

คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



นาย พิพัฒน์ ทองฉิม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-868-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

19 ส.ย. 2545

I1923658X

**DYNAMICS PROPERTIES OF SOFT BANGKOK CLAY**



**MR. PIPAT THONGCHIM**

**สถาบันวิทยบริการ**  
**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

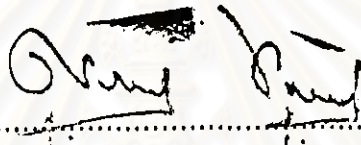
Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-331-868-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ : คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ  
โดย : นายพิพัฒน์ ทองฉิม  
ภาควิชา : วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ  
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



.....คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

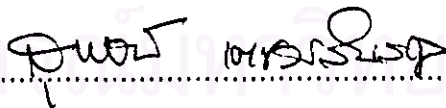
( ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



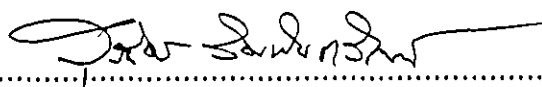
.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล จิวาลักษณ์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)



.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)

พิพัฒน์ ทองฉิม : คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (DYNAMICS PROPERTIES OF SOFT BANGKOK CLAY) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล , 191 หน้า, ISBN 974-331-868-2.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของ หน่วยแรงประสิทธิผล Prestraining และ ความถี่ ต่อค่า equivalent shear modulus และ damping ratio ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบ Cyclic Triaxial ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ได้มาจาก 3 แหล่งด้วยกันได้แก่ บริเวณสนามช้างหอประชุมใหญ่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล และหอสมุดกลางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หลังจากที่ตัวอย่างดินมีความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation degree) ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการคืนหน่วยแรงประสิทธิผล (Re-consolidation) ให้แก่ตัวอย่างดินก่อนที่จะทำการทดสอบแบบ cyclic triaxial ต่อไป ภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ โดยในแต่ละ load step นั้น จะทำการทดสอบจำนวน 15 รอบ เสร็จแล้วจึงเปิดวาล์วระบาย เพื่อลด Excess pore pressure ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดสอบให้หมดไป ก่อนที่จะเริ่มทำขั้นตอนใหม่โดยการเพิ่มขนาดของแรงสูงขึ้น

ผลการทดสอบพบว่าค่า equivalent shear modulus เริ่มต้นที่วัดได้จะอยู่ที่ค่า shear strain ประมาณ  $10^{-4}$  โดยค่า Shear modulus ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณมาจากการวัดความเร็วคลื่นแบบเฉือน (Shear wave velocity) ที่เคยมีการทดสอบในบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างดิน และน้อยกว่าค่าที่คำนวณโดยสูตรทั่วไปของดินเหนียวอ่อนประมาณ 20-30% เมื่อระดับของ Shear strain มีค่าสูงมากขึ้น ค่า equivalent shear modulus จะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ค่า damping ratio จะค่อยๆ มีค่าสูงขึ้นจนถึงประมาณ 20-26% ณ ระดับของ shear strain ที่ก่อให้เกิดการวิบัติของตัวอย่างดิน

การเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลมีผลทำให้ค่า equivalent shear modulus มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และทำให้อัตราการลดลงของ equivalent shear modulus มากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของหน่วยแรงประสิทธิผลต่อ ค่า viscous damping ratio นั้นมีน้อยมาก

การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของการทดสอบ (Rate of loading) โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 0.10 และ 1.0 Hz พบว่าค่าของ shear modulus แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามค่า Damping Ratio จะลดลงประมาณ 20 % เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 0.1 ถึง 1.0 Hz

ผลกระทบต่อคุณสมบัติของตัวอย่างดินเนื่องมาจากการทำ cyclic prestraining ที่ Single amplitude shear strain ประมาณ 0.2 % แบบไม่ระบายน้ำจำนวน 50 รอบ และ 100 รอบ ตามลำดับนั้น พบว่าค่าของ equivalent shear modulus จะเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย แต่เมื่อคิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของว่างแล้ว ผลกระทบดังกล่าวจะมีค่าลดลงเป็นอันมาก

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา .....  
ปีการศึกษา ..... 2541 .....

ลายมือชื่อนิสิตร ..... พิพัฒน์ ทองฉิม .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... สุพจน์ เตชวรสินสกุล .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 3971216621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: CYCLIC LOAD / SHEAR MODULUS / DAMPING RATIO / PRESTRAINING

PIPAT THONGCHIM : DYNAMICS PROPERTIES OF SOFT BANGKOK CLAY.

THESIS ADVISOR : SUPOT TEACHAVORASINSAKUN, D.Eng. 191 pp. ISBN 974-331-868-2.

The effects of effective confining stress, cyclic prestraining and rates of loading on the measured equivalent shear moduli and damping ratios of soft Bangkok clays were investigated using the cyclic triaxial apparatus. Three soils collected in the center of Bangkok were tested. After the samples were saturated and consolidated to have the prescribed values of isotropic stress. The cyclic load was applied under stress controlled and undrained conditions. The number of cycles for each stage of cyclic loading was 15. The excess pore water pressure building-up during each stage was allowed to dissipate before further application of the larger amplitude cyclic load. The initial shear moduli obtained at moderately small strain levels; i.e.,  $(\Delta\gamma)_{SA} \cong 10^{-4}$ , were reasonably similar to the values computed from the down-hole seismic tests carried out at the nearby sites. Nevertheless, the measured initial shear modulus was about 20-30% smaller than the shear modulus obtained from the empirical equations reported in the literature for soft clays. The viscous damping ratios was not significantly affected by the variation of the initial confining stress, while the damping at large strain level was larger when the initial confining stress increased.

The effect of rate of loading on the cyclic properties was also investigated. The frequencies adopted for the test were 0.1 and 1.0 Hz. It was found that their effect on the equivalent shear modulus was minor. However, decreasing of nearly 20% in overall damping ratio was observed when the frequencies increased from 0.1 to 1.0 Hz.

The 50 and 100 cycles of large amplitude cyclic pre-straining was applied to the sample under undrained condition. The applied cyclic pre-straining induced the single shear strain amplitude of about 0.2%. After the excess pore water pressure developed during the pre-straining process was fully dissipated, the equivalent shear modulus and damping ratio curves were again measured. It was found that the prestrained sample showed a little bit stiffer behavior than the virgin one. However, when the changes of the void ratio were taken into account, this became very small and could be neglected. The damping ratio seemed to be insensitive to the cyclic shear stress history. The above conclusion were also applicable for all loading rates employed in the study.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิสิต..... พิศิณห์ ทองฉิม.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ปุณศรี ทองฉิม.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร. สุพจน์ เดชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้ให้คำปรึกษาแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอดและขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล จิวาลักษณ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ ที่ได้กรุณาาร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ห้างหุ้นส่วน วิวัฒน์ จำกัด และ บริษัท STS จำกัด ที่เอื้อเฟื้อด้วยที่ดินสำหรับใช้ในการศึกษาทดสอบ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพี ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการแนะนำการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ รวมทั้งเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอรำลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดา ครู อาจารย์ ที่ได้อบรมและสั่งสอนให้ผู้เขียนสำเร็จการศึกษาจนถึงปัจจุบันนี้

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการเมธีวิจัยอาวุโส ศ.ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์

พิพัฒน์ ทองฉิม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ทฤษฎีและทบทวนงานในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การเคลื่อนตัวของมวลดิน.....	7
2.2 คำนิยามที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว.....	8
2.2.1 ขนาดของการเกิดแผ่นดินไหว.....	10
2.2.2 ลักษณะการเคลื่อนตัวของหินในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว.....	12
2.3 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่มีความถูกต้อง.....	13
2.3.1 แบบจำลองวิสคอสอิลาสติกเชิงเส้น.....	15
2.3.2 The General Express of Cyclic Stress-strain Relationship.....	15
2.3.3 Hysteretic Stress-strain Curve.....	18
2.3.4 แบบจำลองที่แทนระบบด้วยส Spring และ Dashpot.....	23
2.3.5 แบบจำลองของ Kelvin.....	24
2.3.6 แบบจำลองของ Maxwell.....	25
2.3.7 Non-Viscous type Kelvin model.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	วิธีการหาคุณสมบัติของดินทางด้านพลศาสตร์.....	31
2.4.1	การวัดค่าความเร็วคลื่นแบบเฉือนในสนาม.....	31
2.4.2	การหาในห้องปฏิบัติการ.....	34
2.4.2.1	Measurement using wave propagation.....	34
2.4.2.2	measurement using conventional equipmen.....	37
2.5	การคำนวณหาโดยใช้สูตร Empirical.....	37
3	วิธีการและขั้นตอนในการวิจัย.....	39
3.1	สถานที่และการเก็บตัวอย่างทดสอบ.....	39
3.1.1	สถานที่เก็บตัวอย่าง.....	39
3.1.2	วิธีการเจาะสำรวจและการเก็บตัวอย่าง.....	39
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเครื่องทดสอบหลัก.....	41
3.3	การหาคุณสมบัติของดินทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น....	44
3.4	วิธีการทดสอบ.....	44
3.5	ขั้นตอนการทดสอบ.....	45
3.5.1	การเตรียมตัวอย่าง.....	45
3.5.2	ติดตั้งตัวอย่างดินกับชุดเครื่องมือทดสอบ.....	45
3.5.3	ขั้นตอนทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว (Saturation).....	46
3.5.4	ขั้นตอน Consolidation.....	47
3.5.5	Apply Cyclic Load.....	47
3.5.6	นำตัวอย่างออกจาก Cell.....	48
3.6	รายการคำนวณ.....	51
3.6.1	คุณสมบัติของตัวอย่างก่อนทดสอบ.....	51
3.6.2	คุณสมบัติของตัวอย่างหลังการอัดน้ำคายตัว (Consolidation).....	52
3.6.3	Hysteresis Loop.....	52



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

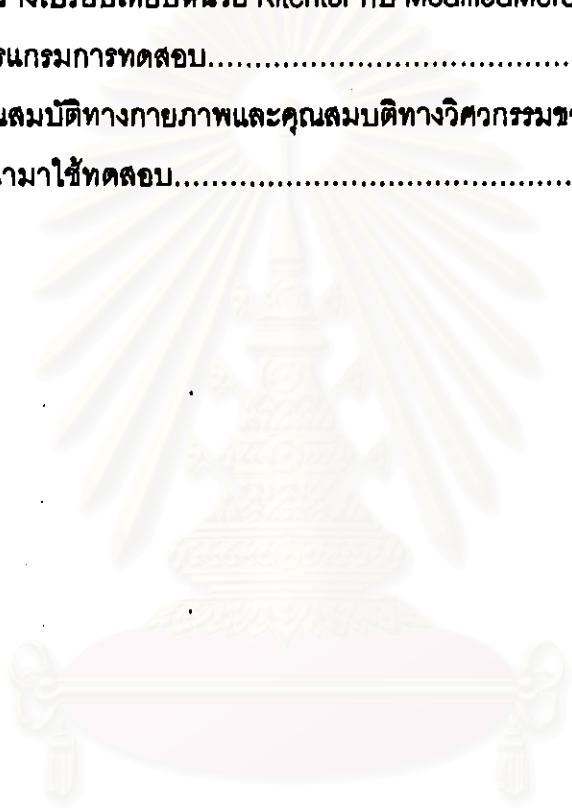
4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	55
4.1 บทนำ.....	55
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ..	55
4.3 ผลการทดสอบของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ค่าเริ่มต้นที่ตรวจวัดได้ อยู่ในช่วงระดับความเครียดเฉือนปานกลาง.....	57
4.4 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	65
4.5 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลต่อ Damping ratio.....	67
4.6 ผลของความถี่ต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	69
4.7 ผลของความถี่ต่อ Damping ratio .....	72
4.8 ผลของ Prestraining ต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	77
4.9 ผลของ Prestraining ต่อ Damping ratio .....	86
5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม.....	94
รายการเอกสารอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบ Cyclic triaxial.....	101
ผลการทดสอบของตัวอย่างดินเหนียว.....	102
ผลการทดสอบของตัวอย่างดินเกษตรศาสตร์.....	137
ผลการทดสอบของตัวอย่างดินจุฬาลงกรณ์.....	152
ภาคผนวก ข. ASTM D3999-91 .....	176
ประวัติผู้เขียน.....	191

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 การวัดขนาดของการเกิดแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 12 ระดับในหน่วยของ Modified Mercalli Scale.....	10
2.2 ตารางเปรียบเทียบหน่วย Richter กับ Modified Mercalli.....	11
3.1 โปรแกรมการทดสอบ.....	44
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินที่นำมาใช้ทดสอบ.....	56



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนที่แสดงตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ในประเทศไทย และประเทศข้างเคียงตั้งแต่ พ.ศ. 2543 จนถึงปัจจุบัน.....	2
รูปที่ 1.2 แผนที่แสดงระดับความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวและโซนเสี่ยงภัยตามเกณฑ์ของ UBC ตัวเลขกำกับเส้น Contour คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราเร่งสูงสุดในแนว ราบของแผ่นดินไหวต่ออัตราเร่งของสนามโน้มถ่วงโลก (g) ที่มีโอกาสเพียง 10% ที่จะมีค่าสูงสุดกว่าในคาบเวลา 50 ปี.....	3
รูปที่ 2.1 นิยามของจุดโฟกัสและอิพิเซนเตอร์; (a) รูปตัด และ (b) รูปแปลน.....	9
รูปที่ 2.2 ระยะทางประสิทธิผลจากรอยแตกถึงสถานที่อ้างอิง.....	9
รูปที่ 2.3 คาบที่เด่นชัดของอัตราเร่งสูงสุดของหิน.....	13
รูปที่ 2.4 อัตราเร่งสูงสุดกับขนาดของแผ่นดินไหวและระยะจากรอยแตกแล้ว.....	14
รูปที่ 2.5 Decomposition of the viscoelastic model into elastic and viscous component.....	21
รูปที่ 2.6 นิยามของ Loss coefficient .....	22
รูปที่ 2.7 แบบจำลอง Viscoelastic model.....	23
รูปที่ 2.8 Loss coefficient of two models as functions of frequency.....	28
รูปที่ 2.9 แบบจำลอง Non-viscous type Kelvin .....	30
รูปที่ 2.10 การทดสอบวิธี Down-hole.....	32
รูปที่ 2.11 การทดสอบวิธี Cross-hole.....	33
รูปที่ 2.12 วิธีการหา Damping ratio จากเครื่องทดสอบ Resonant-column.....	34
รูปที่ 2.13 Resonant column test apparatus.....	35
รูปที่ 2.14 Use of bender elements in the triaxial test apparatus.....	36
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังที่เก็บตัวอย่างดิน.....	40
รูปที่ 3.2 Triaxial Cell สำหรับใช้ทดสอบ.....	40
รูปที่ 3.3 Cyclic Triaxial Test System Layout.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4 Flowchart แสดงกระบวนการทดสอบ.....	49
รูปที่ 3.5 ลักษณะการ FAILURE ของตัวอย่างดิน.....	50
รูปที่ 3.6 Hysteresis Loop.....	54
รูปที่ 4.1 Hysteresis Loop โดยที่ (a) ความเครียดน้อยสุด และ (b) ความเครียด มากที่สุด ที่สามารถวัดได้.....	58
รูปที่ 4.2 แสดงผลของโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้มาด้วยวิธีแตกต่างกัน.....	60
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวัดความเร็วคลื่นแบบเฉือนด้วยวิธี Down-hole โดย Ashford et al., 1997.....	60
รูปที่ 4.4 แสดงผล Normalized shear modulus ของตัวอย่างดินชนิดล (a) 0.10 Hz. และ (b) 1.0 Hz.....	62
รูปที่ 4.5 แสดงผล Normalized shear modulus ของตัวอย่างดินเกษตรศาสตร์.....	64
รูปที่ 4.6 แสดงผล Normalized shear modulus ของตัวอย่างดินจุฬาลงกรณ์.....	64
รูปที่ 4.7 ผลของ Effective confining stress ต่อ Equivalent shear modulus ของดินชนิดล.....	66
รูปที่ 4.8 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลต่ออัตราส่วนแดมพ์พิง (a) 0.10 Hz. และ (b) 1.0 Hz.....	68
รูปที่ 4.9 ผลของความถี่ที่มีต่อ Equivalent shear modulus.....	70
รูปที่ 4.10 ผลของความถี่ที่มีต่อ Damping ratio.....	74
รูปที่ 4.11 ผลของ Prestraining ต่อ Equivalent shear modulus ของดินชนิดล ความถี่ 0.10 Hz.....	78
รูปที่ 4.12 ผลของ Prestraining ต่อ Equivalent shear modulus ของดินชนิดล ความถี่ 1.0 Hz.....	80

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 ผลของ Prestraining ต่อ Equivalent shear modulus ของดินเกษตรศาสตร์ ความถี่ 0.10 Hz.....	81
รูปที่ 4.14 ผลของ Prestraining ต่อ Equivalent shear modulus ของดินเกษตรศาสตร์ ความถี่ 1.0 Hz.....	82
รูปที่ 4.15 ผลของ Prestraining ต่อ Equivalent shear modulus ของดินจุฬาลงกรณ์ ความถี่ 0.10 Hz.....	83
รูปที่ 4.16 ผลของ Prestraining ต่อ Equivalent shear modulus ของดินจุฬาลงกรณ์ ความถี่ 1.0 Hz.....	84
รูปที่ 4.17 ผลของ Prestraining ต่อ Damping ratio ของดินมหิดล.....	89
รูปที่ 4.18 ผลของ Prestraining ต่อ Damping ratio ของดินเกษตรศาสตร์.....	90
รูปที่ 4.19 ผลของ Prestraining ต่อ Damping ratio ของดินจุฬาลงกรณ์.....	91

## สัญลักษณ์

$w$  = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial water content)

$LL$  = ชีดเหลว (Liquid limit)

$PL$  = ชีดพลาสติก (Plastic limit)

$PI$  = ดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity index)

$G_s$  = ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

$\gamma_t$  = หน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight)

$S_u$  = Undrained shear strength

$\sigma_{vm}$  = Maximum past pressure

$\sigma'_{3c}$  = Effective confining stress

$E$  = Young 's modulus

$G_{eq}$  = Equivalent shear modulus

$G_{max}$  = Maximum shear modulus

$H$  = Damping ratio

$\epsilon_{SA}$  = Single amplitude axial strain

$\epsilon_{DA}$  = Double amplitude axial strain

$\gamma_{SA}$  = Single amplitude shear strain

$\gamma_{DA}$  = Double amplitude shear strain

$\mu$  = Poison's ratio

$G_{eq} / G_{max}$  = Normalized shear modulus

$\Delta q$  = Deviator stress