



รศ.ดร. สุทัศน์ ติลาทวิวัฒน์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อการบรรยาย

- ❑ เทคนิคและวิธีการในการเสริมกำลังอาคารด้วยโครงสร้างเหล็ก
- ❑ วิธีการที่นิยมใช้
- ❑ เทคนิค มาตรฐาน และ แนวคิดการวิเคราะห์

- ❑ เทคนิคและวิธีการในการปรับปรุงสมรรถนะอาคาร
 - ❑ การเสริมกำลังเฉพาะที่ เพื่อให้องค์อาคารมีกำลังและความเหนียวเพียงพอ
 - ❑ การเสริมกำลังโดยรวมของโครงสร้างอาคาร (Structure Level) เพื่อให้มีผลตอบสนองลดลงภายใต้แรงแผ่นดินไหว
 - ❑ การลดผลตอบสนองด้วยการติดตั้ง Energy Dissipation Device

Strengthening Applications

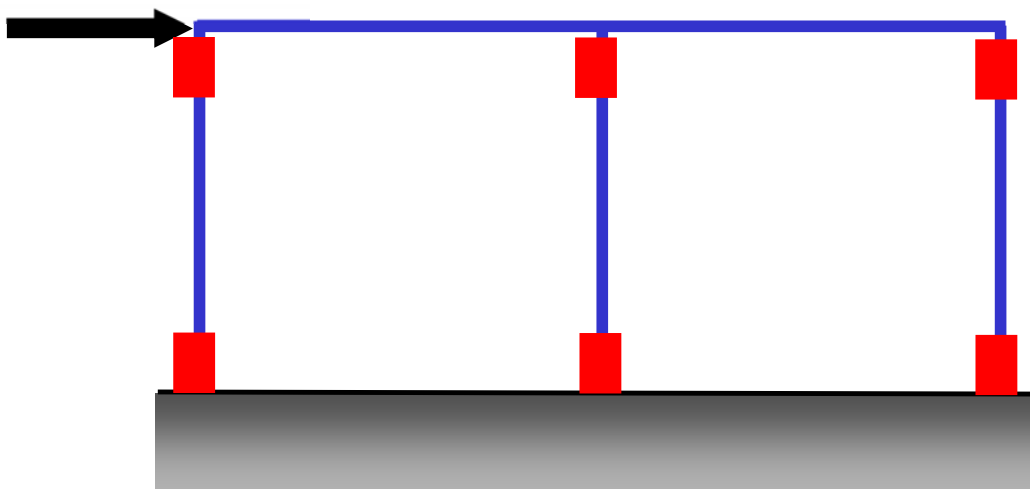
- ❑ การเสริมกำลังอาคารเฉพาะที่
 - ❑ เพิ่มการโอบรัด Confinement
 - ❑ เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน
 - ❑ ลดปัญหาบริเวณต่อทาบเหล็ก Lap Splice
 - ❑ เพิ่มกำลังโดยรวมทั้งอาคาร (ในกรณีที่เสริมจำนวนองค์อาคารมากพอ)

การเสริมกำลังเฉพาะที่

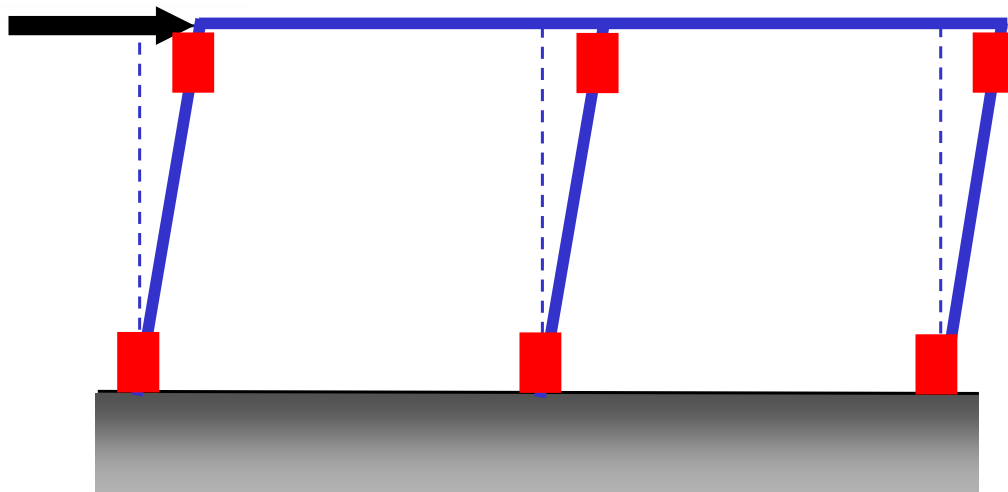
- ❑ เทคนิคและวิธีการการเสริมกำลังเฉพาะที่ที่นิยมใช้
 - ❑ การพอกด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing)
 - ❑ การพันด้วยปลอกเหล็ก (Steel Jacketing)
 - ❑ การพันด้วยวัสดุ composite

การเสริมกำลังเฉพาะที่

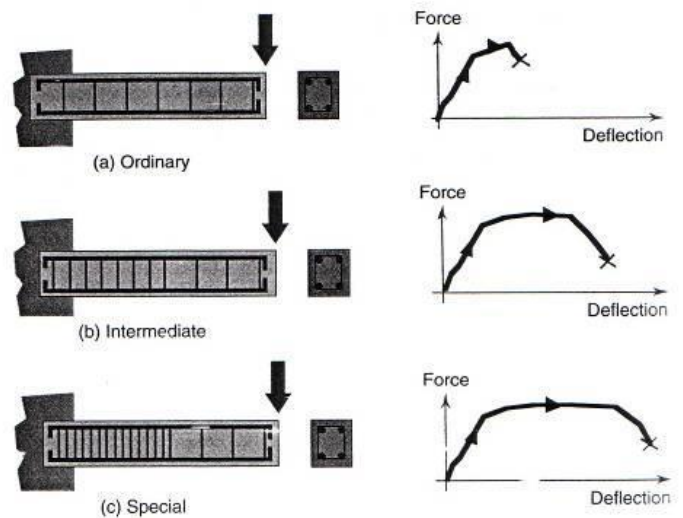
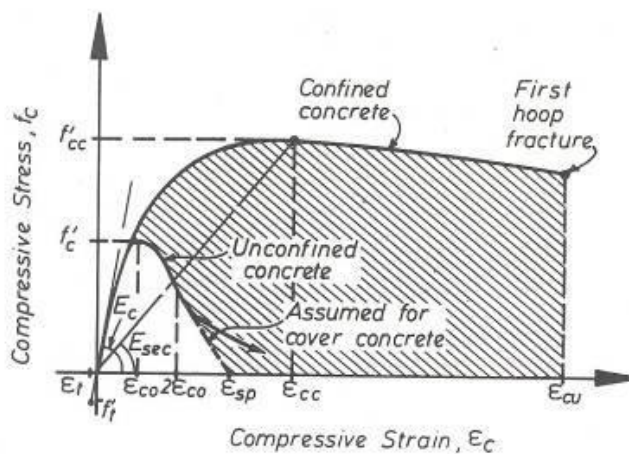
Earthquake Force



Earthquake Force



Importance of Confinement



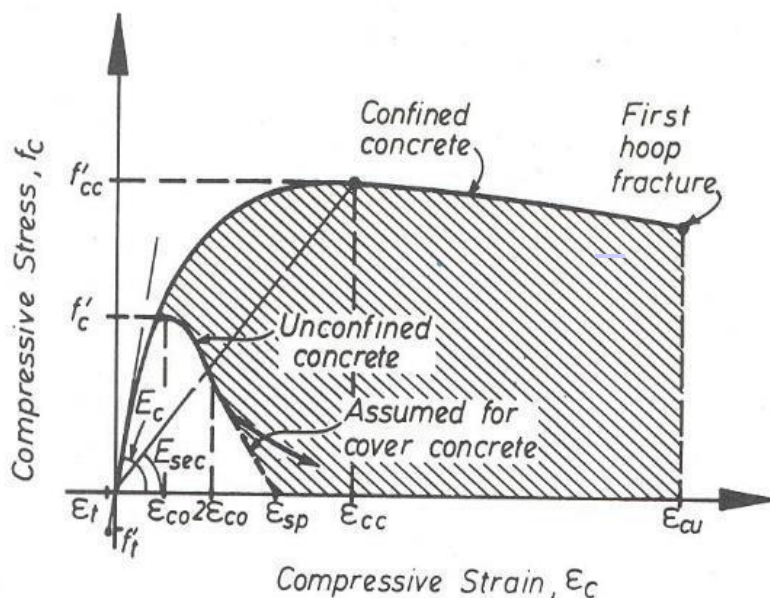
Confinement



Source: National Information Service for Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley



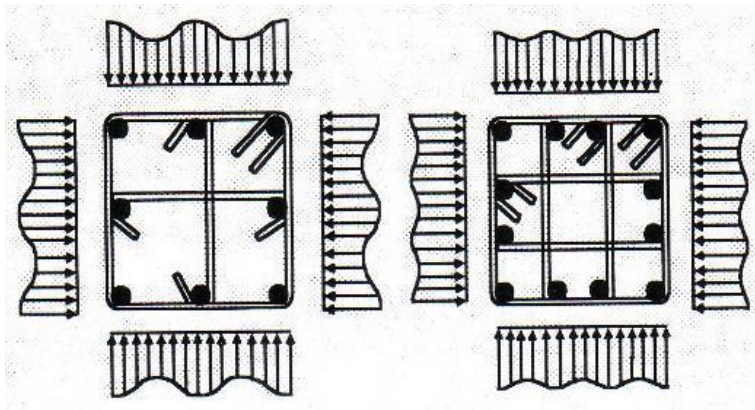
Materials: Concrete



- Confined Concrete Show Significant Ductility

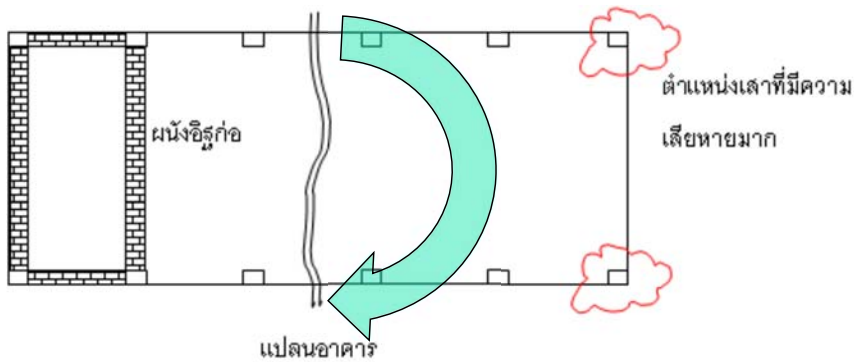
- Design of Ductile RC Buildings Rely on Confinement as a Key to Ductility

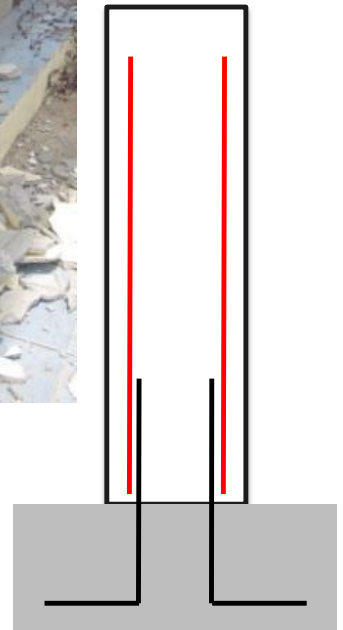
Materials: Concrete

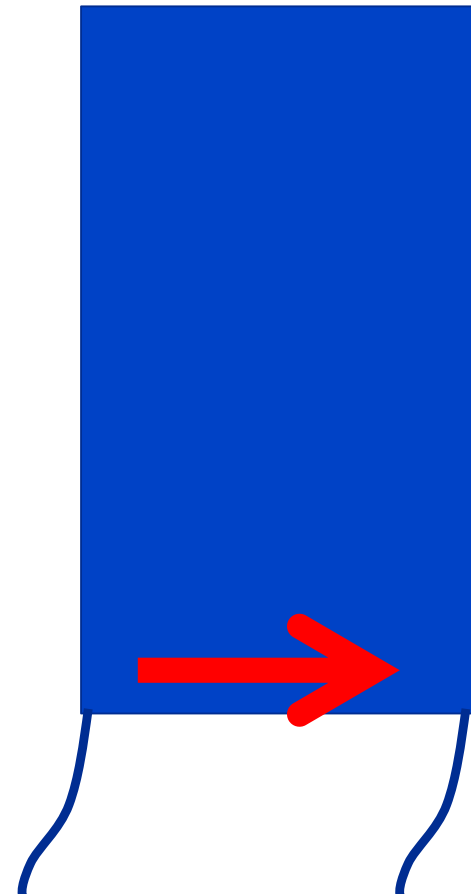
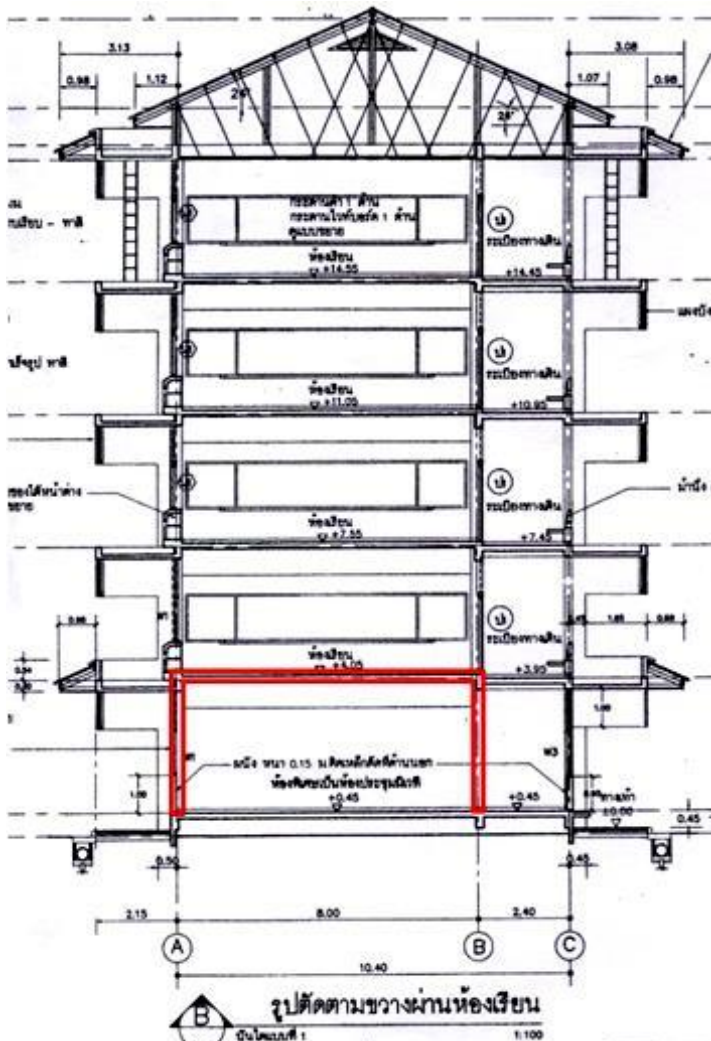
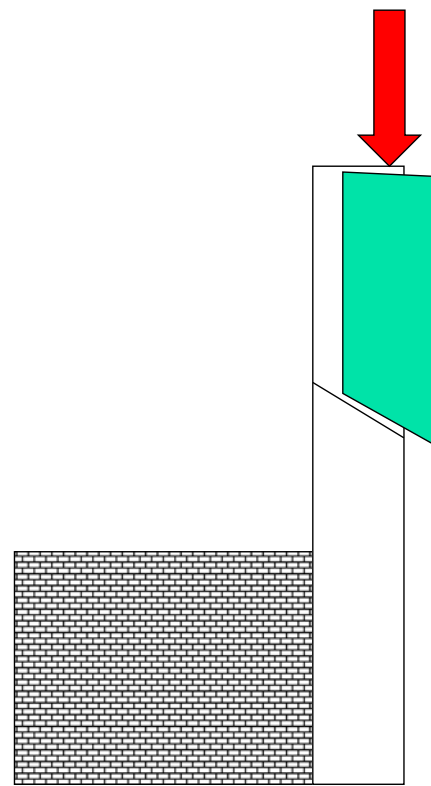


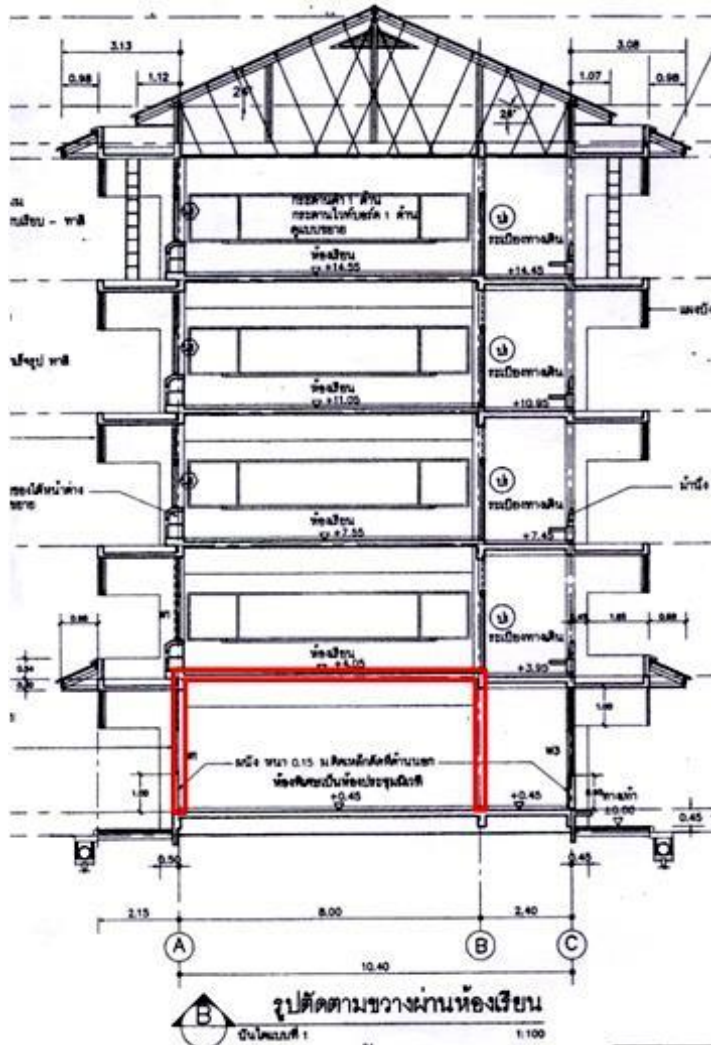
- Confined Concrete Show Significant Ductility

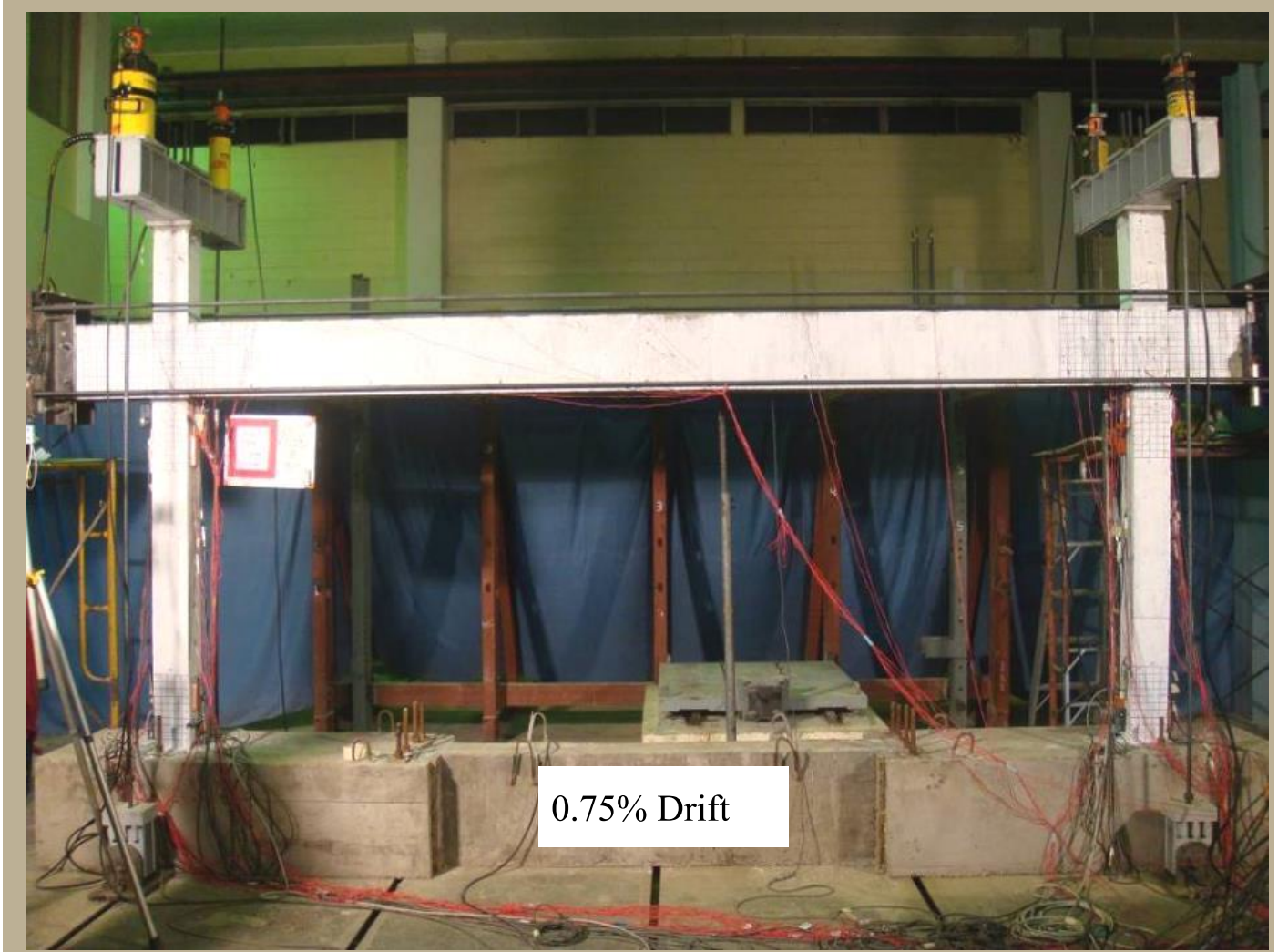
- Design of Ductile RC Buildings Rely on Confinement as a Key to Ductility

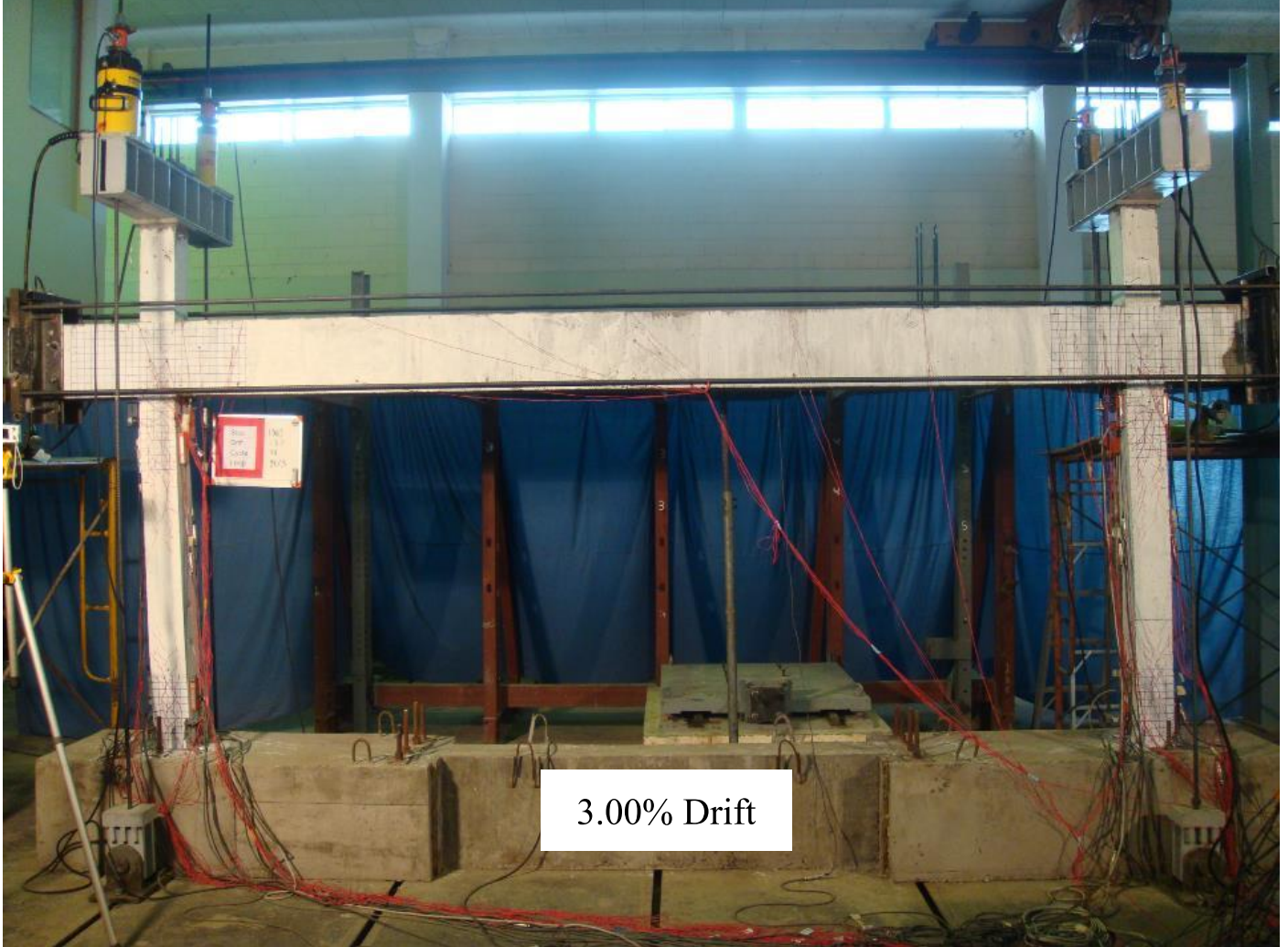


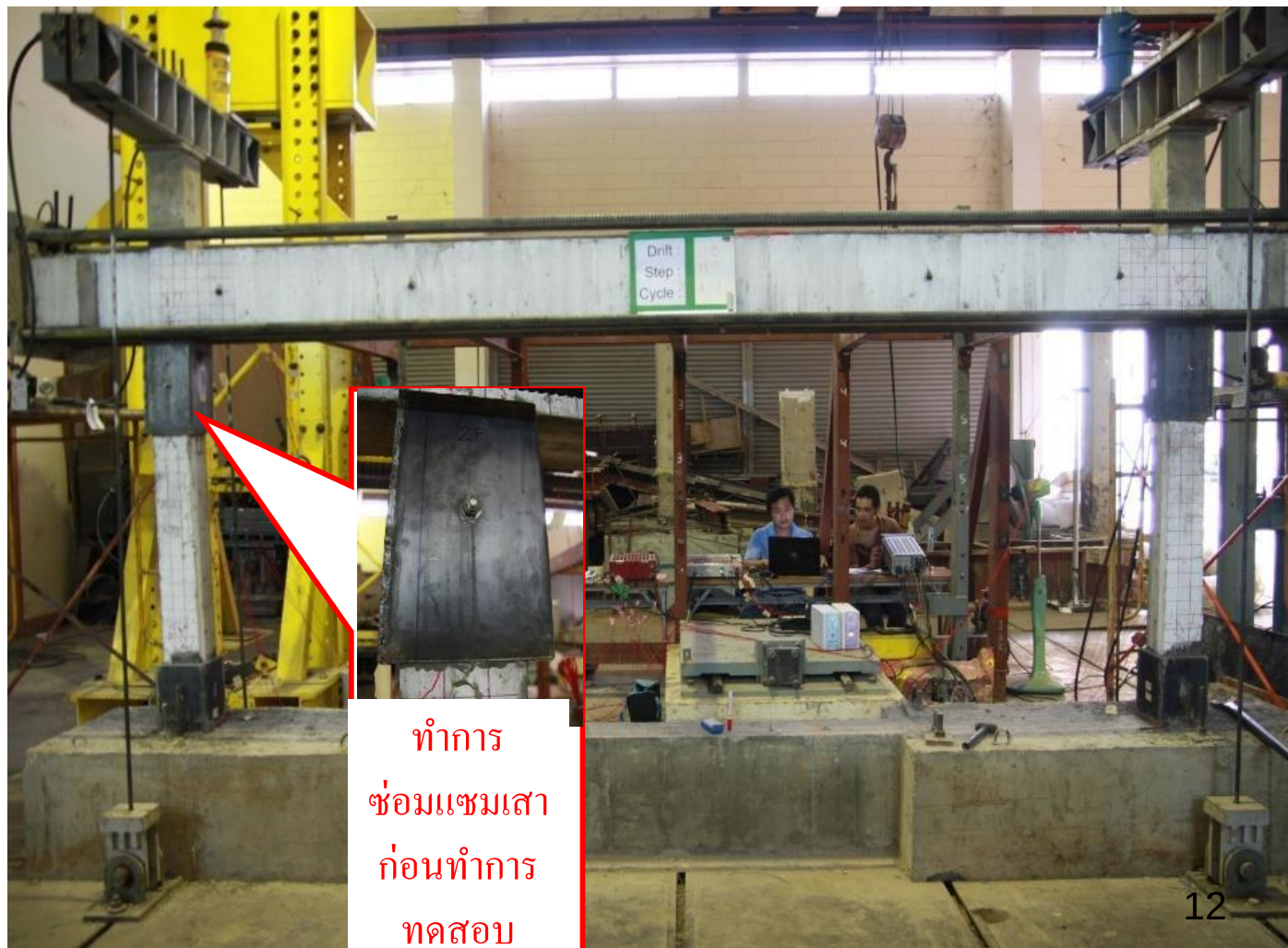
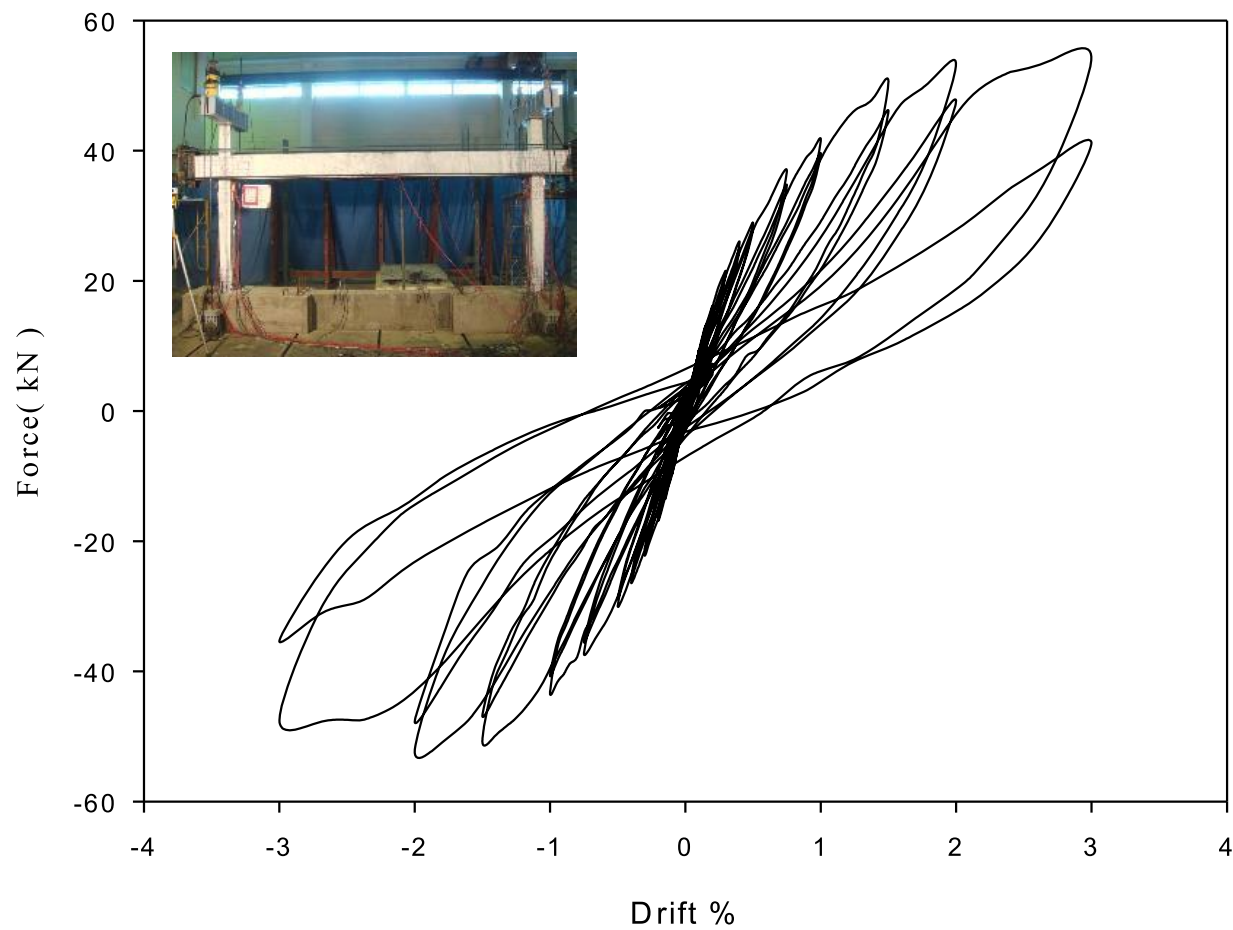


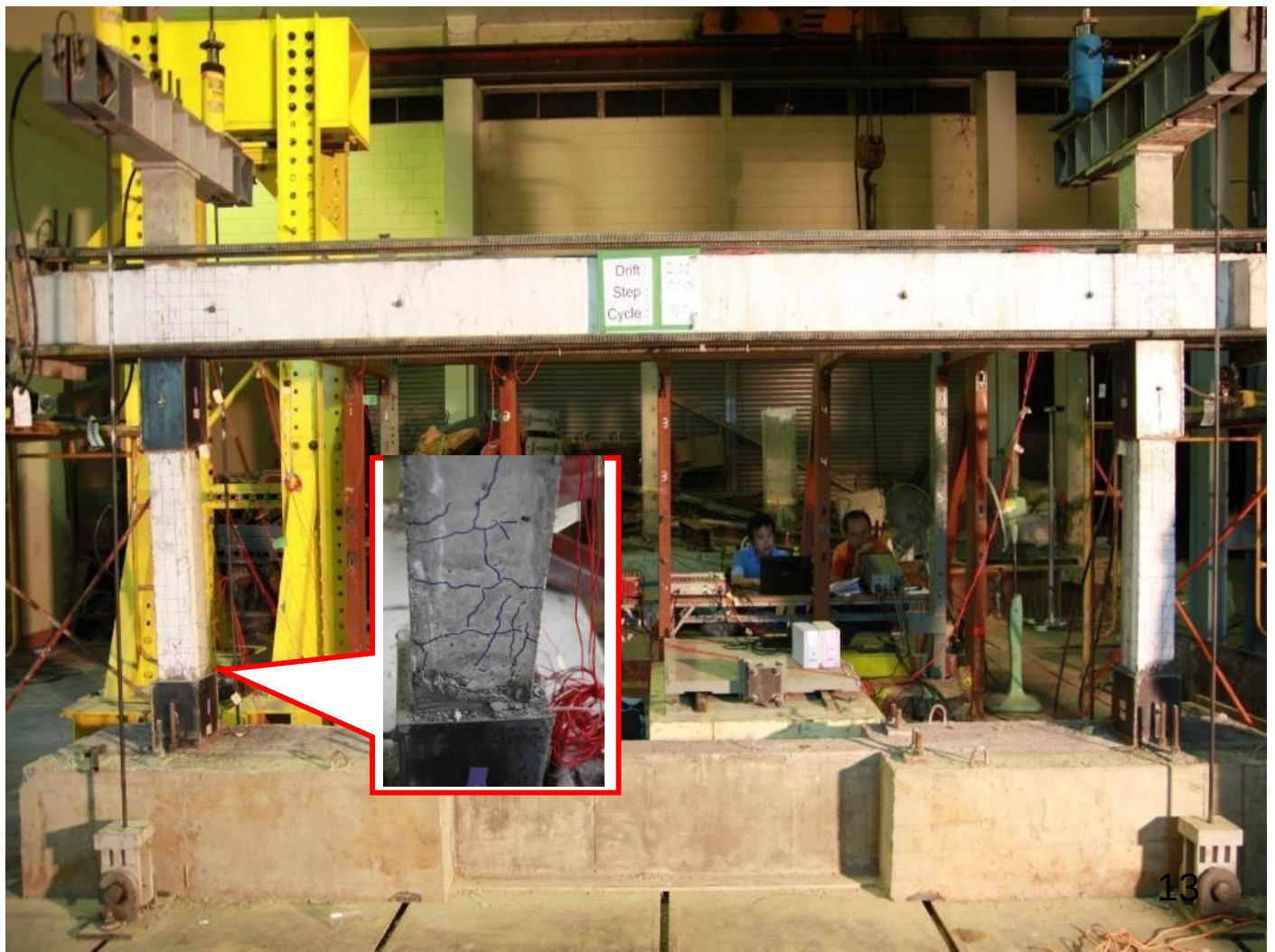
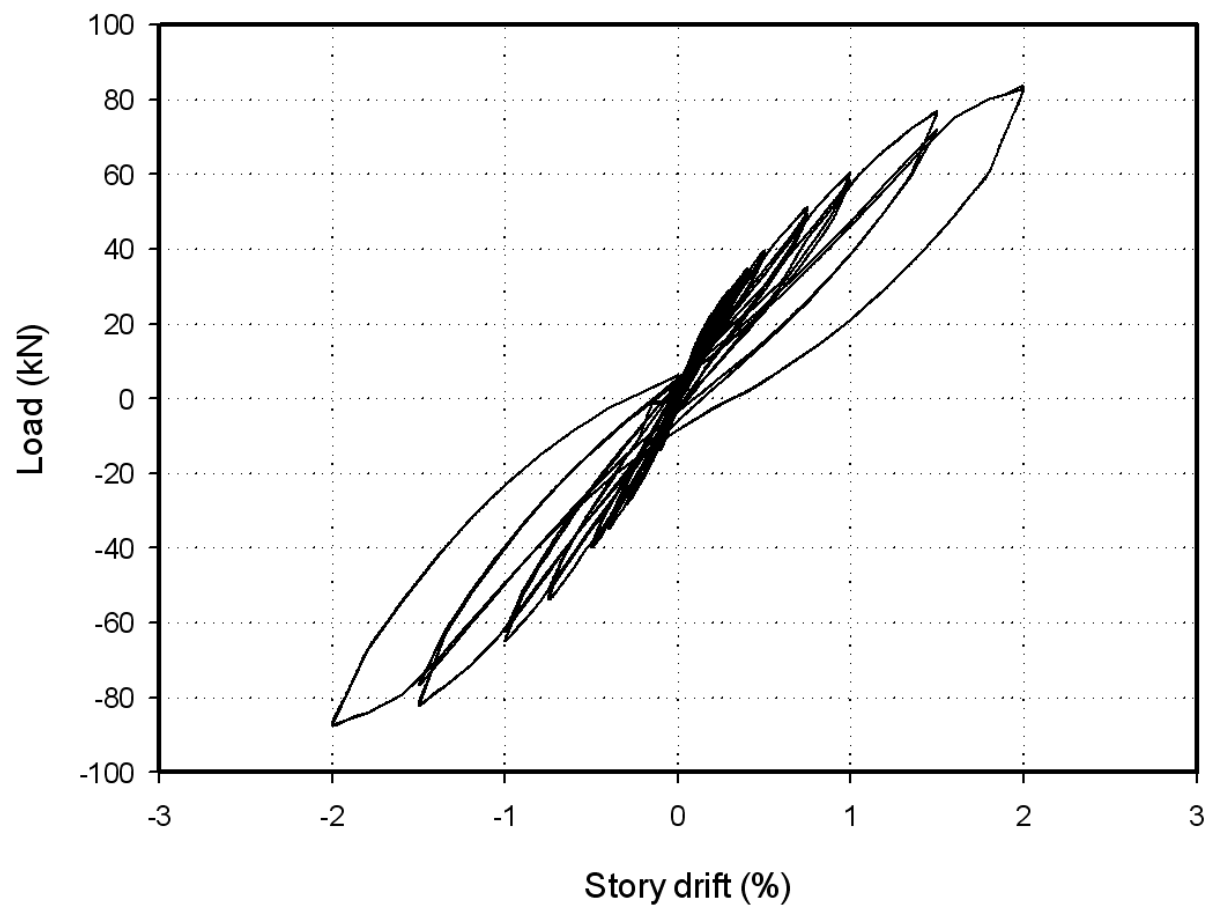




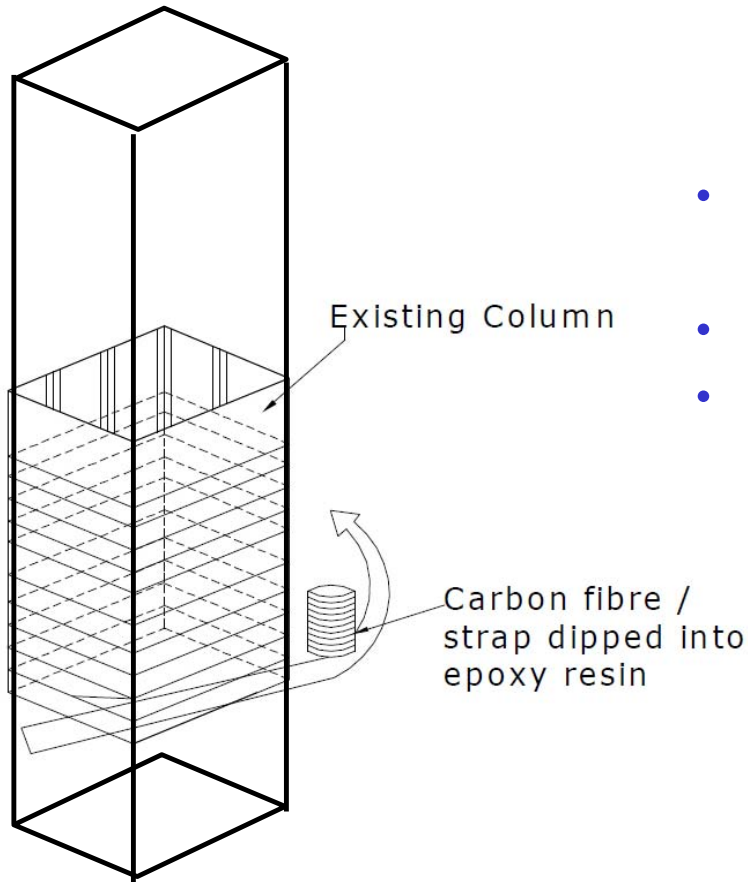






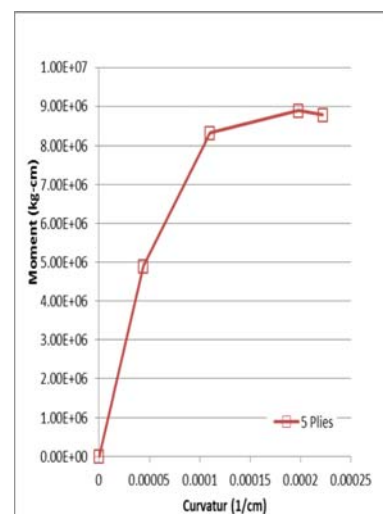
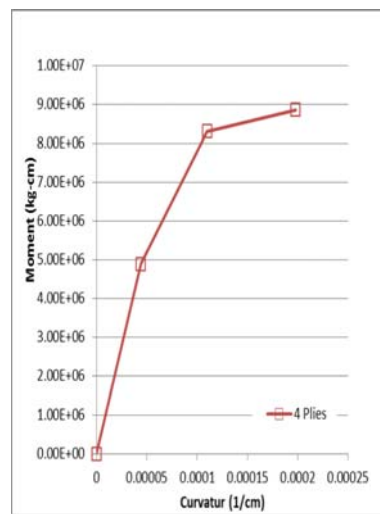
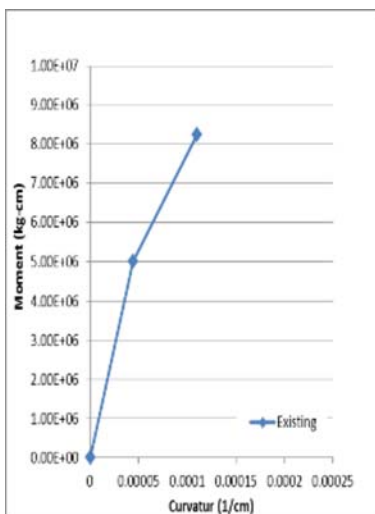


การเสริมกำลังเฉพาะที่ด้วยวัสดุ composite



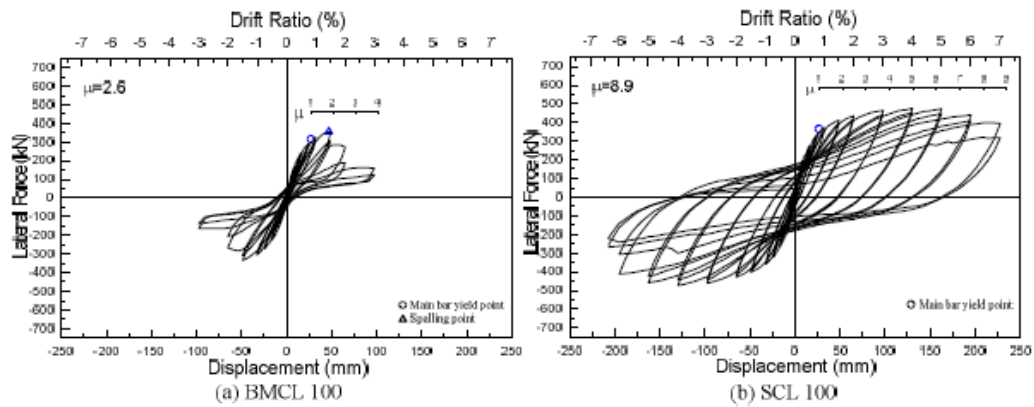
- **High Strength & Stiffness Material**
- **Light Weight**
- **Minimal Disruption**

ตัวอย่างผลการเสริมกำลังเสาขนาด 0.5X0.5 (25DB25) ก่อนและหลังการโอบรัดด้วย FRP

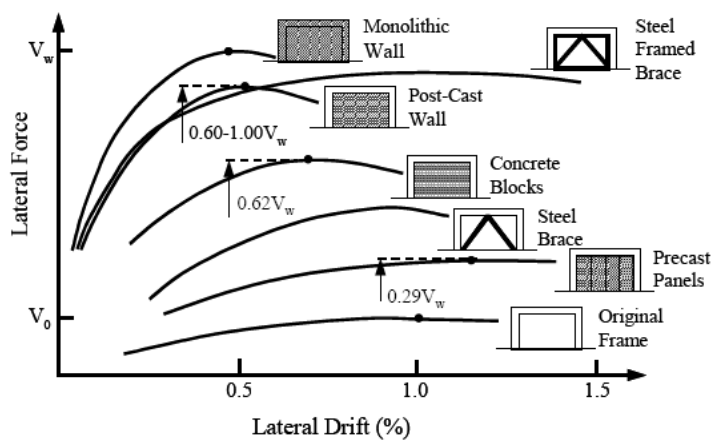


Strengthening Applications

□ Steel Jacket



การเสริมกำลังของอาคารโดยรวม



Kitamura et al. (2004)





(FOEN 2008)

การเสริมกำลังของอาคารโดยใช้ผนังรับแรงเฉือน



New A-shaped steel frame on the west facade and new reinforced concrete structural wall on the north facade of the assembly shop.



New reinforced concrete structural wall from the inside of the east facade of the assembly shop.

(FOEN 2008) 7



New eccentric steel framework constructed between two existing reinforced concrete columns.



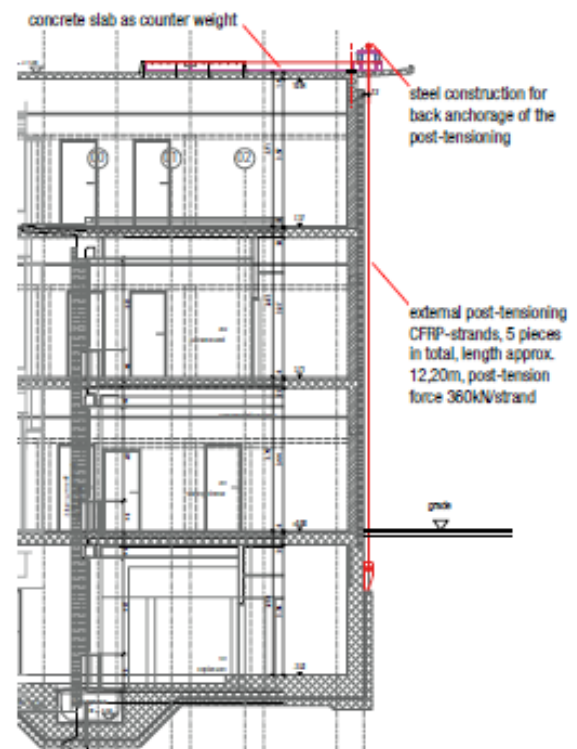
New eccentric steel framework with a column disguise.

(FOEN 2008)

การเสริมกำลังของอาคารโดยรวม



การเสริมกำลังของอาคารโดยรวม



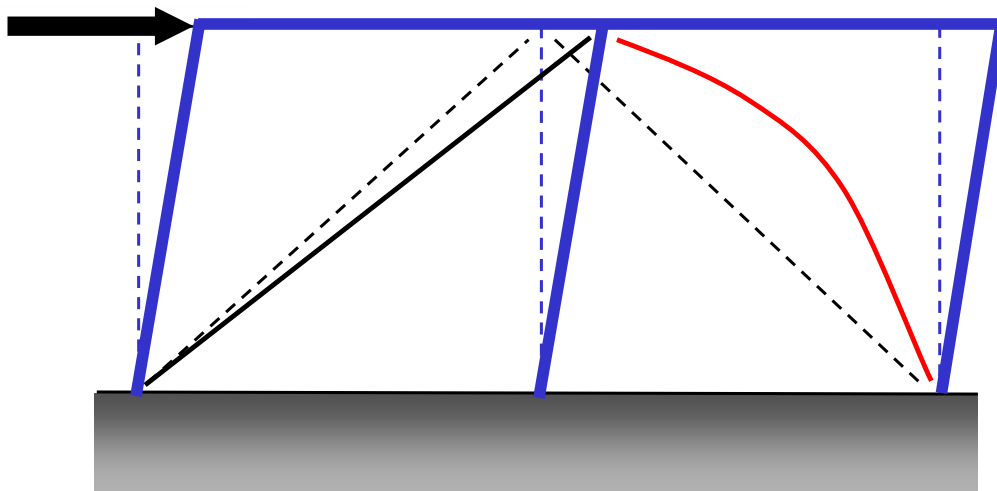
Longitudinal cut through the northern end facade with external carbon fiber tension rod.

การเสริมกำลังด้วย Steel Bracing



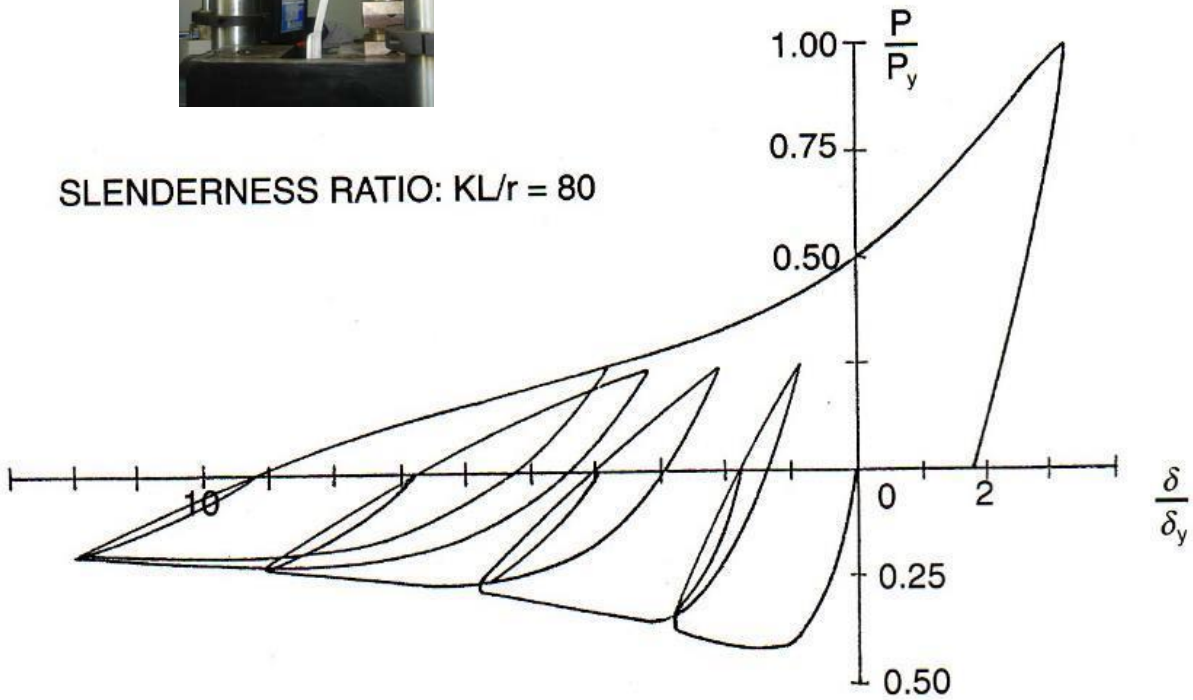
พฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling)

Earthquake Force



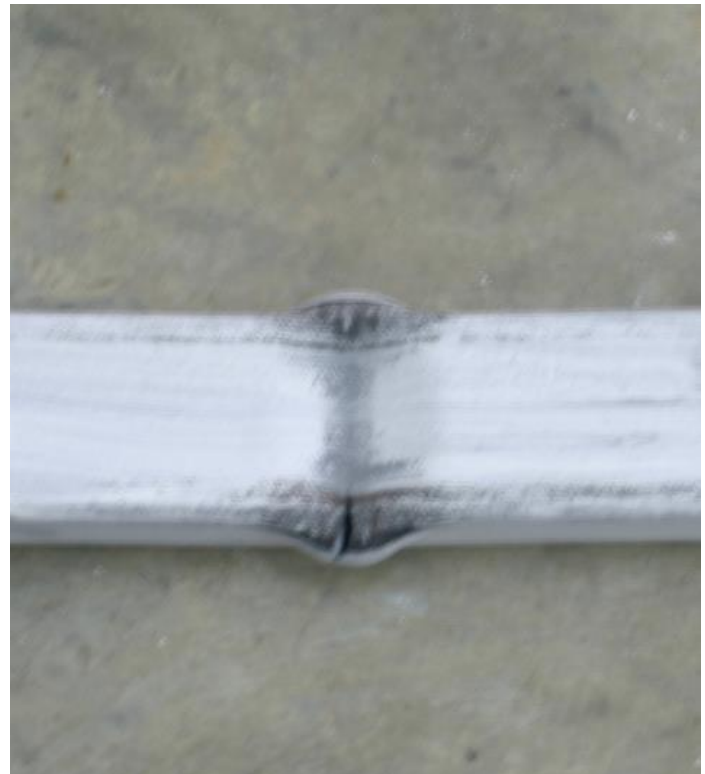


SLENDERNESS RATIO: $KL/r = 80$



Failure of Braced Member

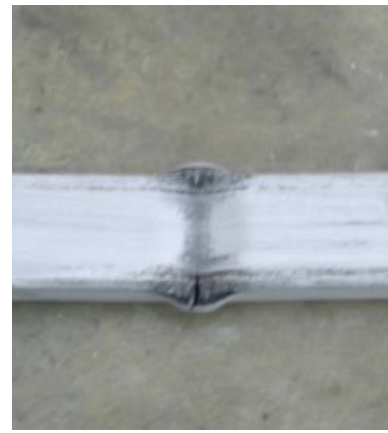
Local Buckling



Factor Affecting Behavior

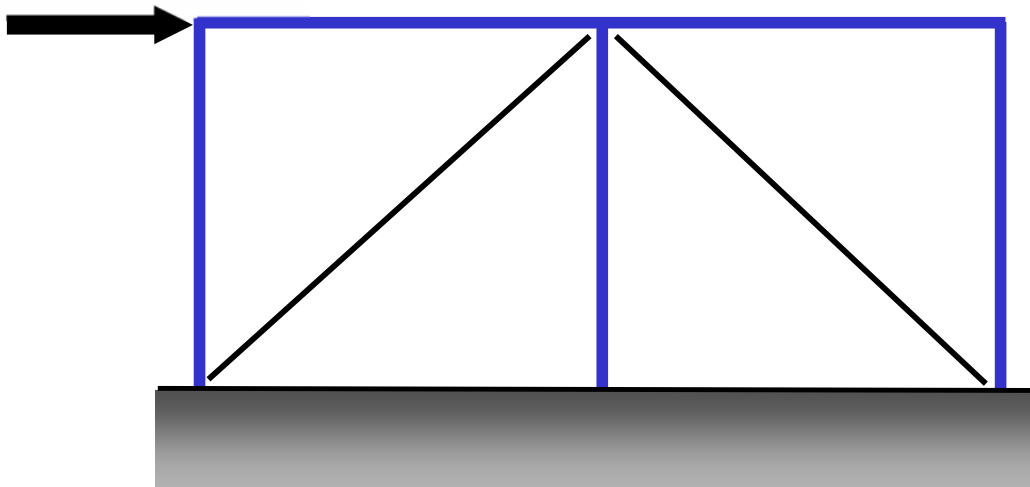
2) Cross Section

- Square Section
 - Circular Section
 - Single Angle
 - Double Angle
-
- Closed sections are better than open sections
 - Section must be compact



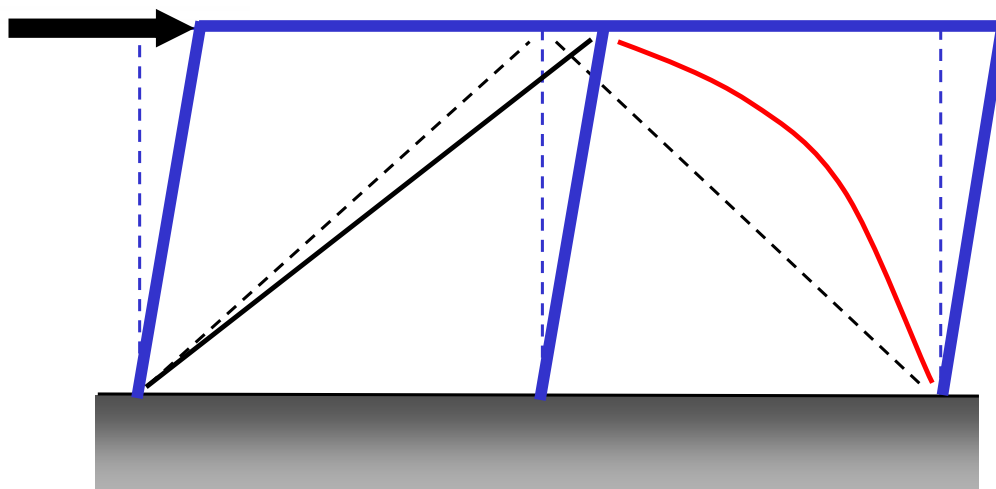
การโก่งเดาะ (Buckling)

Earthquake Force



การโก่งเดาะ (Buckling)

Earthquake Force



การโก่งเดาะ (Buckling)



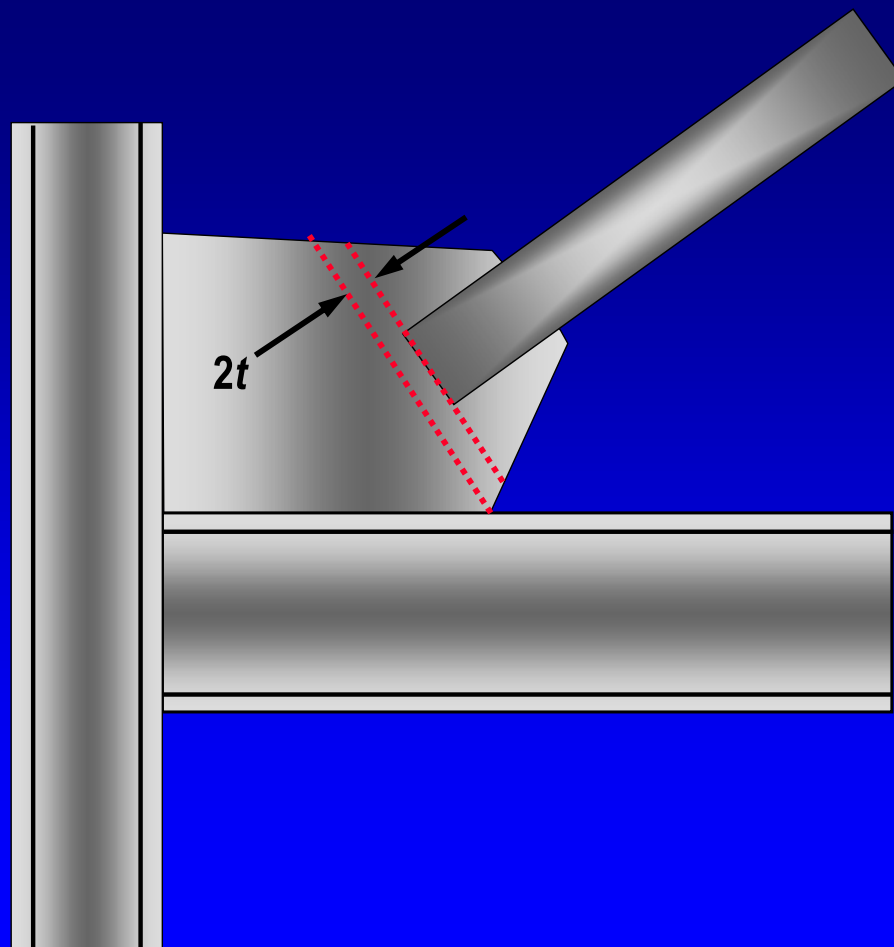
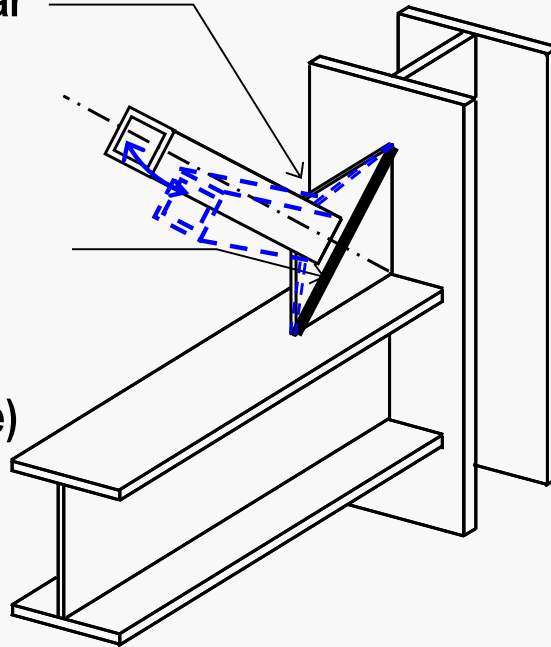
Source: AISC

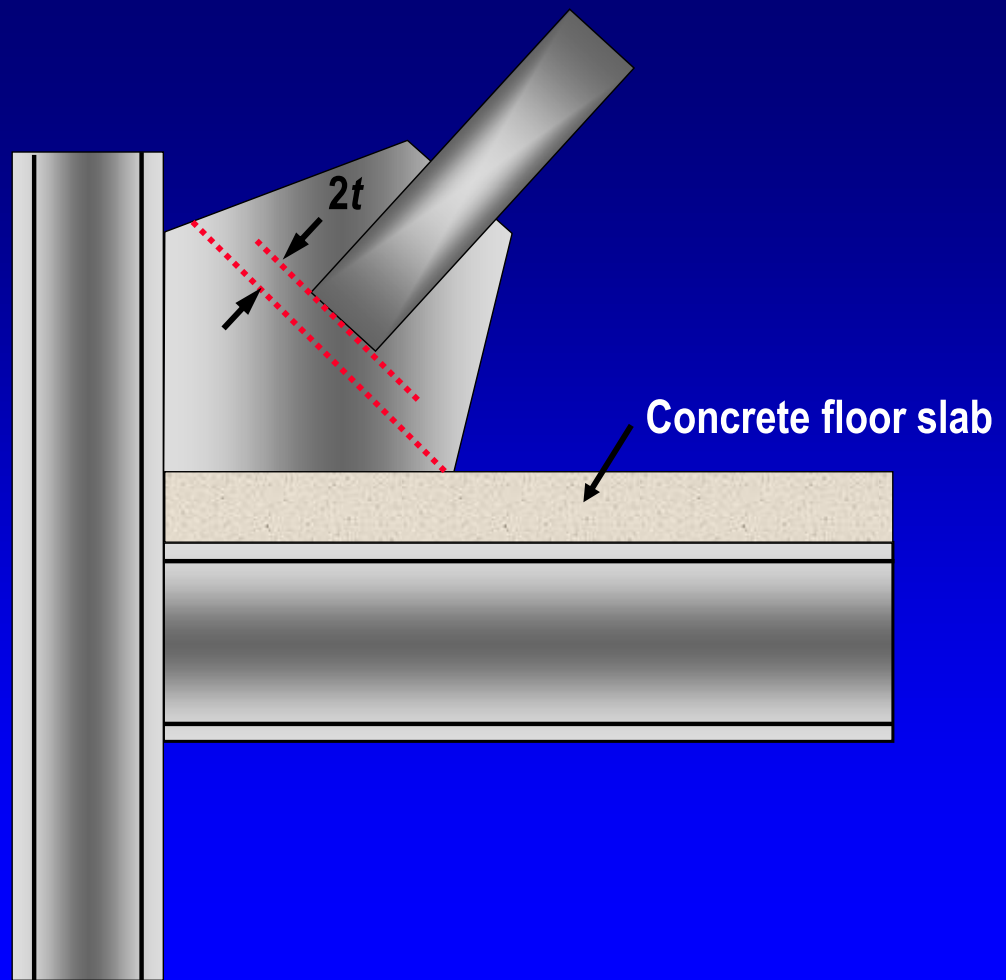


To accommodate brace end rotation: provide "fold line"

Buckling perpendicular
to gusset plate

Line of rotation ("fold
line") when the brace
buckles out-of-plane
(thin direction of plate)

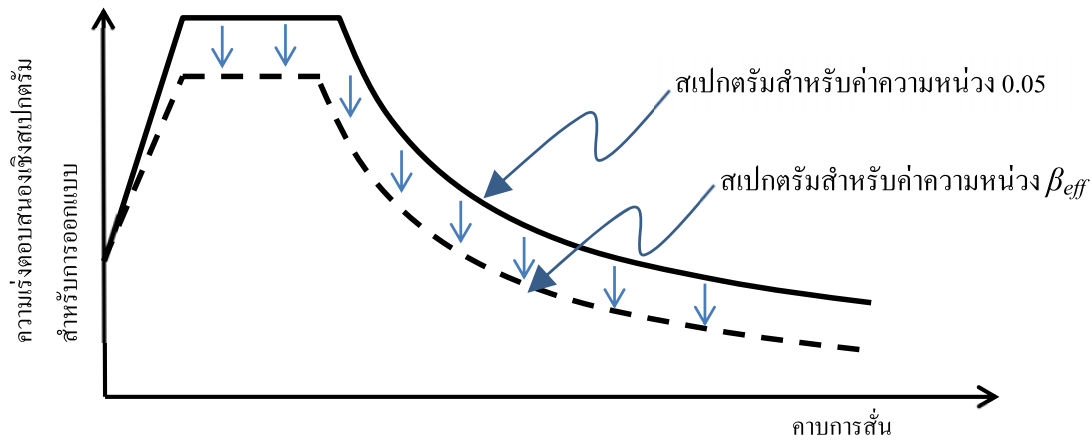




การเสริมกำลังเฉพาะที่รูปแบบอื่นๆ

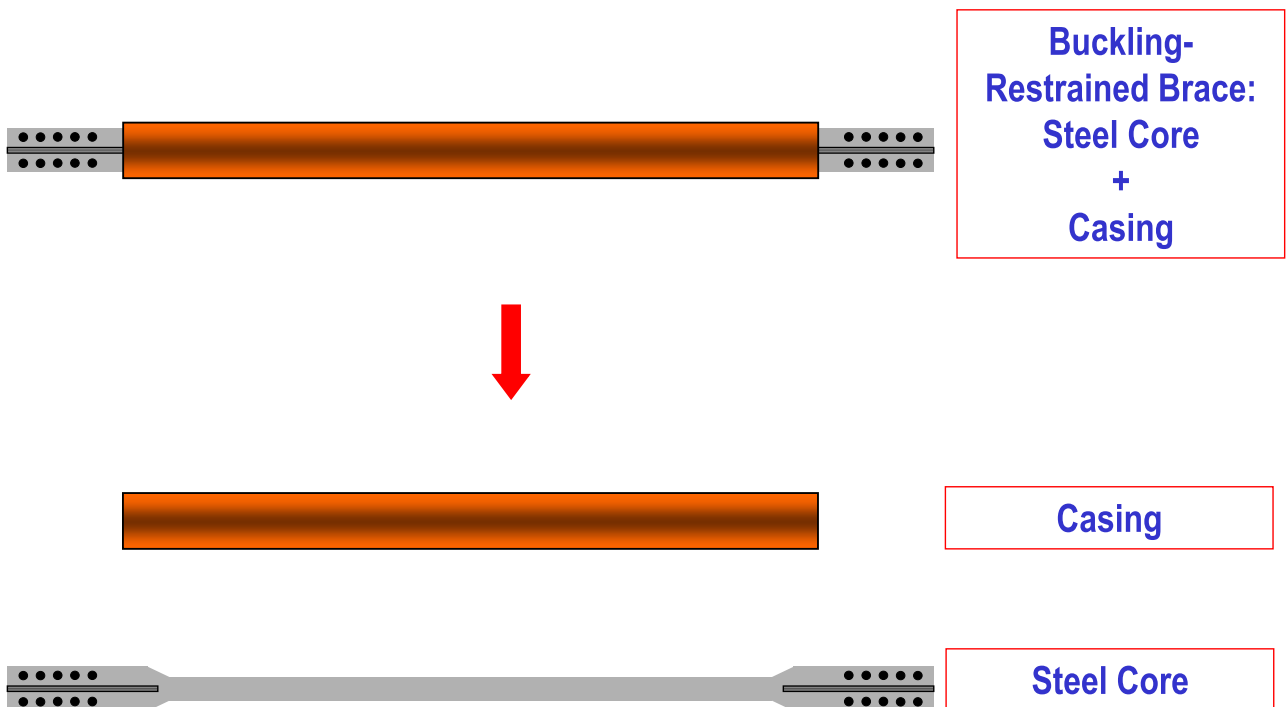


แนวคิดการใช้อุปกรณ์สลายพลังงาน



รูปที่ 2 การปรับลดค่าสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบ โดยใช้อัตราส่วนความหน่วงประสิทธิภาพ

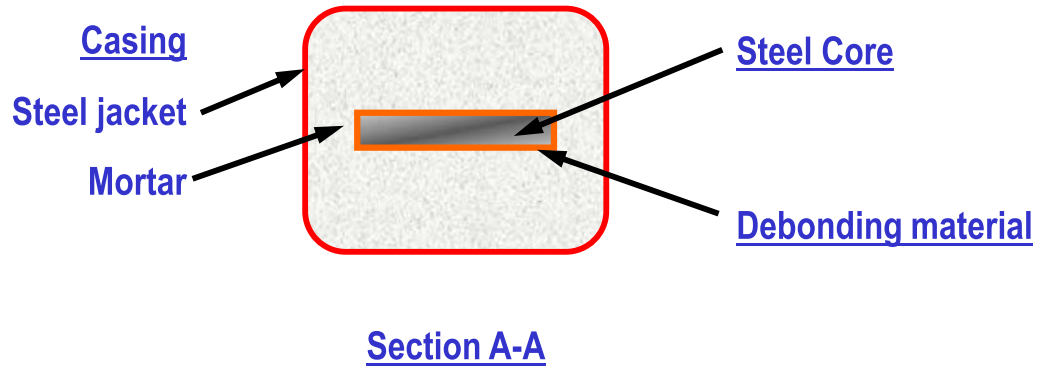
Concept of Buckling-Restrained Brace (Wada et al. 1998)



Concept of Buckling-Restrained Brace (Wada et al. 1998)



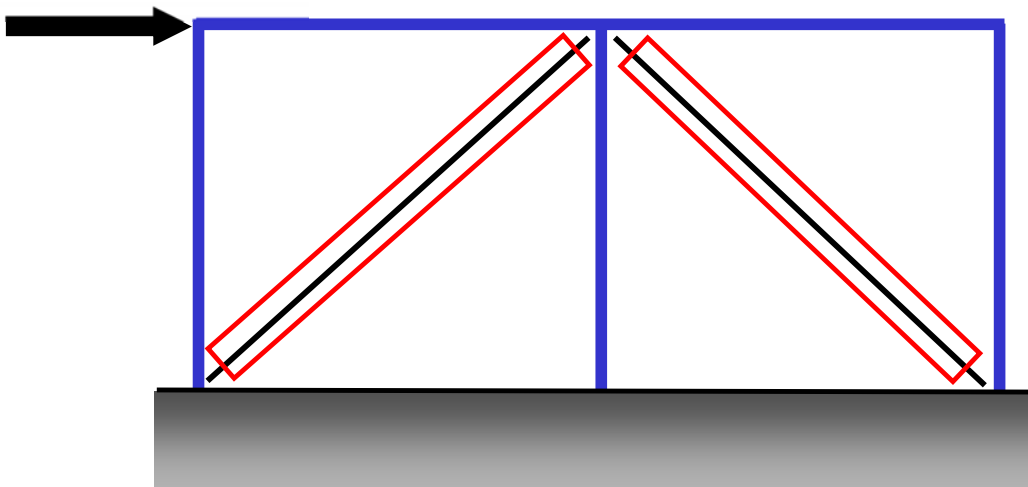
Buckling-
Restrained Brace:
Steel Core
+
Casing



Source: AISC

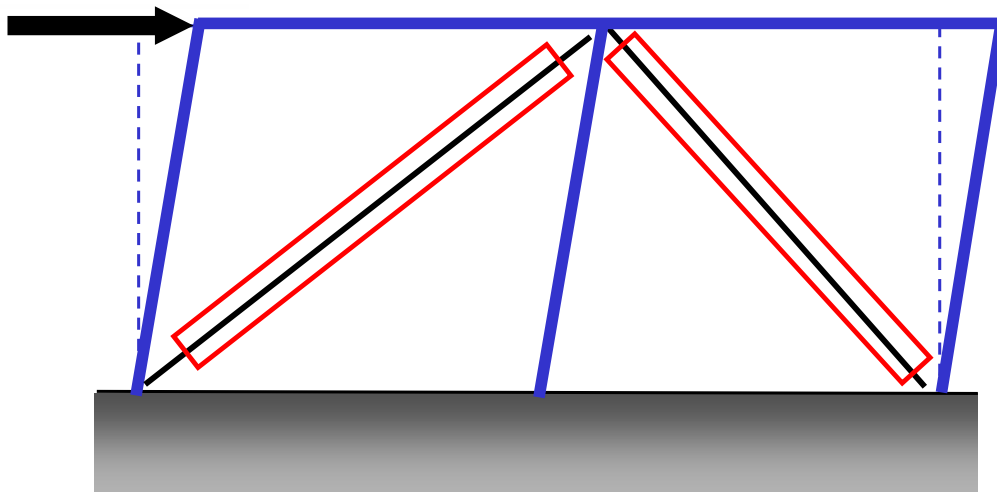
BRB Frame

Earthquake Force



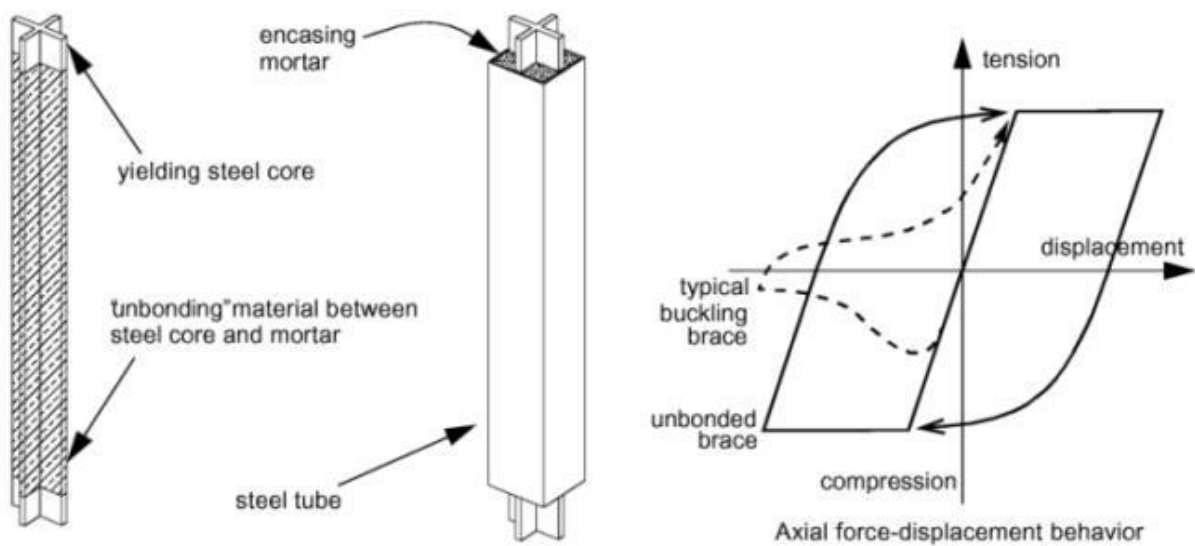
BRB Frame

Earthquake Force



การเสริมกำลังอาคาร ด้วยค้ำยันที่มีการป้องกันการโก่งเดาะ

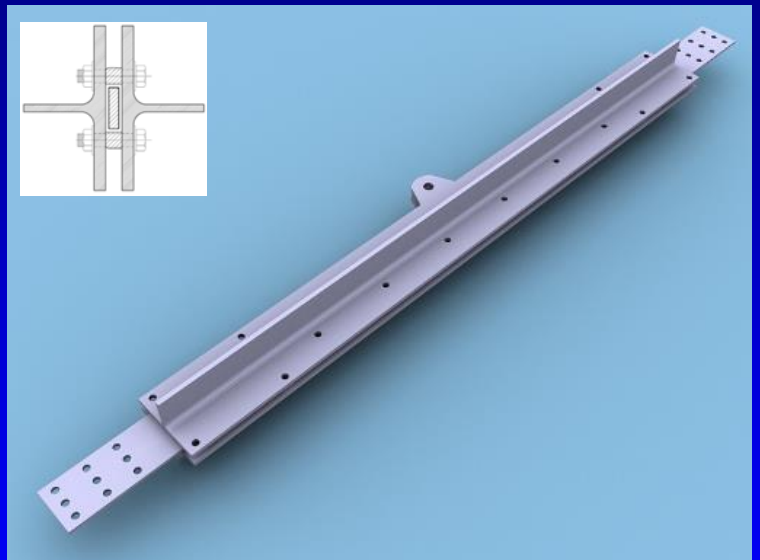
□ Buckling Restraint Brace





การเสริมกำลังของอาคารโดยรวม





0.0% DRIFT



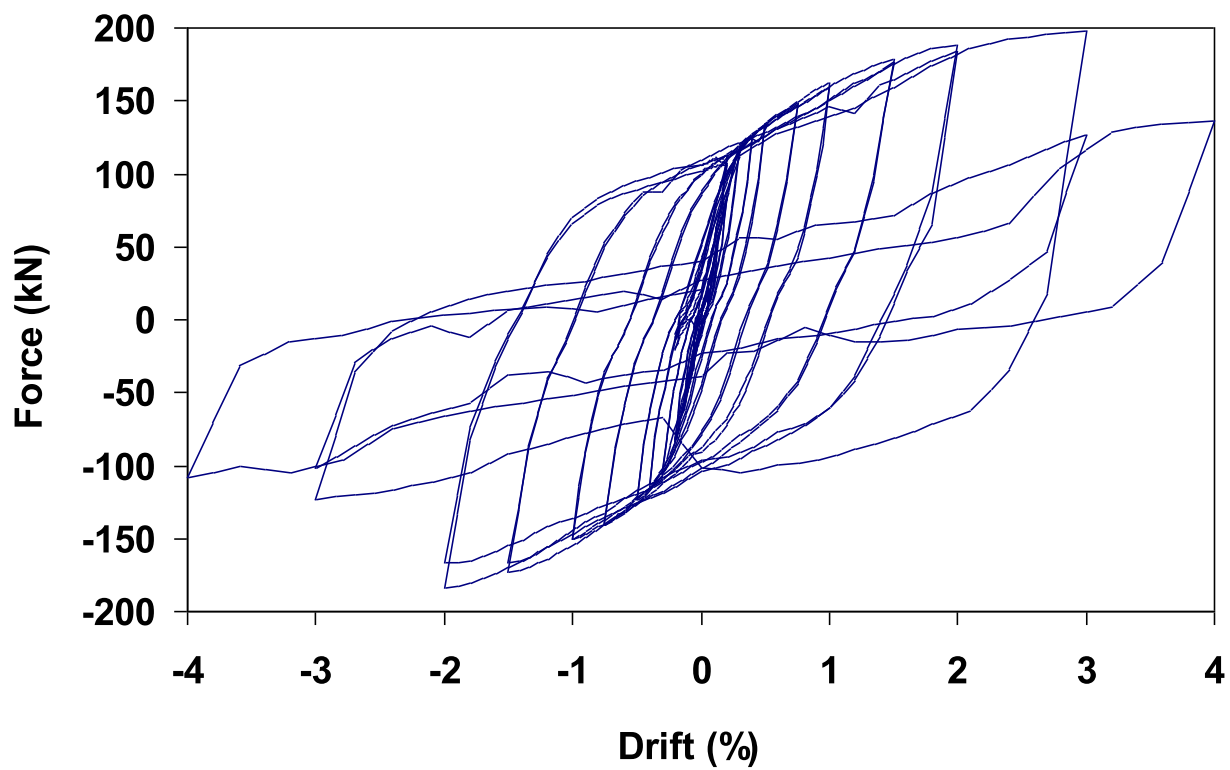
2.0% DRIFT



4.0% DRIFT



BRB-RC Frame

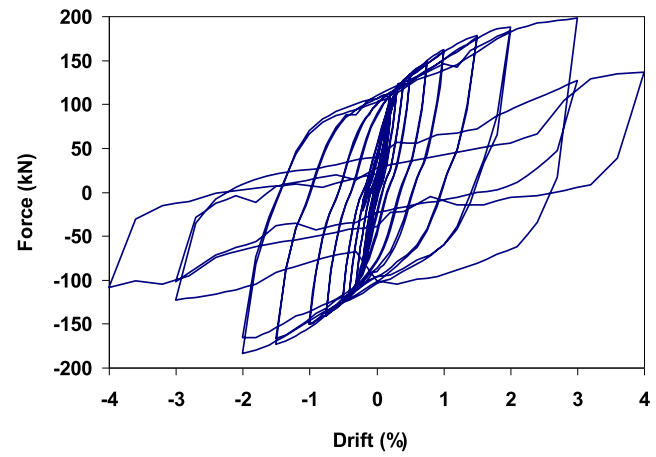
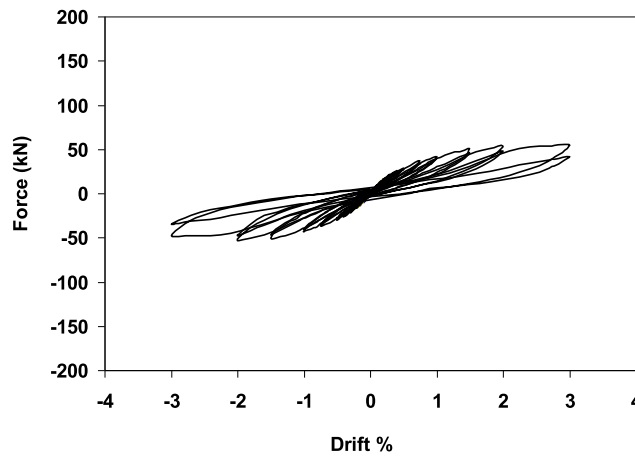




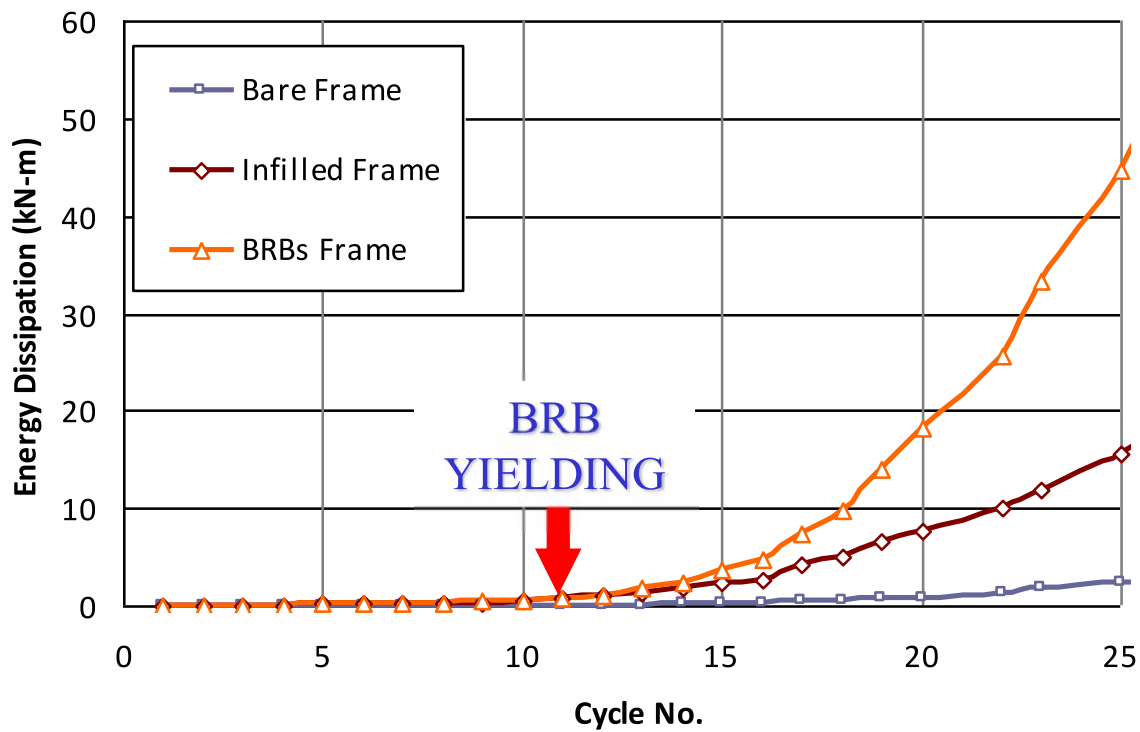
Bare Frame



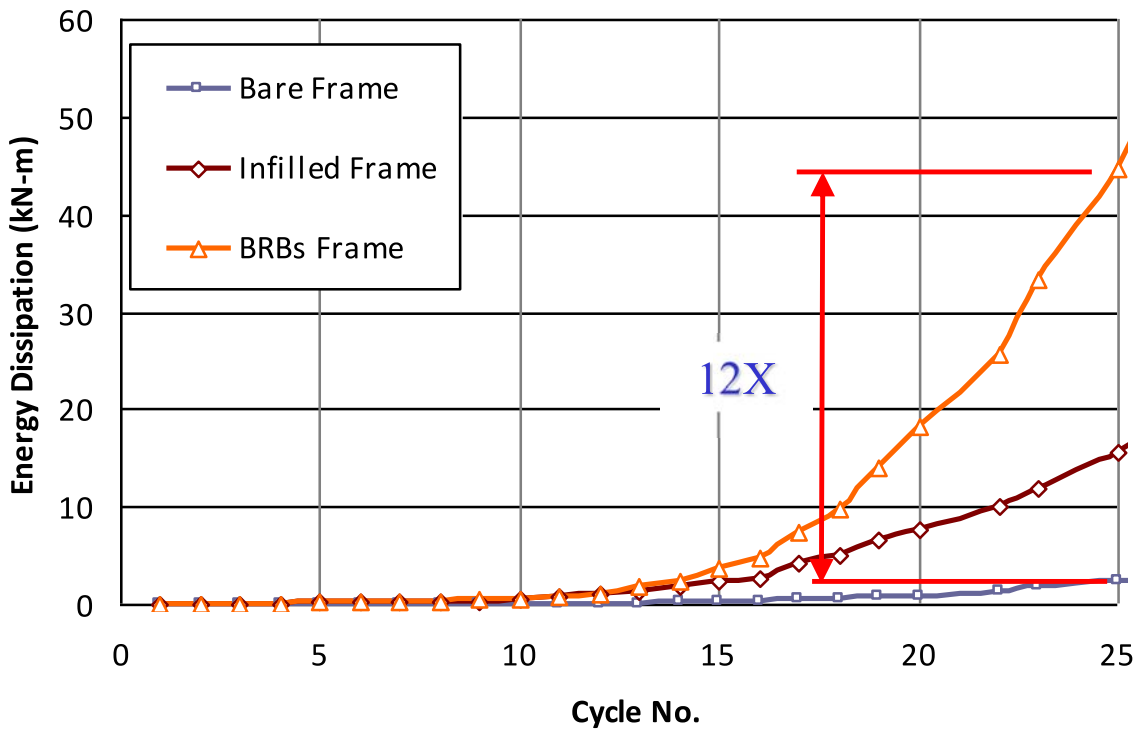
BRB-RC Frame



ENERGY DISSIPATION



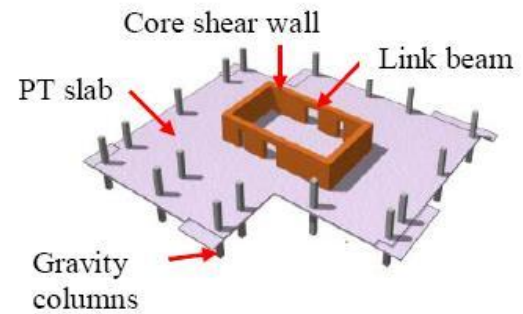
ENERGY DISSIPATION



Seismic Retrofitting of PT Slab



- PT Slabs Are Used as Gravity Load Resisting Systems in Combination with RC Core Wall
- Slabs Are Excluded in the Analysis for Lateral Loads
- Frequently used in Thailand as part of Frame-Wall Interaction System

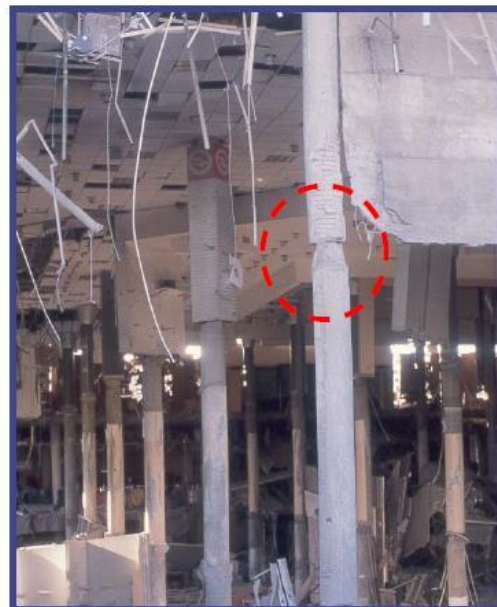
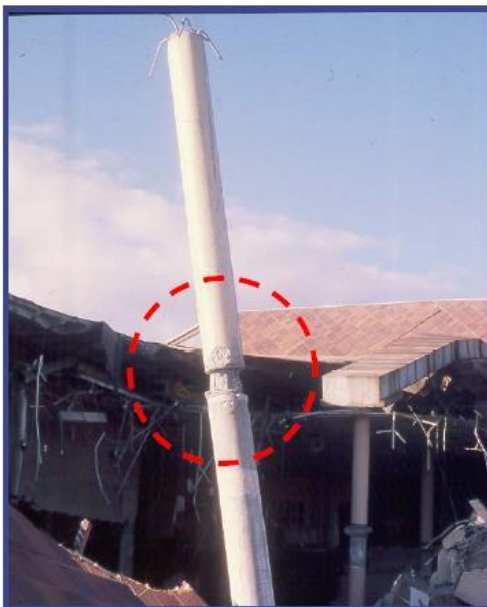


a) Typical isometric view of the floor plan (courtesy of MKA).

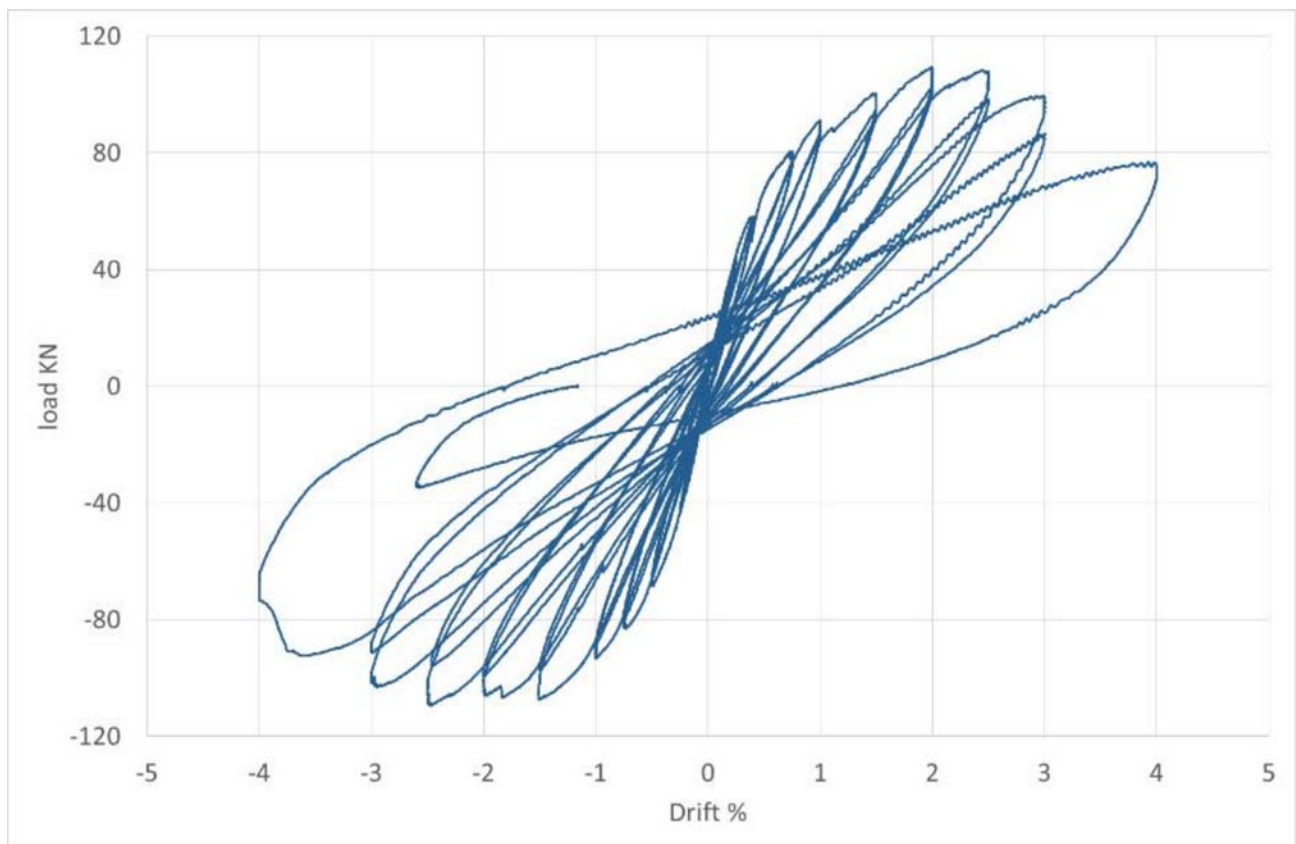
T.Y Yang et al. (2010)

DESIGN OF SLAB-COLUMN FRAME

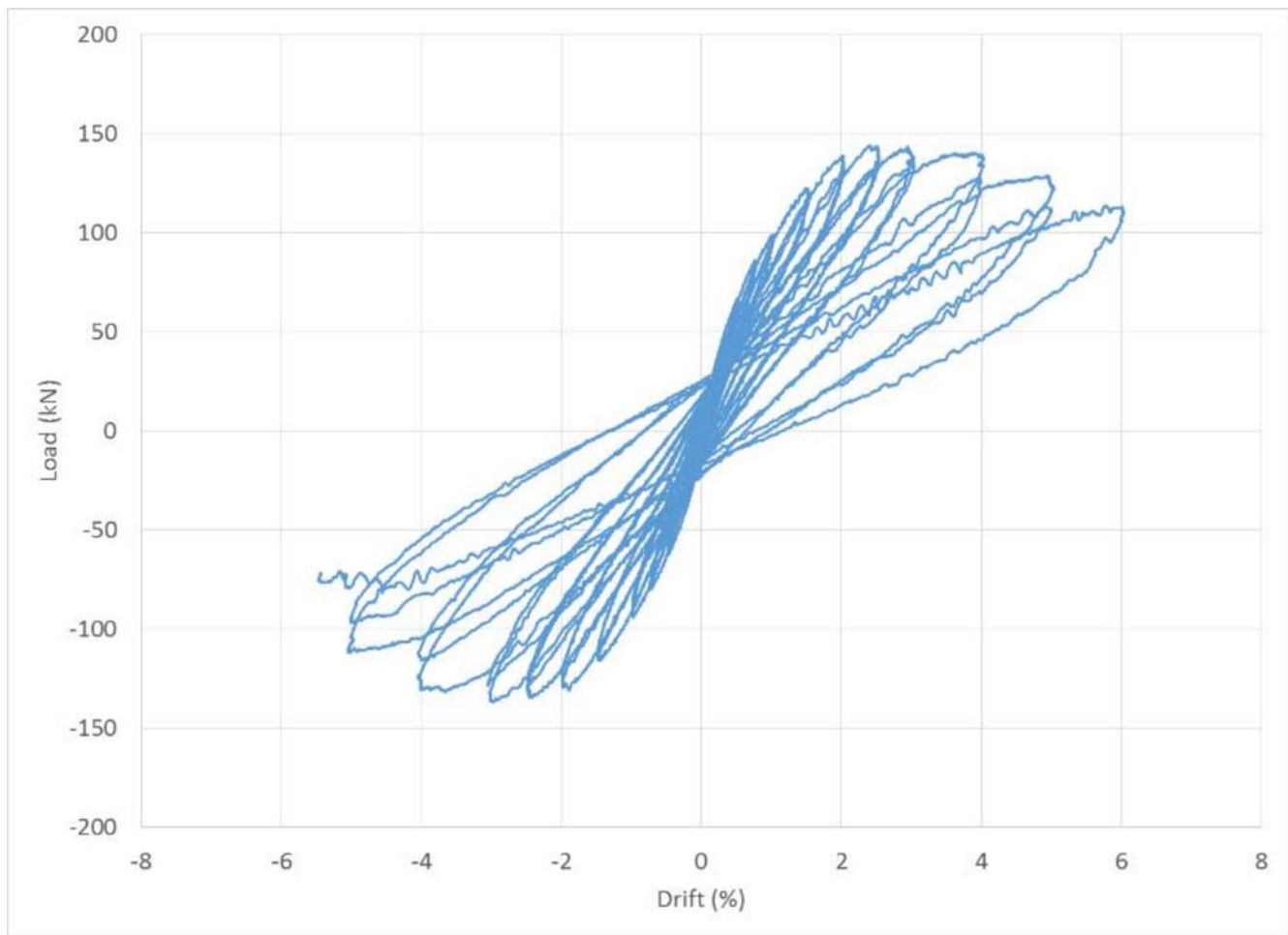
Punching Shear Failure

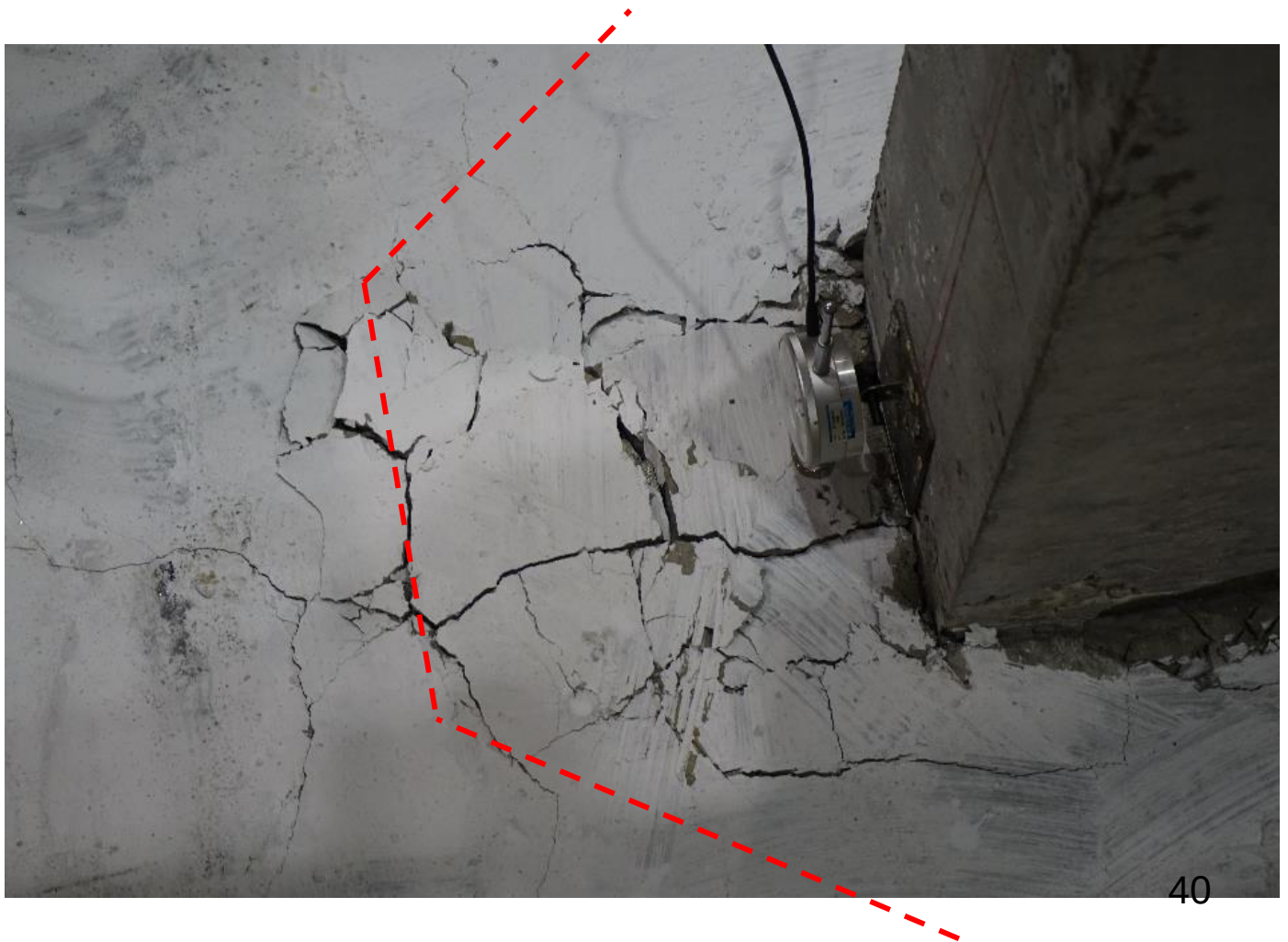
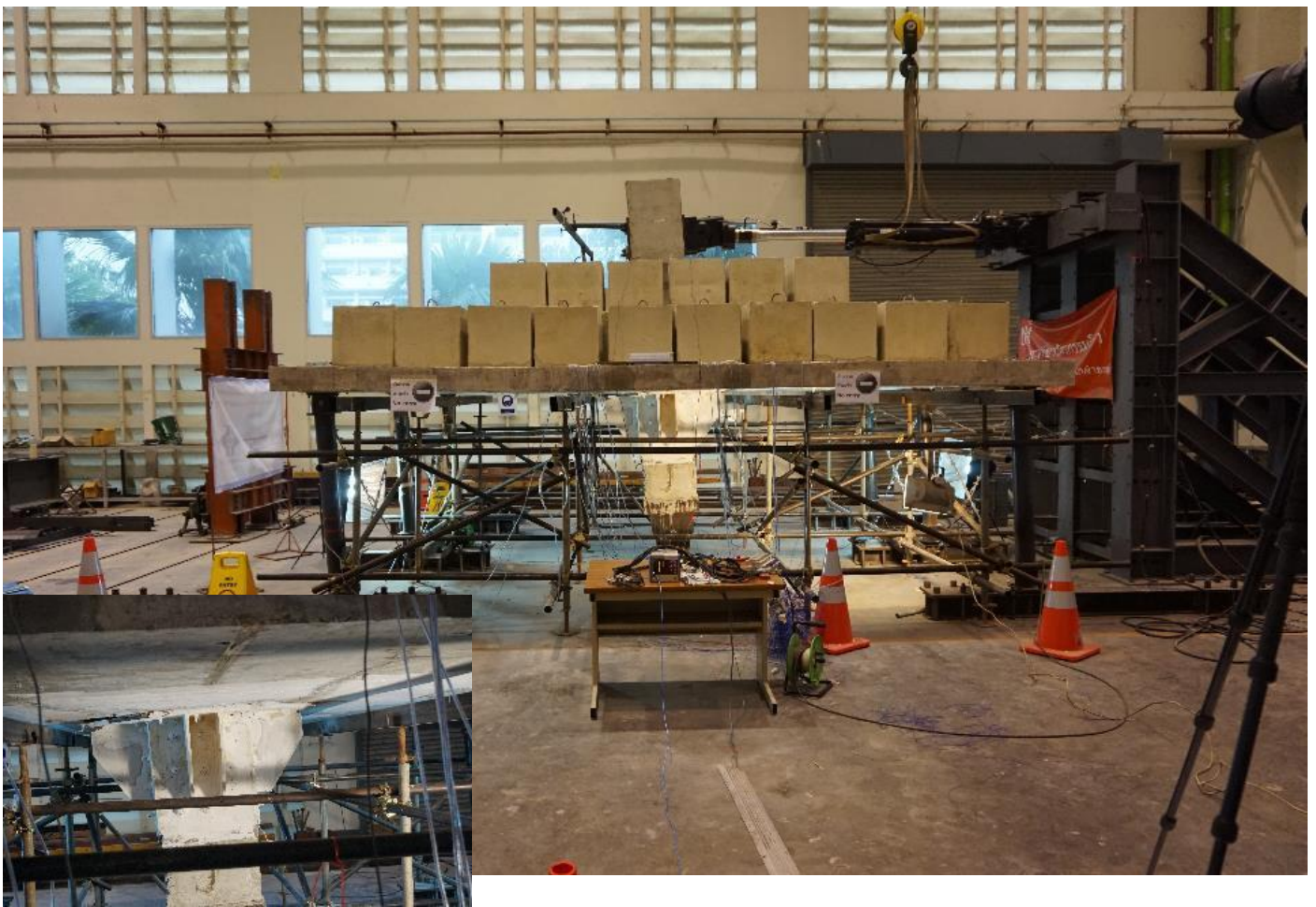


Bullock's Department Store - Northridge Fashion Mall









Tests of Older RC Slab-Column

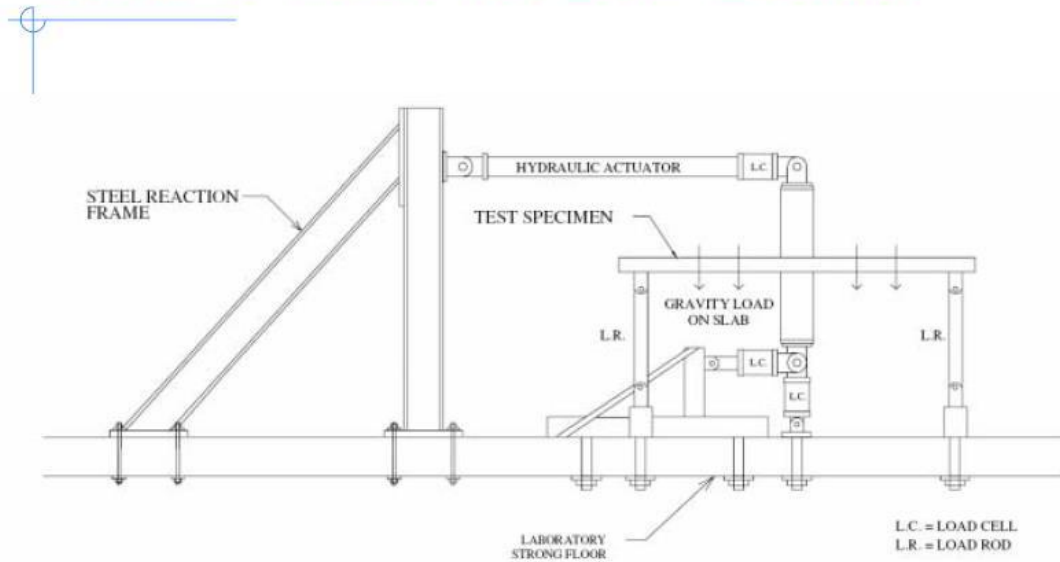
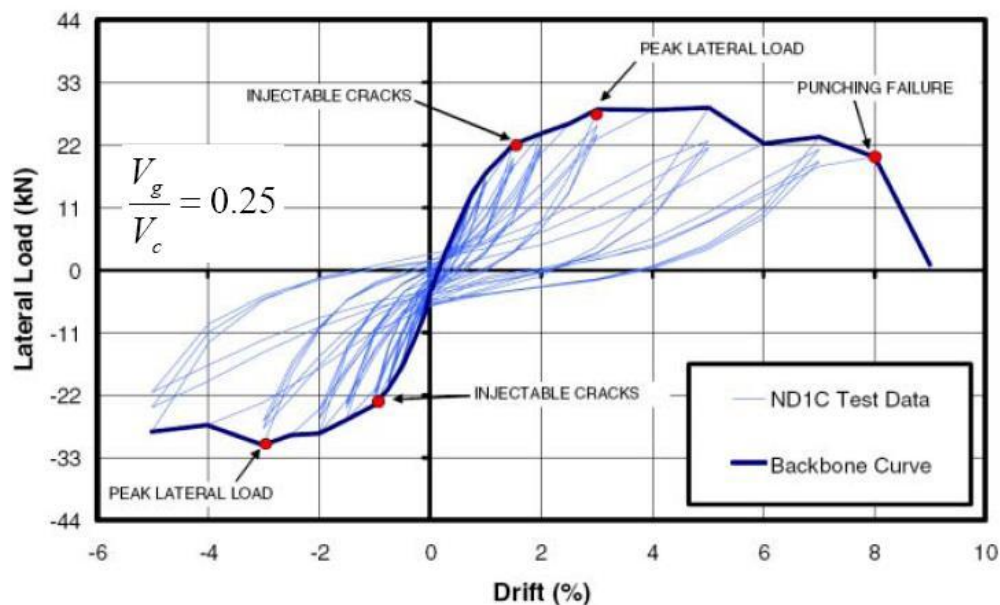


Figure 7-Test Frame Configuration.

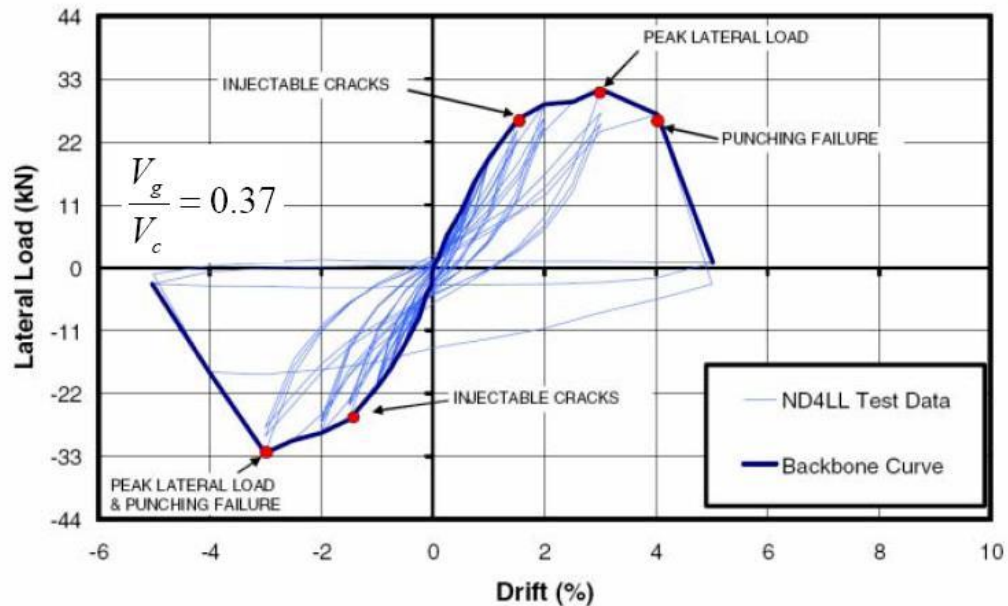
Robertson & Johnson, 13WCEE, August 2004, Paper 143

Test Results – Control Specimen



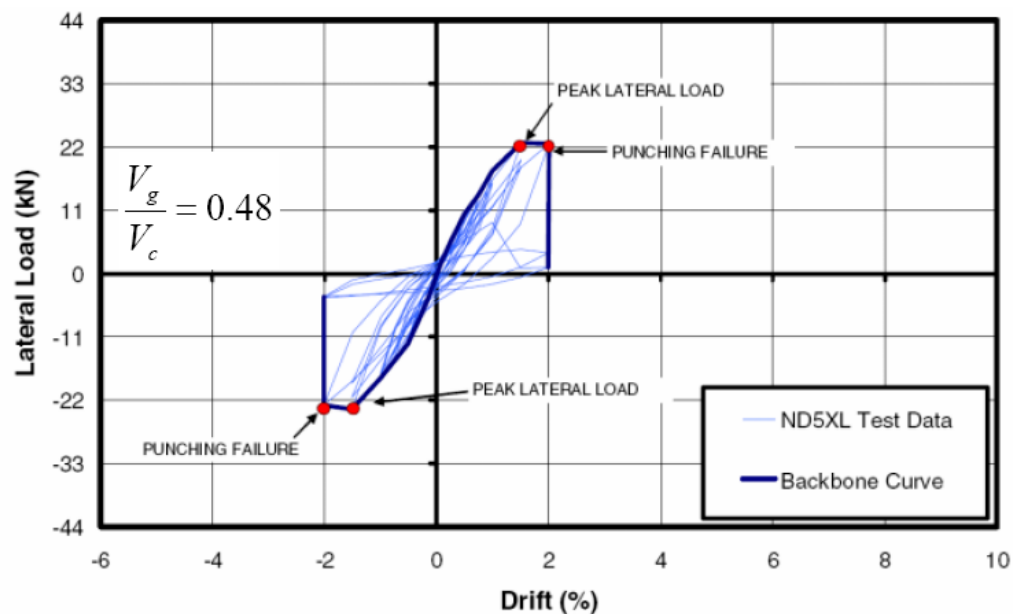
Robertson & Johnson, 13WCEE, August 2004, Paper 143

Test Results



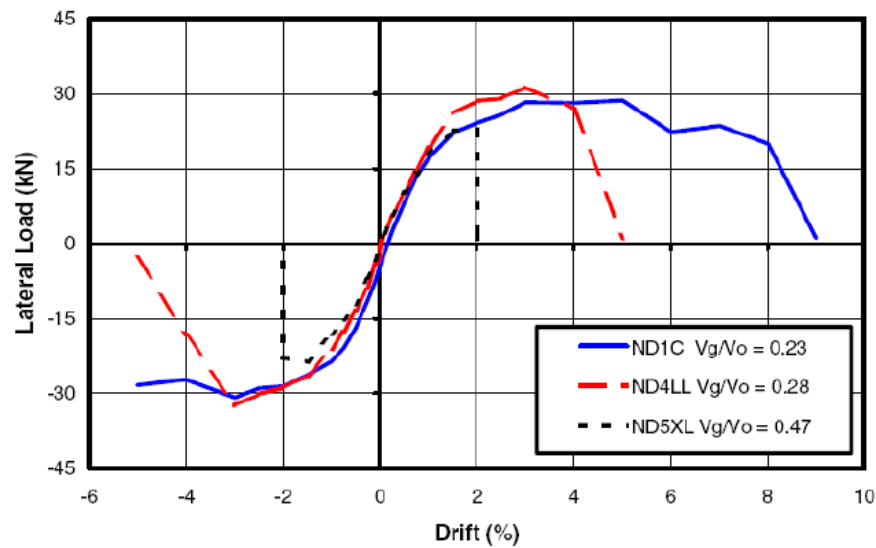
Robertson & Johnson, 13WCEE, August 2004, Paper 143

Test Results



Robertson & Johnson, 13WCEE, August 2004, Paper 143

-



Evaluation Standards

มยพ. 1303-57

มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงทางเชิงแรง

ของโครงสร้างอาคารในเขต

ที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว




$$h_p = 0.08 \left(1 + 0.022 \sqrt{\frac{V_{max}}{N}} \right)$$

$$\mu_p = 1 + \frac{\mu_p - 1}{3 \left(\frac{V_p}{V_u} \right)^{1/3} - 0.5}$$

$$r_{wp} = \mu_{wp} \cdot \phi_{wp} = 0.05$$

$$\phi_p = 0.09 \frac{D_p - V_{wp} - 0.5}{\phi_{wp}}$$

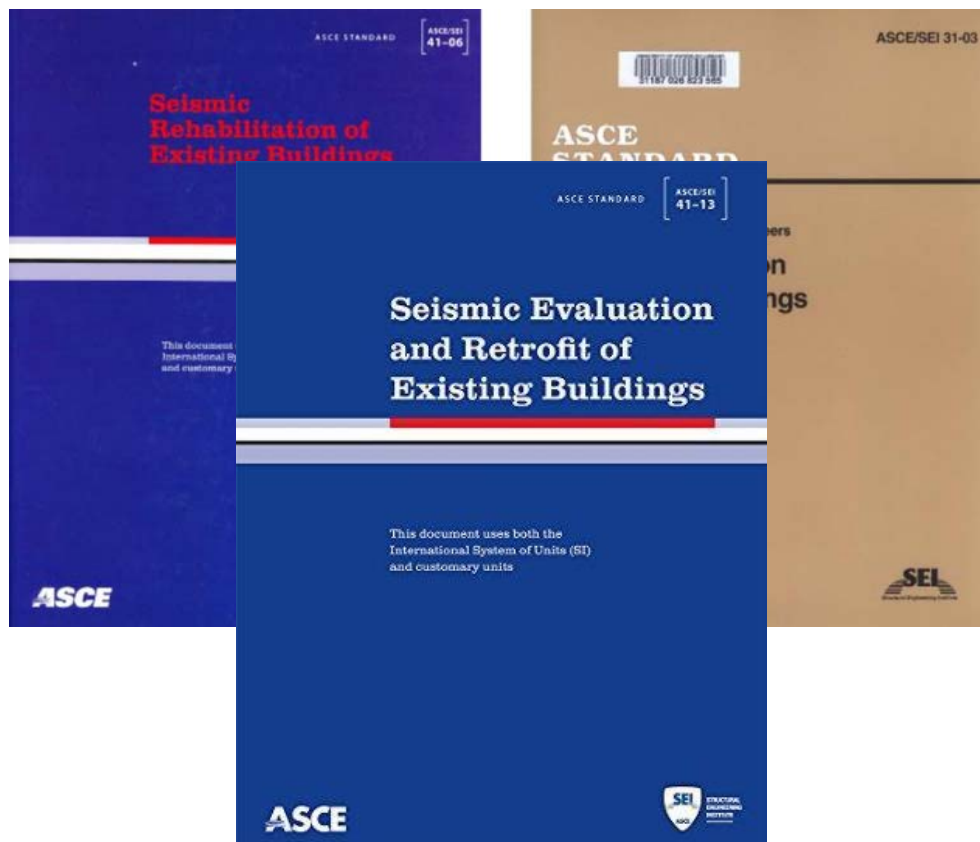
$$\frac{L}{D} = 3.75$$

$$W_u \cdot \lambda \cdot \alpha \left(\alpha \left(\frac{M_{wp}}{V_{wp} \cdot d} \right) \cdot \alpha \left(\frac{M_{wp}}{V_{wp} \cdot d} \right) \right) \leq 2$$

$$\lambda \cdot \alpha \left(\alpha \left(\frac{M_{wp}}{V_{wp} \cdot d} \right) \cdot \alpha \left(\frac{M_{wp}}{V_{wp} \cdot d} \right) \right) \leq 4$$

$$\left(\alpha \left(\frac{M_{wp}}{V_{wp} \cdot d} \right) \cdot \alpha \left(\frac{M_{wp}}{V_{wp} \cdot d} \right) \right)$$

Evaluation Standards



Evaluation Standards



Performance Evaluation& Retrofit Design

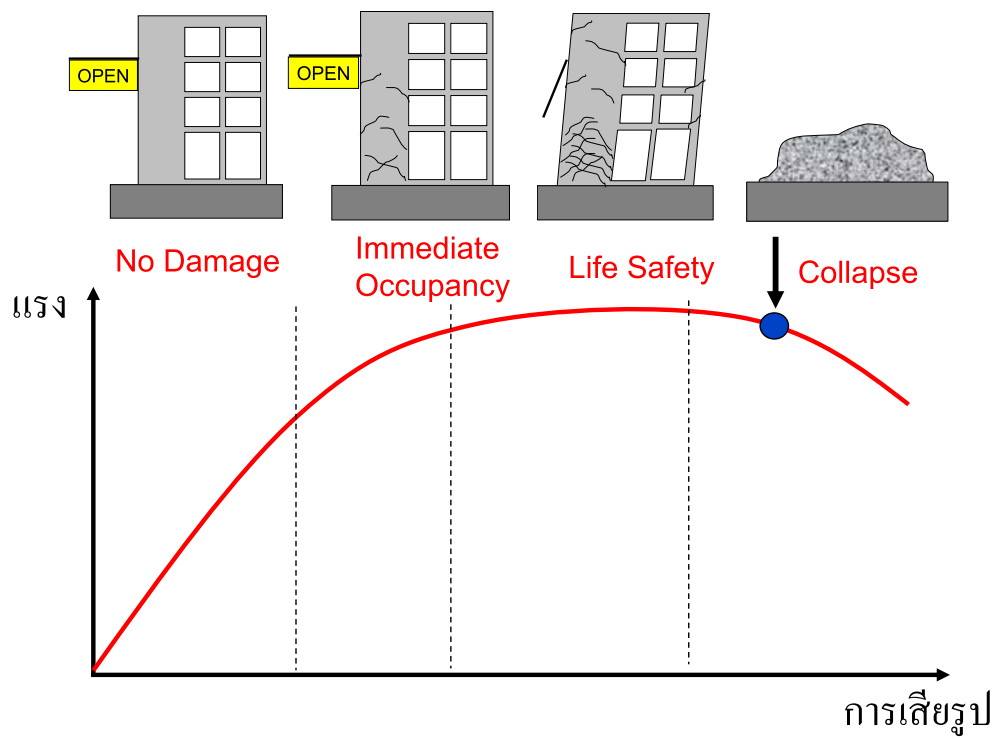
- ❑ Retrofit Design is essentially the same as performance evaluation

“Retrofit Design is simply evaluating a building in an altered state and adjusting the alterations until building’s evaluation meets the desire performance objective” Pekelnicky and Poland 2012

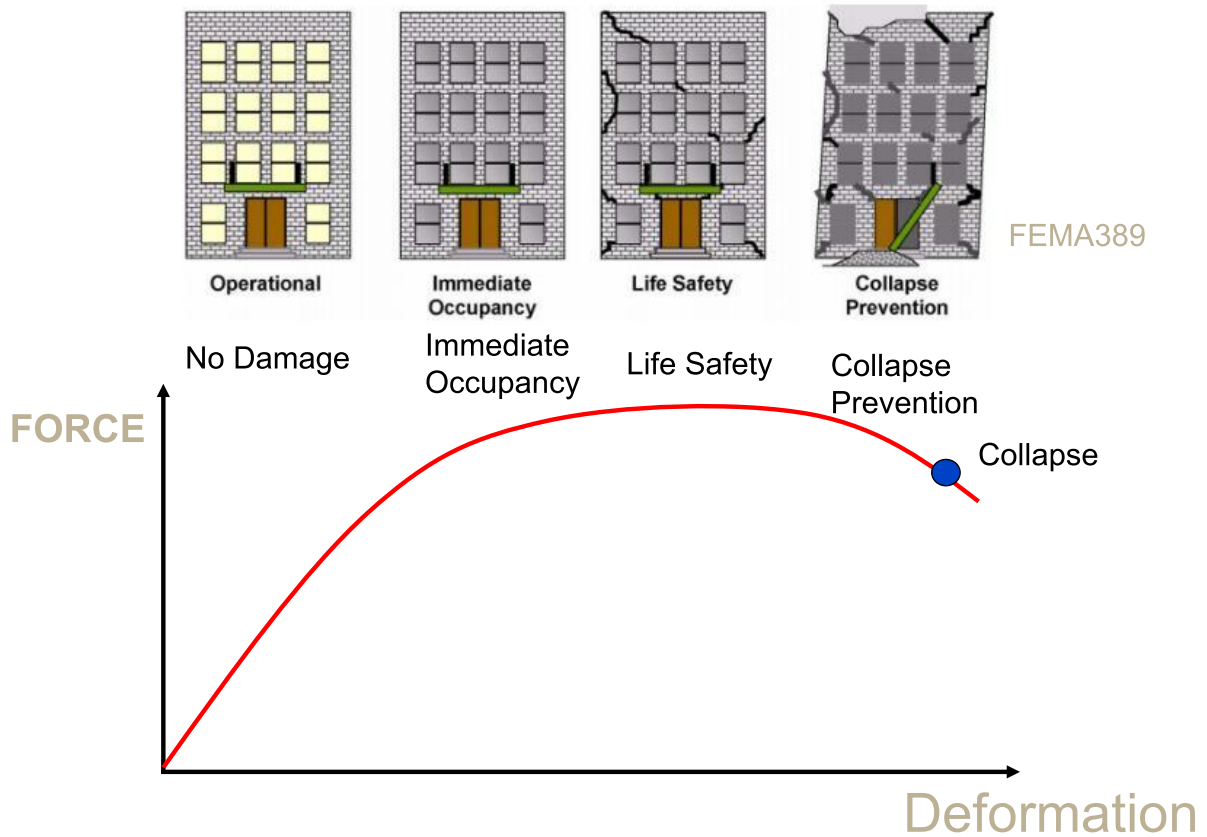
ข้อพิจารณาในการเสริมกำลังของอาคาร

- ❑ ข้อพิจารณาในการปรับปรุงอาคาร
 - ❑ พิจารณาถึงสมรรถนะเป้าหมายที่ต้องการ
 - ❑ พิจารณาถึงความคุ้มค่าในการเสริมกำลัง

สมรรถนะเป้าหมายของการเสริมกำลัง



Structural Performance

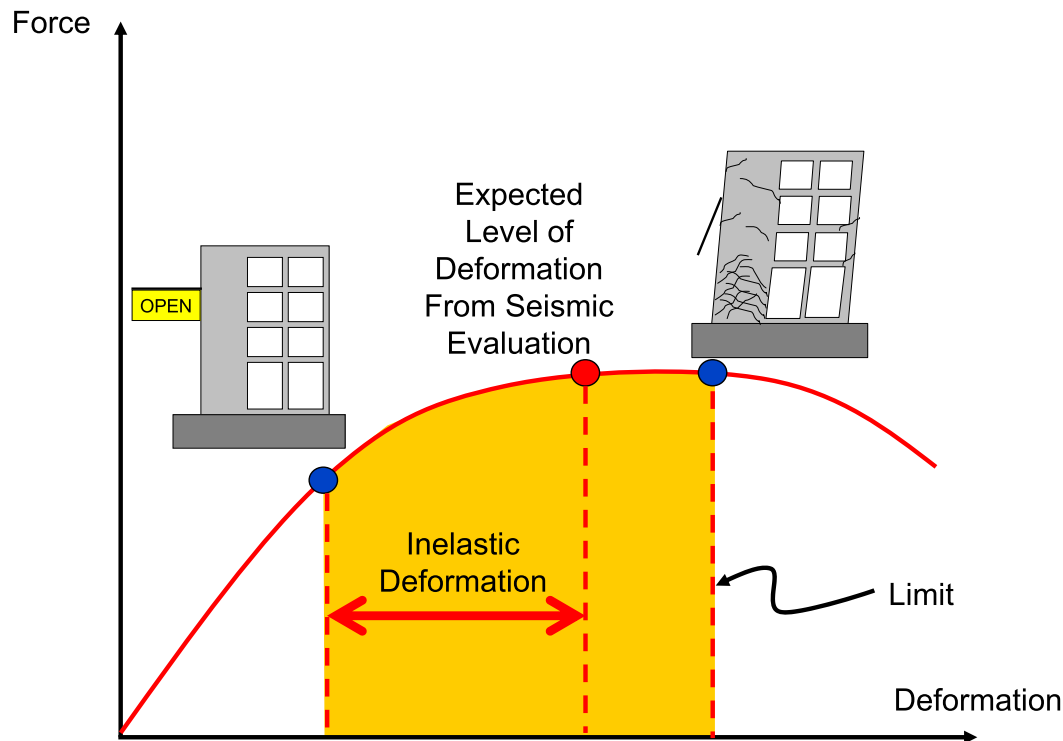


Performance of Structural Component



- ❑ Performance of a structural component can be assessed using engineering demand parameters such as plastic rotation, drift, shear, moment, etc.

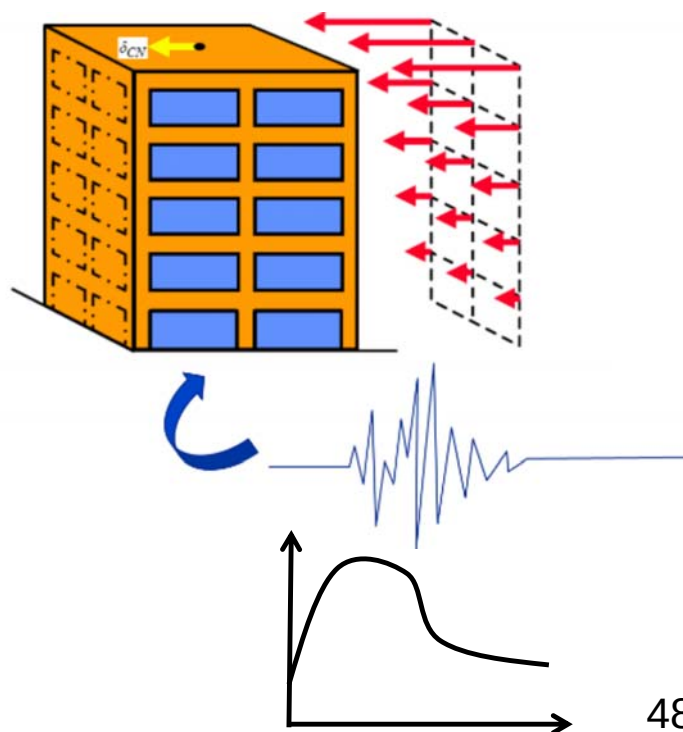
Displacement-Based Design (Retrofit Design)



Structural Analysis

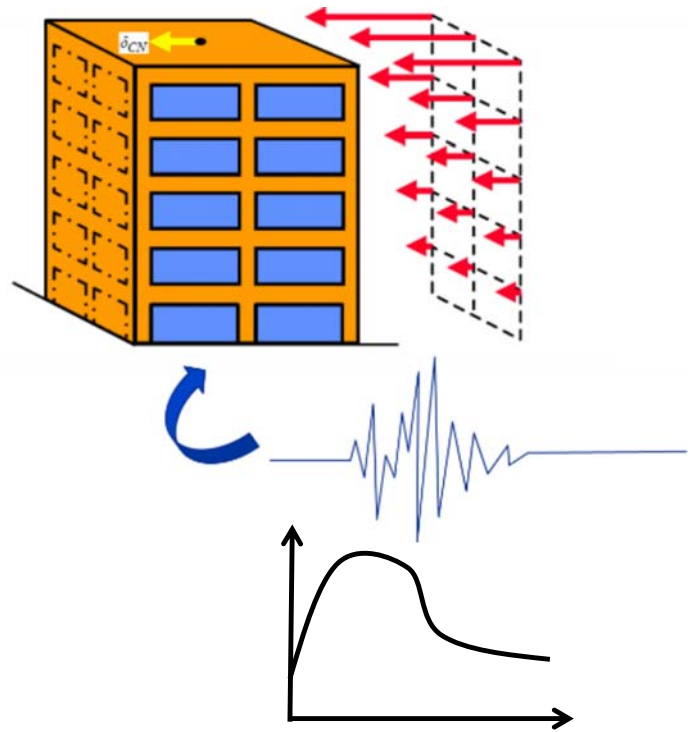
□ Linear Analysis
(Static, Modal
Response
Spectrum Analysis,
Time History
Analysis)

□ Non-Linear
Analysis (Static,
Time History
Analysis)



Linear Analysis

- ❑ Linear Analysis is used to determine member force demands



Member Verification

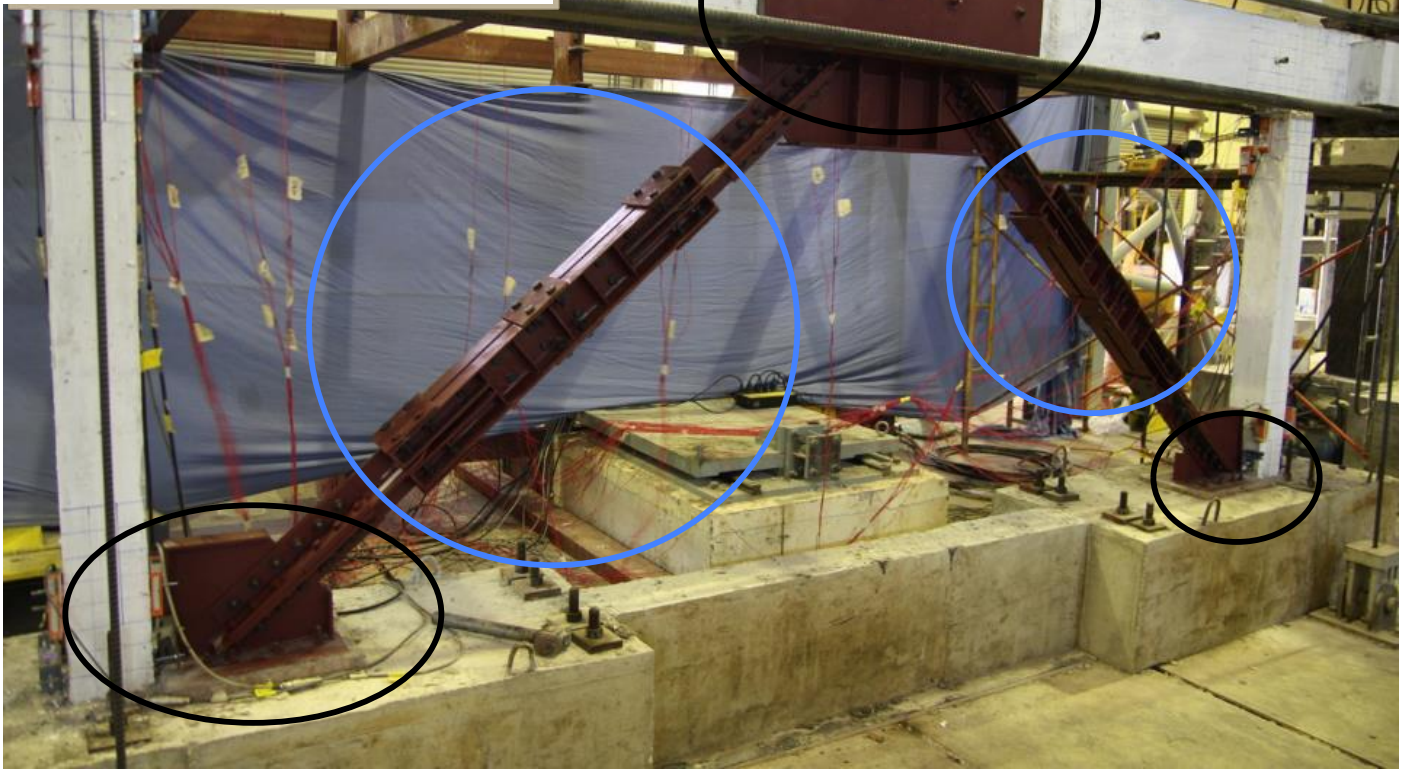
- ❑ Force Controlled Actions (Brittle Behavior, No Yielding is Allowed)
 - ❑ จุดต่อ แผ่นเหล็ก สลักเกลียว รอยเชื่อม
- ❑ Deformation Controlled Actions (Ductile Behavior, Yielding is Allowed)
 - ❑ แรงดึง แรงอัด ในแนวแกน



Force Control

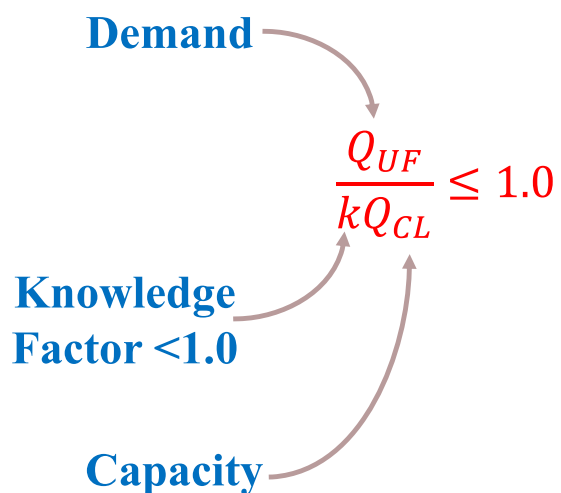


Displacement Control



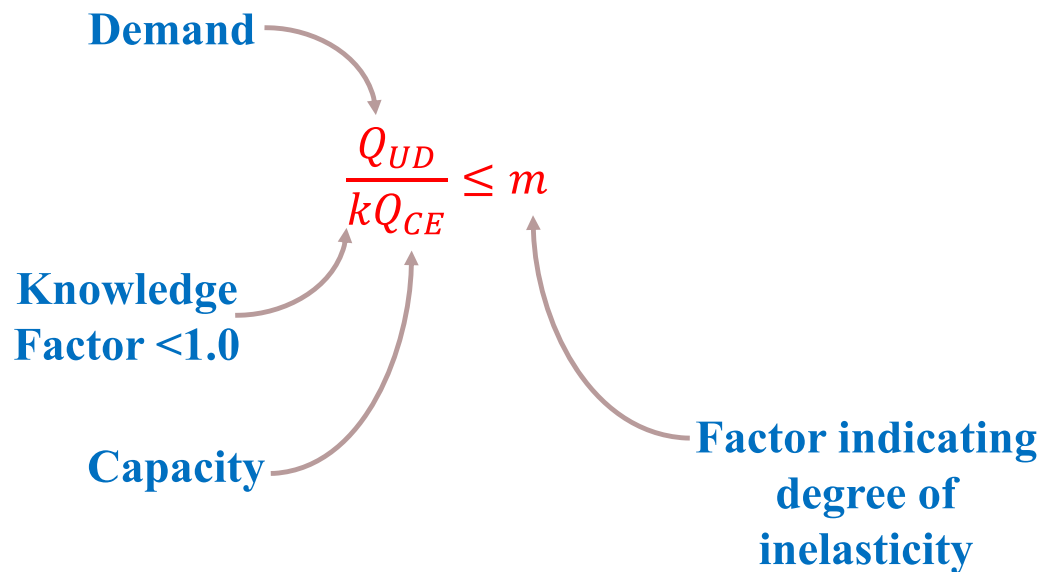
Member Verification

- ❑ Force Controlled Actions (Brittle Behavior, No Yielding is Allowed)



Member Verification

❑ Deformation Controlled Actions (Ductile Behavior, Yielding is Allowed)



ตารางที่ 7.8-2 เกณฑ์การยอมรับสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นของแกนเหล็ก

(ข้อ 7.8)

	ตัวประกอบปรับแก้ความเหนียวของชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้น (m)		
องค์อาคาร	IO	LS	CP
แกนเหล็ภายใต้แรงอัด			
ความชะลุดสูง $kL/r \geq 4.2\sqrt{E/f_y}$			
หน้าตัด WF I 2L และ 2C ที่โก่งคดในระนาบ	1.25	6	8
หน้าตัด 2L และ 2C ที่โก่งคดนอกระนาบ	1.25	5	7
กล่องกลวง ท่อกลวง	1.25	5	7
แกนเหล็ภายใต้แรงดึง			
ความชะลุดต่ำ $kL/r \leq 2.1\sqrt{E/f_y}$			
หน้าตัด WF I 2L และ 2C ที่โก่งคดในระนาบ	1.25	5	7
หน้าตัด 2L และ 2C ที่โก่งคดนอกระนาบ	1.25	4	6
กล่องกลวง ท่อกลวง	1.25	4	6
ความชะลุดปานกลาง	ใช้การเทียบบัญญัติโดยตรงส้โดยใช้ค่าสำหรับแกนที่มีความชะลุดสูงและแกนที่มีความชะลุดต่ำ		
แกนเหล็ภายใต้แรงดึง	1.25	6	8

ค่าในตารางให้ใช้สำหรับหน้าตัดที่อัดแน่นสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว (seismically compact section) หรือสำหรับองค์อาคารกลางที่กรอกด้วยคอนกรีต (concrete-filled section) สำหรับหน้าตัดที่ไม่อัดแน่นให้คูณเกณฑ์การยอมรับด้วย 0.5 สำหรับองค์อาคารที่มีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วนอยู่ระหว่างกลาง ให้ใช้การเทียบบัญญัติไตรยางศ์ เกณฑ์สำหรับหน้าตัดที่อัดแน่นสำหรับรับแรงแผ่นดินไหวและหน้าตัดที่ไม่อัดแน่น ให้ใช้ตามมาตรฐานสากล [14]

สำหรับในระนาบที่แกนแรงเกิดการโก่งเคาะ กำลังรับแรงดัดของจุดต่อต้องมีค่ามากกว่า 1.1 เท่าของค่าพลาสติกโมเมนต์ (M_p) ที่คาดหวัง ในกรณีกำลังจุดต่อไม่เป็นไปตามที่กำหนด ให้คูณค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองและเกณฑ์การยอมรับด้วย 0.8

สำหรับหน้าตัดคู่ 2L หรือ 2C ที่มีจุดยึดต่อระหว่างหน้าตัดคู่ (stitch) ค่าความชะลูด (slenderness ratio) ของแต่ละองค์อาคารเมื่อคิดจากระยะห่างระหว่างจุดยึดต้องมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 40 ของค่าความชะลูดขององค์อาคารคู่ที่ใช้ออกแบบ กำลังรับแรงเฉือนรวมของจุดยึดต้องมีค่า

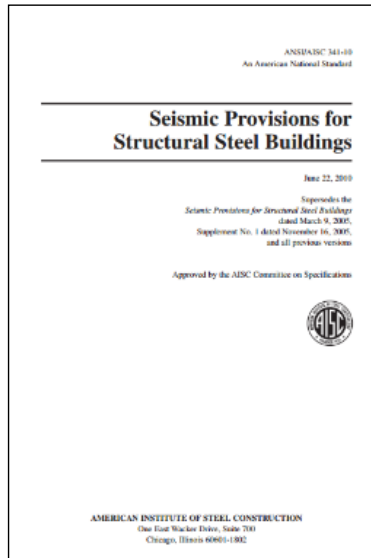
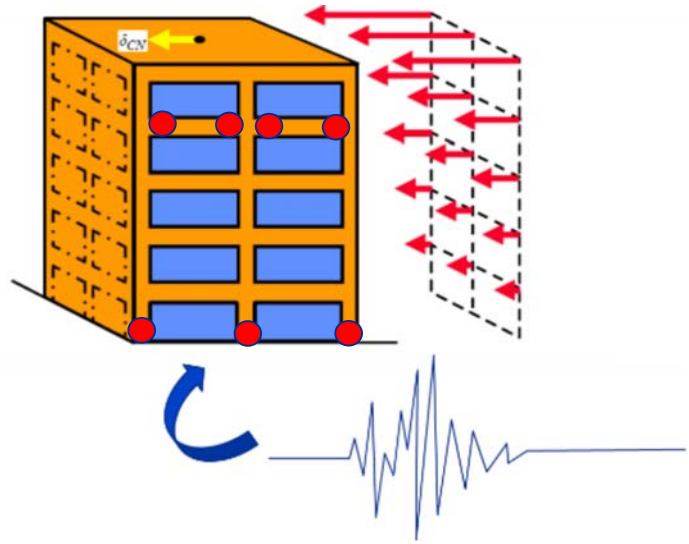


TABLE D1.1
Limiting Width-to-Thickness Ratios for
Compression Elements For Moderately Ductile
and Highly Ductile Members

	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Example
			λ_{hd} Highly Ductile Members	λ_{md} Moderately Ductile Members	
Unstiffened Elements	Flanges of rolled or built-up I-shaped sections, channels and tees; legs of single angles or double angle members with separators; outstanding legs of pairs of angles in continuous contact	b/t	$0.30\sqrt{E/F_y}$	$0.38\sqrt{E/F_y}$	
	Flanges of H-pile sections per	b/t	$0.45\sqrt{E/F_y}$	not applicable	

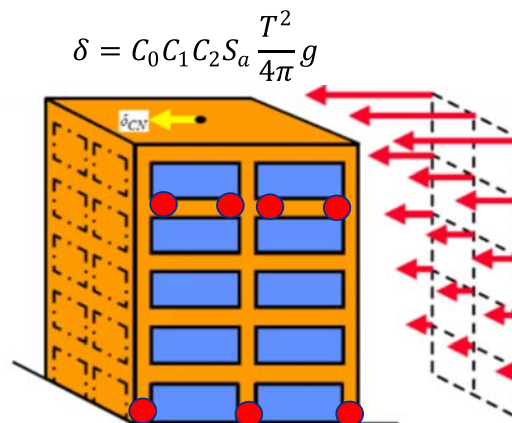
Non-Linear Analysis

- ❑ **Non-Linear Analysis** is used to determine member deformation demands such as rotations, drifts, etc
- ❑ **Deformation demands** can be compared directly with the allowable limits

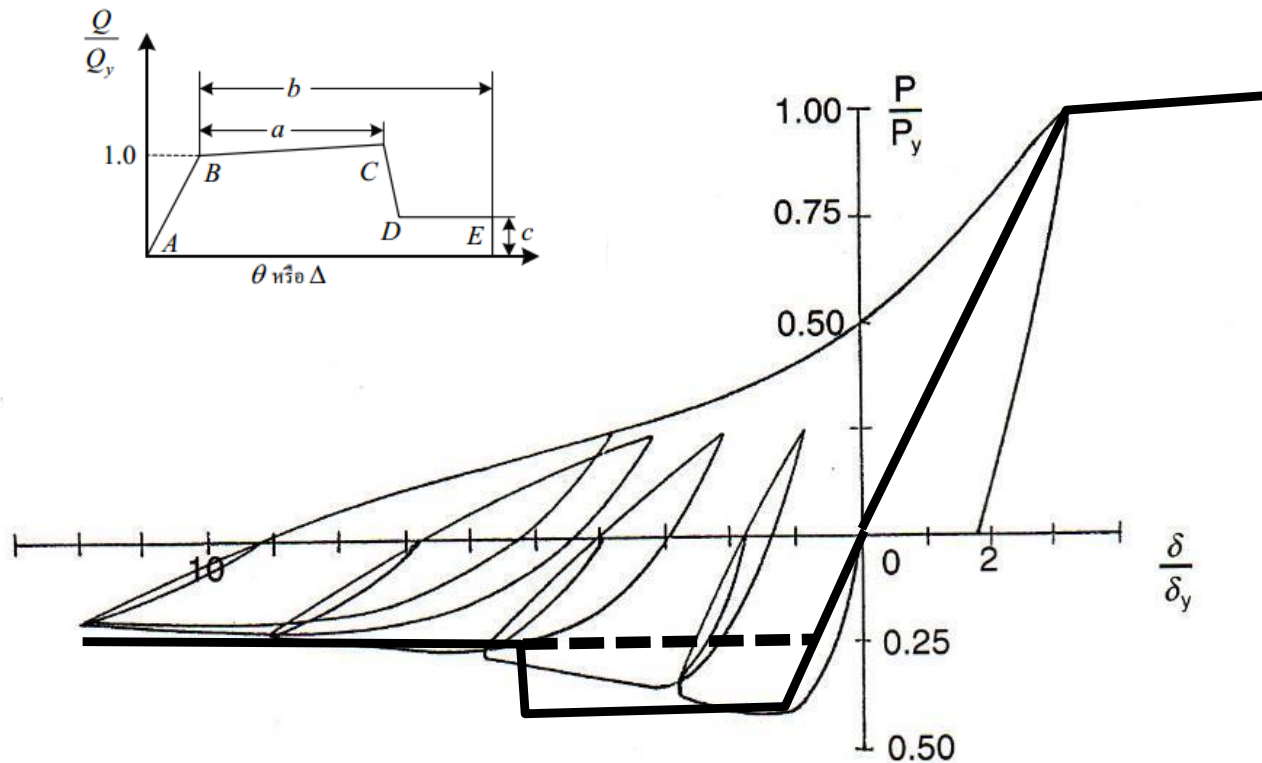


Non-Linear Static Analysis

- ❑ **Displacement Target is Calculated**
- ❑ **Structure is “Pushed” by a Set of Lateral Loads** Until the Target Displacement is reached
- ❑ **Member Deformation Demands** Can be Obtained and Compared Directly with the Allowable Limits



Non-Linear Brace Model



	พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง			เกณฑ์การยอมรับ		
	การเสียรูปในช่วงพลาสติก		อัตราส่วนกำลังคงค้าง	การเสียรูปในช่วงพลาสติก		
องค์อาคาร	a	b	c	IO	LS	CP
แกนแรงภายใต้แรงอัด						
ความชะลูดสูง $kL/r \geq 4.2\sqrt{E/f_y}$						
หน้าตัด WF I 2L และ 2C ที่โก่งเคาะในระนาบ	$0.5 \Delta_C$	$10 \Delta_C$	0.3	$0.25 \Delta_C$	$6 \Delta_C$	$8 \Delta_C$
หน้าตัด 2L และ 2C ที่โก่งเคาะนอกระนาบ	$0.5 \Delta_C$	$9 \Delta_C$	0.3	$0.25 \Delta_C$	$5 \Delta_C$	$7 \Delta_C$
กล่องกลวง ท่อกลวง	$0.5 \Delta_C$	$9 \Delta_C$	0.3	$0.25 \Delta_C$	$5 \Delta_C$	$7 \Delta_C$
ความชะลูดต่ำ $kL/r \leq 2.1\sqrt{E/f_y}$						
หน้าตัด WF I 2L และ 2C ที่โก่งเคาะในระนาบ	$1 \Delta_C$	$8 \Delta_C$	0.5	$0.25 \Delta_C$	$5 \Delta_C$	$7 \Delta_C$
หน้าตัด 2L และ 2C ที่โก่งเคาะนอกระนาบ	$1 \Delta_C$	$7 \Delta_C$	0.5	$0.25 \Delta_C$	$4 \Delta_C$	$6 \Delta_C$
กล่องกลวง ท่อกลวง	$1 \Delta_C$	$7 \Delta_C$	0.5	$0.25 \Delta_C$	$4 \Delta_C$	$6 \Delta_C$
ความชะลูดปานกลาง	ใช้การประมาณเชิงเส้นโดยใช้ค่าสำหรับแกนแรงที่มีความชะลูดสูงและแกนแรงที่มีความชะลูดต่ำ					
แกนแรงภายใต้แรงดึง	$11 \Delta_T$	$14 \Delta_T$	0.8	$0.25 \Delta_T$	$7 \Delta_T$	$9 \Delta_T$

បញ្ចប់