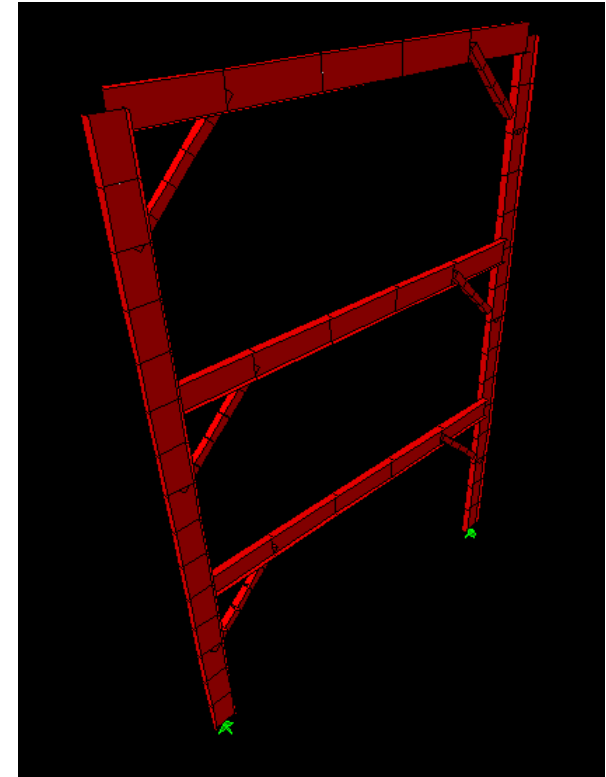


การใช้โครงสร้างเหล็กในอาคารที่
ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและ
การใช้โครงสร้างเหล็กในการเสริม
กำลังอาคารเพื่อรับแรง
แผ่นดินไหว



Sutat Leelataviwat, Ph.D.
King Mongkut's University of
Technology Thonburi

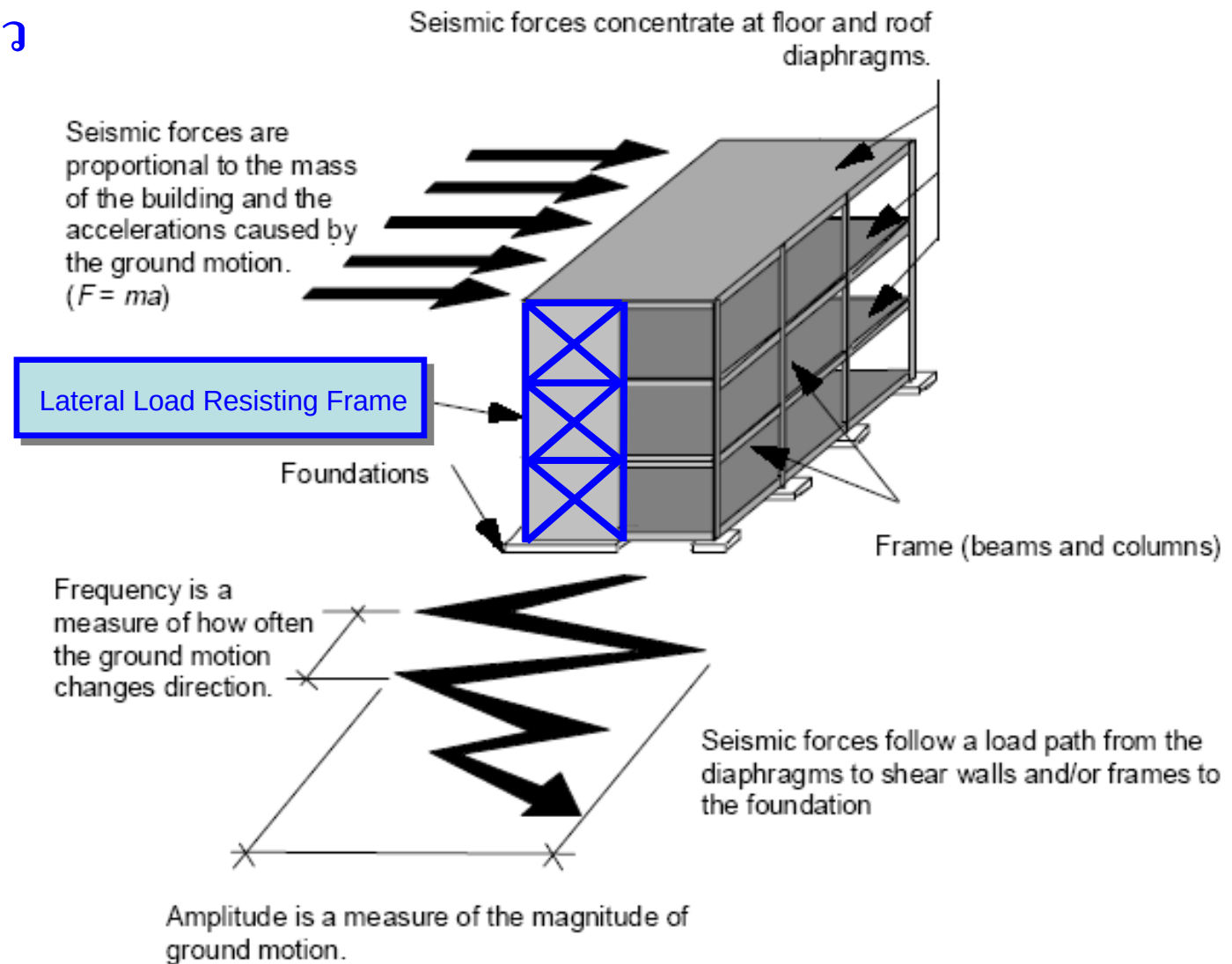


Objectives

- ❑ ระบบโครงสร้างเหล็กรับแรงแผ่นดินไหว
- ❑ หลักการออกแบบและการให้รายละเอียด(Detailing) ที่สำคัญ
- ❑ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการใช้โครงสร้างเหล็กในการปรับปรุงอาคารเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว

Basic Building Response to EQ

☐ แรงแผ่นดินไหว



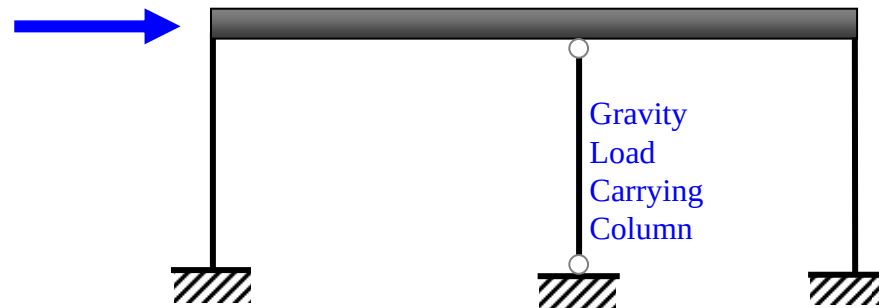
Structural Steel System

- ❑ Steel Structure
 - ❑ Widely used in seismic zones
 - ❑ Generally behave in a ductile manner (Preferable in Seismic Zones)



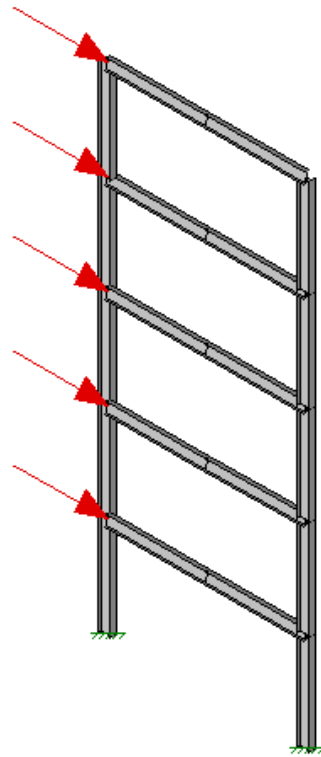
Structural Steel System

- Concepts and Terminology
 - Parts of structure not designed to carry lateral forces are called “Gravity Load Carrying Elements”



Structural Steel System

- Commonly Used Lateral Load Resisting Structural Steel System



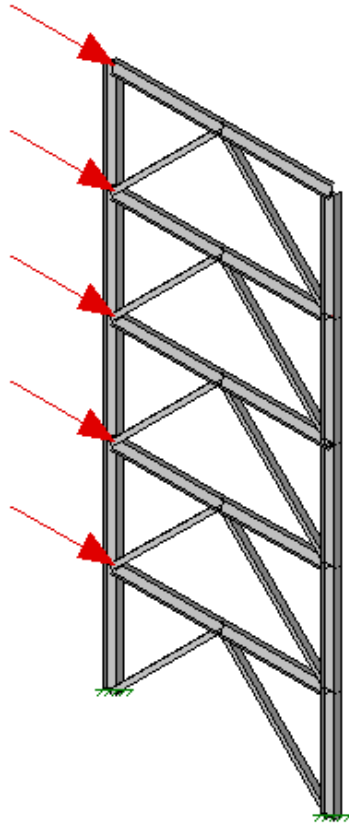
**Moment
Resisting
Frame**

Structural Steel System



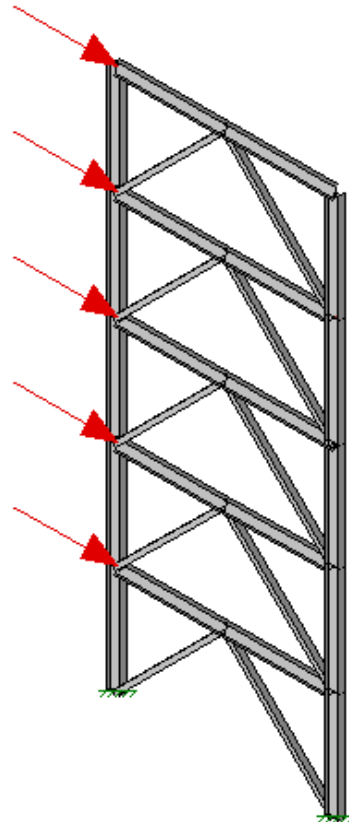
Structural Steel System

□ Braced Frames



Structural Steel System

□ Braced Frames

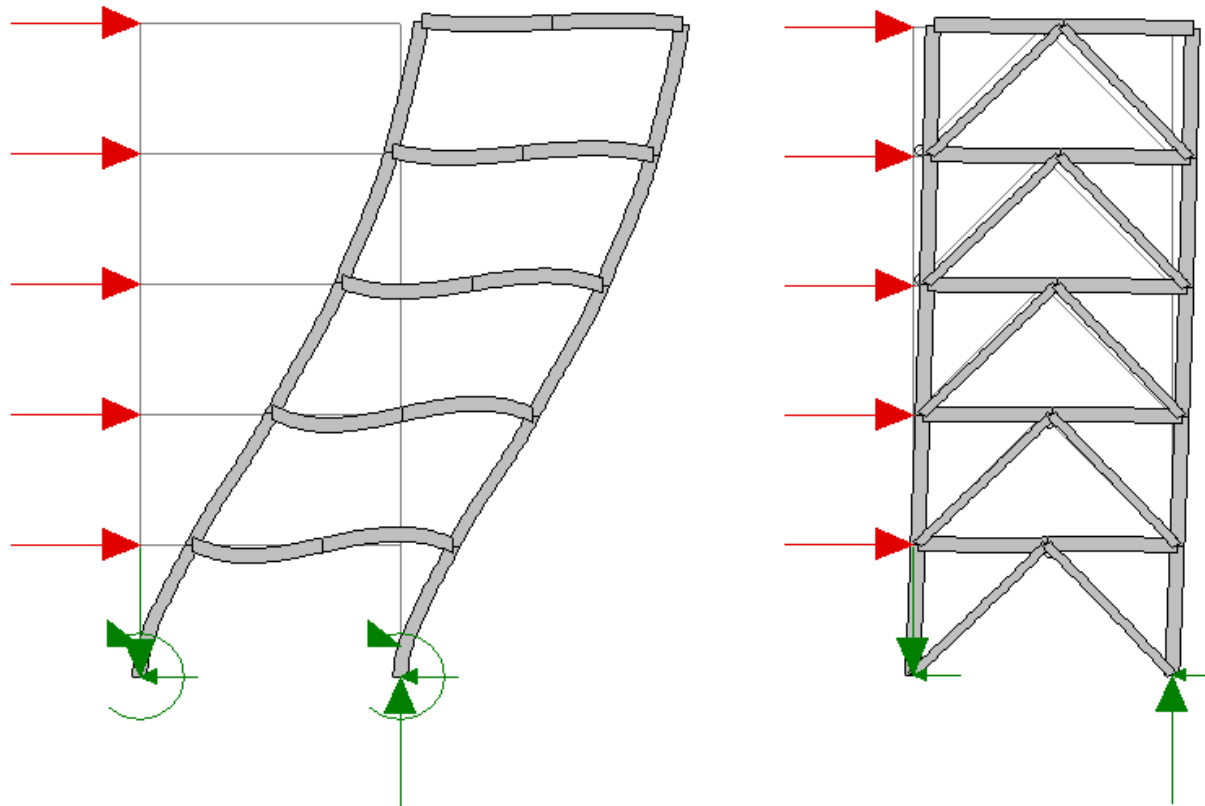


Structural Steel System



Structural Steel System

□ Braced Frame vs Moment Frame



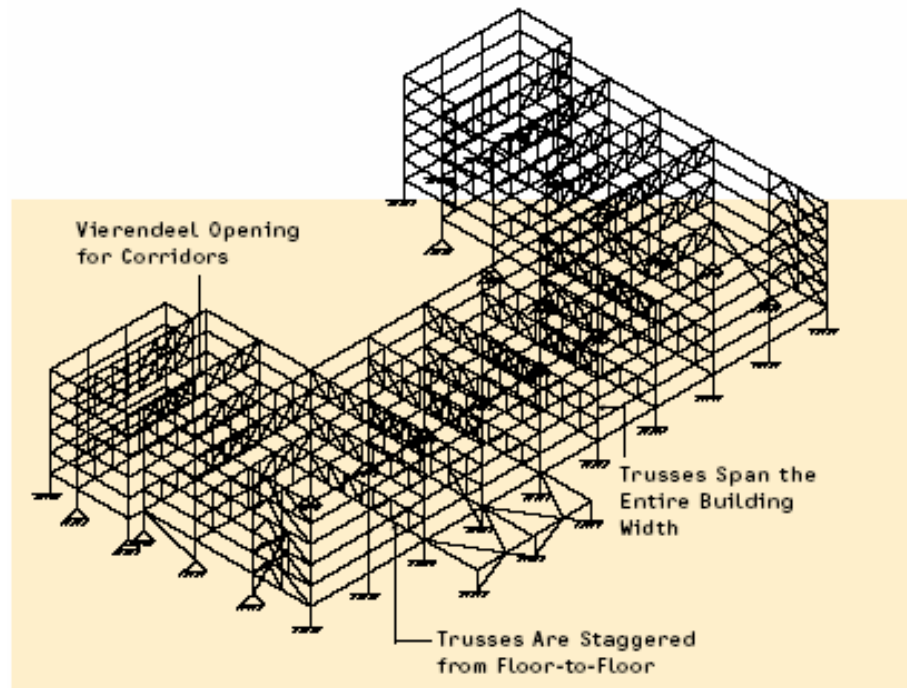
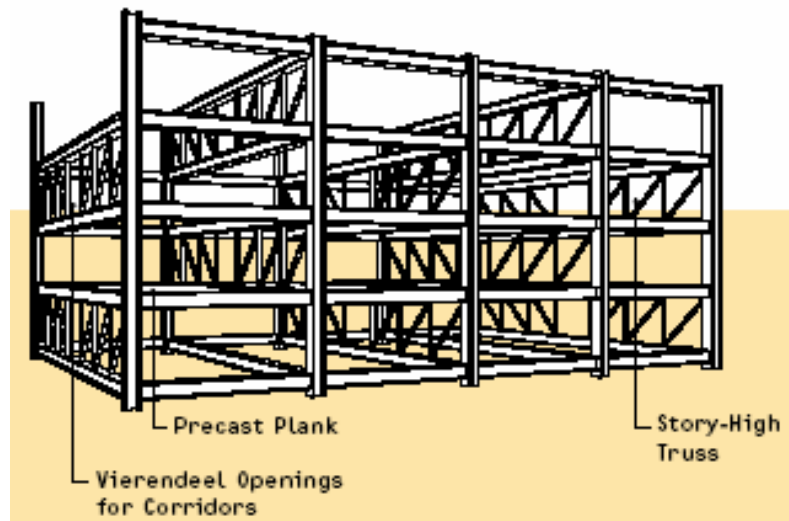
Structural Steel System

- New Structural Systems : Open-Web Frames



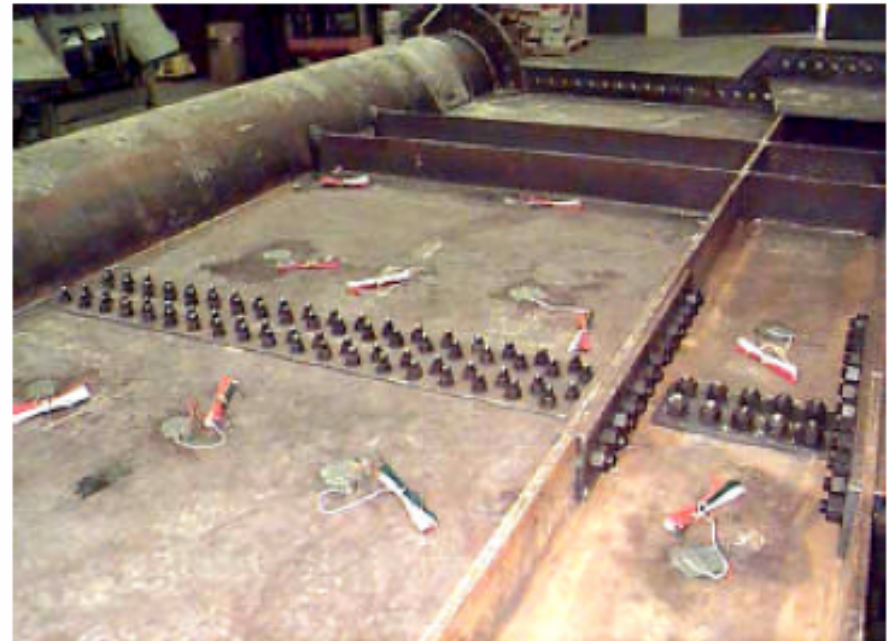
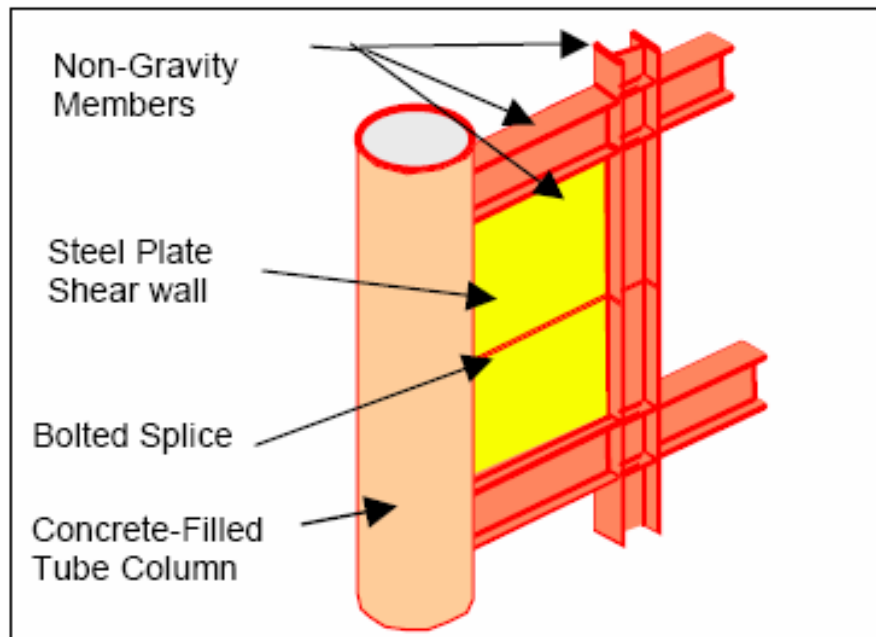
Structural Steel System

□ New Structural Systems : Staggered Trusses



Structural Steel System

□ New Structural Systems : Steel Plate Shear Walls



Seismic Design Process

- **Typical Seismic Design Process**
 - **Determination of Seismic Design Forces**
 - **Structural Analysis**
 - **Member Design / Seismic Design Requirement Checks According to Seismic Provisions**
 - **Reanalysis**
 - **Detailing**
- 

- **Determination of Seismic Design Force**

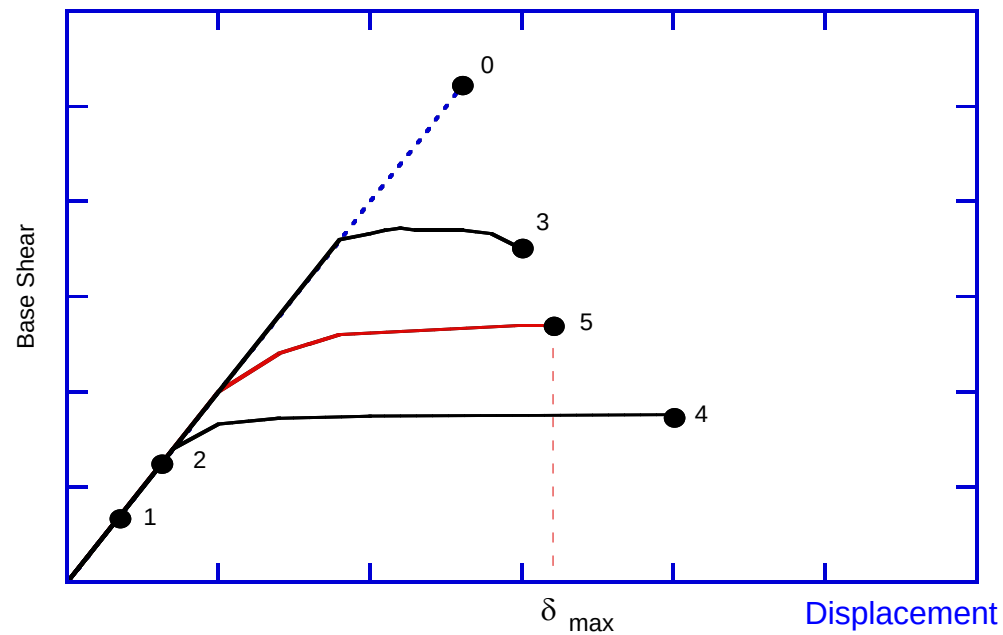
- **กฎกระทรวง 2550**

- **UBC (Uniform Building Code 1994 /
Uniform Building Code 1997)**

- **IBC (International Building Code)**

- **ASCE7-05**

- **Determination Seismic Design Force**
 - **Magnitude of design forces depends on severity of earthquake and ductility of the structure**



แรงในการออกแบบตามกฎกระทรวงฯ

ระบบและชนิดโครงสร้างรับแรงในแนวนอน	ค่าของ K
(๑) โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้กำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) หรือ โครงสร้างแข็งแรง (Braced Frame) ด้านแรงทั้งหมดในแนวนอน	๑.๓๓
(๒) โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงสร้างด้านแรงดัดที่มีความเหนียว (Ductile Moment-Resisting Frame) ด้านแรงทั้งหมดในแนวนอน	๐.๖๓
(๓) โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงสร้างด้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับ กำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างแข็งแรงด้านแรงในแนวนอน โดยมีข้อกำหนด ในการคำนวณออกแบบ ดังนี้	๐.๘๐
(ก) โครงสร้างด้านแรงดัดที่มีความเหนียวต้องสามารถต้านแรงในแนวนอนได้ ไม่น้อยกว่าร้อยละ ๒๕ ของแรงในแนวนอนทั้งหมด	
(ข) กำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างแข็งแรงเมื่อแยกเป็นอิสระจาก โครงสร้างด้านแรงดัดที่มีความเหนียวต้องสามารถต้านแรงในแนวนอนได้ทั้งหมด	
(ค) โครงสร้างด้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนหรือ โครงสร้างแข็งแรงต้องสามารถต้านแรงในแนวนอนได้ทั้งหมด โดยสัดส่วน ของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างแต่ละระบบ ให้เป็นไปตามสัดส่วนความคงตัว (Rigidity) โดยคำนึงถึงการถ่ายเทของแรงระหว่างโครงสร้างทั้งสอง	
(๔) หอถังน้ำ รองรับด้วยเสาไม่น้อยกว่า ๔ ต้น และมีแกนแนวยึดและไม่ได้ตั้งอยู่ บนอาคาร	๒.๕
หมายเหตุ ผลคูณระหว่างค่า K กับค่า C ให้ใช้ค่าต่ำสุดเท่ากับ ๐.๑๒ และ ค่าสูงสุดเท่ากับ ๐.๒๕	
(๕) โครงสร้างด้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัดและโครงสร้างอาคารระบบอื่น ๆ นอกจาก โครงสร้างอาคารตาม (๑) (๒) (๓) หรือ (๔)	๑.๐

← Braced Frame

$$V = ZIKCSW$$

← Intermediate MRF

แรงในการออกแบบตามกฎกระทรวงฯ

Allowable Stress Design

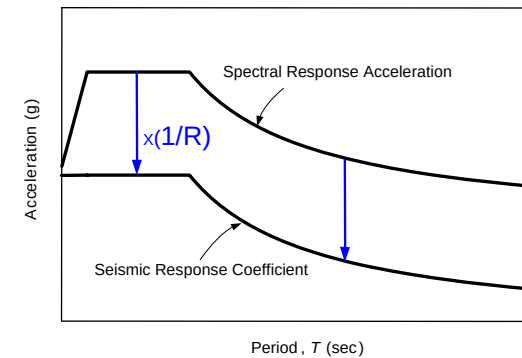
$$R_n / FS \geq \sum Q_i$$

Ex: UBC97
 $R/1.67 \geq (D+L+E)$

International Standard (asce7-05 / IBC2006)

	ระบบโครงสร้าง	Response Modification Factor (R)
Building Frame System with Seismic Detailing	โครงยี่ดิ่งเหล็กแบบรวมศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Concentric Braced Frame)	6
	โครงยี่ดิ่งเหล็กแบบรวมศูนย์แบบธรรมดา (Ordinary Steel Concentric Braced Frame)	$3\frac{1}{4}$
	โครงข้อแข็งเหล็กที่มีความเหนียวเป็นพิเศษ (Special Steel Moment Resisting Frame)	8
	โครงข้อแข็งเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Steel Moment Resisting Frame)	4.5
	โครงข้อแข็งเหล็กธรรมดา (Ordinary Steel Moment Resisting Frame)	3.5
Building Frame System with No Seismic Detailing		3.0

$$V_d = V_e / R$$



Design Method

Load-Resistance Factor

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i$$

Load Combinations: ASCE7-05

1.2D+0.5L+1.0E

0.9D+1.0E

Design Method

	ระบบโครงสร้าง	Response Modification Factor (R)	Equivalent K
Building Frame System with Seismic Detailing	โครงยี่ดิ่งเหล็กแบบรวมศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Concentric Braced Frame)	6	0.9
	โครงยี่ดิ่งเหล็กแบบรวมศูนย์แบบธรรมดา (Ordinary Steel Concentric Braced Frame)	3 ¹ / ₄	1.6
	โครงข้อแข็งเหล็กที่มีความเหนียวเป็นพิเศษ (Special Steel Moment Resisting Frame)	8	0.67
	โครงข้อแข็งเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Steel Moment Resisting Frame)	4.5	1.2
	โครงข้อแข็งเหล็กธรรมดา (Ordinary Steel Moment Resisting Frame)	3.5	1.5
Building Frame System with No Seismic Detailing		3.0	1.8

$$K \approx \frac{8}{1.5R}$$

Note: 1.33
Increase for ASD
is not allowed
(Per UBC1997)

Design Method

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i$$

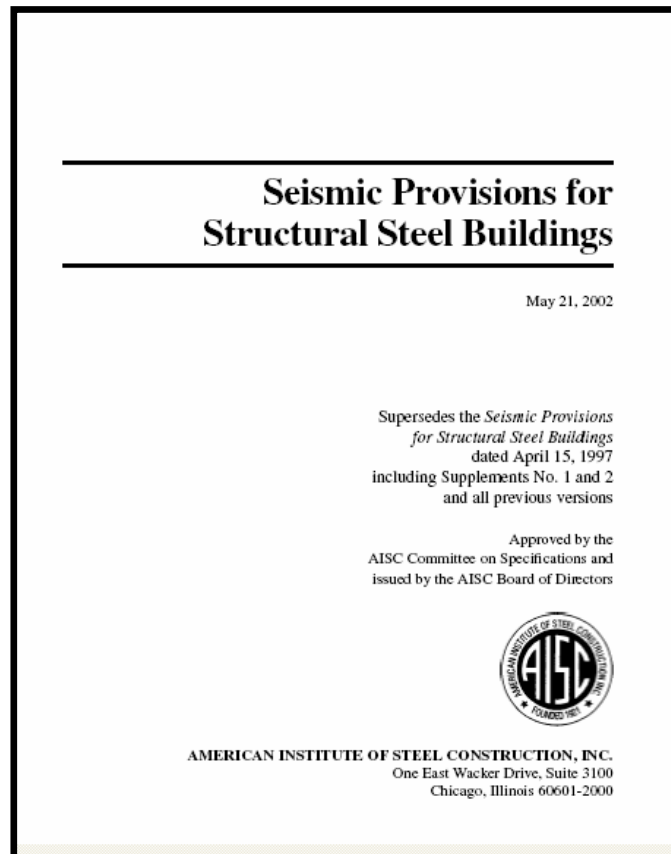
**Different load factor depending on
whether the EQ force is ASD or
LRFD based**

1.0 x (UBC97/ASCE7-05)

1.40x (ภฏภะทรวง)

Detailing Method

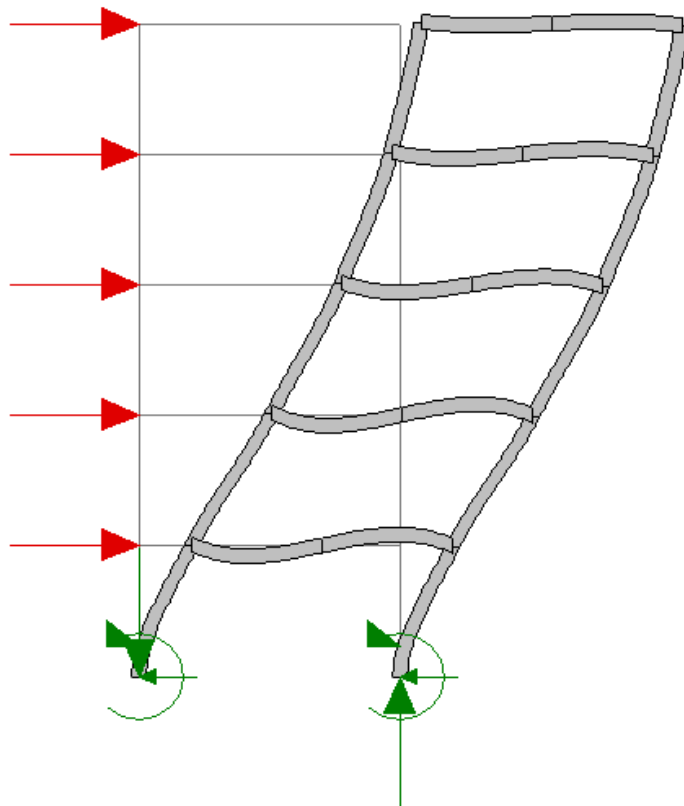
□ Member Design & Seismic Requirements



**AISC Provisions
are LRFD based
(www.aisc.org)**

Introduction to Seismic Design Concepts

Seismic Provisions Govern Design at:



Three Levels

- **Material Level**
- **Member Level**
- **Structure Level**

Three Aspects

- **Strength**
 - **Ductility**
 - **Stability**
-

MATERIAL REQUIREMENTS

Material Requirements

Conventional Design (Static Load)

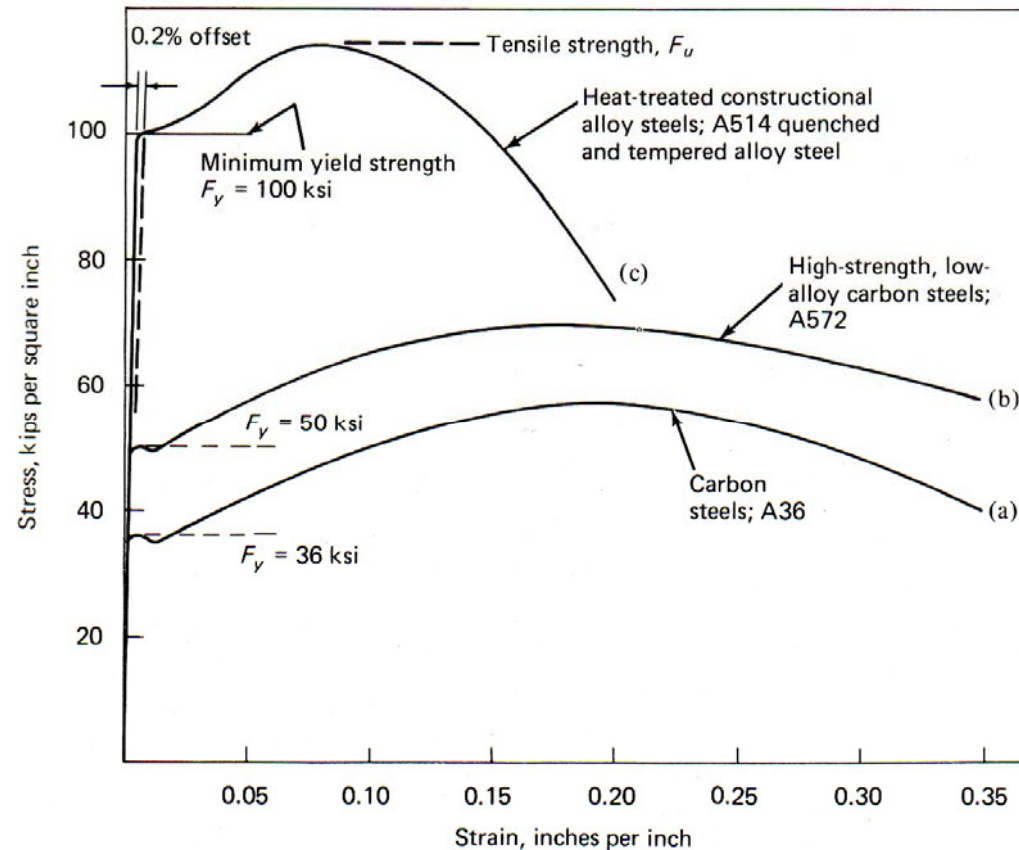
- **The Higher Strength the Better**

For Seismic Design

- **The Higher Strength = the Better**
-

Material Requirements

High Strength -> Less Ductile

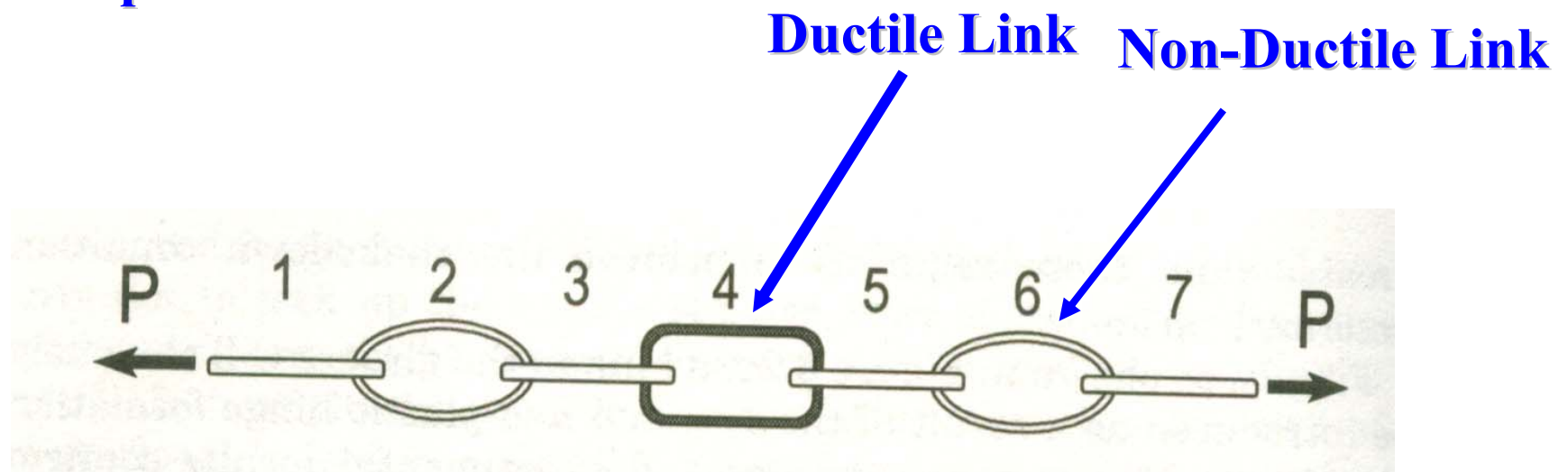


Material Requirements

For Seismic Design

- The Higher Strength $\neq$ the Better

Concept of Ductile Chain Links



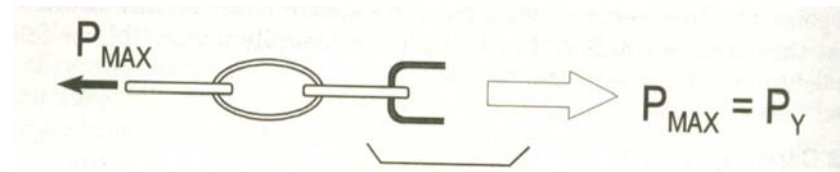
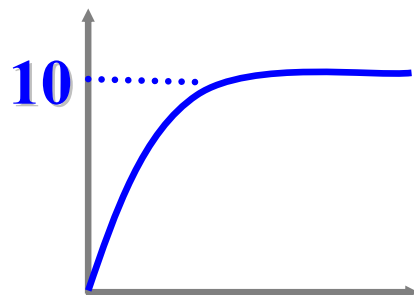
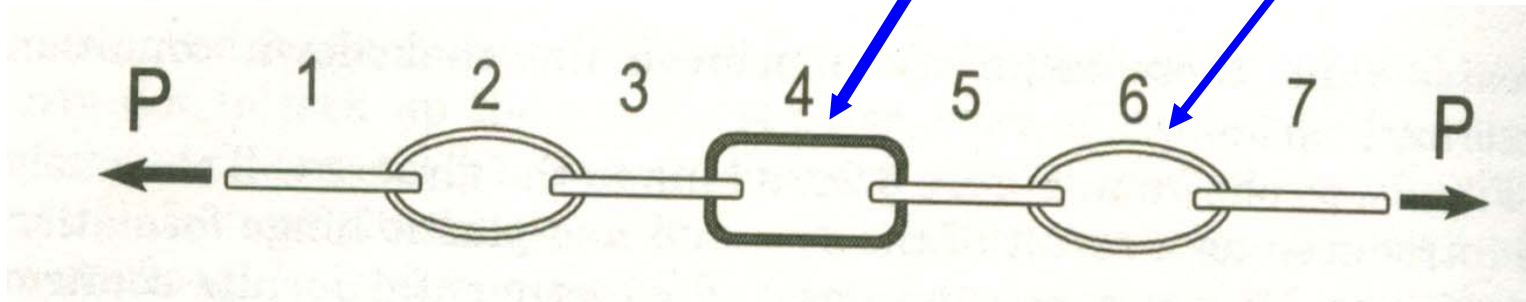
Scenario A

Ductile Link

$$P_y = 10$$

Non-Ductile Link

$$P_y = 15$$



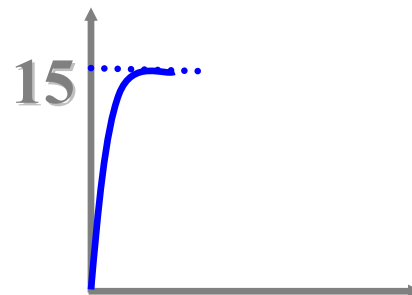
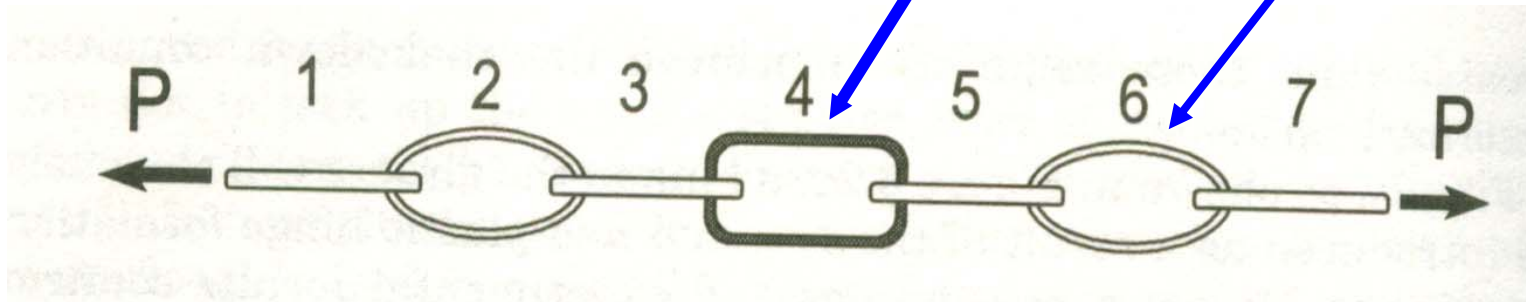
Scenario B

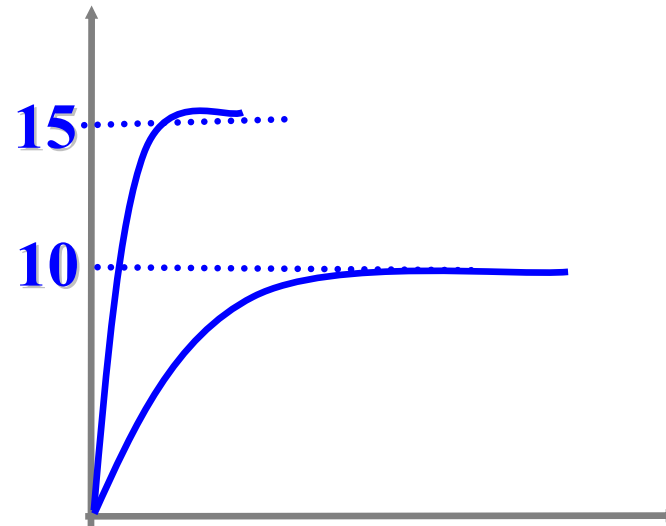
Ductile Link

$$P_y = 16$$

Non-Ductile Link

$$P_y = 15$$





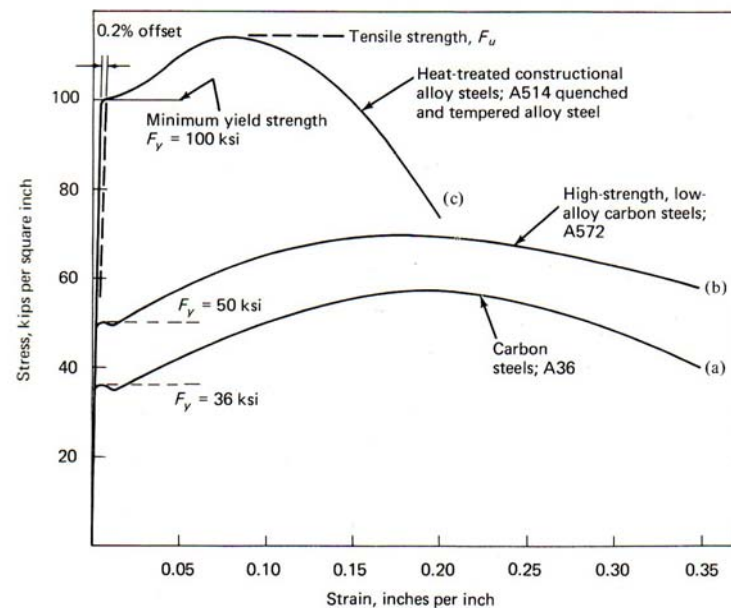
Lessons Learned

- Too high the reserved strength is not good
 - Use actual value of strength (not the specified one) to design critical components
-

Material Requirement Summary

AISC Seismic Provisions:

- Limit Max. Yield Stress = GR50 (50 ksi)
- Use Actual Yield Stress to Design Critical Components $F_y (\text{Actual}) = R_y F_y$

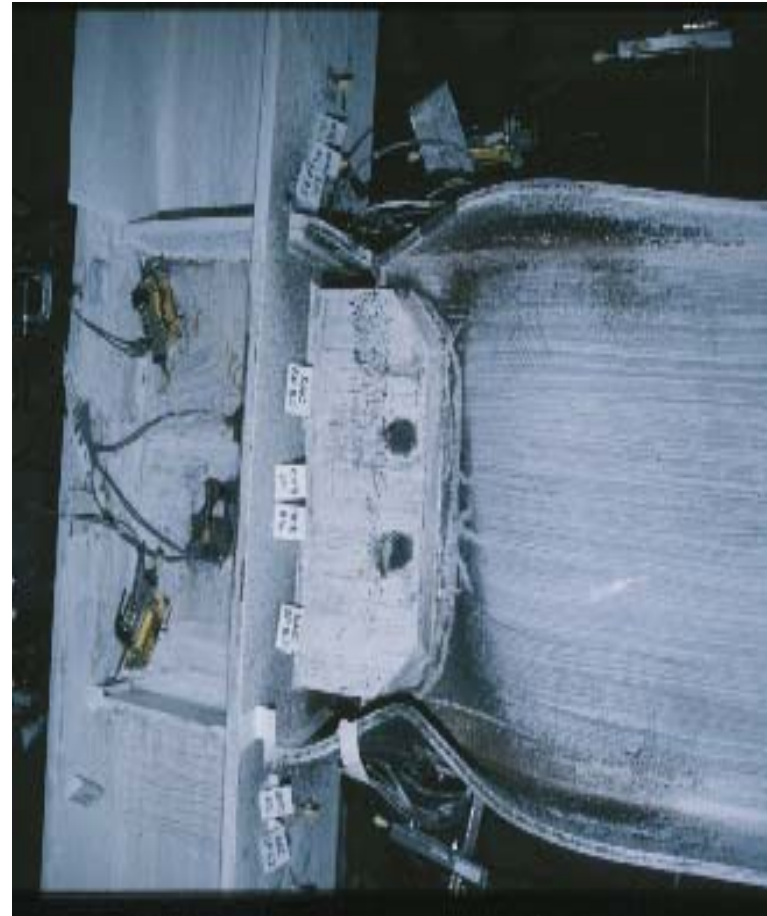
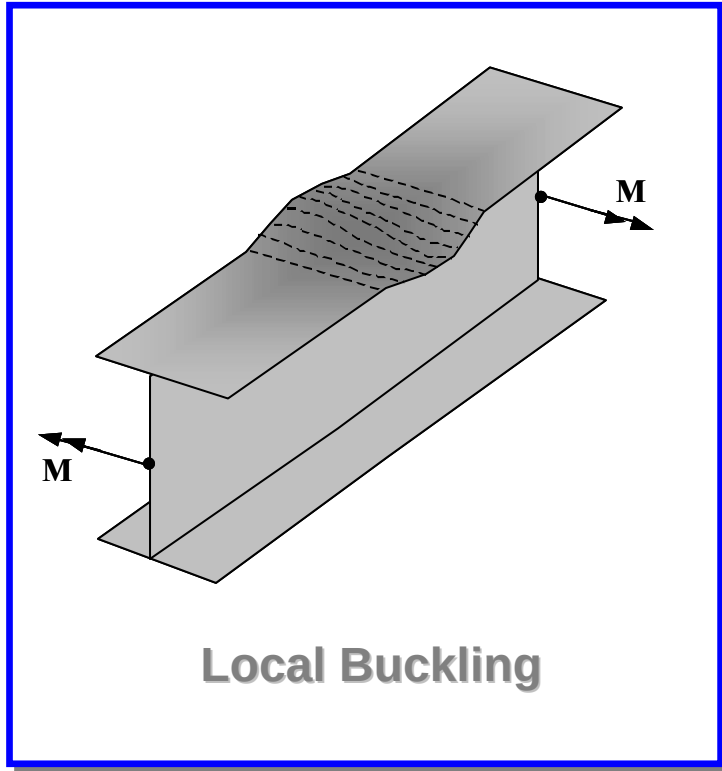


ตารางที่ 2 ค่าตัวคูณเพื่อหาค่าลึงครากจริงของวัสดุ[2]

ชนิดองก์อาคารและวัสดุ	R_y
เหล็กรีดร้อน (Hot-Rolled Section)	
ASTM A36	1.5
ASTM A572	1.3
เหล็กกลวง (Hollow Steel Section)	
ASTM A500	1.3
ท่อเหล็ก (Structural Steel Pipe)	
ASTM A53	1.4

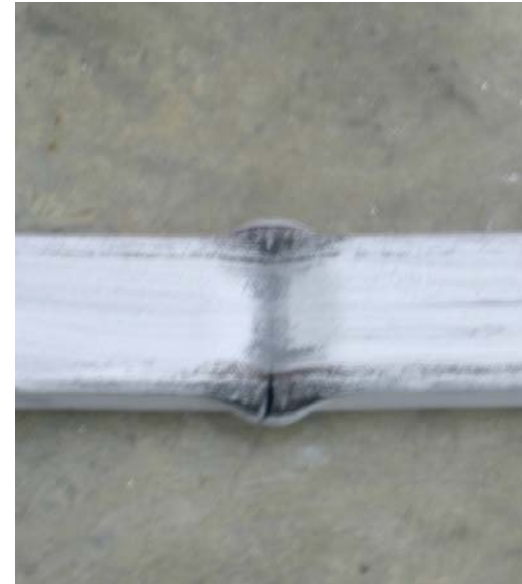
MEMBER REQUIREMENTS

Member Requirement



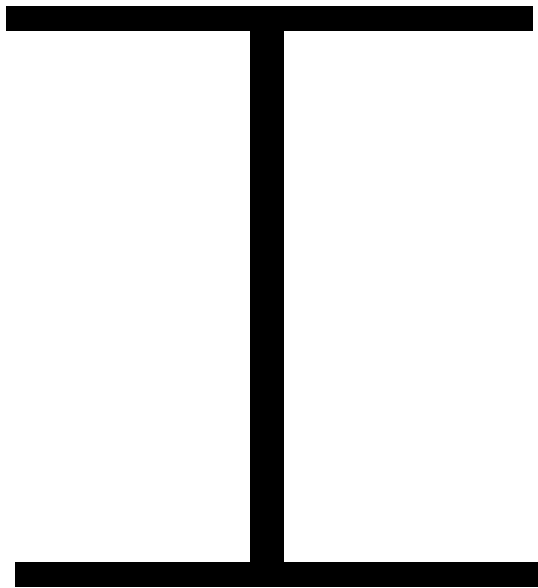
Member Requirement

Local Buckling

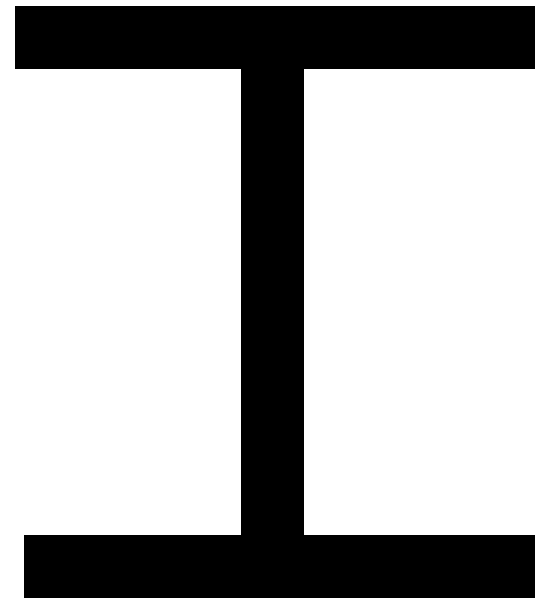


Lessons Learned

- Prevent Local Buckling by Using Compact Section



•Non-Compact



Compact

Member Requirement

Lessons Learned

- Prevent Local Buckling

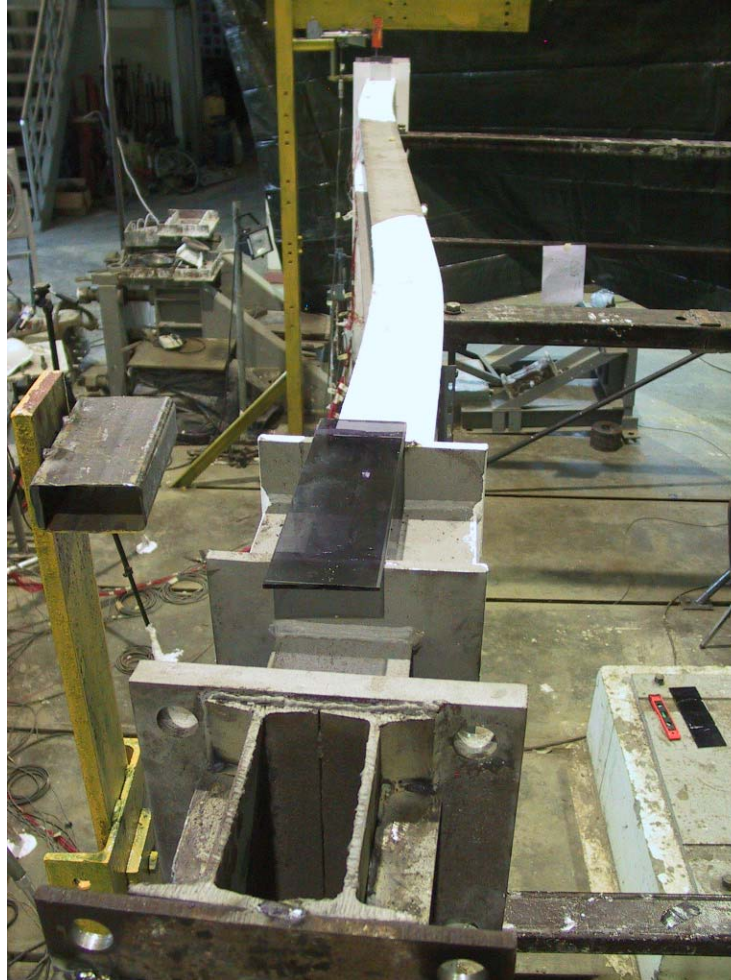
ตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่ยอมให้สำหรับการออกแบบเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว

ตามมาตรฐานการออกแบบ 2002 AISC Seismic Provisions [2]

องค์อาคาร	อัตราส่วน	ค่ามากที่สุดที่ยอมให้
ปีกคานหรือเสารูปตัว I	$b_f/2t$	$0.30\sqrt{E/F_y}$
แผ่นเอวของคานรูปตัว I	h/t_w	$2.45\sqrt{E/F_y}$
แผ่นเอวของเสารูปตัว I	h/t_w	$3.14\sqrt{E/F_y}(1-1.54P_u/\phi P_y)$ เมื่อ $P_u/\phi P_y \leq 0.125$ $1.12\sqrt{E/F_y}(2.33-P_u/\phi P_y)$ เมื่อ $P_u/\phi P_y > 0.125$
ขาของเหล็กลอก	b/t	$0.30\sqrt{E/F_y}$
ท่อเหลี่ยม	b/t	$0.64\sqrt{E/F_y}$
ท่อกลม	D/t	$0.044E/F_y$

Member Requirement

Lateral-Torsional Buckling



Member Requirement

Lessons Learned

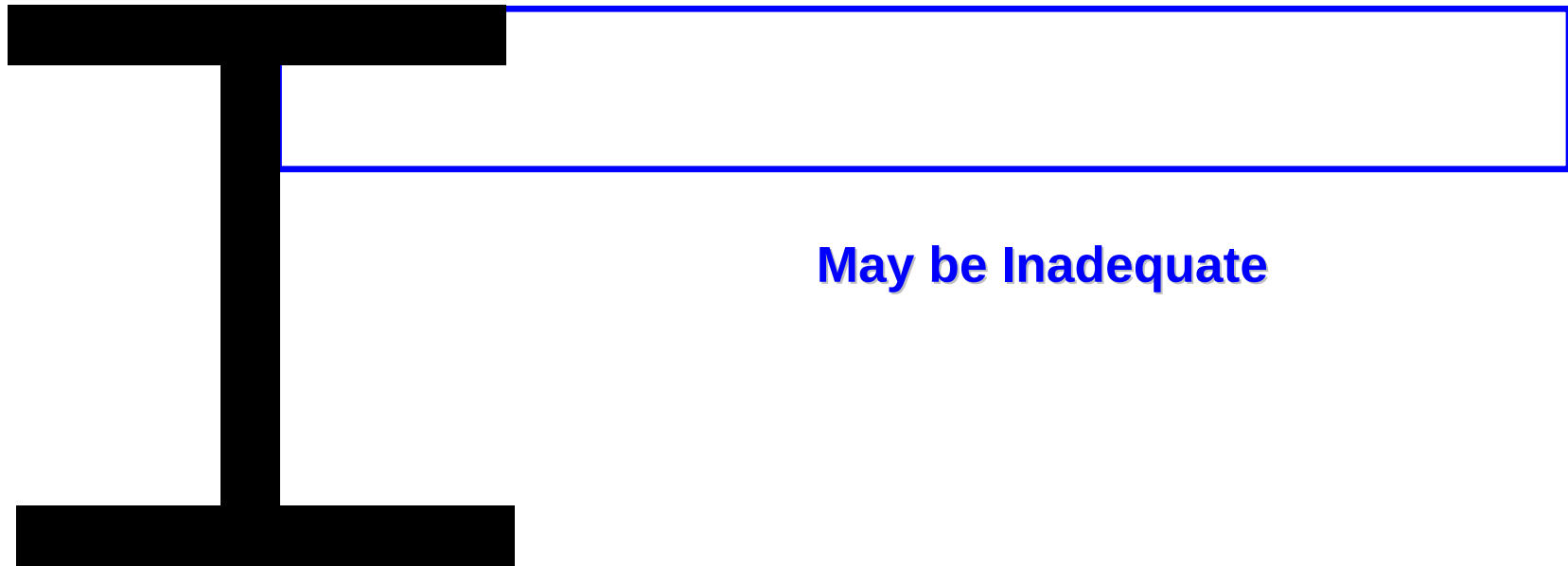
- **Prevent Lateral Torsional Buckling**



Introduction to Seismic Design Concepts

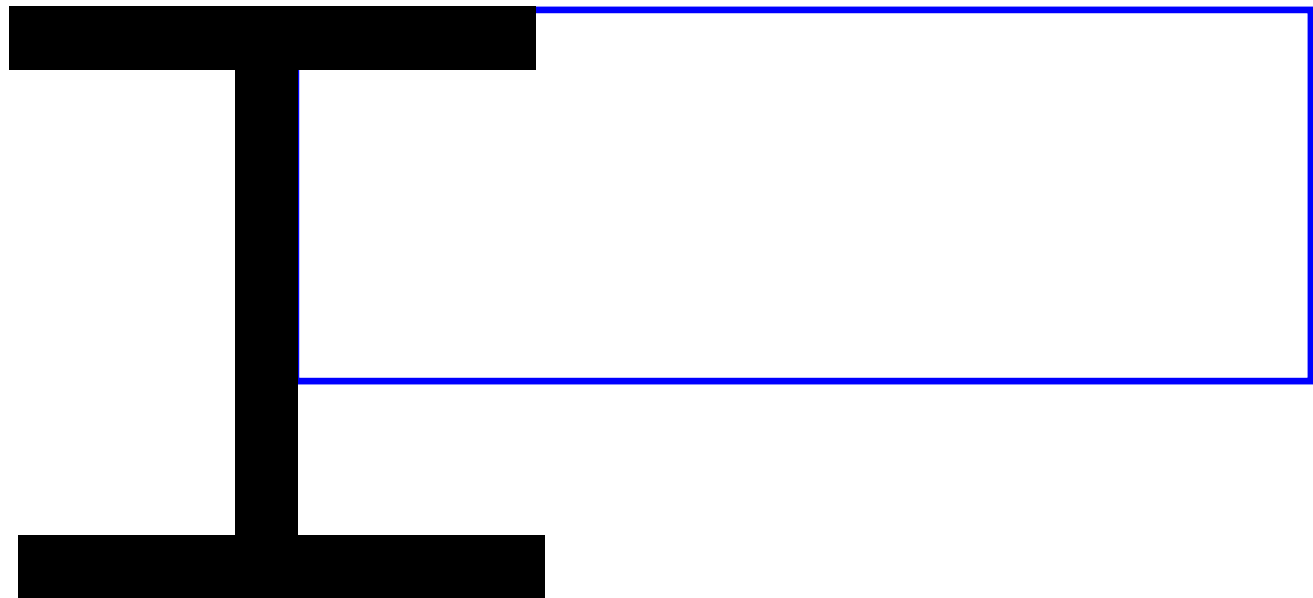
Lessons Learned

- Prevent Lateral Torsional Buckling

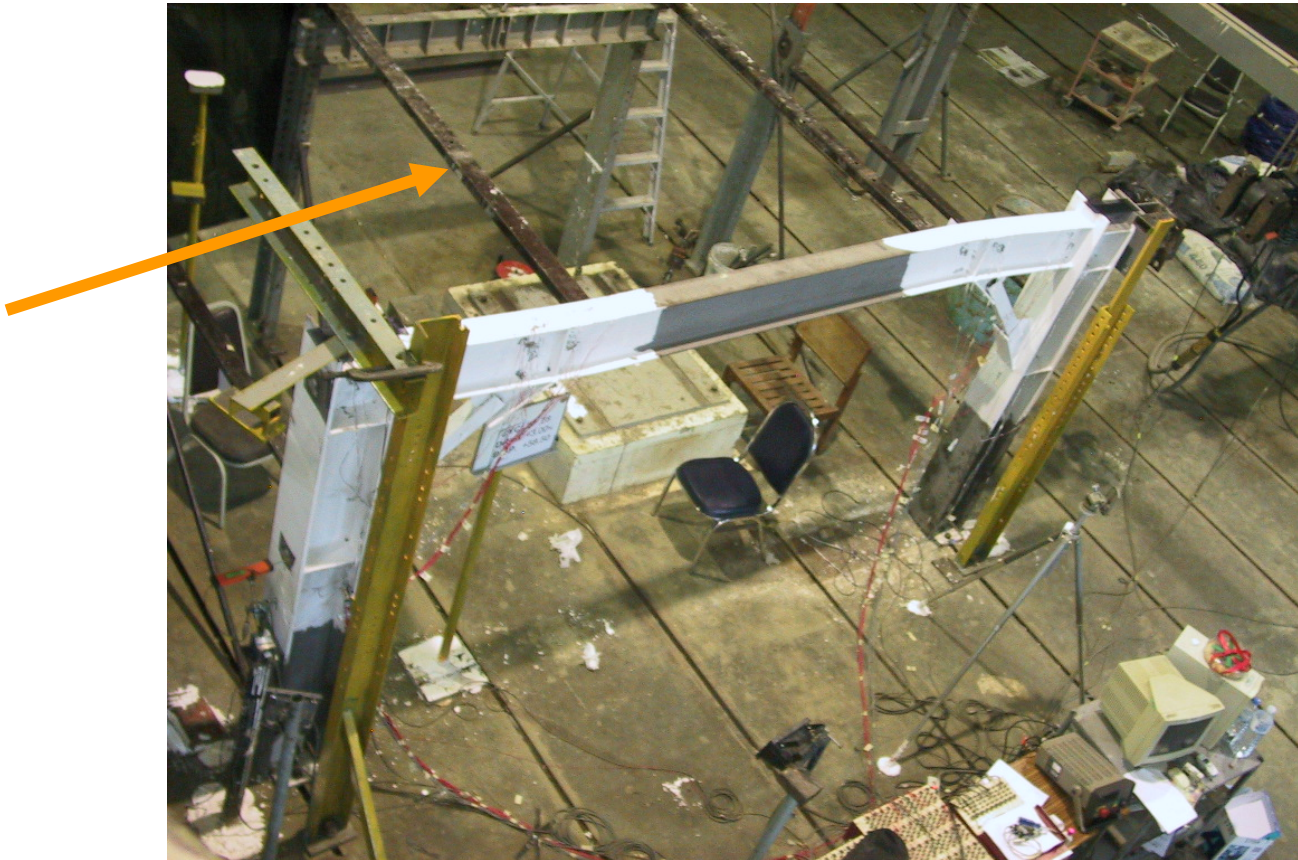


Lessons Learned

- Prevent Lateral Torsional Buckling



Response At Member Level



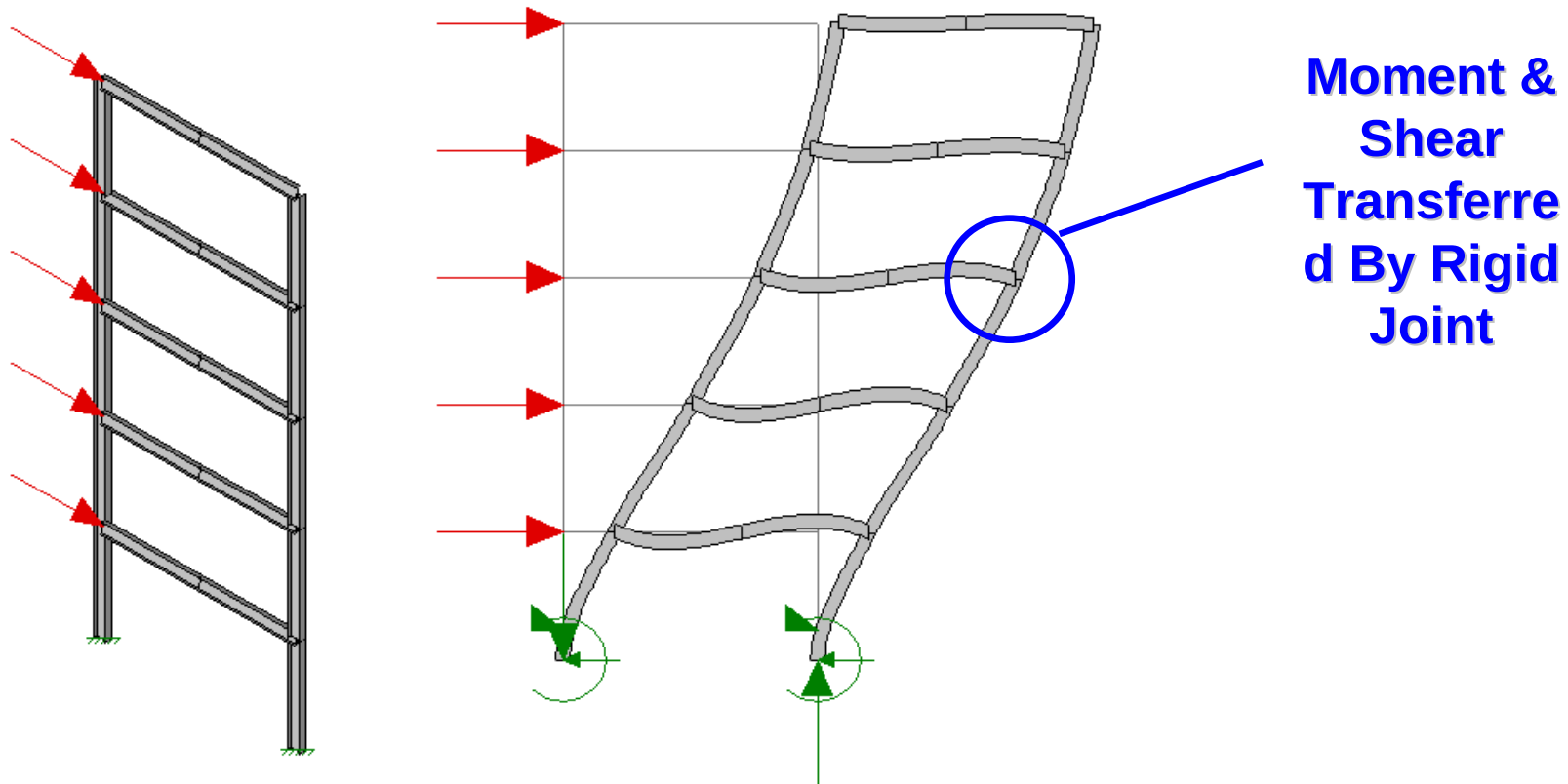
STRUCTURE REQUIREMENTS

Moment Frame



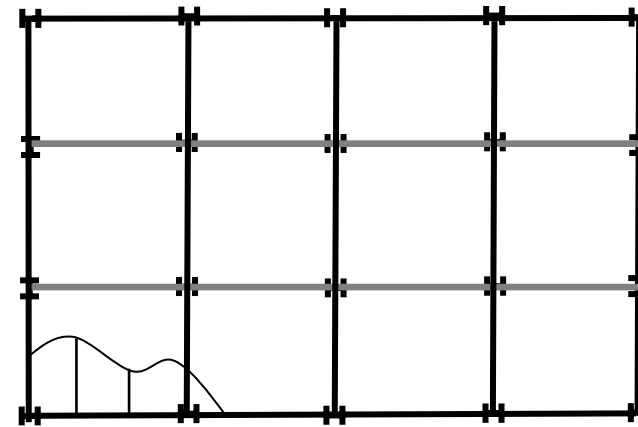
Moment Frame

- Widely used lateral load resisting structural steel system
- One of the best system if properly designed



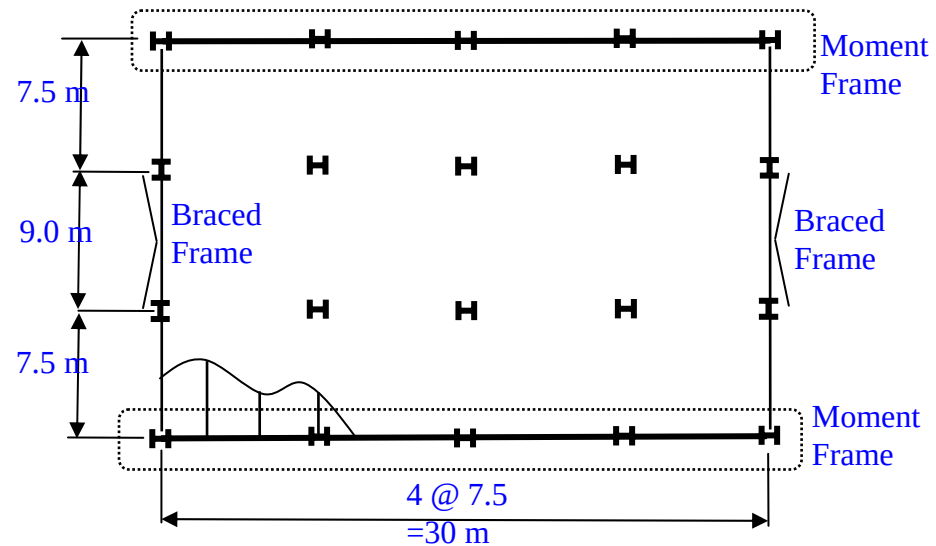
Moment Frame

- Evolution of Moment Resisting Frames
 - Older Moment Frames: All bays are MRF



Moment Frame

- Evolution of Moment Resisting Frames
- Newer Moment Frames: MRF in some bays only



Moment Frame

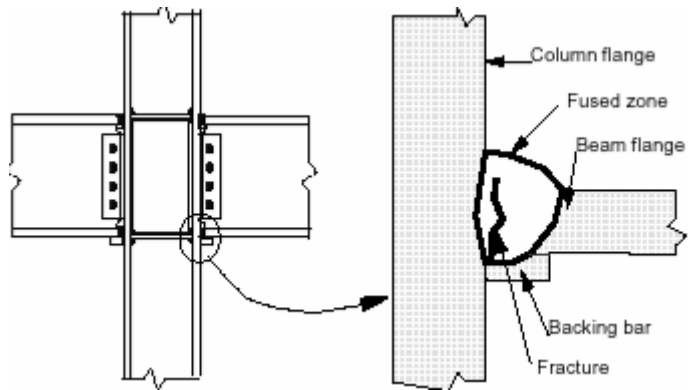


โครงการอบรม การออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว

Moment Frame

- ❑ 1994 Northridge Earthquake (M6.7)
 - ❑ Widespread Damage to Beam-to-Column Connections, Base Plates, and Other Framing Elements
 - ❑ Damaged Structures Included:
 - ❑ 1 Story to 26 Stories in Height
 - ❑ 30-Year-Old to Recently Erected
 - ❑ Areas with Moderate to Severe Levels of Ground Shaking
-

Moment Frame



(After SAC Joint Venture 1999)

Moment Frame

- 1995 Kobe Earthquake (M 6.9)
 - Similar Damage as Found in the Northridge Earthquake
 - Connection Failures resulted in Partial Collapses of Buildings
-

Moment Frame

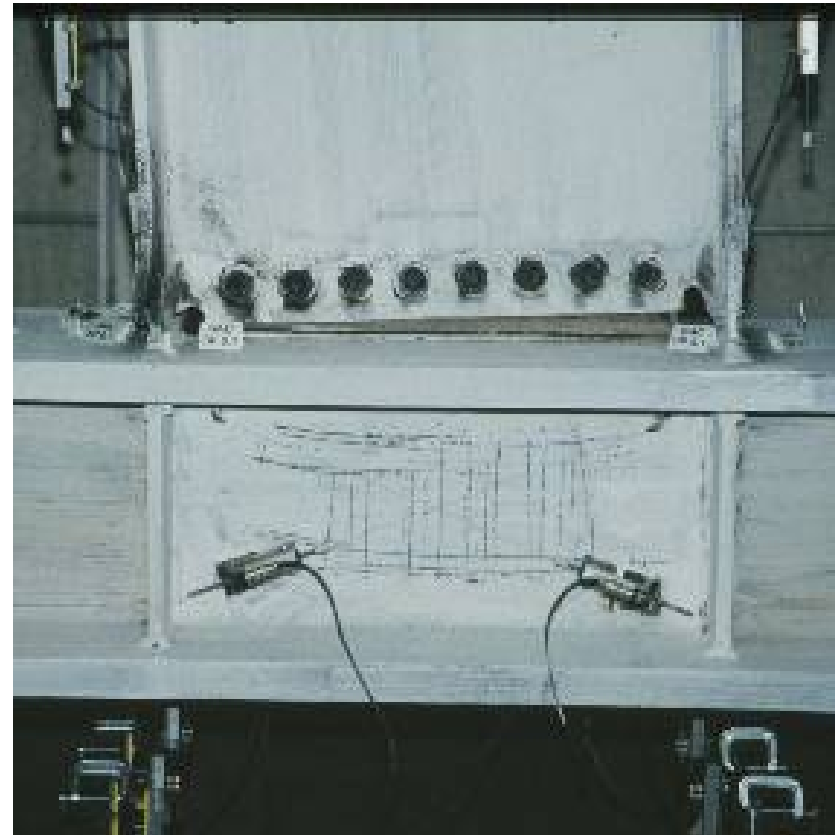
□ Laboratory Test



Uang et al. 2002

Moment Frame

- University of Michigan Test (Wongkaew et al. 2002)



Moment Frame

- University of Michigan Test (Wongkaew et al. 2002)



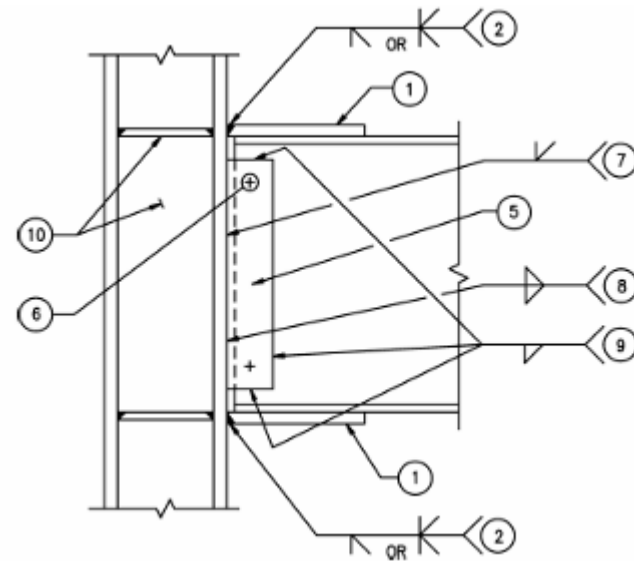
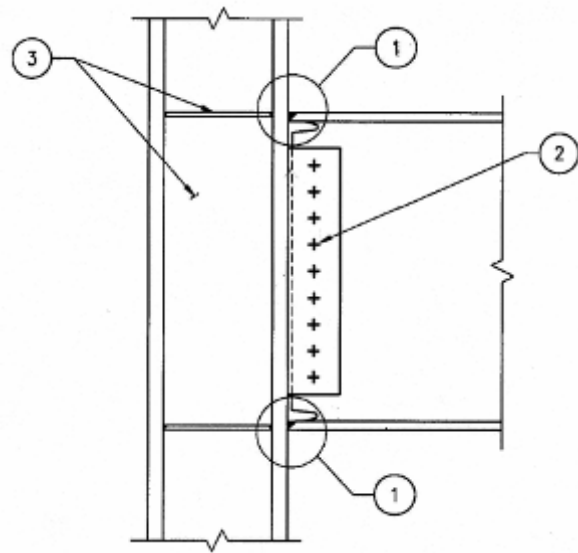
Moment Resisting Frame

Moment Resisting Frame Classification

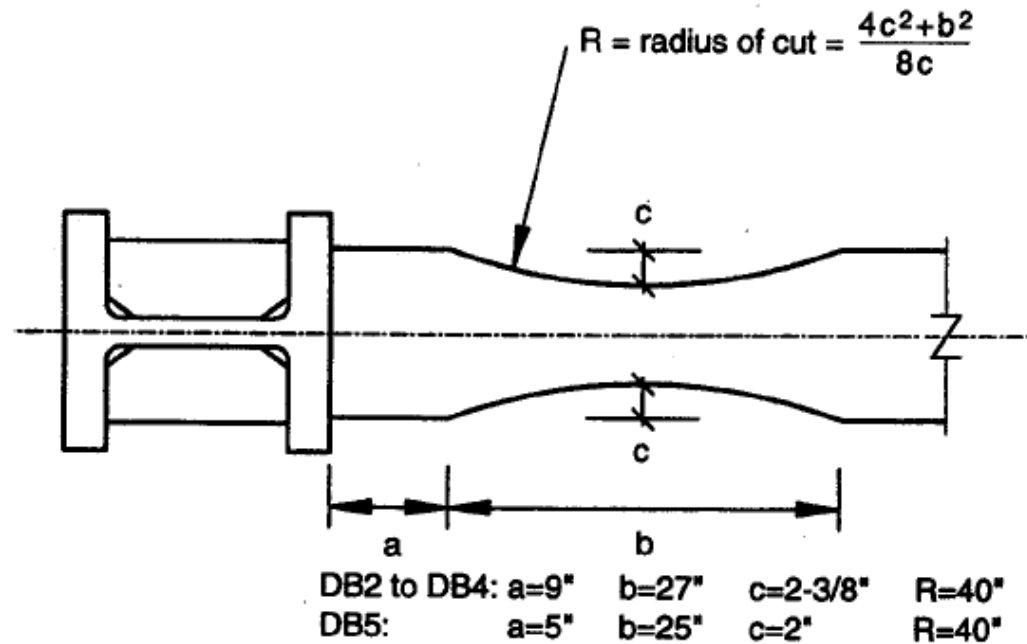
- Special Moment Resisting Frame
(0.04 Rad Rotation Requirement at Joint)
 - Intermediate Moment Resisting Frame
(0.02 Rad Rotation Requirement at Joint)
 - Ordinary Moment Resisting Frame
(Joint Design for $1.1R_yM_p$)
-

SMRF & IMRF Moment Frame

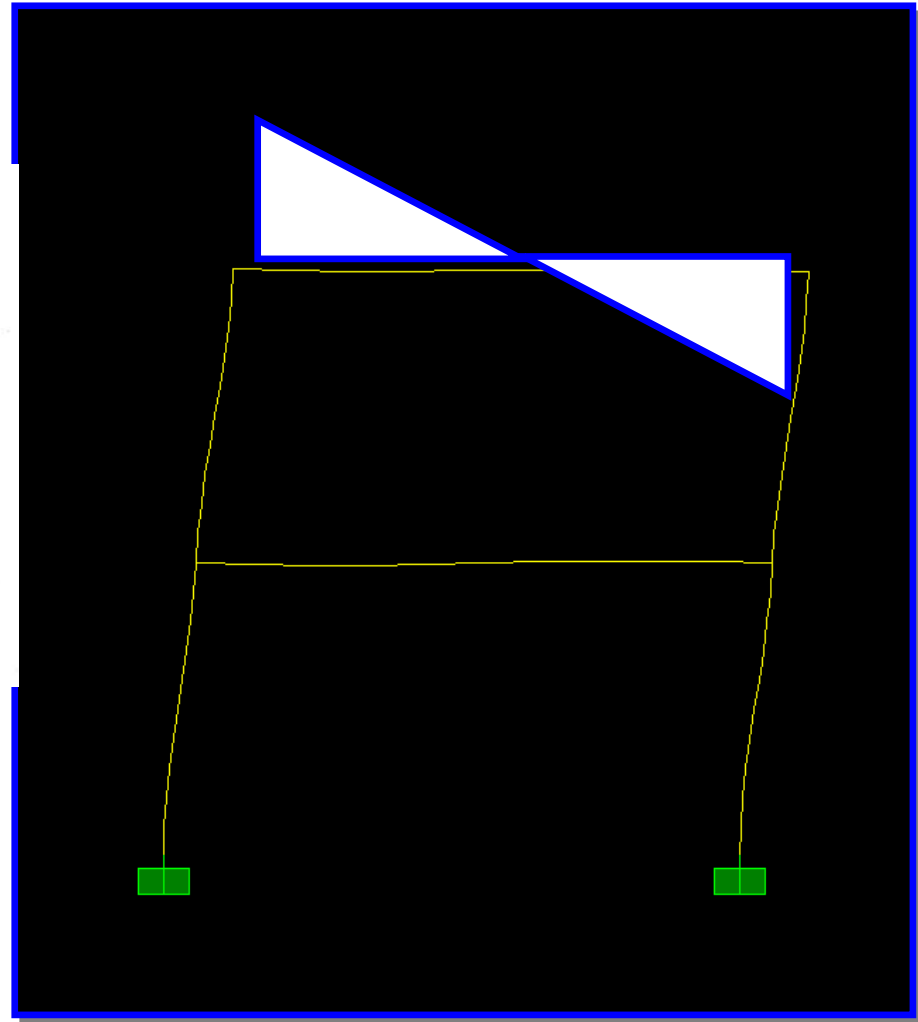
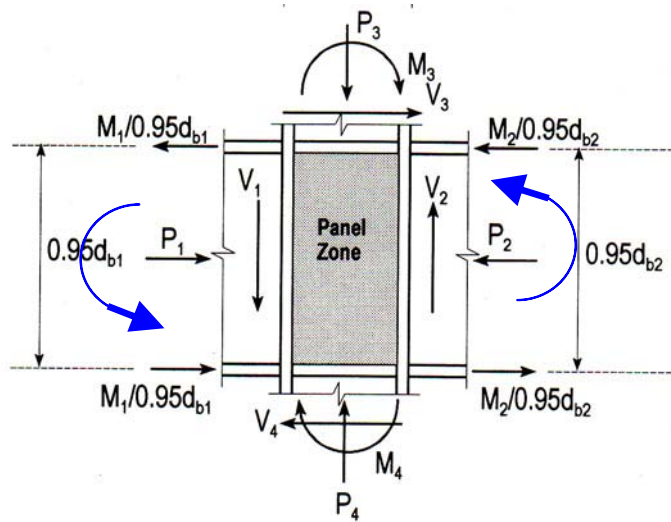
- Moment connection must be a “Prequalified Type”
- Capable of providing 0.04 radian plastic rotation (SMRF) or 0.02 radian for IMRF

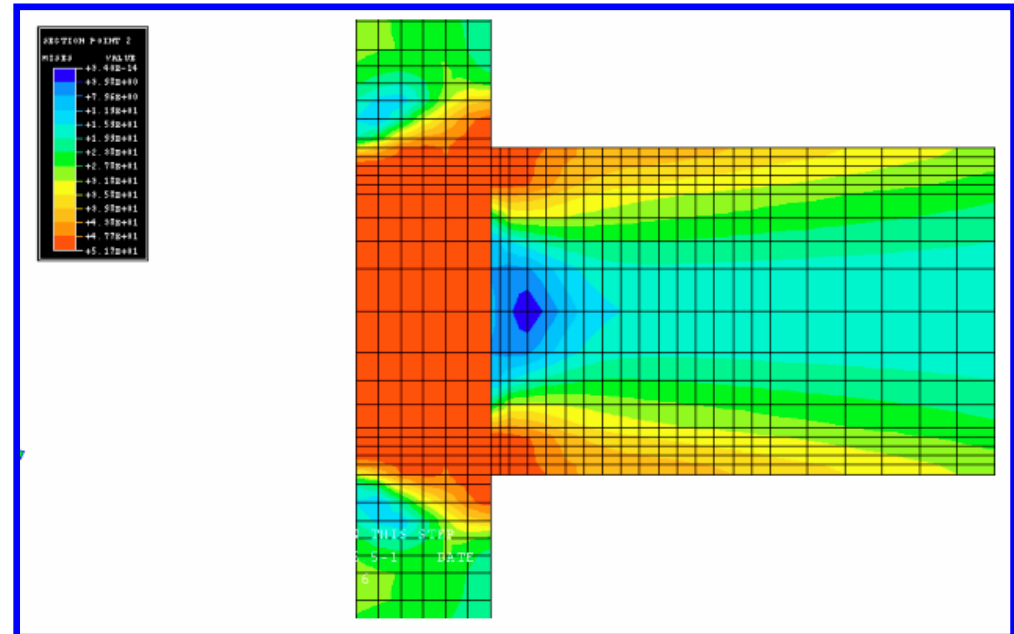


SMRF & IMRF Moment Frame

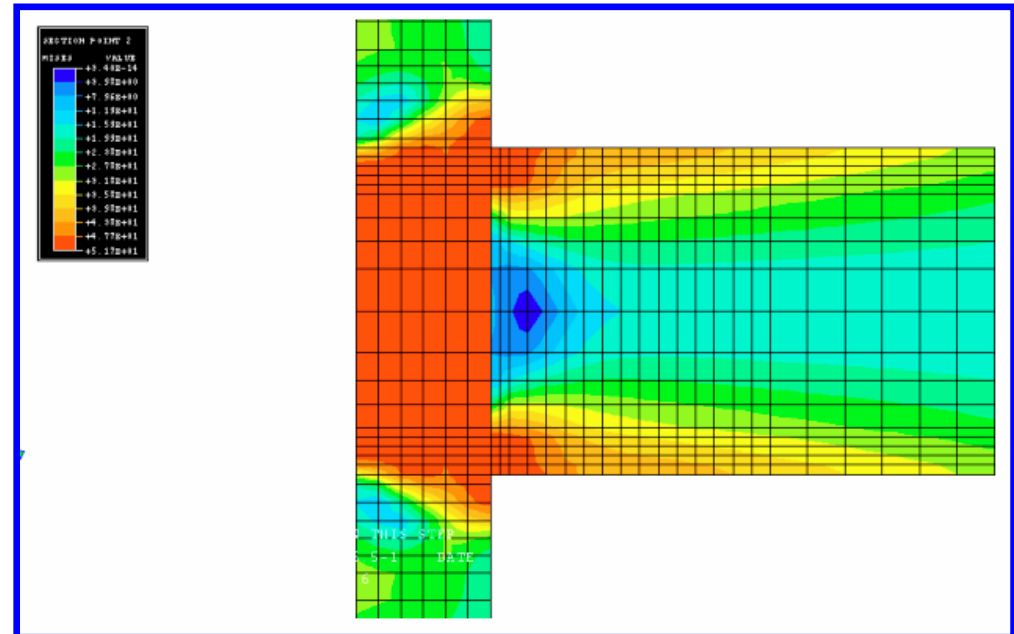


Panel Zone Requirement





Panel Zone Requirement



Wongkaew et al. 2002

Panel Zone Requirement

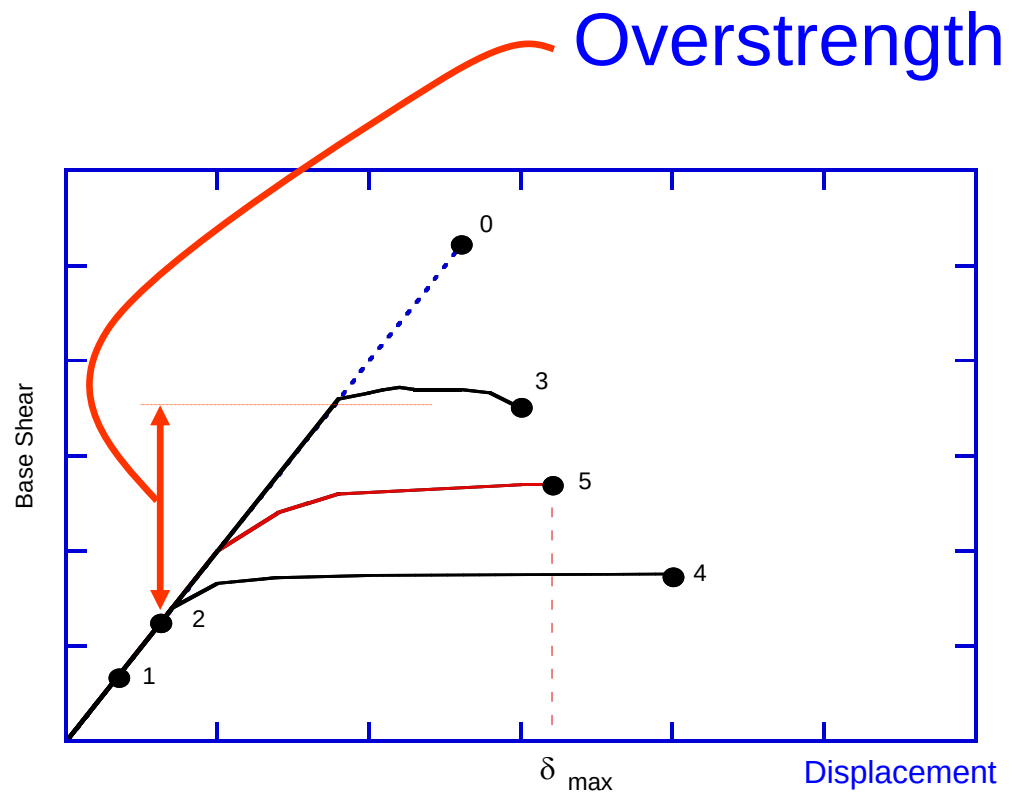
AISC 1992 Panel Zone Strength $\phi V_n \geq V_u$

$$\phi V_n = \phi_v 0.6 F_{yc} d_c t_p \left[1 + \frac{3 b_{cf} t_f^2}{d_b d_c t_p} \right]$$

$$t = \frac{d_z + w_z}{90}$$

Column Requirement

Overstrength Load Combination

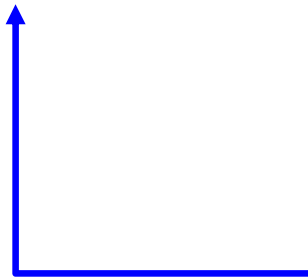


- Columns must be designed for Overstrength Condition
- Code considers only Axial Force

Column Requirement

Load Combination with Overstrength

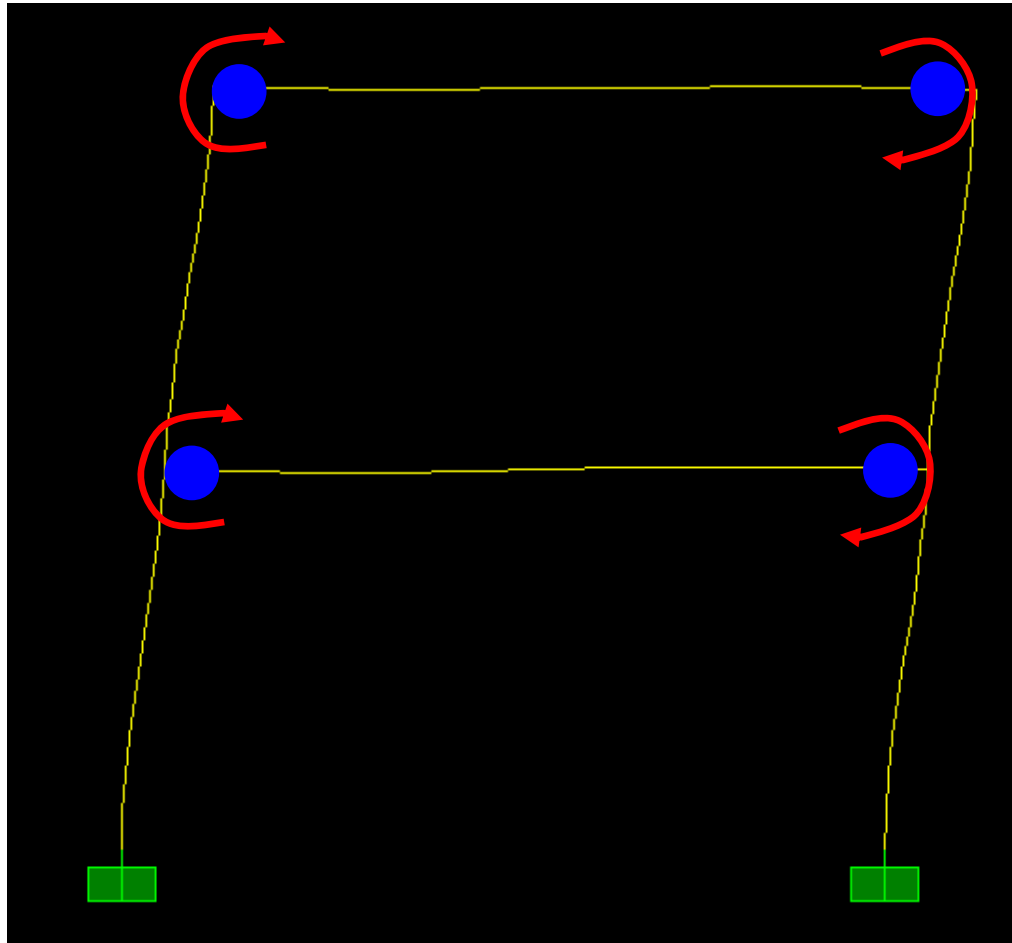
$$P_u = 1.2D + 0.5L + \Omega_o E$$



Overstrength Factor

= 2-3 (based on structural system)

Column Requirement



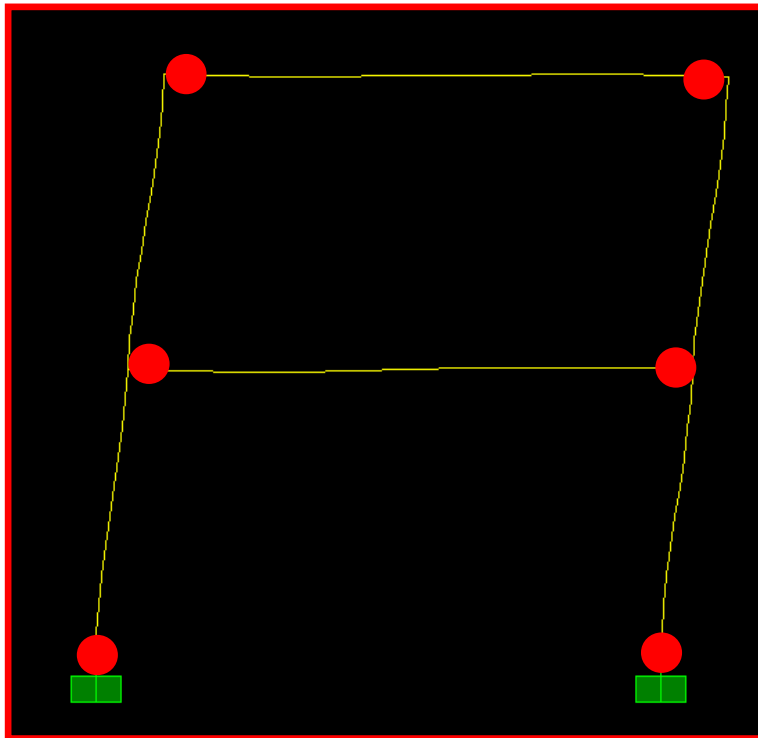
$$V_b = 2M_p/L$$

$$P_2 = 2M_p/L$$

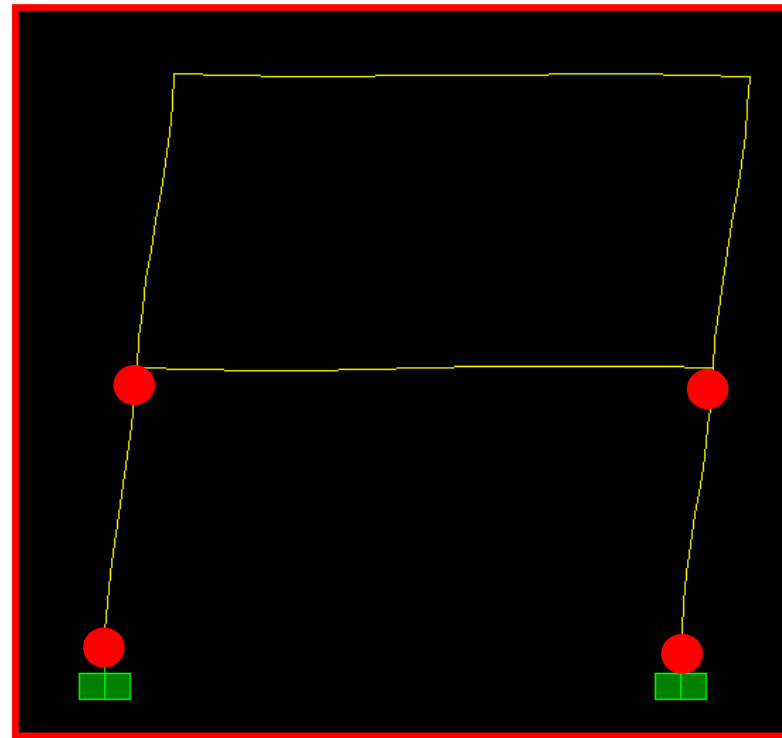
$$P_1 = 2M_p/L + 2M_p/L$$

Misc. Requirement

□ Strong Column
Weak Beam

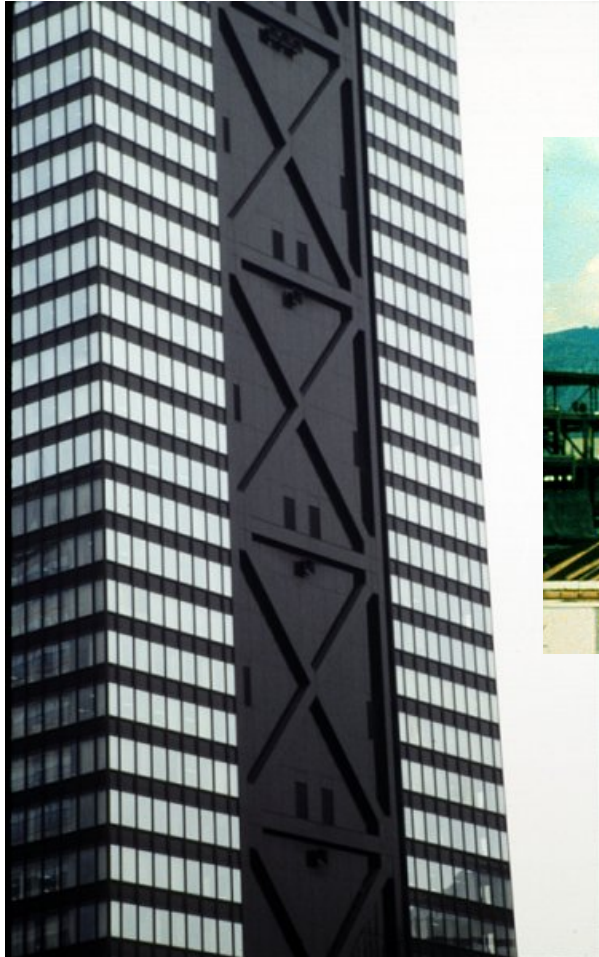


□ Weak Beam
Strong Column

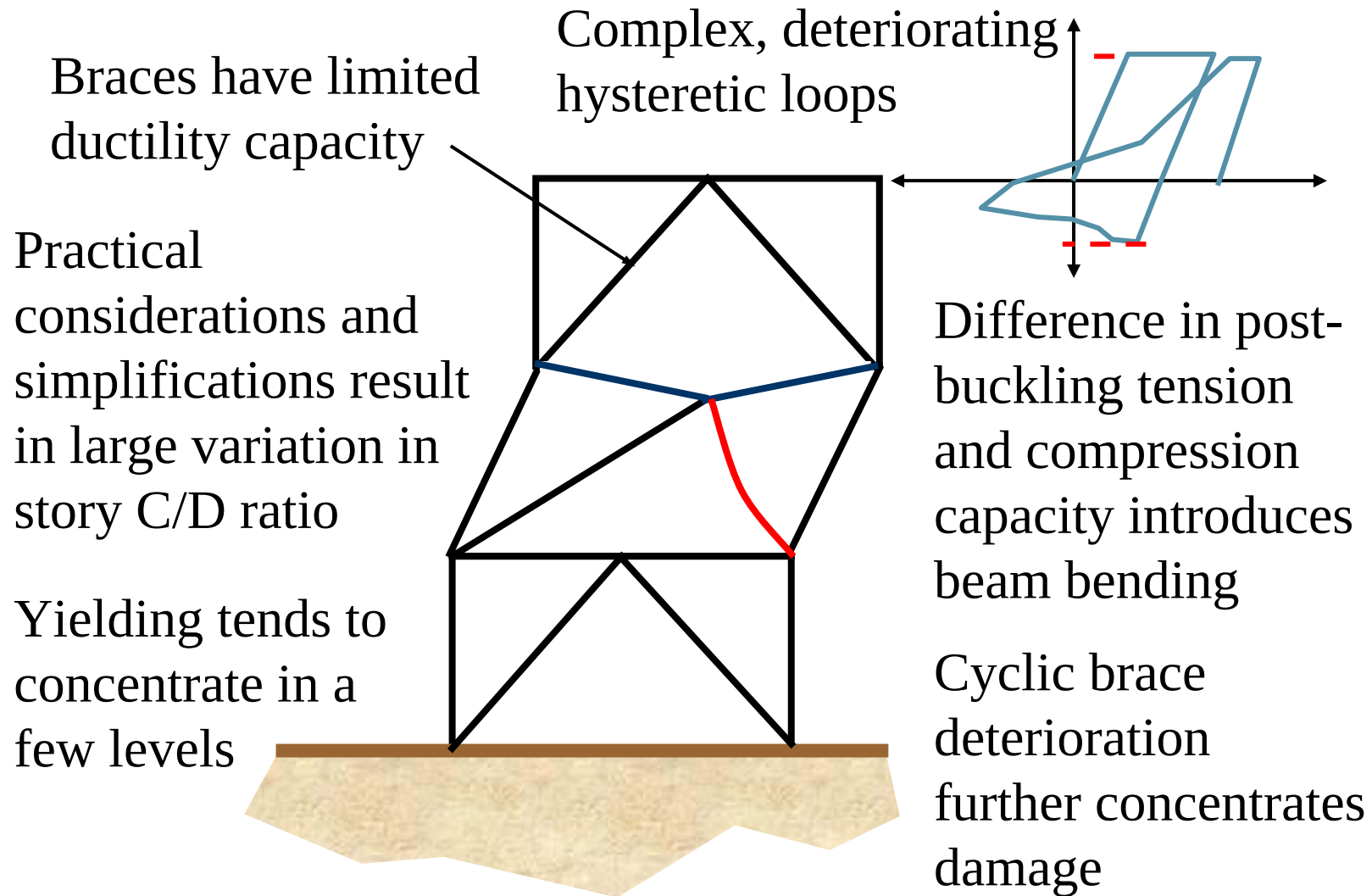


AISC 1992
$$\frac{\sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_g)}{\sum Z_b F_{yb}} \geq 1.0$$

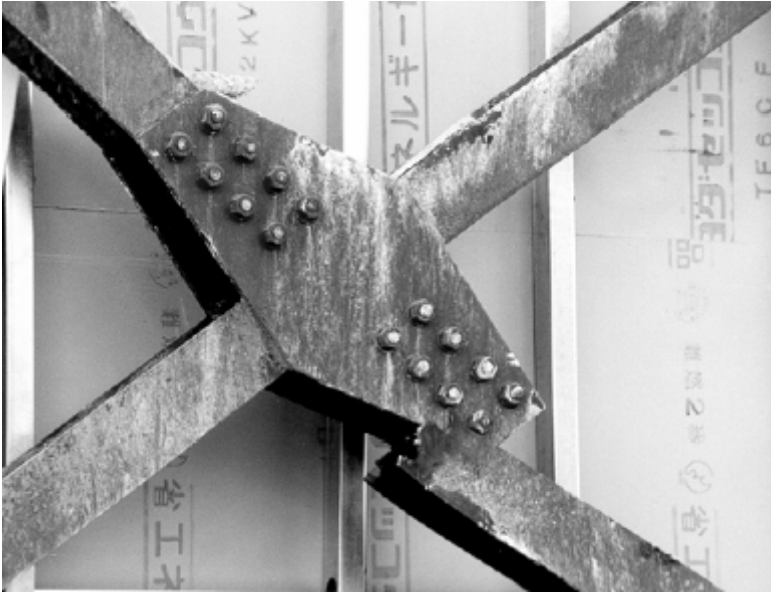
Braced Frame



Problems with Steel Braces

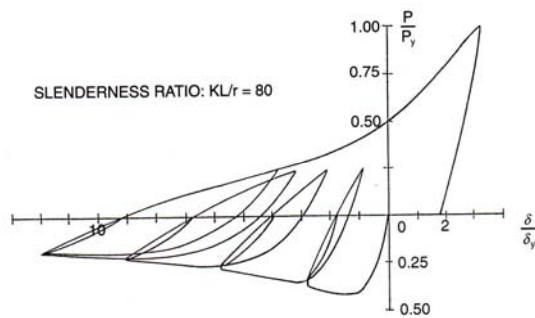


After Sabelli and Mahin, DAESS Design and
University of California, Berkeley

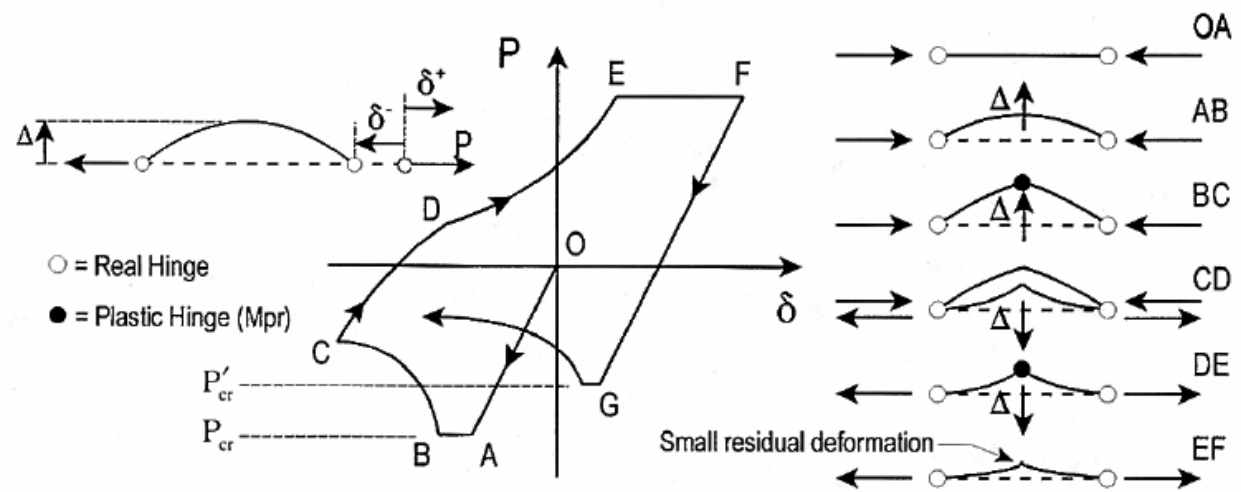


Braced Frame

Behavior of Bracing



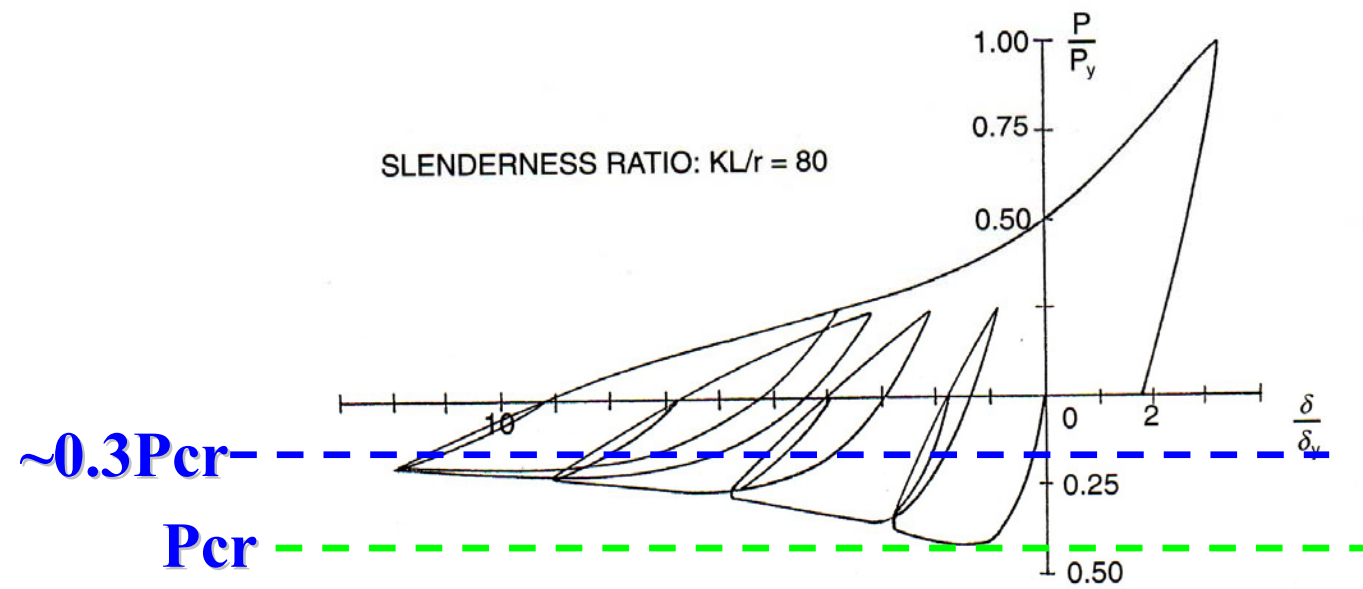
Goel et al.



Uang et al.

Braced Frame

Behavior of Bracing

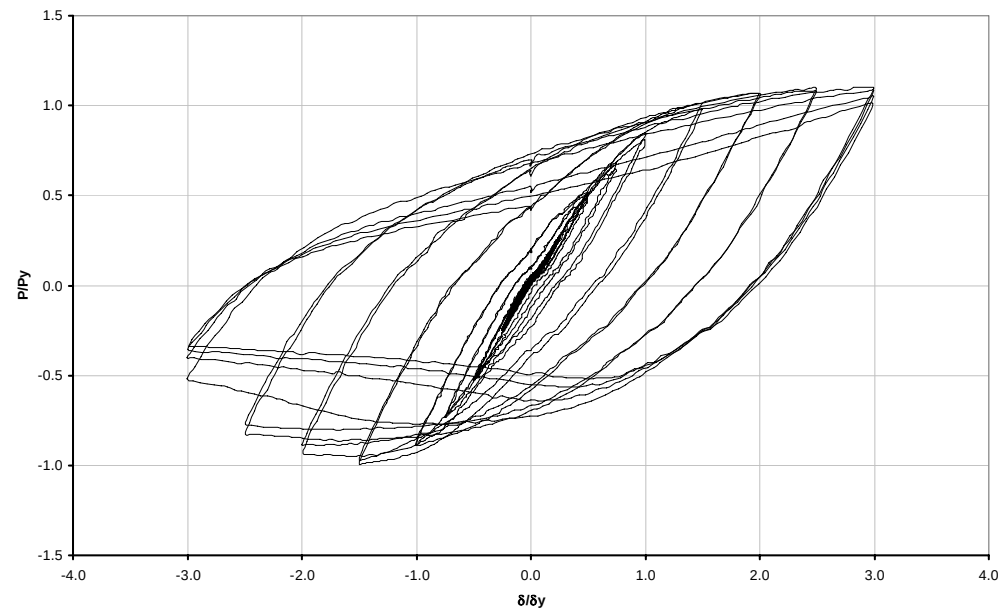


Goel et al.

Braced Frame

Factor Affecting Ductility of Braced Frames

Slenderness Ratio



Braced Frame

Factor Affecting Bracing Behavior

AISC 1992 Slenderness Ratio Limit

$$kL / r \leq 4.23\sqrt{E / F_y}$$

AISC 2002 Slenderness Ratio Limit

$$kL / r \leq 5.87\sqrt{E / F_y}$$

Braced Frame

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



Braced Frame

Factor Affecting Bracing Behavior

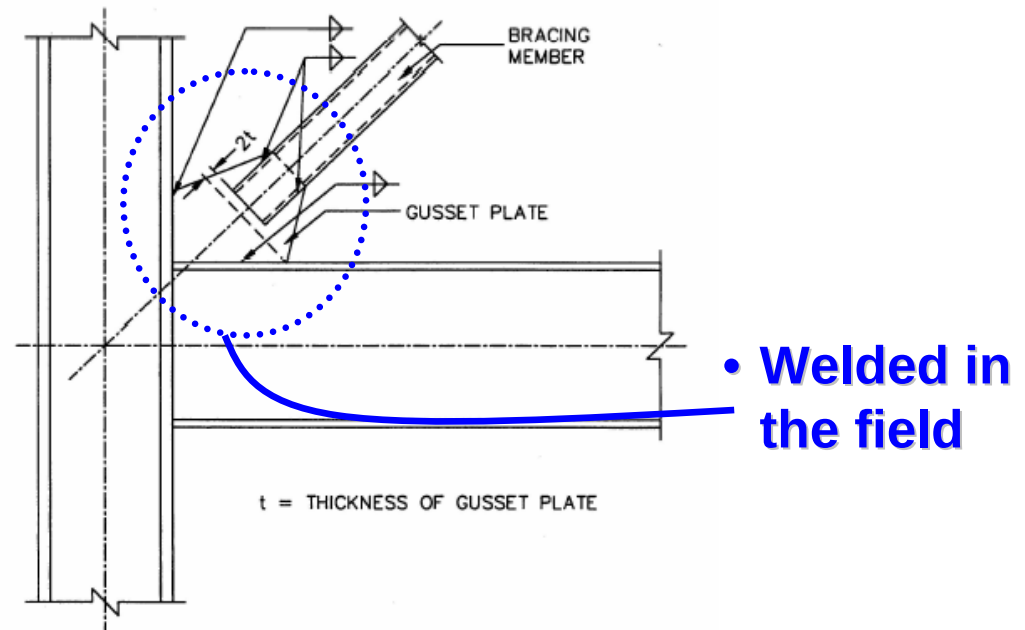
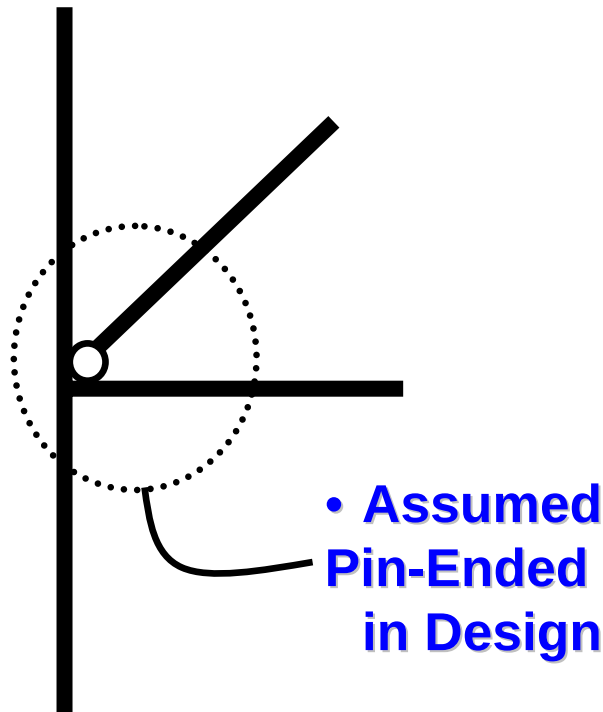
3) Connection

- Bracing-to-Beam
- Bracing-to-Column



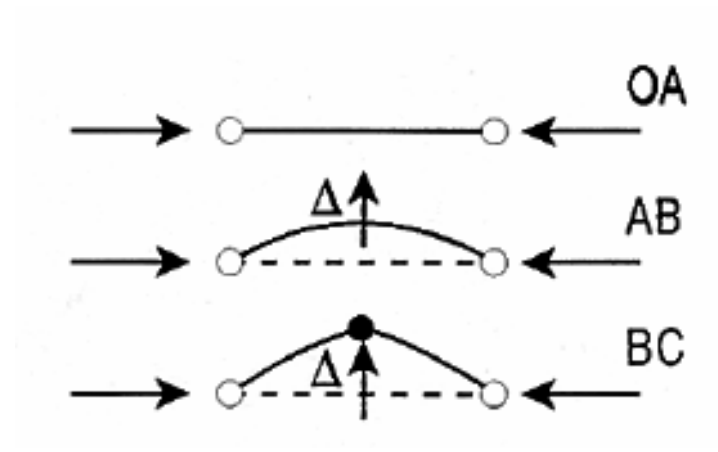
Braced Frame

Connection Design Problem

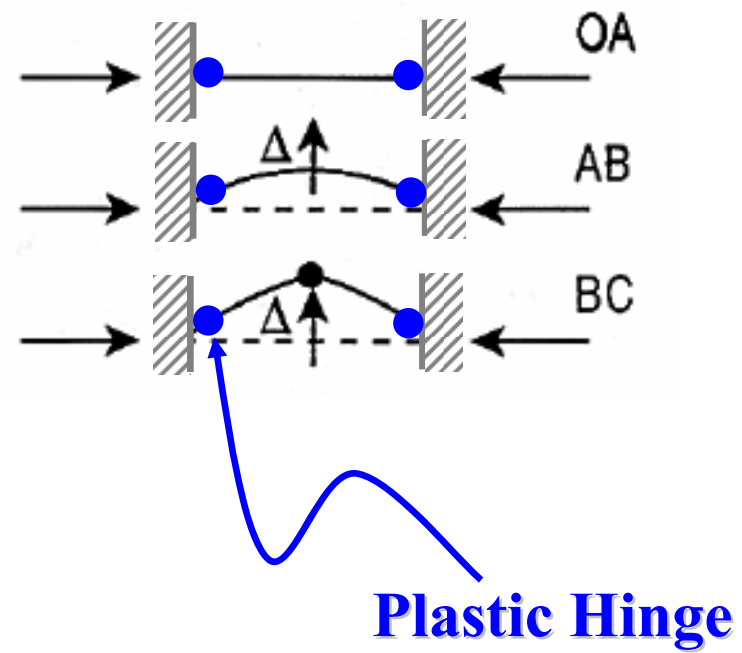


Braced Frame

Assumed



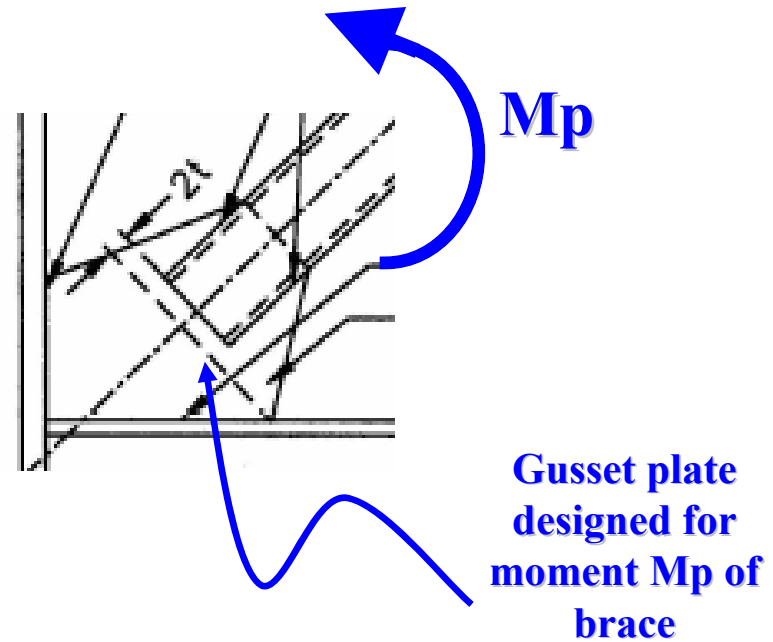
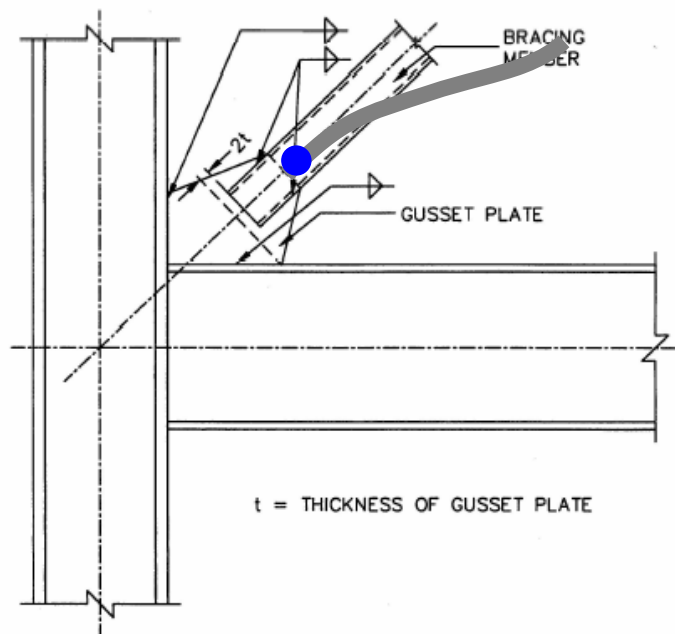
Actual



Braced Frame

Solution

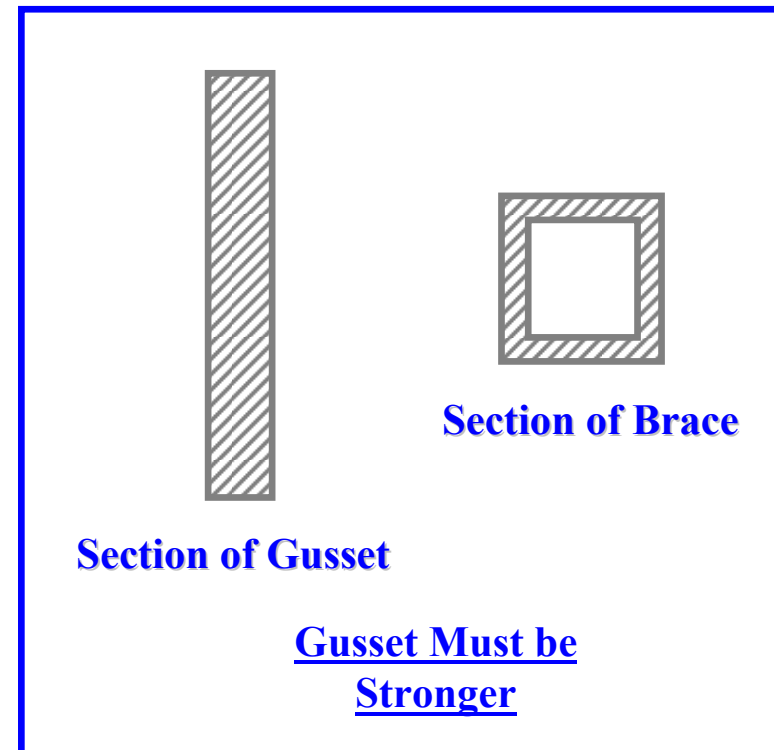
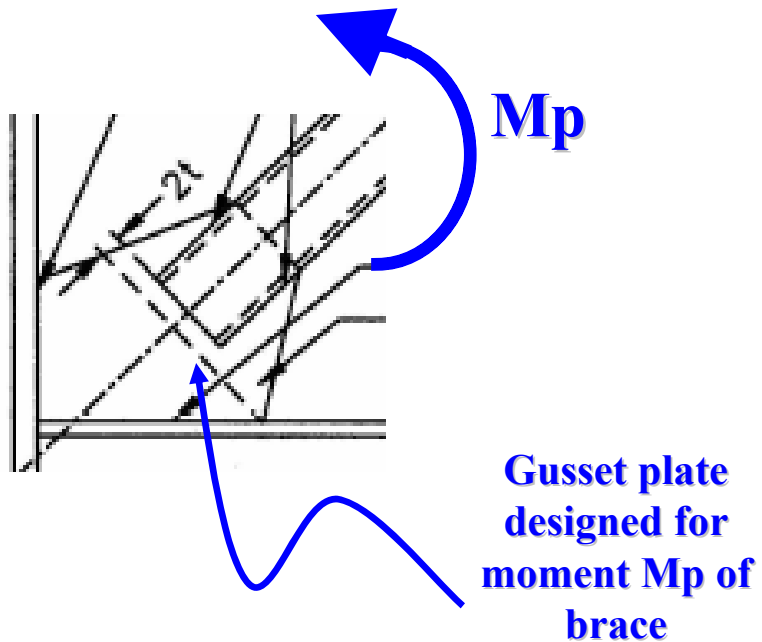
Case A: Brace Buckles in Plane



Braced Frame

Solution

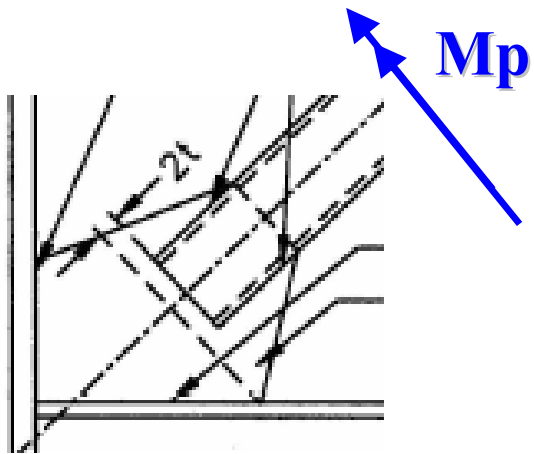
Case A: Brace Buckles in Plane



Braced Frame

Solution

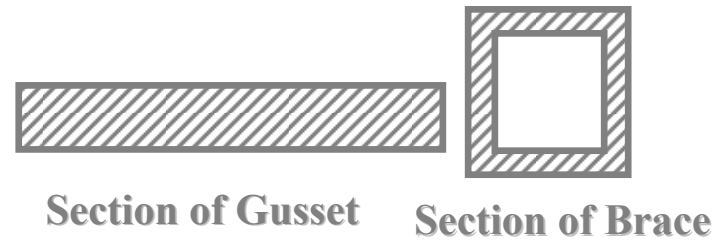
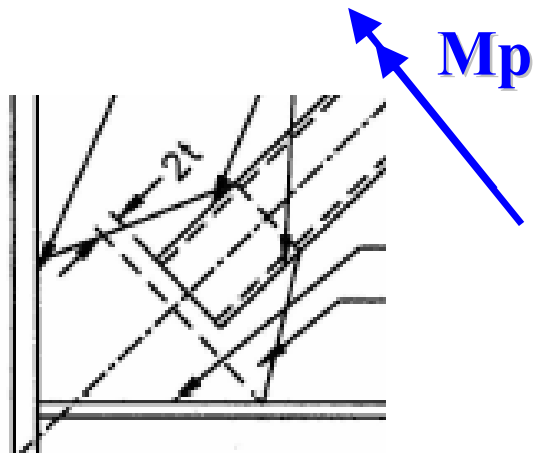
Case B: Brace Buckles Out of Plane



Braced Frame

Solution

Case B: Brace Buckles Out of Plane

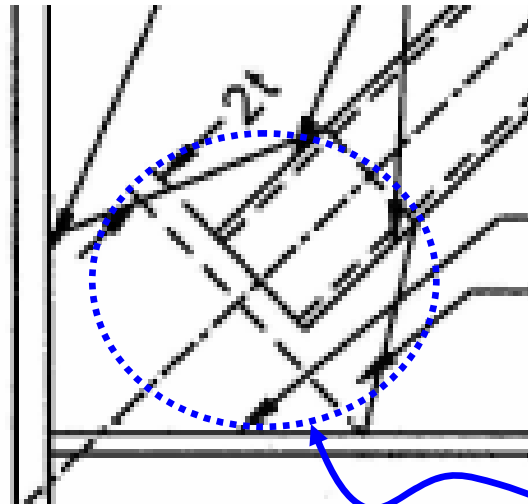


Impossible to
make gusset
stronger than
brace

Braced Frame

Solution

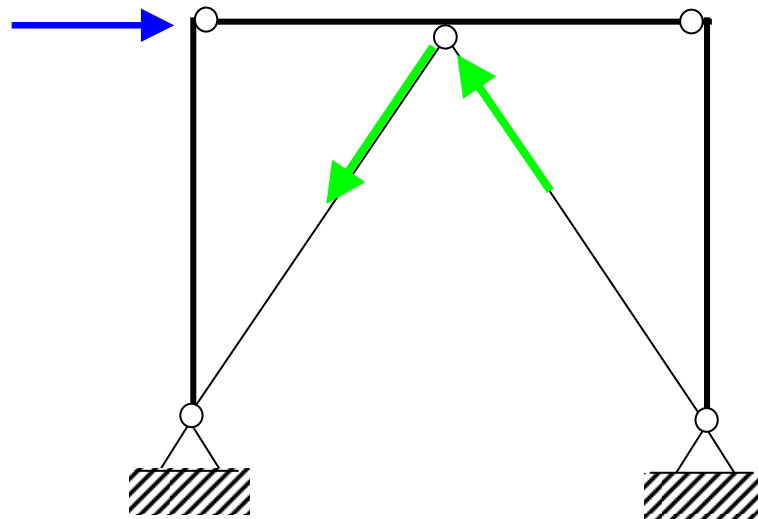
Case B: Brace Buckles Out of Plane



Allow gap at
least $2t$ to
allow plastic
rotation

Braced Frame

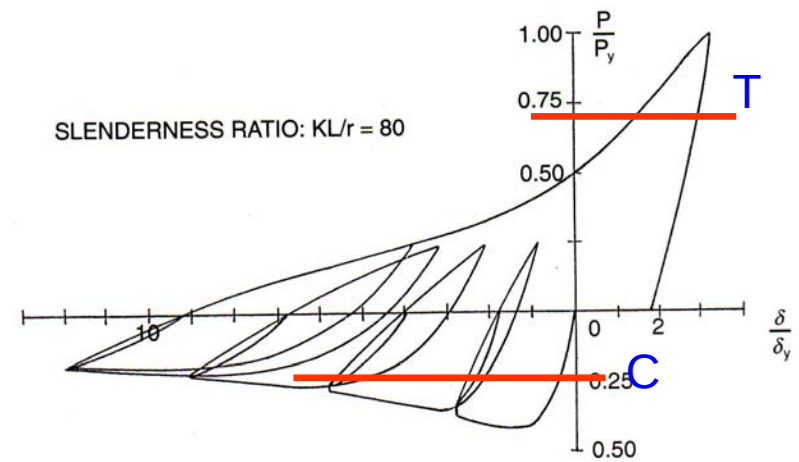
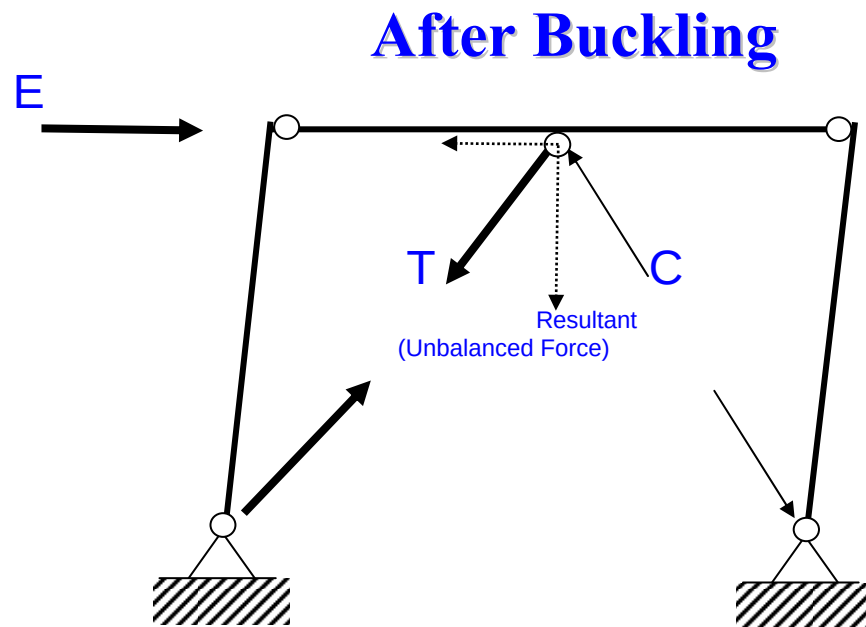
Post Buckling Consideration



Before Buckling

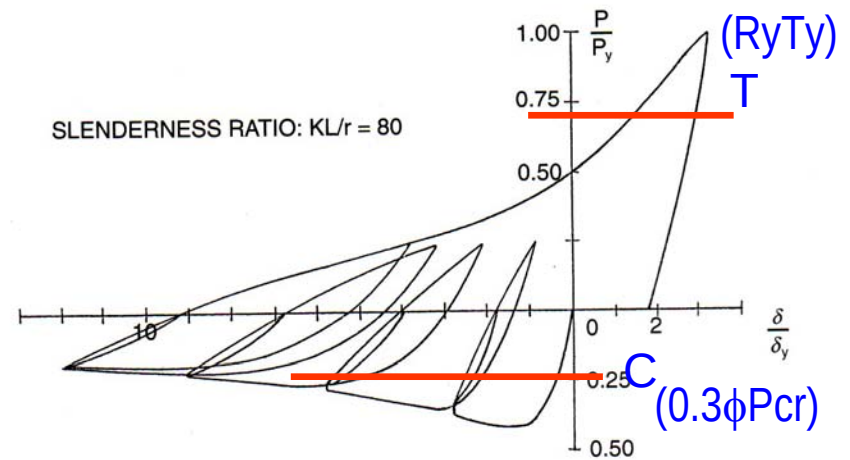
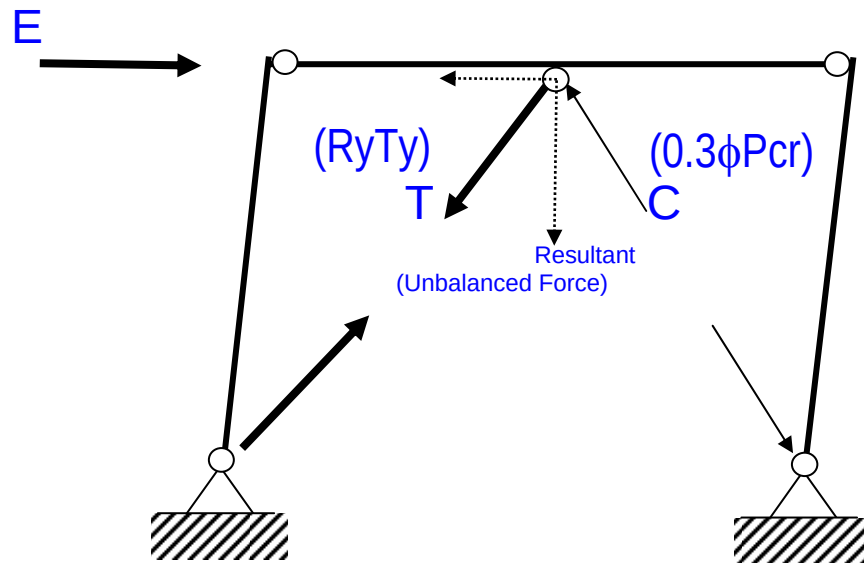
Braced Frame

Post Buckling Consideration



Braced Frame

AISC Requirement



การเสริมกำลังอาคารเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว
โดยใช้โครงสร้างเหล็ก

Advantages

- ❑ ข้อดีของการใช้เหล็กรูปพรรณในการเสริมกำลังอาคาร
 - ❑ กำลัง (Strength) และความแข็ง (Stiffness) และ ความเหนียว (Ductility) ในตัวสูง
 - ❑ เทคโนโลยีที่ใช้อยู่ สามารถใช้ได้ทันที
 - ❑ ปรับปรุงได้หลายรูปแบบ (Versatility)
 - ❑ สามารถทำได้ในขณะที่อาคารมีการใช้งาน
-

Strengthening Applications

□ รูปแบบการใช้เหล็กรูปพรรณในการเสริมกำลังอาคาร

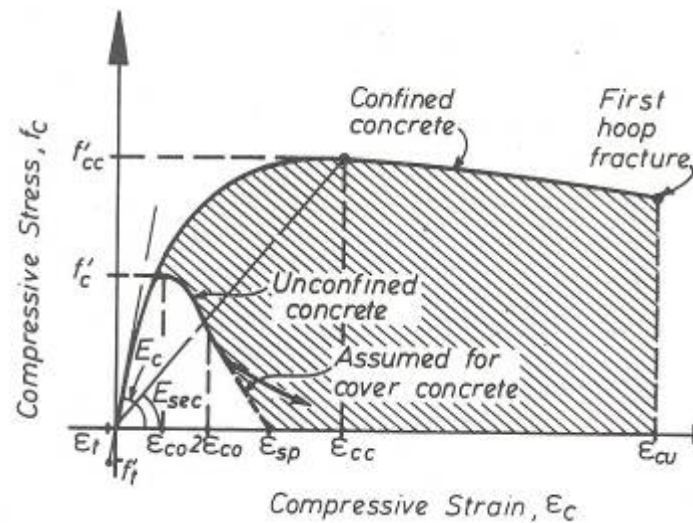
□ เพิ่ม Confinement

□ เพิ่มกำลังรับแรงเฉือน หรือ Lap Splice

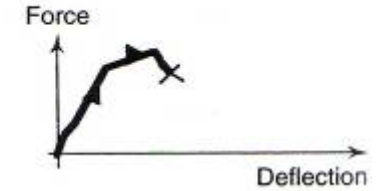
□ เพิ่มกำลังโดยรวมทั้งอาคาร



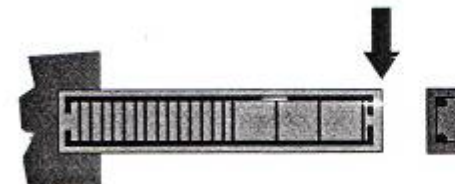
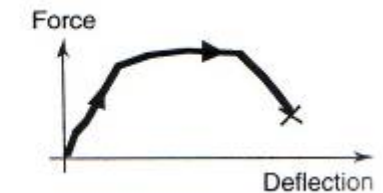
Importance of Confinement



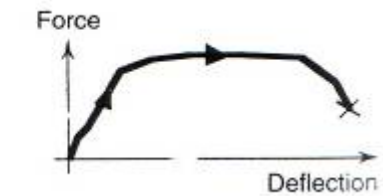
(a) Ordinary



(b) Intermediate



(c) Special



Confinement



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

Strengthening Applications

□ เพิ่ม Confinement

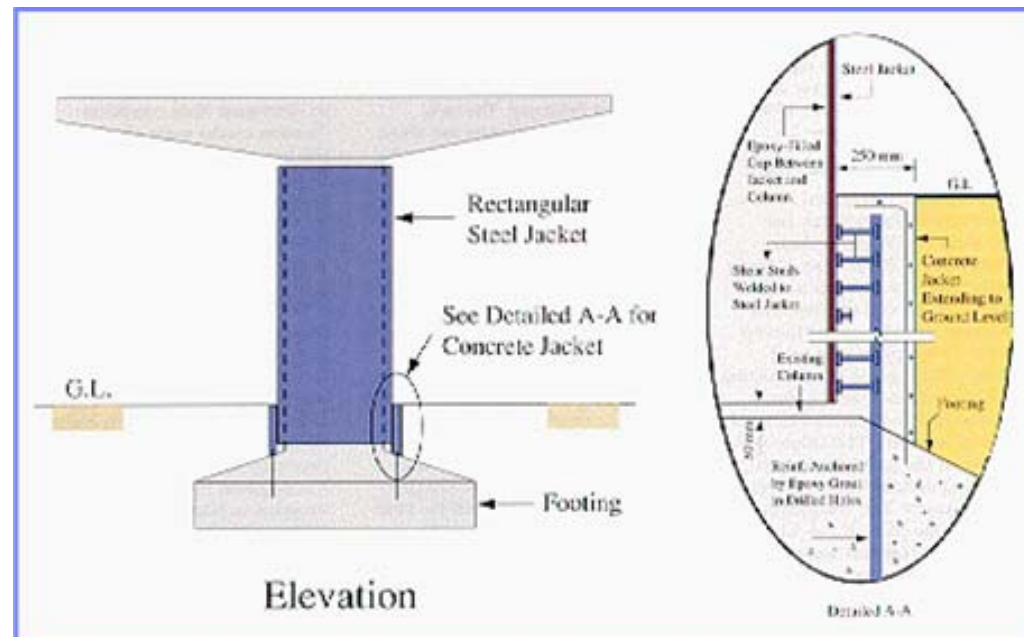
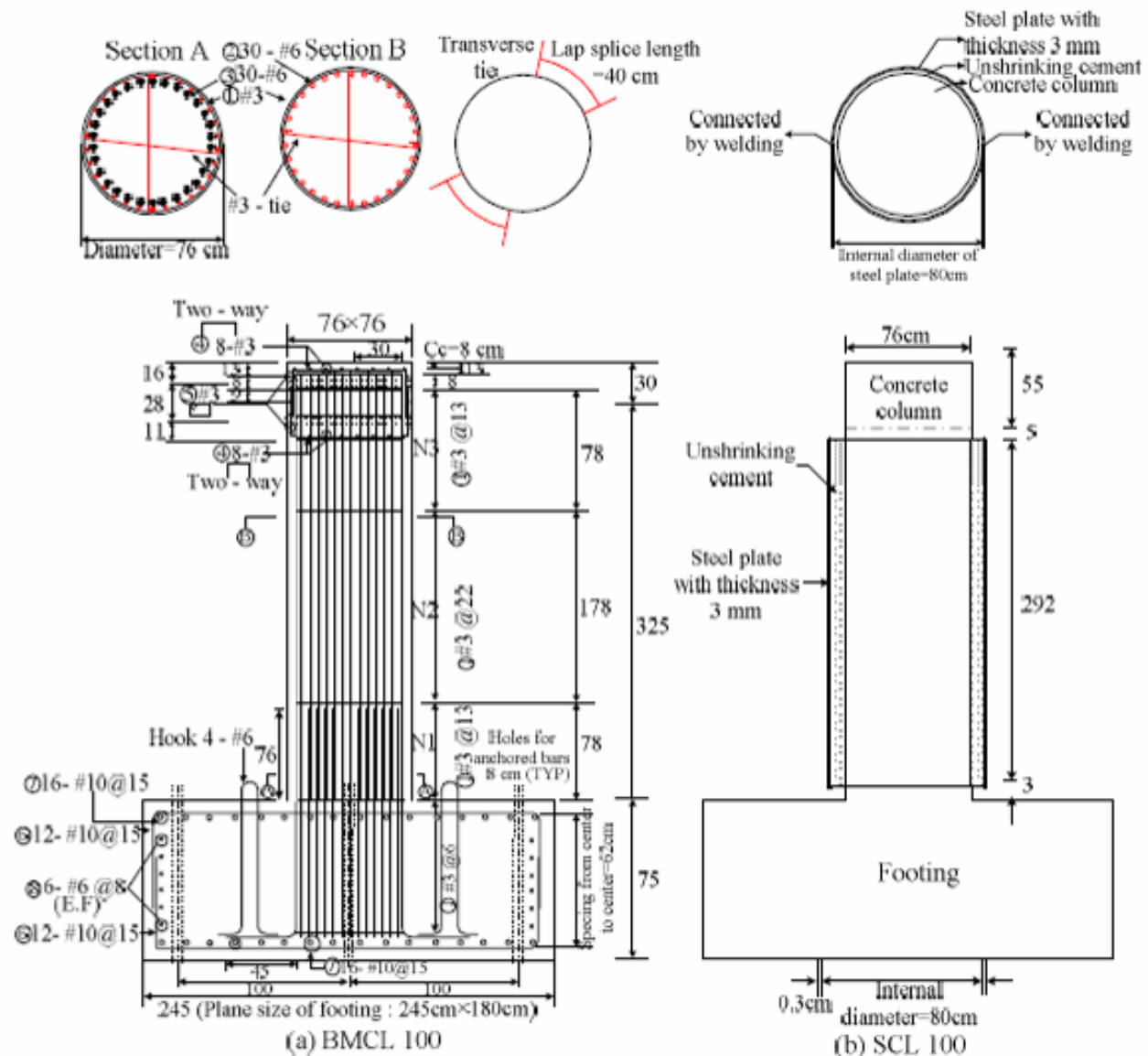


Figure 3 - Diagram of the full-height circular steel jacket used to retrofit the reinforced concrete bridge columns on the Hanshin Expressway in Kobe.

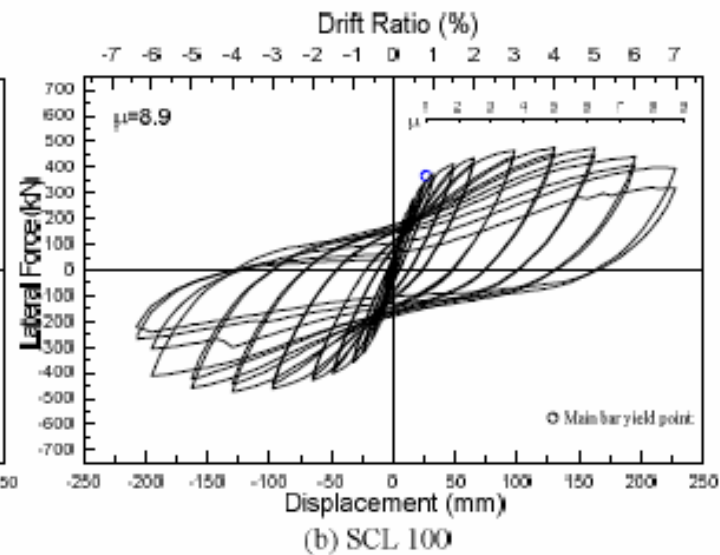
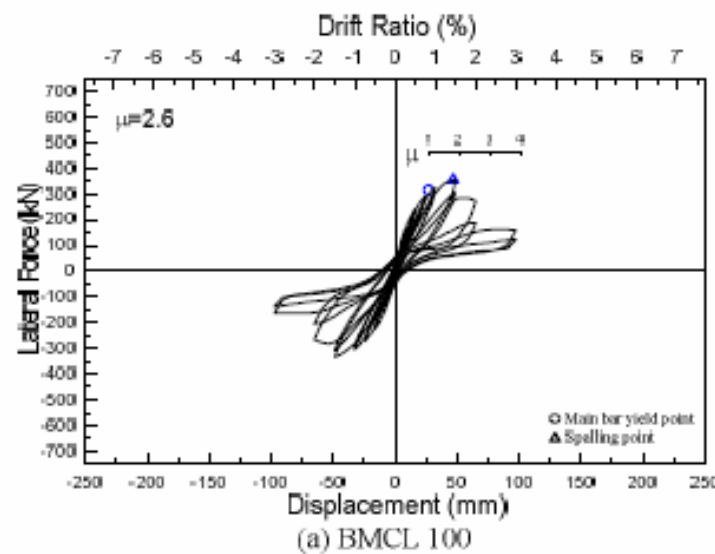
Strengthening Applications

□ Lap Splice



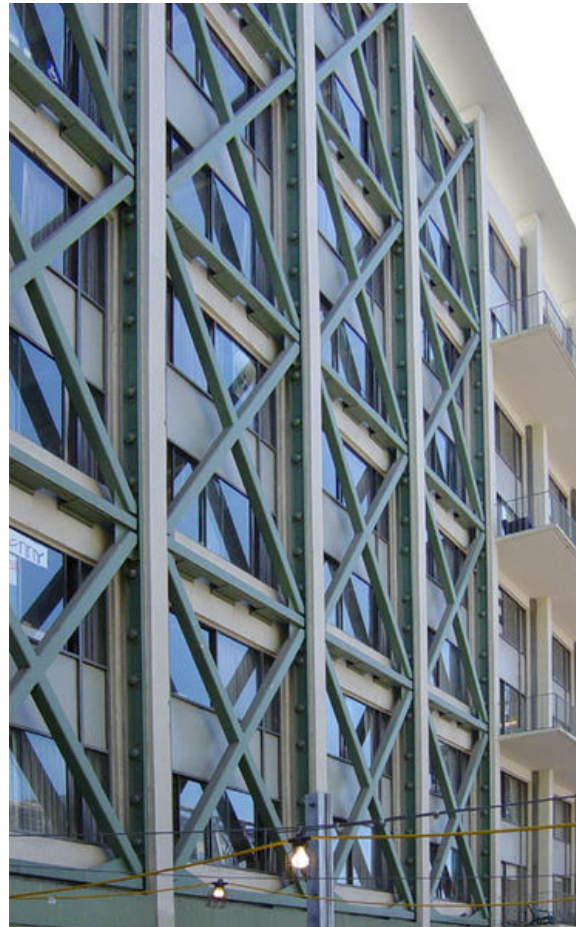
Strengthening Applications

□ Steel Jacket



Strengthening Applications

□ เพิ่ม Overall Lateral Strength และ Stiffness โดยใช้ Bracing



Strengthening Applications

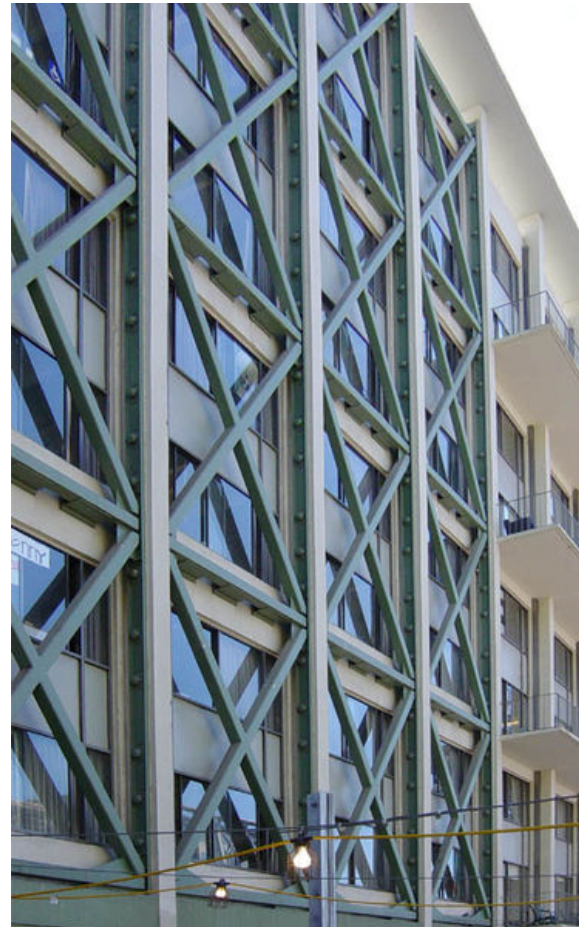
☐ ข้อดี

- ☐ ทางด้านสถาปัตยกรรม

- ☐ สามารถเลือกใส่เฉพาะแนว
(Selective Application) เช่น
Frame ด้านนอก

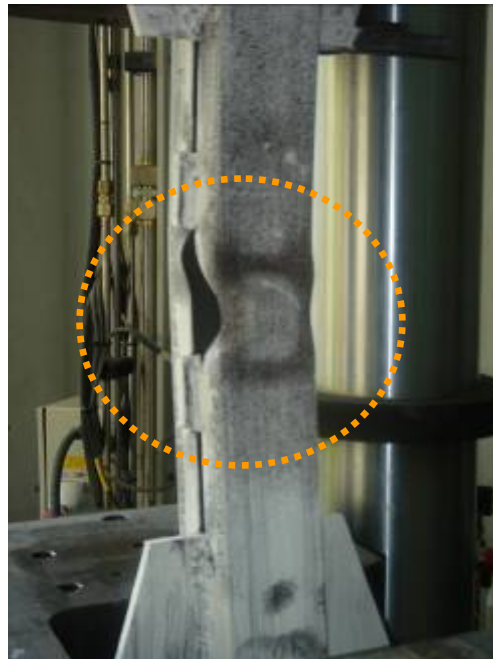
☐ ข้อควรระวัง

- ☐ Buckling (Global and Local)



Strengthening Applications

- ❑ Local Buckling Leads to High Local Deformation Demand



Strengthening Applications

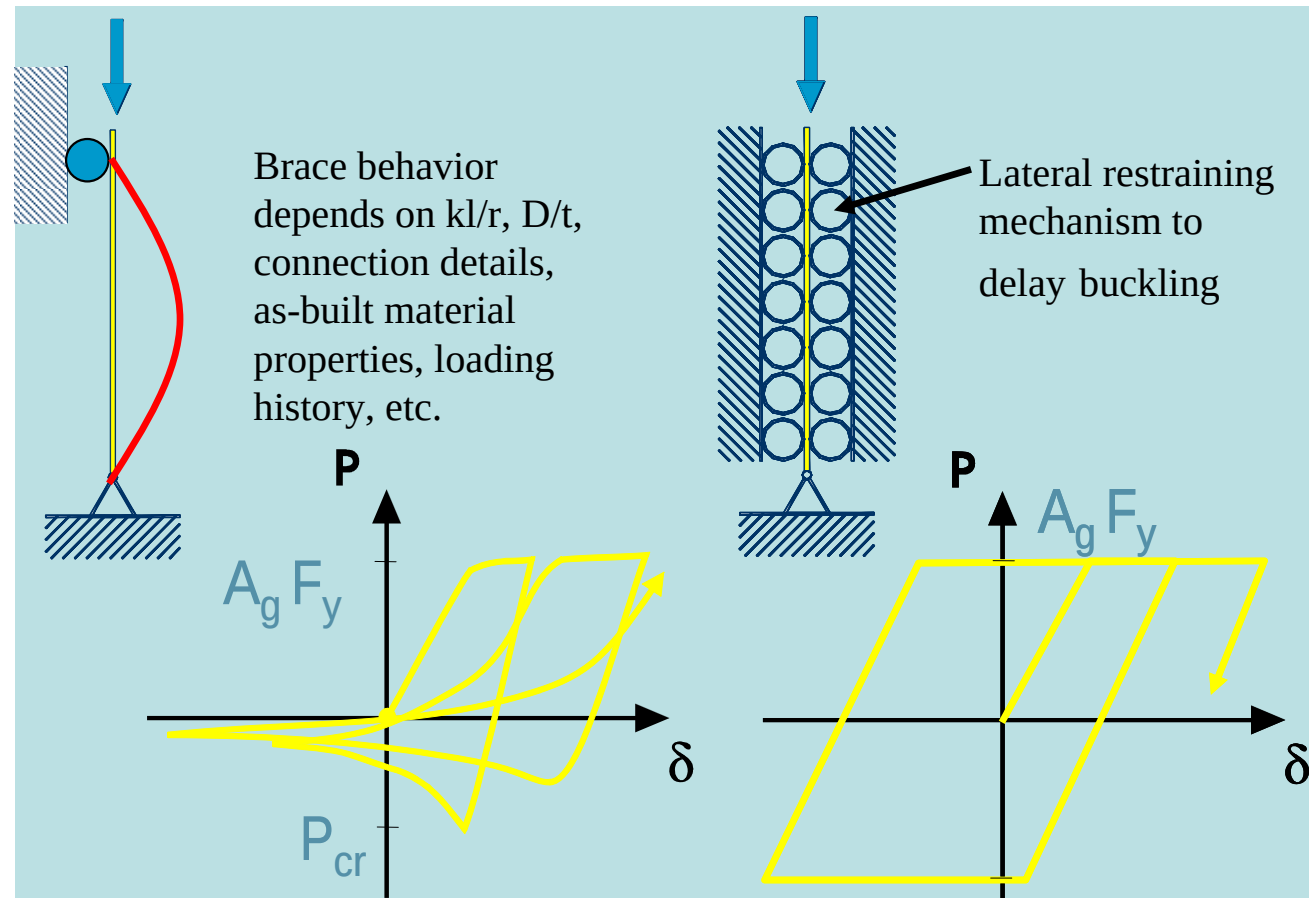
□ Low b/t Ratio (AISC 2002)



องค์อาคาร	อัตราส่วน	ค่ามากที่สุดที่ยอมให้
ปีกคานหรือเสารูปตัว I	$b_f/2t$	$0.30\sqrt{E/F_y}$
แผ่นเอวของคานรูปตัว I	h/t_w	$2.45\sqrt{E/F_y}$
แผ่นเอวของเสารูปตัว I	h/t_w	$3.14\sqrt{E/F_y}(1-1.54P_r/\phi P_n)$ เมื่อ $P_r/\phi P_n \leq 0.125$ $1.12\sqrt{E/F_y}(2.33-P_r/\phi P_n)$ เมื่อ $P_r/\phi P_n > 0.125$
ขาของเหล็กลูกฉาก	b/t	$0.30\sqrt{E/F_y}$
ท่อเหลี่ยม	b/t	$0.64\sqrt{E/F_y}$
ท่อกลม	D/t	$0.044E/F_y$

Recent Technology

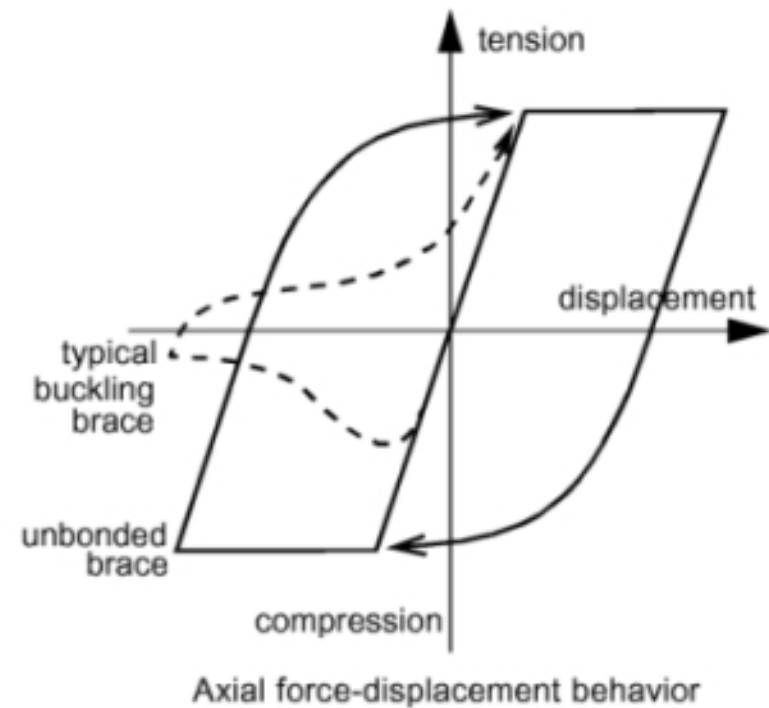
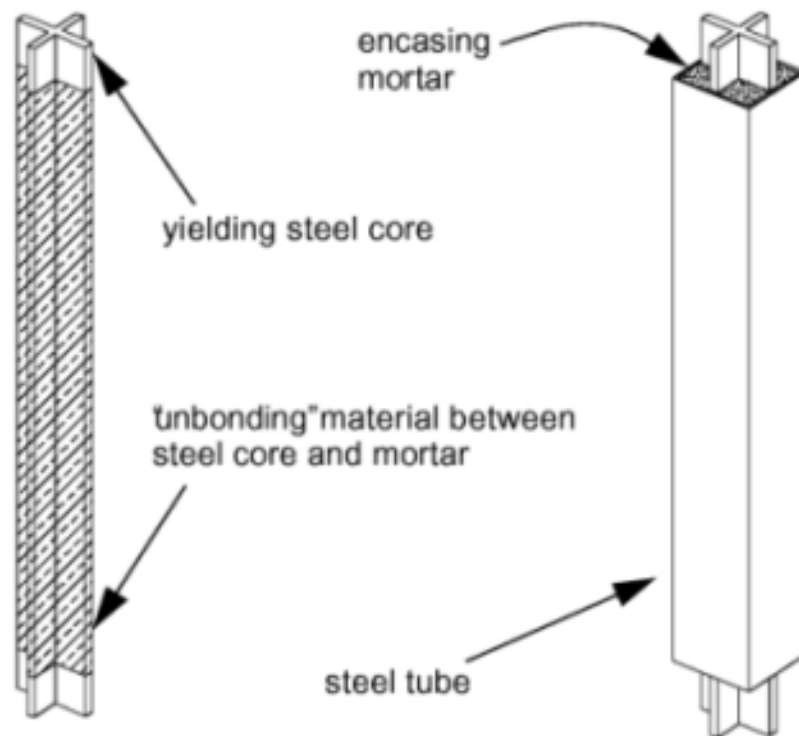
□ Unbonded Brace



After Sabelli and Mahin, DAESS Design and
University of California, Berkeley

Recent Technology

□ Unbonded Brace



Recent Technology

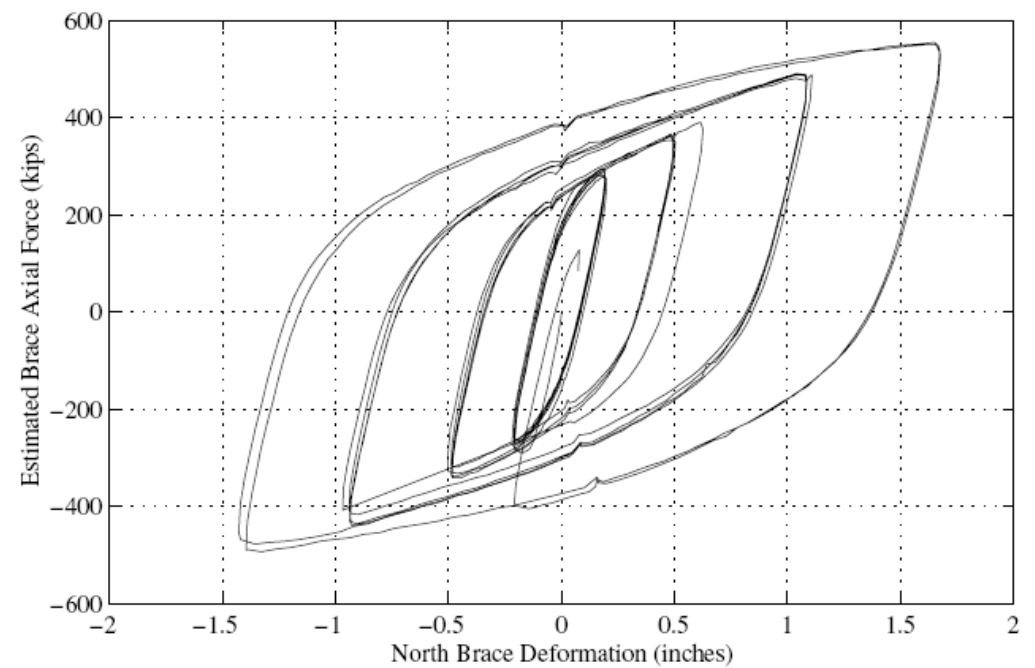
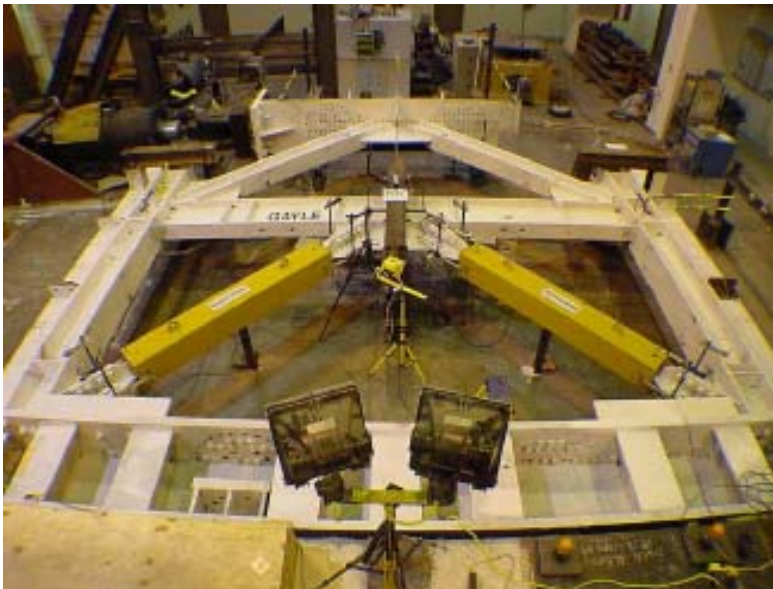
□ Unbonded Brace



After Sabelli and Mahin, DAESS Design and
University of California, Berkeley

Recent Technology

□ Unbonded Brace Test Result



University of California, Berkeley

Recent Technology

□ Unbonded Brace in RC Seismic Retrofitting

Wallace F. Bennett Federal Building
Salt Lake City, Utah



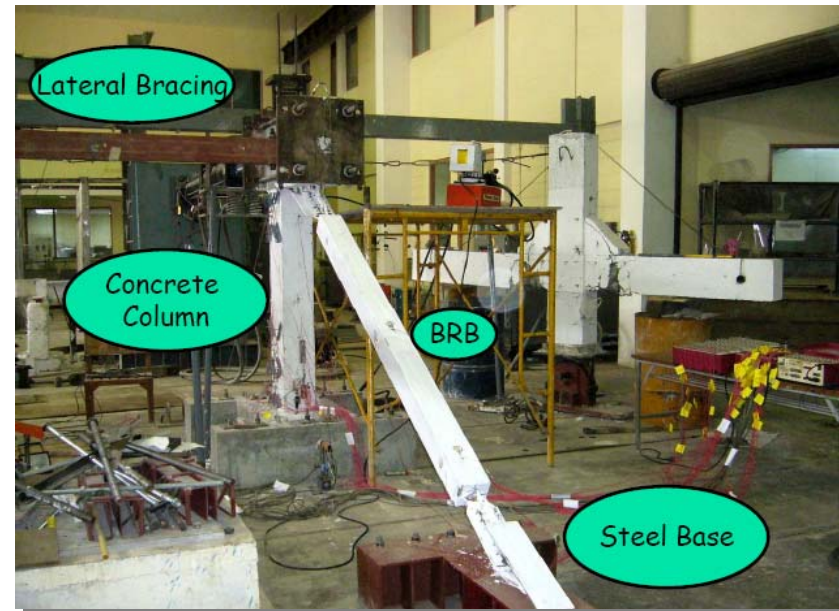
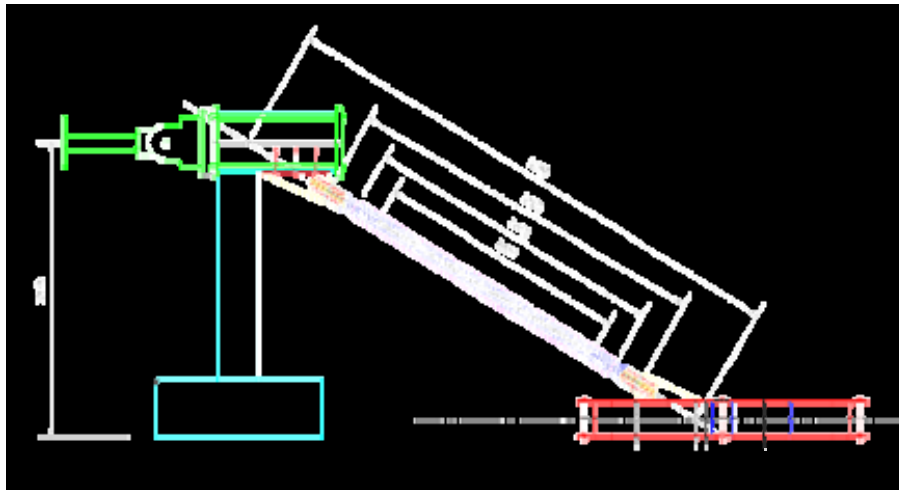
Retrofit of 8-story, 300,000 sf concrete building
344 Unbonded Braces, up to 1900k



After SIE Inc.

Recent Technology

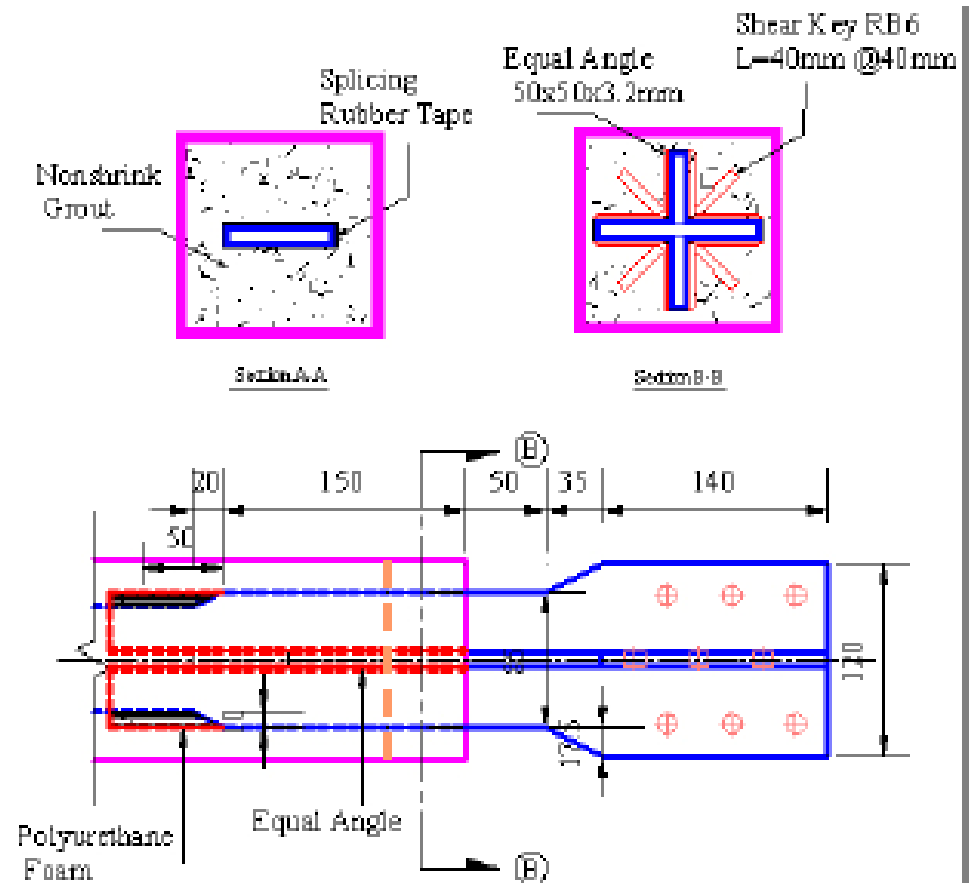
□ Unbonded Brace Technology in Thailand



Yooprasertchai (2007)
Asian Institute of Technology

Recent Technology

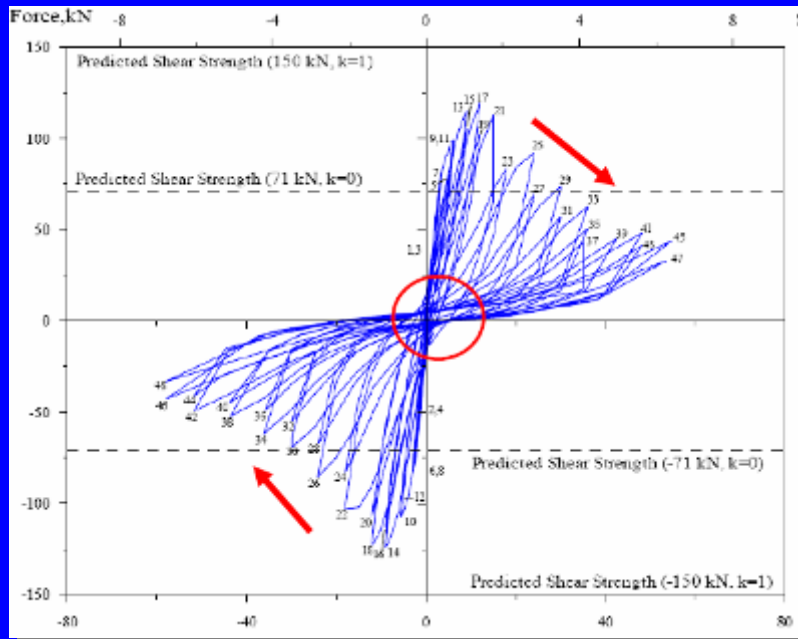
□ Unbonded Brace Technology in Thailand



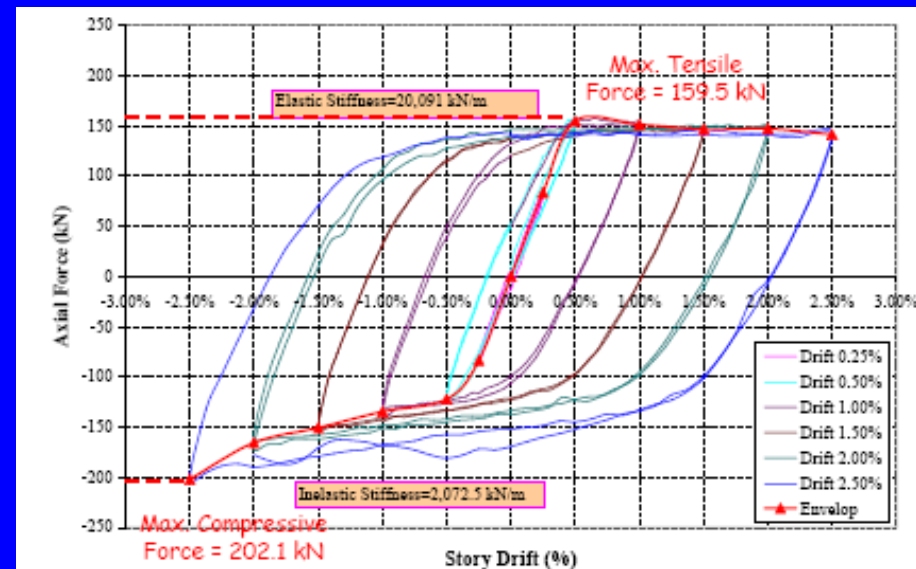
Yooprasertchai (2007)
Asian Institute of Technology

Recent Technology

□ Unbonded Brace Technology in Thailand



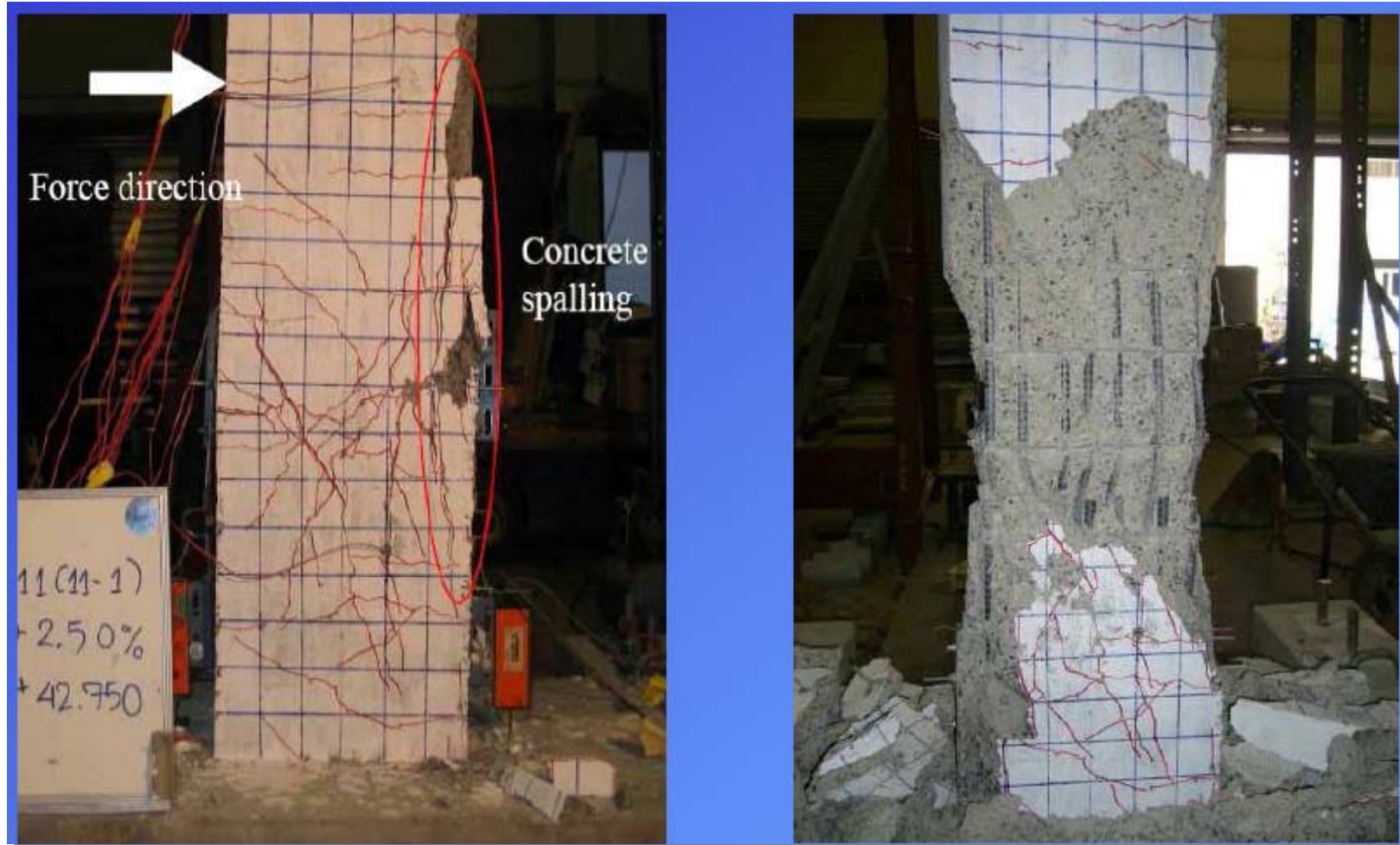
Without BRB



With BRB

Recent Technology

□ Unbonded Brace Technology in Thailand



Yooprasertchai (2007)
Asian Institute of Technology

The End
