

พลศาสตร์โครงสร้างเบื้องต้นสำหรับวิศวกรรมแผ่นดินไหว

BASIC STRUCTURAL DYNAMICS FOR EARTHQUAKE ENGINEERING

นคร ภู่วโรดม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



พลศาสตร์โครงสร้าง (Structural Dynamics)



วัตถุประสงค์

ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงพลวัต (Dynamic force) และวิเคราะห์ผลการตอบสนอง (Response) สำหรับปัญหาแบบต่าง ๆ เพื่อที่จะสามารถตรวจสอบความเหมาะสมของโครงสร้าง ทั้งทางด้านความปลอดภัย (Safety) และความเหมาะสมที่จะใช้งาน (Serviceability)



ปัญหาแผ่นดินไหว



พลศาสตร์โครงสร้างเบื้องต้นสำหรับวิศวกรรมแผ่นดินไหว



Faculty of Engineering
Thammasat University

เนื้อหาของการนำเสนอ

- พลศาสตร์โครงสร้างเบื้องต้น
 - ระบบโครงสร้างแบบง่าย สมการของการเคลื่อนที่ การสั่นแบบอิสระ การสั่นเนื่องจากแรงภายนอกแบบฮาร์โมนิค ระบบที่มีระดับชั้นความเสรีมากกว่าหนึ่ง
 - เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการตอบสนองต่อแรงพลวัต
- ลักษณะการตอบสนองของระบบเนื่องจากแผ่นดินไหว
 - เพื่อให้เข้าใจผลของแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดแรงต่อโครงสร้างต่างๆ (Elastic and Inelastic Response Spectrum)
- พลศาสตร์โครงสร้างในมาตรฐานการออกแบบ
 - เพื่อให้เข้าใจแนวคิดของมาตรฐานการออกแบบ
- คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศ

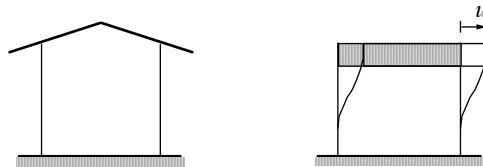
ระบบโครงสร้างแบบง่าย

ระดับชั้นความเสรี (Degree of Freedom) DOF

- จำนวนของระยะพิกัดอิสระที่สามารถใช้อธิบายการเคลื่อนที่ได้อย่างสมบูรณ์

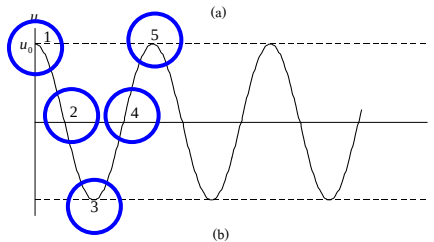
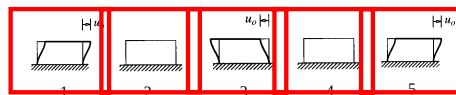
ระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่ง

Single Degree-of-Freedom System (SDOF)



เพื่อการศึกษาพื้นฐานของพลศาสตร์โครงสร้าง และสามารถประยุกต์สำหรับปัญหาที่ซับซ้อนขึ้นได้ต่อไป

องค์ประกอบของระบบพลวัต



แรงที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่

- แรงเฉื่อย (Inertia force)
- แรงสติฟเนส (Stiffness force)
- แรงหน่วง (Damping force)

องค์ประกอบของระบบพลวัต

ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่

• การขจัด (Displacement) $u(t)$

• ความเร็ว (Velocity) $v(t) = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{du}{dt}$ ใช้สัญลักษณ์ $\dot{u} = \frac{du}{dt}$

• ความเร่ง (Acceleration) $a(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{d^2u}{dt^2}$ ใช้สัญลักษณ์ $\ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2}$

ก. องค์ประกอบพื้นฐานของแรงเฉื่อย

มวล (Mass) m

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน

แรงเฉื่อย (Inertia force) $f_I = m \frac{d^2u}{dt^2}$

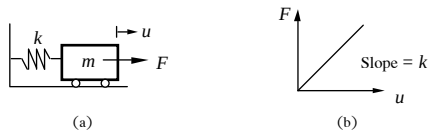
ใช้สัญลักษณ์ $\ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2}$ ดังนั้น

$$f_I = m\ddot{u}$$

แรง = มวล X ความเร่ง

ข. องค์ประกอบพื้นฐานของแรงสติฟเนส

สติฟเนส (Stiffness) k



กฎของฮุก

แรงสติฟเนส (Stiffness force) f_s

$$f_s = ku$$

แรง = ค่าสติฟเนส X การขจัด

Deflection and Stiffness for Various Systems
(Due to Bending Moment Alone)

System	Maximum Deflection (x)	Stiffness (k)
	$\frac{Fh}{AE}$	$\frac{AE}{h}$
	$\frac{Fh^3}{3EI}$	$\frac{3EI}{h^3}$
	$\frac{Fh^3}{12EI}$	$\frac{12EI}{h^3}$
	$\frac{wL^4}{8EI}$	$\frac{8EI}{L^3}$
	$\frac{Fh^3}{12E(I_1 + I_2)}$	$\frac{12E(I_1 + I_2)}{h^3}$
	$\frac{FL^3}{48EI}$	$\frac{48EI}{L^3}$
	$\frac{5wL^4}{384EI}$	$\frac{384EI}{5L^3}$
	$\frac{FL^3}{192EI}$	$\frac{192EI}{L^3}$
	$\frac{wL^4}{384EI}$	$\frac{384EI}{L^3}$

สติฟเนส = แรงที่ทำให้เกิดการเสียรูปหนึ่งหน่วย

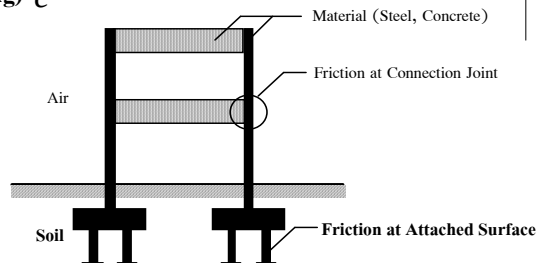
(a) Fixed (b) cantilever

$$k = \left[\frac{h^3}{12EI} + \frac{1.2h}{AG} \right]^{-1} \quad k = \left[\frac{h^3}{3EI} + \frac{1.2h}{AG} \right]^{-1}$$

ค. องค์ประกอบพื้นฐานของแรงหน่วง

ความหน่วง (Damping) C

ที่มาของความหน่วงใน
โครงสร้าง



จากการทดลองพบว่า

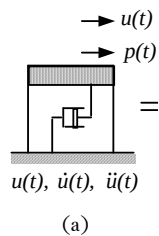
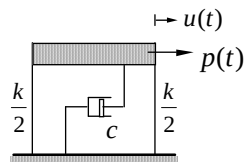
แรงหน่วง (Damping force) $f_D = c \frac{du}{dt}$

ใช้สัญลักษณ์ $\dot{u} = \frac{du}{dt}$ ดังนั้น

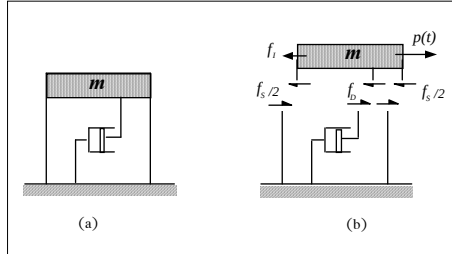
$$f_D = c\dot{u}$$

แรง = ค่าความหน่วง X ความเร็ว

แบบจำลองสำหรับระบบ SDOF



สมการของการเคลื่อนที่



จาก Free Body Diagram ของมวล m

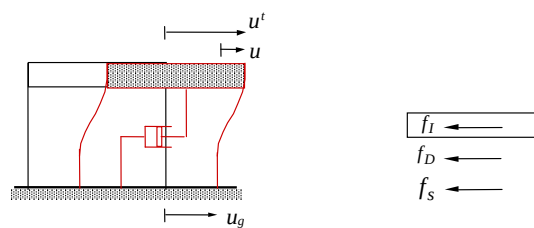
ดังนั้น

$$f_I + f_D + f_S = p(t)$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t)$$

Dynamic Equilibrium $\Rightarrow$ Equation of Motion

สมการของการเคลื่อนที่สำหรับ โครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว



• การจัดรวมของมวล m $u^t(t) = u(t) + u_g(t)$

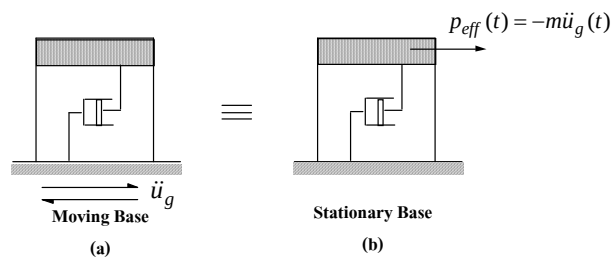
• สมดุล $f_I + f_D + f_S = 0$

• แรงเฉื่อย $f_I = m\ddot{u}^t$

• สมการของการเคลื่อนที่ $m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + ku = 0$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t)$$

แรงแผ่นดินไหวประสิทธิภาพ



Effective Earthquake Force $p_{eff}(t)$

$$p_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t)$$

แรงจากแผ่นดินไหว มีค่าตามมวล (หรือน้ำหนักของโครงสร้าง) และความเร่งของพื้น

การสั่นไหวของโครงสร้าง

การสั่นแบบอิสระ
(ไม่มีแรงภายนอก)

การสั่นเนื่องจากแรงภายนอกแบบฮาร์โมนิค

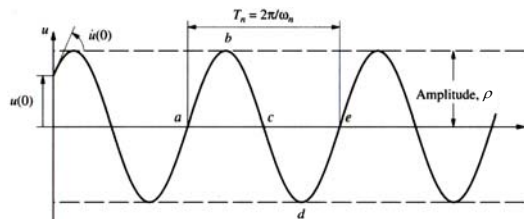
- ระบบที่ไม่มีความหน่วง
- ระบบที่มีความหน่วง

การสั่นแบบอิสระของระบบที่ไม่มี ความหน่วง

$$m\ddot{u} + \cancel{c\dot{u}} + ku = \cancel{p(t)} \quad \Rightarrow \quad m\ddot{u} + ku = 0$$

$$\Rightarrow \ddot{u} + \frac{k}{m}u = 0 \quad \text{หรือ} \quad \ddot{u} + \omega^2 u = 0 \quad \text{โดยที่} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

คำตอบ $u(t) = \rho \cos(\omega t - \theta)$ ρ, θ หาได้จากสภาวะเริ่มต้น



คาบธรรมชาติ (Natural Period)

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

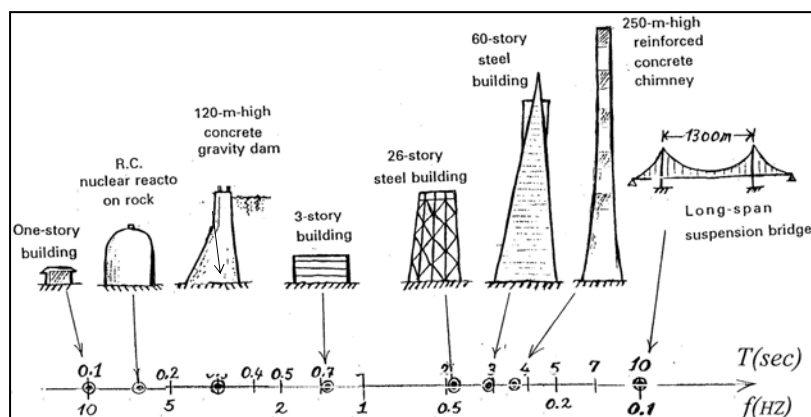


Faculty of Engineering
Thammasat University

Natural Frequency and Natural Period

Natural Frequency $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$

Natural Period $T = \frac{1}{f}$



โครงสร้าง Rigid
ความถี่สูงหรือคาบสั้น

โครงสร้าง Flexible
ความถี่ต่ำหรือคาบยาว

การสั่นแบบอิสระของระบบที่มีความหน่วง

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0$$

หารด้วย m ตลอด $\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = 0$

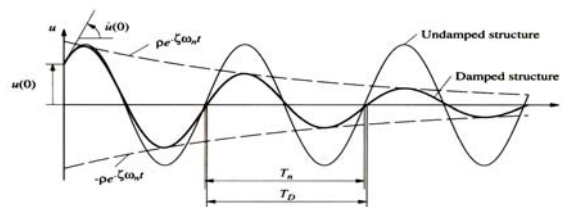
นิยาม Damping Ratio

$$\xi = \frac{c}{2m\omega}$$

(โดยทั่วไป $\xi \approx 0.01 - 0.05$)

คำตอบ

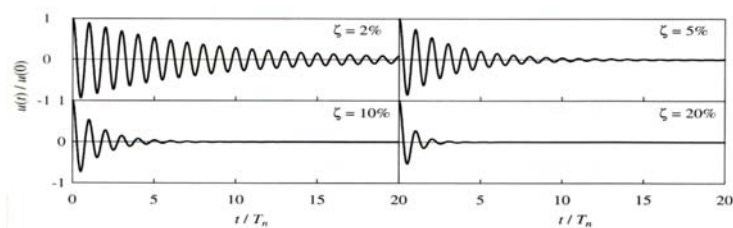
$$u(t) \approx e^{-\xi\omega t} p \cos(\omega t - \theta)$$



Faculty of Engineering
Thammasat University

การสั่นแบบอิสระของระบบที่มีความหน่วง

(Damped Free Vibration)



การสั่นแบบอิสระของระบบ SDOF ที่มี $\xi = 2\%, 5\%, 10\%$ และ 20%

ω, ξ

ตัวแปรสำคัญในการอธิบายการสั่นไหว

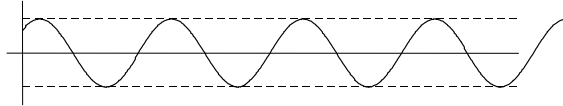
ถ้า ξ สูง



แอมพลิจูดลดลงด้วยอัตราเร็ว

Faculty of Engineering
Thammasat University

การสั่นเนื่องจากแรงภายนอกแบบฮาร์โมนิก (Harmonically Forced Vibration)



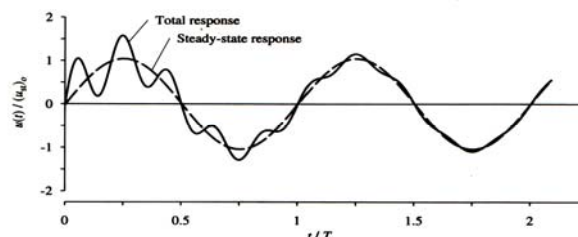
- แรงแบบฮาร์โมนิก คือแรงที่กระทำกลับไปมาและมีความถี่คงที่ เช่นฟังก์ชัน Sine หรือ Cosine เป็นต้น
- แรงจากแผ่นดินไหวและแรงตามธรรมชาติทั่วไปไม่ใช่แรงแบบฮาร์โมนิก แต่สามารถพิจารณาว่าเป็นส่วนผสมของแรงย่อยแบบฮาร์โมนิก หลายแรงที่มีความถี่ต่าง ๆ ผสมกันอยู่ได้
- ผลตอบสนองของแรงทั่วไปมีพื้นฐานจากความเข้าใจ ผลตอบสนองจากแรงแบบฮาร์โมนิก

การสั่นเนื่องจากแรงภายนอกแบบฮาร์โมนิก (Harmonically Forced Vibration)

คำตอบ

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \sin \bar{\omega}t$$

$$u(t) \approx \underbrace{e^{-\xi\bar{\omega}t} \rho \cos(\bar{\omega}t - \theta)}_{\substack{\text{แอมพลิจูดลดลงตามเวลา} \\ \text{Transient Response} \\ \text{สั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง } \omega}} + \underbrace{\frac{p_0}{k} \bar{D} \sin(\bar{\omega}t - \phi)}_{\substack{\text{แอมพลิจูดคงที่} \\ \text{Steady State Response} \\ \text{สั่นด้วยความถี่ของแรงภายนอก } \bar{\omega}}}$$



การสั่นเนื่องจากแรงภายนอกแบบฮาร์โมนิก (Harmonically Forced Vibration)

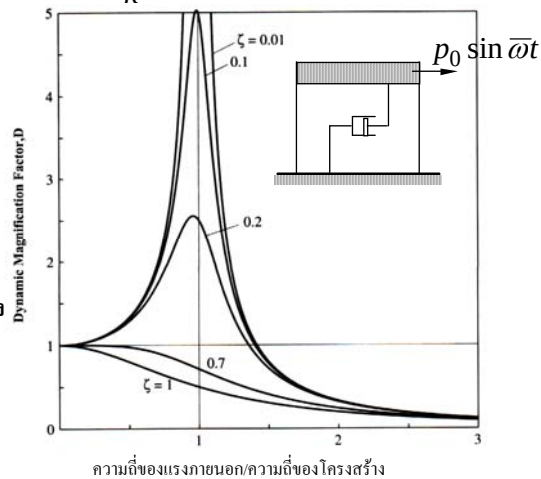
แอมพลิจูดของ Steady State Response = $\frac{p_0}{k} \bar{D}$

ตัวคูณขยายทางพลวัต
(Dynamic Magnification Factor)

$$\bar{D} = \frac{\text{Dynamic Response}}{\text{Static Response}}$$

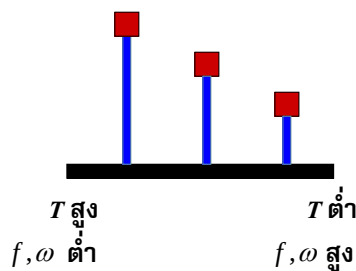
มีค่าขึ้นกับ

- ความถี่ของแรงและของโครงสร้าง
- อัตราส่วนความหน่วง



การสั่นพ้อง (การกำทอน) (Resonance)

Example

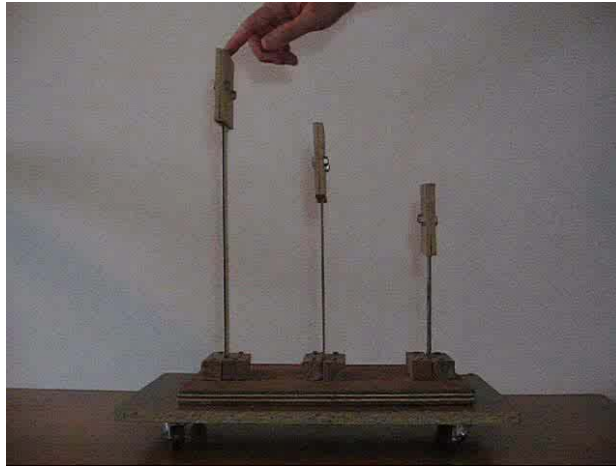


$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

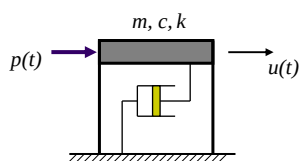
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

การตอบสนองของแบบจำลองอาคารต่อแผ่นดินไหว



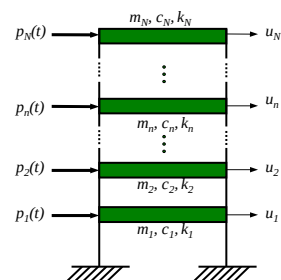
ระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสรีมากกว่าหนึ่ง (Multi Degree of Freedom System , MDOF)



ระบบ SDOF $u(t)$ ขึ้นกับ

- แรงภายนอก
- คาบธรรมชาติ
- ความหน่วง

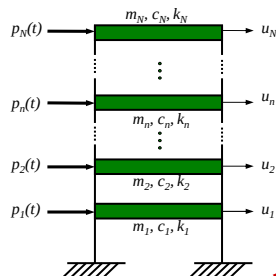
คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์
(Dynamic Properties)



ระบบ MDOF $u(t)$ ขึ้นกับ

- แรงภายนอก
- คาบธรรมชาติ
- ความหน่วง
- ตำแหน่งของ $u(t)$ หรือรูปร่างขณะเกิดการสั่นไหว

ระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสรีมากกว่าหนึ่ง (Multi Degree of Freedom System , MDOF)



คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของระบบ MDOF

- ความหน่วง มักใช้ค่าจากการประมาณ ไม่ใช่จากการวิเคราะห์
- ตำแหน่งของ $u(t)$ หรือรูปร่างขณะเกิดการสั่นไหว เรียกว่า รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape)
- คาบธรรมชาติ หรือ ความถี่ธรรมชาติ

ได้จากการแก้ปัญหาค่า Eigenvalue

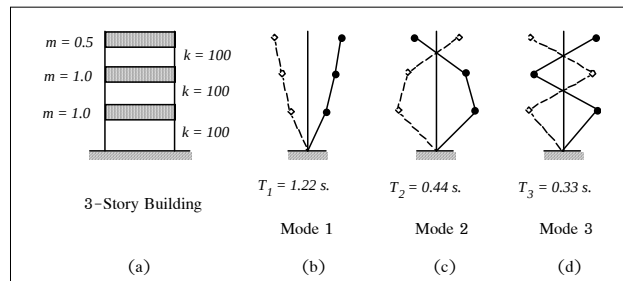
โดยสำหรับระบบที่มีจำนวน DOF เท่ากับ N ตัว

จะมี N ชุดคำตอบสำหรับความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว

ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหว (Natural Frequency and Mode Shape)

- N คำตอบที่แตกต่างกัน แสดงถึงรูปแบบของคำตอบที่แตกต่างกันหรือ Mode เหล่านั้น
- แต่ละ Mode มีคุณลักษณะในการสั่นไหวที่แตกต่างกัน
- ความถี่ธรรมชาติสำหรับ Mode ใด ๆ แสดงถึงจังหวะของการสั่นตามธรรมชาติของ Mode นั้น
- Mode ที่มีค่าความถี่ธรรมชาติน้อยที่สุดเรียกว่า รูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (Fundamental Mode) หรือ Mode ที่หนึ่ง
- ถ้าสำหรับ Mode ที่มีความถี่ธรรมชาติสูงขึ้นเรียกชื่อเป็น Mode ลำดับต่อ ๆ ไป

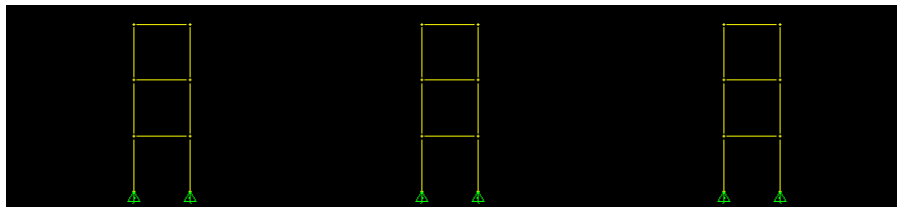
ระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสรีมากกว่าหนึ่ง (Multi Degree of Freedom System , MDOF)



Mode 1

Mode 2

Mode 3



Vibration of 3-DOF System (Mode 1)



Vibration of 3-DOF System (Mode 2)



Vibration of 3-DOF System (Mode 3)



ระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสีมากกว่าหนึ่ง



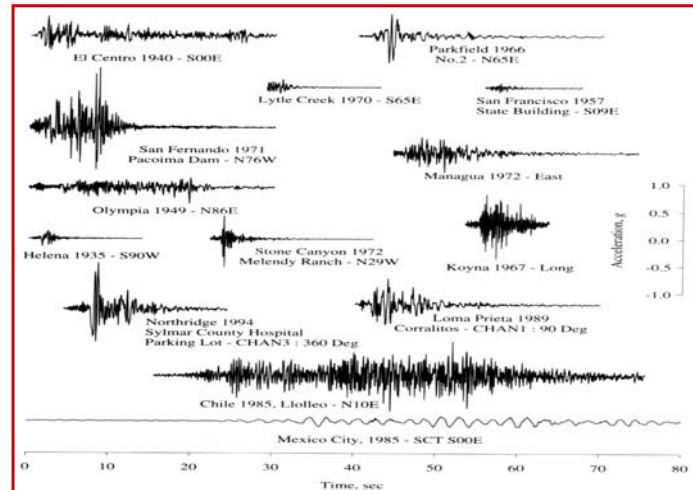
ผลตอบสนองสำหรับ Mode ‘ n ’ $\approx$ ผลตอบสนองสำหรับโครงสร้างแบบง่าย SDOF
(T_n, ξ_n) (with $T = T_n$ and $\xi = \xi_n$)

ผลตอบสนองรวมทั้งหมด = $\sum_{n=1}^N$ ผลตอบสนองย่อยของแต่ละ Mode

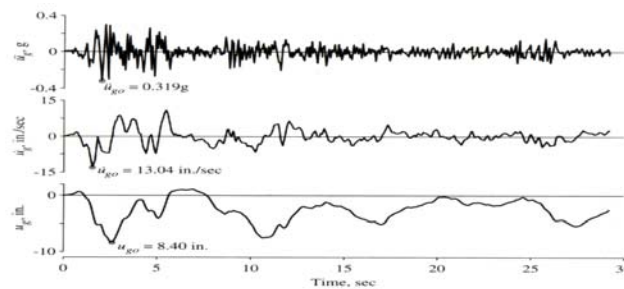
สำหรับโครงสร้างที่มีจำนวน Mode มาก อาจประมาณผลตอบสนองรวม
จากการพิจารณา เฉพาะ ผลตอบสนองของ Mode ต่ำ ๆ ได้

การตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว (Earthquake Response of Linear System)

ตัวอย่างของความเร่งของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว $\ddot{u}_g$



ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหว El Centro

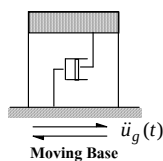


Equation of Motion

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g(t)$$

ω (or T), ξ

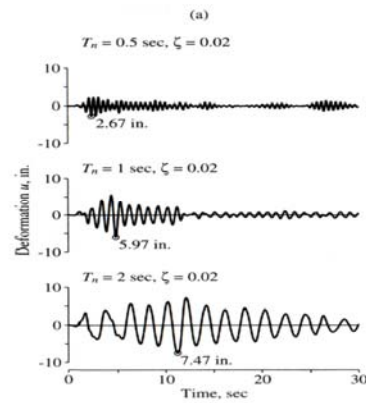
Important Parameters of Structures



การจัดของระบบตัวอย่างต่อคลื่นแผ่นดินไหว El Centro



ระบบมีค่า T ต่างกัน และค่า ζ เท่ากัน

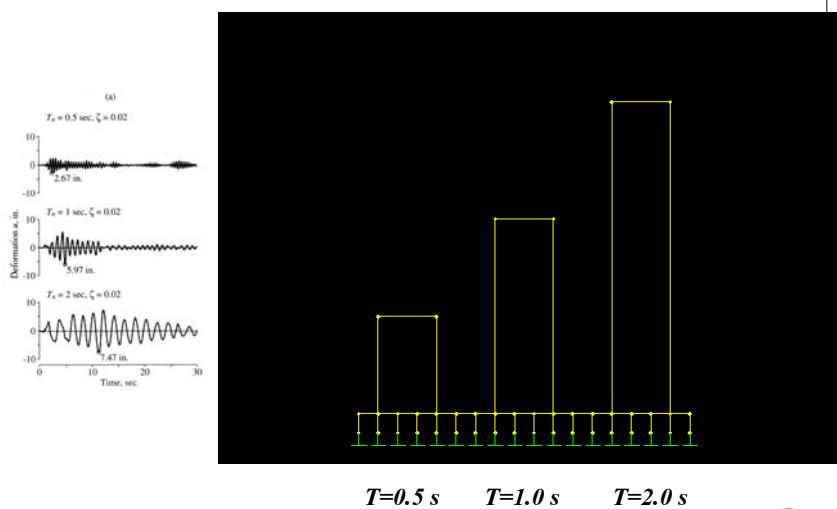


- คาบของการสั่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าคาบธรรมชาติ
- ระบบที่มีคาบธรรมชาติเท่ากับ 2 วินาที มีค่าการขจัดสูงสุด (ไม่เป็นจริงในทุกกรณี)

การตอบสนองของระบบต่อคลื่นแผ่นดินไหว El Centro

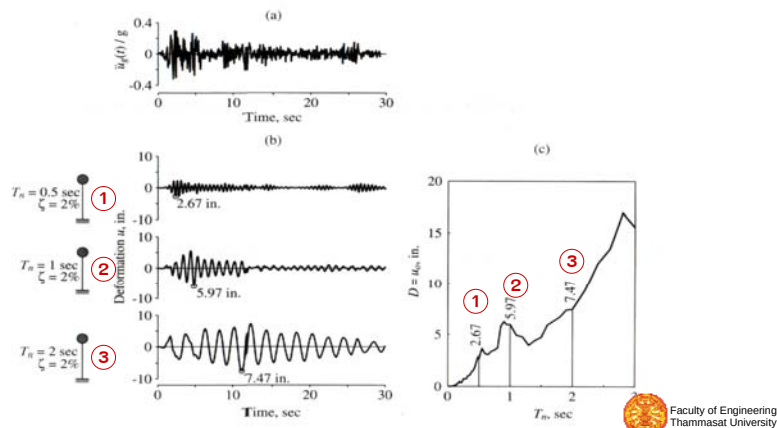


ระบบมีค่า T ต่างกัน และค่า ζ เท่ากัน



Response Spectrum Concept

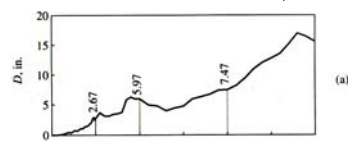
Response Spectrum คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของการตอบสนองต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว กับคาบธรรมชาติของระบบนั้น โดยพิจารณาที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่คงที่ค่าหนึ่ง



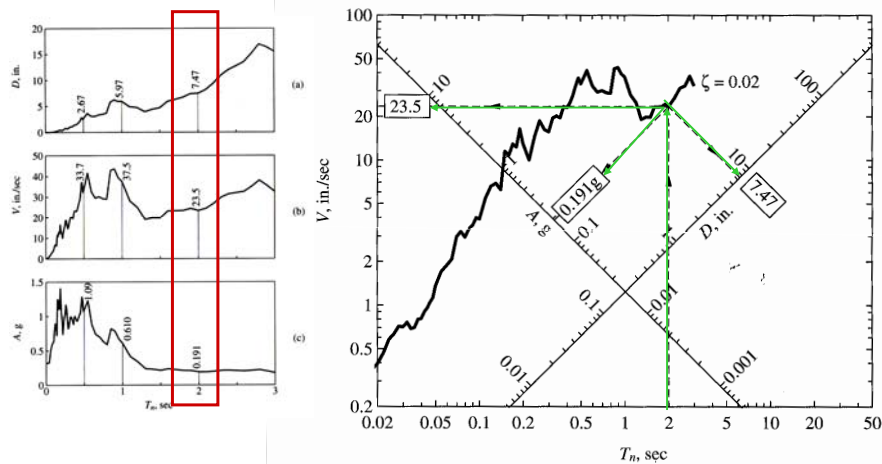
สเปกตรัมผลตอบสนองเสมือน (Pseudo)

$u_0 = D =$ ค่าสูงสุดของระยะขจัดสำหรับระบบใด ๆ

$$\text{จาก } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad k = \omega^2 m \quad \begin{aligned} f_{S0} &= k u_0 = k D \\ f_{S0} &= m \omega^2 D = m A \end{aligned}$$



สเปกตรัมผลตอบสนองรวม $D-V-A$



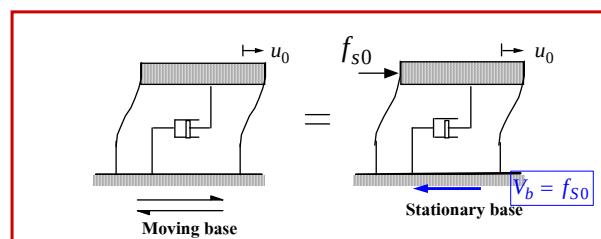
Faculty of Engineering
Thammasat University

แรงสถิตย์เทียบเท่า (Equivalent Static Force)

D = ค่าสูงสุดของระยะขจัดสำหรับระบบ

V ใช้ในการหาค่าพลังงานสูงสุดจากการสั่นไหวที่สะสมภายในระบบ

A ใช้ในการหาค่าสูงสุดของแรงสถิตย์เทียบเท่าและแรงเฉือนที่ฐาน



$$\text{Base Shear } V_b = f_{s0} = mA = \frac{A}{g}W$$

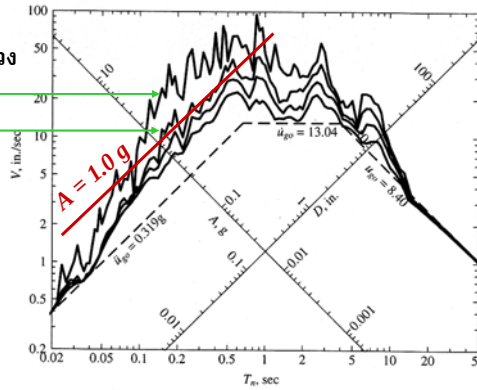
$\frac{A}{g} \equiv \text{Base Shear Coefficient} \quad W = \text{Weight}$

Faculty of Engineering
Thammasat University

การตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว

โครงสร้างที่มีความหน่วง

$\zeta = 0$
 $\zeta = 0.02$



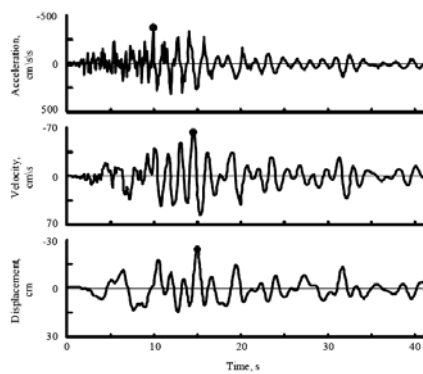
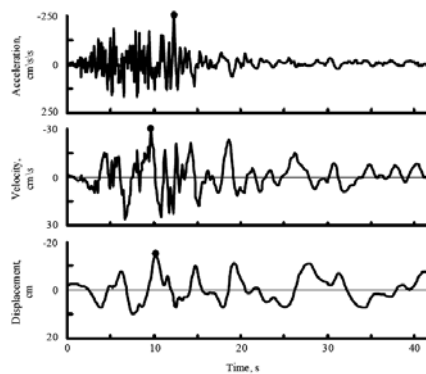
ผลตอบสนองอาจทำให้เกิดแรงประสิทธิผลมีค่ามากมหาศาล $V_b = mA$

การตอบสนองเนื่องจากแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว San Fernando ปี ค.ศ. 1971 ขนาด M 6.4

บันทึกแผ่นดินไหวที่พื้น

ผลตอบสนองของอาคารสูง 7 ชั้น



ผลตอบสนองอาจทำให้เกิดแรงประสิทธิผลมีค่ามากมหาศาล $V_b = mA$

การออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงจากแผ่นดินไหว

- หากการออกแบบที่ต้องให้โครงสร้างต้านทานแรงมากขนาดนี้ได้ โดยพฤติกรรมแบบอีลาสติกของโครงสร้างจะต้องการหน้าตัดของชิ้นส่วนขนาดใหญ่มาก
- หลักการออกแบบที่ใช้คือ ยอมให้โครงสร้างบางส่วนเกิดการวิบัติจากการครากของหน้าตัดเพื่อให้โครงสร้างมีพฤติกรรมแบบอินอีลาสติกได้แต่ไม่เกิดการพังทลายของโครงสร้าง และมีเสถียรภาพ
- สามารถสลายพลังงานการสั่นไหวได้อย่างมากและลดค่าแรงที่ใช้ในการออกแบบได้หลายเท่าตัว
- การพิจารณาผลตอบแทนของโครงสร้างแบบอินอีลาสติกนำไปสู่การสร้างสเปคตรัมผลตอบแทนแบบอินอีลาสติกสำหรับการออกแบบต่อไป



มาตรฐานการออกแบบต้านทานแรงจากแผ่นดินไหว

กฎกระทรวง แผ่นดินไหว พ.ศ. 2550

Uniform Building Code (UBC) 1985

แรงเฉือนในแนวราบที่ระดับพื้นดิน V

$$V = Z I K C S W$$

สัมประสิทธิ์ของ
ความเข้มของแผ่นดินไหว

ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้งาน

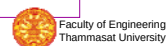
สัมประสิทธิ์ของโครงสร้าง
อาคารที่รับแรงตามแนวราบ

น้อยกว่า 1 สำหรับ
โครงสร้างที่มีความเหนียว

น้ำหนักของตัวอาคาร

สัมประสิทธิ์ของการประสาน
ความถี่ธรรมชาติ
ระหว่างอาคารและชั้นดิน

สัมประสิทธิ์ของคาบธรรมชาติ



มาตรฐานการออกแบบต้านทานแรงจากแผ่นดินไหว

International Building Code (IBC) 2006

แรงเฉือนในแนวราบที่ระดับพื้นดิน V

$$V = \frac{CIW}{R}$$

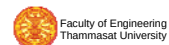
น้ำหนักของตัวอาคาร

ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้งาน

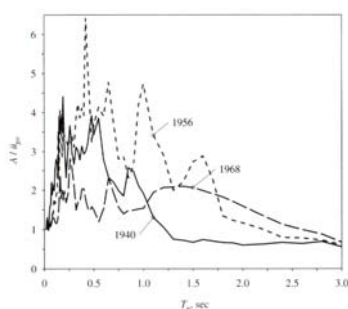
สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับ คาบธรรมชาติ ตำแหน่งของโครงสร้าง และสภาพดิน

ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนอง ขึ้นกับความเหนียว และประสิทธิภาพในการตอบสนองแบบอินอีลาสติกของโครงสร้าง

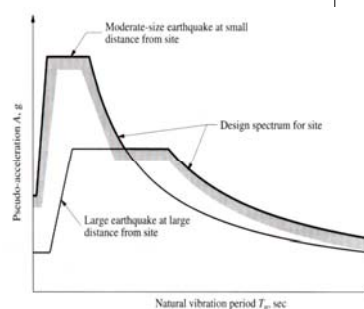
มีค่าตั้งแต่ 1.5 ถึง 8



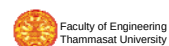
สเปกตรัมเพื่อการออกแบบ



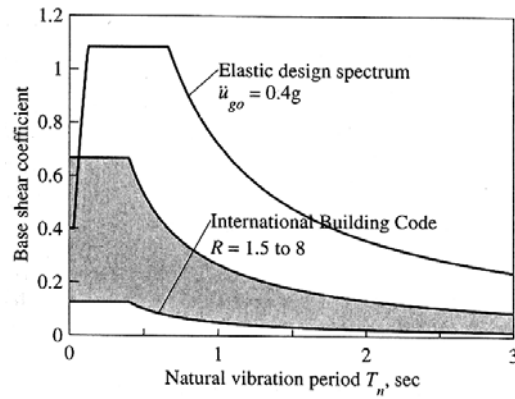
Pseudo-acceleration response spectrum
สำหรับแผ่นดินไหวหลายเหตุการณ์



Pseudo-acceleration design spectrum



การออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงจากแผ่นดินไหว

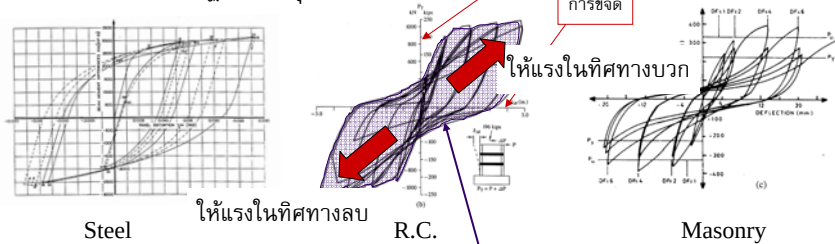


Base Shear $V_b = \frac{A}{g} W$

$\frac{A}{g} \equiv$ Base Shear Coefficient $W =$ Weight

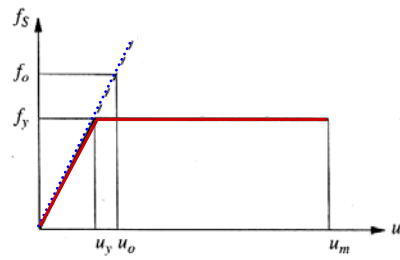
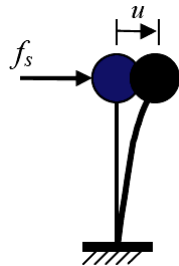
ผลตอบสนองแบบอินอีลาสติก

ผลการทดสอบแบบวัฏจักรของจุดต่อ

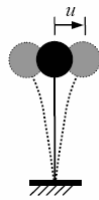


พื้นที่ใต้กราฟ (แรง X การขจัด) = พลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบ

ผลตอบสนองแบบอีลาสติก VS อินอีลาสติก

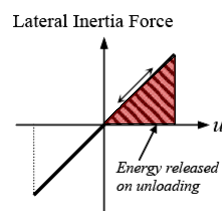


การสลายพลังงานจากการตอบสนองแบบอินอีลาสติก



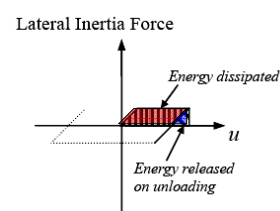
SDOF System

ระบบโยกตัวภายใต้แผ่นดินไหว



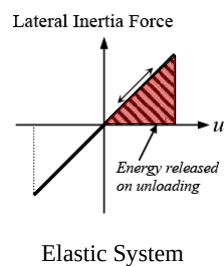
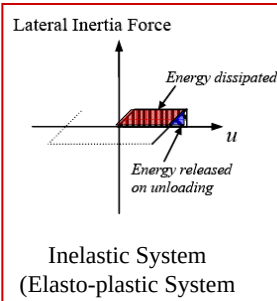
Elastic System

พลังงานจลน์จากการโยกตัว เปลี่ยนค่าเป็น
พลังงานความเครียดในระบบ (เปลี่ยนไป-มา)



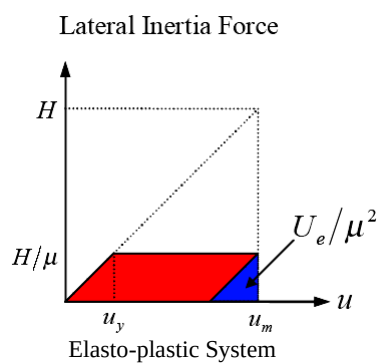
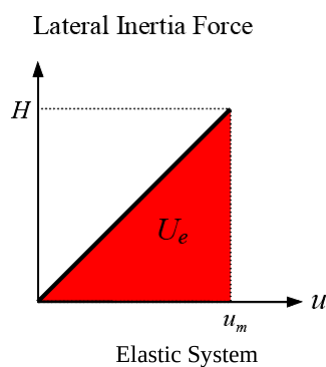
Inelastic System
(Elasto-plastic System)

การสลายพลังงานจากการตอบสนองแบบอินอีลาสติก



- หลังเกิดการคราก ระบบไม่สามารถรับแรงเพิ่ม
- เกิดเป็นจุดหมุนพลาสติกทำให้มีการตอบสนองในช่วงเกินจากช่วงอีลาสติกที่มีการขจัดมากที่ระดับของแรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบอีลาสติก
- ระบบแบบนี้เกิดการเคลื่อนที่ไป-กลับได้โดยยังไม่เกิดการวิบัติแต่การเสียรูปไม่กลับสู่จุดเริ่มต้นเมื่อหยุดแรงกระทำ
- เมื่อระบบนี้โยกตัวกลับมา พื้นที่ส่วนสามเหลี่ยมแสดงถึงพลังงานที่จะเปลี่ยนไปเป็นความเร็วของการเคลื่อนที่
- พลังงานส่วนที่เหลือที่แสดงด้วยพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมด้านขนานจะถูกระบบสลายออกไปในรูปของพลังงานอื่น

ผลจากความเหนียว (Ductility)



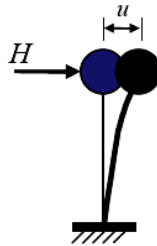
ค่าประกอบความเหนียวสำหรับการขจัด (Displacement ductility factor)

$$\mu = u_m / u_y$$

Force Controlled VS. Displacement Controlled System

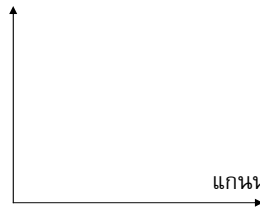


แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
แรง H และการขจัด u ในรูปของ



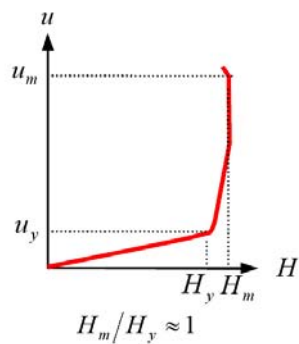
ระบบภายใต้แรงทางด้านข้าง

แกนตั้งเป็นตัวแทน

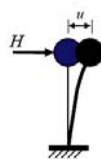


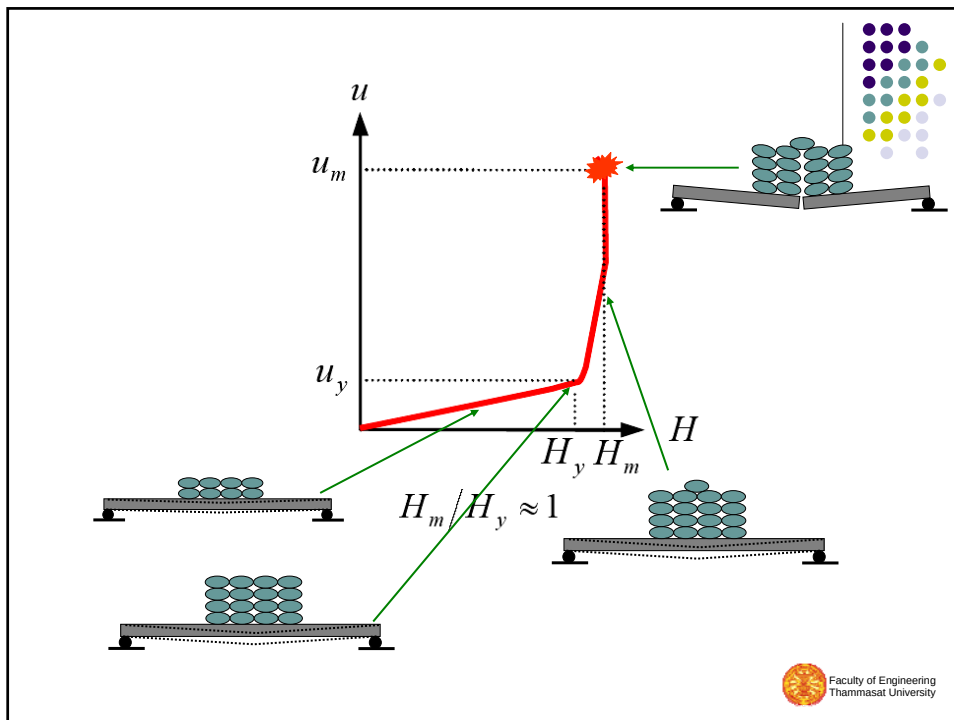
แกนนอนเป็นตัวแทน

Force Controlled System

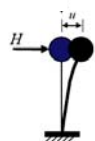
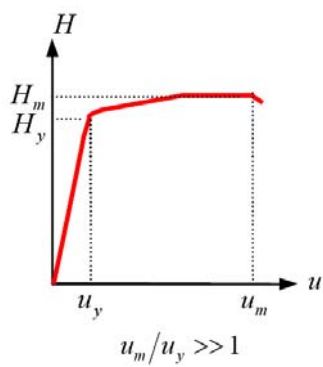


- เมื่อเพิ่มแรงในแนวราบ ค่าการขจัดจะเพิ่มตามจนถึงจุดคราก
- หากเพิ่มค่า H ขึ้นจากจุดนี้ก็จะเกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นในโครงสร้างและการขจัดที่มีค่ามาก
- แรงที่ทำให้ระบบพังทลาย H_m มีค่าไม่ต่างกับแรงที่ทำให้เกิดการครากเริ่มต้น H_y
- คุณสมบัติความเหนียวของระบบไม่ได้ช่วยด้านการเพิ่มความสามารถในการรับแรงมากนัก



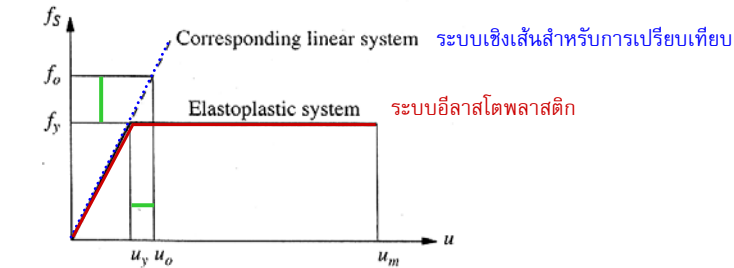


Displacement Controlled System



- เมื่อเพิ่มการขจัดในแนวราบ จะทำให้เกิดการเพิ่มของแรงภายในระบบ เช่นโมเมนต์ที่ฐาน จนกระทั่งถึงจุดคราก
- หากเพิ่มค่า u ขึ้นจากจุดนี้ อีก ค่าโมเมนต์ที่ฐานจะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย
- สำหรับระบบที่มีความเหนียว ค่าการขจัดสูงสุด u_m อาจมีค่ามากกว่าการขจัดที่จุดเริ่มคราก u_y ได้หลายเท่าตัวก่อนที่ระบบจะพังทลาย
- โครงสร้างที่มีความเหนียว สามารถทนต่อการเคลื่อนตัวเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ดี

ตัวประกอบลดกำลังคราก Yield strength reduction factor R_y



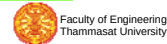
f_o = กำลังต้านทานแรงน้อยที่สุดที่โครงสร้างต้องมีเพื่อให้ผลตอบสนองจำกัดอยู่ในช่วงอีลาสติก

$$R_y = f_o / f_y = u_o / u_y$$

$R_y = 1$ ตอบสนองแบบอีลาสติก

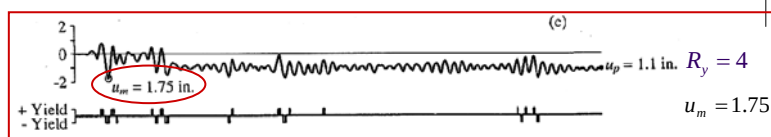
$R_y > 1$ ตอบสนองเกินช่วงอีลาสติก (อินอีลาสติก)

แรงที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าลดลงจากค่าที่ต้องใช้ตอบสนองแบบอีลาสติก = $1/R_y$



ผลของ R_y ต่อการตอบสนอง

ผลตอบสนองของระบบอีลาสโตพลาสติก $T = 0.5 \text{ sec}$, $\xi = 0.05$ ภายใต้ผลของแผ่นดินไหว El Centro



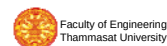
สำหรับระบบอีลาสติก $u_o = 2.25$ และ $u_m / u_o = \mu / R_y$

ความเหนียวที่ต้องการ (Ductility demand) $\mu = (u_m / u_o) R_y = 3.11$

มีความหมายคือ

สำหรับการออกแบบให้โครงสร้างมีความสามารถที่จะตอบสนองเกินช่วงอีลาสติก จะต้องมีความเหนียวไม่น้อยกว่าค่า Ductility demand นี้

(ถ้าใช้วัสดุที่มีกำลังครากต่ำหรือ R_y มาก ต้องใช้ระบบที่มีความเหนียวสูง)



สเปกตรัมเพื่อการออกแบบ



$$V = \frac{CIW}{R}$$

- มาตรฐานการออกแบบทั่วไปกำหนดค่าแรงเฉือนสำหรับการออกแบบไว้ มีค่าต่ำกว่าค่าแรงเฉือนที่เกิดจากการตอบสนองแบบอีลาสติก
- R ในมาตรฐาน IBC เป็นค่าที่ใช้ลดค่าแรงอีลาสติกเป็นค่าแรงอินอีลาสติกเพื่อการออกแบบที่ให้ผลเหมือนกับค่า R_y
- R ในมาตรฐาน IBC เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับค่าธรรมชาติ และเป็นค่าโดยรวมของระบบที่กำหนดค่าจากประสบการณ์ของแผ่นดินไหวในอดีต

พลศาสตร์โครงสร้างในมาตรฐานการออกแบบ

กฎกระทรวง แผ่นดินไหว พ.ศ. 2550

Uniform Building Code (UBC) 1985 (1997)

แรงเฉือนในแนวนอนที่ระดับพื้นดิน V

$$V = Z I K C S W$$

สัมประสิทธิ์ของ
ความเข้มของแผ่นดินไหว

ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้งาน

สัมประสิทธิ์ของโครงสร้าง
อาคารที่รับแรงตามแนวนอน

น้ำหนักของตัวอาคาร

สัมประสิทธิ์ของการประสาน
ความถี่ธรรมชาติ
ระหว่างอาคารและชั้นดิน

สัมประสิทธิ์ของคาบธรรมชาติ



สัมประสิทธิ์ของความเข้มของแผ่นดินไหว Z

● UBC 1985

- ใช้ค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับเขตที่แผ่นดินไหวรุนแรงที่สุด และใช้ค่าลดเป็นสัดส่วนลงมาสำหรับเขตที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวต่ำลง โดยที่ไม่มีความหมายทางกายภาพ

● UBC 1997

- เป็นค่าเทียบเท่ากับความเร่งสูงสุดในแนวนอนของพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในเขตนั้น และค่าอยู่ในรูปร้อยละของความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

สัมประสิทธิ์ของความเข้มของแผ่นดินไหว Z



กฎกระทรวง (ข้อ ๗) กำหนดให้ใช้ค่า

สำหรับบริเวณที่ ๑; $Z = 0.19$

สำหรับบริเวณที่ ๒; $Z = 0.38$

เขตเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว	ค่าสัมประสิทธิ์ของความเข้มของแผ่นดินไหว	
	UBC 1985	UBC 1988 ถึง UBC 1997
4	1	0.4
3	3/4	0.3
2B	3/8 = 0.375	0.2
2A	3/8	0.15
1	3/16 = 0.1875	0.075

ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้งาน I



กฎกระทรวง (ข้อ ๘)	ชนิดของอาคาร	ค่าของ I
(๑) อาคารที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน ตามข้อ ๓		๑.๕๐
(๒) อาคารที่เป็นที่ชุมนุมคนครั้งหนึ่ง ๆ ได้มากกว่าสามร้อยคน		๑.๒๕
(๓) อาคารอื่น ๆ		๑.๐๐

ชนิดของอาคาร	ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้งาน	
	UBC 1985	UBC 1997
อาคารที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน	1.5	1.25
อาคารเก็บวัตถุดิบทราย	-	1.25
อาคารที่เป็นที่ชุมนุมคนครั้งหนึ่ง ๆ ได้มากกว่า 300 คน	1.25	1.0
อาคารอื่น ๆ	1.0	1.0

สำหรับอาคารเก็บวัตถุดิบทราย ที่ไม่ได้จัดกลุ่มไว้ใน UBC 1985 และกฎกระทรวง

หากไปเลือกใช้เป็นอาคารอื่น ๆ จะมีค่าตัวคูณเกี่ยวกับการใช้งานน้อยกว่าค่าใน UBC 1997

ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ K



● UBC 1985

- ค่าสัมประสิทธิ์ไม่มีความหมายทางกายภาพ และกำหนดนิยามประเภทของโครงสร้างไว้เพียง 3 ประเภท

● UBC 1997

- มีความหมายทางกายภาพที่เหมาะสม และเพิ่มประเภทของโครงสร้างจาก เป็น 6 ประเภทหลัก และอีกหลายประเภทย่อยที่มีคำอธิบายวิธีจำแนกประเภทโครงสร้างอย่างสมบูรณ์ขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ K



ระบบและชนิดโครงสร้างรับแรงในแนวราบ	ค่าของ K
(๑) โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้กำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) หรือโครงแกนง (Braced Frame) ด้านแรงทั้งหมดในแนวราบ	๑.๓๓
(๒) โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงด้านแรงดัดที่มีความเหนียว (Ductile Moment-Resisting Frame) ด้านแรงทั้งหมดในแนวราบ	๐.๖๗
(๓) โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงด้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกนงด้านแรงในแนวราบ โดยมีข้อกำหนดในการคำนวณออกแบบ ดังนี้ (ก) โครงด้านแรงดัดที่มีความเหนียวต้องสามารถต้านแรงในแนวราบได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ ๒๕ ของแรงในแนวราบทั้งหมด (ข) กำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกนงเมื่อแยกเป็นอิสระจากโครงด้านแรงดัดที่มีความเหนียวต้องสามารถต้านแรงในแนวราบได้ทั้งหมด (ค) โครงด้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกนงต้องสามารถต้านแรงในแนวราบได้ทั้งหมด โดยสัดส่วนของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างแต่ละระบบ ให้เป็นไปตามสัดส่วนความคงตัว (Rigidity) โดยคำนึงถึงการถ่ายเทของแรงระหว่างโครงสร้างทั้งสอง	๐.๘๐
(๔) หอน้ำ โรงรับด้วยเสาไม้เนื้อแข็ง ๔ ด้าน และมีแกนงยึดและไม่ได้ตั้งอยู่บนอาคาร หมายเหตุ ผลคูณระหว่างค่า K กับค่า C ให้ใช้ค่าต่ำสุดเท่ากับ ๐.๑๒ และค่าสูงสุดเท่ากับ ๐.๒๕	๒.๕
(๕) โครงสร้างแรงดัดที่มีความเหนียวจากแต่ละโครงสร้างระบบอื่น ๆ นอกจากโครงสร้างตาม (๑) (๒) (๓) หรือ (๔)	๑.๑

สัมประสิทธิ์ของคาบธรรมชาติ C



UBC 1997 ได้ปรับปรุงสมการในการคำนวณผลของค่าธรรมชาติต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวจากรูปแบบของ UBC 1985 โดยใช้ผลที่พัฒนาจากข้อมูลของการวิจัยและข้อมูลการตรวจวัดจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น

C สัมประสิทธิ์ของคาบธรรมชาติ ตาม กฎกระทรวง และ UBC 1985



แสดงผลของคาบธรรมชาติต่อแรงเฉือน
$$C = \frac{1}{15\sqrt{T}} \leq 0.12$$

ค่าคาบธรรมชาติ (วินาที) T โดยประมาณ (UBC-85)

1. สำหรับโครงสร้างทั่วไป
$$T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{D}}$$

สำหรับโครงข้อแข็งที่มีความเหนียว
$$T = 0.1N$$

2. จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่เหมาะสมและใกล้เคียงพฤติกรรมจริง

h_n คือ ความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุดวัดจากระดับพื้นดิน มีหน่วยเป็นเมตร

D คือ ความกว้างของโครงสร้างของอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นเมตร

N คือ จำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

การประมาณค่า T ตาม UBC-97



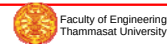
Method A : สำหรับอาคารทั่วไป $T = C_t(h_n)^{3/4}$

Method B : คำนวณค่า T จากการวิเคราะห์โครงสร้าง

$$\text{สูตรของ Rayleigh } T = 2\pi \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2 \right) / \left(g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i \right)}$$

สำหรับเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวต่ำถึงปานกลาง (เขต 1,2 และ 3)
ค่า T ได้จากวิธี B จะต้องไม่เกิน 1.4 เท่าของค่าที่คำนวณจากวิธี A

สำหรับเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวสูง ๆ (เขต 4)
ค่า T ได้จากวิธี B จะต้องไม่เกิน 1.3 เท่าของค่าที่คำนวณจากวิธี A



ค่าสัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่าง อาคารและชั้นดินที่ตั้งอาคาร S

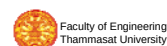


● UBC 1985

- กำหนดค่าตามสภาพของชั้นดินเพียงอย่างเดียว
- จำแนกชั้นดินเป็น 4 ชนิด

● UBC 1997

- กำหนดค่าตามสภาพของชั้นดิน และระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว
- จำแนกชั้นดินเป็น 6 ชนิด โดยมีหลักการจำแนกชนิดที่ชัดเจนขึ้น

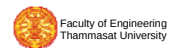


ค่าสัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่าง
อาคารและชั้นดินที่ตั้งอาคาร S ตามกฎกระทรวง (ข้อ ๑๒)

ลักษณะของชั้นดิน	ค่าของ S
หิน (Rock)	1.0
ดินแข็ง (Stiff soil)	1.2
ดินอ่อน (Soft to medium stiff clay and sand)	1.5
ดินอ่อนมาก (Very soft soil)	2.5

และ $CS \leq 0.14$

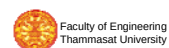
สำหรับดินอ่อนมาก $CS \leq 0.26$



น้ำหนักของตัวอาคาร W

W คือ น้ำหนักของตัวอาคารทั้งหมดรวมทั้งน้ำหนักของวัสดุอุปกรณ์ซึ่งยึด
ตรึงกับที่โดยไม่รวมน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับอาคารทั่วไป

หรือน้ำหนักของตัวอาคารทั้งหมดรวมกับร้อยละ ๒๕ ของน้ำหนักบรรทุก
จรสำหรับโกดังหรือคลังสินค้า

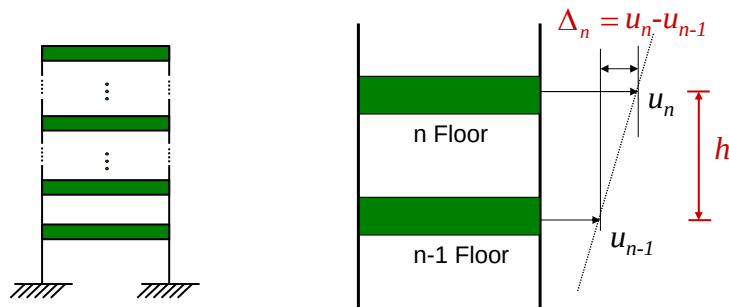


การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ด้านข้างระหว่างชั้นที่อยู่ติดกัน (Story drift)



Story drift

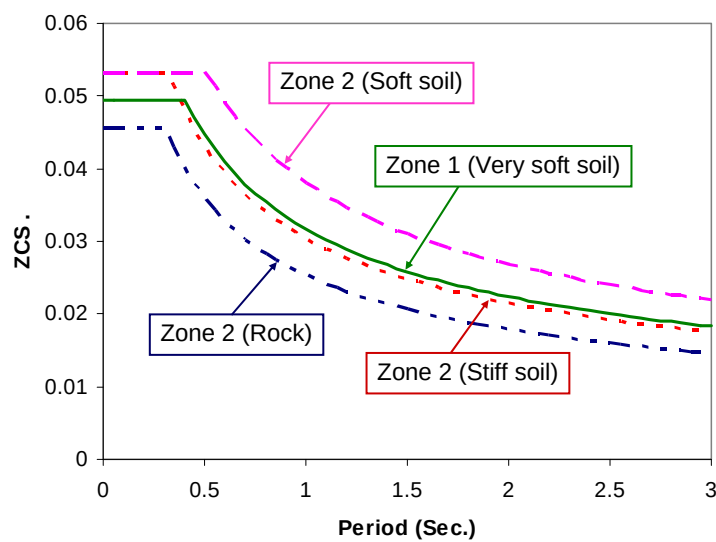
$$\Delta_i \leq 0.005h_i$$



แรงเฉือนสำหรับการออกแบบ $V = ZICKSW$

สัมประสิทธิ์ ZCS

(พิจารณา $I = I$, $K = I$)



การกระจายแรงเฉือนในแนวดิ่ง

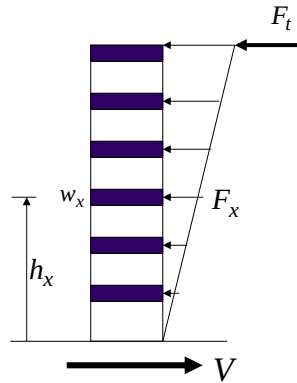
แรงเฉือนที่ฐาน V กระจายตลอดความสูงของอาคาร

$$V = F_t + \sum_{i=1}^n F_i$$

$$F_t = 0.07TV < 0.25V$$

$$F_t = 0 \text{ if } T \leq 0.7 \text{ s}$$

$$F_x = \frac{(V - F_t)w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i}$$



คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในกรุงเทพมหานคร และเชียงใหม่



การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

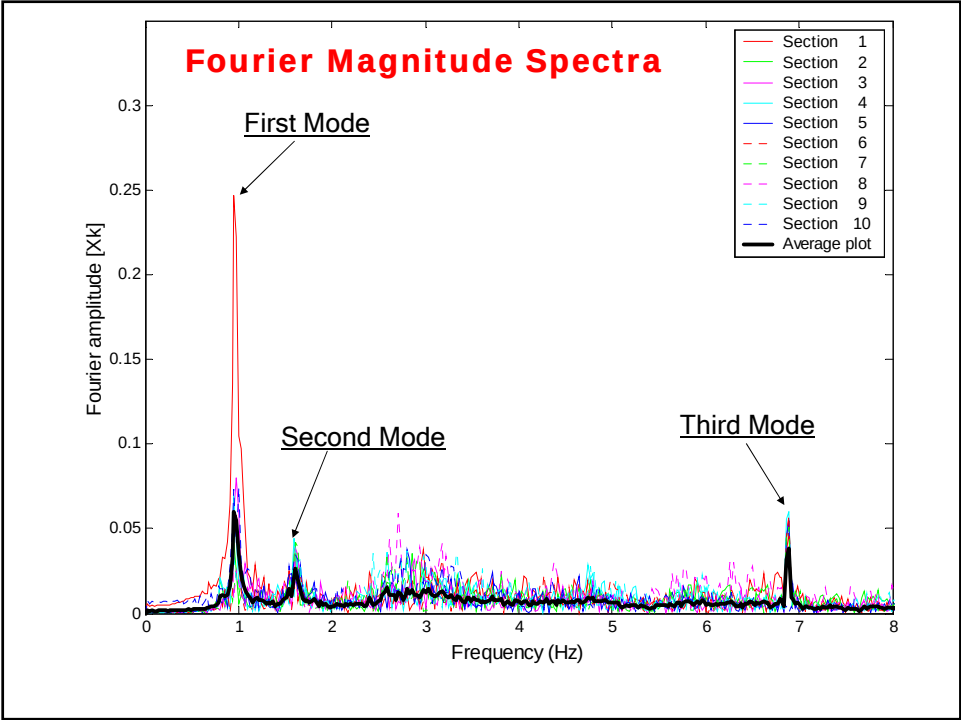
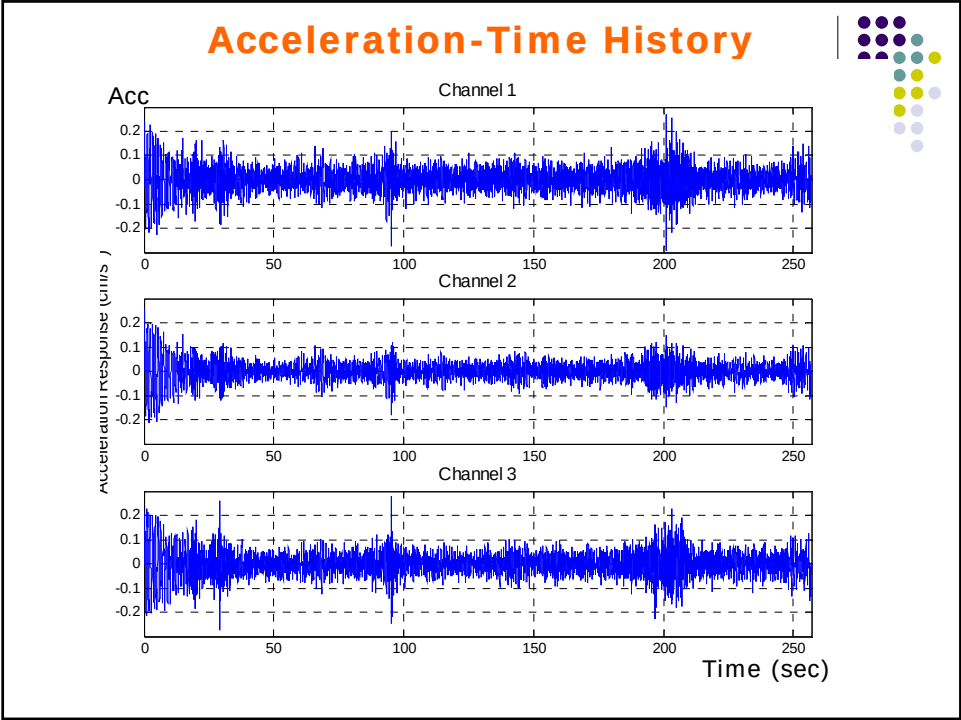


- การวิเคราะห์โครงสร้างจากแบบรายละเอียดการก่อสร้าง
- ประเมินจากการใช้สูตรคำนวณซึ่งเสนอไว้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวต่าง ๆ
- การตรวจวัดจากโครงสร้างจริง

การตรวจวัดด้วยวิธี Ambient Vibration Measurement

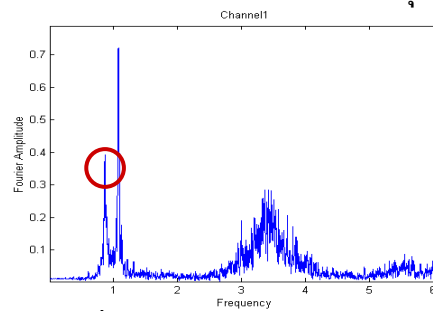




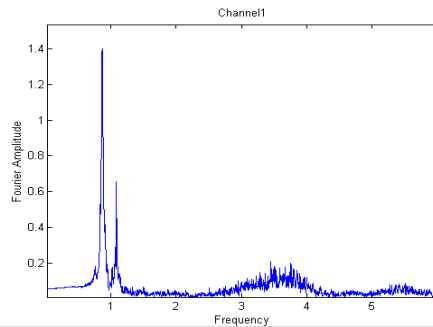




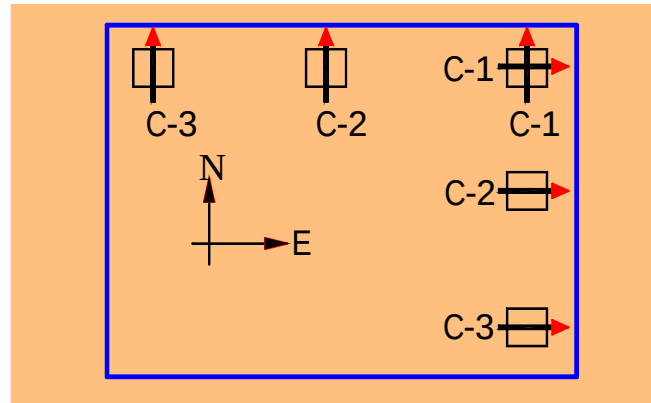
Fourier Spectrum ของอาคารที่ตรวจวัดที่ไม่มีแรงกระตุ้นจากกลุ่มคน



Fourier Spectrum ของอาคารที่ตรวจวัดหลังถูกแรงกระตุ้นจากกลุ่มคน (กระตุ้นที่ $f = 0.88 \text{ Hz}$)



Top Floor Vibration

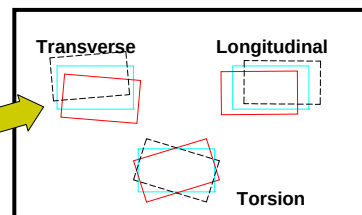
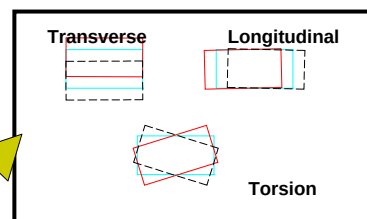


Mode of Motion at Top Floor

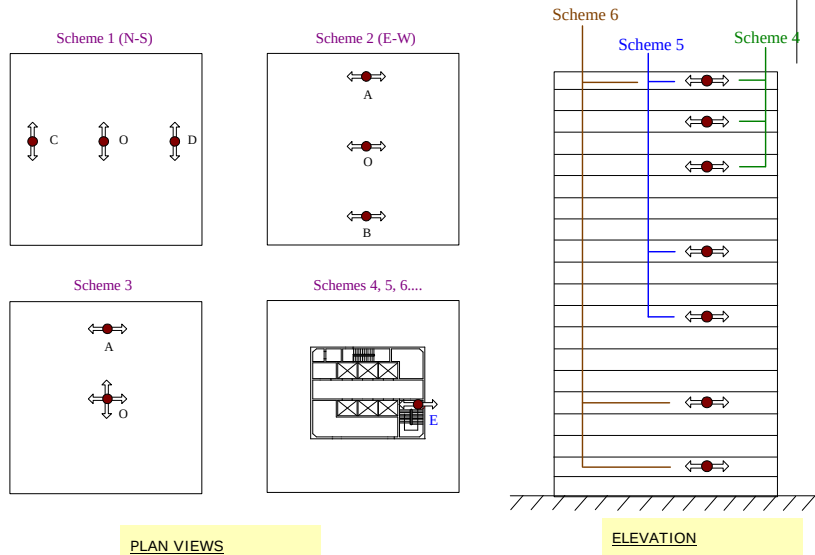
Motion at top floor includes two translation in two orthogonal axes (transverse and longitudinal) and a torsion.

Example of building with pure translation motion in two axes

Example of building with coupling translation motion in two axes

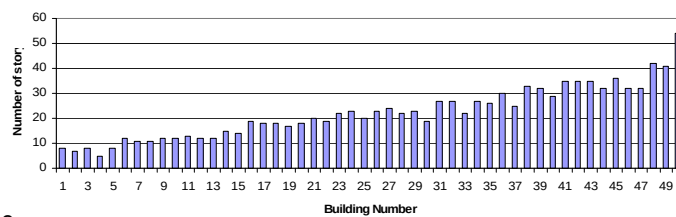


Measure vibration at lower floor for mode shape along building height

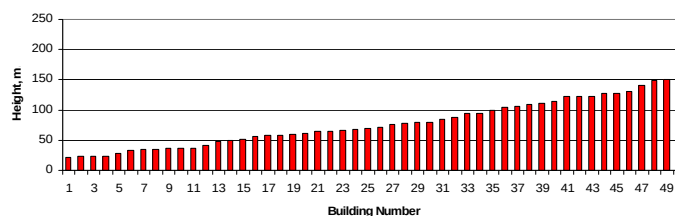


50 Reinforced Concrete Buildings in Bangkok

Number of stories: 5-54

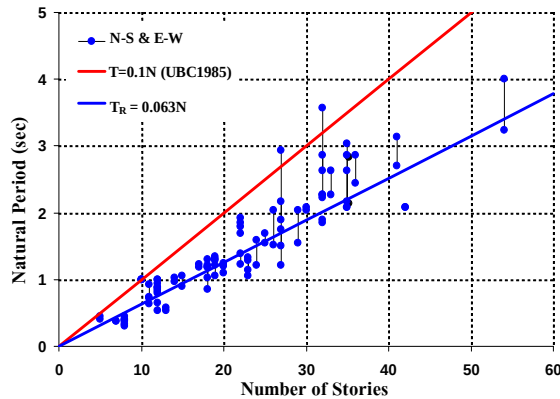


Height: 20-210 m.



Natural Periods

Periods of translational modes and number of stories

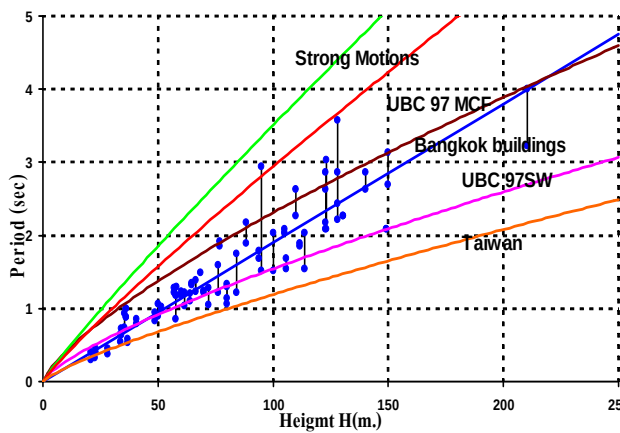


Bangkok Buildings
T = 0.063 N



Empirical formulas for periods

Periods of buildings measured from motion recorded during many earthquakes and ambient vibration



Strong Earthquakes
(USA)

$$T = 0.0507H^{0.92}$$

$$T = 0.0466H^{0.90}$$

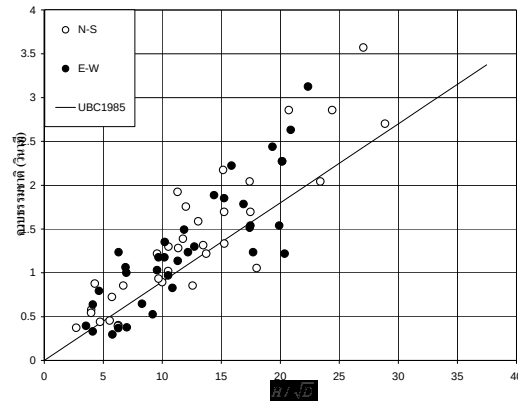
Ambient & Small EQ
(Taiwan)

$$T = 0.0294H^{0.804}$$

Bangkok buildings
T = 0.019H

คาบธรรมชาติจากการตรวจวัด

Periods of translational modes and $H/D^{0.5}$



UBC Code 1985

$$T = 0.09 H/D^{0.5}$$

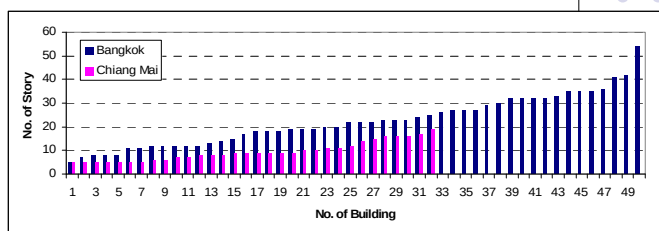
or

$$f = D^{0.5} / (0.09H)$$

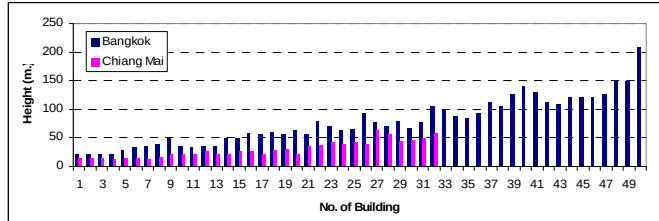


50 Buildings in Bangkok and 32 Buildings in Chiang Mai

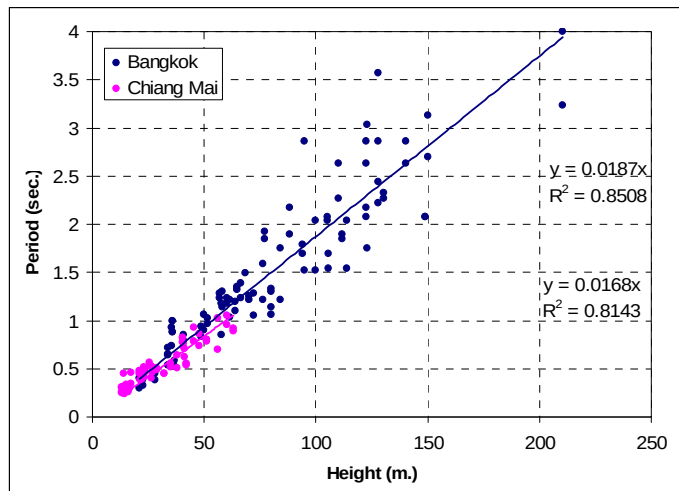
Number of story:
Bangkok 5-42
Chiang Mai 5-19



Height:
Bangkok 20-210 m.
Chiang Mai 14-60 m.



Natural Periods



C สัมประสิทธิ์ของคาบธรรมชาติ ตาม UBC 1985

แสดงผลของคาบธรรมชาติต่อแรงเฉือน

$$C = \frac{1}{15\sqrt{T}} \leq 0.12$$

ค่า T โดยประมาณ (UBC-85)

สำหรับโครงสร้างทั่วไป $T = \frac{0.09H}{\sqrt{D}}$

สำหรับโครงข้อแข็งที่มีความเหนียว $T = 0.1N$

Natural Period in Building Code

- สำหรับ หนึ่งชั้นประมาณ 3.0 – 3.5 m

$$N = H/3.0 - H/3.5$$

$$T = 0.1H / 3.0 \quad T = 0.1H / 3.5$$

- ความสัมพันธ์ของ H และ D

อาคารเตี้ย สมมุติ $D = 2H$

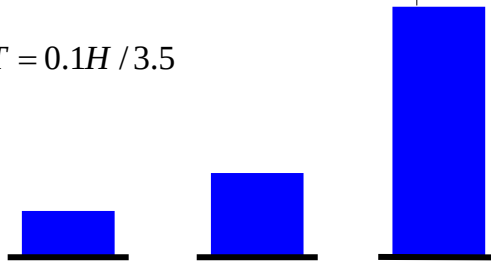
$$T = 0.09H / \sqrt{2H}$$

อาคารสูงปานกลาง $D = H$

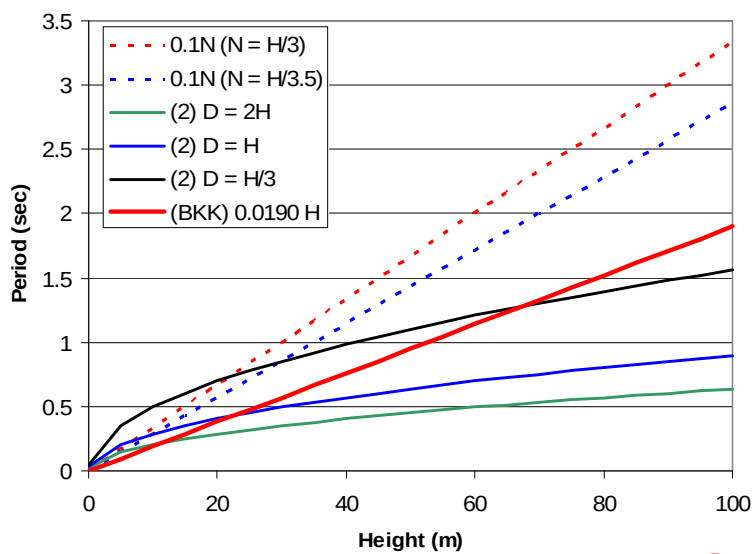
$$T = 0.09H / \sqrt{H}$$

อาคารสูง $D = H/3$

$$T = 0.09H / \sqrt{H/3}$$



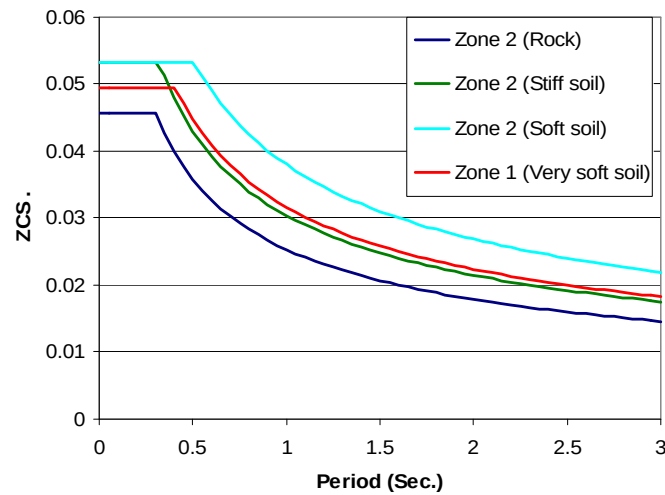
Natural Period in Building Code



แรงเฉือนสำหรับการออกแบบ $V = ZICKSW$

สัมประสิทธิ์ ZCS

(พิจารณา $I = 1, K = 1$)



Faculty of Engineering
Thammasat University

สรุป

1. ระบบพลวัตประกอบด้วย m, c, k (หรือ T, ξ) ภายใต้แรงภายนอก $p(t)$
2. การเคลื่อนที่ของพื้นทำให้เกิดแรงพลวัตประสิทธิผลกระทำต่อโครงสร้าง
3. ลักษณะการสั่นไหวของโครงสร้างขึ้นกับ คาบธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงเป็นหลัก
4. การสั่นไหวของระบบ MDOF สามารถอธิบายด้วยระบบ SDOF
5. การตอบสนองของโครงสร้างต่อแผ่นดินไหวแสดงได้ในรูปของ Response spectrum
6. แรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวสามารถพิจารณาเป็นแรงสถิตย์เทียบเท่าได้

Faculty of Engineering
Thammasat University

ความแตกต่างระหว่างแรงลมกับแรงจากแผ่นดินไหว

ศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

แรงลม

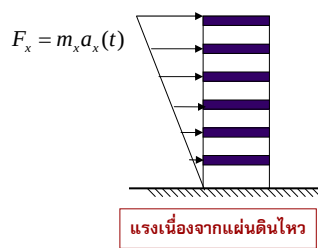
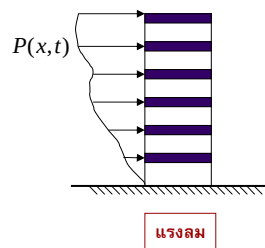
- Meteorology
- Fluid Dynamics
- Statistics of turbulence
- Structural Dynamics
- Probabilistics

แรงจากแผ่นดินไหว

- Seismology
- Structural Dynamics
- Nonlinear Analysis
- Probabilistics

ความแตกต่างระหว่างแรงลมกับแรงจากแผ่นดินไหว

- แรงจากแผ่นดินไหวเกิดในระยะเวลาสั้น ๆ
- ความถี่หลักของคลื่นแผ่นดินไหวโดยทั่วไปมีค่าสูงกว่าค่าความถี่หลักในลมประมาณ 10-50 เท่า
- แรงจากแผ่นดินไหวเกิดขึ้นที่ทุกตำแหน่งของโครงสร้างพร้อมกัน แต่แรงลมในขณะเวลาหนึ่งอาจมีค่าแตกต่างกันที่ตำแหน่งต่าง ๆ



ความแตกต่างระหว่างแรงลมกับแรงจากแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

- แรงลม เป็นประเภทที่เกิดจากแรงภายนอก
 - เรียกว่า ปัญหาที่ควบคุมด้วยแรง
 - ผลจากความเหนียวของโครงสร้าง (หรือพฤติกรรมการรับแรงหลังการคราก) ไม่เกิดประโยชน์ต่อการรับแรงมากนัก
- แรงจากแผ่นดินไหว เป็นประเภทที่เกิดจากการขจัดภายนอก
 - เรียกว่า ปัญหาที่ควบคุมด้วยการขจัด
 - ผลจากความเหนียวของโครงสร้างเกิดประโยชน์ต่อการตอบสนองต่อผลการขจัดอย่างมาก

ความแตกต่างระหว่างแรงลมกับแรงจากแผ่นดินไหว

การออกแบบรับแรงลมและแรงแผ่นดินไหว

- แรงลม พิจารณาแรงที่อาจเกิดขึ้นสูงสุดภายในช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้าง ดังนั้น ต้องออกแบบให้โครงสร้างรับแรงโดยไม่เกิดการเสียหาย
- แรงจากแผ่นดินไหว พิจารณาแรงที่อาจเกิดขึ้นสูงสุดภายในหลายร้อยปี ดังนั้น จึงยอมให้โครงสร้างเกิดการโยกตัวจนองค์อาคารเสียหายได้ แต่ต้องไม่พังทลายลงมา

ดังนั้น แรงที่ใช้ออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวจึงมีค่าลดลง