บทที่ 2

ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีต

2.1) การเคลื่อนตัวของมวลดิน (Ground Motion)

Wood (1908) ได้สรุปรายงานเกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหวใน San Francisco เมื่อปี ค.ศ.1906 ดังนี้ " ขนาดของความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณต่างๆ อันเนื่องจากแผ่นดินไหวในซานฟรานซิสโก เมื่อวันที่ 10 เมษายน 1906 นั้นขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยาของบริเวณนั้นเป็นหลัก" อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวข้างต้นนั้นเกิดขึ้นจากการสังเกตเป็นหลักเนื่องจากข้อมูลทางธรณีวิทยาและข้อมูลแผ่นดินไหวในขณะนั้นยังมีค่อนข้างน้อย และในปี ค.ศ. 1957 นั้นเอง ข้อมูลที่สำคัญที่บ่งชี้ถึงความสำคัญของสภาพทางธรณีวิทยา ต่อระดับความเสียหายอันเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ถูกเปิดเผยออกมา โดยสามารถแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 โดยข้อมูลดังกล่าวได้จากการตรวจวัดอัตราเร็วและความเร่งของการเคลื่อนตัวของชั้นดินในระดับต่างๆ กัน ณ จุดต่างๆ รอบๆ เมือง San Francisco เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับสภาพทางธรณีวิทยาแล้วทำให้สามารถสรุประดับความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างหรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ได้ดังนี้ (Seed et al. 1991, Hisada et al. 1965 and Athanassopoulos and tikou 1990)

1) ตำแหน่งต่างๆที่ทำการตรวจวัดมีระยะที่ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน
2) ชั้นดินอ่อน (Clay หรือ Sand) มีคุณลักษณะที่จะกรองเอาคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่สูงออก และขยายคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่ต่ำ ส่งผ่านขึ้นสู่ผิวดิน

รูปที่ 2.3 แสดง Response Spectrum ของดินอ่อนประเภทต่างๆ ต่อการสั่นสะเทือน (Seed, 1991) โดยจะเห็นได้ว่าในระหว่างดินอ่อนประเภทต่างๆ ก็ยังก่อให้เกิดการเคลื่อนตัว และระดับความเสียหายต่อโครงสร้าง แต่ละประเภทต่างกันออกไป โดยแนวโน้มที่สำคัญคือ ชั้นดินที่อ่อนกว่าจะมี pre-domenant period ที่สูงกว่าจึงมี potential ที่จะก่อความเสียหายแก่อาการที่มี pre-domenant period ยาวๆ (เช่นอาคารสูง) มากกว่าโครงสร้างที่มี natural period ต่างๆ (เช่น อาคารบ้านพักอาศัย)

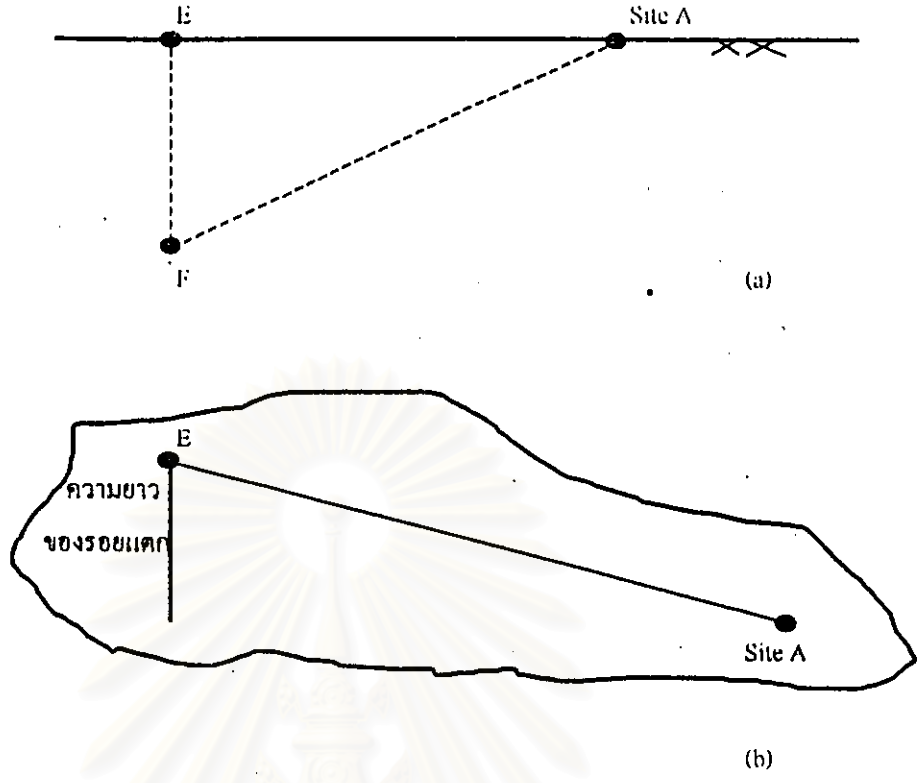
2.2 นิยามที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว (Definition of some Earthquake Related Term)

- โฟกัส (Focus) คือ จุดที่อยู่ใต้ผิวดินซึ่งรอยแตกร้าวเกิดขึ้นเป็นจุดแรก ดังรูป 2.1 (จุด F)
- ความลึกของจุดโฟกัส (Focus Depth) คือ ระยะทางในแนวดิ่งที่วัดจากผิวดินไปถึงจุดโฟกัส ดังรูป 2.1 (a) (ระยะ EF) แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

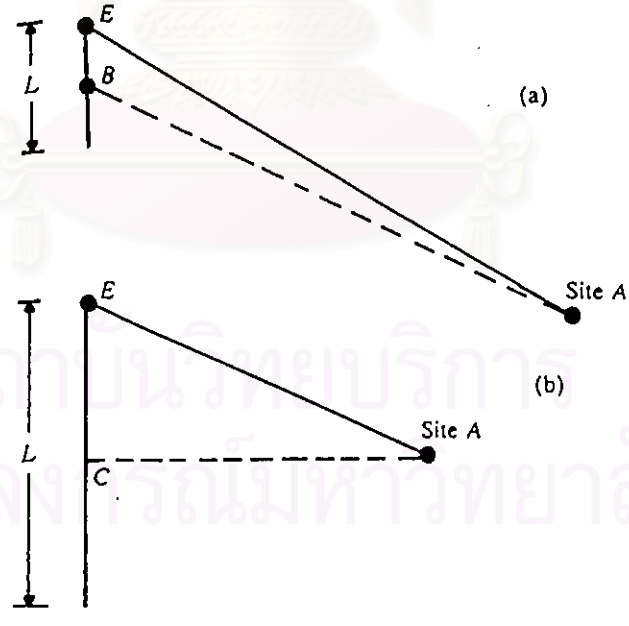
- โฟกัสของการเกิดแผ่นดินไหวระดับลึก (Deep-focus earthquake) คือ ความลึกของจุดโฟกัสตั้งแต่ 300-700 กิโลเมตร (185-435 ไมล์)
- โฟกัสของการเกิดแผ่นดินไหวระดับปานกลาง (Intermediate-focus earthquake) คือ ความลึกของจุดโฟกัสตั้งแต่ 70-300 กิโลเมตร (45-185 ไมล์)
- โฟกัสของการเกิดแผ่นดินไหวระดับตื้น (Shallow-focus earthquake) คือ ความลึกของจุดโฟกัสน้อยกว่า 70 กิโลเมตร (45 ไมล์)

- อิพิเซนเตอร์ (Epicenter) คือ จุดที่อยู่เหนือจุดโฟกัสในแนวดิ่ง ดังแสดงโดยจุด E ในรูป 2.1
- ระยะทางอิพิเซนทริก (Epicentric Distance) คือ ระยะทางในแนวราบระหว่างอิพิเซนเตอร์กับตำแหน่งหรือสถานที่สนใจ ดังแสดงโดยเส้น EA ในรูป 2.1
- ระยะทางไฮโฟเซนตริก (Hypocentric Distance) คือ ระยะทางระหว่างจุดโฟกัสกับตำแหน่งหรือสถานที่สนใจ ดังแสดงโดยเส้น FA ในรูป 2.1(a)
- Effective Distance to Causative fault คือ ระยะทางจากจุดแบ่งครึ่งของรอยแตกร้าวถึงสถานที่สนใจ ดังแสดงในรูป 2.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 นิยามของจุดโฟกัสและอิพิเซนเตอร์ ; (a) รูปตัด และ (b) รูปแปลน



รูปที่ 2.2 ระยะทางประสิทธิผลจากรอยแตกถึงสถานที่อ้างอิง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

● ความเข้มของการเกิดแผ่นดินไหว (Intensity) คือ การวัดขนาดของการเกิดแผ่นดินไหวซึ่งวัดตามตามอำนาจการทำลาย แบ่งออกเป็น 12 ระดับในหน่วยของ Modified Mercalli Scale ดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 การวัดขนาดของการเกิดแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 12 ระดับในหน่วยของ Modified Mercalli Scale

Intensity	Description
I	Detected only by sensitive instruments
II	Felt by a few persons at rest, especially on upper floors; delicate suspended objects may swing
III	Felt noticeably indoors, but not always recognized as a quake; standing autos rock slightly, vibration like passing trucks
IV	Felt indoors by many, outdoors by a few; at night some awaken; dishes, windows, doors disturbed; motor cars rock noticeably
V	Felt by most people; some breakage of dishes, windows and plaster; disturbance of tall objects
VI	Felt by all; many are frightened and run outdoors; falling plaster and chimneys; damage small
VII	Everybody runs outdoors; damage to building varies, depending on quality of construction; noticed by drivers of autos
VII	Panel walls thrown out of frames; fall of walls, monuments, chimneys; sand and mud ejected; drivers of autos disturbed
IX	Buildings shifted off foundations, cracked, thrown out of plumb; ground cracked; underground pipes broken
X	Most masonry and frame structures destroyed; ground cracked; rails bent; landslides
XI	New structures remain standing; bridges destroyed; fissures in ground; pipes broken; landslides; rails bent
XII	Damage total; waves seen on ground surface; lines of sight and level distorted; objects thrown up into air

[a] After Wiegel, R. W. (1970).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1 ขนาดของการเกิดแผ่นดินไหว (Earthquake Magnitude)

ขนาดของแผ่นดินไหวสามารถวัดได้จากขนาดของคลื่นความเค้น (Elastic stress wave) ที่ถูกปลดปล่อยออกมา โดย Richter (1958) ได้เสนอสมการในการแปลงพลังงานของคลื่นการสั่นสะเทือนมาเป็นขนาดของแผ่นดินไหวดังสมการข้างล่างนี้

$$\log_{10}E = 11.4 + 1.5M \qquad 2.1$$

ซึ่ง E คือ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา มีหน่วยเป็น เอิร์ก (Ergs)

M คือ ขนาดของแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็น ริคเตอร์ (Richter)

สมการที่ 2.1 ได้รับการปรับปรุงแก้ไขโดย Bath (1966) โดย Bath ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณขนาดของแผ่นดินไหว ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\log_{10}E = 12.24 + 1.44M \qquad 2.2$$

Tocher (1958) พบว่า ความยาวของแนวแผ่นดินที่เกิดการเคลื่อนตัวแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมามีความสัมพันธ์กับขนาดของของแผ่นดินไหว ดังแสดงในสมการที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม สมการนี้ได้จากข้อมูลแผ่นดินไหวในมลรัฐแคลิฟอร์เนียและมลรัฐเนวาดาเป็นหลัก

$$\log L = 1.02M - 5.77 \qquad 2.3$$

ซึ่ง L คือ ความยาวของรอยแตกร้าว (Fault rupture) หน่วยเป็น กิโลเมตร

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบหน่วยความรุนแรงของแผ่นดินไหวแบบ Richter กับ Modified Mercalli

Richter scale magnitude *M*	Maximum intensity, Modified Mercalli Scale
1	—
2	I, II
3	III
4	IV
5	VI, VII
6	VIII
7	IX, X
8	XI

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 ลักษณะการเคลื่อนตัวของหินในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว (Characteristic of Rock Motion During an Earthquake)

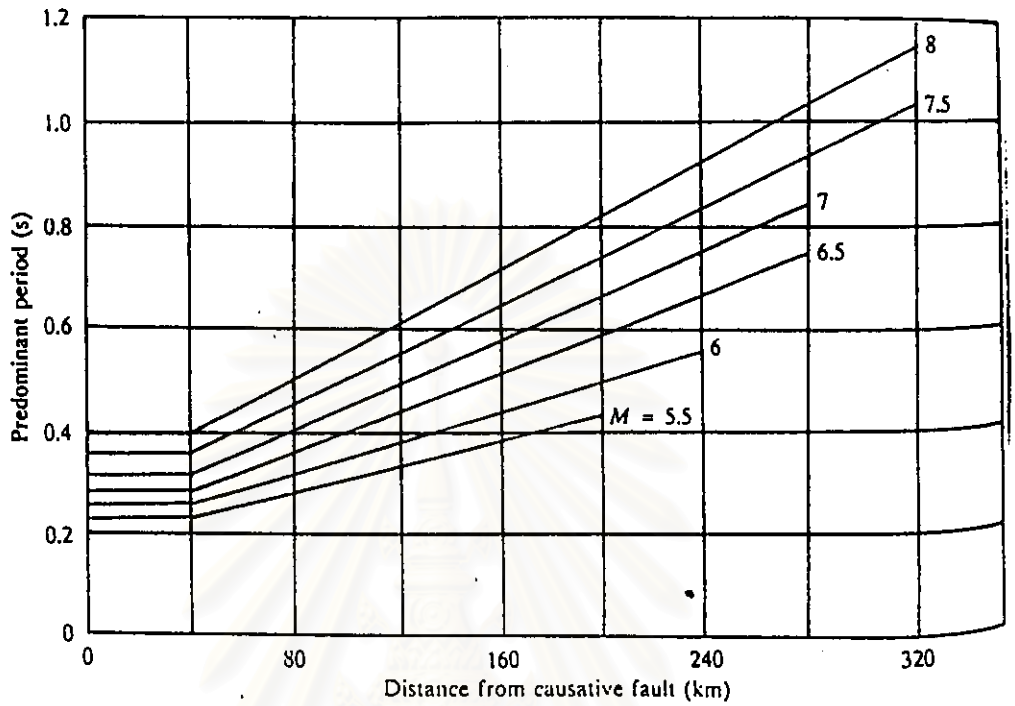
การเกิดแผ่นดินไหวทำให้เกิดคลื่นแบบเฉือนวิ่งผ่านชั้นหินทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของหินและชั้นดินที่อยู่บนชั้นหินเกิดการเคลื่อนตัวด้วย ความเร็วของคลื่นแบบเฉือนในชั้นหินแกรนิตมีค่าประมาณ 3050-3660 m/s ในพวกหินอ่อนๆมีค่าประมาณ 762-915 m/s (Seed ,Idriss and Kieter 1969) วิธีการหาการเคลื่อนตัวของดินที่ตำแหน่งใกล้กับระดับผิวดินได้นั้น โดยจะต้องทราบค่าบางค่าที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหว ดังต่อไปนี้

- ระยะเวลาของการเกิดแผ่นดินไหว (Duration of Earthquake)

Housner (1965) ได้ประมาณค่าของอัตราการแผ่กระจายของรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากการเกิดแผ่นดินไหวมีค่า 3.2 กิโลเมตร/วินาที ซึ่งเมื่อทราบรอยแตกแล้ว จะสามารถคำนวณหาเวลาของการเกิดแผ่นดินไหวได้ ซึ่งระยะของรอยแตกร้าวสามารถคำนวณหาได้มาจากสมการของ Tocher (1958) หรืออาจจะใช้อีกวิธีหนึ่ง คือ เมื่อทราบขนาดของการสั่นสะเทือนในมาตรา Richter ก็จะสามารถคำนวณหาเวลาของการเกิดแผ่นดินไหวได้ด้วย

- คาบที่เด่นชัดของอัตราเร่งในชั้นหิน (Predominant Period of Rock Accelerate)

Seed ,Idriss and Kieter (1969) ได้นำผลการวิเคราะห์ของ Guttenberg and Richter (1956) และของ Figureroa (1960) มาพัฒนาขึ้นเป็นแผนภูมิ ซึ่งในแผนภูมินั้นจะแสดงความสัมพันธ์ค่า average predominant period of accelerations กับขนาดของการเกิดแผ่นดินไหวดังรูปกราฟที่แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 คาบที่เด่นชัดของอัตราเร่งสูงสุดของหิน

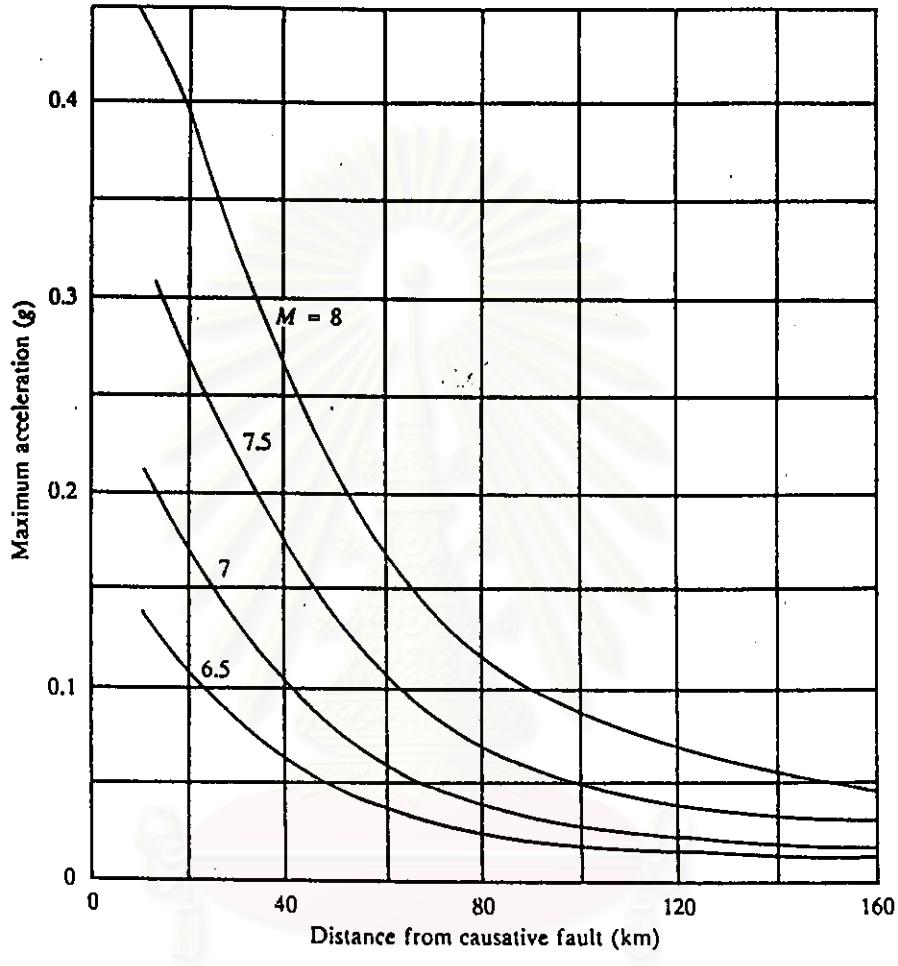
- ค่าความเร่งของแอมพลิจูดสูงสุด (Maximum Amplitude of Acceleration)

ค่าความเร่งของแอมพลิจูดสูงสุด ที่เกิดขึ้นบริเวณ Epicenter ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหวแบบตื้นโดยมีความลึกประมาณ 16 กิโลเมตร จากผิวดินได้มีสมการของ Gutterburg and Richter (1956) ที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่า Maximum Amplitude of Acceleration ดังนี้

$$\log a_0 = -2.10 + 0.81M - 0.027M^2 \qquad 2.4$$

ซึ่ง a_0 คือ ค่าความเร่งของแอมพลิจูดสูงสุด

Seed , Idriss and Kieter (1969) ได้หากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสูงสุดของขนาดแผ่นดินไหวกับ ระยะทางของรอยเลื่อน (Causative fault) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อัตราเร่งสูงสุดกับขนาดของแผ่นดินไหวและระยะจากรอยแตกร้าว

2.3) คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่มีความถูกต้อง (Accuracy of the dynamic soil property of site)

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 60 ม. โดยประมาณที่ถูกต้องมีความสำคัญมากสำหรับการคาดคะเนการเคลื่อนตัวของดินในขบวนการเกิดแผ่นดินไหว การคาดคะเนของการเคลื่อนตัวของดินที่ดีนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินและการวิเคราะห์การเคลื่นตัวของดินที่ถูกต้อง วิธีการวิเคราะห์ที่ง่ายที่สุดและได้ผลเพียงพอสำหรับการ

วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินบริเวณผิวดินได้แก่ Linear equivalent method ซึ่งวิธีการนี้จะเอาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างดิน เช่น โมดูลัสแบบเฉือน และ Damping ratio ไปใช้สำหรับในการวิเคราะห์

2.3.1 แบบจำลอง Linear Viscoelastic

พฤติกรรมของดินที่ทดสอบด้วยเครื่องมือ Cyclic triaxial สามารถแทนด้วยแบบจำลอง Linear viscoelastic เพราะระดับของความเครียดแบบเฉือน (Shear strain) อยู่ในช่วง 10^{-4}- 10^{-3} ซึ่งยังสมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain เป็น Linear แต่พลังงานที่กระจายออกจะแสดงออกมาในรูปของ Damping ratio จะเป็นคุณลักษณะของดินที่ระดับความเครียดแบบเฉือนจุดนั้น ค่าของ Damping ratio มีความสำคัญมากสำหรับการหาการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว ดังนั้นแบบจำลองที่นำเสนอพฤติกรรมของดินจะมีผลต่อการหา Damping ratio ของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบด้วย

2.3.2 ความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดของแรงซ้ำซาก (The General Expression of Cyclic Stress-strain Relationship)

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain) ของแบบจำลอง Viscoelastic มีดังนี้ เมื่อให้ความเค้น (τ) ก่อให้เกิดความเครียด (γ) ในรูปของการเปลี่ยนรูป (Deformation) ที่ได้จาก triaxial simple shear หรือ torsion shear test กำหนดให้ τ และ γ โดยให้แต่ละค่าอยู่ในรูปของ Sinusoidal คือ

$$\tau = \tau_a \sin \omega t \qquad 2.5$$

τ_a คือ Amplitude , t คือ เวลา , ω คือ ความถี่เชิงมุมหรือความถี่รอบที่กระทำต่อตัวอย่างดิน ก่อให้เกิดความเครียดอยู่ในรูปแบบ Sinusoidal เหมือนกัน แต่มีเวลาของการเกิดเข้าไปเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\gamma = \gamma_a \sin(\omega t - \delta) \qquad 2.6$$

γ_a คือ Amplitude ของความเครียด และ δ คือ Angle of phase difference แสดงในรูปของ time lag ของความเครียดที่ตอบสนองต่อการกระทำของความเค้นจากสมการ 2.5 และ 2.6 เพื่อทำให้เข้าใจง่ายขึ้น นำสมการ 2.5 หารด้วยสมการ 2.6 จะได้ τ / γ ไม่เพียงแต่จะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของแอมพลิจูด τ_a/γ_a แต่ยังเป็นฟังก์ชันของ Phase angle difference

แต่จากการหาความสัมพันธ์ข้างต้นนั้นยังมีความสับสนพอสมควรเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นอีก โดยใช้ค่า complex variable เข้ามาช่วยแก้ปัญหา ซึ่งค่าของความเค้นและความเครียดของสมการ 2.5 และ 2.6 สามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$\tau_R = \tau_a \cos\omega t$$
$$\gamma_R = \gamma_a \cos(\omega t - \delta) \qquad 2.7$$

โดยที่ τ_R และ γ_R เป็นความเค้นและความเครียดซึ่งสมการ 2.5 และ 2.6 มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็น Conjugate กัน หรือพูดอีกอย่างได้ว่า ถ้าเป็น viscoelastic body เมื่อมีความเค้น (τ) มากระทำให้ผลของความเครียด (γ) ออกมา ในขณะเดียวกันถ้าเป็น body เดียวกัน ถ้าให้ค่าของความเครียด (γ_R) จะได้ค่าของความเค้น (τ_R) เช่นเดียวกัน ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่า ค่าของความเค้น (τ) ของ viscoelastic body จะเขียนอยู่ในรูปแบบเชิงซ้อน (Complex Variable) ได้ดังนี้ $\bar{\tau} = \tau_R + i\tau$ และในทำนองเดียวกันค่าของความเครียดจะเท่ากับ $\bar{\gamma} = \gamma_R + i\gamma$ โดยให้ i เป็นค่า Unit imaginary number และค่าของ $\bar{\tau}$ และ $\bar{\gamma}$ เป็นค่าของความเค้นและความเครียดในรูปของเชิงซ้อน

จากสมการ 2.5,2.6 และ 2.7 ถ้ากำหนดรูปแบบของ $\bar{\tau}$ และ $\bar{\gamma}$ จากข้างต้นให้เป็นหนึ่งเดียวจะได้สมการใหม่เป็นดังนี้

$$\tau = \tau_a e^{i\omega t}$$
$$\bar{\gamma} = \gamma_a e^{i(\omega t - \delta)} \qquad 2.8$$

จากสมการ 2.8 เป็นรูปแบบทั่วไปของความเค้นและความเครียดที่แสดงอยู่ในรูปเชิงซ้อน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ความเค้นกับความเครียด ส่วนในกรณีที่มีทั้งความเค้นและความเครียดจะสามารถอธิบายโดยอัตราส่วน ของ $\bar{\tau}/\bar{\gamma}$ ซึ่งจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \frac{\tau_a}{\gamma_a} e^{i\delta} = \frac{\tau_a}{\gamma_a}(\cos\delta + i\sin\delta) \qquad 2.9$$

โดยให้ $$\mu = \frac{\tau_a}{\gamma_a}\cos\delta \quad , \quad \mu' = \frac{\tau_a}{\gamma_a}\sin\delta \qquad 2.10$$

เขียนใหม่เป็น $\mu^* = \mu + i\mu'$

หรืออาจจะเขียนเป็น $$\frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \mu + i\mu' = \mu^* \qquad 2.11$$

กำหนดให้ μ = Elastic modulus

μ' = Loss modulus

μ^*= Complex modulus

ค่า Elastic modulus เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงให้เห็นของความเป็น Elastic ในขณะเดียวกันค่า Loss modulus จะแทนพลังงานที่กระจายออกไป ซึ่งเป็นคุณลักษณะของ viscoelastic body จากสมการ 2.10 สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{\tau_a}{\gamma_a}\sqrt{\mu^2 + \mu'^2} = |\mu^*|$$

$$\tan\delta = \frac{\mu'}{\mu} = \eta \qquad 2.12$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า η เป็นพารามิเตอร์ เรียกว่า Loss coefficient จะแสดงให้รู้ว่าพลังงานสูญเสียหรือบางทีอาจจะเรียกว่าเป็นคุณลักษณะของ Damping ค่าสัมบูรณ์ของค่า Complex Modulus จะแสดงให้เห็นว่าเป็นค่าโมดูลัสของวัสดุนั้น

ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ ค่า μ และ μ' เป็นค่าคงที่ ค่าของ μ สามารถนำไปเป็นฟังก์ชั่นของความถี่เชิงมุม (Angular Frequency) ดังนั้นค่า Moduli คือ μ และ μ' ที่แสดงในสมการ 2.10 อาจจะเป็นรูปแบบที่สำคัญ และอาจจะนำไปเขียนอยู่ในรูปแบบอื่นได้ เช่น เป็นฟังก์ชั่นในรูปของความถี่ ดังนั้นรูปแบบของฟังก์ชั่นที่กำหนดค่า Moduli ของพฤติกรรมของวัสดุที่เป็น Viscoelastic สามารถอธิบายได้ชัดเจนมากขึ้น การกำหนดค่า Moduli มีอยู่หลายวิธี อาจจะนำเสนอในรูปแบบของการทดลองโดยตรง (Direct Experiment) บนพื้นฐานแบบจำลองของสปริง (Spring) และ Dashpot โดยจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

2.3.3 Hystertic Stress-Strain Curve

พฤติกรรมของความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain) ของส่วนที่เป็น Viscoelastic body ที่กล่าวมาแล้วนั้น จากสมการ 2.5 และ 2.6 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด กับค่าพารามิเตอร์ ของ ωt ระหว่างสองสมการ และสามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ของหนึ่งสมการได้ดังนี้

$$\left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 - 2\cos\delta\left(\frac{\gamma}{\gamma_a}\right)\left(\frac{\tau}{\tau_a}\right) + \left(\frac{\gamma}{\gamma_a}\right)^2 - \sin^2\delta = 0 \qquad 2.13$$

สมการกำลังสอง ของค่า (τ/τ_a) สามารถอ้างอิงกับนิยามของ μ และ μ' ในสมการ 2.10 สามารถเขียนเป็น

$$\tau = \mu\gamma \pm \mu'\sqrt{\gamma_a^2 + \gamma^2} \qquad 2.14$$

สมการที่ 2.14 อาจจะเป็นสมการสำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง stress-strain ซึ่งอาจจะเป็นตัวแทนของสมการ 2.5 และ 2.6 สมการ 2.14 สามารถเขียนแยกออกเป็นสองส่วน ดังนี้

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

$$\tau_1 = \mu\gamma$$

$$(\frac{\tau_2}{\mu\gamma_a})^2 + (\frac{\gamma}{\gamma_a})^2 = 1 \qquad 2.15$$

จะได้ $\tau_1 = \mu\gamma$ ในสมการ 2.15 จะบรรยายด้วยรูป 2.5 (a) คือเส้นตรง ที่มีความชันเป็น μ ส่วนอีกสมการนั้น จะแสดงให้เห็นเป็นวงรีในรูป 2.5 (a) เหมือนกัน โดยที่ $\tau_2=\mu'\gamma_a$ เป็นแกนทางยาว ส่วน $\gamma=\gamma_a$ เป็นแกนทางสั้น ส่วนในรูป 2.5(b) จะเป็นการรวมสองส่วนเข้าด้วยกันได้เป็นวงรีแกนเอียง เป็นตัวแทนของสมการ 2.15 สำหรับ cyclic shear strain ก่อให้เกิด ความเค้นแบบเฉือน (Shear stress) ประกอบกันขึ้น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง กับความเครียดแบบเฉือน (Shear strain) กลับไปกลับมา ดังแสดงในรูป 2.5 (a) ส่วนที่ 2 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงเป็นวงรีหมุนตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูป 2.5(a) เช่นกัน ดังนั้นตามความเป็นจริงค่าของความเค้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ที่แสดงเป็นวงรีเอียงเคลื่อนตามเข็มนาฬิกา ในกรณีของ cyclic loading เส้นทางการเดินบนวงรีเอียง จะเป็นตัวแทนของ hysteretic loops ดังแสดงในรูป 2.5(b) โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นในการลงพิกัดของ stress-strain ในการทดสอบ cyclic loading

จากรูป 2.5(b) วงรีเอียงตัดแกนความเค้นแบบเฉือนที่ตำแหน่งเท่ากับ $\mu'\gamma_a$ ดังนั้นค่าของ μ' จะนำไปเป็นค่าวัดระดับของความอ้วนหรือผอมของวงรี ค่าของ μ' มากจะแสดงว่าวงรีนั้นอ้วน ค่า Energy loss หรือ Damping มาก ส่วนค่าของ μ' น้อยวงรีจะผอมค่า Damping ก็จะมีค่าน้อยด้วย ซึ่งจะได้จากกราฟของการทดสอบ cyclic loading

ปริมาณของค่า Damping เป็นคุณลักษณะที่แสดงถึง Energy Loss Per Cycle จะมีค่าเท่ากับ พื้นที่ล้อมรอบโดย Hysteresis loop ที่แสดงในรูป 2.5(b) ซึ่งพื้นที่ของ ΔW ล้อมรอบโดยวงรีเอียง ควรจะเท่ากับพื้นที่ที่ปิดล้อมด้วยวงรี ดังแสดงในรูป 2.5(a) จึงสามารถคำนวณหาพื้นที่ได้โดยตรง โดยใช้สูตรการหาพื้นที่ของวงรี ดังนี้

$$\Delta W = \int \tau d\gamma = \mu' \pi \gamma^2_a \qquad 2.16$$

เมื่อพิจารณาค่าสูงสุดของ Elastic Energy หรือ (W) ที่สามารถเก็บในส่วนที่เป็น Viscoelastic body มีอยู่หลายวิธีในการกำหนดการเก็บพลังงาน แต่ที่เป็นจริงมากที่สุด ค่าของพลังงานที่เก็บโดย Elastic component ของความเค้นแบบเฉือน (Shear stress) (τ_1) อ้างความสัมพันธ์ของ $\tau_1 = \mu\gamma_a$ ตามสมการ 2.15 พลังงานที่เก็บสะสมไว้เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = \frac{1}{2}\tau\,\gamma_a = \frac{1}{2}\mu\gamma_a^{\,2} \qquad 2.17$$

ดังนั้นการวัดค่าของ Damping และ Energy loss หรือ ΔW ค่อนข้างจะลำบากเนื่องจากเป็นค่าฟังก์ชันของ Strain amplitude หรือ (γ_a) ซึ่งไม่อาจจะแสดงให้เห็นคุณสมบัติแท้จริงของวัสดุได้ จึงนำค่าของปริมาณทั้งสองมากำหนดเป็นอัตราส่วน คือ Energy loss per cycle ต่อ Maximum stored energy จากสมการ 2.16 และ 2.17 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\mu'\pi\gamma_a}{\frac{1}{2}\pi\mu\gamma_a} = 2\pi\frac{\mu'}{\mu} \qquad 2.18$$

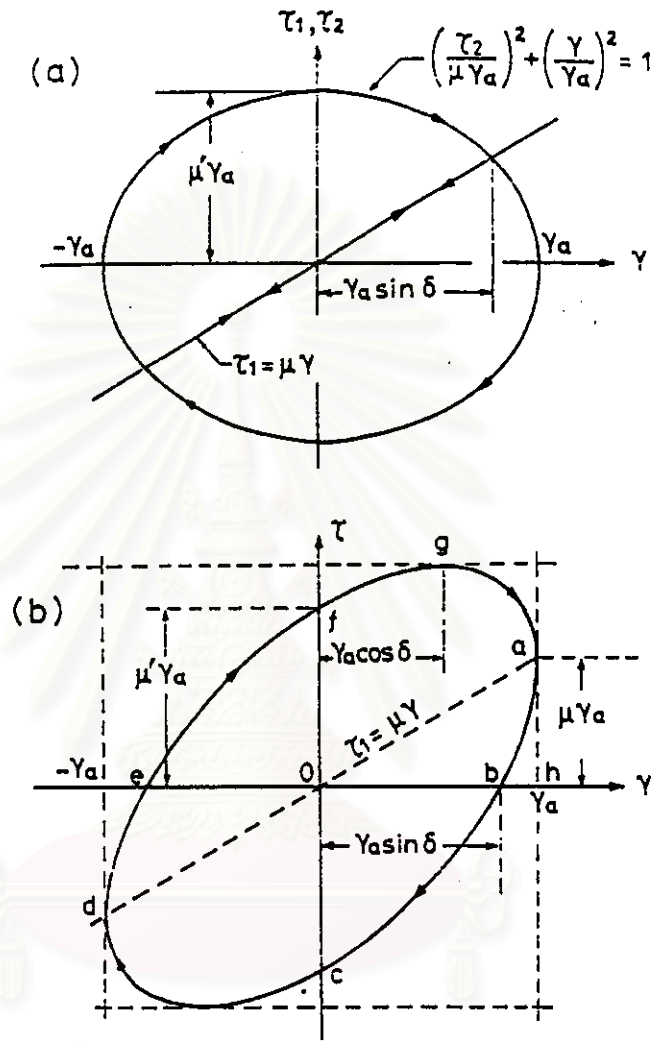
ให้ η = Loss coefficient

$$\eta = \frac{1}{2\pi}\frac{\Delta W}{W} = \frac{\mu'}{\mu} = \tan\delta \qquad 2.19$$

ความสัมพันธ์ที่แสดงถึง Energy loss จะอยู่ในเทอมของ hysteresis loop ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Damping อยู่ในรูปของ Phase Angle Difference ค่าของ Loss coefficient ของสมการ 2.19 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\mu'\gamma_a}{\mu\gamma_a} \qquad 2.20$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

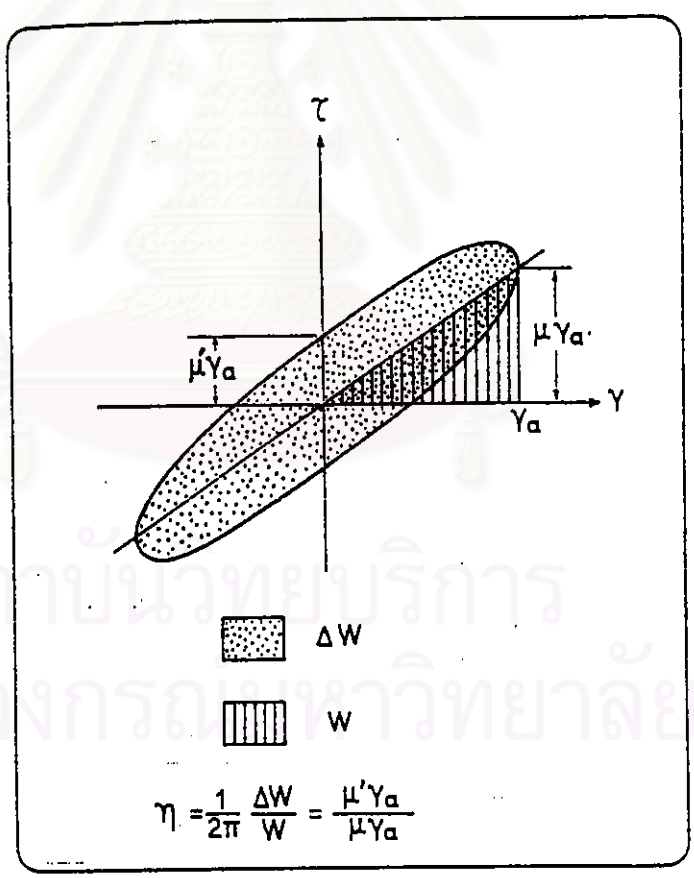


รูปที่ 2.5 Decomposition of the viscoelastic model into elastic and viscous components.

จากสมการ 2.20 ที่ปรากฏเป็นรูปเศษส่วน โดยที่เศษจะมีค่าเท่ากับ $\overline{Of}$ ของ hysteresis loop ในรูปที่ 2.5 และตัวส่วนเท่ากับ ความยาวของ $\overline{ah}$ ดังนั้นจึงเป็นรูปแบบที่ง่ายมากสำหรับวิธีหา Loss coefficient จาก cyclic stress-strain curve ที่ได้จากการทดลอง มีค่าเป็นดังนี้

$$\eta = \frac{shear\quad stress\quad at\quad zero\quad strain}{shear\quad stress\quad at\quad the\quad \max imum\quad strain} \qquad 2.21$$

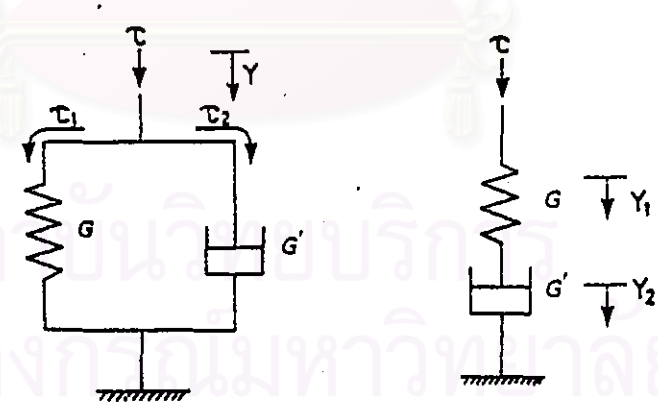
จากวิธีข้างต้นเป็นวิธีที่สะดวกที่สุด โดยใช้กฎการทำซ้ำ (Rule of thumb) คำนวณหา Loss coefficient อย่างไรก็ตามในกรณีเป็น nonlinear hysteresis curve อาจจะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ แต่อาจจะใช้วิธีอื่นที่จะแสดงในรูป 2.6 โดยใช้คำจำกัดความของ ΔW และ W



รูปที่ 2.6 นิยามของ Loss coefficient

2.3.4 แบบจำลองที่แทนระบบด้วยสปริงและ Dashpot (Model representation by the spring-dashpot system)

เพื่อให้เข้าใจดีขึ้นในการอธิบาย พฤติกรรมรูปแบบของ Viscoelastic โดยใช้ Spring-dashpot เข้ามาช่วยประกอบการอธิบาย จะได้เห็นข้อกำหนดและคุณสมบัติทางกายภาพของ Viscoelastic ในแต่ละส่วนของแบบจำลองนั้นเช่น คุณสมบัติของ Elastic จะแทนด้วยสปริงและคุณสมบัติของ Damping จะแทนด้วย Dashpot เป็นต้น โดยการต่อเชื่อมกันของตัวแทนทั้งสองอาจเป็นแบบขนาน (Parallel) หรือ แบบอนุกรม (Series) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในส่วนของ loss energy จะทราบได้จากความแตกต่างภายในของการเปลี่ยนรูปของ Mechanism แต่สิ่งสำคัญควรจำคือ Dashpot สามารถแทนเพียงคุณลักษณะของการสูญเสียพลังงานที่เกี่ยวกับ Viscosity อย่างเดียวเท่านั้น แต่ Damping จะสามารถแทนในส่วนของความเร็ว หรือ เวลาของการ Deformation โดยจะกล่าวถึง rate-dependent damping ส่วนในกรณี cyclic loading ค่าของ rate-dependency จะปรากฏให้เห็นในรูปของ Deformation ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งเป็นคุณลักษณะ frequency-dependent จึงสามารถสรุปได้ว่า Rate dependent เป็นรูปแบบทางเลือกหนึ่งสำหรับการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุ



(a) Kelvin model (b) Maxwell model

รูปที่ 2.7 แบบจำลอง Viscoelastic

2.3.5 แบบจำลองของเคลวิน (Kelvin Model)

เป็นรูปแบบจำลองพื้นฐานและใช้แพร่หลายมากที่สุด แบบจำลองของ Kelvin จะประกอบด้วย สปริงและ Dashpot ซึ่งจะต่อกันแบบขนานดังแสดงในรูป 2.7(a) จากรูป 2.7(a) จะเห็นได้ว่าในขณะที่ใส่ความเครียด (γ) จะก่อให้เกิดความเค้น (τ) โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเกิดที่สปริงมีค่าเท่ากับ τ_1 และจะเกิดที่ Dashpot เท่ากับ τ_2 ดังนั้นการแบ่งความเค้นออกเป็น 2 ส่วนนี้จะทำให้สอดคล้องกับกฎทั่วไปเป็นและไปตามสมการ 2.15 ค่าของความเค้นจะส่งผ่านสปริงมีค่าเท่ากับ $G\gamma$ และที่ Dashpot จะเท่ากับ $G'd\gamma/dt$ ให้ G เป็นค่าของ Spring constant และค่า G' เป็นค่าของ Dashpot constant ดังนั้นความเค้นทั้งหมดจะเท่ากับ $\tau = \tau_1+\tau_2$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tau = G\gamma + G'\frac{d\gamma}{dt} \qquad 2.22$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-strain) จากแบบจำลองของ kelvin สมการ 2.22 เชื่อว่าเป็นกรณีพิเศษของความสัมพันธ์แบบทั่วไปที่แสดงไว้ในสมการ 2.9 ดังนั้นสิ่งที่น่าสนใจคือค่า Elastic modulus (μ) และค่า Loss modulus (μ') อยู่ในเทอมของ G และ G' สำหรับจุดประสงค์สมการ 2.8 ค่าของความเค้นและความเครียดจะแสดงในเทอมของ complex variables มาเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความเค้นและความเครียดในสมการ 2.22 และผลจะเป็นได้ดังนี้

$$\tau_a e^{i\delta} = (G + i\omega G')\gamma_a \qquad 2.23$$

อ้างถึงสมการที่ 2.10 จะเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\mu + i\mu' = G + i\omega G' \qquad 2.24$$

เมื่อเปรียบเทียบในส่วนจริง (Real Part) และในส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) แยกออกเป็นส่วนๆจะมีค่าดังนี้

$$\mu = G, \quad \mu' = \omega G', \quad \eta = \tan\delta = \frac{G'\omega}{G} \qquad 2.25$$

แบบจำลองของ Kelvin ในขณะที่ Elastic modulus (μ) มีค่าของ Shear constant แต่ในส่วนของค่า Loss modulus (μ') จะเป็น a linear function of angular frequency ดังนั้นแนวโน้มของ Loss coefficient (η) ภายใต้ Cyclic loading จะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ของ Body

ตามแบบจำลองของ Kelvin ถ้าเข้าใจในทฤษฎีของ Viscoelastic อาจจะใช้เป็นตัวแทนของพฤติกรรมการครีพ (Creep) ของวัสดุตามเวลาโดย Load คงที่ ซึ่งแสดงในความสัมพันธ์ภายใต้เงื่อนไขของความเค้นคงที่ (Stress-controlled) สามารถดูได้จากสมการ 2.22 กับการคาดคะเนว่าเวลาภายใต้เงื่อนไขนี้ คือ $\tau = \tau_0$ เมื่อ t = 0 ได้สมการเป็นดังนี้

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G}\left(1 - e^{-t/\tilde{t}}\right) \qquad 2.26$$

โดยที่ $\tilde{t}$ = G'/G เรียกว่า retardation time ถ้า $\tilde{t}$ ที่ใส่เข้าไปเท่ากับ t ในสมการ 2.26 จะได้ $\gamma = 0.632\tau_0$ /G ดังนั้นค่าของ retardation time คือระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดความเครียดเท่ากับ 63.2 % ของค่าความเครียดทั้งหมด ภายใต้เงื่อนไขของความเค้นแบบเฉือนที่เหลืออยู่

2.3.6 แบบจำลองของแมกซ์เวล (Maxwell Model)

เป็นแบบจำลองที่ประกอบไปด้วยสปริงและ Dashpot จะต่อกันแบบอนุกรม (Series) ดังแสดงในรูป 2.7(b) ในแบบจำลองนี้จะประยุกต์ค่าความเค้น (τ) ซึ่งจะให้ค่าของความเครียด (γ) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกจะได้จาก Deformation ของ Spring มีค่าเท่ากับ γ_1 ส่วนที่สองมาจากการเปลี่ยนรูป ของ Dashpot เท่ากับ γ_2 โดยในแต่ละส่วนของความเครียดจะมีความ

สัมพันธ์กับค่าความเค้นดังนี้ $\tau = G\gamma_1$ และ $\tau = G'd\gamma_2/dt$ ดังนั้นแบบจำลองของแมกซ์เวล จะมีค่าของ ความเค้นกับความเครียด (Stress-strain) สัมพันธ์กันดังนี้

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$$
$$\frac{\tau}{G} + \frac{1}{G'}\frac{d\tau}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} \qquad 2.27$$

กรณีที่เหมือนกับความสัมพันธ์ข้างต้น ค่าของ Elastic modulus (μ) และ Loss modulus (μ') จะแทนด้วย τ และ γ ของสมการ 2.27 โดยการแทนที่ $\bar{\tau}$ และ $\bar{\gamma}$ ของสมการ 2.8 จะได้สมการใหม่เป็นดังนี้

$$\left(\frac{1}{G} + \frac{1}{i\omega G'}\right)\tau_a = e^{i\delta}\gamma_a \qquad 2.28$$

จากสมการ 2.10 สำหรับค่า μ และ μ' จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$\mu = \frac{\frac{1}{G}}{\left(\frac{1}{G}\right) + \left(\frac{1}{G'\omega}\right)}$$

$$\mu' = \frac{\frac{1}{G'\omega}}{\left(\frac{1}{G}\right) + \left(\frac{1}{G'\omega}\right)} \qquad 2.29$$

$$\eta = \tan\delta = \frac{G}{\omega G'}$$

จากสมการ 2.29 จะเห็นได้ว่าค่าของ Loss coefficient (η) จะแปรผกผันกับค่าความถี่เชิงมุม (Angular frequency) แบบจำลองของแมกซ์เวลจะเป็นตัวแทนของ relaxation behavior ของวัสดุ

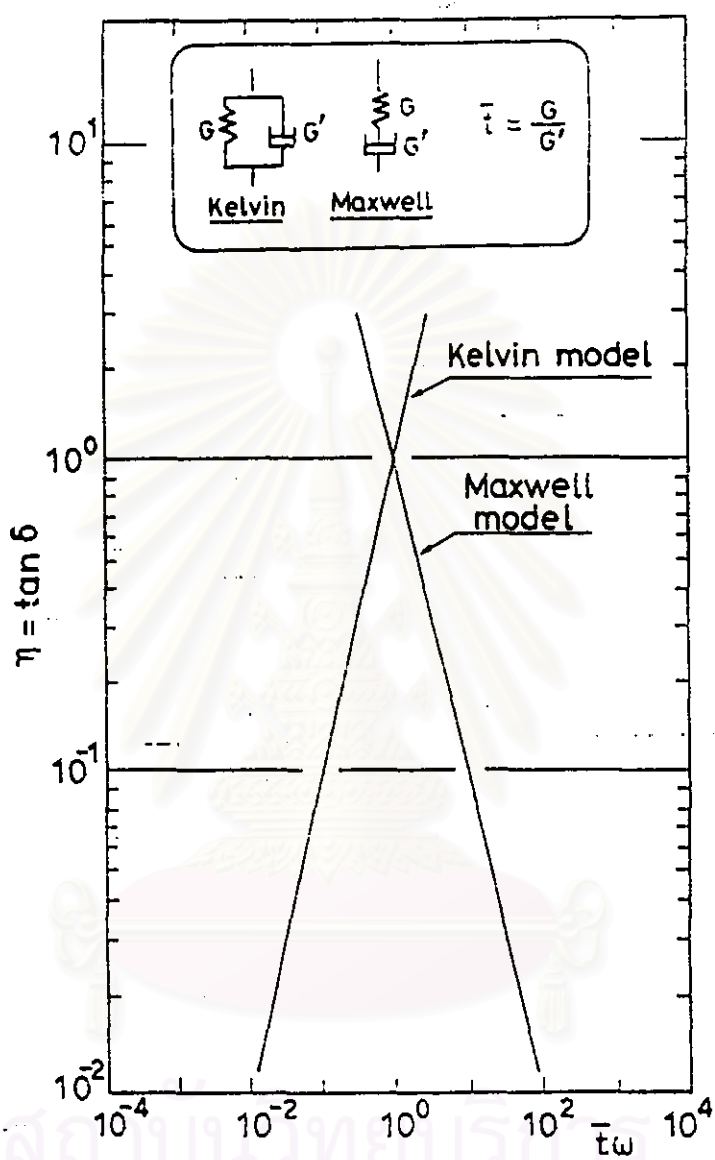
ภายใต้การให้ค่าของความเครียดที่มีขนาดคงที่ โดยใช้ สมการ 2.27 ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้น $\gamma = \gamma_o$ ที่ t = 0 สามารถเขียนอยู่ในรูปความเค้นได้ดังนี้

$$\tau = \gamma_o G e^{-t/\bar{t}} \qquad 2.30$$

โดยที่ $\bar{t} = G'/G$ เรียกว่า relaxation time เมื่อแทนค่า $\bar{t}$ = t ลงในสมการ 2.30 จะได้ $\tau = 0.368 G\gamma_0$ ดังนั้น relaxation time หมายถึง ระยะเวลาที่ต้องการใช้สำหรับ relax ที่จะก่อให้เกิดค่าความเค้นแบบเฉือน (Shear stress) ขั้นต้นเท่ากับ 63.2 % ภายใต้เงื่อนไขของความเครียดแบบเฉือน (Shear strain) ที่เหลืออยู่

ส่วนที่จะแสดงถึงต่อมา ค่าของ loss coefficient จะเท่ากับสองเท่าของค่า damping ratio เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดของการวิเคราะห์การตอบสนองของ Seismic ดังนั้นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการหาค่า nature of loss coefficient ตามนิยามของแบบจำลองของ Kelvin และ Maxwell สังเกตได้จาก frequency dependency และค่า loss coefficient (η) จากสมการ 2.25 และ 2.29 ซึ่งพล็อตกับค่า non-dimensional parameter $\omega \bar{t}$ ในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนของ Loss coefficient ในแบบจำลองของเคลวิน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันของแมกซ์เวลมีค่าลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของความถี่ของ cyclic loading

ในส่วนต่อมาจะแสดงวิธีการมากมาย สำหรับการหาค่า Damping ratio ในการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับการหาค่า Damping ซึ่งเป็นคุณสมบัติของดินแต่ในทางปฏิบัติจะพบว่า Damping ratio จะเป็นอิสระกับค่าความถี่ในช่วงปกติ โดยการพบแบบบังเอิญของการกระทำของแรงแผ่นดินไหว (Seismic loading) ดังนั้นการประยุกต์แบบจำลองของสปริงและ Dashpot จะเป็นปัญหาในทางปฏิบัติ ควรจะจำกัดเฉพาะในกรณีพิเศษ ซึ่งค่าความถี่ ของ loading จะแปรเปลี่ยนในช่วงแคบๆ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ Damping น้อยมากที่จะไปมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่



รูปที่ 2.8 Loss coefficient of two models as functions of frequency

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.7 Non-Viscous type Kelvin model

สิ่งที่พบ คือ ค่าของ frequency dependent nature ของค่า Loss coefficient ตามแบบจำลองของ Spring – dashpot มาจาก Viscous dashpot ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความเค้นและอัตราของเวลา (Time rate) ของความเครียดดังนั้นการกำจัดข้อบกพร่องเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของ Dashpot ที่เป็น rate independent จากการทบทวนทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์ การเปลี่ยนแปลงของ entropy จะแสดงให้เห็นว่า พลังงานถูกแพร่กระจายเสมอ เมื่อมีการจำกัดเทอมของ time rate ของการเปลี่ยนแปลงบนพื้นฐานทางฟิสิกส์ อย่างไรก็ตามยังมี rate independent เหลืออยู่ จึงมีแนวความคิดใหม่โดยการรวม rate-independent ของ Dashpot เข้าด้วยกันทำให้สามารถแก้ปัญหาของแบบจำลองไปได้มากสามารถสะท้อนกลับมาในความเป็นจริงของพฤติกรรมของดินในระดับความถูกต้องที่ดีมาก แบบจำลองที่ว่านั้นมีชื่อว่า non-viscous type kelvin เขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = (G + iG_0')\gamma \qquad 2.31$$

โดยที่ G'_0 เป็นค่าของ Dashpot constant แบบจำลองนี้จะประกอบด้วยสปริง และ rate-independent dashpot จะต่อกันแบบขนาน ดังแสดงในรูป 2.9 ความแตกต่างของเครื่องหมายของ Dashpot เป็นสิ่งสำคัญ สมการ 2.31 สามารถวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งความเค้นจะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกจะเกิดขึ้นพร้อมกับความเครียด เท่ากับ $\tau_1 = G\gamma$ และส่วนที่สองจะเกิดขึ้นมีเฟสต่างกัน 90̊ เท่ากับ $\tau_2 = G'_0\gamma$ ควรจะจำความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด โดยแบบจำลองจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจินภาพ (Imaginary) คือ $iG'_0\gamma$ จะไม่ถูกรวมเข้าไปในสมการเพื่อที่จะอธิบายส่วนจริงของโลกทางกายภาพ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน ส่วนของจินตภาพจะถูกรวมเข้าไปด้วย เพื่อเป็นตัวแทนของ phase loop และแดมพ์พิ่งซึ่งเป็นคุณสมบัติของดิน

ค่า Elastic modulus (μ) และ Loss modulus (μ') ที่สอดคล้องกับแบบจำลอง ที่สามารถนำสมการ 2.8 เข้าไปแทนสมการ 2.11 ที่เขียนเป็นสมการได้ใหม่ดังนี้

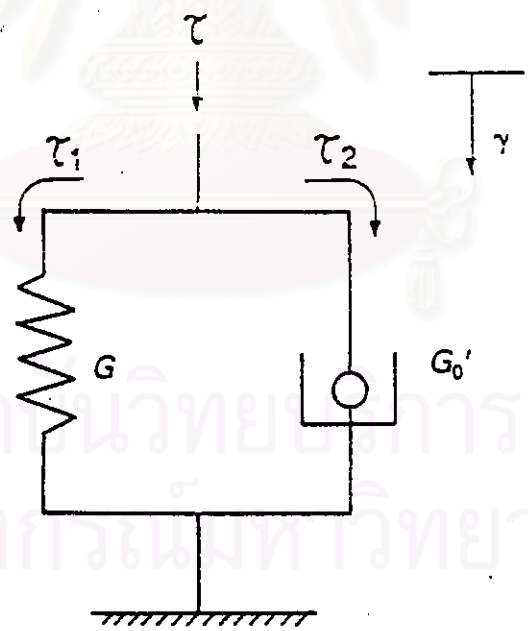
$$\tau_o e^{i\delta} = (G + iG_0')\gamma \qquad 2.32$$

จากสมการ 2.10 ค่าของ μ และ μ' สำหรับ non-viscous type kelvin model มีค่าดังนี้

$$\mu = G,\ \mu' = G_0'$$

และ
$$\eta = \tan\delta = \frac{G}{G_0'} \qquad 2.33$$

ค่าคงที่ของ moduli ทั้งหมดที่เป็น independent of frequency of cyclic loading



รูปที่ 2.9 แบบจำลอง Non-viscous type Kelvin

2.4 วิธีการหาคุณสมบัติของดินทางด้านพลศาสตร์

การหาคุณสมบัติของดินทางด้านพลศาสตร์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ

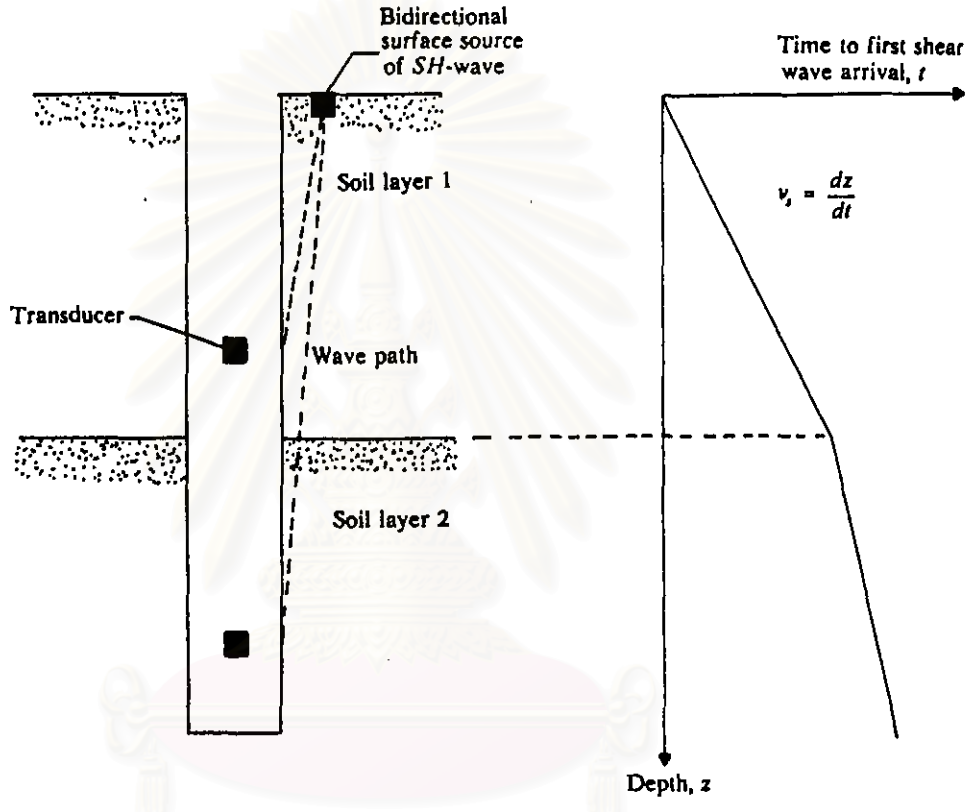
2.4.1 การวัดค่าความเร็วคลื่นแบบเฉือนในสนาม (measurement of in - situ shear wave velocity)

การวัดค่าความเร็วคลื่นในสนามนั้นเป็นการวัดเวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบเฉือน (Shear wave) และ body wave ระหว่างระยะทางที่ทราบไว้แล้วคือรู้ระยะทางระหว่างตัวให้กำเนิดคลื่นกับตัวรับคลื่น เพราะฉะนั้นสามารถหาความเร็วของการแผ่กระจายคลื่น (Propagation) ได้ และความเร็วของคลื่นถูกแปลงให้มาเป็นค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Shear modulus) และค่าโมดูลัสของยัง (Young ' s modulus) แต่อย่างไรก็ตาม การหาค่าโมดูลัสแบบนี้ไม่สามรถทราบค่าของระดับความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นได้ เลยทำให้มีความเห็นแย้งขึ้นมาว่าการกระตุ้นที่ทำให้เกิดคลื่นนั้นเป็นการรบกวนดินหรือไม่ ในการกระตุ้นให้กำเนิดคลื่นจึงจำเป็นต้องกระทำให้เกิดการรบกวนน้อยที่สุด เพื่อให้แน่ใจว่าพฤติกรรมของดินอยู่ในช่วง Elastic ดังนั้นการคำนวณหาค่า Stiffness ควรจะเป็นค่าเริ่มต้นของ elastic stiffness การทดสอบแบบนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด

- Uphole and Downhole Method

Downhole method แหล่งกำเนิดคลื่นจะอยู่ที่ผิวดินแล้วให้ stress wave วิ่งผ่านชั้นดิน โดยมี geophone เป็นตัวรับคลื่นโดยอยู่ในตำแหน่งความลึกที่ได้กำหนดความลึกของหลุมไว้ก่อน วิธีการนี้สามารถค้นคว้าได้จาก Hight et al (1997), Stokoe et al (1995), Richart (1997), Abbiss (1981 and 1986), Kudo et al (1995), Larkin and Taylor (1979) ข้อบกพร่องอย่างหนึ่งของวิธี Downhole ไม่สามารถกำหนด polarization plane ของ shear wave ที่หลากหลายได้เป็นผลกระทบเนื่องมาจาก Stress anisotropy ได้สังเกตในการทดสอบ Downhole ในพวกทรายแป้ง

ส่วนวิธี Uphole ก็ได้ใช้หลักการเดียวกันกับ Downhole ยกเว้นตัวรับคลื่นจะนำมาวางที่ผิวดิน และในขณะเดียวกันตัวกำเนิดคลื่นลงไปวางไว้ในหลุม การทดสอบวิธี Downhole จะแสดงดังในรูปที่ 2.10

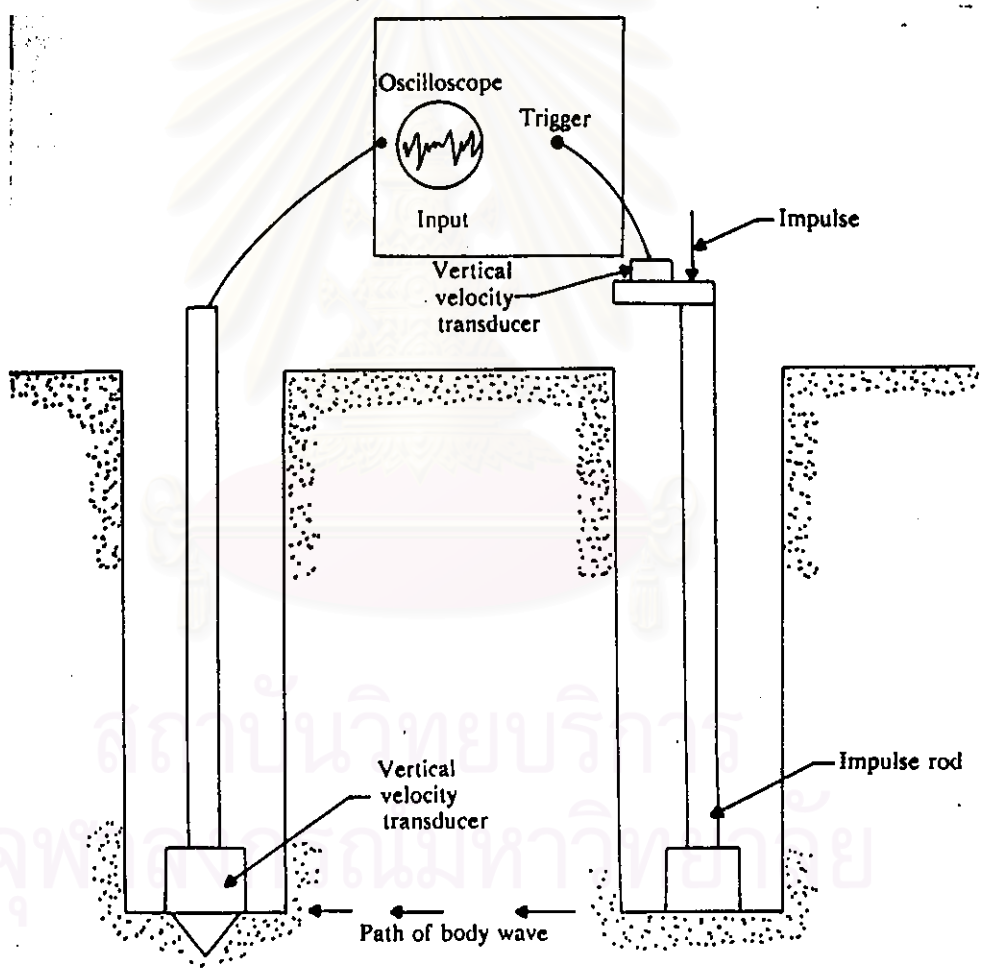


รูปที่ 2.10 การทดสอบวิธี Down-hole

- Cross – hole Method

Stokoe และ Wood (1972) ได้ประยุกต์วิธีการ Cross – hole โดยการวัด propagation velocity stress wave ในดินได้ โดยทำให้กำเนิด stress wave ในหลุมเจาะหนึ่งสามารถตรวจจับได้อีกหลุมเจาะหนึ่งที่ระดับเดียวกัน เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ถึงครั้งแรกเป็นของคลื่นแบบเฉือน (Shear

wave) สามารถหาความเร็วของคลื่นแบบเฉือน (Shear wave) ได้เพราะรู้ระยะห่างระหว่างหลุมของตัวกำเนิดคลื่นและหลุมของตัวรับ ข้อดีของวิธี Cross-hole คือ stress wave มี polarized plane ที่แตกต่างกัน สามารถที่จะให้ผลของ stress anisotropy ได้ การวัดความเร็วของคลื่นแบบเฉือน สามารถหาศึกษาได้จาก Stokoe et al (1995) Nishio and Katsura (1995), Salgado et al (1997) ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า large strain Cross-hole test ซึ่งสามารถหาโมดูลัสแบบเฉือนที่ระดับของ strain ต่างๆ ซึ่งต้องมีความเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของความเร็วของคลื่นแบบเฉือน ค่าของ strain ขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาค และอัตราเร็วเฉลี่ยของคลื่นแบบเฉือน การทดสอบวิธี Cross-hole จะแสดงในรูปที่ 2.11



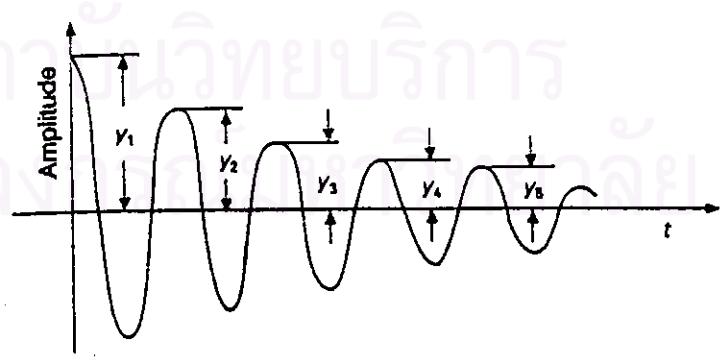
รูปที่ 2.11 การทดสอบวิธี Cross-hole

2.4.2 การหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในห้องปฏิบัติ (Measurement of dynamic properties in laboratory)

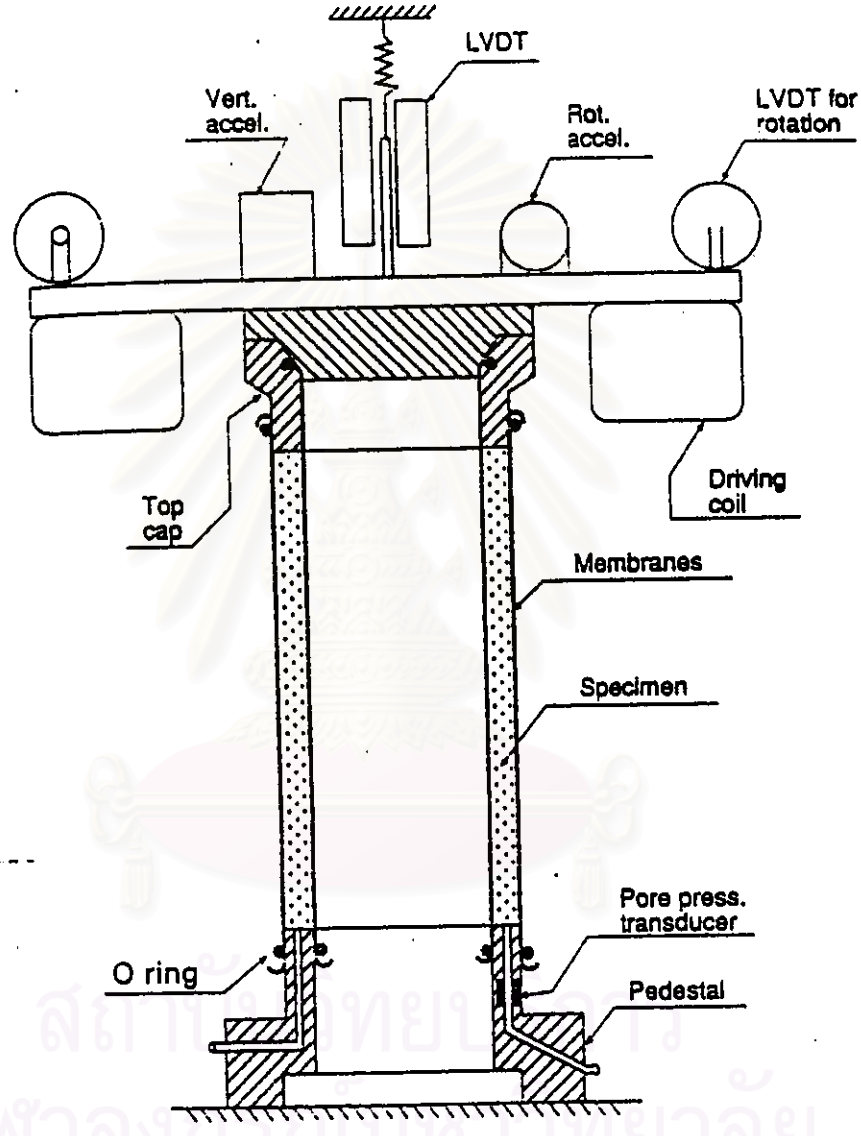
การหาค่าคุณสมบัติของดินทางด้านพลศาสตร์สำหรับในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

2.4.2.1 Measurement of dynamic properties using wave propagation

เครื่องมือที่นิยมมากที่ใช้ในการวัดค่าโมดูลัสแบบเฉือน (Shear modulus) และ Damping ratio ของดินนั้น ได้แก่ Resonant–Column Test (Hardin and Richart 1963,Hardin and Drnevich 1972, Iwasaki et al 1978, Tatsuoka et al 1979, Duffy et al 1994) ข้อบกพร่องอย่างหนึ่งของ Resonant Column Apparatus คือไม่สามารถที่จะทดสอบที่ large strain ส่วน The cyclic torsional shear test ปกติจะรวมผลการทดสอบกับ Resonant Column Apparatus เพราะเป็นการทดสอบตัวอย่างดินที่ระดับ large strain (Iwasaki et al 1978, Lo-presti et al1979) ค่า Damping Ratio ของแท่งตัวอย่างดินถูกวัดด้วย Resonant Column Apparatus ได้จากคำนวณของลดลงแบบ Logarithmic ของการสลายของ Amplitude ของคลื่นของการสั่นหลังจากได้มีการปิดสวิทช์ที่ทำให้เกิดการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และเครื่องมือ Resonant–Column Test จะแสดงในรูปที่ 2.13 ส่วนของ The cyclic torsional shear test ค่าของ Damping ratio ได้จากการคำนวณพื้นที่ของ hysteresis loop (Tatsuoka et al 1979)

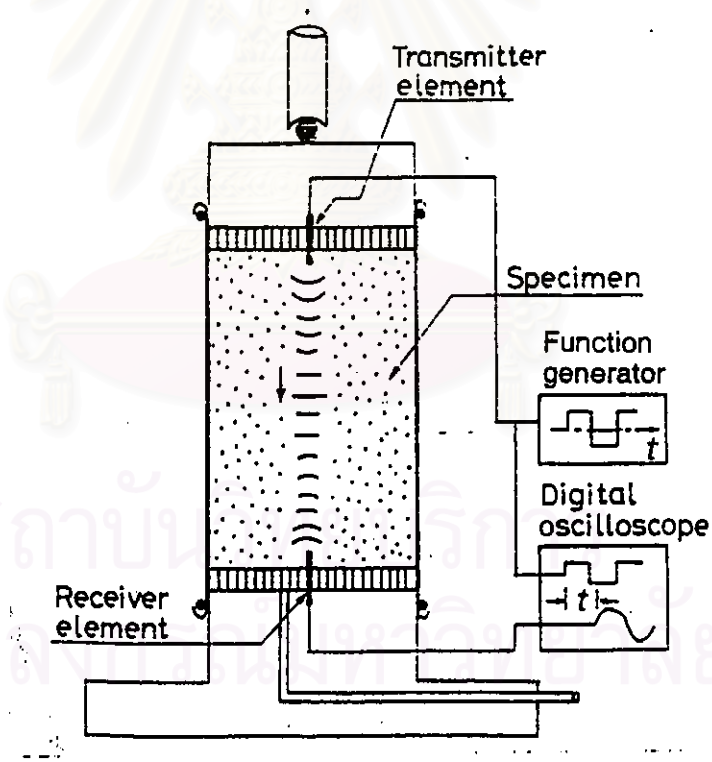


รูปที่ 2.12 วิธีการหา Damping ratio จากเครื่องทดสอบ Resonant–Column



รูปที่ 2.13 Resonant column test apparatus (Drnevich, 1972)

การพัฒนาและความก้าวหน้าของ stress wave generator และ pick up sensor สามารถนำไปติดตั้งที่บนหัวและฐานที่วางแท่งตัวอย่างดินของเครื่องทดสอบแบบดั้งเดิม เช่น Triaxial and plane strain apparatus ศึกษาความเร็วของการแผ่กระจายคลื่น (Wave propagation) ในแท่งตัวอย่างดินที่กำลังทดสอบ Stokoe et al (1985) ได้ทำการวัดความเร็วคลื่นในเครื่อง Triaxial จริง โดยการสำรวจผลกระทบของ stress anisotropy ต่อโมดูลัสแบบเฉือน Tanizawa et al (1994) ได้ใช้วิธีที่เรียกว่า Bender Element ทำการวัดความเร็วของคลื่นแบบเฉือนอย่างต่อเนื่องระหว่างการทดสอบ cyclically shearing ของแท่งตัวอย่างสำรวจผลกระทบของความเค้นแบบเฉือน (Shear stress) ที่มีผลต่อโมดูลัสแบบเฉือนของทราย เครื่องการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 นอกจากนี้ยังสามารถหาวิธีการประยุกต์แบบนี้ได้จาก Shahariar et al (1957), Shibuya et al (1997), Hight et al (1997)



รูปที่ 2.14 Use of bender elements in the triaxial test apparatus

2.4.2.2 Measurement of the stiffness and damping using conventional equipment

เครื่องมือทดสอบแบบดั้งเดิมเช่น Torsional shear, Triaxial and plane strain test ถูกนำมาปรับปรุงและมีการติดตั้ง transducer เพื่อให้ค่าความแม่นยำในการวัดสูงขึ้นซึ่งสามารถวัด stress–strain ที่มีค่าน้อยมากๆได้ และได้มีการปรับปรุงเกี่ยวกับเทคนิคการทดสอบแบบ static เพื่อหาค่า shear modulus ให้กลายเป็นการทดสอบ dynamic เพื่อหาค่า shear modulus ศึกษาได้จากบทความที่ตีพิมพ์จำนวนมากมายตั้งแต่ปี ค.ศ.1992 เป็นต้นมา Teachavorasinsakun et al (1992),Tatsuoka and Shibuya (1991),Jardin et al (1984) ,Hight et al (1997),Bate (1989) ,Lo – presi et al (1993) ผลที่ได้จากค้นพบเครื่องมือ dynamic testing เครื่องมือนี้สามารถจะหา post cyclic behavior ของดินได้ เพื่อหาค่าของ strength และค่า stiffness ของตัวอย่างดิน ได้มีงานค้นคว้าของ Yasuhara et al (1997) และของ Yamazaki and Zen (1991) , Yasuhara et al (1992)

2.5 การคำนวณหาโดยใช้สูตรเอ็มไพริกัล (Empirical)

สูตรเอ็มไพริกัล (Empirical) ใช้สำหรับคำนวณหาโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus) มีอยู่มากมาย แต่ที่นิยมใช้แพร่หลาย เช่น Hardin and Black 1968 และต่อมาได้มีการปรับปรุงเป็น Hardin and Black 1969 ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Maximum shear modulus กับ Effective confining stress, Void ratio และ Overconsolidated ratio ได้จากการทดสอบดินเหนียว ด้วยเครื่องมือทดสอบ Resonant-column test

สมการ Hardin and Black (1968)

$$G_0 = 3270\frac{(2.97-e)^2}{(1+e)}(\sigma_0')^{0.50} \qquad 2.34$$

G_0 = Initial shear modulus (kPa)

σ_0' = Effective confining pressure (kPa)

e = void ratio

ปรับปรุงสมการ 2.34 ได้เป็นสมการใหม่ Hardin and Black (1969)

$$G_{max} = 3.23\frac{(2.973-e)^2}{(1+e)}(\sigma_m')^{0.5}OCR^k \qquad 3.35$$

G_{max}= Maximum shear modulus (MPa)

σ_m' = mean effective consolidation stress (kPa)

$$= \frac{(\sigma_v'+2\sigma_h')}{3}$$

σ_v' = vertical effective consolidation stress (kPa)

σ_h' = horizontal effective consolidation stress (kPa)

e = void ratio

OCR = Overconsolidated Ratio

k = exponent of OCR that depend on plasticity index

นอกจากนี้ยังมีสูตรเอ็มไพริกัลของ Marcuson and Wahls 1972 ซึ่งได้ทำการทดสอบเหมือนกับ Hardin and Black

$$G_0 = 445\frac{(4.4-e)^2}{(1+e)}(\sigma_0')^{0..50} \qquad 2.36$$

G_0 = Initial shear modulus (kPa)

σ_0' = Effective confining pressure (kPa)

e = void ratio

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย