

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ทฤษฎีที่มีพื้นฐานเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ Localization นั้นได้ถูกค้นพบขึ้นประมาณปี ค.ศ. 1900 โดยมอร์ (Mohr) ได้เสนอทฤษฎีความแข็งแรง (Strength theory) ของเหล็ก และจากนั้นได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ทฤษฎีของมอร์ได้อธิบายความสัมพันธ์กันระหว่างความเค้น โดยอาศัยรูปวงกลม ซึ่งสามารถอธิบายสภาพความเค้นในสภาวะต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ จุดวิบัติ (Failure) ของวัสดุต่าง ๆ การเกิด Localization ภายในมวลดินเป็นอุปสรรคสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของมวลดินภายหลังการวิบัติ ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมของการเกิด Localization นั้น ก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติทางกายภาพ และตัวแปรต่าง ๆ ของดิน เช่น ทำให้บริเวณภายในมวลดินส่วนที่เกิด Localization มีความหนาแน่นต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้เกิดการสะสมของความเครียดที่สูงมากในบริเวณนี้ เพื่อทำหน้าที่กระจายพลังงานจากการกระทำของแรงภายนอก เนื่องจากการเกิด Localization เกิดขึ้นภายในมวลดินและเกิดขึ้นในบริเวณแคบ ๆ นอกจากนี้ ยังไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่จะเกิด Localization ได้อย่างแน่นอน ดังนั้นการศึกษาและตรวจสอบกลไกและพฤติกรรมของการเกิด Localization ในมวลดินสันต้องอาศัยการทดสอบที่ยุ่ยากมีหลายขั้นตอน รวมถึงต้องใช้เทคนิคและเครื่องมือที่ทันสมัยและต้องการประสบการณ์ของนักวิจัยในการแปลผลการทดสอบอย่างมาก นักวิจัยหลาย ๆ คนยังอธิบายพฤติกรรมของการเกิด Localization โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้แบบจำลองดินที่ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งในบทนี้จะเป็นการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษาการเกิด Localization ในดินที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินทรายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

2.2 การศึกษาการเกิด Localization ในดินทราย

ดินทรายหรือดินที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Granular materials) นั้นเมื่อมีแรงมากระทำที่มากเพียงพออย่างต่อเนื่อง จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ของ Localizaiton ในมวลดินทรายนั่น ซึ่งเม็ดดินจะเกิดการเคลื่อนตัวโดยการเลื่อนไถล (Slip) และการหมุน (Rotation) ขึ้นในบริเวณแคบ ๆ ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง หรือเรียกกันว่าบริเวณรอยเลื่อนวิบัติ (Localized zone) ทำให้เกิดการพองตัว (Dilatancy) และเกิดการเคลื่อนตัวสูง (High deformation) ภายในบริเวณรอยเลื่อนวิบัตินั้น ซึ่งการเคลื่อนตัวหรือการพองตัวเหล่านี้จะทำให้เกิดความไม่เสถียร (Instability) ขึ้นในมวล

ดิน ด้วยเหตุนี้เองทำให้นักวิจัยด้านวิศวกรรมปฐพีได้เริ่มศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ Localization นี้มากกว่า 40 ปีมาแล้ว โดยทำการศึกษาและวิจัยทั้งการจำลองทางคณิตศาสตร์ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการศึกษาเหล่านั้นส่วนหนึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของรอยเลื่อนวิบัติ เช่น แนวการวางตัวของรอยเลื่อน (Shear band orientation) และความหนาของรอยเลื่อน รวมถึงมีการศึกษาถึงช่วงเวลาและการพัฒนาของการเกิด (Onset and evolution of strain localization) โดยการใช้อุปกรณ์การทดสอบดั้งเดิม เช่น เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial test) เครื่องทดสอบแบบ Plain strain test และเครื่องทดสอบที่ทันสมัยที่ใช้ในงานทางการอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เครื่องยิงรังสี X-ray เครื่องยิงรังสี Gamma เป็นต้น การใช้เครื่องมือทดสอบเหล่านี้จะสามารถทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเกิด Localization ได้ดีมากยิ่งขึ้น

การศึกษาการเกิด Localization ในระยะแรกๆ อาศัยการศึกษาด้วยตาเปล่า (Visual inspection) ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเอาระบบการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image processing) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ (Tatsuoka *et al.* 1972, Lesniewska and Mroz, 2000 and Kodaka *et al.* 2007) อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าว ยังคงเป็นการศึกษาการเกิด Localization จากภายนอก ส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์กลไกและความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่เล็กๆ ที่เกิด Localization ได้ ในระยะต่อมา ได้มีการประยุกต์ใช้ระบบ X-ray เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์กลไกการเกิดและการขยายตัวของ Localization (Roscoe, 1970) ซึ่งวิธีการประยุกต์ภาพถ่าย X-ray เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และ ได้รับการพัฒนาไปจนสามารถสร้างภาพ 3 มิติได้ (X-ray computed tomography) (Desrues *et al.* 1996 และ Batiste *et al.* 2004) หรือประยุกต์ใช้วิธีการทางภาพอื่นๆ เช่น Digital Image Analysis (DIA) (Sachan and Penumadu, 2007) การศึกษาโดยวิธีการทางภาพต่างๆ สามารถศึกษาภาพรวมของการเกิด Localization ในมวลดินได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางด้านคุณสมบัติของดินภายในพื้นที่ที่เกิด Localization ยังมีข้อจำกัดอยู่ค่อนข้างมาก ได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเครื่องมือโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดหลายๆ อย่างเช่น Pore pressure transducer และ Strain meter ในตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิด Localization ในตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบ (Wanatowski and Chu, 2006) เพื่อตรวจวัดระดับของความไม่สม่ำเสมอ (Non-uniformity) ของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore water pressure) และ ปริมาณความเครียด (Strain) เป็นต้น การศึกษาการเกิด Localization โดยการตรวจวัดความไม่สม่ำเสมอของตัวแปรทางวิศวกรรมต่างๆ เหล่านี้ ทำให้ทราบผลกระทบที่เกิดจากการเกิด Localization แต่ไม่สามารถอธิบายกลไกการเกิดได้ และไม่สามารถนำผลการศึกษาไปอธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักภายหลังการวิบัติ (Post peak behavior หรือ Residual strength characteristic)

จากผลการศึกษาและวิจัยของนักวิจัยหลาย ๆ ท่านเกี่ยวกับพฤติกรรมของการเกิดรอยเลื่อนวิบัตินี้ สามารถสรุปประเด็นที่สำคัญต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

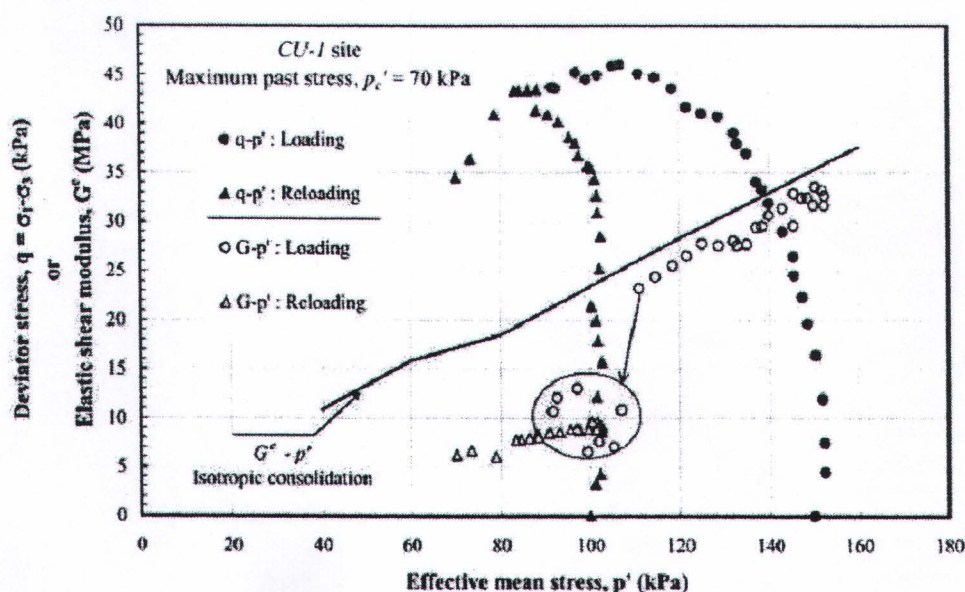
- รอยเลื่อนวิบัติภายในมวลดิน เช่น ดินทราย จะเกิดขึ้นและสามารถตรวจสอบและสังเกตได้จากการทดสอบโดยการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ เช่น เครื่องมือทดสอบแบบแรงอัดสามแกน เครื่องมือทดสอบแรงเฉือน และเครื่องมือทดสอบแบบกระบอกกลวง (Hollow cylindrical test)
- ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ รวมถึงรูปแบบการกระทำของแรง (Loading condition) จะมีผลทำให้รูปแบบของรอยเลื่อนวิบัติที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อน กล่าวคือ ในตัวอย่างดินที่มีขนาดค่อนข้างสั้นที่ทดสอบในเครื่องมือทดสอบแบบแรงอัดสามแกนจะเกิดรอยเลื่อนวิบัติที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นระเบียบกว่าตัวอย่างที่มีขนาดความสูงที่มากกว่าเนื่องจากผลกระทบของขอบเขต (Boundary condition) ของตัวอย่างทดสอบ แต่ในตัวอย่างดินที่ทดสอบในเครื่องมือทดสอบแบบ Plain strain test รอยเลื่อนวิบัติที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างเป็นแถบและสม่ำเสมอที่ค่อนข้างชัดเจน
- ณ ตำแหน่งที่ความเค้นสูงสุดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดนั้น นักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้รายงานผลการศึกษาวิจัยว่าโซนของรอยเลื่อนวิบัติจะพัฒนาขึ้นเต็มรูปแบบในช่วงเวลานี้ โดยจุดเริ่มของการวิบัติจะเกิดขึ้นก่อนตำแหน่งความเค้นสูงสุดนี้เล็กน้อย

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแรงเฉือนและคุณลักษณะต่าง ๆ ของดินทราย

เป็นที่ยอมรับกันว่าการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ของมวลดินภายใต้การกระทำของแรงเฉือน จะมีค่ามุ่งเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเรียกกันว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างวิกฤติ (Critical void ratio) ทั้งนี้การศึกษาจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินทรายก่อนการวิบัติได้ยืนยันข้อสรุปดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ได้มีการพบในภายหลังว่า ในมวลดินทราย (โดยเฉพาะดินทรายที่มีความหนาแน่นสูง) ที่มีการตรวจพบการเกิด Localization ที่ชัดเจนการเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราส่วนช่องว่างระหว่างการทดสอบ จะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างวิกฤติค่อนข้างมาก ต่อมาโดยอาศัยผลการศึกษาโดยวิธี X-ray computed tomography ในระยะหลัง ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนช่องว่างของดินภายในบริเวณที่เกิด Localization นั้น จะมีค่ามุ่งเข้าสู่ค่าอัตราส่วนช่องว่างวิกฤติ (Desrues et al. 1996) อย่างไรก็ตาม การศึกษาโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สลับซับซ้อน เช่น การใช้ Discrete Element Analysis (Gudehus

and Nubel, 2004) กลับพบว่าเพื่อให้การกระจายพลังงานจากการกระทำของแรงภายนอกภายในบริเวณที่เกิด Localization เกิดขึ้นอย่างเพียงพอ จนกระทั่งมวลดินแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักสูงสุด (กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะแบนราบ) แล้ว อัตราส่วนช่องว่างภายในบริเวณ Localization จะต้องมามีค่าที่สูงมากกว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างวิกฤตค่อนข้างมาก ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

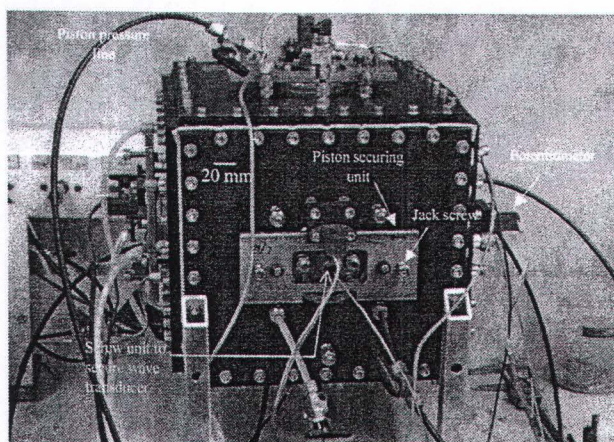
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนภายในมวลดินเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับค่าอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยแรงภายในมวลดินนั้น ๆ ดังนั้นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของคลื่นแรงเฉือนภายในมวลดินในขณะที่มวลดินบางส่วนเกิด Localization จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณค่าอัตราส่วนช่องว่างของมวลดินภายในบริเวณที่เกิด Localization ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ Teachavorasinskun and Amornwithayalax (2002) (รูปที่ 2.1) และ Teachavorasinskun and Akkarakun (2004) ได้ทำการทดสอบหาเส้นทางเดินของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในดินเหนียวก็พบว่า ภายหลังการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ผิดแปลกไปจากรูปแบบที่ได้ในช่วงก่อนการวิบัติ อย่างไรก็ตามในการศึกษาทั้งสองได้เพียงแต่ตั้งข้อสังเกตการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไว้ แต่ไม่สามารถให้รายละเอียดได้ เนื่องจากเครื่องมือทดสอบที่ใช้ไม่ได้มีการวางแผนและจัดเตรียมไว้สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นแรงเฉือนในขณะที่เกิด Localization



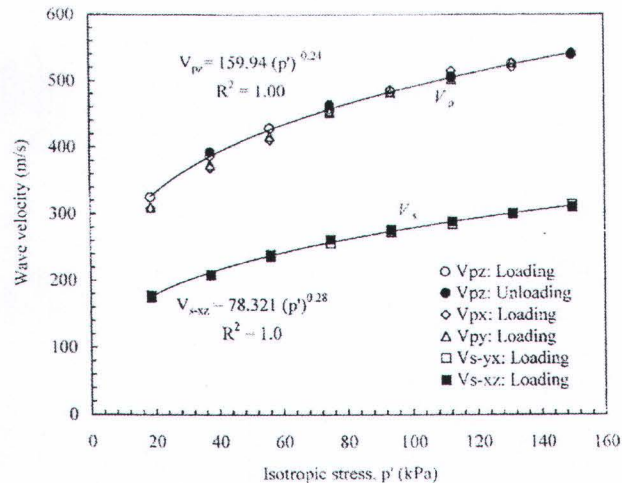
รูปที่ 2.1 การทดสอบหาเส้นทางเดินของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในดินเหนียว
(Teachavorasinskun and Amornwithayalax, 2002)

ในงานวิจัยของ Mostafa A.I. *et al.* (2005) ได้ทดลองวัดคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านดินทรายในเครื่องมือแบบแรงอัดสามแกนจริง (True triaxial apparatus) โดยมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่น (Wave-transducer) ที่ผลิตขึ้นมาแบบพิเศษที่สามารถวัดได้ทั้งคลื่นแรงเฉือน (Elastic shear wave, V_s) และคลื่นแรงอัด (Compressional wave, V_p) ดังรูปที่ 2.2 โดยสมมุติฐานที่ผู้วิจัยได้คิดที่จะทดสอบเนื่องจากมีรายงานการวิจัยจากอดีตพบว่า ความเค้นที่กระทำต่อดินในแต่ละทิศทางในทั้งสามแกนกล่าวคือ ความเค้นหลัก ความเค้นรองและความเค้นส่วนกลาง มีอิทธิพลที่สำคัญต่อค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus) ของดินที่เกิดขึ้นในความเครียดที่ต่ำมาก (Small strain behavior) มากกว่าค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean effective stress, p')

ผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้น พบว่าความเร็วของคลื่นแรงอัดทั้งสามทิศทาง จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าความเค้นที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic stress) ดังรูปที่ 2.3 ส่วนผลกระทบของสภาพบดอัดมากกว่าปกติของดินทราย (Over consolidation of the sand) จะมีผลกระทบน้อยมากกับค่าความแข็งแรงที่ระดับความเครียดต่ำ (Small strain stiffness) นอกจากนี้จากผลการทดสอบยังพบว่าคลื่นแรงอัดทั้งสามทิศทางจะมีผลกระทบจากความเค้นในทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น



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



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของความเค้นที่เท่ากันทุกทิศทางต่อคลื่นแรงอัดและคลื่นแรงเฉือน
(Mostafa A.I. *et al.*, 2005)

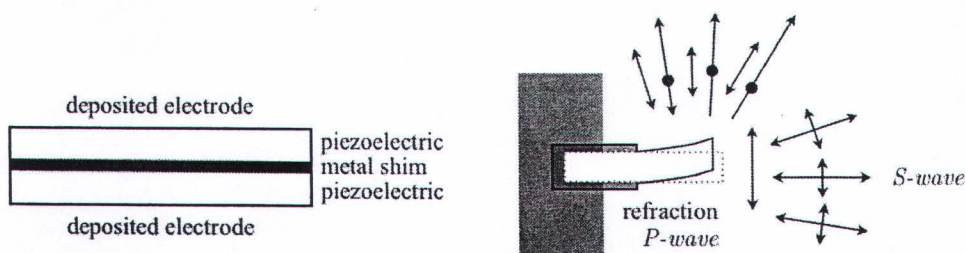
Leong *et al.* (2005) ได้ทำการทดสอบการวัดคลื่นแรงเฉือนที่เคลื่อนที่ผ่านดินทรายแห้ง ดินทรายเปียก และดินทรายอิ่มตัว (Dry, unsaturated and saturated sand) โดยพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของการวัดคลื่นเนื่องจากผลกระทบของชนิดของตัววัดคลื่นแรงเฉือนหรือ Bender element ลักษณะของคลื่นที่ปล่อยออกมา (Waveform) เช่น ขนาด (Magnitude) และความถี่ (Frequency) โดยผลการทดสอบพบว่า ความไม่แน่นอนของทดสอบนั้นขึ้นกับการแปลความหมาย (Interpretation) สัญญาณของตัวรับสัญญาณ โดยในการใช้ตัวกำเนิดคลื่นแบบไซน์ (Sinusoidal input) การบันทึกเวลาในการเคลื่อนที่ (Travel time) ของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านดินควรจะวัดจากส่วนโค้งงอของกราฟที่เกิดขึ้นแรกสุด (First deflection) และเราสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณของคลื่นได้โดย 1) ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อตัวกวน (Signal to Noise, SNR) อย่างน้อย 4 เดซิเบล 2) ค่าความยาวของเส้นทางการเคลื่อนตัวของคลื่นต่ออัตราส่วนของความยาวคลื่นอย่างน้อย 3.33 นอกจากนี้ในการทดสอบเราสามารถเพิ่มค่า SNR ได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กับตัวส่งสัญญาณคลื่น (Transmitter bender element) โดยใช้ตัวขยายกำลังไฟฟ้า (Power amplifier) และ/หรือใช้การต่อตัวส่งสัญญาณเป็นแบบขนาน และต่อตัวรับสัญญาณเป็นแบบอนุกรม เป็นต้น

Minsu Cha and Gye-Chun Cho (2007) ได้ประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทราย โดยใช้ความเร็วคลื่นแรงเฉือน โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แม้กำลังรับแรงเฉือนของดินทรายจะเป็น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ความเครียดที่สูงมาก ส่วนการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนจะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ความเครียดน้อยมากก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นประสิทธิผลและอัตราส่วนช่องว่างเป็นผลกระทบที่สำคัญยิ่งต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินทราย

นอกจากนี้แล้วยังเป็นผลกระทบที่สำคัญต่อความเร็วของคลื่นแรงเฉือนด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า กำลังรับแรงเฉือน ถึงแม้ไม่ได้สัมพันธ์กันโดยตรงแต่ก็มีแนวโน้มที่จะสัมพันธ์กับความเร็วของคลื่นแรงเฉือนได้โดยพิจารณาถึงอัตราส่วนช่องว่างและความเค้นประสิทธิผลในดินทราย ผลการทดสอบยังพบอีกว่า ค่ามุมเสียดทานภายในของทรายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลง และในบทสรุปของงานวิจัยได้แนะนำว่า การประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนในที่ (In-situ shear strength) ของดินทรายโดยใช้คลื่นแรงเฉือนเป็นวิธีที่ได้ผลที่ดีวิธีหนึ่ง โดยความถูกต้องของการประมาณค่านั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลทางพลศาสตร์ที่ตรวจวัดได้ในที่ (In-situ seismic data) เป็นสำคัญ

2.4 การทดสอบโดยใช้ Bender Element เพื่อวัดคลื่นแรงเฉือนในดิน

วิธีการตรวจวัดโดยใช้ Bender Element ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Shirley and Hampton (1977) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายใช้สำหรับการวัดโมดูลัสแรงเฉือนของดินในระดับความเครียดที่ต่ำมาก การทดลองทำได้โดยการวัดความเร็วของคลื่นแรงเฉือนที่แผ่กระจายในตัวอย่างทดสอบจากการส่งผ่านคลื่นแรงเฉือนจากตัวส่ง (Transmitter) ไปสู่ตัวรับ (Receiver) แผ่นทดสอบ Bender Element จะประกอบไปด้วยแผ่น Piezoelectric-ceramic จำนวน 2 แผ่น ประกบกับแผ่นทองเหลือง แผ่นเหล็ก (Metal shim) หรือ สแตนเลสสตีล (Stainless steel) ดังรูป 2.4ก แผ่น Bender Element นี้จะส่งทั้งคลื่นแรงเฉือนและคลื่นแรงอัดไปทุกทิศทางตามรูปที่ 2.4ข



รูปที่ 2.4 (ก) ลักษณะของแผ่น Bender Element

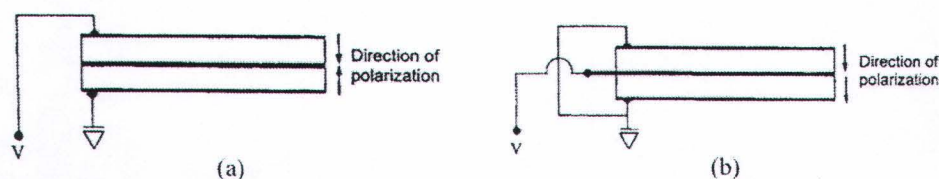
(ข) ทิศทางการส่งคลื่นแรงเฉือนและคลื่นแรงอัดของ Bender Element

(Lee and Santamarina, 2005)

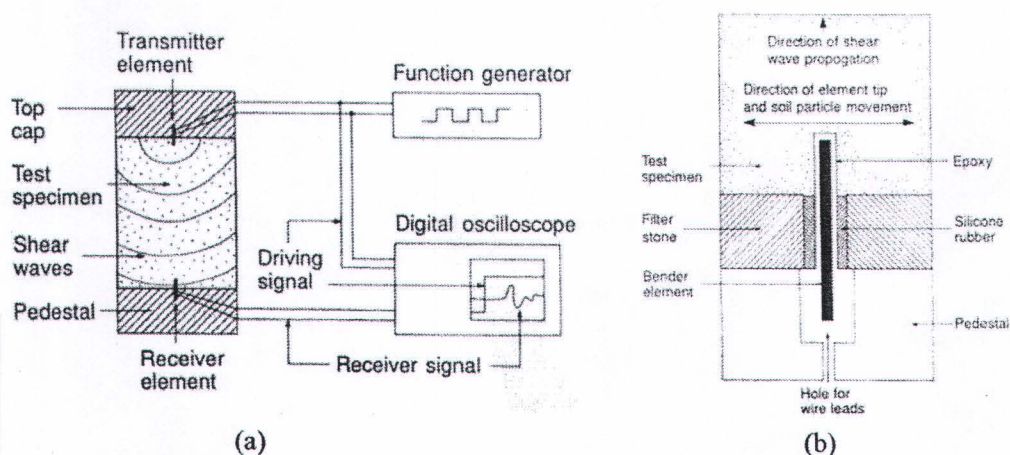
วิธีในการวัดค่าความเร็วของแรงเฉือน จะใช้ Bender Element ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณ Electro-mechanical โดยแปลงพลังงานกล (การสั่นไหว) เป็นพลังงานทางไฟฟ้า หรือในทางกลับกันจะแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแผ่น Bender Element ตัวแผ่นจะเกิดการงอขึ้น ในขณะนั้นแผ่น Bender Element จะแปลงสัญญาณจาก

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลที่เคลื่อนที่ผ่านดิน ไปยัง Bender Element ตัวรับเพื่อเปลี่ยนสัญญาณจากพลังงานกลกลับมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง

Bender Element มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิดแบบขั้ว X (X-Poled) หรือการต่อแบบ ซีรีย์ (Series connection) และ แบบขั้ว Y (Y-Poled) หรือการต่อแบบขนาน (Parallel connection) ดังที่แสดงในรูป 2.5 ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการต่อแบบใดก็สามารถใช้เป็นตัวรับและตัวส่งสัญญาณ โดยที่การใช้จะแตกต่างกันในการต่อวงจรไฟฟ้าจะต่อนุกรมเมื่อใช้เป็นตัวรับสัญญาณและต่อแบบขนานเมื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณเหตุที่ต้องต่อวงจรแตกต่างกันเพื่อที่จะใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละด้านนั่นเอง รูปที่ 2.6 แสดงการเชื่อมต่อ Bender Element เข้ากับอุปกรณ์การทดสอบเพื่อการวัดคลื่นแรงเฉือนในดิน



รูปที่ 2.5 ชนิดของ Bender Element แบบ (a) แบบ X-Poled (b) แบบ Y-Poled
(Lee and Santamarina, 2005)

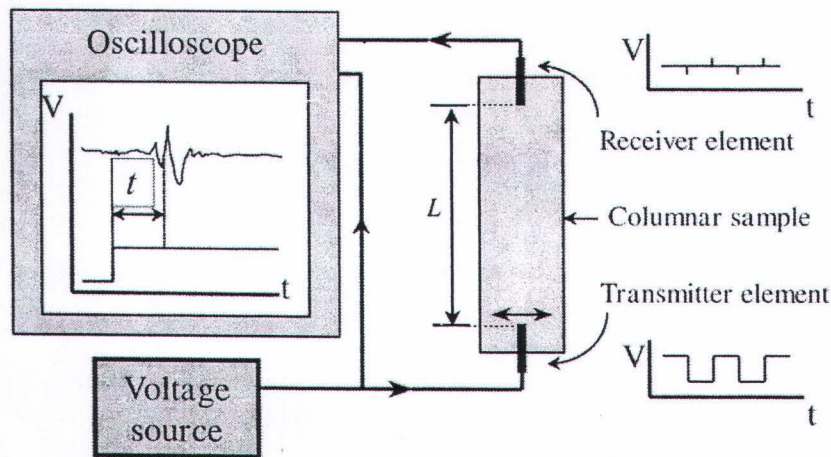


รูปที่ 2.6 (a) การเชื่อมต่อ Bender Element ที่เป็นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ
เข้ากับเครื่อง Oscilloscope (b) การติดตั้งตัว Bender Element เข้ากับหัวกด (Pedestal)
(Piezoceramic bender element test data sheet of Norwegian Geotechnical Institute, NGI)

ในการคำนวณหาค่าคลื่นแรงเฉือนที่ตรวจวัดได้จากสัญญาณรับและส่งนั้นสามารถทำได้โดยง่ายจากสมการที่ 2.1

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

V_s คือ ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน L คือ ระยะระหว่างปลายทั้งสองข้างของตัวรับและตัวส่งของแผ่น Bender Element และ t คือ ระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นแรงเฉือนผ่านตัวอย่างดิน โดยรูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการวัดค่าของ L และ t



รูปที่ 2.7 รูปแสดงการวัดค่าระยะทางการเดินทางของคลื่นแรงเฉือน (L) และเวลาในการเดินทางของคลื่นแรงเฉือน (t) (Blewett *et al.* 1999)

แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณหาเวลาในการเดินทางของคลื่นแรงเฉือน (Travel time) ผ่านตัวอย่างดินนั้นยังมีข้อถกเถียงกันอย่างมากระหว่างนักวิจัยทางด้านปฐพีกลศาสตร์ ทั้งนี้ยังไม่เป็นที่สรุปอย่างแน่ชัดว่าวิธีใดเป็นวิธีที่ดีที่สุด โดยวิธีในการคำนวณหาเวลาเดินทางของคลื่นแรงเฉือนมีดังนี้

- First time of arrival (Kumar and Madhusudhan, 2010)
- Travel time between characteristic points
- The cross-correlation method
- Phase-sensitive detection (Blewett *et al.*, 1999)

นอกจากนี้สัญญาณที่รับได้จากตัวรับสัญญาณคลื่นแรงเฉือนนั้นอาจมีลักษณะที่ยากแก่การคำนวณเนื่องจากสัญญาณที่รับได้อาจถูกรบกวนด้วยผลกระทบของรูปคลื่นแรงเฉือนที่ผิดแปลกไปในช่วงแรก หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า Near-field effect (Sanchez-Salinerio *et al.*, 1986 และ Jovicic *et al.*, 1996)