

พฤติกรรมความเครียดระดับต่ำของดินเหนียวกรุงเทพฯโดยใช้เบนเดออร์ไฮลิเมนต์



นายกฤษฎา กมลเกรียงไกร

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4985-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SMALL STRAIN BEHAVIOR OF BANGKOK CLAY USING BENDER ELEMENT



Mr. Kitsada Kamonkaerngkai

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 2005

ISBN 974-17-4985-6

นายกฤษฎา กมลเกรียงไกร : พฤติกรรมความเครียดระดับต่ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ
 โดยใช้เบนเดอร์เอลิเมนต์. (SMALL STRAIN BEHAVIOR OF BANGKOK CLAY
 USING BENDER ELEMENT). อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร.บุญชัย อุกฤษฎาน, 96หน้า.
 ISBN 974-17-4985-6

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าโมดูลัสแบบเฉือนของตัวอย่างดิน
 เหนียวกรุงเทพฯสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) ในช่วงกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ
 (Consolidation) ที่แตกต่างกัน การทดสอบกระทำในเครื่องมือ Triaxial ที่ทำการติดตั้งแผ่น
 Bender element ที่บริเวณฐานของเครื่องมือทดสอบ และคำนวณค่า Shear modulus จากการวัด
 คลื่นแรงเฉือนที่ส่งผ่านจากแผ่น Bender element การทดสอบในช่วงการบีบอัดตัวคายน้ำแบ่ง
 ออกเป็น Isotropic Consolidation ($K=\sigma'_h/\sigma'_v=1$) และ Anisotropic Consolidation
 ($K=\sigma'_h/\sigma'_v=0.8, 0.6$) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ จึงลดน้ำหนักมาที่หน่วยแรงที่มีค่า
 OCR=2 หลังจากนั้นทำการทดสอบหาค่าลึงรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน พร้อมทั้งตรวจวัดคลื่น
 แรงเฉือนไปพร้อมๆกัน

จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของค่าโมดูลัสแบบเฉือน ทั้งในช่วง Isotropic
 consolidation และ Anisotropic consolidation มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าหน่วยแรงประสิทธิผล
 เฉลี่ย $[P'=(\sigma'_v+\sigma'_h)/2]$ เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์พบว่าที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผล
 เฉลี่ยเดียวกัน ดินที่มีค่า OCR มากกว่า 1 (Over consolidation) จะมีค่าโมดูลัสแบบเฉือนสูงกว่า
 ดินที่อยู่ในสภาพ Normally consolidation และพบอีกว่าเมื่อค่า K ลดลง ค่าโมดูลัสแบบเฉือนมี
 แนวโน้มลดลงด้วย ซึ่งได้ความสัมพันธ์ในรูปของ $G=f(P', OCR, K)$ สมการอิมไพริกัลที่สอดคล้องกับ
 ผลการทดสอบคือ $G=4046.24P'_{oct}{}^{0.5}R^{0.102}$, $r^2=82.18\%$ และ $G=4001.80(\sigma'_v\sigma'_h)^{0.25}R^{0.107}$,
 $r^2=80.73\%$ สำหรับการทดสอบระหว่างการเฉือนตัวอย่างแบบไม่ระบายน้ำ จนกระทั่งตัวอย่างดิน
 วิกฤตพบว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย มีผลกระทบต่ค่าโมดูลัสแบบเฉือนอย่างมาก ในทาง
 ตรงกันข้ามหน่วยแรงเฉือนมีผลกระทบต่ค่าโมดูลัสแบบเฉือนน้อยมาก

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
 ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต..... กฤษฎา กมลเกรียงไกร
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

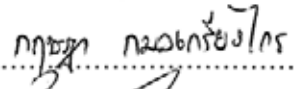
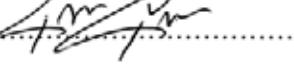
4570207721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD :SHEAR MODULUS/ BENDER ELEMENT/ SHEAR WAVE/ CONSOLIDATION/
RECONSTITUTED BANGKOK CLAY

KITSADA KAMONKAERNGKAI : SMALL STRAIN BEHAVIOR OF BANGKOK
CLAY USING BENDER ELEMENT. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. DR.
BOONCHAI UKRITCHON, 96 pp. ISBN 974-17-4985-6

The purpose of this research is to study the behavior of shear modulus of reconstituted Bangkok clay during different consolidation processes. The testing method was performed in the triaxial apparatus with bender element attached at the top cap and base of the device. The shear modulus can be calculated from shear wave velocity measurement between top and bottom of bender element. The consolidation procedures comprise of two parts: 1) isotropic consolidation ($K=\sigma'_h/\sigma'_v=1$), and 2) anisotropic consolidation ($K=\sigma'_h/\sigma'_v=0.8,0.6$). Then, the stress state was unloaded to the OCR value equal to 2.0 ($OCR=2$). After consolidation process, the shearing was carried out in an undrained mode together with shear wave velocity measurement.

According to test results, shear modulus measured from both isotropic consolidation and anisotropic consolidations tends to increase with an increase in mean effective stress [$P'=(\sigma'_v+\sigma'_h)/2$]. Furthermore, the analysis results show that at the same mean effective stress, shear modulus of the soil having $OCR>1$ (Over consolidation) is higher than that of the normally consolidated clay. The shear modulus is also effected by different K values, resulting in the form of mathematical relationship as : $G=f(P',OCR,K)$. Two empirical formulae corresponding with test results are: $G=4046.24P'_{oct}{}^{0.5}R^{0.102}$, $r^2=82.18\%$ and $G=4001.80(\sigma'_v\sigma'_h)^{0.25}R^{0.107}$, $r^2=80.73\%$. During undrained shearing until failures, the mean effective stress also highly affects shear modulus. On the other hand, the shear stress has very less effect on shear modulus.

Department	Civil Engineering	Student's signature.....	
Field of study	Civil Engineering	Advisor's signature.....	
Academic year	2005		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ทดสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณ Dr.Tian Ho Seah อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้ให้ คำแนะนำในการพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้จนสำเร็จ และขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาใช้เวลาและให้คำแนะนำ รวมทั้งข้อคิดเห็นที่เป็น ประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนๆทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่วิจัยปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรม สั่งสอน และสนับสนุนมาโดยตลอดสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ลักษณะพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ระดับ Strain ต่าง ๆ.....	7
2.3 วิธีการวัดค่า Modulus ในวิธีต่าง ๆ.....	8
2.3.1 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Large strain levels.....	10
2.3.2 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small strain levels.....	10
2.3.3 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Very small strain.....	19
2.3.4 การวัดค่า Modulus ในสนาม.....	25
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 สถานที่และการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทดสอบ.....	28
3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง.....	28
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทดสอบ.....	28
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์หลักสำหรับการทดสอบงานวิจัย.....	30
3.3 การติดตั้งแผ่น Bender Element ลงไปใน cap ของเครื่อง Triaxial.....	33
3.4 การหาคุณสมบัติของดินทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น.....	34
3.4.1 พิกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg 's limit).....	34
3.4.2 ปริมาณความชื้น (Water content).....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity).....	34
3.5 วิธีการทดสอบ.....	34
3.6 ขั้นตอนการทดสอบ.....	35
3.6.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ.....	35
3.6.2 การติดตั้งตัวอย่างดินกับชุดเครื่องมือทดสอบ.....	35
3.6.3 ขั้นตอนทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัว (Saturation).....	36
3.6.4 วิธีการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้น(Shearwave measurement) 36	36
3.6.5 ขั้นตอนอัดตัวคายน้ำและการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้น (Consolidation & Shear wave measurement).....	38
3.6.6 การทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของดินและการวัดค่าความเร็ว ของคลื่นความเค้น (Shearing & Shear wave measurement).....	39
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	41
4.1 บทนำ.....	41
4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมขั้นพื้นฐานของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ.....	41
4.3 ผลกระทบของแรงประสิทธิผลต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	43
4.4 ผลกระทบของสภาพเงื่อนไขของกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำที่แตกต่างกัน ต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	45
4.5 ผลกระทบของค่า OCR ต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน.....	49
4.6 ความสัมพันธ์ทางอิมไพริกัล.....	52
4.7 ผลของโมดูลัสแบบเฉือนระหว่างการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือน (Undrained Shearing).....	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	69
5.1 บทนำ.....	69
5.2 ผลของแรงประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน.....	69
5.2.1 สภาพเงื่อนไขที่แตกต่างกันในกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ และค่า OCR ต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน.....	69
5.2.2 สมการอิมไพริกัล.....	70
5.3 โมดูลัสแบบเฉือนภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน.....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 ข้อดี-ข้อเสีย ในการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วย Bender element	71
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของดินและวิธีการหาคุณสมบัติที่ Strain ต่าง ๆ.....	9
ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบหาความเร็วคลื่นความเค้นในงานวิจัย.....	34
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสร้างใหม่.....	42
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติกับดินเหนียวสร้างใหม่.....	43
ตารางที่ 4.3 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ก่อนทำการทดสอบ.....	44
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Nonlinear statistical regression (Sherrod, 1992-1993).....	54
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Nonlinฯ.....	55
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า S_u/σ'_{vc} กับค่า K.....	60
ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Isotropic consolidation.....	79
ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Isotropic consolidation, Unload	79
ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Anisotropic consolidation (K=0.8).....	80
ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Anisotropic consolidation (K=0.6).....	80
ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Anisotropic consolidation (K=0.8), Unload.....	81
ตารางที่ ก-6 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation)....	82
ตารางที่ ก-7 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation, Unload).....	86
ตารางที่ ก-8 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, K=0.8).....	90
ตารางที่ ก-9 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, K=0.6)	94

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 อิทธิพลของค่า PI และค่า OCR.....	5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_s และ n_0 กับ Plasticity Index.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงค่าของ G ในช่วง Strain ต่าง ๆ.....	7
รูปที่ 2.4 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสม ในการทดสอบวิธีต่าง ๆ.....	7
รูปที่ 2.5 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นความเค้นมากกระทำ.....	10
รูปที่ 2.6 Resonant column test apparatus Hardin & Richart, 1963.....	12
รูปที่ 2.7 Resonant column test apparatus (Drnevich, 1967).....	13
รูปที่ 2.8 การทดสอบแบบ Fixed-Free Resonant Column.....	14
รูปที่ 2.9 การรบกวนตัวอย่างโดยการบิด.....	14
รูปที่ 2.10 ค่าโมดูลัสเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน.....	15
รูปที่ 2.11 Cyclic Simple Shear Test.....	16
รูปที่ 2.12 การคำนวณหาโมดูลัสแบบเฉือนและ Damping ratio จาก Hysteresis loop.....	16
รูปที่ 2.13 Cyclic triaxial test.....	17
รูปที่ 2.14 การคำนวณหา Young's Modulus และ Damping ratio จาก Hysteresis loop.....	18
รูปที่ 2.15 การติดตั้ง Bender Element แบบอนุกรม.....	19
รูปที่ 2.16 การติดตั้ง Bender Element แบบขนาน.....	19
รูปที่ 2.17 การเคลือบ Bender Element.....	20
รูปที่ 2.18 แสดงการติดตั้งกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค และการเคลื่อนที่ของ ShearWave.....	20
รูปที่ 2.19 การติดตั้งอุปกรณ์หลักในการทดสอบ.....	20
รูปที่ 2.20 ผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงของตัวอย่าง (D/H) ต่อค่า Initial Shear Modulus.....	22
รูปที่ 2.21 การส่งคลื่นแบบสี่เหลี่ยม.....	23
รูปที่ 2.22 การส่งคลื่นรูปไซน์.....	23
รูปที่ 2.23 แสดงค่า Factor กับค่าของ Shear Strain.....	23
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงของ stiffness สำหรับโมดูลัสแบบเฉือนด้วยค่า PI Viggiani and Atkinson (1995).....	24
รูปที่ 2.25 Seismic Refraction Survey.....	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 Cross Hole Test	27
รูปที่ 2.27 แสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่น เมื่อชั้นดินด้านล่าง มีความแข็งแรงกว่า.....	27
รูปที่ 2.28 Down Hole Method.....	27
รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดิน.....	29
รูปที่ 3.2 เครื่อง Triaxial พร้อมทดสอบ.....	31
รูปที่ 3.3 เครื่อง Triaxial พร้อมกับ ADU เก็บข้อมูลระหว่างทดสอบตัวอย่าง.....	32
รูปที่ 3.4 วิธีการเคลือบและติดตั้ง Bender Element ลงใน cap ของเครื่อง Triaxial.....	33
รูปที่ 3.5 ลักษณะสัญญาณของ Bender element ที่เกิดขึ้น	37
รูปที่ 4.1 ผลของ Mean effective stress กับค่า Shear modulus (Isotropic consolidation)	44
รูปที่ 4.2 หน่วยแรงที่กระทำในมวลดินที่มีค่าอัตราส่วนช่องว่างต่างกัน	45
รูปที่ 4.3 ผลของ Mean effective stress, P' กับค่า Shear modulus ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในสภาพ K ต่างกัน	46
รูปที่ 4.4 ผลของ Vertical effective stress, P' กับค่า Shear modulus ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในสภาพ K ต่างกัน	47
รูปที่ 4.5 ผลของค่า $G_0/F(e)$ กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผล P'	48
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ Vertical effective stress (KPa).....	50
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus (MPa) กับ Mean effective stress (KPa)....	50
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ Vertical effective stress (KPa).....	51
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus (MPa) กับ Mean effective stress (KPa)....	51
รูปที่ 4.10 ค่า Shear modulus(G_0) ที่ได้จากการทดสอบ และคำนวณจากสมการ ในช่วง consolidation ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในงานวิจัยทั้งหมด	57
รูปที่ 4.11 ผลของค่า $G_0/F(e)$ กับ Octahedral stress, P'_{oct} ของดินทั้งหมด	58
รูปที่ 4.12 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงของดิน (Isotropic).....	61
รูปที่ 4.13 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงของดิน ($K=0.8$)..	62
รูปที่ 4.14 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงของดิน ($K=0.6$)..	63
รูปที่ 4.15 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงของดิน (Isotropic, Unload).....	64

รูปที่ 4.16 P'-q ระหว่างการทดสอบหากำลังรับแรงของดินทั้งหมดในงานวิจัย 65

รูปที่ 4.17 ตัวอย่างดินพังทลาย และเกิดเป็นแนวเพลน (Potential Shearing slip plane)
 ในช่วง Shearing..... 66

รูปที่ 4.18 ค่า Shear modulus(G_0) ที่ได้จากการทดสอบ และคำนวณจากสมการในช่วง
 consolidationและ Shearing ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในงานวิจัยทั้งหมด... 67

รูปที่ 4.19 ค่า Shear modulus(G_0) ที่ได้จากการทดสอบ และคำนวณจากสมการในช่วง
 Shearing ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในงานวิจัยทั้งหมด..... 68

รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic Consolidation..... 75

รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic Consolidation..... 75

รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Anisotropic Consolidation($K=0.8$)..... 76

รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Anisotropic Consolidation($K=0.8$)..... 76

รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Anisotropic Consolidation($K=0.6$)..... 77

รูปที่ ก-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Anisotropic Consolidation($K=0.6$)..... 77

รูปที่ ก-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic Consolidation, Unload..... 78

รูปที่ ก-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain
 ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic Consolidation, Unload..... 78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเกิดแผ่นดินไหว ถือเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่สร้างความเสียหายให้แก่มนุษยชาติ และสิ่งปลูกสร้างอย่างใหญ่หลวง การคาดการณ์ล่วงหน้าของการเกิดแผ่นดินไหว ยังไม่สามารถทำได้ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นการก่อสร้างอาคารให้สามารถต้านทานต่อแรงสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวจึงเป็นทางออกที่เหมาะสมที่สุด

ปัจจุบัน ประเทศไทยได้ออกกฎหมายควบคุมให้อาคารในเขตเสี่ยงภัยได้รับการออกแบบก่อสร้างให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหว เพราะประเทศไทยอาจจะได้รับผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศใกล้เคียงหรือภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย แต่ข้อมูลคุณสมบัติทางพลศาสตร์(Dynamic) ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินในประเทศไทยค่อนข้างจะมีน้อยมาก จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ เพื่อนำไปใช้ในการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินในสภาวะที่เกิดแผ่นดินไหว

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินเหนียวที่ทำการศึกษากันมากได้แก่ ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear modulus) อัตราส่วนแดมป์พิง(Damping ratio) และการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับน้ำหนัก (Shear strength) ภายใต้การกระทำของแรงแบบซ้ำซาก เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินทรายที่ทำการศึกษากันได้แก่ ค่าโมดูลัสเฉือน(Shear modulus) อัตราส่วนแดมป์พิง (Damping ratio) และ Liquefaction potential เป็นต้น

เนื่องจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ(Bangkok Clay) มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรม การก่อสร้างของไทย และเป็นที่น่าทึ่งว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯเป็นดินที่เกิดจากการทับถม, ตกตะกอน(Transport Soil) มีความหนาประมาณ 14-18 เมตร และมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงทำการศึกษาดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เพื่อจะได้เป็นข้อมูลสำหรับการ วิเคราะห์และการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในขณะเกิดแผ่นดินไหว

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของดินนั้น ในทางปฏิบัติสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ(Laboratory test) และการทดสอบในสนาม(In-situ test) ซึ่งในบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ได้เคยมีการทดสอบในสนามโดยใช้วิธีการวัดความเร็วของการแผ่กระจายของคลื่นความเค้น (Wave propagation) โดยทำการวัดความเร็วคลื่นแบบเฉือน (Ashford,A.,S, et al. 1997) ซึ่งได้ค่าโมดูลัส ที่ระดับความเครียดต่ำๆ ต่อมามีการศึกษาหาค่าโมดูลัส และอัตราส่วนแดมป์ฟิง(Damping ratio) ด้วยวิธีการ Cyclic triaxial test (พิพัฒน์ ทองฉิม ,1998) ซึ่งเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ระดับความเครียดสูง การทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถหาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ที่ระดับความเครียดต่ำๆ ได้ จึงมีการทดสอบวิธี Triaxial compression using bender element (ธีรินทร์ อมรวิทยารักษ์,2000)

การทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นยังไม่ครอบคลุมบริเวณดินกรุงเทพฯ และสภาพเงื่อนไขต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในธรรมชาติได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมและนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับเพื่อให้ได้ผลที่สามารถนำไปใช้ได้ถูกต้องต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย มีดังนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมของค่า Shear Modulus ในช่วงกระบวนการ Consolidation ในสภาพ K ต่างๆกัน ของดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) โดยใช้เครื่องมือ Triaxial With Bender Element
2. ศึกษาพฤติกรรมของค่า Shear Modulus ในช่วงกระบวนการ Shearing ของดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) โดยใช้เครื่องมือ Triaxial With Bender Element

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาค่า Shear Modulus ของตัวอย่างดินเหนียวจาก โครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ โดยทำการสร้างตัวอย่างดินสร้างใหม่(Reconstituted Clay) และทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Triaxial Apparatus ที่ติดตั้ง Bender Elements โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็นดังนี้

1. ช่วงบีบอัดตัวคายน้้ำ(Consolidation) จะทำการหาค่าโมดูลัสที่ระดับหน่วยแรงประสิทธิผลในช่วงต่างๆ ตามสภาพ K ที่ทดสอบ
2. ช่วงทดสอบหากำลังรับแรงอัด(Shearing) จะทำการหาค่าโมดูลัสในระหว่างที่ทำการทดสอบหากำลังรับแรงอัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยมีดังนี้

1. ทราบค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) สำหรับการหาค่าโดยวิธี Shear Wave อย่างรวดเร็ว ด้วยเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้น
2. ทราบถึงขีดจำกัดของการทดสอบว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด และสามารถที่จะใช้กับงานให้เหมาะสมอย่างไร
3. นำผลที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผล ไปใช้ประกอบในการออกแบบทางด้านพลศาสตร์ (Soil dynamic) เช่น ฐานรากของเครื่องจักร (Machine foundation) ทั้งแบบฐานรากตื้น (Shallow foundation) และแบบฐานรากลึก (Deep foundation)
4. เป็นการเตรียมการทางด้านข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Soil dynamic) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประมาณการณเคลื่อนตัวของดินในขณะเกิดแผ่นดินไหว และเพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว
5. ทำให้เกิดความสนใจและเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะงานทางด้านคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Soil dynamic) ในประเทศไทยมากขึ้น และเป็นแนวทางการศึกษาและการนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โดยทั่วไปแล้วคุณลักษณะของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในดินนั้น สามารถเขียนในรูปของโมดูลัสที่ระดับค่าความเครียดต่างๆ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ หรือกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดโดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาหาค่าโมดูลัสได้จากค่าความชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์นั้น ซึ่งมีประโยชน์ต่อการจำลองพฤติกรรมของมวลดิน เช่น การทรุดตัวของดิน หรือ เสถียรภาพความชันของมวลดิน ซึ่งการหาค่าโมดูลัสนั้นอาจมีผลกระทบหลายอย่างต่อค่าโมดูลัสจากกระบวนการอื่นที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน

จากผลกระทบดังกล่าว Hardin & Black (1968) ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือนและค่ายังโมดูลัส ซึ่งมีจะมีแนวโน้มที่คล้ายกันแต่ก็มีบางตัวที่แตกต่างกันบ้างซึ่งได้สรุปตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

$$G = f(\sigma'_0, e, C, A, H, t, S, \tau_0, f, \theta, T)$$

เมื่อ

σ'_0 = หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective octahedral normal stress)

e = Void ratio

C = ลักษณะจำเพาะของเม็ดดิน, รูปร่าง, ขนาด, สัดส่วน
คลล, mineralogy

A = ขนาดของ Strain

H = ประวัติของหน่วยแรง (Stress history) และ ประวัติของ
การรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration history)

t = Secondary time effect

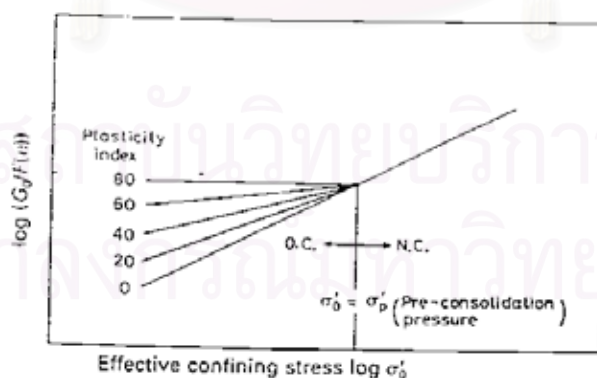
S = ความอิ่มตัวของดิน (Degree of saturation)

τ_0	=	หน่วยแรงเฉือน (Octahedral shear stress)
f	=	ความถี่ของการสั่นสะเทือน (Frequency of vibration)
θ	=	โครงสร้างของดิน (Soil structure)
T	=	อุณหภูมิ

Hardin & Drnevich (1972) เสนอว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสเฉือนในดินเหนียวและในทรายที่ค่าระดับความเครียดต่ำกว่า $10^{-3}\%$ ค่าของโมดูลัสเฉือนจะมีค่าคงที่และจะลดลงเมื่อค่าความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อค่าของอัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลงจะทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นแต่จะมีผลกระทบน้อยมากเมื่อค่าความเครียดน้อยกว่า 1% และ ยังมีผลกระทบจากหน่วยแรงประสิทธิผลที่ทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้น

Affifi and Rchart (1973) และ Hryciw et al (1993) ได้ชี้ให้เห็นถึงผลของกระทบของความเค้นในอดีตที่มีผลต่อค่าโมดูลัสเฉือน เมื่อมีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.04 มิลลิเมตร

Ishihara (1996) ทำการทดสอบ kaolinite & bentonite Clay ซึ่งมีค่าพลาสติกสูงตามรูปที่ 2.1 ทำให้สรุปได้ว่าค่าของ Stiffness จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของดัชนีพลาสติกและอัตราส่วนการยุบตัว



รูปที่ 2.1 อิทธิพลของค่า PI และค่า OCR

จากผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของดัชนีพลาสติกและอัตราส่วนการยุบตัว Hardin & Black (1968) จึงได้ศึกษาและเสนอสมการการหาค่าโมดูลัสเฉือนซึ่งได้อธิบายไว้ค่าโมดูลัสเฉือนของการอัดตัวแบบปกติมีค่าแปรผันตามสมการ ดังนี้

$$G_{CO} = A_{CO} (\sigma'_0)^{n_0} f(e) \quad (1)$$

เมื่อ A_{CO} และ n_0 เป็นค่าคงที่เมื่อ Confining Stress (σ'_0) มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงเบกทานในอดีต (σ'_p) และมีความสัมพันธ์กันดังนี้

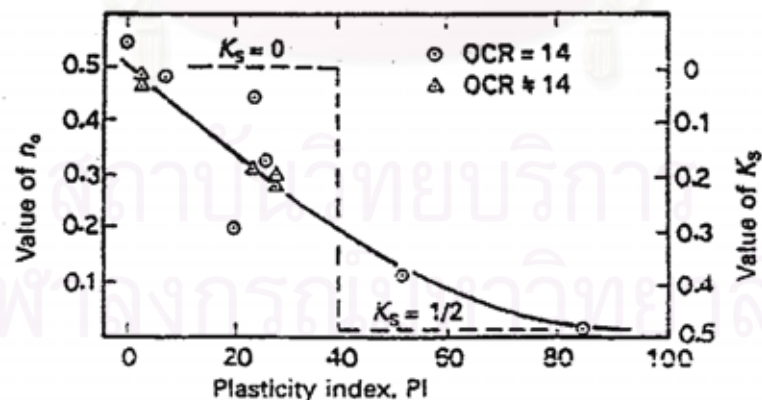
$$A_{CO} = A (\sigma'_p)^{0.5-n_0} = A (\sigma'_0)^{k_s} (OCR) \quad (2)$$

$$k_s = \frac{1}{2} - n_0$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2) กลับไปที่สมการที่ (1) จะได้ว่า

$$G_{CO} = A (OCR)^{k_s} (\sigma'_0)^{0.5} f(e) \quad (3)$$

และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า n_0 และ K_s ไว้ดังรูป ที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_s และ n_0 กับ Plasticity Index

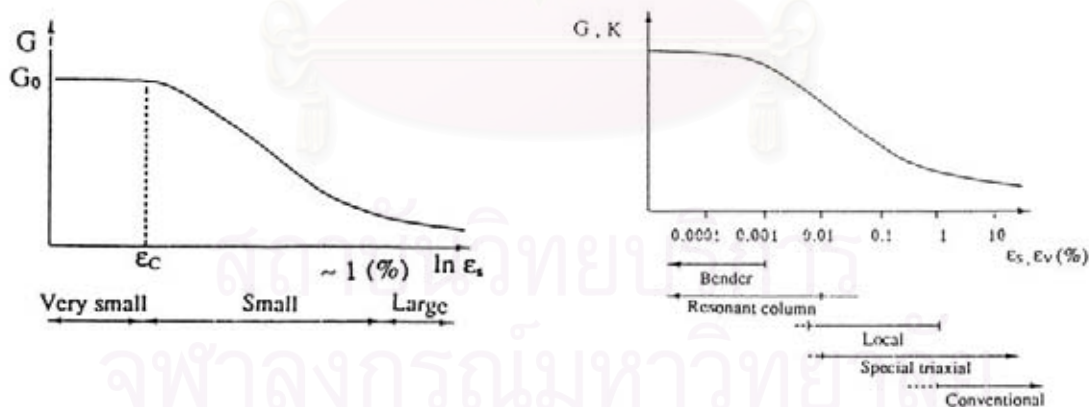
ดังนั้นสำหรับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง ($PI > 40$) ค่า n_0 จะมีค่าเท่ากับศูนย์และสำหรับดินที่มีค่า ดัชนีพลาสติกต่ำ ($PI < 40$) ค่า n_0 จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ทำให้ค่า K_s มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้รูปสมการใหม่ว่า

$$G_{co} = A (\sigma'_p)^{0.5} f(e) \quad (4)$$

ซึ่งแสดงว่าดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงๆนั้น สามารถใช้ค่า (σ'_p) แทนค่าของ (σ'_0) ในสมการที่(3)ในช่วงที่หน่วยแรงมีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงกำลังรับแรงแบกทานในอดีต จึงสรุปได้ว่าค่าดัชนีพลาสติกมีผลต่อค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงของ Over Consolidate

2.2 ลักษณะพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ระดับ Strain ต่าง ๆ

โดยพื้นฐานแล้ว ค่า Stiffness สามารถหาได้จาก ความชันของ Stress-Strain curve (secant หรือ tangential gradient) อย่างไรก็ตามความถูกต้องในการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ระดับ Strain levels ต่าง ๆ ในทางปฏิบัติจะกระทำได้โดยประมาณช่วงของการวัดดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายพฤติกรรมของ Stress-Strain ในดินได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงค่าของ G ในช่วง Strain ต่าง ๆ

รูปที่ 2.4 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสมในการทดสอบวิธีต่าง ๆ

1. Stress-Strain curve จะมีลักษณะ non-linear เพิ่มขึ้นเมื่อ Strain เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่า Shear modulus มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ Strain เปลี่ยน
2. ในช่วง Small strain พฤติกรรมของ Stress-Strain เกือบเป็นเส้นตรงและ Shear modulus มีค่าคงที่
3. ที่ Small strain ค่า Shear modulus จะมีค่ามากแต่ค่าจะลดลงมาเหลือเพียงหนึ่งในสิบเมื่อ Strain เพิ่มขึ้นจนถึง 1% โดยประมาณ
4. ค่า Bulk modulus ที่เปลี่ยนไปเนื่องจาก Volumetric strain (การเปลี่ยนแปลงปริมาตร) จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่า Shear modulus ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่า Shear strain

เป็นการง่ายที่จะแยกความแตกต่างของช่วง Strain โดยใช้คุณสมบัติของ Stress-Strain curve ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงค่า Stiffness ในอุดมคติ ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก Strain levels ของดินโดย Atkinson & Salfors (1989) ซึ่งแบ่งเป็นช่วงได้ดังนี้

1. **Very small strain:** Strain < 0.001% ค่า Shear modulus จะเกือบคงที่เมื่อค่า Strain เปลี่ยนแปลง นั่นคือในช่วงนี้ โมดูลัสแบบเฉือน จะไม่ขึ้นกับ Strain
2. **Small strain:** 0.001% < Strain < 1% ลักษณะของ Stress-Strain curve จะเป็นลักษณะ highly non-linear และค่า โมดูลัสแบบเฉือนจะ ขึ้นกับ Strain
3. **Large strain:** strain > 1% สภาพของดินจะใกล้ Failure ค่า โมดูลัสแบบเฉือนจะมีค่าน้อย

Tatsuoka (1992) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ระดับความเครียดต่ำในการทดสอบแบบ Consolidation Undrain Triaxial Compression Test โดยการทดสอบครั้งนี้พบว่าค่าของโมดูลัสเฉือนเริ่มต้น(initial)ของดินเหนียวไม่ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียด แต่ค่าของโมดูลัสเฉือนจะมีการเปลี่ยนแปลงความเครียดมาก ๆ

2.3 วิธีการวัดค่า Modulus ในวิธีต่าง ๆ

วิธีการวัดค่า Modulus ในแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับค่าของ Strain ในระดับต่างๆ ที่ต้องการหาค่าของ Modulus ถ้าในช่วง strain ที่มากโดยปกติเวลาในการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถหาได้จากความชันของ Stress-Strain curve ได้เลย แต่ถ้าในช่วงที่ Strain น้อย ๆ จะใช้วิธีการ

แพร่กระจายของคลื่นอย่างเช่นวิธี Hardin resonant column test, Drenvich resonant column test และ Ultrasonic shear wave velocity measurements ในการทดสอบหา Shear modulus ที่ Small strain เป็นต้น ถ้าในช่วง Strain ที่น้อยมาก ๆ วิธีที่นิยมใช้มากก็คือวิธี Bender element test ส่วนในการทดสอบหาค่าในสนาม การประมาณค่า Modulus จะใช้วิธี Rayley-wave-velocity survey, Seismic refraction survey, Cross hole test หรือใช้ seismic cones เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของดินและวิธีการหาคุณสมบัติที่ Strain ต่าง ๆ

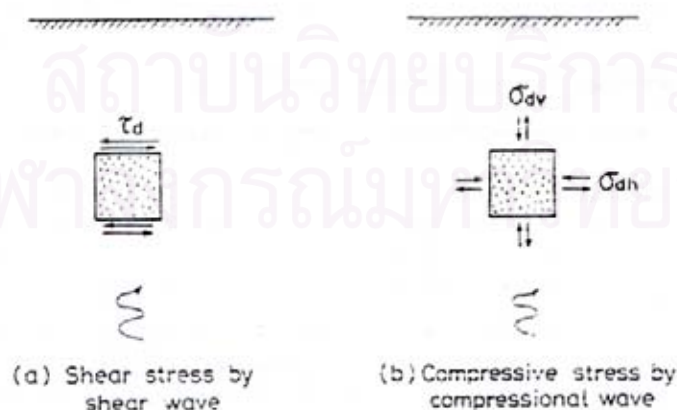
Magnitude of strain	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Phenomena	Wave Propagation, Vibration		Cracks, differential settlement		Slide, compaction, liquefaction	
Mechanical characteristics	Elastic		Elasto-plastic		Failure	
Effect of load repetition			←————→			
Effect of rate of loading			←————→			
Constants	Shear modulus, Poisson's ratio, damping				Angle of internal friction, cohesion	
In-situ measurement	Seismic wave method	←————→				
	In-situ vibration test	←————→				
	Repeated loading test	←————→				
Laboratory Measurement	Wave propagation, precise test	←————→				
	Resonant column precise test	←————→				
	Repeated loading test	←————→				

2.3.1 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Large strain levels

โดยปกติในการหาค่า Modulus ในห้องปฏิบัติการสามารถหาได้จากความชัน Stress-Strain curve ดังเช่นค่า Yong's modulus สามารถหาได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress (σ) กับค่า Strain (ϵ) ซึ่งสามารถกระทำได้ในการทดสอบหาค่ากำลังของดินอย่างเช่น วิธี unconfined compression test และ Triaxial test เป็นต้น ยกเว้นการวัดที่ Small strain Baldi, Hight and Thomas (1988) ได้กล่าวถึงการวัดค่า Stiffness ในการทดสอบทั่วไปว่า ที่ Strain น้อยกว่า 0.1% ในตัวอย่าง Unconsolidated และน้อยกว่า 0.1% ในตัวอย่าง Isotropically consolidated โดยทั่วไปค่าที่ออกมาจะเชื่อถือไม่ได้เพราะฉะนั้นค่า Shear modulus จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั่วไปจะใช้ได้ที่ค่า Strain สูงๆ เท่านั้น

2.3.2 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small strain levels

การหาค่าโมดูลัสที่ Small strain levels นิยมมาจากการแพร่กระจายของคลื่นหลักๆ 2 ชนิดด้วยกัน คือคลื่น Body wave (P-Wave) และ Shear wave (S-Wave) ทั้ง 2 คลื่นจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ตั้งฉากกันโดยที่คลื่น P-wave จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดขณะที่คลื่น S-wave จะทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนดังรูปที่ 2.5 ความแตกต่างของคลื่นทั้ง 2 นี้คือคลื่น P-wave นั้นน้ำจะมีผลกระทบต่อความเร็วของคลื่น ขณะที่จะไม่เกิดขึ้นกับคลื่น S-wave เป็นผลอันเนื่องมาจากน้ำไม่สามารถรับแรงเฉือนได้จึงทำให้ไม่เกิด Shear strain ขึ้นกับน้ำ เพราะฉะนั้นเราจึงให้ความสำคัญกับคลื่น S-wave มากกว่าคลื่น P-wave



รูปที่ 2.5 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นความเค้นมากระทำ

ค่าโมดูลัสจะหามาจากความเร็วของคลื่นที่เดินทางมาถึงครั้งแรก โดยที่ความสัมพันธ์ของโมดูลัสกับความเร็วของคลื่นมาจากพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตันที่ว่าด้วยเรื่องของแรงนั้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$E = \rho v_c^2$$

E	=	ค่า Young's modulus
ρ	=	ความหนาแน่นรวมของดิน
v_c	=	ความเร็วของคลื่นความเค้น P-wave

ในทำนองเดียวกันถ้าเป็น Shear Modulus ความสัมพันธ์ ที่ได้คือ

$$G = \rho v_s^2$$

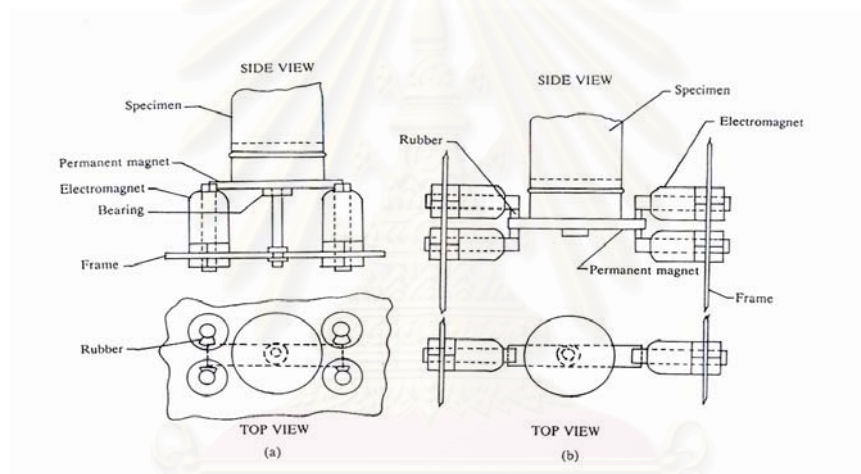
G	=	ค่า Shear modulus
ρ	=	ความหนาแน่นรวมของดิน
v_s	=	ความเร็วของคลื่นความเค้น S-wave

วิธีการแพร่กระจายของคลื่นสำหรับการประมาณค่าโมดูลัส Strain ที่เกิดขึ้นจากคลื่นปกติ มักจะมีขนาดเล็กและสามารถที่จะทำให้ Strain มีขนาดที่เล็กมากๆ ได้ อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสที่หาจากวิธีการแพร่กระจายของคลื่นจะขึ้นกับ ความต้านทาน, ความถี่, ขนาดของคลื่น, ค่าปรับแก้ เป็นต้น วิธีที่ใช้กันมากในการหาค่าโมดูลัส โดยการแพร่กระจายของคลื่น คือ Hardin resonant column test, Drnevich resonant column test และ Ultra sonic shear wave velocity measurement test เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- วิธี Hardin Resonant Column Test

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับการหาคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการซึ่งทฤษฎีและวิธีการในการทดสอบเสนอโดย Hardin & Richart (1963) การทดสอบอาศัยพื้นฐานของทฤษฎีและวิธีการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus กับความถี่กำทอน ในการทดสอบแรงตามแนวแกนสามารถใส่แรงพร้อมกับวัดความถี่กำทอนที่เกิดขึ้นได้ Shear modulus ที่สามารถวัดได้จากเครื่องมือนี้โดยทั่วไปจะให้ค่าของ Strain ที่น้อยมาก ประมาณ 10^{-5} อย่างไรก็ตามสามารถดัดแปลงเครื่องให้สามารถสร้างค่า Strain ที่สูงกว่านี้ได้ (เพิ่มได้ถึง 10^{-3})



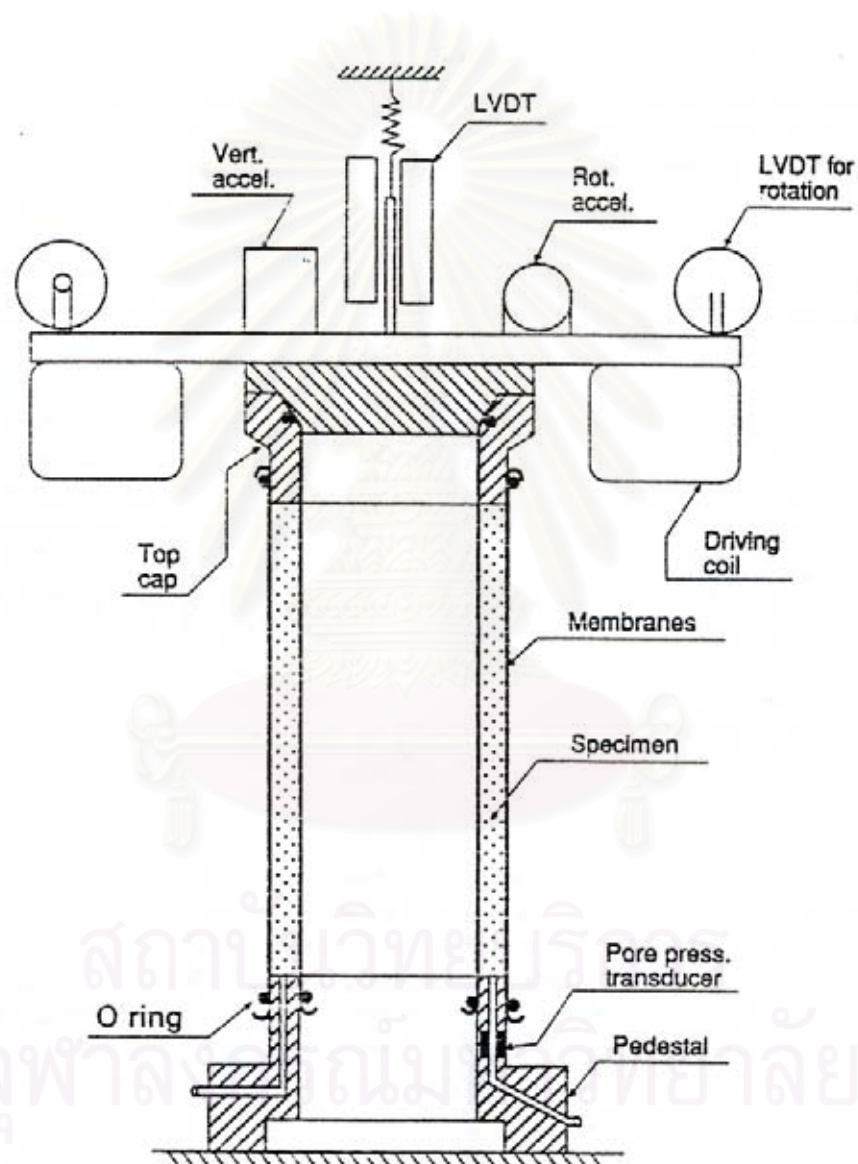
รูปที่ 2.6 Resonant column test apparatus Hardin & Richart, 1963

(a.) for torsional vibration (b.) for longitudinal vibration

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- วิธี Drnevich Resonant Column Test

สร้างโดย Drnevich, Hall & Richart (1967) โดยจะใช้ตัวอย่างที่มีลักษณะกวางแทน ตัวอย่างทรงกระบอก การทดสอบจะสร้างแรงบิดที่สูงบนด้านบนของตัวอย่าง ขนาดของ Strain ที่เกิดขึ้นสามารถสร้างได้มากกว่า 10^{-3}



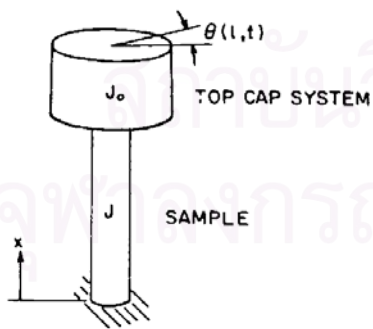
รูปที่ 2.7 Resonant column test apparatus (Drnevich, 1967)

Bolton & Wilson (1985) ได้ทำการศึกษาแบบพลศาสตร์ในทรายแห้ง (Dry Sand) โดยการใช้ Resonant Column พบว่าในทรายแห้งนั้นค่าความถี่ไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือน ต่อมาในปี 1988 Pane & Burghignolli มีรายงานผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในช่วงกว้าง โดยชี้ได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดนั้น มีผลกระทบต่อค่าของความเครียดเองในการวัดค่าโมดูลัสเฉือน

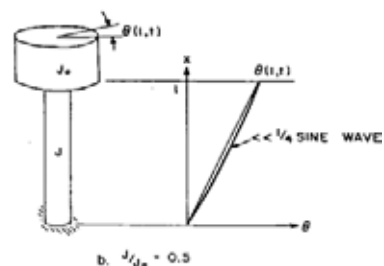
Zavoral, Dan Z. & Campanella (1994) ได้ทำการทดสอบการหาค่าโมดูลัสเฉือนในตัวอย่างดินเหนียวแบบ Undisturbed โดยวิธี Resonant Column ด้วยความถี่ที่ต่างกัน ซึ่งให้ผลปรากฏออกมาว่าค่าโมดูลัสเฉือนจะเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นน้อยๆ

Drnevich, V. P., Hall, J. R., Jr. & Richart, F. E., Jr. ทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนโดยการทดสอบแบบ fix-free Resonant Column ตามรูปที่ 2.8 โดยที่ตัวอย่างและ top cap มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของตัวอย่างและ top cap มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งใช้ตัวอย่างแบบ Hollow Cylindrical โดยอ้างอิงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของ Kelvin-Voigt ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของการทดสอบได้

ดังนั้นในการทดสอบจึงพิจารณาได้ 2 แบบตามรูปที่ 2.9a และ 2.9b ในรูปที่ 2.9a เมื่อเกิดการหมุนที่ด้านปลายอิสระนั้นจะเกิดคลื่นขนาด $\frac{1}{4}$ เท่าของ sine wave 1 ลูกคลื่นและจะมีค่าลดลงเมื่อมวลที่ด้านปลายอิสระเพิ่มมากขึ้น

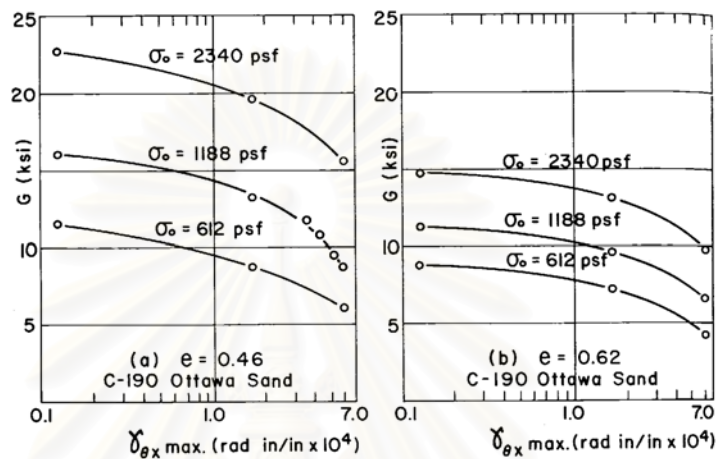


รูปที่ 2.8 การทดสอบแบบ Fixed-Free Resonant Column



รูปที่ 2.9 การรบกวนตัวอย่างโดยการบิด

ในการทดสอบนั้นให้ผลการทดสอบออกมาตามรูปที่ 2.10 ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มค่าการสั่นสะเทือนของ Resonant Column เพิ่มขึ้นและค่าความถี่สั่นพ้องจะมีค่าลดลงนั่นหมายถึงค่าโมดูลัสเฉือนนั้นจะมีค่าลดลงตามค่าความถี่และความสูงคลื่นของค่าความเครียดเพิ่มขึ้น โดยการทดสอบนี้ตัวอย่างจะต้องไม่ถูกการรบกวนด้วยความถี่สูงมาก่อน



รูปที่ 2.10 ค่าโมดูลัสเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

- Ultra Sonic Shear Wave Velocity Measurement

เป็นวิธีที่ใช้วัดความเร็วที่เกิดจากแรงเฉือนสั่นสะเทือนความถี่สูง ถูกคิดค้นโดย Lawrence (1965) โดยจะต้องรู้ความหนาแน่นและความเร็วของ Shear wave ของดิน Shear modulus สามารถคำนวณได้จากกฎการเคลื่อนที่ของวัสดุ Elastic วิธี Ultra sonic ไม่สามารถดัดแปลงให้เพิ่ม Stress ลงไปในตัวอย่างได้ขณะทดสอบและการแปลสัญญาณที่รับได้ยังทำได้ยาก

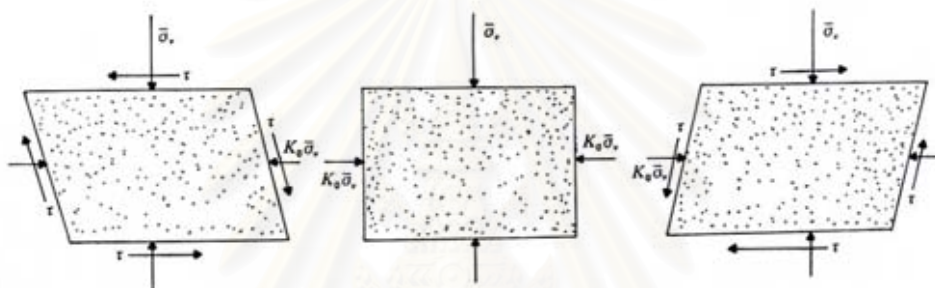
- Cyclic Test

เป็นวิธีการทดสอบหาโมดูลัสแบบเฉือนที่ Small strain level ถึง Large strain level ส่วนใหญ่แล้วเครื่องทดสอบ Cyclic test มักจะใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นดินไหวหรือ การหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางกลศาสตร์อาทิเช่น พฤติกรรมของ Liquefaction, Damping ratio และ โมดูลัสแบบเฉือนเป็นต้น

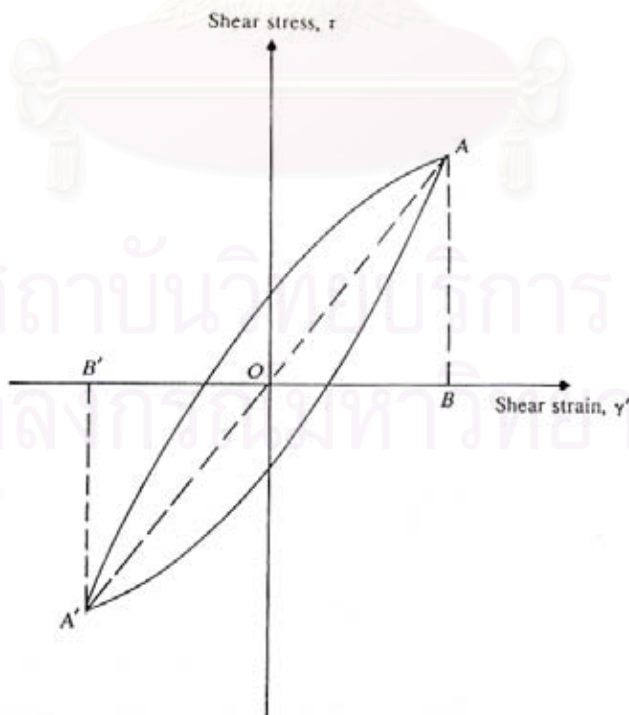
การทดสอบด้วย Cyclic test มีลักษณะเครื่องมือทดสอบหลายประเภทแต่ที่นิยมนำมาใช้มีอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. Cyclic Simple Shear Test เป็นเครื่องมือที่ทดสอบหาค่า โมดูลัสแบบเฉือน (G) และ Damping ratio (D) ของดิน ลักษณะกลไกในการทดสอบคือจะให้แรงทางแนวแกนคงที่ (Vertical effective stress, σ_v') และ ให้แรงแปรเปลี่ยนในทางแนวเฉือน (Cyclic shear stress, τ) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนสามารถหาได้โดย

$$G = \frac{\text{amplitude of cyclic shear stress, } \tau}{\text{amplitude of cyclic shear strain, } \gamma}$$



รูปที่ 2.11 Cyclic Simple Shear Test



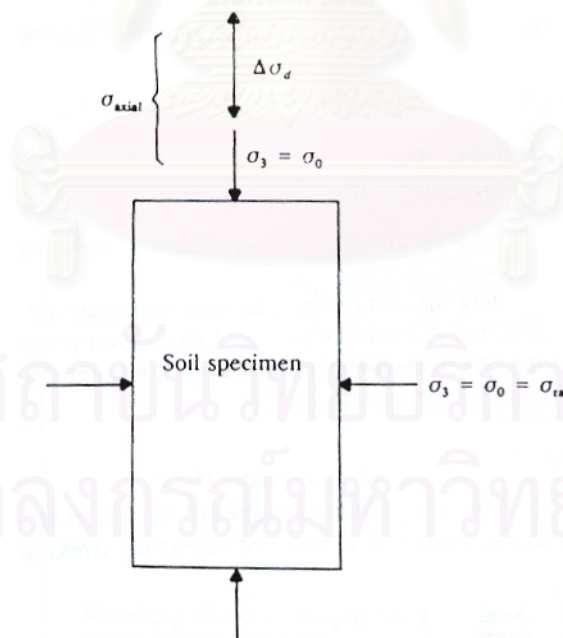
รูปที่ 2.12 การคำนวณหาโมดูลัสแบบเฉือนและ Damping ratio จาก Hysteresis loop

2. Cyclic triaxial test เป็นเครื่องมือที่ทดสอบหาค่า Young's modulus (E) และ Damping ratio (D) ของดินโดยทั่วไปในการทดสอบจะให้ Confining pressure $\sigma_0 = \sigma_3$ และให้แรงแปรเปลี่ยนในแนวแกน (Axial cyclic stress, $\Delta\sigma_d$) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 การคำนวณหาค่า Young's modulus คำนวณจาก Hysteresis loop ในรูปที่ 2.14 จะได้

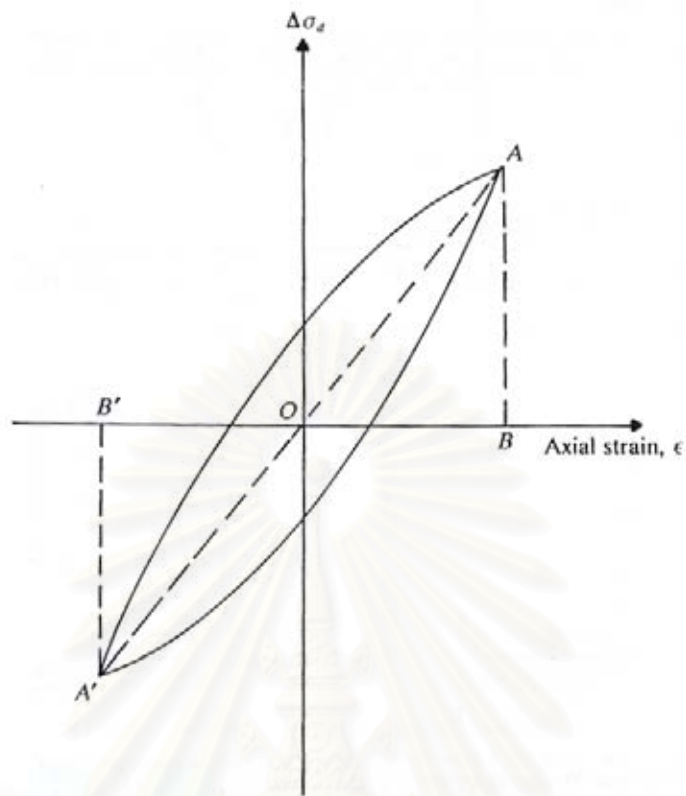
$$E = \frac{\Delta\sigma_d}{\varepsilon}$$

ค่าโมดูลัสแบบเฉือนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus (E) กับ Poisson's ratio จะได้

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$



รูปที่ 2.13 Cyclic triaxial test

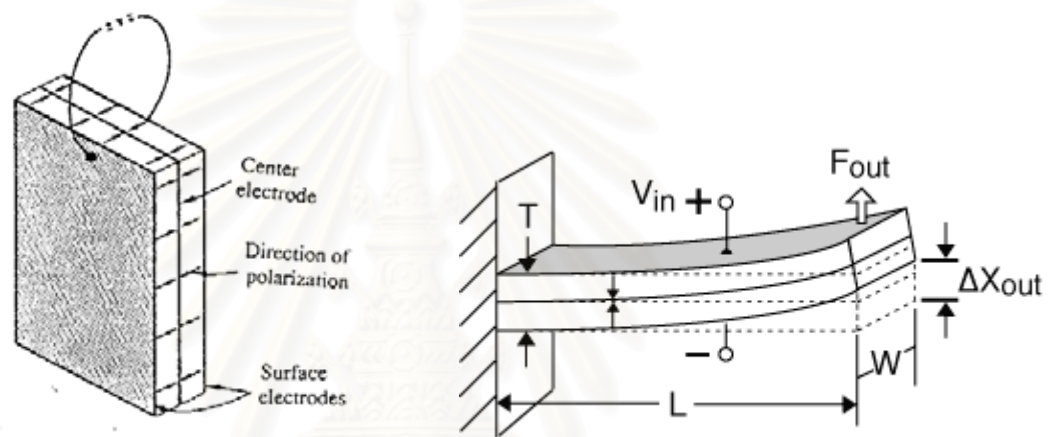


รูปที่ 2.14 การคำนวณหา Young's Modulus และ Damping ratio จาก Hysteresis loop

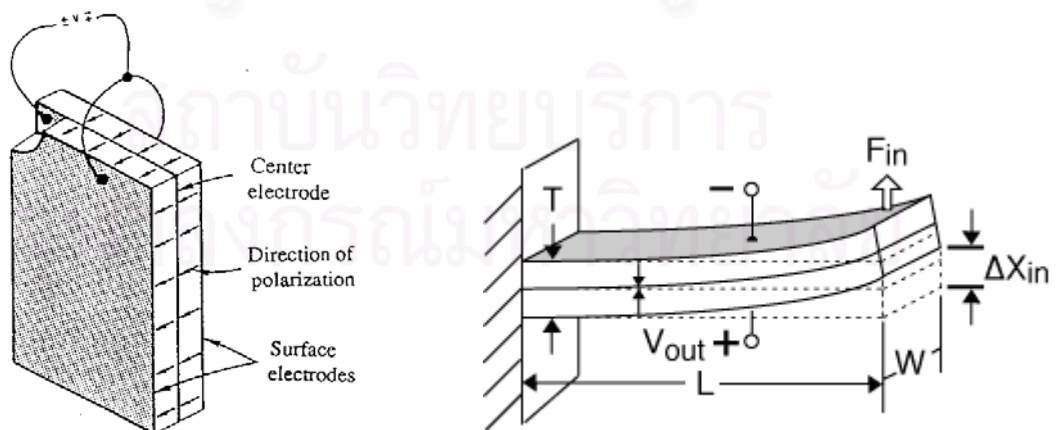
จากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น วิธี Resonant column test เป็นวิธีที่นิยมและน่าเชื่อถือที่สุด เพราะสามารถหาค่า Shear modulus สำหรับปัญหาทั้งทาง Dynamic และ Static ที่ Small elastic strain แต่มีปัญหาในการเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างที่ถูกรบกวนจะทำให้ค่าที่ได้ผิดไปจากความจริง ซึ่งต่างจากวิธีที่ทดสอบหาค่าในสนามจะมีปัญหาเนื่องจากตัวอย่างถูกรบกวนน้อยกว่า ทำให้ความเร็วของ Shear wave ที่วัดได้จากวิธี Resonant column test ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

2.3.3 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Very small strain

การหาโมดูลัสที่ความเครียดน้อยมากโดยการใช้ Bender Element ซึ่งเป็นการแปรสัญญาณจาก electro-mechanics ที่เป็นพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและในทางกลับกันเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล Bender Element เป็น piezo-ceramic plate 2 แผ่นมาประกบกันสามารถใช้ได้เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่น โดยมีวิธีการใช้แตกต่างกันตามรูปที่ 2.15 และ 2.16 อีกทั้งการใช้วิธี Bender Element ยังง่ายและสามารถหาค่าโมดูลัสเฉือนระหว่างการทดสอบแรงเฉือน, อิมพัลส์ด้วยน้ำของตัวอย่างและ การอัดตัวคายน้ำ ขณะที่วิธีอื่นๆทำไม่ได้

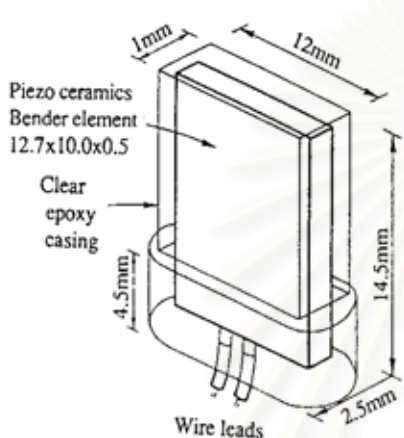


รูปที่ 2.15 การติดตั้ง Bender Element แบบอนุกรม

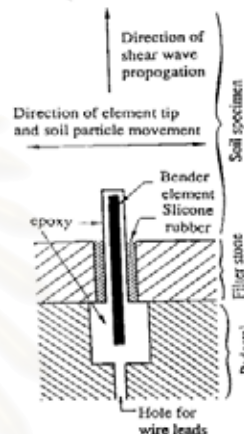


รูปที่ 2.16 การติดตั้ง Bender Element แบบขนาน

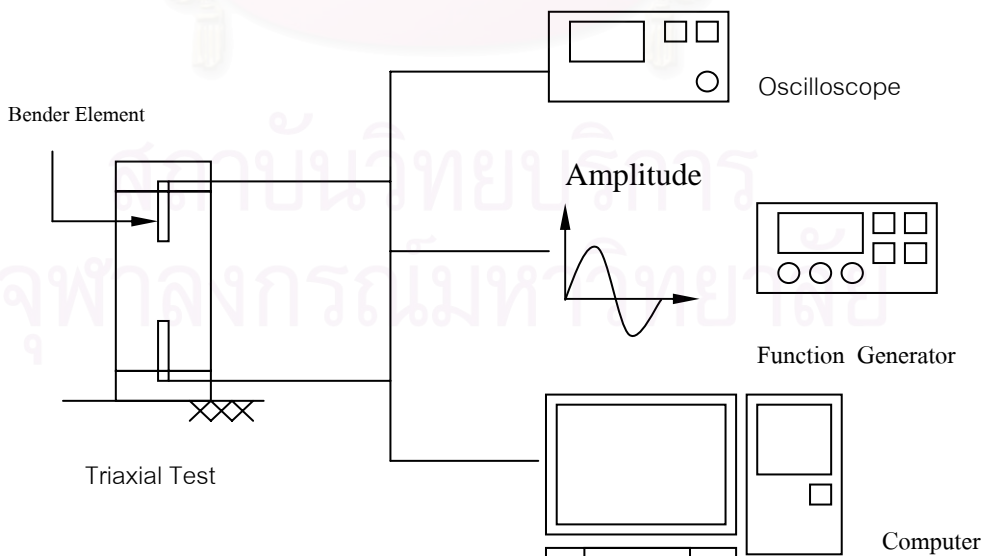
การต่อนั้นตัวส่งคลื่นจะต่อแบบขนานและตัวรับคลื่นจะต่อแบบอนุกรม การต่อที่แตกต่างกันเพื่อประสิทธิภาพ Bender Element เป็นวัสดุที่มีความต้านทานสูงจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการลัดวงจรด้วยการเคลือบ Bender Element ด้วย Epoxy ตามรูปที่ 2.17 และในรูปที่ 2.18 แสดงการติดตั้งกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ และแสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเคลื่อนที่ของคลื่นแรงเฉือนดังนั้นในการทดสอบใช้ Function Generator เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ และ Oscilloscope เป็นตัวรับสัญญาณ และได้อธิบายไว้ในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.17 การเคลือบ Bender Element



รูปที่ 2.18 แสดงการติดตั้งกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเคลื่อนที่ของ ShearWave



รูปที่ 2.19 การติดตั้งอุปกรณ์หลักในการทดสอบ

ในการหาค่าโมดูลัสเฉือนโดยใช้ Bender Element นั้นอาศัยความสัมพันธ์ของค่าความเร็วของคลื่นแรงเฉือน ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$V_s = \frac{L}{t}$$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วคลื่นแรงเฉือน (m/s)
 L คือ ความยาวตัวอย่าง (m)
 T คือ ระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ (s)

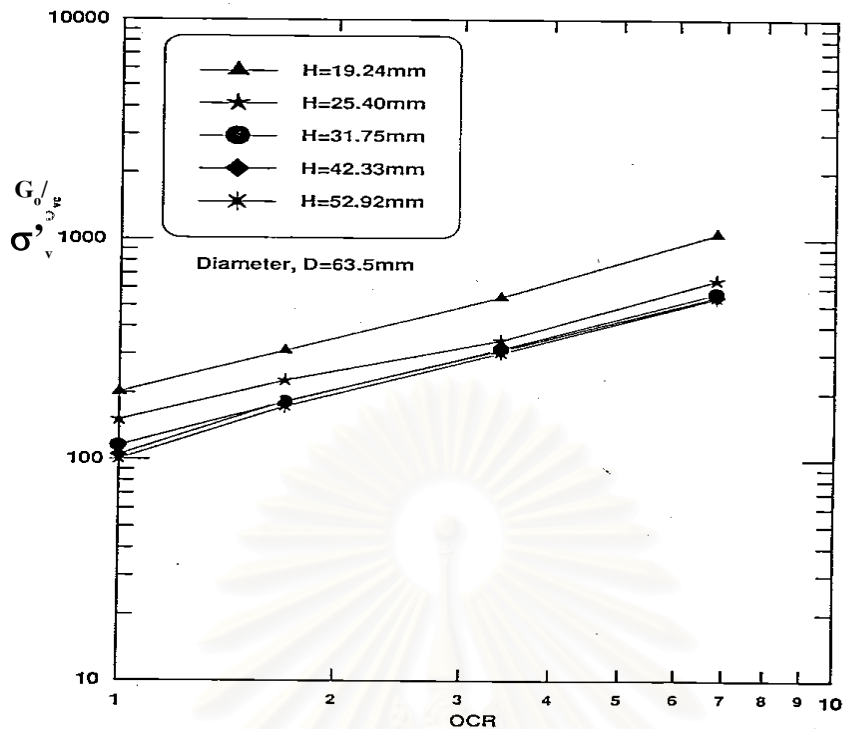
ช่วงเวลาที่วัดได้นั้นจะเป็นช่วงน้อยมากๆ จึงจำเป็นต้องใช้ Oscilloscope ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งค่าโมดูลัสเฉือนมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นแรงเฉือน ดังนี้

$$\text{Shear Modulus, (G)} = \rho(V_s^2)$$

เมื่อ ρ - Density (kg/m^3)

Dyvik & Madshus (1985) ได้ทำการเสนอว่า ค่าความยาวของตัวอย่าง “ L “ ควรพิจารณาจากปลายของ Bender ตัวส่งถึง Bender ตัวรับ และยื่นเข้าไปในตัวอย่างประมาณ 1-2 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบแบบ Triaxial Test และ 2-3 มิลลิเมตร สำหรับ Oedometer Test และได้เปรียบเทียบผลของ Stiffness วัดโดย Bender element กับวิธี Resonant column test ที่ความดันของหน่วยแรงต่างกัน ในการทดสอบทั้ง Loading และ Unloading และผลที่ออกมาถือว่าดีมากมีความใกล้เคียงกัน

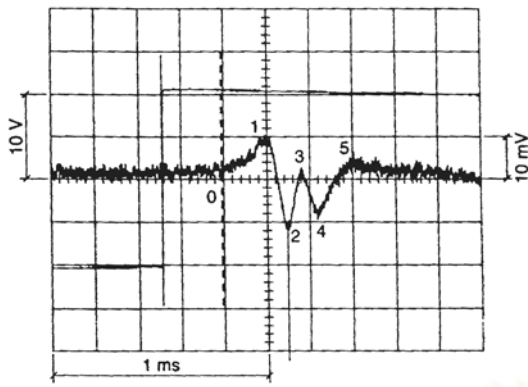
Sahabdeen, Mohamed Mohideen (1996) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงของตัวอย่าง (D/H) ต่อค่า Initial Shear Modulus โดยทำการทดสอบใน Oedometer With Bender Element พบว่า D/H เท่ากับ 2^{1/2} หรือน้อยกว่า จะให้ Initial Shear Modulus เกือบคงที่สำหรับที่สภาพหน่วยแรงต่ำๆ (น้อยกว่า 200 Kpa) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



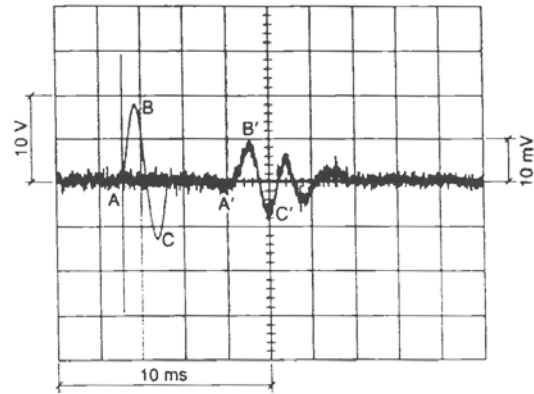
รูปที่ 2.20 ผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงของตัวอย่าง (D/H) ต่อค่า Initial Shear Modulus

Teerin Amornwithayalak (2001) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของ Over consolidation, Plasticity, สภาวะรับแรงเฉือน, σ'_v ต่อค่าของ Shear Modulus **อิติรักษ์ อัครกุล** ได้ทำการทดสอบคล้าย Teerin แต่ในช่วง Shearing ได้เพิ่มขั้นตอน Cyclic loading และ **ณรงค์ศักดิ์ บุญยศ** ได้ศึกษาถึงผลกระทบของ Frequency และ Amplitude ของคลื่นต่อค่า Shear Modulus ในการทดสอบดังกล่าวปลายทั้ง 2 ของ Bender ยื่นเข้าไปในตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบใน Triaxial With Bender Element

Viggiani & Attkinson (1995) ได้ทำการทดสอบโดยการส่งคลื่นทั้ง 2 แบบ คือ คลื่นรูปซายน์ โดยใช้ความถี่ 1-10 kHz และคลื่นรูปสี่เหลี่ยม โดยใช้ความถี่ 50 Hz ซึ่งได้ผลออกมาตามรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการส่งคลื่นรูปซายน์จะสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ออกมาเมื่อคลื่นเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณ



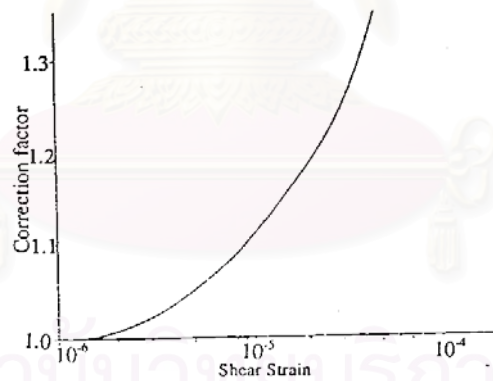
รูปที่ 2.21 การส่งคลื่นแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.22 การส่งคลื่นรูปซายน์

การหาค่าโมดูลัสเฉือนที่ระดับค่าความเครียดน้อยมากนั้นค่าของโมดูลัสเฉือนจะมีค่าคงที่ แต่ที่ระดับอื่น ๆ จะมีค่าลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องมีค่าปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ μ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง μ กับระดับความเครียดตามรูปที่ 2.23 โดยการทดสอบแบบ Seismic Test โดย Larsson (1991)

$$G_0 = G_{measured} \times \text{correction factor}$$



รูปที่ 2.23 แสดงค่า Factor กับค่าของ Shear Strain

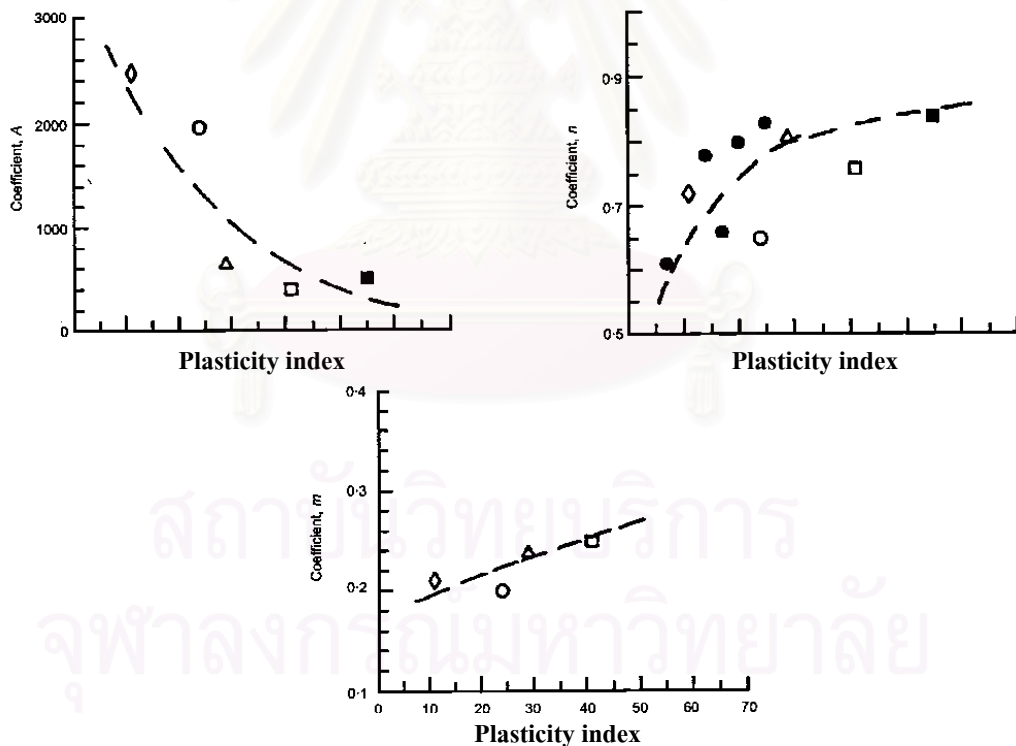
Viggiani and Atkinson (1995) ได้ศึกษาค่าความแข็งของดินเม็ดละเอียด (fine grained) ที่ความเครียดระดับต่ำ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแบบเฉือนที่ความเครียดระดับต่ำใน Reconstituted จำพวก Kaolin จะได้ความสัมพันธ์

$$G_0/Pr = A\{P'/Pr\}^n(OCR)^m$$

เมื่อ A,n,m เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาได้จากรูปที่ 2.24 ค่า P' คือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ,Prคือ หน่วยแรงดันอ้างอิง (ใช้เท่ากับ 1 KPa) และ OCR คือค่าอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุดในอดีตกับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (P'p/P') สมการดังกล่าวข้างบนจะสามารถอธิบายเมื่ออยู่ในสภาวะหน่วยแรงประสิทธิผลไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic) ได้ดังนี้

$$G_o/Pr = Aa\{\sigma'_a/Pr\}^{na} \{\sigma'_r/Pr\}^{nr}$$

เมื่อ σ'_a และ σ'_r เป็นหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งและแนวราบตามลำดับในตัวอย่างทดสอบสามแกน Aa เท่ากับAในสมการทั่วไป ค่าของ n_a และ n_r ไม่เท่ากัน ($n=n_a+n_r$) และ n_a, n_r เป็นความชันของเส้นแรงกดหรือแรงดึงระหว่างค่าโมดูลัสแบบเฉือนกับหน่วยแรงในแนวตั้งและแนวราบ



รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงของ stiffness สำหรับโมดูลัสแบบเฉือนด้วยค่า PI
Viggiani and Atkimson (1995)

2.2.4 การวัดค่า Modulus ในสนาม

การทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนในสนามจะให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงความจริงมากกว่าการทดสอบหาค่าจากห้องปฏิบัติการเพราะตัวอย่างจะถูกรบกวนน้อยและมักจะใช้การกระจายของคลื่นแรงเฉือน โดยปกติแล้วตัวกำเนิดสัญญาณจะให้กำเนิดคลื่น S-Wave และ P-Wave และ Rayleigh Wave และตัวรับสัญญาณที่ผ่านมาจากชั้นดินมีผลกระทบสัญญาณที่จะขึ้นอยู่กับสถานที่, ตำแหน่งของสถานที่ตั้งตัวกำเนิดสัญญาณและตัวรับสัญญาณ, ระยะทางระหว่างตัวกำเนิดและตัวรับและความเป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดินที่คลื่นจะสามารถเดินทางผ่านไปได้ จึงจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์การทำงานและการเลือกใช้วิธีตรวจสอบหาค่าโมดูลัสเฉือน ดังนี้

Rayleigh Wave Velocity Survey เป็นการวิเคราะห์ความเร็วของคลื่น Rayleigh Wave การให้กำเนิดคลื่นทำได้โดยตัวกำเนิด Harmonic Vibration กระทำที่บริเวณพื้นผิวของดิน ความเร็วของคลื่นคำนวณจากความยาวช่วงคลื่นและความถี่ที่เกิดจากแหล่งกำเนิด และหาความยาวคลื่นจากการวัดระยะระหว่างจุดที่คลื่นเริ่มสั่นสะเทือน Richart, Hall, JR and Wood, R.D สมมุติฐานว่าคลื่นแรงเฉือนและ Rayleigh Wave มีความแตกต่างกันน้อยมากจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์เดียวกันกับคลื่นแรงเฉือนหาค่าของค่าโมดูลัสเฉือนได้

Seismic Refraction Survey เป็นวิธีที่ดัดแปลงโดย Drenvich (1971) ตามรูปที่ 2.25 ให้สามารถหาค่าโมดูลัสเฉือนได้ เพราะแต่เดิมที่เป็นการสำรวจหาน้ำ, น้ำมันใต้ผิวดินเท่านั้น จึงได้เสนอสมการการหาค่า ค่าโมดูลัสเฉือน ไว้ดังนี้

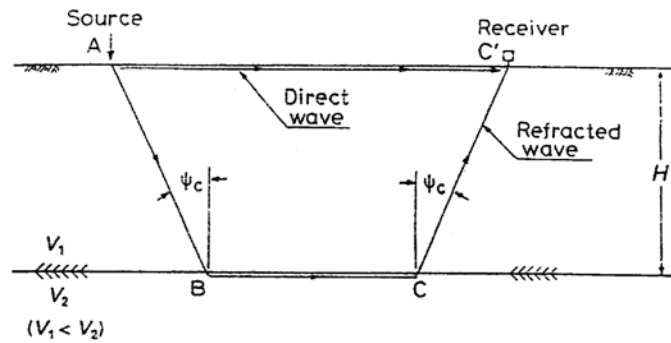
$$G = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} (\rho V_p^2)$$

เมื่อ

V_p - Compression Wave Velocity

ν - Poisson's Ratio

เนื่องจากจำเป็นต้องรู้ค่าของ Poisson's Ratio จึงไม่นิยมใช้มากนัก

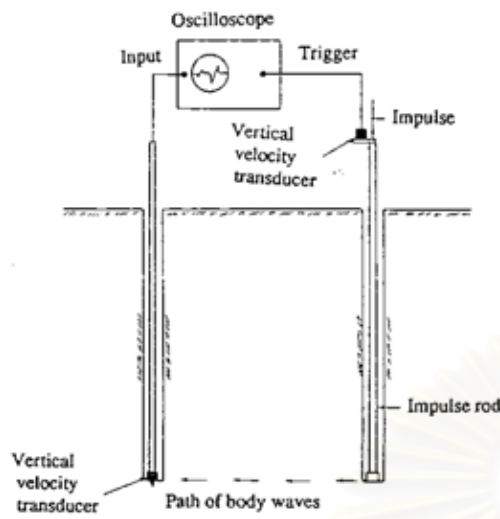


รูปที่ 2.25 Seismic Refraction Survey

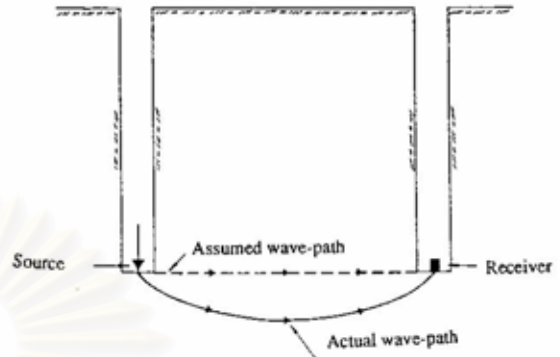
Cross Hole Test เป็นวิธีทดสอบโดยการเจาะหลุมในแนวตั้ง 2 หลุม ระยะห่างระหว่าง 2 หลุมไม่มากนัก ที่ระดับความลึกเท่ากัน โดยที่ตัวกำเนิด และ ตัวรับสัญญาณอยู่คนละหลุมกันและตัวรับตัวส่งจะสัมผัสผิวดินตลอดเวลาขณะทำการทดสอบ ตัวกำเนิดและตัวรับสัญญาณจะต่อเข้ากับ Storage Oscilloscope โดยที่ Oscilloscope จะบันทึกค่าจากตัวรับสัญญาณทันทีเมื่อตัวกำเนิดสร้างคลื่นแรงเฉือนตามรูปที่ 2.26 วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความถูกต้องมากที่สุดวิธีหนึ่งและมักจะมีการใช้อ้างอิงกับวิธีการอื่นๆ แต่จุดอ่อนที่เห็นได้ชัดคือ การเจาะดินเพราะจะเป็นการรบกวนตัวอย่างดินตามธรรมชาติ จึงแก้ปัญหาโดยการให้ตัวกำเนิดคลื่นและตัวรับสัญญาณสัมผัสผิวดินอย่างดี

Andreasson (1979) ได้แสดงการเปรียบเทียบผลของการรบกวนจะประมาณเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหลุมเจาะที่ทำการเจาะไว้ก่อนกับการทดสอบโดยการกดเครื่องมือลงไป ตัวอย่างดิน ยังมีการศึกษาปัญหาต่อพบที่ระดับความลึกที่มากขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่ามากตามยิ่งทำให้ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีการเคลื่อนที่ที่เร็วขึ้นและไปในทิศทางที่เร็วที่สุด ทำให้การหาค่าโมดูลัสเฉือนที่ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนาน้อย ยากต่อการหาค่าที่ถูกต้อง ตามรูปที่ 2.27

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

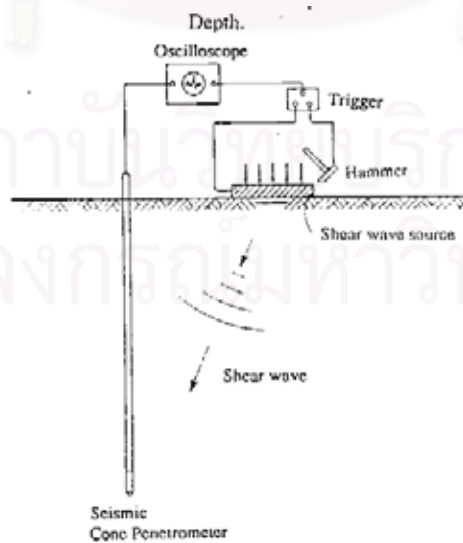


รูปที่ 2.26 Cross Hole Test



รูปที่ 2.27 แสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่น
เมื่อชั้นดินด้านล่าง มีความแข็งแรงกว่า

Down Hole Method เป็นวิธีการที่มีการวัดที่เหมือนกันกับ Cross Hole เพียงแต่มีหลุมเจาะเพียงหลุมเดียวเท่านั้น โดยจะมีตัวรับสัญญาณอยู่ที่หลุมและกำเนิดคลื่นตามแนวนอนบนพื้นผิว ตามรูปที่ 2.28 แสดงถึงการทดสอบแบบ Seismic Down Hole Test ในการทดสอบนี้สามารถทำในทางกลับกันได้ว่าตัวกำเนิดอยู่ในหลุมเจาะและตัวรับสัญญาณอยู่ด้านบน เราเรียกกันว่า Up Hole Test



รูปที่ 2.28 Down Hole Method

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สถานที่และการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทดสอบ

3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

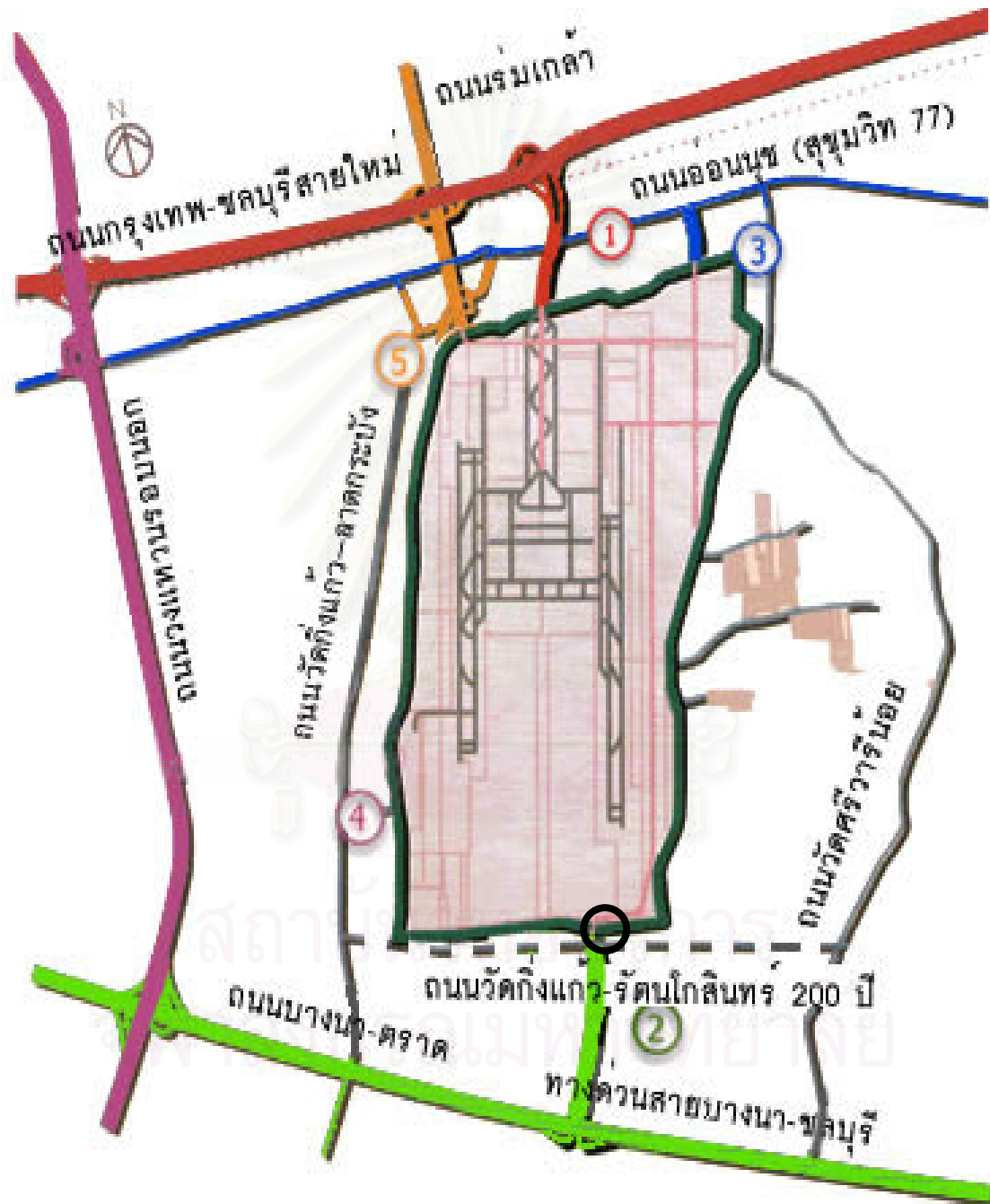
ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ดินเหนียว ซึ่งเก็บมาจากบริเวณทางเข้า-ออกด้านใต้ของโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ (ถนนสายกิ่งแก้ว-รัตนโกสินทร์ 200 ปี กิโลเมตรที่16) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยในบริเวณดังกล่าวจะเป็นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก (Soft to Very Soft Clay) มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมค่อนข้างเหลว กล่าวคือดินมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำและมีค่าการยุบตัวสูง วิธีการเก็บตัวอย่างจะใช้กระบอกบาง (Shelby Tube) เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วและยาวประมาณ 1 เมตร เก็บตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพ (Undisturbed Sample) แบบต่อเนื่องที่ระดับความลึกประมาณ 5-8 เมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกโดยเฉลี่ยของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จำนวน 5 หลุม โดยมีระยะห่างระหว่างหลุมจะประมาณ 2-3 เมตร หลังจากเก็บตัวอย่างดินขึ้นมาแล้วจะทำการเคลือบพาราฟินที่หัวและท้ายกระบอกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำในดินพร้อมทั้งติดฉลากระบุรายละเอียดต่างๆ ของตัวอย่างดิน และนำมาเก็บไว้ในห้องควบคุมความชื้นเพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) โดยเตรียมจากดินเหนียวในสถานะเหลวผ่านกระบวนการอัดตัวคายนํ้าจนเป็นตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งจะนำไปใช้ทำการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) โดยกระบวนการอัดตัวคายนํ้าจะทำการทดสอบทั้งสิ้น 4 ตัวอย่าง และใช้อัตราส่วนการเพิ่มนํ้าหนักกด (Load Increment Ratio, LIR) เท่ากับ 1 สำหรับลำดับการเพิ่มนํ้าหนักจะมีดังนี้ 0.125, 0.25, 0.50 และ 1.00 ksc และหลังจากนั้นจะทำการลดนํ้าหนักลงจาก 1.00 ksc เป็น 0.50 และ 0.25 ksc ตามลำดับ

การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) จะทำการทดสอบตามวิธีการของวิโรจน์ (2546) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมา โดยนำดินเหนียวที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินในสนามมาทำการสร้างเป็นก้อนตัวอย่างดินขึ้นมาใหม่ภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มี

ขนาดตามต้องการและเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ตลอดทั่วทั้งก้อน นอกจากนี้ยังทำการทดสอบไฮโดรมิเตอร์จากตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่บริเวณด้านบนและด้านล่าง เพื่อตรวจสอบโอกาสในการเกิดการแยกตัวของอนุภาคดิน ในระหว่างขบวนการอัดตัวคายน้ำ



สัญลักษณ์ : ○ ตำแหน่งหลุมเจาะที่ 1-5

รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดิน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์หลักๆที่ใช้ในการทดสอบงานวิจัย

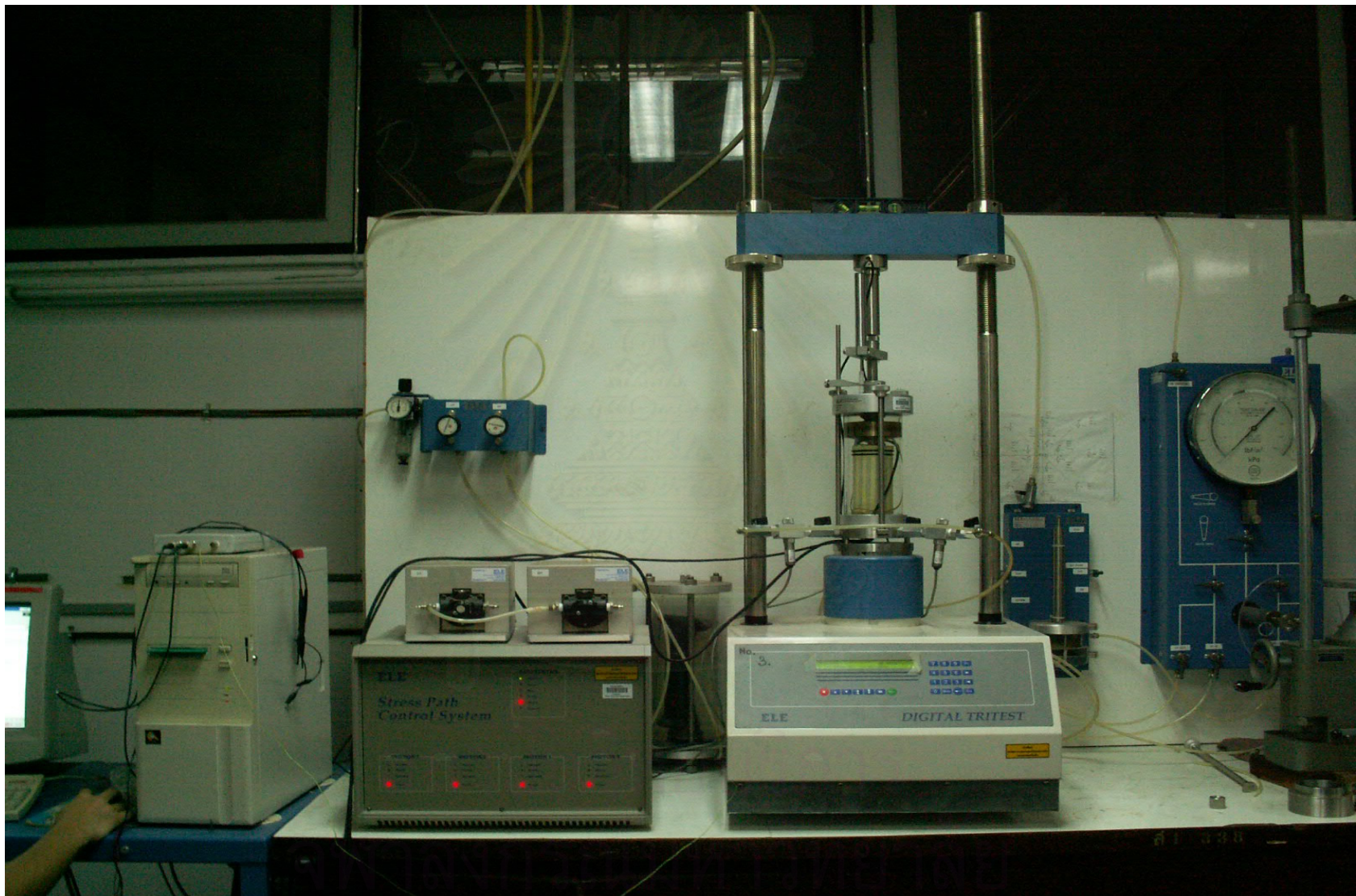
- **Conventional Triaxial** ประกอบด้วยเครื่องมือหลักๆ คือ
 - Water De-Airing System เป็นเครื่องมือสำหรับไล่อากาศในน้ำให้ออกไปเพื่อให้ความดันภายในเซลล์และ ในตัวอย่างมีความสม่ำเสมอ และป้องกันความเสียหายของระบบ Transducer
 - Air filter สำหรับกรองน้ำในอากาศที่ผ่านเข้ามาใน regulator เพื่อป้องกันความเสียหายของ regulator
 - Air Compressor เป็นเครื่องมือสำหรับกำเนิดและรักษาความดันภายในเซลล์ (Cell pressure) และความดันภายในตัวอย่าง (Back pressure) ให้คงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาในช่วงการทดสอบ
 - Bladder เป็นเครื่องมือสำหรับเปลี่ยนแรงดันจากอากาศเป็นแรงดันจากน้ำเข้าสู่ภายในเซลล์ (Cell pressure) และภายในตัวอย่าง (Back pressure)
 - Volume Change Device เป็นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินในระหว่างอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) สำหรับการทดสอบ Triaxial
 - Pressure Control Panel เป็นเครื่องมือสำหรับความดันและควบคุมความดันภายในเซลล์ (Cell pressure) และความดันภายในตัวอย่าง (Back pressure) ให้ระดับความดันสม่ำเสมอ
 - Triaxial Cell จะประกอบด้วยเครื่องมือดังต่อไปนี้
 - Load Cell เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดแรงในแนวแกนในระหว่างทำการทดสอบ
 - LVDT เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการเคลื่อนที่ในแนวแกนในระหว่างทำการทดสอบ
 - Pore Pressure Transducer เป็นอุปกรณ์ที่วัดความดันที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่าง ทั้ง Back pressure และ Excess pore water pressure สำหรับการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ
 - ADU เป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลของตัวแปรสัญญาณแต่ละตัว
- **Bender Element Test Device** เป็นเครื่องมือสำหรับหาค่า Shear modulus ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังต่อไปนี้
 - Bender Element เป็นอุปกรณ์ให้กำเนิดและรับสัญญาณ (Transmitter & Receiver) คลื่นความเค้นในตัวอย่าง

- Function Generator เป็นเครื่องให้กำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้าไปยัง Bender Element
- Oscilloscope เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้บันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า โดยจะนำมาใช้วัดสัญญาณที่เกิดขึ้นของ Bender Element
- Computer เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้บันทึกผลการทดสอบและควบคุมการทำงานของ Oscilloscope

โดยอุปกรณ์และเครื่องมือสำคัญที่ใช้สำหรับการทดสอบงานวิจัยนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19



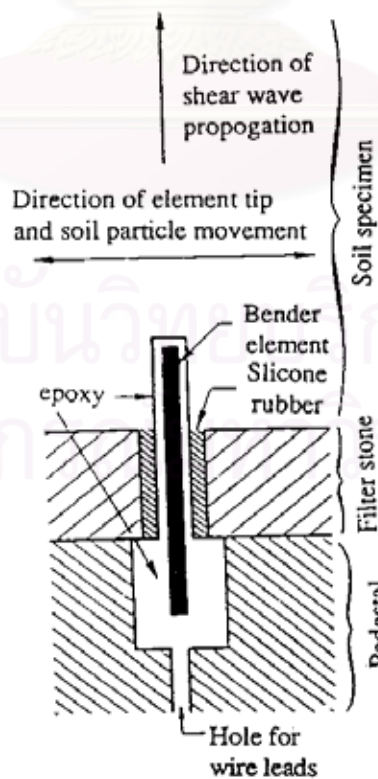
รูปที่ 3.2 เครื่อง Triaxial พร้อมทดสอบ



รูปที่ 3.3 เครื่อง Triaxial พร้อมกับ ADU เก็บข้อมูลระหว่างทดสอบตัวอย่าง

3.3 การติดตั้งแผ่น Bender Element ลงไปใน Top cap และ Base ของเครื่อง Triaxial

1. ทำการต่อเชื่อมสายไฟลงไปในแผ่น Bender element โดยที่ตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) และตัวรับสัญญาณ (Receiver) จะต่อสายไฟแตกต่างกันดังรูป 2.15, 2.16 การต่อสายไฟที่แตกต่างกันของ Transmitter และ Receiver เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำหน้าที่ต่างกันของการส่งและรับสัญญาณคลื่นความเค้น
2. เคลือบ Epoxy ลงในแผ่น Bender element ให้มีความหนาประมาณดังรูป 2.17 เพื่อป้องกันการรั่วและซึมของกระแสไฟฟ้าในแผ่น Bender element
3. เจาะ Top cap และ Base ของเครื่อง Triaxial ดังรูปเพื่อที่สามารถใส่แผ่น Bender element ลงใน Top cap และ Base ได้
4. เท Epoxy ลงไปใน Top cap และ Base เพื่อยึดแผ่น Bender element กับ Top cap และ Base ให้ติดกันดังรูป 3.4 จากนั้นเท Silicone ลงไปใน Top cap และ Base เพื่อให้แผ่น Bender element สามารถเคลื่อนไหวได้
5. ทำ Porous stone โดยใช้ทรายและ Epoxy ให้มีรูขนาดแผ่น Bender element ทะลุลอดผ่านไปได้



รูปที่ 3.4 วิธีการเคลือบและติดตั้ง Bender Element ลงใน cap ของเครื่อง Triaxial

3.4 การหาคุณสมบัติของดินทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น

3.4.1 พิกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg 's limit)

- ชีดเหลว (Liquid limit)
- ชีดพลาสติก (Plastic limit)

3.4.2 ปริมาณความชื้น (Water content)

3.4.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

3.5 วิธีการทดสอบ

การทดสอบหาค่าโมดูลัสแบบเฉือน โดยวิธี Bender element ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบหลักๆ 2 อย่างด้วยกันคือ การทดสอบหาค่าโมดูลัสแบบเฉือน ในช่วงกระบวนการอัดตัวคาน้ำที่สภาวะ K แตกต่างกัน และการทดสอบหาค่าโมดูลัสแบบเฉือน ระหว่างการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดิน (Shearing) โดยทำการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) และจะทำการทดสอบตามโปรแกรมในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 โปรแกรมการทดสอบหาความเร็วคลื่นความเค้นในงานวิจัย

K	Effect vertical stress (kpa)	หมายเหตุ
K=1 (Isotropic)	10,50,60,72,85,100,120,140,165	Shearing
K=0.8	10,50,60,72,85,100,120,140,165	Shearing
K=0.6	10,50,60,72,85,100,120,140,165	Shearing
K=1 (Isotropic)	10,50,60,72,85,100,120,140,165	Unload(OCR=2)-> Shearing

3.6 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบหาค่า Shear modulus โดยใช้ Bender element ในเครื่องทดสอบหาค่าดังแบบสามแกน (Triaxial) จะมีการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนต่างๆ เหมือนการทดสอบ Triaxial ทั่วไปดังต่อไปนี้

3.6.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

1. ทำการทริมตัวอย่างดินตามขนาดของการทดสอบโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 50 มิลลิเมตร และความสูง 100 มิลลิเมตร โดยประมาณพร้อมทั้งตกแต่งผิวตัวอย่างให้เรียบ
2. หาปริมาณความชื้นตัวอย่างดิน โดยนำดินที่เหลือจากการทริมตัวอย่าง นำดินจากด้านบน ด้านล่าง และด้านข้างของตัวอย่างดินไปอบแห้ง
3. ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดตัวอย่างดินทั้งเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงก่อนนำไปติดตั้งกับเครื่องทดสอบ

3.6.2 การติดตั้งตัวอย่างดินกับชุดเครื่องมือทดสอบ

1. เปิดเครื่อง Dr-Airing Water System เพื่อให้ได้อากาศออกจากน้ำกลั่นทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีจนได้อากาศออกหมดจึงเปิดน้ำเข้าสู่ระบบ เพื่อกำจัดฟองอากาศในสายยางทุกเส้น เพื่อป้องกันฟองอากาศภายในสายยางด้านความดันอากาศ
2. นำตัวอย่างดินไปวางบน Pedestal ที่มี Porous stone และกระดาษกรองรองไว้ก่อน การวางตัวอย่างดินลงไปจะต้องระมัดระวังค่อยๆ เสียบแผ่น Bender element ลงไปในดินไม่ให้ตัวอย่างเกิดรอยแตกขึ้นได้ ถ้าตัวอย่างมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็ง จะต้องมีการแซะเป็นร่องเพื่อไม่ให้เกิดรอยแตกขึ้นได้ จากนั้นทำการหุ้มด้วยกระดาษกรองรอบๆ ตัวอย่าง เพื่อช่วยระบายน้ำในระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)
3. สวม Membrane หุ้มตัวอย่างดินเพื่อป้องกันน้ำในเซลล์ซึมผ่านเข้ามาภายในตัวอย่าง
4. รััด O-ring ที่ฐานเพื่อป้องกันน้ำภายในเซลล์ไหลซึมผ่านเข้าสู่ตัวอย่างดิน

5. วาง Top cap ลงบนตัวอย่างดิน ค่อยๆเสียบแผ่น Bender element ลงไปในตัวอย่างระวังอย่าให้ดินเกิดรอยแตก ทำการเซะร่องถ้าดินมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็ง
6. ทำการรัด O-ring ที่ Top cop เพื่อป้องกันน้ำภายในเซลล์ไหลซึมผ่านเข้าสู่ตัวอย่าง

3.6.3 ขั้นตอนทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัว (Saturation)

ทำการปล่อยน้ำเข้าสู่เซลล์ โดยควบคุมระดับความดันภายในเซลล์ไม่ให้มากจนเกินไป จนกระทั่งน้ำไหลเข้าเต็มเซลล์ จากนั้นค่อยๆเพิ่มความดันภายในเซลล์และภายในตัวอย่างสลับกัน และรักษาผลต่างของความดันภายในเซลล์กับภายในตัวอย่างให้คงที่ประมาณ 10 กิโลปาสคาล จนกระทั่งค่าความดันภายในตัวอย่างอยู่ที่ 400 กิโลปาสคาล จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 1-2 วัน หลังจากนั้นทำการตรวจสอบค่า B Parameter ซึ่งตัวอย่างที่เหมาะสม ควรให้ค่า B Parameter มีค่ามากกว่า 95% จึงจะทำกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ต่อไป

3.6.4 วิธีการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้น (Shearwave measurement)

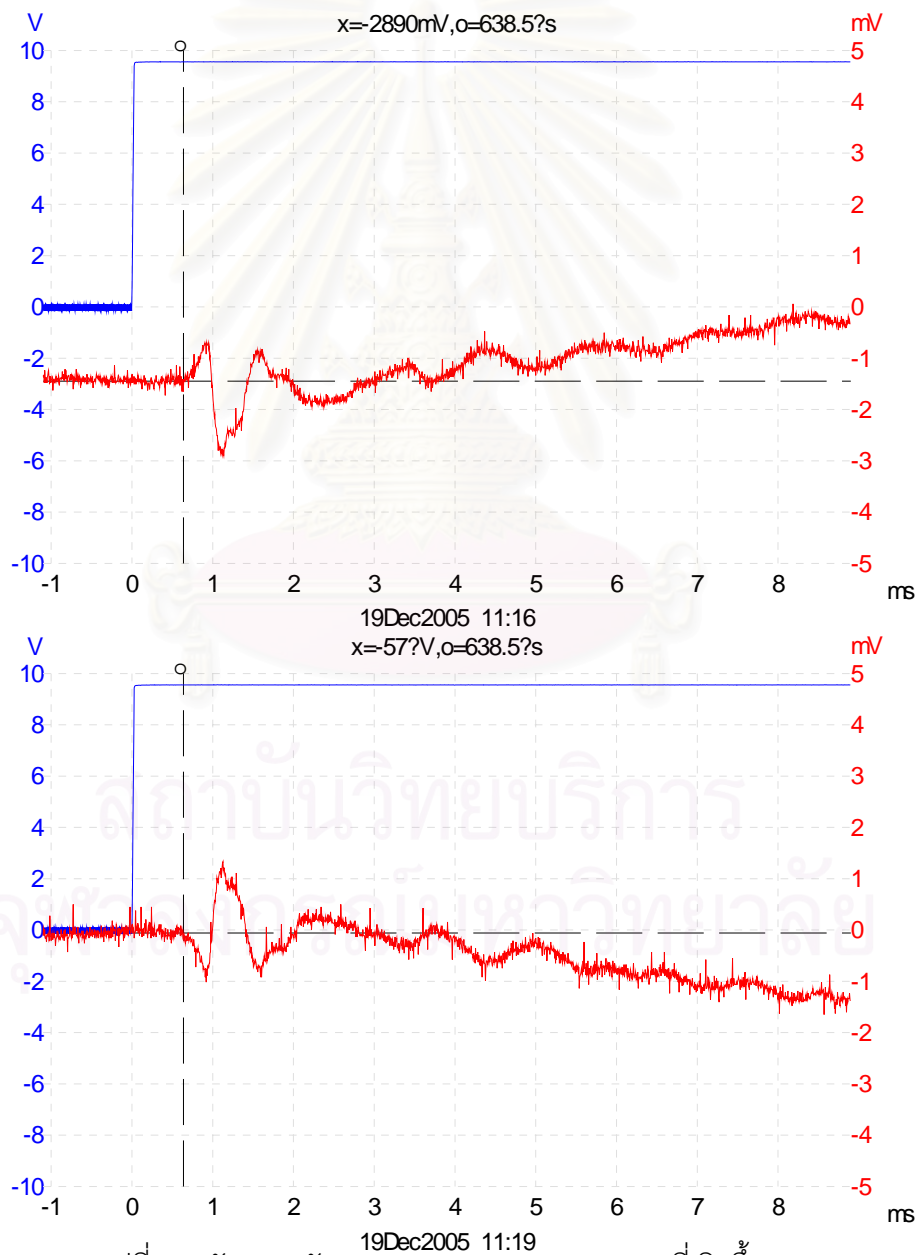
ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นในระหว่างการทดสอบ 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ทำการวัดในช่วงกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) และทำการวัดในช่วงให้กำลังเฉือน (Shearing) โดยวิธีการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นมีขั้นตอนดังนี้

ทำการต่อวงจรทางไฟฟ้าดังรูป 2.19 การทดสอบจะเริ่มโดย Function generator จะให้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยัง Oscilloscope และ Bender element ตัวส่งสัญญาณ Bender element จะแปลงสัญญาณจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลทำให้เกิดการสั่นไหวในตัว Bender element เกิดเป็นคลื่น S wave ลงไปในตัวอย่างดินจากนั้นคลื่น S wave จะแพร่กระจายจากจากดินถึง Bender element ตัวรับสัญญาณ ตัวรับสัญญาณก็จะแปลงสัญญาณทางกลจากคลื่นกลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าไปใน Oscilloscope ผลต่างของเวลาที่ตัวส่งสัญญาณมาถึงตัวรับสัญญาณจะเป็นเวลาที่คลื่นความเค้น (Time arrival) มาถึงซึ่งจะหาได้ดังรูป 3.5

ในการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นจำเป็นจะต้องส่งสัญญาณความเค้นในทิศทางตรงกันข้ามกันด้วยทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจว่าสัญญาณที่ได้นั้นจะเป็นคลื่นความเค้นจริงหรือไม่ ซึ่ง

สัญญาณของคลื่นที่ได้จะมีลักษณะทิศทางตรงกันข้ามกัน (Polarize) ดังรูปที่ 3.5 ในการส่งสัญญาณความเค้นในทิศทางตรงกันข้ามสามารถจะกระทำได้โดยการสลับขั้วสัญญาณของตัวส่งสัญญาณ

การอ่านสัญญาณที่เกิดจากตัวรับสัญญาณ อาจกระทำได้ยากเนื่องจากสัญญาณที่ Bender element ตัวรับสัญญาณให้มามีค่าน้อยมาก อยู่ในระดับหน่วย mv ซึ่งที่ระดับนั้นจะมีปัญหาในด้านสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า แต่สามารถแก้ไขโดยการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เช่นการต่อ Ground หรือใช้ Program กรองสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่แท้จริง



รูปที่ 3.5 ลักษณะสัญญาณของ Bender element ที่เกิดขึ้น

3.6.5 ขั้นตอนอัดตัวคายน้ำและการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้น

(Consolidation & Shear wave measurement)

ในการทดสอบหาค่าความเร็วของคลื่นความเค้น จะกระทำเมื่อทำการอัดตัวคายน้ำที่ระดับหนึ่ง สิ้นสุดแล้ว ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบ (Isotropic Consolidation, Anisotropic Consolidation) โดยกำหนดค่า Effective vertical stress ของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 3.1 โดยค่าความดันแนวตั้ง สามารถคำนวณโดยประมาณได้จาก (กรณี Anisotropic Consolidation)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (W/A) - \sigma_{Sat}$$

เมื่อ W = น้ำหนักแขวนถ่วงแกนกด

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน

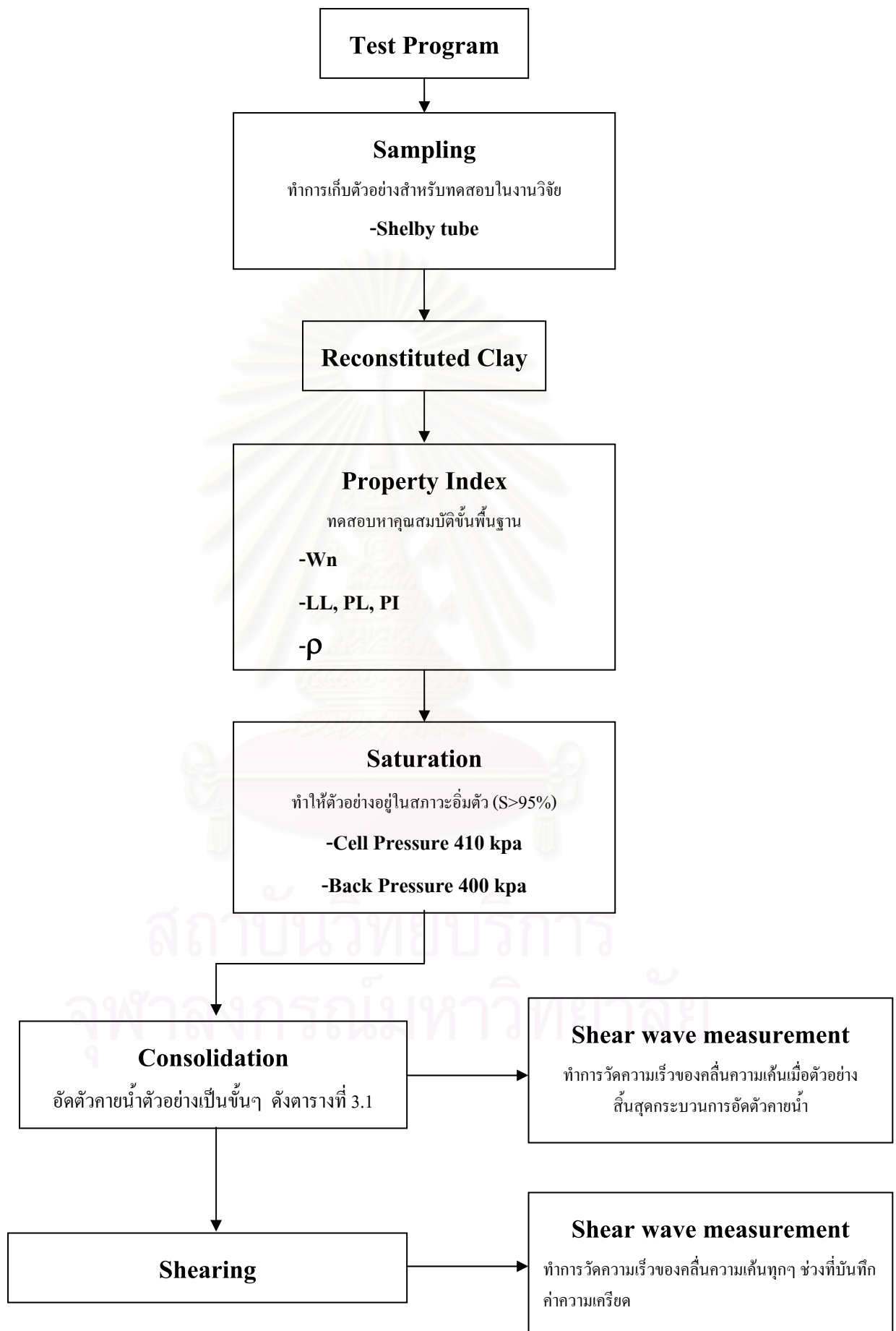
σ_{Sat} = ความดันน้ำอัดตัวอย่างให้อิ่มตัว (Saturation Pressure)

และมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นก่อนทำการอัดตัวคายน้ำ
2. ปิดวาล์วระบายน้ำ (Drain) และเพิ่มความดันภายในเซลล์จนกระทั่งได้ค่าความดันที่ต้องการตามที่กำหนดไว้
3. เปิดวาล์วระบายน้ำ (Drain) โดยทำการวัดค่าและบันทึกผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume change) ของตัวอย่างดินและการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน (Axial deformation) กับเวลาต่างๆ ที่ไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง นำค่าที่ได้เขียนกราฟระหว่างการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนกับ เวลา และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับเวลา
4. เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ ทำการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นอีกครั้งก่อนทำกระบวนการอัดตัวคายน้ำที่ระดับความดันต่อไป

3.6.6 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินและการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้น (Shearing & Shear wave measurement)

1. กำหนดอัตราความเร็วของการกดน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีควบคุมการทดสอบแบบ Strain control โดยควบคุมความเร็วของการกดน้ำหนักไว้ที่ 1% Strain/hr. หรือ 0.01667 mm/min. โดยประมาณ (ความเร็วของการกดน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับความสูงของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ)
2. ปิดวาล์วระบายน้ำ
3. เดินเครื่องกดน้ำหนัก พร้อมทั้งบันทึกค่า Load cell, Pore pressure transducer, LVDT และทำการทดสอบวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นไปพร้อมๆ กัน
4. ทำการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างพัง (โดยทั่วไปควรทำการทดสอบไปเรื่อยๆจนค่า Strain ประมาณ 10%)



บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ จะเป็นการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ (Reconstituted Clay) ซึ่งเก็บมาจากบริเวณทางเข้า-ออกด้านใต้ของโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ (ถนนสายกิ่งแก้ว-รัตนโกสินทร์ 200 ปี กิโลเมตรที่ 16) เพื่อหาค่าโมดูลัสแบบเฉือน โดยใช้วิธีทดสอบแบบ Bender element ในเครื่องมือทดสอบ หากำลังแบบสามแกน (Conventional Triaxial test) และทดสอบในสภาพ CIU (Isotropically Consolidated Undrained) และ CAU (Anisotropically Consolidated Undrained) การทดสอบจะทำเหมือนการทดสอบหากำลังแบบสามแกนทั่วไป นั่นคือจะทำการให้ตัวอย่างอิ่มตัว (Saturation) และบีบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากันทุกทิศทางรอบตัวอย่าง (Isotropic) และด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลไม่เท่ากันทุกทิศทางรอบตัวอย่าง (Anisotropic) และเมื่อจบวนการบีบอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงจึงทำการทดสอบหากำลังภายใต้เงื่อนไข (Strain rate control)

สำหรับการศึกษาและทดลองในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อค่า โมดูลัสแบบเฉือนโดยพิจารณาถึงผลของ หน่วยแรงประสิทธิผล, ค่าหน่วยแรงแบกทานในอดีต (Maximum past pressure), สภาพเงื่อนไขของกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำที่แตกต่างกัน และคุณสมบัติทางกายภาพ และศึกษาพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบหากำลัง (Shearing)

4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมขั้นพื้นฐานของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติมีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ประมาณ 96.3 ± 3.18 % ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) ประมาณ 33.4 ± 0.50 % ซึ่งจะได้ค่าดัชนีพลาสติกซีดี (Plasticity Index, PI) ประมาณ 63.0 ± 3.45 % และความชื้นธรรมชาติในมวลดิน (W_n) มีค่าประมาณ 98.3 ± 5.96 % จะได้ค่าดัชนีความเหลว (Liquidity Index, LI) ประมาณ 1.0 ± 0.04 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นดินอ่อนที่มีความไฉ สำหรับความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid, G_s) จะมีค่าประมาณ 2.65 และหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight, γ_t) มีค่าประมาณ 1.48 ± 0.01 t/m³

ในการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ขึ้นตอนและวิธีการต่างๆจะทำเหมือนในงานวิจัยของวิโรจน์ (2546) โดยทำกระบวนการบีบอัดตัวคายนํ้าจากดินเหนียวเหลว (Clay Slurry) ที่มีปริมาณนํ้าในดินเริ่มต้นประมาณ 150 % หรือประมาณ 1.5 เท่าของค่า LL ค่าหน่วยนํ้าหนักรวม (γ_t) ประมาณ 1.33 t/m^3 และอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (e_0) ประมาณ 4.04 และหลังจากทำการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแล้ว ตัวอย่างทรุดตัวลงไปประมาณ 41 % มีหน่วยนํ้าหนักรวม (γ_t) ประมาณ 1.56 t/m^3 และอัตราส่วนช่องว่าง (e) ประมาณ 1.95 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยขั้นตอนการเพิ่มนํ้าหนักในกระบวนการบีบอัดตัวคายนํ้าเป็นดังนี้คือ 0.125 , 0.25 , 0.50 , 1.00 ksc. ตามลำดับแล้วทำการ Unload มาที่ OCR=4 (0.25 ksc.) ซึ่งดินเหนียวสร้างใหม่นี้มีค่าหน่วยแรงแบกทานในอดีต (Maximum past pressure, หน่วยแรงในแนวดิ่ง) เท่ากับ 1ksc.

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสร้างใหม่

ตัวอย่างดิน	W_n (%)	γ_t (t/m^3)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI
1	74.4	1.53	100.9	35.1	65.8	0.6
2	77.3	1.52	97.0	36.5	60.5	0.7
3	70.9	1.58	99.8	36.1	63.7	0.5
4	69.4	1.60	94.9	35.4	59.5	0.6
ค่าเฉลี่ย	73.0	1.56	98.2	35.8	62.4	0.6

การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดินเหนียวสร้างใหม่ และขีดจำกัด Atterberg Limits เป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวกที่สุดในการตรวจสอบความสม่ำเสมอของเนื้อดิน ซึ่งจะพบว่ามีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ โดยขีดจำกัดเหลว (LL) มีค่าประมาณ 98.2 ± 2.72 % ขีดจำกัดพลาสติก (PL) มีค่าประมาณ 35.8 ± 0.64 % ซึ่งจะได้ค่าดัชนีพลาสติกซีดี (PI) ประมาณ 62.4 ± 2.90 % และปริมาณความชื้นในมวลดิน (W_n) มีค่าประมาณ 73.0 ± 3.55 % ซึ่งจะได้ค่าดัชนีความเหลว (LI) ประมาณ 0.6 ± 0.06 และเมื่อเปรียบเทียบขีดจำกัด Atterberg Limits ระหว่างดินเหนียวธรรมชาติกับดินเหนียวสร้างใหม่ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 จะพบว่าขีดจำกัดเหลว (LL) ของดินเหนียวสร้างใหม่มีค่ามากกว่าดินเหนียวธรรมชาติเล็กน้อย สำหรับขีดจำกัดพลาสติก (PL) จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นี้จะสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของวิโรจน์ (2546)

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวธรรมชาติกับดินเหนียวสร้างใหม่

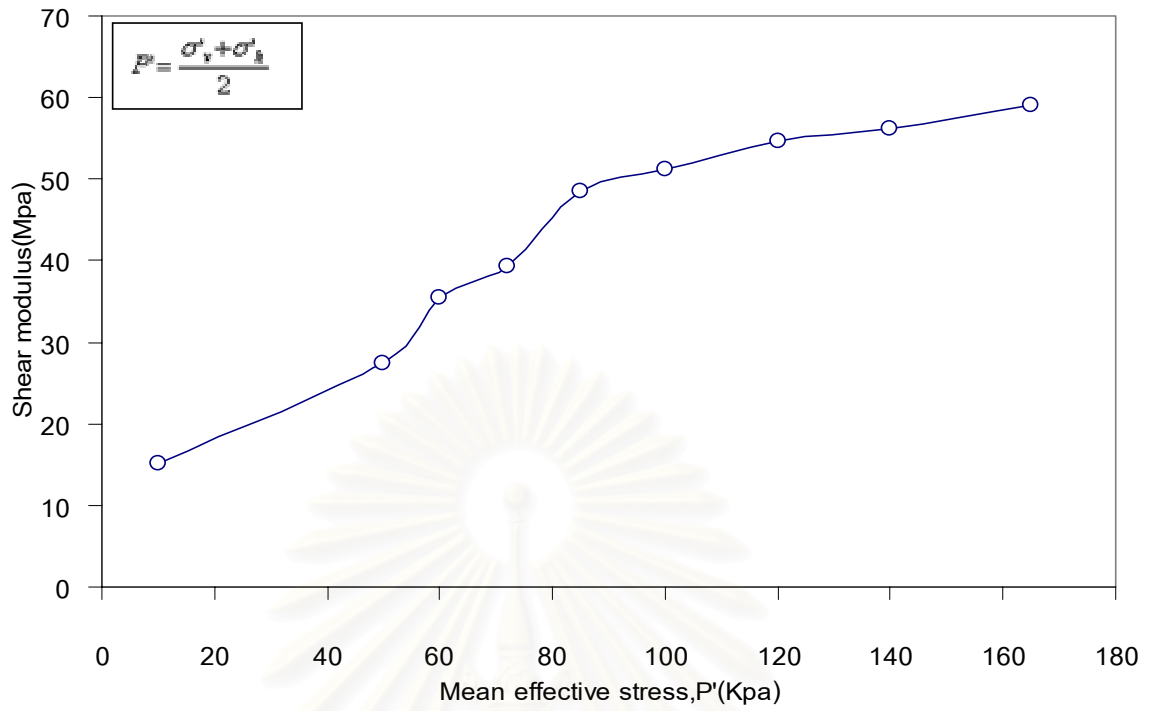
Clay Type	W_n (%)	γ_t (t/m ³)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI
Natural Clay	98.3	1.48	96.3	33.4	63.0	1.0
Reconstituted Clay	73.0	1.56	98.2	35.8	62.4	0.6

หมายเหตุ : คุณสมบัติพื้นฐานที่แสดงไว้ในตารางจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างหลุมเจาะของดินเหนียวธรรมชาติและค่าเฉลี่ยระหว่างรุ่นผสมของดินเหนียวสร้างใหม่

4.3 ผลกระทบของแรงประสิทธิผลต่อโมดูลัสแบบเฉือน

จากรูปที่ 4.1 เมื่อทำการทดสอบตัวอย่างดิน พบว่าผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean effective stress) ที่กระทำกับตัวอย่างดิน เมื่อเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ($G_0 = AF(e)P^n$, Hardin & Black, 1968) เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ $G = \rho V^2$ ในผลการทดสอบพบว่าความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และเมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นค่าความเร็วของคลื่นความเค้นที่วัดได้เพิ่มขึ้นแปรผันตามหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย ส่งผลให้ค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ก่อนเริ่มการทดสอบ ($OCR=4, \sigma'_p = 1Ksc.$) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 22.56 ± 0.766 MPa ดังแสดงในตารางที่ 4.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ผลของ Mean effective stress กับค่า Shear modulus (Isotropic consolidation)

ตารางที่ 4.3 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ก่อนทำการทดสอบ

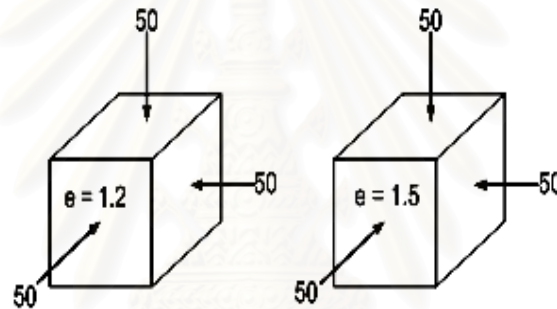
ตัวอย่างดิน	Shear modulus (MPa)
1	21.80
2	22.18
3	23.53
4	22.15
5	23.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลกระทบของสภาพเงื่อนไขของกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำที่แตกต่างกันต่อ โมดูลัสแบบเฉือน

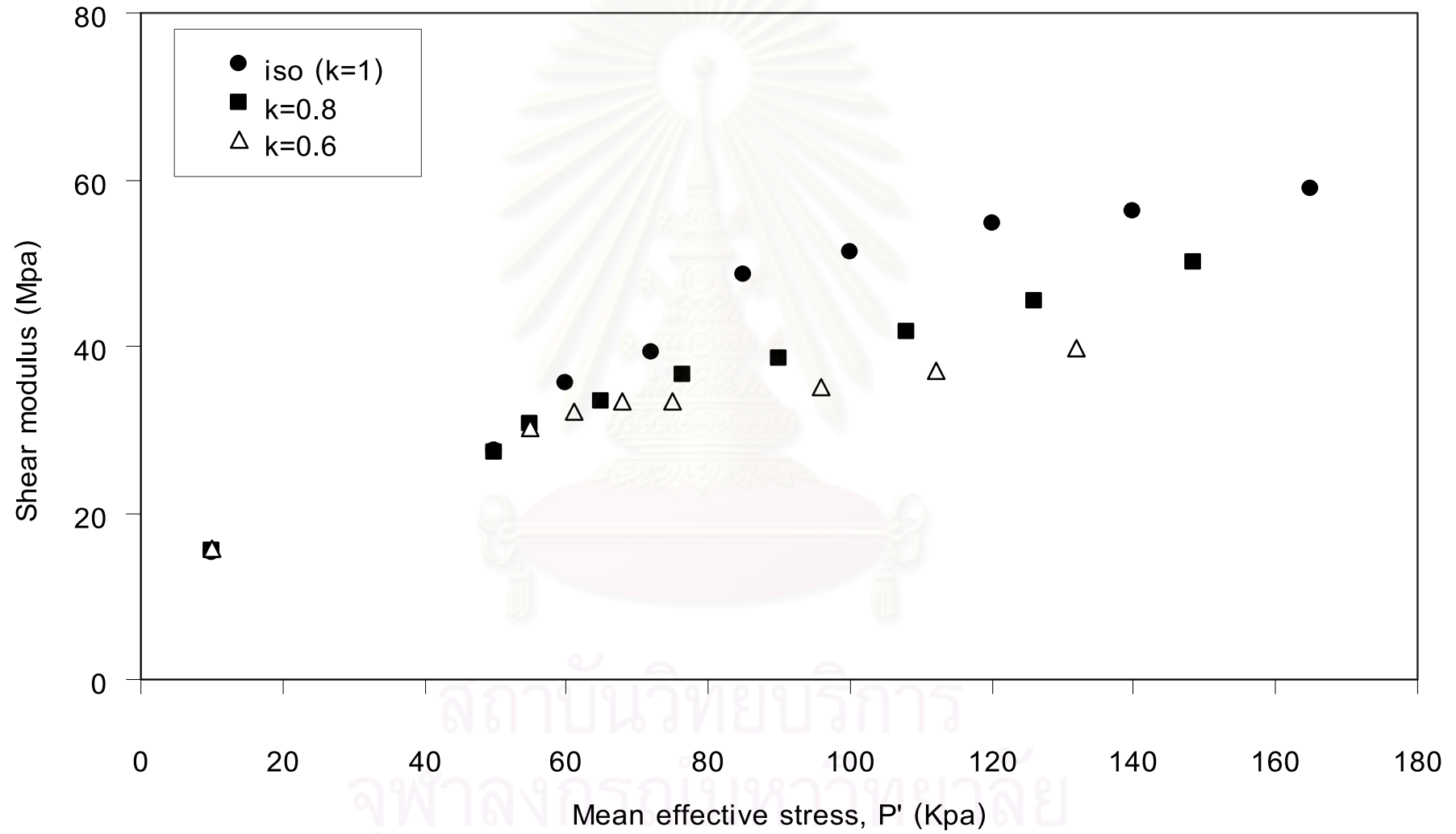
เมื่อพิจารณาที่สภาวะเริ่มต้นของตัวอย่างดิน ที่มีหน่วยแรงกระทำเท่ากัน โดยมีค่าอัตราส่วนช่องว่างที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่งผลให้ความหนาแน่นของดินต่างกันด้วย ซึ่งค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่หาได้จากการทดสอบด้วยวิธี Bender element หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ $G = \rho v^2$ เมื่อค่าความหนาแน่น (ρ) ต่างกัน ส่งผลให้ค่าโมดูลัสแบบเฉือนต่างกันด้วย ดังนั้นในการพิจารณาค่าโมดูลัสแบบเฉือนจึงควรพิจารณาค่าของอัตราส่วนช่องว่างด้วย ซึ่งการทดสอบของ Hardin & Black, 1968 ได้สนับสนุนผลกระทบที่เกิดจากอัตราส่วนช่องว่าง ด้วยฟังก์ชัน $F(e)$,

$$F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)}$$

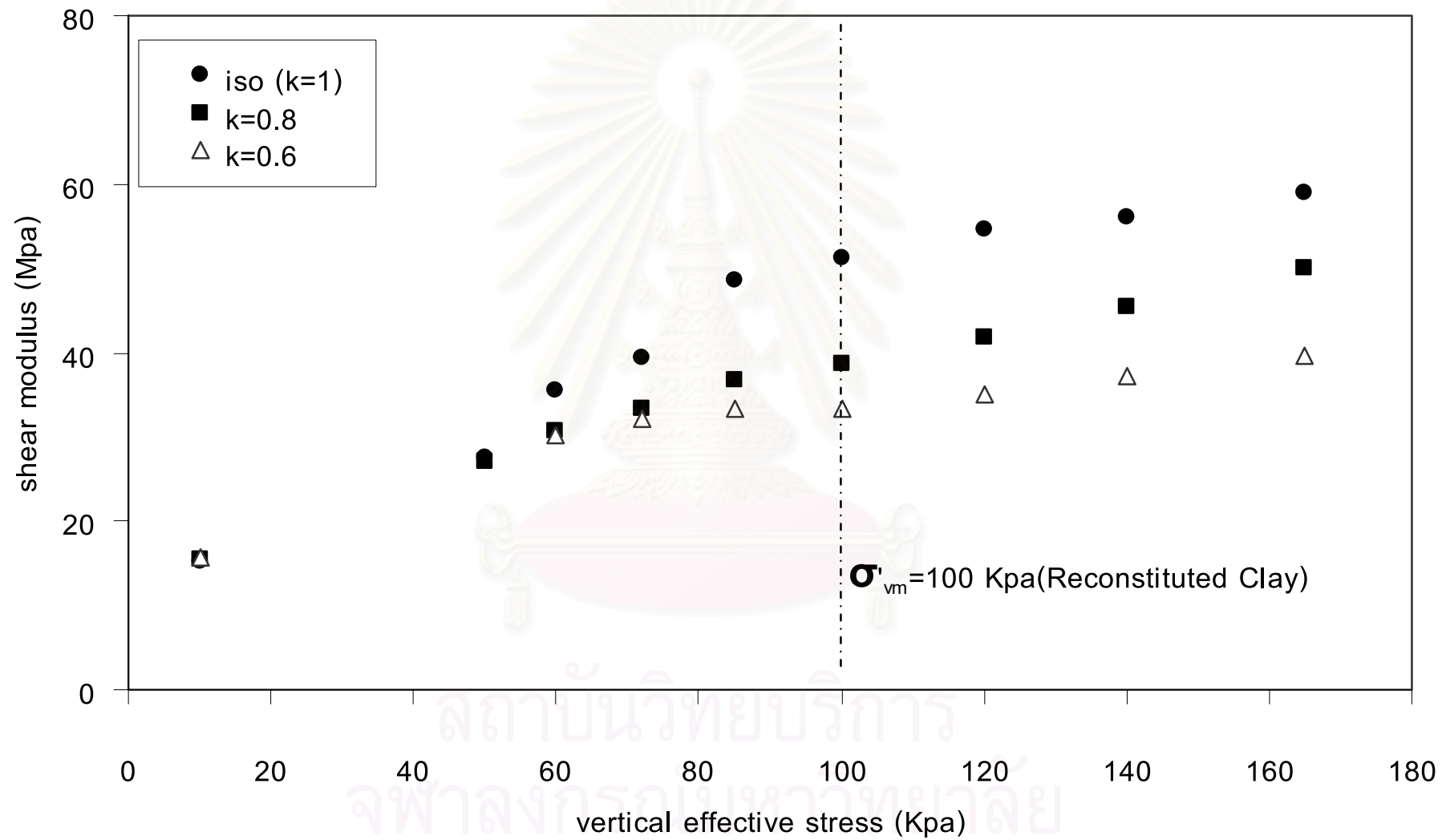


รูปที่ 4.2 หน่วยแรงที่กระทำในมวลดินที่มีค่าอัตราส่วนช่องว่างต่างกัน

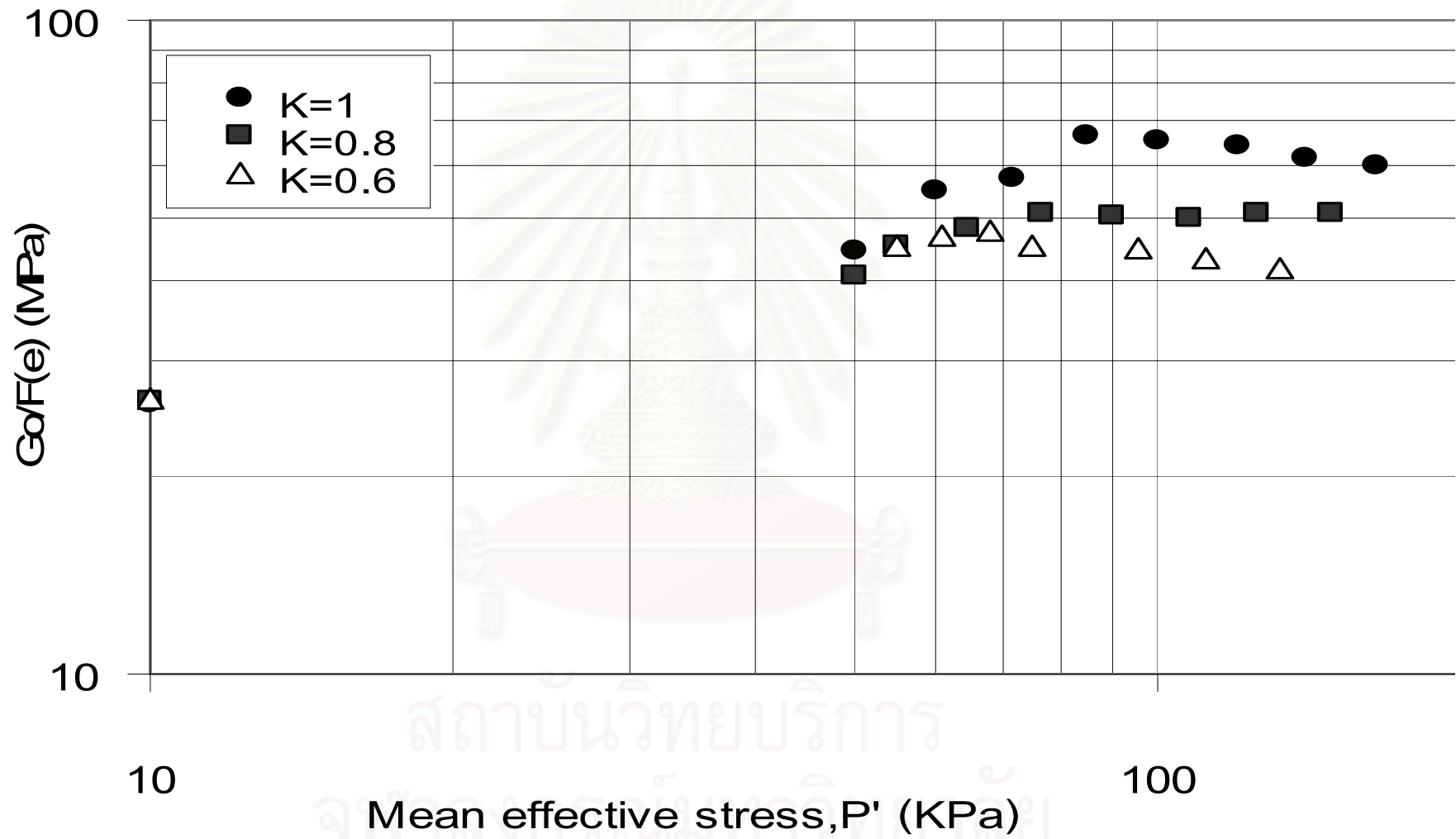
รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสแบบเฉือนเป็นฟังก์ชันกับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย Mean effective stress (P') และรูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสแบบเฉือนเป็นฟังก์ชันกับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง Vertical effective stress (σ'_v) พบว่าที่หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย Mean effective stress (P') เท่ากัน โดยสภาพเงื่อนไขของกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำที่แตกต่างกัน (ค่า K ต่างกัน) มีผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน กล่าวคือ ที่สภาพค่า K ลดลง ค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามค่า K ด้วย $\{G_o: Iso > G_o: K=0.8 > G_o: K=0.6\}$ และเมื่อศึกษาพฤติกรรมของค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วยฟังก์ชัน $F(e)$ $\{F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)}\}$,Hardin & Black, 1968} ที่สภาพหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยต่างๆ โดยนำค่า $G_o/F(e)$ กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย P' มาพล็อตกราฟใน log-log scale ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ที่ค่า Mean effective stress เท่ากันค่า $G_o/F(e)$ มีแนวโน้มลดลงตามสภาพ K ที่ลดลงด้วย จึงเป็นอีกเหตุหนึ่งที่สนับสนุนว่าที่สภาพ K ลดลง ค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มลดลงด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มลดลง เมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบมีค่าลดลง



รูปที่ 4.3 ผลของ Mean effctive stress, P' กับค่า Shear modulus ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในสภาพ K ต่างกัน



รูปที่ 4.4 ผลของ Vertical effective stress กับค่า Shear modulus ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในสภาพ K ต่างกัน

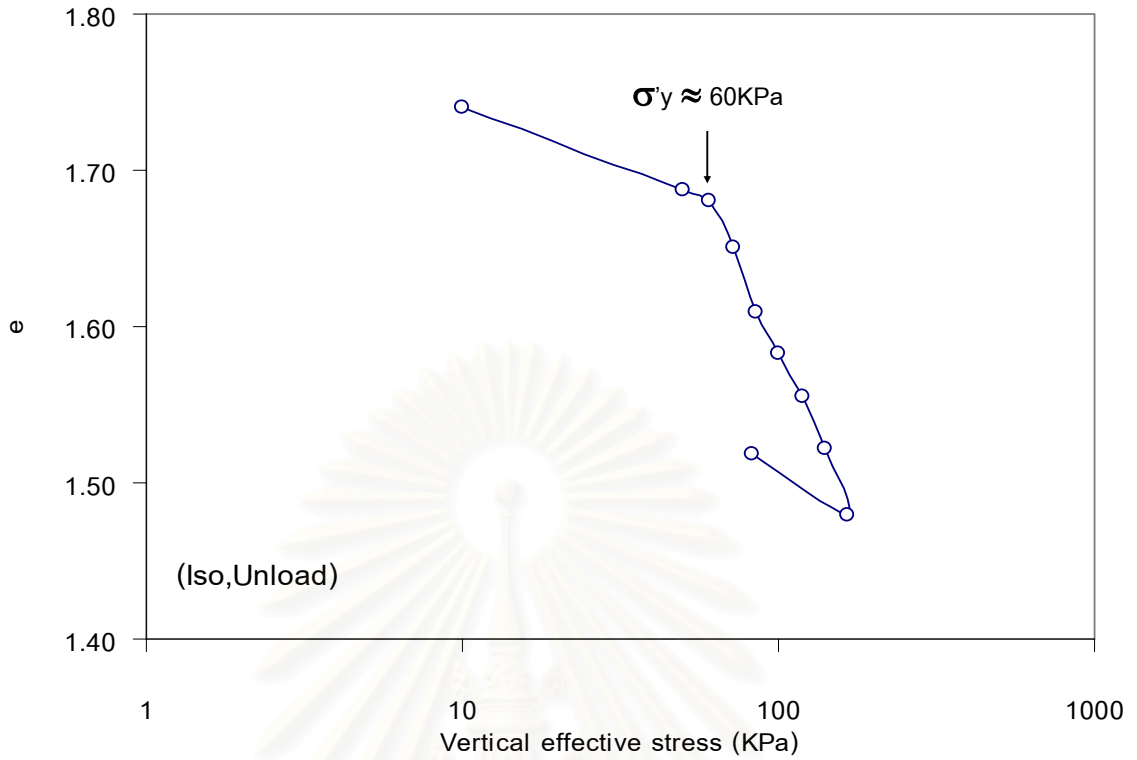


รูปที่ 4.5 ผลของค่า $G_o/F(e)$ กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย P' ของดินเหนียวสร้างใหม่ ในสภาพ K ต่างกัน

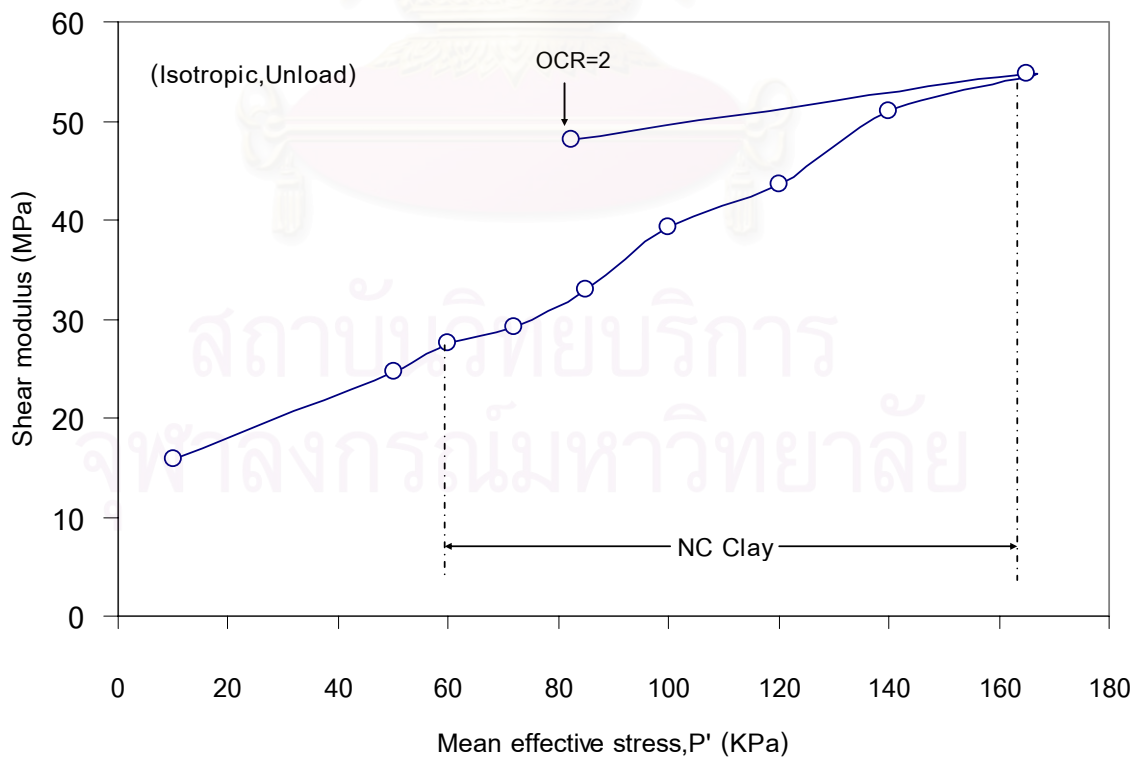
4.5 ผลกระทบของค่า OCR ต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน

การทดสอบในงานวิจัยนี้ทดสอบตัวอย่างดินจากดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งรู้ค่า Yielding stress ประมาณ 100 KPa (ได้จากการเตรียมดิน) และอยากทราบว่า ค่า OCR (Over Consolidated Ratio) มีผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนหรือไม่ โดยทำกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ จนกระทั่ง Vertical effective stress ประมาณ 1.5 เท่าของ Yielding stress (ได้จากการเตรียมดิน, หน่วยแรงในแนวตั้ง) ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำจนได้ Vertical effective stress เท่ากับ 165 KPa ทุกสภาวะค่า K (ดินเหนียวอยู่ในสภาพ Normally consolidation) จากนั้นทำการ Unload มาที่ OCR เท่ากับ 2 แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตามปกติ

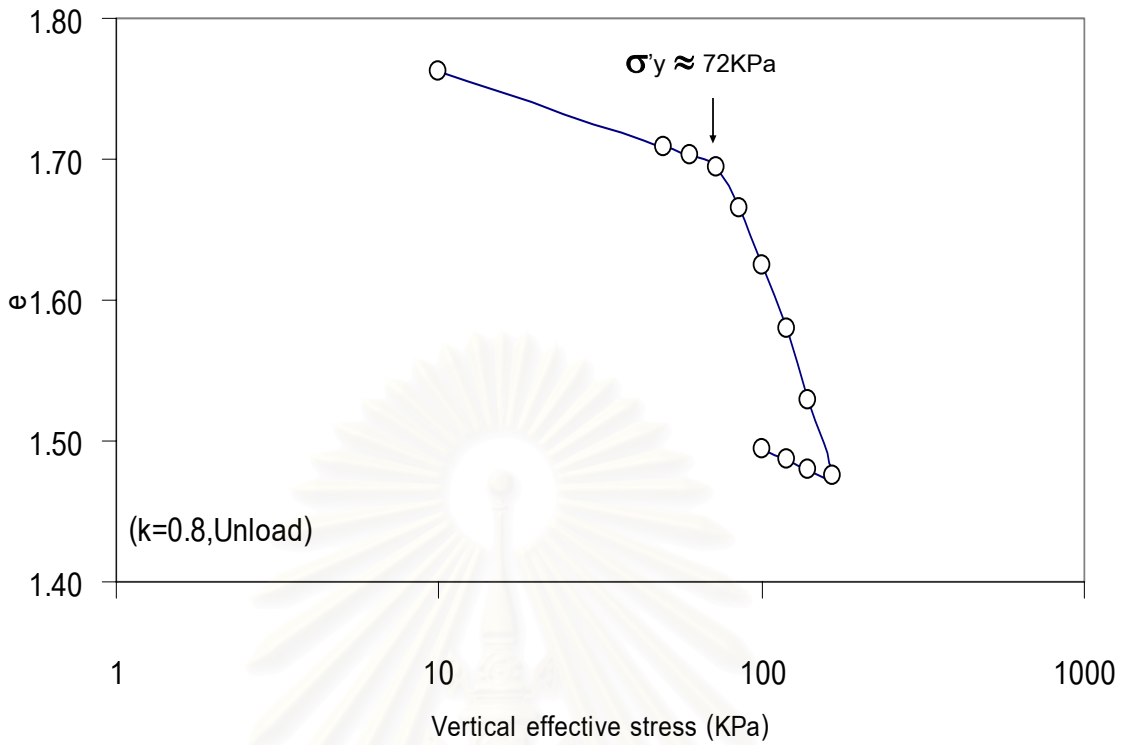
จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 แสดงพฤติกรรมของดินในช่วงกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ จนกระทั่งดินอยู่ในสภาพ NC แล้วทำการ Unload ตัวอย่างดินมาที่ค่า OCR ต่างๆ พบว่า เมื่อดินที่มีค่า OCR มากกว่า 1 ที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยเดียวกัน มีค่าโมดูลัสแบบเฉือนสูงกว่าดินในสภาพ NC และพบว่าค่า Yielding stress (ทดสอบใน Triaxial ,หน่วยแรงในแนวตั้ง) มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการเตรียมดินเหนียวสร้างใหม่ (ประมาณ 100 KPa) แสดงว่าที่สภาวะหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบต่างกัน (K ต่างกัน) มีผลต่อค่า Yielding stress (หน่วยแรงในแนวตั้ง) ด้วย ดังแสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง $e-\sigma'_v$ ในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.8



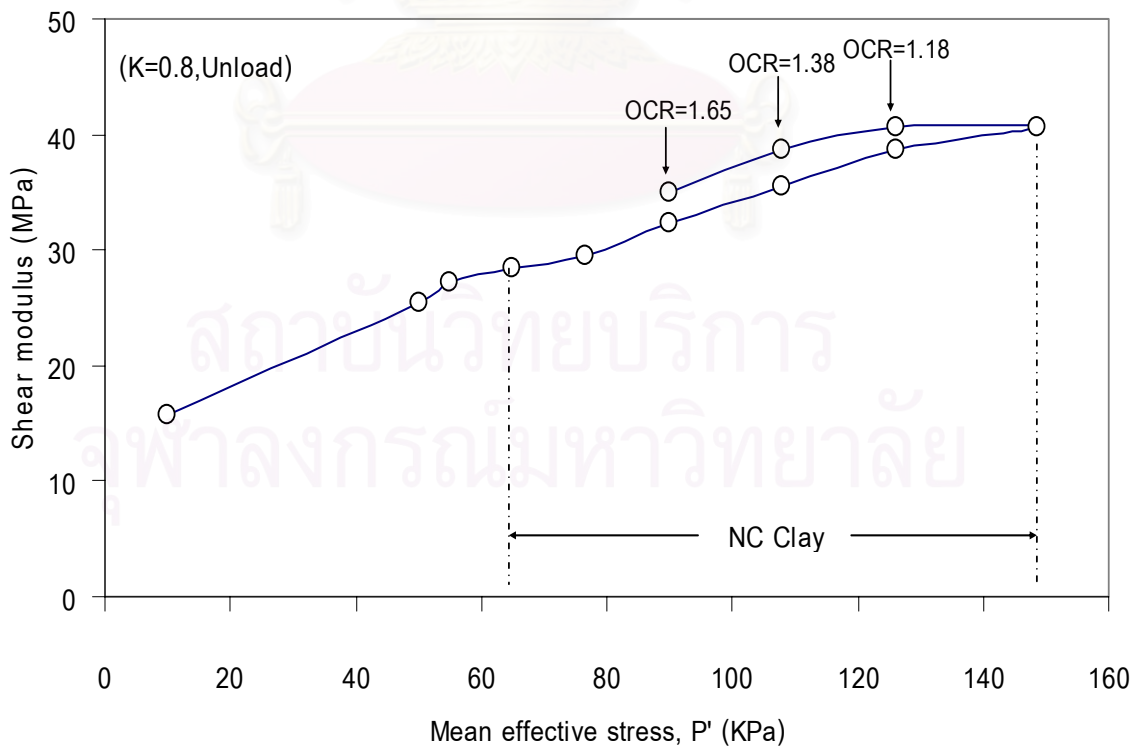
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ Vertical effective stress (KPa)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus (MPa) กับ Mean effective stress (KPa)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง e กับ Vertical effective stress (KPa)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus (MPa) กับ Mean effective stress (KPa)

4.6 ความสัมพันธ์ทางอิมไพริกัล

ความสัมพันธ์ทางสมการอิมไพริกัลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนกับตัวแปรต่างๆได้มีผู้นำเสนอในหลายรูปแบบด้วยกันพอจะสรุปได้ดังนี้

$$G_o = AF(e)(\sigma'_o)^n \quad \text{Hardin \& Black (1968)}$$

$$\frac{G_o}{P_a} = SF(e)OCR^k \left(\frac{P'}{P_a} \right)^n \quad \text{Hardin (1978)}$$

$$\frac{G_o}{P_r} = S \left(\frac{P'}{P_r} \right)^n R^k \quad \text{Viggiani (1992)}$$

$$\frac{G_o}{P_a} = SF(e)OCR^k \frac{(\sigma'_v \sigma'_h)^{\frac{n}{2}}}{P_a^n}$$

$$\text{หรือ } \frac{G_o}{P_r} = SF(e)OCR^k \left(\frac{P'}{P_r} \right)^n \beta^{\frac{n}{2}} \quad \text{Ni (1987), Hardin\&Blandford (1989)}$$

$$\text{โดย } F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \quad P_a, P_r = 100 \text{ KPa}$$

$$A, S, n, k = \text{ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน} \quad \beta = [1 + (\eta/3) - (2\eta^2/9)]$$

$$R, OCR = \text{Overconsolidation Ratio} \quad \eta = q/P'$$

$$P' = \text{Octahedral normal stress } [P' = (\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z)/3]$$

จากความสัมพันธ์ทางสมการอิมไพริกัลที่ได้มีผู้นำเสนอ สามารถสรุปสมการอิมไพริกัลที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 ทางเลือกดังต่อไปนี้คือ

$$1. \frac{G}{P_a} = AF(e) \left(\frac{P'_{oct}}{P_a} \right)^n R^k$$

$$2. \frac{G}{P_a} = A \left(\frac{P'_{oct}}{P_a} \right)^n R^k$$

$$3. \frac{G}{P_a} = AF(e) \frac{(\sigma'_v \sigma'_h)^{\frac{n}{2}}}{P_a^n} R^k$$

$$4. \frac{G}{P_a} = A \frac{(\sigma'_v \sigma'_h)^{\frac{n}{2}}}{P_a^n} R^k$$

โดย P'_{oct} = Octahedral normal stress ($P'_{oct} = (\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$) เนื่องจากในงานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมทั้งแบบ Isotropic consolidation และ Anisotropic consolidation, $R = OCR$ (คิดแบบ Octahedral stress) และจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มีค่า $n=0.5$

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในช่วงกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำทั้งหมด มาหาสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นโดยใช้โปรแกรม Nonlin (Nonlinear statistical regression program, Sherrod, 1992-1993) ตัวอย่างแสดงผลการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Nonlin แสดงในตารางที่ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Variables e,v,h,s,G,O ! Two variables: x and y
 Parameters A,K ! Two parameters to estimate: a and b
 Function $G=A*(s/100)^{0.5}*O^K*100$! Equation
 ---- Final Results ----

Nonlin version 2.5
 Copyright (c) 1992-1993 (shareware) Phillip H. Sherrod.

Asymptotic function: $Y = a + X/(b*X+c)$
 Function: $G=A*(s/100)^{0.5}*O^K*100$
 Number of observations = 48
 Maximum allowed number of iterations = 50
 Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
 Stopped due to: Both parameter and relative function convergence.
 Number of iterations performed = 11
 Final sum of squared deviations = 1.02923E+009
 Standard error of estimate = 4730.18
 Average deviation = 3598.04
 Maximum deviation for any observation = 11287.9
 Proportion of variance explained (R^2) = 0.8218 (82.18%)
 Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0.8180 (81.80%)
 Durbin-Watson test for autocorrelation = 0.365

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable	Minimum value	Maximum value	Mean value	Standard dev.
e	1.42377	1.762956	1.590104	0.09011776
v	10	165	91.71875	44.64623
h	10	165	78.36875	38.71006
s	10	165	82.81875	40.01056
G	15135.36	58987.5	35788.55	11086.66
O	1	6.24	1.612685	1.572209

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter	Initial guess	Final estimate	Standard error	t	Prob(t)
A	1	404.624327	7.852615	51.53	0.00001
K	1	0.101803973	0.06735576	1.51	0.13752

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Nonlinear statistical regression

(Sherrod,1992-1993)

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Nonlinx

สมการ	r^2
$G=A*(2.97-e)^2/(1+e)*(s/100)^{0.5}*O^K*100$	0.6786 (67.86%)
$G=A*(s/100)^{0.5}*O^K*100$	0.8218 (82.18%)*
$G=A*(2.97-e)^2/(1+e)*(v*h)^{(0.5/2)}/(100^{0.5})*O^K*100$	0.6599 (65.99%)
$G=A*(v*h)^{(0.5/2)}/(100^{0.5})*O^K*100$	0.8073 (80.73%)*

จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Nonlinx พบว่าเมื่อไม่พิจารณาผลของ $F(e)$ สมการอิมไพริกัลที่ได้ จะให้ค่าที่ถูกต้องกว่า (r^2 มากกว่า) และสามารถหาสมการที่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ได้ 2 สมการ โดยมีค่า $r^2=82.18\%$ และ 80.73% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 สมการดังกล่าวคือ

$$\frac{G}{P_a} = 404.624 \left(\frac{P'_{oct}}{P_a} \right)^{0.5} R^{0.102} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\frac{G}{P_a} = 400.18 \frac{(\sigma'_v \sigma'_h)^{0.5}}{P_a^{0.5}} R^{0.107} \dots\dots\dots(4.2)$$

เมื่อ $P_a = 100$ KPa จะได้

$$G = 4046.24 P'_{oct}{}^{0.5} R^{0.102} \quad , r^2 = 82.18\%$$

$$G = 4001.80 (\sigma'_v \sigma'_h)^{0.25} R^{0.107} \quad , r^2 = 80.73\%$$

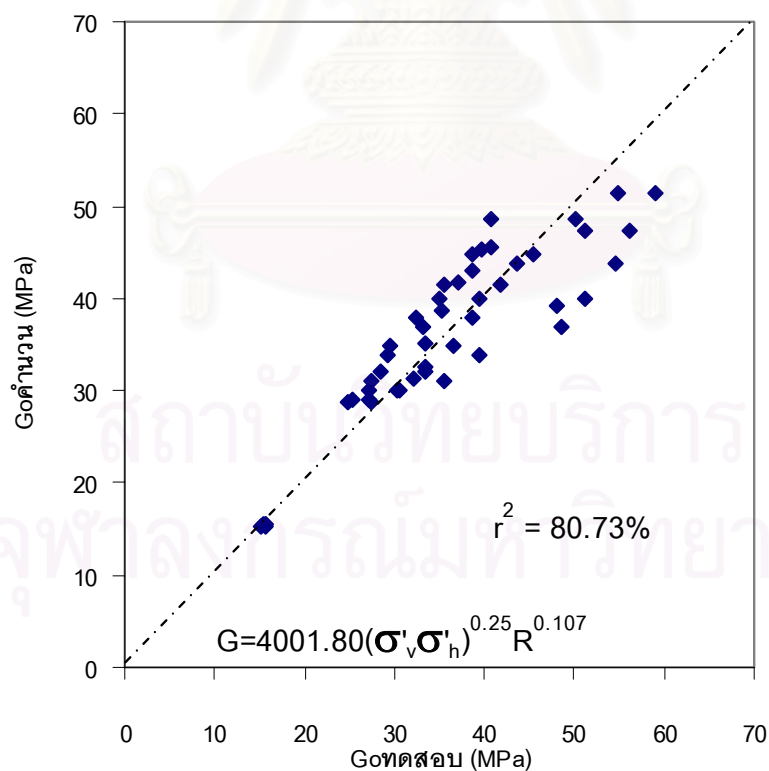
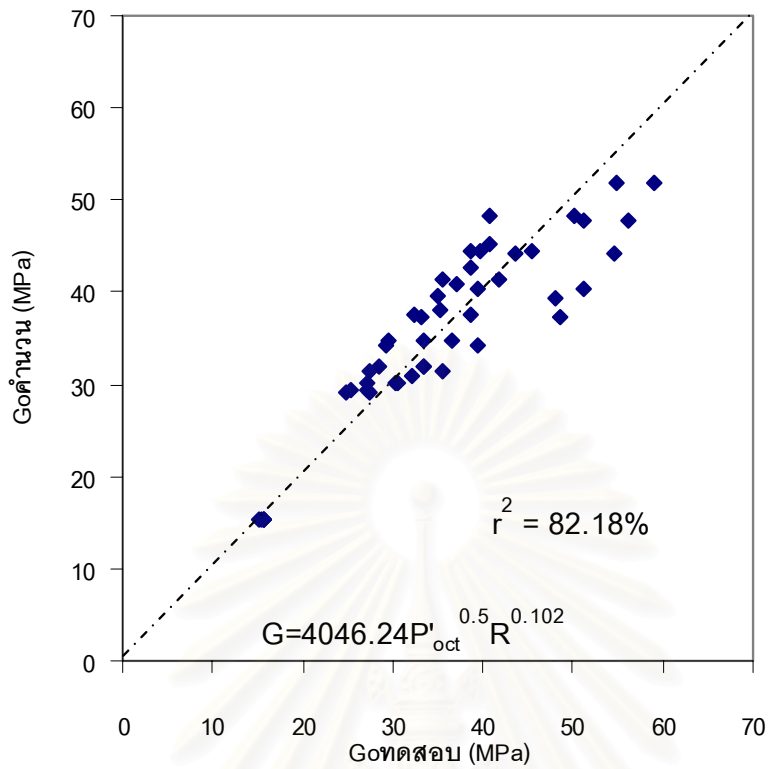
($G, P'_{oct}, \sigma'_v, \sigma'_h$: KPa)

รูปที่ 4.10 แสดงค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยและจากการคำนวณโดยสมการอิมไพริกัล พบว่าผลที่ได้รับระหว่างสมการอิมไพริกัลกับผลการทดสอบสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ซึ่งยืนยันว่าสมการที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

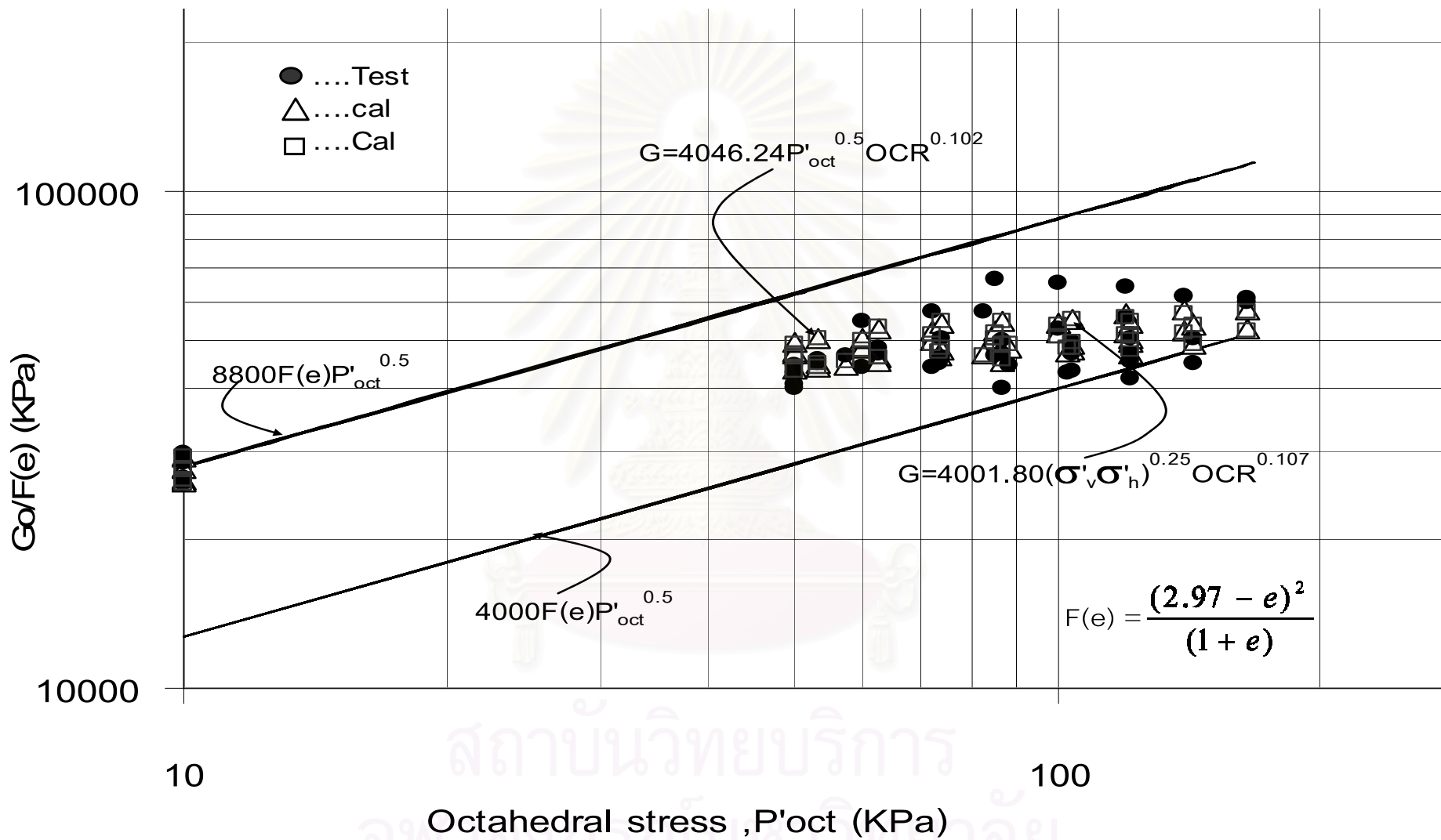
ค่าโมดูลัสแบบเฉือนทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยการทดสอบด้วยวิธี Bender element มีค่าอยู่ในขอบเขตของสมการอิมไพริกัลทั้งสองคือ $G=4000F(e) P'_{oct}{}^{0.5}$ กับ $G= 8800F(e) P'_{oct}{}^{0.5}$ {G:KPa, P'_{oct} :KPa} เมื่อนำมาจัดรูปแบบกราฟระหว่าง $G_0/F(e)$ กับ Mean effective stress (P') ในแกน log-log scale ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ค่า G_0 ที่ได้จากการคำนวณจากสมการอิมไพริกัล $G=4046.24P'_{oct}{}^{0.5}R^{0.102}$ และ $G=4001.80(\sigma'_v\sigma'_h)^{0.25}R^{0.107}$ ก็อยู่ในขอบเขตของสมการอิมไพริกัลทั้งสองดังกล่าวข้างต้นด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 ค่า Shear modulus(G_o) ที่ได้จากการทดสอบ และคำนวณจากสมการ ในช่วง consolidation ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในงานวิจัยทั้งหมด



รูปที่ 4.11 ผลของค่า Go/F(e) กับ Octahedral stress P'oct ของดินเหนียวสร้างใหม่ในงานวิจัยทั้งหมด

4.7 ผลของโมดูลัสแบบเฉือนระหว่างการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน (Undrained Shearing)

ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินจะกระทำเมื่อกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) แล้วเสร็จ โดยในระหว่างทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shearing) ก็จะทำให้การวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นไปพร้อมๆกัน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ จะเป็นดังรูปที่ 4.12-4.15 โดยในรูปจะประกอบด้วย เส้นแนวโน้มของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ได้จากการทดสอบหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนในช่วงกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ (Consolidate) และในตัวอย่างเดียวกันจุดที่ปรากฏในกราฟก็คือ ค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้ในระหว่างขั้นตอนหาค่ากำลังรับแรงเฉือน (Undrained shearing) จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าโมดูลัสแบบเฉือนระหว่างการเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะลดลงเมื่อค่า ความดันน้ำภายในเพิ่มขึ้น หรือมี Mean effective stress ลดลง และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ Shear Modulus กับ Mean effective stress ที่ได้จากการทดสอบ consolidation พบว่าค่าของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าใกล้เคียงกัน

ในการทดลองกำลังของดินด้วยวิธี Undrained Shearing ในเครื่องทดสอบหาค่ากำลังแบบสามแกน (Triaxial Test) เมื่อทำการกดตัวอย่างในแนวแกน จะเกิด Excess pore pressure ขึ้นในตัวอย่างส่งผลให้เมื่อมองพฤติกรรมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างในรูปแกน p - q หรือในหน่วยแรงหลัก (Principle stress) กับหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างจะมีทั้ง Principle stress และ Shear stress ซึ่งความหมายของ Principle stress ก็คือ Mean effective stress ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างในงานวิจัยนี้พบว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการทดสอบ Undrained shearing ($\text{Shear Stress} > 0$) จะมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดสอบหาโมดูลัสแบบเฉือนในการทดสอบบีบอัดตัวคายน้ำและลดลงตามค่า Mean effective stress ที่ลดลง ซึ่งในการบีบอัดตัวคายน้ำได้ทำการทดลองแบบบีบอัดเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) นั่นก็คือค่า Mean effective stress ($\text{Shear stress} = 0$) นั้นหมายความว่า หน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนน้อยมากหรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถละส่วนของผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องมาจาก หน่วยแรงเฉือนไปได้โดยไม่ต้องนำมาคิด และในช่วงการทดลองบีบอัดตัวคายน้ำแบบบีบอัดไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic) พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มเหมือนกับการทดสอบบีบอัดตัวคายน้ำแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) คือ Shear modulus มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับ Mean effective stress โดยหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนน้อยมากหรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถละส่วนของผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากหน่วยแรง

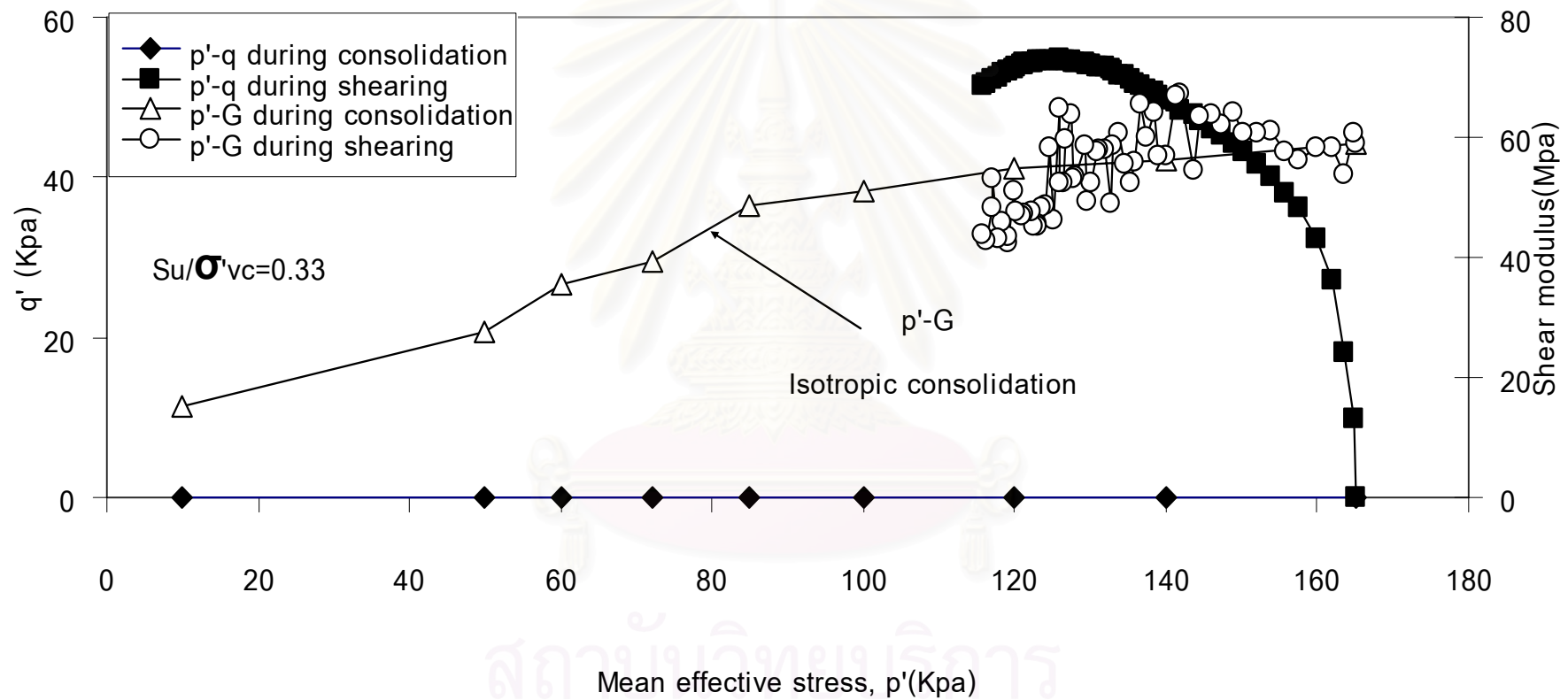
เฉือนไปได้ โดยไม่ต้องนำมาคิดเช่นเดียวกัน และค่าของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ได้จากการทดสอบแบบ Undrained Shearing มักจะมีลักษณะเหมือนกันกับผลการทดสอบที่หาค่าโมดูลัสแบบเฉือนช่วงการบีบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

ความสัมพันธ์ระหว่าง $p'-q'$ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ของดินที่อยู่ในสภาพ Normally consolidation ที่ค่า $K=1, 0.8, 0.6$ สามารถหาค่า S_u/σ'_{vc} ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

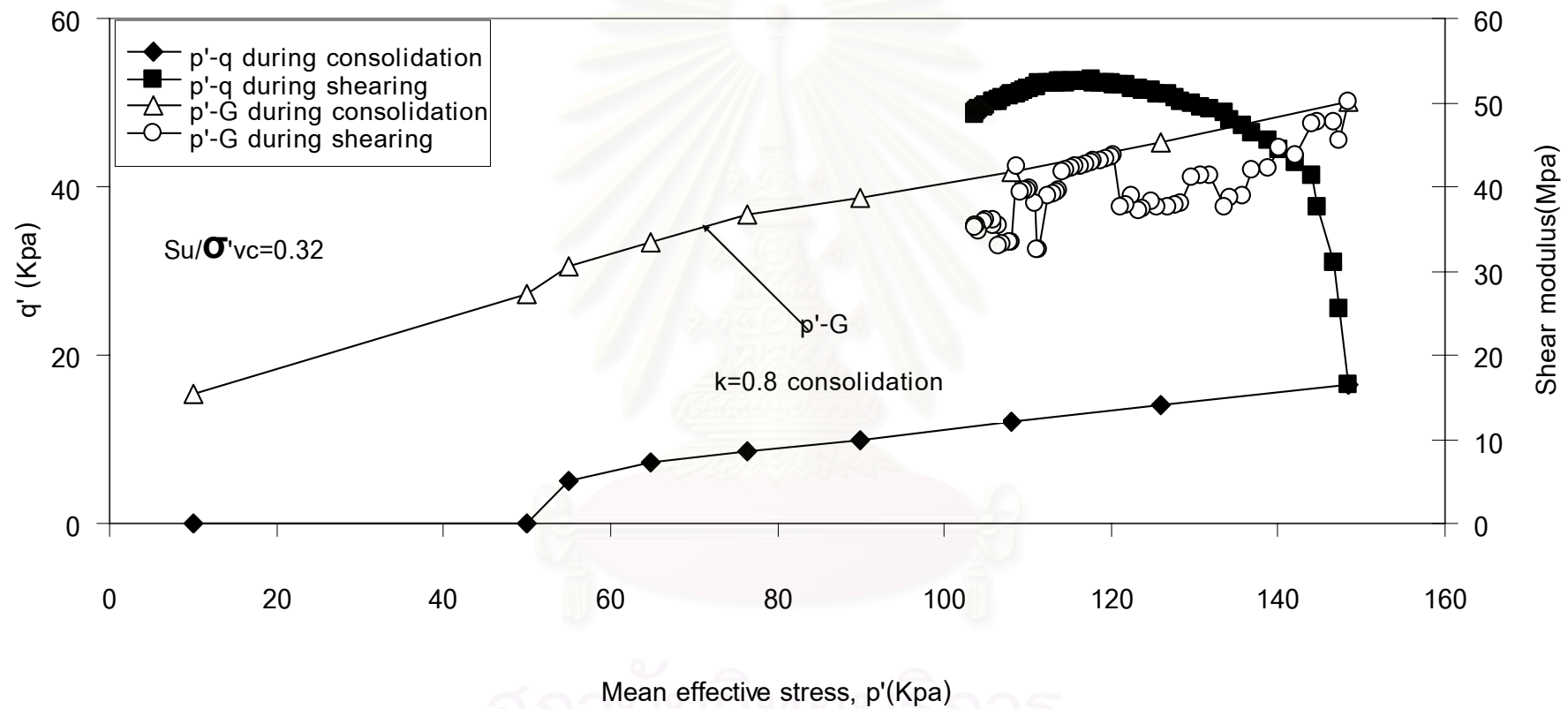
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า S_u/σ'_{vc} กับค่า K

ค่า K	P' (KPa)	σ'_{vc} (KPa)	S_u (KPa)	S_u/σ'_{vc}
$K=1$ (Isotropic)	165	165	54.75	0.33
$k=0.8$	132	165	52.66	0.32
$K=0.6$	99	165	49.2	0.30

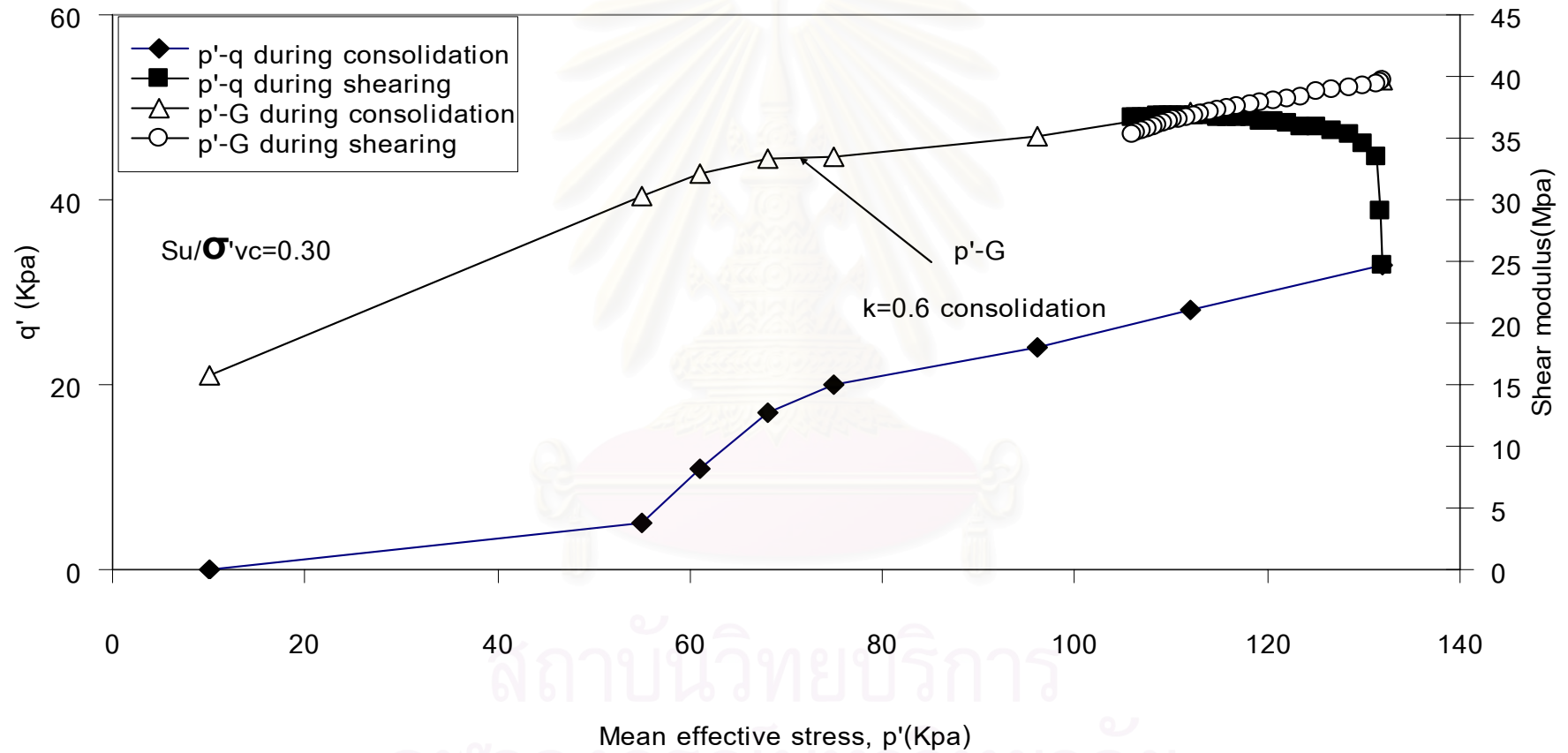
ค่าของ S_u/σ'_{vc} ของดินเหนียวที่สภาพ Normally consolidation มีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.35 ซึ่งจากงานวิจัยค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงนี้ด้วย



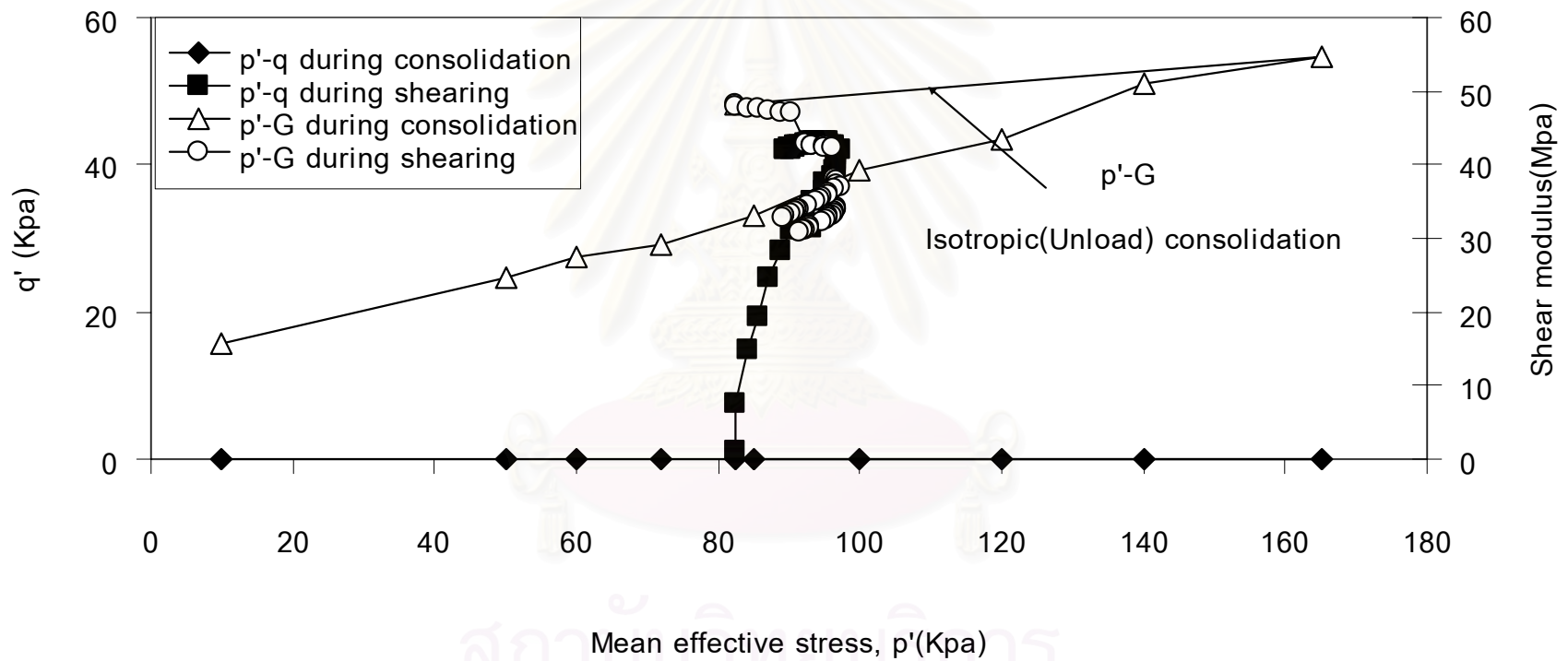
รูปที่ 4.12 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงของดิน (Isotropic)



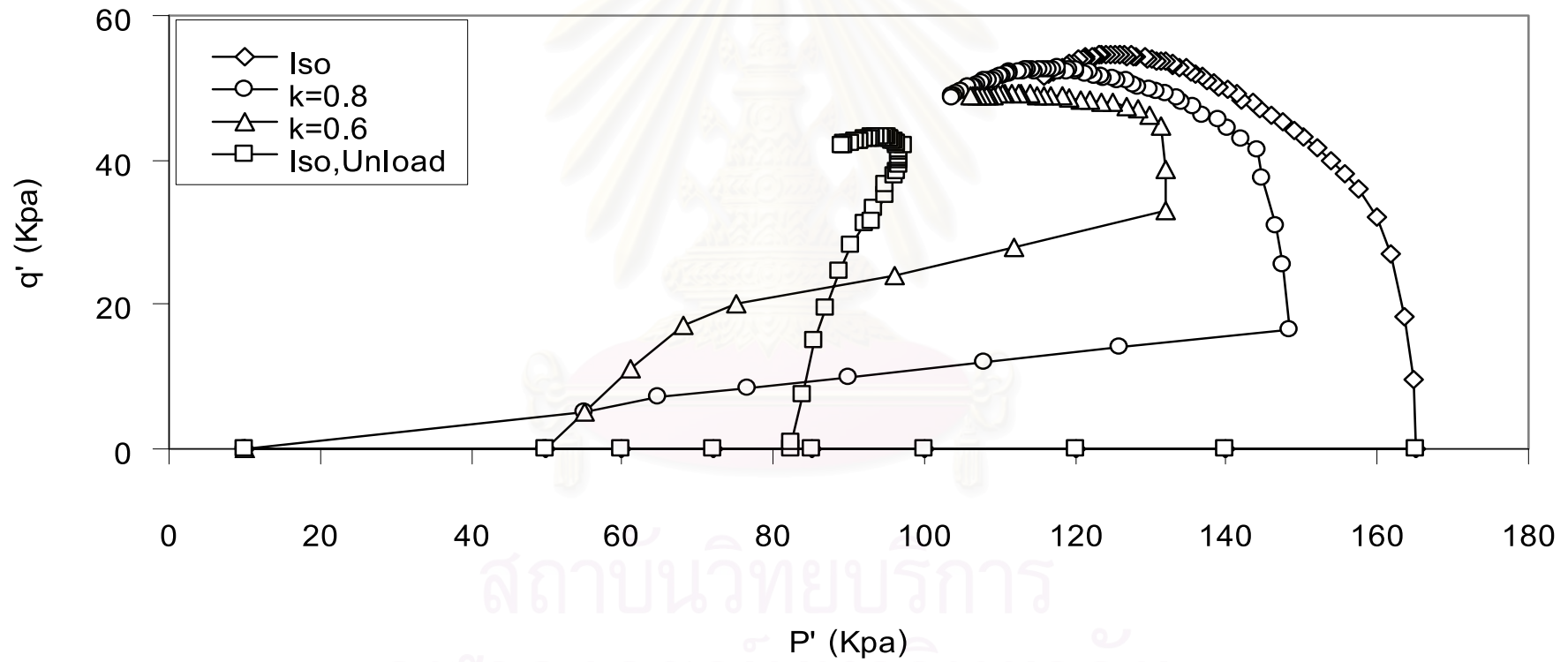
รูปที่ 4.13 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงของดิน ($K=0.8$)



รูปที่ 4.14 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงของดิน (K=0.6)

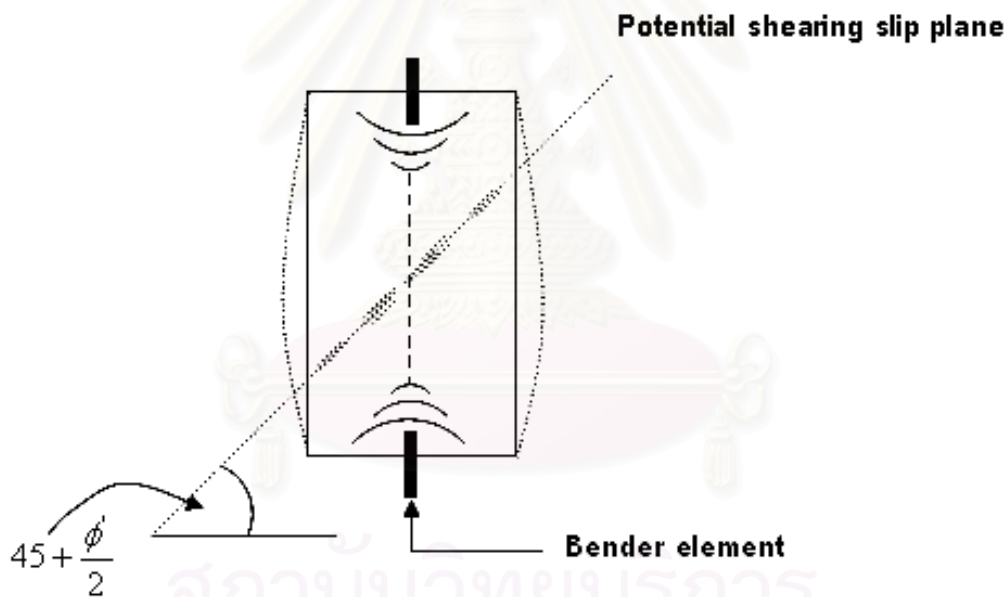


รูปที่ 4.15 ผลของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงของดิน (Isotropic, Unload)



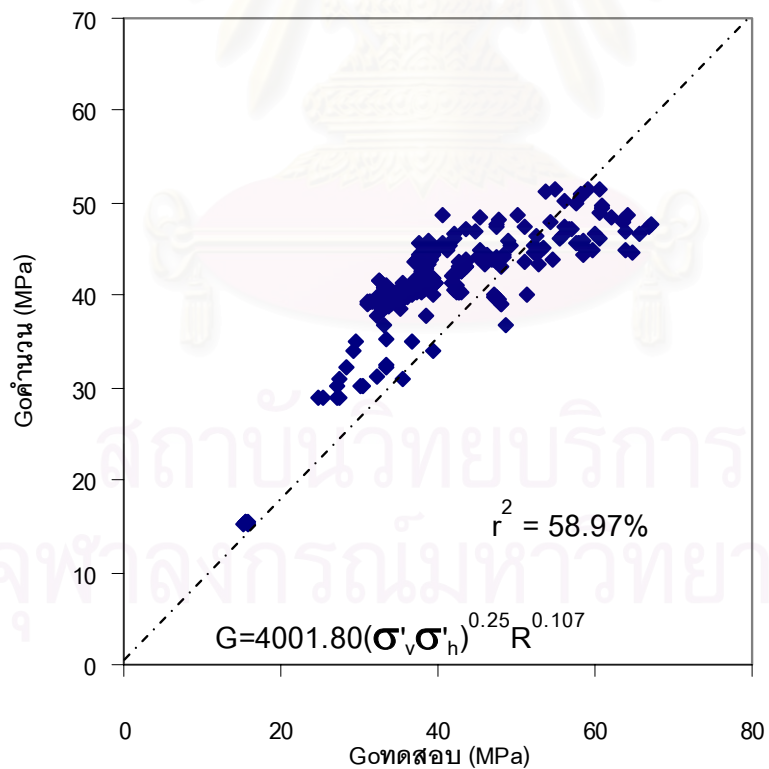
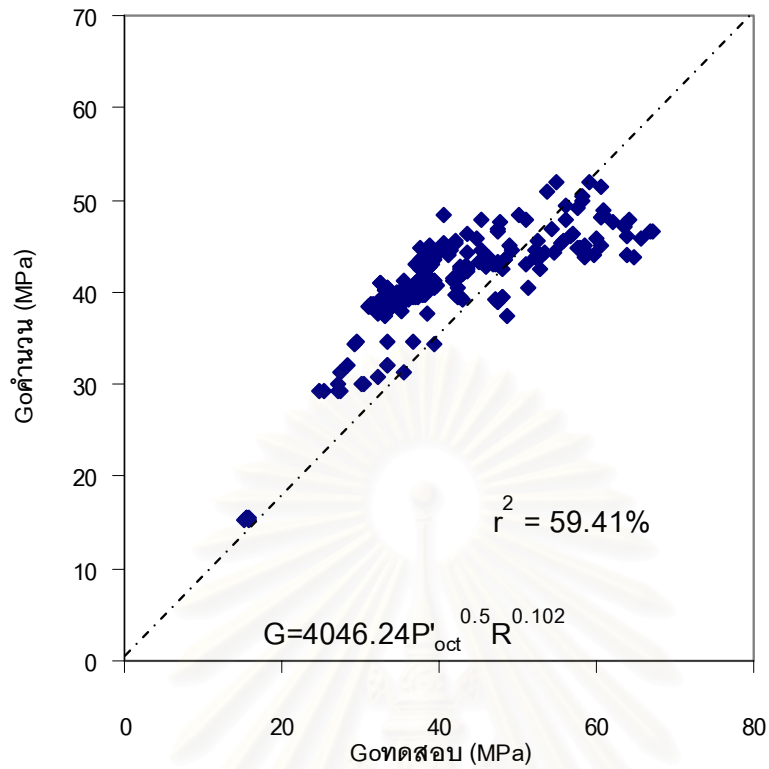
รูปที่ 4.16 P'-q ระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงของดินทั้งหมดในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ต้องการหาสมการอิมไพริกัลที่ครอบคลุมผลงานวิจัยทั้งหมด จึงนำข้อมูลจากการทดสอบทั้งในช่วงกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) และการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shearing) มาแทนค่าในสมการอิมไพริกัลทั้ง 2 สมการ (สมการ 4.1, สมการ 4.2) พบว่าไม่สอดคล้องกับสมการอิมไพริกัลทั้ง 2 ดังกล่าว ซึ่งมีค่า $r^2=59.41\%$ และ $r^2=58.97\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และเมื่อพิจารณาเฉพาะในช่วงการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ก็พบว่าไม่สอดคล้องกับสมการอิมไพริกัลทั้ง 2 ดังกล่าวเช่นกัน ซึ่งมีค่า $r^2=60.95\%$ และ $r^2=61.55\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 สาเหตุเนื่องมาจากตัวอย่างดินพังทลาย และเกิดเป็นแนวเพลน (Potential shearing slip plane) ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของตัวอย่างดิน (Non homogeneous) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการอิมไพริกัลไม่สามารถอธิบายผลการทดสอบในช่วง Undrained shearing ได้

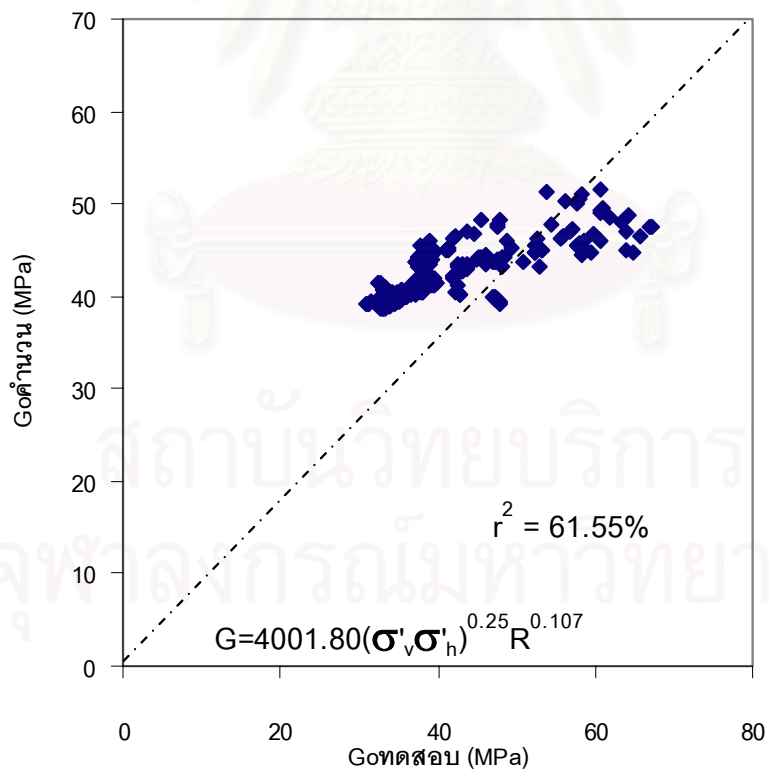
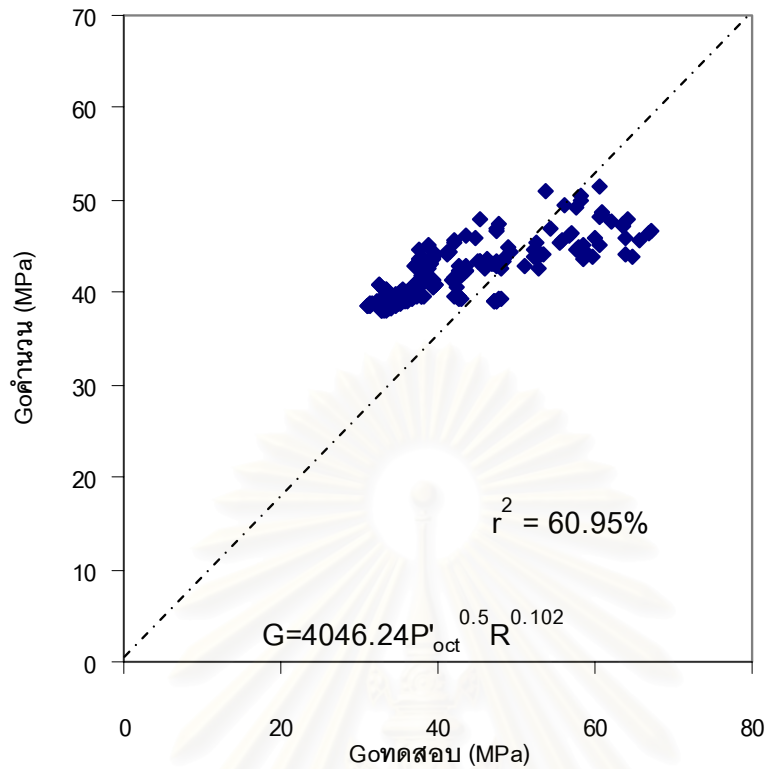


รูปที่ 4.17 ตัวอย่างดินพังทลาย และเกิดเป็นแนวเพลน (Potential Shearing slip plane)

ในช่วง Shearing



รูปที่ 4.18 ค่า Shear modulus(G_o) ที่ได้จากการทดสอบ และคำนวณจากสมการ ในช่วง consolidation และ Shearing ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในงานวิจัยทั้งหมด



รูปที่ 4.19 ค่า Shear modulus(G_o) ที่ได้จากการทดสอบ และคำนวณจากสมการ ในช่วง Shearing ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในงานวิจัยทั้งหมด

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 บทนำ

จากผลการทดลองหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วยวิธี Bender element จะพบว่า การหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนวิธีนี้ไม่ว่าการทดสอบใดๆ ก็ตามจะให้ค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ Very small strain level หรือให้ค่า Initial shear modulus นั้นเอง แตกต่างจากวิธีการหาค่าโมดูลัสที่ได้จากวิธีการทดสอบอื่นๆ และนอกจากนี้การทดสอบหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วยวิธี Bender element ยังสามารถดัดแปลงนำไปใช้กับเครื่องมือทดสอบทางปฐพีต่างๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไปได้ง่ายและมีราคาที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วยวิธี Bender element จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมอย่างยิ่ง

5.2 ผลของแรงประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน

แนวโน้มของโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยหรือ Mean effective stress เพิ่มขึ้นและมีลักษณะเป็นเส้นตรงในรูปของแกน log-log scale ซึ่งความชันจะมีค่าแตกต่างกันในตัวอย่างที่ทดสอบเดียวกันโดยมีค่า Maximum past pressure เป็นตัวแบ่งคือในช่วง Normal consolidation และ Over consolidation

5.2.1 สภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างกันในกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำ และค่า OCR ต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน

จากการทดสอบของตัวอย่างดินในงานวิจัยพบว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า K ลดลง กล่าวคือ ค่าโมดูลัสแบบเฉือนจะมีแนวโน้มลดลงตามสภาวะที่มีหน่วยแรงด้านข้างมากกระทำ มีค่าลดลงด้วย โดยมีค่า Mean effective stress เท่ากัน และ พบอีกว่าดินที่อยู่ในสภาพ Over consolidation (มีค่า OCR > 1) ที่มีค่า Mean effective stress เท่ากัน พบว่ามีค่าโมดูลัสแบบเฉือนสูงกว่าดินที่อยู่ในสภาพ Normally Consolidation

5.2.2 สมการอิมไพร์กัล

จากผลการทดสอบพบว่า ข้อมูลที่ได้มีค่าอยู่ระหว่างค่าที่คำนวณได้จากสมการอิมไพร์กัล 2 สมการ คือ

$$G=4000F(e) P'_{oct}{}^{0.5} \quad \text{และ} \quad G= 8800F(e) P'_{oct}{}^{0.5}$$

$$\text{โดย } F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)}$$

$$G:\text{KPa}, P'_{oct}:\text{KPa}$$

และจากข้อมูลทั้งหมดสามารถหาสมการอิมไพร์กัล ที่สามารถประมาณค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ค่า Octahedral stress ต่างๆ ทั้งในช่วง Normal consolidation และ Over consolidation ได้ และค่าที่คำนวณได้จากสมการอิมไพร์กัล $G=4046.24P'_{oct}{}^{0.5}R^{0.102}$, $r^2=82.18\%$ และ $G=4001.80(\sigma'_v\sigma'_h)^{0.25}R^{0.107}$, $r^2=80.73\%$ ($G, P'_{oct}, \sigma'_v, \sigma'_h$: KPa) นี้ จะอยู่ในขอบเขตสมการอิมไพร์กัลทั้งสองดังที่กล่าวข้างต้นด้วย และสรุปได้ว่าสมการอิมไพร์กัลทั้งสอง สอดคล้องกับผลการทดสอบในช่วงกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำเท่านั้น ส่วนในช่วงทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนไม่สอดคล้องเนื่องจากเกิด Potential shearing slip plane

5.3 โมดูลัสแบบเฉือนภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

วิธีการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วย Bender element เป็นการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วยการสร้างคลื่นกำทอนแพร่กระจายลงไป在地 ซึ่งคลื่นกำทอนที่ได้จากวิธีนี้จะเป็น Small Shear strain เสมอ ดังนั้นไม่ว่าภายใต้สภาวะการทดลองใดๆ การหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วย Bender element ควรจะได้ค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ Very small strain เสมอ (Initial shear modulus)

การหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วย Bender element ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนพบว่า ค่า Initial shear modulus จะขึ้นกับ Mean effective stress ซึ่งเมื่อ Mean effective stress ลดลง ค่า Initial shear modulus จะลดลงและมีแนวโน้มของค่าโมดูลัสเท่ากับการทดลองหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนภายใต้ Mean effective stress ต่างๆ ขณะที่ Shear stress กลับส่งผลกระทบต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนน้อยมาก

5.4 ข้อดี-ข้อเสีย ในการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วย Bender element

วิธีการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วย Bender element เป็นการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วยการสร้างคลื่นกำทอนแพร่กระจายลงไป在地 และสามารถติดตั้งกับเครื่องมือทดสอบทางปรุรูที่ต่างๆได้ง่าย และสะดวกและไม่มีข้อขัดข้องในการคำนวณหาค่าโมดูลัสแบบเฉือน จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่นิยมใช้ในงานวิจัย เพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic) และจากการทดสอบในงานวิจัยนี้ทำให้พบข้อเสียของวิธีการทดสอบนี้คือ ระดับสัญญาณของคลื่นที่รับอ่อนลงเมื่อผ่านดินที่สภาวะ Mean effective stress สูงๆทำให้ยากต่อการวิเคราะห์เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่

5.5 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติมมีดังนี้

1. ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินธรรมชาติที่ไม่ถูกรบกวน(Undisturbed Sample) แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน
2. ศึกษาค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ เพื่อดูว่ามีผลกระทบจากแรงกระทำในแนวราบต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบหรือไม่ ที่สภาวะ Isotropic consolidation และ Anisotropic consolidation

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธีรินทร์ อมรวิทยารักษ์ “ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนโดยเบนเดอริอิลิเมนต์ระหว่างการทดสอบแบบอัดสามแกน” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2000

พิพัฒน์ ทองฉิม “คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 1998

ภาษาอังกฤษ

ANDRAWES, K. Z. “The Resonance Method for Laboratory Determination of Dynamic Elastic Properties” Geotechnique (1981)

ATKINSON, J. H. & POWELL, J. J. M. UK. “Determination of Soil Stiffness Parameters in the Stress Path Probing Tests” Proceedings, 12th ICSMFE, (1992):07-10

BURLAND, J. B., “Small is Beautiful-the Stiffness at Small Strains” Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture, Canadian Geotechnical Journal, 26(1989), 69-76

DIEGO BROCANELLI & VICTOR RINALDI “Measurement of Low-strain Material Damping and Wave velocity with bender elements in the Frequency domain” Canadian Geotechnical Journal, (1998): 1032-1040

Hryciw R. D. & Thomann T. G. “Stress History Based Model for G of Cohesionless Soils.” Geotechnical Testing Journal, Vol 19, No. 7(1993):1073-1093.

ENSLEY, R. A. “Comparison of P- and S-wave seismic data: A new method for detecting gas reservoirs” Geophysics, 49, 9(1984): 1420-1431

LOHANI, TARA NIDHI. “Pseudo-elastic shear modulus of Bangkok clay using bender elements” Asian Institute of Technology Thesis, AIT, Bangkok, Thailand (1996)

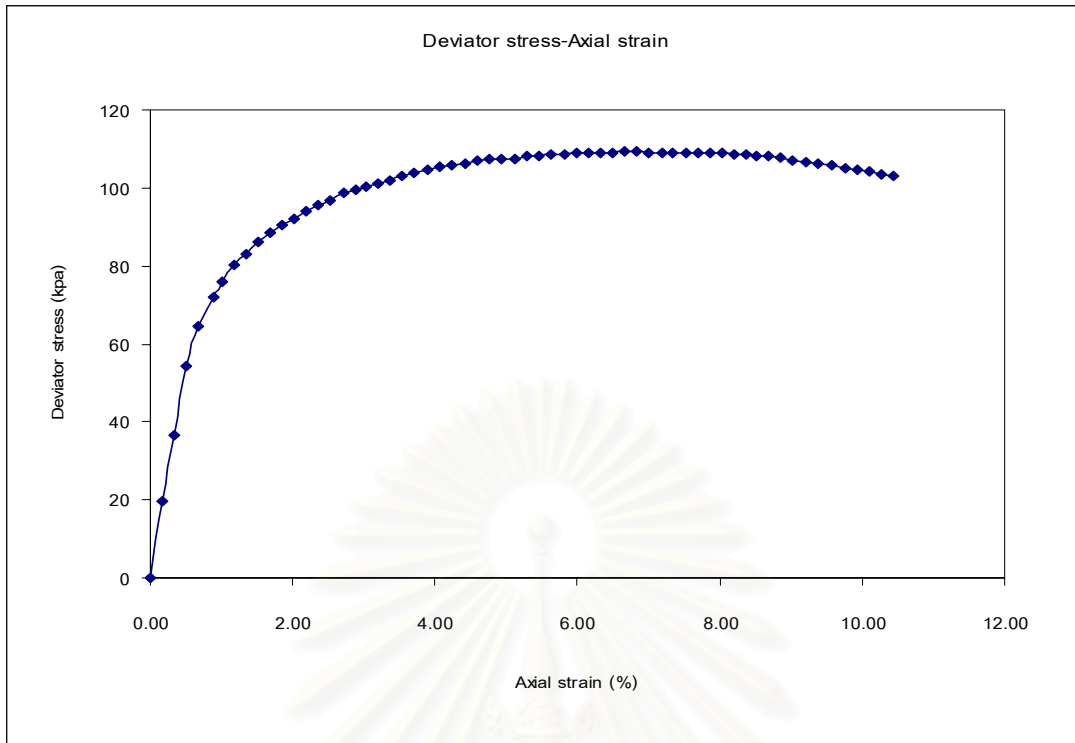
MUKABI, J. N. “Small Strain Stiffness and Elasticity of Clays in Triaxial Compression Tests” Proceedings, Symposium on Triaxial Test, Japanese Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, (1991): 257-264

- PREVOST. J. H. "Undrained Stress-Strain-Time Behavior of Clays" Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.102, No. GT12, Proc. Paper 12644, December, (1976): 1245-1259
- SAHABDEEN, MOHAMED MOHIDEEN. "Stress-strain characteristics of Bangkok subsoils at strain levels using bender elements" Asian Institute of Technology Thesis, AIT, Bangkok, Thailand (1995)
- TATSUOKA, F. & SHIBUYA, A. "Accurate measurements of Stiffness at Small Strains in the Laboratory" Geotechnical Engineering Laboratory Report, University of Tokyo, Japan (1990)
- THOMANN. T. G. & HRYCIW. R. D. "Laboratory Measurement of Small Strain Shear Modulus Under K_0 Conditions" Geotechnical Testing Journal. GTJODJ., 13, 12(1990), June: 97-105
- TOKHEIM, O. "Deformation Behavior of Soils in terms of Shear Modulus" NGI Publication, 152(1991)
- YAMADA. K. "Seismic Wave Propagation in Elastic-Viscoplastic Shear Layers" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126, 3(2000), March:218-226
- Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr. and Woods, R. D. Vibration s of Soils and Foundations. Prentice-Hall, Inc.,Englewood Cliffs,N.J.,1970.
- Hardin, B. O. & Drnevich , V. P. "Shear Modulus and Damping of Soils; Measurements and Parameters Effects. "Journal of Soil Mechanic and Foundation Division ASCE 98 (1972):603-624.
- Mukabi, J. N., Tatsuoka, F. & Hirose, K. "Effect of Strain Rate on Small Strain of Kaolin in Consolidated Undrain Triaxial test." 26th Proceeding, Japan National Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering. Nagono, Japan(1992):659-662.

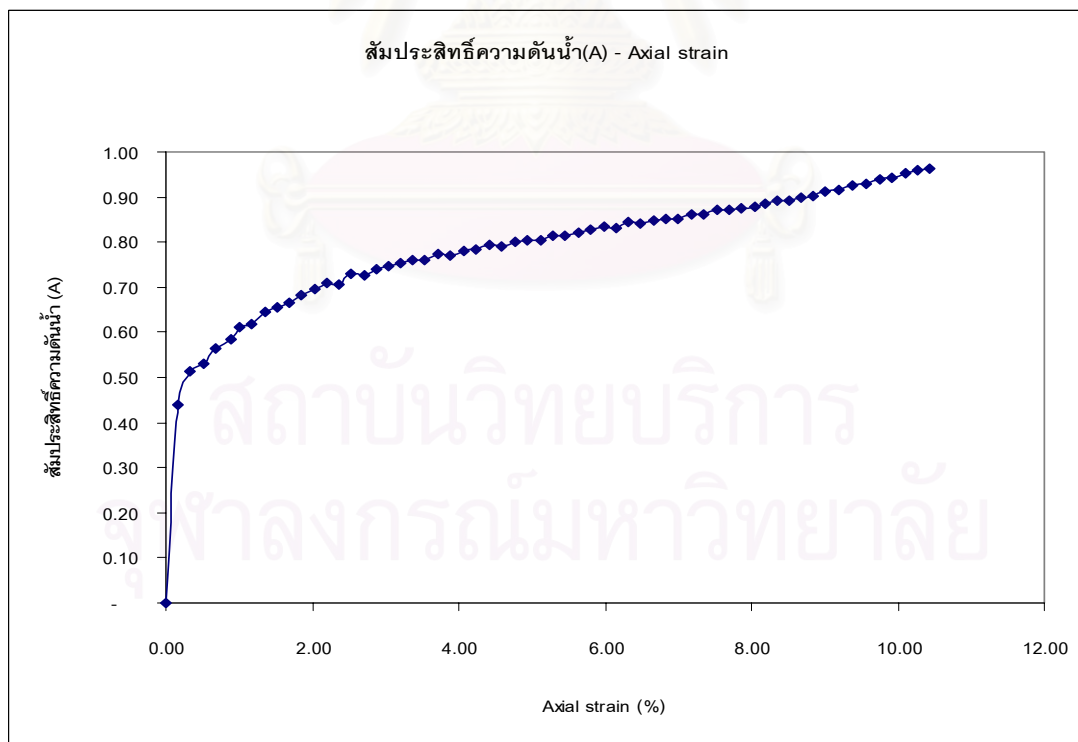


ภาคผนวก

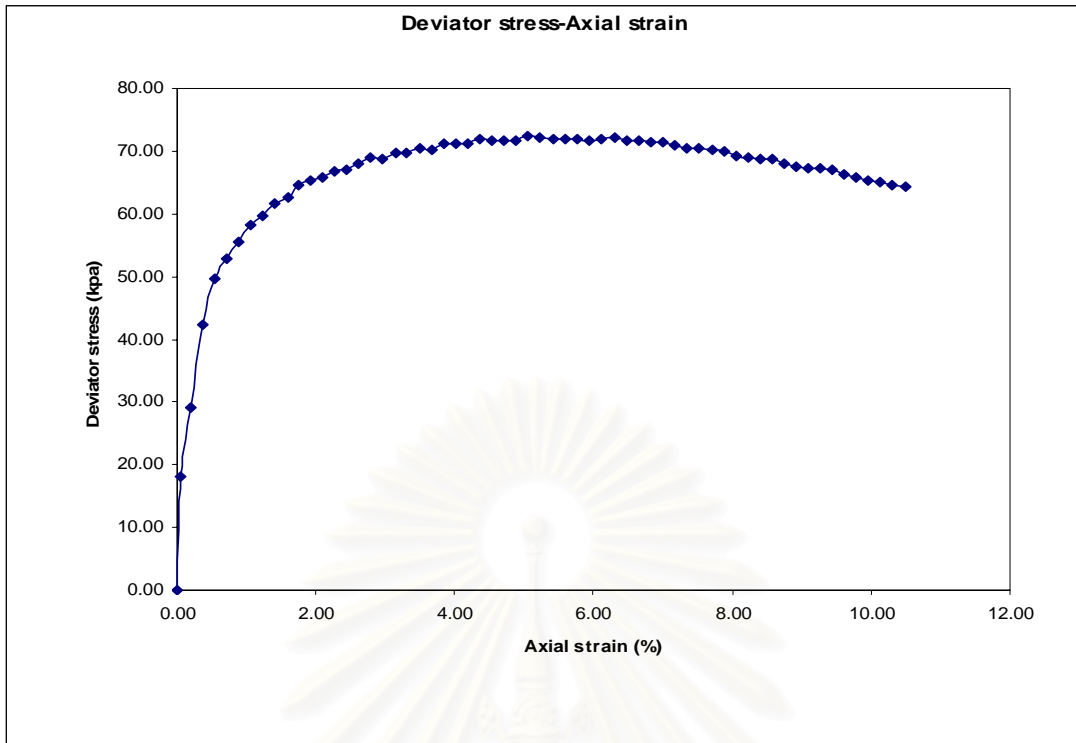
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



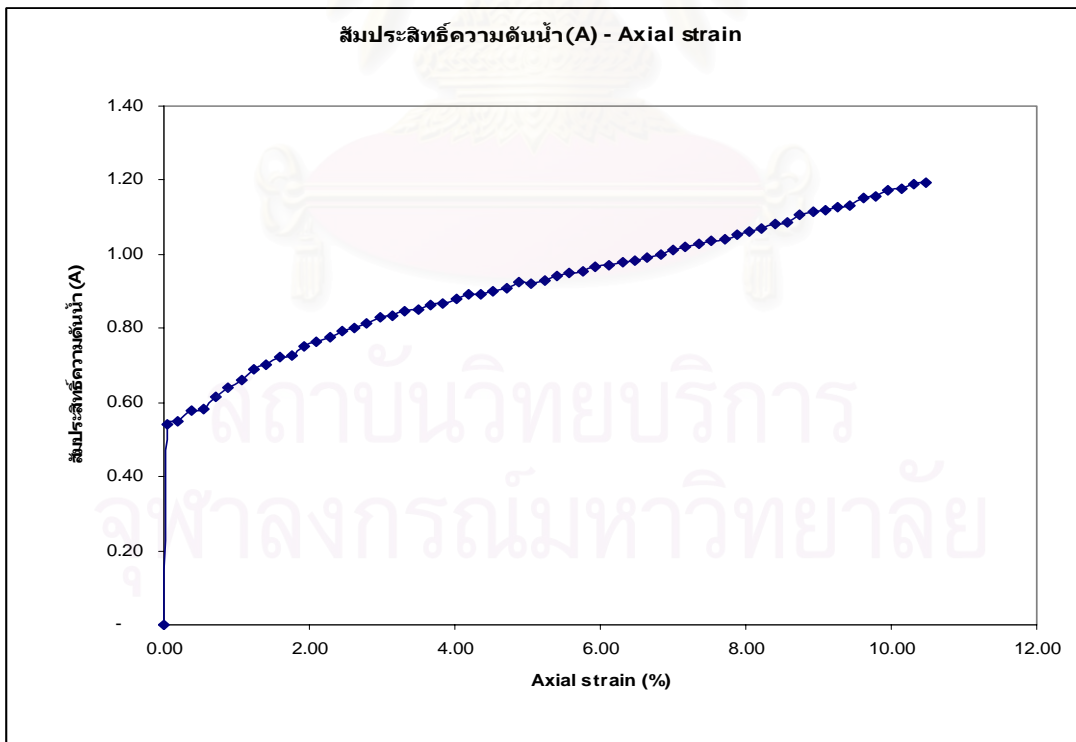
รูปที่ ก-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic Consolidation



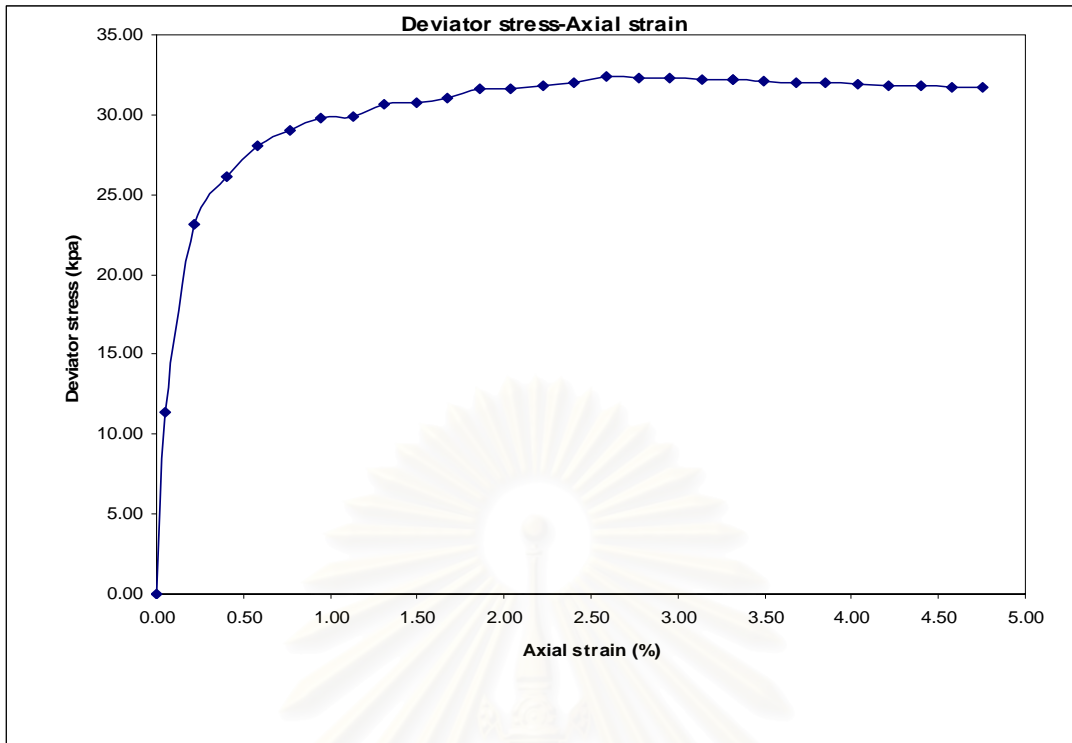
รูปที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำแบบ Isotropic Consolidation



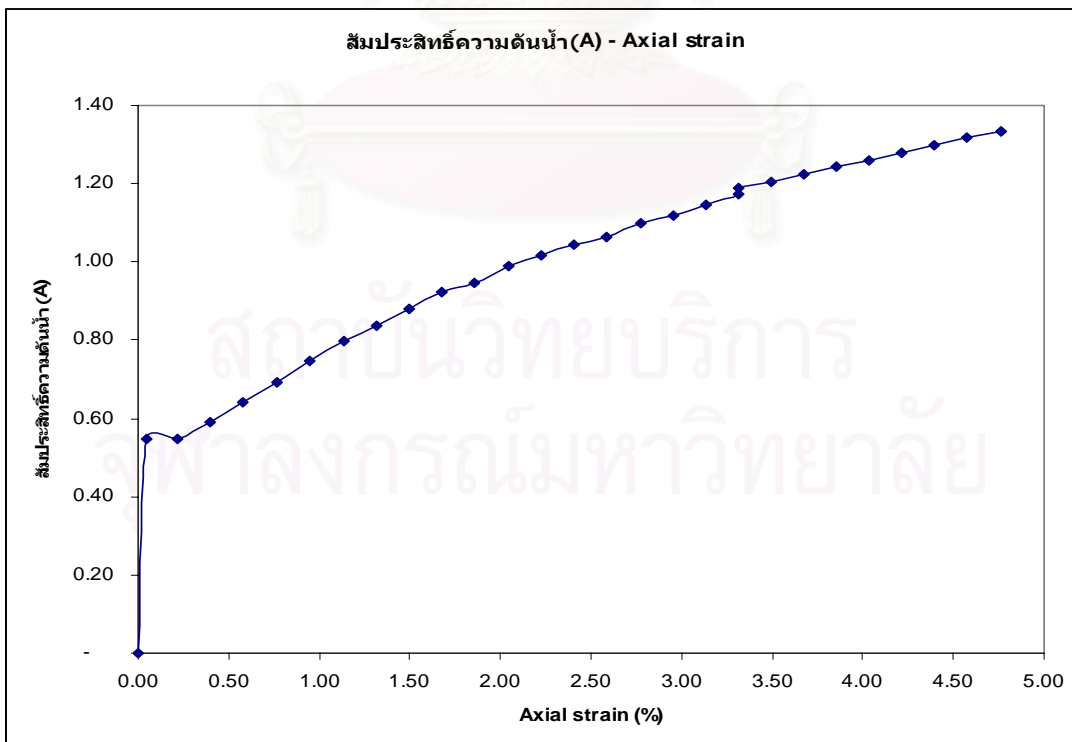
รูปที่ ก-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายนํ้าแบบ Anisotropic Consolidation(K=0.8)



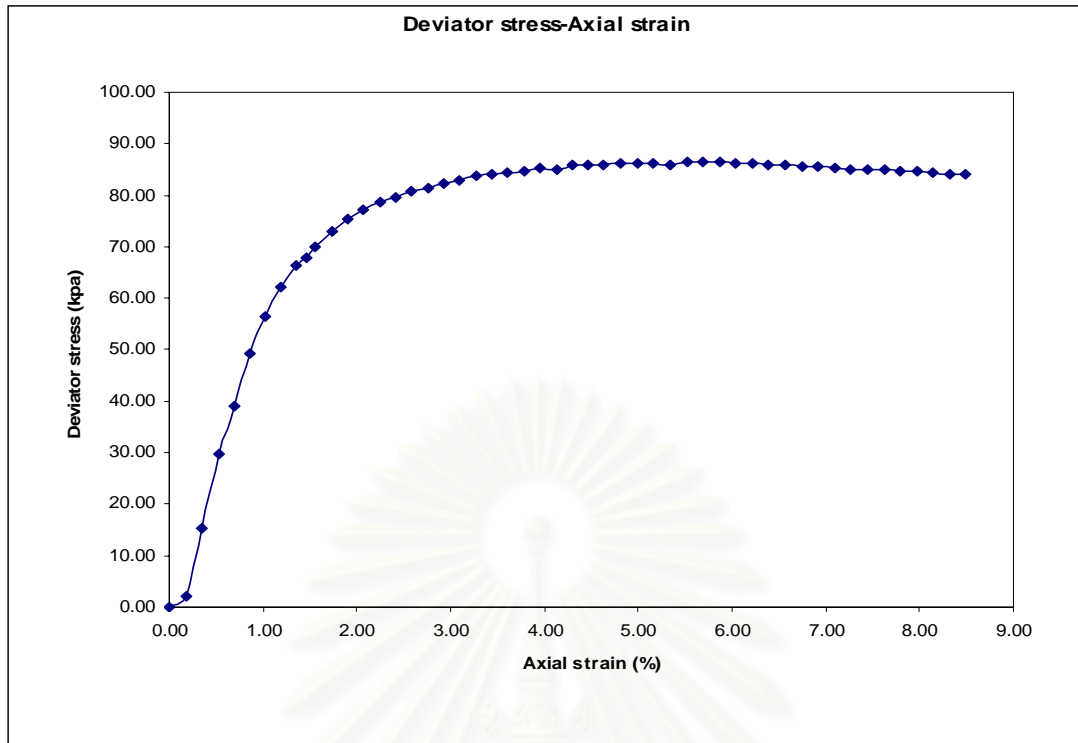
รูปที่ ก-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายนํ้าแบบ Anisotropic Consolidation(K=0.8)



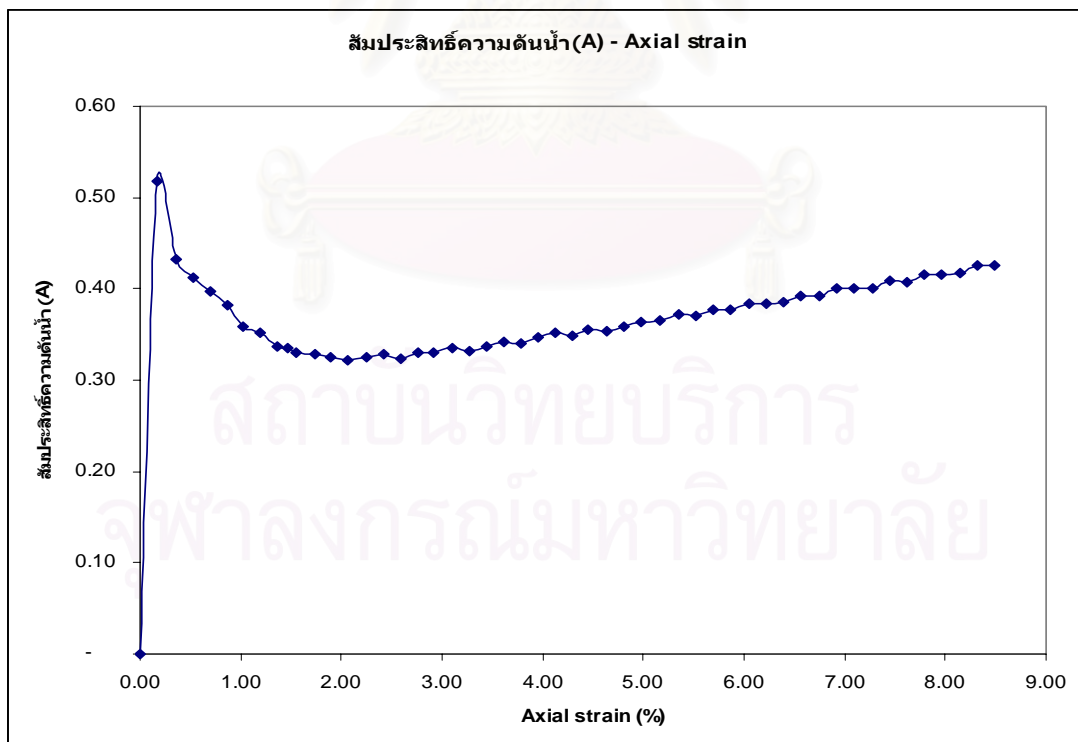
รูปที่ ก-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายนํ้าแบบ Anisotropic Consolidation($K=0.6$)



รูปที่ ก-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมพันธ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายนํ้าแบบ Anisotropic Consolidation($K=0.6$)



รูปที่ ก-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Deviator stress-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายนํ้าแบบ Isotropic Consolidation,Unload



รูปที่ ก-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์ความดันน้ำ(A)-Axial strain ในกระบวนการอัดตัวคายนํ้าแบบ Isotropic Consolidation,Unload

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Isotropic consolidation

P'	σ'_v	ปริมาตร	H	พื้นที่	ความหนาแน่น	ความเร็วคลื่น	Shear modulus	e
(KPa)	(KPa)	(cm ³)	(mm)	(cm ²)	(kg/m ³)	V _s (m/s)	(Mpa)	
เริ่มต้น	เริ่มต้น	197.41	99.5	19.84	1625.64	115.79	21.80	1.71
10	10	197.40	99.49	19.84	1625.72	96.49	15.14	1.71
50	50	195.45	98.64	19.81	1641.93	129.41	27.50	1.68
60	60	193.72	98.39	19.69	1656.58	146.31	35.46	1.66
72	72	191.30	98.17	19.49	1677.53	153.09	39.32	1.63
85	85	189.08	97.95	19.30	1697.21	169.21	48.59	1.60
100	100	186.25	97.64	19.07	1722.99	172.38	51.20	1.56
120	120	182.70	97.10	18.82	1756.45	176.44	54.68	1.51
140	140	179.85	96.59	18.62	1784.26	177.36	56.13	1.47
165	165	176.70	96.04	18.40	1816.06	180.23	58.99	1.43

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Isotropic consolidation, Unload

P'	σ'_v	ปริมาตร	H	พื้นที่	ความหนาแน่น	ความเร็วคลื่น	Shear modulus	e
(KPa)	(KPa)	(cm ³)	(mm)	(cm ²)	(kg/m ³)	V _s (m/s)	(MPa)	
เริ่มต้น	เริ่มต้น	197.41	99.5	19.84	1620.37	117.01	22.18	1.74
10	10	197.39	99.45	19.85	1620.53	98.66	15.77	1.74
50	50	193.58	98.46	19.66	1652.41	122.28	24.71	1.69
60	60	193.08	98.30	19.64	1656.68	128.91	27.53	1.68
72	72	190.93	98.06	19.47	1675.33	131.99	29.19	1.65
85	85	188.00	97.41	19.30	1701.42	139.38	33.05	1.61
100	100	186.05	96.57	19.27	1719.25	151.32	39.37	1.58
120	120	184.08	95.87	19.20	1737.64	158.35	43.57	1.55
140	140	181.68	95.07	19.11	1760.58	170.32	51.08	1.52
165	165	178.59	94.56	18.89	1791.02	174.94	54.81	1.48
82.5	82.5	181.41	95.37	19.02	1763.20	165.19	48.11	1.52

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Anisotropic consolidation(K=0.8)

P' (KPa)	σ'_v (KPa)	ปริมาตร (cm ³)	H (mm)	พื้นที่ (cm ²)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	ความเร็ว คลื่น Vs (m/s)	Shear modulus (MPa)	e
เริ่มต้น	เริ่มต้น	197.41	99.5	19.84	1629.28	120.17	23.53	1.71
10	10	197.34	99.44	19.84	1629.86	97.26	15.42	1.71
50	50	192.56	98.58	19.53	1670.30	127.52	27.16	1.64
55	60	191.81	98.12	19.55	1676.82	135.07	30.59	1.63
64.8	72	191.05	97.97	19.50	1683.49	140.91	33.43	1.62
76.5	85	189.26	97.66	19.38	1699.40	146.79	36.62	1.60
90	100	186.82	97.21	19.22	1721.59	149.83	38.65	1.56
108	120	183.49	96.57	19.00	1752.81	154.25	41.70	1.52
126	140	180.64	95.90	18.84	1780.45	159.62	45.36	1.48
148.5	165	176.56	94.80	18.62	1821.57	165.81	50.08	1.42

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Anisotropic consolidation(K=0.6)

P' (KPa)	σ'_v (KPa)	ปริมาตร (cm ³)	H (mm)	พื้นที่ (cm ²)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	ความเร็ว คลื่น Vs (m/s)	Shear modulus (MPa)	e
เริ่มต้น	เริ่มต้น	197.41	99.5	19.84	1631.72	119.17	23.17	1.71
10	10	196.85	99.50	19.78	1636.35	97.98	15.71	1.70
55	60	192.41	97.92	19.65	1674.09	134.43	30.25	1.64
61	72	191.23	97.32	19.65	1684.42	138.16	32.15	1.63
68	85	190.58	96.86	19.68	1690.16	140.58	33.40	1.62
80	100	188.38	95.98	19.63	1709.89	139.87	33.45	1.59
96	120	185.99	94.98	19.58	1731.85	142.43	35.13	1.55
112	140	182.24	93.38	19.52	1767.46	144.91	37.11	1.50
132	165	178.34	91.62	19.46	1806.09	148.18	39.66	1.45

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบของดินเหนียวสร้างใหม่ ในช่วง Anisotropic consolidation(K=0.8),unload

P' (KPa)	σ'_v (KPa)	ปริมาตร (cm ³)	H (mm)	พื้นที่ (cm ²)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	ความเร็ว คลื่น Vs (m/s)	Shear modulus (MPa)	e
เริ่มต้น	เริ่มต้น	197.41	99.5	19.84	1618.19	117.01	22.15	1.75
10	10	198.34	98.92	20.05	1610.61	98.57	15.65	1.76
50	50	194.43	98.18	19.80	1642.98	124.25	25.36	1.71
55	60	194.03	97.48	19.90	1646.36	128.58	27.22	1.70
64.8	72	193.45	97.32	19.88	1651.29	131.04	28.36	1.69
76.5	85	191.32	96.82	19.76	1669.67	133.12	29.59	1.67
90	100	188.41	96.21	19.58	1695.44	138.15	32.36	1.62
108	120	185.15	95.41	19.41	1725.28	143.37	35.46	1.58
126	140	181.53	94.38	19.23	1759.66	148.39	38.75	1.53
148.5	165	177.66	93.23	19.06	1797.97	150.42	40.68	1.47
126	140	178.04	93.30	19.08	1794.14	150.55	40.66	1.48
108	120	178.48	93.37	19.11	1789.72	146.94	38.64	1.49
90	100	179.02	93.45	19.16	1784.32	140.15	35.05	1.49

Test duration min	Cell Pressure kPa	Back Pressure kPa	Axial Force N	Displacement mm	Axial Force ปรับแก้ N	excess ΔU kpa	A ปรับแก้ cm2	$\sigma_1 - \sigma_3$ kpa	σ_1 kpa	P' kpa	q' kpa	A	% strain	p-wave (ms)	H (mm)	Vs (m/s)	Go (Mpa)
0	565.0	400.9	0.00	0.00	0.0	0.0	18.40	0.00	564.98	165.00	0.00	#DIV/0!	0.00	0.4885	96.04	180.23	58.99
10	564.4	409.4	33.2	0.16	35.9	8.5	18.43	19.48	583.93	164.76	9.74	0.44	0.17	0.4813	95.88	182.59	60.54
20	565.0	419.6	62.2	0.32	67.3	18.7	18.46	36.45	601.43	163.64	18.23	0.51	0.34	0.5100	95.72	171.99	53.72
30	564.4	429.6	92.5	0.48	100.1	28.7	18.49	54.11	618.56	161.90	27.06	0.53	0.50	0.4885	95.56	179.23	58.34
40	565.0	437.2	110.3	0.65	119.3	36.3	18.52	64.40	629.38	159.99	32.20	0.56	0.67	0.4885	95.39	178.90	58.12
53	564.4	443.1	123.9	0.85	134.0	42.2	18.56	72.19	636.63	157.48	36.09	0.58	0.89	0.4956	95.19	175.92	56.20
60	565.0	447.3	130.6	0.97	141.3	46.4	18.59	76.01	640.98	155.65	38.00	0.61	1.01	0.4885	95.07	178.24	57.69
70	564.4	450.5	137.9	1.13	149.1	49.6	18.62	80.09	644.54	153.96	40.05	0.62	1.18	0.4741	94.91	183.31	61.03
80	565.0	454.4	143.3	1.30	155.0	53.5	18.65	83.11	648.08	152.11	41.55	0.64	1.35	0.4741	94.74	182.96	60.79
90	564.6	457.5	148.7	1.45	160.9	56.6	18.68	86.12	650.73	150.20	43.06	0.66	1.51	0.4741	94.59	182.63	60.57
100	564.4	459.6	152.9	1.61	165.4	58.7	18.71	88.39	652.83	149.04	44.19	0.66	1.68	0.4597	94.43	188.01	64.19
110	565.0	462.8	156.9	1.78	169.7	61.9	18.75	90.54	655.51	147.44	45.27	0.68	1.85	0.4669	94.26	184.76	61.99
120	564.9	464.9	160.2	1.94	173.2	64.1	18.78	92.26	657.13	146.06	46.13	0.69	2.02	0.4597	94.10	187.29	63.70

130	565.0	467.6	163.8	2.11	177.2	66.7	18.81	94.18	659.16	144.46	47.09	0.71	2.20	0.4597	93.93	186.92	63.45
140	564.4	468.7	166.9	2.27	180.5	67.8	18.84	95.79	660.23	143.66	47.89	0.71	2.37	0.4956	93.77	173.05	54.39
150	565.0	471.3	168.7	2.43	182.5	70.5	18.88	96.66	661.64	141.96	48.33	0.73	2.53	0.4454	93.61	192.20	67.09
160	564.4	472.4	172.3	2.60	186.4	71.5	18.91	98.57	663.01	141.31	49.28	0.73	2.71	0.4454	93.44	191.82	66.83
170	565.0	474.5	174.1	2.76	188.4	73.7	18.94	99.43	664.41	140.14	49.72	0.74	2.87	0.4813	93.28	177.18	57.01
180	564.4	475.6	176.0	2.92	190.3	74.7	18.97	100.30	664.74	138.98	50.15	0.75	3.04	0.4813	93.12	176.86	56.80
190	565.0	477.2	177.8	3.07	192.3	76.3	19.01	101.16	666.14	138.34	50.58	0.75	3.20	0.4525	92.97	187.77	64.03
200	564.7	478.3	179.6	3.24	194.2	77.4	19.04	102.01	666.72	137.43	51.01	0.76	3.37	0.4669	92.80	181.62	59.90
210	564.4	479.4	181.9	3.40	196.8	78.5	19.07	103.18	667.62	136.68	51.59	0.76	3.54	0.4454	92.64	190.04	65.58
220	565.0	481.0	183.2	3.57	198.2	80.1	19.11	103.71	668.68	135.88	51.85	0.77	3.72	0.4813	92.47	175.51	55.94
230	564.4	481.5	185.0	3.73	200.1	80.6	19.14	104.55	668.99	135.23	52.27	0.77	3.89	0.4956	92.31	170.11	52.55
240	565.0	483.1	186.8	3.90	202.1	82.2	19.18	105.38	670.35	134.58	52.69	0.78	4.06	0.4813	92.14	174.81	55.50
250	564.4	483.6	187.7	4.07	203.1	82.7	19.21	105.69	670.14	133.67	52.85	0.78	4.24	0.4597	91.97	182.66	60.59
260	565.0	485.1	189.2	4.24	204.6	84.2	19.25	106.31	671.29	133.02	53.16	0.79	4.42	0.4669	91.80	179.48	58.50
270	564.6	485.2	190.5	4.41	206.0	84.3	19.28	106.83	671.43	132.79	53.41	0.79	4.60	0.5100	91.63	163.97	48.83
280	565.0	486.8	191.9	4.58	207.6	85.9	19.32	107.45	672.42	131.87	53.72	0.80	4.77	0.4669	91.46	178.75	58.03
290	564.9	487.4	192.3	4.74	208.0	86.5	19.35	107.46	672.33	131.24	53.73	0.80	4.94	0.4669	91.30	178.40	57.80
300	564.4	487.4	192.8	4.91	208.6	86.5	19.39	107.56	672.01	130.87	53.78	0.80	5.11	0.4669	91.13	178.05	57.57

311	565.0	489.0	194.1	5.09	209.9	88.1	19.43	108.06	673.04	130.05	54.03	0.82	5.30	0.4885	90.95	169.81	52.37
320	564.4	489.0	194.6	5.24	210.5	88.1	19.46	108.18	672.62	129.57	54.09	0.81	5.46	0.5028	90.80	164.67	49.24
330	565.0	490.0	195.9	5.41	211.9	89.1	19.50	108.69	673.66	129.29	54.34	0.82	5.63	0.4597	90.63	179.75	58.68
340	564.4	490.6	195.9	5.58	211.9	89.7	19.53	108.48	672.93	128.12	54.24	0.83	5.81	0.4813	90.46	171.33	53.31
350	565.0	491.6	196.8	5.74	212.9	90.7	19.57	108.79	673.76	127.74	54.39	0.83	5.98	0.4813	90.30	170.99	53.10
360	564.4	491.6	197.7	5.90	213.9	90.7	19.60	109.10	673.54	127.36	54.55	0.83	6.15	0.4382	90.14	187.44	63.81
370	565.0	492.7	197.7	6.06	213.9	91.8	19.64	108.90	673.88	126.73	54.45	0.84	6.31	0.4525	89.98	181.16	59.60
380	564.6	492.7	198.3	6.23	214.4	91.8	19.67	109.00	673.60	126.40	54.50	0.84	6.49	0.4813	89.81	169.97	52.47
390	565.0	493.8	199.5	6.40	215.8	92.9	19.71	109.49	674.47	125.96	54.75	0.85	6.66	0.4813	89.64	169.63	52.26
400	565.0	493.8	199.5	6.56	215.8	92.9	19.75	109.29	674.27	125.86	54.64	0.85	6.83	0.4310	89.48	189.04	64.90
410	564.4	493.8	199.5	6.73	215.8	92.9	19.78	109.09	673.53	125.22	54.55	0.85	7.00	0.5100	89.31	159.44	46.17
420	565.0	494.8	200.1	6.90	216.4	93.9	19.82	109.18	674.16	124.73	54.59	0.86	7.18	0.4525	89.14	179.32	58.40
430	564.4	494.8	200.1	7.05	216.4	93.9	19.86	108.99	673.43	124.10	54.49	0.86	7.34	0.4956	88.99	163.41	48.50
440	565.0	495.9	200.4	7.23	216.8	95.0	19.90	108.97	673.94	123.56	54.48	0.87	7.53	0.4956	88.81	163.05	48.28
450	564.4	495.9	201.0	7.40	217.4	95.0	19.93	109.06	673.50	123.07	54.53	0.87	7.70	0.5100	88.64	158.12	45.41
460	565.0	496.4	201.4	7.56	217.8	95.6	19.97	109.06	674.03	123.07	54.53	0.88	7.87	0.5100	88.48	157.81	45.23
470	564.4	496.4	201.4	7.72	217.8	95.6	20.01	108.86	673.30	122.44	54.43	0.88	8.04	0.5100	88.32	157.49	45.04
480	565.0	497.0	201.4	7.87	217.8	96.1	20.04	108.67	673.65	122.34	54.34	0.88	8.19	0.4956	88.17	161.76	47.52

ตารางที่ ก-6 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation) ต่อ

490	564.6	497.5	201.4	8.03	217.8	96.6	20.08	108.47	673.08	121.34	54.24	0.89	8.36	0.4956	88.01	161.44	47.33
500	564.6	497.5	201.4	8.17	217.8	96.6	20.11	108.30	672.90	121.25	54.15	0.89	8.51	0.4956	87.87	161.15	47.16
510	564.9	498.0	201.4	8.33	217.8	97.2	20.15	108.11	672.98	120.89	54.05	0.90	8.67	0.4956	87.71	160.84	46.98
520	564.4	498.0	201.0	8.49	217.4	97.2	20.18	107.71	672.16	120.26	53.86	0.90	8.84	0.4916	87.55	161.82	47.55
530	565.0	498.6	200.1	8.66	216.4	97.7	20.22	107.02	672.00	119.92	53.51	0.91	9.02	0.4741	87.38	167.44	50.91
540	564.4	498.6	199.5	8.84	215.8	97.7	20.26	106.51	670.95	119.13	53.25	0.92	9.20	0.5172	87.20	153.13	42.59
550	565.0	499.1	199.5	9.01	215.8	98.2	20.30	106.30	671.27	119.02	53.15	0.92	9.39	0.5100	87.03	154.95	43.60
560	564.4	499.1	199.2	9.20	215.4	98.2	20.35	105.88	670.32	118.28	52.94	0.93	9.58	0.4956	86.84	159.08	45.96
570	565.0	499.6	198.3	9.37	214.4	98.8	20.39	105.19	670.17	117.94	52.60	0.94	9.75	0.5100	86.67	154.26	43.22
580	564.4	499.6	197.7	9.53	213.9	98.8	20.42	104.71	669.15	117.16	52.35	0.94	9.92	0.4597	86.51	170.79	52.97
590	565.0	500.2	197.4	9.70	213.5	99.3	20.46	104.31	669.28	116.96	52.15	0.95	10.10	0.4813	86.34	162.77	48.11
600	564.7	500.2	196.5	9.86	212.5	99.3	20.50	103.64	668.35	116.36	51.82	0.96	10.27	0.5100	86.18	153.30	42.68
610	564.4	500.2	195.9	10.02	211.9	99.3	20.54	103.16	667.60	115.85	51.58	0.96	10.43	0.5028	86.02	155.17	43.73

ตารางที่ ก-6 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation) ต่อ

Test duration min	Cell Pressure kPa	Back Pressure kPa	Axial Force N	Displacement mm	Volume change ml	Axial Force ปรับแก้ N	excess ΔU kpa	A ปรับแก้ cm2	$\sigma_1 - \sigma_3$ kpa	σ_1 kpa	P' kpa	q' kpa	A	% strain	p-wave (ms)	H (mm)	Vs (m/s)	Go (Mpa)
0.00	482.8	399.8	0.00	0.00	16.00	0.0	0.0	19.02	0.00	482.82	83.00	0.00	-	0.00	0.5289	95.37	165.19	48.11
10.00	482.3	400.9	3.63	0.17	16.00	3.9	1.1	19.05	2.06	484.34	82.43	1.03	0.52	0.18	0.5289	95.20	164.88	47.93
20.0	482.8	406.4	26.8	0.33	16.00	29.0	6.6	19.09	15.21	498.03	84.04	7.61	0.43	0.35	0.5289	95.04	164.56	47.75
30.0	482.7	412.1	52.6	0.50	16.00	56.9	12.3	19.12	29.76	512.47	85.50	14.88	0.41	0.52	0.5289	94.87	164.25	47.57
40.0	482.8	415.3	68.9	0.66	16.00	74.6	15.5	19.15	38.92	521.74	86.98	19.46	0.40	0.69	0.5289	94.71	163.94	47.39
50.0	482.8	418.7	87.6	0.82	16.00	94.8	18.8	19.19	49.39	532.21	88.85	24.69	0.38	0.86	0.5289	94.55	163.63	47.21
60.0	482.3	420.1	100.3	0.98	16.00	108.5	20.3	19.22	56.46	538.74	90.41	28.23	0.36	1.03	0.5289	94.39	163.34	47.04
70.0	482.8	421.7	110.7	1.14	16.00	119.7	21.9	19.25	62.17	544.99	92.20	31.08	0.35	1.19	0.5528	94.23	155.99	42.90
80.0	482.3	422.2	118.5	1.30	16.00	128.1	22.4	19.28	66.44	548.72	93.27	33.22	0.34	1.36	0.5528	94.07	155.70	42.75
90.0	482.8	422.5	121.0	1.40	16.00	130.9	22.7	19.30	67.79	550.61	94.21	33.90	0.33	1.47	0.5528	93.97	155.52	42.65
100.0	482.8	422.9	125.2	1.48	16.00	135.4	23.1	19.32	70.07	552.88	94.92	35.03	0.33	1.55	0.5528	93.89	155.37	42.56
110.0	482.3	423.8	130.6	1.65	16.00	141.3	24.0	19.36	72.98	555.26	94.94	36.49	0.33	1.73	0.5528	93.72	155.06	42.39
120.0	482.8	424.4	135.1	1.81	16.00	146.2	24.6	19.39	75.38	558.20	96.14	37.69	0.33	1.90	0.5528	93.56	154.77	42.24

ตารางที่ ก-7 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation, Unload)

130.0	482.6	424.6	138.4	1.97	16.00	149.7	24.8	19.42	77.07	559.62	96.45	38.54	0.32	2.07	0.5810	93.40	146.98	38.09
140.0	482.8	425.4	141.5	2.14	16.00	153.0	25.6	19.46	78.65	561.47	96.70	39.32	0.33	2.25	0.5810	93.23	146.69	37.94
150.0	482.8	426.0	143.3	2.30	16.00	155.0	26.2	19.49	79.52	562.34	96.60	39.76	0.33	2.41	0.5810	93.07	146.42	37.80
160.0	482.3	426.0	145.7	2.47	16.00	157.5	26.2	19.53	80.69	562.97	96.65	40.34	0.32	2.59	0.6097	92.90	139.25	34.19
170.0	482.8	426.7	146.9	2.63	16.00	158.9	26.9	19.56	81.25	564.06	96.77	40.62	0.33	2.76	0.6097	92.74	138.99	34.06
180.0	482.6	427.0	149.3	2.79	16.00	161.5	27.2	19.59	82.41	564.96	96.72	41.21	0.33	2.92	0.6097	92.58	138.73	33.93
190.0	482.8	427.6	150.6	2.95	16.00	162.8	27.8	19.63	82.96	565.78	96.72	41.48	0.33	3.10	0.5810	92.42	145.30	37.22
200.0	482.8	427.6	152.4	3.12	16.00	164.8	27.8	19.66	83.81	566.63	97.15	41.91	0.33	3.27	0.5810	92.25	145.02	37.08
210.0	482.4	428.1	152.9	3.28	16.00	165.4	28.3	19.70	83.96	566.41	96.32	41.98	0.34	3.44	0.6097	92.09	137.92	33.54
220.0	482.8	428.6	154.2	3.44	16.00	166.8	28.8	19.73	84.51	567.33	96.43	42.26	0.34	3.61	0.6097	91.93	137.66	33.41
230.0	482.7	428.6	154.7	3.61	16.00	167.4	28.8	19.77	84.65	567.36	96.39	42.33	0.34	3.79	0.5810	91.76	144.16	36.64
240.0	482.8	429.4	156.0	3.78	16.00	168.7	29.6	19.81	85.19	568.01	95.97	42.60	0.35	3.96	0.6097	91.59	137.11	33.14
250.0	482.8	429.7	156.0	3.94	16.00	168.7	29.9	19.84	85.05	567.86	95.63	42.52	0.35	4.13	0.6097	91.43	136.84	33.02
260.0	482.3	429.7	157.8	4.09	16.00	170.7	29.9	19.87	85.89	568.17	95.52	42.94	0.35	4.29	0.6097	91.28	136.59	32.89
270.0	482.8	430.2	157.8	4.25	16.00	170.7	30.4	19.91	85.74	568.56	95.44	42.87	0.35	4.46	0.5810	91.12	143.06	36.09
280.0	482.7	430.2	158.4	4.42	16.00	171.3	30.4	19.94	85.88	568.59	95.41	42.94	0.35	4.63	0.5810	90.95	142.78	35.94
290.0	482.8	430.8	159.3	4.58	16.00	172.3	31.0	19.98	86.21	569.03	95.15	43.11	0.36	4.81	0.6097	90.79	135.78	32.51
300.0	482.8	431.2	159.6	4.75	16.00	172.7	31.4	20.02	86.24	569.06	94.74	43.12	0.36	4.99	0.6097	90.62	135.50	32.37

ตารางที่ ก-7 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation, Unload) ต่อ

310.0	482.8	431.3	159.6	4.93	16.00	172.7	31.5	20.06	86.08	568.90	94.55	43.04	0.37	5.17	0.5810	90.44	141.90	35.50
320.0	482.8	431.8	159.6	5.10	16.00	172.7	32.0	20.10	85.92	568.74	93.93	42.96	0.37	5.35	0.5810	90.27	141.60	35.36
330.0	482.8	431.8	161.1	5.26	16.00	174.2	32.0	20.13	86.54	569.36	94.24	43.27	0.37	5.52	0.5810	90.11	141.32	35.21
340.0	482.8	432.4	161.1	5.43	16.00	174.2	32.6	20.17	86.38	569.20	93.63	43.19	0.38	5.69	0.5810	89.94	141.03	35.07
350.0	482.8	432.4	161.4	5.60	16.00	174.6	32.6	20.21	86.41	569.23	93.65	43.21	0.38	5.87	0.5810	89.77	140.75	34.93
360.0	482.8	432.9	161.4	5.76	16.00	174.6	33.1	20.24	86.25	569.07	93.03	43.13	0.38	6.04	0.6097	89.61	133.85	31.59
370.0	482.8	432.9	161.4	5.93	16.00	174.6	33.1	20.28	86.09	568.91	92.95	43.05	0.38	6.22	0.6097	89.44	133.57	31.46
380.0	482.6	432.9	161.4	6.10	16.00	174.6	33.1	20.32	85.93	568.48	92.61	42.97	0.39	6.39	0.5810	89.27	139.89	34.50
390.0	482.8	433.4	161.4	6.26	16.00	174.6	33.6	20.36	85.77	568.59	92.26	42.89	0.39	6.57	0.6097	89.11	133.03	31.20
400.0	482.8	433.4	161.4	6.43	16.00	174.6	33.6	20.40	85.61	568.43	92.18	42.81	0.39	6.74	0.6097	88.94	132.75	31.07
410.0	482.8	434.0	161.4	6.60	16.00	174.6	34.2	20.43	85.45	568.27	91.56	42.73	0.40	6.92	0.6097	88.77	132.48	30.95
420.0	482.8	434.0	161.4	6.77	16.00	174.6	34.2	20.47	85.29	568.10	91.48	42.64	0.40	7.10	0.5810	88.60	138.73	33.94
430.0	482.4	434.0	161.4	6.93	16.00	174.6	34.2	20.51	85.13	567.57	91.03	42.56	0.40	7.27	0.5810	88.44	138.44	33.79
440.0	482.8	434.5	161.4	7.10	16.00	174.6	34.7	20.55	84.97	567.78	90.79	42.48	0.41	7.45	0.5810	88.27	138.16	33.65
450.0	482.8	434.5	162.0	7.27	16.00	175.2	34.7	20.59	85.09	567.90	90.85	42.54	0.41	7.63	0.5810	88.10	137.86	33.51
460.0	482.8	435.0	161.4	7.43	16.00	174.6	35.2	20.63	84.65	567.46	90.09	42.32	0.42	7.79	0.5810	87.94	137.59	33.38
470.0	482.8	435.0	162.0	7.60	16.00	175.2	35.2	20.67	84.77	567.59	90.16	42.39	0.42	7.97	0.5810	87.77	137.30	33.24
480.0	482.3	435.0	161.4	7.77	16.00	174.6	35.2	20.71	84.33	566.61	89.40	42.16	0.42	8.14	0.5810	87.60	137.01	33.10

ตารางที่ ก-7 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation, Unload) ต่อ

490.0	482.8	435.6	161.4	7.93	16.00	174.6	35.8	20.75	84.17	566.98	89.32	42.08	0.42	8.32	0.5810	87.44	136.72	32.96
500.0	482.8	435.6	161.4	8.10	16.00	174.6	35.8	20.79	84.00	566.82	89.24	42.00	0.43	8.49	0.5810	87.27	136.44	32.82

ตารางที่ ก-7 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Isotropic consolidation, Unload) ต่อ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Test duration min	Cell Pressure kPa	Back Pressure kPa	Axial Force N	Displacement mm	Axial Force ปรับแก้ N	excess ΔU kpa	A ปรับแก้ cm2	$\sigma_1-\sigma_3$ kpa	σ_1 kpa	P' kpa	q' kpa	A	% strain	p-wave (ms)	H (mm)	Vs (m/s)	Go (Mpa)
0	531.9	400.3	0.00	0.00	0.0	0.0	18.62	0.00	531.90	131.60	0.00	-	0.00	0.5235	94.80	165.81	50.08
10	531.9	410.0	31.0	0.04	33.5	9.7	18.63	18.00	549.89	130.90	9.00	0.54	0.04	0.5491	94.76	158.00	45.47
20	531.9	416.3	50.2	0.19	54.3	16.0	18.66	29.10	561.00	130.19	14.55	0.55	0.20	0.5347	94.61	161.98	47.80
30	531.9	424.8	73.1	0.35	79.1	24.5	18.69	42.30	574.20	128.25	21.15	0.58	0.37	0.5347	94.45	161.67	47.61
40	531.9	429.2	85.8	0.51	92.8	28.9	18.73	49.56	581.46	127.50	24.78	0.58	0.54	0.5347	94.29	161.38	47.44
50	531.9	432.8	91.6	0.68	99.1	32.5	18.76	52.82	584.72	125.50	26.41	0.62	0.72	0.5563	94.12	154.81	43.65
60	531.9	436.0	96.7	0.84	104.6	35.7	18.79	55.65	587.55	123.72	27.83	0.64	0.89	0.5491	93.96	156.54	44.64
70	531.9	438.7	101.2	1.01	109.5	38.4	18.82	58.16	590.06	122.30	29.08	0.66	1.06	0.5635	93.79	152.25	42.23
80	531.9	441.3	103.9	1.17	112.4	41.0	18.86	59.62	591.52	120.36	29.81	0.69	1.24	0.5635	93.63	151.96	42.06
90	531.9	443.5	107.6	1.34	116.3	43.2	18.89	61.59	593.49	119.21	30.79	0.70	1.42	0.5850	93.46	146.08	38.87
100	531.9	445.6	109.7	1.51	118.7	45.3	18.93	62.72	594.62	117.64	31.36	0.72	1.59	0.5850	93.29	145.80	38.72
110	532.1	447.2	113.0	1.67	122.2	46.9	18.96	64.48	596.54	117.08	32.24	0.73	1.76	0.5922	93.13	143.76	37.65
120	532.1	449.4	114.8	1.83	124.2	49.1	18.99	65.40	597.46	115.41	32.70	0.75	1.93	0.5635	92.97	150.79	41.42

ตารางที่ ก-8 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, K=0.8)

130	531.9	450.5	115.7	2.00	125.2	50.2	19.02	65.80	597.70	114.27	32.90	0.76	2.11	0.5635	92.80	150.49	41.26
140	531.9	452.0	117.5	2.16	127.1	51.7	19.06	66.71	598.61	113.23	33.35	0.78	2.28	0.5635	92.64	150.20	41.10
150	531.9	453.6	118.5	2.32	128.1	53.3	19.09	67.11	599.01	111.83	33.55	0.79	2.45	0.5850	92.48	144.41	37.99
160	532.1	454.8	120.3	2.49	130.1	54.5	19.13	68.01	600.07	111.27	34.01	0.80	2.62	0.5850	92.31	144.12	37.84
170	532.1	456.3	122.1	2.65	132.0	56.0	19.16	68.92	600.98	110.23	34.46	0.81	2.80	0.5850	92.15	143.85	37.69
180	531.9	457.4	122.1	2.81	132.0	57.1	19.19	68.79	600.69	108.94	34.40	0.83	2.97	0.5850	91.99	143.57	37.54
190	531.9	458.4	123.9	2.98	134.0	58.1	19.23	69.69	601.59	108.32	34.84	0.83	3.15	0.5778	91.82	145.06	38.33
200	531.9	459.5	124.3	3.14	134.4	59.2	19.26	69.77	601.67	107.29	34.89	0.85	3.31	0.5850	91.66	143.01	37.25
210	531.9	460.3	125.7	3.31	136.0	60.0	19.30	70.46	602.36	106.83	35.23	0.85	3.49	0.5850	91.49	142.72	37.10
220	531.9	461.1	125.7	3.48	136.0	60.8	19.33	70.33	602.23	105.97	35.16	0.86	3.67	0.5706	91.32	146.03	38.84
230	531.9	462.2	127.5	3.64	137.9	61.9	19.37	71.22	603.12	105.34	35.61	0.87	3.84	0.5778	91.16	143.93	37.74
240	531.9	462.7	127.5	3.81	137.9	62.4	19.40	71.08	602.98	104.74	35.54	0.88	4.02	0.5778	90.99	143.63	37.58
250	531.9	463.8	127.9	3.97	138.3	63.5	19.44	71.16	603.06	103.71	35.58	0.89	4.19	0.5347	90.83	154.91	43.71
260	531.9	464.3	129.3	4.14	139.9	64.0	19.47	71.83	603.73	103.52	35.92	0.89	4.37	0.5347	90.66	154.59	43.53
270	531.9	464.9	129.3	4.30	139.9	64.6	19.51	71.71	603.61	102.81	35.85	0.90	4.53	0.5347	90.50	154.30	43.37
280	531.9	465.4	129.3	4.47	139.9	65.1	19.55	71.57	603.47	102.32	35.79	0.91	4.71	0.5347	90.33	153.98	43.19
290	531.9	466.4	129.7	4.63	140.3	66.1	19.58	71.65	603.55	101.29	35.82	0.92	4.88	0.5347	90.17	153.68	43.02
300	531.9	467.0	131.2	4.80	141.9	66.7	19.62	72.31	604.21	101.09	36.16	0.92	5.06	0.5347	90.00	153.36	42.84

ตารางที่ ก-8 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, K=0.8) ต่

310	531.9	467.5	131.2	4.96	141.9	67.2	19.65	72.18	604.08	100.49	36.09	0.93	5.23	0.5347	89.84	153.06	42.67
320	531.9	468.0	131.2	5.13	141.9	67.7	19.69	72.04	603.94	99.88	36.02	0.94	5.41	0.5347	89.67	152.73	42.49
330	531.9	468.6	131.2	5.29	141.9	68.3	19.73	71.91	603.81	99.29	35.96	0.95	5.58	0.5347	89.51	152.44	42.33
340	531.9	469.1	131.5	5.46	142.2	68.8	19.76	71.98	603.87	98.78	35.99	0.96	5.76	0.5347	89.34	152.12	42.15
350	531.9	469.6	131.2	5.63	141.9	69.3	19.80	71.64	603.54	98.08	35.82	0.97	5.94	0.5347	89.17	151.80	41.98
360	531.9	470.2	132.1	5.80	142.8	69.9	19.84	72.00	603.90	97.73	36.00	0.97	6.12	0.5347	89.00	151.49	41.80
370	531.9	470.7	132.4	5.97	143.2	70.4	19.88	72.06	603.96	97.22	36.03	0.98	6.30	0.5491	88.83	147.20	39.47
380	531.9	470.7	132.1	6.13	142.8	70.4	19.91	71.73	603.63	97.06	35.87	0.98	6.47	0.5491	88.67	146.91	39.31
390	532.1	471.3	132.1	6.31	142.8	71.0	19.95	71.59	603.65	96.51	35.80	0.99	6.65	0.5491	88.49	146.59	39.15
400	531.9	471.8	132.1	6.48	142.8	71.5	19.99	71.45	603.35	95.85	35.73	1.00	6.83	0.5491	88.32	146.28	38.98
410	531.9	472.7	132.4	6.64	143.2	72.4	20.03	71.52	603.42	94.91	35.76	1.01	7.00	0.5994	88.16	133.73	32.58
420	531.9	472.7	131.5	6.80	142.2	72.4	20.06	70.90	602.80	94.67	35.45	1.02	7.18	0.5994	88.00	133.46	32.45
430	531.9	472.8	131.2	6.97	141.9	72.5	20.10	70.57	602.47	94.34	35.28	1.03	7.35	0.5531	87.83	144.33	37.95
440	531.9	473.4	131.2	7.14	141.9	73.1	20.14	70.43	602.33	93.74	35.22	1.04	7.53	0.5387	87.66	147.88	39.84
450	531.9	473.5	131.2	7.30	141.9	73.2	20.18	70.30	602.20	93.57	35.15	1.04	7.70	0.5387	87.50	147.57	39.67
460	532.1	473.9	130.6	7.47	141.3	73.6	20.22	69.87	601.93	93.09	34.94	1.05	7.88	0.5387	87.33	147.26	39.50
470	531.9	473.9	129.7	7.63	140.3	73.6	20.26	69.26	601.16	92.62	34.63	1.06	8.05	0.5387	87.17	146.96	39.34
480	531.9	474.2	129.3	7.80	139.9	73.9	20.29	68.94	600.84	92.19	34.47	1.07	8.22	0.5172	87.00	152.75	42.50

ตารางที่ ก-8 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, K=0.8) ต่อ

490	531.9	474.8	129.3	7.96	139.9	74.5	20.33	68.80	600.70	91.49	34.40	1.08	8.40	0.5818	86.84	135.50	33.45
500	531.9	475.0	129.3	8.13	139.9	74.7	20.37	68.67	600.57	91.26	34.34	1.09	8.58	0.5818	86.67	135.22	33.31
510	531.9	475.5	128.4	8.29	138.9	75.2	20.41	68.06	599.96	90.42	34.03	1.11	8.75	0.5818	86.51	134.94	33.17
520	531.9	475.5	127.5	8.45	137.9	75.2	20.45	67.45	599.35	90.12	33.73	1.11	8.92	0.5818	86.35	134.66	33.03
530	531.9	475.5	127.5	8.62	137.9	75.2	20.49	67.32	599.22	90.05	33.66	1.12	9.10	0.5603	86.18	139.52	35.46
540	531.9	476.0	127.5	8.78	137.9	75.7	20.53	67.20	599.10	89.46	33.60	1.13	9.27	0.5603	86.02	139.24	35.32
550	531.9	476.1	127.5	8.95	137.9	75.8	20.57	67.07	598.97	89.28	33.53	1.13	9.44	0.5531	85.85	140.76	36.09
560	531.9	476.6	126.1	9.11	136.4	76.3	20.60	66.18	598.08	88.41	33.09	1.15	9.61	0.5531	85.69	140.46	35.94
570	531.9	476.6	125.7	9.28	136.0	76.3	20.64	65.86	597.76	88.25	32.93	1.16	9.79	0.5531	85.52	140.16	35.78
580	531.9	476.9	124.9	9.44	135.1	76.6	20.68	65.31	597.21	87.66	32.66	1.17	9.96	0.5603	85.36	138.07	34.72
590	531.9	476.9	124.5	9.61	134.7	76.6	20.72	64.97	596.87	87.49	32.49	1.18	10.14	0.5531	85.19	139.56	35.48
600	531.9	477.0	124.0	9.77	134.1	76.7	20.76	64.59	596.49	87.20	32.30	1.19	10.31	0.5531	85.03	139.27	35.33
610	531.9	477.0	123.8	9.94	133.9	76.7	20.81	64.36	596.26	87.08	32.18	1.19	10.49	0.5531	84.86	138.96	35.18

ตารางที่ ก-8 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, $K=0.8$) ต่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Test duration min	Cell Pressure kPa	Back Pressure kPa	Axial Force N	Displacement mm	Axial Force ปรับแก้ N	excess ΔU kpa	A ปรับแก้ cm ²	$\sigma_1 - \sigma_3$ kpa	σ_1 kpa	P' kpa	q' kpa	A	% strain	p-wave (ms)	H (mm)	Vs (m/s)	Go (Mpa)
0.00	499.1	400.0	0.00	0.00	0.0	0.0	19.46	0.00	499.09	99.09	0.00	-	0.00	0.5643	91.62	148.18	39.66
10.00	499.4	406.2	20.50	0.04	22.2	6.2	19.47	11.39	510.74	98.83	5.69	0.55	0.05	0.5643	91.58	148.11	39.62
20.00	499.4	412.6	41.73	0.20	45.1	12.6	19.51	23.13	522.49	98.30	11.57	0.55	0.22	0.5643	91.42	147.83	39.47
30.00	499.4	415.5	47.17	0.37	51.0	15.5	19.54	26.10	525.46	96.95	13.05	0.59	0.40	0.5643	91.25	147.53	39.31
40.00	499.4	418.0	50.80	0.53	54.9	18.0	19.58	28.06	527.42	95.42	14.03	0.64	0.58	0.5643	91.09	147.25	39.16
50.00	499.4	420.1	52.61	0.71	56.9	20.1	19.62	29.01	528.36	93.76	14.50	0.69	0.77	0.5643	90.91	146.93	38.99
60.42	499.4	422.2	54.06	0.87	58.5	22.2	19.65	29.76	529.11	92.00	14.88	0.75	0.95	0.5643	90.75	146.65	38.84
70.00	499.4	423.8	54.42	1.04	58.9	23.8	19.69	29.90	529.25	90.47	14.95	0.80	1.14	0.5665	90.58	145.77	38.38
80.00	499.4	425.6	55.88	1.20	60.4	25.6	19.72	30.64	530.00	89.08	15.32	0.84	1.31	0.5665	90.42	145.48	38.23
90.00	499.4	427.0	56.24	1.37	60.8	27.0	19.76	30.78	530.14	87.71	15.39	0.88	1.50	0.5665	90.25	145.19	38.07
100.00	499.4	428.6	56.78	1.53	61.4	28.6	19.80	31.02	530.38	86.23	15.51	0.92	1.67	0.5665	90.09	144.90	37.92
110.00	499.4	430.0	58.05	1.70	62.8	30.0	19.83	31.66	531.01	85.21	15.83	0.95	1.86	0.5665	89.92	144.60	37.76
120.00	499.4	431.3	58.05	1.87	62.8	31.3	19.87	31.60	530.95	83.85	15.80	0.99	2.04	0.5665	89.75	144.31	37.61

ตารางที่ ก-9 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, K=0.6)

130.00	499.4	432.4	58.60	2.04	63.4	32.4	19.91	31.84	531.19	82.90	15.92	1.02	2.22	0.5665	89.58	144.01	37.46
140.00	499.4	433.4	58.96	2.20	63.8	33.4	19.94	31.97	531.33	81.90	15.99	1.05	2.41	0.5665	89.42	143.72	37.30
150.00	499.4	434.5	59.87	2.37	64.8	34.5	19.98	32.40	531.76	81.04	16.20	1.07	2.59	0.5665	89.25	143.42	37.15
160.00	499.4	435.6	59.87	2.54	64.8	35.6	20.02	32.34	531.70	79.95	16.17	1.10	2.77	0.5665	89.08	143.13	37.00
170.00	499.4	436.1	59.87	2.71	64.8	36.1	20.06	32.28	531.64	79.38	16.14	1.12	2.95	0.5665	88.91	142.83	36.85
180.00	499.4	436.9	59.87	2.87	64.8	36.9	20.09	32.22	531.58	78.55	16.11	1.15	3.14	0.5665	88.75	142.54	36.69
190.00	499.4	437.7	59.87	3.04	64.8	37.7	20.13	32.16	531.52	77.72	16.08	1.17	3.32	0.5665	88.58	142.24	36.54
200.00	499.4	438.2	59.87	3.04	64.8	38.2	20.13	32.16	531.52	77.24	16.08	1.19	3.32	0.5665	88.58	142.24	36.54
210.00	499.4	438.7	59.87	3.20	64.8	38.7	20.17	32.10	531.46	76.71	16.05	1.21	3.49	0.5665	88.42	141.96	36.40
220.00	499.4	439.2	59.87	3.37	64.8	39.2	20.21	32.04	531.40	76.18	16.02	1.22	3.68	0.5665	88.25	141.66	36.24
230.00	499.4	439.8	59.87	3.53	64.8	39.8	20.24	31.98	531.34	75.55	15.99	1.24	3.85	0.5665	88.09	141.38	36.10
240.00	499.4	440.2	59.87	3.70	64.8	40.2	20.28	31.92	531.28	75.12	15.96	1.26	4.04	0.5665	87.92	141.08	35.95
250.00	499.4	440.8	59.87	3.86	64.8	40.8	20.32	31.86	531.22	74.49	15.93	1.28	4.21	0.5665	87.76	140.79	35.80
260.00	499.4	441.3	59.87	4.03	64.8	41.3	20.36	31.80	531.16	73.96	15.90	1.30	4.40	0.5665	87.59	140.49	35.65
270.00	499.4	441.8	59.87	4.19	64.8	41.8	20.40	31.74	531.10	73.43	15.87	1.32	4.57	0.5665	87.43	140.21	35.51
280.00	499.4	442.2	59.87	4.36	64.8	42.2	20.44	31.68	531.04	73.00	15.84	1.33	4.76	0.5665	87.26	139.91	35.35

ตารางที่ ก-9 แสดงผลการทดสอบช่วงทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Anisotropic consolidation, K=0.6) ต่อ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษฎา กมลเกรียงไกร เกิดวันที่ 4 มกราคม 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี จบการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย