

ผลกระทบของแรงซ้ำซากต่อพฤติกรรมการรับน้ำนักแบกทานของดินเหนียว



นายฉัตรชัย ลีวรพันธ์ชัย

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0029-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF REPEATING LOADS ON SHEAR STRENGTH OF CLAY



MR. CHATCHAI LEEVORAPHUNCHAI

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0028-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของแรงซ้ำซากต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบกทานของดิน  
เหนียว

โดย

นายฉัตรชัย ลีวรพันธ์ชัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)

ฉัตรชัย ลีวรพันธ์ชัย : ผลกระทบของแรงซ้ำซากต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบกทานของดินเหนียว.

(EFFECT OF REPEATING LOADS ON SHEAR STRENGTH OF CLAY) อ. ที่ปรึกษา :

ผศ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 71 หน้า. ISBN 974-17-0029-6.

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาพฤติกรรมของดินภายใต้การกระทำ ของแรงแบบซ้ำซาก และภายใต้การลดแรงที่มีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยทำการทดสอบจากดินเหนียวกรุงเทพฯที่บริเวณ สนามฟุตบอลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งทำการเก็บตัวอย่างดินที่ความลึก 7.50-8.50 เมตร และ 10.50-11.50 เมตร จากนั้นทำการทดสอบในเครื่องอัดแบบสามแกนโดยทำการพัฒนาขึ้นมาเองบางส่วน ในขั้นตอนทำการทดสอบแต่ละตัวอย่างทำการลดแรงจำนวน 4 รอบจากนั้นจึงทำการให้แรงจน ตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยในช่วงที่ทำการลดแรงที่ระดับความเค้น ปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วทำการให้ แรงเข้าไปใหม่จนถึงระดับความเค้นที่ต้องการอีก หลังจากนั้นทำการลดแรงอีกครั้ง ทำการทดสอบแบบ นี้ ไปอีก 4-5 รอบ เพื่อทำการสังเกตพฤติกรรมของดินจากการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในดินและ การเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน

จากผลการทดสอบพบว่าหลังจากที่มีการให้แรงซ้ำซาก 4 รอบ ตัวอย่างดินจะยังไม่เปลี่ยนคุณสมบัติในการรับแรงเฉือนและจากการศึกษาพบว่าจะต้องมีการให้แรงซ้ำซากหลายๆรอบเพื่อที่จะให้ตัวอย่างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการรับแรงเฉือนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับ ความเค้นของการลดแรงด้วย และในการปล่อยให้ตัวอย่างดินให้ลดแรงลงทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง พบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมของการเปลี่ยนค่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น ในทุกครั้งที่มีการให้แรงกระทำอีกครั้งนั้นจะมีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกันกับที่สังเกตพบในการให้แรงในครั้งแรก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมโยธา \_\_\_\_\_ ลายมือชื่อนิสิต \_\_\_\_\_

สาขาวิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมโยธา \_\_\_\_\_ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา \_\_\_\_\_ 2544 \_\_\_\_\_

# # 4270263521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: REPEATED LOADING / UNDRAINED SHEAR STRENGTH / MODULUS OF ELASTICITY

CHATCHAI LEEVORAPHUNCHAI : EFFECT OF REPEATING LOADS ON  
SHEAR STRENGTH OF CLAY THESIS ADVISOR: ASST.PROF.DR.SUPOT  
TEACHAVORASINSKUN, 71 pp. ISBN 974-17-0029-6.

This research aim to study the behavior of soils under repeated loadings condition and included time response. The clay samples were collected within Bangkok at Chulalongkorn University at the depth 7.50-8.50 m. and 10.50-1.50 m.

The experiments were tested in a Triaxial apparatus. Each sample were unloaded for four rounds and after the last cycle was applied the sample was tested to failure. Before the reloading of each cycle was applied, the clay sample was kept under constant total stress for 24 hours. The research aims to observe the behavior of soil by monitoring the change of pore water pressure, undrained shear strength and Young's modulus of soil sample.

It was found that after four rounds of repeated loading were applied, the undrained shear strength of soil sample remained the same as that of an intact sample. The Young's modulus characteristic (degradation curve) at each reloading step was almost similar to that obtained during virgin loading.

Department Civil Engineering Student's signature \_\_\_\_\_

Field of study \_\_\_\_\_ Advisor's signature \_\_\_\_\_

Academic year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณ คุณชัยรัตน์ ระตีพูน, คุณยุทธนา กู้โรจนวงศ์, คุณ อภิชาติ อัครเสนา, คุณ ธีรินทร์ อมรวิทย์รักษ์ และเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดมา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนผู้เขียนจนได้สำเร็จการศึกษา

ฉัตรชัย ลีวรพันธ์ชัย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและผลงานที่ผ่านมา.....	4
2.1 แนวความคิดและสมมุติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 Stress Parameters.....	4
2.1.2 Strain Parameters .....	5
2.1.3 Axial Strain ของตัวอย่างที่ทำการทดสอบในเครื่อง Triaxial .....	5
2.1.4 Loading และ Unloading.....	6
2.1.5 SKEMPTON 's Pore Pressure Coefficients.....	6
2.1.6 Consolidation of Soils .....	6
2.1.7 Rate of Compression .....	7
2.1.7.1 Taylor's square root of time fitting method .....	8
2.1.7.2 Casagrande's logarithm of time fitting method .....	8
2.1.7.3 Inflection Point Method ( Cour , 1971 ).....	8
2.2 พฤติกรรมของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวและความแข็งแรงของดินภายใต้ของการให้แรง ....	9
2.2.1 Shear Strength.....	9
2.2.2 พฤติกรรมของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ.....	11

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3 พฤติกรรมของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวและกำลังรับแรงเฉือนของดินภายใต้การกระทำของ แรงแบบ Repeated Loading.....	12
2.3.1 การทดสอบกระทำของแรงซ้ำซากกับตัวอย่างดินสภาวะแบบ กึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำและมีการบดอัด .....	12
2.3.2 การทดสอบแรงแบบซ้ำซากกับตัวอย่างดินที่ไม่โดนรบกวนที่ อิ่มตัวด้วยน้ำ.....	14
2.4 ผลกระทบของแรงซ้ำซากกับการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ .....	18
2.5 Stress Relaxation .....	18
2.5.1 ผลกระทบที่เกิดจากการลดแรง.....	19
บทที่ 3 วิธีการและขั้นตอนในการวิจัย .....	22
3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างทดสอบ .....	22
3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน .....	22
3.1.2 การเจาะสำรวจและการเก็บตัวอย่าง .....	23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเครื่องทดสอบหลัก .....	23
3.3 การหาคุณสมบัติของดินด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น .....	27
3.4 วิธีการทดสอบ.....	27
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ .....	27
3.5.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ .....	27
3.5.2 ติดตั้งตัวอย่างดินกับชุดเครื่องทดสอบ.....	28
3.5.3 ขั้นตอนทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว (Saturation).....	28
3.5.4 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation).....	29
3.5.5 ขั้นตอนการ Apply Repeated Loading .....	29
3.5.6 นำตัวอย่างดินออกจากเซลล์ หลังจากการทดสอบเสร็จ .....	29



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 รายการคำนวณ.....	31
3.6.1 คุณสมบัติของตัวอย่างก่อนการทดสอบ.....	31
3.6.2 คุณสมบัติของตัวอย่างหลังการอัดตัวคายน้ำ.....	31
3.6.3 คุณสมบัติของตัวอย่างขณะทำการ Repeated Loading.....	32
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	33
4.1 ผลการทดสอบตัวอย่างดิน.....	34
4.1.1 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากหลาย ๆ รอบ จากตัวอย่างดินที่ ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร.....	34
4.1.2 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากในกรณีที่ใช้จำนวนรอบน้อยกว่า แต่มีการทิ้งให้แรงดันน้ำเกิดการระบายออก 24 ชั่วโมง.....	35
4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียว.....	37
4.2.1 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากในกรณีที่ใช้จำนวนรอบที่มาก ๆ.....	37
4.2.2 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากในกรณีที่ทำให้การลดแรงโดยที่มีการปล่อย ให้แรงดันน้ำเกิดการระบายออกก่อน 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการให้แรงใหม่.....	38
4.3 คุณสมบัติของดินทางกลศาสตร์จากการกระทำของแรงแบบซ้ำซาก.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	40
5.2 ข้อเสนอแนะในการทดสอบ.....	41
รายการอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก.....	43
— รูปประกอบบทที่ 4 และ 5.....	43
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	71

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	โปรแกรมการทดสอบ.....27
4.1	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวที่ระดับ ความลึก 7.50-8.50 เมตร.....33
4.2	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวที่ระดับ ความลึก 10.50-11.50 เมตร.....34
4.3	แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 7.50-8.50 เมตร ( $q$ , kPa ).....35
4.4	แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 7.50-8.50 เมตร ( $q^*$ , kPa ).....36
4.5	แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 10.50-11.50 เมตร ( $q$ , kPa ).....36
4.6	แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 10.50-11.50 เมตร ( $q^*$ , kPa ).....36
4.7	แสดงความดันน้ำในโพรงดินที่ความลึก 7.50-8.50 เมตร ( kPa ).....37
4.8	แสดงความดันน้ำในโพรงดินที่ความลึก 10.50-11.50 เมตร ( kPa ).....37

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงรูปตัดชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศเหนือไปทิศใต้ (วสท 2520).....	3
1.2 แสดงรูปตัดชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก (วสท 2520) .....	3
2.1 การทดสอบ Stress Relaxation.....	19
2.2 ความสัมพันธ์ของความเค้นและหน่วยแรง .....	20
2.3 อิทธิพลจากการลดแรงแล้วเกิด stress relaxation .....	20
3.1 แสดงแผนที่เก็บตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ.....	22
3.2 แสดงรูป Loading Apparatus .....	24
3.3 แสดงรูป Volume Change Device .....	25
3.4 แสดงรูป Pressure Control Panel.....	25
3.5 แสดงรูป Triaxial Cell .....	26
3.6 แสดงเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ Repeated Loading .....	26
3.7 Flow Chart แสดงกระบวนการทดสอบ .....	30
4.1 แสดงทางเดินของความเค้นในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $p, q$ ) .....	44
4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $q, \epsilon_a$ ) .....	45
4.3 แสดงทางเดินของความเค้นในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $p^*, q^*$ ) .....	46
4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $q^*, \epsilon_a$ ) .....	47
4.5 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $\Delta U, \epsilon_a$ ) .....	48
4.6 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับแรงที่เพิ่มขึ้นในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $\Delta \sigma, \Delta U$ ) .....	49
4.7 แสดงความสัมพันธ์ของการลดแรงในการเกิด Stress Relaxation ( $q_1, t$ ) .....	50
4.8 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องกับเวลาในการทดสอบแรงซ้ำซาก ( $q, t$ ) .....	51
4.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเนื่องกับเวลาในการทดสอบแรงซ้ำซาก ( $q^*, t$ ) .....	52
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับเวลาในการทดสอบแรงซ้ำซาก ( $\Delta u, t$ ) .....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับเวลาในการทดสอบแรงซ้ำซาก ( $\varepsilon_a, t$ ) .....	54
4.12 แสดงทางเดินของความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $\varepsilon_a, q$ ) .....	55
4.13 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงกับเวลาที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $\Delta u, t$ ) .....	56
4.14 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับเวลาที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $\varepsilon_a, t$ ) .....	57
4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับการเคลื่อนตัวในแนวแกน ที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $\Delta u, \varepsilon_a$ ) .....	58
4.16 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับแรงที่เพิ่มขึ้นที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $\Delta \sigma, \Delta u$ ) .....	59
4.17 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับ Log ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.8 Su ที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $E, \log \% \varepsilon_a$ ) .....	60
4.18 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับ Log ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.9 Su ที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $E, \log \% \varepsilon_a$ ) .....	61
4.19 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับ Log ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 1.0 Su ที่ตัวอย่างดินลึก 7.50 –8.50 เมตร ( $E, \log \% \varepsilon_a$ ) .....	62
4.20 แสดงทางเดินของความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 – 11.50 เมตร ( $\varepsilon_a, q$ ) .....	63
4.21 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงกับเวลาที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 –11.50 เมตร ( $\Delta u, t$ ) .....	64
4.22 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับเวลาที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 –11.50 เมตร ( $\varepsilon_a, t$ ) .....	65
4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับการเคลื่อนตัวในแนวแกน ที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 –11.50 เมตร ( $\Delta u, \varepsilon_a$ ) .....	66
4.24 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับแรงที่เพิ่มขึ้นที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 – 11.50 เมตร ( $\Delta \sigma, \Delta u$ ) .....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับ Log ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.8 Su ที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 – 11.50 เมตร ( $E, \log \% \varepsilon_s$ ) .....	68
4.26 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับ Log ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.9 Su ที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 – 11.50 เมตร ( $E, \log \% \varepsilon_s$ ) .....	69
4.27 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับ Log ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 1.0 Su ที่ตัวอย่างดินลึก 10.50 – 11.50 เมตร ( $E, \log \% \varepsilon_s$ ) .....	70



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงระยะเวลา 10 ปี ที่ผ่านมาความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยีของโลกได้เติบโตขึ้นอย่างมาก ทำให้ในแต่ละประเทศจำเป็นต้องมีการส่งเสริมและขยายการลงทุน ทั้งในภาครัฐบาล และภาคเอกชนไปยังภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการก่อสร้าง อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ ฯลฯ เป็นต้น เพื่อให้รองรับกับการขยายตัวของเมืองต่างๆ ให้สอดคล้องกับเศรษฐกิจของเมือง ซึ่งในกรุงเทพฯ ก็เช่นกัน มีการขยายตัวของสิ่งก่อสร้างต่างๆ อย่างมาก อาทิ โครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน รถไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟลอยฟ้า อุโมงค์ส่งน้ำดิบ ทางด่วน เป็นต้น อาคารขนาดใหญ่ เช่น อาคารชุด อาคารสำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น เพื่อให้สอดคล้องกับการขยายตัวของเศรษฐกิจโลกและการเจริญเติบโตของประเทศ

ความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจ ทำให้เกิดการขยายตัวทางด้าน อุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็นอย่างมาก ด้วยการใช้โครงการขนาดใหญ่เกิดขึ้นมากมาย และโครงสร้างมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ต้องมีการระวังมากขึ้นโดยเฉพาะกับโครงสร้างที่วางบนดินอย่างเช่น ฐานราก โดยเฉพาะฐานรากที่วางบนดินอ่อน อย่างเช่น ดินเหนียวอ่อนบริเวณกรุงเทพฯ ซึ่งติดอันดับดินที่มีสภาพทางด้านกรรับน้ำหนักแย่มากอันดับแรกๆ ของโลก ดินเหนียวบริเวณกรุงเทพฯ นั้นเป็นดินตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนจากทะเล ชนิด Marine และ Alluvial ซึ่งเป็นแบบ Terrestrial Deposit มีความหนามากกว่า 1500 เมตร ชั้นล่างเป็นหินดาน ซึ่งอยู่ที่ความลึกไม่แน่นอน โดยมีความเชื่อว่าเกินกว่า 1500 เมตร (วสท. 2520) ถัดจากชั้นหินดานเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสลับกับชั้นทราย และชั้นกรวดจนกระทั่งถึงความลึกประมาณ 14-20 เมตร จากผิวดิน จากนั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลางสีเทา ซึ่งในเวลาต่อมาเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลสูงขึ้นทำให้ดินเหนียวอ่อนตกตะกอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 14-18 เมตร และต่อมาเมื่อดินเหนียวอ่อนซึ่งเป็น Marine Deposit โดนชะล้าง (Leaching) ทำให้ปริมาณเกลือในน้ำลดลงเป็นผลให้โครงสร้างของดินไม่มีเสถียรภาพและมีความไวสูง (Sensitivity) และมีสมบัติทางด้านวิศวกรรมค่อนข้างเลว ชั้นดินเหนียวอ่อนดังกล่าวบริเวณใกล้กรุงเทพฯ ซึ่งแสดงในรูปที่ 1.1-1.2

เนื่องจากบริเวณที่ตั้งของกรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนดังกล่าวมาแล้วข้างต้น สิ่งก่อสร้างใดๆ ก็ตามทีวางอยู่บนชั้นดินเหนียวนี้ เช่น ถนน อาคารพาณิชย์ ห้างสรรพสินค้า ฯลฯ การออกแบบสิ่งก่อสร้างที่จะสร้างขึ้นจำเป็นต้องพิจารณาถึง Static Loading เช่น น้ำหนักที่เกิดจากอาคารที่ถ่ายลงบนฐานราก และ Repeated Loading เช่น น้ำหนักของรถที่วิ่งบนถนน น้ำหนักเครื่องจักรที่กำลังทำงาน ซึ่งแรงเหล่านี้มีผลต่อพฤติกรรมของดินในด้านต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อทำการศึกษาลักษณะของแรงแบบ Repeated Loading ที่ระดับของหน่วยแรงที่กระทำต่าง ๆ กัน ที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินเหนียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในการรับแรง เช่น การเพิ่มของแรงดันน้ำ Modulus of Elasticity, Stress Path, Deviator Stress, Shear Strength ของดิน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแรงซ้ำซาก ในรูปแบบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินเหนียว โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Triaxial Apparatus โดยที่การทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ ภายใต้เงื่อนไขของการลดที่ระดับความเค้นที่ต้องการ โดยวิธีการควบคุมการเคลื่อนตัวของดิน (Strain Controlled) ปัจจัยที่จะทำการศึกษามีดังนี้

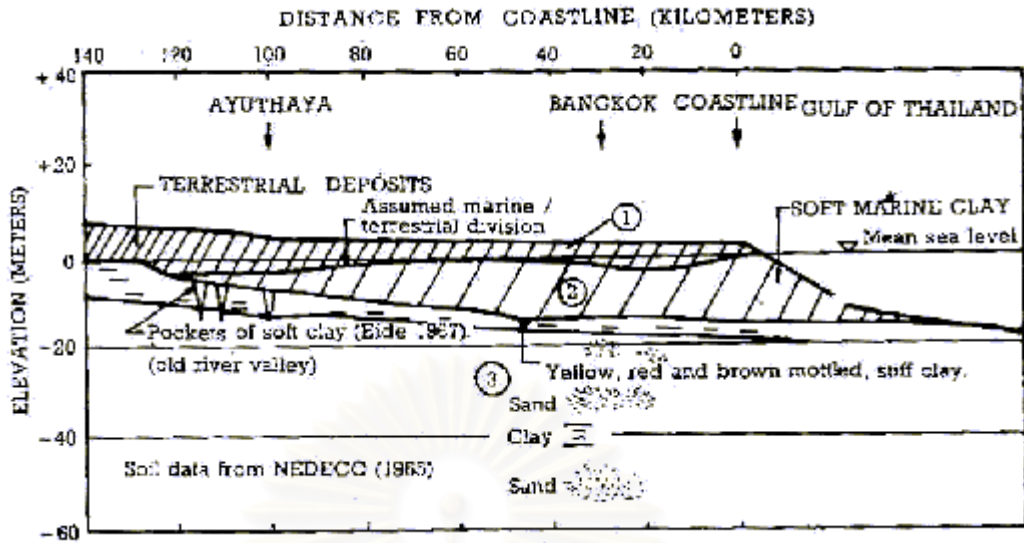
1.3.1 ศึกษาผลกระทบบของระดับของหน่วยแรงที่ 0.8Su, 0.9Su, 1.0Su ภายใต้เงื่อนไขของแรงกระทำซ้ำซาก

1.3.2 ศึกษาผลกระทบบของ Modulus of Elasticity ภายใต้เงื่อนไขของแรงกระทำซ้ำซาก

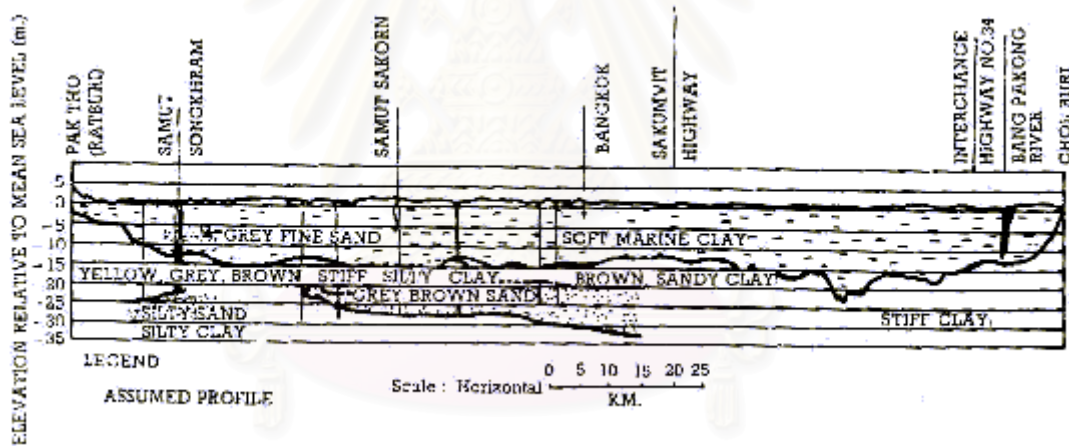
1.3.3

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

จากการทำการวิจัยครั้งนี้ ทำให้สามารถทราบถึงพฤติกรรมของดินภายใต้กระทำของแรงแบบซ้ำซากที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อคุณสมบัติการรับแรงของดินเหนียว ที่ทำการทดสอบ โดยสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบต่อไปและยังสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อีกด้วย



รูปที่ 1.1 แสดงรูปตัดชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศเหนือไปทิศใต้ (วสท. 2520)



รูปที่ 1.2 แสดงรูปตัดชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก (วสท. 2520)



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และผลงานที่ผ่านมา

ในการนำวิชากลศาสตร์ของดินมาประยุกต์ให้เข้ากับ ตัวอย่างดินในห้องทดลองเพื่อที่จะทดสอบหาคุณสมบัติการรับแรงของดิน เพื่อนำไปอ้างอิงในการใช้ประโยชน์ และสามารถแสดงถึงแนวความคิดและสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

#### 2.1 แนวความคิดและสมมุติฐานที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 Stress Parameters

เป็นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณของการทดสอบ Triaxial ซึ่งพัฒนามาจากการวิจัยของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ในการเสนอ

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

และ

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$$

เมื่อ  $\sigma_2 = \sigma_3$  สำหรับกรณีของการทดสอบในเครื่องทดสอบ Triaxial

และ  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  เป็นค่า Principal Stress

โดยปกติแล้ว  $p, q$  จะอยู่ในรูปของความเค้นประสิทธิผลโดยจะเรียกว่า Mean Normal และ Deviator Stress ตัวแปรทั้ง 2 เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับ Stress Invariant ของ Stress tensor

$$\begin{vmatrix} \bar{\sigma}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\sigma}_3 \end{vmatrix}$$

### 2.1.2 Strain Parameters

การเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขของ Axi-symmetric

$$dv = ds_1 + 2ds_3$$

และ

$$ds = \frac{2}{3}(ds_1 - ds_3)$$

เมื่อ  $ds_1, ds_2, ds_3$  เป็นค่า Principal Increment Compressive Strain โดยค่า Strain Parameter นี้จะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ Volumetric Strain และ Shear Strain และอาจจะเขียนรูปแบบของสมการความสัมพันธ์กับสมการพลังงานได้เป็น

$$\bar{\sigma}_1 ds_1 + 2\bar{\sigma}_3 ds_3 = p dv + q ds$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปของ Stress Invariants ของ Strain Tensor

$$\begin{vmatrix} ds_1 & 0 & 0 \\ 0 & ds_2 & 0 \\ 0 & 0 & ds_3 \end{vmatrix}$$

### 2.1.3 Axial Strain ของตัวอย่างที่ทำการทดสอบในเครื่อง Triaxial

Nadai (1950) ทำการเสนอ Axial Strain ของตัวอย่างดินภายใต้เงื่อนไขการทดสอบแบบ Triaxial Compression แสดงเป็น

$$\epsilon_1 = \int_L^{L_0} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_0}{L}\right)$$

เมื่อ  $L_0, L$  เป็นค่าที่ความสัมพันธ์ของความสูงของเวลาเริ่มทดสอบและความสูงขณะทดสอบซึ่งการหาค่า Strain อาจจะได้เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวตายนี้

ความเครียดที่เกิดขึ้น  $\epsilon_1$  สามารถหาได้จากสมการ

$$\epsilon_1^* = \frac{L_0 - L}{L_0}$$

เมื่อความเครียดมีค่าน้อยๆ  $\epsilon_1 = \epsilon_1^*$  แต่จะแตกต่างกันมากเมื่อความเครียดมีค่ามากๆ

### 2.1.4 Loading และ Unloading

ในการให้แรงเป็นการเพิ่ม Stress ให้แก่ตัวอย่างดินและเมื่อมีการลดแรงจะเป็นการลดการให้น้ำหนักแก่ตัวอย่างดินกลับไปยังจุดเดิม

สำหรับการลดแรงและการให้แรงนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า  $de$  โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรง เมื่อนำแรงออกจะมีส่วนของความเครียดที่สามารถย้อนกลับได้  $de_p$  และจะมีส่วนที่ไม่สามารถย้อนกลับได้  $de_p$

### 2.1.5 SKEMPTON 's Pore Pressure Coefficients

สำหรับดินโดยใช้สมมติฐานว่าเป็นวัสดุที่ Elastic และ Isotropic ที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ SKEMPTON (1954) เสนอว่าความสัมพันธ์ของ Pore Pressure เขียนได้เป็น

$$\Delta u = B [\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$$

เมื่อ A, B เรียกว่า Pore Pressure Coefficient โดย A ขึ้นอยู่กับอัตราของ Overconsolidation และ Sensitivity ของดิน ขณะที่ B=1 สำหรับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำเต็มช่องว่าง

### 2.1.6 Consolidation of Soils

Terzaghi ได้ทำการเสนอว่าการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการ

$$\frac{K(1+e)}{a_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

เมื่อ  $k$  = Permeability

$e$  = Void Ratio

$\gamma_w$  = Unit Weight of Water

$a_v$  = Coefficient of Compressibility =  $-\frac{de}{dp}$

$m_v$  = Coefficient of Volume Compressibility =  $\frac{a_v}{1+e_0}$

$c_v$  = Coefficient of Consolidation โดยจัดรูปสมการก่อนหน้าให้อยู่ในรูป

$$c_v \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\partial U}{\partial t}$$

เราสามารถหาค่าตัวแปร  $U_z$  ได้เป็น

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \left( \sin \frac{Mz}{H} \right) \exp^{-M^2 T}$$

เมื่อ  $U_z =$  Consolidation Ratio  $= 1 - \frac{U}{U_i}$

$T =$  Time Factor  $= \frac{c_v t}{H^2}$

$M = \frac{1}{2} \pi (2m + 1)$  (Taylor, 1942, 1948)

และได้มีผู้ทำวิจัยหลายคนที่ยพยายามขยายทฤษฎีเพื่อใช้กับในกรณีที่ดินมีการอัดตัวและความชื้นได้เป็นตัวแปรโดยไม่ใช้ค่าคงที่

### 2.1.7 Rate of Compression

เพื่อที่จะทำการประมาณอัตราการให้แรงแก่ตัวอย่างดินจำเป็นที่จะต้องนำสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องกับด้วย มีหลายวิธีที่จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งวิธีต่างๆสามารถแสดงได้ดังนี้

#### 2.1.7.1 Taylor's square root of time fitting method

วิธีนี้ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้คือร้อยละ 90 ของ Primary Consolidation

$$c_v = \frac{0.85H^2}{t_{90}}$$

#### 2.1.7.2 Casagrande's logarithm of time fitting method

วิธีนี้ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้คือร้อยละ 50 ของ Primary Consolidation

$$c_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}}$$

### 2.1.7.3 Inflection Point Method (Cour, 1971)

วิธีนี้มีพื้นฐานขึ้นอยู่กับทฤษฎีที่ใช้เวลาที่มีความสัมพันธ์กับจุดดัดกลับของการลงจุดใน Semi-logarithm ของเวลาที่ทำให้แรง

$$C_v = \frac{0.405H^2}{t_j}$$

เมื่อ  $t_j$  เป็นเวลาที่จุดดัดกลับของเวลาที่เกิดจากการให้แรง

วิธีนี้ให้ค่าเฉลี่ยของ  $C_v$  เป็นค่าเฉลี่ยของ 0-70 % ของการอัดตัวคายน้ำ

ส่วนของอัตราของ Secondary Compression สามารถหาได้จาก  $R_s$  คือการเปลี่ยนในอัตราส่วนช่องว่างต่อจำนวนรอบที่ใช้ในการทดสอบ หรือ  $C_R$  คือการเปลี่ยนของปริมาตรของความเครียดต่อจำนวนรอบที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจากการวิจัยโดย Newland และ Alley (1960) และ Wahls (1962) เสนอว่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำครั้งที่ 2 ( $C_{\alpha}$ ) เป็น Function ของอัตราส่วนช่องว่าง และ หน่วยแรงรวม ค่า  $C_{\alpha}$  ไม่ขึ้นอยู่กับ การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรง และสัดส่วนของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น

## 2.2 พฤติกรรมของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวและความแข็งแรงของดินภายใต้ของการให้แรง

มีการวิจัยและทำการเสนอในเรื่องความแข็งแรงของดินและพฤติกรรมของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวภายใต้สภาพของการรับน้ำหนัก ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องอธิบายก่อนที่จะนำไปสู่พฤติกรรมของดินภายใต้การกระทำของแรงอีกแบบหนึ่งซึ่ง เป็น Repeated Loading โดยจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปของดิน

### 2.2.1 Shear Strength

Coulomb (1773) ได้ทำการแนะนำสมการของความแข็งแรงของดินสำหรับจุดวิบัติของดินในรูปของหน่วยแรงรวม

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi$$

- เมื่อ
- $\tau_f$  = เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนบนระนาบที่วิบัติ
  - $c$  = Cohesion
  - $\phi$  = มุมเสียดทานภายในของดิน
  - $\sigma_f$  = Normal Stress บนระนาบที่วิบัติ

ในรูปของ  $q_F, p_F$  ที่จุดวิบัติ สมการจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$q^*_F = a + p^*_F \tan \alpha$$

เมื่อ

$$q^*_F = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_F}{2}$$

$$p^*_F = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)_F}{2}$$

$$a = c \cos \phi$$

$$\tan \alpha = \sin \phi$$

สัญลักษณ์ตัวห้อย  $f$  หมายถึง ค่าที่จุดวิบัติของดินและจากสมการข้างต้นสามารถหาความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผลได้เป็น

$$\tau_F = \bar{c} + \bar{\sigma}_F \tan \bar{\phi}$$

และ

$$\bar{q}^*_F = a + \bar{p}^*_F \tan \bar{\alpha}$$

เมื่อ

$$\bar{a} = \bar{c} \cos \bar{\phi}$$

$$\tan \bar{\alpha} = \sin \bar{\phi}$$

Henkel (1959, 1960) ได้ทำการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator Stress และ Mean Normal Stress ที่จุดวิบัติและปริมาณน้ำในดินของตัวอย่างดินจำนวนหลายตัวอย่างดินเหนียวในบริเวณ Weald และ London ภายใต้การทดสอบแบบให้แรงอัดและแรงดึงกับตัวอย่างดิน และต่อมา Ladd (1963) จึงทำการย้ำถึงความสัมพันธ์นี้อีกครั้งหนึ่งและได้เสนอถึงความสัมพันธ์ของดินไว้เป็น

2.2.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของดินกับความเค้นประสิทธิผลที่จุดวิบัติแสดงให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์กัน  $q_F^* = f(\bar{p}_F^*)$  โดยมีค่าเดียวและยังสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำในดิน ความเค้นเฉือนและแรงเค้นประสิทธิผลของดิน ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่า Intermediate Principal Stress และค่า Maximum Past Pressure

2.2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินที่จุดวิบัติ กำลังรับแรงเฉือนและแรงเค้นประสิทธิผลที่จุดวิบัติจะมีค่าเดียว ซึ่งเรียกว่า Hvorslev's parameters  $q_F^* = f(W_F) + f(\bar{\sigma}_{3F})$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า Intermediate Principal Stress

ในการทดสอบดินเหนียวที่บริเวณเมือง Weald โดย Roscoe, Schofield และ Wroth (1958) ยังแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นความสัมพันธ์แบบมีค่าตอบเดียวโดยทำการทดสอบในแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำและทำการลงจุดในแกนของ  $p, q, e$  และทำการมองในระนาบแกนของ  $p, q$  กับความชื้น  $M$  เรียกว่า Critical State Line และยังเป็นเส้นตรงที่มีความชัน  $\lambda$  ในแกนของ  $e - \log p$  สำหรับดินที่อยู่ในสภาพของการอัดตัวแบบปกติจะเห็นว่า  $M$  มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมเสียดทานภายในของดิน  $\bar{\phi}$

$$\sin \bar{\phi} = \frac{3M}{6 + M}$$

## 2.2.2 พฤติกรรมของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ

Roscoe และ Poorooshasb (1963), Poorooshasb (1961) และ Thurairajah (1961), Balasubramaniam (1976) แสดงข้อมูลสำหรับดินเหนียว Kaolin และ Weald ที่อยู่ในสภาพการอัดตัวแบบปกติและดินเหนียวในกรุงเทพมหานคร แสดงให้เห็นว่าทางเดินของหน่วยแรงมีความใกล้เคียงกันในแกน  $p, q$  และทำการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของทางเดินของหน่วยแรงโดยใช้ตัวแปร  $\frac{q}{p_e}$  และ  $\frac{p}{p_e}$  เมื่อ  $p_e$  เป็นค่า Mean Equivalent Pressure ตามการเสนอของ Hvorslev (1937) ซึ่งเสนออยู่ในรูป

$$p_e = p_0 e^{\left(\frac{e_0 - e}{\lambda}\right)}$$

เมื่อ  $(e_0, p_0)$  จะอยู่ในเส้นที่เป็น Isotropic Consolidation และ  $\lambda$  เป็นค่าความชันของการลงจุดในแกน  $(e, \log p)$  และต่อมาโดยการเสนอโดย Ladd (1964) ในรูปที่ 2.1 โดยสามารถอธิบายได้ว่าทางเดินของหน่วยแรงในแบบที่ 1 จะเป็นดินเหนียวที่อยู่ในสภาพแบบ Heavily Overconsolidated โดยเมื่อเริ่มแรกจะมีค่า Pore Pressure เป็นบวกและจะมีค่า Pore Pressure เป็นลบเมื่อทดสอบไปเรื่อยๆ และทางเดินของหน่วยแรงแบบที่ 2 และแบบที่ 3 จะเป็นดินเหนียวที่อยู่ในสภาพแบบ Lightly Overconsolidated และ Normally Consolidated ตามลำดับ

Roscoe และ Poorooshasb (1963) & Balasubramaniam & Chaudhry (1971) เสนอข้อมูลของความเครียดเฉือนของดินรูปของ Linear Contours ในแกนของ  $(p, q)$  เพราะฉะนั้นความเครียดเฉือนในการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำจึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปร  $\frac{q}{p}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.3 พฤติกรรมของหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวและกำลังรับแรงเฉือนของดินภายใต้การกระทำของแรงแบบ Repeated Loading

ในการศึกษาพฤติกรรมของดินภายใต้การกระทำของแรงแบบซ้ำๆ นั้นยังสามารถแบ่งออกไปได้เป็นแบบ Static Repeated Loading และ Dynamic Repeated Loading ซึ่งกรณีหลังนี้จะนำความเร่งเข้ามาคิดในระบบด้วยซึ่งในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้จะทำการคิดเฉพาะในกรณีของ Static Repeated Loading และเป็นแบบไม่ระบายน้ำ

### 2.3.1 การทดสอบกระทำของแรงซ้ำๆ กับตัวอย่างดินสภาวะแบบกึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำและมีการบดอัด

มีผู้ทำการวิจัยหลายคนมากที่ศึกษาในรายละเอียด ตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่โดนบดอัดแล้วนำมาทำการให้แรงแบบซ้ำๆ ภายใต้การทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ โดยไม่มีการอัดตัวคายน้ำ

การทดสอบแรงแบบซ้ำๆ กับดินเหนียวผสมดินร่วนที่ไม่อิ่มตัวด้วยที่โดนบดอัด โดย Seed, Chan และ Monismith (1955) สังเกตว่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างดินขึ้นอยู่กับจำนวนรอบที่ทำการให้แรงและความถี่ของการให้แรงและยังพบอีกว่าความแข็งแรงของตัวอย่างดินที่มีการทดสอบแรงแบบซ้ำๆ ที่มีจำนวนครั้งของการกระทำที่มากกว่าและใช้แรงที่มากกว่าระหว่างการกระทำซ้ำ ตัวอย่างที่ใช้วิธีดังกล่าวจะให้ผลของกำลังรับแรงเฉือนของดินมากขึ้น

การใช้ดินเหนียวผสมดินร่วน และทำการบดอัดที่ระดับอิ่มตัวด้วยน้ำที่เท่าๆ กันแต่มีค่าปริมาณน้ำในดินต่างกัน โดยการเสนอของ Seed และ Mcnell (1956) พบว่าการหาการเคลื่อนตัวภายใต้ การให้แรงแบบธรรมดาไม่ได้บ่งชี้พฤติกรรมของดินภายใต้การกระทำของแรงแบบซ้ำๆ

Seed, Mcnell และ Glenin (1958) ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานเมื่อดินมีการเคลื่อนตัวที่เกิดจากแรงซ้ำๆ และผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานกับการเคลื่อนตัวจะเกิดเมื่อความเครียดน้อยกว่า 4 % และกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบแรงแบบซ้ำๆ จะให้ค่าเท่ากับตัวอย่างที่ทำการลดแรงแบบธรรมดา



Seed และ Chan (1958) ทำการศึกษาผลกระทบของน้ำหนักกดทับในอดีตและความถี่ของการให้แรงกับการเคลื่อนตัวของดินเหนียวภายใต้แรงซ้ำซาก ผู้วิจัยได้เสนอว่าการเคลื่อนตัวของดินเหนียวปนดินร่วนภายใต้แรงแบบซ้ำซากขึ้นอยู่กับน้ำหนักกดทับในอดีตที่ระดับของความเค้นสูงๆ ผลกระทบของความถี่ของแรงที่มากระทำแล้วทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินเหนียวปนดินร่วนจะเกิดขึ้นกับตัวอย่างดินที่มีความอิ่มตัวด้วยน้ำในระดับที่สูงๆเท่านั้น สำหรับตัวอย่างที่มีการอิ่มตัวของน้ำที่ระดับต่ำจะเห็นว่าความถี่ของแรงที่มากระทำจะไม่มีผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวของดิน

Seed และ Chan (1961) ทำการศึกษาต่อไปสำหรับผลกระทบของช่วงเวลาและความถี่ของแรงที่มากระทำ โดยทดสอบกับตัวอย่างดินทรายปนดินร่วนและดินเหนียวปนดินร่วน ทำการจัดเตรียมตัวอย่างและทำการบดอัด เสร็จแล้วเก็บตัวอย่างไว้ 2 สัปดาห์แล้วจึงนำมาทำการทดสอบ ในการทดสอบสรุปผลการทดสอบว่าตัวอย่างดินที่มีระยะเวลาของแรงและความถี่ของแรงที่มากระทำต่อตัวอย่าง มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของดิน ซึ่งผลกระทบของความถี่ของแรงที่มากระทำอาจจะเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิด Creep และ Thixotropy

Larew และ Leonards (1962) ทำการทดสอบแรงแบบซ้ำซากกับดินเม็ดละเอียดโดยทำการบดอัดแล้วทำการทดสอบในเครื่องอัดสามแกน ที่ค่าแรงอัดในแนวแกนต่างๆกัน ผู้วิจัยพบว่าระดับวิกฤตของแรงซ้ำซากที่เกิดจากแรงที่มากระทำต่อตัวอย่างดิน มีผลต่อความแข็งแรงของดินเหนียวที่ทำการบดอัดแล้วทำการให้แรงแบบซ้ำซาก ความเค้นที่จุดวิกฤตที่ความชันของการเคลื่อนตัวกับจำนวนของการกระทำซ้ำของแรงจะคงที่หลังจากการกระทำของแรงครั้งแรก สำหรับระดับของแรงที่ทำให้เกิดระดับวิกฤตของดิน เส้นโค้งของการเคลื่อนตัวจะมีแนวโน้มเป็นแบบ Concave โดยความชันจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการวิบัติโดยมีการเคลื่อนตัวตามระนาบแรงเฉือน สำหรับหน่วยแรงที่ต่ำกว่าระดับวิกฤต การเคลื่อนตัวจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

Kawakami และ Ogawa (1965) เสนอผลการทดสอบของแรงซ้ำซากกับดินเหนียวและดินเหนียวปนทราย หลังจากทำการทดสอบ 10,000 รอบ ของแรงซ้ำซากภายใต้หลายๆ ค่าแรงอัดตามแนวแกน ปรากฏว่าตัวอย่างดินวิบัติจากการทดสอบแบบ Unconfined Compression ความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างที่ทำการบดอัดและทำการให้แรงแบบซ้ำซากพบว่ามีอิทธิพล โดยความเข้มของแรงกระทำที่ซ้ำ ๆ ปริมาณน้ำในดิน ความหนาแน่น และแรงที่ใช้อัดตัวอย่างเมื่อเริ่มทำการทดสอบ

### 2.3.2 การทดสอบแรงแบบซ้ำซากกับตัวอย่างดินที่ไม่โดนรบกวนและอิมตัวด้วยน้ำ

Sangrey , Henkel และ Esrig (1969) เสนอผลการทดสอบโดยวิธี Strain Controlled แบบไม่ระบายน้ำในเครื่องทดสอบอัดสามแกน โดยตัวอย่างทดสอบแบบ Isotropic Consolidation ในการทดสอบทำทั้งการให้แรงและการลดแรงในแต่ละรอบระหว่าง 2 ขนาดของแรงที่ใช้ทดสอบ แรงดันน้ำที่ทำการวัดทั้งในกรณีที่ให้แรงและลดแรง ผู้วิจัยสังเกตว่าบางตัวอย่างที่มีการให้แรงแบบซ้ำซากที่ตัวอย่างมีการวิบัติแบบไม่สมดุลงและมีการพบว่าระดับวิกฤตของแรงซ้ำซากเป็นการแบ่งแยก สภาวะการวิบัติแบบไม่สมดุลงและการเพิ่มขึ้นของความเครียดตามแนวแกนกับแรงซ้ำซากที่รอบของการให้แรง ขนาดของระดับวิกฤตของแรงซ้ำซากขึ้นอยู่กับความสมดุลงในความเค้นประสิทธิผลโดยระดับของหน่วยแรงนี้จะคล้ายกับผลการวิจัยของ Larew และ Leonards (1962) ที่เรียกว่า ระดับวิกฤตของแรงแบบซ้ำซาก

ความเครียดในแนวแกนและแรงดันน้ำในโพรงดินของตัวอย่างดิน ขึ้นอยู่กับแรงที่ทำซ้ำซากภายใต้เงื่อนไขการวิบัติแบบไม่สมดุลง สังเกตว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนของแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดิน จนกระทั่งถึงขนาดที่มากที่สุดที่จะทำได้ หลังจากจำนวนรอบผ่านไปน้อยๆ โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการให้แรงจะไม่ทำให้ ความเค้นกับความเครียดและแรงดันน้ำกับความเครียดใกล้เคียงกับ Hysterisis Loops แรงดันน้ำของตัวอย่างดินภายใต้เงื่อนไขว่าไม่เกิดการวิบัติภายใต้แรงแบบซ้ำซากจะลดลง เมื่อมีการถอนแรงที่กระทำออกจากตัวอย่างดิน อย่างไรก็ตามแรงดันน้ำของตัวอย่างดินเหล่านี้จะตกลงภายใต้การลดลงของแรงกระทำ ผลการทดสอบของการวิบัติแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นในแรงดันน้ำและแสดงว่า

$$N(\sigma_1) = R_1(\bar{\sigma}_1) + R_2(\bar{\sigma}_1) = N$$

เมื่อ  $\bar{\sigma}_1, R_1$  เป็นค่าคงที่และ  $R_2$  เป็นความชันของเส้นตรง

Balasubramaniam และ Chui (1976) ทำการศึกษาผลกระทบของแรงซ้ำซากกับพฤติกรรมของความเค้นและความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะ Strain Controlled ในเครื่องทดสอบแบบอัดสามแกน ระดับวิกฤตของแรงที่มากกระทำอาจจะขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของตัวอย่างดินที่มีความเค้นแบบ Isotropic โดยพบว่าระหว่างที่มีการให้แรงแบบซ้ำซาก อย่างไรก็ตามดีสำหรับความดันที่สูงกว่าระดับวิกฤต การวิจัยของตัวอย่างดินเกิดขึ้นหลังจากมีการให้แรงแบบซ้ำซากในจำนวนที่มากพอ ผลกระทบต่อไปนี้เป็นผลที่เกิดจากแรงซ้ำซากที่ได้จากการทดสอบดินเหนียวกรุงเทพฯ

(i) ความเครียดเฉือนทั้งหมดและความเครียดเฉือนที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ จะเพิ่มขึ้นไปด้วยกับจำนวนรอบที่กระทำและอัตราการเพิ่มของความเครียด พบว่าจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงกระทำ สำหรับความเค้นที่ต่ำกว่าระดับวิกฤต จะได้ว่าอัตราการเพิ่มของความเครียดเฉือนกับจำนวนรอบน้อยๆ ในขณะที่แรงกระทำสูงกว่าระดับวิกฤต จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนกับจำนวนรอบของแรงซ้ำซากและความเครียดเฉือนเป็นลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบ Concave จนกระทั่งการวิบัติเกิดขึ้น สำหรับแรงกระทำภายใต้ระดับของความเค้นที่ถึงจุดวิกฤต ความเครียดเฉือนจะสอดคล้องกับการให้แรงและการลดแรงซึ่งพบว่าเป็นลักษณะคล้ายๆกันสำหรับดินเหนียว จากการวิจัยของ Balasubramaniam และ Parameswaran (1975) พบว่าความเครียดเฉือนและแรงดันน้ำของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำที่บริเวณ Kaolin ที่ระดับความดันต่ำๆ มีความสอดคล้องกับการเพิ่มแรงและการลดแรงเหมือนกันสำหรับดินเหนียว

(ii) สำหรับทั้งสภาพของการให้แรงและลดแรง แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นกับรอบของการกระทำซ้ำของการให้แรงกระทำ ซึ่งพบว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของแรงกระทำ ความสัมพันธ์ที่เป็นลักษณะให้คำตอบเดียวระหว่างค่าแรงดันน้ำในดินกับความเครียดเฉือน ผลการวิจัยนั้นถูกต้องเพราะจากการวิจัยของ Lo (1961) ทำการแสดงผลที่เป็นคำตอบเดียวของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำและความเครียดเฉือน ความสัมพันธ์นี้สามารถที่จะใช้แรงดันน้ำเพื่อทำการคาดคะเนภายใต้แรงซ้ำซาก

(iii) พฤติกรรมที่เป็นทิศทางเดียวที่ได้คำตอบเดียวระหว่างความเครียดเฉือนและอัตรา  $\frac{q}{p}$  ที่ทำการวิจัย การสังเกตในการวิจัยของ Roscoe และ Poorooshasb (1963) และการวิจัยโดย Balasubramaniam (1973) ทำการแสดงผลการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำกับตัวอย่างที่ทำการให้แรงเฉือนจากความแตกต่างของความเค้นแบบ Isotropic สำหรับทุกๆตัวอย่าง  $\frac{q}{p}$  และความเครียดเฉือนความสัมพันธ์จะเป็นไปในลักษณะทิศทางเดียวกัน

(iv) ทางเดินของความเค้นจะเลื่อนออกมาจากจุดเริ่มต้น จากการกระทำซ้ำของแรงในการเคลื่อนตัวที่ย้อนกลับไม่ได้จากจำนวนครั้งของแรงที่กระทำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเค้นลดลง แรงดันน้ำจะเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะเส้นตรงกับแรงที่มากระทำกับตัวอย่างดินภายใต้เงื่อนไขของการไม่วิบัติแบบสมดุลย์

Sangrey (1969) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของระดับของความเค้นและการเคลื่อนตัวภายใต้แรงแบบซ้ำซากได้พบว่าที่ระดับความเค้นที่ต่ำมากๆ จะไม่มี ความแตกต่างระหว่างความเครียดในรอบแรกและการให้แรงกระทำซ้ำในการทดสอบ อย่างไรก็ตามก็ตีความความเครียดที่สมมูลย์ ดูเหมือนจะมากขึ้นกว่ารอบแรกของความเครียดเมื่อเข้าไปใกล้ระดับวิกฤตของความเค้น ความสมมูลย์จะไม่มากขึ้นและความเครียดสะสมมีแนวโน้มมากขึ้นที่ระดับหน่วยแรงวิกฤต

ในเนื้อหาการทดสอบของ Sangrey (1969) และ Ting (1970) แสดงข้อมูลจากการใช้การทดสอบแบบ Strain Controlled และให้แรงซ้ำซากแบบ Quasi - Static กับดินที่อัดตัวด้วยน้ำเต็มที่เป็นดินที่อยู่ในสภาพอัดแน่นปกติ ทำการ Remold จากตัวอย่างดินที่เก็บจาก Kaolin ทดสอบในเครื่องอัดสามแกนภายใต้สภาวะแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ ผู้วิจัยได้แสดงผลทดสอบในรูปแบบของความเครียดรวมโดยใช้ตัวแปร  $\frac{q}{p_e}$  เมื่อ  $p_e$  เป็นค่าขนาดของความเค้นเริ่มแรกที่อัดตัวด้วยน้ำแบบ Isotropic จากตัวอย่างทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ ความเครียดเฉือน คือค่าเดียวกับความเครียดในแนวแกน  $e_1$  ในการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำและได้สังเกตการกระทำซ้ำของแรงในรอบแรกของการทดสอบหาความสัมพันธ์ของ  $N_T^c$  และ  $N_p^c$  กับ  $N$  ซึ่งจะเป็นเส้นตรงเมื่อ  $N_T^c$  เป็นความเครียดเฉือนรวมหลังจาก  $N$  รอบของการให้แรงและ  $N_p^c$  เป็นความเครียดที่ย้อนกลับไม่ได้หลังจาก  $N$  รอบของการทดสอบ (ความเครียดเฉือนที่ย้อนกลับไม่ได้ตั้งสมมุติฐานว่าความเครียดนั้นจะไม่ย้อนกลับขณะที่ทำการถอนแรง) ค่า  $(N_T^c, N)$  และ  $(N_p^c, N)$  เป็นเส้นตรงที่ขนานสำหรับทุกๆ ครั้งที่มีแรงกระทำ ความเครียดเฉือนทั้ง  $N_p^c$  และ  $N_T^c$  สามารถเขียนได้เป็น

$$N^c = R_1 \left( \frac{q}{p_e} \right) + R_2 \left( \frac{q}{p_e} \right) R_3(N)$$

เมื่อ  $R_1$  และ  $R_2$  เป็น Function ของ  $\frac{q}{p_e}$  และ  $R_3$  เป็น Function ของ  $N$  และพบว่า  $N^c$  แปรผันเป็นเส้นตรงกับ  $N$  และ  $R_3(N) = N$  ผู้วิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาของการทดสอบ ( $\Delta t$ ) ทำให้ความชันของ  $(N^c, N)$  ซึ่งเป็นเส้นตรงของ  $N_T^c$  และ  $N_p^c$  แต่ความสัมพันธ์ยังคงเป็นเส้นตรงและการเป็นเส้นขนานของเส้น 2 เส้น โดยผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลา ของการให้แรงกระทำสามารถปรับแต่งสมการก่อนหน้า นี้เป็น

$$N^c = R_1 \left( \frac{q}{p_e} \right) + R_2 \left( \frac{q}{p_e} \right) R_4(\Delta t)W$$

เมื่อ  $R_4$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงในความชัน  $(N^c, N)$  แปรผันเป็นเส้นตรงสำหรับ  $\frac{q}{p_e}$  เป็นสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาของการให้แรงที่ระยะเวลา ( $\Delta t$ )

Ting (1970) ได้ทำการเสนอผลการทดสอบจากอัตราการใช้แรง 3 ระดับโดยวิธีการทดสอบแบบ Stress Controlled ที่ทำการให้แรงแบบช้าๆ สำหรับการทดสอบแบบระบายน้ำ ขนาด ( $\sigma_1, \sigma_3, N, e_1, e_3$ ) ใช้แทน ( $q, p, N, e, v$ ) เมื่อทิศทางของ  $\sigma_1$  และ  $e_1$  เหมือนกันและ  $\sigma_3$  คงที่ ผู้วิจัยสังเกตว่ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นระหว่าง  $e_1$  และ  $N$  สำหรับค่าที่แตกต่างกันของ  $\sigma_1$  สมการที่เสนอมานี้สามารถใช้ได้เมื่อมีการใช้แรงแบบช้าๆ ในการทดสอบ

(v) การเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับจำนวนรอบของการให้แรงกระทำกวนที่รอบแรกของการทดสอบ

Chui (1975) แสดงให้เห็นว่าระหว่างของการทดสอบมีการพิจารณาผลกระทบของขนาดของความเครียดเฉือนและแรงดันน้ำอย่างไรก็ดี ระหว่างที่ทำการลดแรงจะไม่มีการกระทบจากแรงเฉือนและแรงดันน้ำ ผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่าแรงที่กระทำที่ต่ำกว่า ความเค้นวิกฤตของการใช้แรงแบบช้าๆ กับตัวอย่างทดสอบ ทำการให้แรงใหม่ภายใต้วิธีของ Stress Controlled บ่งชี้ว่าค่าสูงสุดของแรงที่กระทำ  $q_f$  ที่จุดวิบัติ ไม่ขึ้นกับน้ำหนักกดทับในอดีตของตัวอย่าง การศึกษาโดย Chui (1975) ได้บอกไว้สำหรับตัวอย่างดินที่มีการใช้แรงเท่าๆกัน และเวลาที่เท่าๆกัน แสดงให้เห็นว่าความเครียดเฉือนของการทดสอบแบบ Cyclic ตัวอย่างทดสอบจะมีค่าแรงดันน้ำมากกว่าตัวอย่างที่ทำการใช้แรงเฉือนแบบธรรมดา 100-300 %

Knight และ Blight (1965) ศึกษาการให้แรงและการลดแรงกับดินในสภาพ Overconsolidated โดยทดสอบแบบไม่ระบายน้ำกับตัวอย่างดินและทำการเสนอว่าความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแรงดันน้ำใน Heavily Overconsolidated

- (i) ที่จุดสิ้นสุดของรอบของการลดแรง แรงดันน้ำสามารถที่จะมากกว่าที่จุดสิ้นสุดของการให้แรง โดยจะเกิดขึ้นเมื่อการให้แรงเฉือนมีขนาดใหญ่พอที่จะเกิดแรงดันน้ำขึ้นมา
- (ii) ในดินที่ไม่มีการระบายน้ำเลย จะเห็นว่าแรงดันน้ำจะเปลี่ยนที่จำนวนของแรงช้าๆ เพิ่มขึ้น หลังจากผ่านไปรอบแรกๆ และการลดแรงเป็นผลให้เกิดการลดลงของแรงดันน้ำเท่านั้น

## 2.4 ผลกระทบของแรงซ้ซากกับการอัดตัวคายน้แบบ 1 มิติ

Katti และ Sadasivan (1967) ทำการศึกษาผลกระทบของแรงซ้ซากของการให้แรงและการลดแรงกับการอัดตัวคายน้ การถอนแรง การบวมของการใช้ความเค้นทดสอบดินจาก Poona จะได้ผลว่าขนาดของการถอนแรง การเพิ่มขึ้นแต่ละรอบกับการเพิ่มแรงและการลดแรงสำหรับดินเหนียว 5 ไมครอน และ ดินเหนียวขนาดประมาณ 30 % ในรอบแรก และมากกว่า 70-80 % ในรอบต่อมา ในดินร่วนและดินทรายขนาดการถอนแรงคล้ายกับการทดสอบโดยใช้แรงต่ำๆ ในรอบแรกๆ และจะเพิ่มขึ้นในรอบต่อไป ลักษณะเฉพาะของการอัดตัวคายน้และการถอนแรงของดินที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของ ชนิดของดิน เช่น ดินเหนียว ดินทราย ดินร่วน

Wagener (1960) ทำการวิจัยการใช้แรงซ้ซากในเครื่องทดสอบแบบอัดตัวคายน้ ได้ผลว่าการหลุดตัวจากน้หนักแบบสถิตย์จะเท่ากับ การหลุดตัวที่เกิดจากแรงซ้ซาก และเวลาที่ใช้ในการให้แรงแบบซ้ซากจะเท่ากับเวลาในการทดสอบในกรณีใช้น้หนักแบบสถิตย์

## 2.5 Stress Relaxation

การเกิด Stress Relaxation ในดินเกิดได้จากที่ทำการลดแรง ซึ่งจะทำให้เกิดผลที่ตามมาคือ ดินจะเกิดการขยายตัวภายในเงื่อนไขที่กำหนด โดยจากการศึกษาของ Lacerda and Houston (1973) ได้ทำการเสนอสมการสำหรับ Stress Relaxation

$$\sigma = \frac{D}{D_0} = 1 - s \log \frac{t}{t_0} \quad , t \geq t_0$$

เมื่อ  $D$  =  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  = Deviator stress

$D_0$  = Deviator stress at time  $t_0$

$t_0$  = Time at beginning of stress relaxation

$\sigma$  = Released stress levels at time  $t$

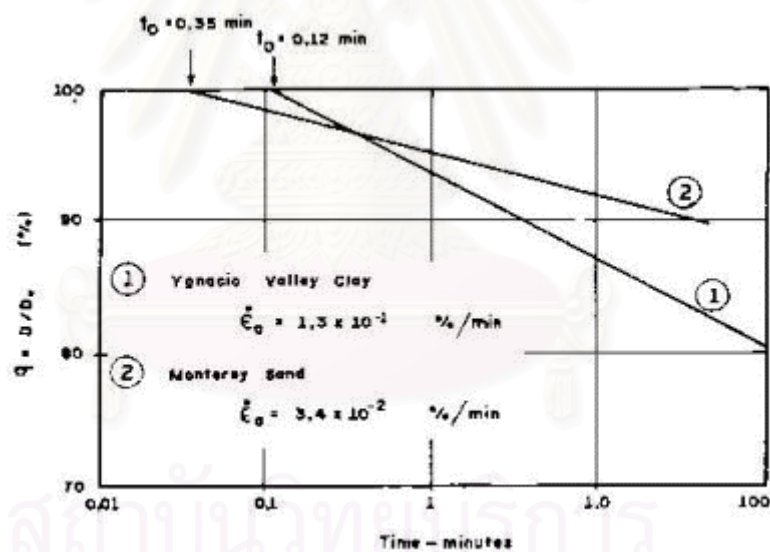
$s$  = Slope of stress relaxation line

สมการข้างบนนี้ใช้ได้ในเรื่องการทดสอบแบบระบายน้ำและแบบไม่ระบายน้ำ เวลา  $t_0$  ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและอัตราการเคลื่อนตัวของดิน ที่ใช้ในการทดสอบในเครื่องอัดแบบสามแกน โดยเวลา  $t = 0$  เป็นเวลาที่ทำการหยุดการให้แรงในเรื่องทดสอบ จะเห็นว่าหลังจากเวลา  $t_0$  จะทำให้  $D$  มีค่าลดลงเป็นฟังก์ชันแบบลอการิทึมกับเวลา

ถ้าตัวอย่างดินมีการระบายน้ำในระหว่างที่มีการเกิด Stress Relaxation จะเป็นการที่ตัวอย่างดินเกิดจากการอัดตัวคายน้ำ โดยจะเห็นว่าผลการทดสอบจาก Stress Relaxation จะเป็นขนานกับผลการทดสอบ undrained relaxation ซึ่งจะเห็นว่าผลการลดแรงในแนวดิ่งจะมีผลต่อการเกิด stress relaxation ในตัวอย่างดิน

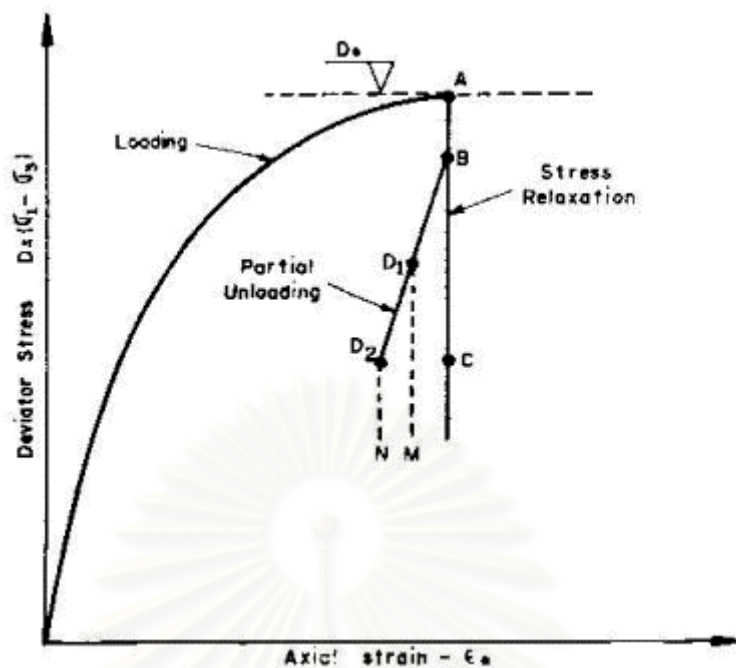
### 2.5.1 ผลกระทบที่เกิดจากการลดแรง

หลังจากที่พฤติกรรมของดินมีการเกิด Stress relaxation การเคลื่อนตัวของดินจะหดกลับจากการหยุดการลดแรง

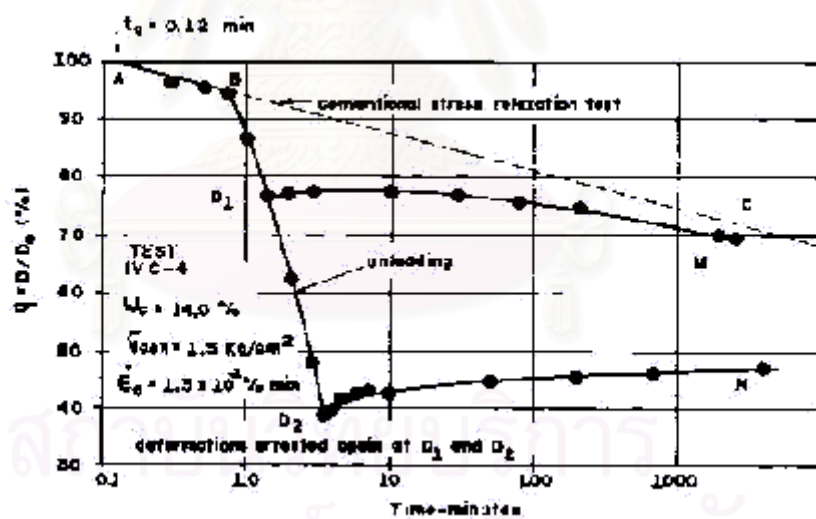


รูปที่ 2.1 การทดสอบ Stress Relaxation

สถาบันนวมวิทยการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของความเค้นและหน่วยแรง



รูปที่ 2.3 อิทธิพลจากการลดแรงแล้วเกิด stress relaxation



พิจารณาจุด A จาก รูปที่ 2.2 จากการวิจัยของ Lacerda และ Houston (1973) ได้แสดง การทดสอบการให้แรงซ้ำจากการทดสอบ stress relaxation ได้ผลการทดสอบในทิศทาง AC ใน รูปที่ 2.1-2.2 จากนั้นทำการให้แรงกลับไปจุด B ซึ่งใช้อัตราเร็วของแรงเหมือนกับที่ทดสอบตอน แรก เมื่อถึงจุด B ทำการลดแรงอย่างช้าๆ จนถึงจุด  $D_1$  จึงทำการหยุดการทดสอบอีกครั้ง

รูปที่ 2.3 ได้ทำการแสดงพฤติกรรมที่เกิดจากระดับของความเค้น  $\sigma$  กับเวลาจากการ ทดสอบดินเหนียวที่ Ygnicio Valley โดยหลังจากที่มีเพิ่มแรงอย่างช้าๆ ประมาณ 10 นาที จึงทำ การลดแรงลงอย่างช้าๆ จนถึงจุด M ซึ่งถ้าทิ้งไว้ประมาณ 3,000 ชั่วโมงจะได้พฤติกรรมเป็นแบบ การทดสอบครั้งแรกในเส้น AC จากนั้นทำการทดสอบอีกครั้งโดยใช้การทดสอบตาม A , B ,  $D_2$  จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการลดแรงที่มีผลของการเกิด Stress relaxation เข้ามาด้วยทั้งในเงื่อนไขการทดสอบแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำที่มีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง โดย เวลานี้จะมีความจำเป็นมากในการทำให้การเกิดของหน่วยแรงในตัวอย่างดินข้าง เมื่อเกิดการ เปลี่ยนแปลงระดับความเค้น

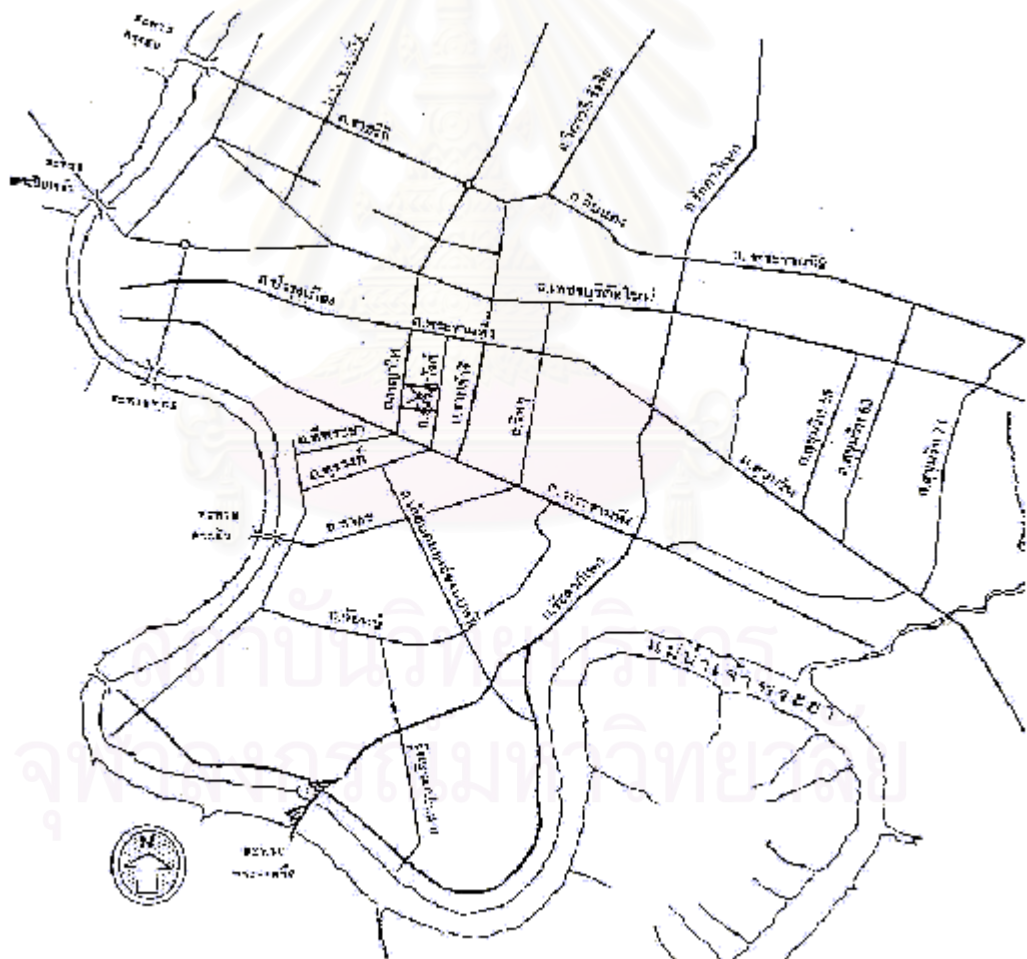
### บทที่ 3

## วิธีการและขั้นตอนในการวิจัย

### 3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างทดสอบ

#### 3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน

สถานที่ที่เก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาวิจัย คือ บริเวณข้างหอประชุมใหญ่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนน พญาไท เขตปทุมวัน กทม. แผนที่พอสั่งเขปของสถานที่เก็บตัวอย่างดินสำหรับใช้ทดสอบจะแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนที่เก็บตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ

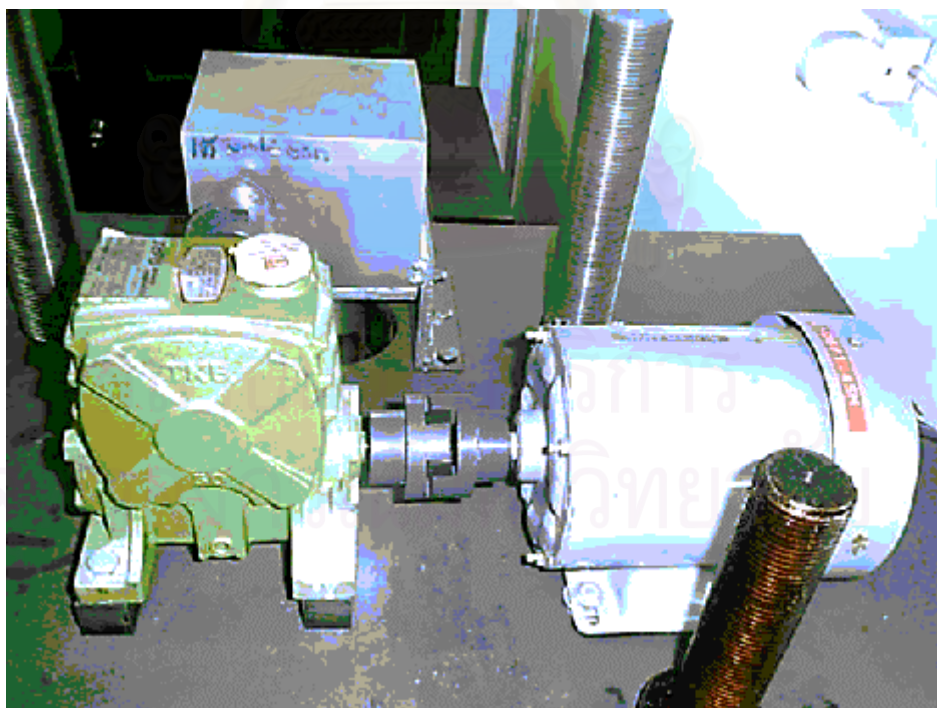
### 3.1.2 การเจาะสำรวจและการเก็บตัวอย่าง

วิธีการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างดิน ใช้วิธีฉีดล้าง (Wash Boring) และเก็บตัวอย่างด้วย piston sampler ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 ซม. และความยาวกระบอก 90 ซม. จะทำการเก็บตัวอย่างดินทุกระดับความลึก 1.50 ม. และเริ่มเก็บตัวอย่างดินที่ความลึก 2.0 ม. และความลึกหลุมเจาะสุดท้ายประมาณ 12.30 ม. ซึ่งอยู่ในช่วงดินเหนียวอ่อน เมื่อทำการเก็บโดยใช้ Piston sampler แล้วนำขึ้นมาค่อย ๆ extrude ออกจากกระบอก piston แล้วนำตัวอย่างที่ได้ห่อหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ ให้มิดชิด และนำไปเคลือบด้วยซีฟิ่งอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างดินสูญเสียปริมาณความชื้นไป และขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการอย่างระมัดระวังโดยไม่ให้กระทบกระเทือนน้อยที่สุด

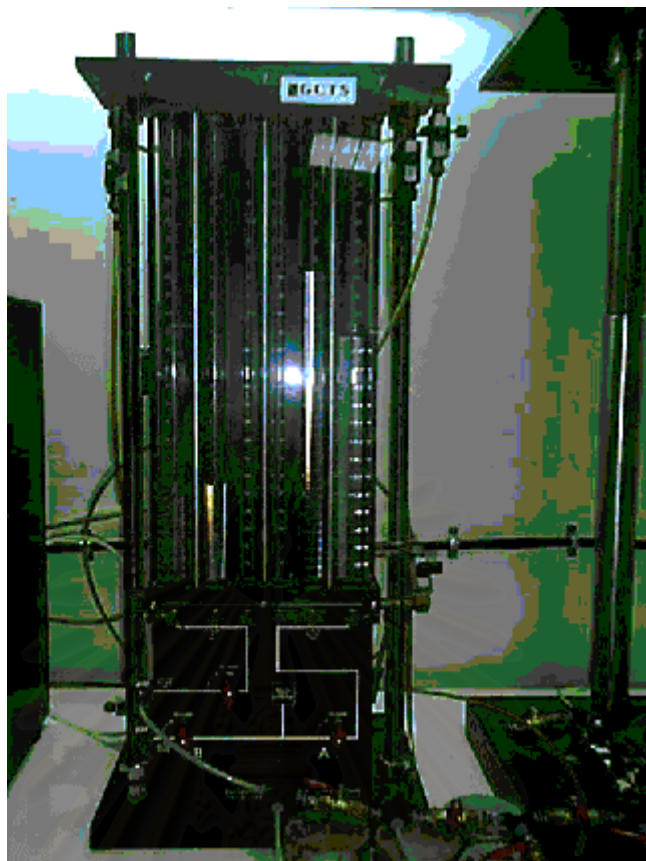
### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเครื่องทดสอบหลัก

- Air Compressor เป็นเครื่องมือสำหรับให้กำเนิดความดันและรักษาความดันภายในเซลล์ (Cell Pressure) และความดันภายในตัวอย่างให้คงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาในช่วงทำการทดสอบ
- Air Filter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการกรองอากาศแห้ง เพราะอากาศที่ได้มาจากเครื่องปั๊มลม จะมีไอน้ำปะปนออกมาด้วย ก่อนจะผ่านเข้าสู่ตู้ควบคุมความดันจะต้องกำจัดไอน้ำ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมความดัน
- Loading Apparatus เป็นเครื่องมือสำหรับให้กำเนิดแรงในแนวแกน ประกอบด้วยเครื่องมือดังต่อไปนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2)
  - Motor คือ ตัวขับเคลื่อนที่ใช้ในการทดสอบ เป็นมอเตอร์ A/C 220 volt ขนาด 100 watt
  - Worm Gear คือ ชุดทดสอบของการเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน ภายในประกอบด้วยเฟืองหลายขนาดประกอบกันซึ่งที่ใช้ในการทดสอบ เป็น 1 : 60 และ 1 : 30
  - Inverter คือ เครื่องมือที่ใช้ในการปรับความเร็วของ Motor ในระดับต่าง ๆ กัน

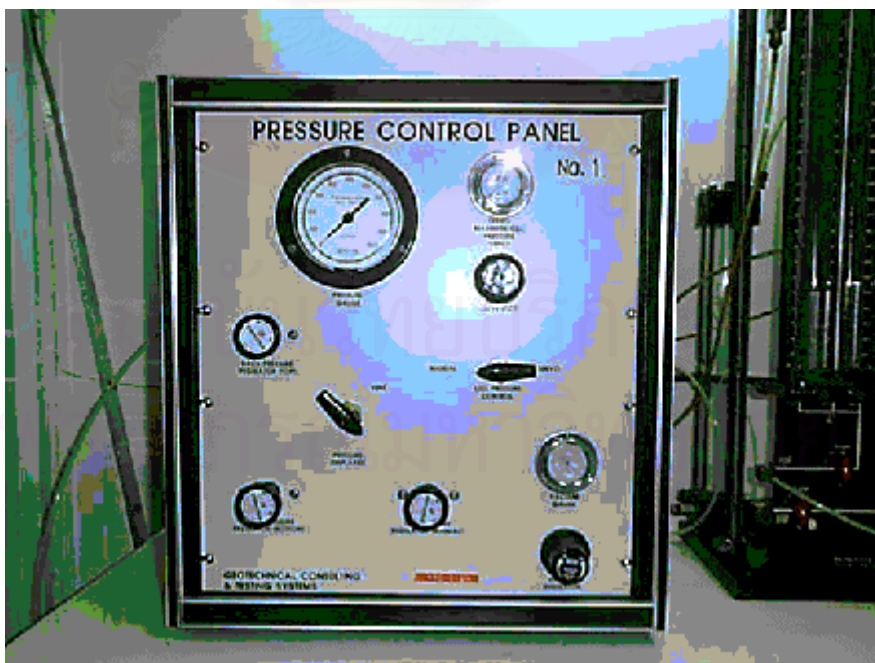
- Volume Change Device เป็นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน ในระหว่างการทำอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) สำหรับการทดสอบแบบ Triaxial ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- Pressure Control Panel เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ปรับความดันและควบคุมความดันภายในเซลล์ (Cell Pressure) และความดันภายในตัวอย่าง ( Back Pressure ) ให้มีระดับความดันสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- Triaxial Cell จะประกอบด้วยเครื่องมือวัดดังต่อไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5
  - Proving Ring เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงในแนวแกนในระหว่างทำการทดสอบ
  - Dial Guage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการเคลื่อนตัวของดิน (Deformation) ในแนวแกนระหว่างทำการทดสอบ
  - Pore Pressure Transducer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความดันภายในตัวอย่างทั้ง Back Pressure และ Excess Pore Water Pressure สำหรับการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained)
  - ไตอะแกรมของอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับใช้สำหรับทดสอบ Repeated Loading Triaxial แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.2 แสดงรูป Loading Apparatus



