

ผลกระทบของแอนไอโซโทรปีเนื่องจากโครงสร้างและหน่วยแรงต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนของทราย



นายวลาวัต บินอุมาร์

สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2438-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF STRUCTURE AND STRESS INDUCED ANISOTROPY ON SHEAR MODULUS
OF SAND

Mr.Walawat Bin-uma



สถาบันวิทยบริการ

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

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2438-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของแอนไอโซโทรปีเนื่องจากโครงสร้างและ
หน่วยแรงต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนของทราย

โดย

นายวลาวัต บินอุมาร์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

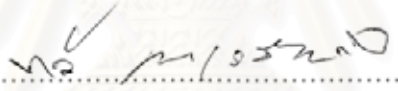
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับ
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวันยศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธนะเจริญกิจ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัด บุญยะฐี)

วลาวัต บินอุมาร์ : ผลกระทบของแอนไอโซโทรปีเนื่องจากโครงสร้างและหน่วยแรงต่อ
ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของทราย. (EFFECT OF STRUCTURE AND STRESS
INDUCED ANISOTROPY ON SHEAR MODULUS OF SAND) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร.
สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 68 หน้า.ISBN 974-53-2438-8

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวัดคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างทรายที่ทดสอบในเครื่องมือ
อัดตัวคายนํ้ารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยทำการวัดความเร็วคลื่นใน 2 ทิศทาง คือ แนวยราบกับแนวตั้ง
การเตรียมตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนระนาบการวางของตัวอย่าง คือวางทำมุม 0 องศา, 30 องศา,
45 องศา, 60 องศา ตามลำดับ ซึ่งทำให้ระนาบที่ตัว Bender element ฝังอยู่เปลี่ยนมุมตามไป
ด้วย โดยทำการเตรียมตัวอย่าง 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 เตรียมตัวอย่างแบบปล้อยอิสระ (pluviation) และ
วิธีที่ 2 เตรียมตัวอย่างแบบบดอัด (Compaction)

จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของค่าโมดูลัสแบบเฉือน ในวิธี pluviation ความเร็ว
คลื่นความเค้นในแนวตั้งจะเร็วกว่าที่วัดได้ในแนวยราบ และค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) มี
ค่ามากกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวยราบ (G_{hh}) โดยค่า G_{vh} มีค่าสูงกว่าประมาณ 10-30%
และค่าโมดูลัสแบบเฉือน ในระนาบ 0 องศา, 30 องศา, 45 องศา และ 60 องศา มีค่าที่ใกล้เคียงกัน
ในทรายสภาพหลวม ส่วนทรายในสภาพแน่นค่าโมดูลัสแบบเฉือนระนาบ 45 องศา จะมีค่าสูงกว่า
ระนาบ 0 องศา, 30 องศา และ 60 องศา ในวิธี compaction ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh})
มีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวยราบ (G_{hh}) เช่นเดียวกัน โดยค่า (G_{vh}) มีค่าสูงกว่า
ประมาณ 10-50% โดยประมาณ ระนาบ 30 องศา และ 45 องศา จะมีค่าต่ำกว่าระนาบ 0 องศา
และ 60 องศา ซึ่งความแตกต่างของค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้ เป็นผลเนื่องจากโครงสร้างภายใน
ของทรายตามธรรมชาติ (inherent anisotropy)

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4570523021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD : SHEAR MODULUS / BENDER ELEMENT / STRESS ANALYSIS

WALAWAT BIN-UMA : THESIS TITLE. EFFECT OF STRUCTURE AND STRESS INDUCED ANISOTROPY ON SHEAR MODULUS OF SAND. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SUPOT TEACHAVORASINSKUN, D.Eng., 68 pp.ISBN 974-53-2438-8

The purpose of this research is to investigate the influences of sample preparation and bedding plane orientation on shear wave velocity of sand. Test were conducted using the square oedometer. The shear wave velocity were propagated in horizontal and vertical direction. Samples were prepared using the air pluviation and dry compaction with their bedding planes were 0, 30, 45 and 60 degrees to the horizontal direction.

From the result of the test it was found that the vertically logged shear modulus measured from pluviated sample is higher than in the horizontal one by approximately 10-30%. In loose pluviated sand the shear modulus from inclined sample are similar. However, the 45 degree inclined sample provided the higher shear modulus. The compacted sand, the vertical shear modulus (G_{vh}) is higher than the horizontal shear modulus (G_{hh}) by approximately 10-50%. It was found that samples having bedding plane of 30 degree and 45 degree have the lower the shear modulus. The difference of the shear modulus is the result of the inherent anisotropy.

Department..... Civil Engineering Student's signature..... *Walawat Bin-uma*
 Field of study..... Civil Engineering Adviser's signature..... *Supot T.*
 Academic year..... 2005

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “ผลกระทบของแอนไอโซโทรปีเนื่องจากโครงสร้างและหน่วย
แรงต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนของทราย” ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์
เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำทุกสิ่งทุกอย่างในการทำวิจัยมา
ด้วยดีตลอดและขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ฐานะเจริญกิจ ประธาน
คณะกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร
บุญญะฐิี คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ และอาจารย์สาขา
วิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนในขณะที่เรียนอยู่สาขาวิศวกรรมปฐพี

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ได้กรุณา
อบรมสั่งสอนผู้เขียนจนได้สำเร็จการศึกษา

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 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎี.....	3
2.2 ลักษณะพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือนที่ค่า strain level ต่างๆ.....	3
2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	4
2.4 ผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในดินประเภท Cohesionless soil.....	5
2.5 วิธีการวัดค่า modulus ที่ very small strain level	7
2.6 การวัดค่า Modulus ในสนาม	13
บทที่ 3 วิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ.....	18
3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างทดสอบ.....	18
3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง.....	18
3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง.....	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์หลักสำหรับการทดสอบงานวิจัย	18
3.3 การหาคุณสมบัติของดินทางด้านกายภาพ	22
3.3.1 การหาขนาดเม็ดดินโดยใช้ตะแกรง (Sieve Analysis)	22
3.3.2 การหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density).....	22

3.3.3 การทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด	22
3.3.4 ความถ่วงจำเพาะ.....	22
3.4 วิธีการทดสอบ.....	22
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	23
3.5.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ	23
3.5.2 ขั้นตอนการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน	30
3.6 การวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน.....	30
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	33
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบ.....	33
4.2 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....	35
4.2.1 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างวิธีที่ 1.....	35
4.2.2 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างวิธีที่ 2.....	41
4.3 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในช่วง loading และ unloading	43
4.4 ผลของโมดูลัสแบบเฉือนที่วัดได้จากแนวราบและแนวตั้ง จากการเปลี่ยนมุม.....	32
ระนาบของการตัวอย่างทดสอบ	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
รายการอ้างอิง.....	66
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	68

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้.....	34
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test).....	35



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงค่าของ G ในช่วงstrain ต่างๆ	3
รูปที่ 2.2 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสมในการทดสอบวิธีต่าง ๆ	3
รูปที่ 2.3 ผลกระทบของหน่วยแรงประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนโดย Kokusho 1980	6
รูปที่ 2.4 แสดงการต่อวงจรตัวรับสัญญาณ (X-pole)	8
รูปที่ 2.5 แสดงการต่อวงจรตัวส่งสัญญาณ (Y-pole)	8
รูปที่ 2.6 แสดงวิธีการเคลือบepoxy	8
รูปที่ 2.7 วิธีการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender element	8
รูปที่ 2.8 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test Thoman, T.G. & Hryciw, R.D., 1990	10
รูปที่ 2.9 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test , Zeng.X & Ni. B, 1998	11
รูปที่ 2.10 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test , Zeng.X & Ni. B, 1998	11
รูปที่ 2.11 ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จาก bender element test Fioravante. V & Capoferri. R, 2001	12
รูปที่ 2.12 ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จาก bender element test Fioravante. V & Capoferri. R, 2001	12
รูปที่ 2.13 Seismic refraction survey	14
รูปที่ 2.14 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear modulus ด้วยวิธี Cross-hole test	15
รูปที่ 2.15 แสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่นเมื่อชั้นดินด้านล่างมีความแข็งกว่าชั้นบน	16
รูปที่ 2.16 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear modulus ด้วยวิธี Down-hole test.....	17
รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบที่ทำขึ้นใหม่.....	19
รูปที่ 3.2 bender element ที่ใช้ในการทดสอบ	19
รูปที่ 3.3 ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบหาความเร็วของคลื่นความเค้นด้วยbender element	20
รูปที่ 3.4 ผังการติดตั้งเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบหาความเร็วของคลื่นความเค้นด้วย bender element	21
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบ	23
รูปที่ 3.6 ขนาดของกล่องตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ	24
รูปที่ 3.7 วิธีการเตรียมตัวอย่างในวิธีที่ 1	25
รูปที่ 3.8 วิธีการเตรียมตัวอย่างในวิธีที่ 1 (ปรับระนาบมุม)	25
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่าง (วิธีที่ 1)	26

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้ว	27
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างที่ติดตั้งใน loading frame พร้อมทดสอบ	27
รูปที่ 3.12 เครื่องมือที่ใช้ในการบดอัดทราย	28
รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมตัวอย่างในวิธีที่ 2	29
รูปที่ 3.14 การบดอัดตัวอย่างทรายในกล่องตัวอย่าง	29
รูปที่ 3.15 การติดตั้งแผ่น bender element ในการทดลอง	31
รูปที่ 3.16 การวัดความเร็วคลื่นความเค้นด้วย bender element	32
รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบการหาขนาดคลื่นของทรายตัวอย่าง	33
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับค่าปริมาณ ความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างทรายแม่น้ำปิง	34
รูปที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 0 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)	36
รูปที่ 4.4 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 30 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$) ...	36
รูปที่ 4.5 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 45 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$) ...	37
รูปที่ 4.6 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 60 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$) ..	37
รูปที่ 4.7 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 0 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$)	38
รูปที่ 4.8 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 30 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$)	39
รูปที่ 4.9 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 45 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$)	39
รูปที่ 4.10 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 60 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$)	40
รูปที่ 4.11 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการ เตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 0 องศา) ตัวอย่าง Compaction	41

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.26 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2(Compaction) ตัวอย่างวางทำมุม 60 องศา	57
รูปที่ 4.27 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)	58
รูปที่ 4.28 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 80\%$).....	59
รูปที่ 4.29 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2 ตัวอย่างบดอัด (Compaction).....	60
รูปที่ 4.30 สัดส่วนค่า G_{vh}/G_{hh} กับ vertical effective stress ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)	61
รูปที่ 4.31 สัดส่วนค่า G_{vh}/G_{hh} กับ vertical effective stress ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างสภาพแน่น ($D_r = 80\%$).....	61
รูปที่ 4.32 สัดส่วนค่า G_{vh}/G_{hh} กับ vertical effective stress ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2 ตัวอย่าง Compaction	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วง 2 ปีที่ผ่านมา ได้เกิดแผ่นดินไหวมีขนาดปานกลางบริเวณประเทศในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ขึ้นบ่อยครั้ง เช่น แผ่นดินไหวที่เกาะสุมาตรา หรือ แผ่นดินไหวที่ประเทศพม่า เมื่อไม่นานมานี้ ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะไม่อยู่ในเขตที่เกิดแผ่นดินไหวรุนแรง เหมือนเช่นในประเทศญี่ปุ่น หรือ สหรัฐอเมริกาก็ตาม แต่ข้อมูลคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic) ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินในประเทศไทยค่อนข้างจะมีน้อยมาก จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ เพื่อนำไปใช้ในการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินในสภาวะที่เกิดแผ่นดินไหว จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของดินทรายในภาคเหนือขึ้น เพราะเป็นเขตที่มีความเสี่ยงภัยเนื่องจากแผ่นดินไหวมากกว่าภาคอื่นๆในประเทศไทย คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินทรายที่ทำการศึกษากันได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสแบบเฉือน อัตราส่วนแอมป์ฟิง และ liquefaction potential เป็นต้น

การศึกษาในครั้งนี้จะใช้ตัวอย่างทราย บริเวณริมแม่น้ำปิง จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้เครื่องทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นมาทำการวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน ภายใต้สภาพความแน่นต่าง ๆ กัน เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Shear modulus) และนำผลการตรวจสอบกับข้อมูลที่มีการทดสอบแล้วต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จุดประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของทราย บริเวณริมแม่น้ำปิง จังหวัดเชียงใหม่ ที่ Very Small strain โดยวิธีการแพร่กระจายของคลื่นด้วย Bender element ในเครื่องมือทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นมา โดยทำการวัดความเร็วคลื่นใน 2 ทิศทาง คือในแนวตั้งและแนวราบ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีอยู่ โดยแบ่งได้ดังนี้

1. ศึกษาผลกระทบของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ_v') ที่มีต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า Shear modulus ที่สภาวะความแน่นต่าง ๆ กัน

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า Shear modulus เมื่อทำการวัดใน 2 ทิศทาง คือ ในแนวตั้งและแนวราบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของทราย บริเวณริมแม่น้ำปิง จังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นมาที่ติดตั้ง Bender element โดยการทดสอบจะทำในตัวอย่างที่สภาพความแน่นต่างๆกัน และจะทำการหาค่าโมดูลัสในระหว่างที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

- 1 ผลที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลไปใช้ประกอบในการออกแบบทางด้านพลศาสตร์(Soil dynamic) เช่น ฐานรากของเครื่องจักร(Machine foundation) ทั้งแบบฐานรากตื้น(Shallow foundation) และแบบฐานรากลึก(Deep foundation)
- 2 เป็นการเตรียมการทางด้านข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางพลศาสตร์(Soil dynamic) ของดินทรายในภาคเหนือของประเทศไทย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประมาณการเคลื่อนตัวของดินในขณะเกิดแผ่นดินไหวและเพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว
- 3 ทำให้เกิดความสนใจและเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะงานทางด้านคุณสมบัติทางพลศาสตร์(Soil dynamic) ในประเทศไทยมากขึ้นและเป็นแนวทางการศึกษาและการนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอนาคต

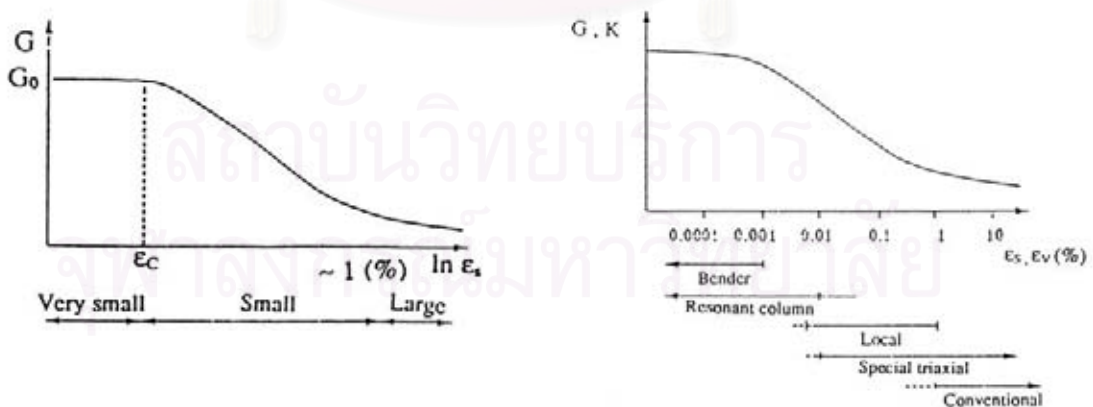
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

ค่าโมดูลัสแบบเฉือนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและใช้มากในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี โดยเฉพาะปัญหาทางด้านพลศาสตร์ (Soil dynamics) ซึ่งสามารถหาได้หลายวิธี เช่นวิธี Conventional routine test (การทดสอบกำลังของดินทั่วไป) เช่น Unconfined compression test, Triaxial test สำหรับหาที่ Large strain การวัดความเร็วของคลื่นที่วิ่งผ่านดิน (Wave propagation techniques) สำหรับหาที่ small strain, Bender element สำหรับหาที่ very small strain และวิธีหาค่า Stiffness modulus ในสนาม หรือทำการหาค่า Stiffness modulus โดยใช้สมการอิมไพร์กัล

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 2.1 และ 2.2 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายพฤติกรรมของ Stress-Strain ในดินได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงค่าของ G ในช่วง strain ต่างๆ

รูปที่ 2.2 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสม
ในการทดสอบวิธีต่าง ๆ

2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ โมดูลัสแบบเฉือน

พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน กับ Young's modulus นี้มักจะมีแนวโน้มที่เหมือนกันเกือบทั้งหมด แต่ก็จะมีแตกต่างกันบ้างในบางตัว Hardin & Black, 1968 ซึ่งให้เห็นถึงพารามิเตอร์สำคัญๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในรูปแบบของฟังก์ชันดังนี้

$$G = f(\sigma_0', e, C, A, H, t, S, \tau_0, f, \theta, T) \quad 2.1$$

เมื่อ

σ_0'	=	หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective octahedral normal stress)
e	=	Void ratio
C	=	ลักษณะจำเพาะของเม็ดดิน, รูปร่าง, ขนาดคละ,
A	=	ขนาดของ Strain
H	=	ประวัติของหน่วยแรง (Stress history) และ ประวัติของการรับแรงสั่นสะเทือน (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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในดินประเภท Cohesionless soil

การทดลองหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ Small strain ของดินประเภท Cohesionless soil จากห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการทดลองหลายประเภทพบว่า ในการทดลองหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนภายใต้สภาพหน่วยแรงดันประสิทธิผลที่แตกต่างกัน (Effective confining pressure) ค่า Void ratio (e) จะมีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนมากที่สุด Hardin & Richart (1963) เสนอผลกระทบของ Void ratio อยู่ในรูปฟังก์ชัน $F(e)$ ซึ่งมีลักษณะของสมการดังนี้

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \quad \text{หรือ} \quad F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \quad 2.2$$

ฟังก์ชัน $F(e)$ ในสมการที่ 2.2 ฟังก์ชัน $F(e)$ ตัวแรกโดยทั่วไปมักใช้กับดินประเภททรายเกลี้ยงที่ค่า Void ratio อยู่ประมาณ 0.5 – 1.2 ส่วนดินทรายที่มีค่า Void ratio มากกว่านั้นหรือสูงกว่าจะใช้ฟังก์ชัน $F(e)$ ในสมการที่ 2 แทน

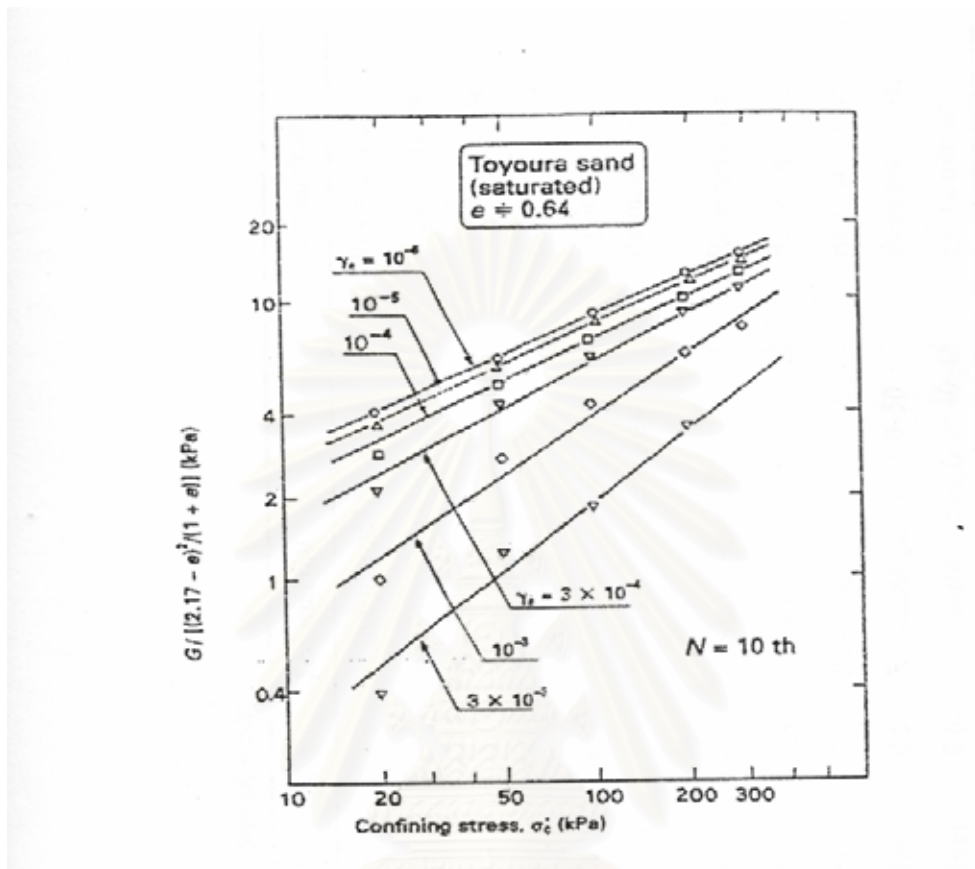
การอธิบายพฤติกรรมของค่าโมดูลัสแบบเฉือนด้วยฟังก์ชัน $F(e)$ ที่สภาพหน่วยแรงประสิทธิผลต่างๆ ได้รับการยอมรับอย่างมากและมีการทดลองสนับสนุนฟังก์ชัน $F(e)$ ของ Hardin & Richart, 1963 มากมายดังเช่นผลการทดลองของ Kokusho, 1980 ที่ได้ทำการทดลองหาค่าโมดูลัสแบบเฉือน (G_0) ของดินทรายที่ Toyoura ด้วยเครื่องทดสอบ Cyclic test คุณสมบัติของตัวอย่างเป็นดินทรายอิมตัวมีค่า Poisson's ratio $\nu = 0.5$ และเมื่อนำมาพล็อตกราฟ log – log scale ในความสัมพันธ์ของ $G/F(e)$ กับหน่วยแรงประสิทธิผล (σ'_0) พบว่าลักษณะของค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่อค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเพิ่มขึ้นสนับสนุนกับ $F(e)$ ที่ Hardin & Richart, 1963 ได้เสนอไว้ โดยความสัมพันธ์ของโมดูลัสแบบเฉือนกับหน่วยแรงประสิทธิผลสามารถหาความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการอิมไพริกัลดังนี้

$$G_0 = AF(e)(G'_0)^n \quad 2.3$$

G_0 = ค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Initial shear modulus) (KPa)

G'_0 = หน่วยแรงประสิทธิผลที่กระทำต่อดิน (KPa)

A, n = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับ Strain level และชนิดของดิน



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของหน่วยแรงประสิทธิผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนโดย Kokusho 1980

ในการทดลองดังกล่าว Kokusho, 1980 สามารถหาความสัมพันธ์ของโมดูลัสแบบเฉือนกับหน่วยแรงประสิทธิผลของดินทรายที่ Toyoura ที่ Small shear strain ($\gamma = 10^{-5}$) ได้เท่ากับ

$$G_0 = 8400 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} (G'_0)^{0.5} \text{ (KPa)} \quad 2.4$$

Hardin และ Blandford (1989) ได้ปรับปรุงสูตรสมการหาค่า G_{max} โดยพิจารณาทิศทางของ Stress และทิศทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคของดิน ได้สมการอิมไพริกัล ดังนี้

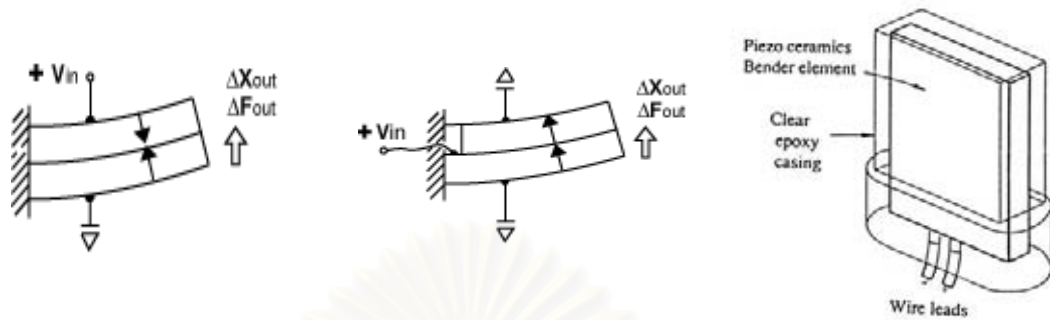
$$G_{\max} = \frac{S}{F(e)} \frac{P_a^{1-n}}{2(1+V)} (G_v' \cdot G_h')^{n/2} \quad 2.5$$

โดย

- S = dimensionless elastic stiffness coefficient
 F(e) = $0.3 + 0.7 e^2$, e = void ratio
 Pa = atmospheric pressure
 v = elastic poisson's ratio
 n = elastic constant
 G_v' = vertical effective stress, and
 G_h' = horizontal effective stress

2.5 วิธีการวัดค่า modulus ที่ very small strain

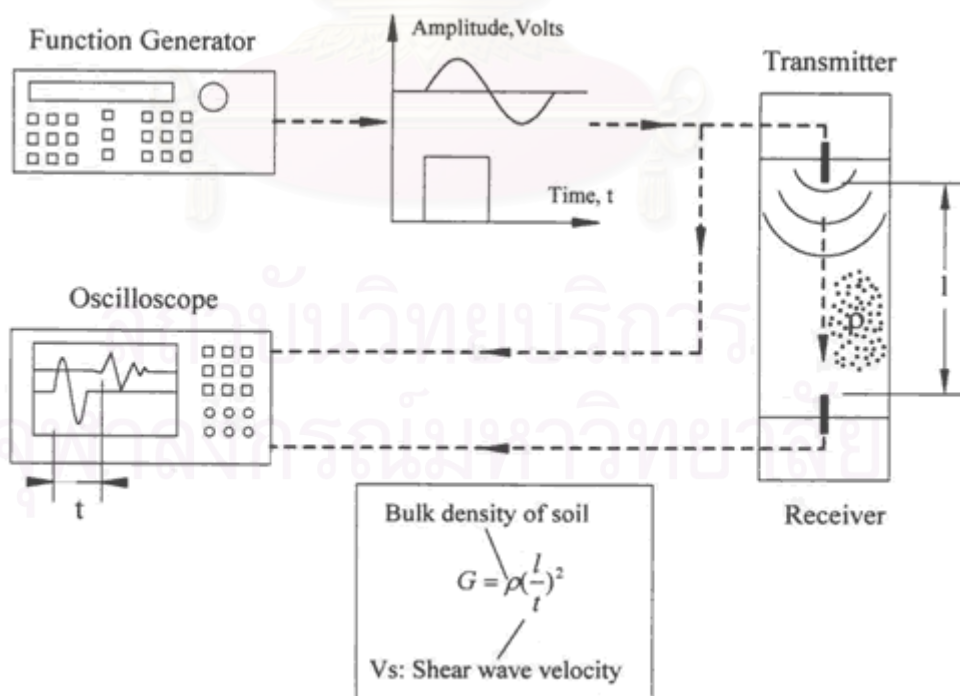
วิธีที่ใช้วัดหาค่า shear modulus ที่ very small strain จะใช้วิธี bender element ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณ electro-mechanical โดยจะแปลงพลังงานกล (การสั่นไหว) เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือในทางกลับกัน จะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล bender element จะเป็นแผ่น piezo-ceramic สองแผ่นประกบติดกัน จะสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ โดยที่การใช้จะแตกต่างกัน ในการต่อวงจรไฟฟ้างดรูปที่ 2.6 จะต่ออนุกรมเมื่อใช้เป็นตัวรับสัญญาณ และรูปที่ 2.7 จะต่อแบบขนานเมื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณเหตุที่ต้องต่อวงจรแตกต่างกันเพื่อที่จะใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละด้านนั่นเอง ในการใช้ bender element เนื่องจากเป็นวัสดุที่ต้านทานกระแสไฟฟ้าเพราะฉะนั้นจะต้องระวังเรื่องการลัดวงจร จึงจำเป็นต้องมีฉนวนกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเนื่องจากความชื้น โดยจะใช้ epoxy เคลือบรอบตัว bender element ดังรูปที่ 2.8 การทดสอบโดยวิธี bender element จะใช้ function generator เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ และ Oscilloscope ในการวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.9 จะแสดงถึงวิธีการต่อวงจรของ bender element



รูปที่ 2.4 แสดงการต่อวงจร
ตัวรับสัญญาณ (X-pole)

รูปที่ 2.5 แสดงการต่อวงจร
ตัวส่งสัญญาณ (Y-pole)

รูปที่ 2.6 แสดงวิธีการ
เคลือบ epoxy



รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender element

การวัดค่า Modulus โดยใช้ Bender element

การหาค่าโมดูลัส ด้วยวิธี bender element เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่น ซึ่งกระทำได้โดยการเสียบแผ่น bender element ที่เป็นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณลงไปในตัวอย่างดิน ในทางตรงกันข้ามและทิศทางขนานกันดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเราสามารถหาความเร็วของคลื่นความเค้น S-wave ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$v_s = \frac{L}{t} \quad 2.6$$

v_s	=	Shear wave velocity
L	=	ระยะทางระหว่างปลายทั้งสองข้างของ bender element
t	=	เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง (Time arrival)

Dyvik & Madshus, 1985 พบว่าระยะทาง “L” ควรวัดจากปลายทั้งสองข้างระหว่าง Bender element (Tip to tip) และเนื่องจากเวลาที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ($t \approx 10^{-6}$ - 10^{-12} วินาที) ควรจะใช้ Oscilloscope ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้เกิดการผิดพลาดเนื่องจากการวัดเวลาน้อยที่สุด

ค่า modulus ของดินจะหาได้จากสมการ

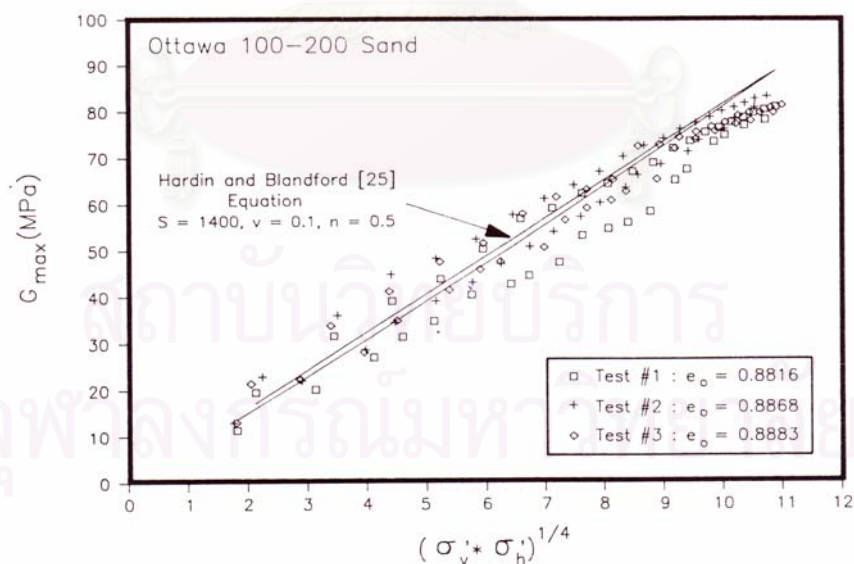
$$G = \rho v_s^2 \quad 2.7$$

G	=	ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดิน
ρ	=	ความหนาแน่นของดิน

Thomann, T. G. & Hryciw, R. D., 1990 ได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือ Oedometer ติดแผ่น bender element เพื่อวัดค่า shear modulus ในแนวตั้ง และวัดแรงดันด้านข้าง ปรากฏว่าค่า shear modulus ที่วัดได้สอดคล้องกับ สมการ Hardin และ Blandford (1989) ที่เสนอไว้

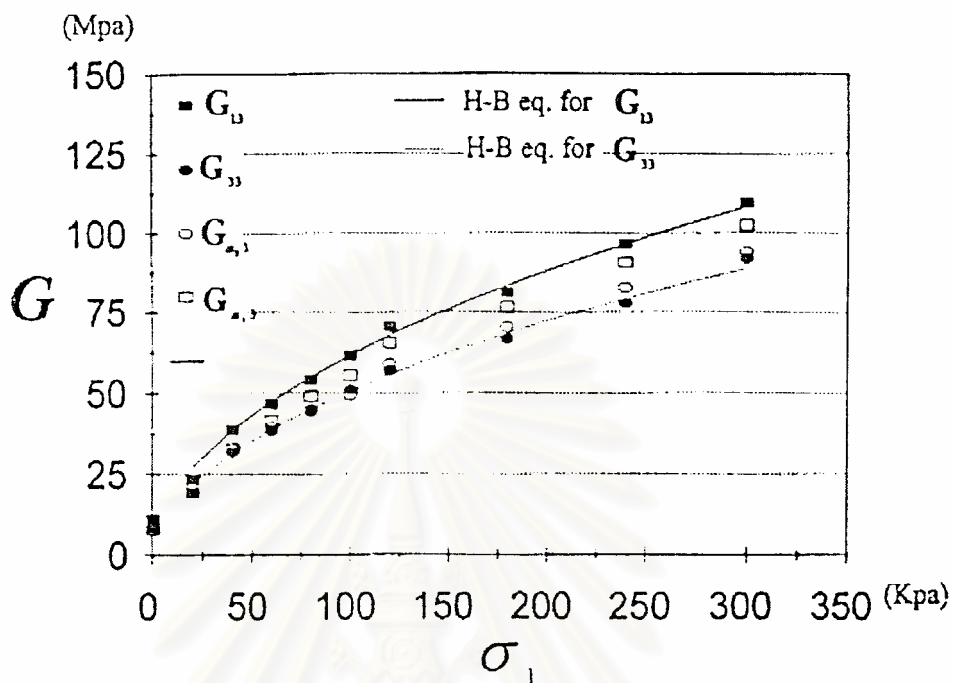
Zeng. X & Ni. B, 1998 ได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือ Oedometer ติดแผ่น bender element เพื่อวัดค่า shear modulus ในทิศทางต่างๆกัน โดยวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในแนวราบ (V_{hh}), ในแนวตั้ง (V_{vh}), ในระนาบทำมุม 30 องศา (V_{30h}) และระนาบทำมุม 60 องศา (V_{60h}) ปรากฏว่าค่า shear modulus ที่วัดได้ในแนวตั้ง (G_{vh}) สูงที่สุด ค่า shear modulus ที่วัดได้ในแนวราบ (G_{hh}) ต่ำที่สุด และค่า shear modulus ที่วัดได้ในระนาบ 60 องศา (G_{60h}) สูงกว่าค่า shear modulus ที่วัดได้ในระนาบ 30 องศา (G_{30h}) เล็กน้อย

Fioravante. V & Capoferri. R, 2001 ได้นำ Ticino Sand มาทดสอบโดยใช้เครื่องมือ triaxial ติดแผ่น bender element เพื่อวัดค่า shear modulus ในทิศทางต่างๆกัน โดยวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ทิศทางการแพร่ของคลื่นอยู่ในแนวราบด้วยทิศทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคทรายอยู่ในแนวราบ (V_{hh}) และความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ทิศทางการแพร่ของคลื่นอยู่ในแนวตั้ง ด้วยทิศทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคทรายอยู่ในแนวราบ (V_{vh}) ซึ่งความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วัดได้นั้น ปรากฏว่าค่า (V_{hh}) จะวิ่งได้เร็วกว่า (V_{vh}) อยู่เล็กน้อย เป็นผลเนื่องจากความเป็น ligh inherent anisotropy ของทรายตามธรรมชาติ

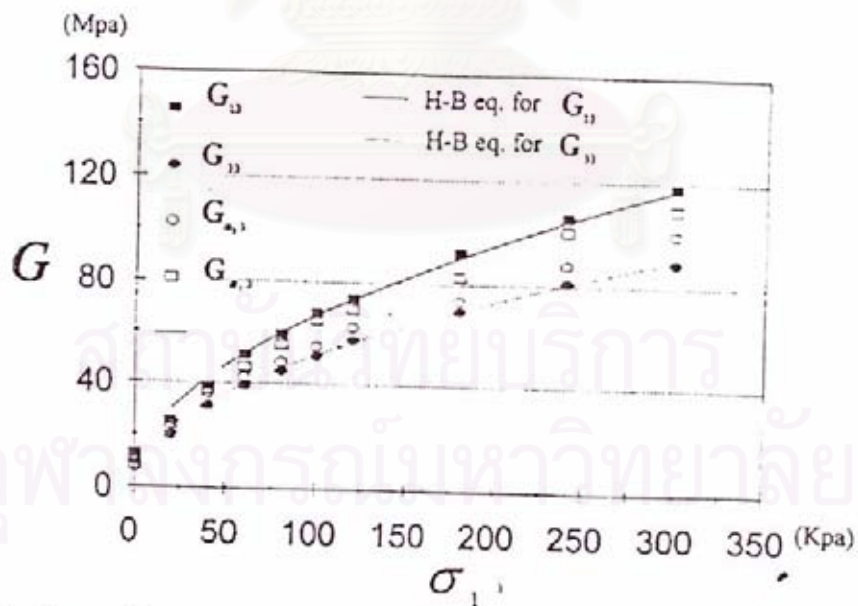


รูปที่ 2.8 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test

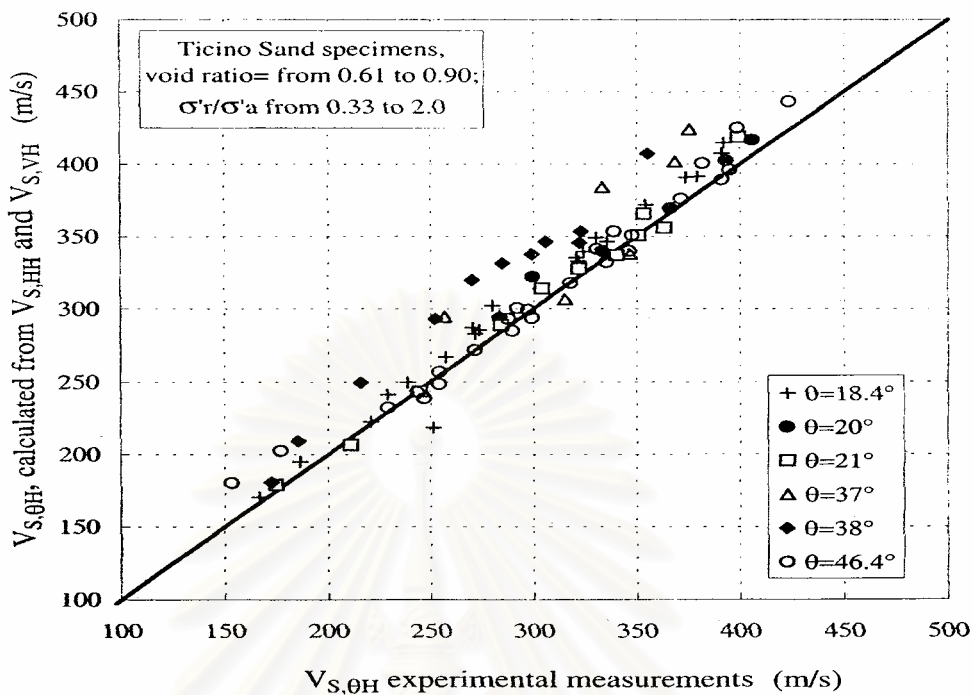
Thomann, T. G. & Hryciw, R. D., 1990



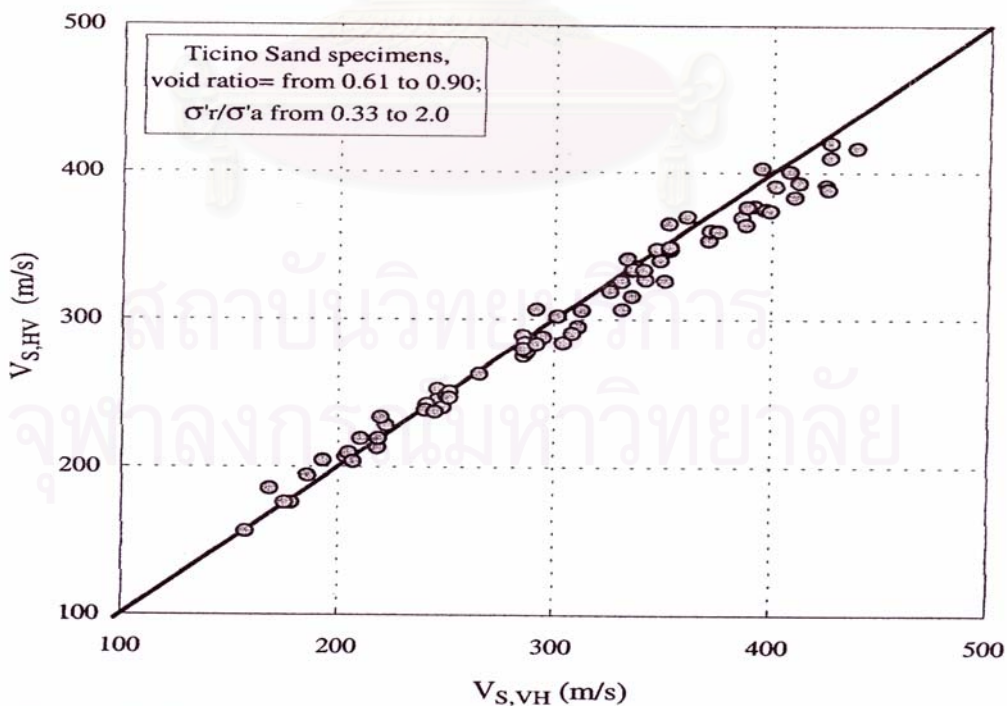
รูปที่ 2.9 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test , Zeng. X & Ni. B, 1998



รูปที่ 2.10 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test , Zeng. X & Ni. B, 1998



รูปที่ 2.11 ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จาก bender element test ,
Fioravante. V & Capoferri. R, 2001



รูปที่ 2.12 ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จาก bender element test ,
Fioravante. V & Capoferri. R, 2001

2.6 การวัดค่า Modulus ในสนาม

การทดสอบในสนามจะให้ผลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าในห้องปฏิบัติการ เพราะตัวอย่างจะมีผลของการถูกรบกวนน้อยมากส่วนใหญ่มักใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่นในการทดสอบ และในการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีความชำนาญในการจำแนกสัญญาณที่ได้ โดยปกติแล้วตัวกำเนิดสัญญาณจะให้คลื่น Primary wave (P-wave), Secondary wave (S-wave) และ Rayleigh wave และตัวรับสัญญาณจะรับสัญญาณที่ผ่านมาจากชั้นดินผลกระทบของสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับ สถานที่, ตำแหน่งของทั้งตัวกำเนิดและตัวรับสัญญาณ, ระยะทางระหว่างตัวกำเนิดและตัวรับ และความเป็นเนื้อเดียวกันของดิน คลื่นสามารถแพร่กระจายทะลุผ่านชั้นดินไปได้ การวิเคราะห์หาอาจผิดพลาดได้ง่ายและจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์อย่างมากในการจำแนกแยกคลื่นที่จะวิเคราะห์ถึงจะให้ผลที่ถูกต้องได้

- Rayleigh Wave velocity survey

เป็นวิธีที่วัดความเร็วของคลื่น Rayleigh wave การให้กำเนิดคลื่นทำได้โดยตัวกำเนิด Harmonic vibration กระทำที่บริเวณพื้นผิวของดิน ความเร็วของคลื่นจะคำนวณจาก ความยาวช่วงคลื่นและความถี่ของผลที่เกิดจาก Surface wave ความยาวช่วงคลื่นคำนวณโดยวัดระยะระหว่างจุดที่คลื่นเริ่มสั่นสะเทือน

เนื่องจาก Shear wave และ Rayleigh wave มีความแตกต่างกันน้อยมาก Richart, Hall, JR and Wood, R.D จึงสมมุติว่าคลื่นทั้งสองนี้มีค่าเท่ากัน และสามารถใช้สมการที่ 10 หาค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่เกิดโดยใช้ความเร็วของคลื่น Rayleigh wave แทน Shear wave ได้เลย

- Seismic refraction survey

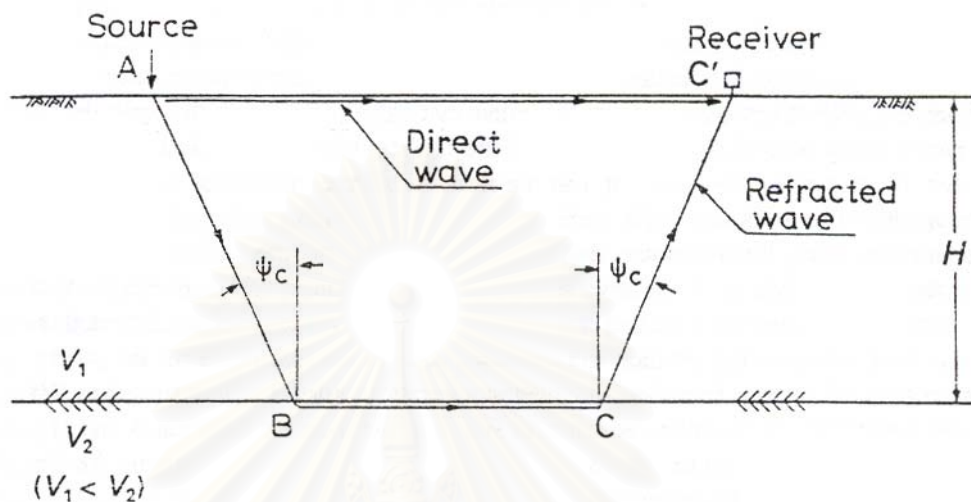
เป็นวิธีที่วัดความเร็วของคลื่น P-wave ซึ่งกำเนิดโดยใส่พลังงานลงไปในตัวดิน พลังงานอาจจะเป็นการระเบิดหรือการใช้ค้อนกระแทกลงไปในผิวดิน เดิมทีวิธีนี้จะใช้สำหรับการสำรวจใต้ผิวดิน (การหาน้ำมัน, น้ำ, ฯลฯ) จนต่อมา Dmевич, 1971 ได้ดัดแปลงเพื่อที่จะนำมาทดสอบหา Shear modulus โดยใช้คลื่น P-wave ในการหา ซึ่งสามารถหาค่า Shear modulus ได้จากสมการที่ 12 ดังนี้

$$G = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \rho V_p^2 \quad 2.8$$

V_p = Compression wave velocity

ν = Poisson's ratio

เนื่องจากจำเป็นต้องรู้ค่า Poisson's ratio จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก



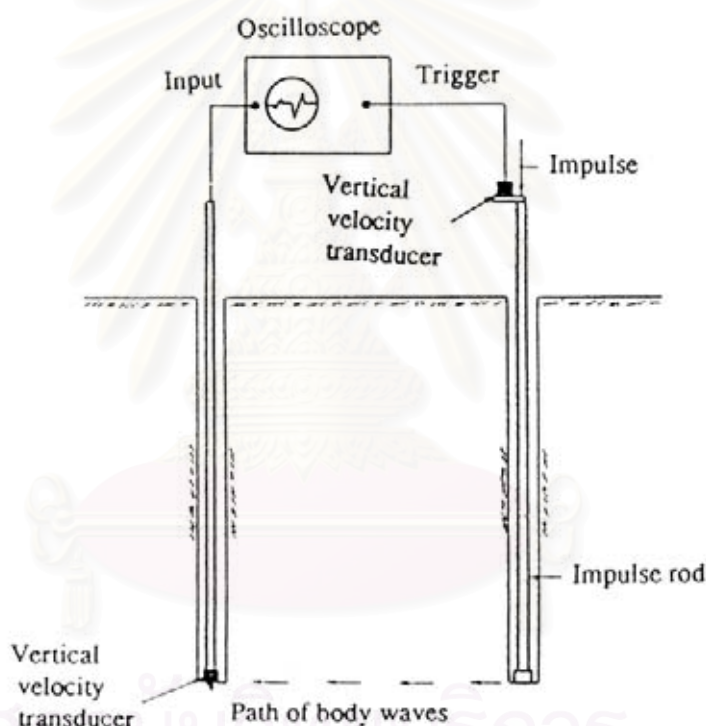
รูปที่ 2.13 Seismic refraction survey

- Direct arrival survey

เป็นวิธีที่ใช้วัดความเร็วของ Shear wave โดยตรง โดยใช้สมการที่ 10 จากทฤษฎีของ Elastic wave ซึ่งสามารถหาค่า Shear modulus ได้ง่าย แม้ว่าการคำนวณหาความเร็วของคลื่นจะกระทำได้ง่าย แต่การวิเคราะห์หาเวลาการมาถึงของคลื่น (Time arrival) นั้นยังกระทำได้ยาก การบันทึกค่าการมาถึงของคลื่น (Wave arrival) ของตัวรับที่เดินทางจากดินแล้วเป็นสิ่งที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามวิธี Cross-hole shooting method Raghu and Stokoe, 1972 พบว่าเมื่อให้กำเนิดสัญญาณจากหลุมหนึ่ง คลื่นที่เกิดขึ้นจากหลุมจะมีคลื่น Compression wave (Body wave or P-wave) และ Shear wave (S-wave) ไปยังหลุมอีกหลุมที่มีตัวรับสัญญาณ และคลื่น Body wave นั้นจะมีความเร็วกว่า Shear wave เสมอ ดังนั้นถ้ารู้ระยะทางระหว่างหลุมทั้ง 2 หลุม เราจะสามารถหาความเร็วของ Body wave ได้โดยตรงแต่ใน Shear wave เราจำเป็นต้องจำแนกการมาถึงของคลื่นครั้งที่ 2 ที่เป็น คลื่น Shear wave

- Cross-hole test

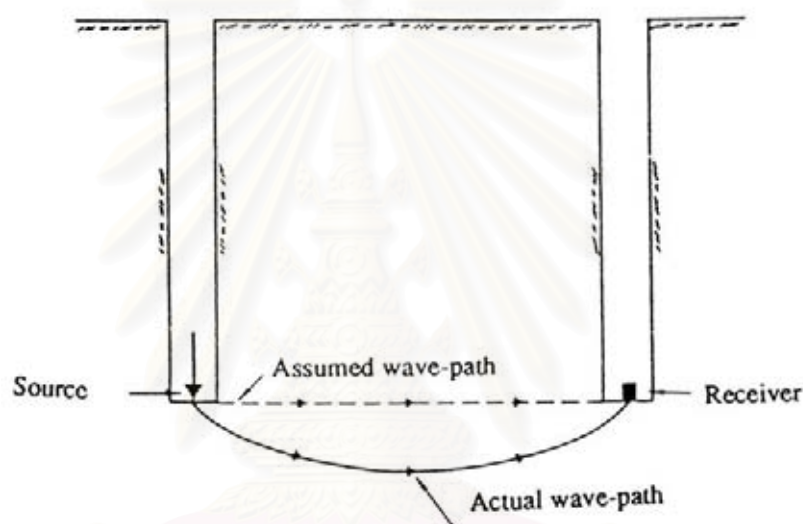
วิธี Cross-hole technique ทำโดย เจาะหลุมในแนวตั้ง 2 หลุม ซึ่งตำแหน่งและระยะห่างระหว่างหลุม 2 หลุมไม่มากนัก ระดับความลึกของแต่ละหลุมควรจะมีค่าเท่ากัน ตัวกำเนิดคลื่นและตัวรับสัญญาณจะติดตั้งอยู่บนหลุม และตัวรับและตัวส่งจะสัมผัสกับหน้าดินตลอดเวลาขณะทดสอบ ตัวกำเนิด และตัวรับสัญญาณจะต่อเข้ากับ Storage Oscilloscope โดยที่ Oscilloscope จะบันทึกค่าจากตัวรับสัญญาณทันทีเมื่อตัวกำเนิดคลื่นสร้างคลื่น Shear wave รูปที่ 15 จะแสดงถึงเครื่องมือหลักๆ ของ Seismic cross hole technique



รูปที่ 2.14 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear modulus ด้วยวิธี Cross-hole test

วิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องแม่นยำมากที่สุดอีกวิธีหนึ่งและมักจะใช้เป็นวิธีที่อ้างอิงวิธีทดสอบอื่นๆ แต่ทว่า มันก็มีจุดอ่อนบางอย่างคือ เมื่อเราทำการเจาะหลุมก่อนทดสอบ มันจะเกิดการ Disturbance เนื่องจาก Stress relief รอบๆ หลุมที่เจาะ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการที่ให้ตัวกำเนิดคลื่น และ Geophone สัมผัสกับผิวดินอย่างดี Andreasson, 1979 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบของผลการ Disturbance จะประมาณเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหลุมเจาะทำการเจาะไว้ก่อนกับการที่เราทดสอบโดยกดเครื่องมือ (ตัวกำเนิด, Geophone) ลงไปในดิน

และพบว่ายังมีปัญหาอีกอย่างเช่น ค่า Shear modulus จะเปลี่ยนไปตามความลึก ยิ่งความลึกมาก ดินมักจะมีค่าความแข็งมาก Shear wave ก็จะได้เดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณได้เร็ว ยิ่งขึ้น และเส้นทางเดินทางของคลื่นจะไม่เป็นตามแนวนอน มันจะเดินทางไปยังเส้นทางที่จะใช้ เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดดังรูปที่ 16 จะแสดงลักษณะของเส้นทางของคลื่นเป็นรูปโค้งในดินที่มีลักษณะมีค่า Stiffness เพิ่มขึ้นตามความลึก ดังนั้น ในชั้นดินที่อ่อนและมีความหนาของชั้นดินที่น้อยจะยากต่อการหาค่าที่ถูกต้องได้

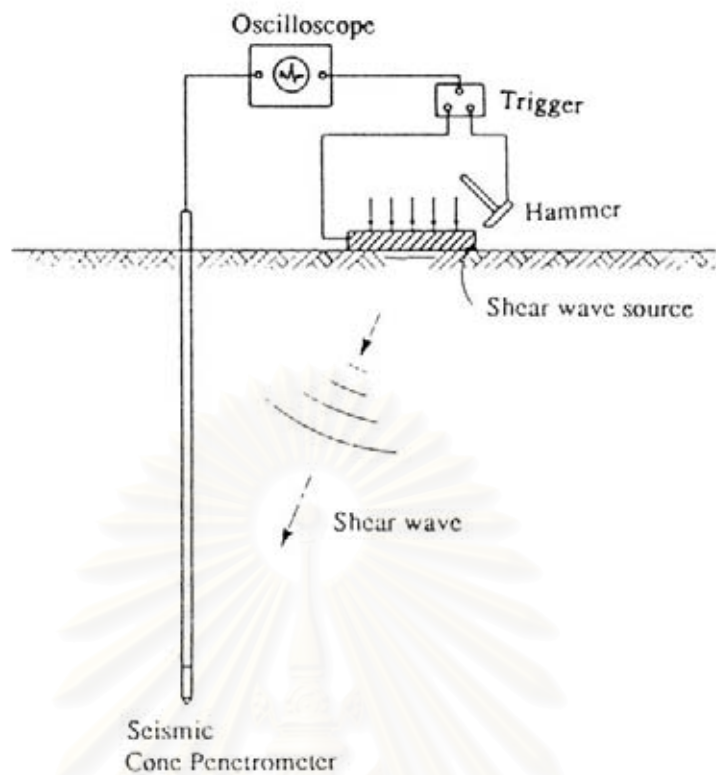


รูปที่ 2.15 แสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่นเมื่อชั้นดินด้านล่างมีความแข็งกว่าชั้นบน

- Down-hole test

วิธี Down-hole test จะมีลักษณะการวัดเหมือนกับวิธี Cross-hole แต่จะต้องการหลุมเจาะเพียงหลุมเดียวเท่านั้น โดยจะมีตัวรับสัญญาณอยู่ที่หลุมและกำเนิดคลื่นในทางแนวนอนบนพื้นผิว ดังรูปที่ 17 จะแสดงถึงวิธีการทดสอบแบบ Seismic down hole ในการทดสอบนี้สามารถทำในการกลับกันได้คือให้ตัวกำเนิดคลื่นอยู่ในหลุมและตัวรับสัญญาณจะอยู่บนพื้นผิวแทน ซึ่งเราจะเรียกรูปวิธีนี้ว่า Up-hole test

ผลของการผิดพลาดเนื่องจากการ Disturbance จะเหมือนกันกับที่เกิดขึ้นในวิธี Cross-hole test วิธี Down-hole test ยังสามารถที่จะหาความหนาของชั้นดินในทางตั้งได้อีกด้วยแต่จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะสามารถทดสอบได้



รูปที่ 2.16 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear modulus ด้วยวิธี Down-hole test

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ

3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างทดสอบ

3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

สถานที่เก็บตัวอย่างทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษางานวิจัยคือทรายแม่น้ำที่เก็บจากบริเวณริมแม่น้ำปิง ซึ่งอยู่ในจังหวัดเชียงใหม่

3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง

วิธีการเก็บตัวอย่างทรายแม่น้ำสำหรับนำมาทดสอบจะทำการเก็บตัวอย่างด้วยการตักขึ้นมาจากริมแม่น้ำปิง โดยเก็บตัวอย่างทรายแม่น้ำประมาณ 50 กิโลกรัม ลักษณะของทรายแม่น้ำเป็นทรายเม็ดหยาบ เมื่อสัมผัสจะรู้สึกสากมือ ตัวอย่างทรายที่เก็บขึ้นมาจะมีเศษใบไม้และชิ้นส่วนของไม้ชิ้นเล็กๆปะปนมาด้วย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์หลักสำหรับใช้ในการทดสอบงานวิจัย

- เครื่องมือทดสอบที่ทำขึ้นมาใหม่ตามที่แสดงดังรูปที่ และรูปที่
- เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลการทดสอบ
- Dial gauge เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการยุบตัวของทรายตัวอย่าง
- Bender element เป็นอุปกรณ์ให้กำเนิดและรับสัญญาณ (transmitter and reciever) คลื่นความเค้นในตัวอย่างดังรูปที่
- Function generator เป็นเครื่องให้สัญญาณทางไฟฟ้าไปยัง bender element
- Oscilloscope เป็นอุปกรณ์สำหรับบันทึกสัญญาณไฟฟ้า โดยจะนำมาใช้วัดสัญญาณที่เกิดขึ้นของ bender element

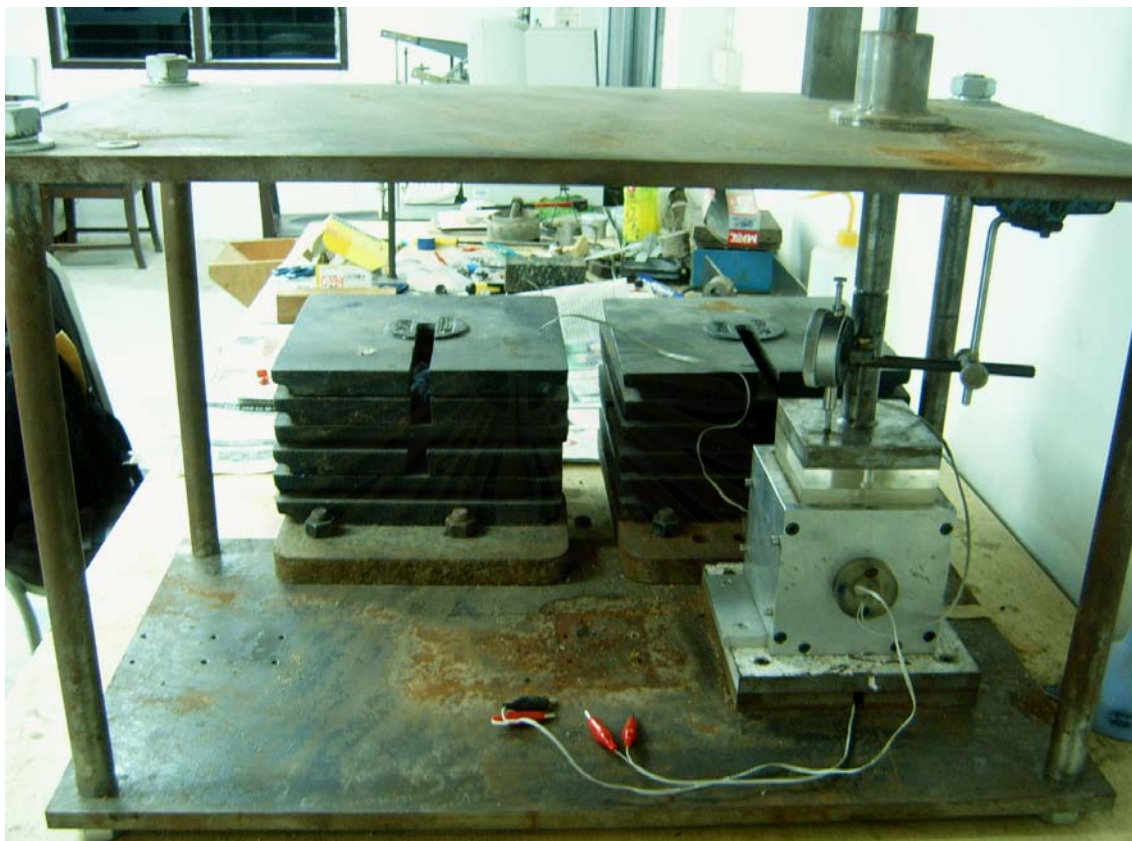
โดยอุปกรณ์และเครื่องมือสำคัญที่ใช้สำหรับการทดสอบงานวิจัยนี้แสดงไว้ดังรูปที่



รูปที่ 3.1 เครื่องมือทดสอบที่ทำขึ้นใหม่

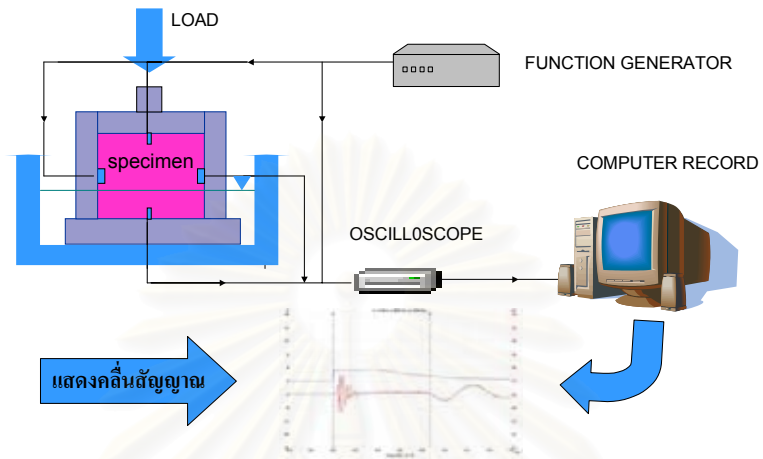


รูปที่ 3.2 bender element ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.3 ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบหาความเร็วของคลื่นความเค้นด้วย bender element

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



■ ผังแสดงการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1/1/2002

9

รูปที่ 3.4 ผังการติดตั้งเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบหาความเร็วของคลื่นความเค้นด้วย bender element

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การหาคุณสมบัติของดินทางด้านกายภาพ

3.3.1 การหาขนาดเม็ดดินโดยใช้ตะแกรง (Sieve Analysis)

3.3.2 การหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density)

3.3.3 การทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด

3.3.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

3.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบหาค่าโมดูลัสแบบเฉือน โดยวิธี bender element ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบหลักๆคือ ใส่ น้ำหนักกดลงในตัวอย่างทรายแห้ง โดยจะต้องเริ่มต้นด้วยความดันที่น้อยก่อนแล้วค่อยเพิ่มน้ำหนักขึ้น โดยเพิ่มทีละประมาณ 1 เท่าของน้ำหนักกดครั้งก่อน หลังจากนั้นวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน โดยจะทำการทดสอบ 2 วิธีดังนี้

วิธีที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทรายโดยการปล่อยแบบอิสระ (Pluviation) โดยกล่อตัวอย่างทรายจะวางทำมุมกับแนวราบเป็นมุม 0 องศา, 30 องศา, 45 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ โดยเตรียมตัวอย่างทรายในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$) และทรายอยู่ในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$)

วิธีที่ 2 การเตรียมตัวอย่างทรายในสภาพบดอัดแน่น (Compaction) โดยนำทรายมาคลุกเคล้ากับน้ำจำนวนหนึ่ง (ค่า water content ที่ OMC.) แล้วนำไปบดอัดในกล่อตัวอย่าง โดยทำการบดอัดทีละชั้นจำนวนสามชั้น แต่ละชั้นบดอัดด้วยค้อน จำนวน 25 ครั้ง เท่าๆกัน ซึ่งจะได้ค่าพลังงานในการบดอัดแต่ละชั้นที่เท่ากัน การเตรียมตัวอย่างจะเตรียมตัวอย่างวางทำมุมกับแนวราบ เป็นมุม 0 องศา, 30 องศา, 45 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ

3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

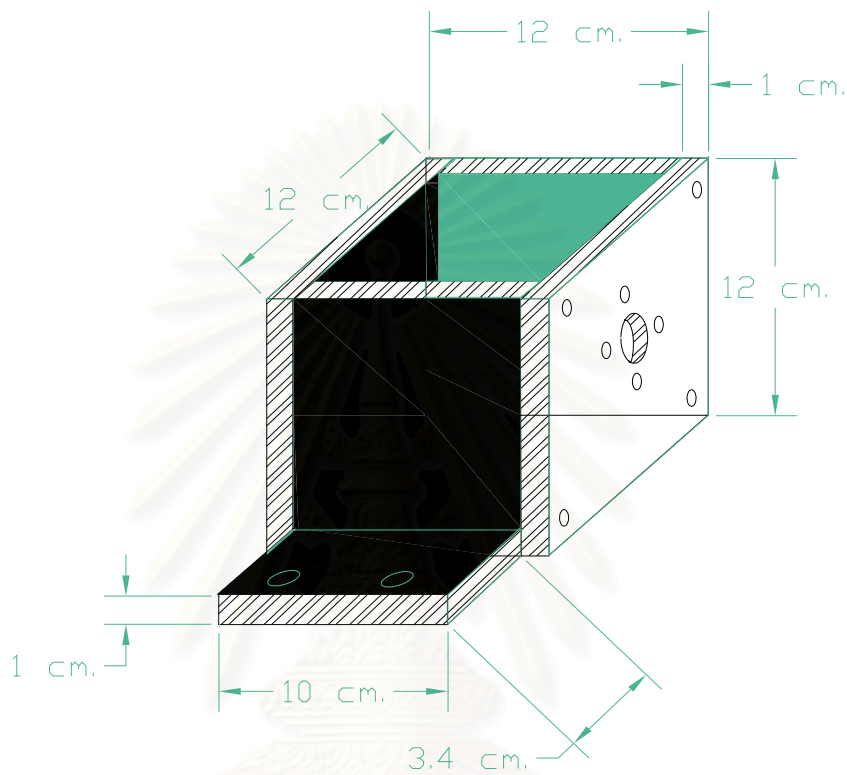
3.5.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

วิธีที่ 1

1. นำตัวอย่างมาล้างน้ำประปาให้สะอาด โดยร่อนผ่านตะแกรง No. 200 แล้วเอาส่วนที่เหลือค้างตะแกรงไปอบในตู้อบ
2. เตรียมตัวอย่าง โดยการป้อนตัวอย่างทรายให้ตกแบบอิสระโดยผ่านทางกรวยกลม ตกกลงไปในกล่องตัวอย่างที่รองรับอยู่ด้านล่างในแนวราบ

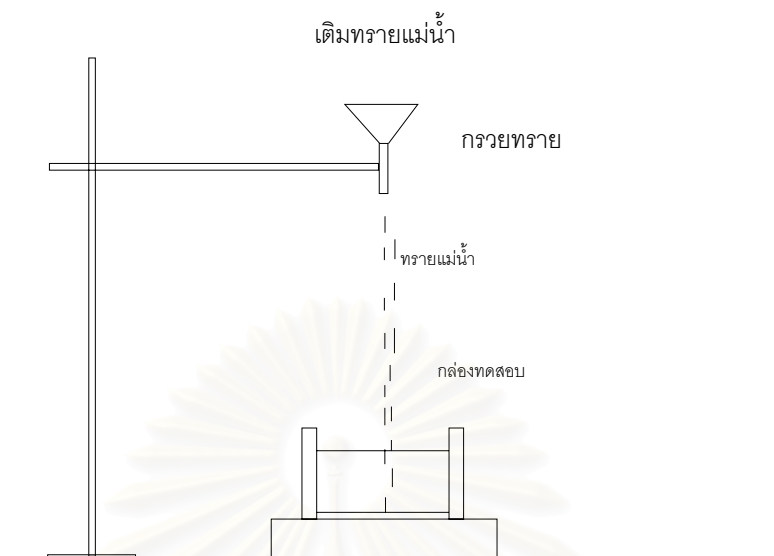


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างทรายที่ใช้ในการทดสอบ

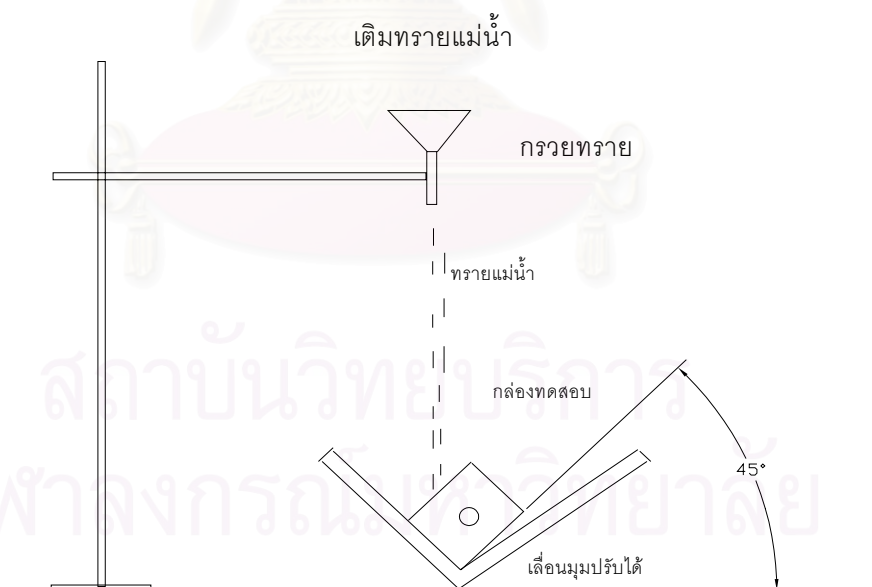


รูปที่ 3.6 ขนาดของกล่องตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 วิธีการเตรียมตัวอย่างในวิธีที่ 1

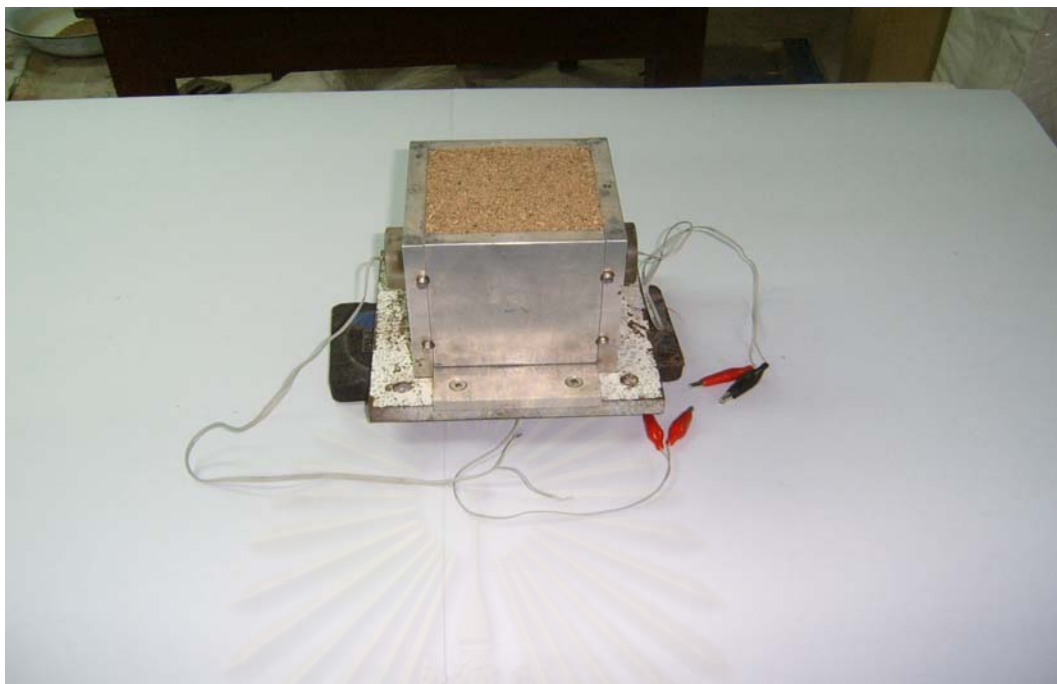


รูปที่ 3.8 วิธีการเตรียมตัวอย่างในวิธีที่ 1 (ปรับระนาบมุม)

3. นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก เพื่อจะคำนวณหาความหนาแน่นที่ต้องการ (Dry Density, γ_d) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($Dr = 60\%$)
4. นำกล่องตัวอย่างพร้อมแท่นรองรับเข้าติดตั้งใน loading frame ติด dial gauge สำหรับวัดการทรุดตัวของตัวอย่าง
5. ทำการทดลองใหม่ โดยการเปลี่ยนระนาบการวางของกล่องตัวอย่าง โดยวางทำมุม 30 องศา, 45 องศา, 60 องศา กับแนวราบ โดยติดตั้งในอุปกรณ์ที่ทำขึ้นดังแสดงในรูปที่ แล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับ ข้อ 2-4 โดยทำการทดลองในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$)



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวอย่าง (วิธีที่ 1)



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างที่ติดตั้งใน loading frame พร้อมทดสอบ

วิธีที่ 2

1. นำตัวอย่างทรายที่เตรียมไว้ ผสมกับน้ำโดยเปอร์เซ็นต์ของน้ำให้ใกล้เคียงเปอร์เซ็นต์ของ water content ที่จุด OMC. (ได้จากการทดสอบ Compaction Test แบบมาตรฐาน)
2. แบ่งตัวอย่างทรายออกเป็น 3 ส่วน เอาส่วนที่หนึ่งใส่ลงในกล่องตัวอย่าง โดยกะว่าเมื่อบดอัดแล้วได้ความหนาแน่นประมาณ 1/3 ของปริมาตรของกล่องตัวอย่าง บดอัดด้วยค้อน 25 ครั้ง/ชั้น โดยบดอัด 3 ชั้น
3. ปาดทรายส่วนเกินให้พอดีกับขอบกล่องตัวอย่าง นำกล่องตัวอย่างกับทรายไปชั่งน้ำหนัก พร้อมกับคำนวณค่าความหนาแน่น
4. ค่อยๆเสียบแผ่น bender element ลงไปในตัวอย่างทราย ถ้าตัวอย่างมีลักษณะค่อนข้างแข็งจะต้องมีการแซะเป็นร่องก่อน
5. นำกล่องตัวอย่างพร้อมแท่นรองรับเข้าติดตั้งใน loading frame ติดตั้ง dial guage สำหรับวัดการทรุดตัวของตัวอย่าง
6. ทำการทดลองใหม่โดยการเปลี่ยนระนาบการวางของกล่องตัวอย่างโดยวางทำมุม 30 องศา, 45 องศา, และ 60 องศา กับแนวราบโดยติดตั้งในอุปกรณ์ที่ทำขึ้นดังแสดงในรูปที่ และปฏิบัติเช่นเดียวกับ ข้อ 2 – 5



รูปที่ 3.12 เครื่องมือที่ใช้ในการบดอัดทราย



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมตัวอย่างในวิธีที่ 2



รูปที่ 3.14 การบดอัดตัวอย่างทรายในกล่องตัวอย่าง

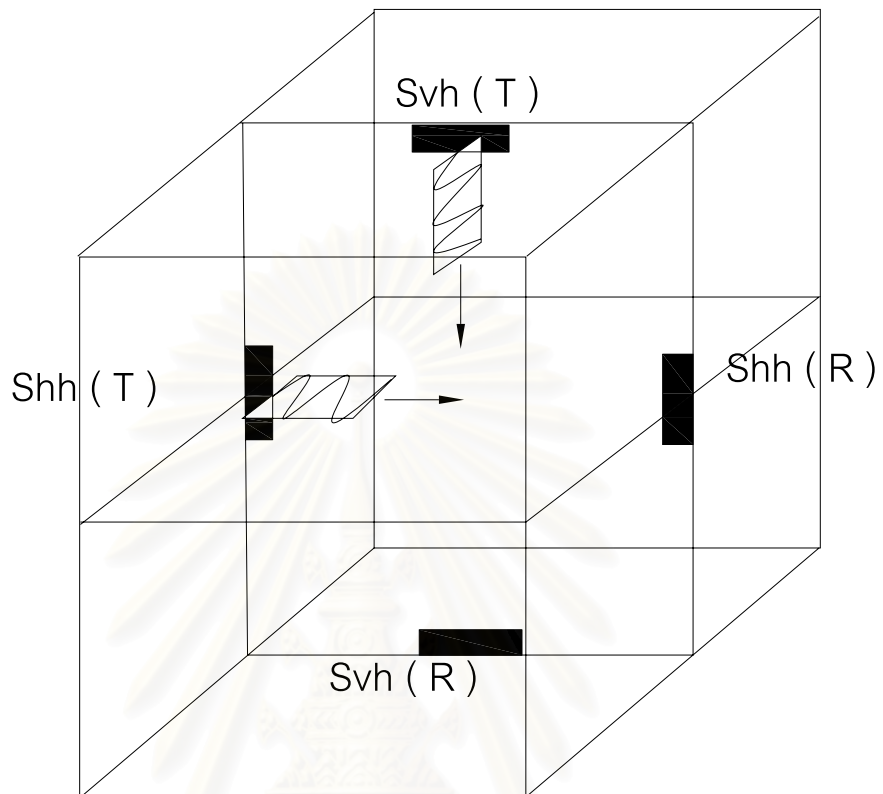
3.5.2 ขั้นตอนการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน

1. วางน้ำหนักชุดแรกซึ่งคานจะขยายน้ำหนักให้กดลงบนตัวอย่าง ซึ่งน้ำหนักที่กดลงครั้งแรกเท่ากับ 34 KPa อ่านค่าการทรุดตัวในแนวตั้งจาก dial gauge
2. ทำการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนทั้งแนวราบและแนวตั้ง หลังจากนั้นเพิ่มน้ำหนักชุดต่อไปเรื่อยๆ โดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มประมาณ 1 เท่าตัวของน้ำหนักชุดครั้งก่อน โดยเพิ่มชุดน้ำหนักให้มีค่าประมาณ 550 KPa หลังจากนั้นทำการลดน้ำหนักออกเพื่อดูการยืดตัวของตัวอย่าง
3. ในวิธีที่ 2 หลังจากทดสอบเสร็จ นำตัวอย่างทรายบางส่วนเข้าเตาอบเพื่อหาค่า water content

3.6 การวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน

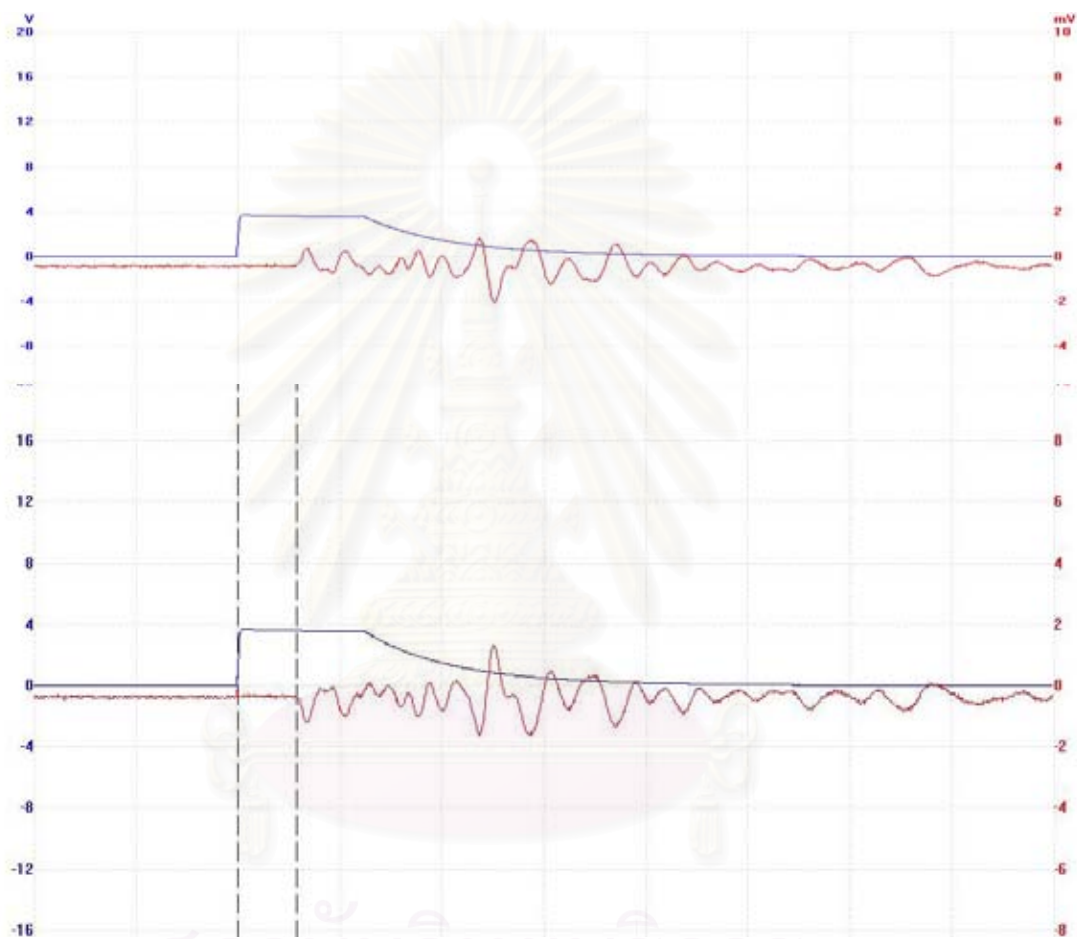
ในการวิจัยนี้จะทำการวัดหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนหลังจากการเพิ่มน้ำหนักกดในแต่ละช่วง โดยวิธีการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนทั้งในแนวราบและแนวตั้ง โดยในแนวราบการวัดคลื่นความเร็วจะวัดความเร็วคลื่นที่ระนาบเคลื่อนตัวในแนวราบVhh(horizontally polarised shear waves propagating in the horizontal direction) ส่วนในแนวตั้งการวัดคลื่นความเร็วจะวัดความเร็วคลื่นที่ระนาบเคลื่อนตัวในแนวตั้งVvh(horizontally polarised shear waves propagating in the vertical direction)มีขั้นตอนดังนี้

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.4 การทดสอบจะเริ่มโดยที่ function generator จะให้สัญญาณไฟฟ้าส่งไปยัง oscilloscope และ bender element ตัวส่งสัญญาณ จะแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นพลังงานกลทำให้เกิดการสั่นไหวในตัว bender element เกิดเป็นคลื่น S wave ลงไปในตัวอย่างดินจากนั้นคลื่น S wave จะแพร่กระจายจากดินไปถึง bender element ตัวรับสัญญาณ ซึ่งจะแปลงสัญญาณทางกลจากคลื่นไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าไปใน oscilloscope ผลต่างของเวลาที่ตัวส่งสัญญาณมาถึงตัวรับสัญญาณมาถึงจะเป็นเวลาที่คลื่นแรงเฉือนมาถึง (time arrival)



รูปที่ 3.15 การติดตั้งแผ่น bender element ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.16 การวัดความเร็วคลื่นความเค้นด้วย bender element

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

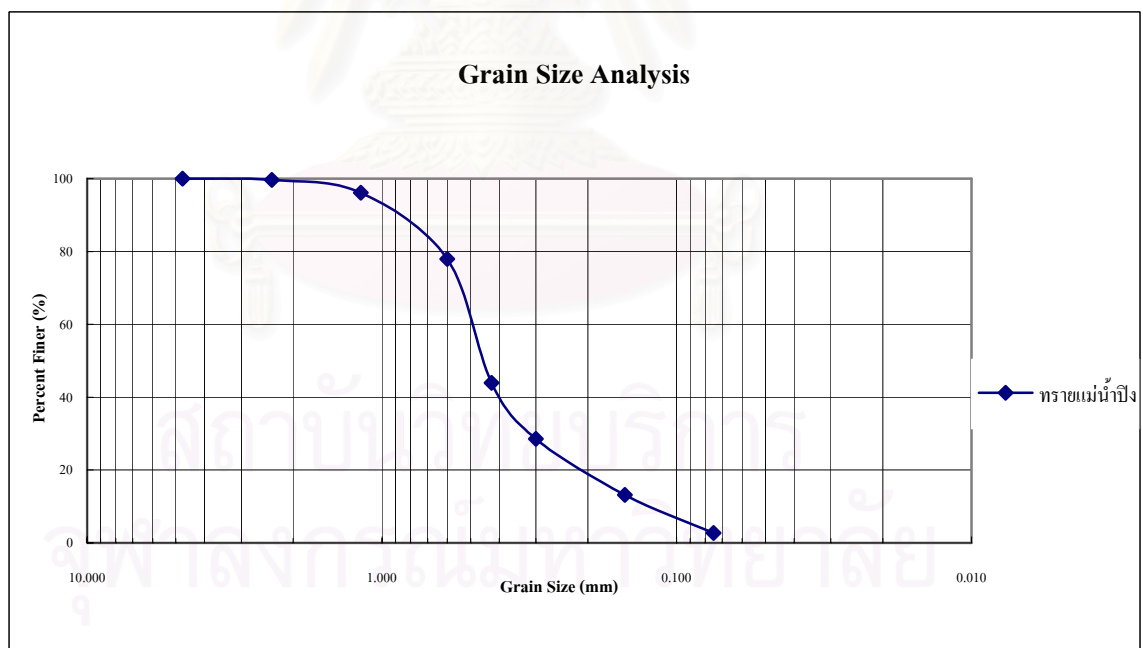
บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบ

ตัวอย่างทรายที่นำมาใช้ทดสอบเป็นตัวอย่างทรายที่นำมาจากแม่น้ำปิง จังหวัดเชียงใหม่ ลักษณะของทรายแม่น้ำจะมีทั้งเม็ดกลมและแบนปะปนกัน และมีเศษไม้ชิ้นเล็กๆ และใบไม้ปะปนอยู่บ้างเมื่อนำมาทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, G_s) ได้ค่า $G_s = 2.65$

จากผลการทดสอบหาขนาดคละของทรายแสดงไว้ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งจากผลการทดสอบหาขนาดคละได้ค่า $D_{50} = 0.46$ mm. ค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u) $C_u = 3.85$, ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Concavity, C_c) $C_c = 1.68$ โดยตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบจัดเป็นทรายประเภท SP (Poorly grade sand)

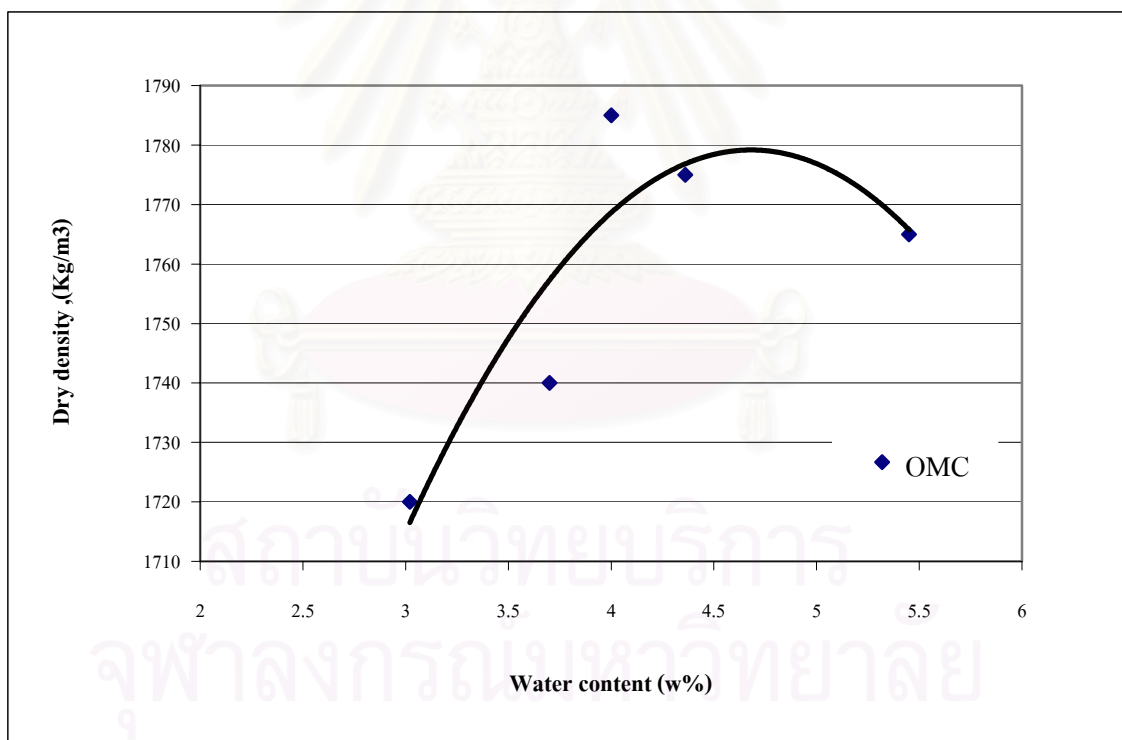


รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบการหาขนาดคละของทรายตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้

Sand Name	D_{50} (mm.)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}
ทรายแม่น้ำปิง	0.46	3.85	1.68	0.78	0.49

จากการนำตัวอย่างทรายมาทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, γ_{dmax}) และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) จะได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างทรายแม่น้ำปิง

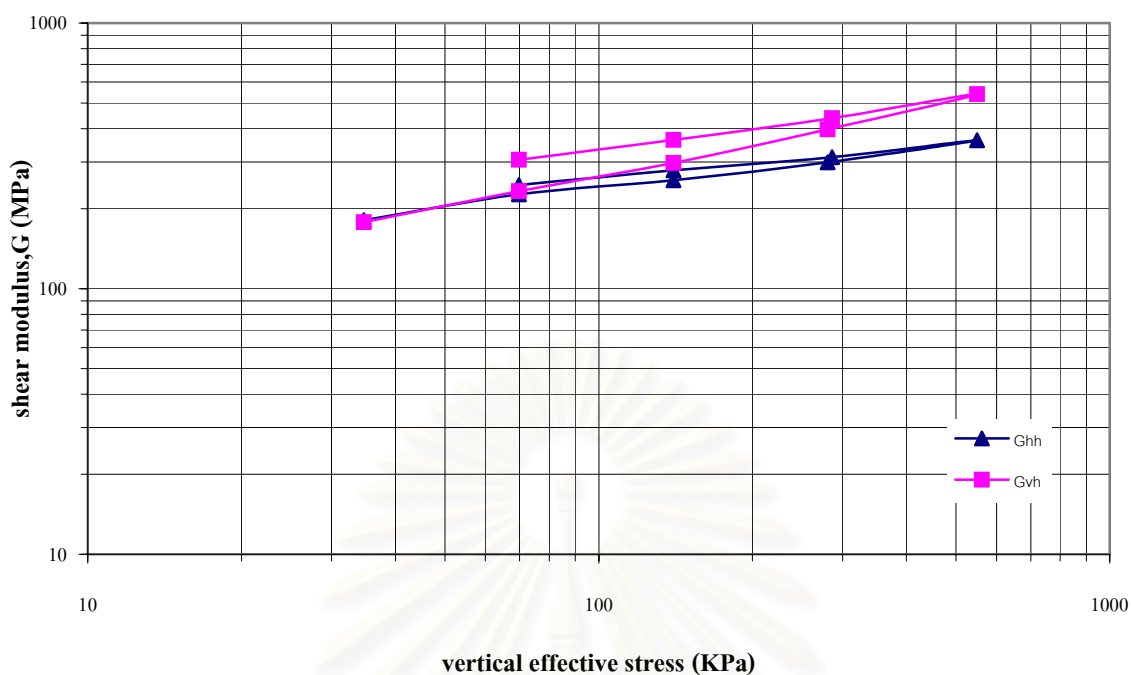
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test)

ชนิดของทราย	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตัน/ลบ.ม.) (Max. Dry Density, γ_{dmax})	ความชื้นที่เหมาะสม (%) (Optimum Moisture Content)
ทรายแม่น้ำปิง	1.78	4.7

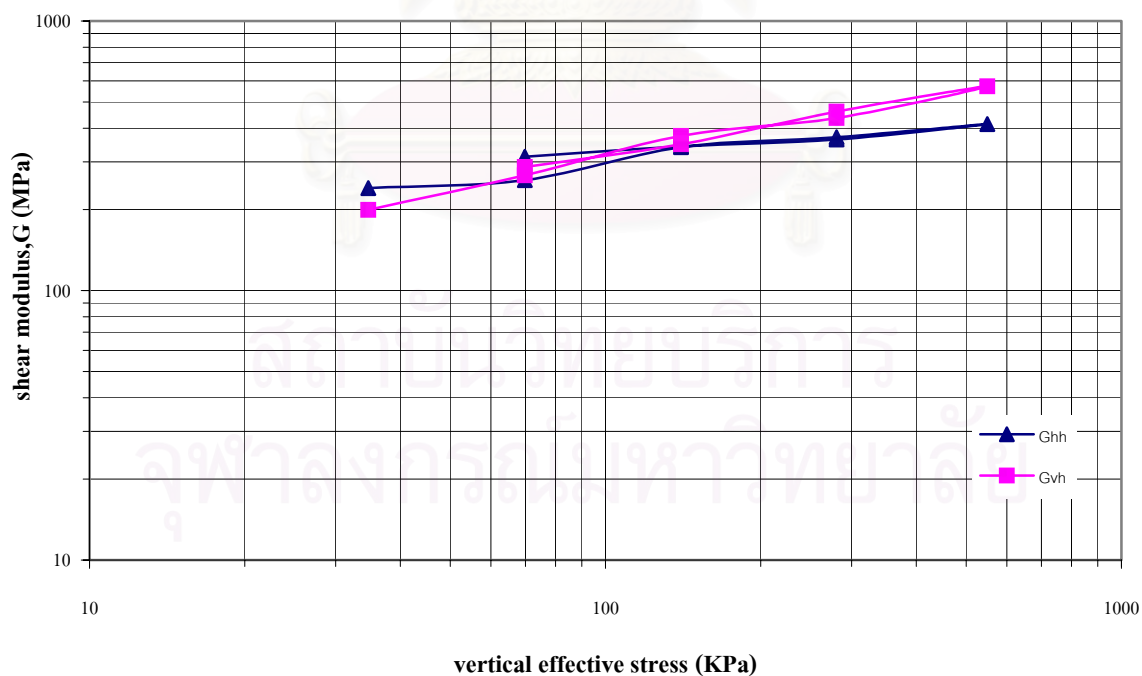
4.2 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือน

4.2.1 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างวิธีที่ 1

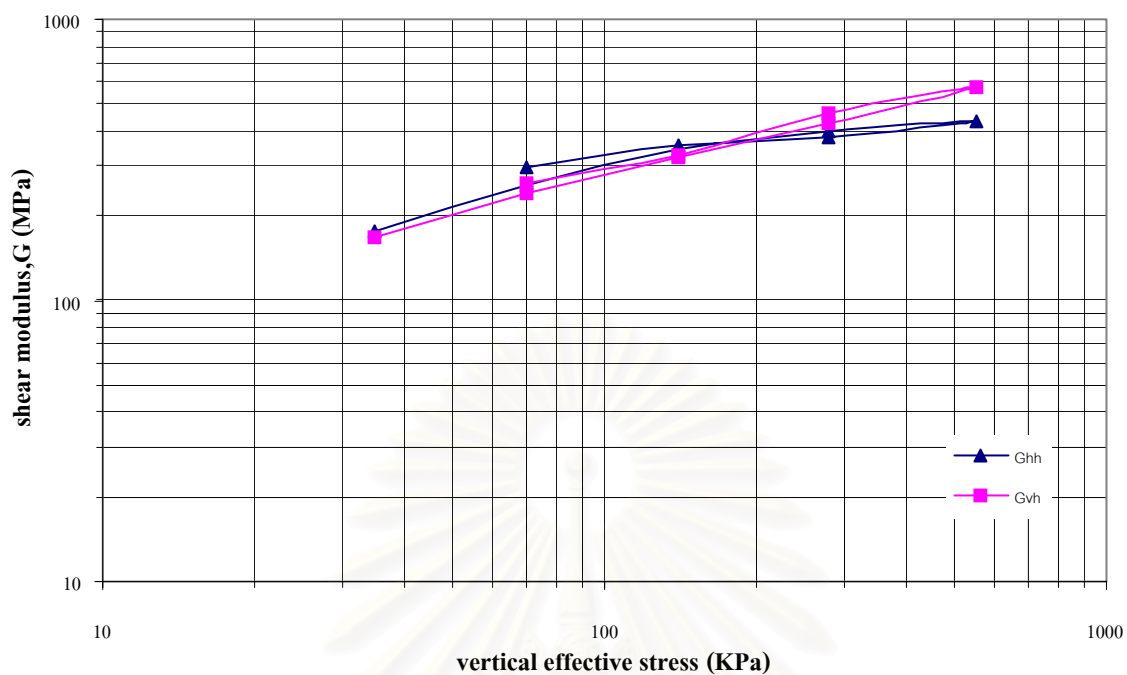
ในการทดสอบหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนหลังจากเพิ่มน้ำหนักหรือเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่ง (Vertical effective stress, σ_v') ต่อตัวอย่างทราย พบว่าตัวอย่างทรายที่อยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$) ช่วงเริ่มต้นที่หน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งมีค่าน้อย ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวดิ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ หลังจากเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งขึ้นไปอีกค่าโมดูลัสแบบเฉือนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างทรายที่วางในแนวราบ (มุม 0 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวดิ่ง (G_{vh}) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่ประมาณ 13 – 33 % ตัวอย่างทรายที่วางตัวอย่างในแนวเอียง (มุม 30 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวดิ่ง (G_{vh}) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่ประมาณ 9 – 28 % ตัวอย่างทรายที่วางตัวอย่างในแนวเอียง (มุม 45 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวดิ่ง (G_{vh}) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่ประมาณ 6 – 25 % และตัวอย่างทรายที่วางตัวอย่างในแนวเอียง (มุม 60 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวดิ่ง (G_{vh}) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่ประมาณ 9 – 30%



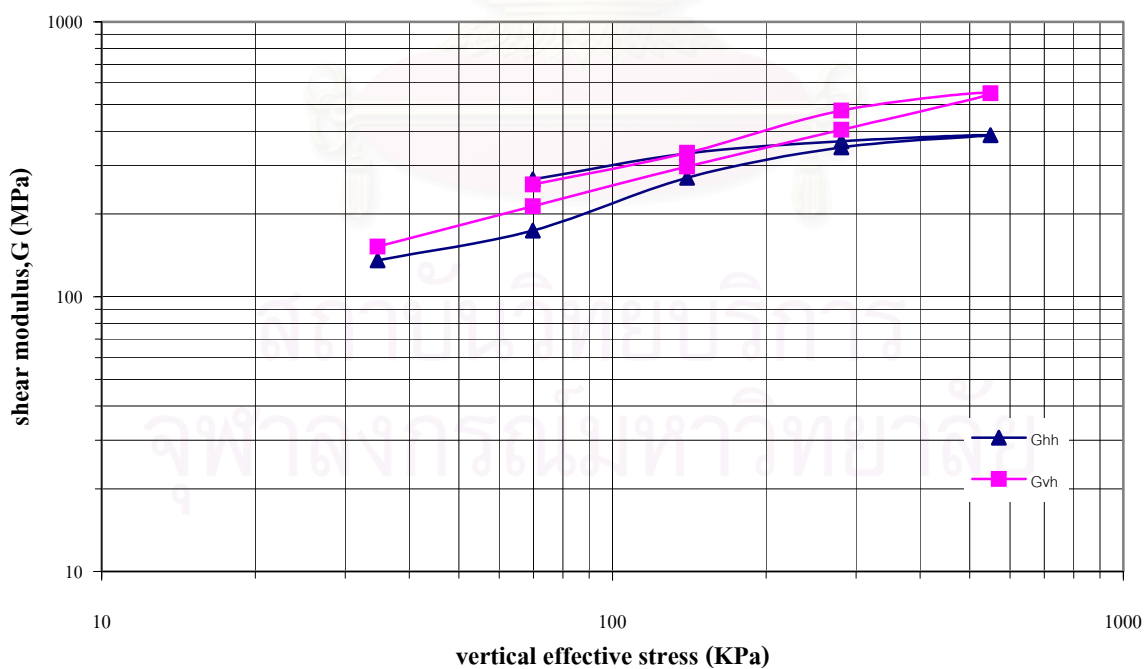
รูปที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 0 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)



รูปที่ 4.4 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 30 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)

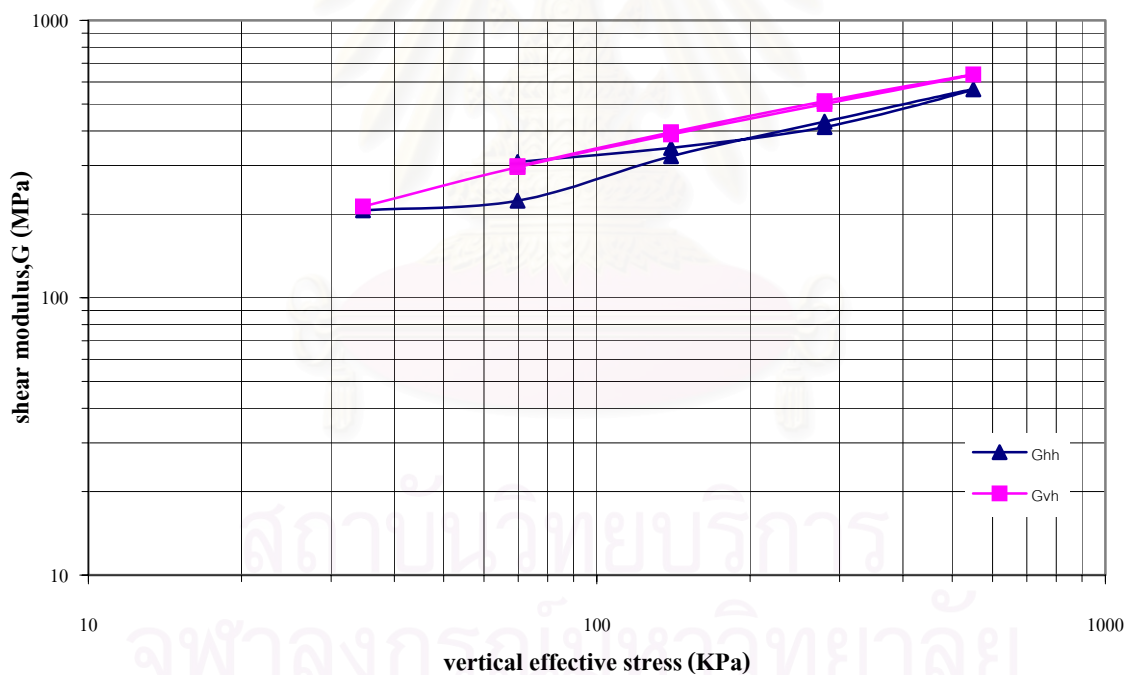


รูปที่ 4.5 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 45 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)

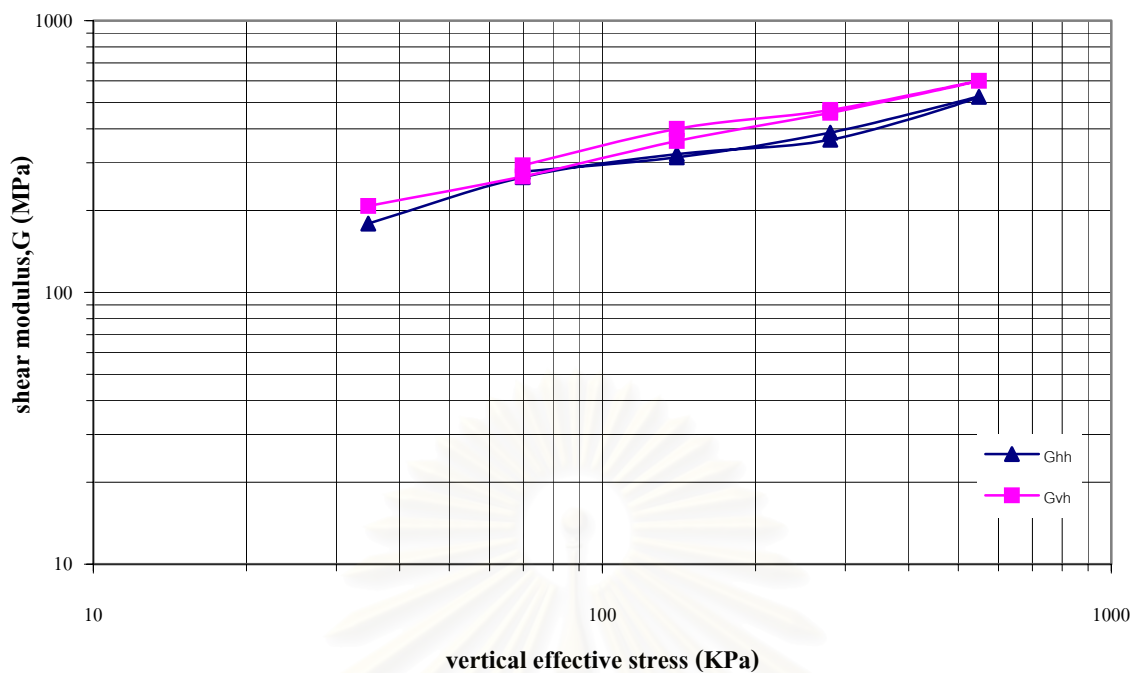


รูปที่ 4.6 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 60 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)

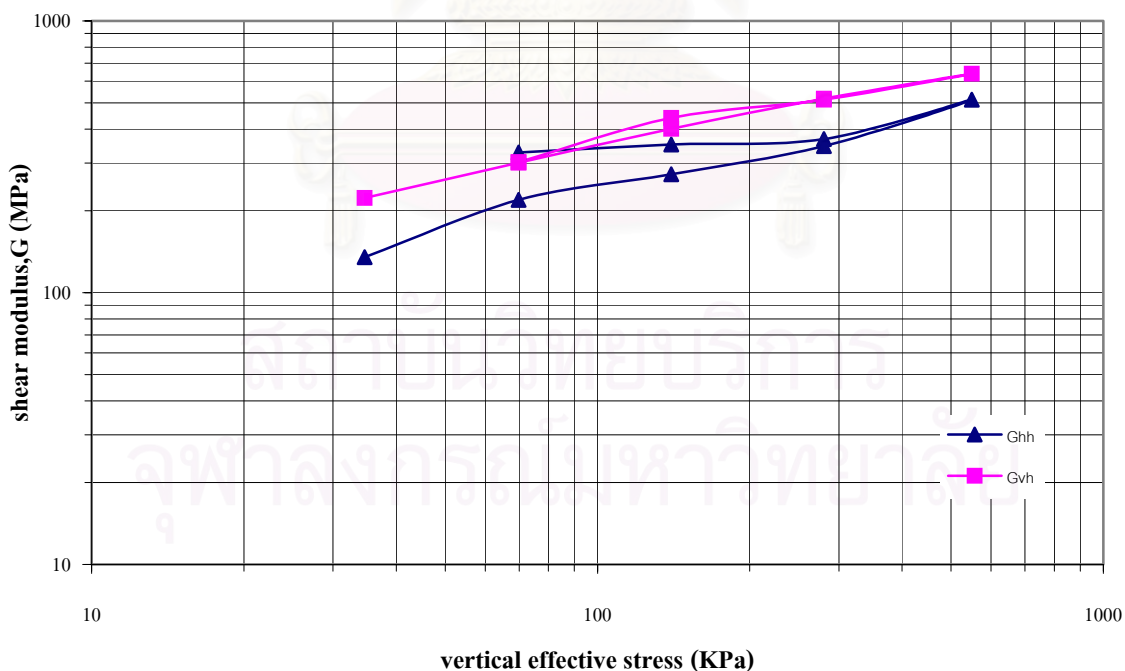
สำหรับตัวอย่างทราย ที่อยู่ในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$) พบว่าตัวอย่างทรายที่วางในแนวราบ (มุม 0 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 11 - 24% ตัวอย่างทรายที่วางตัวอย่างในแนวเอียง (มุม 30 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 10 - 20% ตัวอย่างทรายที่วางตัวอย่างในแนวเอียง (มุม 45 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 20 - 40% และตัวอย่างทรายที่วางตัวอย่างในแนวเอียง (มุม 60 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 11 - 34%



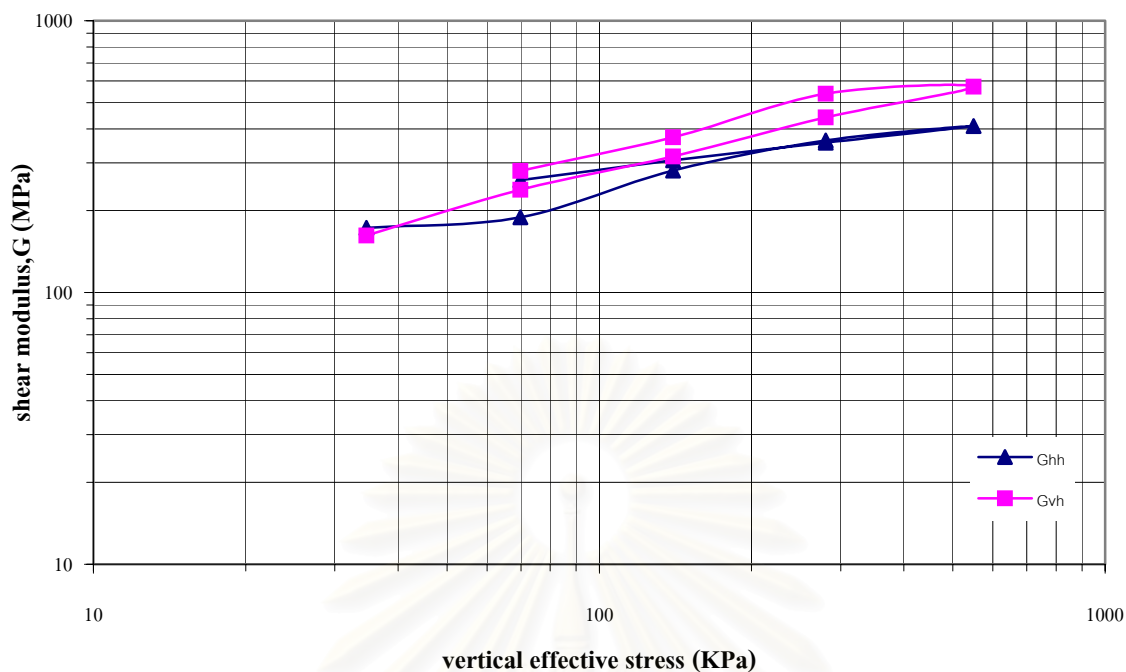
รูปที่ 4.7 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 0 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$)



รูปที่ 4.8 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 30 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$)



รูปที่ 4.9 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 45 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$)



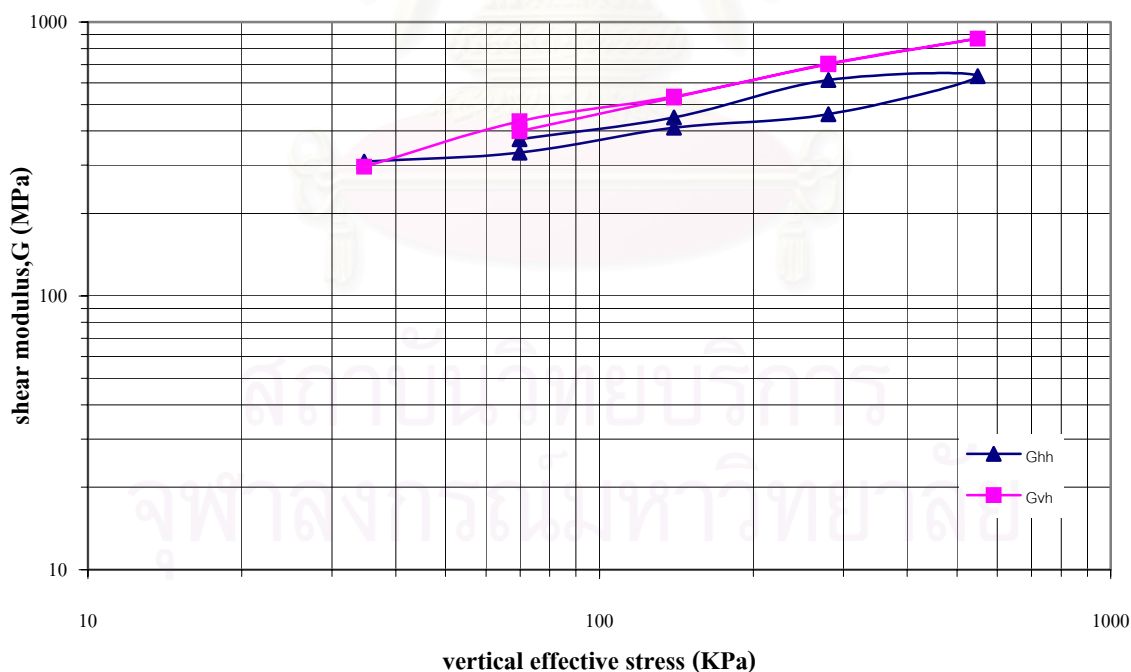
รูปที่ 4.10 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 60 องศา) ตัวอย่างอยู่ในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$)

เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ $G = \rho v^2$ ในผลการทดสอบพบว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของตัวอย่างทรายที่อยู่ในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$) มีค่าสูงกว่า ตัวอย่างทรายที่อยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$) อยู่ประมาณ 14 – 25%

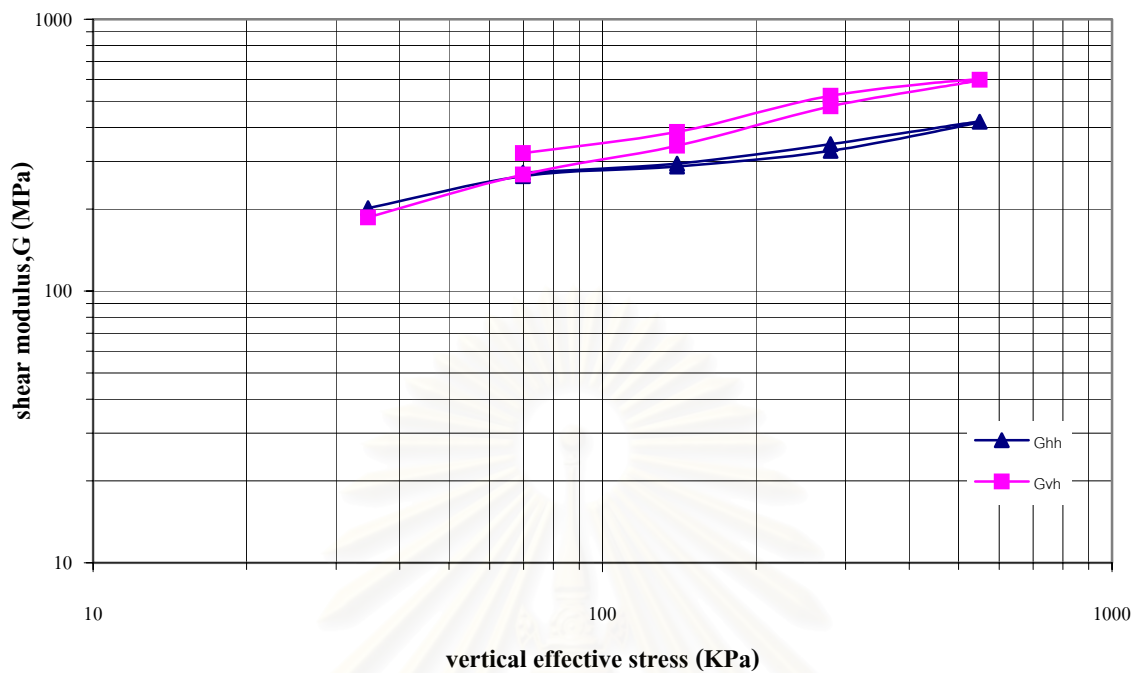
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างวิธีที่ 2

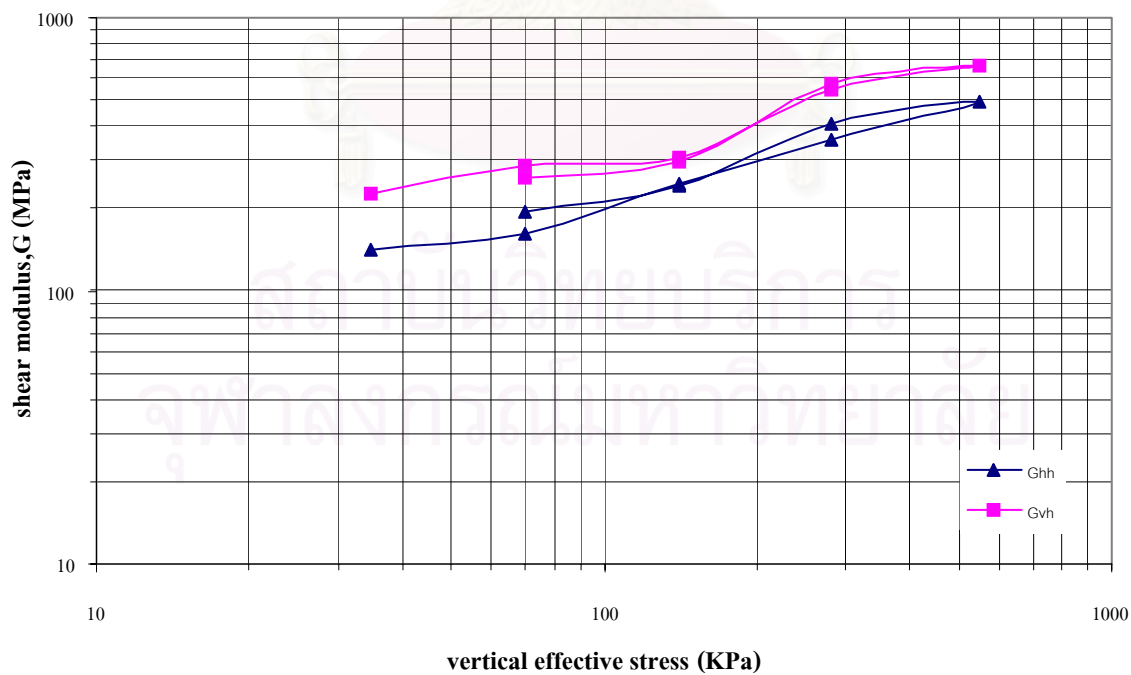
การทดสอบในวิธีนี้ จะทำการบดอัด (Compaction) ตัวอย่างทรายก่อนการทดสอบ และจากผลการทดสอบ เมื่อทำการเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ_v') พบว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และความแตกต่างของค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้งกับค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ โดยตัวอย่างทรายที่วางในแนวราบ (มุม 0 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 12 – 35% ตัวอย่างทรายที่วางในแนวราบ (มุม 30 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 15 - 33% ตัวอย่างทรายที่วางในแนวราบ (มุม 45 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 17 – 38% ตัวอย่างทรายที่วางในแนวราบ (มุม 60 องศา) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (Gvh) มีค่าสูงกว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (Ghh) อยู่ประมาณ 30 - 54%



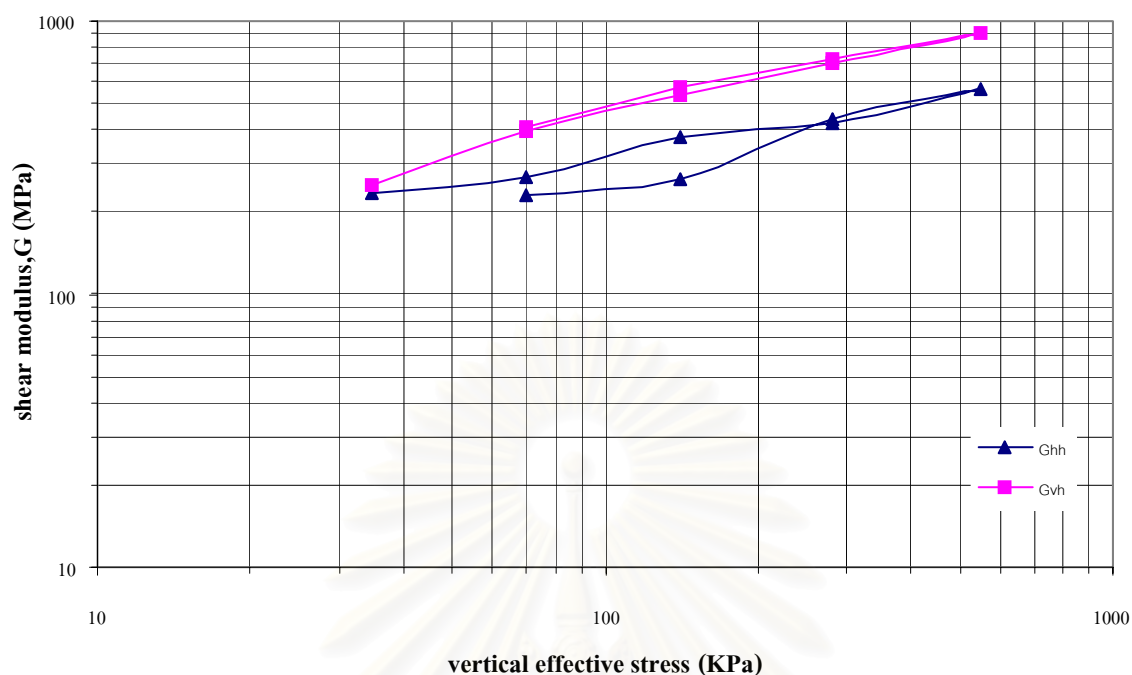
รูปที่ 4.11 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 0 องศา) ตัวอย่าง Compaction



รูปที่ 4.12 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 30 องศา) ตัวอย่าง Compaction



รูปที่ 4.13 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 45 องศา) ตัวอย่าง Compaction



รูปที่ 4.14 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในแนวราบ (มุม 60 องศา) ตัวอย่าง Compaction

4.3 พฤติกรรมของค่าโมดูลัสแบบเฉือน ในช่วง loading และ unloading

จากผลการทดลองค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) ต่อค่า $F(e)$ ในรูปของ $G/F(e)$ กับ หน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ_v') ในแกนธรรมชาติ กับแกน log พบว่าเมื่อพิจารณาการทดลองในช่วง loading และ unloading ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในช่วง unloading จะมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในช่วง loading อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างทรายจะมีสภาพแน่นขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำการให้น้ำหนักกด (loading) และมีการคืนตัวเล็กน้อยเมื่อนำเอาน้ำหนักออก (unloading) โดยช่วง loading ค่าโมดูลัสแบบเฉือนยังคงเพิ่มขึ้นเป็นแนวเส้นตรง และมีความชันคงที่ ส่วนในช่วง unloading ค่าโมดูลัสแบบเฉือนมีการลดลงคงที่เช่นเดียวกัน

4.4 ผลของโมดูลัสแบบเฉือนที่วัดได้จากแนวราบและแนวตั้ง จากการเปลี่ยนมุมระนาบของการวางตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบในครั้งนี้ ได้มีการวัดความเร็วคลื่นความเค้นในสองทิศทาง คือในแนวราบ (V_{hh}) และในแนวตั้ง (V_{vh}) โดยมีวิธีทดสอบอยู่ 2 วิธี คือวิธีที่ 1 เตรียมตัวอย่างโดยการปล่อยแบบอิสระ (Piuvation) และอีกวิธีคือนำตัวอย่างทรายไปทำการบดอัด (Compaction) ก่อนการทดสอบ และทั้งสองวิธี ในการเตรียมตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนระนาบการวางของตัวอย่าง คือวางทำมุม 0 องศา กับแนวราบ, 30 องศา กับแนวราบ, 45 องศา กับแนวราบ และ 60 องศา กับแนวราบ ซึ่งเป็นผลให้ระนาบที่ตัว bender element ฝังอยู่เปลี่ยนมุมตามไปด้วย

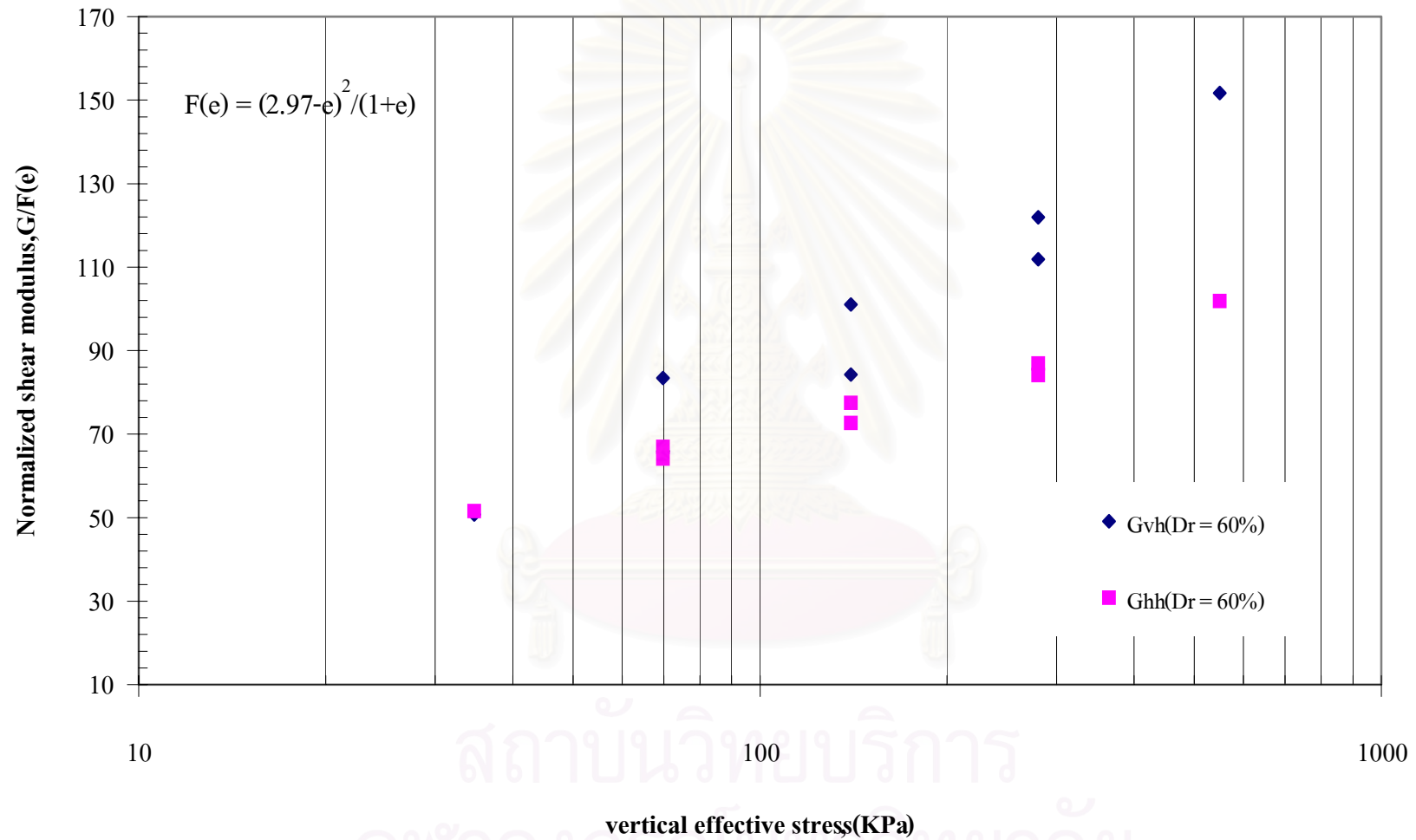
จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อพิจารณากราฟ $G_v/F(e)$ กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress) ในแกน log – log ปรากฏว่า ในวิธีที่ 1 ค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) ในระนาบ มุม 0 องศา, มุม 30 องศา, มุม 45 องศา และมุม 60 องศา มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทั้งทรายในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$) และทรายในสภาพแน่น ($D_r = 80\%$) และสำหรับค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) จะมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่เล็กน้อย โดยทรายในสภาพหลวมที่ระนาบมุม 0 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.21$, มุม 30 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.13$, มุม 45 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.04$ และมุม 60 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.17$ และทรายในสภาพแน่นที่ระนาบมุม 0 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.17$ มุม 30 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.18$, มุม 45 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.31$ และมุม 60 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.26$ ตามลำดับ

เมื่อทำการทดลองในวิธีที่ 2 พบว่า ค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) ในระนาบมุม 0 องศา และระนาบ 60 องศา มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่า ในระนาบมุม 30 องศา และมุม 45 องศา โดยที่ผลต่างระหว่างค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) กับค่า โมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมุมของระนาบมีค่าที่มากขึ้น โดยที่ระนาบมุม 0 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.27$, มุม 30 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.30$ ระนาบมุม 45 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.41$ และมุม 60 องศา มีอัตราส่วน $G_{vh}/G_{hh} = 1.52$ ตามลำดับ

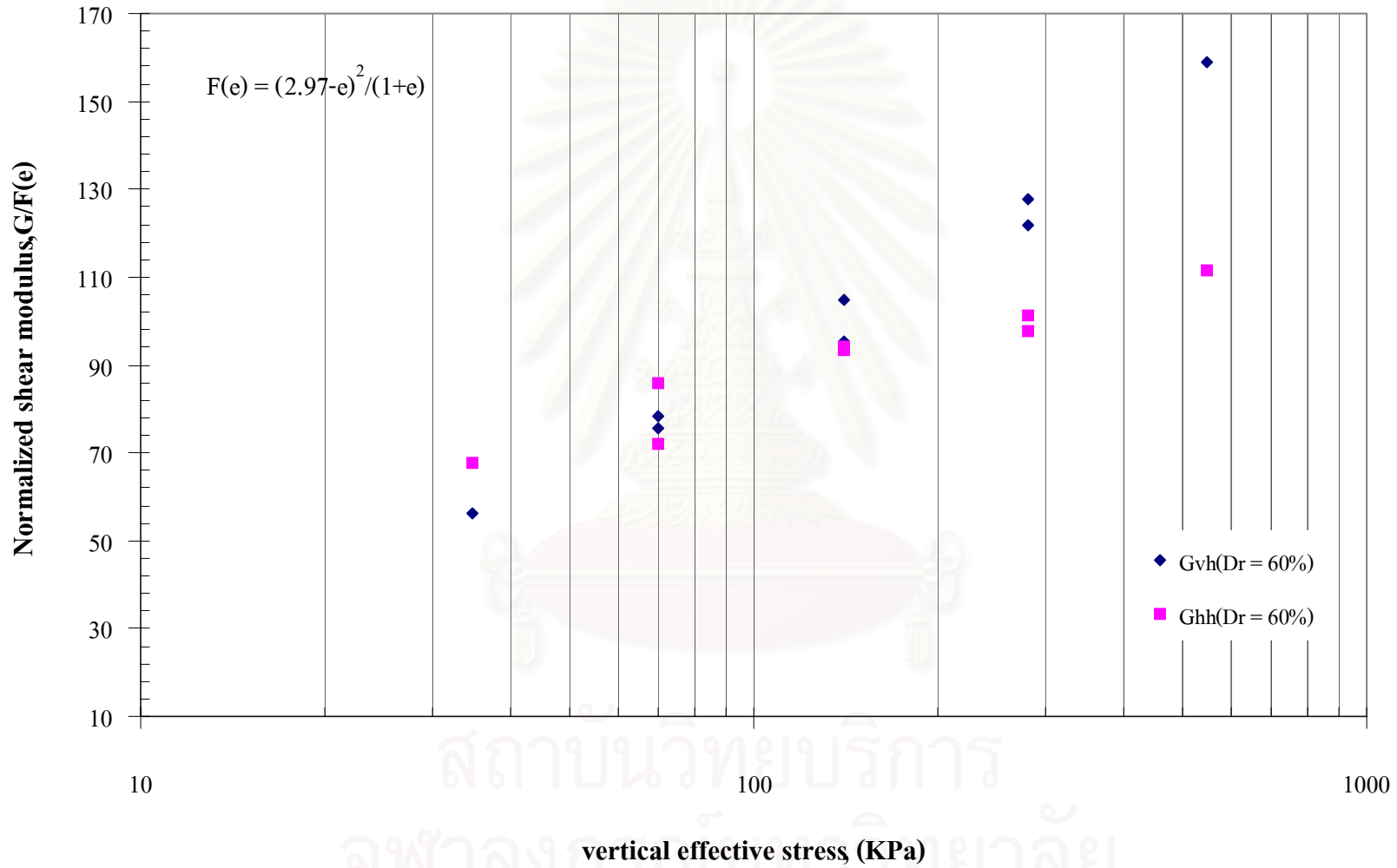
ความแตกต่างของค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) ที่ได้จากการทดสอบทั้งในแนวราบและแนวตั้งนั้น เนื่องจากโครงสร้างภายในของทรายตามธรรมชาติ (inherent anisotropy) และระนาบการเรียงตัวของอนุภาคทราย เมื่อคลื่นความเค้นวิ่งผ่านตัวอย่างทรายในทิศทางที่แตกต่างกัน ทิศทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคทรายก็จะแตกต่างกันตามทิศทางการวิ่งผ่านของคลื่น



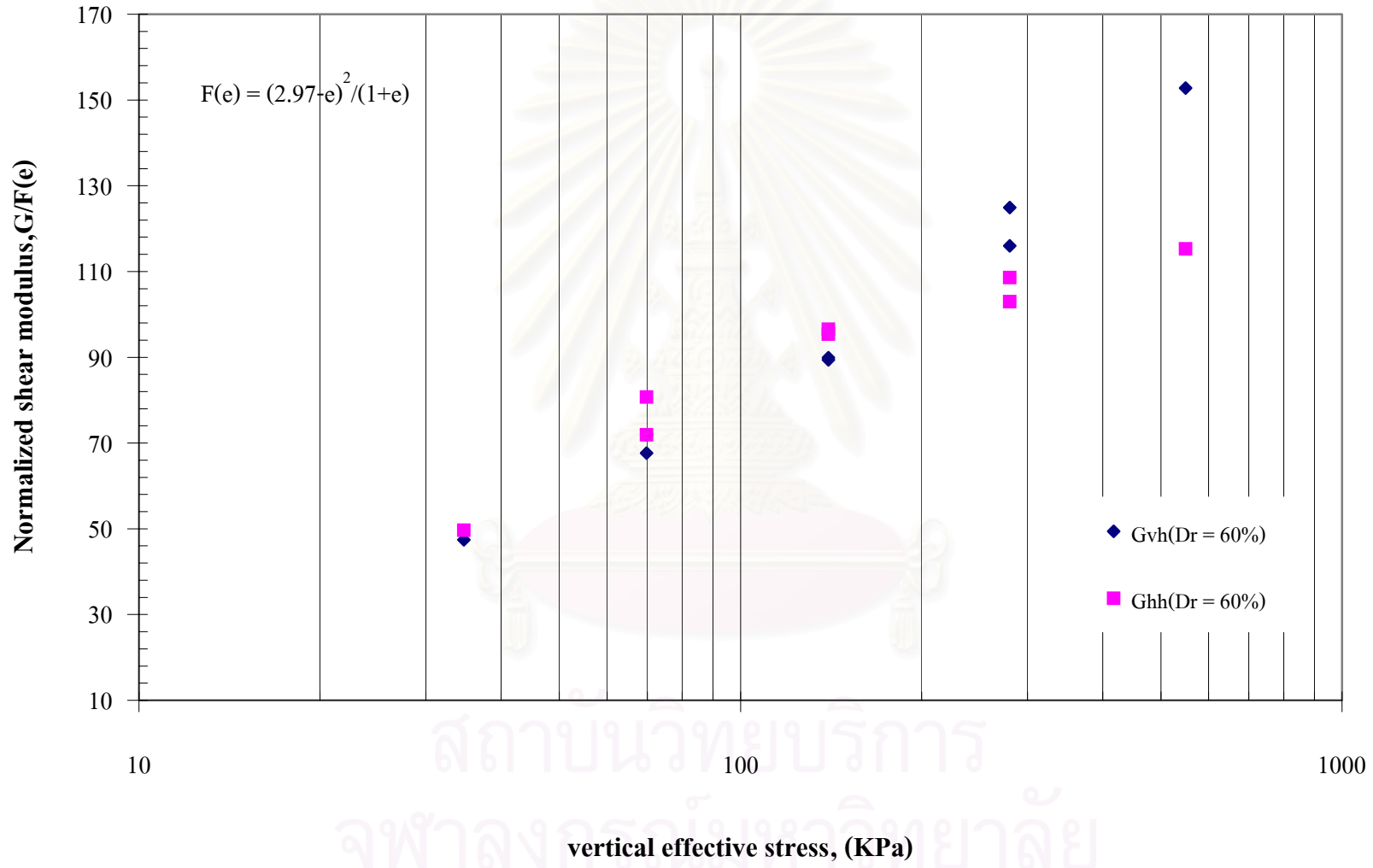
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



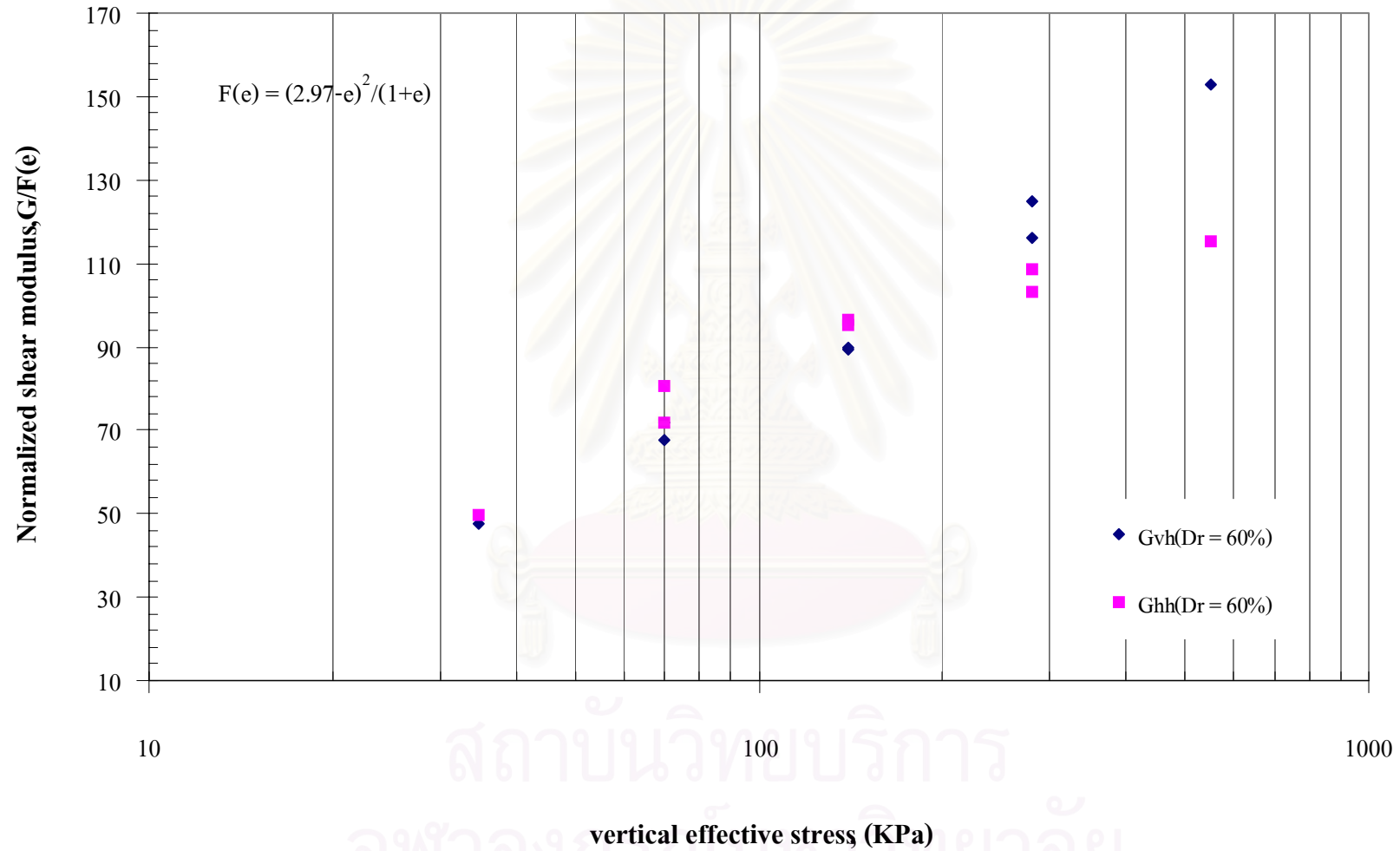
รูปที่ 4.15 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งผลต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางทำมุม 0 องศา (สภาพหลวม)



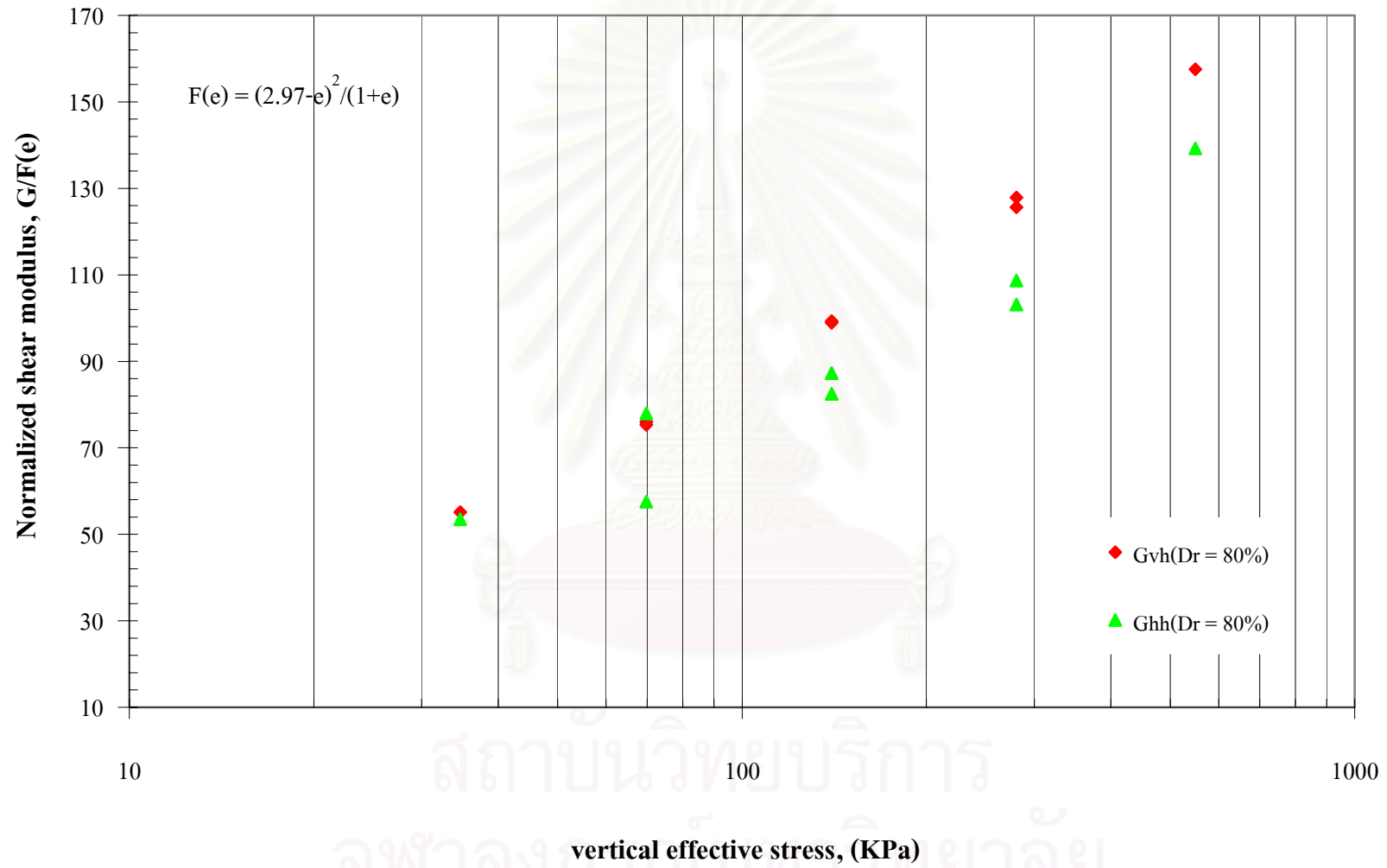
รูปที่ 4.16 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางทำมุม 30 องศา (สภาพหลวม)



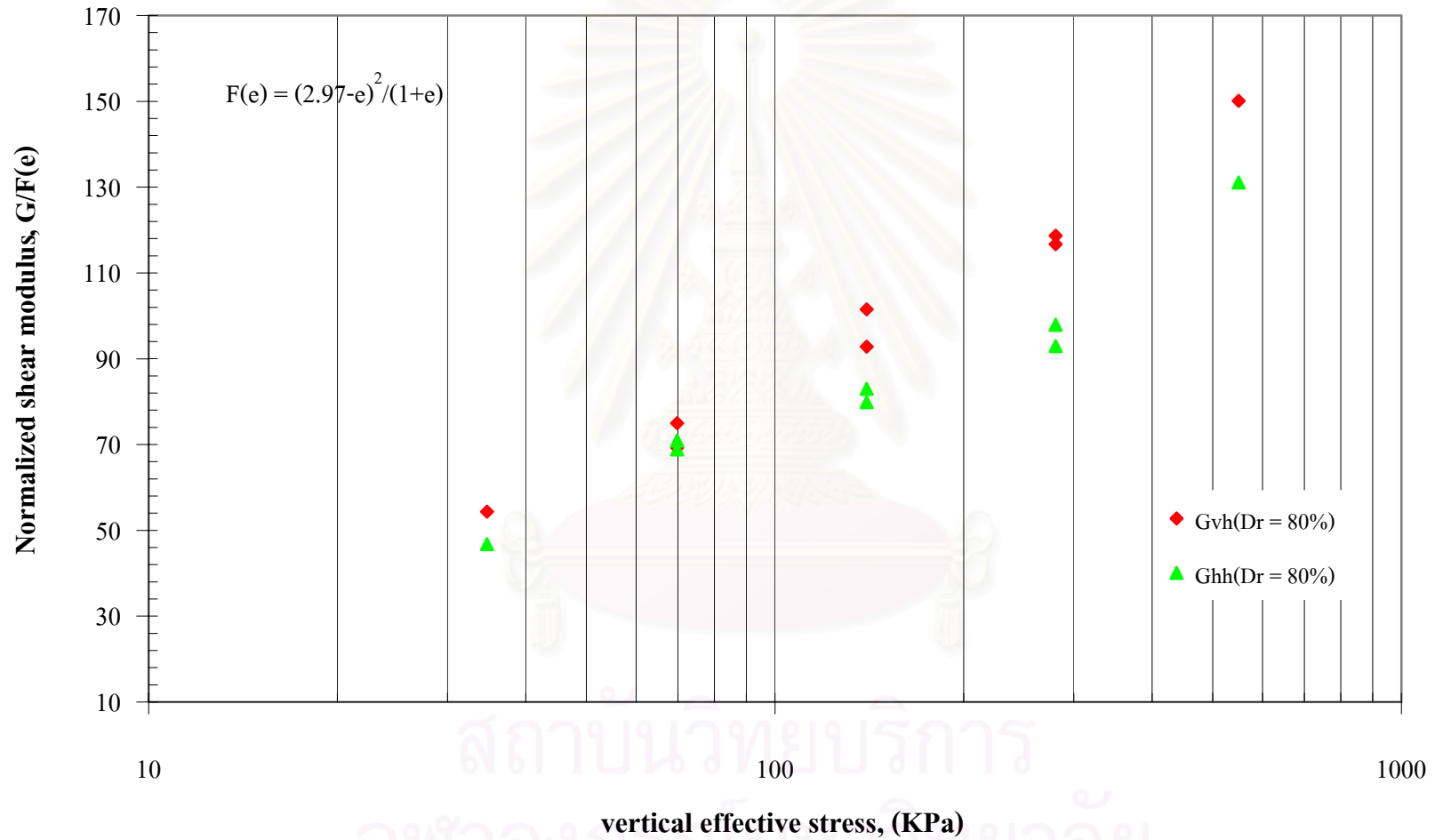
รูปที่ 4.17 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางทำมุม 45 องศา (สภาพหลวม)



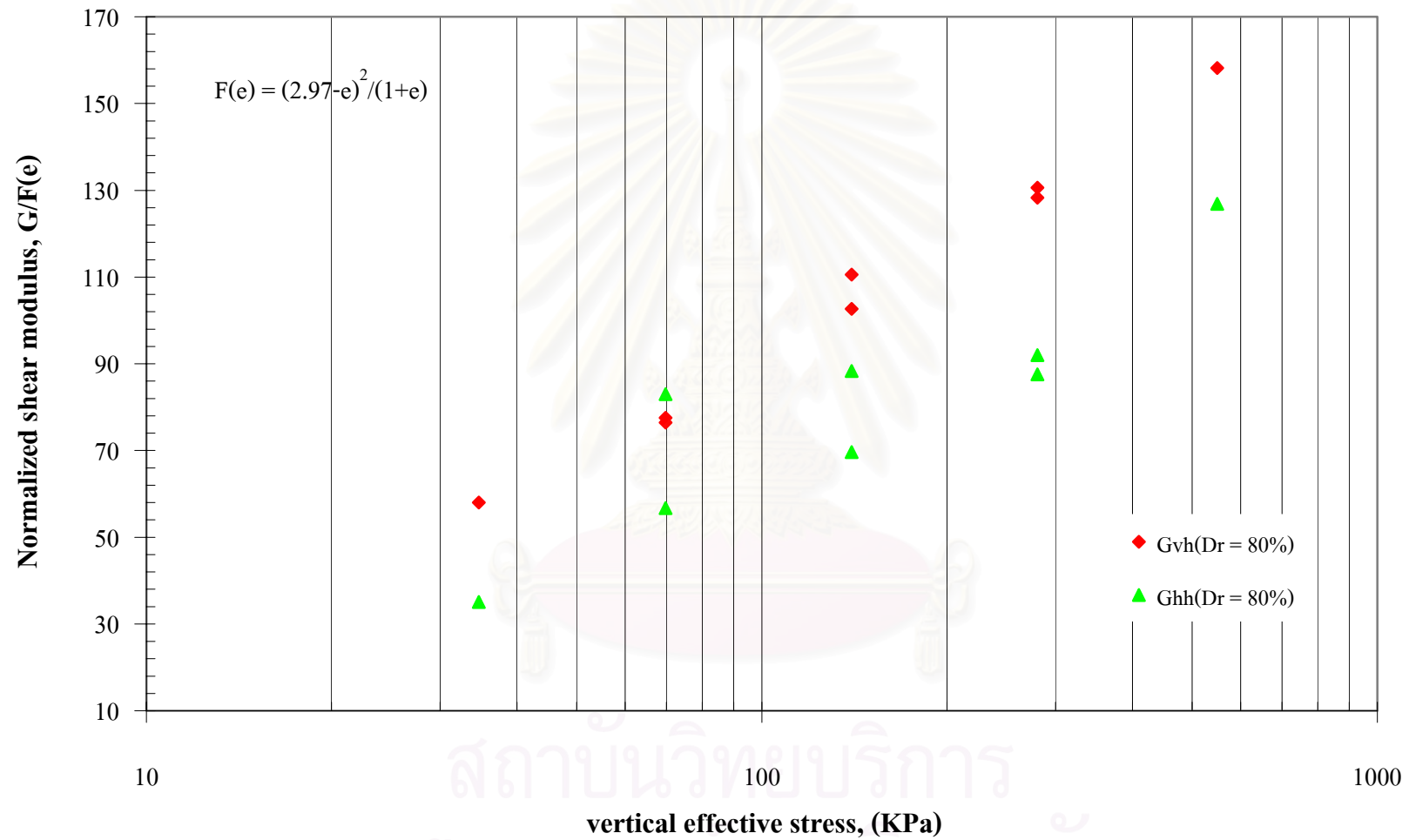
รูปที่ 4.18 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางทำมุม 60 องศา (สภาพหลวม)



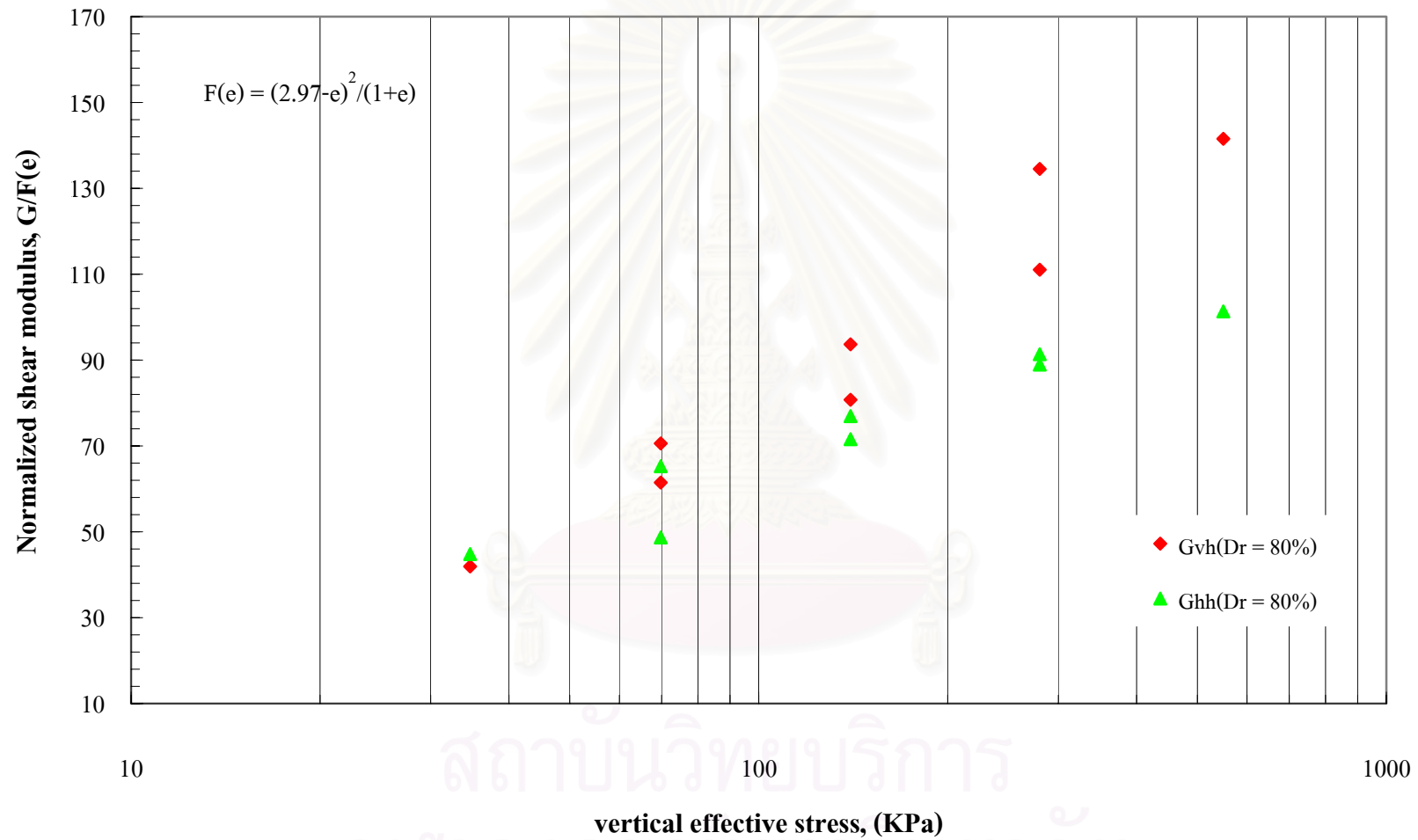
รูปที่ 4.19 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางทำมุม 0 องศา (สภาพแน่น)



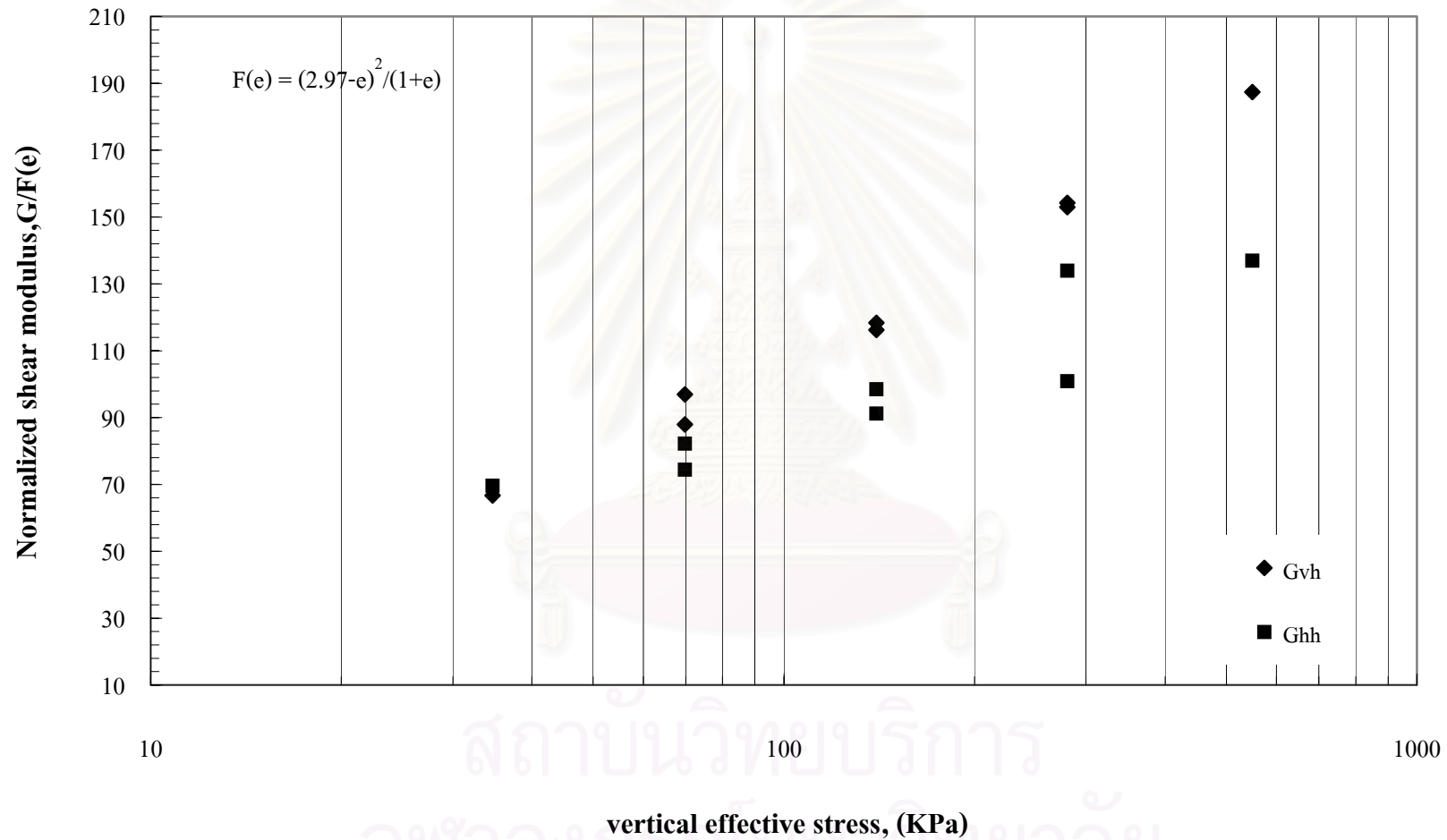
รูปที่ 4.20 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางท่ามุม 30 องศา (สภาพแน่น)



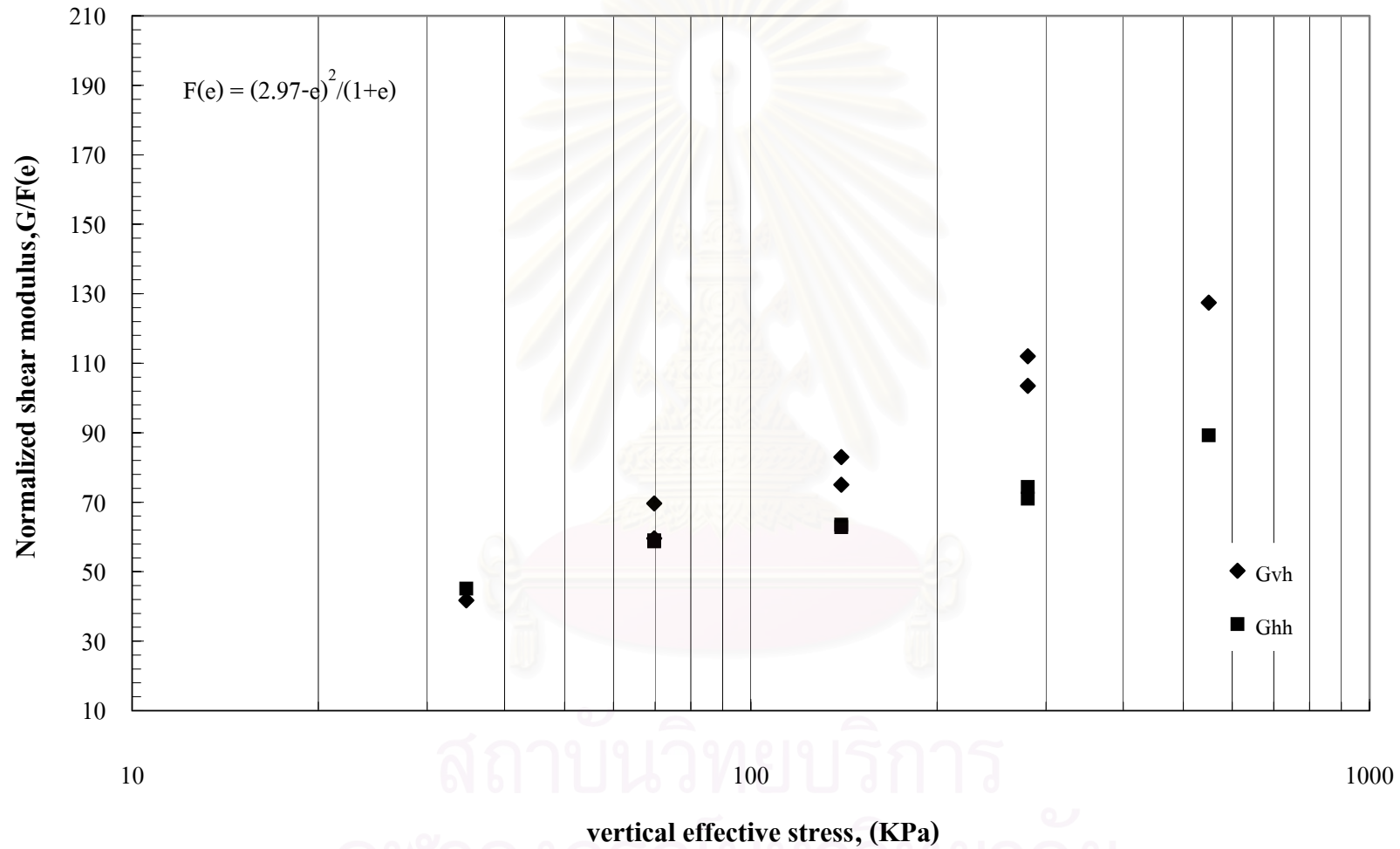
รูปที่ 4.21 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางท่ามุม 45 องศา (สภาพแน่น)



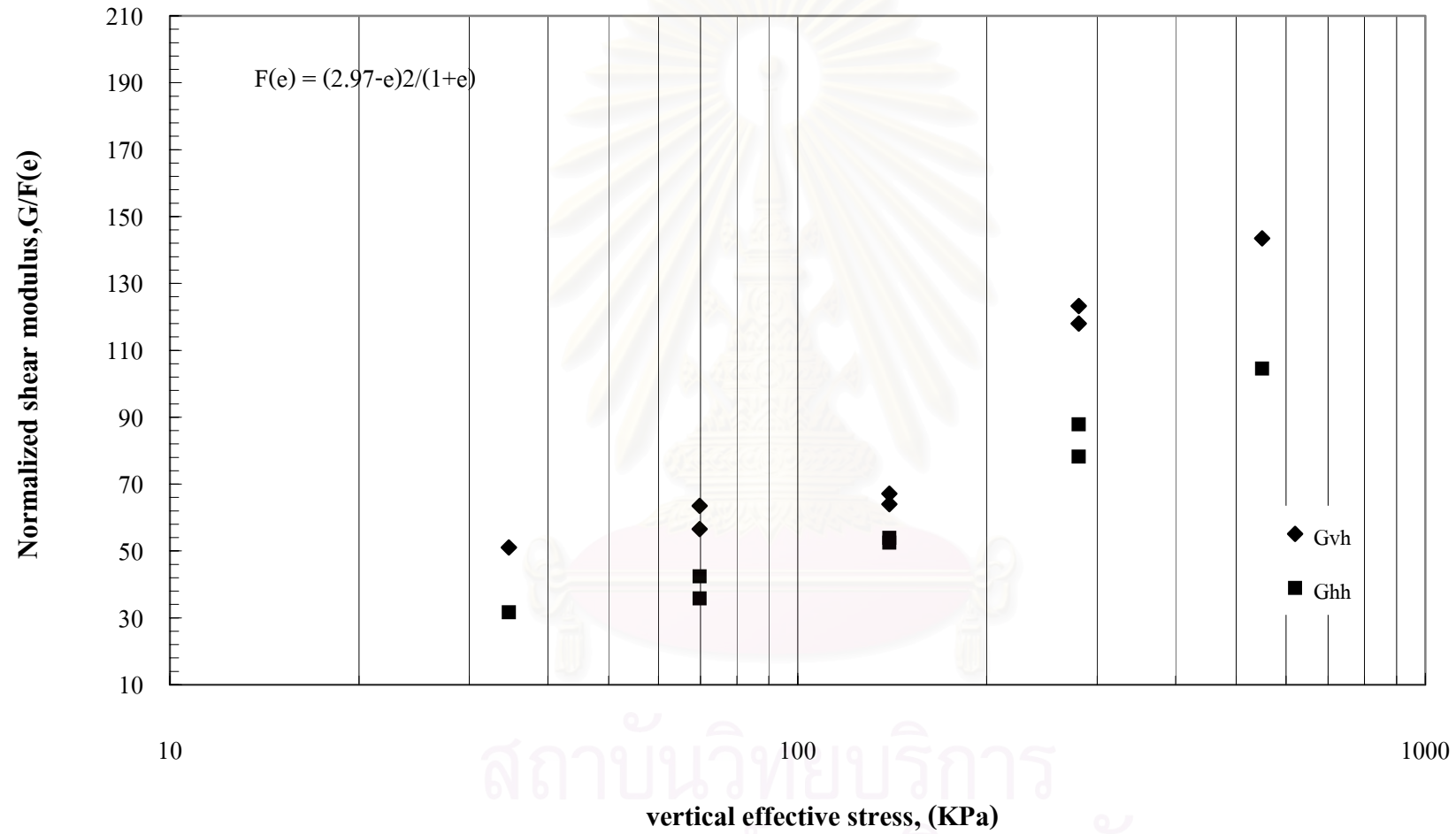
รูปที่ 4.22 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 (Pluvation) ตัวอย่างวางท่ามุม 60 องศา (สภาพแน่น)



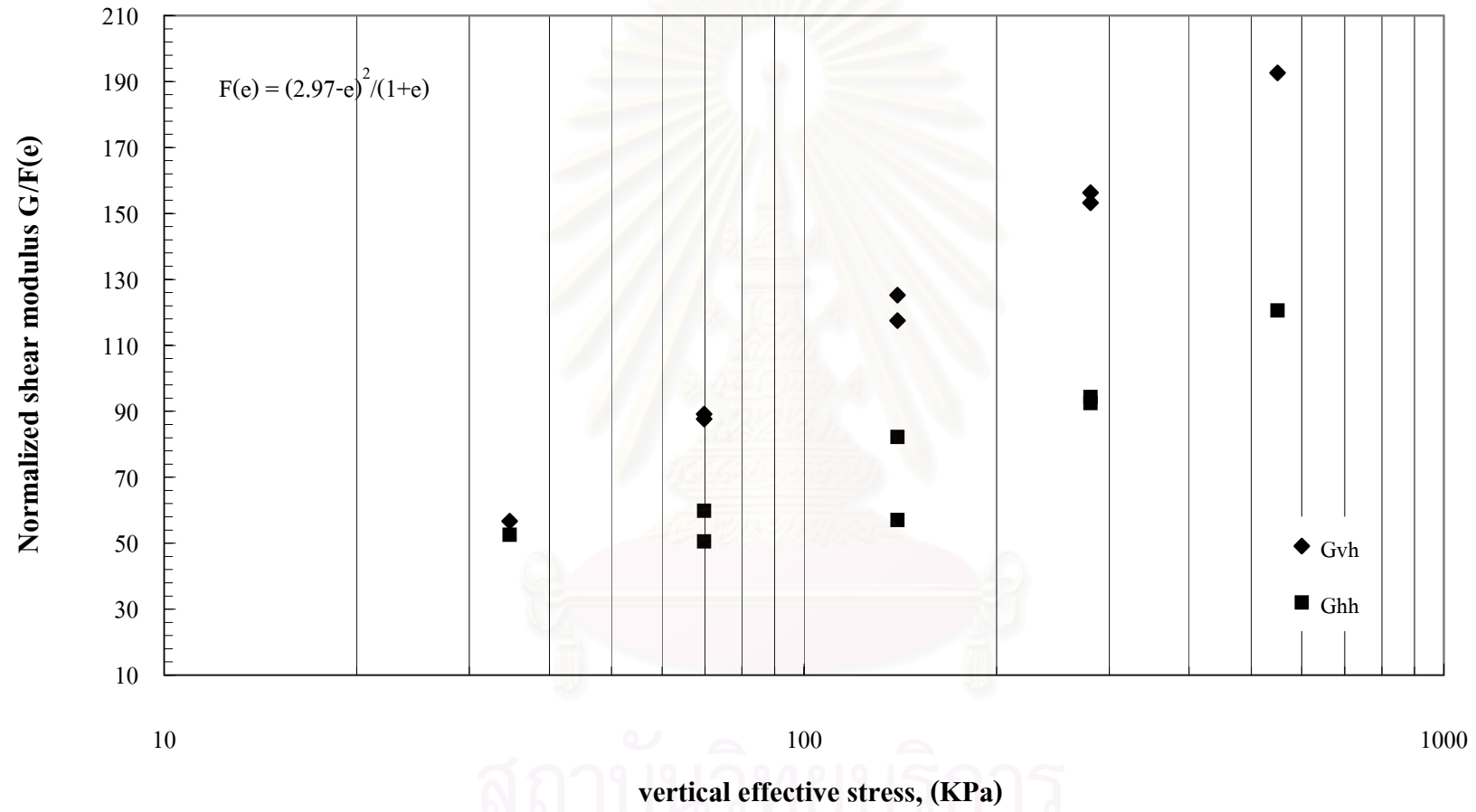
รูปที่ 4.23 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2 (Compaction) ตัวอย่างวางทำมุม 0 องศา



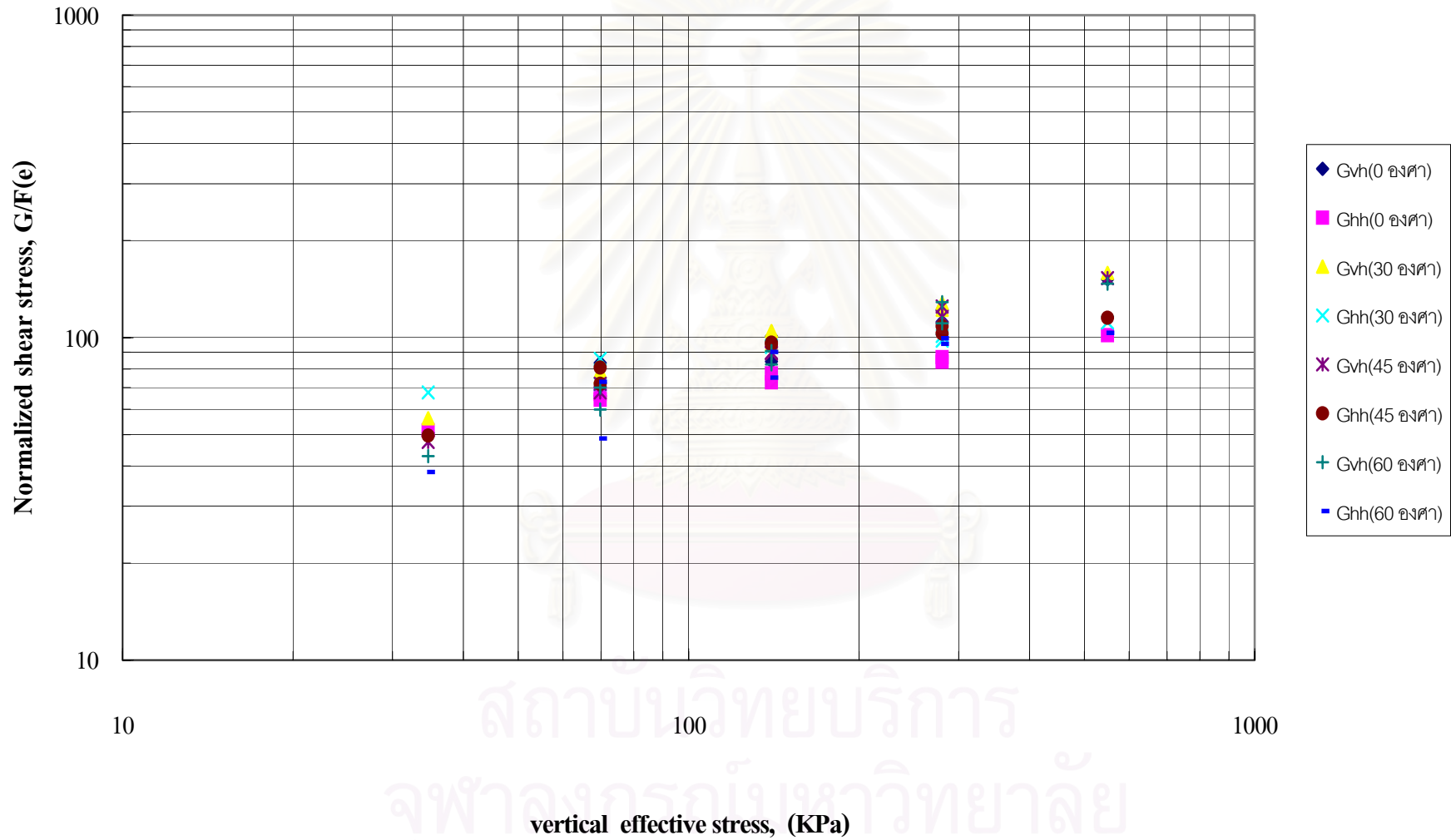
รูปที่ 4.24 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2 (Compaction) ตัวอย่างวางทำมุม 30 องศา



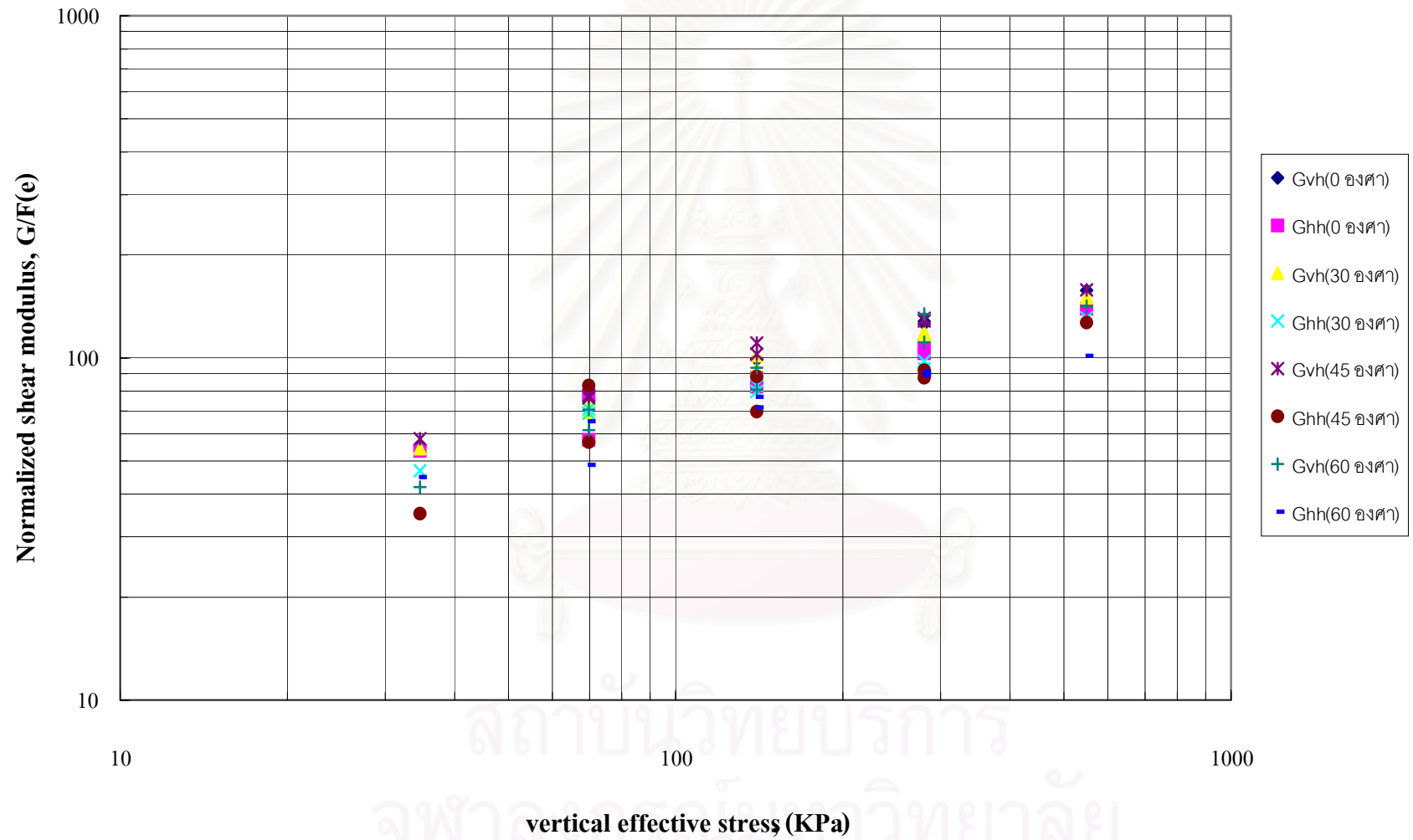
รูปที่ 4.25 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2 (Compaction) ตัวอย่างวางทำมุม 45 องศา



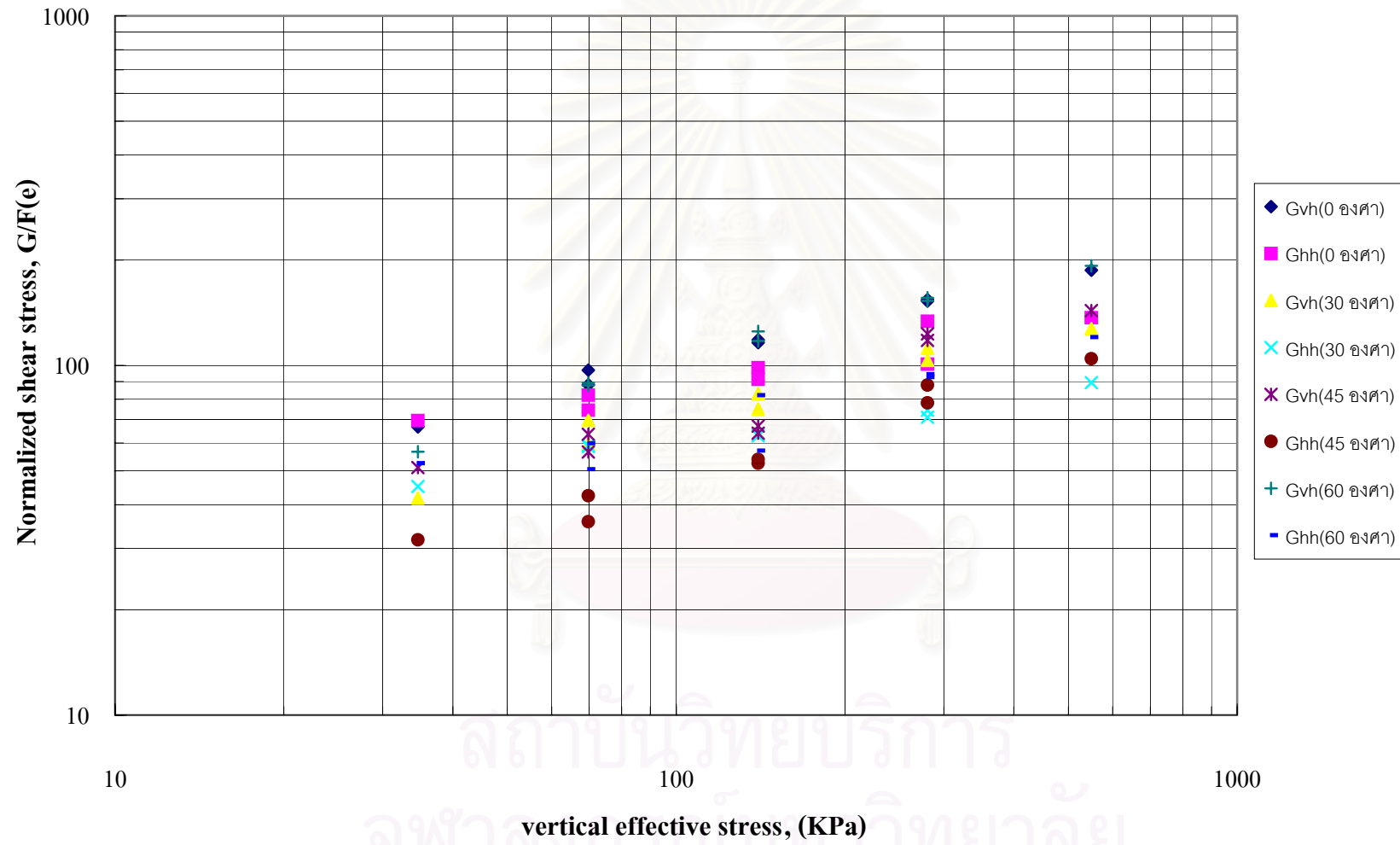
รูปที่ 4.26 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2 (Compaction) ตัวอย่างวางทำมุม 60 องศา



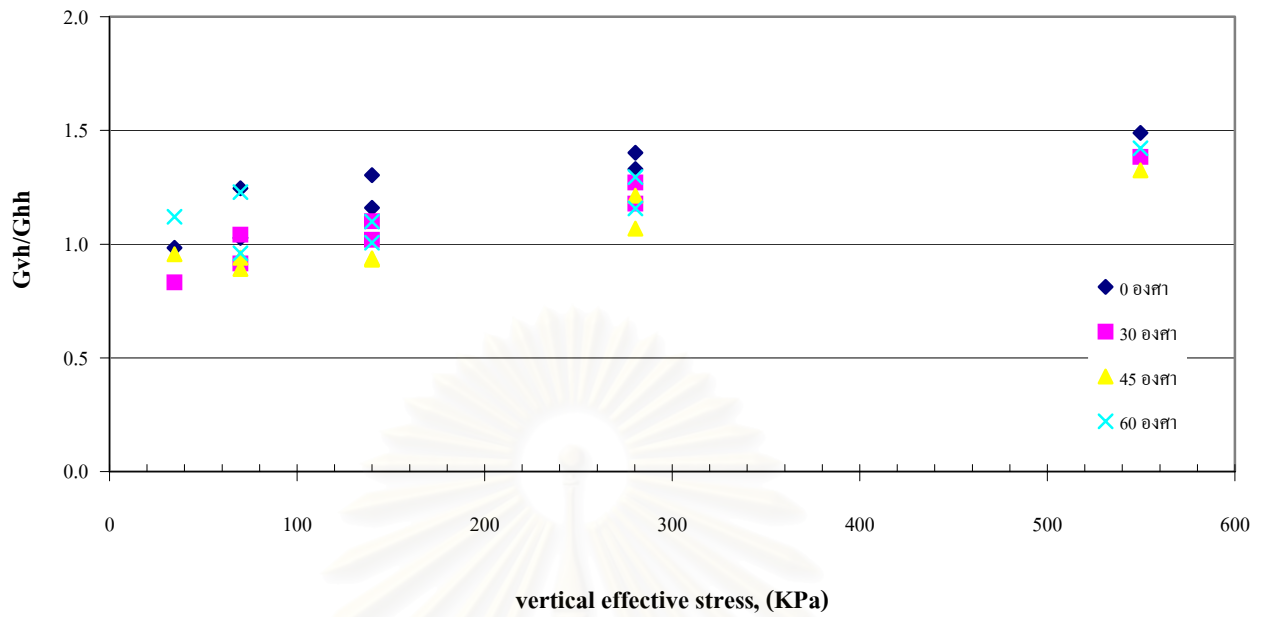
รูปที่ 4.27 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)



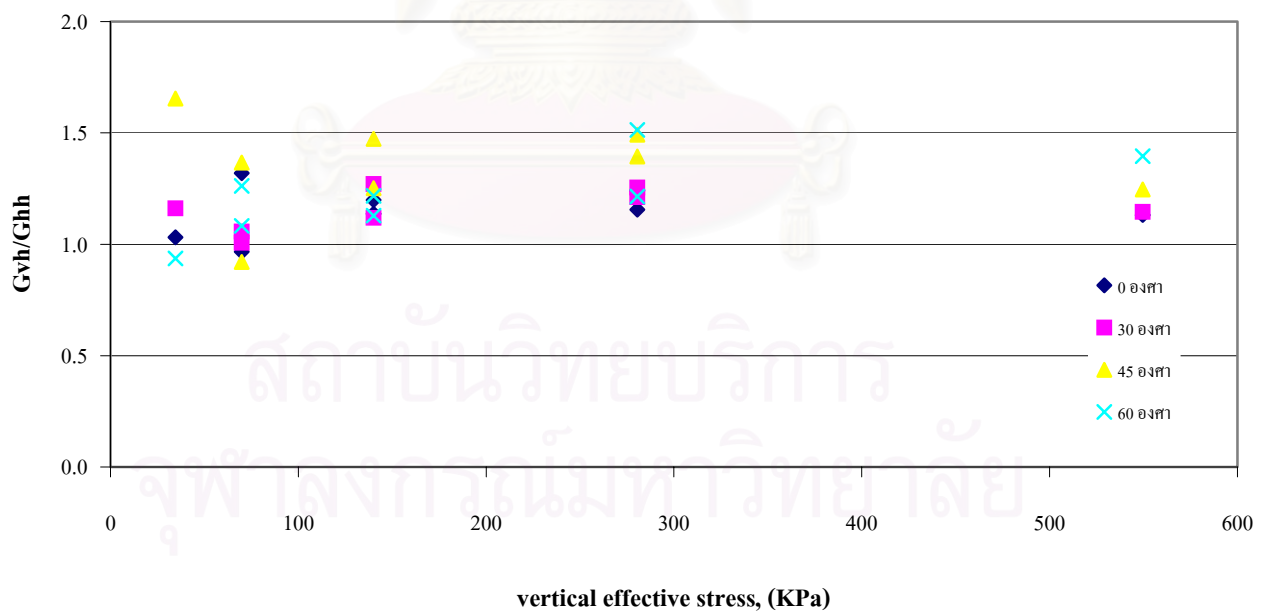
รูปที่ 4.28 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวม ($D_r = 80\%$)



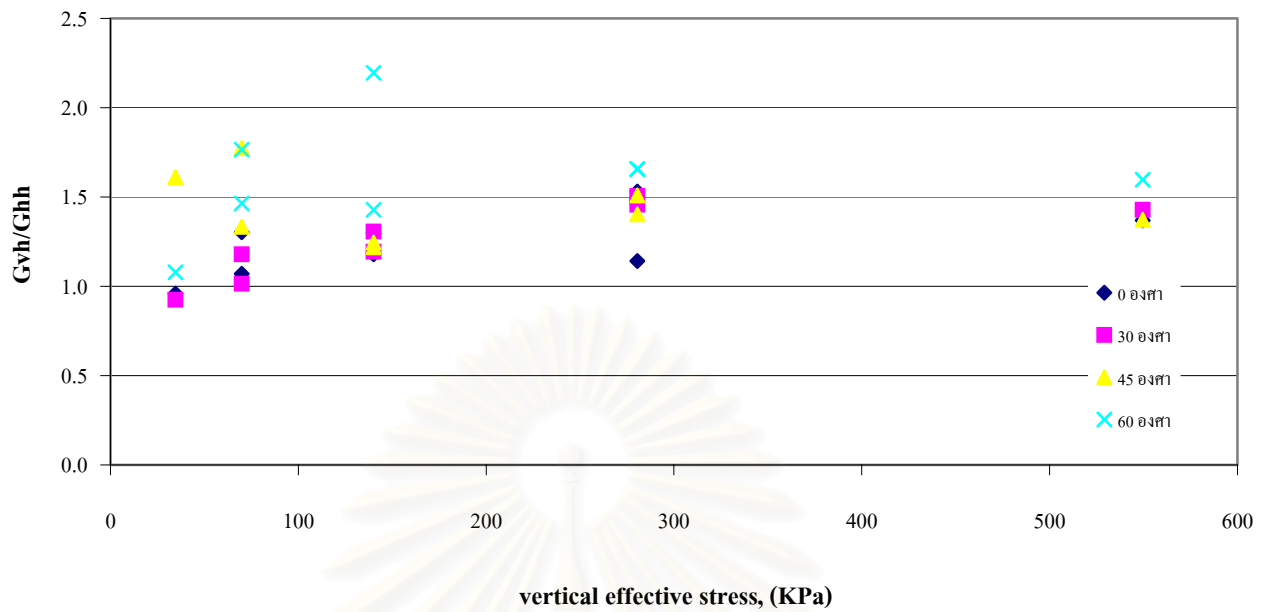
รูปที่ 4.29 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่า Normalized shear modulus ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างบดอัด (Compaction)



รูปที่ 4.30 สัดส่วนค่า G_{vh}/G_{hh} กับ vertical effective stress ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างสภาพหลวม ($D_r = 60\%$)



รูปที่ 4.31 สัดส่วนค่า G_{vh}/G_{hh} กับ vertical effective stress ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 1 ตัวอย่างสภาพแน่น ($D_r = 80\%$)



รูปที่ 4.32 สัดส่วนค่า G_{vh}/G_{hh} กับ vertical effective stress ที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ 2 ตัวอย่าง Compaction

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. แนวโน้มของค่าโมดูลัสแบบเฉือน เมื่อหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ_v') เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสแบบเฉือนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่ออยู่ในรูปแบบของแกน log – log ของความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized shear modulus, $G_v/F(e)$ กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ_v')

2. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) กับหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ_v') ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในช่วง unloading จะมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในช่วง loading อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างทรายจะมีสภาพแน่นขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำการให้น้ำหนักกด (loading) และมีการคืนตัวของตัวอย่างเพียงเล็กน้อย เมื่อนำเอาน้ำหนักกดออก (unloading)

3. ตัวอย่างทรายในสภาพหลวม ($Dr = 60\%$) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) จะมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่ประมาณ 9 – 33% และตัวอย่างทรายในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) จะมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่ประมาณ 11 – 34%

4. ทรายที่อยู่ในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$) จะมีค่าโมดูลัสแบบเฉือน มากกว่าทรายที่อยู่ในสภาพหลวม ($Dr = 60\%$) อยู่ประมาณ 14 – 25 %

5. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized shear modulus, $G_v/F(e)$ กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ_v') ในแกน log – log พบว่าตัวอย่างทรายในสภาพหลวม ($Dr = 60\%$) และตัวอย่างทรายในสภาพแน่น ($Dr = 80\%$) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) และ ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) ที่วัดได้จาก 0 องศา, 30 องศา, 45 องศา และ 60 องศา มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

6. ความแตกต่างของค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) ที่ได้จากการทดสอบทั้งในแนวตั้งและแนวราบ เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติของทรายตามธรรมชาติ (inherent anisotropy) มากกว่าที่จะเกิดจากหน่วยแรงประสิทธิผลที่ให้กับตัวอย่าง

7. ตัวอย่างทรายที่ทำการบดอัด (Compaction) พบว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) จะมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) อยู่ประมาณ 12 – 54% และผลต่างระหว่างค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวตั้ง (G_{vh}) กับค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบ (G_{hh}) จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมุมของระนาบมีค่ามากขึ้น

8. ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของตัวอย่างทรายที่ทำการบดอัด (Compaction) ที่วัดได้ในระนาบ 0 องศา และระนาบ 60 องศา มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าในระนาบ 30 องศา และระนาบ 45 องศา ตามลำดับ

9. ตัวอย่างทรายที่ทำการบดอัด (Compaction) ความแตกต่างของค่าโมดูลัสแบบเฉือน (shear modulus) ที่ได้จากการทดสอบทั้งในแนวตั้งและแนวราบ จะมีค่ามากกว่าการทดสอบโดยวิธีปล่อยแบบอิสระ (pluvation) นั้น เนื่องจากได้ทำการบดอัดตัวอย่างทรายนก่อนการทดสอบ ทำให้อนุภาคของเม็ดทรายบางส่วนเกิดการแตกหัก ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่วิ่งผ่านตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป อาจเป็นสาเหตุทำให้ค่าโมดูลัสแบบเฉือนในแนวราบลดลงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

1. ติดตั้งแผ่น bender element เพิ่มขึ้นอีก เพื่อศึกษาผลกระทบของคลื่นความเค้นในทิศทางและระนาบที่ต่างๆกัน
2. ศึกษาในตัวอย่างทรายที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เพื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบและใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบต้านทานเนื่องจากแผ่นดินไหว
3. นำผลการทดลองที่ได้มาใช้ในโปรแกรมต่างๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธีรินทร์ อมรวิทยารักษ์. ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนโดยเบนเดอริอิลิเมนต์ระหว่างการทดสอบแบบอัดสามแกน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2000

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
- CALLISTO, L. & RAMPOLLO, S. Shear strength and small strain stiffness of a natural clay under general stress conditions. Geotechnique 52,8(2002): 547-560
- 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
- DYVICK, R. & MADHSHUS, C. Laboratory Measurements of G_{max} using Bender Elements. Proceedings of ASCE Annual Convention (1985)
- ENSLEY, R. A. Comparison of P- and S-wave seismic data: A new method for detecting gas reservoirs. Geophysics, 49, 9(1984): 1420-1431
- FIORAVANTE, V & CAPOFERRI, R. On the use of Multi-directional Piezoelectric Transducers in Triaxial Testing. Geotechnical Testing Journal. GTJODJ., 24, 3, (September 2001): 243-255
- 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, 102, 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)
- TEACHAVORASINSKUN,S. & AMORNWITHAYALAX,T. Elastic shear modulus of Bangkok clay during undrained triaxial compression. Geotechnique 52,(2002): 537-540
- TEACHAVORASINSKUN,S. & AKKARAKUN,T. Path of elastic shear modulus of clays. Geotechnique. 54,5,(2004): 331-333
- THOMANN. T. G. & HRYCIW. R. D. Laboratory Measurement of Small Strain Shear Modulus Under K_0 Conditions. Geotechnical Testing Journal. GTJODJ., 13, 12, (June 1990): 97-105
- TOKHEIM, O. Deformation Behavior of Soils in terms of Shear Modulus. NGI Publication, 152(1991)
- Zeng. X and Ni.B. Application of Bender Elements in Measuring G_{max} of Sand Under K_0 Condition. Geotechnical Testing Journal. GTJODJ , 21,3, (September 1998): 251-263

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวลาวัต บินอุมาร์ เกิดวันที่ 5 มีนาคม 2517 ที่อำเภอปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2545 ปัจจุบันรับราชการ ตำแหน่ง วิศวกรโยธา 5 สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย