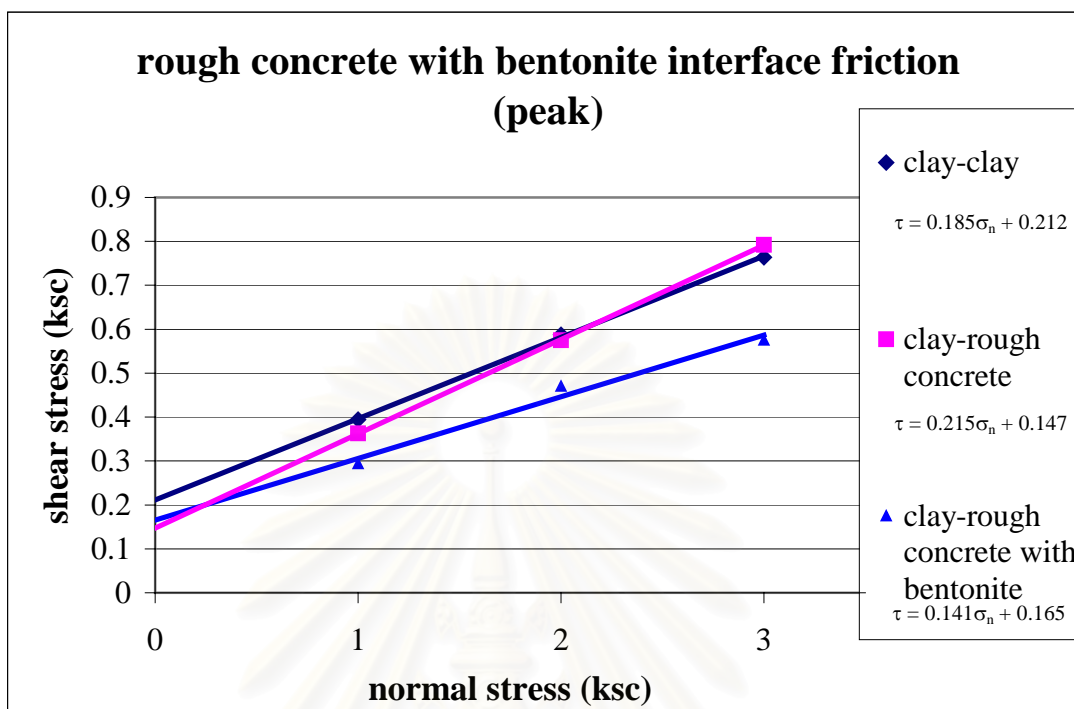
รูปที่ 4.64 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



รูปที่ 4.65 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc



รูปที่ 4.66 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบ และคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc



รูปที่ 4.67 เปรียบเทียบหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งของคอนกรีตผิวหยาบและคอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์

จากผลการทดสอบพบว่า สารละลายเบนโทไนด์สามารถช่วยลดแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสได้ โดยหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดจะลดลงเหลือประมาณ 0.75 เท่าจากที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงเฉียดทานสูงสุด ($\tan \delta$) ได้ เหลือประมาณ 0.67 เท่าจากที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น แต่ไม่ได้ช่วยลดค่า c_a (adhesion) ลง แต่เนื่องจากในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตหยาบนั้นเกิดการเขื่อนขึ้นที่ตัวอย่างดิน ค่าที่ได้จึงไม่ใช่ค่าแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสที่แท้จริง ดังนั้นอัตราส่วนการลดลงของแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์นั้นอาจมีค่าต่างจากค่าที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อลดแรงเฉียดทานด้วยการใช้สารละลายเบนโทไนด์นั้น ระยะเวลาเคลื่อนที่ในแนวการเขื่อนจากเริ่มต้นทดสอบจนถึงจุดสูงสุดจะน้อยลง และเมื่อผ่านจุดสูงสุดแล้วหน่วยแรงเฉียดทานจะลดลงในอัตราที่ค่อนข้างเร็ว (เกิด peak ชื้นเล็กน้อย) จนถึงค่าที่ค่อนข้างคงที่

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวของตัวอย่างดินขณะทดสอบเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์เป็นสารหล่อลื่นพบว่า ค่าการหลุดตัวของตัวอย่างดินเมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์มีค่าลดลงเหลือประมาณ 0.65 เท่าจากที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น และพบว่าในช่วงแรกของการ

ทดสอบที่ใช้สารละลายเบนโทไนด์ ตัวอย่างดินจะไม่เกิดการทรุดตัวโดยค่อนข้างคงที่ หลังจากนั้นจะค่อยๆ เกิดการทรุดตัวขึ้น

4.6.2.2 เปรียบเทียบระหว่างเหล็กผิวเรียบกับเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์

รูปที่ 4.68 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 1 ksc

รูปที่ 4.69 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 2 ksc

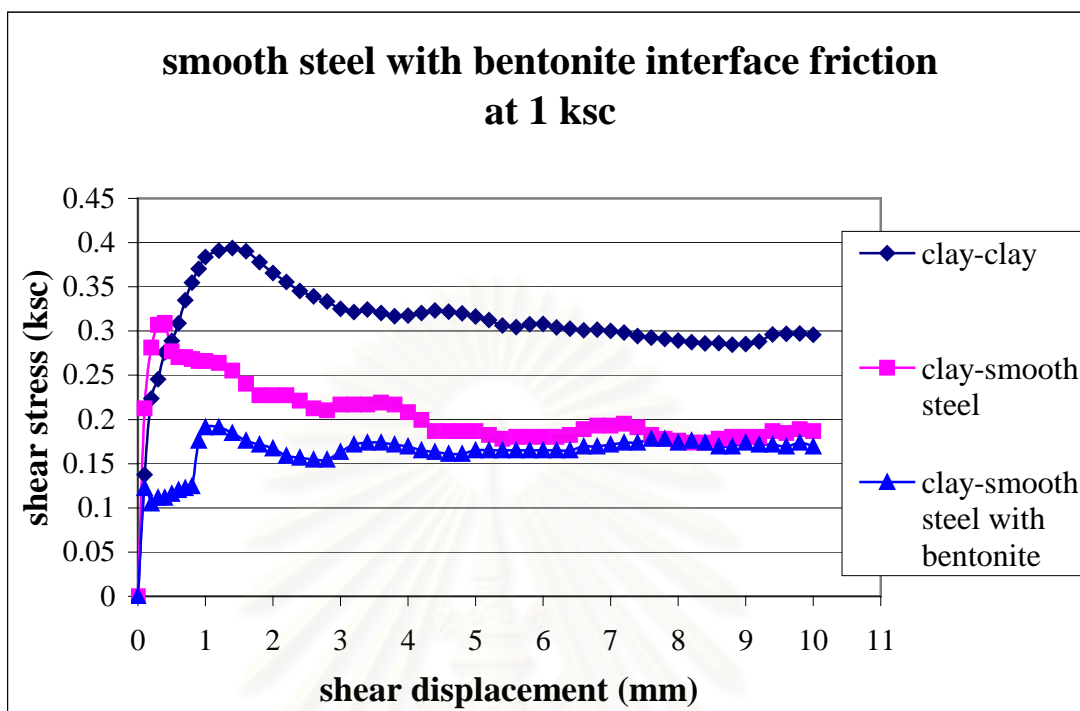
รูปที่ 4.70 แสดงหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัส ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 3 ksc

รูปที่ 4.71 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 1 ksc

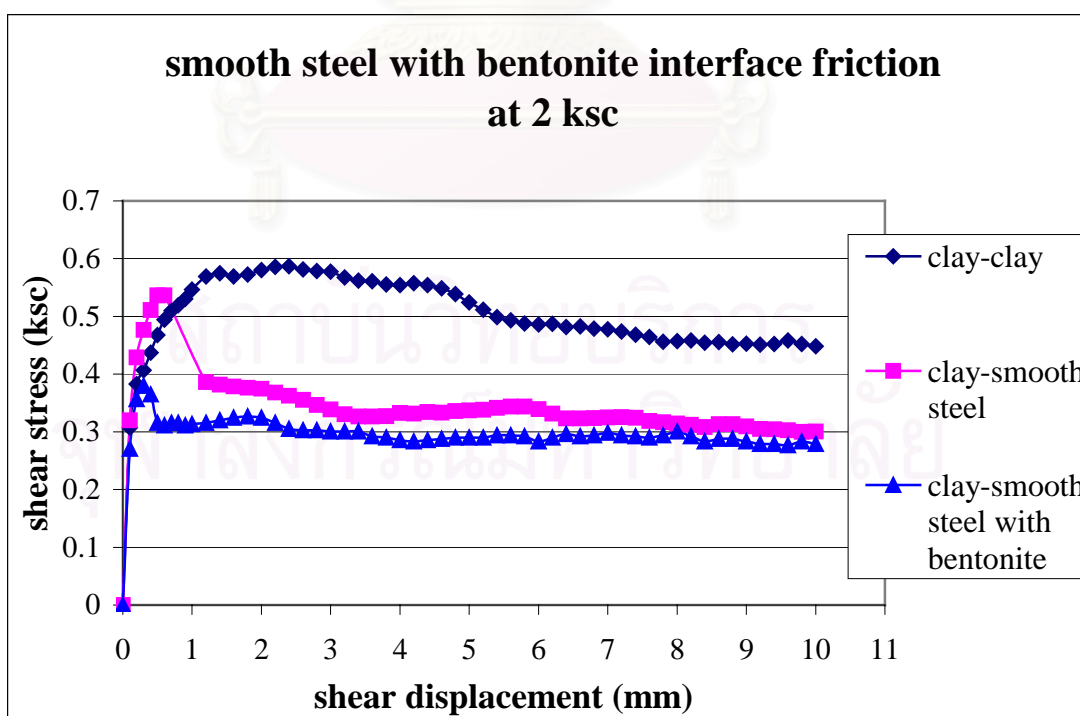
รูปที่ 4.72 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 2 ksc

รูปที่ 4.73 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 3 ksc

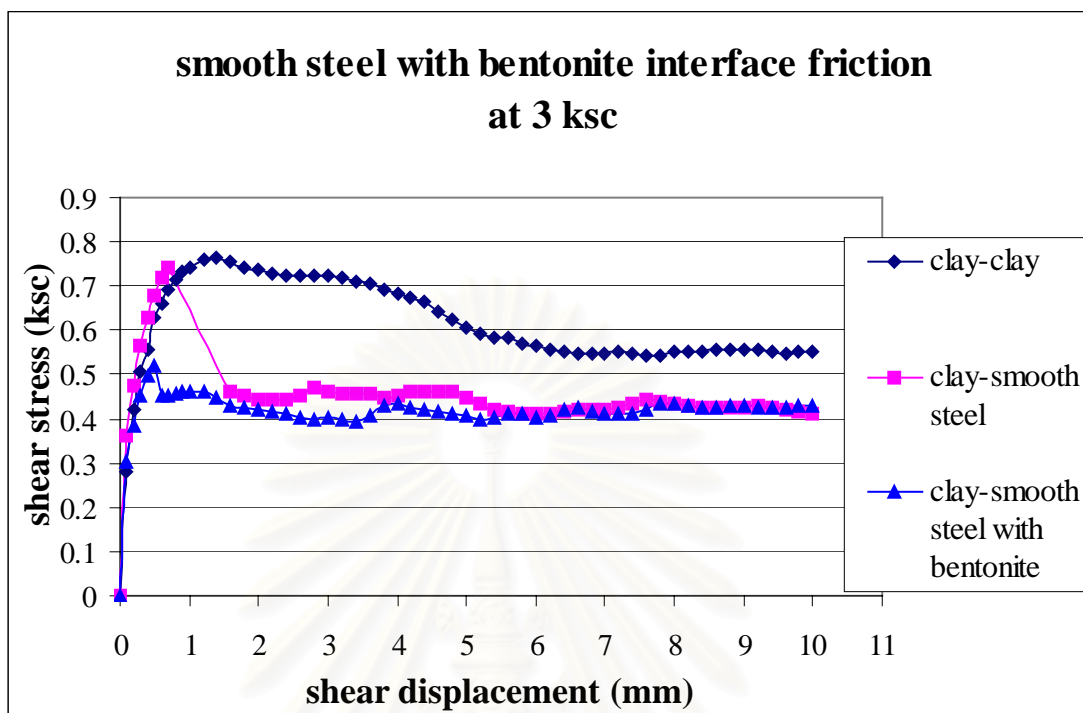
รูปที่ 4.74 แสดงหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่ผิวสัมผัสกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง



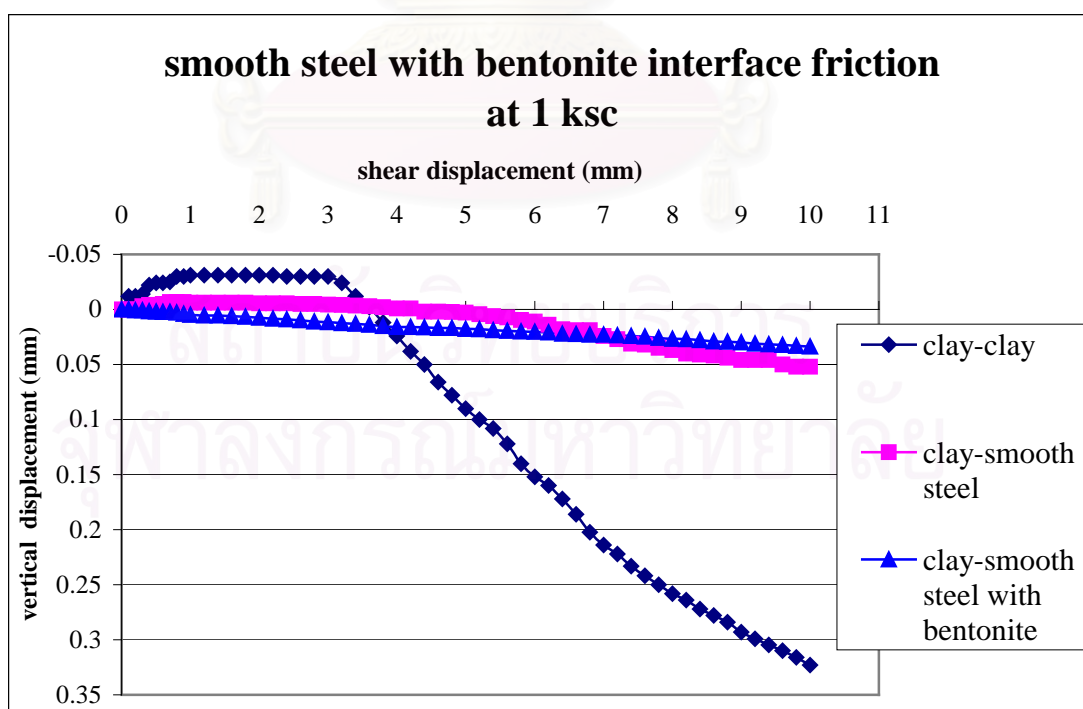
รูปที่ 4.68 เปรียบเทียบหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



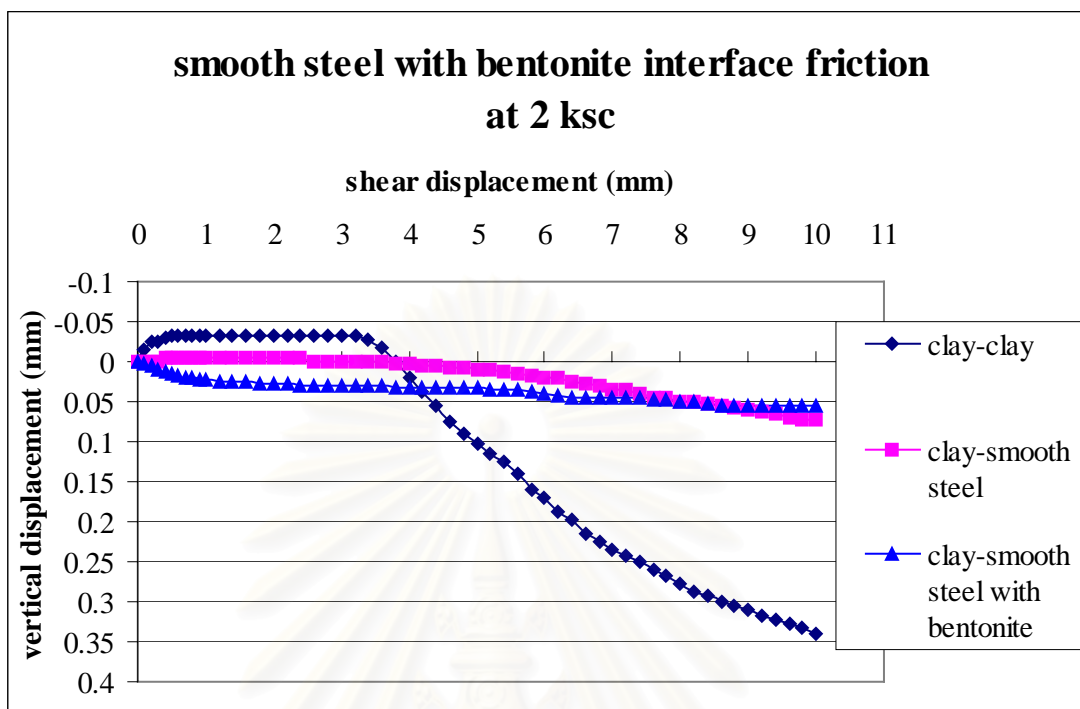
รูปที่ 4.69 เปรียบเทียบหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc



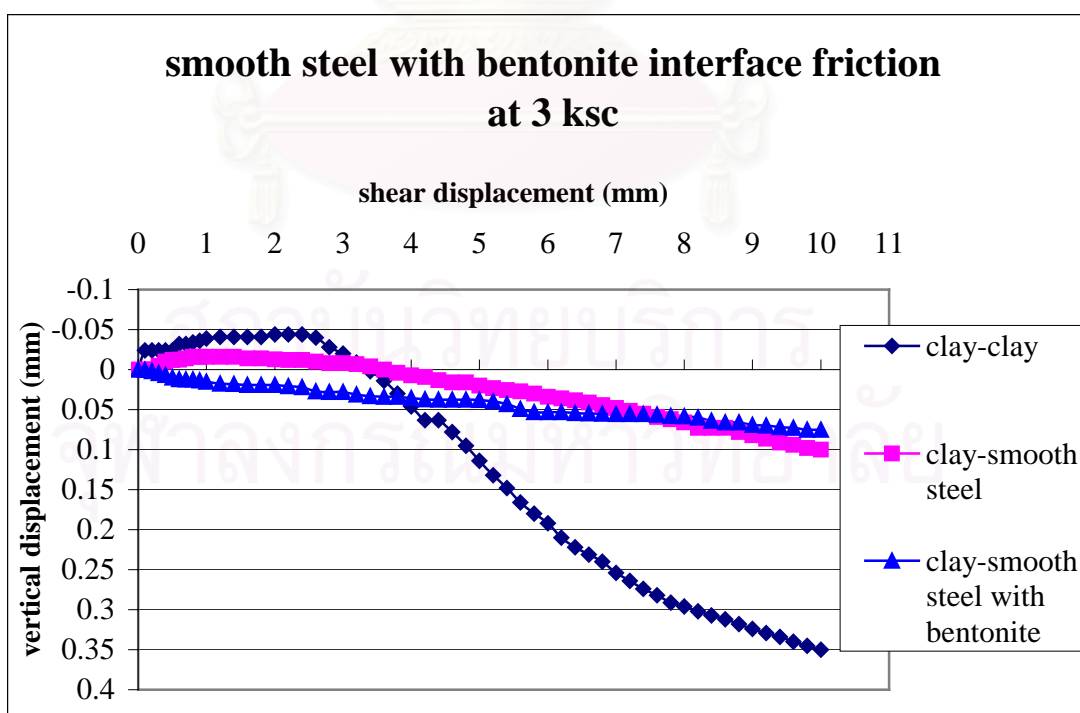
รูปที่ 4.70 เปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc



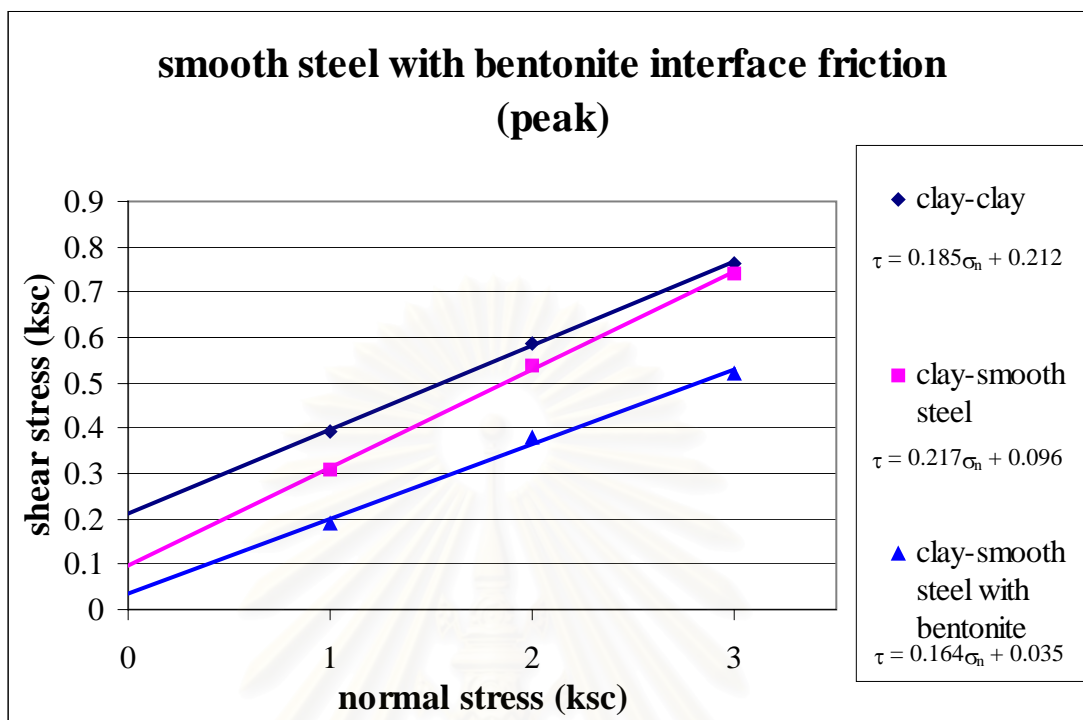
รูปที่ 4.71 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินในการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc



รูปที่ 4.72 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินในการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 2 ksc



รูปที่ 4.73 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของตัวอย่างดินในการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 3 ksc



รูปที่ 4.74 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งของเหล็กผิวเรียบและเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์

ตารางที่ 4.10 อัตราส่วนระหว่างค่าจากการทดสอบของเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ต่อค่าจากการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ

	หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง, σ_n		
	1 ksc	2 ksc	3 ksc
อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด	0.62	0.71	0.70
อัตราส่วนการหลุดตัวที่ระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน 10 ม.ม.	0.60	0.71	0.80
อัตราส่วนระหว่างค่า c_a	0.37		
อัตราส่วนระหว่างค่า $\tan \delta$	0.76		

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้สารละลายเบนโทไนด์เป็นสารหล่อลื่นสามารถลดหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบได้ โดยจะลดหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดลงเหลือประมาณ 0.68 เท่าของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น

ลดค่า c_a (adhesion) ได้เหลือประมาณ 0.37 เท่า และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดลดเหลือประมาณ 0.76 เท่าจากที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น นอกจากนี้ยังพบว่า การทดสอบที่ใช้สารละลายเบนโทไนด์ช่วยลดแรงเสียดทานจะทำให้ค่าแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดได้เร็วกว่าการทดสอบที่ไม่ใช้สารละลายเบนโทไนด์ และจะลดลงอย่างรวดเร็วสู่หน่วยแรงเสียดทานคงค้าง ถ้าพิจารณาหน่วยแรงเสียดทานคงค้างจะพบว่าหน่วยแรงเสียดทานคงค้างในการทดสอบเหล็กผิวเรียบทาผิวด้วยสารละลายเบนโทไนด์มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบของเหล็กผิวเรียบ

สำหรับผลการทดสอบของตัวอย่างดินขณะทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบดูจะพบว่าในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบและการทดสอบของเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์นั้นมีการหลุดตัวของตัวอย่างดินค่อนข้างน้อย โดยสารละลายเบนโทไนด์สามารถช่วยลดการหลุดตัวของตัวอย่างดินลงได้เหลือประมาณ 0.7 เท่าจากที่ไม่ได้ใช้สารหล่อลื่น

4.6.3 เปรียบเทียบผลจากอัตราเร็วในการเฉือน

รูปที่ 4.75 เปรียบเทียบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวเรียบ ที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน

รูปที่ 4.76 เปรียบเทียบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ ที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน

รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวเรียบ ที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน

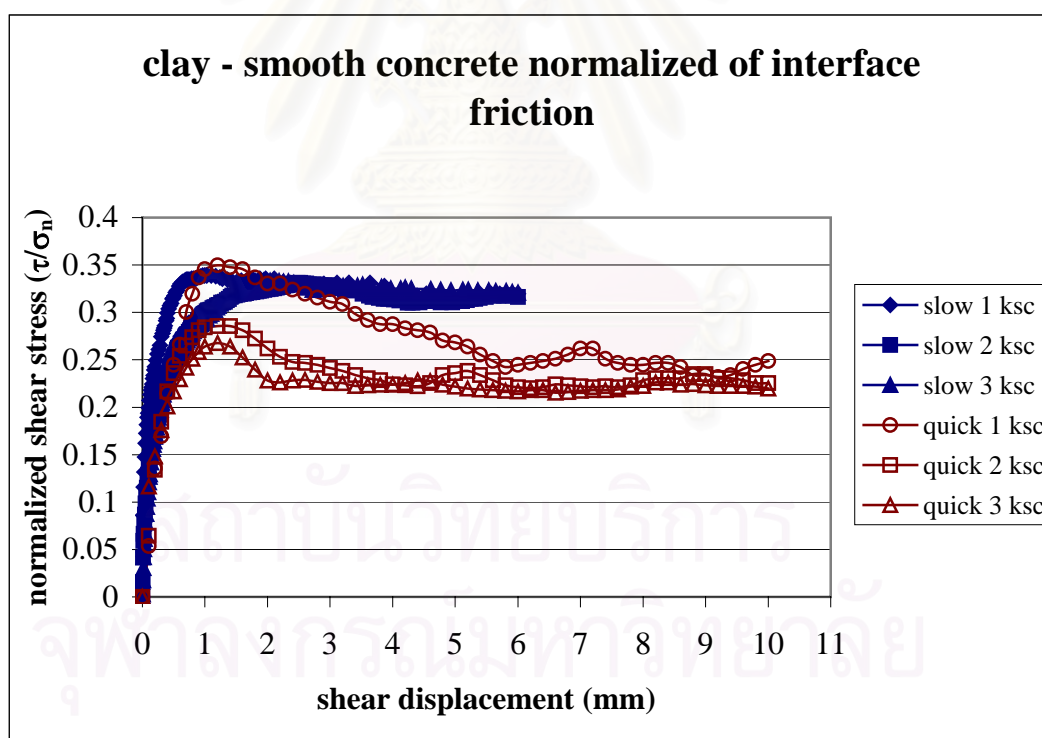
รูปที่ 4.78 เปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขณะทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ ที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

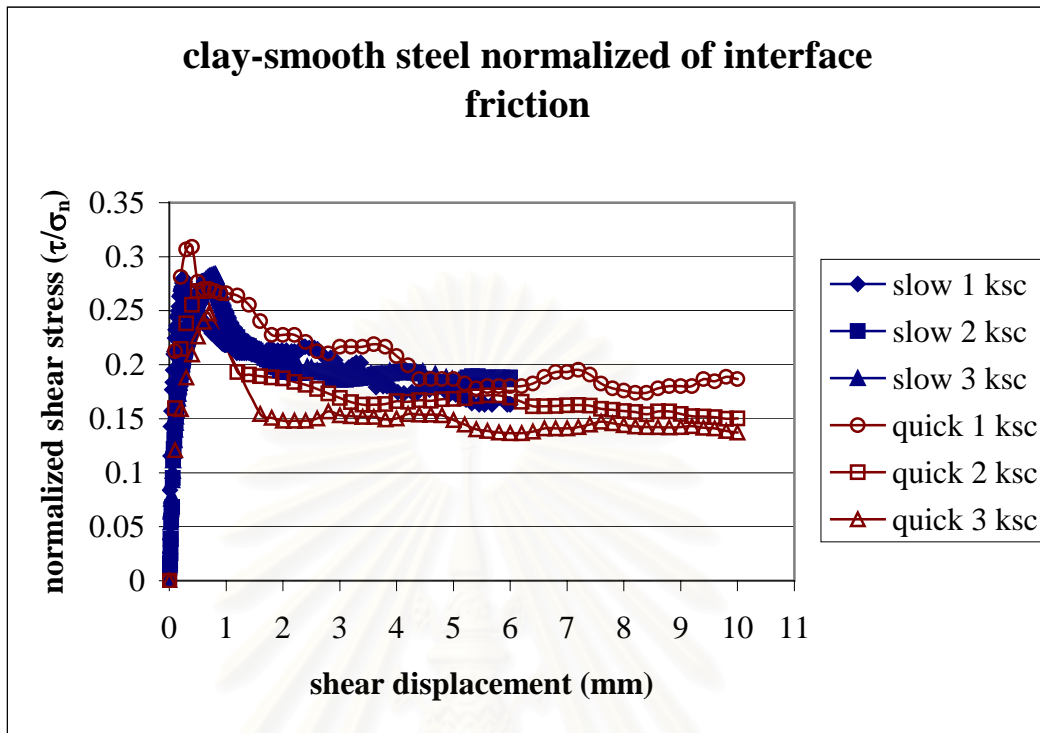
ตารางที่ 4.11 อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนทานคงค้างต่อหน่วยแรงเฉือนทานสูงสุด ในการทดสอบแรงเฉือนทานที่ผิวสัมผัสที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน

หน่วยแรงกดทับ ในแนวตั้ง	อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนทานคงค้างต่อหน่วยแรงเฉือนทานสูงสุด			
	คอนกรีตผิวเรียบ		เหล็กผิวเรียบ	
	แบบเฉือนช้า*	แบบเฉือนเร็ว	แบบเฉือนช้า*	แบบเฉือนเร็ว
1 ksc	0.94	0.71	0.60	0.61
2 ksc	0.96	0.79	0.68	0.58
3 ksc	0.96	0.82	0.66	0.56

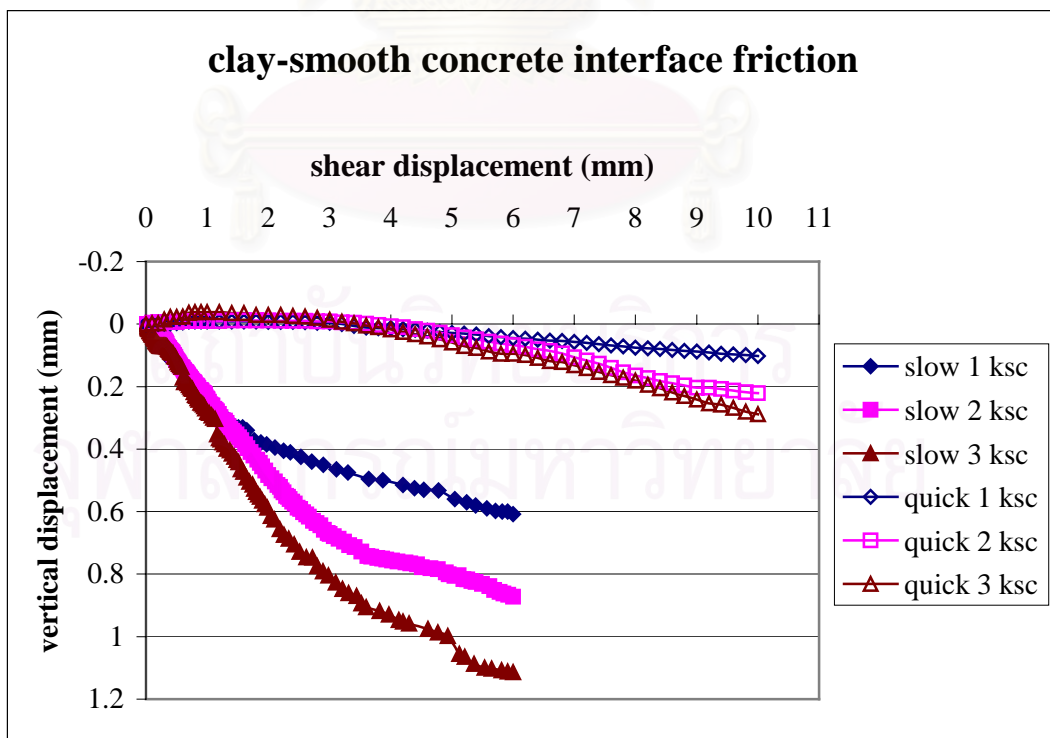
* ทดสอบแบบอัดตัวคายน้ำเฉือนแบบระบายน้ำ อัตราการเฉือน 0.03 ม.ม./นาที (ชัยรัตน์, 2544)



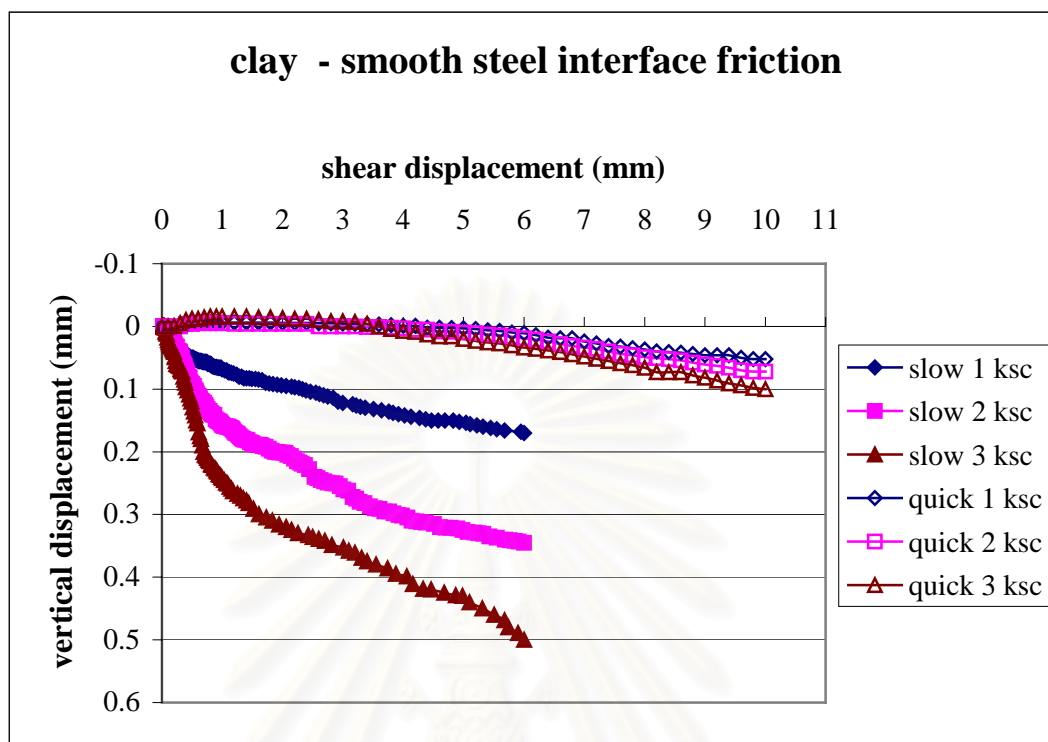
รูปที่ 4.75 เปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวเรียบที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน



รูปที่ 4.76 เปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ
ที่อัตราเร็วในการเฉือนต่างกัน



รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทำการเฉือน
ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวเรียบ ที่อัตราการเฉือนต่างกัน



รูปที่ 4.78 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทำการเฉือน ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ ที่อัตราการเฉือนต่างกัน

จากตารางที่ 4.11 พบว่าในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตผิวเรียบด้วยอัตราการเฉือนที่ช้านั้น หลังจากผ่านหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดแล้วจะเกิดการลดลงของหน่วยแรงเสียดทานน้อยมากโดยมีค่าเกือบจะคงที่ ส่วนในการทดสอบด้วยอัตราการเฉือนที่เร็วจะเกิดการลดลงของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในอัตราที่ค่อนข้างมากอย่างชัดเจน (เกิด peak) สำหรับการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็กผิวเรียบนั้น พบว่าจะเกิดการลดลงของหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดอย่างรวดเร็วในอัตราที่สูง โดยในการทดสอบด้วยอัตราการเฉือนที่เร็วจะมีอัตราการลดลงที่มากกว่าในการทดสอบด้วยอัตราการเฉือนที่ช้า ทั้งนี้เนื่องจากแรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction) จะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่ามากขึ้น นอกจากนี้จากรูปที่ 4.75 และ 4.76 จะเห็นว่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างจากการทดสอบที่อัตราเร็วในการเฉือน 0.03 ม.ม./นาที (ชัยรัตน์, 2544) กับที่อัตราเร็วในการเฉือน 2 ม.ม./นาที มีค่าใกล้เคียงกัน โดยหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของการทดสอบที่ใช้อัตราในการเฉือนที่เร็วจะมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการทดสอบทั้งสองชนิดนั้นมีสภาวะในการทดสอบที่ต่างกัน คือที่อัตราเร็วในการเฉือน 0.03 ม.ม./นาที เป็นการทดสอบใน

สภาวะเงื่อนไขแบบระบายน้ำ แต่ที่อัตราเร็วในการเงื่อนไข 2 ม.ม./นาที่ นั้นเป็นการทดสอบในสภาวะเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ

จากรูปที่ 4.77 และ 4.78 พบว่า ในการทดสอบแบบเงื่อนไขเร็วจะมีค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินขณะทำการเงื่อนไขน้อยกว่าในการทดสอบแบบเงื่อนไขช้า เพราะว่าการทดสอบแบบเงื่อนไขเร็ว นั้นเปรียบเหมือนการทดสอบแบบเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ แต่ไม่สามารถหนีความดันน้ำไว้ได้ทั้งหมดจึงเกิดการทรุดตัวขึ้นเล็กน้อย ส่วนในการทดสอบแบบเงื่อนไขช้า นั้นเป็นการทดสอบแบบระบายน้ำ ทำให้ตัวอย่างดินเกิดการทรุดตัวมากกว่า

4.6.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งหมด

รูปที่ 4.79 แสดงหน่วยแรงเงื่อนไขในการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc
รวมทุกการทดสอบ

รูปที่ 4.80 แสดงหน่วยแรงเงื่อนไขในการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc
รวมทุกการทดสอบ

รูปที่ 4.81 แสดงหน่วยแรงเงื่อนไขในการทดสอบที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc
รวมทุกการทดสอบ

รูปที่ 4.82 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc รวมทุกการทดสอบ

รูปที่ 4.83 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc รวมทุกการทดสอบ

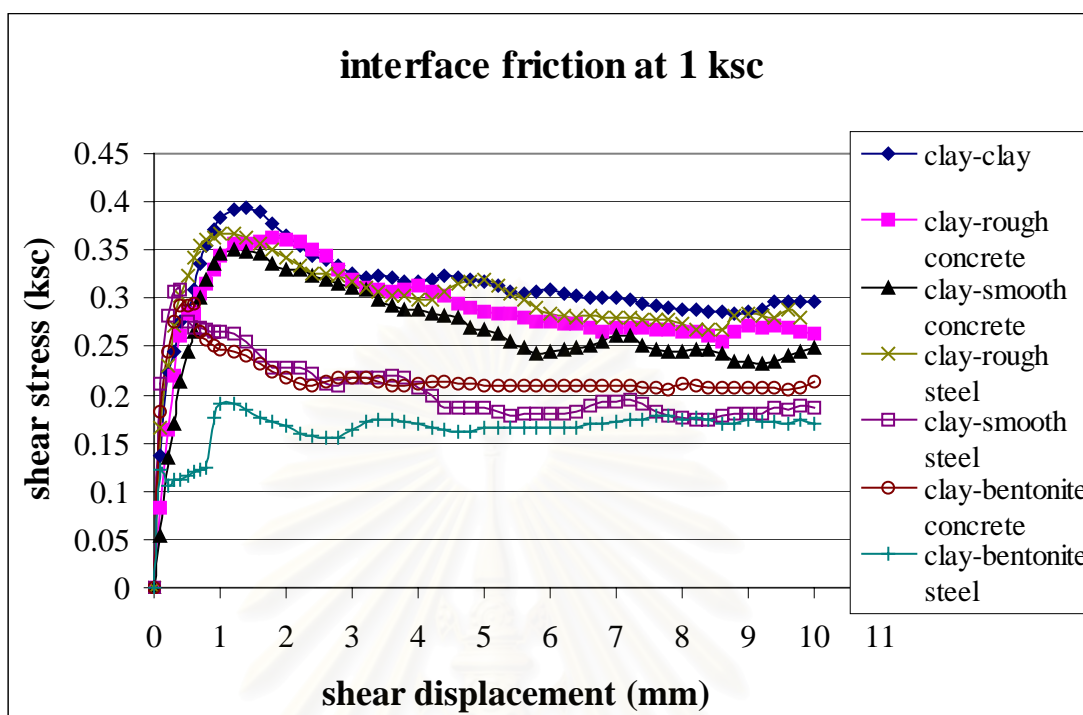
รูปที่ 4.84 แสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทดสอบ ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc รวมทุกการทดสอบ

รูปที่ 4.85 แสดงหน่วยแรงเงื่อนไขสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง รวมทุกการทดสอบ

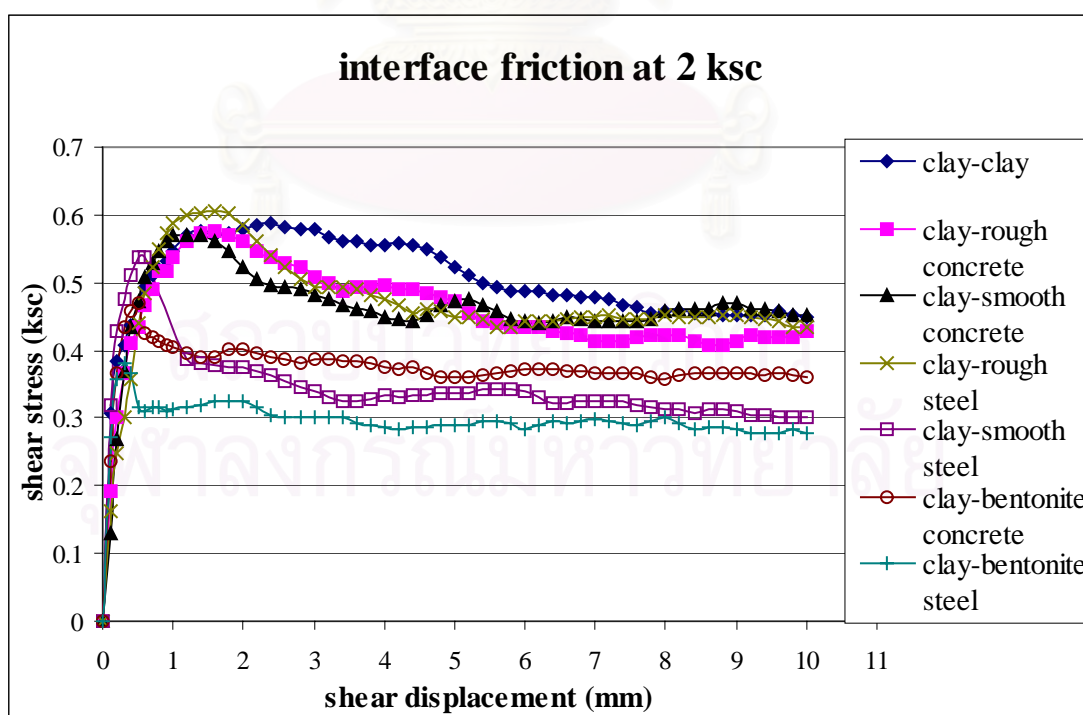
ตารางที่ 4.12 หน่วยแรงเฉือนสูงสุดและพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบรวมทุกการทดสอบ เทียบ
อัตราส่วนกับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

วัสดุ	กำลังรับแรงเฉือนหรือหน่วยแรงเฉียดทานสูงสุด (ksc)					
	ที่ $\sigma_n = 1$ ksc		ที่ $\sigma_n = 2$ ksc		ที่ $\sigma_n = 3$ ksc	
	τ หรือ f	f/τ	τ หรือ f	f/τ	τ หรือ f	f/τ
ดินเหนียว	0.394	-	0.587	-	0.764	-
คอนกรีตผิวหยาบ	0.363	0.92	0.575	0.98	0.792	1.04
คอนกรีตผิวเรียบ	0.350	0.89	0.571	0.97	0.803	1.05
เหล็กผิวหยาบ	0.368	0.93	0.605	1.03	0.800	1.05
เหล็กผิวเรียบ	0.309	0.78	0.537	0.92	0.743	0.97
คอนกรีตผิวหยาบ ทาสารละลาย เบนโทไนต์	0.294	0.75	0.470	0.80	0.575	0.75
เหล็กผิวเรียบ ทาสารละลาย เบนโทไนต์	0.191	0.49	0.380	0.65	0.519	0.68

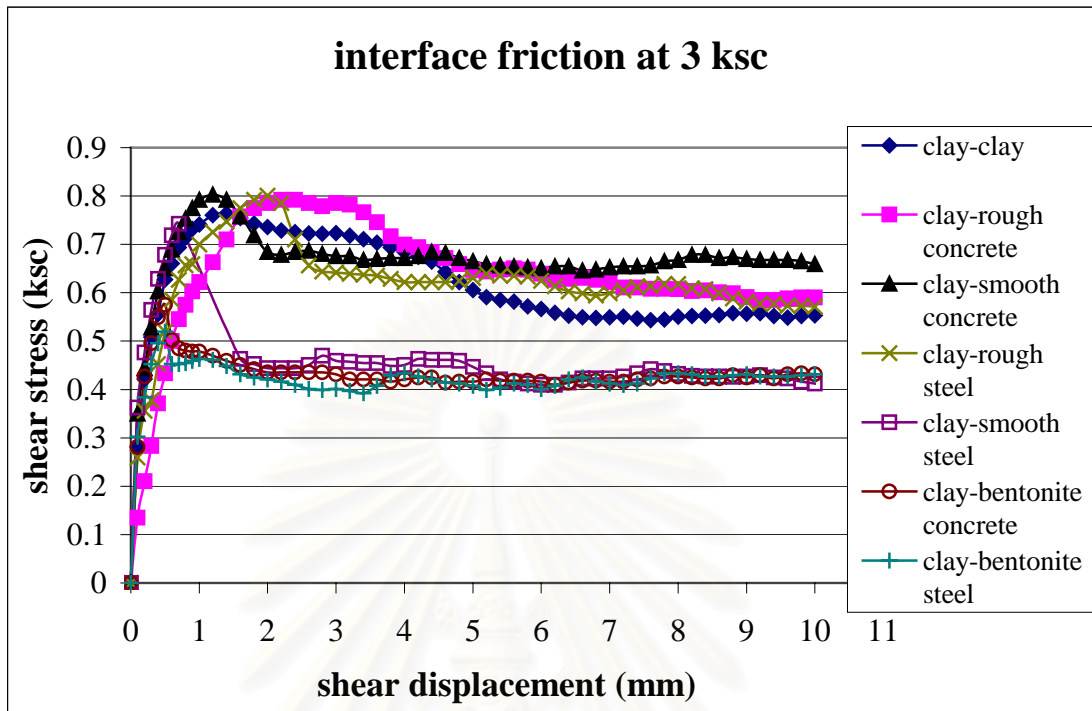
วัสดุ	c หรือ c_a	$\tan \phi$ หรือ $\tan \delta$	ϕ หรือ δ	c_a/c	$\tan \delta / \tan \phi$
ดินเหนียว	0.212	0.185	10.5°	-	-
คอนกรีตผิวหยาบ	0.147	0.215	12.1°	0.70	1.16
คอนกรีตผิวเรียบ	0.122	0.226	12.8°	0.58	1.22
เหล็กผิวหยาบ	0.159	0.216	12.2°	0.75	1.17
เหล็กผิวเรียบ	0.096	0.217	12.2°	0.45	0.76
คอนกรีตผิวหยาบทา สารละลายเบนโทไนต์	0.165	0.141	8.0°	0.78	0.89
เหล็กผิวเรียบทาสาร ละลายเบนโทไนต์	0.035	0.164	9.3°	0.17	1.16



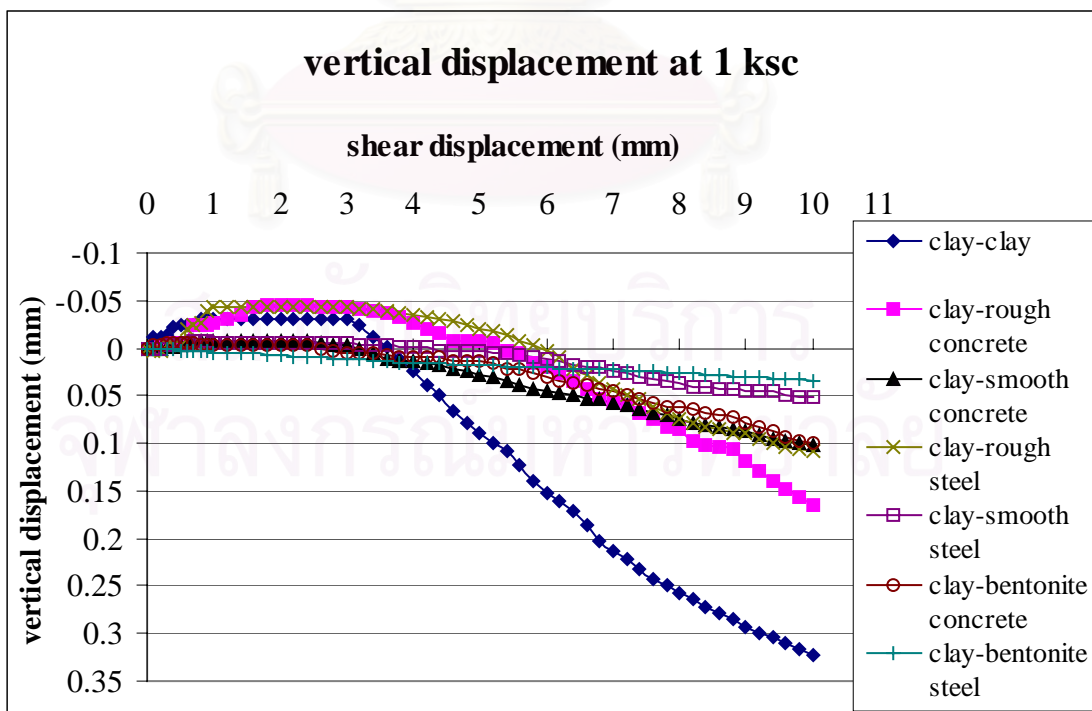
รูปที่ 4.79 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc รวมทุกการทดสอบ



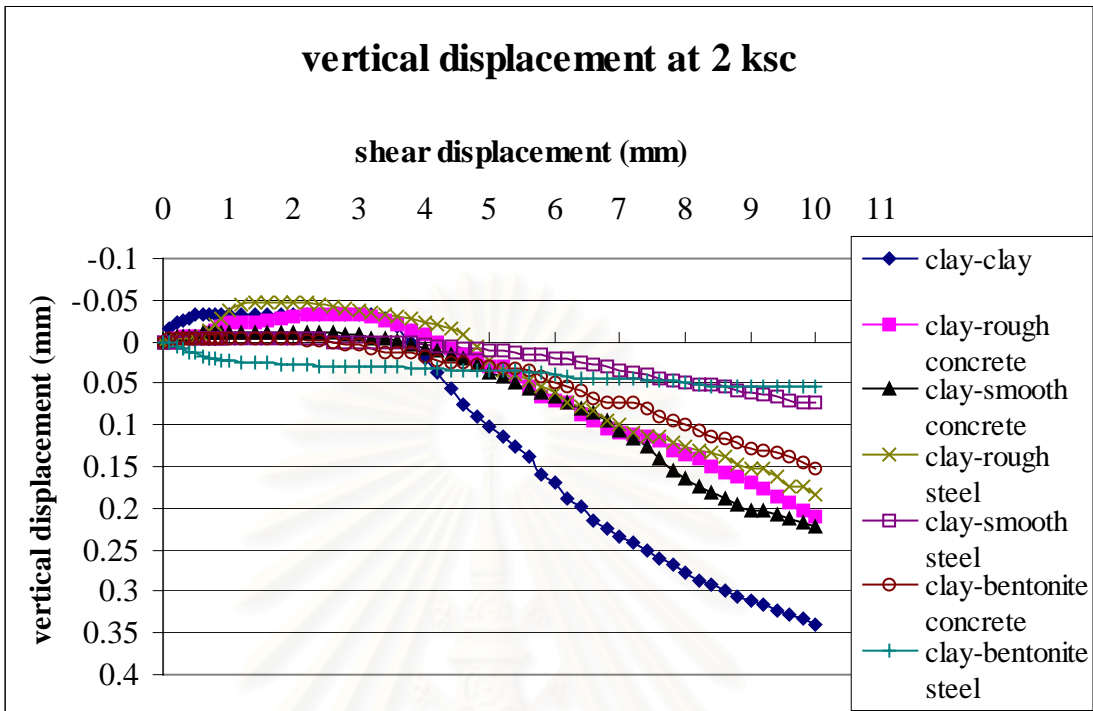
รูปที่ 4.80 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 2 ksc รวมทุกการทดสอบ



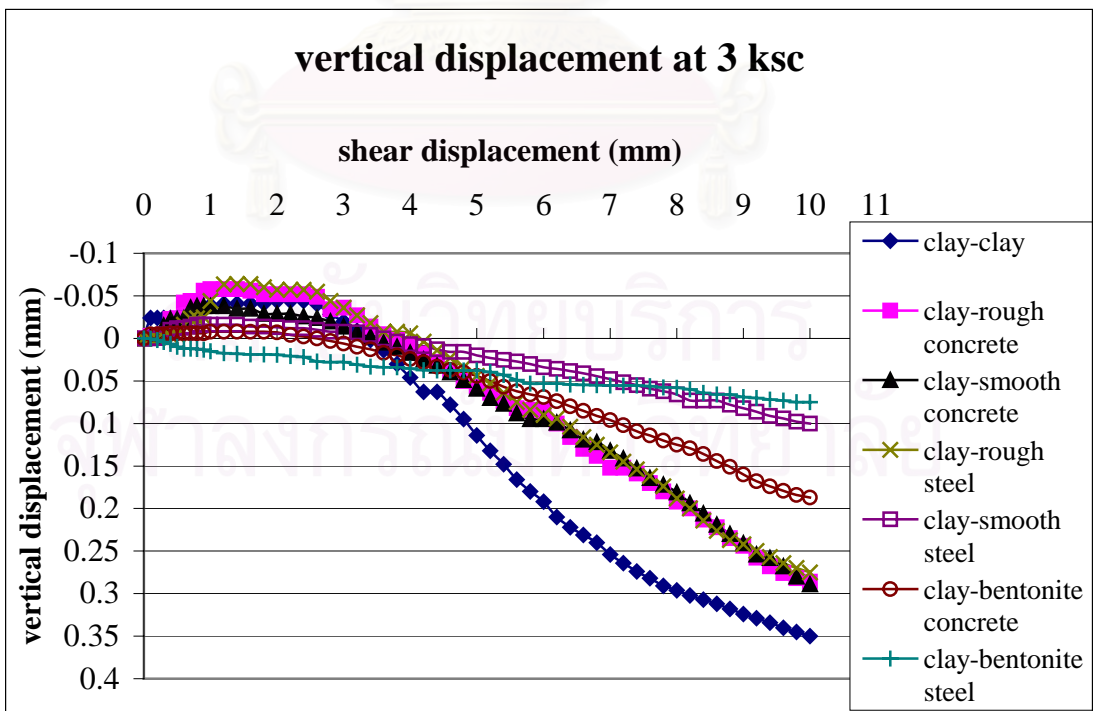
รูปที่ 4.81 หน่วยแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 3 ksc รวมทุกการทดสอบ



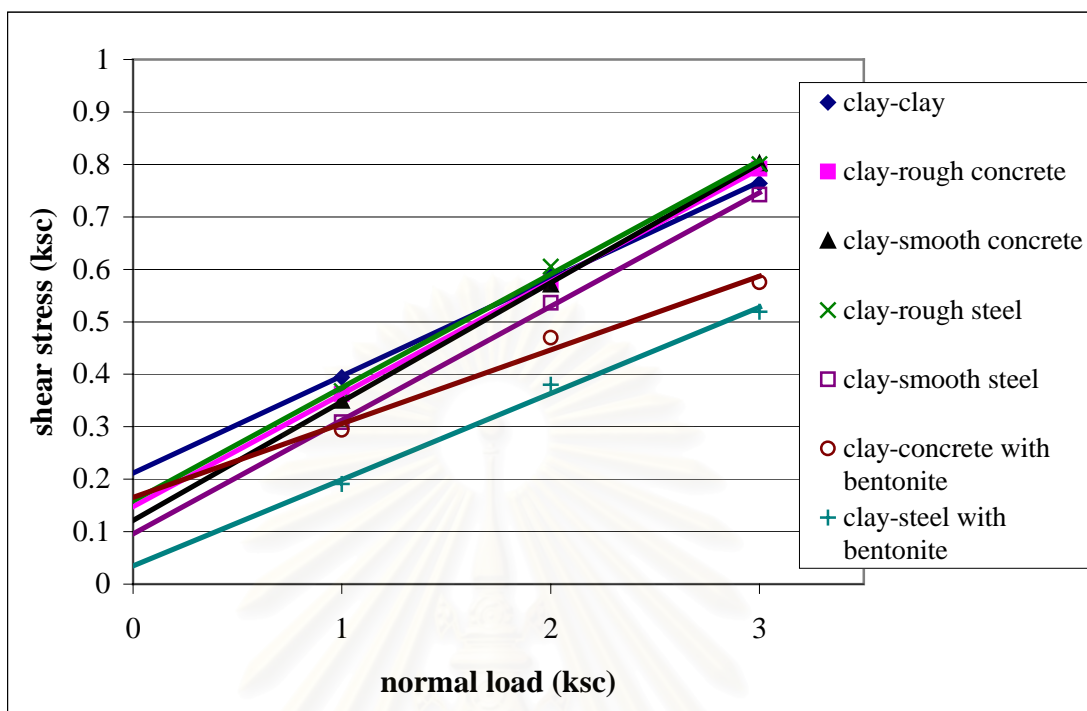
รูปที่ 4.82 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ที่หน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง 1 ksc รวมทุกการทดสอบ



รูปที่ 4.83 การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 2 ksc รวมทุกการทดสอบ



รูปที่ 4.84 การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งกับการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือน
ที่หน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง 3 ksc รวมทุกการทดสอบ



รูปที่ 4.85 หน่วยแรงเฉียดทานสูงสุดกับหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง รวมทุกการทดสอบ

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบทุกการทดสอบรวมกัน พบว่า

- ค่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตผิวหยาบ, คอนกรีตผิวเรียบ และเหล็กผิวหยาบนั้นมีค่าเกือบจะเท่ากัน และมีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินเหนียว เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.75 - 4.77 และ 4.81 จะเห็นว่ากราฟทั้ง 4 เส้นนั้นเกาะกลุ่มกันและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันอย่างชัดเจน จากผลของหน่วยแรงเฉียดทานที่ได้และจากสภาพภายหลังการทดสอบของแท่งดินสอดที่เสียบในตัวอย่างดินแสดงว่า ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสวัสดุโครงสร้างทั้ง 3 ชนิดที่ได้กล่าวมานั้น เกิดการเฉือนขึ้นที่ตัวอย่างดินแทนการเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้าง ทำให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของวัสดุโครงสร้างมีสภาพขรุขระมากจนทำให้ค่าแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน ดังนั้นจะเกิดการเฉือนขึ้นภายในตัวอย่างดินแทน ตามกฎการวิบัติซึ่งจะวิ่งไปตามเส้นทางที่ใช้แรงน้อยที่สุดหรือจะเกิดการวิบัติในระนาบที่แข็งแรงน้อยที่สุด (Weakest Plane) นั่นเอง

- จากการทดสอบทั้งหมด ค่าหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสจากการทดสอบเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนต์จะมีค่าต่ำที่สุด ตามมาด้วยการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบทา

สารละลายเบนโทไนด์และเหล็กผิวเรียบ ตามลำดับ สำหรับการทดสอบที่ได้คำนวณแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสมากที่สุดคือ การทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบ คอนกรีตผิวเรียบ และเหล็กผิวหยาบ

- เมื่อเปรียบเทียบปัจจัยจากชนิดของวัสดุโครงสร้างที่นำมาทดสอบ คือ คอนกรีตและเหล็ก พบว่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตจะมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับเหล็ก

- ผลการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็กผิวเรียบ, คอนกรีตผิวหยาบทาสารละลายเบนโทไนด์ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์นั้นมีลักษณะคล้ายกัน คือเมื่อเริ่มทำการทดสอบหน่วยแรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดได้ในระยะการเคลื่อนที่ในแนวการเฉือนเพียงระยะประมาณ 0.5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นหน่วยแรงเสียดทานจะลดลงอย่างรวดเร็วในทันที (เกิด peak) ทั้งนี้ เนื่องจากชนิดและพื้นผิวของเหล็กผิวเรียบมีลักษณะลื่นและเรียบ ทำให้เมื่อหน่วยแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจนหน่วยแรงเฉือนมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสสูงสุด ซึ่งสามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction) ระหว่างตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้างได้แล้ว หลังจากนั้นค่าแรงเฉือนที่ใช้กระทำให้วัสดุเคลื่อนที่ต่อไปก็จะลดลง และเมื่อวัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นเหล็กผิวเรียบซึ่งพื้นผิวมีลักษณะลื่นและเรียบมาก ก็จะส่งผลให้หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสลดลงได้อย่างรวดเร็วและในอัตราที่ค่อนข้างสูง เช่นเดียวกับวัสดุที่ทาผิวด้วยสารละลายเบนโทไนด์เพื่อช่วยลดแรงเสียดทานนั้น จะเกิดการเฉือนขึ้นที่ชั้นของสารละลายเบนโทไนด์ซึ่งมีลักษณะลื่นและเหลว

- ทุกการทดสอบ สามารถ Normalized ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสได้ด้วย $c_u \cot \delta + \sigma_n$ และสามารถ Normalized ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวได้ด้วย $c \cot \phi + \sigma_n$ เช่นกัน เพื่อให้สามารถนำค่าดังกล่าวมาเปรียบเทียบกันได้

- การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวอย่างดินขณะทำการทดสอบ มีลักษณะคล้ายๆ กัน ทุกการทดสอบ คือเกิดการขยายตัวขึ้นเล็กน้อยในตอนแรก หลังจากนั้นตัวอย่างดินจะเกิดการทรุดตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเริ่มทำการเฉือนด้วยอัตราที่เร็ว จะมีความดันน้ำเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ แต่เนื่องจากการทดสอบชนิดนี้ไม่สามารถควบคุมให้ตัวอย่างดินผนึกความดันน้ำไว้ได้ทั้งหมดตลอดการทดสอบ ส่งผลให้มีน้ำระบายออกจากตัวอย่างดิน ตัวอย่างดินจึงเกิดการทรุดตัวขึ้นตามมา

- เมื่อเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินในทุกการทดสอบ พบว่าในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจะมีค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินมากที่สุด ตามมาด้วยกลุ่มการทดสอบของคอนกรีตผิวหยาบ, คอนกรีตผิวเรียบ และเหล็กผิวหยาบซึ่งมีค่าการทรุดตัวใกล้เคียงกัน จากนั้นตามมาด้วยการทรุดตัวในการทดสอบของคอนกรีตผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์, เหล็กผิวเรียบ และเหล็กผิวเรียบทาสารละลายเบนโทไนด์ ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างต่างๆ รวมถึงผลของการลดแรงเสียดทานด้วยสารละลายเบนโทไนด์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง จะแปรผันตามสภาพความขรุขระของพื้นผิวสัมผัส คือ หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะมีความมากขึ้น เมื่อลักษณะพื้นผิวสัมผัสมีความขรุขระเพิ่มขึ้น (มีความหยาบมากขึ้น)

2) หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโครงสร้าง คือ หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุโครงสร้าง โดยหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตจะมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของเหล็ก

3) หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างจะแปรผันตามหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่ง คือ เมื่อหน่วยแรงกดทับในแนวดิ่งมีความมากขึ้นจะทำให้ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

4) ในการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างโดยใช้อัตราในการเฉือนที่เร็วขึ้น เมื่อถึงค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดแล้วจะเกิดการลดลงของหน่วยแรงเสียดทาน (เกิด peak) ในอัตราที่มากกว่าการทดสอบแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสโดยใช้อัตราในการเฉือนที่ช้า สำหรับค่าการหลุดตัวของตัวอย่างดินขณะทำการเฉือนพบว่าการทดสอบโดยใช้อัตราในการเฉือนที่เร็วจะเกิดการหลุดตัวของตัวอย่างดินน้อยกว่าการทดสอบโดยใช้อัตราในการเฉือนที่ช้า เนื่องจากการเฉือนด้วยอัตราที่เร็วจะทำให้หน้าไม่สามารถระบายออกจากตัวอย่างดินได้ทัน

5) กลไกการเกิดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสนั้นมีลักษณะดังนี้ คือ แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเสมอ เนื่องจากถ้าสภาพความขรุขระของพื้นผิวสัมผัสมีความหยาบมากจนค่าแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงมีค่ามากเกินกว่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินแล้ว เมื่อทำการเฉือนจะเกิดการเฉือนขึ้นในตัวอย่างดินแทนการเฉือนที่ผิวสัมผัส ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบจึงเป็นค่าจาก

กำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน สำหรับวัสดุโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่เรียบ เมื่อทำการเฉือนก็จะเกิดการเฉือนหรือการไถลขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้าง ค่าที่ได้จะเป็นหน่วยแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสที่แท้จริง

6) ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง ถ้าเกิดการไถลขึ้นที่ผิวสัมผัสแล้ว แ่งดินสอที่เสียบอยู่ภายในตัวอย่างดินจะคงสภาพเดิมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเฉือน แต่ถ้าในการทดสอบนั้นเกิดการเฉือนขึ้นในตัวอย่างดิน แ่งดินสอที่เสียบอยู่ภายในตัวอย่างดินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเฉือนคือ เกิดการงอหรือการหักของแ่งดินสอขึ้น ซึ่งบริเวณที่แ่งดินสองอหรือหักนั้นคือบริเวณของตัวอย่างดินที่มีการเฉือนเกิดขึ้น โดยที่ตำแหน่งบริเวณตรงกลางของตัวอย่างดินจะมีระยะการงอสูงที่สุด

7) ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว แ่งดินสอที่เสียบอยู่ภายในตัวอย่างดินเพื่อศึกษาขอบเขตและเส้นทางการวิบัติ (Failure Zone & Failure Profile) ในตัวอย่างดินภายหลังการเฉือน จะเกิดการหักขึ้นที่บริเวณส่วนกลางระหว่างตัวอย่างดินก่อนบนและก่อนล่าง ระยะการหักและความชันของแ่งดินสอที่บริเวณกลางตัวอย่างจะมีค่าสูงที่สุด เมื่อเชื่อมต่อกจุดที่แ่งดินสอเกิดการหักตามตำแหน่งต่างๆ ในตัวอย่างดินจะได้เส้นทางการวิบัติเป็นส่วนโค้ง

8) สารละลายเบนโทไนต์สามารถช่วยลดขนาดแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง รวมทั้งระยะการทรุดตัวของตัวอย่างดินขณะทำการเฉือนได้ โดยเฉลี่ยประมาณ 30 %

9) ในการทดสอบแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้างแบบอัดตัวคายน้ำเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในงานวิจัยนี้เกิดการทรุดตัวของตัวอย่างดินเพียงเล็กน้อยขณะทำการเฉือน โดยมีการทรุดตัวสูงสุดประมาณ 0.3 มิลลิเมตรเท่านั้น ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินจะแปรผันตามหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งและสภาพความขรุขระของพื้นผิวสัมผัส คือ การทรุดตัวของตัวอย่างดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงกดทับในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเกิดการทรุดตัวมากขึ้นเมื่อพื้นผิวสัมผัสมีความหยาบมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยต่อไป

ในการศึกษาพฤติกรรมและกลไกการเกิดแรงเฉียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง และผลของการใช้สารหล่อลื่นเพื่อช่วยลดแรงเฉียดทานในงานวิจัยนี้ มีข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยเพิ่มเติมต่อไปโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถเข้าใจในพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวและวัสดุโครงสร้าง รวมถึงผลของการใช้สารหล่อลื่นช่วยลดแรงเสียดทานในระดับสูงขึ้นไปได้ดียิ่งขึ้น

1) ปรับเปลี่ยนความหยาบของพื้นผิววัสดุ โดยเริ่มจากวัสดุที่พื้นผิวมีความหยาบน้อยๆ (เรียบ) จากนั้นค่อยๆ เพิ่มความหยาบของพื้นผิวให้มากขึ้น จนกระทั่งเกิดการเฉือนขึ้นที่ตัวอย่างดินแทนการเฉือนที่ผิวสัมผัส พร้อมทั้งหาค่าความหยาบของพื้นผิววัสดุ (Average Surface Roughness, R_a) ในแต่ละการทดสอบด้วย เมื่อนำผลการทดสอบมาเขียนกราฟระหว่างหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับค่าความหยาบของพื้นผิววัสดุ จะได้ค่าความหยาบวิกฤต (Critical Roughness) ซึ่งเป็นค่าความหยาบน้อยที่สุดของพื้นผิววัสดุที่ทำให้เกิดการเฉือนขึ้นที่ตัวอย่างดินแทนการเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินกับวัสดุโครงสร้าง

2) ควรมีการนำตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบมาจากสถานที่ต่างๆ ที่มีคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมแตกต่างกัน เพื่อศึกษาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุโครงสร้างกับดินเหนียวจากสถานที่ต่างๆ กัน

3) ควรพัฒนาเครื่องมือทดสอบให้สามารถวัดความดันน้ำภายในตัวอย่างดินได้ เพื่อให้สามารถศึกษาค่าคงตัวประสิทธิภาพ (Effective Stress Parameters) ได้ โดยการติดตั้งแผ่นหินปูนที่ด้านล่างของตัวอย่างดิน ภายในแผ่นวัสดุโครงสร้าง พร้อมทั้งเจาะรูภายในรูใส่แผ่นวัสดุโครงสร้างเพื่อเชื่อมต่อกับตัวแปลงสัญญาณวัดความดัน (Pressure Transducer) ด้านนอกอีกที

4) ควรมีการศึกษาถึงปริมาณสารหล่อลื่นที่เหมาะสมต่อการลดแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง

5) ควรมีการศึกษาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง และผลของการใช้สารหล่อลื่นลดแรงเสียดทาน จากการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ Direct Simple Shear เพื่อลดข้อจำกัดบางประการที่เกิดขึ้นในการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ Direct Shear

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชัยรัตน์ ระตีพูน. 2544. แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างดินเหนียวกับวัสดุโครงสร้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาพร คูวิจิตรจากร. 2541. ทดลองปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพฯ : ไลบวรารี นาย.

ภาษาอังกฤษ

- American Society for Testing and Materials.1991. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. ASTM C305-94.
- American Society for Testing and Materials.1991. Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM D2216-98.
- American Society for Testing and Materials.1991. Standard Test Method of Practical – Size Analysis of Soils. ASTM D422-63 (Reapproved 1998).
- American Society for Testing and Materials.1991. Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. ASTM D4253-93 (Reapproved 1996).
- American Society for Testing and Materials.1991. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plastic Index of Soils. ASTM D4318-98.
- American Society for Testing and Materials.1991. Standard Test Method for Specific Gravity of Soils. ASTM D854-98.
- Bardet, J.P. 1997. Experimental Soil Mechanics. New Jersey : Prentice Hall,
- Bowden, F.P. and Tabor, D. 1967. Friction and Lubrication. London : Methuen,
- Fearon, R. E. and Coop, M.R. 2000. Reconstitution: What Makes an Appropriate Reference Material. Geotechnique 50 No.4 : 471-477.

- 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.
- Goh, A.T.C. and Donald, I.B. 1984. Investigation of Soil-Concrete Interface Behaviour by Simple Shear Apparatus. National Conference Publication – Institution of Engineers, Australia, n 84/2, 1984, Fourth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics : 101-106.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. 1969. Soil mechanics. New York : John Wiley & Sons,
- Lemos ,L. J. L. and Vaughan, P. R. 2000. Clay - interface shear resistance. Geotechnique 50 No.1 : 55-64.
- Littleton, I. 1976. An experimental study of the adhesion between clay and steel. Journal of Terramechanics 13 No.3 : 141-152.
- 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.
- Potyondy, J. G. 1961. Skin friction between various soils and construction materials. Geotechnique 11 No.4 : 339-353.
- Rabinowicz, E. 1965. Friction and wear of materials. New York : John Wiley & Sons
- 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.
- 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.
- Tsubakihara, Y. , Kishida, H.and Nishiyama, T. 1993. Frictional behaviour between cohesive soils and steel . Soils and Foundations 33 No. 2 : 145-156.
- 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.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วีระพล กิติพงษ์ไพโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ.2521 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย