



TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ



DEPREME DAYANIKLI ÇELİK YATAY YÜK TAŞIYICI SİSTEMLERİN TASARIMI

İMO İSTANBUL EĞİTİM SEMİNERLERİ

16 MART 2026

Doç. Dr. Onur ŞEKER

Gebze Teknik Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Doç. Dr. Onur Şeker



Doktora

Iowa Eyalet Üniversitesi (ISU)
Yapı Mühendisliği Programı (PhD, 2016)

Yüksek Lisans

Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ)
Yapı Anabilim Dalı, (MSc, 2011)

Lisans

Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ)
İnşaat Mühendisliği, (BSc, 2009)

Araştırma Alanları

- Çelik Yapıların Deprem Davranışı
- Sismik Damperler
- Mevcut Yapıların Güçlendirilmesi ve İyileştirilmesi



İçerik

I. İlgili Yönetmelikler

II. Genel Tasarım İlkeleri

III. Yatay Yük Taşıyıcı Sistemler

- Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler
- Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveseler
- Moment Çerçeveseler
- Dışmerkez Çaprazlı Çerçeveseler

İlgili Yönetmelikler

İlgili Yönetmelikler

ANSI/AISC 341-16
An American National Standard

Seismic Provisions for Structural Steel Buildings

July 12, 2016

Supersedes the *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*
dated June 22, 2010, and all previous versions

Approved by the AISC Committee on Specifications



AISC 341-22

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION
130 East Randolph Street, Suite 2000
Chicago, Illinois 60601-6204

ANSI/AISC 358-16
ANSI/AISC 358s1-18
An American National Standard

Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplement No. 1

May 12, 2016
(includes 2018 supplement)

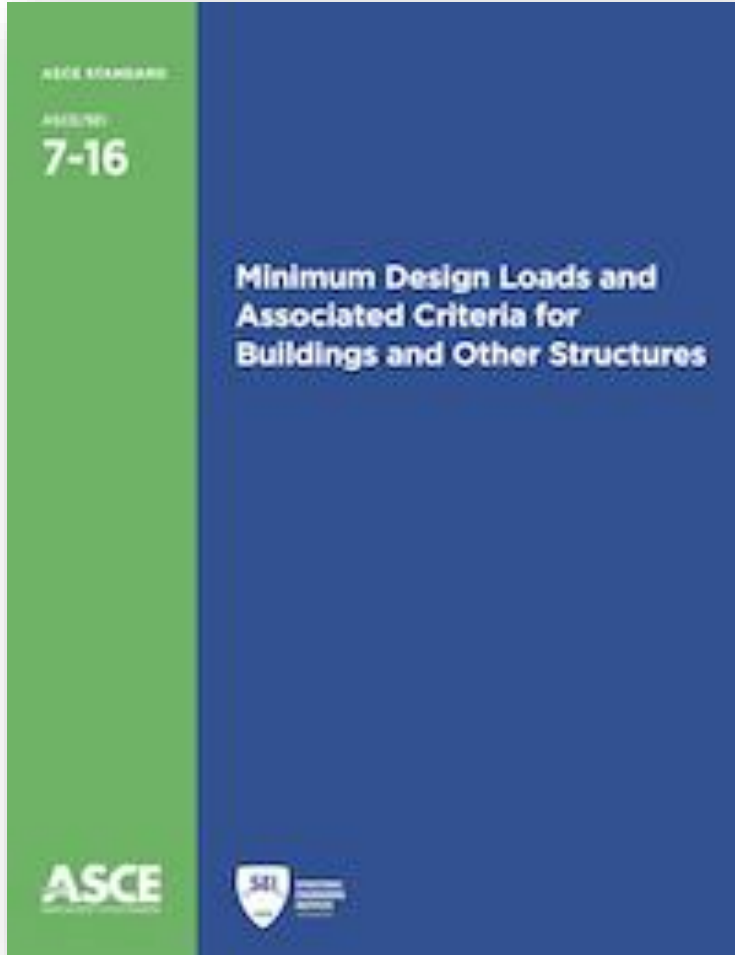
Approved by the Connection Prequalification Review Panel

AISC 358-22



Smarter.
Stronger.
Steel.

İlgili Yönetmelikler



ASCE 7-22

BÖLÜM 9 – DEPREM ETKİSİ ALTINDA ÇELİK BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİNİN TASARIMI İÇİN ÖZEL KURALLAR

9.0. SİMGELER

Bu bölümde aşağıdaki simgelerin kullandığı boyutlu ifadelerde, kuvvetler *Newton* [N], uzunluklar *milimetre* [mm], açılar *radyan* [rad] ve gerilmeler *MegaPascal* [MPa] = [N/mm²] birimindedir.

A	= Enkesit alanı
A_c	= Beton enkesit alanı
A_e	= Etkin net enkesit alanı
A_{fb}	= Başlık enkesit alanı
A_f	= Kayıpsız enkesit alanı
A_f	= Kompozit elemanın toplam enkesit alanı
A_{sv}	= Spiral sargı donatısının enkesit alanı
A_s	= Çelik enkesit alanı
A_{sc}	= Çelik çekirdeğin akma şekildeğiştirme gösteren enkesit alanı
A_{sk}	= Etriye kompozit kolonlarda sarılma bölgesindeki minimum toplam etriye alanı
A_{tr}	= Boyuna donatı alanı
A_w	= Gövde enkesit alanı
A_w	= Köşe kaynak alanı
a	= Etriye kollarının ve/veya çirozların arasındaki yatay uzaklık
b	= Genişlik (yarım başlık genişliği)
b_{bf}	= Kiriş kesitinin başlık genişliği
b_k	= Kolon enkesitinde en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık
C_s	= Gerekli aksel kuvvet dayanımının tasarım aksel kuvvet dayanımına oranı
D	= Dairesel halka kesitlerde dış çap
D	= Dayanım fazlalığı katsayısı
D	= Dairesel kolonun göbek çapı (spiral sargı donatısı eksenleri arasındaki uzaklık)
d_b	= Kiriş enkesit yüksekliği
d_c	= Kolon enkesit yüksekliği
E	= Yapı çeliği elastisite modülü, $E = 200000 \text{ N/mm}^2$
E_d	= Deprem etkisi
e	= Bağ kirişi boyu
F_{cr}	= Kritik burkulma gerilmesi

Bölüm 9, TBDY (2018)

AISC 341

A. GENERAL REQUIREMENTS

- Materials
- Structural Design Drawings and Specifications

B. GENERAL DESIGN REQUIREMENTS

- General Seismic Design Requirements
- Loads and Load Combinations and so on.

C. ANALYSIS

D. GENERAL MEMBER AND CONNECTION DESIGN REQUIREMENTS

- Member Requirements
- Connections

E. MOMENT-FRAME SYSTEMS

F. BRACED-FRAME and SHEAR WALL SYSTEMS

G. COMPOSITE MOMENT-FRAME SYSTEMS

H. COMPOSITE BRACED-FRAME AND SHEAR-WALL SYSTEMS

I. FABRICATION AND ERECTION

J. QUALITY CONTROL AND QUALITY ASSURANCE

K. PREQUALIFICATION AND CYCLIC QUALIFICATION TESTING PROVISIONS

COMMENTARY

ANSI/AISC 341-16
An American National Standard

Seismic Provisions for Structural Steel Buildings

July 12, 2016

Supersedes the *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*
dated June 22, 2010, and all previous versions

Approved by the AISC Committee on Specifications



AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION
130 East Randolph Street, Suite 2000
Chicago, Illinois 60601-6204

AISC 358

1. GENERAL
2. DESIGN REQUIREMENTS
3. WELDING REQUIREMENTS
4. BOLTING REQUIREMENTS
5. REDUCED BEAM SECTION (RBS) MOMENT CONNECTION
6. BOLTED UNSTIFFENED AND STIFFENED EXTENDED END-PLATE MOMENT CONNECTIONS
7. BOLTED FLANGE PLATE (BFP) MOMENT CONNECTION
8. WELDED UNREINFORCED FLANGE-WELDED WEB (WUF-W) MOMENT CONNECTION
9. KAISER BOLTED BRACKET (KBB) MOMENT CONNECTION
10. CONXTECH CONXL MOMENT CONNECTION
11. SIDEPLATE MOMENT CONNECTION
12. SIMPSON STRONG-TIE STRONG FRAME MOMENT CONNECTION
13. DOUBLE-TEE MOMENT CONNECTION
14. SLOTTEDWEB (SW) MOMENT CONNECTION

ANSI/AISC 358-16
ANSI/AISC 358s1-18
An American National Standard

Prequalified Connections

for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplement No. 1

May 12, 2016
(includes 2018 supplement)

Approved by the Connection Prequalification Review Panel

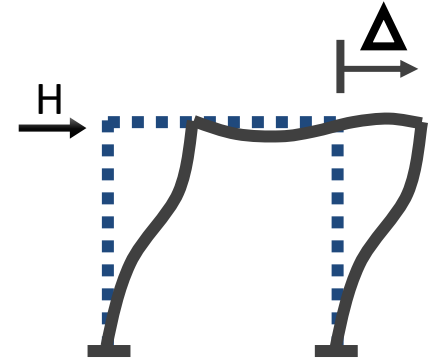
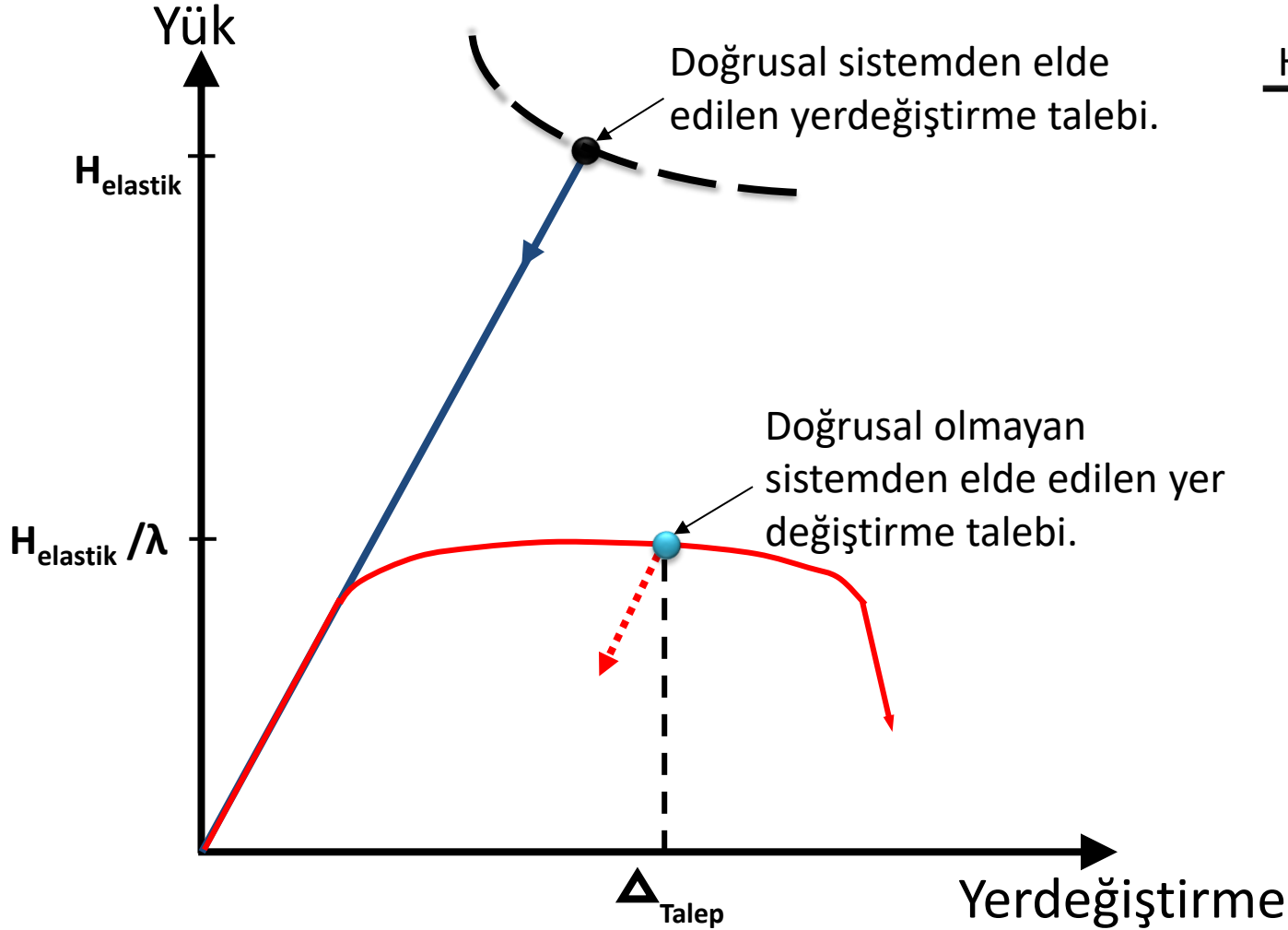


Smarter.
Stronger.
Steel.

Genel Sismik Tasarım İlkeleri

Tasarım Yaklaşımı

Elastik ötesi davranış kaçınılmaz!



Dayanım ↓

Süneklik ↑

Tasarım Yaklaşımı

Tablo 4.1 (devamı)

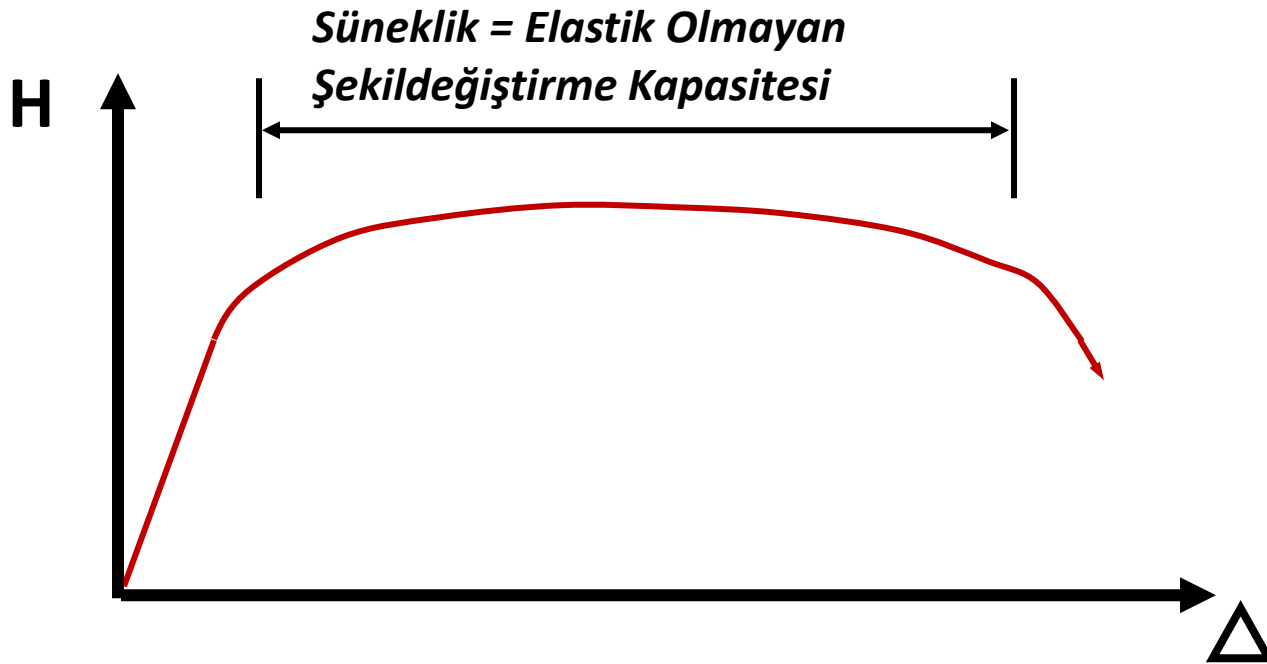
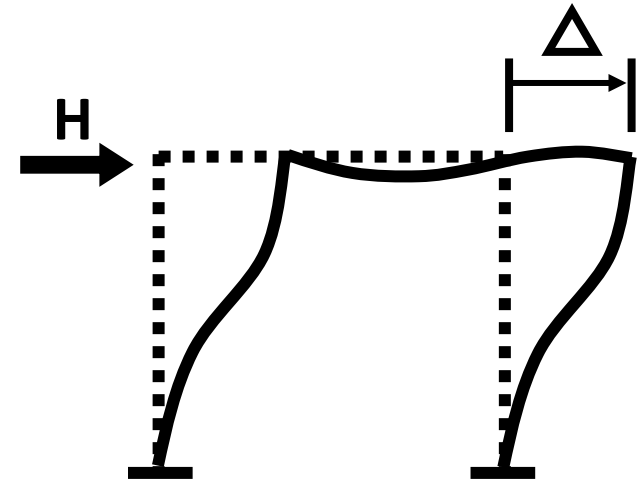
Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R	Dayanım Fazlalığı Katsayısı D	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
C. ÇELİK BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
C1. Sünelik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
C11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran <i>sünelik düzeyi yüksek</i> çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3	BYS ≥ 3
C12. Deprem etkilerinin tamamının <i>sünelik düzeyi yüksek</i> dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı binalar	8	2.5	BYS ≥ 2
C13. Deprem etkilerinin tamamının <i>sünelik düzeyi yüksek</i> merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı binalar	5	2	BYS ≥ 4
C14. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>sünelik düzeyi yüksek</i> çelik çerçeveler ile <i>sünelik düzeyi yüksek</i> dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya <i>sünelik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz. 4.3.4.5)	8	3	BYS ≥ 2
C15. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>sünelik düzeyi yüksek</i> çelik çerçeveler ile <i>sünelik düzeyi yüksek</i> merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya <i>sünelik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz. 4.3.4.5)	6	2.5	BYS ≥ 2
C16. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan ve yüksekliği 12 m'yi geçmeyen <i>sünelik düzeyi yüksek</i> çelik kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	4	2	-
C2. Sünelik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.6)			
C21. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>sünelik düzeyi sınırlı</i> çelik çerçeveler ile <i>sünelik düzeyi yüksek</i> dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya <i>sünelik düzeyi yüksek</i> bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz. 4.3.1.2)	6	2.5	BYS ≥ 4
C22. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>sünelik düzeyi sınırlı</i> çelik çerçeveler ile <i>sünelik düzeyi yüksek</i> merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya <i>sünelik düzeyi yüksek</i> boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar (Bkz. 4.3.1.2)	5	2	BYS ≥ 4
C3. Sünelik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.7)			
C31. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran <i>sünelik düzeyi sınırlı</i> çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	4	2.5	BYS ≥ 7
C32. Deprem etkilerinin tamamının <i>sünelik düzeyi sınırlı</i> merkezi çaprazlı çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	3	2	BYS = 8
C33. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>sünelik düzeyi sınırlı</i> çelik çerçeveler ile <i>sünelik düzeyi sınırlı</i> merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından birlikte karşılandığı binalar	4	2	BYS ≥ 7

Tasarım Yaklaşımı

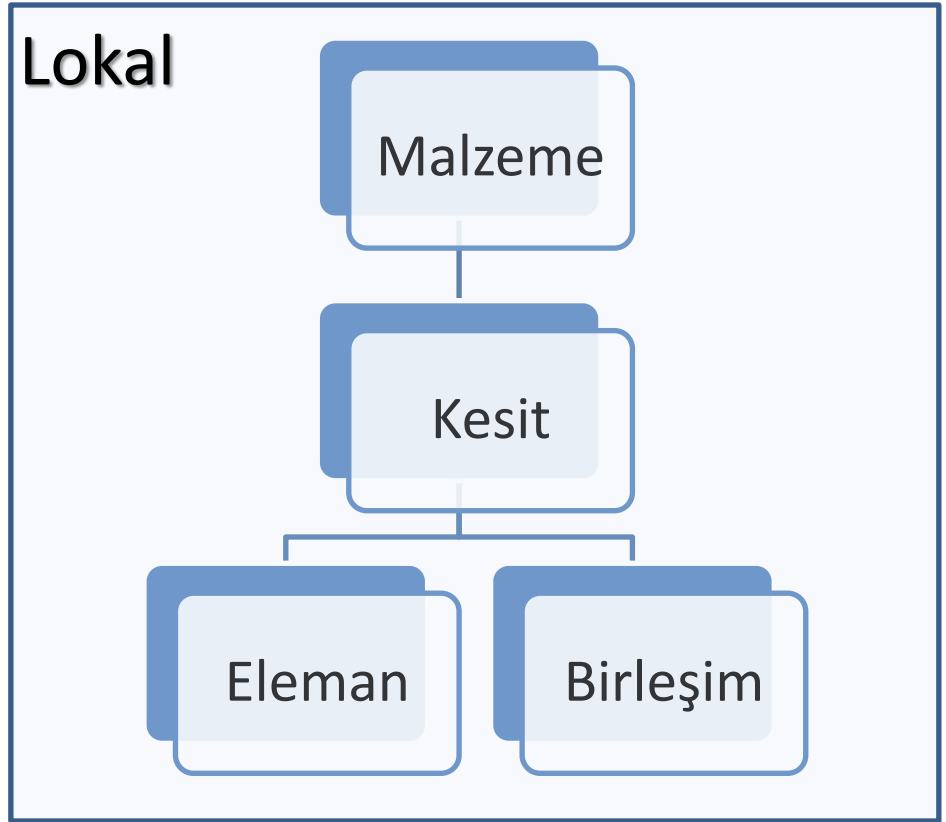
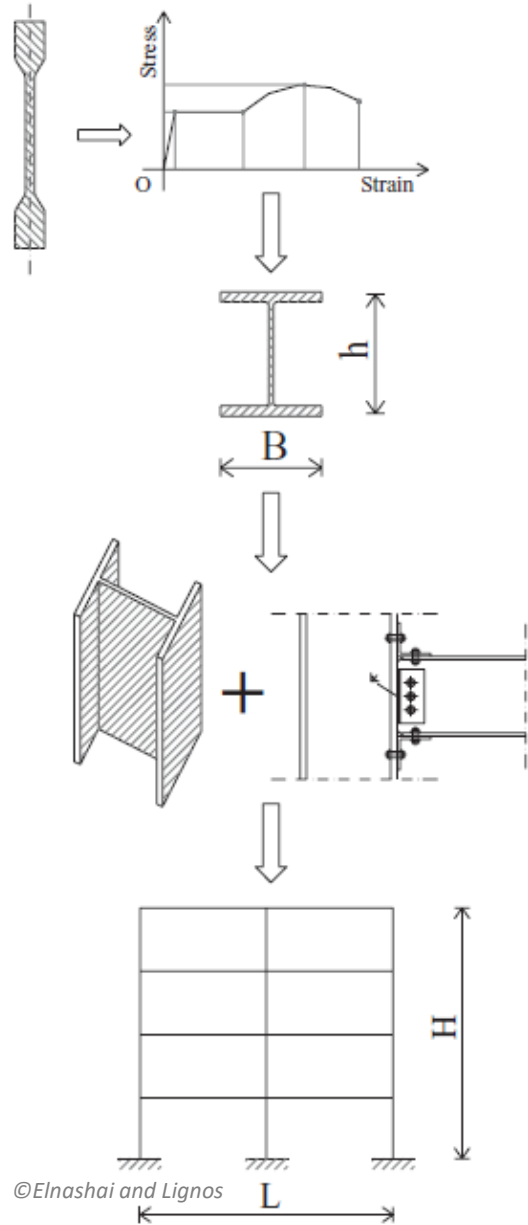
R factors for Selected Steel Systems (ASCE 7):

SMF	(<i>Special Moment Resisting Frames</i>):	R = 8
IMF	(<i>Intermediate Moment Resisting Frames</i>):	R = 4.5
OMF	(<i>Ordinary Moment Resisting Frames</i>):	R = 3.5
EBF	(<i>Eccentrically Braced Frames</i>):	R = 8
SCBF	(<i>Special Concentrically Braced Frames</i>):	R = 6
OCBF	(<i>Ordinary Concentrically Braced Frames</i>):	R = 3.25
BRBF	(<i>Buckling Restrained Braced Frame</i>):	R = 8
SPSW	(<i>Special Plate Shear Walls</i>):	R = 7

Süneklik

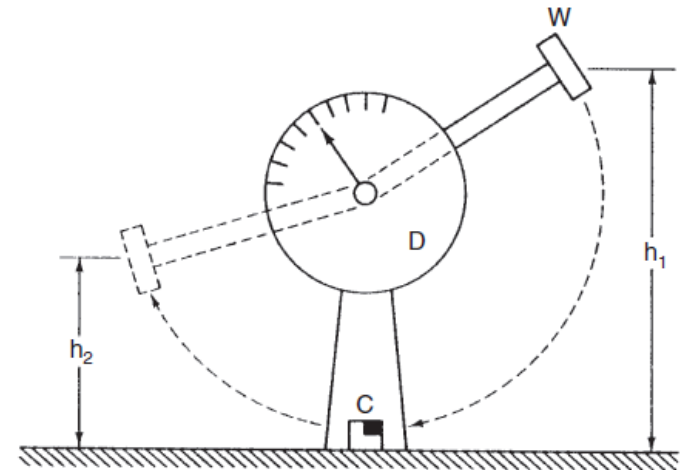
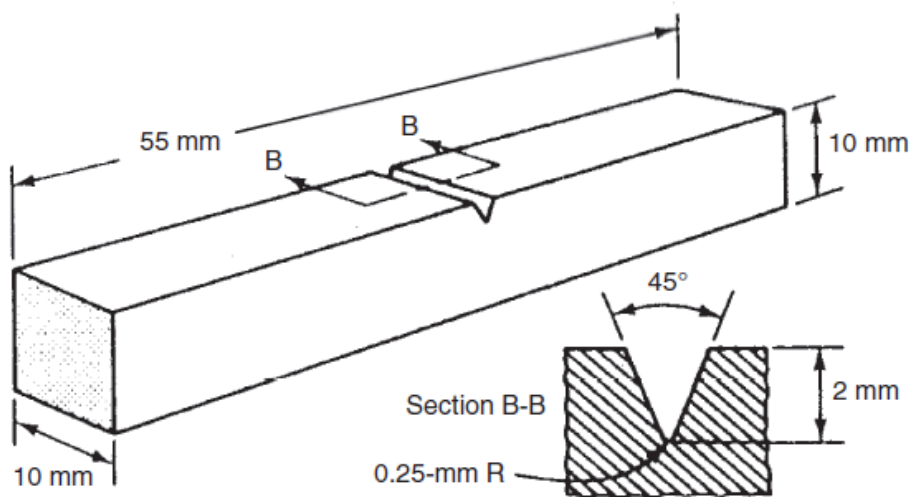
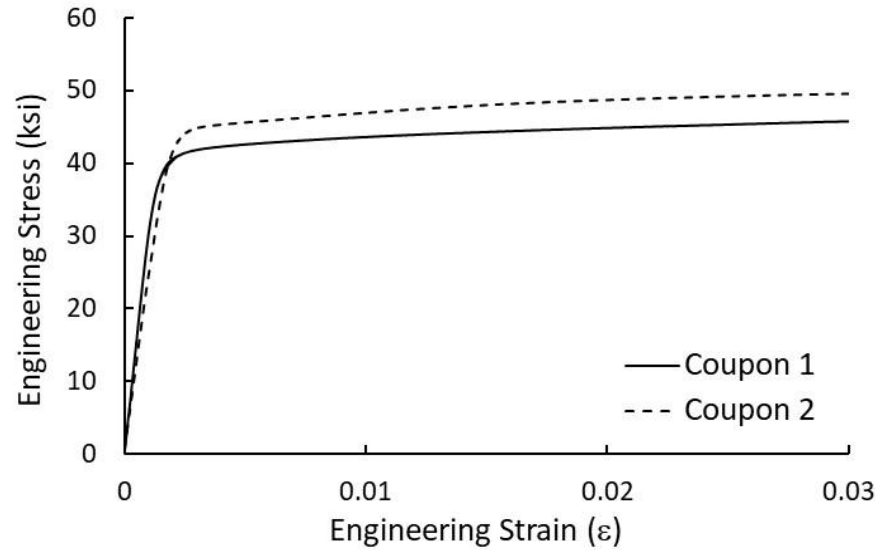


Süneklik



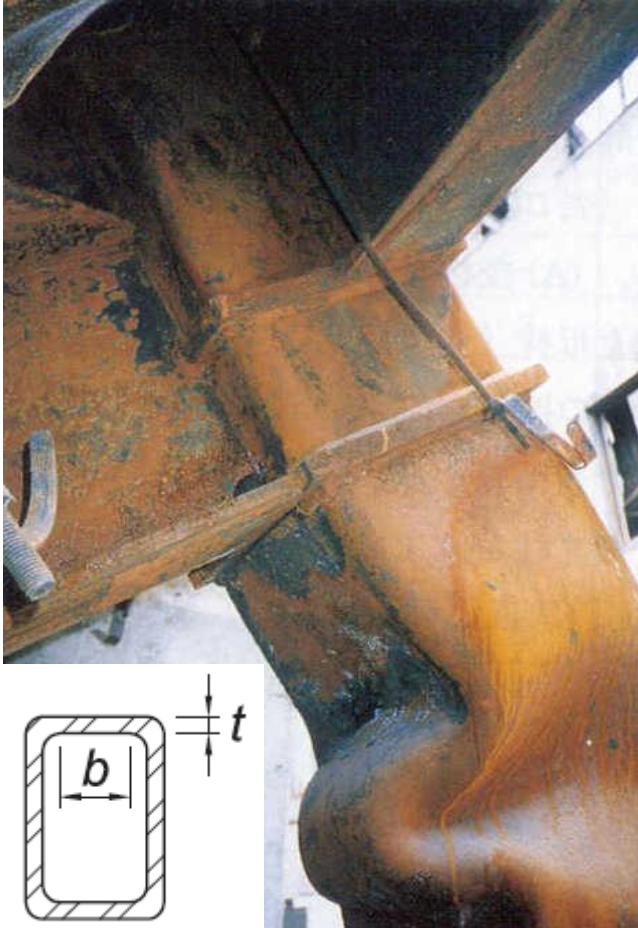
Sistem Sünekliği

Malzeme Sünekliği

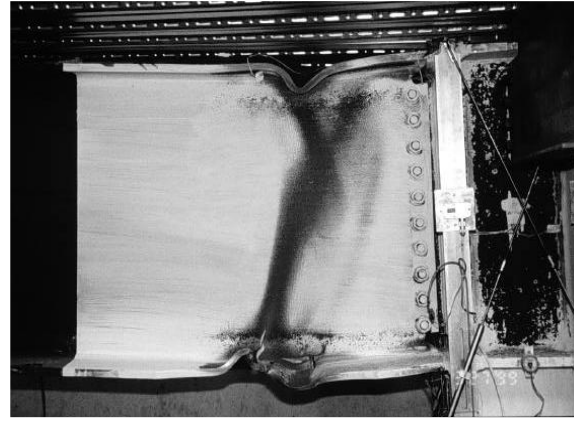
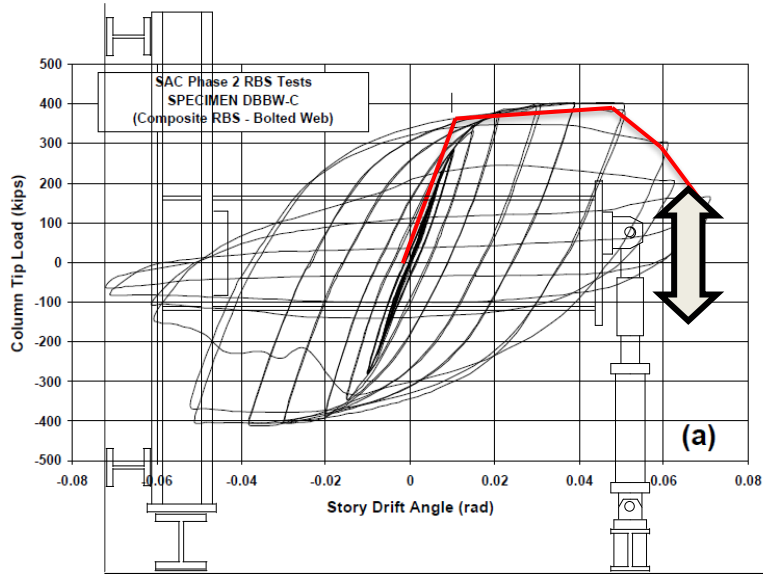


Charpy V Çentik Dayanımı Testi

Sünek Davranış



Sünek Davranış

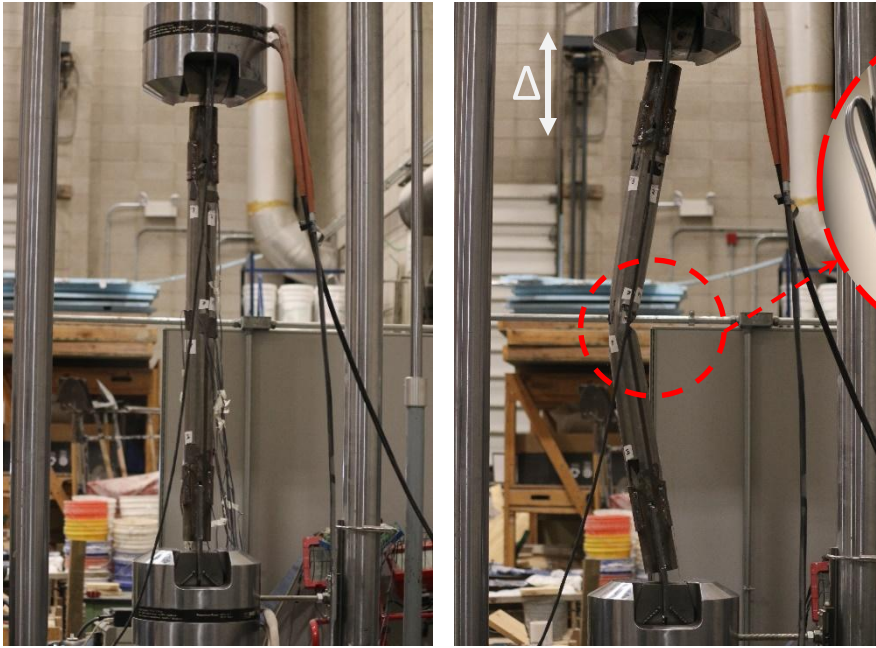


Akma

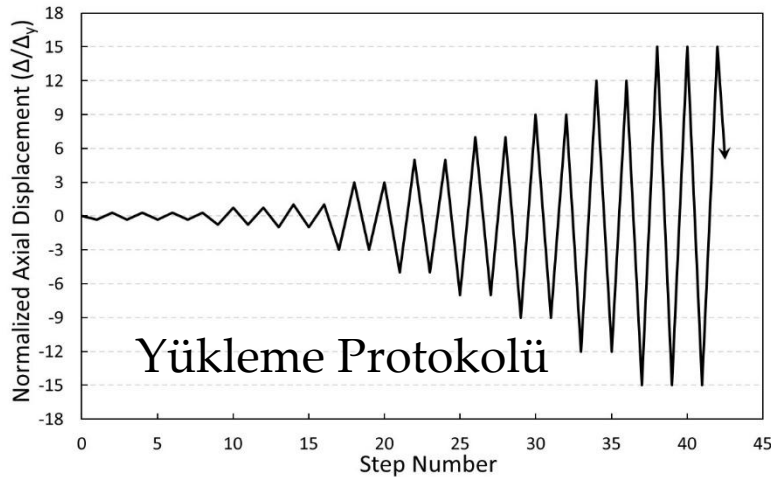
Lokal
Burkulma

Başlıkta
Kırılma

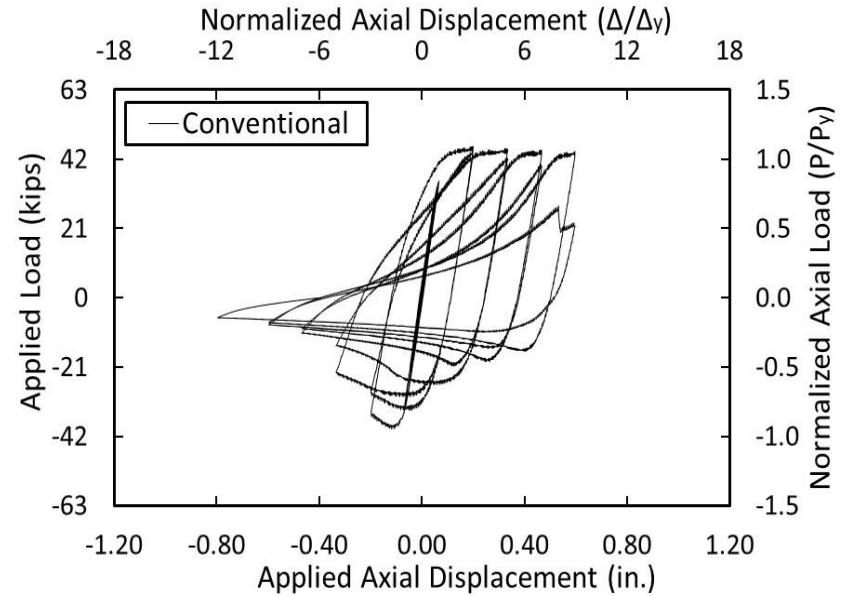
Sünek Davranış



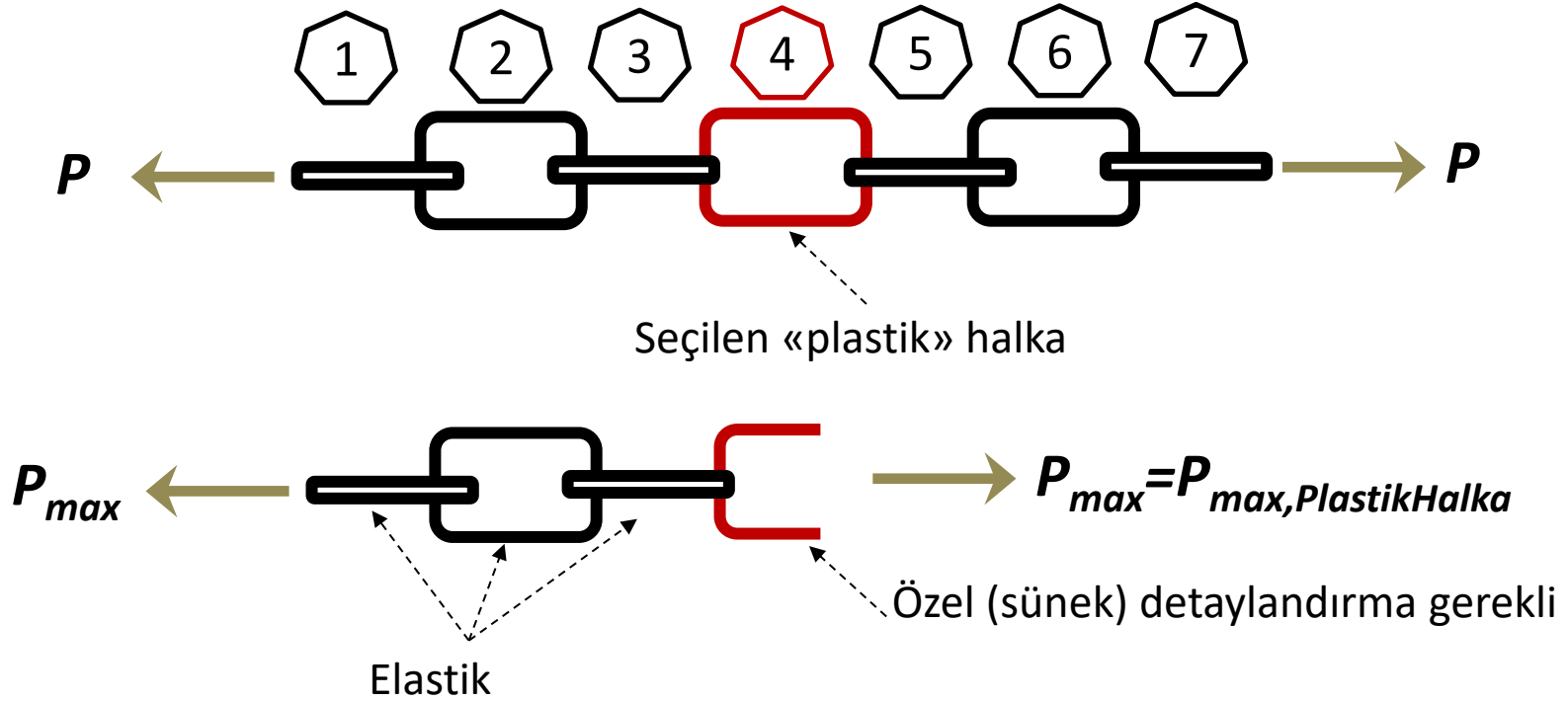
Çapraz Deneyi



Çevrimsel Davranış (Hysteresis)



Kapasite Tasarımı



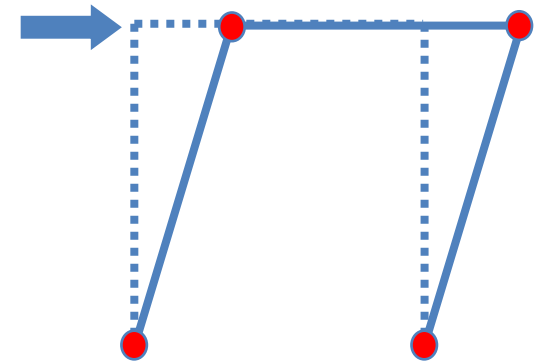
TBDY (2018) Bölüm 4.2.2. Kapasite Tasarımı İlkeleri

Kapasite tasarımı yaklaşımı, taşıyıcı sistemde doğrusal olmayan sünek davranışın açık olarak tanımlanan belirli elemanlarla (veya kesitlerle) sınırlı tutulmasını, bu davranışla uyumlu olarak diğer bütün elemanların yeterli dayanım kapasitesine sahip olmasını öngören tasarım yaklaşımıdır.

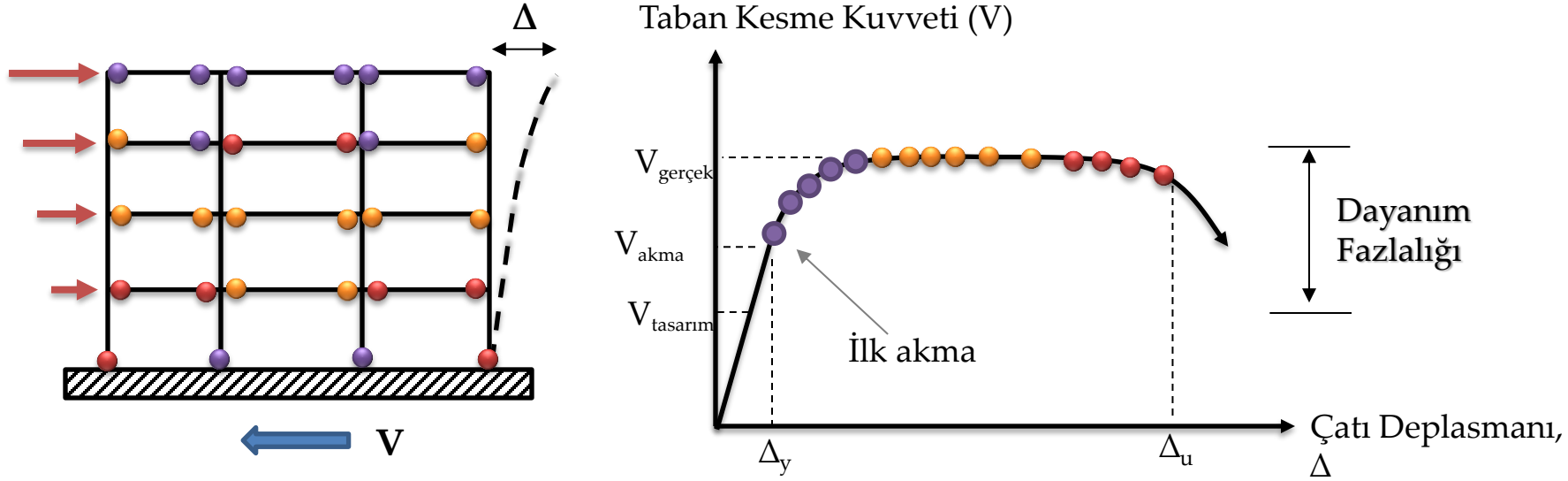
Sünek Davranışın Sağlanması:

Doğrusal Olmayan Davranışının Anlaşılması ve Kontrol Edilmesi:

- Deprem sırasında akacak olan çerçeve elemanları (“sigortaları”), yani plastik mafsalsal bölgeleri seçilmelidir.
- Plastik mafsalsal bölgeleri, kırılma veya stabilite kaybının başlangıcından önce büyük elastik olmayan dönmeleri karşılayabilecek şekilde detaylandırılmalıdır.
- Diğer bütün çerçeve elemanları, plastik mafsalsal bölgelerinden daha güçlü olacak şekilde detaylandırılmalıdır.



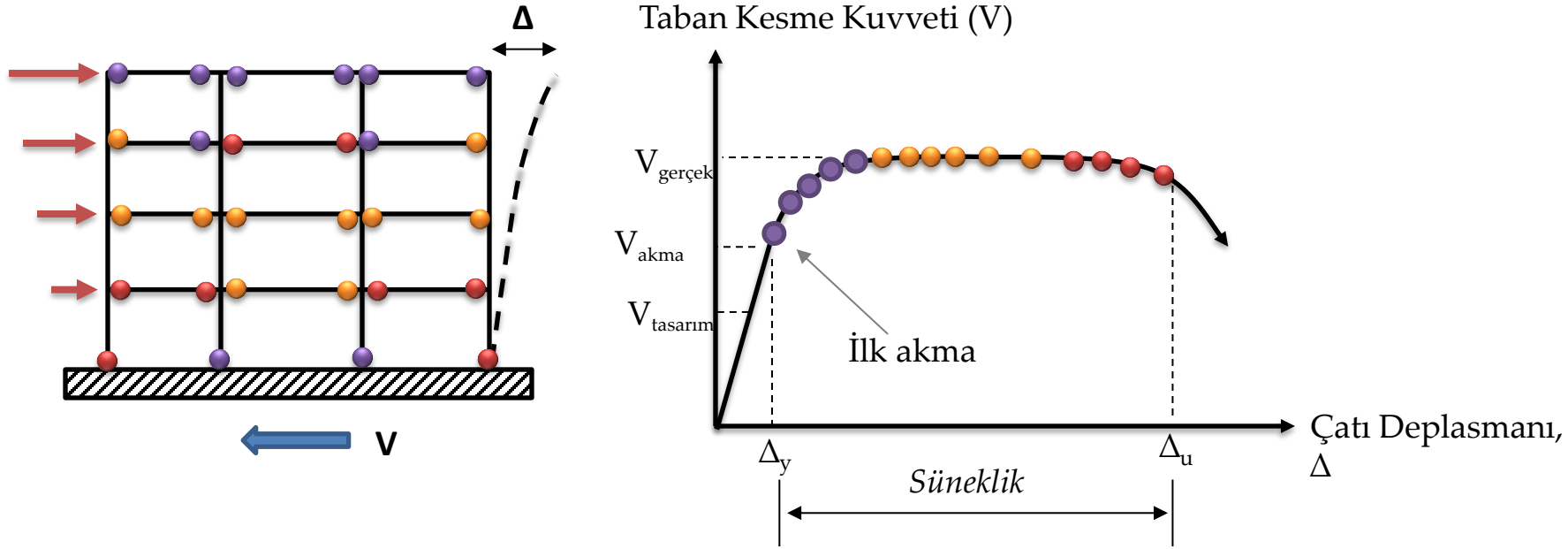
Sistem Sünekliği ve Dayanım Fazlalığı



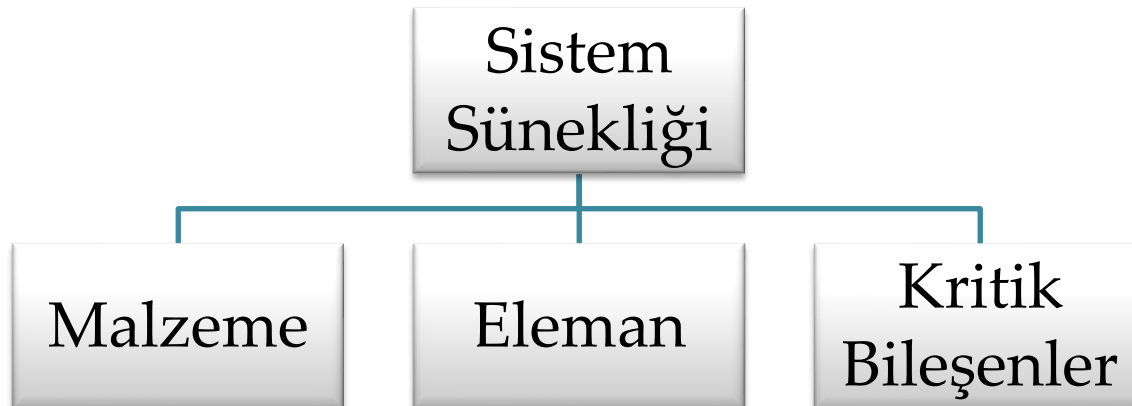
Yapıların gerçek dayanımı tasarımda tahmin edilenden çok daha yüksek olabilir!

$$DayanımFazlalığı = D = \frac{V_{gerçek}}{V_{tasarım}}$$

Sistem Sünekliği ve Dayanım Fazlalığı



Süneklik = Enerji Tüketme Kapasitesi



$$Süneklik = \mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Sismik Yükler

Deprem Yükleri

Analiz

Deprem yüklerini içeren temel yük birleşimleri

1. $1.4D$
2. $1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
3. $1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R) + (L \text{ or } 0.5W)$
4. $1.2D + 1.0W + L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R)$
5. $0.9D + 1.0W$
6. $1.2D + E_v + E_h + L + 0.2S$
7. $0.9D - E_v + E_h$

$$E_v = 0.2S_{DS}D \quad E_h = \rho Q_E$$

Burada

E = Deprem yükü

E_h = Yatay deprem yükü

E_v = Düşey deprem yükü

Q = «redundancy factor»


$$(1.2 + 0.2 S_{DS}) D + 1.0 Q Q_E + 0.5L + 0.2S$$

$$(0.9 - 0.2 S_{DS}) D + 1.0 Q Q_E$$

Deprem Yükleri

Analiz

Dayanım Fazlalığı İçeren Deprem Yükleri

6. $1.2D + E_v + E_{mh} + L + 0.2S$

7. $0.9D - E_v + E_{mh}$

$$E_{mh} = \Omega_0 Q_E$$

Burada

Q_E = Yatay deprem yükü

Ω_0 = Dayanım fazlalılığı katsayısı

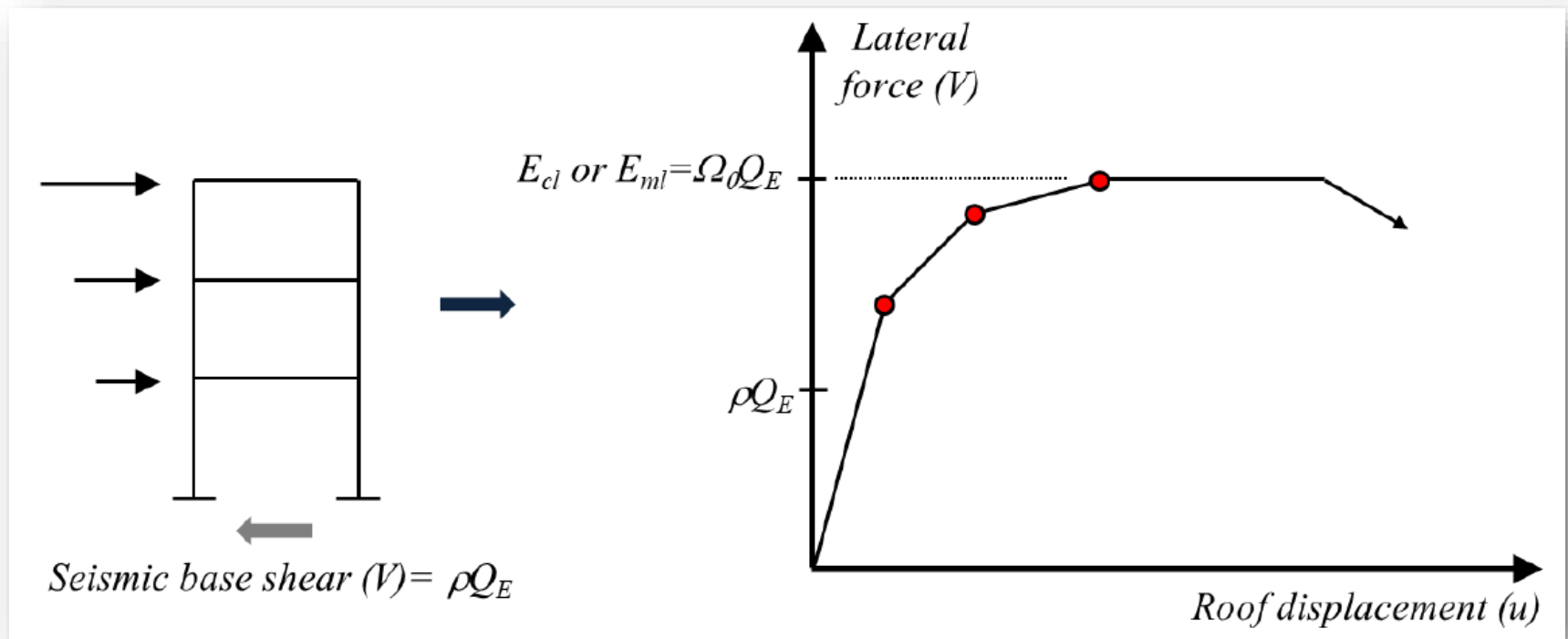
For Load Combination: $1.2D + 1.0E + 0.5L + 0.2S$

Overstrength Seismic Load: $E = \Omega_0 Q_E + 0.2 S_{DS} D$

For Load Combination: $0.9D + 1.0E$

Overstrength Seismic Load: $E = \Omega_0 Q_E - 0.2 S_{DS} D$

Deprem Yükleri



Deprem Yükleri

Analiz

Kapasite Sınırlı Deprem Yükleri

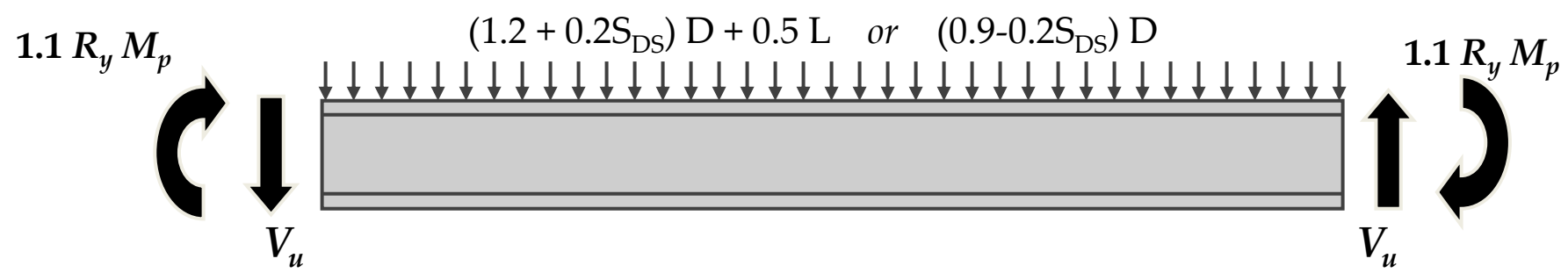
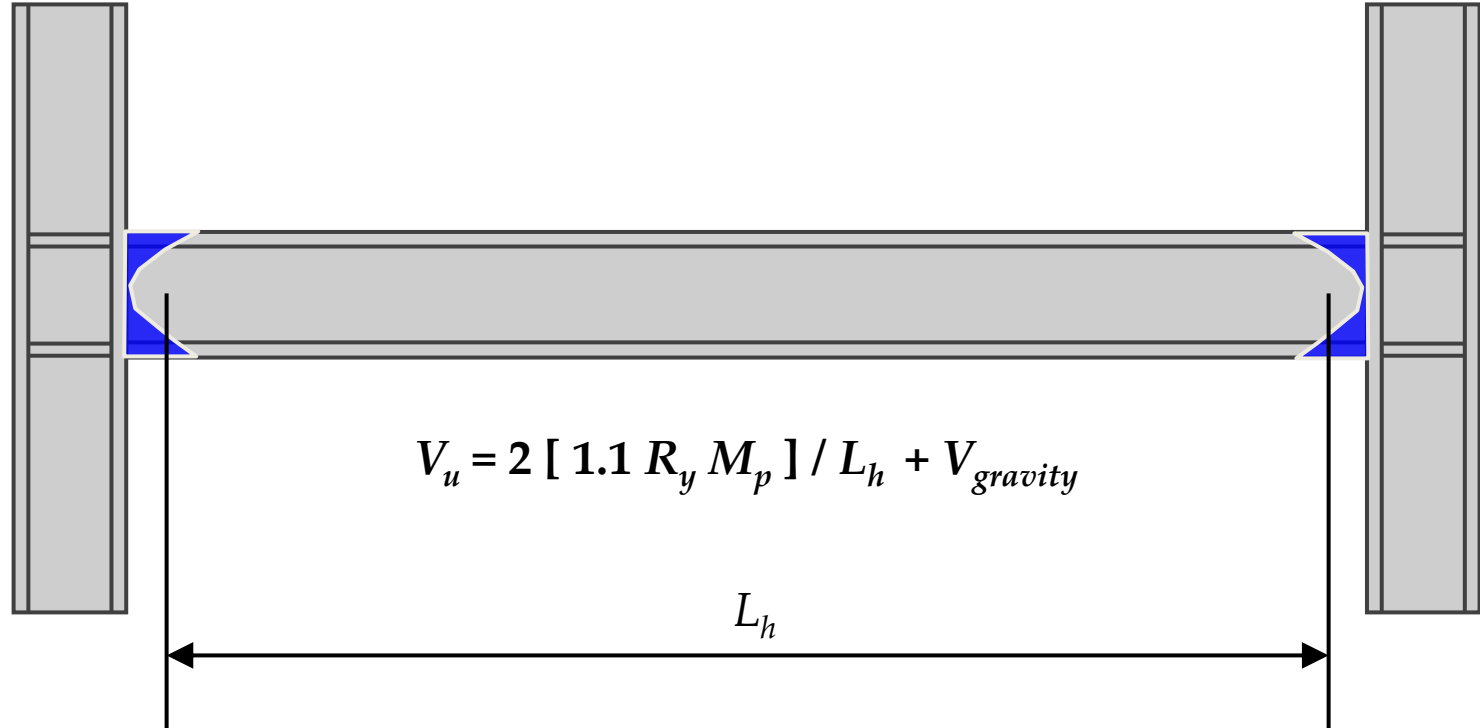
For Load Combination: $1.2D + 1.0E + 0.5L + 0.2S$

Capacity-Limited Seismic Load: $E = E_{cl} + 0.2 S_{DS} D$

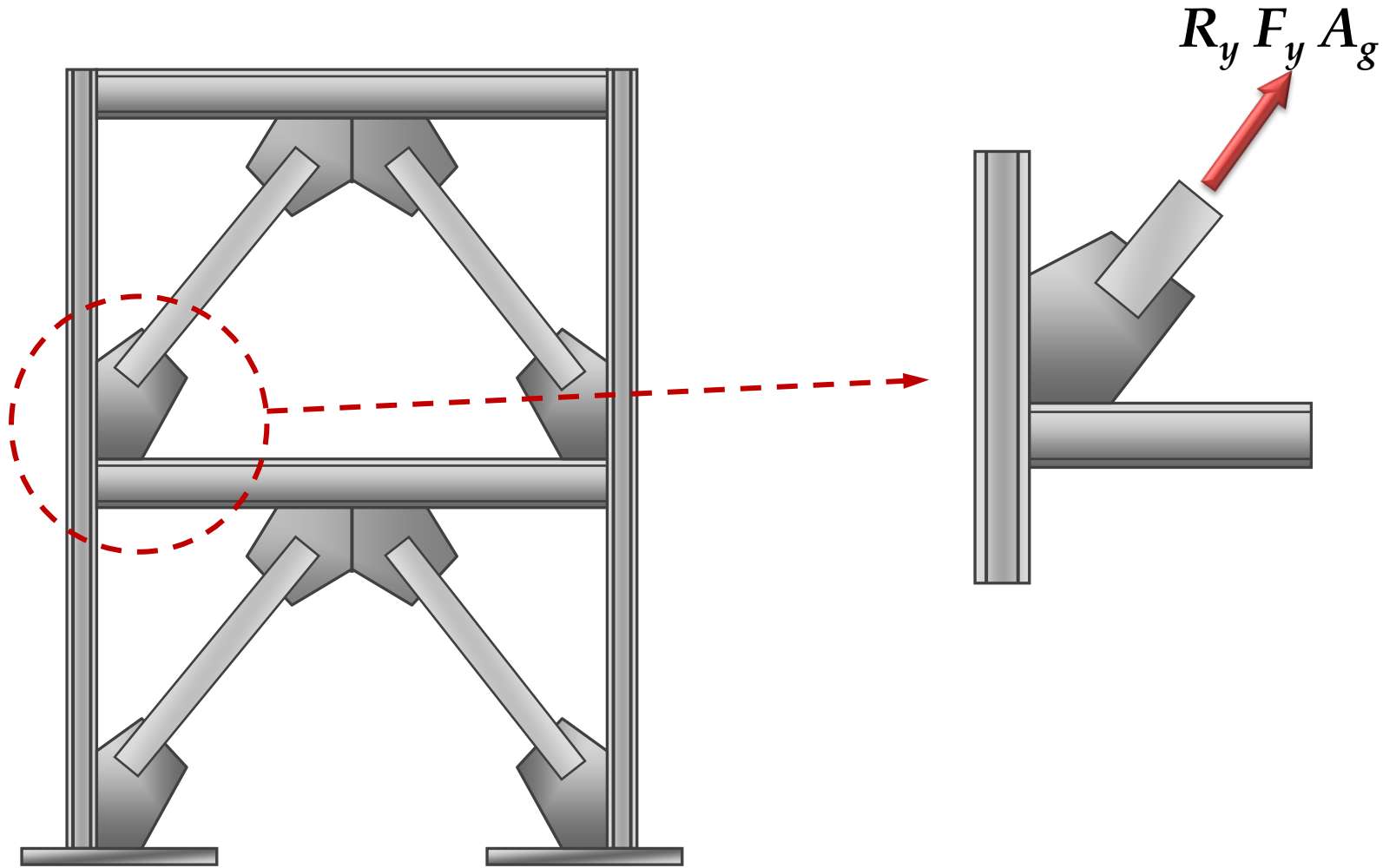
For Load Combination: $0.9D + 1.0E$

Capacity-Limited Seismic Load: $E = E_{cl} - 0.2 S_{DS} D$

Kapasite Sınırlı Deprem Yüğü



Kapasite Sınırlı Deprem Yüğü

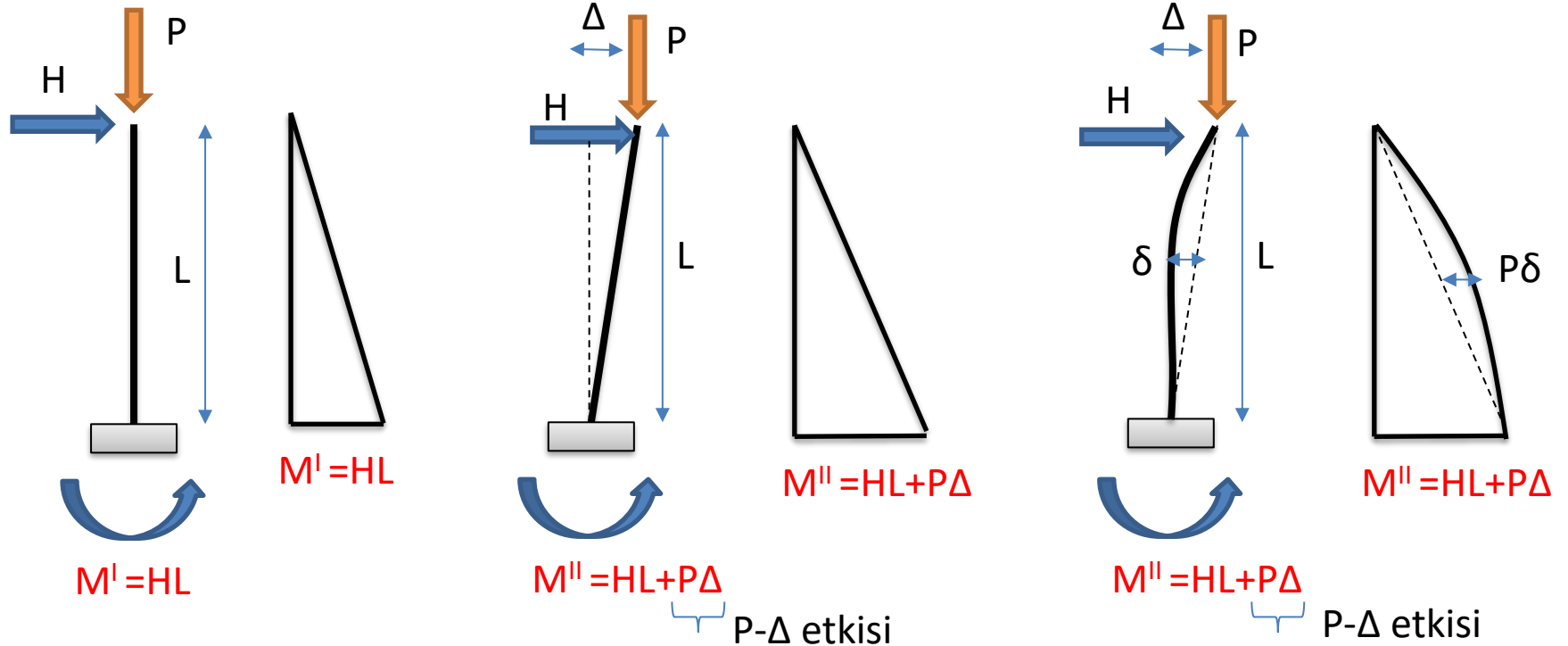


Yatay Yük Taşıyıcı Sistemler

Doğrusal Olmayan Davranış

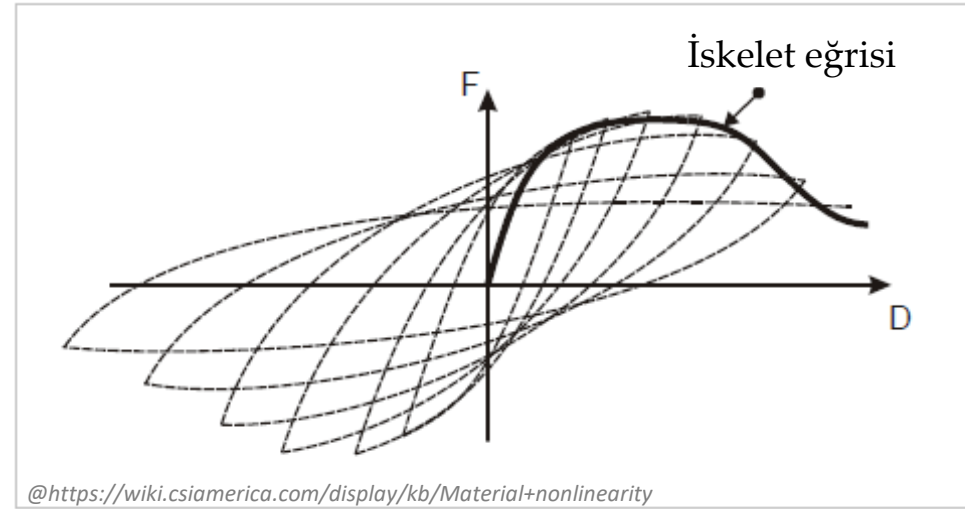
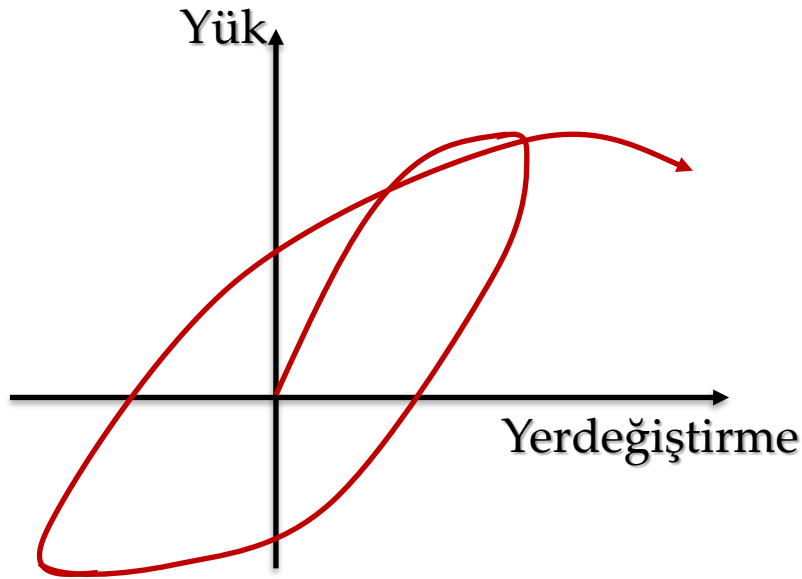
Doğrusal olmama hali:

1. Malzemede elastik ötesi davranış;
2. Yapı ve yapısal elemanların yer ve/veya şekil değiştirmesinden kaynaklanan geometrik doğrusal olmama hali;
3. Doğrusal olmayan mesnet şartları.



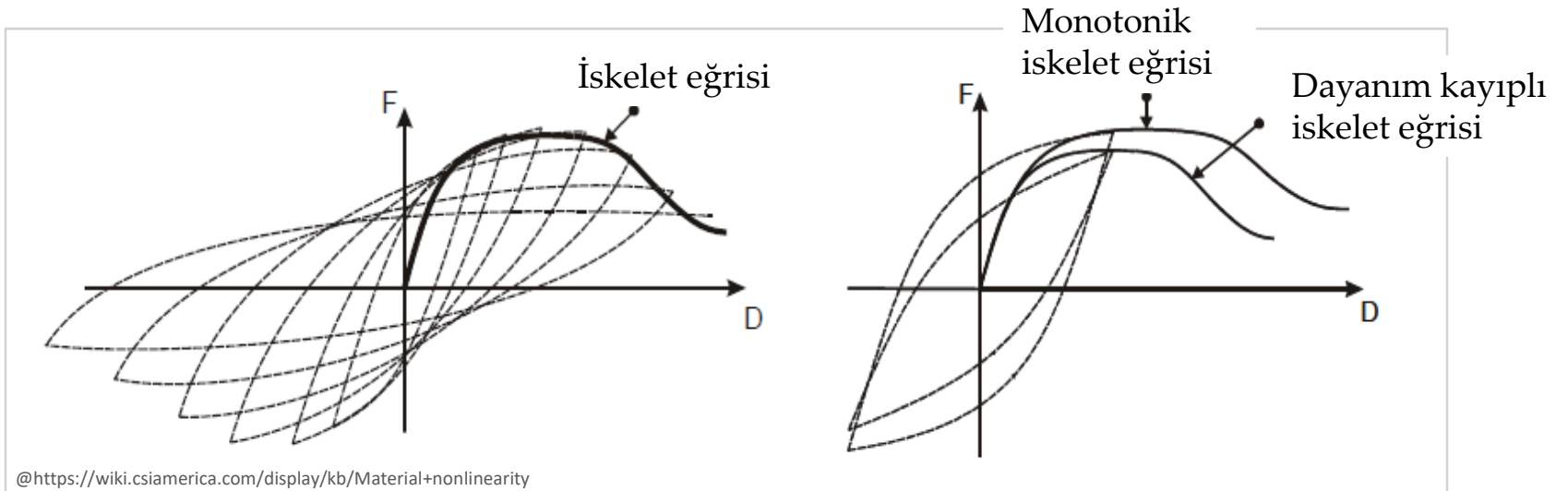
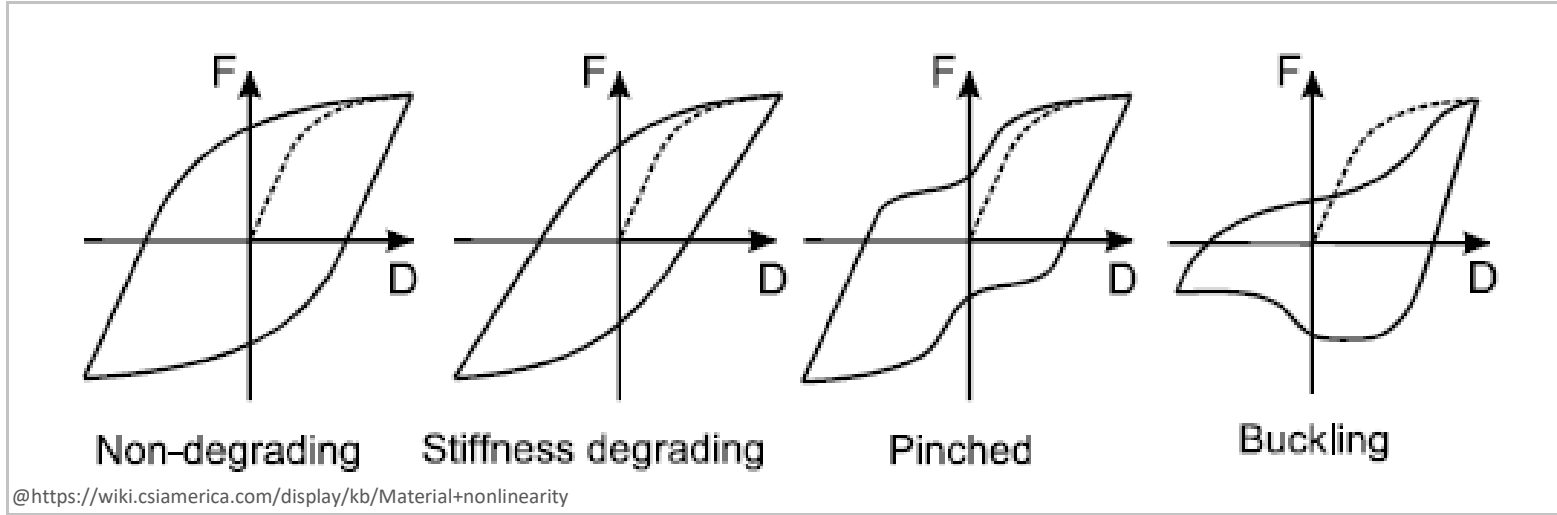
Çevrimsel Davranış

Doğrusal olmayan davranış, ancak doğrusal olmayan davranış göstermesi beklenen elemanların çevrimsel davranışının «olabildiğince» doğru modellenmesiyle tahmin edilebilir.

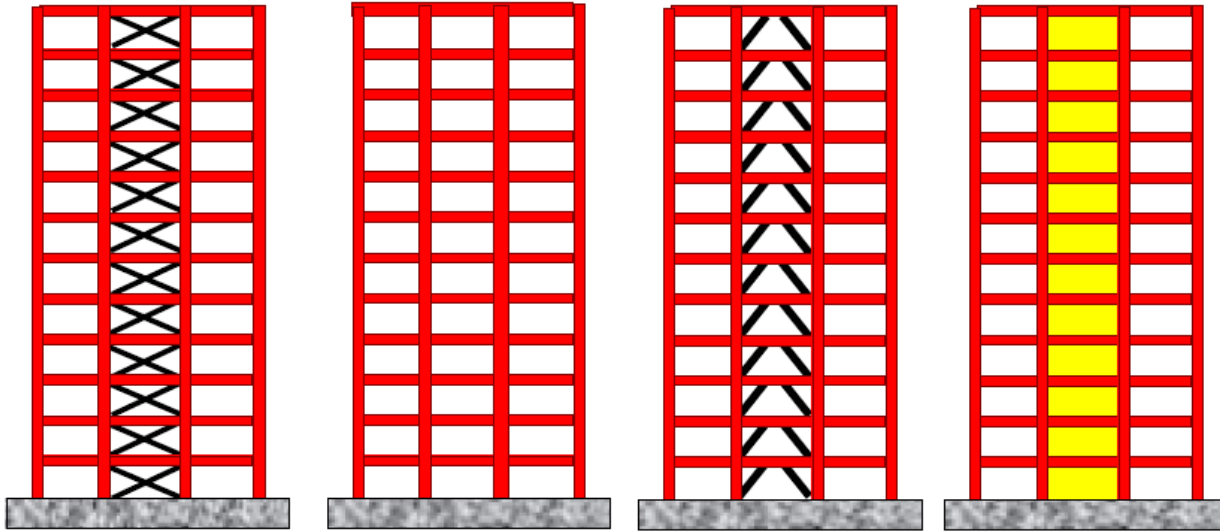


Çevrimsel Davranış

Genel Çevrimsel Davranış Türleri



Çelik Yatay Yük Taşıyıcı Sistemler



© Astaneh-Asl, A. and Shen, J.

- Moment Çerçeveseler
- Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler
- Dışmerkez Çaprazlı Çerçeveseler
- Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveseler
- Süneklik Düzeyi Yüksek Levha Perde Duvarlar
- Karma Sistemler

Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler

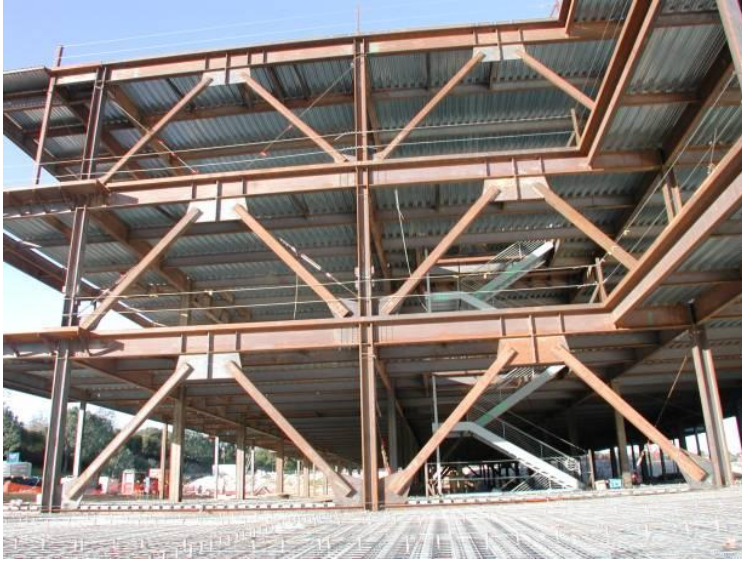
Tanım

Sünek MÇÇ'ler, birleşim noktasında birleşen elemanların merkez çizgilerinin bir noktada kesiştiği, böylece yanal yüklere direnç gösteren düşey bir kafes sistemi oluşturan destekli çerçevelerdir.



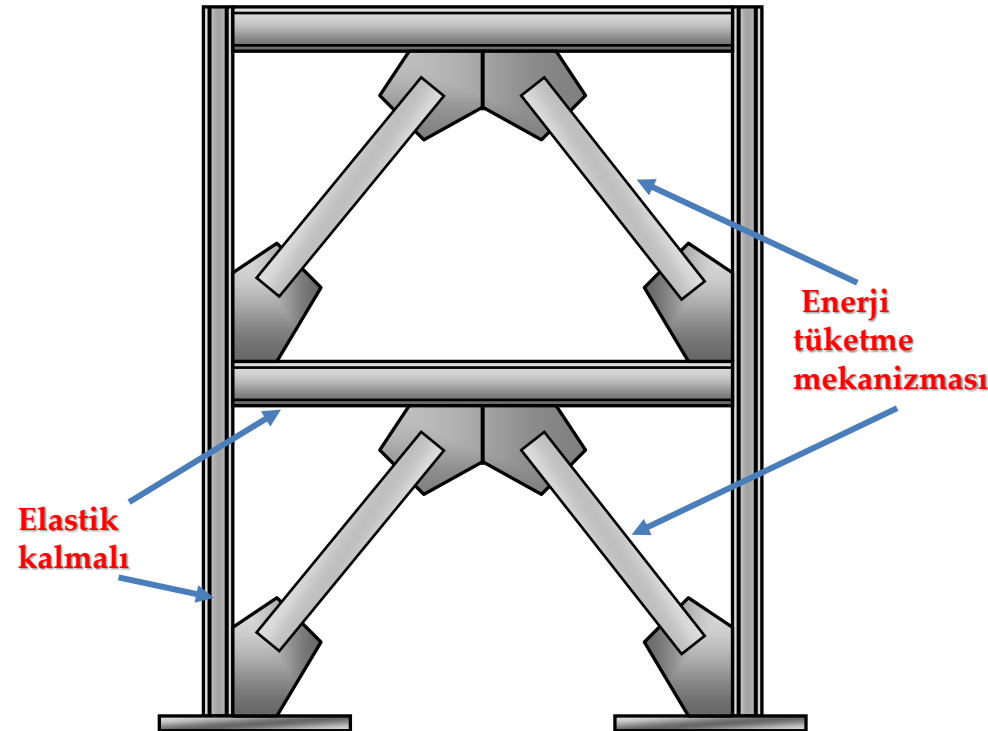
Kiriş derinliğinden daha küçük dış merkezliklere, ortaya çıkan eleman ve bağlantı kuvvetlerinin tasarımda ele alınması ve beklenen elastik olmayan deformasyon kapasitesinin kaynağını değiştirmemesi durumunda izin verilir.

Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler

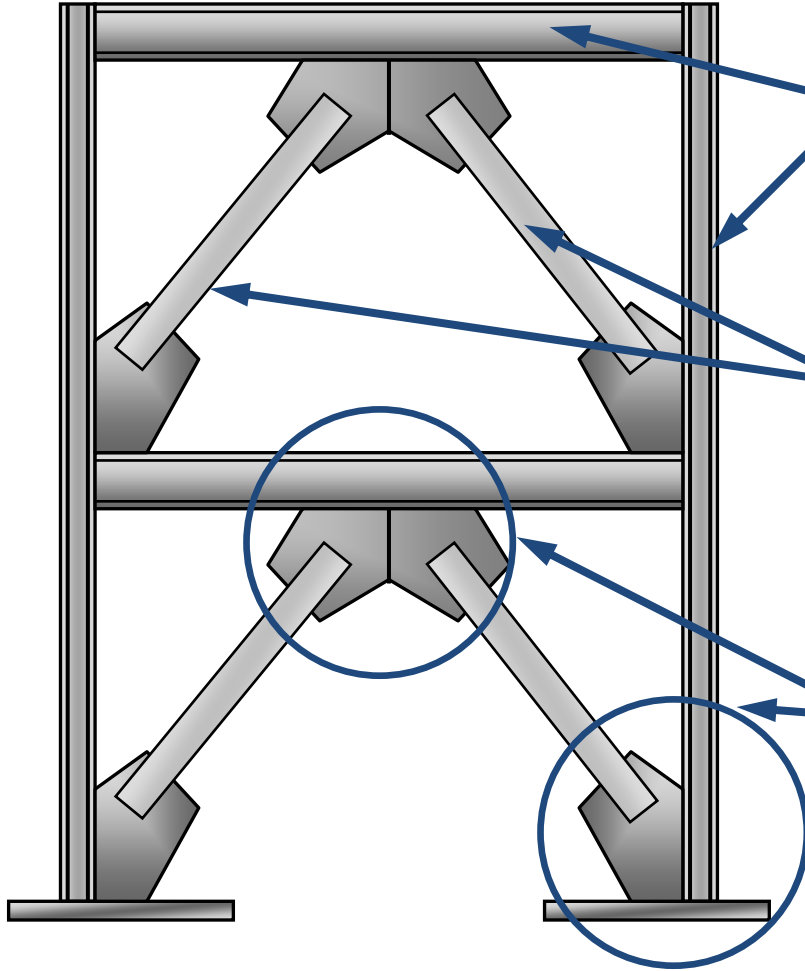


Süneklik büyük ölçüde çaprazlardaki elastik ötesi çevrimsel davranışla sağlanır

- Çaprazlar akar ve burkulur



Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler

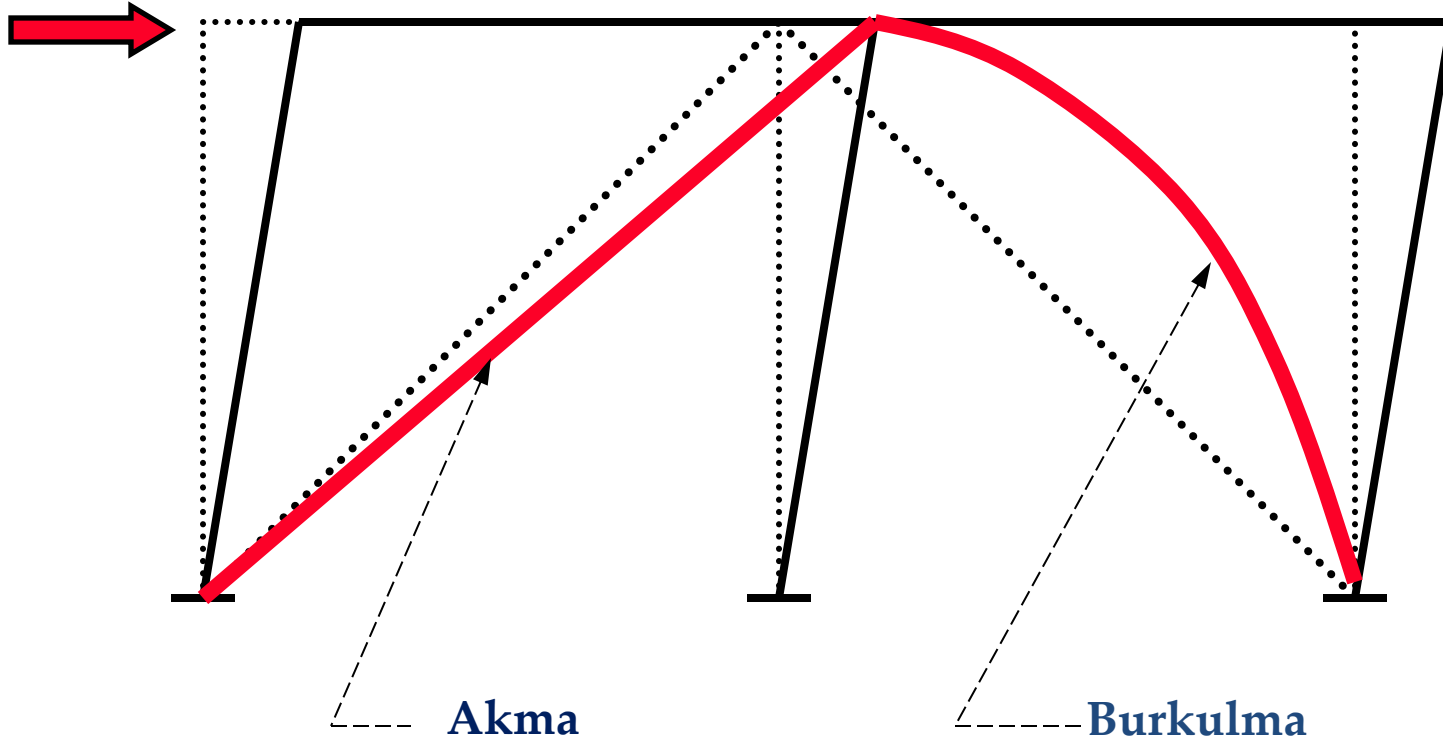


- Kiriş ve kolonlar, çaprazlardan aktarılan en büyük yüke (dengelenmemiş çapraz kuvvetleri) göre tasarlanır

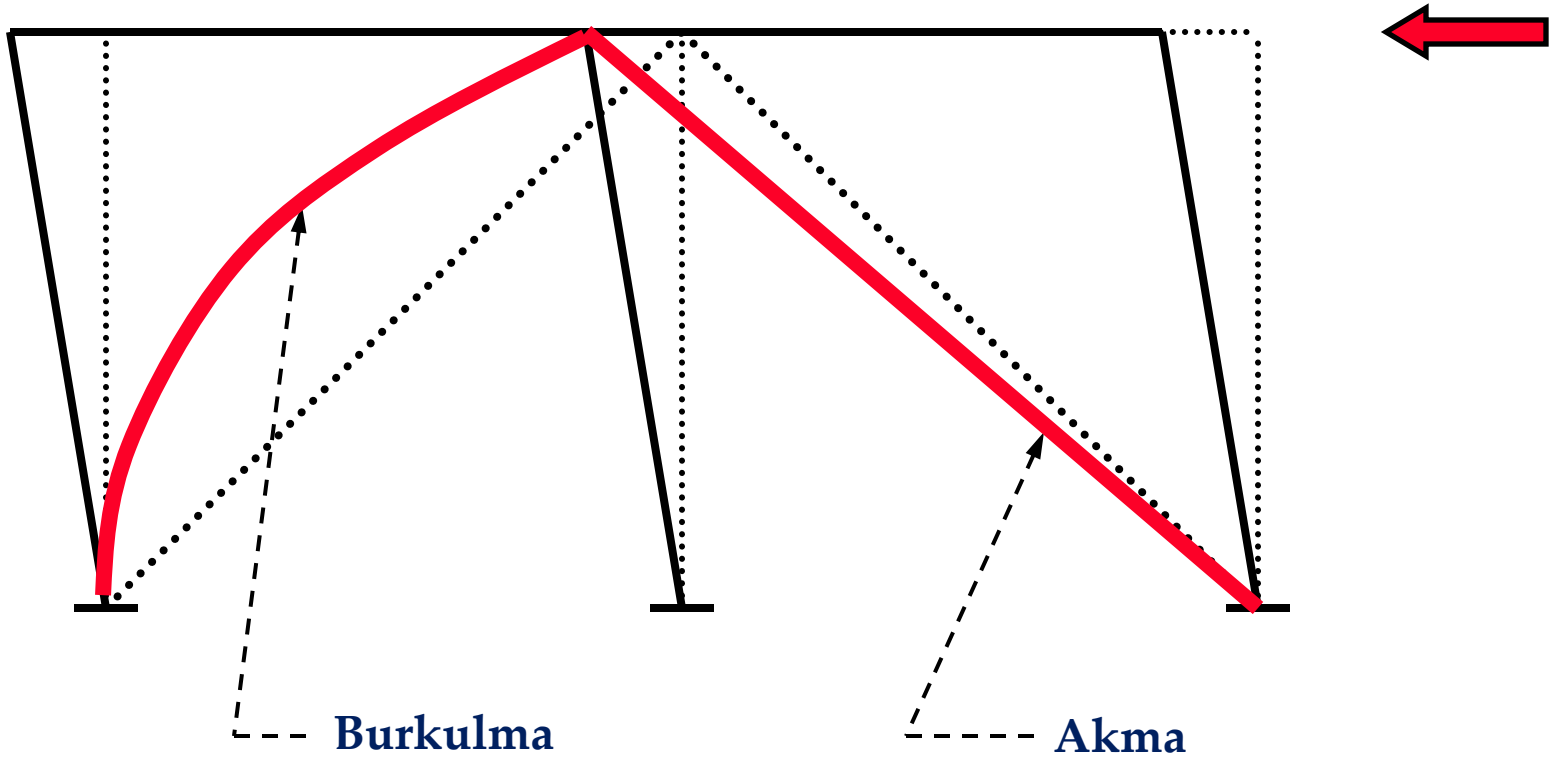
- Çaprazlar yönetmeliklerde tanımlanan azaltılmış deprem yüklerine göre tasarlanır

- Birleşimler, burkulma ve akma durumlarını gözeterek, çaprazlardan aktarılan en büyük yüke ve yerdeğiştirmelere göre tasarlanır

Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler



Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler



Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler

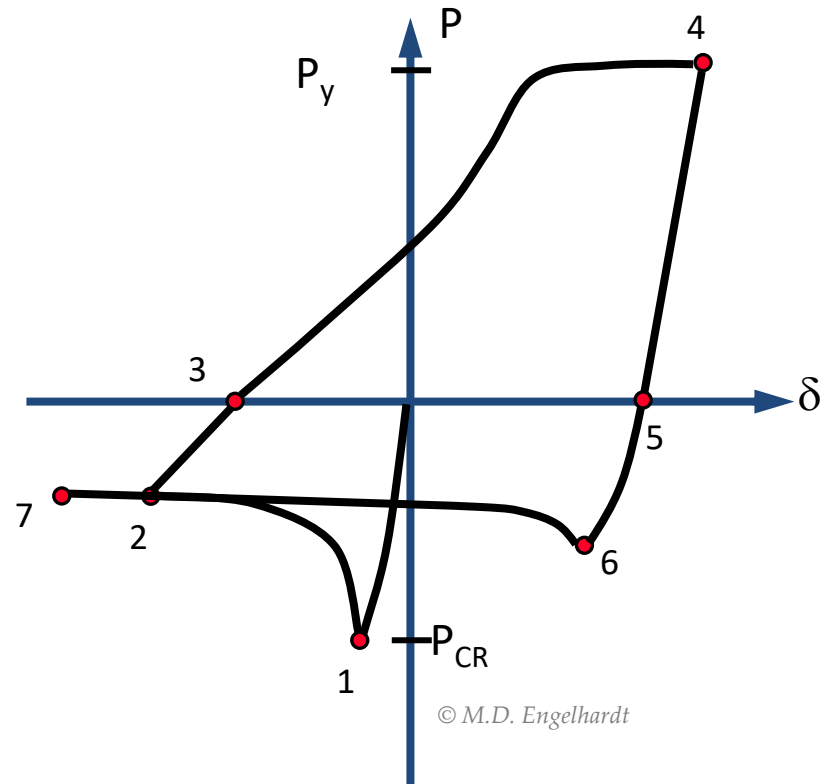
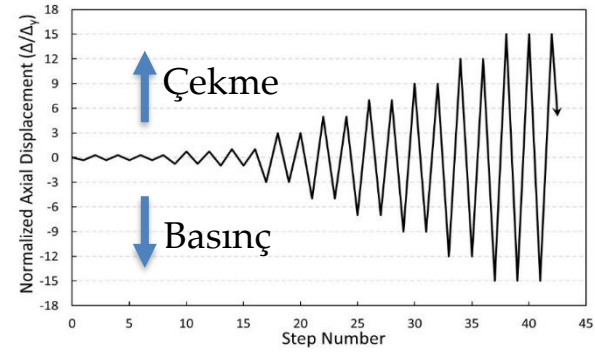
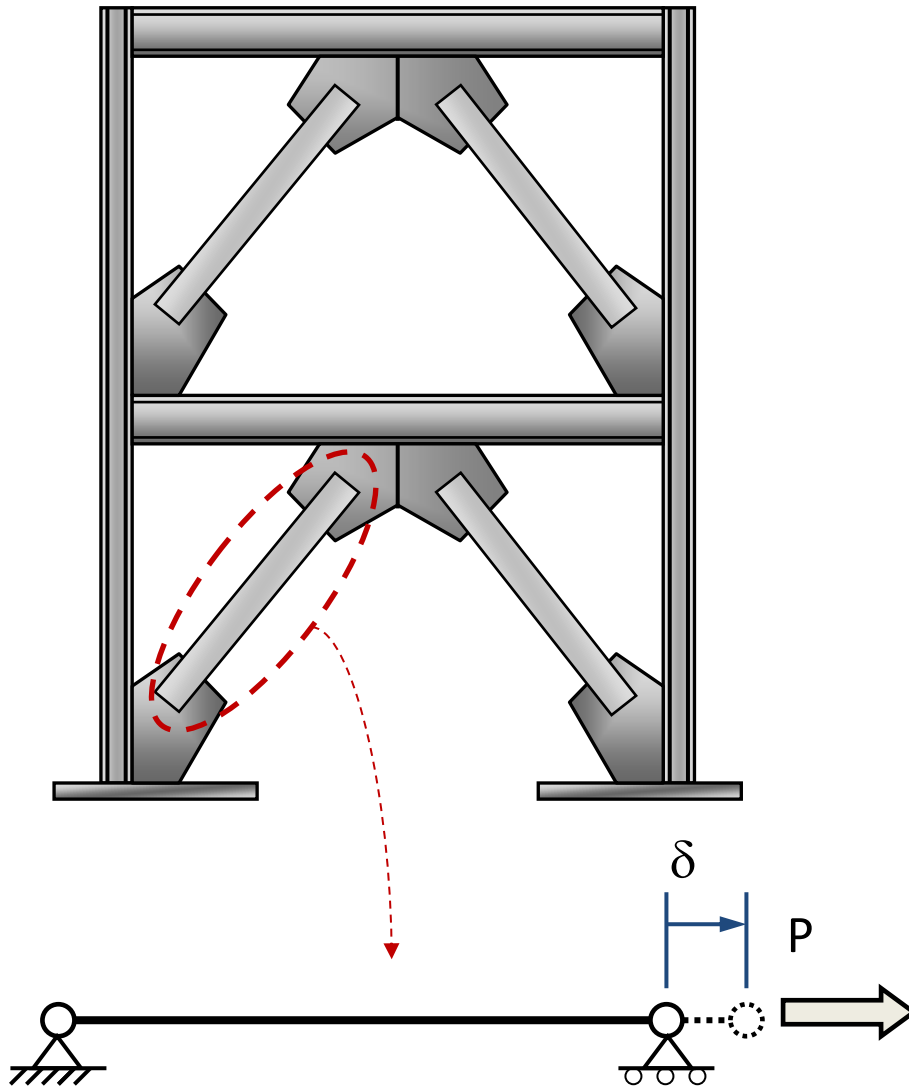


Ocak 17, 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe), Japonya Depremi

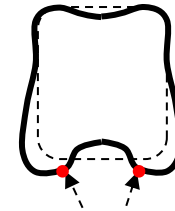
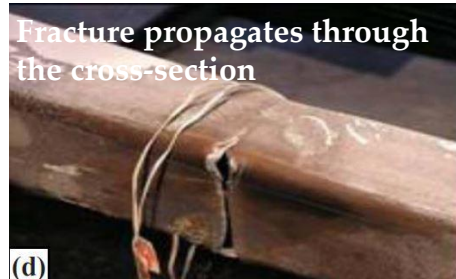
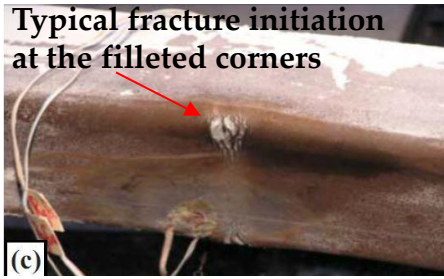
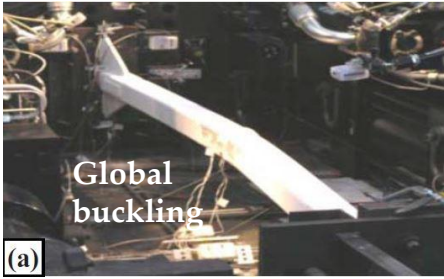
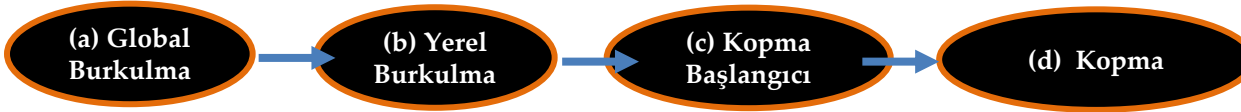
Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler



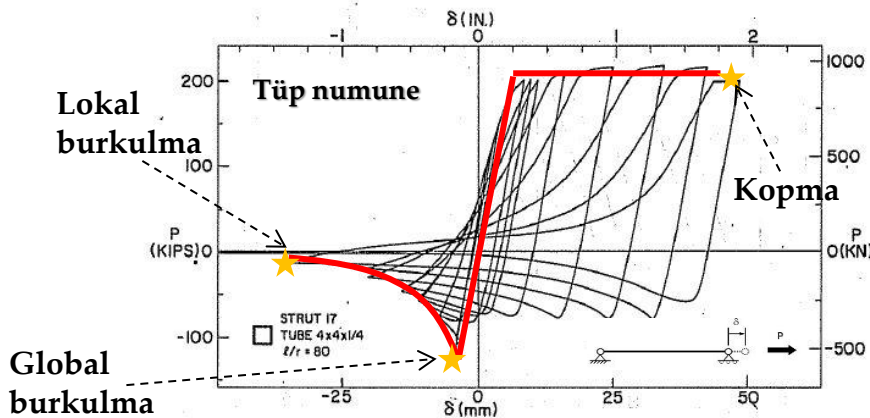
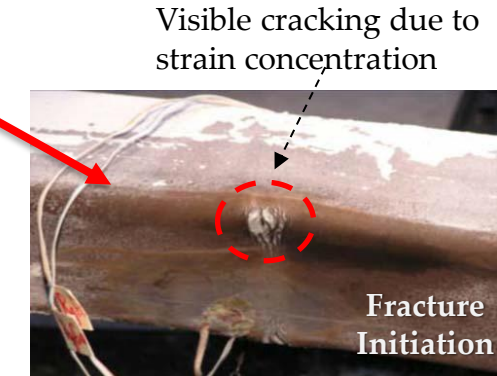
Merkezi Çaprazlı Çerçeveseler



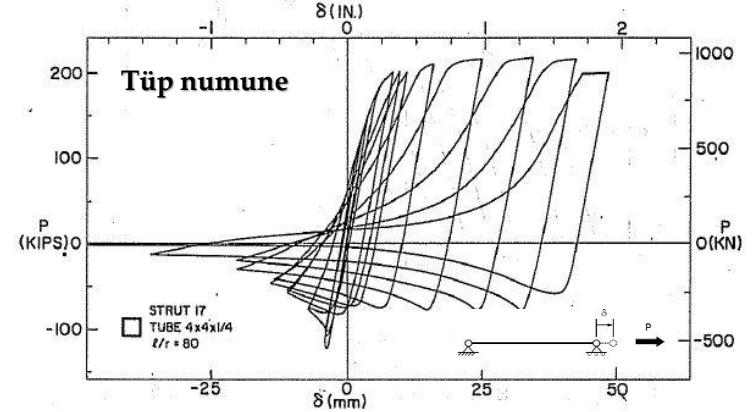
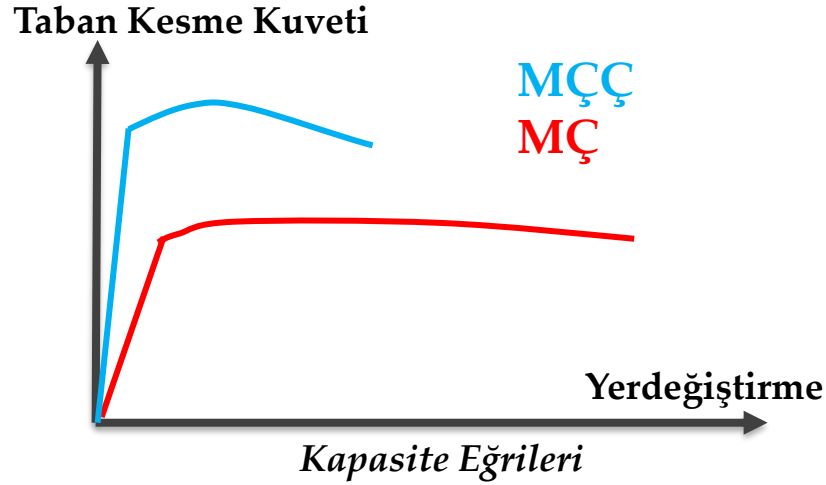
Çevrimsel Davranış



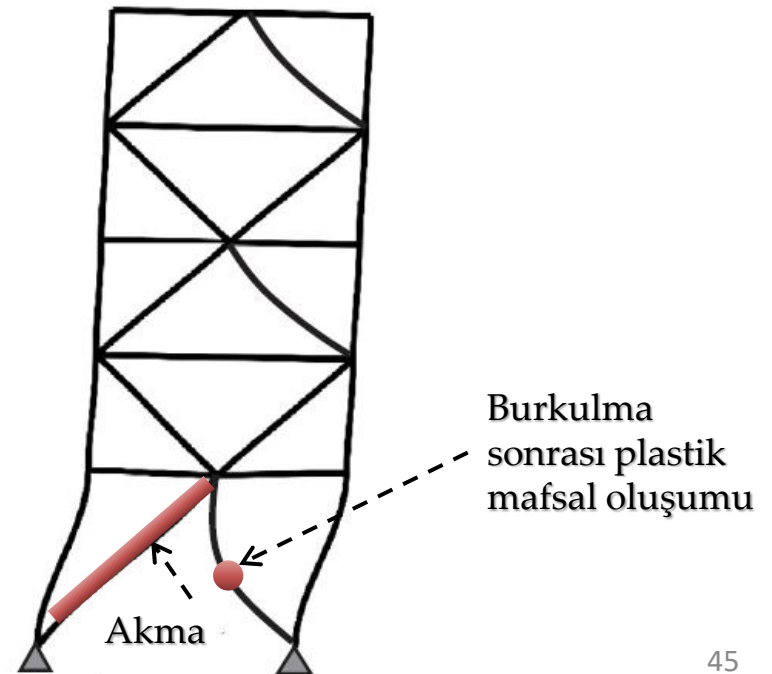
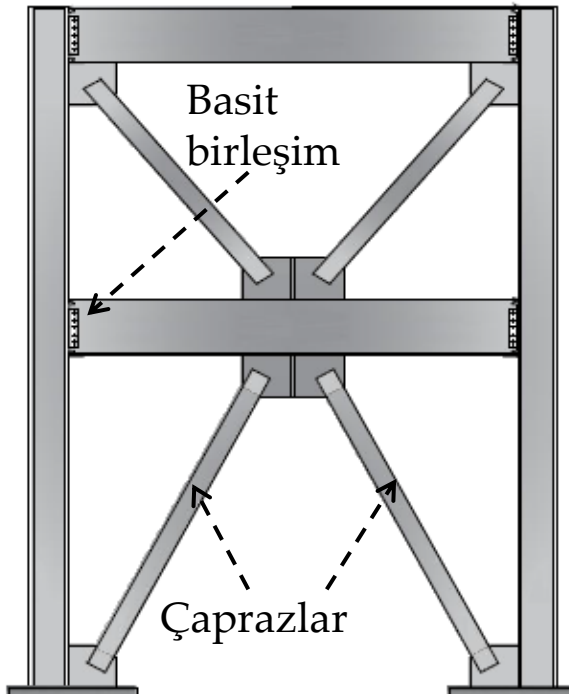
Strain concentration on concave side



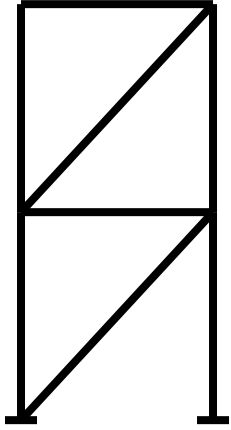
Merkezi Çaprazlı Çerçeveler



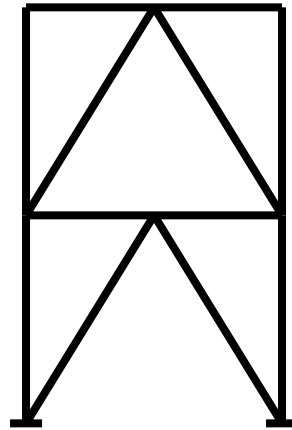
Çevrimsel Çapraz Davranışı (Popov and Black, 1981)



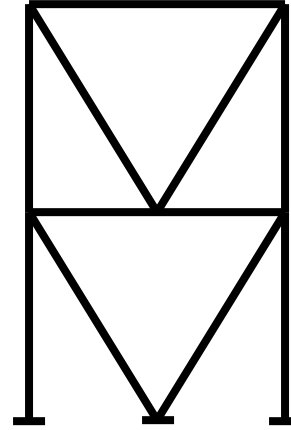
Çapraz Düzeni



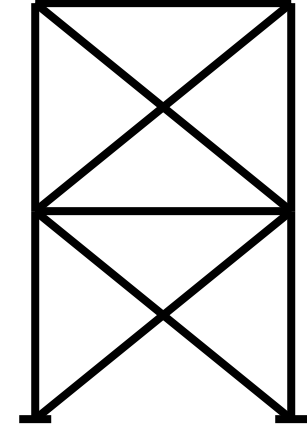
Diagonal



Inverted V- Bracing

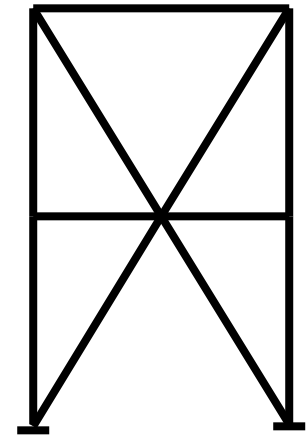


V- Bracing



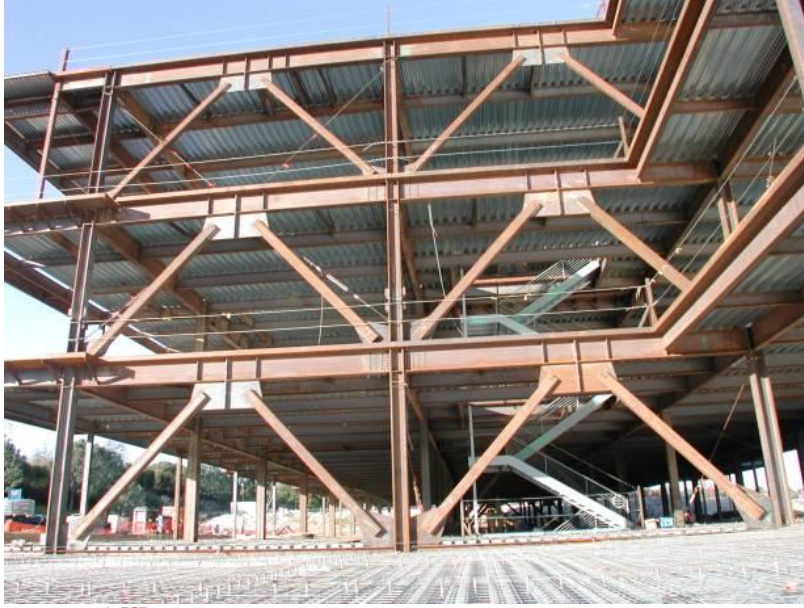
X- Bracing

Orta ila şiddetli bir deprem sırasında, çapraz elemanlarının ve bağlantılarının burkulma sonrası önemli elastik olmayan deformasyonlara uğraması beklenir. Bu nedenle, **çapraz konfigürasyonunun davranış üzerinde önemli bir etkisi vardır.**

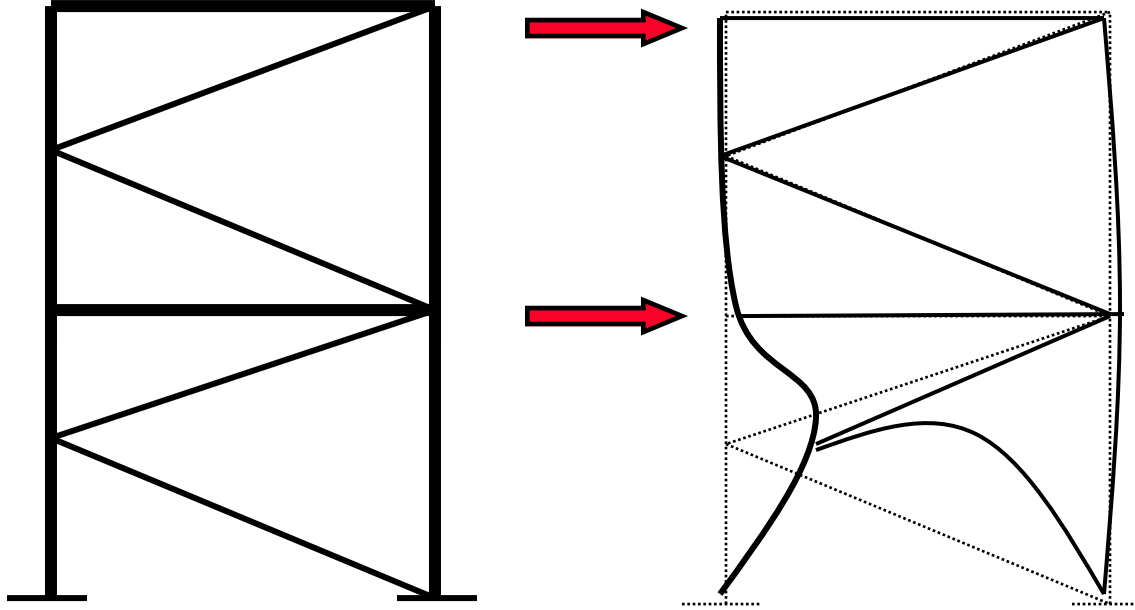


Two Story X-Bracing

Çapraz Düzeni



Çapraz Düzeni



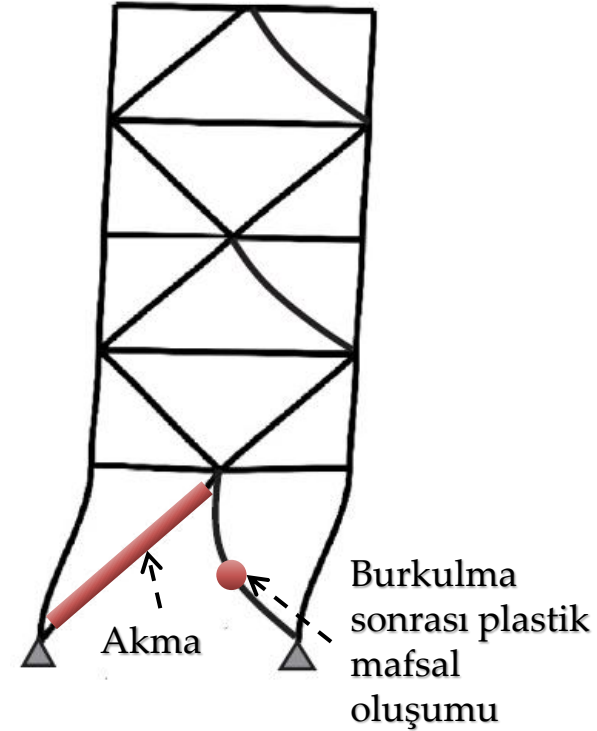
K çapraz düzenine yüksek sünek MÇÇ'lerde izin verilmez!

Sadece çekmeye çalışan (tension-only) çaprazlara yüksek sünek MÇÇ'lerde izin verilmez!

Tasarımın Temeli

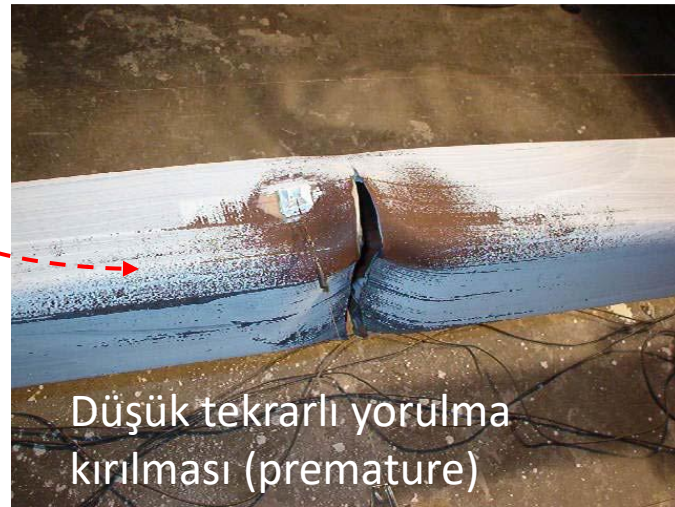
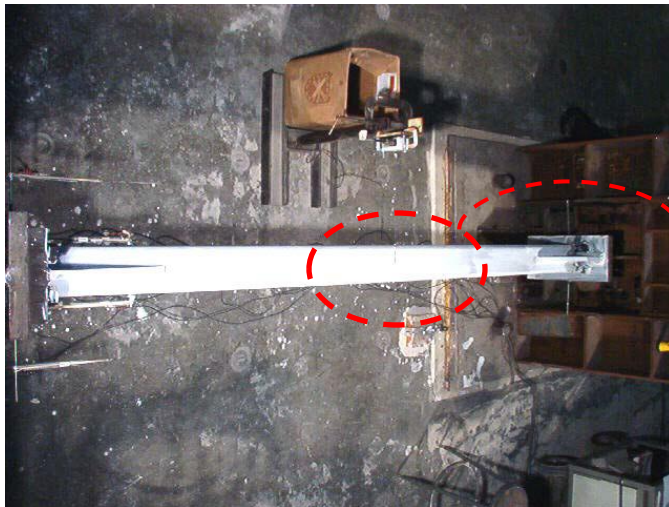
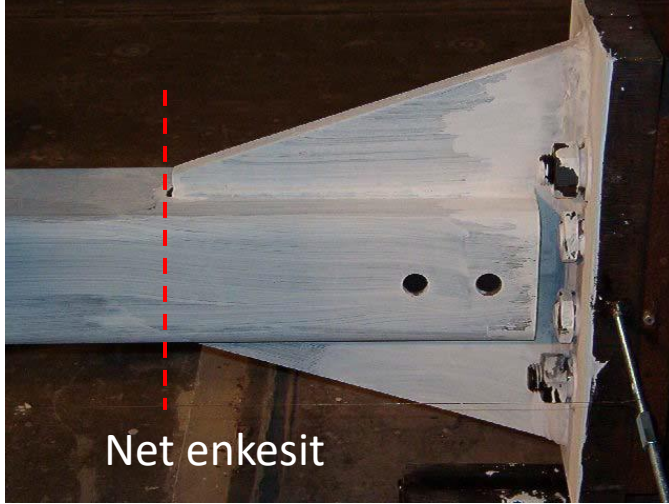
Yönetmelik hükümlerine uygun olarak tasarlanan bir MÇÇ'nin, öncelikle çapraz burkulması ve çekme altındaki çaprazın akması yoluyla **önemli derecede elastik olmayan deformasyon kapasitesi** sağlaması beklenmektedir.

- Tipik bir MÇÇ'deki çaprazların, **yaklaşık %0,3 ila %0,5 gibi orta düzeydeki kat ötelenmelerinde akması ve burkulması** beklenebilir.
- Şiddetli bir depremde, çaprazlar burkulma sonrası **akma deformasyonlarının 10 ila 20 katı** kadar bir aksenal deformasyonlara maruz kalabilirler.
- Bu kadar büyük çevrimsel deformasyonlarını göçme yaşamadan atlatabilmek için, **çapraz elemanlar ve bağlantıları uygun şekilde detaylandırılmalıdır.**



Tasarımın Temeli

Yapılan araştırmalar, göçmelerin sıklıkla plastik mafsal bölgesinde (yerel burkulma kaynaklı) veya birleşim bölgesinde meydana geldiğini ortaya koymuştur.

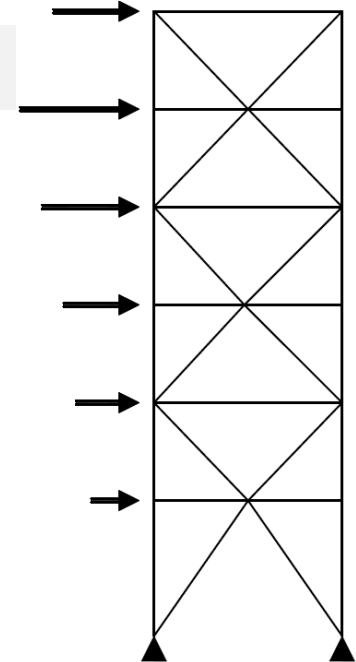


Analiz

- MÇÇ'ler genellikle elastik analiz ile tasarlanırsa da, **beklenen davranışları**, çapraz burkulması ve akması nedeniyle **önemli ölçüde doğrusal olmayan davranış içerir**.
- Sistem sünekliği, ancak kiriş ve kolonlarda istenen davranış sağlanırsa elde edilebilir. Bu nedenle, **uygun bir tasarım için elastik analizin desteklenmesi gerekmektedir**.
- Mevcut tasarım kuralları, elastik olmayan bir analiz gerektirmeden elastik olmayan davranışa karşılık gelen kuvvetleri yaklaşık olarak hesaplamayı amaçlamaktadır.

«Mümkün olan en büyük» yükleri nasıl belirleriz?

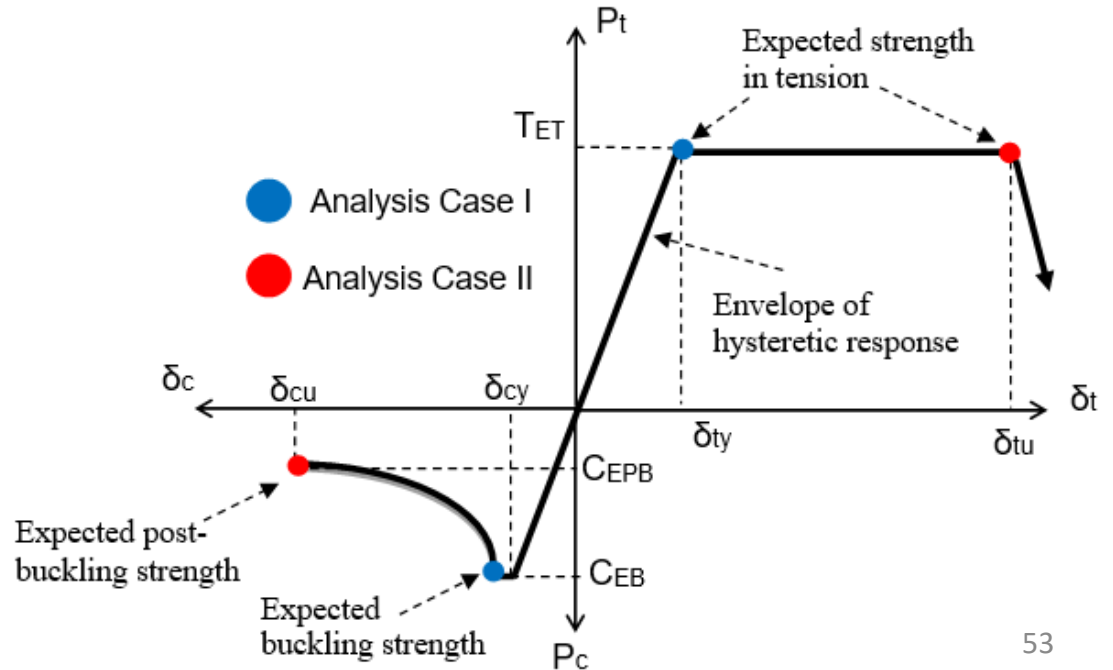
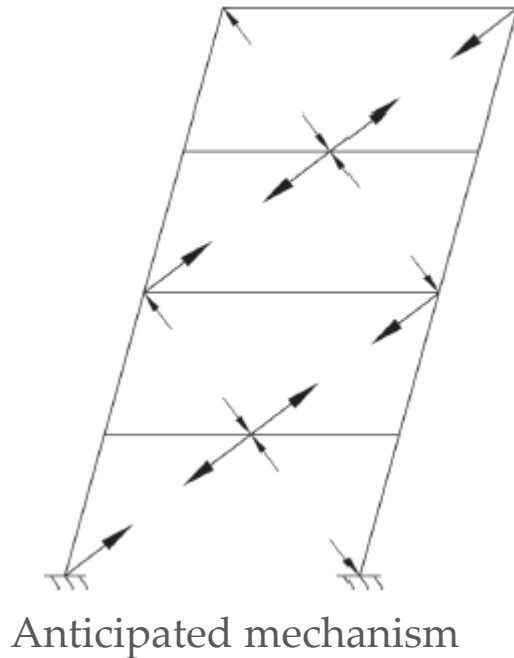
- Tasarım için aşağıdaki adımlar izlenebilir:
 1. Yapısal elemanların boyutlandırılmasının ilk adımı, **çaprazların tasarlanması**dır. Çapraz tasarımı, ilgili yönetmeliklerde (örneğin, ASCE 7 veya TBDY 2018) belirtilen yatay yükler kullanılarak yapılır.
 2. Daha sonra, **kirişler ve kolonlar**, çaprazlar tarafından üzerlerine uygulanan maksimum kuvvetlere göre tasarlanır.



Analiz

Çaprazların basınç davranışı çekme davranışından önemli ölçüde farklı olduğundan, iki ayrı analiz gereklidir. Kiriş ve kolonlarda kapasite sınırlı sismik yük etkilerinin (E_{cl}) belirlenmesinde, aşağıdaki iki yapısal analiz gereklidir:

1. Tüm çaprazların maksimum iç kuvvetlerine ulaştığı bir analiz.
2. Çekme çaprazlarının maksimum dayanım seviyesinde olduğu ve basınç çaprazlarının burkulma sonrası dayanımlarının önemli bir yüzdesini kaybettiği bir analiz.



Analiz

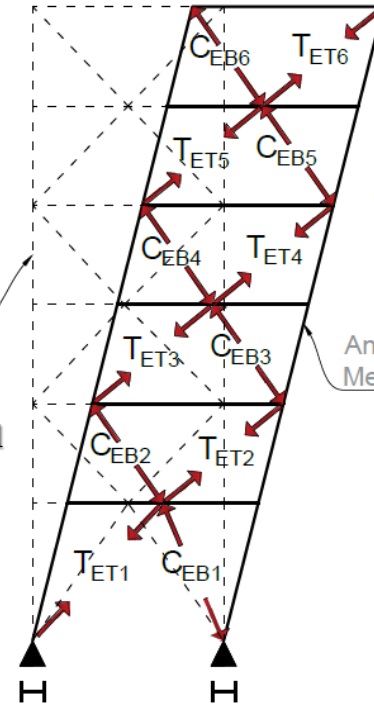
Çekmede beklenen çapraz kuvveti, T_{ET} , basınçta beklenen burkulma dayanımı, C_{EB} , and basınçta beklenen burkulmas sonrası dayanım, C_{EPB} , aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$T_{ET} = R_y F_y A_g$$

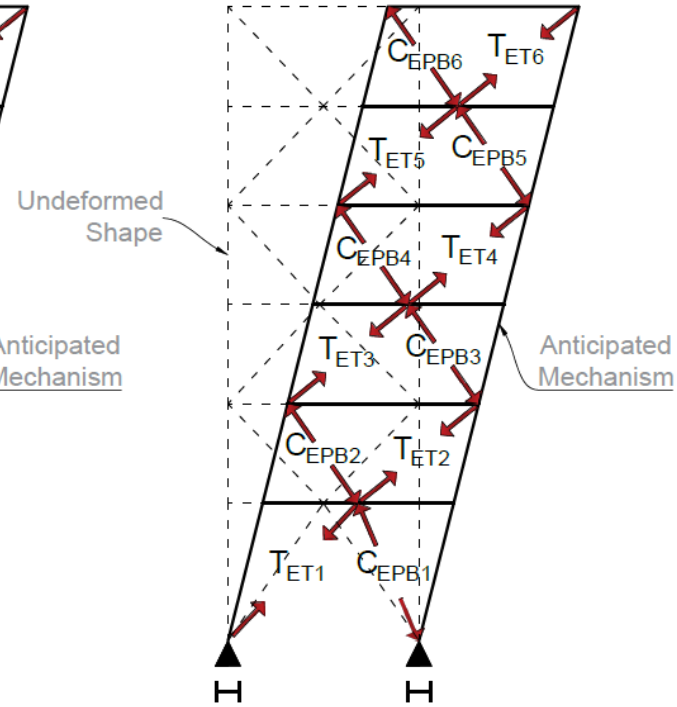
$$C_{EB} = \{R_y F_y A_g ; F_{cre} A_g / 0.877\}_{\min}$$

$$C_{EPB} = 0.3 C_{EB}$$

Kapasite Sınırlı Sismik Yükler, E_d



Analysis Case I

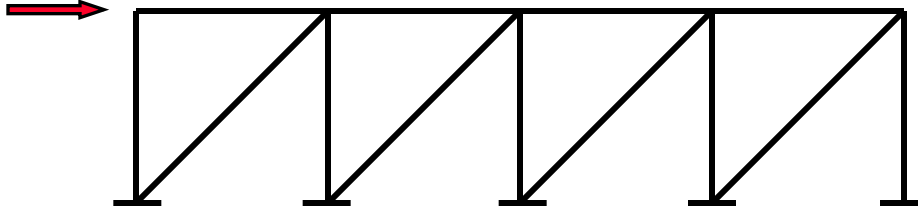


Analysis Case II

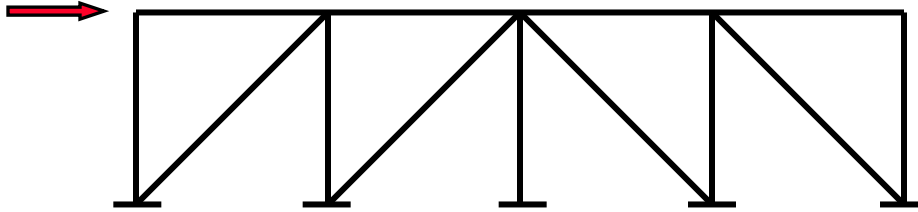
Bir çaprazın basınçta mı yoksa çekmede mi olduğunu belirlerken birinci deformasyon modu dikkate alınır. Yani, **kolonların eğilmeye maruz kalmadığı kabul edilir!**

Yatay Yük Dağılımı

Çaprazlar, yaklaşık yarısı çekme (diğer yarısı basınç altında) olacak şekilde yerleştirir.



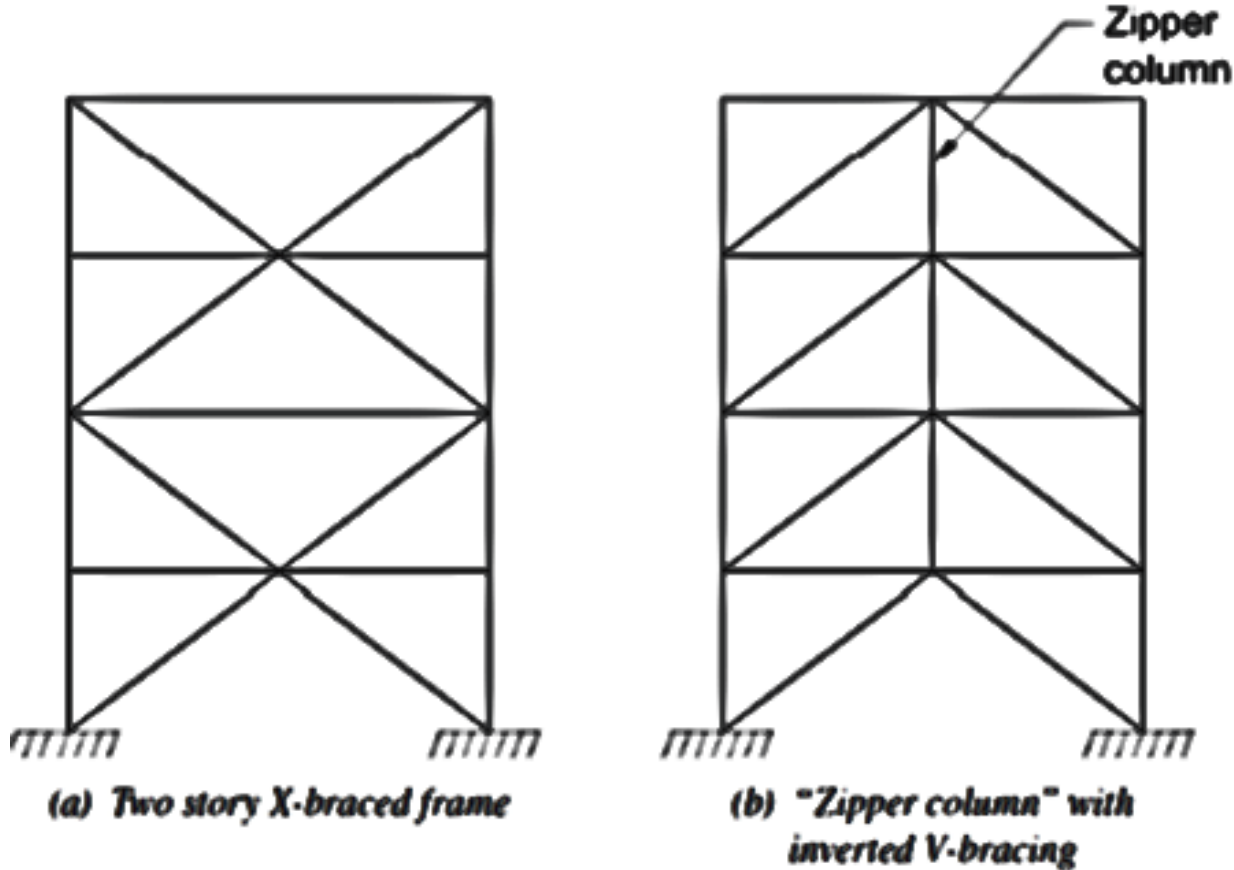
Tüm çaprazlar çekmede (veya basınçta) *Uygun Değil!*



OK

AISC 341, F2.4a'ya göre, çaprazların herhangi bir hat boyunca, yatay yükün her iki yönü için de, o hat boyunca toplam yatay kuvvetin en az %30'u, ancak en fazla %70'i çekme altındaki çaprazlar tarafından direnç sağlanacak şekilde alternatif yönlerde yerleştirilmelidir.

V- ve Ters V-Çaprazlı Çerçeveler



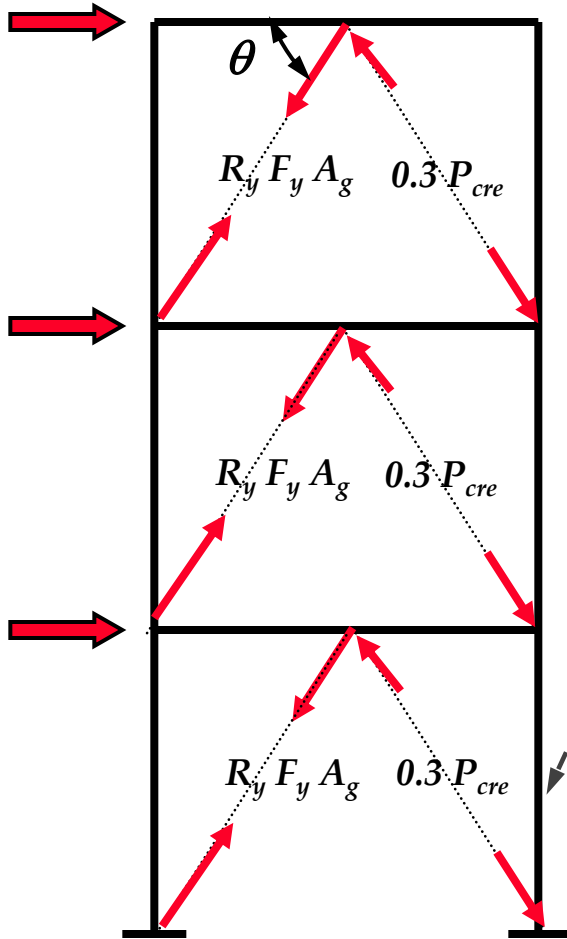
Bu dengelenmemiş kuvvetin olumsuz etkisi, iki kat boyunca X şeklinde bir konfigürasyon oluşturarak (dönüşümlü katlarda V ve ters V çaprazlar gibi) veya bu yükleri dengeleyecek düşey kolonlar (zipper column) kullanılarak hafifletilebilir.

V- ve Ters V-Çaprazlı Çerçevesler

Kiriş çaprazların kesiştiği noktada stabiliteyi sağlayacak yeterli düzlem dışı mukavemete ve rijitliğe sahip değilse, V tipi (veya ters V tipi) destekli çerçevelerin kesişim noktasında **en az bir set yanal destek gereklidir.**



V- ve Ters V-Çaprazlı Çerçeveseler



Kolon için gerekli aksenal basınç dayanımı =

$$[\Sigma (R_y F_y A_g - 0.3 P_{cre}) \sin\theta] / 2$$

+

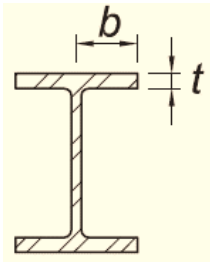
$$\Sigma (0.3 P_{cre}) \sin\theta$$

+

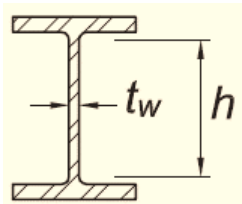
$$\Sigma [(1.2 + 0.2 S_{DS}) D + 0.5 L]$$

Kolon-Kiriş Enkesit Şartları

Kolonlar ve kirişler, yüksek süneklığe sahip elemanlar için gereklilikleri karşılamalıdır.



$$b/t \leq 0.30 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$



$$h/t_w \leq$$

$C_a \leq 0.125$ ise

$$2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (1 - 0.93 C_a)$$

$C_a > 0.125$ ise

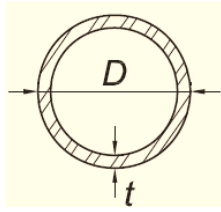
$$0.77 \sqrt{\frac{E}{F_y}} (2.93 - C_a) \geq 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Yüksek sünek (λ_{hd})

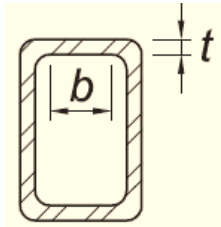
Çaprazlar

TBDY çaprazlar için birkaç özel gereklilik belirtir:

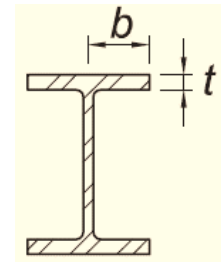
(1) Enkesit şartı: Çaprazlar yüksek süneklik şartını sağlamalıdır.



$$D/t \leq 0.038 \frac{E}{F_y}$$



$$b/t \leq 0.55 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$



$$b/t \leq 0.30 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Yüksek sünek (λ_{hd})

Çaprazlar

(2) Narinlik şartı: AISC 341, Bölüm F2.5'e göre **çaprazların narinlik oranı 200'den küçük olmalıdır.**

$$\frac{L_c}{i} \leq 200$$

L_c = Burkulma boyu= KL (mm)

i = kontrol eden atalet yarı çapı (mm)

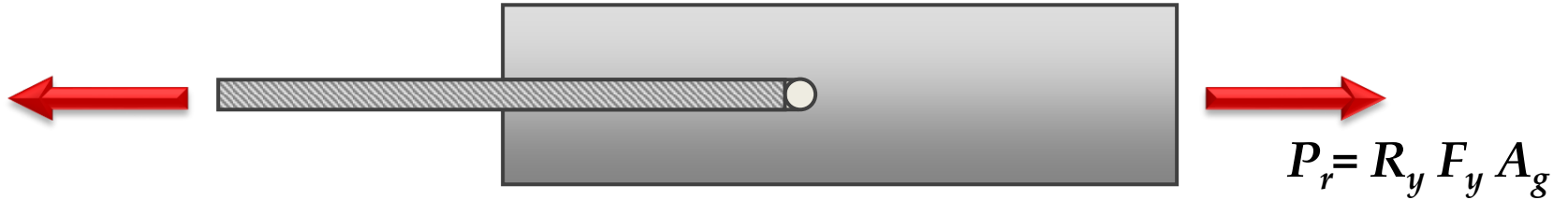
(3) Net enkesit şartı: Çaprazların etkin net enkesit alanı, çaprazların kayıpsız enkesit alanından az olmamalıdır. Takviye kullanıldığında aşağıdaki şartlar geçerli olacaktır:

- Plakaların belirtilen minimum akma dayanımı, en azından çaprazın belirtilen minimum akma dayanımına eşit olmalıdır.
- Plakaların çaprazlara bağlantıları, azaltılmış net enkesitin her iki tarafında beklenen plaka dayanımını geliştirmek için yeterli dayanıma sahip olmalıdır.

Çapraz Birleşimleri

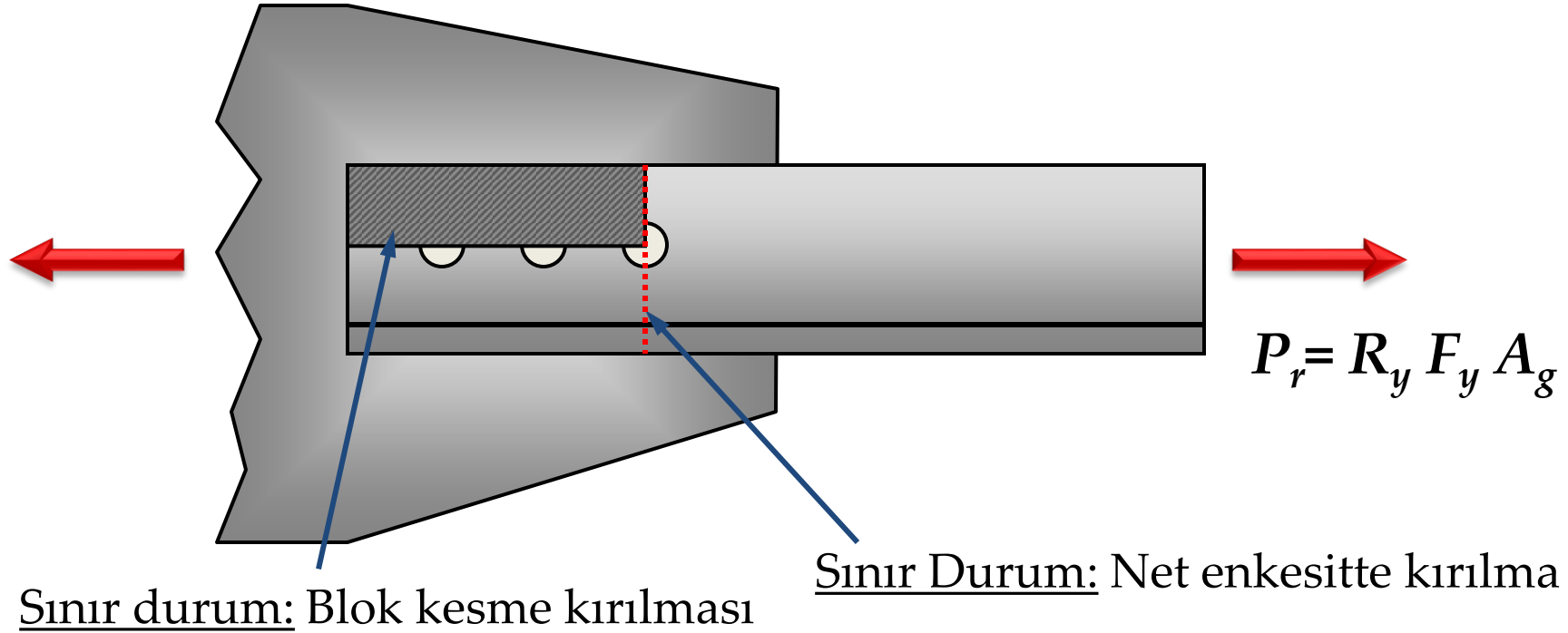
Gerekli çekme dayanımı, aşağıdakilerden hangisi daha az ise o olacaktır:

1. Çaprazın çekme durumundaki beklenen akma dayanımı, $R_y F_y A_g$ olarak belirlenir
2. Sistem tarafından geliştirilebilecek maksimum kuvvet (Elastik olmayan analiz gerektirir).



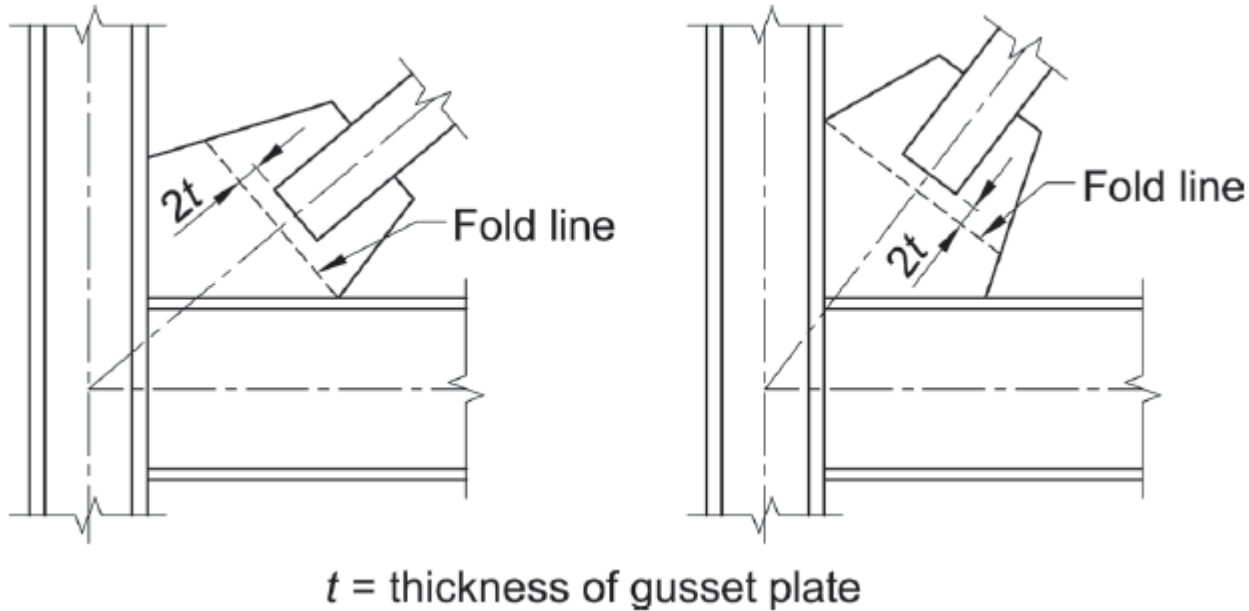
MÇÇ'deki çaprazların, sünek bir şekilde akabilmesi için, **kontrol eden sınır durum olarak kayıpsız enkesitte akma** olması gerekir. Blok kesme kırılması gibi **ani göçme modları önlenmelidir**. Bu nedenle, bu göçme modları için hesaplamalarda çaprazın oluşturabileceği maksimum yük kullanılmalıdır.

Çapraz Birleşimleri



Burkulmada Uç Serbestliđi

Çaprazlarda uç dönmelerinden kaynaklanan kırılmaları önlemek için, çapraz bağlantılarının, çaprazın elastik olmayan dönmesini sınırlayacak yeterli mukavemete veya çapraz uç dönmelerini karşılayacak yeterli süneklığe sahip olması gerekir.

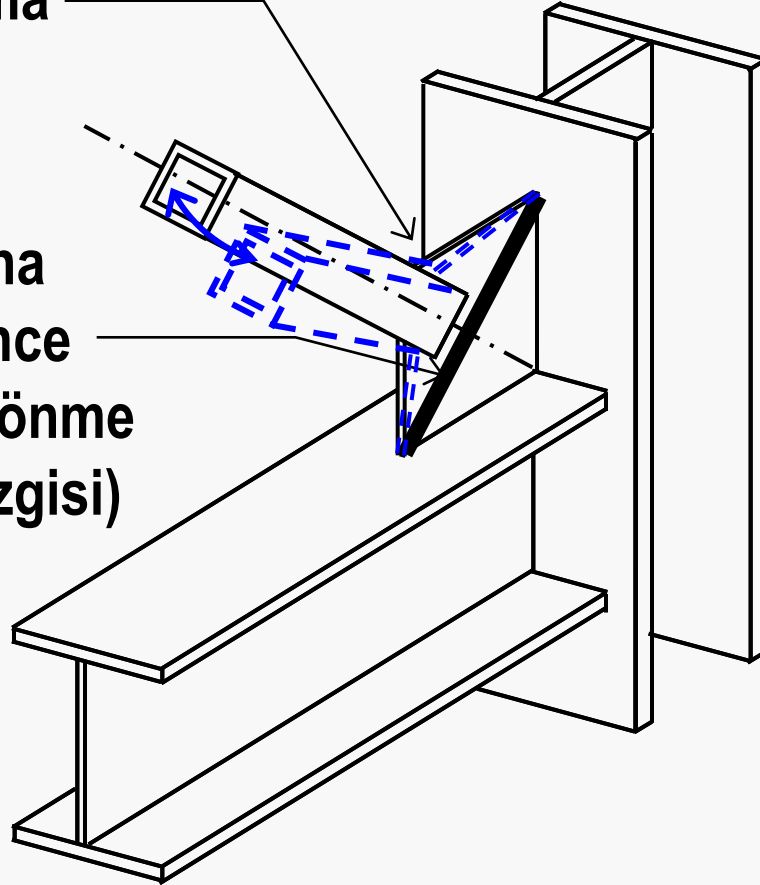


Uygulamada, montaj toleranslarını sağlamak için biraz daha büyük bir mesafe (örneğin $2t + 25 \text{ mm}$) belirtilmesi tavsiye edilebilir.

Burkulmada Uç Serbestliđi

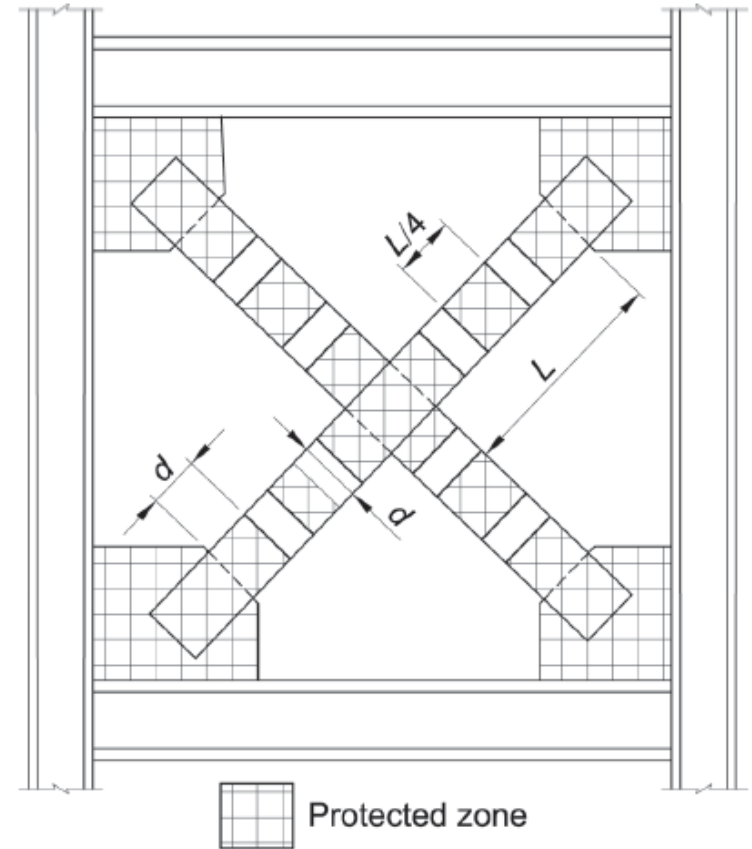
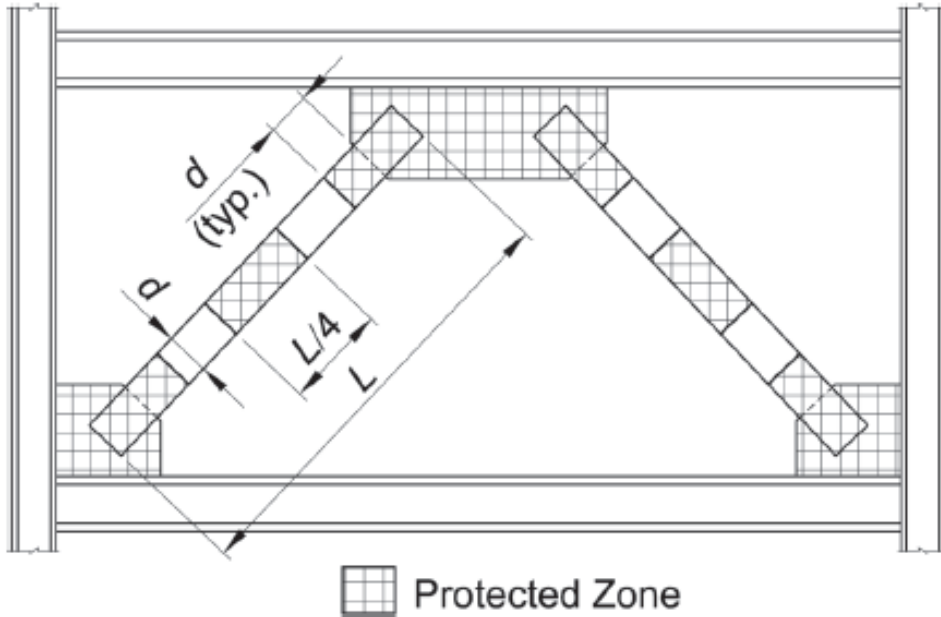
Düzlem dışı burkulma

Çapraz düzlem dışına burkulduğundaki (ince levha doğrultusu) dönme çizgisi (katlanma çizgisi)



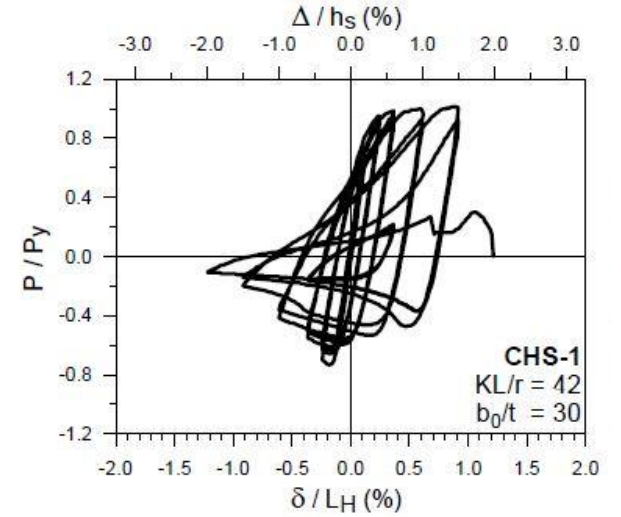
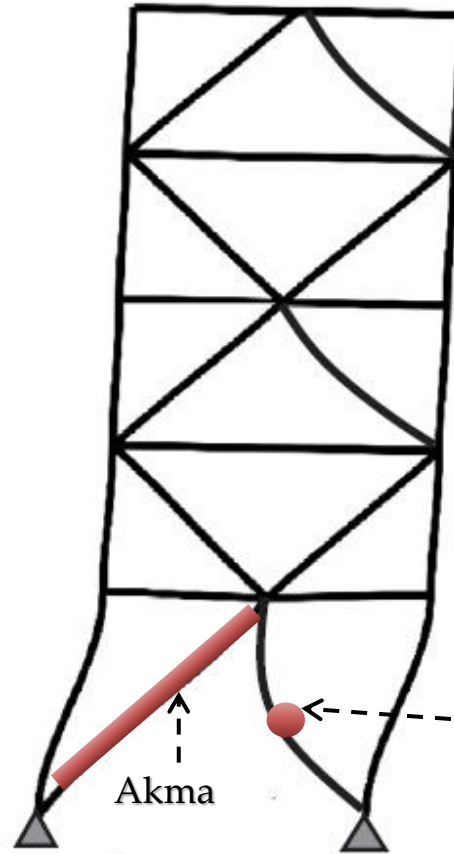
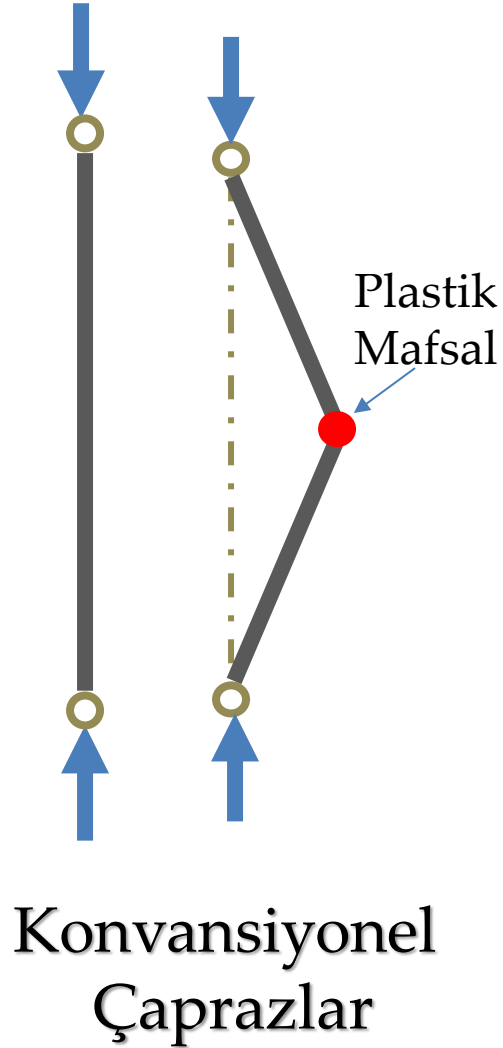
Not: Çapraz birleşimlerde mafsal davranışı sağlamanın en yaygın yolu “katlanma çizgisi” yaklaşımıdır. Bu yaklaşımla, çapraz ucunun dönmesine guse levhasında bir katlanma çizgisi oluşturarak izin verilir.

Korunmuş Bölgeler

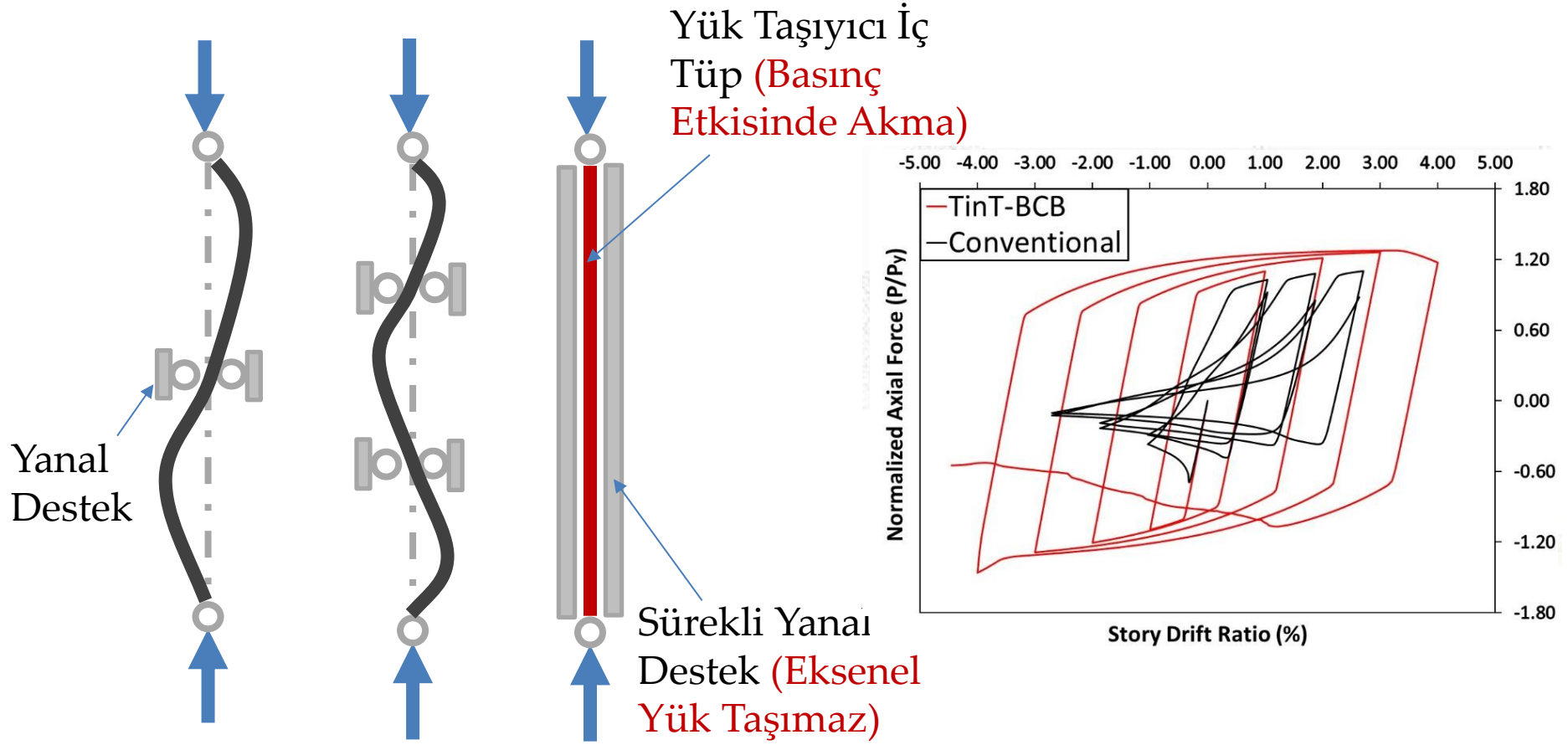


Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveseler

Burkulmanın Önlenmesi Konsepti

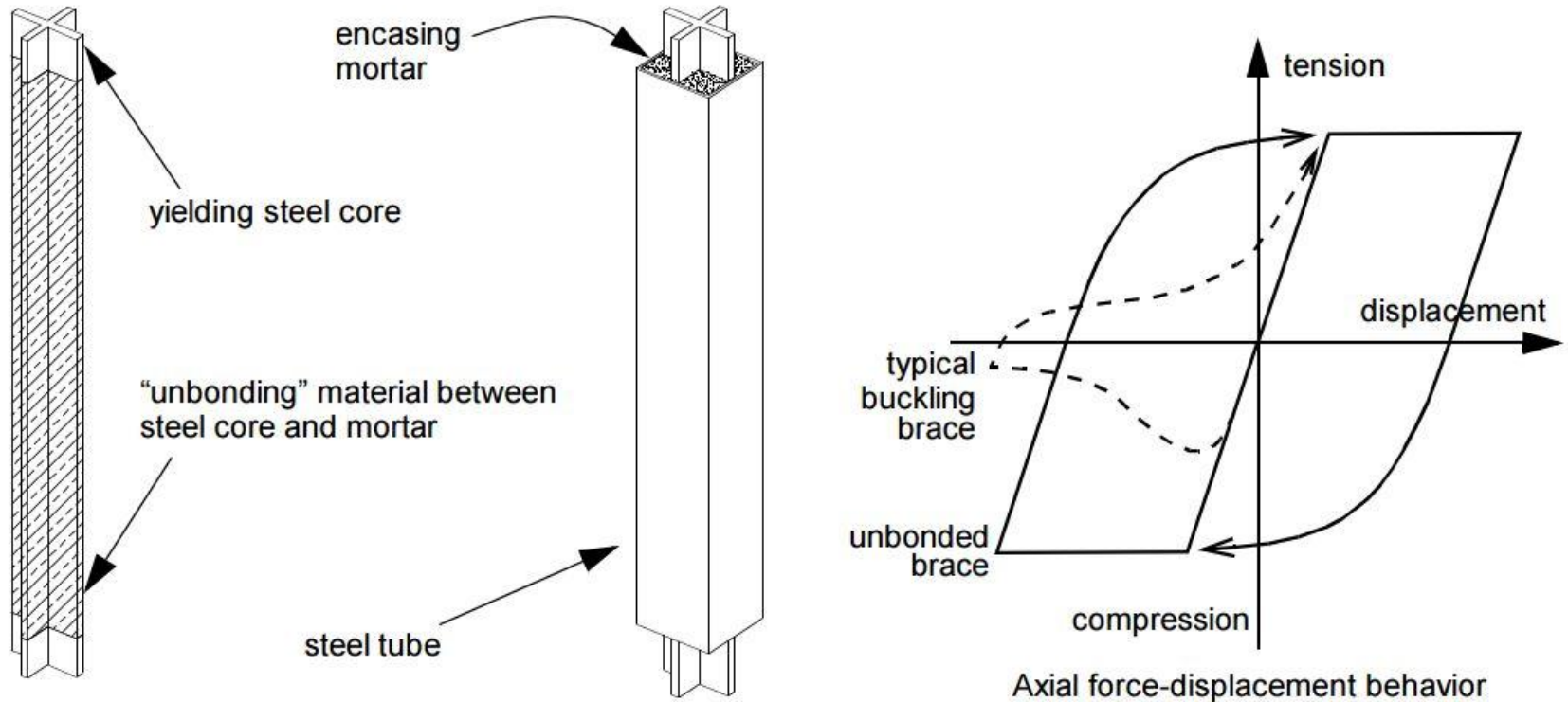


Burkulmanın Önlenmesi Konsepti



Burkulmanın Önlenmesi
Konsepti

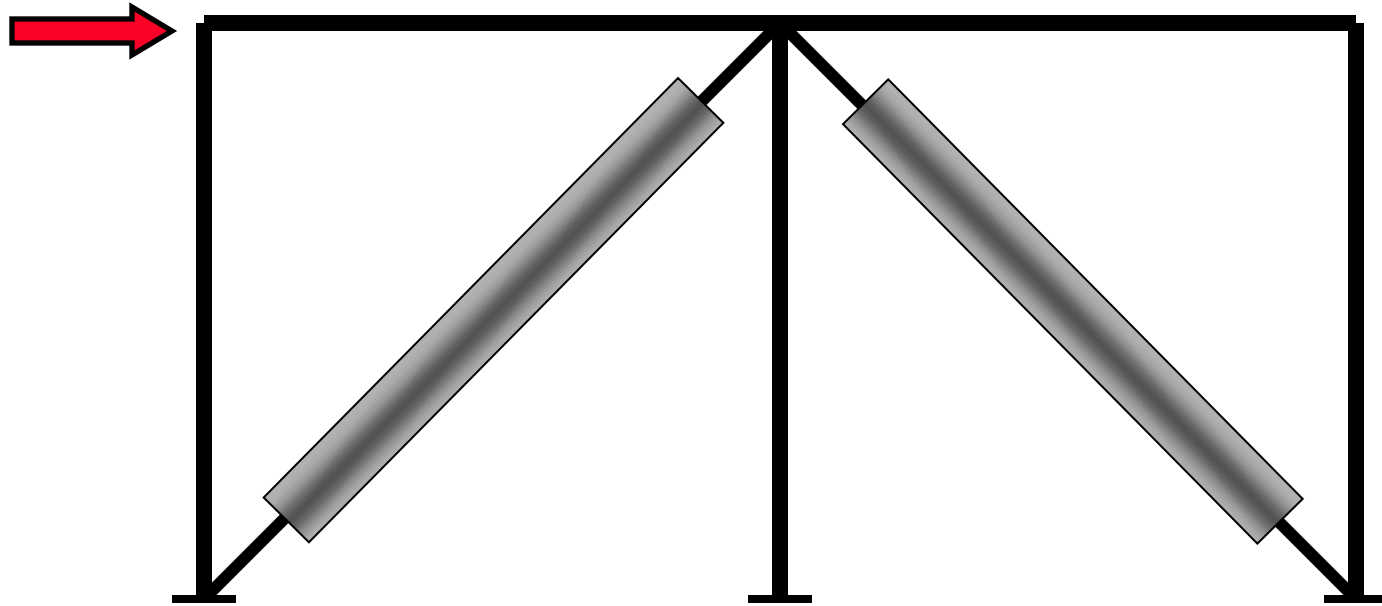
Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveseler



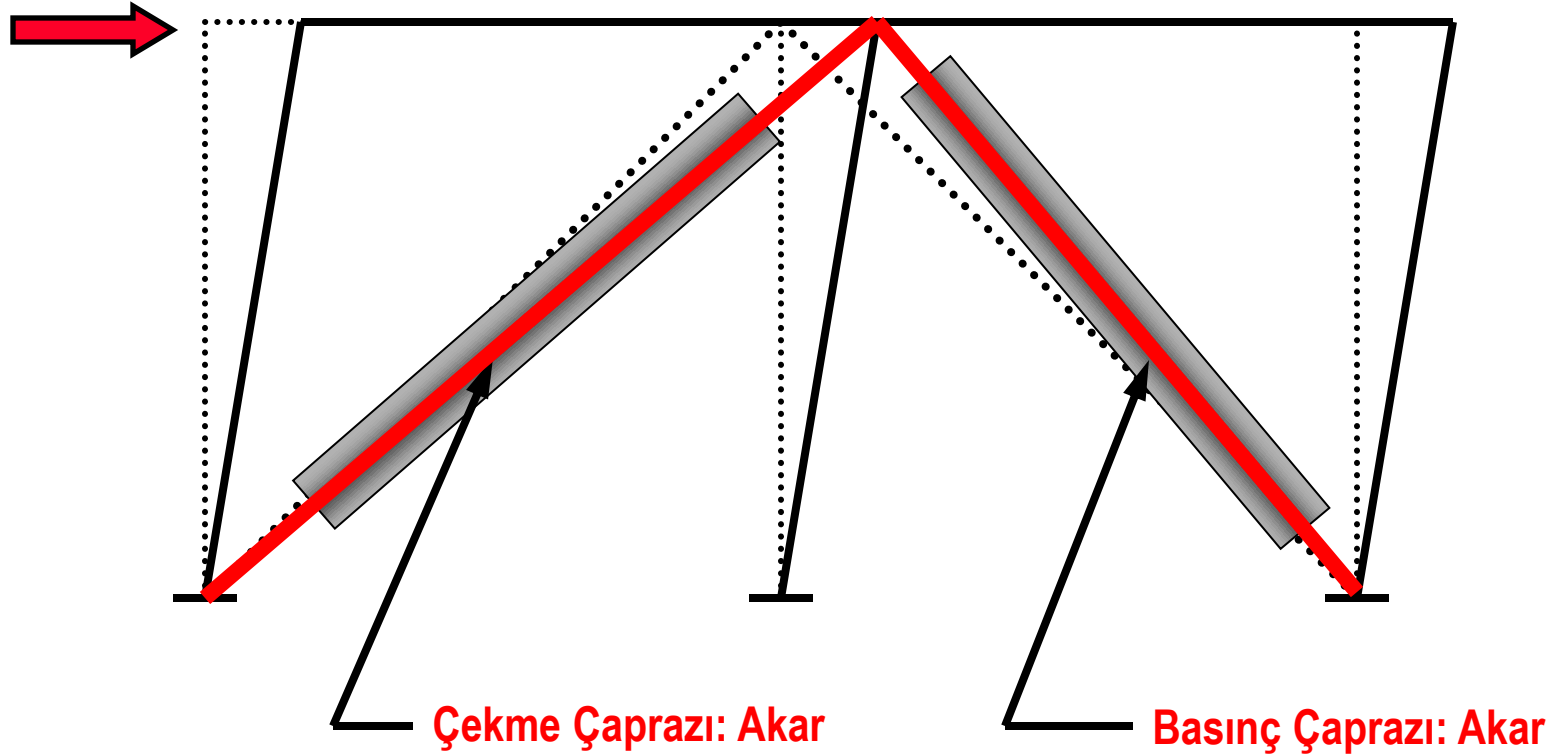
© Clark vd., 1999

Özel tip çapraz elemanlar kullanılır: *Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (BRBs)*. BRB hem çekmede hem de basınç da akar (burkulma yok).

Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveseler

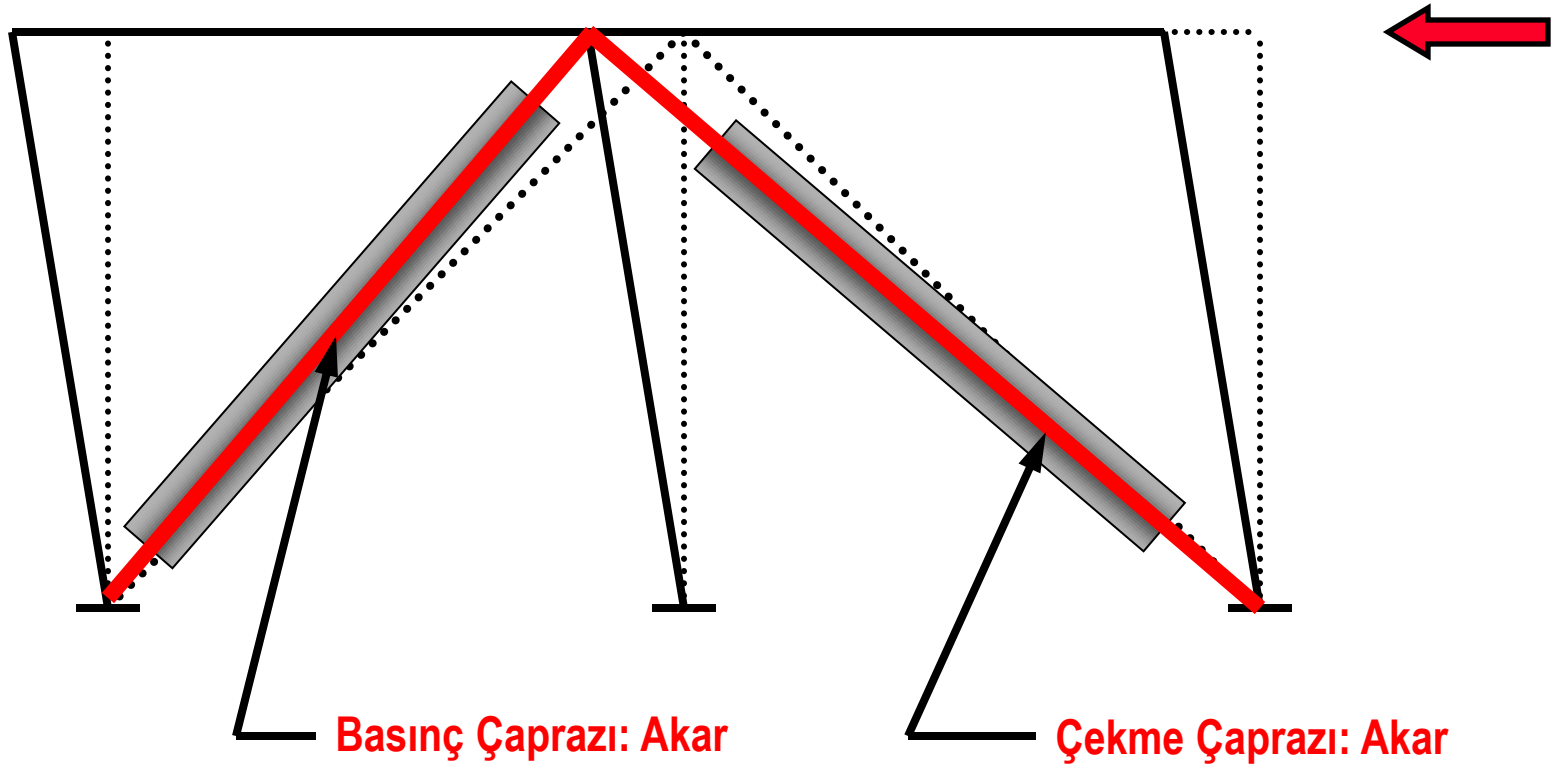


Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveseler



Kolonlar ve kirişler: elastik kalırlar

Burkulması Önlenmiş Çaprazlı Çerçeveseler



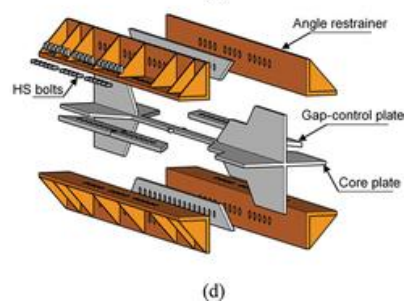
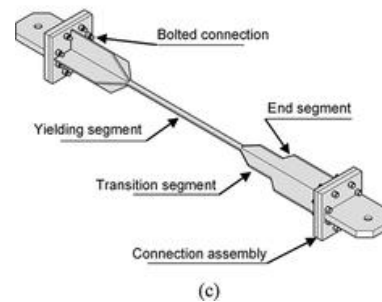
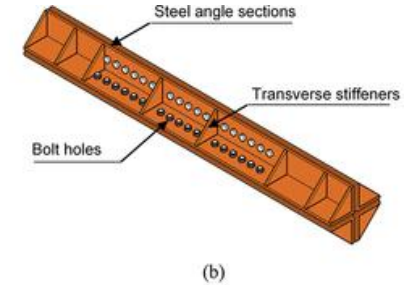
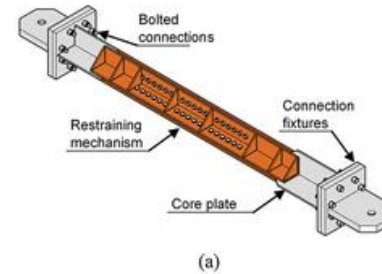
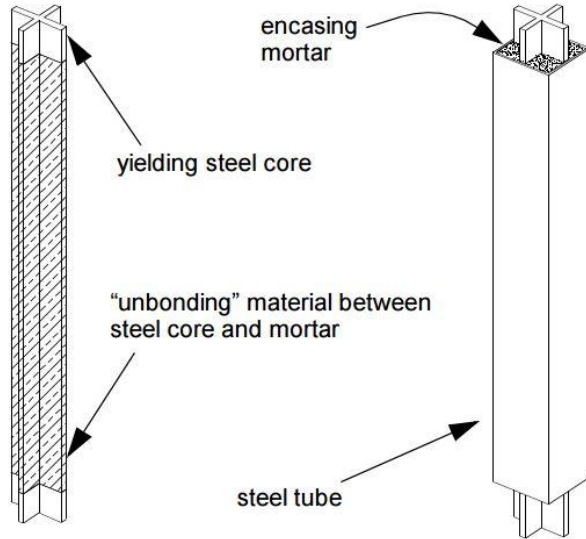
Kolonlar ve kirişler: elastik kalırlar

Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (Histeretik Damper)

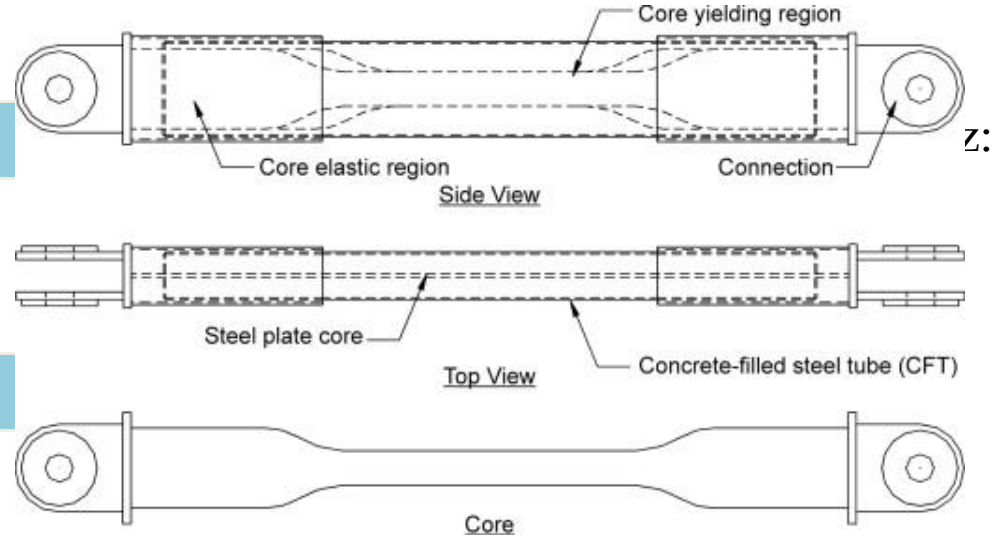
Burkulması
Önlenmiş Çaprazlar

Beton Dolgulu

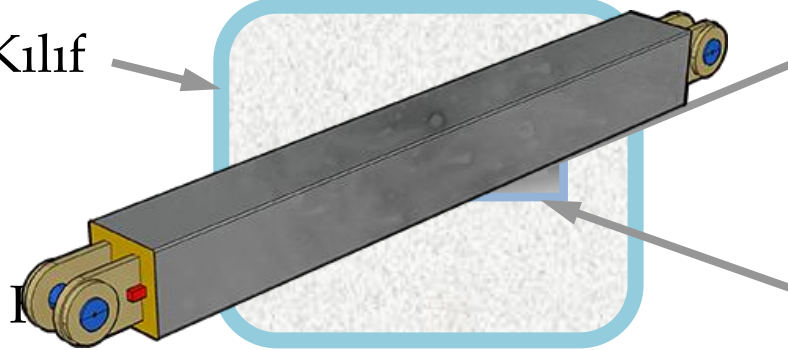
Sadece Çelik



Beton Dolgulu Burkulması Önlenmiş Çaprazlar



Kılıf



Ç

Y

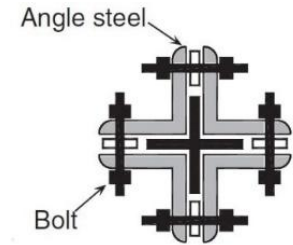
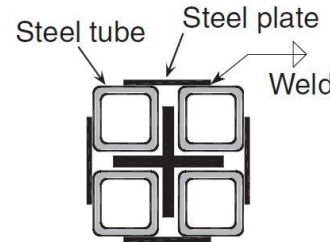
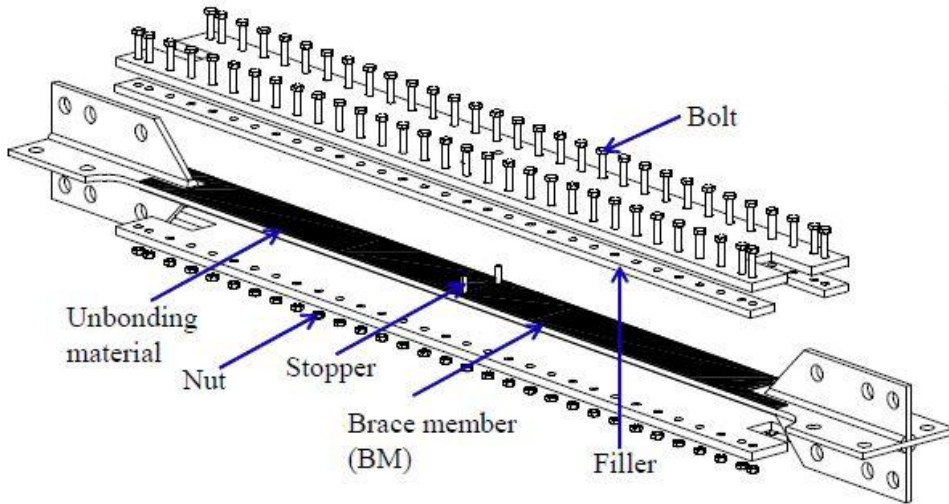
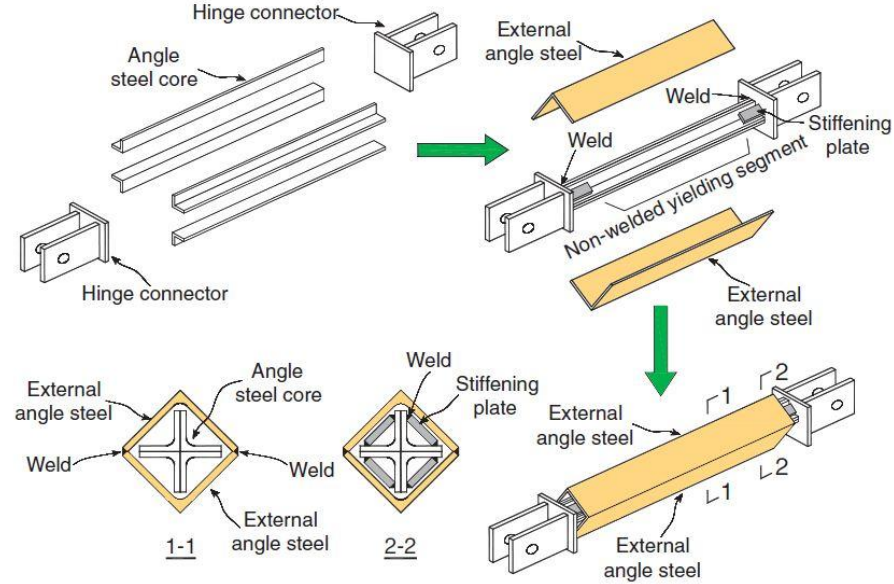
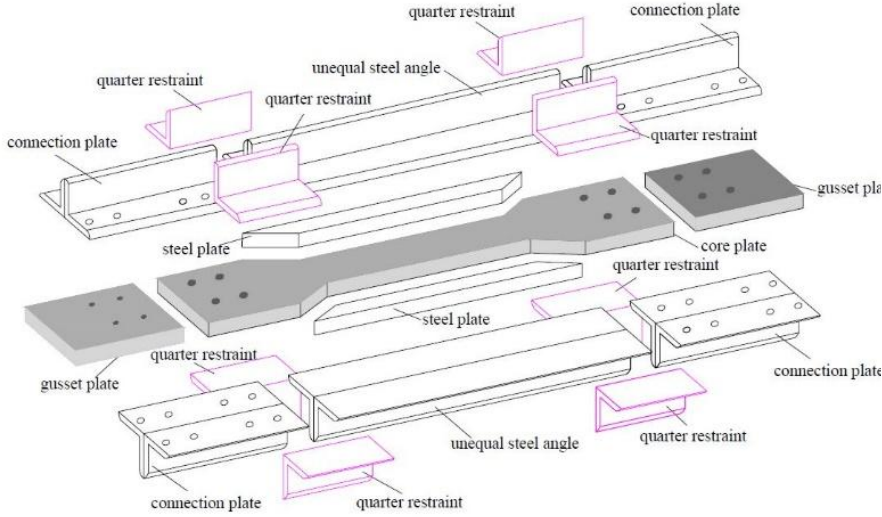
m



Celik

Beton Dolgulu Burkulması Önlenmiş Çaprazlar

Sadece Çelik Burkulması Önlenmiş Çaprazlar

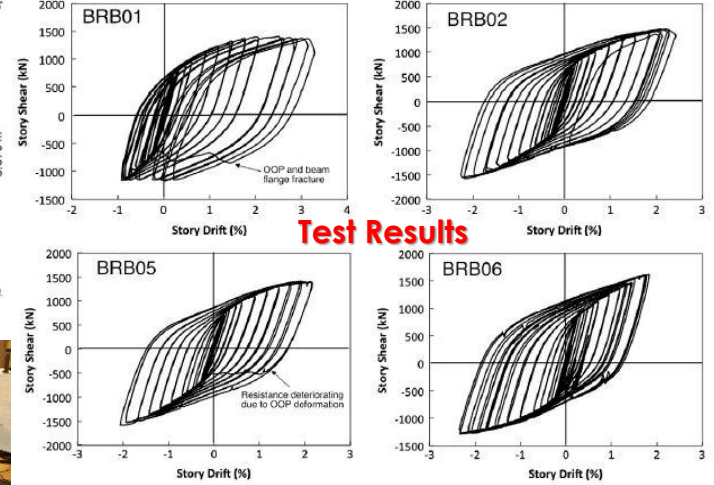
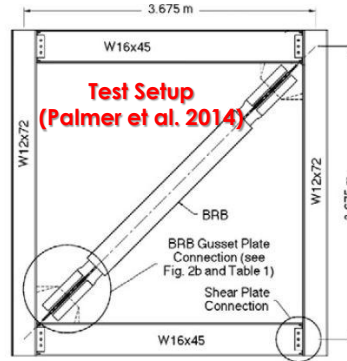


Sadece Çelik Burkulması
Önlenmiş Çaprazlar

Beton Dolgulu BRB'lerin Avantajları/Dezavantajları



Typical Concrete-Encased BRB
(Star Seismic Company)



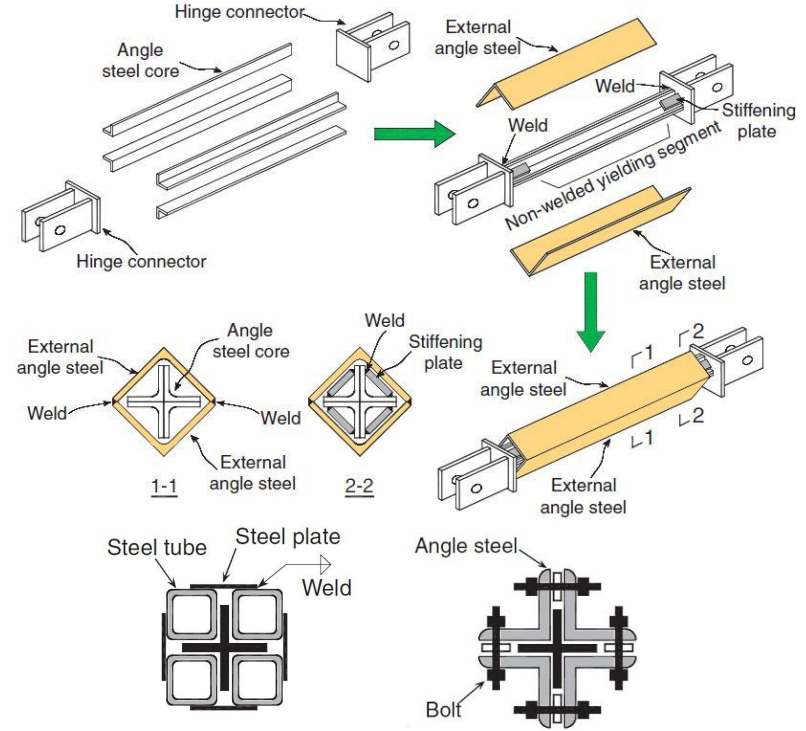
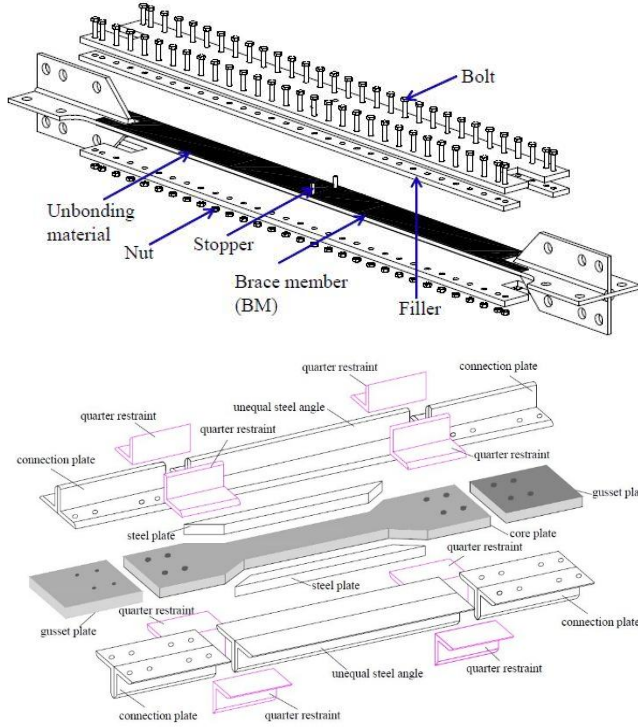
Artılar

- Rijitlik, mukavemet ve süneklik sağlar
- Kararlı histerik davranış
- Genel yapısal ağırlığı azaltır
- Yüksek kümülatif süneklik kapasitesi

Eksiler

- Sıradan binalar (örneğin konutlar) için maliyetlidir.
- Beton dolgulu BRB'ler ağırdır.
- Şiddetli bir depremde sonra incelenmesi ve değiştirilmesi zordur.
- Basınç dayanımı çekme dayanımını %50 aşabilir (Palmer vd. 2014).

Sadece Çelik BRB'lerin Avantajları/Dezavantajları



Artılar

- Rijitlik, mukavemet ve süneklik sağlar
- Kararlı histerik davranış
- Beton dolgu olmaması nedeniyle nispeten daha hafiftir
- Kolayca incelenebilir ve değiştirilebilir

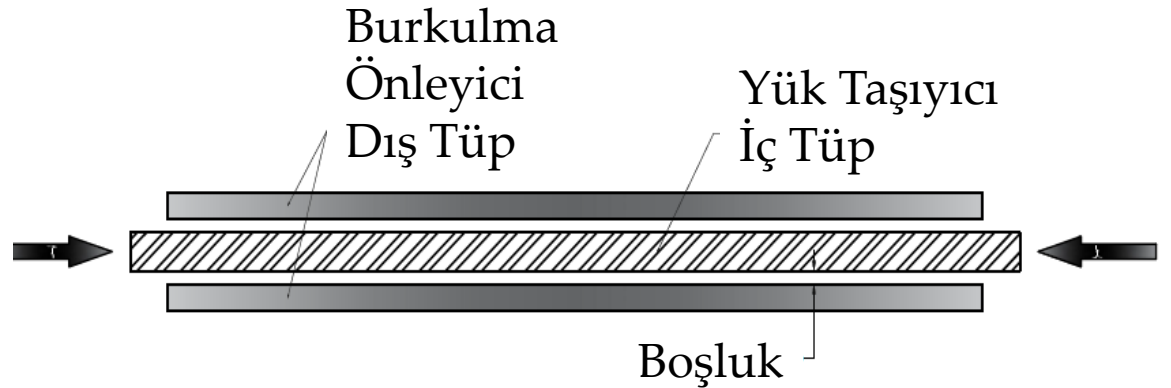
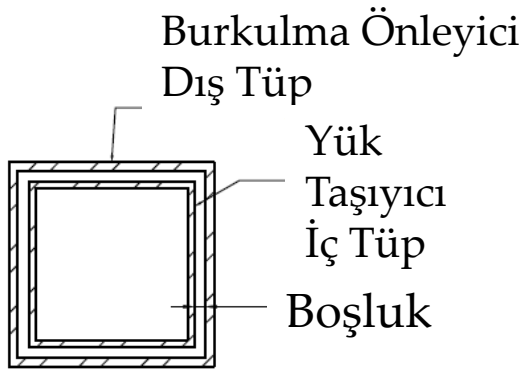
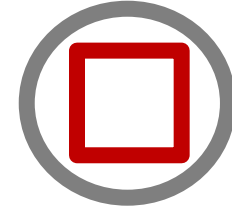
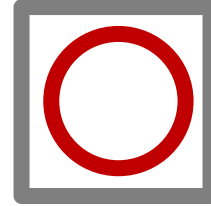
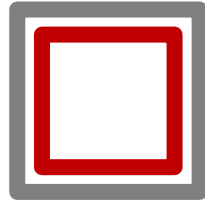
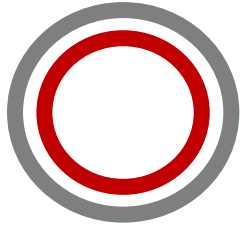
Eksiler

- Konfigürasyonlar çoğu zaman gereksiz karmaşıktır, bu da onları maliyetli ve mühendislik uygulamaları için pratik olmayan hale getirir.

TnT Çaprazlar (Tube-in-Tube)

Tüp İçinde Tüp Burkulması Önlenmiş Çapraz Elemanlar

TnT Çaprazlar



TnT Çapraz Elemanlar: Öncü Çalışmalar

AISC Destekli Araştırma Projesi (2013-2015)

“Improving Seismic Performance of Concentrically Braced Frames with Buckling-Controlled Braces”



AISC: American Institute of Steel Construction

Proje Sonucu SCI Dergilerde Yayınlanan Akademik Makaleler:

1. Shen, J., Şeker, O., Sutchiewcharn, N., and Akbaş, B., “Cyclic Behavior of Buckling-Controlled Braces.” *Journal of Constructional Steel Research* 121 (2016) 110–125.
2. Shen, J., Şeker, O., Akbaş, B., Şeker, P., Momenzadeh, S., Faytarouni M., “Seismic performance of concentrically braced frames with and without brace buckling.” *Engineering Structures* 141 (2017) 461–481.
3. Şeker, O. and Shen, J., “Developing an All-Steel Buckling Controlled Brace.” *Journal of Constructional Steel Research* 131 (2017) 94–109.
4. Momenzadeh, S., Şeker, O., Faytarouni M., Shen, J., “Seismic Performance of All-Steel Buckling-Controlled Braces with Various Cross-Sections.” *Journal of Constructional Steel Research* 139 (2017) 44–61.
5. Şeker, O., Akbas, B., Seker, P.T., Faytarouni, M., Shen, J., Mahamid, M., "Three-segment Steel Brace for Seismic Design of Concentrically Braced Frames." *Journal of Constructional Steel Research* 137 (2017) 211–227.



Amerikan Yapısal Çelik Birliđi
Çelik Kutu Profil Birliđi
Destekli Araştırma Projesi



TnT apraz Elemanlar

Gebze Teknik Üniversitesi-Iowa Eyalet Üniversitesi
Ortak Araştırma Projesi



Proje Ekibi

Dr. Jay Shen
(Iowa State University)



Dr. Bülent Akbaş
(Gebze Teknik Üniversitesi)



Dr. Onur şeker
(Gebze Teknik Üniversitesi)



Dr. Mahmoud Faytarouni
(Nucor Corporation)



TnT apraz Elemanlar

*Development of an Innovative Steel Tube-in-Tube Buckling-
Controlled Brace for Earthquake-Resistant Building
Structures– From Research to Application*



Uygulamaya Yönelik Araştırma Projesi (2021-2023)

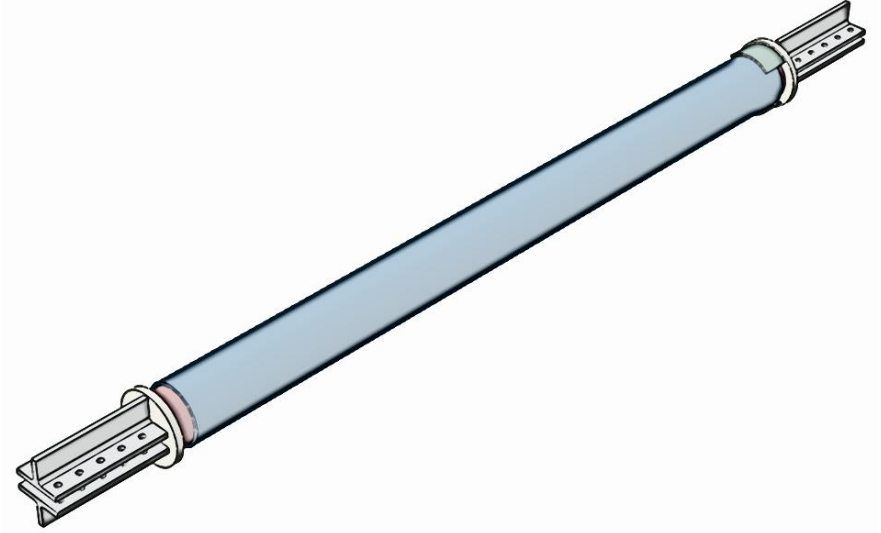
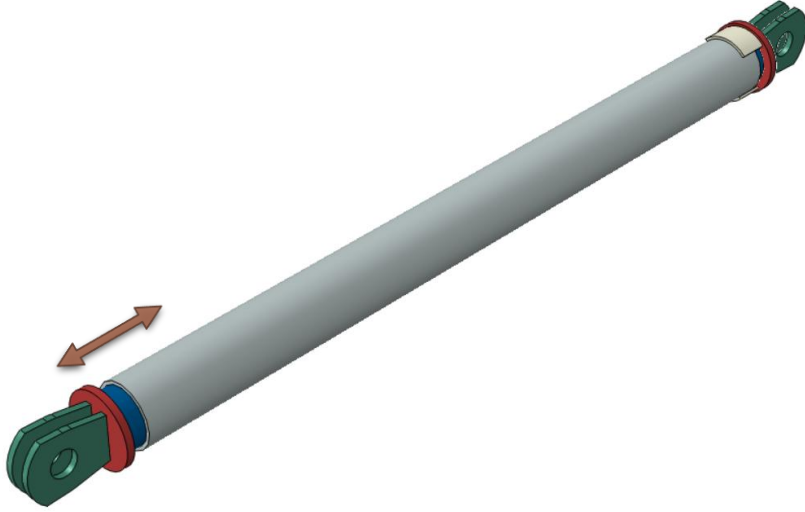
AISC Proje İzleme Kurulu

Prof. Chia-Ming Uang (University of California, San Diego)
Rafael Sabelli, SE (Director of Seismic Design, Walter P Moore)
Devin Huber, PE, PhD (Director of Research, AISC)

STI Proje İzleme Kurulu

Cathleen Jacinto, SE (Technical Advisor, FORSE Consulting)
Holly Schaubert, PE (Director of HSS, STI)
Mike Mano, PE (Structural Engineer, FORSE Consulting)

TnT Çapraz Elemanlar



Parçalar:

1. Dış Tüp (Burkulma Önleyici)
2. İç Tüp (Yük Taşıyıcı Tüp)
3. Dış Tüp Sabitleyici
4. Uç Levhaları
5. Uç Bağlantı Elemanı

**TURK
PATENT**
TÜRK PATENT VE MARKA KURUMU
TR2023003999

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property
Organization
International Bureau

(43) International Publication Date
17 October 2024 (17.10.2024)


WIPO | PCT

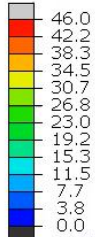


(10) International Publication Number
WO 2024/215296

TnT Çapraz Elemanlar

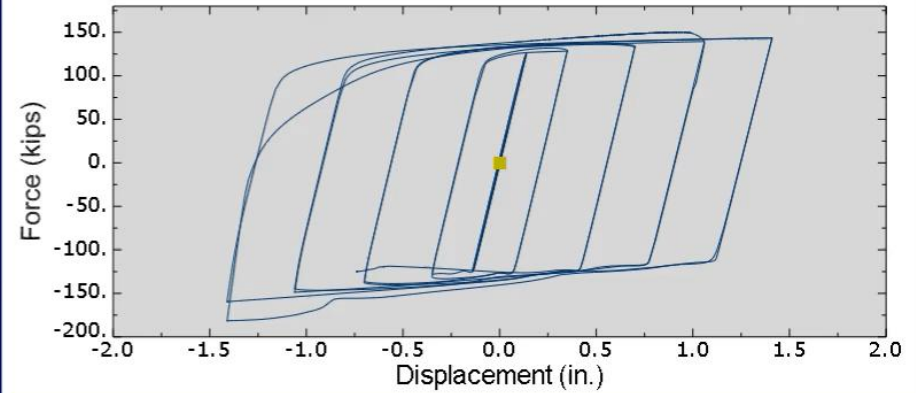
Viewport: 2 ODB: D:\ABAQUS ODB\TnT- AISC S...ens-Nucor Model\Job-1.odb

S, Mises
(Avg: 75%)

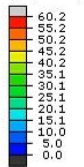


Step: Step-1 Frame: 0
Total Time: 0.000000

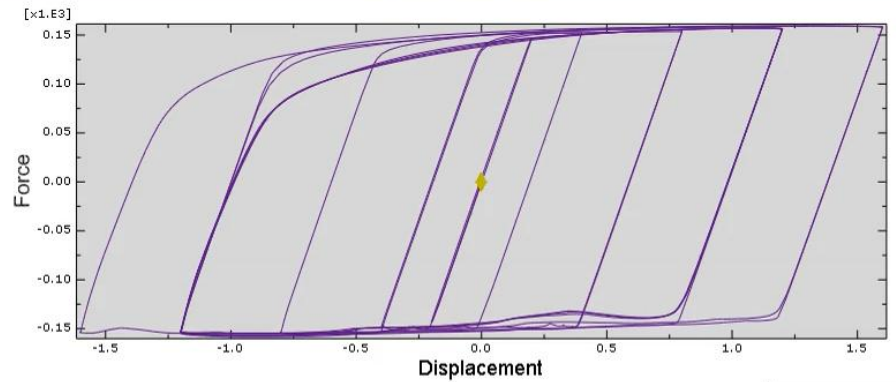
Viewport: 3 Plot: XYPlot-3



S, Mises
(Avg: 75%)



Step: Step-1 Frame: 0
Total Time: 0.000000

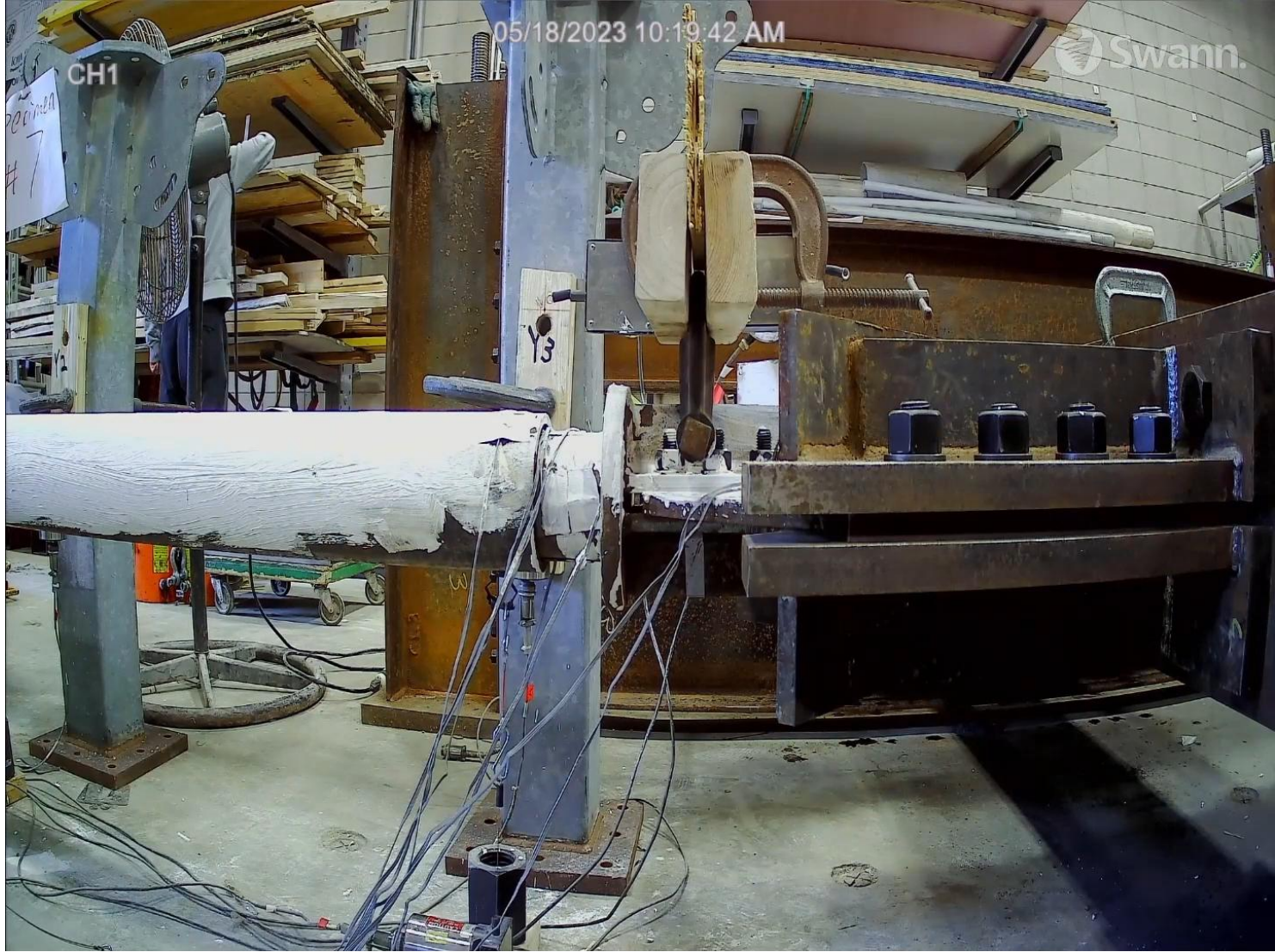


Step: Step-1
Increment: 0: Step Time = 0.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.0e+00

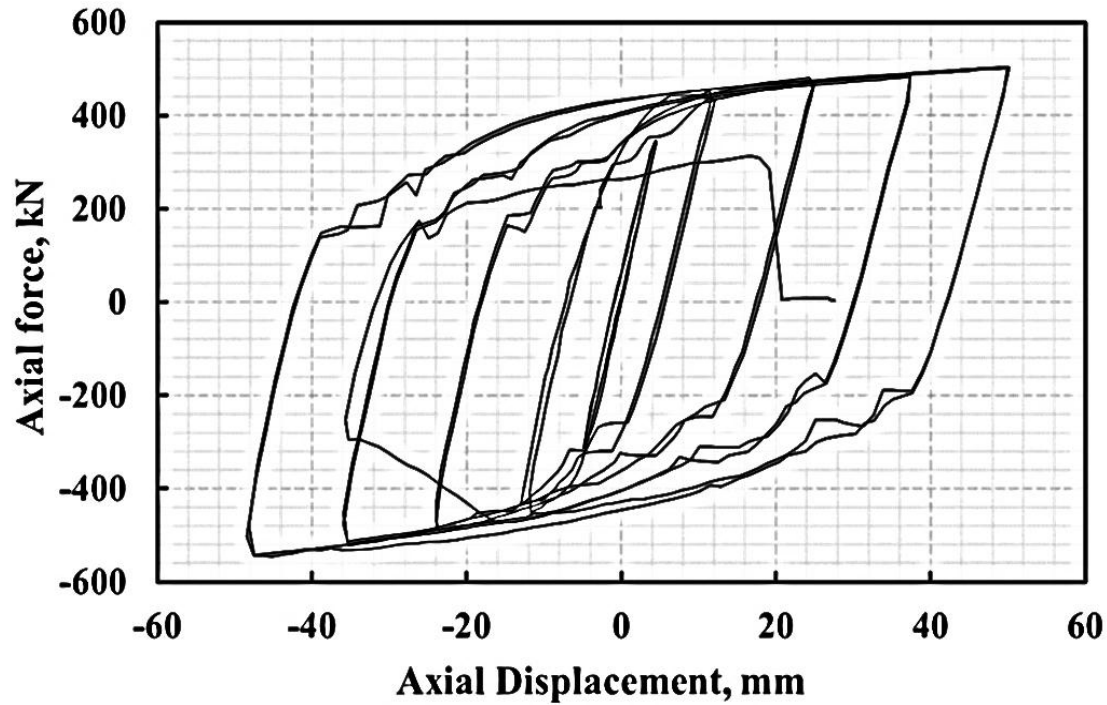
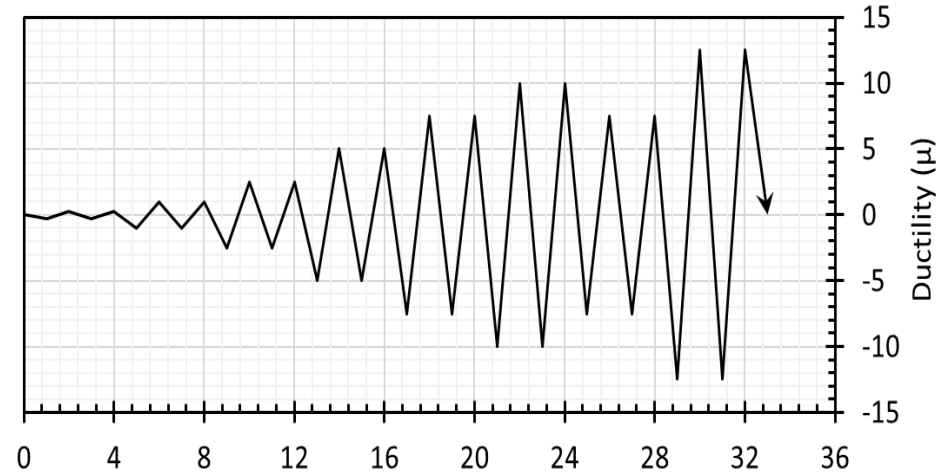
TnT Çapraz Elemanlar



TnT Çapraz Elemanlar



TnT Çapraz Elemanlar





Sarsma Tablası Deneyleri


TnT Sarsma Tablası Deneyleri

Bulletin of Earthquake Engineering
<https://doi.org/10.1007/s10518-025-02229-3>

ORIGINAL ARTICLE



Seismic retrofitting of substandard RC frames using tube-in-tube buckling-restrained braces: shake table evaluation and field insights

Evrin Oyguc¹ · Resat Oyguc¹  · Abdul Hayir² · Onur Seker³ · Jay Shen⁴ · Bulent Akbas³

Received: 31 March 2025 / Accepted: 9 July 2025

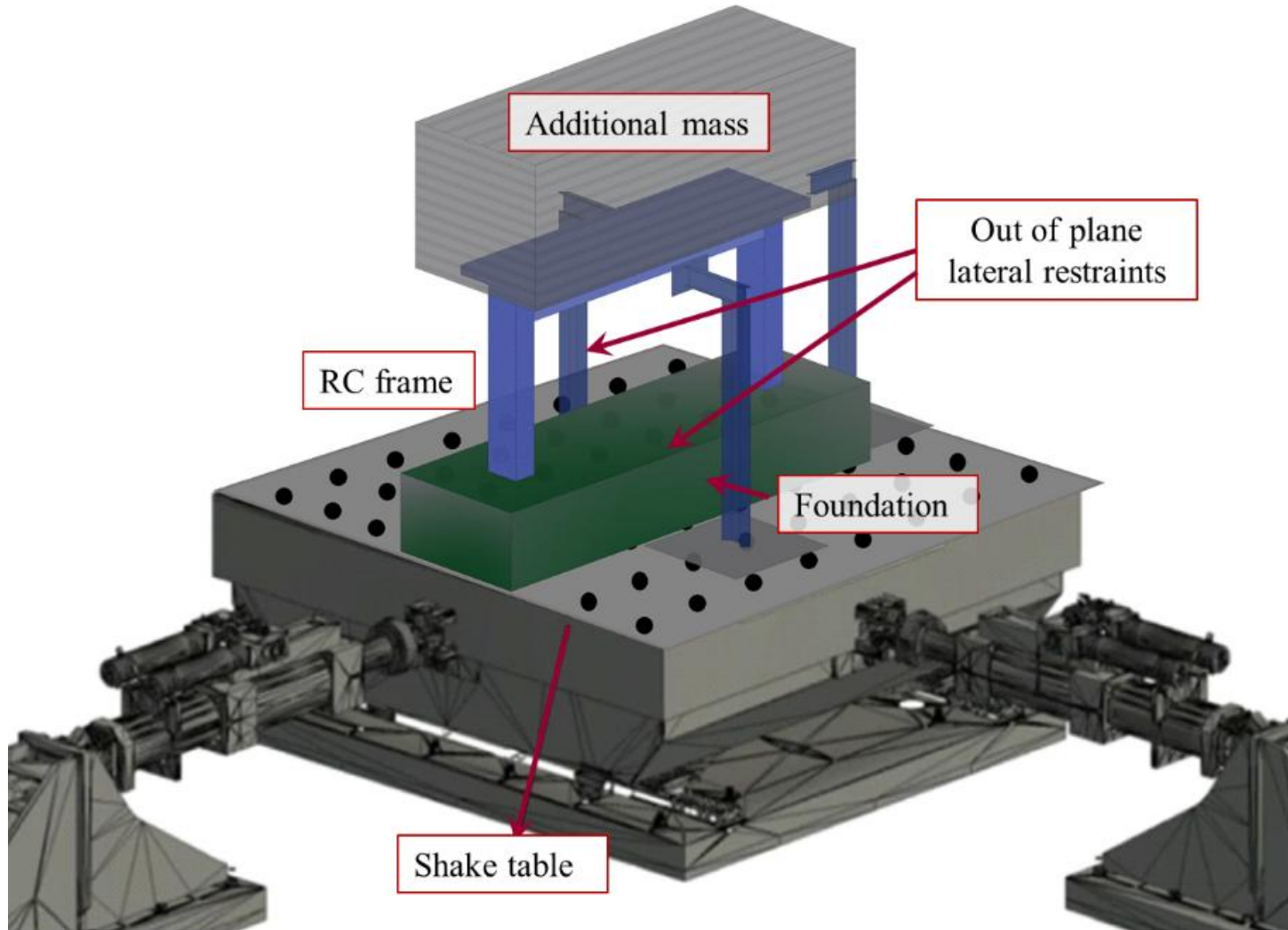
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature B.V. 2025

Sponsor Firma

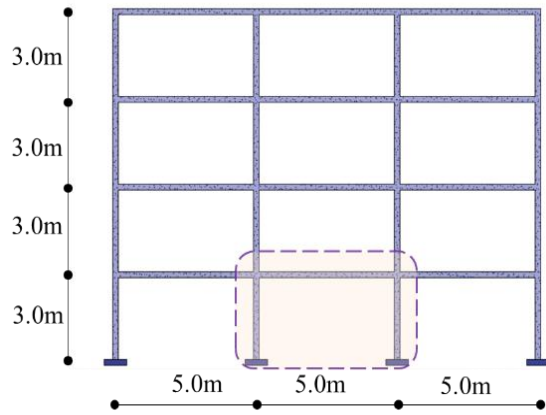


ÖRTAŞ ÇELİK A.Ş.

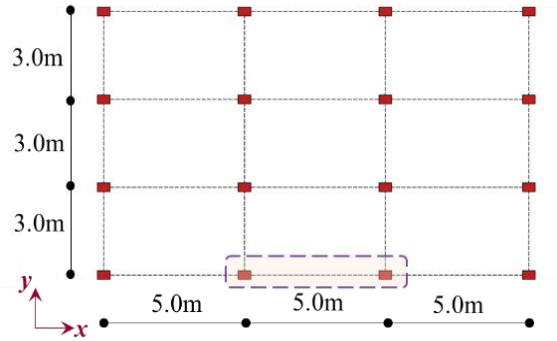
TnT Sarsma Tablası Deneyleri



TnT Sarsma Tablası Deneyleri



Prototip Bina



Deney Numuneleri

TnT Sarsma Tablası Deneyleri



- ✓ İki eşdeğer betonarme çerçeve numunesi
- ✓ Betona dayanımı: ~9 MPa
- ✓ Etriye sıklaştırması yok.
- ✓ 90° kanca kıvrımlı etriye kancası.
- ✓ Kolonlar zayıf ekseninde çalışıyor.

TnT Sarsma Tablası Deneyleri

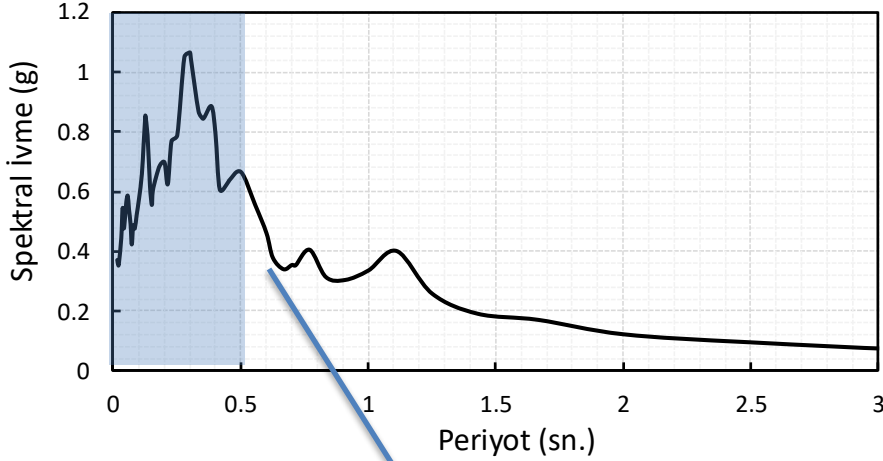


TnT Sarsma Tablası Deneyleri

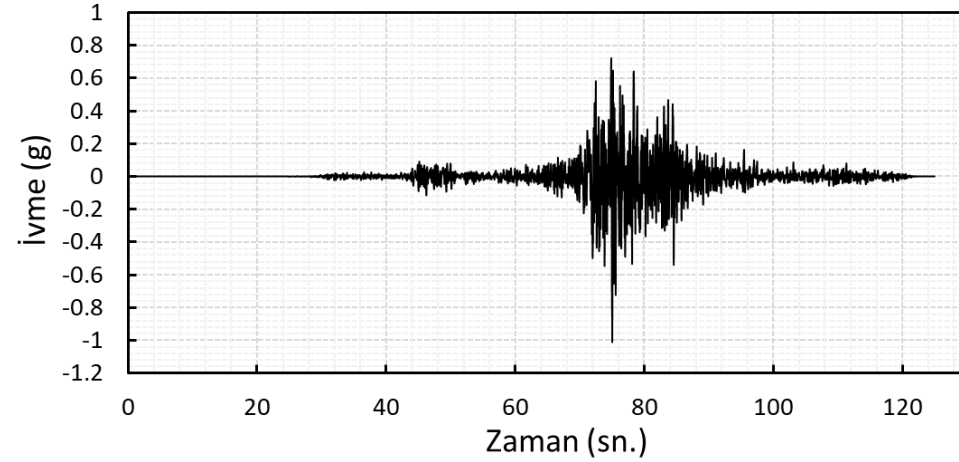


TnT Sarsma Tablası Deneyleri

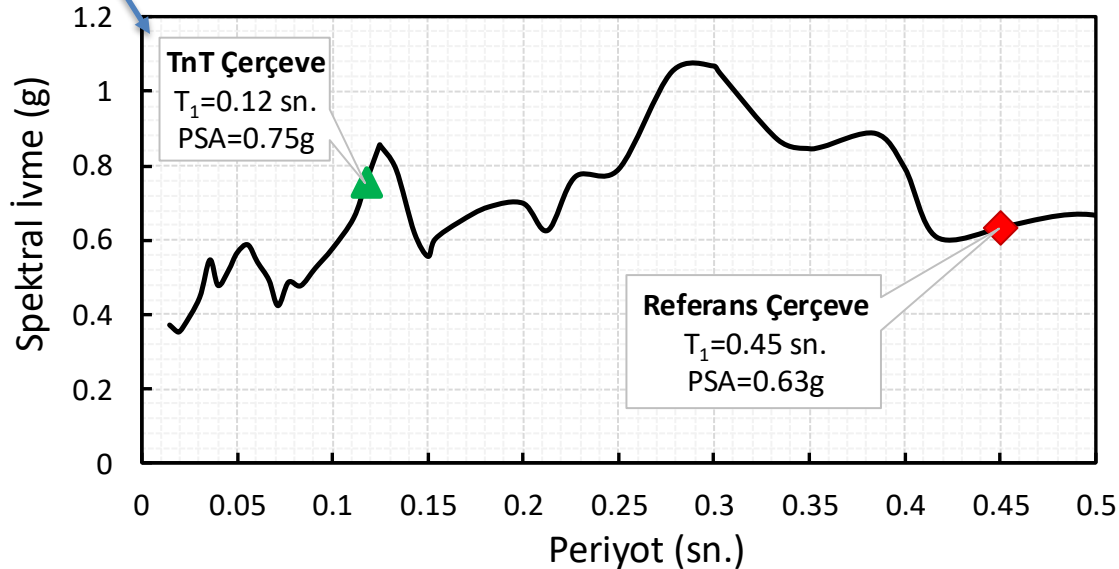
Kahramanmaraş (Pazarcık)-Hatay 3141



Kahramanmaraş (Pazarcık)-Hatay 3141 İvme Kaydı



Kahramanmaraş (Pazarcık)-Hatay 3141



Referans Çerçeve



Deprem Ölçeği: $\sim 1/3$

En büyük yer ivmesi = $0.35g$

TnT Çerçeve



Deprem Ölçeği: 1:1

En büyük yer ivmesi=1.0g

TnT Sarsma Tablası Deneyleri

Referans Çerçeve - **Deprem Ölçeği=%35**



TnT Sarsma Tablası Deneyleri

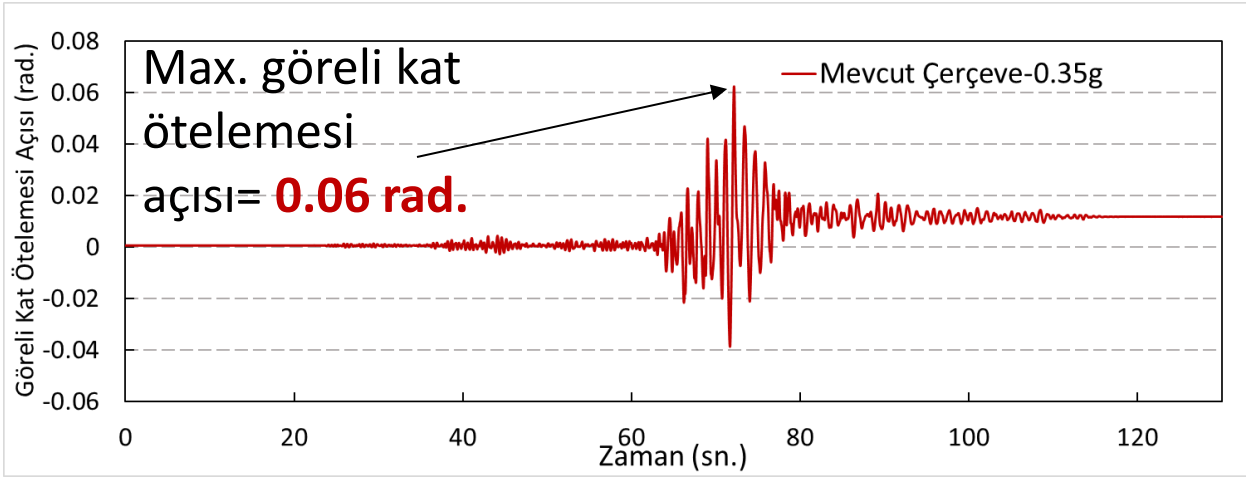


TnT Çerçeve - Deprem Ölçeği=%100

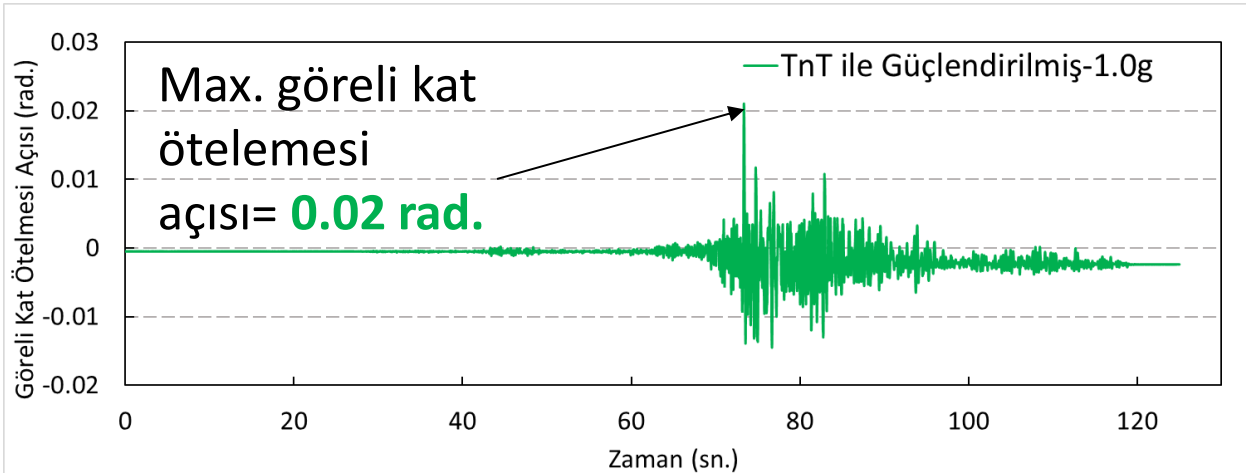


TnT Sarsma Tablası Deneyleri

Referans Çerçeve - Deprem Ölçeği=%35



TnT Çerçeve - Deprem Ölçeği=%100

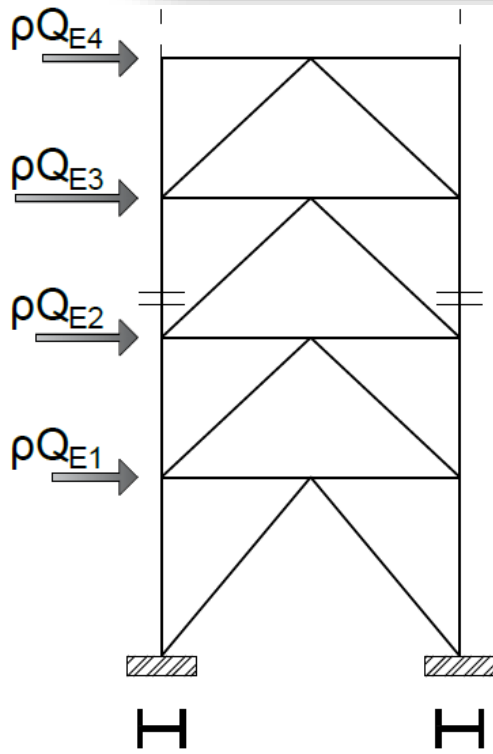


Çapraz Tasarımı

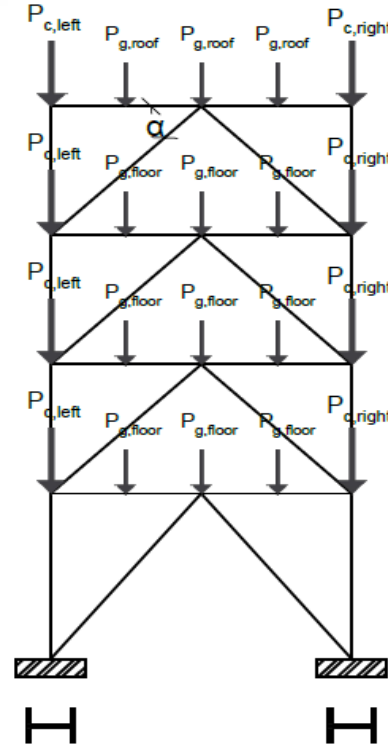
9.9.3.2 – Çelik çekirdek, çapraz elemana etkiyen aksel kuvvetin tamamını karşılayacak şekilde boyutlandırılacaktır. Çapraz elemanın aksel kuvvet dayanımı, P_{ysc} , **Denk.(9.25)** ile hesaplanacaktır.

$$P_{ysc} = F_{ysc} A_{sc} \quad (9.25)$$

Tasarım aksel kuvvet dayanımı, ϕP_{ysc} , (YDKT) veya güvenli aksel kuvvet dayanımı, P_{ysc} / Ω , (GKT), $\phi = 0.90$ (YDKT) veya $\Omega = 1.67$ (GKT) alınarak belirlenecektir.



Deprem Yükleri



Düşey Yükler

$$(1.2 + 0.2S_{DS})G + E + 0.5Q$$

$$\text{Dayanım Şartı} \rightarrow P_r \leq \phi F_{ysc} A_{sc}$$

Sistem Analizi

9.9.2. Sistem Analizi

9.9.2.1 – Burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeve sistemlerinin kolon, kiriş ve birleşimlerinin boyutlandırılmasında gerekli dayanımlar, **9.2.6** esas alınarak, aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır.

(a) Kolon, kiriş ve birleşimlerin **9.2.6**'da tanımlanan akma (mekanizma) durumu ile uyumlu iç kuvvetlerinin hesabı için, çapraz elemanların iç kuvvetleri aşağıda **Denk.(9.23)** ve **Denk.(9.24)** ile tanımlanmıştır.

$$T = \omega R_y P_{y_{sc}} \quad (9.23)$$

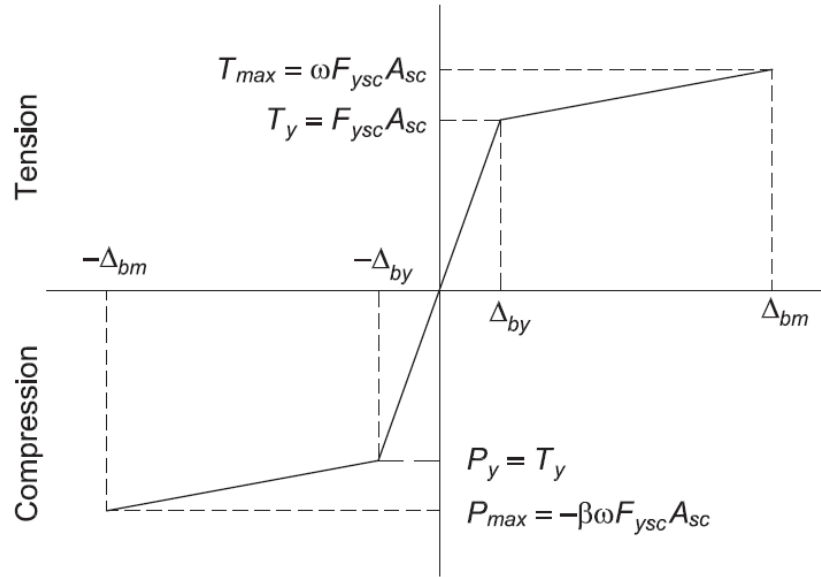
$$P = \beta \omega R_y P_{y_{sc}} \quad (9.24)$$

(b) Pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ω , olası yerdeğiştirme durumu için maksimum çekme dayanımının, akma dayanımına ($R_y P_{y_{sc}}$) oranı olarak üretici tarafından belirlenecektir.

(c) Çelik çekirdeğin aksenal akma dayanımı, $P_{y_{sc}}$ 'nin belirlenmesinde, çekme deneyi ile elde edilen akma gerilmesinin kullanılması halinde, R_y katsayısının uygulanmasına gerek yoktur.

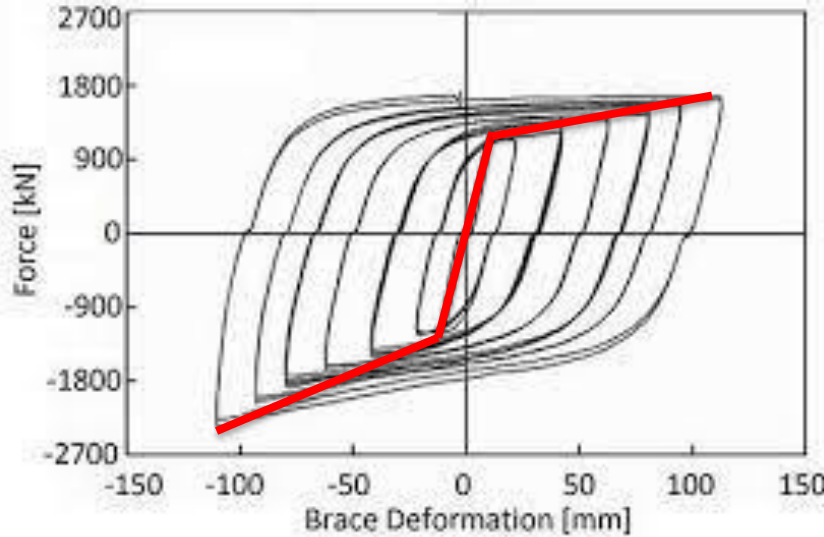
(d) Basınç dayanımı düzeltme katsayısı, β , olası yerdeğiştirme durumu için maksimum basınç kuvvetinin maksimum çekme kuvvetine oranı olarak belirlenecektir. Üretici tarafından belirlenen bu oran hiç bir durumda 1.0 değerinden küçük olamaz.

Beklenen Çapraz Dayanımları (Kapasite Sınırlı Deprem Yükleri)



$$\beta = \frac{\beta \omega F_{y_{sc}} A_{sc}}{\omega F_{y_{sc}} A_{sc}} = \frac{P_{max}}{T_{max}}$$

$$\omega = \frac{\omega F_{y_{sc}} A_{sc}}{F_{y_{sc}} A_{sc}} = \frac{T_{max}}{F_{y_{sc}} A_{sc}}$$

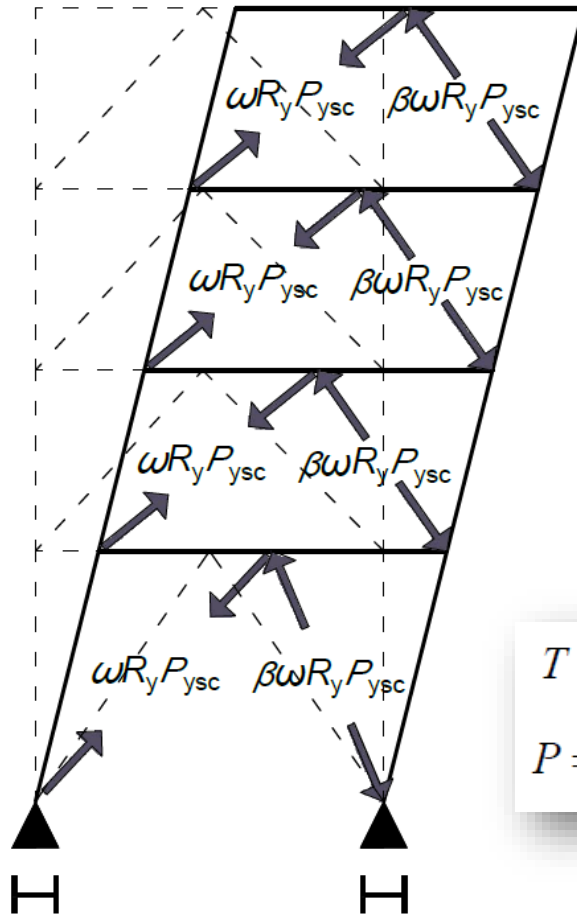


Çaprazlarının Beklenen Çekme ve Basınc Dayanımları

$$T = \omega R_y P_{y_{sc}}$$

$$P = \beta \omega R_y P_{y_{sc}}$$

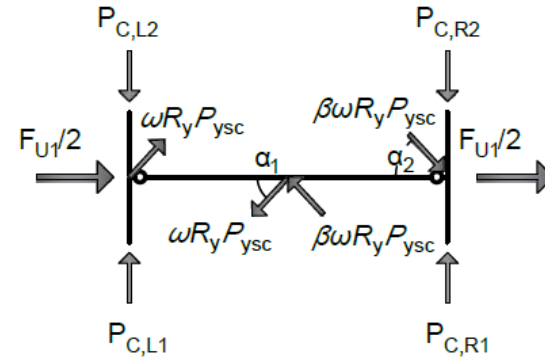
Kapasite Sınırlı Deprem Yükleri



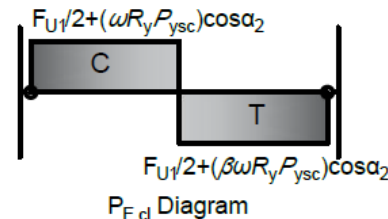
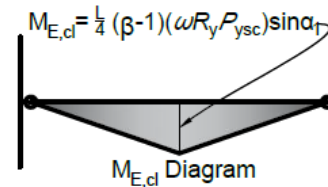
Anticipated Mechanism

$$T = \omega R_y P_{ysc}$$

$$P = \beta \omega R_y P_{ysc}$$



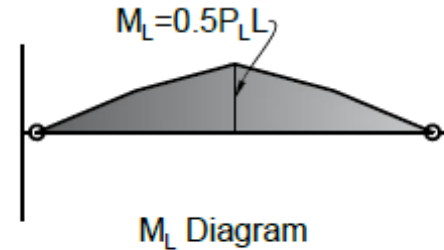
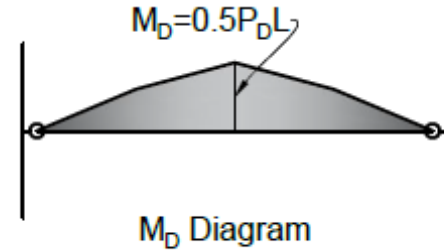
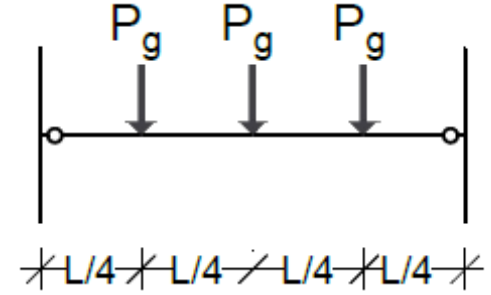
Free Body Diagram of 1st story under capacity-limited seismic loads



V ve Ters V Çaprazlı Çerçeveseler

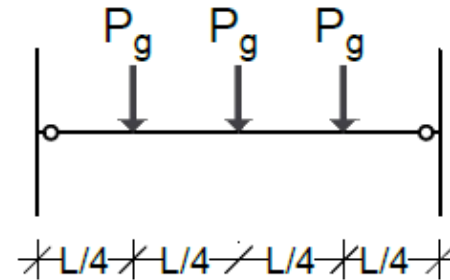
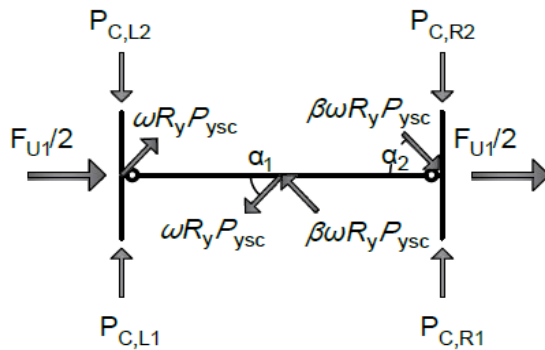
- Çaprazlar tarafından kesilen kirişlerin gerekli dayanımı, çaprazların düşey yükler için destek sağlamadığı varsayılarak, geçerli yapı yönetmeliğinin yük kombinasyonlarına göre belirlenecektir.

Düşey yükler → **Basit Kiriş Kabulü**

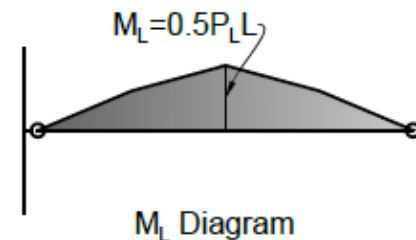
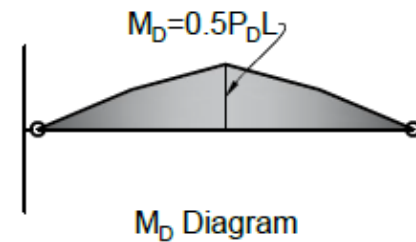
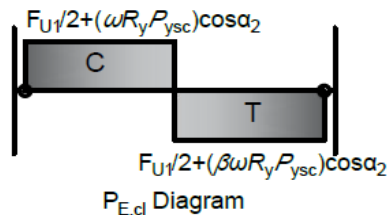
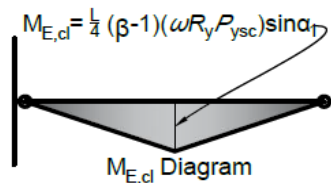


Sistem Analizi

Kontrol Eden Yük Kombinasyonu: $(1.2 + 0.2S_{DS})G + E_{cl} + 0.5Q$



Free Body Diagram of 1st story under capacity-limited seismic loads



Kapasite Sınırlı Deprem Yükleri

Düşey Yükler

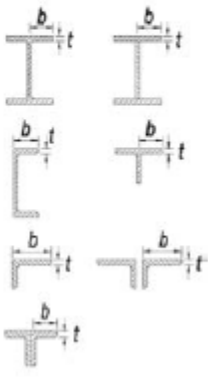
V ve Ters V Çaprazlı Çerçeveseler

- Kirişler sürekli olmalıdır.
- Kirişler, sınırlı sünek elemanlar için geçerli yanal destek şartlarını sağlayacaktır.
- Kirişler kolonlar arasında sürekli olacaktır. Kirişlerin üst ve alt başlıkları yanal doğrultuda mesnetlenecektir.
- Kirişler, V veya ters V çaprazların kesişme noktasında en az bir set yanal destek gereklidir.



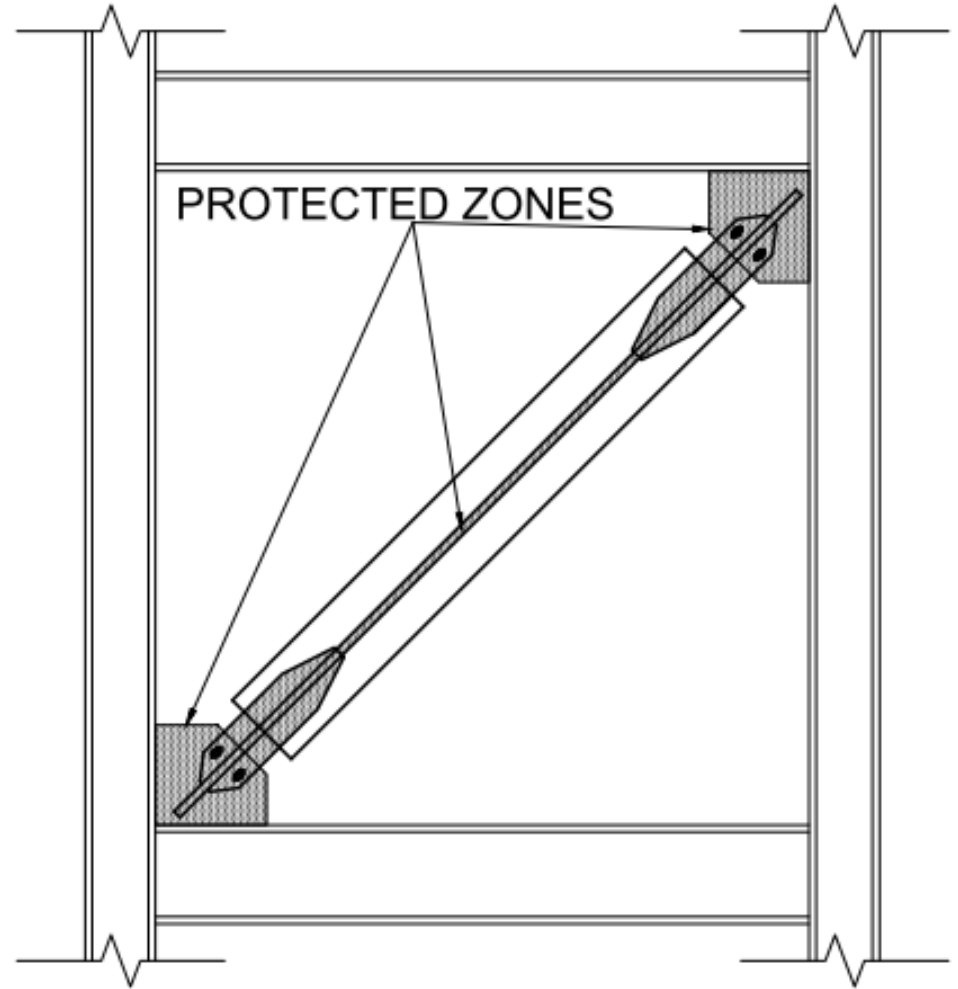
Enkesit Şartları

- Kolonlar → Yüksek sünek şartını sağlamalıdır.
- Kirişler → Sınırlı sünek şartını sağlamalıdır.

	Eleman Tanımı	Narinlik Oranı	Sınır değerler		Açıklama
			Süneklik Düzeyi Yüksek Elemanlar, λ_{hd}	Süneklik Düzeyi Sınırlı Elemanlar, λ_{md}	
Rijitleştirilmemiş Elemanlar	I veya yapma I kesitlerin başlıkları, U veya T kesitler, komiyer (L) veya ayırık çift komiyerlerin kolları, sürekli birleşik çift komiyerlerin kolları	b/t	$0.30 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Korunmuş Bölgeler

- Yük taşıyıcı çekirdek, elastik olmayan gerilmenin beklenen bölgesi olarak korunan bir bölgedir.
- Çekirdeği kirişlere ve kolonlara bağlayan tüm elemanlar, guse levhaları ve birleşimleri.



Teşekkürler



oseker@gtu.edu.tr



Kaynakça

1. Engelhardt, M.D., University of Texas at Austin, AISC, V.1, 2007.
2. Fell BV, Kanvinde A., Deierlein GG, Myers AT., “Experimental investigation of inelastic cyclic buckling and fracture of steel braces.” J. Struct. Eng. (2009) ;135:19–32.
3. Graham H. Powell, Performance Based Design Using Non-linear Analysis, a presentation of CSI, 2006.
4. Shen, J., Akbas, B., Şeker, O., Faytarouni M. «Design of Steel Structures», 1st Edition, McGraw Hill, 2021.
5. Shen, J., Akbas, B., Seker, O., Carter, C. “Structural Engineering Handbook” Fifth Edition, Chapter 8: Design of Structural Steel Members, McGraw Hill, 2020.
6. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018).
7. Shen, J., Şeker, O., Sutchiewcharn, N., and Akbas, B., “Cyclic Behavior of Buckling-Controlled Braces.” Journal of Constructional Steel Research 121 (2016) 110–125.
8. Şeker, O. and Shen, J., “Developing an All-Steel Buckling Controlled Brace.” Journal of Constructional Steel Research 131 (2017) 94–109.
9. Shen, J., Şeker, O., Akbas, B., Şeker, P., Momenzadeh, S., Faytarouni M., “Seismic performance of concentrically braced frames with and without brace buckling.” Engineering Structures 141 (2017) 461–481.
10. Tremblay, R., Haddad, M., Martinez, G., Richard, J., Moffatt, K. Inelastic Cyclic Testing of Large Size Steel Bracing Members(The 14thWorld Conference on Earthquake Engineering) October 12–17, 2008 (Beijing, China).
11. Usami, T., Wang, C., and Funayama, J., 2011, Low-Cycle Fatigue Tests of a Type of Buckling Restrained Braces, Procedia Engineering, 14:956–964.
12. Zhao, J., Wu, B., and Ou, J., 2011, A novel type of angle steel buckling-restrained brace: Cyclic behavior and failure mechanism, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 40:1083–1102.