รูปที่ 3.3 แสดงรูป Volume Change Device



รูปที่ 3.4 แสดงรูป Pressure Control Panel



รูปที่ 3.5 แสดงรูป Triaxial Cell



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ Repeated Loading

### 3.3 การหาคุณสมบัติของดินด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น

#### 3.3.1 พิกัดแอตเตอร์เบอร์ก (Atterberg Limit)

- ชีดเหลว (Liquid Limit)
- ชีดพลาสติก (Plastic Limit)

#### 3.3.2 ปริมาณความชื้น (Water Content)

#### 3.3.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

#### 3.3.4 การทดสอบอัดตัวคายนํ้าแบบหนึ่งมิติ (One-Dimensional Consolidation test)

#### .5 หน่วยน้ำหนักของดิน (Unit Weight)

### 3.4 วิธีการทดสอบ

จะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือ Triaxial Apparatus ในการทดสอบจะทดสอบแบบนํ้าหนักคงที่ (Load Controled) ภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายนํ้า (Undrained Condition) การอัดตัวคายนํ้าเป็นแบบหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropically) โดยใช้ค่า  $\sigma_{vc}$  เท่ากัน ทุก Depth คือ 200 กิโลปาสคาล และระดับของแรงที่กระทำต่อดินมี 3 ระดับ คือ  $0.8S_u$ ,  $0.9S_u$  และ  $1.0S_u$

ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบ

Depth (m)	$\sigma_{vc}$ (kPa)	Shear Stress Level	$\sigma_p$ (t/m <sup>2</sup> )
7.50-8.50 m.	200	0.8, 0.9, 1.0 $S_u$	11.20
10.50-11.50 m.	200	0.8, 0.9, 1.0 $S_u$	17.20

### 3.5 ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

#### 3.5.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างที่ทำการเก็บและหุ้มด้วยฟอยด์นำมาทริม
- 2) ทำการทริมตัวอย่างดิน ให้ได้ขนาดตามมาตรฐานโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.5 ซม. และความสูงประมาณ 7.20 ซม. พร้อมทั้งตบแต่งผิวตัวอย่างดินให้เรียบ
- 3) หาปริมาณความชื้นตัวอย่างดินโดยนำดินที่เหลือจากการทริมที่ได้จากด้านบน ด้านล่าง ด้านข้างของตัวอย่างดินไปอบแห้ง

- 4) ชั่งน้ำหนักและวัดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง และ ความสูง ของตัวอย่างดิน ก่อนนำไปติดตั้งกับเครื่องมือทดสอบ

### 3.5.2 ติดตั้งตัวอย่างดินกับชุดเครื่องทดสอบ

- 1) นำตัวอย่างดินมาวางบน Pedestal โดยมี Porous Stone และกระดาษกรองไว้ก่อนทั้งบนและล่าง นำกระดาษกรอง ( Side Drain ) ที่ได้ตัดมาแล้วทำการหุ้มด้านข้างตัวอย่างโดยรอบเพื่อช่วยในการระบายน้ำในระหว่างทำการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)
- 2) สวม Membrane หุ้มตัวอย่างดิน เพื่อป้องกันน้ำภายในเซลล์ซึมผ่านเข้าตัวอย่างดิน
- 3) รััด O-ring ที่ Base ของตัวอย่าง ทำเพื่อป้องกันน้ำภายในเซลล์ไหลซึมผ่านเข้าตัวอย่างดิน
- 4) ใส่ Top Cap วางบน Porous stone และ ทำการรััด O-ring ที่ Top Cap
- 5) กำจัดฟองอากาศในสายยางทุกเส้นด้วยน้ำกลั่นที่ทำการ De-aired แล้ว เพื่อป้องกันฟองอากาศภายในสายยางด้านความดันที่ใช้สำหรับการทำ Saturation
- 6) ใส่ Cell แล้วทำการขัน Plate ที่ยึดบน Cell ให้แน่นพอประมาณ
- 7) ทำการเปิด Valve เต็ม De-aired water supply เข้า Cell
- 8) ทำการติดตั้ง Proving Ring เข้ากับแกน Ram และ Dial Guage บน Plate ที่ยึด Ram
- 9) ขันน็อต Lock แกน Ram เพื่อไม่ให้แกน Ram ตกลงมากกระทบกับตัวอย่างดิน

### 3.5.3 ขั้นตอนทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว (Saturation)

หลังจากทำการปล่อยน้ำเข้าสู่ Cell แล้ว ทำการเพิ่มความดันภายใน Cell ให้อยู่ที่ 10 kPa และความดันภายในตัวอย่างอยู่ที่ศูนย์ จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มความดันภายใน Cell และความดันภายในตัวอย่าง รักษาผลต่างความดันภายใน Cell กับภายในตัวอย่างให้คงที่ประมาณ 10 kPa ตลอดการเพิ่มความดัน จนได้ความดันภายในตัวอย่างที่ 200 kPa และความดันภายใน Cell ที่ 210 kPa ปล่อยให้ไว้ประมาณ 1-2 วัน หลังจากนั้นทำการตรวจสอบค่า B parameter ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 95% ทำการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ต่อไป



### 3.5.4 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

สำหรับการทดสอบนี้ ใช้วิธี Isotropically Consolidation ซึ่งใช้ Effective Confining Stress ที่ 200 kPa ทุกความลึกที่ทำการทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ปิด Valve ระบายน้ำ (Drain) บนและล่างของตัวอย่างและเพิ่มความดันภายใน Cell (Cell Pressure) จนกระทั่งได้ค่าผลต่างความดันภายนอก Cell และความดันภายในตัวอย่าง (Back Pressure) เท่ากับ 200 kPa ต่อมาทำการเปิด Valve ระบายน้ำบนและล่าง และทิ้งไว้ประมาณ 24 ชม. โดยตรวจสอบค่า Volume Change และ Excess Pore Pressure ในตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง แล้วจึงทำการ Shear ต่อไป

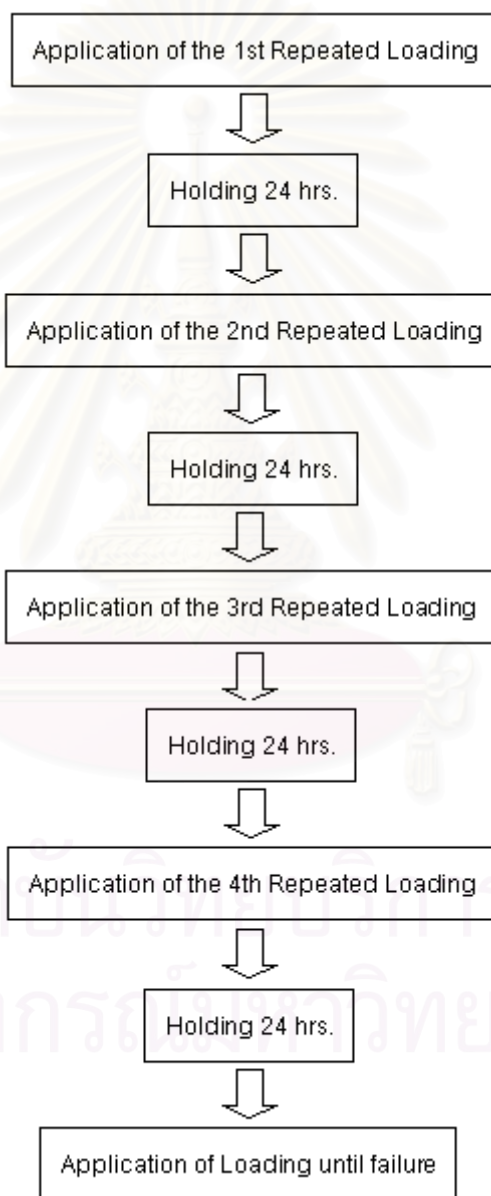
### 3.5.5 Apply Repeated Loading มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ทำการ Shear ตัวอย่างดิน Monotonic Loading โดยใช้อัตราเร็วประมาณ 2.6%Strain/ชม. ในแต่ละความลึกที่จะทำการทดสอบ โดย Shear ไปที่ประมาณ 10%Strain แล้วทำการหาค่า  $q_{max}$  ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2_{max}$
- 2) หลังจากที่ได้ค่า  $q_{max}$  ในแต่ละ Depth แล้วนำค่า  $q_{max}$  ที่ได้มาใช้ โดยค่า Maximum Repeated Loading จะเท่ากับ 0.8  $q_{max}$  , 0.9  $q_{max}$  , 1.0  $q_{max}$  ในแต่ละตัวอย่างของการทดสอบโดยเปรียบเทียบกับ Area ของตัวอย่างที่ได้หลังจาก Consolidation แล้วนำมาคำนวณหาน้ำหนักที่ต้องกดลงบนตัวอย่าง ซึ่งค่าน้ำหนักที่คำนวณได้จะใช้เป็นค่า Load<sub>max</sub> ซึ่งคงที่ตลอดการทดสอบ
- 3) เมื่อได้ค่า Load<sub>max</sub> แล้ว จะทำการคำนวณกลับไปหา Proving Ring ว่า จะต้องทำการกดตัวอย่างดินถึงระดับเท่าใด
- 4) ทำการปิดวาล์วระบายน้ำ ( Undrained ) และเริ่มทำการ Shear ตัวอย่างดินจนกระทั่งถึงค่า Load<sub>max</sub> และทำการหยุดทันทีและทิ้งไว้ 24 ชม. ตั้งแต่ทำการหยุดเมื่อครบ 24 ชม. ก็จะเริ่มทำการ Shear ตัวอย่างดินต่อไปจนกระทั่งถึงค่า Load<sub>max</sub> ค่าเดิม ทำอย่างนี้ประมาณ 4 วัน หลังจากนั้นทำการ Shear ตัวอย่างดินจนได้ค่าประมาณ 90%Strain จน Failure ตั้งแต่เริ่มทำการ Shear บันทึกค่า Load , Axial Deformation , Excess Pore Pressure

### 3.5.6 นำตัวอย่างดินออกจากเซลล์ หลังจากการทดสอบเสร็จ

- 1) เปิดวาล์วระบายน้ำจาก cell ทิ้ง

- 2) ค่อย ๆ ลดความดันภายในตัวอย่าง ( Back Pressure ) และความดันภายในเซลล์ (Cell Pressure) ตามลำดับ
- 3) ชั้นน้ำที่ยึด Plate บน cell ออก
- 4) ชั้นข้อต่อแกนของ Proving Ring กับ Ram ออก
- 5) ถอด O-ring ที่ Top Plate และ Pedestal
- 6) ถอด Membrane และกระดาศกรองที่ช่วยระบายน้ำระหว่างการอัดตัวคายน้ำออก จากตัวอย่างดินและนำไปอบแห้ง เพื่อหาปริมาณความชื้นหลังการทดสอบ



รูปที่ 3.7 Flow Chart แสดงกระบวนการทดสอบ

### 3.6 รายการคำนวณ

#### 3.6.1 คุณสมบัติของตัวอย่างก่อนการทดสอบ

$W$	=	น้ำหนักทั้งหมดของมวลดิน
$V$	=	ปริมาตรทั้งหมดของมวลดิน
$W_s$	=	น้ำหนักของส่วนที่เป็นเนื้อดิน
$V_s$	=	ปริมาตรที่เป็นของแข็งมวลดิน
$W_w$	=	น้ำหนักของส่วนที่เป็นน้ำ
$V_w$	=	ปริมาตรส่วนที่เป็นน้ำ
$V_v$	=	ปริมาตรของช่องว่างในมวลดิน

- ปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้น (Initial Water Content)

$$W = \frac{W_w}{W_s} \quad \dots(3.1)$$

- ปริมาตรของส่วนที่เป็นเนื้อดิน (Volume of Solids)

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} \quad \dots(3.2)$$

- หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight)

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \quad \dots(3.3)$$

- อัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (Initial Void Ratio)

$$Se = wG_s \quad \dots(3.4)$$

- องศาความอิ่มตัว (Initial Degree of Saturation)

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad \dots(3.5)$$

#### 3.6.2 คุณสมบัติของตัวอย่างหลังการอัดตัวคายน้ำ

- ความสูงของตัวอย่าง

$$H_c = H_0 - \Delta H \quad \dots(3.6)$$

- $H_c$  = ความสูงของตัวอย่างหลังการอัดตัวคายน้ำ  
 $H_0$  = ความสูงของตัวอย่างเริ่มต้น  
 $\Delta H$  = การเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างหลังการอัดตัวคายน้ำ

- พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

$$A_c = \frac{V_0 - \Delta V}{H_0 - \Delta H} \quad \dots(3.7)$$

- $A_c$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างหลังการอัดตัวคายน้ำ  
 $V_0$  = ปริมาตรของตัวอย่างเมื่อเริ่มต้น  
 $\Delta V$  = การเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างการทำ Consolidation  
 - การหา  $Load_{max}$  (P)

$$\begin{aligned}
 \text{Stress Level} &= xq \\
 P &= A_c xq \quad \dots(3.8)
 \end{aligned}$$

- $x$  = %Stress Level  
 $q$  =  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$   
 $P$  = น้ำหนักที่ใช้ในการกดตัวอย่าง

### 3.6.3 คุณสมบัติของตัวอย่างขณะทำการ Repeated Loading

$$E = \frac{q}{\% \varepsilon} \times 100$$

- $E$  = Young's Modulus  
 $q$  =  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$   
 $\% \varepsilon$  =  $\frac{\Delta l}{l_0} \times 100$

#### บทที่ 4 ผลการทดสอบ

ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบได้มาจากตัวอย่างดินที่เก็บจากสนามฟุตบอล บริเวณภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 7.50-8.50 เมตร และที่ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร ทำการทดสอบในเครื่องทดสอบ Triaxial เป็นการทดสอบในแบบ Strain Controlled ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบของคุณสมบัติดินในตาราง 4.1-4.2 แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 4.1-4.27 โดยรูปที่ 4.1-4.11 เป็นผลการทดสอบการให้แรงซ้ำซากหลายรอบ ซึ่งดินจะมีการยืดตัวออกมาเนื่องจากพฤติกรรมของการเป็น Elastic ของดินเอง รูปที่ 4.12-4.27 เป็นผลการทดสอบแรงซ้ำซากที่มีการกระทำของรอบที่น้อยกว่าแตกต่างจากการทดสอบแบบแรกที่จะมีการปล่อยให้ดินเหนียวเกิดการระบายออกของแรงดันน้ำก่อน 24 ชั่วโมงแล้วจึงทำการให้แรงอีกครั้ง โดยจะให้แรงซ้ำซากเหมือนกันต่างกันว่าวิธีการลดแรงจะหยุดที่ระดับความเค้นที่ต้องการ โดยจะเห็นว่าพฤติกรรมของดินจากความเป็น Elastic เมื่อยืดออก ซึ่งจะอธิบายต่อไปจากรูปที่แสดงผลการทดสอบ โดยรูปที่ 4.12-4.19 เป็นผลที่จะได้จากการทดสอบที่ระดับความลึก 7.50-8.50 เมตร และ รูปที่ 4.20-4.27 เป็นผลที่จะได้จากการทดสอบที่ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร

ตาราง 4.1 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวที่ระดับความลึก 7.50-8.50 เมตร

Water Content (%)	46.5
Plastic Limit (%)	37.8
Liquid Limit (%)	84.3
Plastic Index	45.5
Specific Gravity	2.69
Total Unit Weight ( t/m <sup>3</sup> )	1.58
Dry Unit Weight ( t/m <sup>3</sup> )	1.08
Color	ดำ

ตาราง 4.2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวที่ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร

Water Content (%)	43.3
Plastic Limit (%)	38.0
Liquid Limit (%)	81.3
Plastic Index	43.3
Specific Gravity	2.63
Total Unit Weight ( t/m <sup>3</sup> )	1.65
Dry Unit Weight ( t/m <sup>3</sup> )	1.15
Color	ดำปนเทา

#### 4.1 ผลการทดสอบตัวอย่างดิน

4.1.1 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากหลายรอบ จากตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร

4.1.1.1 แสดงทางเดินของความเค้นของดินอยู่ในรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการทดสอบแบบ Monotonic มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 60 kPa และเมื่อทำการลดแรงที่ระดับความเค้น 50 kPa พบว่าดินเหนียวที่ทำการทดสอบมีความเป็น Elastic การทดสอบทำการลดแรงมาถึงศูนย์แล้วจึงให้แรงให้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการลดแรงดินแต่ละครั้งดินมีอยู่ในสภาพอัดแน่นไม่ปกติมากขึ้น จนครั้งสุดท้ายมีค่าอัตราส่วนอัดแน่นไม่ปกติเท่ากับ 1.42 จากนั้นทำการให้แรงจนดินวิบัติพบว่าดินเหนียวมีทางเดินของความเค้นคล้ายกับดินที่ได้ทำการทดสอบแบบ Monotonic โดยมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 61 kPa โดยรูปที่ 4.3 แสดงผลทดสอบโดยรวม ผลกระทบของ Intermediate Principal Stress เข้ามาด้วย

4.1.1.2 แสดงความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวของดินอยู่ในรูปที่ 4.2 พบว่าแต่ละรอบของการให้แรงซ้ำซากแล้วทำการลดแรงจะมีการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นถาวรมากขึ้นแต่คุณสมบัติทางด้านกรับแรงของดินจะไม่เปลี่ยนแปลง

4.1.1.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในโพรงดินกับการเคลื่อนตัวของดิน ในรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อทำการลดแรงแต่ละครั้งจะมีแรงดันน้ำที่ไม่สามารถระบายออกจากช่องว่างดินได้ทัน

และ รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในโพรงดินกับน้ำหนักที่มากกระทำกับตัวอย่างดิน

4.1.1.4 แสดงผลการทดสอบเมื่อเกิด Stress Relaxation ในตัวอย่างดิน อยู่ในรูปที่ 4.7 พบว่าไม่มีการเกิด Stress Relaxation เนื่องจากการลดลงของความเค้นลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงอยู่ในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ซึ่งเป็นการทำให้ดินค่อยๆ ยึดตัวขึ้นมา

4.1.1.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในโพรงดินกับเวลา ในรูปที่ 4.10 ซึ่งสามารถได้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อ ทำการลดความเค้นเฉือนลงเป็นศูนย์แต่ก็ยังคงมีความดันน้ำในโพรงดินไม่ลดลงตามไปด้วย และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าอัตราส่วนอัตราตัวแน่นไม่ปกติเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแรงดันน้ำในโพรงดินกับเวลา นี้มีลักษณะคล้ายๆกันกับ การเคลื่อนตัวของดินกับเวลาซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.11

4.1.2 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากในกรณีที่ใช้จำนวนรอบน้อยกว่าแต่มีการทิ้งให้แรงดันน้ำเกิดการระบายออก 24 ชั่วโมง

4.1.2.1 แสดงความเค้นเฉือนของดินอยู่ในรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อทำการทดสอบแบบ Monotonic มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 56 kPa สำหรับตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 7.50-8.50 เมตร และรูปที่ 4.20 กับตัวอย่างดินที่ความลึก 10.50-11.50 เมตร มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 57 kPa โดยได้แสดงผลของของความเค้นเฉือนในตาราง 4.3 และ 4.4 กับการให้แรงซ้ำซากหลังจากการถอนน้ำหนักออก 24 ชั่วโมง โดยการลดแรงที่ร้อยละของกำลังรับแรงเฉือนต่างๆกัน

ตาราง 4.3 แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 7.50-8.50 เมตร ( $q$ , kPa)

ระดับความเค้น	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
1.0Su	54	53.5	53	52.5
0.9Su	50.5	49.5	50.5	50
0.8Su	45.5	45	45	45

ตาราง 4.4 แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 7.50-8.50 เมตร ( $q^*$ , kPa)

ระดับความเค้น	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
1.0Su	108	107	106	105
0.9Su	101	99	101	100
0.8Su	91	90	90	90

ตาราง 4.5 แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 10.50-11.50 เมตร ( $q$ , kPa)

ระดับความเค้น	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
1.0Su	54	54	54	53.5
0.9Su	50.5	49	50	50
0.8Su	46.5	46	46	46

ตาราง 4.6 แสดงความเค้นเฉือนที่ความลึก 10.50-11.50 เมตร ( $q^*$ , kPa)

ระดับความเค้น	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
1.0Su	108	108	108	107
0.9Su	101	98	100	100
0.8Su	93	92	92	92

4.1.2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในโพรงดินเมื่อทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วทำการให้แรงอีกครั้งหนึ่งกับการเคลื่อนตัวอยู่ในรูปที่ 4.15,4.23 พบว่าเมื่อทำการลดแรงแต่ละครั้งจะมีแรงดันน้ำที่ไม่สามารถระบายออกจากช่องว่างดินได้ทันทำให้ดินเกิดความดันน้ำเพิ่มขึ้น และจะสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อทำการทดสอบการลดแรงมากขึ้น ซึ่งเมื่อการเคลื่อนตัวเพิ่มจะมีแนวโน้มคงที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง 4.7 แสดงความดันน้ำในโพรงดินที่ความลึก 7.50-8.50 เมตร (kPa)

ระดับความเค้น	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
1.0Su	88	96	99	102
0.9Su	77	82	88	92
0.8Su	70	76	78	80

ตาราง 4.8 แสดงความดันน้ำในโพรงดินที่ความลึก 10.50-11.50 เมตร (kPa)

ระดับความเค้น	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
1.0Su	87	95	100	101
0.9Su	76	83	87	93
0.8Su	68	75	78	80

#### 4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบตัวอย่างดินเหนียว

##### 4.2.1 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากในกรณีที่ใช้จำนวนรอบที่มาก ๆ

###### 4.2.1.1 ความสัมพันธ์ของ ความเค้นและความเครียด

แสดงผลของการทดสอบใน รูปที่ 4.1-4.4 โดยทำการลดแรงที่ระดับความเค้น 50 kPa แสดงให้เห็นได้ชัดว่าคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของดินไม่เปลี่ยนแปลงจะเห็นว่าเมื่อ ทำการให้แรงใหม่ในรอบต่อไปใน รูปที่ 4.2, 4.4 ค่า Modulus of Elasticity ของดินไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งเมื่อทำการทดสอบต่อไปจะให้ค่าที่ลดลง ถึงแม้ว่าจะมีการเคลื่อนตัวที่ไม่สามารถย้อนกลับได้เกิดขึ้นมากเพราะว่าดินที่ใช้ทดสอบมีสถานะแบบอัดแน่นปกติเมื่อเริ่ม แต่จากการทดสอบที่ลดแรงหลายครั้งแสดงให้เห็นว่าดินมีสภาพเป็นดินแบบสถานะอัดแน่นไม่ปกติมีค่าอัตราส่วนการอัดแน่นไม่ปกติเท่ากับ 1.42 คล้ายกับการทดสอบ Monotonic โดยกำลังรับกำลังของแรงเฉือนยังไม่เปลี่ยนแปลง

#### 4.2.1.2 ความสัมพันธ์ของการเกิดแรงดันน้ำในโพรงดิน

แสดงผลความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของน้ำในโพรงดินใน รูปที่ 4.5-4.6 จะเห็นว่าแรงดันน้ำในโพรงดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่อทำการลดแรง ซึ่งจะวิบัติเมื่อค่าประมาณ 117 kPa เมื่อทำการทดสอบแบบ Monotonic และจากการให้จำนวนครั้งของแรงมากขึ้น จะพบว่าแต่ละรอบจะมีค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดแรงแต่ละรอบจะมีแรงดันน้ำที่ค้างอยู่ในตัวอย่างดิน ซึ่งไม่สามารถระบายออกได้เนื่องจากเม็ดดินที่มีขนาดเล็กมากซึ่งไม่สามารถคลายความดันได้ในทันทีและเมื่อทำการให้จำนวนครั้งของแรงหลายๆ จะมีแนวโน้มทำให้เกิดจุดสูงสุดของแรงดันน้ำ ซึ่งจะคล้ายกันกับผลการทดสอบของดินเมื่อทดสอบแบบ Monotonic เมื่อใช้ตัวอย่างดินที่มีค่าอัตราส่วนการอัดแน่นไม่ปกติ

#### 4.2.1.3 ผลจากการเกิด Stress Relaxation

จากผลทดสอบพบว่าไม่มีการเกิด Stress Relaxation ซึ่งโดยปกติจะมีเนื่องจากการลดแรงโดยทันทีสังเกตได้จาก รูปที่ 4.7 เนื่องจากการทดสอบของ Lacerda, W (1975) แสดงให้เห็นพฤติกรรมของดินเหนียวเมื่อเกิด Stress Relaxation เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วพบว่าดินที่ทำการลดแรงนี้การยืดตัวกลับของดินไม่มีผลของ Stress Relaxation โดยรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับการลดลงของความเค้นเทียบกับเวลาที่ทำให้เกิดการลดลงของ Stress Relaxation

#### 4.2.2 ผลการทดสอบการให้แรงแบบซ้ำซากในกรณีที่ทำการลดแรงโดยที่มีการปล่อยให้แรงดันน้ำเกิดการระบายออกก่อน 24 ชั่วโมงแล้วจึงทำการให้แรงใหม่

##### 4.2.2.1 ความสัมพันธ์ของ ความเค้นและความเครียด

สำหรับตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 7.50-8.50 เมตร ได้ทำการแสดงผลของการทดสอบใน รูปที่ 4.12-4.19 โดยทำการลดแรงที่ระดับความเค้นต่างๆกัน 80%, 90%, 100% ของกำลังรับแรงเฉือนของดินดังที่ได้แสดงอยู่ในรูป และแสดงให้เห็นได้ชัดว่าคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของดินไม่เปลี่ยนแปลงจะเห็นว่าเมื่อ ทำการให้แรงใหม่ในรอบต่อๆ ไปใน รูปที่ 4.12 จากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวกับความเค้นแสดงให้เห็นว่า การทดสอบเมื่อทำการลดแรงทุกครั้งจะมีการทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อรอให้แรงดันน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วจึงให้แรงใหม่

สำหรับตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร และแสดงผลของการทดสอบใน รูปที่ 4.20-4.27

#### 4.2.2.2 ความสัมพันธ์ของการเกิดแรงดันน้ำในโพรงดิน

สำหรับตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 7.50-8.50 เมตร และแสดงผลของการทดสอบใน รูปที่ 4.13,4.15,4.16 จะเห็นว่าแรงดันน้ำในโพรงดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงเพิ่มขึ้นและมีทิศทางไปใน ทิศทางเดียวกับแรงกระทำ โดยจะวิบัติเมื่อค่าประมาณ 117 kPa เมื่อทำการทดสอบแบบ Monotonic และจากการให้จำนวนครั้งของแรงมากขึ้นจะพบว่าแต่ละรอบจะมีค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดแรงแต่ละรอบจะมีแรงดันน้ำที่ค้างอยู่ในตัวอย่างดิน ซึ่งไม่สามารถระบายออกได้ เนื่องจากเม็ดดินที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งไม่สามารถคลายความดันได้ในทันทีและเมื่อทำการให้ จำนวนครั้งของแรงหลายๆ จะมีแนวโน้มทำให้เกิดจุดสูงสุดของแรงดันน้ำ ซึ่งจะคล้ายกันกับผลการ ทดสอบของดินเมื่อทดสอบแบบ Monotonic เมื่อใช้ตัวอย่างดินที่มีค่าอัตราส่วนการอัดแน่นเกิน ปกติ

สำหรับตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร แสดงผลของการทดสอบใน รูปที่ 4.21,4.23,4.24

### 4.3 คุณสมบัติของดินทางกลศาสตร์จากการกระทำของแรงแบบซ้ำซาก

ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวกับ Modulus of Elasticity สำหรับตัวอย่างดินที่ทำการ ทดสอบแสดงอยู่ในรูปแสดงผลการทดสอบ โดยรูปที่ 4.17-4.19 แสดงผลการทดสอบที่ระดับความ ลึก 7.50-8.50 เมตร และรูปที่ 4.25-4.27 แสดงผลการทดสอบที่ระดับความลึก 10.50-11.50 เมตร

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาลักษณะของแรงแบบ Repeated Loading ที่ระดับของหน่วยแรงที่กระทำต่างๆ กัน ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบสิ่งก่อสร้างที่จะได้รับผลกระทบ เนื่องจากแรงซ้ำซาก (Repeated Loading)

ข้อมูลของ Young's Modulus, Pore Pressure ฯลฯ ที่ได้มาจากการทดสอบดินเหนียวอ่อนบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ มาจากสนามฟุตบอลภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ระดับความลึก 7.50-8.50 เมตร และ 10.50-11.50 เมตร โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Triaxial Apparatus ทดสอบแบบ ไม่ระบายน้ำ ภายใต้เงื่อนไขของ Strain Controlled

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 Modulus of Elasticity ที่ได้จากการทดสอบโดยใช้วิธี Secant โดยการทำให้แรงแบบ Repeated Loading ให้ค่า  $E_{initial}$  ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อจำนวนรอบต่างๆ จากการทดสอบของ Chi kwong-Fun (1975), Lo Wai Bun (1976) โดย Modulus of Elasticity จะต่ำลงเมื่อจำนวนรอบที่มากขึ้น ประมาณ 15 รอบขึ้นไป ซึ่งจะต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด และตัวอย่างที่ทำการทดสอบ มีค่า  $E_{initial} = 80000$  kPa ที่ตัวอย่างดินลึก 7.5-8.5 เมตร และ  $E_{initial} = 112000$  kPa ที่ตัวอย่างดินลึก 10.50-11.50 เมตร และจากการทดสอบ Monotonic Loading จะให้ค่า Modulus of Elasticity โดยวิธีของ Secant มากที่สุด เมื่อเริ่มทำการทดสอบ และจะมีค่าลดลง เมื่อการเคลื่อนที่ของดินมากขึ้น ซึ่งผลการทดสอบของ Lade (1976) กับ Boston blue Clay พบว่าเป็น Function ของ OCR ด้วย

5.1.2 จากผลการทดสอบพบว่า Pore Pressure มีการเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันกับ Deviator Stress ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้แรงและลดลงเมื่อมีการลดแรงแต่จะลดลงไม่หมดเนื่องจากดินเหนียวจะไม่สามารถระบายน้ำออกได้ในทันที เมื่อการทดสอบที่จำนวนรอบมากขึ้นจะเห็นว่าจะมีแรงดันน้ำในโพรงดินที่ไม่สามารถระบายออกได้ทันมากขึ้นตามไปด้วยทำให้ดินมีสภาพเป็นแบบสภาวะอัดตัวแน่นเกินปกติมากขึ้นจาก รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าดินจะไม่มีการวิบัติมีค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นไม่ปกติประมาณ 1.4 จากการทดสอบครั้งแรก 1.0 ซึ่งถ้าจะทดสอบด้วยแรงซ้ำซากให้ดินวิบัติอาจจะใช้จำนวนรอบถึง 1000 รอบ โดยผลการทดสอบในรูปที่ 4.5 แสดงผลของแรง

ดินน้ำในโพรงดินโดยการลดแรงเพียงอย่างเดียว ส่วนใน รูปที่ 4.15-4.16, 4.23-4.24 ในการลดลงของแรงดันน้ำในโพรงดินจะมีผลของการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในโพรงดินจากการเคลื่อนตัวขึ้นของดิน ซึ่งทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในดินเอง

5.1.3 เมื่อทำการโดยปกติแล้วโดยทั่วไปจะมีการเกิด Stress Relaxation เป็นผลจากการที่ดินจะต้องใช้เวลาชั่วกระยะหนึ่งเพื่อที่จะทำให้เกิดการปรับโครงสร้างภายใน เพื่อให้เกิดพฤติกรรมแบบ Elastic โดยจะเป็นตัวแปรกับเวลาเพียงอย่างเดียว แต่จากการทดสอบในการวิจัยครั้งนี้พบว่าไม่มีการเกิด Stress Relaxation เพราะเป็นผลดีจากการที่มีน้ำหนักของ Ram ที่ช่วยทำให้ดินค่อยๆ ยึดตัวออกมาจากการลดแรง โดยน้ำหนักนี้จะมีผลน้อยมากจากการทดสอบสังเกตได้จากการที่ระดับของแรงลดลงมาเป็นศูนย์เมื่อทำการลดแรง จากรูปที่ 4.1- 4.4

5.1.4 คุณสมบัติทางด้านกรับแรงของดินไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากพฤติกรรมของดินแบบ Elastic เมื่อทำการลดแรงและให้แรงซ้ำอีกครั้งสังเกตว่าจะมีค่า Modulus of Elasticity เท่าเดิม อย่างไรก็ตามจากผลการวิจัยของ Lo Wai Bun (1976), Baladubraniam และ Chui (1976) ได้ผลว่าสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ คุณสมบัติทางด้านกรับแรงของดินจะเปลี่ยนเมื่อเกิดการลดแรงที่ระดับความเค้นสูงๆ และนอกจากนั้นอาจเกิดจากจำนวนรอบที่มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวแกนมากขึ้น โดยจะทำให้คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของดินลดลง และจากการทดสอบของ Chi-Kwang-fun (1975) พบว่าถ้ามีการให้แรงซ้ำซากแก่ตัวอย่างดินหลายๆ จะมีผลทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการทดสอบ

5.2.1 ในการทดสอบ Repeated Loading เพื่อให้รู้พฤติกรรมของดินต้องทำการทดสอบจำนวนรอบมากๆ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมของดินจะเปลี่ยนไปเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น โดยจะทำให้ค่า Undrained Shear Strength ลดลง และค่า Modulus of Elasticity ของดินจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง เนื่องจากจำนวนรอบในการทดสอบไม่มากนักแต่จะมีผลมากเมื่อตัวอย่างทดสอบทำการลดแรงที่ระดับของ Stress ที่สูงขึ้น โดยเมื่อระดับของ Stress สูงขึ้นจะมีผลให้ค่า Modulus of Elasticity มีแนวโน้มต่ำลงเนื่องจากโครงสร้างของดินโดนทำลาย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. วิศวกรรมปฐพี. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธันวาคม 2540 .พิมพ์ครั้งที่ 1

### ภาษาอังกฤษ

Akai, K., Ohnishi, Y. , Kita, K. and Yamanaka, Y. (1979). Experimental Study on Behavior of Cohesive Soil under Repeated Shearing. Jnl. of the Soc. of Materials Sci., 28 , 314:1109-1115.

Balasubramaniam, A. S. and Parameswaran, S. Effects of Repeated Loading on the Stress-Strain Behavior of a Saturated Clay

Chi, K. F. Effects of Repeated Loading on the Stress Strain Behavior of Soft Bangkok Clay Under Undrained Conditions . Thesis AIT(Bangkok) , (1975.)

Hyde, A. F. L. and Brown, S. F. (1976). The Plastic Deformation of a Silty Clay under creep and repeated loading. Geotechnique 26 , 1:173-184.

Lacerda, W. and Hoston, W. N. (1973). Stress Relaxation in Soils. Proc.VIIIth .Icosomef , Moscow 1,1: 221-227

Maschwitz, G. , Richwein, W. and Rizkallah, V. Relevant soil parameters for normally consolidated clay Design parameters in geotechnical engineering. BGS London 2 ,(1979.)

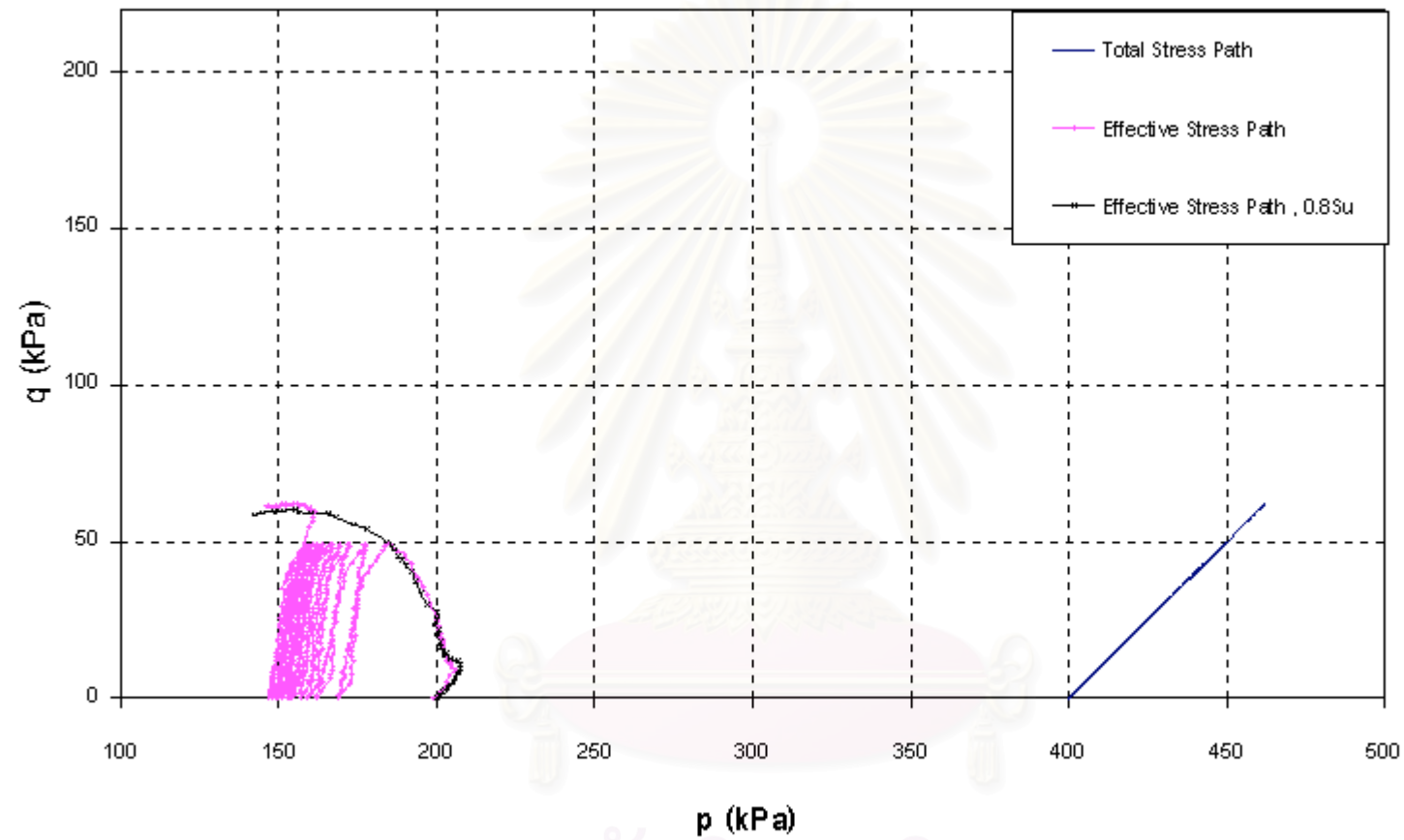
Pusch, R. A physical clay creep model and its mathematical analogy. Third International Conference on Numerical Method in Geomechanics , Aachen ,2-6 April ,(1979.)

Sheu, W. Y. and Chang, N. Y. Cyclic Behavior of a clay : Experiment and Modelling



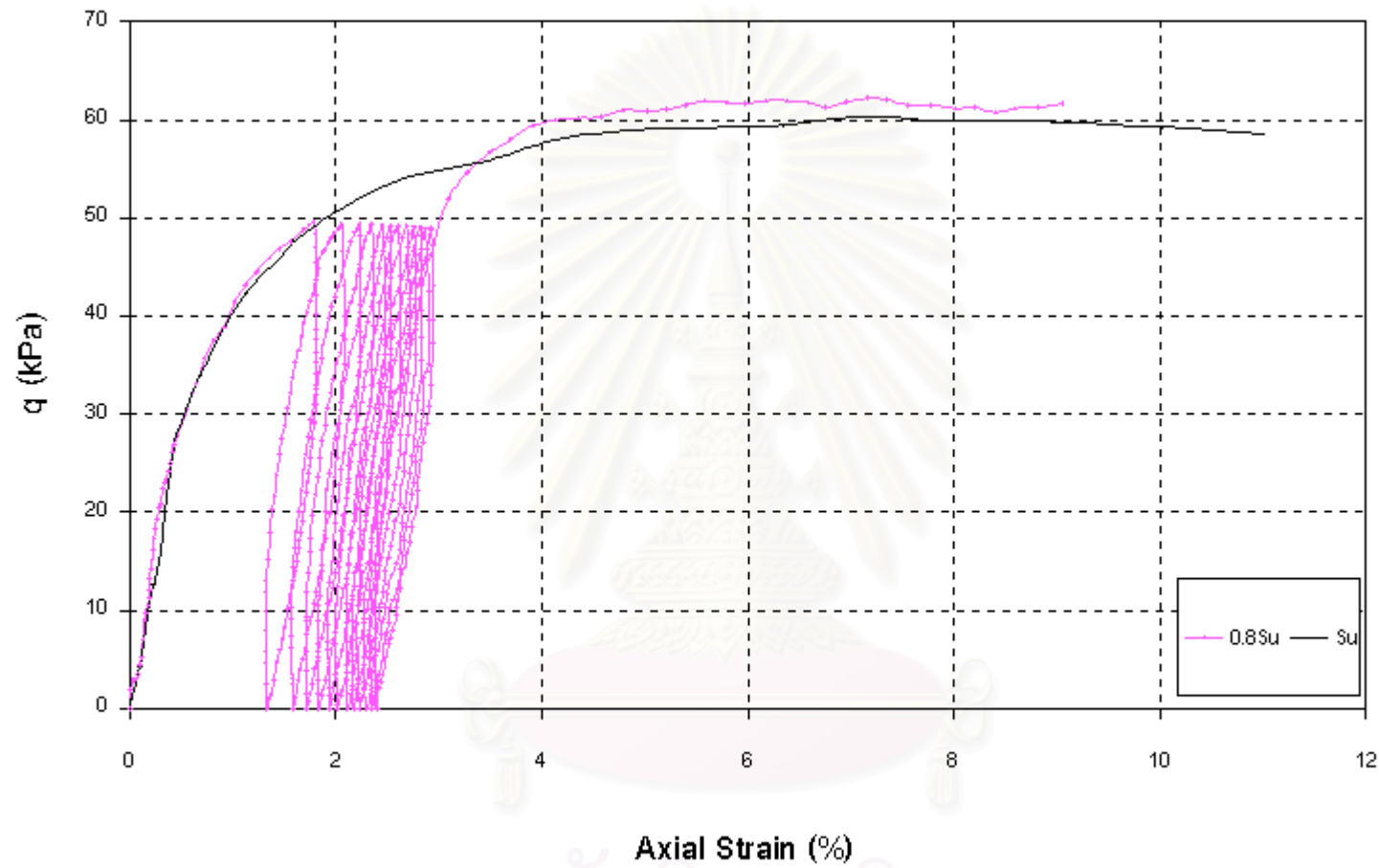
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

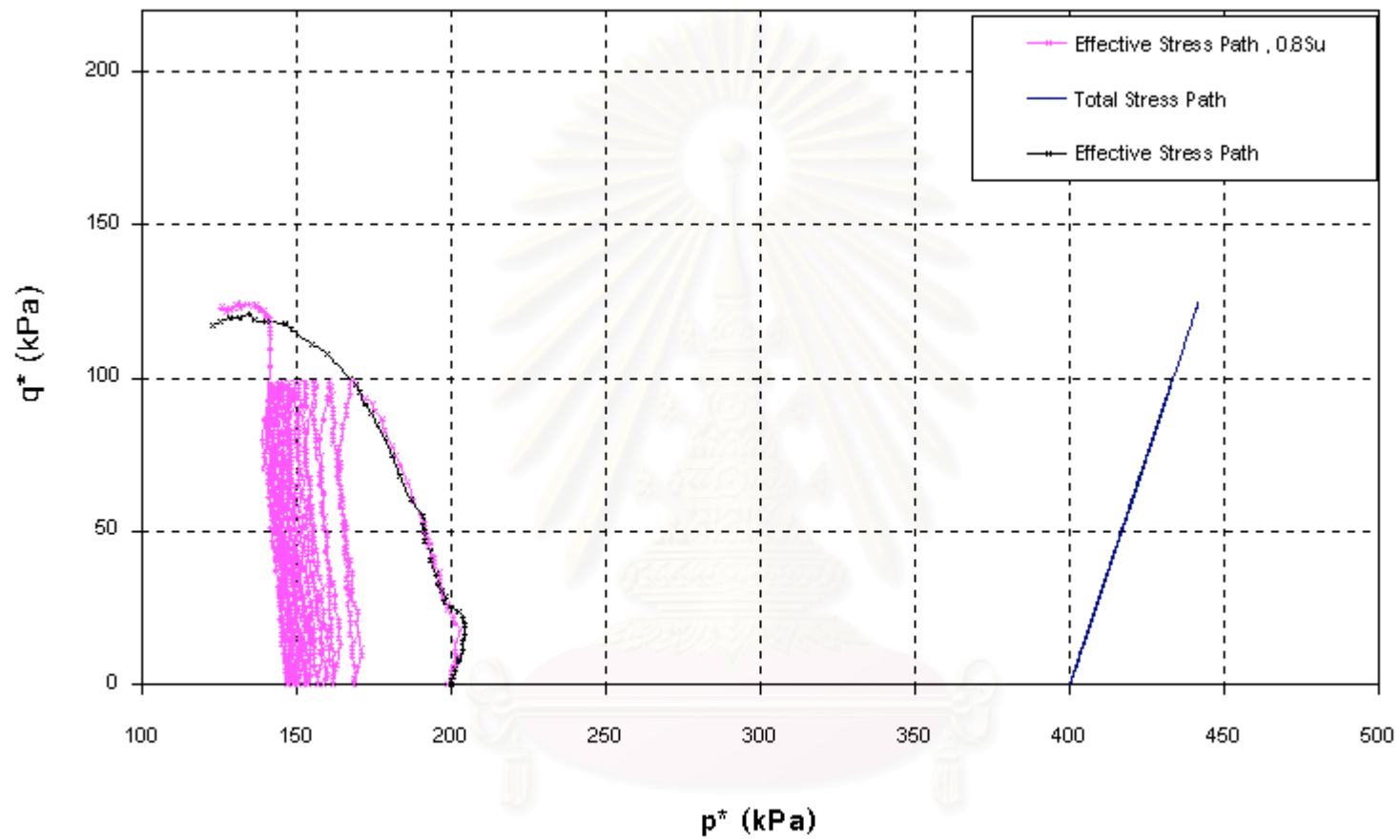


รูปที่ 4.1 แสดงทางเดินของความเค้นในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $p, q$ )  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



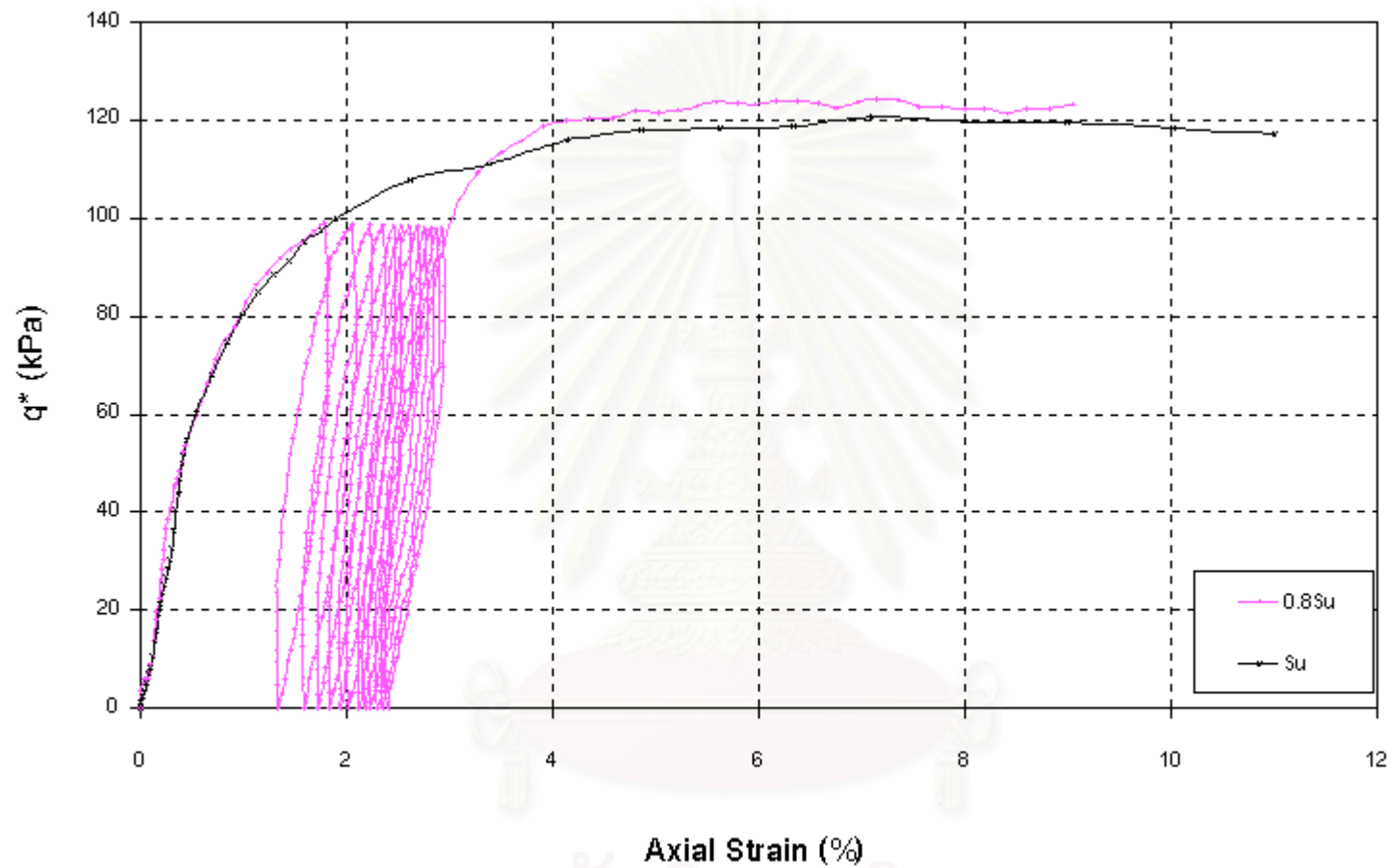


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $q, \epsilon_s$ )

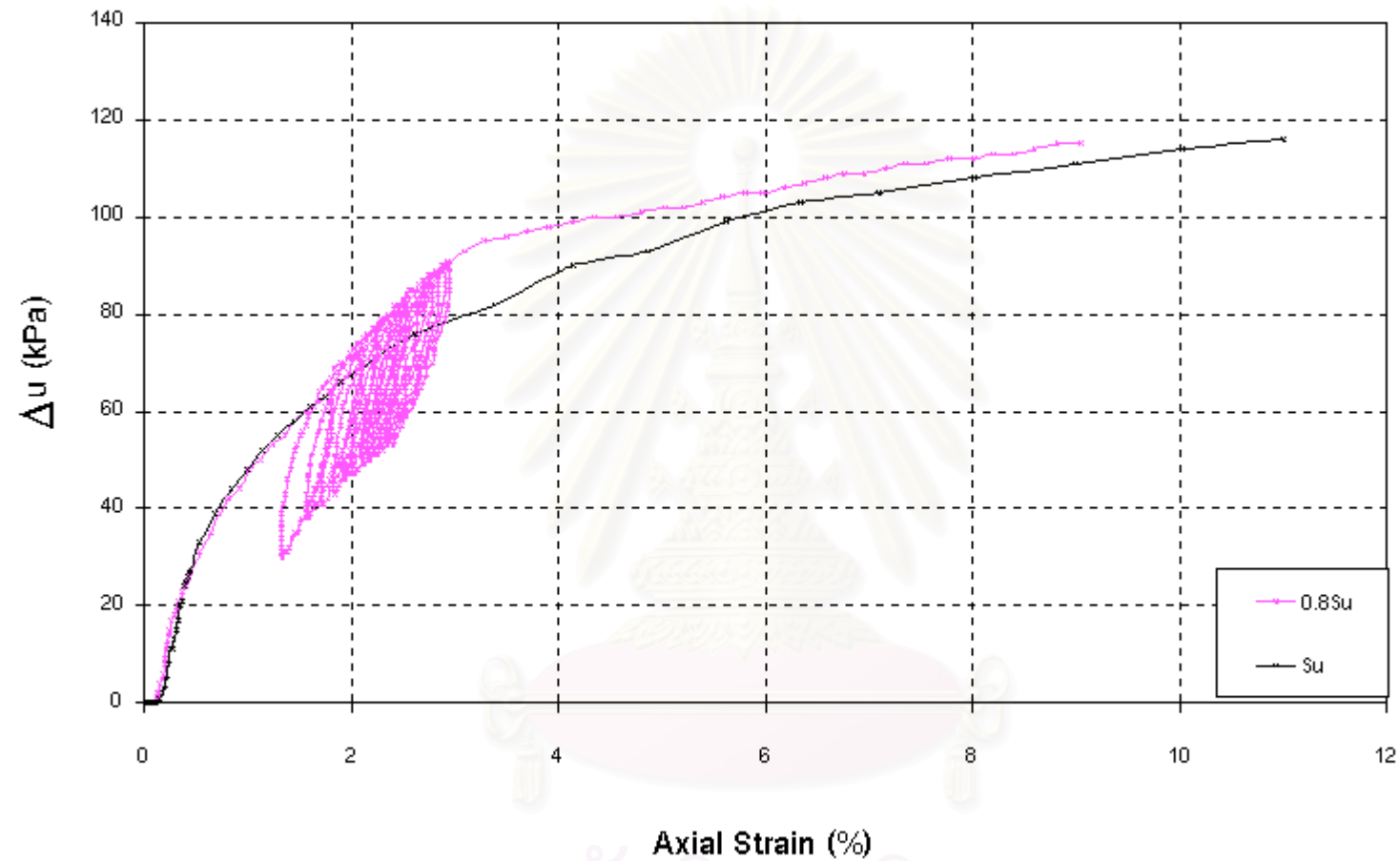


รูปที่ 4.3 แสดงทางเดินของความเค้นในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $p^*, q^*$ )

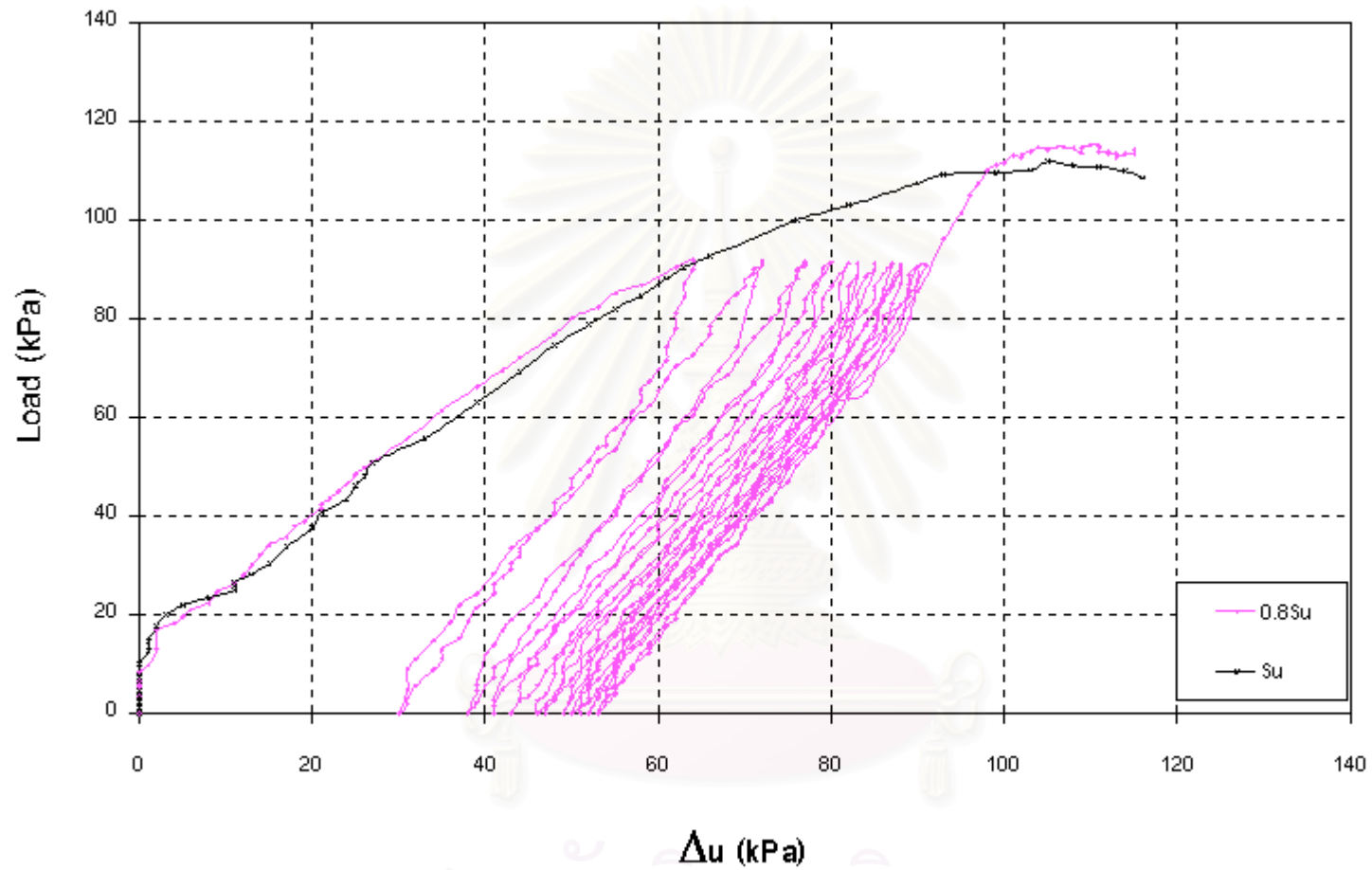
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



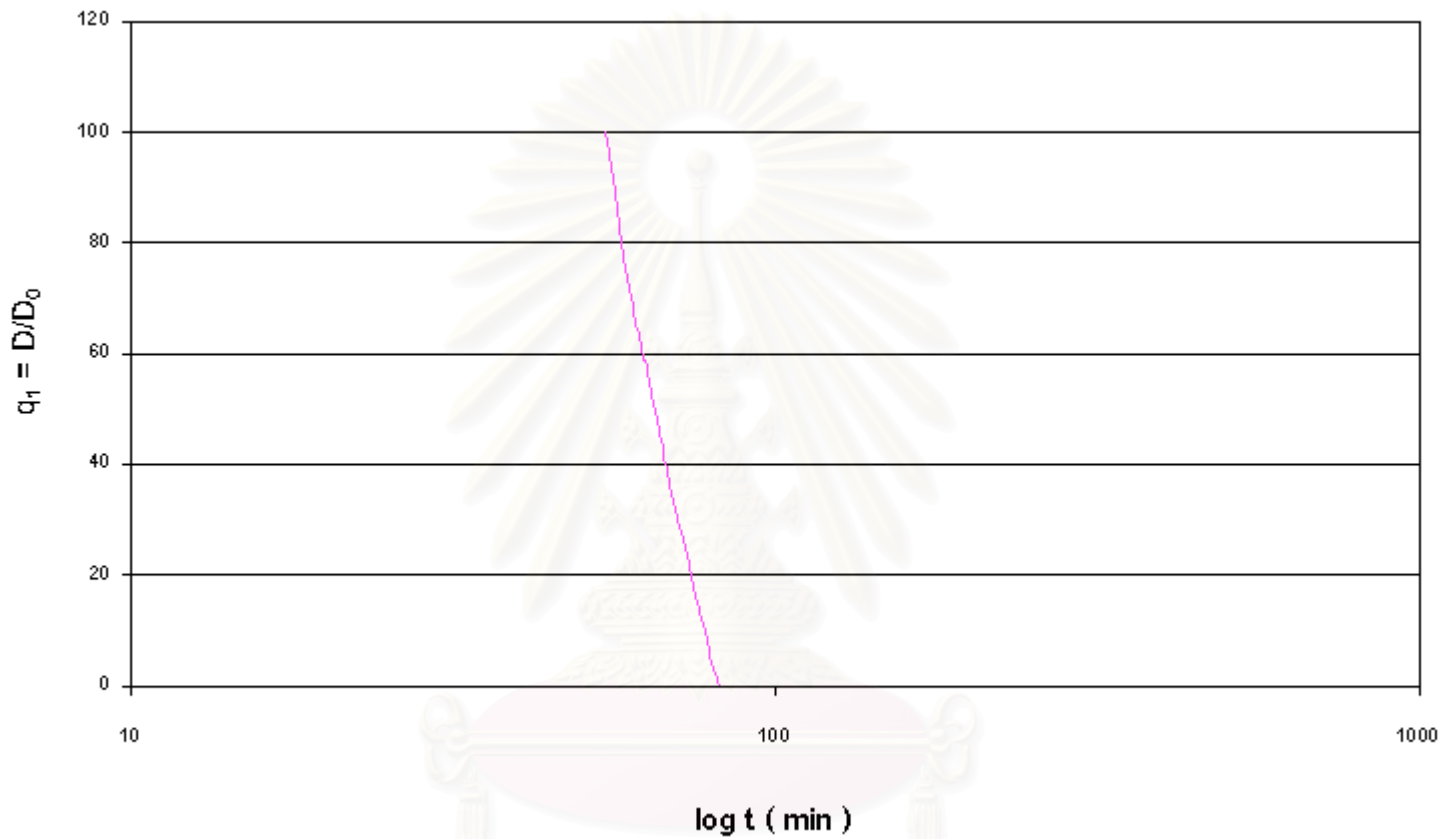
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $q^*, \varepsilon_a$ )



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับการเคลื่อนตัวในแนวแกนในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $\Delta u, \epsilon_a$ )

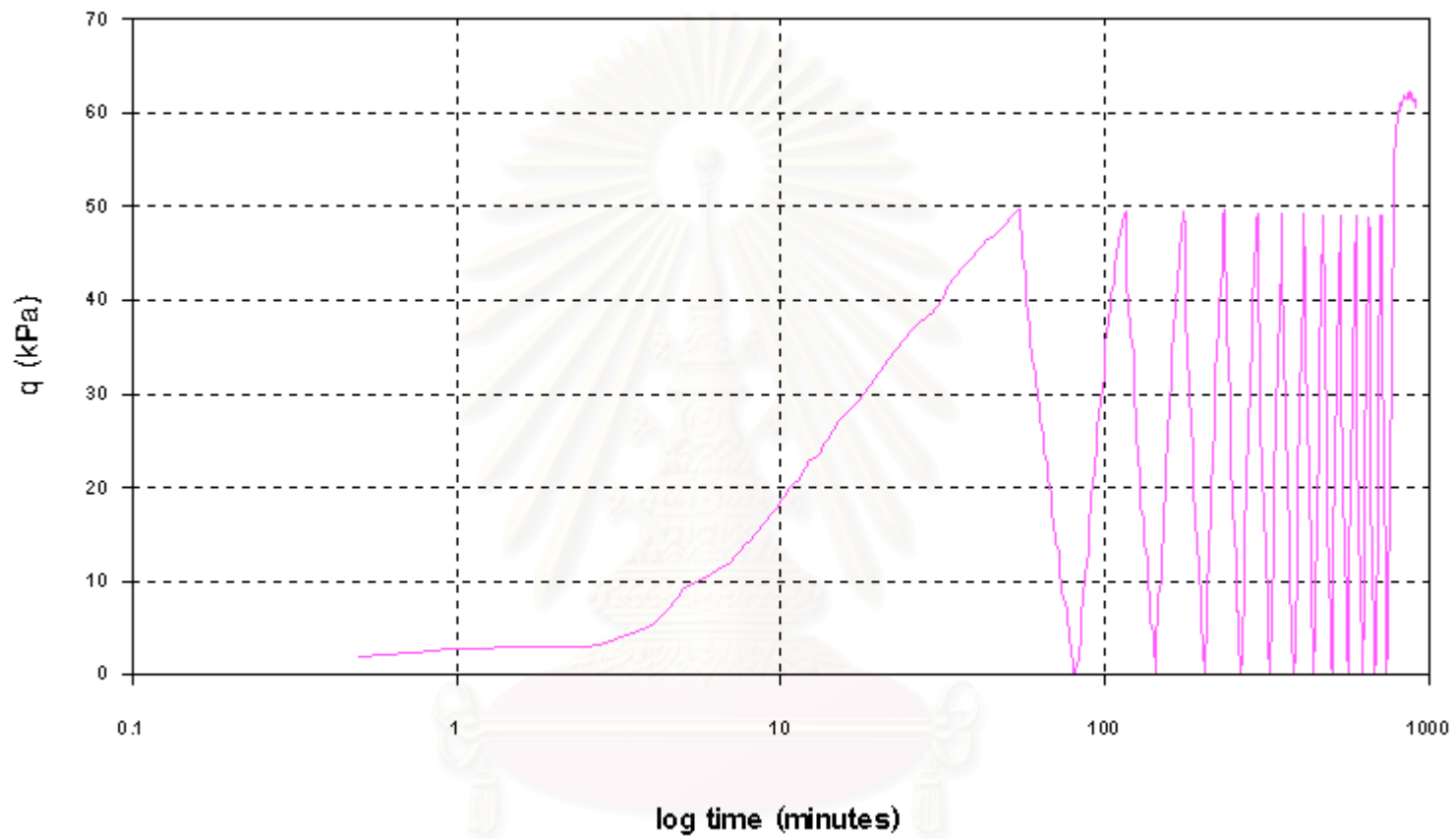


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับแรงที่เพิ่มขึ้นในการทดสอบการให้แรงซ้ำซาก ( $\Delta\sigma, \Delta u$ )



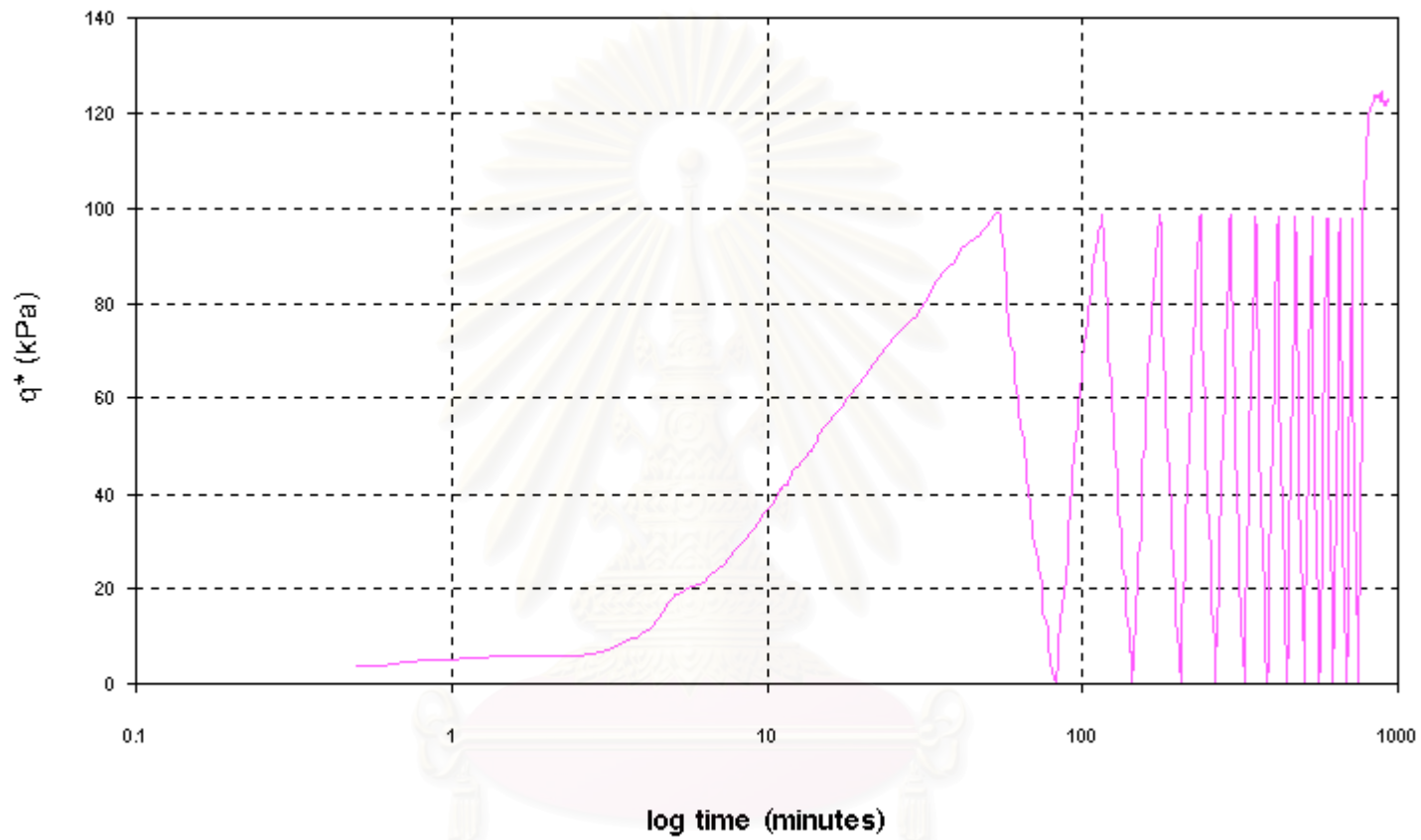
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของการลดแรงในการเกิด Stress Relaxation ( $q_1, t$ )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับเวลาในการทดสอบแรงซ้ซาก ( $q, t$ )

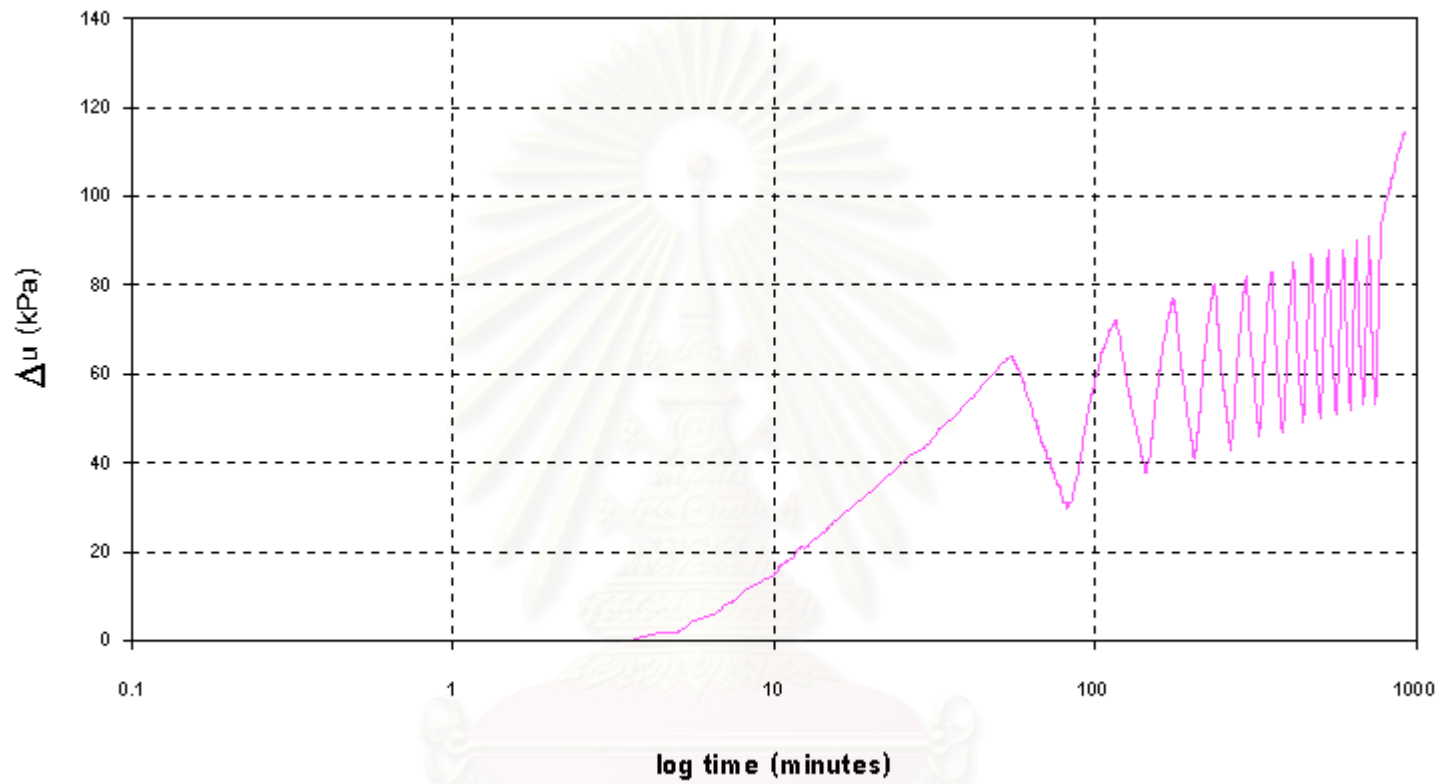
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับเวลาในการทดสอบแรงซ้ซาก ( $q^*, t$ )

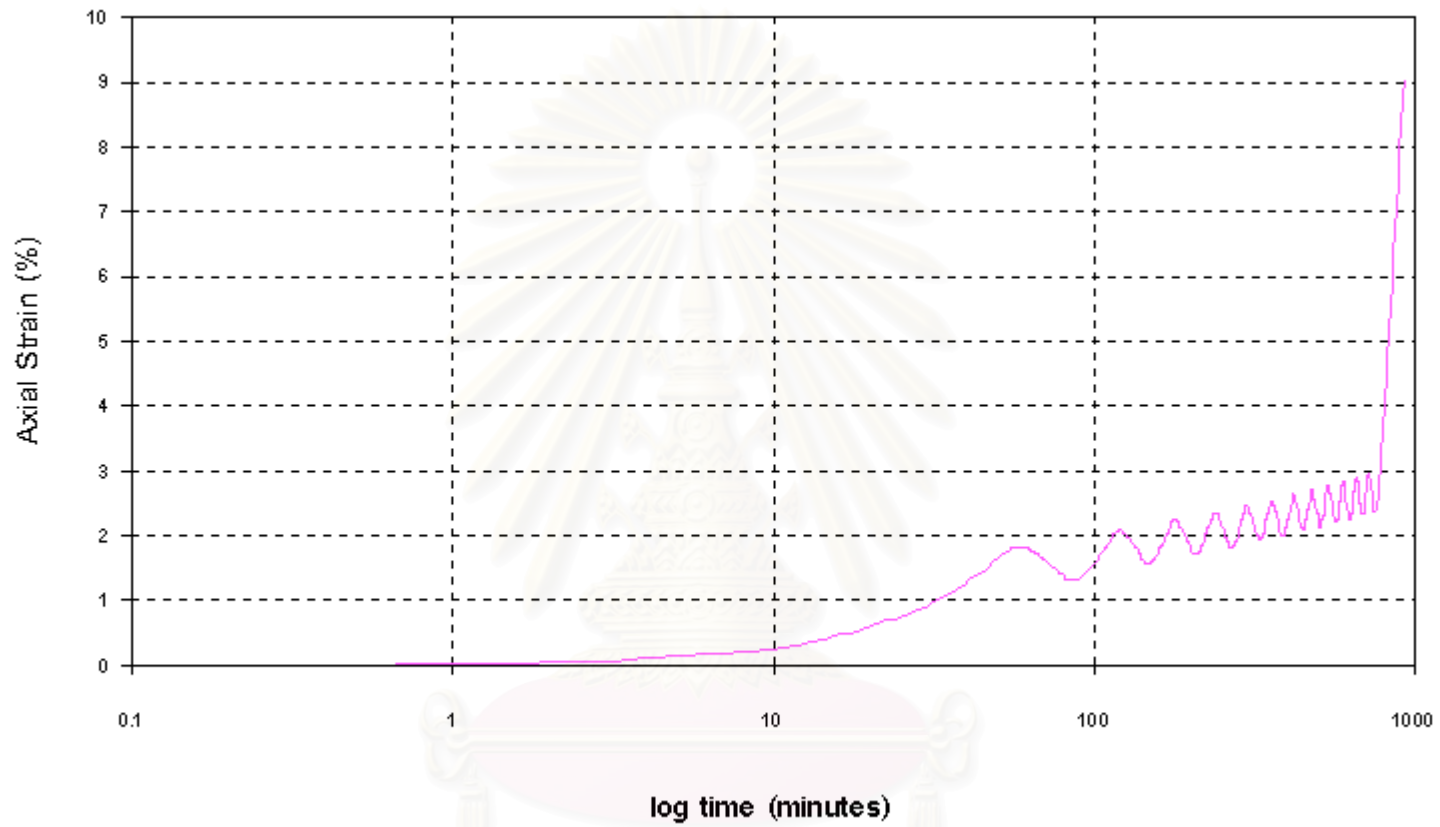
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



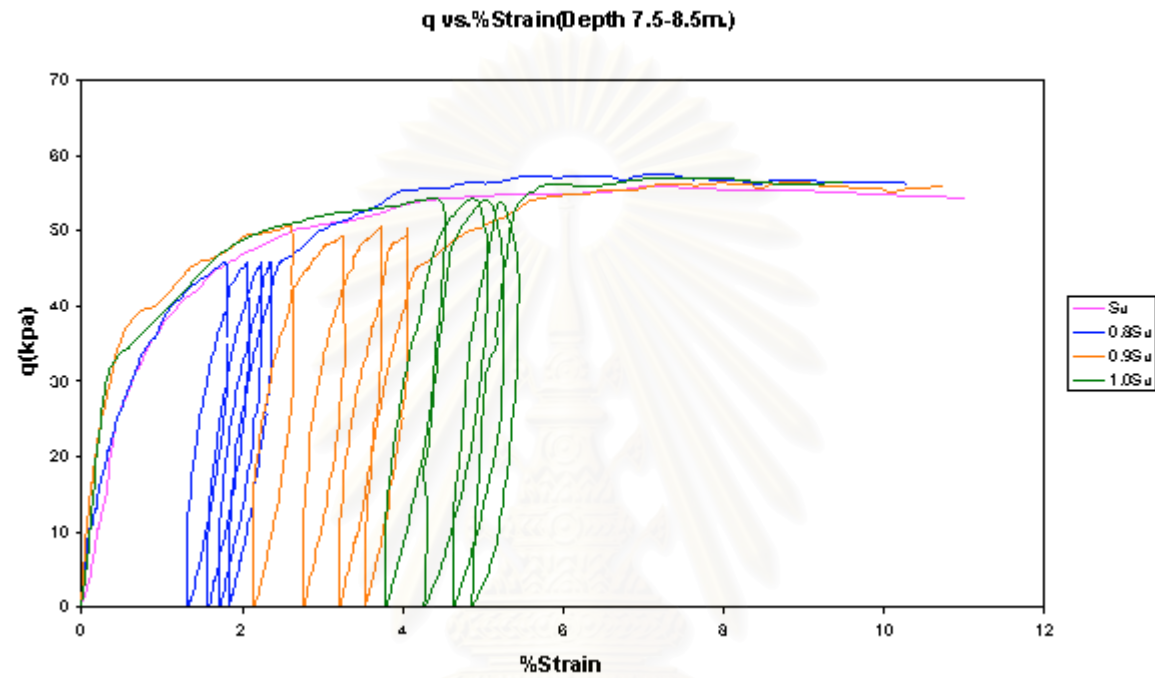


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับเวลาในการทดสอบแรงซ้้าซาก ( $\Delta u, t$ )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

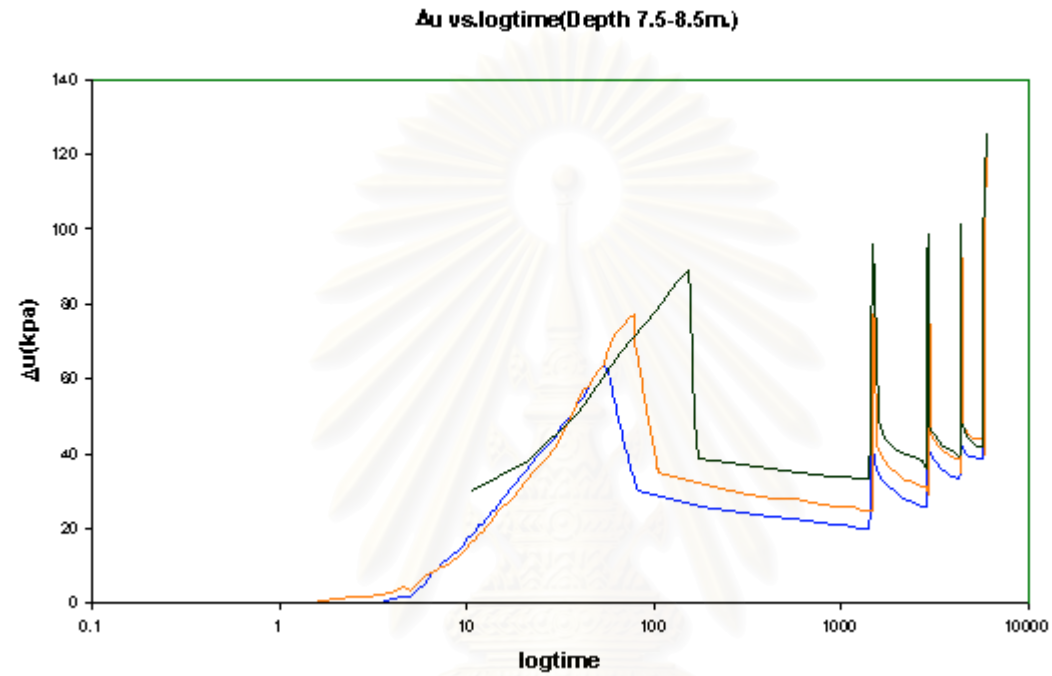


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับเวลาในการทดสอบแรงซ้ำซาก ( $\epsilon_a, t$ )



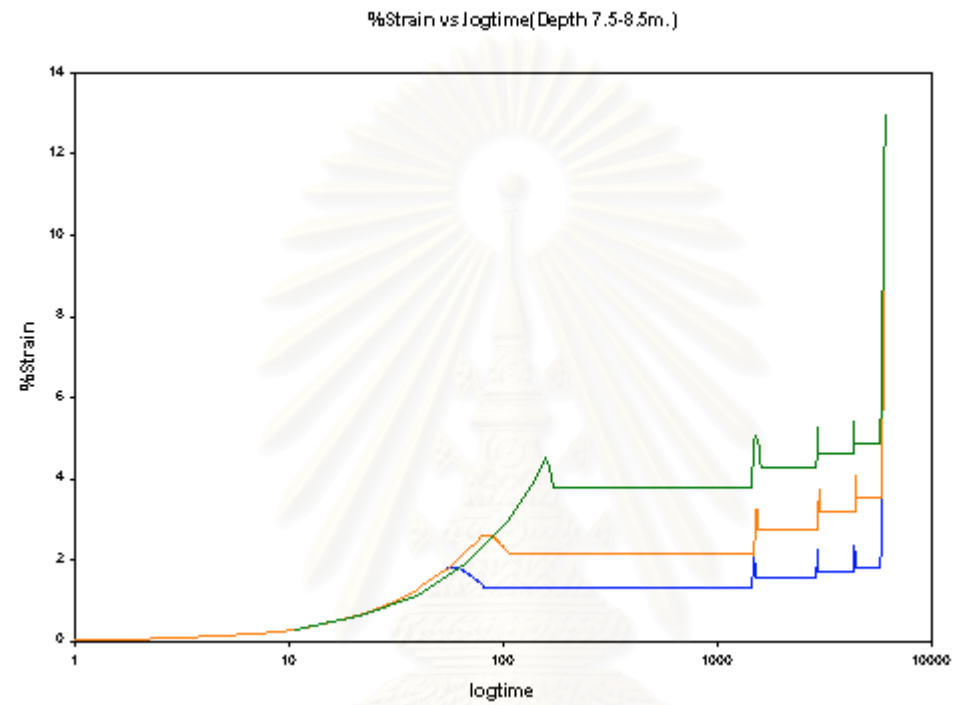
รูปที่ 4.12 แสดงความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวแกน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

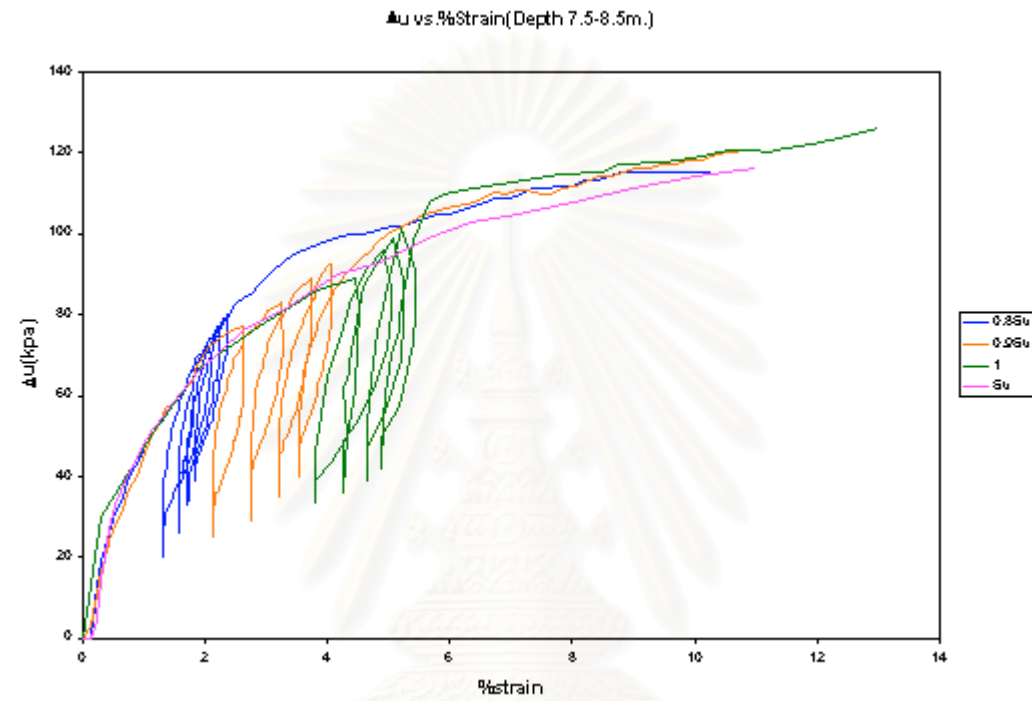


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงกับเวลา

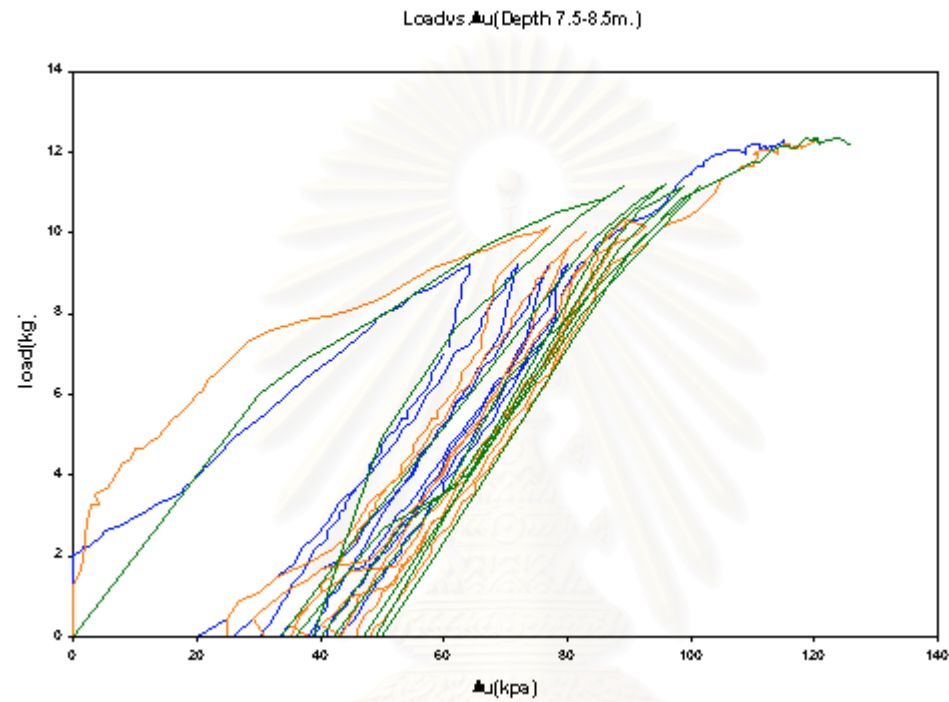
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



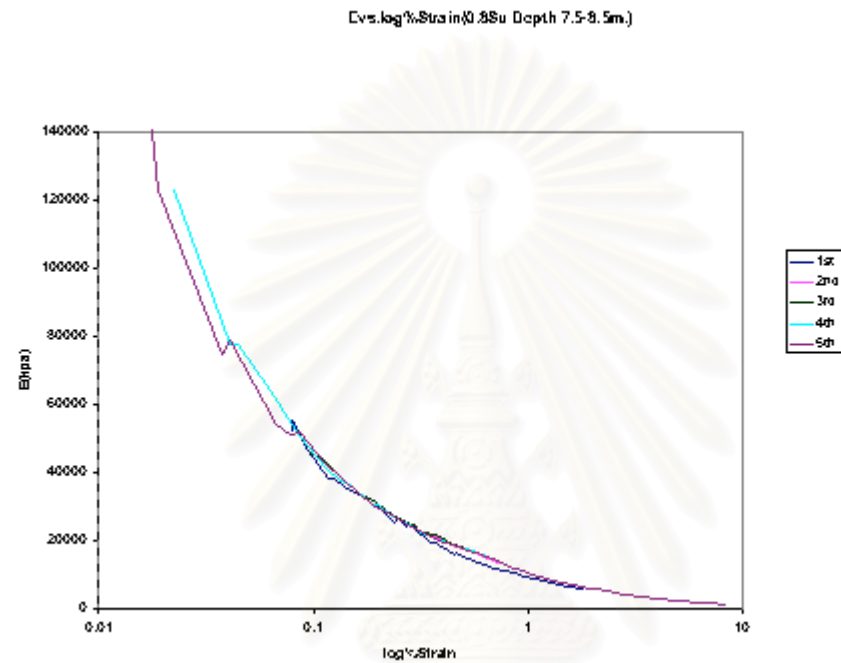
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับเวลา



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับการเคลื่อนตัวในแนวแกน

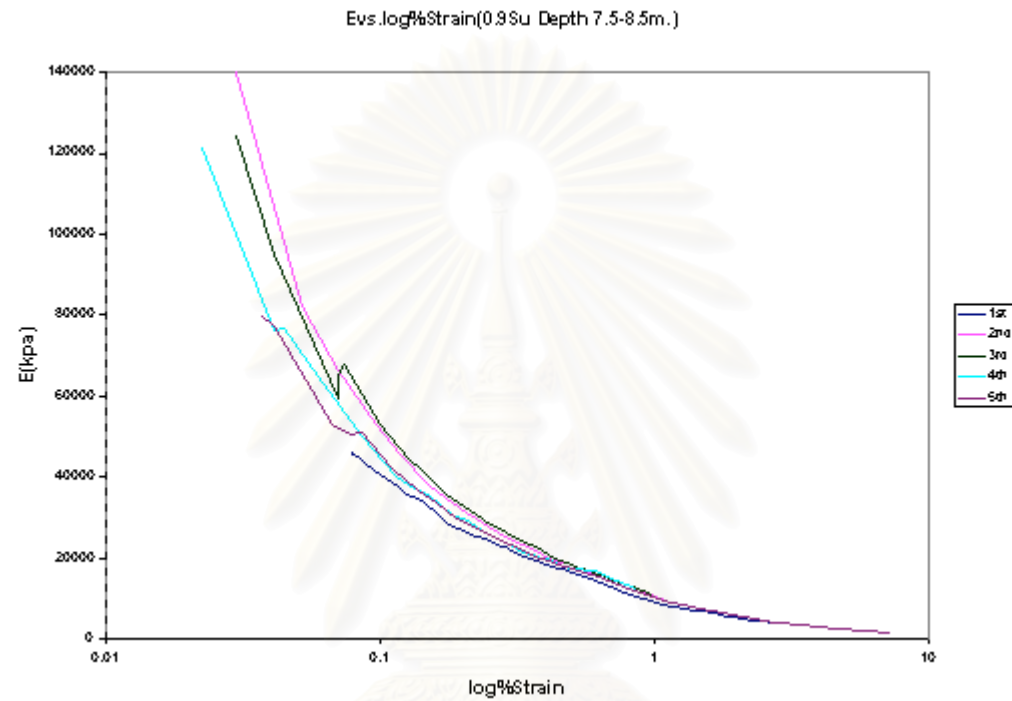


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับแรงที่เพิ่มขึ้น

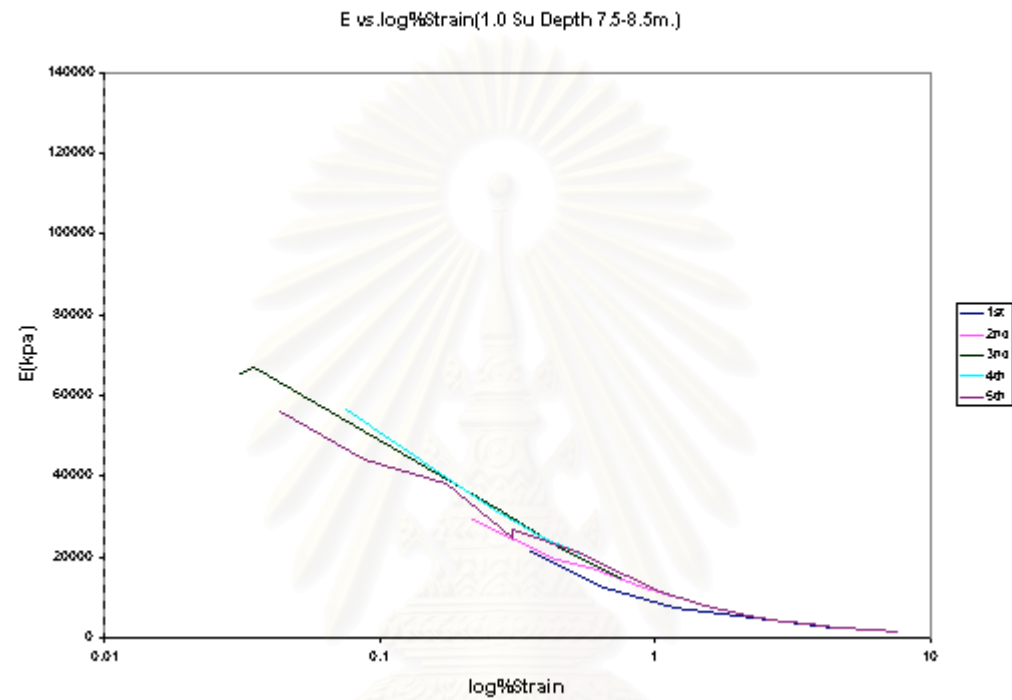


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับlog ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.8Su

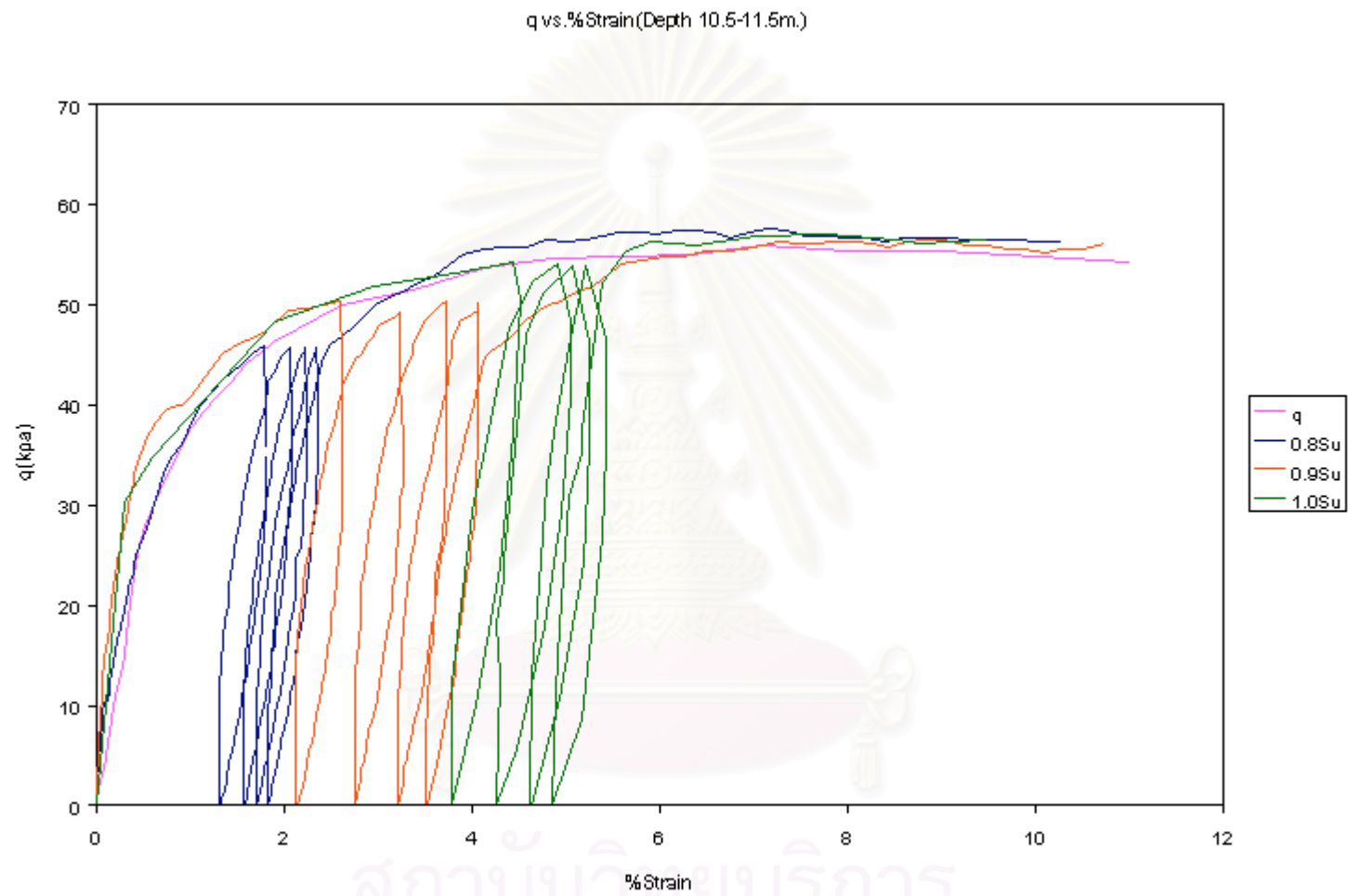




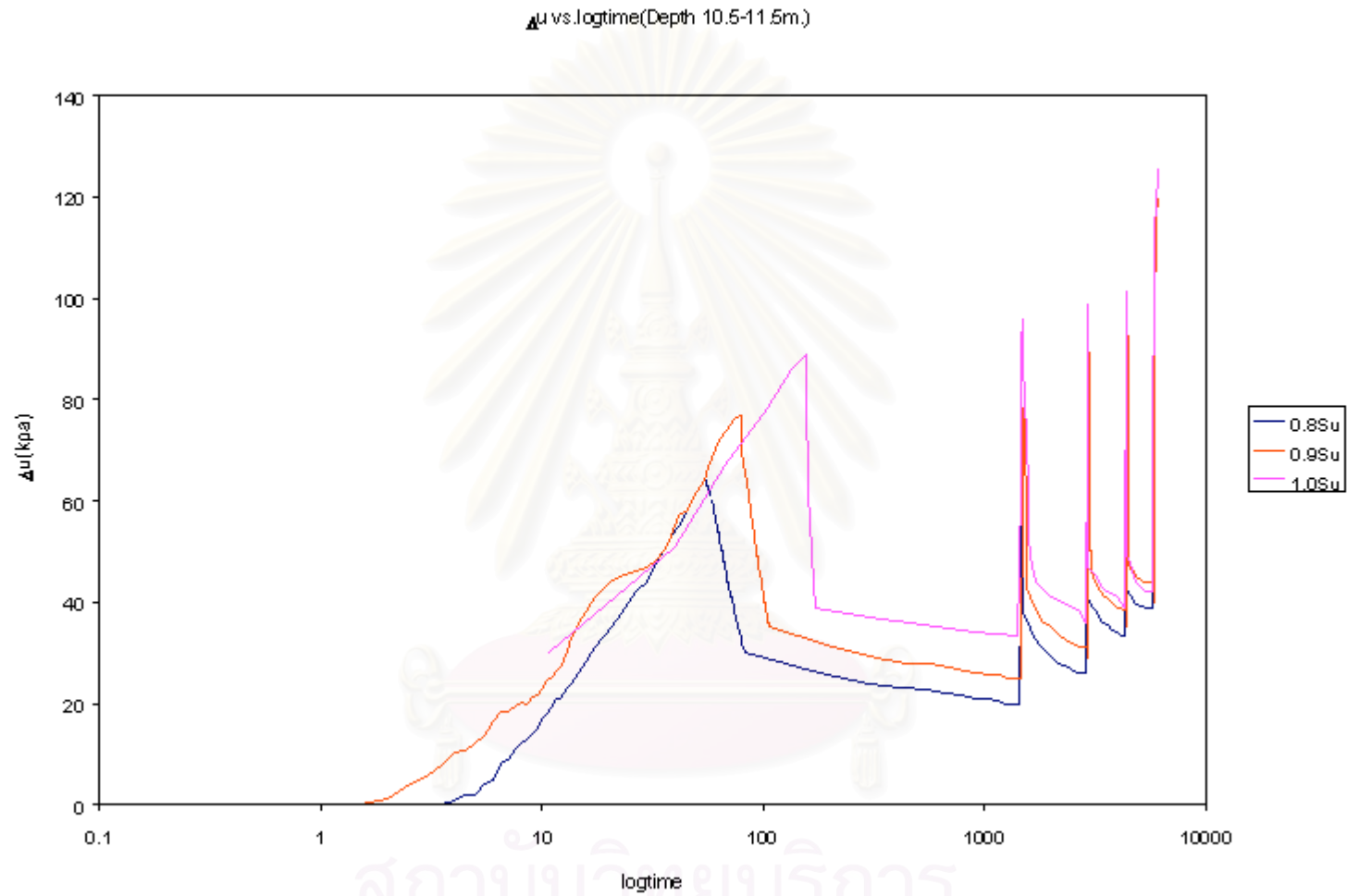
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับlog ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.9Su



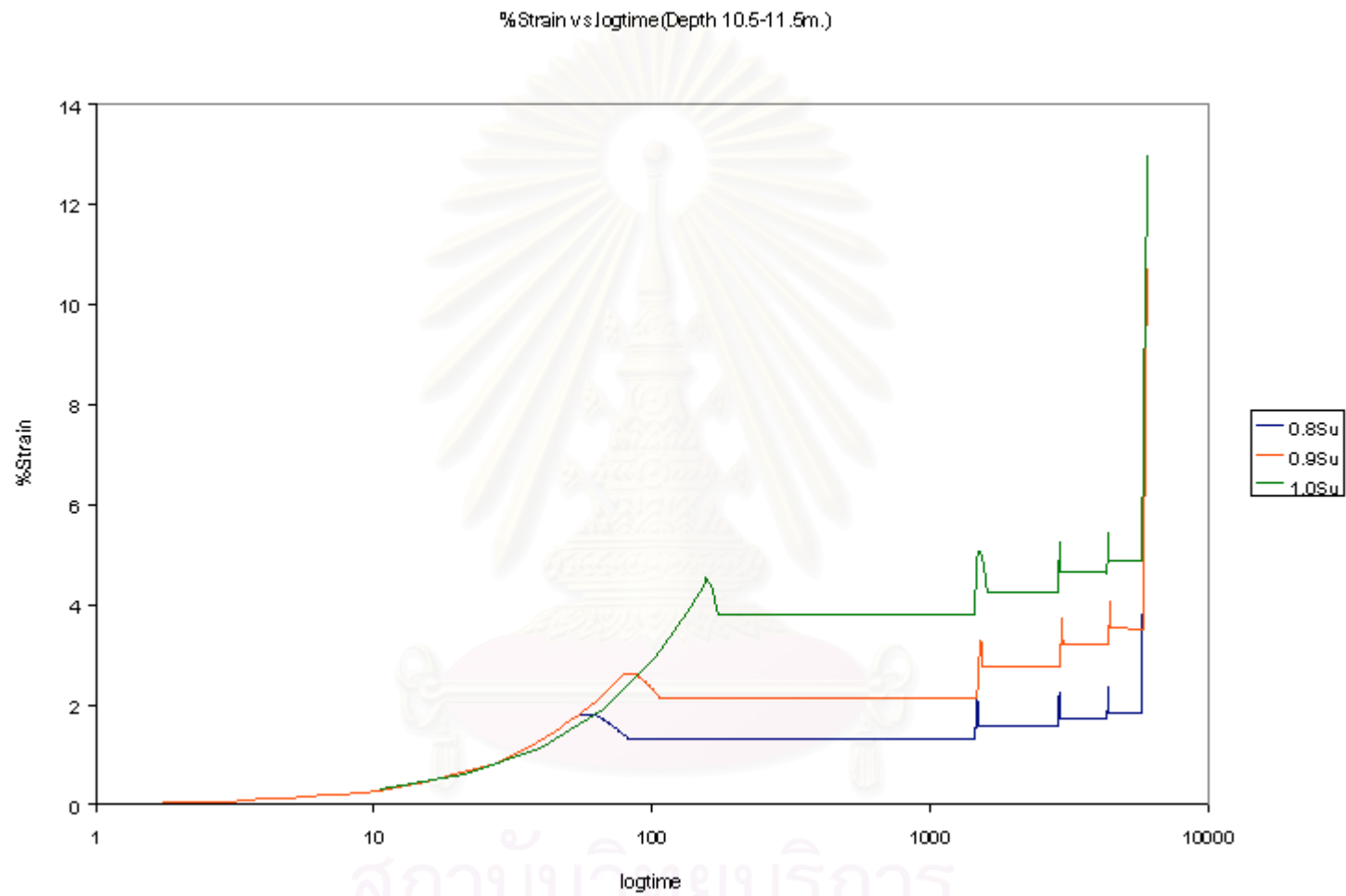
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับlog ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 1.0Su



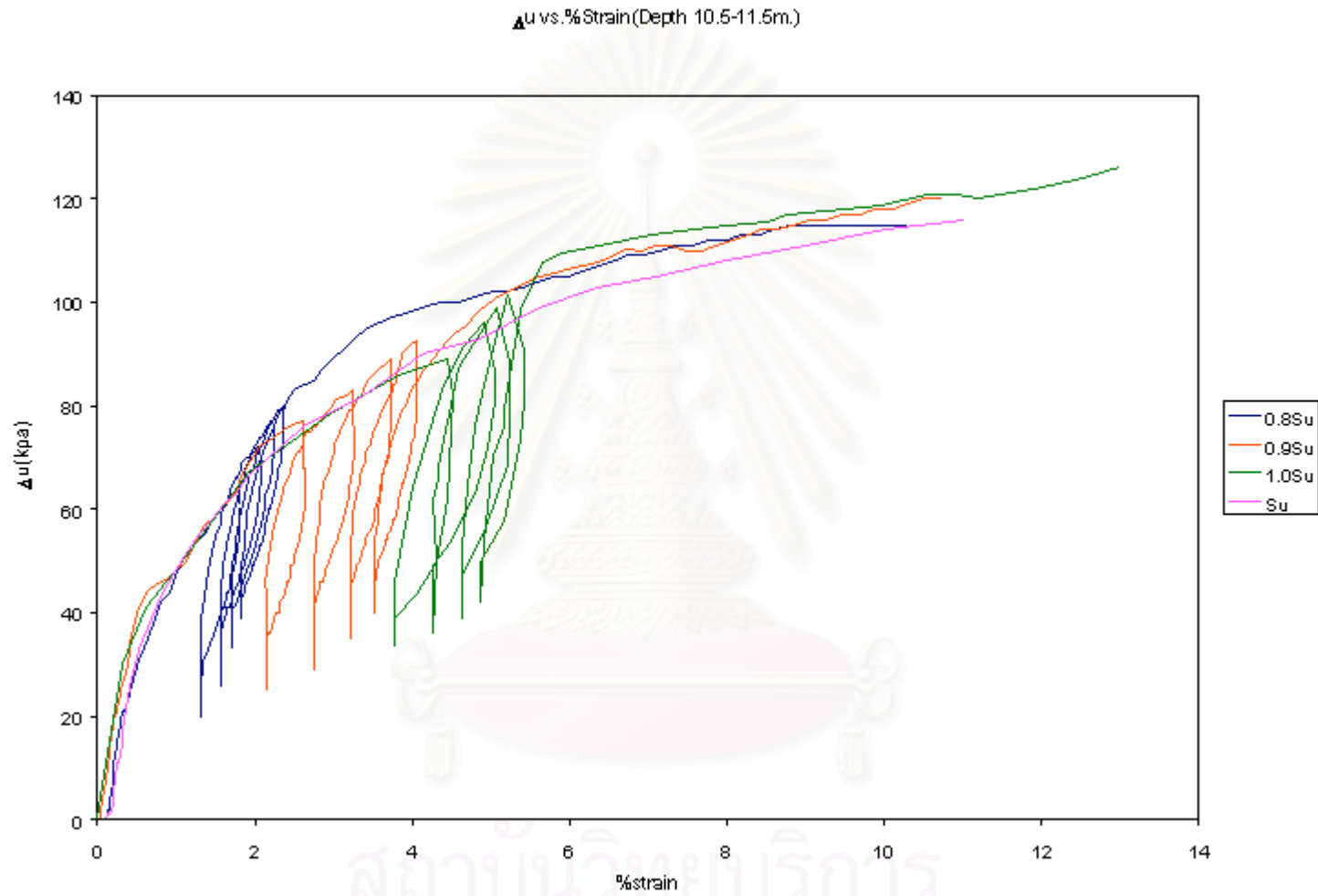
รูปที่ 4.20 แสดงความเค้นเฉือนกับการเคลื่อนตัวในแนวแกน



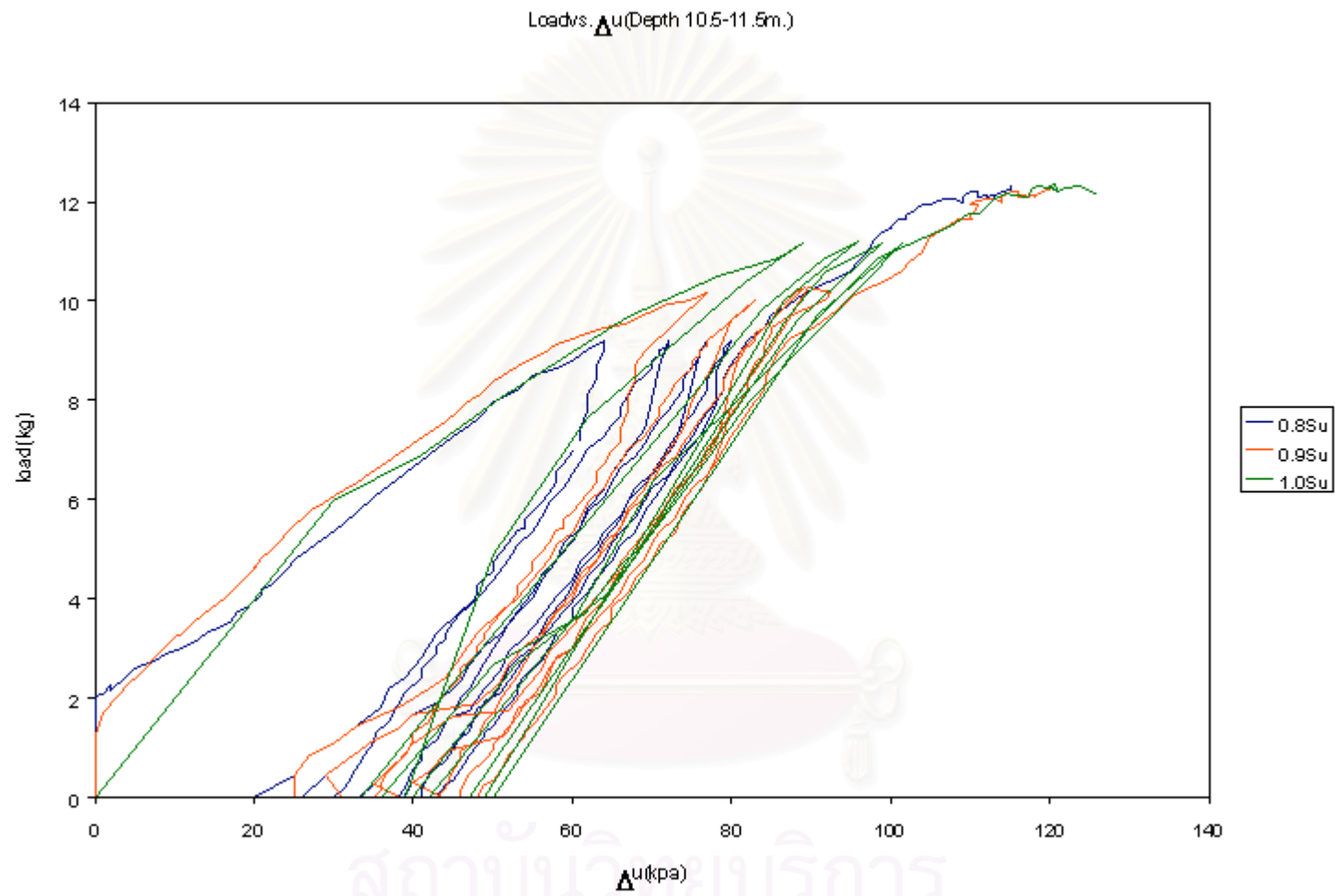
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงกับเวลา



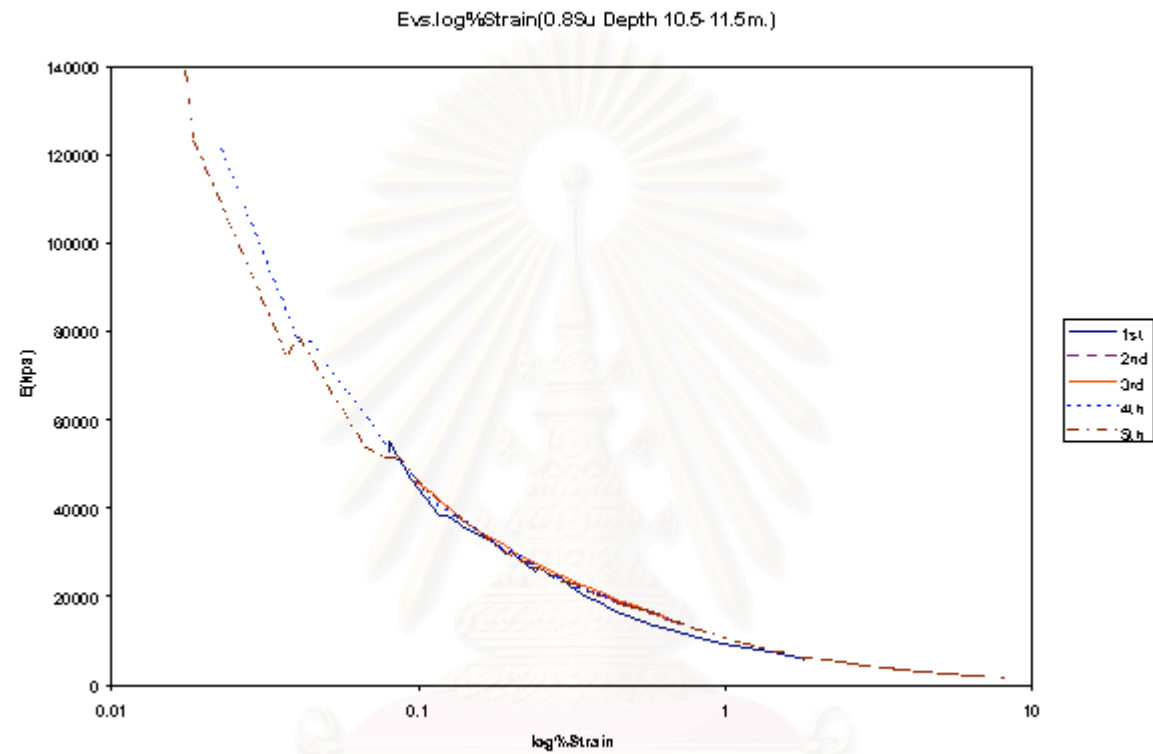
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนกับเวลา



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับการเคลื่อนตัวในแนวแกน



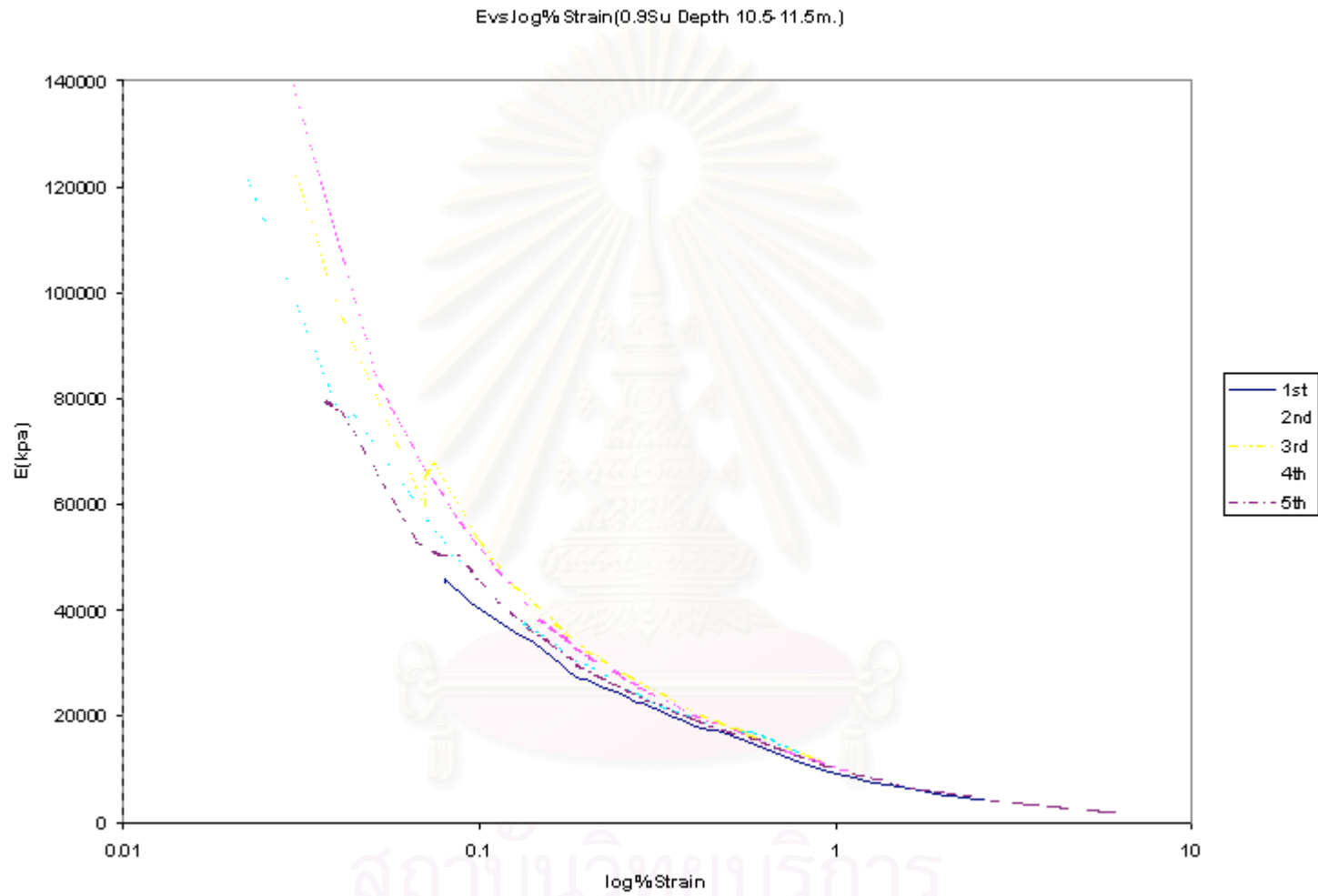
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินกับแรงที่เพิ่มขึ้น



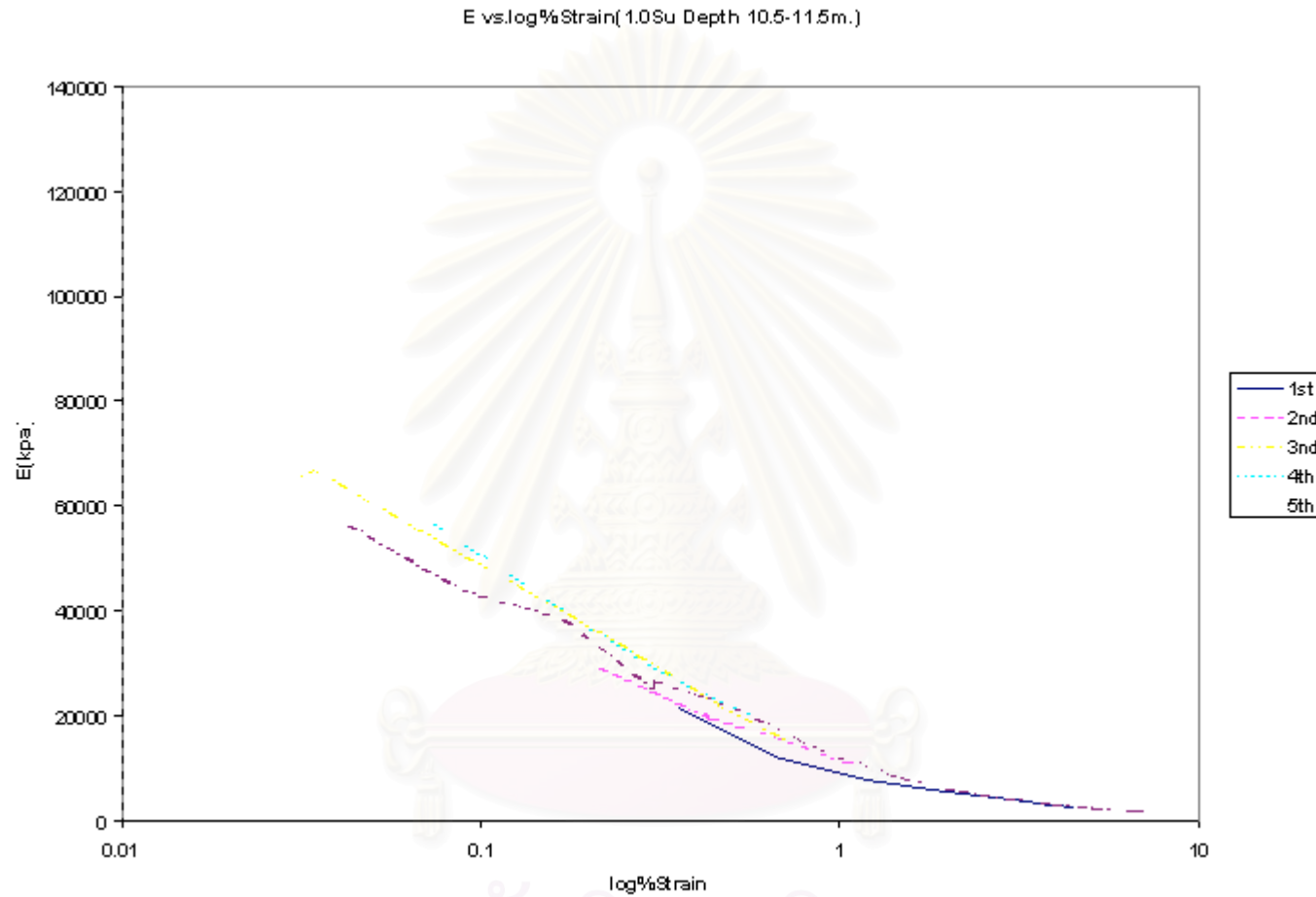
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับlog ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.8Su

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับlog ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 0.9Su



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ของโมดูลัสของความยืดหยุ่นกับlog ของการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่ 1.0Su

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรชัย ลีวรพันธ์ชัย เกิดวันที่ 22 ธันวาคม 2511 ที่อำเภอ เมือง จ.นครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2533 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2542

### ประสบการณ์การทำงาน

- พ.ศ.2533-2534 - บ.เกษมกิจคอนสตรัคชั่น จก.  
วิศวกรสนามประจำโครงการ CTI Tower ถ.รัชดาภิเษก กทม.  
วิศวกรสนามประจำโครงการ UM Tower ถ.รามคำแหง คลองตัน กทม.
- พ.ศ.2535-2536 -บ.ชาติอมรชัยก่อสร้าง จก.  
วิศวกรโครงการ โรงยิมเนเซียม สโมสรพณิชยศาสตร์ อ.ทุ่งโฮเต็ล อ.เมือง จ.เชียงใหม่  
วิศวกรโครงการ Chlorination Plant และ Sand Filter Plant ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น
- พ.ศ.2536-2538 -บ.เพ็ญคอน จก.  
วิศวกรโครงการ บ้านไม้อิงธาร ต.ศาลายา อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม  
วิศวกรโครงการ แคลยทาวเวอร์ อ.เมือง จ.นนทบุรี
- พ.ศ.2539-2540 -บ.ยูเนี่ยนไฟรเจ็คแมนเนจเม้นท์ จก.  
รองผู้จัดการโครงการ Combibloc Manufacturing Project ใน นิคมอุตสาหกรรม Eastern Seaboard อ.ปลวกแดง จ.ระยอง
- . พ.ศ.2540-2542 -หจก.สามประสิทธิ์  
วิศวกรอาวุโส Pattaya Waste Water Treatment Project พัทยา จ.ชลบุรี