รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ธีรินทร์ อมรวิทยารักษ์. ความเร็วของคลื่นแรงเฉือนในดินเหนียวโดยเบนเดอร์อิลีเมนต์ระหว่างการทดสอบแบบอัดสามแกน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2545.

สถาพร คูวิจิตรจารุ. การทดลองปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: รุ่งแสงทิพย์การพิมพ์, 2541.

ภาษาอังกฤษ

Abbiss, C. P. Shear Wave Measurement of Elasticity on The Ground. Geotechnique 31 (1981):91-104.

Das, B. M. Principle of Soil Dynamics. Boston: PWS - KENT Publishing Company, 1993.

Drnevich , V. P., Hardin, B. O., and Shippy, D. J. Modulus and Damping of Soils by The Resonant Column Method. Dynamic Geotechnical Testing (1977):91-125.

Dyvik , R. & Madshus, C. Laboratory Measurements of G_{max} Using Bender Elements. Detroit: Proceeding of American Society Civil Engineering Conservation,1985.

Hardin, B. O. & Black, W. L. Vibration Modulus of Normally Consolidation Clay. Journal of The SMF Div. Proc.,ASCE, 95(1969):1531-1537.

Hardin, B. O. & Drnevich , V. P. Shear Modulus and Damping of Soils; Measurements and Parameters Effects. Journal of Soil Mechanic and Foundation Division ASCE 98 (1972):603-624.

Hardin, B. O. & Richart, F. E.,Jr. Elastic Wave Velocity in Granular Soils. Journal of Soil Mechanic. ASCE 89(1963):33-65.

Hryciw R. D. & Thomann T. G. Stress History Based Model for G of Cohesionless Soils. Geotechnical Testing Journal,19,7(1993):1073-1093.

Ishihara K. Soil Behavior on Earthquake Geotechnics. Oxford: Clarendon Press.

Jamiolkowski M., Lancellotta, R. & Lo Presti, D. C. F. Prefailure Deformation of Geomaterials. Remarks on The Stiffness at Small Strain of Six Italian Clays.(1995):817-836

Jovicic, V.,Coop, M. R. and Simic, M. Objective Criteria for Determining G_{max} from Bender Element. Geotechnique 46(1996): 357 – 362.

Lawrence, Jr., F. V. Ultrasonic Shear Wave Velocity in Sand and Clay." Research report r65-05. Massachusetts Institute of Technology,1965.

Lohani, T. N. Pseudo-Elastic Shear Modulus of Bangkok Clay Using Bender Elements. Master's thesis, Faculty of engineering, Asian Institute of Technology,1997.

Mukabi, J. N., Tatsuoka, F. & Hirose, K. Effect of Strain Rate on Small Strain of Kaolin in Consolidated Undrain Triaxial test. 26th Proceeding, Japan National Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering. Nagono, Japan,1992:659-662.

Prakash, Shamsher. Soil Dynamic. New York: McGraw – Hill Book , 1981.

Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr. and Woods, R. D. Vibration s of Soils and Foundations. Englewood Cliffs,NJ:,Prentice-Hall,1970.

Roester, S. K. Anisotropic Shear Modulus due to Stress-Anisotropy. Journal of Geotech. Engineering Division. ASCE 105 (1979):871-880.

Sahabdeen, M. M. Stress-Strain Characteristics of Bangkok Subsoils at Low Strain Levels Using Bender Elements. Master's thesis, Faculty of engineering, Asian Institute of Technology,1996.

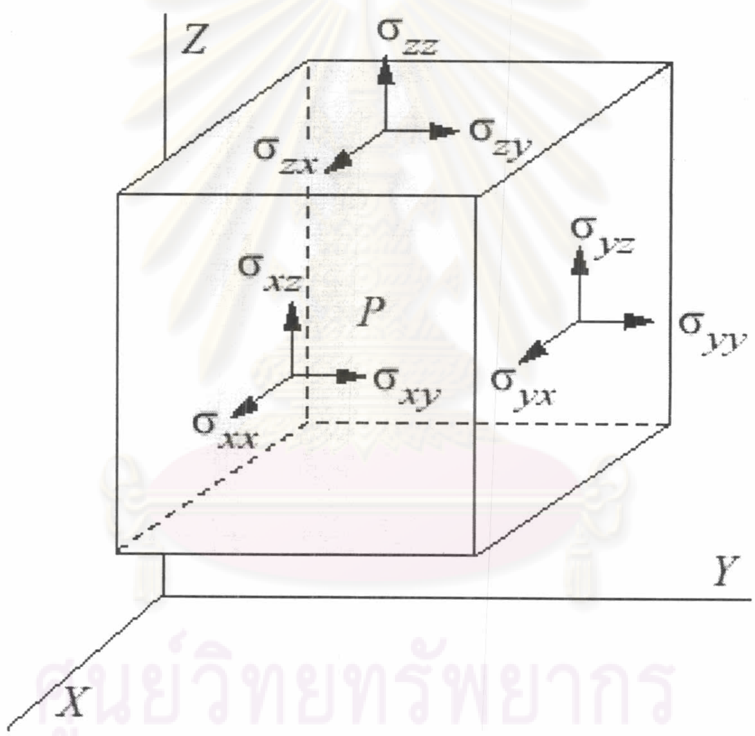
Shibuya S., Mitachi T., Fukuda F. & Degoshi T. Strain Rate Effects on Shear Modulus and Damping of NC Clay. Geotechnique 3.(1995):365-375.

Thomas, G. and Ronan, D. Laboratory Measurement of Small Strain Modulus under k_0 Conditions.Geotechnique Testing Journal 13,2(1990):97 –105.

ภาคผนวก

ก. WAVE IN ELASTIC MEDIUM

1.0) Stress & Strain



รูปที่ 1. Notations for normal and shear stress

รูปที่ 1 แสดงถึงชิ้นส่วนใน Elastic medium โดยมีขนาดในแต่ละด้าน dx , dy และ dz และมี normal stress และ shear stress กระทำบนระนาบตั้งฉากกับระนาบ x, y และ z

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \qquad \text{ก.1}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \qquad \text{ก.2}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \qquad \text{ก.3}$$

Strain

พิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทาง x, y และ z เป็นค่า u, v และ w โดยสมการของ Strain และ การเคลื่อนตัวแบบหมุนของวัสดุที่เป็น elastic และ isotropic material ในรูปของการเคลื่อนตัวในทิศทางต่างๆ ดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \text{ก.4}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \text{ก.5}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \qquad \text{ก.6}$$

$$\gamma'_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \qquad \text{ก.7}$$

$$\gamma'_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \qquad \text{ก.8}$$

$$\gamma'_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \qquad \text{ก.9}$$

$$\overline{\omega}_x = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right) \qquad \text{ก.10}$$

$$\overline{\omega}_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \qquad ก.11$$

$$\overline{\omega}_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \qquad ก.12$$

โดยที่ ε_x , ε_y และ ε_z Normal strain ในทิศทาง x, y และ z

γ'_{xy} Shear Stress ระหว่างระนาบ xz และ yz

γ'_{yz} Shear Stress ระหว่างระนาบ yx และ zx

γ'_{zx} Shear Stress ระหว่างระนาบ zy และ xy

$\overline{\omega}_x$, $\overline{\omega}_y$ และ $\overline{\omega}_y$ พจน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุนตามแกน x, y และ z

Hooke's Law

สำหรับวัสดุแบบ Elastic Isotropic Material สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ normal Stress และ Normal Strain ได้ดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)\right] \qquad ก.13$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)\right] \qquad ก.14$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)\right] \qquad ก.15$$

โดยที่ ε_x , ε_y และ ε_z Normal strain ในทิศทาง x, y และ z

E Young's Modulus

μ Poisson 's ratio

ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress และ Shear Strain สามารถเขียนได้ว่า

$$\tau_{xy} = G\gamma'_{xy} \qquad ก.16$$

$$\tau_{yz} = G\gamma'_{yz} \qquad ก.17$$

$$\tau_{zx} = G\gamma'_{zx}$$ ก.18

เมื่อ Shear Modulus

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$ ก.19

เมื่อพิจารณาสมการที่ a.13-a.15 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Normal Stress ในรูปของNormal Strain ได้ว่า

$$\sigma_x = \lambda\bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_x$$ ก.20

$$\sigma_y = \lambda\bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_y$$ ก.21

$$\sigma_z = \lambda\bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_z$$ ก.22

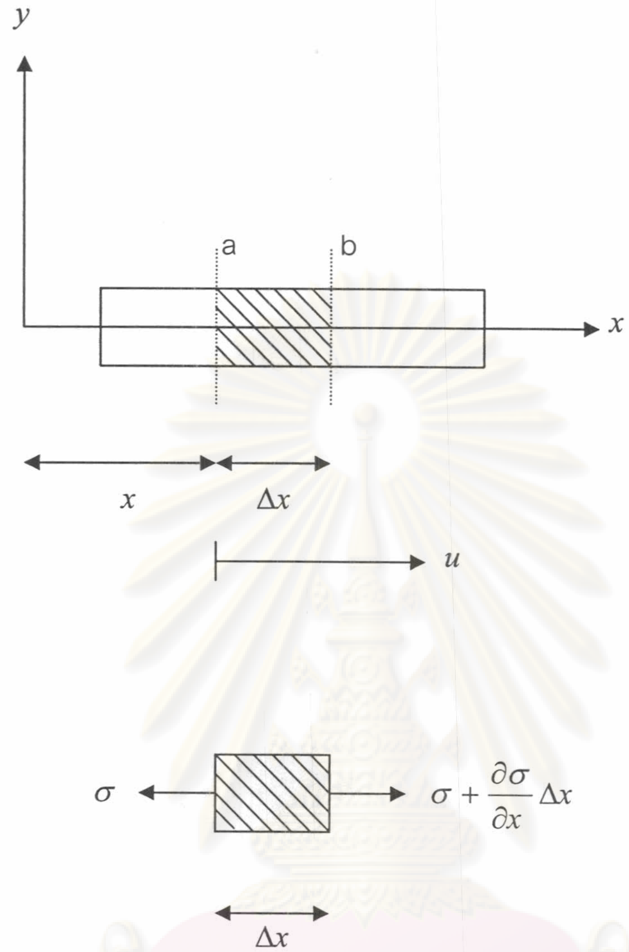
เมื่อค่า

Lame's Constant $$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$ ก.23

Volume Metric Strain $$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$ ก.24

Poisson's Ratio $$\mu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$$ ก.25

Longitudinal Elastic Wave in a Bar



Longitudinal Elastic Wave in a Bar

จากรูป แสดงหน้าตัดของ rod ซึ่งมีหน้าตัดเท่ากับ A และ ให้ค่า Young's Modulus และ Unit weight ของวัสดุมีค่าเป็น E และ γ และให้ Normal Stress หน้าตัด a-a เพิ่มขึ้นเท่ากับ σ และที่หน้าตัด b-b Normal Stress เพิ่มขึ้นเป็น $\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x}\Delta x$ ใช้กฎข้อ 2^{nd} Newton's Law ได้ว่า

$$\sum force = (mass)(acceleration)$$

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x}\Delta x\right) = \left(\frac{A \Delta x \gamma}{g}\right)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right) \qquad \text{ก.26}$$

โดยที่ $A\Delta\gamma$ = น้ำหนักของ rod ที่ความยาว Δx

g = ความเร่งโลก

u = การเคลื่อนที่ในแนวแกน x

t = ระยะเวลา

จากสมการที่ a.26 เมื่อลดรูปจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} = \rho\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right) \qquad \text{ก.27}$$

ซึ่งอยู่ในสมมุติฐานที่ว่า

1.0) Stress ที่กระทำมีค่าเท่ากันตลอดหน้าตัด

2.0) หน้าตัดมีค่าคงที่ตลอดการเลื่อนที่

และ $$\sigma = E\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) \qquad \text{ก.28}$$

แทนค่าสมการ a.28 ลงใน a.27 จะได้ว่า

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

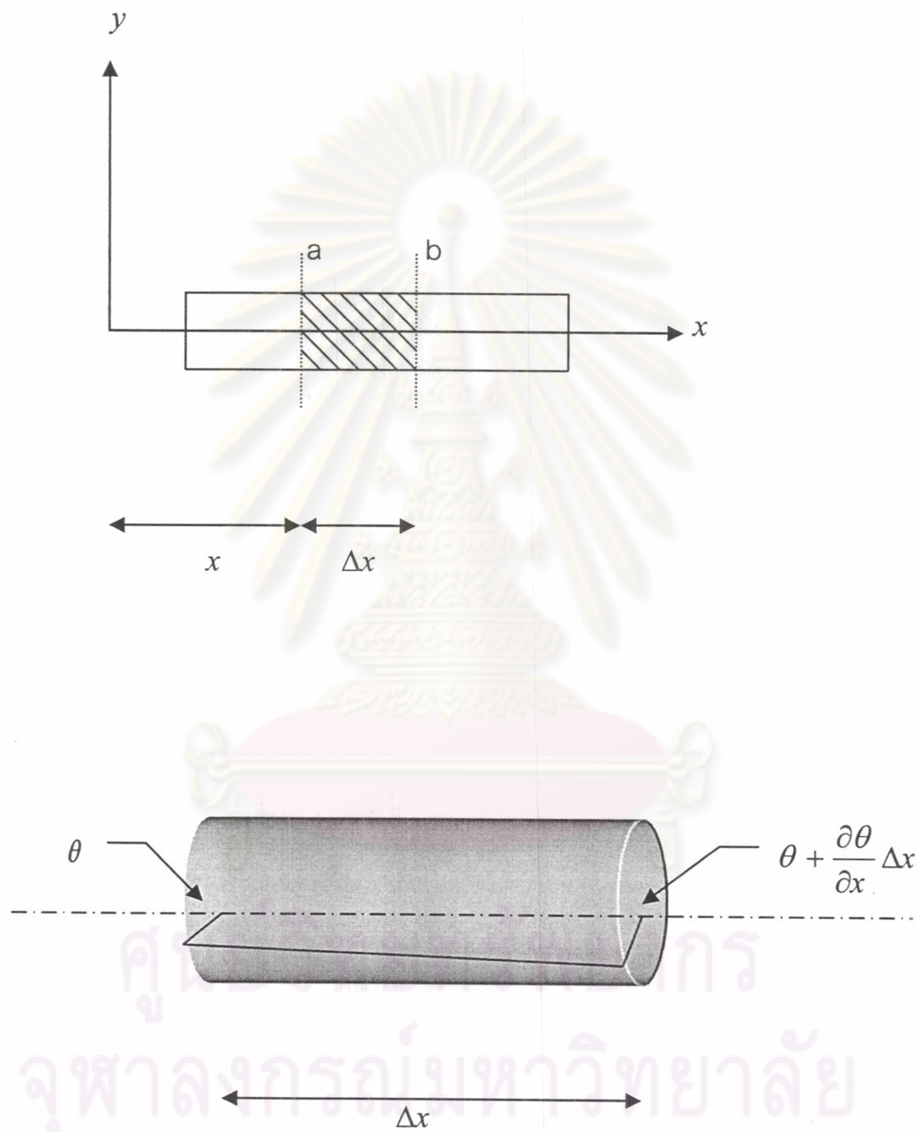
หรือ $$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right) = \left(v_c^2\right)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right) \qquad \text{ก.29}$$

ดังนั้นกำหนดค่า $v_c^2 = \dfrac{E}{\rho}$ (Longitudinal velocity wave)

จะได้ความเร็ว $$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad \text{ก.30}$$

Torsion Wave in Bar

จากรูปแสดง rod ที่ถูกกระทำด้วย Torque(T) ที่ระยะ x และทีการบิดตัวเท่ากับ θ และที่ระยะ $x + \Delta x$ กระทำด้วย $T + \frac{\partial T}{\partial x} dx$ และ ใช้กฎข้อ 2nd Newton's Law ได้ว่า



Torsion wave in a Bar

จากรูปได้รูปสมการว่า

$$-T + \left(T + \frac{\partial T}{\partial x}\Delta x\right) = (\rho J)(\Delta x)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right)$$ ก.36

เมื่อ $T = JG\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$, J = Polar Moment of Inertia ก.37

แทนค่าในสมการ a.37 ลงใน a.36 จะได้

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \left(\frac{G}{\rho}\right)\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right)$$ ก.38

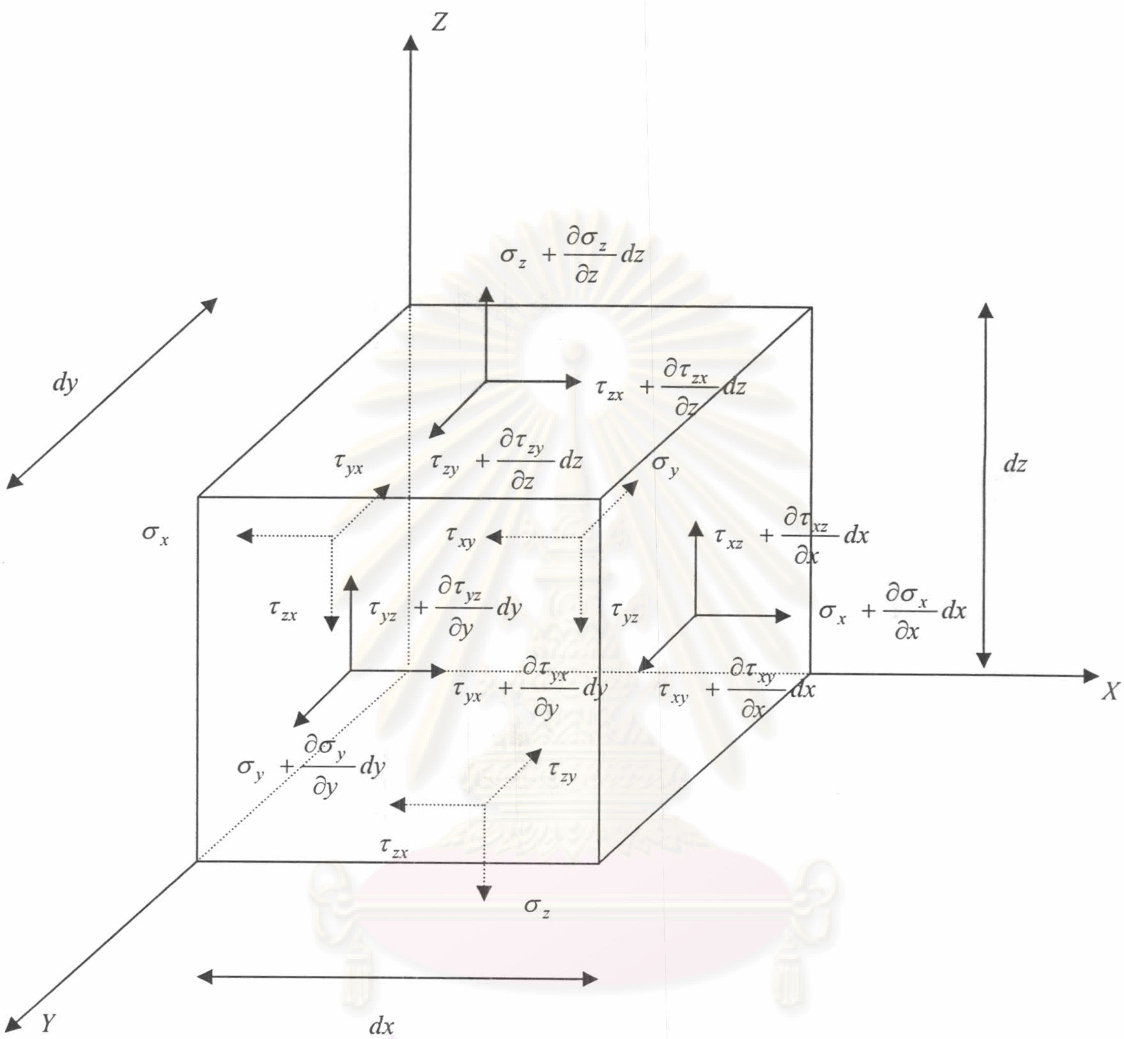
หรือ

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \left(v_s^2\right)\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right)$$ ก.39

กำหนดค่า $v_s^2 = \frac{G}{\rho}$ (Shear Wave)

จะได้ความเร็ว $v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ ก.40

STRESS WAVES IN AN INFINITE ELASTIC MEDIUM



รูปที่2. Derivation of the Equation of Motion in an Elastic Medium

1.0) Equation of Motion in an Elastic Medium

จากรูปที่แสดงไว้ข้างต้น แสดงถึงชิ้นส่วนใน Elastic medium โดยมีขนาดในแต่ละด้าน dx , dy และ dz และมี normal stress และ shear stress กระทำบนระนาบตั้งฉากกับระนาบ x, y และ z ในรูปของสมการ differential ของการเคลื่อนที่

พิจารณาในทิศทาง x

$$\left[\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx\right) - \sigma_x\right](dy)(dz) + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz\right) - \tau_{zx}\right](dx)(dy)$$

$$\left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy\right) - \tau_{yx}\right](dx)(dz) = (\rho)(dx)(dy)(dz)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right)$$

เมื่อทำการหาแรงลัพธ์ในทิศทาง x จะเหลือรูปสมการที่ว่า

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \qquad \text{ก.62}$$

พิจารณาในทิศทาง y

$$\left[\left(\sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dy\right) - \sigma_y\right](dx)(dz) + \left[\left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx\right) - \tau_{xy}\right](dy)(dz)$$

$$\left[\left(\tau_{zy} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz\right) - \tau_{zy}\right](dx)(dy) = (\rho)(dx)(dy)(dz)\left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}\right)$$

เมื่อทำการหาแรงลัพธ์ในทิศทาง y จะเหลือรูปสมการที่ว่า

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \qquad \text{ก.63}$$

พิจารณาในทิศทาง z

$$\left[\left(\sigma_z + \frac{\partial\sigma_z}{\partial z}dz\right) - \sigma_z\right](dx)(dy) + \left[\left(\tau_{xz} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}dx\right) - \tau_{xz}\right](dy)(dz)$$

$$\left[\left(\tau_{yz} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}dy\right) - \tau_{yz}\right](dx)(dz) = (\rho)(dx)(dy)(dz)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right)$$

เมื่อทำการหาแรงลัพธ์ในทิศทาง z จะเหลือรูปสมการที่ว่า

$$\frac{\partial\sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \qquad \text{ก.64}$$

$\rho =$ ความหนาแน่น

$u, v, w =$ การเคลื่อนที่ในแนวทิศทาง x, y, z

2.0) Equation for Stress Waves

A. Compression Wave

จากสมการที่ a.62-a.64 แสดงความสัมพันธ์ของสมการการเคลื่อนที่ในรูปของ Stress โดยเริ่มพิจารณาจากสมการ a.62 และมีค่าของ $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}$

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z}$$

แทนค่า (a.16),(a.18) และ (a.20) จะได้ว่า

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial(\lambda\bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_x)}{\partial x} + \frac{\partial(G\gamma'_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(G\gamma'_{xz})}{\partial z}$$

แทนค่า (a.7) และ (a.9) ในรูปสมการข้างต้น จะได้ว่า

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial(\lambda \bar{\varepsilon} + 2G\varepsilon_x)}{\partial x} + G\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) + G\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)$$

หรือ

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + G\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad \text{ก.65}$$

แต่

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} = \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} \qquad \text{ก.66}$$

ดังนั้น

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G)\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + G\nabla^2 u \qquad \text{ก.67}$$

เมื่อ

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad \text{ก.68}$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาในอีก 2 ทิศทางคือ y , z จะได้ว่า

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G)\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} + G\nabla^2 v \qquad \text{ก.69}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + G)\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + G\nabla^2 w \qquad \text{ก.70}$$

ทำการ Differentiate ทั้ง 3 สมการคือ a.67,a.69 และ a.70 แล้วนำมารวมกันจะได้ว่า

$$\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=(\lambda+G)\left(\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial z^2}\right)+G\nabla^2\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)$$

หรือ

$$\rho\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial t^2}=(\lambda+G)\left(\nabla^2\bar{\varepsilon}\right)+G\left(\nabla^2\bar{\varepsilon}\right)=(\lambda+2G)\nabla^2\bar{\varepsilon} \qquad \text{ก.71}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial t^2}=\left(\frac{\lambda+2G}{\rho}\right)\left(\nabla^2\bar{\varepsilon}\right)=\left(v_p^2\right)\left(\nabla^2\bar{\varepsilon}\right) \qquad \text{ก.72}$$

พิจารณาค่า v_p

$$v_p=\sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} \qquad \text{ก.73}$$

B. Distortional Waves or Shear Wave

ทำการ Differentiate สมการที่ (3.69)และ(3.70) ในทิศทาง z , y

$$\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)=(\lambda+G)\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial y\partial z}+G\nabla^2\frac{\partial v}{\partial z} \qquad \text{ก.74}$$

และ

$$\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)=(\lambda+G)\frac{\partial^2\bar{\varepsilon}}{\partial y\partial z}+G\nabla^2\frac{\partial w}{\partial y} \qquad \text{ก.75}$$

นำสมการที่ (a.75)-(a.74) จะได้ว่า

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}\right)=G\nabla^2\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

อย่างไรก็ตาม จากสมการ(a.10) $\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}=2\overline{\omega}_x$ จะได้ว่า

$$\rho \frac{\partial^2 \overline{\omega}_x}{\partial t^2}=G\nabla^2\overline{\omega}_x \qquad \text{ก.76}$$

หรือ

$$\frac{\partial^2 \overline{\omega}_x}{\partial t^2}=\left(\frac{G}{\rho}\right)\nabla^2\overline{\omega}_x=\left(v_s^2\right)\left(\nabla^2\overline{\omega}_x\right) \qquad \text{ก.77}$$

พิจารณา $v_s^2=\frac{G}{\rho}$ (Shear Wave)

$$v_s=\sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

เมื่อพิจารณาอีก 2 ทิศทางคือ y , z
จะได้ว่า

$$\rho \frac{\partial^2 \overline{\omega}_y}{\partial t^2}=\left(v_s^2\right)\nabla^2\overline{\omega}_y \qquad \text{ก.78}$$

$$\rho \frac{\partial^2 \overline{\omega}_z}{\partial t^2}=\left(v_s^2\right)\nabla^2\overline{\omega}_z \qquad \text{ก.79}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ณรงค์ศักดิ์ บุญยศ เกิดวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2544