

ผลกระทบของสภาวะหน่วยแรงต่อ โมดูลัสแรงเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพ

นาย ชติรักษ์ อัครกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3975-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF STRESS STATES ON SHEAR MODULUS OF BANGKOK CLAY

Mr. Thitirak Akkarakun

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2003

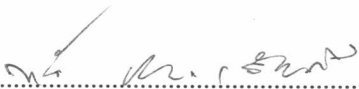
ISBN 974-17-3975-3

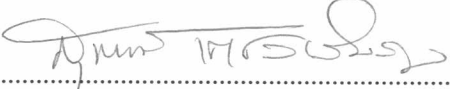
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของสภาวะหน่วยแรงต่อโมดูลัสแรงเสียดทานของดินเหนียว
กรุงเทพ
โดย นาย ชติรักษ์ อัครกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

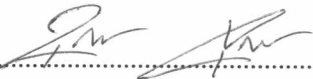
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี ชนะเจริญกิจ)


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. จีรวัตร บุญญะจี)

จิตรีภย์ อัครกุล : ผลกระทบของสภาวะหน่วยแรงต่อ โมดูลัสแรงเฉือนของดินเหนียว
กรุงเทพฯ. (EFFECT OF STRESS STATES ON SHEAR MODULUS OF BANGKOK
CLAY) อ.ที่ปริกษาพศ.ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 84 หน้า. ISBN 974-17-3975-3

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาค่าโมดูลัสแรงเฉือน(Shear Modulus) ด้วยเครื่องทดสอบแบบ
แรงอัดสามแกน(Conventional Triaxial Test) ที่ติดตั้งแผ่น Bender Element ไว้ที่ Top-Bottom Cap ซึ่งจะทำหน้าที่
เป็นตัวรับและตัวส่งสัญญาณตามลำดับ แผ่น Bender Element มีคุณสมบัติคือ เมื่อส่งผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปแผ่น
Bender Element ที่เป็นตัวส่งสัญญาณจะเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของ
อนุภาคของดินอย่างต่อเนื่องจากแหล่งกำเนิด(Propagation) คลื่นแรงเฉือนที่แพร่กระจายผ่านอนุภาคของดินจะ
เคลื่อนเข้าหาแผ่น Bender Element อีกแผ่นหนึ่งที่เป็นตัวรับสัญญาณจะเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นสัญญาณทาง
ไฟฟ้า โดยทำการตรวจวัดการมาถึงของคลื่นแรงเฉือนดังกล่าวด้วยเครื่อง Oscilloscope ทำให้สามารถคำนวณ
ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน(Shear Wave Velocity) ได้ และสามารถคำนวณหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนต่อไปได้

ขั้นตอนการทดสอบในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมตัวอย่างดินแบบแรงดันเท่ากันทุกทิศทาง(Isotropic) เป็น
2 สถานะด้วยกันคือ ดินอัดแน่นปกติ(Normally Consolidated Clay, NC Clay) และ ดินอัดแน่นเกินตัว(Over
Consolidated Clay, OC Clay) โดยแบ่งการทดสอบหาค่าโมดูลัสแรงเฉือน(Shear Modulus) เป็น 2 ช่วง คือ 1) การ
หาค่าโมดูลัสแรงเฉือนขณะกระบวนการอัดตัวคายนํ้า(Consolidation) สิ้นสุดลงแต่ละสภาวะ และ 2) การหาค่า
โมดูลัสแรงเฉือนขณะทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน(Shearing)

จากผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสแรงเฉือน(Shear Modulus) ในช่วงการทดสอบเมื่อกระบวนการอัดตัว
คายนํ้า(Consolidation) สิ้นสุดลงแต่ละสภาวะนั้น พบว่าแนวโน้มของค่าโมดูลัสแรงเฉือนเพิ่มขึ้น เมื่อหน่วยแรง
ประสิทธิผล(Effective Confining Pressure) เพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน(Shearing) พบว่า
สำหรับดินอัดแน่นปกติ(NC Clay) ค่าโมดูลัสแรงเฉือนไม่มีผลเนื่องจากหน่วยแรงรอง(Deviatoric Stress) ที่
เพิ่มขึ้น แต่เมื่อตัวอย่างดินเกิดการวิบัติ ค่าโมดูลัสแรงเฉือนจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงการอัดตัวคายนํ้า
สำหรับดินอัดแน่นเกินตัว(OC Clay) ค่าโมดูลัสแรงเฉือนจะมีผลเนื่องจากหน่วยแรงรองที่เพิ่มขึ้น โดยค่าโมดูลัส
แรงเฉือนมีค่าลดลง และแนวโน้มการลดลงจะเข้าสู่ช่วงการอัดตัวคายนํ้า

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

4470349021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : SHEAR MODULUS / BENDER ELEMENT / SMALL STRAIN / SHEAR WAVE

THITIRAK AKKARAKUN : EFFECT OF STRESS STATES ON SHEAR MODULUS OF BANGKOK CLAY. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. SUPOT TEACHAVORASINSKUN, D.Eng., 84 pp. ISBN 974-17-3975-3

The objective of the thesis is to study the shear modulus value by a conventional triaxial test which is installed a bender element at the top-bottom cap to act as a sensor and a actuator of the signal. The qualification of the bender element is when an electric current run into it, which is the actuator, the electric current will be changed from an electrical signal to a mechanical energy to create a propagation of the clay particle from the resource. Then, the shear wave that runs through the clay particle will move toward another bender element, which is the sensor, and it will be changed from the mechanical energy to the electrical signal. In addition, by checking time arrival of the shear wave with an oscilloscope machine, we can calculate the shear wave velocity and the shear modulus value.

The testing process of this thesis is to prepare the sample of an isotropic clay into 2 types; the normally consolidated clay (NC clay) and the overconsolidated clay (OC clay). Moreover, the process to test the shear modulus value can be divided into 2 stages. The first stage is to find out the modulus value when the consolidation finished in each condition. The second one is to find out the shear modulus value while testing a shearing.

The result of the shear modulus value in the stage when the consolidation finished in each condition reveals that the trend of the shear modulus value will be increased when the effective confining pressure increased. As for the stage which is the test of the shearing, it reveals that the shear modulus value did not have any effect on the normally consolidated clay due to the increasing of the deviatoric stress. However, comparing with the consolidation stage, the shear modulus value will be decreased when the sample failed. In addition, according to the overconsolidated clay, the shear modulus value will be decreased due to the increasing of deviatoric stress. Furthermore, in shearing stage the decreasing trend of the shear modulus value will bend into the consolidation stage.

Department..... Civil Engineering..... Student's signature..... *A. Thitirak*.....
Field of study..... Civil Engineering..... Advisor's signature..... *Dr. Supot Teachavorasinskun*.....
Academic year..... 2003.....

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “ผลกระทบของสภาวะหน่วยแรงต่อ โมดูลัสแรงเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพฯ” ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ฐานะเจริญกิจ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน และอาจารย์ ดร. จีรวัตร บุญญะฐิติ ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณธีรินทร์ อมรวิทย์รักษ์ นิสิตปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำในการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบจนแล้วเสร็จ และได้ให้คำปรึกษาต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดมา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนผู้เขียนจนได้สำเร็จการศึกษา

ธิตีร์กษ์ อัครกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กำเนิดและลักษณะชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....	7
2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil).....	9
2.2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ.....	9
2.2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดละเอียด.....	10
2.2.2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ.....	11
2.2.2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบ ในสนามแบบเวน (Field Vane Shear Test).....	15
2.2.2.3 กำลังรับแรงเฉือนของดินจากวิธี Empirical.....	16
2.3 มุมต้านทานแรงเฉือนของดิน.....	17
2.4 ค่าโมดูลัสของดิน (Soil Modulus).....	19
2.5 พฤติกรรม Stress-Strain ของดิน.....	20
2.6 ลักษณะพฤติกรรมของ โมดูลัสแบบเฉือน ที่ระดับ Strain ต่าง ๆ.....	21
2.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ โมดูลัสแบบเฉือน.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.8 วิธีการวัดค่า Modulus ในวิธีต่างๆ.....	24
2.8.1 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Large Strain Levels.....	25
2.8.2 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small Strain Levels.....	25
2.8.3 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Very Small Strain.....	37
2.9 การวัดค่า Modulus ในสนาม.....	40
บทที่ 3 วิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ.....	45
3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างดิน.....	45
3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน.....	45
3.1.2 วิธีเก็บตัวอย่างดิน.....	45
3.2 การทดสอบและโปรแกรมการทดสอบ.....	47
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
3.2.2 การติดตั้งแผ่น Bender Element ลงไปใน Top Cap และ Base ของเครื่องทดสอบ Triaxial.....	51
3.2.3 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน (Basic Properties Test).....	52
3.2.4 ขั้นตอนในการทดสอบ.....	52
3.2.4.1 การเตรียมตัวอย่างดิน.....	52
3.2.4.2 การเตรียมเครื่องมือทดสอบและจัดตัวอย่าง ในเครื่องมือทดสอบ.....	52
3.2.4.3 ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว(Saturation Stage).....	54
3.2.4.4 วิธีการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้น (Shear Wave Measurement).....	54
3.3 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำและการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้น (Consolidation & Shear Wave Measurement).....	55
3.4 การทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนของดินและการวัดค่าความเร็ว ของคลื่นความเค้น(Shearing & Shear Wave Measurement).....	56
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	58
4.1 บทนำ.....	58

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ.....	59
4.2.1 คุณสมบัติของตัวอย่างดินจากบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	59
4.2.2 คุณสมบัติของตัวอย่างดินจากบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ.....	59
4.3 ผลการทดสอบตัวอย่างดินจากบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	60
4.3.1 การหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนเมื่อ กระบวนการอัดตัวคายนํ้า(Consolidation) สิ้นสุดลงแต่ละสถานะ.....	61
4.3.1.1 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นปกติ(NC Clay).....	61
4.3.1.2 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นเกินตัว(OC Clay).....	61
4.3.2 การหาค่าโมดูลัสแรงเฉือน(Shear Modulus) ขณะทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน(Shearing).....	62
4.3.2.1 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นปกติ(NC Clay).....	62
4.3.2.2 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นเกินตัว(OC Clay).....	63
4.4 ผลการทดสอบตัวอย่างดินจากบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ.....	63
4.4.1 การหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนเมื่อ กระบวนการอัดตัวคายนํ้า(Consolidation) สิ้นสุดลงแต่ละสถานะ.....	64
4.4.1.1 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นปกติ(NC Clay).....	64
4.4.1.2 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นเกินตัว(OC Clay).....	64
4.4.2 การหาค่าโมดูลัสแรงเฉือน(Shear Modulus) ขณะทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน(Shearing).....	65
4.4.2.1 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นปกติ(NC Clay).....	65
4.4.2.2 สำหรับการทดสอบกับดินอัดแน่นเกินตัว(OC Clay).....	65
4.5 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสแรงเฉือนระหว่าง การเพิ่ม-ลดแรงกระทำ>Loading-Unloading) ขณะกระบวนการอัดตัวคายนํ้า(Consolidation).....	66
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 บทนำ.....	78
5.2 ค่าโมดูลัสแรงเฉือนระหว่างกระบวนการอัดตัวคายนํ้า.....	78

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.3 ค่าโมดูลัสแรงเฉือนในการเพิ่ม-ลดหน่วยแรงประสิทธิผล ระหว่างกระบวนการอัดตัวคาน้ำ.....	78
5.4 ค่าโมดูลัสแรงเฉือนระหว่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน.....	79
5.5 ข้อดี-ข้อเสียและข้อจำกัดในการหาค่าโมดูลัสแรงเฉือน ด้วย Bender Element.....	79
5.6 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนที่แสดงตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในคาบเวลา 80 ปี (พ.ศ.2453-2532)ในประเทศไทยและประเทศใกล้เคียง.....	2
รูปที่ 1.2 แผนที่แสดงความเสี่ยงภัยของแผ่นดินไหวและ โชนเสี่ยงภัยตามเกณฑ์ของ UBC ตัวเลขกำกับเส้น Contour คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราเร่งสูงสุด ในแนวราบของแผ่นดินไหวต่ออัตราเร่งของสนามโน้มถ่วงโลก(g) ที่มีโอกาสเพียง 10% ที่จะมีค่าสูงสุดในคาบเวลา 50 ปี.....	3
รูปที่ 2.1 รูปตัดแสดงชั้นดินบริเวณ ใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศเหนือไปทิศใต้(ว.ส.ท.,2520).....	8
รูปที่ 2.2 รูปตัดแสดงชั้นดินบริเวณ ใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก(ว.ส.ท.,2520).....	9
รูปที่ 2.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของทราย จากการทดสอบ Direct Shear.....	10
รูปที่ 2.4 หน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดินจากการทดสอบ Triaxial.....	11
รูปที่ 2.5 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CD ของ NC Clay.....	12
รูปที่ 2.6 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CU ของ NC Clay.....	13
รูปที่ 2.7 เส้นการวิบัติจากการทดสอบแบบ UU และ Unconfined Compression ของ NC Clay.....	14
รูปที่ 2.8 เส้นแสดงการวิบัติของ Mohr-Coulomb สำหรับ Overconsolidated Clay.....	14
รูปที่ 2.9 ตัวปรับแก้ μ ของ Bjerrum (1972) ที่ใช้กับการทดสอบแบบ FV.....	16
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ ϕ' ของดินเม็ดหยาบ (TPEC,1985).....	18
รูปที่ 2.11 ตัวปรับแก้ C_N สำหรับการหาค่า N_{cor} และ ϕ'	18
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า โมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับค่าดัชนีความเหลว และ OCR (Duncan and Buchigani,1976).....	20
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_u กับ G_i โดย Hara et al, 1973.....	21
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_p กับ G_u^{50}/C_u โดย Termatt, Vermeer และ Verger, 1985.....	21
รูปที่ 2.15 แสดงค่าของ G ในช่วง Strain ต่าง ๆ.....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.16 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสมในการทดสอบวิธีต่าง ๆ.....	22
รูปที่ 2.17 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นความเค้นมากระทำ.....	25
รูปที่ 2.18 Longitudinal Elastic Wave in a Bar.....	26
รูปที่ 2.19 Torsional Waves in a Bar.....	29
รูปที่ 2.20 Resonant Column Test Apparatus Hardin & Richart, 1963 (a.) For Torsional Vibration (b.) For Longitudinal Vibration.....	31
รูปที่ 2.21 Resonant Column Test Apparatus (Drnevich, 1967).....	32
รูปที่ 2.22 Cyclic Simple Shear Test.....	34
รูปที่ 2.23 การคำนวณหาโมดูลัสแบบเนียนและ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop.....	34
รูปที่ 2.24 Cyclic Triaxial Test.....	35
รูปที่ 2.25 การคำนวณหา Young's Modulus และ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop.....	36
รูปที่ 2.26 แสดงการต่อวงจรตัวกำเนิดสัญญาณ (X-pole).....	37
รูปที่ 2.27 แสดงการต่อวงจรตัวรับสัญญาณ(Y-pole).....	37
รูปที่ 2.28 แสดงวิธีการเคลือบ Bender Element ด้วย Epoxy.....	37
รูปที่ 2.29 แสดงวิธีการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender Element.....	38
รูปที่ 2.30 Seismic Refraction Survey.....	41
รูปที่ 2.31 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear Modulus ด้วยวิธี Cross-Hole Test.....	42
รูปที่ 2.32 แสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่น เมื่อชั้นดินด้านล่างมีความแข็งกว่าชั้นบน.....	43
รูปที่ 2.33 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear Modulus ด้วยวิธี Down-Hole Test.....	44
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างด้วยวิธี Fixed Piston Sampling.....	47
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบหาความเร็วของคลื่น ความเค้นด้วยวิธี Bender Element ในเครื่องทดสอบ Triaxial Test.....	49
รูปที่ 3.3 ลักษณะของ Bender Element ที่ติดตั้งใน Top-Base Cap ของเครื่อง Triaxial.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะเมื่อตัวอย่างดินถูกติดตั้งใน เครื่องทดสอบ Triaxial เรียบร้อยแล้ว.....	50
รูปที่ 3.5 แสดงการติดตั้งแผ่น Bender Element กับ Top-Base Cap.....	51
รูปที่ 3.6 แสดงผลต่างของเวลาที่ตัวส่งสัญญาณมาถึงกับตัวรับสัญญาณมาถึง จะเป็นเวลาที่คลื่นความเค้น (Time Arrival) และ ลักษณะทิศทางตรงกันข้ามกัน(Polarize).....	55
รูปที่ 3.7 Flow Chart แสดงขั้นตอนการทดสอบ โดยสังเขป.....	57
รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น NC Clay($\sigma'_c = 300$ kPa) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	67
รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น NC Clay($\sigma'_c = 180$ kPa) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	68
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น OC Clay(OCR = 2) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	69
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น OC Clay(OCR = 3.5) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	70
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	71
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น NC Clay($\sigma'_c = 300$ kPa) จากสนามบินสุวรรณภูมิ.....	72
รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น NC Clay($\sigma'_c = 180$ kPa) จากสนามบินสุวรรณภูมิ.....	73
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น OC Clay(OCR = 2) จากสนามบินสุวรรณภูมิ.....	74
รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินที่เป็น OC Clay(OCR = 3) จากสนามบินสุวรรณภูมิ.....	75
รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างดินจากสนามบินสุวรรณภูมิ.....	76
รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสระหว่างการเพิ่ม-ลดแรงกระทำ.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของดินและวิธีการหาคุณสมบัติที่ Strain ต่าง ๆ.....	24
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดิน ที่นำมาทดสอบ.....	60
ตารางที่ 5.1 ข้อดี-ข้อเสียของการหาค่าโมดูลัสแรงเฉือนด้วย Bender Element.....	80