บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพและบริเวณใกล้เคียง

2.1.1 กำเนิดของชั้นดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินกรุงเทพฯ เป็นดินตกตะกอน (Transported Soil) ชนิด Marine และ Alluvial ซึ่งเป็นการตกตะกอนจากน้ำหรือสิ่งพัดพาจากพื้นดิน (Terrestrial Deposit) โดยมีความหนามากกว่า 1,500 ม. ชั้นล่างเป็นชั้นหินดานซึ่งอยู่ที่ความลึกไม่แน่นอนเชื่อว่าเกินกว่า 1,500 ม. (ว.ส.ท. 2520)

ถัดจากหินดานขึ้นมาเป็นชั้นดินแยกออกเป็นชั้นๆ เป็นดินเหนียวแข็งสลับกับชั้นทรายและกรวดในสภาพที่อัดแน่นจนกระทั่งถึงความลึกประมาณ 14-20 ม. จากผิวดิน จากนั้นดินตกตะกอนเป็นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลางสีเทา

กลไกการกำเนิดของชั้นดินเหนียวแข็งสลับกับชั้นทรายอัดแน่นใต้ชั้นดินอ่อนยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน เชื่อกันว่าเป็นทั้ง Marine และ Terrestrial Deposit (ว.ส.ท. 2520) ข้อมูลจากคุณสมบัติของดินเหนียวแข็งชั้นแรกที่วัดได้ แสดงว่าดินชั้นนี้ต้องเกิดก่อนดินเหนียวอ่อนเป็นเวลานาน เพราะข้อมูลแสดงผลของ Weathering และการสึกกร่อน (Erosion) ที่ทำให้ดินเหนียวอยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated) ค่อนข้างมาก ส่วนดินเหนียวแข็งและทรายชั้นแรกเชื่อว่าเป็นพวก Marine Deposit

ในเวลาต่อมามีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นจึงทำให้ดินเหนียวอ่อนตกตะกอน ด้วยเหตุนี้จึงมีหลักฐานที่เชื่อถือได้ว่าดินเหนียวอ่อนเป็น Marine Deposit ดินเหนียวอ่อนนี้มักจะเริ่มจากระดับ MSL (Mean Sea Level) โดยมีความหนา 14-18 ม. ในบริเวณกรุงเทพฯ และในช่วง 2-3 ม. สุดท้าย ดินเหนียวจะอยู่ในสภาพแข็งปานกลาง

ดินเหนียวส่วนบนที่อยู่เหนือดินเหนียวอ่อนมักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลาง มีความหนาประมาณ 3-5 ม. และมักถูกเรียกว่า Weathered Bangkok Clay เพราะถูกแปรสภาพมาก ดินเหนียวส่วนนี้อาจเป็นได้ทั้ง Terrestrial และ Marine Deposit (เชื่อว่าเป็น Terrestrial Deposit เสียส่วนใหญ่) ในบริเวณใกล้ปากอ่าวเกือบจะไม่มีชั้นดินชั้นนี้

ดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวส่วนบนถูกชะล้าง (Leaching) ในเวลาต่อมา การชะล้างของดินเหนียวอ่อนที่เป็น Marine Deposit ทำให้ปริมาณเกลือในน้ำลดลงไปเป็นผลให้โครงสร้างของดินไม่มี

เสถียรภาพ (Meta-Structure) ดินจึงมีพฤติกรรมที่มีความไว (Sensitivity) สูง ดินเหนียวส่วนบนก็มีความไวเช่นกันแต่น้อยกว่าดินเหนียวอ่อนชั้นล่างมาก

ดินเหนียวในช่วง Weathered Zone ซึ่งส่วนมากเป็น Terrestrial Deposit อยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว สาเหตุส่วนใหญ่เชื่อว่ามาจากขบวนการ Weathering โดยเฉพาะมาจาก Chemical Weathering การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน และ Desiccation ส่วนผลของการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเนื่องจากการสึกกร่อน (Erosion) เชื่อว่าไม่ใช่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ

ดินเหนียวอ่อนที่เป็น Marine Deposit ก็อยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (Over consolidated) เช่นกัน กลไกของการเกิดการอัดแน่นเกินตัว เชื่อว่าส่วนใหญ่มาจาก Aging อันเป็นผลของการอัดตัวครั้งที่สองหรือครีพแบบระบายน้ำ (Drained Creep) Mechanical และ Chemical Bonding ตามอายุของดิน

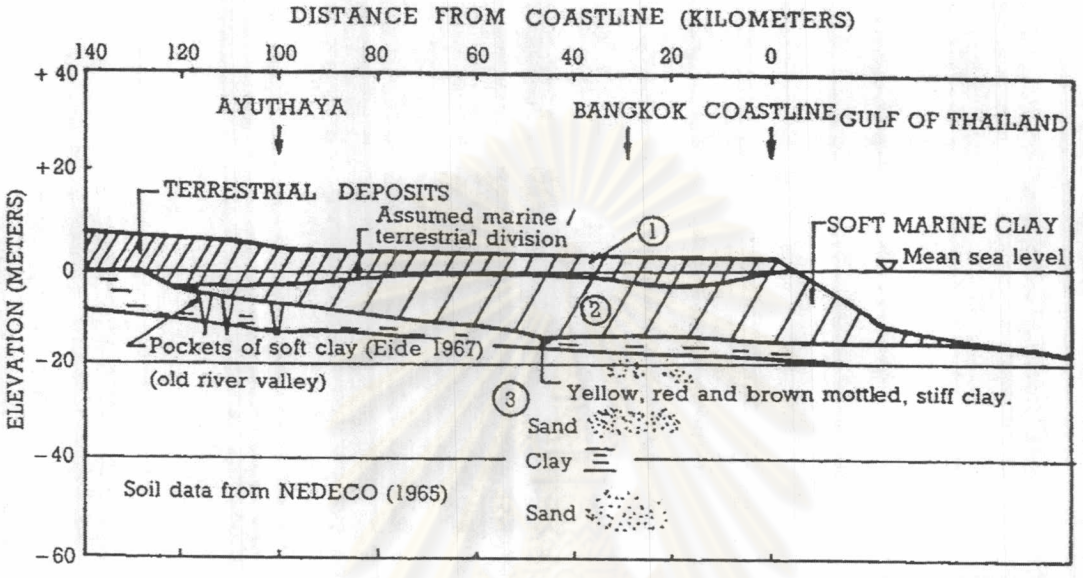
2.1.2 กำเนิดของชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ

รูปที่ 2.1 และ 2.2 แสดงรูปตัดของชั้นดินในบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ รูปที่ 2.1 แสดงรูปตัดจากอ่าวไทยไปยังอยุธยา (นั่นคือ จากทิศใต้ไปทิศเหนือ) จะเห็นว่าความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดจาก Marine Deposit เพิ่มขึ้นเมื่อใกล้อ่าวไทย และดินเหนียวบริเวณอ่าวไทยจะมีสมบัติทางด้านวิศวกรรมค่อนข้างเลว ส่วนจากกรุงเทพฯ ไปทางอยุธยาความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนลดลง แต่ความหนาของดินชั้นบนที่เป็น Terrestrial Deposit เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเลยอยุธยาไปชั้นดินเหนียวอ่อนขาดหายไป โดยชั้นดินมีเพียง Terrestrial Deposit ซึ่งเป็นดินเหนียวแข็งปานกลางตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง อายุของดินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจากบริเวณอ่าวไทยไปยังอยุธยาเช่นกัน ดังนั้นดินเหนียวที่บริเวณอยุธยาจะมีสภาพอัดแน่นเกินตัว (Over consolidated) มากกว่าดินบริเวณอ่าวไทย

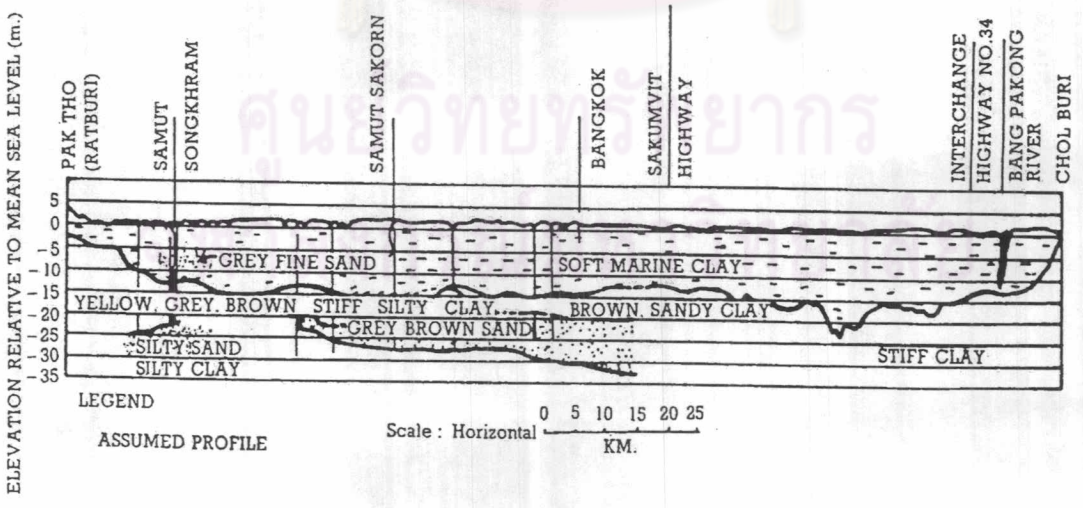
รูปที่ 2.2 แสดงรูปตัดของชั้นดินในบริเวณกรุงเทพฯ จากชลบุรีไปราชบุรี จะเห็นว่ามีดินเหนียวอ่อนเป็นแอ่งอยู่ และแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมีความไม่แน่นอน ความหนาของดินเหนียวอ่อนใกล้แม่น้ำบางปะกงมีถึง 20 ม. ความหนาของดินเหนียวอ่อนเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้จังหวัดชลบุรี และจากจังหวัดสมุทรสงครามไปยังจังหวัดชลบุรีโดยทั่วไปอายุของดินเหนียวอ่อนจะน้อยที่สุดบริเวณใกล้จังหวัดชลบุรี จากนั้นอายุของดินและสภาพอัดแน่นเกินตัว (Over consolidated) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในทิศทางไปยังจังหวัดราชบุรี

บริเวณจังหวัดชลบุรีและระยอง ดินส่วนมากเป็น Residual Soil โดยเกิดจากการสลายตัวของหินอัคนี ชั้นบนเป็นทรายค่อนข้างหลวม มีความหนาแน่นไม่แน่นอน ทรายหยาบชั้นบนเป็นดินตกตะกอนอาจเป็นพวก Marine หรือ Alluvial Deposit ชนิดของดินตอนบนที่เป็นส่วนของ Residual

Soil อาจเป็นดินเหนียวหรือทรายแป้ง (Silt) ที่มีค่า Plasticity Index (PI) สูง ถัดลงมาดินเหนียวจะมีค่า Plasticity Index (PI) น้อยลง ดินส่วนมากจะเป็นพวกทรายปนดินเหนียวหรือดินปนทรายที่มีกรวดหรือเม็ดหินปนอยู่



รูปที่ 2.1 รูปตัดแสดงชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศเหนือไปทิศใต้
(ว.ส.ท. , 2520)



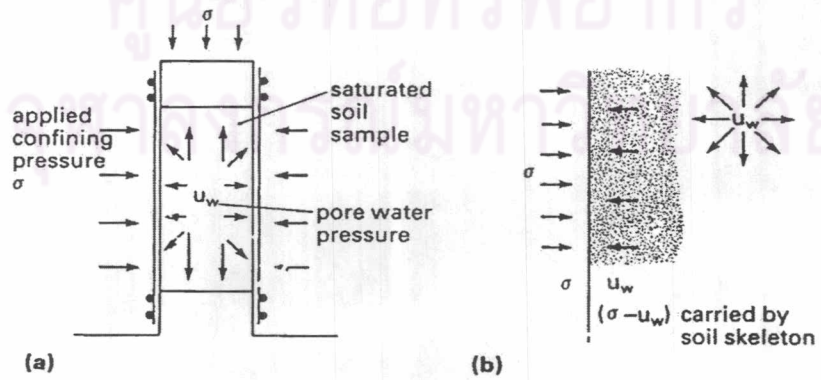
รูปที่ 2.2 รูปตัดแสดงชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก
(ว.ส.ท. , 2520)

ดินในประเทศไทยชนิดที่เป็นดินตกตะกอนส่วนใหญ่เกิดขึ้นในภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคเหนือ ส่วนภาคใต้มีดินตกตะกอนบ้างเป็นบางแห่ง แต่ส่วนใหญ่จะเป็นพวก Residual Soil บริเวณริมฝั่งทะเลตะวันออก ดินเกือบทั้งหมดเป็น Residual Soil หรือเมื่อมี Oxide ของเหล็กมาก มักจะถูกเรียกว่าดินลูกรัง (Lateritic Soil)

2.2 หน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล (Total Stress and Effective Stress)

การพิจารณาหน่วยแรงในมวลดินสามารถแยกได้เป็น 2 ชนิด คือ พิจารณาจากภายนอก ซึ่งหน่วยแรงจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงรวม (Total Stress) และพิจารณาจากภายในซึ่งสามารถแยกได้เป็นการพิจารณาแบบโครงสร้างรวม (Macroscopic Structure) และแบบโครงสร้างย่อย (Microscopic Structure) สำหรับการพิจารณาจากภายในแบบโครงสร้างรวมหน่วยแรงจะประกอบไปด้วย หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) และหน่วยแรงจากแรงดันน้ำในโพรงดิน (Pore Pressure) สำหรับหน่วยแรงประสิทธิผลนั้น เมื่อพิจารณาจากภายในแบบโครงสร้างย่อยอาจแยกย่อยได้เป็นหน่วยแรงจากประจุไฟฟ้า (Interparticle Force) หน่วยแรงจากการเสียดทานและเสียดสีระหว่างเม็ดดิน (Friction and Interference Force) ฯลฯ

ในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation , S = 100 %) ภายใต้สภาวะสมดุล เมื่อถูกกระทำโดยหน่วยแรงค่าหนึ่ง ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า หน่วยแรงรวม (Total Stress , σ) จะถูกกระจายแรงออกเป็น 2 ส่วน คือ รับโดยเม็ดดิน (Solid Particle) และรับโดยแรงดันน้ำระหว่างช่องว่างในเม็ดดิน (Pore Pressure , u_w) ดังแสดงในรูปที่ 2.3(a) ความแตกต่างระหว่าง σ-u_w จะถูกรับโดยโครงสร้างของมวลดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.3(b)



รูปที่ 2.3 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Triaxial

ความแตกต่างระหว่างหน่วยแรงรวม (Total Stress , σ) และแรงดันน้ำในโพรงดิน (Pore Pressure , u_w) ก็คือ หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress , σ') นั่นเอง ซึ่งเป็นค่าที่เราไม่สามารถวัดได้แต่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = \sigma' - u_w \qquad (2.1)$$

สมการนี้ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในสาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดย Professor Karl Terzaghi ใน ปี ค.ศ. 1924 โดยหน่วยแรงประสิทธิผลรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยแรงนี้ ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของมวลดิน (Soil Behaviour)

2.3 การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของโมดูลัสเฉือนที่ผ่านมา

โดยทั่วไปแล้วคุณลักษณะพฤติกรรมของดินส่วนใหญ่แล้วขึ้นกับความเค้นและเครียดที่เกิดขึ้นภายในมวลดินนั้น ซึ่งสามรถเขียนในรูปของโมดูลัสที่ระดับค่าความเครียดต่างๆ และสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์หรือกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำมาหาค่าโมดูลัสได้จากค่าความชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์นั้น ซึ่งมีประโยชน์ต่อการจำลองพฤติกรรมของมวลดิน เช่น การทรุดตัวของดิน หรือเสถียรภาพความชันของมวลดิน ซึ่งการหาค่าโมดูลัสนั้นอาจมีผลกระทบหลายอย่างต่อค่าโมดูลัสจากกระบวนการอื่นๆที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน

จากผลกระทบดังกล่าวนั้น Hardin & Richart (1963) ได้เสนอความสัมพันธ์ของค่า Shear Modulus โดยใช้ทรายเป็นตัวอย่างและการทดสอบด้วยวิธี Resonant Column ไว้ว่า

$$G_{\max} = Af(e)\left(\frac{P}{P_r}\right)^m \qquad (2.2)$$

เมื่อ P - Mean Effective Pressure

P_r - Reference Pressure

A,m - Constant

f(e) - Void Ratio

ถ้าใช้ Reference Pressure เท่ากับ 98.1 kPa สามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$G_{\max} = \frac{6900(2.17-e)^2}{(1+e)\left(\frac{P}{98.1}\right)^{0.5}} \tag{2.3}$$

Hardin & black (1968) ได้สร้างสมการความสัมพันธ์ของ Shear Modulus ของตัวอย่างดินเหนียวที่ทำการ Remolded สำหรับดินที่เป็น Normal Consolidation และมีค่า Plastic Index = 21 ได้สมการว่า

$$G_{\max} = 3270\left(\frac{(2.973-e)^2}{1+e}\right)\sqrt{\sigma'_v} \tag{2.4}$$

Humphries and Wahls (1968) ได้สร้างสมการความสัมพันธ์ของ Shear Modulus ของตัวอย่างดินเหนียวที่ทำการ Remolded ที่มีค่า Compressible สูง และมีค่า Plastic Index = 60 ในรูปของ void ratio ได้สมการว่า

$$G_{\max} = 35000 - 13000e \quad \text{(in kPa)} \tag{2.5}$$

จากผลกระทบดังกล่าว ที่มีตัวแปรมากมาย Hardin & Black, (1968) ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือนและค่ายังโมดูลัส ซึ่งมีจะมีแนวโน้มที่คล้ายกันแต่ก็มีบางตัวที่แตกต่างกันบ้างซึ่งได้สรุปตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

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

เมื่อ

σ'_0 = หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective octahedral normal Stress)
e = อัตราส่วนช่องว่าง
C = ลักษณะจำเพาะของเม็ดดิน
A = ขนาดของ Strain
H = ประวัติของหน่วยแรง (Stress History) และ ประวัติของการรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration History)
t = Secondary Time Effect
S = ความอิ่มตัวของดิน (Degree of Saturation)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

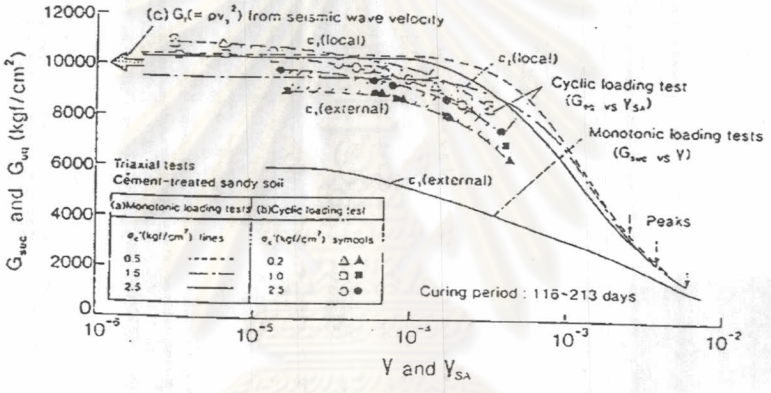
τ_0 = หน่วยแรงเฉือน (Octahedral Shear Stress)

f = ความถี่ของการสั่นสะเทือน (Frequency of Vibration)

θ = โครงสร้างของดิน (Soil Structure)

T = อุณหภูมิ (Temperature)

Hardin & Drnevich(1972) เสนอว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสเฉือนในดินเหนียวและในทรายที่ค่าระดับความเครียดต่ำกว่า 10^{-3}% ค่าของค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่าคงที่และจะลดลงเมื่อค่าความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อค่าของอัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลงจะทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้นแต่จะมีผลกระทบน้อยมากเมื่อค่าความเครียดน้อยกว่า 1% และ ยังมีผลกระทบจากหน่วยแรงประสิทธิผลที่ทำให้ค่าโมดูลัสเฉือนเพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของ Parameter ต่าง ๆต่อ Shear Modulus (Shibuya et al,1992)

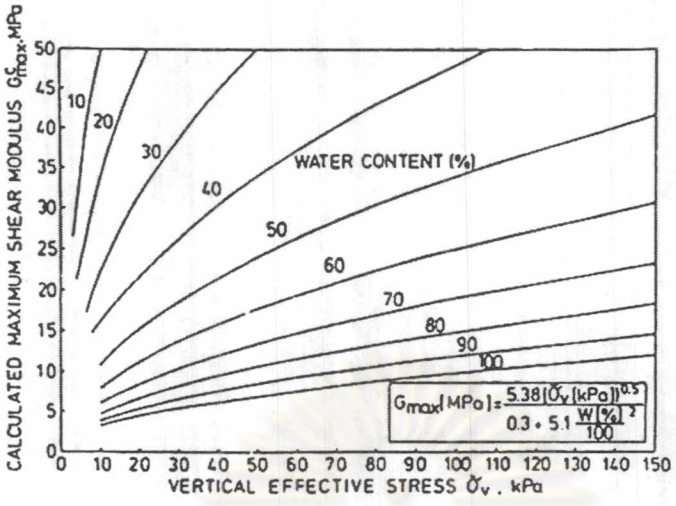
Hardin (1978) ได้สร้างสมการประมาณค่า Shear Modulus ในลักษณะ Semi-Empirical ไว้ ดังนี้

$$G_{\max} = \frac{625}{0.3+0.7e}(OCR)^k(\sigma_0 P_a)^{0.5} \qquad (2.6)$$

และสำหรับ Normal Consolidated Clay สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

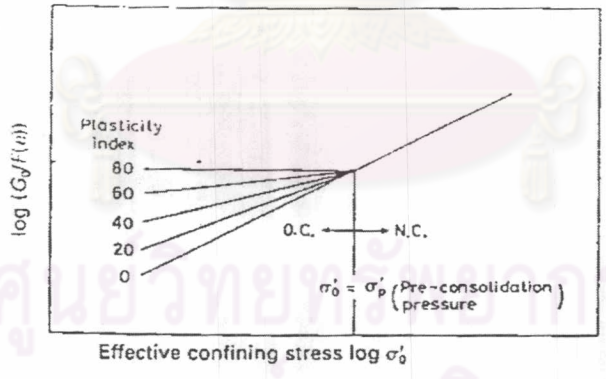
$$G_{\max} = \frac{86281}{0.3+5.1(w)^2}(\sigma_0)^{0.5} \qquad (2.7)$$

และเพื่อให้ง่ายขึ้น Hardin ได้เขียนความสัมพันธ์ในลักษณะขอกราฟโดยใช้รูปแบบของสมการที่ (2.7) ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Max Shear modulus for Normal Consolidated

Ishihara,(1996) ทำการทดสอบ kaolinite & bentonite Clay ซึ่งมีค่าพลาสติกสูงตามรูปที่ 2.6 ทำให้สรุปได้ว่าค่าของ Stiffness จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของดัชนีพลาสติกและอัตราส่วนการยุบตัว



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของค่า PI และค่า OCR

จากผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของดัชนีพลาสติกและอัตราส่วนการยุบตัว Hardin & Black,(1968) จึงได้ศึกษาและเสนอสมการการหาค่าโมดูลัสเฉือน ซึ่งได้อธิบายไว้ค่าโมดูลัสเฉือนของการอัดตัวแบบปกติมีค่าแปรผันตามสมการ ดังนี้

$$G_{co} = A_{co}(\sigma'_0)^{n_0} f(e) \qquad (2.8)$$

เมื่อ A_{CO} และ n_0 เป็นค่าคงที่เมื่อ Confining Stress (σ'_0) มีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงแบกทานในอดีต (σ'_P) และมีความสัมพันธ์กันดังนี้

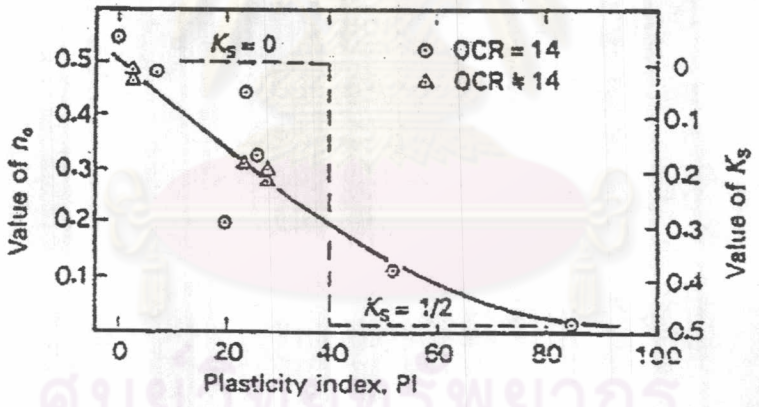
$$A_{CO} = A(\sigma'_P)^{0.5-n_0} = A(\sigma'_0)^{k_s}(OCR) \qquad (2.9)$$

$$k_s = \frac{1}{2} - n$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.9) กลับไปที่สมการที่ (2.8) จะได้ว่า

$$G_{CO} = A\,(OCR)^{k_s}(\sigma'_0)^{0.5} f(e) \qquad (2.10)$$

และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า n_0 และ K_s ไว้ดังรูป ที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_s และ n_0 กับ Plasticity Index

ดังนั้นสำหรับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง (PI > 40) ค่า n_0 จะมีค่าเท่ากับศูนย์และสำหรับดินที่มีค่า ดัชนีพลาสติกต่ำ (PI < 40) ค่า n_0 จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ทำให้ค่า K_s มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้รูปสมการใหม่ว่า

$$G_{CO} = A\,(\sigma'_p)^{0.5} f(e) \qquad (2.11)$$

ซึ่งแสดงว่าดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูงๆนั้นสามารถใช้ค่า (σ'_p) แทนค่าของ (σ'_0) ในสมการที่ (2.5) ในช่วงที่หน่วยแรงมีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงกำลังรับแรงแบกทานในอดีต จึงสรุปได้ว่าค่าดัชนีพลาสติกมีผลต่อค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงของ Over Consolidate

Bolton & Wilson, (1985) ได้ทำการศึกษาแบบพลศาสตร์ในทรายแห้ง (Dry Sand) โดยการใช้ Resonant Column พบว่าในทรายแห้งนั้นค่าความถี่ไม่มีผลกระทบต่อค่าโมดูลัสเฉือน ต่อมาในปี 1988 Pane & Burghignolli มีรายงานผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในช่วงกว้าง โดยชี้ได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดนั้นมีผลกระทบน้อยกว่าค่าของความเตรียดเองในการวัดค่าโมดูลัสเฉือน

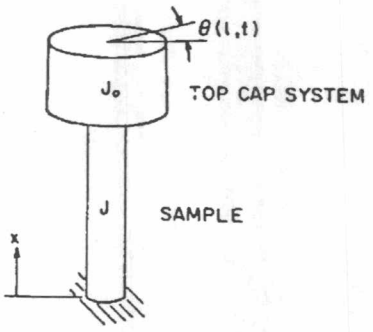
Tatsuoka, (1992) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ระดับความเครียดต่ำในการทดสอบแบบ Consolidation Undrain Triaxial Compression Test โดยการทดสอบครั้งนี้พบว่าค่าของโมดูสัสเฉือนเริ่มต้น (Initial Shear Modulus) ของดินเหนียวไม่ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียด แต่ค่าของโมดูสัสเฉือนจะมีการเปลี่ยนแปลงความเครียดมากๆ

Zavoral, Dan Z. & Campanella, (1994) ได้ทำการทดสอบการหาค่าโมดูลัสเฉือนในตัวอย่างดินเหนียวแบบ Undisturbed โดยวิธี Resonant Column ด้วยความถี่ที่ต่างกัน ซึ่งให้ผลปรากฏออกมาว่าค่าโมดูลัสเฉือนจะเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ

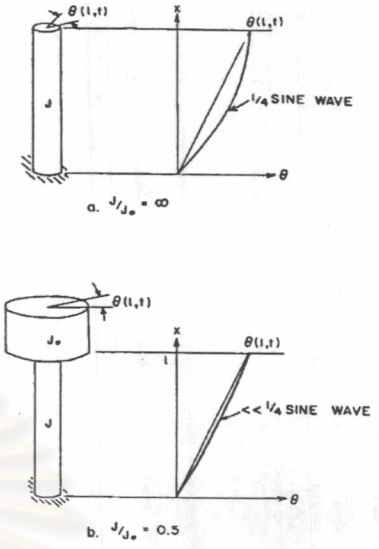
Drnevich, V. P., Hall, J. R., Jr. & Richart, F. E., Jr. ทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนโดยการทดสอบแบบ fix-free Resonant Column ตามรูปที่ 2.8 โดยที่ตัวอย่างและ top cap มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของตัวอย่างละ top cap ไม่เท่ากัน ซึ่งใช้ตัวอย่างแบบ Hollow Cylindrical โดยอ้างอิงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของ Kelvin-Voigt

ดังนั้นในการทดสอบของ Drnevich จึงพิจารณาได้ 2 แบบตามรูปที่ 2.9a และ 2.9b ในรูปที่ 2.8a เมื่อเกิดการหมุนที่ด้านปลายอิสระนั้นจะเกิดคลื่นขนาด ¼ เท่าของ sine wave 1ลูกคลื่นและจะมีค่าลดลงเมื่อมวลที่ด้านปลายอิสระเพิ่มมากขึ้น

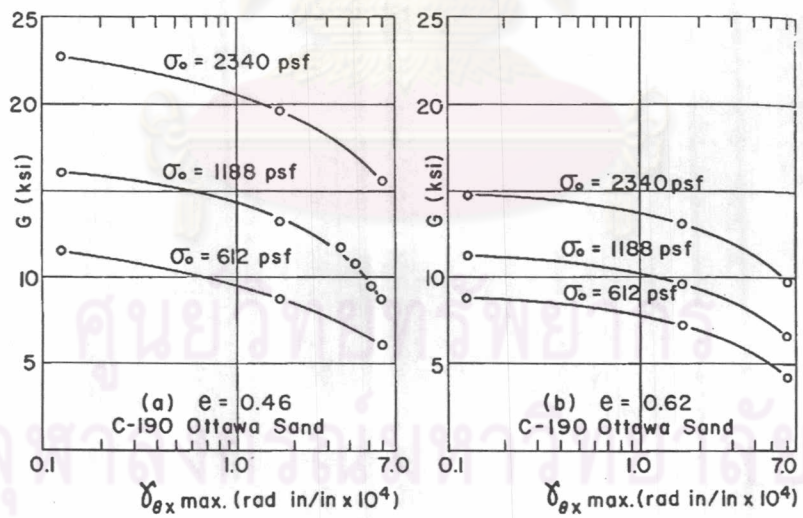
ในการทดสอบนั้นให้ผลการทดสอบออกมาตามรูปที่ 2.10 ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มค่าการสั่นสะเทือนของ Resonant Column ค่าความถี่สั่นพ้องจะมีค่าลดลงนั่นหมายถึงค่าโมดูลัสเฉือนนั้นจะมีค่าลดลงตามค่าความถี่และขนาดของค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น โดยการทดสอบนี้ตัวอย่างจะต้องไม่ถูกการรบกวนด้วยความถี่สูงมาก่อน



รูปที่ 2.8 การทดสอบแบบ Fixed-Free Resonant Column



รูปที่ 2.9 การรบกวนตัวอย่างโดยการบิด



รูปที่ 2.10 ค่าโมดูลัสเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

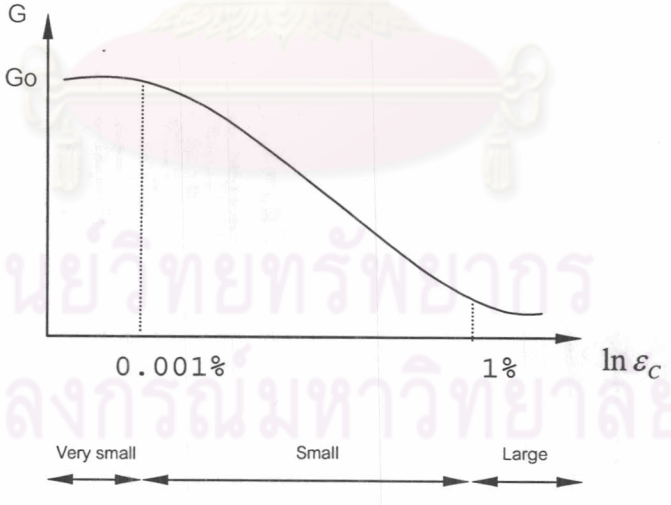
จากรายงานการศึกษาข้างต้น ทำให้ทราบว่าค่าของโมดูลัสเฉือนจะมีค่าไม่คงที่ตามขนาดของความเครียดนั้น จึงได้มีการรวบรวมผลการศึกษาต่างๆและสรุปผลเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาพฤติกรรมและการใช้งานจึงได้มีการเสนอระดับของความเครียดในช่วงต่างๆ

Atkinson & Sallfors,1989 เสนอว่าเพื่อให้ง่ายต่อการแยกความแตกต่างที่เหมาะสมของความเครียดซึ่งเป็นการแสดงค่าของโมดูลัสเฉือนในอุดมคติ แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งสามารถแบ่งเป็นช่วงได้ ดังนี้

1.0) ความเครียดน้อยมาก : ค่าความเครียดมีค่าน้อยกว่า 0.001% ค่าโมดูลัสเฉือนมีค่าเกือบเป็นเส้นตรง มีการเปลี่ยนแปลงน้อย เกือบจะไม่ขึ้นกับ ความเครียด

2.0) ความเครียดน้อย : ค่าความเครียดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.001% < ความเครียด < 1% ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีลักษณะที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้น

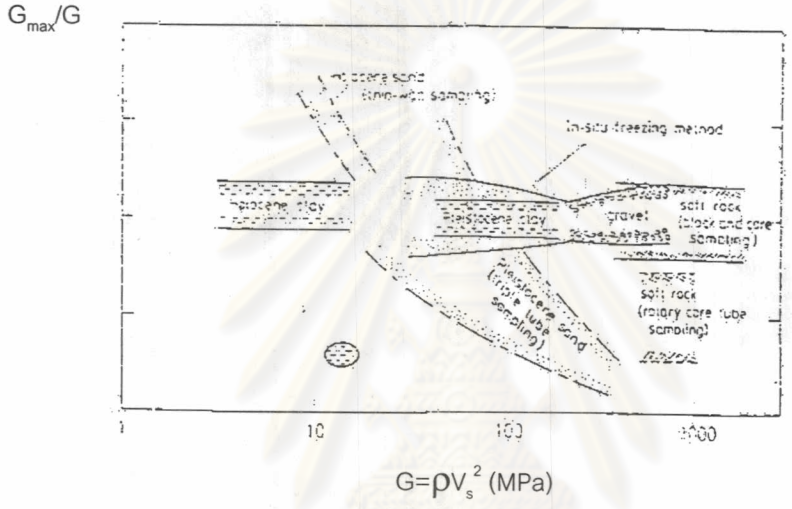
3.0) ความเครียดมาก : ค่าของความเครียดมีค่ามากกว่า 1% สภาพของดินมีค่าใกล้วิบัติค่าของโมดูลัสจะมีค่าน้อย



รูปที่ 2.11 แสดงค่าของ G ช่วง Strain ต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยทั่วไปนั้นการหาค่าโมดูลัสมักนิยมใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการและใช้วิธีการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (triaxial test) โดยการทดสอบกับตัวอย่างที่เก็บมาจากหลุมที่ทำการเจาะสำรวจในสนามซึ่งทำให้เกิดการรบกวนตัวอย่างได้ง่ายเนื่องจากการเคลื่อนย้ายตัวอย่างและการทดสอบแบบแรงอัดสามแกนก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ค่าของความเครียดนั้นมีค่าค่อนข้างที่จะอยู่ในช่วงความเครียดมากและเป็นเพียงการจำลองสภาพจากธรรมชาติให้เหมือนจริงเท่านั้น จากการวิเคราะห์การเก็บตัวอย่างหลายๆวิธีทำให้สรุปอัตราส่วนระหว่าง G_{lab}/G_{field} มีค่าประมาณ 0.8-1.2 ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบค่า Shear Modulus ของการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ

Baldi Hight และ Thomas,(1988) ได้พูดถึงค่าโมดูลัสเฉือนว่าในการทดสอบที่ค่าความเครียดน้อยกว่า 0.1% ในตัวอย่าง Unconsolidated และ Isotropically Consolidate โดยทั่วไปค่าที่ออกมามักจะเชื่อถือไม่ได้ ดังนั้นค่าของโมดูลัสเฉือนจากการทดลองในห้องปฏิบัติการจะให้ค่าความเครียดมากเท่านั้น

ในการหาค่าของโมดูลัสเฉือนนั้นต้องเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสม ซึ่งต้องมีการจำลองสภาพให้ใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุดและได้ค่าที่ถูกต้อง ดังนั้นการหาค่าโมดูลัสเฉือนจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับวิธีการที่ใช้และระดับของความเครียดที่ต้องการหาค่าโมดูลัสเฉือน

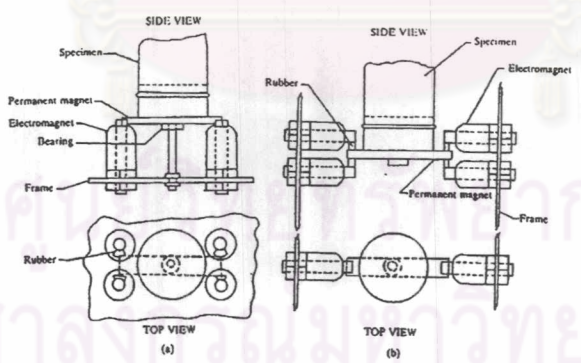
2.4 การทดสอบการหาค่าโมดูลัสเฉือนในห้องปฏิบัติการ

2.4.1 การหาค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงความเครียดมาก

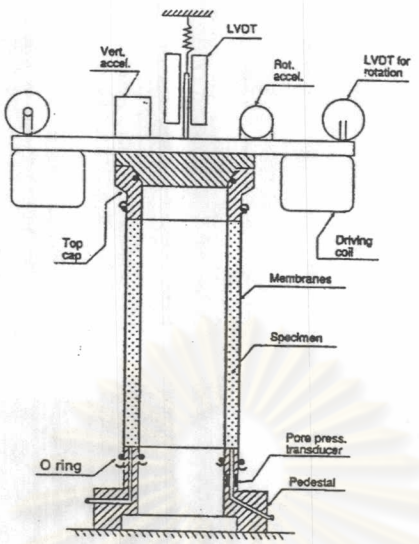
การหาค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงที่เป็นความเครียดมาก นิยมใช้วิธีการหาจากค่าความชันของ(tangent) กราฟระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดที่ทดสอบได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า การทดสอบแบบวนรอบ (Cyclic Test) เป็นวิธีการทดสอบหาโมดูลัสเฉือนที่ Small Strain ถึง Large Strain ส่วนใหญ่แล้วการทดสอบแบบ cyclic test มักจะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดแผ่นดินไหว หรือ ตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบและเกี่ยวข้องกับการออกแบบทางพลศาสตร์ เช่น Damping Ratio และ Shear Modulus เป็นต้น

2.4.2. การหาค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงความเครียดน้อย

การกาค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงความเครียดน้อย นิยมใช้วิธีการกระจายของคลื่น (Wave Propagation) เช่น Resonant Column (Hardin & Richart,1963) รูปที่ 2.13, Resonant Column (Drenvich,1978) รูปที่ 2.14 และ Ultra Sonic Shear Wave (Lawrence,1965) ซึ่งใช้ได้กับ Resonant Frequency



รูปที่ 2.13 Hardin & Richart ,(1963) Resonant Column Test (a) Torsion Vibration,(b)Longitudinal Vibration



รูปที่ 2.14 Drnevich Resonant Column Test,(1967)

2.4.3 การหาค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงความเครียดน้อยมาก

การหาค่าโมดูลัสเฉือนในช่วงความเครียดน้อยมาก นิยมใช้วิธี Bender Element Test ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดสอบ และการติดตั้งในอุปกรณ์การทดสอบหลักต่างๆ เช่น Triaxial Test หรือ Oedometer เป็นต้น ส่วนวิธี Mini-Air Hammer ที่คิดค้นโดย Arulnathan R. ในปี 2000 ตามรูปที่ 2.15 ยังไม่เป็นที่รู้จักกันมากนัก

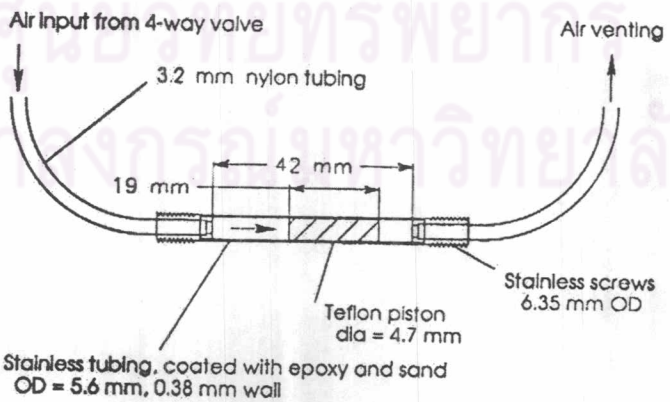
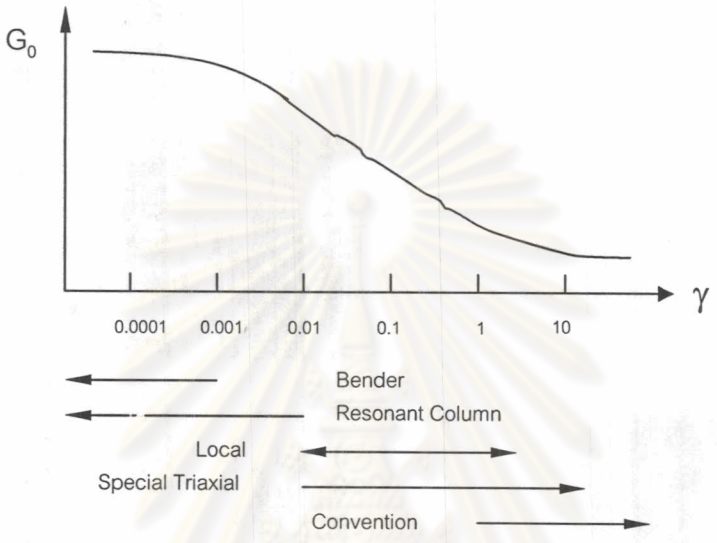


FIG. 1—*Layout of a mini-air hammer.*

รูปที่ 2.15 Mini-Air Hammer (Arulnathan,2000)

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนในสนามใช้วิธีเช่น Rayley-Wave-Velocity survey, Seismic Refraction Survey, Cross Hole Test หรือ Seismic Cone เป็นต้นและได้แสดงวิธีการหาค่าโมดูลัสเฉือนตามคุณสมบัติของดินและวิธีการหาคุณสมบัติที่ระดับความเครียดต่างๆตามตารางที่ 1และรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงค่าของช่วง Strain ต่างๆที่เหมาะสมการทดสอบ

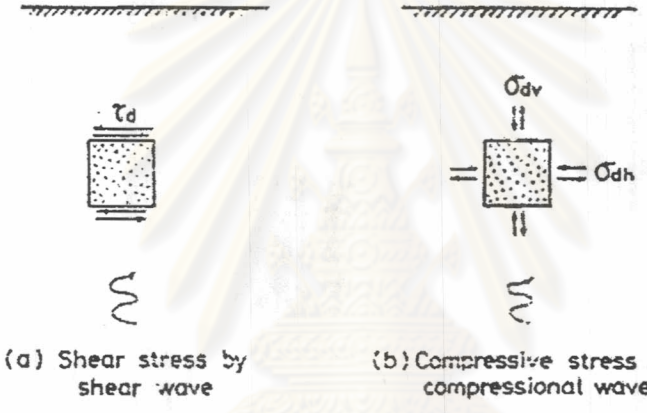
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของดินและวิธีการหาคุณสมบัติที่ระดับ Strain ต่างๆ

Magnitude of Strain		10^{-6} 10^{-5}	10^{-4} 10^{-3}	10^{-2} 10^{-1}
Phenomena		Wave Propagation Vibration	Crack Differential Settlement	Slide Vibration
Mechanical Characteristics		Elastic	Elastic-Plastic	Failure
Effect of Load Repetition			← →	
Effect to Rate of Loading			← →	
Internal Constants		Shear Modulus ,Poisson's Ratio ,damping		Angle of friction
In-situ Measurement	Seismic Wave Method	← →		
	In-situ Vibration Test		← →	
	Repeated Loading Test		← →	
Laboratory Measurement	Wave Propagation Precise Test	← →		
	Resonant Column Precise Test		← →	
	Repeated Loading Test		← →	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทดสอบการหาค่าโมดูลัสเฉือนที่ระดับความเครียดน้อยถึงน้อยมาก ด้วยวิธีการกระจายของคลื่น (Wave Propagation)นั้น จะต้องพิจารณาคลื่นหลักอยู่ 2 ชนิด คือ P-Wave (compressive Wave) และ S-Wave (Shear Wave) ตามรูปที่ 2.17 ซึ่งการเคลื่อนที่ของ P-Wave นั้นจะถูกรบกวนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านน้ำหรือดินเปียกเนื่องมาจากน้ำเป็นของเหลวที่สามารถรับแรงอัดได้ (Compressible Fluid) ในขณะที่ S-Wave ไม่มีผลกระทบจากน้ำและได้นำทฤษฎีของ Elastic Wave Medium และ Non-Linear Wave Motion ประยุกต์ใช้ในการทดสอบด้วย การใช้วิธีดังกล่าวยังมีผลกระทบอีกหลายตัวแปร เช่น ความต้านทานของอุปกรณ์ไฟฟ้า , ความถี่สั่นพ้อง , ความสูงคลื่น.การรบกวนตัวอย่าง และ Soil Mass เป็นต้น



รูปที่ 2.17 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่น Shear wave และ compressive wave

การหาโมดูลัสที่ความเครียดน้อยมากนิยมใช้ Bender Element ซึ่งเป็นการแปรสัญญาณจาก electro-mechanics ที่เป็นพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและในทางกลับกันเปลี่ยนพลังไฟฟ้าเป็นพลังงานกล Bender Element เป็น piezo-ceramic plate 2 แผ่นมาประกบกัน สามารถใช้ได้เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่น อีกทั้งการใช้วิธี Bender Element ยังง่ายและสามารถหาค่าโมดูลัสเฉือนระหว่างการทดสอบแรงเฉือน,อิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่างและ การอัดตัวคายน้ำ ขณะที่วิธีอื่นๆทำไม่ได้

ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติ ,ข้อจำกัด และวิธีการใช้งานอย่างละเอียดถี่ถ้วนเสียก่อน เพราะแผ่น Bender Element นั้นเป็นอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ที่ค่อนข้างราคาแพง

2.5 การเลือกแบบและการประกอบแผ่น Bender Element

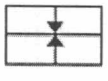
ในการเลือกขนาดหรือคุณสมบัติของ Bender Element จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่จะนำ Bender Element เข้าไปติดตั้ง โดยการเลือก Bender Element มีขั้นตอนดังนี้

2.5.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุ

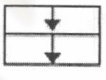
ทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าใน Bender Element นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องมาจากทิศทางของประจุไฟฟ้าจะบอกถึงการกำเนิดคลื่นของตัว Bender Element นั่นเอง โดยทิศทางของไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ประจุไฟฟ้าทิศทางเดียวกัน (Same Polarization) คือ ทิศทางของประจุไฟฟ้าใน Bender Element มีทิศทางชี้ไปทางเดียวกัน ตามรูปที่ 2.18

2) ประจุไฟฟ้าทิศทางตรงกันข้าม (Opposite Polarization) คือ ทิศทางของประจุไฟฟ้าใน Bender Element มีทิศทางชี้ไปทางตรงกันข้าม ตามรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 Same Polarization



รูปที่ 2.19 Opposite Polarization

2.5.2 การเชื่อมต่อ Bender Element

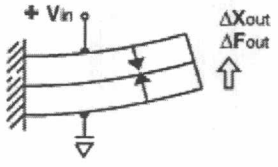
โดยทั่วไปการต่อ Bender Element นั้นสามารถต่อได้ 2 วิธี คือ

1) การต่อแบบอนุกรม[1] คือ ค่าความต่างศักย์เคลื่อนที่ส่งผ่านตัว Bender Element จะเคลื่อนที่ผ่านทุกๆชั้นของ Bender Element และค่าความต่างศักย์ของแต่ละชั้นใน Bender Element ถูกแบ่งโดยจำนวนชั้นของแผ่น Bender Elementตามรูปที่ 2.20

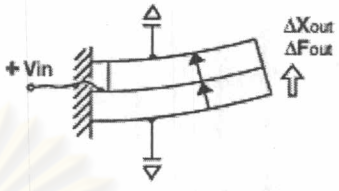
---

[1] ข้อมูลจาก www.piezo.com

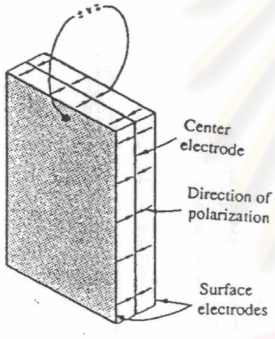
2) การต่อแบบขนาน[2] คือ ค่าความต่างศักย์เคลื่อนที่ส่งผ่านตัว Bender Element จะเคลื่อนที่แยกออกจากกันในแต่ละชั้น และการต่อแบบขนานนั้น ใช้ค่าความต่างศักย์เพียงครึ่งหนึ่งของการต่อแบบอนุกรมเท่านั้นตามรูปที่ 2.21



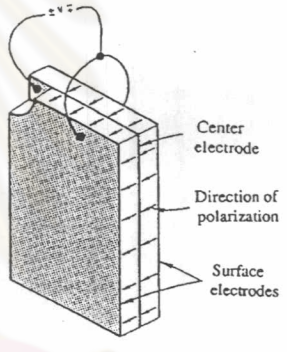
รูปที่ 2.20 ก 2-Layer Bending Element, Poled for Series Operation (2-wire)



รูปที่ 2.21 ก 2-Layer Bending Element, Poled for Parallel Operation (3-wire)



รูปที่ 2.20 ข การต่อแบบอนุกรม



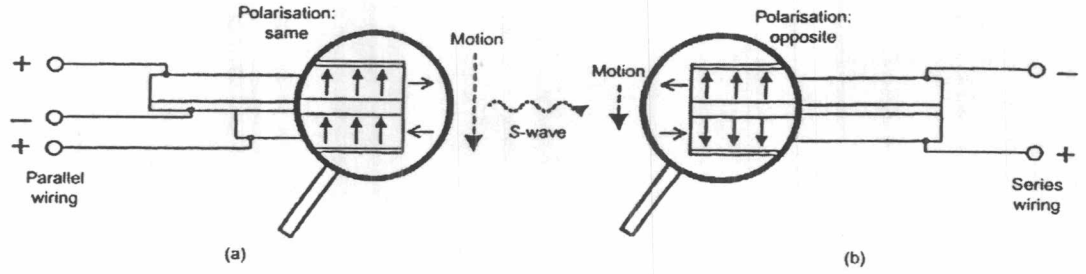
รูปที่ 2.21 ข การต่อแบบขนาน

ดังนั้นผลของ Polarization ที่แตกต่างกันนั้นเองทำให้ขั้วไฟฟ้าต่างกันในด้านตัวส่งและตัวรับจะทำให้เกิดลักษณะของคลื่นที่ต่างกัน คือ

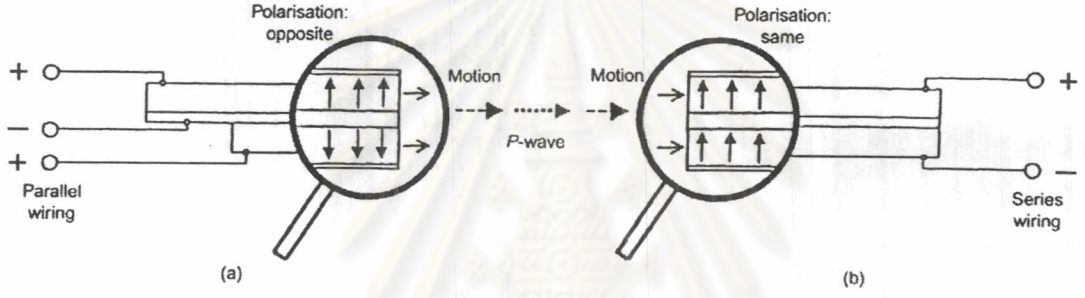
1) ตัวส่งต่อขนานแบบและตัวรับต่ออนุกรมแบบได้คลื่นแรงเฉือน (โดยเลือกแบบ Bending Motor)ตามรูปที่ 2.22

2) ตัวส่งต่อขนานแบบและตัวรับต่ออนุกรมแบบได้คลื่นแรง (โดยเลือกแบบ Extension Motor) ตามรูปที่ 2.23

[2] ข้อมูลจาก www.piezo.com



รูปที่ 2.22 แสดงการต่อแบบส่งคลื่นแรงเฉือน



รูปที่ 2.23 แสดงการต่อแบบส่งคลื่นแรงอัด

การต่อนั้นตัวส่งคลื่นจะต่อแบบขนานและตัวรับคลื่นจะต่อแบบอนุกรม ซึ่งการต่อที่แตกต่างกันเพื่อประสิทธิภาพของการทำงาน Bender Element เป็นวัสดุที่มีความต้านทานสูงจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการลัดวงจรด้วยการเคลือบ Bender Element ด้วย Epoxy ตามรูปที่ 2.24 และในรูปที่ 2.25 แสดงการติดตั้งกับอุปกรณ์กับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ และแสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเคลื่อนที่ของคลื่นแรงเฉือนดังนั้นในการทดสอบใช้ Function Generator เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ และ Oscilloscope เป็นตัวรับสัญญาณ

ในการหาค่าโมดูลัสเฉือนโดยใช้ Bender Element นั้นอาศัยความสัมพันธ์ของค่าความเร็วของคลื่นแรงเฉือน ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$V_s = \frac{L}{t} \tag{2.12}$$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วคลื่นแรงเฉือน (m/s)

L คือ ความยาวตัวอย่าง (m)

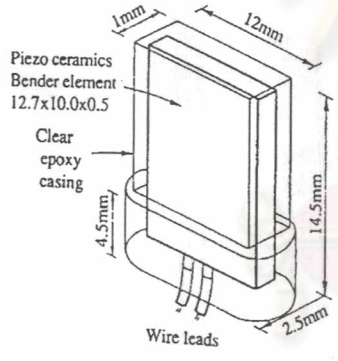
T คือ ระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ (s)

ช่วงเวลาที่วัดได้นั้นจะเป็นช่วงน้อยมากๆ จึงจำเป็นต้องใช้ Oscilloscope ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งค่าโมดูลัสเฉือนมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นแรงเฉือน ตามทฤษฎี Elastic Wave Motion (แสดงไว้ในภาคผนวก ก.) ดังนี้

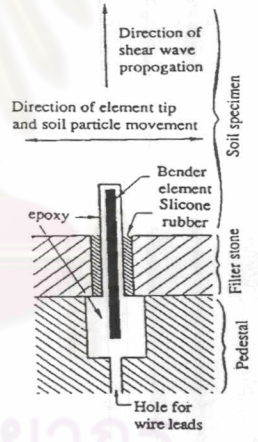
$$\text{Shear Modulus,(G)} = \rho\left(V_s^2\right) \qquad (2.13)$$

เมื่อ

ρ - Density (kg/m^3)



รูปที่ 2.24 การเคลือบ Bender Element

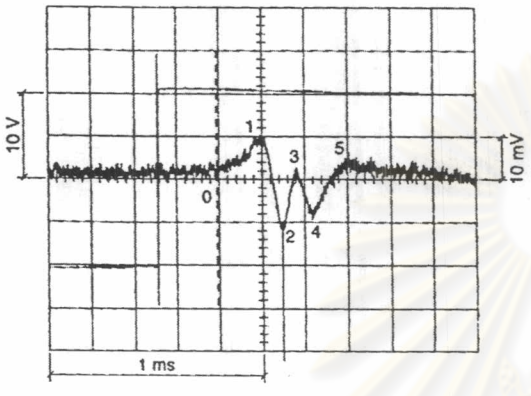


รูปที่ 2.25 การติดตั้งกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบและทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเคลื่อนที่ของ Shear Wave

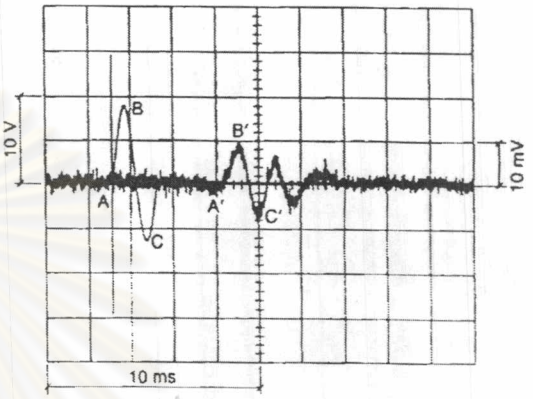
Dyvik & Madshus,(1985) ได้ทำการเสนอว่า ค่าความยาวของตัวอย่าง " L " ควรพิจารณาจากปลายของ Bender ตัวส่งถึง Bender ตัวรับ และยื่นเข้าไปในตัวอย่างประมาณ 1-2 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบแบบ Triaxial Test และ 2-3 มิลลิเมตร สำหรับ Oedumeter Test

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Viggiani & Attkinson (1995) ได้ทำการทดสอบโดยการส่งคลื่นทั้ง 2 แบบ คือ คลื่นรูปซายน์ โดยใช้ความถี่ 1-10 kHzและคลื่นรูปสี่เหลี่ยม โดยใช้ความถี่ 50 Hz ซึ่งได้ผลออกมาตามรูป2.26 และ 2.27 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการส่งคลื่นรูปซายน์ (sin wave) จะสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ออกมาเมื่อคลื่นเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณ

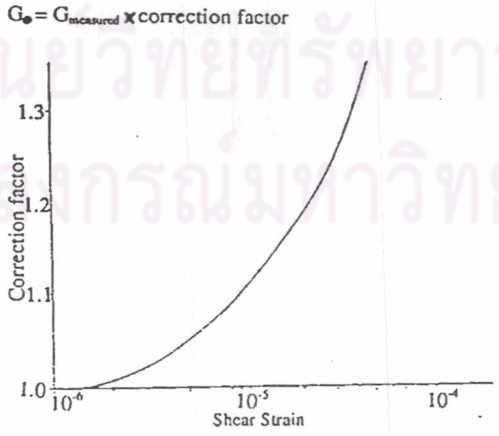


รูปที่ 2.26 การส่งคลื่นแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.27 การส่งคลื่นรูปซายน์

การหาค่าโมดูลัสเฉือนที่ระดับค่าความเครียดน้อยมากนั้นค่าของโมดูลัสเฉือนจะมีค่าคงที่ แต่ที่ระดับอื่นๆจะมีค่าลดลงในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องมีค่าปรับแก้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ μ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง μ กับระดับความเครียดตามรูปที่ 2.28 โดยการทดสอบแบบ Seismic Test (Larsson,1991)



รูปที่ 2.28 แสดงค่า Factor กับค่าของ Shear Strain

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 การทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนในสนาม

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

2.6.1 Rayleigh Wave Velocity Survey

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

2.6.2 Seismic Refraction Survey

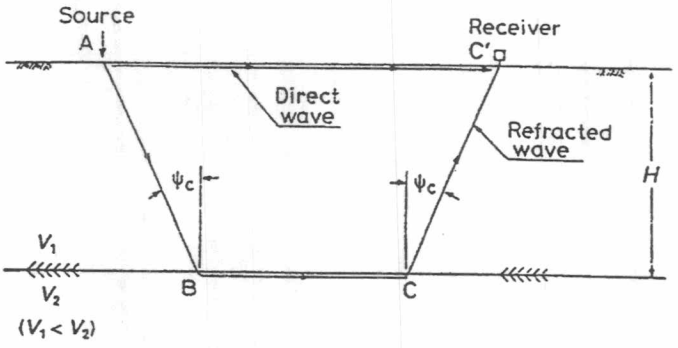
เป็นวิธีที่ดัดแปลงโดย Drenvich,1971 ตามรูปที่ 2.29 ให้สามารถหาค่าโมดูลัสเฉือนได้ เพราะแต่เดิมทีเป็นการสำรวจหาน้ำ ,น้ำมันใต้ผิวดินเท่านั้น จึงได้เสนอสมการการหาค่า โมดูลัสเฉือน ไว้ดังนี้

$$G = \frac{1-2\upsilon}{2(1-\upsilon)}\left(\rho V_p^2\right) \qquad (2.14)$$

เมื่อ

V_p - Compression Wave Velocity

υ - Poisson's Ratio



รูปที่ 2.29 Seismic Refraction Survey

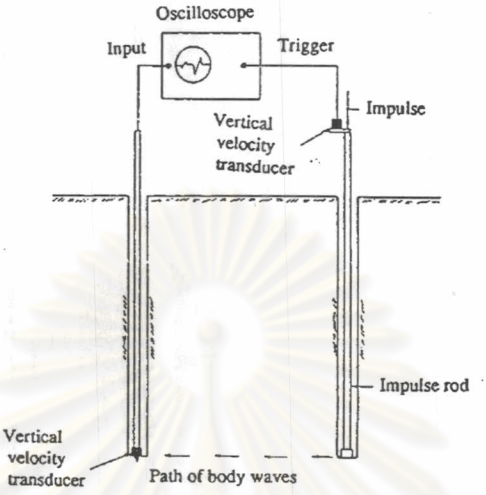
2.6.3 Cross Hole Test

เป็นวิธีทดสอบโดยการเจาะหลุมในแนวดิ่ง 2 หลุม ระยะห่างระหว่าง 2 หลุมไม่มากนัก ที่ระดับความลึกเท่ากัน โดยที่ตัวกำเนิด และ ตัวรับสัญญาณอยู่คนละหลุมกันและตัวรับตัวส่งจะสัมผัสหน้าดินตลอดเวลาขณะทำการทดสอบ ตัวกำเนิดและตัวรับสัญญาณจะต่อเข้ากับ Storage Oscilloscope โดยที่ Oscilloscope จะบันทึกค่าจากตัวรับสัญญาณทันทีเมื่อตัวกำเนิดสร้างคลื่นแรงเฉือนตามรูปที่ 2.30 วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความถูกต้องมากที่สุดวิธีหนึ่งและมักจะมีการใช้อ้างอิงกับวิธีการอื่นๆ แต่จุดอ่อนที่เห็นได้ชัดคือ การเจาะดินเพราะจะเป็นการรบกวนตัวอย่างดินตามธรรมชาติ จึงแก้ปัญหาโดยการให้ตัวกำเนิดคลื่นและตัวรับสัญญาณสัมผัสหน้าดินอย่างดี

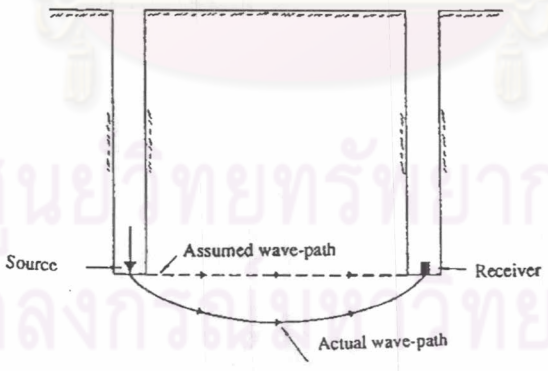
Andreasson,1979 ได้แสดงการเปรียบเทียบผลของการรบกวนจะประมาณเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหลุมเจาะที่ทำการเจาะไว้ก่อนกับการทดสอบโดยการกดเครื่องมือลงไปในตัวอย่างดิน ยังมีการศึกษาปัญหาต่อพบว่าที่ระดับความลึกที่มากขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่ามากตามยิ่งทำให้ความเร็วคลื่นแรงเฉือนมีการเคลื่อนที่ที่เร็วขึ้นและไปในทิศทางที่เร็วที่สุด ทำให้การหาค่าโมดูลัสเฉือนที่ชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนาน้อย ยากต่อการหาค่าที่ถูกต้อง ตามรูปที่ 2.31

2.6.4 Down Hole Method

เป็นวิธีการที่มีการวัดที่เหมือนกันกับ Cross Hole เพียงแต่มีหลุมเจาะเพียงหลุมเดียวเท่านั้น โดยจะมีตัวรับสัญญาณอยู่ที่หลุมและกำเนิดคลื่นตามแนวนอนบนพื้นผิว ตามรูปที่ 2.32 แสดงถึงการทดสอบแบบ Seismic Down Hole Test ในการทดสอบนี้สามารถทำในทางกลับกันได้ว่าตัวกำเนิดอยู่ในหลุมเจาะและตัวรับสัญญาณอยู่ด้านบน เราเรียกกันว่า Up Hole Test

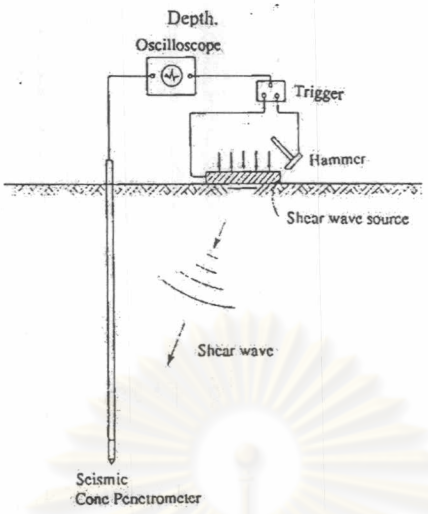


รูปที่ 2.30 Cross Hole Test

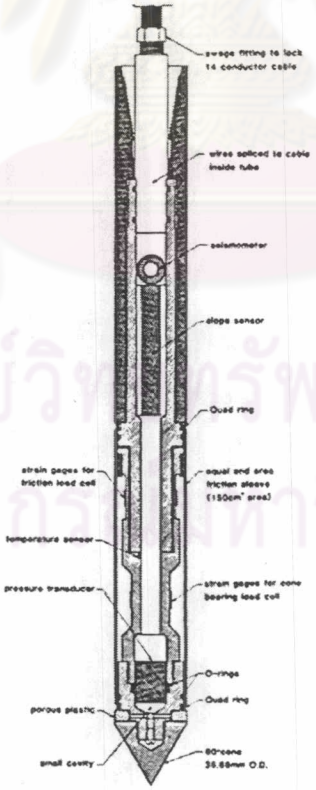


รูปที่ 2.31 แสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่นเมื่อชั้นดินด้านล่างมีความแงแรงกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.32 Down Hole Method



รูปที่ 2.33 รายละเอียดของ Seismic Cone Penetration

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากวิธีการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นวิธีที่ค่อนข้างมีความซับซ้อนและความยากลำบากในการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ดังนั้นจึงเป็นการดีอย่างยิ่งถ้าหากทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากการทดสอบภาคสนามโดยตรง ซึ่งสามารถหาค่าได้รวดเร็วกว่าและง่ายกว่าวิธีที่ผ่านมาในอดีต โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแรงเฉือน(Shear Modulus) กับความเครียด(Strain) เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์การคาดคะเนการเสียรูปของมวลดิน กำลังของมวลดิน เป็นต้น

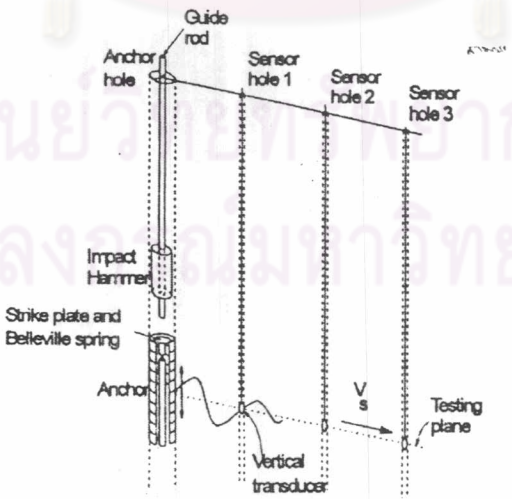
ต่อมาในปี 1995 Viggiani G. และ Atkinson J. H. ศึกษาเกี่ยวกับการตีความสัญญาณในการทดสอบหาค่าโมดูลัสเฉือนด้วย Bender Element และให้คำนิยามของ Potential Error ไว้ดังนี้

$$\frac{\Delta G_0}{G_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{2\Delta L}{L} + \frac{2\Delta t}{t} \qquad (2.13)$$

เมื่อ t , Δt = Travel time ,Error of Travel Time

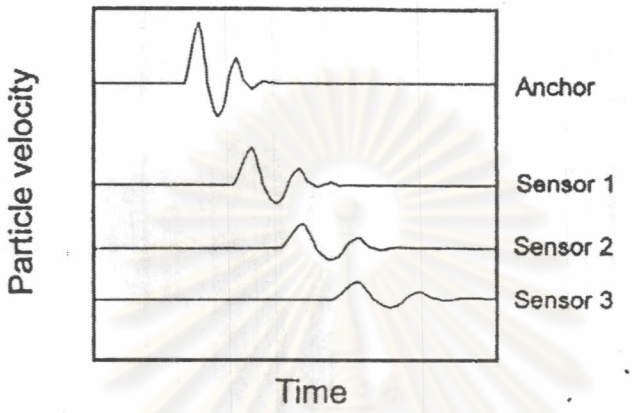
L, ΔL = Length, Error of Length

Salgado R. และคณะ (1997) ได้ทำการทดสอบแบบ Large-Strain Seismic Cross-Hole Test โดยการใช้ hammer-anchor เป็นตัวกำเนิดคลื่นแรงเฉือน (Shear Wave) โดยการตกกระทบของ hammer ที่กระทบ anchor ตามรูปที่ 2.34



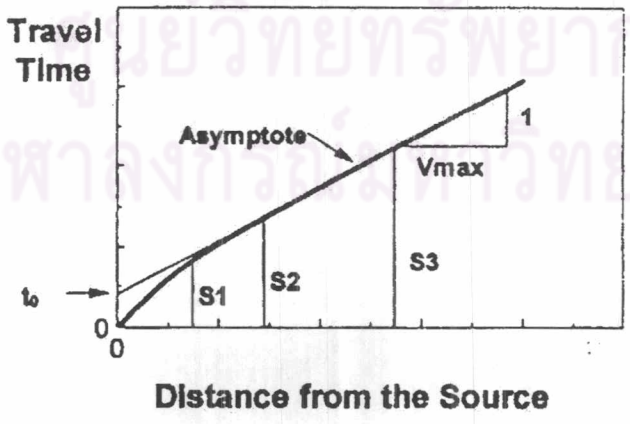
รูปที่ 2.34 Large Strain Cross Hole Test

ซึ่งใช้ vertical transducer เป็นตัววัดสัญญาณที่ระยะทาง 1.2,2.4 และ 4.8 เมตร จาก hammer-anchor ซึ่งสามารถวัดความเร็วของอนุภาคมวลดินที่เคลื่อนที่เนื่องจากการเคลื่อนตัวผ่านของ shear wave จากตัว vertical transducer นี้ ตามรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 การหาความเร็วของอนุภาคดิน

และสามารถหาความความเร็วของ shear wave โดยการเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง travel time และ ระยะทางระหว่าง anchor และ transducer และใช้วิธีสร้างสมการของความสัมพันธ์ดังกล่าว และนำมาหาค่าความชัน ตามรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 การหาความเร็วของ Shear Wave

ซึ่งสามารถสร้างสมการออกมาได้ว่า

$$t = t_0 + \frac{x}{V_{max}} \tag{2.16}$$

และนำมาหาค่าความเครียด โดยใช้สูตรที่ว่า

$$\gamma = \frac{v}{V_S} \tag{2.17}$$

และใช้สมการความสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอโดย Hardin & Drnevich (1972) ซึ่งมีลักษณะของฟังชันก์ hyperbolic และเมื่อแทนค่าต่างลงไปก็สามรถหาค่า Shear Modulus ได้

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_t}\left[1 + a\left(e^{-b\frac{\gamma}{\gamma_t}}\right)\right]} \tag{2.18}$$

และอาศัยสมการพื้นฐานอีก 2 สมการ คือ $dx = V_S dt$ และ $G = \rho V_S^2$ และนำสมการข้างต้นมาแทนค่าใน 2 สมการหลังสุดจะได้

$$x = V_{max} \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{1 + \frac{\gamma}{\gamma_t}\left[1 + a\left(e^{-b\frac{\gamma}{\gamma_t}}\right)\right]}} \tag{2.19}$$

เมื่อทำการอินทริเกรตสมการสุดท้ายนี้ ก็จะสามารถหาค่า ตัวแปร a ,b และ นำไปหาค่าของ Shear Modulus ได้

โดยที่ $\gamma =$ ความเครียด

$\gamma_t =$ ความเครียดที่จุดทดสอบ

$v =$ ความเร็วอนุภาค

$V_s =$ ความเร็วของ shear wave

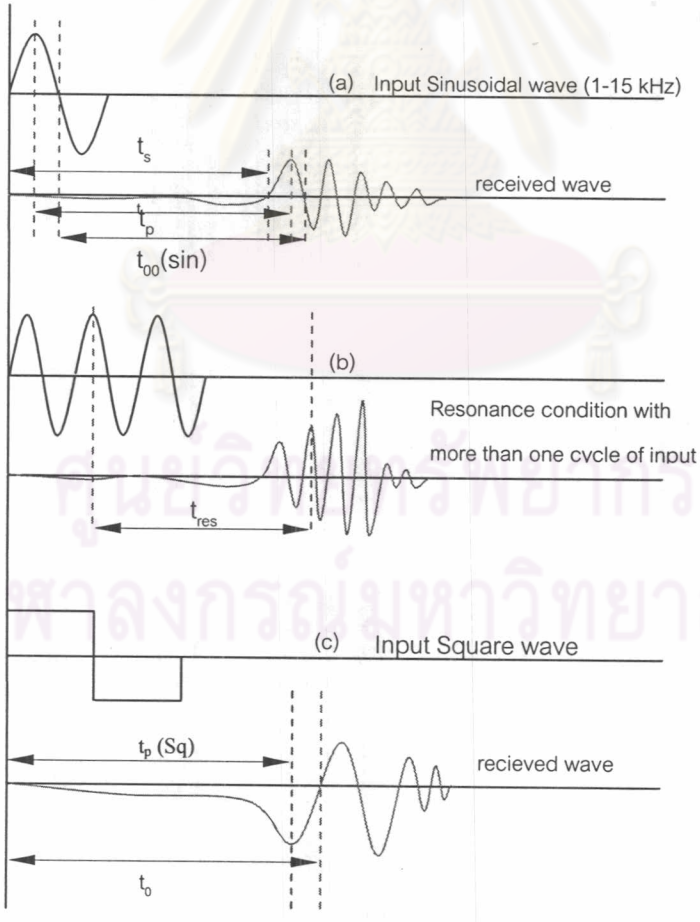
$a, b =$ ตัวแปรอิสระที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

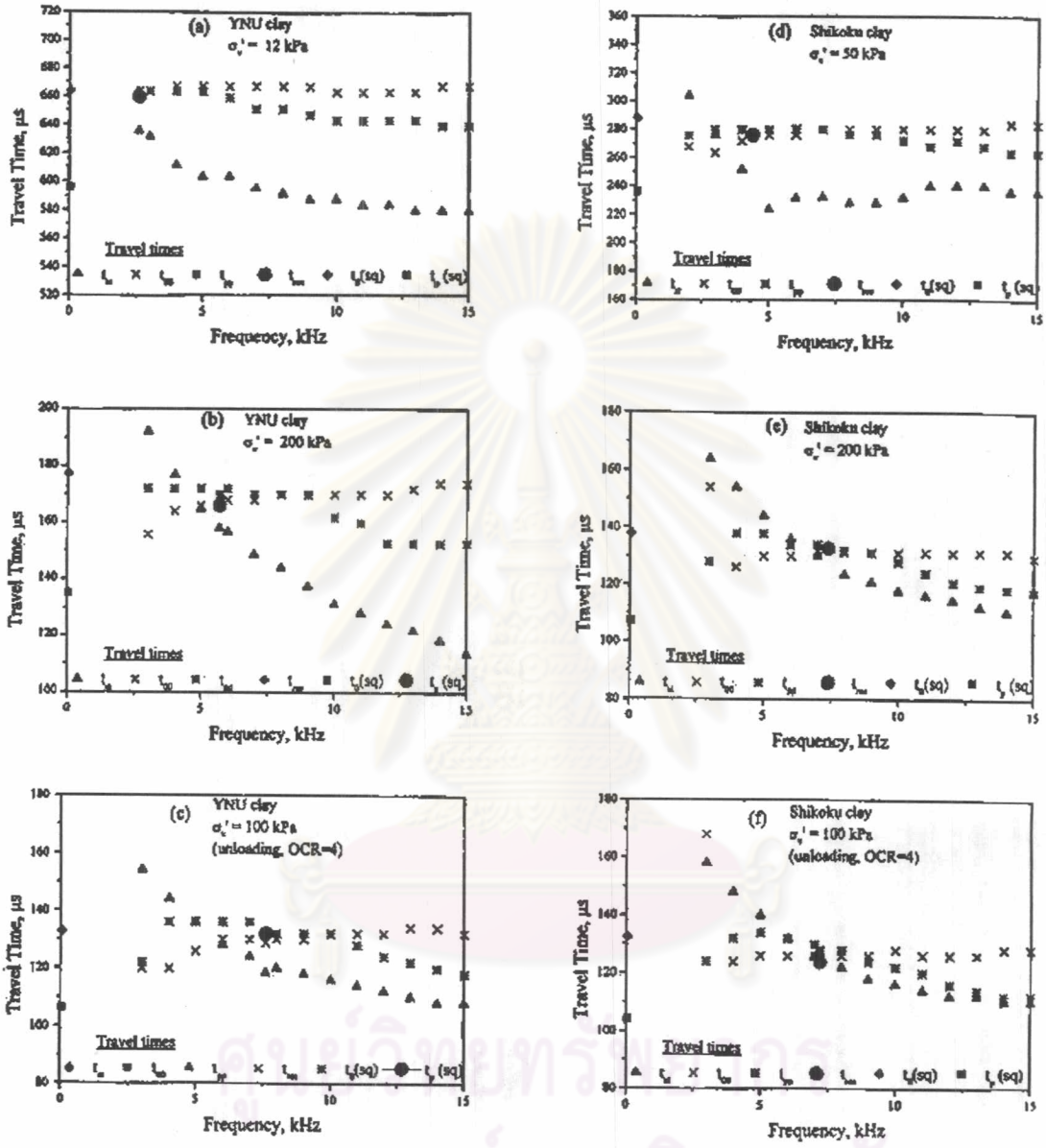
Lohani & Imai และ Shibuya (1999) ได้ทำการทดสอบโดยใช้ Bender Element และทำการเก็บเวลาในช่วงๆต่าง โดยการส่งคลื่นออกเป็น 3 แบบ และใช้ช่วงเวลาวัดที่แตกต่างกัน ตามลักษณะของแหล่งกำเนิดคลื่น ตามรูปที่ 2.37 ดังนี้

1. คลื่นรูปซายน์ 1 ลูกคลื่น (Single Sine Wave)
2. คลื่นรูปซายน์แบบต่อเนื่อง (Continues Sine Wave)
3. คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave)

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มค่าความถี่ขึ้น เวลาการเดินทางของคลื่นมีการเวลาการเคลื่อนที่ลดลงเป็นส่วนมากของการทดลง แต่ในช่วงเวลา t_{00} มีการเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นด้วย ตามรูปที่ 2.37 และได้ให้ข้อแนะนำในการทดสอบว่าการวัดช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่นแรงเฉือนที่ดีที่สุดคือช่วง t_{00} และเฉพาะกับการทดสอบแบบคลื่นรูปไซด์เท่านั้น



รูปที่ 2.37 คำจำกัดความของช่วงเวลา (a) ส่งคลื่นแบบ Sine wave (b) ส่งคลื่นแบบ Sine wave ในเงื่อนไขของการสั่นพ้อง (c) ส่งคลื่นแบบ Square wave



รูปที่ 2.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาเมื่อความถี่เพิ่ม (Shibuya,1999)

จากศึกษาวิธีการทดลองและผลการทดลองในอดีตที่เคยมีการทดสอบมาทั้งที่กล่าวไว้ข้างต้น ในรายงานการประชุม, วารสารทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น Geotechnique, Thesis และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยมุ่งเน้นไปที่ทฤษฎี Elastic Wave Motion และ Non-Linear Wave Motion เป็นต้น ผู้เขียนจึงทำการค้นคว้าเพื่อนำมาตั้งสมมุติฐานที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ตั้งสมมุติฐานไว้ดังนี้

1) การเคลื่อนที่ของคลื่นแรงเฉือนผ่านมวลดินนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของมวลดิน ส่งผลให้เกิดความเครียดเฉือนของมวลดิน

2) ความเครียดเฉือนของมวลดิน หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเร็วอนุภาคส่วนด้วยความเร็วคลื่นแรงเฉือน

$$\text{Shear Strain},(\gamma) = \frac{V_{Particle}}{(V_{Wave})} \qquad (2.20)$$

$$\text{Shear Modulus},(G) = \rho(V_s)^2 \qquad (2.21)$$

โดยที่

$V_{Particle}$ = Velocity of Particle = Slope of receive wave

$V_{Shear\ Wave}$ = Velocity of Shear Wave = L/t_s

ρ = ความหนาแน่น (kg/m^3)

V_S = ความเร็วคลื่นแรงเฉือน (m/s)

จะเห็นได้ว่าในการทดสอบมีตัวแปรในการทดสอบอยู่ 2 ตัวที่มีผลต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน คือ ความถี่และความสูงคลื่นที่ส่งผ่านมวลดิน ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีอิทธิผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นแรงเฉือนและการเสียรูปของมวลดิน ดังนี้

- เมื่อความเร็วของคลื่นแรงเฉือนมีค่ามาก
  - มวลดินจะถูกรบกวนน้อย
  - ค่าความเครียดจะมีค่าน้อย
  - ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่ามาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ความเร็วของ Shear Wave มีค่าน้อย
  - มวลดินจะถูกรบกวนมาก
  - ค่าความเครียดจะมีค่ามาก
  - ค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่าน้อย

3) ซึ่งผลกระทบในข้อ (2) นั้นนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนและคลื่นแรงเฉือนเป็นไปตามสมการทางคณิตศาสตร์และหาค่าตัวแปร

เมื่อเราสามารถทดสอบได้ตามสมมุติฐานแล้ว นำข้อมูลมาพล็อตกราฟแล้ววิเคราะห์ เพื่อหาแนวโน้ม, ค่าตัวแปรตามฟังชั่นทางคณิตศาสตร์ที่ได้สมมุติไว้ หรือความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นว่ามีความสมบูรณ์และถูกต้องมากน้อยเพียงใดในการนำค่าที่หาได้มาใช้ในงานทางวิศวกรรมปฐพี ซึ่งง่ายมากต่อการใช้งาน กล่าวคือ ถ้าทำการทดสอบในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นำข้อมูลที่ได้นั้นมาวิเคราะห์ตามขั้นตอน ก็จะได้สมการของข้อมูลที่บริเวณนั้นมา เมื่ออยากรู้ข้อมูลก็เพียงแทนค่าความเครียดลงไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย