

## บทที่ 4

### ผลทดสอบและการวิเคราะห์ผล

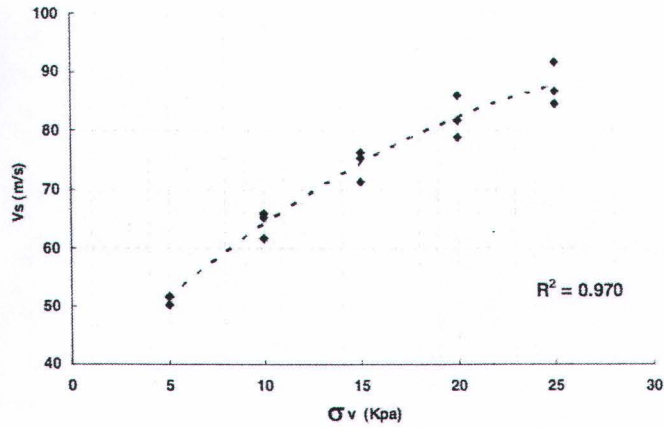
#### 4.1 การทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน

##### 4.1.1 ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อความเร็วคลื่นแรงเฉือน

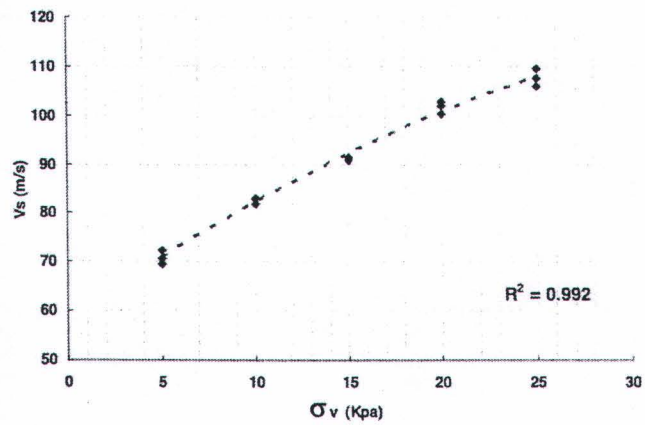
ผลของหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งที่มีผลต่อความเร็วคลื่นแรงเฉือนในการทดสอบหาความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $V_s$ ) ในอุปกรณ์ทดสอบความไม่สม่ำเสมอของดิน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง ( $\sigma'_v$ ) พบว่าค่าความเร็วของความคลื่นแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเค้นในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะแปรผันตรงกับแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งซึ่งมีความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลยกกำลังสอง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 - 4.3 และจากค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $V_s$ ) และค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio,  $e$ ) ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4

เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งแต่ละค่าจากสมการเส้นตรง (รูปที่ 4.4) ที่พาดผ่านความเร็วคลื่นแรงเฉือนของแต่ละหน่วยแรงได้ดังนี้

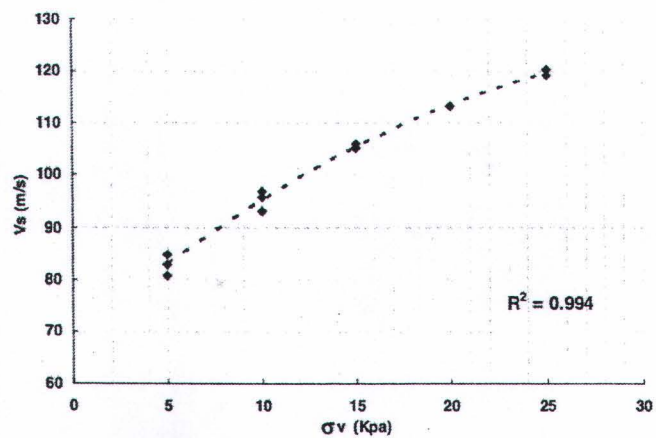
- ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรงแนวตั้ง 5 kPa:  $V_{s5\text{kPa}} = (1.499 - e) / k$
  - ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรงแนวตั้ง 10 kPa:  $V_{s10\text{kPa}} = (1.640 - e) / k$
  - ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรงแนวตั้ง 15 kPa:  $V_{s15\text{kPa}} = (1.743 - e) / k$
  - ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรงแนวตั้ง 20 kPa:  $V_{s20\text{kPa}} = (1.812 - e) / k$
  - ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่หน่วยแรงแนวตั้ง 25 kPa:  $V_{s25\text{kPa}} = (1.840 - e) / k$
- เมื่อ  $e$  คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง และ  $k$  คือค่าคงที่ซึ่งมีค่า 0.010



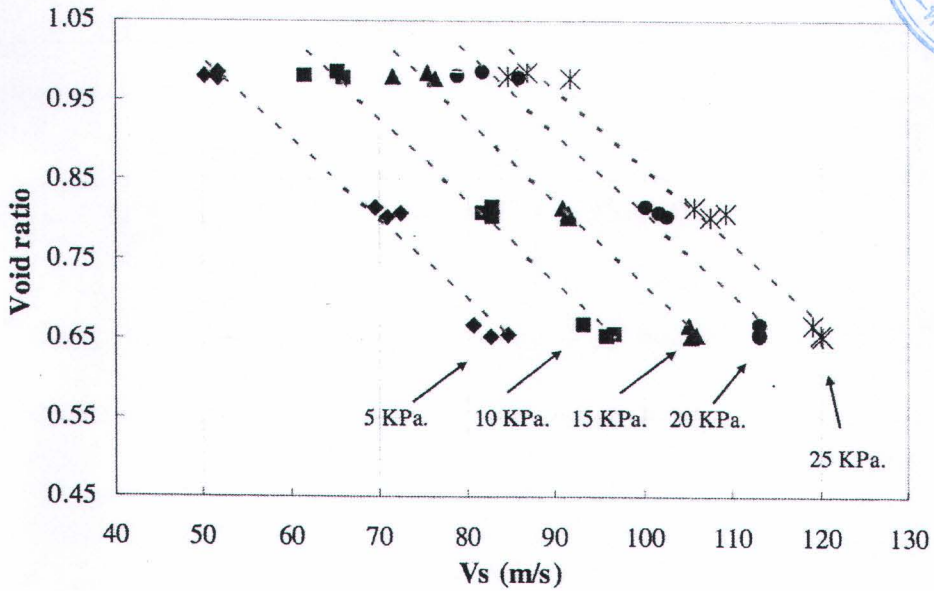
รูปที่ 4.1 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน  
ในตัวอย่างสภาพหลวมมาก ( $D_r = 10\%$ )



รูปที่ 4.2 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน  
ในตัวอย่างสภาพแน่นปานกลาง ( $D_r = 45\%$ )



รูปที่ 4.3 ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้งต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน  
ในตัวอย่างสภาพแน่นมาก ( $D_r = 75\%$ )



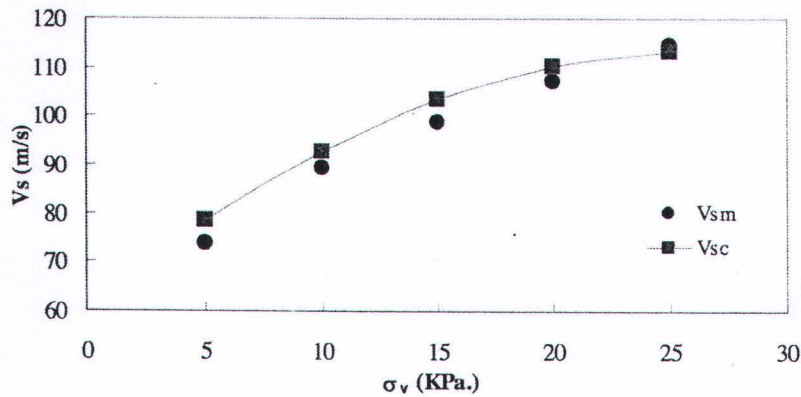
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน  
 ในสภาวะหน่วยแรงต่าง ๆ

4.1.2 ผลของการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากการตรวจวัดและการ  
 คำนวณ

ในการทดสอบนี้ได้ทำการวัดคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างทรายที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ ซึ่ง  
 การจำลองตัวอย่างดินทรายที่มีความหนาแน่นไม่คงที่นี้เป็นการจำลองความไม่สม่ำเสมอที่จะ  
 เกิดขึ้นจากตัวอย่างดินทรายที่ได้รับหน่วยแรงเฉือนกระทำกับตัวอย่างดินโดยจะเปรียบเทียบ  
 ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จริง ( $V_{sm}$ ) กับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จาก  
 การคำนวณ ( $V_{sc}$ ) ที่มาจากสมการในรูปที่ 4.4 โดยตัวอย่างดินทรายที่ทำการทดสอบแบ่งออก  
 เป็นสี่เงื่อนไขดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจากบทที่ 3 ซึ่งผลการทดสอบความแตกต่างของ  
 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนในแต่ละเงื่อนไขมีดังต่อไปนี้

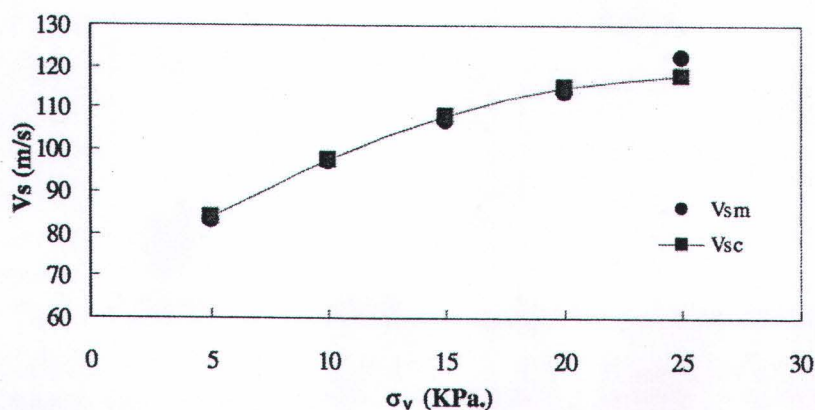
ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข A โดยชั้น D1 มีค่าอัตราส่วน  
 ช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av1} = 0.643$  ชั้น D2 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av2} = 0.866$  และชั้น D3 มีค่า  
 อัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av3} = 0.634$  จากการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ณ ค่าหน่วยแรง  
 แนวตั้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 kPa นั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการที่  
 คำนวณได้จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่คำนวณ ( $V_{sc}$ ) ได้นั้นจะมีค่าสูงกว่าค่า  
 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จริง ( $V_{sm}$ ) โดยค่าความต่างนั้นมีค่าเท่ากับ 6.49%,  
 4.01%, 4.54%, 2.80% และ 1.22% ที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง 5, 10, 15, 20 และ

25 kPa ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.5 แสดงความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วัดได้และจากการคำนวณ



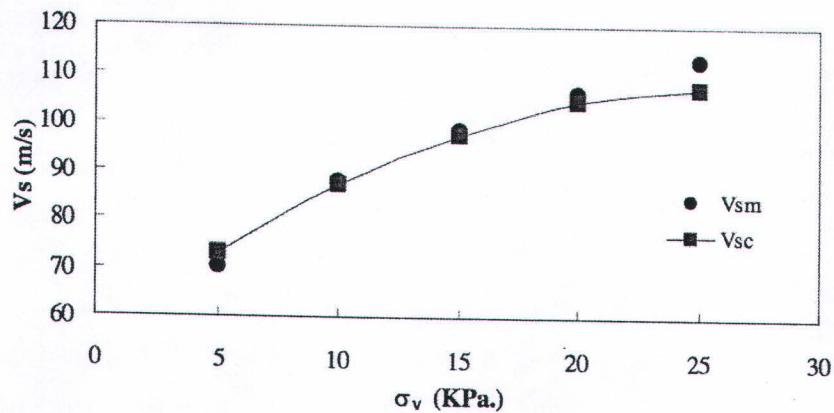
รูปที่ 4.5 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้และจากการคำนวณในกรณี A

ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข B โดยชั้น D1 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av1} = 0.652$  ชั้น D2 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av2} = 0.802$  และชั้น D3 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av3} = 0.622$  จากการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ณ ค่าหน่วยแรงแนวตั้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 kPa นั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการที่คำนวณได้จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่คำนวณ ( $V_{sc}$ ) ใต้นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จริง ( $V_{sm}$ ) โดยค่าความต่างนั้นมีค่าเท่ากับ 0.84%, 0.50%, 1.31%, 1.14% และ 3.59% ที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง 5, 10, 15, 20 และ 25 kPa ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.6 แสดงความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วัดได้และจากการคำนวณ



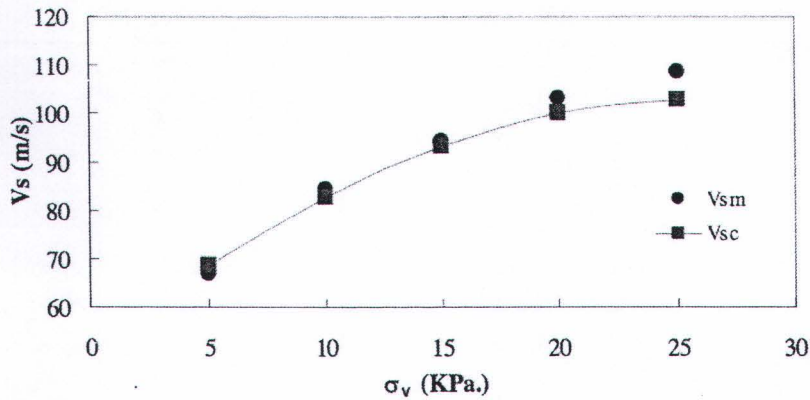
รูปที่ 4.6 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้และจากการคำนวณในกรณี B

ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข C โดยชั้น D1 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av1} = 0.823$  ชั้น D2 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av2} = 0.598$  และชั้น D3 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av3} = 0.808$  จากการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ณ ค่าหน่วยแรงแนวตั้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 kPa นั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการที่คำนวณได้จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่คำนวณ ( $V_{sc}$ ) ได้นั้นจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จริง ( $V_{sm}$ ) โดยค่าความแตกต่างนั้นมีค่าเท่ากับ 3.98%, 0.76%, 1.05%, 1.77% และ 5.17% ที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง 5, 10, 15, 20 และ 25 kPa ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.8 แสดงความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วัดได้และจากการคำนวณ



รูปที่ 4.7 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้และจากการคำนวณในกรณี C

ผลการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในเงื่อนไข D โดยชั้น D1 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av1} = 0.861$  ชั้น D2 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av2} = 0.553$  และชั้น D3 มีค่าอัตราส่วนช่องว่างเฉลี่ย  $e_{av3} = 0.823$  จากการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ณ ค่าหน่วยแรงแนวตั้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 kPa นั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมการที่คำนวณได้จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่คำนวณ ( $V_{sc}$ ) ได้นั้นจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จริง ( $V_{sm}$ ) โดยค่าความแตกต่างนั้นมีค่าเท่ากับ 2.56%, 2.01%, 1.19%, 2.95% และ 5.44% ที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวตั้ง 5, 10, 15, 20 และ 25 kPa ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.8 แสดงความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วัดได้และจากการคำนวณ



รูปที่ 4.8 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้และจากการคำนวณในกรณี D

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเร็วของคลื่นแรงเฉือนที่เดินทางผ่านมวลดินนั้นขึ้นอยู่กับค่าของสภาวะหน่วยแรง (Stress state) อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) รวมถึงความเหมือนกันของค่าความหนาแน่นภายในมวลดิน (Uniformity of soil density) โดยจากการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เราสามารถใช้ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนเพื่อประมาณค่าอัตราส่วนช่องว่างภายในมวลดินได้ดีในระดับหนึ่ง แม้ว่าจะมีความไม่ต่อเนื่องของความหนาแน่นเกิดขึ้นภายในมวลดินก็ตาม

#### 4.2 การทดสอบการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนในอุปกรณ์ทดสอบแบบแรงอัดสามแกน

การทดสอบหาความเร็วของการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนผ่านตัวอย่างดินทรายจะแบ่งออกเป็นสองการทดสอบหลัก ๆ คือ ในช่วงของการอัดตัวของดินแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation state) หรือช่วงก่อนการเฉือนตัวอย่างดินทราย และในช่วงของการเฉือน (Shear state) ตัวอย่างดิน

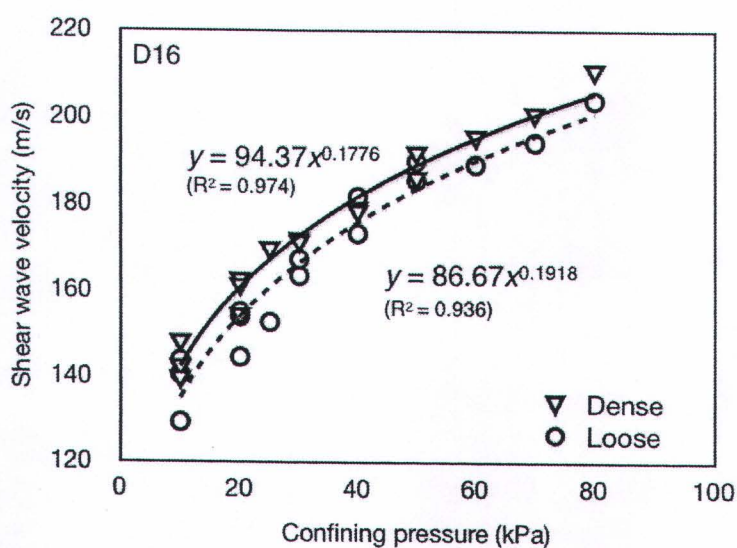
##### 4.2.1 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนช่วงการอัดตัวแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation)

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของคลื่นแรงเฉือนและหน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดิน รวมถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบบกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน เช่น การสัมผัสของเม็ดดิน อัตราส่วนช่องว่าง จำนวนจุดที่กระทบกันของเม็ดดิน (Coordination number) รวมถึงพฤติกรรมการรับแรงในอดีต (Stress history) ซึ่งแสดงไว้ใน Santamarina *et al.*, 2001 ดังนี้

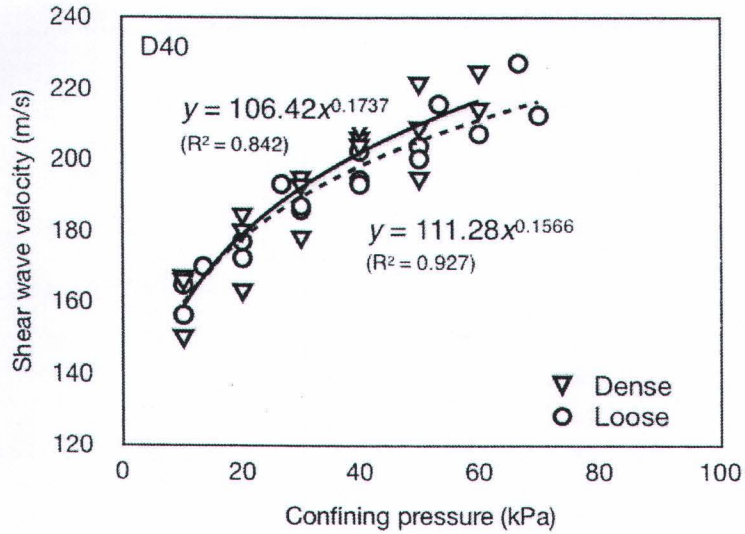
$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_o}{1 \text{ kPa}} \right)^\beta \quad (4.1)$$

ค่า  $V_s$  คือ ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ค่า  $\sigma'_o$  คือ ความเค้นอัดที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic loading)  $\alpha$  และ  $\beta$  สามารถวัดได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการทดสอบในที่ (in-situ) ซึ่งตัวแปร  $\alpha$  และ  $\beta$  ทั้งสองนี้เป็นตัวแทนของผลกระทบที่เกิดจากการตอบสนองทางกายภาพจากเม็ดดิน เช่น ผลกระทบจากการสัมผัสระหว่างเม็ดดิน อัตราส่วนช่องว่างในเม็ดดิน ค่า Coordination number ค่าหน่วยแรงในอดีต เป็นต้น

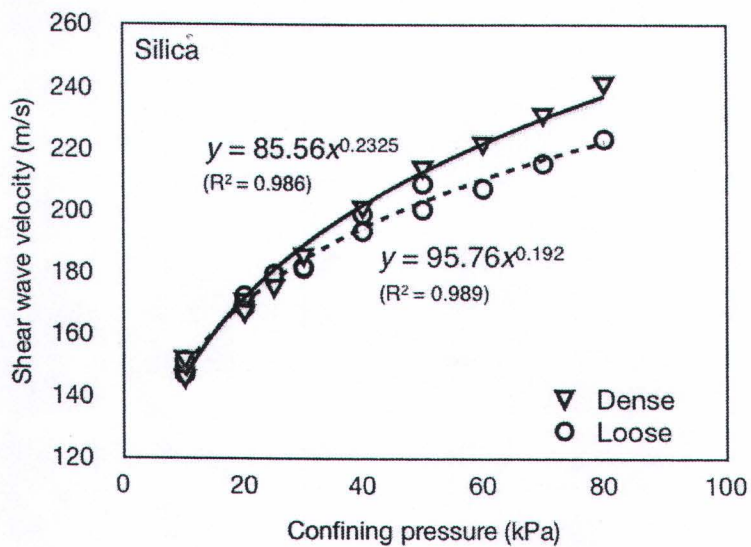
จากการตรวจสอบและวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดินทรายนั้น พบว่าค่าหน่วยแรงบีบอัด (Isotropic confining stress) มีผลต่อความเร็วคลื่นแรงเฉือนอย่างมาก โดยความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะเคลื่อนที่ได้เร็วมากขึ้นเมื่อหน่วยแรงบีบอัดนั้นมีขนาดเพิ่มมากขึ้น โดยเราสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่สำคัญสองตัว คือ ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $V_s$ ) และค่าความเค้นอัดที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic confining pressure,  $\sigma'_o$ ) ที่มีลักษณะเหมือนกับในสมการที่ 4.1 ได้ดังรูปที่ 4.9 ที่แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_s$  และ  $\sigma'_o$  ของตัวอย่างดินทราย D16 ที่มีสภาพความหนาแน่นแบบหลวม (loose) และแน่น (dense) และรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_s$  และ  $\sigma'_o$  ของตัวอย่างดินทราย D40 และ Silica โดยจะเห็นได้ว่าสมการความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบ Polynomial ซึ่งค่าคงที่  $\alpha$  และเลขยกกำลัง  $\beta$  ของแต่ละสมการจะมีค่าที่แตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างของเส้นโค้งระหว่างดินสภาพแน่นและสภาพหลวมนั้นมีไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบที่มีความเค้นบีบอัดที่น้อยมาก ( $\sigma'_o = 10 - 20$  kPa) ซึ่งความแตกต่างนี้จะสังเกตเห็นได้มากขึ้นเมื่อความเค้นบีบอัดมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและความเค้นบีบอัดของดินทราย D16 ในสภาพหลวมและสภาพแน่น



รูปที่ 4.10 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและความเค้นบีบอัดของดินทราย D40 ในสภาพหลวมและสภาพแน่น



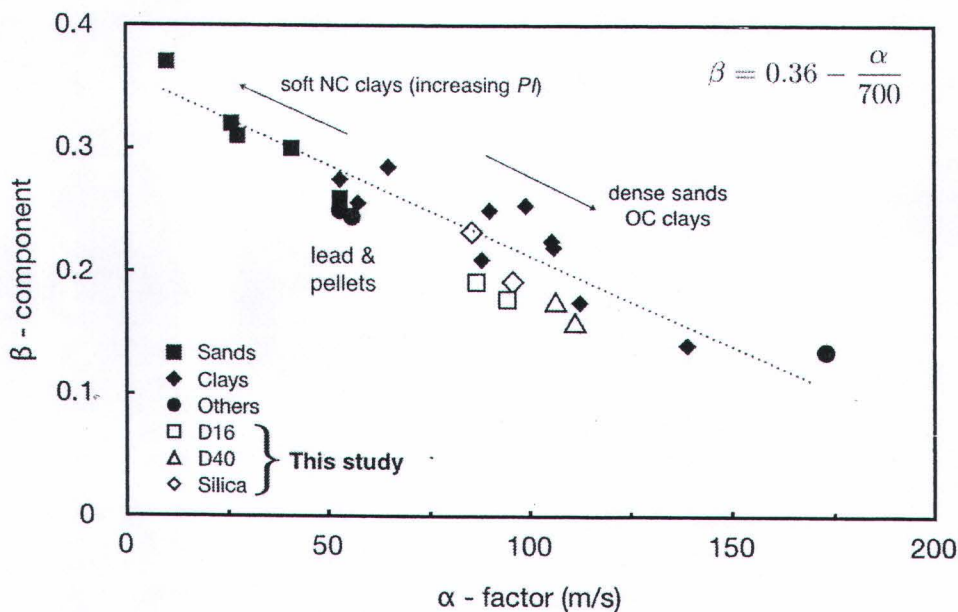
รูปที่ 4.11 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและความเค้นบีบอัดของดินทราย Silica ในสภาพหลวมและสภาพแน่น

จากผลของการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและความเค้นบีบอัดในสภาวะต่าง ๆ ของดินทราย เราสามารถประมาณค่าของสัมประสิทธิ์  $\alpha$  และเลขยกกำลัง  $\beta$  ได้ Santamarina *et al.* (2001) ได้ทำการรวบรวมค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  และเลขยกกำลัง  $\beta$  จากการทดสอบดินเหนียว ดินทราย ลูกเหล็ก และตะกั่ว ในกรณีต่าง ๆ (รูปที่ 4.12) ซึ่งสามารถสรุปค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  และเลขยกกำลัง  $\beta$  ได้ดังสมการเส้นตรงที่ (4.2)



$$\beta = 0.36 - \frac{\alpha}{700} \quad (4.2)$$

และจากผลการทดสอบในงานวิจัยฉบับนี้จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  และเลขยกกำลัง  $\beta$  ที่ได้นั้นจะมีค่าที่อยู่ในบริเวณที่ต่ำกว่าสมการเส้นตรงดังกล่าวเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟเส้นตรงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  นั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเลขยกกำลัง  $\beta$  นั้นมีค่าลดลง



รูปที่ 4.12 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  และเลขยกกำลัง  $\beta$

[Reproduced from Santamarina *et al.* (2001)]

Santamarina *et al.* (2001) ได้อธิบายถึงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  ว่าประกอบไปด้วยตัวแปรที่สำคัญสองตัว คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง (Sample density) และลักษณะของเม็ดดิน (Fabric characteristics) ถ้าเราจำแนกค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  ออกเป็นตัวแปรอีกสองตัว คือ 1) ค่า  $A$  เป็นตัวแปรที่เกิดจากผลกระทบของลักษณะเม็ดดิน (grain characteristic) และ 2)  $F(e)$  เป็นตัวแปรที่เกิดจากผลกระทบของความหนาแน่นของตัวอย่างดิน (Packing properties) เช่น อัตราส่วนช่องว่าง ( $e$ ) และค่า Coordination number ( $C_n$ )

ดังนั้นถ้าเราทำการวัดคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างดินชนิดเดียวกัน แต่ทำการตรวจวัดที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน เช่น ตรวจวัดในดินที่มีการเตรียมตัวอย่างดินที่มีค่าความหนาแน่นหลวม (Loose) และในตัวอย่างดินชนิดเดียวกันที่มีค่าความหนาแน่นสูง (Dense) เราจะสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนช่องว่าง ( $e$ ) ได้โดยประมาณ เนื่องจากค่า  $A$  และค่า Coordination number

( $C_n$ ) นั้นเป็นค่าเดียวกัน ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการที่ 4.1 ได้ใหม่ดังสมการที่ 4.3 Santamarina *et al.* (2001)

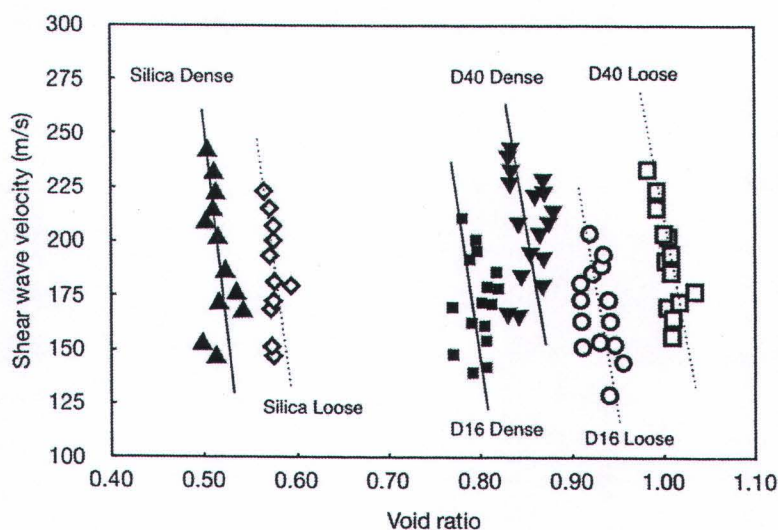
$$V_s = AF(e) \left( \frac{\sigma'_o}{1 \text{ kPa}} \right)^\beta \quad (4.3)$$

โดยฟังก์ชัน  $F(e)$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดยนักวิจัยหลาย ๆ ท่านในอดีตจากการทดสอบแบบ Resonant column, cyclic triaxial และ ultrasonic pulse ฟังก์ชันที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นแสดงได้ดังสมการที่ 4.4 และ 4.5 ที่ถูกนำเสนอโดย Hardin & Richard (1963) สำหรับอนุภาคดินทรงกลม (round particle) และสำหรับอนุภาคดินแบบเหลี่ยม (angular particle) ตามลำดับ จากสมการที่ 4.3 เราสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $V_s$  และค่าอัตราส่วนช่องว่าง ( $e$ ) ของดินแบบต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.13

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (\text{round particles}) \quad (4.4)$$

$$F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \quad (\text{angular particles}) \quad (4.5)$$

จากรูปที่ 4.13 เราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $V_s - e$  ให้มีลักษณะเป็นเส้นตรง แม้ว่าในเม็ดดินที่ค่อนข้างเป็นเหลี่ยมมุมเช่น D16 และ D40 ค่าความสัมพันธ์จะมีค่อนข้างกระจัดกระจายมากกว่าดินที่มีความมนกลมก็ตาม นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่า เมื่ออัตราส่วนช่องว่างภายในดินเพิ่มมากขึ้น ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนจะเดินทางได้ช้าลง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_s - e$  ของตัวอย่างดิน D16, D40 และ Silica ที่ความหนาแน่นแบบหลวมและแบบแน่น

#### 4.2.2 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนระหว่างการเฉือน (Shearing state)

หลังจากตัวอย่างดินได้ถูกบีบอัดให้ได้ตามความเค้นเริ่มต้นที่ต้องการแล้ว ตัวอย่างดินทลายจะถูกเฉือนในเครื่องมือทดสอบโดยการเพิ่มแรงอัดตามแนวตั้งด้วยอัตราการกดที่น้อยมาก (ประมาณ 0.5 มม./นาที) ในขณะที่แรงอัดตามแนวนอนมีค่าคงที่ด้วยแรงดูดโดยสูญญากาศ (Vacuum suction) ตลอดการทดสอบ Santamarina *et al.* (2001) ได้รวบรวมสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $V_s$ ) ที่เดินทางไปตามแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  ที่เป็นทิศทางหรือแกนของแรงกระทำ  $\sigma'_3$  และ  $\sigma'_1$  ตามลำดับ ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic compression) และ  $V_s$  แสดงได้ดังสมการที่ 4.6 และ 4.7

$$V_s = \Omega \left( \frac{\sigma'_3}{1 \text{ kPa}} \right)^\theta \left( \frac{\sigma'_1}{1 \text{ kPa}} \right)^\delta \quad (4.6)$$

$$V_s = \Theta \left( \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2 \text{ kPa}} \right)^\zeta \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2 \text{ kPa}} \right)^\psi \quad (4.7)$$

โดยค่า  $\Omega$  และ  $\Theta$  นั้นเป็นตัวแปรที่มีลักษณะเหมือนกับในกรณีของการรับแรงที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic loading) ดังเช่นในสมการที่ 4.1 ที่เป็นอิทธิพลของอัตราส่วนช่องว่างที่มีการจัดเรียงตัวในตัวอย่างดิน และเลขยกกำลัง  $\theta, \delta, \zeta, \psi$  นั้นเป็นอิทธิพลของผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินซึ่งสามารถวัดค่าได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม Santamarina *et al.* (2001) ได้รายงานว่าอิทธิพลของค่า  $\Omega$  และ  $\Theta$  จะมีผลกระทบต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนน้อยมากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการสัมผัสกันระหว่างเม็ดดินขณะที่เม็ดดินมีการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงกระทำของแรงเฉือนที่เกิดขึ้น Santamarina & Cascante (1996) ได้ทดสอบตัวอย่างดินแบบ Resonant-column เพื่อตรวจวัดอิทธิพลของแรงอัดและแรงเฉือนต่อการเคลื่อนที่ผ่านเม็ดดินของคลื่นแรงเฉือนที่ระดับความเค้นที่ต่ำมาก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าของเลขยกกำลัง  $\theta$  และ  $\delta$  มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $\beta$  ที่ตรวจวัดได้จากกรณีของการทดสอบแบบแรงอัดเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic loading) โดย  $\theta + \delta = \beta$  นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าความเค้นที่กระทำในทิศทางของการเคลื่อนที่ของเม็ดดินจะมีผลกระทบในการเคลื่อนที่ของคลื่นแรงเฉือนมากกว่า (มีเลขยกกำลังที่สูงกว่า) ความเค้นในทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นแรงเฉือน

ในส่วนของเลขยกกำลัง  $\zeta$  และ  $\psi$  พบว่า เลขยกกำลัง  $\zeta$  ในเทอมของความเค้นเฉลี่ยประสิทธิภาพ (Mean effective stress) นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าของเลขยกกำลัง  $\beta$  ส่วนเลขยกกำลังในเทอมของความเค้นเบี่ยงเบน (Deviatoric stress) นั้นมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ ( $\sim 0$ ) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า สำหรับการทดสอบที่มีค่าอัตราส่วนความเค้นประสิทธิภาพ (Stress ratio,  $q'/p'$ ) ที่ไม่

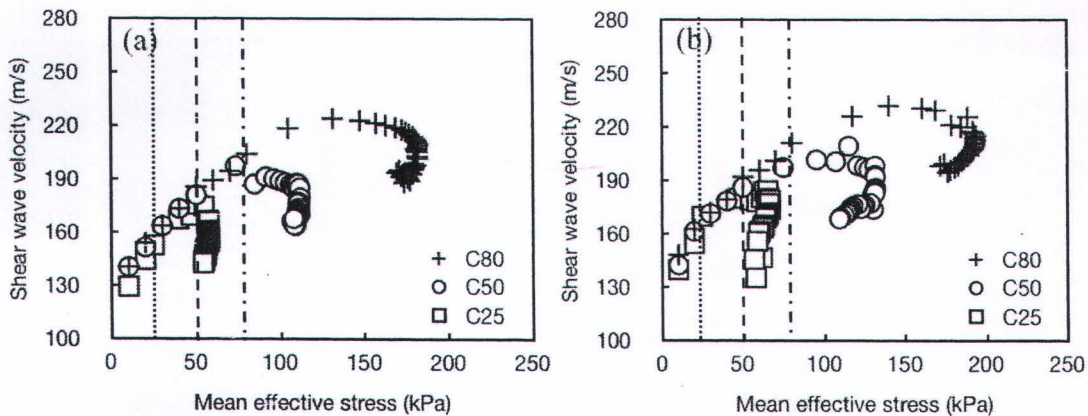
สูงมากนัก (ประมาณ 2-3) การคำนวณค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในช่วงของแรงอัดที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic) อาจทำได้โดยการใช้สมการที่ 4.8

$$V_s = \Psi \left( \frac{\sigma'_{mean}}{1 \text{ kPa}} \right)^{\varphi} \quad (4.8)$$

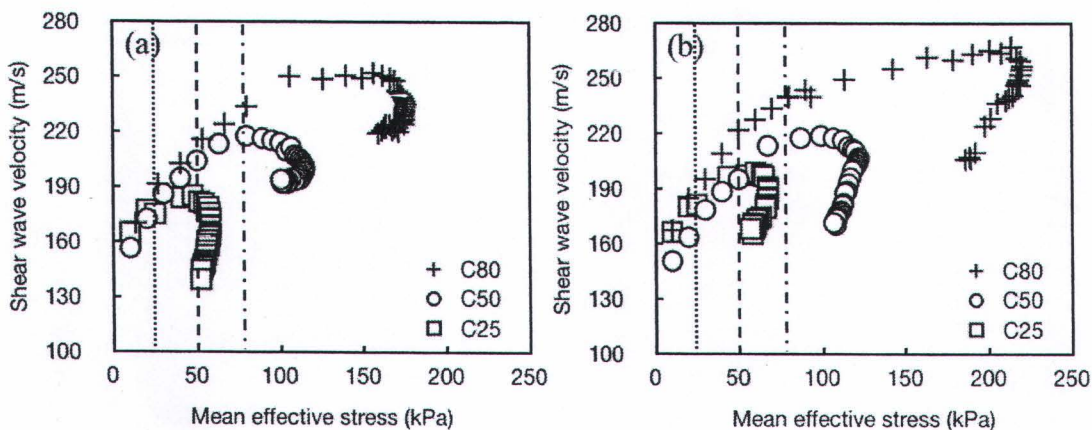
โดยค่าสัมประสิทธิ์  $\Psi$  คือ ผลกระทบของอัตราส่วนช่องว่าง  $\varphi$  แสดงถึงผลกระทบของพฤติกรรมจากการสัมผัสระหว่างเม็ดดินภายใต้การรับแรงกระทำแบบที่ไม่เท่ากันทุกทิศทางและ  $\sigma'_{mean}$  คือค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล รูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือน ( $V_s$ ) และค่า  $\sigma'_{mean}$  (Mean effective stress) ของดินทราย D16, D40 และ Silica ที่ความเค้นบีบอัดที่แตกต่างกัน ( $\sigma'_c = 25, 50$  และ  $80 \text{ kPa}$ ) จากรูปกราฟดังกล่าวจะเห็นว่า สภาวะเริ่มต้นของตัวอย่างดิน เช่น ดินที่มีสภาพหลวมและสภาพแน่นที่มีค่าความเค้นบีบอัดที่แตกต่างกัน มีผลกระทบต่อการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าขนาดเม็ดดินมีผลกระทบต่อความเร็วคลื่นแรงเฉือนด้วยเช่นกัน โดยตัวอย่างดินที่มีขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่าจะมีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่มากกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าเม็ดดินที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินที่มากกว่าเม็ดดินขนาดใหญ่ จากรูปกราฟความสัมพันธ์ยังพบอีกว่าเมื่อค่าความเค้นประสิทธิผลมีค่าถึงระดับหนึ่ง เช่น หลังจากตัวอย่างดินเริ่มถูกแรงเฉือนมากระทำ ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.8 จะไม่สามารถใช้ได้ต่อไปเนื่องด้วยผลกระทบจากการเกิดปรากฏการณ์ Localization ในตัวอย่างดิน

จากผลการทดสอบการวัดคลื่นแรงเฉือนในเครื่องมือทดสอบแบบแรงอัดสามแกนระหว่างการเฉือนตัวอย่างดินที่เกิดลักษณะการรับแรงแบบไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic loading) นั้นยังพบว่าอิทธิพลของความเค้นเบี่ยงเบน (Deviatoric stress,  $\sigma'_1 - \sigma'_3$ ) นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลของค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล ( $\sigma'_{mean}$ ) รูปที่ 4.17 - 4.19 ซึ่งผลของการทดสอบนี้ตรงกับงานของ Santamarina & Cascante (1996) รูปที่ 4.20 - 4.22 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนประสิทธิผลและความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล (Principal stress ratio,  $q'/p'$ ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า  $q'/p'$  มีค่ามากกว่า 1.2 ความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ลดลงนี้สามารถอธิบายได้จากการเกิดความไม่ต่อเนื่องหรือความไม่สม่ำเสมอ (Non-homogeneous) ขึ้นในตัวอย่างดิน ทำให้ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีค่าลดลงจากการที่อัตราส่วนช่องว่างในตัวอย่างดินในบางแห่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทพลังงานภายในมวลดินเหล่านั้น

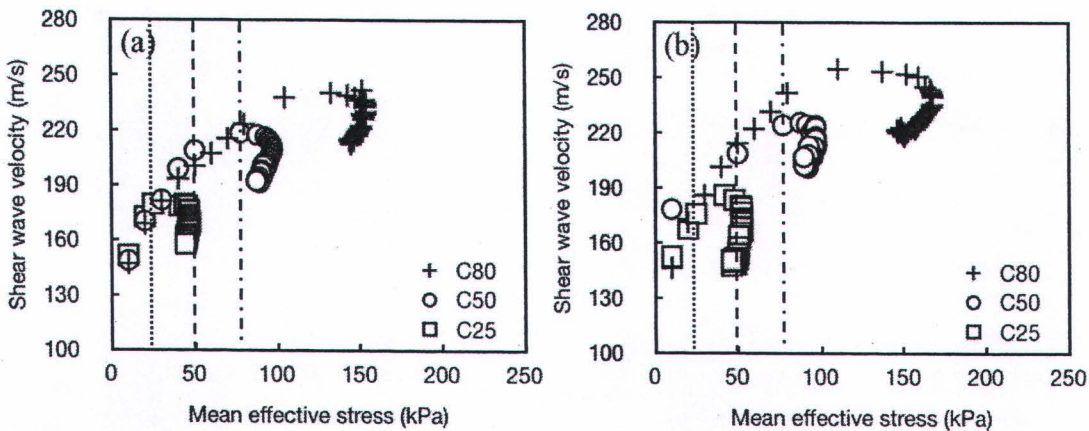
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดินทรายทั้งในขั้นตอนการบีบอัดและขั้นตอนการเฉือนตัวอย่างดินในอุปกรณ์การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน



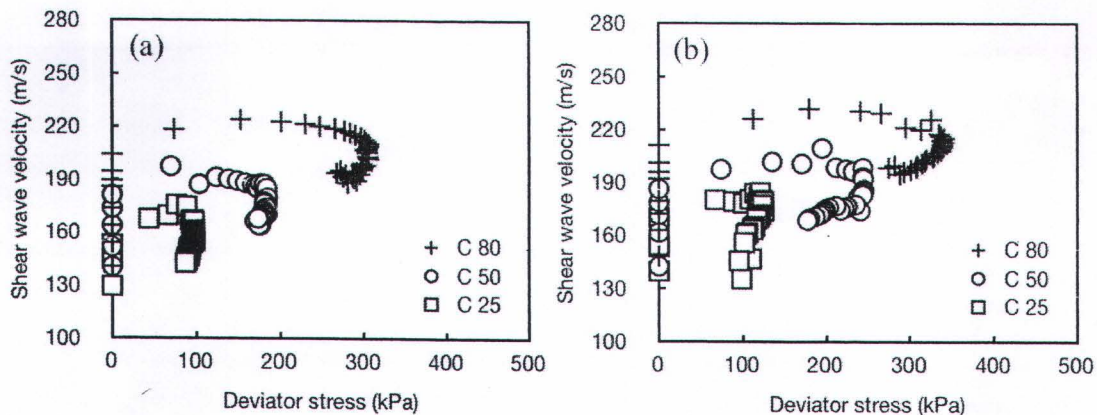
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลของดินทราย D16 ที่ความเค้นบีบอัดที่ต่างกัน a) สภาพหลวม b) สภาพแน่น



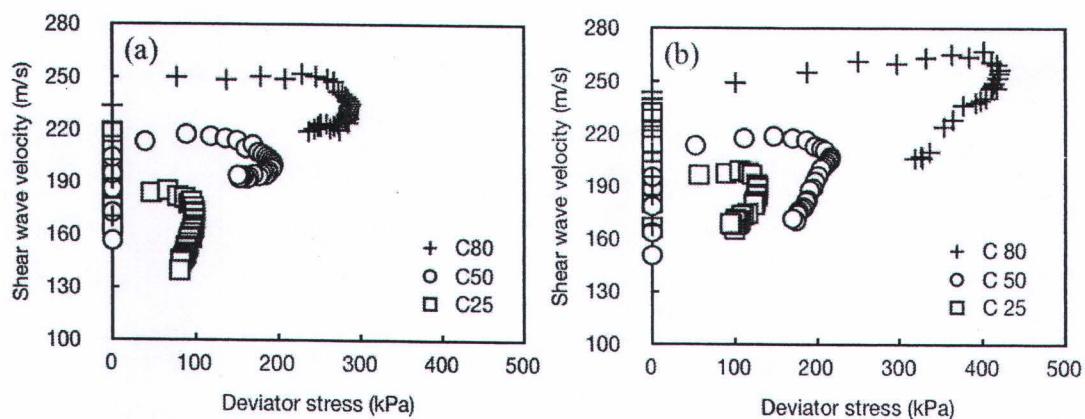
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลของดินทราย D40 ที่ความเค้นบีบอัดที่ต่างกัน a) สภาพหลวม b) สภาพแน่น



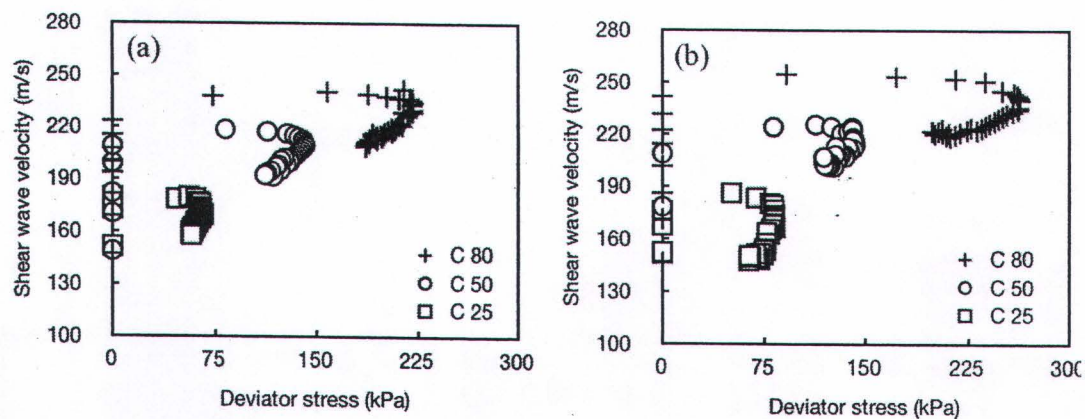
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลของดินทราย Silica ที่ความเค้นบีบอัดที่ต่างกัน a) สภาพหลวม b) สภาพแน่น



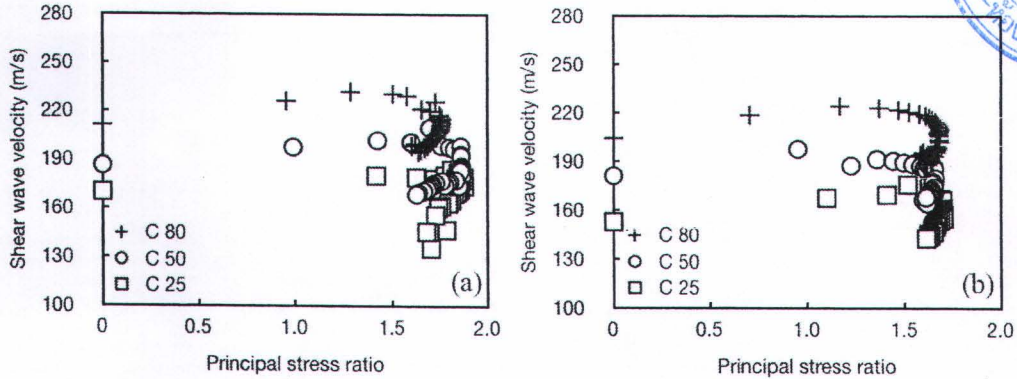
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าความเค้นเบี่ยงเบนของดินทราย D16 ที่ความเค้นบีบอัดที่ต่างกัน a) สภาพหลวม b) สภาพแน่น



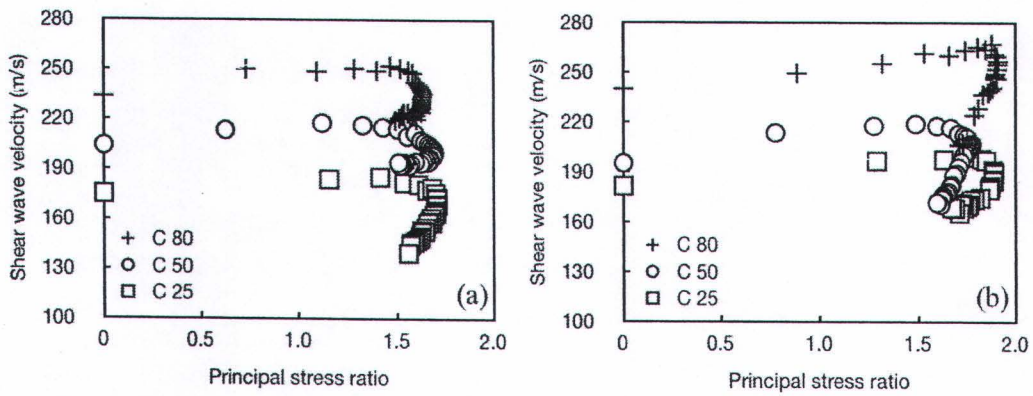
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าความเค้นเบี่ยงเบนของดินทราย D40 ที่ความเค้นบีบอัดที่ต่างกัน a) สภาพหลวม b) สภาพแน่น



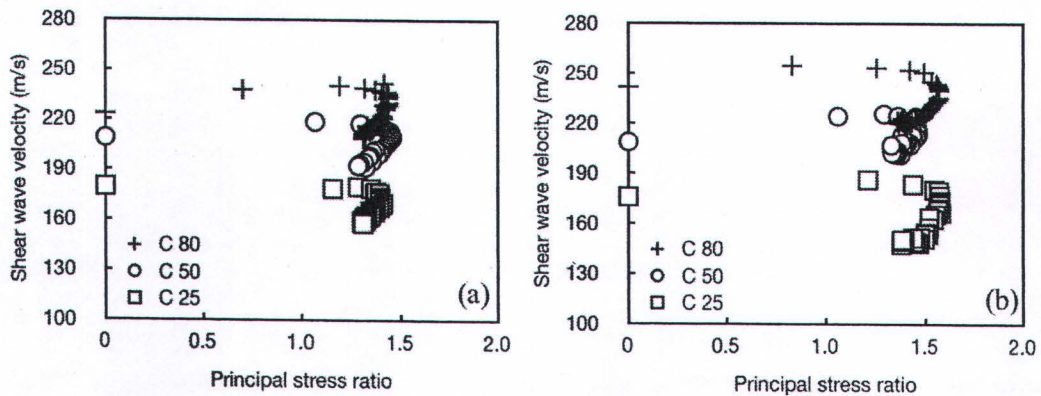
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าความเค้นเบี่ยงเบนของดินทราย Silica ที่ความเค้นบีบอัดที่ต่างกัน a) สภาพหลวม b) สภาพแน่น



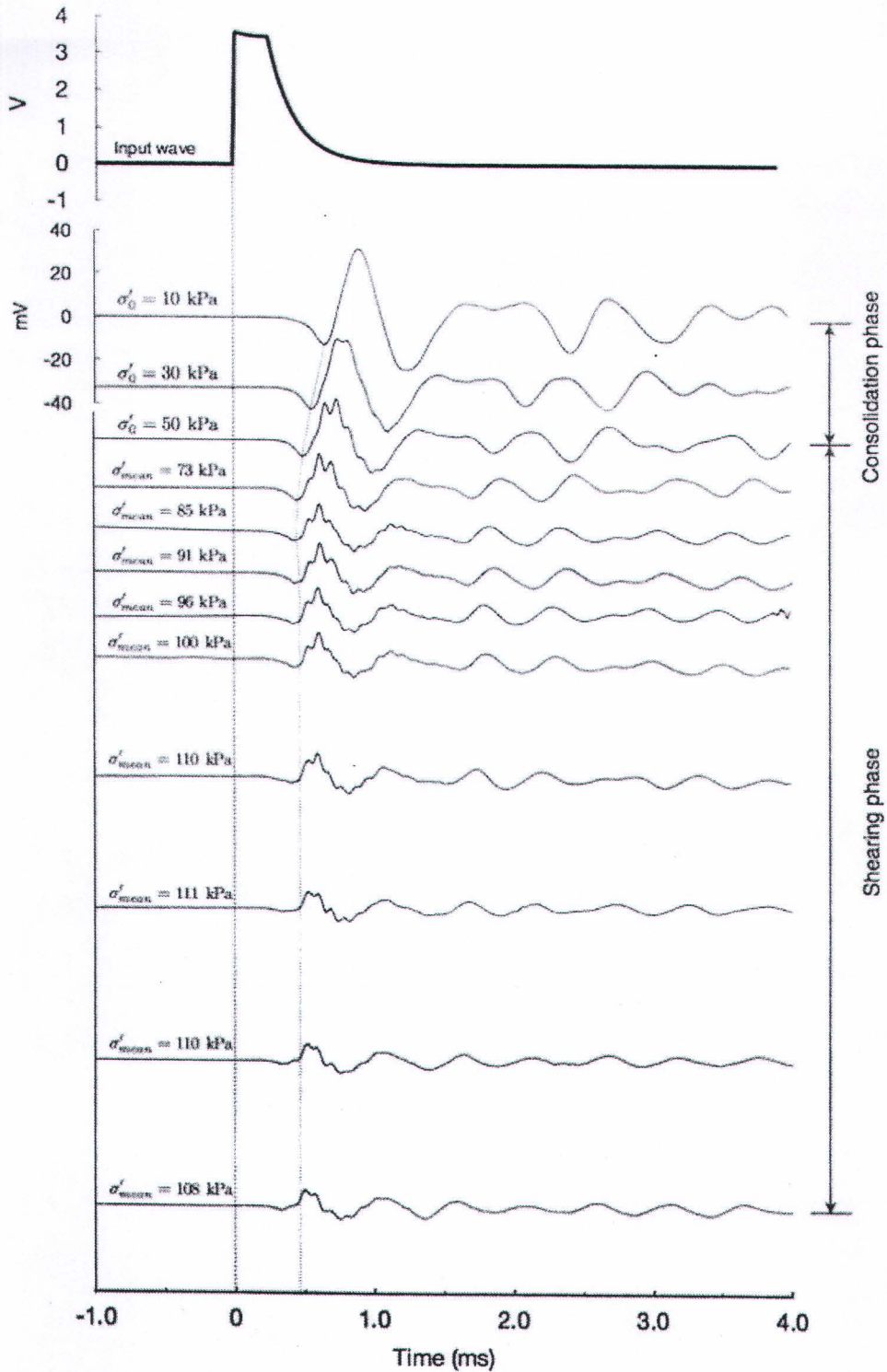
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉื่อยประสิทธิผล (Principal stress ratio,  $q'/p'$ ) ของตัวอย่างดินทราย *D16* ที่ความเค้นบีบอัดต่าง ๆ a) สภาพแน่น b) สภาพหลวม



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉื่อยประสิทธิผล (Principal stress ratio,  $q'/p'$ ) ของตัวอย่างดินทราย *D40* ที่ความเค้นบีบอัดต่าง ๆ a) สภาพแน่น b) สภาพหลวม



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉื่อยประสิทธิผล (Principal stress ratio,  $q'/p'$ ) ของตัวอย่างดินทราย *Silica* ที่ความเค้นบีบอัดต่าง ๆ a) สภาพแน่น b) สภาพหลวม



รูปที่ 4.23 กราฟคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดินทรายในขั้นตอนการบีบอัดแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic consolidation) และขั้นตอนการเฉือน (Shearing) ตัวอย่างดินในอุปกรณ์การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน



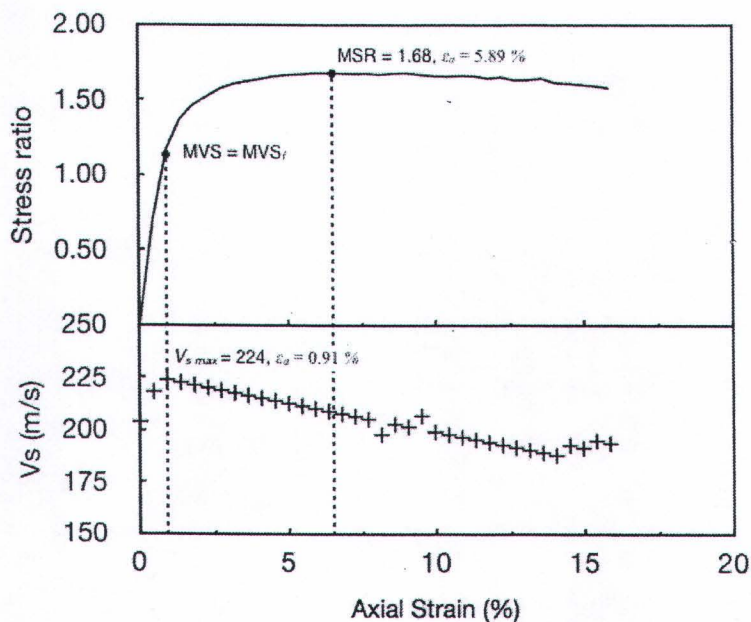
### 4.3 การตรวจวัดการเกิด Localization จากการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างดิน

การตรวจวัดการเกิดปรากฏการณ์ Localization ในดินทรายแต่ละชนิดในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบจากค่าความเร็วของคลื่นแรงเฉือนและค่าอัตราส่วนความเค้นหลักระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล (Principal stress ratio,  $q'/p'$ ) รวมถึงจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image analysis) มาช่วยในการวิเคราะห์การเกิด Localization ในตัวอย่างดินด้วยเช่นกัน เพื่อช่วยให้สามารถตรวจสอบช่วงเวลาในการเกิด (Initiation) และพัฒนาการ (Persistent) ของความไม่ต่อเนื่องในดินทรายเป็นต้นไปให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ดียิ่งขึ้น

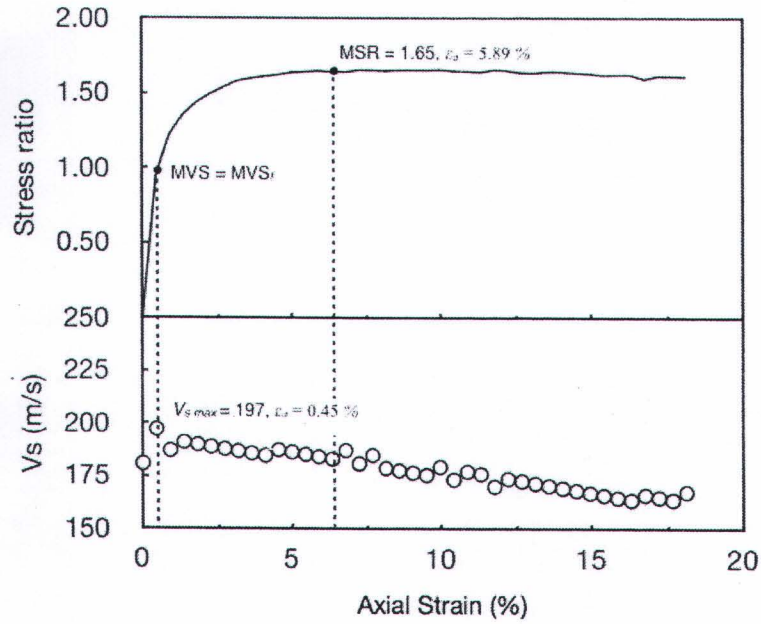
#### 4.3.1 การตรวจวัดการเกิด Localization จากความเร็วคลื่นแรงเฉือนและอัตราส่วนระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล (Principal stress ratio, $q'/p'$ )

จากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยหลายชิ้นในอดีตพบว่าดินทรายเมื่อถูกกระทำจากความเค้นเฉือนจนถึงจุดหนึ่งจะเกิดความไม่ต่อเนื่องในรูปแบบของรอยเลื่อนขึ้นในมวลดิน โดยความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวจะเริ่มที่จุดที่ใกล้กับค่า  $q'/p'$  ที่สูงที่สุดและความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวนี้จะพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง (Desrues & Viggiani, 2004; Finno *et al.*, 1997; Sachan and Penumadu, 2007) รูปที่ 4.24 – 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนตลอดช่วงของการทดสอบจนตัวอย่างวิบัติและค่า  $q'/p'$  ของดินทราย D16, D40 และ Silica ที่ความเค้นบีบอัดต่าง ๆ ในสภาพหลวมและสภาพแน่น จากผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ก่อนข้างมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน สามารถแสดงผลสรุปจากการทดสอบแบบต่าง ๆ (Typical results) ได้ดังรูปที่ 4.42 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ในช่วงต้นของการทดสอบกล่าวคือช่วงของการบีบอัดตัวของตัวอย่าง (Consolidation state) และในช่วงแรกของการเฉือนตัวอย่าง (Shearing state) หรือในช่วงของความเครียดที่ไม่เกินประมาณ 2% ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเค้นอัดตัว / ค่าความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผล ซึ่งการเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear relation) นี้จะพบได้เฉพาะช่วงที่ตัวอย่างดินยังไม่เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในมวลตัวอย่างดินหรือในช่วงที่ตัวอย่างดินยังอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic range) หลังจากที่ตัวอย่างดินถูกความเค้นเฉือนกระทำถึงจุดคลาก (Yield point) หรือจุดที่มวลดินเปลี่ยนจากสถานะสม่ำเสมอ (Uniform) ไปสู่สถานะที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) ในบางจุดภายในมวลดินแล้วนั้น ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะมีค่าสูงที่สุด (Maximum shear wave velocity, MVS) และจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจุดคลากที่เกิดขึ้นนี้เป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟระหว่างค่า  $q'/p'$  และค่าความเครียดตามแนวแกน (Axial strain) (รูปที่ 4.42) นอกจากนี้จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ลดลงนี้ไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่าง ลักษณะ และขนาดของเม็ดดิน แต่ขึ้นอยู่กับสภาพความเริ่มต้นของดิน (Initial condition) เนื่องจากรูปภาพ

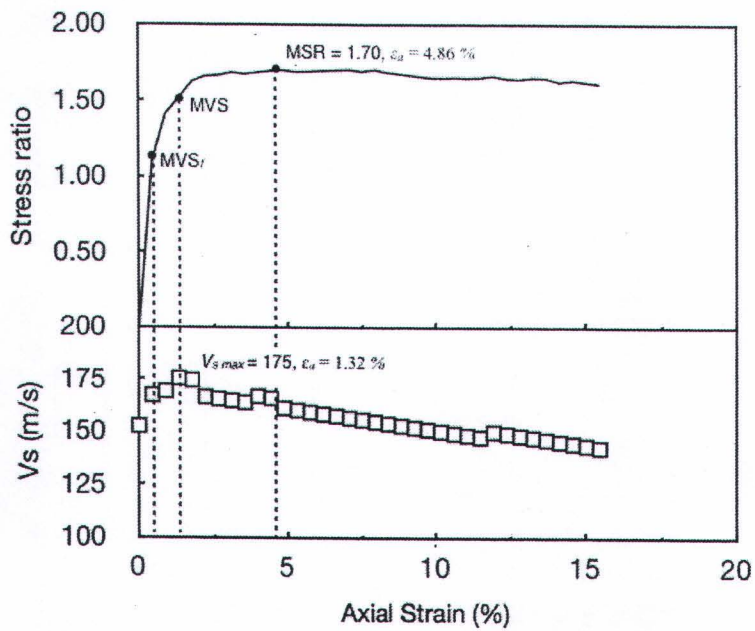
แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างดินที่มีสถานะเริ่มต้นก่อนการทดสอบอยู่ในสภาพแน่น ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะลดลงมากกว่าตัวอย่างดินที่มีสถานะเริ่มต้นอยู่ในสภาพหลวม โดยการลดลงของความเร็วคลื่นแรงเฉือนนั้นสามารถอธิบายได้จาก 2 กรณีที่สำคัญ คือ เกิดจากตัวอย่างดินมีความสูงลดลงจากแรงกดที่กระทำ และเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในตัวอย่างดินทรายในบางจุด แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ที่จุดสูงสุดของค่า  $q'/p'$  นั้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ชัดเจน ดังนั้นจึงมีการทำการวิเคราะห์ผลเพิ่มเติมโดยการใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายจากการถ่ายตัวอย่างดินระหว่างการทดสอบในทุก ๆ 0.5 มิลลิเมตรของการกดทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน



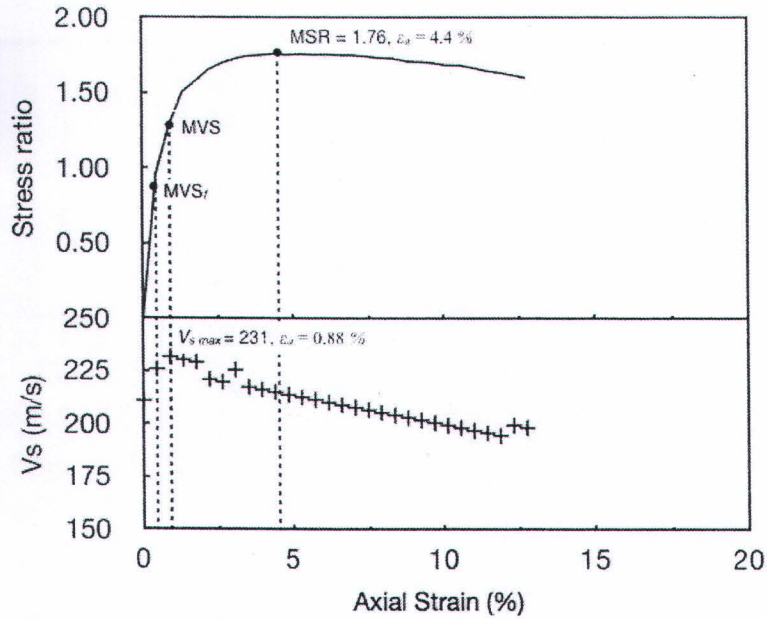
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ ) ของดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



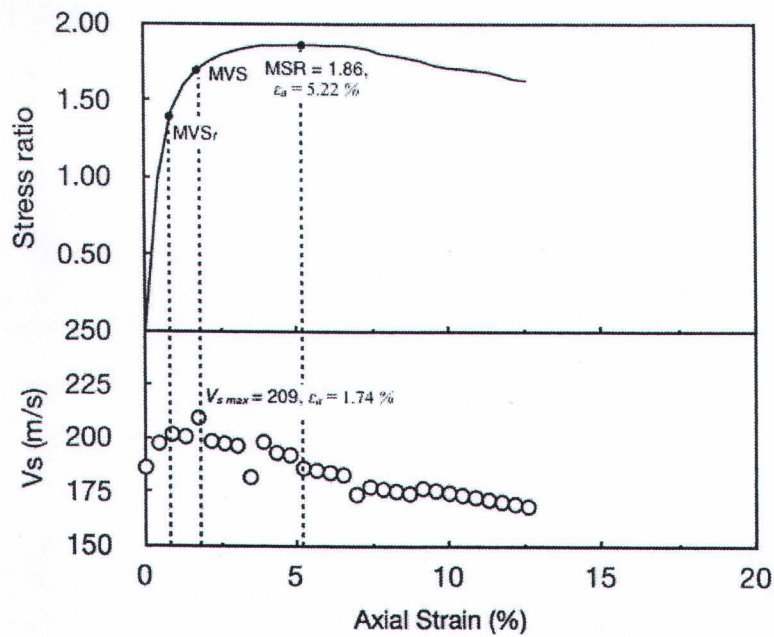
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 50$  kPa



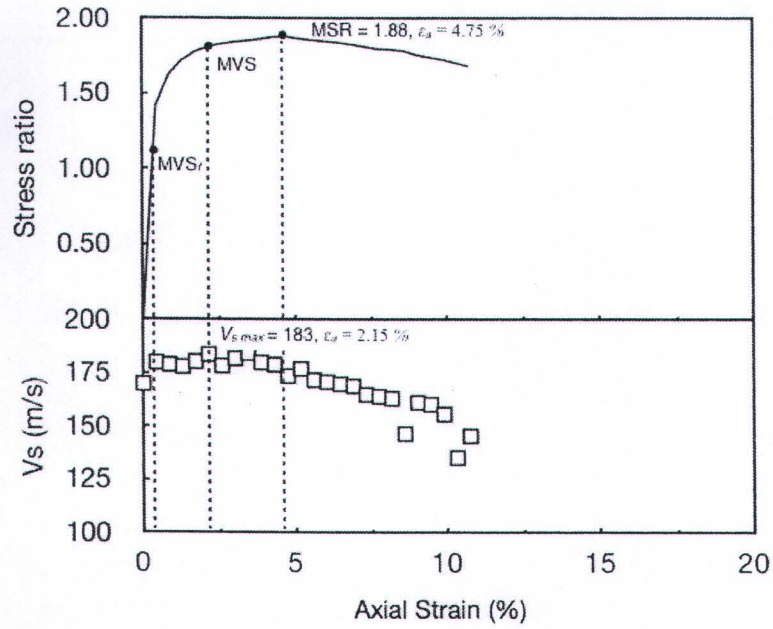
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



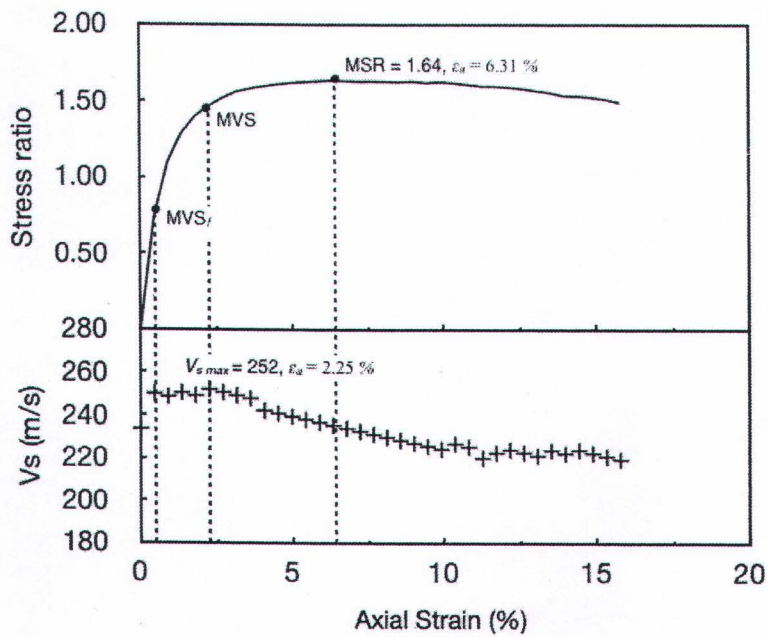
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



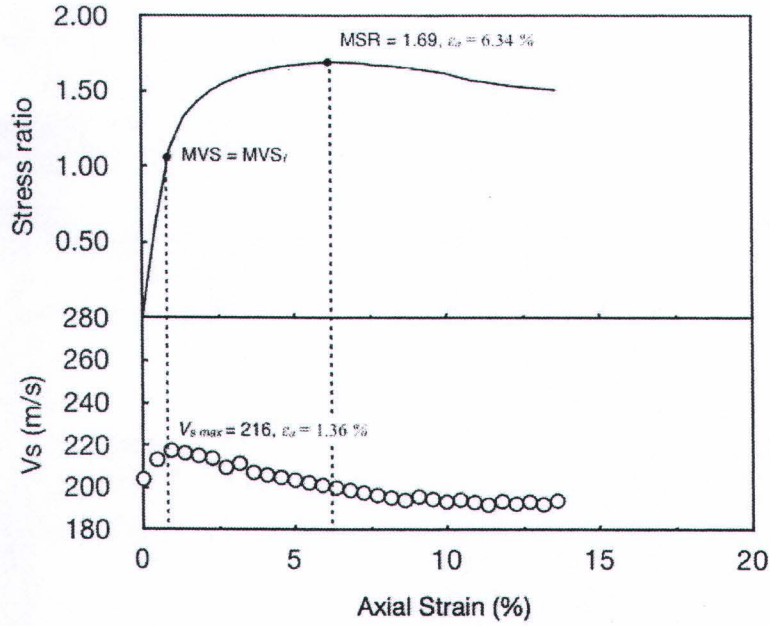
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 50$  kPa



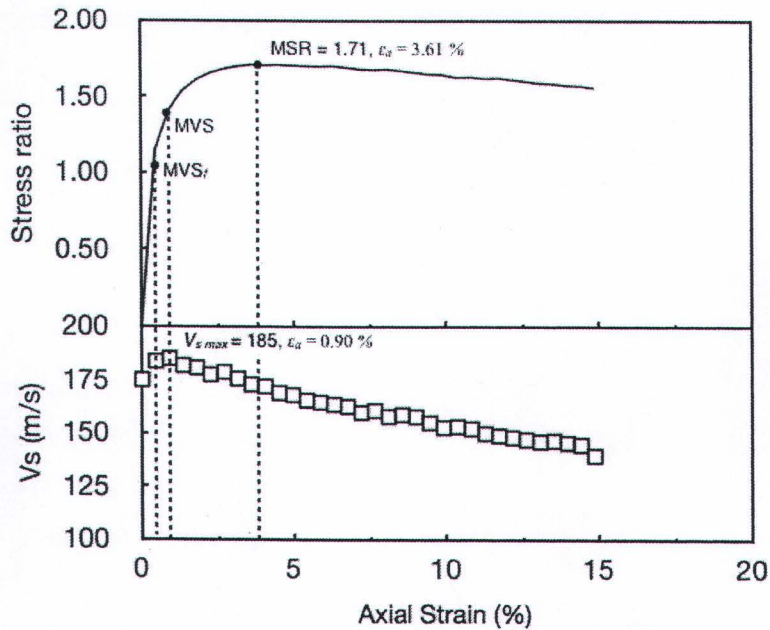
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



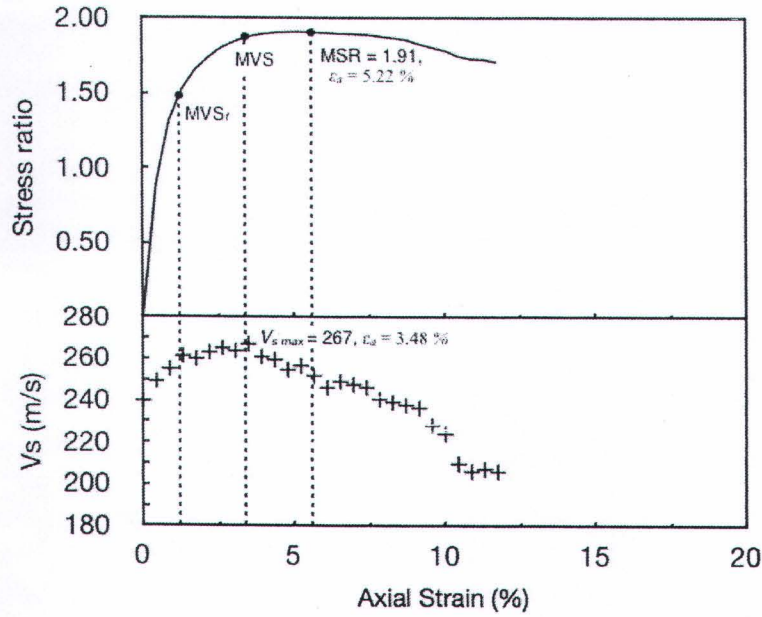
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D40 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



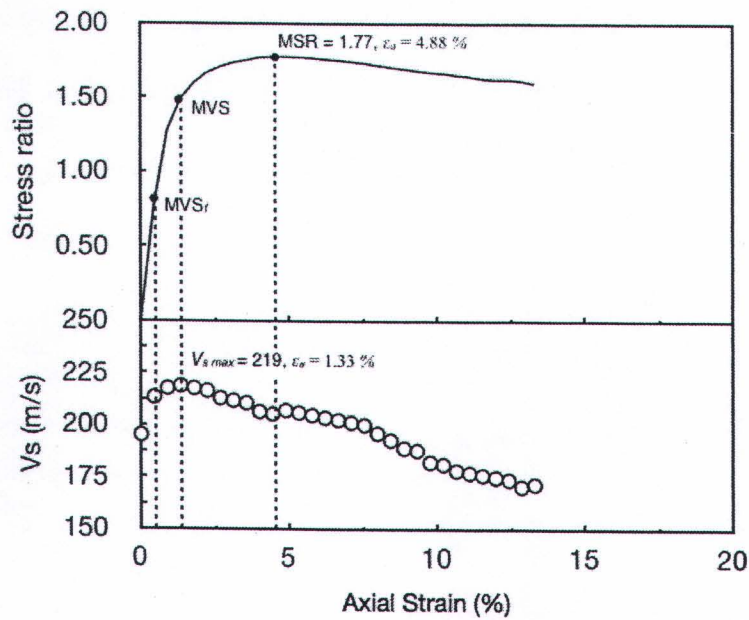
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ ) ของดินทราย D40 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 50$  kPa



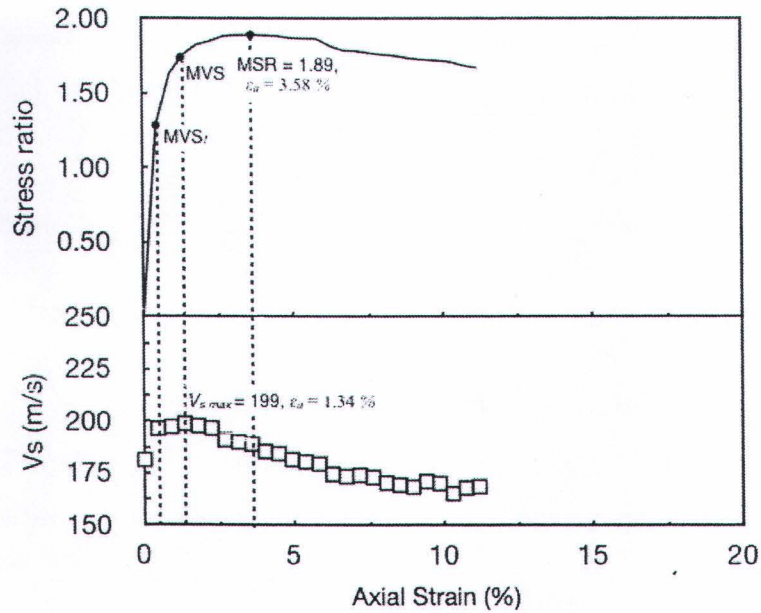
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ ) ของดินทราย D40 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



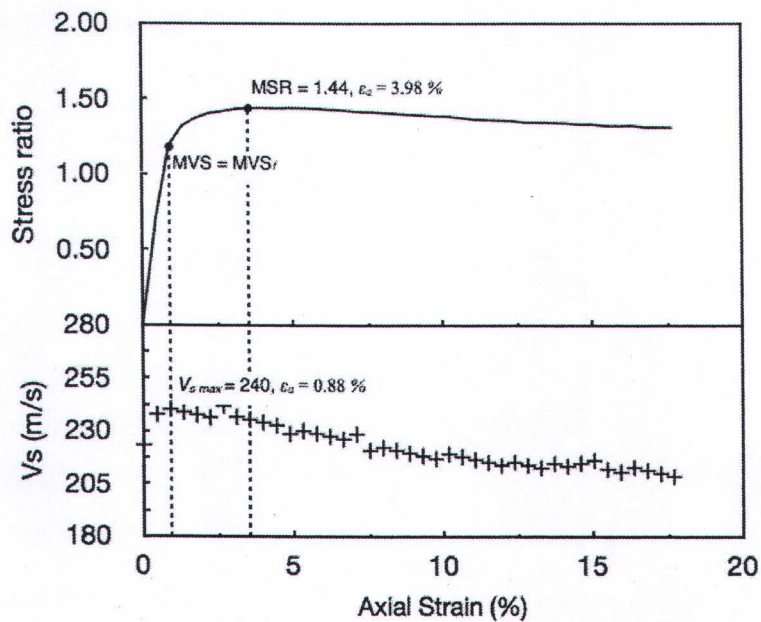
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D40 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D40 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 50$  kPa

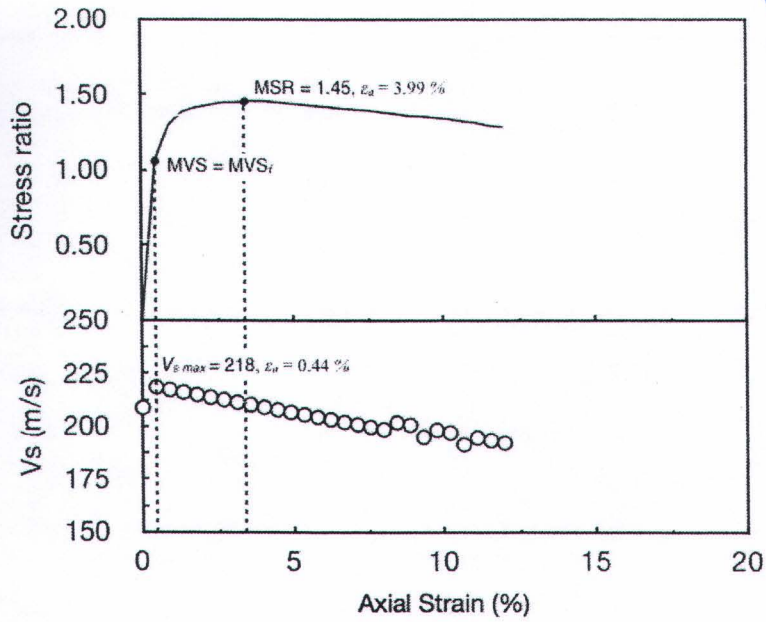


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย D40 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 25$  kPa

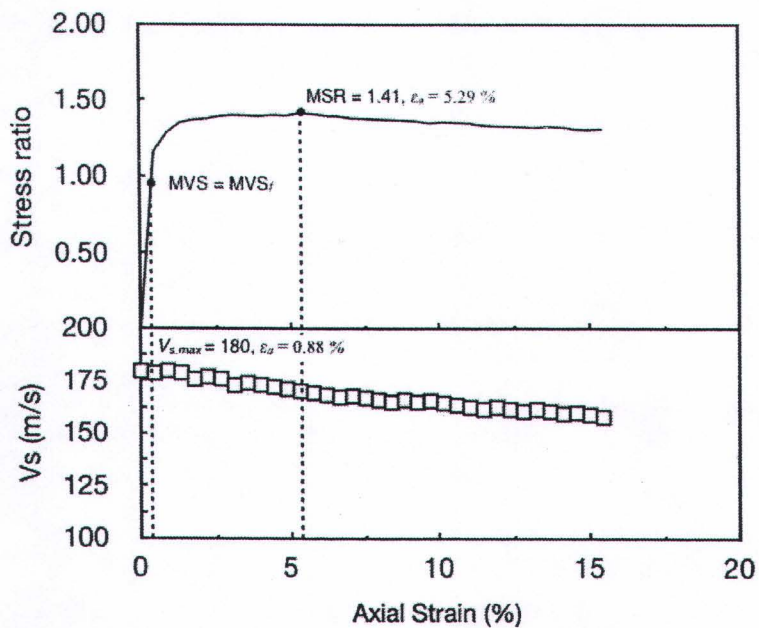


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย Silica สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa

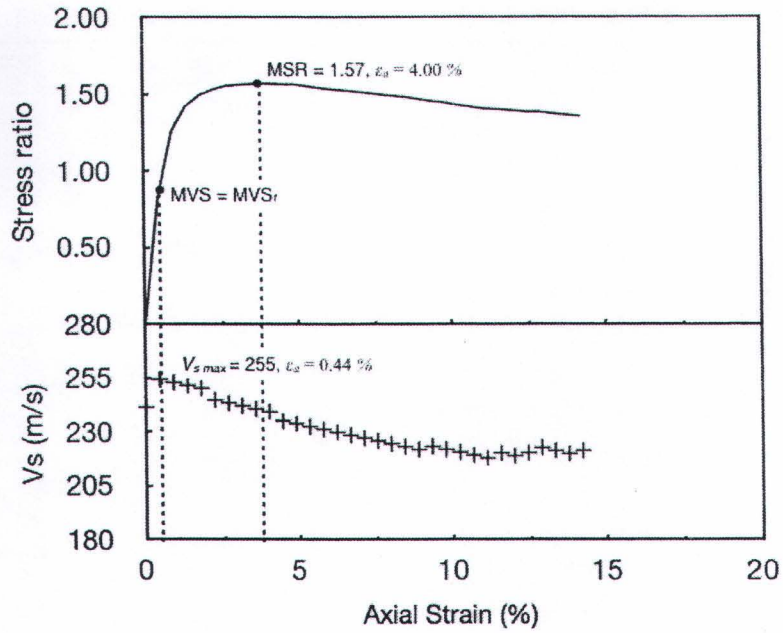




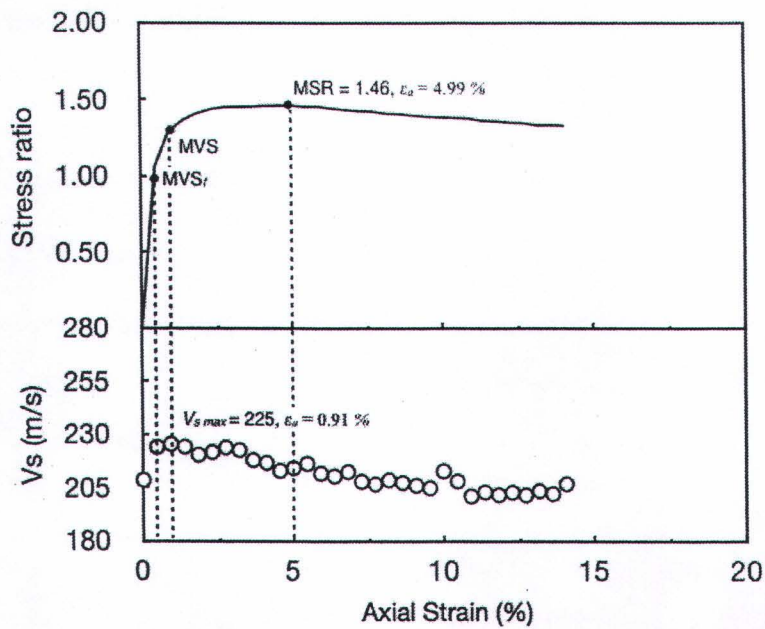
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
 ของดินทราย *Silica* สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 50$  kPa



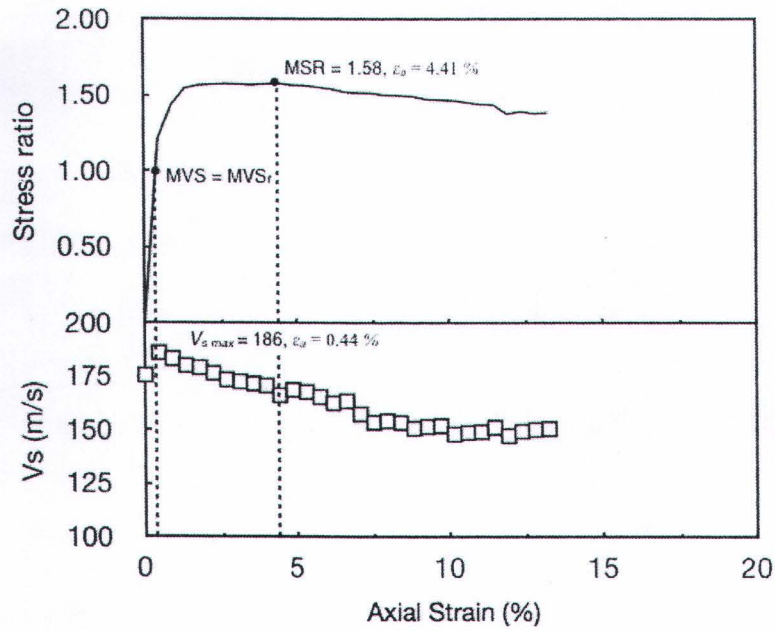
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
 ของดินทราย *Silica* สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



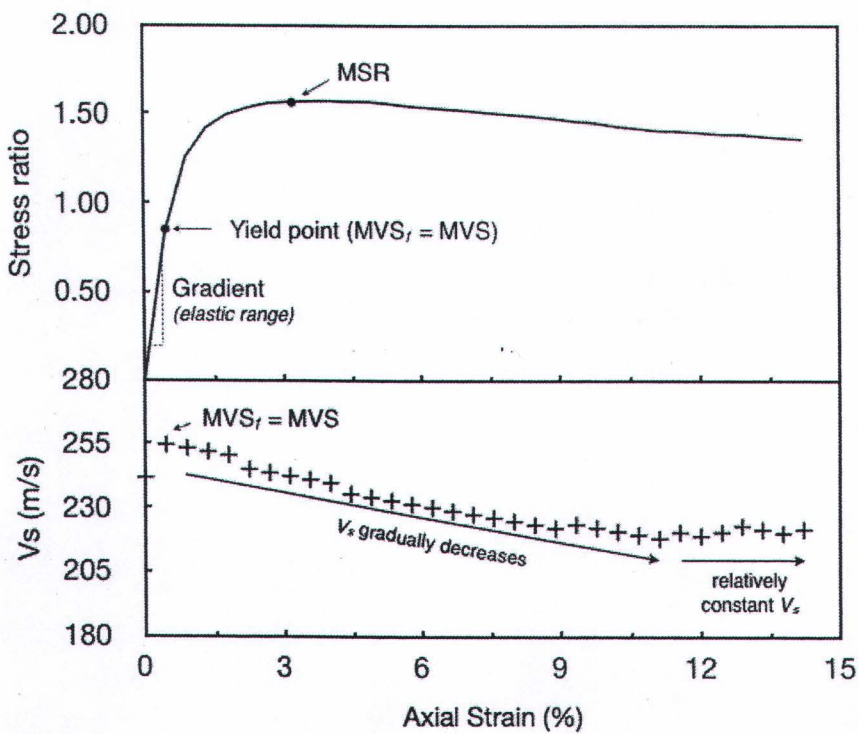
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย *Silica* สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ )  
ของดินทราย *Silica* สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 50$  kPa



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ ) ของดินทราย Silica สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



รูปที่ 4.42 แสดงผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและค่า Stress ratio ( $q'/p'$ ) ของดินทรายตลอดช่วงการทดสอบ

#### 4.3.2 การตรวจวัดการเกิด Localization จากการวิเคราะห์ภาพถ่าย

จากหัวข้อที่ 4.3.1 แสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนสามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิด Localization ได้ดีในระดับหนึ่ง กล่าวคือ สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจะเริ่มลดลงจากค่าสูงสุดเมื่อในมวลดินเกิดความไม่ต่อเนื่อง (Non-homogeneous) ขึ้น ซึ่งความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นนี้เป็นจุดเริ่มต้น (Onset) ของการเกิด Localization ในมวลดินที่ถูกแรงเฉือนกระทำอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดวิบัติ แต่อย่างไรก็ตาม ณ จุดที่มวลดินเกิด Localization โดยสมบูรณ์ (จุดที่มีค่า  $q' / p'$  สูงที่สุด) นั้น ไม่ปรากฏว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าปรากฏการณ์ Localization ในมวลดินนั้นจะเริ่มต้นก่อดำเนินอย่างต่อเนื่อง ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในมวลดิน จากนั้นความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวจะค่อย ๆ พัฒนาและขยายตัวจนเกิดเป็นโซนของรอยเลื่อน (Slip line หรือ Rupture line) ความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกายภาพของดินในบริเวณแคบ ๆ โดยในดินทรายเม็ดทรายในบริเวณดังกล่าวจะทำการจัดเรียงตัวกันใหม่ ก่อให้เกิดแนวความไม่ต่อเนื่องของความหนาแน่น โดยมีความหนาแน่นในบริเวณดังกล่าวจะต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ก่อนข้างมาก

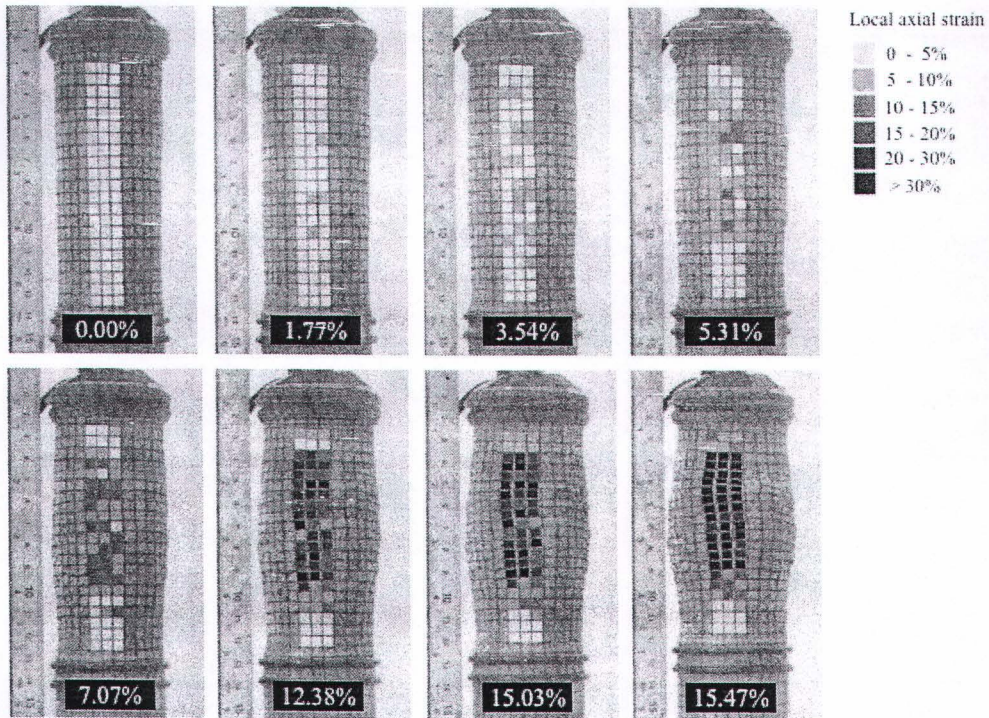
จากข้อจำกัดในบางประการของการใช้คลื่นแรงเฉือนเพื่อประเมินการเกิด Localization ในมวลดินนั้น การใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพในระหว่างการทดสอบในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน จะสามารถช่วยให้การวิเคราะห์การเกิด Localization ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์ภาพถ่ายนี้จะเป็นการคำนวณความเครียดเฉพาะจุด (Local strain) จากตาราง (Grid) ขนาดประมาณ 5 x 5 มิลลิเมตร ที่ได้วาดไว้บน Membrane ก่อนการทดสอบ ซึ่งการคำนวณความเครียดเฉพาะจุดที่เกิดขึ้นนี้เป็นการคำนวณความเครียดตามแนวแกนการเคลื่อนตัวของตัวอย่างดินตามแนวแกน y (Axial strain) จากภาพถ่ายดิจิทัลที่มีความละเอียดสูงที่ประมาณ 6 ล้านพิกเซล ความละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นสามารถวิเคราะห์ขนาดที่เล็กที่สุดของช่องตารางได้ที่ประมาณ 0.01 มิลลิเมตร โดยความเครียดเฉพาะจุดที่คำนวณได้นั้น จะทำให้เราสามารถทราบตำแหน่งและโซนในการเกิด Localization ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อการคำนวณหาความเครียดเฉพาะจุดนั้นมีจุดประสงค์ในการทำในสองลักษณะคือ 1) เพื่อหาตำแหน่งของโซนที่เกิด Localization 2) เวลาเริ่มต้นของการเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในมวลดิน (Onset of non-uniformity) โดยในแบบแรกนั้นจะเป็นการคำนวณหาความเครียดเฉพาะจุดของอีลิเมนต์ทุก ๆ อีลิเมนต์ในบริเวณสามแถวกลางของแท่งตัวอย่างดิน (รูปที่ 4.43, 4.45, 4.47, 4.49, 4.51 และ 4.53) เพื่อดูว่าบริเวณใดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุด และบริเวณภายในมวลดินนั้นมีความเครียดเกิดขึ้นเท่าใด โดยจะนำเสนอในรูปแบบของความเข้มสี (Intensity) ที่จะเปลี่ยนไปทุก ๆ 5 – 10% ของความเครียดที่เกิดขึ้น ส่วนในแบบที่สองจะเป็นการสุ่มอีลิเมนต์ภายในตัวอย่างดินทั้งหมด 9 อีลิเมนต์ตลอดความสูงของ

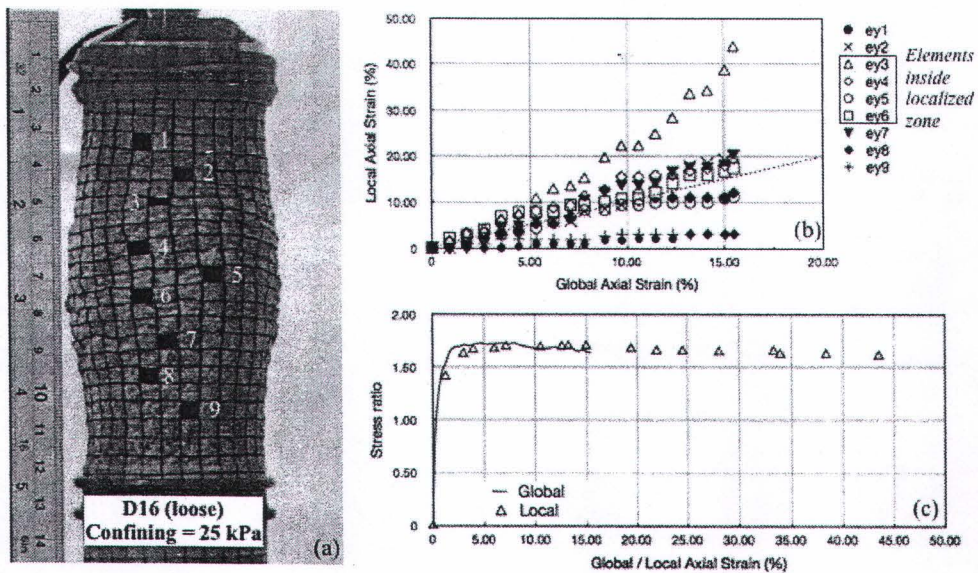
ตัวอย่างดิน เพื่อดูว่าอิลิเมนต์ที่สุ่มขึ้นนี้มีวิวัฒนาการของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณโซนที่เกิด Localization (รูปที่ 4.44, 4.46, 4.48, 4.50, 4.52 และ 4.54) ซึ่งการวิเคราะห์ภาพถ่ายทั้งสองแบบนี้จะมีการแสดงความสัมพันธ์กับค่าของความเครียดรวมตามแนวแกน  $y$  (Global axial strain) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบช่วงเวลาในการเกิด Localization ได้อย่างชัดเจน โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกเอาตัวอย่างดิน  $D16$  ในสภาพหลวมและแน่นที่มีความเค้นบีบอัดเริ่มต้นที่ 25 และ 80 kPa และในส่วนของดินทราย *Silica* จะวิเคราะห์ตัวอย่างดินทรายในสภาพหลวมและแน่นที่ความเค้นบีบอัดประมาณ 80 kPa

จากรูปที่ 4.43 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายของตัวอย่างดินทราย  $D16$  สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa ที่ความเครียดรวม (Global axial strain) ประมาณ 1.77% อิลิเมนต์บางอิลิเมนต์ในตัวอย่างมวลดินมีความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ที่มากกว่า 5% โดยจำนวนอิลิเมนต์ที่มีความเครียดเฉพาะจุดที่มากกว่า 5% นี้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามความเครียดทั้งหมดของตัวอย่างดินที่มีค่ามากขึ้นจากแรงเฉือนที่กระทำต่อมวลดิน เมื่อความเครียดรวมมีค่าประมาณ 5.31% จำนวนอิลิเมนต์ที่มีค่าความเครียดเฉพาะจุดมากกว่า 5% จะมีเพิ่มมากขึ้น โดยจำนวนอิลิเมนต์เหล่านี้จะกระจุกตัวกันอยู่เป็นแถบหรือรอยเลื่อนอยู่บริเวณส่วนกลางของตัวอย่างดิน ซึ่งแถบสีของรอยเลื่อนนี้แสดงให้เห็นว่า มวลดินเกิดพฤติกรรม Localization อย่างสมบูรณ์ และจากรูปความเข้มของสีนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่า บริเวณนอกรอยเลื่อนนี้ ค่าความเครียดเฉพาะจุดของอิลิเมนต์จะมีค่าน้อยกว่า 5% ซึ่งอธิบายได้ว่าบริเวณที่เกิด Localization นั้นจะเป็นบริเวณที่รองรับความเค้นที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่ของดิน ทำให้บริเวณนี้มีอัตราส่วนช่องว่างที่มากขึ้นเนื่องจากการกระจายพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

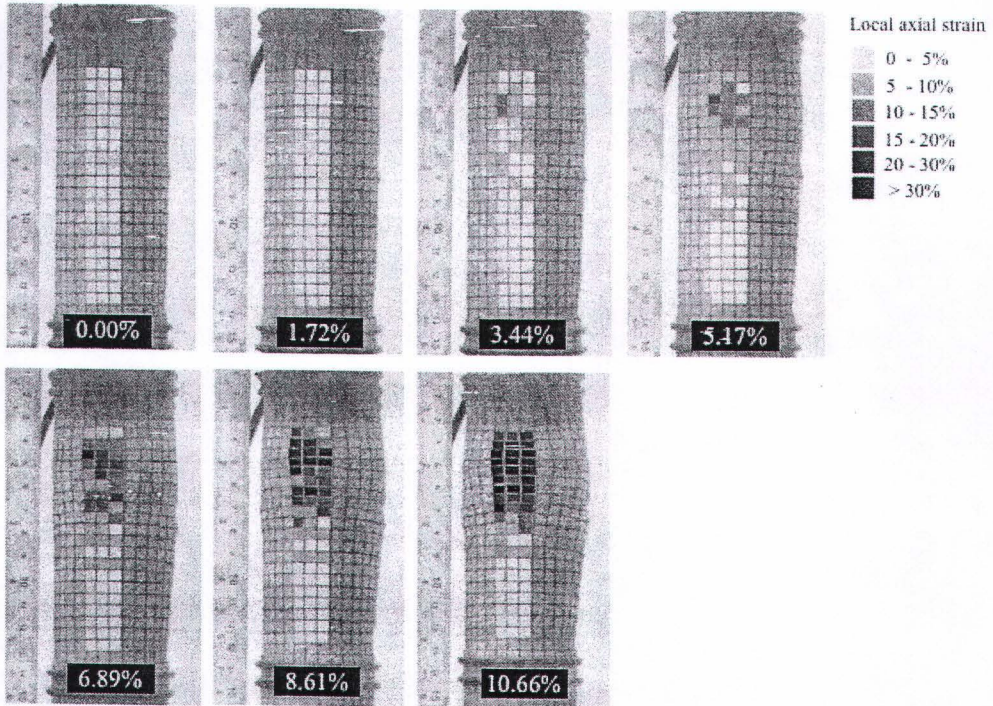
จากรูปที่ 4.44 แสดงภาพตัวอย่างของดินวิบัติและตำแหน่งของอิลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุดของตัวอย่างดินทราย  $D16$  สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa ซึ่งจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า อิลิเมนต์ในบริเวณที่เกิด Localization (อิลิเมนต์ที่ 3, 4, 5 และ 6) จะมีค่าความเครียดเฉพาะจุดที่มากกว่าในบริเวณอื่น ๆ อย่างมาก (กราฟความสัมพันธ์อยู่เหนือเส้นประในรูปที่ 4.44b) โดยในบางอิลิเมนต์ เช่น อิลิเมนต์ที่ 3 จะเริ่มมีความเครียดเฉพาะจุดที่เพิ่มมากขึ้นกว่าความเครียดรวมที่ความเครียดประมาณ 2% ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ช่วงที่ความเครียดเฉพาะจุดมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าความเครียดรวมนั้นจะเป็นจุดที่มวลดินเริ่มมีความไม่ต่อเนื่อง (Onset of non-uniformity) ในการรับความเค้นเฉือนเกิดขึ้น รูปที่ 4.45 - 4.54 เป็นผลของการวิเคราะห์ภาพถ่ายของตัวอย่างดิน  $D16$  และ *Silica* ในสภาพหลวมและแน่นในสภาวะความเค้นแบบต่าง ๆ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีลักษณะที่เหมือนกันกับผลของตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น กล่าวคือ อิลิเมนต์บางอิลิเมนต์ในตัวอย่างดินจะมีความเครียดเฉพาะจุดที่มากกว่า 5% เมื่อความเครียดรวมของตัวอย่างมีค่าประมาณ 1.5% ขึ้นไป และตัวอย่างดินจะเกิดโซนของ Localization อยู่ที่ความเครียดรวมประมาณ 4 - 7% (ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวอย่างดินมีค่า Stress ratio สูงที่สุด) เช่นกัน



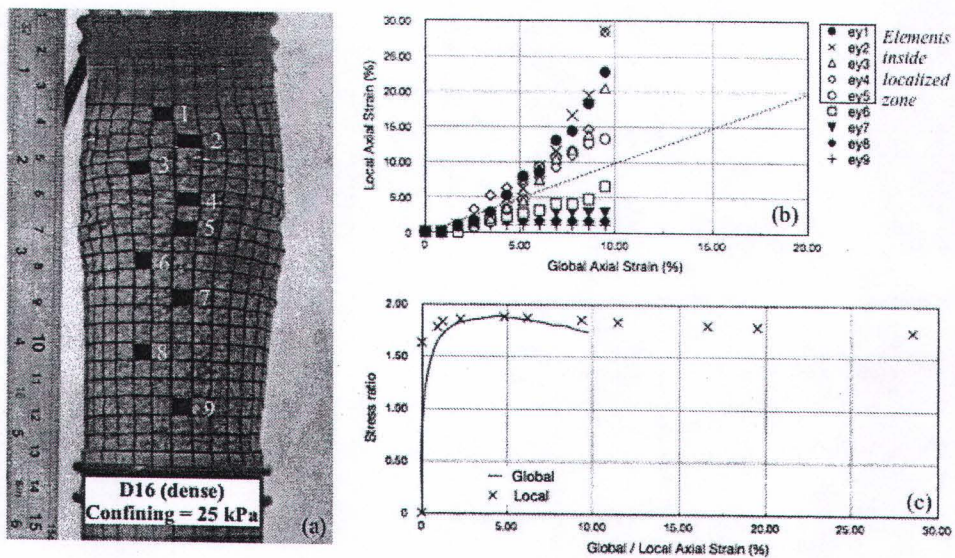
รูปที่ 4.43 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



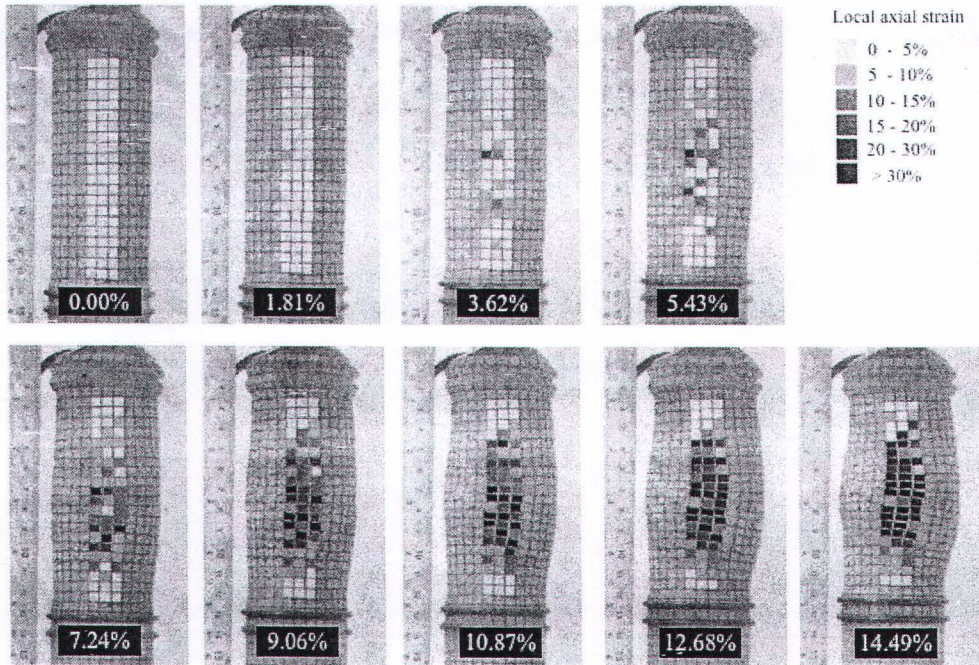
รูปที่ 4.44 a) ตัวอย่างดินชนิดวิบัติและอีลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด b) การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของอีลิเมนต์ต่าง ๆ c) ค่า Stress ratio ของอีลิเมนต์ที่มีความเครียดเฉพาะจุดที่มากที่สุด ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



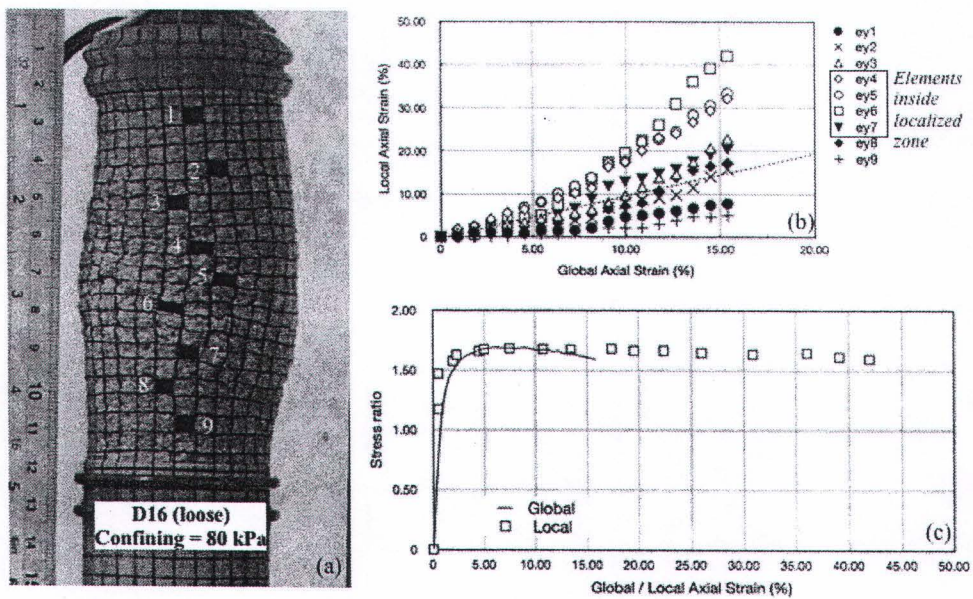
รูปที่ 4.45 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



รูปที่ 4.46 a) ตัวอย่างดินชนิดและอิเลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด b) การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของอิเลิเมนต์ต่าง ๆ c) ค่า Stress ratio ของอิเลิเมนต์ที่มีความเครียดเฉพาะจุดที่มากที่สุด ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 25$  kPa

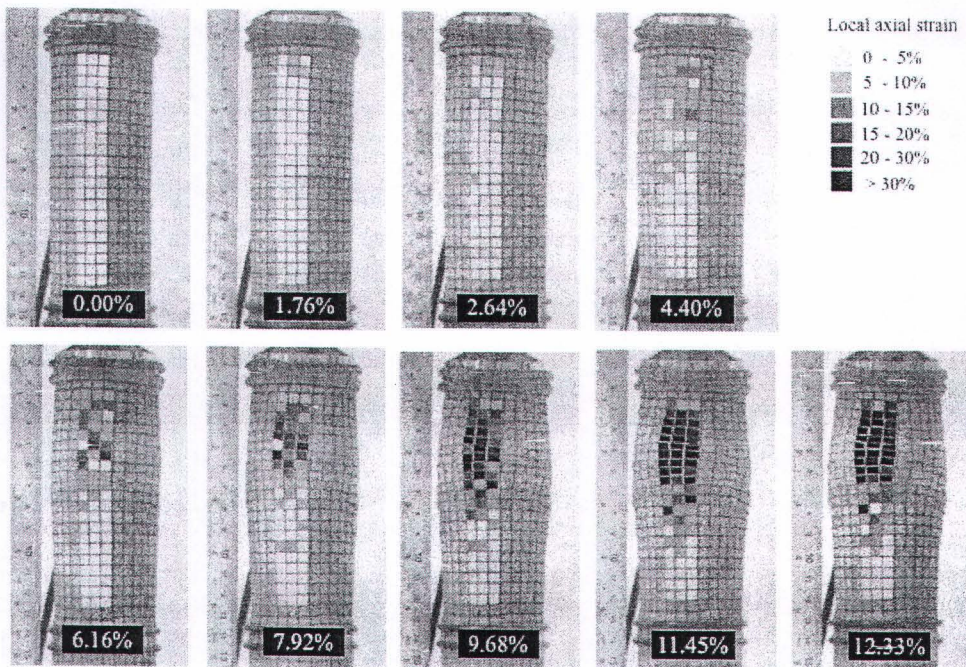


รูปที่ 4.47 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa

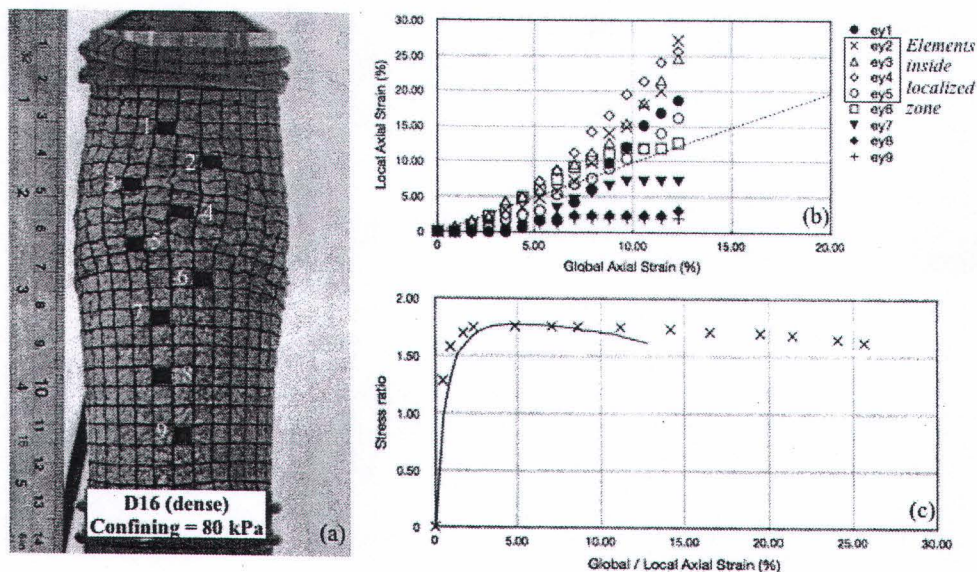


รูปที่ 4.48 a) ตัวอย่างดินวิบัติและอีลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด b) การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของอีลิเมนต์ต่าง ๆ c) ค่า Stress ratio ของอีลิเมนต์ที่มีความเครียดเฉพาะจุดที่มากที่สุด ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa

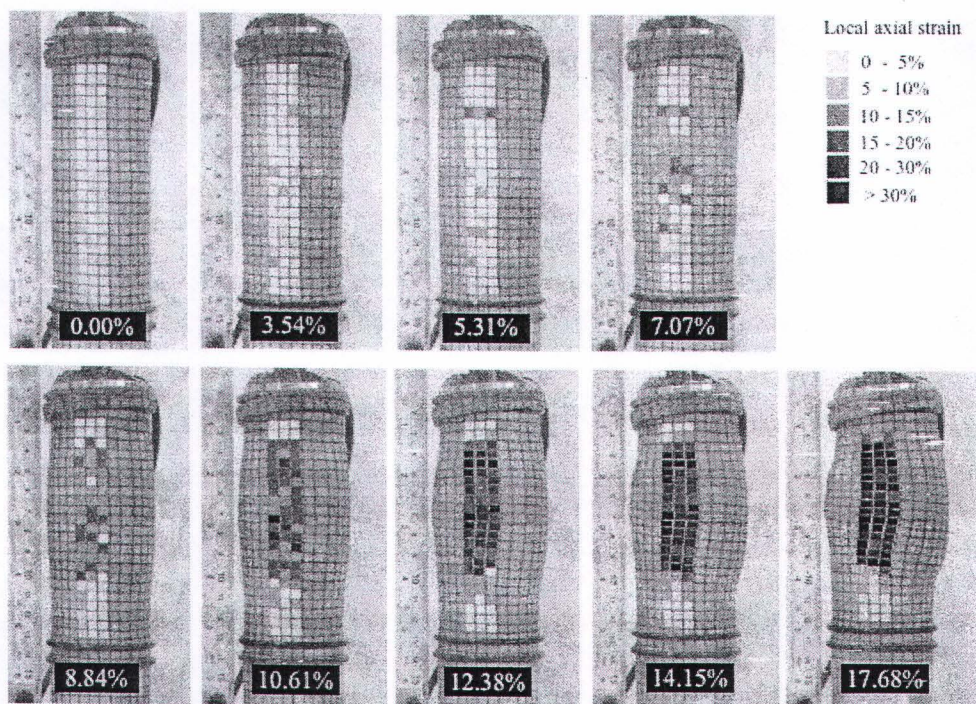




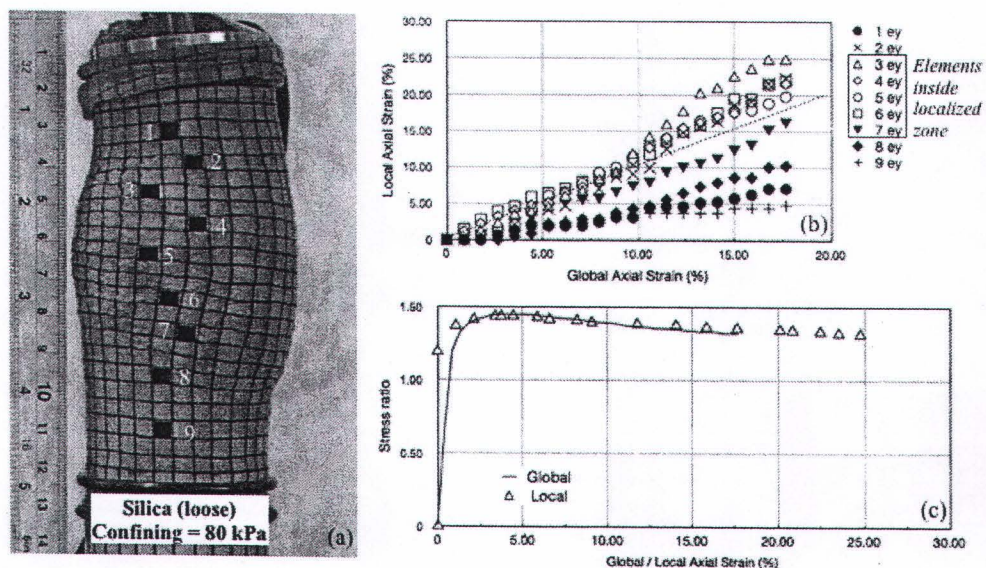
รูปที่ 4.49 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



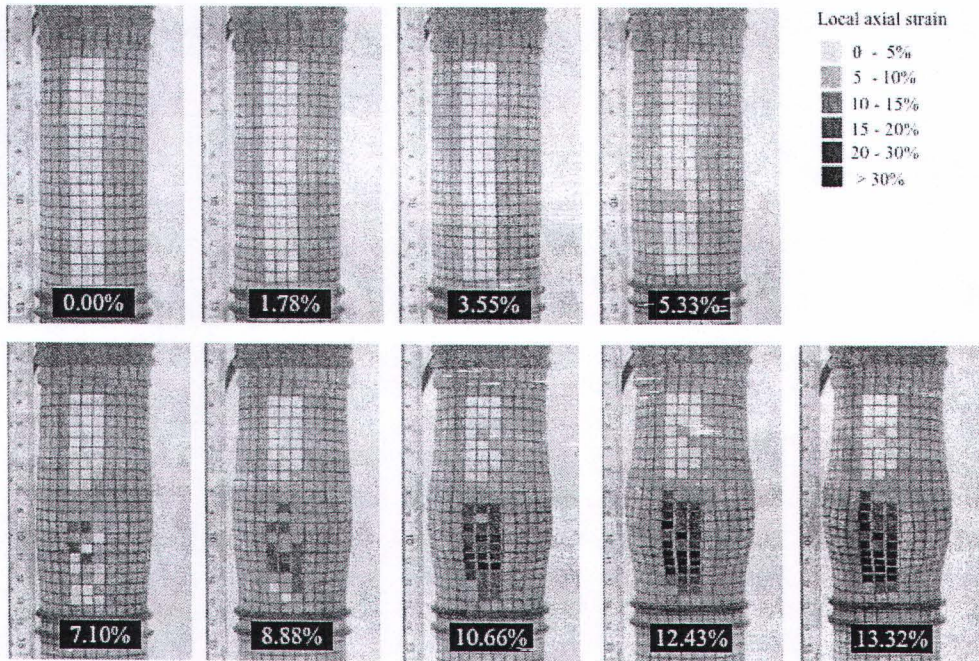
รูปที่ 4.50 a) ตัวอย่างดินชนิดและอิลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด b) การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของอิลิเมนต์ต่าง ๆ c) ค่า Stress ratio ของอิลิเมนต์ที่มีความเครียดเฉพาะจุดที่มากที่สุด ของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



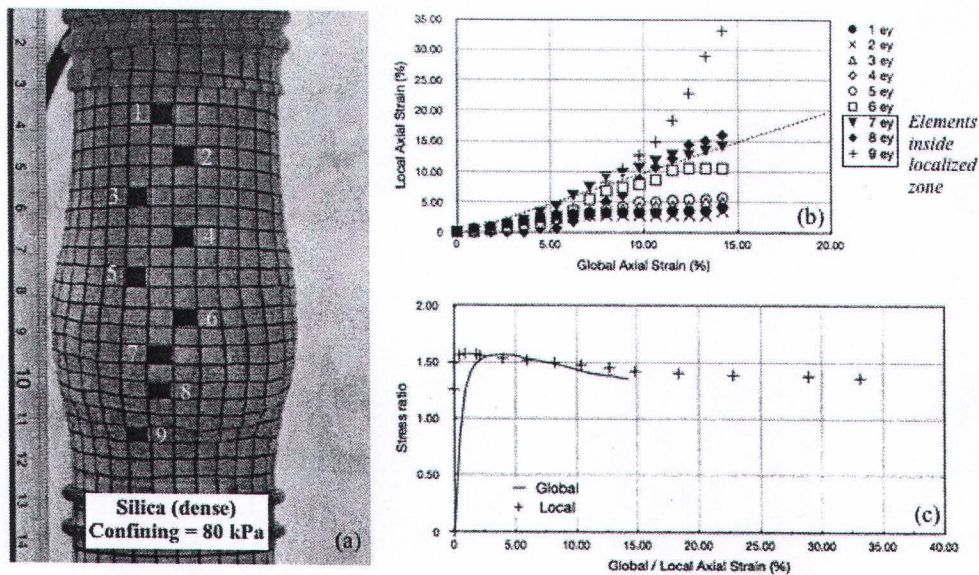
รูปที่ 4.51 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของตัวอย่างดินทราย Silica สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



รูปที่ 4.52 a) ตัวอย่างดินชนิดและอีลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด b) การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของอีลิเมนต์ต่าง ๆ c) ค่า Stress ratio ของอีลิเมนต์ที่มีความเครียดเฉพาะจุดที่มากที่สุด ของตัวอย่างดินทราย Silica สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



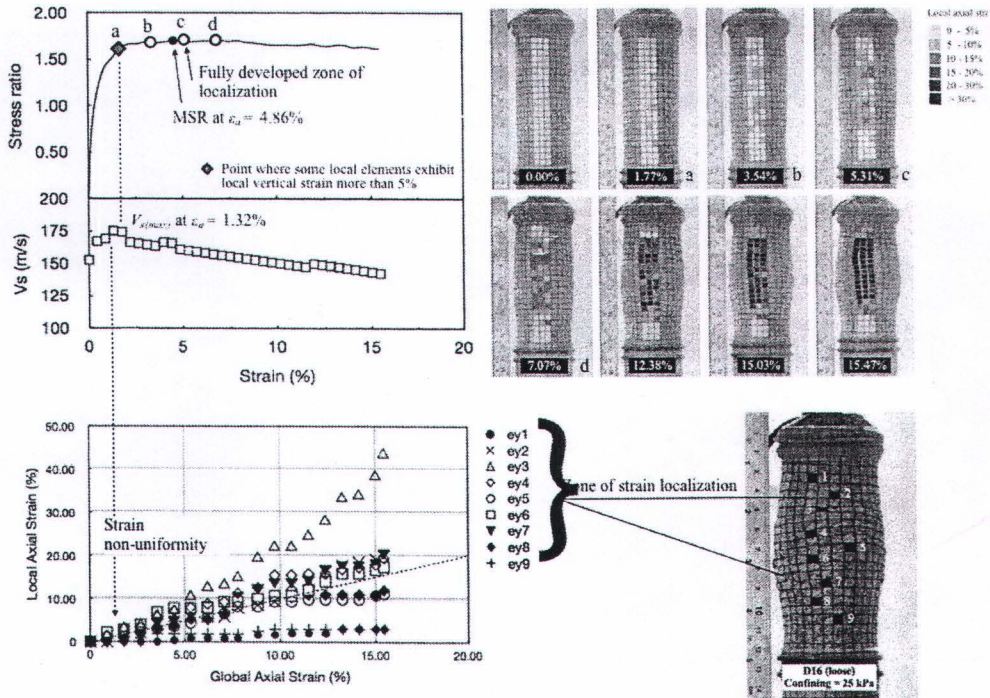
รูปที่ 4.53 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของตัวอย่างดินทราย *Silica* สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



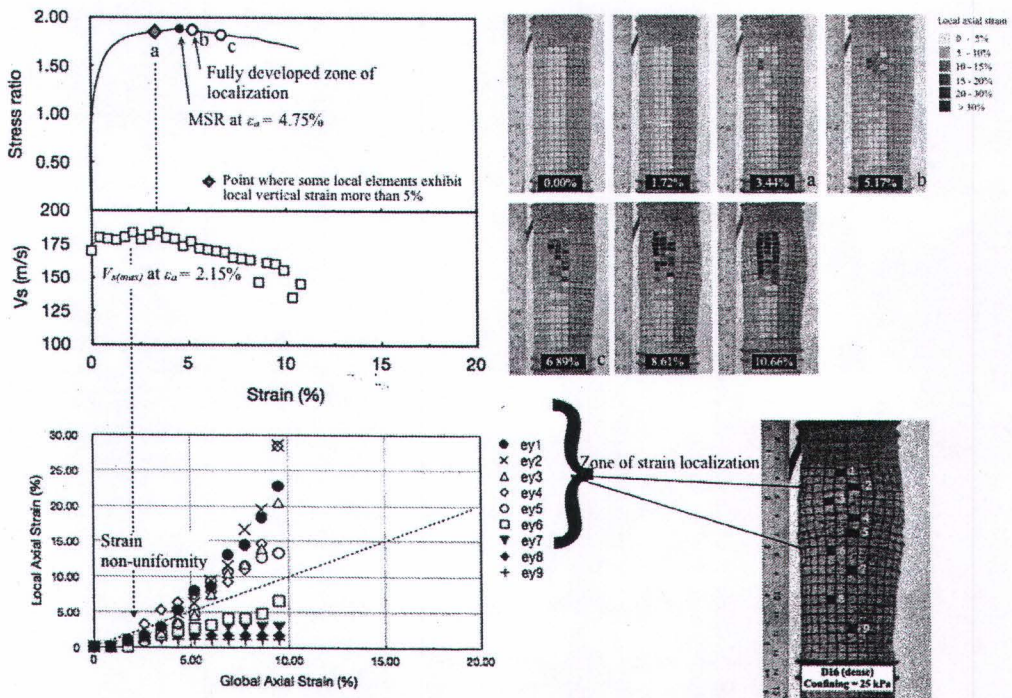
รูปที่ 4.54 a) ตัวอย่างดินชนิดวิบัติและอิลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด b) การเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉพาะจุด (Local axial strain) ของอิลิเมนต์ต่าง ๆ c) ค่า Stress ratio ของอิลิเมนต์ที่มีความเครียดเฉพาะจุดที่มากที่สุด ของตัวอย่างดินทราย *Silica* สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



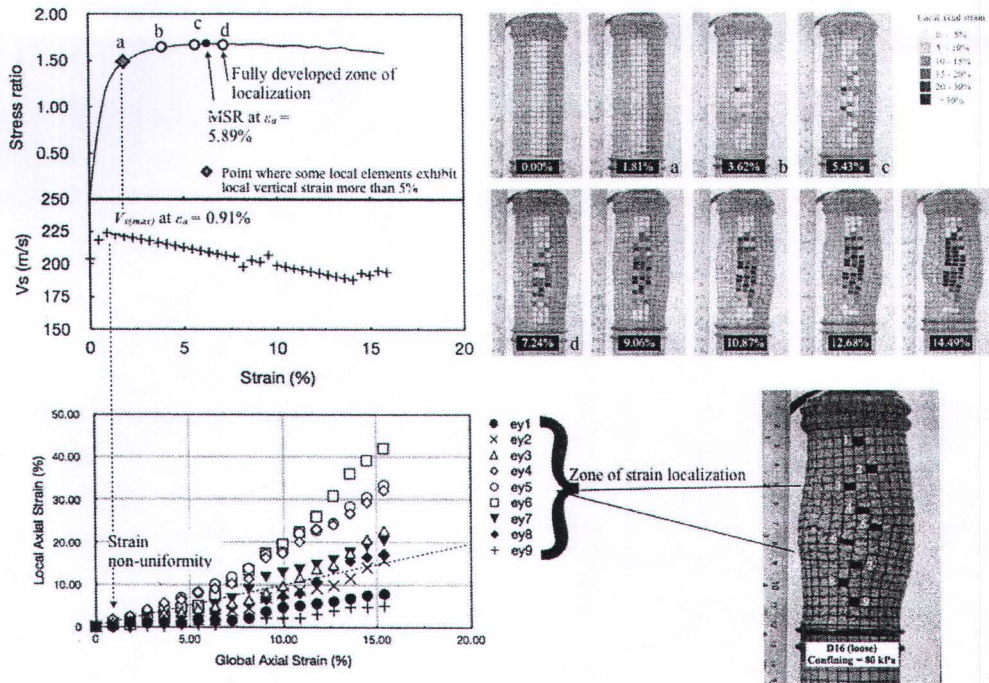
รูปที่ 4.55 - 4.60 แสดงผลของ Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุด เพื่อให้การวิเคราะห์การเกิด Localization ชัดเจนมากขึ้น จากรูปที่ 4.55 เป็นผลการวิเคราะห์จากตัวอย่างดินทราย  $D_{16}$  สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa ซึ่งจุด a บนเส้นความสัมพันธ์ของ Stress ratio เป็นจุดที่มีความเครียดรวมที่ประมาณ 1.77% ของการวิเคราะห์ความเครียดเฉพาะจุดจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย จะเห็นได้ว่าเป็นเกือบเป็นจุดเดียวที่ตรงกับค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่สูงสุด ( $V_{s(max)}$ ) ที่ความเครียดรวมประมาณ 1.32% ซึ่งแสดงถึงช่วงของความเครียดรวมที่ตัวอย่างดินเริ่มมีความไม่ต่อเนื่อง (Non-uniformity) เกิดขึ้น และที่จุดกลมสีดำ (บนเส้นความสัมพันธ์ของ Stress ratio) ซึ่งแสดงถึงจุดที่มีค่า Stress ratio สูงที่สุดที่ค่าความเครียดรวมที่ประมาณ 4.86% ซึ่งที่ความเครียดระดับนี้ จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดจะเห็นว่าที่ความเครียดรวมประมาณ 5.31% (จุด c) โซนของ Localization จะมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งจากความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างสอดคล้องกันระหว่าง Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดนั้นชี้ให้เห็นว่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การเกิด Localization ในมวลดินได้ในระดับหนึ่ง อย่างน้อยทำให้ทราบว่าจุดใดที่เป็นจุดเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในมวลดิน



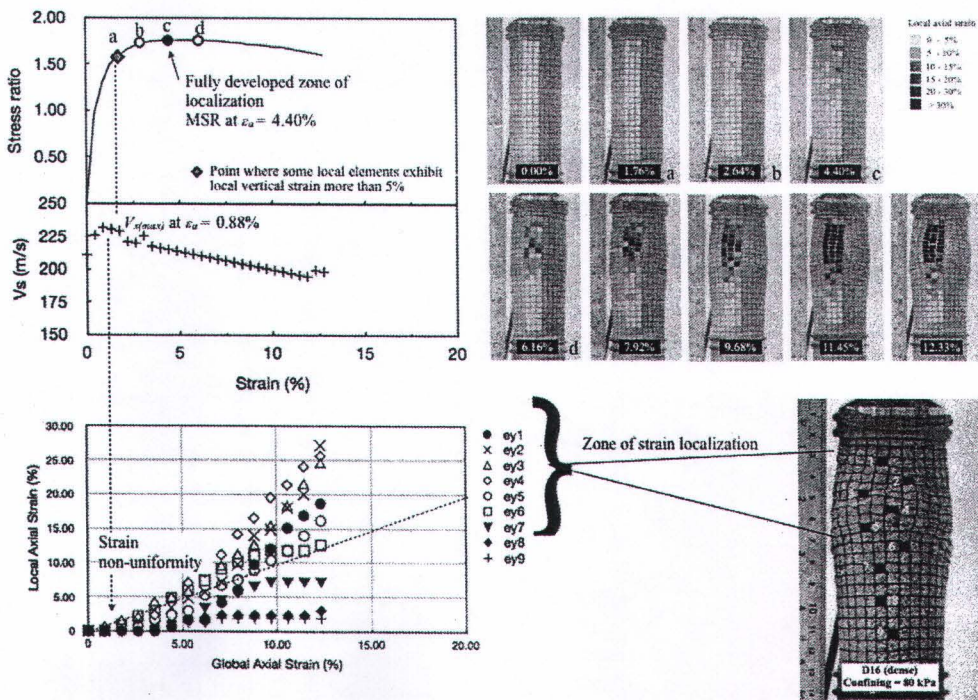
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดและความเครียดรวมของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



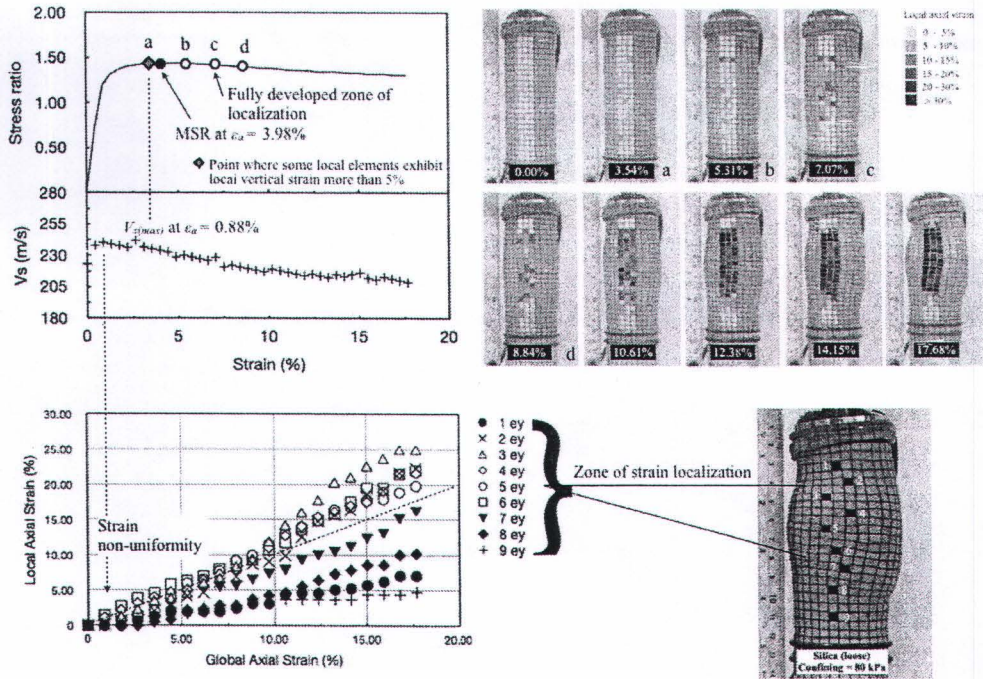
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดและความเครียดรวมของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 25$  kPa



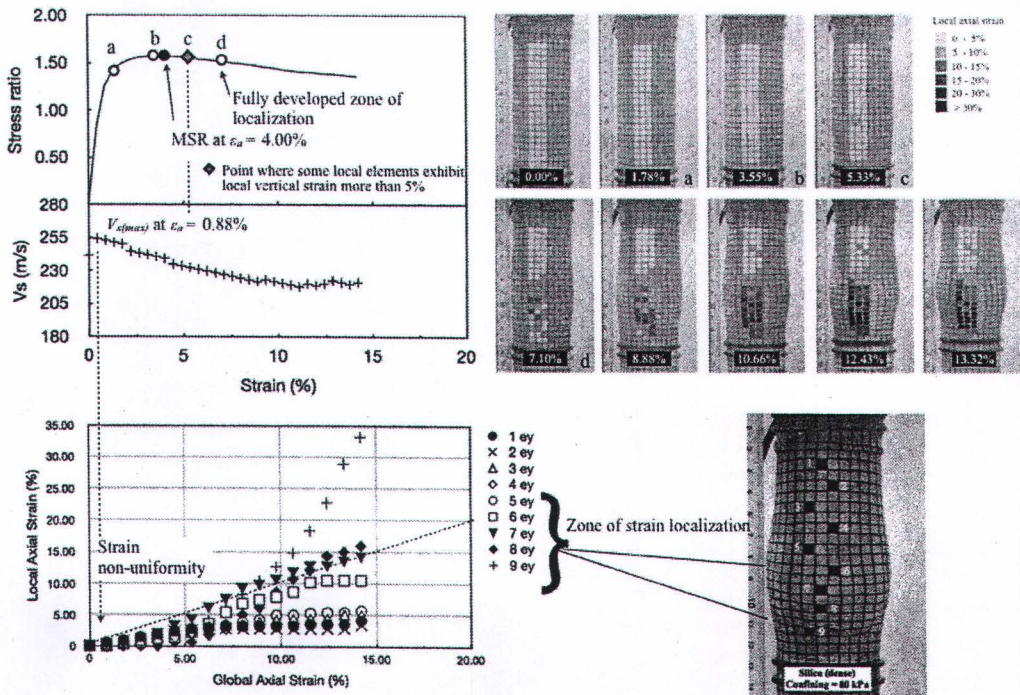
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดและความเครียดรวมของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดและความเครียดรวมของตัวอย่างดินทราย D16 สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดและความเครียดรวมของตัวอย่างดินทราย Silica สภาพหลวมที่  $\sigma'_c = 80$  kPa



รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress ratio ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของความเครียดเฉพาะจุดและความเครียดรวมของตัวอย่างดินทราย Silica สภาพแน่นที่  $\sigma'_c = 80$  kPa