

การศึกษาอิทธิพลของวิธีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวอ่อนภายใต้สภาพ  
ระบายนํ้า



นายจตุรงค์ ทองจรรูแห

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 0 7 0 2 3 2 1 2 1

A STUDY OF INFLUENCE OF STRESS PATH ON SHEAR WAVE VELOCITY OF SOFT  
CLAY UNDER DRAINED CONDITION



Mr.Jaturong Thongjarukae

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของวิถีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน  
ของดินเหนียวอ่อนภายใต้สภาพระบายน้ำ

โดย

นายจตุรงค์ ทองจรรูแซ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวัดิต บุญญะฐิติ

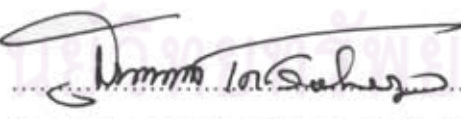
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiratวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธีระเจริญกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จีรวัดิต บุญญะฐิติ)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เดชวรสินสกุล)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ)

จตุรงค์ ทองจารุแห : การศึกษาอิทธิพลของวิถีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวอ่อนภายใต้สภาพระบายน้ำ (A STUDY OF INFLUENCE OF STRESS PATH ON SHEAR WAVE VELOCITY OF SOFT CLAY UNDER DRAINED CONDITION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิ, 73 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการดัดแปลงเครื่องทดสอบสามแกนที่มีอยู่เดิมให้สามารถควบคุมวิถีของหน่วยแรงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันน้ำและมอเตอร์โดยตัดสัญญาณป้อนกลับเชิงไฟฟ้าที่ได้จากมาตรวัดชนิดต่างๆ เครื่องมือดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการศึกษาผลของวิถีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนในดินเหนียวอ่อนสร้างใหม่โดยการวัดความเร็วคลื่นเฉือนในระหว่างการทดสอบภายใต้วิถีหน่วยแรง 3 แบบที่มีจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดเหมือนกัน

จากผลการทดสอบพบว่าวิถีหน่วยแรงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นเฉือนและความเร็วของคลื่นเฉือนมีความสัมพันธ์แบบเลขชี้กำลังกับความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) และความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) โดยความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยมีอิทธิพลต่อความเร็วคลื่นเฉือนมากกว่าความเค้นเบี่ยงเบนในทุกวิถีหน่วยแรง และได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $G = f(F(e), P')$  พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนแปรผันตามฟังก์ชันของอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าช่วงทำการเฉือนตัวอย่างที่ความเค้นเบี่ยงเบนสูงในขณะที่ความเค้นเฉลี่ยต่ำและความเค้นเบี่ยงเบนสูงในขณะที่ความเค้นเฉลี่ยสูง ค่าความเร็วคลื่นที่วัดได้มีแนวโน้มไม่สอดคล้องกัน ซึ่งสันนิษฐานว่าในขณะที่ทำการทดสอบไม่สามารถควบคุมอัตราการคายน้ำได้อย่างสมบูรณ์จึงทำให้เกิดการอัดตัวคายน้ำอยู่ในขณะที่เฉือนตัวอย่างจึงต้องมีการปรับปรุงต่อไป

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่อนิสิต.....จตุรงค์ ทองจารุแห.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....[Signature].....

ปีการศึกษา.....2553.....

## 5070232121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : STRESS PATH / SHEAR WAVE VELOCITY / TRIAXIAL APPARATUS

JATURONG THONGJARUKAE : A STUDY OF INFLUENCE OF STRESS PATH ON SHEAR WAVE VELOCITY OF SOFT CLAY UNDER DRAINED CONDITION. ADMSOR : ASSOC.PROF. TIRAWAT BOONYATEE, D.Eng, 73 pp.

In this study, the effects of stress path on shear wave velocity of clay, a number of modifications were made on an existing triaxial apparatus. A computer program is used to automatically control pore pressure and driving motor of the apparatus based on feedback signals from various transducers. By modified apparatus, reconstitute clay specimens were tested under three different stress-paths having same origin and destination.

From the results, stress path influenced to shear wave velocity and shear wave velocity have exponent relationship with main effective stress ( $P'$ ) and deviation stress. Main effective stress have more influenced than deviation stress in every stress path. For  $G = f(F(e), P')$ , shear modulus varied with function of void ratio and effective stress. Moreover, shear wave velocity trends were not consisted at shear phase which high deviation stress and low main effective stress and high deviation stress and high main effective stress. Assume that at shear phase cannot controlled the perfect consolidation, it caused the consolidation during shear test. So, it's should be improved shear phase later.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....CIVIL ENGINEERING.....

Student's Signature .....

Field of Study.....CIVIL ENGINEERING.....

Advisor's Signature.....

Academic Year...2010.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตถ์ บุญญะฐิ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการพัฒนาเครื่องทดสอบ ตรวจสอบ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาใช้เวลาและให้คำแนะนำ รวมทั้งข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่น้อง สาขาวิศวกรรมปฐพี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้กำลังใจและเป็นมิตรที่ดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในกองปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ คงมีวันนี้ไม่ได้หากไม่มีบุคคลทั้งสองท่านนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา – มารดา ที่ให้การสนับสนุนและอดทนส่งลูกเรียนด้วยความยากลำบากจนสำเร็จการศึกษา



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....  | ญ    |
| สารบัญภาพ.....  | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                           | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                                  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....  | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                | 3    |
| 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....                                       | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                        | 4    |
| 2.1 บทนำ.....   | 4    |
| 2.2 ค่าโมดูลัสของดิน (Soil Modulus).....                          | 5    |
| 2.3 พฤติกรรม Stress – Strain ของดิน.....                          | 6    |
| 2.4 ลักษณะพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ระดับ ความเครียดต่าง..... | 7    |
| 2.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน.....                     | 9    |
| 2.6 วิธีการวัดค่า Modulus ในวิธีต่าง ๆ.....                       | 10   |
| 2.6.1 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Large Strain Levels.....          | 11   |
| 2.6.2 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small Strain Levels.....          | 11   |
| 2.6.3 วิธี Hardin Resonant Column Test.....                       | 15   |
| 2.6.4 Drnevich Resonant Column Test.....                          | 15   |
| 2.6.5 Ultra Sonic Shear Wave Velocity Measurement.....            | 16   |
| 2.6.6 Cyclic Test.....  | 16   |
| 2.6.7 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small Strain.....                 | 19   |
| 2.7 การวัดค่า Shear Modulus ในสนาม.....                           | 22   |

|  |    |
|--|----|
| 2.7.1 Rayleigh Wave Velocity Surey.....  | 22 |
| 2.7.2 Seismic Refraction Survey.....   | 22 |
| 2.7.3 Down Hole Test.....  | 23 |
| 2.7.4 Cross Hole Test.....   | 24 |
| 2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับดินเหนียวสร้างใหม่.....  | 25 |
| บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....  | 29 |
| 3.1 การดัดแปลงเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน.....  | 29 |
| 3.2 ส่วนของเครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ประกอบเครื่องทดสอบสามแกน.....   | 29 |
| 3.2.1 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณและมาตรวัดต่าง.....   | 29 |
| 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเร็วคลื่น.....  | 33 |
| 3.3 การติดตั้งแผ่น Bender Element กับเครื่องทดสอบ.....   | 35 |
| 3.4 ส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมวิธีของหน่วยแรง.....   | 37 |
| 3.5 การควบคุมวิธีหน่วยแรง (Control Stress Path).....   | 39 |
| 3.6 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ.....   | 40 |
| 3.7 ขั้นตอนการทดสอบ.....   | 41 |
| 3.7.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ.....  | 41 |
| 3.7.2 การเตรียมเครื่องมือทดสอบและจัดตัวอย่างในเครื่องทดสอบ.....  | 41 |
| 3.7.3 ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัว (Saturation).....  | 43 |
| 3.7.4 วิธีการวัดความเร็วของคลื่นความเค้น (Shear wave measurement)....  | 45 |
| 3.7.5 ขั้นตอนการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรง.....  | 46 |
| บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....   | 47 |
| 4.1 บทนำ.....  | 47 |
| 4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมขั้นพื้นฐานระหว่างรุ่นของดินเหนียวสร้างใหม่.....   | 47 |
| 4.3 ผลการพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนและการตรวจวัด<br>ค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยระบบอัตโนมัติ..... | 48 |
| 4.4 ผลกระทบของวิธีหน่วยแรงต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือน(Shear Wave Velocity).....   | 51 |
| 4.5 ความสัมพันธ์ทางอิมไพริกัล.....   | 66 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....   | 70 |
| 5.1 บทนำ.....  | 70 |



|  |    |
|--|----|
| 5.2 ผลการดัดแปลงเครื่องทดสอบสามแกน.....                                  | 70 |
| 5.3 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบต่างๆ.....              | 70 |
| 5.4 ข้อดี-ข้อเสีย ในการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยเบนเดอริอิลิเมนต์..... | 71 |
| 5.5 ข้อเสนอแนะ.....  | 71 |
| รายการอ้างอิง.....   | 72 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....  | 73 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของดินและวิธีการหาคุณสมบัติที่ Strain ต่าง ๆ.....                   | 10   |
| ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการดูดอากาศออกจากตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ.....       | 43   |
| ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานในแต่ละรุ่นของดินเหนียวสร้างใหม่.....              | 48   |
| ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์แบบเลขชี้กำลังของ $P'$ และ $q$ ต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือน..... | 69   |



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

|  | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับค่าดัชนีความเหลวและ OCR..... | 6    |
| ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_u$ กับ $G$ .....   | 7    |
| ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_p$ กับ $G_{50} / C_u$ .....  | 7    |
| ภาพที่ 2.4 แสดงค่าของ $G$ ในช่วง Strain ต่าง ๆ.....  | 8    |
| ภาพที่ 2.5 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสมในการทดสอบวิธีต่างๆ.....   | 8    |
| ภาพที่ 2.6 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นความเค้นมากกระทำ.....  | 11   |
| ภาพที่ 2.7 Longitudinal Elastic Wave in a Bar.....   | 12   |
| ภาพที่ 2.8 Torsional Waves in a Bar.....   | 14   |
| ภาพที่ 2.9 Resonant Column Test Apparatus Hardin & Richart, 1963 (a) For Torsional Vibration (b) For Longitudinal Vibration..... | 15   |
| ภาพที่ 2.10 Resonant Column Test Apparatus.....  | 16   |
| ภาพที่ 2.11 Cyclic Simple Shear Test.....  | 17   |
| ภาพที่ 2.12 การคำนวณหาโมดูลัสแบบเฉือนและ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop.....  | 17   |
| ภาพที่ 2.13 Cyclic Triaxial Test.....  | 18   |
| ภาพที่ 2.14 การคำนวณหา Young's Modulus และ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop..   | 18   |
| ภาพที่ 2.15 เบนเดอรีอีลิเมนต์.....   | 29   |
| ภาพที่ 2.16 แสดงวิธีการเคลือบ Bender Element ด้วย Epoxy.....   | 20   |
| ภาพที่ 2.17 แสดงวิธีการต่อวงจรการทดสอบด้วย Render Element.....   | 20   |
| ภาพที่ 2.18 Down Hole Method.....  | 24   |
| ภาพที่ 2.19 Cross Hole Test.....   | 25   |
| ภาพที่ 2.20 Seismic Con Penetration apparatus.....   | 26   |
| ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้รับและส่งสัญญาณทางไฟฟ้า NI cRIO 9073.....  | 29   |
| ภาพที่ 3.2 ดิจิตอลมอเตอร์.....   | 30   |
| ภาพที่ 3.3 โหลดเซลล์.....  | 30   |
| ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน (LVDT).....   | 31   |
| ภาพที่ 3.5 มาตรวัดแรงดันน้ำ (Cell Pressure).....   | 31   |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| ภาพที่ 3.6  | มาตรวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ (Volumetric transducer).....   | 32 |
| ภาพที่ 3.7  | อุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำ (Cell & Back Pressure).....   | 32 |
| ภาพที่ 3.8  | อุปกรณ์โอบสัญญาณรบกวน.....   | 33 |
| ภาพที่ 3.9  | แผ่น Bender Element.....   | 33 |
| ภาพที่ 3.10 | Amplifier .....  | 34 |
| ภาพที่ 3.11 | National Instruments NI 6120 cart.....   | 34 |
| ภาพที่ 3.12 | (ก) แสดงการต่อวงจรตัวกำเนิดสัญญาณ (X-pole) (ข)แสดงการต่อวงจรตัวรับ<br>สัญญาณ (Y-pole).....                                   | 35 |
| ภาพที่ 3.13 | (ก) แสดงการต่อวงจรตัวกำเนิดสัญญาณ (X-pole) (ข)แสดงการต่อวงจรตัวรับ<br>สัญญาณ (Y-pole).....                                   | 36 |
| ภาพที่ 3.14 | รายละเอียดการทำงานของเครื่องทดสอบสามแกนที่ได้ดัดแปลงขึ้น.....  | 36 |
| ภาพที่ 3.15 | เครื่องทดสอบสามแกนที่พัฒนาขึ้น.....  | 37 |
| ภาพที่ 3.16 | โปรแกรมควบคุมวิธีหน่วยแรง.....   | 38 |
| ภาพที่ 3.17 | โปรแกรมหาความเร็วคลื่น.....  | 38 |
| ภาพที่ 3.18 | วิธีหน่วยแรงของการทดสอบแบบต่าง ๆ.....  | 39 |
| ภาพที่ 3.19 | การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่.....   | 40 |
| ภาพที่ 3.20 | ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ รุ่นที่ 1.....  | 41 |
| ภาพที่ 3.21 | วิธีการทำตัวอย่างดินให้อิ่มตัวด้วยน้ำ.....   | 44 |
| ภาพที่ 3.22 | แผนผังการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender Element.....   | 45 |
| ภาพที่ 4.1  | แสดงผลการควบคุมวิธีหน่วยแรงของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น A.....  | 49 |
| ภาพที่ 4.2  | แสดงผลการควบคุมวิธีหน่วยแรงของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น B.....  | 49 |
| ภาพที่ 4.3  | แสดงผลการควบคุมวิธีหน่วยแรงของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น C.....  | 50 |
| ภาพที่ 4.4  | ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดิน<br>เหนียวสร้างใหม่รุ่น Aของวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1..... | 52 |
| ภาพที่ 4.5  | ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดิน<br>เหนียวสร้างใหม่รุ่น Bของวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1..... | 53 |
| ภาพที่ 4.6  | ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดิน<br>เหนียวสร้างใหม่รุ่น Cของวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1..... | 53 |





|  |    |
|--|----|
| ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับอัตราส่วนช่องว่างของดินเหนียว<br>สร้างใหม่รุ่น A B และC ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 3..... | 62 |
| ภาพที่ 4.22 รวมผลการทดสอบการควบคุมวิธีของหน่วยแรงกับดินเหนียวสร้างใหม่ชุด A.....   | 63 |
| ภาพที่ 4.23 รวมผลการทดสอบการควบคุมวิธีของหน่วยแรงกับดินเหนียวสร้างใหม่ชุด B.....   | 63 |
| ภาพที่ 4.24 รวมผลการทดสอบการควบคุมวิธีของหน่วยแรงกับดินเหนียวสร้างใหม่ชุด C.....   | 64 |
| ภาพที่ 4.25 ผลของ Strain Axial (%) กับความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด A.....  | 64 |
| ภาพที่ 4.26 ผลของ Strain Axial (%) กับความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด B.....  | 65 |
| ภาพที่ 4.27 ผลของ Strain Axial (%) กับความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด C.....  | 65 |
| ภาพที่ 4.28 ผลของค่า G/F(e) กับค่าความเค้นประสิทธิผล P' ของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด A....   | 66 |
| ภาพที่ 4.29 ผลของค่า G/F(e) กับค่าความเค้นประสิทธิผล P' ของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด B....   | 67 |
| ภาพที่ 4.30 ผลของค่า G/F(e) กับค่าความเค้นประสิทธิผล P' ของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด C....   | 67 |
| ภาพที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Theta$ และ $\zeta$ .....   | 68 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมาตรฐานของภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ถูกดัดแปลงให้สามารถใช้เบนเดอริอิลิเมนต์ในการตรวจวัดความเร็วคลื่นเฉือน และมีนิสิตที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความเร็วของคลื่นเฉือนในดินเหนียวกรุงเทพฯ มาอย่างต่อเนื่อง อาทิ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของคลื่นเฉือนโดยเบนเดอริอิลิเมนต์ ระหว่างการทดสอบแบบอัดสามแกน (ธีรินทร์ อมรวิทยารักษ์, 2000) ผลกระทบของสภาวะหน่วยแรงต่อโมดูลัสแรงเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพฯ (ธิตีรักษ์ อัครกุล, 2003) และพฤติกรรมความเครียดระดับต่ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ (กฤษฎา กมลเกรียงไกร, 2005) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเร็วคลื่นเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัย รวมทั้งความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเฉือนด้วย ดังเช่นจากผลการศึกษาของ Santamarina, et al. (2001) ซึ่งได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ดังสมการที่ 1.1

$$V_s = \Theta \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{p_0} \right)^\zeta \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{p_0} \right)^\psi \quad (1.1)$$
$$\zeta = 0.36 - \frac{\Theta}{700}$$

โดยที่  $V_s$  คือความเร็วคลื่นเฉือน  $\Theta$  คือค่าคงที่  $\sigma'_1$  คือความเค้นประสิทธิผลหลักที่หนึ่ง  $\sigma'_3$  คือความเค้นประสิทธิผลหลักที่สาม  $p_0$  คือความเค้นอ้างอิง  $\zeta$  และ  $\psi$  คือเลขชี้กำลัง

จากสาเหตุดังกล่าวเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมาตรฐานที่มีอยู่เดิมจึงมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถแยกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นเฉือนที่วัดได้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร (ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ อัตราส่วนช่องว่างและความเค้นเฉี่ยประสิทธิผล) หรือจากการเสีรูปร่างเชิงเบี่ยงเบน (ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเครียดเฉือนและความเค้นเฉือน) ผู้เขียนจึงได้ดัดแปลงเครื่องทดสอบที่มีอยู่เดิมให้สามารถควบคุมวิถีหน่วยแรงในระหว่างการทดสอบได้โดยอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากมาตรวัดต่างๆ และใช้เครื่อง

ทดสอบดังกล่าวในการศึกษาผลของวิธีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนในตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสร้างใหม่โดยใช้วิธีหน่วยแรงที่แตกต่างกันสามแบบซึ่งมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเดียวกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อดัดแปลงเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมาตรฐานที่มีอยู่เดิมให้สามารถควบคุมวิธีหน่วยแรงได้ตามต้องการโดยอัตโนมัติ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของวิธีหน่วยแรงที่มีต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียว
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ความเค้นเบี่ยงเบน และอัตราส่วนช่องว่างที่มีผลต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมาตรฐานที่ได้ทำการดัดแปลงให้สามารถควบคุมวิธีหน่วยแรงได้ โดยทำการทดสอบกับดินเหนียวสร้างใหม่ด้วยวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและระบายน้ำ แล้วใช้เบนเดอริลลิเมนต์ในการตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนขณะที่ทำการทดสอบ โดยรูปแบบของวิธีหน่วยแรงที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือนแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ซึ่งทุกรูปแบบบังคับให้มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเดียวกัน ได้แก่

1. ควบคุมให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) คงที่ ความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเปลี่ยนให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นและความเค้นเบี่ยงเบนคงที่
2. ควบคุมให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยและความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น
3. ควบคุมให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเค้นเบี่ยงเบนคงที่ หลังจากนั้นเปลี่ยนให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยคงที่และความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น

#### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าและทำการศึกษาเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น การติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการควบคุมเครื่องทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทำตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ การทดสอบแรงอัดสามแกน การตรวจวัดความเร็วคลื่นเฉือนด้วยเบนเดอริอิลิเมนต์ เป็นต้น
2. กำหนดร่างของเนื้อหา (Framework) วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย เพื่อจัดทำเป็นข้อเสนอโครงการ
3. ดัดแปลงเครื่องทดสอบสามแกนที่มีอยู่เดิมให้สามารถควบคุมวิธีหน่วยแรง พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมมาตรวัดของเครื่องทดสอบสามแกน
4. ทำตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่พร้อมทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น แล้วทำการทดสอบดินเหนียวสร้างใหม่ด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบอัดตัวคายน้ำและระบายน้ำ
5. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบผลกระทบของวิธีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน
2. สามารถดัดแปลงเครื่องทดสอบสามแกนให้สามารถควบคุมเส้นทางเดินของหน่วยแรงได้
3. เข้าใจถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย เช่น การรวบรวมองค์ความรู้ การวางแผนการดำเนินงานและการแก้ปัญหา เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินเหนียวที่ทำการศึกษากันมากได้แก่ ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) อัตราส่วนแดมป์พิง(Damping Ratio) และการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับน้ำหนัก(shear Strength) ภายใต้การกระทำของแรงแบบซ้ำๆ เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของทรายที่ทำการศึกษากันได้แก่ ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) อัตราส่วนแดมป์พิง(Damping Ratio)และ Liquefaction Potential เป็นต้น เนื่องจากกรุงเทพฯ ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหวต่ำในอดีตนักวิจัยมักจะไม่ให้ความสำคัญต่อคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินกรุงเทพฯอย่างไรก็ดีน่าจะเป็นการดีที่จะได้ทราบถึงความเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว โดยการวิเคราะห์โดยละเอียดจึงจำเป็นต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินกรุงเทพฯ

การศึกษาทางด้านพลศาสตร์ของดินนั้น ในทางปฏิบัติสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ(Laboratory Test) และการทดสอบในสนาม(In-Situ Test) ซึ่งบริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ได้เคยมีการทดสอบในสนามโดยใช้วิธีการวัดความเร็วของการแพร่กระจายของคลื่นความเค้น (wave Propagation) โดยการทำการวัดความเร็วคลื่นแบบเฉือน (Shear Wave Velocity) (Ashford,A.,S, et al. 1997) ซึ่งการวัดความเร็วของคลื่นความเค้นนี้จะได้ค่าโมดูลัส ที่ระดับความเครียดต่างๆ ต่อมามีการศึกษาหาค่าโมดูลัส และอัตราส่วนแดมป์พิง (Damping Ratio) ด้วยวิธีการ Cyclic Triaxial Test (พิพัฒน์ ทองนิม,1998) ซึ่งเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ระดับความเครียดสูง การทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ระดับความเครียดต่างๆได้ จึงมีการทดสอบวิธี Triaxial Compression using Bender Element (ธีรินทร์ อมรวิทย์รักษ์,2001)

สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของวิธีหน่วยแรงของการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรที่ไม่เท่ากันโดยมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเหมือนกันต่อค่าความเร็วเฉือน (Shear Wave Velocity)



## 2.2 ค่าโมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

โดยทั่วไปแล้วค่าโมดูลัสของดินเหนียวจะหาได้มาจากความสัมพันธ์แบบ Empirical กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ( $S_u$ ), ค่าดัชนีความเหลว (PI) และ OCR หรือสามารถหาค่าโมดูลัสของดินเหนียวได้จากการทดสอบ Self Boring Pressure meter

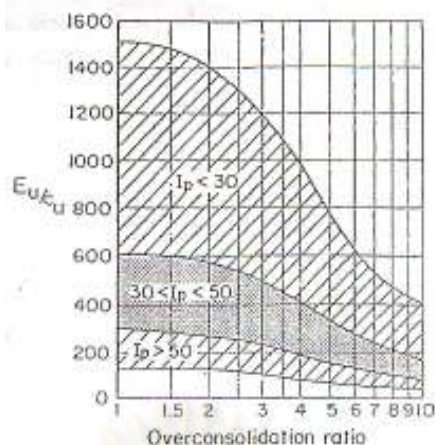
Duncan and Buchigani (1976) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Undrained Young's Modulus,  $E_u$ ) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าดัชนีความเหลว และ OCR ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยปกติแล้วสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีค่าดัชนีความเหลวอยู่ระหว่าง 30-50% และ OCR อยู่ระหว่าง 1.0 – 2.0 จะมีค่าของ  $E_u / S_u$  อยู่ระหว่าง 300 ถึง 600 สำหรับในชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่มีค่าดัชนีความเหลวต่ำกว่า 30% จะมีค่าของ  $E_u / S_u$  อยู่ระหว่าง 600 ถึง 1500 อย่างไรก็ตามช่วงอัตราส่วนของ  $E_u / S_u$  ดังกล่าวจะมีค่าแตกต่างกันมากและเป็นค่าที่เกิดจากการประมาณเท่านั้น

สำหรับค่าโมดูลัสของดินที่หาจากการทดสอบ Self Boring Pressure meter ซึ่งปกติค่าโมดูลัสของดินเหนียวได้มาจากการแปลงค่าของความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus (G) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยอาศัยสมการที่ 2.1

$$E = 2G(1 + \nu) \quad 2.1$$

สำหรับดินเหนียวสภาพไม่ระบายน้ำ  $\nu = 0.5$  จะได้  $E_u = 3G$  โดยที่ค่าโมดูลัสของดินในสภาพระบายน้ำ (Drained Young's Modulus,  $E'$ ) กับค่าโมดูลัสของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Young's Modulus) มีความสัมพันธ์ดังแสดงสมการที่ 2.2

$$E' = (1 + \nu') E_u / (1 + \nu_u) \quad 2.2$$

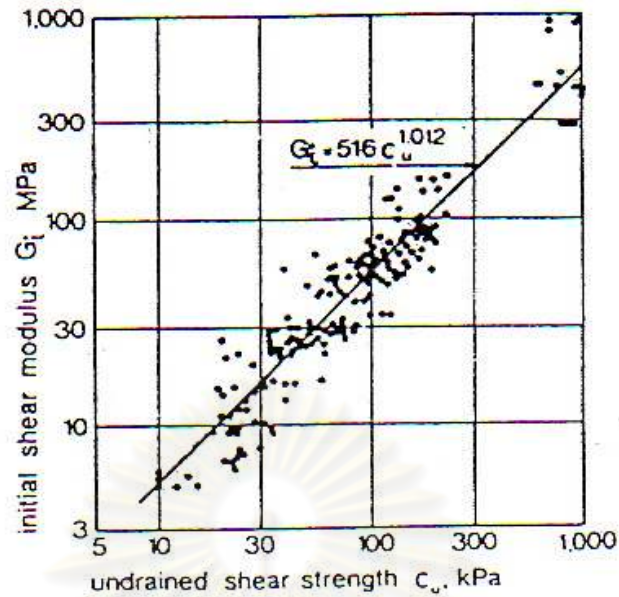


ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับค่าดัชนีความเหลวและ OCR (Duncan and Buchigani, 1976)

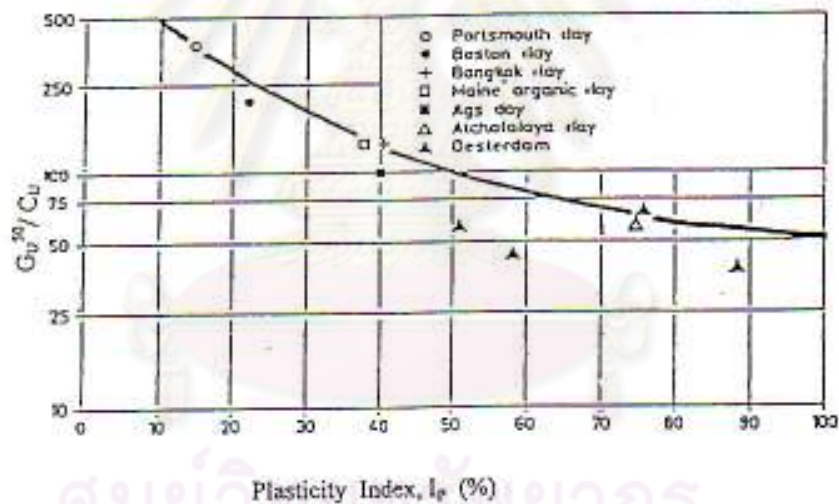
### 2.3 พฤติกรรม Stress – Strain ของดิน

พฤติกรรมของ Stress – Strain ของดินในเทอมของโมดูลัสสามารถแบ่งได้ที่ระดับ Strain ต่าง ๆ กันคือที่ Very Small Strain, Small Strain และ Large Strain ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อโมดูลัส ได้แก่ Rate of Loading, Time Effect, Creep, ระดับของ Stress – Strain, OCR และ Stress History ของตัวอย่างดินเป็นต้น

ค่าโมดูลัสแบบเฉือนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและใช้มากในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี สามารถหาได้หลายวิธี เช่นวิธี Conventional Routine Test (การทดสอบกำลังของดินทั่วไปเช่น Unconfined Compaction Test, Triaxial test) ซึ่งเป็นค่าโมดูลัสที่ระดับ Strain สูง ๆ , วิธี Wave Propagation Techniques สำหรับหาค่าโมดูลัสที่ Small Strain และวิธีหาค่า Stiffness Modulus ในสนาม หรือทำการหาค่า Stiffness Modulus โดยใช้สมการเอ็มไพริคัลป์ เช่น Hara et al, 1973 เสนอผลการทดสอบบนความสัมพันธ์ระหว่าง  $G_s$  กับ  $C_u$  ที่ได้จากการทดสอบในดินเหนียวที่ประเทศญี่ปุ่นซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2.2 หรือจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G_{50}$  กับค่า Index Properties แสดงดังภาพที่ 2.3 ซึ่งพล็อตระหว่างค่า  $G_{50}/C_u$  กับค่า IP (%) ซึ่งประมาณโดย Termatt, Vermeer และ Verger, 1985 สำหรับดินเหนียวเป็นต้น



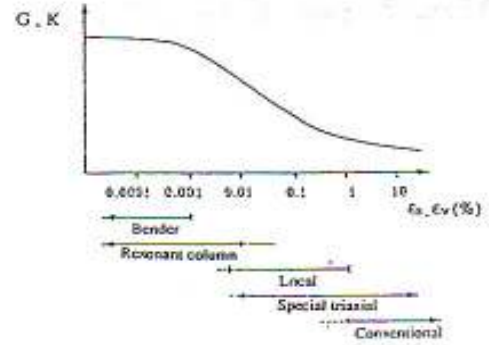
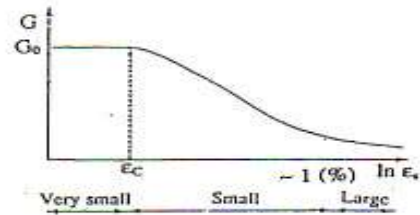
ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_u$  กับ  $G_i$  (Hara et al, 1973)



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_p$  กับ  $G_v^{50}/C_u$  (Termatt, Vermeer and Verger, 1985)

## 2.4 ลักษณะพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ระดับ ความเครียดต่าง ๆ

โดยพื้นฐานแล้วค่า Stiffness สามารถหาได้จาก ความชันของ Stress – Strain Curve (Secant หรือ Tangential Gradient) อย่างไรก็ตามความถูกต้องในการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ระดับ Strain Levels ต่าง ๆ ในทางปฏิบัติจะกระทำได้โดยประมาณช่วงของการวัดดังภาพที่ 2.4 และ 2.5 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายพฤติกรรมของ Stress – Strain ในดินได้ดังนี้



ภาพที่ 2.4 แสดงค่าของ  $G$  ในช่วง Strain ต่าง ๆ      ภาพที่ 2.5 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสมในการทดสอบวิธีต่างๆ

- 1) Stress – Strain Curve จะมีลักษณะ Non – Linear เพิ่มขึ้นเมื่อ Strain เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่า Shear Modulus มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ Strain เปลี่ยน
- 2) ในช่วง Small Strain พฤติกรรมของ Stress – Strain เกือบเป็นเส้นตรงและ Shear Modulus มีค่าคงที่
- 3) ที่ Small Strain ค่า Shear Modulus จะมีค่ามากแต่ค่าจะลดลงมาเหลือเพียงหนึ่งในสิบเมื่อ Strain เพิ่มขึ้นจนถึง 1% โดยประมาณ
- 4) ค่า Bulk Modulus ที่เปลี่ยนไปเนื่องจาก Volumetric Strain (การเปลี่ยนแปลงปริมาตร) จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่า Shear Modulus ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่า Shear Strain

เป็นการง่ายที่จะแยกความแตกต่างของช่วง Strain โดยใช้คุณสมบัติของ Stress – Strain Curve ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงค่า Stiffness ในอุดมคติ ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก Strain Levels ของดินโดย Atkinson & Salfors, 1989 ซึ่งแบ่งเป็นช่วงได้ดังนี้

- 1) Very Small Strain: Strain < 0.001% ค่า Shear Modulus จะเกือบคงที่เมื่อค่า Strain เปลี่ยนแปลง นั่นคือในช่วงนี้ โมดูลัสแบบเฉือน จะไม่ขึ้นกับ Strain
- 2) Small Strain: 0.001% < Strain < 1% ลักษณะของ Stress – Strain Curve จะเป็นลักษณะ Highly Non – Linear และค่า โมดูลัสแบบเฉือนจะขึ้นกับ Strain
- 3) Large Strain: Strain > 1% สภาพของดินจะใกล้ Failure ค่า โมดูลัสแบบเฉือนจะมีค่าน้อย

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน

พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน กับ Young's Modulus นี้มักจะมีแนวโน้มที่เหมือนกันเกือบทั้งหมด แต่ก็จะมีแตกต่างกันบ้างในบางตัว Hardin & Black, 1968 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงพารามิเตอร์สำคัญ ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในรูปแบบของฟังก์ชันดังนี้

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

เมื่อ

|             |   |   |
|-------------|---|---|
| $\sigma'_0$ | = | หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Octahedral Nomal Stress)                                    |
| $e$         | = | Void Ratio  |
| $C$         | = | ลักษณะจำเพาะของเม็ดดิน, รูปร่าง, ขนาด, สัดส่วนคละ, Mineralogy                             |
| $A$         | = | ขนาดของ Strain  |
| $H$         | = | ประวัติของหน่วยแรง (Stress History) และประวัติของการรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration History) |
| $t$         | = | Secondary Time Effect   |
| $S$         | = | ความอิ่มตัวของดิน (Degree of Saturation)  |
| $\tau_0$    | = | หน่วยแรงเฉือน (Octahedral Shear Stress)   |
| $f$         | = | ความถี่ของการสั่นสะเทือน (Frequency of Vibration)   |
| $\theta$    | = | โครงสร้างของดิน (Soil Structure)  |
| $T$         | = | อุณหภูมิ  |

## 2.6 วิธีการวัดค่า Modulus ในวิธีต่าง ๆ

วิธีการวัดค่า Modulus ในแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับค่าของ Strain ในระดับต่าง ๆ ที่ต้องการหาค่าของ Modulus ถ้าในช่วง Strain ที่มากโดยปกติเวลาในการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถหาได้จากความชันของ Stress - Strain Curve ได้เลย แต่ถ้าในช่วงที่ Strain น้อย ๆ จะใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่นอย่างเช่นวิธี Hardin Resonant Column Test, Drenvich Resonant Column Test และ Ultrasonic Shear Wave Velocity Measurements ในการทดสอบหา Shear Modulus ที่ Small Strain เป็นต้น ถ้าในช่วง Strain ที่น้อยมาก ๆ วิธีที่นิยมใช้มากก็คือวิธี Bender Element Test ส่วนในการทดสอบหาค่าในสนาม การประมาณค่า Modulus จะใช้วิธี Rayley -





### 2.6.1 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Large Strain Levels

โดยปกติในการหาค่า Modulus ในห้องปฏิบัติการสามารถหาได้จากความชัน Stress-Strain Curve ดังเช่นค่า Yong's Modulus สามารถหาได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress ( $\sigma$ ) กับค่า Strain ( $\epsilon$ ) ซึ่งสามารถกระทำได้ในกรณีทดสอบกำลังของดินอย่างเช่น วิธี Unconfined Compression Test และ Triaxial Test เป็นต้น ยกเว้นการวัดที่ Small Strain Baldi, Hight and Thomas, 1988 ได้กล่าวถึงการวัดค่า Stiffness ในการทดสอบทั่วไปว่า ที่ Strain น้อยกว่า 0.1% ในตัวอย่าง Unconsolidated และน้อยกว่า 0.1% ในตัวอย่าง Isotropic ally Consolidated โดยทั่วไปค่าที่ออกมาจะเชื่อถือไม่ได้เพราะฉะนั้นค่า Shear Modulus จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั่วไปจะใช้ได้ที่ค่า Strain สูง ๆ เท่านั้น

### 2.6.2 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small Strain Levels

การหาค่าโมดูลัสที่ Small Strain Levels นิยมมาจากการแพร่กระจายของคลื่นหลัก ๆ 2 ชนิดด้วยกัน คือคลื่น Body Wave (P-Wave) และ Shear Wave (S-Wave) ทั้ง 2 คลื่นจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ตรงกันโดยที่คลื่น P-Wave จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดขณะที่คลื่น S-Wave จะทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนดังภาพที่ 2.6 ความแตกต่างของคลื่นทั้ง 2 นี้คือคลื่น P-Wave นั้นน้ำจะมีผลกระทบต่อความเร็วของคลื่น ขณะที่จะไม่เกิดขึ้นกับคลื่น S-Wave เป็นผลอันเนื่องมาจากน้ำไม่สามารถรับแรงเฉือนได้จึงทำให้ไม่เกิด Shear Strain ขึ้นกับน้ำ เพราะฉะนั้นเราจึงให้ความสำคัญกับคลื่น S-wave มากกว่าคลื่น P-wave

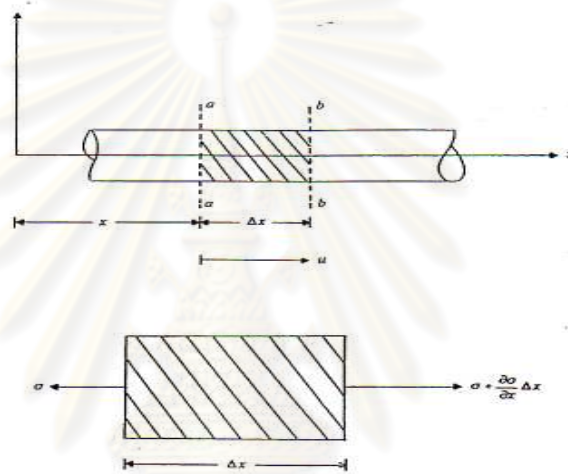


ภาพที่ 2.6 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นความเค้นมากระทำ

ค่าโมดูลัสจะหาได้จากความเร็วของคลื่นที่เดินทางมาถึงครั้งแรก โดยที่ความสัมพันธ์ของโมดูลัสกับความเร็วของคลื่นมาจากพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตันที่ว่าด้วยเรื่องของแรงนั้นคือ

$$F = ma$$

เมื่อพิจารณาลักษณะของวัตถุในกรณีนี้ที่แรงกระทำในแนวแกนจากภาพที่ 2.7 เมื่อพิจารณาแท่งวัตถุในพื้นที่ย่อยนั้นคือที่ Section a-a ถึง Section b-b พบว่าจะมีแรงกระทำต่อวัตถุคือ



ภาพที่ 2.7 Longitudinal Elastic Wave in a Bar

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x\right) A = \frac{(A \Delta x \gamma)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} (A \Delta x \gamma) &= \text{น้ำหนักของแท่งวัตถุที่ตัด Section} \\ g &= \text{ความเร่งของ gravity} \end{aligned}$$

จากสมการข้างต้นเมื่อลดรูปจะได้

$$-\sigma_A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x\right)_A = \frac{(A \Delta x \gamma)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$-\sigma_A + \sigma_A + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x_A = \frac{(A \Delta x \gamma)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

จาก

$$\sigma = (\epsilon)(E) = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)(E)$$

จะได้

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(E) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{E}{\rho}\right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)$$

จาก

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)$$

เพราะฉะนั้นจะได้

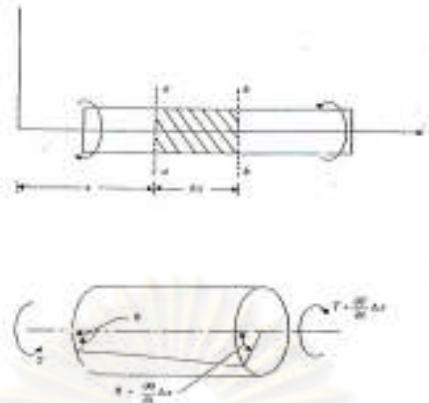
$$E = \rho v_c^2$$

E = ค่า Young's Modulus

$\rho$  = ความหนาแน่นรวมของดิน

$v_c$  = ความเร็วของคลื่นความเค้น P - Wave

ทำนองเดียวกันถ้าให้แรงกระทำในรูปแบบแรงบิดดังภาพที่ 2.8 เมื่อพิจารณาแท่งวัตถุใน  
พื้นที่ย่อยนั้น ที่ Section a-a ถึง Section b-b พบว่าจะมีแรงกระทำต่อวัตถุคือ



ภาพที่ 2.8 Torsional Waves in a Bar

$$-T + \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x\right) = \rho J \Delta x \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$$

เมื่อ

$J$  = Polar moment of inertia ของ cross section

จากสมการข้างต้นเมื่อลดรูปจะได้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$$

และจาก

$$T = JG \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

แทนลงในสมการที่แล้วจะได้

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

$$G = \rho v_s^2$$

$G$  = ค่า Shear Modulus

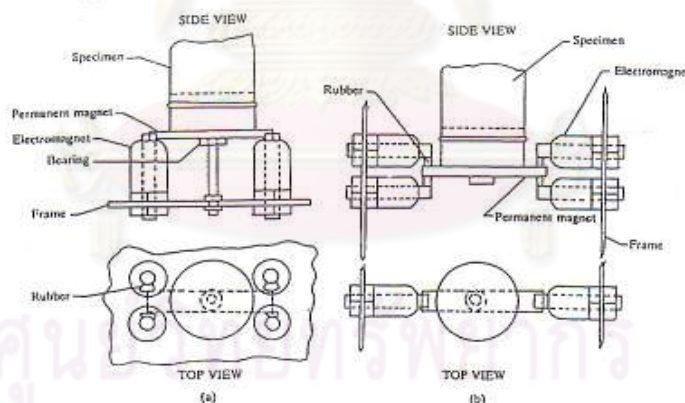
$\rho$  = ความหนาแน่นรวมของดิน

$v_s$  = ความเร็วของคลื่นความเค้น S-Wave

วิธีการแพร่กระจายของคลื่นสำหรับการประมาณค่าโมดูลัส Strain ที่เกิดขึ้นจากคลื่นปกติ มักจะมีขนาดเล็กและสามารถที่จะทำให้ Strain มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสที่หาจากวิธีการแพร่กระจายของคลื่นจะขึ้นกับ ความต้านทาน, ความถี่, ขนาดของคลื่น, ค่าปรับแก้ เป็นต้น วิธีที่ใช้กันมากในการหาค่าโมดูลัส โดยการแพร่กระจายของคลื่น คือ Hardin Resonant Column Test, Drnevich Resonant Column Test และ Ultra Sonic Shear Wave Velocity Measurement Test เป็นต้น

### 2.6.3 วิธี Hardin Resonant Column Test

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากอีกวิธีหนึ่งสำหรับการหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการซึ่ง ทฤษฎีและวิธีการในการทดสอบเสนอโดย Hardin & Richart, 1963 การทดสอบอาศัยพื้นฐานของ ทฤษฎีและวิธีการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus กับ ความถี่กำทอน ในการ ทดสอบแรงตามแนวแกนสามารถใส่แรงพร้อมกับวัดความถี่กำทอนที่เกิดขึ้นได้ Shear Modulus ที่ สามารถวัดได้จากเครื่องมือนี้โดยทั่วไปจะให้ค่าของ Strain ที่น้อยมากประมาณ  $10^{-5}$  อย่างไรก็ตาม สามารถดัดแปลงเครื่องให้สามารถสร้างค่า Strain ที่สูงกว่านี้ได้ (เพิ่มได้ถึง  $10^{-3}$ )

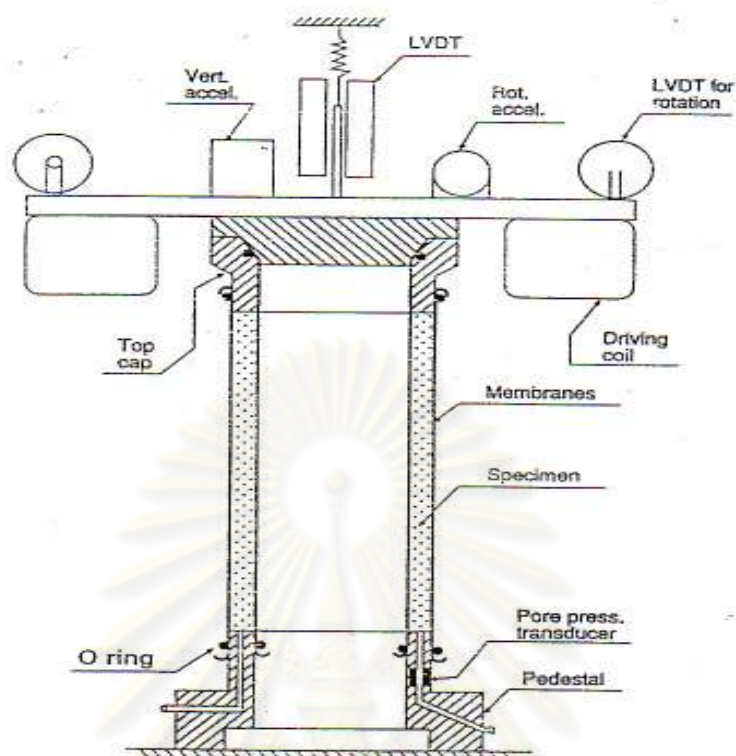


ภาพที่ 2.9 Resonant Column Test Apparatus Hardin & Richart, 1963 (a) For Torsional Vibration (b) For Longitudinal Vibration

### 2.6.4 วิธี Drnevich Resonant Column Test

สร้างโดย Drnevich, Hall & Richart, 1967 โดยจะใช้ตัวอย่างที่มีลักษณะกลวงแทน ตัวอย่างทรงกระบอก การทดสอบจะสร้างแรงบิดที่สูงบนด้านบนของตัวอย่าง ขนาดของ Strain ที่เกิดขึ้นสามารถสร้างได้มากกว่า  $10^{-3}$





ภาพที่ 2.10 Resonant Column Test Apparatus (Drnevich, 1967)

### 2.6.5 Ultra Sonic Shear Wave Velocity Measurement

เป็นวิธีที่ใช้วัดความเร็วที่เกิดจากแรงเฉือนสั้นสะท้อนความถี่สูง ถูกคิดค้นโดย Lawrence, 1965 โดยจะต้องรู้ความหนาแน่นและความเร็วของ Shear Wave ของดิน Shear Modulus สามารถคำนวณได้จากกฎการเคลื่อนที่ของวัสดุ Elastic วิธี Ultra Sonic ไม่สามารถดัดแปลงให้เพิ่ม Stress ลงไปในตัวอย่างได้ขณะทดสอบและการแปลสัญญาณที่รับได้ยังทำได้ยาก

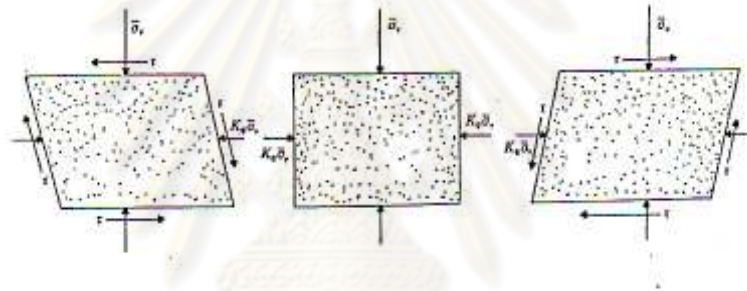
### 2.6.6 Cyclic Test

เป็นวิธีการทดสอบหาโมดูลัสแบบเฉือนที่ Small Strain Level ถึง Large Strain Level ส่วนใหญ่แล้วเครื่องทดสอบ Cyclic Test มักจะใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นดินไหวหรือ การหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางกลศาสตร์อาทิ เช่น พฤติกรรมของ Liquefaction, Damping Ratio และ โมดูลัสแบบเฉือนเป็นต้น

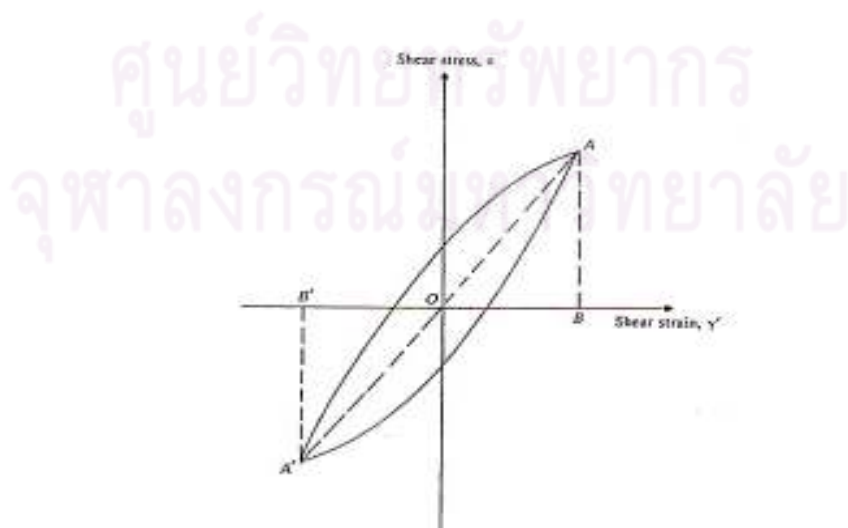
การทดสอบด้วย Cyclic Test มีลักษณะเครื่องมือทดสอบหลายประเภทแต่ที่นิยมนำมาใช้ มีอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ

1) Cyclic Simple Shear Test เป็นเครื่องมือที่ทดสอบหาค่า โมดูลัสแบบเฉือน (G) และ Damping Ratio (D) ของดิน ลักษณะกลไกในการทดสอบคือจะให้แรงทางแนวแกนตั้งที่ (Vertical Effective Stress,  $\sigma'_v$ ) และ ให้แรงแปรเปลี่ยนในทางแนวเฉือน (Cyclic Shear Stress,  $\tau$ ) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนสามารถหาได้โดย

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



ภาพที่ 2.11 Cyclic Simple Shear Test



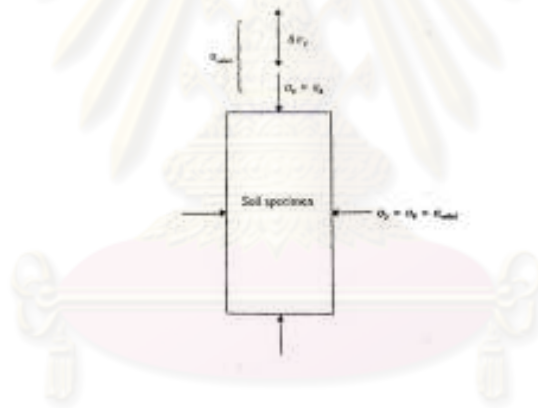
ภาพที่ 2.12 การคำนวณหาโมดูลัสแบบเฉือนและ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop

2) Cyclic Triaxial Test เป็นเครื่องมือที่ทดสอบหาค่า Young's Modulus (E) และ Damping Ratio (D) ของดินโดยทั่วไปในการทดสอบจะให้ Confining Pressure  $\sigma_0 = \sigma_3$  และ ให้แรงแปรเปลี่ยนในทางแนวแกน (Axial Cyclic Stress,  $\Delta\sigma_d$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 การคำนวณหาค่า Young's Modulus (E) คำนวณจาก Hysteresis Loop ในภาพที่ 2.14 จะได้

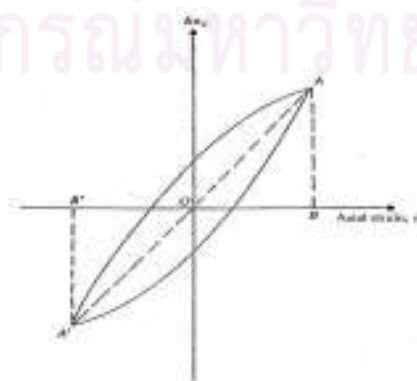
$$E = \frac{\Delta\sigma_d}{\varepsilon}$$

ค่าโมดูลัสแบบเฉือนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Young's Modulus (E) กับ Poisson's Ratio จะได้

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



ภาพที่ 2.13 Cyclic Triaxial Test

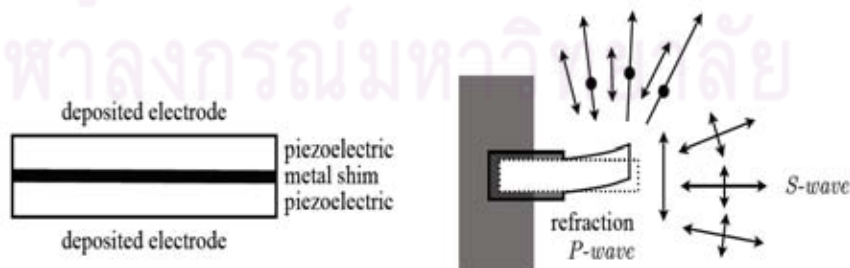


ภาพที่ 2.14 การคำนวณหา Young's Modulus และ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop

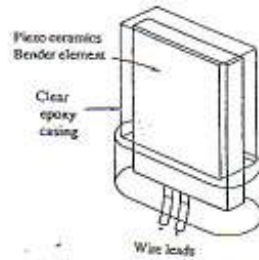
จากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น วิธี Resonant Column Test เป็นที่นิยมและน่าเชื่อถือที่สุด เพราะสามารถหาค่า Shear Modulus สำหรับปัญหาทั้งทาง Dynamic และ Static ที่ Small Elastic Strain แต่มีปัญหาในการเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างที่ถูกกระทบจะทำให้ค่าที่ได้ผิดไปจากความจริง ซึ่งต่างจากวิธีที่ทดสอบหาค่าในสนามจะมีปัญหาเนื่องจากตัวอย่างถูกกระทบน้อยกว่า ทำให้ความเร็วของ Shear Wave ที่วัดได้จากวิธี Resonant Column Test ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

### 2.6.7 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small Strain

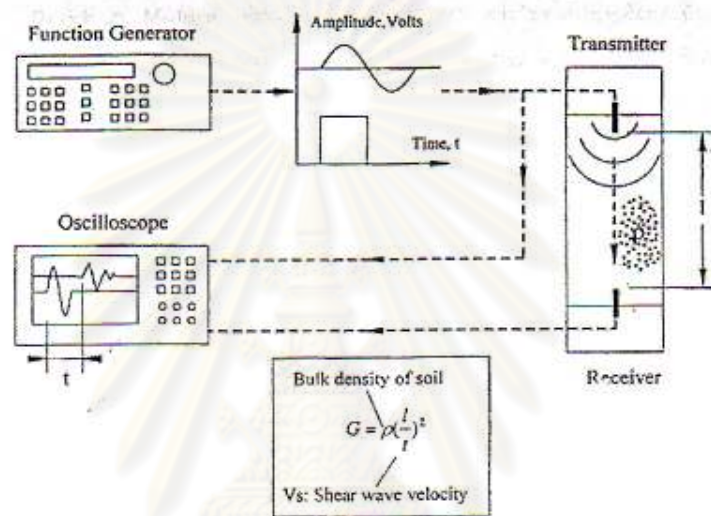
วิธีที่ใช้วัดค่า Modulus ที่ Small Strain จะใช้วิธี Bender Element ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณ Electro – Mechanical โดยจะแปลงพลังงานกล (การสั่นไหว) เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางกลับกัน จะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล Bender Element จะเป็นแผ่น Piezo – Ceramic สองแผ่นประกบติดกัน จะสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ โดยที่ใช้จะแตกต่างกัน ในการต่อวงจรไฟฟ้างภาพที่ 2.15 จะต่ออนุกรมเมื่อใช้เป็นตัวรับสัญญาณ และภาพที่ 2.16 จะต่อแบบขนานเมื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณเหตุที่ต้องต่อวงจรแตกต่างกันเพื่อที่จะใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละด้านนั่นเอง ในการใช้ Bender Element เนื่องจากเป็นวัสดุที่ต้านทานกระแสไฟฟ้าเพราะฉะนั้นจะต้องระวังเรื่องการลัดวงจร จึงจำเป็นต้องมีฉนวนกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเนื่องจากความชื้น โดยจะใช้ Epoxy เคลือบรอบตัว Bender Element ดังภาพที่ 2.16 การทดสอบโดยวิธี Bender Element จะใช้ Function Generator เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและ Oscilloscope ในการวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น ซึ่งภาพที่ 2.17 จะแสดงถึงวิธีการต่อวงจรของ Bender Element



ภาพที่ 2.15 เบนเดอริอิลิเมนต์ (Lee Santamarina, 2005)



ภาพที่ 2.16 แสดงวิธีการเคลือบ Bender Element ด้วย Epoxy



ภาพที่ 2.17 แสดงวิธีการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender Element

การหาค่าโมดูลัส ด้วยวิธี Bender Element เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่นซึ่งกระทำได้โดยการเสียบแผ่น Bender ที่เป็นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณลงในตัวอย่างดินในทางตรงกันข้ามและทิศทางขนานกัน (Polarize) ซึ่งเราสามารถหาความเร็วของคลื่นความเค้น S-Wave ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

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

$V_s$  = 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

$$G = \rho v_s^2$$

G = ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดิน

$\rho$  = ความหนาแน่นของดิน

ที่ Strain น้อย ๆ โมดูลัสแบบเฉือน จะเป็นค่าสูงสุด ( $G_{max}$ ) และมีค่าคงที่แต่ที่ Stain อื่น ๆ ค่าโมดูลัสแบบเฉือน จะลดลง จึงจำเป็นจะต้องมีค่าปรับแก้ค่า G ดังสมการ

$$G = \mu G_{max}$$

$\mu$  = Correction Factor

วิธีที่นิยมใช้กันมากในการวัดค่า Maximum Shear Modulus ในห้องปฏิบัติการ คือวิธี Resonant Column Technique ซึ่งใช้ตัวอย่าง ทรงกระบอกหรือกลวงโดยการทดสอบจะสร้างแรงบิดและเกิดคลื่นก้ำทอนลงไปในตัวอย่าง ผลที่ออกมาจะเป็นค่าความถี่ก้ำทอนของดิน การทดลองจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดและมวลของดินเพื่อที่จะหาค่าคงที่ ขณะที่วิธีหา Maximum Shear Modulus โดยวิธี Bender Element จะหาได้ง่ายและซับซ้อนน้อยกว่าวิธี Resonant Column Technique อีกทั้ง Bender Element ยังสามารถหาค่า Shear Modulus ระหว่างทดสอบแรงเฉือน, Saturation และ Consolidation ขณะที่วิธีอื่นทำไม่ได้

Dyvik & Madshus, 1985 ได้เปรียบเทียบผลของ Stiffness วัดโดย Bender Element กับวิธี Resonant Column Test ที่ ความดันของหน่วยแรงต่างกัน ในการทดสอบทั้ง Loading และ Unloading และผลที่ออกมาถือว่าดีมากมีความใกล้เคียงกัน



## 2.7 การวัดค่า Shear Modulus ในสนาม

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

### 2.7.1 Rayleigh Wave Velocity Surey

เป็นการวิเคราะห์ความเร็วของคลื่น Rayleigh Wave การให้กำเนิดคลื่นทำได้โดยตัวกำเนิด Harmonic Vibration กระทำที่บริเวณพื้นผิวของดินความเร็วของคลื่นคำนวณจากความยาวช่วงคลื่นและความถี่ที่เกิดจากแหล่งกำเนิด และหาความยาวคลื่นจากการวัดระยะระหว่างจุดที่คลื่นเริ่มสั่นสะเทือน Richart, Hall, JR and Wood, R.D สมมุติฐานว่าคลื่นแรงเฉือนและ Rayleigh Wave มีความแตกต่างกันน้อยมากจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์เดียวกันกับคลื่นแรงเฉือนหาค่าของค่าโมดูลัสเฉือนได้

### 2.7.2 Seismic Refraction Survey

เป็นวิธีที่ดัดแปลงโดย Drenvich (1971) ตามภาพที่ 1 ให้สามารถหาค่าโมดูลัสเฉือนได้ เพราะแต่เดิมเป็นการสำรวจหาน้ำมันใต้ผิวดินเท่านั้นจึงได้เสนอสมการการหาค่าโมดูลัสเฉือนไว้ดังนี้

$$G = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}(\rho V_p^2) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$V_p$  - Compression Wave Velocity

$\nu$  - Poisson's Ratio

เนื่องจากจำเป็นต้องรู้ค่า Poisson's Ratio จึงไม่นิยมใช้มากนัก

### 2.7.3 Down Hole Test

การทดสอบดาวโฮเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมในการหาค่าความเร็วคลื่นอัดและความเร็วคลื่นเฉือนในภาคสนามเนื่องจากเป็นวิธีที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์(Luna and Jadi, 2000; Hight et al.,1997). การทดสอบดาวโฮนี้ต้องการเพียงหนึ่งหลุมเจาะในการติดตั้งจีโอโฟนลงไปในดิน แห่่งกำเนิดคลื่นเฉือนถูกสร้างด้วยการตีไม้บนผิวดินในทิศทางที่ขนานกับพื้นผิวดังแสดงในภาพที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างความเร็วคลื่นอัดกับความเร็วคลื่นเฉือน คือ ความเร็วคลื่นเฉือนจะถูกสร้างโดยการตีที่ไม่ในทิศทางตรงกันข้ามและทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวดิน ส่วนความเร็วคลื่นอัดจะถูกสร้างโดยการตีที่ด้านบนของแผ่นไม้

เมื่อแผ่นไม้ถูกตีอุปกรณ์บันทึกข้อมูลจะรับข้อมูลและบันทึกข้อมูลของสัญญาณที่ส่งมาจากแผ่นไม้และที่รับได้จากจีโอโฟนซึ่งเป็นตัวรับที่ติดตั้งอยู่ในดิน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ ) และโมดูลัสเฉือน ( $G$ ) จะสามารถคำนวณได้จากความเร็วคลื่นอัด ( $V_c$ ) และความเร็วคลื่นเฉือน ( $V_s$ ) ด้วยสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$E = \rho_{depth} V_c^2 \left[ \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \right] \quad (2.1)$$

$$G = \rho_{depth} V_s^2 \quad (2.2)$$

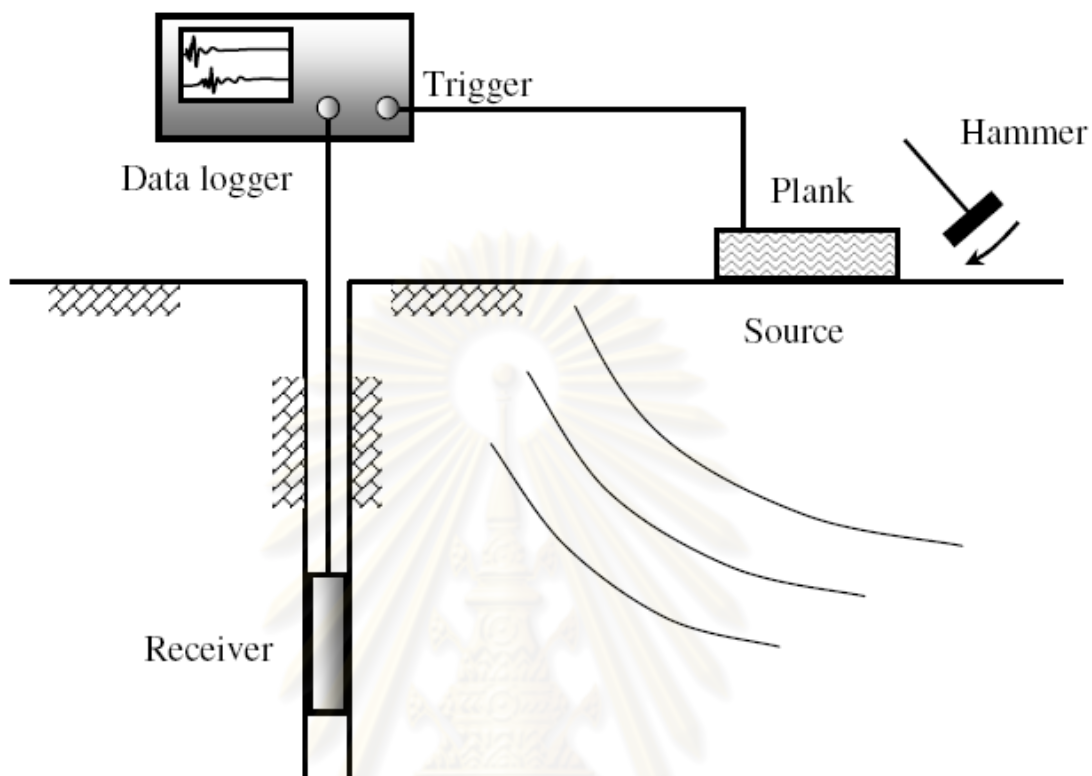
โดยที่  $\rho_{depth}$  คือ ความหนาแน่นรวมของดิน ณ ตำแหน่งความลึกที่อ้างอิง และ  $\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซอง ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนแสดงไว้ในสมการที่ 2.3

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.3)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ 2.1 และ 2.2 ลงไปในสมการที่ 2.3 ค่าอัตราส่วนปัวซองจะสามารถพิสูจน์ได้จากความเร็วคลื่นอัดและความเร็วคลื่นเฉือน ดังสมการที่ 2.4

$$\nu = \frac{[0.5(V_c/V_s)^2] - 1}{(V_c/V_s)^2 - 1} \quad (2.4)$$

ในการทดสอบดาวโฮ ค่าโมดูลัสเฉือนที่คำนวณได้ คือ  $G_{VH}$  หมายความว่า คลื่นจะวิ่งผ่านตัวกลางในแนวตั้ง และ อนุภาคเม็ดดินจะเคลื่อนที่ในแนวราบ



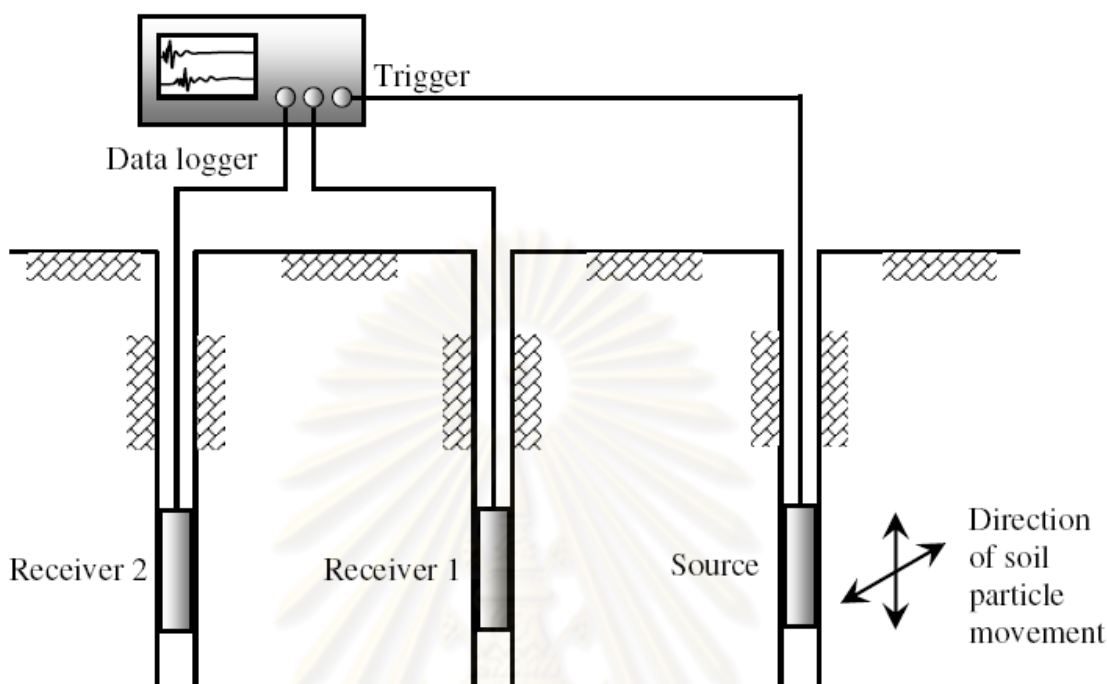
ภาพที่ 18 Down Hole Method (Kok-Hooi Chan,2007)

#### 2.7.4 Cross Hole Test

เป็นวิธีทดสอบโดยการเจาะหลุมในแนวตั้ง 2 หลุม (Stokoe and Woods, 1972; Salgado et al., 1997; Hight et al.,1997).ระยะห่างการระหว่าง 2 หลุมไม่มากนัก ที่ระดับความลึกเท่ากัน โดยที่ตัวกำเนิด และ ตัวรับสัญญาณอยู่คนละหลุมกันและตัวรับสัญญาณจะสัมผัสตลอดเวลา ขณะทำการทดสอบตัวกำเนิดและตัวรับสัญญาณจะต่อเข้ากับ Storage Oscilloscope จะบันทึกค่าจากตัวรับสัญญาณทันทีเมื่อตัวกำเนิดสร้างคลื่นแรงเฉือนตามภาพที่ 19 วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความถูกต้องมากที่สุดวิธีหนึ่งและมักจะมีการใช้อ้างอิงกับวิธีการอื่นๆ แต่จุดอ่อนที่เห็นได้ชัดคือ การเจาะดินเพราะจะเป็นการรบกวนตัวอย่างดินธรรมชาติ จึงแก้ปัญหาโดยการให้ตัวกำเนิดคลื่นและตัวรับสัญญาณสัมผัสหน้าดินอย่างดี

Andreasson (1979) ได้แสดงการเปรียบเทียบผลของการรบกวนจะประมาณเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหลุมเจาะที่ทำการเจาะไว้ก่อนกับการทดสอบโดยการกดเครื่องมือลงไปในตัวอย่างดิน ยังมีการศึกษาปัญหาต่อพบว่าที่ระดับความลึกที่มากขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่ามาก

ตามยิ่งทำให้ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีการเคลื่อนที่ที่เร็วขึ้นและไปในทิศทางที่เร็วที่สุด ทำให้การหาค่าโมดูลัสเฉือนที่ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนาแน่นน้อย ยากต่อการหาค่าที่ถูกต้อง ตามภาพที่ 21



ภาพที่ 19 Cross Hole Test (Kok-Hooi Chan,2007)

## 2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับดินเหนียวสร้างใหม่

ดินเหนียวสร้างใหม่ทำโดยแยกดินธรรมชาติให้แตกออกเป็นอนุภาคเม็ดดิน ทำลายระนาบเฉือน (Shear Plane) กำจัดช่องว่างขนาดใหญ่ และอัดดินขึ้นใหม่ให้โครงสร้างดินเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด (Fearon & Coop,2000) ในปัจจุบันขบวนการสร้างดินใหม่นั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อแยกดินออกให้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก โดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกัน Burland (1990) ได้แนะนำว่าตัวอย่างดินสร้างใหม่ควรจะทำจากตัวอย่างดินธรรมชาติ ผสมน้ำให้เป็นของเหลวโดยไม่ใช้ดินแห้งในการผสม ดินเหลวควรมีปริมาณน้ำในดินระหว่างพิกัดเหลว (Liquid Limit) ถึง 1.5 เท่าของพิกัดเหลว จากนั้นนำดินเหลวมาทำการอัดตัวคายน้ำ ให้อยู่ในสภาพ 1 มิติ น้ำที่ใช้ผสมดินควรมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกับของเหลวในช่องว่างดิน Burland เรียกพารามิเตอร์ดินที่เตรียมด้วยวิธีการนี้ว่า “สิ่งที่มีอยู่แต่ดั้งเดิมในธรรมชาติ (Intrinsic)” เนื่องจากพารามิเตอร์เหล่านี้มีแนวโน้มที่จะมีลักษณะพิเศษเฉพาะตัว และมีมาแต่กำเนิดสำหรับดินชนิดนั้น

Fearon & Coop (2000) ได้รายงานว่าพลังงานสูงและต่ำที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินสร้างใหม่อาจจะให้พฤติกรรมดินที่แตกต่างกันมาก สำหรับดินเหนียว Argillie Scagliose ที่

สร้างใหม่โดยไม่ได้เตรียมตัวอย่างจากการปั่นละเอียดซึ่งใช้พลังงานสูง น่าจะเป็นดินอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้เปรียบเทียบกับดินธรรมชาติ เพราะดินสร้างใหม่ที่ได้จะเป็นเนื้อเดียวกัน มีโครงสร้างพื้นฐานที่ค่อนข้างจะมีเสถียรภาพ สามารถทำซ้ำใหม่ได้ และมีโครงสร้างผลึกที่ใกล้เคียงกับดินธรรมชาติมากกว่าดินจากการผสมโดยการปั่นละเอียด ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินสร้างใหม่ของ Fearon ประกอบด้วย การนำดินธรรมชาติมาตัดเป็นชิ้นๆ ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาณความชื้นในดินประมาณ 1.1 ถึง 1.5 เท่าของพิกัดเหลว และทิ้งไว้ข้ามคืนให้ดินเหนียววมตัว จากนั้นนำไปผสมในเครื่องกวนดิน (Mechanical Mixer) ประมาณ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้ดินเหลว (Soil Slurry) ที่เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำดินเหลวไปอัดตัวคายน้ำที่ระดับความเค้นที่ต้องการ เพื่อให้ความชื้นในดินลดลง

Mathew and Rao (1997) ได้ศึกษาอิทธิพลของไออนบวกต่อพฤติกรรมการอัดตัวของดินเหนียวทะเล การศึกษาจากระบบไออนเชิงเดี่ยวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงอิทธิพลของวาเลนซี และรัศมีวงน้ำของไออนบวกที่ถูกยึดเกาะไว้ต่อการอัดตัวของดินเหนียว ผลการทดสอบ Oedometer แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของวาเลนซีมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของดัชนีการอัดตัว (Compression Index) และต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต

เทคนิคในการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่จากงานวิจัยต่างๆที่ได้รวบรวมไว้ มีดังนี้

Brand & Tsai (1972)

1. กวนดินที่จะใช้ทดสอบ
2. นำดิน 250 กรัม ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาณน้ำในดิน 250% ใช้มือผสมร่วมกับเครื่องกวน
3. เติมน้ำเกลือให้ดินเหลวมีเกลือเข้มข้น 35 กรัม/ลิตร และเพิ่มปริมาณน้ำในดินให้ได้ 2500%
4. เทดินเหลวใส่ในCylinder
5. ทิ้งให้ดินตกตะกอนจนกระทั่งมีน้ำใสสูงประมาณ 8 ซม. จึงดูดน้ำออก
6. เติมดินเหลวที่เตรียมตามข้อ1-3 เพิ่ม
7. ทำซ้ำตามข้อ 5-6 จนความสูงของดินเหนียวที่ต้องการ
8. เมื่อตกตะกอนสมบูรณ์แล้ว จึงปล่อยให้เกิด Self Weight Consolidation ประมาณ 2 สัปดาห์
9. ทดสอบการอัดตัวคายน้ำจนถึงหน่วยแรงที่ต้องการ

Chakrabarti & Horvath (1985)

1. นำดินเปียกมาผึ่งลมให้แห้ง
2. บดให้เป็นผง
3. ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100
4. ผสมน้ำให้ชื้น และบ่มไว้ 24 ชั่วโมง
5. เติมน้ำกลั่นที่ไล่ฟองอากาศ ให้ได้ปริมาณน้ำเริ่มต้น 250 – 300% และผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
6. ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100
7. ทำการอัดตัวคายน้ำ โดยให้หน่วยแรงที่ต้องการมีค่าคงที่ประมาณ 72 ชั่วโมง

#### Fearon & Coop (2000)

1. นำดินธรรมชาติมาตัดเป็นชิ้นๆ
2. ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาณความชื้นในดินประมาณ 1.1 ถึง 1.5 เท่าของพิกัดเหลว
3. บ่มทิ้งไว้ข้ามคืนให้ดินเหนียวบวมตัว
4. ผสมในเครื่องกวนดิน (Mechanical Mixer) ประมาณ 2 ชั่วโมง จนเป็นเนื้อเดียวกัน
5. ทดสอบการอัดตัวคายน้ำจนถึงหน่วยแรงที่ต้องการ

#### Lee et al. (1993)

1. ผสมดินเหนียวคงสภาพด้วยน้ำประปาให้มีอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้นประมาณ 7 และเก็บไว้ในบ่อรวม (Common Pool) ใช้เป็นตัวอย่างดินเหลวเริ่มต้นในทุกการทดสอบ
2. ตักดินเหลวจากข้อ 1 ใส่ลงใน Sedimentation Tank ที่ประกอบอยู่ด้านบนของ เครื่องอัดตัวคายน้ำ
3. ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ให้ตกตะกอน
4. ถอด Sedimentation Tank ออก และปาดดินให้เสมอกว้างของเครื่องอัดตัวคายน้ำ
5. ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ โดยเพิ่มก้อนน้ำหนักเป็นชิ้นๆจนถึง 80 kPa

#### Seah (1990)

1. นำดินมาล้างน้ำ ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40
2. อบดินให้แห้งที่ 105 องศาเซลเซียส



3. บดให้เป็นผง โดยขนาดเม็ดดินต้องผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ไม่น้อยกว่า 95%
4. ผสมผงดินเหนียวกับน้ำเกลือในสภาพสุญญากาศ ให้ได้ปริมาณน้ำเริ่มต้น 100% และดินเหลวมีความเข้มข้นเกลือ 16 กรัม/ลิตร
5. เทดินเหลวลงในConsolidometer ในสภาพสุญญากาศ
6. ทดสอบการอัดตัวคายน้ำจนถึงหน่วยแรงที่ต้องการ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การดัดแปลงเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน

การควบคุมกระบวนการต่างๆของเครื่องทดสอบ ให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพนั้นสิ่งที่จำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งคือจะต้องทราบถึงลักษณะและชนิดตลอดจนปริมาณของตัวแปรที่จะต้องควบคุม เช่น ความดันน้ำภายในและภายนอกของตัวอย่าง การไหลเข้าออกของน้ำ การเคลื่อนที่ ความเครียด และแรงที่เกิดขึ้น เป็นต้น เมื่อทราบลักษณะ ชนิดและปริมาณของตัวแปรต่างๆ เหล่านี้แล้ว จะต้องทำการปรับระดับปริมาณของตัวแปรนั้นๆให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ต่อรวมอยู่ในระบบ อุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดและแปลงค่าปริมาณตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมเครื่องทดสอบให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ทดสอบ

ในงานวิจัยนี้จะทำการดัดแปลงเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีอยู่เดิมให้สามารถควบคุมวิธีหน่วยแรงและหาความเร็วคลื่นเฉือน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของอุปกรณ์เครื่องทดสอบฯ และส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมวิธีหน่วยแรง

#### 3.2 ส่วนของเครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ประกอบเครื่องทดสอบสามแกน

##### 3.2.1 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณและมาตรวัดต่าง

1.) อุปกรณ์รับและส่งสัญญาณ National Instruments NI cRIO 9073

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับและส่งสัญญาณของตัวแปลงสัญญาณแต่ละตัว ซึ่งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยตัวส่งสัญญาณเอาต์พุต NI 9263 AO  $\pm 10$  V และตัวรับสัญญาณอินพุต NI 9237 AI Bridge ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้รับและส่งสัญญาณทางไฟฟ้า NI cRIO 9073

## 2.) ดิจิตอลมอเตอร์ (Digital motor)

เป็นอุปกรณ์สำหรับการเคลื่อนที่ของเครื่องทดสอบในแนวแกนซึ่งต่อกับช่องผ่านสัญญาณเอาต์พุต NI 9263 AO  $\pm 10$  V ดังภาพที่ 3.2 สามารถให้เลือกใช้ได้ทั้ง ระบบ Manual และ Computer ในระบบ Manual สามารถควบคุมที่มอเตอร์ได้โดยตรงส่วนระบบ Computer จะต้องป้อนคำสั่งจากโปรแกรม Triaxial control Panel ซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่ตั้งแต่ 00.00- 600 Hz หรือ 0.00- mm/min



ภาพที่ 3.2 ดิจิตอลมอเตอร์ (Digital motor)

## 3.) โหลดเซลล์ (Load Cell)

เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบโดยต่อเข้าตัวรับสัญญาณอินพุต NI 9237 AI Bridge ดังแสดงในภาพที่ 3.3 มีความสามารถในการวัดแรงได้ 5 กิโลนิวตัน



ภาพที่ 3.3 โหลดเซลล์ (Load Cell)

#### 4.) Displacement transducer

เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนโดยต่อเข้ากับตัวรับสัญญาณอินพุต NI 9237 AI Brigde ดังแสดงในภาพที่ 3.4 มีความสามารถในการวัดได้ 5 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน (LVDT)

#### 5.) มาตรวัดแรงดันน้ำ (Pressure transducer)

เป็นอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกของตัวอย่าง มี 2 ขนาดด้วยกันคือ 500 kPa สำหรับวัดแรงดันภายใน (Back&Pore Pressure) และ 1 MPa สำหรับการวัดแรงดันภายนอก(Cell Pressure) ซึ่งต่อกับตัวรับสัญญาณอินพุต NI 9237 AI Brigde ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 มาตรวัดแรงดันน้ำ (Cell Pressure)

#### 6.) Volumetric transducer

เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินซึ่งต่อกับตัวรับสัญญาณอินพุต NI 9237 AI Bridge ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 มาตรฐานวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำ (Volumetric transducer)

#### 7.) Electro-Pneumatic transducer

เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมความดันภายนอก (Cell Pressure) และความดันภายในเซลล์ (Back&Pore Pressure) ซึ่งต่อกับตัวรับสัญญาณอินพุต NI 9237 AI Bridge ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำ (Cell & BackPressure)

8.) Precision isolator / Noise filter

เป็นอุปกรณ์ลด Noise ที่เป็นสัญญาณรบกวนต่างๆ



ภาพที่ 3.8 อุปกรณ์ลดสัญญาณรบกวน

### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเร็วคลื่น

เครื่องมือสำหรับหาค่าความเร็วคลื่น ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังต่อไปนี้

1. แผ่น Bender Element เป็นเครื่องมือส่งและรับสัญญาณ (Actuator & Sensor) คลื่นความเค้นในตัวอย่าง



ภาพที่ 3.9 แผ่น Bender Element



2. Amplifier เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ขยายสัญญาณทางไฟฟ้า



ภาพที่ 3.10 National Instruments NI 6120 cart

3. National Instruments NI 6120 cart เป็นอุปกรณ์สำหรับรับและส่งข้อมูลจากบนเดอริลิเมนต์สู่อุปกรณ์คอมพิวเตอร์โดยใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในการนำเสนอข้อมูล



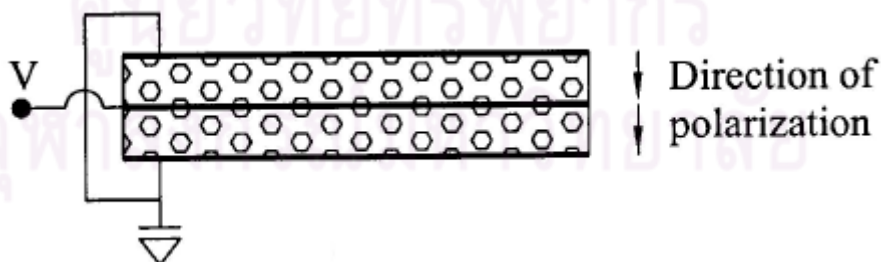
ภาพที่ 3.11 National Instruments NI 6120 cart

### 3.3 การติดตั้งแผ่น Bender Element กับเครื่องทดสอบ

วิธีการติดตั้งเบนเดอร์อีลิเมนต์ (Bender Element) ลงไปใน Top Cap และ Base ของเครื่องทดสอบ Triaxial ทำการต่อเชื่อมสายไฟกับแผ่น Bender Element โดยที่ตัวส่งสัญญาณ (Actuator) และตัวรับสัญญาณ (Sensor) จะต่อวงจรแตกต่างกันดังภาพที่ 3.12 (ก)และ(ข) ตามลำดับการต่อวงจรที่แตกต่างกันของ Actuator และ Sensor เพื่อให้ Bender Element มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำหน้าที่ที่แตกต่างกันของการส่งและรับสัญญาณคลื่นความเค้น แล้วเคลือบแผ่น Bender Element ด้วยน้ำมันเคลือบแข็งโพลียูรีเทน ให้มีความหนาพอประมาณ เพื่อป้องกันการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าในแผ่น Bender Element แล้วเจาะ Top Cap และ Base ของเครื่อง Triaxial ดังภาพที่ 3.13(ก)เพื่อให้สามารถใส่แผ่น Bender Element ลงไปใน Top Cap และ Base ได้เทกาว Epoxy ลงไปใน Top Cap และ Base เพื่อยึดแผ่น Bender Element กับ Top Cap และ Base ให้ติดกันดังภาพที่ 3.13(ข) เจาะแผ่นหินปูน (Porous Stone) ให้รูมีขนาดที่แผ่น Bender Element สามารถทะลุผ่านไปได้

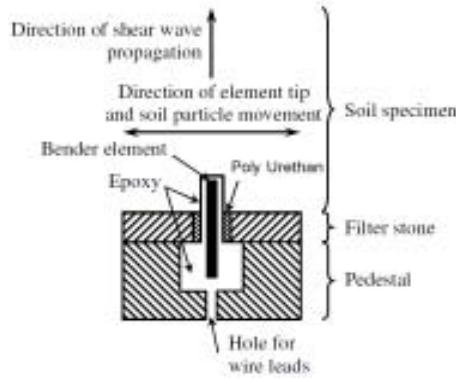


(ก)

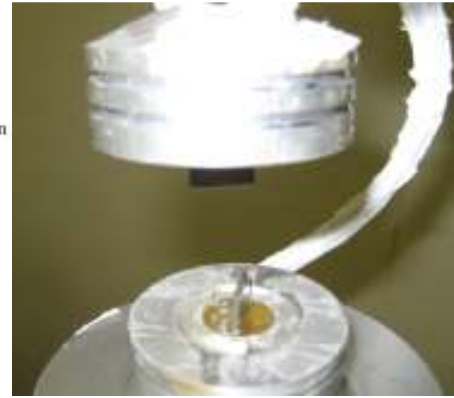


(ข)

ภาพที่ 3.12 (ก) แสดงการต่อวงจรตัวกำเนิดสัญญาณ (X-pole) (ข) แสดงการต่อวงจรตัวรับสัญญาณ (Y-pole)

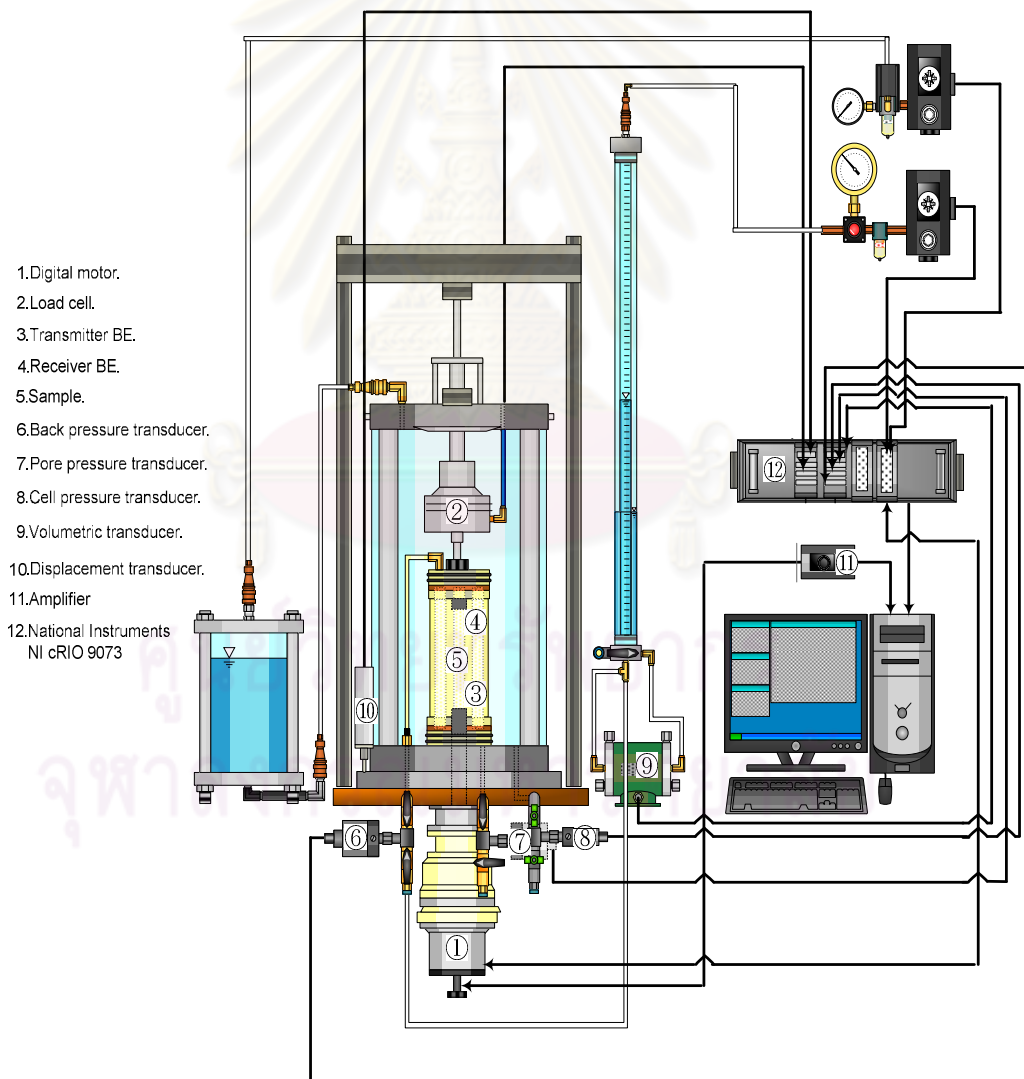


(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.13 (ก) การเคลือบแผ่น Bender Element (ข) การติดตั้งแผ่น Bender Element



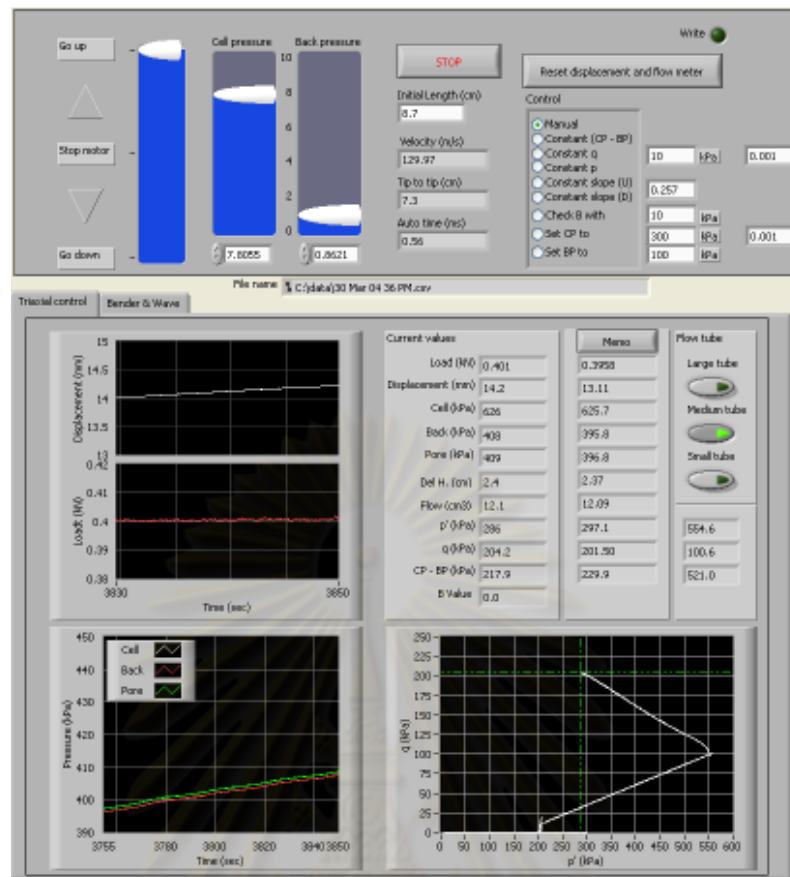
ภาพที่ 3.14 รายละเอียดการทำงานของเครื่องทดสอบสามแกนที่ได้ดัดแปลงขึ้น



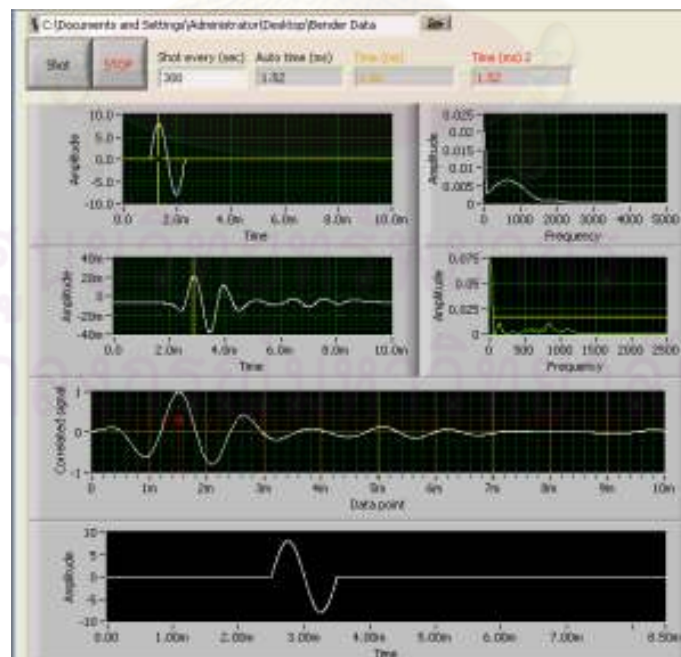
ภาพที่ 3.15 เครื่องทดสอบสามแกนที่พัฒนาขึ้น

### 3.4 ส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมวิถีของหน่วยแรง

สำหรับการควบคุมวิถีหน่วยแรงได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการจัดการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้วิถีของหน่วยแรงเป็นไปตามความต้องการของผู้ทดสอบ นอกจากนี้การควบคุมวิถีหน่วยแรงแบบอัตโนมัติแล้ว ยังได้พัฒนาโปรแกรมให้สามารถตรวจวัดความเร็วคลื่นเฉือนในระหว่างการทดสอบแบบอัตโนมัติโดยใช้การประมวลผลสัญญาณเชิงเลขแบบสหสัมพันธ์ไขว้ ลักษณะของโปรแกรมควบคุมวิถีหน่วยแรงและการตรวจวัดความเร็วคลื่นเฉือนได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.16 โปรแกรมควบคุมวิถีหน่วยแรง



ภาพที่ 3.17 โปรแกรมหาความเร็วคลื่น



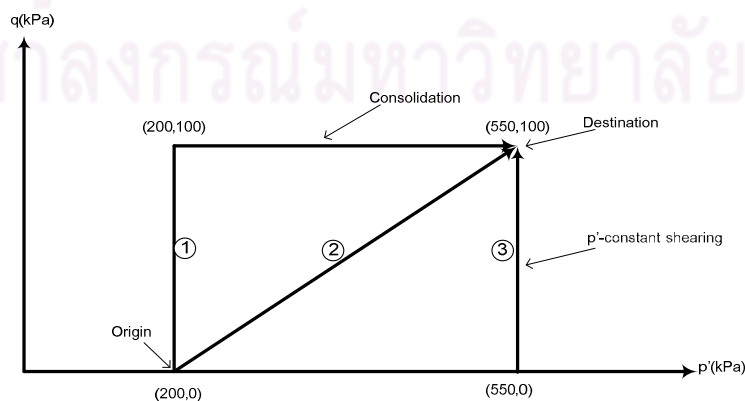
### 3.5 การควบคุมวิถีหน่วยแรง(Control Stress Path)

การควบคุมวิถีหน่วยแรงบนเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนเพื่อศึกษาผลของวิถีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนในดินเหนียวอ่อนสร้างใหม่ได้ใช้เบนเดอริอิลิเมนต์สร้างและรับคลื่นเฉือนเพื่อคำนวณหาความเร็วคลื่นที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ทดสอบภายใต้วิถีหน่วยแรง 3 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 3.18 จะใช้ความสัมพันธ์ที่แสดงไว้ในสมการที่ (2.1) เป็นหลัก คือ แบบที่ 1 เมื่อต้องการให้วิถีหน่วยแรงมีค่าความเค้นประสิทธิผล ( $p'$ ) คงที่แต่มีค่าความเค้นเฉือน ( $q$ ) เพิ่มขึ้น โปรแกรมจะเพิ่มความเค้นเฉือนโดยการสั่งให้มอเตอร์ดันตัวอย่างดินตามแนวแกนด้วยความเร็ว 0.025 mm/min และในขณะเดียวกันก็จะปรับค่าความดันเซลล์ลงตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.1) เมื่อต้องการเฉือนตัวอย่างดินโดยรักษาอัตราส่วน  $p'/q$  ให้มีค่าคงที่ โปรแกรมจะเพิ่มความเค้นเฉือนโดยการสั่งให้มอเตอร์ดันตัวอย่างดินตามแนวแกนด้วยความเร็วคงที่พร้อมกับปรับค่า  $CP$  ให้เปลี่ยนแปลงตามกัน ในกรณีที่ต้องการเพิ่มค่า  $p'$  และรักษาค่า  $q$  ให้คงที่ โปรแกรมจะทำการเพิ่มแรงดันเซลล์และรักษาแรงเฉือนให้มีความคงที่ด้วยการควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ขึ้นลงตามความจำเป็นเพื่อลดผลจากการคลายตัวของชุดเกียร์ (Relaxation and backlash of gear)

$$p' = \frac{q}{3} + CP - BP = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{3} \quad (2.1)$$

$$q = \frac{F}{A} = \sigma_1 - \sigma_3$$

โดยที่  $p'$  คือความเค้นประสิทธิผล  $q$  คือความเค้นเบี่ยงเบน  $CP$  คือความดันเซลล์  $BP$  คือความดันน้ำภายในตัวอย่าง  $F$  คือแรงกดตามแกน และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน



ภาพที่ 3.18 วิถีหน่วยแรงของการทดสอบแบบต่าง ๆ



### 3.6 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

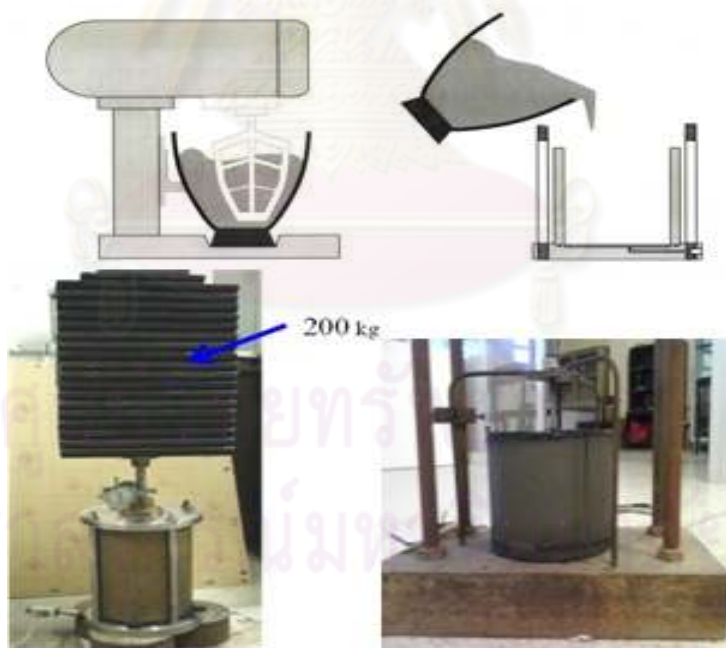
ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่(reconstituted clay) จากดินบริเวณซอยวิภาวดี 62 ที่ระดับความลึกประมาณ 6-10 เมตร ตัวอย่างดินถูกสร้างใหม่โดยใช้การอัดตัวอย่างดินจากสภาพเหลวด้วยหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นดังนี้ 0.125, 0.25, 0.50 และ 1.00 ksc เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำได้ทำการลดน้ำหนักลงจาก 1.00 เป็น 0.50 และ 0.25 ksc ตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการดันตัวอย่างดินออกจากโมลด์แล้วแบ่งออกเป็น 3 ตัวอย่างดังภาพที่ 3.14 และ 3.15 และทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมพื้นฐานดังนี้

ปริมาณความชื้น (Water content)

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

พิกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg 's limit)

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



ภาพที่ 3.19 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่



ภาพที่ 3.20 ตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ รุ่นที่ 1

### 3.7 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity) โดยใช้ Bender element ในเครื่องทดสอบสามแกนแบบควบคุมวิถีความเค้นจะมีการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนต่างๆเหมือนการทดสอบเครื่องทดสอบสามแกนทั่วไปดังต่อไปนี้

#### 3.7.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

นำตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบมาทำการเอาพาราฟินและอลูมิเนียมฟลอยด์ที่หุ้มอยู่ออกแล้วนำมาตัดแต่งขอบ (Trim) ด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก (Steel Wire Saw) ใน Trimming Frame จนกระทั่งได้ตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกทรงกลมโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 50 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาตัดหัวและท้ายโดยใช้ Meter Box ให้เหลือความยาวประมาณ 100 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้สัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 2 ต่อ 1 ( $H:D = 2:1$ ) ตามขนาดมาตรฐาน จากนั้นนำตัวอย่างดินที่ถูกตัดแต่งแล้วมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่น (Total Density,  $\gamma_t$ ) ส่วนปริมาณความชื้น (Water Content,  $W_n$ ) ในตัวอย่างดินหาได้โดยใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างปริมาณความชื้นของดินส่วนบน ส่วนกลางและส่วนล่างของตัวอย่าง

#### 3.7.2 การเตรียมเครื่องมือทดสอบและจัดตัวอย่างในเครื่องทดสอบ

1. ทำการตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าว่าอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้เรียบร้อย
2. ทำการตรวจสอบข้อต่อจุดต่างๆว่ามีการรั่วซึมหรือไม่

3. ทำการไล่ฟองอากาศออกจากระบบด้วย Water Dr-Airing (จากเครื่อง Water Dr-Airing System โดยทำการ De-air น้ำที่จะใช้ในการทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อยประมาณ 30 นาทีก่อนนำมาใช้) ทั้งในสายของ Cell Pressure และ Back Pressure และที่สำคัญคือหลังจากไล่ฟองอากาศออกจากระบบแล้ว ต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีแรงดันตกค้างอยู่ในระบบ โดยการเปิดระบบ(ประตูน้ำหรือValve)ออกสู่บรรยากาศ
4. นำแผ่นหินพรุน(Porous stone)ที่ผ่านการต้มไล่ฟองอากาศในน้ำเดือดอย่างน้อย 10 นาที วางบนฐานของ Triaxial แล้ววางทับด้วยกระดาษกรอง(Filter Paper)ก่อนที่จะนำตัวอย่างที่ผ่านการตัดแต่ง(Trimmed) มาวางโดยจะต้องเสียบแผ่น Bender Element ลงไปในดินไม่ให้ตัวอย่างเกิดรอยแตกขึ้นได้จากนั้นตามด้วยกระดาษกรอง, หินพรุนและ Top cap ที่มีแผ่น Bender Element เสียบติดอยู่ ถ้าตัวอย่างมีลักษณะที่ค่อนข้างแข็งจะต้องมีการเจาะเป็นร่องเพื่อที่จะสามารถเสียบแผ่น Bender Element ลงไปได้
5. ทำการติดกระดาษกรอง(Side Drained) ขนาดตามมาตรฐานของ Bishop and Henkel (1962)รอบๆตัวอย่างเพื่อช่วยเร่งอัตราการระบายของแรงดันน้ำ(Pore Pressure Dissipation) ในระหว่างกระบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)และช่วยในการกระจายของแรงดันน้ำในระหว่างการเค้นตัวอย่าง โดยปลายทั้งสองของกระดาษกรองจะต้องสัมผัสกับแผ่นหินพรุนทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง
6. สวม Membrane หุ้มตัวอย่างเพื่อไม่ให้น้ำสัมผัสกับตัวอย่างดินโดยตรง
7. รััด O-ring ที่ฐานและที่ Cap เพื่อป้องกันน้ำภายในเซลล์ไหลซึมผ่านเข้าสู่ตัวอย่างดิน
8. นำ Triaxial cell ครอบลงบนฐานของ Triaxial แล้วทำการยึดด้วยสกรู และควรระวัง Piston กระแทกหรือกดตัวอย่างก่อนเริ่มการทดสอบซึ่งอาจทำให้ตัวอย่างวิบัติได้จึงควรมีการล็อกหรือค้ำ Piston ไว้ก่อนทำขั้นตอนนี้
9. เติมน้ำเข้า Triaxial Cell ผ่านทางสายของ Cell Pressure โดยเปิด Air Valve ด้านบนของ Triaxial Cell ไว้ แล้วรอจนกระทั่งน้ำเต็มล้นออกทาง Air Valve จากนั้นทำการปิด Air Valve
10. ทำการตั้งค่าต่างๆให้เป็นศูนย์เพื่อเริ่มการทดสอบในขั้นตอนนี้ต่อไป

### 3.7.3 ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัว (Saturation)

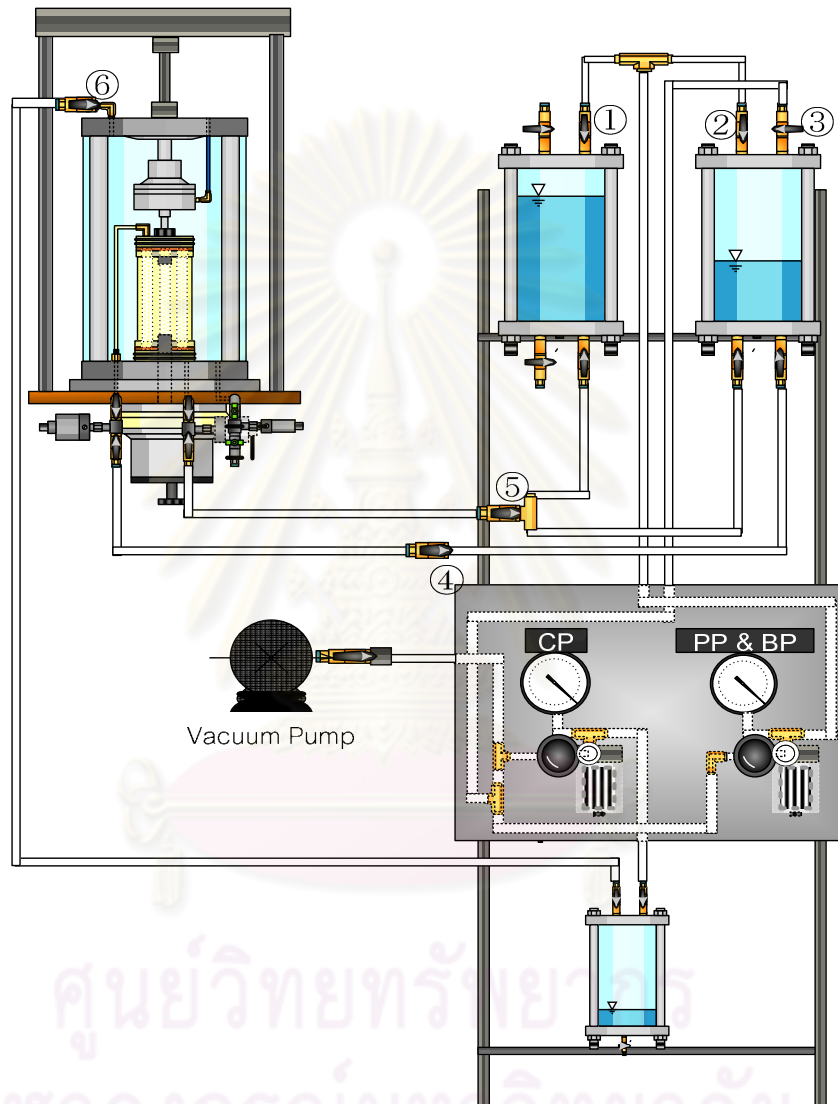
ขั้นตอนนี้เป็นการทำงานให้มั่นใจว่าตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ และขจัดปัญหาของ Negative Porpressur ซึ่งเราไม่รู้ค่า โดยทำการไล่อากาศออกจากตัวอย่างดินเพื่อให้ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการดูดอากาศ(Suc tion) ด้วย Vacuum Pump เป็นวิธีการไล่ฟองอากาศออกจากตัวอย่างโดยให้น้ำไหลเข้าด้านล่างของตัวอย่างดินแล้วออกทางด้านบนด้วยน้ำกลั่นที่นำมา De-Air ไว้แล้ว นานประมาณ 3-4 ชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 3.21 โดยมีขั้นตอนและวิธีการควบคุมแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการดูดอากาศออกจากตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

| Step   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Top    | -20 | -40 | -60 | -80 | -90 | -90 |
| Cell   | 0   | -20 | -40 | -40 | -70 | -70 |
| Bottom | -20 | -40 | -60 | -80 | -90 | -80 |

1. เติมน้ำที่ De- Air ไว้แล้วเข้าในภาชนะ A และ B ให้ระดับน้ำ A สูงกว่า B
2. เปิด Vacuum Pump ให้ความดัน Pressure gage -90 kPa
3. เปิดวาล์ว (1)(2)(4)(6)และ(5)โดยใช้น้ำจากภาชนะ B
4. ปรับ Pressure gage ของ BP&PP ที่ความดัน -20 kPa และ CP 0 kPa ทิ้งไว้ 20 นาที
5. ปรับ Pressure gage ของ BP&PP ที่ความดัน -40 kPa และ CP -20 kPa ทิ้งไว้ 20 นาที จนถึง step 5
6. เปิดวาล์ว (5) และ(3) ปิดวาล์ว(2) เพื่อให้ น้ำไหลจากภาชนะ A เข้า Bottom ผ่านตัวอย่างดินออกทางด้านบนเข้าในภาชนะ B
7. ปรับ Pressure gage ของ BP&PP ที่ความดัน -80 kPa และ CP -70 kPa ทิ้งไว้ 20 นาที
8. ปรับ Pressure gage ของ BP&PP ที่ความดัน -90 kPa แล้วเปิดวาล์ว(2) ปิด(3)
9. ลดความดันจาก Step 5 ย้อนกลับจนถึง Step 1

10. ปิดวาล์ว(6) ค่อยๆเพิ่มความดัน CP 20 kPa พร้อมกับปลดความ Pressure gage ของ BP&PP จนถึง 0 kPa ปิด Vacuum Pump และวาล์ว (1)(2)(4) และ(5)
11. หลังจากนั้นทำการตรวจสอบค่า B Parameter ซึ่งตัวอย่างที่เหมาะสม ควรให้ค่า B Parameter มีค่ามากกว่า 95% จึงทำกระบวนการอัดตัวคายน้ำต่อไป

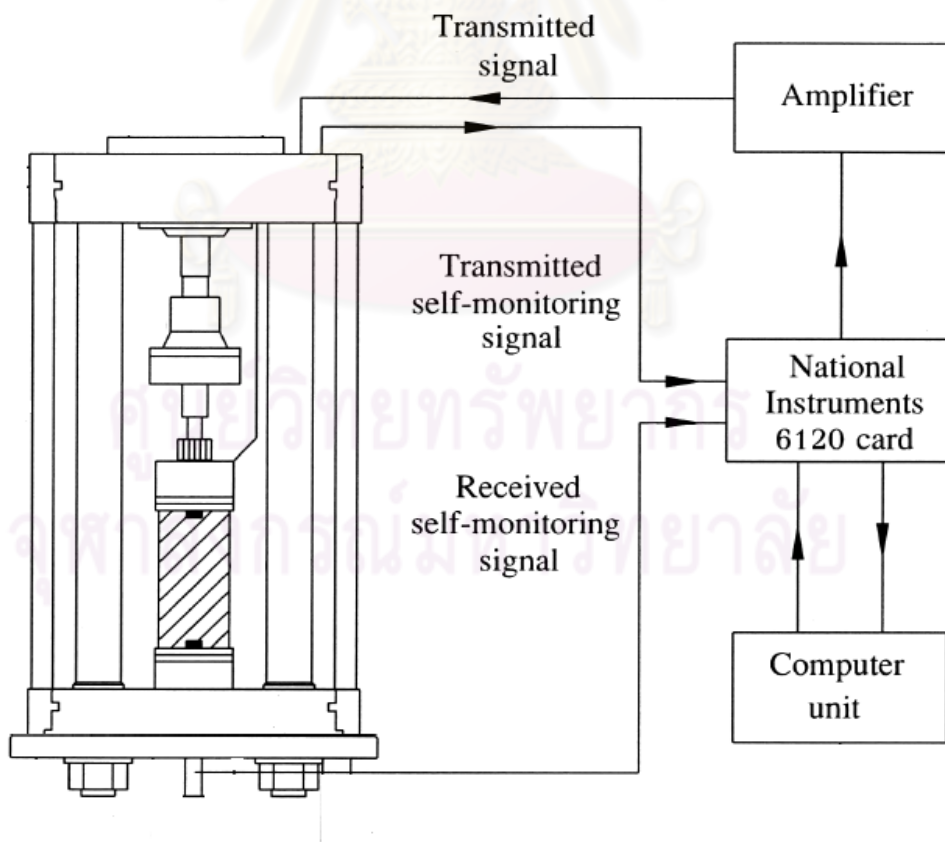


ภาพที่ 3.21 วิธีการทำตัวอย่างดินให้อิ่มตัวด้วยน้ำ

### 3.7.4 วิธีการวัดความเร็วของคลื่นความเค้น (Shear wave measurement)

ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดหาค่าความเร็วของคลื่นความเค้นในระหว่างการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรง โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยการประมวลผลสัญญาณเชิงเลขแบบสหพันธ์ ไขว้ วิธีการวัดค่าความเร็วของคลื่นความเค้นมีขั้นตอนดังนี้

ทำการต่อวงจรทางไฟฟ้าดังภาพที่ 3.22 การทดสอบจะเริ่มจากโปรแกรมจะให้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยัง NI 6120 card ผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณและ Bender element ตัวส่งสัญญาณ Bender element จะแปลงสัญญาณจากพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกลทำให้เกิดการสั่นไหว ในตัว Bender element เกิดเป็นคลื่น S wave ลงไปในตัวอย่างดินจากนั้นคลื่น S wave จะแพร่กระจายจากดินไปถึง Bender element ตัวรับสัญญาณ ตัวรับสัญญาณก็จะแปลงสัญญาณทางกลจากคลื่นกลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าผ่าน NI 6120 card และแสดงผลบนคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.22 แผนผังการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender Element



### 3.7.5 ขั้นตอนการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรง

หลังจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงจึงเริ่มดำเนินการทดสอบ ภายใต้โปรแกรมควบคุมวิธีหน่วยแรง และวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือน มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. กำหนดอัตราความเร็วของมอเตอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีควบคุมแบบ Strain control โดยควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไว้ที่ 0.35 Hz 1.5% Strain/hr. หรือ 0.025 mm/min. โดยประมาณ
2. เดินมอเตอร์ให้ Load cell ตะกะกับ Top cap
3. เปิดวาล์วระบายน้ำ Back&Pore Pressur
4. ใส่ความสูงของตัวอย่างใหม่หลังจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงบนโปรแกรมควบคุมวิธีหน่วยแรง
5. Reset Displacement and flow meter
6. กำหนดการเก็บค่าความเร็วคลื่นในทุกๆ 120 วินาทีบนโปรแกรมหาความเร็วคลื่น
7. เริ่มทำการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบต่างๆโดยแบ่งออกเป็น 3 แบบที่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเดียวกันดังต่อไปนี้
  - 7.1) การควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1 ควบคุมให้  $P'$  คงที่  $q$  เพิ่มขึ้น (200,0 ถึง 200,100) แล้วเปลี่ยนเป็น  $P'$  เพิ่มขึ้น  $q$  คงที่ (200,100 ถึง 550,100)
  - 7.2) การควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 2 ควบคุมให้  $P'$  และ  $q$  เพิ่มขึ้น (200, 0 ถึง 550,100) ด้วยความชัน 0.257
  - 7.3) การควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 3 ควบคุมให้  $P'$  เพิ่มขึ้น  $q$  คงที่ (200,0 ถึง 550,0) แล้วเปลี่ยนเป็น  $P'$  คงที่  $q$  เพิ่มขึ้น (550,0 ถึง 550,100)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

ผลการดัดแปลงเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนแบบมาตรฐานที่มีอยู่เดิมให้สามารถควบคุมวิถีของหน่วยแรงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เครื่องมือดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการศึกษาผลของวิถีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนในตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่(Reconstituted Clay) ซึ่งเก็บมาจากบริเวณชอยวิภาวดี 62 ที่ระดับความลึกประมาณ 6-10 เมตร โดยการวัดความเร็วคลื่นเฉือนในระหว่างการทดสอบภายใต้วิถีหน่วยแรง 3 แบบที่มีจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดเหมือนกัน การทดสอบจะทำเหมือนการทดสอบแรงอัดสามแกนทั่วไป คือ ทำให้ตัวอย่างอิ่มตัว(Saturation) และบีบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากันทุกทิศทาง(Isotropic) เมื่อขบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงจึงทำการทดสอบหาความเร็วคลื่นเฉือนในแต่ละเส้นทางเดินของวิถีหน่วยแรงซึ่งทดสอบในสภาพ CID (Isotropically Consolidation Drained)ภายใต้เงื่อนไข (Strain control)

สำหรับการดัดแปลงเครื่องทดสอบในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของวิถีหน่วยแรงที่มีผลกระทบต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยพิจารณาถึงผลของ อัตราส่วนช่องว่าง, หน่วยแรงประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบน เป็นหลัก

#### 4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมขั้นพื้นฐานระหว่างรุ่นของดินเหนียวสร้างใหม่

ในการเตรียมตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ ขั้นตอนและวิธีต่างๆจะทำเหมือนในงานวิจัยของวิโรจน์(2546)โดยขั้นตอนการเพิ่มน้ำหนักในกระบวนการบีบอัดตัวคายน้ำคือ 0.125 , 0.25 , 0.50 , 1 ksc. ตามลำดับแล้วทำการ Unload มาที่ OCR=4 (0.25 ksc.) ซึ่งดินเหนียวสร้างใหม่นี้มีค่าหน่วยแรงแบกทานในอดีต (Maximum past pressure, หน่วยแรงในแนวตั้ง) เท่ากับ 1 ksc.

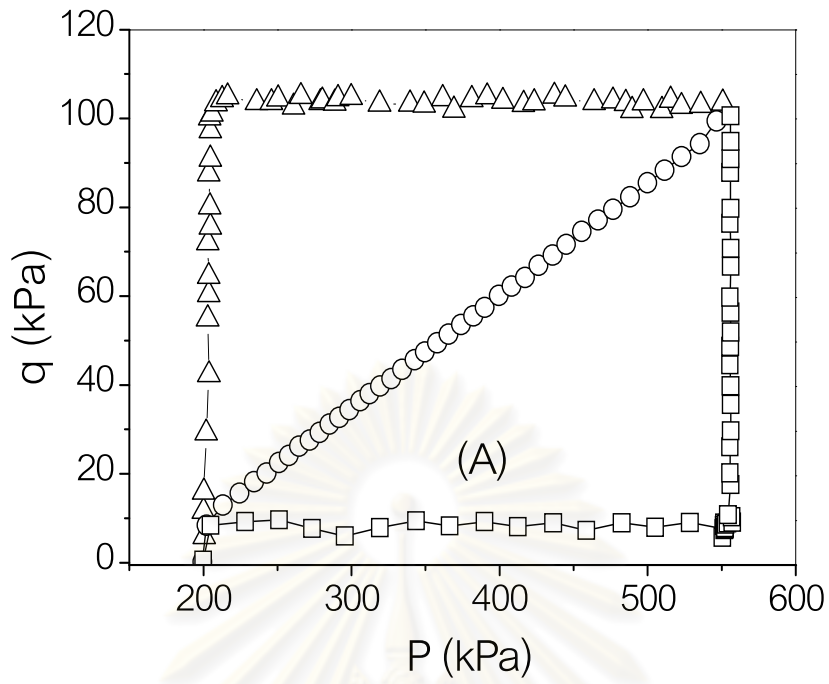
การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดินเหนียวสร้างใหม่ และขีดพิภัก Atterberg Limits เป็นวิธีการง่ายและสะดวกที่สุดในการตรวจสอบความสม่ำเสมอของเนื้อดิน ซึ่งพบว่าตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในแต่ละรุ่นที่ผสมมีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวสร้างใหม่

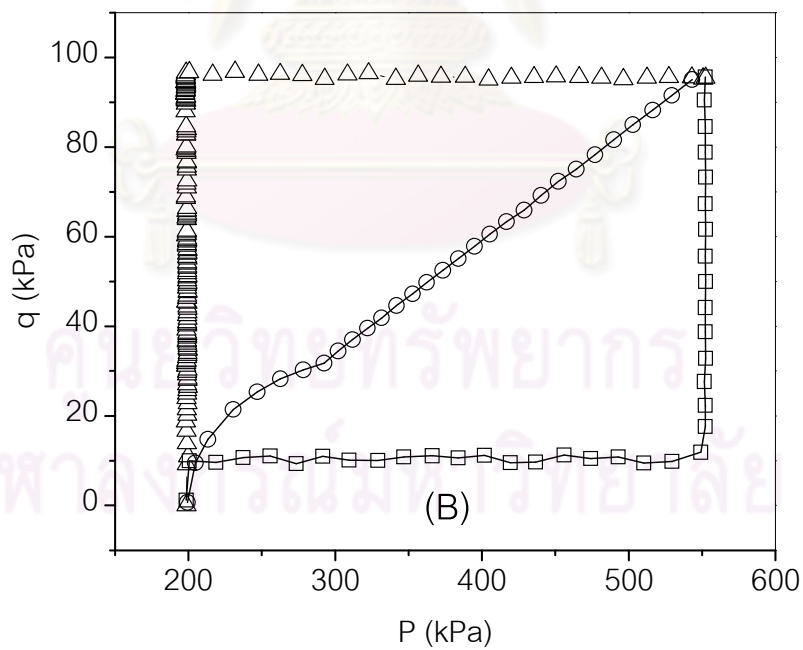
| รุ่น | Sample | $W_n$<br>(%) | $\gamma_t$<br>(t/m <sup>3</sup> ) | LL<br>(%) | PL<br>(%) | PI<br>(%) | LI<br>(%) |
|------|--------|--------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A    | 1      | 53.92        | 1.65                              | 69.18     | 27.65     | 41.53     | 0.63      |
|      | 2      | 53.59        | 1.68                              | 69.35     | 27.27     | 42.08     | 0.63      |
|      | 3      | 53.73        | 1.70                              | 69.70     | 27.56     | 42.14     | 0.62      |
| B    | 1      | 60.33        | 1.65                              | 72.62     | 30.36     | 42.26     | 0.70      |
|      | 2      | 59.68        | 1.64                              | 72.87     | 31.41     | 41.46     | 0.68      |
|      | 3      | 60.25        | 1.65                              | 73.20     | 32.42     | 40.78     | 0.68      |
| C    | 1      | 59.59        | 1.64                              | 73.47     | 33.56     | 39.91     | 0.65      |
|      | 2      | 57.79        | 1.64                              | 72.92     | 32.48     | 40.44     | 0.63      |
|      | 3      | 60.05        | 1.65                              | 73.35     | 33.65     | 39.70     | 0.66      |

#### 4.3 ผลการพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนและการตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยระบบอัตโนมัติ

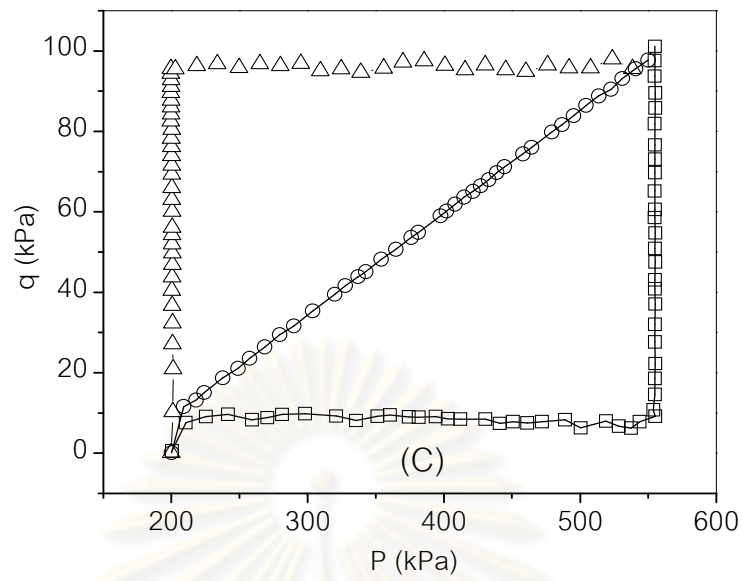
เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน(Triaxial Test) ที่ดัดแปลงขึ้นให้สามารถควบคุมวิธีหน่วยแรงนั้น แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 แบบคือ แบบที่ 1 ควบคุมให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) คงที่ ความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) เพิ่มขึ้นก่อนแล้วเปลี่ยนเป็นให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) เพิ่มขึ้นและความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) คงที่ แบบที่ 2 ควบคุมให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) และความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) เพิ่มขึ้น แบบที่ 3 ควบคุมให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) เพิ่มขึ้น ความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) คงที่ก่อนแล้วเปลี่ยนเป็นให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) คงที่และความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) เพิ่มขึ้น โดยมีผลการทดสอบดังภาพที่ 4.1 4.2 และ 4.3 เป็นการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงกับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ในแต่ละรุ่นการผสม ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเครื่องทดสอบที่ได้ดัดแปลงขึ้นมานั้นสามารถควบคุมเส้นทางเดินของวิธีหน่วยแรงและสามารถตรวจวัดความเร็วคลื่นเฉือนดังภาพที่ 4.4 ในระหว่างการทดสอบแบบอัตโนมัติซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของผู้ทดสอบ



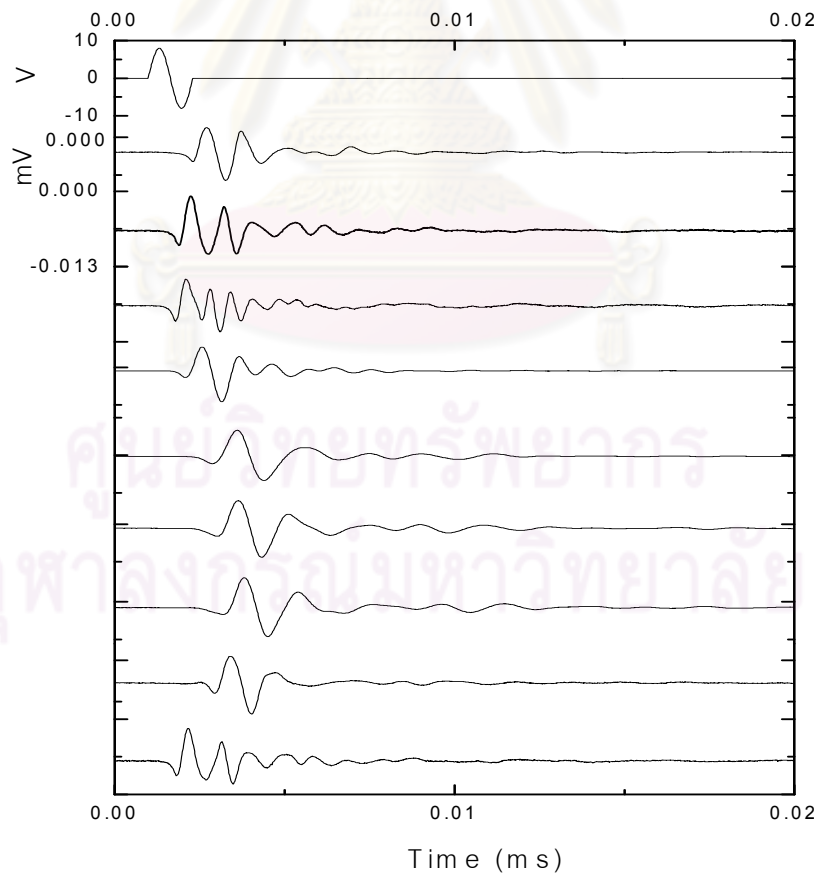
ภาพที่ 4.1 แสดงผลการควบคุมเส้นทางเดินของวิถีหน่วยแรงของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น A



ภาพที่ 4.2 แสดงผลการควบคุมเส้นทางเดินของวิถีหน่วยแรง ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น B



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการควบคุมเส้นทางเดินของวิธีหน่วยแรง ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น C



ภาพที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณของ Bender element ที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรมหาความเร็วคลื่น

#### 4.4 ผลกระทบของวิธีหน่วยแรงต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือน(Shear Wave Velocity)

นักวิจัยหลายท่านได้เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ( $V_s$ ) กับสถานะของความเค้น (State of stress) ในทิศทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของคลื่น โดยที่ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของเหนียวเกิดจากความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $\sigma'_{mean}$ ) ซึ่งความเค้นประสิทธิผลหลัก ( $\sigma'_1$ ) และรอง ( $\sigma'_3$ ) กระทำในทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นและทิศทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาคดินตามลำดับภายใต้การให้แรงกระทำแบบเท่ากันทุกทิศทาง ( $\sigma'_0$ ) หลังจากทำการให้แรงกระทำแบบเท่ากันทุกทิศทางตัวอย่างดินเหนียวจะถูกทำการเฉือนโดยการเพิ่มแรงกระทำในแนวตั้งด้วยอัตราความเครียดอัดในระดับต่ำๆที่ซึ่งแรงกระทำในแนวราบมีค่าไม่คงที่ตามเงื่อนไขการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงตลอดการทดสอบ ในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีสองความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์ที่ได้มีการนำเสนอไว้ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนตลอดระยะเวลาหลักทั้งแกน x และ y กับความเค้นในทิศทางของ  $\sigma'_1$  และ  $\sigma'_3$  ซึ่งเป็นทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นและการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามลำดับ Santamarina และ คณะ (2001) ได้รวบรวมสูตรเชิงประสบการณ์ทั้งสองไว้ในรูปของสถานะของความเค้นภายใต้การให้แรงกระทำแบบไม่เท่ากันทุกทิศทางดังแสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$V_s = \Omega \left( \frac{\sigma'_3}{1kPa} \right)^\theta \left( \frac{\sigma'_1}{1kPa} \right)^\delta \quad (4.1)$$

$$V_s = \Theta \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2kPa} \right)^\zeta \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2kPa} \right)^\psi \quad (4.2)$$

โดยที่  $\Omega$  และ  $\Theta$  แสดงอัตราส่วนช่องว่างของการจัดเรียงที่โครงสร้างคงที่เหมือนกับคุณสมบัติการเกาะกลุ่ม ขณะที่ค่าคงที่ที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่  $\theta$   $\delta$   $\zeta$  และ  $\psi$  สะท้อนถึงการสัมพันธ์กันของอนุภาคและอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

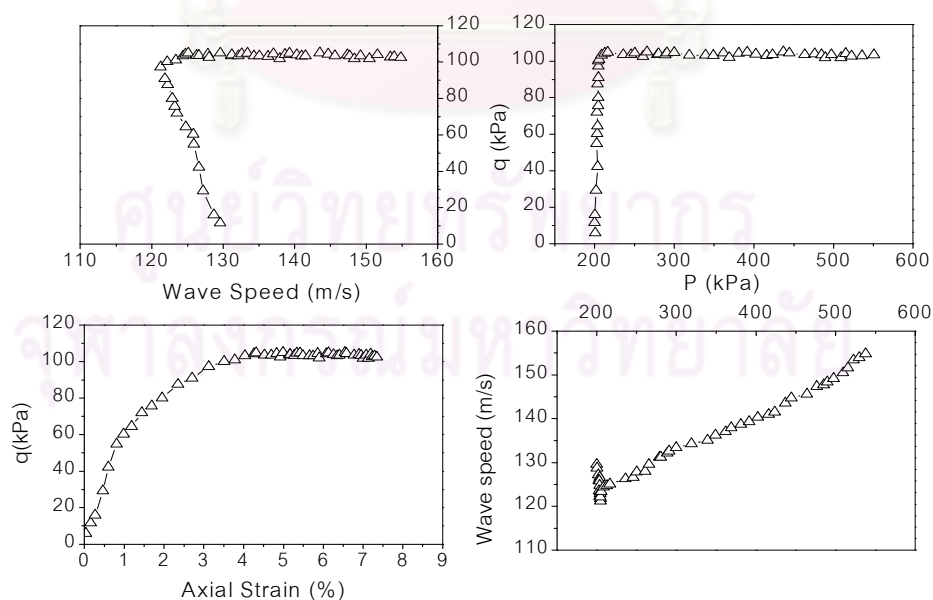
ภาพที่ 4.4 4.5 และ 4.6 เป็นผลการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงในเส้นทางที่ 1 มีค่าความเร็วคลื่นเริ่มต้นประมาณ 130 128 และ 122m/s ตามลำดับเมื่อเริ่มดำเนินการเฉือน (Shearing) ตัวอย่างแบบควบคุมให้ความเค้นเฉลี่ยคงที่และความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นในช่วงนี้พบว่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มลดลงประมาณ 121 120 111 m/s แล้วจึงทำการควบคุมแบบให้ความเค้นเฉลี่ยเพิ่มขึ้นและความเค้นเบี่ยงเบนคงที่ในช่วงนี้พบว่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



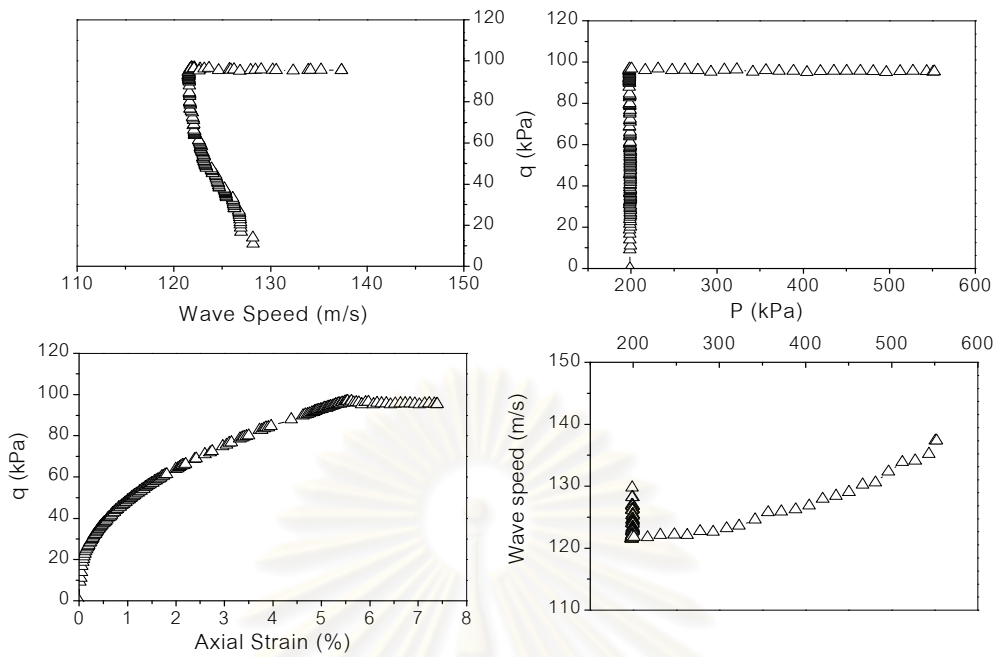
ประมาณ 157 138 139 m/s ตามลำดับ ภาพที่ 4.7 4.8 และ 4.9 เป็นผลการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงในเส้นทางที่ 2 เมื่อขบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงจะมีค่าความเร็วคลื่นประมาณ 135 122 119 m/s เมื่อเริ่มดำเนินการเฉือน(Shearing)ตัวอย่างแบบควบคุมให้ความเค้นเฉื่อยและความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นด้วยความชัน 0.285 ในช่วงนี้พบว่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 168 147 143 m/s ตามลำดับ ภาพที่ 4.10 4.11 และ 4.12 เป็นผลการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงในเส้นทางที่ 3 เมื่อขบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลงจะมีค่าความเร็วคลื่นประมาณ 125 113 116 m/s เมื่อเริ่มดำเนินการทดสอบตัวอย่างแบบควบคุมให้ความเค้นเฉื่อยเพิ่มขึ้นและความเค้นเบี่ยงเบนคงที่ในช่วงนี้พบว่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 161 135 138 m/s แล้วจึงทำการควบคุมแบบให้ความเค้นเฉื่อยคงที่และความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นในช่วงนี้พบว่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 180 148 155 m/s ตามลำดับ

จากผลการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 1 2 และ 3 กับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ระหว่างรุ่น A B และ C ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือน ( $V_s$ ) หารด้วยค่าความคลื่นเริ่มต้น ( $V_{s0}$ ) ที่ได้รับอิทธิพลจากความเค้นประสิทธิผลเฉื่อยและความเค้นเบี่ยงเบนดังแสดงในภาพที่ 4.13 ถึง 4.15 พบว่าค่าความเร็วคลื่นเฉือนมีแนวโน้มเหมือนกันของการควบคุมวิธีหน่วยแรงในแต่ละแบบ

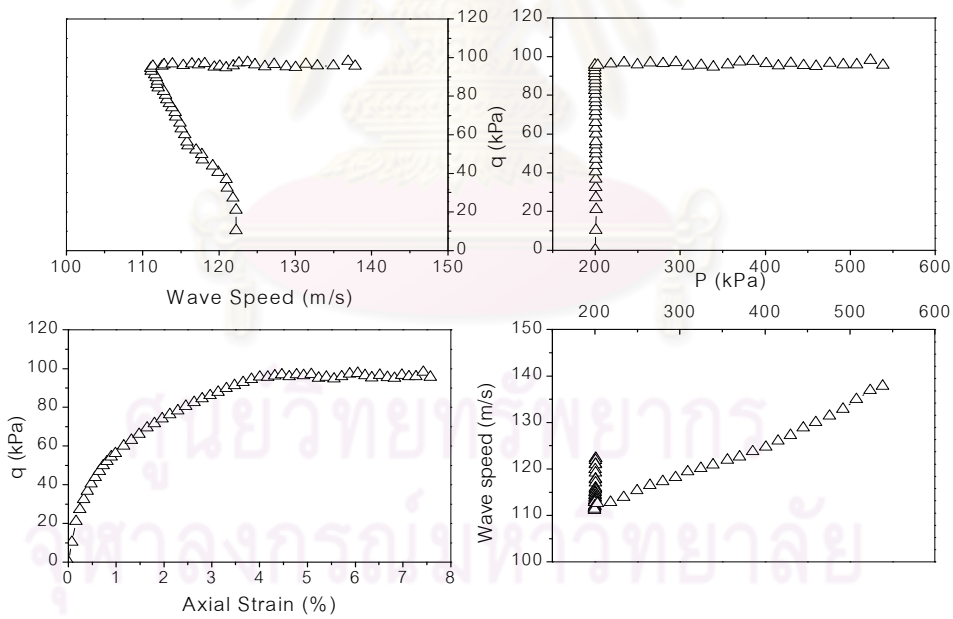
#### ผลของการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1



ภาพที่ 4.4 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น A

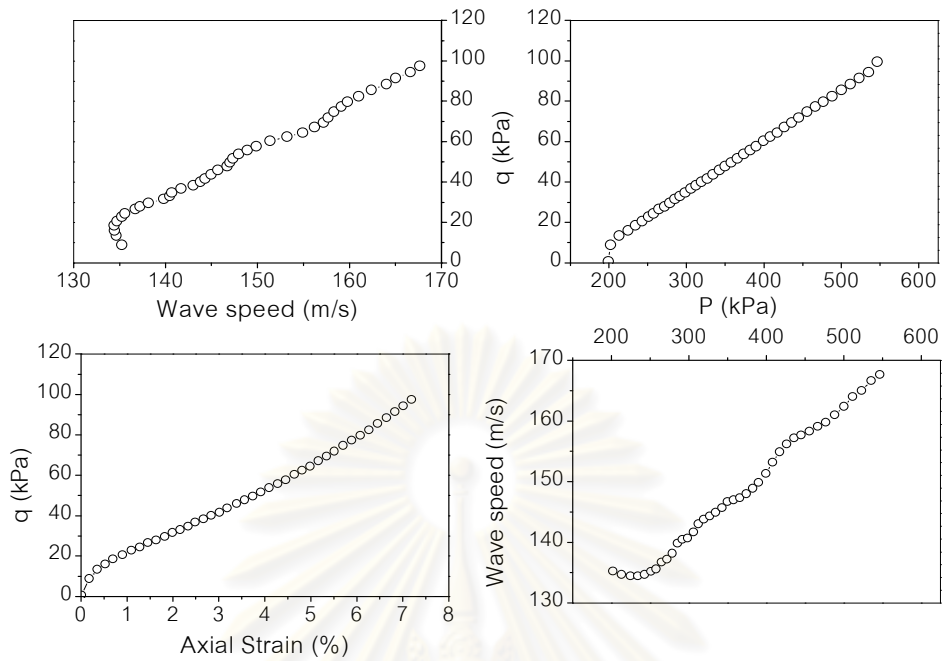


ภาพที่ 4.5 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของตัวอย่าง ดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น B

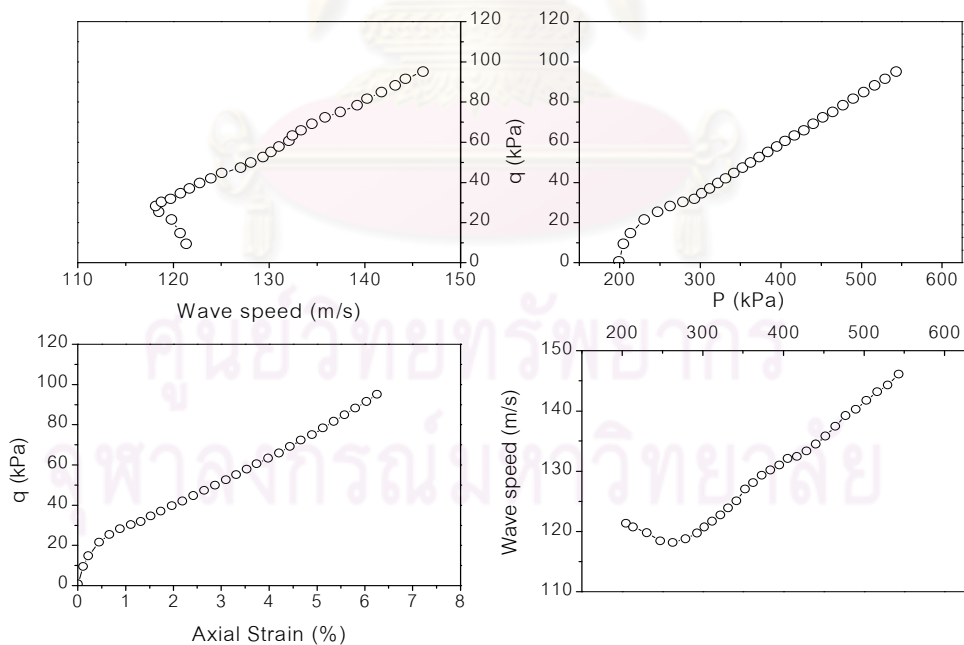


ภาพที่ 4.6 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดินเหนียว สร้างใหม่รุ่น C

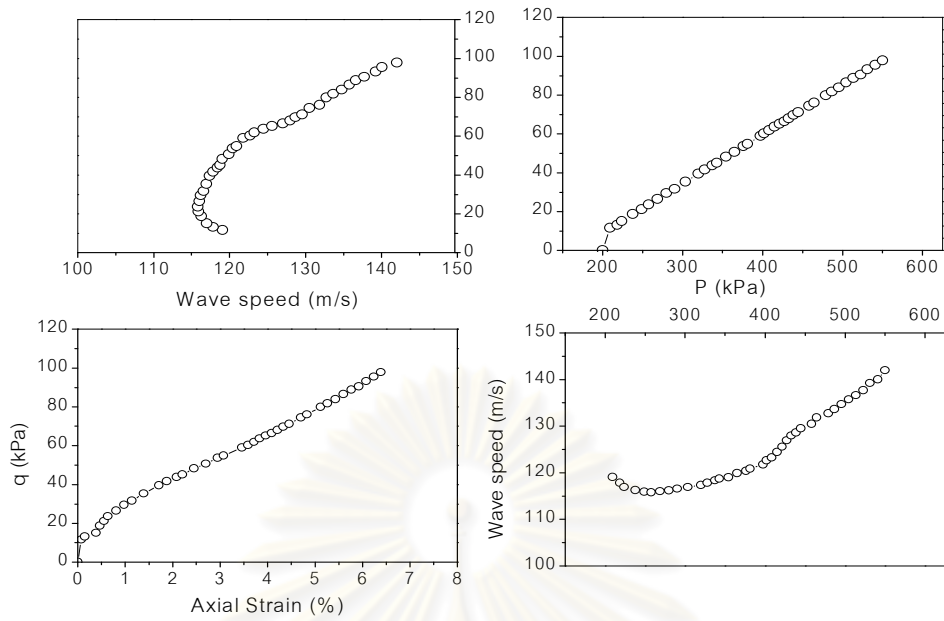
## ผลของการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 2



ภาพที่ 4.7 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น A

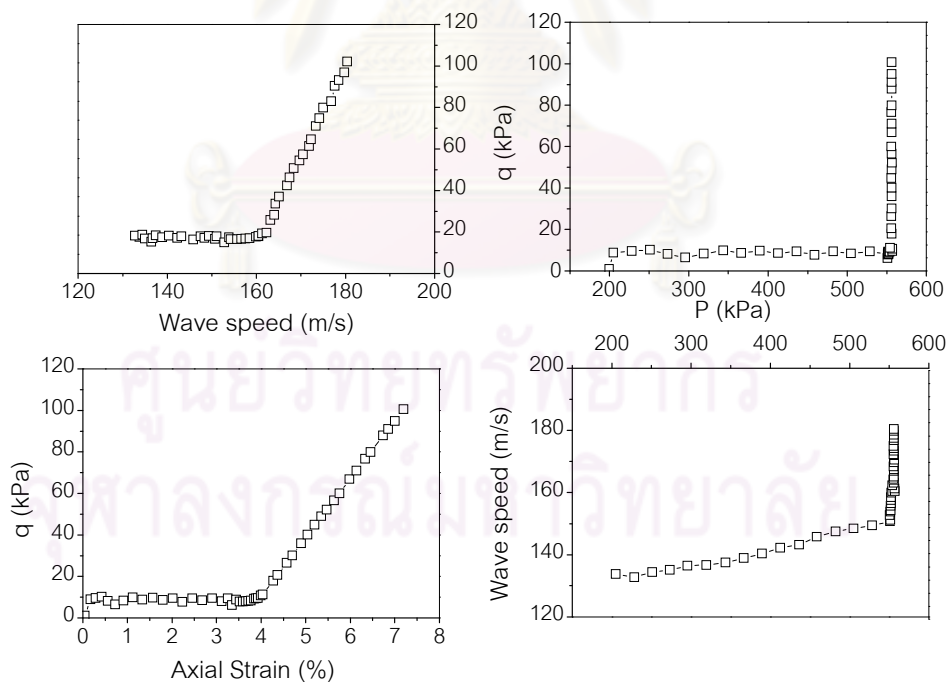


ภาพที่ 4.8 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น B

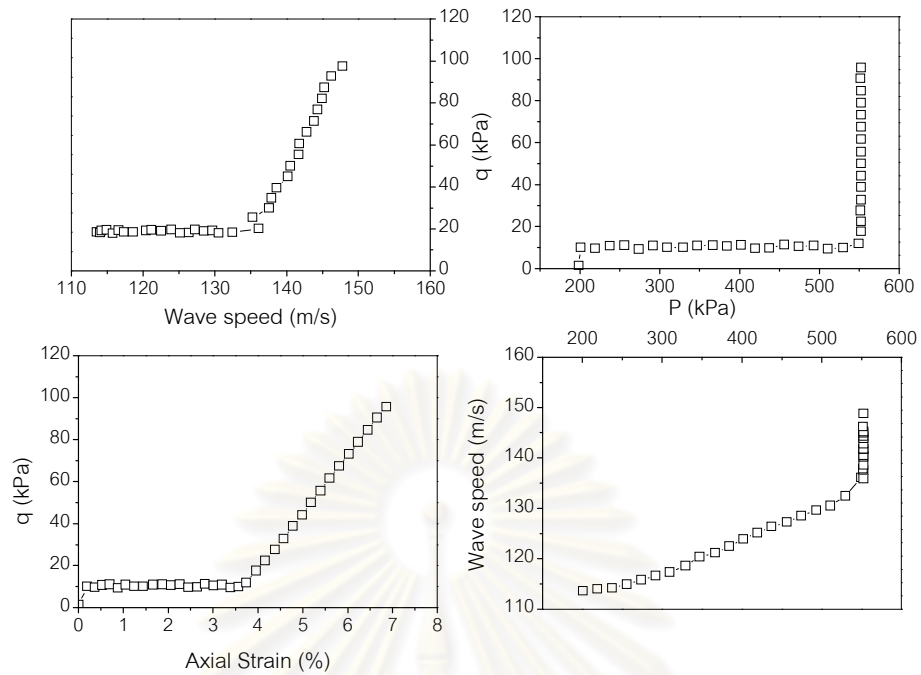


ภาพที่ 4.9 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดินเหนียว  
สร้างใหม่รุ่น C

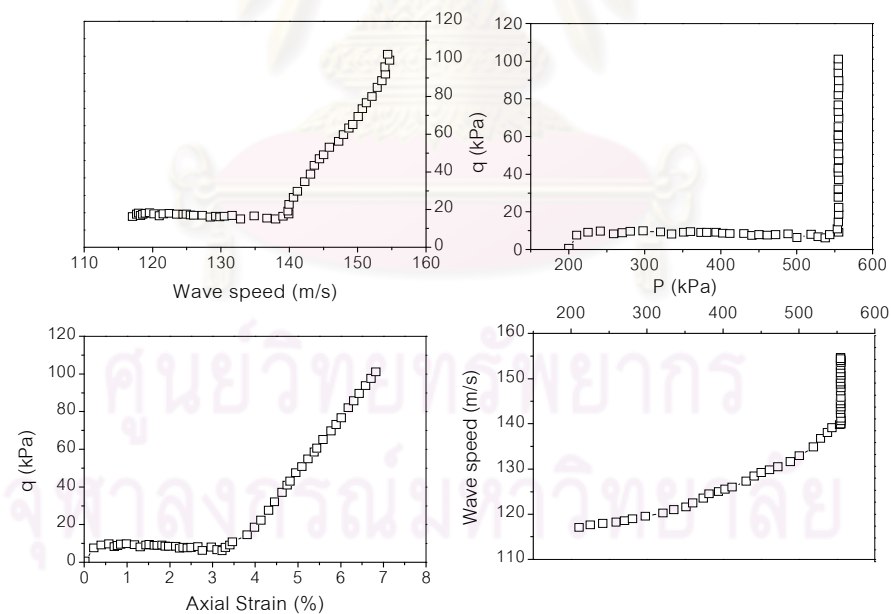
### ผลของการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 3



ภาพที่ 4.10 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดิน  
เหนียวสร้างใหม่รุ่น A

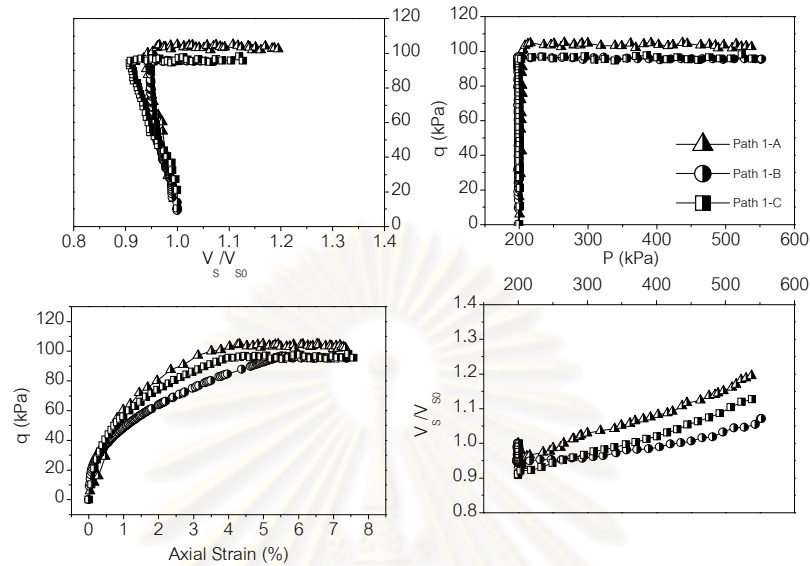


ภาพที่ 4.11 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น B



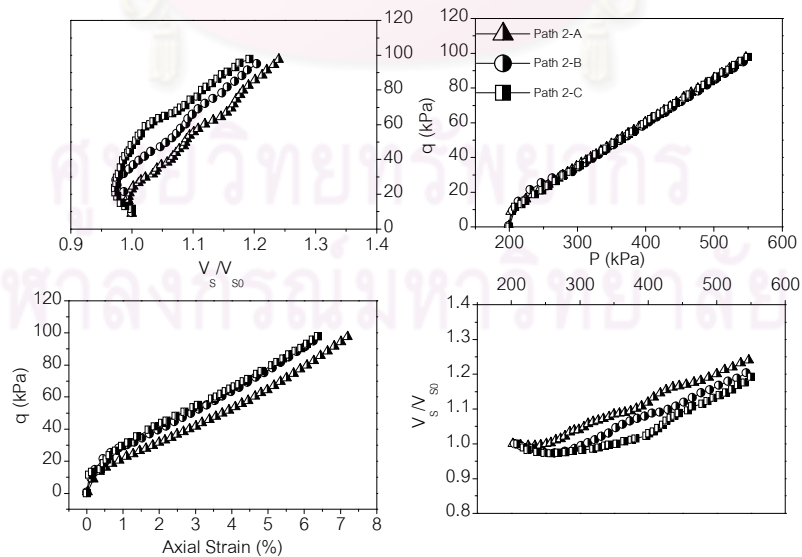
ภาพที่ 4.12 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น C

การเปรียบเทียบผลของการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1 ของตัวอย่างดินเหนียว  
สร้างใหม่ 3 รุ่น



ภาพที่ 4.13 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดิน  
เหนียวสร้างใหม่รุ่น A B และC ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 1

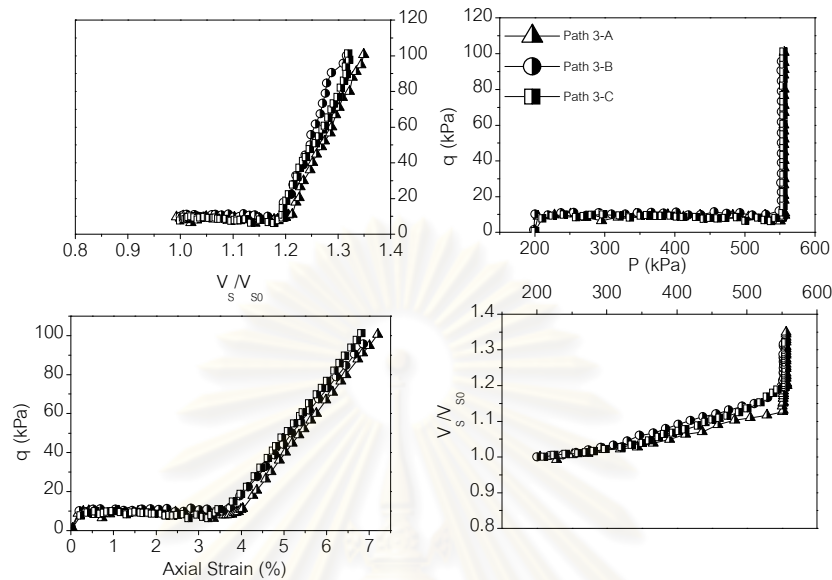
การเปรียบเทียบผลของการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 2 ของตัวอย่างดินเหนียว  
สร้างใหม่ 3 รุ่น



ภาพที่ 4.14 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดิน  
เหนียวสร้างใหม่รุ่น A B และC ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 2



การเปรียบเทียบผลของการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 2 ของตัวอย่างดินเหนียว  
สร้างใหม่ 3 รุ่น



ภาพที่ 4.15 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือน ของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น A B และ C ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 3

อย่างไรก็ตามค่า  $\Theta$  เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของหลายคุณสมบัติ เช่น ความหนาแน่นของตัวอย่างเหมือนกับลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบของดิน เป็นต้น โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า  $\Theta$  สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ 1.พารามิเตอร์ A ที่บ่งบอกถึงอิทธิพลของคุณสมบัติการเกาะกลุ่มของอนุภาคดิน เช่น อัตราส่วนช่องว่าง เป็นต้น 2.พารามิเตอร์  $F(e)$  ได้ถูกนำเสนอไว้สำหรับทั้งดินทรายและดินเหนียวจากความเป็นมาของการสร้างสมการเชิงประสบการณ์ที่ได้จากหลายวิธีการทดสอบ รายละเอียดของ  $F(e)$  นี้ได้ถูกค้นพบโดย Ishihara (1996) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการดั้งเดิมที่ถูกนำเสนอไว้โดย Hardin และ Richard (1963) ดังแสดงในสมการที่ 4.3 และ 4.4 จากปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า  $\Theta$  ที่กล่าวมาทำให้สามารถเขียนสมการที่ 4.1 ขึ้นใหม่ได้ดังสมการที่ 4.5

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$$

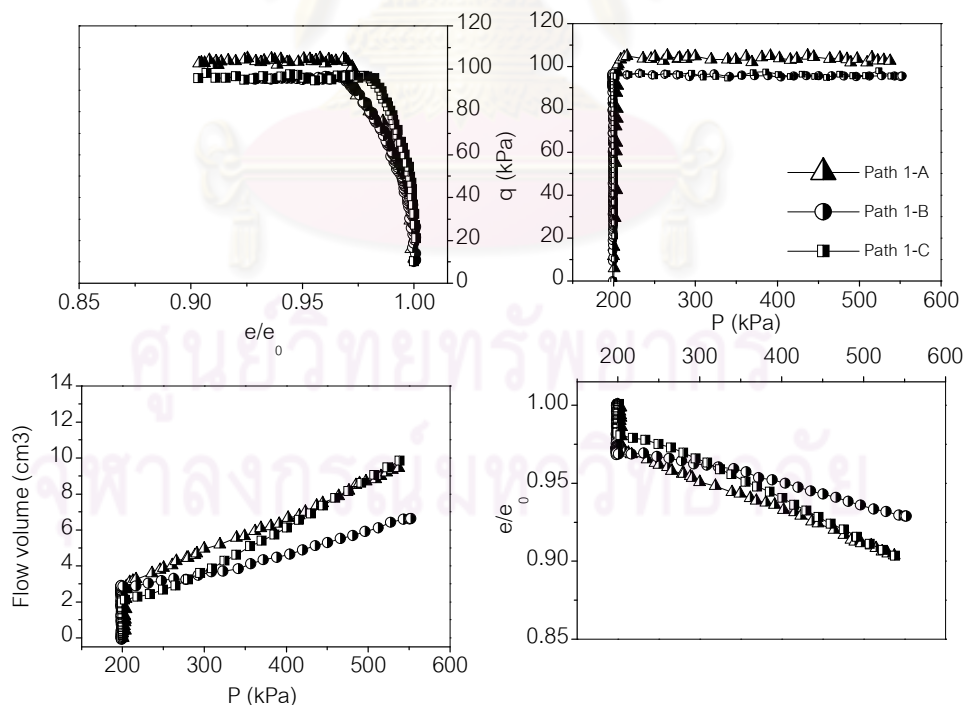
Round particles (4.3)

Angular particles (4.4)

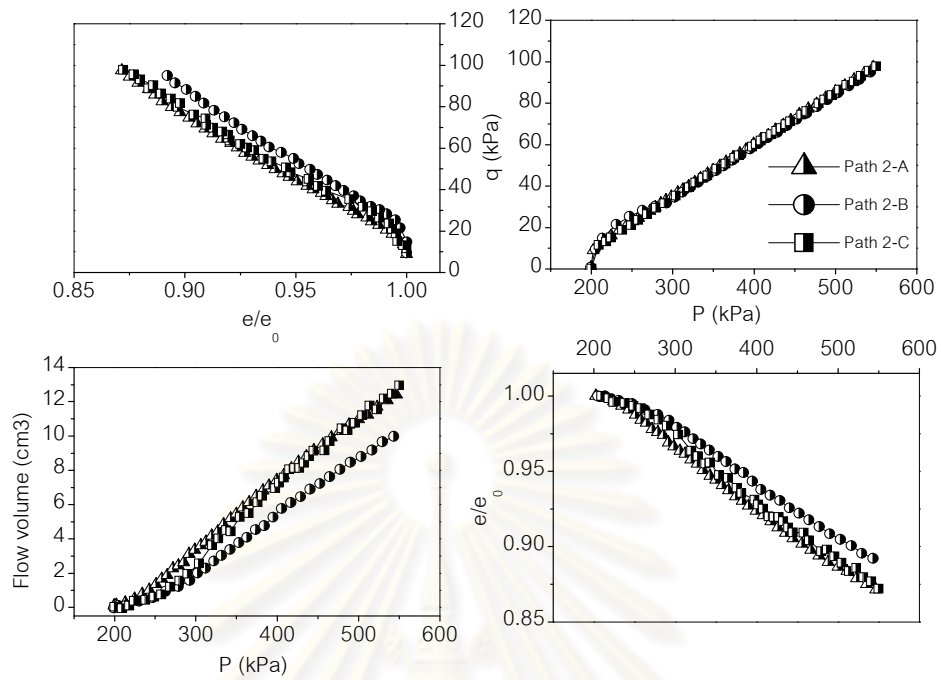
$$F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e}$$

$$V_s = AF(e) \left( \frac{\sigma'_0}{1 \text{ kPa}} \right)^\beta \quad (4.5)$$

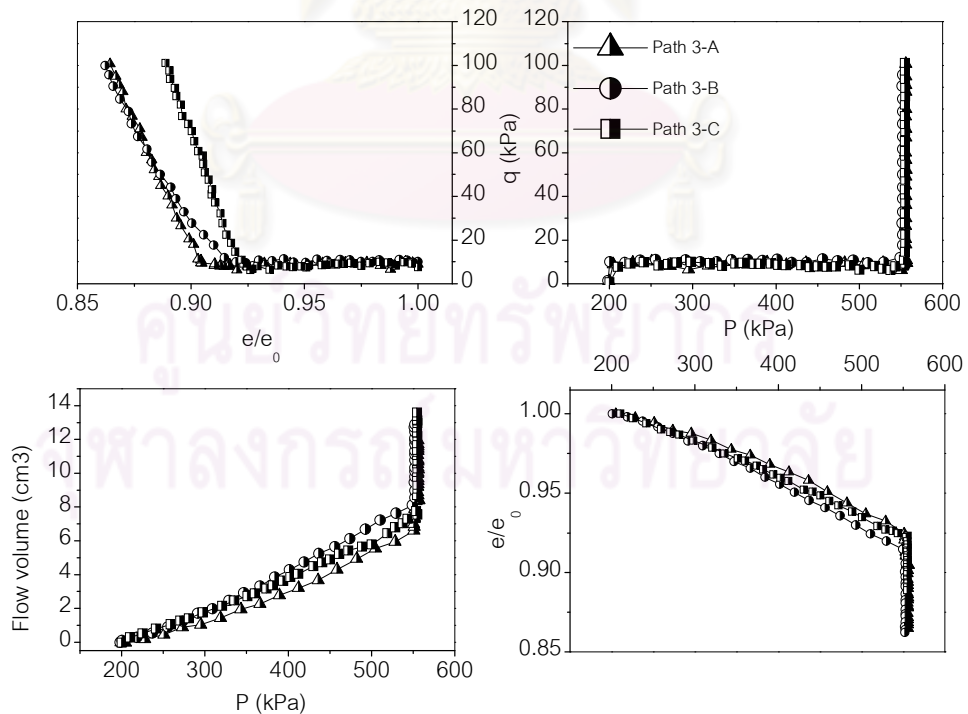
ภาพที่ 4.16 4.17 และ 4.18 แสดงผลของความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่อค่าอัตราส่วนช่องว่างของดิน ซึ่งการควบคุมวิธีหน่วยแรงทั้ง 3 แบบที่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเดียวกันจะมีผลต่ออัตราส่วนช่องว่างที่ไม่เท่ากัน คืออัตราส่วนช่องว่างของการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1 น้อยกว่าแบบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ  $e_1 < e_2 < e_3$  ภาพที่ 4.19 4.20 และ 4.21 แสดงความแปรผันระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับอัตราส่วนช่องว่างของดินเหนียวสร้างใหม่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของคลื่นเฉือนนี้อยู่ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรงทั้ง 3 แบบ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับอัตราส่วนช่องว่างมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงและสามารถสรุปได้ว่าถ้าอัตราส่วนช่องว่างลดลงจะทำให้ความเร็วคลื่นเฉือนมีค่ามากขึ้น



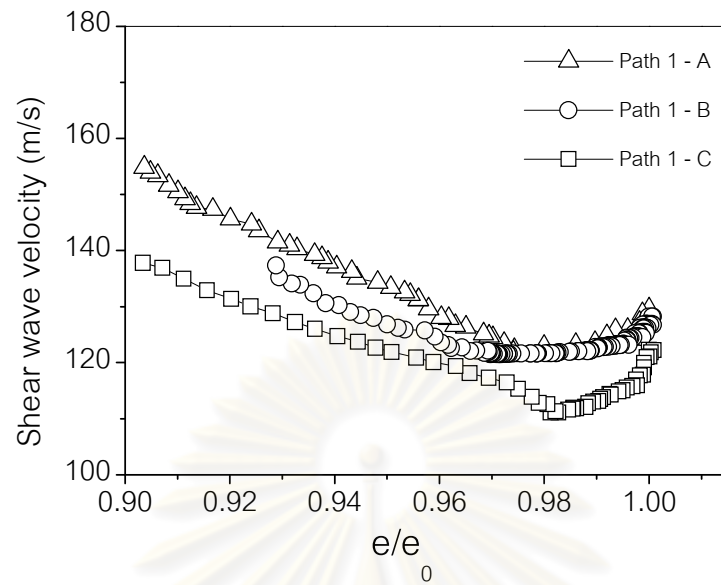
ภาพที่ 4.16 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่ออัตราส่วนช่องว่าง ของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น A B และ C ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 1



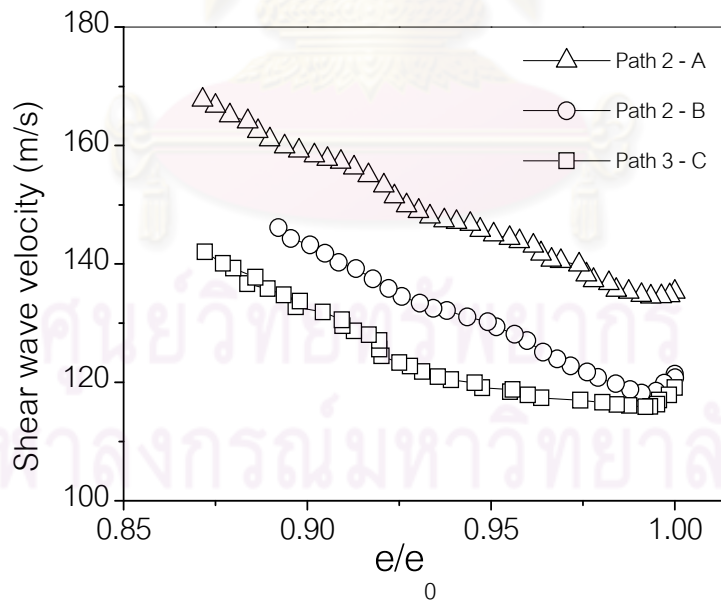
ภาพที่ 4.17 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่ออัตราส่วนช่องว่าง ของดินเหนียว  
สร้างใหม่รุ่น A B และ C ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 2



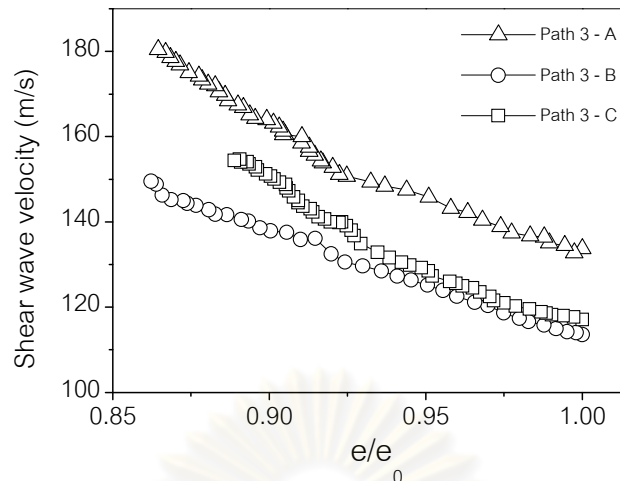
ภาพที่ 4.18 ความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเบี่ยงเบนที่มีต่ออัตราส่วนช่องว่าง ของดินเหนียว  
สร้างใหม่รุ่น A B และ C ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 3



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนและอัตราส่วนช่องว่างของดินเหนียว  
สร้างใหม่รุ่น A B และ C ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 1



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนและอัตราส่วนช่องว่าง ของดินเหนียว  
สร้างใหม่รุ่น A B และ C ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 3

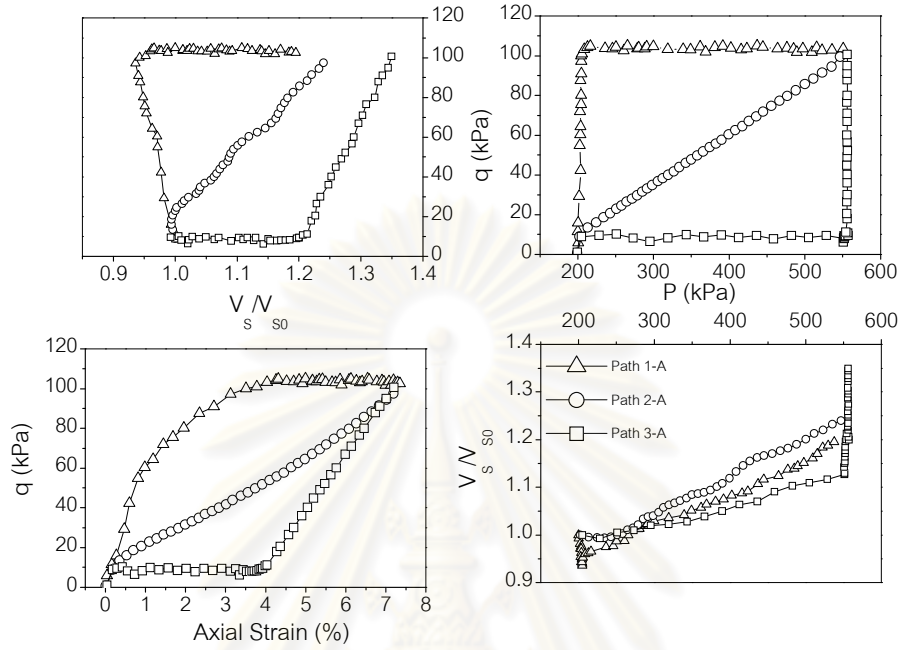


ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนและอัตราส่วนช่องว่างของดินเหนียวสร้างใหม่รุ่น A B และ C ภายใต้การควบคุมวิธีหน่วยแรง แบบที่ 3

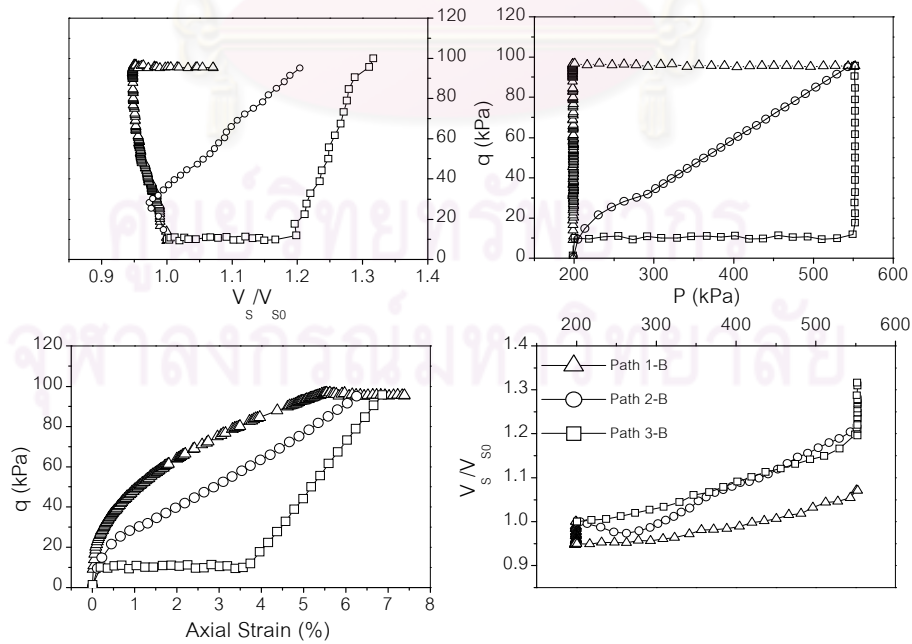
#### เปรียบเทียบผลของวิธีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนของตัวอย่างดินร่วนเดียวกัน

ภาพที่ 4.22 4.23 และ 4.24 แสดงผลการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงกับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ทั้ง 3 รุ่น พบว่าค่าความเร็วคลื่นเฉือนของการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบเดียวกันจะมีแนวโน้มของค่าความเร็วเฉือนเหมือนกัน สำหรับวิธีหน่วยแรงที่ต่างกันค่าความเร็วคลื่นเฉือนก็จะต่างกัน โดยสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบแบบควบคุมวิธีหน่วยแรงทั้ง 3 แบบที่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเดียวกันจะมีค่าความเร็วคลื่นไม่เท่ากัน สำหรับการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1 และแบบที่ 3 ในช่วงของการเฉือนแบบควบคุมให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) คงที่ ความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) เพิ่มขึ้นค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จะแตกต่างกัน คือ การควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1 มีแนวโน้มลดลงซึ่งแบบที่ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทดสอบควบคุมวิธีหน่วยแรงทั้งสองแบบจะกระทำหลังจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดลง ที่ซึ่งการควบคุมแบบที่ 1 เป็นไปตามเงื่อนไขการทดสอบส่วนในการควบคุมวิธีหน่วยแรงแบบที่ 3 ก่อนที่จะเริ่มเฉือนแบบให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) คงที่ ความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) เพิ่มขึ้นจะต้องผ่านขั้นตอนควบคุมแบบให้ความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย ( $P'$ ) เพิ่มขึ้น ความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) คงที่ก่อนกระบวนการดังกล่าวอาจยังไม่สิ้นสุดลงจึงทำให้ในขณะทำการเฉือนแบบที่ 3 ค่าความเร็วที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ในขั้นตอนการเฉือนแบบที่ 1 และ 3 มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ไม่สอดคล้องกัน และค่าความเค้นประสิทธิผลแบบที่ 3 ที่ได้อาจไม่ใช้ความเค้นประสิทธิผล

ที่แท้จริง ภาพที่ 4.27 4.28 และ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ความเร็วคลื่นเฉือนกับ Strain axial (%) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในระหว่างการทดสอบของดินทั้ง 3 รุ่น

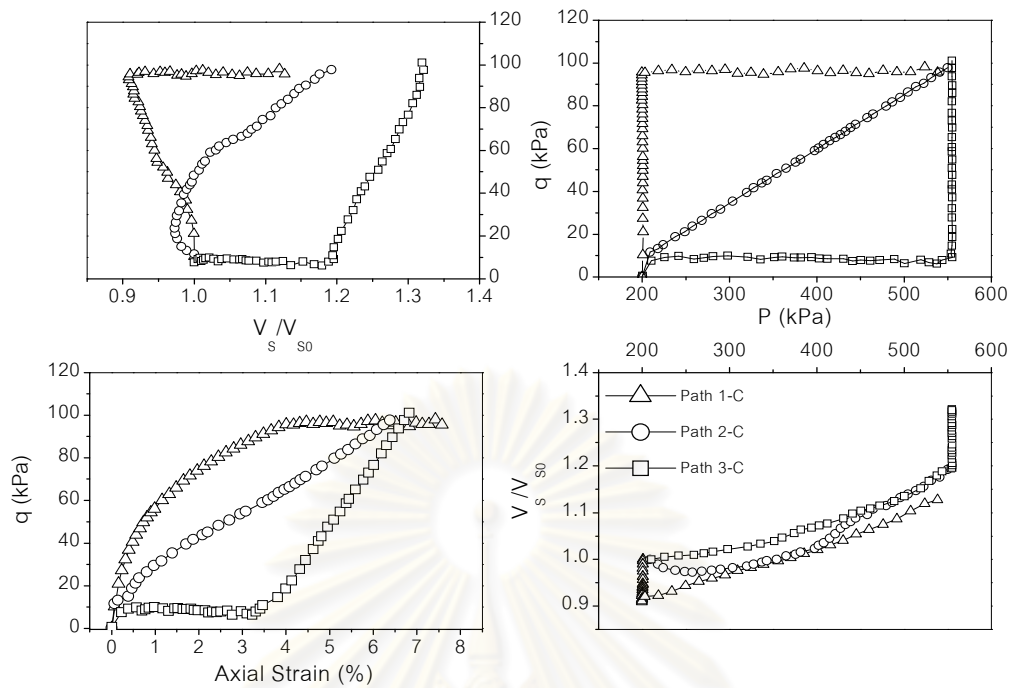


ภาพที่ 4.22 รวมผลทดสอบแบบควบคุมวิธีของหน่วยแรงกับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ชุด A



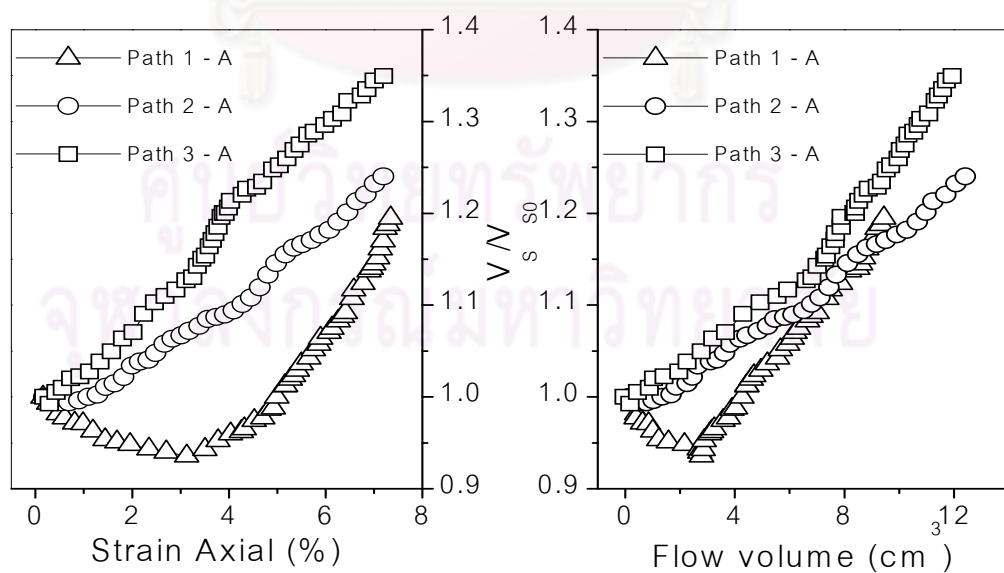
ภาพที่ 4.23 รวมผลทดสอบแบบควบคุมวิธีของหน่วยแรงกับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ชุด B



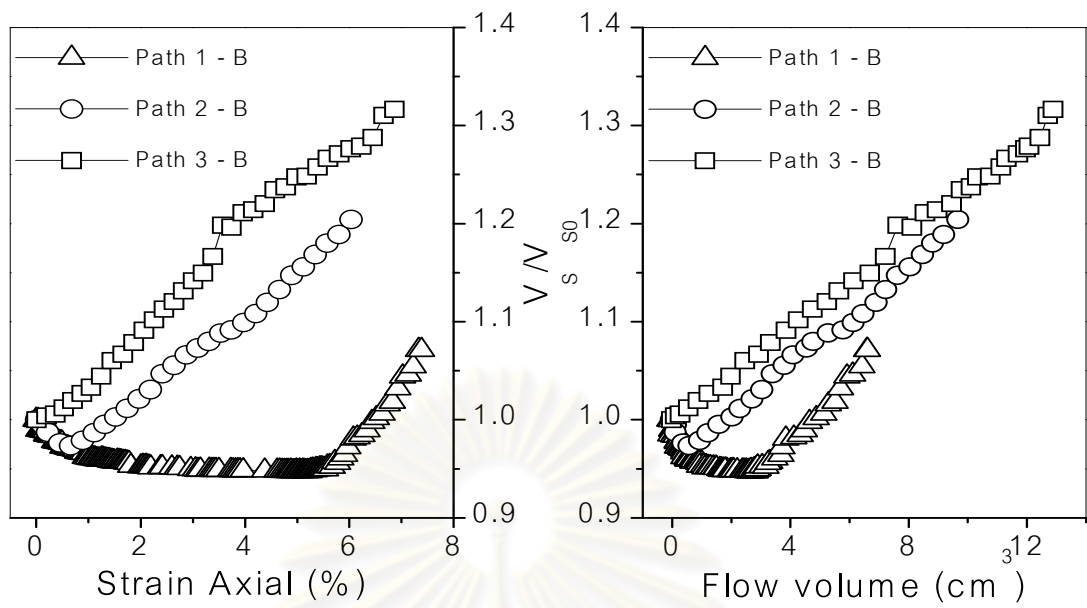


ภาพที่ 4.24 รวมผลทดสอบแบบควบคุมวิธีของหน่วยแรงกับตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ชุด C

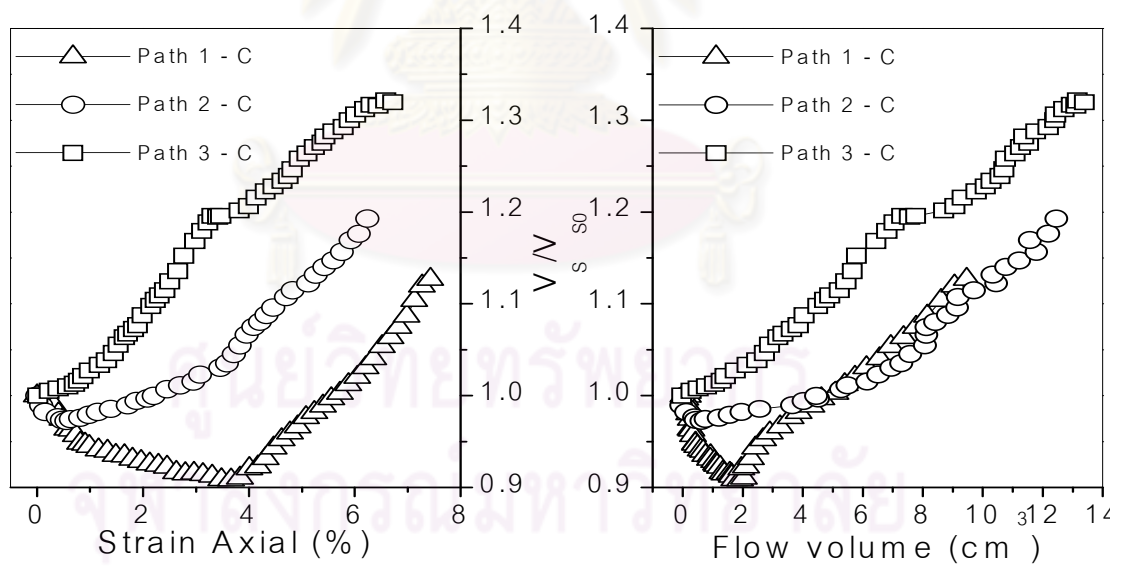
เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับ Strain (%) และ Flow volume



ภาพที่ 4.25 ผลของ Strain Axial (%) กับความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด A



ภาพที่ 4.26 ผล Strain Axial (%) กับความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด B



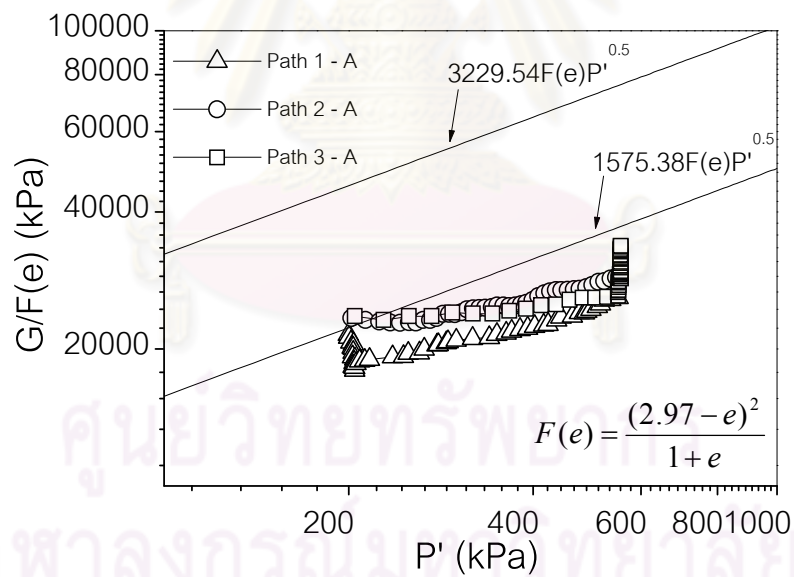
ภาพที่ 4.27 ผลของ Strain Axial (%) กับความเร็วคลื่นเฉือนของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด C

#### 4.6 ความสัมพันธ์ทางอิมไพริกัล

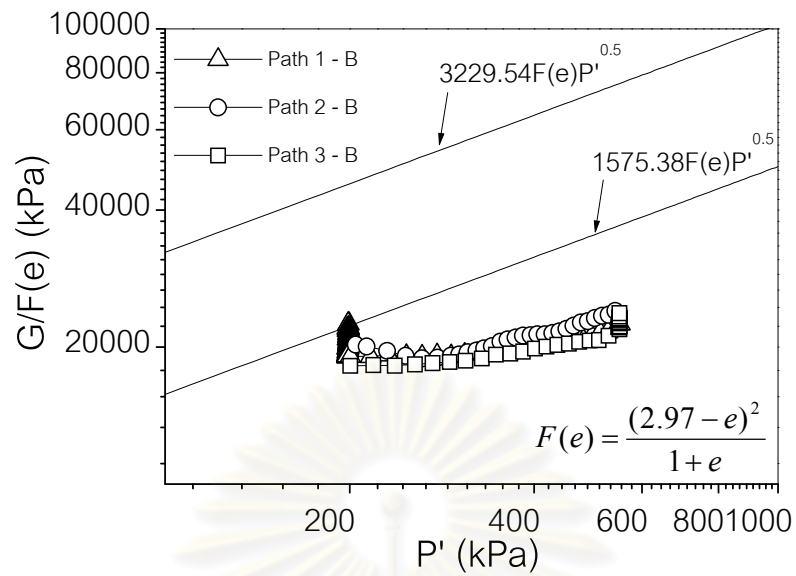
Hardin & Black (1968) ได้เสนอความสัมพันธ์ทางสมการเชิงประสพการณ์ของค่าโมดูลัสแบบเฉือนกับฟังก์ชันของอัตราส่วนช่องว่าง  $F(e)$  ดังสมการที่ 4.6

$$G_0 = cF(e)(\sigma_0)^{0.5} \quad 4.6$$

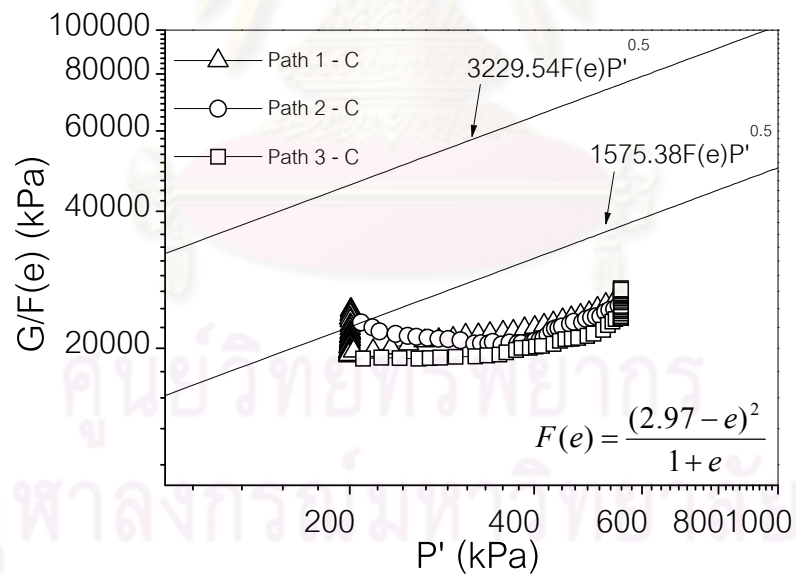
ค่าโมดูลัสแบบเฉือนทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยการทดสอบด้วยวิธี Bender element มีค่าต่ำกว่าขอบเขตของสมการเชิงประสพการณ์ทั้งสองคือ  $G = 1575.38F(e)P'^{0.5}$  กับ  $G = 3229.54F(e)P'^{0.5}$  {G:kPa, P':kPa} เมื่อนำมาจัดรูปแบบกราฟระหว่าง  $G/F(e)$  กับ Mean effective stress (P') ในแกน log-log scale ดังแสดงในภาพที่ 4.28, 4.29 และ 4.30



ภาพที่ 4.28 ผลของค่า  $G/F(e)$  กับค่าความเค้นประสิทธิผล  $P'$  ของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด A



ภาพที่ 4.29 ผลของค่า  $G/F(e)$  กับค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย  $P'$  ของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด B



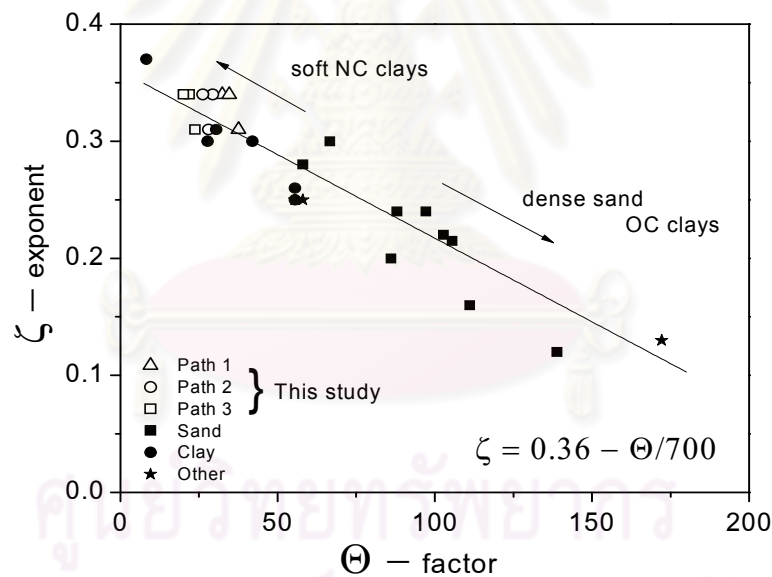
ภาพที่ 4.30 ผลของค่า  $G/F(e)$  กับ ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย  $P'$  ของดินเหนียวสร้างใหม่ชุด C

เมื่อนำผลการทดสอบมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นเฉือนกับความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเฉือนตามรูปแบบของสมการ(4.1) จะได้ความสัมพันธ์สำหรับวิธีของหน่วยแรงแบบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

$$V_s = \Theta \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2kPa} \right)^\zeta \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2kPa} \right)^\psi$$

$$\zeta = 0.36 - \frac{\Theta}{700}$$

จากวิธีหน่วยแรงแบบที่ 1 2 และ 3 ของตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่ทั้งสามรุ่น ในตาราง 4.1 เลขชี้กำลังของความเค้นประสิทธิผลและความเค้นเฉือนมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับสมการของ Santamarina, et al. (2001) ดังแสดงในภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Theta$  และ  $\zeta$  (เขียนใหม่จาก Santamarina, et al.,2001)

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์แบบเลขชี้กำลังของ  $P'$  และ  $q$  ต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือน

| รุ่นของตัวอย่างดิน<br>เหนียวสร้างใหม่ | วิธีหน่วยแรงแบบ<br>ต่างๆ | $V_s = \Theta \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2 kPa} \right)^\zeta \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2 kPa} \right)^\psi$ | $R^2$ |
|---------------------------------------|--------------------------|---|-------|
| A                                     | 1                        | $V_s = 32.44 p'^{0.34} q^{-0.078}$  | 0.72  |
|                                       | 2                        | $V_s = 29.42 p'^{0.34} q^{-0.045}$  | 0.98  |
|                                       | 3                        | $V_s = 21.97 p'^{0.34} q^{0.044}$   | 0.84  |
| B                                     | 1                        | $V_s = 37.56 p'^{0.31} q^{-0.079}$  | 0.32  |
|                                       | 2                        | $V_s = 28.10 p'^{0.314} q^{-0.034}$   | 0.92  |
|                                       | 3                        | $V_s = 23.75 p'^{0.31} q^{0.016}$   | 0.82  |
| C                                     | 1                        | $V_s = 34.68 p'^{0.34} q^{-0.119}$  | 0.21  |
|                                       | 2                        | $V_s = 26.20 p'^{0.34} q^{-0.067}$  | 0.85  |
|                                       | 3                        | $V_s = 20.07 p'^{0.34} q^{0.028}$   | 0.87  |



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อดัดแปลงเครื่องทดสอบสามแกนที่มีอยู่เดิม (Conventional triaxial apparatus) ให้สามารถควบคุมวิถีหน่วยแรงหน่วยแรง (Stress path) ในระหว่างการทดสอบได้โดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และใช้เครื่องทดสอบดังกล่าวในการศึกษาผลของวิถีหน่วยแรงที่มีต่อความเร็วคลื่นเฉือนในตัวอย่างดินเหนียวสร้างใหม่โดยใช้วิถีหน่วยแรงที่แตกต่างกันสามแบบซึ่งมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขความเครียดคงที่ (Strain Control)

#### 5.2 ผลการดัดแปลงเครื่องทดสอบสามแกน

เพื่อการทดสอบหาความเร็วคลื่นเฉือนภายใต้วิถีหน่วยแรงที่ต้องการ ผู้ศึกษาได้ทำการดัดแปลงเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีอยู่จนสามารถควบคุมวิถีหน่วยแรงได้ตามต้องการ เครื่องมือที่ถูกรับปรุงสามารถใช้ในการศึกษาผลของวิถีหน่วยแรงที่มีต่อพฤติกรรมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสร้างใหม่ได้

#### 5.3 ผลของค่าความเร็วคลื่นเฉือนภายใต้การควบคุมวิถีหน่วยแรงแบบต่าง ๆ

จากผลการทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนสร้างใหม่สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภายใต้การควบคุมวิถีหน่วยแรงแบบที่ 1 ค่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มลดลงในช่วงความเค้นเฉื่อยคงที่ความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นและค่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเค้นเฉื่อยเพิ่มขึ้นความเค้นเบี่ยงเบนคงที่ ภายใต้การควบคุมวิถีหน่วยแรงแบบที่ 2 ค่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยควบคุมให้ความเค้นเฉื่อยและความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น สำหรับภายใต้การควบคุมวิถีหน่วยแรงแบบที่ 3 ค่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเค้นเฉื่อยเพิ่มขึ้นความเค้นเบี่ยงเบนคงที่และค่าความเร็วคลื่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกในช่วงความเค้นเฉื่อยคงที่ความเค้นเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น

2. จากผลการทดสอบพบว่าวิถีหน่วยแรงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นเฉือน และความเร็วของคลื่นเฉือนมีความสัมพันธ์แบบเลขชี้กำลังกับความเค้นประสิทธิผลเฉื่อย ( $P'$ ) และความเค้นเบี่ยงเบน ( $q$ ) โดยความเค้นประสิทธิผลเฉื่อยมีอิทธิพลต่อความเร็วคลื่นเฉือนมากกว่าความเค้นเบี่ยงเบนในทุกวิถีหน่วยแรง

- เมื่อได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนกับฟังก์ชันของอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย  $G = f(F(e), P')$  พบว่าค่าโมดูลัสเฉือนแปรผันตามฟังก์ชันของอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าช่วงทำการเฉือนตัวอย่างที่ความเค้นเบี่ยงเบนสูงในขณะที่ความเค้นเฉลี่ยต่ำและความเค้นเบี่ยงเบนสูงในขณะที่ความเค้นเฉลี่ยสูง ค่าความเร็วคลื่นที่วัดได้มีแนวโน้มไม่สอดคล้องกัน ซึ่งสันนิษฐานว่าในขณะทำการทดสอบไม่สามารถควบคุมอัตราการคายน้ำได้อย่างสมบูรณ์จึงทำให้เกิดการอัดตัวคายน้ำอยู่ในขณะที่เฉือนตัวอย่างจึงต้องมีการปรับปรุงต่อไป

#### 5.4 ข้อดี-ข้อเสีย ในการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยเบนเดอร์อิลิเมนต์

วิธีการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยเบนเดอร์อิลิเมนต์เป็นการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการสร้างคลื่นกำหนดแอมพลิจูดกระจายลงในดินและสามารถติดตั้งกับเครื่องทดสอบทางปฐพีต่างๆ ได้ง่าย และสะดวกไม่มีความซับซ้อนในการคำนวณหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้ในงานวิจัยเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ และจากการทดสอบในงานวิจัยนี้ทำให้พบข้อเสียของวิธีนี้คือ ระดับสัญญาณของคลื่นที่รับอ่อนลงเมื่อผ่านดินที่สภาวะ Mean effective stress สูงๆ ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่

#### 5.5 ข้อเสนอแนะ

- ในขั้นตอนการควบคุมวิธีหน่วยแรงในช่วงของความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเค้นเบี่ยงเบนคงที่ควรให้ค่าพอสำหรับแรงดันน้ำส่วนเกินสามารถระบายออกหมด
- ศึกษาค่าความเร็วคลื่นเฉือนในแนวราบเพื่อดูว่ามีผลกระทบจากแรงกระทำในแนวราบต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือนหรือไม่
- ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินธรรมชาติที่ไม่ถูกรบกวน (Undisturbed Sample) แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กฤษฎา กมลเกรียงไกร. พฤติกรรมเครียดระดับตื้นของดินเหนียวกรุงเทพฯโดยใช้เบนเดอริอิมেন্ট.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- เจริญ เพชรมณี. เขียนลัด Lab VIEW. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2547.
- ธิตีรักษ์ อัครกุล. ผลกระทบของสภาวะหน่วยแรงต่อโมดูลัสแรงเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพฯ.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- ธินทร์ อมรวิทยารักษ์. ความเร็วของคลื่นเฉือนโดยเบนเดอริอิมেন্টระหว่างการทดสอบ  
แบบอัดสามแกน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543
- พจนานฎ สุวรรณมณี. เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร:  
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.
- วิโรจ บุศยพลากร พฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวกรุงเทพฯสร้างใหม่ จาก  
สถานะเหลวถึงสถานะพลาสติก วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. วิศวกรรมปฐพี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่ง  
ประเทศไทย, 2540.

### ภาษาอังกฤษ

- Pulpong Study of localization in sandy soil using shear wave logging , Department of  
Civil Engineering
- Santamarina, J.C., and Cascante, G. 1996. Stress anisotropy and wave propagation – A  
micromechanical view. Canadian Geotechnical Journal, 33(5): 770-782.
- Teparaksa, W. Principal and application of instrumentation for the first MRTA subway  
project in Bangkok. Proc. of 5<sup>th</sup> International Conference on Field Measurement in  
Geomechanics: 411-416.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจตุรงค์ ทองจรรูแซ เกิดวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ.2525 ที่จังหวัดนราธิวาส สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาด้าน ปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยพักร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย