การออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ : วิธีสเปกตรัมผลตอบสนอง (Response Spectrum Analysis, RSA)

รศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568

การออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์

1. วัตถุประสงค์ของการใช้วิธีแบบพลศาสตร์
2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)
3. ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์
4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์
5. P-Delta effect
6. Accidental torsion amplification

การออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์

7 Design load combinations

8 การคำนวณ Strain ในกำแพง

9 เป้าหมายในการออกแบบ

1. วัตถุประสงค์ของการใช้วิธีแบบพลศาสตร์

1) เพื่อคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างซึ่งได้แก่ base reactions, internal forces, displacement และ deformation ของโครงสร้างที่เป็นผลมาจากแผ่นดินไหว

2) วิธีแรงสถิตเทียบเท่า (ELF) ใช้ค่าความเร่งสเปกตรัม Sa และการกระจายแรงตามความสูงอาคาร จากโหมดพื้นฐาน (โหมดแรก) เป็นหลักเท่านั้น ซึ่งจะมีความถูกต้องดีเฉพาะกรณีที่อาคารมีความสูงไม่มาก และรูปทรงค่อนข้างปกติซึ่งมีความสม่ำเสมอของการกระจายมวลและสติฟเนส

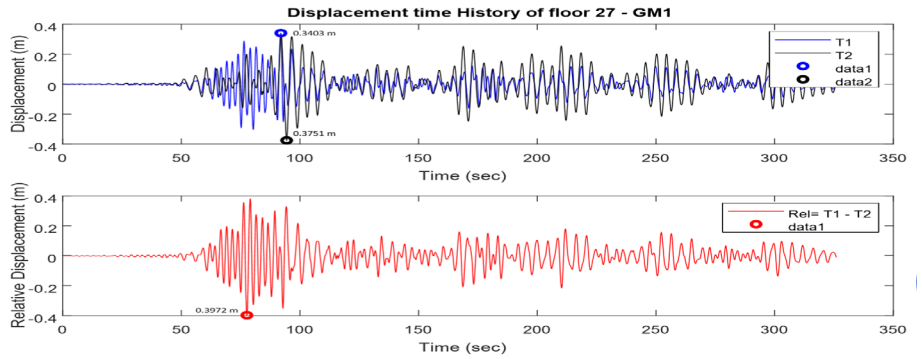
3) ในกรณีที่เป็นอาคารสูง หรือมีรูปทรงไม่ปกติ จำเป็นต้องใช้วิธีแบบพลศาสตร์เพื่อคำนึงถึงการมีส่วนร่วมของโหมดอื่นๆ ที่สูงกว่าโหมดพื้นฐาน จึงจะได้ค่าการตอบสนองที่ถูกต้องเพียงพอ

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

วิธีวิเคราะห์โครงสร้างแบบต่างๆ ภายใต้แผ่นดินไหว

1. Linear Static หรือที่มาตรฐาน ASCE 7 เรียกว่า วิธี Equivalent Lateral Force (ELF)
2. Linear Dynamic
   - 2.1 Modal Analysis แยกการตอบสนองเป็นแต่ละโหมด แล้วนำมารวมกัน
     - 2.1.1 Modal Response History Analysis (RHA) ให้ค่าการตอบสนองที่ทุกขณะเวลาที่โครงสร้างสั่นไหว
     - 2.1.2 **Modal Response Spectrum Analysis (RSA)** ให้ค่าเฉพาะการตอบสนองสูงสุดจากทิศบวกและลบ
   - 2.2 Direct integration response history analysis ไม่มีการแยกเป็นโหมด แต่แก้ระบบสมการด้วยวิธีเชิงตัวเลข
3. Nonlinear Static (Pushover Analysis) ใช้ในการวิเคราะห์อาคารที่ผ่านการออกแบบเบื้องต้นมาแล้ว
4. Nonlinear Dynamic (Nonlinear response history analysis, NLRHA) จัดว่ามีความสมจริงที่สุด

วิธี RSA เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะการป้อนค่าใส่ในโปรแกรม
ทำได้สะดวกกว่าวิธีอื่น และสามารถใช้ได้กับอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอ



2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

สมการของการเคลื่อนที่ภายใต้แผ่นดินไหว

สำหรับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น $\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{p}_{eff}(t) = -\mathbf{m}\boldsymbol{\iota}\ddot{u}_g(t)$ เป็นระบบสมการ differential equations

โดยที่

$\mathbf{u}(t)$ คือ displacement vector ซึ่งเป็น unknown ที่ต้องการหาคำตอบจากสมการนี้

t คือ เวลา ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ

$\dot{\mathbf{u}}(t)$ และ $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ คือ ความเร็ว และ ความเร่ง ตามลำดับ

$\mathbf{m}$ คือ mass matrix $\mathbf{c}$ คือ damping matrix $\mathbf{k}$ คือ stiffness matrix

ข้างขวาของสมการเป็น แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผล $\mathbf{p}_{eff}(t) = -\mathbf{m}\boldsymbol{\iota}\ddot{u}_g(t)$

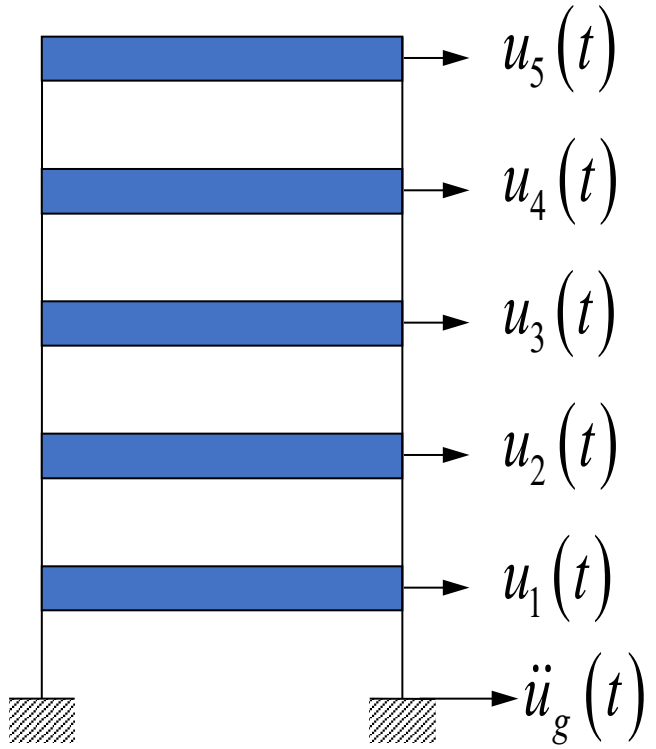
$\boldsymbol{\iota}$ คือ influence vector ซึ่งแต่ละแถวสอดคล้องกับแต่ละ degree of freedom (DOF) ค่าในแถวนั้นจะเท่ากับหนึ่ง หาก DOF นั้นมีการเคลื่อนที่ไปพร้อมการแผ่นดินไหวในทิศทางที่กำลังพิจารณา และเท่ากับศูนย์ หาก DOF นั้นไม่เคลื่อนที่ไปพร้อมการแผ่นดินไหวในทิศทางที่กำลังพิจารณา

$\ddot{u}_g(t)$ คือ ความเร่งของพื้นดินที่สั่นไหวเนื่องจากแผ่นดินไหว

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

ตัวอย่างอาคาร 5 ชั้น

สมมติให้อาคารนี้มีคานที่แข็งเกร็ง (rigid beams) ทำให้จุดต่อเสา-คานไม่เกิดการหมุน และ DOF ที่ต้องพิจารณาในการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์เหลือเพียงการเคลื่อนที่ในแนวราบของพื้นแต่ละชั้นเท่านั้น จึงมีทั้งหมด 5 DOFs



ในที่นี้ทุก DOF ซึ่งอยู่ในแนวราบจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับพื้นดิน จึงทำให้ Influence vector $\boldsymbol{\iota}$ มีค่าเท่ากับ 1 ในทุกแถว ซึ่งจะเรียกว่า vector $\mathbf{1}$

$$\boldsymbol{\iota} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \mathbf{1}$$

และสมมติให้มวลของพื้นแต่ละชั้นเท่ากับ m

สติฟเนสของเสาแต่ละชั้นทำให้อาคารมีสติฟเนสด้านข้าง (lateral stiffness) เท่ากับ k ในทุกชั้น

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

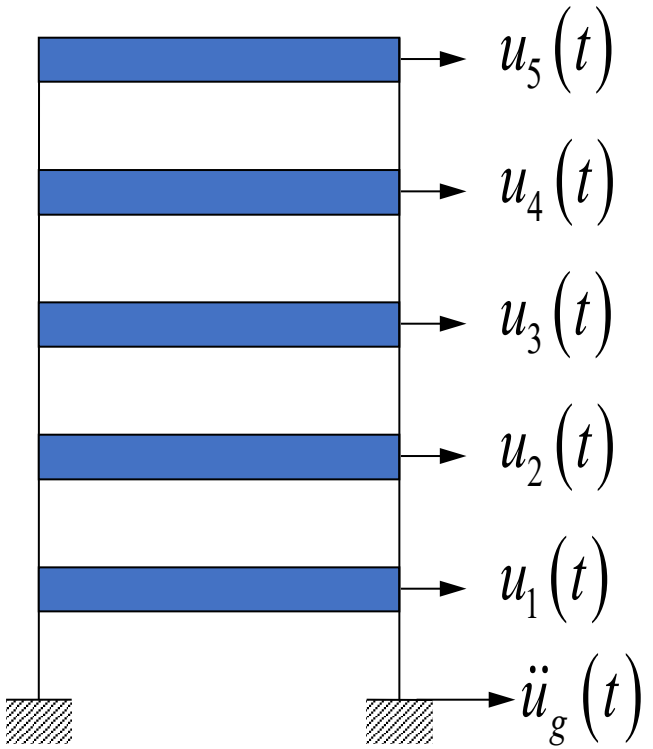
ตัวอย่างอาคาร 5 ชั้น

Mass matrix

$$\mathbf{m}=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix}$$

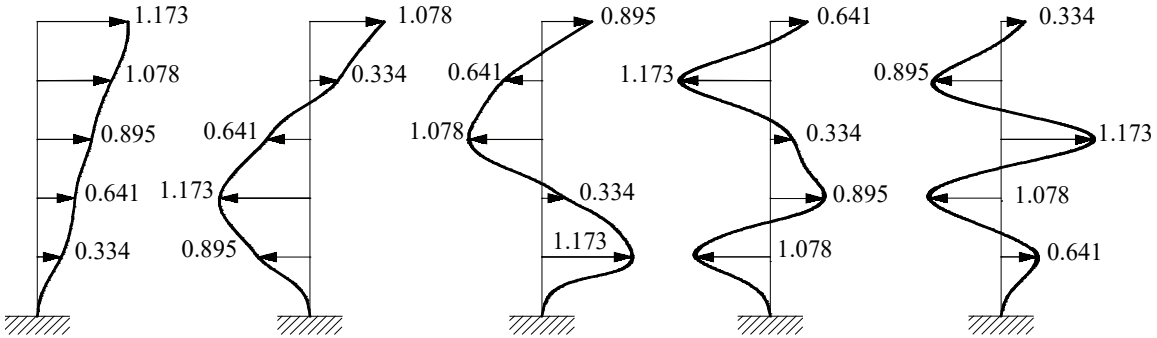
Stiffness matrix

$$\mathbf{k}=\begin{bmatrix} 2k & -k & 0 & 0 & 0 \\ -k & 2k & -k & 0 & 0 \\ 0 & -k & 2k & -k & 0 \\ 0 & 0 & -k & 2k & -k \\ 0 & 0 & 0 & -k & k \end{bmatrix}$$



รูปร่างโหมด

$$\phi_1=\begin{Bmatrix} 0.334 \\ 0.641 \\ 0.895 \\ 1.078 \\ 1.173 \end{Bmatrix} \quad \phi_2=\begin{Bmatrix} -0.895 \\ -1.173 \\ -0.641 \\ 0.334 \\ 1.078 \end{Bmatrix} \quad \phi_3=\begin{Bmatrix} 1.173 \\ 0.334 \\ -1.078 \\ -0.641 \\ 0.895 \end{Bmatrix} \quad \phi_4=\begin{Bmatrix} -1.078 \\ 0.895 \\ 0.334 \\ -1.173 \\ 0.641 \end{Bmatrix} \quad \phi_5=\begin{Bmatrix} 0.641 \\ -1.078 \\ 1.173 \\ -0.895 \\ 0.334 \end{Bmatrix}$$



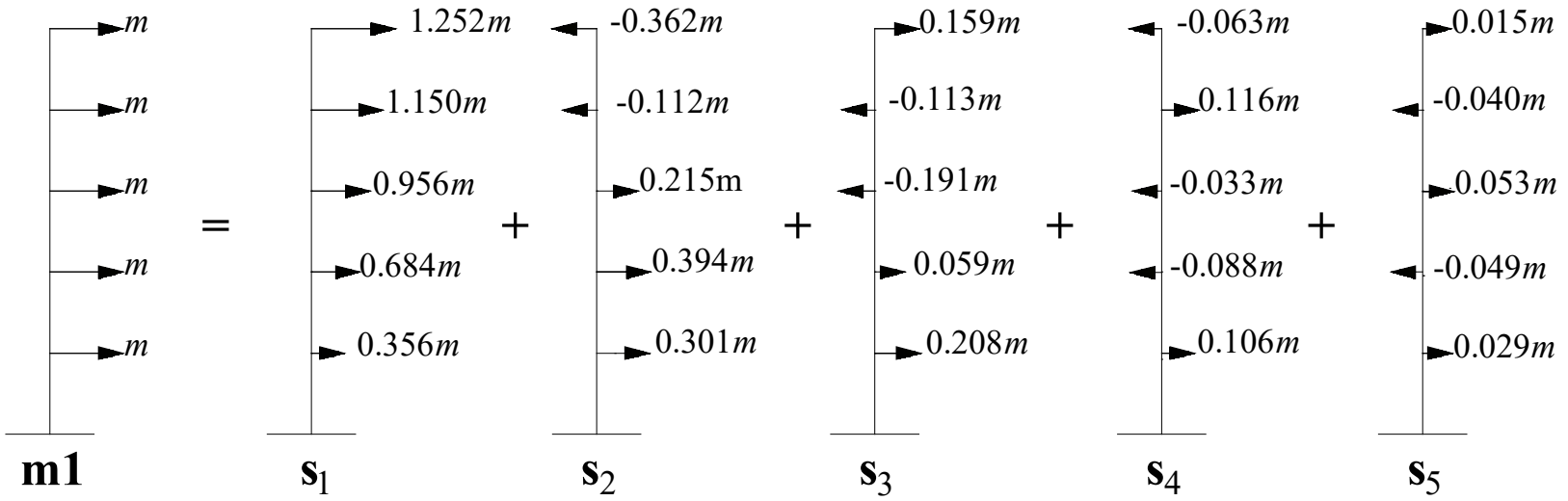
2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผลแยกโหมด (modal expansion of effective earthquake force)

- แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผลสามารถแยกพิจารณาเป็นผลรวมจากหลายโหมด (modal expansion of p_{eff})

$$\mathbf{m\iota} = \sum_{n=1}^{N} \mathbf{s}_n \quad \text{โดยที่} \quad \mathbf{s}_n = \Gamma_n \mathbf{m} \phi_n \qquad \text{และ } \Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \text{ คือ modal participation factor}$$

- ในการวิเคราะห์แบบโหมด (modal analysis) แต่ละโหมดถูกกระตุ้นโดยแรงแผ่นดินไหวประสิทธิผลของโหมดนั้นๆ $\mathbf{s}_n$



Modal expansion of **m1**

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

Concept of modal analysis

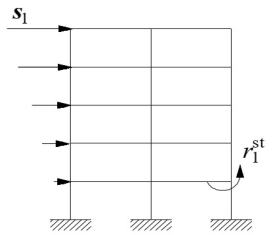
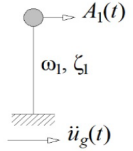
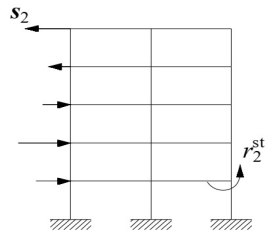
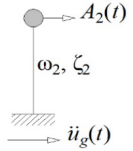
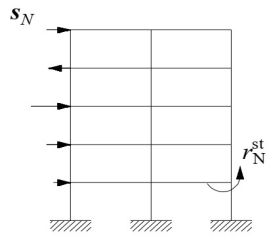
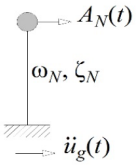
ผลตอบสนองของแต่ละโหมด สามารถคำนวณได้จาก

$$r_n = r_n^{st} A_n$$

โดยที่

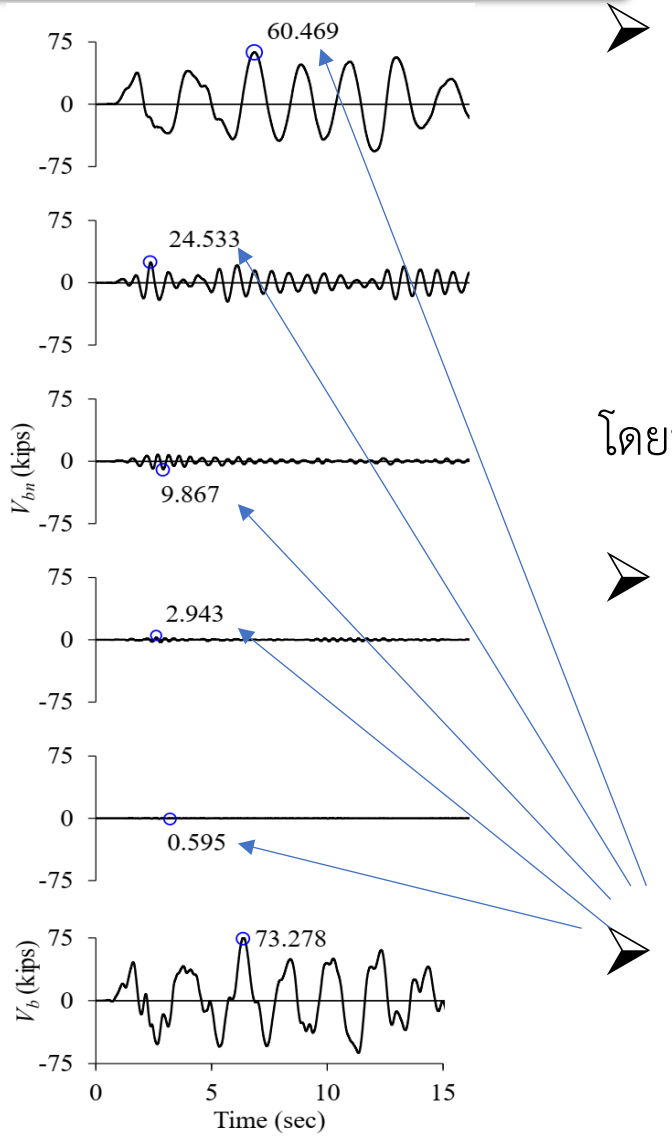
- Modal static response r_n^{st} เป็นผลตอบสนองเนื่องจากแรงแบบสถิต $\mathbf{s}_n$ ในโหมดที่ n
- A_n หรือ $S_a(T{=}T_n)$ คือ ความเร่งสเปกตรัมของโหมดที่ n
- ในกรณีที่พิจารณาแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (base shear)

  Modal static base shear V_{bn}^{st} สำหรับโหมดที่ n คือ แรงเฉือนที่ฐานอาคารเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวประสิทธิผลในโหมดที่ n ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า effective modal mass หรือ modal participating mass

Mode	Static analysis of structure	Dynamic analysis of SDF System	Modal contribution of Dynamic Response
1			$r_1(t) = r_1^{st} A_1(t)$
2			$r_2(t) = r_2^{st} A_2(t)$
⋮	⋮	⋮	⋮
N			$r_N(t) = r_N^{st} A_N(t)$
Total response			$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t)$

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี modal response history analysis (RHA)

Concept of modal analysis



- การรวมผลตอบสนองจากหลายโหมดโดยการรวมประวัติเวลาเข้าด้วยกันจะได้คำตอบที่แม่นตรง เรียกว่า วิธี modal response history analysis (RHA)

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n^{st} A_n(t)$$

โดยที่ $A_n(t)$ คือ ประวัติเวลาของความเร่งเทียม Pseudo-acceleration history ของโหมดที่ n

- ซึ่งข้อมูล $A_n(t)$ จำเป็นต้องคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในขณะที่ค่าสูงสุดของ $A_n(t)$ สามารถอ่านค่าได้ทันทีจากกราฟความเร่งสเปกตรัมที่ค่าคาบตรงกับคาบของโหมดที่ n

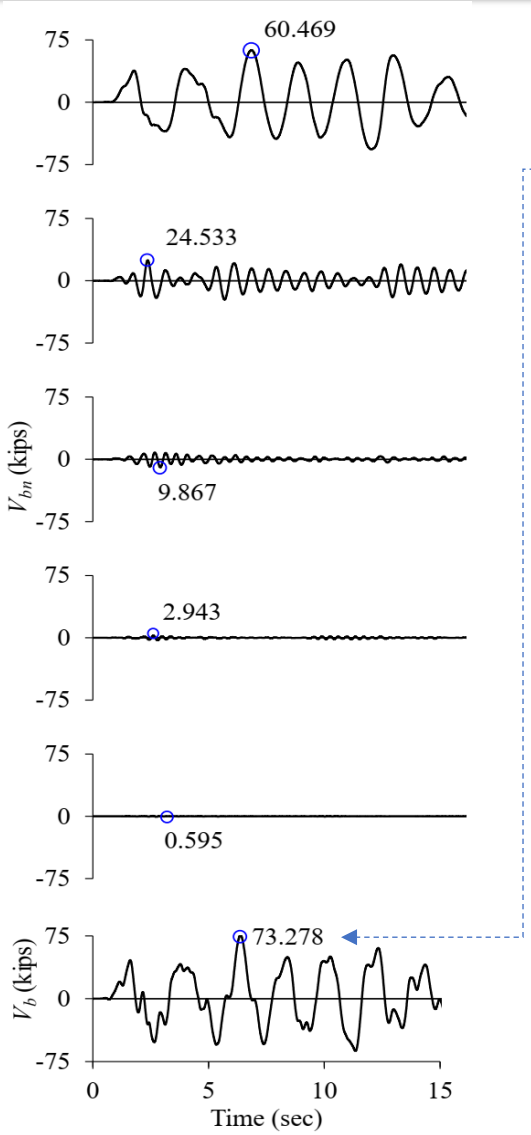
$$\max_{\forall t} \left| A_n(t) \right| = S_a\left(T = T_n\right)$$

- โดยค่าตอบสนองสูงสุดในแต่ละโหมด peak modal response สามารถคำนวณได้สะดวก

$$r_{no} = \max_{\forall t} \left| r_n(t) \right| = r_n^{st} S_a\left(T = T_n\right)$$

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี modal response history analysis (RHA)

Concept of modal analysis



- การรวมค่าการตอบสนองสูงสุด (modal peak responses, r_{no}) จากหลายโหมดเข้าด้วยกันเพื่อประมาณ**ค่าสูงสุดของการตอบสนองรวม** (peak total response, r_o) เรียกว่า วิธี **modal response spectrum analysis (RSA)**
- ซึ่งจะเป็นค่าแบบประมาณ อาจมีความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่เนื่องจากไม่ได้รวมผลตอบสนองแบบประวัติเวลาเข้าด้วยกัน แต่ใช้ค่า peak modal responses มารวมกันแบบประมาณ
- วิธีการรวมมีหลายวิธี เรียกว่า modal combination rule ได้แก่ square root of sum of square (SRSS) หรือ complete quadratic combination (CQC) ซึ่ง CQC ให้ค่าถูกต้องดีกว่า SRSS แต่ใช้สมการที่ซับซ้อนมากกว่า
- หากใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แนะนำให้ใช้วิธี CQC

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

Peak total response r_o ประมาณค่าได้จากการรวม peak modal response r_{no} ของโหมดต่างๆ ด้วยวิธี เช่น square-root-of-sum-squares (SRSS) หรือ complete quadratic combination (CQC)

$$r_o \simeq \sqrt{\sum_{n=1}^{N} r_{no}^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left(r_n^{st} A_n\right)^2}$$

เช่น Base shear — effective modal mass

$$V_b = \sqrt{\left(V_{b1}^{st} A_1\right)^2 + \left(V_{b2}^{st} A_2\right)^2 + \left(V_{b3}^{st} A_3\right)^2 + \cdots} = \sqrt{V_{b1}^{\ 2} + V_{b2}^{\ 2} + V_{b3}^{\ 2} + \cdots}$$

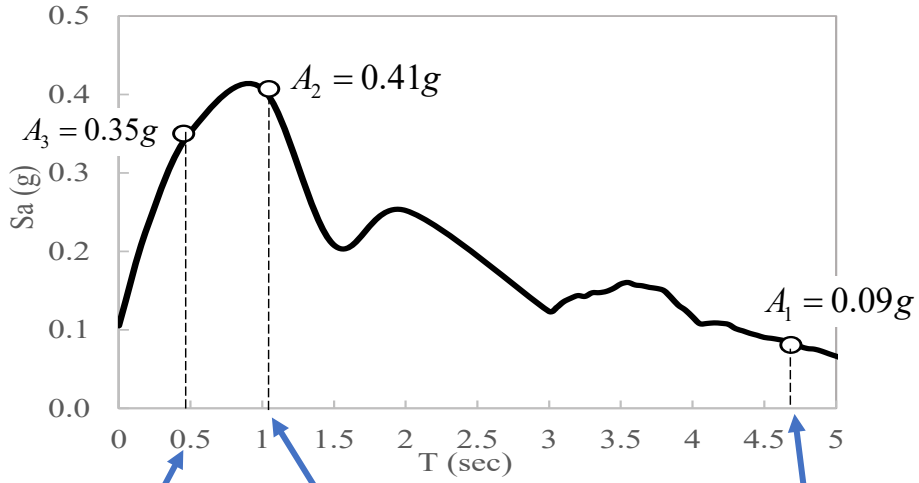
Base bending moment $M_b = \sqrt{M_{b1}^{\ 2} + M_{b2}^{\ 2} + M_{b3}^{\ 2} + \cdots}$

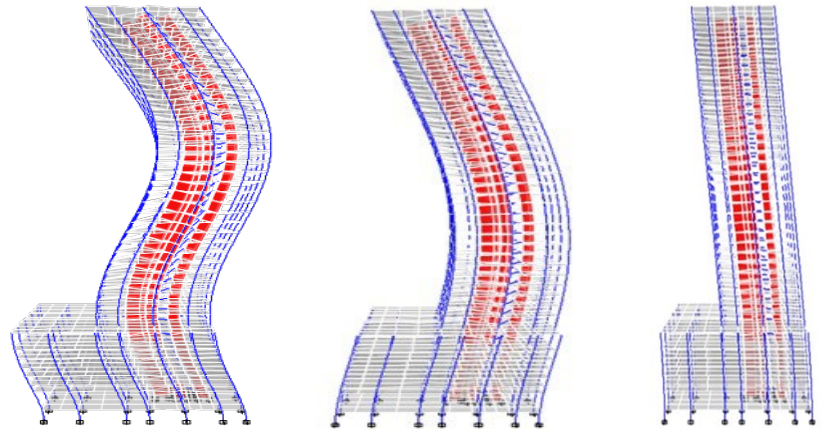
จากตัวอย่างอาคาร 5 ชั้น

Response History Analysis (RHA) $V_b = 73.728\,\text{kips}$

Response Spectrum Analysis (RSA) by SRSS

$$V_b \simeq \sqrt{60.469^2 + 24.533^2 + 9.867^2 + +2.943^2 + 0.595^2} = 66.066\,\text{kips}$$





กรณีอาคารสูง $A_2 > A_1$ ทำให้ผลของโหมดสูงมีความสำคัญ

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี response spectrum analysis (RSA)

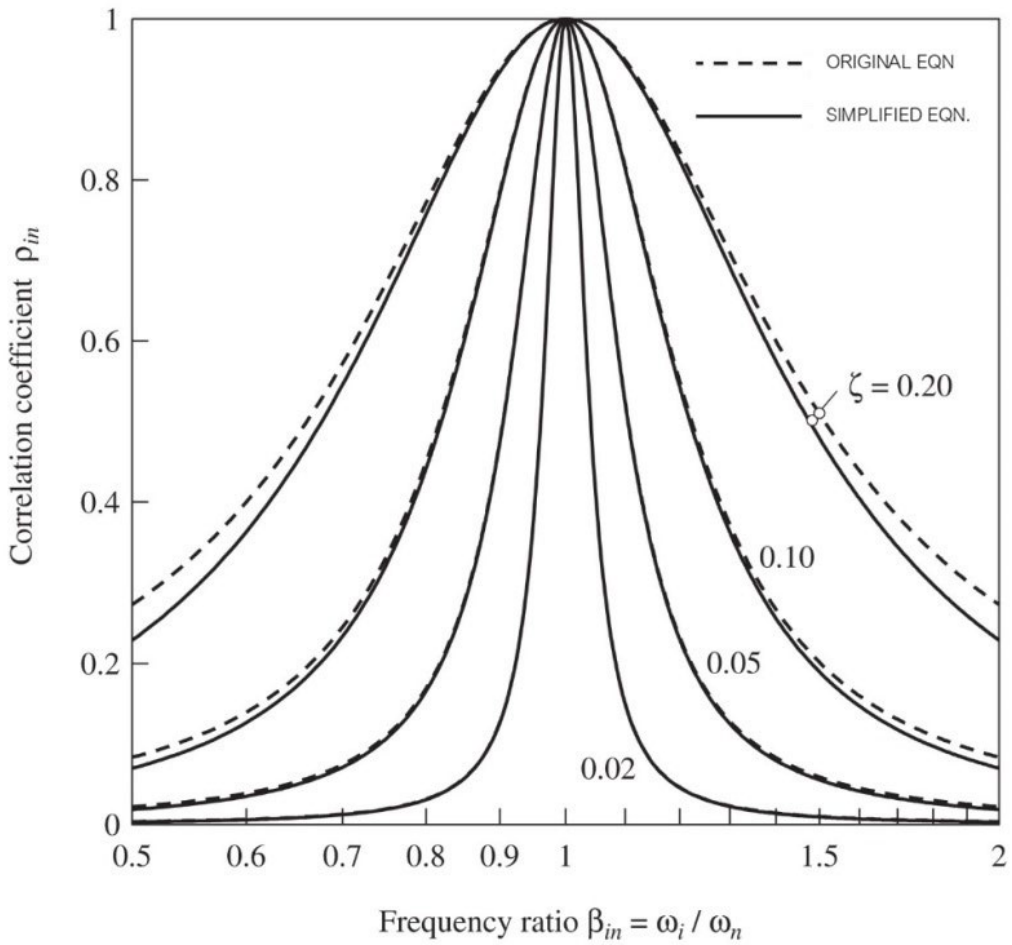
การรวม peak modal response ด้วยวิธี Complete quadratic combination (CQC)

$$r_o \simeq \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{n=1}^{N}\rho_{in} r_{io} r_{no}}$$

โดยที่ r_{io} และ r_{no} คือ peak modal responses ของโหมดที่ i และ โหมดที่ n

$$\rho_{in} = \frac{8\sqrt{\zeta_i \zeta_n}\left(\beta_{in}\zeta_i + \zeta_n\right)\beta_{in}^{1.5}}{\left(1-\beta_{in}^2\right)^2 + 4\zeta_i\zeta_n\beta_{in}\left(1+\beta_{in}^2\right) + 4\left(\zeta_i^2 + \zeta_n^2\right)\beta_{in}^2}$$

คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ระหว่างโหมดที่ i และ โหมดที่ n ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความถี่ธรรมชาติของทั้งสองโหมด $\beta_{in} = \omega_i / \omega_n$ และ damping ratio



วิธี CQC ให้คำตอบที่ถูกต้องดีกว่าวิธี SRSS ในกรณีที่คาบธรรมชาติของบางโหมดมีค่าใกล้กัน เช่นต่างกันไม่เกิน 20% ซึ่งทำให้มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโหมดมาก

2. วิธีคำนวณผลตอบสนองแบบเชิงเส้นด้วยวิธี modal response spectrum analysis (RSA)

ข้อสังเกตและข้อควรระวัง

- ค่าการตอบสนองสูงสุดที่ได้จากวิธี RSA จะมีแต่ค่าบวกที่ไม่สามารถบอกได้ว่าเกิดจากค่าสูงสุดในทิศทางบวกหรือลบ
- การนำค่าการตอบสนองสูงสุดที่ได้ไปคำนวณหาค่าตอบสนองอื่นต่ออาจให้คำตอบที่ผิดหลาด เช่น การนำ peak floor displacement ของพื้นสองชั้นถัดกันมาหักลบเพื่อหาค่า peak story drift จะเป็นค่าที่ไม่ถูกต้องและต่ำกว่าความเป็นจริงเพราะ peak story drift อาจจะเกิดขึ้นขณะที่พื้นสองชั้นถัดกันนั้นเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกัน
- ดังนั้นจะต้องคำนวณ peak story drift โดยรวมค่า peak modal story drift จากหลายโหมดเข้าด้วยกัน ห้ามคำนวณจาก peak floor displacement
- การวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลศาสตร์ RSA ที่กล่าวมาข้างต้นโดยใช้ค่าความเร่งสเปกตรัม Sa จาก Elastic Response Spectrum จะให้ผลตอบสนองของโครงสร้างแบบ linear elastic ซึ่งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อโครงสร้างตอบสนองช่วง linear elastic
- ในการออกแบบโครงสร้างจะยอมให้โครงสร้างครากได้บ้าง โดยแรงออกแบบเท่ากับแรงอิลาสติก หารด้วย R และการเคลื่อนตัวที่คาดว่าจะเกิดจริงเท่ากับ การเคลื่อนที่แบบอิลาสติก คูณ C_d / R

3. ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์ response spectrum analysis (RSA)

1. จากตำแหน่งที่ตั้งอาคาร กำหนดค่าความเร่งสเปกตรัม S_{DS} และ S_{D1} และลักษณะชั้นดิน (หัวข้อ 1.4 ใน มยผ.1301/1302-61)
2. กำหนดประเภทความสำคัญ และระบุตัวประกอบความสำคัญ (I) (หัวข้อ 1.5 ใน มยผ.1301/1302-61)
3. กำหนดประเภทการออกแบบ ซึ่งมีผลต่อระบบโครงสร้างที่ยอมให้ใช้ได้ (หัวข้อ 1.6 ใน มยผ.1301/1302-61)
4. กำหนดระบบโครงสร้างต้านแรงด้านข้างที่จะใช้ (หัวข้อ 2.3 ใน มยผ.1301/1302-61) และระบุค่าพารามิเตอร์ R C_d และ Ω_0
5. กำหนดค่าอัตราส่วนความหน่วงซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงอาคาร และอุปกรณ์หน่วงถ้ามี (หัวข้อ 1.4 ใน มยผ.1301/1302-61)
6. กำหนด Elastic Design Response Spectrum ที่จะใช้ (หัวข้อ 1.4 ใน มยผ.1301/1302-61) กรณีแอ่งกทม.จะต่างจากพื้นที่อื่น
7. คำนวณการตอบสนองแบบอิลาสติก ด้วยวิธี RSA โดยใช้ effective stiffness ของหน้าตัดชิ้นส่วนโครงสร้าง (หัวข้อ 2.8.3)

ในที่นี้ ขั้นตอน 1 ถึง 6 จะเหมือนกับขั้นตอนที่ต้องทำ ในกรณีการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

3. ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์ response spectrum analysis (RSA)

8. นำผลตอบสนองแบบอิลาสติกไปคูณปรับค่าเพื่อใช้เป็นแรงสำหรับออกแบบ และการเคลื่อนตัวออกแบบเพื่อตรวจสอบตามเกณฑ์

ในการนำผลตอบสนองแบบอิลาสติกไปคูณปรับค่าก่อนนำไปใช้เป็นแรงที่ต้องต้านทานในการคำนวณออกแบบ มีรายละเอียดดังนี้

ก) คำนวณแรงภายในต่างๆ และแรงเฉือนที่ฐาน $V_{t,\ RSA}$ เพื่อการออกแบบ จากแรงแบบอิลาสติกที่ได้จาก RSA คูณด้วย I/R

ข) ตรวจสอบว่า ค่าแรงเฉือนที่ฐาน $V_{t,\ RSA}$ น้อยกว่า 85% ของแรงเฉือนที่ฐานจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า V ตามหัวข้อ 3.2 หรือไม่ ถ้า $V_{t,\ RSA}$ น้อยกว่า V ให้มีการคูณเพิ่มค่าแรงออกแบบ ด้วย scaling factor $SF = 0.85V / V_{t,\ RSA}$ [SF ต้องไม่น้อยกว่า 1]

ค) เฉพาะการคำนวณแรงเฉือนที่ต้องต้านทานในการออกแบบกำแพงและเสา ให้ใช้วิธี Modified RSA (MRSA) ซึ่งจะได้ค่ามากกว่าวิธี RSA แบบปกติประมาณ 3 เท่า ด้วยเหตุผลหลักคือ ไม่ยอมให้เกิดการแตกร้าวทแยงเนื่องจากแรงเฉือนในกำแพงและเสา (หัวข้อ 4.2.2)

ง) ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี RSA และ Modified RSA ให้คำนึงถึงผลของ accidental torsion (หัวข้อ 3.5.2 และ 3.5.3) และ p-delta (หัวข้อ 3.8) ด้วย

3. ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์ response spectrum analysis (RSA)

9. ตรวจสอบการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น story drift ซึ่งอาจพิจารณาในรูปแบบอัตราส่วนระหว่าง story drift กับ ความสูงชั้น เรียกว่า story-drift ratio โดยใช้ค่าผลตอบสนองแบบอิลาสติกที่ได้จาก RSA คูณ C_d/R แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมให้ ในหัวข้อ 2.11.1 ใน มยผ.1301/1302-61 และให้คำนึงถึงผลของ accidental torsion และ p-delta ด้วย

10. ตรวจสอบค่าความเครียดในกำแพงโครงสร้าง ทั้งแบบอัด และแบบดึง ซึ่งหากพบว่ามีความเครียดเกินกว่า 0.002 อาจมีการวิบัติแบบอัดประลัยของคอนกรีต หรือ การครากของเหล็กเสริมเกิดขึ้น ให้ทำการเสริมเหล็กปลอกบริเวณดังกล่าวเพื่อให้มีความเหนียวดังข้อกำหนดสำหรับกำแพงที่มีความเหนียวพิเศษ

3. ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์ response spectrum analysis (RSA)

Modified Response Spectrum Analysis (MRSA)

- วิธี Modified RSA หรือ MRSA ใช้เฉพาะคำนวณแรงเฉือนในกำแพงและเสา เพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนที่ถูกต้องสมจริง ซึ่งเป็นค่าที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงและได้รับการตรวจสอบว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ nonlinear response history analysis (NLRHA) ที่จัดว่ามีความถูกต้องสมจริงมากที่สุด งานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นว่าแรงนี้มีค่ามากกว่าแรงแบบอิลาสติกทุกโหมดหารด้วย R ประมาณ 3 เท่า

- มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อป้องกันการวิบัติแบบเฉือนซึ่งเป็นแบบเปราะและทำให้เกิดการแตกร้าวทแยงที่จะทำให้เสาและกำแพงสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักแนวดิ่ง ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้องค์อาคารมีกำลังต้านทานแรงเฉือนเพียงพอ ที่จะไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือน

$$V = I\sqrt{\left(\frac{S_F \times \Omega_0 V_{1e}}{R}\right)^2 + V_{2e}{}^2 + V_{3e}{}^2 + \cdots}$$

- โดยที่ $V_{1e}, V_{2e}, V_{3e}, \ldots$ คือแรงเฉือนแบบอิลาสติกในแต่ละโหมด (peak modal shear force) ในองค์อาคารนั้นๆ

3. ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์ response spectrum analysis (RSA)

Modified Response Spectrum Analysis (MRSA)

- ในการตรวจสอบค่าความเครียด (strain) ในกำแพงที่ตำแหน่งต่างๆ ว่ามีแนวโน้มที่จะเกิดการอัดประลัย หรือ การครากของเหล็กเสริมหรือไม่ เพื่อจะได้ทำการเสริมเหล็กปลอกให้มีความเหนียวเพียงพอ สามารถคำนวณค่าความเครียดได้จาก

$$\varepsilon_c = \frac{P}{EA_g} - \frac{M}{EI_{eff}}(c - c_{long}/3) \qquad \text{compressive strain}$$

$$\varepsilon_t = \frac{P}{EA_g} + \frac{M}{EI_{eff}}(c + c_{long}/3) \qquad \text{tensile strain}$$

- โดยที่ P และ M คือ แรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดแบบอิลาสติกที่ได้รวมผลของแผ่นดินไหวและน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งแล้ว

c คือ ระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ไปถึงขอบกำแพงด้านที่ต้องการคำนวณค่าความเครียด

c_{long} คือ ระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ไปถึงขอบกำแพงด้านที่ไกลกว่าของหน้าตัดนั้น

E คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity)

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (gross cross-sectional area)

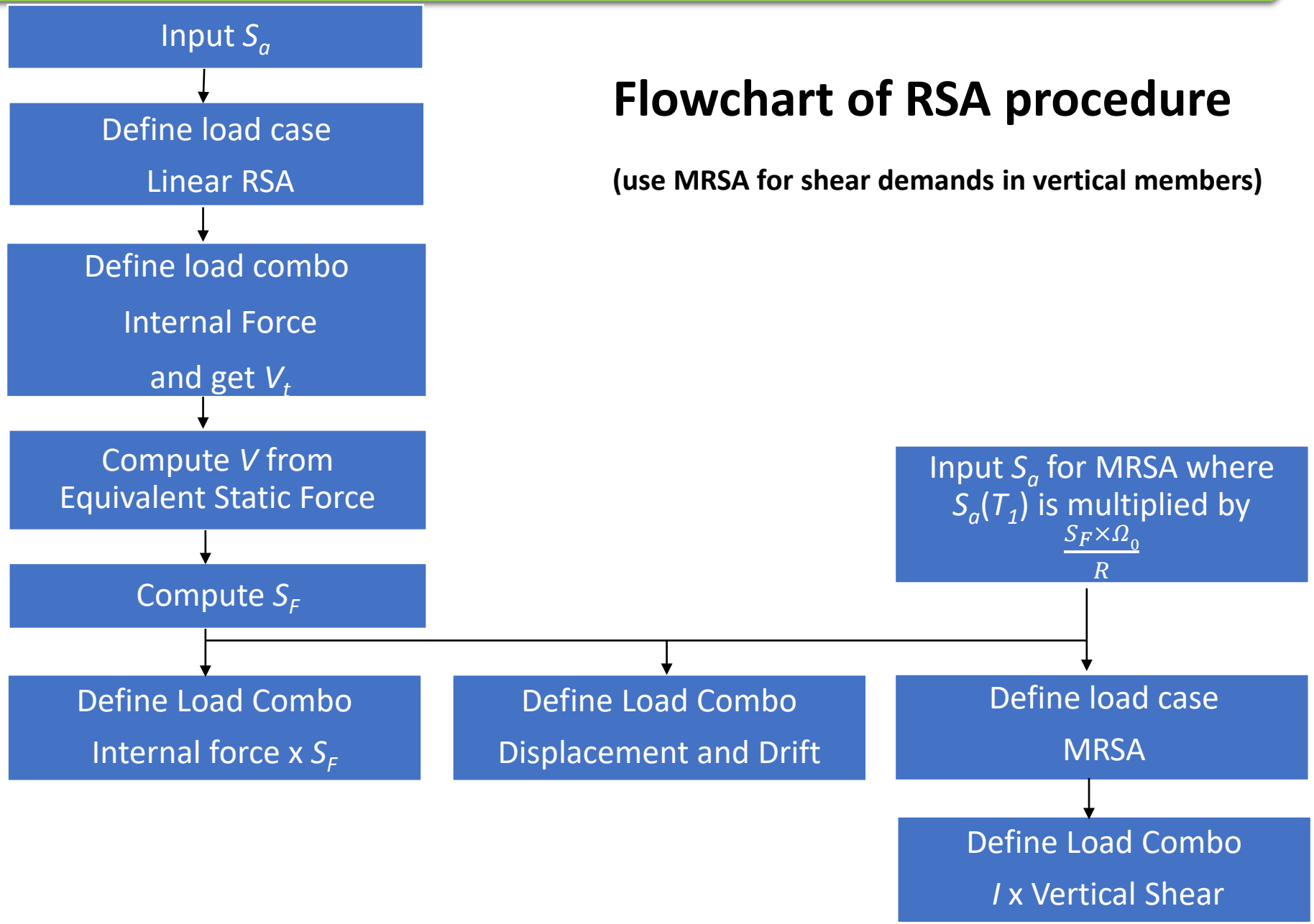
I_{eff} คือ effective moment of inertia of cross-sectional area อ้างอิงตาม ACI 318

$$I_{eff} = \left(0.80 + 25\frac{A_{st}}{A_g}\right)\left(1 - \frac{M_u}{P_u h} - 0.5\frac{P_u}{P_0}\right) I_g \qquad 0.35 I_g \le I_{eff} \le 0.875 I_g$$

3. ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์ response spectrum analysis (RSA)

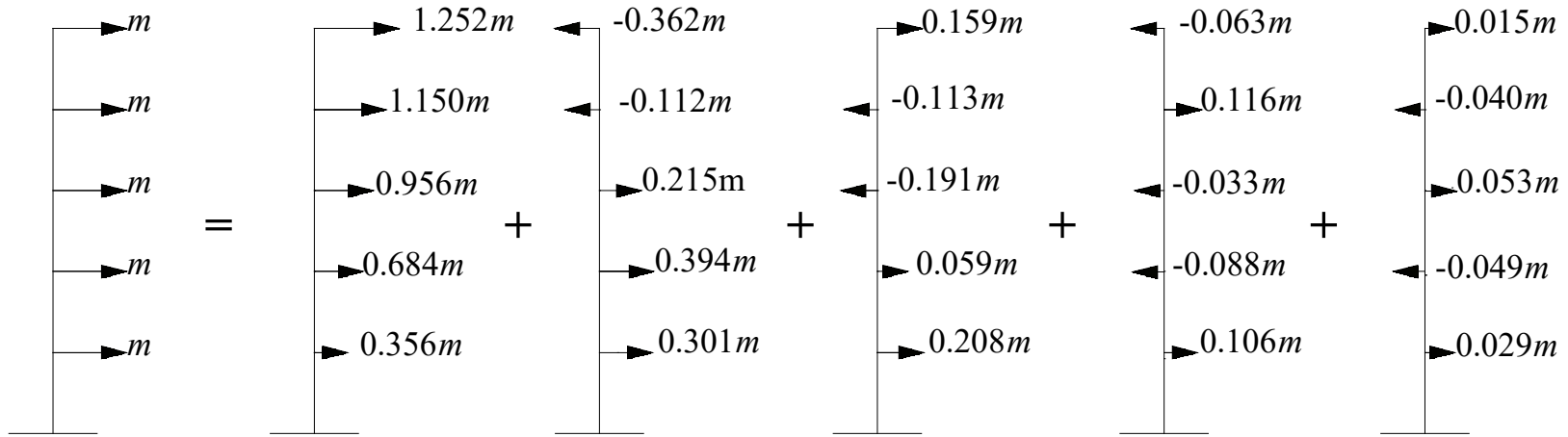
Flowchart of RSA procedure

(use MRSA for shear demands in vertical members)



4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

- ในทางทฤษฎี การคำนวณให้ได้คำตอบที่ครบถ้วนสมบูรณ์จะต้องรวมผลตอบสนองจากทุกโหมดของโครงสร้างเข้าด้วยกัน แต่จำนวนโหมดทั้งหมดของโครงสร้างซึ่งเท่ากับจำนวน degree of freedom (DOF) ซึ่งอาจจะมีมากถึงหลายพัน DOF
- ในทางปฏิบัติจึงยอมให้รวมผลของโหมดแรกๆ ที่มีความสำคัญเป็นหลัก กล่าวคือ โหมดกลุ่มที่มีความถี่ต่ำที่สุด หรือโหมดกลุ่มที่คาบธรรมชาติยาวที่สุด โดยให้มีมวลประสิทธิผล (effective modal mass ซึ่งเท่ากับ modal static base shear) สะสมได้ไม่น้อยกว่า 90% ของมวลทั้งหมดของอาคาร



Total mass=5m V_{b1}^{st}= 4.395m V_{b2}^{st}= 0.436m V_{b3}^{st}= 0.121m V_{b4}^{st}= 0.037m V_{b5}^{st}= 0.008m

PMR_1=**87.9%** PMR_2=**8.72%** PMR_3=**2.42%** PMR_4=**0.74%** PMR_5=**0.16%**

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

- ในการใช้โปรแกรมช่วยคำนวณ และทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ ค่า participating mass ratio PMR คือ อัตราส่วนระหว่าง effective modal mass กับ total mass ทั้งหมดของอาคาร
- โหมดที่มีค่า PMR มากในทิศทางใด เช่น UX หรือ UY แสดงถึง รูปร่างโหมดที่มีการโยกตัวของอาคารในทิศทางนั้น
- โหมดที่เป็นการบิดตัวของอาคารรอบแกนดิ่ง จะมีค่า PMR มากในกรณี Rotation about z-axis หรือ RZ
- เมื่ออาคารไม่มีความสมมาตร รูปร่างโหมดจะมีการโยกตัว พร้อมกับการบิดตัวรอบแกนดิ่ง เรียกว่า มี coupling ระหว่าง translation กับ torsion ซึ่งจะมีค่า PMR มากทั้งในทิศทาง การเคลื่อนที่แนวราบ และการหมุนรอบแกนดิ่ง (z-axis)

- หากใช้โปรแกรมช่วยคำนวณ ควรใช้วิธี CQC ในการรวมผลตอบสนองจากโหมดเข้าด้วยกัน ซึ่งดีกว่า SRSS เพราะคำนึงถึงสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างโหมดเมื่อเกิดกรณีที่สองโหมดมีคาบธรรมชาติใกล้กัน

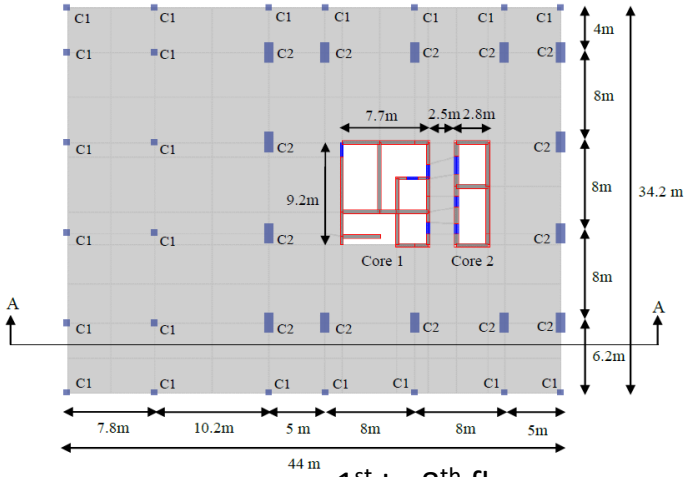
4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

- ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ มักจะมีรายละเอียดน้อยกว่าสภาพความเป็นจริงและมีความแตกต่างจากอาคารจริง เช่น ไม่มีการจำลองผนังอิฐ ซึ่งมักจะทำให้แบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์มี stiffness น้อยกว่า และมี natural period มากกว่าความเป็นจริง ซึ่งการคำนวณโดยใช้ค่าคาบธรรมชาติที่มากเกินไปจะส่งผลให้ใช้ค่าความเร่งสเปกตรัม Sa หรือ A_n ที่น้อยเกินไป และทำให้คำนวณได้ค่าแรงสำหรับการออกแบบที่ต่ำเกินไป จึงต้องมีการนำแรง V_t จากวิธี RSA ไปเทียบกับแรงเฉือนที่ฐาน V จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (equivalent lateral force, ELF) และมีการบังคับให้ใช้ scaling factor SF คูณเพิ่มแรงในวิธี RSA เพื่อไม่ให้ใช้ค่าที่ต่ำเกินไปในการออกแบบอาคาร

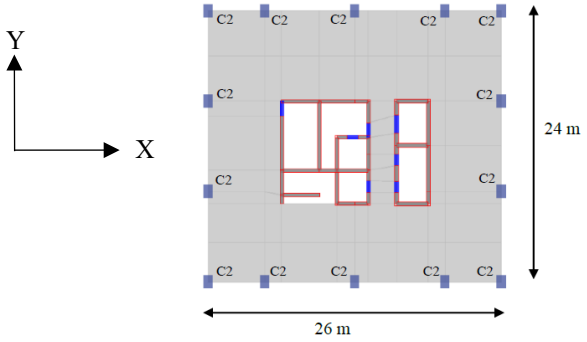
- การใช้ค่าอัตราส่วนหน่วงมีผลต่อค่าตอบสนองทั้งหมด กล่าวคือ ยิ่งอัตราส่วนความหน่วงมีค่ามากขึ้น การตอบสนองจะมีค่าน้อยลง
- ปกติจะอนุญาตให้ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 5% แต่งานวิจัยชี้ว่าอาคารสูง และโครงสร้างเหล็กจะมีอัตราส่วนความหน่วงต่ำลงจึงต้องใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงไม่เกิน 2.5% สำหรับอาคารสูงเกิน 60 เมตร (หัวข้อ 1.4)
- ในการคำนวณการเคลื่อนตัวและ story drift ต้องมีการคูณ Cd ด้วย (ไม่ต้องคูณ SF) ก่อนที่จะนำไปตรวจสอบกับค่าที่ยอมให้ โดยทำการตรวจสอบ story drift ตรงตำแหน่งเสาทั้งหมดในชั้นนั้นๆ และที่มุมของอาคาร

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

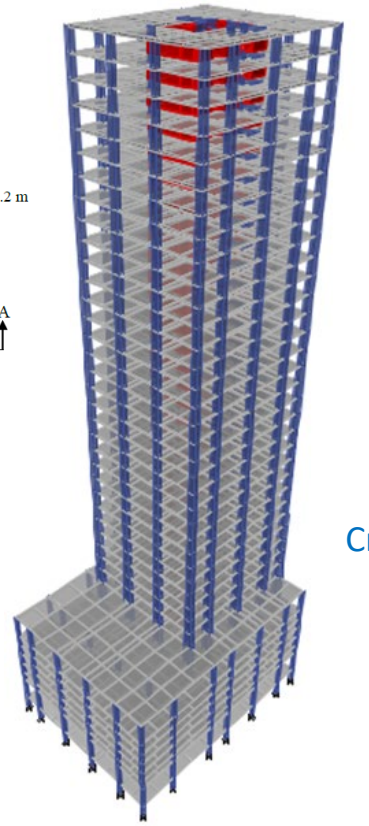
ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น



1st to 8th floor



9th to 39th floor



Cross section of columns (cm x cm)

Story	C1	C2
35th-39th		80 x 80
12th-35th		80 x 120
10th-12th		80 x 140
8th-10th		80 x 160
Base-8th	60 x 60	80 x 180

Slab and wall thickness (cm)

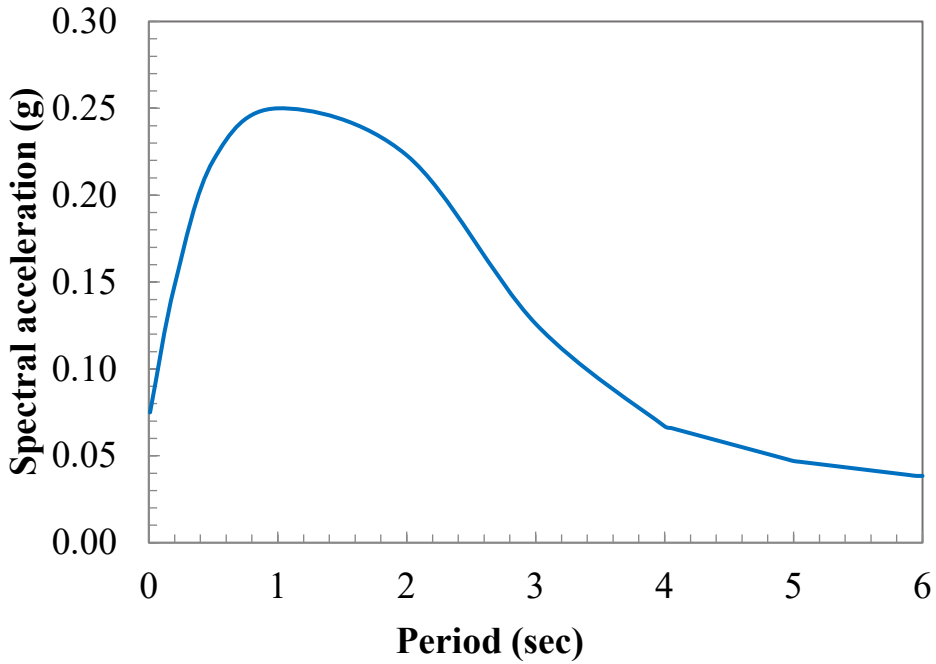
Story	Slab	Core 1	Core 2
9th-39th	25	30	35
Base-8th	30	30	35

No. story		39
Total height (m)		125.55
Podium height (m)		26.05
Maximum height-to-width ratio	X direction	3.6
	Y direction	2.8
Typical story height (m)		3.2
Tower floor area (m^2)		624
Podium floor area (m^2)		1504
Wall area /floor area		0.015
Column area/floor area		0.019
Lateral force resisting system		Special RC wall
Design parameters from the code		R=6, C_d=5, Ω_0=2.5
Occupancy		III (I = 1.25)

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น

- สมมติอาคารตั้งอยู่ กทม. โซน 5
- S_{DS}=Sa (0.2sec)=0.148, S_{D1}=Sa(1.0sec)=0.25
- ประเภทความสำคัญ III (มาก) ตัวประกอบความสำคัญ I = 1.25
- ประเภทการออกแบบ (seismic design category) ง
- Damping ratio = 2.5% เนื่องจากอาคารสูงเกิน 60 เมตร



Elastic spectral acceleration for 2.5% damping ratio

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสาหรับการออกแบบ ด้วยวิธีพลศาสตร์สาหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 2.5%) ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ (หน่วยเป็น g)

S_a โซน	S_a (0.01s)	S_a (0.2 s)	S_a (0.5 s)	S_a (1.0s)	S_a (2.0 s)	S_a (3.0 s)	S_a (4.0 s)	S_a (5.0 s)	S_a (6.0 s)
1	0.208	0.654	0.451	0.233	0.110	0.053	0.042	0.031	0.029
2	0.136	0.318	0.439	0.249	0.196	0.108	0.058	0.038	0.030
3	0.111	0.266	0.320	0.353	0.217	0.109	0.064	0.044	0.034
4	0.102	0.260	0.330	0.264	0.218	0.100	0.039	0.029	0.027
5	0.075	0.148	0.220	0.250	0.223	0.126	0.067	0.047	0.038
6	0.099	0.226	0.340	0.198	0.207	0.093	0.053	0.040	0.035
7	0.093	0.200	0.291	0.231	0.177	0.103	0.064	0.046	0.040
8	0.085	0.236	0.210	0.097	0.055	0.033	0.018	0.012	0.011
9	0.080	0.205	0.269	0.194	0.144	0.061	0.026	0.017	0.013
10	0.115	0.383	0.225	0.059	0.047	0.031	0.017	0.012	0.010

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น

- ตัวอย่างนี้ใช้โปรแกรม ETABS ช่วยในการคำนวณ
- ในขั้นต้นสมมติแรงบิดโดยบังเอิญทำให้แรงเฉื่อยจากมวลพื้นเยื้องตำแหน่งไปร้อยละ 5 ของความกว้างอาคารในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของแผ่นดินไหว ในหัวข้อ 6 ของการบรรยายนี้ จะอธิบายเพิ่มเติมเรื่องการขยายค่าแรงบิดโดยบังเอิญ
- น้ำหนักประสิทธิผลและมวลที่ใช้คำนวณแรงแผ่นดินไหวมาจาก dead load (DL) และ super-imposed dead load (SDL)
- มีการกำหนด rigid floor diaphragm ที่พื้นแต่ละชั้น
- ใช้สติฟเนสประสิทธิผลของแต่ละชิ้นส่วนตามหัวข้อ 2.8.3 ใน มยผ.1301/1302-61

คาน :	$I_{eff} = 0.35 I_g$
เสา :	$I_{eff} = 0.70 I_g$
	$A_{eff} = 1.0 A_g$
กำแพงที่ไม่แตกร้าว:	$I_{eff} = 0.70 I_g$
กำแพงที่มีการแตกร้าว:	$I_{eff} = 0.35 I_g$
แผ่นพื้นไร้คาน:	$I_{eff} = 0.25 I_g$

โดยที่ I_g และ A_g คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และพื้นที่หน้าตัดที่คำนวณจากหน้าตัดเต็ม

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

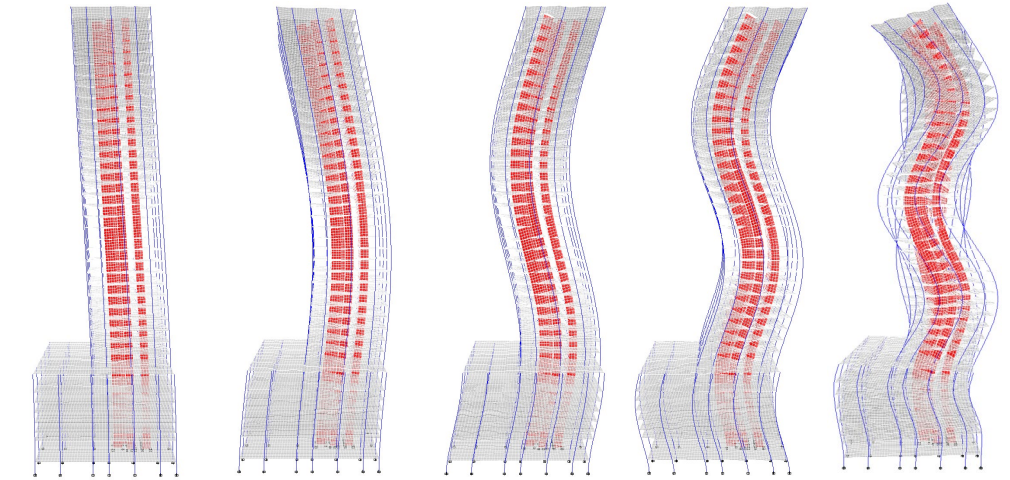
ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น (modal properties)

Modal properties of the first 20 modes

Mode	Period (sec)	Modal participating mass ratios		Cumulative mass ratio	
		X	Y	X	Y
1	5.61	0%	52%	0%	52%
2	4.85	54%	0%	54%	52%
3	3.04	0%	0%	54%	52%
4	1.23	0%	21%	54%	73%
5	1.21	19%	0%	73%	73%
6	1.10	0%	0%	73%	73%
7	0.72	0%	3%	73%	76%
8	0.58	12%	0%	85%	76%
9	0.49	0%	8%	85%	85%
10	0.43	0%	0%	85%	85%
11	0.35	6%	0%	90%	85%
12	0.30	0%	1%	90%	86%
13	0.28	0%	4%	90%	90%
14	0.24	1%	0%	92%	91%
15	0.23	1%	0%	93%	91%
16	0.18	0%	2%	93%	93%
17	0.18	0%	0%	93%	93%
18	0.17	1%	0%	94%	93%
19	0.15	0%	0%	94%	93%
20	0.13	0%	1%	94%	95%

Modal properties of the first-five translational modes in X direction

Mode	Period (sec)	Modal participating mass ratios	Cumulative mass ratio
1	4.85	54%	54%
2	1.21	19%	73%
3	0.58	12%	85%
4	0.35	6%	91%
5	0.24	1%	92%



T_1=4.85 sec T_2=1.21 sec T_3=0.58 sec T_4=0.35 sec T_5=0.24 sec

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น (scaling factor SF)

RSA base shear

Base shear force of each mode in X direction

Mode	Period (sec)	M_n^* (ton)	A_n (g)	$V_{bn} = M_n^* A_n$ (kN)
1	4.85	20,409	0.05	10,007
2	1.21	7,062	0.24	16,894
3	0.58	4,417	0.22	9,734
4	0.35	2,109	0.18	3,823
5	0.24	446	0.16	686

$$V_t = \frac{I}{R}\sqrt{V_{1e}^{\ 2} + V_{2e}^{\ 2} + V_{3e}^{\ 2} + \cdots} = 4,636 \text{ kN}$$

ELF base shear

$$V = C_s W$$

$$C_s = S_a \frac{I}{R} \geq 0.01$$

$$W = 370,566 \text{ kN}$$

$$T_a = 0.02H = 0.02 \times 125.55 = 2.51 \text{ sec}$$

$$T = \min(C_u T_a, T_{etabs}) = 3.77 \text{ sec}$$

$$S_a(3.77 \text{ sec}) = 0.0808$$

$$C_s = \frac{0.0808 \times 1.25}{6} = 0.01683$$

$$V = 0.01683 \times 370,566 = 6,238 \text{ kN}$$

Scaling Factor

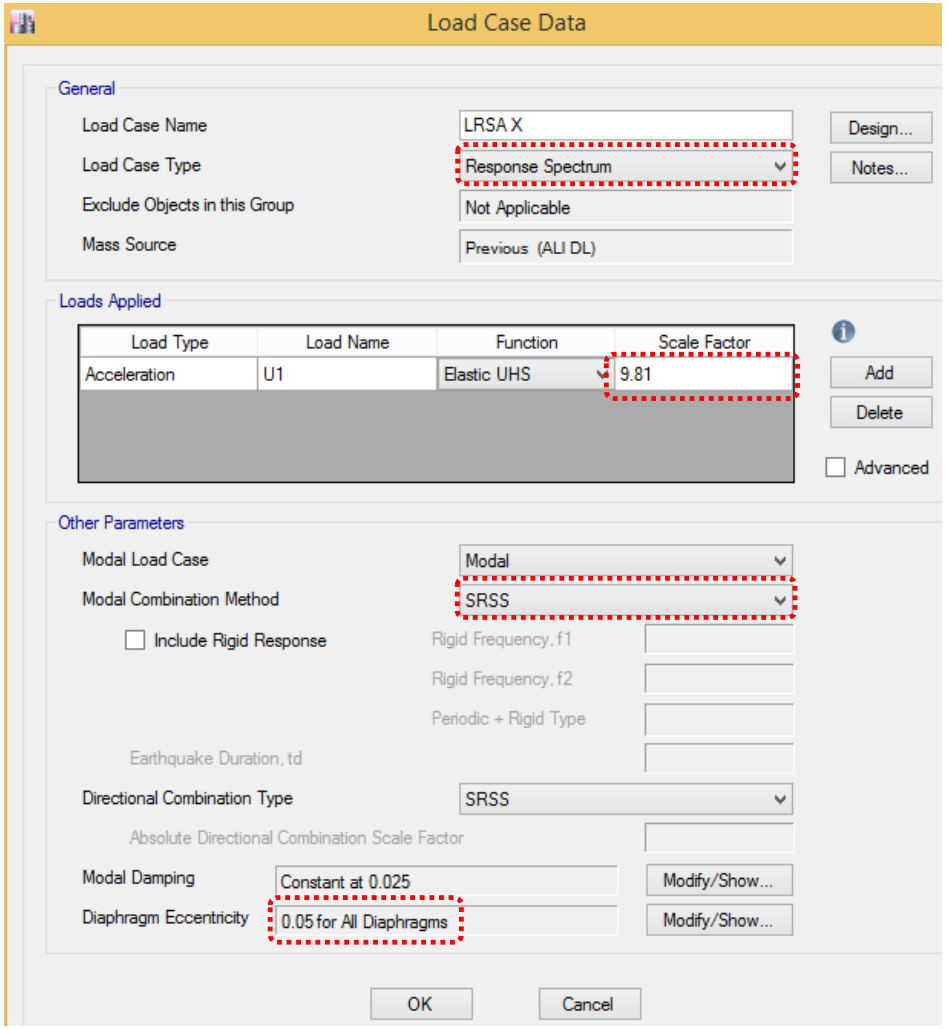
$V_t = 4,636 \text{ kN} < 0.85V = 5,302 \text{ kN}$

Scaling factor (S_F) is required

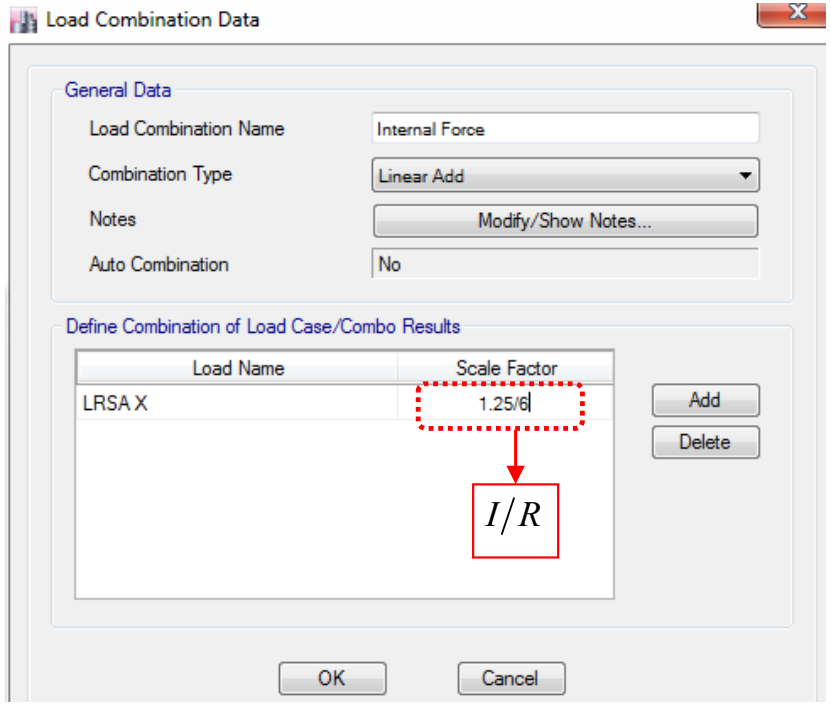
$$S_F = \frac{0.85V}{V_t} = 1.143$$

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น (Load Case: Linear Elastic RSA และ InternalForce before SF



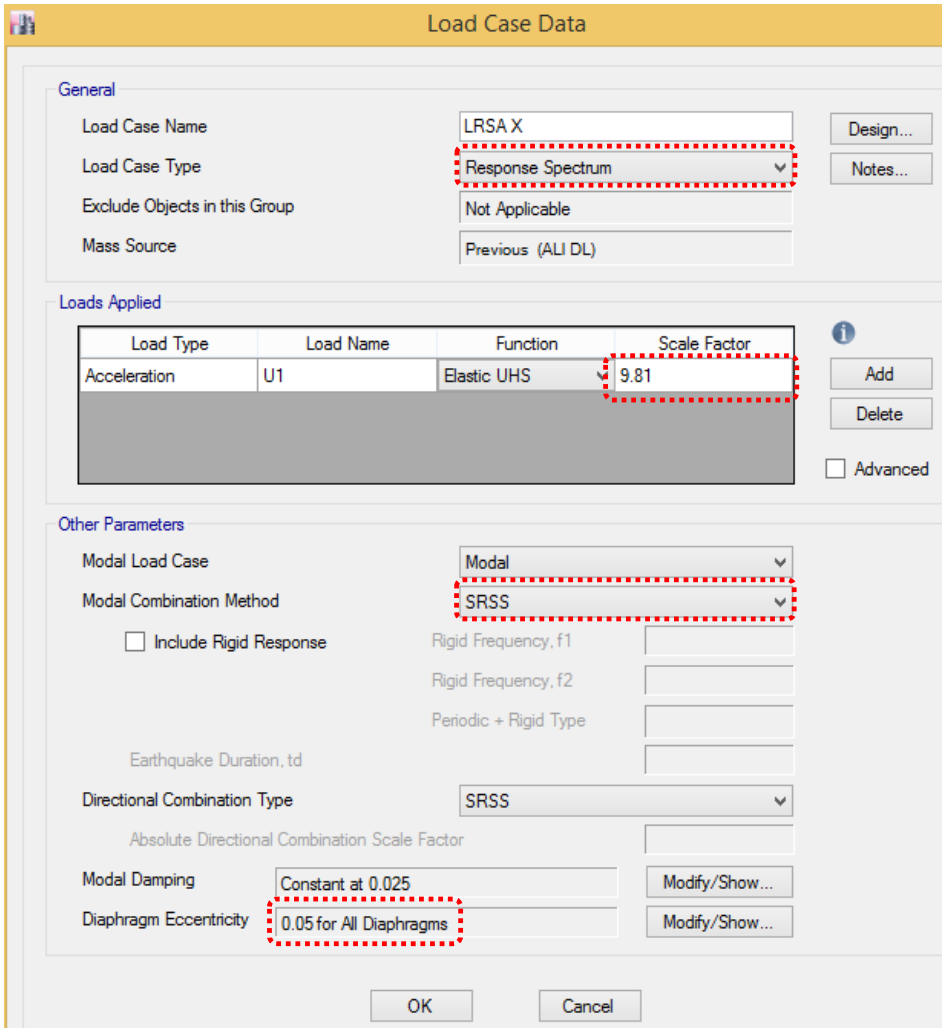
Load Case: Linear RSA



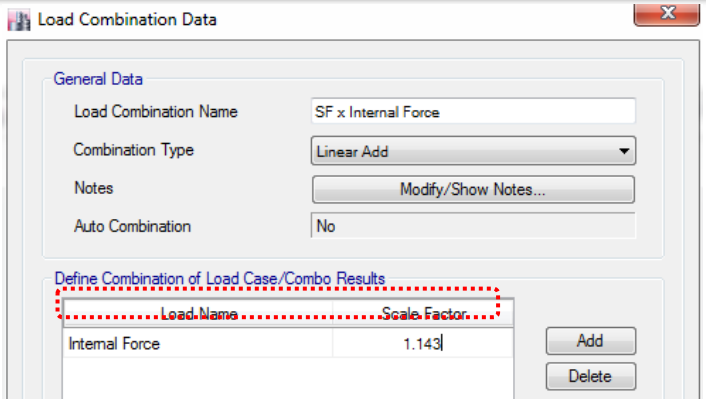
Load Combination: RSA Internal forces without scaling factor

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น (Load Case: SF x InternalForce และ Displacement and Drift

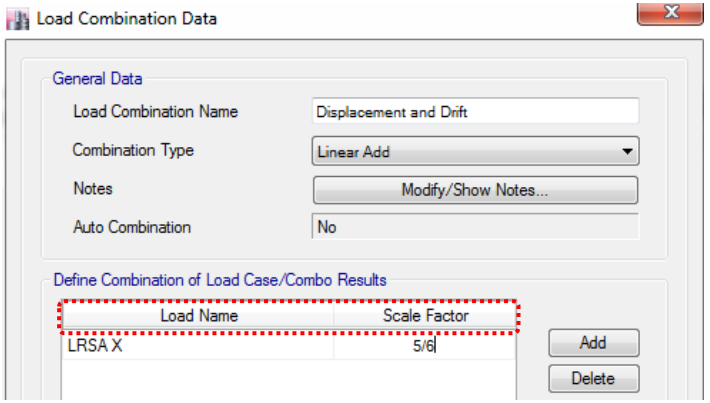


Load Case: Linear RSA



$$M = \frac{SF \times I}{R}\sqrt{M_{1e}^{\ 2} + M_{2e}^{\ 2} + M_{3e}^{\ 2} + \cdots}$$

RSA internal forces with scaling factor



$$\Delta = \frac{C_d}{R}\sqrt{\Delta_{1e}^{\ 2} + \Delta_{2e}^{\ 2} + \Delta_{3e}^{\ 2} + \cdots}$$

Displacement and drift from RSA

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

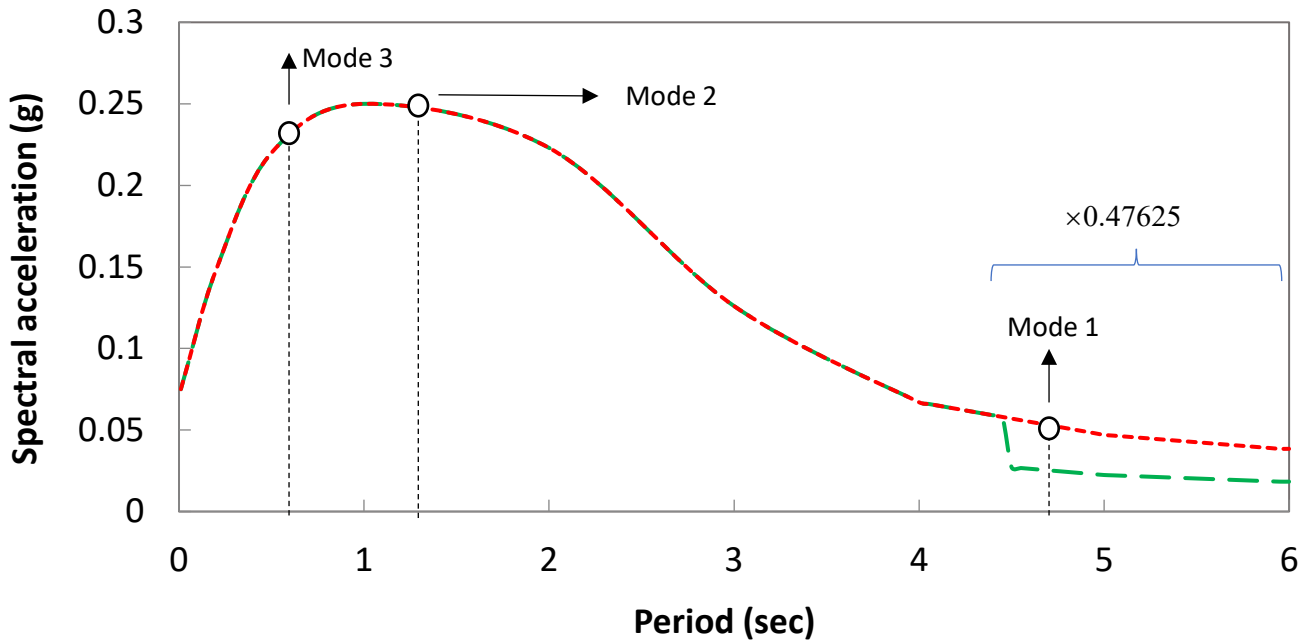
ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น (Sa สำหรับ Modified RSA)

เพื่อให้สามารถทำการคำนวณแรงเฉือนในกำแพงและเสาตามสมการในวิธี Modified RSA จำเป็นต้องป้อนค่า spectral acceleration function เป็นพิเศษ โดยมีการคูณ $\frac{S_F \times \Omega_0}{R} = \frac{1.143 \times 2.5}{6} = 0.47625$ ที่ค่า Sa ที่ค่าคาบซึ่งครอบคลุมค่าธรรมชาติของโหมดแรก แล้วสั่งให้โปรแกรมนำ spectral acceleration function นี้ไปใช้ในการคำนวณ RSA แบบปกติ เพื่อคำนวณแรงเฉือนในกำแพงและเสา

$$V = I\sqrt{\left(\frac{SF \times \Omega_0 V_{1e}}{R}\right)^2 + V_{2e}^{\ 2} + V_{3e}^{\ 2} + \cdots}$$

Factor to multiply with elastic spectrum for X direction (T_{1x} =4.85 sec) is

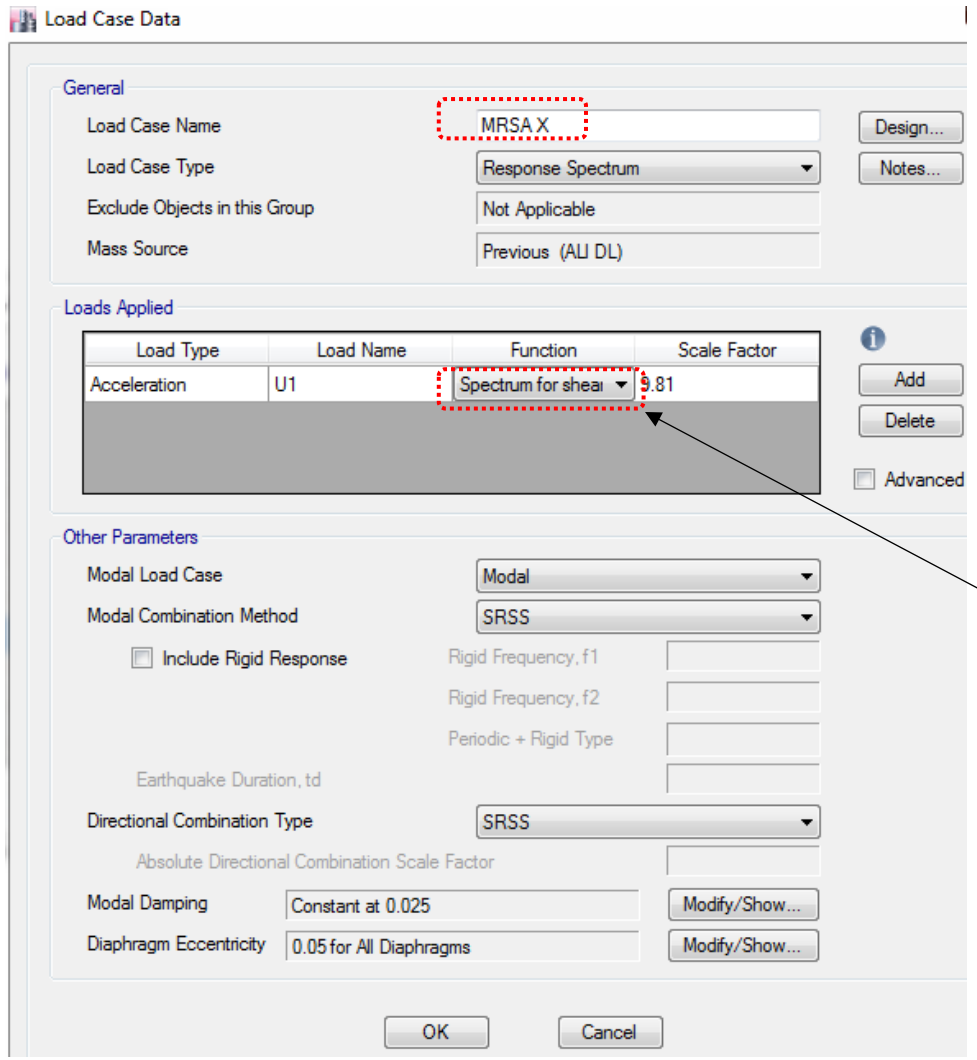
$$\frac{S_F \times \Omega_0}{R} = \frac{1.143 \times 2.5}{6} = 0.47625$$



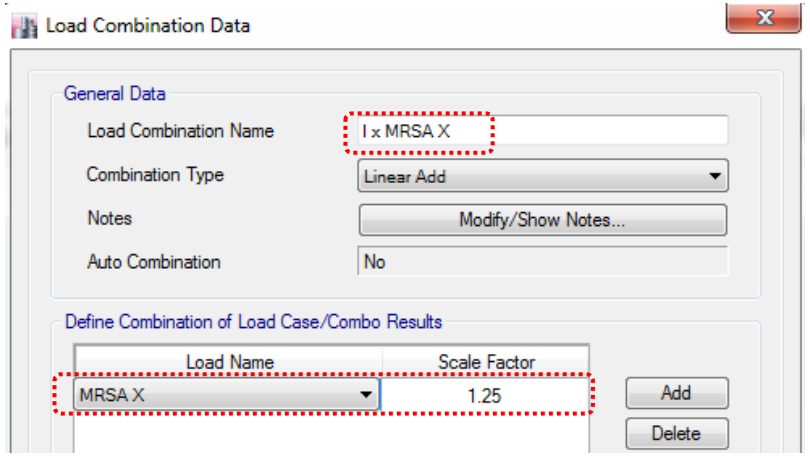
ในรูปนี้แสดงโหมด 1 2 และ 3 ของการโยกตัวทาง X แต่ในวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 3 มิติ จะมีโหมดของการโยกทิศทาง Y และ torsion มาปนด้วย ให้ทำการคูณ factor ให้ครอบคลุมคาบของ 3 โหมดแรกของโมเดล 3 มิติไปเลย โดยเฉพาะกรณีที่มี coupling ระหว่าง translation และ torsion

4. ข้อพิจารณาและตัวอย่างในการคำนวณการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์

ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น (Load Case: MRSA และ I x MRSA)



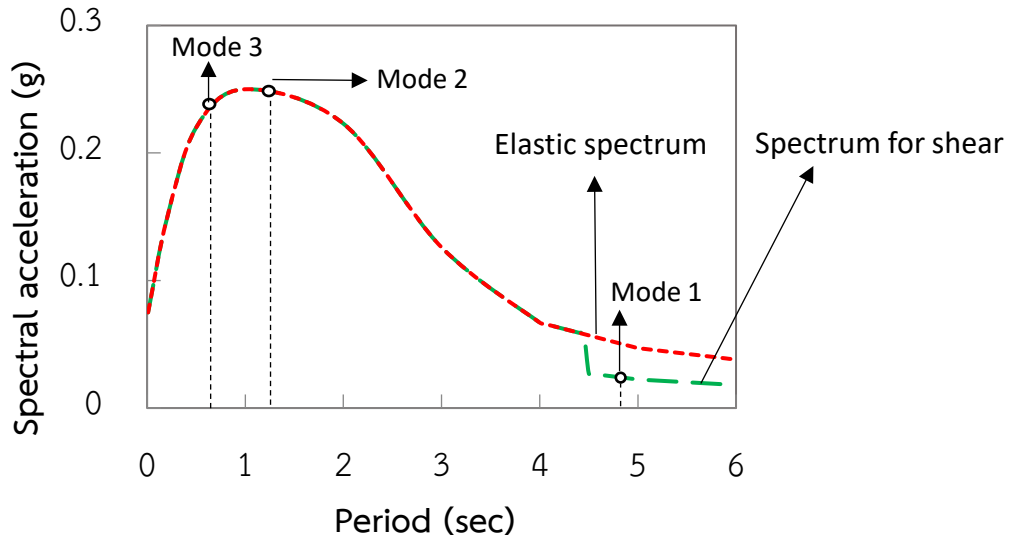
Load Case: MRSA



Load Case: I x MRSA

Modified RSA design shear force

$$V = I\sqrt{\left(\frac{SF \times \Omega_0 V_{1e}}{R}\right)^2 + V_{2e}^{\ 2} + V_{3e}^{\ 2} + \cdots}$$



5. P-delta effect

- ผลของน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งที่เปลี่ยนตำแหน่งและเยื้องศูนย์ไปเนื่องจากการกระจัดของอาคารทำให้เกิดโมเมนต์ดัดและโมเมนต์พลิกคว่ำเพิ่มขึ้น นำไปสู่แรงภายใน การเสียรูป และการกระจัดที่เพิ่มขึ้น

- หัวข้อ 3.8 ใน มยผ.1301/1302-61 กำหนดให้ตรวจสอบว่า ค่า stability coefficient θ ตามสมการ $\theta = \dfrac{P_x \Delta}{V_x h_{sx} C_d}$

โดยที่ P_x = unfactored total design gravity load at level *x*

V_x = total design shear at level *x*

Δ = story drift due to V_x multiplied by C_d

h_{sx} = story height

- ถ้า $\theta < 0.1$ ไม่ต้องคูณขยายค่าแรงและการกระจัด

- ถ้า $0.1 < \theta < \theta_{max}$ ต้องคูณขยายค่าแรงและการกระจัดด้วย $\dfrac{1}{1-\theta}$ แต่ถ้าโปรแกรมได้พิจารณา p-delta effect แล้ว ไม่ต้องคูณขยายค่าอีก

- ถ้า $\theta > \theta_{max}$ โครงสร้างไม่มีเสถียรภาพเพียงพอ ให้ปรับปรุงการออกแบบ

โดยที่ $\theta_{\max} = \dfrac{0.5}{\beta C_d} \le 0.25$ และ β = shear demand / shear capacity ซึ่งยอมให้สมมติค่าเท่ากับ 1 ได้

5. P-delta effect

- สังเกตได้ว่า $\theta = \frac{P_x \Delta}{V_x h_{sx} C_d}$ ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่ง P_x, ความสูงชั้น h_{sx}, และ lateral story stiffness V_x / Δ
- ในการคำนวณข้างต้นให้ใช้ V_x และ Δ จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ซึ่งจะทำให้อัตราส่วน V_x / Δ เป็นค่า lateral story stiffness
- จากตัวอย่างอาคาร 39 ชั้น พบว่า θ มีค่าน้อยกว่า 0.1 ทุกชั้น
- ไม่จำเป็นต้องคูณขยายค่าด้วย p-delta amplification factor $\frac{1}{1-\theta}$

Story	h_{sx} (m)	P_x (kN)	V_x (kN)	Δ (m)	θ
39	3.2	7,010	404	0.043	0.05
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
15	3.2	182,827	5830	0.047	0.09
14	3.2	190,124	5890	0.045	0.09
13	3.2	197,651	5943	0.044	0.09
12	3.2	205,177	5989	0.042	0.09
11	3.2	212,876	6028	0.040	0.09
10	3.2	220,574	6060	0.037	0.09
9	3.5	228,755	6088	0.038	0.08
8	4.9	248,494	6139	0.048	0.08
7	2.65	265,477	6171	0.022	0.07
6	2.65	282,461	6194	0.020	0.07
5	2.65	299,445	6211	0.018	0.06
4	2.65	316,429	6223	0.015	0.06
3	2.05	332,678	6230	0.010	0.05
2	5.5	353,151	6235	0.019	0.04
1	3	370,564	6236	0.004	0.01

6. Accidental Torsion Amplification

- จากหัวข้อ 3.5.3 ใน มยผ.1301/1302-61 ในกรณีที่อาคารมีประเภทการออกแบบ ค หรือ ง และมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบ แบบ 1ก หรือ 1ข จะต้องขยายค่าแรงบิดโดยบังเอิญในทุกๆ ชั้นโดยการคูณโมเมนต์บิดโดยบังเอิญรอบแกนดิ่ง M_{ta} ด้วยตัวประกอบขยายแรงบิดโดยบังเอิญ A_x

$$A_x = \left(\frac{\delta_{\max}}{1.2\delta_{\text{avg}}} \right)^2 \qquad 1 \le A_x \le 3$$

โดยที่ $\delta_{\max}$ = การเคลื่อนที่สูงสุดในแนวราบที่ชั้นนั้น

δ_{avg} = การเคลื่อนที่ในแนวราบที่ชั้นนั้นเฉลี่ยจากขอบอาคาร 2 ด้าน

- ในอาคารตัวอย่าง 39 ชั้นนี้พบว่า $A_x < 1$ จึงไม่ต้องคูณขยายค่าโมเมนต์บิดโดยบังเอิญ M_{ta} ซึ่งคำนวณจากระยะเยื้องศูนย์ร้อยละ 5 ของความกว้างอาคาร

Story	δ_1 (m)	δ_2 (m)	Δ_{ave} (m)	Δ_{max} (m)	A_x
39	0.402	0.397	0.399	0.402	0.70
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
15	0.127	0.122	0.124	0.127	0.72
14	0.116	0.111	0.113	0.116	0.72
13	0.105	0.100	0.102	0.105	0.73
12	0.094	0.089	0.091	0.094	0.73
11	0.083	0.079	0.081	0.083	0.73
10	0.072	0.069	0.070	0.072	0.73
9	0.062	0.059	0.060	0.062	0.73
8	0.051	0.048	0.050	0.051	0.73
7	0.037	0.035	0.036	0.037	0.74
6	0.030	0.028	0.029	0.030	0.74
5	0.024	0.022	0.023	0.024	0.74
4	0.018	0.017	0.017	0.018	0.74
3	0.013	0.012	0.012	0.013	0.75
2	0.009	0.008	0.009	0.009	0.75
1	0.002	0.001	0.002	0.002	0.75

7. Design load combinations

- กรณีที่อาคารอยู่ในประเภทการออกแบบ ง ทั้งที่มีรูปทรงโครงสร้างสม่ำเสมอ และ ไม่สม่ำเสมอ หรือประเภทการออกแบบ ค ที่มีรูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบแบบที่ 5 ให้พิจารณาแผ่นดินไหวกระทำ 2 ทิศทางพร้อมกัน โดยเลือกวิธีหนึ่งวิธีใด จาก 2 วิธีดังนี้

1) ก) ร้อยละ 100 ของผลจากแผ่นดินไหวทิศทาง X + ร้อยละ 30 ของผลจากแผ่นดินไหวทิศทาง Y

   ข) ร้อยละ 30 ของผลจากแผ่นดินไหวทิศทาง X + ร้อยละ 100 ของผลจากแผ่นดินไหวทิศทาง Y

2) ให้แผ่นดินไหวกระทำพร้อมกันทั้ง 2 ทิศทางในการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบประวัติเวลา

- สำหรับอาคารตัวอย่าง 39 ชั้น ที่มีประเภทการออกแบบ ง และใช้วิธี RSA จึงต้องใช้วิธีแรก ซึ่งมีการรวมผลของแรงดังนี้

สำหรับกรณีที่ไม่ต้องใช้ overstrength factor

$$U_1 = 0.75(1.4D + 1.7L) + 1.0E_x + 0.3E_y$$
$$U_2 = 0.75(1.4D + 1.7L) + 0.3E_x + 1.0E_y$$
$$U_3 = 0.9D + 1.0E_x + 0.3E_y$$
$$U_4 = 0.9D + 0.3E_x + 1.0E_y$$

สำหรับกรณีที่ต้องใช้ overstrength factor

$$U_5 = 0.75(1.4D + 1.7L) + 1.0\Omega_0 E_X + 0.3\Omega_0 E_Y$$
$$U_6 = 0.75(1.4D + 1.7L) + 0.3\Omega_0 E_X + 1.0\Omega_0 E_Y$$
$$U_7 = 0.9D + 1.0\Omega_0 E_X + 0.3\Omega_0 E_Y$$
$$U_8 = 0.9D + 0.3\Omega_0 E_X + 1.0\Omega_0 E_Y$$

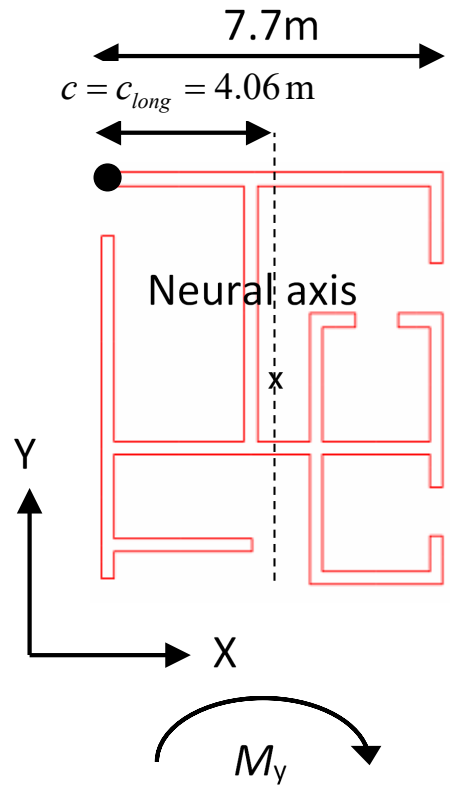
8. การคำนวณ Strain ในกำแพง

- หัวข้อ 4.2.7 ใน มยผ. 1301/1302-61 กำหนดให้ตรวจสอบความเครียดรวมเนื่องจากแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดในกำแพงรับแรงเฉือนเพื่อจะได้เสริมเหล็กปลอกพิเศษให้บริเวณที่คาดว่าจะเกิดการอัดประลัยหรือการครากของเหล็กเสริม เนื่องจากความเครียดมีค่าเกิน 0.002 มีความเหนียวเพียงพอ

- สำหรับอาคารตัวอย่าง 39 ชั้น คำนวณความเครียดตามสมการ

$$\varepsilon_c = \frac{P}{EA_g} - \frac{M}{EI_{eff}}(c - c_{long}/3)$$

$$\varepsilon_t = \frac{P}{EA_g} + \frac{M}{EI_{eff}}(c + c_{long}/3)$$



โดยที่

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} = 4700\sqrt{32} = 26,587\,\text{MPa} = 26.587\times10^6\,\text{kN/m}^2$$

$$A_g = 14.61\,\text{m}^2$$

$$I_{g,y} = 102.32\,\text{m}^4$$

$$c = c_{long} = 4.06\,\text{m}$$

8. การคำนวณ Strain ในกำแพง

ตัวอย่าง อาคาร 39 ชั้น (การคำนวณ I_{eff})

$$\varepsilon_c = \frac{P}{EA_g} - \frac{M}{EI_{eff}}(c - c_{long}/3)$$

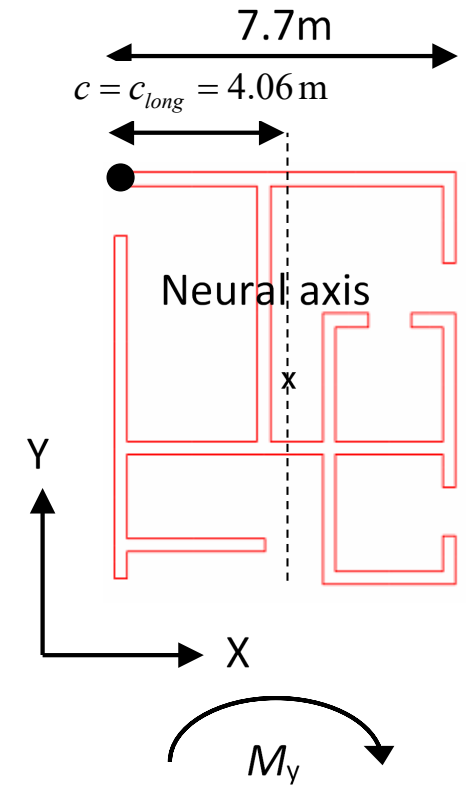
$$\varepsilon_t = \frac{P}{EA_g} + \frac{M}{EI_{eff}}(c + c_{long}/3)$$

- ปริมาณเหล็กยืน $\frac{A_{st}}{A_g} = 0.25\%$
- โมเมนต์ดัด และแรงตามแนวแกน $M_u = 80,955\ \text{kN}\cdot\text{m}$ $P_u = 111,505\,\text{kN}$
- กำลังต้านแรงตามแนวแกนระบุ $P_0 = 326,222\,\text{kN}$
- ความยาวทั้งหมดของหน้าตัดในทิศทางแรงแผ่นดินไหว h=7.7m

$$0.35I_g \le I_{eff} = \left(0.80 + 25\frac{A_{st}}{A_g}\right)\left(1 - \frac{M_u}{P_u h} - 0.5\frac{P_u}{P_0}\right)I_g \le 0.875I_g$$

$$I_{eff} = (0.80 + 25\times 0.0025)\left(1 - \frac{80,955\,\text{kN}\cdot\text{m}}{111,505\,\text{kN}\times 7.7\text{m}} - 0.5\frac{111,505\,\text{kN}}{326,222\,\text{kN}}\right)I_g$$

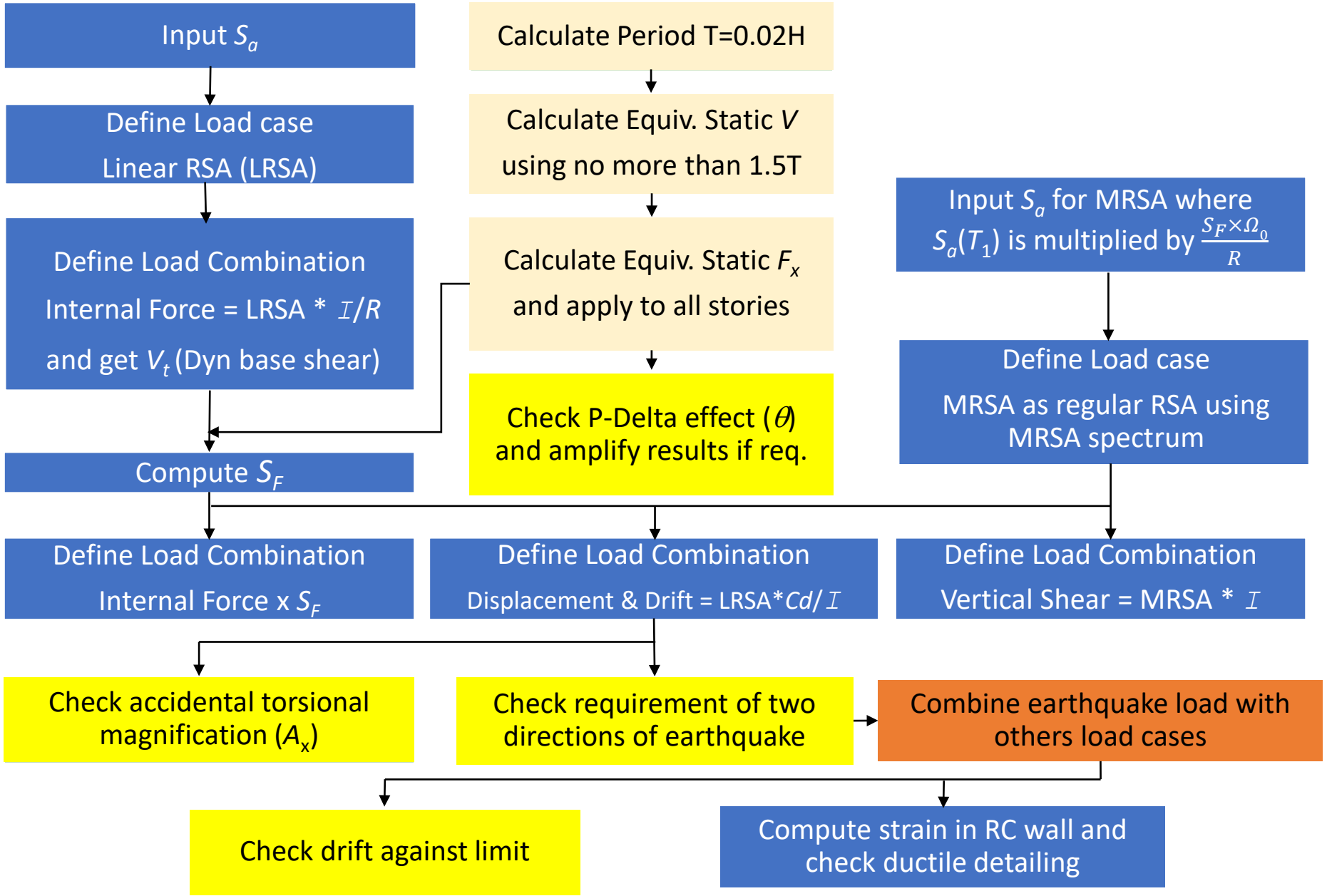
$$I_{eff} = 0.63I_g$$



9. เป้าหมายของการออกแบบ

1. ได้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงเพียงพอ มีเสถียรภาพ มีการโก่งตัวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
2. ยอมให้เกิดการครากแบบเหนียวได้ในบางตำแหน่ง เช่น ปลายคาน โคนเสาหรือกำแพงชั้นล่างสุด ที่มีการเสริมเหล็กปลอกเพื่อทำให้มีความเหนียว
3. ป้องกันการวิบัติแบบเปราะที่ไม่ยอมให้เกิดขึ้น เช่น crushing และ diagonal crack ในเสาและกำแพง
4. ยอมให้มีการครากเกิดแบบกระจายไปหลายแห่งโดยไม่กระจุกที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง
5. ปรับสัดส่วนองค์อาคารให้เป็นไปตามแนวทาง strong-column weak-beam เพื่อป้องกันการวิบัติของเสาก่อนคาน
6. หลีกเลี่ยง story mechanism หรือ weak / soft story
7. ใช้วิธี Modified RSA คำนวณ design shear demand เพื่อหลีกเลี่ยงการวิบัติแบบเฉือนใน vertical members
8. เสริมเหล็กปลอกโอบรับเพิ่มความเหนียวในบริเวณที่ความเครียดมากกว่า 0.002 ซึ่งคาดว่าจะเกิดการครากหรือการอัดแตก

Flowchart of MRSA procedure



โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้ เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม
จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568