หลักการออกแบบโครงสร้าง และการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงอาคาร สำหรับต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

ศ. ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

(ทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2568)

หัวข้อบรรยาย

1. หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว
2. ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบและแนวดิ่ง และผลกระทบต่อการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว
3. ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร สำหรับการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ส่วนที่ 1
หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว

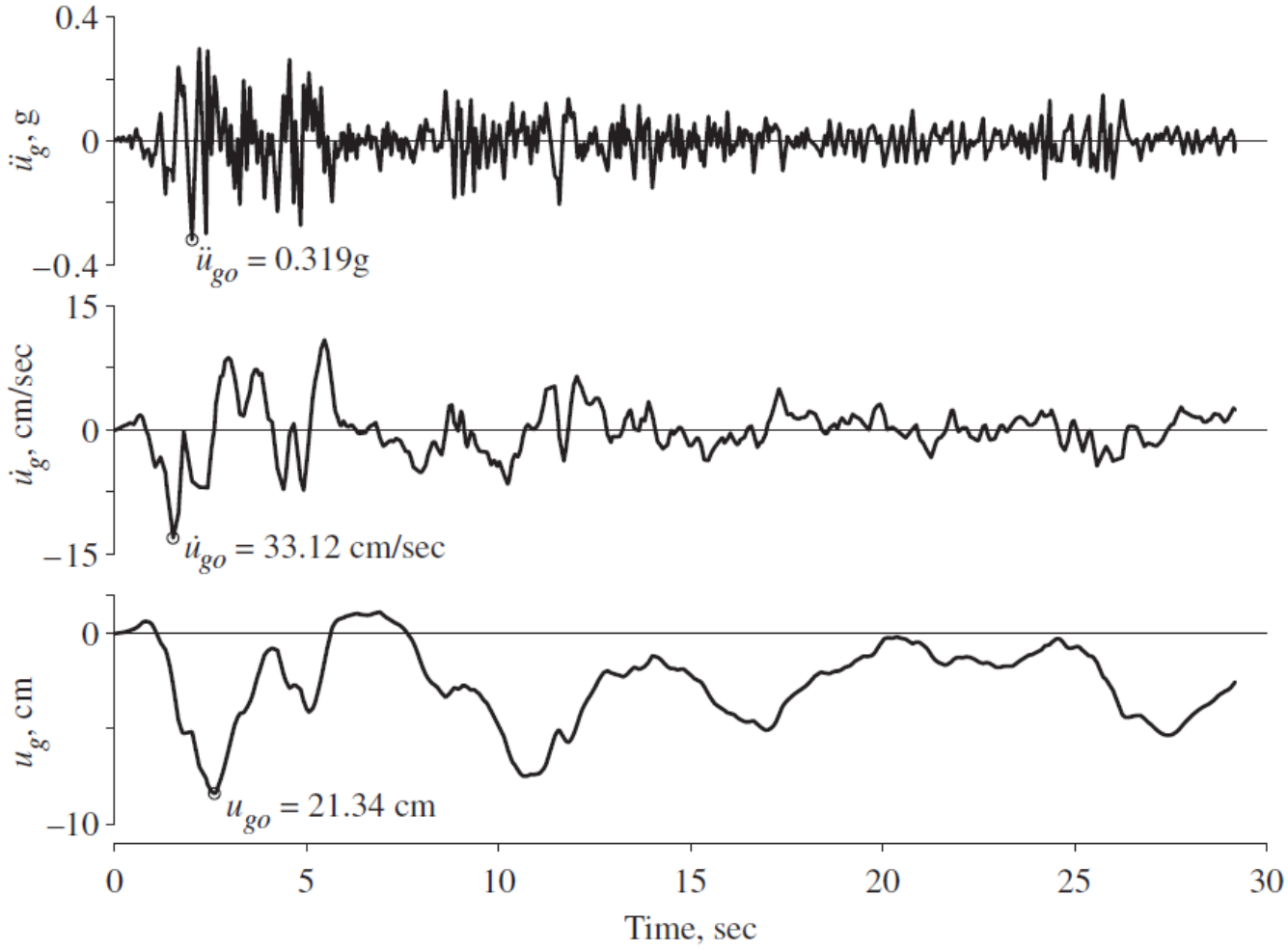
1.1 หลักการสเปกตรัมการตอบสนอง

1.2 การตอบสนองแบบอินอิลาสติกของโครงสร้าง และความเหนียวของโครงสร้าง

1.3 พฤติกรรมของโครงสร้างแบบอินอิลาสติกที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบ

1.1 หลักการสเปกตรัมการตอบสนอง

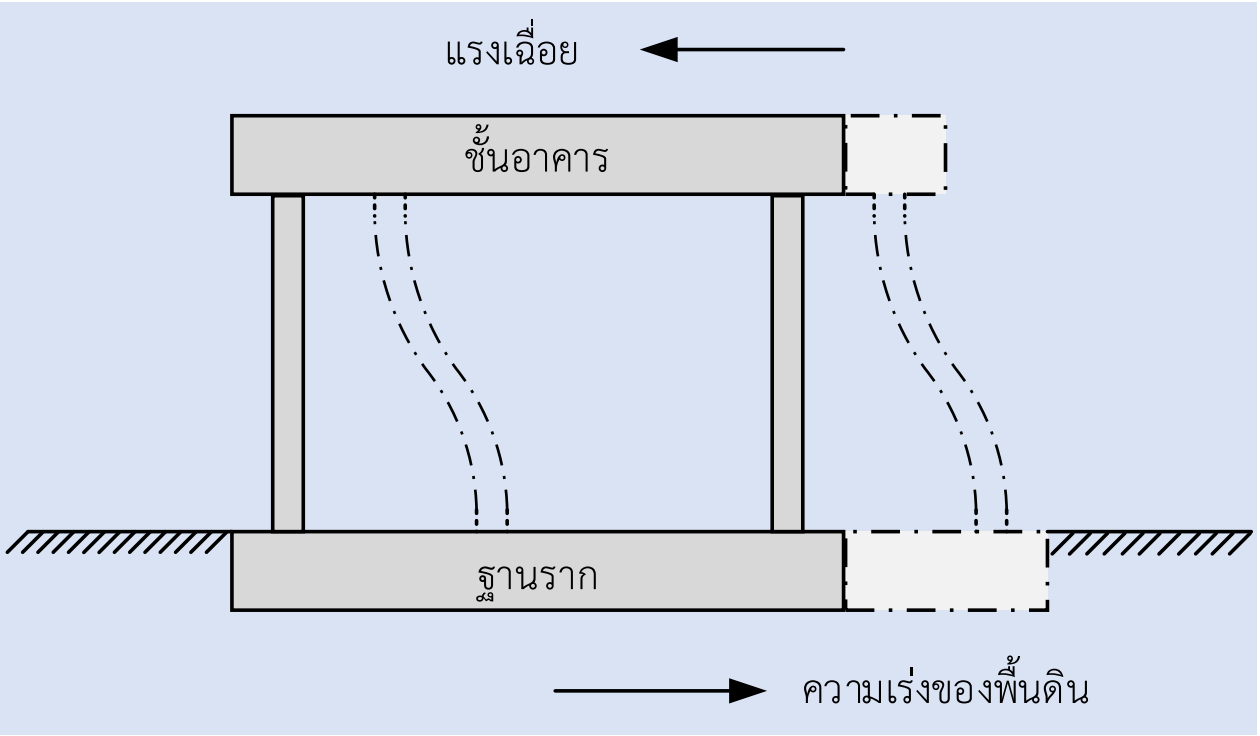
ตัวอย่างค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน ค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดิน และค่าการขจัดสูงสุดของพื้นดิน ของคลื่น El Centro (N-S Component) ณ วันที่ 18 พฤษภาคม คศ. 1940



แรงแผ่นดินไหว

แรงแผ่นดินไหวในอาคารเกิดจากการโยกตัวของอาคารจากการสั่นไหวของพื้นดิน ซึ่งขนาดของแรงและการโยกตัวในอาคารจะขึ้นกับคุณสมบัติของโครงสร้าง ฐานราก และลักษณะการสั่นไหวของพื้นดิน

พฤติกรรมของอาคารภายใต้แผ่นดินไหวสามารถอธิบายได้จากในรูป เมื่อพื้นดินมีการเคลื่อนที่ ฐานของอาคารก็จะเคลื่อนตามไปด้วย แต่ตัวอาคารข้างบนยังไม่เคลื่อนที่ไปตาม เนื่องจากความเฉื่อยของมวลอาคารนั้นต้านทานการเคลื่อนที่และทำให้อาคารเกิดการโยกตัว



รูป การโยกตัวของอาคารภายใต้แผ่นดินไหว

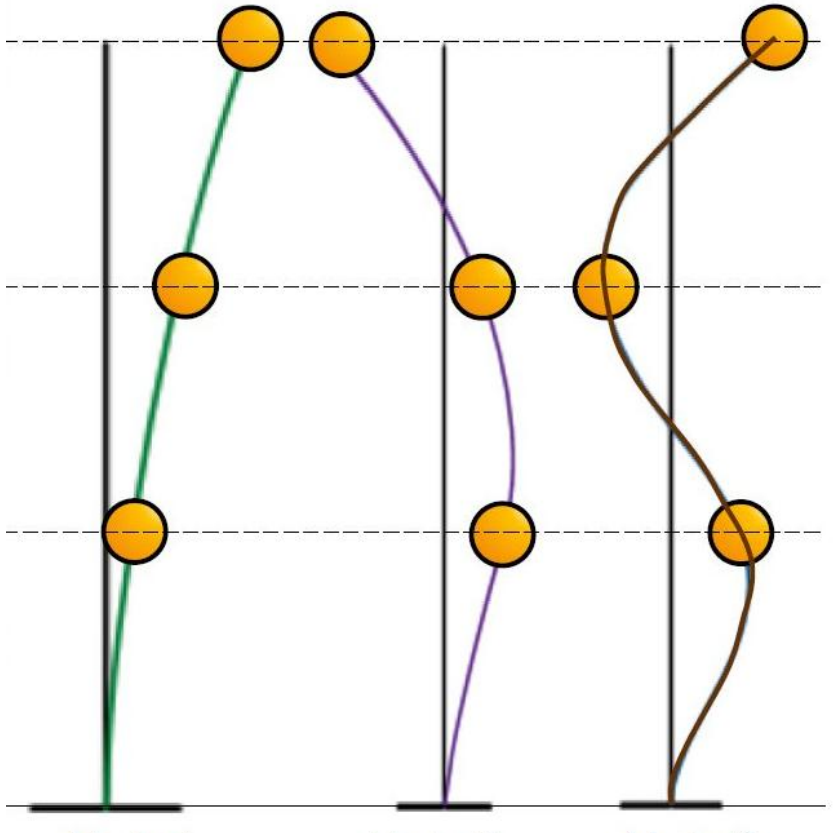
Shaking Table Test ของอาคารที่มีพฤติกรรมไม่เหนียว คือระบบเสาอ่อน – คานแข็ง



ที่มา VDO : National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED)

การสั่นพ้อง (การกำทอน) (Resonance) ของระบบระดับความเสรีหลายค่า





Mode 1 Mode 2 Mode 3

4.35 Hz 12.55 Hz

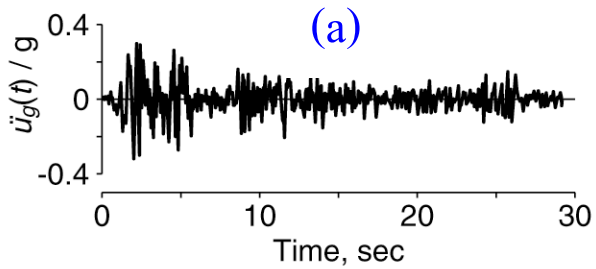
ที่มา VDO : Missouri S&T, Prof. O. Kwon

หลักการสเปกตรัมการตอบสนอง (Response Spectrum Concept)

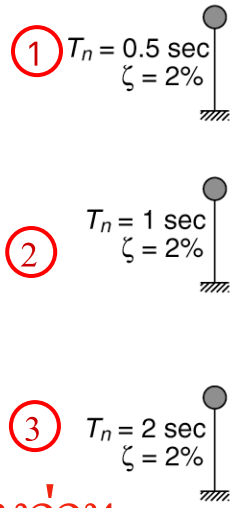
คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของการตอบสนอง ต่อแรงแผ่นดินไหว กับคาบธรรมชาติของระบบ ที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงคงที่ค่าหนึ่ง

คลื่นแผ่นดินไหว

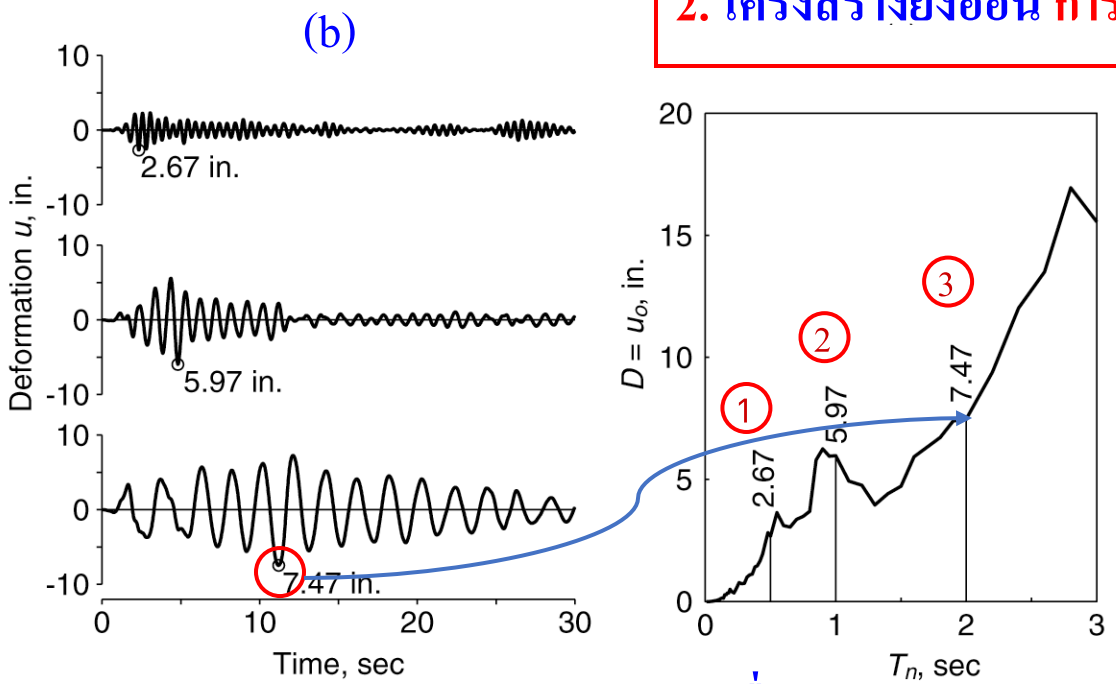
EI Centro



โครงสร้างแข็ง



โครงสร้างอ่อน



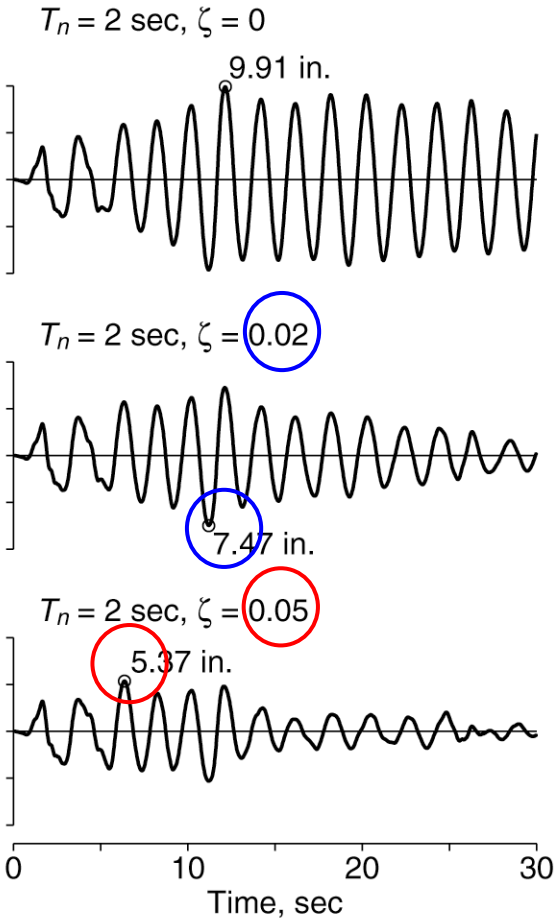
1. คลื่นแผ่นดินไหว ที่ประกอบด้วยคาบต่างๆจำนวนมาก โครงสร้างจะตอบสนองการสั่นไหวด้วยคาบของโครงสร้างหลัก

2. โครงสร้างยิ่งอ่อน การตอบสนองด้านการขจัดยิ่งมาก

สเปกตรัมการตอบสนองด้านการขจัด ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว

หลักการสเปกตรัมการตอบสนอง (Response Spectrum Concept)

อัตราส่วน
ความหน่วง น้อย



อัตราส่วน
ความหน่วง มาก

3. โครงสร้างที่มีอัตราส่วนความหน่วงมาก การตอบสนองด้านการขจัดจะมีค่าน้อย

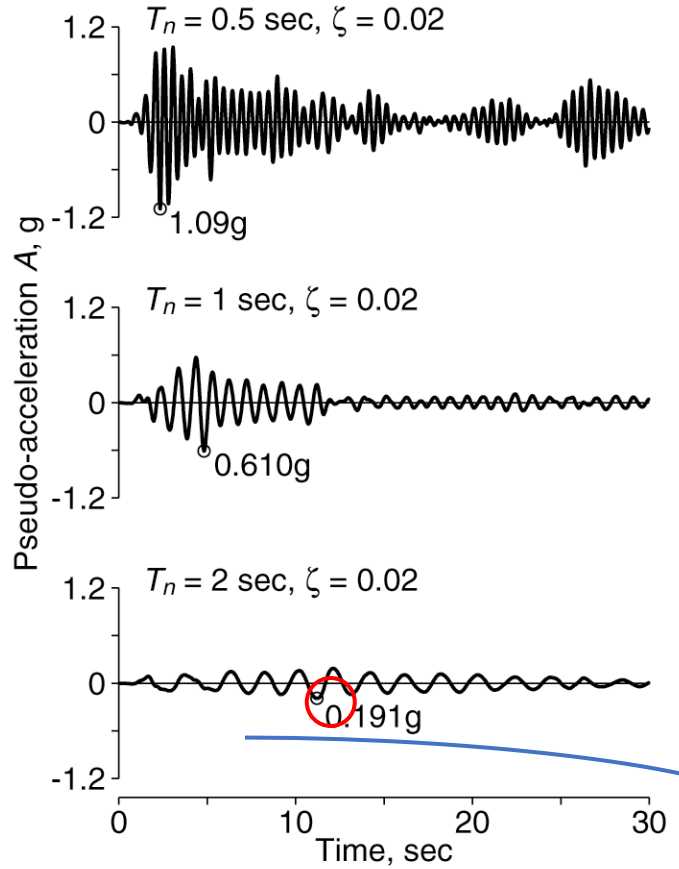
การตอบสนองด้านการขจัด ของระบบที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วง

0, 0.02 และ 0.05 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro

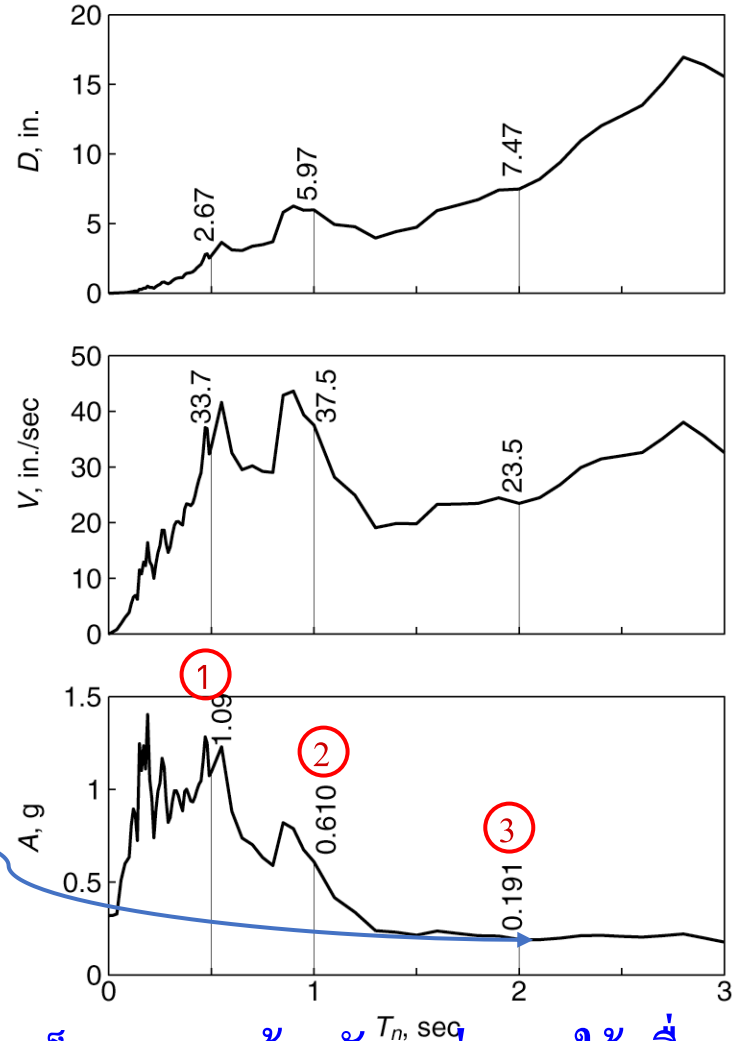
หลักการสเปกตรัมการตอบสนอง (Response Spectrum Concept)

โครงสร้างแข็ง

โครงสร้างอ่อน



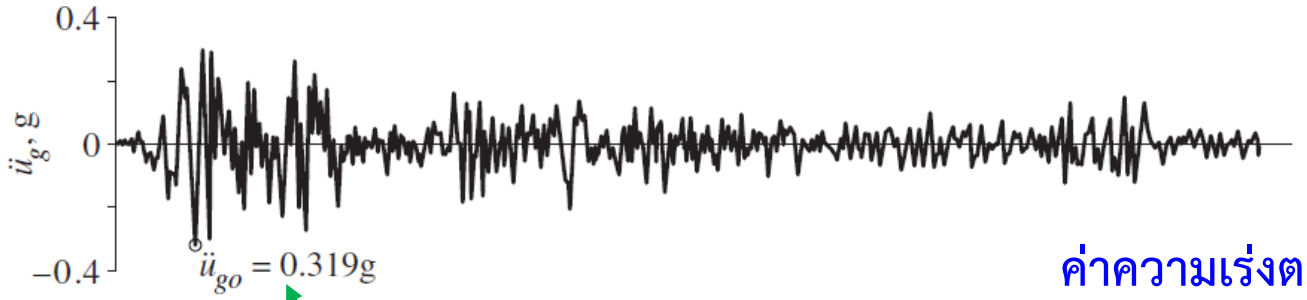
การตอบสนองด้านอัตราเร่ง



สเปกตรัมการตอบสนอง (a) ด้านการขจัด (b) ด้านความเร็ว และ (c) ด้านอัตราเร่ง ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว

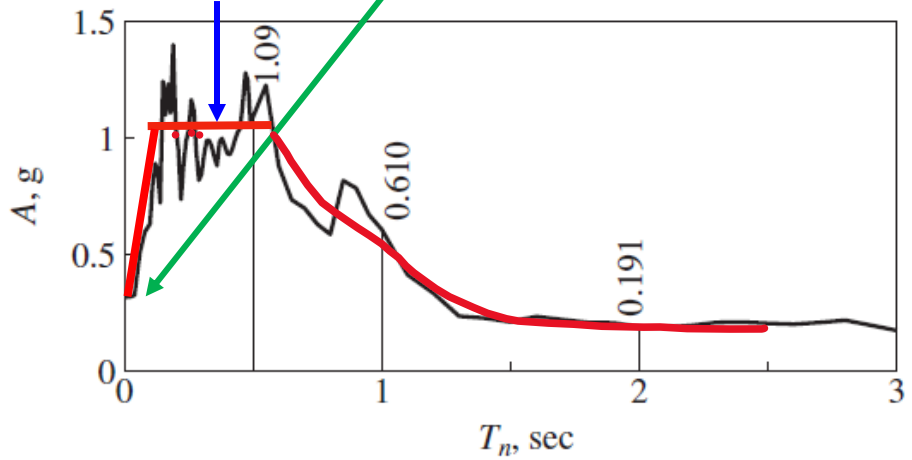
$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D$$

4. โครงสร้างยิ่งอ่อน การตอบสนองด้านอัตราเร่งยิ่งน้อย ดังนั้น แรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร=mA=มวลxอัตราเร่งเสมือน จึงมีค่าน้อย



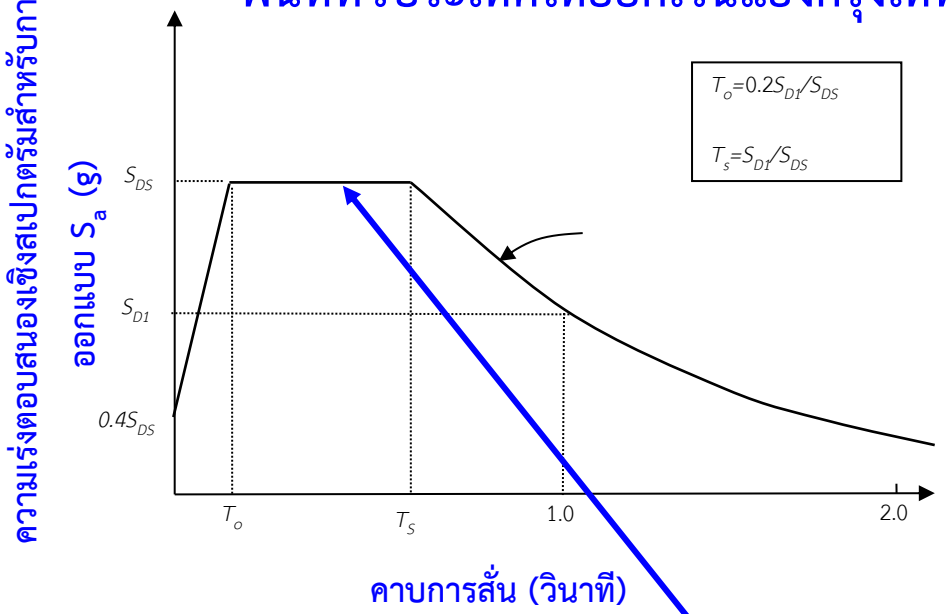
ตัวคูณขยายทางพลศาสตร์ขึ้นกับอัตราส่วนความหน่วง (รูปนี้ ζ = 0.02)

คลื่นแผ่นดินไหว El Centro PGA=0.319g



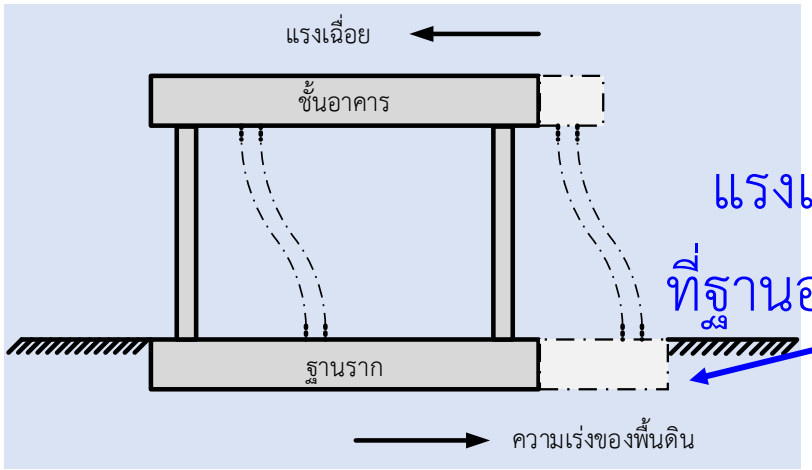
สเปกตรัมการตอบสนอง ด้านอัตราเร่ง ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทยยกเว้นแอ่งกรุงเทพ



มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว มยผ. 1311 และ ASCE 7 ใช้ตัวคูณขยายทางพลศาสตร์ (Dynamic Magnification Factor) เฉลี่ย =2.5 แล้วมีค่าลดลงเมื่อคาบการสั่นของโครงสร้างมากกว่าค่า Ts

หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว - แรงเฉือนที่ฐานอาคาร



แรงเฉือน
ที่ฐานอาคาร

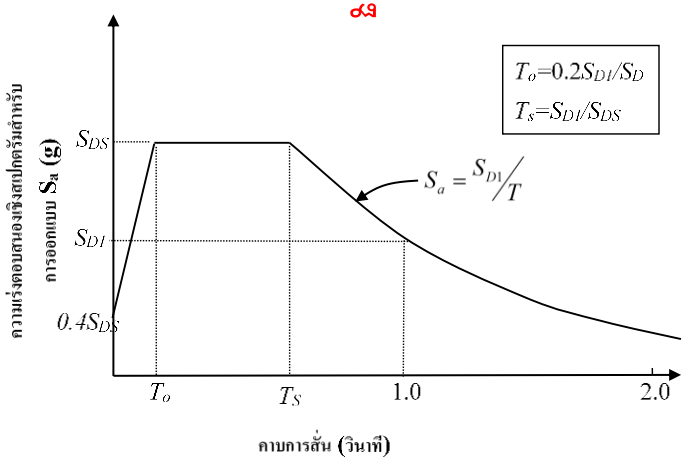
$$V = S_a \left(\frac{I}{R} \right) W$$

ตัวประกอบความสำคัญของอาคาร

น้ำหนักโครงสร้าง
ประสิทธิผลของอาคาร

ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง
ขึ้นกับความเหนียวของระบบโครงสร้าง

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
สำหรับการออกแบบ
ที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร (T)

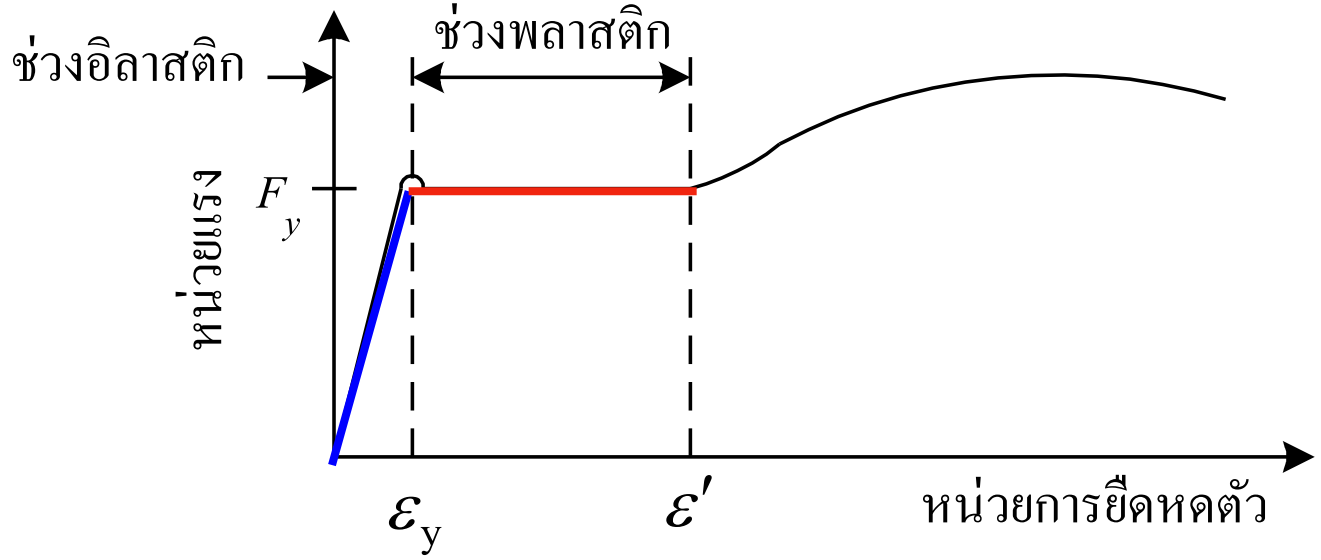


สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว

$$C_S = S_a \left(\frac{I}{R} \right)$$

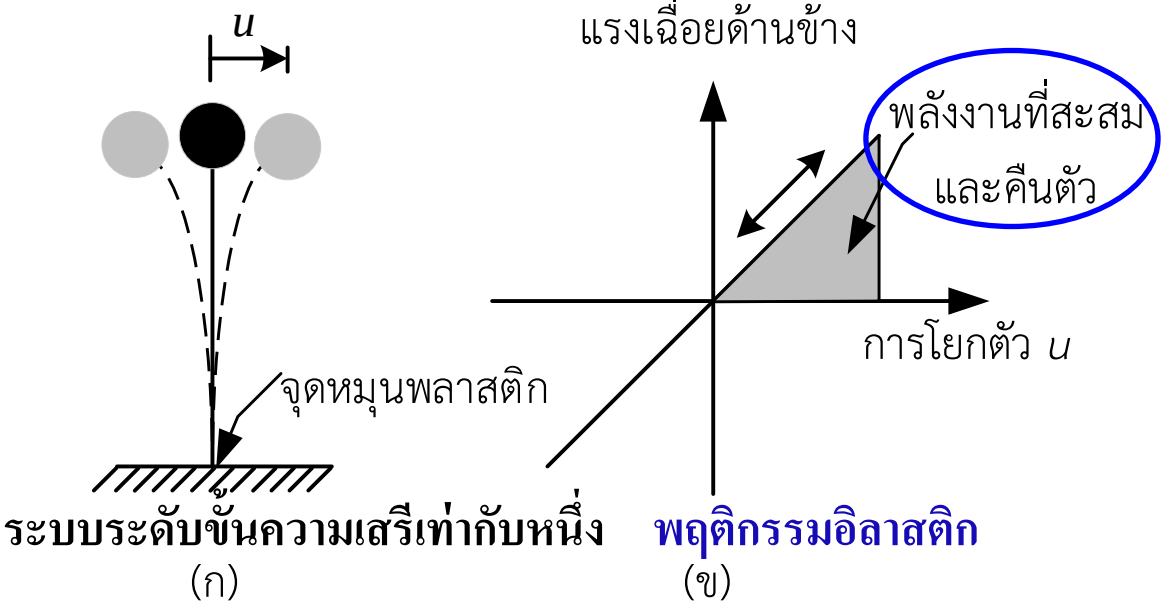
จะต้องมีค่า
ไม่น้อยกว่า 0.01

1.2 การตอบสนองแบบอินอิลาสติกของโครงสร้าง และความเหนียวของโครงสร้าง



รูป ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และหน่วยการยืดหดตัว ของเหล็กโครงสร้างโดยทั่วไป

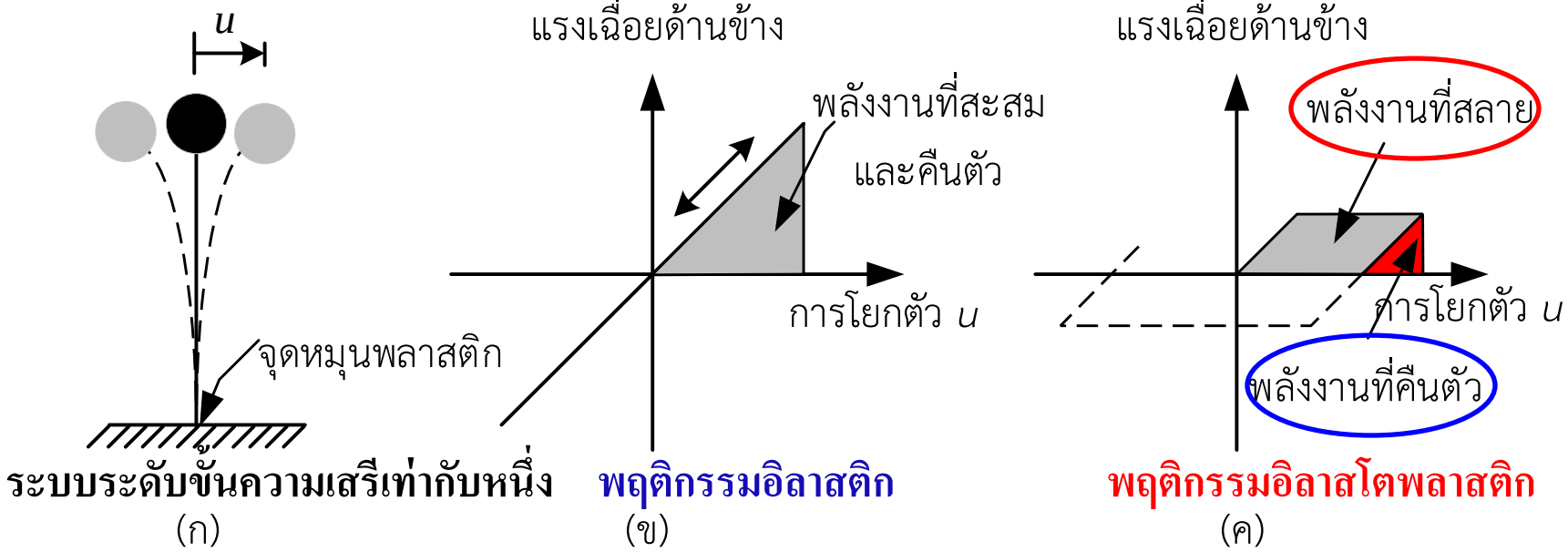
การตอบสนองแบบอินอิลาสติกของโครงสร้าง



รูป พลังงานภายในระหว่างการโยกตัวจากแผ่นดินไหว

- รูป (ข) พฤติกรรมแบบอิลาสติกเชิงเส้น พลังงานที่เกิดจากการโยกตัวจะเกิดขึ้นภายในระบบในรูปของพลังงานความเครียด แสดงด้วยพื้นที่แรเงา พลังงานมีค่าเริ่มจากศูนย์และเพิ่มตามการกระจัดเมื่อระบบโยกตัวไปจนถึงจุดสูงสุด เมื่อระบบโยกตัวกลับมาพลังงานที่สะสมไว้จะแปลงเป็นความเร็วทำให้ระบบสั่นไปอีกด้าน และสะสมพลังงานความเครียดด้านนั้น ระบบจึงเกิดการสั่นกลับไปมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานเหล่านี้ ในระบบนี้พลังงานมีแต่การเปลี่ยนรูปเท่านั้น ไม่มีการสูญเสียพลังงาน

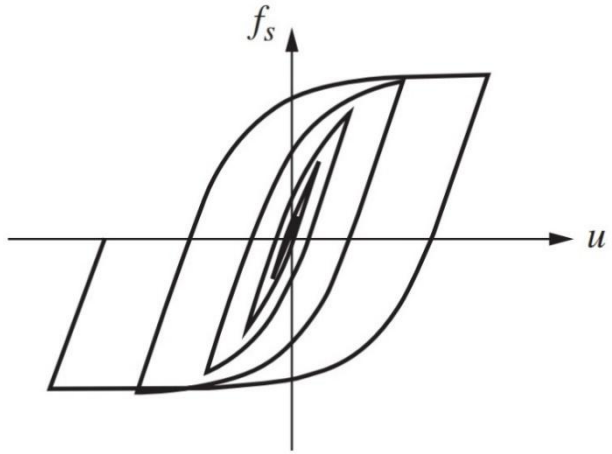
การตอบสนองแบบอินอิลาสติกของโครงสร้าง



รูป พลังงานภายในระหว่างการโยกตัวจากแผ่นดินไหว

- รูป (ค) พฤติกรรมแบบอินอิลาสติก เป็นระบบที่เกิดการคราก จากการตอบสนอง และเกิดเป็นจุดหมุนพลาสติก ทำให้มีการตอบสนองในช่วงเกินจากช่วงอิลาสติกที่มีการกระจัดมาก ทำให้ระดับของแรงแผ่นดินไหวต่ำกว่ามาก เมื่อเทียบกับระบบอิลาสติกในรูป (ข) ระบบแบบนี้เกิดการเคลื่อนที่ไป-กลับได้ โดยยังไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากความเหนียวขององค์อาคาร แต่เมื่อแผ่นดินไหวจบแล้ว องค์อาคารจะเกิดการเปลี่ยนรูปไม่กลับสู่สภาพเดิม จะมีความเสียหายและระยะเคลื่อนตัวตกค้าง เรียกชื่อว่า ระบบอิลาสโตพลาสติก (elastoplastic system) พื้นที่ส่วนสามเหลี่ยมของรูป (ค) แสดงถึงพลังงานที่คืนตัว และพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมด้านขนานแสดงถึงพลังงานที่สลายไปโดยการสร้างจุดหมุนพลาสติก พลังงานส่วนที่สลายไปนี้เป็นส่วนที่ไม่สามารถกลับคืนได้

ความเหนียวของโครงสร้าง



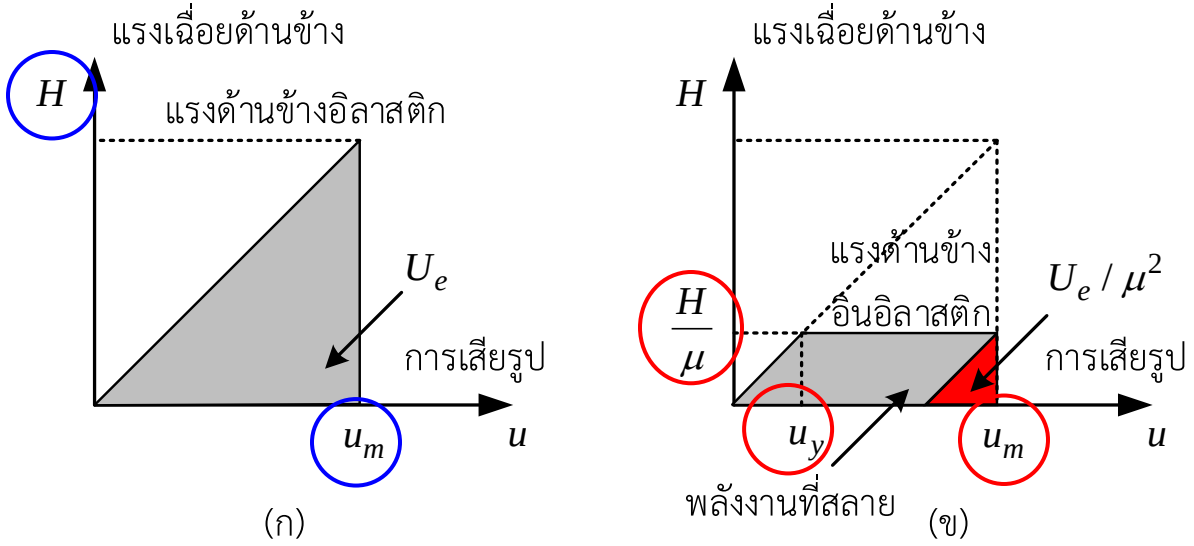
รูป ตัวอย่างการทดสอบแบบวัฏจักร ในรูปความสัมพันธ์ของแรง f_s และการเสียรูป u ขององค์อาคารที่มีความเหนียว

- ความเหนียวของโครงสร้าง (ductility of structure) คือความสามารถของโครงสร้างในการดูดซับพลังงานจากการเสียรูปในช่วงไม่ยืดหยุ่นโดยไม่วิบัติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในการออกแบบต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว
- เมื่อโครงสร้างเกิดการเสียรูปเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ช่วงอินอิลาสติก หรือไม่ยืดหยุ่น (inelastic) และแรงแผ่นดินไหวที่มากระทำมีลักษณะเป็นการกระทำแบบวนรอบซ้ำหรือวัฏจักร (cyclic loading) ทำให้เกิดวงรอบฮิสเตอร์เรติก (hysteretic loop) ซึ่งมีส่วนช่วยในการสลายพลังงานของการสั่นไหว

ความเหนียวของโครงสร้าง

- ลักษณะการตอบสนองแบบไม่ยืดหยุ่นสามารถพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนรูปในแบบวัฏจักรหรือไป-กลับ ซึ่งหมายถึงโครงสร้างที่โยกตัวภายใต้ผลจากแผ่นดินไหว พลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบในรูปของพลังงานความเครียด (strain energy) หาได้จากผลคูณของแรงและค่าการเปลี่ยนรูป หรือแทนด้วยพื้นที่ใต้กราฟของรูปเหล่านี้
- สำหรับระบบที่มีพื้นที่ใต้กราฟมาก เช่น โครงสร้างเหล็ก ย่อมมีความสามารถในการรับพลังงานจากการสั่นไหว และสลายออกไปในรูปของพลังงานการเกิดจุดหมุนพลาสติก โครงสร้างเหล็กจึงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

ความเหนียวของโครงสร้าง



ค่าประกอบความเหนียวสำหรับการกระจัด (displacement ductility factor, μ) เป็นอัตราส่วนระหว่างการกระจัดสูงสุดต่อการกระจัดที่จุดคราก

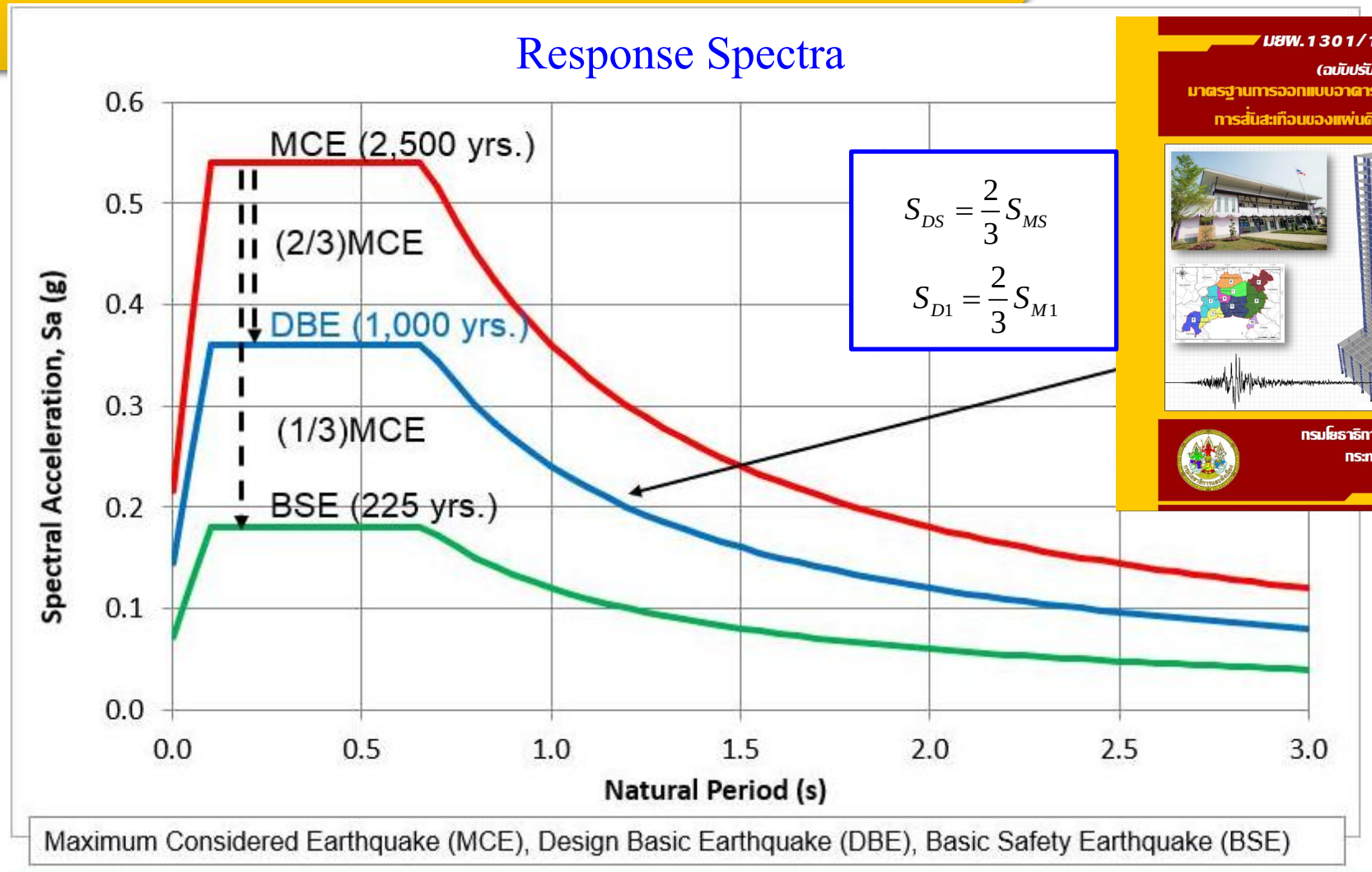
$$\mu = \frac{u_m}{u_y}$$

รูป ผลของความเหนียวต่อการลดแรงทางด้านข้าง และพลังงานความเครียดในโครงสร้างที่การกระจัดสูงสุด u_m เท่ากัน (ก) ระบบอิลาสติก (ข) ระบบอิลาสโตพลาสติก

- แรงที่ใช้ในระบบอีลาสโตพลาสติกมีค่าลดลงจากแรงสำหรับพฤติกรรมแบบระบบอิลาสติกตามค่าสัดส่วนของ μ และพลังงานของการโยกตัวที่เปลี่ยนกลับไป-มาในแต่ละรอบเหลือค่าเพียง $1/\mu^2$ ของค่าจากระบบแบบอิลาสติก เนื่องจากมีพลังงานที่สลายไปโดยการสร้างจุดหมุนพลาสติก (การครากของเหล็ก และการแตกร้าวของคอนกรีต)
- ดังนั้นจึงสามารถออกแบบโครงสร้างที่มีความเหนียวรับแรงแผ่นดินไหวโดยใช้แรงที่มีค่าน้อยกว่าแรงที่ใช้สำหรับพฤติกรรมระบบอิลาสติกได้เป็นอย่างมาก

1.3 พฤติกรรมของโครงสร้างแบบอินอิลาสติกที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบ

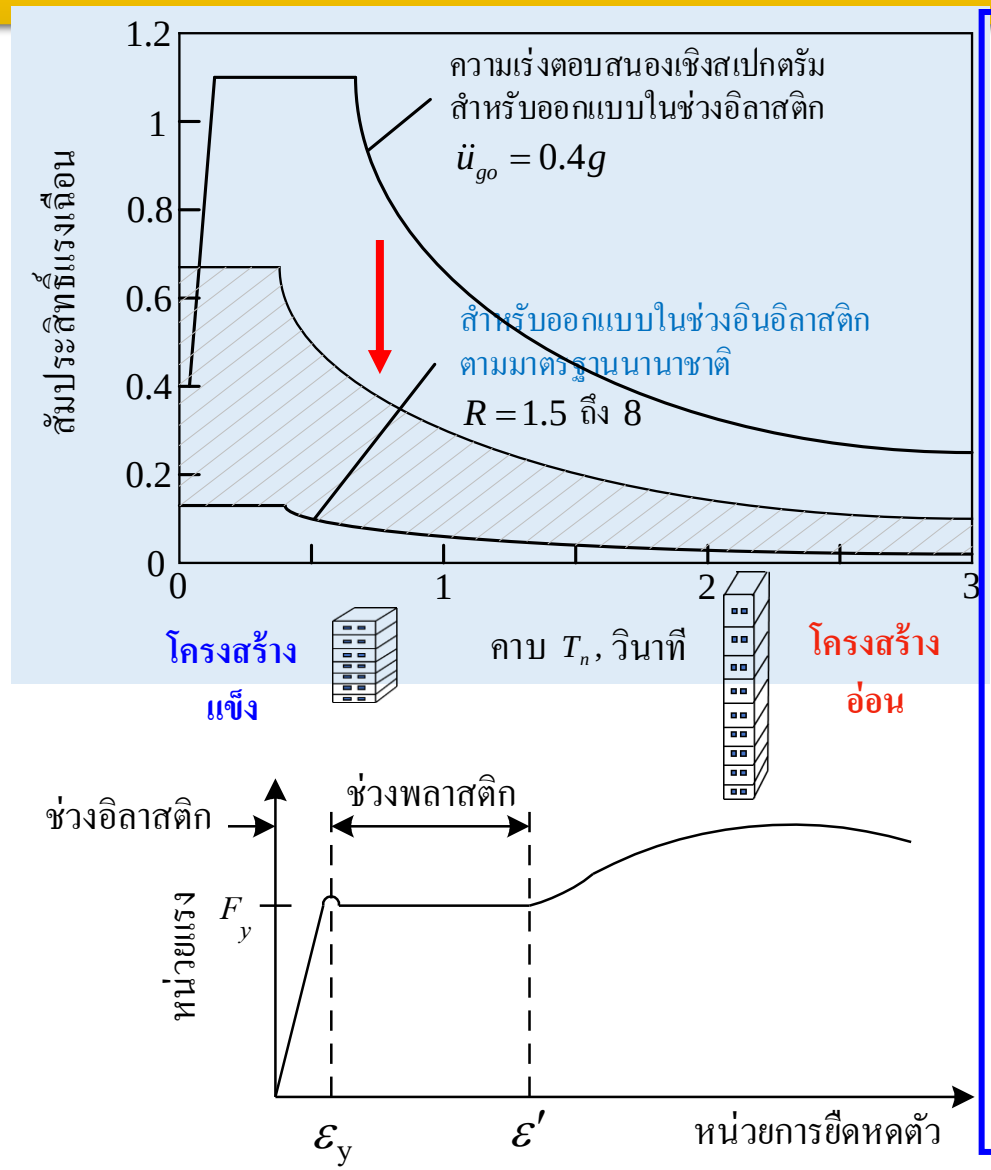
หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



Maximum Considered Earthquake (MCE), Design Basic Earthquake (DBE), Basic Safety Earthquake (BSE)

แผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ที่คาบการเกิดซ้ำ 2500 ปี เมื่อนำมาใช้ในการออกแบบจะต้องลดค่าให้เหมาะสม โดยการคูณลดด้วยค่า 2/3 เป็นระดับแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ ซึ่งเทียบเท่าคาบการเกิดซ้ำ 500 ปี สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา และเทียบเท่า 1,000 ปี สำหรับประเทศไทย

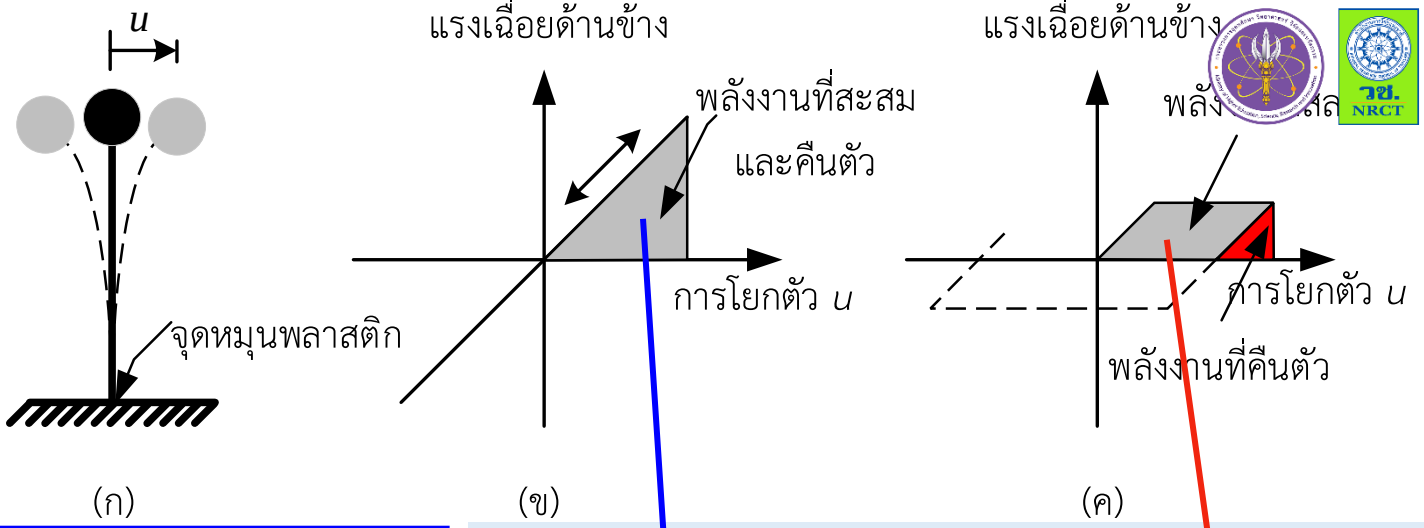
หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



- มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวกำหนดแรงแผ่นดินไหวสำหรับออกแบบอาคารน้อยกว่าที่เกิดขึ้นจริงจากพฤติกรรมอิลาสติก
- โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าอาคารมีความเหนียวเพียงพอที่ทำให้อาคารสามารถต้านทานการสั่นไหวถึงขั้นแตกร้าว และหรือการครากขององค์อาคารได้พอสมควร โดยการสามารถสลายพลังงานจากการสั่นไหวในช่วงอินอิลาสติกและกระจายกำลังไปยังส่วนองค์อาคารที่ยังมีกำลังเหลืออยู่ได้
- ประกอบกับเมื่อโครงสร้างเกิดการครากหรือแตกร้าวแล้ว โครงสร้างจะอ่อนลง ซึ่งทำให้แรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างลดลงไปด้วย

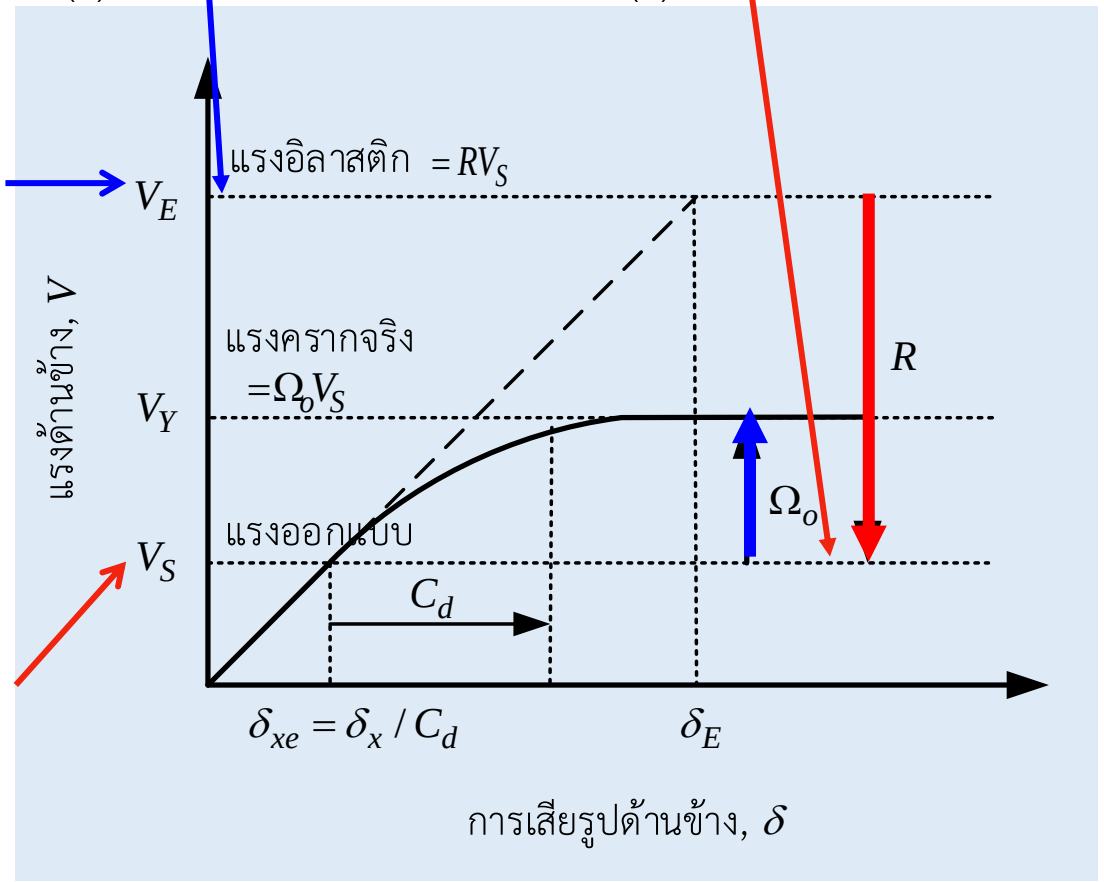
รูป ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และหน่วยการยืดหดตัวของเหล็กโครงสร้างโดยทั่วไป

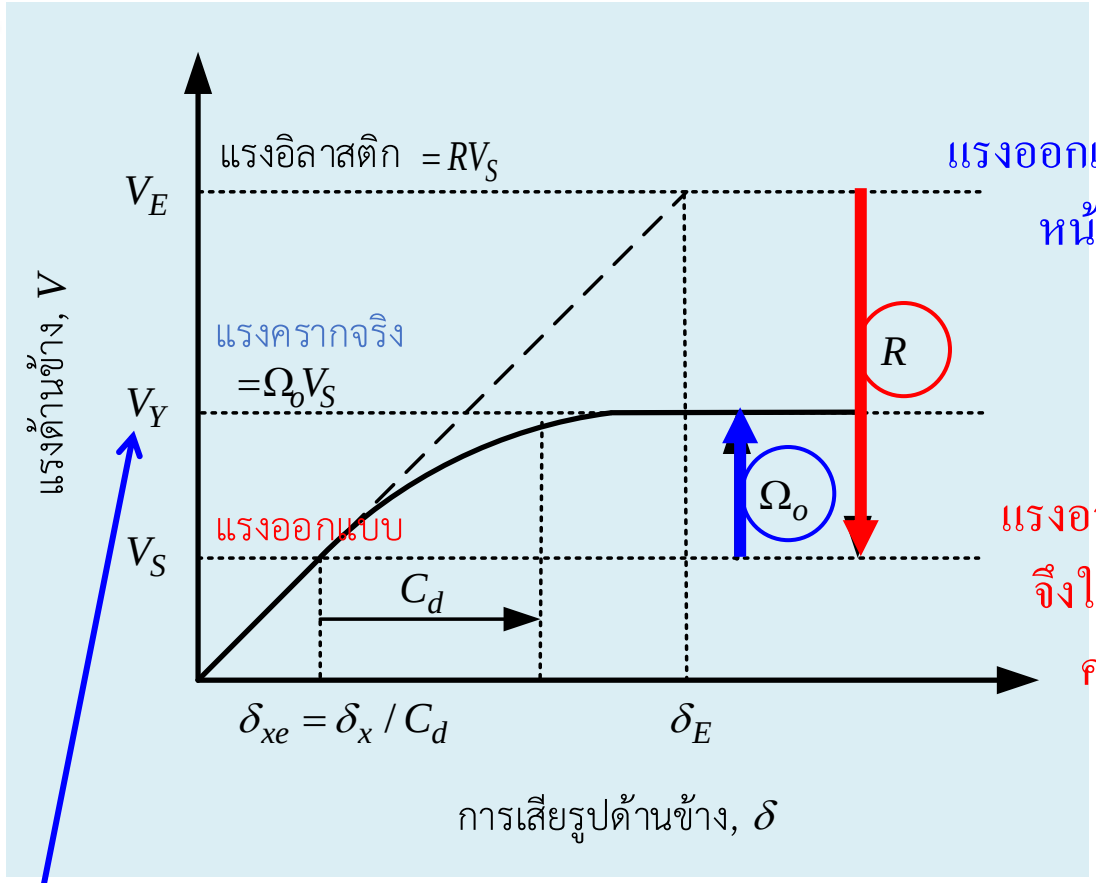
การเปรียบเทียบแรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างอิลาสติก กับค่าที่ใช้ออกแบบตามมาตรฐาน



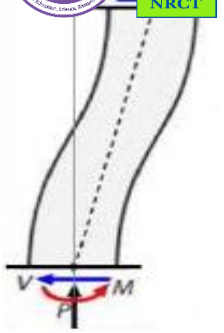
การออกแบบอาคารระดับแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบที่คาบการเกิดซ้ำ 1,000 ปี โดยให้อาคารมีพฤติกรรมอิลาสติกจะเป็นการไม่ประหยัด เนื่องจากจะรับแรงแผ่นดินไหวสูงมาก ดังแสดงในรูป

ดังนั้นจึงลดแรงอิลาสติกเป็นแรงออกแบบ โดยหารด้วยตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R)

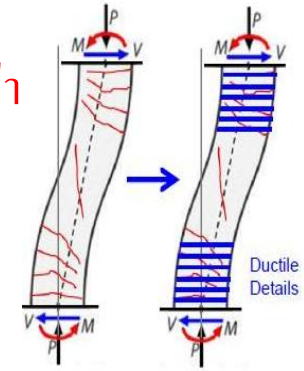




แรงออกแบบมาก จึงใช้หน้าตัดใหญ่

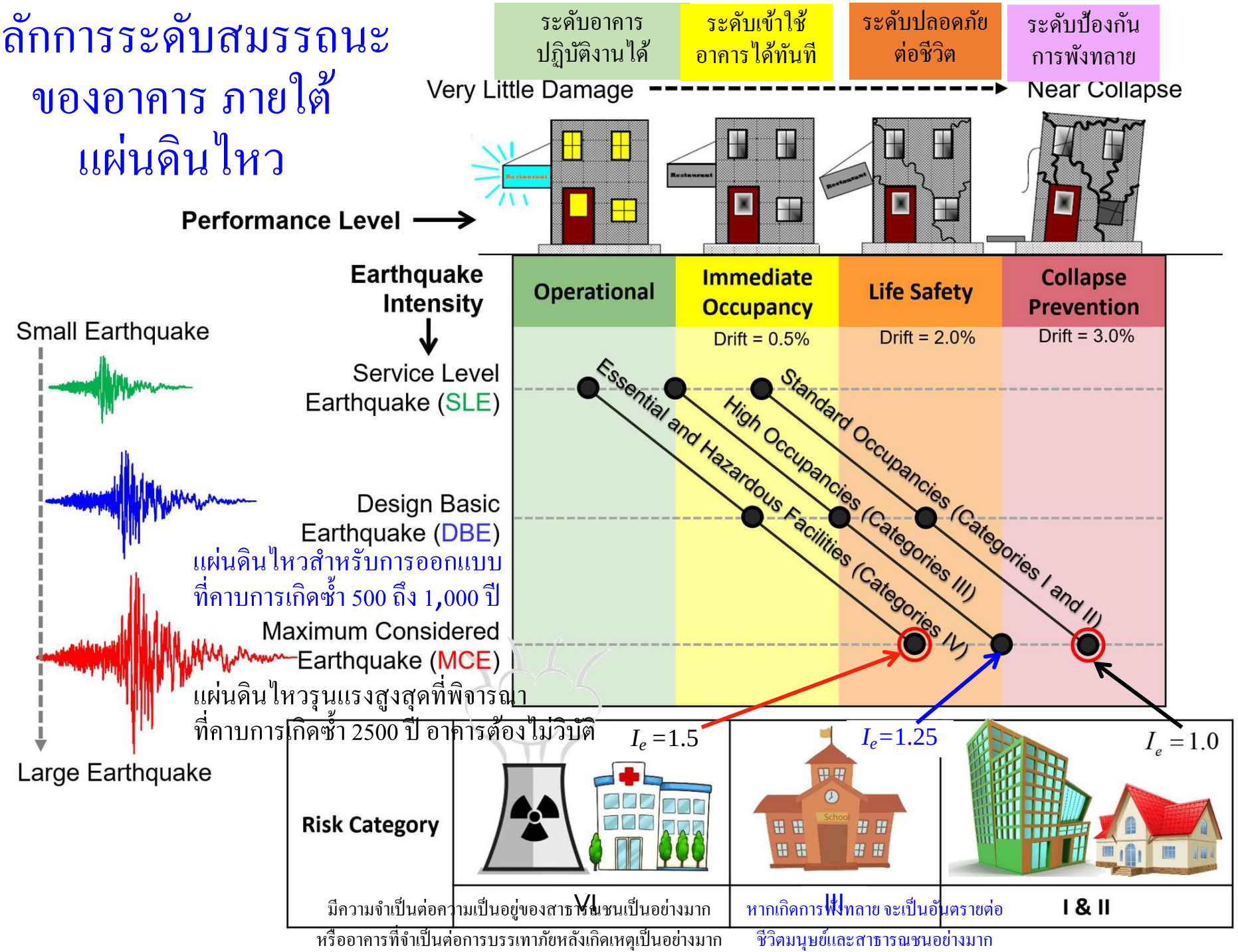


แรงออกแบบน้อยกว่า จึงใช้หน้าตัดเล็ก + ความเหนียว

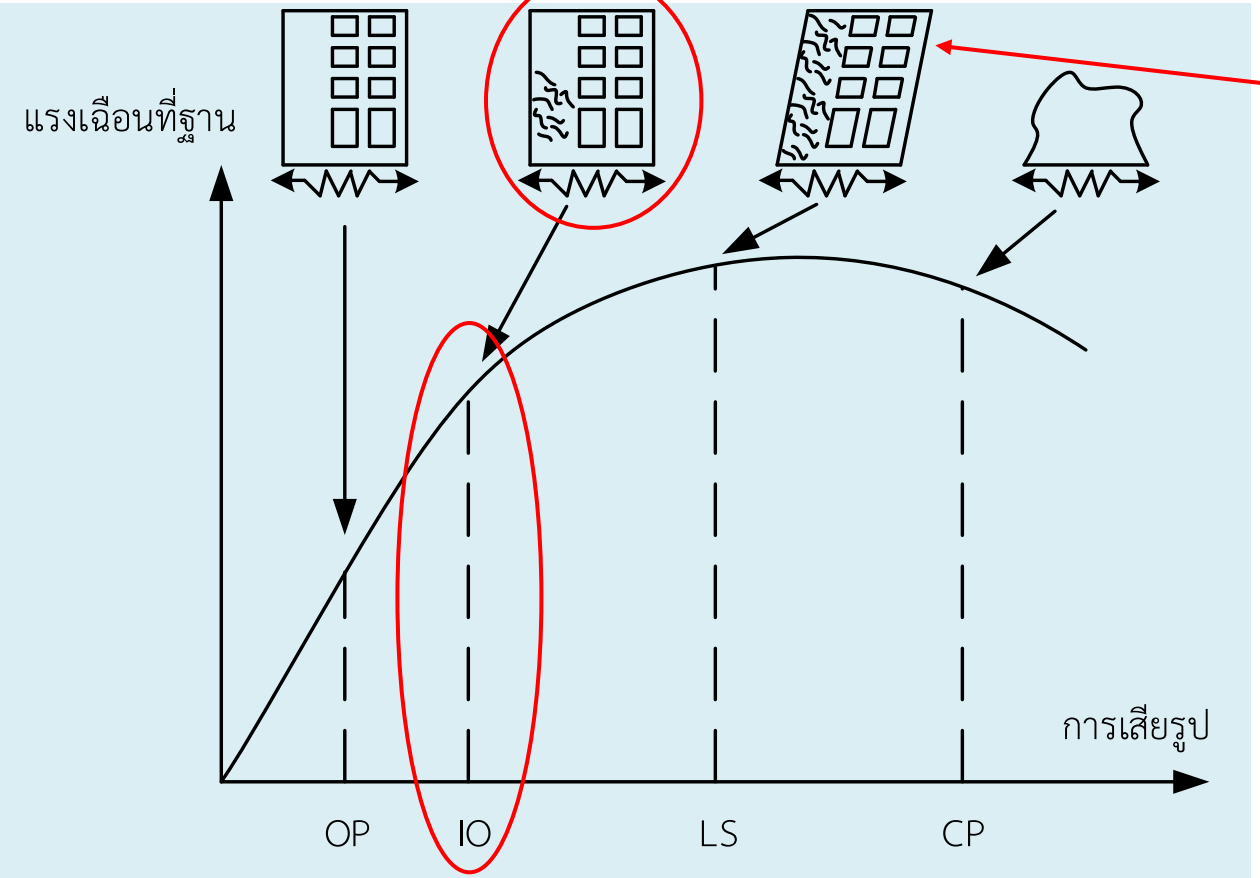


นอกจากนี้โดยทั่วไปโครงสร้างที่ออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวยังสามารถรับกำลังได้อีก 2 -3 เท่าของที่ออกแบบไว้ โดยไม่พังทลายลงมา เนื่องจากผลของกำลังส่วนเกิน (overstrength) ของโครงสร้าง

หลักการระดับสมรรถนะของอาคาร ภายใต้แผ่นดินไหว



หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



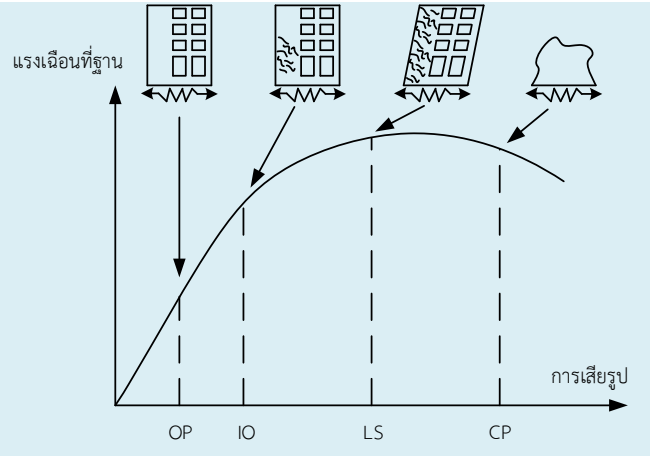




หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว อาคารควรมีระดับสมรรถนะต่าง ๆ ตาม มยผ. 1303-57 ซึ่งได้จำแนกระดับสมรรถนะของอาคารไว้ 4 ระดับ ได้แก่

- ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level – OP)
- ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level – IO)
- ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level -LS)
- ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP)

หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



สามารถอธิบาย ตาม มยผ. 1303-57 โดยสรุปได้ดังนี้

1) ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level – OP)

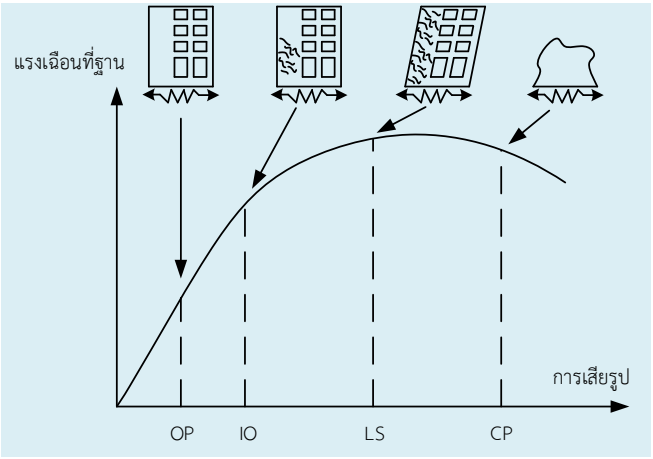
- อาคารมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพก่อนเกิดแผ่นดินไหว ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นอย่างถาวร โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนสและกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้
- ส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างไม่มีความเสียหาย ระบบไฟฟ้าและสาธารณูปโภคต่าง ๆ ใช้งานได้ ถึงแม้ว่าอาจต้องใช้ระบบฉุกเฉินช่วยสนับสนุน
- อาคารยังคงมีความปลอดภัยสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที
- จัดเป็นระดับสมรรถนะอาคารที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินในระดับต่ำที่สุด

2) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level – IO)

- อาคารมีสภาพใกล้เคียงกับสภาพก่อนเกิดแผ่นดินไหวไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นอย่างถาวร โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนสและกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้
- ส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างเกิดความเสียหายน้อย
- ซ่อมแซมอาคารเล็กน้อยก็สามารถใช้งานได้ตามปกติ
- จัดเป็นระดับสมรรถนะอาคารที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินในระดับต่ำมาก

หลักการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว



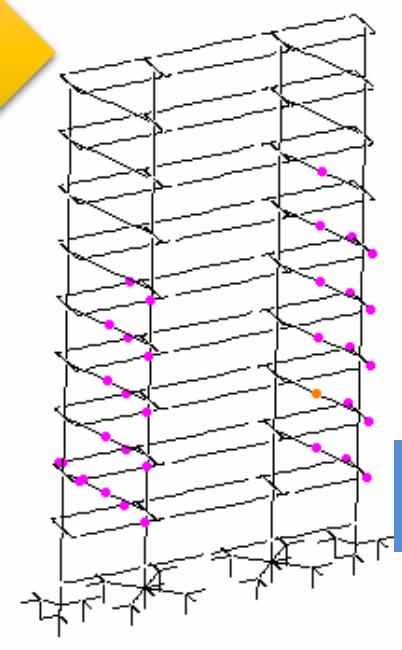


3) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level – LS)

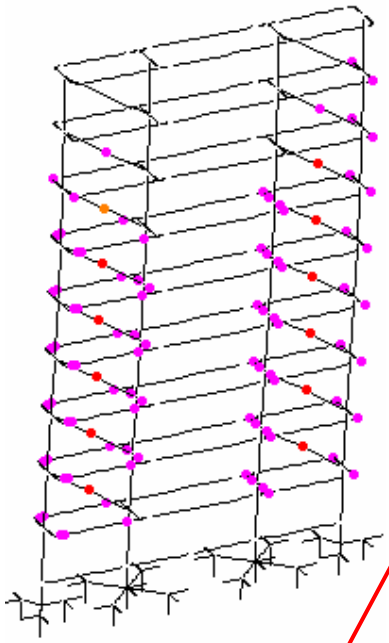
- โครงสร้างมีความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญภายหลังการเกิดแผ่นดินไหวแต่ไม่พังทลาย
- ส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนทางสถาปัตยกรรม ระบบเครื่องจักรกลและไฟฟ้าเกิดความเสียหายแต่ไม่มีความเสี่ยงจากวัตถุตกหล่น
- อาคารไม่สามารถใช้งานได้ทันที ต้องทำการตรวจสอบและซ่อมแซมอาคารก่อนกลับเข้าใช้งาน
- จัดเป็นระดับสมรรถนะอาคารที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินในระดับต่ำ

4) ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP)

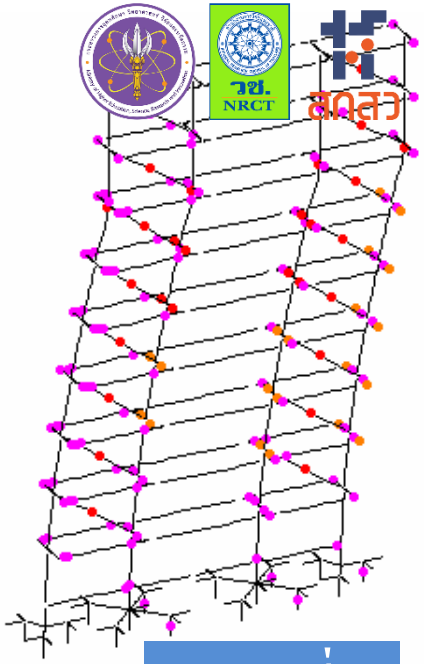
- อาคารเกิดความเสียหายโดยรวมรุนแรงมาก
- โครงสร้างอาคารมีสติฟเนสและกำลังคงค้างอยู่น้อยมากแต่ยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงได้ ทำให้สามารถอพยพผู้ใช้อาคารส่วนใหญ่ได้
- มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตของผู้ใช้อาคารบางส่วนเนื่องจากการพังทลายของชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง



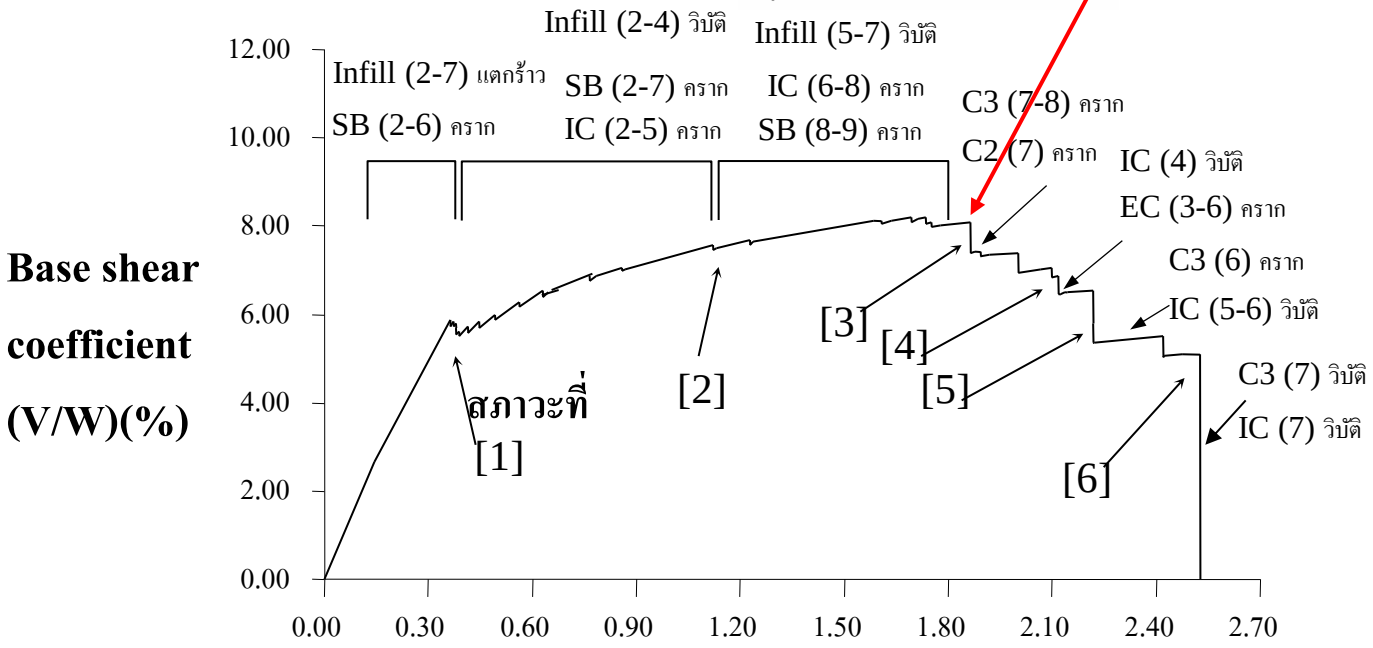
สภาวะที่ 1



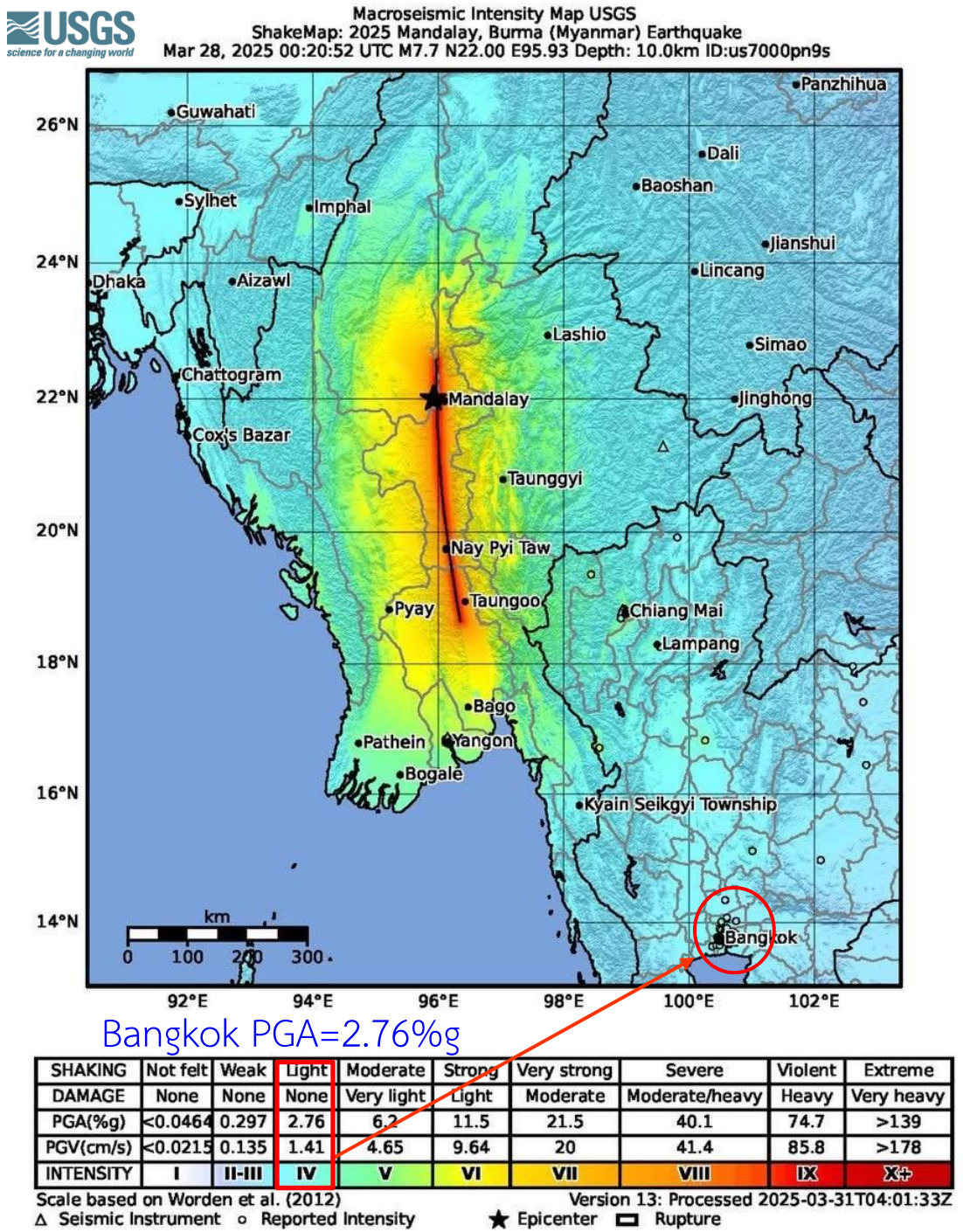
สภาวะที่ 3



สภาวะที่ 6



การประเมินสมรรถนะอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้นของอาคาร 9 ชั้น ระบบพื้น-เสา



Bangkok PGA=2.76%g

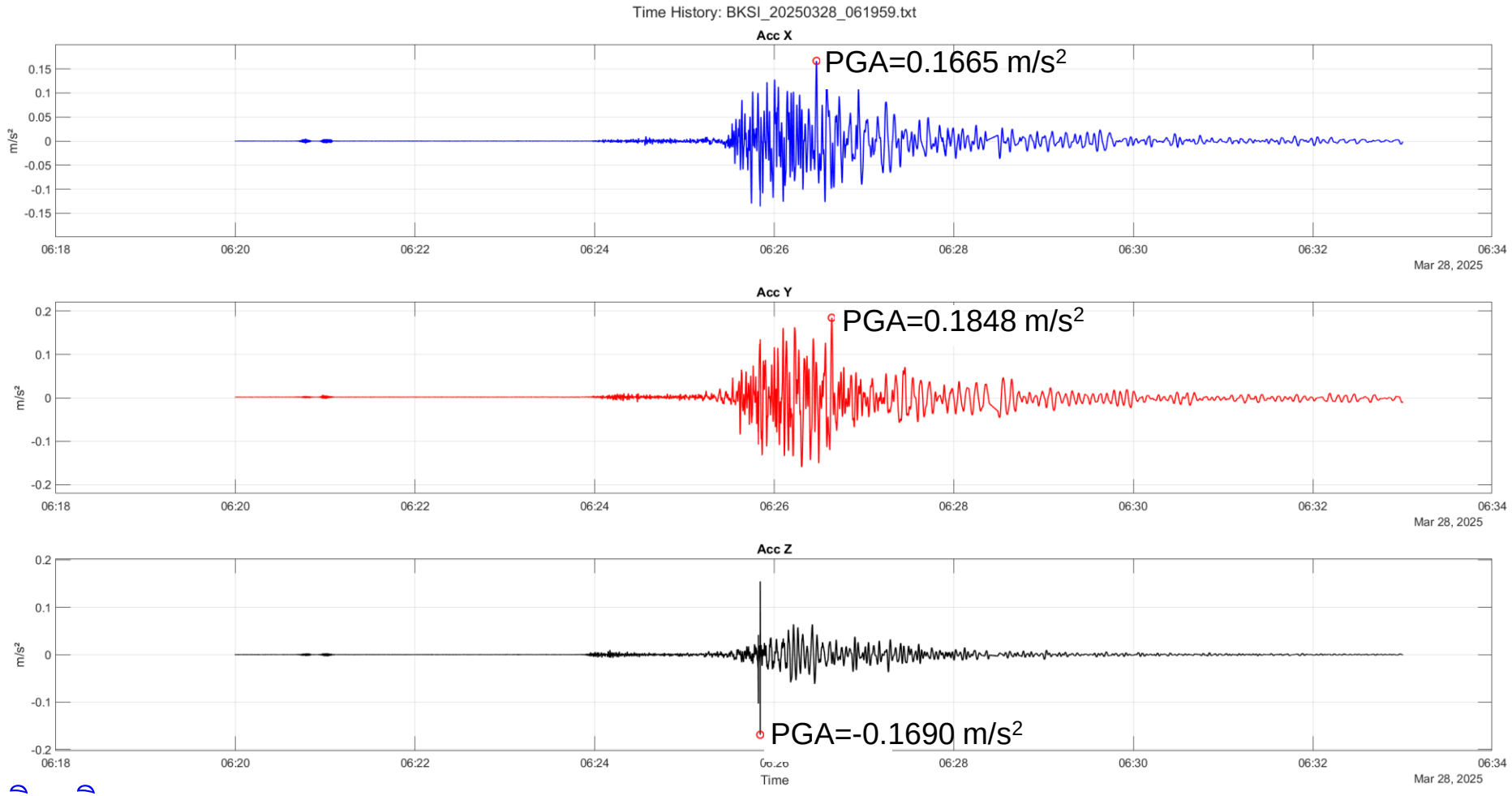
Mandalay Earthquake

M_w 7.7 28 Mar 2025

ที่มา : USGS science for a changing world

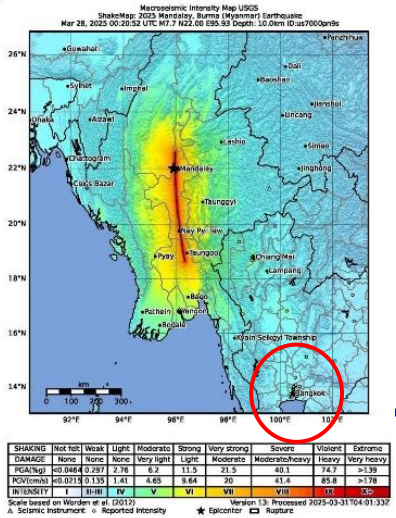
Mandalay Earthquake M_w 7.7 28 Mar 2025

สถานี ผิวดิน ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพ ระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวประมาณ 1,100 กิโลเมตร

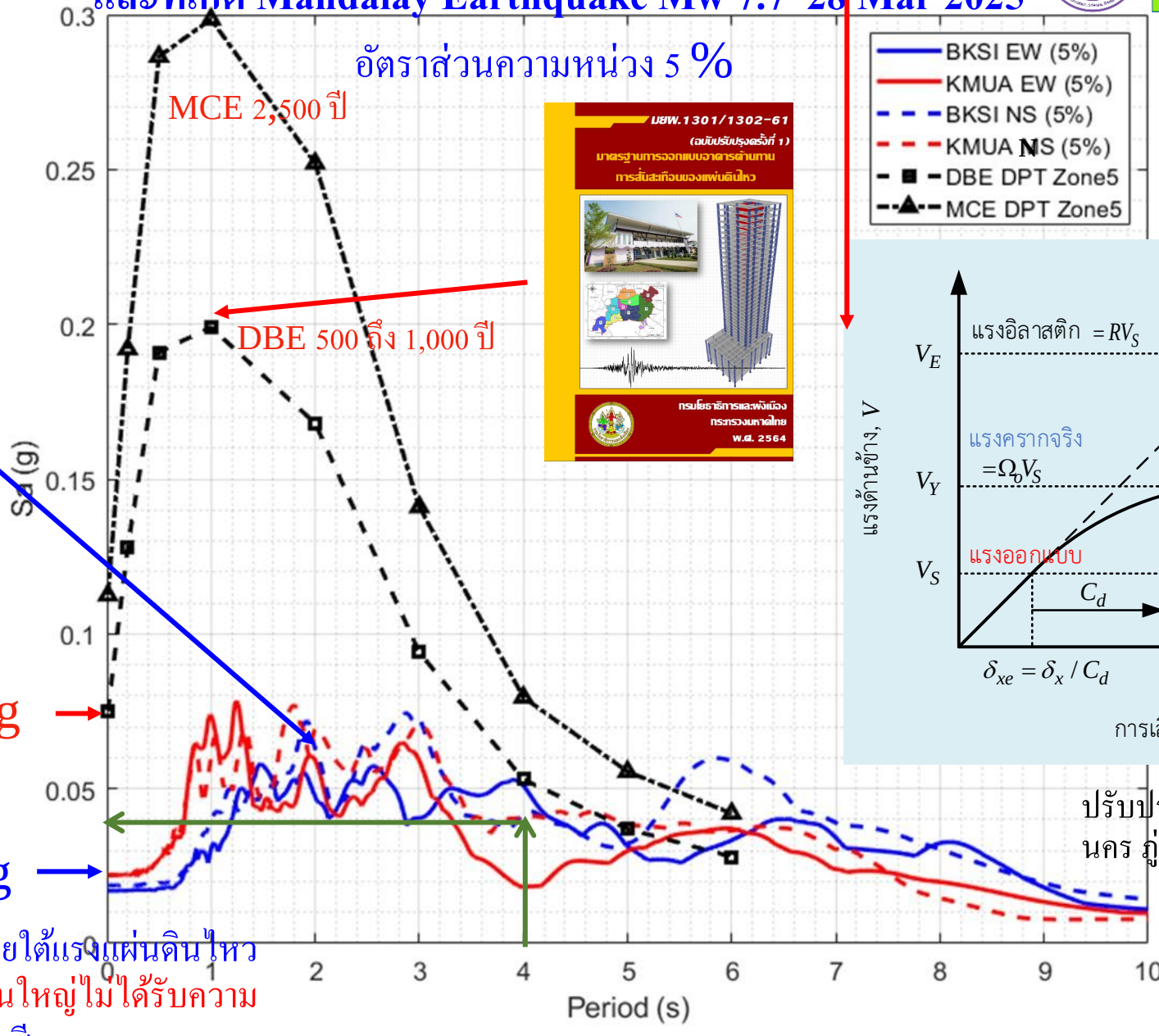


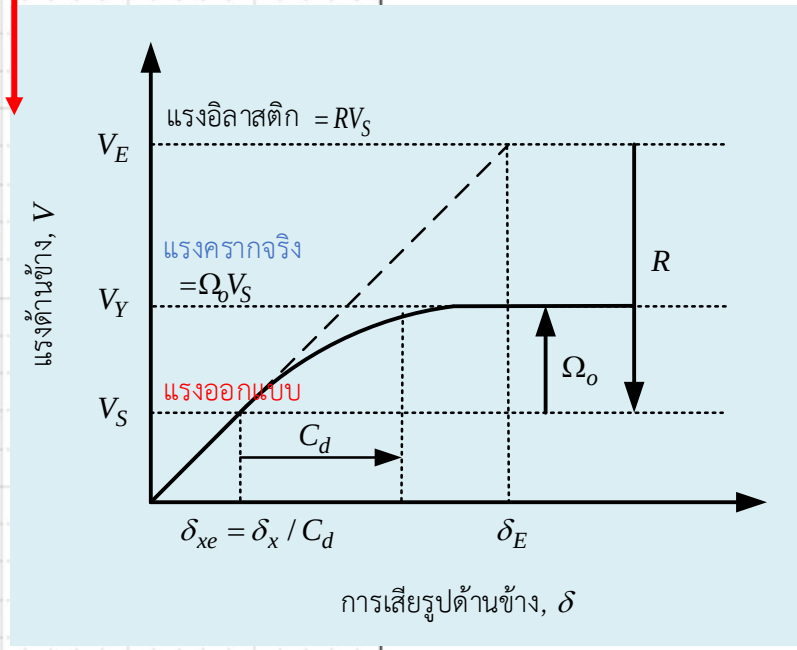
ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา

การเปรียบเทียบ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม สำหรับการออกแบบ และที่เกิด Mandalay Earthquake Mw 7.7 28 Mar 2025



กรุงเทพ ฯ
ระยะห่าง 1,100 กม





PGA มยผ =0.075g

PGA ที่เกิด =0.02g

ปรับปรุงจากข้อมูล
นคร ภู่วโรดม และภัคพงษ์ ลิขิตสุวรรณ

สมรรถนะของอาคารเตี้ยและสูง ภายใต้แรงแผ่นดินไหว ระยะไกลครั้งนี้ โครงสร้างหลักส่วนใหญ่ไม่ได้รับความเสียหาย แต่มีบ้างอาคารได้รับความเสียหาย

1.3 พฤติกรรมของโครงสร้างแบบอินอิลาสติกที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบ

มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว โดยทั่วไปใช้วิธีสมรรถนะ(Performance) ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างแบบอินอิลาสติก มาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 ได้กำหนดตัวประกอบที่เกี่ยวข้อง 3 ตัว คือ ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (Overstrength factor,Ω_o) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection amplification factor C_d)

โดยที่ V_E คือค่าแรงทางด้านข้างเนื่องจากแผ่นดินไหวสำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอิลาสติก

V_Y คือ ค่าแรงที่ทำให้เกิดการครากแบบสมบูรณ์ของโครงสร้าง

V_S คือ ค่าแรงที่ใช้ออกแบบ

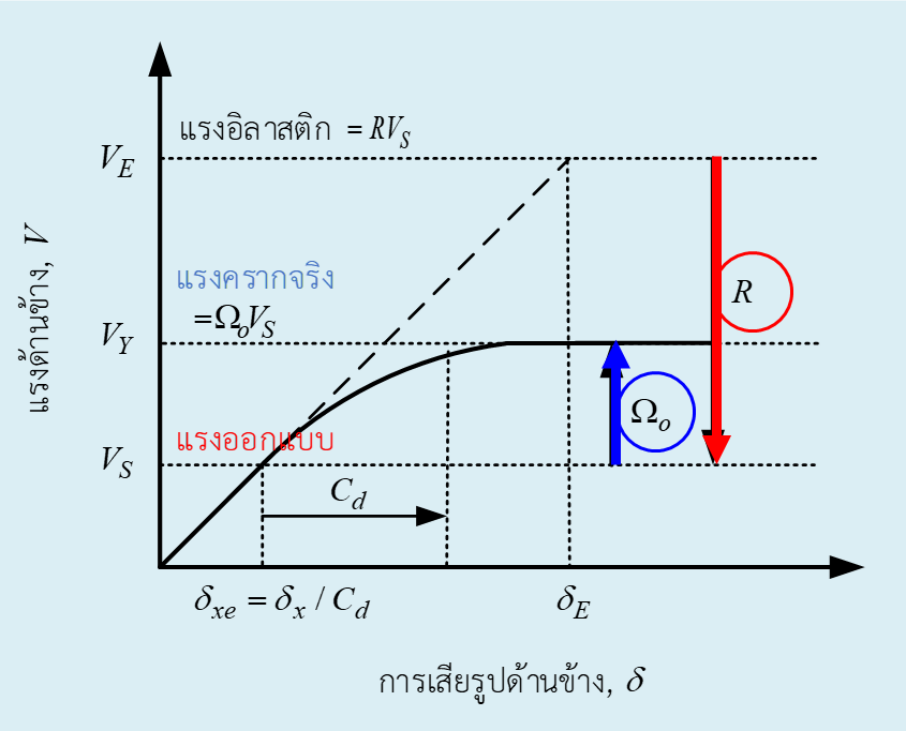
δ_E คือ ค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวจากการคำนวณแบบอิลาสติก

δ_x คือ ค่าการกระจัดสำหรับการออกแบบ หรือค่าการกระจัดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงเนื่องจากแผ่นดินไหวในการออกแบบ

δ_{xe} คือ ค่าการกระจัดทางทฤษฎีที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวในการออกแบบและได้จากการคำนวณแบบอิลาสติก

ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง $R = V_E / V_S$

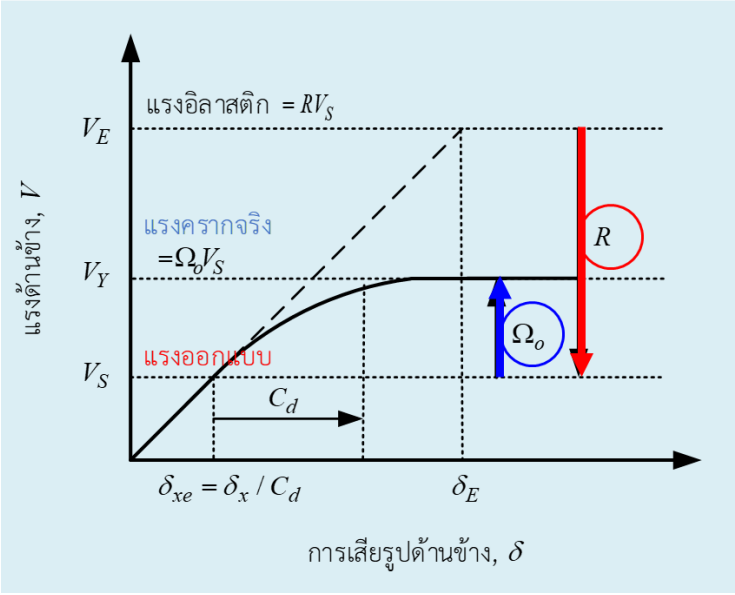
เป็นค่าที่แทนถึงอัตราส่วนของแรงที่ต้องใช้ต้านทานในโครงสร้างหากมีพฤติกรรมแบบอิลาสติกเท่ากับ V_E หารด้วยค่า V_S และแสดงถึงความสามารถของระบบที่จะมีพฤติกรรมการตอบสนองแบบอินอิลาสติกโดยไม่พังทลายและสามารถดูดซับพลังงานการสั่นไหว โดยค่า R ใช้ในการปรับค่า V_E ให้เป็นค่า V_S เพื่อใช้ออกแบบ



ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน $\Omega_0 = V_Y / V_S$

กำลังส่วนเกินของระบบมาจากพฤติกรรมอินอิลาสติกที่สร้างกำลังสำรองให้กับโครงสร้างในการต้านทานการเคลื่อนตัวอย่างมากภายใต้แผ่นดินไหว กำลังส่วนเกินมาจากหลายสาเหตุ ได้แก่

1) กำลังส่วนเกินจากวัสดุ เช่นกำลังที่แท้จริงของวัสดุมีค่ามากกว่าที่ใช้ออกแบบ ตัวอย่างเช่น กำลังครากของเหล็กรูปพรรณหรือเหล็กกลมข้ออ้อยเสริมคอนกรีตจะมีค่าสูงกว่ากำลังครากระบุที่ใช้ออกแบบประมาณ 1.1 ถึง 1.3 เท่า



THAMMASAT UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
CIVIL ENGINEERING LABORATORY

TSE | THAMMASAT SCHOOL OF ENGINEERING

Tensile Test of Reinforcing Steel

Project :

Owner :

Sample : Deformed Bar Dia. 25 mm.

Ref.No : 005/2564/06/0301/0557

Test by : Mr. Supravee Thananchaisirigul Date : 08/06/2564

Report by : Mr. Noppadol Mangkornthong Date : 15/06/2564

Sample No.	Type of Steel	Diameter (mm.)	Weight (kg.)	Length (m.)	Weight (kg/m.)	Py (kg.)	Pu (kg.)	Fy (ksc.)	Fu (ksc.)	Gauge Length After (mm.)	Elongation (%)
1	SD40T EF	25.0	3.728	0.99	3.766	27547	36551	5,610	7,443	147.6	18.1
2	SD40T EF	25.0	3.746	1.00	3.746	27109	36170	5,520	7,366	149.3	19.4
3	SD40T EF	25.0	3.742	0.99	3.780	27313	35540	5,562	7,237	150.8	20.6

ตัวอย่างกำลังส่วนเกินจากวัสดุ $\cong$ 1.4

THAMMASAT UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
CIVIL ENGINEEING LABORATORY

TSE | THAMMASAT SCHOOL OF ENGINEERING

Tensile Test of Reinforcing Steel

Project :

Owner :

Sample : Deformed Bar Dia. 16 mm.

Ref.No : 005/2564/07/0345/0688

Test by : Mr. La-miad Thamthanta Date : 09/07/2564

Report by : Mr. Noppadol Mangkornthong Date : 16/07/2564

Sample No.	Type of Steel	Diameter (mm.)	Weight (kg.)	Length (m.)	Weight (kg/m.)	Py (kg.)	Pu (kg.)	Fy (ksc.)	Fu (ksc.)	Gauge Length After (mm.)	Elongation (%)
1	SD40T EF	16.0	1.538	1.01	1.523	11802	13355	5,867	6,640	98.5	23.1
2	SD40T EF	16.0	1.549	1.02	1.519	11867	13495	5,900	6,709	97.8	22.3
3	SD40T EF	16.0	1.543	1.02	1.513	12152	13696	6,041	6,809	95.7	19.6

ตัวอย่างกำลังส่วนเกินจากวัสดุ $\cong 1.48$

2) การเลือกขนาดหน้าตัดในการออกแบบที่มีขนาดใหญ่กว่าค่าที่ต้องการรับแรงออกแบบจริง หรือออกแบบทำตามข้อกำหนดกำลังขั้นต่ำที่ระบุในมาตรฐาน เช่น การระบุปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ

3) การออกแบบต้องพิจารณาจัดรวมน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งและแรงด้านข้าง เช่น แรงลม และแรงแผ่นดินไหว โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแต่ละองค์อาคารที่ได้จากการจัดรวมน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวไปออกแบบ

4) อาคารส่วนใหญ่มักมีระบบโครงสร้างส่วนเกิน (Redundancy) การครากขององค์อาคารและหรือข้อต่อจำนวนพอสมควร แต่อาคารก็ยังมีเสถียรภาพอยู่ได้เนื่องจากความเหนียวของอาคาร

5) การออกแบบโครงสร้างที่สูงและอ่อนตัว อาจถูกควบคุมด้วยระดับการเคลื่อนตัวด้านข้างหรือระดับการสั่นไหวจากแรงลม ทำให้ใช้หน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งอาจมีกำลังมากกว่าที่ต้องการ

6) ความสามารถด้านการสลายพลังงานจากการเปลี่ยนรูป

ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นล้วนส่งผลให้โครงสร้างมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างสูงกว่าที่ต้องการอย่างน้อยประมาณ 1.5 เท่าได้ ดังนั้นในมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 จึงใช้ตัวเลข 2/3 ไปคูณ (หรือ 1.5 ไปหาร) ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงสุด (คาบการเกิดซ้ำ 2500 ปี) เพื่อให้เป็นค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ (คาบการเกิดซ้ำ 500 ปี ถึง 1,000 ปี ขึ้นกับเส้นความชัน เท่ากับ 500 ปี สำหรับ ASCE 7 และ 1,000 ปี สำหรับ มยผ. 1301 /1302)

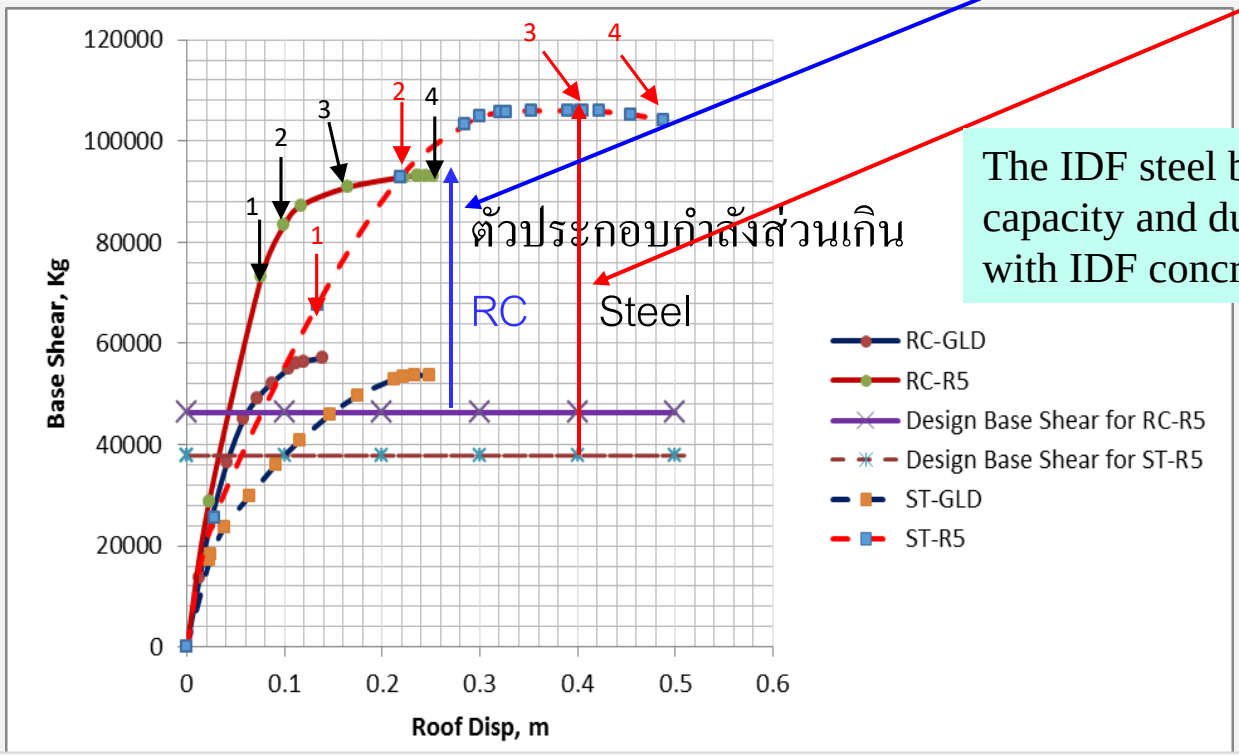
นอกจากนี้อาคารที่มีระบบโครงสร้างที่ดี การออกแบบรายละเอียดของโครงสร้างให้มีความเหนียว มีโครงสร้างส่วนเกิน (Redundancy) ระดับของการครากแบบสมบูรณ์ของโครงสร้างอาจมีค่าสูงกว่าระดับที่ออกแบบได้ถึง 2 ถึง 3 เท่าตัว โดยโครงสร้างไม่พังทลายลงมา

ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว $C_d = \delta_x / \delta_{xe}$

ค่า ใช้สำหรับการหาค่าการกระจัดที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวในการออกแบบ ใช้ในการปรับค่าการกระจัดจาก ซึ่งได้จากการวิเคราะห์แบบอิลาสติกภายใต้แรงที่ใช้ออกแบบให้เป็นค่า ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริง

การเปรียบเทียบสมรรถนะ
ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและอาคารเหล็ก สูง 5 ชั้น

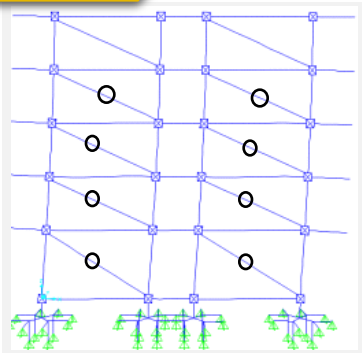
โครงสร้าง	แรงเฉือนออกแบบที่ฐาน (กก)	การโก่งตัวที่ยอดอาคารสูงสุด (ม)	แรงเฉือนสูงสุดที่ฐาน (กก)	ค่ากำลังส่วนเกิน
RC,GLD	-	0.139	57,117	-
RC,R5	46,359	0.253	93,003	2.01
ST,GLD	-	0.248	53,765	-
ST,R5	37,842	0.488	104,166	2.75



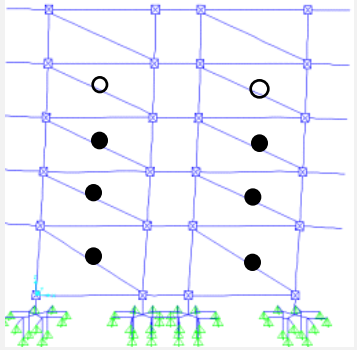
The IDF steel building has more capacity and ductility compared with IDF concrete building

[Boonyapinyo and Hinlad 2021]

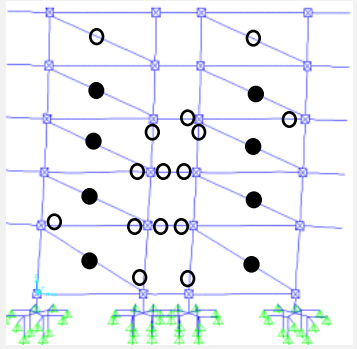
การเปรียบเทียบสมรรถนะของอาคาร ในรูปแรงเฉือนที่ฐานและการโก่งตัวที่ยอดอาคารสูงสุด ของคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) และอาคารเหล็ก (ST) ที่ออกแบบใหม่ ทั้งแบบไม่ได้คำนึงถึงแรงแผ่นดินไหว (GLD) และแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความเหนียวจำกัด (R5)



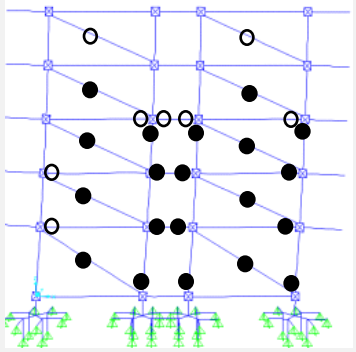
1st stage.



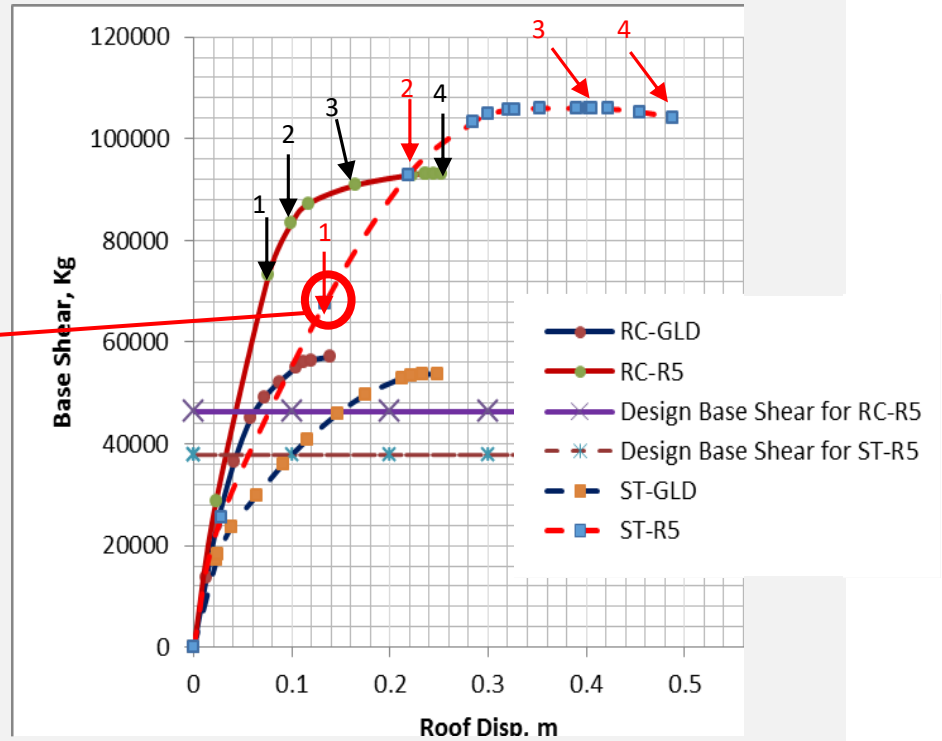
2nd stage.



3th stage.



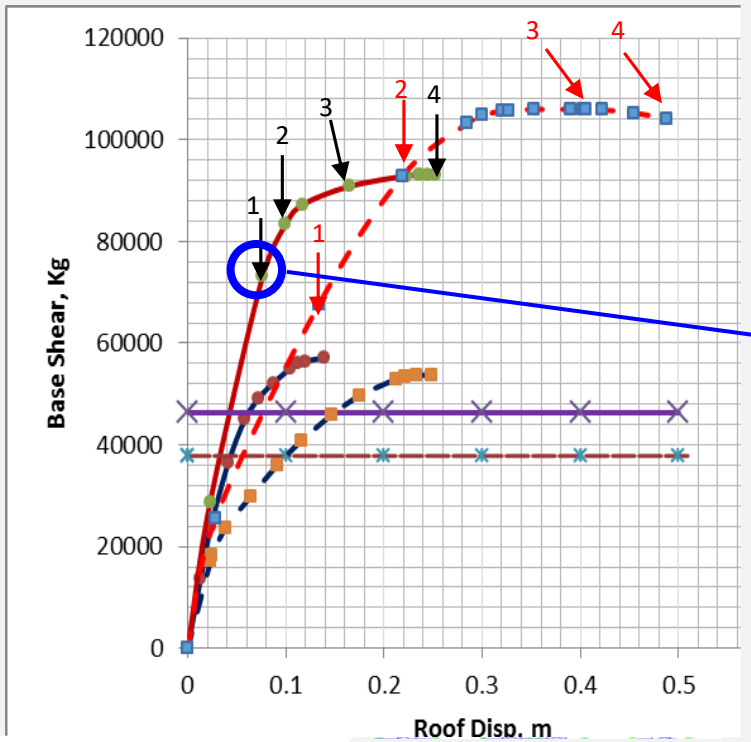
4th stage.

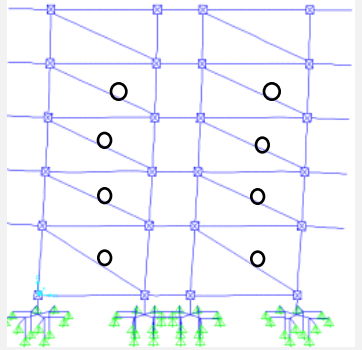


(a) IDF steel building

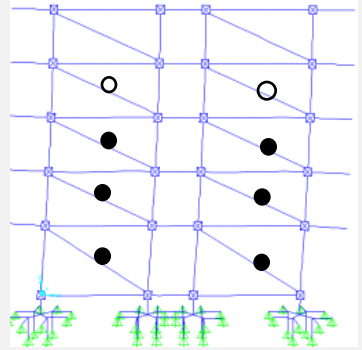
o Flexural yield, • Local failure

การเปรียบเทียบลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติก ของอาคารเหล็ก (ST)
ที่ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความเหนียวจำกัด (R5)

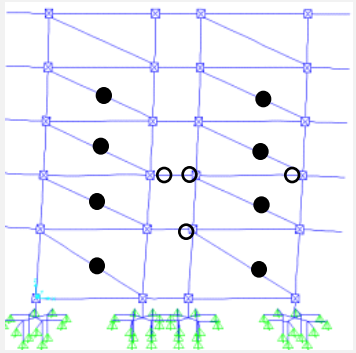




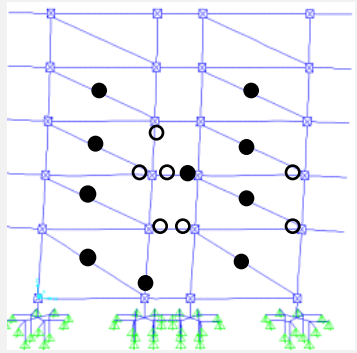
1st stage.



2nd stage.



3th stage.



4th stage.

(b) IDF concrete building

o Flexural yield, *• Local failure*

การเปรียบเทียบลำดับการเกิดจุดหมุนพลาสติก ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC)
ที่ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความเหนียวจำกัด (R5)

ส่วนที่ 2
ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบและแนวดิ่ง และผลกระทบต่อการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

การตอบสนองของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ขึ้นกับการออกแบบทางด้านสถาปัตยกรรมและทางวิศวกรรมโครงสร้างดังนี้

- รูปทรงของอาคาร หมายถึง ขนาด สัดส่วนและรูปทรงของอาคารใน 3 มิติ รวมถึง ตำแหน่ง รูปร่าง และขนาดขององค์อาคารหลักของโครงสร้างเช่น ตำแหน่งเสา ผนังรับแรงเฉือน (ปล่องลิฟต์) และความยาวเสา
- ระบบโครงสร้างหลัก ต้านทานแรงในแนวดิ่ง และแรงทางด้านข้าง
- การออกแบบรายละเอียด ของข้อต่อและองค์อาคารหลักให้มีความเหนียว
- องค์อาคารที่ไม่รับแรง เช่น ระบบผนังภายนอกของอาคาร ผนังภายใน และส่วนตกแต่งต่างๆ การออกแบบที่ไม่ดีเพียงพออาจทำให้เกิดการเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้

ดังนั้น ในการออกแบบทั้งทางสถาปัตยกรรม และทางวิศวกรรมโครงสร้าง จะต้องทำงานร่วมกันเพื่อการออกแบบอาคารที่ดีสำหรับต้านทานแรงแผ่นดินไหว

- อาคารที่มีรูปทรงที่ดี ระบบโครงสร้างที่ดี และออกแบบให้มีความเหนียวเพียงพอ สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นมากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 2 - 3 เท่า ได้โดยไม่พังทลายลงมา ถึงแม้จะเกิดความเสียหายมาก

Shaking Table Test, JMA Kobe 100%, คอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอ
(Irregular Building Configurations)

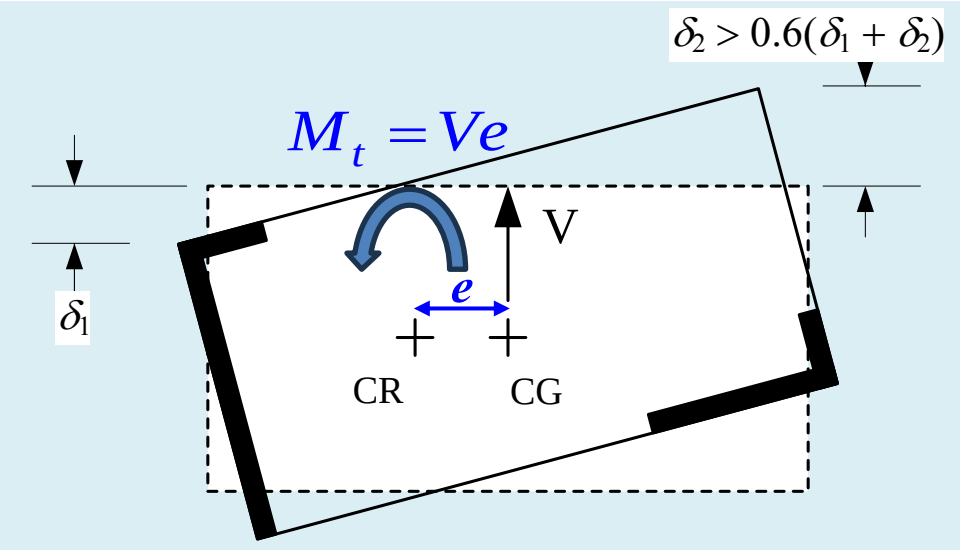
- รูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอภายใต้แรงแผ่นดินไหว จะเกิดหน่วยแรงสูงมากในบางตำแหน่ง ดังนั้นจึงต้องใช้การวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์อย่างเหมาะสม และต้องออกแบบรายละเอียดองค์อาคารและข้อต่อเป็นพิเศษ
- รูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ และ ความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่ง

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

รูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบมีลักษณะดังต่อไปนี้

[ประกาศกระทรวงมหาดไทย 2564, มยผ. 1301/1302-61]

1ก.) ความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิด (Torsional irregularity) (พิจารณากรณีที่ไดอะแฟรมเป็นประเภทแข็งหรือกึ่งแข็ง) เมื่อค่าสูงสุดของการเคลื่อนตัวด้านข้างระหว่างชั้น (story drift) ในแนวตั้งฉากแนวแกน (คำนวณจากแรงด้านข้างที่รวมผลของแรงบิดโดยบังเอิญ) ที่ปลายด้านหนึ่งของโครงสร้างมีค่ามากกว่า 1.2 เท่าของค่าเฉลี่ยที่ปลายสองด้าน



CR = จุดศูนย์กลางของ Rigidity

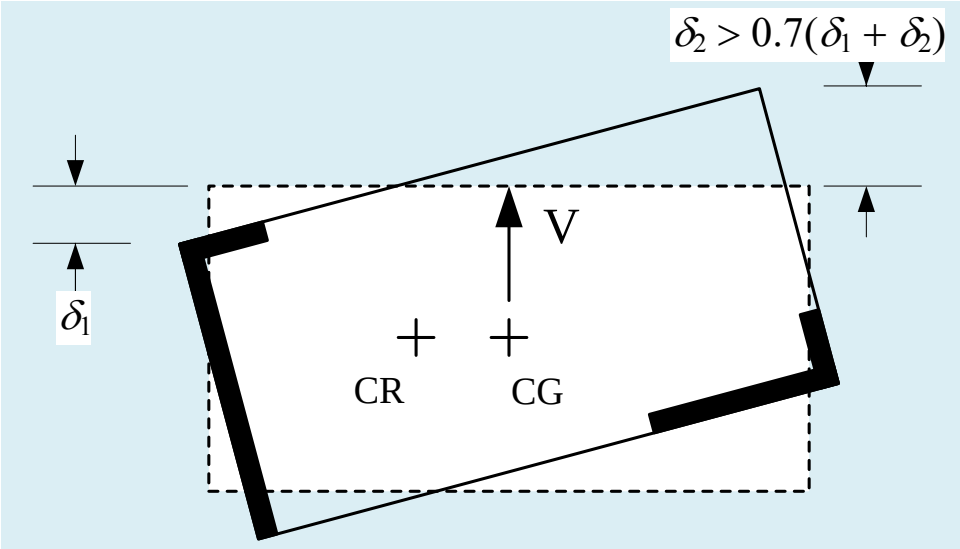
CG = จุดศูนย์กลางของมวล

V = แรงจากแผ่นดินไหว

e = ระยะเยื้องศูนย์ระหว่าง CR กับ CG

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

1ข.) ความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิดอย่างมาก (Extgreme torsional irregularity) (พิจารณากรณีที่ไดอะแฟรมเป็นประเภทแข็งหรือกึ่งแข็ง) เมื่อค่าสูงสุดของการเคลื่อนตัวด้านข้างระหว่างชั้น (story drift) ในแนวตั้งฉากแนวแกน (คำนวณจากแรงด้านข้างที่รวมผลของแรงบิดโดยบังเอิญ) ที่ปลายด้านหนึ่งของโครงสร้างมีค่ามากกว่า 1.4 เท่าของค่าเฉลี่ยที่ปลายสองด้าน

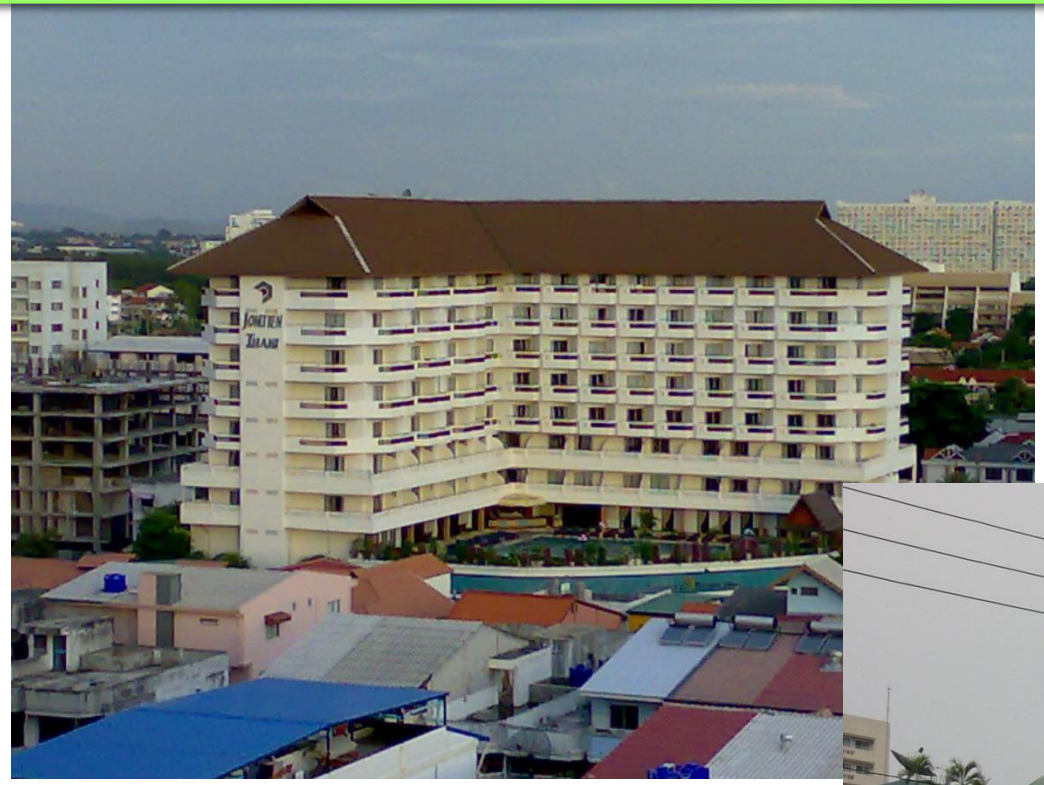


CR = จุดศูนย์กลางของ Rigidity

CG = จุดศูนย์กลางของมวล

V = แรงจากแผ่นดินไหว

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ



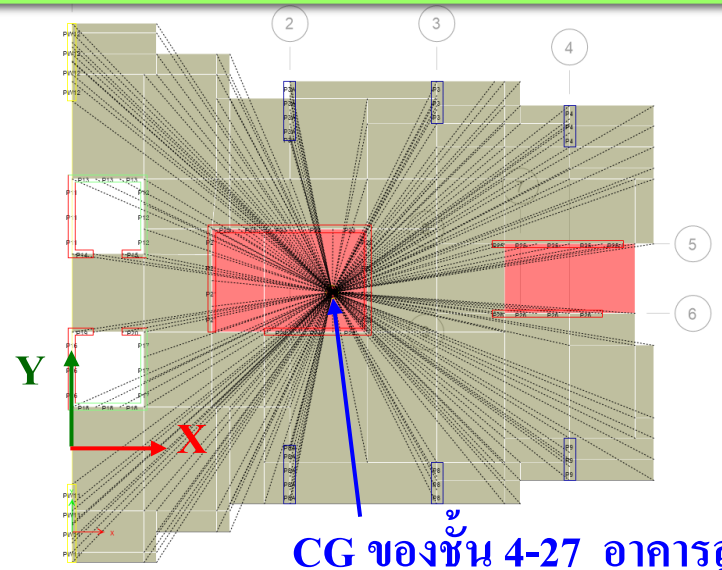
อาคารที่ริมหาดจอมเทียน พัทยา

ตัวอย่างอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิด

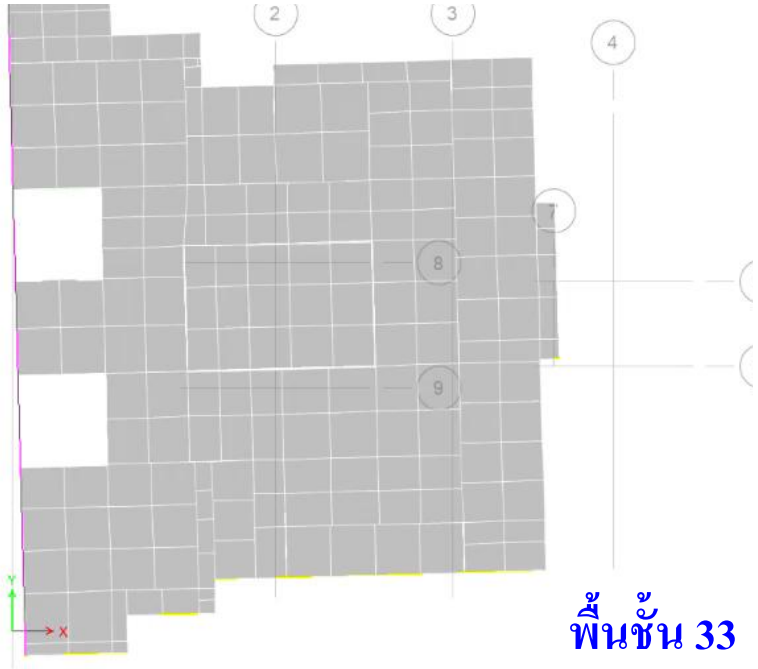


อาคารในกรุงเทพ

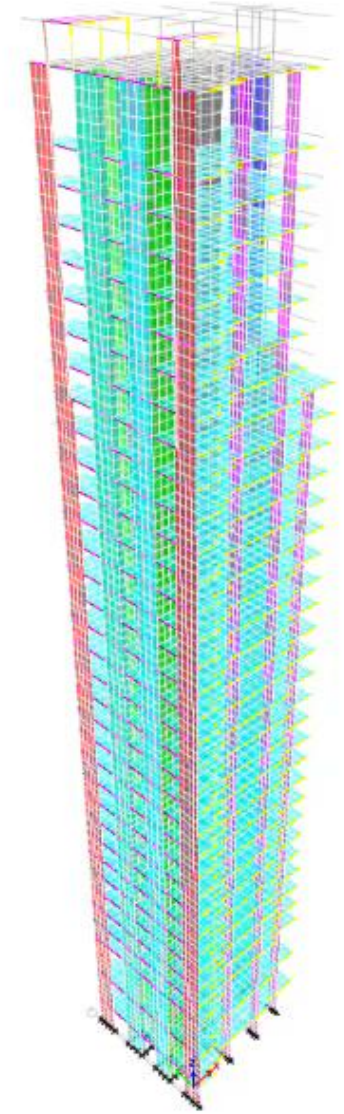
2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ



CG ของชั้น 4-27 อาคารสูง 33 ชั้น



พื้นชั้น 33



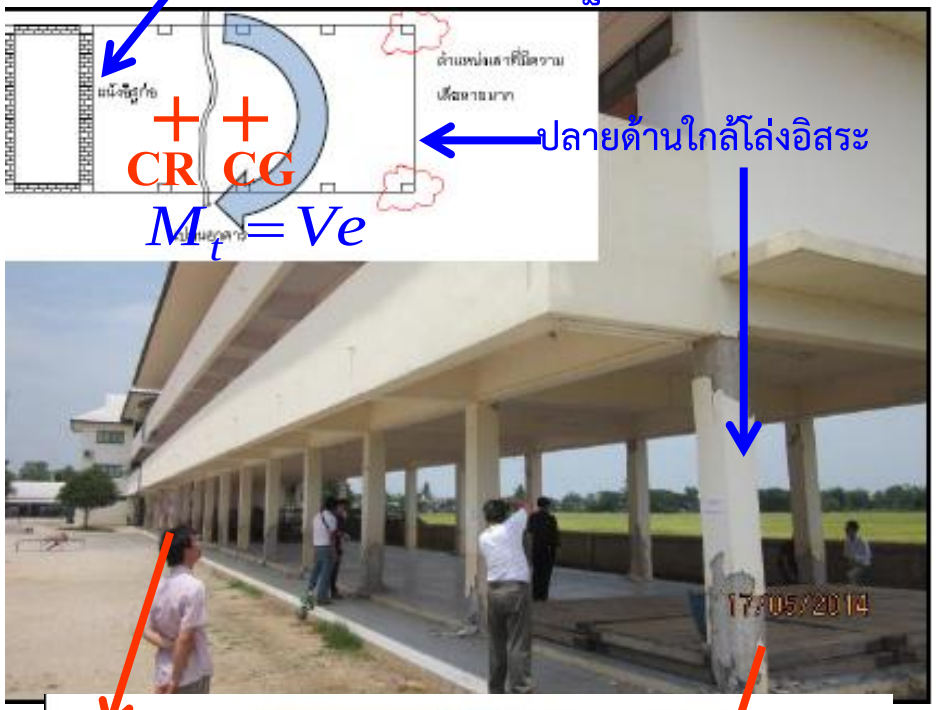
ตัวอย่างรูปแบบการสั่นไหวของอาคาร ที่มีความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิด

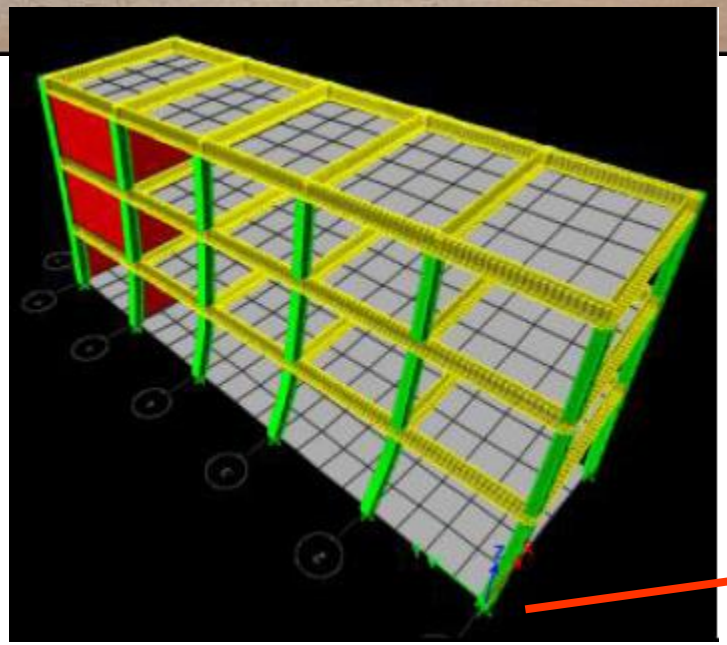
รูปแบบการสั่นไหว ที่ 1 (Mode 1) ในทิศทาง Y ผสมกับการบิดจากการเยื้องศูนย์ของ CG กับ CR

การเกิดความเสียหายของอาคารจากความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิด

ปลายด้านไกลมีโครงสร้างบันไดและกำแพงอิฐก่อที่ชั้นหนึ่ง











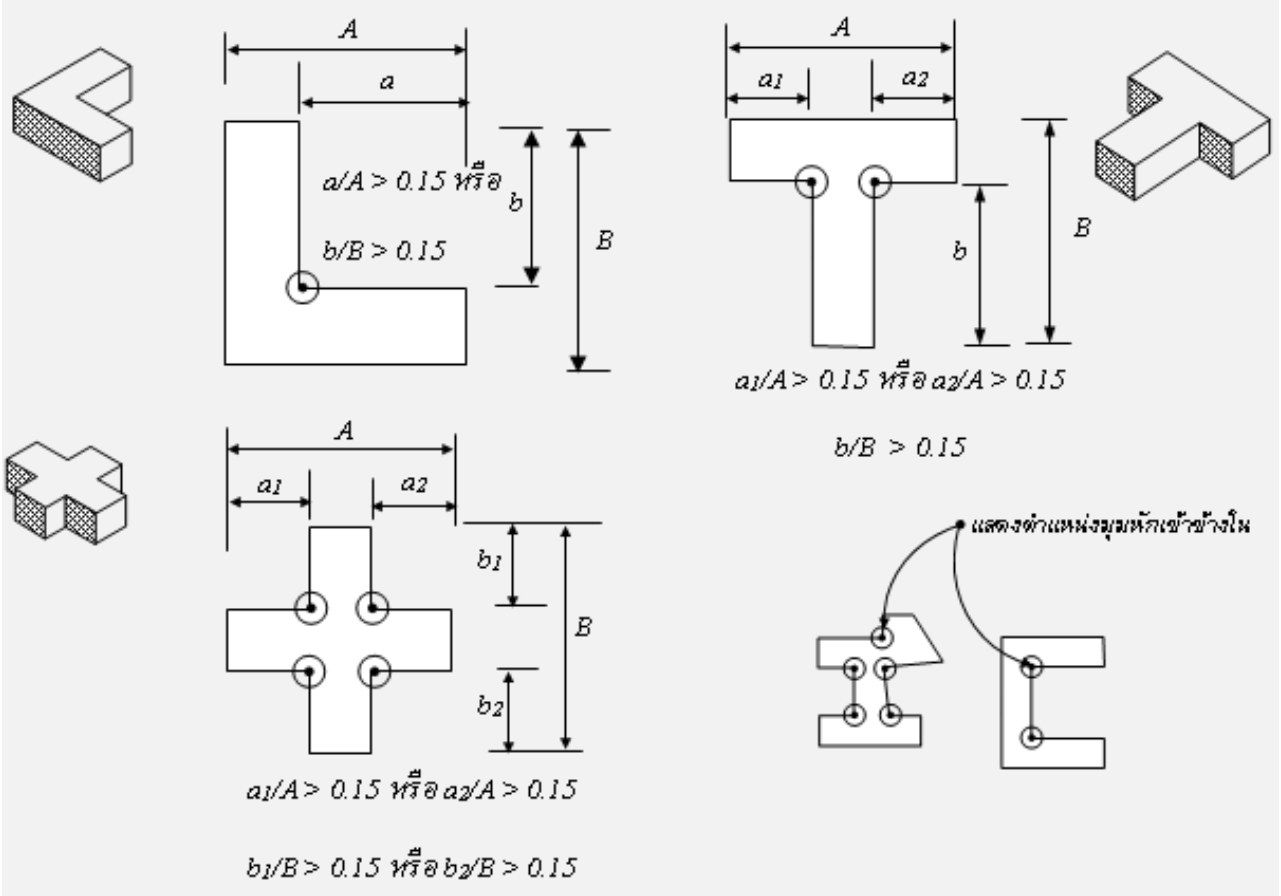
จากการเกิดแผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงราย เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557

ภาพจาก
ศ.ดร. สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

2.) ความไม่สม่ำเสมอจากการมีมุมหักเข้าข้างใน (Reentrant corner irregularity)

เมื่อผังโครงสร้างมีลักษณะหักเข้าข้างในทำให้เกิดส่วนยื่น โดยที่ส่วนยื่นนั้นมีระยะฉายในแต่ละทิศทางมากกว่าร้อยละ 15 ของมิติของผังในทิศทางนั้น



2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

ตัวอย่างอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอจากการมีมุมหักเข้าข้างใน



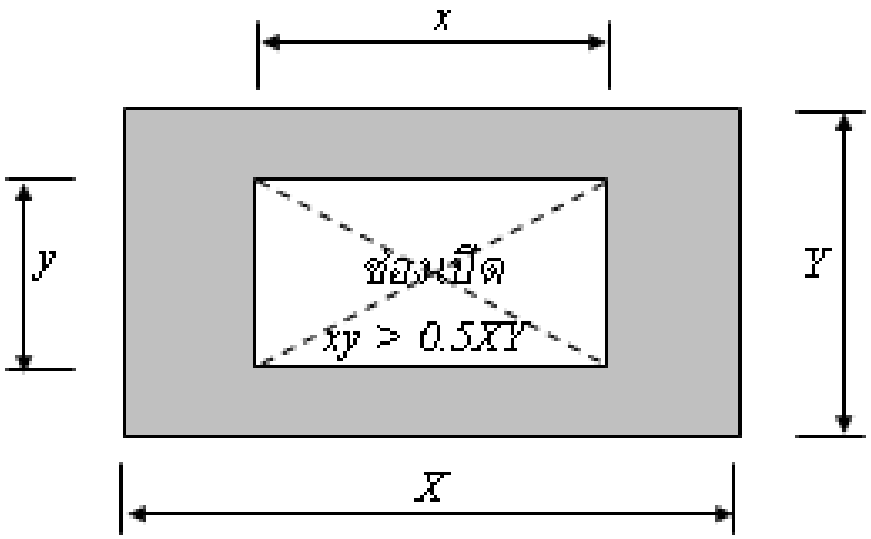
อาคารที่ริมหาดจอมเทียน พัทยา



อาคารในกรุงเทพ

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

3.) ความไม่สม่ำเสมอจากความไม่ต่อเนื่องของไดอะแฟรม (Diaphragm discontinuity irregularity) เมื่อไดอะแฟรมมีความไม่ต่อเนื่องหรือมีการเปลี่ยนค่าสติฟเนสอย่างทันทีทันใด รวมถึงการเจาะช่องพื้นหรือมีช่องเปิดมากกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่ไดอะแฟรม หรือสติฟเนสประสิทธิผลของไดอะแฟรมของชั้นหนึ่งชั้นใดมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับชั้นถัดไป





อาคารเรียนใน จ. ปทุมธานี

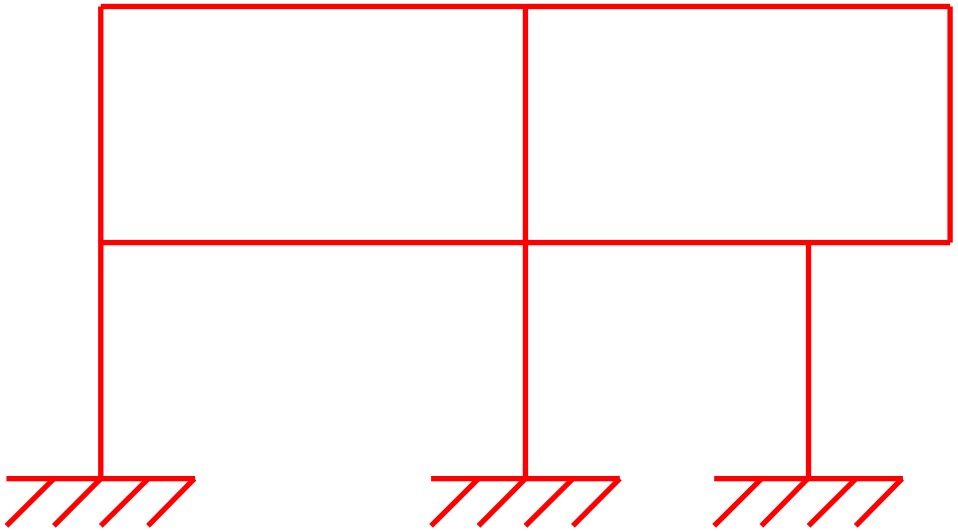


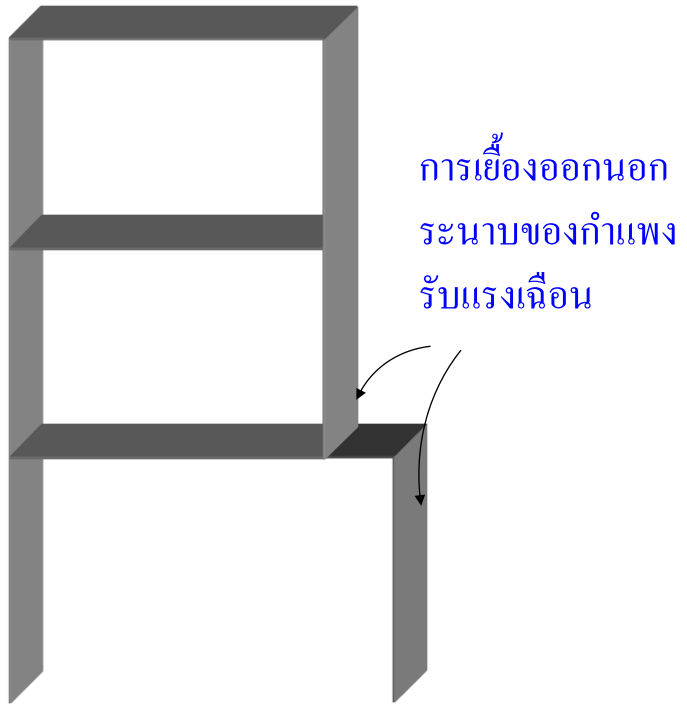
โรงแรมใน จ. เชียงใหม่

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

4.) ความไม่สม่ำเสมอจากการเยื้องออกนอกระนาบ (Out–of–plane offset irregularity)

เมื่อเส้นทางการถ่ายแรงของแรงด้านข้างมีความไม่ต่อเนื่อง เช่น กรณีมีการเยื้องระหว่างระนาบของกำแพงรับแรงด้านข้าง



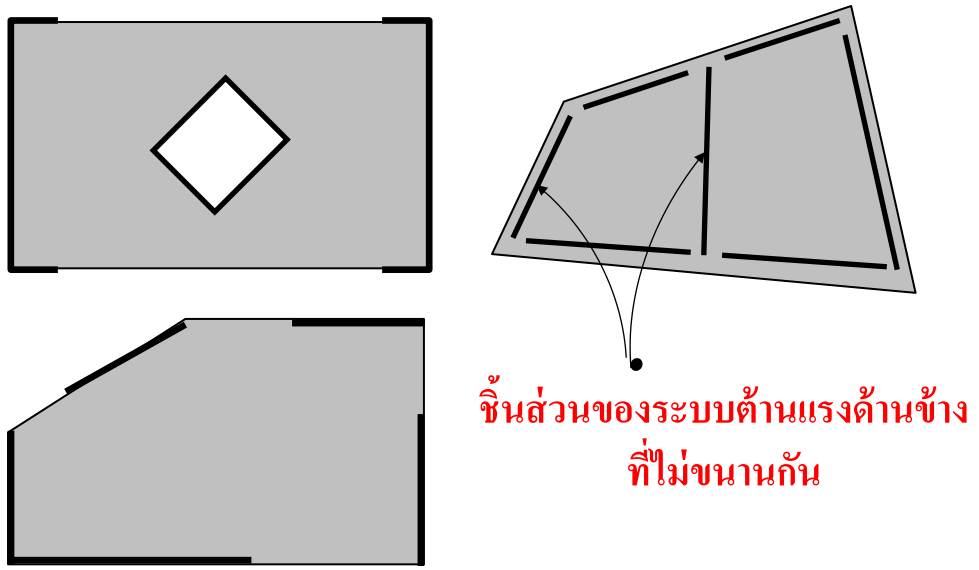


56

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

5.) ความไม่สม่ำเสมอจากระบบที่ไม่ขนานกัน (Nonparallel system irregularity)

เมื่อระบบที่มีองค์อาคารแนวดิ่งที่ต้านทานแรงทางด้านข้างวางตัวในแนวที่ไม่ขนานกันหรือไม่สมมาตรกัน เมื่อเทียบกับแกนหลักของระบบโครงสร้างหลักต้านทานแรงทางด้านข้าง



2.1 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบ

ตัวอย่างอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอจากระบบที่ไม่ขนานกัน



รูปด้านหน้า



อาคารที่ริมหาดจอมเทียน พัทยา

รูปด้านหลัง

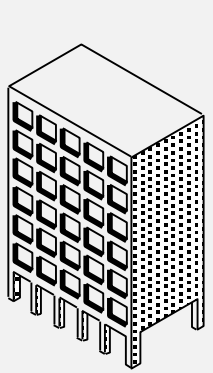
2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

รูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งมีลักษณะดังต่อไปนี้

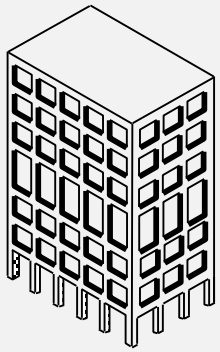
[ประกาศกระทรวงมหาดไทย 2564, มยผ. 1301/1302-61]

1ก.) ความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส หรือชั้นที่อ่อน (Stiffness-soft story irregularity)

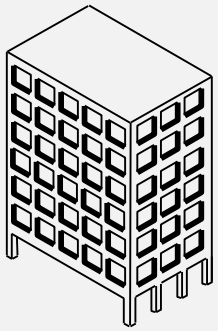
เมื่อชั้นใด ๆ มีค่าสติฟเนสทางด้านข้าง (Lateral stiffness) น้อยกว่าร้อยละ 70 ของชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป หรือน้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไป



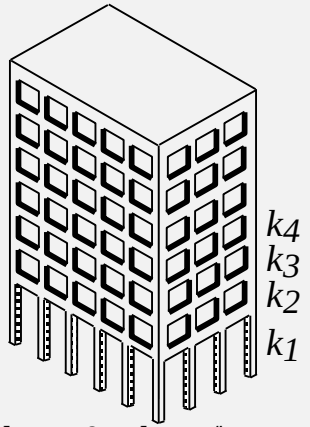
ช่องเปิดขนาดใหญ่ใน กำแพงรับแรงเฉือน



ความสูงของชั้นไม่สม่ำเสมอ



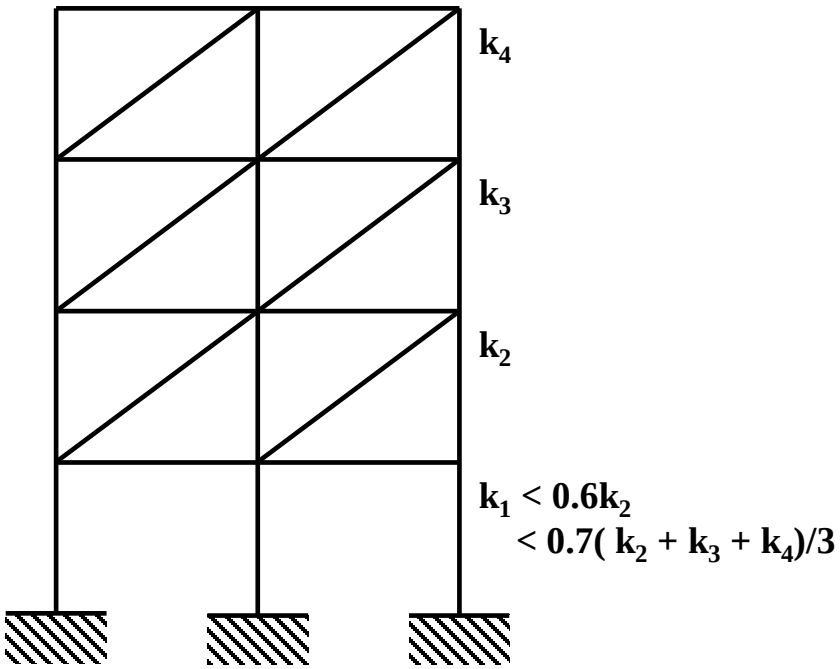
ความไม่ต่อเนื่องของเสา



$k_1 < 0.7\ k_2$ หรือ
$< 0.8\ (k_2+k_3+k_4)/3$

2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

1ข.) ความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส หรือชั้นที่อ่อนอย่างมาก (Stiffness-extreme soft story irregularity) เมื่อชั้นใด ๆ มีค่าสติฟเนสทางด้านข้าง (Lateral stiffness) น้อยกว่าร้อยละ 60 ของชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป หรือน้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไป





โรงแรมในกรุงเทพ

2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง



ที่มา:

Anil K. Chopra, 5Ed., 2020.

การวิบัติของอาคาร Olive View Hospital, 1971 ที่มีความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส หรือชั้นที่อ่อนที่เสาชั้น 1 และเสาชั้นใต้ดิน โดยมีผนังรับแรงเฉือนที่ 4 ชั้นบนแต่ไม่ต่อเนื่องมาที่ 2 ชั้นล่าง แต่เป็นโครงสร้างที่มีความเหนียวมาก จึงไม่พังทลายลงมา

2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

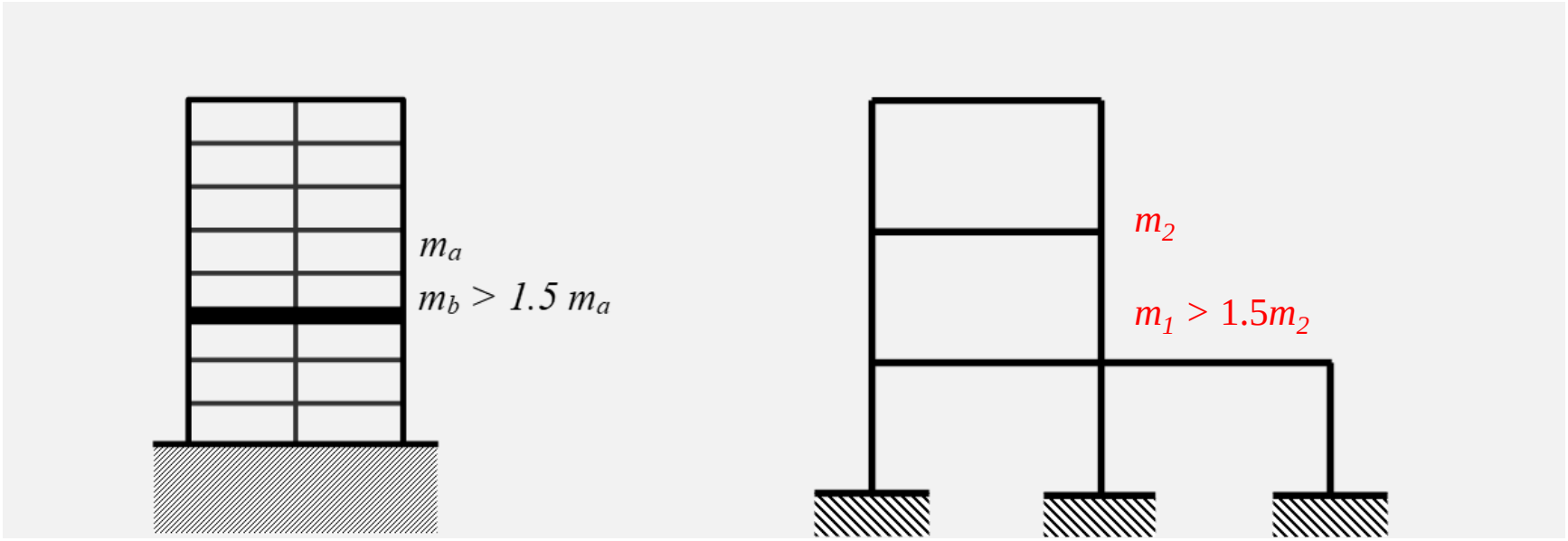


การวิบัติของอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส หรือชั้นที่อ่อนที่เสาชั้นที่ 1

M 6.9, คศ 1995, Kobe, Japan

2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

2.) ความไม่สม่ำเสมอของน้ำหนักหรือมวล (Weight or mass irregularity) เมื่อมวลประสิทธิผล (Effective mass) ของชั้นใด ๆ มีค่ามากกว่าร้อยละ 150 ของมวลประสิทธิผลของชั้นที่ติดกัน หลังคาที่มีมวลน้อยกว่าพื้นชั้นถัดลงมาไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา



2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

ตัวอย่างอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอของน้ำหนักหรือมวล



อาคารในเมือง Tokyo



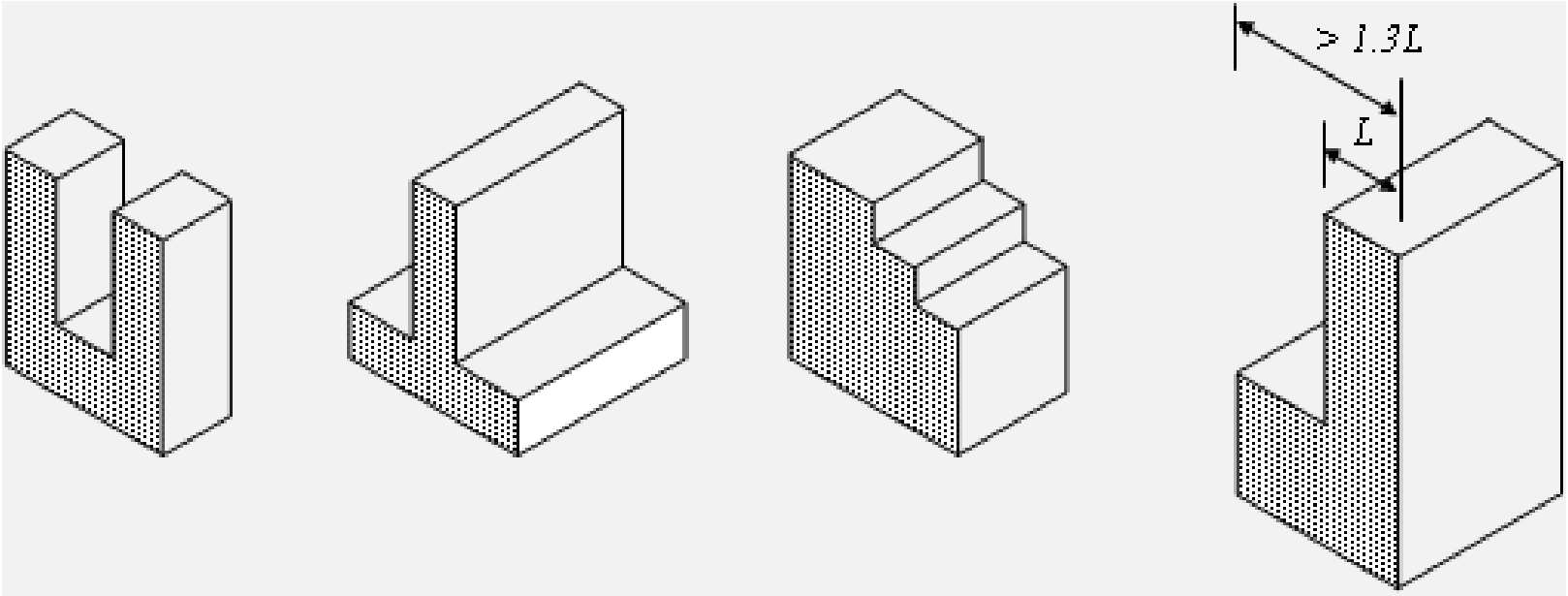


อาคารในกรุงเทพ

2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

3.) ความไม่สม่ำเสมอทางเรขาคณิตของรูปทรงในแนวดิ่ง (Vertical geometric irregularity)

เมื่อมิติในแนวราบของระบบต้านแรงด้านข้างของชั้นใด ๆ มีค่ามากกว่าร้อยละ 130 ของชั้นที่ติดกัน



2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

ตัวอย่างอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอทางเรขาคณิตของรูปทรงในแนวดิ่ง

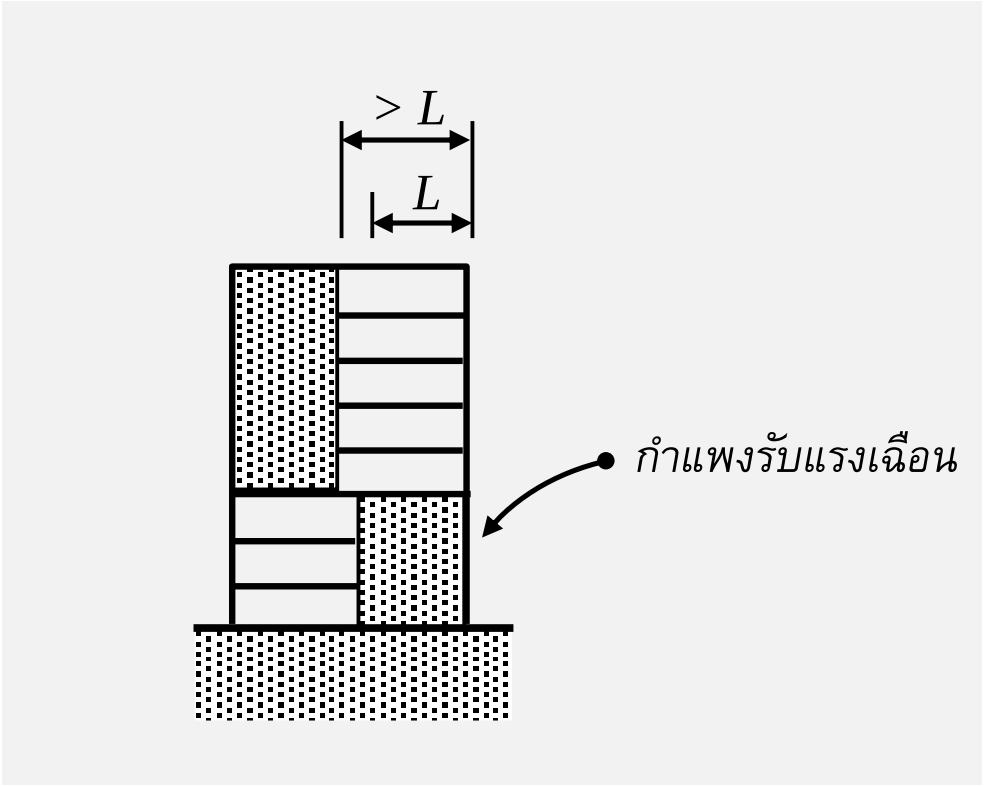




อาคารในกรุงเทพ

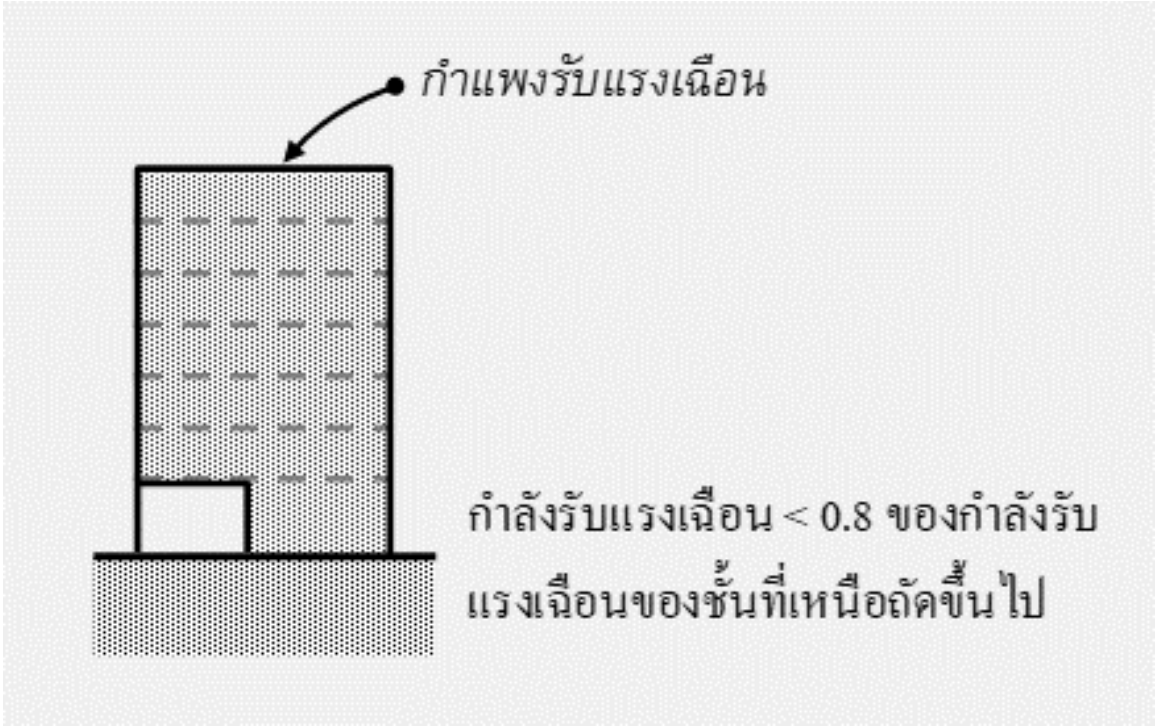
2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

4.) ความไม่สม่ำเสมอจากความไม่ต่อเนื่องในระนาบขององค์อาคารต้านแรงด้านข้างในแนวดิ่ง (In – plane discontinuity in vertical lateral force–resisting element irregularity) เมื่อระยะเยื้องในแนวดิ่งในระนาบขององค์อาคารต้านแรงด้านข้าง มีค่ามากกว่าความยาวขององค์อาคารนั้น



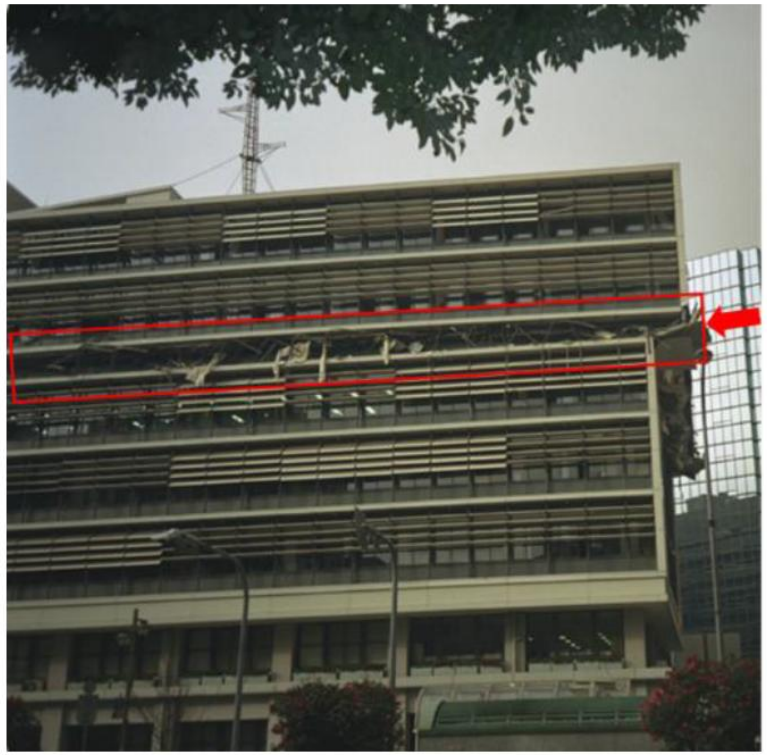
2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

5ก.) **ความไม่สม่ำเสมอจากความไม่ต่อเนื่องของกำลังรับแรงด้านข้างหรือชั้นที่อ่อนแอ (Discontinuity in lateral strength–weak story irregularity)** เมื่อชั้นใด ๆ ที่มีผลรวมกำลังรับแรงด้านข้างต้านแรงแผ่นดินไหวในทิศทางที่พิจารณาทั้งหมด มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 80 ของชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป



2.2 ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวดิ่ง

5ข.) ความไม่สม่ำเสมอจากความไม่ต่อเนื่องของกำลังรับแรงด้านข้างหรือชั้นที่อ่อนแออย่างมาก (Discontinuity in lateral strength–extreme weak story irregularity) เมื่อชั้นใดๆ ที่มีผลรวมกำลังรับแรงด้านข้างต้านแรงแผ่นดินไหวในทิศทางที่พิจารณาทั้งหมด มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 65 ของชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป

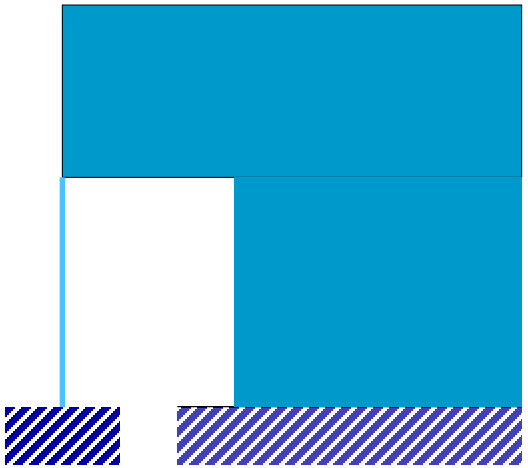




การวิบัติของอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอจากความไม่ต่อเนื่องของกำลังรับแรงด้านข้างหรือชั้นที่อ่อนแออย่างมาก จาก M 6.9, คศ 1995, Kobe, Japan (Images courtest of the NOAA(2012))

ข้อจำกัดและข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับอาคารที่รูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ

- (1) อาคารที่มีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ง จะต้องไม่เป็นอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งแบบ 5ข
- (2) อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งแบบ 5ข จะมีความสูงได้ไม่เกิน 2 ชั้น หรือ 9 เมตร เว้นแต่อาคารนั้นสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (Ω_0) ได้

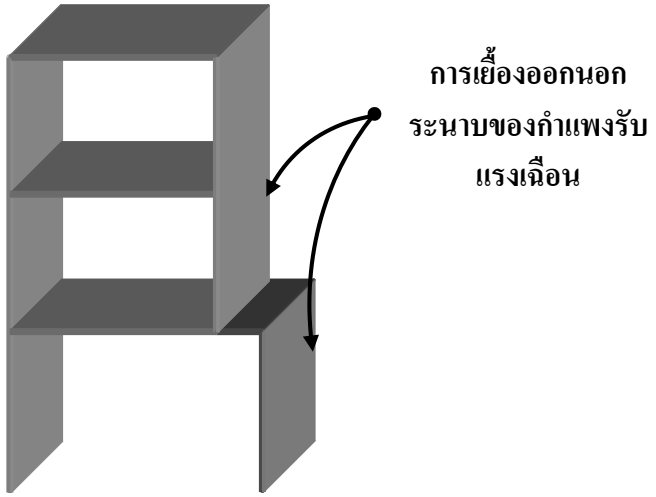


กำลังรับแรงเฉือน
< 0.65 ของกำลังรับแรงเฉือน
ของชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป

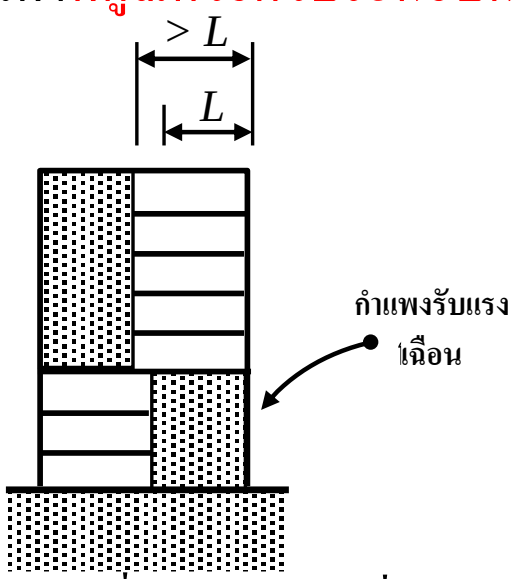
อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งแบบ 5ข

ข้อจำกัดและข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับอาคารที่รูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ

- (3) อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบแบบ 4 หรือในแนวดิ่งแบบ 4 จะต้องได้รับการออกแบบให้องค์อาคารต่าง ๆ ที่รองรับกำแพงหรือโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่อง มีกำลังเพียงพอที่จะต้านทานแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุก กระทำร่วมกับแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (Ω_0)



ความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบแบบ 4
จากจากการเยื้องออกนอกระนาบ



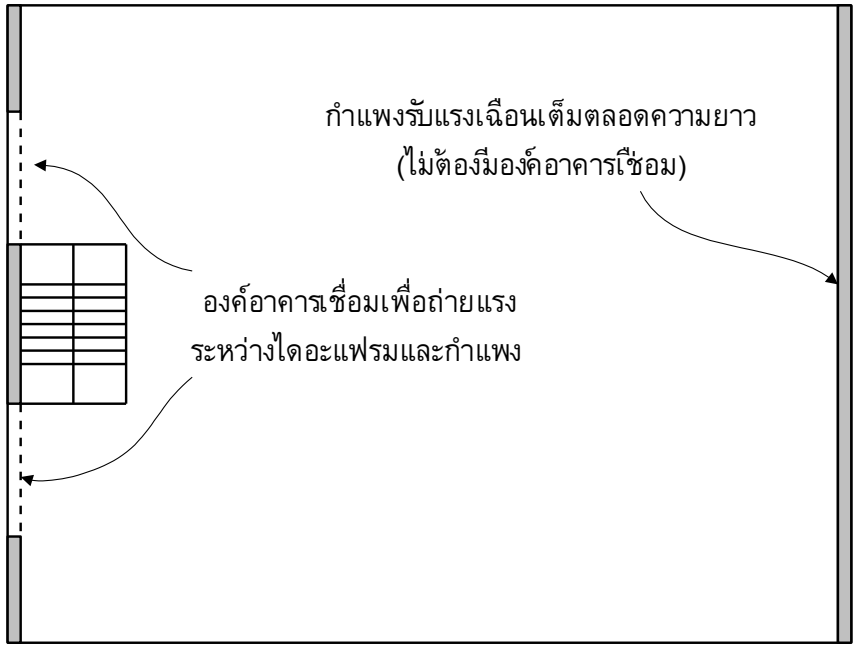
ความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งแบบ 4
ความไม่ต่อเนื่องในระนาบดิ่ง

รูป ตัวอย่างการออกแบบ องค์อาคารต่าง ๆ ที่รองรับกำแพงหรือโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่อง
เช่นคานถ่ายแรงขนาดใหญ่ (transfer girder) ต้องมีกำลังเพียงพอที่จะต้านทานแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุก
กระทำร่วมกับแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (Ω_0)

ข้อจำกัดและข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับอาคารที่รูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ

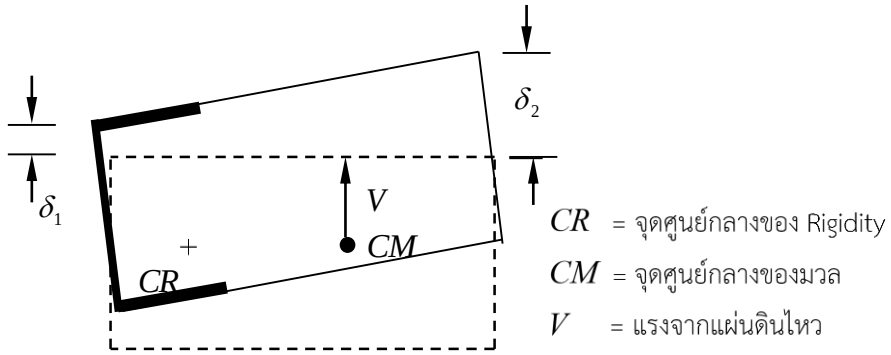
- (4) อาคารที่มีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ง และมีความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบ แบบ 1ก 1ข 2 3 หรือ 4 หรือมีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่ง แบบ 4 จะต้องได้รับการออกแบบให้
  - (ก) จุดต่อระหว่างไดอะแฟรมกับโครงสร้างแนวดิ่งต้านแรงด้านข้าง
  - (ข) จุดต่อระหว่างไดอะแฟรมกับองค์อาคารเชื่อม (collector)
  - (ค) จุดต่อระหว่างองค์อาคารเชื่อมกับโครงสร้างแนวดิ่งต้านแรงด้านข้าง

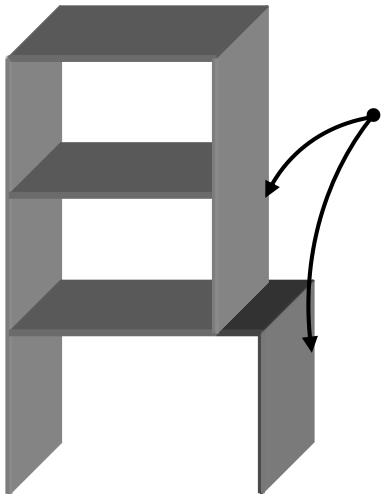
สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วย 1.25 องค์อาคารเชื่อม และจุดต่อระหว่างองค์อาคารเชื่อม ก็ต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงดังกล่าว เว้นแต่ว่าได้ถูกออกแบบให้ต้านทานแรงซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกกระทำร่วมกับ แรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกินเรียบร้อยแล้ว



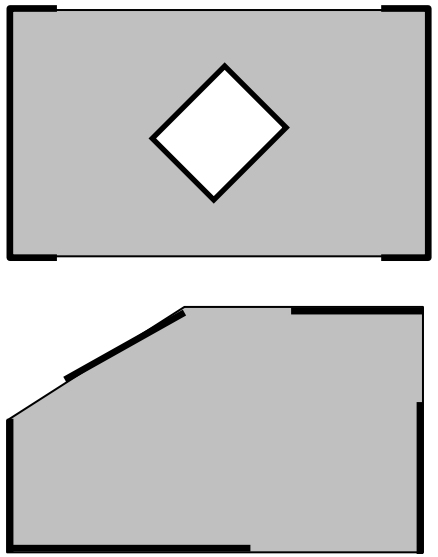
ข้อจำกัดและข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับอาคารที่รูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ

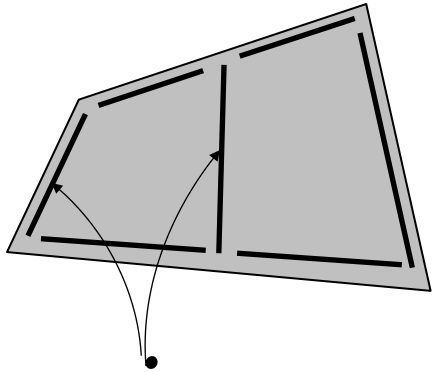
- (5) ในกรณีที่อาคารมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบ แบบ 1ก, 1ข, 4 หรือ 5 แบบจำลองโครงสร้างจะต้องเป็นแบบ 3 มิติที่สามารถจำลองการเคลื่อนตัวโครงสร้างในแนวราบได้ทั้งทิศทางหลัก 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน และการบิดตัวรอบแกนในแนวดิ่งของโครงสร้าง





การเยื้องออกนอกระนาบของกำแพงรับแรงเฉือน





ชิ้นส่วนของระบบต้านแรงด้านข้างที่ไม่ขนานกัน

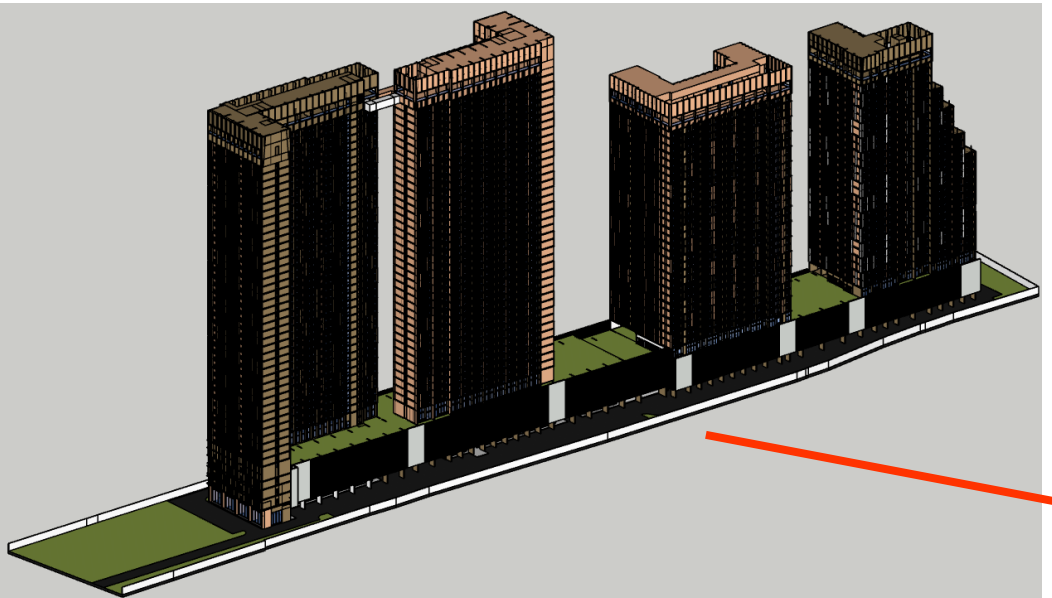
วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อคำนวณผลของแรงแผ่นดินไหวที่อนุญาตให้ใช้ได้

[มยผ. 1301/1302 –61, ASCE 7 – 05]

ขึ้นกับ

- ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว
- คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์
- ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างของอาคาร

เช่น อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้าง ที่มีความสูงเกิน 50 ม. และเป็นประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ง ต้องใช้การออกแบบโครงสร้างด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์



ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว	ลักษณะโครงสร้าง	วิธีแรงสถิตเทียบเท่า	วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด	วิธีวิเคราะห์การตอบสนองแบบประวัติเวลา
ข, ค	โครงสร้างอาคารทุกรูปแบบ	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
ง	อาคารที่มีประเภทความสำคัญแบบ I หรือ II ที่ใช้โครงสร้างเบา (light-frame Construction)	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารแบบอื่น ๆ ที่มีประเภทความสำคัญ แบบ I หรือ II และมีความสูงไม่เกิน 2 ชั้น	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารที่มีรูปทรงโครงสร้างสม่ำเสมอ และมีความสูงไม่เกิน 50 เมตร	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารนอกแอ่งกรุงเทพฯ ที่มีรูปทรงโครงสร้างสม่ำเสมอที่สูงเกิน 50 เมตรและมีคาบการสั่นพื้นฐานน้อยกว่า $3.5T_s$	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารที่มีความสูงไม่เกิน 50 เมตร และมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวระนาบแบบ 2, 3, 4, หรือ 5 หรือในแนวดิ่ง แบบ 4, 5ก หรือ 5ข	อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต
	อาคารแบบอื่น ๆ	ไม่อนุญาต	อนุญาต	อนุญาต

ส่วนที่ 3
ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงอาคาร สำหรับการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร

1. รูปทรงอาคารที่มีความสม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบและในแนวดิ่ง และสมมาตร

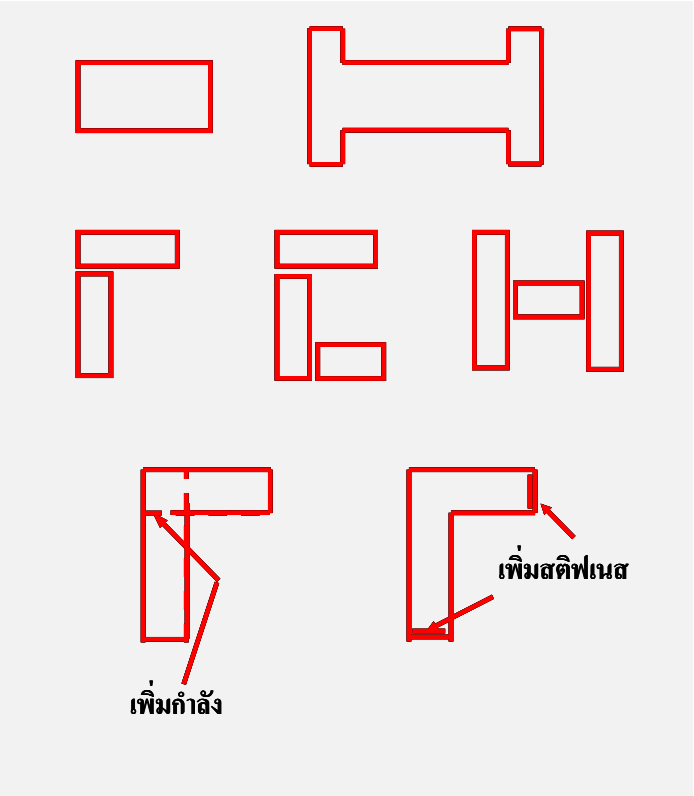
- รูปทรงอาคารที่มีความสม่ำเสมอของโครงสร้างในแนวระนาบและในแนวดิ่ง และสมมาตร เพื่อไม่ทำให้เกิดการบิดของอาคารเนื่องจากแผ่นดินไหว อาคารรูปทรงสม่ำเสมอและสมมาตรได้พิสูจน์ในแผ่นดินไหวในอดีตแล้วว่า มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวได้ดีกว่า และรอดพ้นจากการพังทลายได้มากกว่าอาคารที่มีลักษณะยุ่งยากหรือไม่สมมาตร
- ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงรูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวราบ และหลีกเลี่ยงรูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่ง

1.1 หลีกเลี่ยงรูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวราบ

ไม่ควรเลือก

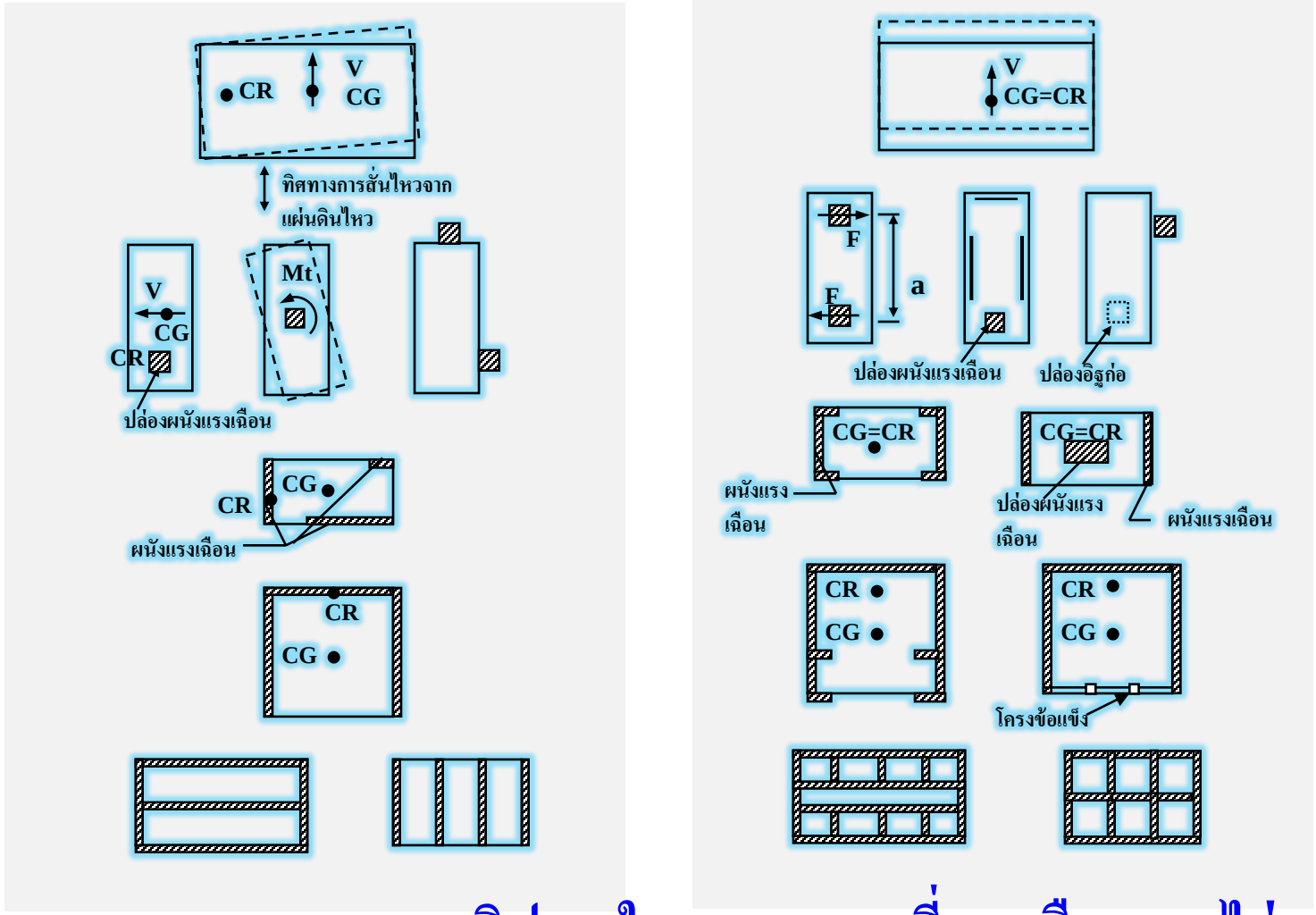


ควรเลือก



รูปทรงอาคารในแนวระนาบที่ควรเลือกและไม่ควรเลือก

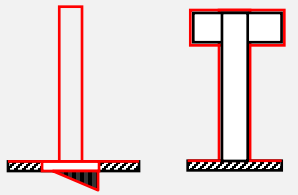
1.1 หลีกเลี่ยงรูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวราบ (ต่อ)

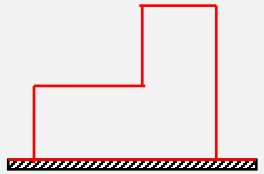


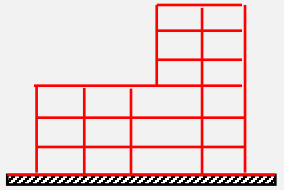
การกระจายของมวลและสติฟเนสในแนวระนาบที่ควรเลือก และไม่ควรเลือก

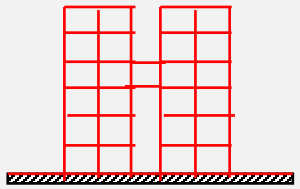
1.2 หลีกเลี่ยงรูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่ง

ไม่ควรเลือก



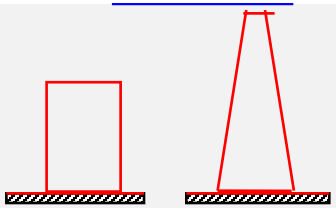


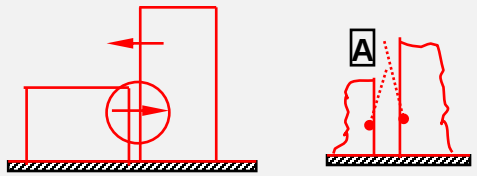


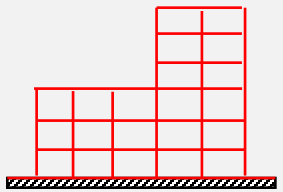


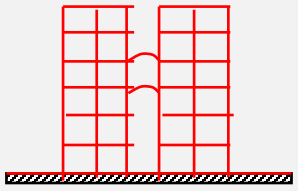
อาคาร 2 อาคาร ต่อกันด้วยการยึดแน่น

ควรเลือก









อาคาร 2 อาคาร ต่อกันด้วยการเคลื่อนที่ได้อิสระ

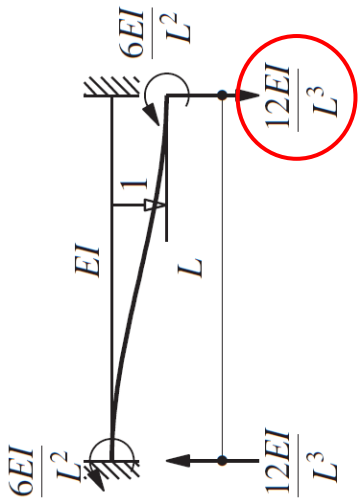


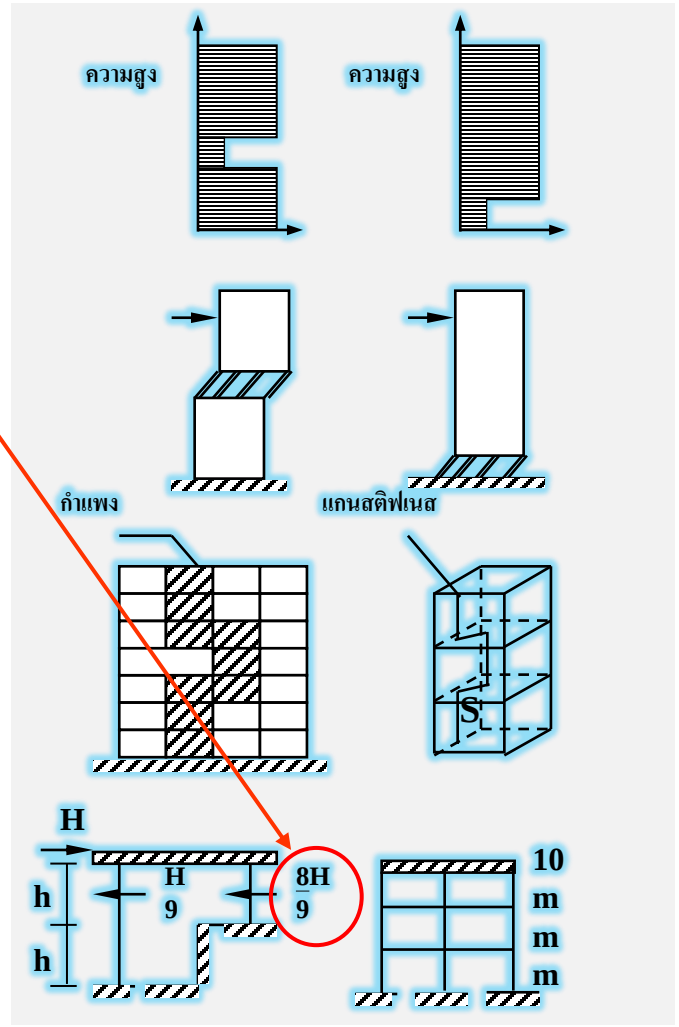
อาคาร Petronas สูง 452 ม 88 ชั้น ในประเทศมาเลเซีย

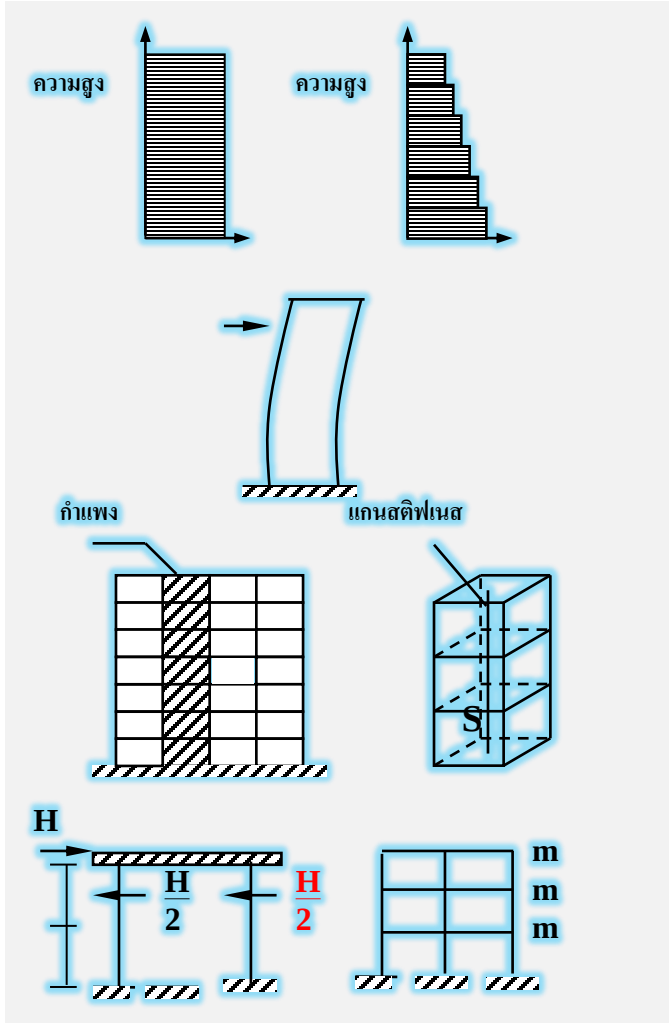
รูปทรงอาคารในแนวดิ่งที่ควรเลือกและไม่ควรเลือก

1.2 หลีกเลี่ยงรูปทรงอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่ง (ต่อ)

อาคารเกิดการการโก่งตัวด้านข้างไปด้วยกันภายใต้แรงแผ่นดินไหว แต่เสาสั้นมีสติฟเนสด้านข้างมากกว่าเสายาวมาก ดังนั้นเสาสั้นจะรับแรงเฉือนจากแผ่นดินไหว $F=ku$ มากกว่าเสายาวมาก







การกระจายของมวลและสติฟเนสในแนวดิ่ง ที่ควรเลือกและไม่ควรเลือก

ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร





การวิบัติของเสาที่ถูกทำให้เสาสั้นลงเนื่องจากการค้ำยันของผนังอิฐก่อ
จากการเกิดแผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงราย ขนาด 6.3 ริกเตอร์ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557





ตัวอย่างแบบจำลองอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอและมีความอ่อนตัวมาก อาจต้องทดสอบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว ในเขตแผ่นดินไหวระดับปานกลางถึงสูง ที่ Tong Ji University



82

ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร

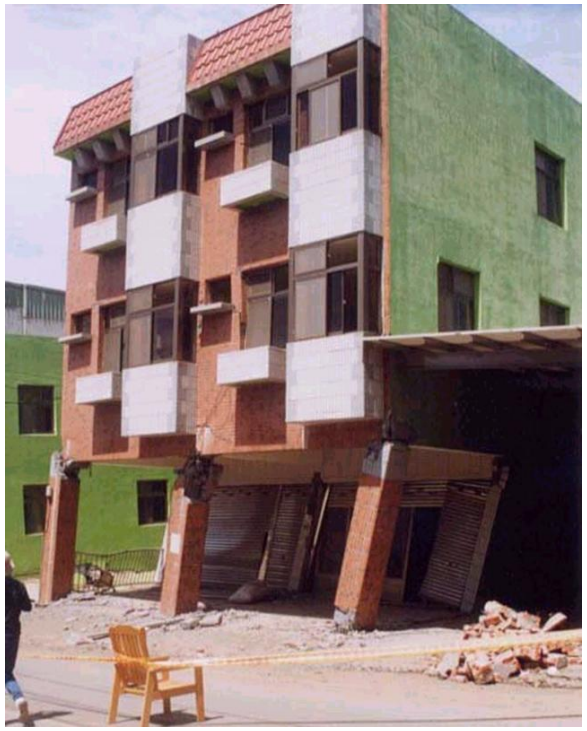
การเปรียบเทียบการโก่งตัวด้านข้าง และผลของ P-Δ



ก. อาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส หรือชั้นที่อ่อน ข. อาคารที่มีสติฟเนสอย่างเหมาะสม



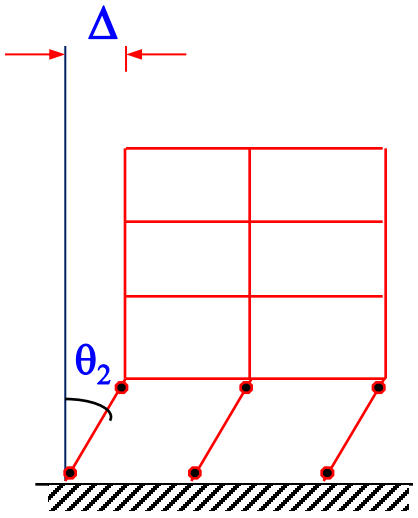
ค. ตัวอย่างความเสียหาย ของอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส หรือชั้นที่อ่อน



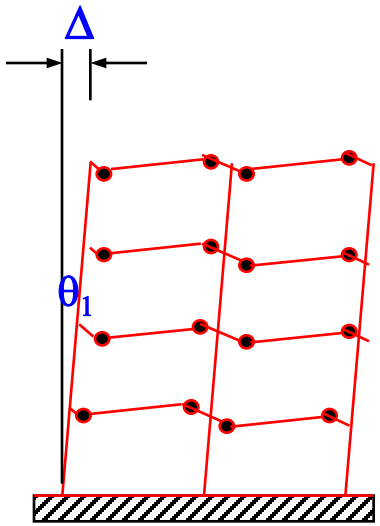
2. ระบบเสาแข็ง-คานอ่อน (เมื่อกับเทียบกับเสา) (Strong column-weak beam system)

เมื่อให้การเคลื่อนตัวที่ยอดอาคาร Δ เท่ากันของ 2 ระบบ

- ในระบบคานอ่อนคานจำนวนมากที่เกิดจุดหมุนพลาสติก สามารถดูดซับพลังงานจากแผ่นดินไหวได้
- ในขณะที่ในระบบเสาอ่อนเสาชั้นล่างจะเกิดจุดหมุนพลาสติกเพื่อดูดซับพลังงานจากแผ่นดินไหว ซึ่งจะต้องใช้ความเหนียวของเสาสูงมาก และก่อให้เกิดผล *P*-Δ ตามมาด้วย



ก. ระบบเสาอ่อน – คานแข็ง



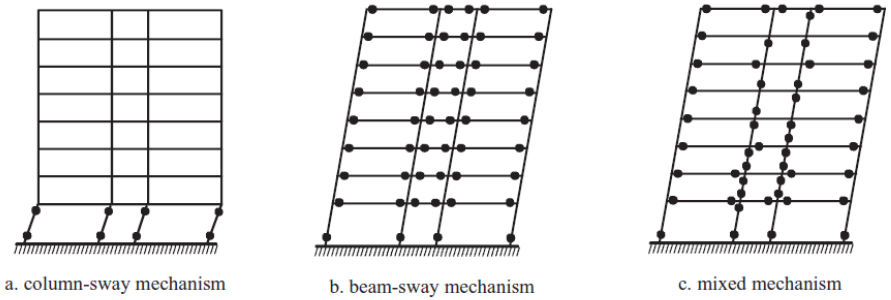
ข. ระบบเสาแข็ง – คานอ่อน

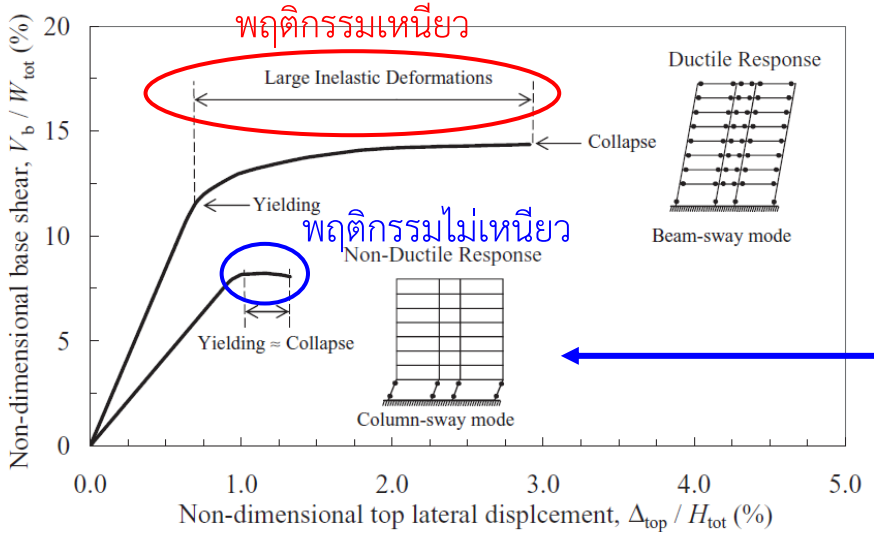
การวิบัติของอาคาร

Shaking Table Test ของอาคารที่มีพฤติกรรมไม่เหนียว คือระบบเสาอ่อน – คานแข็ง

พฤติกรรมไม่เหนียว
คือระบบเสาอ่อน – คานแข็ง

พฤติกรรมเหนียว
คือระบบเสาแข็ง – คานอ่อน





กลไกการดูดดูดซับพลังงานของอาคารสูงที่มี พฤติกรรมเหนียว และไม่เหนียว

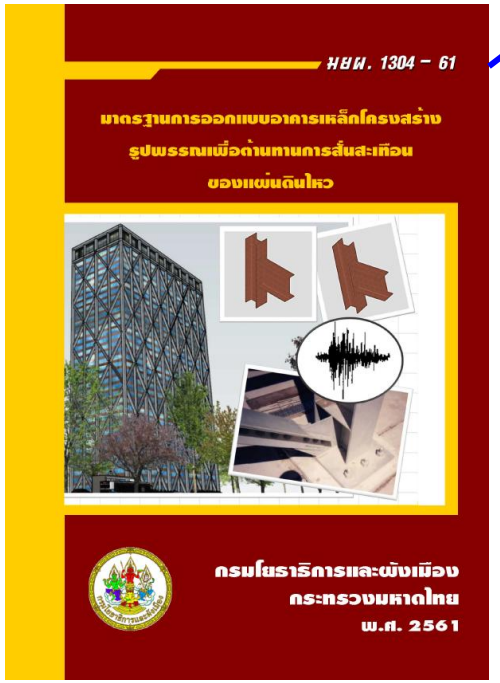
ที่มา: Amr S. Elnashai and Luigi Di Sarno, 2000.



ที่มา VDO : National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED)

ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร

- เสาเป็นองค์อาคารที่สำคัญมาก หากเสาวิบัติโครงสร้างจะพังทลายค่อนข้างกระทันหัน ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเปราะ (Brittle failure) ซึ่งอันตรายมาก ในบริเวณที่มีแผ่นดินไหวรุนแรงการออกแบบจึงควรจัดให้ลักษณะการวิบัติแบบเกิดจุดหมุนพลาสติกในคานแทนที่จะเกิดในเสา
- ผลรวมของกำลังประลัยของเสาที่ข้อต่อมากกว่าหรือเท่ากับของคาน สำหรับอาคารเหล็กที่มีความเหนียว (พิเศษ)
- ผลรวมของกำลังประลัยของเสาที่ข้อต่อมากกว่าของคาน อย่างน้อย 20% สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียว (พิเศษ) เพื่อบังคับให้เกิดจุดหมุนพลาสติกในคานก่อน





3. การยึดรั้ง (Anchoring) และ การยึดโยง (Bracing) องค์อาคารส่วนต่าง ๆ ต้องยึดรั้งเข้าด้วยกัน เพื่อให้องค์อาคารสั่นไหวไปด้วยกัน

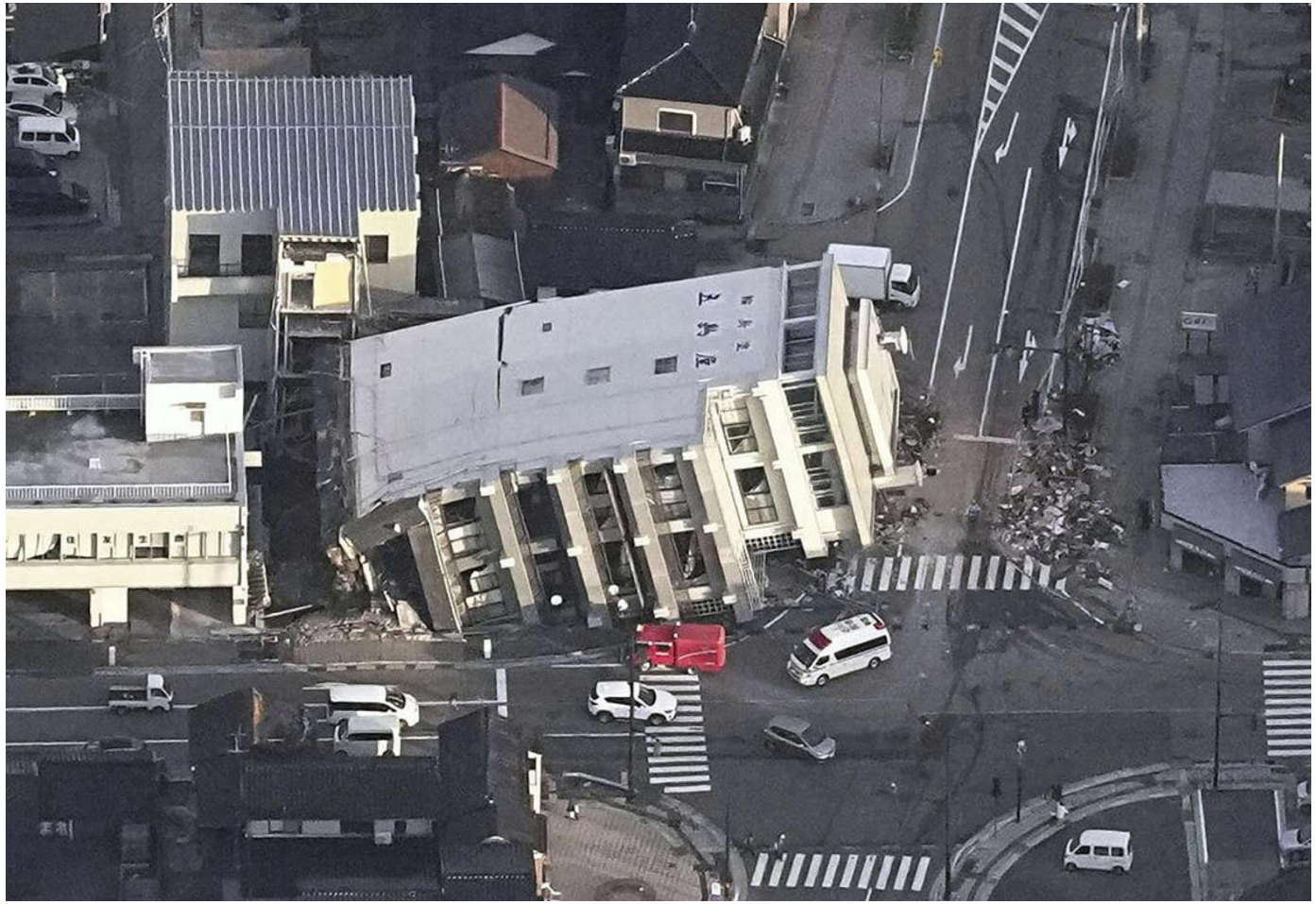
- **ถ้าการยึดรั้งไม่ดีพอเมื่อเกิดการสั่นไหวรุนแรง องค์อาคารอาจแยกจากกัน ทำให้พังทลายลงมาได้**
- **ควรทำการยึดโยงอาคารไม้และอาคารเหล็ก ด้วยชิ้นส่วนทแยง เพื่อให้อาคารมีความสามารถรับแรงด้านข้าง จากแรงแผ่นดินไหวได้**



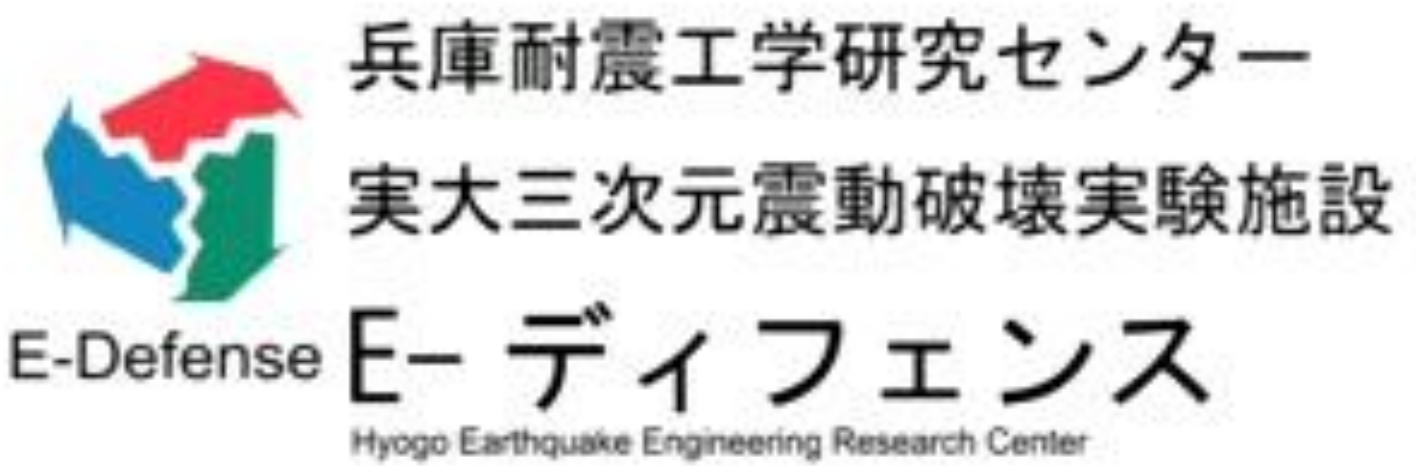
สะพานที่พังลงมา เนื่องจากการยึดรั้งไม่ดีพอ ภายใต้แผ่นดินไหวขนาดใหญ่

ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร

- อาคารที่มีอัตราส่วนความชะลูดสูง และการยึดรั้งที่ฐานรากไม่ดี อาจเกิดการพลิกคว่ำได้ ภายใต้แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ แผ่นดินไหวญี่ปุ่น 1 มค 2567







ที่มา VDO : National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED)
E-Defense, Hyogo Earthquake Engineering Research Center

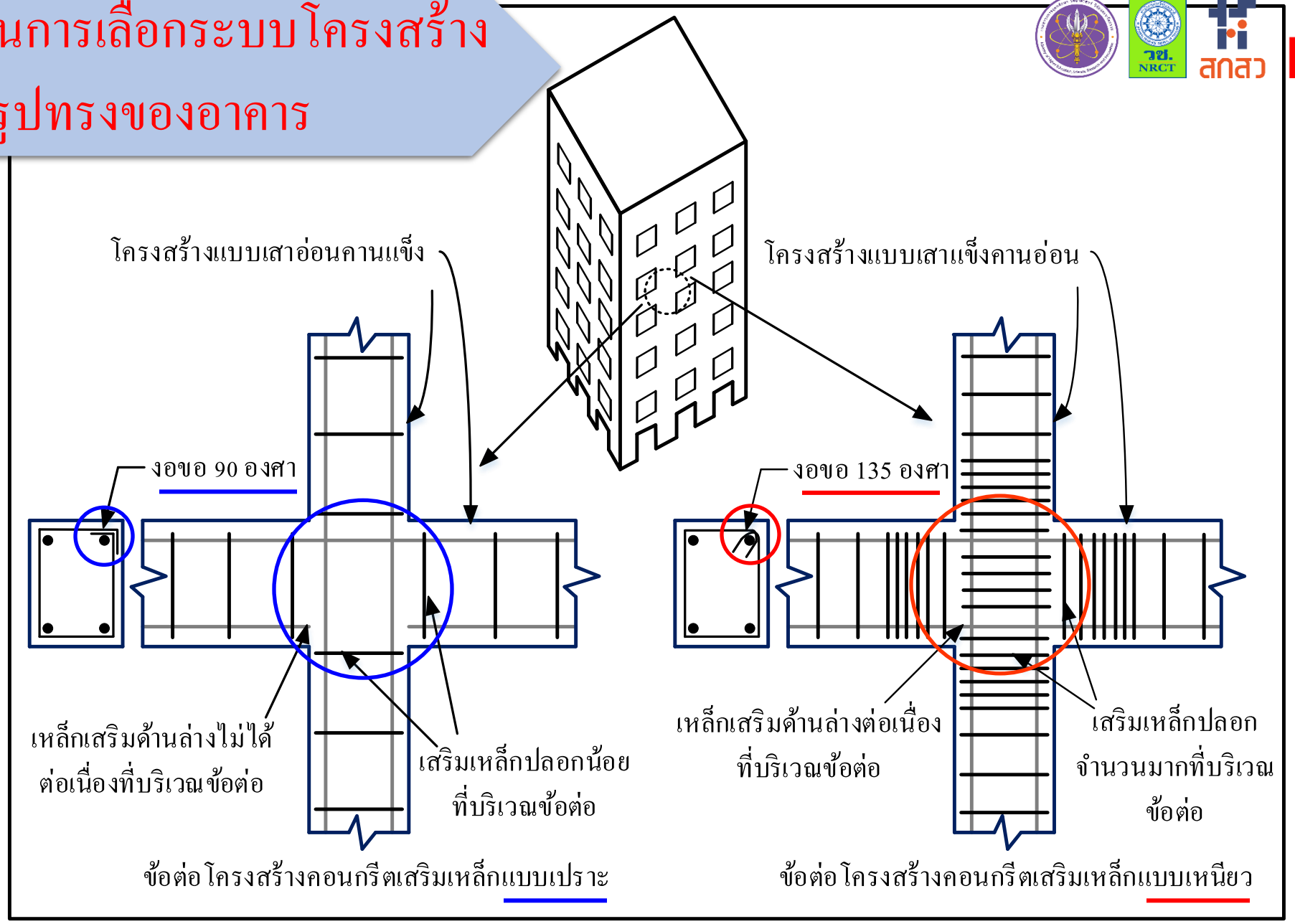
4. ข้อต่อ (Connection) ข้อต่อระหว่างคานและเสาเป็นจุดอ่อนที่จะเกิดการประลัยจากแรงแผ่นดินไหวก่อนจุดอื่น ๆ ในโครงสร้าง ข้อต่อเป็นส่วนสำคัญที่ส่งถ่ายแรงจากองค์อาคารส่วนหนึ่งไปยังองค์อาคารอีกส่วนหนึ่ง

- **เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงจะมากกว่าแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ออกแบบ โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าอาคารมีความเหนียวเพียงพอ ซึ่งจะสามารถสลายพลังงานจากการสั่นไหวในช่วงอินอิลาสติก ดังนั้นหากข้อต่อไม่แข็งแรงพอหรือไม่เหนียวพอตามสมมุติฐานที่ใช้ออกแบบจะวิบัติเสียก่อนที่โครงสร้างจะได้สลายพลังงานจากการสั่นไหวในช่วงอินอิลาสติก และก่อนที่โครงสร้างจะรับแรงได้เพิ่มขึ้นจากกำลังขององค์อาคารส่วนที่เหลือ**
- **โครงสร้างที่พังทลายเนื่องจากมีข้อต่อไม่แข็งแรงพอหรือไม่เหนียวพอมีพบบ่อยมาก จึงควรได้รับการพิจารณาออกแบบเป็นพิเศษ**



(ภาพจาก เป็นหนึ่ง วานิชชัย)

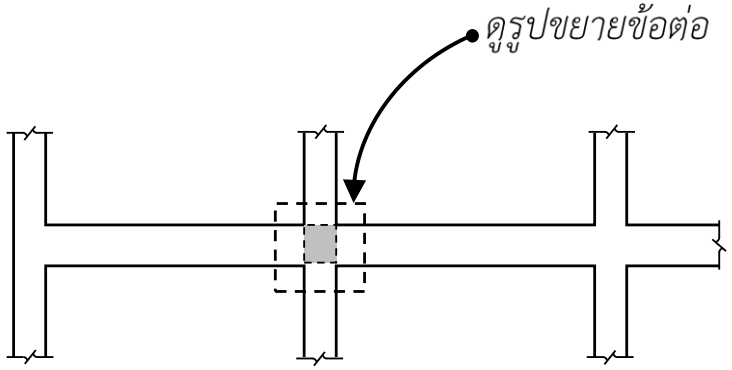
ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร



การเปรียบเทียบข้อต่อและรายละเอียดเหล็กเสริมในโครงข้อแข็ง

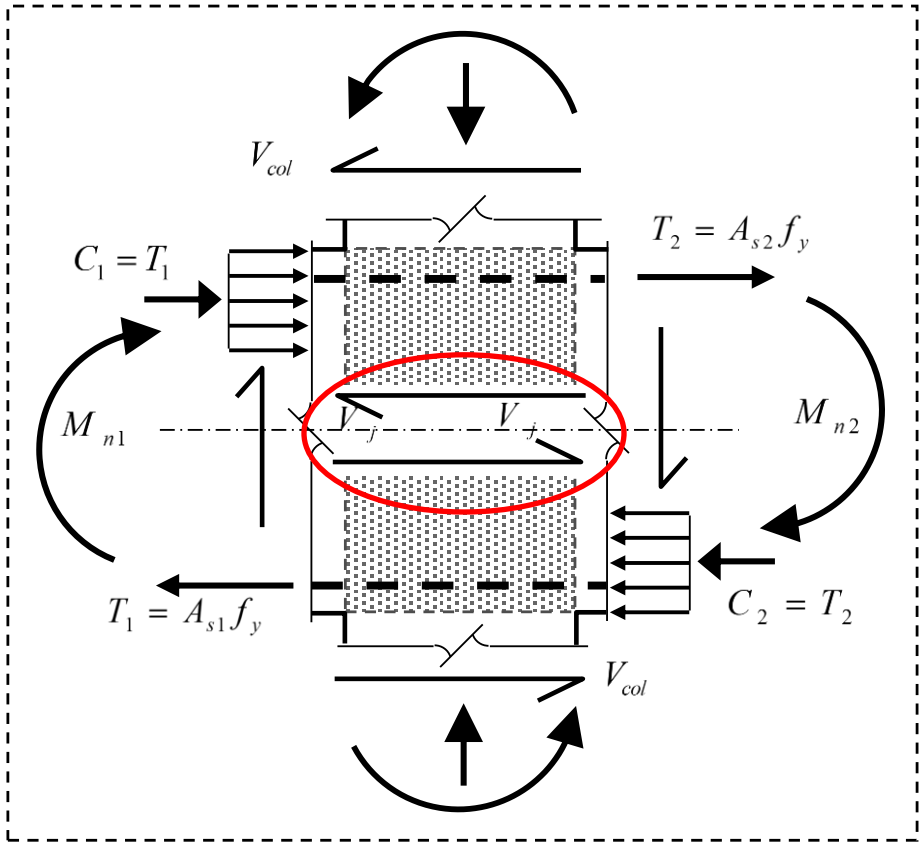
แรงเฉือนในแนวนอนสูงสุดที่กระทำต่อข้อต่อ

เมื่อมีแรงกระทำจากด้านข้างจากแรงแผ่นดินไหว /แรงลม



(ก) โครงต้านแรงดัด

$$
\begin{aligned}
V_j &= C_1 + T_2 - V_{col} \\
&= T_1 + T_2 - V_{col} \\
&= \left(A_{s1} f_y + A_{s2} f_y\right) - V_{col}
\end{aligned}
$$

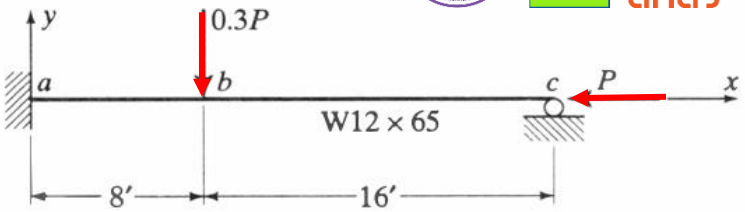


(ข) รูปขยายข้อต่อ

พฤติกรรมการรับแรงของคาน-เสาที่มีความเหนียว

The member and loading are those of Example 8.6.

1. Compare first- and second-order inelastic analyses.
2. Determine the plastic deformation vector and the incremental force relationship at first hinge formation in the first-order analysis.



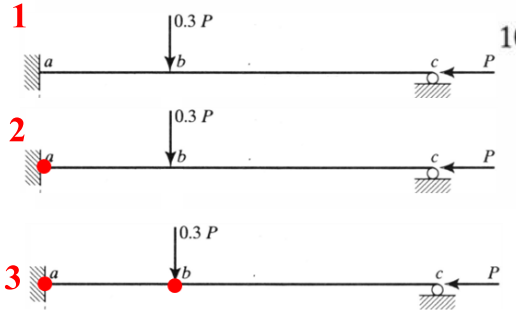
1. Idealize *ab* and *bc* as single elements.
From Example 8.6 $P_y = 955$ kips $M_p = 4840$ in. kips

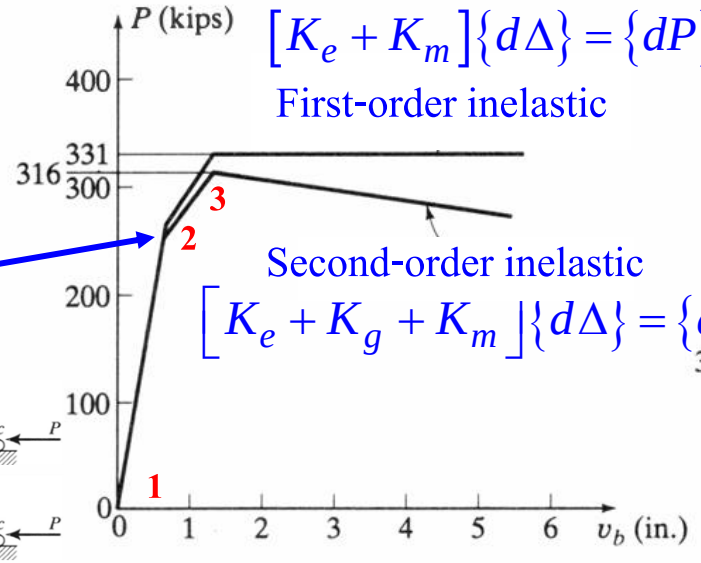
From Equation 10.18, the yield surface is $\left(\frac{P}{955}\right)^2 + \left(\frac{M}{4840}\right)^2 + 3.5\left(\frac{PM}{4.62 \times 10^6}\right)^2 = 1 \qquad (a)$

From Equations 8.4 and 8.5, response curves and force point traces are:



ถ้าข้อต่อไม่เหนียว โครงสร้างจะวิบัติตั้งแต่สภาวะ 2



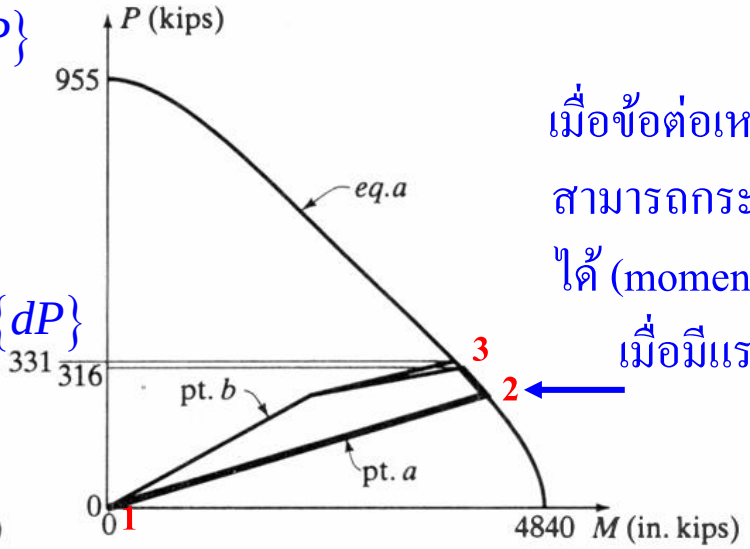


$[K_e + K_m]\{d\Delta\} = \{dP\}$

First-order inelastic

Second-order inelastic

$[K_e + K_g + K_m]\{d\Delta\} = \{dP\}$



เมื่อข้อต่อเหนียว องค์อาคารสามารถกระจายโมเมนต์ดัดได้ (moment redistribution) เมื่อมีแรงอัดเพิ่มขึ้น

ที่มา: McGuire, W., Gallagher, R.H., and Ziemian, R., Matrix Structural Analysis, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2014

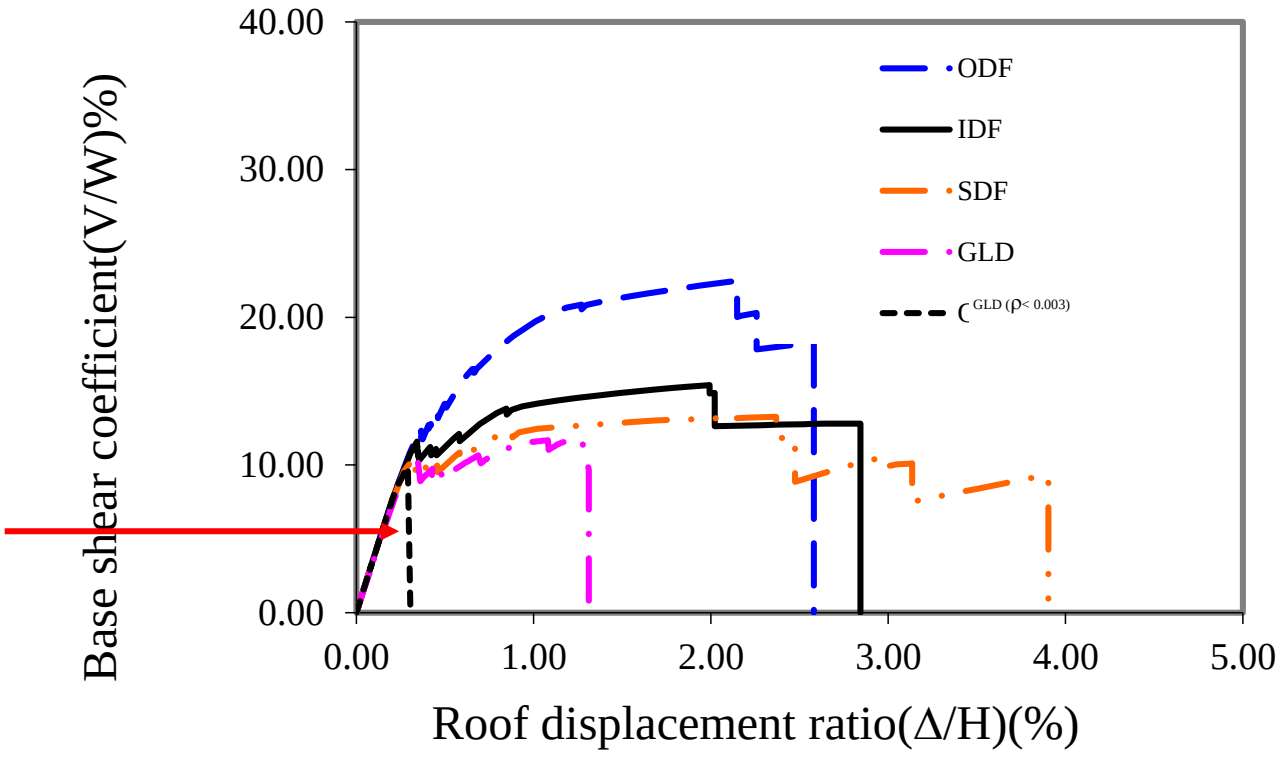
การเปรียบเทียบสมรรถนะของอาคาร ในรูปค่าสัมประสิทธิแรงเฉือนที่ฐาน (ต่อ 1 โครง) กับการเคลื่อนตัวที่ยอดอาคาร ของอาคารที่มีระดับความเหนียวแตกต่างกันจำนวน 5 แบบ



การวิบัติบริเวณจุดต่อเสา-คาน

Balakot, Kashmir Earthquake (2005)

(ภาพซ้ายจาก เป็นหนึ่ง วานิชชัย)



การวิบัติของอาคาร สตง กรุงเทพ ฯ ที่มีพฤติกรรมไม่เหนียว

ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 7.7 จุดศูนย์กลาง จังหวัด Mandaray ประเทศพม่า เมื่อวันที่ 28 มีค พ.ศ. 2568

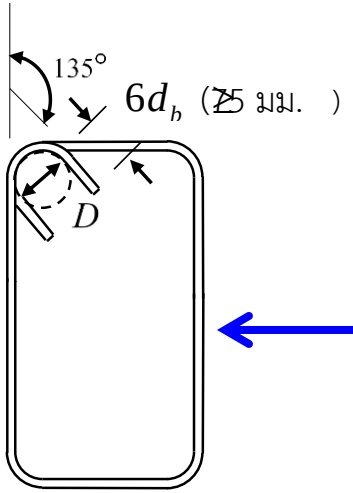
ข้อมูลจาก **Worsak Kanok-Nukulchai (Slowed to 10 times)**



5. ความเหนียว ข้อควรพิจารณาเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีพฤติกรรมเหนียว ดังนี้

ก. วัสดุ ไม่ใช้วัสดุที่เปราะในส่วนโครงสร้าง ได้แก่ อิฐ หรือคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ไม้ที่ไม่ได้คุณภาพ

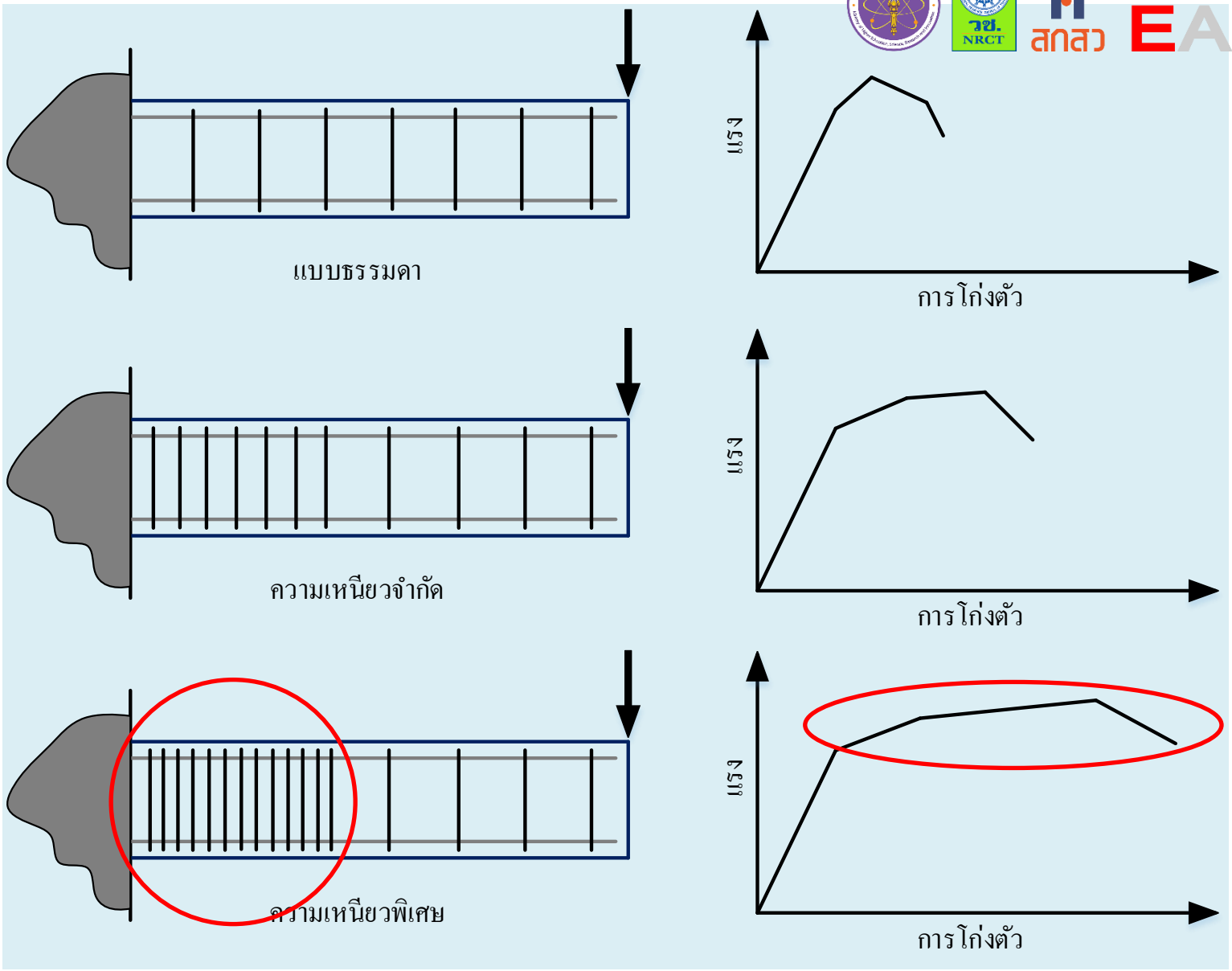
ข. การรัดเสาคอนกรีตด้วยเหล็กปลอกอย่างเพียงพอ จะทำให้คอนกรีตมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เหล็กปลอกยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เหล็กยืนในเสาโก่งเดาะอีกด้วย เหล็กปลอกที่เสริมในเสาและคานจะต้องจัดระยะให้ไม่น้อยกว่าที่กำหนดในมาตราฐาน มยผ. 1301 / 1302 - 61 (2561) ในกรณีที่ใช้**เหล็กปลอกเดี่ยวจะต้องงอขอ 135 องศา** โดยเฉพาะสำหรับอาคารสาธารณะ ควรหลีกเลี่ยงการใช้ขอ 90 องศา ซึ่งพิสูจน์มาในแผ่นดินไหวรุนแรงแล้วว่าไม่มีประสิทธิ์ภาพพอ เนื่องจากเมื่อปูนกะเทาะออกแล้วขอจะไม่สามารถยึดรั้งได้เพียงพอ



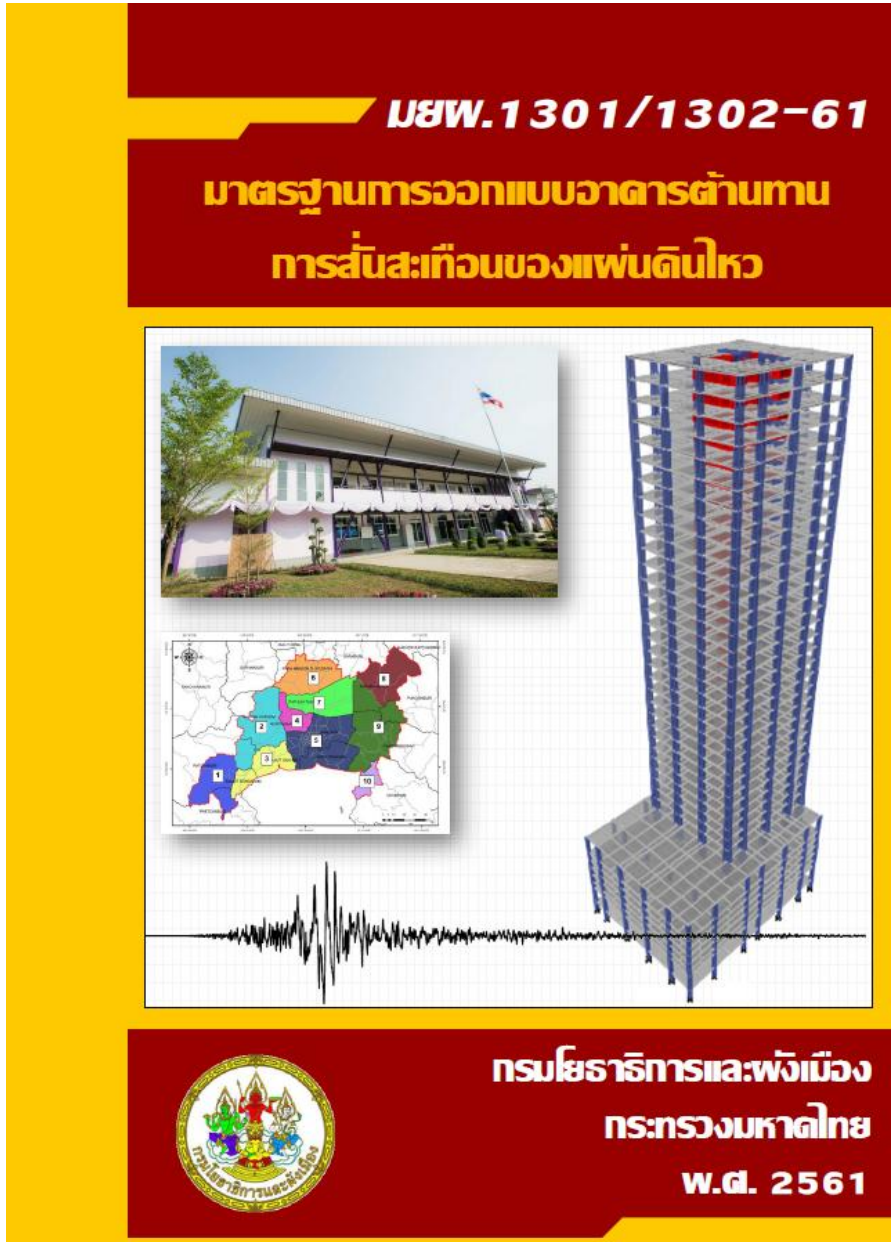


เปรียบเทียบพฤติกรรมเหนียวของเสา (ต้นกลาง) ที่รัดด้วยเหล็กปลอกเกลียวเพียงพอ และพฤติกรรมไม่เหนียว (เปราะ) ของเสา (ต้นริมนอก) ที่รัดด้วยเหล็กปลอกไม่พอ





ระดับความเหนียวของโครงสร้าง 3 ระดับ

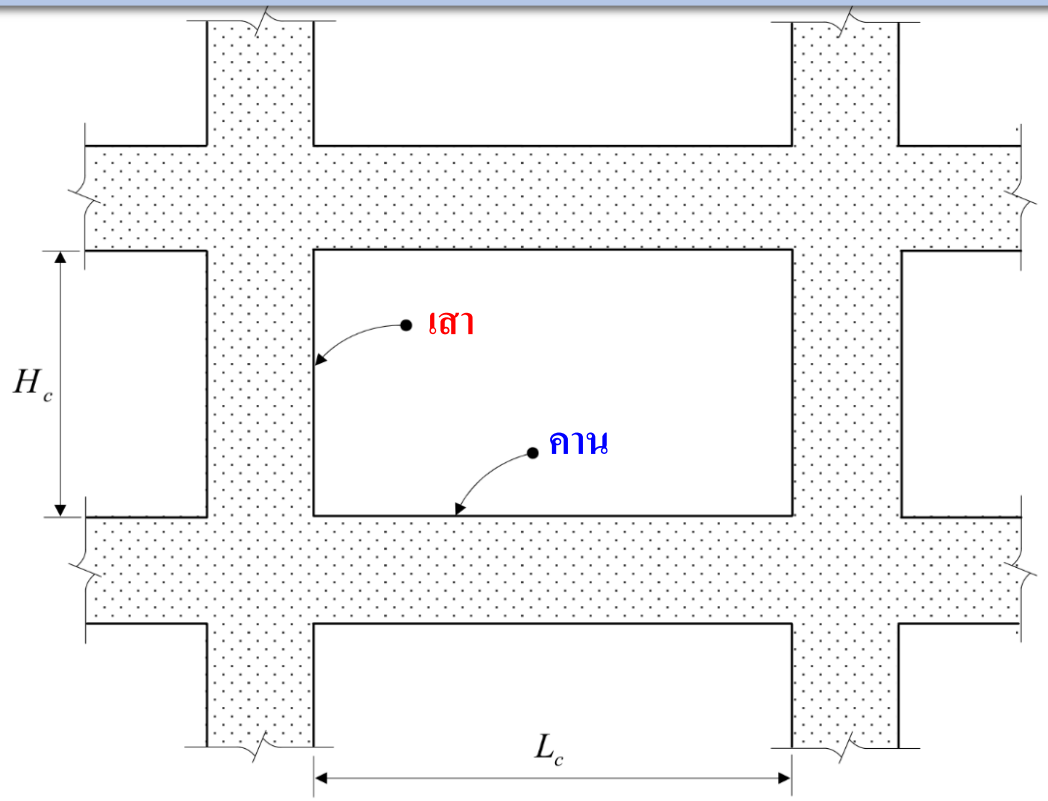

มยพ.1301/1302-61
มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทาน
การสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว
กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ. 2561

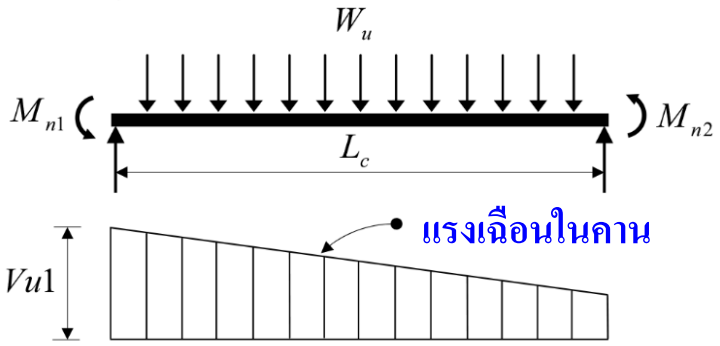

มยพ.1301/1302-61
(ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1)
มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทาน
การสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว
กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ. 2564

รายละเอียดการเสริมเหล็กโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวปานกลาง สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

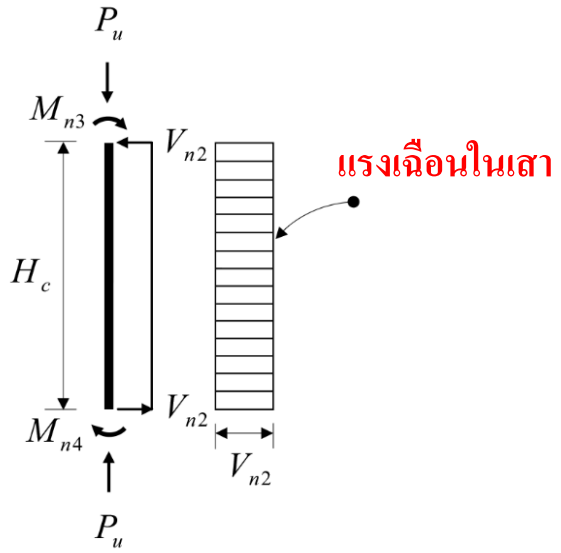
- คานและเสา คานหมายถึง องค์อาคารของโครงต้านแรงดัดที่มีแรงตามแนวแกนปรับค่า (Factored Axial Load) ไม่มากกว่า $0.10A_g f_c'$ และเสาหมายถึงองค์อาคารของโครงต้านแรงดัดที่มีแรงตามแนวแกนปรับค่ามากกว่าค่าดังกล่าว
- กำลังต้านแรงเฉือน กำลังต้านแรงเฉือนที่ใช้ออกแบบ คาน เสา และแผ่นพื้นสองทางแบบไร้คาน สำหรับต้านแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวจะต้องไม่น้อยกว่าค่าแรงเฉือนดังต่อไปนี้ ข้อใดข้อหนึ่ง
  - แรงเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อแรงดัดที่ปลายขององค์อาคารทั้งสองถึงค่าโมเมนต์กำลังระบุรวมกับแรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (ถ้ามี)
  - แรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากการรวมน้ำหนักบรรทุกออกแบบ (Design Load Combinations) ที่พิจารณาแรงแผ่นดินไหวเป็น 2 เท่าของแรงที่กำหนดในกฎหมายควบคุมอาคารว่าด้วยการก่อสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

ข้อเสนอแนะในการเลือกระบบโครงสร้างและรูปทรงของอาคาร





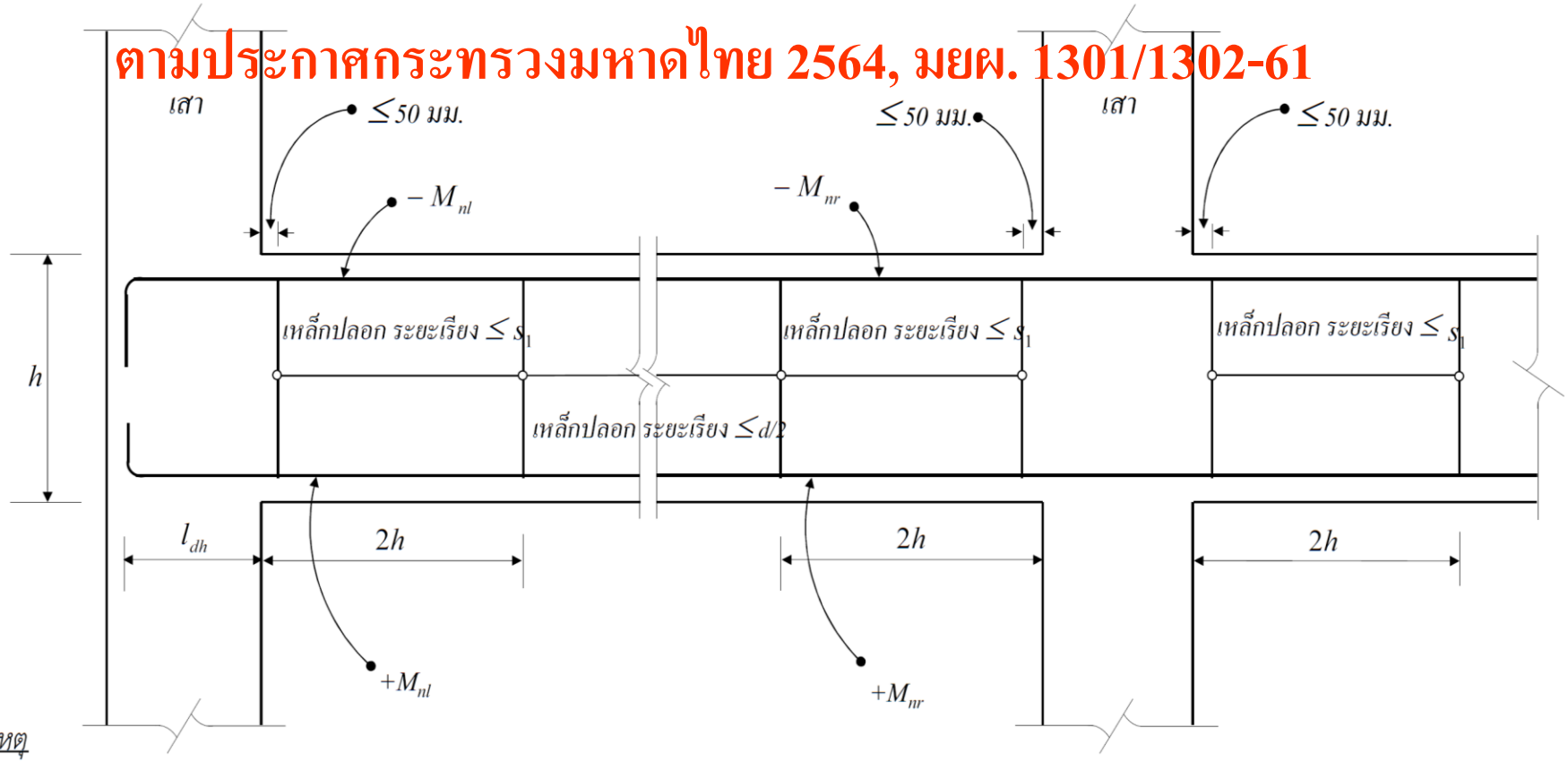
$$V_{u1} = \frac{M_{n1} + M_{n2}}{L_c} + \frac{1}{2} w_u L_c$$



หมายเหตุ น้ำหนักบรรทุกปรับค่าW_u และ P_u ให้คำนวณจากชุดน้ำหนักบรรทุกรวมระหว่างน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

รายละเอียดการเสริมเหล็กในคาน ให้มีความเหนียวจำกัด (ปานกลาง)

ตามประกาศกระทรวงมหาดไทย 2564, มยผ. 1301/1302-61



หมายเหตุ

ก) ระยะเรียงของเหล็กปลอก s_1 ต้องไม่มากกว่าค่าที่น้อยสุดของค่าดังต่อไปนี้

(1) 1 ใน 4 ของความลึกประสิทธิผล

(2) 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามความยาวที่มีขนาดเล็กสุด

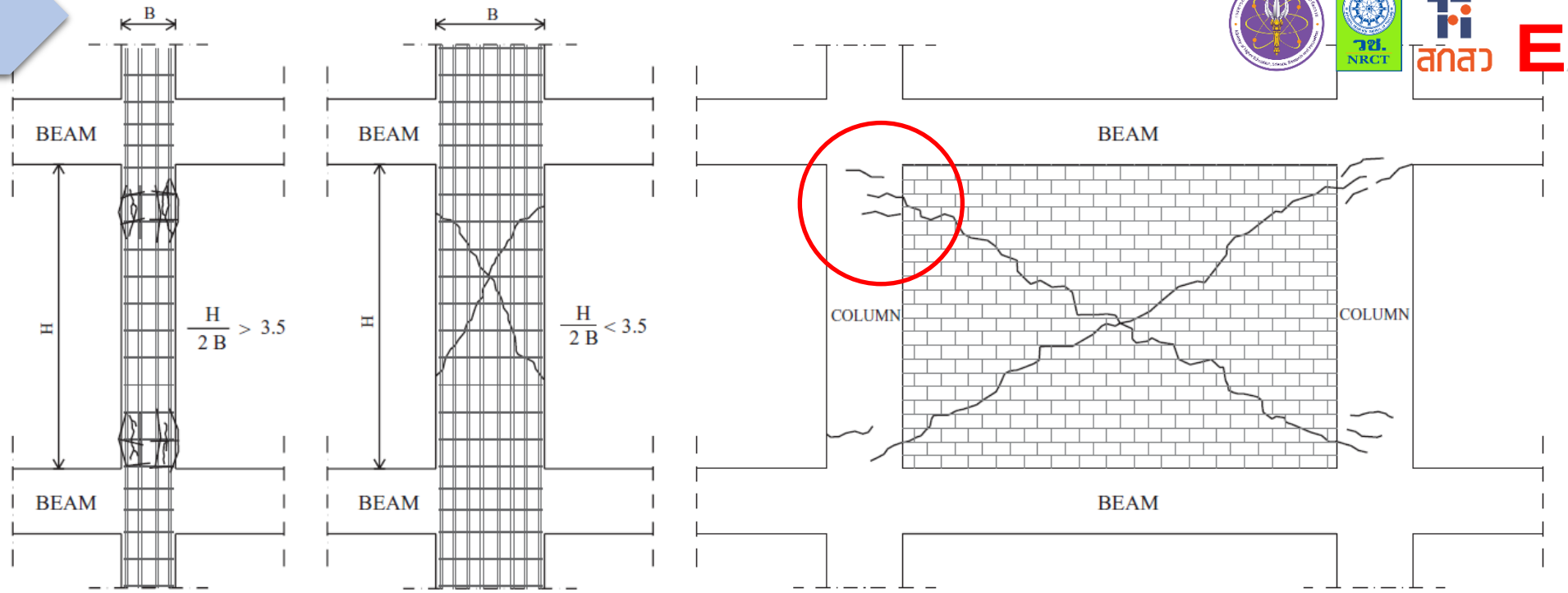
(3) 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก และ

(4) 300 มิลลิเมตร

ข) กำลังต้านโมเมนต์ของคานต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้ (1) $+M_{nl} \geq (1/3)(-M_{nl})$ (2) $+M_{nr} \geq (1/3)(-M_{nr})$ และ

(3) $+M_n$ และ $-M_n$ ที่หน้าตัดใดๆ $\geq (1/5)$ ของค่าสูงสุดระหว่าง $-M_{nl}$ และ $-M_{nr}$

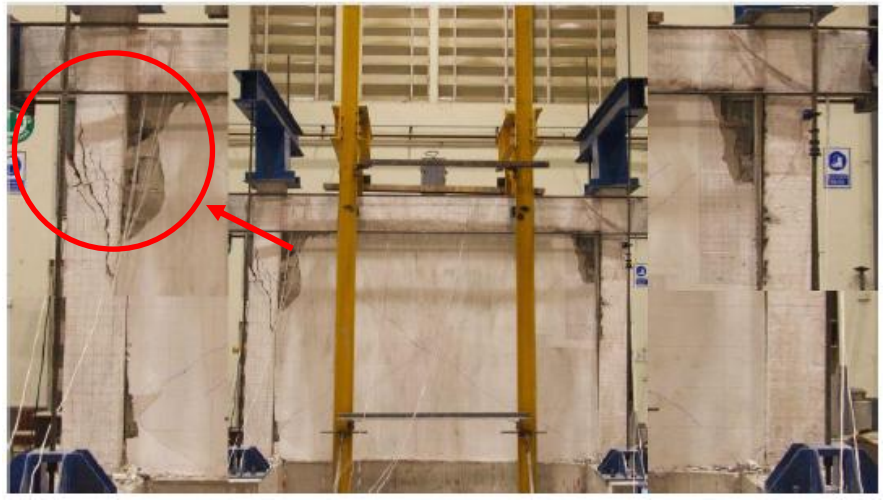
- จาก



ลักษณะการวิบัติในเสา

จากโมเมนต์ดัด **จากโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน** **จากแรงเฉือนจากผลของกำแพงอิฐก่อ**

(ภาพบนจาก Penelis and Kappos, 1997)

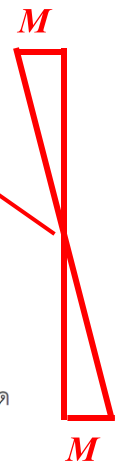


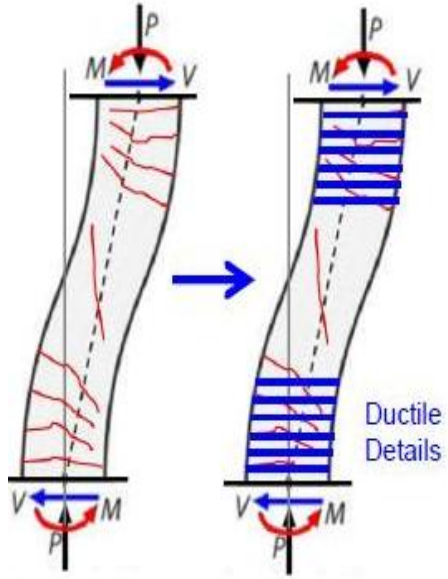
(ภาพล่างจาก สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์)

รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา ให้มีความเหนียวจำกัด (ปานกลาง) ตามประกาศกระทรวงมหาดไทย 2564, มยผ. 1301/1302-61



ต่อเหล็กกลางเสา มีโมเมนต์น้อย





หมายเหตุ

ก) ระยะเรียง s_0 ต้องไม่มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของค่าดังต่อไปนี้
- (1) 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดเล็กสุด
- (2) 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก
- (3) c_2 / 2 และ (4) 300 มิลลิเมตร

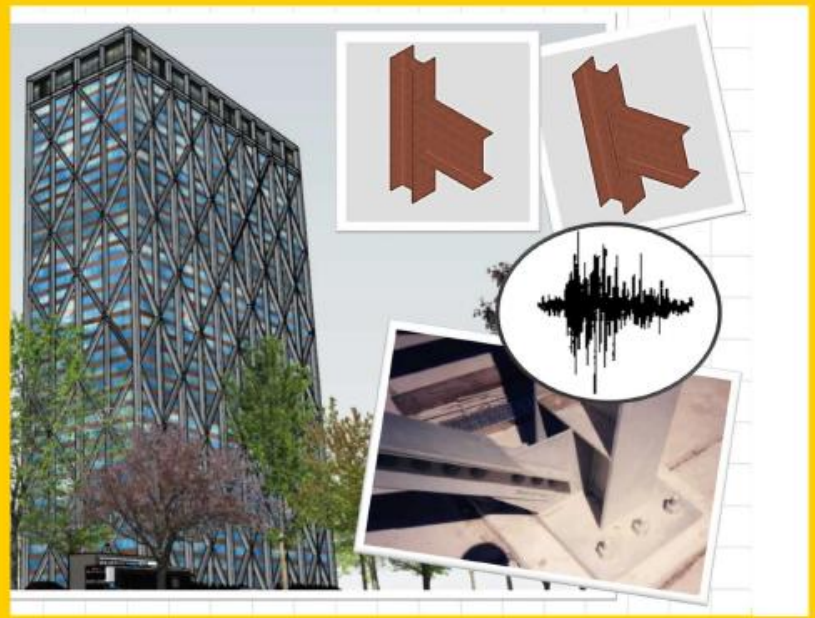
ข) ระยะ l_0 ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่มากที่สุดของค่าดังต่อไปนี้
- (1) $H/6$ (2) c_1 และ (3) 500 มิลลิเมตร

ค) การต่อเหล็กเสาให้ต่อบริเวณช่วงกลางความสูงเสา

ง) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด A_s / A_g ของเสา ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 และไม่ควรมากกว่าร้อยละ 6

มยผ. 1304 – 61

มาตรฐานการออกแบบอาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

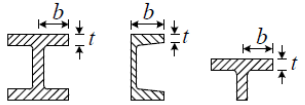
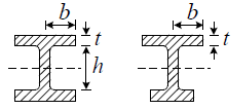


กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ. 2561



ตัวอย่าง
รอยต่อแผ่นเหล็กเสริมปลายมีสลักเกลียว

อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วนรับแรงอัด เนื่องจากโมเมนต์ดัด ของโครงสร้างเหล็กแบบปรกติ ที่เป็นหน้าตัดไม่อัดแน่นและอัดแน่น

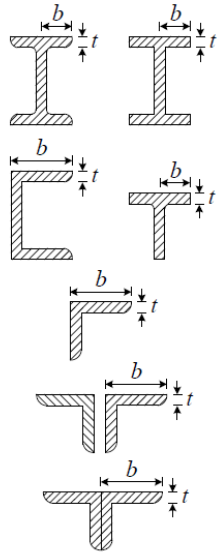
ประเภทของชิ้นส่วน	อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา	อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาสูงสุด		ตัวอย่าง
		λ_p	λ_r	
ชิ้นส่วนปลายยึด				
ปีกของคานรูปพรรณรูปตัว H รูปตัว C และรูปตัว T	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
ปีกของคานประกอบรูปตัว H สมมาตรแกนเดียวและสองแกน	b/t	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	[a][b] $0.95\sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$	



หน้าตัดอัดแน่น = ความเหนียวปานกลาง

การโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสา

อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วนรับแรงอัด ที่มีความเหนียวปานกลาง และมีความเหนียวสูง เพื่อต้านทานแผ่นดินไหว (มยผ. 1304 -61)

คำอธิบายของชิ้นส่วน	อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา	ขอบเขตของอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา		ตัวอย่าง
		λ_{hd} ชิ้นส่วนที่มีความเหนียวสูง	λ_{md} ชิ้นส่วนที่มีความเหนียวปานกลาง	
ชิ้นส่วนปลายยึด				
ปีกของหน้าตัดขึ้นรูปร้อนหรือหน้าตัดประกอบรูปตัวไอ เหล็กรางน้ำและเหล็กตัวที ขาของเหล็กฉากเดี่ยว หรือเหล็กฉากคู่ที่ไม่ติดกัน ขาที่ไม่ติดกันของเหล็กฉากคู่ที่ติดกัน	b/t	$0.30\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Shaking Table Test, JR Takatori 100%, โครงสร้างเหล็ก



ที่มา VDO : E-Defense, Hyogo Earthquake Engineering Research Center

ค. หลีกเลี่ยงลักษณะการวิบัติแบบเปราะ เช่น การวิบัติโดยการเฉือน การบดอัด (Crushing) การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว การสูญเสียเสถียรภาพ เป็นต้น การวิบัติเหล่านี้เกิดขึ้นค่อนข้างกะทันหัน จึงเป็นอันตรายมาก จึงต้องออกแบบให้มีส่วนความปลอดภัยมากกว่าการดัด



ง. ใส่เหล็กเสริมรับแรงดัดให้หน้าตัดเป็น under - reinforcement section ในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงดัดเป็นหลัก เพื่อให้องค์อาคารมีพฤติกรรมแบบเหนียว โดยจำกัดอัตราส่วนเหล็กเสริมไม่ให้เกิน 75% ของ balanced steel ratio

จ. เสาสั้น จะรับแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวมากกว่าเสายาว จึงทำให้เกิดการวิบัติได้ง่าย ดังนั้นเสาต้องได้รับการเสริมเหล็กปลอกให้มากเป็นพิเศษอย่างน้อยเท่ากับบริเวณใกล้ข้อต่อ เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเสาสั้น

109

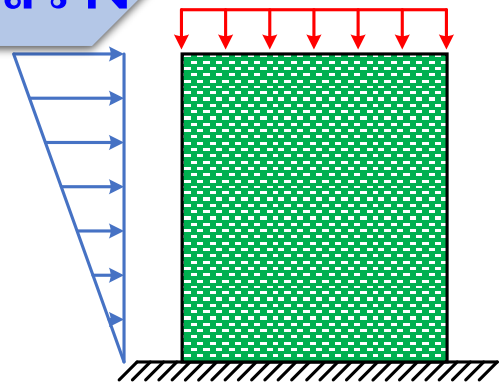
การจำแนกระบบโครงสร้างและข้อกำหนด

ระบบต้านแรงด้านข้างและระบบรับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งของโครงสร้างอาคารอาจเป็นระบบใดระบบหนึ่งที่กำหนดไว้ในตารางใน มยผ. 1301/1302 หรือเป็นระบบผสมที่ได้จากการรวมระบบโครงสร้างหลายแบบ ระบบโครงสร้างที่สามารถเลือกใช้ได้จะขึ้นกับประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

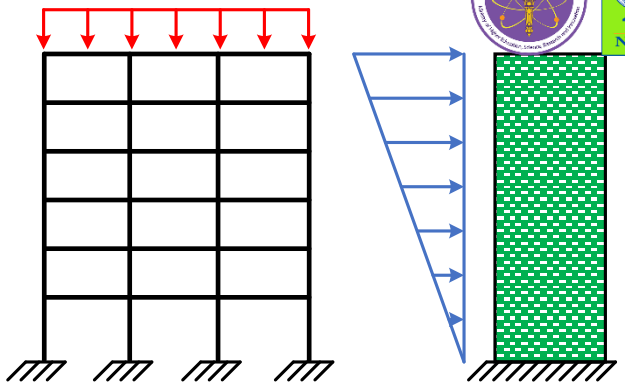
ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (response modification factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (system overstrength factor, Ω_0) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (deflection amplification factor, C_d) ของระบบโครงสร้างแต่ละแบบให้เป็นไปตามที่กำหนดในตาราง ค่าตัวประกอบเหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแรงเฉือนที่ฐาน (base shear) แรงในองค์อาคารเพื่อการออกแบบ (element design force) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ด้านข้างระหว่างชั้น (story drift)

ระบบโครงสร้างที่เลือกใช้ จะต้องได้รับการออกแบบและกำหนดรายละเอียดของโครงสร้าง (detailing) ให้เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐานอ้างอิงที่เกี่ยวข้องและข้อกำหนดเพิ่มเติมตามที่ระบุในมาตรฐาน มยผ. 1301/1302 –61

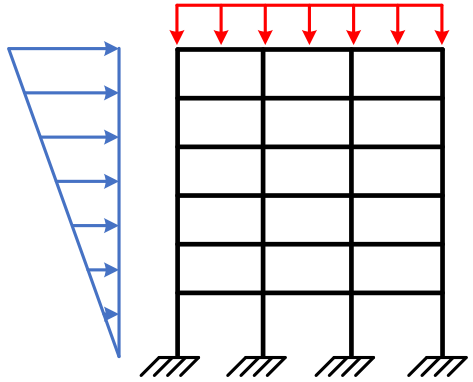
การจำแนกระบบโครงสร้าง



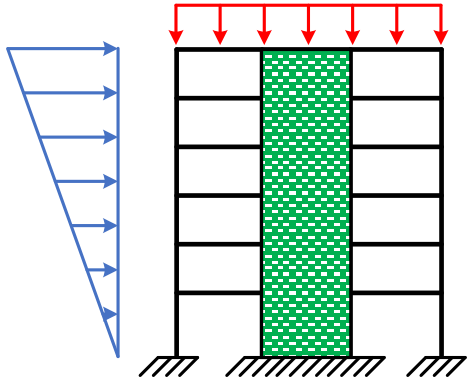
(ก) ระบบกำแพงรับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่ง
(Bearing wall system)



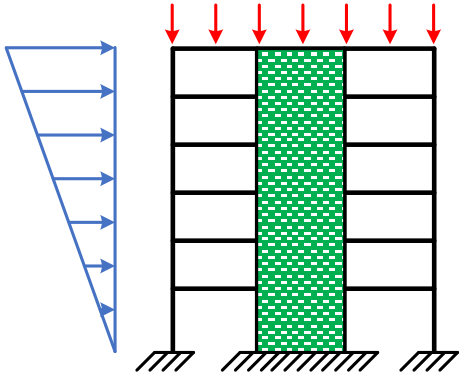
(ข) ระบบโครงอาคาร
(Building frame system)



(ค) ระบบโครงต้านแรงดัด
(Moment-resisting frame)



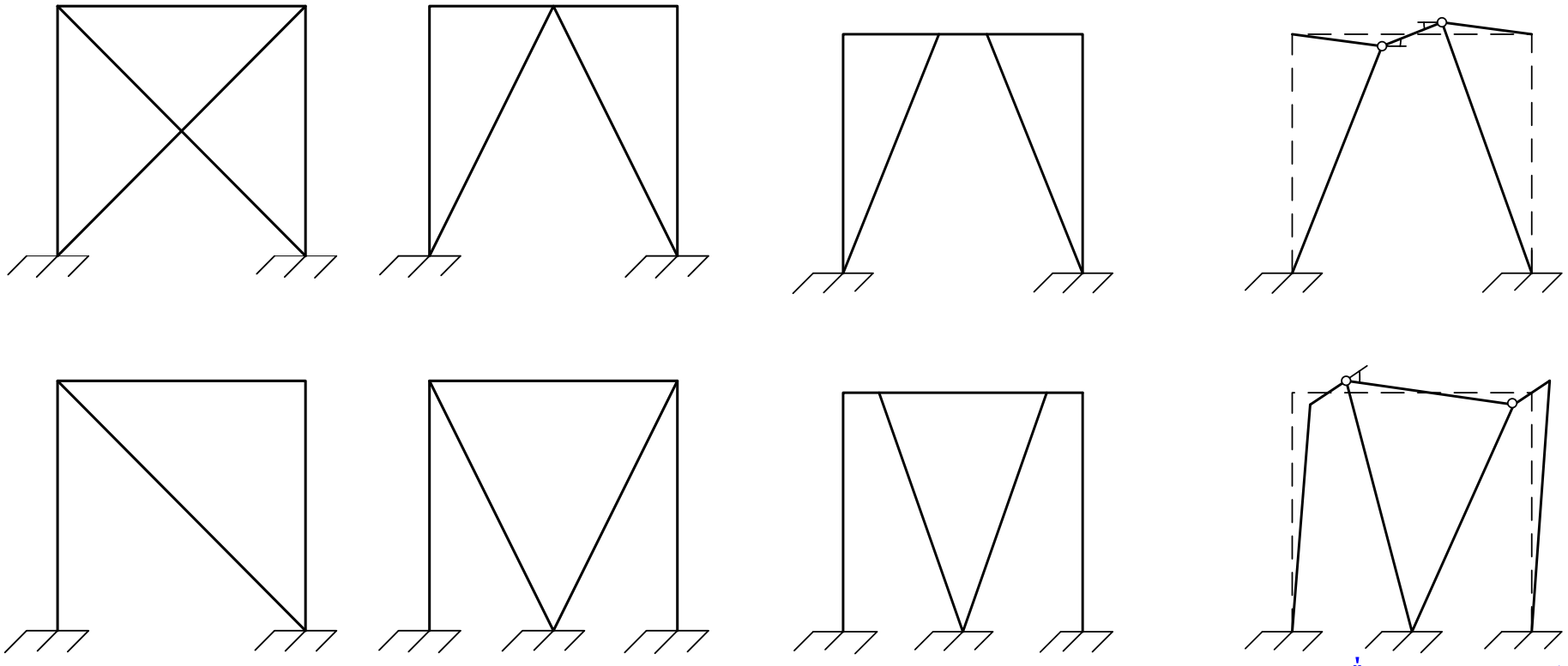
(ง) ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัดที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด
(Dual system with moment resisting frame with limited ductility / Dual system with moment resisting frame)



(จ) ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด

(Dual system with special moment-resisting frame)

การจำแนกระบบโครงสร้าง

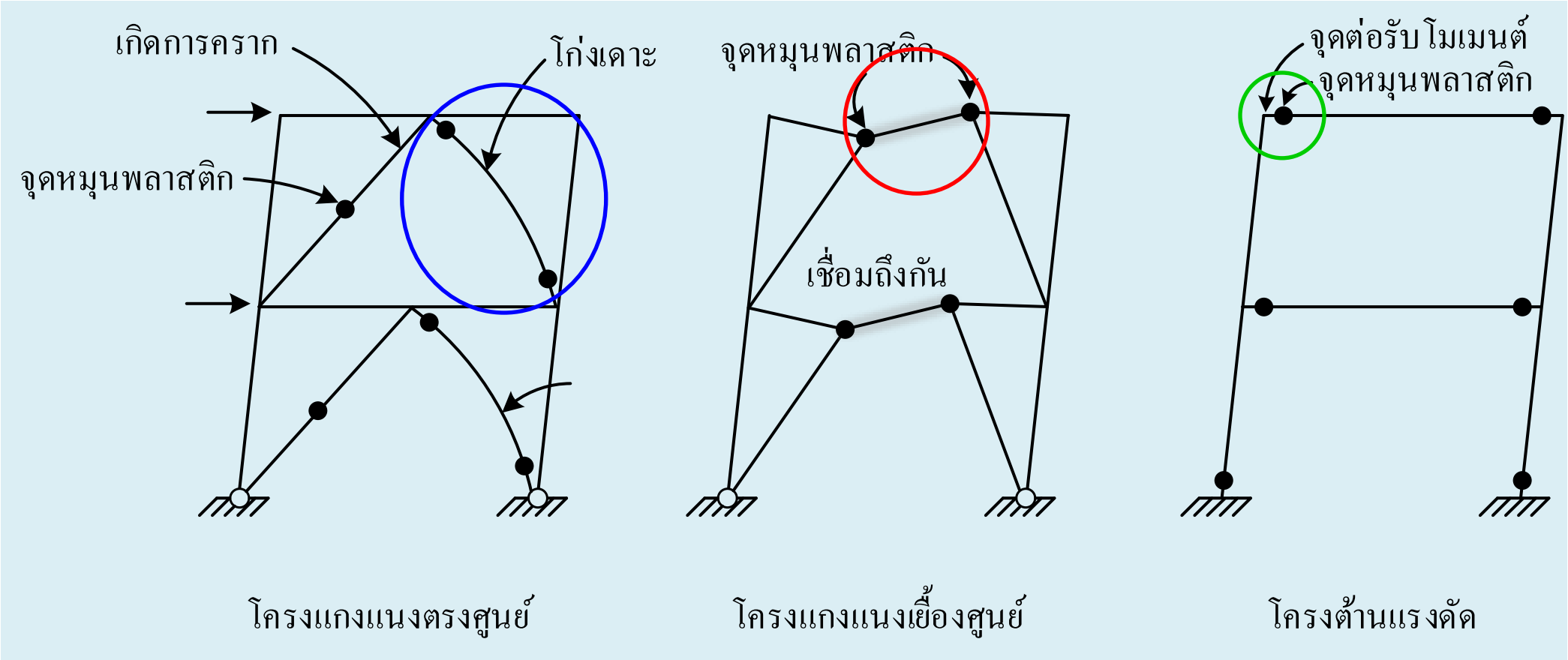


ก่อนการเสียรูป　　การเสียรูปเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

(ก) แบบตรงศูนย์ (**Concentric**)　　(ข) แบบเยื้องศูนย์ (**Eccentric**)

โครงยึดรั้งเหล็ก หรือโครงแกงแนงเหล็ก (**Braced frame**)

กลไกการวิบัติของระบบโครงสร้างเหล็ก ที่มีความเหนียวสูง



การจำแนกระบบโครงสร้าง





รูป โครงยึดรั้งเหล็ก หรือโครงแกงแนงเหล็ก แบบตรงศูนย์ ด้วยเหล็กค้ำยันในแนวทแยง

การจำแนกระบบโครงสร้าง



รูป โครงยึดรั้งเหล็ก หรือโครงแกงแนงเหล็ก แบบตรงศูนย์ ด้วยเหล็กค้ำยันในแนวทแยง



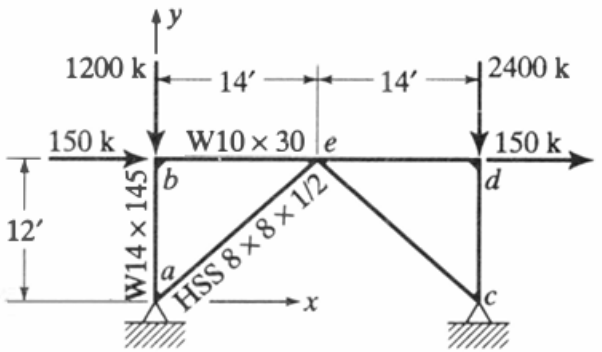


รูป โครงยึดรั้งเหล็ก หรือโครงแกงแนงเหล็ก แบบเยื้องศูนย์

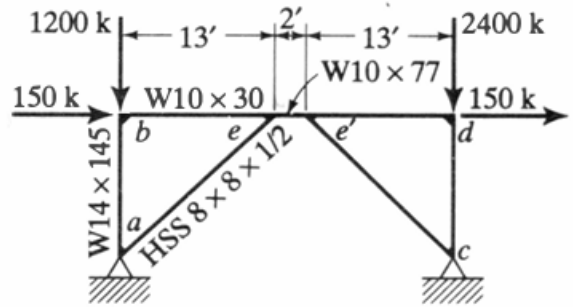
EXAMPLE

เสาด้านท้ายลม มีแรงอัดเพิ่มจากผลของ Frame action

Compare the behavior of the following frames, E = 29,000 ksi. For beams, σ_y = 33 ksi. For columns and diagonals, σ_y = 100 ksi.



Frame A



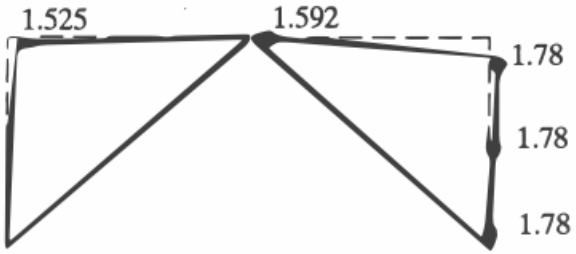
Frame B

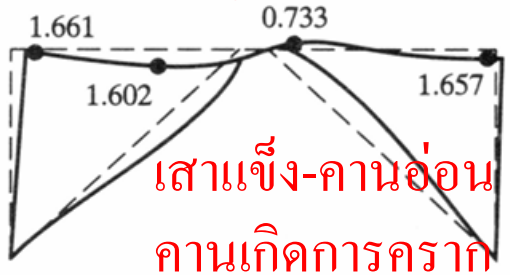
โครงยึดรั้ง แบบตรงศูนย์ A

แบบเยื้องศูนย์ B

Model ee' by one element, all other members by two elements. Use Equation 8.5. Account for elastic shearing deformation (see Example 7.11).

Failure modes and plastic hinge formation sequence (by load factor):





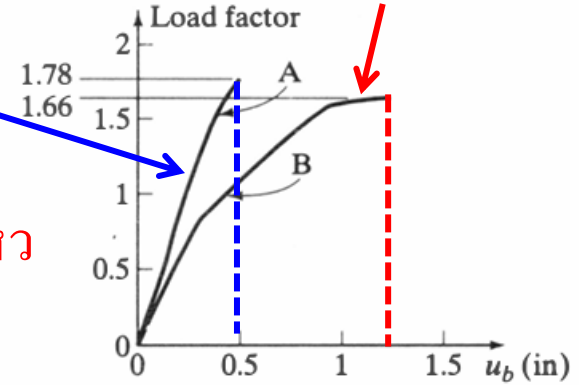
เสาแข็ง-คานอ่อน

คานเกิดการคราก

Response curves:

เสาอ่อน-คานแข็ง

เสาโก่งเดาะในช่วงอินอิลาสติก



พื้นที่ใต้กราฟแสดงพลังงานที่ดูดซับได้ ดังนั้นบริเวณที่มีแผ่นดินไหวรุนแรง มาตรฐานจึงกำหนดให้ใช้เฉพาะโครงยึดรั้งแบบเยื้องศูนย์

ที่มา: McGuire, W., Gallagher, R.H., and Ziemian, R., Matrix Structural Analysis, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 2014

18TH WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING
WCEE2024
MILAN

MILAN, ITALY
30TH JUNE - 5TH JULY 2024
www.wcee2024.it

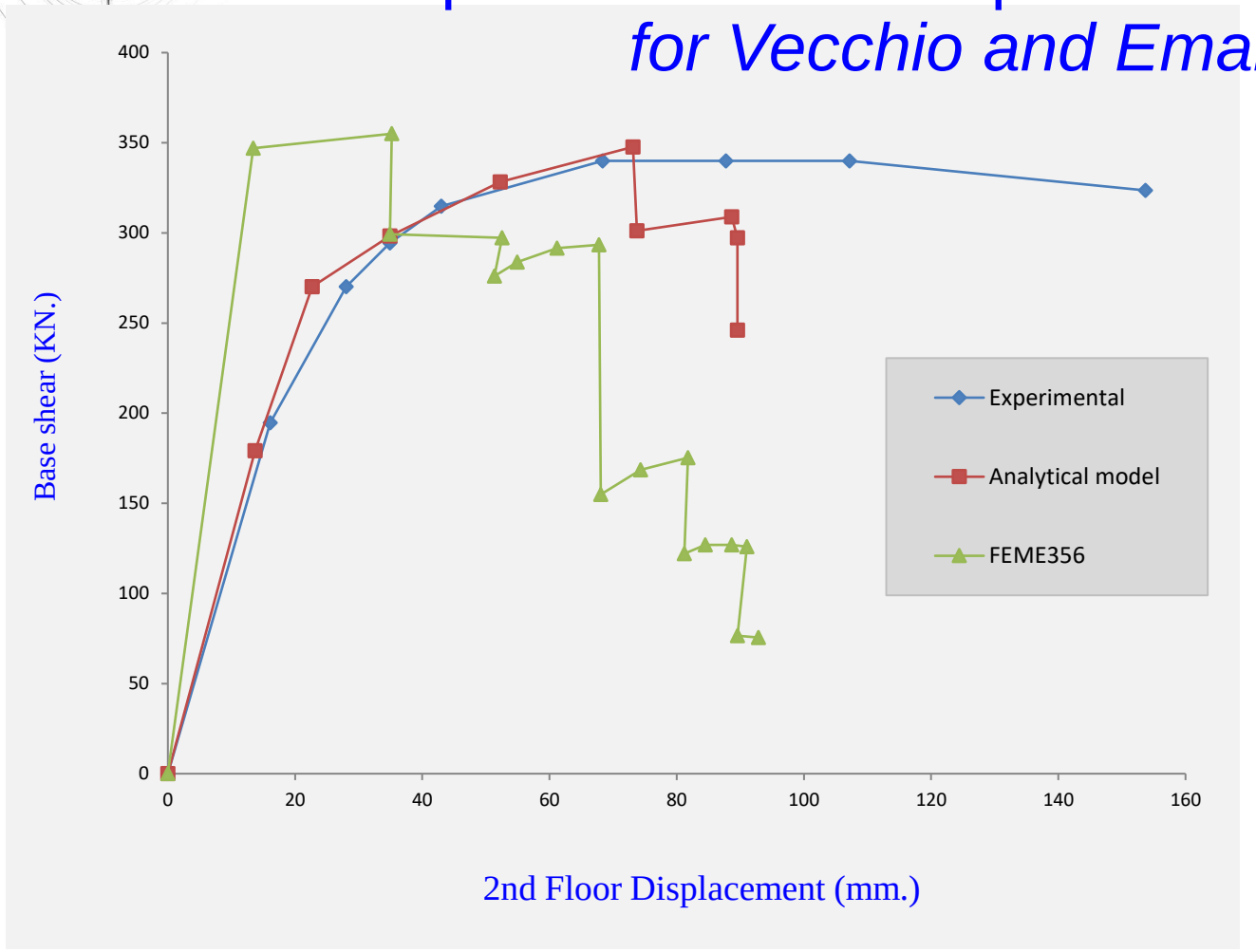
Seismic Evaluation Comparisons of Steel Buildings between Moment-Resisting Frames and Braced Frames

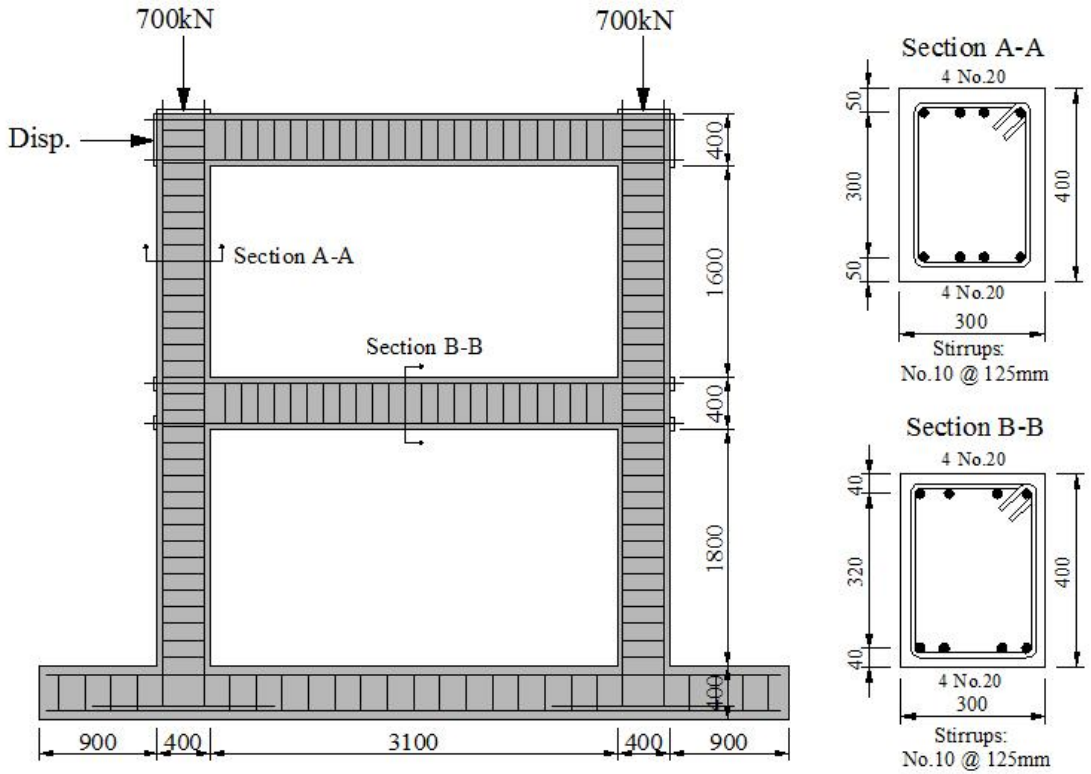
Virote Boonyapinyo, Naramet Preethai
Thammasat University, Thailand
Jirawat Junruang
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus
Prakit Chomchuen
Mahanakorn University of Technology, Thailand

Objectives and Scopes

- To evaluate the seismic performance comparisons of steel structures with different structural systems, ductility and locations.
- The structural systems are divided into three categories
  - 1) Moment resisting frames
  - 2) Concentric braced frames
  - 3) Eccentric braced frames
- In each structural system, the frames consist of 3 ductility
  - 1) Ordinary, 2) Intermediate, and 3) Special ductility.
- The 8-storey steel buildings are located in the two seismic density levels
  - Low density at Bangkok (BKK)
  - Moderate density at Mueang Chiang Mai (CNX)

Comparisons between pushover solutions and experiments *for Vecchio and Emara Frame (1992)*



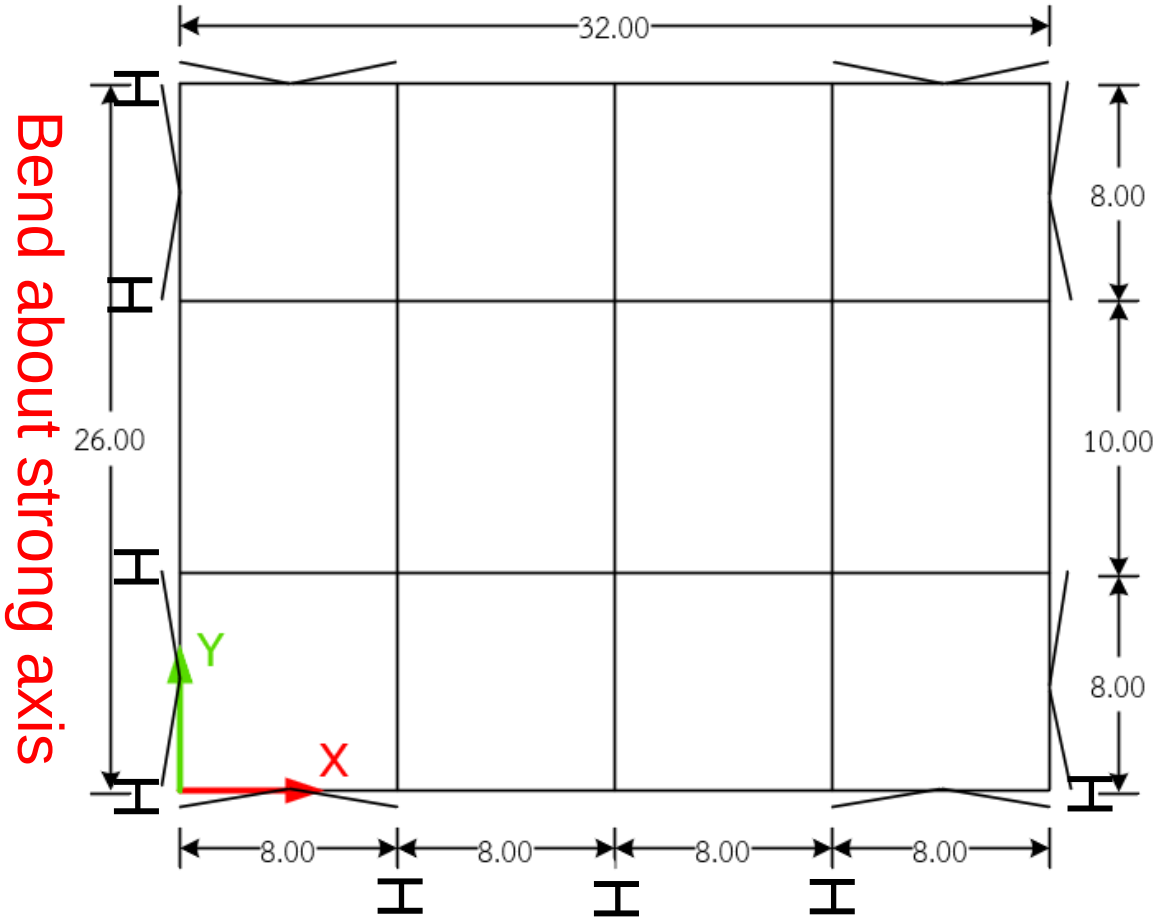


An accurate result can be obtained by the proposed analytical method [Boonyapinyo and Junruang 2014], compared with the experimental results.

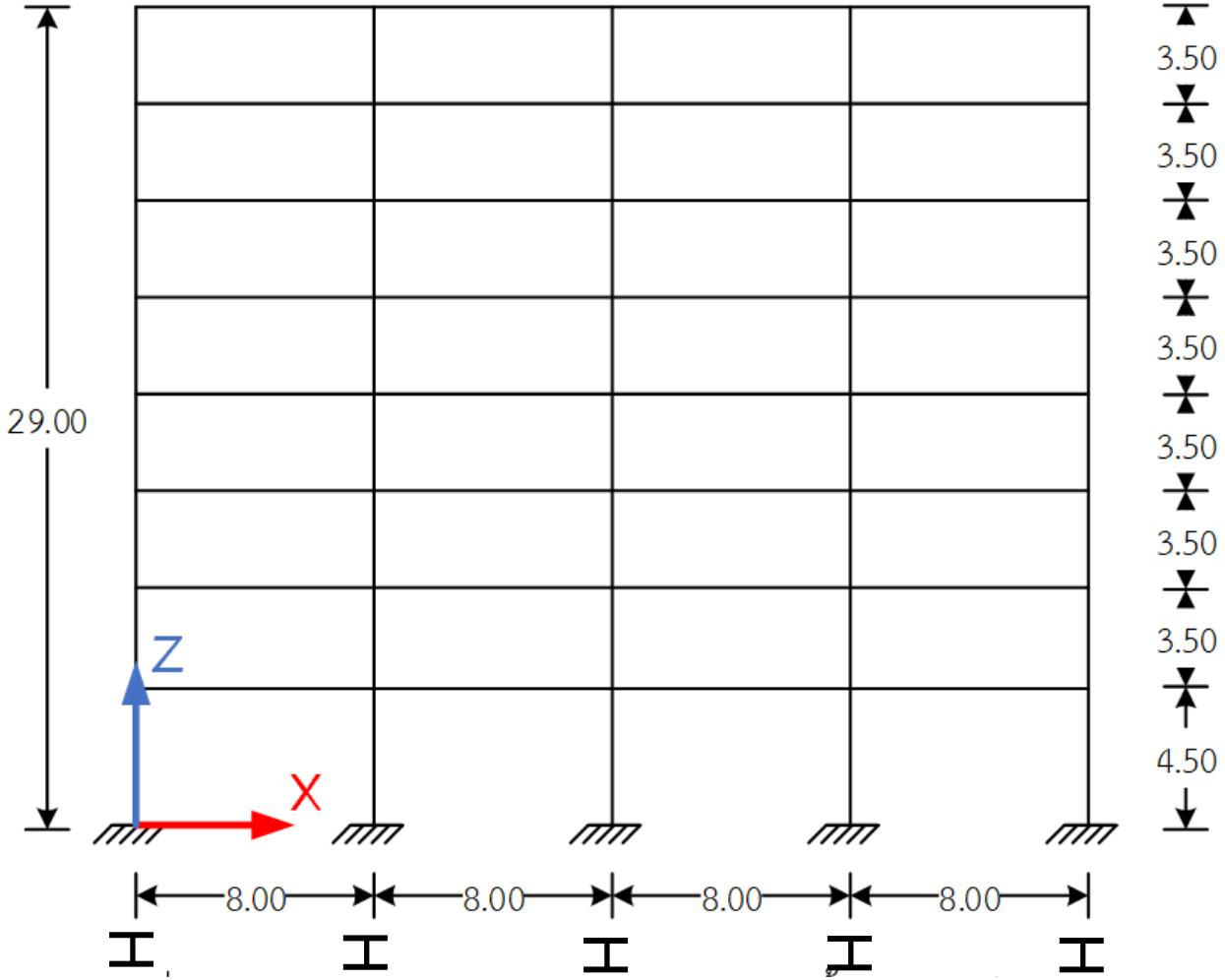
Analytical Model

Case Study for 8-Storey Steel Building

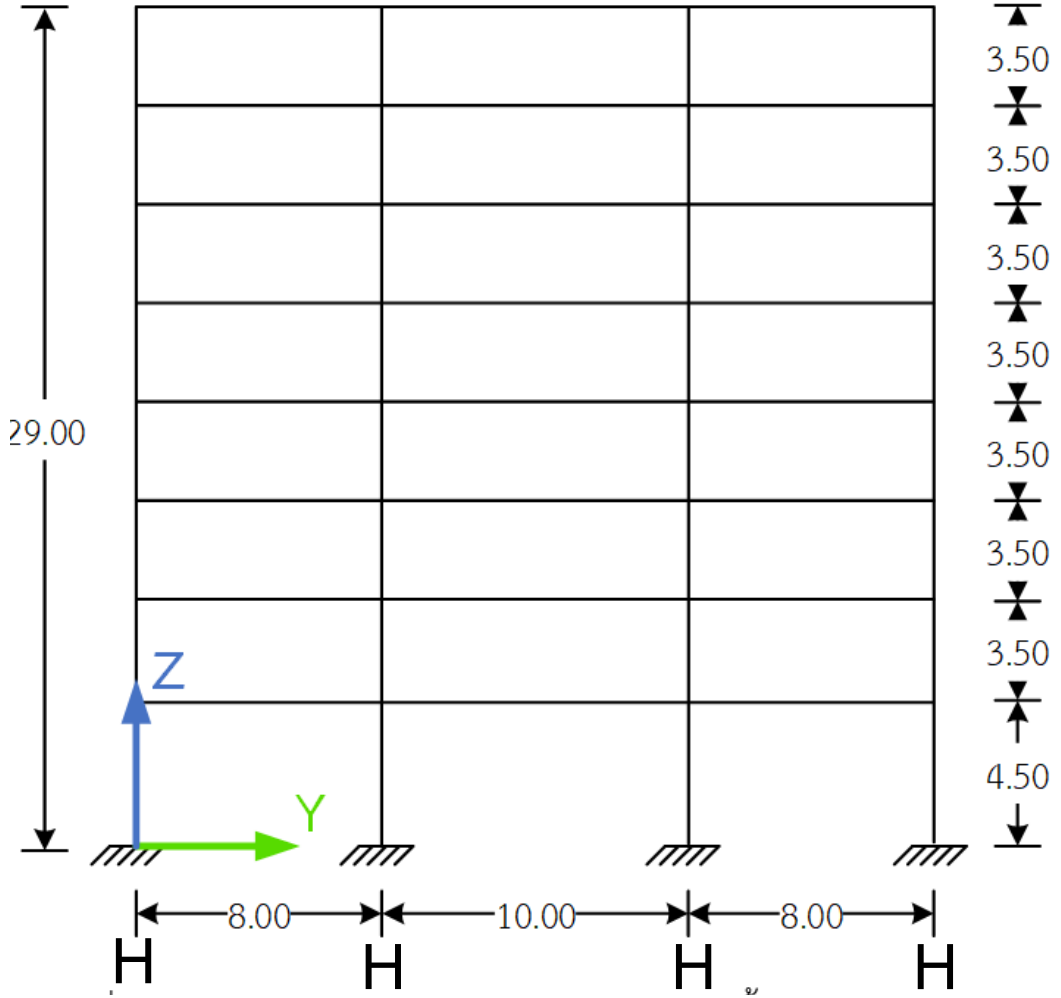
- An eight-story steel structure with plan dimensions of 32 m x 26 m. The story height is 4.5 m for the first floor and 3.5 m for other floors.
- The moment-resistant frames (MRFs) are about major X axis or in Y direction.
- The concentrically and eccentrically braced frames (CBFs/EBFs) are positioned along the perimeter in both X and Y directions.



Elevation View of 8-Storey Steel Building (unit: m).



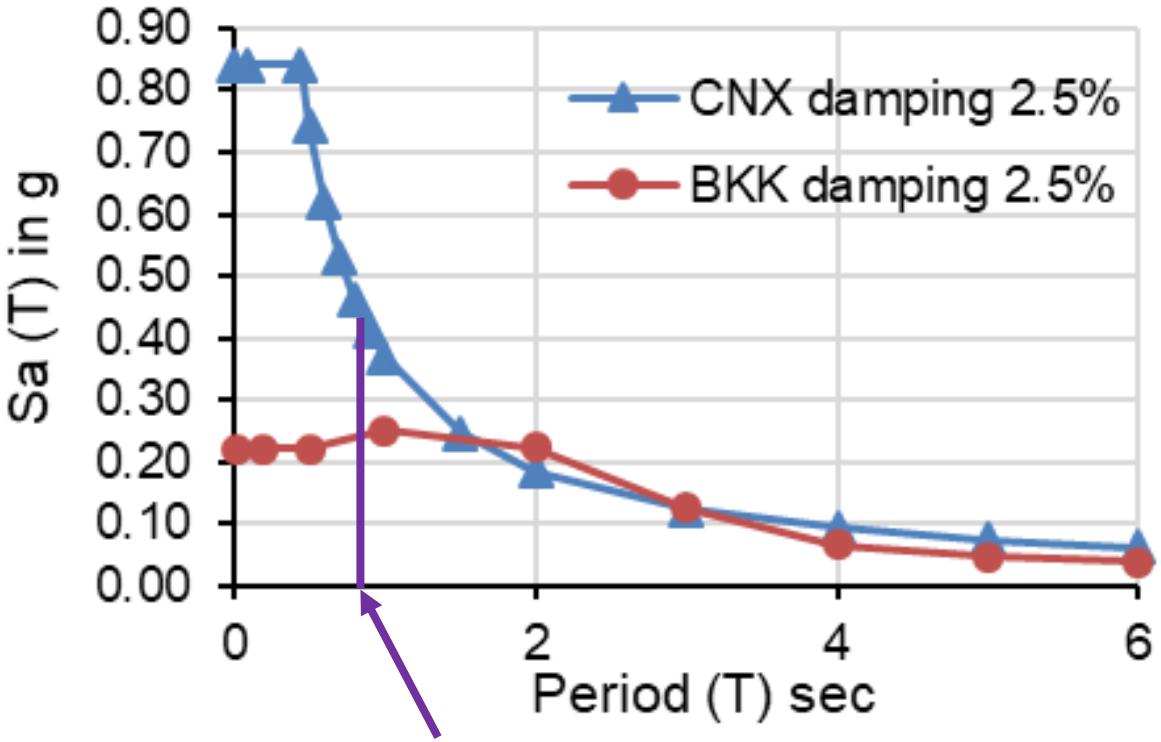
Bend about weak axis



Bend about strong axis

Seismic Demand Calculations

- Guidelines in DPT.1301/1302-61.
- The two levels of seismic density are considered, namely, low density at Bangkok and moderate density at Mueang Chiang Mai.
- For Muang Chiangmai Soil type “D” is considered and S_{DS} = 0.84, S_{D1} = 0.37, S_a for 8-storey buildings = 0.426.
- For Bangkok located in soft soil, effects of soil are directly included for design spectrum, S_{DS} = 0.220, S_{D1} = 0.250, S_a for 8-storey buildings = 0.242.
- The importance factor is assumed as I = 1.0.
- For steel structure, damping ratio = 2.5%



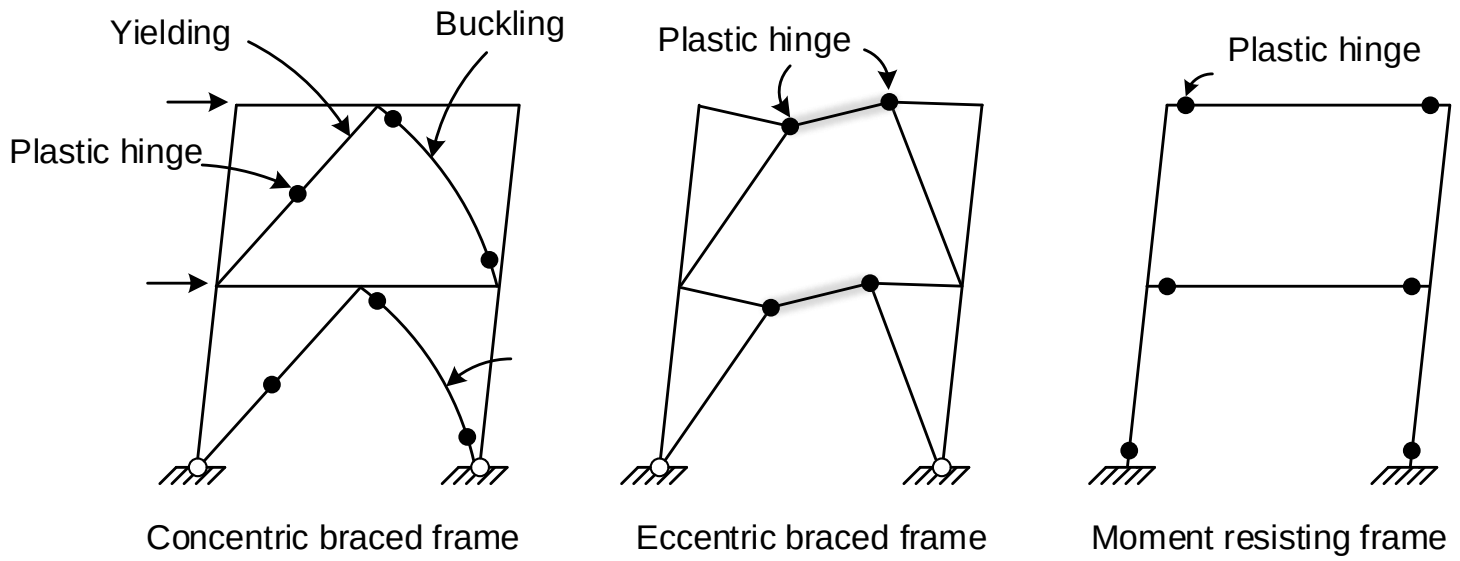
8-storey steel buildings

$$T = 0.03H = 0.03(29) = 0.870 \text{second}$$

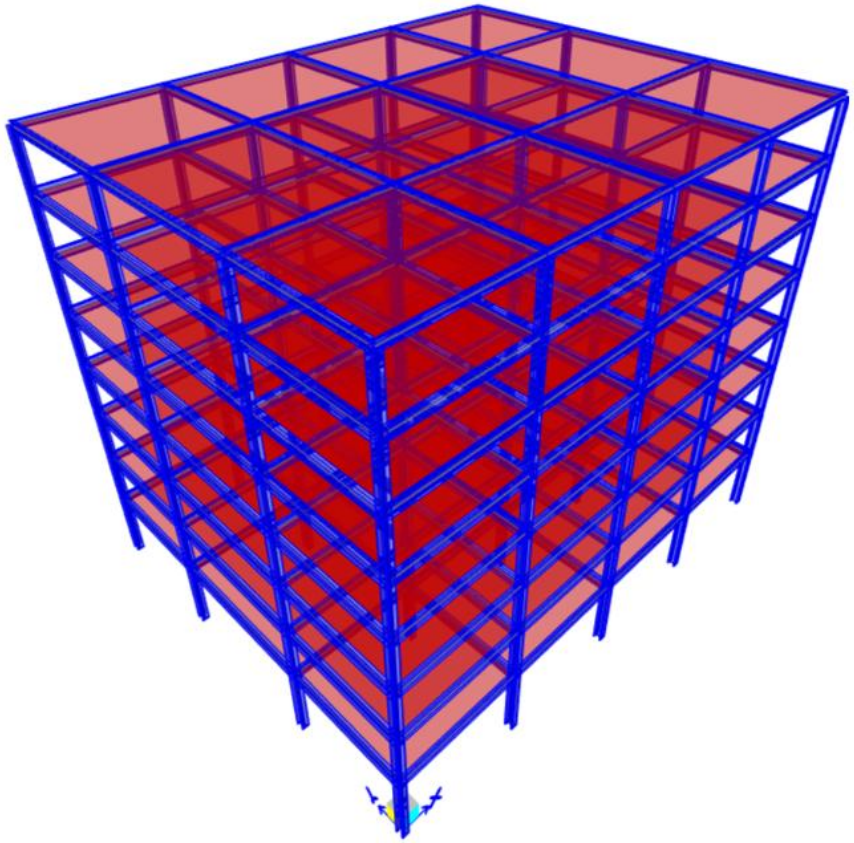
Elastic and design spectra for Muang Chiang Mai and Bangkok, Thailand (DPT.1301/1302-61).

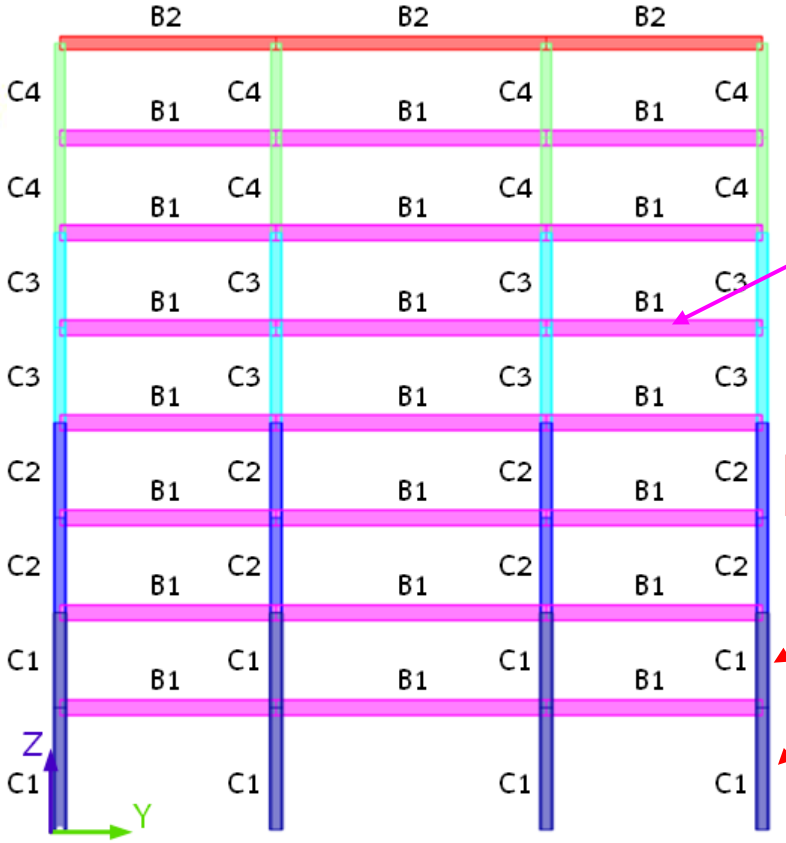
Strength Reduction Factor

Structural systems in seismic design	Response modification coefficient, *R*
Ordinary Steel Moment Resisting Frame, OMRFs	3.5
Intermediate Steel Moment Resisting Frame, IMRFs	4.5
Ductile/Special Steel Moment Resisting Frame, SMRFs	8.0
Ordinary Steel Concentric Braced Frame, OCBFs	3.5
Special Steel Concentric Braced Frame, SCBFs	6.0
Steel Eccentrically Braced Frame with Moment Resisting Connections, EBFs	8.0



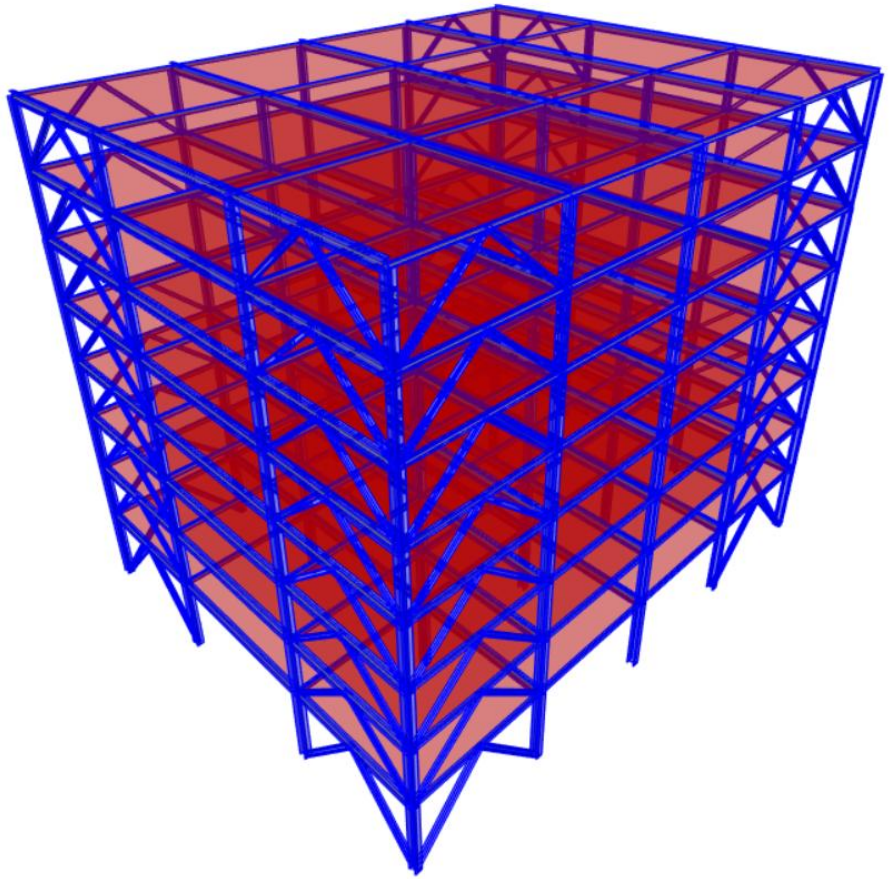
Finite element model and Structural steel sections of IMRF/CNX

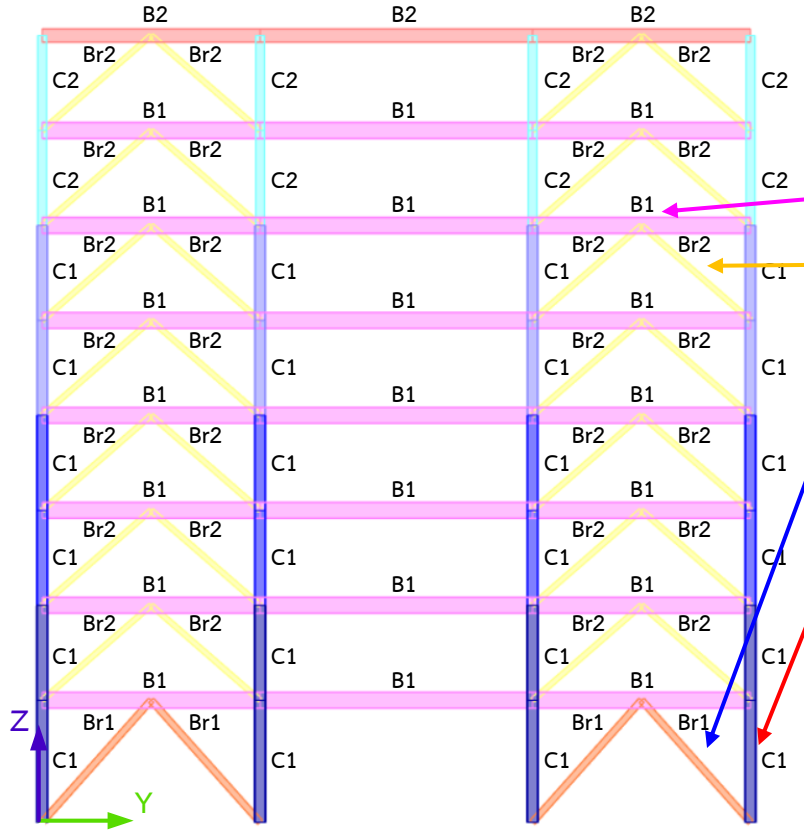




Member	Location	Steel section
B2	Roof	W500x200x89.6 kg/m
B1	1st – 7th floor	W600x300x151 kg/m
C4	7th – 8th floor	W400x400x197 kg/m
C3	5th – 6th floor	W450x400x283 kg/m
C2	3th – 4th floor	W450x400x415 kg/m
C1	1st – 2nd floor	W500x450x605 kg/m

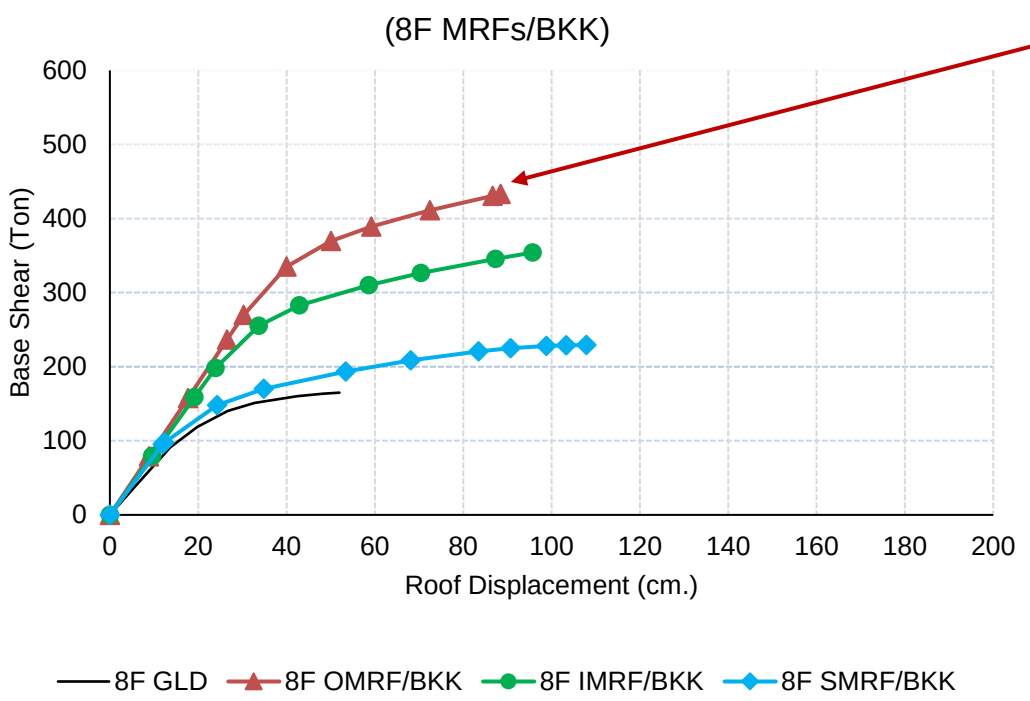
Finite element model and Structural steel sections of SCBF/CNX





Member	Location	Steel section
B2	Roof	W500x200x89.6 kg/m
B1	1st – 7th floor	W600x200x120 kg/m
Br2	2nd – 8th floor	W175x175x40.2 kg/m
Br1	1st floor	W200x200x49.9 kg/m
C2	7th – 8th floor	W450x300x145 kg/m
C1	1st – 6nd floor	W450x400x283 kg/m

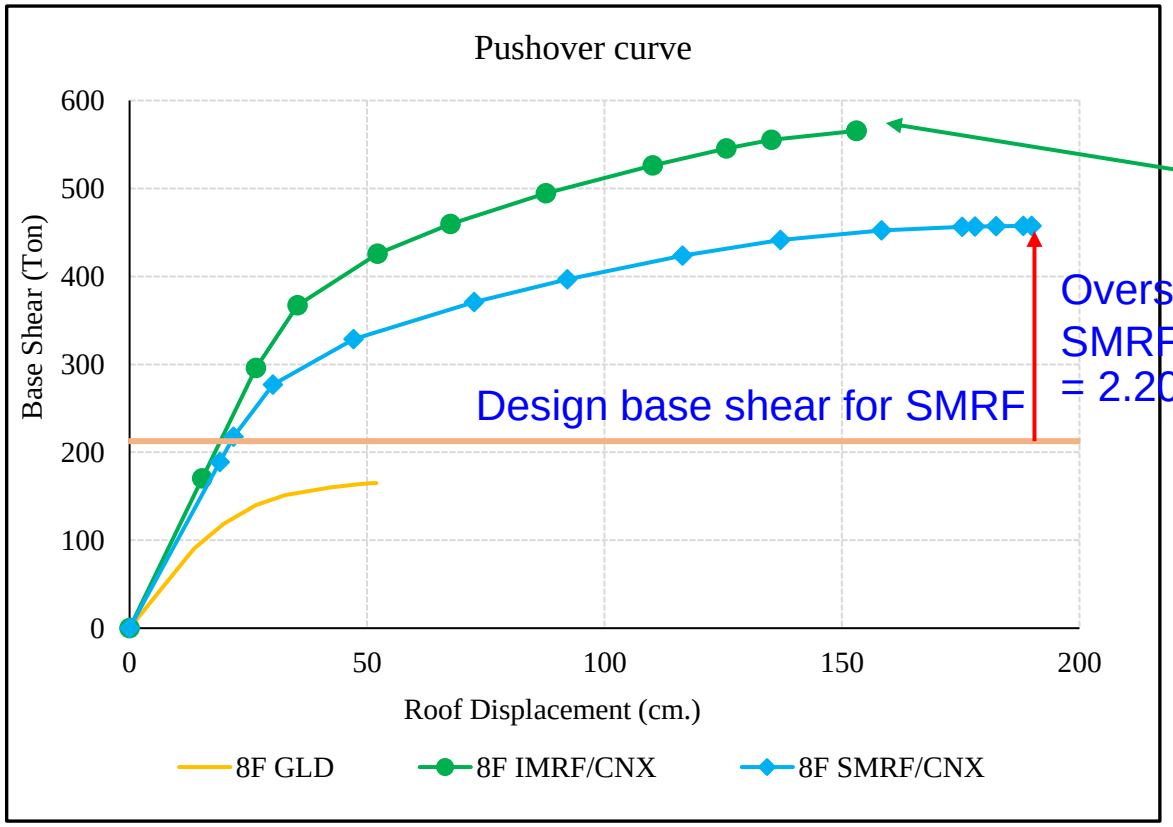
Moment Resisting Frame, MRF



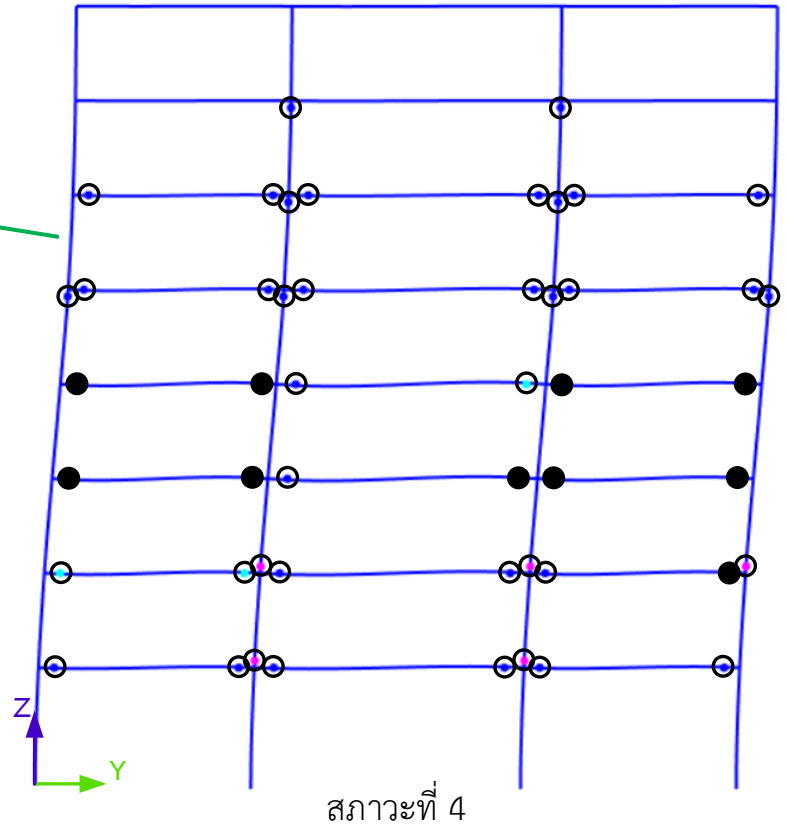
- Base shear of OMRF, IMRF and SMR equal to 433, 354, and 229 tons, respectively
- Roof displacement of the building equal to 88, 95, and 107 cm, respectively.

Pushover curve of 8F MRFs/BKK

Moment Resisting Frame, MRF



Pushover curve of 8F MRFs/CNX.

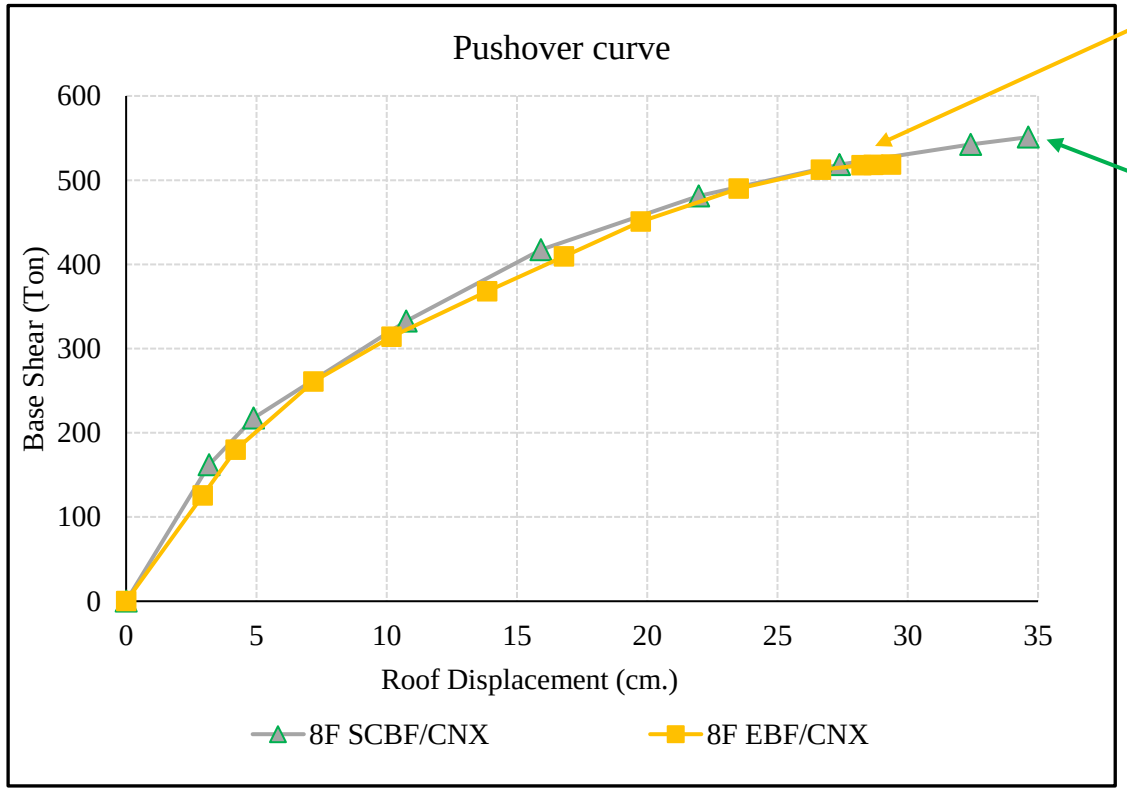


สภาวะที่ 4

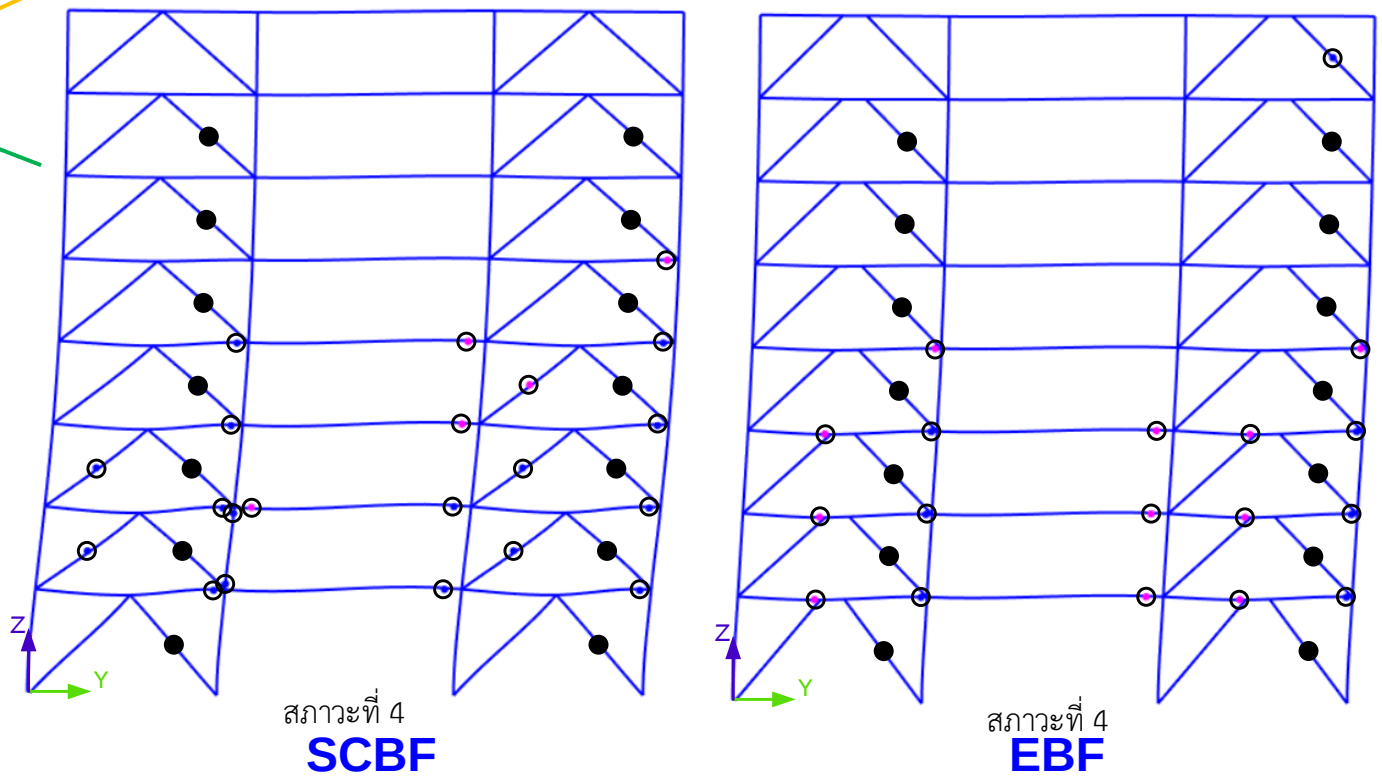
(○ yielding, ● Plastic hinge)

Pattern of plastic hinge formation of IMRFs/CNX.

Concentric / Eccentric Braced Frame, CBF & EBF



Pushover curve of 8F CBF & EBF / CNX.

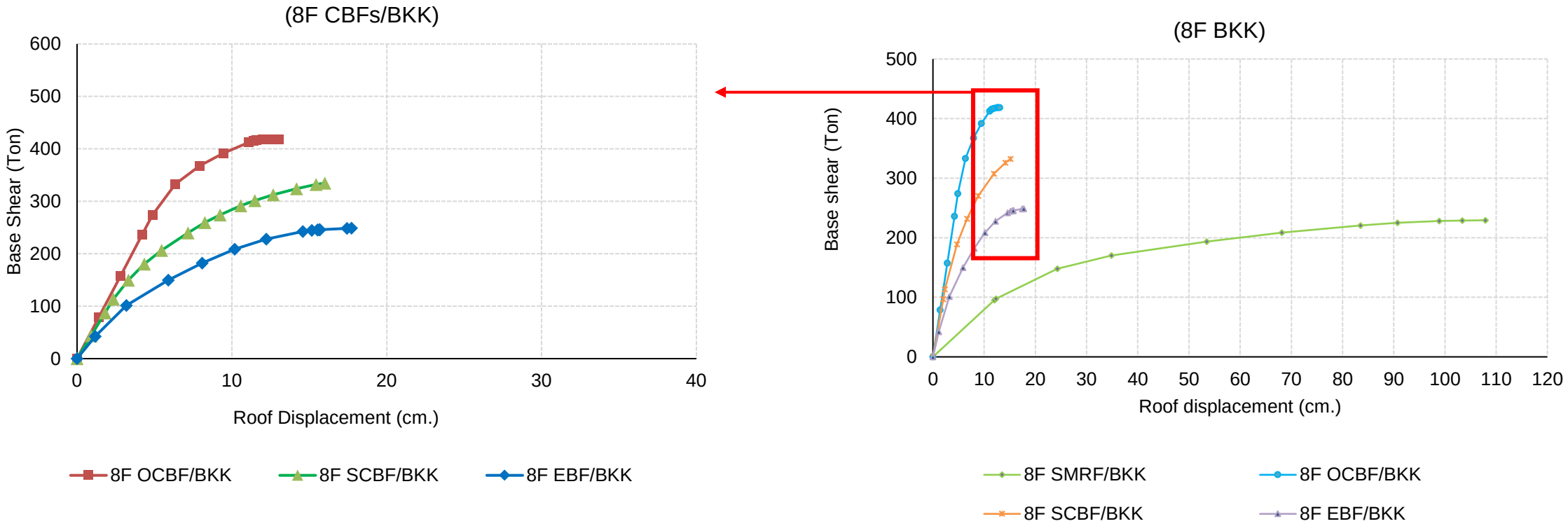


SCBF **EBF**

(○ yielding, ● Plastic hinge)

Pattern of plastic hinge formation of IMRFs/CNX.

Moment Resisting Frame, MRF
Concentric / Eccentric Braced Frame, CBF & EBF



Pushover curve of 8F MRF, CBF & EBF / BKK.

- Base shears of OCBF, SCBF, EBF and SMRF equal to 419, 332, 249 and 229 tons, respectively.
- Roof displacement of the building equal to 13, 15, 18 and 108 cm, respectively.

สรุป

- การออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว
  - อาคารที่มีรูปทรงที่ดี (โดยหลีกเลี่ยงความไม่สม่ำเสมอในแนวระนาบและในแนวดิ่ง)
  - ระบบโครงสร้างที่ดี
  - และออกแบบให้มีความเหนียวเพียงพอตาม มยผ. 1301 / 1302 - 61

  สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นมากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 2 - 3 เท่า ได้โดยไม่พังทลายลงมา ถึงแม้จะเกิดความเสียหายมาก
- การออกแบบอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งและแนวราบ บางประเภท ต้องออกแบบหน้าตัดวิกฤติให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวสถิตเทียบเท่าที่คูณด้วยตัวประกอบกำลังส่วนเกินได้ เพื่อป้องกันหน้าตัดวิกฤติให้อยู่ในช่วงอิลาสติก (ช่วงยืดหยุ่น) หรืออยู่ในช่วงอินอิลาสติกเล็กน้อย

ขอขอบคุณ

และ

สวัสดี









โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้ เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม
จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2568