

บทที่ 2

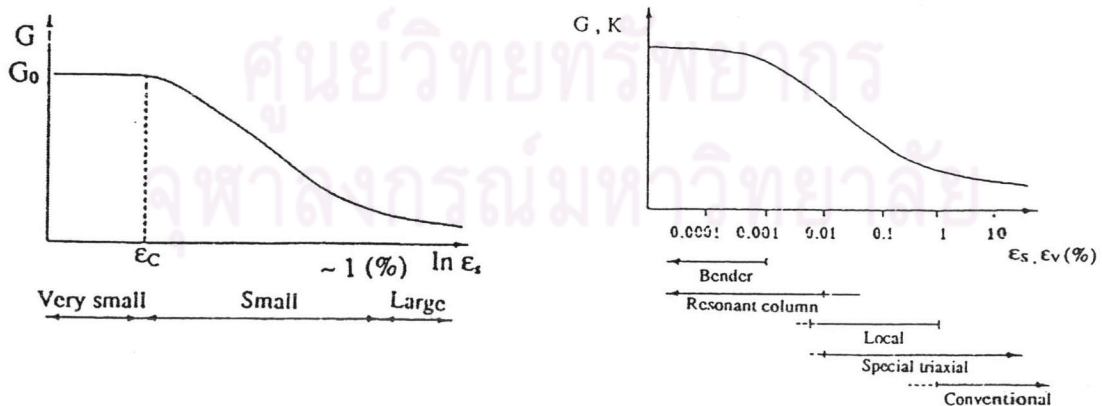
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

ค่าโมดูลัสแบบเฉือนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและใช้มากในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี โดยเฉพาะปัญหาทางด้านพลศาสตร์ (Soil dynamics) ซึ่งสามารถหาได้หลายวิธี เช่นวิธี Conventional routine test (การทดสอบกำลังของดินทั่วไป) เช่น Unconfined compression test, Triaxial test สำหรับหาที่ Large strain การวัดความเร็วของคลื่นที่วิ่งผ่านดิน (Wave propagation techniques) สำหรับหาที่ small strain, Bender element สำหรับหาที่ very small strain และวิธีหาค่า Stiffness modulus ในสนาม หรือทำการหาค่า Stiffness modulus โดยใช้สมการอิมไพร์กัล

2.2 ลักษณะพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ระดับ Strain ต่าง ๆ

โดยพื้นฐานแล้ว ค่า Stiffness สามารถหาได้จาก ความชันของ Stress-Strain curve (secant หรือ tangential gradient) อย่างไรก็ตามความถูกต้องในการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ระดับ Strain levels ต่าง ๆ ในทางปฏิบัติจะกระทำได้โดยประมาณช่วงของการวัดดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายพฤติกรรมของ Stress-Strain ในดินได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงค่าของ G ในช่วง strain ต่างๆ

รูปที่ 2.2 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสม ในการทดสอบวิธีต่าง ๆ

2.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ โมดูลัสแบบเฉือน

พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน กับ Young's modulus นี้มักจะมีแนวโน้มที่เหมือนกันเกือบทั้งหมด แต่ก็จะมีแตกต่างกันบ้างในบางตัว Hardin & Black, 1968 ที่ให้เห็นถึงพารามิเตอร์สำคัญๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในรูปแบบของฟังก์ชันดังนี้

$$G = f(\sigma'_0, e, C, A, H, t, S, \tau_0, f, \theta, T) \quad (2.1)$$

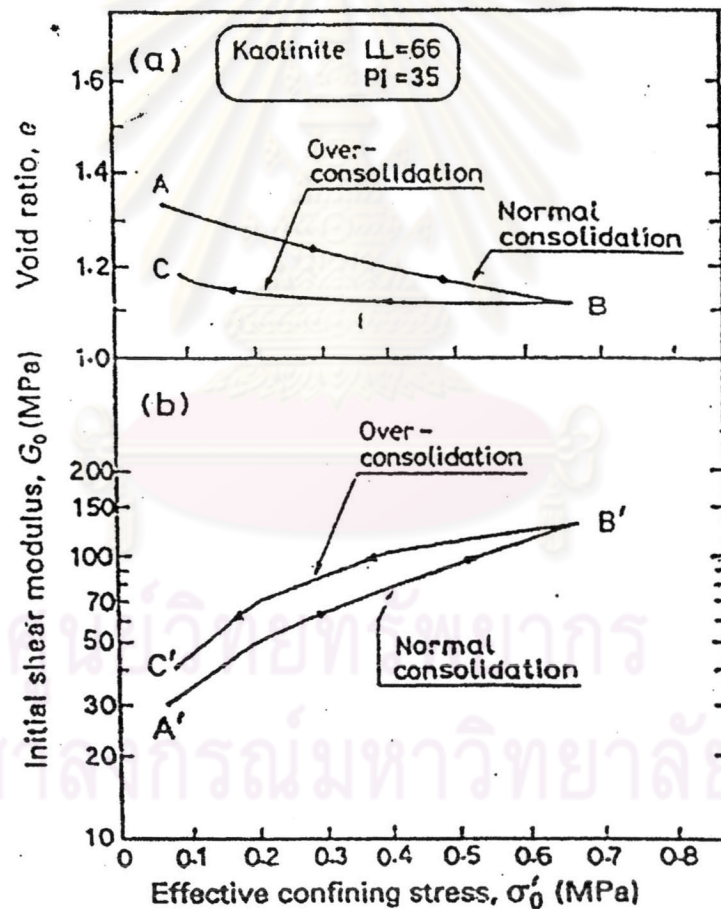
เมื่อ

σ'_0	=	หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective octahedral normal stress)
e	=	Void ratio
C	=	ลักษณะจำเพาะของเม็ดดิน, รูปร่าง, ขนาดคละ,
A	=	ขนาดของ Strain
H	=	ประวัติของหน่วยแรง (Stress history) และ ประวัติของการรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration history)
t	=	Secondary time effect
S	=	ความอิ่มตัวของดิน (Degree of saturation)
τ_0	=	หน่วยแรงเฉือน (Octahedral shear stress)
f	=	ความถี่ของการสั่นสะเทือน (Frequency of vibration)
θ	=	โครงสร้างของดิน (Soil structure)
T	=	อุณหภูมิ

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

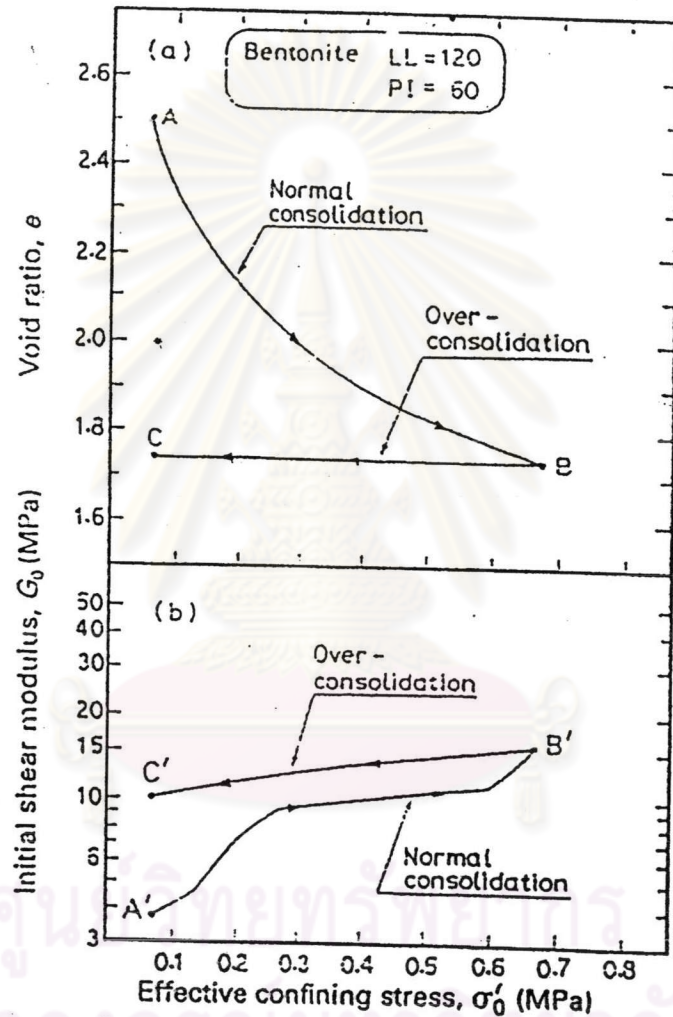
2.4 ผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในดินประเภท Cohesive soil

เป็นที่รู้กันดีว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของดินประเภท Cohesive soil ก็คือ plasticity และ stress history และในงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของ plasticity และ stress history ที่มีผลต่อค่าโมดูลัสแบบเฉือน ดังเช่นในการทดลองของ Humphries & Wahls , 1968 ที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ OCR ที่มีต่อค่า shear modulus ในตัวอย่างดินเหนียว Kaolinite ที่มี plasticity index (I_p) = 35% ด้วยวิธี resonant column test ซึ่งผลการทดลองที่ออกมาปรากฏว่าค่า shear modulus ในช่วง over consolidation จะมีค่าสูงกว่าค่า shear modulus ในช่วง normal consolidation ประมาณ 10 - 30% Humphries & Wahls , 1968 อธิบายถึงผลการทดลองที่ได้ว่าเป็นผลอันเนื่องมาจากค่า void ratio



รูปที่ 2.3 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวที่มีค่า plasticity ต่ำซึ่งมีอิทธิพลในช่วง OCR

ในการทดลองลักษณะเดียวกันกับดินเหนียว Bentonite ที่มี plasticity index (I_p) = 60% ค่า shear modulus จะมีค่าต่ำกว่าเนื่องมาจากค่า plasticity index สูง และจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า shear modulus เมื่อ OCR เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ชัดกว่าดินเหนียวที่มีค่า plasticity index ต่ำ จะเห็นได้ว่า plasticity ของดินเหนียวมีผลอย่างมากในช่วง over consolidation



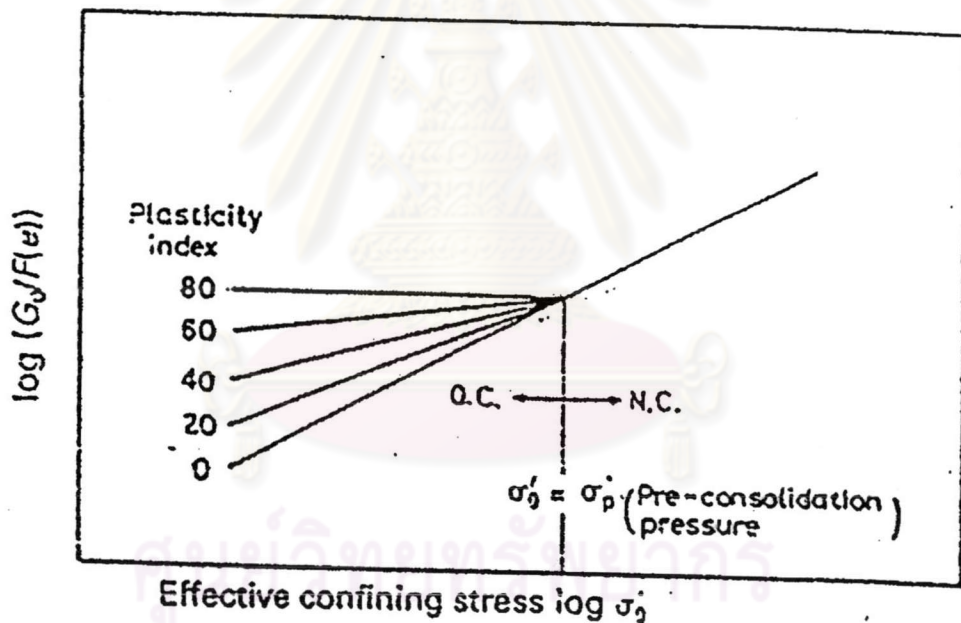
รูปที่ 2.4 ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวที่มีค่า plasticity สูง ซึ่งมีอิทธิพลในช่วง OCR

ต่อมาได้มีการทดลองที่สนับสนุนพฤติกรรมข้างต้นโดย Hadrin & Black , 1969 ได้แสดงความสัมพันธ์ของ shear modulus สัมพันธ์กับ $F(e)$ กับ effective confining stress การทดลองด้วยวิธี resonant column test ค่าของ preconsolidation pressure ประมาณ 0.2 MPa การทดลองทั้งหมดจะเห็นว่าผลของ shear modulus จะอยู่ในขอบเขตใน imperial equation 2 สมการดังนี้คือ

$$G_0 = 104F(e)(\sigma'_0)^{0.5}$$

และ

$$G_0 = 47.4F(e)(\sigma'_0)^{0.5}$$



รูปที่ 2.5 คุณลักษณะของโมดูลัสแบบเฉือนของดินเหนียวที่มีผลกระทบบอันเนื่องมาจากค่า over consolidation และ plasticity index

และเมื่อสังเกตจากผลการทดลองช่วง over consolidation ของดินเหนียวที่มีค่า plasticity index ที่สูง จะพบว่าค่า shear modulus จะมีแนวโน้มที่เพิ่มน้อยกว่าดินเหนียวที่มีค่า plasticity index ที่ต่ำ Hadrin & Black ได้เสนอสมการหาค่า shear modulus ที่คิดถึงผลกระทบของ OCR โดยที่ค่า shear modulus ในช่วง over consolidation จะเป็นในรูปสมการดังนี้

$$G_{co} = A_{co}F(e)(\sigma'_0)^{n_0} \quad (2.2)$$

A_{co} และ n_0 เป็นค่าคงที่เมื่อ effective confining stress (σ'_0) มีค่าต่ำกว่า preconsolidation pressure (σ'_p) และมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$A_{co} = A * F(e)(\sigma'_p)^{0.5-n_0} = A * F(e)(\sigma'_0)^{k_s} \quad (2.3)$$

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

เมื่อแทนค่ากลับไปในสมการ (2.3) จะได้

$$G_{co} = AF(e)(OCR)^{k_s}(\sigma'_0)^{0.5} \quad (2.4)$$

ค่าของ n_0 ถูกคิดขึ้นโดย โดย Hadrin & Black , 1969 จากการทดสอบในตัวอย่างดินเหนียวหลายประเภทดังแสดงในรูป n_0 กับค่า plasticity index ของดินเหนียวจะมีค่าตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.0 แต่ในการใช้งานจริงอาจใช้ค่า n_0 เท่ากับ 0.5 หรือ 0.0 สำหรับดินที่มีค่า plasticity index น้อยกว่าหรือมากกว่า 40% มากๆ ดังเช่นกรณีดินเหนียวที่มีค่า ค่า plasticity index น้อยกว่า 40% มากๆ สมการ $G_0 = AF(e)(\sigma'_0)^n$ สามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องคิดผลกระทบของ shear modulus อันเนื่องมาจาก preconsolidation pressure กับ plasticity index ในทางกลับกันดินที่มีค่า plasticity index มากกว่า 40% มากๆ ค่า shear modulus หาได้จาก

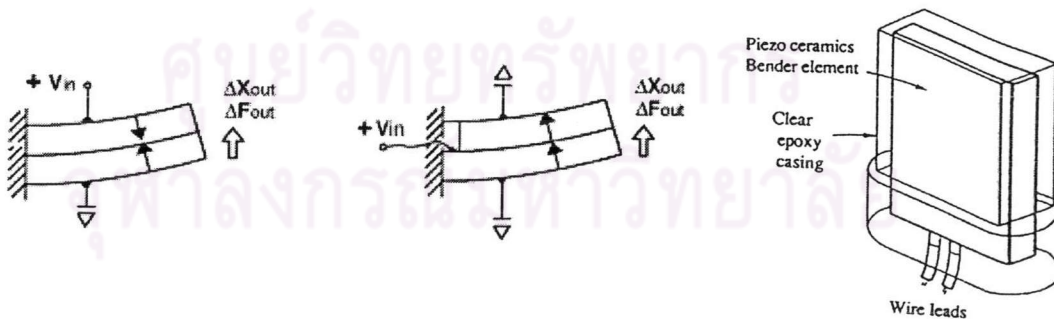
$$G_0 = AF(e)(\sigma'_p)^{0.5} \quad (2.5)$$

สำหรับดิน highly plastic over consolidation ค่า preconsolidation pressure (σ'_p) จะใช้แทน effective confining stress (σ'_0) ในสมการข้างต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสรุปได้ว่า shear modulusของดินประเภท cohesive soil ผลกระทบอันเนื่องมาจาก plasticity จะมีอิทธิพลในช่วง over consolidation แต่จะไม่มีผลในช่วง normal consolidation

2.5 วิธีการวัดค่า modulus ที่ very small strain

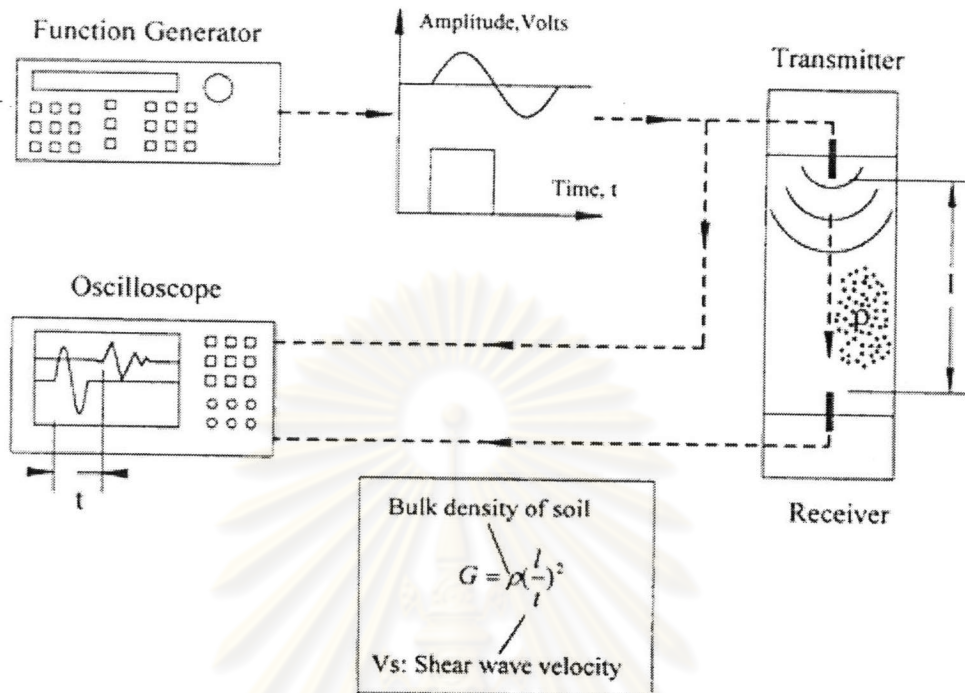
วิธีที่ใช้วัดหาค่า shear modulus ที่ very small strain จะใช้วิธี bender element ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณ electro-mechanical โดยจะแปลงพลังงานกล (การสั่นไหว) เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางกลับกัน จะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล bender element จะเป็นแผ่น piezo-ceramic สองแผ่นประกบติดกัน จะสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ โดยที่การใช้จะแตกต่างกัน ในการต่อวงจรไฟฟ้างดรูปที่ 2.6 จะต่ออนุกรมเมื่อใช้เป็นตัวรับสัญญาณ และรูปที่ 2.7 จะต่อแบบขนานเมื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณเหตุที่ต้องต่อวงจรแตกต่างกันเพื่อที่จะใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละด้านนั่นเอง ในการใช้ bender element เนื่องจากเป็นวัสดุที่ต้านทานกระแสไฟฟ้าเพราะฉะนั้นจะต้องระวังเรื่องการลัดวงจร จึงจำเป็นต้องมีฉนวนกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเนื่องจากความชื้น โดยจะใช้ epoxy เคลือบรอบตัว bender element ดังรูปที่ 2.8 การทดสอบโดยวิธี bender element จะใช้ function generator เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ และ Oscilloscope ในการวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.9 จะแสดงถึงวิธีการต่อวงจรของ bender element



รูปที่ 2.6 แสดงการต่อวงจร ตัวรับสัญญาณ (X-pole)

รูปที่ 2.7 แสดงการต่อวงจร ตัวส่งสัญญาณ (Y-pole)

รูปที่ 2.8 แสดงวิธีการ เคลือบepoxy



รูปที่ 2.9 แสดงวิธีการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender element

- การวัดค่า Modulus โดยใช้ Bender element

การหาค่าโมดูลัส ด้วยวิธี bender element เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่น ซึ่งกระทำได้โดยการเสียบแผ่น bender element ที่เป็นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณลงไปในตัวอย่างดิน ในทางตรงกันข้ามและทิศทางขนานกันดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเราสามารถหาความเร็วของคลื่นความเค้น S-wave ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$v_s = \frac{L}{t} \quad (2.6)$$

- v_s = Shear wave velocity
- L = ระยะทางระหว่างปลายทั้งสองข้างของ bender element
- t = เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง (Time arrival)

Dyvik & Madshus, 1985 พบว่าระยะทาง "L" ควรวัดจากปลายทั้งสองข้างระหว่าง Bender element (Tip to tip) และเนื่องจากเวลาที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ($t \approx 10^{-6}$ - 10^{-12} วินาที) ควรจะใช้ Oscilloscope ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้เกิดการผิดพลาดเนื่องจากการวัดเวลาน้อยที่สุด

ค่า modulus ของดินจะหาได้จากสมการ

$$G = \rho v_s^2 \quad (2.7)$$

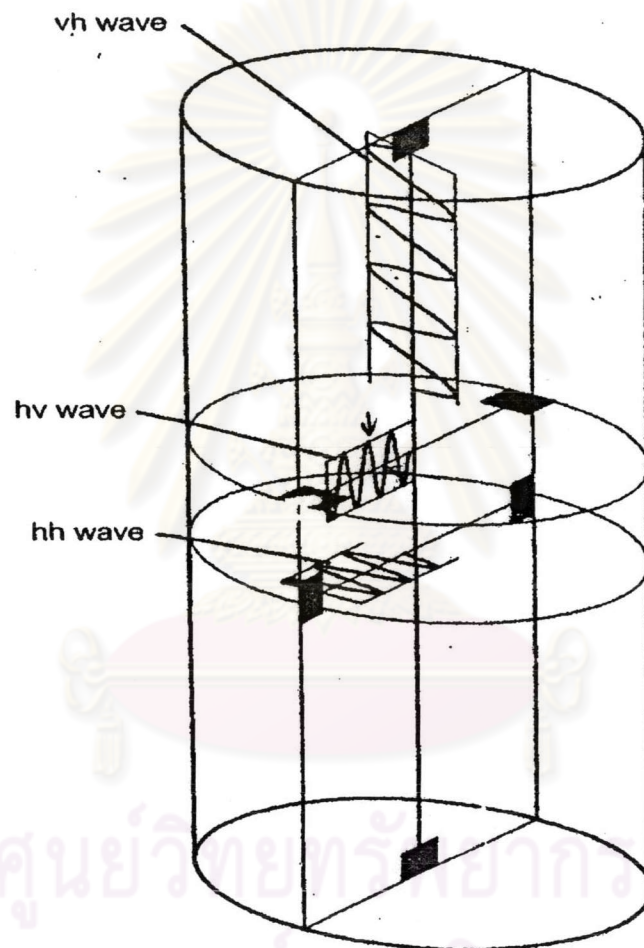
G = ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดิน

ρ = ความหนาแน่นของดิน

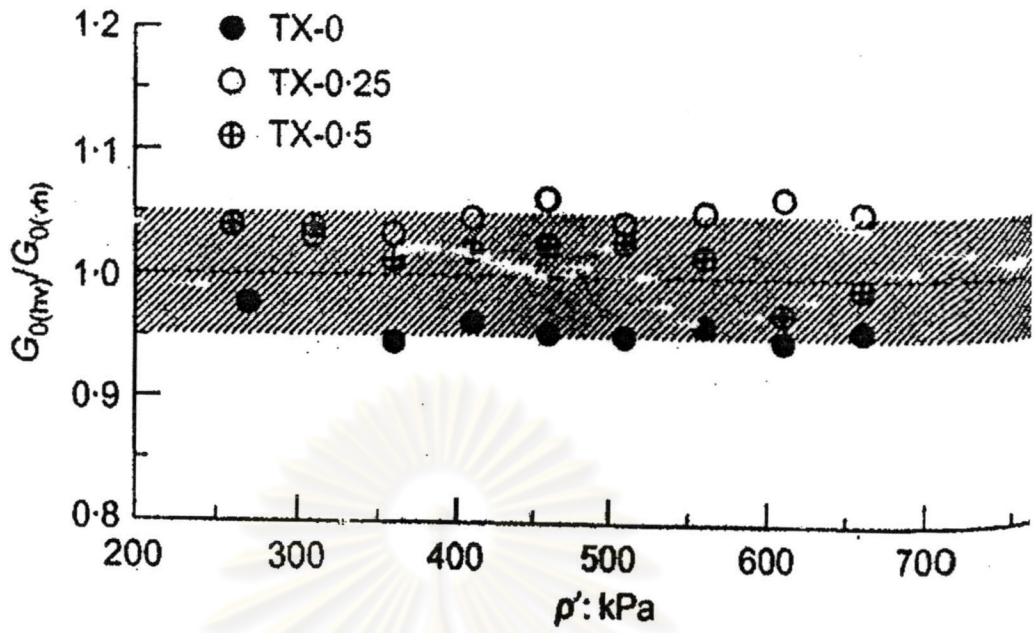
Fioravante.V and Capoferri.R,2001 ได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือ triaxial ติดแผ่นbender element เพื่อวัดค่า shear modulus ในทิศทางต่างๆกัน โดยวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ทิศทางการแพร่ของคลื่นอยู่ในแนวราบด้วยทิศทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคดินอยู่ในแนวราบ(Vhh) และความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ทิศทางการแพร่ของคลื่นอยู่ในแนวตั้งด้วยทิศทางการเคลื่อนตัวของอนุภาคดินอยู่ในแนวราบ(Vvh) ซึ่งความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่วัดได้นั้นปรากฏว่าค่า (Vhh) จะวิ่งได้เร็วกว่า (Vvh) เป็นผลเนื่องจากความเป็น light inherent anisotropy ของดินตามธรรมชาติ

Callisto.L & Rampello.S , 2002 ได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือ true triaxial ติดแผ่นbender element จำนวน 3 คู่เพื่อวัดค่า shear modulus ในทิศทางแนวราบและแนวตั้ง ช่วง isotropic และ anisotropic compression จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า anisotropic compression มีผลต่อกำลังของดินเหนียว และค่า stiffness ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของ stress path สำหรับค่า shear strain ที่น้อยกว่า 0.01% shear modulus ในทิศทางแนวราบ(Ghh)จะมีค่าสูงกว่าแนวตั้ง(Gvh)ประมาณ 22%

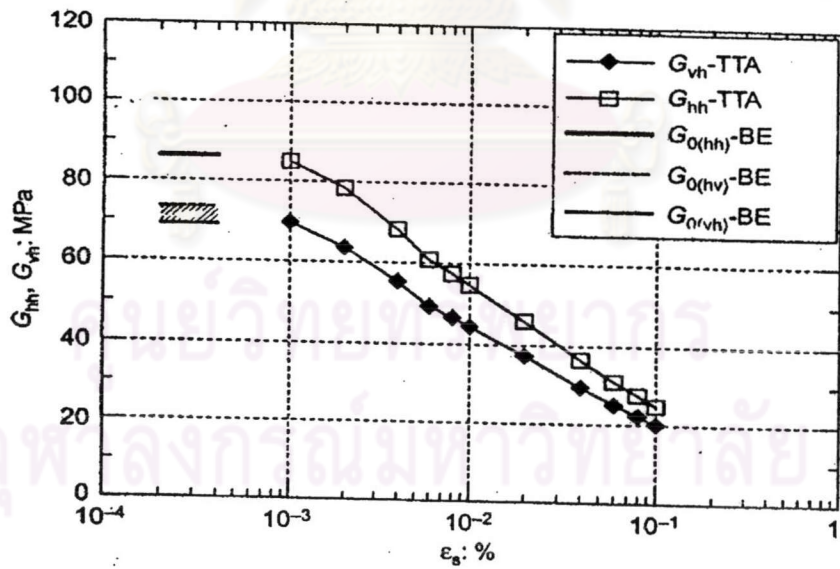
Davis Nash , 2003 ได้ทำการทดลองคล้ายกับ Callisto.L & Rampello.S โดยทดลองเครื่องมือ triaxial ติดแผ่นbender elementเพื่อวัดค่า shear modulus ในทิศทางแนวราบและแนวตั้ง ผลที่ได้คือค่าของ shear modulus ในทิศทางแนวราบ(G_{hh})จะมีค่าสูงกว่าแนวตั้ง(G_{vh}) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Callisto.L & Rampello.S



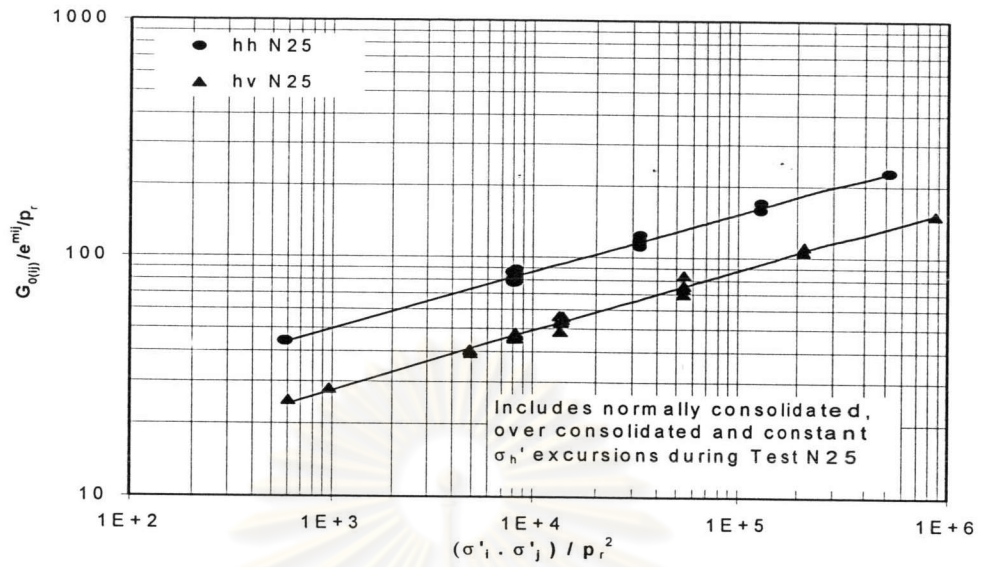
รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการติด Bender element ในการทดสอบ, Callisto.L & Rampello.S , 2002



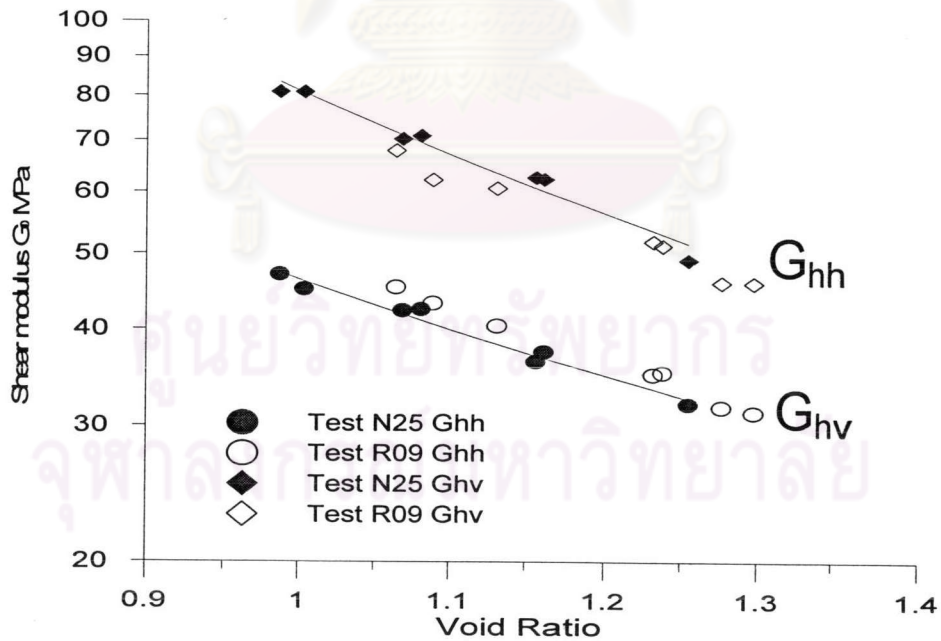
รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test ,
 Callisto.L & Rampello.S , 2002



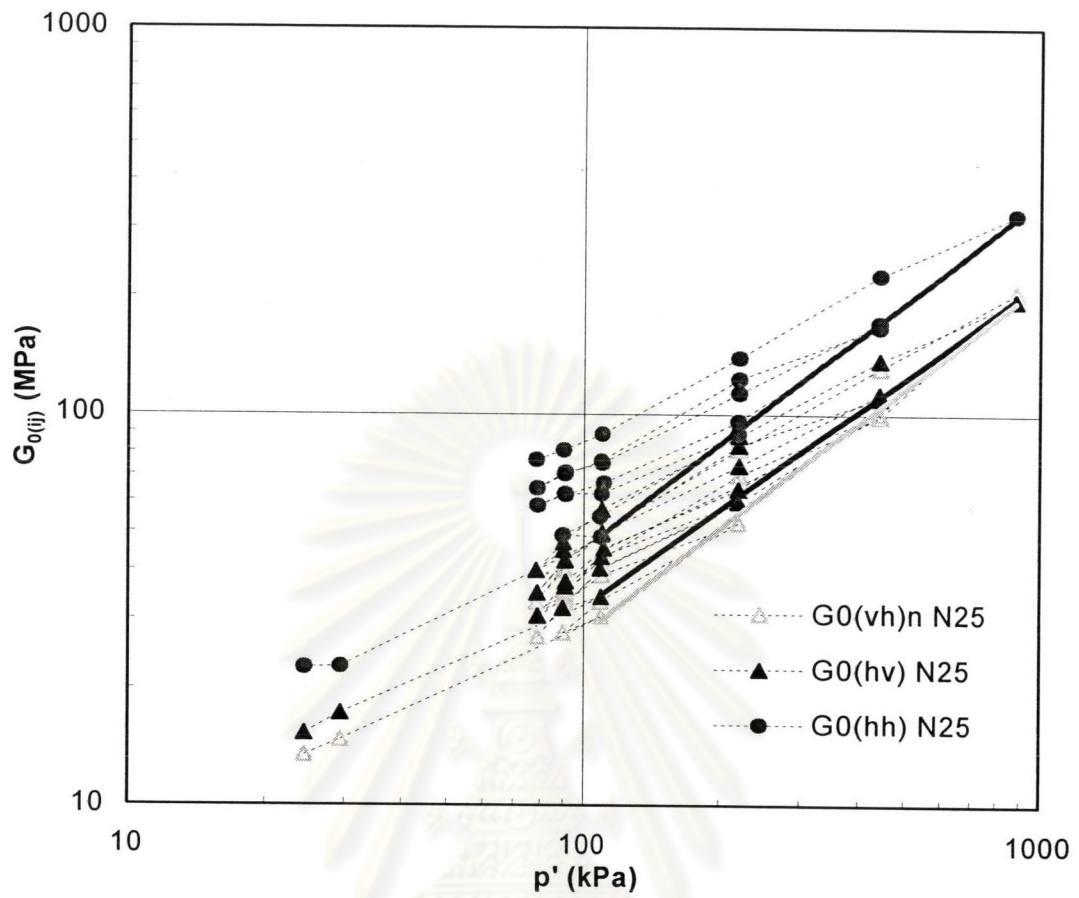
รูปที่ 2.12 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element และ true triaxial test ,
 Callisto.L & Rampello.S , 2002



รูปที่ 2.13 ค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test , Davis Nash , 2003



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบค่า shear modulus ที่ได้จาก bender element test , Davis Nash , 2003



รูปที่ 2.15 ค่า shear modulus กับค่า mean effective stress , Davis Nash , 2003

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย