

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กำเนิดและลักษณะของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เกิดจากการตกตะกอนของดินเหนียวในน้ำทะเล (Marine Deposit) ทำให้โครงสร้างของดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะจัดเรียงตัวกันแบบประเกอะระกะ (Flocculation) ในเวลาต่อมาเมื่อระดับน้ำทะเลลดลง ดินเหนียวอ่อนจะถูกชะล้าง (Leaching) ทำให้ปริมาณเกลือในดินลดลง โดยดินเหนียวส่วนบนจะถูกชะล้างน้อยกว่าดินเหนียวอ่อนชั้นล่างอันเป็นผลเนื่องจากอายุของดิน (Aging) เป็นผลทำให้โครงสร้างของดินไม่มีเสถียรภาพ ดินจึงมีพฤติกรรมที่มีความไวตัว ซึ่งดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีค่าความไวตัว (Sensitivity) ประมาณ 4-6 ซึ่งจัดเป็นดินเหนียวที่มีความไวตัวสูง (Sensitive Clay)

ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีความหนาประมาณ 12-20 ม. โดยชั้นดินเหนียวส่วนบน (ระดับ 3-5 ม.) มักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลางและอยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated Clay) ซึ่งมีสาเหตุมาจากกระบวนการการกัดกร่อน (Weathering) โดยเฉพาะการกัดกร่อนทางเคมี (Chemical Weathering), การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินและกระบวนการ Desiccation ส่วนชั้นดินเหนียวอ่อนที่อยู่ลึกลงไปก็อยู่ในสภาพอัดแน่นเกินตัวเล็กน้อย (Slightly Overconsolidated Clay) ซึ่งเชื่อว่าส่วนใหญ่มาจากกระบวนการ Aging อันเป็นผลมาจากการอัดตัวครั้งที่สอง (สุรณัฏ, 2540)

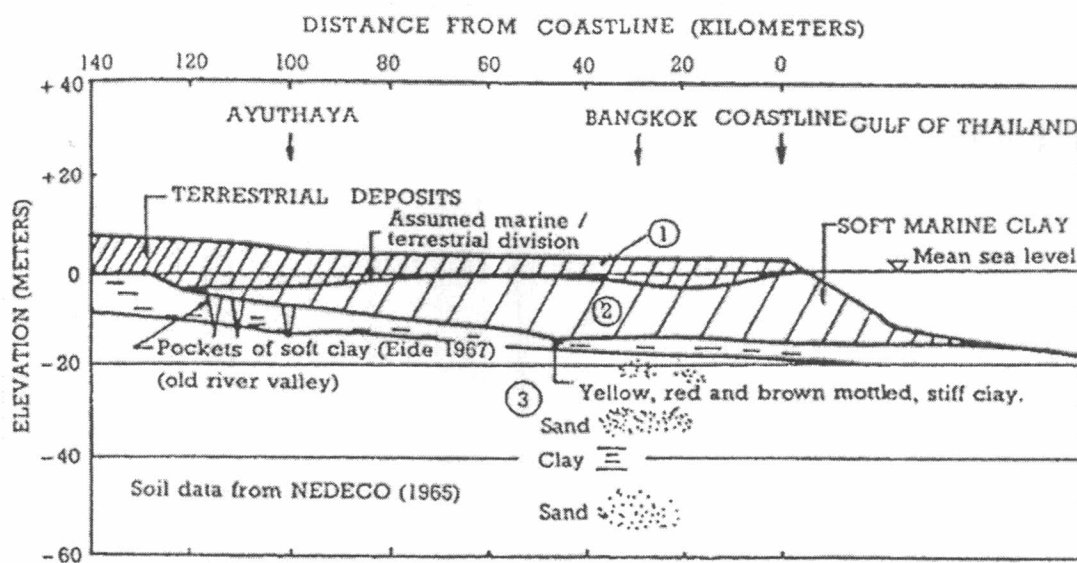
ในบริเวณกรุงเทพฯ สามารถจำแนกชนิดดินเหนียวอ่อนโดยใช้ค่าดัชนีพลาสติกซิตี (Plasticity Index: PI) เป็นเกณฑ์ในการแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- ก. บริเวณตอนเหนือของกรุงเทพฯ ตั้งแต่รังสิตเป็นต้นไป ดินเหนียวจะมีค่า $PI \approx 20-30\%$
- ข. บริเวณใจกลางกรุงเทพฯ ดินเหนียวจะมีค่า $PI \approx 40\%$
- ค. บริเวณชานเมืองกรุงเทพฯ ด้านที่อยู่ใกล้อ่าวไทย ดินเหนียวจะมีค่า $PI \approx 60-80\%$

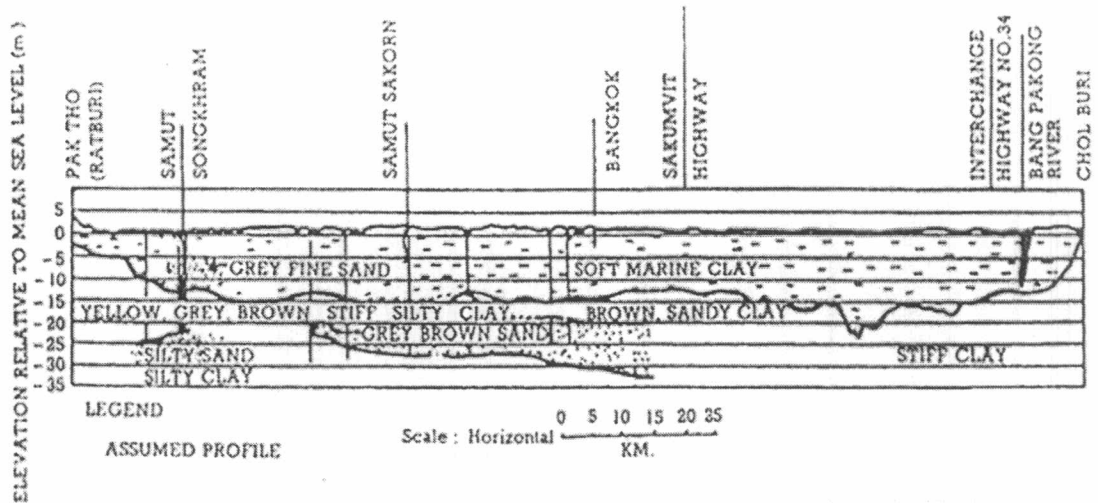
รูปที่ 2.1 แสดงรูปตัดของชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นรูปตัดจากอ่าวไทยไปยังอยุธยา(นั่นคือ จากทิศใต้ไปทิศเหนือ) จะเห็นว่าความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดจาก Marine Deposit เพิ่มขึ้นเมื่อใกล้อ่าวไทย และดินเหนียวบริเวณอ่าวไทยจะมีสมบัติทางด้านวิศวกรรมค่อนข้างเลว ส่วนจากกรุงเทพฯ ไปทางอยุธยาความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนลดลง แต่ความหนาของดินชั้นบนที่เป็น Terrestrial Deposit เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเลยอยุธยาไปชั้นดินเหนียวอ่อนขาดหายไป

โดยมีเพียงชั้นดิน Terrestrial Deposit ซึ่งเป็นดินเหนียวแข็งปานกลางตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งอายุของดินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจากบริเวณอ่าวไทยไปยังอยุธยาเช่นกัน ดังนั้นดินเหนียวที่บริเวณอยุธยาจะมีสภาพอัดแน่นเกินตัว(Overconsolidated) มากกว่าดินบริเวณอ่าวไทย

รูปที่ 2.2 แสดงรูปตัดของชั้นดินบริเวณใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากชลบุรีไปราชบุรี จะเห็นว่าดินเหนียวอ่อนเป็นแอ่งอยู่ และแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมีความไม่แน่นอน ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนใกล้แม่น้ำบางปะกงมีถึง 20 ม. ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใกล้จังหวัดชลบุรีและจากจังหวัดสมุทรสงครามไปยังจังหวัดชลบุรี โดยทั่วไปอายุของดินเหนียวอ่อนจะน้อยที่สุดบริเวณใกล้จังหวัดชลบุรี จากนั้นอายุของดินและสภาพอัดแน่นเกินตัว(Overconsolidated) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในทิศทางไปยังจังหวัดราชบุรี



รูปที่ 2.1 รูปตัดแสดงชั้นดินบริเวณ ใกล้เคียงกรุงเทพฯ จากทิศเหนือไปทิศใต้(ว.ศ.ท.,2520)



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

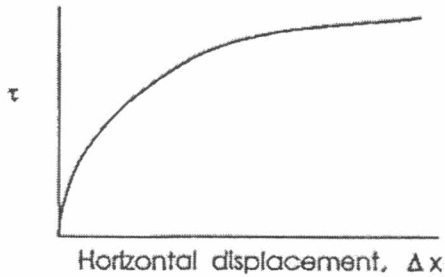
2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil)

ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะเป็นหน่วยแรงที่ใช้ในการต้านทานกับหน่วยแรงภายนอกที่มากกว่าต่อมวลดินเพื่อป้องกันการวิบัติของมวลดิน โดยที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะขึ้นอยู่กับหน่วยแรงกดทับในอดีต (Stress History), สภาพการระบายน้ำในขณะเกิดการเฉือนของมวลดิน, การรบกวนต่อตัวอย่างดินที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Disturbance), อัตราของค่าความเครียดในดิน (Strain Rate), การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรในดิน (Volume Change) ฯลฯ สำหรับการหาค่าแรงเฉือนของดินจะแบ่งตามชนิดของดินได้เป็น 2 ประเภท คือ

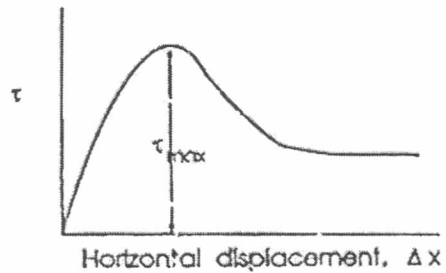
2.2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ

กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบซึ่งปกติเป็นดินจำพวกทรายส่วนใหญ่จะหาได้จากการทดสอบ Direct Shear โดยมีขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น มาตรฐาน ASTM โดยผลการทดสอบที่ได้นั้นเป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายที่อยู่ในสภาพหลวม (Loose Sand) และสภาพแน่น (Dense Sand) ซึ่งจะพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายจะแปรผันโดยตรงกับค่าหน่วยแรงกดทับ (Normal Stress) แต่ในส่วนของค่ามุมต้านทานแรงเสียดทานของดิน (ϕ) สำหรับตัวอย่างทรายที่อยู่ในสภาพอัดแน่นจะให้ค่ามุมต้านทานแรงเสียดทานมากกว่าตัวอย่างทรายที่อยู่ในสภาพหลวม พร้อมทั้งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

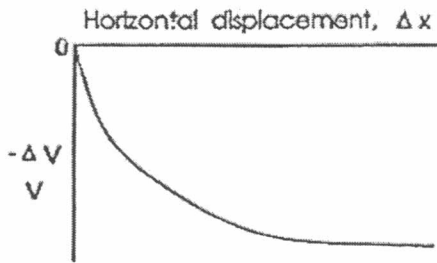
ในทรายหลวมจะเกิดการลดลงของปริมาตรไปเรื่อยๆ ในขณะที่ทรายที่อยู่ในสภาพแน่นจะเกิดการลดลงของปริมาตรในช่วงแรกที่เพิ่มหน่วยแรงกดทับและเมื่อเพิ่มหน่วยแรงกดทับขึ้นอีกจะเป็นผลให้ปริมาตรของทรายเพิ่มขึ้น (Dilatancy) ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.3



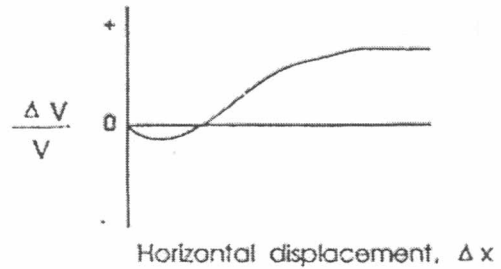
ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของ Loose sand



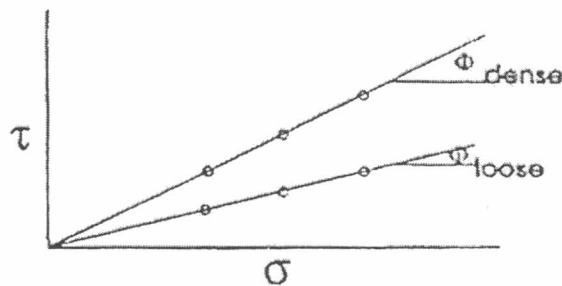
ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของ Dense sand



การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ Loose sand



การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ Dense sand



เส้นการวิบัติของ Mohr-Coulomb สำหรับ Loose sand และ Dense sand

รูปที่ 2.3 ผลการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของทรายจากการทดสอบ Direct Shear

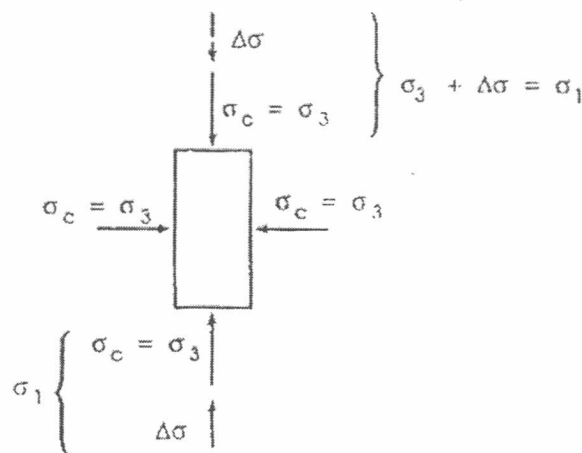
2.2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดละเอียด

การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดละเอียด (ดินเหนียว) สามารถหาได้จากวิธีการต่างๆ หลายวิธี คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ, ค่ากำลัง

รับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบในสนามแบบเวน (Field Vane Shear Test), ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากวิธี Empirical และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากวิธี In-Situ Self Boring Pressuremeter Test โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่ได้มานั้นอาจจะอยู่ในรูปของค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำ (Drained Shear Strength) หรือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากวิธีการต่างๆ นั้นจะมีความเหมาะสมกับชนิดของดินและลักษณะของงานที่แตกต่างกันตามการพิจารณาของผู้ออกแบบ

2.2.2.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ใช้สำหรับหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวได้แก่ การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ซึ่งจะหาค่ากำลังรับแรงเฉือนทั้งในสภาพระบายน้ำและสภาพไม่ระบายน้ำ โดยมีขั้นตอนการทดสอบคร่าวๆ คือ ขั้นแรกเป็นการให้หน่วยแรงโดยรอบเพื่อให้เหมือนสภาพธรรมชาติ (Cell Pressure, σ_c) แก่ตัวอย่างดิน พร้อมทั้งสามารถกำหนดให้ตัวอย่างดินเกิดการระบายน้ำ (Consolidated) หรือไม่ยอมให้เกิดการระบายน้ำ (Unconsolidated) ออกจากตัวอย่างดิน สำหรับขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเพิ่มหน่วยแรงในแนวตั้ง (Axial Stress, $\Delta\sigma$) ให้แก่ตัวอย่างดินซึ่งสามารถกำหนดให้มีการระบายน้ำและไม่ระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินเหมือนในขั้นตอนแรกดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่การทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ



รูปที่ 2.4 หน่วยแรงที่กระทำต่อตัวอย่างดินจากการทดสอบ Triaxial

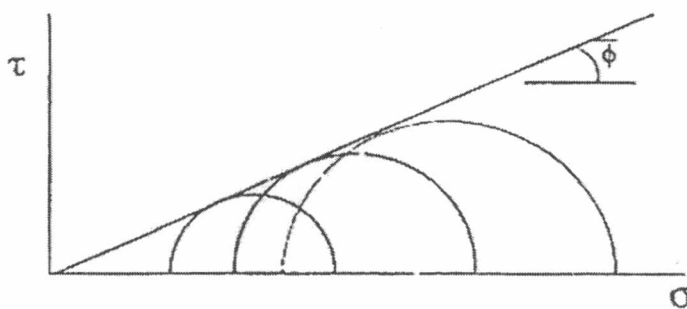
ก) Consolidated Drained Test for Normally Consolidated Clay

การทดสอบแบบนี้จะยอมให้มีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินทั้งในขั้นตอนที่ให้หน่วยแรง Cell Pressure และขั้นตอนที่เพิ่ม Axial Stress เป็นผลให้ค่าหน่วยแรงค้ำน้ำในดินของตัวอย่างมีค่าเป็นศูนย์ตลอดเวลา ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) จากกฎการวิบัติของ Mohr's Coulomb จะสามารถหาค่าหน่วยแรงเฉือนดังแสดงในรูปที่ 2.5

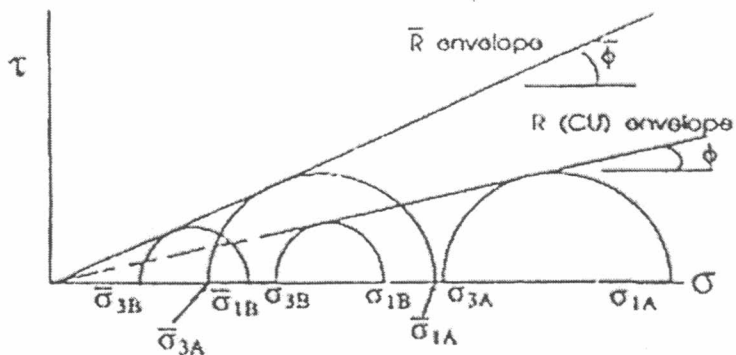
$$\tau_f = \sigma' \tan \phi \quad 2.1$$

ข) Consolidated Undrained Test for Normally Consolidated Clay

การทดสอบแบบนี้จะยอมให้มีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินเฉพาะในขั้นตอนที่ใส่ Cell Pressure แก่ตัวอย่างดิน ส่วนขั้นตอนที่เพิ่ม Axial Stress นั้นจะไม่มีมีการระบายน้ำออกจากตัวอย่าง ซึ่งเป็นผลให้ได้ค่าการวิบัติทั้งในสภาพระบายน้ำ (เมื่อมีการวัดความค้ำน้ำในดินโดยใช้ Transducer และสภาพไม่ระบายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CD ของ NC Clay



รูปที่ 2.6 เส้นแสดงการวิบัติจากการทดสอบแบบ CU ของ NC Clay

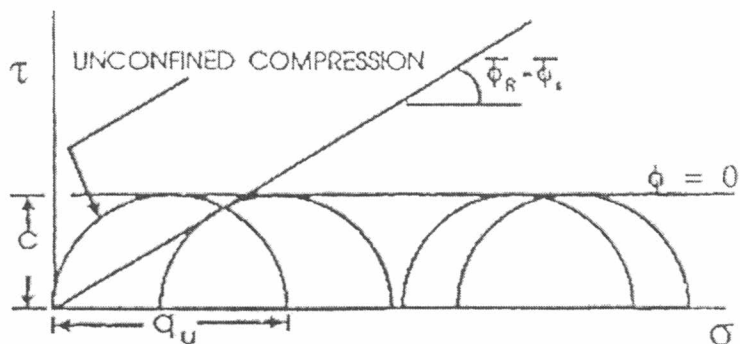
จากการทดสอบแบบ CU จะให้คุณสมบัติของดินเหนียวซึ่งสามารถนำมาใช้ในการออกแบบดังนี้

- ให้ค่า ϕ' และ C' สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) โดยต้องทำการทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่างที่ σ'_c ต่างกัน รวมทั้งยังให้ค่า ϕ และ C สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงรวมแต่ยกแ่การนำไปใช้
- ให้ค่า A พารามิเตอร์ของ Skempton ในการคาดคะเนความดันน้ำในดินที่ความเครียดต่างๆ โดยที่ค่า A หาได้เมื่อทราบค่า Δu
- ให้ S_u สำหรับการคาดคะเนความดันดินในสภาพ Active และโมดูลัสของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) ในการวิเคราะห์การทรุดตัวที่เกิดขึ้นแบบไม่ระบายน้ำ

ค) Unconsolidated Undrained Test for Normally Consolidated Clay

การทดสอบแบบนี้จะไม่มีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินในขณะที่ทำการทดสอบเป็นผลให้สามารถหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) โดยอาศัยแนวคิด $\phi = 0$ ซึ่งในการทดสอบแบบ UU ค่ากำลังรับแรงเฉือนในดินจะขึ้นอยู่กับค่า Consolidation Stress แต่จะไม่ขึ้นกับค่า Cell Pressure, σ_c ทำให้สามารถทดสอบโดยใช้ค่า σ_c ที่เท่ากับศูนย์ได้เหมือนการทดสอบแบบ Unconfined Compression จากหลักการ $\phi = 0$ และรูปของวงกลม Mohr ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ

$$S_u = q_u/2 = (\sigma_{1f} - \sigma_{3f})/2 \tag{2.2}$$

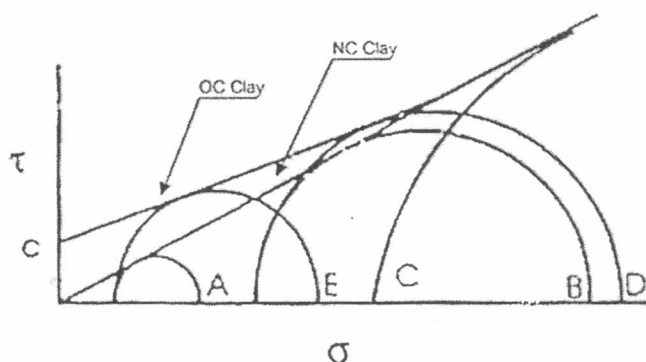


รูปที่ 2.7 เส้นการวิบัติจากการทดสอบแบบ UU และ Unconfined Compression ของ NC Clay

ง) กำลังรับแรงเฉือนของ Overconsolidated Clay

ดินเหนียวที่เป็น OC Clay จะเกิดมาจากที่ในอดีตนั้นดินเหนียวเคยได้รับหน่วยแรงกดทับหรือที่เรียกว่า หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (σ'_p) มากกว่าค่าหน่วยแรงกดทับที่ได้รับอยู่ในสภาพปัจจุบันทำให้ค่า OCR ($OCR = \sigma'_p / \sigma'_{vo}$) มีค่ามากกว่า 1.0 โดยสาเหตุที่ทำให้ดินมีหน่วยแรงประสิทธิผลในอดีตมากกว่าปัจจุบัน ซึ่งอาจเกิดจากผลของการสึกกร่อนของดินตามธรรมชาติ (Erosion), ผลของการมีอายุแก่ขึ้นของดินเหนียวที่มีพลาสติกซิติสูง (Aging), ผลของปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดสารเชื่อมแน่น (Cementation) และการเปลี่ยนแปลงของระดับเส้นน้ำอิสระ

จากการเปรียบเทียบระหว่าง NC Clay กับ OC Clay ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะพบว่าที่ระดับของหน่วยแรงประสิทธิผลเดียวกัน OC Clay จะให้ค่าความแข็งแรงของดินมากกว่า NC Clay โดยเส้นแสดงการวิบัติของดินที่ได้จาก Mohr-Coulomb จะตัดแกนของค่าแรงเฉือนที่ระยะ C ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนของ OC Clay จะมีค่าเท่ากับ $\tau_f = C + \sigma \tan \phi$



รูปที่ 2.8 เส้นแสดงการวิบัติของ Mohr-Coulomb สำหรับ Overconsolidated Clay

2.2.2.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบในสนามแบบเวน (Field Vane Shear Test)

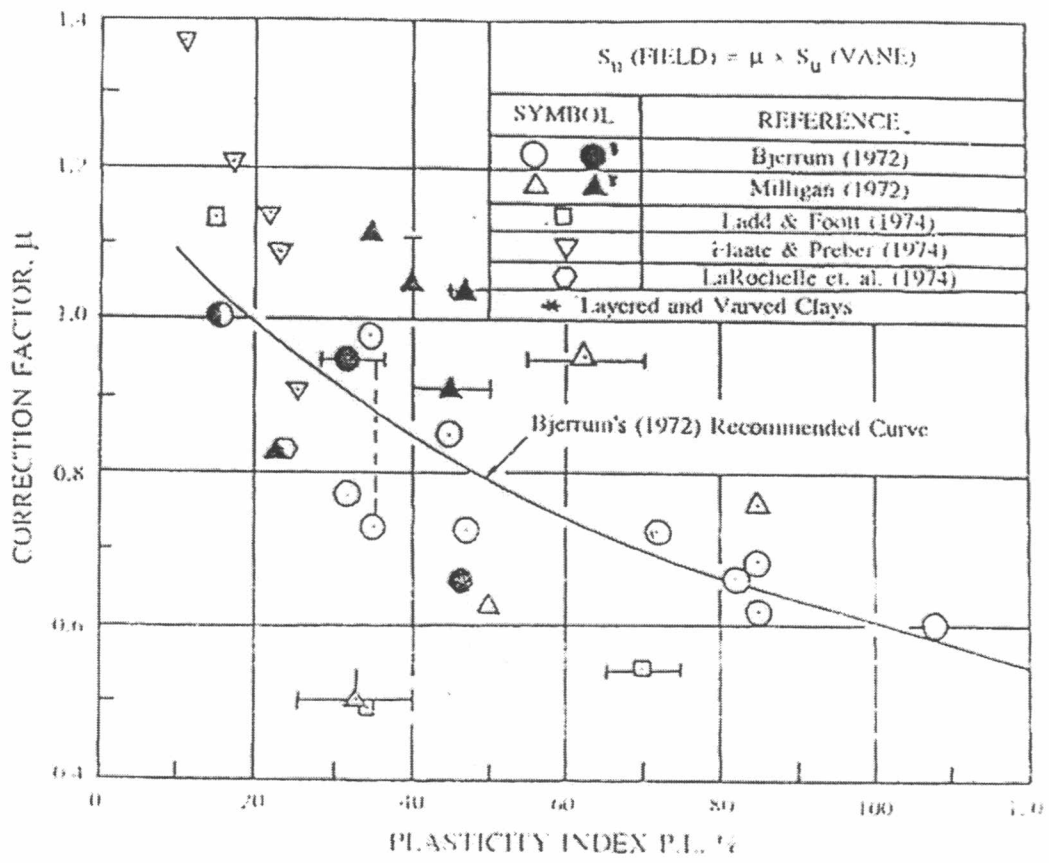
การทดสอบแบบนี้จะอาศัยเครื่องมือที่มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กบางๆ รูปสี่เหลี่ยมคล้ายใบมีด 4 อัน เชื่อมอยู่ด้วยกันมาทำการทดสอบ โดยการหมุนจนกระทั่งดินเหนียวรอบๆ เวนเกิดการวิบัติและนำค่า Torque สูงสุดเพื่อมาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน

จากค่า $S_{u(FV)}$ ที่ได้ นั้น Bjerrum (1972) พบว่า สำหรับดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง $S_{u(FV)}$ จะมีค่าสูงเกินไป สำหรับดินเหนียวที่มีค่า $PI > 20\%$ เมื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบปัญหาทางด้านเสถียรภาพของดินเหนียว โดย S_u ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีการปรับแก้จากค่า μ ดังสมการที่ 2.3

$$S_u = \mu S_{u(FV)} \quad 2.3$$

เมื่อ μ = ตัวปรับแก้ที่ได้จาก Bjerrum (1972) จากรูปที่ 2.9

สำหรับค่า μ ที่ใช้ในการปรับแก้ค่า $S_{u(FV)}$ นั้น Bjerrum (1972) เสนอว่าเป็นผลของการใช้ อัตราความเครียดที่กระทำต่อดินแตกต่างจากค่าที่เกิดขึ้นจริง, สมบัติของดินที่ไม่เท่ากันทุกด้าน เมื่อมีหน่วยแรงกระทำต่างทิศทางกัน (Anisotropy) และการวิบัติของมวลดินบนระนาบการวิบัติที่ไม่พร้อมกัน



รูปที่ 2.9 ตัวปรับแก้ μ ของ Bjerrum (1972) ที่ใช้กับการทดสอบแบบ FV

2.2.2.3 กำลังรับแรงเฉือนของดินจากวิธี Empirical

ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายจากวิธีนี้ ได้แก่ การทดสอบ SPT ซึ่งใช้ได้เฉพาะกับดินเหนียวแข็ง โดยในดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ชั้นแรกนั้น (วิระนันท์, 2526) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง S_u กับ N และพบว่าความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบอย่างมาก โดยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ S_u ($S_u = q_u / 2$) มีค่าดังนี้

$$S_u = 0.685N \text{ (t/m}^2\text{)} \text{ สำหรับดินเหนียวชนิด CH} \tag{2.4}$$

$$S_u = 0.520N \text{ (t/m}^2\text{)} \text{ สำหรับดินเหนียวชนิด CL} \tag{2.5}$$

นอกจากนี้ Stroud (1989) ยังได้เสนอความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในรูปของ N_{60} ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$S_u = 0.50N_{60} \text{ (t/m}^2\text{)} \text{ (Stroud, 1989)} \quad 2.6$$

$$\text{โดย } N_{60} = 10 + 1.55z$$

เมื่อ $z = 0$ ที่ระดับความลึก 15 เมตรจากระดับผิวดิน

นอกจากวิธีการทดสอบ SPT แล้วการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สามารถหาได้โดยอาศัยคุณสมบัติของการ Normalized ของดินเหนียวกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งตามธรรมชาติ (σ_{vo}') ที่เสนอโดย Ladd et al (1977) ดังนี้

$$(C_u/\sigma_{vo}') = (C_u/\sigma_{vo}')_{NC} (\text{OCR})^m \quad 2.7$$

$$(C_u/\sigma_{vo}')_{NC} = 0.11 + 0.0037PI \quad 2.8$$

เมื่อ $m = 1.5$ สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Eide & Holmberg, 1972)

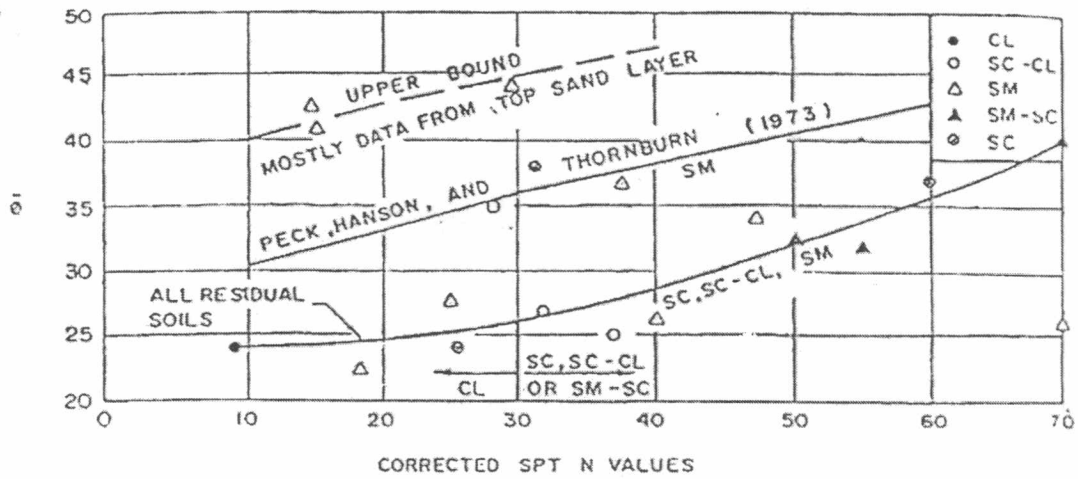
2.3 มุมต้านทานแรงเฉือนของดิน

ในการหาค่ามุมต้านทานแรงเฉือนจิงดิน โดยเฉพาะกับดินเม็ดหยาบนิยมใช้วิธี Empirical จากการทดสอบ SPT ซึ่งในการทดสอบ SPT จะนำค่า N ที่ได้มาปรับเปลี่ยนโดยอาศัยความสัมพันธ์เฉพาะที่มาเป็นค่าของมุมต้านทานแรงเฉือนของดิน ความสัมพันธ์ของ N กับมุมต้านทานแรงเฉือนของดินในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ') ได้ถูกเสนอโดย Peck Hanson and Thornburn (1973) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยในรูปดังกล่าวค่า N ต้องได้รับการปรับแก้ด้วยผลจากหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งตามธรรมชาติ σ_{vo}' ในตำแหน่งที่ทำการทดสอบโดยใช้สมการที่ 2.9

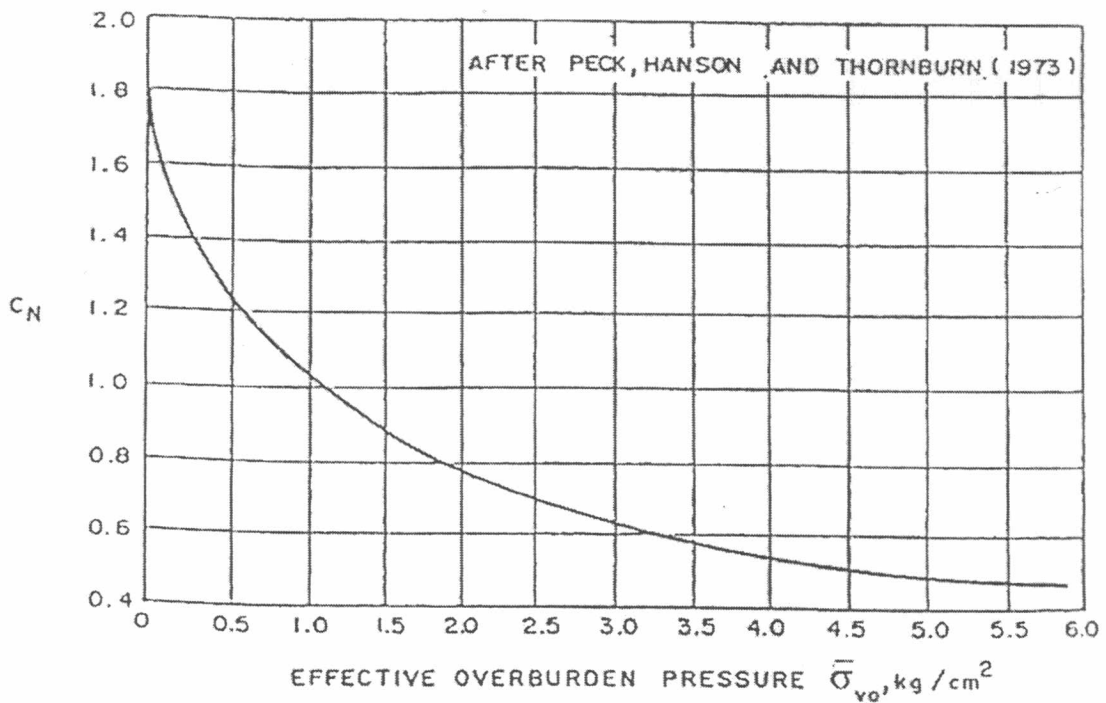
$$N_{cor} = C_N N_{field} \quad 2.9$$

สำหรับค่าปรับแก้ C_N ซึ่งได้จากการเทียบกับผลการทดสอบ SPT ภายใต้น้ำหนักมาตรฐาน $\sigma_{vo} = 1.0 \text{ t/ft}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ส่วนค่า N_{field} คือ ค่า N ที่วัดได้จากในสนามที่น้ำหนักมาตรฐาน ($\sigma_{vo} = 1.0 \text{ t/ft}^2$)

การใช้ความสัมพันธ์ N กับ σ'_{vo} นี้จำเป็นต้องใช้ด้วยความระมัดระวังมากเพราะปริมาณของดินชนิดอื่นที่มีมาผสมในทรายและขนาดของเม็ดทรายจะเป็นตัวประกอบที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ ϕ' มีค่าเปลี่ยนไป



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ ϕ' ของดินเม็ดหยาบ (TPEC, 1985)



รูปที่ 2.11 ตัวปรับแก้ C_N สำหรับการหาค่า N_{cor} และ ϕ'

2.4 ค่าโมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

โดยทั่วไปแล้วค่าโมดูลัสของดินเหนียวจะหาได้จากความสัมพันธ์แบบ Empirical กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (S_u), ค่าดัชนีความเหลว (PI) และ OCR หรือสามารถหาค่าโมดูลัสของดินเหนียวได้จากการทดสอบ Self Boring Pressuremeter

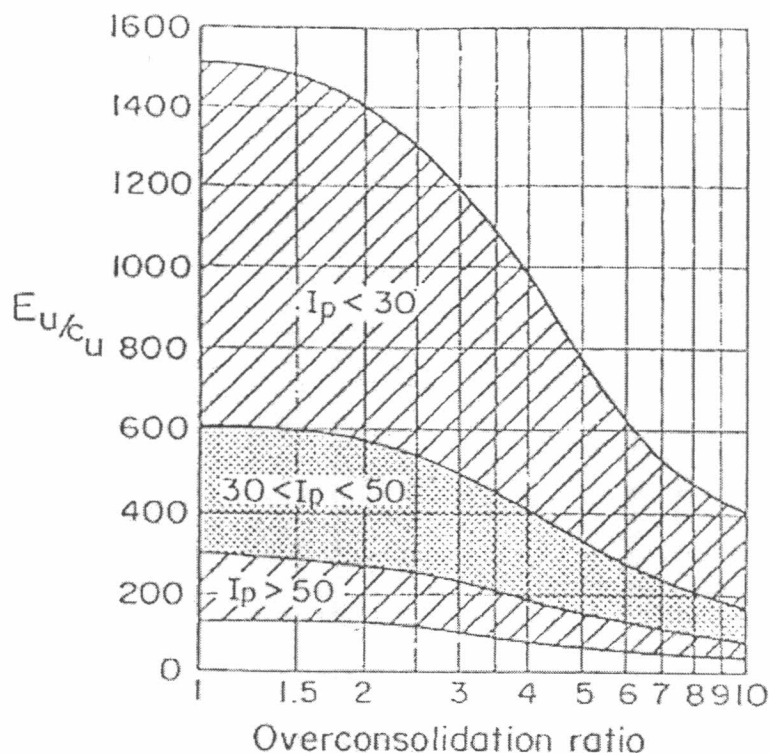
Duncan and Buchigani (1976) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (Undrained Young's Modulus, E_u) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, ค่าดัชนีความเหลว และ OCR ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยปกติแล้วสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่มีค่าดัชนีความเหลวอยู่ระหว่าง 30-50% และ OCR อยู่ระหว่าง 1.0-2.0 จะมีค่าของ E_u / S_u อยู่ระหว่าง 300 ถึง 600 สำหรับในชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ที่มีค่าดัชนีความเหลวต่ำกว่า 30% จะมีค่าของ E_u / S_u อยู่ระหว่าง 600 ถึง 1500 อย่างไรก็ตามช่วงค่าของ E_u / S_u ดังกล่าวจะมีค่าแตกต่างกันมากและเป็นค่าที่เกิดจากการประมาณเท่านั้น

สำหรับค่าโมดูลัสของดินที่หาจากการทดสอบ Self Boring Pressuremeter ซึ่งปกติค่าโมดูลัสของดินเหนียวได้มาจากการแปลงค่าของความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus (G) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยอาศัยสมการที่ 2.10

$$E = 2G(1+V) \quad 2.10$$

สำหรับดินเหนียวสภาพไม่ระบายน้ำ $V = 0.5$ จะได้ $E_u = 3G$ โดยที่ค่าโมดูลัสของดินในสภาพระบายน้ำ (Drained Young's Modulus, E') กับค่าโมดูลัสของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Young's Modulus) มีความสัมพันธ์ดังแสดงสมการที่ 2.11

$$E' = (1+V')E_u / (1+V_u) \quad 2.11$$



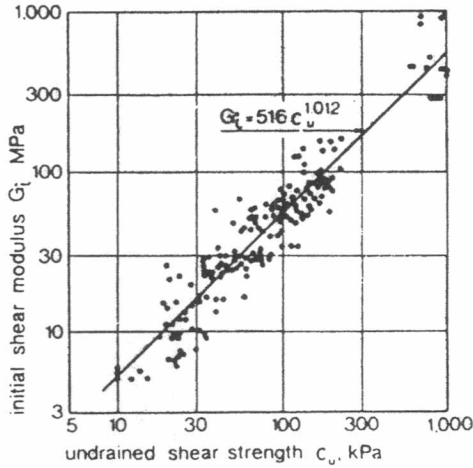
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับค่าดัชนีความเหลวและ OCR (Duncan and Buchigani, 1976)

2.5 พฤติกรรม Stress-Strain ของดิน

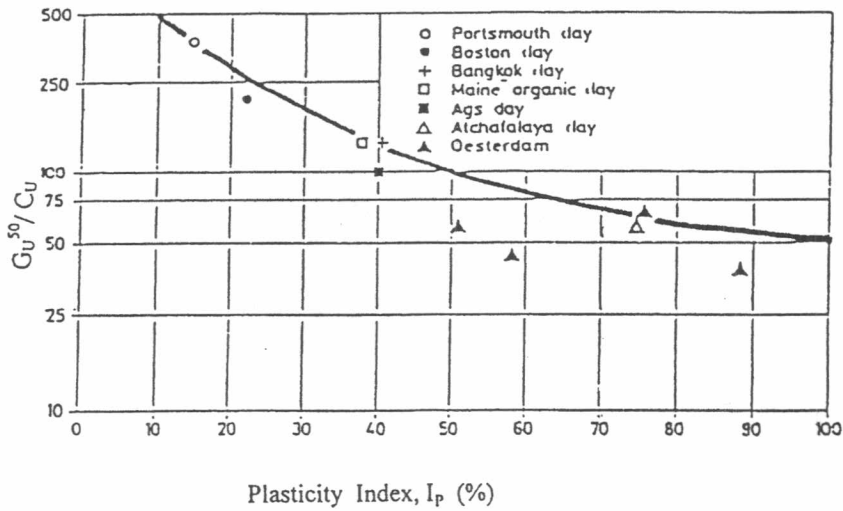
พฤติกรรมของ Stress-Strain ของดินในเทอมของโมดูลัสสามารถแบ่งได้ที่ระดับ Strain ต่างๆ กันคือที่ Very Small Strain, Small Strain และ Large Strain ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อโมดูลัสได้แก่ Rate of Loading, Time Effect, Creep, ระดับของ Stress-Strain, OCR และ Stress History ของตัวอย่างดินเป็นต้น

ค่าโมดูลัสแบบเฉือนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและใช้มากในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพี สามารถหาได้หลายวิธี เช่นวิธี Conventional Routine Test (การทดสอบกำลังของดินทั่วไปเช่น Unconfined Compaction Test, Triaxial test) ซึ่งเป็นค่าโมดูลัสที่ระดับ Strain สูงๆ, วิธี Wave Propagation Techniques สำหรับหาค่าโมดูลัสที่ Small Strain และวิธีหาค่า Stiffness Modulus ในสนาม หรือทำการหาค่า Stiffness Modulus โดยใช้สมการเอ็มไพริคัล เช่น Hara et al, 1973 เสนอผลการทดสอบบนความสัมพันธ์ระหว่าง G_v กับ C_u ที่ได้จากการทดสอบในดินเหนียวที่ประเทศญี่ปุ่นซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.13 หรือจากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า G_{50} กับค่า

Index Properties แสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งพล็อตระหว่างค่า G_{50}/C_u กับค่า IP (%) ซึ่งประมาณโดย Termatt, Vermeer และ Verger, 1985 สำหรับดินเหนียวเป็นต้น



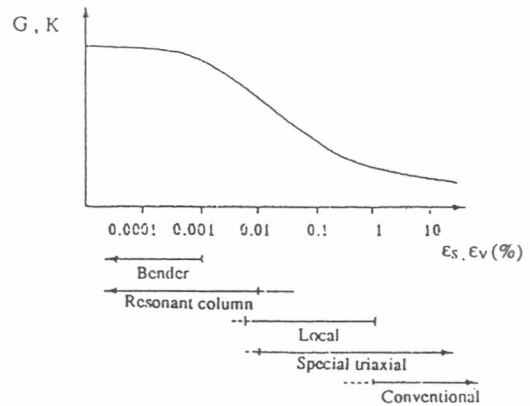
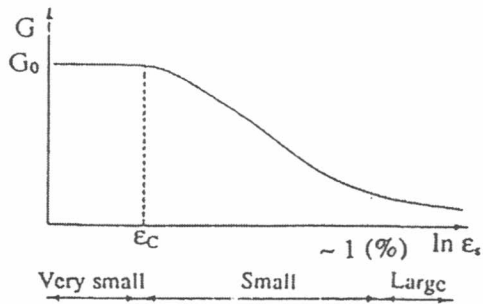
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_u กับ G_i โดย Hara et al, 1973



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_p กับ G_{50}/C_u โดย Termatt, Vermeer และ Verger, 1985

2.6 ลักษณะพฤติกรรมของโมดูลัสแบบเฉือน ที่ระดับ Strain ต่าง ๆ

โดยพื้นฐานแล้ว ค่า Stiffness สามารถหาได้จาก ความชันของ Stress-Strain Curve (Secant หรือ Tangential Gradient) อย่างไรก็ตามความถูกต้องในการหาค่าโมดูลัสแบบเฉือนที่ระดับ Strain Levels ต่าง ๆ ในทางปฏิบัติจะกระทำได้โดยประมาณช่วงของการวัดดังรูปที่ 2.15 และ 2.16 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายพฤติกรรมของ Stress-Strain ในดินได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 แสดงค่าของ G ในช่วง Strain ต่าง ๆ

รูปที่ 2.16 แสดงช่วงของ Strain ที่เหมาะสม ในการทดสอบวิธีต่าง ๆ

1. Stress-Strain Curve จะมีลักษณะ Non-Linear เพิ่มขึ้นเมื่อ Strain เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่า Shear Modulus มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อ Strain เปลี่ยน
2. ในช่วง Small Strain พฤติกรรมของ Stress-Strain เกือบเป็นเส้นตรงและ Shear Modulus มีค่าคงที่
3. ที่ Small Strain ค่า Shear Modulus จะมีค่ามากแต่ค่าจะลดลงมาเหลือเพียงหนึ่งในสิบเมื่อ Strain เพิ่มขึ้นจนถึง 1% โดยประมาณ
4. ค่า Bulk Modulus ที่เปลี่ยนไปเนื่องจาก Volumetric Strain (การเปลี่ยนแปลงปริมาตร) จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่า Shear Modulus ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่า Shear Strain

เป็นการง่ายที่จะแยกความแตกต่างของช่วง Strain โดยใช้คุณสมบัติของ Stress-Strain Curve ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงค่า Stiffness ในอุดมคติ ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจาก Strain Levels ของดิน โดย Atkinson & Salfors, 1989 ซึ่งแบ่งเป็นช่วงได้ดังนี้

1. **Very Small Strain:** Strain < 0.001% ค่า Shear Modulus จะเกือบคงที่เมื่อค่า Strain เปลี่ยนแปลง นั่นคือในช่วงนี้ โมดูลัสแบบเฉือน จะไม่ขึ้นกับ Strain
2. **Small Strain:** 0.001% < Strain < 1% ลักษณะของ Stress-Strain Curve จะเป็นลักษณะ Highly Non-Linear และค่า โมดูลัสแบบเฉือนจะ ขึ้นกับ Strain

3. **Large Strain:** Strain > 1% สภาพของดินจะใกล้ Failure ค่า โมดูลัสแบบเฉือนจะมีค่าน้อย

2.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ โมดูลัสแบบเฉือน

พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือน กับ Young's Modulus นี้มักจะมีแนวโน้มที่เหมือนกันเกือบทั้งหมด แต่ก็จะมีแตกต่างกันบ้างในบางตัว Hardin & Black, 1968 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงพารามิเตอร์สำคัญๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสแบบเฉือนในรูปแบบของฟังก์ชันดังนี้

$$G = f(\sigma_0', e, C, A, H, t, S, \tau_0, f, \theta, T) \quad 2.12$$

เมื่อ

σ_0'	=	หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Octahedral Normal Stress)
e	=	Void Ratio
C	=	ลักษณะจำเพาะของเม็ดดิน, รูปร่าง, ขนาด, สัดส่วน กละ, Mineralogy
A	=	ขนาดของ Strain
H	=	ประวัติของหน่วยแรง (Stress History) และ ประวัติของ การรับแรงสั่นสะเทือน (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

2.8 วิธีการวัดค่า Modulus ในวิธีต่าง ๆ

วิธีการวัดค่า Modulus ในแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับค่าของ Strain ในระดับต่างๆ ที่ต้องการหาค่าของ Modulus ถ้าในช่วง Strain ที่มากโดยปกติเวลาในการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถหาได้จากความชันของ Stress-Strain Curve ได้เลยแต่ถ้าในช่วงที่ Strain น้อย ๆ จะใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่นอย่างเช่นวิธี Hardin Resonant Column Test, Drenvich Resonant Column Test และ Ultrasonic Shear Wave Velocity Measurements ในการทดสอบหา Shear Modulus ที่ Small Strain เป็นต้น ถ้าในช่วง Strain ที่น้อยมาก ๆ วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือวิธี Bender Element Test ส่วนในการทดสอบหาค่าในสนาม การประมาณค่า Modulus จะใช้วิธี Rayley-wave-velocity Survey, Seismic Refraction Survey, Cross Hole Test หรือใช้ Seismic Cones เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของดินและวิธีการหาค่าคุณสมบัติที่ Strain ต่าง ๆ

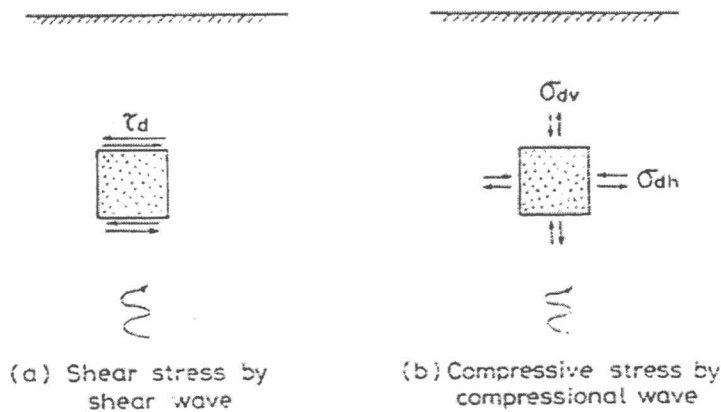
Magnitude of strain	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Phenomena	Wave Propagation, Vibration		Cracks, differential settlement	Slide, compaction, liquefaction		
Mechanical characteristics	Elastic		Elasto-plastic	Failure		
Effect of load repetition			←————→			
Effect of rate of loading			←————→			
Constants	Shear modulus, Poisson's ratio, damping				Angle of internal friction, cohesion	
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	←————→				

2.8.1 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Large Strain Levels

โดยปกติในการหาค่า Modulus ในห้องปฏิบัติการสามารถหาได้จากความชัน Stress-Strain Curve ดังเช่นค่า Yong's Modulus สามารถหาได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress (σ) กับค่า Strain (ϵ) ซึ่งสามารถกระทำได้ในการทดสอบหาค่ากำลังของดินอย่างเช่น วิธี Unconfined Compression Test และ Triaxial Test เป็นต้น ยกเว้นการวัดที่ Small Strain Baldi, Hight and Thomas, 1988 ได้กล่าวถึงการวัดค่า Stiffness ในการทดสอบทั่วไปว่า ที่ Strain น้อยกว่า 0.1% ในตัวอย่าง Unconsolidated และน้อยกว่า 0.1% ในตัวอย่าง Isotropically Consolidated โดยทั่วไปค่าที่ออกมาจะเชื่อถือไม่ได้เพราะฉะนั้นค่า Shear Modulus จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั่วไปจะใช้ได้ที่ค่า Strain สูงๆ เท่านั้น

2.8.2 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Small Strain Levels

การหาค่าโมดูลัสที่ Small Strain Levels นิยมมาจากการแพร่กระจายของคลื่นหลักๆ 2 ชนิดด้วยกัน คือคลื่น Body Wave (P-Wave) และ Shear Wave (S-Wave) ทั้ง 2 คลื่นจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ตั้งฉากกันโดยที่คลื่น P-Wave จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดขณะที่คลื่น S-Wave จะทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนดังรูปที่ 2.17 ความแตกต่างของคลื่นทั้ง 2 นี้คือคลื่น P-Wave นั้นน้ำจะมีผลกระทบต่อความเร็วของคลื่น ขณะที่จะไม่เกิดขึ้นกับคลื่น S-Wave เป็นผลอันเนื่องมาจากน้ำไม่สามารถรับแรงเฉือนได้จึงทำให้ไม่เกิด Shear Strain ขึ้นกับน้ำ เพราะฉะนั้นเราจึงให้ความสำคัญกับคลื่น S-wave มากกว่าคลื่น P-wave

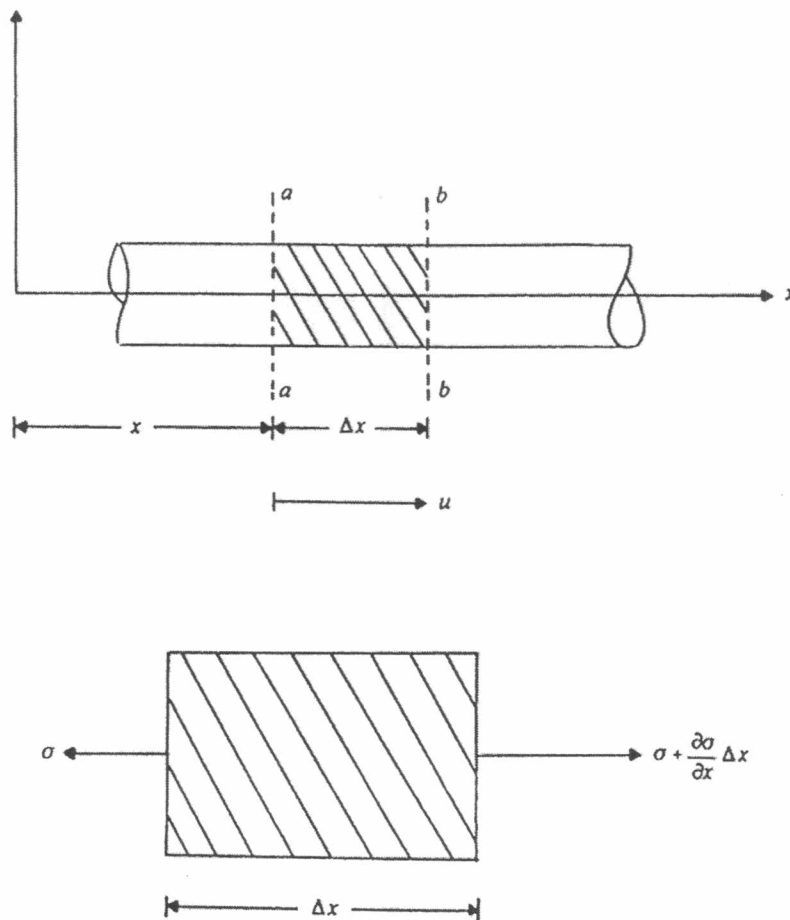


รูปที่ 2.17 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นความเค้นมากระทำ

ค่าโมดูลัสจะหาได้จากความเร็วของคลื่นที่เดินทางมาถึงครั้งแรก โดยที่ความสัมพันธ์ของโมดูลัสกับความเร็วนั้นมาจากพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตันที่ว่า ด้วยเรื่องของแรงนั้นคือ

$$\sum \text{force} = (\text{mass})(\text{acceleration}) \quad 2.13$$

เมื่อพิจารณาลักษณะของวัตถุในกรณีที่มีแรงกระทำในแนวแกนจากรูปที่ 2.18 เมื่อพิจารณาแท่งวัตถุในพื้นที่ย่อยนั้นคือที่ Section a-a ถึง Section b-b พบว่าจะมีแรงกระทำต่อวัตถุคือ



รูปที่ 2.18 Longitudinal Elastic Wave in a Bar

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x\right) A = \frac{(A \Delta x \gamma)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad 2.14$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} (A \Delta x \gamma) &= \text{น้ำหนักของแท่งวัตถุที่ตัด Section} \\ g &= \text{ความเร่งของ gravity} \end{aligned}$$

สมการที่ 2.14 เมื่อลดรูปจะได้

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x\right) A = \frac{(A \Delta x \gamma)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$-\sigma A + \sigma A + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x A = \frac{(A \Delta x \gamma)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad 2.15$$

จาก

$$\sigma = (\varepsilon)(E) = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)(E) \quad 2.16$$

จะได้

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(E) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{E}{\rho}\right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)$$

จาก

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad 2.17$$

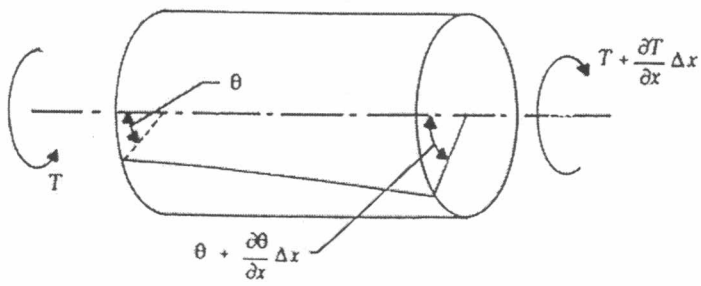
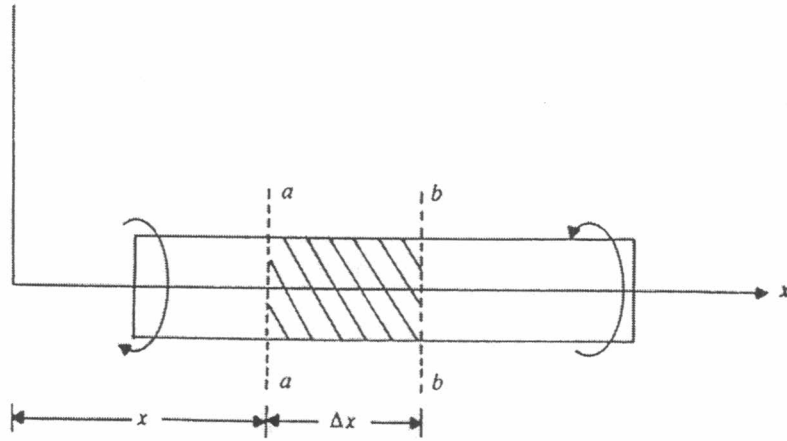
เพราะฉะนั้นจะได้

$$E = \rho v_c^2 \quad 2.18$$

E	=	ค่า Young's Modulus
ρ	=	ความหนาแน่นรวมของดิน
v_c	=	ความเร็วของคลื่นความเค้น P-Wave

ทำนองเดียวกันถ้าให้แรงกระทำในรูปแบบแรงบิดดังรูปที่ 2.19 เมื่อพิจารณาแท่งวัตถุใน
พื้นที่ย่อนั้น

ที่ Section a-a ถึง Section b-b พบว่าจะมีแรงกระทำต่อวัตถุคือ



รูปที่ 2.19 Torsional Waves in a Bar

$$-T + (T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x) = \rho J \Delta x \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \tag{2.19}$$

เมื่อ

J = Polar moment of inertia ของ cross section

สมการที่ 2.19 เมื่อลดรูปจะได้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \tag{2.20}$$

และจาก

$$T = JG \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

แทนลงในสมการที่ 2.20 จะได้

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

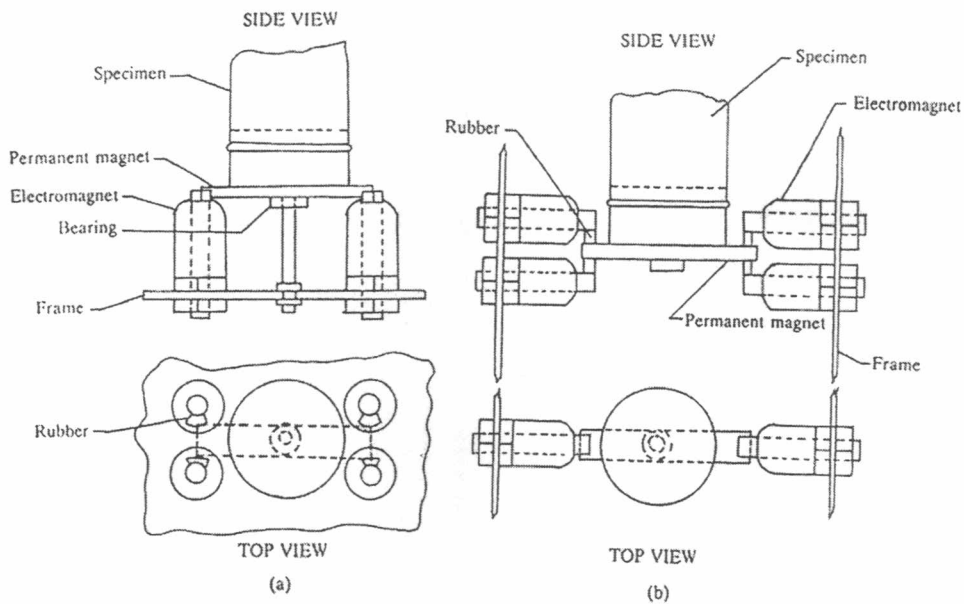
$$G = \rho v_s^2 \quad 2.21$$

G	=	ค่า Shear Modulus
ρ	=	ความหนาแน่นรวมของดิน
v_s	=	ความเร็วของคลื่นความเค้น S-Wave

วิธีการแพร่กระจายของคลื่นสำหรับการประมาณค่าโมดูลัส Strain ที่เกิดขึ้นจากคลื่นปกติ มักจะมีขนาดเล็กและสามารถที่จะทำให้ Strain มีขนาดเล็กมากๆ ได้ อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสที่หาจากวิธีการแพร่กระจายของคลื่นจะขึ้นกับ ความต้านทาน, ความถี่, ขนาดของคลื่น, ค่าปรับแก้ เป็นต้น วิธีที่ใช้กันมากในการหาค่าโมดูลัส โดยการแพร่กระจายของคลื่น คือ Hardin Resonant Column Test, Drnevich Resonant Column Test และ Ultra Sonic Shear Wave Velocity Measurement Test เป็นต้น

• วิธี Hardin Resonant Column Test

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากอีกวิธีหนึ่งสำหรับการหาคุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการซึ่งทฤษฎีและวิธีการในการทดสอบเสนอโดย Hardin & Richart, 1963 การทดสอบอาศัยพื้นฐานของทฤษฎีและวิธีการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Modulus กับ ความถี่กำทอน ในการทดสอบแรงตามแนวแกนสามารถใส่แรงพร้อมกับวัดความถี่กำทอนที่เกิดขึ้นได้ Shear Modulus ที่สามารถวัดได้จากเครื่องมือนี้โดยทั่วไปจะให้ค่าของ Strain ที่น้อยมากประมาณ 10^{-5} อย่างไรก็ตามสามารถดัดแปลงเครื่องให้สามารถสร้างค่า Strain ที่สูงกว่านี้ได้ (เพิ่มได้ถึง 10^{-3})

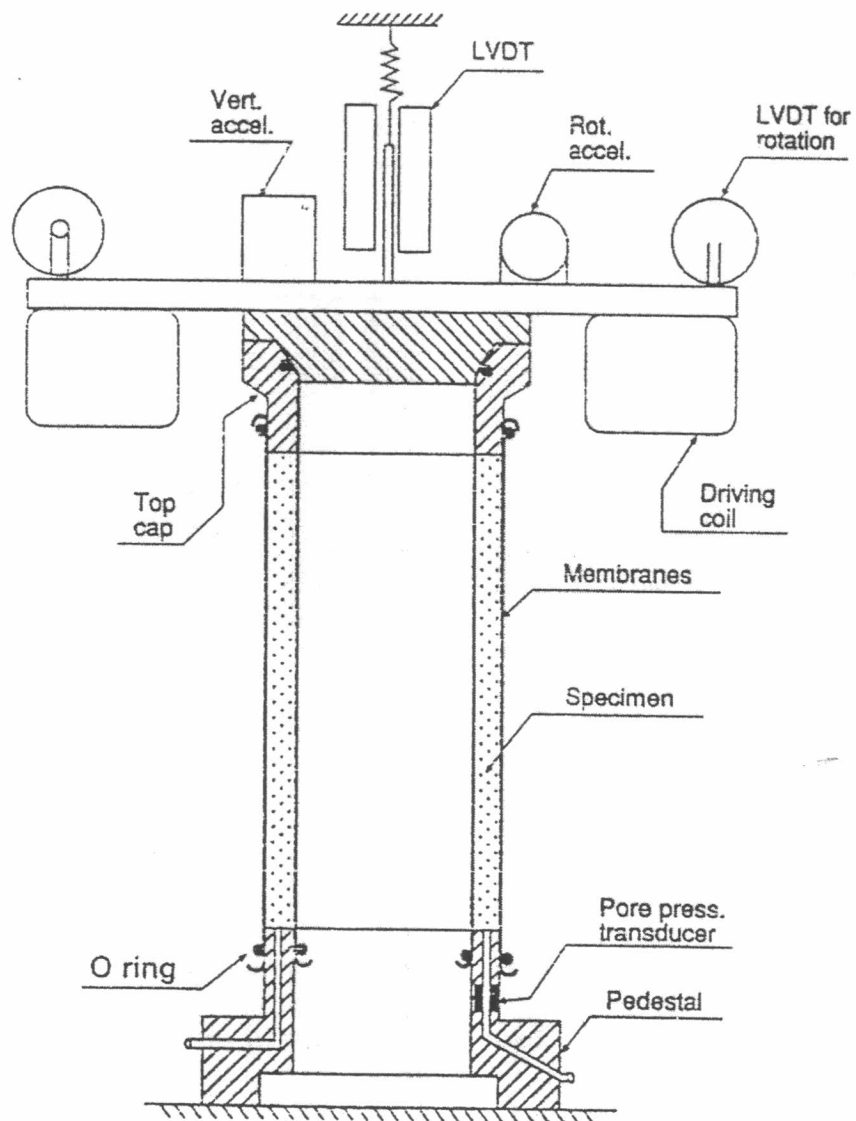


รูปที่ 2.20 Resonant Column Test Apparatus Hardin & Richart, 1963

(a.) For Torsional Vibration (b.) For Longitudinal Vibration

• วิธี Drnevich Resonant Column Test

สร้างโดย Drnevich, Hall & Richart, 1967 โดยจะใช้ตัวอย่างที่มีลักษณะกวางแทนตัวอย่างทรงกระบอก การทดสอบจะสร้างแรงบิดที่สูงบนด้านบนของตัวอย่าง ขนาดของ Strain ที่เกิดขึ้นสามารถสร้างได้มากกว่า 10^{-3}



รูปที่ 2.21 Resonant Column Test Apparatus (Drnevich, 1967)

● Ultra Sonic Shear Wave Velocity Measurement

เป็นวิธีที่ใช้วัดความเร็วที่เกิดจากแรงเฉือนสั้นสะท้อนความถี่สูง ถูกคิดค้นโดย Lawrence, 1965 โดยจะต้องรู้ความหนาแน่นและความเร็วของ Shear Wave ของดิน Shear Modulus สามารถคำนวณได้จากกฎการเคลื่อนที่ของวัสดุ Elastic วิธี Ultra Sonic ไม่สามารถดัดแปลงให้เพิ่ม Stress ลงไปในตัวอย่างได้ขณะทดสอบและการแปลสัญญาณที่รับได้ยังทำได้ยาก

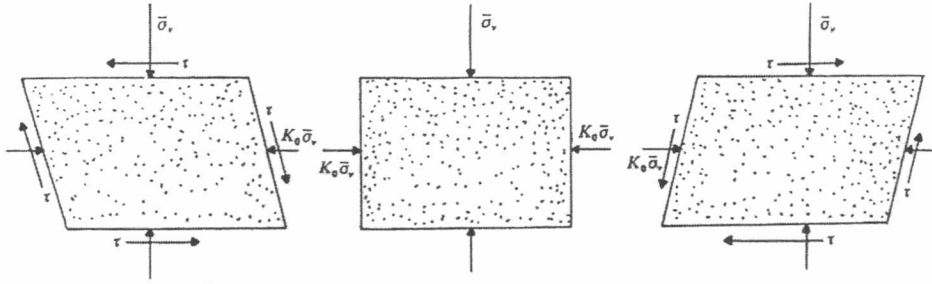
● Cyclic Test

เป็นวิธีการทดสอบหาโมดูลัสแบบเฉือนที่ Small Strain Level ถึง Large Strain Level ส่วนใหญ่แล้วเครื่องทดสอบ Cyclic Test มักจะใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นดินไหวหรือ การหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางกลศาสตร์อาทิเช่น พฤติกรรมของ Liquefaction, Damping Ratio และ โมดูลัสแบบเฉือนเป็นต้น

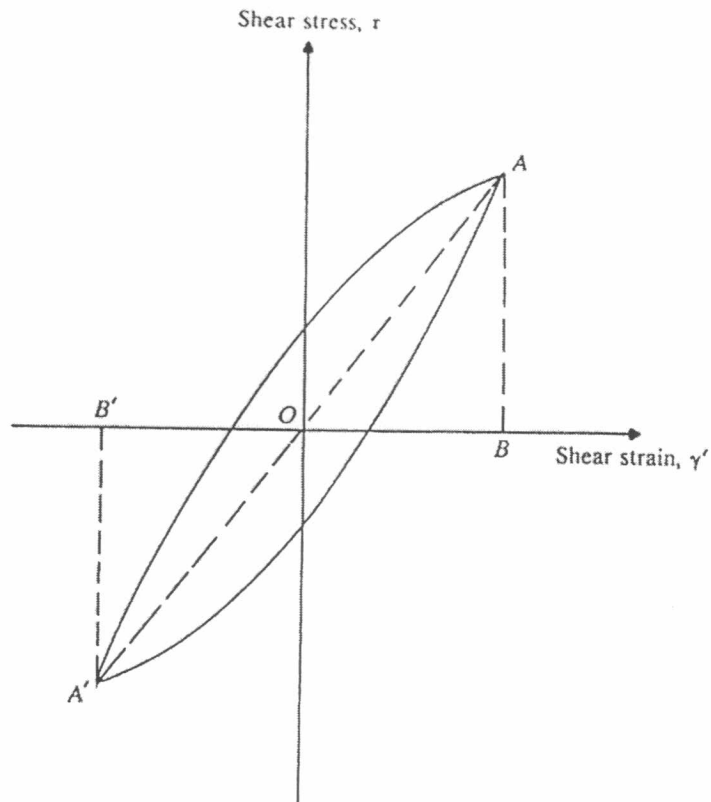
การทดสอบด้วย Cyclic Test มีลักษณะเครื่องมือทดสอบหลายประเภทแต่ที่นิยมนำมาใช้มีอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. **Cyclic Simple Shear Test** เป็นเครื่องมือที่ทดสอบหาค่า โมดูลัสแบบเฉือน (G) และ Damping Ratio (D) ของดิน ลักษณะกลไกในการทดสอบคือจะให้แรงทางแนวแกนคงที่ (Vertical Effective Stress, σ_v') และ ให้แรงแปรเปลี่ยนในทางแนวเฉือน (Cyclic Shear Stress, τ) ค่าโมดูลัสแบบเฉือนสามารถหาได้โดย

$$G = \frac{\text{amplitude of cyclic shear stress, } \tau}{\text{amplitude of cyclic shear strain, } \gamma} \quad 2.22$$



รูปที่ 2.22 Cyclic Simple Shear Test



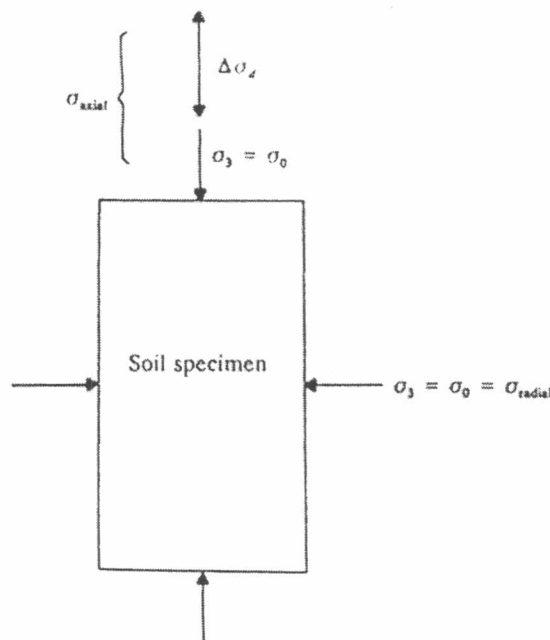
รูปที่ 2.23 การคำนวณหาโมดูลัสแบบเฉือนและ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop

2. **Cyclic Triaxial Test** เป็นเครื่องมือที่ทดสอบหาค่า Young's Modulus (E) และ Damping Ratio (D) ของดินโดยทั่วไปในการทดสอบจะให้ Confining Pressure $\sigma_0 = \sigma_3$ และให้แรงแปรเปลี่ยนในแนวแกน (Axial Cyclic Stress, $\Delta\sigma_d$) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 การคำนวณหาค่า Young's Modulus คำนวณจาก Hysteresis Loop ในรูปที่ 2.25 จะได้

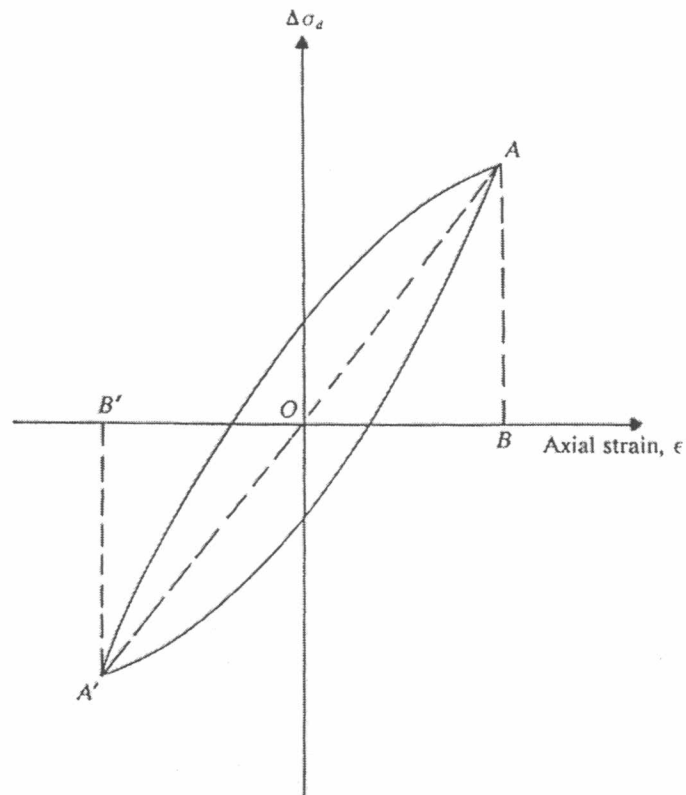
$$E = \frac{\Delta\sigma_d}{\varepsilon} \quad 2.23$$

ค่าโมดูลัสแบบเฉือนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Young's Modulus (E) กับ Poisson's Ratio จะได้

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad 2.24$$



รูปที่ 2.24 Cyclic Triaxial Test

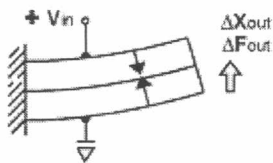


รูปที่ 2.25 การคำนวณหา Young's Modulus และ Damping Ratio จาก Hysteresis Loop

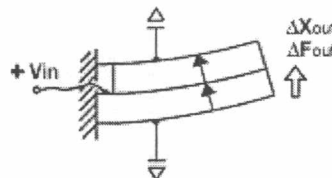
จากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น วิธี Resonant Column Test เป็นวิธีที่นิยมและน่าเชื่อถือที่สุด เพราะสามารถหาค่า Shear Modulus สำหรับปัญหาทั้งทาง Dynamic และ Static ที่ Small Elastic Strain แต่มีปัญหาในการเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างที่ถูกรบกวนจะทำให้ค่าที่ได้ผิดไปจากความจริง ซึ่งต่างจากวิธีที่ทดสอบหาค่าในสนามจะมีปัญหาเนื่องจากตัวอย่างถูกรบกวนน้อยกว่า ทำให้ความเร็วของ Shear Wave ที่วัดได้จากวิธี Resonant Column Test ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

2.8.3 วิธีการวัดค่า Modulus ที่ Very Small Strain

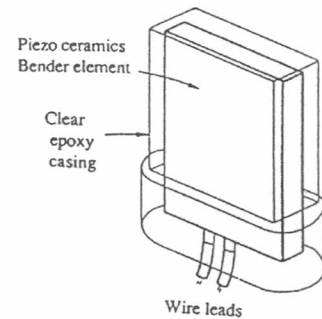
วิธีที่ใช้วัดค่า Modulus ที่ Very Small Strain จะใช้วิธี Bender Element ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณ Electro-Mechanical โดยจะแปลงพลังงานกล (การสั่นไหว) เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางกลับกัน จะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล Bender Element จะเป็นแผ่น Piezo-Ceramic สองแผ่นประกบติดกัน จะสามารถเป็นได้ทั้งตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ โดยที่การใช้จะแตกต่างกัน ในการต่อวงจรไฟฟ้างรูปที่ 2.26 จะต่ออนุกรมเมื่อใช้เป็นตัวรับสัญญาณ และรูปที่ 2.27 จะต่อแบบขนานเมื่อใช้เป็นตัวส่งสัญญาณเหตุที่ต้องต่อวงจรแตกต่างกันเพื่อที่จะใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในแต่ละด้านนั่นเอง ในการใช้ Bender Element เนื่องจากเป็นวัสดุที่ต้านทานกระแสไฟฟ้าเพราะฉะนั้นจะต้องระวังเรื่องการลัดวงจร จึงจำเป็นต้องมีฉนวนกันกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเนื่องจากความชื้น โดยจะใช้ Epoxy เคลือบรอบตัว Bender Element ดังรูปที่ 2.28 การทดสอบโดยวิธี Bender Element จะใช้ Function Generator เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ และ Oscilloscope ในการวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น ซึ่งรูปที่ 2.29 จะแสดงถึงวิธีการต่อวงจรของ Bender Element



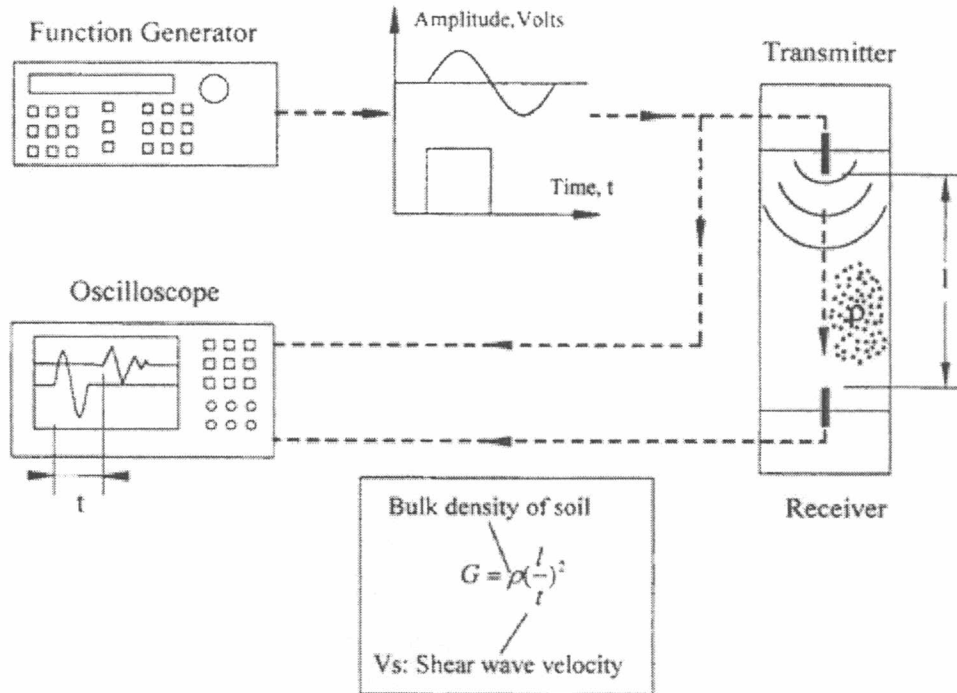
รูปที่ 2.26 แสดงการต่อวงจร
ตัว กำเนิด
สัญญาณ (X-pole)



รูปที่ 2.27 แสดงการต่อวงจร
ตัวรับสัญญาณ
(Y-pole)



รูปที่ 2.28 แสดงวิธีการเคลือบ
Bender Element
ด้วย Epoxy



รูปที่ 2.29 แสดงวิธีการต่อวงจรการทดสอบด้วย Bender Element

- การวัดค่า Modulus โดยใช้ Bender Element

การหาค่าโมดูลัส ด้วยวิธี Bender Element เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่น ซึ่งกระทำได้โดยการเสียบแผ่น Bender ที่เป็นตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณลงไปในตัวอย่างดิน ในทางตรงกันข้ามและทิศทางขนานกัน(Polarize) ซึ่งเราสามารถหาความเร็วของคลื่นความเค้น S-Wave ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$v_s = \frac{L}{t} \quad 2.25$$

v_s	=	Shear Wave Velocity
L	=	ระยะทางระหว่างปลายทั้งสองข้างของ Bender Element
t	=	เวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง (Time Arrival)

Dyvick & Madshus, 1985 พบว่าระยะทาง “L” ควรวัดจากปลายทั้งสองข้างระหว่าง Bender Element (Tip to Tip) และเนื่องจากเวลาที่วัดได้มีค่าน้อยมาก ($t \approx 10^{-6}$ - 10^{-12} วินาที) ควรจะใช้ Oscilloscope ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้เกิดการผิดพลาดเนื่องจากการวัดเวลาน้อยที่สุด ค่า Modulus ของดินจะหาได้จากสมการ

$$G = \rho v_s^2 \quad 2.26$$

G = ค่าโมดูลัสแบบเฉือนของดิน

ρ = ความหนาแน่นของดิน

ที่ Strain น้อยๆ โมดูลัสแบบเฉือน จะเป็นค่าสูงสุด (G_{\max}) และมีค่าคงที่แต่ที่ Strain อื่นๆ ค่าโมดูลัสแบบเฉือน จะลดลง จึงจำเป็นจะต้องมีค่าปรับแก้ค่า G ดังสมการ

$$G = \mu G_{\max} \quad 2.27$$

μ = Correction Factor

วิธีที่นิยมใช้กันมากในการวัดค่า Maximum Shear Modulus ในห้องปฏิบัติการ คือวิธี Resonant Column Technique ซึ่งใช้ตัวอย่าง ทรงกระบอกหรือกลวงโดยการทดสอบจะสร้างแรงบิด และเกิดคลื่นก้ำทอนลงไปในตัวอย่าง ผลที่ออกมาจะเป็นค่าความถี่ก้ำทอนของดินการทดลองจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดและมวลของดินเพื่อที่จะหาค่าคงที่ ขณะที่วิธีหา Maximum Shear Modulus โดยวิธี Bender Element จะหาได้ง่ายและซับซ้อนน้อยกว่าวิธี Resonant Column Technique อีกทั้ง Bender Element ยังสามารถหาค่า Shear Modulus ระหว่างทดสอบแรงเฉือน, Saturation และ Consolidation ขณะที่วิธีอื่นทำไม่ได้

Dyvick & Madshus, 1985 ได้เปรียบเทียบผลของ Stiffness วัดโดย Bender Element กับวิธี Resonant Column Test ที่ ความดันของหน่วยแรงต่างกัน ในการทดสอบทั้ง Loading และ Unloading และผลที่ออกมาถือว่าดีมากมีความใกล้เคียงกัน

2.9 การวัดค่า Modulus ในสนาม

การทดสอบในสนามจะให้ผลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าในห้องปฏิบัติการ เพราะตัวอย่างจะมีผลของการถูกรบกวนน้อยมากส่วนใหญ่มักใช้วิธีการแพร่กระจายของคลื่นในการทดสอบ และในการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีความชำนาญในการจำแนกสัญญาณที่ได้ โดยปกติแล้วตัวกำเนิดสัญญาณจะให้คลื่น Primary Wave (P-wave), Secondary Wave (S-wave) และ Rayleigh Wave และตัวรับสัญญาณจะรับสัญญาณที่ผ่านมาจากชั้นดินผลกระทบของสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับ สถานที่, ตำแหน่งของทั้งตัวกำเนิดและตัวรับสัญญาณ, ระยะทางระหว่างตัวกำเนิดและตัวรับ และความเป็นเนื้อเดียวกันของดิน คลื่นสามารถแพร่กระจายทะลุผ่านชั้นดินไปได้ การวิเคราะห์หาอาจผิดพลาดได้ง่ายและจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์อย่างมากในการจำแนกแยกคลื่นที่จะวิเคราะห์ถึงจะให้ผลที่ถูกต้องได้

● Rayleigh Wave Velocity Survey

เป็นวิธีที่วัดความเร็วของคลื่น Rayleigh Wave การให้กำเนิดคลื่นทำได้โดยตัวกำเนิด Harmonic Vibration กระทำที่บริเวณพื้นผิวของดิน ความเร็วของคลื่นจะคำนวณจาก ความยาวช่วงคลื่นและความถี่ของผลที่เกิดจาก Surface Wave ความยาวช่วงคลื่นคำนวณโดยวัดระยะระหว่างจุดที่คลื่นเริ่มสั่นสะเทือน

เนื่องจาก Shear Wave และ Rayleigh Wave มีความแตกต่างกันน้อยมาก Richart, Hall, JR and Wood, R.D จึงสมมุติว่าคลื่นทั้งสองนี้มีค่าเท่ากัน และสามารถใช้สมการที่ 2.15 หาค่า โมดูลัสแบบเฉือนที่เกิดโดยใช้ความเร็วของคลื่น Rayleigh Wave แทน Shear Wave ได้เลย

● Seismic Refraction Survey

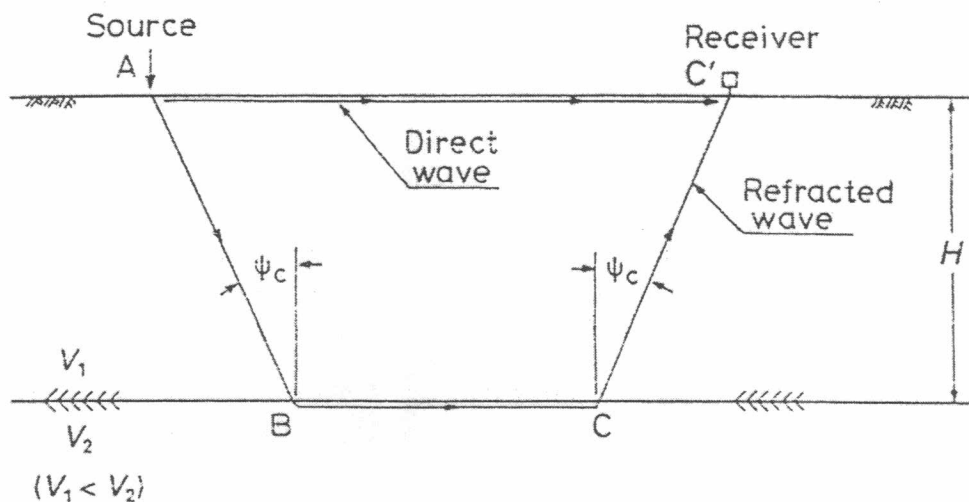
เป็นวิธีที่วัดความเร็วของคลื่น P-Wave ซึ่งกำเนิดโดยใส่พลังงานลงไปในตัวดิน พลังงานอาจจะเป็นการระเบิดหรือการใช้ก้อนกระแทกลงไปในผิวดิน เดิมทีวิธีนี้จะใช้สำหรับการสำรวจใต้ผิวดิน (การหาน้ำมัน, น้ำ, ฯลฯ) จนต่อมา Drnevich, 1971 ได้ดัดแปลงเพื่อที่จะนำมาทดสอบหา Shear Modulus โดยใช้คลื่น P-Wave ในการหา ซึ่งสามารถหาค่า Shear Modulus ได้จากสมการที่ 2.17 ดังนี้

$$G = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \rho V_p^2 \quad 2.28$$

V_p = Compression Wave Velocity

ν = Poisson's Ratio

เนื่องจากจำเป็นต้องรู้ค่า Poisson's Ratio จึงไม่เป็นที่นิยมมากนัก



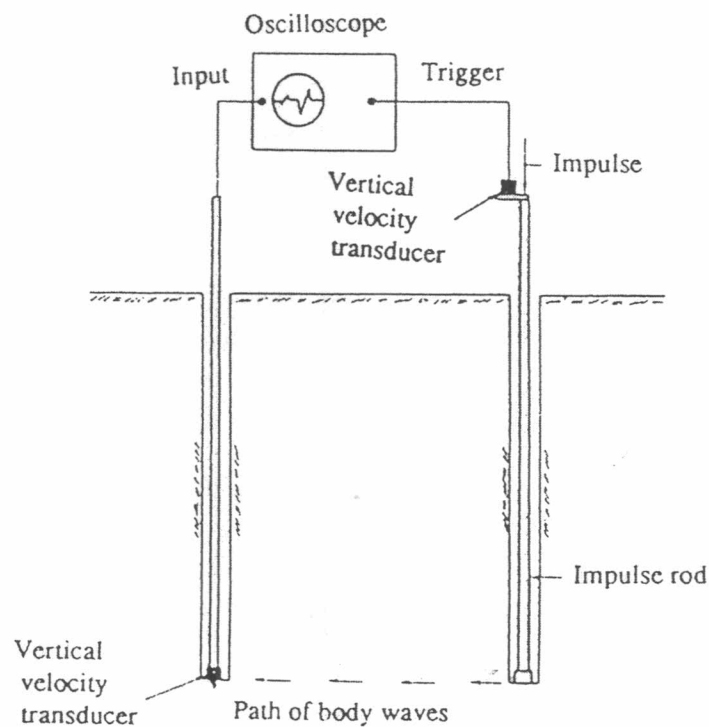
รูปที่ 2.30 Seismic Refraction Survey

- Direct Arrival Survey

เป็นวิธีที่ใช้วัดความเร็วของ Shear Wave โดยตรง โดยใช้สมการที่ 2.15 จากทฤษฎีของ Elastic Wave ซึ่งสามารถหาค่า Shear Modulus ได้ง่าย แม้ว่าการคำนวณหาความเร็วของคลื่นจะกระทำได้ง่าย แต่การวิเคราะห์หาเวลาการมาถึงของคลื่น (Time Arrival) นั้นยังกระทำได้ยาก การบันทึกค่าการมาถึงของคลื่น (Wave Arrival) ของตัวรับที่เดินทางจากดินแล้วเป็นสิ่งที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามวิธี Cross-Hole Shooting Method Raghu and Stokoe, 1972 พบว่าเมื่อให้กำเนิดสัญญาณจากหลุมหนึ่ง คลื่นที่เกิดขึ้นจากหลุมจะมีคลื่น Compression Wave (Body Wave or P-Wave) และ Shear Wave (S-Wave) ไปยังหลุมอีกหลุมที่มีตัวรับสัญญาณ และคลื่น Body Wave นั้นจะมีความเร็วกว่า Shear Wave เสมอ ดังนั้นถ้ารู้ระยะทางระหว่างหลุมทั้ง 2 หลุม เราจะสามารถหาความเร็วของ Body Wave ได้โดยตรงแต่ใน Shear Wave เราจำเป็นต้องจำแนกการมาถึงของคลื่นครั้งที่ 2 ที่เป็น คลื่น Shear Wave

- Cross-Hole Test

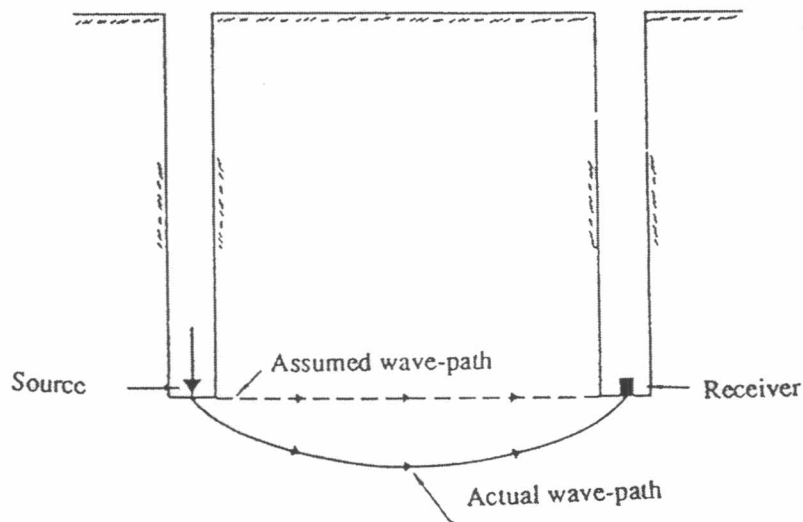
วิธี Cross-Hole Technique ทำโดย เจาะหลุมในแนวตั้ง 2 หลุม ซึ่งตำแหน่งและระยะห่างระหว่างหลุม 2 หลุมไม่มากนัก ระดับความลึกของแต่ละหลุมควรจะมีค่าเท่ากัน ตัวกำเนิดคลื่นและตัวรับสัญญาณจะติดตั้งอยู่คนละหลุม และตัวรับและตัวส่งจะสัมผัสกับหน้าดินตลอดเวลา ขณะทดสอบ ตัวกำเนิด และตัวรับสัญญาณจะต่อเข้ากับ Storage Oscilloscope โดยที่ Oscilloscope จะบันทึกค่าจากตัวรับสัญญาณทันทีเมื่อตัวกำเนิดคลื่นสร้างคลื่น Shear Wave รูปที่ 2.31 จะแสดงถึงเครื่องมือหลักๆ ของ Seismic Cross Hole Technique



รูปที่ 2.31 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear Modulus ด้วยวิธี Cross-Hole Test

วิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องแม่นยำมากที่สุดอีกวิธีหนึ่งและมักจะใช้เป็นวิธีที่อ้างอิงวิธีทดสอบอื่นๆ แต่ทว่า มันก็มีจุดอ่อนบางอย่างคือ เมื่อเราทำการเจาะหลุมก่อนทดสอบ มันจะเกิดการ Disturbance เนื่องจาก Stress Relief รอบๆ หลุมที่เจาะ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการที่ให้ตัวกำเนิดคลื่น และ Geophone สัมผัสกับผิวดินอย่างดี Andreasson, 1979 ได้แสดงการเปรียบเทียบของผลการ Disturbance จะประมาณเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหลุมเจาะทำการเจาะไว้ก่อนกับการที่เราทดสอบโดยกดเครื่องมือ (ตัวกำเนิด, Geophone) ลงไปในดิน

และพบว่ายังมีปัญหาอีกอย่างเช่น ค่า Shear Modulus จะเปลี่ยนไปตามความลึก ยิ่งความลึกมาก ดินมักจะมีความแข็งมาก Shear Wave ก็จะเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณ ได้เร็วยิ่งขึ้น และเส้นทางเดินทางของคลื่นจะไม่เป็นตามแนวอน มันจะเดินทางไปยังเส้นทางที่จะใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดดังรูปที่ 2.32 จะแสดงลักษณะของเส้นทางของคลื่นเป็นรูปโค้งในดินที่มีลักษณะมีค่า Stiffness เพิ่มขึ้นตามความลึก ดังนั้น ในชั้นดินที่อ่อนและมีความหนาของชั้นดินที่น้อยจะยากต่อการหาค่าที่ถูกต้องได้

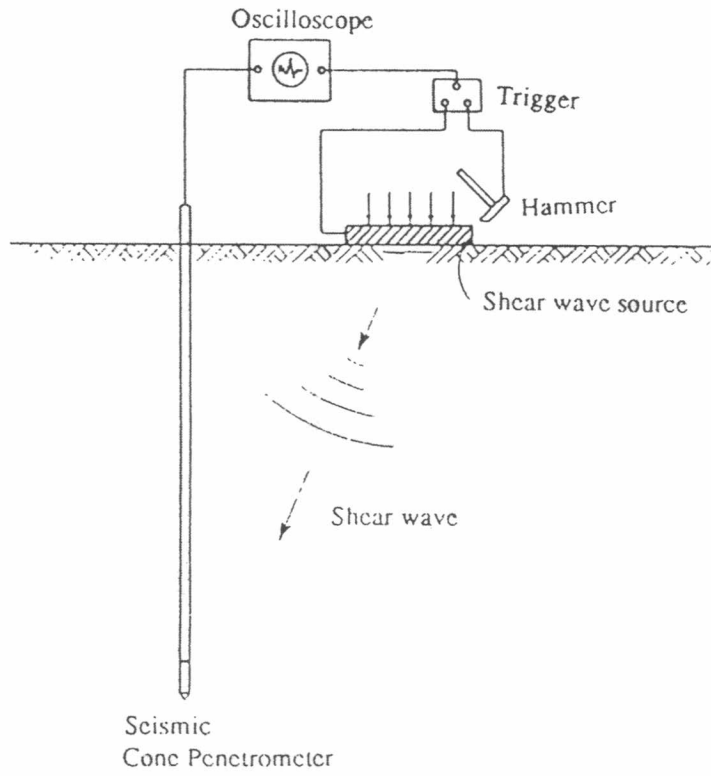


รูปที่ 2.32 แสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่นเมื่อชั้นดินด้านล่างมีความแข็งกว่าชั้นบน

- Down-Hole Test

วิธี Down-Hole Test จะมีลักษณะการวัดเหมือนกับวิธี Cross-Hole แต่จะต้องการหลุมเจาะเพียงหลุมเดียวเท่านั้น โดยจะมีตัวรับสัญญาณอยู่ที่หลุมและกำเนิดคลื่นในทางแนวอนบนพื้นผิว ดังรูปที่ 2.33 จะแสดงถึงวิธีการทดสอบแบบ Seismic Down hole ในการทดสอบนี้สามารถทำการกลับกันได้คือให้ตัวกำเนิดคลื่นอยู่ในหลุมและตัวรับสัญญาณจะอยู่บนพื้นผิวแทน ซึ่งเราจะเรียกวิธีนี้ว่า Up-Hole Test

ผลของการผิดพลาดเนื่องจากการ Disturbance จะเหมือนกันกับที่เกิดขึ้นในวิธี Cross-Hole Test วิธี Down-Hole Test ยังสามารถที่จะหาความหนาของชั้นดินในทางตั้งได้อีกด้วยแต่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะสามารถทดสอบได้



รูปที่ 2.33 เครื่องมือและการทดสอบหา Shear Modulus ด้วยวิธี Down-Hole Test