

พฤติกรรมเดือนไม้ระบายน้ำแบบวัฏจักรของดินเหนียวกรุงเทพโดยเครื่องมือทดสอบแรงเดือนอย่างง่าย



นายนิรุจน์ ก้อนคง

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CYCLIC UNDRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF BANGKOK CLAY USING  
DIRECT SIMPLE SHEAR APPARATUS



Mr.Nirut Konkong

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

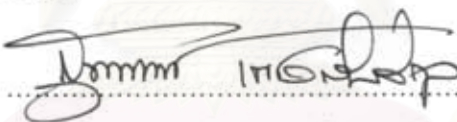
Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมเขื่อนไม้ระบายน้ำแบบวัฏจักรของดินเหนียวกรุงเทพฯโดย เครื่องมือทดสอบแรงเขื่อนอย่างง่าย
โดย	นายนิรุจน์ ก้อนคง
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัดร บุญญะฐิติ)

  
..... กรรมการ  
(Tian Ho Seah, Sc.D.)

นิรุจน์ ก้อนคง : พฤติกรรมเฉือนไม่ระบายน้ำแบบวัฏจักรของดินเหนียวกรุงเทพฯโดย  
เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนอย่างง่าย (CYCLIC UNDRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF  
BANGKOK CLAY USING DIRECT SIMPLE SHEAR APPARATUS) อ.ที่ปรึกษา:ผศ.  
ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, อ.ที่ปรึกษาร่วม: รศ.ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน, 122 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของแรงกระทำแบบทางเดียวและแบบวัฏจักรที่มี  
อิทธิพลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯโดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือน  
ทางตรงอย่างง่าย ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯเก็บจากระดับความลึก 2.5 – 15.5 เมตร ถูกเตรียม  
ตัวอย่างให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำและผ่านกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ  $K_0$  ก่อนที่จะทำการ  
เฉือนไม่ระบายน้ำ การเฉือนแบบทางเดียวจะกระทำที่อัตราความเครียดเฉือนเท่ากับ 5%  
ต่อชั่วโมง จนกระทั่งความเครียดเฉือนเท่ากับ 20 % โดยทดสอบกับตัวอย่างดินอัดแน่นปกติ (NC)  
4 ตัวอย่าง ที่ระดับความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) เท่ากับ 200 300 400 และ 500 kPa ตามลำดับ และ  
ทดสอบกับตัวอย่างดินอัดแน่นกว่าปกติ (OC) 4 ตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว  
(OCR) เท่ากับ 1.5 2 3 และ 4 ตามลำดับ นำผลการทดสอบแบบทางเดียวมาวิเคราะห์หา  
ค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ใช้ประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP  
ส่วนการทดสอบแบบวัฏจักรจะเลือกใช้ความถี่ 3 ค่าคือ 0.1 1 และ 5 Hz และระดับความเค้นใน  
แนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) เท่ากับ 200 300 และ 400 kPa ตามลำดับ โดยการทดสอบเป็นแบบควบคุมแอม  
พลิจูดของความเครียดเฉือนที่  $\pm 0.5$  % จำนวน 100 รอบ  $\pm 1.5$ % จำนวน 100 รอบและ  $\pm 3$ % ใน  
1000 รอบสุดท้ายของแต่ละตัวอย่างการทดสอบ ผลการทดสอบแบบวัฏจักรทั้ง 9 ตัวอย่างพบ  
ว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วง 0.1 - 5 Hz ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์เชิง  
พลศาสตร์ของดินกรุงเทพฯ เช่น โมดูลัสของความเค้นเฉือน ( $G$ ) และอัตราส่วนการกระจายตัว  
ของพลังงาน ( $D$ ) แต่ผลของแอมพลิจูดของความเครียดและจำนวนรอบของแรงแบบวัฏจักรจะ  
ส่งผลต่อค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน และอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน ซึ่งสอดคล้อง  
กับผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักรก่อนหน้านี้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต..... พิศนธ์ ก้อนคง.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศิวเกียรติ นิลโคตรเมษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

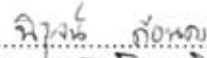
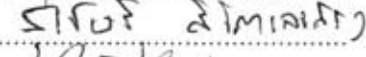
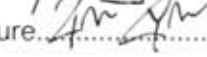


## 4870349421: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: DIRECT SIMPLE SHEAR / MONOTONIC-CYCLIC TEST / SEANSEP / SHEAR  
MODULUS AND DAMPING RATIO

NIRUT KONKONG: CYCLIC UNDRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF BANGKOK  
CLAY USING DIRECT SIMPLE SHEAR APPARATUS. THESIS ADVISOR:  
ASST.PROF. SUCHED LIKITLERSUANG, D.Phil, CO-ADVISOR ASSOC PROF.  
BOONCHAI UKRITCHON, Sc.D 122 pp.

This research aims to study shear responses of Bangkok Clay both monotonically and cyclically using Direct Simple Shear apparatus (DSS). All tests were performed on undisturbed Bangkok clay collected at the depth of 2.5 – 15.5 m. The samples were prepared in saturated condition and  $K_0$  consolidated before undrained sheared. Samples were monotonically sheared at the shear strain rate 5 % per hour until the shear strain reach 20 %. The four normally consolidated (NC) samples were consolidated with vertical stress ( $\sigma'_{vc}$ ) of 200, 300, 400 and 500 kPa, respectively and another four overconsolidated (OC) samples were prepared at OCR values of 1.5, 2, 3, and 4 respectively. All data from monotonic tests were analyzed according to the SHANSEP method in order to estimate the undrained shear strength parameters. For cyclic loading, the nine tests were carried out at different frequencies of 0.1, 1 and 5 Hz and varied the vertical stress ( $\sigma'_{vc}$ ) from 200, 300 and 400 kPa, respectively. The shear strain amplitude of all tests were controlled at  $\pm 0.5$  % for first 100 cycles, then increased the shear strain amplitude to  $\pm 1.5$  % for next 100 cycles and finally increased up to  $\pm 3$  % for the last 1,000 cycles. The results from cyclic tests showed that the frequency in the range of 0.1 to 5 Hz does not affect the dynamic properties such as shear modulus ( $G$ ) and damping ratio ( $D$ ). However, the increase in the strain amplitude and number of cycles significantly affects to the shear modulus and damping ratio, which corresponds to the existing cyclic triaxial undrained results.

Department ..... Civil Engineering ..... Student's signature .....   
Field of study ..... Civil Engineering ..... Advisor's signature .....   
Academic year ..... 2007 ..... Co-advisor's signature ..... 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ต้องขอแสดงความขอบคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ที่ปรึกษาและรองศาสตราจารย์  
ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำชี้แนะวิธีการทดสอบและทฤษฎีที่  
ใช้ในการวิเคราะห์ ตลอดจนได้ปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินกุล สำหรับคำชี้แนะแนวทาง รวมทั้งคำแนะนำอื่นๆ  
ที่เป็นประโยชน์อีกมากมาย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาใช้เวลาและให้คำแนะนำรวมทั้งให้  
ข้อคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บิดา-มารดา และครอบครัว สำหรับ แรงกาย แรงใจ และทุนทรัพย์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์  
ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอพระคุณ  
ทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฅ
สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.1.1 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย.....	5
2.1.2 ประวัติเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย.....	5
2.2 ตัวอย่างผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบทางเดียว.....	7
2.3 ทฤษฎีและสมมุติฐาน.....	9
2.3.1 สมมุติฐานของการวิบัติของดิน.....	9
2.3.2 สมมุติฐานของการวิบัติของดินที่ใช้กับเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย.....	9
2.3.3 สมมุติฐานเกี่ยวกับความสม่ำเสมอของความเค้นและความเครียด.....	11
2.3.4 สมมุติฐานเกี่ยวกับการทดสอบแบบปริมาตรคงที่.....	13
2.4. คุณสมบัติและพฤติกรรมของแรงกระทำแบบวัฏจักร.....	14
2.4.1 คุณสมบัติของความเค้นและความเครียดของแรงกระทำแบบวัฏจักร.....	14
2.4.2 การตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน.....	18

2.5 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย.....	26
บทที่ 3 วิธีการวิจัยและทดสอบ.....	29
3.1 สถานที่เก็บตัวอย่างและวิธีการเก็บตัวอย่าง.....	29
3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง.....	29
3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง.....	29
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
3.2.1 เครื่องมือการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำแบบปกติ.....	29
3.2.2 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย.....	29
3.3 การพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสำหรับการทดสอบทางพลศาสตร์.....	31
3.3.1 สมมุติฐานในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ.....	31
3.3.2 การออกแบบอุปกรณ์เบื้องต้น.....	31
3.3.3 การออกแบบแหล่งกำเนิดกำลังสำหรับหมุนแกนเพลลา.....	33
3.3.4 การตรวจความถูกต้องของเครื่องมือ.....	33
3.3.5 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย.....	34
3.4) โปรแกรมการทดสอบ.....	35
3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน.....	35
3.4.2 การทดสอบหาความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต.....	36
3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย.....	36
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
4.1 บทนำ.....	46
4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น.....	46
4.3 การทดสอบอัดตัวคายน้ำ.....	47
4.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว.....	47



4.5 การทดสอบกำลังรับแรงเค้นทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร.....	54
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	102
5.1 บทนำ.....	102
5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว.....	102
5.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร.....	104
บทที่ 6 สรุปผลการการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	115
6.1 สรุปตัวอย่างทดสอบ.....	115
6.2 สรุปผลการทดสอบทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว.....	115
6.3 สรุปผลการทดสอบทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร.....	116
6.4 ข้อเสนอในการศึกษาเพิ่มเติม.....	117
รายการอ้างอิง.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	122

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน .....	16
2.2 ค่าคงที่ k.....	17
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือทดสอบ .....	33
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน.....	35
3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	37
3.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย.....	43
3.5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร.....	45
4.1 ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างทดสอบ.....	46
4.2 ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบแบบทางเดียว.....	49
4.3 ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบแบบวงจักร.....	56

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 ระนาบการวิบัติของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรง.....	4
2.2 ภาพหน้าตัดของเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของ Royal Swedish Geotechnical Institute.....	5
2.3 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์แบบ Mk7.....	6
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งเปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินกว่าปกติ ของการการทดสอบ $CK_0UDSS$ ในดินเหนียวอัดตัวแน่นมากกว่าปกติ จำนวน 5 ชนิด.....	7
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งเปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินกว่าปกติ ของการการทดสอบ $CK_0UDSS$ ในและการทดสอบ CIUC ของดินเหนียวกรุงเทพฯ.....	8
2.6 การวิบัติของดินตามสมมุติฐานของมอร์-คูลอมป์.....	9
2.7 การวิบัติของดินตามสมมุติฐานของมอร์-คูลอมป์.....	10
2.8 การหมุนวงกลมมอร์-คูลอมป์เพื่อให้ปรากฏความเค้นเฉือนสูงสุด.....	11
2.9 การเปรียบเทียบระหว่างสถานะของความเค้นในตัวอย่งการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับสภาพที่เกิดขึ้นจริง .....	11
2.10 ความเค้นยึดหยุ่นในอุปกรณ์การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์.....	12
2.11 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของบริษัท Geonor.....	12
2.12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบปริมาตรคงที่และการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำที่มี การวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน .....	13
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความเครียดเฉือนหรือกราฟวงฮีสเทอรีซิส.....	15
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความเครียดเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสของแรงเฉือน.....	16
2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความเครียดเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน .....	17
2.16 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธี Suspension logging test .....	19
2.17 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธี Up-hole และ Down-hole.....	20

ภาพประกอบที่	หน้า
2.18 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธี Cross-hole.....	20
2.19 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธีวัดแรงดัน.....	21
2.20 เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักร.....	22
2.21 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยเครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกน แบบวัฏจักรจากดินเหนียวกรุงเทพฯ 3 แหล่ง.....	23
2.22 สมมุติฐานในการคำนวณความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือน แบบวัฏจักรของแรงบิดแบบ Hollow Cylinder Torsion shear.....	24
2.23 เครื่องมือการทดสอบเสาสั้นพ้อง (Resonant column).....	25
2.24 เครื่องมือการวัดความเร็วคลื่นในห้องปฏิบัติการด้วย Piezoelectric Bender Element.....	26
2.25 เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางเดียวอย่างง่าย .....	27
2.26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรของดินเหนียวบอสตัน.....	28
3.1 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	30
3.2 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกอย่างง่ายแบบการเคลื่อนที่วงกลม.....	31
3.3 การทำงานของลูกสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน.....	32
3.4 ภาพจำลองหลักการให้แรงแบบวัฏจักรของเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้น.....	32
3.5 เครื่องมือวัดความเร็วมอเตอร์ยี่ห้อ SAMPO รุ่น DT2236B.....	33
3.6 การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง.....	34
3.7 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่ติดตั้งเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นใหม่.....	35
3.8 เครื่องมือการเตรียมตัวอย่างทดสอบในการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือน อย่างง่าย.....	36
3.9 ภาพจำลองการเพิ่มความเค้นในแนวตั้งของการทดสอบการอัดตัวของตัวอย่าง ทดสอบ.....	42
3.10 การจำลองขั้นตอนการเพิ่มแอมพลิจูดของความเครียดเฉือนขณะกระทำแรงเฉือน.....	44
4.1 กราฟการยุบอัดตัว.....	47
4.2 การอัดตัวของตัวอย่างทดสอบทางเดียว.....	49
4.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ .....	50
4.4 การ normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วนการ อัดตัวแน่นปกติ.....	51
4.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว.....	52

ภาพประกอบที่	หน้า
4.6 การ normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วน การอัดตัวแน่นเกินตัว .....	53
4.7 การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบแบบวงจักร.....	55-56
4.8 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN1.....	57-61
4.9 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN2.....	62-66
4.10 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN3.....	67-71
4.11 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN4.....	72-76
4.12 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN5.....	77-81
4.13 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN6.....	82-86
4.14 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN7.....	87-91
4.15 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN8.....	92-96
4.16 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN9.....	97-101
5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว.....	102
5.2 Normalized Stress Path ของการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว.....	103
5.3 ขั้นตอนการคำนวณค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนแบบเฉลี่ย.....	104
5.4 ขั้นตอนการคำนวณค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน.....	105
5.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความถี่ 0.1 Hz....	106
5.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความถี่ 1 Hz.....	107
5.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความถี่ 5 Hz.....	108
5.8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความถี่ 0.1Hz.....	109
5.9 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความถี่ 1 Hz.....	110
5.10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความถี่ 5 Hz.....	111
5.11 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความเค้น สูงสุดเท่ากับ 200 kPa.....	112
5.12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความเค้น สูงสุดเท่ากับ 300 kPa .....	113
5.13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักรที่ความเค้น สูงสุดเท่ากับ 400 kPa.....	114



ภาพประกอบที่	หน้า
6.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแรงอัดสามแกนกับการทดสอบแรงเฉือน ทางตรงอย่างง่าย ที่ความถี่เท่ากับ 0.1 Hz .....	118
6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแรงอัดสามแกนกับการทดสอบทดสอบ แรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ที่ความถี่เท่ากับ 0.1 Hz.....	119



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สัญลักษณ์

ญ

$A$  = ระยะความกว้างแขนของข้อเหวี่ยง

$D$  = อัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน (Damping Ratio)

$G$  = โมดูลัสของความเค้นเฉือน (Shear Modulus)

$G_{sec}$  = ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนที่จุดตัดสูงสุด (Secant Shear Modulus)

$G_{tan}$  = ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนแบบสัมผัส (Tangent Shear Modulus)

$G_{max}$  = ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Modulus)

$G_{eq}$  = ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนสูงสุดแบบเฉลี่ยในหนึ่งรอบของแรงกระทำ (Equivalent Shear Modulus)

$s_u$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)

$c'$  = ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion Intercept)

$\phi'$  = มุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Shearing Resistance)

$\theta_p$  = มุมระหว่างระนาบของความเค้นที่กระทำหลักการ (Orientation of the plane on which  $\sigma'_1$  acts)

$\tau$  = ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

$\tau_c$  = ความเค้นเฉือนแบบวัฏจักร (Cyclic Shear Stress)

$\gamma$  = ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

$\gamma_c$  = ความเครียดเฉือนแบบวัฏจักร (Cyclic Shear Strain)

$\gamma_{eq}$  = ความเครียดเฉือนแบบเฉลี่ยในหนึ่งรอบของแรงกระทำ (Equivalent Shear Strain)

$\sigma'_{vm}$  = ความเค้นสูงสุด (Maximum Vertical Effective Stress)

$\sigma'_p$  = ความเค้นสูงสุดในอดีต (Maximum Past pressure)

$\sigma'_1$  = ความเค้นหลัก (Major Principle Stress)

$\sigma'_3$  = ความเค้นรอง (Minor Principle Stress)

$\sigma'_v$  = ความเค้นในแนวตั้ง (Vertical Effective Stress)

$\sigma'_h$  = ความเค้นในแนวราบ (Horizontal Effective Stress)

$\Delta u$  = แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure)

$e$  = อัตราส่วนช่องว่างของดิน (Void Ratio)

$K_0$  = การอัดตัวคายนํ้าแบบ  $K_0$  ( $K_0$  Consolidation)

NC = ดินเหนียวอัดตัวแน่นปกติ (Normally Consolidation)

OC = ดินเหนียวอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidation)

DSS = เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

OCR = ค่าอัตราส่วนการยุบอัดแน่นเกินตัว ((Overconsolidation Ratio)

ASTM = องค์การทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Material)

CK<sub>0</sub>UDSS = การทดสอบกำลังแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบที่มีการอัดตัวคายน้ำแบบ K<sub>0</sub> ด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย (K<sub>0</sub> Consolidation-Undrained Direct Simple Shear Test)

CIUC = การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบที่มีการอัดตัวคายน้ำเท่ากันทุกทิศทาง ด้วยเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน (Isotropic Consolidation –Undrained Triaxial Compression Test)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับดิน สามารถแบ่งเป็นสองหมวดปัญหา คือ ปัญหาเกี่ยวกับความสมดุลหรือความมั่นคงของดิน (Stability problem) และปัญหาการเคลื่อนตัวของดิน (Displacement problem) สำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความสมดุลหรือความมั่นคงของดินนั้น สิ่งที่วิศวกรต้องพิจารณาการวิบัติที่เกิดขึ้นจากดินที่ต้องรับน้ำหนักหรือแรงกระทำเกินความสามารถที่จะรับได้และเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพของโครงสร้างดิน เช่น การพังทลายของเขื่อน การพังทลายของไหล่ถนนและคันคลอง เป็นต้น ส่วนปัญหาที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของดินความเสียหายที่เกิดขึ้นเรียกว่า การวิบัติจากการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดิน เช่น การทรุดตัวของฐานรากและการวิบัติของกำแพงกันดิน ในการที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการวิบัติของดินจะต้องจำลองสภาพการวิบัติในห้องปฏิบัติการเพื่อทำการศึกษาดังพฤติกรรมและองค์ประกอบของการวิบัติตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการออกแบบ แต่ในงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคบางประเภท มีความจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องมือทดสอบเพื่อจำลองระนาบการวิบัติที่แท้จริง เช่น งานทางด้านลาดความชัน เนื่องจากการใช้เครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการทั่วไป เช่น เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) หรือเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ยังมีข้อจำกัดในเงื่อนไขของระนาบการวิบัติ ซึ่งอาจไม่ถูกต้องตามสภาพที่เกิดขึ้นจริง

งานวิจัยนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด ภายใต้สภาวะความเค้นเฉือนทางตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear) และกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength,  $s_u$ ) ตลอดจนพฤติกรรมของแรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) ที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เช่น ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน (Shear Modulus,  $G$ ) ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน (Damping Ratio,  $D$ ) และแรงดันน้ำส่วนเกินในช่องว่างของดิน (Excess Pore Water Pressure,  $\Delta u$ ) โดยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำ ทั้งแบบทางเดียว (Monotonic Load) และแบบวัฏจักร (Cyclic load)

1.2.2 เพื่อประมาณกำลังรับแรงเฉือนทางเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties)

1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงแบบวัฏจักรที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เช่น ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน และแรงดันน้ำส่วนเกินในช่องว่างของดิน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากแรงกระทำแบบทางเดียวและแบบวัฏจักรที่มีต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ซึ่งจะทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ

## 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

1.4.1 สามารถประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนทางเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำทั้งแบบทางเดียวและแบบวัฏจักร

1.4.2 ประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์แบบ SHANSEP เพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินทั่วไป

1.4.3 ทราบถึงพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน กับจำนวนรอบของแรงกระทำ และโมดูลัสของความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและออกแบบโครงสร้างทางพลศาสตร์



## 1.5 การนำค่ากำลังไปใช้งานในด้านต่างๆ

### 1.5.1 การทดสอบแบบสถิตยศาสตร์

1.5.1.1 ใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำในการออกแบบดินคันทาง (Road Embankment)

1.5.1.2 ใช้ค่ากำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำในการออกแบบเสาเข็มประเภทรับแรงเสียดทานที่ผิว (Pile Shafts)

### 1.5.2 การทดสอบแบบวัฏจักร

1.5.2.1 ใช้พารามิเตอร์แบบวัฏจักรเพื่อออกแบบระบบฐานรากด้านแผ่นดินไหว

1.5.2.2 ใช้พารามิเตอร์แบบวัฏจักรเพื่อออกแบบพื้นผิวทางจราจร

1.5.2.3 ใช้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเพื่อทำนายการกลายสภาพเป็นของเหลวของดิน (Liquefaction) ขณะเกิดแผ่นดินไหว

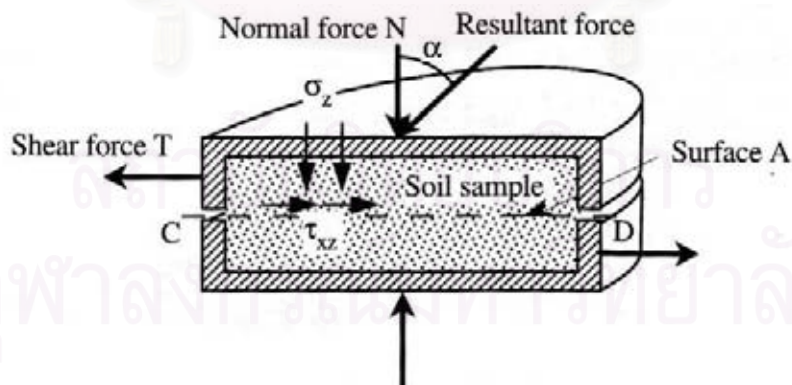
1.5.2.4 การออกแบบฐานรากรองรับเครื่องจักรที่เกิดการสั่นไหวขณะทำงาน

## บทที่ 2 ทฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

เนื่องจากดินเหนียวมีค่าความชื้นน้ำต่ำ จึงไม่สามารถระบายน้ำออกได้ทันเมื่อถูกน้ำหนักกระทำ กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจึงเป็นแบบไม่ระบายน้ำแต่การประมาณค่ากำลังแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำให้ถูกต้องเป็นสิ่งยาก และการทดสอบโดยเครื่องมือทดสอบแบบปกติก็ยังไม่สามารถอธิบายการวิบัติที่แท้จริงของดินได้ จึงมีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบที่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงของดิน ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบที่สามารถอธิบายระนาบการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงนั้น ต้องเป็นเครื่องมือที่ไม่มีการบังคับหรือควบคุมระนาบของการวิบัติ

การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) เป็นการทดสอบที่บังคับให้ตัวอย่างทดสอบมีระนาบการวิบัติในแนวราบดังรูปที่ 2.1 ซึ่งไม่สามารถจำลองการวิบัติที่แท้จริงได้ และเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงยังไม่สามารถควบคุมการระบายน้ำได้ การทดสอบจึงมีการทดสอบเพียงแบบเร็ว (แบบไม่ระบายน้ำ) และแบบช้า (แบบระบายน้ำ) ซึ่งผลการทดสอบแรงเฉือนจะใช้เพื่อหาค่า  $c'$  (Cohesion intercept) และค่า  $\phi'$  (Angle of Shearing Resistance) ในสภาพระบายน้ำและ  $s_u$  ในสภาพไม่ระบายน้ำนั้นจะให้ค่าที่สูงเกิน ซึ่งอาจไม่ปลอดภัยต่อการนำมาใช้งาน จึงต้องมีการพัฒนาเครื่องมือการทดสอบที่ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนทั้งทางเดียวและแบบวัฏจักรของระนาบการวิบัติที่แท้จริง คือเครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย



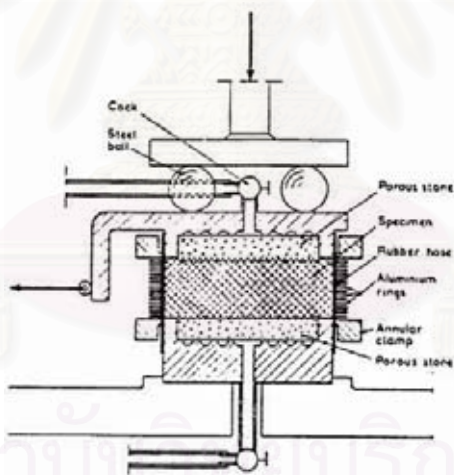
รูปที่ 2.1 ระนาบการวิบัติของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรง  
(Bardet, 1997)

### 2.1.1 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

เป็นเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่ทำการหมุนค่าของความเค้นหลัก (Principal Stress) เพื่อให้เกิดระนาบที่มีเฉพาะความเค้นเฉือนกระทำต่อตัวอย่างทดสอบเท่านั้น

### 2.1.2 ประวัติเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

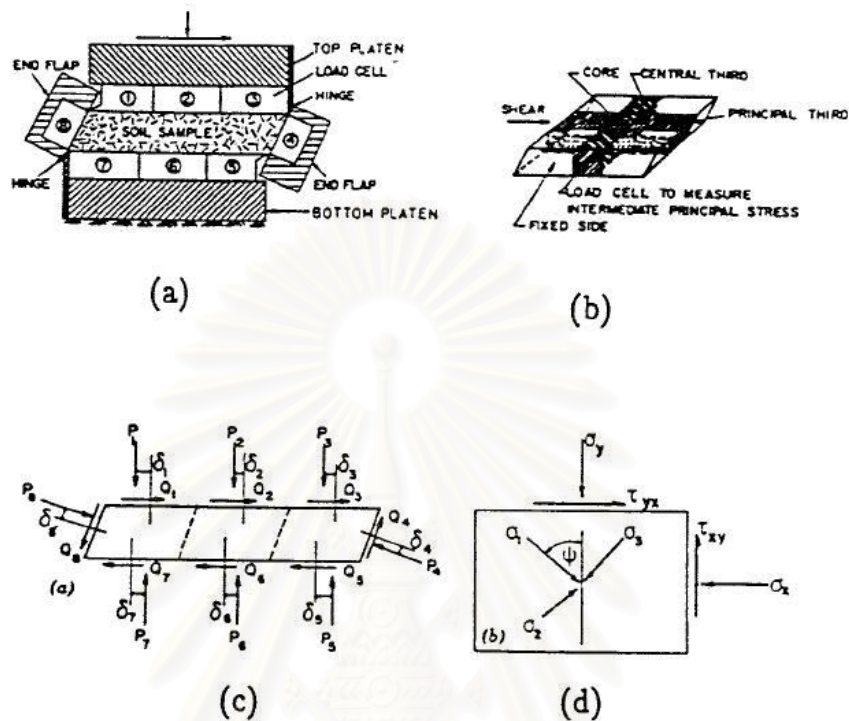
ปี ค.ศ.1936 เริ่มมีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน และในเวลาต่อมา Royal Swedish Geotechnical Institute ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงให้เป็นเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย โดยลักษณะของตัวอย่างทดสอบของ Royal Swedish Geotechnical Institute จะมีหน้าตัดเป็นวงกลม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ซึ่งมีแผ่นร่อง (Grooved Plate) ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 2.2 และมีแผ่นยางสังเคราะห์ ซึ่งทำจากอลูมิเนียมวางเรียงซ้อนเป็นชั้นแล้วเคลือบด้วยยาง หุ้มตัวอย่างทดสอบเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัด และมีน้ำหนักถ่วงจากตะกั่วใช้เป็นตัวกระทำความเค้นในแนวตั้งและความเค้นเฉือนในแนวราบ ตัวอย่างจะถูกเฉือน ภายใต้สภาวะการควบคุมความเค้น (Stress control) (Kjellman, 1951)



รูปที่ 2.2 หน้าตัดของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของ Royal Swedish Geotechnical Institute (Kjellman, 1951)

ต่อมาในปี ค.ศ.1953 มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ประเทศอังกฤษ ทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย (Roscoe, 1953) โดยมีการกำหนดให้มีความเค้นเฉือนอย่างง่ายเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ขนาด  $6 \times 6 \times 2$  เซนติเมตร สำหรับการทดสอบตัวอย่างดินทรายที่สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างกระทำแรงเฉือนได้ โดยปัจจุบันได้พัฒนา

เครื่องมือมาจนถึงรุ่น Mk7 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่ซับซ้อนมาก สามารถวัดค่าแรงกระทำตั้งฉาก และแรงเฉือนที่ขอบของตัวอย่างดิน และยังสามารถทดสอบตัวอย่างที่เป็นดินเหนียวได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์แบบ Mk7

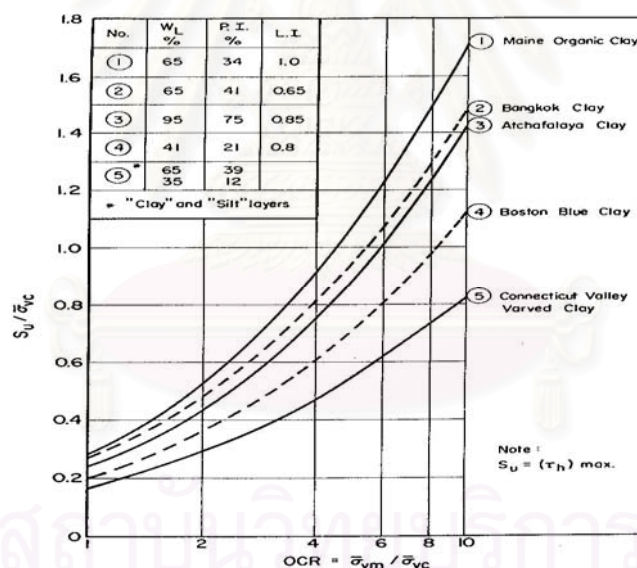
- (a) รูปตัดของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์
- (b) การจัดเครื่องวัดแรง
- (c) การติดตั้งที่วัดแรงต่างๆ ไป
- (d) ความเค้นที่แกนกลางของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (Budhu, 1985)

ในปี ค.ศ.1960 Norwegian Geotechnical Institute (NGI) ทำการพัฒนาเครื่องมือสำหรับทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย (Bjerrum และ Landva, 1966) โดยใช้หลักการเดียวกันกับแบบ Royal Swedish Geotechnical Institute เครื่องมือนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ  $K_0$  สำหรับตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพที่มีความไวสูง ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร โดยมีแผ่นยางเสริมลวดเหล็ก (wire-reinforced rubber membrane) หุ้มตัวอย่างทดสอบ ซึ่งแผ่นยางเสริมลวดเหล็กยอมให้ตัวอย่างเคลื่อนที่เฉพาะในแนวตั้งและในแนวราบเท่านั้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ

## 2.2 ตัวอย่างผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบทางเดียว

ผลข้อมูลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายในอดีต ทำการเก็บตัวทดสอบจากบริเวณต่างๆ ดังนี้ Atchafalaya, Boston, Connecticut, Portland และดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบทางตรงอย่างง่ายที่ Massachusetts Institute of Technology (MIT) ในการทดสอบจะวัดค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงสุดของตัวอย่างดินที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (Overconsolidated Clay) ที่แตกต่างกัน เรียกการทดสอบนี้ว่าการทดสอบ  $CK_0UDSS$  ( $K_0$  Consolidation-Undrained Direct Simple Shear Test) (Ladd and Edger, 1972)

นำผลการทดสอบมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งกับค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวของดินเหนียวทั้ง 5 ชนิด และสามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.4



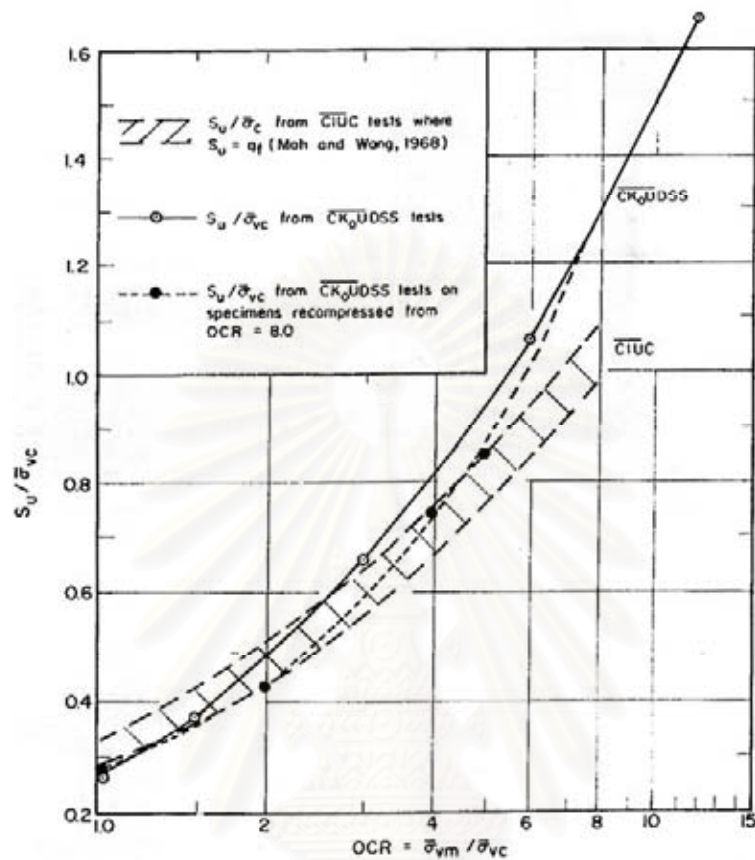
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งเปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว ของการทดสอบ  $CK_0UDSS$  ในดินเหนียวอัดตัวแน่นมากกว่าปกติ จำนวน 5 ชนิด

(Ladd และ Edger , 1972)

การทดสอบ  $CK_0UDSS$  ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Ladd และ Edger, 1972) โดยเก็บตัวอย่างจากกระบอกบางขนาด 5 นิ้ว ที่ระดับความลึก 5 เมตร บริเวณสวนลุมพินี แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบ  $CK_0UDSS$  และทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ CIUC



(Isotropic Consolidation –Undrained Triaxial Compression Test) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดสอบ ว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งเปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว ของการทดสอบ CK<sub>0</sub>UDSS ในและการทดสอบ CIUC ของดินเหนียวกรุงเทพฯ (Ladd และ Edger ,1972)

ในปัจจุบันการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสามารถทดสอบในประเทศไทยได้แล้ว โดยตัวอย่างที่เคยทดสอบในประเทศไทย เก็บจากบริเวณโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ และทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมสำหรับการใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งทำการทดสอบแบบทางเดียวและแบบเสมือนวัฏจักร (Pseudo Cyclic Behaviors) (รัชชัย 2548)

## 2.3 ทฤษฎีและสมมุติฐาน

### 2.3.1 สมมุติฐานของการวิบัติของดิน

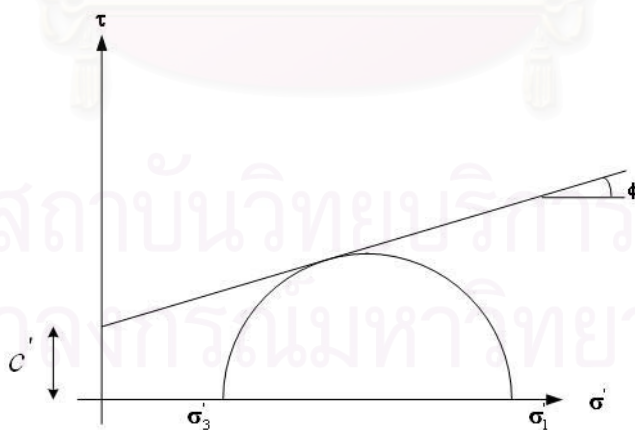
การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดิน มีองค์ประกอบของกำลังรับแรงเฉือนที่สำคัญสองประการคือ แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน

สำหรับดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว เช่น กรวด ทราย ค่ากำลังรับแรงเฉือนขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินและน้ำหนักกดที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของแรงเฉือน แต่ดินชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว เช่น ดินเหนียว กำลังรับแรงเฉือนขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน

ในปี ค.ศ.1773 คูลอมป์ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเค้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัสกับระนาบต่างๆ ของดินอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังรูปที่ 2.6 เรียกว่า สมการมอร์-คูลอมป์ ซึ่งใช้หาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดวิบัติของดิน

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.1)$$

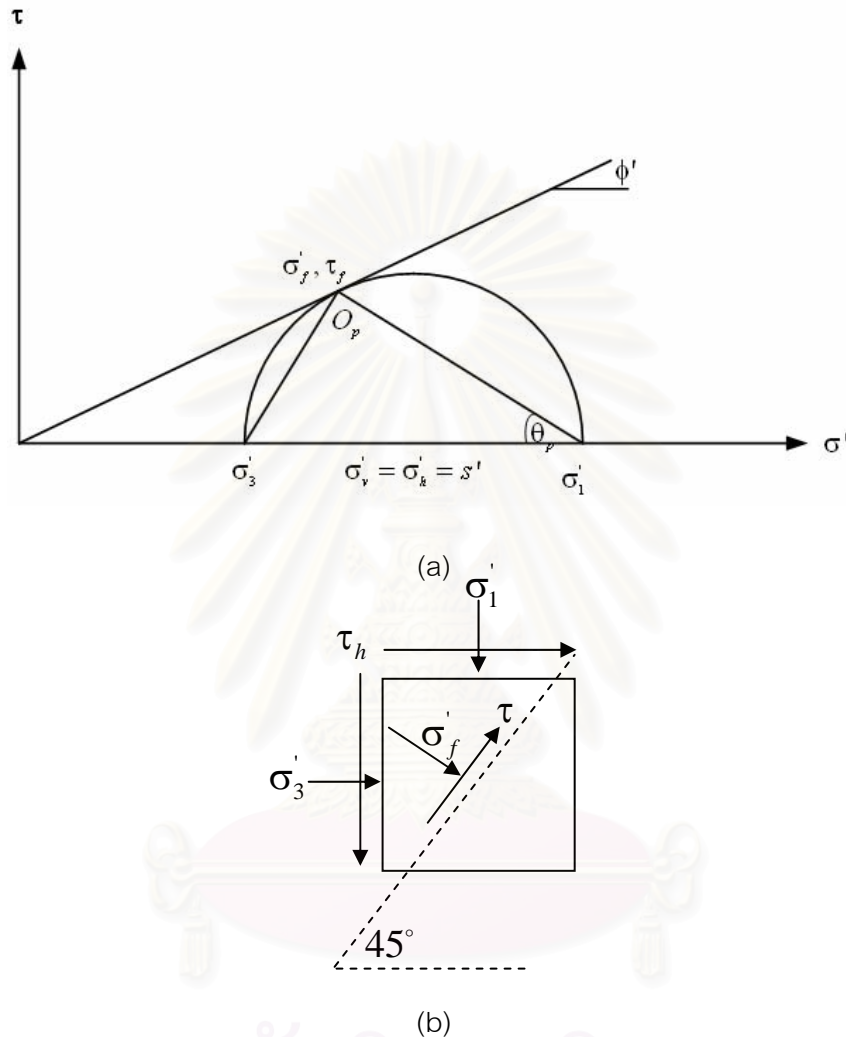
เมื่อ  $\tau$  คือ ความเค้นเฉือนบนระนาบที่เกิดการวิบัติ  $\sigma'$  คือความเค้นตั้งฉากบนระนาบที่เกิดการวิบัติ  $\sigma'_1$  คือความเค้นที่กระทำหลัก (Major Principal Stress)  $\sigma'_3$  คือ ความเค้นที่กระทำรอง (Minor Principal Stress)  $c'$  คือความเชื่อมแน่น  $\phi'$  คือมุมต้านทานแรงเฉือน



รูปที่ 2.6 การวิบัติของดินตามสมมุติฐานของมอร์-คูลอมป์

2.3.2 สมมุติฐานของการวิบัติของดินที่ใช้กับเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

จากสมมติฐานการวิบัติของดินของ มอร์-คูลอมป์ โดยเริ่มต้นของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างเป็นค่าที่ได้จากการอัดตัวคายน้ำแบบ  $K_0$  และความเค้นที่กระทำบนระนาบที่เป็นระนาบวิบัติคือ  $\tau_f$  และ  $\sigma'_f$  ดังรูปที่ 2.7



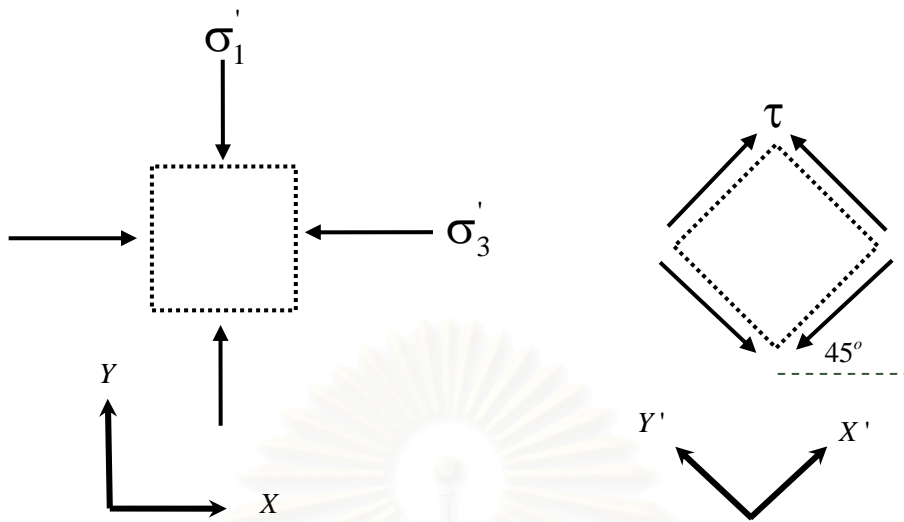
รูปที่ 2.7 การวิบัติของดินตามสมมติฐานของมอร์-คูลอมป์

(a) ความเค้นสูงสุดในวงกลมมอร์-คูลอมป์

(b) ระนาบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

เมื่อ  $\tau_f$  = ความเค้นเฉือนสูงสุดบนระนาบวิบัติ  $\tau_h$  = ความเค้นเฉือนสูงสุดในแนวราบ

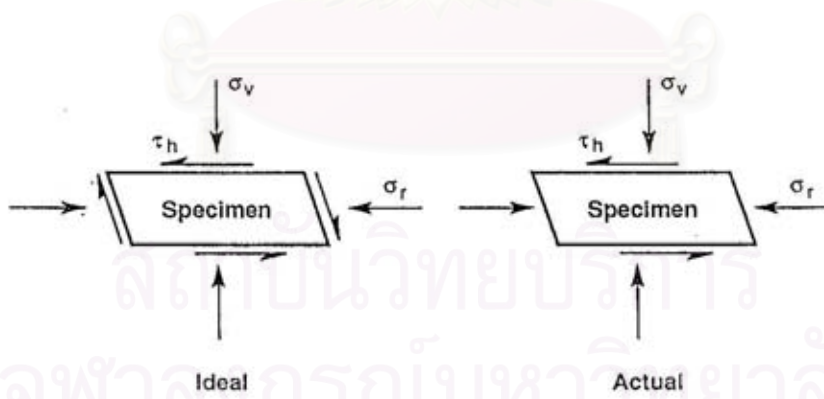
$\theta_p$  = มุมระหว่างระนาบของความเค้นที่กระทำหลักกับแนวราบ  $\phi'$  คือมุมด้านทานแรงเฉือน โดยระนาบความเค้นหลักจะเอียงทำมุม  $45^\circ$  กับแนวราบ ( $\theta_p = 45^\circ$ ) ซึ่งจะปรากฏความเค้นเฉือนสูงสุดดังรูปที่ 2.8 โดยความเค้นกดตั้งฉากที่กระทำเริ่มต้นต้องอยู่ในสถานะเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic)



รูปที่ 2.8 การหมุนวงกลมมอร์-คูลอมป์เพื่อให้เห็นความเค้นเฉือนสูงสุด

2.3.3 สมมุติฐานเกี่ยวกับความสม่ำเสมอของความเค้นและความเครียด

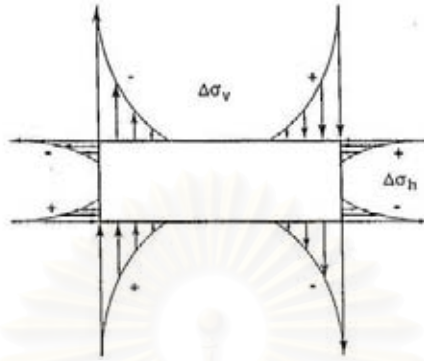
ปัญหาความสม่ำเสมอของความเค้นและความเครียด เกิดจากอุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายไม่สามารถกระทำความเค้นเฉือนตลอดทั้งตัวอย่างทดสอบอย่างสมบูรณ์ได้ ทั้งในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวราบและความเค้นเฉือนที่ผิวของตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 2.9 (Roscoe, 1953)



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบระหว่างสถานะของความเค้นในตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับสภาพที่เกิดขึ้นจริง (Roscoe, 1953)

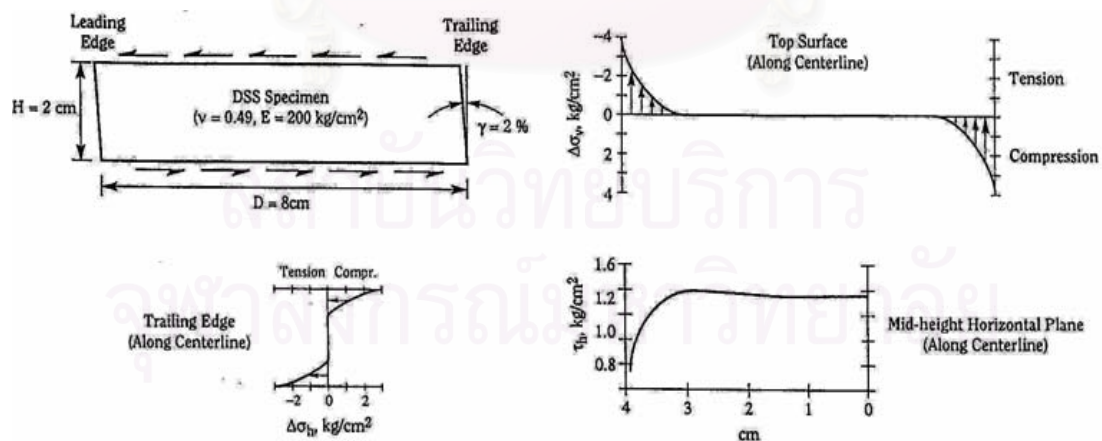
ในปี ค.ศ. 1953 Roscoe, Duncan และ Dunlop ได้ทดสอบเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับวัสดุแบบยืดหยุ่น (Elastic Material) ของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์และ

วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ พบว่าความเค้นเฉือนที่กระทำตามผิวด้านบนและด้านล่างมีค่าเท่ากัน แต่จะกระทำในลักษณะที่เป็นแรงคู่ควบซึ่งกันและกัน ส่วนด้านข้างของตัวอย่างทดสอบจะเกิดแรงคู่ควบที่มีขนาดเท่ากันกระทำอยู่ด้วยดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความเค้นยึดหยุ่นในอุปกรณ์การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ (Roscoe, 1953; Duncan และ Dunlop, 1969)

ในปี ค.ศ. 1972 Lucks ศึกษาสภาพของความเค้นของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของบริษัท Geonor กับวัสดุที่มีคุณสมบัติยึดหยุ่นแบบเชิงเส้นเท่ากันทุกทิศทาง (Linear Elastic Isotropic) และวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติจากผลการทดสอบดังรูปที่ 2.11 ซึ่งปรากฏความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของวัสดุ แต่ยังมีค่าน้อยมากซึ่งยังไม่สามารถหากล้างสมมติฐานว่า ความเค้นที่กระทำมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งตัวอย่างทดสอบได้



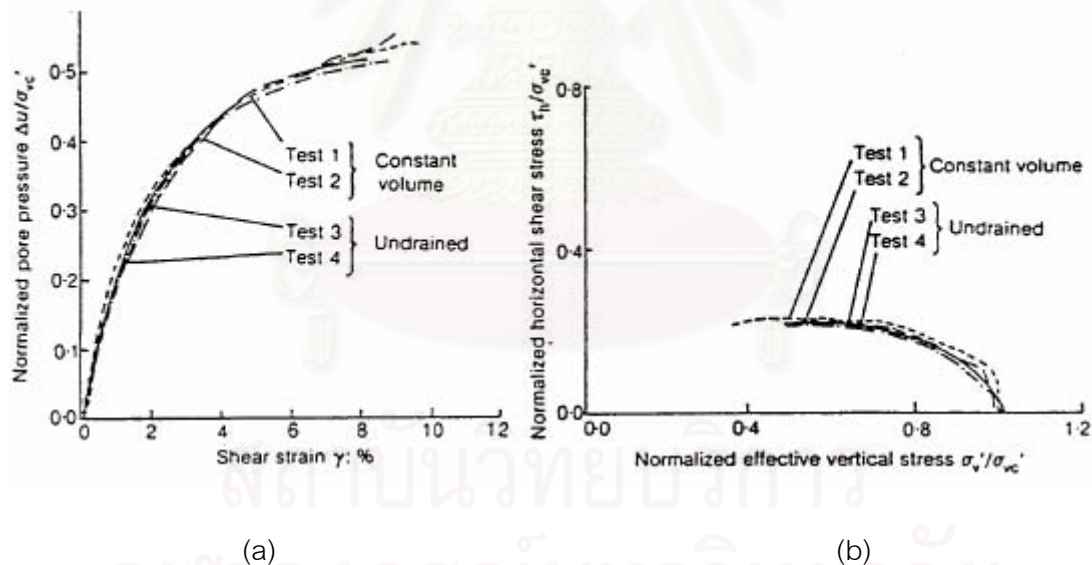
รูปที่ 2.11 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของบริษัท Geonor (Lucks, 1972)



### 2.3.4 สมมุติฐานเกี่ยวกับการทดสอบแบบปริมาตรคงที่

การทดสอบแบบไม่ระบายน้ำของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายคือ การควบคุมปริมาตรของตัวอย่างทดสอบให้มีค่าคงที่ตลอดการกระทำ ความเค้นเฉือน การทดสอบด้วยเครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Geonor จะมีแรงดันด้านข้างจากวงยางรอบตัวอย่างทดสอบ และยังรักษาพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบให้มีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) ที่เกิดขึ้น

ในปี ค.ศ. 1987 Dyvik ทำการวัดแรงดันน้ำส่วนเกินในเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของ NGI เพื่อวัดแรงดันน้ำส่วนเกินในขณะที่ทดสอบตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ และทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบปริมาตรคงที่ ในเงื่อนไขของ  $CK_0$  UDSS กับตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวที่มีอัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทั้ง 2 แบบ ดังรูปที่ 2.12 จากผลการทดสอบทั้งสองวิธี สรุปว่า การเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวตั้งจะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างการทดสอบนั้นเป็นจริง แต่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นจะต้องเป็นตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบปริมาตรคงที่และการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำที่มีการวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน

(a) รูปแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Normalized Excess Pore Water Pressure กับ Shear Strain

(b) รูปแสดง Normalized Effective Stress Path (Dyvik, 1987)

## 2.4 คุณสมบัติและพฤติกรรมของแรงกระทำแบบวัฏจักร

แรงกระทำแบบวัฏจักร คือ รูปแบบหนึ่งของแรงกระทำทางพลศาสตร์ ซึ่งมีการกระทำแบบรอบการเกิดซ้ำที่เป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆ แหล่งที่มาของแรงอาจมาจากทางธรรมชาติหรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์เอง เช่น แรงกระทำจากแผ่นดินไหว น้ำหนักบรรทุกจากการจราจรและแรงกระทำจากฐานรากของอาคารที่รองรับการทำงานของเครื่องจักรกล เป็นต้น สิ่งที่ต้องศึกษาคือพฤติกรรมระหว่างความเค้น-ความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างแรงกระทำแบบวัฏจักร โดยพฤติกรรมเหล่านี้อาจเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงค่าดัชนีของความปลอดภัยและความมั่นคงของดิน ตลอดจนสิ่งก่อสร้างหรืออาคารบริเวณนั้นด้วย และปัญหาที่มีความสัมพันธ์กับงานทางด้านวิศวกรรมที่ต้องพิจารณาถึงลักษณะของแรงแบบวัฏจักรหรือแรงกระทำทางพลศาสตร์ คือ

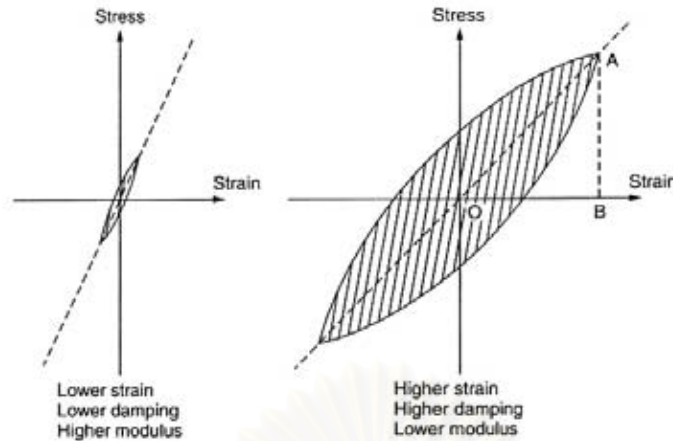
1. ปัญหาด้านการเคลื่อนตัวของดินขณะได้รับแรงกระทำหรือหลังจากได้รับแรงกระทำ
2. ปัญหาด้านคุณสมบัติของดินในการรับน้ำหนักบรรทุกหรือกำลังรับแรงเฉือนของดิน
3. ปัญหาการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินซึ่งเป็นสาเหตุของการกลายสภาพเป็นของเหลวของดิน (Liquefaction)

การศึกษาพฤติกรรมทางด้านการรับแรงกระทำพลศาสตร์ของดิน จะต้องศึกษาลักษณะและรูปแบบของแรงที่มากระทำ และอิทธิพลที่มีต่อมวลดินรวมไปถึงการตรวจวัดค่าคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์อีกด้วย (Das, 1993 และ สุพจน์, 2549)

### 2.4.1 คุณสมบัติของความเค้นและความเครียดของแรงกระทำแบบวัฏจักร

1.) กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบวัฏจักร ( $\tau_c$ ) คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินระหว่างที่แรงเฉือนกระทำแบบวัฏจักรหรือค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบทางเดียว (Monotonic) หลังการเกิดแรงกระทำแบบวัฏจักร

เมื่อทราบค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความเครียดเฉือนแล้วสามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนเรียกว่า วงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ดังรูปที่ 2.13 แล้วนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาหาคุณสมบัติต่างๆของดิน เช่น ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน ค่าอัตราส่วนของการกระจายตัวของพลังงานเป็นต้น (Kramer, 1996)



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความ  
เครียดเฉือนหรือกราฟวงฮีสเทอรีซิส (Kramer, 1996)

2.) ค่าโมดูลัสของความเค้นแรงเฉือน ( Shear Modulus,  $G$  ) คือ ค่าที่แสดงถึงความของ  
ความแข็งของดิน ( Soil Stiffness ) ที่มีอิทธิพลมาจากค่าคุณสมบัติต่างๆของดินและรูปแบบของ  
แรงกระทำ เช่น ช่วงความกว้างของความเครียดแบบวัฏจักร ( Strain Amplitude ) อัตราส่วน  
ช่องว่าง ( Void Ratio ) ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( Mean Effective Stress ) ค่าดัชนีความเหนียว  
( Plasticity Index ) ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว และจำนวนรอบของการเกิดแรงกระทำ  
แบบวัฏจักร ( Number of loading cycles )

การคำนวณค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับการใช้งาน  
และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เช่น ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนที่จุดตัดสูงสุด ค่าโมดูลัสของ  
ความเค้นเฉือนแบบสัมผัส ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนสูงสุด

ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนที่จุดตัดสูงสุด ( Secant Shear Modulus,  $G_{sec}$  ) คือค่า  
โมดูลัสของแรงเฉือนที่เกิดจากความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนแบบวัฏจักรสูงสุดกับค่า  
ความเครียดเฉือนแบบวัฏจักรสูงสุด ดังสมการที่ 2.2 และ รูปที่ 2.14 (Kramer, 1996)

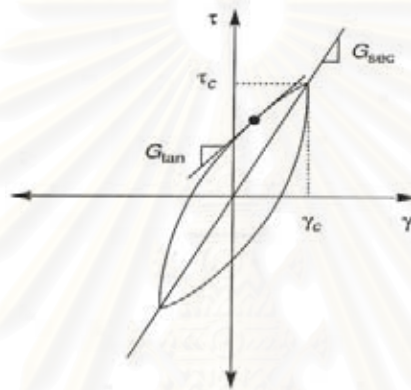
$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.2)$$

ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนแบบสัมผัส ( Tangent Shear Modulus,  $G_{tan}$  ) คือ ค่า  
โมดูลัสของความเค้นเฉือนที่เป็นตัวแทนค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนทุกๆจุดบนกราฟวงฮีสเทอรี  
ซิส ดังรูปที่ 2.14

ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Modulus ,  $G_{max}$  ) คือ ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนสูงสุดของดินซึ่งต้องวัดโดยการวัดค่าทางกายภาพ โดยใช้หลักการของการเคลื่อนที่ของคลื่นในดิน ซึ่งทำการวัดความเร็วของคลื่นในสนามแล้วคำนวณหาค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน ดังสมการที่ 2.3 ( Bozorgnia and Bertero, 2004)

$$G_{max} = \rho v^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของดิน  $v$  = ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านดิน



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความเครียดเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสของแรงเฉือน

การหาค่าโมดูลัสของแรงเฉือนสูงสุดยังสามารถทำการทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างทดสอบเสาสั้นพ้อง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน

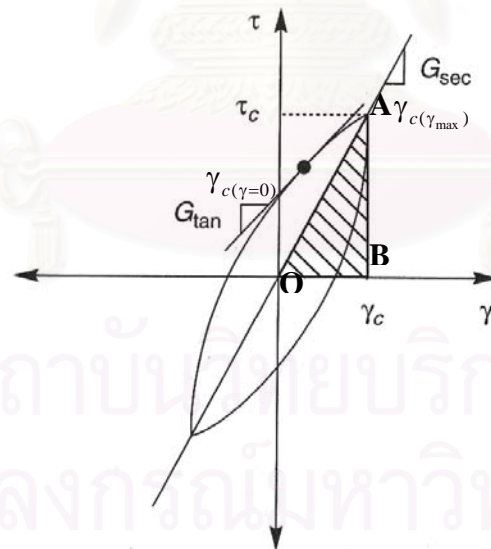
ทรายที่เป็นลักษณะเม็ดกลมมน (Hardin and Richart , 1963)	$G_{max} = \frac{6908(2.17 - e)^2}{1 + e} p_0'^{0.5}$	(2.4)
ทรายที่เป็นลักษณะเม็ดเหลี่ยม (Hardin and Richart , 1963)	$G_{max} = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} p_0'^{0.5}$	(2.5)
ดินเหนียว (Hardin and Dmnevich , 1972 )	$G_{max} = \frac{1230(2.97 - e)^2}{1 + e} (OCR)^k p_0'^{0.5}$	(2.6)

เมื่อ  $e =$  อัตราส่วนช่องว่างของดิน  $p'_0 = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$ ,  $OCR =$  อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว  $k =$  ค่าคงที่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าดัชนีของความเหนียว

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่  $k$  (Das, 1993)

ดัชนีความเหนียว (PI %)	$k$
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
$\geq 100$	0.5

3.) ค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน (Damping Ratio,  $D$ ) คือ ค่าที่แสดงการลดลงของพลังงานในการสั่นสะเทือน หรือการลดลงของช่วงความถี่ของการสั่นพ้องซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับความเค้นเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความเครียดเฉือนแบบวัฏจักรดังรูปที่ 2.15 และ สมการที่ 2.7 (Kramer, 1996)



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบวัฏจักรและค่าความเครียดเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน

การคำนวณหาค่าการกระจายตัวของพลังงานระหว่างรอบของการให้แรงสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ล้อมรอบเส้นทางเดินของความเค้นและความเครียดดั่งสมการที่ 2.7 หรือจากการประมาณจากความสัมพันธ์ของวงฮีสเทอรีซิสแบบวงรีและค่าความเครียดที่จุดศูนย์กลางของวงรี ( $\gamma=0$ ) เป็นตัวแสดงถึงการลดลงของพลังงานในแต่ละรอบของแรงกระทำดั่งสมการที่ 2.8 (สุพจน์ 2549)

$$D = \frac{A_{Loop}}{4\pi A_{AOB}} \quad (2.7)$$

$$D = \frac{\tau_{\gamma=0}}{2\tau_{\gamma \max}} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $A_{Loop}$  = พื้นที่ของวงฮีสเทอรีซิส (จากรูปที่ 2.14),  $A_{AOB}$  = พื้นที่ของสามเหลี่ยม AOB (จากรูปที่ 2.15),  $\gamma_c$  = ค่าความเครียดเฉือนแบบวัฏจักร

#### 2.4.2 การตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน

การตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินสามารถทำได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดและเงื่อนไขที่แตกต่างกัน การตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินสามารถกระทำได้ ทั้งระดับความเครียดต่ำและการทดสอบที่ระดับความเครียดสูง การทดสอบที่ระดับความเครียดต่ำสามารถทดสอบสามารถทดสอบได้ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบ Suspension Logging Test การทดสอบ Up-hole และ Down-hole การทดสอบ Cross-hole การทดสอบวัดแรงดันการวัดความเร็วคลื่นในห้องปฏิบัติการด้วย Piezoelectric Bender Element และการทดสอบเสาสั้นพ้อง (Kramer, 1996)

การทดสอบที่ระดับความเครียดสูงมักทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักร การทดสอบแรงเฉือนแบบวัฏจักรของแรงเฉือนบิด และเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร (Kramer, 1996 และ สุพจน์ 2549)

##### 1.) การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินในสนาม

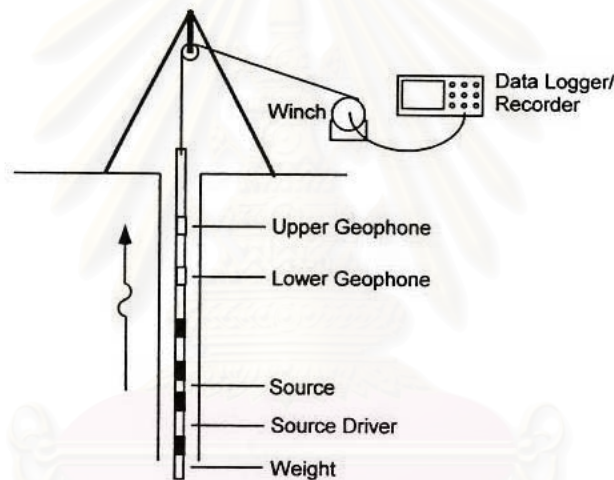
การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินในสนาม คือการตรวจวัดค่าคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์โดยการติดตั้งเครื่องมือทางเทคนิคที่ทำการตรวจวัดค่าต่างๆ ของดินที่อยู่ในสถานที่จริง ซึ่งข้อดีของการทดสอบลักษณะนี้คือไม่ต้องพิจารณาเรื่องการถูกรบกวนของตัวอย่างทดสอบและจะได้ผลการทดสอบที่เป็นอิทธิพลของ คุณสมบัติความเค้น คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติของอุณหภูมิ และคุณสมบัติของโครงสร้างดินจริง

การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินในสนามมักทำการเจาะและติดตั้งเครื่องมือทดสอบลงไปตรวจวัดในหลุมเจาะนั้นหรืออาจวัดที่ผิวดินก็ได้ เช่น การทดสอบ Suspension



Logging Test การทดสอบ Up-hole และ Down-hole การทดสอบ Cross-hole และการทดสอบ วัดแรงดัน (Pressuremeter Test) (Kramer, 1996)

1.1) การทดสอบ Suspension Logging Test เป็นการทดสอบที่มักใช้ในการสำรวจจุดเจาะปิโตรเลียม แต่ภายหลังได้นำมาใช้กับการทดสอบคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์ โดยเฉพาะงานทางด้านการศึกษาแผ่นดินไหว โดยการส่งเครื่องส่งสัญญาณคลื่นและรับสัญญาณคลื่นลงไปหลุมเจาะที่มีสารรักษาเสถียรสภาพของหลุมเจาะอยู่ ดังรูปที่ 2.16 การทดสอบจะทำการวัดค่าความเร็วของคลื่นเฉือนที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องส่งในทุกทิศทางซึ่งทำให้ของเหลวที่อยู่ภายในหลุมเจาะ เกิดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ เท่ากับ 1000 - 3000 Hz คลื่นเฉือนจะเคลื่อนที่จากตัวกำเนิดคลื่นผ่านผิวของหลุมเจาะเข้าสู่ตัวรับสัญญาณคลื่น และทำการวัดเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางและคำนวณหาความเร็วของคลื่น (สุพจน์ 2549)

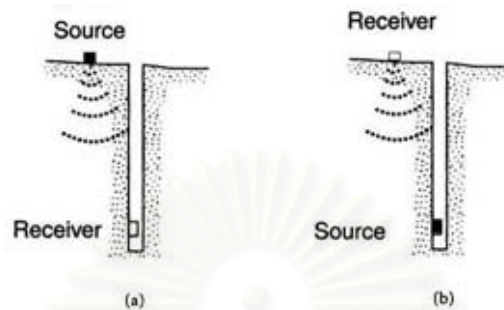


รูปที่ 2.16 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธี Suspension logging test (Kramer, 1996)

1.2) การทดสอบ Up-hole และ Down-hole เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความเร็วของคลื่นในแนวตั้งของหลุมเจาะ โดยกำหนดให้คลื่นเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการกระจายคลื่นชนิด P และ S ให้เคลื่อนที่ผ่านดินเพื่อวัดความเร็วของคลื่น ในการทดสอบแบบ Up-hole จะการติดตั้งตัวส่งสัญญาณคลื่นที่บริเวณก้นของหลุมเจาะแล้วปล่อยคลื่นเคลื่อนที่มาที่ตัวรับสัญญาณคลื่นที่บริเวณปากหลุมเจาะ ส่วนของ Down-hole ก็ทำในลักษณะที่คล้ายกันแต่เปลี่ยนตำแหน่งของตัวรับและตัวส่ง ดังรูปที่ 2.17 (Kramer, 1996)

ในการทดสอบจะสมมุติให้คลื่นเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเท่ากับ ความลึกของหลุมเจาะ แต่ในการวิเคราะห์อย่างละเอียดจำเป็นต้องพิจารณาระยะทางการ

เคลื่อนที่ของคลื่นผ่านตัวกลางอย่างละเอียด เพราะในบางจุดคลื่นอาจไม่เคลื่อนที่ในแนวตั้งอย่าง เดียว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณามุมตกกระทบและมุมหักเหของคลื่นด้วย รวมทั้งความเร็วของ คลื่นในระดับความลึกระดับตื้น (สุพจน์ 2549)

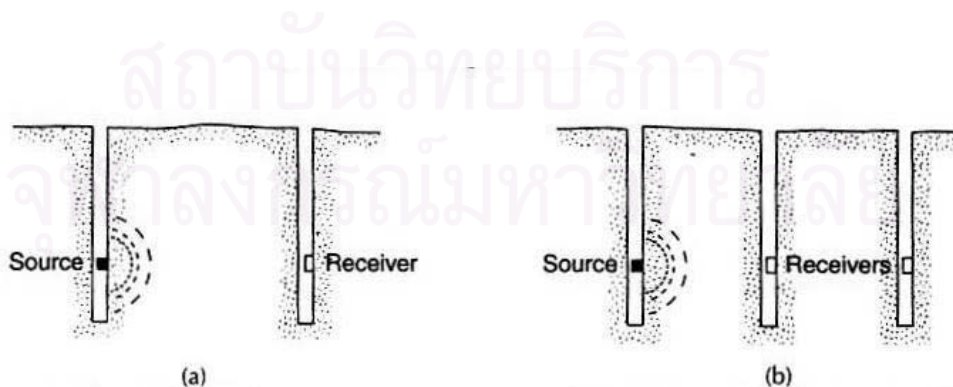


รูปที่ 2.17 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธี Up-hole และ Down-hole

(a) Down-hole;

(b) Up-hole (Kramer, 1996)

1.3) การทดสอบ Cross-hole เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความเร็วของคลื่นเฉือนในดิน โดยการติดตั้งตัวรับ-ส่งสัญญาณ จะติดตั้งในหลุมเจาะที่ระดับความลึกเดียวกันดังรูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของคลื่นบางครั้งจะเคลื่อนที่ผ่านดินที่มีความไม่สม่ำเสมอ จึงต้องพิจารณามุมตกกระทบ และมุมหักเหของคลื่นด้วยและต้องใช้กำลังของเครื่องกำเนิดคลื่นให้เหมาะสม ผลของการทดสอบ ด้วยวิธี Cross-hole สามารถแสดงแต่เฉพาะในส่วนของชั้นดินและความลึกที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน เท่านั้น การทดสอบต้องทำการวัดระยะทางและเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านแล้วนำมาคำนวณ ความเร็ว (สุพจน์ 2549)

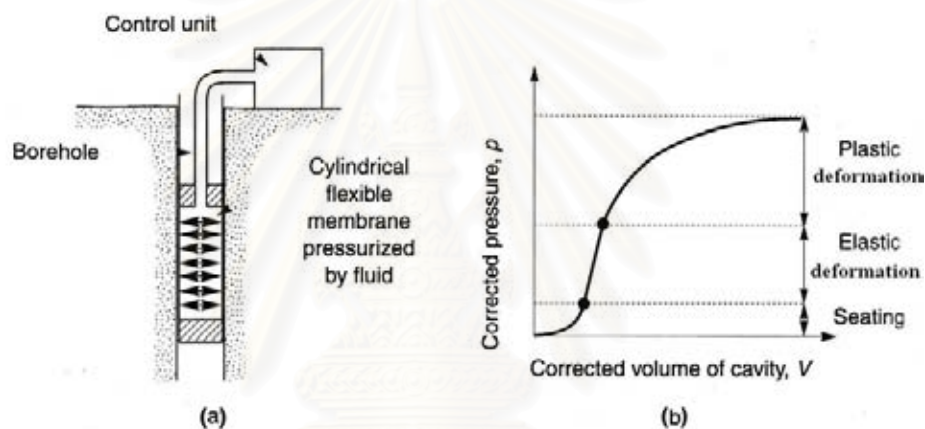


รูปที่ 2.18 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธี Cross-hole

(a) ตัวรับคลื่นตัวเดียว

(b) ตัวรับคลื่นหลายตัว (Kramer, 1996)

1.4) การทดสอบวัดแรงดัน (Pressuremeter Test , PMT) เป็นศึกษาพฤติกรรมของดิน ด้านความเค้นและความเครียด การทดสอบจะติดตั้งกระเปาะแรงดันในหลุมเจาะดังรูปที่ 2.19 โดยให้มีการสัมผัสกันระหว่างกระเปาะแรงดันกับผนังของหลุมเจาะ การทดสอบจะเพิ่มแรงดันของกระเปาะวัดแรงดัน ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของกระเปาะแรงดันแล้วผนังของหลุมเจาะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของผนังหลุมเจาะ ในการทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินจะเพิ่มและลดแรงดันในระหว่างการทดสอบ ในการวัดค่าแรงดันในกระเปาะความดันต้องเปรียบเทียบค่าระหว่างแรงดันกับค่าการขยายตัวของกระเปาะแรงดันในสถานะ ต่างๆ ของการเคลื่อนตัวดังรูปที่ 2.19 (b) (Kramer,1996 และ สุพจน์ 2549)



รูปที่ 2.19 การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยวิธีวัดแรงดัน

(a) การติดตั้งกระเปาะความดันในหลุมเจาะ

(b) กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าระหว่างแรงดันกับค่าการขยายตัวของกระเปาะแรงดัน (Kramer,1996)

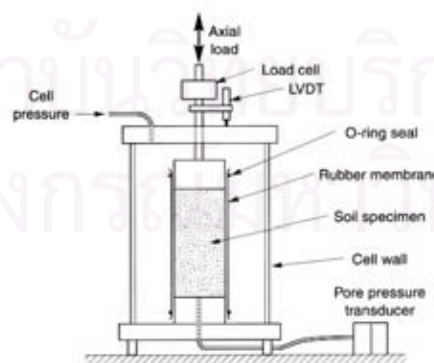
## 2.) การทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปคือ การจำลองลักษณะของตัวอย่างทดสอบโดยสมมุติให้ ตัวอย่างทดสอบนั้นเป็นหนึ่งในชิ้นส่วน (Elements) ของดินที่อยู่ในสถานะที่จริง ซึ่งเป็นการจำลองพฤติกรรมบางส่วนของดินเท่านั้น เนื่องจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่สามารถจำลองความเค้นและความเครียดที่แท้จริงได้ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากการถูกรบกวนของตัวอย่างทดสอบจากระบวนการเก็บตัวอย่างด้วย

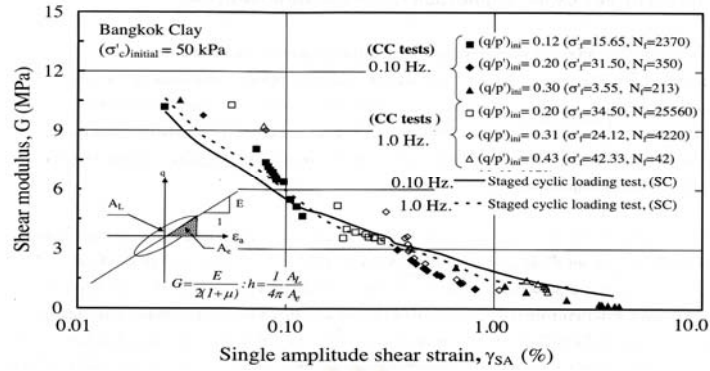
2.1) การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักร (Cyclic Triaxial Test) เป็นศึกษาพฤติกรรมของดินด้านความเค้นและความเครียด โดยจำลองลักษณะของความเค้นให้เหมือนดินที่

อยู่ในธรรมชาติโดยการอัดแรงกระทำในทุกทิศทางของตัวอย่างทดสอบ สามารถทดสอบได้ทั้งแบบสถิตและแบบพลศาสตร์ดังรูปที่ 2.20 ตัวอย่างทดสอบจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดและความสูงของตัวอย่างเท่ากับ 1:2 เพื่อให้ระนาบของการวิบัติเกิดขึ้นตลอดทั้งความสูงของตัวอย่างทดสอบ โดยมีความเค้นในแนวตั้งและค่าความเค้นในแนวรัศมี (Radial Stress) กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ ในการทดสอบแบบวัฏจักรจะมีการควบคุมค่าความเค้นในแนวรัศมีให้คงที่และค่าความเค้นในแนวตั้งมีการควบคุมให้กระทำแบบวัฏจักรโดยมีความถี่ ประมาณ 0.1-10 Hz ซึ่งเป็นความเค้นในช่วงของแรงกระทำแบบพลศาสตร์ (สุพจน์ 2549)

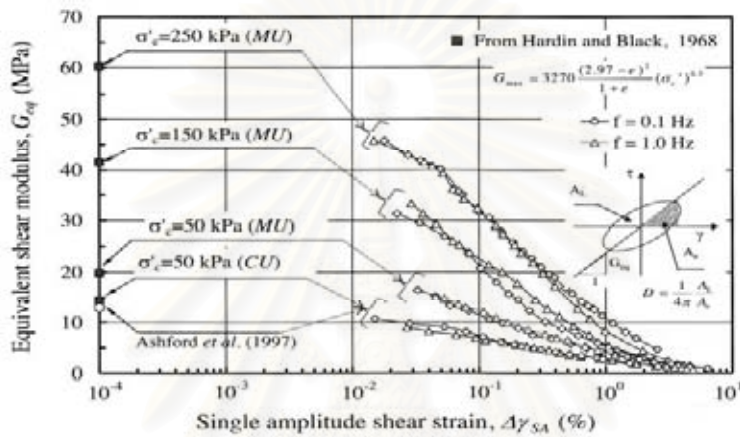
การทดสอบสามารถทำได้ทั้งในทรายและดินเหนียวโดยวัดค่าความเค้น ความเครียดและแรงดันน้ำส่วนเกินของการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักร แล้วนำมาคำนวณค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนและค่าการกระจายตัวของพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนแบบวัฏจักรดังรูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างทดสอบดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯซึ่งรูปที่ 2.21 (a) คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความเค้นเฉือน ( $G$ ) กับค่าความเครียดเฉือนที่จุดสูงสุดเฉพาะทิศทางที่ความเครียดเฉือนมีค่าเป็นบวก ( $\gamma_{SA}$ ) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนที่รูปแบบของแรงกระทำที่ต่างกันคือ CC (Continuous cyclic loading) และ SC (Staged cyclic loading) รูปที่ 2.21 (b) คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนแบบเสมือนของการให้แรงในหนึ่งรอบ ( $G_{eq}$ ) กับค่าความเครียดเฉือนที่จุดสูงสุดเฉพาะทิศทางที่ความเครียดเฉือนมีค่าเป็นบวก ( $\gamma_{SA}$ ) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความถี่และรูปที่ 2.21 (c) แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับค่าความเครียดเฉือนที่จุดสูงสุดเฉพาะทิศทางที่ความเครียดเฉือนมีค่าเป็นบวก ( $\gamma_{SA}$ ) ของการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ



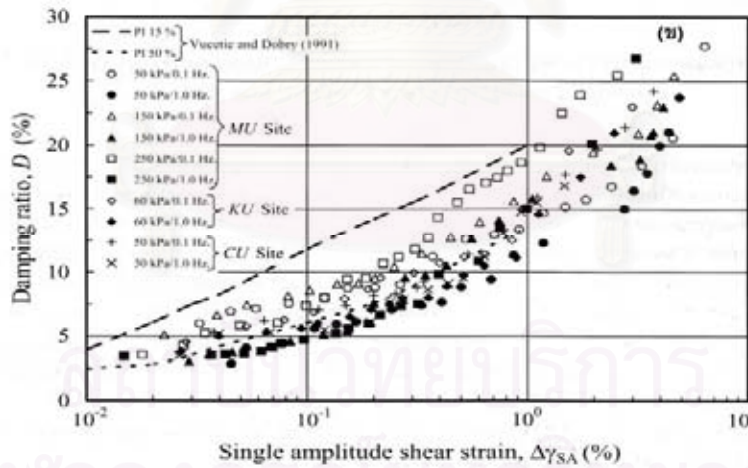
รูปที่ 2.20 เครื่องมือการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักร (Kramer, 1996)



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.21 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยเครื่องมือการทดสอบแรงอัด

สามแกนแบบวัฏจักรจากดินเหนียวกรุงเทพฯ 3 แห่ง

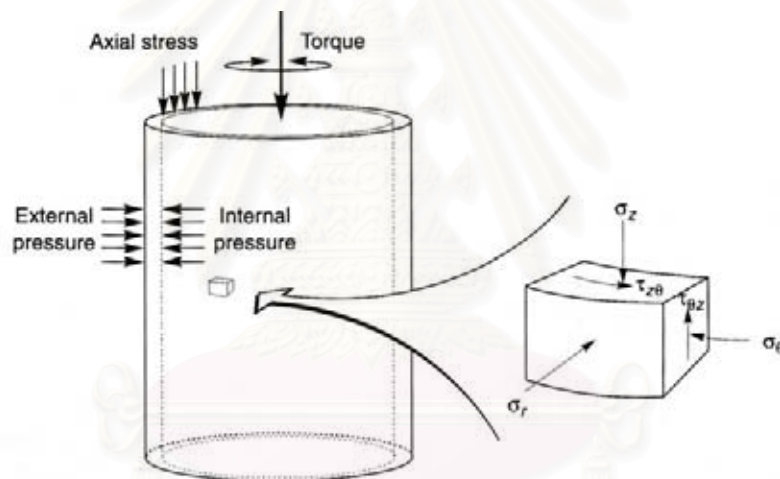
(a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน

(b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนแบบเสมือนกับความเครียดเฉือน

(c) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับความเครียดเฉือน (Teachavorasinskun, Thongchim and Lukkunaprasit, 2002)



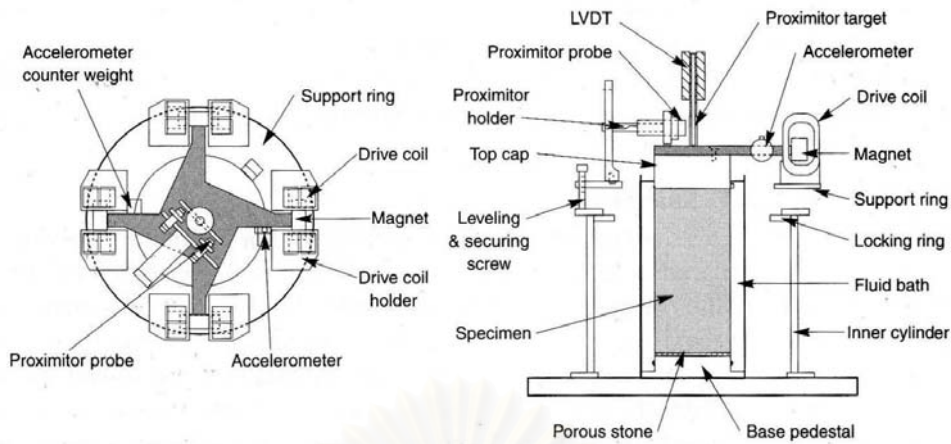
2.2) การทดสอบแรงเฉือนแบบวัฏจักรของแรงเฉือนบิด (Cyclic Torsional Shear Test) เป็นเครื่องมือทดสอบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าความเค้นหลักในแนวราบ โดยมาจากสมมุติฐานว่า ตัวอย่างที่มีผนังบางจะมีสภาวะของความเค้นที่กระทำสม่ำเสมอมากกว่า ตัวอย่างที่ผนังที่หนา จึงใช้ตัวอย่างการทดสอบที่มีผนังบางมาก การทดสอบมักทำในดินเหนียว ส่วนในทรายนั้นไม่นิยมกระทำเนื่องมีจากการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก ทดสอบโดยการให้ความเค้นกับตัวอย่างทดสอบที่เป็นลักษณะทรงกระบอกกลวง โดยให้ความเค้นกระทำทั้งเปลือกทางด้านนอกและเปลือกทางด้านในของตัวอย่างการทดสอบดังรูปที่ 2.22 และแรงกระทำในแนวดิ่งจะทำให้เกิดลักษณะเดียวกับการทดสอบแรงอัดแบบสามแกน ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่าง เครื่องมือจะเฉือนตัวอย่างโดยการบิดตัวอย่างการทดสอบ การทดสอบแบบทางเดียวจะทำการบิดตัวอย่างการทดสอบจนเกิดการวิบัติ ส่วนการทดสอบแบบวัฏจักรจะมีการกลับทิศของแรงบิดด้วยความถี่ประมาณ 0.1-10 Hz (Kramer, 1996)



รูปที่ 2.22 สมมุติฐานในการคำนวณความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนในการทดสอบแรงเฉือนแบบวัฏจักรของแรงบิดแบบ Hollow Cylinder Torsion shear (Kramer, 1996)

2.3) การทดสอบเสาสั้นพ้อง (Resonant Column Test) เป็นเครื่องมือทดสอบที่อาศัยหลักการการสั่นพ้องของคลื่นและการเคลื่อนที่ของคลื่น เครื่องมือทดสอบจะสร้างความเค้นเฉือนต่อตัวอย่างทดสอบ โดยให้ความเค้นบิดและการสั่นพ้องจากคลื่นให้เกิดขึ้นพร้อมกันและความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าประมาณ 0.1-1000 Hz ดังรูปที่ 2.23 (Kramer, 1996)





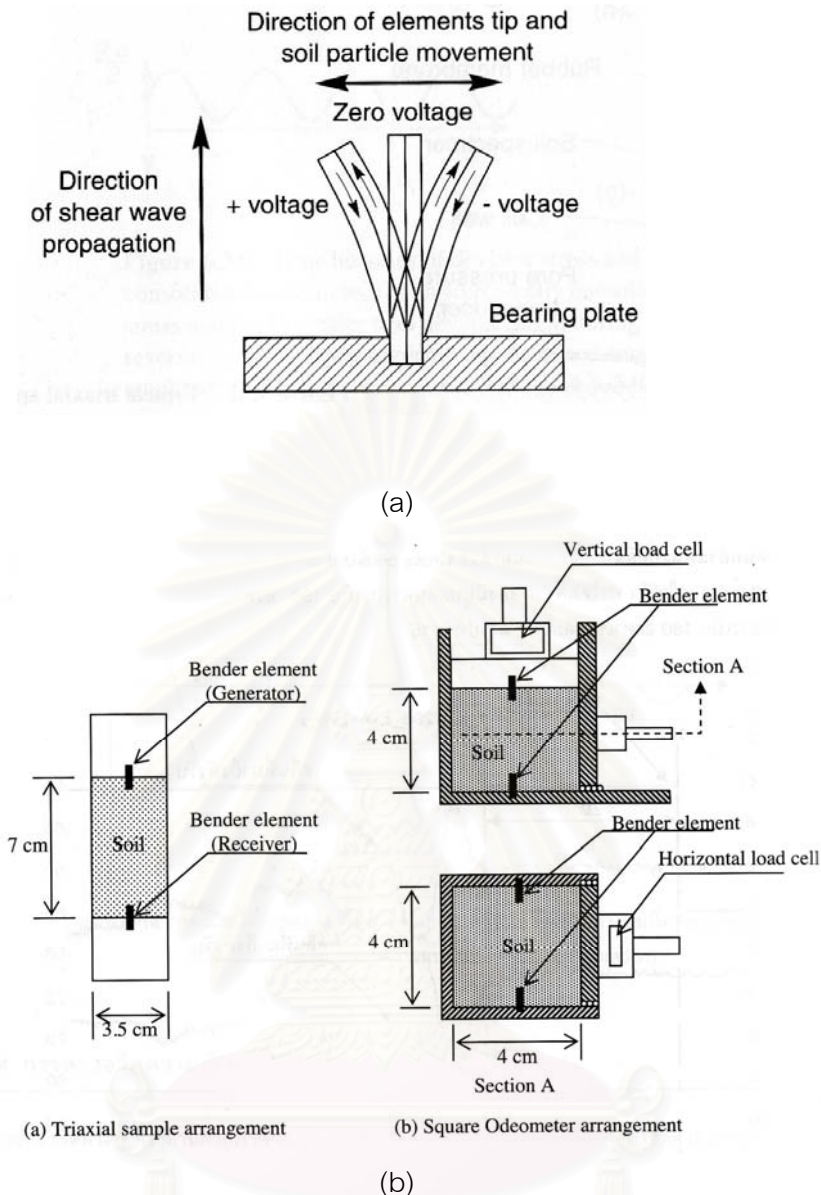
top view of loading system

profile view of loading and soil specimen

รูปที่ 2.23 เครื่องมือการทดสอบเสาสั้นพ้อง (Resonant column) (Kramer, 1996)

2.4) การวัดความเร็วคลื่นในห้องปฏิบัติการด้วย Piezoelectric Bender Element เป็นการทดสอบเพื่อวัดความเร็วของคลื่นในห้องปฏิบัติการ โดยใช้หลักการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Bender Element จะทำให้เกิดการยืดตัวทางด้านซ้ายบวกและหดตัวทางด้านซ้ายลบ ถ้ามีการส่งกระแสไฟฟ้าเข้าไปใน Bender Element เป็นวงจกร จะทำให้เกิดการสับัดของ Bender Element ตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านดังรูปที่ 2.24 (a) ซึ่งทำให้เกิดคลื่นแรงเฉือนเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดิน ในการติดตั้ง Piezoelectric Bender Element ในเครื่องมือการทดสอบต่างๆ จะติดตั้งบริเวณด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 2.24 (b)

การทดสอบสามารถกระทำได้ทั้งตัวอย่างทดสอบที่เป็นทรายและดินเหนียว โดยปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปใน Bender Element ทำให้เกิดการสับัดของ Bender Element ตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและทำให้เกิดคลื่นเฉือนขึ้นในตัวอย่างทดสอบและเคลื่อนที่ไปยัง Bender Element ที่เป็นตัวรับสัญญาณทำให้ Bender Element ที่เป็นตัวรับสัญญาณเกิดการสับัดและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า แล้ววัดเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างการทดสอบจากนั้นหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น และค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (สุพจน์ 2549)



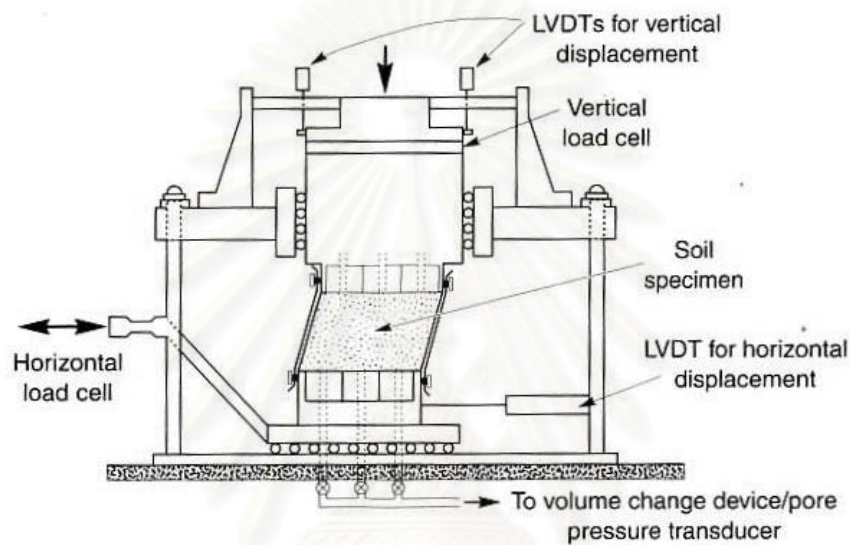
รูปที่ 2.24 (a) เครื่องมือการวัดความเร็วคลื่นในห้องปฏิบัติการด้วย Piezoelectric Bender Element (Kramer, 1996)

(b) การติดตั้ง Piezoelectric Bender Element ในเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนและเครื่องมือทดสอบการอัดตัวคลายน้ำ (สุพจน์ 2549)

## 2.5 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

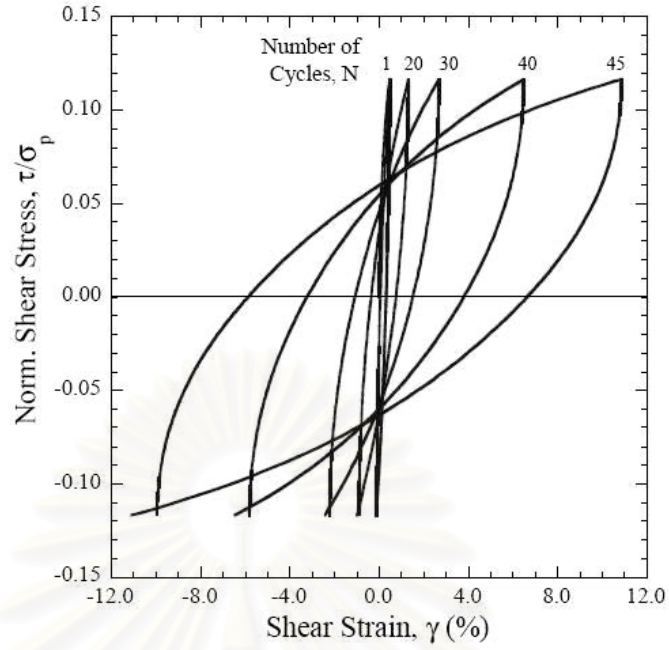
การทดสอบสามารถทำได้ตัวอย่างทดสอบที่เป็นทรายและดินเหนียว โดยเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย มักทำการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำเนื่องจากในขณะที่เกิดแรงกระทำแบบวัฏจักรจะเกิดในระยะเวลา

สั้นๆ ตัวอย่างทดสอบจึงไม่สามารถระบายน้ำได้ทัน และวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ค่าความเครียดเฉือน รวมถึงค่าแรงดันน้ำส่วนเกินเพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนและค่าการกระจายตัวของพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนแบบวัฏจักรรูปแบบทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบแรงกระทำแบบวัฏจักรจะทำการควบคุมค่าความเค้นเฉือนให้คงที่ในระหว่างที่ทำการเฉือนไม่ระบายน้ำแบบปริมาตรคงที่ โดยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายจะให้ความเค้นเฉือนกระทำในแนวราบแบบวัฏจักรดังรูปที่ 2.25

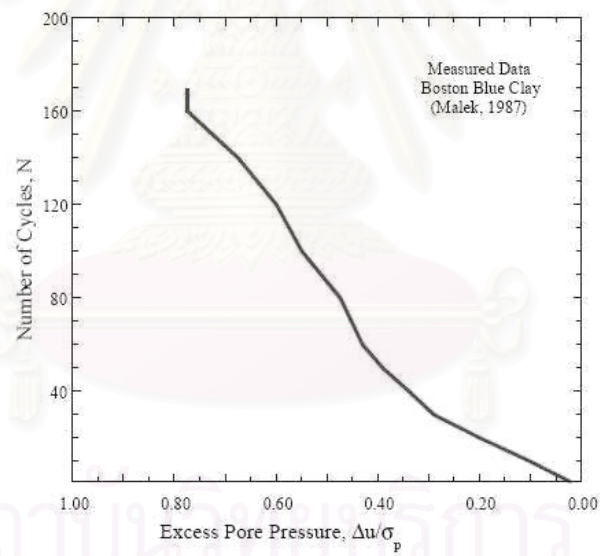


รูปที่ 2.25 เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางเดียวอย่างง่าย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรในอดีตได้มีการทดสอบที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียเบิร์กลีย์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของดินเหนียวบอสตันและนำพารามิเตอร์ไปพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมดิน (Constitutive model) การทดสอบกระทำภายใต้การควบคุมความเค้นเฉือนและทำการวัดการตอบสนองของค่าความเค้นเฉือนแบบวัฏจักร, ความเครียดเฉือนแบบวัฏจักรและแรงดันน้ำส่วนเกินขณะกระทำความเค้นเฉือนโดยการเพิ่มจำนวนรอบของแรงกระทำดังรูปที่ 2.26 (Pestana and Biscontin, 2001) โดยรูปที่ 2.26 (a) แสดงความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของดินเหนียวบอสตันบลูและรูปที่ 2.26 (b) แสดงการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำเพิ่ม



(a)



(b)

รูปที่ 2.26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรของดินเหนียวบอสตัน

(a) ความเค้นเฉือน-ความเครียดเฉือนของการทดสอบกำลังรับแรงอย่างง่าย

แบบวัฏจักร ของดินเหนียวบอสตัน

(b) แรงดันน้ำส่วนเกินของการทดสอบกำลังรับแรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรของดิน

เหนียว (Pestana และ Biscontin, 2001)

### บทที่ 3

#### วิธีการวิจัยและทดสอบ

#### 3.1 สถานที่เก็บตัวอย่างและวิธีการเก็บตัวอย่าง

##### 3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บจากบริเวณโครงการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กรุงเทพฯ (BTS) ส่วนต่อขยาย (สุขุมวิท-บางนา) บริเวณสถานีรถไฟฟ้าอ่อนนุช

##### 3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

เจาะหลุมสำหรับเก็บตัวอย่างดินด้วยวิธีฉีดล้าง (Wash Boring) แล้วเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกบาง (Shelby Tube) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 นิ้ว ยาว 1 เมตร เก็บตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ แบบต่อเนื่องที่ระดับความลึกประมาณ 2.5 ถึง 15.5 เมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกโดยเฉลี่ยของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จำนวน 2 หลุม ห่างกันประมาณ 7 เมตร เมื่อค้นตัวอย่างออกจากกระบอกเก็บดินแล้ว นำมาหุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟรอยด์ แล้วเคลือบด้วยพาราฟินตลอดทั้งตัวอย่าง

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.2.1) เครื่องมือทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ( Oedometer Apparatus )

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำของบริษัท ELE International รุ่น EL25-0402 ซึ่งทำการวัดการยุบตัวในแนวดิ่งของตัวอย่างทดสอบเพื่อคำนวณค่าความเค้นกดในอดีตและอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำในธรรมชาติ

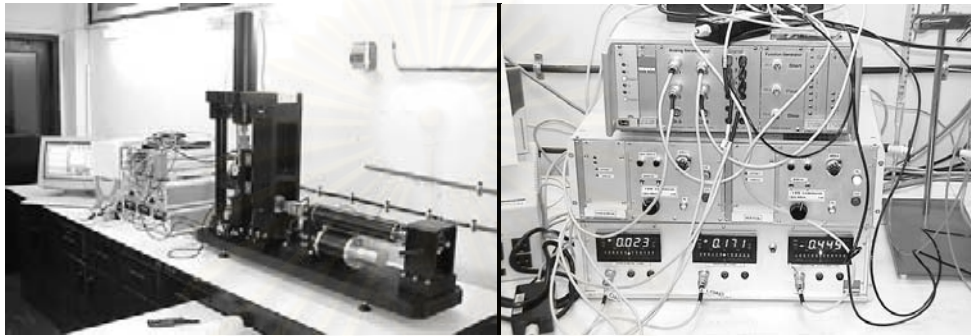
##### 3.2.2) เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นของบริษัท GEONOR รุ่น Geonor H -12 Direct Simple Shear ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงลักษณะของเครื่องมือทดสอบดังรูปที่ 3.1 (a) และแบบจำลองของการให้แรงของเครื่องมือทดสอบดังรูปที่ 3.1 (b) ลักษณะและคุณสมบัติของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

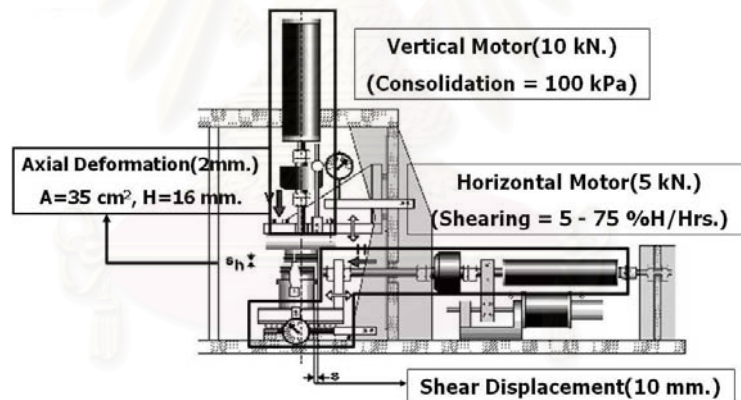
- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1) พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน | 35 ซม <sup>2</sup><br>(เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6.675 ซม.) |
| 2) ความสูงของตัวอย่าง           | 1.6 – 2.0 ซม.  |
| 3) แรงกดในแนวดิ่งมากที่สุด      | 10 kN  |



- 4) แรงเฉือนในแนวนอนมากที่สุด 5 kN
- 5) แรงเฉือนในแนวนอนมากที่สุดโดยใช้ 3.3 kN (Pneumatic Cyclic Cylinder)
- 6) ความเร็วมอเตอร์ในแนวตั้ง 0.2 - 60 มม./นาที
- 7) ความเร็วมอเตอร์ในแนวราบ 0.001 - 0.2 มม./นาที
- 8) ค่าความถี่ต่ำสุดของแรงวัฏจักร 1 Hz (Pneumatic Cyclic Cylinder)
- 9) การแสดงผลและการเก็บข้อมูลทำด้วยระบบคอมพิวเตอร์



(a)



(b)

รูปที่ 3.1 (a) เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ เครื่องมือควบคุมการทดสอบของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(b) ภาพจำลองการให้แรงในแนวตั้งและแนวราบจากมอเตอร์ทั้งสองทิศทาง

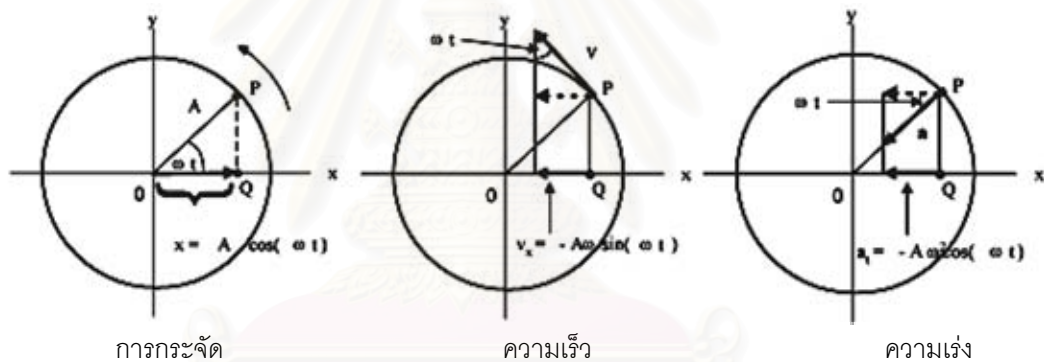


### 3.3 การพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสำหรับการทดสอบทางพลศาสตร์

เนื่องจากเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยยังไม่สามารถทำการทดสอบแรงกระทำแบบวัฏจักรที่ระดับพลศาสตร์ได้ ซึ่งจะทำให้การพัฒนาในส่วนของคุณสมบัติให้กำลังแบบพลศาสตร์ในแนวราบ ขั้นตอนในการออกแบบมีดังนี้

#### 3.3.1) สมมุติฐานในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ

สมมุติฐานที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ คือ การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion) การเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเส้นโดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นแบบกลับไปกลับมา ซึ่งจะผ่านจุดหลักคงที่จุดหนึ่งเสมอ และจุดหลักนี้เรียกว่า “ตำแหน่งสมดุลของการเคลื่อนที่” ในงานวิจัยนี้จะใช้การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายแบบการเคลื่อนที่วงกลมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายแบบการเคลื่อนที่วงกลม

ซึ่งการเคลื่อนที่ของจุด Q จะมีการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ ในแนวแกน  $\pm x$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ 3.1

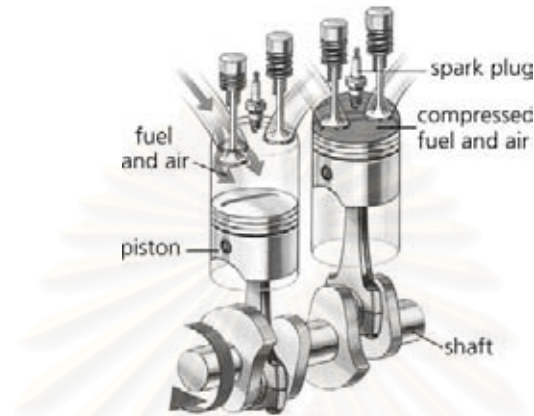
$$x = A \cos(\omega T) \quad (3.1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.2)$$

เมื่อ  $x$  = ระยะกระจัด  $A$  = แอมพลิจูด  $\omega$  = ความถี่เชิงมุม (เรเดียน ต่อ วินาที)  $T$  = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ (วินาที)  $f$  = จำนวนรอบที่เคลื่อนที่ได้ในหนึ่งวินาที (Hz)

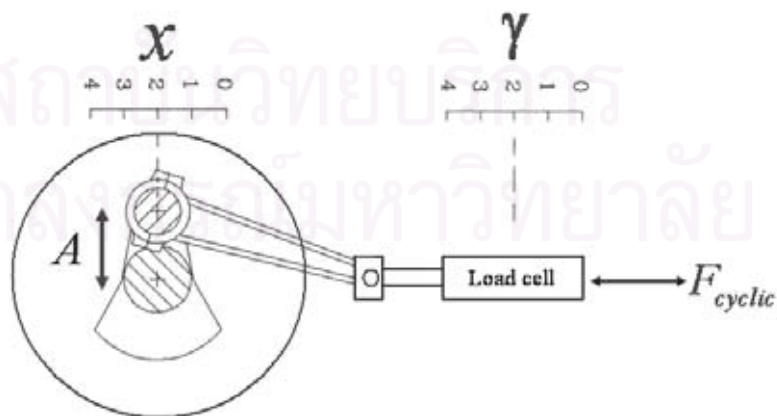
### 3.3.2) การออกแบบอุปกรณ์เบื้องต้น

จากแนวคิดการทำงานของลูกสูบเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนซึ่งเป็นลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมาเหมือนแบบการเคลื่อนฮาร์มอนิกอย่างง่าย จึงนำไปสู่การศึกษาลักษณะโครงสร้างและการทำงานของลูกสูบที่ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การทำงานของลูกสูบของเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน

จากการทำงานระบบลูกสูบในเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนทำการจำลองพฤติกรรมเพื่อใช้ในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ แต่เปลี่ยนระบบการทำงานจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบเป็นแหล่งต้นกำเนิดพลังงานเพื่อหมุนเพลลาเป็นการหมุนเพลลาเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของลูกสูบแทน ซึ่งได้รูปแบบของโครงสร้างดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองหลังการการให้แรงแบบวัฏจักรของเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้น

### 3.3.3) การออกแบบแหล่งกำเนิดกำลังสำหรับหมุนแกนเพลลา

การออกแบบแหล่งกำเนิดต้นกำลังนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขของการทำงานดังนี้

- (i) กำหนดแรงกระทำสูงสุดที่สามารถกระทำตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 300 นิวตัน
- (ii) กำหนดการเคลื่อนที่สูงสุดทั้งด้านไปและกลับเท่ากับ 3 เซนติเมตร
- (iii) กำหนดความถี่ของแรงกระทำเท่ากับ 0.1, 1 และ 5 Hz

จากข้อกำหนดทั้ง 3 ข้อนำไปทำการคำนวณหาค่าแรงบิดของการหมุนจากสมการที่ 3.3

$$M = F \times A \quad (3.3)$$

เมื่อ  $M$  = แรงบิด ( นิวตัน-เมตร)  $F$  = แรงกระทำในแนวราบ (นิวตัน)  $A$  = ความกว้างแขนของแรง(เมตร) ซึ่งจากข้อกำหนดข้างต้น แรงบิดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 9 N-m จากการกำหนดความถี่สูงสุดของแรงกระทำกับ 5 รอบ/วินาที รอบของการหมุนสูงสุดของแหล่งกำเนิดต้องไม่น้อยกว่า 300 รอบ/นาที จากข้อกำหนดเบื้องต้นนำไปเลือกขนาดของการหมุนได้ดังนี้

- มอเตอร์กระแสลับ 3 เฟส 0.5 แรงม้า ความเร็วสูงสุด 1410 รอบ/นาที
- ชุดเกียร์ทดรอบมอเตอร์ 1:10 และ 1:60

ซึ่งในการทดสอบในแต่ละความเร็วจะต้องใช้ชุดเกียร์ทดรอบมอเตอร์และการปรับความเร็วมอเตอร์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การให้แรงแบบวัฏจักรของเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้น

ความถี่ (Hz)	ชุดเกียร์ทดรอบมอเตอร์		แรงบิดสูงสุด (N-m)	ความเร็วมอเตอร์ (รอบ/นาที)
	1:10	1:60		
0.1		✓	152	360
1	✓		25.3	60
5	✓		25.3	3000

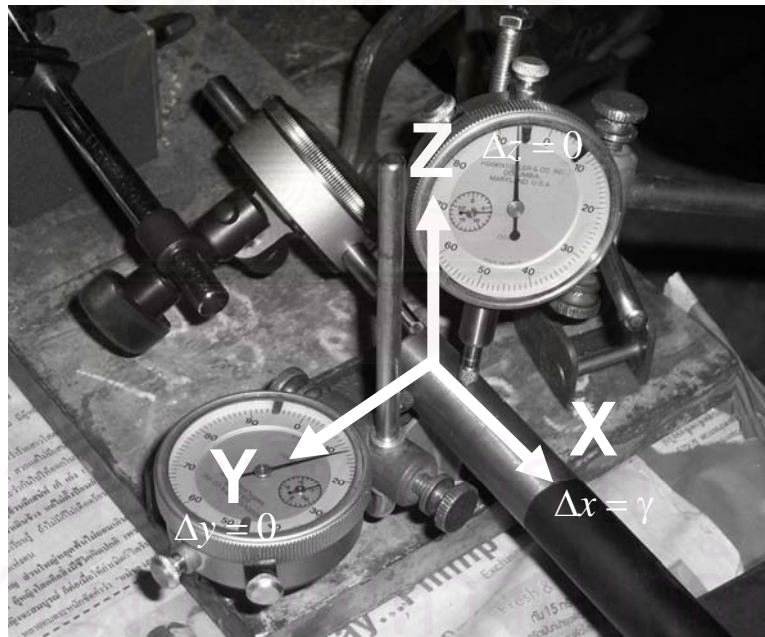
### 3.3.4) การตรวจความถูกต้องของเครื่องมือ

ตรวจสอบค่าความเร็วสูงสุดของมอเตอร์เพื่อใช้เป็นค่าความเร็วต้นกำลังโดยมีเงื่อนไขดังนี้ ไฟฟ้ากระแสลับ 3 เฟส 380 V 49 Hz ผลของการวัดมีค่าเท่ากับ  $1403 \pm 2$  รอบ/นาทีซึ่งใช้เครื่องมือวัดดังรูปที่ 3.5



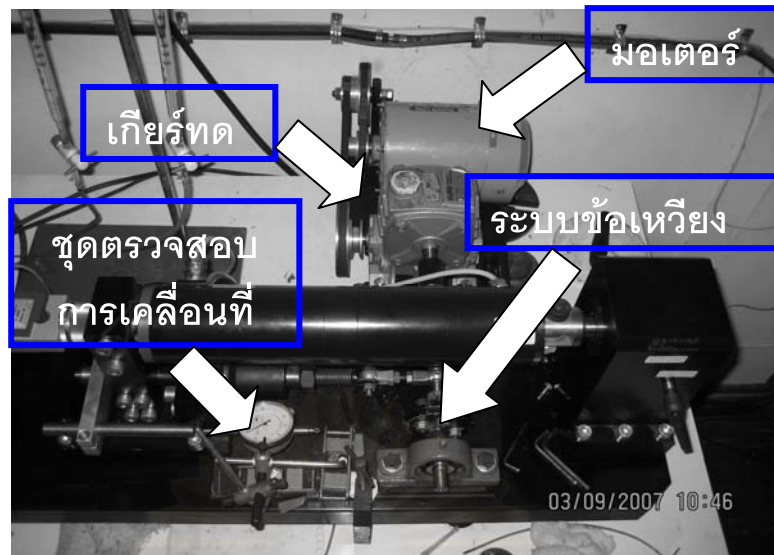
รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดความเร็วมอเตอร์ยี่ห้อ SAMPO รุ่น DT2236B

-ตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังโดยการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังต้องมีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่กำหนดเท่านั้นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง

3.3.5) การติดตั้งเครื่องมือทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเพิ่มจะทำการติดตั้งแทนที่กระบอกแรงดันลมเดิม (Pneumatic Cyclic Cylinder) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่ติดตั้งเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นใหม่

### 3.4 โปรแกรมการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

ตัวอย่างดินที่เก็บมาได้ จะนำมาศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ตามมาตรฐานของ ASTM (American Society for Testing and Materials) โดยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานดังตารางที่

3.2

ตารางที่ 3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน	มาตรฐานการทดสอบ
การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total Unit Weight)	ASTM D1156-90
การทดสอบหาค่าความชื้นในมวลดิน (Natural Moisture Content)	ASTM D2216-05
การทดลองหาค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit)	ASTM D4318-93
การทดลองหาค่าพิกัดพลาสติก (Plastic Limit)	ASTM D4318-05
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid)	ASTM D854-92



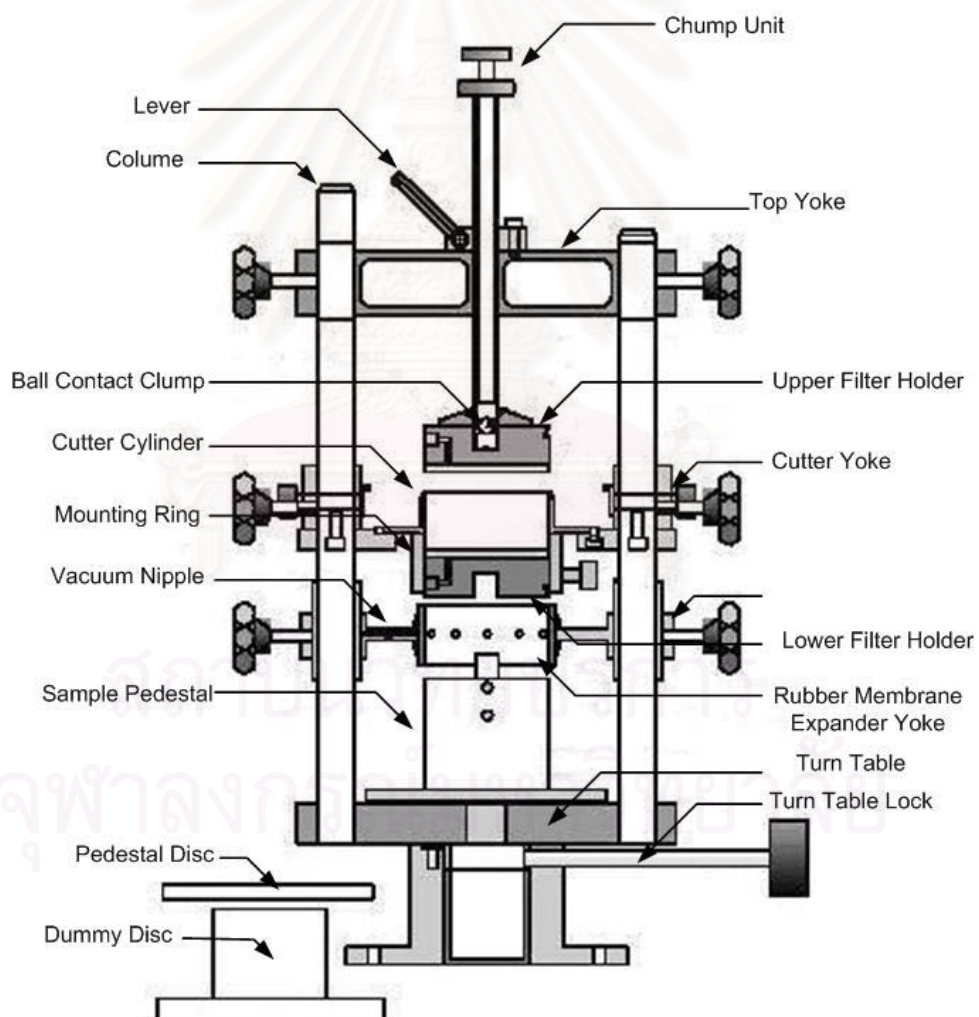
### 3.4.2 การทดสอบหาความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต

นำตัวอย่างดินมาทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำแบบปกติ (Oedometer Test) เพื่อหาเส้นโค้งการยุบอัดตัว (Compression Curve) และหาค่าความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต ( $\sigma'_p$ ) และเพื่อคำนวณหาค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว (OCR) ตามมาตรฐาน ASTM D2435-04

### 3.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

การทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสำหรับตัวอย่างทดสอบชนิดที่มีความเชื่อมแน่นสามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐานของ ASTM D 6525-00 (Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils) ดังขั้นตอนต่อไปนี้

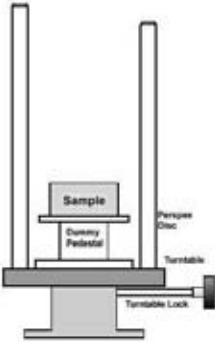
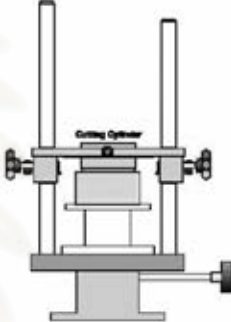
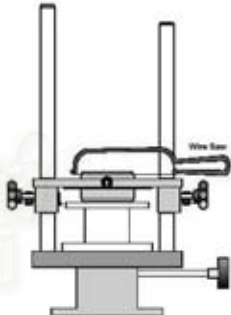
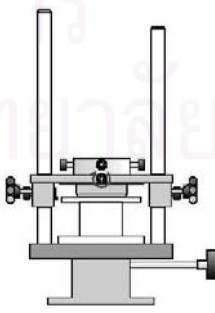
- 1.) เตรียมตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีเครื่องมือดังรูปที่ 3.8 และขั้นตอนรายละเอียดต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

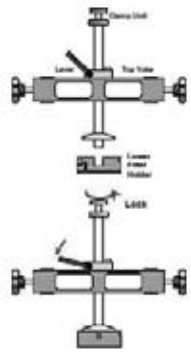
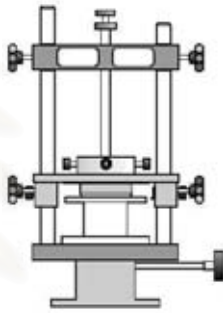
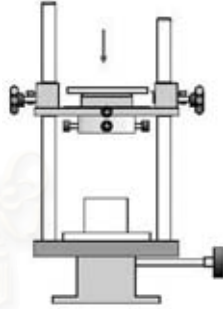
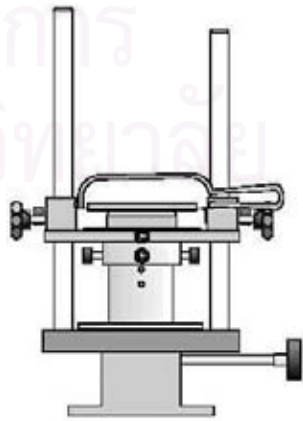



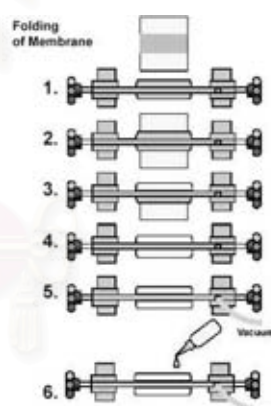
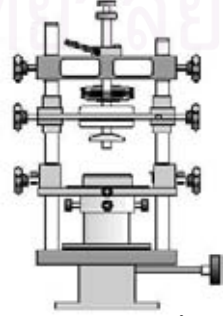
รูปที่ 3.8 เครื่องมือการเตรียมตัวอย่างทดสอบในการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่าย

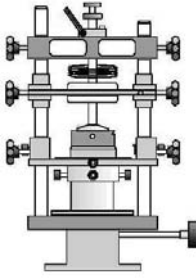
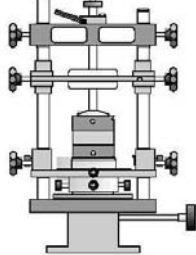
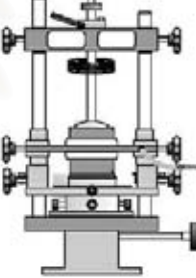
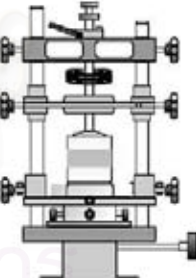
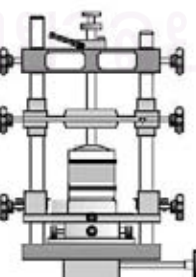


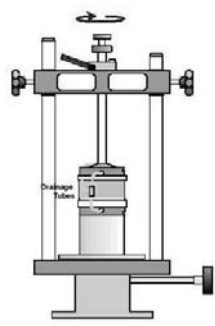
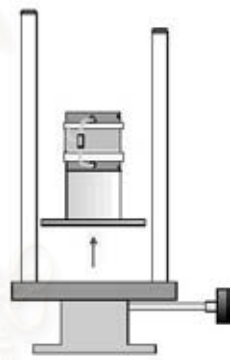

ตารางที่ 3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

<p>1) ชั่งน้ำหนักของ Filter Holders ทั้ง 2 ชิ้น (รวมแผ่นหินพรุนที่อยู่ด้านในด้วย), แผ่นยาง และ O-rings ตามรูปพร้อมกับจุดบันทึกค่าไว้</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 2</p>
<p>2) นำตัวอย่างดินเหนียวที่ใช้ทดสอบวางบนแผ่นพลาสติกกลมที่วางอยู่บน Dummy Pedestal โดยความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบต้องให้สูงกว่าความสูงที่ต้องการจริงประมาณ 3 เท่า</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 3</p>  <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 3</p>
<p>3) ตัดตัวอย่างดินโดยเลื่อนเครื่องตัดตัวอย่าง ( Cutting Yoke ) ลงจนกระทั่งคมมีดใกล้แตะผิวที่ดินด้านบน แล้วตรวจสอบตำแหน่งของตัวอย่างดินว่าถูกต้องหรือไม่ จากนั้นกดเครื่องตัดตัวอย่างดินลงในตัวอย่างดิน และทำการตกแต่งตัวอย่างที่เลยพื้นเครื่องตัดออกมา</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 4</p>
<p>4) ติดตั้ง Mounting Ring และกระดาศกรองลงบนช่องที่อยู่ด้านบนของเครื่องตัดตัวอย่างแล้วยึดให้แน่น</p>	

<p>5) นำ Filter Holder สวมเข้ากับ Top Yoke โดยใช้ Clamp Unit ส่วนบนสุดบิดให้แน่น เพื่อยึด Lower Filter Holder แล้วนำ Top Yoke สวมลงในเสาของ Turn Table แล้วยึดให้แน่น</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 5</p>
<p>6) เลื่อน Top Yoke จน Lower Filter Holder อยู่ใน Mounting Ring พอดี แล้วยึด Lower Filter Holder กับ Mounting Ring ให้แน่น</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 6</p>
<p>7) ถอด Top Yoke จาก Lower Filter Holder แล้วเลื่อน Top Yoke ออกจากเสาของ Turn Table</p>	
<p>8) เลื่อนเครื่องตัดตัวอย่างออกจากเสาของ Turn Table แล้วทำการพลิกเครื่องตัดตัวอย่างจากด้านบนให้อยู่ด้านล่างแล้วสวมกลับเข้าไปในเสาของ Turn Table จากนั้นเปลี่ยน Dummy Pedestal เป็น Sample Pedestal แล้วเลื่อนเครื่องตัดตัวอย่างดินลงมา จนแกนของ Sample Pedestal ตรง Lower Filter Holder แล้วยึดเครื่องตัดตัวอย่างดินกับเสาของ Turn Table ให้แน่น จากนั้นทำการทำความสะอาดบริเวณด้านบนของตัวอย่างดิน</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 8</p>

<p>9) ติดตั้ง เวย์คาลิปเปอร์ ที่เสาของ Turn Table แล้วยึดให้แน่น ให้ปลายของ เวย์คาลิปเปอร์ สัมผัสกับฐานของเครื่องตัดตัวอย่างดิน แล้วกด Cutter Yoke ลง จนได้ความสูงของ ตัวอย่างดินเท่ากับ 16 มิลลิเมตร แล้วตัดดิน ส่วนที่เหลือออกและวางกระดาษกรองบน ตัวอย่างดิน</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 9</p> <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 9</p>
<p>10) นำ Reinforced Rubber Membrane มา ติดตั้งเข้าในช่องว่างของ Expander Yoke โดย ให้ลวดอยู่ภายในทั้งหมด เหลือเพียงขอบที่เป็น ยางออกมาในส่วนบนและส่วนล่างของ Expander Yoke เท่านั้น หลังจากนั้นให้พับยาง ลงทั้ง 2 ส่วน โดยต่อกับปั๊มดูดอากาศเพื่อช่วย จัดยางให้ตึงเรียบแล้วทาน้ำมันหล่อลื่นหรือ ซิลิโคนภายใน Reinforced Rubber Membrane ให้ทั่ว แล้วสวม Expander Yoke ลงในเสาของ Turn Table</p>	 <p>Folding of Membrane</p> <p>1. 2. 3. 4. 5. 6.</p> <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 10</p>
<p>11) นำ O-ring คล้องไว้ที่ก้านของ Top Yoke จำนวน 2 เส้น จากนั้นสวม Top Yoke ลงในเสา ของ Turn Table แล้วเลื่อนก้านของ Top Yoke ให้ปลายของ Top Yoke มีระดับต่ำกว่า Expander Yoke จากนั้นนำ Upper Filter Holder สวมเข้ากับ Top Yoke</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 11</p>

<p>12) เลื่อน Top Yoke ลงจนกระทั่ง Upper Filter Holder สัมผัสกับตัวอย่างดินพอดี</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 12</p>
<p>13) เลื่อน Cutter Yoke ลงจนตัวอย่างดินและ Lower Filter Holder ออกจาก Cutter Yoke</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 13</p>
<p>14) เลื่อน Expander Yoke ลงจนสุด แล้วคลายที่พับของของ Expander Yoke ออก ยก Expander Yoke ขึ้นให้พ้นจากตัวอย่างดิน แล้วนำ O-ring รััดตัวอย่างที่ Lower Filter Holder และ Upper Filter Holder จากนั้นพับ Rubber Membrane ลงมาปิด O ring ทั้งด้านบนและด้านล่าง</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 14</p>  <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 14</p>  <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 14</p>

<p>15) นำตัวอย่างดินออกจาก Turn Table แล้วเลื่อน Top Yoke Expander Yoke และเครื่องตัดดินออกจาก Turn Table</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 17</p>
<p>16) นำตัวอย่างดินมาวางที่ Sample Pedestal แล้ว Top Yoke กับเสาของ Turn Table จากนั้นเลื่อนให้ปลายของ Top Yoke อยู่ใน Upper Filter Holder เพื่อไม่ให้ตัวอย่างเลื่อนได้</p>	
<p>17) ติดตั้งท่อระบายน้ำที่ Lower Filter Holder และ Upper Filter Holder แล้วยึด Lower Filter Holder กับ Sample Pedestal ให้แน่น แล้วถอด Top Yoke ออกจากเสาของ Turn Table</p>	
<p>18) นำตัวอย่างที่เตรียมแล้วติดตั้งในเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายและติดตั้งเครื่องวัดการยุบตัว (Linear Variable Differential Transformer, LVDT)</p>	 <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 18</p>  <p>ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในขั้นตอนที่ 18</p>



2.) ทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

2.1) ปล่อยน้ำเข้าตัวอย่างดินโดยผ่านทางรูระบายน้ำด้วยปิเรต

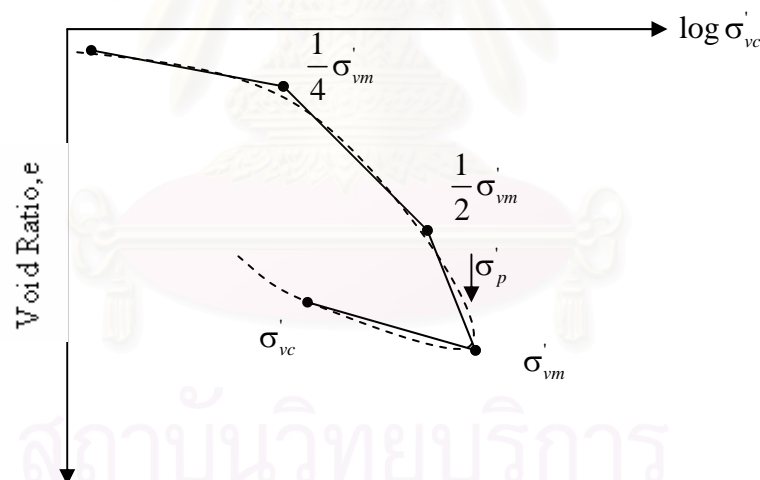
2.2) เริ่มใส่ความเค้นในแนวตั้งด้วยค่าเท่ากับ 5 kPa เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.) การอัดตัวคายน้ำ

การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) เป็นลำดับขั้นโดยมีอัตราส่วนค่า LIR=1 (Load increment ratio) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุด ( $\sigma'_{vm}$ ) ที่มีค่ามากกว่า  $\sigma'_p$  จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ในแต่ละลำดับขั้นของความเค้นจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.9

3.1) การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบที่การอัดตัวแน่นปกติจะกระทำโดยเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุด ( $\sigma'_{vm}$ ) ที่ต้องการ

3.2) การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบที่การอัดตัวแน่นเกินตัวจะกระทำโดยเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุด ( $\sigma'_{vm}$ ) ที่ต้องการจากนั้นจะลดค่าความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) จนถึงระดับค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว ตามต้องการ



รูปที่ 3.9 การจำลองการเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบ

4) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

4.1) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

4.1.1) ทำการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำด้วยอัตราเร็วของแรงเฉือน ( $\dot{\gamma}$ )

เท่ากับ 5 % ต่อชั่วโมง

4.1.2) กำหนดค่าความเร็วของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง เท่ากับ 10 มม / นาที

4.1.3) กำหนดค่าของการเปลี่ยนแปลงความสูงตัวอย่างทดสอบในแนวดิ่ง ต้องไม่เกิน 0.02 มม. เพื่อให้มีการปรับลดหรือเพิ่มของความเค้นในแนวดิ่ง

4.1.4) เปิดวาล์วระบายน้ำเพื่อให้ น้ำมีการไหลเข้า-ออกขณะกระทำแรงเฉือน

4.1.5) บันทึกค่าความเค้นสูงสุดในแนวดิ่ง การยุบตัวในแนวดิ่ง ความเค้นในแนวราบ และการเคลื่อนตัวในแนวราบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวสามารถสรุปลำดับของการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.4

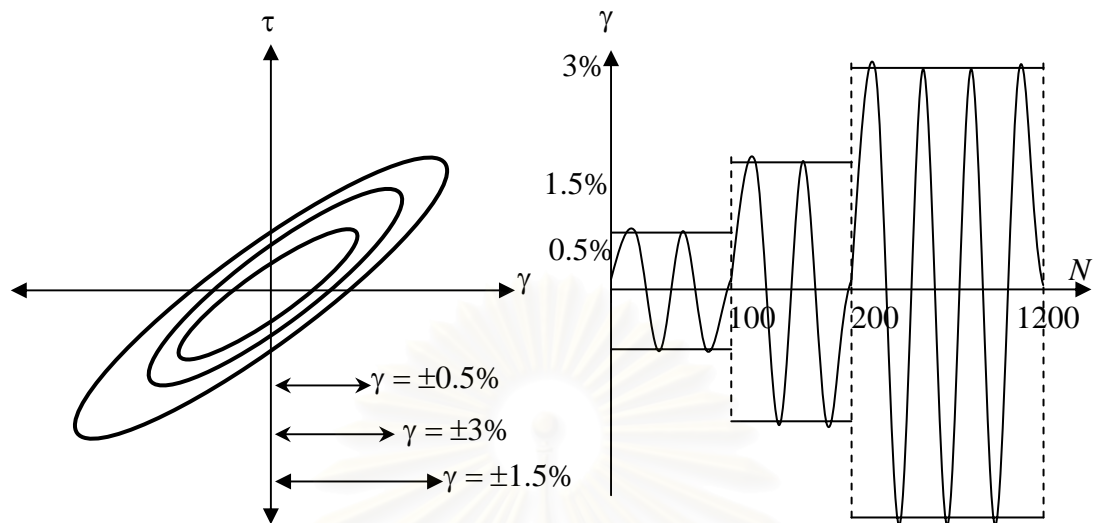
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

ตัวอย่างทดสอบ	อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (OCR)	Maximum Stress $\sigma'_{vm}$ (kPa)	Vertical Stress $\sigma'_{v0}$ (kPa)
MN1	1	200	200
MN2	1	300	300
MN3	1	400	400
MN4	1	500	500
MO1	1.5	500	333.3
MO2	2	500	250
MO3	3	500	166.6
MO4	4	500	125

หมายเหตุ MN คือ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว (Monotonic test) ของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ (Normally consolidation), MO คือ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว (Monotonic test) ของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (Over consolidation)

4.2) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

4.2.1) ทำการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำด้วยแอมพลิจูดของความเครียดเฉือนคงที่ เท่ากับ  $\pm 0.5\%$  ใน 100 รอบแรกของแรงกระทำ,  $\pm 1.5\%$  ใน 100 รอบต่อมาของแรงกระทำ และ  $\pm 3\%$  สำหรับ 1000 รอบสุดท้ายของแรงกระทำดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การจำลองขั้นตอนการเพิ่มแอมพลิจูดของความเครียดเฉือนขณะกระทำแรงเฉือน

4.2.2) กำหนดค่าความเร็วของการเปลี่ยนแปลงความเค้นในแนวตั้ง เป็น 30 มม. / นาที ของการทดสอบที่ความถี่ 5 Hz และ 15 มม. / นาทีของการทดสอบที่ความเร็ว 0.1 และ 1 Hz

4.2.3) กำหนดค่าของการเปลี่ยนแปลงความสูงตัวอย่างทดสอบในแนวตั้ง ต้องไม่เกิน 0.02 มม. เพื่อให้มีการปรับลดหรือเพิ่มของความเค้นในแนวตั้ง

4.2.4) เปิดวาล์วระบายน้ำเพื่อให้ น้ำมีการไหลเข้า-ออกขณะกระทำแรงเฉือน

4.2.5) บันทึกค่า ความเค้นสูงสุดในแนวตั้ง การยุบตัวในแนวตั้ง ความเค้นในแนวราบ การเคลื่อนตัวในแนวราบและจำนวนรอบของแรงกระทำ

5) นำตัวอย่างออกจากเครื่องมือทดสอบหลังจากทดสอบเสร็จแล้วนำไปอบแห้งเพื่อหาปริมาณความชื้นหลังทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรสามารถสรุปลำดับของการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

ตัวอย่างทดสอบ	ความถี่ (Hz)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	การควบคุมแอมพลิจูดของความเครียดเฉือน		
			$\gamma$ (%) (N=1-100)	$\gamma$ (%) (N=100-200)	$\gamma$ (%) (N=200-1200)
CN1	0.1	200	$\pm 0.5$	$\pm 1.5$	$\pm 3$
CN2		300			
CN3		400			
CN4	1	200			
CN5		300			
CN6		400			
CN7	5	200			
CN8		300			
CN9		400			

หมายเหตุ CN คือ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร (Cyclic load) ของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ (Normally consolidation)

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

#### 4.1 บทนำ

ผลการทดสอบนี้ทำการทดสอบจากตัวอย่างทดสอบดินเหนียวกรุงเทพฯ จากบริเวณสถานีรถไฟฟ้าวอชนุช โดยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายเพื่อทำการศึกษากำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำ ซึ่งการทดสอบแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ

- การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างทดสอบ
- การทดสอบอัดตัวคายน้ำ
- การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำ

#### 4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น โดยนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบดังต่อไปนี้ การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร การทดสอบหาค่าความชื้นในมวลดิน การทดสอบหาค่าพิกัดเหลว การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติก การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ค่าคุณสมบัติต่างๆสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างทดสอบ

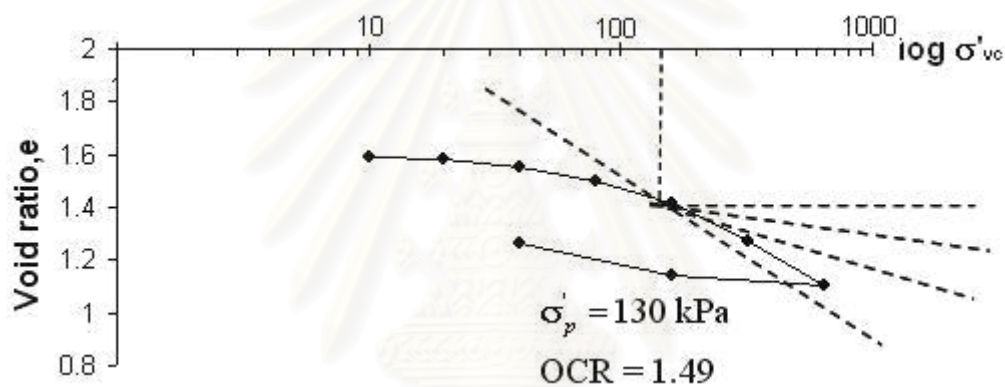
คุณสมบัติ	ค่า
ระดับความลึก (เมตร)	2.5 – 15.5
ปริมาณความชื้น (%)	59 - 62
ค่าพิกัดเหลว (%)	78 - 83
ค่าพิกัดพลาสติก (%)	41 - 44
ค่าดัชนีพลาสติกซีดี (%)	37 - 39
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.64
หน่วยน้ำหนักรวม ( $t/m^2$ )	1.633



### 4.3 การทดสอบอัดตัวคายน้ำ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 1/8 1/4 1/2 1 2 4 และ 8 เท่าของแรงกดทับในธรรมชาติ (Overburden Pressure,  $\sigma'_{v0}$ ) และลดค่าค่าความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 2 และ 0.5 เท่าของแรงกดทับในธรรมชาติ ในขั้นตอนการคืนตัว

ผลที่ได้จากการทดสอบนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $e$  ต่อ  $\log \sigma'_{vc}$  เพื่อสร้างเส้นโค้งการยุบตัวและหาค่าความเค้นประสิทธิผลที่เคยกระทำในอดีต ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟการยุบอัดตัว (Compression Curve)

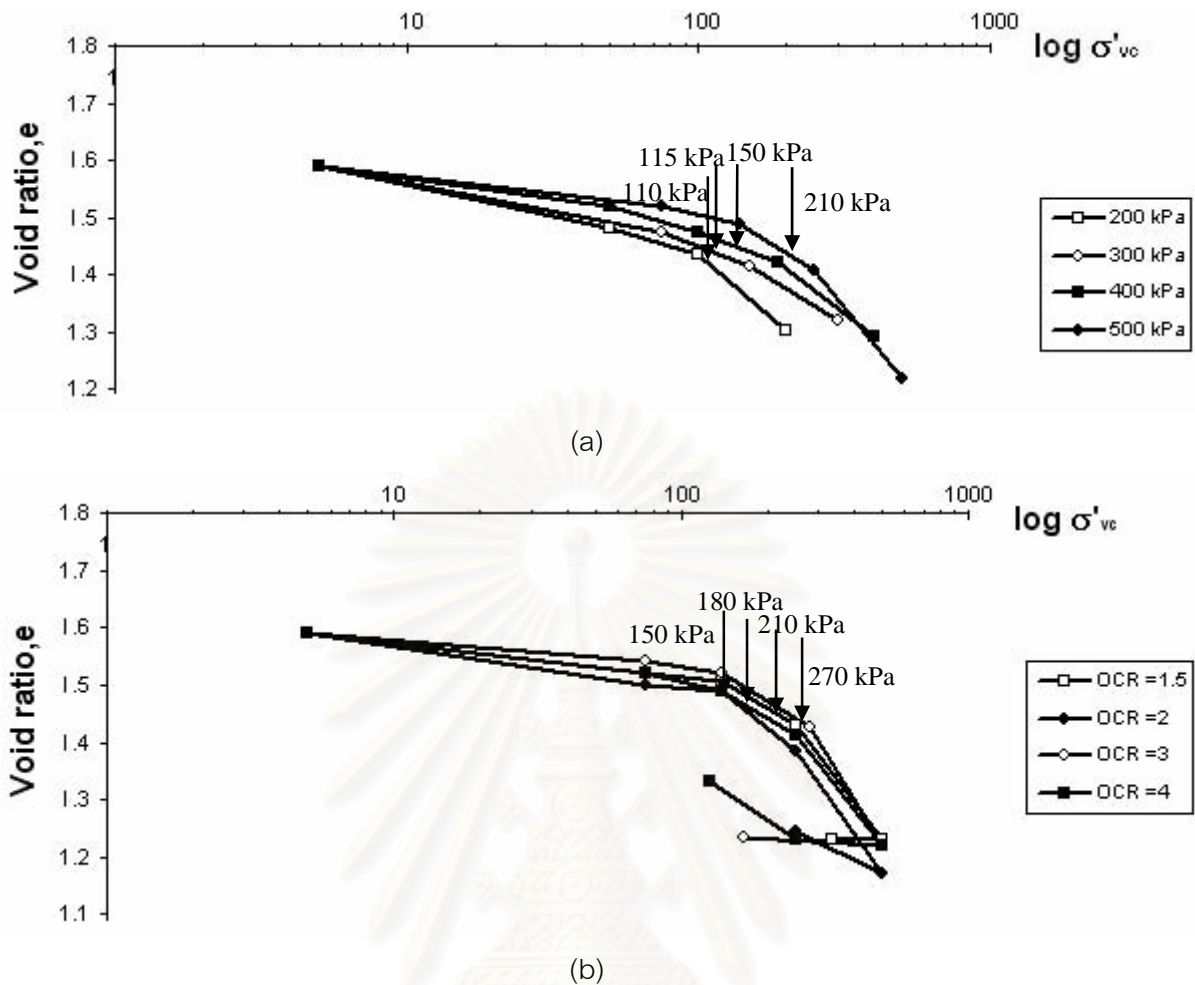
จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติสามารถทราบค่าความเค้นกดทับสูงสุดในอดีต (Stress History) มีค่าเท่ากับ 130 kPa ซึ่งจะนำค่านี้ไปกำหนดค่า  $\sigma'_{vm}$  ในการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย และคำนวณอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวในธรรมชาติได้เท่ากับ 1.49

### 4.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว โดยทำการทดสอบจะทำการวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำที่อัตราส่วนการอัดแน่นเกินกว่าปกติที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่ระดับการอัดตัวแน่นเกินตัวที่แตกต่างกัน คือ ทำการทดสอบการอัดตัวแน่นเกินตัวเท่ากับ 1 1.5 2 3 และ 4 ตามลำดับ สำหรับการเตรียมตัวอย่างด้วยการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรง

อย่างง่าย เพื่อแน่ใจว่าการเตรียมตัวอย่างอยู่ในสภาพตามที่ต้องการ ทั้งการเตรียมตัวอย่างแบบ การอัดตัวแน่นปกติ และการเตรียมตัวอย่างแบบการอัดตัวแน่นเกิน สามารถตรวจสอบได้โดยค่า  $\sigma'_{vc} > 1.5\sigma'_p$  ดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 การกระทำแรงเฉือนจะวัดค่าความเค้นเฉือนสูงสุด ความเครียดเฉือนและแรงดันน้ำส่วนเกิน สำหรับผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วน การอัดตัวแน่นปกติจะแสดงดังรูปที่ 4.3 และผลการทดสอบแบบ Normalized ดังรูปที่ 4.4 โดยมี ลายละเอียดดังนี้

- รูปที่ 4.3 (a) คือทางเดินของความเค้นขณะกระทำแรงเฉือนแบบ  $\tau$  กับ  $\sigma'_{vc}$
  - รูปที่ 4.3 (b) และผลกระทบของความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน ( $\gamma$ )
  - รูปที่ 4.3 (c) คือกราฟความสัมพันธ์ของแรงค้ำน้ำส่วนเกิน ( $\Delta u$ ) ในตัวอย่างทดสอบที่มี ผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน
  - รูปที่ 4.4 (a) คือทางเดินของความเค้นที่ Normalized  $\tau, \sigma'_{vc}$  ด้วย  $\sigma'_{vc}$  ( $\tau/\sigma'_{vc}$ ) ( $\sigma'_{vc}/\sigma'_{vc}$ )
  - รูปที่ 4.4 (b) ผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน โดยที่ค่าความเค้นเฉือนซึ่ง Normalized ด้วย  $\sigma'_{vc}$  ( $\tau/\sigma'_{vc}$ )
  - รูปที่ 4.4 (c) ผลของของแรงค้ำน้ำส่วนเกินขณะกระทำแรงเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับ ความเครียดเฉือน โดยการ Normalized  $\Delta u$  ด้วย  $\sigma'_{vc}$  ( $\Delta u/\sigma'_{vc}$ )
- การทดสอบที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวผลการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4.5 และผล การทดสอบแบบ Normalized ดังรูปที่ 4.6 โดยมีลายละเอียดดังนี้
- รูปที่ 4.5 (a) คือทางเดินของความเค้นขณะกระทำแรงเฉือน
  - รูปที่ 4.5 (b) คือผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน
  - รูปที่ 4.5 (c) คือแรงค้ำน้ำส่วนเกินในตัวอย่างทดสอบที่มีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ ความเครียด
  - รูปที่ 4.6 (a) คือทางเดินของความเค้นที่ Normalized  $\tau, \sigma'_{vc}$  ด้วย  $\sigma'_{vm}$  ( $\tau/\sigma'_{vm}$ ), ( $\sigma'_{vc}/\sigma'_{vm}$ )
  - รูปที่ 4.6 (b) ผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน โดยที่ค่าค่าความเค้นเฉือนจะซึ่ง Normalized ด้วย  $\sigma'_{vm}$  ( $\tau/\sigma'_{vm}$ )
  - รูปที่ 4.6 (c) ผลของของแรงค้ำน้ำส่วนเกินขณะกระทำแรงเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับ ความเครียดเฉือน โคนทำการ Normalized  $\Delta u$  ด้วย  $\sigma'_{vm}$  ( $\Delta u/\sigma'_{vm}$ )



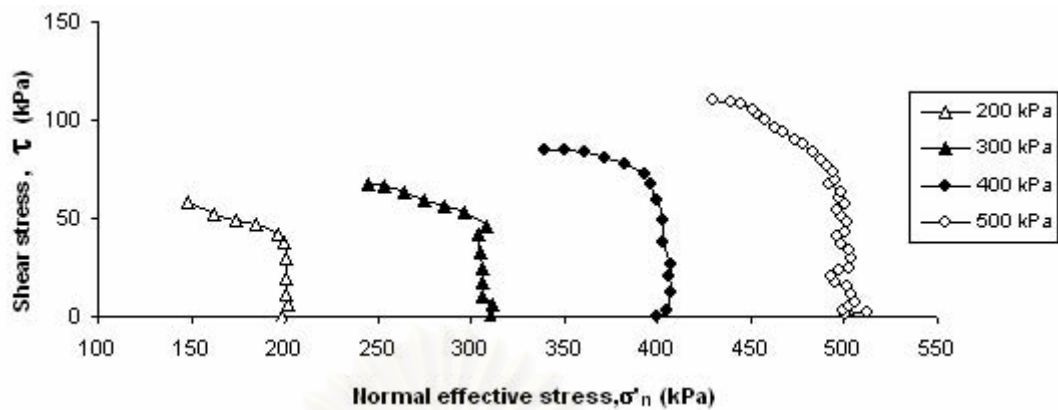
รูปที่ 4.2 การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบทางเดียว

(a) ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบการอัดตัวแน่นปกติ

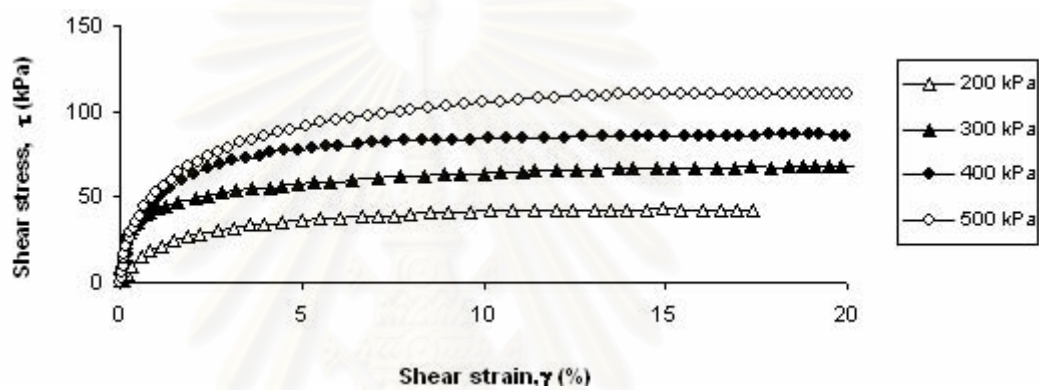
(b) ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบการอัดตัวแน่นเกินตัว

ตารางที่ 4.2 ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบแบบทางเดียว

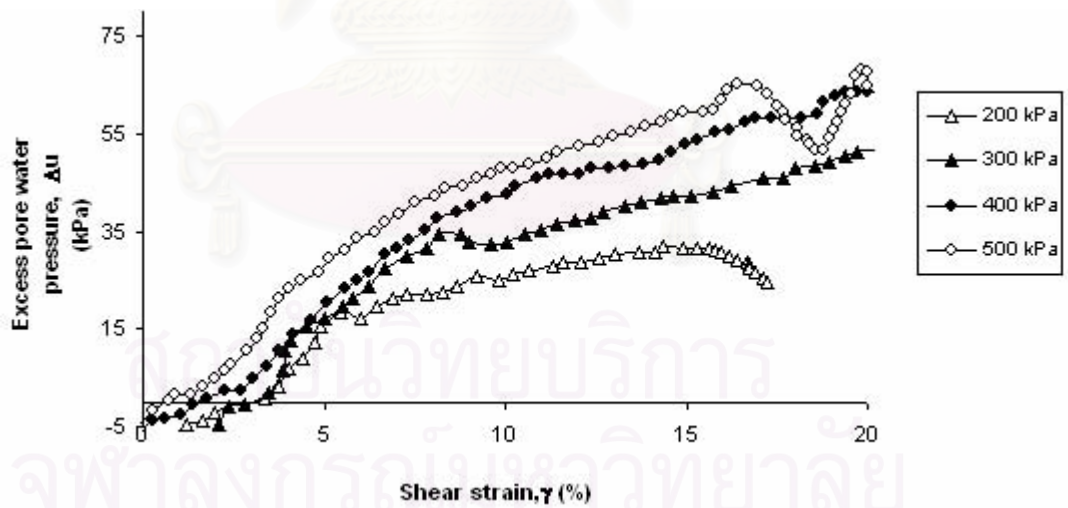
การเตรียมตัวอย่าง	ตัวอย่างทดสอบ	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	$\sigma'_p$ (kPa)	$1.5\sigma'_p$
NC	MN1	200	110	165
	MN2	300	115	172.5
	MN3	400	150	225
	MN4	500	210	315
OC	MO1	500	150	225
	MO2	500	180	270
	MO3	500	210	315
	MO4	500	270	405



(a)



(b)



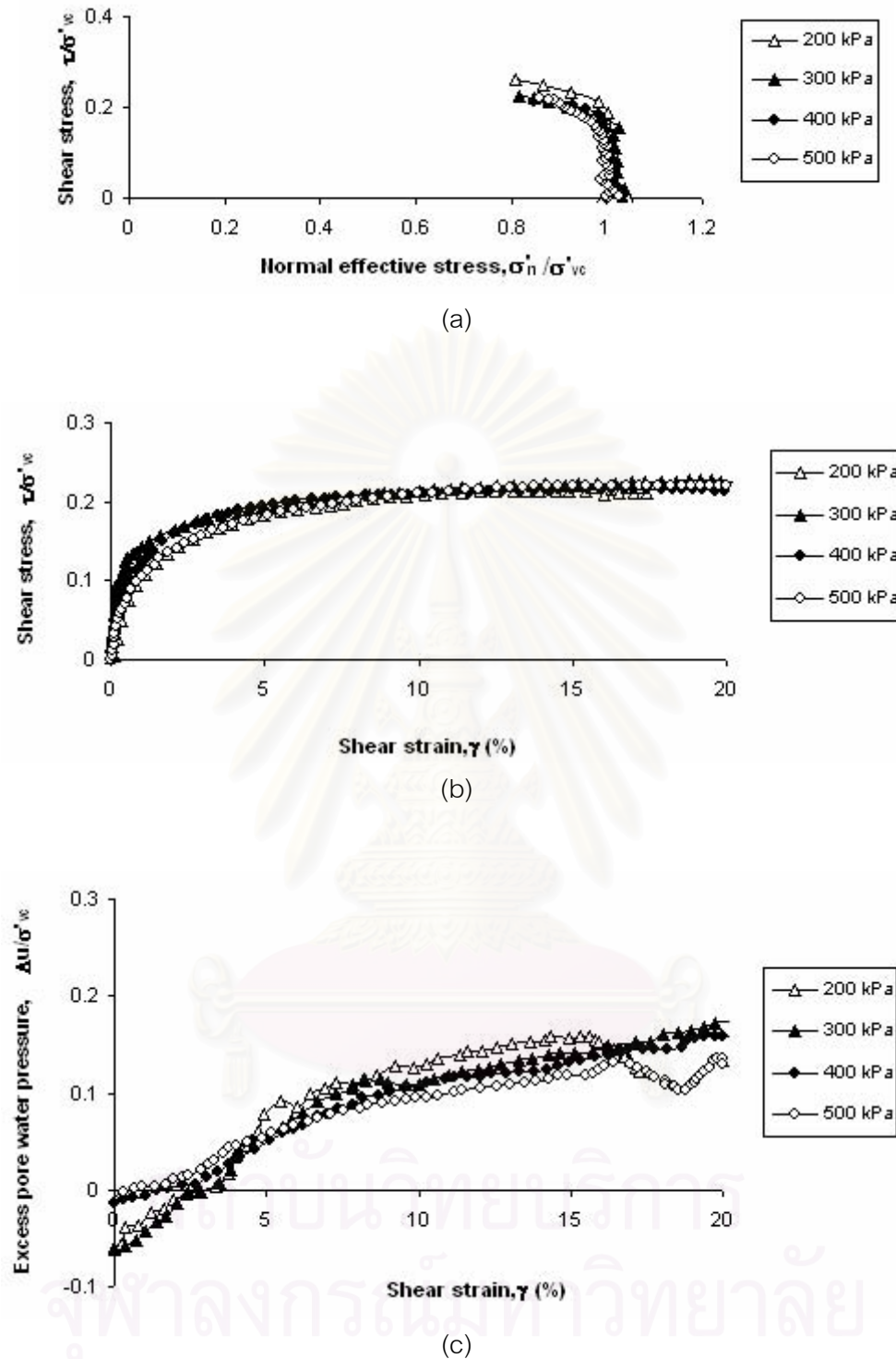
(c)

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

(a) ทางเดินของความเค้นที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

(b) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือน



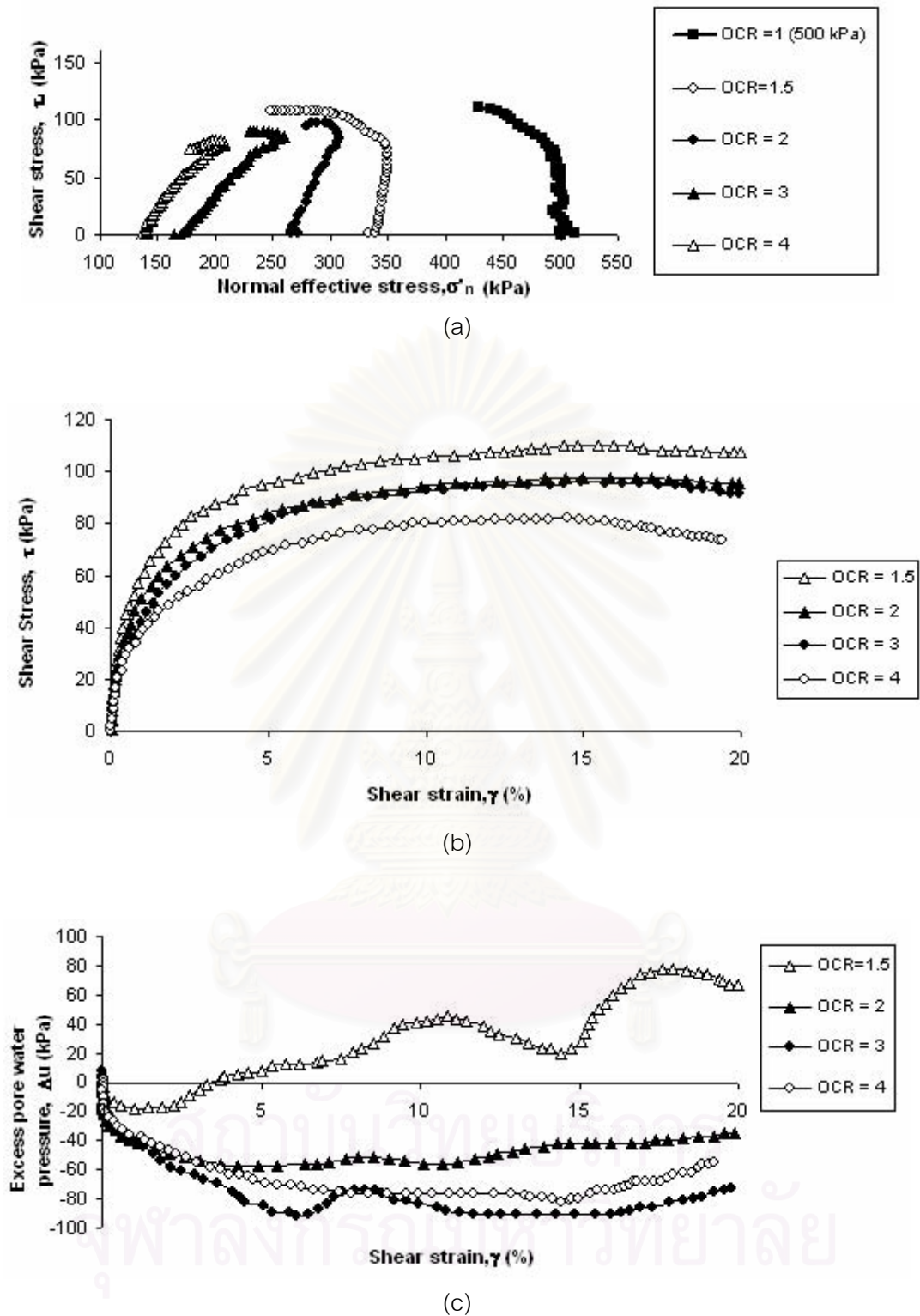
รูปที่ 4.4 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

(a) ทางเดินของความเค้นที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

(b) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือน



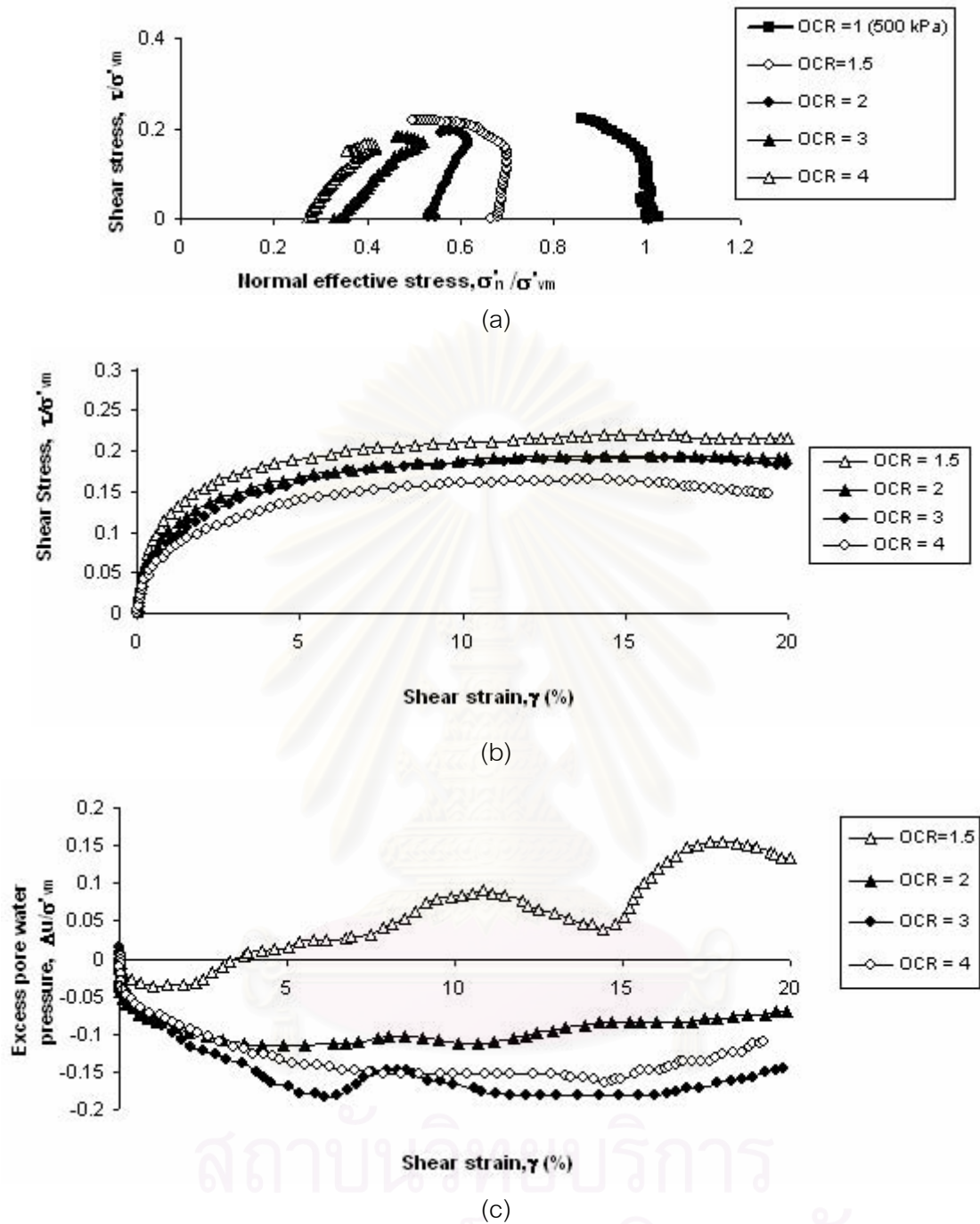


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว

(a) ทางเดินของความเค้นที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว

(b) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือนที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว



รูปที่ 4.6 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว

(a) ทางเดินของความเค้นที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

(b) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือนที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

#### 4.5 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

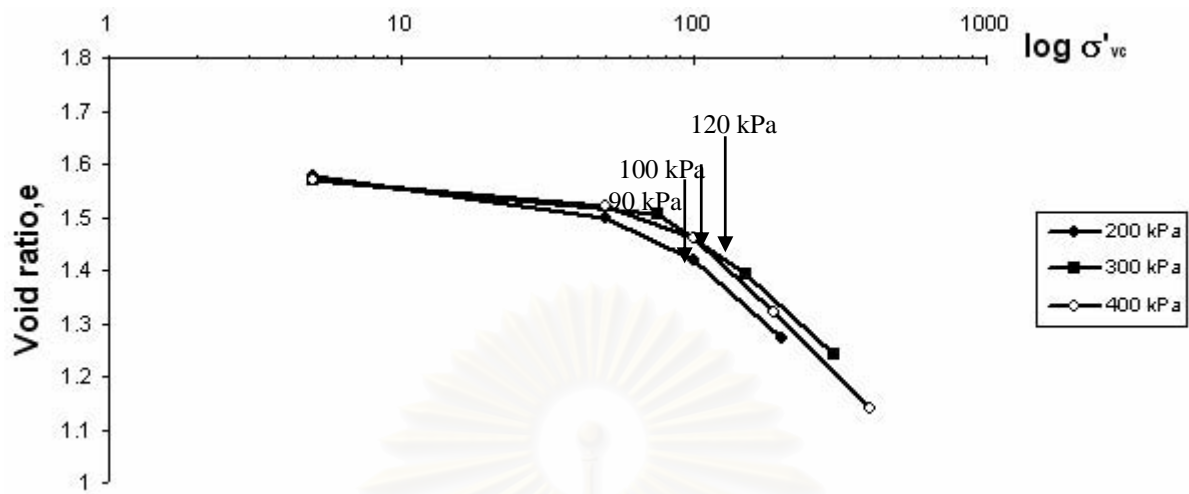
การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายไม่ระบายน้ำแบบวัฏจักรซึ่งทำการทดสอบที่ระดับความถี่ 0.1 1 และ 5 Hz และเพิ่มแอมพลิจูดของความเครียดเฉือนขณะทำการทดสอบโดยเริ่มจาก 0.5% ในการทดสอบ 100 รอบของแรงกระทำจากนั้นเพิ่มเป็น 1.5% ใน 100 รอบของแรงกระทำต่อมาและ 3% ของ 1000 รอบของแรงกระทำสุดท้าย รวมจำนวนรอบของแรงกระทำในหนึ่งการทดสอบเท่ากับ 1200 รอบ การเตรียมตัวอย่างด้วยการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายทำการเตรียมตัวอย่างแบบการอัดตัวแน่นปกติ และเพื่อแน่ใจว่าการเตรียมตัวอย่างทดสอบเป็นแบบการอัดตัวคายน้ำแบบปกติ สามารถตรวจสอบได้โดยค่า  $\sigma'_{vc} > 1.5\sigma'_p$  ดังรูปที่ 4.7 (a) (b) (c) และตารางที่ 4.3

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของความเครียดเฉือนที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนและแรงดันน้ำส่วนเกิน ผลการทดสอบจะนำมาสร้างวงฮีสเทอรีซิสเพื่อคำนวณค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนและอัตราส่วนของการกระจายตัวของพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.8-4.16 ซึ่งในแต่ละตัวอย่างการทดสอบจะแสดงกราฟของผลการทดสอบทั้งหมด 5 รูปด้วยกันคือ

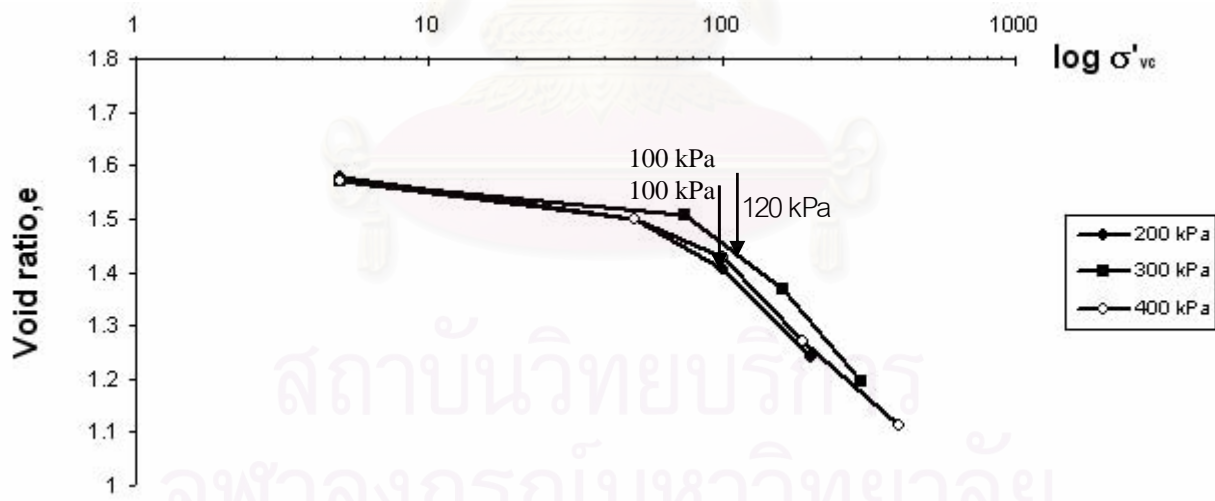
- รูปที่ 1 2 และ 3 คือผลการทดสอบที่แอมพลิจูดของความเค้นเฉือนเท่ากับ 0.5% 1.5% และ 3% ตามลำดับซึ่งในแต่ละแอมพลิจูดจะมีรูปย่อยคือ (a) คือทางเดินของความเค้นของการทดสอบ (b) ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับค่าความเค้นเฉือนของการทดสอบ และ (c) ผลของแรงดันน้ำส่วนเกินขณะกระทำแรงเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับจำนวนรอบของแรงกระทำ

- รูปที่ 4 คือผลสรุปของการทดสอบทั้ง 3 ความเครียดเฉือน โดยมีรูปย่อยคือ (a) คือรูปแสดงผลของความเค้นเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดเฉือนทั้ง 3 ค่า (b) คือรูปแสดงผลกระทบของค่าความเค้นเฉือนที่มีผลกระทบจากจำนวนรอบของแรงกระทำ และ (c) คือรูปแสดงผลกระทบของแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

- รูปที่ 5 คือการ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร (a) คือทางเดินของความเค้นที่ Normalized  $\tau, \sigma'_{vc}$  ด้วย  $\sigma'_{vc}$  ( $\tau/\sigma'_{vc}$ ) ( $\sigma'_{vc}/\sigma'_{vc}$ ) (b) คือรูปแสดงผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดความเครียดเฉือน โดยที่ค่าความเค้นเฉือนจะ Normalized ด้วย  $\sigma'_{vc}$  ( $\tau/\sigma'_{vc}$ ) และ (c) ผลของของแรงดันน้ำส่วนเกินขณะกระทำแรงเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดเฉือน โดยทำการ Normalized  $\Delta u$  ด้วย  $\sigma'_{vc}$  ( $\Delta u/\sigma'_{vc}$ )

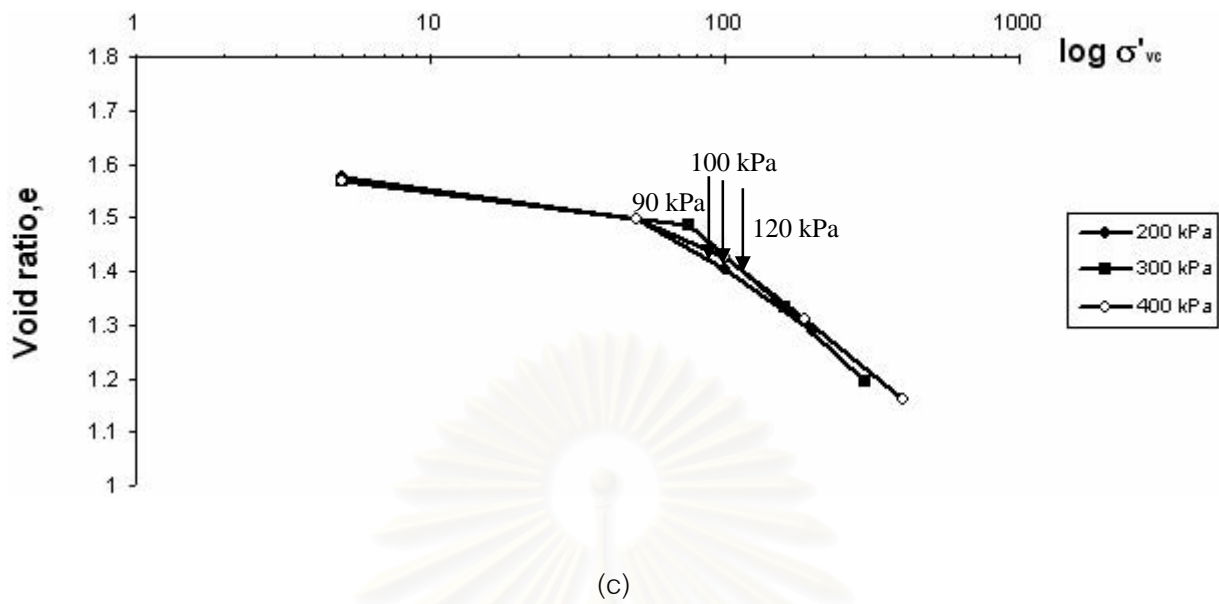


(a)



(b)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



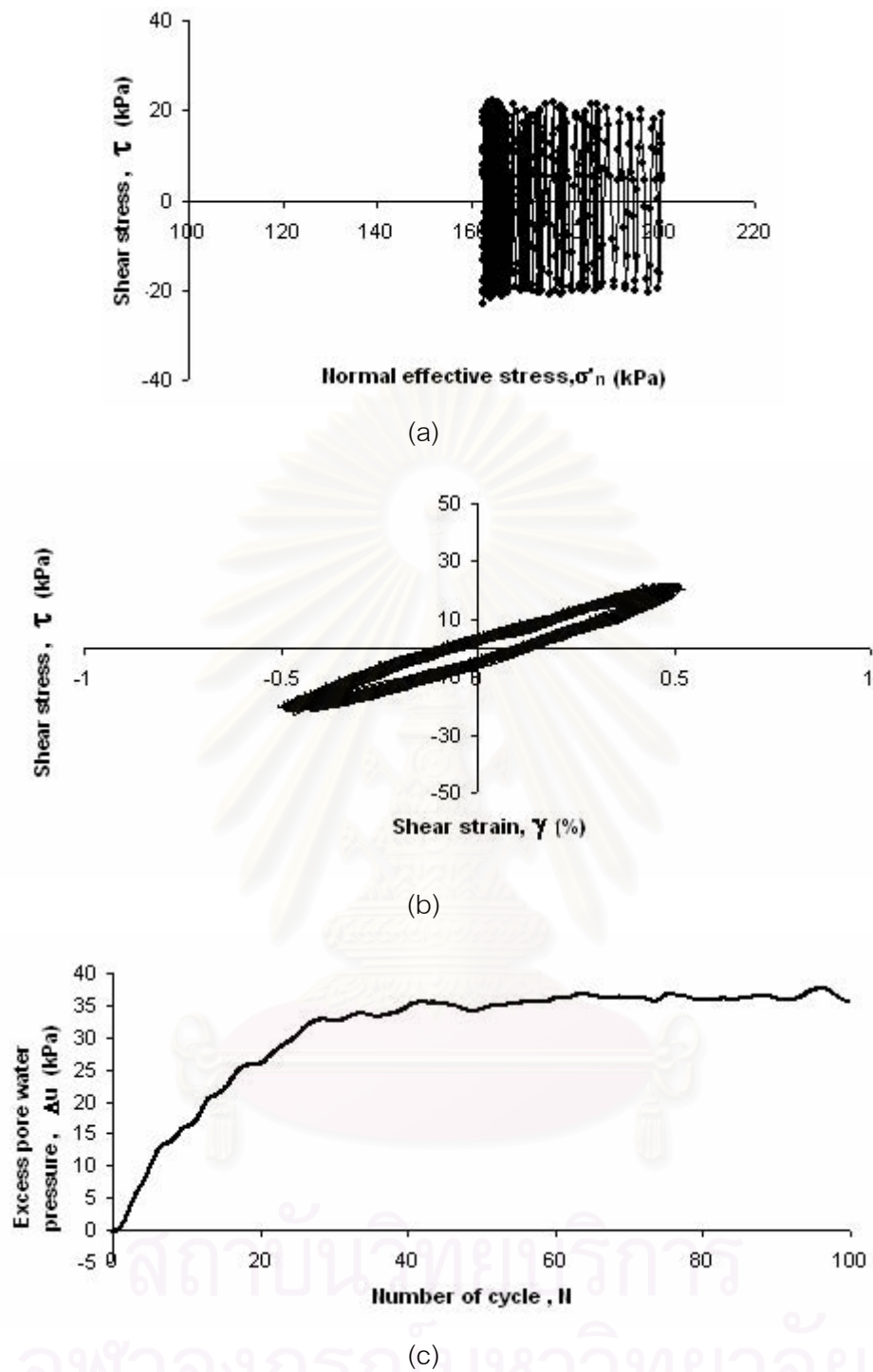
รูปที่ 4.7 การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบแบบวัฏจักร

- (a) ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบที่ความถี่ 0.1 Hz  
 (b) ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบที่ความถี่ 1 Hz  
 (c) ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบที่ความถี่ 5 Hz

ตารางที่ 4.3 ผลการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบแบบวัฏจักร

ความถี่ (Hz)	ตัวอย่างทดสอบ	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	$\sigma'_p$ (kPa)	$1.5\sigma'_p$
0.1	CN1	200	90	135
	CN2	300	100	150
	CN3	400	120	180
1	CN4	200	100	150
	CN5	300	100	150
	CN6	400	120	180
5	CN7	200	90	135
	CN8	300	100	150
	CN9	400	120	180





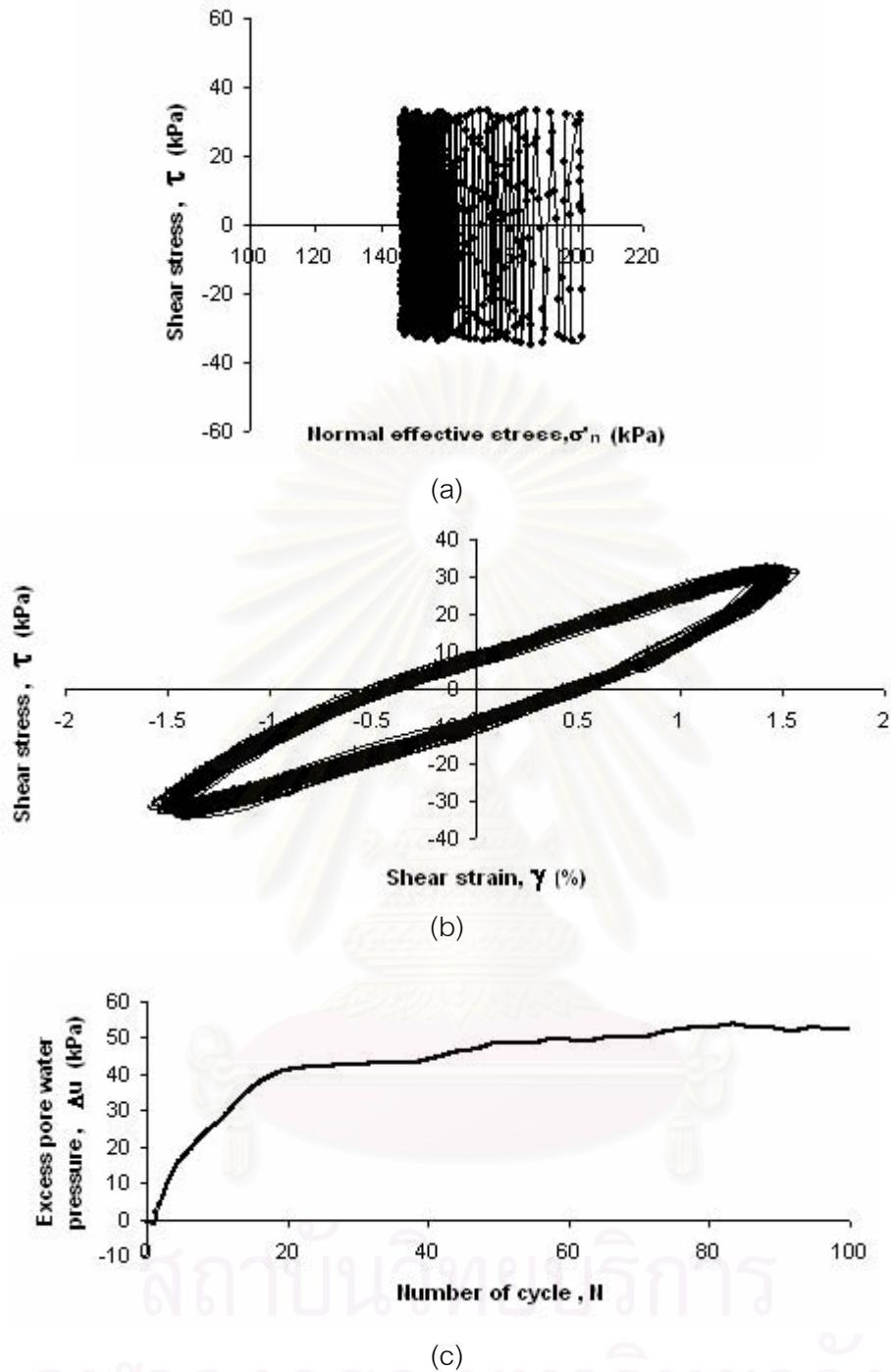
รูปที่ 4.8.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรตัวอย่างทดสอบ CN1 ที่

แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



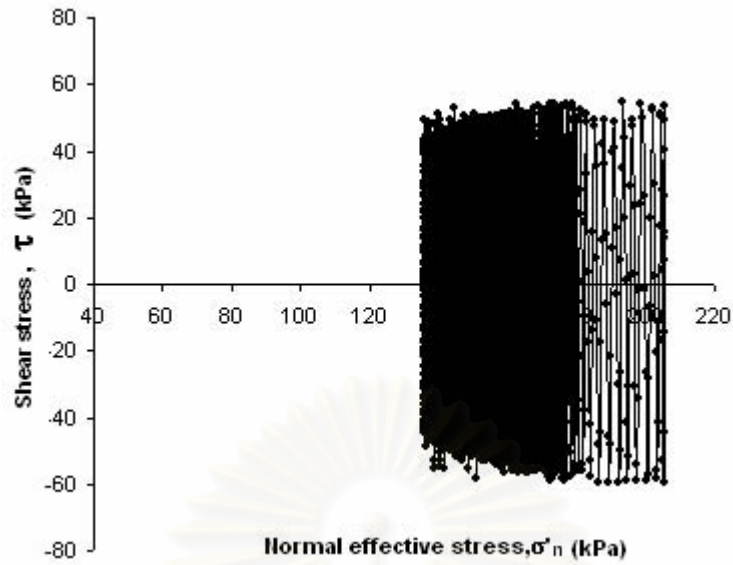
รูปที่ 4.8.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรตัวอย่างทดสอบ CN1 ที่

แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

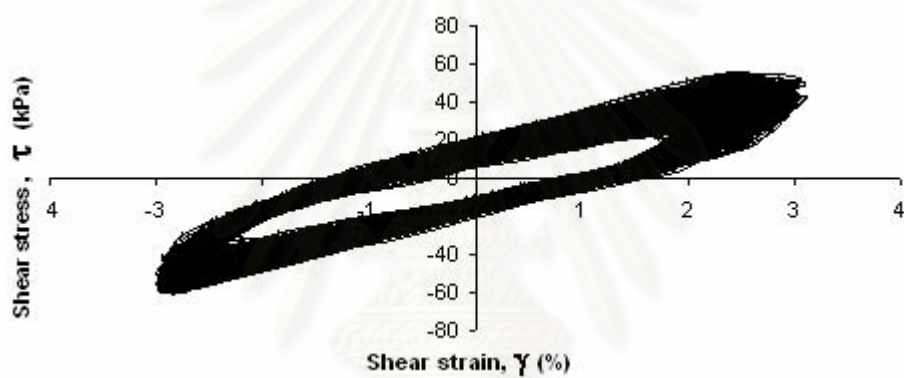
(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

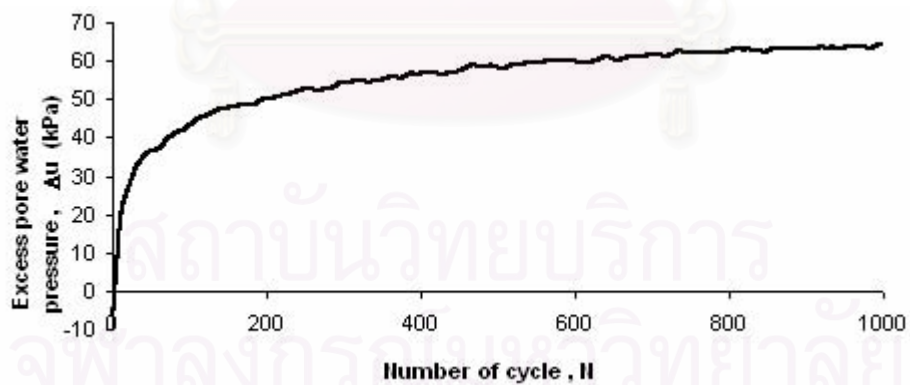
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)

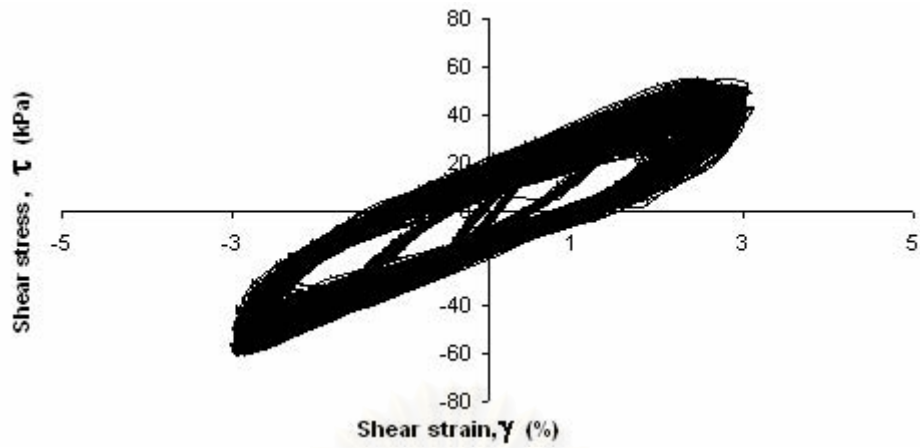


(b)



(c)

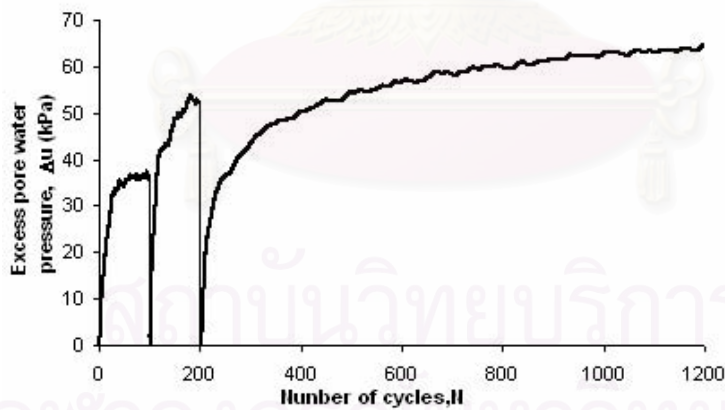
- รูปที่ 4.8.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN1 ที่  
 แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$
- (a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ
  - (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
  - (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



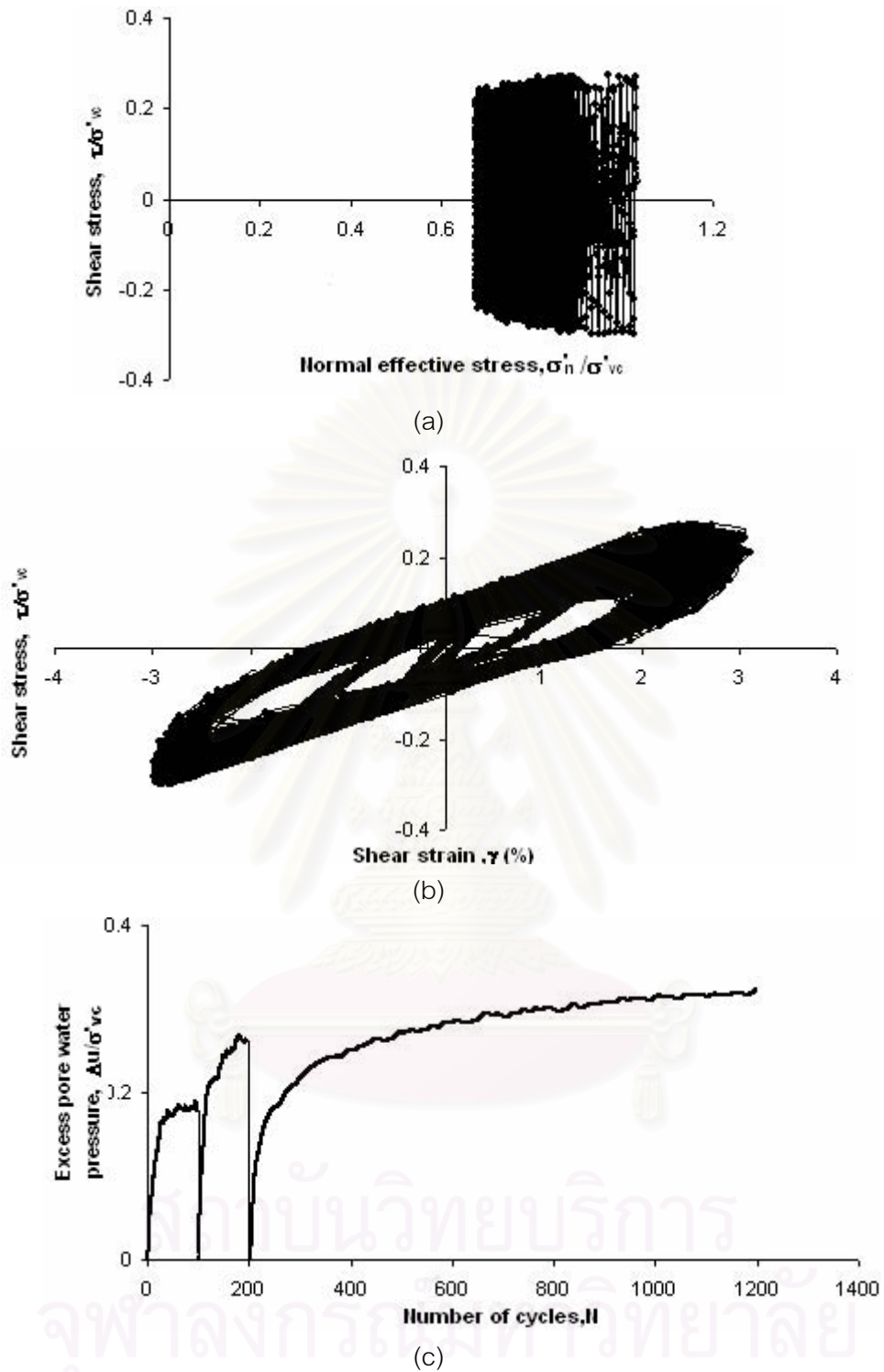
(b)



(c)

รูปที่ 4.8.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรตัวอย่างทดสอบ CN1

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



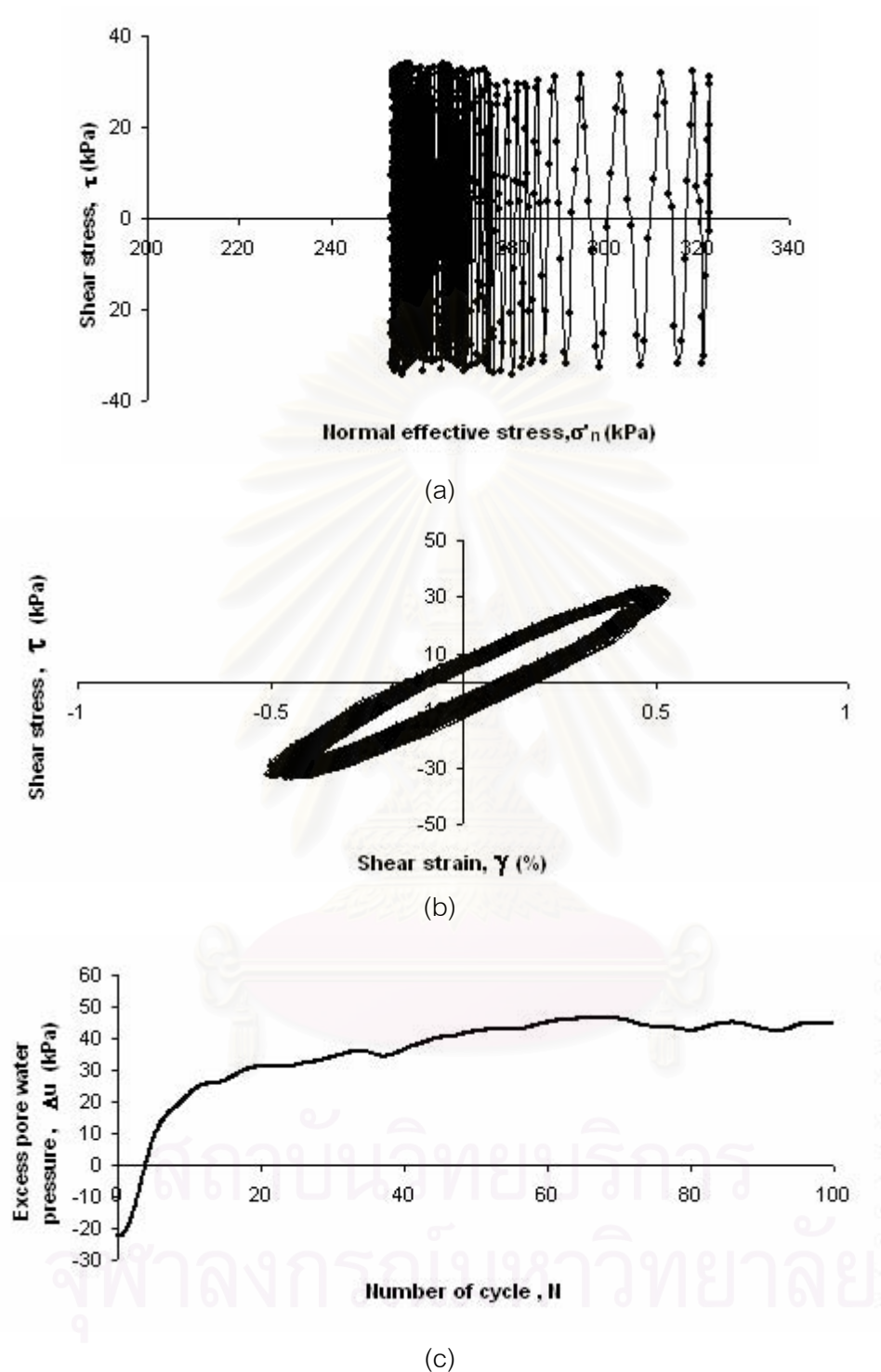
รูปที่ 4.8.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN1

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ





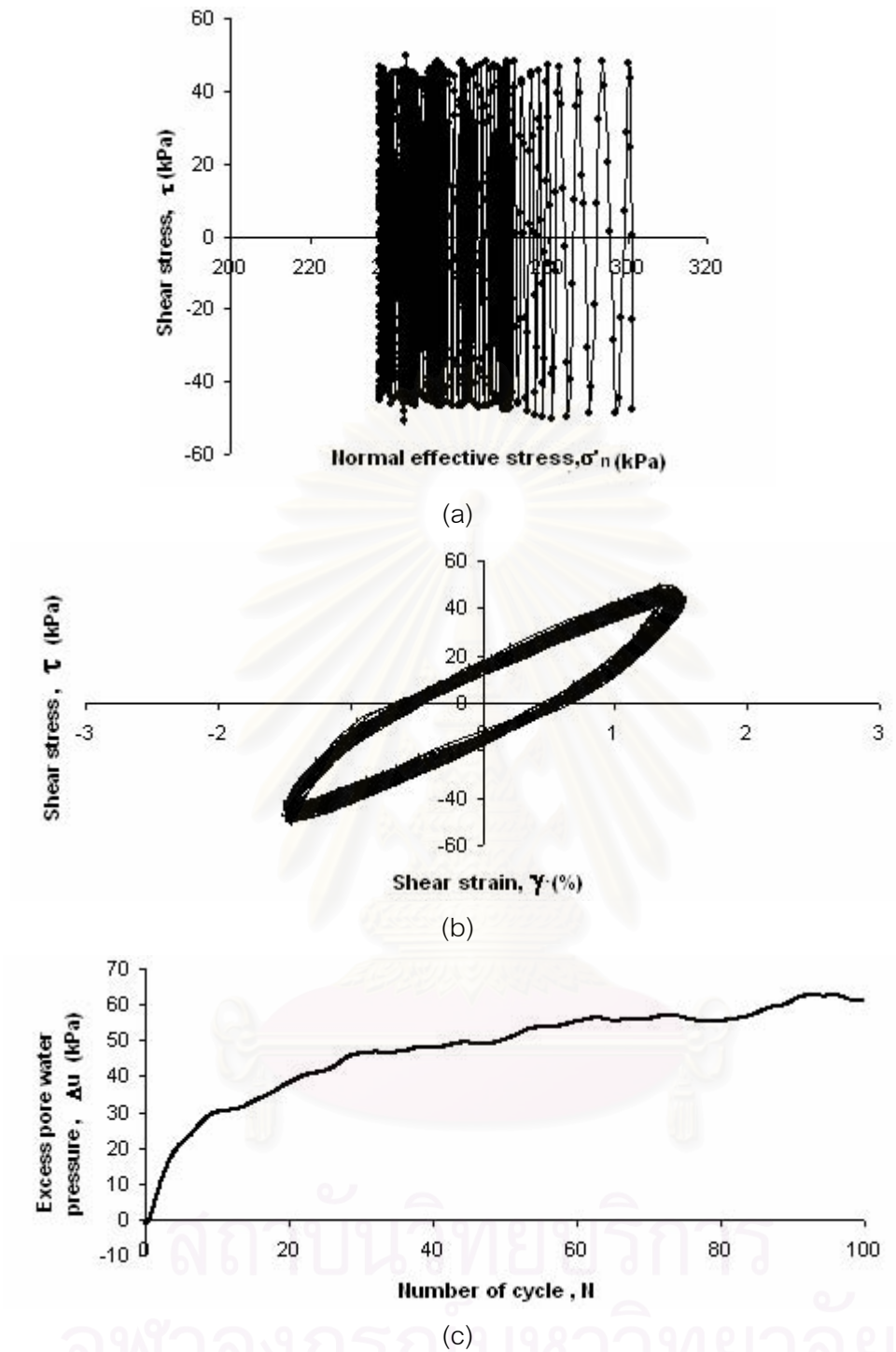
รูปที่ 4.9.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN2 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



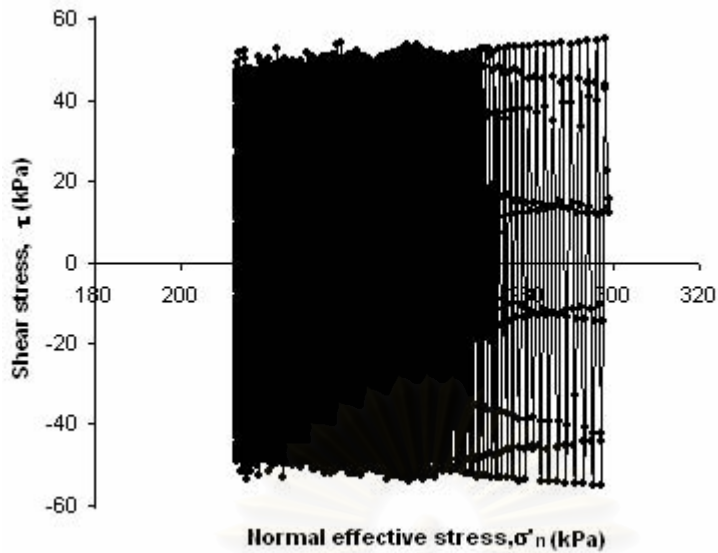
รูปที่ 4.9.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN2 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

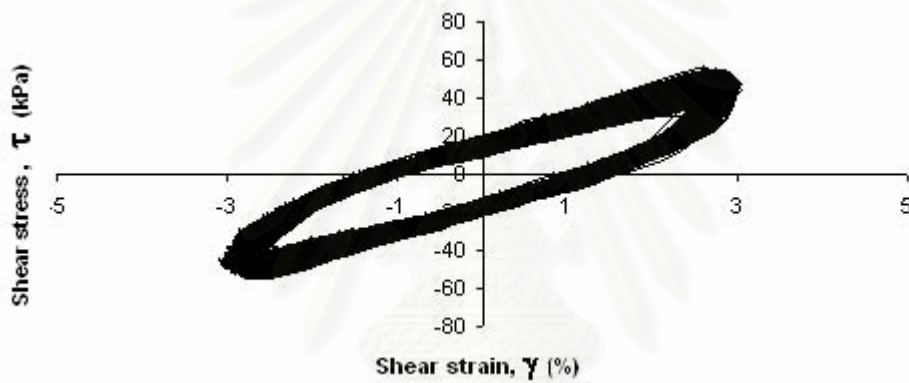
(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

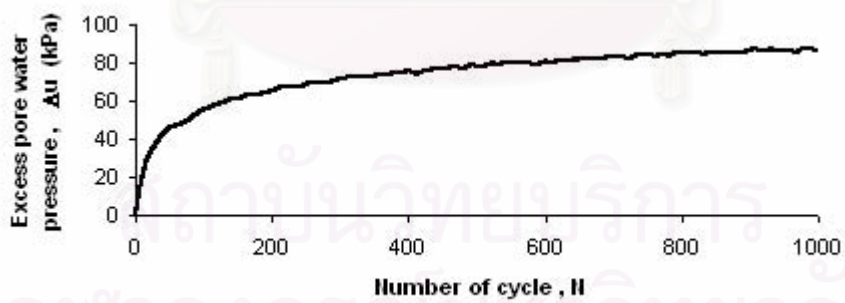
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



(b)



(c)

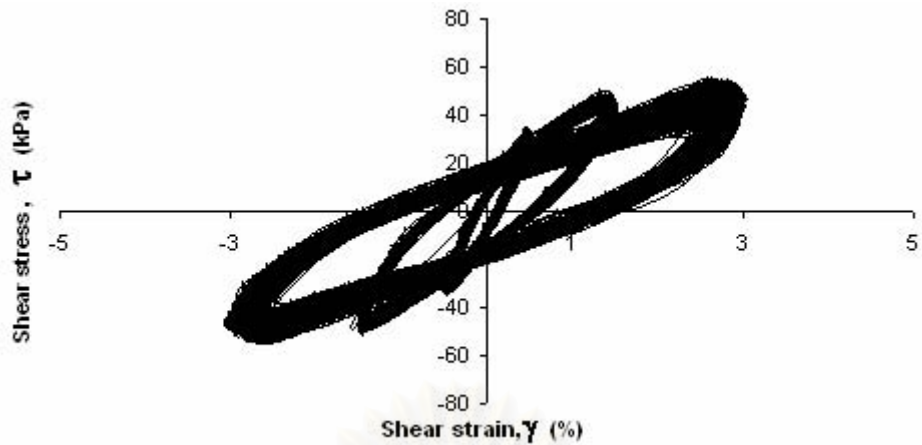
รูปที่ 4.9.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN2 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

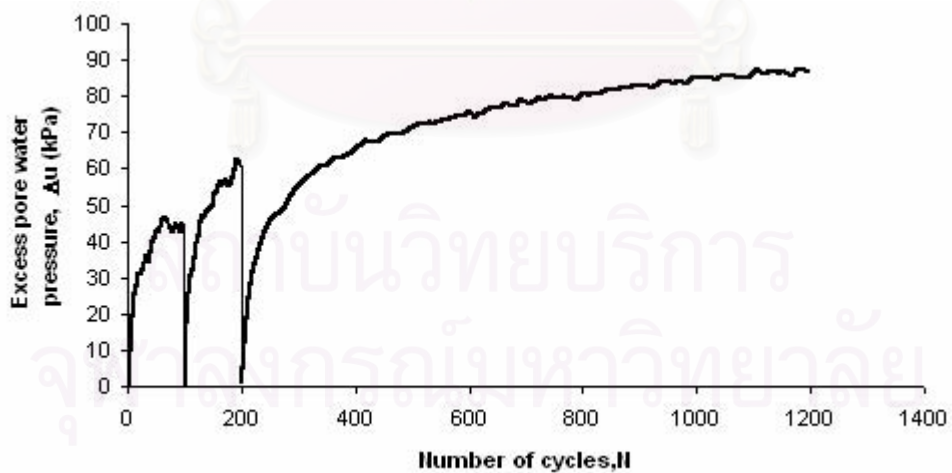
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



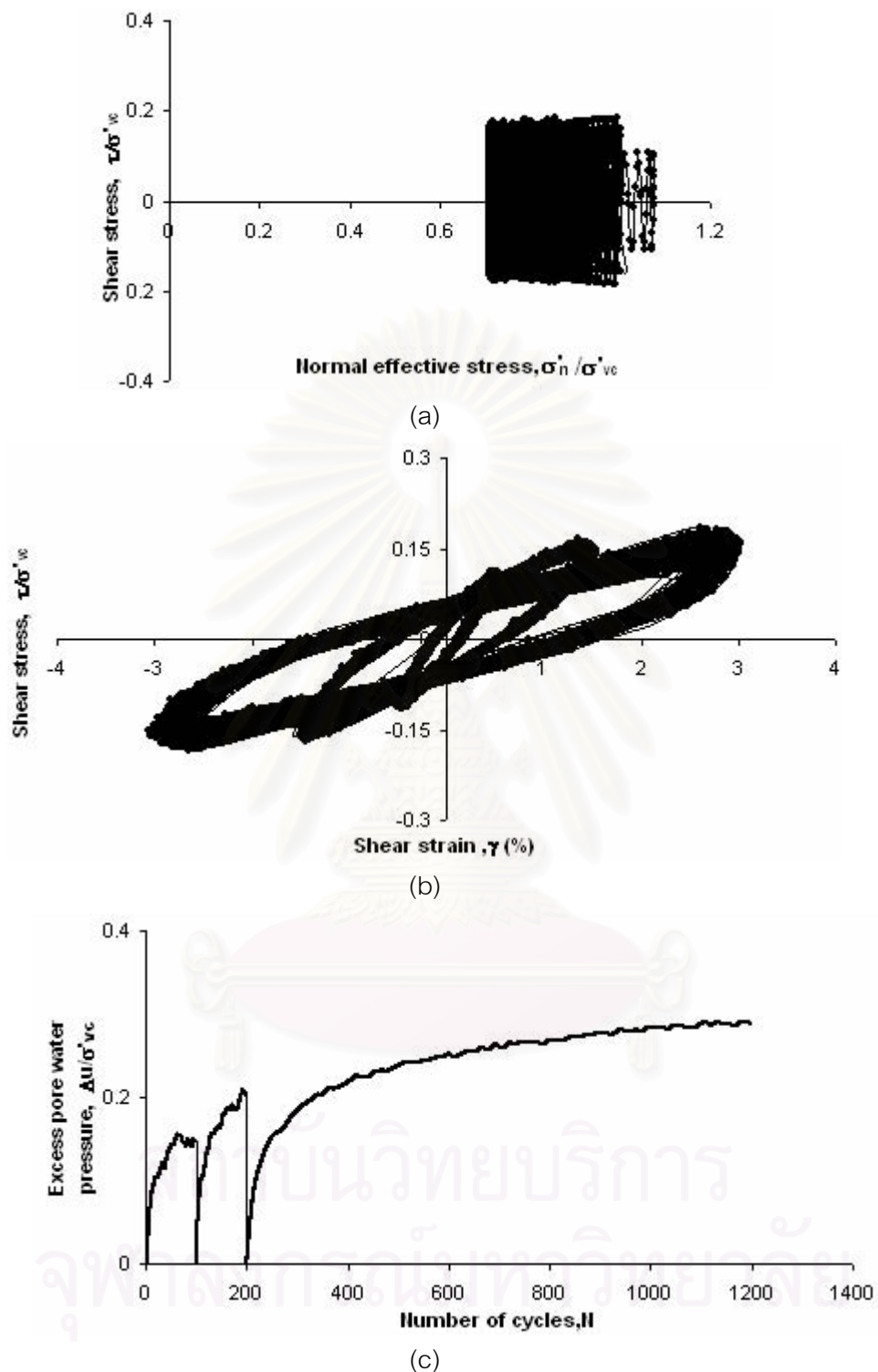
(b)



(c)

รูปที่ 4.9.4. ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN2

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 4.9.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

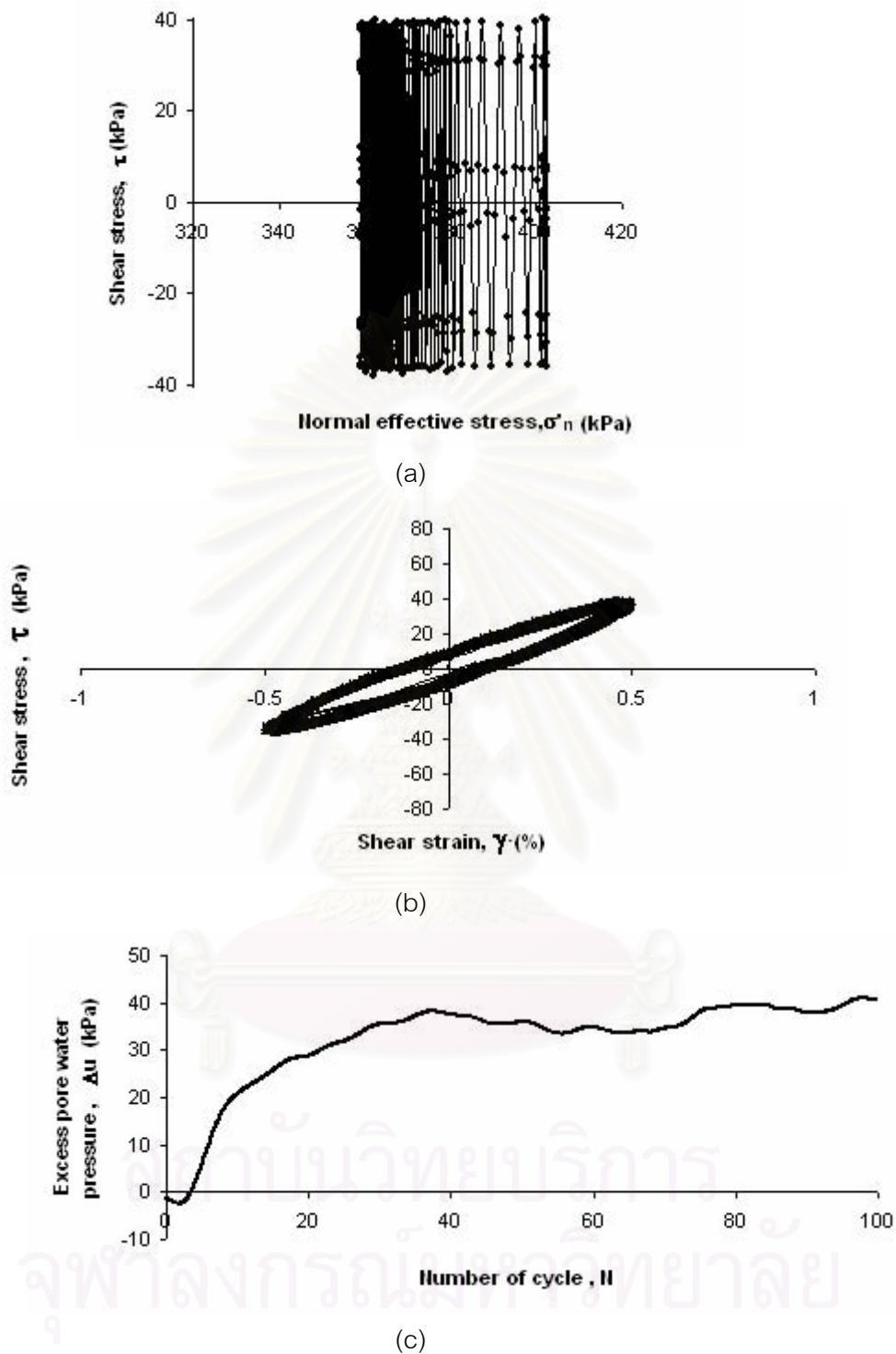
ตัวอย่างทดสอบ CN2

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



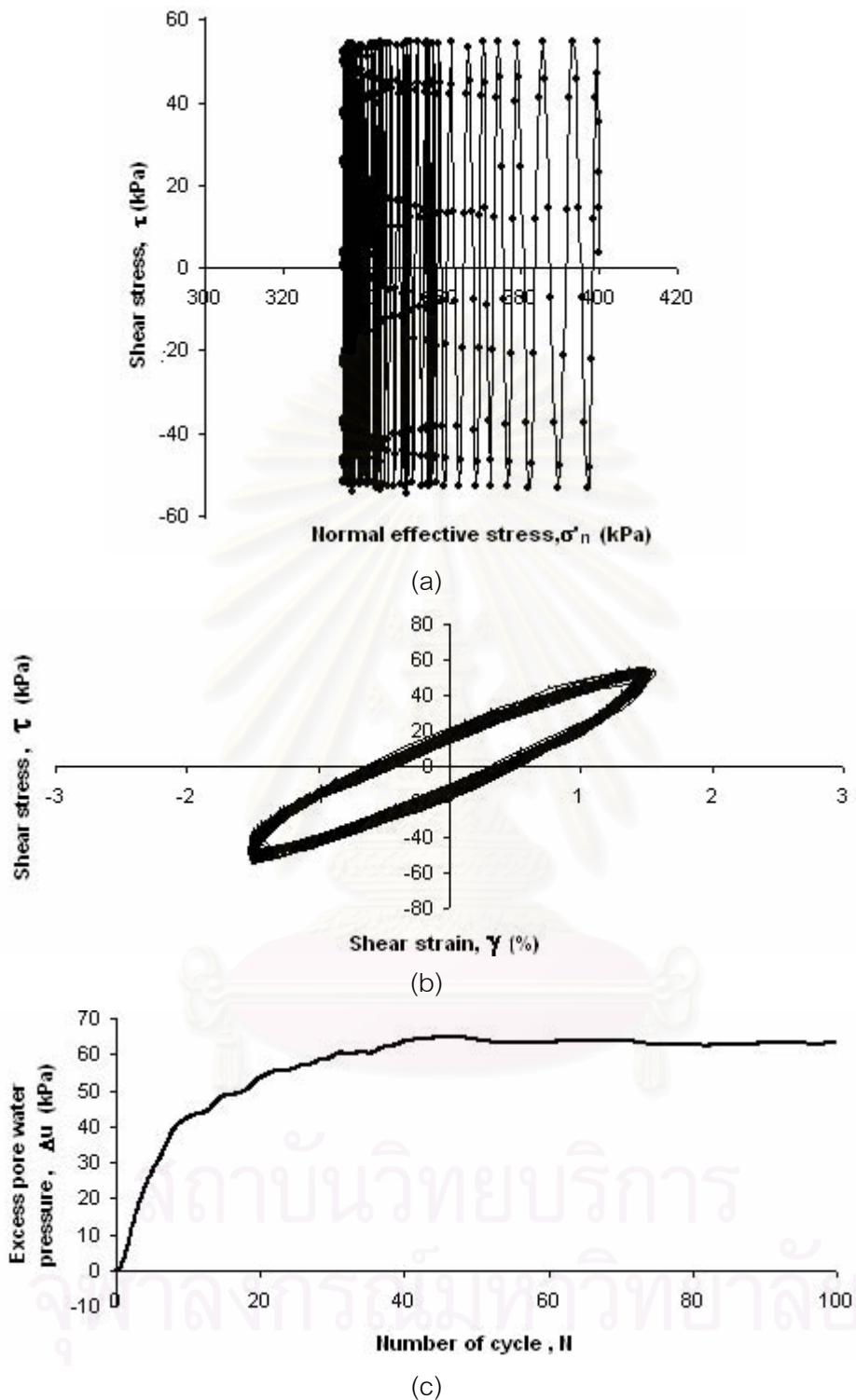


รูปที่ 4.10.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรตัวอย่างทดสอบ CN3 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



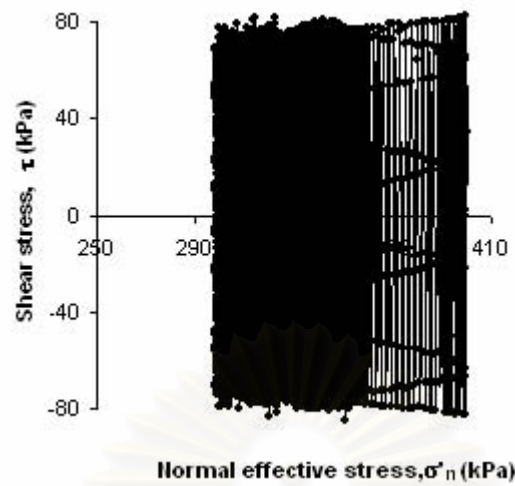
รูปที่ 4.10.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN3

ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

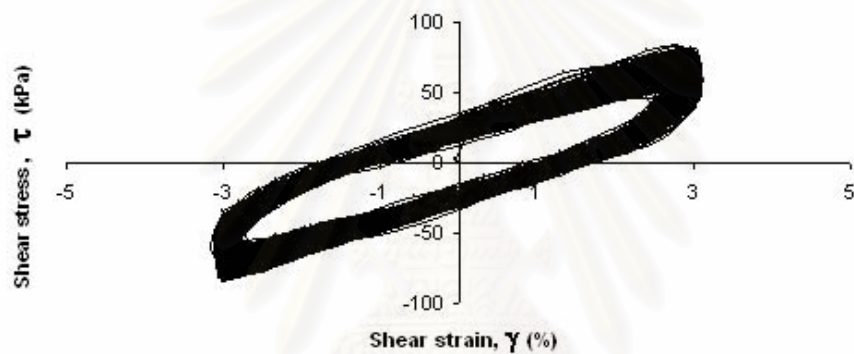
(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

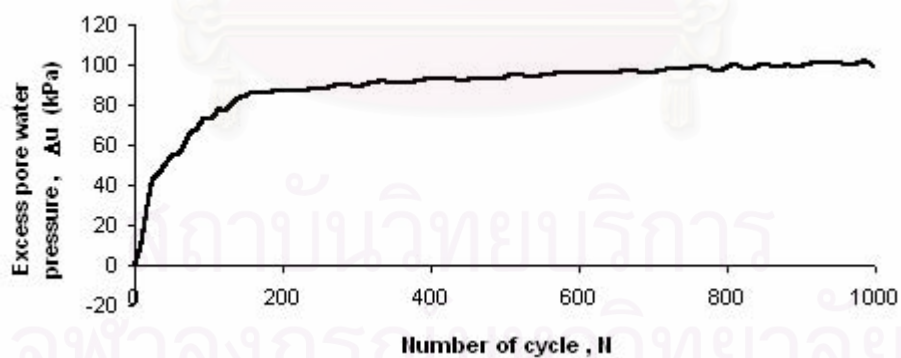
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



(b)



(c)

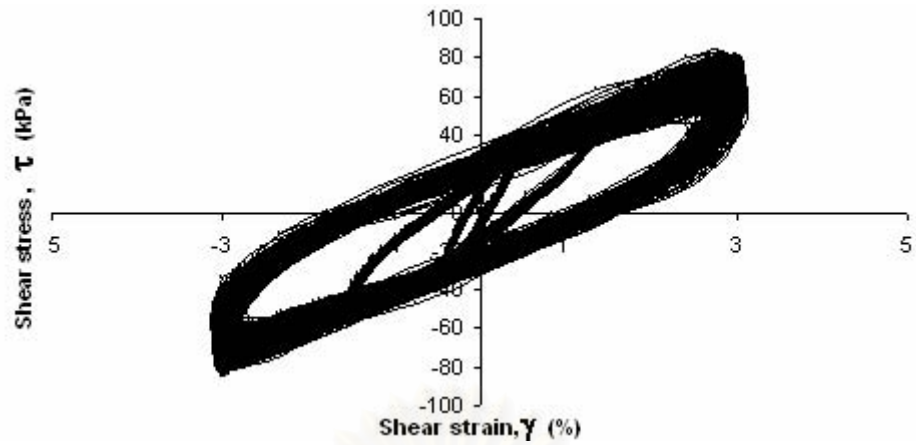
รูปที่ 4.10.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN3 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

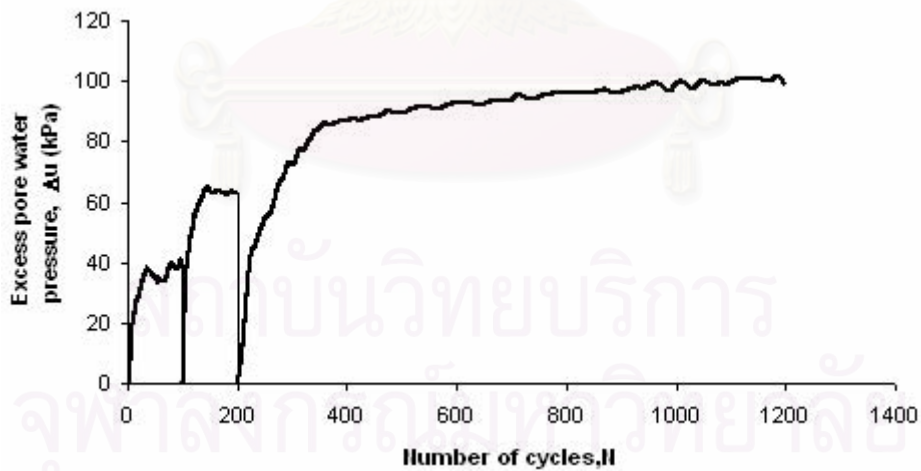
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



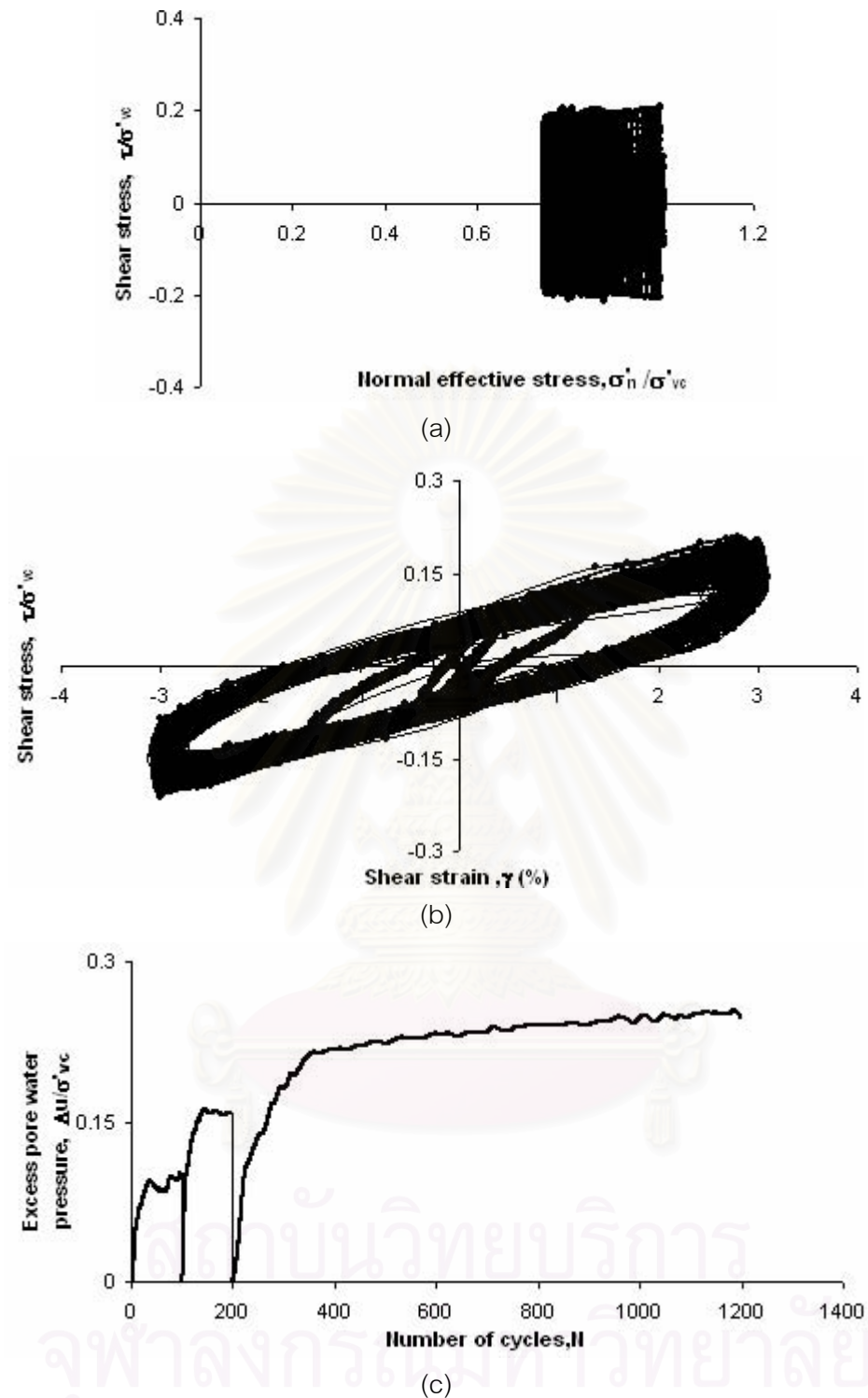
(b)



(c)

รูปที่ 4.10.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN3

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 4.10.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

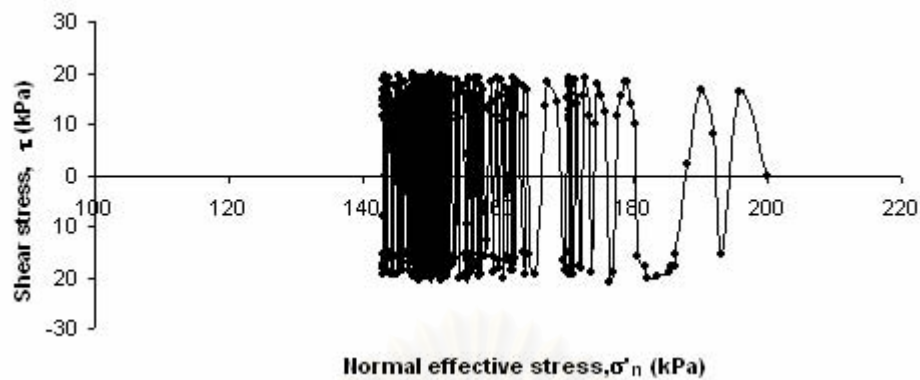
ตัวอย่างทดสอบ CN3

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

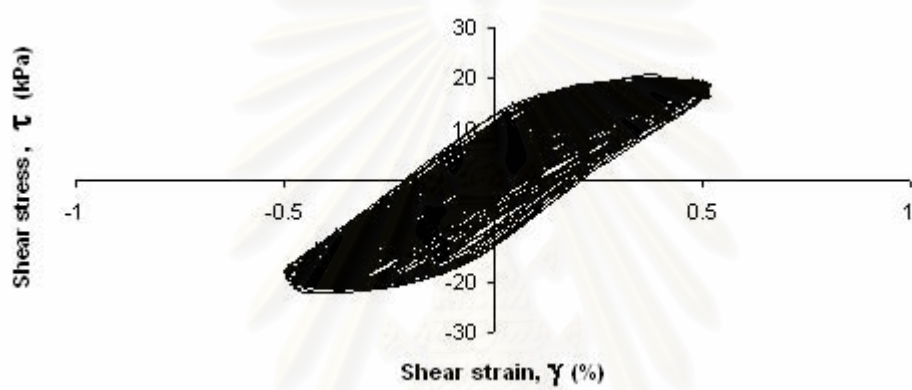
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

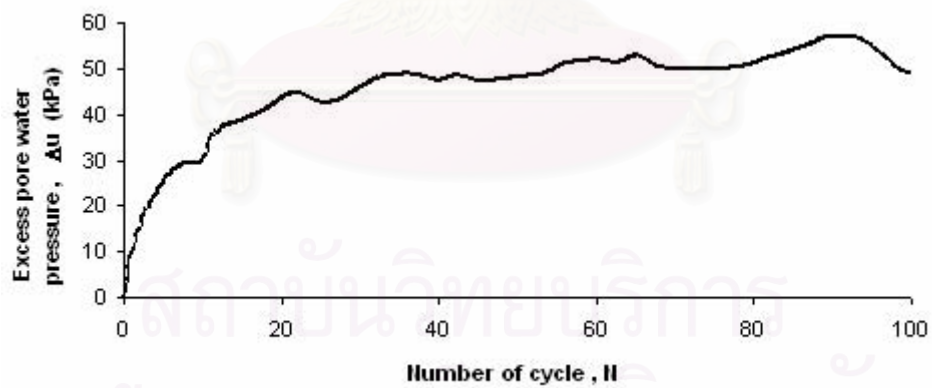




(a)



(b)



(c)

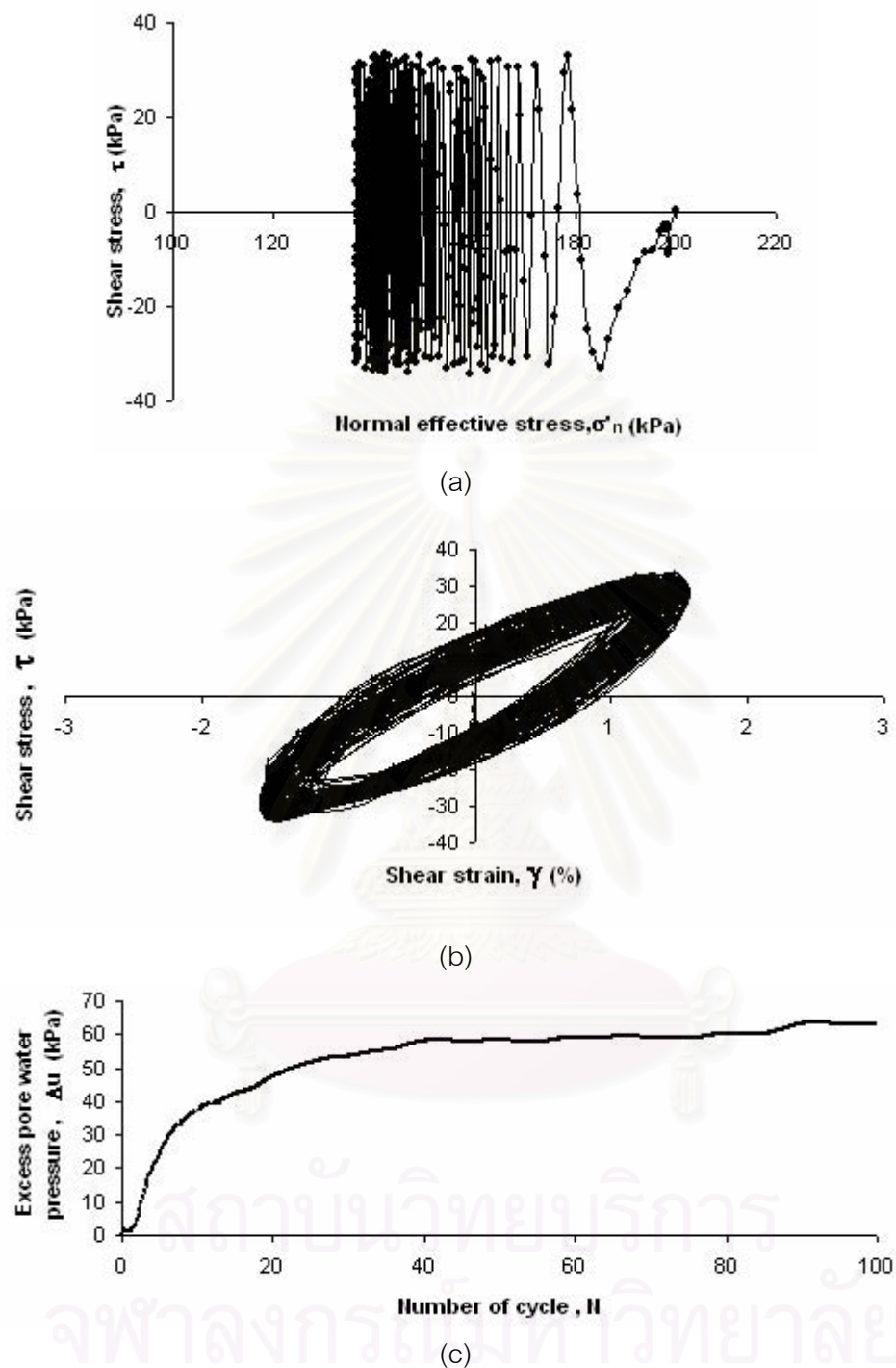
รูปที่ 4.11.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN4 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



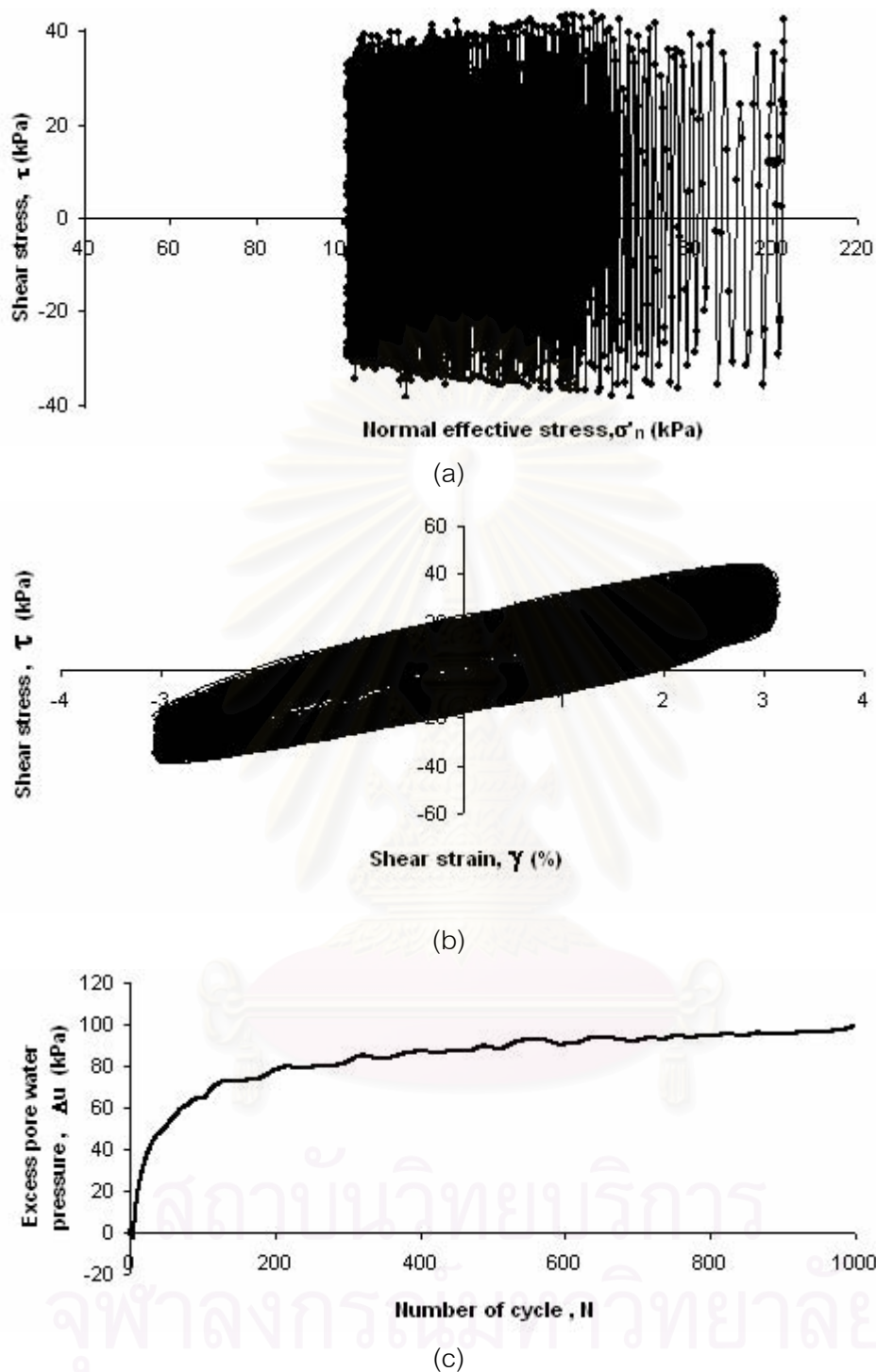
รูปที่ 4.11.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN4 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



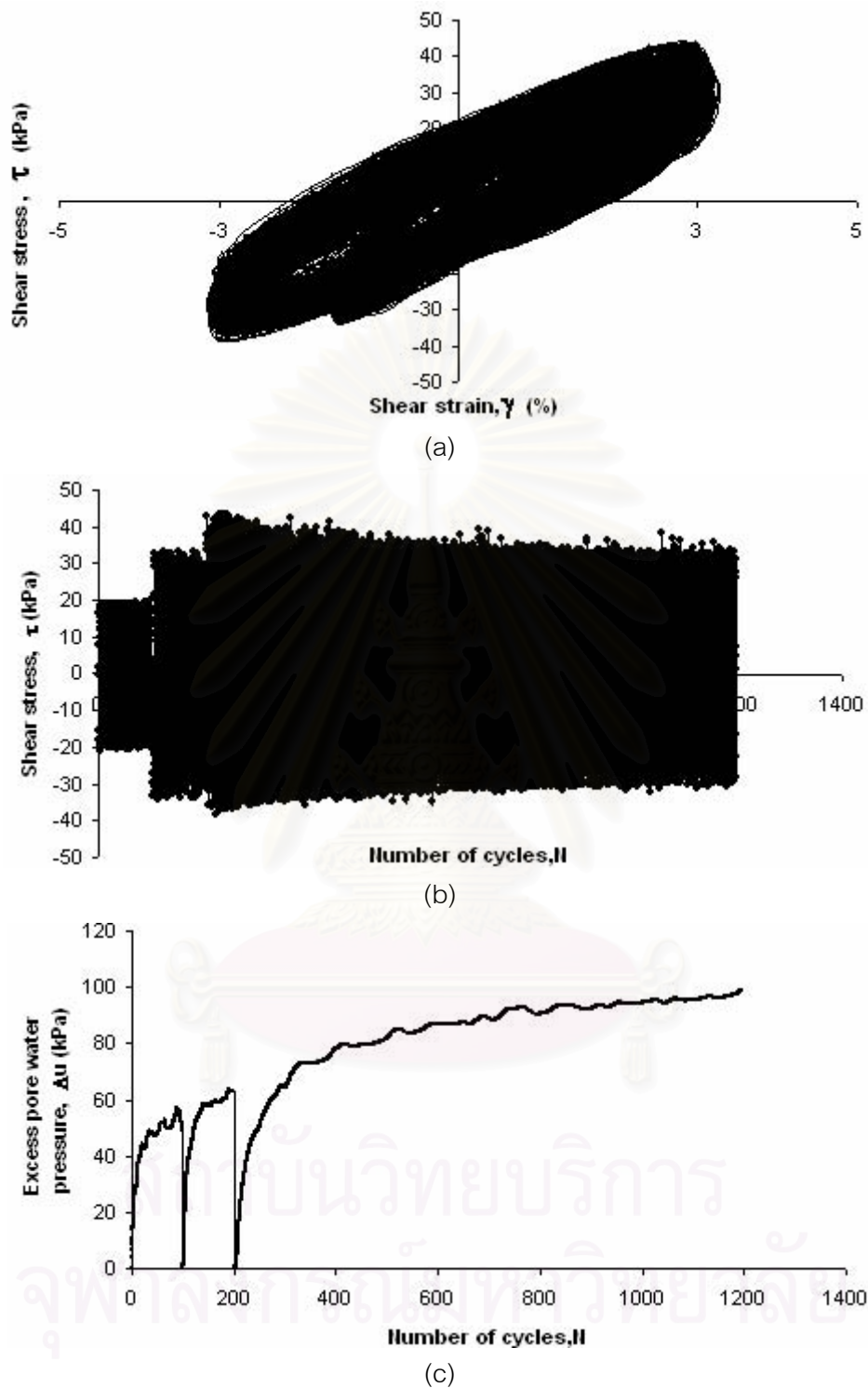
รูปที่ 4.11.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN4 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

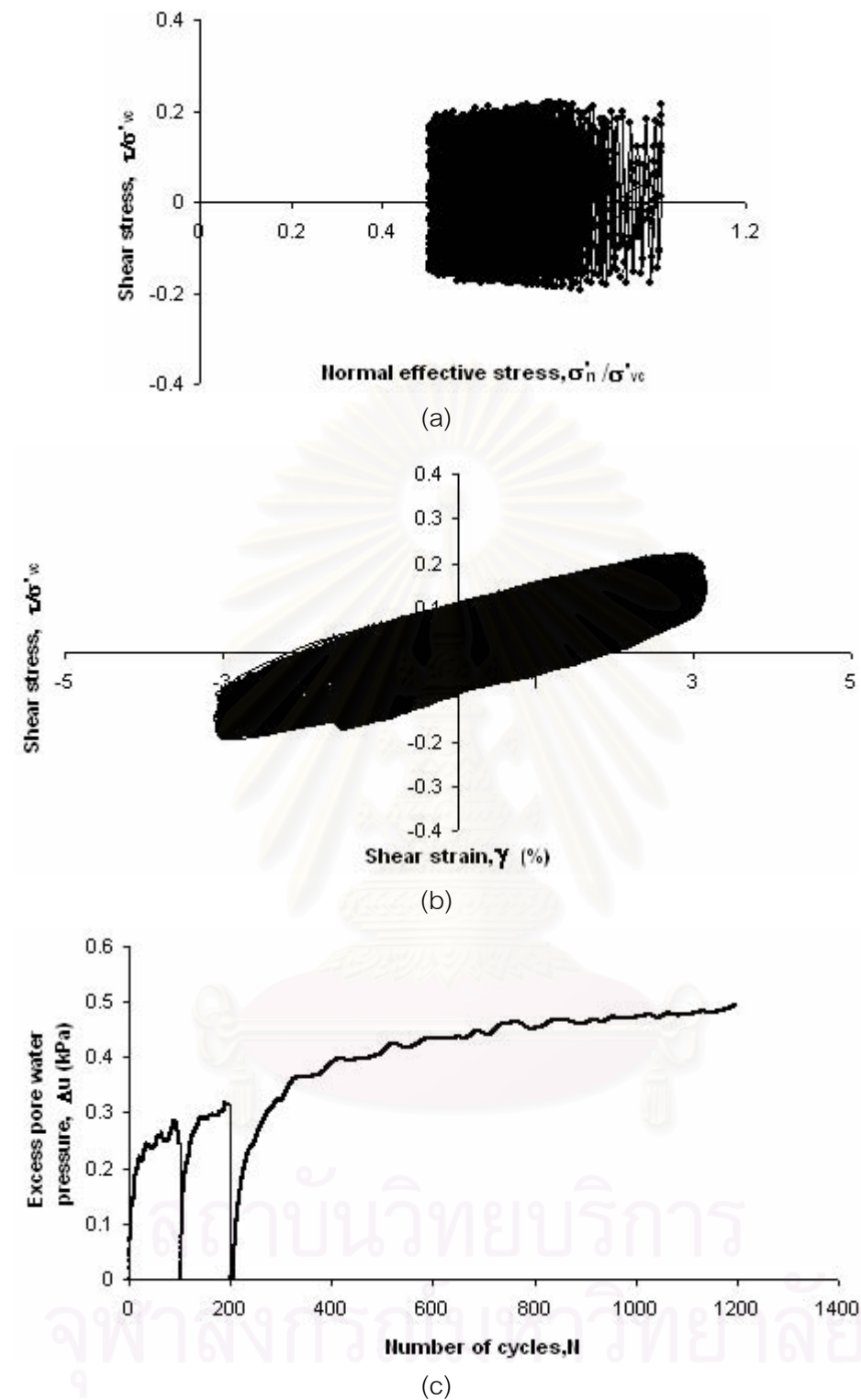
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 4.11.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN4

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



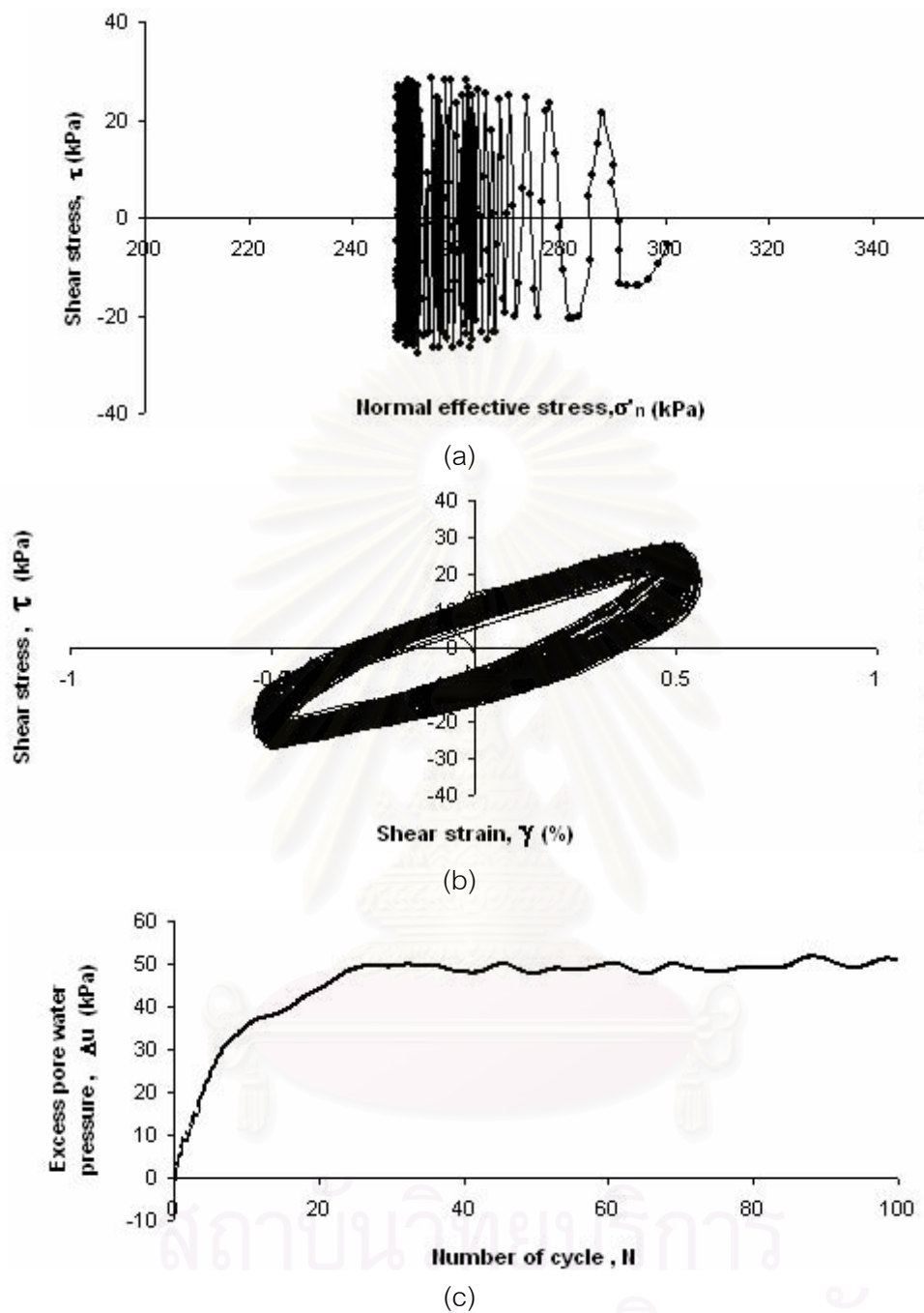
รูปที่ 4.11.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร  
ตัวอย่างทดสอบ CN4

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



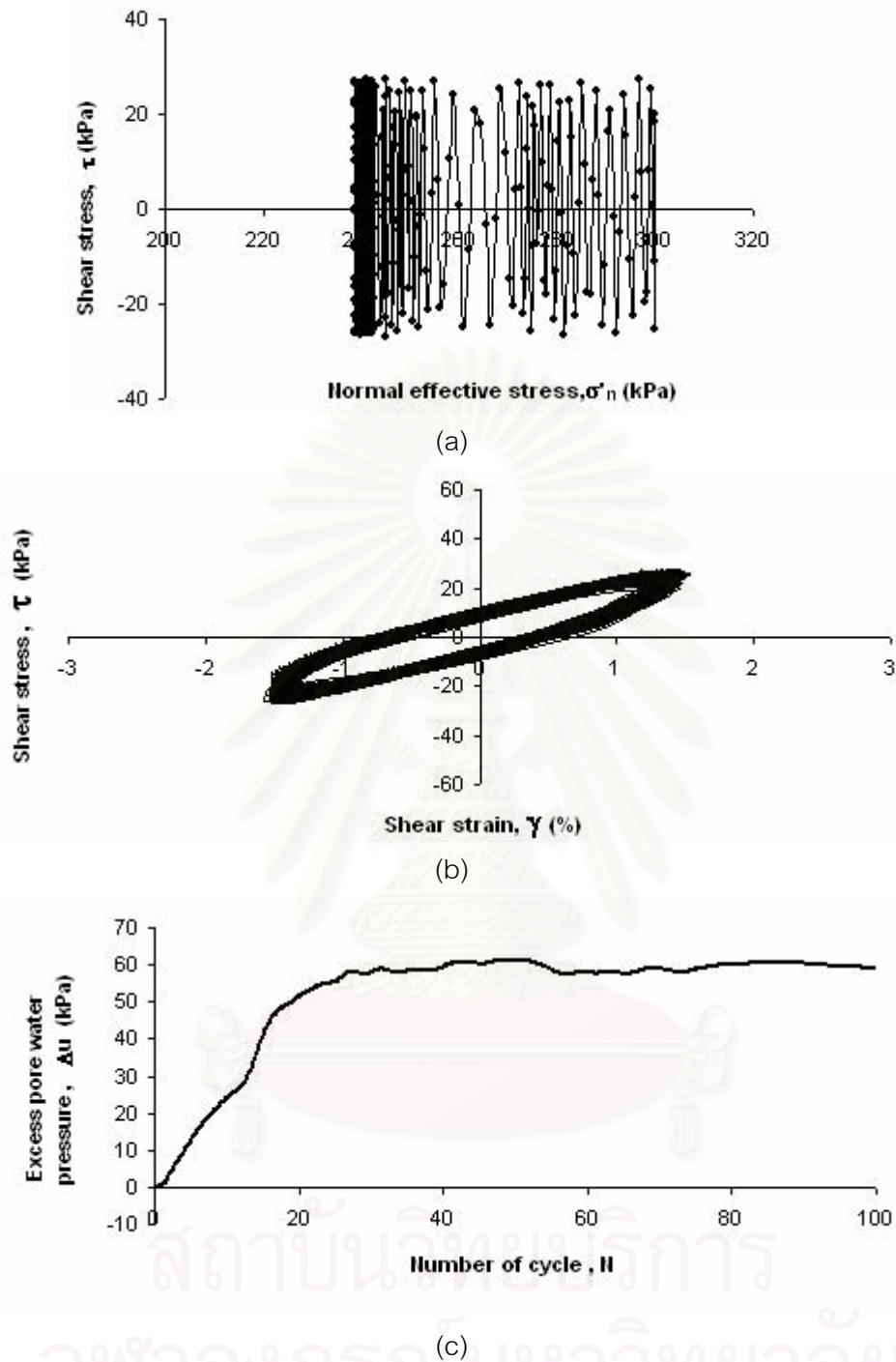


รูปที่ 4.12.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรตัวอย่างทดสอบ CN5 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



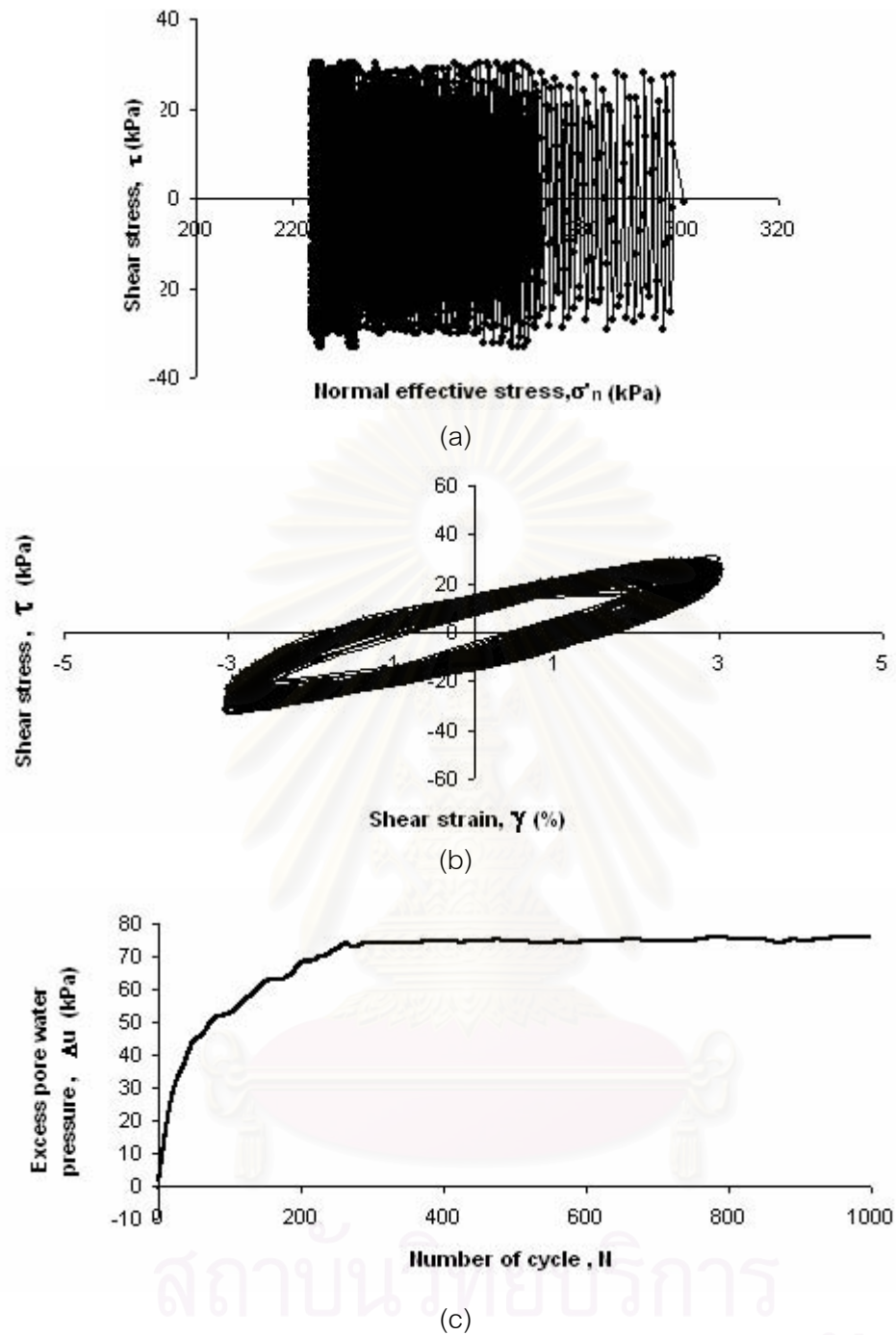
รูปที่ 4.12.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN5 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

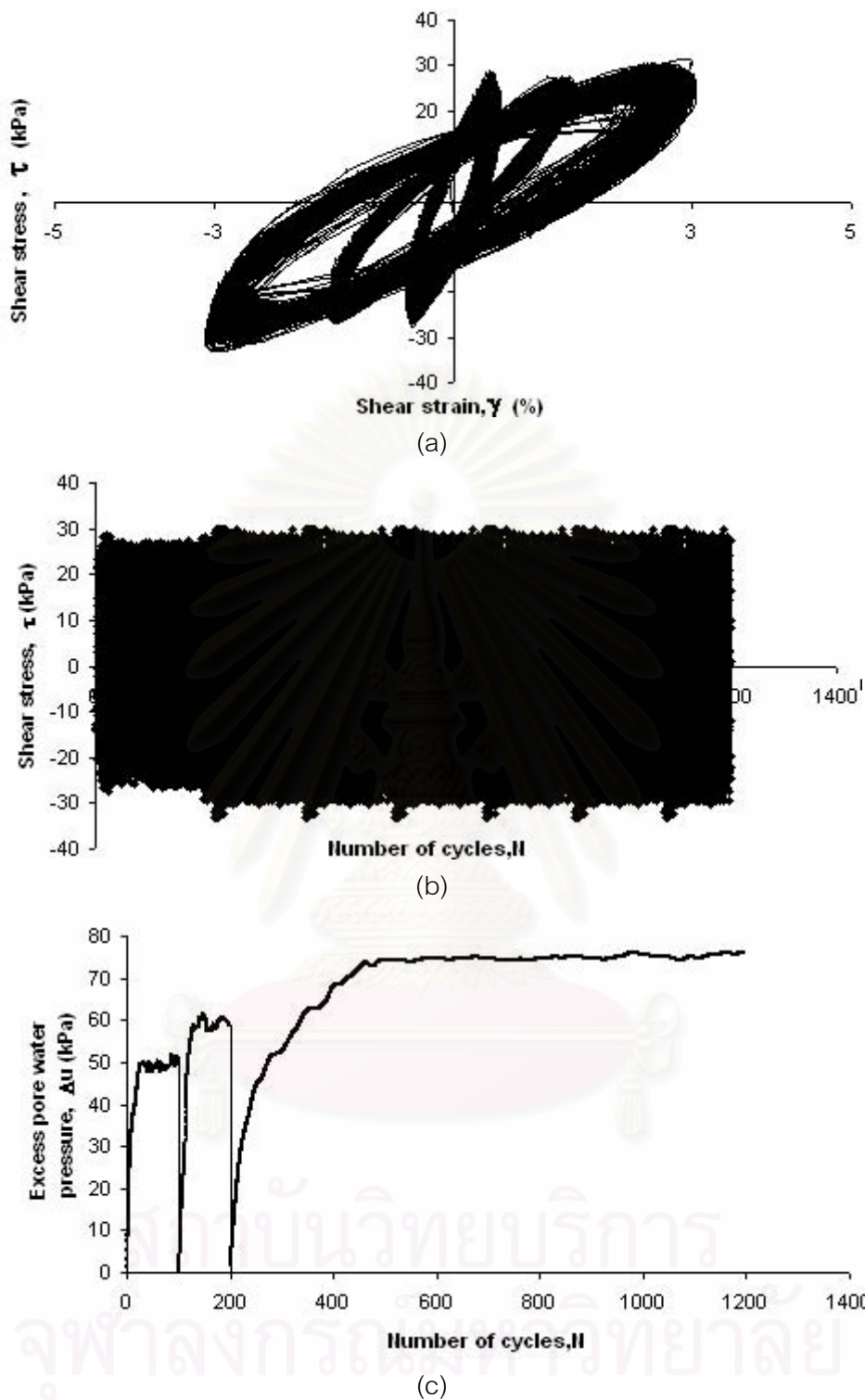


รูปที่ 4.12.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ CN5 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

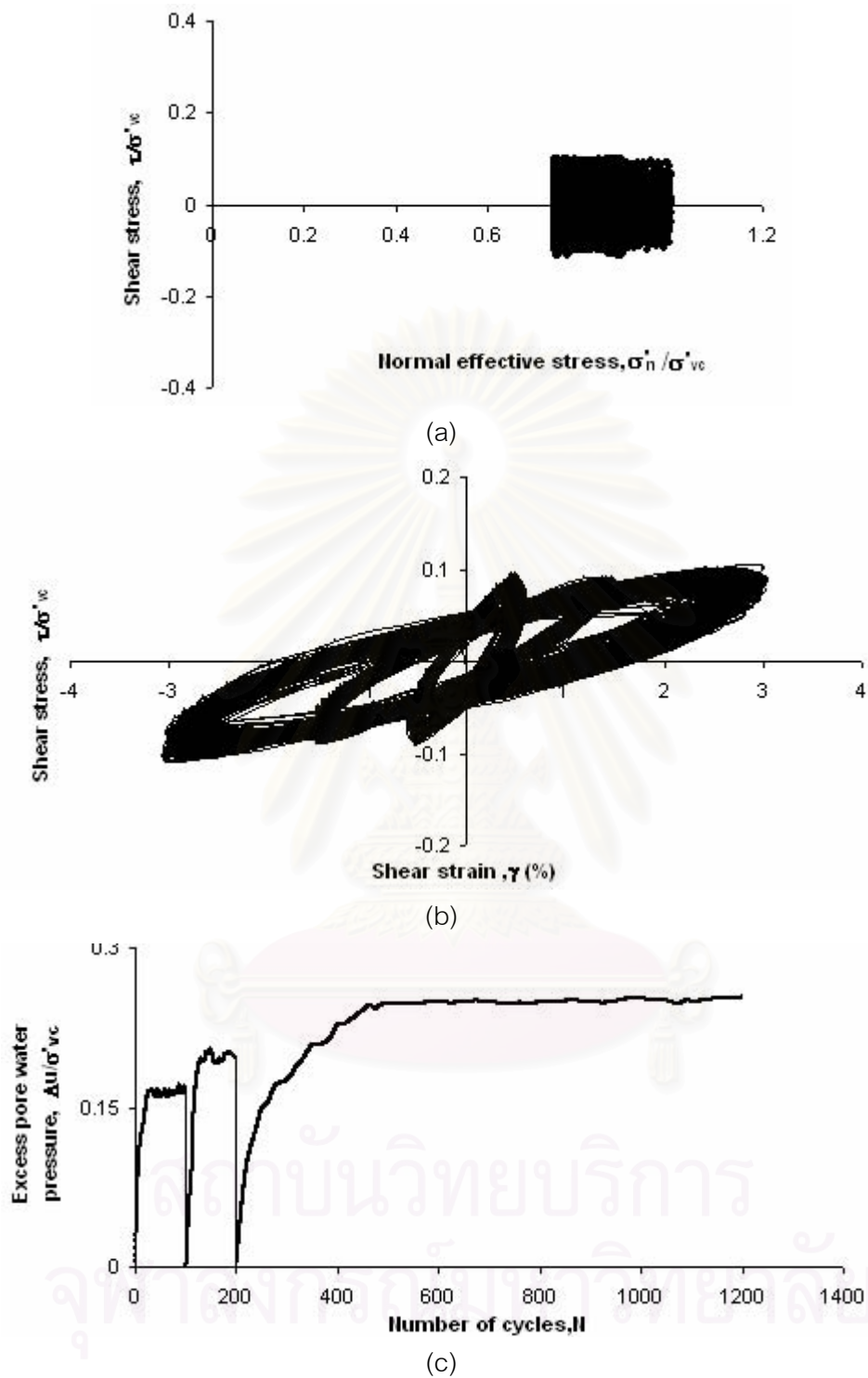
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 4.12.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN5

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



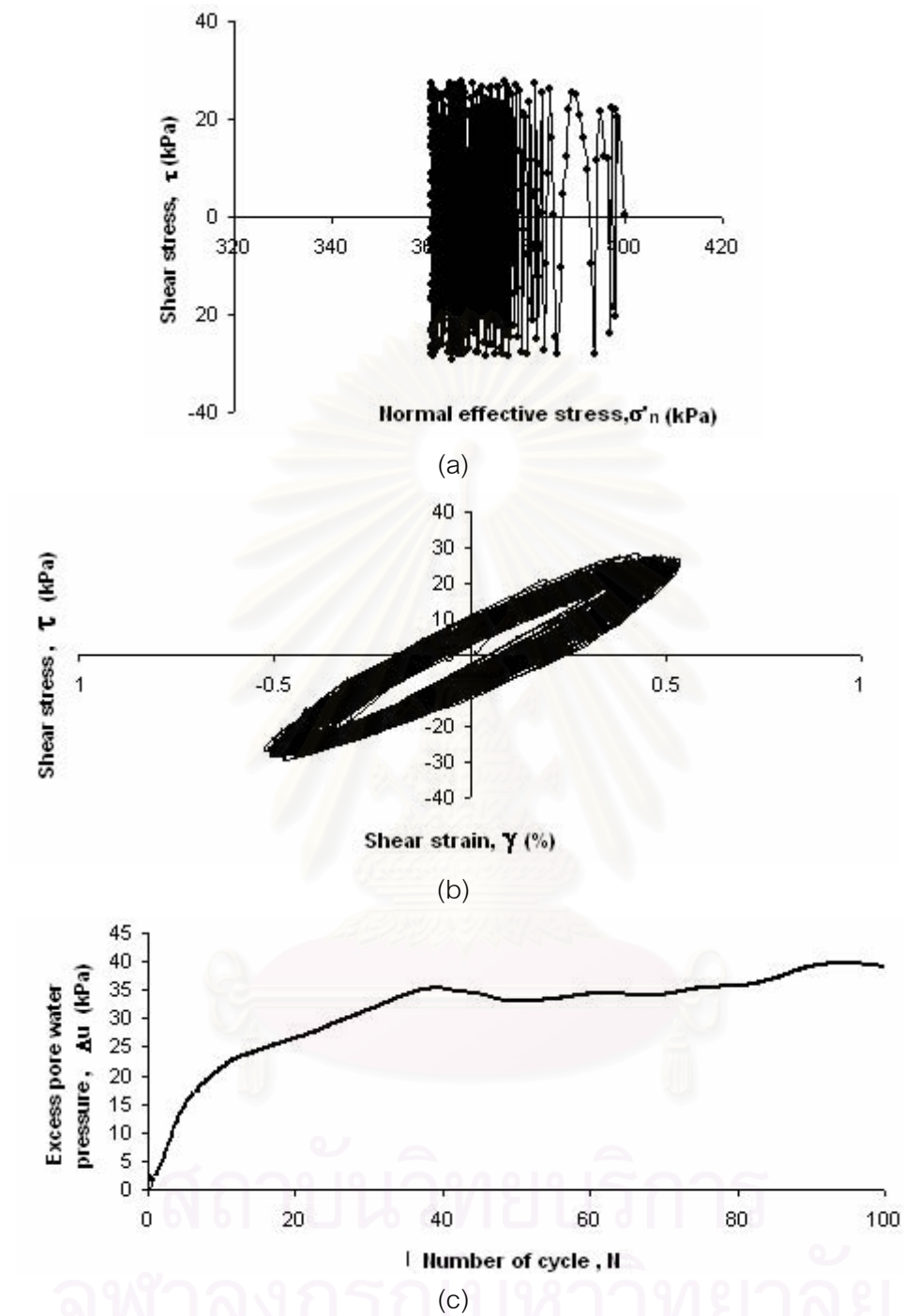
รูปที่ 4.12.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

ตัวอย่างทดสอบ CN5

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 4.13.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

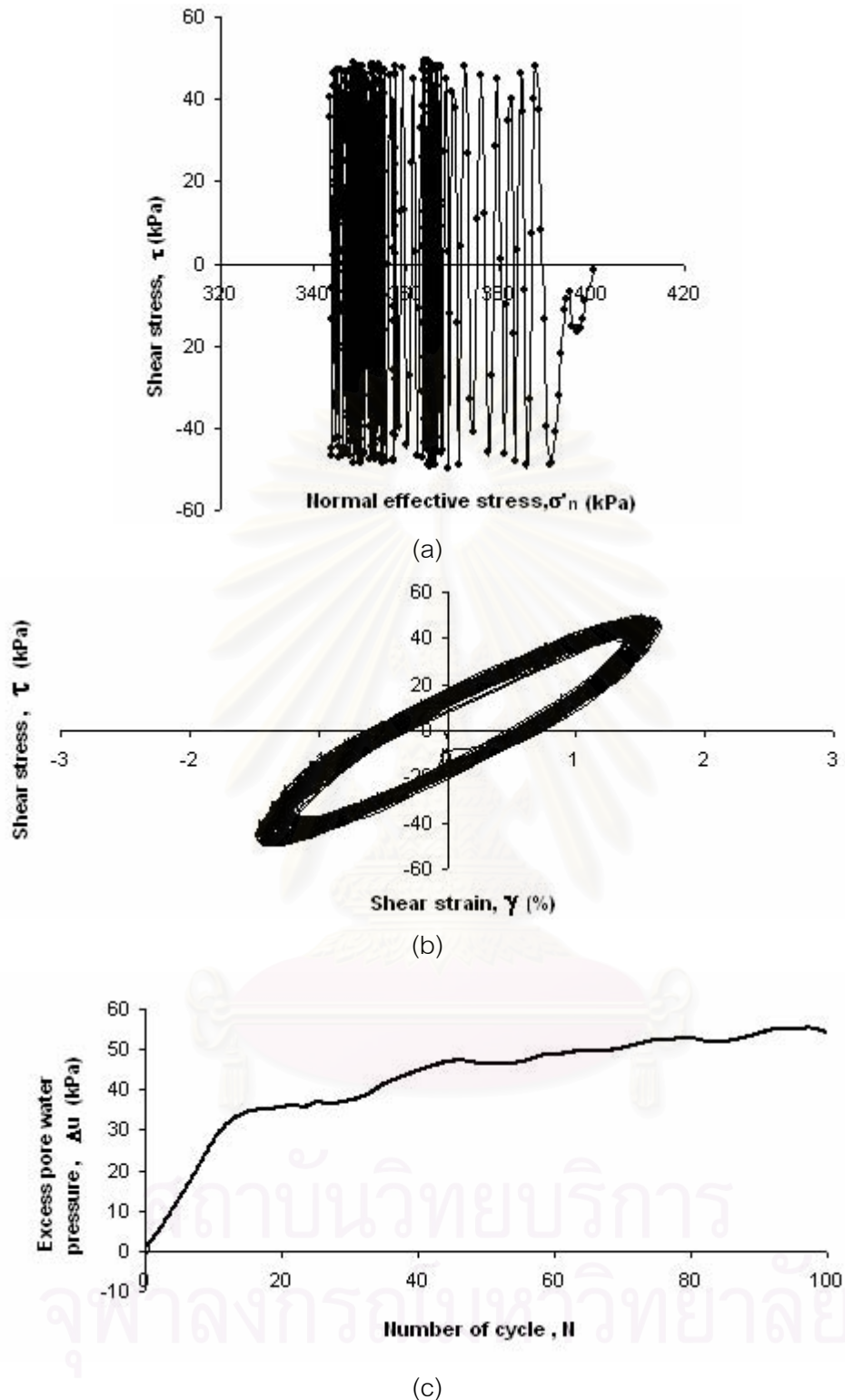
CN6 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



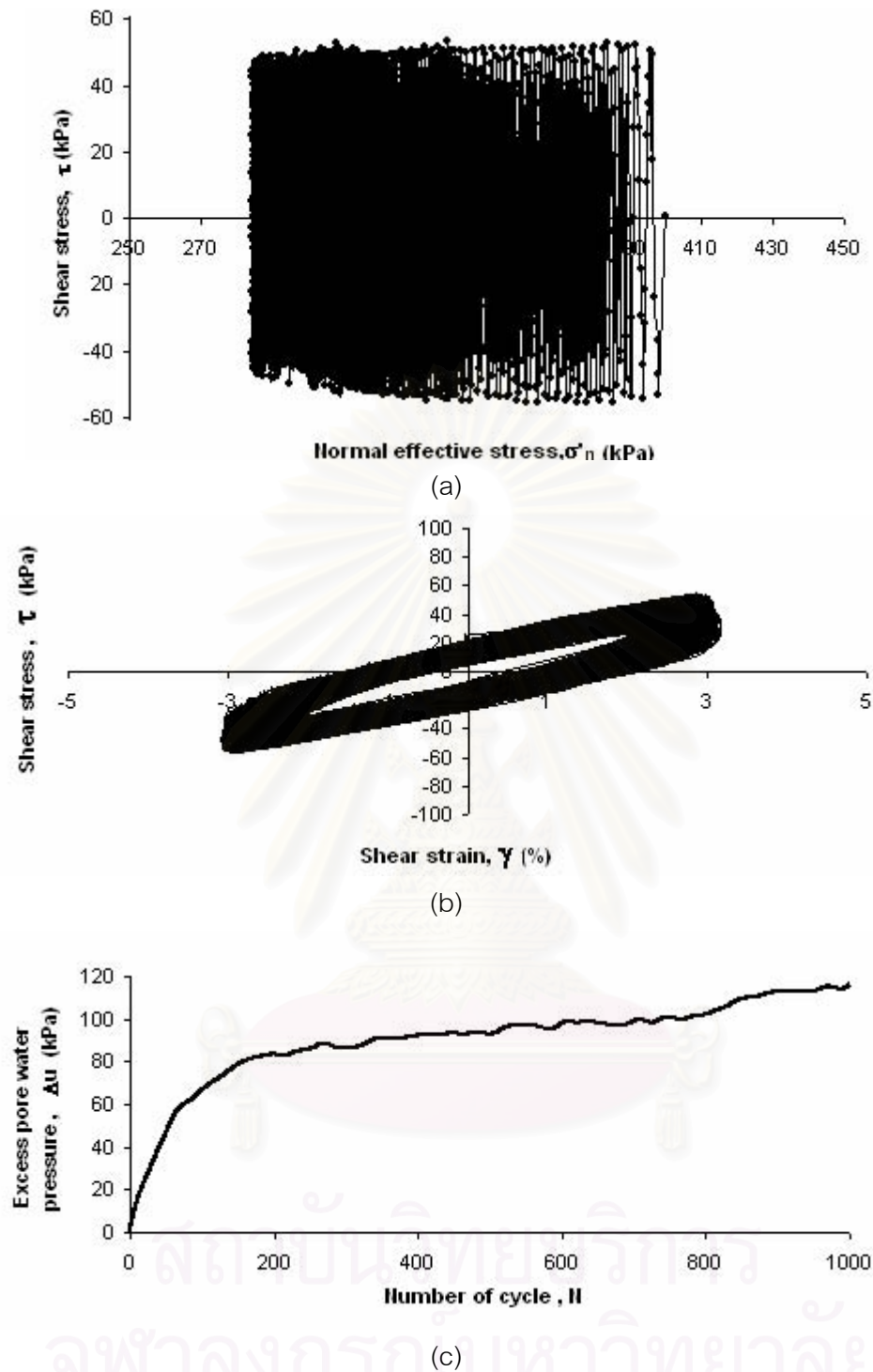


รูปที่ 4.13.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN6 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



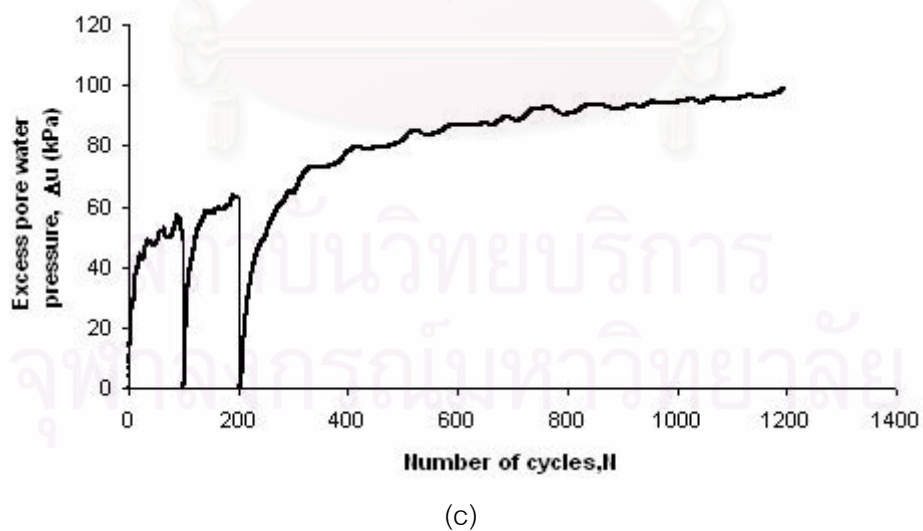
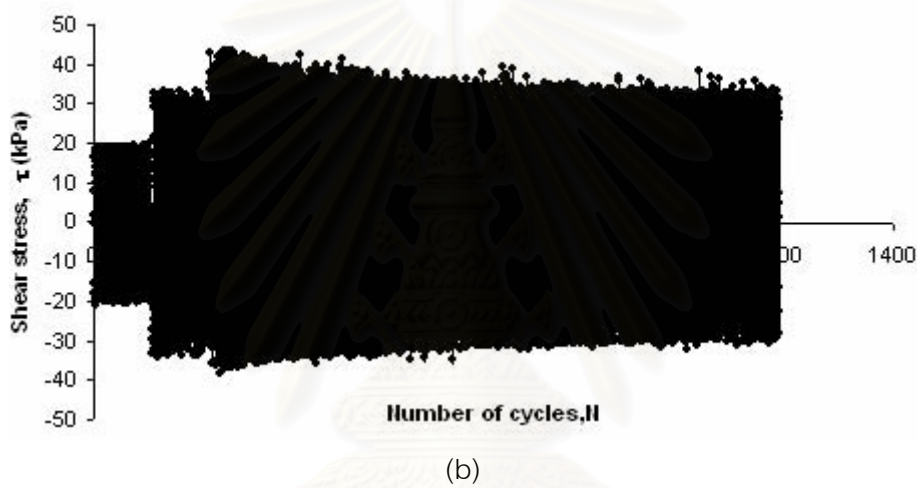
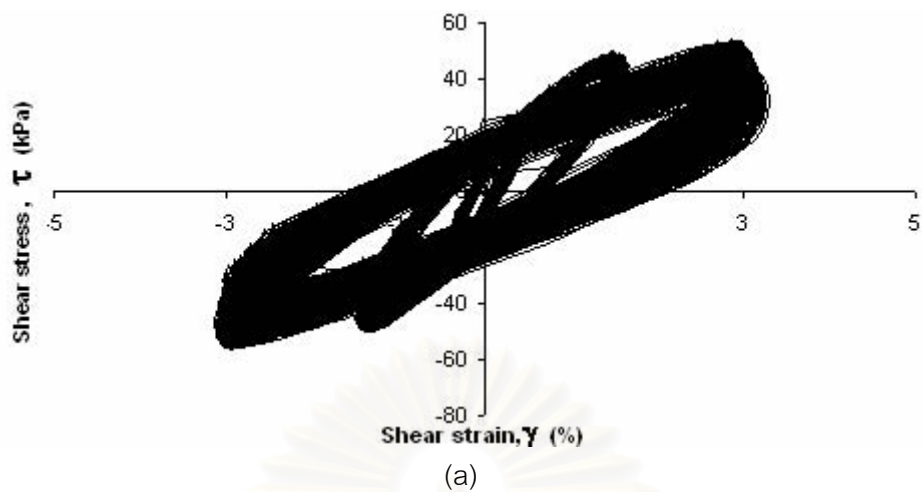
รูปที่ 4.13.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN6 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

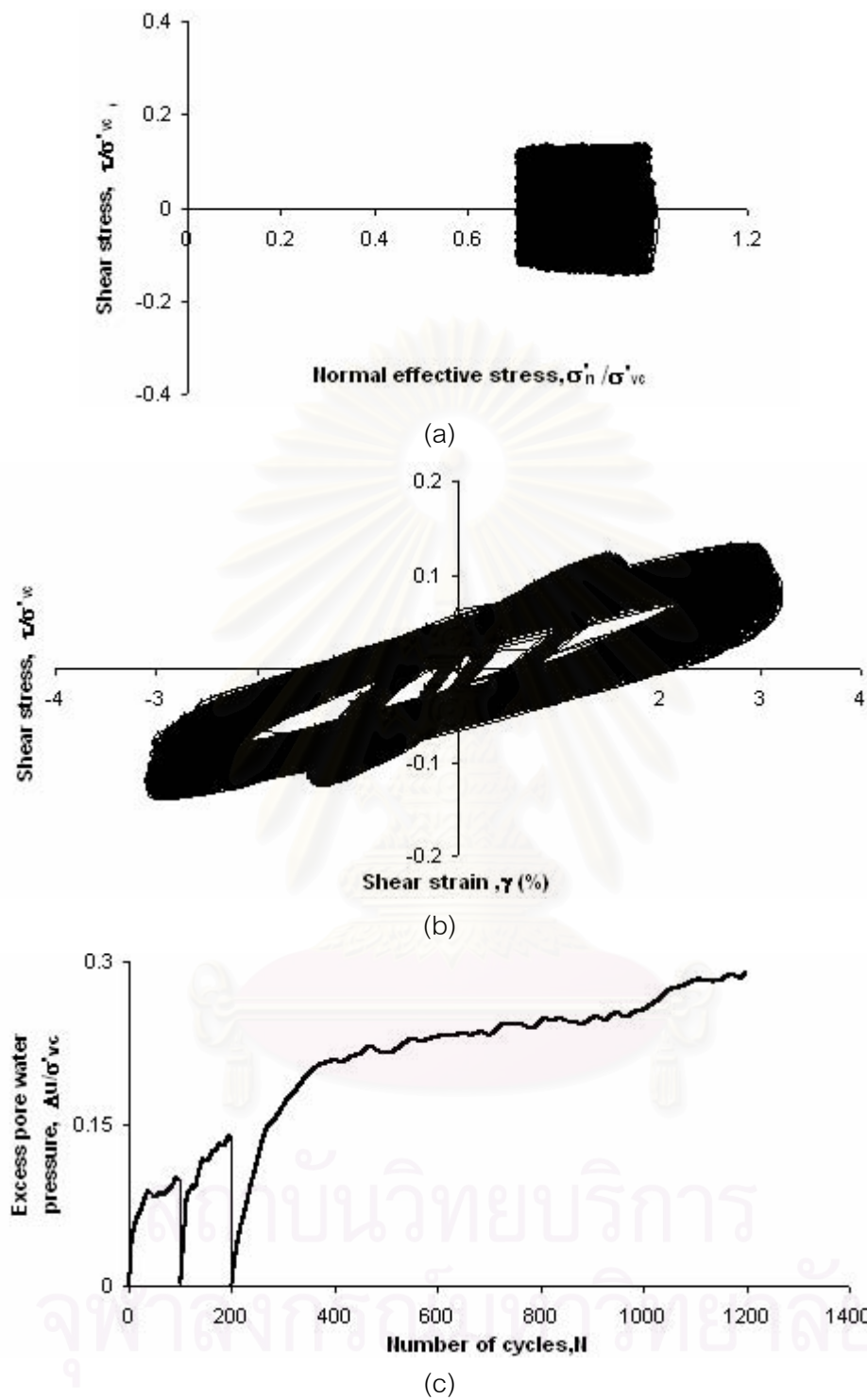


รูปที่ 4.13.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN6

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



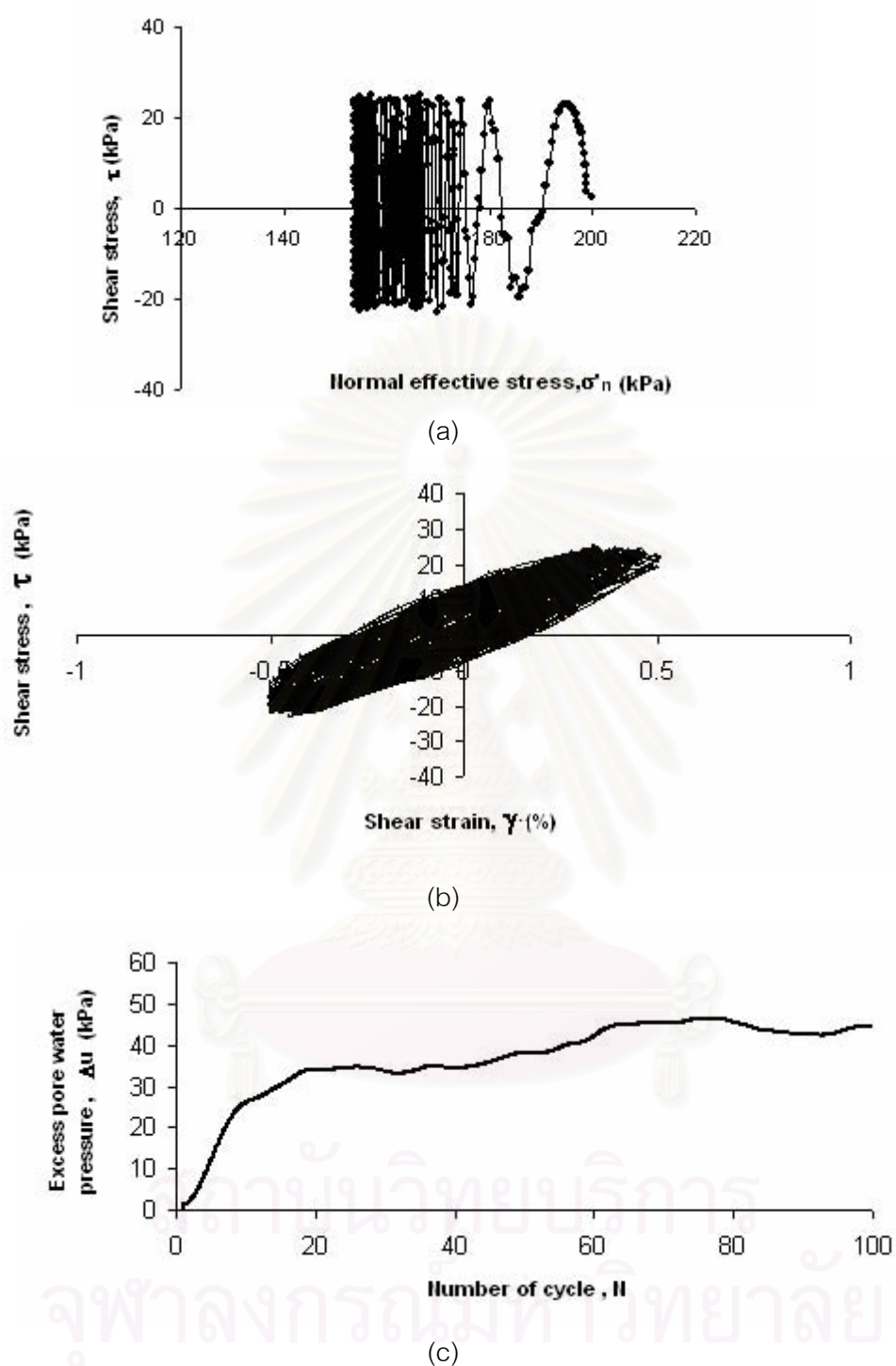
รูปที่ 4.13.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

ตัวอย่างทดสอบ CN6

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



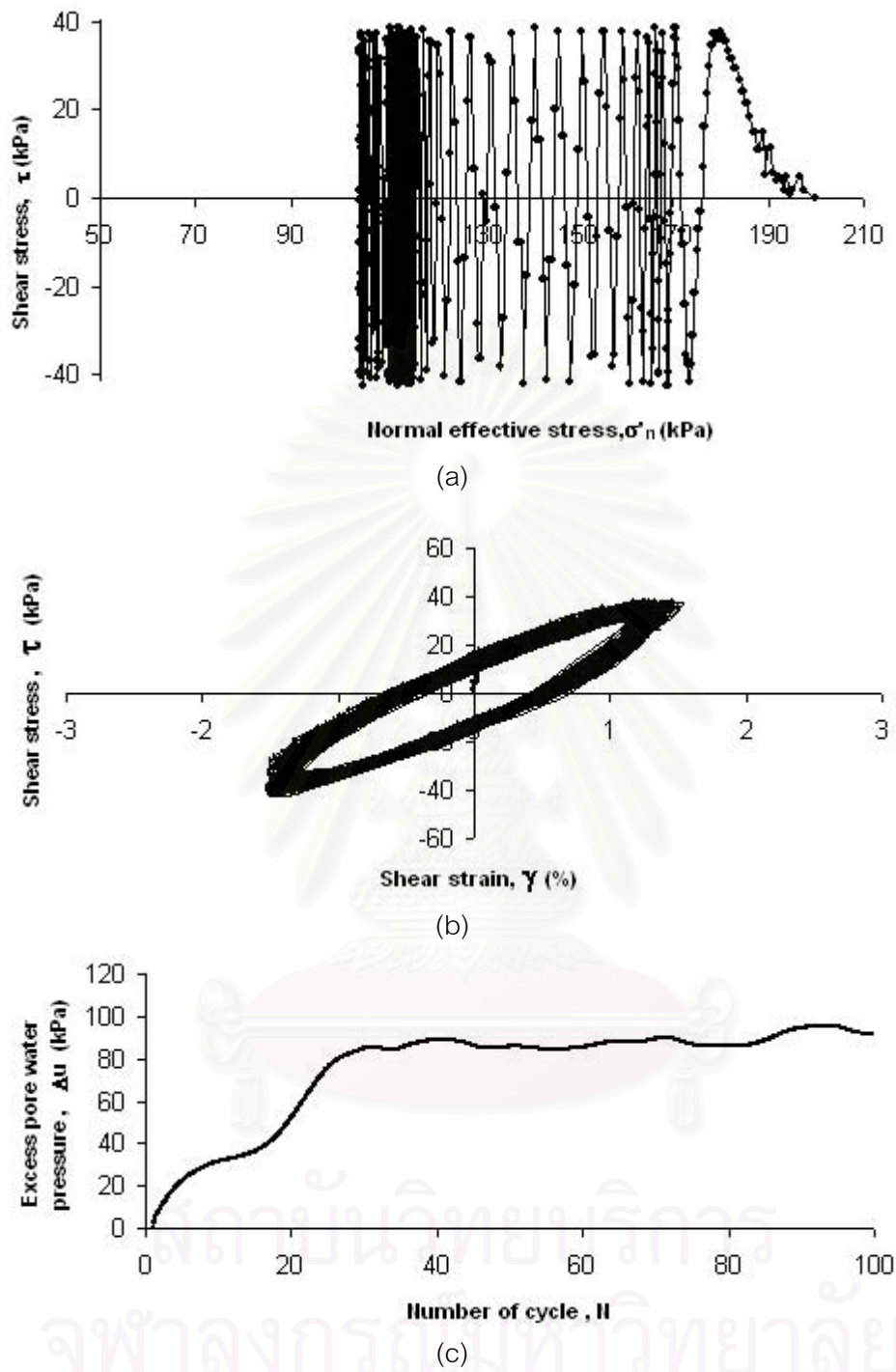
รูปที่ 4.14.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN7 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



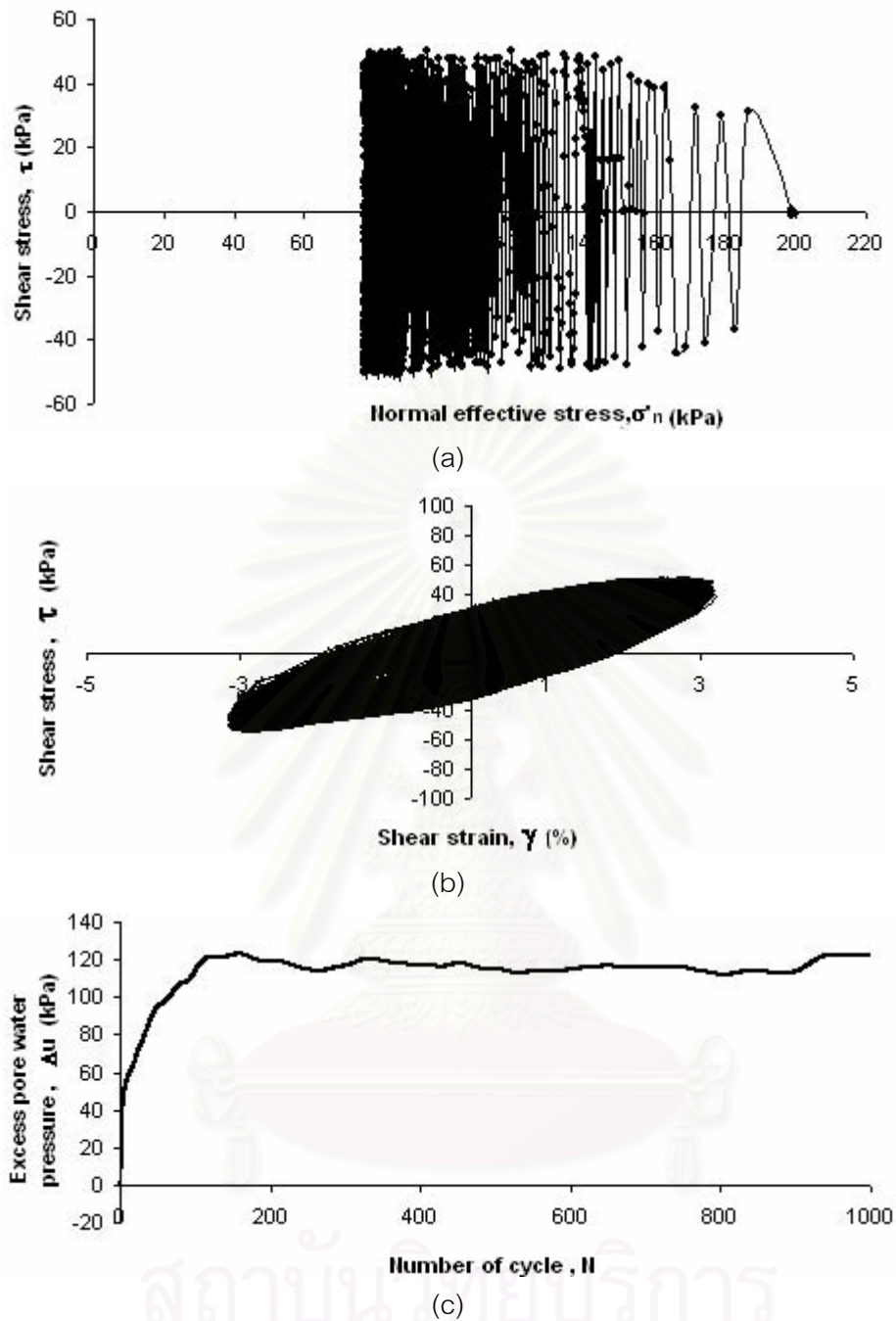
รูปที่ 4.14.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN7 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



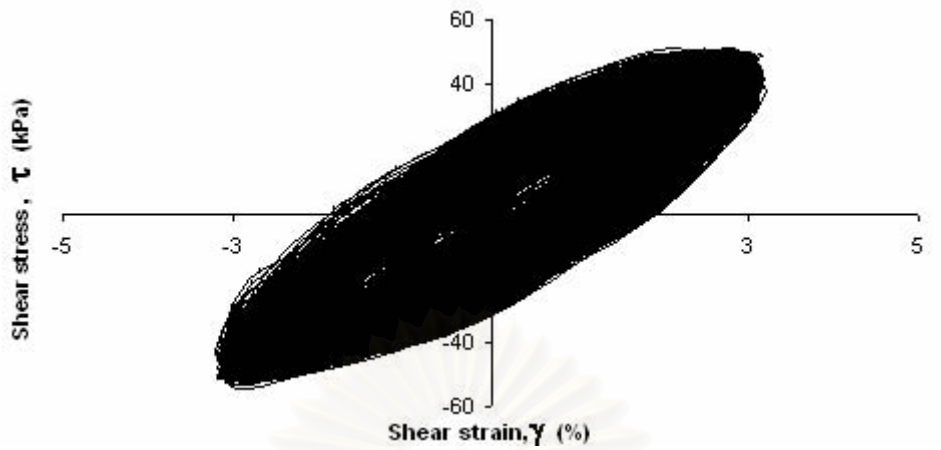


รูปที่ 4.14.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรตัวอย่างทดสอบ CN7 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

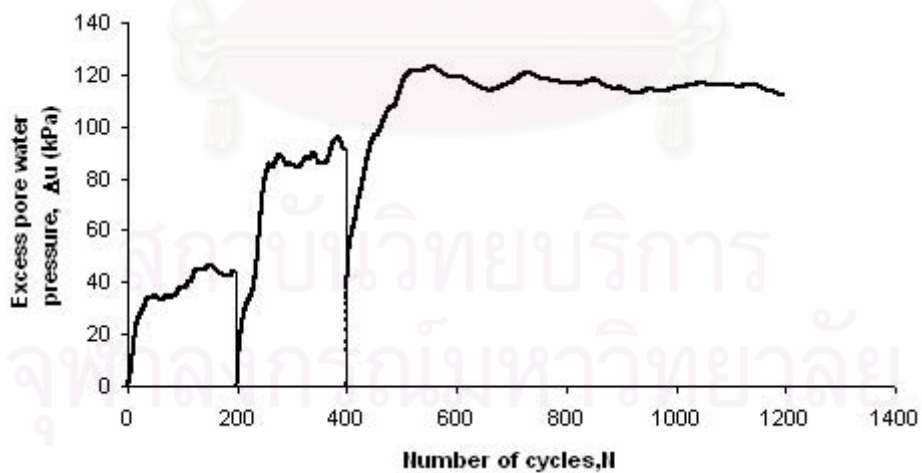
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



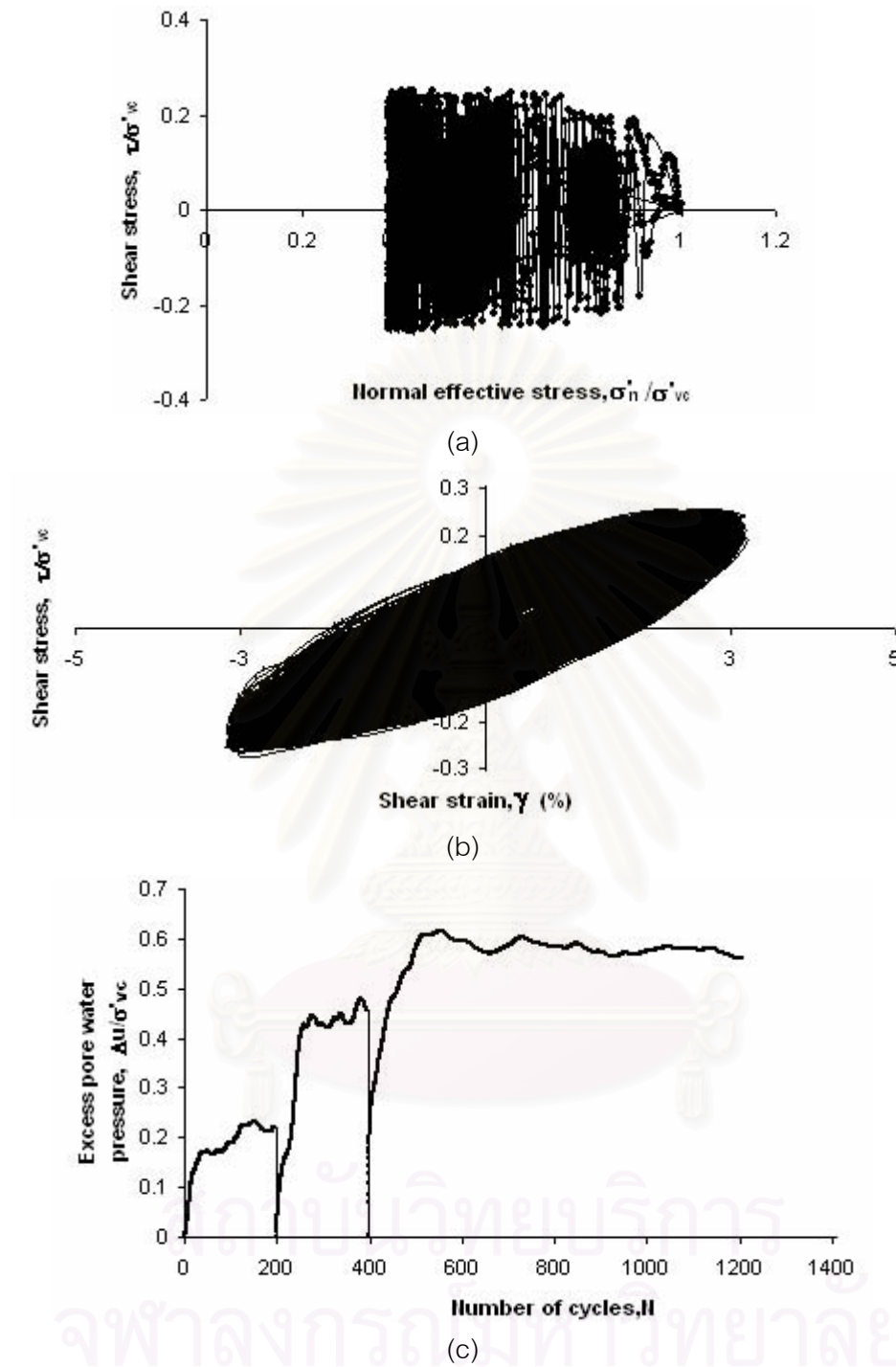
(b)



(c)

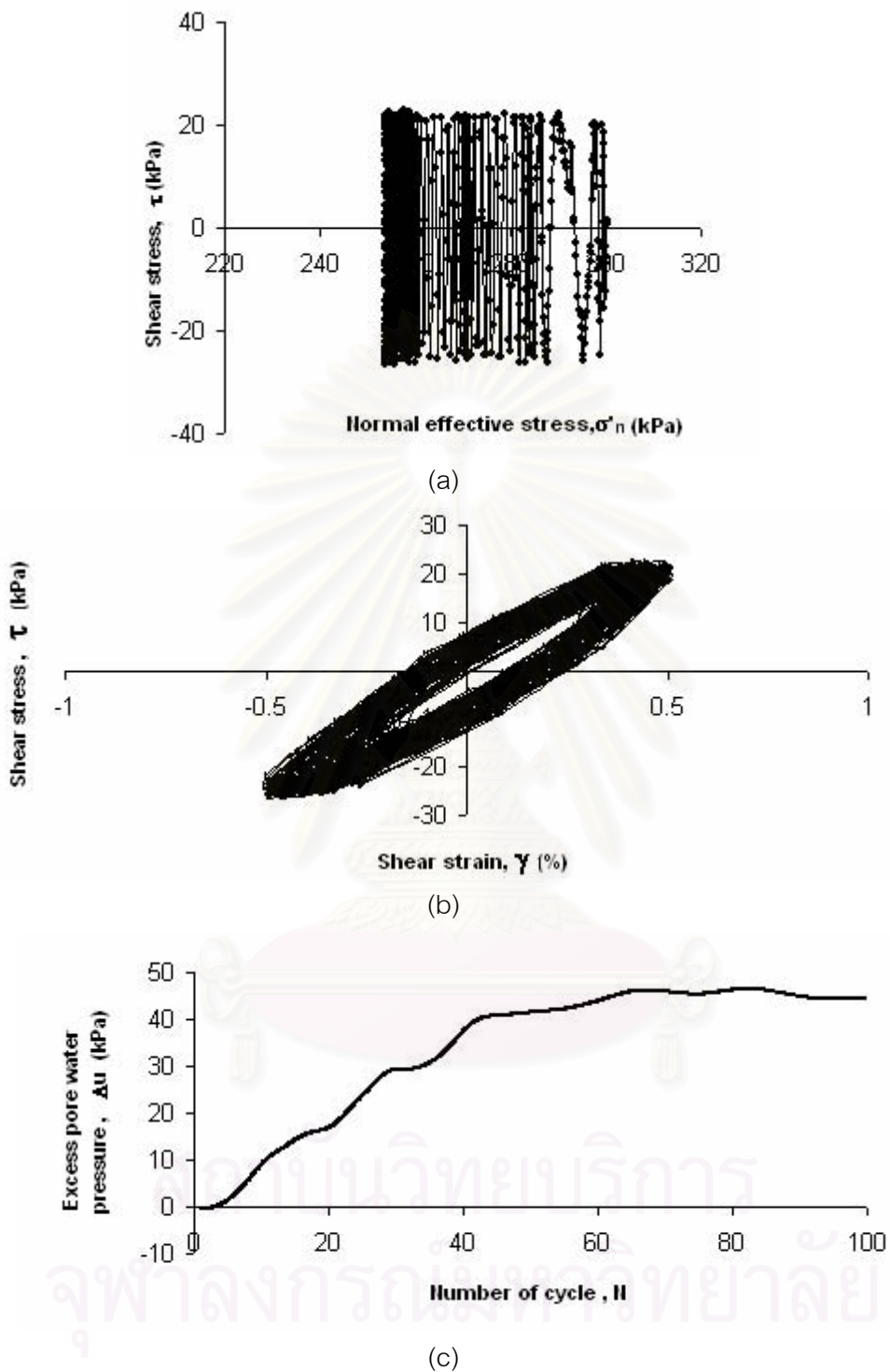
รูปที่ 4.14.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN7

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 4.14.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN7

- (a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

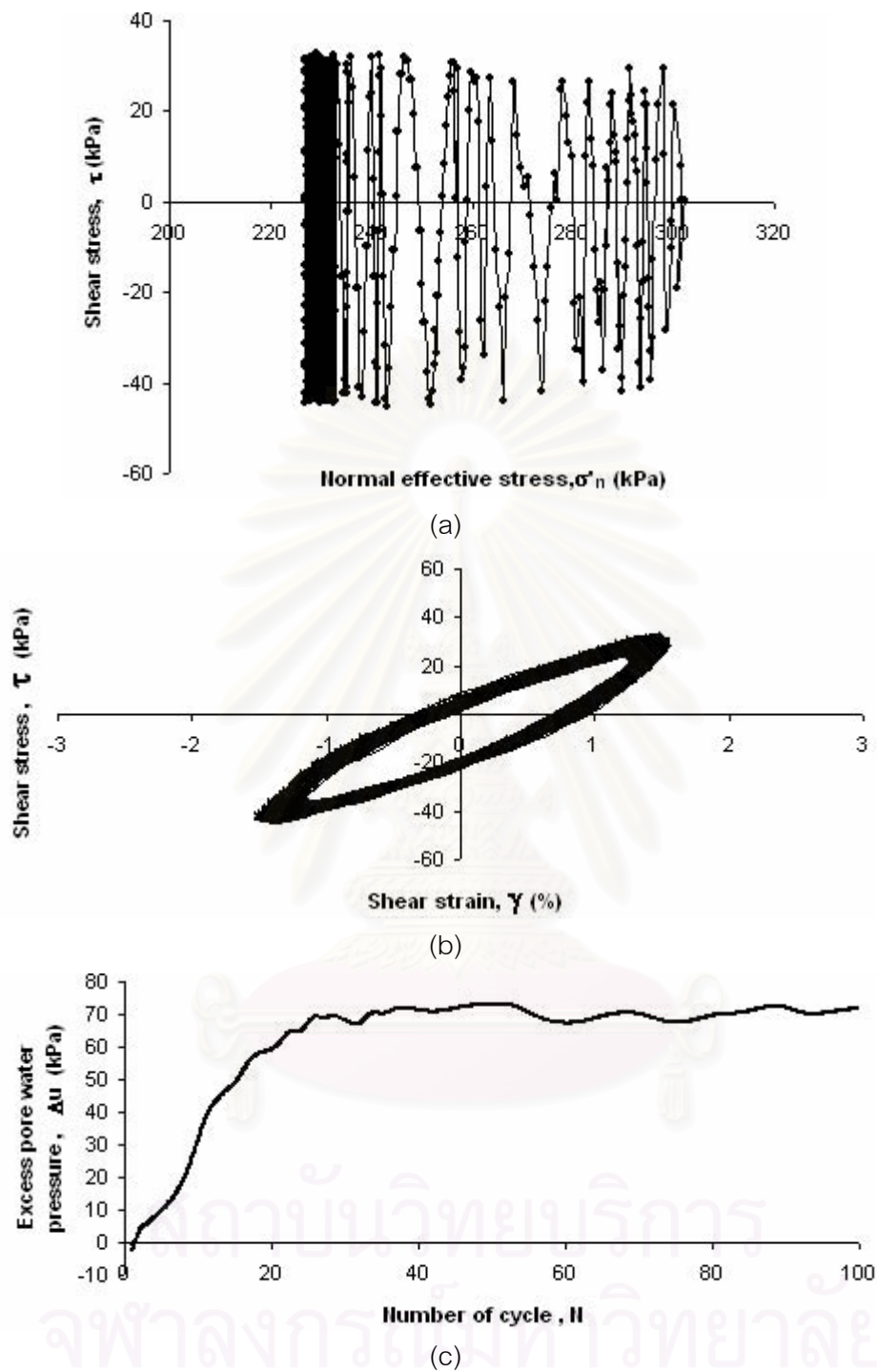


รูปที่ 4.15.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN8 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

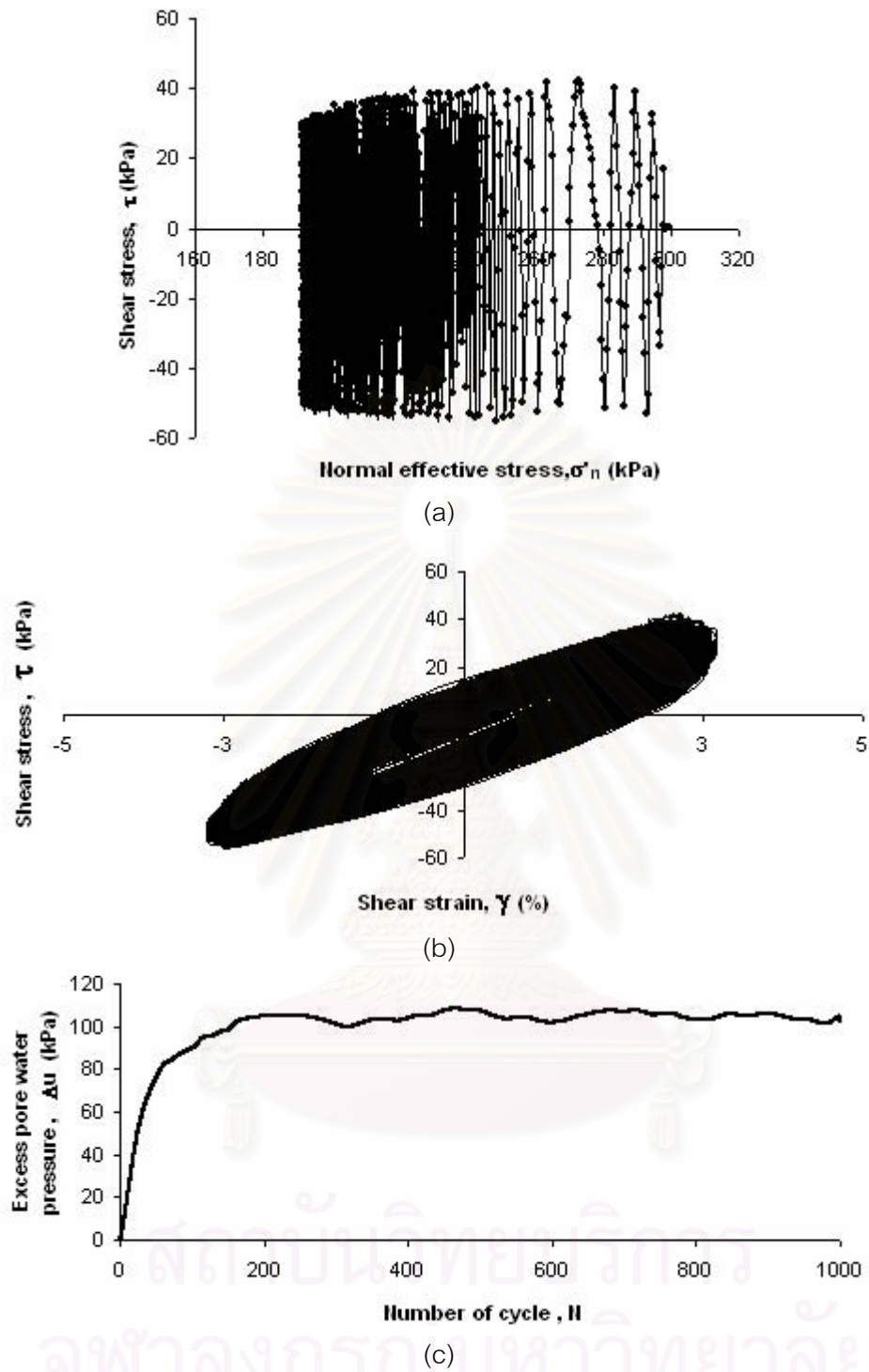


รูปที่ 4.15.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN8 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



รูปที่ 4.15.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร ตัวอย่างทดสอบ

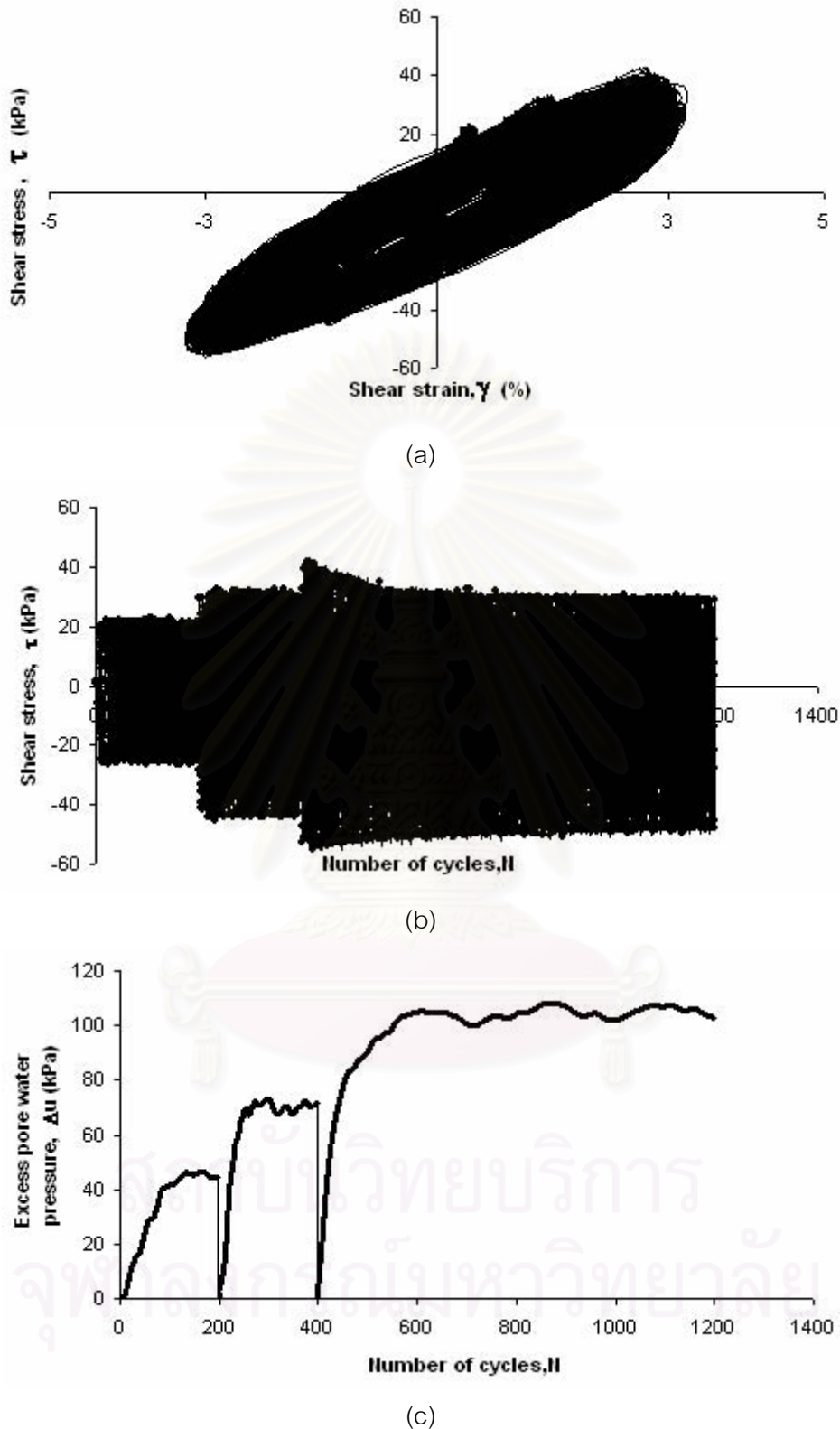
CN8 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

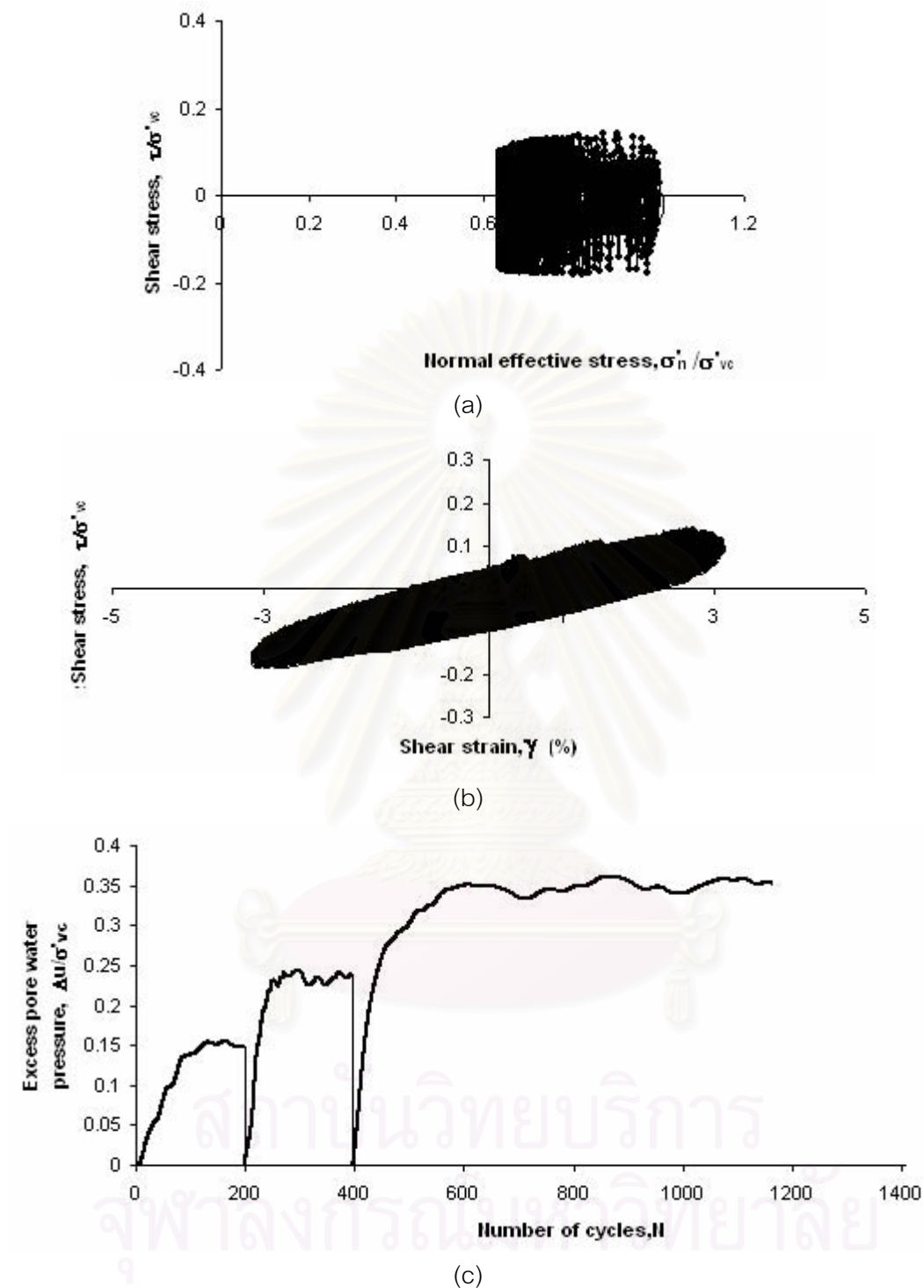
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ





รูปที่ 4.15.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN8

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

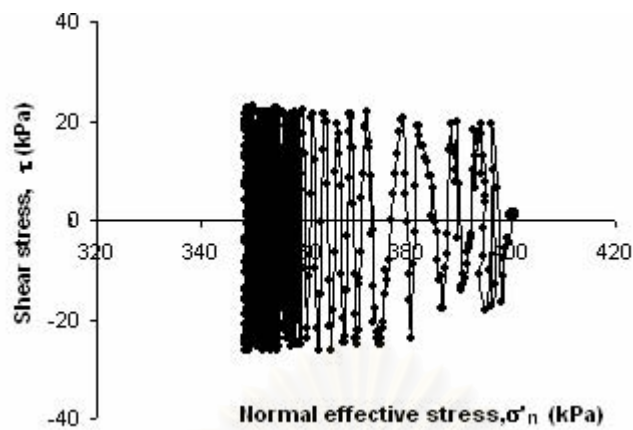


รูปที่ 4.15.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร  
ตัวอย่างทดสอบ CN8

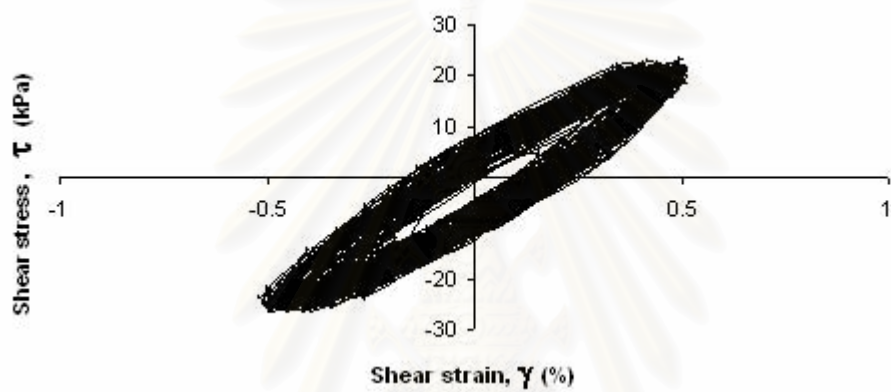
(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

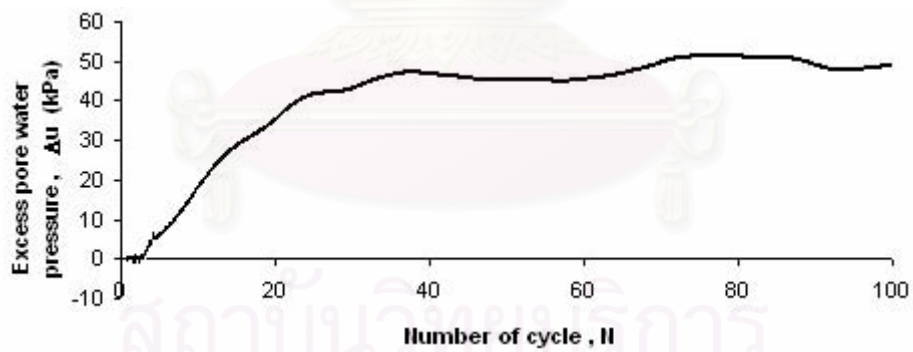
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



(b)



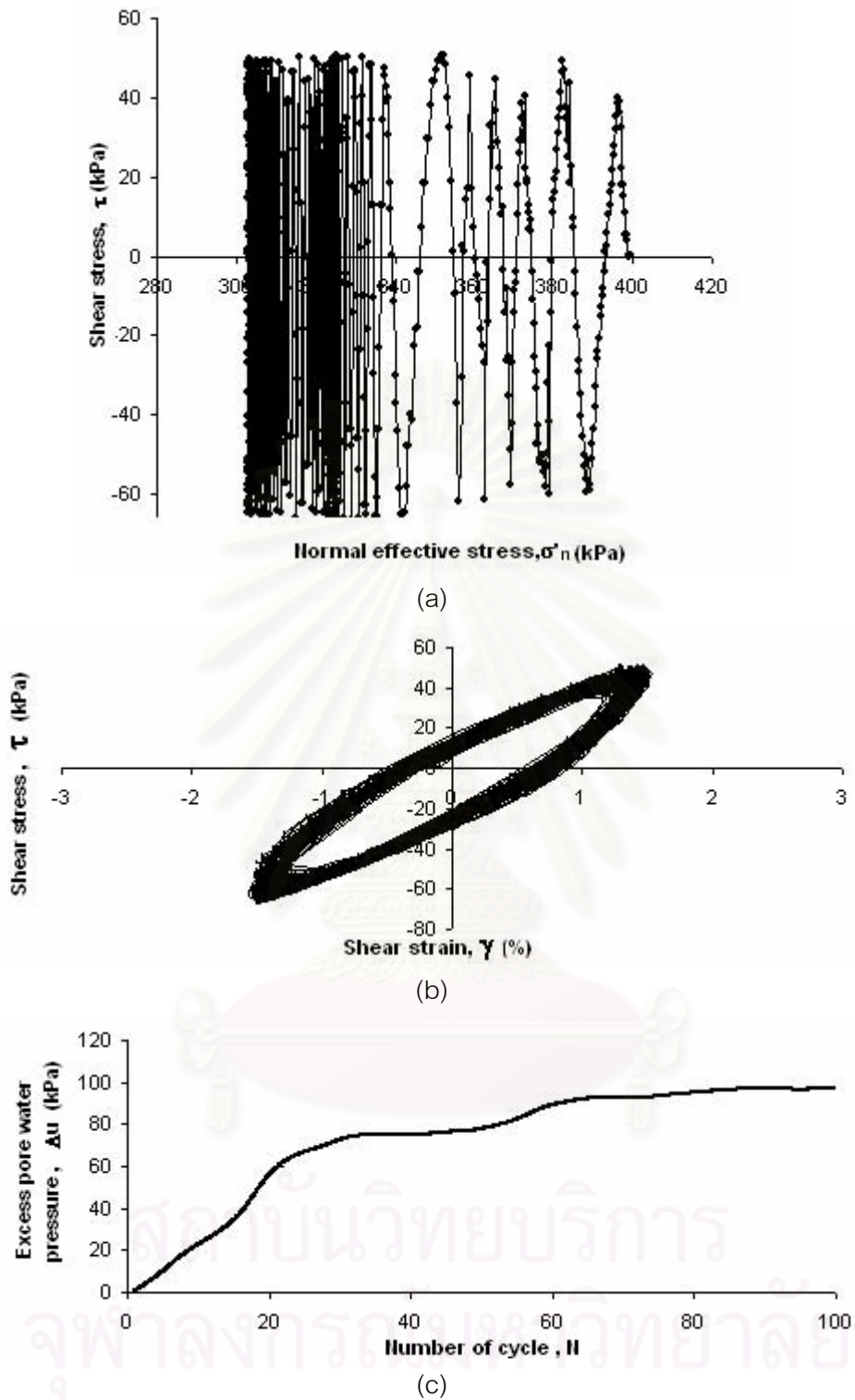
(c)

รูปที่ 4.16.1 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN9 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 0.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

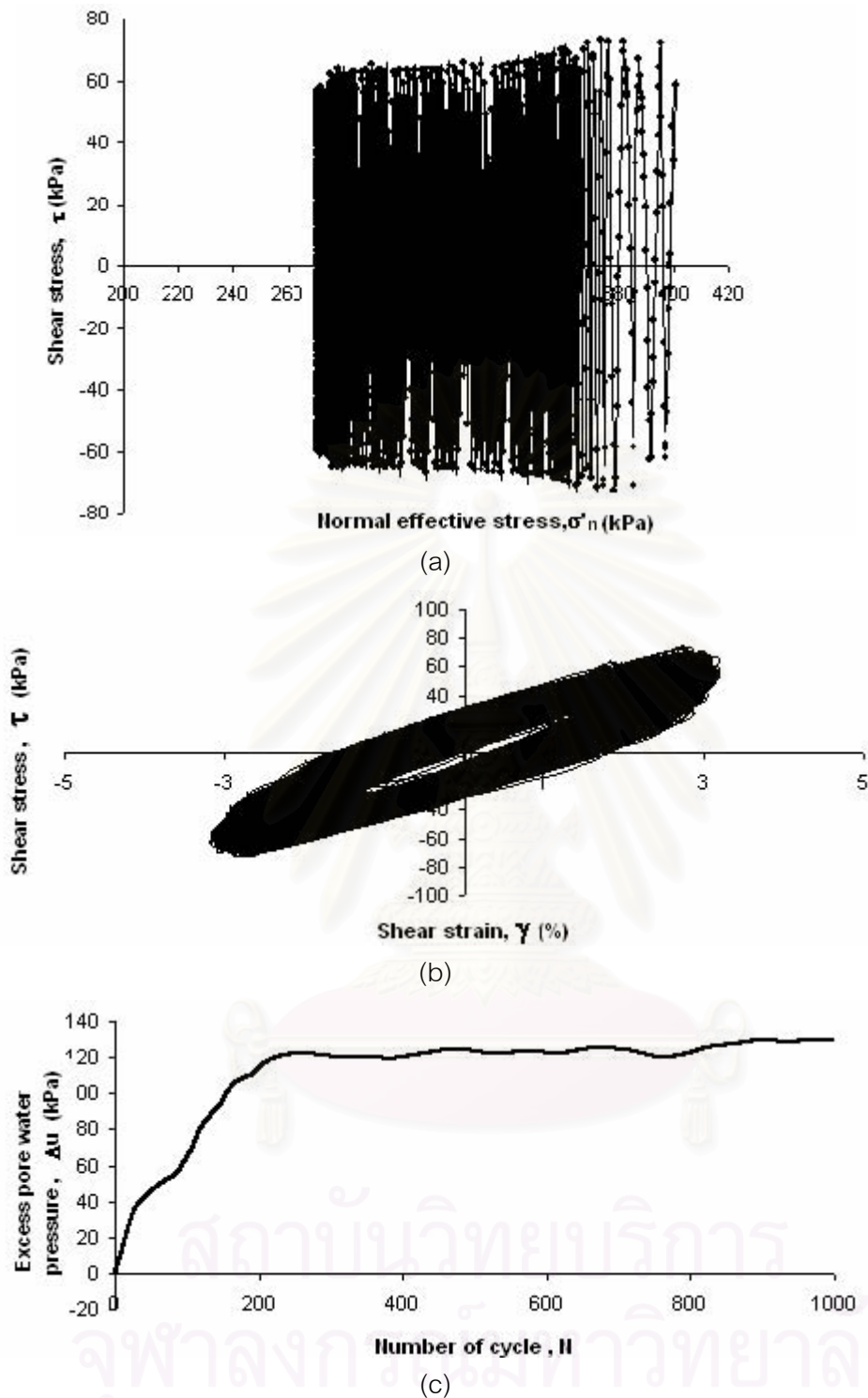


รูปที่ 4.16.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN9 ที่ความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 1.5\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



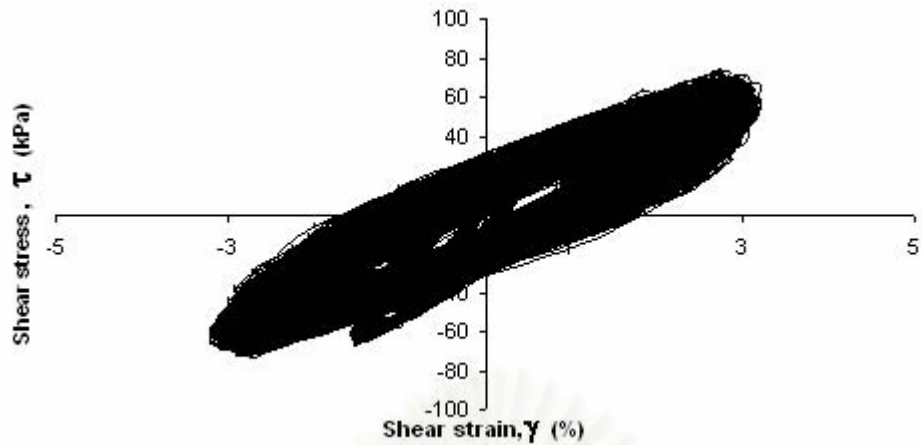
รูปที่ 4.16.3 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ

CN9 ที่แอมพลิจูดของความเครียดเฉือนเท่ากับ  $\pm 3\%$

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

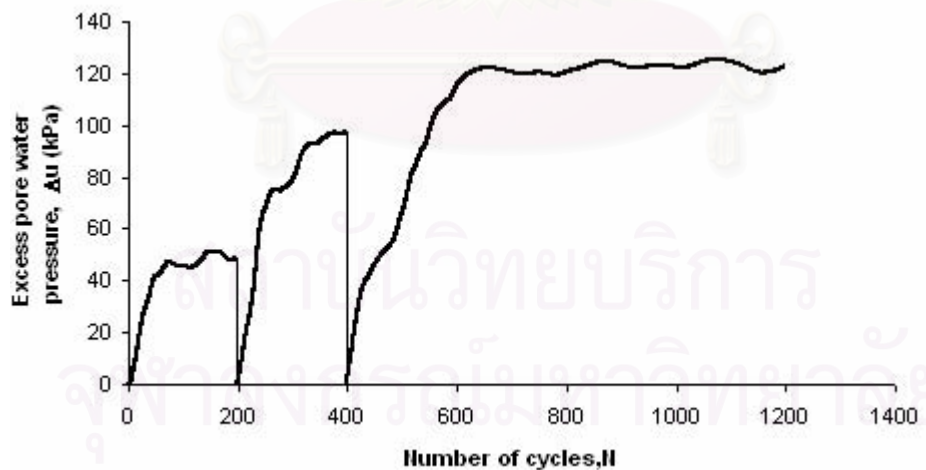
(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



(b)

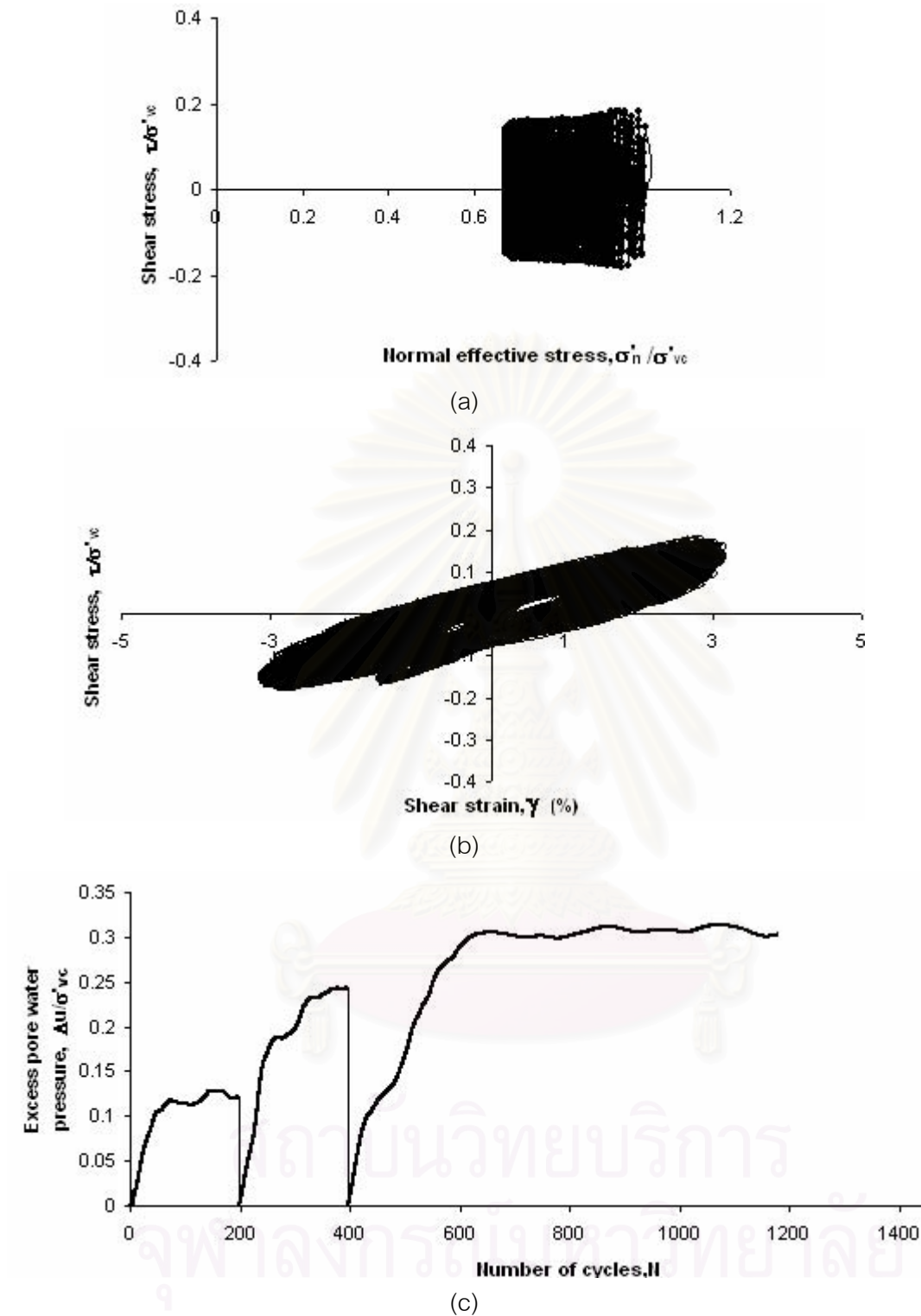


(c)

รูปที่ 4.16.4 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร ตัวอย่างทดสอบ CN9

- (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน
- (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับกับจำนวนรอบของแรงกระทำ
- (c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ





รูปที่ 4.16.5 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร

ตัวอย่างทดสอบ CN9

(a) ทางเดินของความเค้นของการทดสอบ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(c) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ

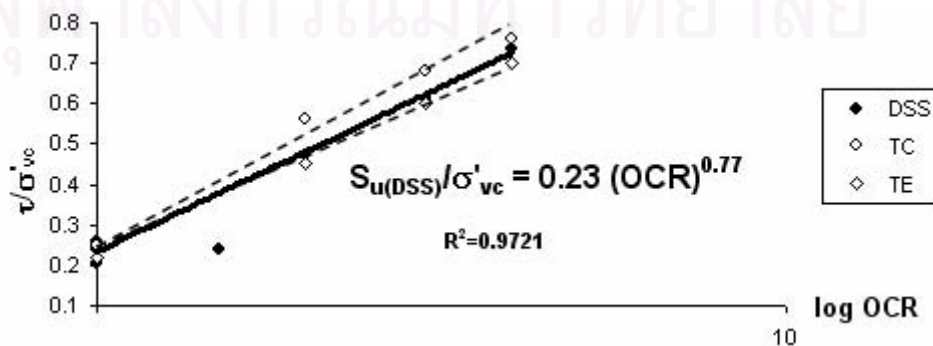
- ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของแรงกระทำแบบทางเดียว ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวกรุงเทพฯ เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และแรงดันน้ำส่วนเกินขณะทดสอบ
- ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของแรงกระทำแบบวัฏจักร ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวกรุงเทพฯ เช่น ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน อัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานและแรงดันน้ำส่วนเกินขณะทดสอบ

#### 5.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

การทดสอบแบบทางเดียวจะนำค่าแรงเฉือนสูงสุดที่วัดได้ ที่การอัดตัวแน่นเกินตัวแตกต่างกัน และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ในการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำตามวิธี SHANSEP ดังสมการที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 ซึ่งผลการทดสอบนั้น มีค่าอยู่ระหว่างการทดสอบการทดสอบแรงอัดสามแกนชนิดอัด (Compression) และชนิดดึง (Extension) (สุรฉัตร 2540)

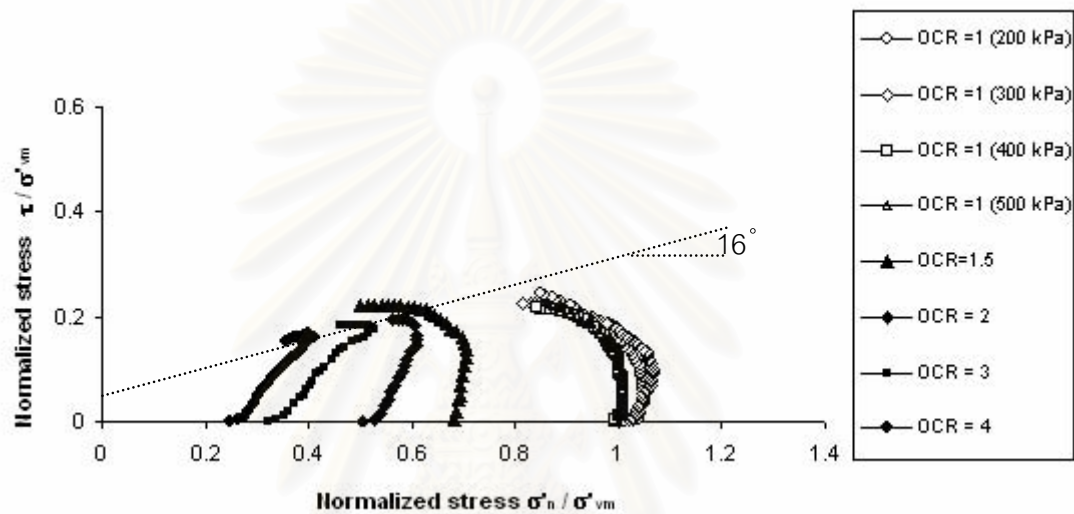
$$\frac{S_{u(DSS)}}{\sigma'_{vc}} = s(OCR)^m \quad (5.1)$$

เมื่อ  $s = 0.23$  และ  $m = 0.77$  โดยที่  $OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vc}}$

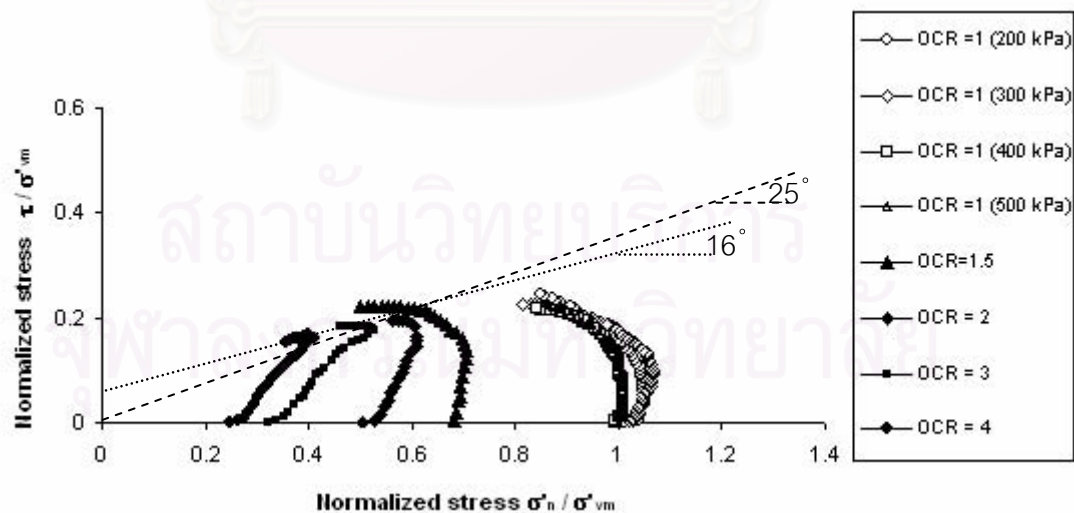


รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว (SHANSEP)

ผลการทดสอบนำมาสร้างกราฟของการ Normalized Stress Path และสร้างเส้นวิบัติตามสมมติฐานของมอร์-คูลอมป์ (Failure envelope) เพื่อหาค่า  $c'$  และ  $\phi'$  ดังรูปที่ 5.2 (a) โดยคำนวณค่า  $c'=33.35$  kPa  $\phi' = 16^\circ$  ส่วนตัวอย่างทดสอบแบบการอัดตัวแน่นปกติทำการสร้างเส้นวิบัติ ( $K_f$ -line) โดยมีการประมาณค่าทางเดินของความเค้นเพิ่มเติม เนื่องจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบแบบการอัดตัวแน่นปกติที่ทำการเจือจางจนกระทั่งความเครียดเฉือนมีค่าเท่ากับ 20% ตัวอย่างทดสอบยังไม่ถึงจุดวิบัติ ดังรูปที่ 5.2 (b) ซึ่งสามารถประมาณค่า  $\phi_{NC} = 25^\circ$



(a)

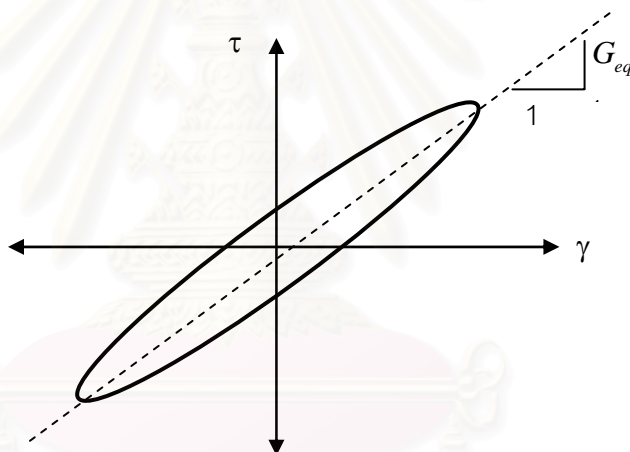


(b)

รูปที่ 5.2 Normalized Stress Path ของการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

### 5.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวงจักร

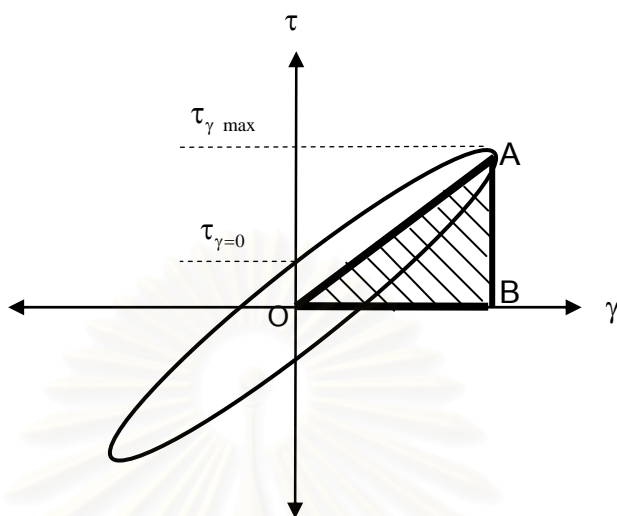
การทดสอบแบบวงจักรทำการศึกษาผลของการเพิ่มระดับแอมพลิจูดของความเครียดและจำนวนรอบของแรงกระทำและความถี่ที่มีอิทธิพลต่อโมดูลัสของความเค้นเฉือน อัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานและแรงดันน้ำส่วนเกิน โดยในการคำนวณค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนจะใช้การคำนวณแบบเฉลี่ย ( $G_{eq}$ ) คือค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนเฉลี่ยในหนึ่งรอบของแรงกระทำ ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้ ขั้นตอนแรกนำผลของค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนของการทดสอบในหนึ่งรอบของแรงกระทำนำมาสร้างวงฮิสเทอรีซิสดังรูปที่ 5.3 จากนั้นลากเส้นผ่านระหว่างจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของวงฮิสเทอรีซิส โดยที่เส้นตัดนี้ผ่านจุดศูนย์กลางของวงฮิสเทอรีซิสด้วย และคำนวณหาความชันของเส้นนี้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนแบบเฉลี่ย



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการคำนวณค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนแบบเฉลี่ย

ส่วนการคำนวณอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน สามารถคำนวณได้จากการสูญเสียพลังงานในระหว่างกระทำแรงเฉือนซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกนำผลของค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนของการทดสอบในหนึ่งรอบของแรงกระทำนำมาสร้างวงฮิสเทอรีซิสดังรูปที่ 5.4 จากคำนวณการพื้นที่ของการสูญเสียพลังงานนั้นคือ สามเหลี่ยม AOB และพื้นที่ของการสะสมพลังงานนั้นคือ พื้นที่ทั้งหมดของวงฮิสเทอรีซิส และนำพื้นที่ทั้งสองมาคำนวณค่าอัตราส่วนของารกระจายตัวของพลังงานดังสมการที่ 2.7 ( $D = A_{Loop} / 4\pi A_{AOB}$ ) แต่การหาพื้นที่ของวงฮิสเทอรีซิสมีความยุ่งยากมาก ในงานวิจัยครั้งนี้จะคำนวณค่าอัตราส่วนของารกระจายตัวของพลังงานโดยการประมาณดังสมการที่ 2.8 ( $D = \tau_{\gamma=0} / 2\tau_{\gamma_{max}}$ ) ซึ่งมีการสมมุติความ

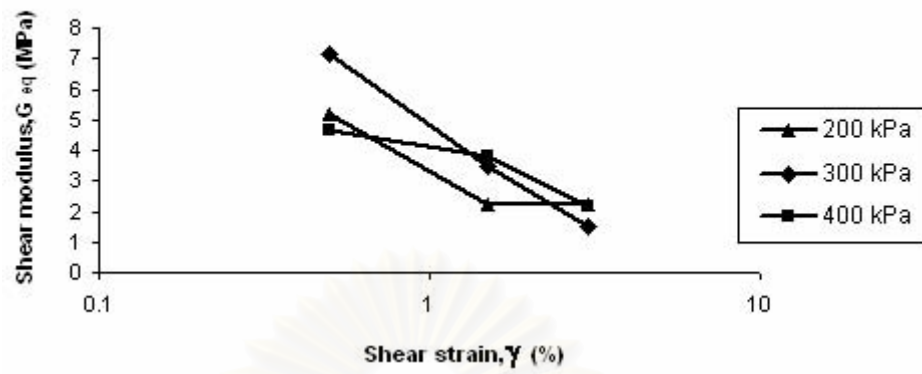
สัมพันธภาพของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนเป็นแบบวงรี



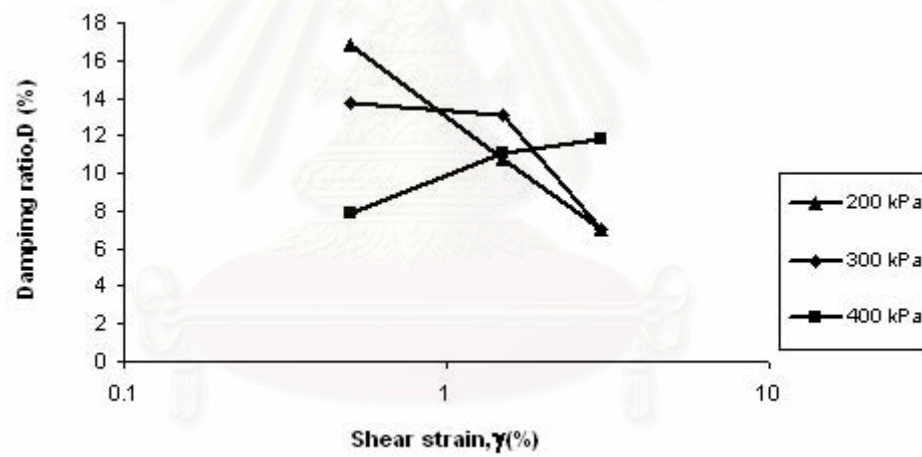
รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการคำนวณค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงาน

ผลการคำนวณค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนและค่าการกระจายตัวของพลังงาน นำมาสร้างกราฟเพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนและอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของความเครียดเฉือนดังรูปที่ 5.5 5.6 และ 5.7 จากนั้นนำมาสร้างกราฟเพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนและอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานที่มีอิทธิพลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของแรงกระทำ โดยการเปรียบเทียบที่ความเค้นในแนวตั้งแตกต่างกันแต่ความถี่เดียวกัน ดังรูปที่ 5.8 5.9 5.10 และที่ระดับความถี่แตกต่างกันแต่ความเค้นในแนวตั้งเดียวกันดังรูปที่ 5.11 5.12 5.13

สถาบันนวัตกรรมการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



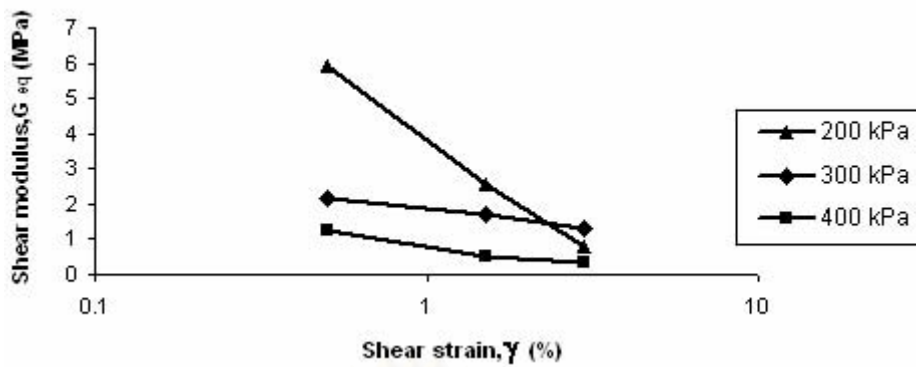
(b)

รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.1 Hz

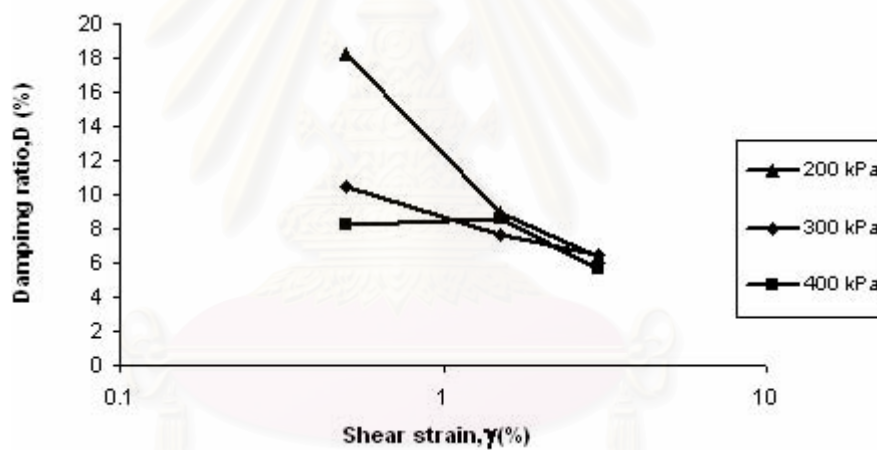
(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับความเครียดเฉือน





(a)

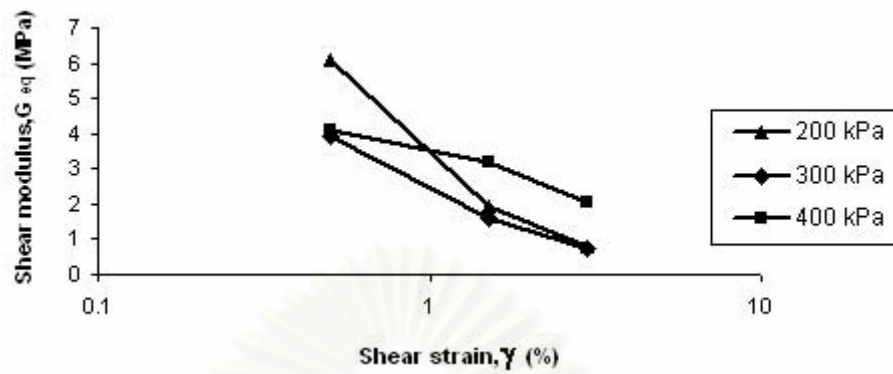


(b)

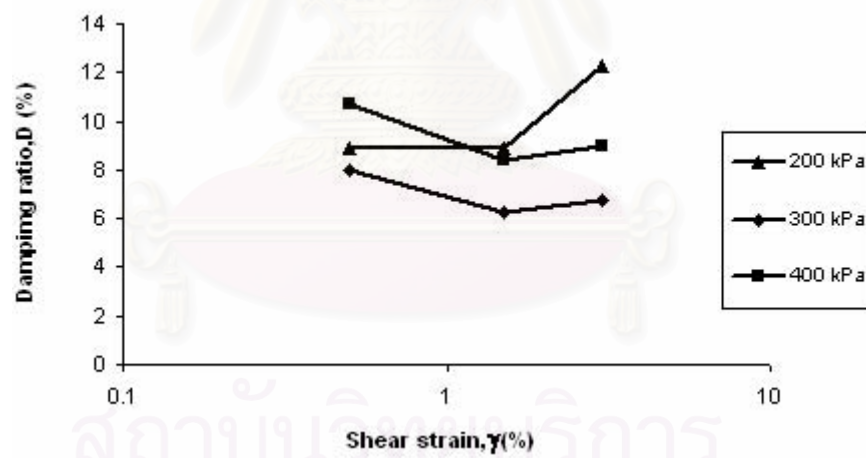
รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความถี่ 1 Hz

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับความเครียดเฉือน



(a)

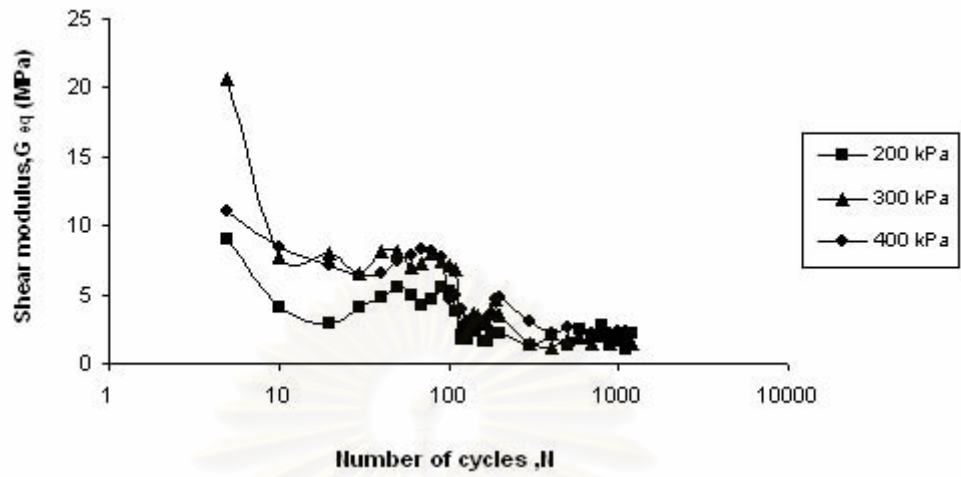


(b)

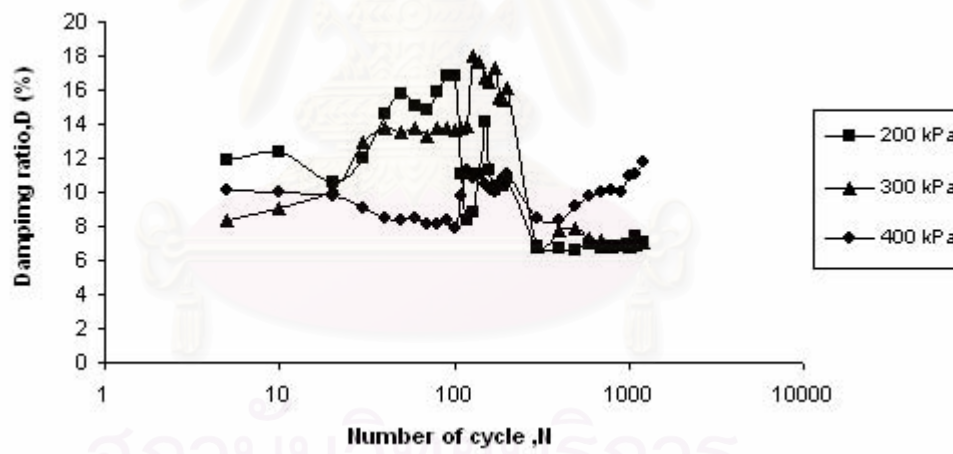
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความถี่ 5 Hz

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือน

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับความเครียดเฉือน

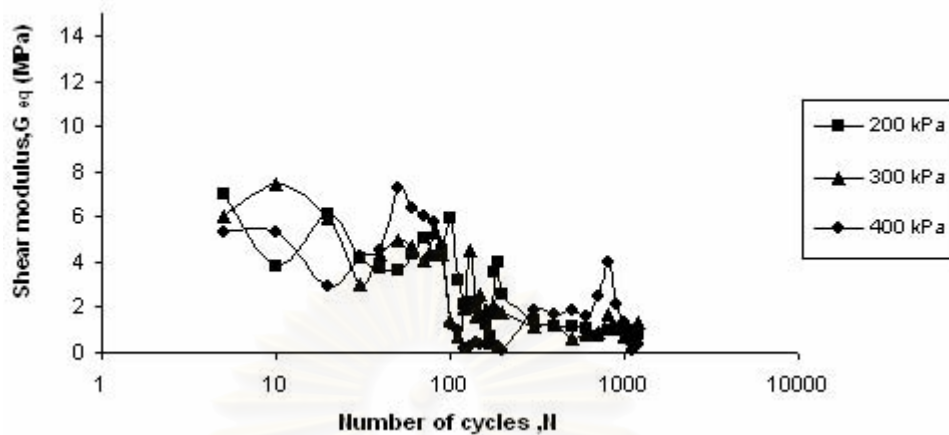


(a)

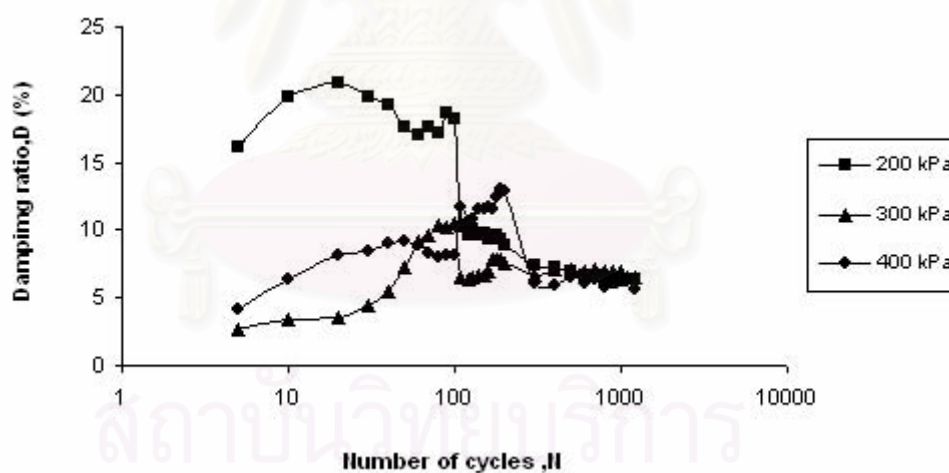


(b)

รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความถี่ 0.1Hz  
 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับจำนวนรอบของแรงกระทำ  
 (b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)

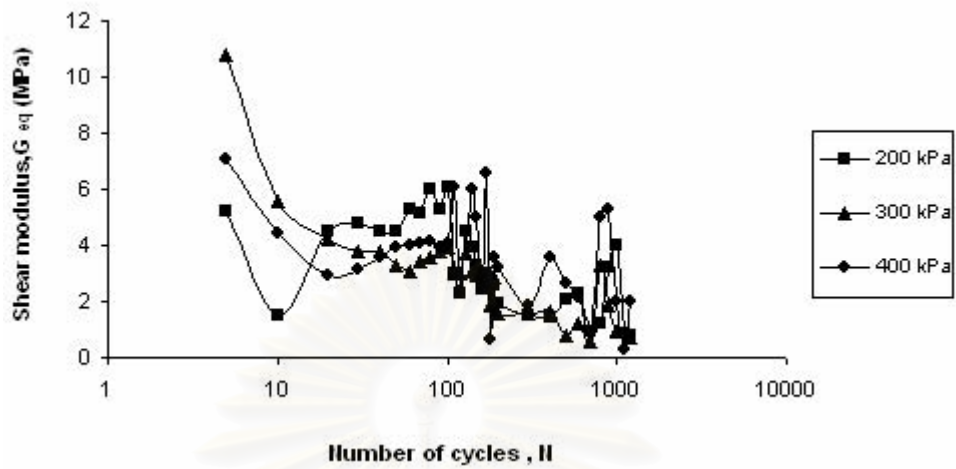


(b)

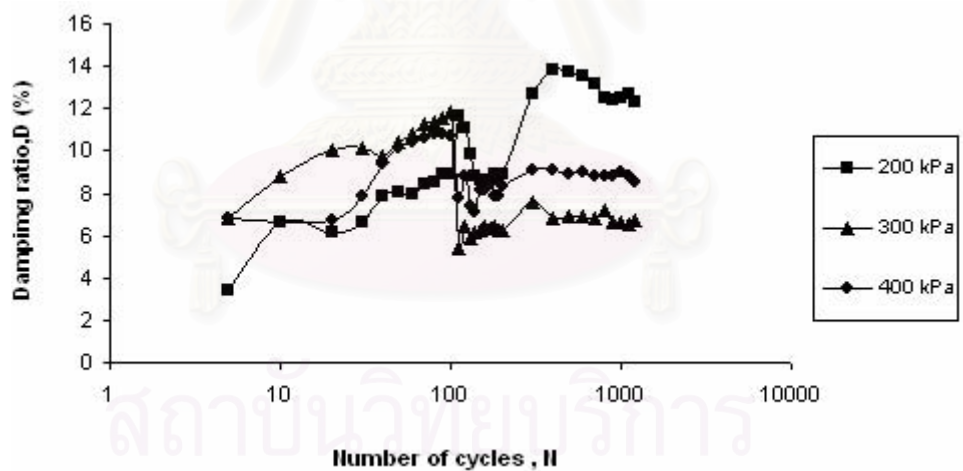
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความถี่ 1 Hz

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)

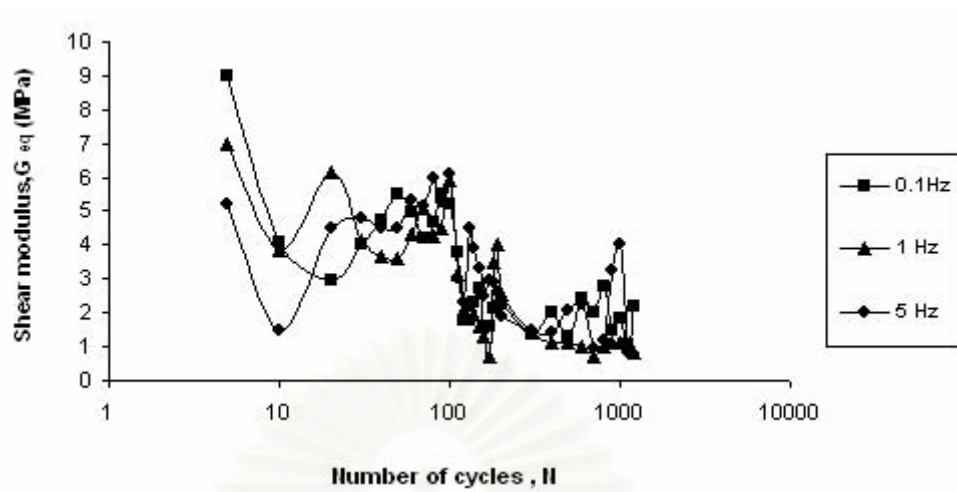


(b)

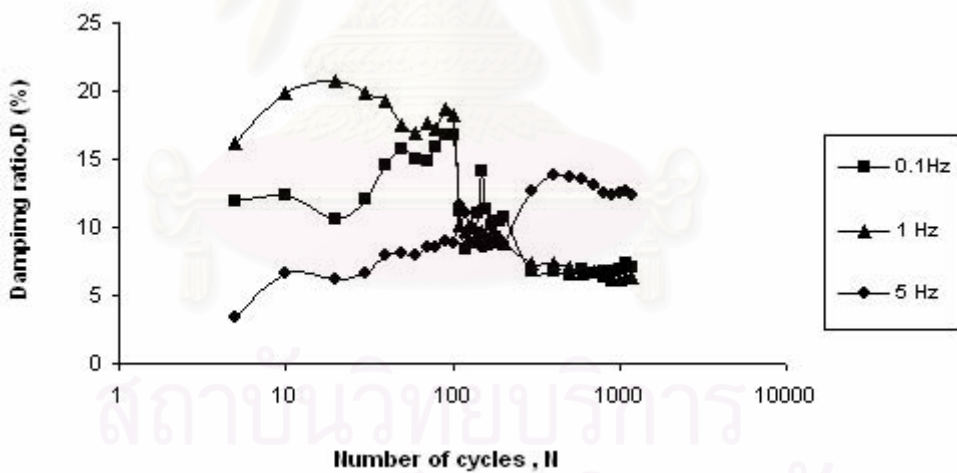
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความถี่ 5 Hz

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



(b)

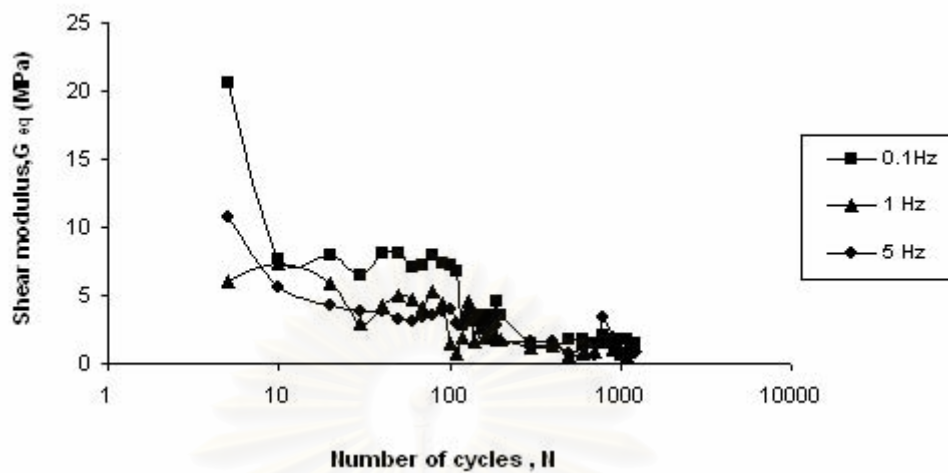
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความเค้น

สูงสุดเท่ากับ 200 kPa

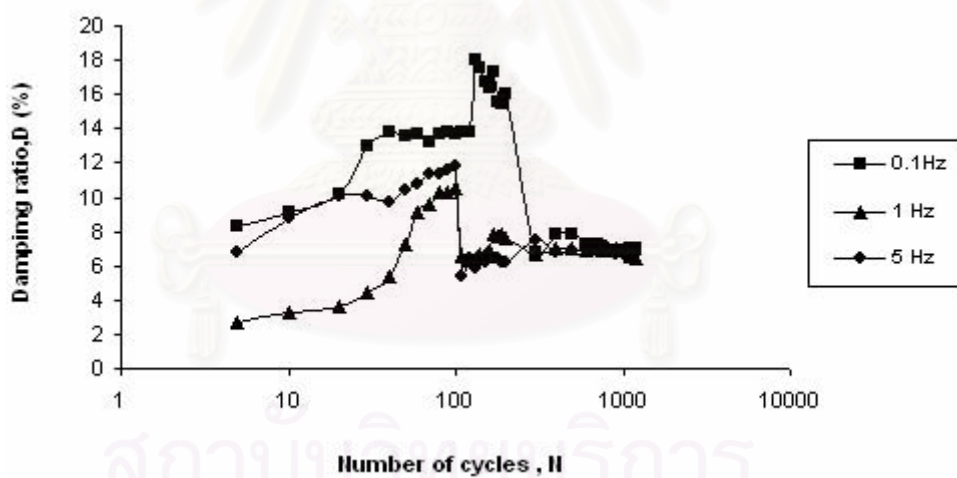
(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับจำนวนรอบของแรงกระทำ





(a)



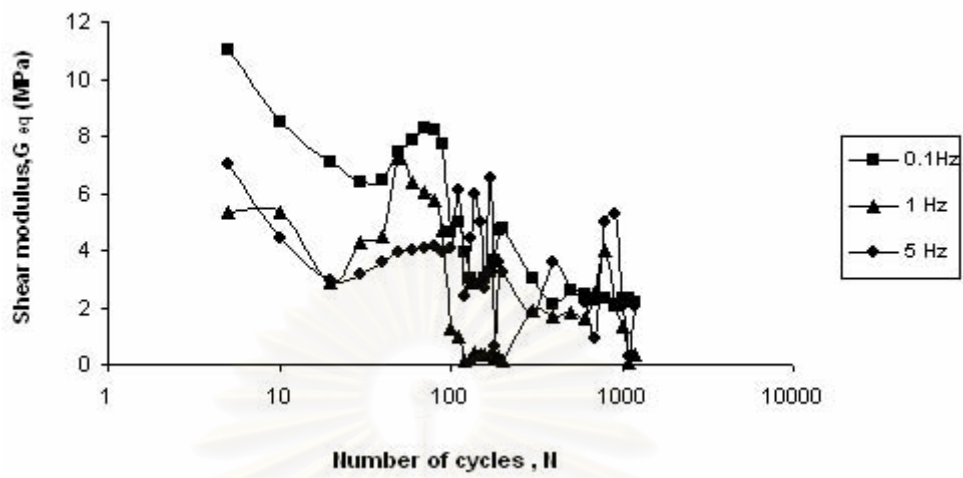
(b)

รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความเค้น

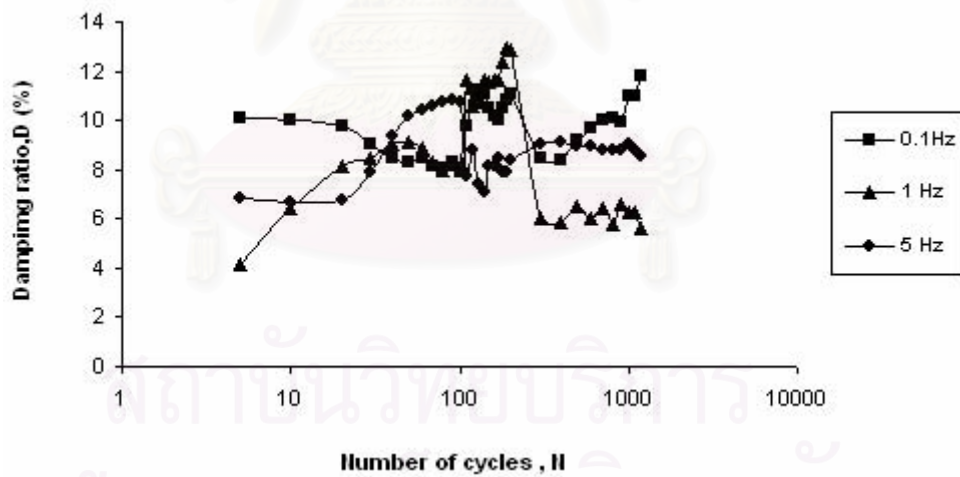
สูงสุดเท่ากับ 300 kPa

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับค่าจำนวนรอบของแรงกระทำ



(a)



(b)

รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักรที่ความเค้น

สูงสุดเท่ากับ 400 kPa

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับจำนวนรอบของแรงกระทำ

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงกระทำแบบทางเดียวและแบบวงจักรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯโดยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ซึ่งสามารถจำลองระนาบการวิบัติที่สอดคล้องกับการวิบัติในธรรมชาติได้

#### 6.1 สรุปตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบเป็นตัวอย่างทดสอบของดินเหนียวอ่อนในธรรมชาติ ซึ่งจัดเก็บมาจากบริเวณสถานีรถไฟฟ้าอ่อนนุช ที่ระดับความลึก 2.5-15.5 เมตร ด้วยวิธีการฉีดล้างและเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกบาง 3 นิ้ว จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบไปทำการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน การอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติและการทดสอบแรงเฉือนอย่างง่าย

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย จะนำตัวอย่างทดสอบมาทำการอัดตัวคายน้ำ โดยการเพิ่มน้ำหนักกดทับ ( $\sigma'_{vc}$ ) ให้มีค่ามากกว่า  $1.5\sigma'_p$  เพื่อแน่ใจว่าตัวอย่างทดสอบเป็นการเตรียมตัวอย่างทดสอบแบบการอัดตัวแน่นปกติ สำหรับการเตรียมตัวอย่างแบบการอัดตัวแน่นเกินตัวหลังจากการเพิ่มน้ำหนักกดทับมากกว่า  $1.5\sigma'_p$  จะทำการถอดน้ำหนักกดทับออกเพื่อให้ได้อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวตามต้องการ

#### 6.2 สรุปผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

การทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว สามารถนำผลการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ในการประมาณกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ คือ  $s_{u(DSS)} / \sigma'_{vc} = 0.23(OCR)^{0.77}$  และคำนวณพารามิเตอร์ของกำลังตามทฤษฎีการวิบัติของ มอร์-คูลอมป์ ซึ่งได้ค่าดังนี้  $c' = 33.35$  kPa และ  $\phi' = 16^\circ$

สำหรับการทดสอบในตัวอย่างแบบการอัดตัวแน่นปกติสามารถประมาณเส้นการวิบัติ ( $K_f$ -line) โดยต้องทำการประมาณค่าทางเดินของความเค้นเพิ่มเติม เนื่องจากดินเหนียวกรุงเทพฯมีความเป็นพลาสติกสูงมาก การทดสอบของตัวอย่างทดสอบแบบการอัดตัวแน่นปกติทำการเฉือนจนกระทั่งความเครียดเฉือนมีค่าเท่ากับ 20% ตัวอย่างทดสอบยังไม่ถึงจุดวิบัติ ประกอบกับข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบเอง แผ่นยางเสริมลวดเหล็กที่หุ้มตัวอย่างทดสอบอาจ

เกิดความเสียหายหากทดสอบที่ความเครียดเฉือนสูงกว่านี้ จึงทำให้มีการประมาณค่าเส้นทางเดินของความเค้นเพิ่มไปจนกระทั่งสัมผัสกับเส้นวิบัติโดยสมมุติว่าค่า  $\phi_{NC} = 25^\circ$

### 6.3 สรุปผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบวัฏจักร

การทดสอบแบบวัฏจักรทำการศึกษาผลของระดับแอมพลิจูดของความเครียด จำนวนรอบของแรงกระทำและความถี่ที่มีอิทธิพลต่อโมดูลัสของความเค้นเฉือน อัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานและแรงดันน้ำส่วนเกิน จากนั้นนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนแบบวัฏจักร (สุพจน์ 2549) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบการควบคุมความเค้นเฉือน เพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องของผลการทดสอบที่ตัวอย่างดินชนิดเดียวกันเครื่องมือการทดสอบแตกต่างกัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

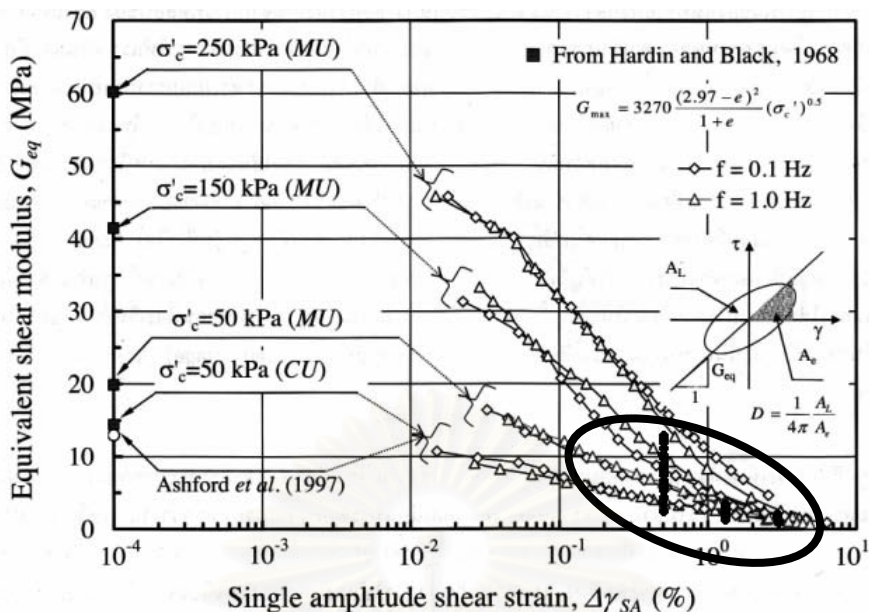
1. ผลกระทบของจำนวนรอบของแรงกระทำ (N) มีอิทธิพลต่อแรงดันน้ำส่วนเกิน โดยเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำเพิ่ม มีผลให้แรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบและเริ่มเข้าสู่สภาวะ steady state จนมีค่าคงที่
2. ผลของการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแนวตั้ง ( $\sigma'_{vc}$ ) มีอิทธิพลทำให้ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และอัตราส่วนของการกระจายตัวของพลังงานมีค่าลดลงเล็กน้อย
3. ผลของการเพิ่มของแอมพลิจูดความเครียดเฉือนขณะทำการทดสอบทำให้ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือน และอัตราส่วนของการกระจายตัวของพลังงานลดลง
4. ผลกระทบของจำนวนรอบของแรงกระทำ ทำให้ค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนลดลงและอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานลดลงเมื่อจำนวนรอบของแรงกระทำเพิ่มขึ้น
5. ผลกระทบของความถี่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนน้อยมาก แต่ทำให้อัตราส่วนของการกระจายตัวของพลังงานเพิ่มขึ้นที่ระดับความถี่สูง
6. การเปรียบเทียบผลกับการทดสอบแรงอัดสามแกน
  - ผลของค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนจากการทดสอบแรงอัดสามแกนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการทดสอบของเครื่องมือทดสอบแรงทางตรงอย่างง่ายยังอยู่ในช่วงของผลการทดสอบแรงอัดสามแกนดังรูปที่ 6.1 (a) และ รูปที่ 6.2 (a)
  - ผลของอัตราส่วนของการกระจายตัวของพลังงานจากการทดสอบแรงอัดสามแกนมีค่ามากกว่าการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายในการทดสอบ แต่ค่ายังใกล้เคียงกันดังรูปที่ 6.1 (b) และรูปที่ 6.2 (b)

7. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำแบบวัฏจักรด้วยการควบคุมปริมาตรของตัวอย่างทดสอบให้มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ จะให้ค่าอาจไม่ถูกต้องนักสำหรับค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน เนื่องจากการทดสอบที่ระดับความถี่สูงยังไม่สามารถอธิบายความถูกต้องของพฤติกรรมแรงดันน้ำส่วนเกินในตัวอย่างทดสอบได้ สมมุติฐานของเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการวัดแรงดันน้ำส่วนเกินอาจจะยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมทางพลศาสตร์

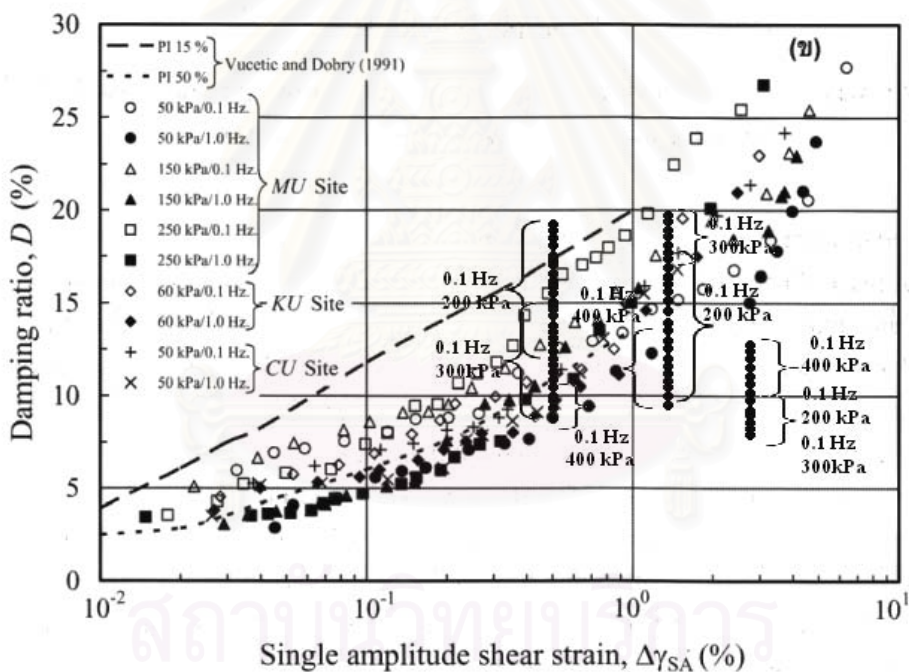
#### 6.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

1. ศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยเครื่องเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่ระดับความถี่น้อยกว่า 0.1Hz เพราะว่าการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายน่าจะเหมาะสมกับการทดสอบที่ความถี่ต่ำ
2. ศึกษาและพัฒนาระบบการตรวจวัดแรงดันน้ำส่วนเกินที่มีความละเอียดและถูกต้อง
3. ศึกษาและทดสอบถึงผลกระทบของแรงกระทำแบบวัฏจักรที่มีผลกระทบต่อตัวอย่างที่ดินทรายเพื่อศึกษาการรกลายสภาพเป็นของเหลวของทราย





(a)



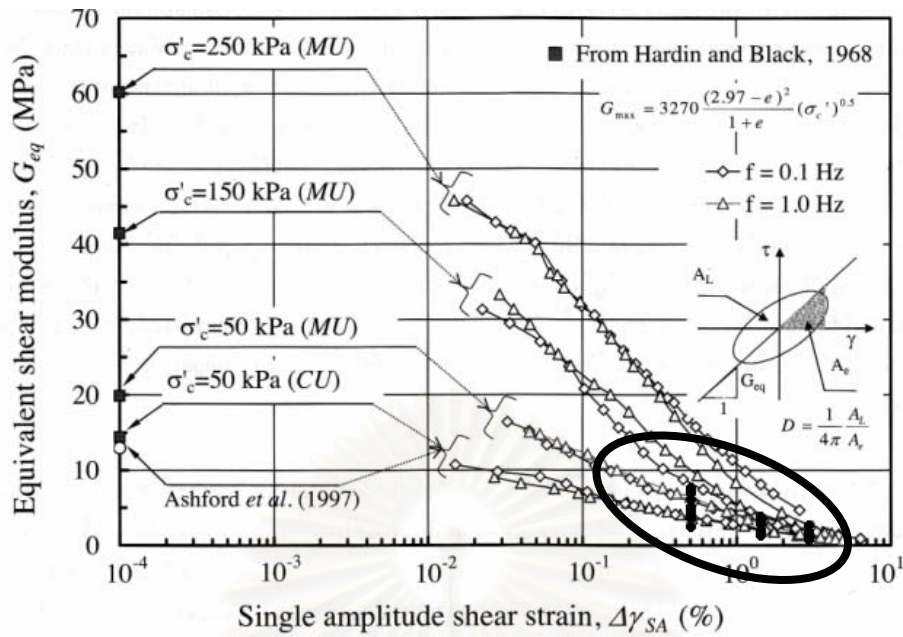
(b)

รูปที่ 6.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแรงอัดสามแกน (สุพจน์ 2549) กับการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ที่ความถี่เท่ากับ 0.1 Hz

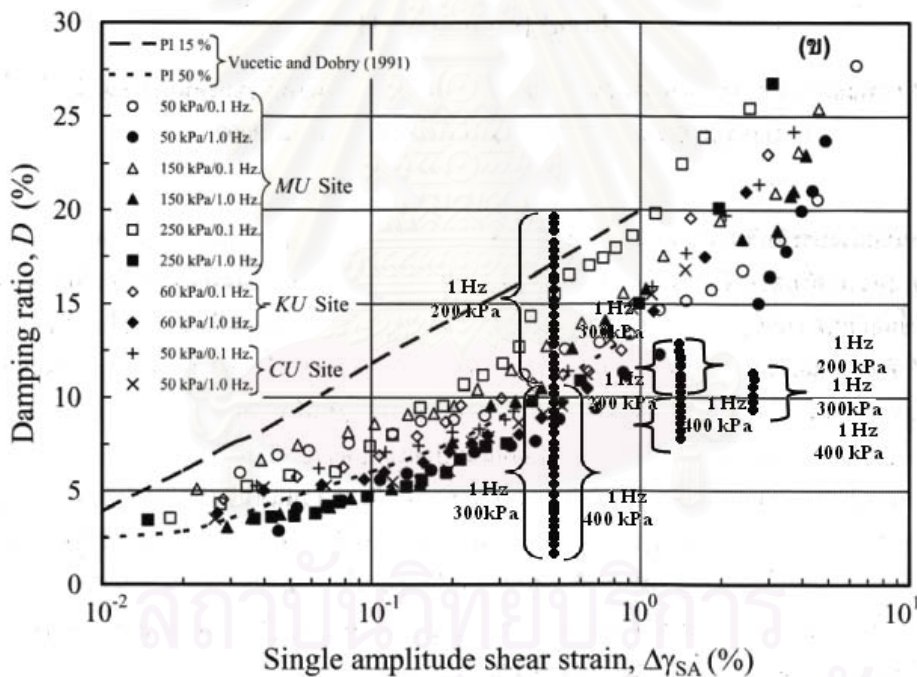
(a) การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนแบบเฉลี่ยกับค่าความเครียดเฉือน

(b) การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับค่าความเครียดเฉือน





(a)



(b)

รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบแรงอัดสามแกน (สุพจน์ 2549) กับการ

ทดสอบทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ที่ความถี่เท่ากับ 1 Hz

(a) การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของความเค้นเฉือนแบบเฉลี่ยกับค่าความเครียดเฉือน

(b) การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของพลังงานกับค่าความเครียดเฉือน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- รัชชชัย สังขะวิไล. การทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายในดินเหนียวกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- พิพัฒน์ ทองฉิน. ผลกระทบของอัตราเร็วของแรงกระทำแบบวัฏจักรต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546
- สุพจน์ เตชวรสินสกุล. พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์, กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- สถาพร คูวิจิตรจารุ. ทดลองปลูที่กลศาสตร์, กรุงเทพฯ: ไลบรารีน่าย, 2541
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. วิศวกรรมปลูที่. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2540

### ภาษาอังกฤษ

- ASTM Standard. Standard Test Method for 1-D Consolidation Properties of Soils, Designation: D 2435 – 80, in Annual Book of ASTM Standards, 04.08: 378-384, 1980.
- ASTM Standard. Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils, Designation: D 6528 – 00, in Annual Book of ASTM Standards.04.08, 2000.
- Badet, and Jean-Pierre. Experimental Soil Mechanics. LA: Prentice hall, 1997.
- Bjerrum L., and Landva A. Direct Simple Shear Tests on Norwegian Quick Clay. Geotechnique, 16.01, 1966: 1-20.
- Bozorgnia Yousef and Bertero V.Vitelmo. Earthquake Engineering. USA: CRC Press ,2004
- Burland E.W., and Tsai C.T. Dissipation of Pore Pressure During One Dimensional Consolidation on an Artificial Marine Clay, AIT Research Report No. 40, 1973.
- Das.Braja M.Principal of Soil Dynamic .PWS-KENT Publishing Company:BOSTON. 1993.
- DeGroot D.J., Germaine J.T. and Ladd C.C., (1994). Effect of Non-uniform Stresses

- on Measured DSS Stress-Strain Behavior. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(5): 892–912.
- DeGroot D.J., Ladd C.C., and Germaine J.T. Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils, Research Report No. R92-18, Center for Scientific Excellence in Offshore Engineering, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge: MA, 1992.
- Kramer L. Steven. Geotechnical Earthquake Engineering, USA: Prentice hall, 1996.
- Ladd C.C., and Edgers L. Consolidated -Undrained Direct-Simple Shear Tests on Saturated Clays. MIT Research Report No. R72-82, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge: MA, 1972.
- Mitchell, J.K. Fundamental of Soil Behavior. 2<sup>nd</sup>, USA: John Wiley & Sons, 1993.
- Teachavorasinskun.S.,Thongchim P., and Lukkunaprasit P. Shear Modulus and damping of soft Bangkok Clays. Canadian Geotechnical journal, 39: 2002: 1201- 1208.
- Teachavorasinskun S., Thongchim P., and Lukkunaprasit,P. Stress Rate Effect on The Stiffness of a Soft Clay From Cyclic Compression and Extension Triaxial Tests. Geotechnique, 52(1), 2002: 51-54.
- Teachavorasinskun S.,Thongchim P., and Lukkunaprasit P. Shear Modulus and Damping of a Clay During Undrained cyclic Loading. Geotechnique, 51(5), 2002: 467-470.

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนิรุจน์ ก้อนคง เกิดวันที่ 23 เมษายน พ.ศ.2525 ที่จังหวัดพิษณุโลก และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมชลประทาน (โยธา, กรมชลประทาน) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาด้าน ปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย