

การเดินทางของคลื่นแรงโน้มถ่วงเหนือระหว่างการวิบัติของดินทรายในการทดสอบแรงอัดสามแกน



นายมนตรี มัสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SHEAR WAVE PROPAGATION DURING FAILURE OF SAND IN TRIAXIAL TEST



Mr.Montree Masgul

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเดินทางของคลื่นแรงโน้มถ่วงระหว่างการวิบัติของดินทราย
ในการทดสอบแรงอัดสามแกน

โดย

นายมนตรี มัสกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

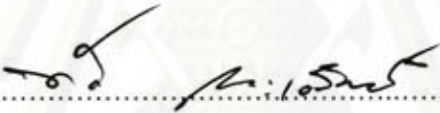
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

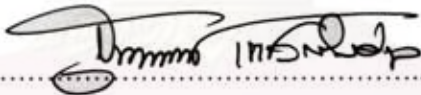
รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล

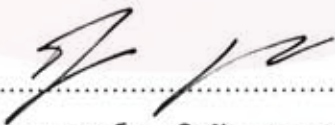
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

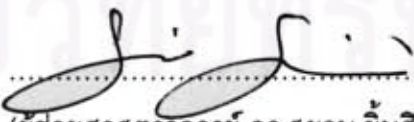
 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศฤทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ณะเจริญกิจ)

 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิตร บุญงู)

 กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)

ศูนย์วิศวกรรมทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มนตรี มัสกุล : การเดินทางของคลื่นแรงเฉือนระหว่างการวิบัติของดินทรายในการทดสอบแรงอัดสามแกน (Shear wave propagation during failure of sand in Triaxial test). อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 72 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กลไกเคลื่อนตัวของคลื่นแรงเฉือนในการตรวจวัดความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่เกิด Localization ในการทดสอบโดยเครื่องมือแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial) ในการทดสอบขั้นต้นจะใช้เครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นเอง โดยสามารถสร้างตัวอย่างดินที่มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอที่มีความหนาแน่นที่กำหนดได้ โดยติดตั้งแผ่น Bender element ไว้ที่ฐานและด้านบนของอุปกรณ์ ตัวอย่างดินทรายที่ใช้ในการทดสอบจะมีชั้นทรายที่มีความหนาแน่นแตกต่างจากส่วนอื่นๆของตัวอย่างดินแทรกอยู่ระหว่างกลางของตัวอย่างทดสอบ โดยที่ชั้นแทรกจะมีความหนา 1 เซนติเมตร และ 2 เซนติเมตร แล้วแต่กรณี ในการทดสอบในเครื่องทดสอบแบบสามแกนจะใช้ตัวอย่างดินทรายที่มีขนาดคละแคบ (Uniform sand) โดยใช้ดินทราย 3 ประเภทคือ ทรายหยาบ ($D_{50} = 1.180 \text{ mm.}$) ทรายละเอียด ($D_{50} = 0.425 \text{ mm.}$) และทรายเม็ดกลม (Ottawa sand) ในการทดสอบทั้ง 2 แบบจะทำการตรวจวัดความเร็วคลื่นเฉือน ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่เวลาต่างๆกัน

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการตรวจวัดและจากการคำนวณในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน ให้ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.84 % - 6.49 % จากผลที่ได้พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างจริง ในส่วนของการทดสอบในเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนพบว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณที่เกิด Localization มีค่าที่ลดลงอยู่ระหว่าง 40% - 66% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณที่ไม่เกิด Localization ซึ่งแนวโน้มของการลดลงของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณที่เกิด Localization ในทรายที่มีเม็ดละเอียดให้ค่าความเร็วที่ลดลงมากกว่าทรายที่มีเม็ดหยาบกว่า

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต *มนตรี มัสกุล*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก *สุพจน์ เตชวรสินกุล*
 ปีการศึกษา.....2552.....

5070403121: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: SHEAR WAVE VELOCITY / LOCALIZATION / SANDY SOIL / BENDER ELEMENT

MONTREE MASGUL: SHEAR WAVE PROPAGATION DURING FAILURE OF SAND IN TRIAXIAL TEST. THESIS ADVISOR: ASSOC PROF. SUPOT TEACHAVORASINSKUN, Ph.D. 72 pp.

The present study aimed to explore the possibility of using the propagation of shear wave velocity in detecting the non-uniformity caused by localization induced in sandy sample. The tested was conducted in triaxial compression apparatus. The reliability of the propagation of shear wave was calibrated using the developed square odeometer at which sample with known non-uniformity can be built and tested. The shear wave then was generated from the bender element installed at the top platen of the equipment. Three types of poorly graded sands with different average diameters were used.

From the odeometer, it was found that the propagation of shear wave was highly influenced by the thin layer of non-uniform density. By careful analysis, the global shear wave velocity can be predicted. The different between the measured and computed shar wave velocity was almost the same. In triaxial equipment, drained triaxial compression test was imposed in order to eliminate the influence of stress states before and after initialization of localization. At a specific stress conditions, it was found that the shear wave velocities of sandy sample before and after failure were very much different. At similar stress state, shear wave velocity after failure was much lower than that before failure. Decreasing in shear wave velocity due to localization could be as high as 60%. Furthermore, finer sand resulted in greater reduction in shear wave velocity than that of coarse sand.

Department: Civil Engineering Civil Student's Signature..... *M. Masgul*
 Field of Study: ... Civil Engineering Advisor's Signature..... *[Signature]*
 Academic Year: 2009

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง "การเดินทางของคลื่นแรงโน้มถ่วงระหว่างการวิบัติของดินทรายในการทดสอบแรงอัดสามแกน" ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำทุกสิ่งทุกอย่างในการทำวิจัยมาด้วยดีตลอด และกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธนะกิจเจริญ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้จนสมบูรณ์ และอาจารย์สาขาวิศวกรรมธรณีเทคนิคทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนตลอดมา

นายธนกร ชมภูรัตน์ นายณัฐวุฒิ เหมะภูดิน นายจตุรงค์ ทองจาวูแซ สำหรับคำชี้แนะแนวทาง พร้อมอุปกรณ์ในการทำงานและข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอีกมากมาย คุณยุทธกาล คุณกฤษฎา คุณอ้ออด เจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน

สุดท้ายนี้ขอระลึกถึงพระคุณ บิดา-มารดา และครอบครัว สำหรับร่างกาย แรงใจ และทุนทรัพย์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

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 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 การตรวจวัดการเกิด Localization ด้วยวิธีการต่างๆ.....	6
2.2.1 การศึกษากลไกการเกิด Localization ด้วยภาพถ่าย.....	6
2.2.2 การศึกษาการเกิด Localization โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	10
2.2.3 การตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยใช้ Bender Element.....	12
2.3 วิธีการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนจาก Bender element.....	13
2.3.1 คำจำกัดความของ Bender Element.....	13
2.3.2 ชนิดของ Bender Element.....	14
2.3.3 การวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยใช้ Bender Element.....	15
2.3.4 การหาระยะทางประสิทธิผล.....	16
2.3.5 การหาTravel time.....	17
2.3.6 รูปแบบของคลื่นกำเนิดสัญญาณ.....	18
บทที่ 3 วิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ.....	20
3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างทดสอบ.....	20
3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง.....	20
3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง.....	20

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบงานวิจัย.....	20
3.3 การหาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น.....	22
3.4 การติดตั้งแผ่นBender element ลงในอุปกรณ์ทดสอบ.....	23
3.4.1 การติดตั้งแผ่นBender element ลงในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอ ของตัวอย่างดิน.....	23
3.4.2 การติดตั้งแผ่นBender element ลงในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน.....	23
3.5 วิธีการทดสอบในเครื่องมือทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน.....	24
3.5.1 การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนในการทดสอบสำหรับทดสอบใน เครื่องทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน.....	25
3.6 วิธีการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial).....	27
3.6.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบในเครื่องทดสอบใน เครื่องทดสอบสามแกน.....	27
3.6.2 ขั้นตอนการอัดตัวอย่างด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum).....	29
3.6.3 ขั้นตอนการวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shearwave measurement).....	29
3.6.4 ขั้นตอนการอัดตัวอย่างด้วยระบบสุญญากาศและการวัดความเร็ว คลื่นแรงเฉือน (Vacuum & Shearwave measurement).....	30
3.6.5 การทดสอบหากำลังรับน้ำหนักของดินและวัดค่าความเร็ว คลื่นแรงเฉือน (Shearing & Shearwave measurement).....	31
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	33
4.1 บทนำ.....	33
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบ.....	33
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายในการทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบความ ไม่สม่ำเสมอของทราย	33
4.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน.....	34
4.3 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นแรงเฉือนในอุปกรณ์ทดสอบ ความไม่สม่ำเสมอของดิน.....	35
4.3.1 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อความเร็วคลื่นแรงเฉือน.....	36
4.3.2 ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจาก การตรวจวัดและการคำนวณ	37

4.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเครื่องทดสอบแรง
 อัดสามแกน (Undrained Triaxial test) 39

4.5 ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณ Localization 50

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....55

5.1 สรุปผลการทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน 55

5.2 สรุปผลการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test)56

5.3 ข้อเสนอแนะ..... 56

รายการอ้างอิง.....57

ภาคผนวก..... 59

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 72



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สรุปค่าต่างๆของรูปแบบของคลื่น, ขนาดและความถี่ของคลื่น และชนิดของดินที่ทำการทดสอบ (After Leong et al, 2005).....	19
ตารางที่ 3.1	ความสูงของตัวอย่างที่ทำการทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน.....	26
ตารางที่ 4.1	คุณสมบัติของทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน.....	34
ตารางที่ 4.2	ค่าความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือน	51
ตารางที่ ก-1	แสดงการคำนวณความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่าง ทรายเม็ดหยาบ (D16).....	60
ตารางที่ ก-2	แสดงการคำนวณความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่าง ทรายเม็ดละเอียด (D40).....	61
ตารางที่ ก-3	แสดงการคำนวณความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างทรายOttawa.....	62

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนจริงที่ติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนและตัวอัดแรงดัน.....	4
รูปที่ 2.2 ผลกระทบของความเค้นเท่ากันทุกทิศทางต่อคลื่นแรงอัดและคลื่นแรงเฉือน.....	4
รูปที่ 2.3 การขยายตัวของระนาบเฉือน (Shear band) ในแบบจำลองของกำแพงกันดิน ด้วยภาพ X-ray (Roscoe, 1970).....	6
รูปที่ 2.4 การตอบสนองของดินต่อแรงเฉือน.....	7
รูปที่ 2.5 (a) การเสียรูปของตัวอย่างที่ 3.8% ของความเครียดตามแนวแกน (Axial strain) (b) การเคลื่อนตัวของระนาบเฉือน (Shear band) บนตัวอย่าง (Khalid A. Alshibli และ Stein Sture, 1999).....	8
รูปที่ 2.6 ส่วนของตำแหน่งขึ้นส่วนบางที่ถูกตัดออก (Khalid A. Alshibli และ Stein Sture, 1999).....	8
รูปที่ 2.7 (a) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างตามหน้าตัด A (b) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน ช่องว่างตามหน้าตัด D (Khalid A. Alshibli และ Stein Sture, 1999).....	9
รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบด้วยการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (Shear strain) แถวบน และ ความเครียดของปริมาตร (Volumetric strain) แถวล่าง (Desrues และ Viggiani, 2004).....	10
รูปที่ 2.9 เส้นกราฟ σ_c แสดงถึงค่าเฉลี่ยของตัวอย่างโดยรวมในขณะที่กราฟ σ_c คือค่าเฉลี่ยที่ เกิดขึ้นในระนาบเฉือน (Shear band).....	11
รูปที่ 2.10 การทดสอบหาเส้นทางเดินของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในดินเหนียว.....	12
รูปที่ 2.11 (a) Bender Element (b) โครงสร้างภายในของ Bender Element.....	13
รูปที่ 2.12 (a) แสดงการต่อวงจรตัวรับสัญญาณ (X-pole) (b) แสดงการต่อวงจรตัวกำเนิด สัญญาณ (Y-pole).....	14
รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการต่อวงจรทดสอบด้วย Bender Element.....	15
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Travel time กับ ความยาวของตัวอย่าง (Viggiani & Atkinson, 1995).....	16
รูปที่ 2.15 (a) รูปแบบของคลื่นสัญญาณที่เกิดจากคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Viggiani & Atkinson, 1995) (b) รูปแบบของคลื่นสัญญาณที่เกิดจากคลื่นรูปซายน์ (Dyvik & Madshus, 1985).....	17
รูปที่ 2.16 (a) ลักษณะของคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (b) ลักษณะของคลื่นรูปซายน์ และ(c) ลักษณะของรูปคลื่นรูปซายน์แบบต่อเนื่อง.....	18
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน.....	21
รูปที่ 3.2 Bender element.....	21

รูปที่ 3.3 Function generator.....	21
รูปที่ 3.4 Oscilloscope.....	22
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial).....	22
รูปที่ 3.6 การติดตั้ง Bender element ลงบนอุปกรณ์ทดสอบ.....	24
รูปที่ 3.7 ลักษณะของตัวอย่างที่ทำการทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน.....	26
รูปที่ 3.8 ทRAYตัวอย่างในการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน.....	27
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างพร้อมทดสอบบนเครื่องแรงอัดสามแกน.....	28
รูปที่ 3.10 ลักษณะสัญญาณของ Bender element ที่เกิดขึ้น.....	30
รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบขนาดคละของตัวอย่างทราย	34
รูปที่ 4.2 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง ในสภาพหลวมมาก ($D_r=10\%$)	35
รูปที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง สภาพแน่นปานกลาง ($D_r=45\%$)	36
รูปที่ 4.4 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง ในสภาพแน่น ($D_r=75\%$)	36
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio)	37
รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข A	38
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข B	38
รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข C	39
รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข D	39
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างดินที่เกิดรอยเลื่อน (Slip line) ในช่วง Shearing	40
รูปที่ 4.11 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทราย D16 (Loose) ที่ Confining pressure 25 KPa.	41
รูปที่ 4.12 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทราย D16 (Dense) ที่ Confining pressure 25 KPa.	41
รูปที่ 4.13 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทราย D16 (Loose) ที่ Confining pressure 50 KPa.	42
รูปที่ 4.14 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทราย D16 (Dense) ที่ Confining pressure 50 KPa.	42

รูปที่ 4.15 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD16 (Loose) ที่ Confining pressure 80 KPa.	43
รูปที่ 4.16 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD16 (Dense) ที่ Confining pressure 80 KPa.	43
รูปที่ 4.17 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Loose) ที่ Confining pressure 25 KPa.	44
รูปที่ 4.18 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Dense) ที่ Confining pressure 25 KPa.	44
รูปที่ 4.19 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Loose) ที่ Confining pressure 50 KPa.	45
รูปที่ 4.20 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Dense) ที่ Confining pressure 50 KPa.	45
รูปที่ 4.21 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Loose) ที่ Confining pressure 80 KPa.	46
รูปที่ 4.22 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Dense) ที่ Confining pressure 80 KPa.	46
รูปที่ 4.23 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Loose) ที่ Confining pressure 25 KPa.	47
รูปที่ 4.24 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Dense) ที่ Confining pressure 25 KPa.	47
รูปที่ 4.25 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Loose) ที่ Confining pressure 50 KPa.	48
รูปที่ 4.26 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Dense) ที่ Confining pressure 50 KPa.	48
รูปที่ 4.27 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Loose) ที่ Confining pressure 80 KPa.	49
รูปที่ 4.28 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Dense) ที่ Confining pressure 80 KPa.	49
รูปที่ 4.29 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D16 (loose)	52

รูปที่ 4.30 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D16 (dense)	52
รูปที่ 4.31 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D40 (loose)	53
รูปที่ 4.32 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D40 (dense)	53
รูปที่ 4.33 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย Ottawa (loose)	54
รูปที่ 4.34 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย Ottawa (dense)	55
รูปที่ ก-1 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Dense C25	63
รูปที่ ก-2 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Loose C25	63
รูปที่ ก-3 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Dense C50	64
รูปที่ ก-4 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Loose C50	64
รูปที่ ก-5 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Dense C80	65
รูปที่ ก-6 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Loose C80	65
รูปที่ ก-7 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Dense C25	66
รูปที่ ก-8 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Loose C25	66
รูปที่ ก-9 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Dense C50	67
รูปที่ ก-10 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Loose C50	67
รูปที่ ก-11 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Dense C80	68
รูปที่ ก-12 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Loose C80	68
รูปที่ ก-13 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Dense C25	69
รูปที่ ก-14 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Loose C25	69
รูปที่ ก-15 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Dense C50	70
รูปที่ ก-16 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Loose C50	70
รูปที่ ก-17 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Dense C80	71
รูปที่ ก-18 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Loose C80	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวิบัติของดินจะก่อให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในรูปแบบของรอยเลื่อน (Slip line หรือ Rupture line) ความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกายภาพของดินในบริเวณแคบๆ โดยในดินทรายเม็ดทรายในบริเวณดังกล่าวจะทำการจัดเรียงตัวกันใหม่ก่อให้เกิดแนวความไม่ต่อเนื่องของความหนาแน่น โดยมีความหนาแน่นในบริเวณดังกล่าวจะต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ค่อนข้างมาก การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกกันว่า Localization ทั้งนี้มวลดินจะใช้แนว Localization เหล่านี้ในการกระจายพลังงานที่เกิดจากการกระทำของแรงภายนอก โดยกระจายพลังงานออกไปในรูปของการเคลื่อนตัว หรือการไถล (sliding) ตามแนว Localization นี้ ซึ่งส่งผลให้หน่วยแรง (Stress) ที่เกิดขึ้นภายในมวลดินไม่เพิ่มขึ้นอีก ถึงแม้ว่าแรงกระทำภายนอกยังคงเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยที่ค่าขอบเขตของหน่วยแรงนี้ได้แก่ค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินนั่นเอง ดังนั้น การเข้าใจกลไกและพฤติกรรมของการเกิด Localization จะเป็นกระบวนการที่สำคัญในการกำหนดค่ากำลังรับน้ำหนัก (Strength) ของดินนั้นๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการออกแบบทางด้านวิศวกรรม นอกจากนี้ การเข้าใจกระบวนการเกิด Localization ยังเป็นส่วนที่สำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักหลังวิบัติ (Residual strength characteristics) ของมวลดิน

งานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาพฤติกรรมของการเกิด Localization โดยใช้การตรวจวัดด้วยความเร็วคลื่นแรงเฉือน ซึ่งใช้ตัวอย่างทรายบริเวณนิคมอุตสาหกรรมภาคตะวันออก จังหวัดชลบุรี โดยใช้เครื่องทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นมาทำการทดสอบ และสามารถสร้างตัวอย่างดินทรายที่มีรูปแบบของความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นในรูปแบบที่กำหนดและนำผลของความเร็วจลื่นดังกล่าวที่ได้ไปวิเคราะห์หาพฤติกรรมการเกิด Localization ในเครื่องมือทดสอบ Triaxial ที่ติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จุดประสงค์ของการวิจัย เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิด Localization ที่เกิดขึ้นภายในมวลดิน โดยอาศัยการตรวจวัดความเร็วของคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านมวลดินด้วย Bender element ในเครื่องมือทดสอบรูปแบบของความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดินที่ประดิษฐ์ขึ้นมาแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเครื่องมือทดสอบ Triaxial ซึ่งสรุปดังนี้

1. ศึกษาความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการตรวจวัดและจากการคำนวณที่ผ่านตัวอย่างดินที่มีค่าความหนาแน่นที่ต่างกัน ในเครื่องมือทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในมวลดินที่เกิด Localization โดยอาศัยการตรวจวัดความเร็วของคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านมวลดินในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาหลักการเกิด และการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านมวลดินภายในบริเวณที่เกิด Localization โดยทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือทดสอบ Triaxial ที่จะทำให้การปรับปรุงระบบการตรวจวัดคลื่นแรงเฉือน และ เครื่องมือทดสอบรูปแบบของความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน ตัวอย่างดินที่ใช้จะเป็นตัวอย่างดินทรายที่มีทำการคัดเลือกขนาดแล้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณที่เกิด Localization
2. เข้าใจพฤติกรรมการรับน้ำหนักของดินหลังการวิบัติของมวลดินได้

บทที่ 2

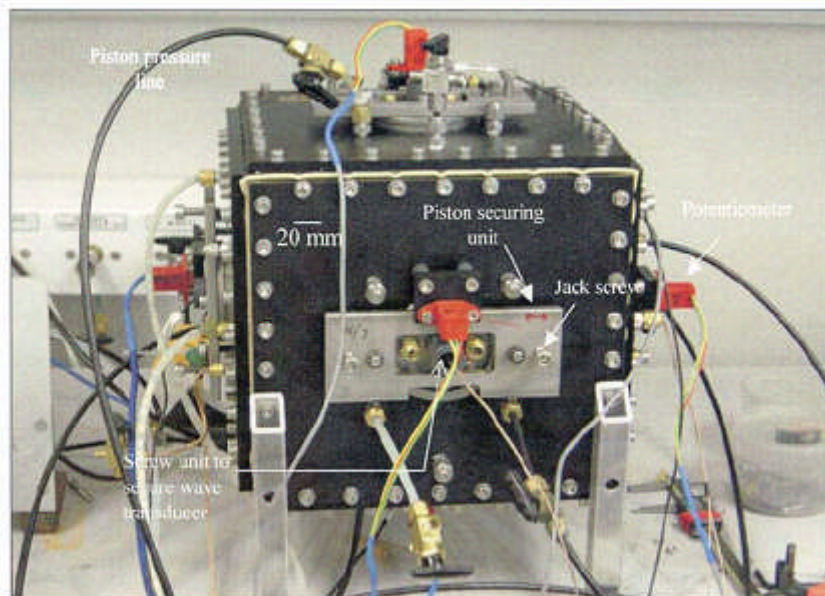
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

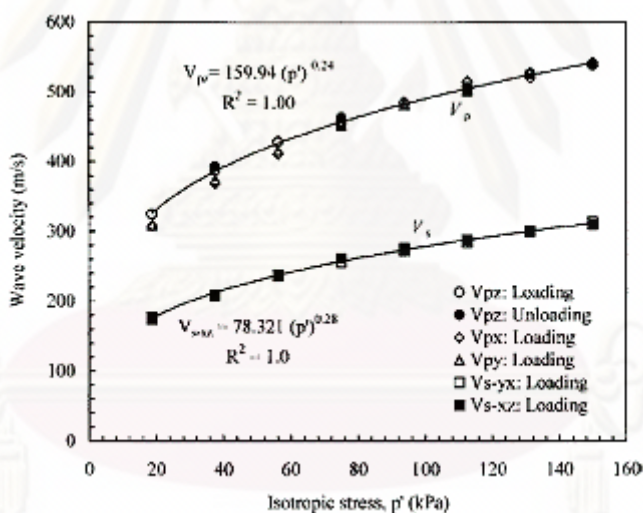
การเกิด Localization ภายในมวลดินเป็นอุปสรรคสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของมวลดินภายหลังการวิบัติ ทั้งนี้ เพราะ Localization นั้นก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติและตัวแปรต่างๆ ของดิน เช่น ทำให้บริเวณแคบๆ ภายในมวลดินที่เกิด Localization มีความหนาแน่นต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ ทำให้เกิดการสะสมของความเครียดที่สูงมากในบริเวณนี้ เพื่อทำหน้าที่กระจายพลังงานจากการกระทำของแรงภายนอก เนื่องจากการเกิด Localization เกิดขึ้นภายในมวลดิน และเกิดขึ้นในบริเวณเล็กๆ นอกจากนี้ ยังไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่จะเกิด Localization ได้อย่างแน่นอน ทำให้การศึกษาและตรวจสอบกลไก และ พฤติกรรมของการเกิด Localization ทำได้ยากลำบากมาก

เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าของความเร็วของคลื่นแรงเฉือนที่ผ่านมวลดินนั้น จะมีตัวแปรที่เข้ามาเกี่ยวข้องหลักๆ อยู่ 2 ตัวแปรคือ ความหนาแน่นของดินและสถานะความเค้นที่อยู่ในมวลดิน จากคุณสมบัติตรงนี้แล้ว เราสามารถสร้างสถานะควบคุมต่างๆ ของตัวอย่างดินขึ้นมาได้เพื่อรวบรวมข้อมูลค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในมวลดินที่มีความสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอของมวลดินได้ เพื่อนำไปใช้ในการตรวจวัดการเกิด localization ในห้องทดลองได้

Mostafa A.I. *et al.* (2005) ได้ทำการทดลองวัดคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านดินทรายในเครื่องมือแบบแรงอัดสามแกนจริง (True triaxial apparatus) ดังรูปที่ 2.1 ณ มหาวิทยาลัยแห่งออสเตรเลียตะวันตก (University of Western Australia) โดยใช้เครื่องกำเนิดคลื่น (Wave transducer) ที่ผลิตขึ้นมาแบบพิเศษที่สามารถวัดได้ทั้งคลื่นแรงเฉือน (Elastic shear wave, V_s) และคลื่นแรงอัด (Compression wave, V_p) ดังรูปที่ 2.1 โดยสมมุติฐานที่ผู้วิจัยได้คิดที่จะทดสอบเนื่องจากมีรายงานการวิจัยจากอดีตพบว่า ความเค้นที่กระทำต่อดินในแต่ละทิศทางในทั้งสามแกน กล่าวคือ ความเค้นหลัก ความเค้นรองและความเค้นกลาง ล้วนแต่มีอิทธิพลที่สำคัญต่อค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear modulus) ของดินที่เกิดขึ้นในความเครียดที่น้อยมาก (Small-strain behavior) มากกว่าค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean effective stress, p')



รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนจริงที่ติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนและตัวอัดแรงดัน (Mostafa A.I. et al. ,2005)



รูปที่ 2.2 ผลกระทบของความเค้นเท่ากันทุกทิศทางต่อคลื่นแรงอัดและคลื่นแรงเฉือน (Mostafa A.I. et al. ,2005)

ผลการศึกษาพบว่าความเร็วของคลื่นแรงอัดทั้งสามทิศทาง จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยความเค้นประสิทธิผล (Mean effective stress) ดังรูปที่ 2.2 ส่วนผลกระทบของสภาพบดอัดมากกว่าปกติของดินทราย (Over consolidation of the sand) จะมีผลกระทบน้อยมากกับค่าความแข็งแรงที่ความเครียดน้อย ๆ (Small strain stiffness) นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังพบว่าคลื่นแรงอัดทั้งสามทิศทางจะมีผลกระทบจากความเค้นในทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น

E.C. Leong *et al.* (2005) ได้ทำการทดสอบการวัดคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านดินทรายแห้ง ดินทรายเปียก และดินทรายอิ่มตัว (dry, unsaturated and saturated sand) โดยพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของการวัดคลื่นเนื่องจากผลกระทบของชนิดของตัววัดคลื่นแรงเฉือนหรือเบนเดอร์อีลิเมนต์ (Bender element) ลักษณะของคลื่นที่ปล่อยออกมา (Waveform) ขนาด (Magnitude) และความถี่ (Frequency) โดยผลการทดสอบพบว่า ความไม่แน่นอนของทดสอบนั้นขึ้นกับการแปลความหมาย (Interpretation) สัญญาณของตัวรับสัญญาณ โดยในการใช้ตัวกำเนิดคลื่นแบบไซน์ (Sinusoidal input) การบันทึกเวลาในการเคลื่อนที่ (Travel time) ของคลื่นผ่านดิน ควรจะวัดจากส่วนโค้งของกราฟที่เกิดขึ้นแรกสุด (First deflection) และเราสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณของคลื่นได้โดยควรใช้ 1) ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อตัวรบกวน (Signal to noise, SNR) อย่างน้อย 4 เดซิเบล 2) ค่าความยาวของเส้นทางการเคลื่อนตัวของคลื่นต่ออัตราส่วนของความยาวคลื่น (Lu/λ) อย่างน้อย 3.33 นอกจากนี้ในการทดสอบเราสามารถเพิ่มค่า SNR ได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กับตัวส่งสัญญาณคลื่น (Transmitter bender element) โดยใช้ตัวขยายกำลังไฟฟ้า (Power amplifier) และ/หรือ ใช้การต่อตัวส่งสัญญาณเป็นแบบขนาน และต่อตัวรับสัญญาณเป็นแบบอนุกรม เป็นต้น

Minsu Cha and Gye-Chun Cho (2007) ได้ประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทรายโดยใช้ความเร็วคลื่นแรงเฉือน โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แม้กำลังรับแรงเฉือนของดินทรายจะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ความเครียดที่สูงมาก ส่วนการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนจะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ความเครียดน้อยมากก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนช่องว่างเป็นผลกระทบที่สำคัญต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินทราย นอกจากนี้แล้วยังเป็นผลกระทบที่สำคัญต่อความเร็วของคลื่นแรงเฉือนด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า กำลังรับแรงเฉือนถึงแม้ไม่ได้สัมพันธ์กันโดยตรงแต่ก็มีแนวโน้มที่จะสัมพันธ์กับความเร็วของคลื่นแรงเฉือนได้โดยพิจารณาถึงอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลในดินทราย ผลการทดสอบยังพบอีกว่า ค่ามุมเสียดทานภายในของทรายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลง และในบทสรุปของงานวิจัยได้แนะนำว่าการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนในที่ (In-situ shear strength) ของดินทรายโดยการวัดคลื่นแรงเฉือนเป็นวิธีที่ได้ผลที่ดีวิธีหนึ่ง โดยความถูกต้องของการประมาณค่านั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลทางพลศาสตร์ที่ตรวจวัดได้ในที่ (In-situ seismic data) เป็นสำคัญ

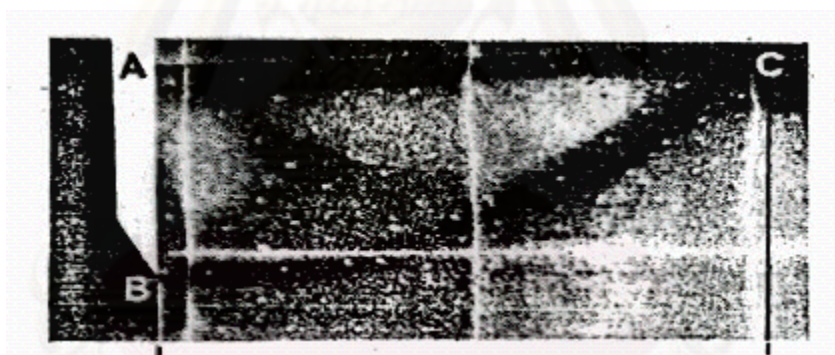
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การตรวจวัดการเกิด Localization ด้วยวิธีการต่างๆ

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการเกิด Localization ด้วยวิธีต่างๆกันหลายรูปแบบ ซึ่งการศึกษาการเกิด Localization ที่ผ่านมามีทำให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากการเกิด Localization แต่ยังไม่สามารถอธิบายถึงกลไกการเกิดได้ และไม่สามารถนำผลการศึกษาไปอธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักภายหลังการวิบัติได้

2.2.1 การศึกษาการเกิด Localization ด้วยภาพถ่าย

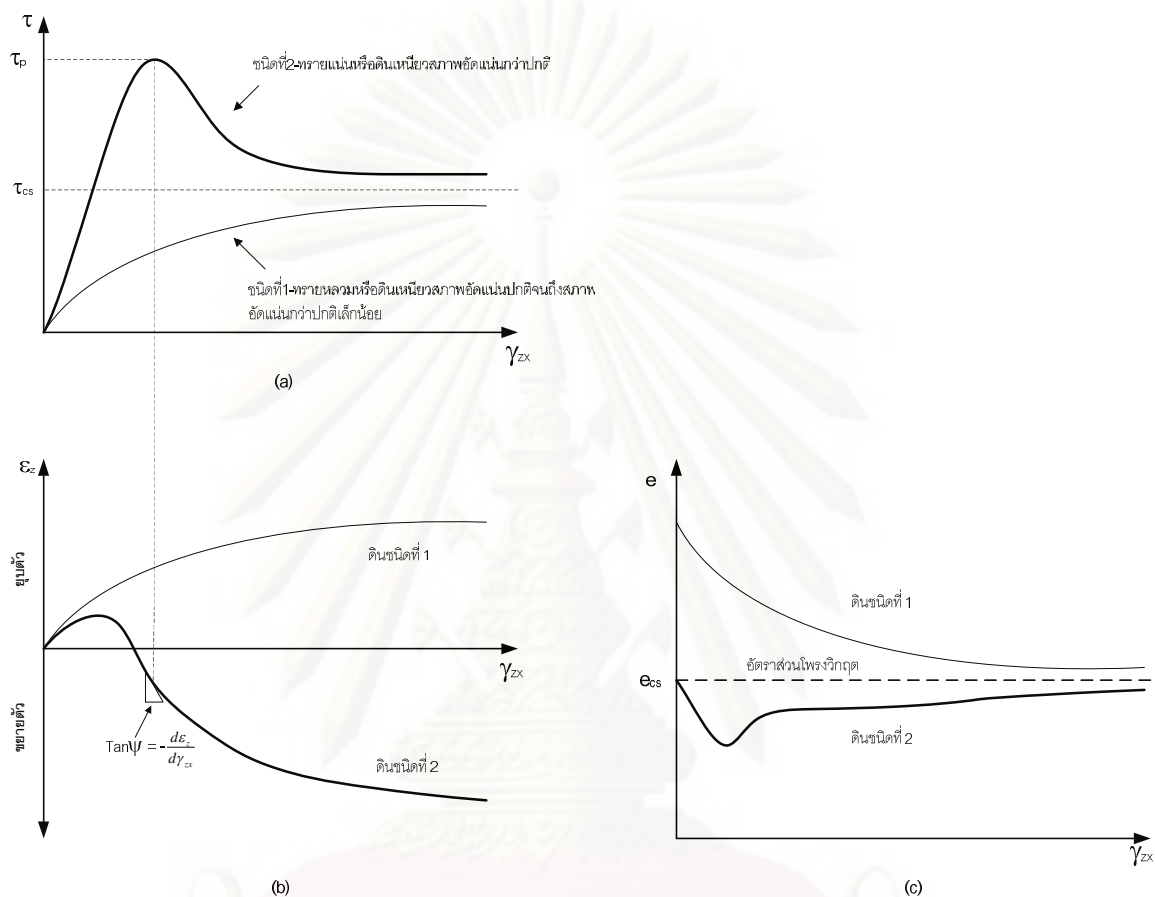
จากปรากฏการณ์ดังกล่าวได้มีการศึกษาการเกิด Localization ของดินโดยการศึกษาในระยะแรกๆ เป็นการศึกษาด้วยตาเปล่าและ Roscoe (1970) ได้ประยุกต์โดยการนำระบบ X-ray เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ กลไกการเกิดและการขยายตัวของระนาบ Localization ในแบบจำลองของกำแพงกันดิน (Retaining wall) โดยใช้เงื่อนไขในการทดสอบเป็นระนาบความเครียด (Plane strain) ดังรูปที่ 2.3 แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังเป็นการศึกษาวิเคราะห์การเกิด Localization จากภายนอกเท่านั้น



รูปที่ 2.3 การขยายตัวของระนาบเฉือน (Shear band) ในแบบจำลองของกำแพงกันดินด้วยภาพ X-ray (Roscoe, 1970)

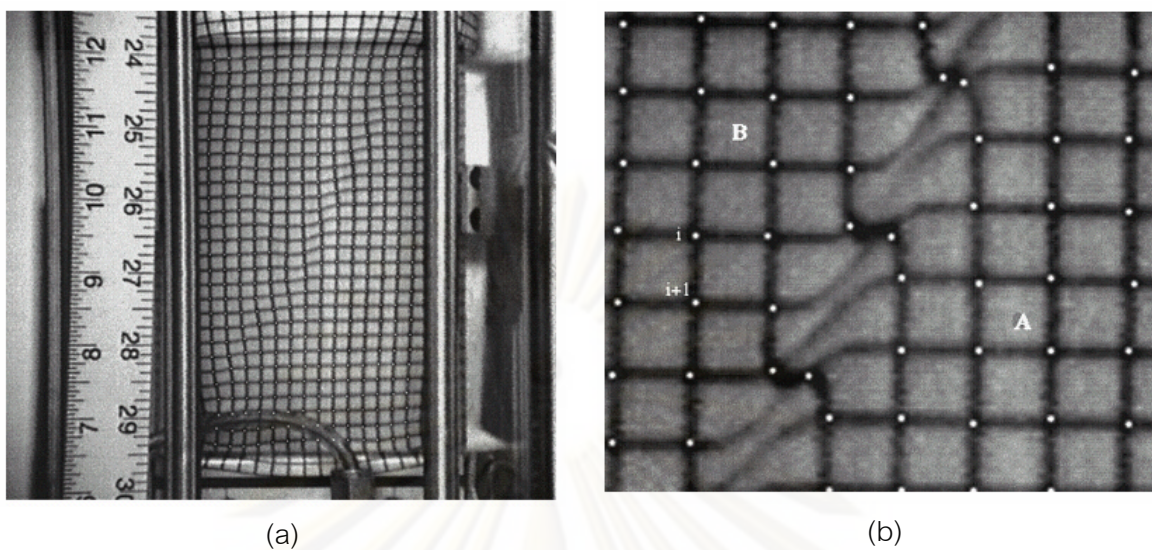
เป็นที่ยอมรับกันว่าการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ของมวลดินภายใต้การกระทำของแรงเฉือนจะมีค่ามุ่งเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเรียกกันว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างวิกฤติ (Void ratio) ดังรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ในภาวะของดินที่ความเค้นประสิทธิผลตั้งฉาก (Normal effective stress) มีค่าคงตัวและเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนในอัตราคงที่ ซึ่งความสัมพันธ์ประกอบไปด้วยความเค้นเฉือน (τ) และความเครียดเฉือน (γ_{cx}) รูปที่ 2.4(a) ส่วนรูปที่ 2.4(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain, ϵ_v) กับความเครียดเฉือน (γ_{cx}) และรูปที่ 2.4(c) แสดงอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio, e) กับความเครียดเฉือน อย่างไรก็ตามได้มีการพบภายหลังว่า ในมวลดิน

ทราย (โดยเฉพาะทรายที่มีความหนาแน่นสูง) ที่ได้มีการตรวจพบการเกิด Localization ที่ชัดเจนและมีค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างระหว่างการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนช่องว่างวิกฤติค่อนข้างมาก

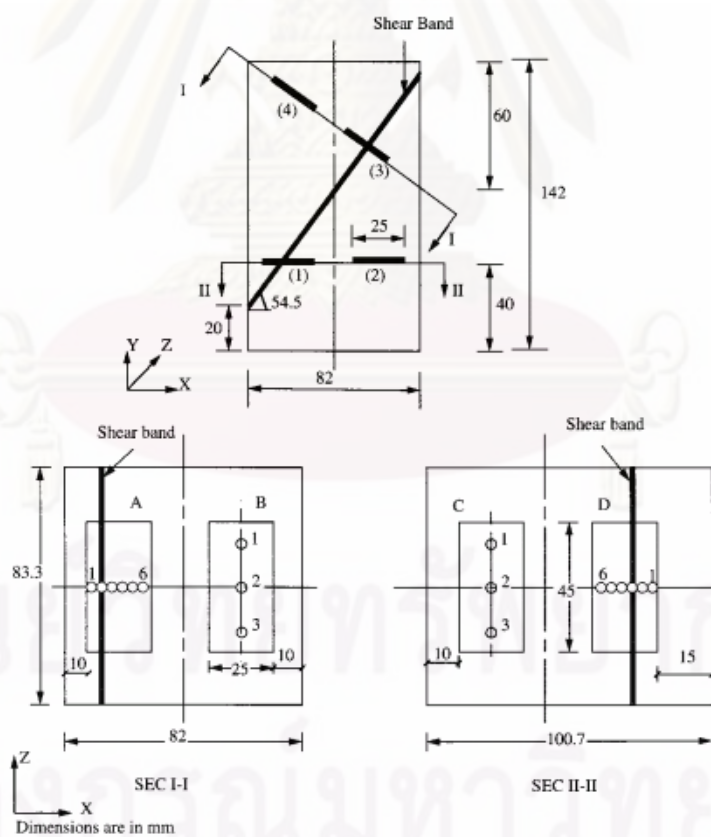


รูปที่ 2.4 การตอบสนองของดินต่อแรงเฉือน (วาดใหม่ สุเชษฐ์ 2552)

Khalid A. Alshibli และ Stein Sture (1999) ได้วิเคราะห์การเสียรูปร่างของดินทรายโดยใช้เทคนิคภาพแบบดิจิทัล (Digital imaging analysis) โดยการทดสอบแบบระนาบความเครียด (Plane strain) และใช้เทคนิคสองอย่างมาประยุกต์ใช้เปรียบเทียบผลคือ อย่างแรกโดยการการวาดตารางลงบน Membrane เพื่อสังเกตตรวจวัดทิศทาง, มุมที่เกิด, และความหนาของแนวระนาบที่เกิด Localization ดังรูปที่ 2.5 และเทคนิคที่สองคือการใส่ของเหลวที่มีชื่อว่า Ultra - low viscosity resin ไปในตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาโครงสร้างภายในของตัวอย่างโดยแบ่งออกเป็น 4 ชั้นบางๆแล้วใช้กล้องจุลทรรศน์ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนช่องว่างตามความยาวของระนาบที่เกิด Localization ดังรูปที่ 2.6 จากผลการทดสอบที่ได้ในขั้นตอนที่หนึ่ง พบว่ามุมของระนาบที่เกิดขึ้นมีค่า 54.5° และความหนาของระนาบเฉือนมีค่า 3.01 มิลลิเมตร ส่วนความหนาของระนาบเฉือนภายในตัวอย่างมีค่า 3.19 และ 3.29 มิลลิเมตร (ที่ 2 ตำแหน่ง)

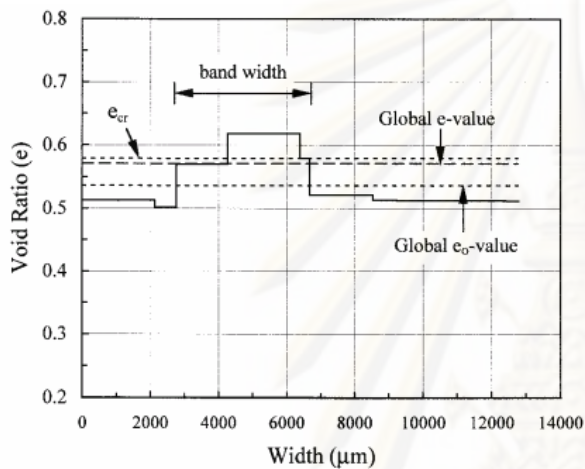


รูปที่ 2.5 (a) การเสียรูปของตัวอย่างที่ 3.8% ของความเครียดตามแนวแกน (Axial strain) (b) การเคลื่อนตัวของระนาบเฉือน (Shear band) บนตัวอย่าง (Khalid A. Alshibli และ Stein Sture, 1999)

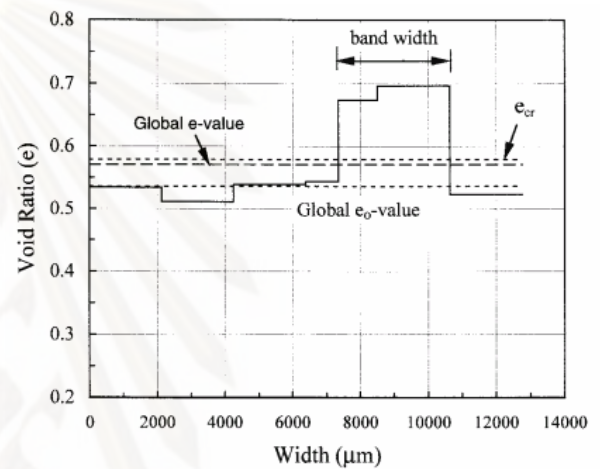


รูปที่ 2.6 ส่วนของตำแหน่งชิ้นส่วนบางที่ถูกตัดออก (Khalid A. Alshibli และ Stein Sture, 1999)

จากผลการทดสอบหาค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นค่าของอัตราส่วนช่องว่างในบริเวณที่เกิดระนาบเฉือน (Shear band) นั้นจะมีค่าอัตราส่วนช่องว่างที่เพิ่มขึ้นกว่าบริเวณที่ไม่เกิดระนาบเฉือนดังรูปที่ 2.7 โดยในหน้าตัด A เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างสูงสุดอยู่ที่ 15.3 % เมื่อเทียบกับอัตราส่วนช่องว่างโดยรวมเริ่มต้น (Global e_0 -value) และในหน้าตัด D เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างสูงสุดอยู่ที่ 29.8 % เมื่อเทียบกับอัตราส่วนช่องว่างโดยรวมเริ่มต้น (Global e_0 -value)



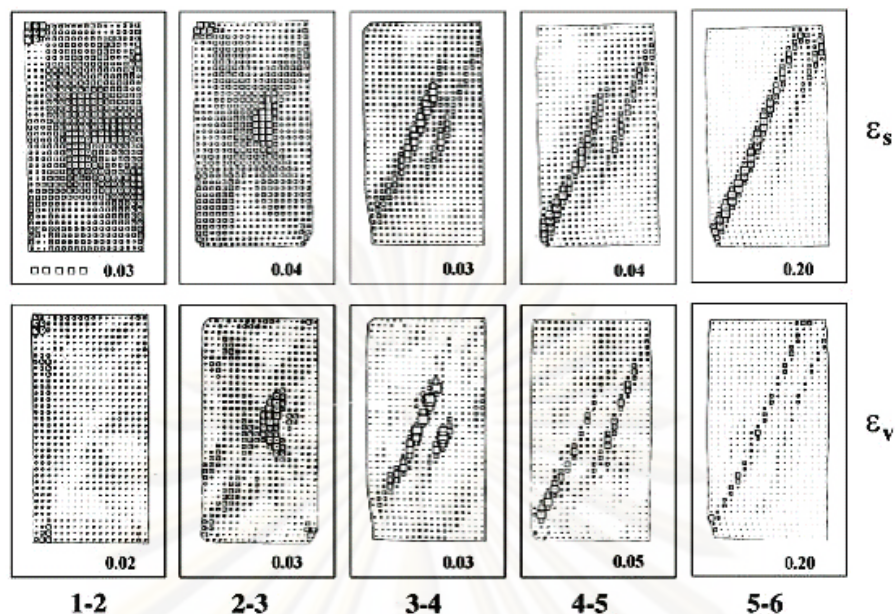
(a) หน้าตัด A



(b) หน้าตัด D

รูปที่ 2.7 (a) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างตามหน้าตัด A (b) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างตามหน้าตัด D (Khalid A. Alshibli และ Stein Sture, 1999)

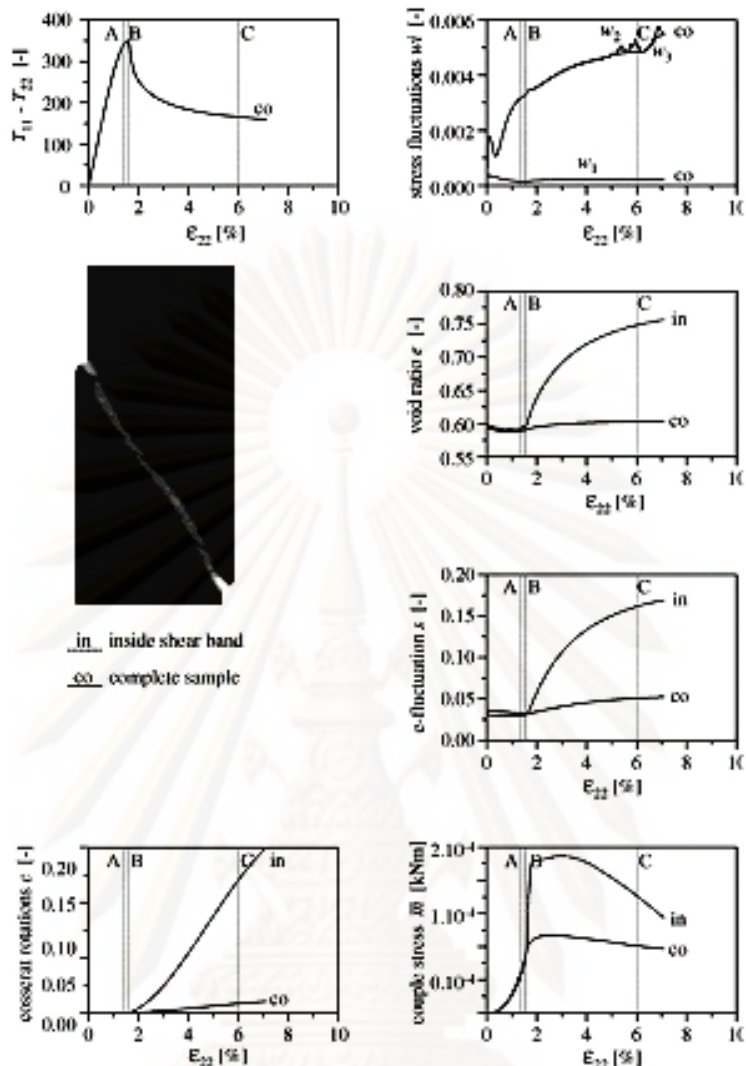
Desrues และ Viggiani (2004) ได้ทำการทดสอบการเสียรูปของตัวอย่างทรายโดยการทดสอบการอัดตัวในระนาบความเครียดแบบระบายน้ำ (Drained plane strain compression tests) ซึ่งใช้ระบบการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยภาพถ่ายการเสียรูปของก่อนการเกิด, ขณะเกิด และหลังการเกิด Localization เพื่อหารูปแบบของการเกิด ทิศทางของการกระจายตัว และรวมถึงความหนาของระนาบ Localization ซึ่งส่วนหนึ่งของการทดสอบในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2.8 โดยผลการทดสอบที่ได้นั้นตัวอย่างดินเหนียวจะเกิดระนาบ Localization ในแนวเฉียงสองเส้นคู่ขนานกันจากส่วนกลางของตัวอย่าง และระนาบที่เกิดทางด้านซ้ายมือจะใหญ่กว่าเสมอ ซึ่งเป็นระนาบเดียวที่สามารถพาดผ่านไปจนสุดของอีกฝั่งหนึ่งได้ส่วนแนวกลางเป็นค่าความเครียดเชิงปริมาตรซึ่งจะขยายออกตามระนาบของการเกิด Localization



รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบด้วยการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (Shear strain) แถวบน และความเครียดของปริมาตร (Volumetric strain) แถวล่าง (Desrues และ Viggiani, 2004)

2.2.2 การศึกษาการเกิด Localization โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

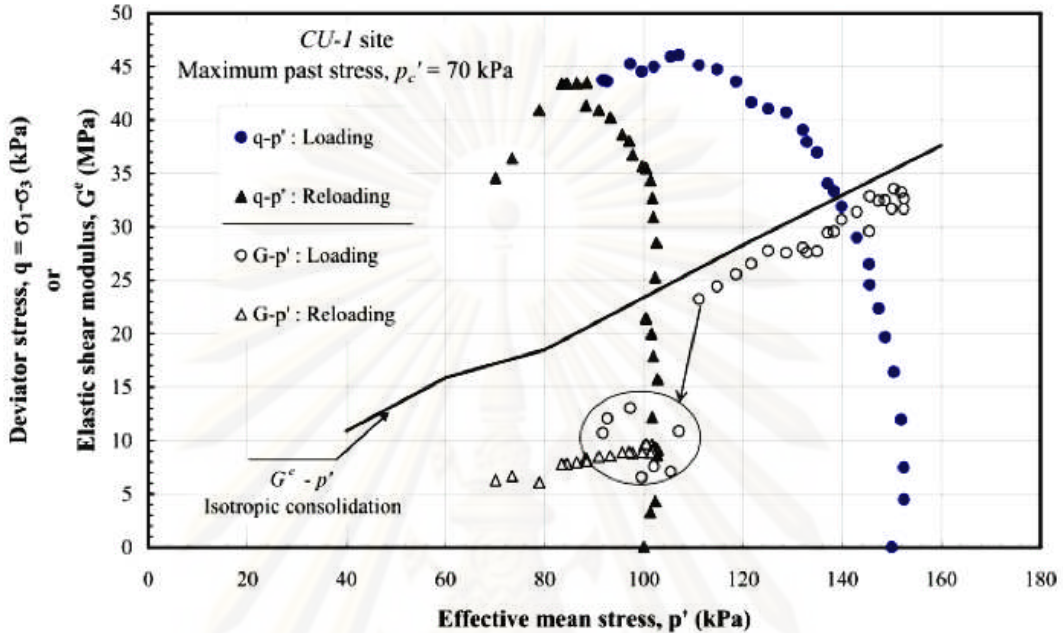
Konrad Nubel และ Wenxiong Huang (2004) ได้ศึกษาโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาทิเช่น Micro-polar hypoplastic constitutive model เพื่อหาค่าต่างๆที่เกิดขึ้นในส่วนที่เกิด Localization จากผลการศึกษาที่ได้นั้นพบว่า การกระจายพลังงานจากการกระทำของแรงภายนอก ในบริเวณที่เกิด Localization เกิดขึ้นอย่างเพียงพอจนกระทั่งมวลดินแสดงพฤติกรรมรับน้ำหนักสูงสุด (กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain มีลักษณะแนวราบ) แล้วผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การทดสอบอัดแรงแบบสองแกน (Biaxial compression) เส้นกราฟ σ_c แสดงถึงค่าเฉลี่ยของตัวอย่างโดยรวมของตัวอย่าง ในขณะที่กราฟ σ_{in} คือค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในระนาบเฉือน (Shear band) ดังรูปที่ รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เส้นกราฟ co แสดงถึงค่าเฉลี่ยของตัวอย่างโดยรวมในขณะที่กราฟ in คือค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในระนาบเฉือน (Shear band) (Konrad Nubel และ Wenxiong Huang, 2004)

ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนภายในมวลดินเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับค่าอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยแรงภายในมวลดินนั้นๆ ดังนั้นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของคลื่นแรงเฉือนภายในมวลดินในขณะที่มวลดินบางส่วนเกิด Localization จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณค่าอัตราส่วนช่องว่างของมวลดินภายในบริเวณที่เกิด Localization ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ Teachavorasinskun และ Amornwithayalax (2002) และ Teachavorasinskun และ Akkarakun (2004) ซึ่งทำการทดสอบหาเส้นทางเดินของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในดินเหนียวก็พบว่า ภายหลังจากวิบัติของตัวอย่างทดสอบ ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ผิดแปลกไปจากรูปแบบที่ได้ในช่วงก่อนการวิบัติรูปที่ 2.10 อย่างไรก็ตามในการศึกษาทั้งสองได้เพียงแต่ตั้งข้อสังเกตการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไว้ แต่ไม่สามารถให้รายละเอียดได้ เนื่องจากเครื่องมือทดสอบที่ใช้ไม่ได้มีการ

วางแผนและจัดเตรียมไว้สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนในขณะที่เกิด Localization



รูปที่ 2.10 การทดสอบหาเส้นทางเดินของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในดินเหนียว (Teachavorasinskun and Amornwithayalax, 2002)

2.2.3 การตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยใช้ Bender Element

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าความเร็วของคลื่นแรงเฉือนนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัวแปรคือ ค่าอัตราส่วนช่องว่าง และสถานะของความเค้นในมวลดิน เมื่อระนาบแรงเฉือนเกิดขึ้นการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนจะผ่านส่วนของตัวอย่างสองส่วนคือส่วนที่มีความหนาแน่นสูง ($h - \Delta h$) กับส่วนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Δh) สมมติเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านตัวอย่างโดยรวมคือ t_{av} ฉะนั้น

$$t_{av} = \frac{h}{(v_s)_{av}} = \frac{h - \Delta h}{(v_s)_{in}} + \frac{\Delta h}{(v_s)_{lo}} \tag{2.1}$$

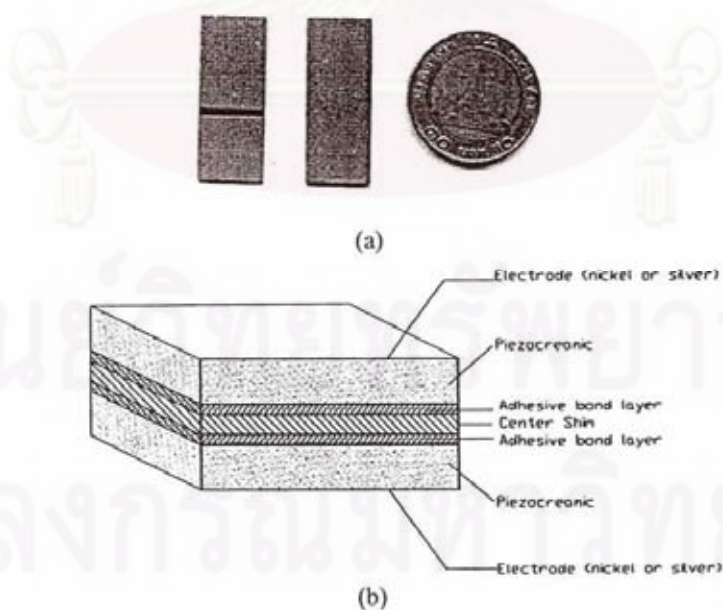
เมื่อ h คือความสูงของตัวอย่าง Δh คือความสูงในส่วนที่เกิด Localization $(v_s)_{av}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของคลื่นแรงเฉือน $(v_s)_{in}$ คือ ความเร็วคลื่นแรงเฉือนในส่วนที่ไม่เกิด Localization และ $(v_s)_{lo}$ คือ ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนในส่วนที่เกิด Localization

2.3 วิธีการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนจาก Bender element

2.3.1 คำจำกัดความของ Bender Element

วิธีการตรวจวัดโดยใช้ Bender Element ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Shirley & Hampton (1987) ซึ่งเป็นวิธีง่ายในการวัดโมดูลัสแรงเฉือนของดินในระดับ very small strain ของดิน G_{max} โดยการวัดความเร็วของคลื่นแรงเฉือนที่แผ่กระจายในตัวอย่างทดสอบ

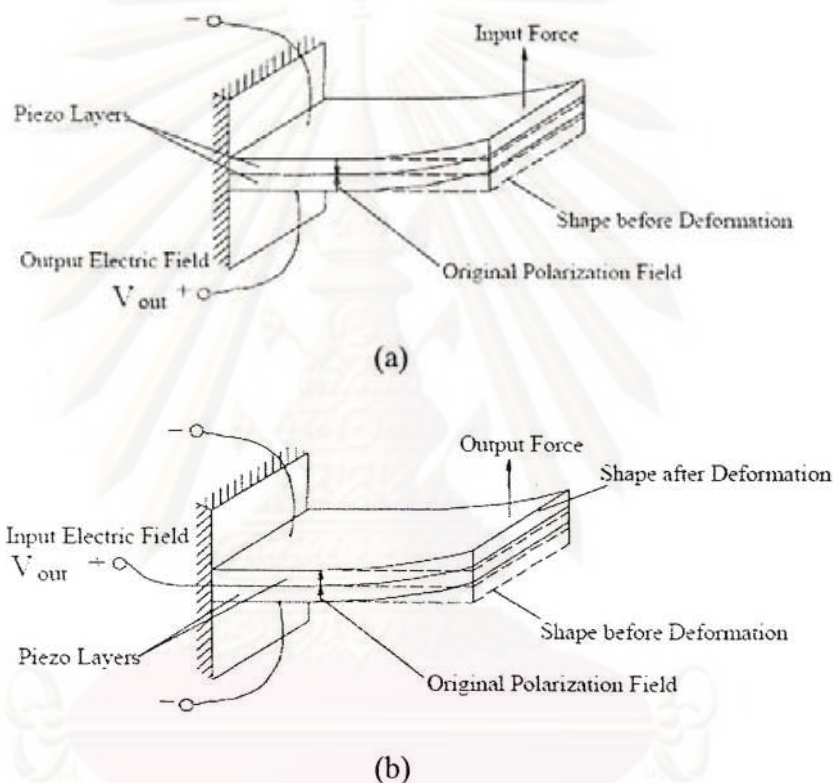
Bender Element ประกอบด้วยแผ่น Piezoelectric ceramic 2 แผ่น ประกบกับแผ่นทองเหลือง หรือ สแตนเลส สตีล (Stainless steel) ดังรูป 2.11 วิธีวัดค่าความเร็วของแรงเฉือน จะใช้ Bender element ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณ electro-mechanical โดยแปลงพลังงานกล(การสั่นไหว) เป็นพลังงานทางไฟฟ้า หรือในทางกลับกันจะแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปใน Bender element จะเกิดการงอขึ้นในแผ่น Bender element ในขณะนั้นแผ่น Bender element จะแปลงสัญญาณจากไฟฟ้าเป็นพลังงานกลที่เคลื่อนที่ผ่านดิน ไปยัง Bender element ตัวรับเพื่อเปลี่ยนสัญญาณจากพลังงานกลกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า



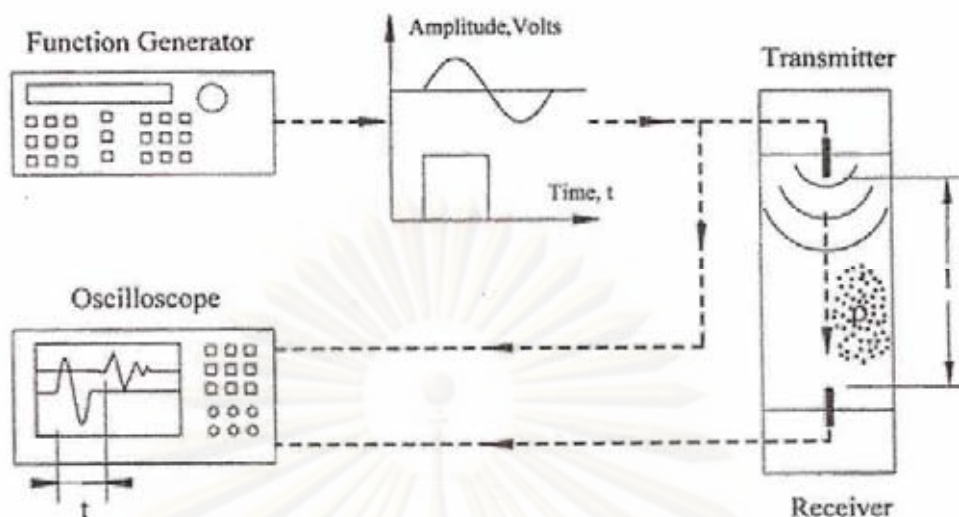
รูปที่ 2.11 (a) Bender Element (b) โครงสร้างภายในของ Bender Element

2.3.2 ชนิดของ Bender Element

Bender Element ประกอบด้วย 2 ชนิดคือ X-Poled และ Y-Poled ดังที่แสดงในรูป 2.12 ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและตัวส่งสัญญาณ โดยที่การใช้จะแตกต่างกัน ในการต่อวงจรไฟฟ้าจะต่ออนุกรมเมื่อใช้เป็นตัวรับสัญญาณและต่อแบบขนานเมื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณเหตุที่ต้องต่อวงจรแตกต่างกันเพื่อที่จะใช้งานได้มีประสิทธิภาพในแต่ละด้านนั่นเอง



รูปที่ 2.12 (a) แสดงการต่อวงจรตัวรับสัญญาณ (X-pole) (b) แสดงการต่อวงจรตัวกำเนิดสัญญาณ (Y-pole)



รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการต่อวงจรทดสอบด้วย Bender Element

2.3.3 การวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยใช้ Bender Element

การหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยใช้ Bender element ซึ่งกระทำโดยการเสียบแผ่น Bender element ซึ่งเป็นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณลงไปในตัวอย่างดินโดยการวัดเวลาที่คลื่นเดินทางผ่าน (t) ซึ่งสามารถหาความเร็วคลื่นความเค้น S-wave (V_s) ได้ดังสมการที่ 2.2

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (2.2)$$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วคลื่นแรงเฉือน L คือ ระยะทางระหว่างปลายทั้งสองข้างของ Bender element และ t คือ เวลาที่คลื่นเดินทาง (travel time)

Dyvik & Madshus (1985) พบว่าระยะทาง " L " ควรวัดจากปลายทั้งสองข้างของ Bender element เนื่องจากเวลาที่ได้นั้นมีค่าน้อยมาก ($t \approx 10^{-6} - 10^{-12}$ วินาที) เพราะฉะนั้นคนใช้ Oscilloscope ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้เกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากการวัดเวลาให้น้อยที่สุด

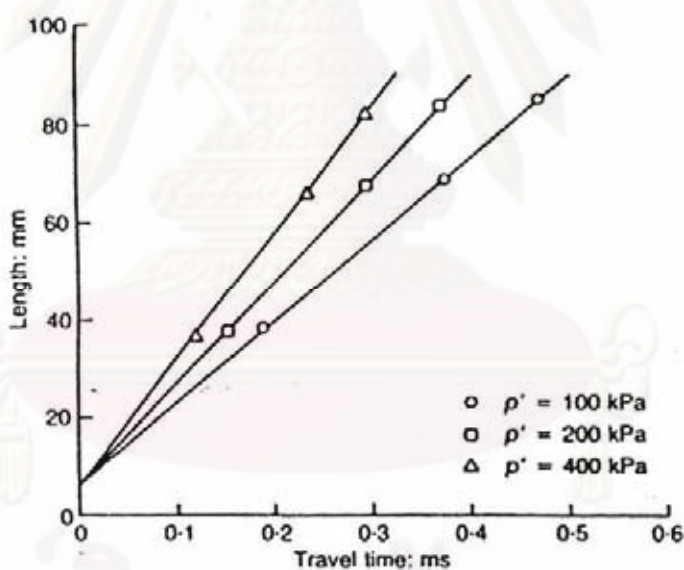
จากค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ค่าโมดูลัสแรงเฉือนของดิน (G_{\max}) สามารถหาได้จากสมการ
ดังนี้

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของดิน

2.3.4 การหาระยะทางประสิทธิผล

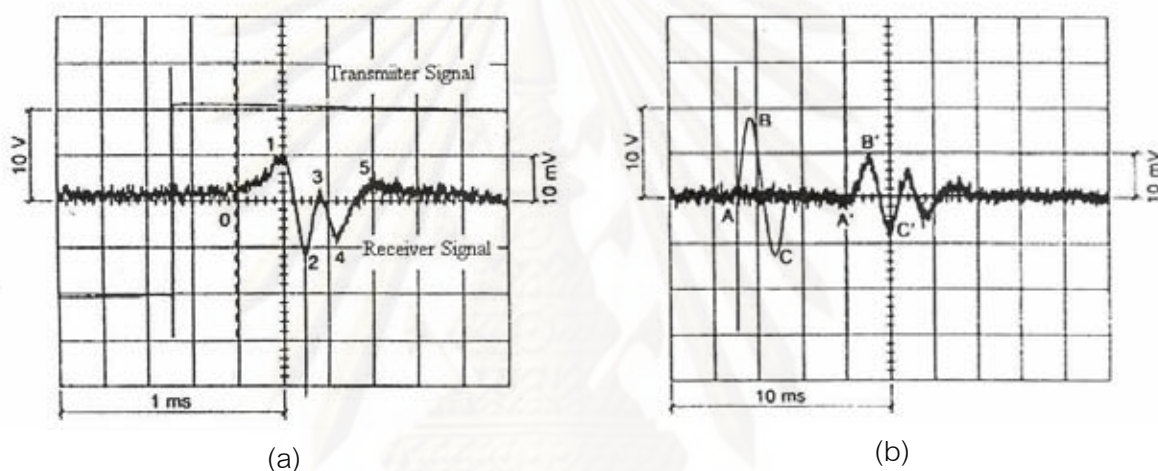
Viggiani & Atkinson (1995) ได้ทดสอบกับตัวอย่างดินที่มีความยาวแตกต่างกันและใช้ Bender element ยื่นเข้าไปในตัวอย่างด้านละ 3 มิลลิเมตร โดยทดสอบด้วยความเค้นที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นได้พล็อตกราฟระหว่าง travel time กับความยาวของตัวอย่างดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Travel time กับ ความยาวของตัวอย่าง (Viggiani & Atkinson, 1995)

2.3.5 การหาTravel time

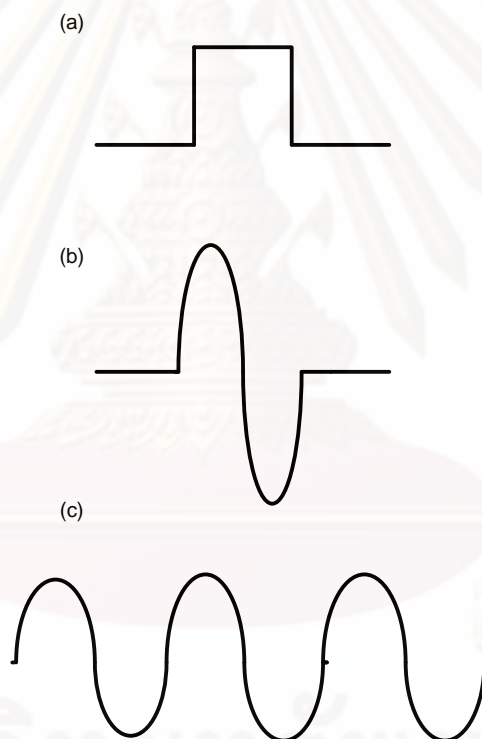
Viggiani & Atkinson (1995) ได้ทำการทดสอบโดยการส่งคลื่นเข้าไปในตัวอย่างดินสองรูปแบบ คือ คลื่นรูปซายน์ โดยใช้ความถี่ 1-10 kHz และ คลื่นรูปสี่เหลี่ยมโดยใช้ความถี่ 50 kHz ดังรูป 2.15 และได้แนะนำว่าสำหรับคลื่นสี่เหลี่ยมตำแหน่งที่ถูกต้องของการวัด travel time ของคลื่นแรงเฉือนจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 ในขณะที่ Dyvik & Madshus (1985) ได้เสนอไว้ สำหรับการวัด travel time ของคลื่นซายน์ จะวัดระหว่างจุด A-A', B-B' และ C-C' ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นรูปซายน์จะสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ออกมาเมื่อคลื่นเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณ



รูปที่ 2.15 (a) รูปแบบของคลื่นสัญญาณที่เกิดจากคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Viggiani & Atkinson, 1995) (b) รูปแบบของคลื่นสัญญาณที่เกิดจากคลื่นรูปซายน์ (Dyvik & Madshus, 1985)

2.3.6 รูปแบบของคลื่นกำเนิดสัญญาณ

สัญญาณที่ Bender element ตัวรับสัญญาณจะได้รับนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ส่งผ่านมาจาก Bender element ตัวส่งสัญญาณและผ่านมาที่ดินตามลำดับ ซึ่งแรงดันทางไฟฟ้ามีอยู่ 3 ตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือ รูปแบบของคลื่นกำเนิดสัญญาณ, ขนาดของคลื่น และความถี่ของคลื่น ซึ่งโดยปกติแล้ว รูปแบบของคลื่นที่นิยมใช้กันนั้นมีอยู่ 3 รูปแบบด้วยกันคือ คลื่นรูปสี่เหลี่ยม, คลื่นรูปไซน์ และคลื่นรูปซายน์ต่อเนื่องดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 โดยคลื่นเหล่านี้ถูกใช้ในการทดสอบด้วย Bender element อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้จะใช้คลื่นรูปสี่เหลี่ยมมาทำการทดสอบเพราะว่ามีความสัมพันธ์และการปฏิบัติงานที่ง่าย ในตารางที่ 2.1 เป็นการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบของคลื่น, ความถี่, แรงดันไฟฟ้า และชนิดของดินที่ทำการทดสอบโดยนักวิจัยคนก่อนๆ



รูปที่ 2.16 (a) ลักษณะของคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (b) ลักษณะของคลื่นรูปไซน์ และ(c) ลักษณะของรูปคลื่นรูปซายน์แบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.1 สรุปค่าต่างๆของรูปแบบของคลื่น, ขนาดและความถี่ของคลื่น และชนิดของดินที่ทำการทดสอบ (After Leong et al, 2005)

Reference	Voltage Applied			Soil Type	Method of Interpretation
	Wave form	Magnitude (V_{pp})	Frequency (Hz)		
Dyvik and Madshus (1985)	Square	20	5-100	Clay	First arrival (first reversal)
Bates (1989)	Square	10	2	Sand	First arrival (?*)
Argawal and Ishibashi (1991)	Sine	100-600	13560	Glass spheres	First arrival (?) First arrival (first deflection, first reversal)
Viggiani and Atkinson (1995)	Square	20	50	Clay	Characteristics point
	Sine		1000-10000		Cross correlation Cross power
Brignoli et al. (1996)	Sine	20	3000-10000	Clay	First arrival (first reversal)
				Sand	
Gijo et al. (1997)	Square	150	10000	Sand	First arrival (first deflection)
	Sine				
Arulnathan et al. (1998)	Sine	20	900-4500	Organic soil	First arrival (?) Characteristics point Cross correlation Cross power
Lohani et al. (1999)	Square	20	50	Clay	First arrival (first reversal)
Blewett et al. (2000)	Sine	-	200-10000	Sand	-
Diaz-Rodriguez et al. (2001)	Square	20	7	Silty clay	First peak
Kawaguchi et al. (2001)	Square	20	100	Clay	First arrival (average of first rise and first peak)
	Sine		1,2,4,8		
Pennington et al. (2001)	Sine	20	8000-25000	Clay	First arrival (first deflection)
Callisto and Rampello (2002)	Square	20	50	Clay	Average of first deflection and reversal point
	Sine		10000		Characteristics peak

* Not specified

บทที่ 3

วิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ

3.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างทดสอบ

3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

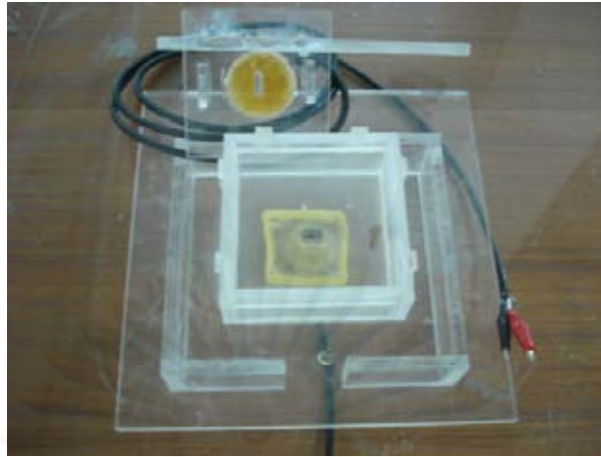
สถานที่เก็บตัวอย่างทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือทรายบริเวณนิคมอุตสาหกรรมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดชลบุรี

3.1.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง

วิธีการเก็บตัวอย่างโดยการเก็บตัวอย่างทรายที่ระดับความลึกประมาณ 1 เมตรจากผิวดินและเก็บตัวอย่างมาประมาณ 30 กิโลกรัม ลักษณะของทรายจะเป็นทรายเม็ดหยาบ ปนกับเศษหินและเปลือกหอยเล็กน้อย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดสอบงานวิจัย

- อุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดินดังรูปที่ 3.1
- คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลการทดสอบ
- Bender element เป็นอุปกรณ์ให้กำเนิดและรับสัญญาณ (Transmitter and Receiver) คลื่นความเค้นในตัวอย่างดังรูปที่ 3.2
- Function generator เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้าไปยัง Bender element ดังรูปที่ 3.3
- Oscilloscope เป็นอุปกรณ์สำหรับบันทึกสัญญาณทางไฟฟ้า และนำมาใช้วัดสัญญาณที่เกิดขึ้นของ Bender element ดังรูปที่ 3.4
- เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial) ดังรูปที่ 3.5
- ปั๊มดูดอากาศ (Vacuum pump)



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.2 Bender element



รูปที่ 3.3 Function generator



รูปที่ 3.4 Oscilloscope



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน(Triaxial)

3.3 การหาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น

3.3.1 การหาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตระแกรงร่อน (Sieve analysis)

3.3.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน (Specific gravity)

3.3.3 การหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)

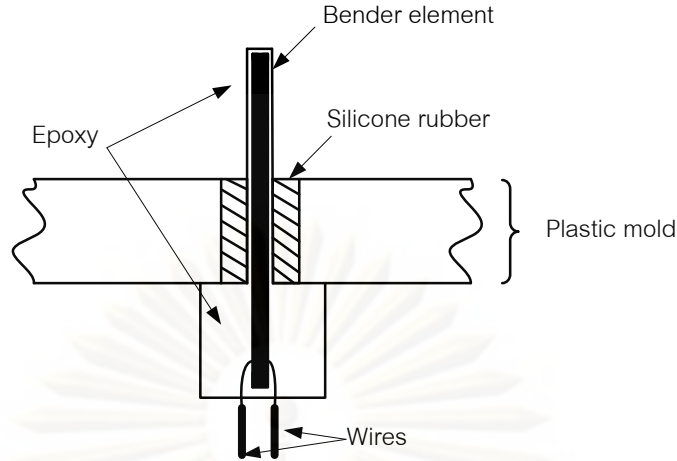
3.4 การติดตั้งแผ่นBender element ลงในอุปกรณ์ทดสอบ

3.4.1 การติดตั้งแผ่นBender element ลงในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน

1. เชื่อมสายไฟกับ Bender element โดยที่ตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) และตัวรับสัญญาณ (Receiver) จะแตกต่างกันดังรูปที่ 2.11
2. เคลือบ Epoxy ลงบนแผ่น Bender element ให้มีความหนารวมกับแผ่น Bender element ประมาณ 1 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันกระแสไฟรั่วและการช็อตกันของไฟฟ้าในแผ่น Bender element
3. เสียบ Bender element ที่เคลือบ Epoxy แล้วลงในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดินที่ด้านล่างและฝาของเครื่องมือที่เจาะรูไว้แล้ว
4. เท Epoxy ลงบนฝาและด้านล่างของอุปกรณ์ทดสอบเพื่อยึด Bender element ให้ติดกับอุปกรณ์ทดสอบ หลังจากนั้นเท silicone ลงในช่องว่างของอุปกรณ์ทดสอบกับ Bender element เพื่อไม่ให้แผ่น Bender element สามารถเคลื่อนไหวได้ดังรูปที่ 3.6

3.4.2 การติดตั้งแผ่นBender element ลงในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน

1. เชื่อมสายไฟกับ Bender element โดยที่ตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) และตัวรับสัญญาณ (Receiver) จะแตกต่างกันดังรูปที่ 2.11
2. เคลือบ Epoxy ลงบนแผ่น Bender element ให้มีความหนารวมกับแผ่น Bender element ประมาณ 1 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันกระแสไฟรั่วและการช็อตกันของไฟฟ้าในแผ่น Bender element
3. เจาะ Top cap และฐานของเครื่อง Triaxial เพื่อให้ใส่แผ่น Bender element ลงใน Top cap และฐานได้
4. เท Epoxy ลงใน Top cap และฐาน เพื่อยึดแผ่น Bender element กับ Top cap และฐาน ให้ติดกันดังรูปที่ 3.6 จากนั้นเท Silicone ลงใน Top cap และฐาน เพื่อให้แผ่น Bender element สามารถเคลื่อนไหวได้



รูปที่ 3.6 การติดตั้ง Bender element ลงบนอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน

3.5 วิธีการทดสอบในเครื่องมือทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน

ในการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดินนั้นนั้นหลักๆแล้วจะแบ่งเป็นสองส่วนด้วยกันโดยส่วนแรกคือการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนของดินที่มีความหนาแน่นเท่ากันทั้งตัวอย่าง โดยกำหนดความหนาแน่นของตัวอย่างทรายไว้สามลักษณะคือ ทรายหลวม ทรายหลวมปานกลาง และ ทรายแน่น ด้วยวิธี การตกแบบอิสระ (Air pluviation) หลังจากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนกับน้ำหนักกดแวนดิ่งที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 KPa เพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูลข้อมูล จากนั้นทำการทดสอบในส่วนที่ 2 ทำการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างโดยเตรียมตัวอย่างทรายออกเป็น 2 กรณี โดยกรณีที่ 1 เป็นการเตรียมตัวอย่างทรายที่มีลักษณะเป็นทรายหลวมเป็นชั้นบางๆ อยู่ระหว่างชั้นทรายที่มีลักษณะเป็นทรายแน่น กรณีที่ 2 เป็นการเตรียมตัวอย่างทรายที่มีลักษณะเป็นทรายแน่นเป็นชั้นบางๆ อยู่ระหว่างชั้นทรายที่มีลักษณะเป็นทรายหลวมและทั้งสองกรณีจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนกับน้ำหนักกดแวนดิ่งที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 KPa เหมือนกับขั้นตอนที่ 1

3.5.1 การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนในการทดสอบสำหรับทดสอบในเครื่องทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน

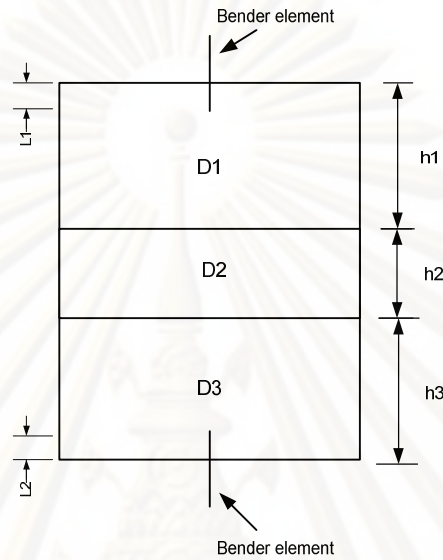
ขั้นตอนที่ 1

1. นำตัวอย่างทรายไปล้างน้ำให้สะอาดหลังจากนั้นนำเข้าเตาอบเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้ตัวอย่างแห้งสนิท
2. นำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงโดยคัดขนาดที่มากกว่าตะแกรงเบอร์ 8 และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ออก
3. เตรียมตัวอย่างโดยการปล่อยทรายให้ตกแบบอิสระผ่านกรวยกลมในเครื่องมือทดสอบให้ได้ความสูงของตัวอย่าง 10 cm.
4. นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของตัวอย่าง (Dry density γ_d) โดยให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพหลวมมาก ($D_r \sim 10\%$)
5. นำตัวอย่างที่เตรียมเรียบร้อยแล้วติดตั้ง Dial gauge เพื่อวัดการทรุดตัวของตัวอย่าง
6. ใส่น้ำหนักกระทำไปบนตัวอย่าง โดยใส่น้ำหนักดังนี้ 5, 10, 15, 20, 25 KPa. วัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในแต่ละน้ำหนักที่กระทำ
7. ทำการทดสอบใหม่ โดยเปลี่ยนความหนาแน่นของตัวอย่างเป็น สภาพแน่นปานกลาง ($D_r \sim 45\%$) และ สภาพแน่น ($D_r \sim 75\%$) ตามลำดับและปฏิบัติเช่นเดียวกันกับข้อ 5-6

ขั้นตอนที่ 2

1. เตรียมตัวอย่างทรายโดยให้ตัวอย่างทรายมีความหนาแน่นที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3.7 และตารางที่ 3.1
2. ในการเตรียมตัวอย่างนั้น ในชั้น D1 และ D3 จะกำหนดเป็นสภาพแน่น (Dense) ส่วนในชั้น D2 จะกำหนดให้เป็นสภาพหลวม (Loose) และขณะที่กำลังเตรียมตัวอย่างให้ทำการหาความหนาแน่นของตัวอย่างในแต่ละชั้นที่เตรียมตัวอย่างด้วย
3. นำตัวอย่างที่เตรียมเรียบร้อยแล้วติดตั้ง Dial gauge เพื่อวัดการทรุดตัวของตัวอย่าง

4. ใส่น้ำหนักกระทำไปบนตัวอย่าง โดยใส่น้ำหนักดังนี้ 5, 10, 15, 20, 25 KPa. วัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในแต่ละน้ำหนักที่กระทำ
5. ทำการทดสอบเงื่อนไข 3 ตัวอย่างแล้วทดสอบเงื่อนไขใหม่ ดังตารางที่ 3.1 และปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 2-4 ตามลำดับ



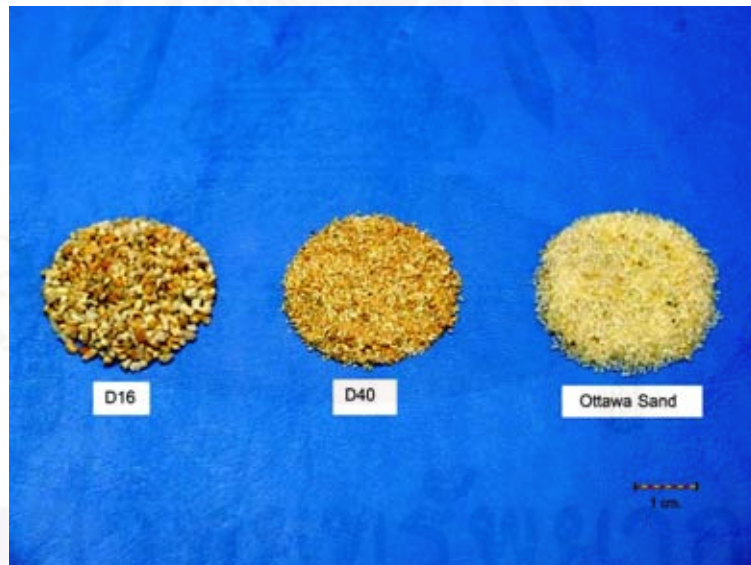
รูปที่ 3.7 ลักษณะของตัวอย่างที่ทำการทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน

ตารางที่ 3.1 ความสูงของตัวอย่างที่ทำการทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน

เงื่อนไข	h1 (ซม.)	D1	h2 (ซม.)	D2	h3 (ซม.)	D3
A	4	Dense	2	Loose	4	Dense
B	5	Dense	1	Loose	4	Dense
C	4	Loose	2	Dense	4	Loose
D	5	Loose	1	Dense	4	Loose

3.6 วิธีการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial)

ทำการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนที่ติดตั้ง Bender element เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือน ความหนาแน่น และ สภาวะของหน่วยแรงของดินทรายที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งนี้การทดสอบจะทำการทดสอบ Triaxial ไม่ระบายน้ำโดยใช้ตัวอย่างดินทรายที่มีสภาวะการอัดตัวแบบ Isotropic ซึ่งในที่นี้ทรายที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ทรายที่มีขนาดเดียวกัน (Uniform sand) ด้วยกัน 3 ชนิด คือ ทรายเม็ดหยาบ (D16) ขนาดของเม็ดทราย (Particle size) 1.180 mm. ทรายเม็ดละเอียด (D40) ขนาดของเม็ดทราย 0.425 mm. และทราย Ottawa ขนาดของเม็ดทราย 0.600 mm. ดังรูปที่ 3.8 โดยที่ความหนาแน่นของตัวอย่างดินที่ใช้จะมีค่าครอบคลุมค่าอัตราส่วนความหนาแน่นสูงสุด และ ต่ำสุด (Maximum และ Minimum void ratios) ของดินทรายที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะต้องได้รับการปรับปรุงจนสามารถวิเคราะห์ความหนาของบริเวณที่เกิด Localization ได้อย่างค่อนข้างแม่นยำด้วยการวาดตาราง (Grid) ลงบนแผ่นยางหุ้มตัวอย่าง (Membrane) และมีระบบวิเคราะห์ภาพถ่ายประกอบ



รูปที่ 3.8 ทรายตัวอย่างในการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน

3.6.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบในเครื่องทดสอบสามแกน

1. สวม Rubber membrane ลงบนฐานของเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน
2. ชั่งน้ำหนักทรายตามน้ำหนักที่ใช้ในแต่ละการทดสอบ โดยน้ำหนักทรายที่ชั่งควรมีน้ำหนักมากกว่าน้ำหนักที่ใช้ในตัวอย่างเล็กน้อย

3. ติดตั้งกระบอกลูกสูบไว้บนฐานของเครื่องทดสอบให้ครอบ Rubber membrane ไว้ และในส่วนด้านบนของกระบอกลูกสูบให้พับ Rubber membrane ที่พื้นออกมาคลุมกระบอกลูกสูบ
4. เปิดปั๊มดูดอากาศประมาณ 5-10 KPa. เพื่อให้ Rubber membrane ที่อยู่ในกระบอกลูกสูบตึงเรียบ
5. ใส่ทรายที่เตรียมไว้ลงใน Rubber membrane ด้วยวิธีการตกแบบอิสระผ่านกรวยกลม โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายกรวยกับผิวหน้าของทรายเท่ากับตลอดในขณะเตรียม
6. ปาดผิวหน้าสุดท้ายของทรายให้เรียบ แล้วค่อยๆ ติดตั้ง Top cap ลงบนผิวหน้าของทราย จากนั้นพับปลายของ Rubber membrane ที่เหลือปิดหุ้ม Top cap สุดท้ายใส่ O-Ring ที่ Top cap เพื่อป้องกันการไหลผ่านของอากาศออกจากตัวอย่างดังรูปที่ 3.9 แสดงการเตรียมตัวอย่างที่พร้อมทดสอบ



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างพร้อมทดสอบบนเครื่องแรงอัดสามแกน

3.6.2 ขั้นตอนการอัดตัวอย่างด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum)

เนื่องจากจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการหาคุณสมบัติที่ได้จากทรายแห้งและต้องการถ่ายภาพการเกิด Localization ได้อย่างชัดเจน ทางผู้วิจัยจึงนำระบบดูดอากาศเข้ามาใช้แทนการอัดแรงดันตัวอย่างด้วยน้ำซึ่งให้คุณสมบัติเช่นเดียวกัน

ซึ่งในการทดสอบนี้การเพิ่มแรงดันให้กับตัวอย่างกระทำโดยปรับวาล์วควบคุมแรงดันภายในตัวอย่างโดยการทดสอบจะแบ่งแรงดันออกเป็นสามกรณี คือ กรณีทดสอบที่แรงดันต่ำ กรณีทดสอบแรงดันปานกลางและ กรณีทดสอบที่แรงดันสูง ซึ่งมีแรงดันตามลำดับคือ 25, 50 และ 80 KPa.

3.6.3 ขั้นตอนการวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shearwave measurement)

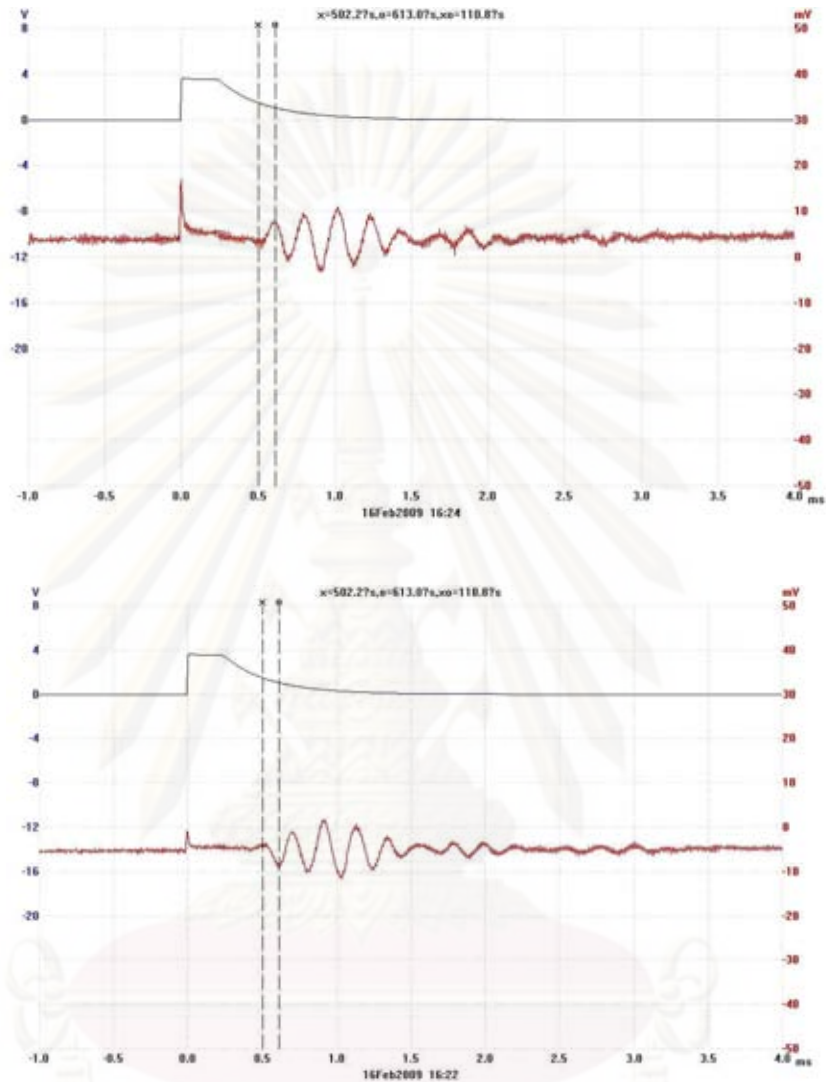
ในงานวิจัยนี้ทำการวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างการทดสอบ 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ การวัดในช่วงอัดตัวอย่างด้วยสุญญากาศ (Vacuum) และการวัดในช่วงที่ให้กำลังเฉือนกับตัวอย่าง (Shearing) โดยวิธีการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีดังนี้

ต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 2.12 การทดสอบจะเริ่มโดย function generator ให้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยัง Oscilloscope และ Bender element ตัวส่งสัญญาณ Bender element จะแปลงสัญญาณจากสัญญาณไฟฟ้าเป็นพลังงานกลทำให้เกิดการสั่นไหวในตัว Bender element เกิดเป็นคลื่น S wave ลงไปในตัวอย่างดินจากนั้นคลื่น S wave จะแพร่กระจายจากดินไปถึง Bender element ตัวรับสัญญาณ ตัวรับสัญญาณก็จะแปลงสัญญาณทางกลจากคลื่นกลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าไปใน Oscilloscope ผลต่างของเวลาที่ตัวส่งสัญญาณมาถึงตัวรับสัญญาณมาถึงจะเป็นเวลาที่คลื่นแรงเฉือน (Travel time) มาถึงซึ่งหาได้ดังรูปที่ 3.10

ในการวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนจำเป็นต้องส่งสัญญาณความเค้นในทิศทางตรงกันข้ามกันด้วย ทั้งนี้เพื่อนเป็นการตรวจว่าสัญญาณที่ได้นั้นจะเป็นคลื่นแรงเฉือนจริงหรือไม่ ซึ่งสัญญาณของคลื่นที่ได้จะมีลักษณะทิศทางตรงกันข้ามกัน (Polarize) ดังรูปที่ 3.10 ในการส่งสัญญาณความเค้นในทิศทางตรงกันข้ามกันสามารถทำได้โดยการสลับขั้วสัญญาณของตัวส่งสัญญาณ

การอ่านสัญญาณที่เกิดจากตัวรับสัญญาณ อาจทำได้ยากเนื่องจากสัญญาณที่ Bender element ตัวรับสัญญาณให้มีค่าน้อยมากอยู่ในระดับหน่วย mV ซึ่งในระดับนั้นจะมีสัญญาณรบกวนทาง

ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แต่สามารถแก้ไขได้โดยทำการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเช่นการต่อสายดิน (Ground) หรือใช้ โปรแกรมกรองสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่แท้จริง



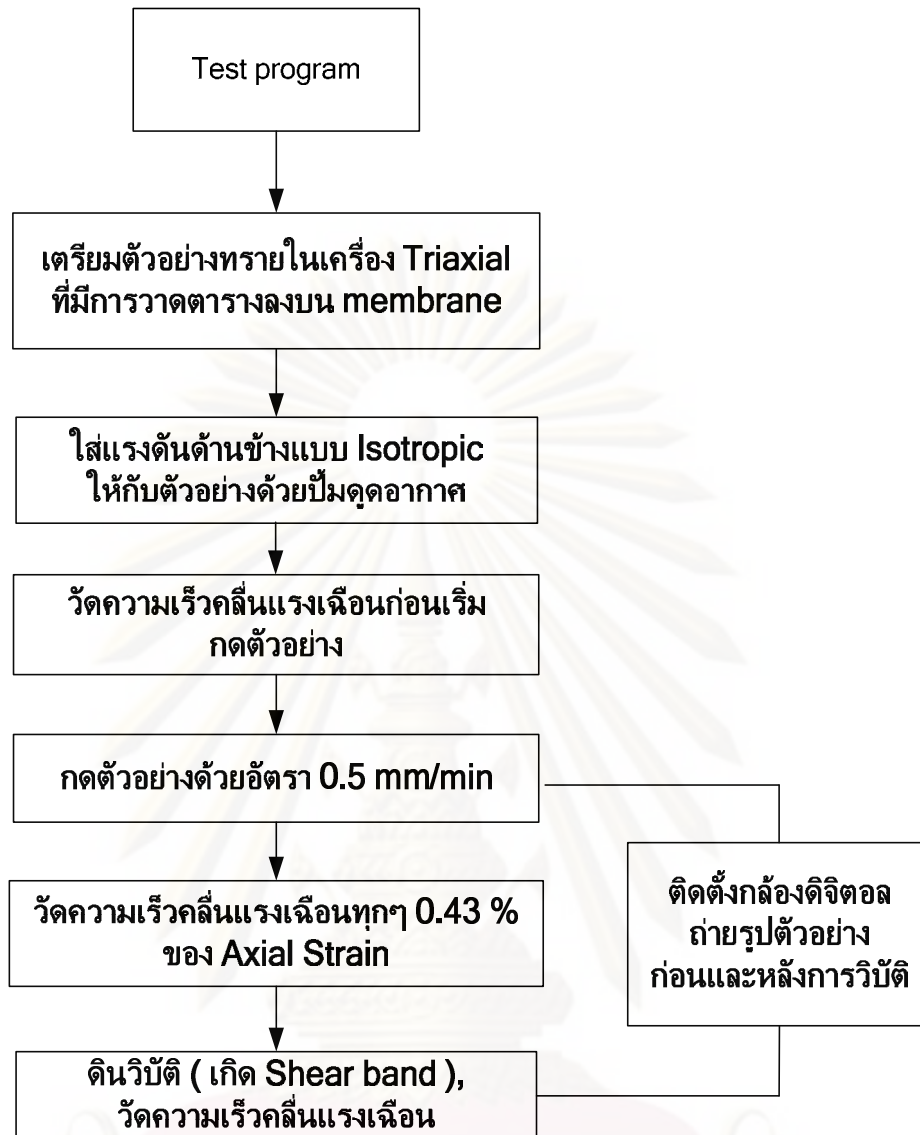
รูปที่ 3.10 ลักษณะสัญญาณของ Bender element ที่เกิดขึ้น

3.6.4 ขั้นตอนการอัดตัวอย่างด้วยระบบสุญญากาศและการวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Vacuum & Shearwave measurement)

ในงานวิจัยนี้จะใช้ปั๊มดูดอากาศ ดูดอากาศออกจากตัวอย่างแทนการอัดแรงดันด้วยน้ำซึ่งงานวิจัยนี้จะกำหนดแรงดูดที่ให้กับตัวอย่างไว้ดังนี้ 25, 50 และ 80 KPa. โดยจะเริ่มต้นวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนของทุกตัวอย่างที่ 10 KPa. และเพิ่มแรงดูดขึ้นไปทีละ 10 KPa. และวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน ณ จุดที่เพิ่ม ทำการเพิ่มแรงดูดไปเรื่อยๆจนได้แรงดูดที่ต้องการและวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือน ณ แรงดูดที่ต้องการ

3.6.5 การทดสอบหากล้างรับน้ำหนักของดินและวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shearing & Shearwave measurement)

1. กำหนดอัตราการกดน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีควบคุมการทดสอบแบบ Strain control โดยควบคุมอัตราการกดน้ำหนักไว้ที่ 0.5 mm/min
2. ในขณะที่ทำการกดตัวอย่างจะต้องเปิดวาล์วของปั๊มดูดอากาศไปด้วยเพื่อให้แรงดันภายในตัวอย่างคงที่และได้แรงดันตามที่กำหนด
3. เดินเครื่องกดน้ำหนักพร้อมบันทึก พร้อมบันทึกค่าแรงกดจาก Proving ring ค่า Strain จาก Dial gauge พร้อมทั้งวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน โดยการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะวัดทุก 20 ช่องของ Dial gauge หรือทุกๆ 0.508 mm.
4. ในขณะที่ทำการทดสอบทำการบันทึกภาพถ่ายในเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปร่างของตัวอย่างก่อนและหลังวิบัติ
5. ทำการทดสอบจนกระทั่งตัวอย่างเกิดระนาบวิบัติอย่างชัดเจน (โดยทั่วไปควรทำการทดสอบไปเรื่อยๆจนค่า Strain ประมาณ 10-13%



บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

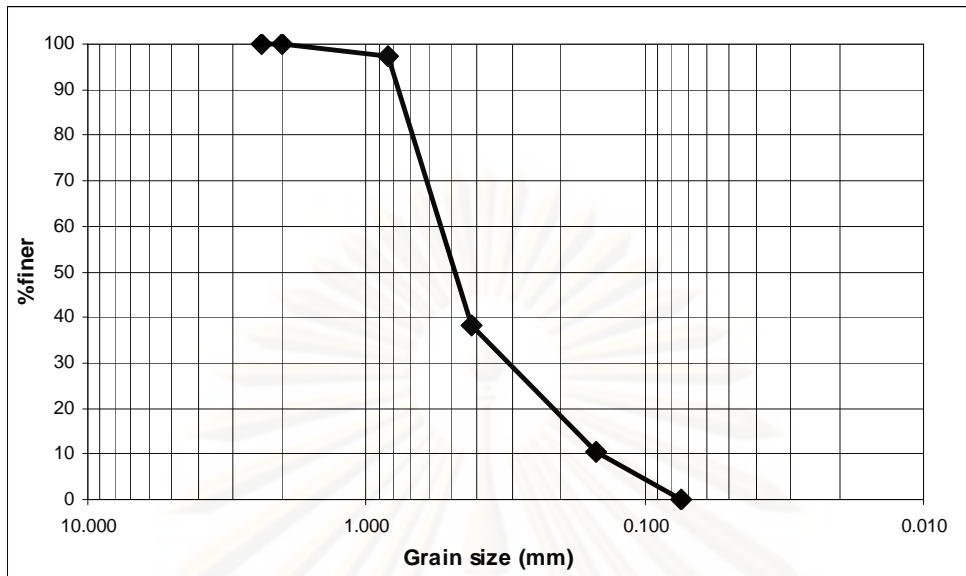
ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนแรกเป็นการทดสอบหาค่าความไวตัวของความเร็วคลื่นแรงเฉือน ในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่างดิน โดยใช้ Bender element โดยทดสอบจะแบ่งเป็นสองลักษณะ คือ ลักษณะแรกทดสอบโดยให้ทรายที่มีความหนาแน่นต่ำเป็นชั้นบางอยู่ระหว่างทรายที่มีความหนาแน่นสูง ลักษณะที่สองให้ทรายที่มีความหนาแน่นสูงเป็นชั้นบางอยู่ระหว่างทรายที่มีความหนาแน่นต่ำ และเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วัดได้จริงกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณ สำหรับการทดสอบในส่วนที่สองเป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระนาบวิบัติที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทรายที่ทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน ซึ่งตัวอย่างทรายที่ทดสอบจะใช้ตัวอย่างทรายที่คัดขนาดให้มีขนาดเท่ากัน โดยใช้จะใช้ทรายเม็ดหยาบ (D16) เม็ดละเอียด (D40) และทรายOttawa การทดสอบจะทำเหมือนการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักแบบสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ

สำหรับการศึกษาและทดสอบในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในส่วนที่เกิด Shear band โดยพิจารณาถึงผลของ หน่วยแรงประสิทธิผล, คุณสมบัติทางกายภาพ และพฤติกรรมของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างการทดสอบหาค่ากำลังที่ทำการศึกษาในตัวอย่างทรายด้วยกันสามขนาด

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบ

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายในการทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของทราย

ตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบเป็นทรายจังหวัดชลบุรี ลักษณะของทรายจะเป็นทรายเม็ดหยาบ ปนกับเศษหินและเปลือกหอยเล็กน้อย และเมื่อนำมาหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, G_s) $G_s = 2.68$ จากผลการทดสอบขนาดคละได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากผลการทดสอบขนาดคละได้ค่า $D_{50} = 0.48$ mm. ค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Coefficient of uniformity, C_u) $C_u = 3.691$ ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of concavity, C_c) $C_c = 1.25$ โดยมีค่าอัตราส่วนช่องว่างสูงสุด (Maximum void ratio, e_{max}) $e_{max} = 1.027$ และค่าอัตราส่วนช่องว่างต่ำสุด (Minimum void ratio, e_{min}) $e_{min} = 0.528$



รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบขนาดคละของตัวอย่างทราย

4.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน

ตัวอย่างทรายที่นำมาทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสามแกนนั้นจะเป็นทรายที่นำมาจากจังหวัดชลบุรีเช่นเดียวกับการทดสอบแรก แต่ในการทดสอบนี้จะนำทรายมาคัดตามขนาดที่กำหนดไว้สองขนาดคือ ทรายเม็ดหยาบ (D16), ทรายเม็ดละเอียด (D40) และในการทดสอบนี้ได้เพิ่มทราย Ottawa เข้ามาทำการทดสอบด้วย ซึ่งคุณสมบัติของทรายที่ใช้ทดสอบในเครื่องมือทดสอบแรงอัดสามแกนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของทรายที่นำมาใช้ในการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน

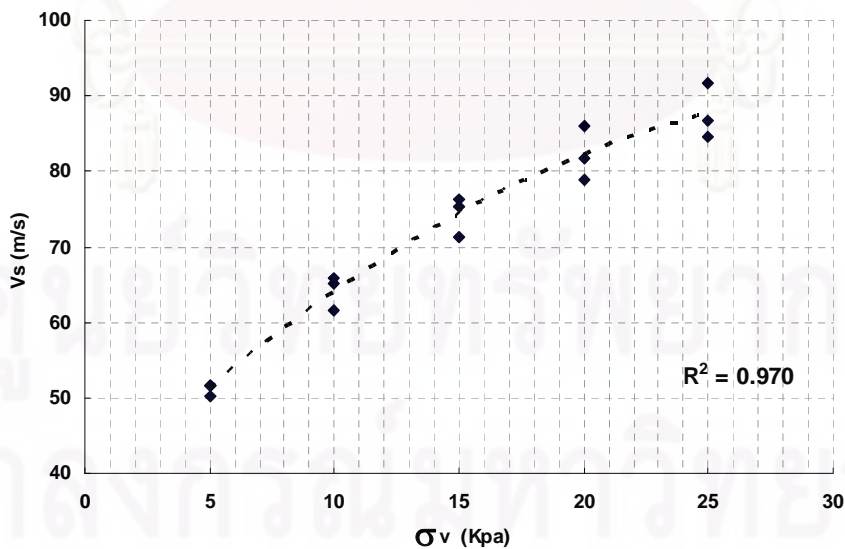
Sand	Grain size (mm.)	Gs	e_{max}	e_{min}
D16	1.180	2.69	1.067	0.713
D40	0.425	2.72	1.117	0.808
Ottawa	0.600	2.65	0.604	0.459

4.3 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นแรงเฉือนในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน

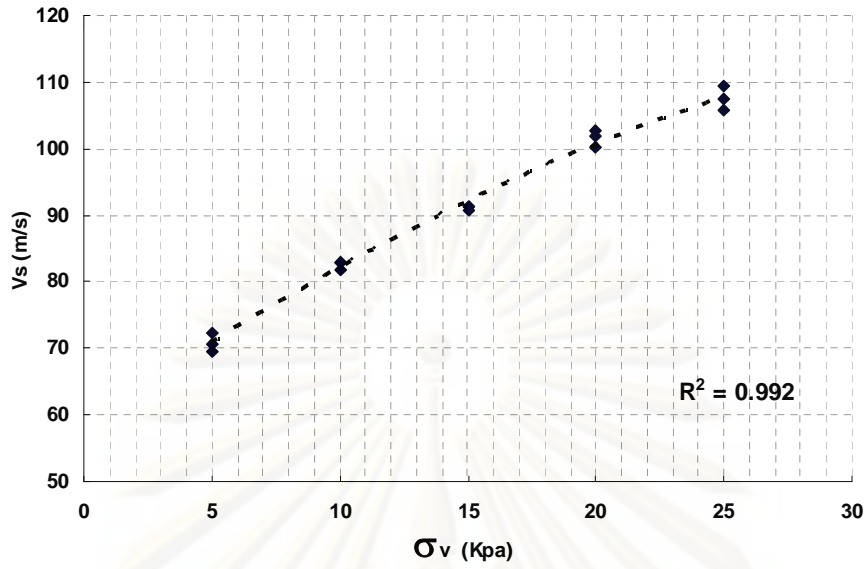
4.3.1 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อความเร็วคลื่นแรงเฉือน

ในการทดสอบหาความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) ในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดินพบว่าเมื่อทำการเพิ่มแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง (σ'_v) พบว่าค่าความเร็วของความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเค้นในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะแปรผันตรงกับแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งซึ่งมีความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลแบบยกกำลังสอง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2-4.4 และจากค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) และค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio, e) ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5

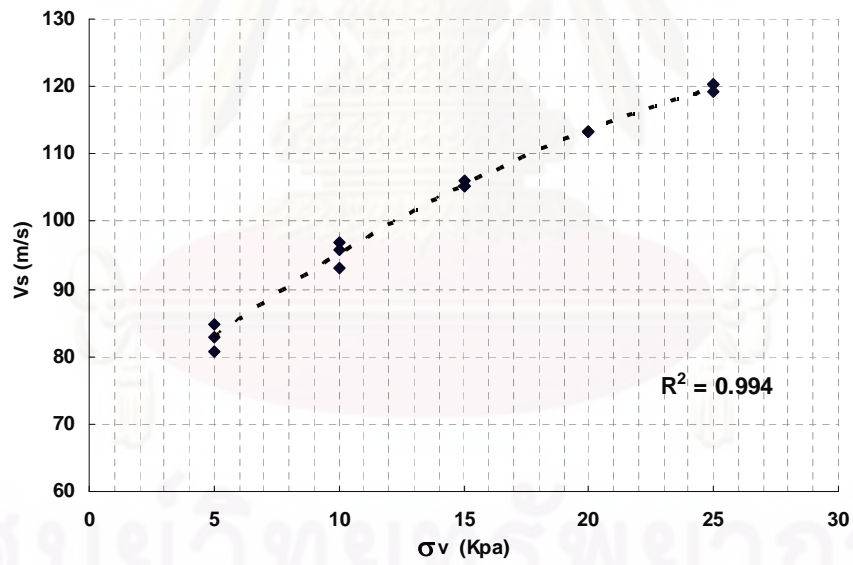
เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในแต่ละค่าแรงประสิทธิผลในแนวตั้งโดยได้จากการหาสมการเส้นตรงที่พาดผ่านความเร็วคลื่นแรงเฉือนของแต่ละหน่วยแรงได้ดังนี้ ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรง 5KPa. $V_{s_{5KPa}} = (1.499 - e)/k$, ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรง 10KPa. $V_{s_{10KPa}} = (1.640 - e)/k$ ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรง 15KPa. $V_{s_{15KPa}} = (1.743 - e)/k$, ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรง 20KPa $V_{s_{20KPa}} = (1.812 - e)/k$ และค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรง 25KPa $V_{s_{25KPa}} = (1.840 - e)/k$ เมื่อ e คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง และ k คือค่าคงที่ซึ่งมีค่า 0.010



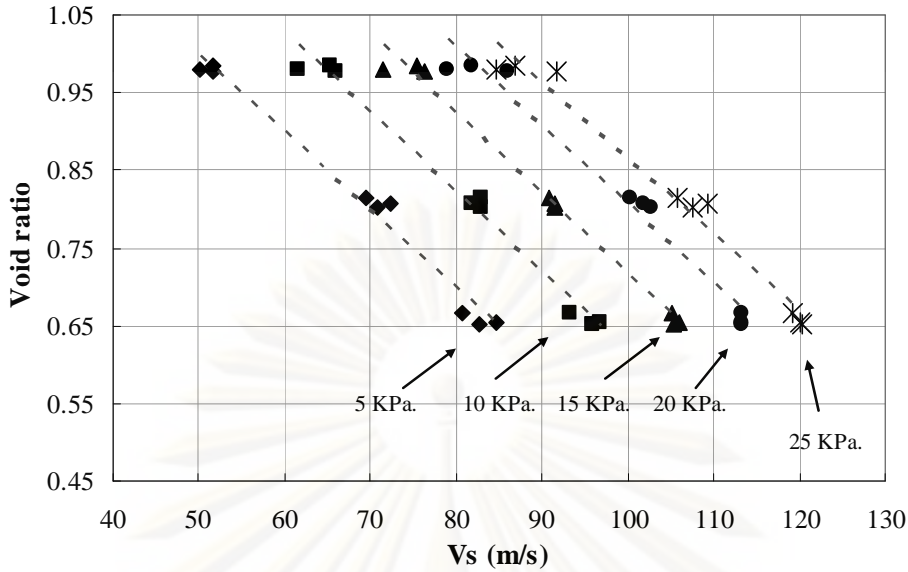
รูปที่ 4.2 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในสภาพหลวมมาก ($D_r=10\%$)



รูปที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างสภาพแน่นปานกลาง ($D_r=45\%$)



รูปที่ 4.4 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างในสภาพแน่น ($D_r=75\%$)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนช่องว่าง(Void ratio)

4.3.2 ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากการตรวจวัดและการคำนวณ

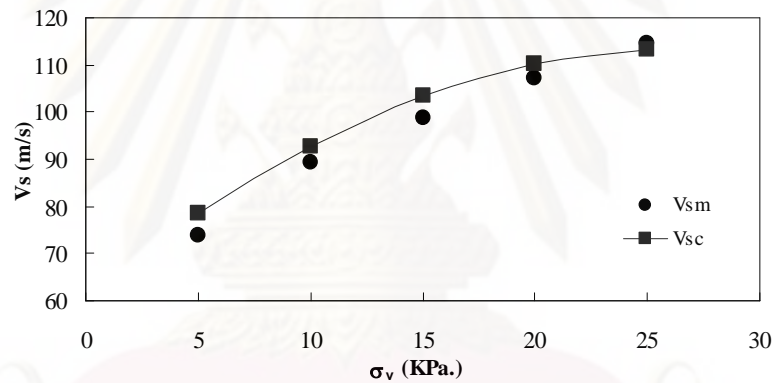
ในการทดสอบนี้ได้ทำการวัดคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างทรายที่มีความหนาแน่นไม่คงโดยจะเปรียบเทียบค่าระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัด (Vsm) กับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณ (Vsc) ที่มาจากสมการในรูปที่ 4.5 โดยตัวอย่างที่ทำการทดสอบแบ่งออกเป็นสี่เงื่อนไขตามตารางที่ 3.1 ซึ่งผลการทดสอบความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในแต่ละเงื่อนไขมีดังนี้

ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไขA โดยชั้นD1 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างโดยเฉลี่ย (e_{av}), $e_{av1}=0.643$ ชั้นD2 ค่า $e_{av2}=0.866$ และชั้นD3 $e_{av3}=0.634$ และสำหรับค่าเปรียบเทียบของความเร็วคลื่นแรงเฉือนพบว่าค่า (Vsc) จะมีค่าสูงกว่า (Vsm) เป็นส่วนใหญ่ โดยค่าความแตกต่างของค่าทั้งสองตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งที่ 5, 10, 15, 20 และ25KPa. ตามลำดับดังนี้ 6.49%, 4.01%, 4.54%, 2.80% และ 1.22% ดังรูปที่4.6

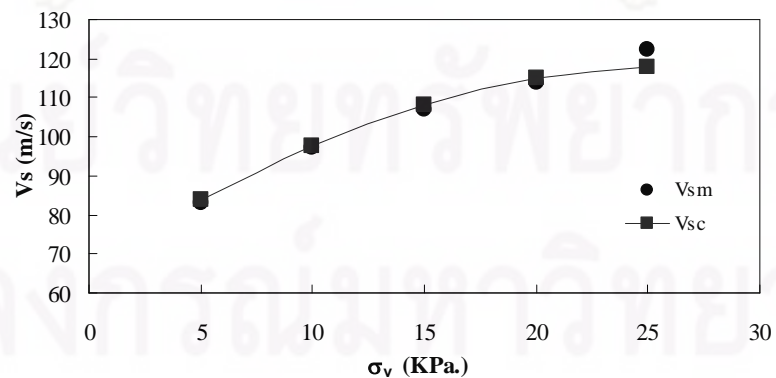
ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไขB โดยชั้นD1 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างโดยเฉลี่ย (e_{av}), $e_{av1}=0.652$ ชั้นD2 ค่า $e_{av2}=0.802$ และชั้นD3 $e_{av3}=0.622$ และสำหรับค่าเปรียบเทียบของความเร็วคลื่นแรงเฉือนพบว่าค่า (Vsc) ใกล้เคียงกับค่า (Vsm) โดยค่าความแตกต่างของค่าทั้งสองตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่งที่ 5, 10, 15, 20 และ25KPa. ตามลำดับดังนี้ 0.84%, 0.50%, 1.31%, 1.14% และ 3.59% ดังรูปที่4.7

ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไขC โดยชั้นD1 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างโดยเฉลี่ย (e_{av}), $e_{av1}=0.823$ ชั้นD2 ค่า $e_{av2}=0.598$ และชั้นD3 $e_{av3}=0.808$ และสำหรับค่าเปรียบเทียบของความเร็วคลื่นแรงเฉือนพบว่าค่า (V_{sc}) มีค่าต่ำกว่า (V_{sm}) เป็นส่วนใหญ่ โดยค่าความแตกต่างของค่าทั้งสองตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่ 5, 10, 15, 20 และ25KPa. ตามลำดับดังนี้ 3.98%, 0.76%, 1.05%, 1.77% และ 5.17% ดังรูปที่4.8

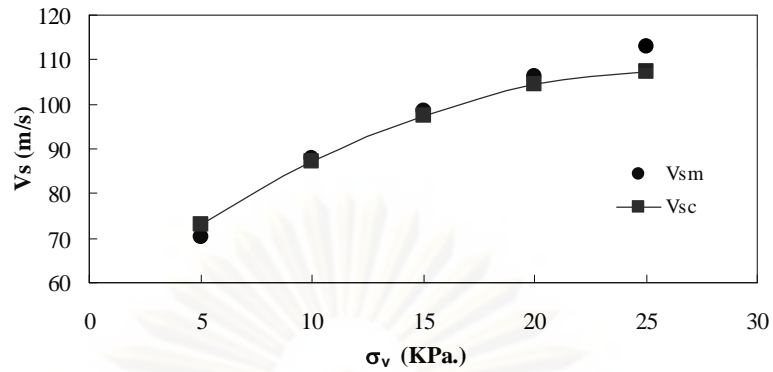
ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไขD โดยชั้นD1 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างโดยเฉลี่ย (e_{av}), $e_{av1}=0.861$ ชั้นD2 ค่า $e_{av2}=0.553$ และชั้นD3 $e_{av3}=0.823$ และสำหรับค่าเปรียบเทียบของความเร็วคลื่นแรงเฉือนพบว่าค่า (V_{sc}) มีค่าต่ำกว่า (V_{sm}) เป็นส่วนใหญ่ โดยค่าความแตกต่างของค่าทั้งสองตามค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่ 5, 10, 15, 20 และ25KPa. ตามลำดับดังนี้ 2.56%, 2.01%, 1.19%, 2.95% และ 5.44% ดังรูปที่4.9



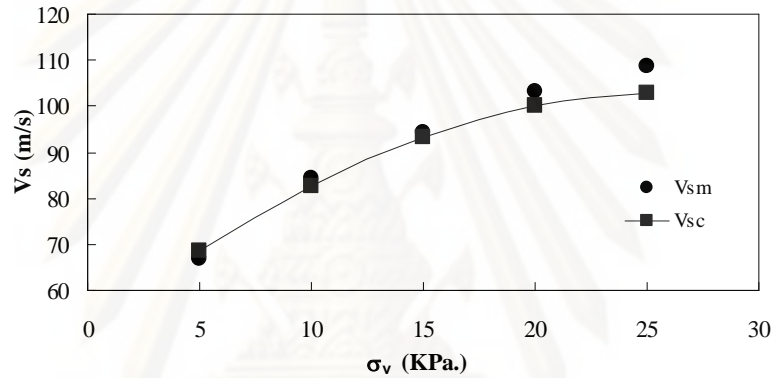
รูปที่4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข A



รูปที่4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข B



รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข C

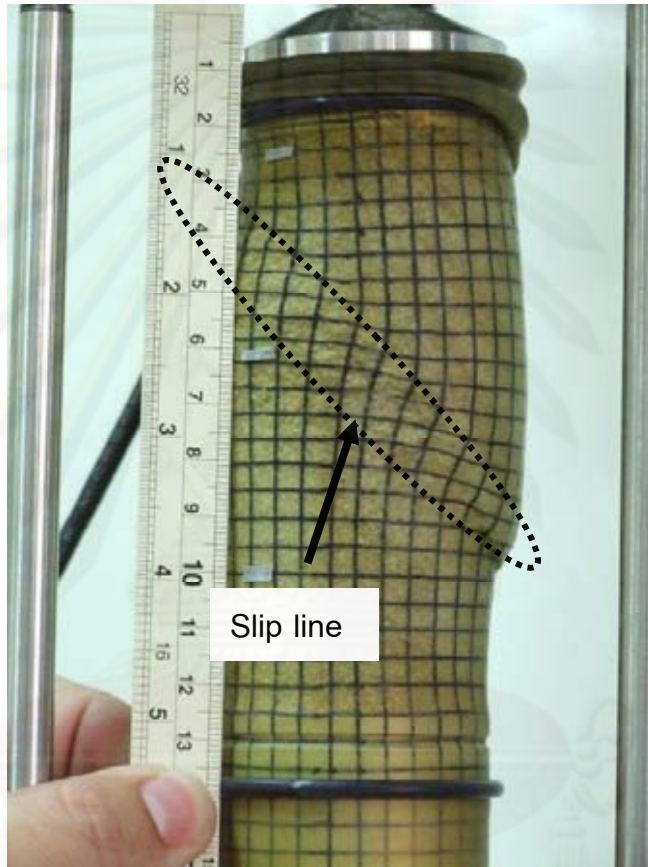


รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข D

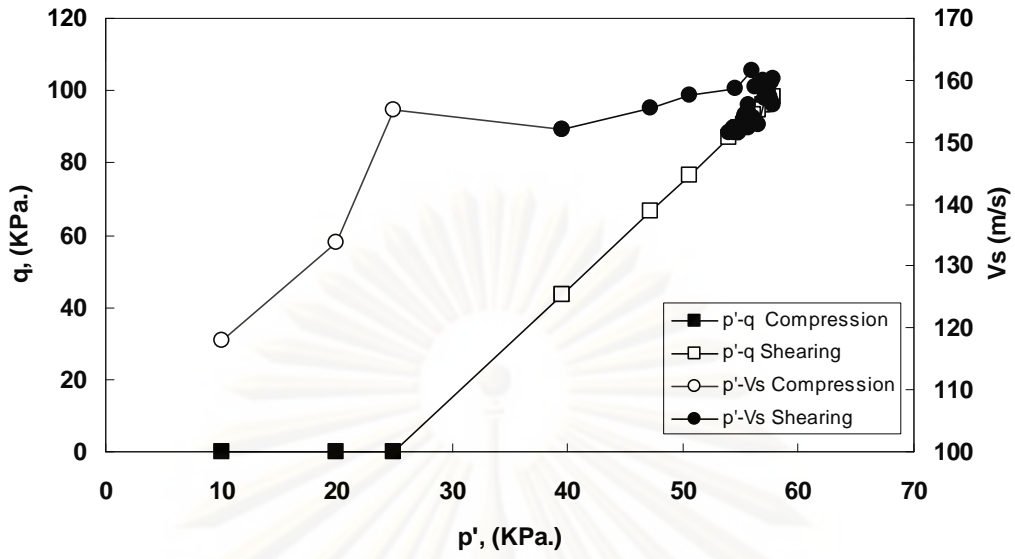
4.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Undrained Triaxial test)

ในการทดสอบหารับน้ำหนักของตัวอย่างดินจะกระทำเมื่อทำการทดสอบการบีบอัดตัวอย่าง (Compression) เสร็จสิ้นแล้ว และในขณะที่ทำการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนของดิน ทำการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนไปพร้อมๆกัน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.11-4.28 โดยในรูปจะประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล (mean effective stress, p') และค่าความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress, q) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลและค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) ซึ่งเห็นว่าเมื่อทำการทดสอบผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันด้านข้าง (Confining pressure) ให้กับตัวอย่าง และเมื่อทำการกดตัวอย่าง จะเห็นว่าค่าแนวโน้มของความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนถึงบริเวณที่ใกล้กับจุดสูงสุดของค่าความเค้น

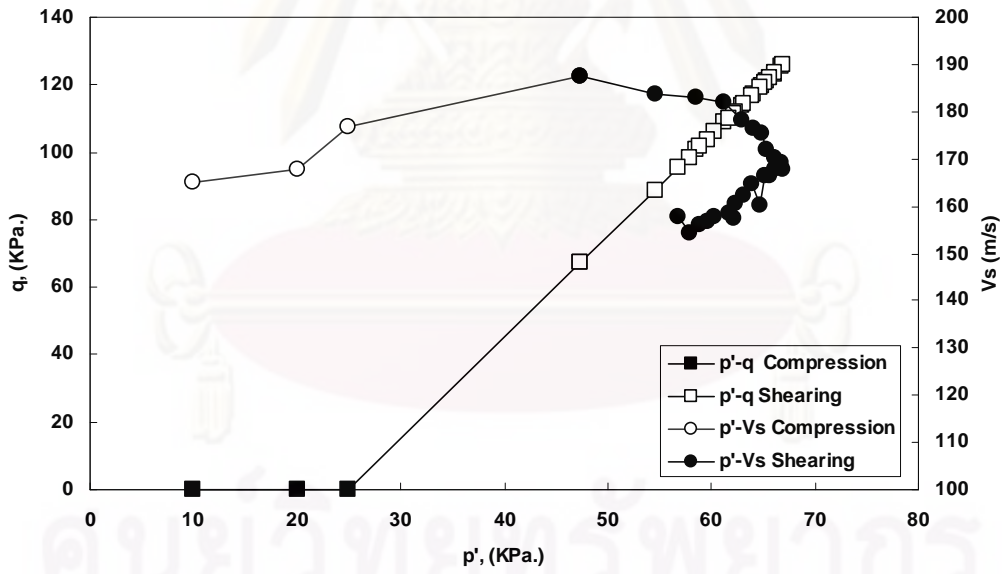
เฉลี่ยประสิทธิผล (p') หลังจากนั้นความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะลดลงเล็กน้อย และเมื่อถึงค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในช่วงที่พ้นจากค่า p' สูงสุดแล้วจะเห็นว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะลดลงเป็นอย่างมาก สาเหตุอันเนื่องมาจากตัวอย่างดินเริ่มเกิดรอยเลื่อน (Slip line) หรือระนาบวิบัติ (failure line) และทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของตัวอย่าง (Non homogenous) ก่อให้เกิดการแยกชั้นของความหนาแน่นของดิน ในบริเวณที่เกิดระนาบวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งทำให้ความหนาแน่นในบริเวณดังกล่าวลดลงเป็นสาเหตุที่ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนลดลงเป็นอย่างมาก



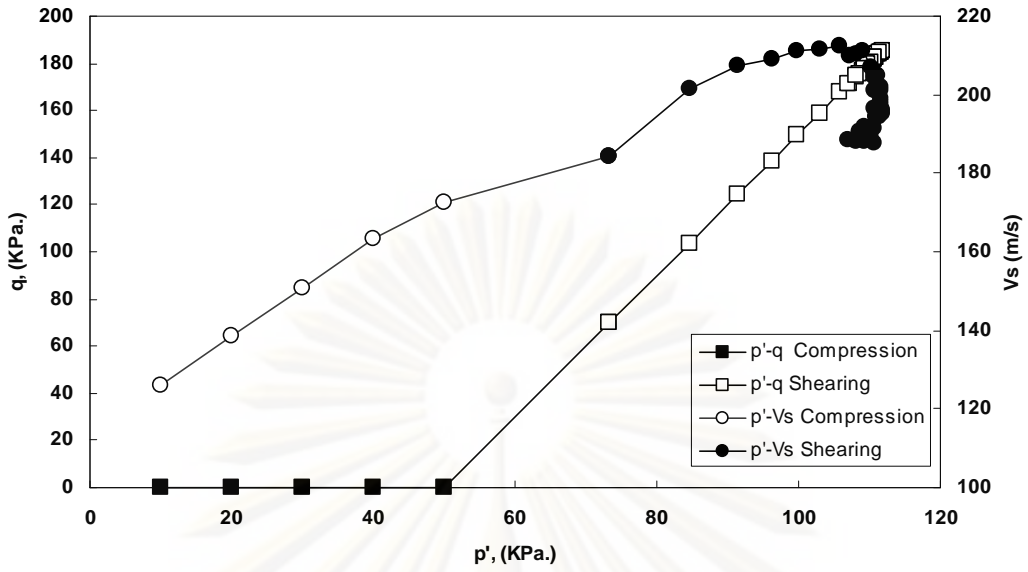
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างดินที่เกิดรอยเลื่อน (Slip line) ในช่วงShearing



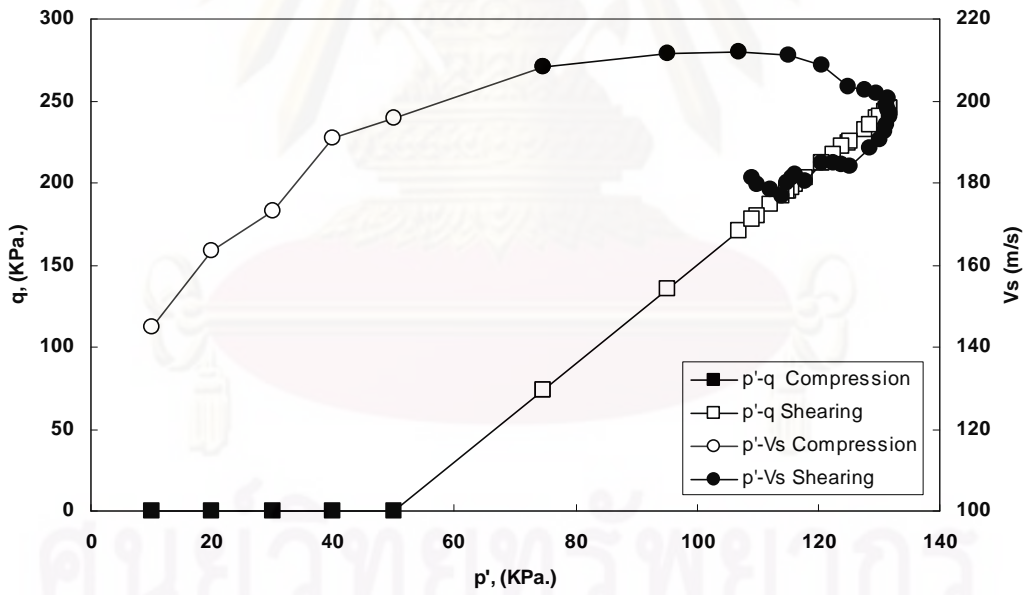
รูปที่ 4.11 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD16 (Loose) ที่ Confining pressure 25 KPa.



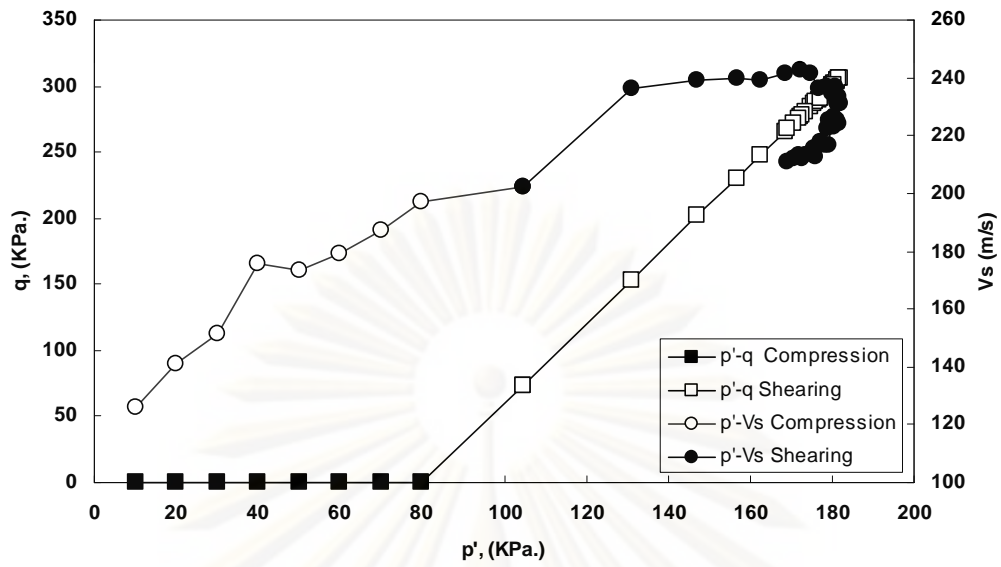
รูปที่ 4.12 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD16 (Dense) ที่ Confining pressure 25 KPa.



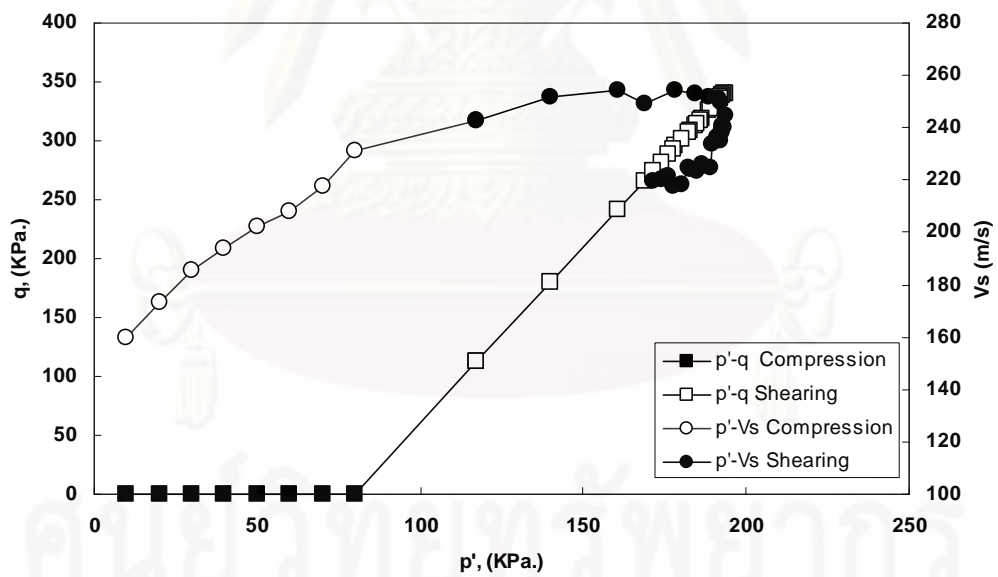
รูปที่ 4.13 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD16 (Loose) ที่ Confining pressure 50 KPa.



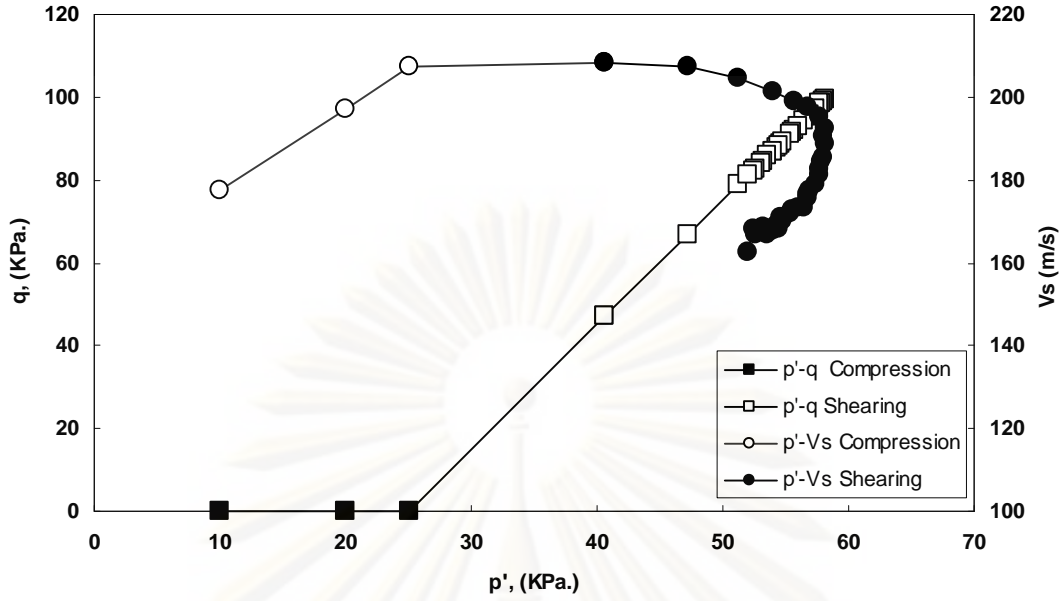
รูปที่ 4.14 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD16 (Dense) ที่ Confining pressure 50 KPa.



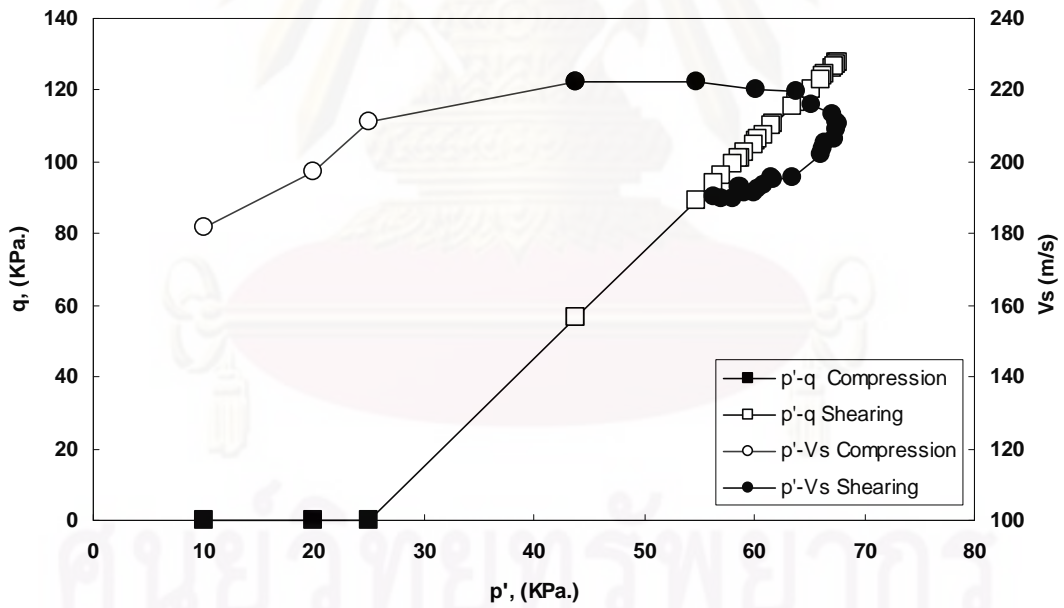
รูปที่ 4.15 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทราย D16 (Loose) ที่ Confining pressure 80 KPa.



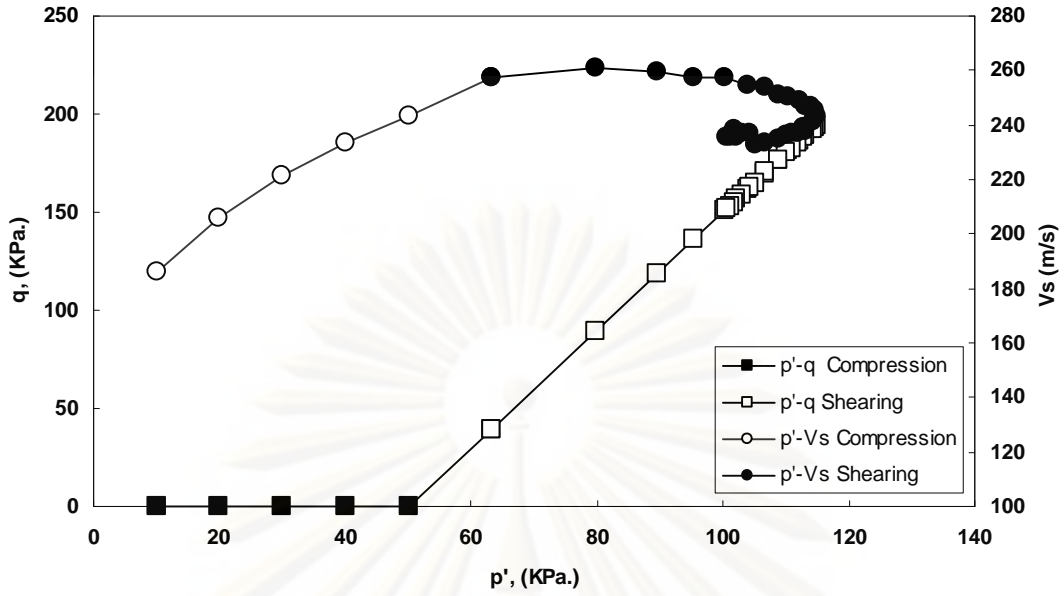
รูปที่ 4.16 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทราย D16 (Dense) ที่ Confining pressure 80 KPa.



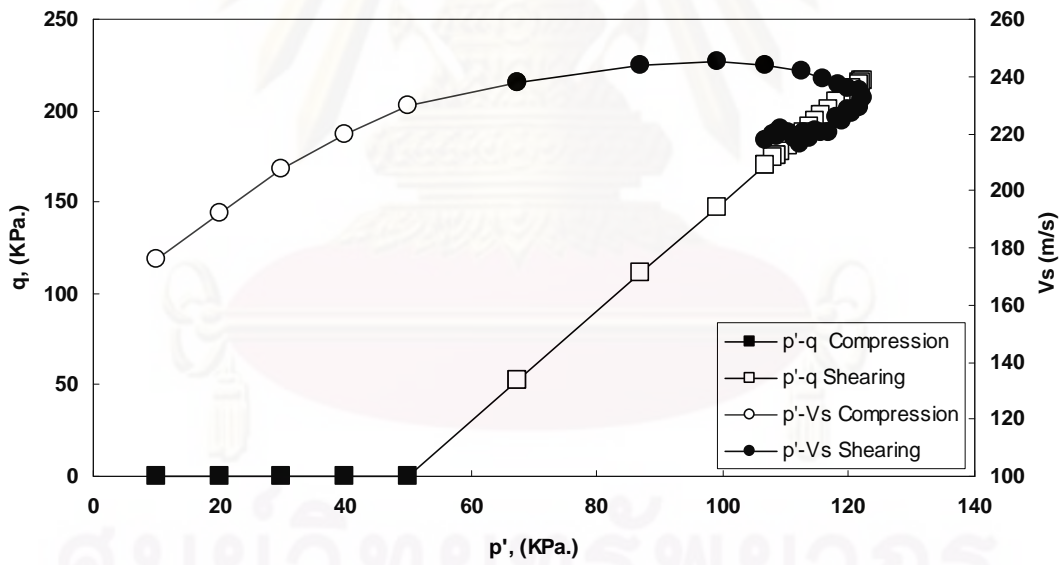
รูปที่ 4.17 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Loose) ที่ Confining pressure 25 KPa.



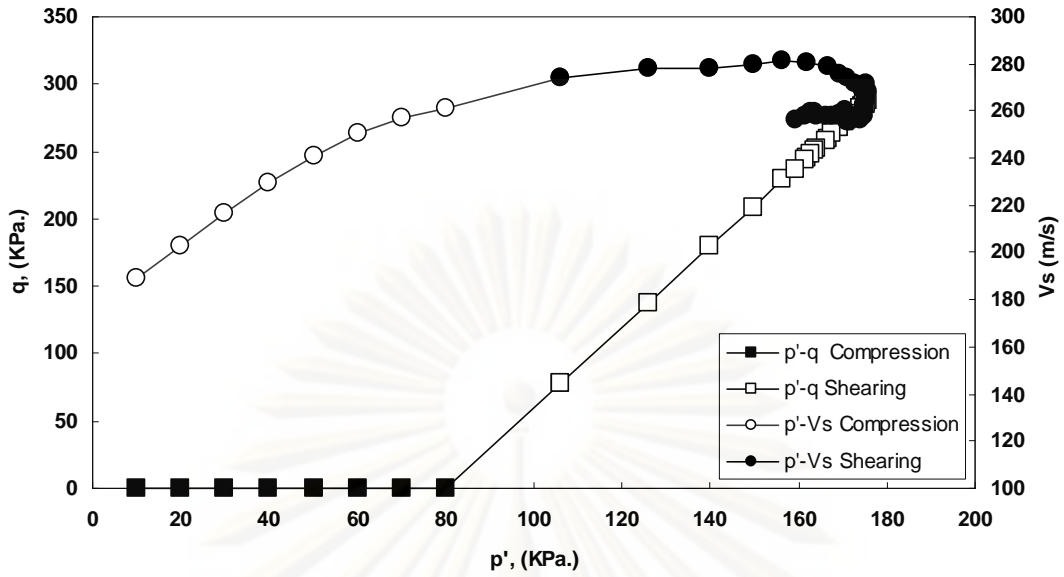
รูปที่ 4.18 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Dense) ที่ Confining pressure 25 KPa.



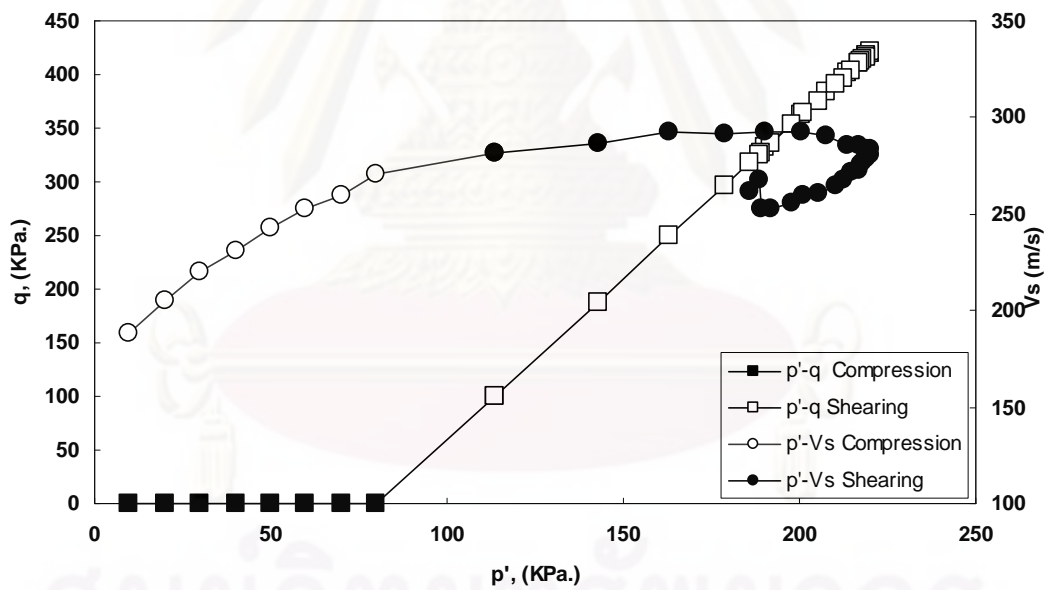
รูปที่ 4.19 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Loose) ที่ Confining pressure 50 KPa.



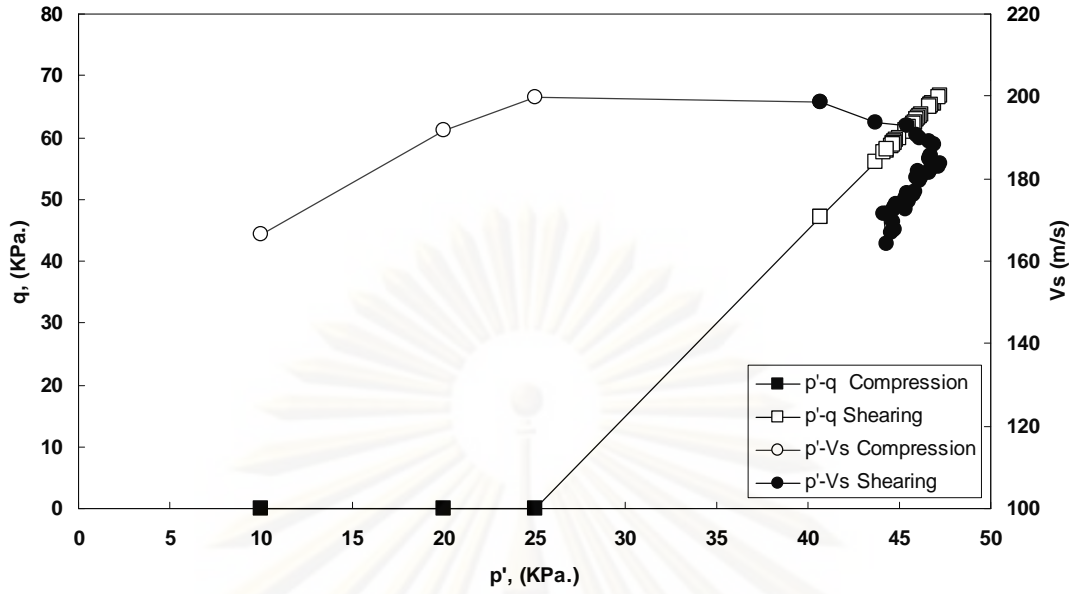
รูปที่ 4.20 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Dense) ที่ Confining pressure 50 KPa.



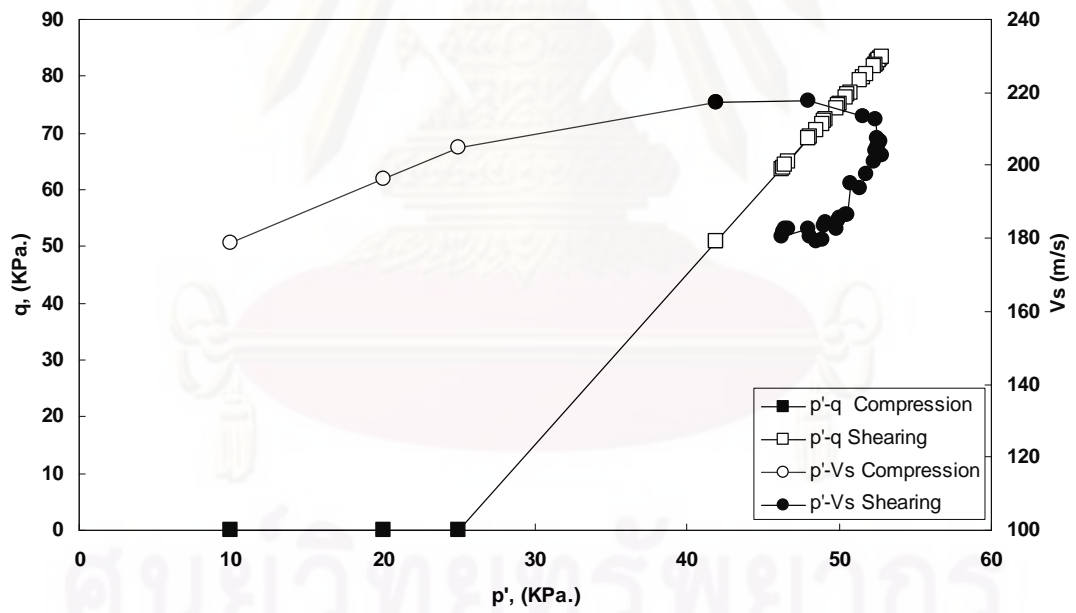
รูปที่ 4.21 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Loose) ที่ Confining pressure 80 KPa.



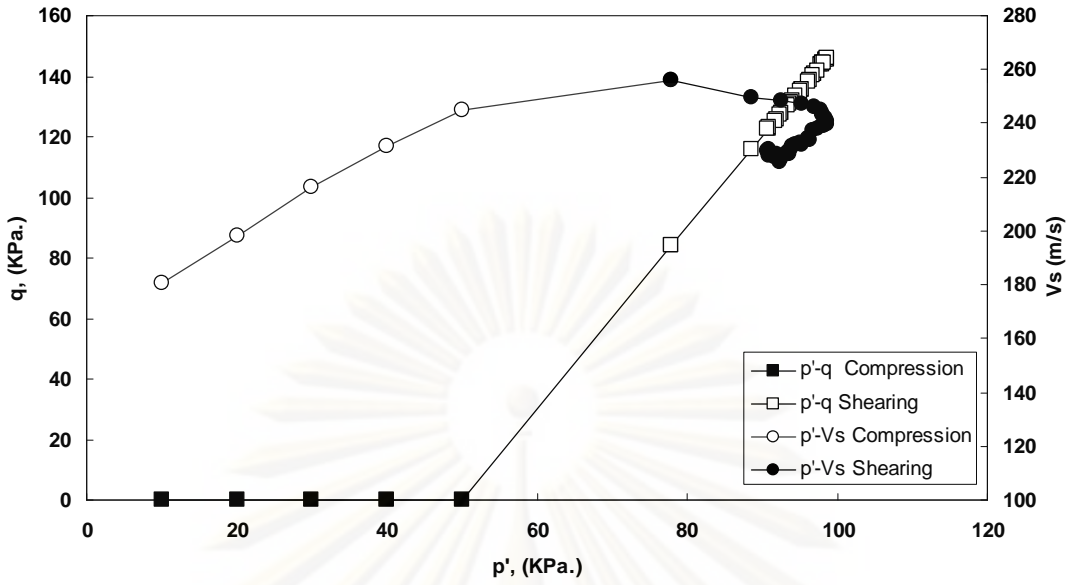
รูปที่ 4.22 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายD40 (Dense) ที่ Confining pressure 80 KPa.



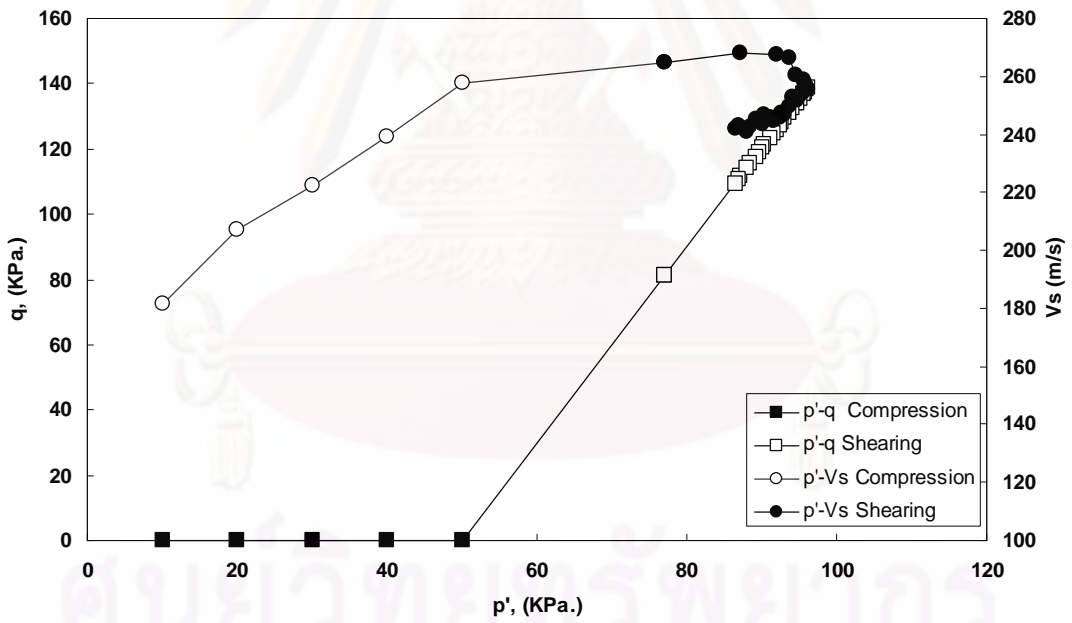
รูปที่ 4.23 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Loose) ที่ Confining pressure 25 KPa.



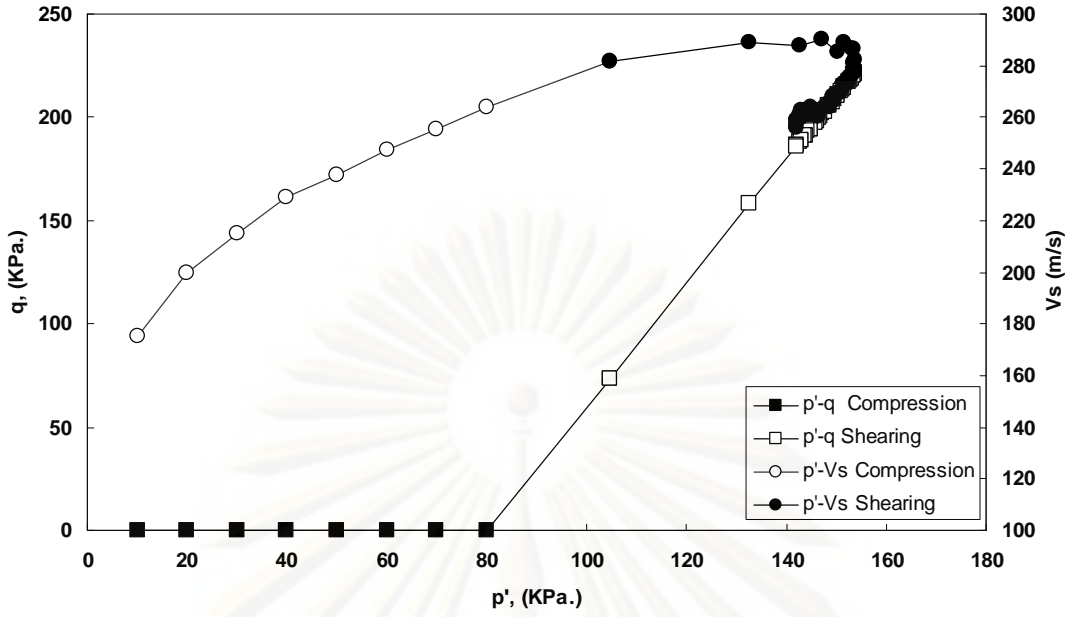
รูปที่ 4.24 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Dense) ที่ Confining pressure 25 KPa.



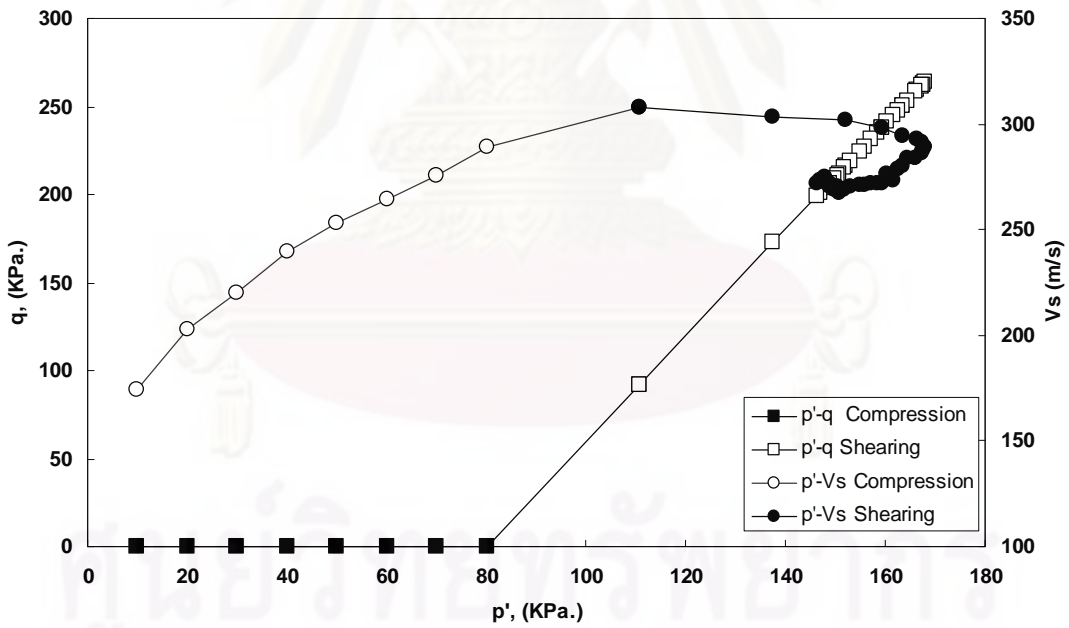
รูปที่ 4.25 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Loose) ที่ Confining pressure 50 KPa.



รูปที่ 4.26 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Dense) ที่ Confining pressure 50 KPa.



รูปที่ 4.27 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Loose) ที่ Confining pressure 80 KPa.



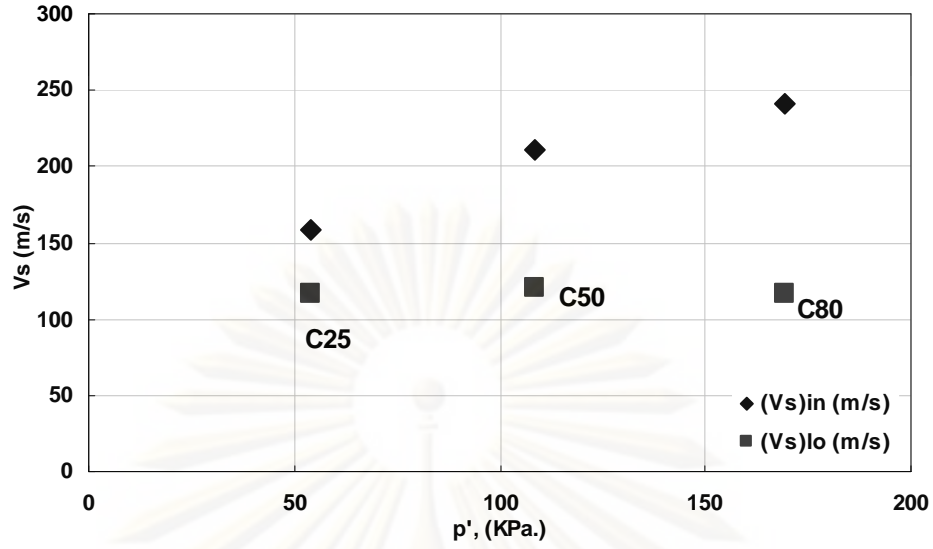
รูปที่ 4.28 ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในระหว่างทดสอบของทรายOttawa (Dense) ที่ Confining pressure 80 KPa.

4.5 ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณ Localization

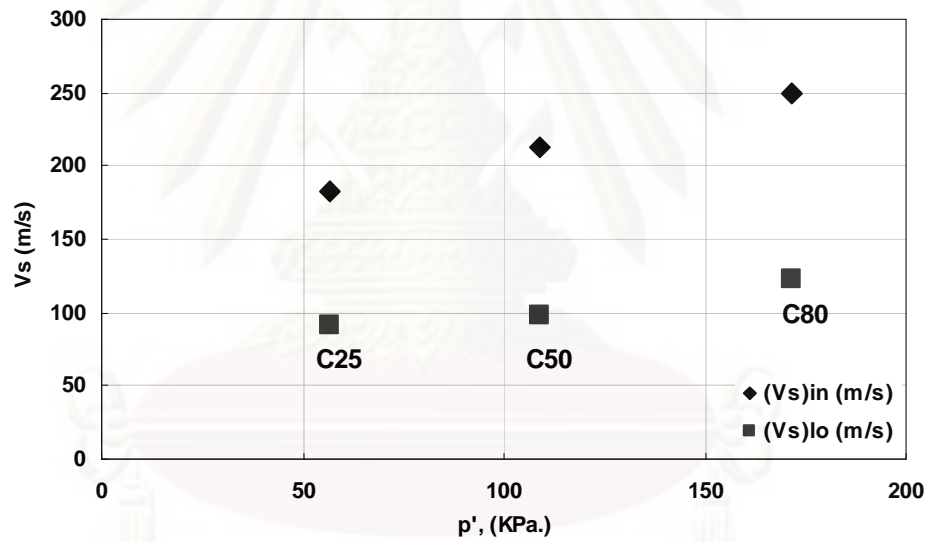
ในงานวิจัยนี้ต้องการหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณที่เกิด Localization ในตัวอย่างของทรายจึงต้องทำการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน เพื่อที่จะหาค่าความหนาของระนาบ Localization (Δh) ที่เกิดขึ้นเพื่อนำค่าที่ได้มาพิจารณาเกี่ยวกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ (สมการ 2.1) เพื่อที่จะหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในส่วนที่เกิด Localization ($(Vs)_{lo}$) ซึ่งค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่คำนวณพบว่ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในส่วนที่ไม่เกิด Localization ($(Vs)_{in}$) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังตารางที่ 4.2 และในรูปที่ 4.29-4.34 แสดงความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในส่วนที่เกิด Localization และไม่เกิด Localization เทียบกับค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล (p')

ตารางที่ 4.2 ค่าความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือน

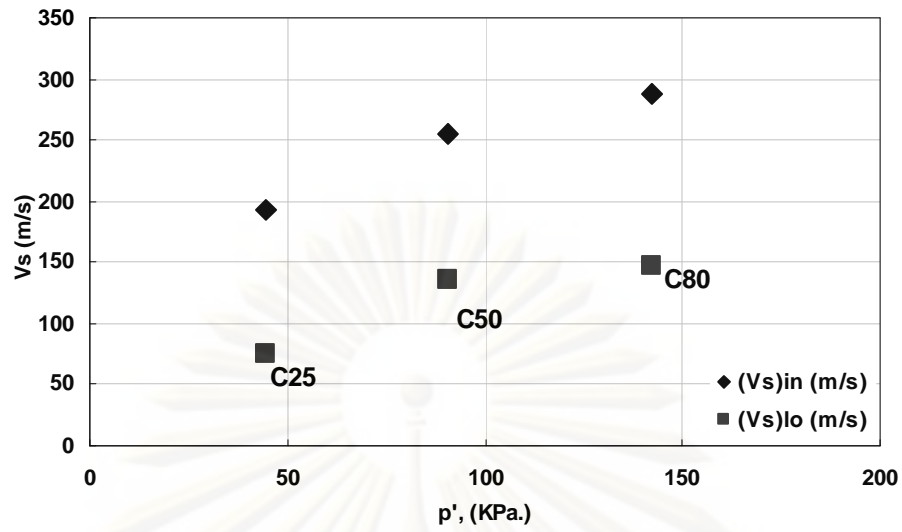
ชนิด		Confining Pressure (KPa.)	$(Vs)_{in}$ (m/s)	$(Vs)_{lo}$ (m/s)	% ต่างต่าง
D16	Loose	25	158.54	116.01	26.83
	Loose	50	210.43	120.06	42.93
	Loose	80	241.52	116.86	51.61
	Dense	25	182.87	90.83	50.33
	Dense	50	212.08	98.43	53.59
	Dense	80	249.19	122.13	50.99
D40	Loose	25	204.77	52.55	74.34
	Loose	50	257.22	101.15	60.68
	Loose	80	281.78	114.80	59.26
	Dense	25	222.26	71.18	67.98
	Dense	50	244.01	78.05	68.01
	Dense	80	261.42	94.13	67.77
Ottawa	Loose	25	193.72	75.17	61.20
	Loose	50	255.40	135.23	47.05
	Loose	80	287.79	147.13	48.88
	Dense	25	217.72	75.45	65.34
	Dense	50	262.17	150.05	42.77
	Dense	80	301.85	167.84	44.39



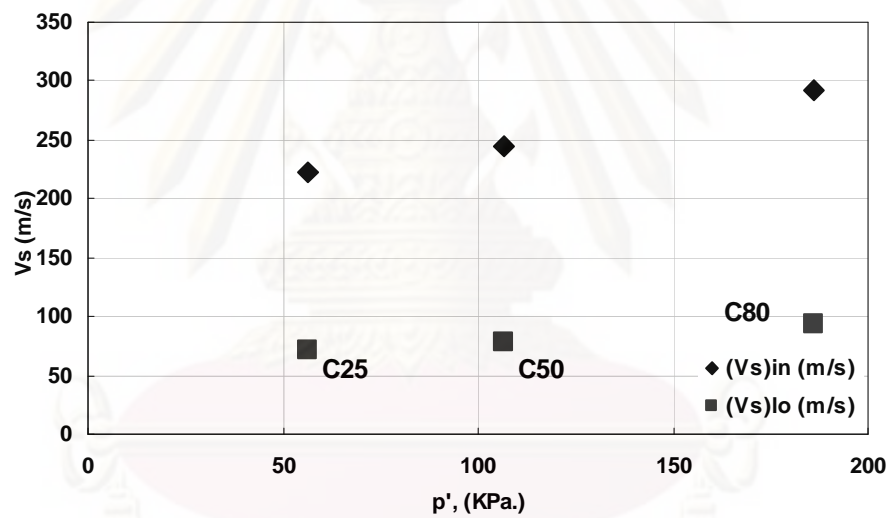
รูปที่ 4.29 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D16 (loose)



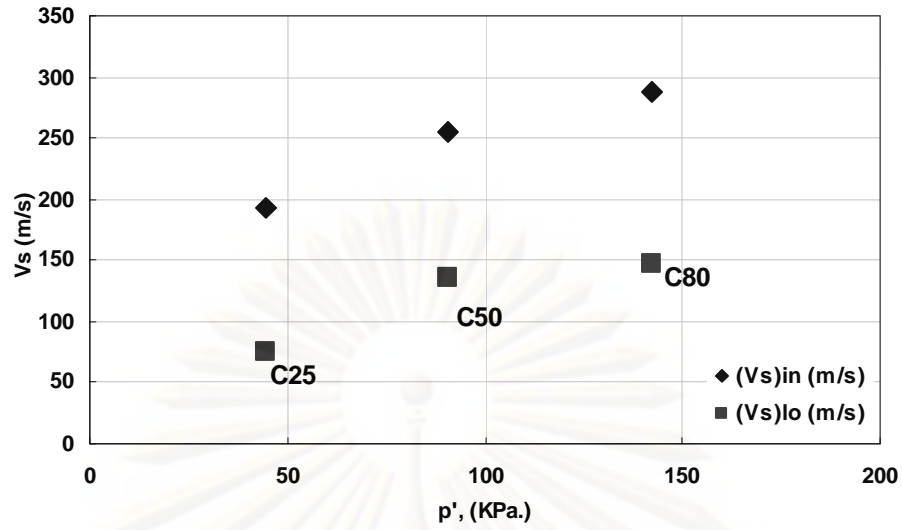
รูปที่ 4.30 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D16 (dense)



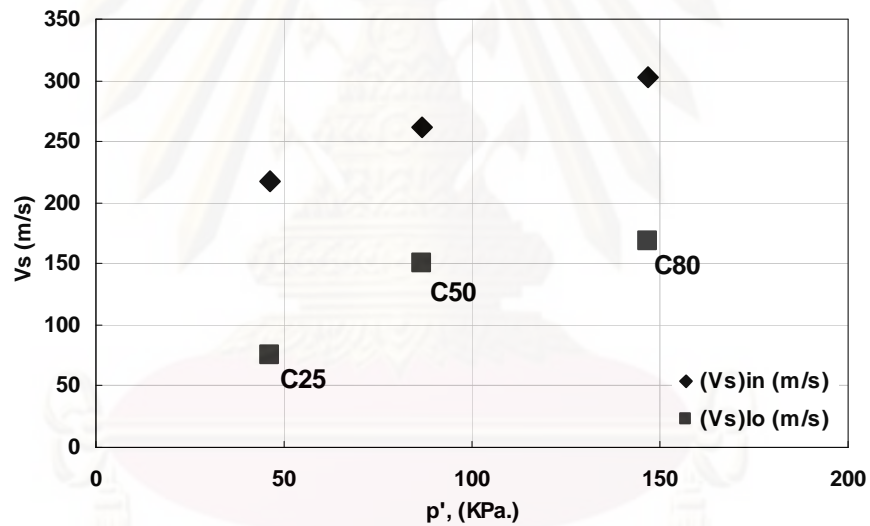
รูปที่ 4.31 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D40 (loose)



รูปที่ 4.32 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย D40 (dense)



รูปที่ 4.33 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย Ottawa (loose)



รูปที่ 4.34 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเมื่อเทียบกับ p' ของทราย Ottawa (dense)

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน

จากผลการทดสอบการหาความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการตรวจวัดจริง (V_{sm}) กับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณ (V_{sc}) ในตัวอย่างทรายที่มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ พบว่าค่าความแตกต่างกันของค่าทั้งสองให้ค่าความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 0.84 % – 6.49 % จากค่าที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 เมื่อพิจารณาจากค่าความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จริงพบว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัดในตัวอย่างจริง

5.1.2 เมื่อพิจารณาความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้ได้พบว่าชั้นดินที่มีความแตกต่างของความหนาแน่นและความสูงที่แทรกอยู่ระหว่างกลางของตัวอย่างเพียงเล็กน้อย จะส่งผลต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่กระจายผ่านมวลดินได้

5.2 สรุปผลการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test)

จากผลการทดสอบการหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในส่วนที่เกิด Localization ($(V_s)_{lo}$) ของตัวอย่างทรายในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial) นั้นพบว่าค่าความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้ในบริเวณที่เกิด Localization ($(V_s)_{lo}$) มีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณที่ไม่เกิด Localization ($(V_s)_{in}$) อยู่ระหว่าง 40.46% - 66.66% และจากการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.2.1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Mean effective stress และความเร็วคลื่นแรงเฉือน พบว่าเมื่อค่า Mean effective stress พ้นจุดสูงสุดไปแล้วค่าของความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับช่วงก่อนถึงจุดสูงสุดของ Mean effective stress บ่งชี้เมื่อตัวอย่างเริ่มพังทลายทำให้เกิดระนาบของความไม่ต่อเนื่องของความหนาแน่นที่ต่ำกว่าทำให้ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีค่าลดลงไป

5.2.2 จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในส่วนที่เกิด Localization, $(Vs)_o$ และในส่วนที่ไม่เกิด Localization, $(Vs)_in$ พบว่าเมื่อพิจารณาจากขนาดของเม็ดทรายที่นำมาทดสอบแล้วค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ลดลงในส่วนที่เกิด Localization ของทรายที่มีเม็ดละเอียดมีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในบริเวณที่เกิด Localization ที่ลดลงสูงกว่าเมื่อเทียบเม็ดทรายที่มีขนาดที่หยาบกว่า

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

1. ศึกษาในตัวอย่างการทดสอบแบบ Anisotropic consolidation drained test
2. จากแนวคิดที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถดัดแปลงค่าความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเพื่อหาค่าอัตราส่วนช่องว่างในบริเวณที่เกิด Localization ในตัวอย่างได้
3. ประยุกต์โดยนำสารที่สามารถทำให้แข็งตัวหล่อเข้าไปในตัวอย่างทดสอบที่ทำการทดสอบเสร็จแล้วเพื่อนำตัวอย่างบริเวณที่เกิด Localization นั้นมาหาค่าอัตราส่วนช่องว่างในบริเวณนั้นได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธีรินทร์ อมรวิทย์ลักษณ์ “ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนโดยเบนเดอริอิลิเมนต์ระหว่างการทดสอบแบบอัดสามแกน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรอง, ปฐพีกลศาสตร์หลักการพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Alshibli, A.K., and Sture, S., Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital Imaging Techniques. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 13, 2 (1999): 103-109.

Anongphouth, A. (2006). Effect of stress-induced anisotropy on elastic shear modulus of sands using bender elements, Master thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

Desrues, J. and Viggiani, G., Strain localization in sand an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 28 (2004): 279-321.

Dyvik, R., and Madshus, C. Laboratory measurements of G_{max} using bender element. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs Convention, Detroit. New York: American Society of Civil Engineering, 1985.

Ismail, A.M., Sharma, S.S., and Fahey, M. A Small True Triaxial Apparatus with Wave Velocity Measurement. Geotechnical Testing Journal, 28, 2 (2005): 113-122.

Lee, C., Lee, J., Lee, W., and Cho, T., Experiment Setup for Shear Wave and Electrical Resistance Measurements in an Oedometer. Geotechnical Testing Journal, 31, 2 (2007): 149-156.

Leong, E.C., Yeo, S.H., Rahardjo, H., Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements. Geotechnical Testing Journal, 28, 5 (2005): 488-498.

Minsu, C., and Gye-Chun, C., Shear Strength Estimation of Sandy Soils Using Shear Wave Velocity. Geotechnical Testing Journal (GTJ), 30, 6 (2007): 484-495.

Nubel, K. and Huang, W., A study of localized deformation pattern in granular media. Computer methods in applied mechanics and engineering, 193 (2004): 2719–2743

Roscoe, K.H., The influence of strains in soil mechanics. Geotechnique, 20 (1970): 129-170.

Shirley, D.J., and Hampton, L.D., Shear wave measurements in laboratory sediments. Journal of the Acoustic Society of American, 63, 5 (1977): 607-613.

Teachavorasinskun, S. and Amornwithayalax, T., Elastic shear modulus of Bangkok clay during undrained triaxial compression. Geotechnique 52, 7(2002), 537-540.

Teachavorasinskun, S. and Akkarakun, T., Paths of elastic shear modulus of clays. Geotechnique 54, 5(2004), 331-333

Viggiani, G., and Atkinson, J.H., Interpretation of bender element tests. Geotechnique, 45, 1(1995): 249-265.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 แสดงการคำนวณความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างทรายเม็ดหยาบ (D16)

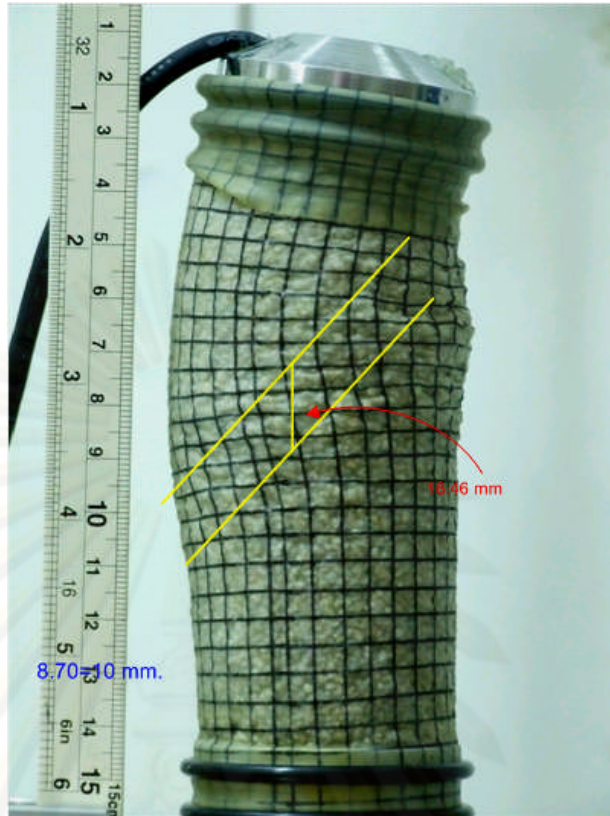
	D16 loose C 25		D16 loose C 50		D16 loose C 80		D16 Dense C 25		D16 Dense C 50		D16 Dense C 80	
	S4	S35	S9	S39	S6	S35	S3	S25	S3	S29	S4	S29
H_0 , (cm.)	11.49		11.44		11.22		11.8		11.54		11.54	
A_0 , (cm ²)	18.01		18.21		18.66		18.16		18.58		18.62	
V_0 , (cm ³)	206.95		208.38		209.32		214.31		214.41		214.85	
e_0	0.912		0.936		0.929		0.780		0.788		0.799	
Position	S4	S35	S9	S39	S6	S35	S3	S25	S3	S29	S4	S29
ΔL , (cm.)	0.203	1.778	0.457	1.9812	0.305	1.778	0.1524	1.27	0.1524	1.4732	0.203	1.4732
L_i , (cm.)	11.29	9.71	10.98	9.46	10.92	9.44	11.65	10.53	11.39	10.07	11.34	10.07
ϵ	0.018	0.155	0.040	0.173	0.027	0.158	0.013	0.108	0.013	0.128	0.018	0.128
p' , (KPa.)	54.6	54.0	108.1	108.5	168.5	169.2	58.6	56.8	107.0	109.2	168.6	171.6
q' , (KPa.)	88.8	87.1	174.3	175.6	265.6	267.6	100.8	95.4	171.0	177.5	265.9	274.7
h , (mm.)	112.9	97.1	109.8	94.6	109.2	94.4	116.5	105.3	113.9	100.7	113.4	100.7
t_{av} , (ms)	0.712	0.641	0.522	0.496	0.452	0.448	0.637	0.667	0.537	0.555	0.455	0.459
V_s , (m/s)	158.5	151.5	210.4	190.7	241.5	210.8	182.9	157.9	212.1	181.4	249.2	219.4
Δh , (mm.)		12.29		13.00		12.92		16.46		14.76		13.18
$V_{s_{in}}$ (m/s)		158.5		210.4		241.5		182.9		212.1		249.2
$V_{s_{10}}$ (m/s)		116.01		120.07		116.87		90.84		98.44		122.13
%ความแตกต่าง		26.83		42.93		51.61		50.33		53.59		50.99

ตารางที่ ก-2 แสดงการคำนวณความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างทรายเม็ดละเอียด (D40)

	D40 loose C 25		D40 loose C 50		D40 loose C 80		D40 Dense C 25		D40 Dense C 50		D40 Dense C 80	
	S3	S33	S5	S30	S5	S35	S2	S25	S4	S30	S5	S27
H_0 , (cm.)	11.27		11.21		11.27		11.28		11.28		11.67	
A_0 , (cm ²)	18.18		18.04		19.25		18.47		18.26		17.98	
V_0 , (cm ³)	204.90		202.21		216.99		208.29		206.00		209.84	
e_0	1.091		0.999		1.022		0.898		0.838		0.832	
Position	S3	S33	S5	S30	S5	S35	S2	S25	S4	S30	S5	S27
ΔL , (cm.)	0.1524	1.6764	0.254	1.524	0.254	1.778	0.102	1.27	0.2032	1.524	0.254	1.3716
L_i , (cm.)	11.12	9.59	10.96	9.69	11.02	9.49	11.18	10.01	11.08	9.76	11.42	10.30
ε	0.014	0.149	0.023	0.136	0.023	0.158	0.009	0.113	0.018	0.135	0.022	0.118
p' , (KPa.)	51.3	52.0	100.3	100.6	156.4	159.1	54.7	56.4	106.8	106.6	190.4	185.9
q' , (KPa.)	78.8	81.1	150.8	151.7	229.2	237.3	89.2	94.2	170.3	169.9	331.3	317.8
h , (mm.)	111.2	95.9	109.6	96.9	110.2	94.9	111.8	100.1	110.8	97.6	114.2	103.0
t_{av} , (ms)	0.543	0.591	0.426	0.411	0.391	0.370	0.503	0.526	0.454	0.448	0.391	0.394
V_s , (m/s)	204.8	162.4	257.2	235.7	281.8	256.6	222.3	190.3	244.0	217.8	292.0	261.4
Δh , (mm.)		8.66		5.74		6.42		7.92		5.53		5.74
$V_{s_{in}}$ (m/s)		204.8		257.2		281.8		222.3		244.0		292.0
$V_{s_{lo}}$ (m/s)		52.55		101.15		114.80		71.18		78.05		94.13
%ความแตกต่าง		74.34		60.68		59.26		67.98		68.01		67.77

ตารางที่ ก-3 แสดงการคำนวณความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างทรายOttawa

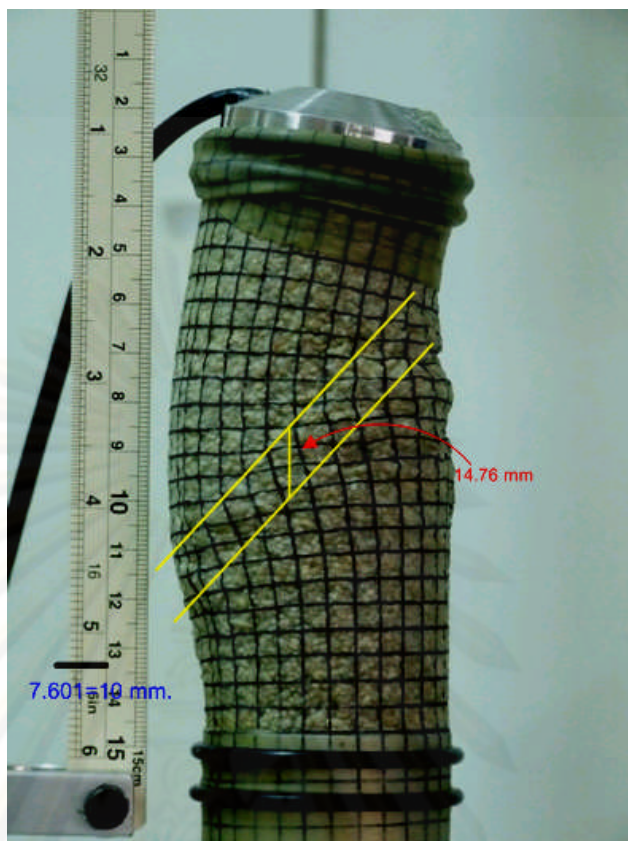
	Ottawa loose C 25		Ottawa loose C 50		Ottawa loose C 80		Ottawa Dense C 25		Ottawa Dense C 50		Ottawa Dense C 80	
	S2	S35	S2	S31	S3	S39	S2	S29	S2	S26	S3	S31
H_0 , (cm.)	11.51		11.44		11.49		11.4		11.19		11.44	
A_0 , (cm ²)	18.89		18.26		18.66		18.85		18.66		18.79	
V_0 , (cm ³)	217.38		208.85		214.45		214.87		208.76		215.00	
e_0	0.581		0.545		0.568		0.507		0.491		0.514	
Position	S2	S35	S2	S31	S3	S39	S2	S29	S2	S26	S3	S31
ΔL , (cm.)	0.102	1.778	0.102	1.575	0.152	1.981	0.102	1.473	0.102	1.372	0.152	1.575
L_i , (cm.)	11.41	9.73	11.34	9.87	11.34	9.51	11.30	9.93	11.09	9.82	11.29	9.87
ϵ	0.009	0.154	0.009	0.138	0.013	0.172	0.009	0.129	0.009	0.123	0.013	0.138
p' , (KPa.)	43.7	44.3	88.6	90.8	142.6	142.1	48	46.4	87.2	87.0	152.0	146.9
q' , (KPa.)	56.0	58.0	115.9	122.3	187.8	186.2	69.0	64.3	111.5	110.9	215.9	200.7
h , (mm.)	114.1	97.3	113.4	98.7	113.4	95.1	113.0	99.3	110.9	98.2	112.9	98.7
t_{av} , (ms)	0.589	0.593	0.444	0.419	0.394	0.370	0.519	0.546	0.423	0.416	0.374	0.361
V_s , (m/s)	193.7	164.1	255.4	235.5	287.8	257.0	217.7	182.6	262.2	236.1	301.8	273.3
ΔL , (mm.)		11.13		9.41		11.92		10.40		14.56		12.92
$V_{s_{in}}$ (m/s)		193.7		255.4		287.8		217.7		262.1		301.8
$V_{s_{lo}}$ (m/s)		75.17		135.23		147.13		75.45		150.05		167.84
%ความแตกต่าง		61.20		47.05		48.88		65.34		42.77		44.39



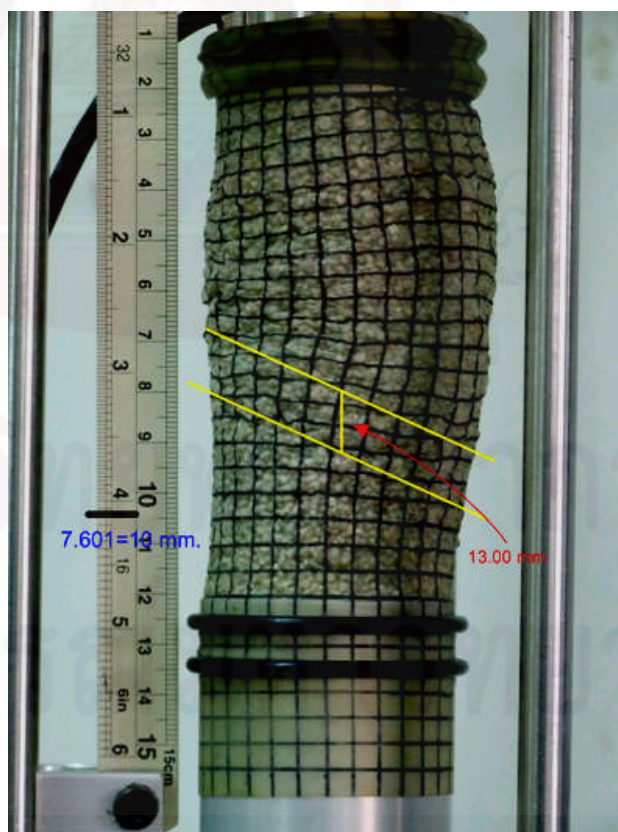
รูปที่ ก-1 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Dense C25



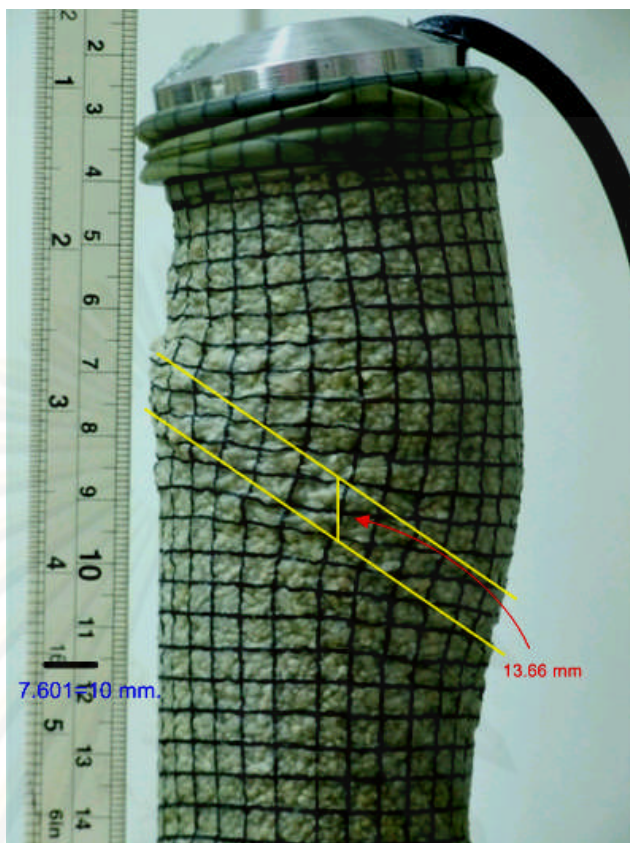
รูปที่ ก-2 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Loose C25



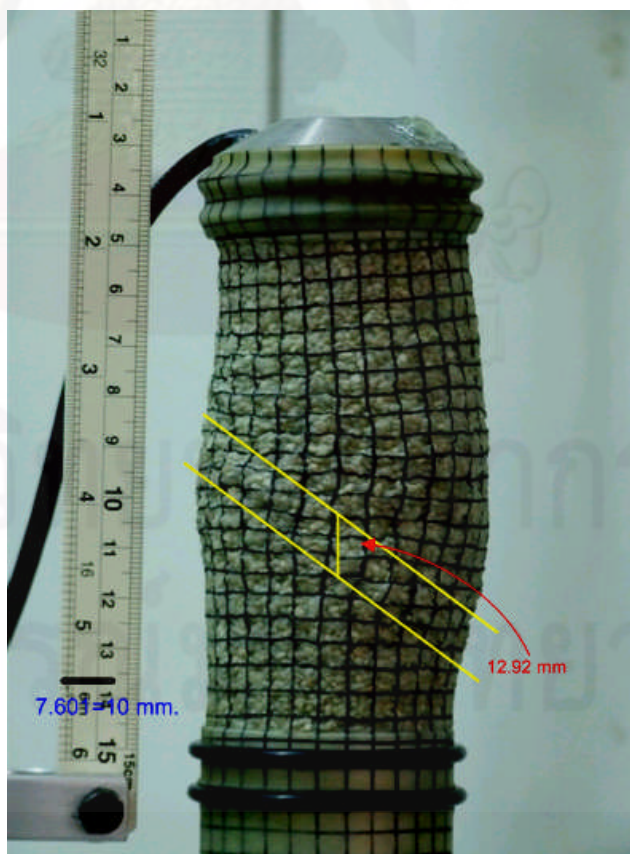
รูปที่ ก-3 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Dense C50



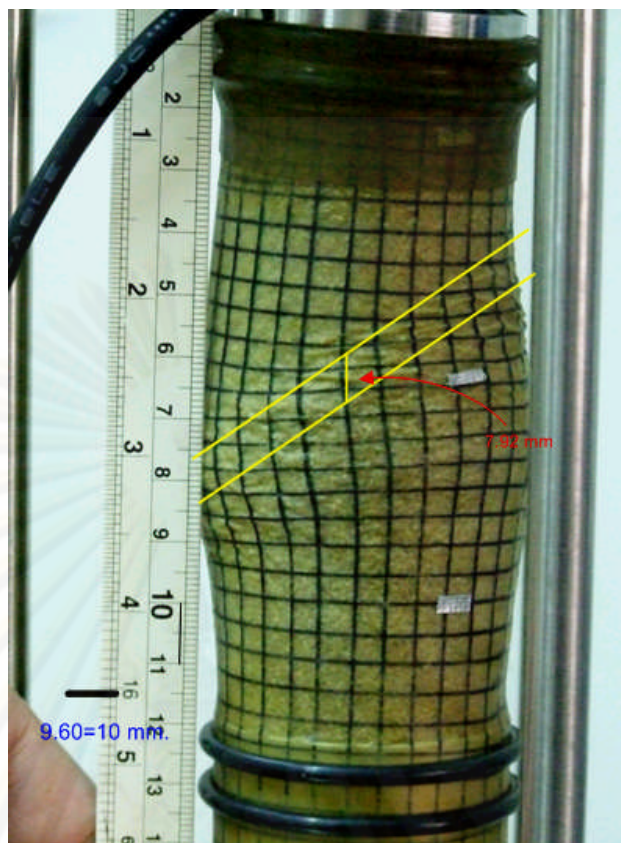
รูปที่ ก-4 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Loose C50



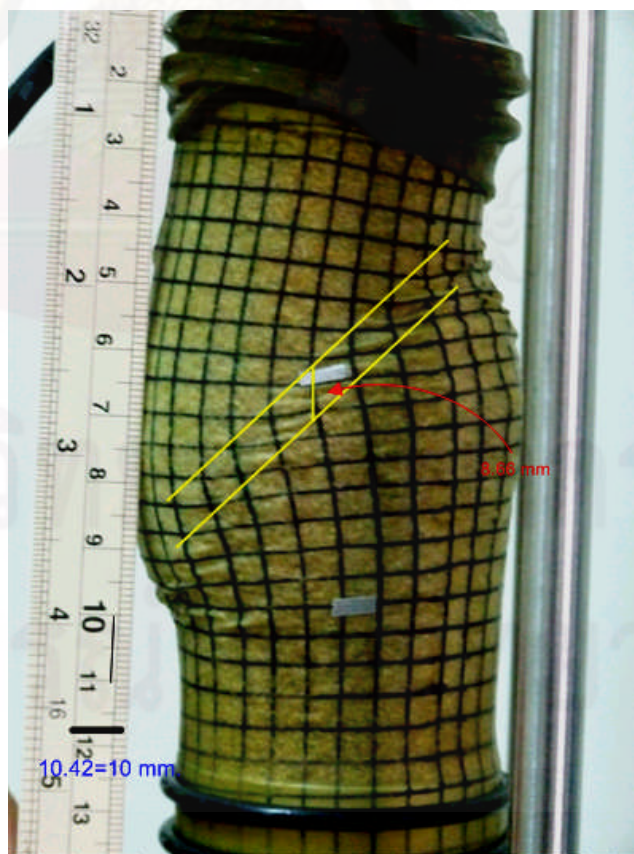
รูปที่ ก-5 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Dense C80



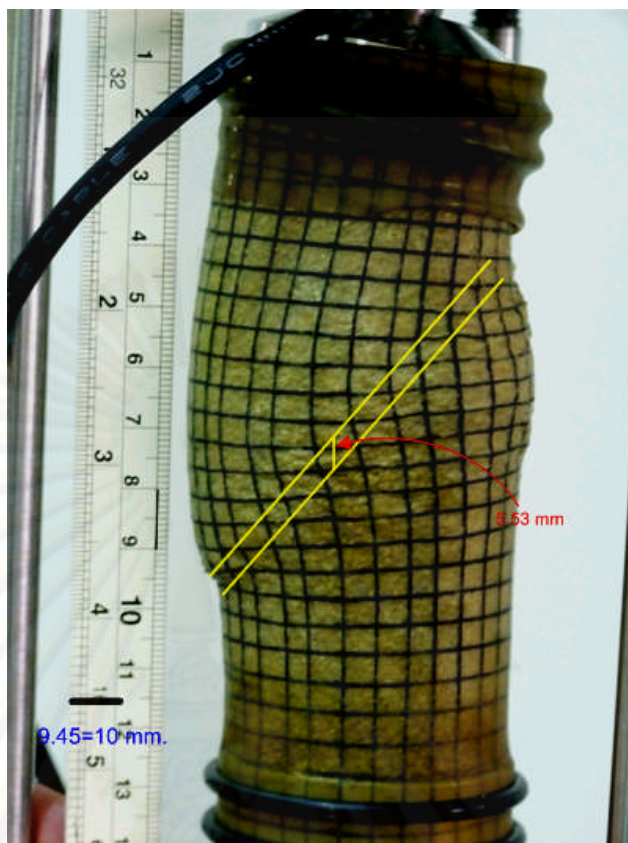
รูปที่ ก-6 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D16 Loose C80



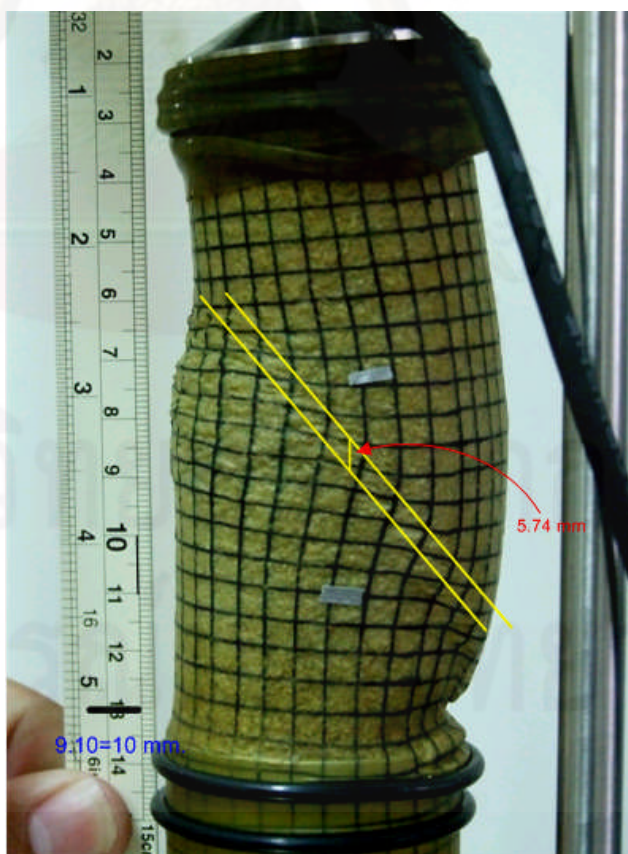
รูปที่ ก-7 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Dense C25



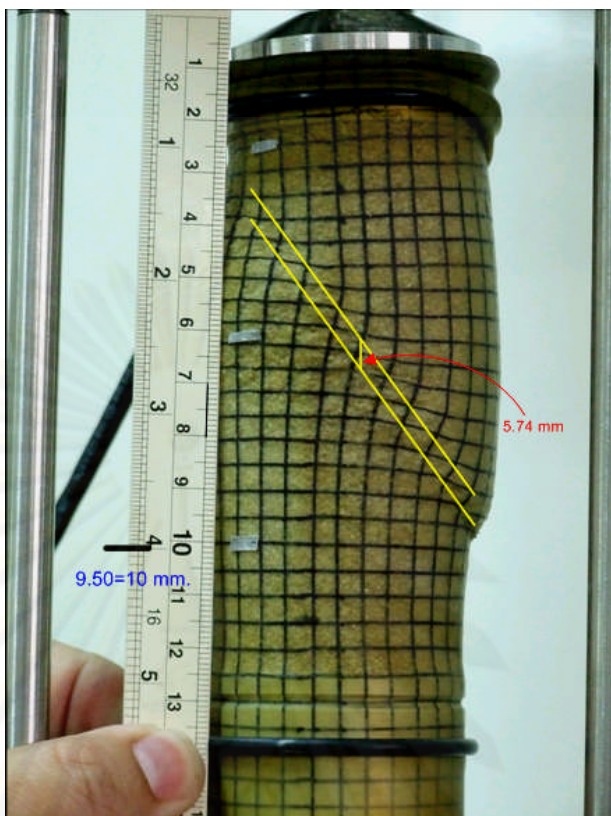
รูปที่ ก-8 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Loose C25



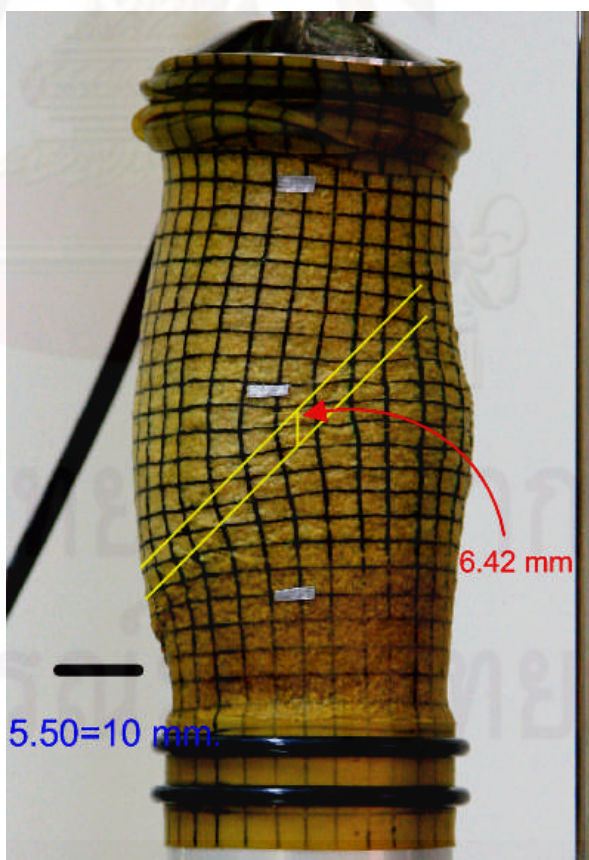
รูปที่ ก-9 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Dense C50



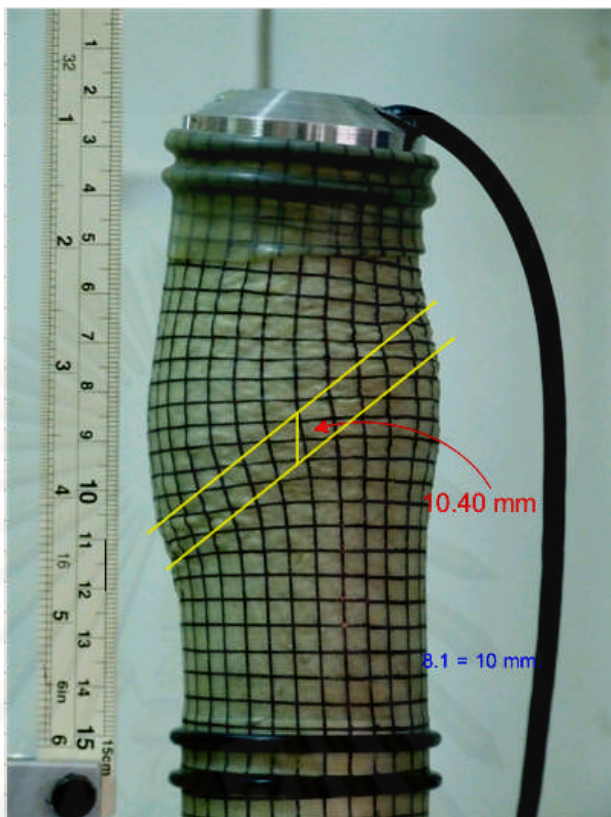
รูปที่ ก-10 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Loose C50



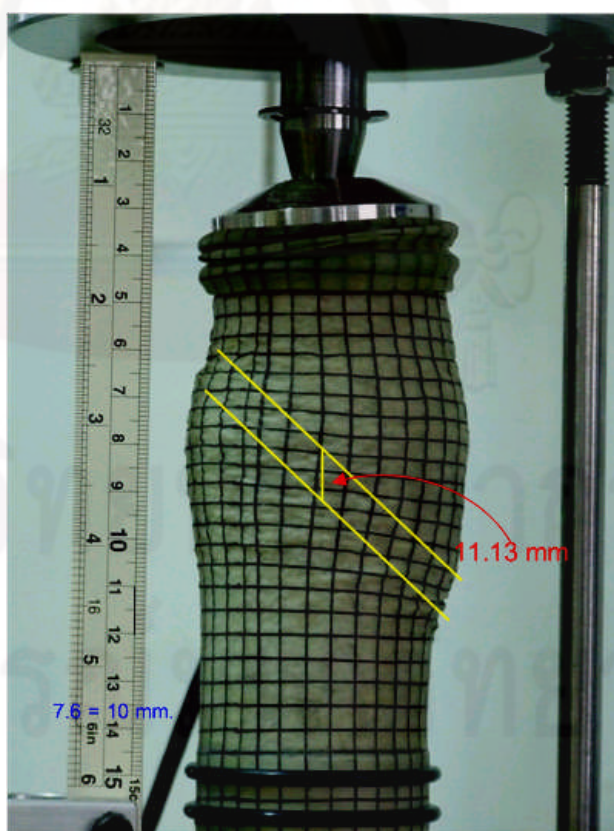
รูปที่ ก-11 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Dense C80



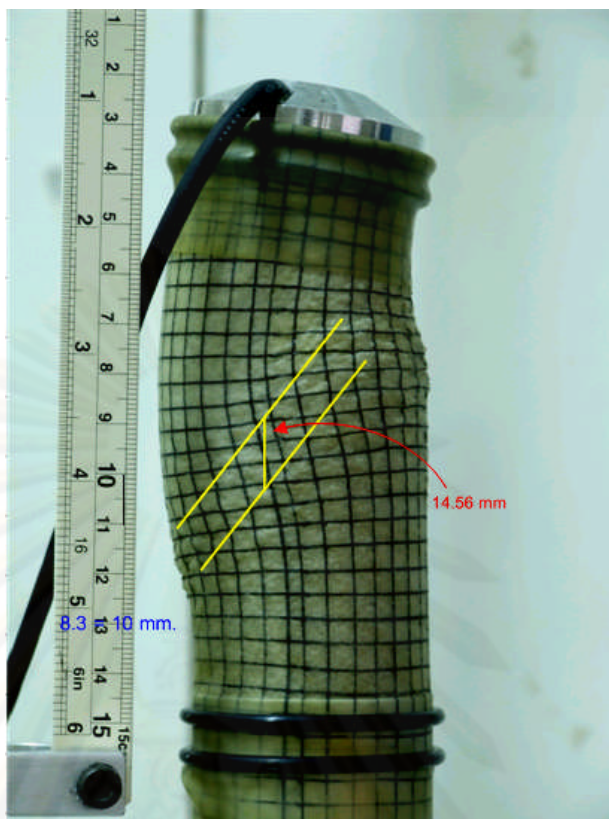
รูปที่ ก-12 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง D40 Loose C80



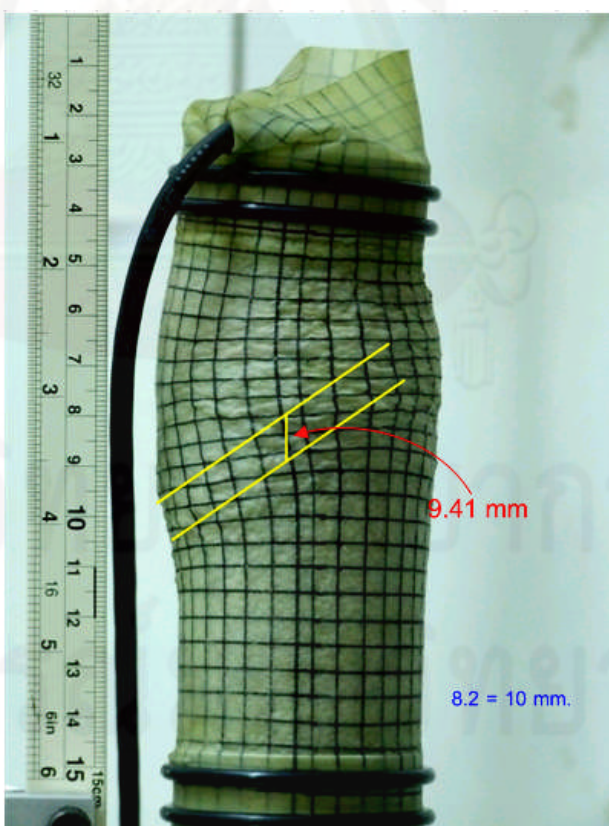
รูปที่ ก-13 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Dense C25



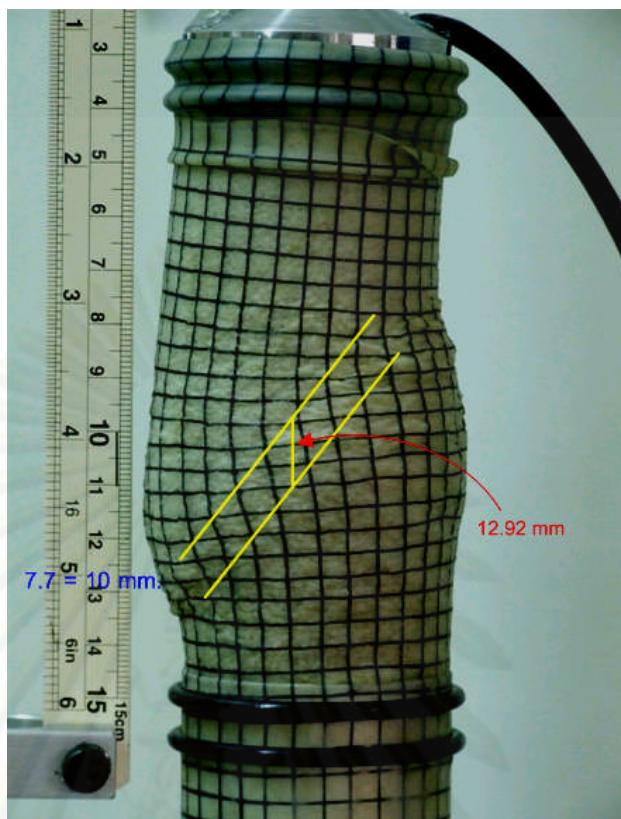
รูปที่ ก-14 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Loose C25



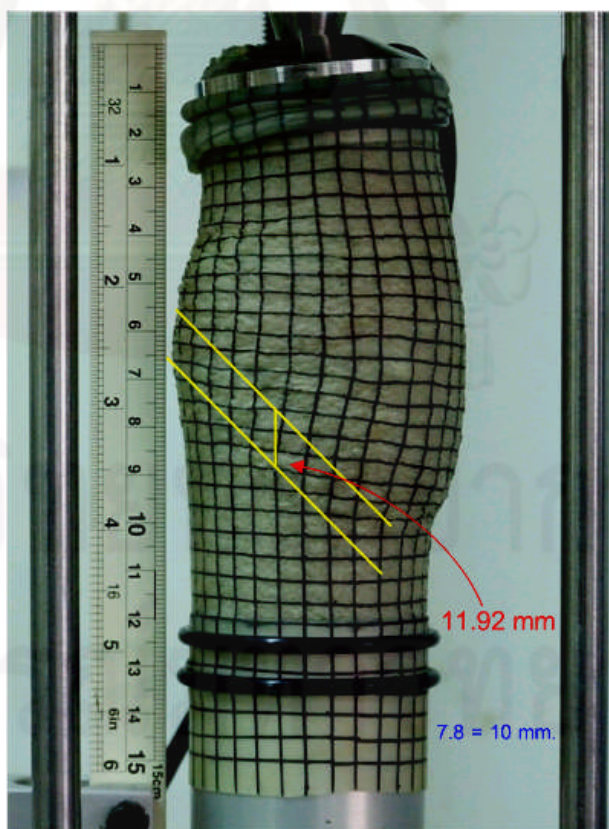
รูปที่ ก-15 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Dense C50



รูปที่ ก-16 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Loose C50



รูปที่ ก-17 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Dense C80



รูปที่ ก-18 ลักษณะการเกิดLocalizationของตัวอย่าง Ottawa Loose C80

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมนตรี มัสกุล เกิดวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ.2528 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ปี
การศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาด้าน ปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย