

## บทที่ 2

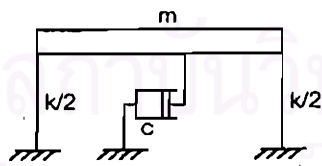
### การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ในการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกทั่วไปหรือแรงลม เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงยืดหยุ่นและในการออกแบบจะไม่ยอมให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างเหล่านั้น แต่สำหรับการออกแบบโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวจะยอมให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้นได้แต่โครงสร้างต้องไม่พังทลาย ดังนั้นจึงเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งในช่วงที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น ทั้งนี้เนื่องจากว่าการออกแบบโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวจะออกแบบโดยใช้ความเข้มของแผ่นดินไหวที่มีรอบ (Return period) อยู่ในช่วง 100–500 ปี การที่จะออกแบบให้โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น จะทำให้ได้โครงสร้างที่ขนาดใหญ่และเป็นการไม่ประหยัด ดังนั้นจึงยอมให้โครงสร้างมีพฤติกรรมถึงช่วงไม่ยืดหยุ่น คือยอมให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้บ้างแต่ไม่ถึงกับพังทลายลง

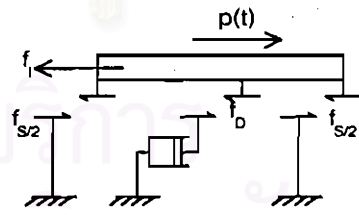
สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวทั้งในช่วงที่โครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจะกล่าวถึงโครงสร้างที่มีดีกรีของควมอิสระเท่ากับ 1 นอกจากนั้นยังพูดถึงหลักการในการวิเคราะห์ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

#### 2.1 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โครงสร้างโดยหลักการทางพลศาสตร์ (Dynamic analysis) จะมีแรงภายใน 3 แรง ได้แก่ แรงเฉื่อย (Inertia force,  $f_I = mi\ddot{u}$ ), แรงสติฟเนส (Stiffness force,  $f_S$ ) และแรงหน่วง (Damping force,  $f_D = c\dot{u}$ ) แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยที่โครงสร้างมีมวล  $m$ , สติฟเนส  $k$  และค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วง  $c$



รูปที่ 2.1(ก) โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 2.1(ข) สมดุลของแรง

จากรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการสมดุลของแรงได้เป็น

$$f_I + f_D + f_S = p(t) \quad (2.1)$$

โดยที่

$p(t)$  เป็นแรงภายนอกที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา

$\dot{u}$ ,  $\ddot{u}$  และ  $u$  เป็นความเร่ง, ความเร็ว และการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้าง ตามลำดับ

สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Linear elastic) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงสติฟเนสกับการเปลี่ยนตำแหน่งจะเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) เขียนได้ว่า

$$f_S = ku \quad (2.2)$$

แต่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงสติฟเนสกับการเปลี่ยนตำแหน่งจะไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่จะขึ้นกับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนตำแหน่งเขียนได้ว่า

$$f_S = f_S(u, \dot{u}) \quad (2.3)$$

สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) ได้เป็น

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_S = p(t) \quad (2.4)$$

โดยที่

$$f_S = ku \quad \text{สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น}$$

$$f_S = f_S(u, \dot{u}) \quad \text{สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น}$$

### 2.1.1 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น

จากสมการที่ 2.4 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ได้เป็น

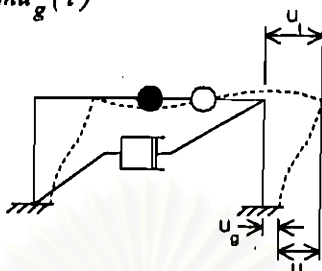
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.5)$$

เนื่องจากแผ่นดินไหวทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ฐานของโครงสร้าง ถ้าให้  $u'$  เป็นการเคลื่อนที่ทั้งหมด (สัมบูรณ์) ของโครงสร้าง,  $u_g$  เป็นการเคลื่อนที่ของพื้นดิน และ  $u$  เป็นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของโครงสร้างกับพื้นดิน แสดงในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้เป็น

$$u'(t) = u(t) + u_g(t) \quad (2.6)$$

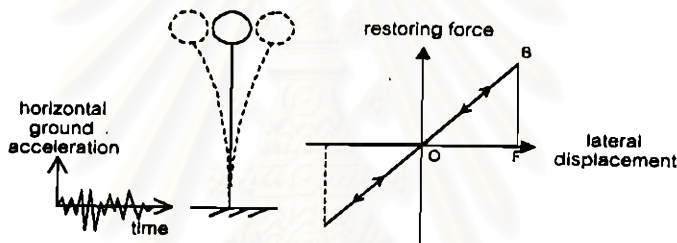
จากความสัมพันธ์ดังกล่าวมาข้างต้น ภายใต้แรงแผ่นดินไหวเมื่อแรงภายนอกมีค่าเท่ากับศูนย์ และ  $f_1 = m\ddot{u}'$  จะได้ว่า

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \tag{2.7}$$

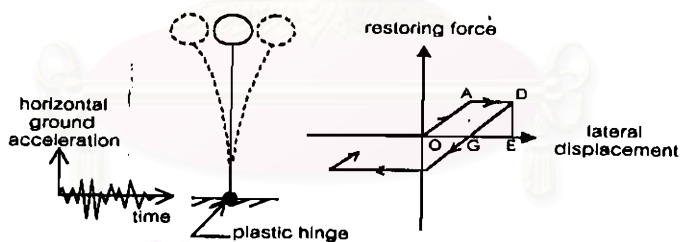


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดกับการเคลื่อนที่ของพื้นดินและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น สำหรับระบบที่มีดักิริของความสัมพันธ์เท่ากับ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ก)



รูปที่ 2.3(ก) โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น



รูปที่ 2.3(ข) โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น

### 2.1.2 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น

จากสมการที่ 2.4 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้เป็น

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = p(t) \tag{2.8}$$

สำหรับการเคลื่อนที่ภายใต้แรงแผ่นดินไหว สามารถเขียนได้เป็น

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_S(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.9)$$

พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่น สำหรับระบบที่มีดักริชของความอิสระเท่ากับ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ข)

สำหรับโครงสร้างภายใต้แรงแบบเป็นวัฏจักร พบว่าโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนตำแหน่งรอบจุดสมดุลคงที่จุดหนึ่งแต่สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น โครงสร้างจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งรอบจุดสมดุลที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องจากการครากที่เกิดขึ้น ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งอย่างถาวร

พิจารณารูปที่ 2.3 เมื่อคิดว่าโครงสร้างเคลื่อนที่อย่างอิสระและไม่มี ความหน่วง ( $c = 0$ ) มีความเร็วเมื่อผ่านตำแหน่งสมดุลเท่ากับ  $\dot{u}_{max} = v_{max}$  กำหนดให้รอยต่อของโครงสร้างรูปที่ 2.3(ก) มีความสามารถด้านทานที่รอยต่อเท่ากับ  $V_{2u}$  สำหรับโครงสร้างรูปที่ 2.3(ข) มีความสามารถด้านทานที่รอยต่อน้อยกว่าโครงสร้างแรกมีค่า  $V_{2u}$

ให้โครงสร้างในรูปที่ 2.3(ก) มีการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดเท่ากับ  $u_{01}$  จากกฎทรงพลังงานจะได้ว่าพลังงานศักย์ของโครงสร้างซึ่งอยู่ในรูปพลังงานความเครียด (Strain energy) ที่การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของโครงสร้างเมื่อผ่านตำแหน่งสมดุล ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}ku_{01}^2 \quad (2.10)$$

$$u_{01} = \left(\frac{m}{k}\right)^{1/2} v_{max} \quad (2.11)$$

สำหรับโครงสร้างในรูปที่ 2.3(ข) เนื่องจากความสามารถในการด้านทานของโครงสร้างมีน้อย ทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ขึ้นที่ฐาน แรงด้านทานที่เกิดขึ้นมีค่า  $V_{2u}$  และการเปลี่ยนตำแหน่งมีค่า  $u_{02}$  พลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟ OADE ของรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ของโครงสร้าง ดังแสดง

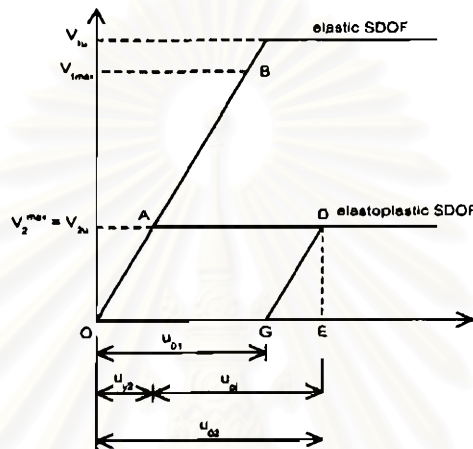
$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}V_{2u}u_{y2} + V_{2u}u_{pl} \quad (2.12)$$

ได้ว่า

$$u_{pl} = \frac{1}{2V_{2u}} (mv_{max}^2 - V_{2u}u_{y,2}) \quad (2.13)$$

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโครงสร้างมีค่า

$$u_{o2} = u_{y,2} + u_{pl} \quad (2.14)$$



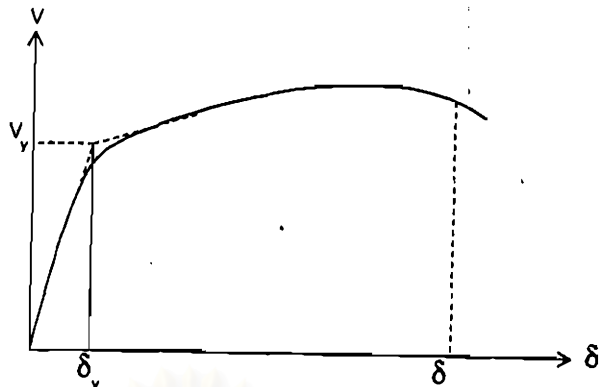
รูปที่ 2.4 แรงและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

โครงสร้างในรูปที่ 2.3(ก) เป็นโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น พลังงานศักย์ของโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ทั้งหมด แต่สำหรับโครงสร้างในรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่น พลังงานศักย์ที่เปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟ GDE ดังรูปที่ 2.4 ส่วนพื้นที่ใต้กราฟ OADG จะเป็นพลังงานที่ถูกสลายไปโดยการครากที่เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วน (Dissipate energy) โดยอาจเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อน

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวของโครงสร้างเกิดจาก ความต้านทานของโครงสร้างทั้งในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น และความสามารถของโครงสร้างในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก ที่เรียกว่า ความเหนียว (Ductility)

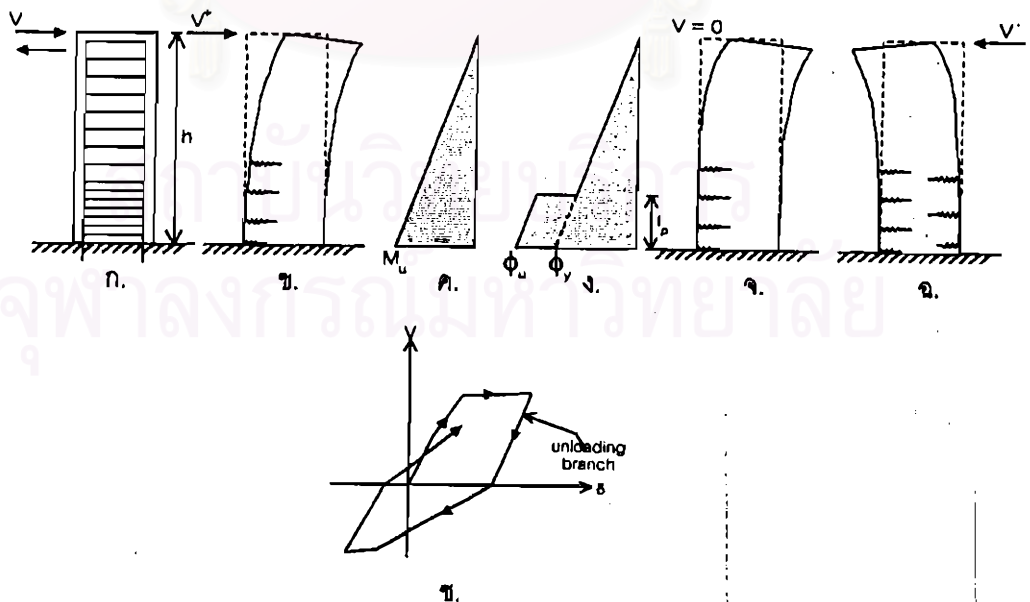
ความเหนียว (Ductility) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโครงสร้างมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างที่ตำแหน่งวิบัติ (Ultimate deformation,  $\delta_u$ ) กับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ตำแหน่งคราก (Yield deformation,  $\delta_y$ ) ดังแสดงดังรูปที่ 2.5

พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่นภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรแสดงดังรูปที่ 2.6

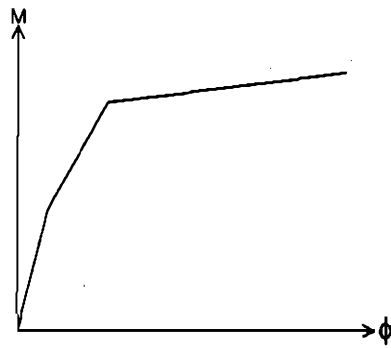


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนตำแหน่ง

ในการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของโครงสร้างภายใต้แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว วิธีที่เหมาะสมที่สุดคือการคำนวณเชิงตัวเลข โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีพฤติกรรมในช่วงไม่ยืดหยุ่นซึ่งความสามารถในการรับแรงของหน้าตัดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 2.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดเพื่อความสะดวกจึงสมมติให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันต่างกัน 3 เส้น จุดที่เปลี่ยนความชันคือจุดที่คุณสมบัติของหน้าตัดเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่จุดที่คอนกรีตเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดึง, จุดที่เหล็กเสริมคราก และ จุดที่ชิ้นส่วนเกิดการวิบัติ ภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรความสามารถในการรับแรงของหน้าตัดจะลดลงเมื่อรอบที่กระทำต่อโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาของ Park และคณะ (1985) ได้เสนอแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร เรียกว่า Three parameter park model โดยมีความคิดว่าความสามารถด้านทานแรงภายนอกของหน้าตัดมีค่าลดลงโดยมีตัวแปรสำคัญ ได้แก่ การลดลงของสติฟเนส (Stiffness degradation parameter), การลดลงของกำลัง (Strength deterioration parameter) และการลดลงเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม และการเปิด-ปิดของรอยแตกของคอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของแรงกระทำ (Slip or crack closing parameter)



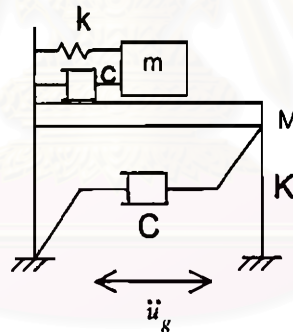
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัด

## 2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

การใช้มวลหน่วงปรับค่าในการลดการตอบสนองของโครงสร้าง เป็นการเพิ่มค่าความหน่วงให้กับโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ตามมวลหน่วงปรับค่าจะทำงานได้ดีหรือไม่ ขึ้นกับการเลือกตัวแปรต่างๆ เช่นมวล, ค่าสติฟเฟส และค่าความหน่วง ของมวลหน่วงปรับค่า นอกจากนั้นยังมีผลของลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวอีกด้วย กล่าวคือหากคลื่นไม่มีลักษณะที่เป็นฮาร์โมนิก และไม่มีความถี่ที่เด่นชัดแล้ว มวลหน่วงปรับค่าก็ไม่สามารถทำงานได้ดี รูปที่ 2.8 เป็นโครงข้อแข็งที่ได้ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า ที่ชั้นบนของอาคาร ทำให้จากที่มีดีกรีของควมอิสระเท่ากับ 1 ก็กลายเป็นเท่ากับ 2 ทำให้ความถี่ของโครงสร้างมีค่าเปลี่ยนไป สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ ดังสมการที่ 2.15(n) และ 2.15(ข)



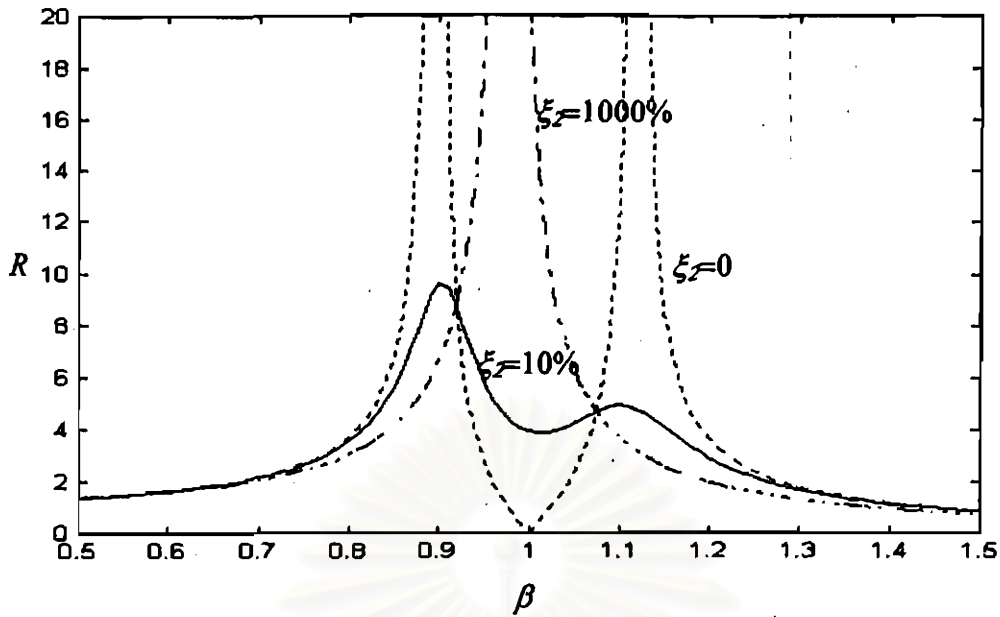
รูปที่ 2.8 โครงข้อแข็งพอร์ทอลที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าไว้ที่ชั้นบน

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = c\dot{z}(t) + kz(t) - M\ddot{u}_g(t) \quad (2.15n)$$

$$m_2\ddot{z}(t) + c_2\dot{z}(t) + k_2z(t) = -m_2\ddot{u}(t) - m_2\ddot{u}_g(t) \quad (2.15ข)$$

โดยที่

$\ddot{u}(t)$ ,  $\dot{u}(t)$  และ  $u(t)$  เป็นความเร่ง, ความเร็ว และการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงข้อแข็ง เทียบกับฐาน .  $\ddot{u}_g(t)$  เป็นความเร่งของแผ่นดินไหว และ  $\dot{z}(t)$ ,  $\dot{z}(t)$  และ  $z(t)$  เป็นความเร่ง, ความเร็ว และการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลหน่วงปรับค่า เทียบกับโครงสร้าง



รูปที่ 2.9 สัมประสิทธิ์การขยายการตอบสนองกับอัตราส่วนของความถี่ของแรงกับโครงสร้าง

จากการศึกษาของ Den Hartog ภายใต้ระบบโครงสร้างที่ไม่มีค่าความหน่วง ( $C = 0$ ) และแรงกระทำเป็นรูปไซน์ มีความถี่เท่ากับ  $\omega$  การทำงานของมวลหน่วงปรับค่าเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนตำแหน่งแบบสถิต ได้ออกมาในรูปของสัมประสิทธิ์การขยาย (Dynamic amplification factor,  $R$ ) สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีค่าความหน่วง จะได้เป็น

$$R = \frac{y_{max}}{y_{st}} = \sqrt{\frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_u \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\zeta_u \alpha \beta)^2 (1 - \beta^2 - \beta^2 \mu)^2}} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_s} = \text{อัตราส่วนความถี่ของแรงกับโครงสร้าง}$$

$$\alpha = \frac{\omega_u}{\omega_s} = \text{อัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วงปรับค่ากับโครงสร้าง}$$

$$\omega_u = \sqrt{\frac{k}{m}} = \text{ความถี่ธรรมชาติของมวลหน่วงปรับค่า}$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K}{M}} = \text{ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง}$$

$$\omega = \text{ความถี่ของแรง}$$

$$\zeta_u = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega_u} = \text{อัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า}$$

$$\mu = \frac{m}{M} = \text{อัตราส่วนมวลของมวลหน่วงปรับค่ากับโครงสร้าง}$$



จากสมการ 2.16 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การขยายกับอัตราส่วนของความถี่ของแรงกับโครงสร้าง ได้ดังรูปที่ 2.9 จะได้ว่าที่อัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วยปรับค่ามีค่าเท่ากับ 1000% เมื่อโครงสร้างเกิดการก้ำทอน มวลหน่วยปรับค่าจะไม่ช่วยลดการตอบสนองของโครงสร้างเลย และที่อัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วยปรับค่ามีค่าเท่ากับ 0 พบว่ามวลหน่วยปรับค่าจะช่วยลดการตอบสนองของอาคาร หากเกิดการก้ำทอนขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากความถี่ของแรงมีค่าต่างกับความถี่ของโครงสร้างเล็กน้อย กลับเป็นการทำให้การตอบสนองเกิดมาก แต่ที่อัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วยปรับค่ามีค่าเท่ากับ 10% พบว่าหากโครงสร้างเกิดการก้ำทอน มวลหน่วยปรับค่าจะช่วยลดการตอบสนองได้ แม้ว่าจะไม่สามารถลดลงจนเป็นศูนย์ก็ตาม และถ้าหากความถี่ของแรงมีค่าต่างกับความถี่ของโครงสร้างเล็กน้อย ก็ไม่ทำให้เกิดการก้ำทอนขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่าหากมวลหน่วยปรับค่ามีความถี่ของช่วงการใช้ประโยชน์จะกว้างกว่า และเพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนความถี่ที่เหมาะสม ได้มีการเสนอสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ขึ้นซึ่งแตกต่างกันไปตามลักษณะของแรงที่กระทำ ในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นการศึกษาความถี่เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวกระทำที่ฐานอาคารจะได้ว่า

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2.17ก)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (2.17ข)$$

### 2.3 ดัชนีความเสียหาย (Damage Index)

ดัชนีความเสียหายเป็นค่าที่สามารถบอกความเสียหายขององค์อาคาร รวมทั้งความเสียหายของชั้นและความเสียหายของโครงสร้างทั้งหมด Park และคณะ (1984) ได้เสนอความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความเสียหายของโครงสร้างขึ้น โดยค่าความเสียหายภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ประกอบด้วยความเสียหาย 2 ส่วนรวมกันแบบเชิงเส้น ได้แก่ความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งแบบไม่ยืดหยุ่น และความเสียหายสะสมที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบเป็นวัฏจักรของโครงสร้าง แสดงได้ดังสมการ

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u P_y} \int dE_h \quad (2.18)$$

โดยที่

$\delta_m$  เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุดที่เกิดขึ้น

$\delta_u$  เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ตำแหน่งวิบัติ

$P_y$  เป็นกำลังครากของชิ้นส่วน

$\int dE_h$  เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในชิ้นส่วน

$\beta$  เป็นค่าคงที่ของแบบจำลองมีความสัมพันธ์กับการลดลงของกำลัง

ค่าดัชนีความเสียหายสามารถคำนวณได้ 3 ระดับได้แก่

1. ความเสียหายระดับขึ้นส่วนของอาคาร ได้แก่ เสา, คาน และ กำแพงรับแรงเฉือน
2. ความเสียหายระดับขึ้น ได้แก่ ความเสียหายขององค์ประกอบทั้งหมดของชั้นทางด้านแนวตั้ง (เสาและกำแพงรับแรงเฉือน) และความเสียหายขององค์ประกอบทั้งหมดของชั้นทางด้านแนวราบ (คานและพื้น) และความเสียหายทั้งหมดของชั้น
3. ความเสียหายทั้งหมดของโครงสร้าง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย