

**İKİ YÖNLÜ TEKRARLI YÜKLEMELER ALTINDAKİ BETONARME
KENAR KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNDE ÇELİK TEL TAKVİYELİ
BETONUN KULLANILDIĞI ETKİLİ BÖLGENİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Mustafa GENÇOĞLU
(50932003)**

101268

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Şubat 2000
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Haziran 2000**

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. İlhan EREN

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Nahit KUMBASAR (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Melike ALTAN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Saadettin ÖKTEN (M.Ü.)

Prof.Dr. Naci YÜCEFER (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2000

ÖNSÖZ

İki yönlü tekrarlı yüklemeler altındaki Betonarme kenar kolon-kiriş birleşimlerinde çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı etkili bölgenin araştırılmasını konu alan bu tez çalışması Prof.Dr. İlhan Eren'in yönetiminde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın tüm aşamalarında gösterdiği her türlü ilgi, destek ve anlayış için hocama en içten teşekkürlerimi sunarım. Deney sisteminin hazırlanmasındaki değerli katkı ve yardımlarından dolayı Prof.Dr. Hasan Boduroğlu'na ve Y.Doç.Dr. Pınar Özdemir'e teşekkür ederim. Çalışmalarında sık sık bilgisine başvurduğum Prof.Dr. Zekai Celep'e teşekkürlerimi sunarım. Deneyler aşamasında yardım ve desteklerini esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Kutlu Darılmaz, Y.DoçDr. Ercan Yüksel, Y.Doç.Dr. Alper İlki ve İnş. Yük. Müh. Hakan Saruhan başta olmak üzere Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı ve Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Deneylerde kullanılan çelik telleri temin ettiğimiz BEKSA Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve İnş. Yük. Müh. Mehmet Yerlikaya'ya teşekkürlerimi sunarım. Deneylerde kullanılan hazır betonu temin ettiğimiz Lafarge Ekmel Beton Sanayii A.Ş.'ye ve beton karışımlarını tasarlayan Prof.Dr. Erbil Öztekin'e teşekkür ederim. Deney numunelerinin hazırlanması aşamasındaki desteklerinden dolayı Koray İnşaat A.Ş. ve şantiye şefi İnş. Y. Müh. Fahri Demirelli'ye teşekkür ederim. Deney numunelerinde kullanılan çelik kalıbı ve çelik deney parçalarını hazırlayan kayınpederim Ahmet Mollaoğlu'na ve tezimin her aşamasında vermiş oldukları maddi ve manevi desteklerinden dolayı ailemin tüm fertlerine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde JICA (Japonya Uluslararası İşbirliği Teşkilatı)'nın sağladığı aletlerle güncelleştirilen İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nın imkanlarından yararlanılmıştır. Bu çalışma İTÜ Araştırma Fonu ve TÜBİTAK İNTAG kuruluşları tarafından desteklenmiştir. Her iki kuruluşa vermiş oldukları desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Haziran 2000

Mustafa Gençoğlu

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xii
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.2. Betonarme Kolon-Kiriş Birleşimleri	3
1.3. Çelik Tel Takviyeli Beton	13
1.3.1. Eğilme etkisinde çelik tel takviyeli betonarme kirişlerin davranışı ve hesap modelleri	15
1.3.2. Çelik tel takviyeli betonarme kirişlerin kayma dayanımı	20
1.3.3. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde Çelik Tel Takviyeli Betonların Etkisi	23
2. KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİM DENEYLERİ	28
2.1. Deney Numuneleri ve Hazırlanışı	28
2.1.1. Beton Karışımı	28
2.2.2. Deney Numuneleri	29
2.3. Deney Sistemi	34
2.4. Beton Silindir Basınç Deneyleri	36
2.5. Beton Prizma Eğilme Deneyleri	38
2.6. Kenar Kolon Birleşim Deneyleri	41
2.7. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	78
2.7.1. Numunelerin hasar dağılımları	78
2.7.2. Kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitindeki rijitlik azalmaları	84
2.7.3. İki yönlü tekrarlı yüklemeler altında kolon-kiriş birleşim numuneleri tarafından yutulan enerji miktarı	94
2.7.4. Numunelerin eşdeğer viskoz sönüm oranları	97
2.7.5. Numunelerin elastik ve plastik davranışıyla yutmuş olduğu enerji miktarına göre süneklik	100
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	112
EKLER	118
ÖZGEÇMİŞ	125

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. : Deney numunelerini genel değerlendirme tablosu



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Kolon-kiriş birleşim bölgesi kayma gerilmesinin hesabına ait iç kuvvetler ve olan kesitlerin gösterimi.....	4
Şekil 1.2 : İç kolon-kiriş birleşimlerinin idealleştirilmiş davranışı.....	8
Şekil 1.3 : Kolon sarılma bölgesi.....	10
Şekil 1.4 : Kiriş sarılma bölgesi.....	12
Şekil 1.5 : Çalışmada kullanılan çelik teller.....	14
Şekil 1.6 : R.Craig [26] tarafından önerilen çelik tel takviyeli beton kesitin eğilme hesap modeli.....	17
Şekil 2.1 : Birinci numunenin donatı düzeni ve eleman kesit özellikleri.....	29
Şekil 2.2 : Deneyde kullanılan donatının çekme gerilmesi-şekil değiştirme diyagramı.....	30
Şekil 2.3 : Kenar kolon-kiriş birleşim bölgelerinde çelik tel takviyeli beton kullanılan numunelerin donatı düzeni	31
Şekil 2.4 : Deney sistemi ve deneyden alınan ölçüm noktaları.....	35
Şekil 2.5 : Kolon-kiriş birleşimlerine uygulanan tekrarlı yükleme.....	36
Şekil 2.6 : Beton silindir basınç deneyleri.....	36
Şekil-2.7 : Herbir numuneye ait beton silindirlerin basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.....	37
Şekil 2.8 : Beton prizmaların eğilme deneyleri.....	38
Şekil 2.9 : Çelik tel takviyeli beton prizmaların eğilme deneyinden sonra görünümü.....	39
Şekil 2.10 : Normal beton ve çelik tel takviyeli beton prizmaların eğilme çekme gerilmesi-sehim eğrileri.....	40
Şekil 2.11a : Birinci numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	43
Şekil 2.11b : Birinci numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenini dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	43
Şekil 2.12a : Birinci numunenin kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	44
Şekil 2.12b : Birinci numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	44
Şekil-2.13 : Birinci numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulmuş enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	45
Şekil 2.14a : Üçüncü numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	47
Şekil 2.14b : Üçüncü numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenini dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	47
Şekil 2.15a : Üçüncü numunenin kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	48

Şekil 2.15b: Üçüncü numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	48
Şekil 2.16 : Üçüncü numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	49
Şekil 2.17 : Dördüncü numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	51
Şekil 2.18a: Dördüncü numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	52
Şekil 2.18b: Dördüncü numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenı dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	52
Şekil 2.19a: Dördüncü numunenin kiriş plastik mafsall bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	53
Şekil 2.19b: Dördüncü numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	53
Şekil 2.20 : Beşinci numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	55
Şekil 2.21a: Beşinci numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	56
Şekil 2.21b: Beşinci numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenı dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	56
Şekil 2.22a: Beşinci numunenin kiriş plastik mafsall bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	57
Şekil 2.22b: Beşinci numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	57
Şekil 2.23 : Altıncı numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	59
Şekil 2.24a: Altıncı numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	60
Şekil 2.24b: Altıncı numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenı dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	60
Şekil 2.25a: Altıncı numunenin kiriş plastik mafsall bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	61
Şekil 2.25b: Altıncı numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	61
Şekil 2.26 : Yedinci numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	63
Şekil 2.27a: Yedinci numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	64
Şekil 2.27b: Yedinci numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenı dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	64
Şekil 2.28a: Yedinci numunenin kiriş plastik mafsall bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	65
Şekil 2.28b: Yedinci numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	65
Şekil 2.29 : Sekizinci numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	67
Şekil 2.30a: Sekizinci numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	68
Şekil 2.30b: Sekizinci numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenı dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	68
Şekil 2.31a: Sekizinci numunenin kiriş plastik mafsall bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	69
Şekil 2.31b: Sekizinci numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	69
Şekil 2.32 : Dokuzuncu numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	71

Şekil 2.33a: Dokuzuncu numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	72
Şekil 2.33b: Dokuzuncu numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenini dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	72
Şekil 2.34a: Dokuzuncu numunenin kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	73
Şekil 2.34b: Dokuzuncu numunenin deney sonunda çatlak dağılımı	73
Şekil 2.35 : Onuncu numune tarafından iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında yutulan enerji miktarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	75
Şekil 2.36a: Onuncu numunenin kiriş uç yerdeğiştirmesi -kiriş uç kuvveti değişimini gösteren çevrimler.....	76
Şekil 2.36b: Onuncu numunenin kolon yüzündeki kiriş eksenini dönmesi-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	76
Şekil 2.37a: Onuncu numunenin kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği-aynı kesitin eğilme momenti değişimini gösteren çevrimler.....	77
Şekil 2.37b: Sekizinci numunenin deney sonunda çatlak dağılımı.....	77
Şekil 2.38 : Normal beton ve çelik tel takviyeli beton (Ç.T.T.B.) kullanılan betonarme kesitlerin teorik eğrilik-eğilme momenti değişimini gösteren eğri.....	90
Şekil 2.39 : Numunelerin kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine ait eğilme momenti-eğrilik değişimini ve teorik olarak normal ç.t.t.b. için teorik moment-eğrilik değişimini veren eğriler.....	92
Şekil 2.40 : Numunelerin kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesiti eğilme rijitliğinin kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	93
Şekil 2.41 : Örnek yük- deplasman histeresis çevriminden numunenin yuttuğu enerji miktarının hesap şekli.....	94
Şekil 2.42 : İki yönlü tekrarlı yüklemelerin etkisi altında deney numunelerinin yutmuş olduğu toplam enerji miktarı.....	95
Şekil 2.43 : Eşdeğer viskoz sönüm oranı hesaplamalarında kullanılan örnek yarı çevrim alanları.....	98
Şekil 2.44 : Numunelerin eşdeğer viskoz sönüm oranlarının kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimini gösteren eğriler.....	100
Şekil 2.45 : Numunelerin elastik ve plastik davranışla yutmuş oldukları enerji miktarının örnek bir çevrimde gösterimi.....	101
Şekil 2.46 : Her bir numunenin plastik davranışla yutmuş olduğu toplam enerji miktarı.....	102
Şekil 2.47 : Her bir numunenin elastik davranışla yutmuş olduğu toplam enerji miktarı.....	104
Şekil Ek.1: Çelik tel takviyeli beton kullanılan kenar kolon kiriş birleşim numunesinin kalıbı ve donatılarının yerleşimi.....	119
Şekil Ek.2: Normal beton kullanılan dördüncü kenar kolon kiriş birleşim numunesinin kalıbı ve donatılarının yerleşimi.....	119
Şekil Ek.3: Deney düzeneğinin genel görünümü.....	120
Şekil Ek.4: Birinci numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	120
Şekil Ek.5: Dördüncü numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	121
Şekil Ek.6: Beşinci numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	121
Şekil Ek.7: Altıncı numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	122
Şekil Ek.8a: Yedinci numunedeki segregasyon boşluklarının görünümü.....	122
Şekil Ek.8b: Yedinci numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	122
Şekil Ek.9a: Sekizinci numunedeki segregasyon boşluklarının görünümü.....	123

Şekil Ek.9: Sekizinci numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	123
Şekil Ek.10: Dokuzuncu numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	123
Şekil Ek.11: Onuncu numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü.....	124



SEMBOL LİSTESİ

a	: Kesite etkiyen dikdörtgen beton basınç bloğunun yüksekliği
a'	: Kesme açıklığı
A_c	: Kolonun brüt enkesit alanı
A_{ck}	: Sargı donatısı dışından dışına alınan ölçü içinde kalan çekirdek beton alanı
A_s	: Kesitteki çekme donatısının toplam alanı
A_{sh}	: Birleşim bölgesinde kiriş üst ve alt donatısı arasına konulacak toplam kayma donatısı alanı
a_{vh}	: Her bir yatay etriye donatısının kesit alanı
a_{vv}	: Her bir düşey etriye donatısının kesit alanı
b	: Kesit genişliği
b_b	: Kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş kesitinin genişliği
b_c	: Kolon kesitinin genişliği
b_j	: Birleşim bölgesinin ortalama genişliği
b_{kolon}	: Kolon kesitinin genişliği
c	: Eşdeğer viskoz sönüm oranı
C	: Basınç kuvveti
C_c	: Beton basınç bloğunun bileşke kuvveti
C_s	: Basınç lifindeki donatının almış olduğu basınç kuvveti
C_j	: İki asal doğrultuya eksenel basınç etkisini paylaşdırmak için gerekli katsayı
d	: Kesitin faydalı yüksekliği
d_b, d_b^+	: Eğilme momentinin yönüne göre kiriş faydalı yüksekliği
d_f	: Çelik telin çapı
E_{cc}	: Çelik tel takviyeli betonun basınç etkisi altındaki elastisite modülü
E_{ct}	: Çelik tel takviyeli betonun çekme etkisi altındaki elastisite modülü
E_f	: Çelik telin elastisite modülü
E_{mc}	: Normal betonun basınç elastisite modülü
E_{mt}	: Normal betonun çekme elastisite modülü
f	: Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki gerilme değerleri
F_{be}	: Çelik tellerin betondaki bağ etkisi
F_c	: Beton basınç bloğu tarafından taşınan basınç kuvveti
f'_c	: Betonun karakteristik silindirik basınç dayanımı
f_{cd}	: Betonun silindirik hesap basınç dayanımı
f_r	: Betonun çekme dayanımı
f_{rf}	: Çelik tel takviyeli betonun çekme dayanımı
F'_s	: Basınç bölgesindeki donatıların taşıdığı basınç kuvveti
F_s	: Çekme bölgesindeki donatıların taşıdığı çekme kuvveti
f'_t	: Silindirik yarma deneyinden elde edilen indirekt beton çekme dayanımı
f_y	: Donatının akma dayanımı
f_{yk}	: Donatının karakteristik akma dayanımı
f_{yw}	: Enine donatının karakteristik akma dayanımı
H	: Kat yüksekliği

h	: Kesit yüksekliği
h_c	: Kolonun moment etkiye yönündeki boyutu
$h_{kiriş}, h_b$	: Kiriş kesitinin yüksekliği
j_b	: Kesitin manivela kolu
L	: İç kolon-kiriş birleşimlerinde sağ ve sol kirişin ucuna etkiyen tekil yükler arasındaki uzaklık
l_c	: Çelik telin aderans boyu
l_f	: Çelik telin boyu
l_h	: Kolon çekme ve basınç liflerindeki boyuna donatılar arası yatay uzaklık
l_v	: Kolon etriye aralıkları
M_{cr}	: Kesitin taşıdığı çatlama momenti
M_j	: Kolon-kiriş birleşim bölgesine etkiyen eğilme momenti
M_n	: Kesitin nominal eğilme dayanımı
M_u	: Göçme durumunda kesitin taşıdığı eğilme momenti
M_y	: Çekme donatısının akmaya başladığı andaki kesitin taşıdığı eğilme momenti
P_e/A_g	: Birleşim bölgesi üzerinde kolonun brüt kesit alanındaki minimum ortalama basınç gerilmesi
$R.I.$	: Uçları kıvrılmış çelik tellerin ağırlık oranlarına göre güçlendirme indeksi
s	: Enine donatı aralığı
T	: Donatıdaki çekme kuvveti
u_b	: Birleşim bölgesinden geçen kiriş donatısının aderans gerilmesi
V	: Kesme kuvveti
V_b	: Kiriş kesme kuvveti
V_c	: Kolon kesme kuvveti
v_c	: Kolon-kiriş birleşim bölgesinde diyagonal basınç gerilmesi dağılımıyla (beton tarafından) taşınan kayma gerilmesi
v_{cf}	: Çelik tel takviyeli betonun kayma gerilmesi
V_{cf}	: Çelik tel takviyeli taşıdığı kesme kuvveti
V_e	: Kolon ve kirişte enine donatı hesabına esas alınan kesme kuvveti
V_f	: Çelik tellerin beton karışım hacmine göre hacimce oranı
v_j	: Kolon-kiriş birleşim bölgesinde oluşan kayma gerilmesi
V_{kol}	: Düğüm noktasının üstünde ve altında deprem çözümlemesinden bulunan kolon kesme kuvvetlerinin küçük olanı
V_m	: Normal beton hacim oranı
v_{nf}	: Çelik tel takviyeli beton ile etriye kullanılan betonarme kesitin kayma gerilmesi
V_s	: Etriyenin taşıdığı kesme kuvveti
v_{s}, v_{sh}	: Etriyenin aldığı kayma gerilmesi
w_f	: Çelik tellerin betona göre ağırlık oranı
ρ	: Donatı oranı
μ	: Çelik tel takviyeli betonun eğilme çekme dayanımının doğrudan çekme (silindir yarma deneyinden elde edilen) dayanımına oranı
η_0	: Beton karışımında rasgele dağılmış çelik tellerin pozisyonuna ait katsayı
ϵ_0, ϵ_c	: En büyük basınç gerilmesine karşı gelen şekil değiştirme
σ_{cf}	: Çelik tel takviyeli betonun basınç gerilmesi
ρ_f	: Çelik tellerin beton karışım hacmine göre hacimce oranı
σ_{tu}	: Çelik tel takviyeli betonun taşıdığı çekme gerilmesi
ϕ_b	: Kiriş boyuna donatısının çapı
ϕ_c	: Kolon boyuna donatısının çapı

- ϕ_u : Göçme durumunda kiriş kesitinin eğriliği
 ϕ_y : Çekme donatısının akma durumuna ulaştığı durumda kiriş kesitinin eğriliği
 ϵ_y : Donatı akma şekil değiştirmesi
 ϵ : Gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki şekil değiştirme değerleri
 ϵ : Malzeme parametresi

İKİ YÖNLÜ TEKRARLI YÜKLEMELER ALTINDAKİ BETONARME KENAR KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNDE KULLANILAN ÇELİK TEL TAKVİYELİ BETONUN ETKİLİ BÖLGESİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Kocaeli ve Düzce 1999 gibi şiddetli depremlere maruz kalan ve taşıyıcı sistemi betonarme çerçevelerden oluşan binalar, sünek davranış gösterecek şekilde projelendirilmelidir. Sünek davranış, bir elemanın veya yapının deprem esnasında ortaya çıkan enerjinin oldukça büyük bir kısmını, mukavemetinden önemli ölçüde kayba uğramadan, elastik sınırın ötesinde elastik olmayan davranışla büyük genlikli, dönüşümlü deformasyonlarla yutma kabiliyetidir. Deprem gibi iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemelere maruz kalan betonarme çerçeveli sistemlerde, genellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde büyük zorlanmalar oluşmaktadır. Bundan dolayı, betonarme çerçeveli yapıların sünek davranışı, kolon-kiriş birleşim bölgelerinin sünek davranışına bağlıdır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin deprem gibi iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında sünek davranabilmesi için bu bölgelere çok sık enine donatılar yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla diğer ülkelerin deprem yönetmeliğine benzer olarak, 1998 yılında yürürlüğe giren deprem yönetmeliğimiz, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde enine donatı aralıklarının sıklaştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bununla birlikte kolon-kiriş birleşimini oluşturan kolon ve kirişin bu bölgelerde taşıyacağı eğilme momentlerinin büyük olmasından dolayı her iki elemanın kolon-kiriş birleşim bölgelerinde bulunması gerekli boyuna donatıları da çok yoğun olmaktadır. Birleşim bölgelerinde boyuna ve enine donatıların çok yoğun olmasından kaynaklanan nedenlerle bu bölgelerdeki betonun iyi yerleştirilmesinde ve enine donatıların projedeki detaylara uygun olarak sık konulmasında işçilik açısından önemli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu zorluklardan dolayı iyi kontrol edilemeyen yapıların kolon-kiriş birleşim bölgeleri yönetmeliklere ve projeye uygun olarak özenle inşa edilememektedir. Günümüze kadar birçok araştırmacı, bu bölgelerdeki işçilik hatalarını ve zorluklarını en aza indireyecek ve sünek birleşim davranışını sağlayacak donatı detayları üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu amaçla yapılmış çalışmalardan biri de, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde sık enine donatıların yerine çelik tel takviyeli beton kullanılmasıdır. Bu konuda yapılan çalışmaların pek çoğunda, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde deprem yönetmeliğinin önerdiği, sık enine donatı aralıkları yerine sık olmayan aralıklarla enine donatı ile kolon-kiriş birleşim bölgelerinin belli bölümünde çelik tel takviyeli beton kullanılmıştır. Bu araştırmaların deney parametreleri, genellikle beton karışımındaki çelik telin miktarı, yükleme şekli, enine ve boyuna donatı miktarları olarak ele alınmıştır. Bu araştırmalardan, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde sargı donatısı olarak kullanılan ilave enine donatının yerine çelik tel takviyeli betonun kullanılabileceği, enine donatı aralıkları sık olmayan ve çelik tel takviyeli beton kullanılan kolon-kiriş birleşimlerinin, normal betonlu ve deprem yönetmeliğinin önerdiği sık enine donatılara sahip olan kolon-kiriş birleşimlerinden daha sünek davrandığı, daha büyük

yük taşıma kapasitelerine ve enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu sonuçları bulunmuştur. Ancak deprem etkileri gibi iki yönlü tersinir tekrarlı yüklere maruz betonarme çerçevelerden oluşan bir yapının kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşan iç kuvvetlerin birbiri ile olan etkileşiminin karmaşık olması ve buna ilaveten beton karışımı içindeki çelik tellerin üç farklı yöne rastgele dağılmış olması gibi nedenlerden dolayı literatürde henüz basit bir hesap modeli sunulamamıştır.

Bu çalışmanın amacı; ara kat kenar kolon-kiriş birleşimlerinde kirişin üç farklı bölgesinde çelik tel takviyeli beton kullanılarak, bu bölgeler arasında çelik tel takviyeli betonun etkili olabildiği minimum bir bölgenin elde edilmesidir. Bunun için deprem yönetmeliğinin önerdiği normal betonlu ve süneklik seviyesi yüksek çok katlı betonarme yapının ara kat kenar kolon-kiriş birleşim numunesi baz numune olarak ele alınıp, bu numunenin davranışına en yakın özelliklere sahip olan ve kirişin üç farklı bölgesinde çelik tel takviyeli beton kullanılan kenar kolon-kiriş birleşim numunesinin elde edilmesidir.

Bu çalışmanın kapsamında, kenar kolon-kiriş birleşimlerinin sünek davranışını sağlayan ve sargı donatıları olarak bilinen ilave enine donatıları bulunmayan ve kirişin üç ayrı bölgesine çelik tel takviyeli beton kullanılan sekiz adet numune üretilmiştir. Çelik tel takviyeli beton kullanılan numunelere ilaveten normal beton karışımı kullanılan iki adet kenar kolon-kiriş birleşim numunesi de üretilmiştir. Normal beton kullanılan numunelerden birisi “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (A.B.Y.Y.H.Y.)” koşullarına uygun olarak hazırlanmış sünek kenar kolon-kiriş birleşim numunesidir. Normal beton kullanılan diğer numune ise, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde(düğüm noktasında) hiçbir enine donatı bulunmamasına karşılık kolon ile kiriş sarılma bölgelerinde yönetmeliğin önerdiği miktarda sık enine donatıları bulunan ve yapılarda deprem yönetmeliği koşullarına en yakın uygulama olarak karşılaşılan bir numunedir.

Deney numunelerinde, karışımı aşağıda verilen BS 20 kalitesinde hazır beton ve BÇ IIIa kalitesinde betonarme demirleri kullanılmıştır. Laboratuarda yapılan silindir basınç deneylerinde, normal beton basınç dayanımı, 25 Mpa ~ 33 Mpa arasında bulunmuştur. Çelik çubuk çekme deneylerinde, kullanılan betonarme demirlerinin akma dayanımı 520 Mpa olarak elde edilmiştir. Çelik tel takviyeli beton kullanılan betonlarda, hazır olarak gelen normal beton karışımına hacminin %1’i oranında, boy/çap oranı 60mm/0.8mm ve akma dayanımı 1100 Mpa olan uçları kıvrılmış çelik teller kullanılmıştır. Bu şekilde hazırlanmış olan çelik tel takviyeli betonların silindir basınç dayanımı 22 Mpa ~ 32 Mpa arasında olmuştur. Normal beton karışımı,

Çimento	:	340 kg	
Kırma taş-1	:	906 kg	(maksimum agrega 16mm)
Kum	:	349 kg	
Su	:	197 kg	
Katkı	:	%05 normal akışkanlaştırıcı	(son iki numunede süper akışkanlaştırıcı)

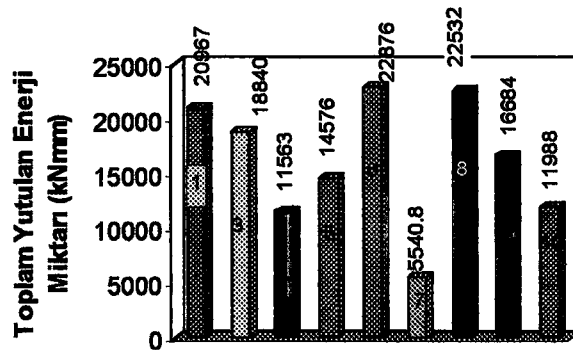
Bu çalışmada deney parametreleri, her numunede, normal beton karışımları, boyuna donatı miktarları ve donatı özellikleri aynı olmuştur. Ayrıca çelik tel takviyeli beton kullanılan numunelerde, beton karışımına ilave edilen çelik tellerin miktarı, fiziksel ve mekaniksel özellikleri değiştirilmemiştir. Çelik tel takviyeli beton (Ç.T.T.B.) kullanılan kenar kolon-kiriş birleşim numuneleri, iki farklı tipte sekiz adet olarak

hazırlanmıştır. Bu numunelerden beş tanesinde, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde sadece bir adet enine donatı yerleştirilmiş, diğer üç numunenin birleşim bölgesine(düğüm noktasına) enine donatı yerleştirilmemiştir. Çelik tel takviyeli beton, tüm numunelerde, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde ve kolonda, kolon genişliğinin iki katı kadar bir bölgede kullanılırken, kirişte, $2h_{kiriş}$, $h_{kiriş}$, $h_{kiriş}/2$ olmak üzere üç ayrı bölgede kullanılmıştır.

Kenar kolon-kiriş birleşim numuneleri, deplasman kontrollü olarak kiriş ucundan etkiyen iki yönlü tersinir tekrarlı yükler ile kolon ekseninden etkiyen sabit eksenel basınç yükü altında deneye tabi tutulmuştur. Kiriş ucundan etkiyen iki yönlü tekrarlı yükler, kalıcı kiriş uç yer değiştirmesi oluşana kadar bir çevrim, daha sonra her bir yükleme adımında üç çevrim yapılmıştır. Deney numunelerinin yükleme adımları genel olarak aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Bu deneylerden herbir numune için, kiriş uç kuvveti (kN)-kiriş uç yer değiştirmesi (mm), kolon-kiriş birleşim bölgesi arakesitindeki eğilme momenti (kNm)-dönme (rad), kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitindeki eğilme momenti (kNm)-eğrilik(rad/mm) arasındaki değişimi gösteren histeresis çevrimleri elde edilmiştir. Her bir yükleme adımında numunelerin yutmuş olduğu enerji miktarı, kiriş uç kuvveti(kN)-kiriş uç yer değiştirmesi(mm) eğrilerinin altında kalan alan değeri olarak hesaplanmış ve kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğriler elde edilmiştir. Her bir yükleme adımında hesap edilen bu değerler toplanarak numunenin yutmuş olduğu toplam enerji miktarı bulunmuştur. İki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında tüm numunelerin yutmuş oldukları toplam enerji miktarları aşağıdaki, grafikte gösterilmiştir.



Şekil-2: Deney Numuneleri Tarafından Yutulan Toplam Enerji Miktarları

Bununla birlikte herbir yükleme adımında, kiriş plastik mafsal bölgesi orta kesitine etkiyen eğilme momenti hesaplanmış, aynı kesitin uzama ve kısalması ölçülmüş ve ölçülen bu değerlerden kesitin eğriliği elde edilmiştir. Daha sonra herbir yükleme adımında, kiriş plastik mafsal bölgesi orta kesitinin eğilme rijitliği hesaplanmış ve bu eğilme rijitliğinin kiriş uç yerdeğiştirmesi ile değişimini gösteren eğri elde edilmiştir. Ayrıca herbir yükleme adımında, kenar kolon-kiriş birleşim numunesinin viskoz sönüm oranlarını hesaplanmış ve bu viskoz sönüm oranlarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğriler elde edilmiştir. Bu işlemler tüm numuneler için ayrı ayrı yapılmış ve elde edilen bu grafikler yardımıyla numuneler arasında gerekli karşılaştırmalar ve değerlendirmeler yapılarak, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çatlağın oluştuğu kesitte çatlağı dik yönde kesen çelik tellerin bulunması çatlak genişliğinin büyümesine engel olabilmektedir.
- Çelik tel takviyeli beton kullanılan kolon-kiriş birleşimlerinde, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde(düğüm noktasında) Ç.T.T.B. ile bir adet enine donatı kullanılması, bu bölgelerde X şeklinde kayma çatlakları oluşumunu engelleyememiştir. Ancak düğüm noktasındaki Ç.T.T.B. ve bir adet enine donatı bulunması X kayma çatlağının kılcal boyutlarda kalmasını ve yüklemenin ileri aşamalarında oluşmasını sağlamıştır.
- Kirişte, kolon-kiriş birleşim bölgesi arakesitinden itibaren kiriş kesiti yüksekliğinin yarısı kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton, kullanılan onuncu numunenin davranışına göre, **Ç.T.T.B. kirişte, kolon yüzünden itibaren kiriş kesiti yükseklik değerinin yarısından daha büyük bir bölgede kullanılmasının uygun olduğu kanısına varılmıştır.**
- Çelik tel takviyeli beton kullanılan altıncı ve sekizinci kenar kolon-kiriş birleşim numunelerinin deprem yönetmeliğinin önerdiği detaylara uygun olarak hazırlanmış birinci numuneden daha büyük yük taşıma kapasitelerine, moment taşıma kapasitelerine, enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu görölmüştür.
- Normal beton kullanılan birinci ve dördüncü numuneler karşılaştırılınca, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde(düğüm noktasında) kolon enine donatılarının devam ettirilmesinin kolon-kiriş birleşimlerinin sünek davranış göstermesinde çok etkili olduğu görölmüştür.
- Numunelerin plastik davranışla yutmuş oldukları enerji miktarlarına göre, çelik tel takviyeli beton kullanılan kolon-kiriş birleşimleri daha sünek davranış göstermiştir.
- Çelik tel takviyeli beton karışımlarının kalıba kolay ve iyi yerleştirilmesi için mutlaka süper akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır.
- Birçok araştırmada olduğu gibi, bu çalışmada da Ç.T.T.B. kullanılan betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının dayanım ve davranışlarında önemli ölçüde iyileşmelerin olduğu görölmüştür. Ancak bugüne kadar yol, endüstriyel zeminler ve uçak iniş pisti inşaatında yaygın olarak kullanılan Ç.T.T.B.'nin davranışına ait deney sonuçlarıyla elde edilen bilgiler arttıkça ve ampirik ifadelerden arındırılmış basit hesap modelleri geliştirildikçe, kolon, kiriş ve döşeme plakları gibi betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında da yaygın bir şekilde kullanılmasının mümkün olacağı kanısına varılmıştır.

Bu araştırmada kullanılan kenar kolon kiriş birleşim numunelerinin özelliklerini ve deneylerden elde edilen bazı sayısal sonuçlar aşağıdaki tabloda özetle verilmiştir.

Numune No	Hacimce çelik tel miktarı	Birleşimde etriyenin durumu	Sarıma bölgesinde etriye sıklaştırma durumu	Kiriş ve kolonda Ç.T.T.B.kull. Bölge	f_{ck}	f_{ctd}	Yutulmuş Toplam Enerji	Ort. Viskoz Sönüm Oranı	Kiriş Plas. Orta Kesit	Mafs Böl. Eğil.Rij.
	%			(kiriş/kolon)	Mpa	Mpa	(kNm)		Başlangıç (kNm ²)	Nihai (kNm ²)
1	0	var (sık)	var	-	30	-	9199.4739	0.0680	550068.0	17567.40
2	1	var	yok	120cm/50cm	30	26	-	-	-	-
3	1	yok	yok	120cm/50cm	28	25	10665.008	0.0730	76815.3	20764.70
4	0	yok	var	-	28	-	5360.005	0.0930	130468.3	11406.15
5	1	var	yok	60cm/50cm	26	-	7415.838	0.0700	139037.6	14746.82
6	1	var	yok	120cm/50cm	33	32	11936.991	0.0907	995000.0	25400.00
7	1	yok	yok	60cm/50cm	33	32	3333.455	0.0964	109947.8	33161.10
8	1	var	yok	120cm/50cm	26	-	9440.675	0.0594	82761.1	20039.07
9	3	yok	yok	60cm/50cm	26	22	7598.677	0.0630	90960.3	18480.96
10	1	var	yok	30cm/50cm	26	22	6057.904	0.0790	289039.1	8913.45

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTIVE ZONE OF THE STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE USED IN EXTERIOR BEAM-COLUMN CONNECTIONS SUBJECTED TO BI-DIRECTIONAL REVERSALS CYCLIC LOADINGS

SUMMARY

Reinforced concrete frame structures subjected to strong earthquakes such as Kocaeli and Düzce 1999 have to be designed according to the requirements of earthquake codes as high ductility level structures. Ductility can be described as an ability of reinforced concrete cross sections, elements and structures to absorb large energy released during to earthquake without losing the strength in inelastic behaviour under large amplitudes and reversible deformations. Generally, beam-column connection zones of the reinforced concrete frame systems subjected to bi-directional reversals cyclic loads such as earthquake are subjected to large stresses. Consequently, the ductility of reinforced concrete structures depends heavily on the ductility of beam-column connection zones. For adequate ductility of beam-column joints subjected to bi-directional reversals cyclic loading such as earthquake, the joints have closely spaced hoops (lateral reinforcements). On the other hand, cross-sections of beams and columns close to the joints are subjected to large bending moments and large longitudinal reinforcements of beams and columns pass through these joints. The lateral reinforcements and concrete can be placed with difficulty by workers, because the longitudinal and lateral reinforcements passing through into beam-column joints are very congestive and intersect each others. Because of these difficulties, the beam-column joints of the reinforced concrete structures can not be controlled easily by experienced civil engineers and it can not be suitable built with care according to the design drawings. Numerous researches have attempted to reduce workmanship faults and difficulties by simplifying the reinforcement lay-out in joints. In several investigations the use of steel fiber reinforced concrete is proposed instead of closely spaced lateral reinforcements in beam-column joints. In many of these investigations steel fiber reinforced concrete is used in certain part of the joint beside of the normal spaced lateral reinforcements instead of the closely spaced lateral reinforcements. The experimental parameters of these experimental studies have been type of loading, amount of steel fiber in concrete mix, loading method, amount of lateral and longitudinal reinforcements. The beam-column joint specimens having normally spaced lateral reinforcements at interval and the steel fiber reinforced concrete into the certainly part of the joint displayed higher capacity of shear forces and flexural moments, dissipated more energy and showed more ductile behaviour than the conventional ductile beam-column joints of plain concrete. Unfortunately, simple design models have not been yet presented at the literature about the design of the columns, beams, plate and beam-column joints used the steel fiber reinforced concrete. The reason is that interactions of the internal forces at the

beam-column joints of the reinforced concrete frame structures subjected to bi-directional reversal cyclic loads such as earthquake are much complex and addition to this state, steel fibers in concrete mix are randomly dispersed three directions of the element.

The aim of present research is to find a minimum zone where the steel fiber reinforced concrete is placed at the beam-column joints for an adequate ductile behaviour. For the purpose, all of the specimens are compared from the point of view of the capacity of carrying load and moment, energy dissipation, rigidity, cracks, damping ratio.

The present research includes, eight specimens where the steel fiber reinforced concrete in the different three parts of the beam, beam-column joint core, a $2b_{\text{column}}$ part of the column and the normal spaced lateral reinforcements by disregarding the requirements related to the ductile beam-column joint of The Earthquake Code is used, produced. However, two specimens are produced by using plain concrete completely. One of them is the specimen where plain concrete and closely spaced lateral reinforcements are used as proposed by The Earthquake Code for the ductile beam-column joints for comparison purposes. Other specimen where plain concrete and closely spaced lateral reinforcements at all of the joint were used except the beam-column joint core (node) where no lateral reinforcements are present as it was in the fourth specimen. In practise it is very often the case where the beam-column joint zones are similar to the fourth specimen. All of the specimens are in full scale.

The quality of concrete and reinforcement used in the test specimens was C 25 and S 520. The laboratory test results of the materials revealed that cylinder compression strength of the plain and the steel fiber reinforced concrete showed a variation in between 26 MPa to 33 MPa, and from 22 MPa to 26 MPa, respectively. However, the yield of the lateral and longitudinal reinforcement was found to be 520 MPa. The mix design for plain concrete was as follows:

Cement	: 340 kg
Coarse aggregate	: 906 kg (max. 16 mm.)
Fine aggregate	: 349 kg.
Water	: 197 kg
Normal plasticizer	: 0.5 % (super plasticizer at the end of two specimen is used)

The steel fibers which were put into the concrete at 1% by volume of concrete (78 kg/m^3) mix were 60mm-long $\times$ 0.8 mm-diameter collated hooked-end Dramix fibers which has a yield strength of 1100 MPa.

Due to the large number of the test parameters, the study is restricted to the following parameters for all of the specimen used the steel fiber reinforced concrete;

- Steel fiber reinforced concrete was placed to the beam-column joint core and to the part of the column with a distance of $2b_{\text{column}}$ from the beam-column connection intersection,
- Steel fiber reinforced concrete was placed to three different part of the beam of a width of $2h_{\text{beam}}$, h_{beam} , $h_{\text{beam}}/2$ from the beam-column connection intersection,

- Five specimen had only one lateral reinforcement at the centre of the beam-column joint core,
- Three specimen had no lateral reinforcement at the beam-column joint core,

Some experimental specimens were indicated in Figure-1.

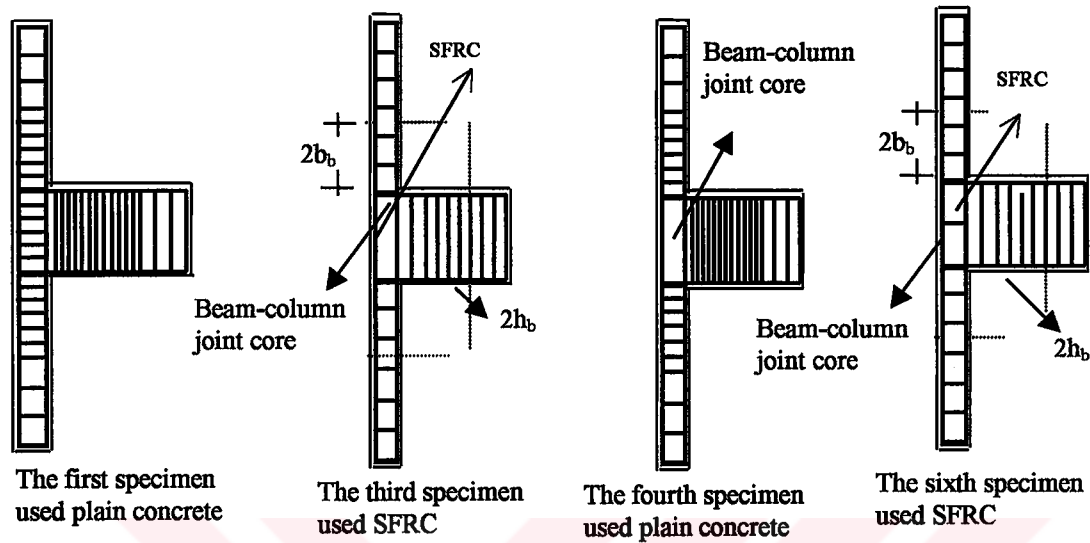


Figure-1: The view of some experimental specimens

The exterior beam-column joint specimens were tested under the displacement controlled and the bi-directional reversals cyclic loads acting from the end of the beam. In addition to these cyclic loads, the constant axial load was applied to the column. Bi-directional reversals cyclic loads are applied at the end of the beam until the first residual displacement occur. After that stage, bi-directional reversals cyclic loads at the end of the beam are applied for three cycles at the each loading step up to the failure of the joint. The loading steps of the test specimens and loads on the specimens are showed in Figure-2.

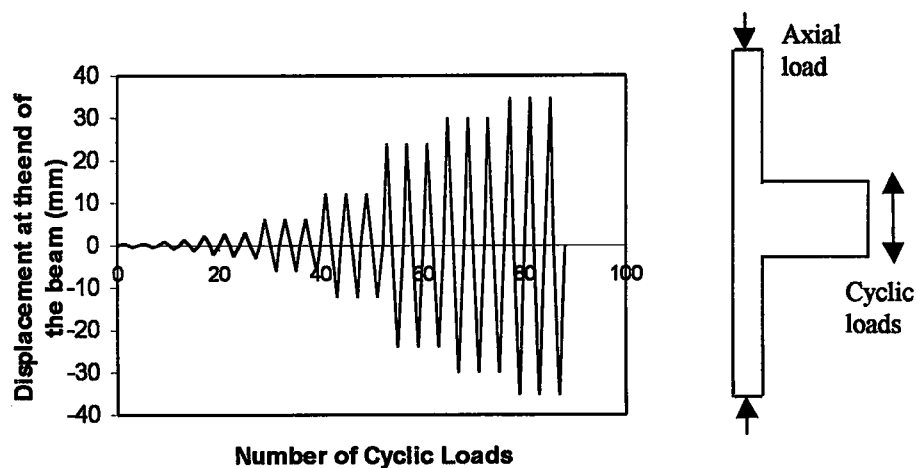


Figure-2: The cyclic loading path and applied loads

The beam tip load versus the beam tip displacement, the moment of beam at the column face versus the rotation of the axis of beam at the column face and the flexure moment at the middle section of the beam which corresponds for plastic

hinge zone versus the curvature of this section are plotted for each specimen which display hysteretic loops. Furthermore, the energy dissipation capacity of each specimen are obtained by computing the area of the variation between the beam tip load and the beam tip displacement curve as the cumulative external work. This energy dissipation capacity of each specimen was given in Figure-3.

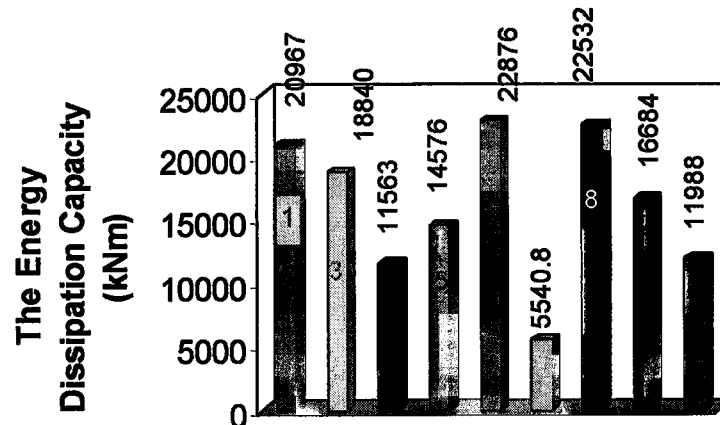


Figure-3: The dissipation energy capacity

In addition to the cumulative energy dissipation of each specimen, the energy dissipated in each cycle was evaluated and the dissipated energy versus displacement curve is plotted for all specimen separately. By using the beam tip load versus beam tip displacement hysteresis loops, the viscous damping ratios of the specimens in each cycle were computed and the viscous damping ratios of the specimens versus beam tip displacement curve are plotted separately.

On the other hand, at the each loading stage, the flexure moment at the middle section of the beam which corresponds to the plastic hinge zone and the curvature of this section by measuring the elongation and shortening were calculated, and then the flexure rigidity at the this section of the beam was found in each cycle for all specimen separately. Furthermore, the flexure rigidity at the middle section of the beam plastic hinge zone versus beam tip displacement (mm) curve was obtained.

The conclusions obtained by comparing the experimental tests can be stated as follows:

- If steel fiber crosses through a crack by forming a bridge, between sides of the crack, width of the crack does not increase.
- By using the steel fiber reinforced concrete together with one stirrup in the beam-column connection core, the formation of the X shear crack at this zone could not be prevented, however, it was ensured that X shear crack remain very fine at the advanced stage of the loading.
- The behaviour of the tenth specimen where the steel fiber reinforced concrete in the part of $h_{beam}/2$ at the beam is used shows clearly that, the use of the steel fiber reinforced concrete in larger part of the beam than the part of $h_{beam}/2$ at the beam yields very positive overall behaviour.
- The sixth and eighth specimen where the steel fiber reinforced concrete is used into the part of the $2b_{column}$ in the column, the beam-column connection core and the part of $2h_{beam}$ of the beam displays higher capacity of shear force and flexural

moments, dissipate energy and more ductile behaviour than conventional ductile beam-column joints where is used plain concrete and detailed according to earthquake code.

- When the first specimen having the plain concrete is compared with the fourth specimen having the plain concrete, the importance of the closely placed column stirrups in the beam-column connection core is observed better for the ductile beam-column connections.
- In relation with the amount of the energy dissipation of the specimens by the plastic behaviour, it was observed that the specimens having the steel fiber reinforced concrete show more ductile than the specimen having the plain concrete.
- The super plasticizer must be used in the mix for the workability of the steel fiber reinforced concrete.
- It is observed at this research that the strength and behaviour of the structural elements having the steel fiber reinforced concrete improved. However, the prior researches dealing with the steel fiber reinforced concrete has used at the construction of roads, industrial floor and pavements. Depending on the results of the present investigation it is believed that the steel fiber reinforced concrete can be extensively used in the structural elements such as column, beam, plate and beam-column joint. However, these types of applications require that the simple calculation method should be evaluated instead of empirical statement.

The characteristics of the test specimens in this research and some numerical results of the experiments are presented in Table 1

Specimen no	Amount of steel fiber by volume	Stirrups at the beam-column connection core	Closely spaced embracing zone of the beam-column connection	Part of S.F.R.C. at the beam and column	f_{ck}	f_{ckf}	Cumulative energy dissipation	Average viscous damping ratio	Flexure of the middle of the beam hinge	stiffness section plastic zone
	%			(beam/column)	MPa	MPa	(kNmm)		Initial state (kNm ²)	ultimate state (kNm ²)
1	0	yes (often)	yes	-	30	-	9199.4739	0.0680	550068.0	17567.40
2	1	yes (one)	no	120cm/50cm	30	26	-	-	-	-
3	1	no	no	120cm/50cm	28	25	10665.008	0.0730	76815.3	20764.70
4	0	no	yes	-	28	-	5360.005	0.0930	130468.3	11406.15
5	1	yes	no	60cm/50cm	26	-	7415.838	0.0700	139037.6	14746.82
6	1	yes	no	120cm/50cm	33	32	11936.99	0.0907	995000.0	26400.00
7	1	no	no	60cm/50cm	33	32	3333.455	0.0964	109947.8	33161.10
8	1	yes	no	120cm/50cm	26	-	9440.675	0.0594	82761.1	20039.07
9	3	no	no	60cm/50cm	26	22	7598.677	0.0630	90960.3	18480.96
10	1	yes	no	30cm/50cm	26	22	6057.904	0.0790	289039.1	8913.45

1.GİRİŞ

1.1 TEZİN KAPSAM VE AMACI

Deprem gibi dinamik etkilerin hakim olduğu yükleme durumlarında yapıların güvenliğini tanımlayan iki önemli özellik, dayanım ve s nekliktir. Bu özelliklerden dayanım, yapının kullanım amacına uygun olarak etkimesi d ş n len yükleme kombinezonlarında taşıyıcı sistem ve taşıyıcı sistem elemanlarının göçmeden söz konusu yükleri taşıyabilmesi olarak tanımlanabilir. Süneklik, taşıyıcı sistem veya elemanlarının veya kullanılan malzemenin elastik ötesi davranışta da dayanımın önemli bir kısmını sürdürme özelliğinin yanı sıra tekrarlı yüklemede enerji yutabilme özelliğı olarak ifade edilebilir [1]. Betonarme yapılarda dayanım ve sünekliğin sağlanabilmesi için;

- kullanılan beton ve  elik kalitesinin projesine uygun olması,
 - taşıyıcı sistemlerin uygun seçilmesi, ayrıca ilgili şartname koşullarını sağlayacak şekilde projelendirilmesi,
 - projede verilen donatı detaylarına uygun inşa edilmesi, bilhassa kolon-kiriş birleşim bölgesi etriye sıklaştırmasına ve kolonlarda sık etriye düzeninin devam ettirilmesine  zen gösterilmesi,
 - betonun kalıba iyi yerleştirilmesi, bakımının iyi yapılması
 - yapıların inşaat aşamasında projesine uygunluğunun sıkı denetlenmesi,
- gerekir.

Erzincan-1992, Dinar-1995 ve Adana, Ceyhan-1998, Kocaeli ve Düzce -1999 depremlerinde orta ve ağır hasarlı betonarme binalar üzerinde yapılan incelemeler neticesinde, hasar nedenlerinden en önemlisinin kolon-kiriş birleşim bölgelerinde deprem yönetmeliğinin öngördüğü birleşim detaylarına genelde uyulmaması olarak belirlenmiştir. Bunun da nedeni olarak,

donatıların yoğun olduğu kolon-kiriş birleşim bölgelerinde etriye sıklaştırmasının yapılmaması, beton yerleştirmesindeki işçiliğin yeterli olmaması ve gerekli özenin gösterilmemesidir. Bu önemli detayların yukarıda açıklanan nedenlerle deprem yönetmeliğine uygun olarak yapılmamasından dolayı, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde uygulaması kolay ve yapının sünek davranışını sağlayabilecek donatı detayları üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu amaçla yapılmış olan araştırma alanlarından biri de kolon-kiriş birleşim bölgesinde çelik tel takviyeli betonlar (Ç.T.T.B.) kullanılmasıdır. Bu konunun araştırılması gereken alanlardan birisi olduğu ve çelik tel takviyeli beton kullanılarak, birleşimde gerekli olan kayma donatısı miktarının azaltılabildiği, birleşimin maksimum kesme kuvveti ve eğilme momenti kapasitesinin artırılabilirdiği de belirtilmiştir [2].

Bu çalışmanın amacı ise; kenar kolon-kiriş birleşim bölgelerinde şartnamelere göre sargı donatısı olarak gerekli etriye sıklaştırması yapılmadan birleşimi oluşturan kirişin üç değişik bölgesinde çelik tel takviyeli beton kullanılarak numunelerin dayanımındaki, sünekliğindeki, enerji yutma miktarındaki ve viskoz sönüm oranlarındaki değişimlerin gözlemlenmesi ile çelik tel takviyeli betonun etkili olduğu bölgenin iki yönlü tekrarlı yükler altında yapılan deneysel bir araştırma ile elde edilmesidir. Çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı bu bölgeler; kolonda sabit tutularak kolon genişliğinin iki katı ($2b_{kolon}$), kirişte ise kolon yüzünden itibaren $2h_{kiriş}$, $h_{kiriş}$ ve $h_{kiriş}/2$ olarak seçilmiştir. Söz konusu değişimlerin karşılaştırılmasında esas alınan numune ise "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (A.B.Y.Y.H.Y.)" koşullarına göre gerekli etriye sıklaştırmasının yapıldığı, kuvvetli kolon, zayıf kiriş kabullerine uygun olarak hazırlanmış betonarme kenar kolon-kiriş birleşimi olmuştur. Bölüm-2'de detaylı olarak açıklanan deneysel çalışmalarda, değişik özelliklere sahip on adet ara kat kenar kolon-kiriş birleşim numunesi hazırlanmış olup, bu numuneler iki yönlü tekrarlı yükler altında deneye tabi tutulmuştur. Bu özelliklere göre;

Deney numunelerinde değişmeyen parametreler,

- normal beton kalitesi ve karışımı,
- boyuna ve enine donatının kalitesi,
- boyuna donatı miktarı ve düzeni,

- sadece numune-9 dışında, beton karışımlarında hacimce oranı %1 olan çelik tel miktarı,
- kullanılan çelik tellerin fiziksel ve mekanik özellikleri,
- kolonda, kolon genişliğinin iki katı olan bir bölge ile kolon-kiriş birleşim bölgesinde çelik tel takviyeli beton kullanılması,

Deney numunelerinde değişen parametreler,

- kirişin kolon yüzünden itibaren üç değişik bölgesinde çelik tel takviyeli beton (Ç.T.T.B.) kullanılması,
- kolon-kiriş birleşim bölgesinde bir adet etriyenin bulunup bulunmaması olarak belirlenmiştir.

Bu konu üzerinde bugüne kadar yapılmış olan ve Bölüm 1.3.3'de açıklanan çalışmalardan da görülebileceği gibi, Ç.T.T.B., kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, kolonda ve kirişte belli bir bölgede kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, beton karışımına ilave edilen çelik tel miktarı, donatı düzeni, deney sistemi ve birleşim tipleri gibi değişen deney parametreleri esas alınmıştır. İki yönlü tekrarlı yükler altında 1998 yılında yürürlüğe giren "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik" koşullarına uygun olarak hazırlanmış süneklik seviyesi yüksek taşıyıcı sistemlerin kenar kolon-kiriş birleşim numunesinin özellikleri esas alınarak yukarıda açıklanan parametrelere sahip Ç.T.T.B. kullanılan deney numuneleri ile yapılmış olan karşılaştırmalar sonucunda Ç.T.T.B.'nin etkili bölgesinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmanın daha önceki çalışmalardan farklı olduğu kanısına varılmıştır.

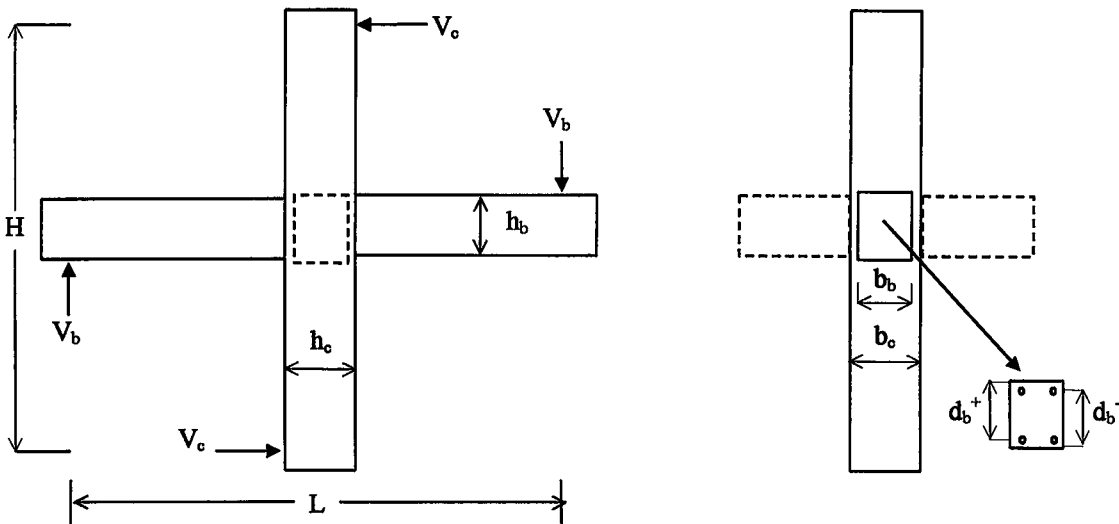
1.2. BETONARME KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİ

Betonarme çerçeve veya perde-çerçeve sistemlerde düğüm noktası olarak ifade edilen kiriş-kolon birleşim bölgesi, kiriş ve kolonların kesişim bölgelerinde, kolonun kiriş yüksekliği içerisinde kalan kısmı olarak tanımlanabilir. Bu bölgeler, özellikle deprem etkilerinde taşıyıcı sistemin sünek davranış göstermesinde çok etkili olmaktadır. Dolayısıyla, deprem vb. dış yükler altında betonarme yapıların davranışında çok etkili olan kolon-kiriş birleşimlerinin davranışını etkileyen faktörler

hakkında çeşitli araştırmalar ve bu araştırmalardan elde edilen sonuçlara bağlı olarak farklı görüşler öne sürülmektedir.

Kurose ve arkadaşları[4] tarafından deprem etkilerine benzer tek ve iki eksenli yüklemeler altında seksen dört adet iç ve kenar kolon-kiriş birleşim deneyleri yapılmıştır. Pessiki [3] tarafından yapılan çalışmada, bu deneylerden elde edilen sonuçları da dikkate alarak kolon-kiriş birleşiminin davranışını etkileyen faktörler,

- beton dayanımının artmasıyla kolon-kiriş birleşimi kayma dayanımının arttığı,
$$v_r = 20 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (1.1)$$
- kiriş genişliğinin kolon genişliğine oranı 1'e yaklaştıkça birleşimin kayma dayanımının arttığı,
- kiriş yüksekliğinin kolon genişliğine oranı 1'den büyük olduğu zaman kayma dayanımının azaldığı,
- birleşimde deprem etkisine dik yönde iki kirişin kolona birleşmesiyle, birleşimin kayma dayanımının yaklaşık %30 arttığı,
- birleşimdeki enine donatı miktarının artmasıyla kayma dayanımının arttığı,
- kiriş boyuna donatısı çapının kolon derinliğine oranı arttıkça, birleşim bölgesinden geçen kiriş boyuna donatısında bağ (aderans) bozulmasına neden olabildiği,



Şekil-1.1 Kolon-kiriş birleşim kayma gerilmesi için hesap yöntemi

g) kolon eksenel basınç kuvvetinin birleşimde diyagonal olarak iletilecek kayma kuvvetinin önemli bileşeni olmasına rağmen, sürpriz bir sonuç olarak kolon eksenel basınç kuvvetinin birleşimin kayma dayanımına etkisinin olmadığı, şeklinde verilmiştir.

Kurose ve arkadaşları[4] tarafından Şekil-1.1'deki hesap yöntemine göre iç kolon-kiriş birleşimi için kayma gerilmesi,

$$v_j = M_j \times \left(1 - \frac{h_c}{L} - \frac{j_b}{H}\right) \div (b_j \times h_c \times j_b), \quad M_j = V_b \times L = V_c \times H \quad (1.2a \text{ ve } b)$$

olarak verilmiştir.

Yukarıda belirtilen faktörler üzerine yapılmış araştırmalardan biri de Kitayama ve arkadaşları tarafından [5] yapılan çalışmada, birleşimin iki yüzündeki kolon genişliği boyunca kiriş donatısının ani akma değerine ulaştığı kabulü ile bulunan maksimum aderans (bağ) gerilmesi, u_b , olmak üzere Denklem 1.3 ile tanımlanmış olan bağ indeksine bağlı olarak kolon-kiriş birleşimine ait viskoz sönüm oranının azalmaması ve 0.10 luk eşdeğer viskoz sönüm oranının sağlanması için de kayma indeksinin 4.5 den büyük olmaması şartı verilmiştir.

$$\frac{u_b}{\sqrt{f'_c}} = f_y \times \left(\frac{d_b}{h_c}\right) \times \frac{1}{2 \times \sqrt{f'_c}} \leq 4.5 \quad (1.3)$$

Burada, f_y : kiriş boyuna donatılarının akma dayanımı (kgf/cm^2), d_b :kiriş boyuma donatısının çapı(mm), h_c : kolon derinliği(mm), f'_c : beton basınç dayanımı (kgf/cm^2).

Denklem 1.3 deki ifadenin 4.5 değerine eşitlenmesi ile birleşimi oluşturan kolonun yüksekliği için minimum bir değer Denklem-1.3a ile verilmiştir.

$$h_c \geq d_b \times f_y / (9 \times \sqrt{f'_c}) \quad (1.3a)$$

Kolon eksenel basınç gerilmesinin, $0.3f_c$ den küçük olması halinde birleşimdeki kiriş donatısının bağ dayanımına, $0.5 f_c$ den küçük olması halinde de birleşim kayma dayanımına olumlu etkisinin olmadığı görülmüştür.

Birleşimin dört yüzünde çerçeve kirişinin bulunmasıyla yani kuşatılmış birleşimlerde her bir birleşim yüzünün de en az üçte ikisinin kirişle kaplı olması halinde birleşim kayma dayanımının %30 artabildiği belirtilmiştir. Bununla birlikte birleşim bölgesinde, bulunması gereken minimum kayma donatısı miktarının birleşim kesit alanının % 0.4'ü kadar olması önerilmiştir.

Yukarıda belirtilen hususlar, Yeni Zelanda Betonarme Yapıların Tasarımı Yönetmeliği [6] ve Aoyama [7]'de

$$h_c \geq 25 d_b ; \quad f_y = 275 \text{ Mpa}$$

$$h_c \geq 35 d_b ; \quad f_y = 380 \text{ Mpa}$$

olarak yer almıştır. Normal tasarımda pek dikkate alınmayan donatıların aderans kaybının (kaymasının), taşıyıcı sistemin lineer olmayan dinamik analizinde mutlaka gözönüne alınması gerektiği belirtilerek ACI 318-89 [8]'da tanımlanan deprem etkileri için verilen tip-2 birleşimlerde geçerli olmak üzere yukarıdaki koşullara benzer olarak,

$$h_c (\text{kolon}) \geq 20 \phi_b (\text{kiriş donatısı})$$

$$h_b (\text{kiriş}) \geq 20 \phi_c (\text{kolon donatısı})$$

Bonacci ve Pantazopoulou tarafından [9] yapılan farklı bir çalışmada kolon eksenel basınç yükünün kiriş-kolon birleşimlerinin dayanımını fark edilebilir derecede artırmadığı, ancak birleşimin şekil değiştirebilme yeteneğini iyileştirdiği ifade edilmiştir. Bu konu hakkında Fujii ve Morita [10] yapmış oldukları deneysel çalışmada kolon eksenel yük seviyesi, beton basınç dayanımının dörtte birine kadar artırılmış. Böyle bir artışın, iç kolon-kiriş birleşimlerinin nihai kayma dayanımları üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı, buna karşılık kenar kolon-kiriş birleşimlerinin nihai kayma dayanımlarında yaklaşık %10 kadar iyileşmenin olduğu görülmüştür

Ancak bu değerlendirmelerle çelişki teşkil edebilecek araştırmalardan olan Paulay ve arkadaşları tarafından [11] ve [12] yapılan çalışmalarda, kolon eksenel basınç yükünün birleşim çekirdeğini sınırlayarak ya da birleşim kritik kesitlerindeki kesme kuvvetlerinin oluşturduğu diyagonal beton basınç gerilmesi dağılımını dengeleyerek kiriş-kolon birleşim bölgesinin kayma dayanımlarını arttırdığı belirtilmiştir. Böyle bir artış Yeni Zelanda Yönetmeliğinde, birleşim bölgesindeki beton tarafından taşınacak kayma gerilmesi ,

$$v_c = \frac{2}{3} \times \sqrt{C_j P_e / A_g - f'_c / 10} \quad (1.4)$$

kayma donatısı tarafından taşınan gerilmesi ise

$$v_{sh} = A_{sh} \times f_{yh} / (b_j \times h_c) \quad (1.4a)$$

Denklem-1.4 ve 1.4a ile verilmiştir.

P_e / A_g (Mpa): Birleşim bölgesi üzerinde kolonun brüt kesit alanındaki ortalama minimum basınç gerilmesi,

C_j : İki asal doğrultuya eksenel basınç etkisini paylaştırmak için bir katsayı

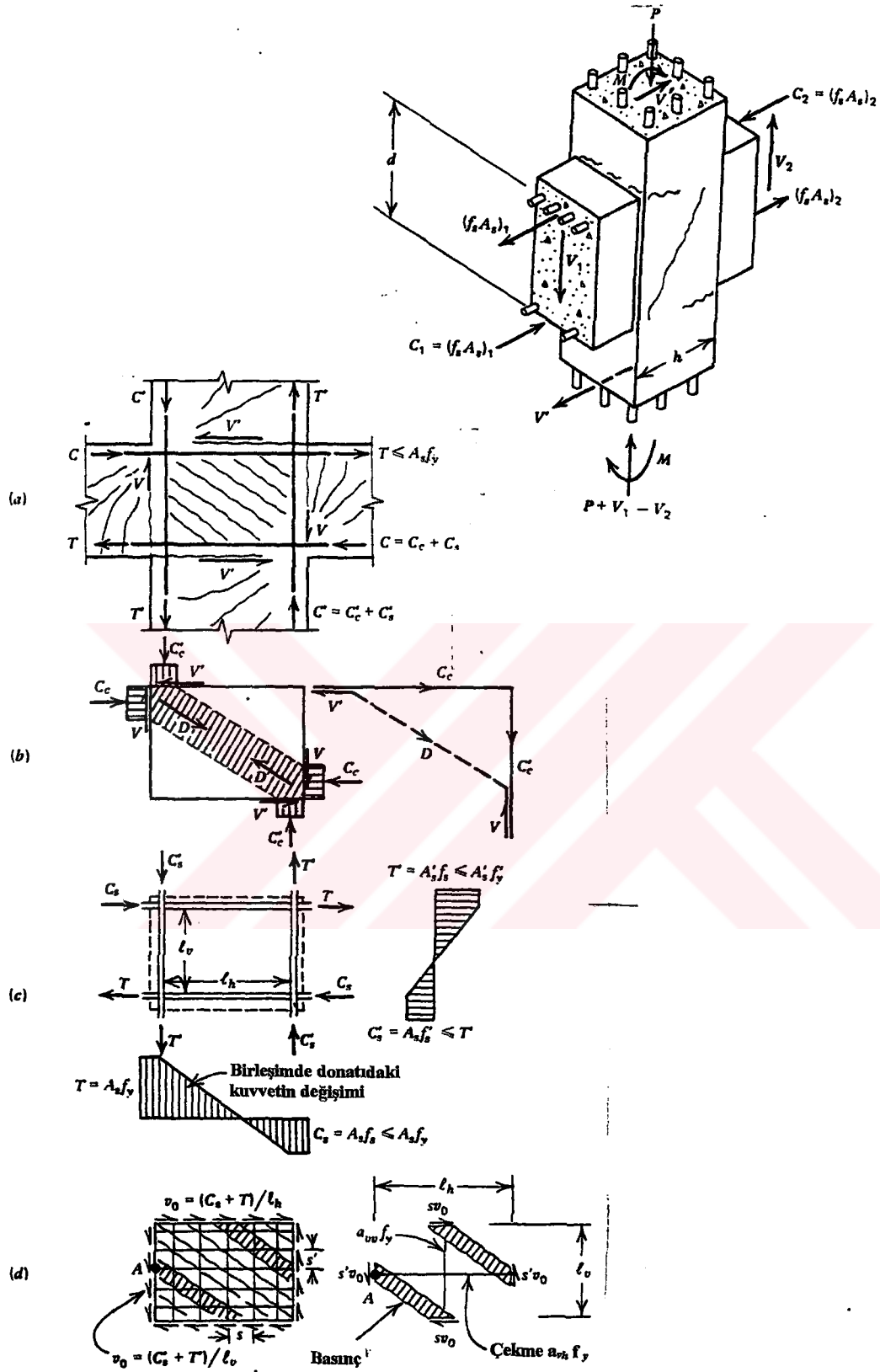
A_{sh} (mm²): Birleşim bölgesinde kiriş st ve alt donatısı arasında kolona konulacak toplam yatay kayma donatısı alanı,

f_y (Mpa): Kayma donatısı akma dayanımı,

b_j (mm): Birleşim genişliği

h_c (mm):Kolon yüksekliği

Park ve Paulay [13] tarafından yapılan çalışmada, kiriş-kolon birleşim bölgelerine etkiyen iç kuvvet durumları şekil-1.2'de verilmiş olup, iç kuvvet dengelerinin sağlanması neticesinde, birleşime etkiyen kolon ve kiriş kritik kesitlerindeki kesme kuvvetlerinin birleşimde oluşan diyagonal beton basınç gerilmesi dağılımı ile, birleşim bölgesinden geçen kolon ve kiriş boyuna donatılarındaki bağ (aderans) kuvvetlerinin güvenle aktarılması için gerekli olan düşey ve yatay etriye donatısı kesit alanı;



Şekil-1.2 İç kolon-kiriş birleşimlerinin idealleştirilmiş davranışı a) iç etkiler ve çatlaklar, b) basınç mekanizması ile kayma transferi, c) sadece donatıdaki kuvvetler, d) truss(kafes) mekanizması

$$a_{vh} = \frac{(C_c + T) \times s'}{l_v \times f_y} \quad (1.5)$$

$$a_{vv} = \frac{(C'_s + T') \times s}{l_h \times f_y} \quad (1.6)$$

Diyagonal beton basınç gerilmesi dağılımıyla taşınan birleşim kayma gerilmesi,

$$v_c = \frac{(C_c - V')}{b \times d} \quad (1.7)$$

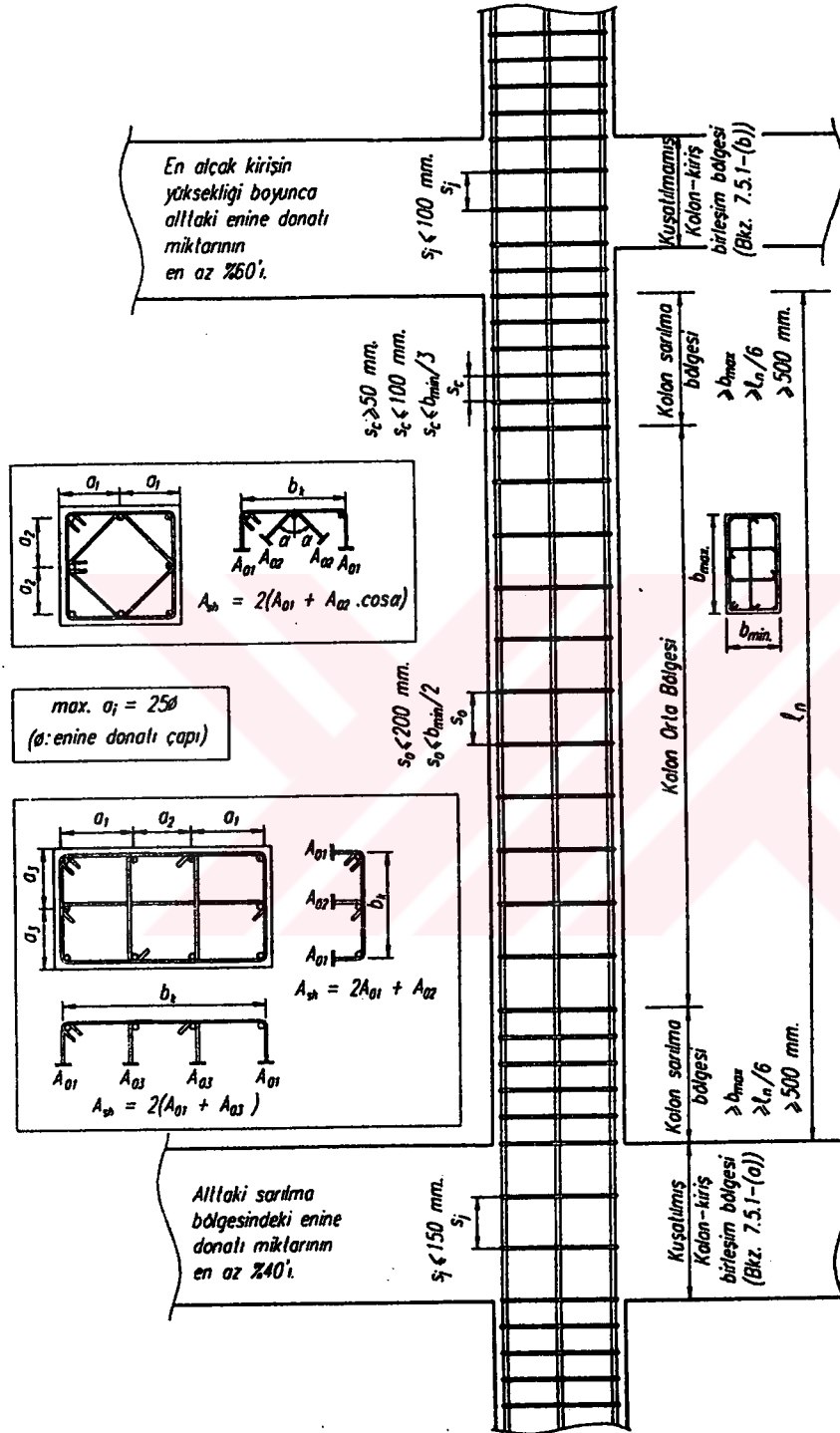
olarak verilmiştir.

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin tasarım ve donatı detayı için, 1998 yılında yürürlüğe giren Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (A.B.Y.Y.H.Y.)[14] ile ACI 318-89 [8] koşulları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

A.B.Y.Y.H.Y. 1998'e göre kolon-kiriş birleşim bölgeleri iki sınıfa ayrılmıştır. Birincisi kirişlerin kolona dört taraftan birleşmesi ve her bir kirişin genişliğinin birleştiği kolon genişliğinin 3/4 'ünden daha az olmaması durumunda, kolon-kiriş birleşimi kuşatılmış birleşim olarak tanımlanmıştır. İkincisi ise bu tanımlamaya uymayan tüm birleşimler kuşatılmamış birleşim olarak tanımlanmıştır. Birleşim bölgelerinin kesme güvenliği için, göz önüne alınan deprem doğrultusundaki kesme kuvveti,

$$V_e = 1.25 \times f_{yk} \times (A_{s1} + A_{s2}) - V_{kol} \quad (1.8)$$

olarak verilmiştir. Ancak bu kesme kuvvetinin aşağıdaki sınırları aşmaması gerektiği belirtilmiş olup, bu sınırların aşılması durumunda kolon veya kiriş boyutları büyütülerek deprem hesabının tekrarlanması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil-1.3 Kolon Sarılma Bölgeleri

- Kuşatılmış birleşimlerde : $V_e \leq 0.50 \times b_j \times h \times f_{cd}$
- Kuşatılmamış birleşimlerde: $V_e \leq 0.30 \times b_j \times h \times f_{cd}$

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kullanılacak minimum enine donatı miktarı için ;

- Kuşatılmış birleşimlerde alttaki kolonun sarılma bölgesi için bulunan enine donatının en az %40'ı birleşim bölgesi boyunca kullanılması, etriye çapının 8mm den az olmaması ve enine donatı aralığının 150mm yi aşmaması gerektiği belirtilmiştir.
- Kuşatılmamış birleşimlerde alttaki kolonun sarılma bölgesi için bulunan enine donatının en az %60'ı birleşim bölgesi boyunca kullanılması, etriye çapının 8mm den az olmaması ve enine donatı aralığının 100mm yi aşmaması gerektiği belirtilmiştir.

Süneklik düzeyi yüksek kolonlar için, kolonun alt ve üst ucunda özel sarılma bölgeleri oluşturulması gerektiği belirtilmiş olup, gerekli koşullar Şekil 1.3'de verilmiştir. Sarılma bölgesinde kullanılması gerekli enine donatı miktarı etriyeli kolonlarda hesap eksenel basınç kuvveti $N_d > 0.20 \times A_c \times f_{ck}$ olması durumunda

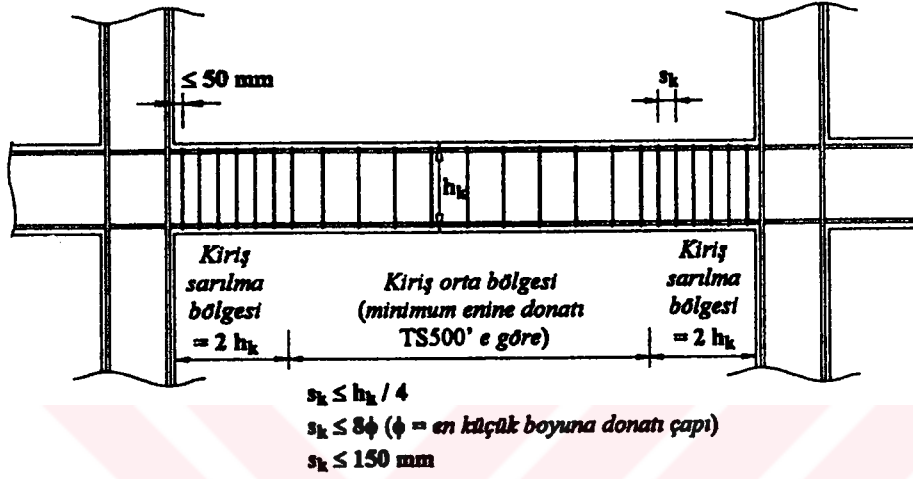
$$A_{sh} \geq 0.30 \times s \times b_k \times \left[\left(\frac{A_c}{A_{ck}} \right) - 1 \right] \times \left(\frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \right) \quad (1.9)$$

$$A_{sh} \geq 0.075 \times s \times b_k \times \left(\frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \right) \quad (1.10)$$

$N_d \leq 0.20 \times A_c \times f_{ck}$ olması durumunda kolon sarılma bölgesinde kullanılması gerekli minimum enine donatı miktarının yukarıdaki Denklem 1.9 ve 1.10 ile bulunan enine donatıların en az 2/3'ü olması gerektiği belirtilmiştir.

Birleşimi oluşturan kirişlerde sarılma bölgesi, kolon yüzünden itibaren kiriş yüksekliğinin iki katı kadar bir bölge olup, sarılma bölgesinde ilk etriyenin kolon yüzünden en çok 50mm uzaklıkta olup, enine donatı aralıkları kiriş yüksekliğinin

¼'ünü, en küçük boyuna donatı çapının 8 katını ve 150mm yi aşmaması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil-1.4: Kiriş Sarılma Bölgesi

ACI Betonarme Yapılar Standardı (ACI 318-89) koşulları, kolon genişliğinin, kolon-kiriş birleşiminde birleşen kirişlerin genişliğine eşit veya daha büyük olduğu durumlar için geçerlidir. Söz konusu şartnameye göre kiriş-kolon birleşim bölgelerinin tasarımında kullanılacak kuvvetler statik veya dinamik çözümleme sonucu elde edilen kuvvetler olmayıp, ilgili kesitlerin taşıma güçlerine ulaşmaları durumunda ortaya çıkacak kuvvetlerdir. Bu yönetmelikte de “kuvvetli kolon-zayıf kiriş” tasarımı esas alınmıştır.

- Birleşimi oluşturan kolonların taşıma gücü momentleri toplamının kiriş taşıma gücü momentleri toplamına oranının 1.2’den küçük olmamalıdır.
- Birleşimi oluşturan kolonun en küçük boyutu birleşimden geçen kiriş donatısı çapının yirmi katından az olmamalıdır.

1. 3. ÇELİK TEL TAKVİYELİ BETON

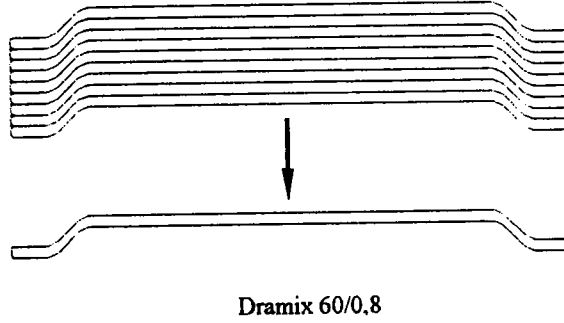
Betonun çekme dayanımının basınç dayanımına göre oldukça küçük ve gevrek bir malzeme olması nedeniyle kiriş, kolon ve kiriş-kolon birleşim bölgeleri, döşeme plağı gibi yapı elemanlarında çekme gerilmelerinin hakim olduğu bölgelerde betonun yetersiz kaldığı, bu bölgelerdeki çekme gerilmelerini alabilecek çelik çubukların kullanıldığı bilinmektedir. Beton açısından bu olumsuz durumun etkisini azaltmak veya gidermek için beton karışıma ince, küçük boyutlarda çelik teller veya polimer vb. esaslı lifler ilave edilmesi düşünülmüştür. Beton karışımına ilave edilen liflerin etkisiyle, betonun çekme dayanımını ve sünekliğini artırmak, çelik çubuklarla kompozit çalışmayı sağlayarak boyuna ve enine donatı miktarlarını azaltmak, dolayısıyla daha uzun ömürlü ve daha ekonomik yapı elemanları tasarlamak amaçlanmıştır. Bu konudaki çalışmaların ve gelişmelerin tarihçesi aşağıda kısaca özetlenmiştir:

Betonun düşük çekme dayanımı ve gevrekliğini iyileştirmek amacıyla beton karışımlarda ilk zamanlar fiber (lif) denilen çelik tel parçalarının kullanılması 1960'lı yılların başlarında gerçekleştirilmiştir[15]. İlk zamanlarda doğrusal çelik teller kullanılmış olup, karşılaşılan ana problem karışımın ve işlenebilirliğin zorluğu ile biraz yüksek hacim oranlarındaki beton karışımında topaklanmalar olmuştur.

Ramarkishnan ve arkadaşları[16] süneklik ve tokluk açısından aynı sonuçları veren uçları kıvrılmış olan çelik tellerin doğrusal tellere göre çok daha az hacim oranlarında kullanılabileceğini, tellerin birbiriyle suda çözülebilen yapıştırıcı ile yapıştırılmasıyla karışımdaki topaklanma sorununun giderilebildiğini, süper akışkanlaştırıcı özellikli katkıları ile karışımdaki su miktarının azalmasına karşılık betonun işlenebilirliğinin iyileştirilebildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da bu teller kullanılmış olup Şekil-1.5'de gösterilmiştir.

Polimerik lif (fiber) lerin kullanımı 1965'de düşünülmüş olmasına rağmen 1970'lerin ikinci yarısında büyük oranda kullanılmaya başlanmış olup, çok düşük hacim oranlarında (yaklaşık %0.1) kullanılması ile rötire çatlaklarını önlediği, daha yüksek

hacim oranlarında ise sertleşmiş betonun özelliklerinde iyileşmeler sağlayabileceği ifade edilmiştir[17].



Şekil-1.5 Çalışmada kullanılan çelik teller

Beton karışıma ilave edilen bu liflerden başka diğer karbon liflerine göre daha düşük maliyetli petrol ziftinden yapılmış karbon lifler ile selüloz, kokonat (büyük hindistan cevizi), bambu, sisal (urgen yapımında kullanılan sağlam liflere sahip) gibi bitkiler de doğal lifler olarak betonun özelliklerini iyileştirmede kullanılabileceği öngörülmüştür[18].

Liflerle güçlendirilmiş betonların özelliklerindeki iyileşmeleri yapı elemanlarının tasarımında kullanmak üzere deney sonuçlarına bağlı olarak birçok ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Ancak liflerin beton içinde rasgele dağılımı, geometrisi, değişkenliği nedeniyle henüz tasarım için geçerli bir hesap modeli elde edilememiş olup, literatürde sunulan modeller sürekli revize edilmekte ve geliştirilmektedir.

Beton karışıma ince ve küçük boyutlardaki çelik tellerin ilave edilmesiyle oluşturulan ve çelik tel takviyeli beton (Ç.T.T.B.) olarak tanımlanan betonun, bilinen betona göre mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu, dolayısıyla bu malzemenin betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında kullanılması sonucunda, elemanın davranışına sağlayabileceği yararlar R. J. Craig [19] tarafından aşağıda belirtilmiştir. Buna göre;

- Elemanın moment taşıma kapasitesini artırmaktadır.

- Elemanın sünekliği artmaktadır.
- Betonun çekme dayanımı artmaktadır.
- Kirişlerin kayma donatısını azaltmakta ve kayma dayanımını artırmaktadır.
- Çatlak kontrolünü iyileştirmektedir.
- Elemanın rijitliğini artırmaktadır.
- Nihai göçme yükünü geçen kirişin yapısal bütünlüğünü korumaktadır.
- Burulma etkisinde çatlama momenti ve dönme kapasitesini artırmaktadır.

Bunlara ilaveten beton karışıma ilave edilen çelik tellerle tekrarlı yüklemeler altındaki betonarme kirişlerin yorulma dayanımının arttığı [20] ve nihai zımbalama dayanımının arttığı, döşeme-kolon birleşimlerinde sünek kesme göçmesinin olduğu da [21] ifade edilmiştir.

Çalışmanın amacını oluşturan kiriş-kolon birleşim bölgelerinin davranışına hakim olan iki önemli etki, eğilme ve kesme kuvveti olduğu bilinmektedir. Bu etkilere karşı çelik tel takviyeli betonların (Ç.T.T.B.) kullanılmasının sağlayabileceği olumlu katkılar hakkında yapılan çalışmaların sonuçları iki ayrı bölüm halinde aşağıda sunulmuştur. Bunlara bağlı olarak deprem vb. yüklemeler durumunda Ç.T.T.B. kullanılan kiriş-kolon birleşim bölgelerinin davranışları ile ilgili yapılan araştırmalar da diğer bölümde verilmiştir.

1. 3. 1 Eğilme Etkisinde Çelik Tel Takviyeli Betonarme Kirişlerin Davranışı ve Hesap Modelleri

Tzu C. Ve arkadaşlarının [22] yaptıkları çalışmada, Ç.T.T.B. kullanılan betonarme kirişin eğilme davranışını tahmin edebilmek üzere Ezeldin ve Balaguru tarafından geliştirilmiş ve aşağıdaki çelik tel takviyeli betona ait basınç gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisini ve elastisite modülünü veren ampirik bağıntılar kullanılarak bir hesap algoritması sunulmuştur. Çelik tel takviyeli betonların eğilme davranışında önemli bir özellik olarak literatürde belirtildiği gibi, beton kesitte, çekme etkisinden dolayı oluşan çatlağın bulunduğu bölgeyi çelik teller köprü gibi geçerek ve bu bölgedeki gerilmeyi çatlağın her iki tarafına aktararak kesitin çekme dayanımını artırması özelliği ise bu hesap modelinde dikkate alınmamıştır.

$$\frac{f}{f'_c} = \frac{\beta \frac{\epsilon}{\epsilon_0}}{\left[\beta - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^\beta \right]} \quad (1.11)$$

$$\beta = 1.093 + 0.7132 (R.I.)^{-0.926}$$

$$E_{cf} = E_c + 0.941 \times 10^6 \times (R.I.)$$

Burada, f , ϵ ; eğri üzerindeki gerilme ve şekil değiştirme değerleri, f'_c ; betonun basınç dayanımı, β ; malzeme parametresi, ϵ_0 ; pik basınç gerilmesine karşı gelen şekil değiştirme, $R.I. = \omega_f \times l_f/d_f$; uçları kıvrılmış çelik tellerin ağırlık oranına göre güçlendirme indeksi, ω_f ; betona göre çelik tellerin ağırlık oranı, l_f/d_f ; çelik telin uzunluk/çap oranı, E_{cf} ; Ç.T.T.B. nun elastisite modülü, E_c ; normal betonun elastisite modülü dür.

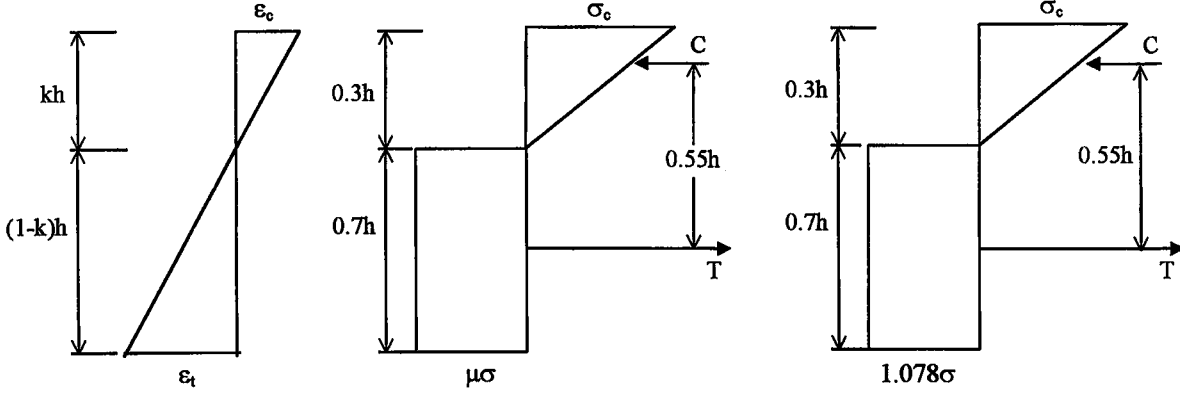
Çelik tel takviyeli betonların önemli özelliklerinden birisi de tokluk olup Ç.T.T.B. kirişlerin yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın en büyük yük ile en büyük sehimin çarpımına oranı olarak [23]'de tanımlanmıştır. Bu oran [24] , [25] ,

$$\begin{aligned} \text{Eğer } R.I. < 40 & \quad \text{ise} \quad TR = 0.5 \\ \text{Eğer } R.I. \geq 40 & \quad \text{ise} \quad TR = 0.005 \times R.I. + 0.3 \end{aligned}$$

olarak verilmiştir.

Dwarakanath, H.V., Nagaraj, T.S. tarafından yapılan [26] çalışmada, çelik tel takviyeli betonların basınç, direkt çekme ve eğilme deneyleri ile literatürdeki eğilme deney sonuçlarını ve hesap modellerini dikkate alarak farklı bir hesap modeli önerilmiştir. Ayrıca yapmış oldukları bu çalışmada, eğilmede oluşan çekme dayanımının direkt çekme dayanımından yaklaşık 1.078 kat daha büyük olduğu, tarafsız eksen derinliğinin, kesit yüksekliğinin yaklaşık 0.30'u kadar olduğu

belirtilmiştir. Buna göre Şekil-1.6'da önerilen hesap modelinde beton basınç bloğunun üçgen olmasının yanı sıra çekme bölgesinde dikdörtgen çekme gerilmesi bloğu da dikkate alınmıştır.



Şekil-1.6: [26] da önerilen eğilme hesap modeli

Bu hesap modelinde, beton karışıma ilave edilen telin miktarı (hacimce oranı, v_f) ile görünüş oranı (uzunluk/çap) arasındaki karşılıklı etkileşim parametrelerinin etkisi birlikte gözönüne alınarak kompozitin direkt çekme dayanımı belirlendiğinden, bu modelin daha basit ve diğer modellere göre deney sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Craig tarafından yapılan [27] çalışmada, Ç.T.T.B. kullanılan betonarme kirişlerin nominal eğilme dayanımı, ACI standardına benzer olarak Denklem 1.12 ile verilmiştir.

$$M_n = A_s \times f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t \times b \left(h - \frac{a}{\beta_1} \right) \left(\frac{h}{2} + \frac{a}{2 \times \beta_1} - \frac{a}{2} \right) \quad (1.12)$$

$$a = \frac{\frac{A_s \times f_y}{b} + \sigma_t \times h}{0.85 \times f'_c + \left(\frac{\sigma_t}{\beta_1} \right)} \quad (1.13)$$

$$\sigma_t = 1.12 \times F_{be} \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \times \rho_f = 1.12 \times F_{be} (R.I.) \quad (1.14)$$

Sünek göçmeyi sağlamak ve aşırı çatlamayı önlemek için kirişte bulunacak çekme donatısının alanı, A_s , için aşağıdaki kriterler verilmiştir.

- Betonun aşırı çatlamasını önlemek için ACI 318-89 da verilen betonarme kesitin çatlama momenti ile çelik tel takviyeli kesitin nominal eğilme dayanımını veren Denklem 1.12' ye eşitleyerek, kesitte bulunması gerekli en az çekme donatısı miktarı Denklem 1.15 ile verilmiştir.

$$A_{smin} \geq \left[\frac{2.75}{f_y} \right] \times b \times d \quad (1.15)$$

- Kesitin sünek göçmesini sağlamak için kesite konulması gereken maksimum donatı miktarı, dengeli kesit donatısının 0.75 inden daha az boyuna çekme donatısı konulması koşulu ile Denklem 1.17'de verilmiştir.

$$A_{smax} \leq \left[0.75 \left(\frac{0.85 \times f'_c \times \beta_1 + \sigma_t}{f_y} \right) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_y} - \frac{\sigma_t \times h}{f_y \times d} \right] \times b \times d \quad (1.17)$$

Yukarıdaki ifadelerde, M_n ; kesitin nominal eğilme dayanımı, A_s ; kesitte bulunan toplam çekme donatısı alanı, f_y ; donatının akma dayanımı, a ; dikdörtgen gerilme bloğunun yüksekliği, σ_t ; çelik tel takviyeli betonun çekme gerilmesi, b ; kiriş genişliği, d ; faydalı yükseklik, h ; kiriş yüksekliği, β_1 ; beton basınç dayanımına bağlı olan 0.65 ile 0.85 arasında bir katsayı, f'_c ; beton basınç dayanımı, ϵ_c ; en büyük beton basınç gerilmesindeki şekil değiştirme, ϵ_y ; donatı akma şekil değiştirmesi, F_{be} ; çelik tellerin bağ (aderans) etkisi, l_f ; çelik tel uzunluğu, d_f ; çelik tel çapı, ρ_f ; çelik tellerin hacimce yüzdeleri olarak verilmiştir.

Lim, Paramasivam ve Lee [28], çelik tel takviyeli betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerine yapmış oldukları çalışmada, önceki araştırma sonuçlarına benzer olarak betona çelik teller ilave edilmesi ile kirişlerin hem nihai eğilme dayanımının hem de nihai yükteki sünekliğinin artırılabilmesini belirtmişlerdir. Ayrıca, basınç gerilmesi-şekil değiştirme diyagramının idealleştirilmesinde, normal betonun çatlağın başladığı gerilme olarak en büyük gerilmenin 0.85 i alınırken çelik tel takviyeli betonda bu değerin 0.90 olarak alınabileceği de belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda çelik tellerin beton içindeki dağılımlarına göre geliştirilmiş ampirik ifadelerle bağlı olarak moment-eğrilik ifadeleri verilmiştir. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan farklı bir çalışmada ise, çelik tel takviyeli beton kompozitlerin basınç ve direkt çekme gerilmelerine göre ayrı ayrı elastisite modülleri verilmiştir.

$$E_{cc} = E_{mc} \times V_m + \eta_l \times \eta_0 \times E_f \times V_f \quad (1.18)$$

$$E_{ct} = E_{mt} \times V_m + \eta_l \times \eta_0 \times E_f \times V_f \quad (1.19)$$

Burada, E_{cc} ve E_{ct} ; Çelik tel takviyeli beton kompozitin sırasıyla basınç ve çekme elastisite modülü, E_{mc} ve E_{mt} ; betonun sırasıyla basınçta ve çekmede elastisite modülü, E_f ; Çelik telin elastisite modülü, V_m ; beton hacim oranı, V_f ; çelik tellerin hacimsel oranı,

$$\eta_l = 0.5 \quad l_f = l_c$$

$$\eta_l = 1 - \frac{l_c}{2 \times l_f} \quad l_f \geq l_c$$

l_f ; çelik telin uzunluğu, l_c ; aderans için gerekli uzunluk

$$\eta_0 = \frac{\int_0^{\bar{\rho}} \int_0^{\bar{\theta}} \cos^4 \theta \cos^4 \rho d\theta d\rho}{\int_0^{\bar{\rho}} \int_0^{\bar{\theta}} d\theta d\rho} \quad (1.20)$$

Burada, η_0 ; çelik tellerin beton içindeki durumunu ve yönünü veren katsayı olup, kesit yüksekliği ve genişliğinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$\bar{\theta} = \sin^{-1}\left(\frac{h}{l_f}\right) \leq \pi/2 \quad \text{ve} \quad \bar{\rho} = \sin^{-1}\left(\frac{b}{l_f}\right) \leq \pi/2$$

1. 3. 2 Çelik Tel Takviyeli Betonarme Kirişlerin Kayma Davranışı

Bu konuda yapılmış olan araştırmalarda, beton karışıma çelik teller ilave edilerek Ç.T.T.B.'nin kullanıldığı betonarme kirişin kayma dayanımındaki artışla kayma donatısı miktarında ve göçme modunda olabilecek değişiklikler incelenmiştir. Kayma dayanımındaki bu artışın nedenleri,

- beton karışımı içinde rasgele dağılmış olan çelik teller arasındaki küçük aralıklar,
 - betonda ilk çatlağı oluşturan yükün ve nihai çekme dayanımının artışı,
 - kayma-sürtünme dayanımının artışı,
- olarak ifade edilmiştir[21].

Batson, Jenkins ve Spatney tarafından yapılan [29] araştırmada kayma donatılı kirişlerde betona hacimce %0.44 oranında çelik tel ilave edilerek, kirişin dört noktadan yüklenmesi durumunda sünek eğilme göçmesinin elde edilebildiği belirtilmiştir.

R.N.Swamy ve H.M. Bahia [30], yaptıkları çalışmada, kirişlerde çelik tel takviyeli beton kullanılmasıyla yüklemenin ileri aşamasında pim bölgesinde oluşabilecek çatlakların genişlemesi ve yayılması önemli ölçüde kontrol edilebildiği için sünek bir göçmenin oluşmasına da neden olduğu ifade edilmiştir. Aynı araştırmacıların [31] yapmış oldukları diğer bir çalışmada, beton içindeki çelik tel miktarı arttıkça kayma şekil değiştirmelerinin azaldığı, çelik tellerin kayma donatısı olarak etkili olduğu, nihai kayma dayanımının eğilme dayanımı ile lineer arttığı, sadece çekme bölgesinde Ç.T.T.B. kullanmanın ise kayma göçmesini önlemekte yeterli olmadığı, çelik tellerin kayma donatısı olarak etriyelerle kompozit olarak etkili olabildiği belirtilmiştir.

E.I. Niema tarafından [32] yapılan farklı bir çalışmada ise, beton karışımına ilave edilen çelik tellerin (fiber) hacim oranları ile görünüş oranı olarak ifade edilebilen, telin boyunun telin çapına oranının farklı olması durumlarında kesme etkisi altındaki Ç.T.T.B. kullanılan betonarme kirişlerin kayma davranışı incelenmiştir. Bu çalışmanın neticesi olarak, kiriş kayma davranışının tel hacim oranlarına bağlı olarak önemli ölçüde iyileştiği, görünüş oranındaki artışla kiriş ilk çatlak dayanımının arttığı, görünüş oranında ve tel hacim oranındaki artışlarla kiriş sünekliğinin arttığı belirtilmiştir.

Çelik tellerin beton karışıma ilave edilmesiyle Ç.T.T.B nun kullanıldığı betonarme kirişlerin kayma dayanımının ve sünekliğinin arttığı hususu yukarıda belirtilen çalışmaların ortak sonucu olarak sunulmuştur.

A.K. Sharma tarafından yapılan [33] çalışmada, benzer sonuçlara ilaveten etriye ile birlikte beton karışımında çelik tellerin bulunması durumunda kirişlerin yaklaşık kayma dayanımını veren aşağıdaki ampirik bağıntılar verilmiştir.

$$v_{nf} = v_{cf} + v_s \quad (1.21)$$

Burada, v_{nf} ;çelik tel takviyeli beton kullanılmış betonarme kesitin nominal kayma gerilmesi, v_{cf} ;çelik telli betonun kayma gerilmesi, v_s ; etriye donatısının dolay kayma gerilmesi dir

. ACI 318-89'a göre etriye donatısının kayma dayanımı ,

$$V_s = A_s \times f_y \times \frac{d}{s} \quad (1.22)$$

Ç.T.T.B.'nun kayma gerilmesi,

$$V_{cf} = k \times f'_t \times \left(\frac{d}{a'} \right)^{0.25} \quad (1.23)$$

olarak verilmiştir. Burada d ; kiriş faydalı yüksekliği; a' ; kesme açıklığı; f_t ;silindir (150mm×300mm) numunelerin indirekt (silindir yarma deneyi) çekme deneylerinden elde edilen beton çekme dayanımı; k , 2/3 olarak alınan bir katsayı olup P.J.F. Wright tarafından [34] önerilmiştir.

Narayanan ve Darwish [35] tarafından yapılan çalışmada Ç.T.T.B.'nun kullanıldığı betonarme kirişlerin kayma dayanımını, çelik tel takviyeli betonun taşıdığı kesme kuvveti ile enine donatının taşıdığı kesme kuvvetleri toplamı olarak verilmiştir. Buna göre;

Çelik tel takviyeli betonun taşıdığı kesme kuvveti,

$$V_{cf} = \left[e \times \left(0.24 \times f'_t + 0.80 \times \rho \times \frac{d}{a'} \right) + 250 \times F \right] \times b \times d \quad (1.24)$$

olup, burada d/a' ; kiriş faydalı yüksekliğinin kesme açıklığına oranı, F ; çelik tel faktörü $RI \cdot d$ olup, uçları kıvrılmış çelik teller için $d=1.0$, düz yuvarlak teller için $d=0.5$, kıvrımlı teller için $d= 0.75$ alınır.

$$\frac{d}{a} > 2.8 \xrightarrow{ise} e = 1.0$$

$$\frac{d}{a} \leq 2.8 \xrightarrow{ise} e = 2.8 \times \frac{d}{a}$$

enine donatının taşıdığı kesme kuvveti

$$V_s = \frac{A_w \times f_y \times d}{s} \quad (1.25)$$

olmak üzere, kirişin kayma dayanımı

$$V_n = V_{cf} + V_s \quad (1.26)$$

olarak verilmiştir.

K.H. Tan, K. Murugappan ve P. Paramasivam [36] tarafından yapılan çalışmada, Ç.T.T.B. kullanılan betonarme kirişlerin kayma davranışı üzerine yapılmış olan farklı bir araştırmanın sonucu olarak özellikle kiriş gövdesinde kayma etkisi ile diyagonal çatlakların oluşmasından sonra, boyuna donatının şekil değiştirmesi normal betonarme kirişin boyuna donatısıyla karşılaştırılınca Ç.T.T.B. kullanılan kirişlerde daha az olduğu, kiriş gövdesinde alınan şekil değiştirme ölçümlerinden kiriş kayma şekil değiştirmeleri açısından bir değerlendirme yapıldığında Ç.T.T.B. kirişlerin kayma şekil değiştirmelerinin normal betonarme kirişe göre daha yavaş değiştiği ve daha büyük kesme kuvveti taşıdığı, kayma dayanımındaki bu değişimin beton karışımındaki ince tellerin miktarı ile arttığı belirtilmiştir.

1. 3. 3 Kolon-Kiriş Birleşim Bölgelerinde Çelik Tel Takviyeli Betonların Etkisi

Çelik tel takviyeli betonların kiriş, plak, kolon gibi yapı elemanlarında kullanılması durumunda bu elemanların özellikle eğilme ve kayma dayanımlarının arttığı, göçmede daha sünek bir davranış gösterdiği ve göçme anında elemanın yapısal bütünlüğünü koruyabildiği, betonun çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığı, boyuna donatılar ve enine donatılarla kompozit olarak birlikte etkili çalışabildiği, bunların sonucunda elemanların kesit boyutlarında ve donatılarında azalmaların da söz konusu olabildiği yukarıdaki araştırmaların ortak sonuçları olarak özetlenebilir. Süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçevelerin elde edilebilmesi için ülkemizin deprem yönetmeliği koşullarında ve diğer ülkelerin benzer yönetmelik koşullarında kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki betonun iyi sarılması için bu bölgelerde çok sık enine donatının yerleştirilmesi gerektiği daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu sık enine donatılara ilaveten bu bölgelerin özellikle deprem etkilerinde aşırı zorlanmaları nedeniyle büyük miktarda boyuna donatıların da yerleştirilmesi gerekeceğinden kolon-kiriş birleşim bölgeleri donatıların çok yoğun olduğu bölgeler olarak teşkil edilmektedir. Çelik tel takviyeli beton kullanılması durumunda kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki donatı yoğunluğunun azaltılabilmesinin sağlanması ile beraber birleşimin, moment ve kesme kuvveti dayanımlarının, süneklik oranının artırılabilmesi, deprem gibi tekrarlı yükler altında birleşimin enerji yutma özelliğinin iyileştirilebildiği hususları aşağıda kısaca özetlenmiş olan araştırmaların ortak amaçlarını oluşturmaktadır.

Jindal, R.,L. ve Hasan A.K. [37] tarafından Ç.T.T.B. kullanılan betonarme kolon-kiriş birleşimlerinin davranışı üzerine yapılan deneysel araştırmada, enine donatı düzeni açısından üç ayrı özelliğe sahip iki açıklıklı numunelerden ikişer adet üretilmiştir. Bu numunelerden Tip A da, BÇ I kalitesinde kolonda $\phi 6/120$, kirişlerde $\phi 6/200$ etriyeler kullanılmış, fakat birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı kullanılmamıştır. Tip B de enine donatı olarak, BÇ III kalitesinde kolonda $\phi 3/120$, kirişte $\phi 3/500$ enine donatı ile beraber kolon ve kiriş uzunluğunca beton karışımı ağırlığının %2 si kadar 25/0.25mm (l_f/ϕ) boyutuna, 630 Mpa akma dayanımına sahip düz çelik tellerin bulunduğu Ç.T.T.B. kullanılmıştır. Tip C de ise, birleşim bölgesi ve bu bölgenin civarında kolon ve kirişte 300mm lik bölgede aynı özellikte Ç.T.T.B. kullanılmış, diğer bölgelerde normal beton kullanılmıştır. Ç.T.T.B. kullanılan bölümde kirişte enine donatı konulmamış, kolonda ise birleşim bölgesi dışında $\phi 3/120$ enine donatı kullanılmıştır. Kolonda sabit 180 kN eksenel basınç kuvveti, kirişlerde ise kolon ekseninden itibaren 575mm mesafede tek yönlü artan tekrarlı yük uygulanmıştır. Numunelerin bu yükleme altındaki yük-sehim, moment-dönme eğrilerinin karşılaştırılmasıyla, Ç.T.T.B. kullanılan betonarme kolon-kiriş birleşimlerinin normal beton kullanılan birleşimlere göre daha sünek bir davranış gösterdiği, birleşimin kayma kapasitesinin arttığı, kolon ve kirişin uzunluğu boyunca Ç.T.T.B. kullanılan numunenin diğer numunelerden daha rijit olduğu, sadece birleşim bölgesinde Ç.T.T.B. kullanılan birleşimin ise klasik betonarme birleşimden daha rijit olduğu saptanmıştır.

Craig, Mahadev, Patel, Viteri ve Kertesz [38] yapmış oldukları deneysel çalışmada, kenar kolon-kiriş birleşim bölgesine ait numunelerde, ACI 318-89 yönetmeliğinin gerektirdiği enine donatı miktarından daha az donatı kullanmıştır. Bu numuneler, kolona etkiyen yaklaşık 180 kN sabit eksenel basınç kuvveti ve kolon eksenine göre beş değişik uzaklıklarda kirişe etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında deneye tabi tutulmuştur. Bu yüklemelerin her birine ait donatı detayları aynı olan iki adet numune üretilmiş olup, numunelerden birine, normal beton diğerine, sadece birleşim bölgesinde beton hacminin %1.5 i oranında, 30/0.5mm boyutunda ve yaklaşık 950 Mpa nihai çekme dayanımına sahip uçları kıvrılmış çelik tellerin bulunduğu Ç.T.T.B. dökülmüştür. Bu deneysel çalışmanın sonuçları olarak, sadece kolon-kiriş birleşim bölgesinde Ç.T.T.B.nun kullanıldığı numuneler, normal betonun kullanıldığı

numunelere göre, daha rijit davrandığı, daha büyük kesme kuvveti ve moment taşıma kapasitelerine sahip olduğu, enerji yutma kapasitesinde önemli miktarda artış olduğu ve daha az yapısal hasarların olduğu belirtilmiştir.

Katzensteiner, Mindess, Filiatrout, Nathan ve Banthia [39] yapmış oldukları çalışmada, iki katlı düzlem çerçevelerden biri, Kanada Beton Standardı Can3-A23.3-M84'e göre deprem yüklerine karşı birleşim bölgelerinde etriye sıklaştırması yapılarak oluşturulan sünek paralel iki çerçeve, diğeri ise, birleşim bölgesinde etriye sıklaştırılması yapılmadığı ve buna karşılık sadece bu bölgelerde beton hacminin %0.76 (60kg/m^3) ı kadar Ç.T.T.B. kullanıldığı paralel iki adet çerçevedir. Beton karışıma ilave edilen çelik teller ise, uçları kıvrılmış olup, 30/0.5mm uzunluk/çap oranına ve 1170 Mpa çekme dayanımına sahiptir. Beton silindir basınç dayanımları normal beton için 34.5 Mpa, çelik tel takviyeli beton için 45 Mpa olarak elde edilmiştir. Bu çerçevelerde, birleşim bölgesindeki enine donatı detayı dışında diğer bütün özellikler tamamen aynıdır. İki katlı, paralel iki çerçeve birbiri ile çelik konstrüksiyon yardımıyla rijit şekilde bağlanmış, üzerine düşey yüklere benzeyen ağırlıklar da konularak, sarsma tablasına yerleştirilmiştir. Her iki deney grubuna sekiz adet deprem zemin yer ivmesi-zaman spektrumu kayıtları uygulanmış, deney başlangıcında ve sonunda yapının doğal frekansı, sönümlenme oranı gibi dinamik özellikleri elde edilerek iki deney grubunun deprem öncesi ve sonrası bu özelliklerdeki değişimler karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda, birleşim bölgelerinde Ç.T.T.B. kullanılan çerçeveli yapıda, deprem sonrası ölçülen doğal frekanstaki azalmanın daha az olmasıyla deprem sonrası hasarın ve rijitlik kaybının daha az olduğu , uygulanan deprem etkilerinde yutulan enerji miktarının daha çok olduğu, çelik tellerin etkili bir şekilde betonu bir arada tutmasından dolayı normal betonlu sünek birleşimli çerçevelerin aksine yüklemenin sonunda birleşim bölgesinden beton örtüsünün ayrılmadığı ve bu şekilde yapısal bütünlüğün korunabildiği görülmüştür.

Filiatrault, Ladicani, Massicote tarafından [40] yapılan çalışmada, dört adet birebir gerçek boyutlu kenar kolon-kiriş birleşim numunelerinden birincisi, normal beton kullanılarak ve Kanada deprem yönetmeliğinin birleşim bölgeleri için önerdiği enine donatı koşulları ihmal edilerek, ikinci numune, bu yönetmelik koşullarına uyularak

ve normal beton kullanılarak, üçüncü ve dördüncü numune, donatı düzeni açısından birinci numuneye benzer olup, üçüncü numunede 30/0.5 mm (uzunluk/çap) boyutunda, beton hacminin % 1 i oranında, dördüncü numunede 50/0.5 mm boyutunda, beton hacminin % 1.6 ı oranında uçları kıvrılmış çelik teller ile imal edilmiştir. Birleşim bölgesi ile kirişte kolon yüzünden itibaren yaklaşık 750mm, kolonda, kiriş yüzünden itibaren yaklaşık 500mm'lik bölgede Ç.T.T.B., kullanılmış olup, numunenin geri kalan bölümlerinde normal beton dökülmüştür. Kolona 350 kN sabit basınç kuvveti ile kirişe kolon yüzünden itibaren 2m uzaklıkta iki yönlü tekrarlı yükler uygulanmıştır. Her bir numuneye ait deneyden elde edilen yük-deplasman eğrilerinden; çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı dördüncü numunenin başlangıç tanjant rijitliği diğer numunelerden daha büyük olup, 4 süneklik seviyesinde göçmüştür. Aynı donatı detayına sahip normal beton kullanılan birinci numune 2.5 süneklik seviyesinde göçmüştür. Dış kuvvetlerin yaptığı iş olarak hesaplanmış olan her bir numunenin yuttuğu enerji miktarı açısından karşılaştırma yapıldığı zaman, Kanada deprem yönetmeliğince verilen sünek birleşim koşullarına uygun donatı detayına sahip normal beton kullanılan ikinci numune ile Ç.T.T.B.'nin kullanılmasıyla birleşim bölgesinde ilave sargı donatılarının bulunmadığı dördüncü numune hemen hemen aynı miktarda enerji yutma kapasitesine sahip olmuştur. Böyle bir sonucun ortaya çıkmasında, çatlağın oluştuğu yeri dik olarak kesen çelik tellerin köprü görevi yaparak buradaki gerilmeyi taşıması ve çatlağın iki tarafına aktarmasının etkili olduğu ifade edilmiştir. Bu sonuçlara ilaveten kolon-kiriş birleşimlerinin davranışında beton karışıma ilave edilen çelik tellerin miktarı ve boyutlarının da etkili olduğu görülmüştür.

Filiatrault, Pineau ve Houde [41] yapmış oldukları çalışmada, üç adet gerçek boyutlu iç kolon-kiriş birleşim numunesi üretilmiştir. Birinci numunede, birleşim bölgesinde kolonda iki adet enine donatı bulunmakla beraber kolon ve kirişte herhangi bir enine donatı sıklaştırma bölgesi yapılmamış, ikinci numunede, Kanada deprem yönetmeliği tarafından önerilen sünek yapı davranışı için istenilen donatı detaylarına uyularak birleşim bölgesinde enine donatı sıklaştırılması yapılmıştır. Her iki numunede normal beton kullanılmıştır. Üçüncü numune ile birinci numune, donatı düzeni ve boyutları açısından benzer olmakla beraber kolon-kiriş birleşim bölgesinde ve kirişlerde kolon yüzünden itibaren yaklaşık 800mm, kolonda kiriş yüzünden itibaren

yaklaşık 600mm'lik bölgede, beton hacminin % 1.6 ı oranında, 50/0.5mm boyutunda, uçları kıvrılmış çelik tellerin kullanıldığı Ç.T.T.B. ile üretilmiştir. Kolona 670 kN sabit aksenal basınç kuvveti ile kirişin birisinde kolon yüzünden 1.64 m, diğer kirişe kolon yüzünden 1.96 m uzaklıkta iki yönlü tekrarlı tekil yükler uygulanmıştır. Bu deneylerde her bir süneklik seviyesinde yer değiştirmenin sıfır olduğu tanjant rijitliğindeki azalmalar incelendiği zaman, birinci numunede rijitlik azalmasının çok daha hızlı olduğu, üçüncü numunede ise diğer numunelere göre rijitlik azalmalarının daha yavaş olduğu, beton karışımında kullanılan çelik tellerin sargı donatısı olarak kullanılan ilave enine donatılara seçenek olarak kullanılması durumunda, kolon-kiriş birleşim bölgelerinin kayma dayanımının arttığı, Ç.T.T.B.'nun kullanıldığı birleşim numunesinde, tekrarlı yükler altında dış kuvvetlerin yaptığı iş olarak belirlenmiş olan toplam yutulan enerji miktarının, yönetmelik koşullarına uygun olarak hazırlanmış ikinci numunenin % 85 i kadar olduğu belirlenmiştir.

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde Ç.T.T.B. kullanılması ile ilgili olarak bugüne kadar yapılmış olan çalışmalarda; beton karışımı içerisinde çelik tellerin dağılımının her doğrultuda rastgele dağılmış olmasından, birleşim bölgesinde oluşan iç kuvvetlerin etkileşiminin karmaşıklığından kaynaklanan nedenlerle basit bir hesap modeli önerilememiştir. Beton karışımındaki çelik tellerin dağılımından dolayı bu bölgedeki betonun bir arada tutulması başka bir deyişle iyi sarılmasından kaynaklanan özelliklerle birleşimlerin daha sünek davranış gösterdiği, bunun sonucunda birleşim bölgesinde enine donatı miktarının azaltılabildiği, enerji yutma ve dayanımlarının arttığı, normal betonun kullanıldığı sünek birleşim donatı detaylarındaki uygulama zorluklarının giderildiği sonuçlarına varılmıştır.

2. KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİM DENEYLERİ

2.1. DENEY NUMUNELERİ VE HAZIRLANIŞI

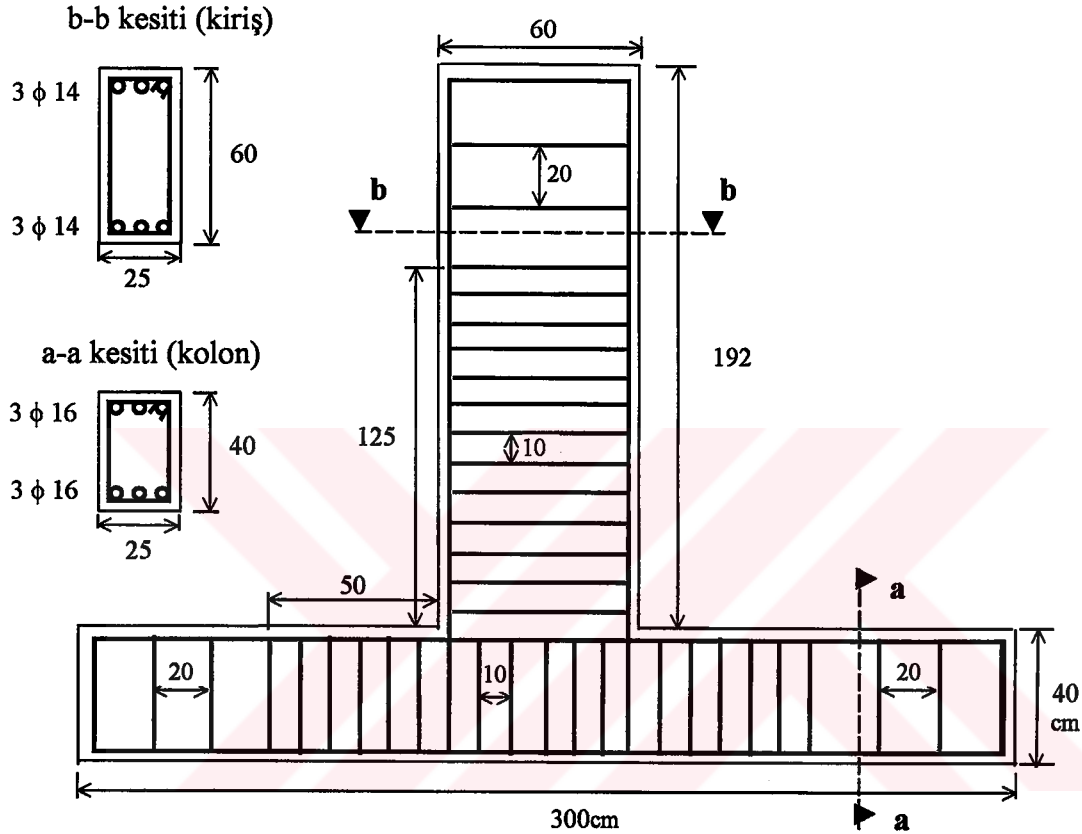
2.1.1 Beton karışımı:

Deneylede karakteristik silindir basınç dayanımı 20Mpa olan BS20 kalitesinde hazır beton kullanılması düşünölmüştür. Çelik tellerin beton karışımında kolay karışması ve betonun iyi yerleştirilmesi için en büyük agrega boyutu 10mm ile 16mm arasında sınırlandırılmıştır. Beton miktarı hacim olarak beton santraline bildirilmiş olup, deneylede düşünölen çelik tel miktarı ise, numunelerde gerekli olan normal beton kullanıldıktan sonra karıştırıcının içinde kalan beton hacminin %1 i oranında transmikserin içine atılmıştır. Bu karışımnda çelik tellerin homojen dağılımının elde edilebilmesi için çok hızlı bir şekilde yaklaşık iki dakika süreyle beton karıştırılmıştır. Bu karışım neticesinde oluşan çelik tel takviyeli betonların çok sıkı kıvamda olduğu, kalıba betonun zorlukla yerleştirildiği de gözlemlenmiştir. Bu zorluğun ise betona ilave edilen katkının süper akışkanlaştırıcı olması ile giderilmesinin mümkün olabildiği son iki numunede görölmüştür. Yapılan çalışmanın pratik ve uygulamaya biraz daha yakın olması için böyle bir beton karışımı ve imalatı amaçlanmıştır. İkişerli gruplar halinde üretilen deney numunelerinde kullanılan normal ve çelik tel takviyeli beton karışımların karakteristik basınç dayanımının tespiti için iki farklı beton karışımından beşer adet 150mm çapında, 300mm yüksekliğinde silindir numunesi örnekleri alınmıştır. Bununla birlikte iki farklı karışıma sahip betonların eğilme etkisi altındaki çekme dayanımının tespiti için de her bir karışımdan ikişer adet 100mm×100mm×500mm boyutlarında prizma numunesi örnekleri alınmıştır. Bu numuneler de deney numuneleri ile aynı koşullarda muhafaza edilmiştir. Buna göre deney numunelerinde kullanılan beton karışımı ise;

Çimento	:	340 kg
Kırma taş-1	:	906 kg

Kum : 349 kg
Su : 197 kg
Katkı : %05 normal akışkanlaştırıcı

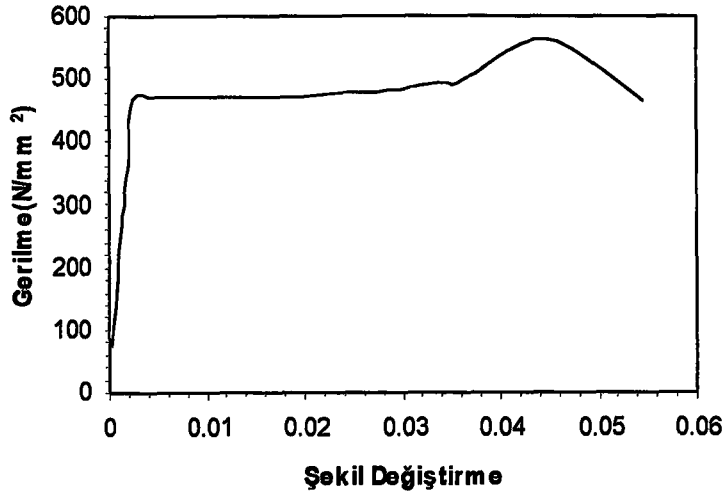
2.2.2. Deney Numuneleri



Şekil-2.1: Deney düzeneğine göre 1.numunenin donatı düzeni ve kesit özellikleri

Şekil-2.1'den görüldüğü gibi tüm numunelerde geçerli olmak üzere kirişlerde ve kolonlarda boyuna donatılar simetrik olarak yerleştirilmiş olup, kiriş üst ve alt donatısı 3Φ14, kolonlarda 3Φ16 boyuna donatıları kullanılmıştır. Numunelerin itme ve çekme şeklindeki iki yönlü yüklemelerinde olabilecek göçmenin herhangi bir yükleme aşamasında boyuna donatı yetersizliğinden oluşmaması için kesitlere simetrik donatılar konulmuştur. Birinci numunede enine donatılar sarılma bölgelerinde 10 cm. aralıkla diğer bölgelerde de 20 cm. aralıkla yerleştirilmiştir. Tüm numunelerde kullanılan boyuna ve enine donatıların çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi Şekil-2.2'de gösterilmiştir. Beton kalıba dökülmeden önce numuneler üzerinde LVDT(Linear Vertical Displacement Transducer) denilen yer

değiştirme ölçerlerle ölçüm alınacak noktalara 10mm çapında çelik borular yerleştirilmiştir.



Şekil-2.2: Deneyde kullanılan donatının çekme gerilmesi-şekil değiştirme diyagramı

Çelik tel takviyeli beton kullanılan numunelerde Şekil-2.3'de gösterildiği gibi iki tip enine donatı düzeni kullanılmış olup, tip-1 ve tip-2 olarak isimlendirilmiştir. Buna göre birleşim bölgesinde enine donatı kullanılmasının katkısını araştırmak için tip-1'de, kiriş ile kolonun birleşim bölgesinin ortasında kolona bir adet etriye konulmuş, tip-2'de ise birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı konulmamıştır. Çelik tel takviyeli beton kullanılan bölgeleri, normal beton kullanılan bölgelerden ayırmak için iki farklı beton bölgesinin arakesitine çelik levhalardan ayraçlar yerleştirilmiştir. Betonlar dökülüp, sıkıştırıldıktan hemen sonra bu ayraçlar çıkartılarak arakesitlerde inşaat derzi oluşmaması için bu bölgelere tekrar vibratör tutulup, betonlar master veya mala ile düzeltilmiştir.

Numune-1: “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” koşullarına uygun olarak süneklik düzeyi yüksek sistemlerin kolon-kiriş birleşimleri için hazırlanmış olan bu numunenin donatı düzeni Şekil-2.1'de gösterilmiştir. Buna göre kolonlar ve kirişin sarılma bölgelerinde etriye aralığı sıklaştırılmış olup, birleşim bölgesinde kolonda da sarılma bölgesindeki etriye aralığı devam ettirilmiştir. Numunenin tamamında normal beton karışımı kullanılmış olup, beton vibratörle yerleştirilmiştir.

Numune-2: Beton karışımı ile kiriş ve kolon boyuna donatılarının birinci numune ile aynı olmasıyla beraber kirişte, kolon yüzünden itibaren $2h_{kiriş}$, kolonlarda kiriş yüzünden $2b_{kolon}$ kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton kullanılmıştır ve bu bölgede etriye aralığında şartnamenin önerdiği sıklaştırma yapılmamıştır. Bu bölgeye çelik tel takviyeli betonlar dökülmüş olup, donatı düzeni tip-1'e uygun olarak imal edilmiştir.

Numune-3: Bu numunenin donatı düzeni tip-2'e uygun olup, çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı bölge ikinci numune ile aynı olmakla beraber bu numune, ikinci numuneden farklı zamanda imal edilmiştir. Birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı bulunmaması durumunda beton karışımındaki çelik tellerin enine donatının yerini alıp alamayacağının araştırılması amacıyla bu numune imal edilmiştir.

Numune-4: Bu numune, üçüncü numune ile aynı zamanda imal edilmiş ve numunenin her yerinde normal beton kullanılmış olup, kolon-kiriş birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı kullanılmamış, ancak kiriş ve kolonda sarılma bölgelerinde şartnamenin önerdiği ve birinci numuneye benzer etriye sıklaştırılması yapılmıştır. Birleşim bölgesinde kolon enine donatısının aynı aralıkla devam ettirilmesinin işçilik açısından zor olması nedeniyle pratikte şartname koşullarına en yakın uygulama olarak bu numune detayı yapılmaya çalışılmaktadır. Böyle bir kolon-kiriş birleşiminin yapılması ile hem pratik uygulamada sık karşılaşılan birleşim örneğinin deprem etkisine benzeyen iki yönlü tekrarlı yüklemeler altındaki davranışının araştırılması hem de çelik tel takviyeli beton kullanılan tip-2'e sahip numunelerle karşılaştırılması düşünülmüştür.

Numune-5: Bu numunenin donatı düzeni tip-1'e uygun olup, kirişte çelik tel takviyeli beton kullanılan bölge küçültülerek kolon yüzünden itibaren $h_{kiriş}$, kolonlarda kiriş yüzünden itibaren $2b_{kolon}$ kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton kullanılmıştır. Çelik tel takviyeli beton kullanılan bölgenin küçültülmesi ile ikinci numuneye göre bu numunenin davranışında oluşabilecek değişikliklerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Numune-6 ve Numune-8: Her iki numune de farklı zamanda beton dökülmesi dışında ikinci numune ile tamamen benzer özelliklerde imal edilmiştir. Kiriş uç yer değiştirmesinin iyi kontrol edilememiş olmasından kaynaklanan hatalı yükleme

nedeni ile ikinci numune, deneyin henüz başlangıç aşamalarında tek bir yüklemeye göçmüştür. Bundan dolayı numune-5 ile aynı zamanda dökülen numune-8 imal edilmiştir. Ancak sekizinci numunenin de kiriş genişlikleri doğrultusunda çelik tel takviyeli beton karışımlarının çok sıkı kıvamda olması ve hatalı beton yerleştirilmesinden dolayı büyük boşluklar oluşmuştur. Bu boşluklar, iyice temizlenerek çimento oranı yüksek ince agregalı betonla doldurulup, sıkıştırılmıştır. Diğer numunelerde olduğu gibi tamir harcı yeterince sertleştikten sonra, bu numune de iki yönlü tekrarlı yüklemelerle deneye tabi tutulmuştur. Böyle bir araştırmanın amacına yönelik yapılacak değerlendirmeler için ikinci ve sekizinci numuneler önemli özelliklere sahip olduğundan dolayı altıncı numune de bu numunelere benzer olarak imal edilmiş olup, bu numunenin imalatında ve deney aşamasında, deney neticelerini etkileyecek herhangi bir olumsuz durumla karşılaşmamıştır.

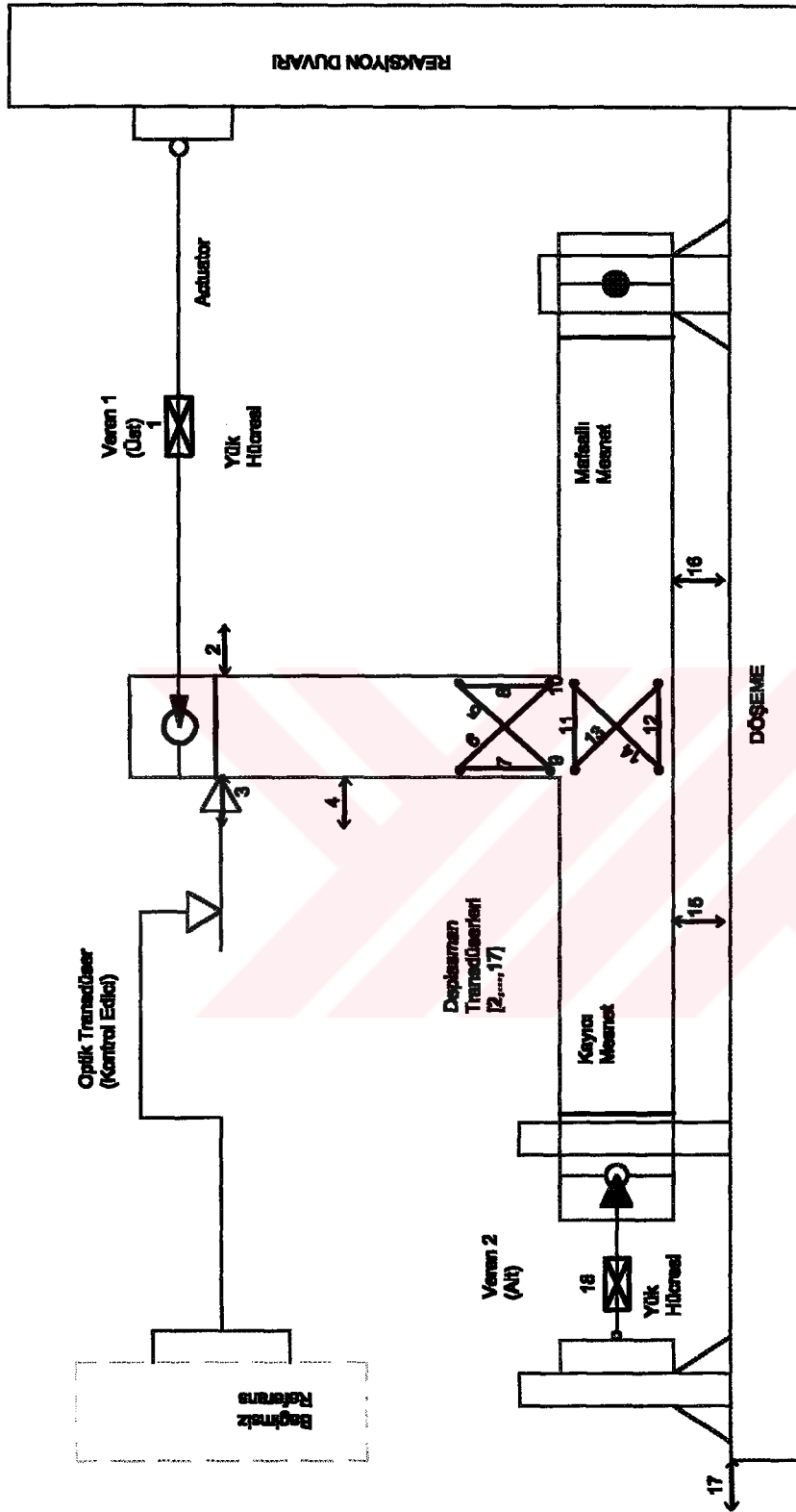
Numune-7 ve Numune-9: Donatı düzeni tip-2'ye uygun olup, çelik tel takviyeli beton kullanılan bölge, kirişte, kolon yüzünden itibaren $h_{kiriş}$, kolonda kiriş yüzünden itibaren $2b_{kolon}$ kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton kullanılmıştır. Yedinci numunede de betonun kalıba hatalı yerleştirilmesinden dolayı numunenin kolon-kiriş birleşim arakesitinde ve bazı bölümlerinde segregasyondan kaynaklanan boşluklar oluşmuştur. Bu boşluklar, iyice temizlenerek çimento oranı yüksek ince agregalı betonla doldurulup, sıkıştırılmıştır. Yukarıda açıklandığı gibi kolon ile kirişin birleşim arakesitinde ve kiriş yüksekliği doğrultusunda oluşan boşluklar nedeniyle bu yedinci numunede, yüklemenin 24mm lik kiriş uç deplasmanı aşamasında ani gevrek göçme meydana gelmiştir. Bundan dolayı bu numunenin benzeri olarak dokuzuncu numune üretilmiştir. Ancak bu numunede de betonun istenilen miktardan az gelmesi nedeniyle hacimce %1 olarak tasarlanan çelik tel miktarı bu numunede yaklaşık %3 olmuştur. Bu çelik tel miktarına rağmen beton karışıma normal akışkanlaştırıcı yerine süper akışkanlaştırıcı ilave edilmesinden dolayı beton iyi ve kolay yerleştirilmiştir. Böylece daha önceki numunelerde karşılaşılan üretim kusurları bu numunede oluşmamıştır.

Numune-10: Bu numunenin donatı düzeni tip-1'e uygun olup, çelik tel takviyeli beton kullanılan bölge, kirişte kolon yüzünden itibaren $h_{kiriş} / 2$, kolonlarda kiriş yüzünden itibaren $2b_{kolon}$ kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton kullanılmıştır.

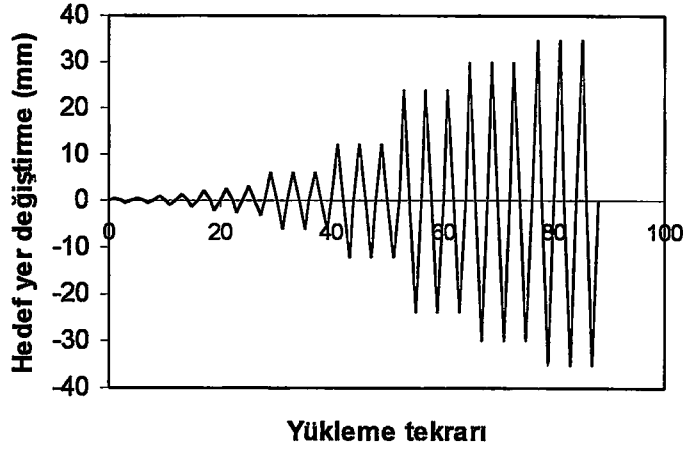
2.3. DENEY SİSTEMİ

Deprem etkilerine maruz kalan çok katlı betonarme çerçevenin ara kat kenar kolon-kiriş birleşimi gerçek boyutlarda modellenmiştir. Kolona sabit 150 kN eksenel basınç kuvveti ve kiriş uç yer değiştirmesine göre deplasman kontrollü olarak, 250kN kapasiteli bir veren ile itme ve çekme şeklinde iki yönlü tekrarlı yükler kiriş ucundan numuneye uygulanmıştır. Şekil-2.4'de gösterildiği gibi numune üzerindeki onbeş noktadan ilgili kesit ve doğrultularda yer değiştirmeler ile numunenin yerleştirildiği yükleme çerçevesinin toplam yatay hareketini ölçmek üzere numunenin dışından yükleme çerçevesine sabit bir noktadan LVDT olarak da adlandırılan elektriksel yer değiştirme ölçerler yerleştirilip gerekli ölçümler alınmıştır. Her bir hedef deplasman seviyesine ulaşıncaya ve numune üzerindeki yükün yavaş yavaş boşaltılıncaya kadar çok kısa aralıklarda veri toplayıcı (data logger) aracılığı ile paralel bağlı bilgisayara bu yer değiştirmeler ile iki verenin ucundaki yük hücrelerindeki yük değerleri kaydedilmiştir. Deneyler yer değiştirme kontrollü olarak yapıldığı için kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yükler, numunenin kiriş uç yer değiştirmesi hedef değere ulaştığı zaman yük veren pompa derhal durdurulup, gerekli ölçümler ve hasar durumları kaydedildikten sonra numune üzerindeki yük yavaş yavaş boşaltılırken de sık aralıklarla veriler toplanmıştır. Ayrıca kirişte plastik mafsall oluşması beklenen bölge kolon yüzünden itibaren kiriş faydalı yüksekliği kadar bir bölge olarak kabul edilmiş ve bu bölge *kiriş plastik mafsall bölgesi* olarak isimlendirilmiştir. Kiriş plastik mafsall bölgesinin orta kesitinde kiriş üst ve alt lifine ait uzama ve kısaltmalar ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler yardımı ile söz konusu kesite moment-eğrilik ve rijitlik-kiriş uç yerdeğiştirmesi değişimlerini veren eğriler elde edilmiştir.

Yüklemeler numune üzerinde ilk kalıcı deplasman oluşuncaya kadar itme ve çekme yönünde birer tekrarla, daha sonra her bir aşamada en son kiriş uç yer değiştirme değerinin iki katı hedef kiriş uç yer değiştirme değerine kadar itme ve çekme yönlerinde üçer tekrarla yapılmıştır. Çatlakların çok genişlediği durumlarda iki aşama arasındaki yer değiştirme seviyeleri daha kısa tutulmuştur. Böyle bir tekrarlı yüklemenin genel olarak şekli, kiriş uç kuvveti(kN)-tekrar sayısını gösteren grafik Şekil-2.5'de verilmiştir. Bu grafikte itme yönündeki kiriş uç yüklerini pozitif, çekme yönündeki kiriş uç yüklerini negatif işaretli olarak gösterilmiştir.



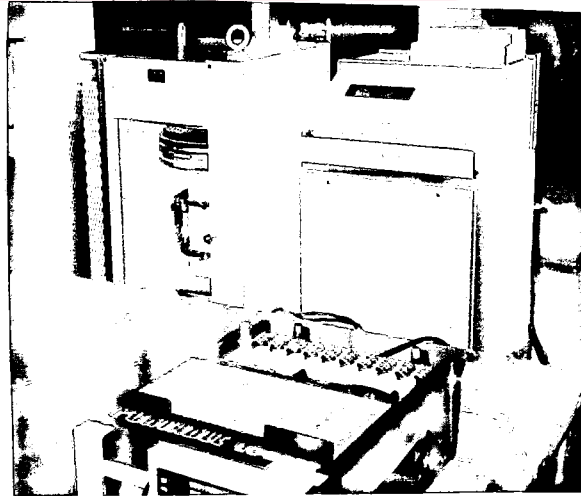
Şekil:-2.4 Deney Sistemi ve Deneylerde Ölçüm Alınan Noktalar



Şekil-2.5: Kolon-Kiriş Birleşimlerine Uygulanılan Tekrarlı Yükleme

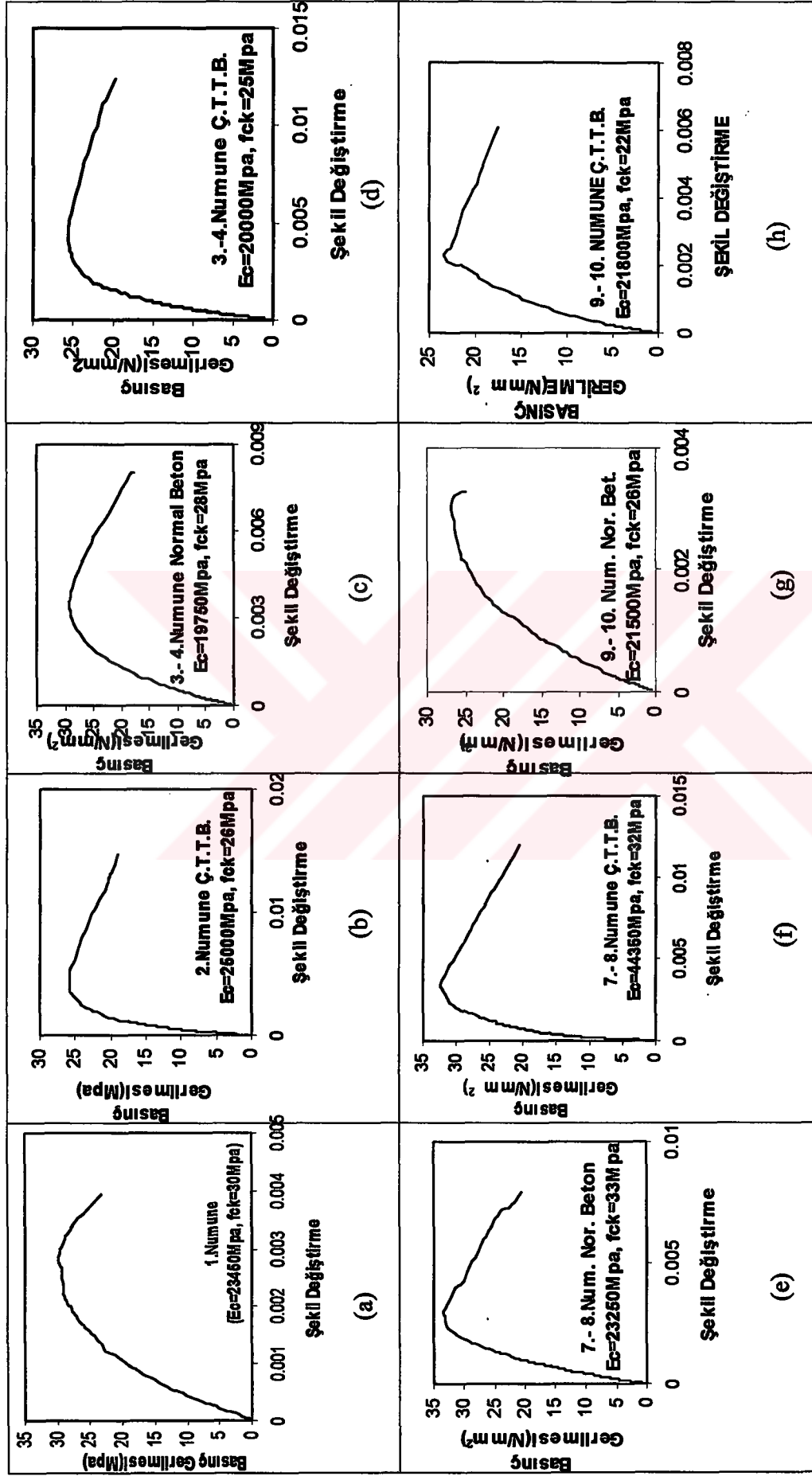
2.4. BETON SİLİNDİR BASINÇ DENEYLERİ

Her beton dökümünde normal beton ve çelik tel takviyeli beton basınç dayanımlarını belirlemek üzere her iki karışımdan, beşer tane beton silindir numune ile eğilmede çekme dayanımlarını elde etmek için de ikişer tane beton prizmalar alınmıştır. Bu beton silindir numuneler Şekil-2.6'da gösterildiği gibi beton silindire monte edilmiş olan iki adet yer değiştirme ölçerin bağlı olduğu üst bilezikle 15cm altındaki diğer bilezik arasında ölçülen kısaltmalar veri toplayıcıya belli yük seviyelerinde kaydedilmiştir.



Şekil-2.6 Beton silindir basınç deneyleri

Beton silindir numunelerinin eksenel basınç etkisindeki gerilme-şekil değiştirme eğrileri herbir numune için elde edilmiş olup, basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri Şekil-2.7'de gösterilmiştir.

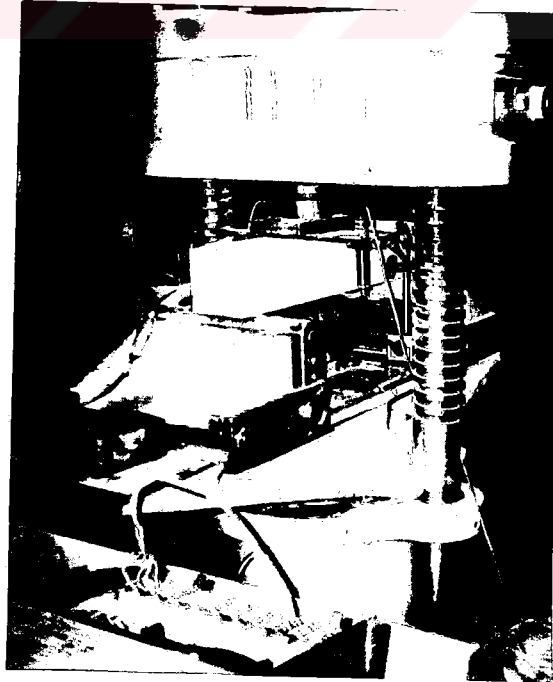


Şekil-2.7: Her bir numuneye ait beton silindirlerin basınç gerilmesi(Mpa)- şekil değişirme eğrileri

Betonların silindir basınç dayanımlarından görüldüğü gibi aynı karışıma sahip normal betonun ortalama basınç dayanımı çelik tel takviyeli betonun basınç dayanımından genelde yaklaşık %10 kadar büyük olmuştur. Silindir kalıbı boyutlarına göre beton karışımına ilave edilen çelik tellerin boyutlarının büyük olmasının böyle bir sonucun çıkmasında etkili olduğu düşünülmüştür. Çelik tel takviyeli betonlarda basınç dayanımındaki bu küçük azalmanın olmasına karşılık normal betonlara göre daha büyük şekil değiştirmeye sahip olduğu da görülmektedir.

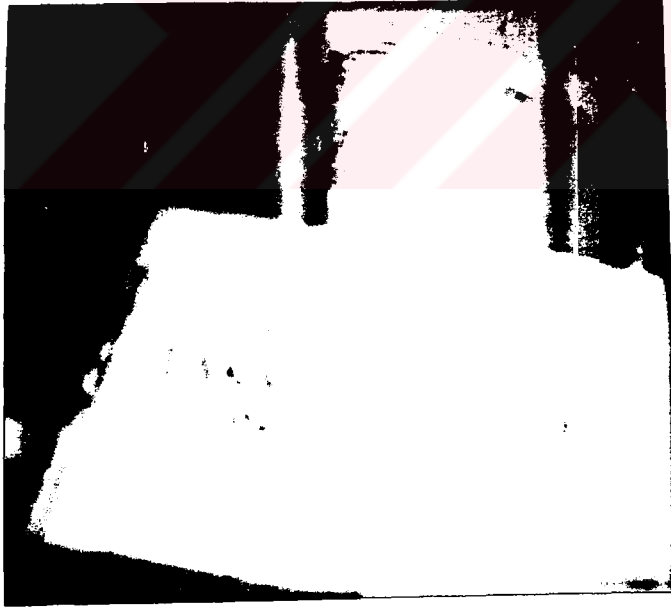
2.5. BETON PRİZMA EĞİLME DENEYLERİ

Her beton dökümünde normal ve çelik tel takviyeli betonların eğilmede oluşan dayanımlarının elde edilmesi için farklı iki beton karışımından ikişer tane beton prizmalar alınmıştır. Bu prizmalar da numunelerle de aynı koşullarda muhafaza edilmiştir. Şekil-2.8’de görüldüğü gibi prizmaların alt yüzünün ortasına yapıştırılan cam parçalarının üzerine yerleştirilen iki adet LVDT ve veri toplayıcı yardımıyla belli yükleme seviyelerinde iki noktadan düşey yüklü prizmanın sehimleri kaydedilmiştir. Prizmaların alt yüzlerindeki çekme liflerinde uzama değerleri alınamadığından dolayı eğilme çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi yerine yük-sehim eğrisi elde edilmiş olup, Şekil-2.10’da gösterilmiştir.

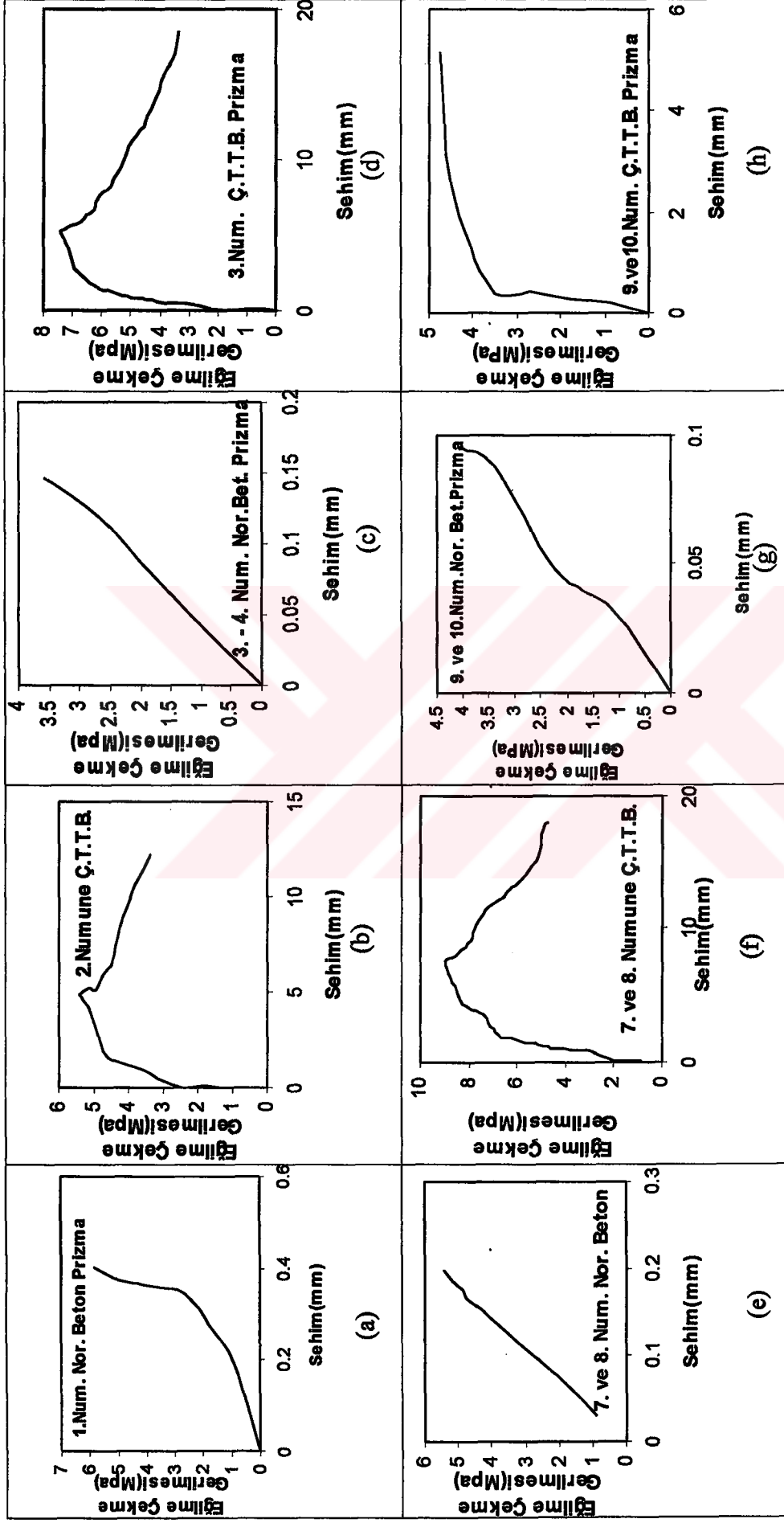


Şekil- 2.8: Beton prizmaların eğilme deneyleri

Beton prizmaların eğilme deneyleri, çelik tel takviyeli beton numunelerin, normal beton numunelerden yaklaşık %75 daha büyük eğilme çekme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Normal betonla yapılan prizmalar, maksimum yüke ulaşıldığı zaman ani göçme ile iki parça halinde kırılmıştır. Oysa çelik tel takviyeli beton prizmalar, maksimum yükten sonra yük taşımaya devam ederken ölçüm için beton prizmanın altına yapıştırılan cam parçalarının numuneden düşmesine kadar sehimlerinin ölçülmesi ve kaydedilmesi mümkün olmuştur. Ç.T.T.B. prizmalar, normal beton prizmalara göre daha büyük eğilme çekme dayanımına sahip olduğu, maksimum yükten sonra da kırılmadan yük taşıyıp şekil değiştirebildiğinden eğilme etkisinde daha çok enerji yutma kabiliyetine sahip olabildiği deneylerden görülmüştür. Göçmede hiçbir Ç.T.T.B. prizma, normal beton prizmalarda olduğu gibi iki parçaya ayrılmamış olup, Şekil-2.9'da gösterilmiştir



Şekil-2.9: Çelik tel takviyeli beton prizmaların eğilme deneyinden sonra görünümü



Şekil-2.10: Normal beton ve çelik tel takviyeli beton prizmaların eğilme çekme gerilmeleri (Mpa)-sehim (mm) eğrileri, a-h

2.6. KENAR KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİM DENEYLERİ

Kiriş uç yer değiştirmesine göre deplasman kontrollü olarak yapılmış olan kenar kolon-kiriş birleşim deneyleri, giriş ucuna etkiyen itme ve çekme şeklinde iki yönlü tekrarlı yükler ile kolon eksenel sabit basınç yükü altında yapılmıştır. Deney ve yükleme sistemi daha detaylı olarak Bölüm-2.3’de sunulmuştur.

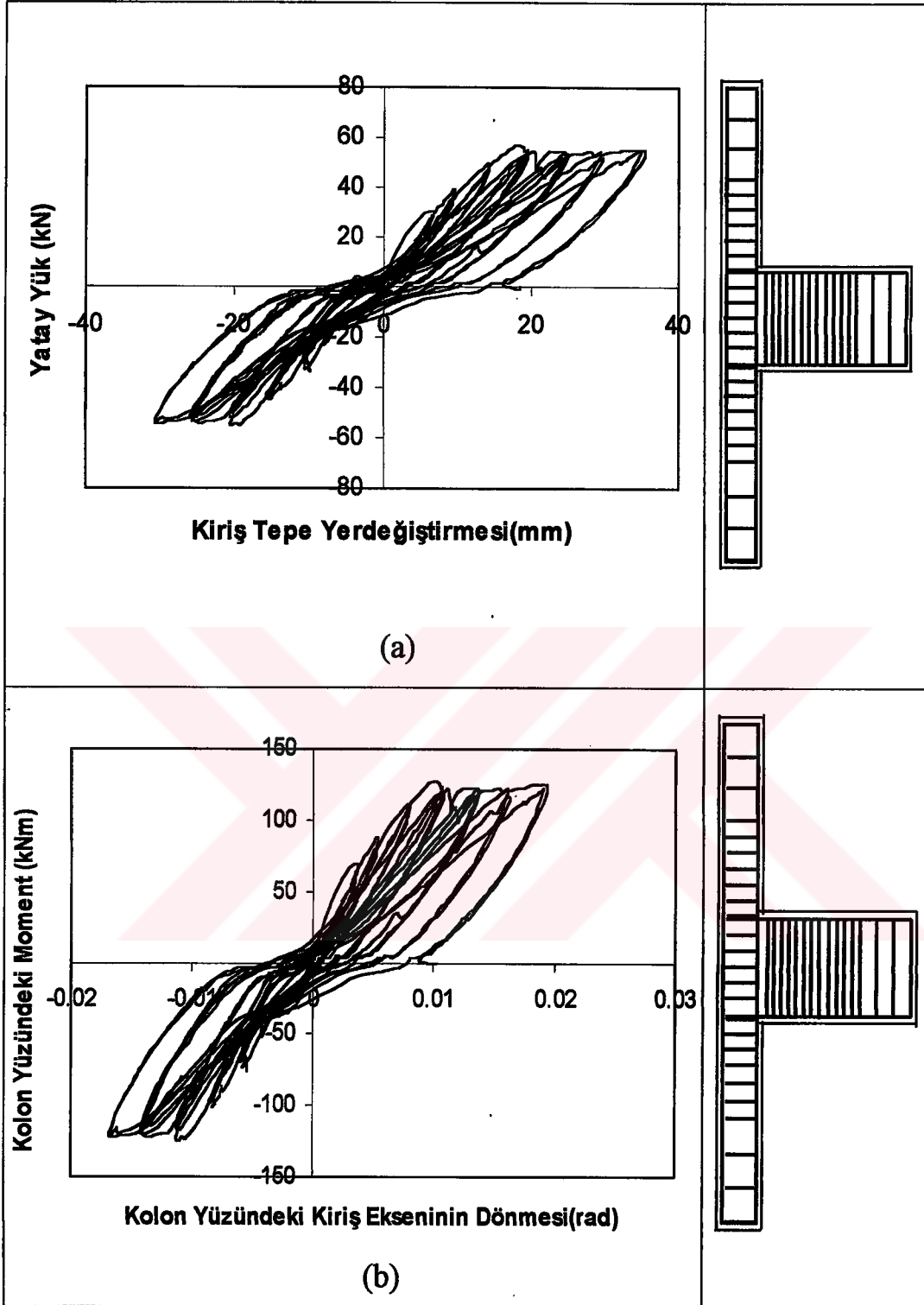
Numune-1 : A.B.Y.Y.H.Y. koşullarına göre sünelik seviyesi yüksek olan taşıyıcı sistem çerçevesinin kenar kolon-kiriş birleşimi olarak hazırlanmış olan bu numune diğer numunelerin dayanımına ve davranışına esas teşkil ettiği için deneylerin başlangıcını oluşturmuştur. Bu numunede, yer değiştirme ölçerlerden ve yüklemenin değerini veren yük hücrelerinden alınan veriler, kuvvet ve uzunluk birimlerine dönüştürülmemiş mikro-strain ($\mu\epsilon$) olarak adlandırılan elektriksel değerler olmuştur. Bu değerler ilgili ölçüm aletlerinin kalibrasyonuna bağlı olarak verilen değerler yardımıyla kuvvet birimi olarak kN’a, uzunluk birimi olarak da mm’ye dönüştürülmüştür.

Numunede oluşan ilk çatlak, giriş uç kuvveti itme durumunda ve giriş uç yer değiştirmesi 2.5mm’ye ulaştığı zaman girişte kolon yüzünden 20cm mesafedeki kesitte kuvvetin yönüne göre çekme lifinde oluşmuş olup, yine aynı çevrimde giriş uç kuvveti ters yönde çekme durumunda iken hemen hemen aynı kesitte birbirini bağlayacak şekilde kuvvetin yönüne göre çekme lifinde başka çatlak oluşmuştur. Kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı ise, giriş uç hedef yer değiştirme değerinin 4mm olduğu çevrimde, giriş uç kuvveti önce itme durumunda, daha sonra çekme durumunda iken oluşmuştur. Yüklemin ileri aşamalarında, kolon yüzünde oluşan giriş çatlağının çok genişlediği ve girişin hemen hemen birleşim davranışından ayrıldığı zamana kadar, girişin muhtelif kesitlerinde birbirini bağlayan eğilme çatlakları, kuvvet önce itme yönünde sonra çekme yönünde iken meydana gelmiştir. İlk kalıcı giriş uç yer değiştirme değerine(3mm) kadar her bir yer değiştirme seviyesinde birer çevrimle yüklemeler yapılmıştır. Bu yer değiştirme değerinden sonra, göçmeye yakın, herhangi bir kesitteki çatlak genişliğinin 3mm’yi geçtiği giriş uç yer değiştirmesine kadar bir önceki yer değiştirme değerinin iki katı kadar yaklaşık hedef yer değiştirme değerlerinde üçer çevrim yapılmıştır. Bu kritik

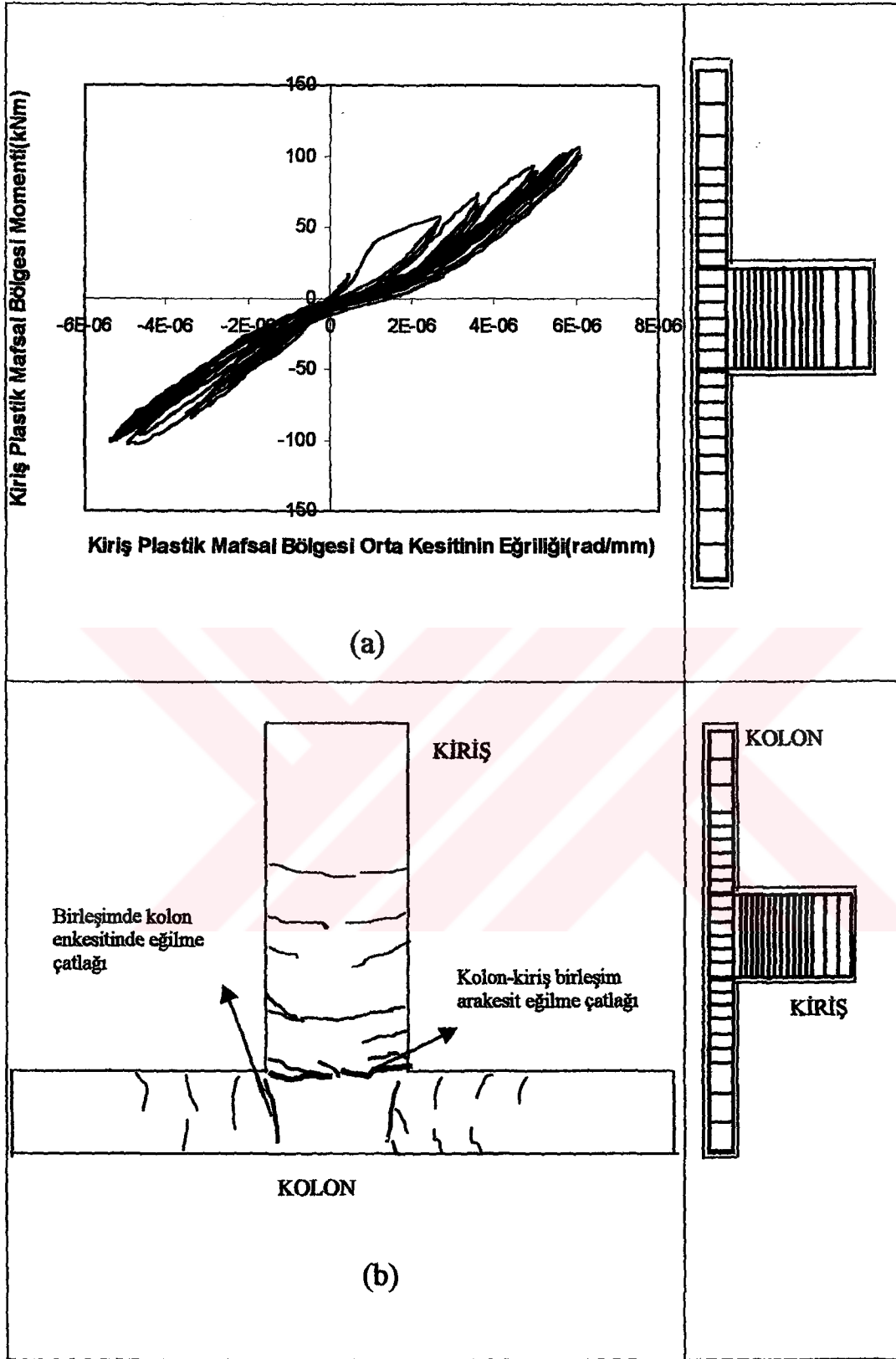
yer değiştirme değerinden, gcmeye kadar hedef yer değiştirme aralıkları ise biraz daha sık tutulmuştur. Kirişte oluşan tüm çatlaklar, eğilme çatlakları şeklinde oluşmuştur. Kolondaki çatlaklar ise, kiriş uç yer değiştirmesi 15mm.'de iken kirişin kolon yüzünde oluşan çatlağın kolona doğru ilerlemesinden ve yaklaşık 1.0mm. kadar genişlemesinden sonra kirişin kolonda birleşim bölgesini sınırlayan kesitlerde düşey eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Bu evrimden sonra birleşim bölgesi dışında kolonda da kılcal eğilme çatlakları oluşmuştur.

Kolon ve kirişte oluşan hasarlar, genellikle eğilme çatlakları şeklinde oluşmuştur. Bununla birlikte bu numunenin kolon-kiriş birleşim bölgesinde hiçbir eğik kayma çatlağı oluşmamıştır. Bu çatlakların oluşum özelliklerinden söz konusu numunenin eğilme modunda sünek davranışla göçtüğü de grlmştir. Kolon yüzündeki kiriş çatlaklarından birisi gcmeye yakın kolona doğru ilerlemiş olan diğer çatlakla birleşmiştir. Kiriş uç yer değiştirmesi 35mm'nin ikinci çevriminde iken bu iki çatlaktaki açılma miktarı da yaklaşık 7mm'yi geçmiş olup, aynı zamanda, kirişin kolon yüzündeki çatlak ile aynı kesitten kolona doğru ilerleyen çatlağın sınırladığı bir beton parçasının numuneden kopmasıyla deney bitirilmiştir. Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde şekil 2.12b' de gösterilmiştir. İki yönlü tekrarlı yüklemeler altında bu numunenin kiriş uç kuvveti(kN) ile kiriş uç yer değiştirmesi(mm), kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti(kNm) ile kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi(rad) ve kirişin plastik mafsalsal bölgesinin orta kesitindeki eğilme momenti(kNm) ile buradaki kesitin eğriliği(rad/mm) arasındaki değişimleri gösteren eğriler şekil-2.11a,b ve 2.12a'da verilmiştir.

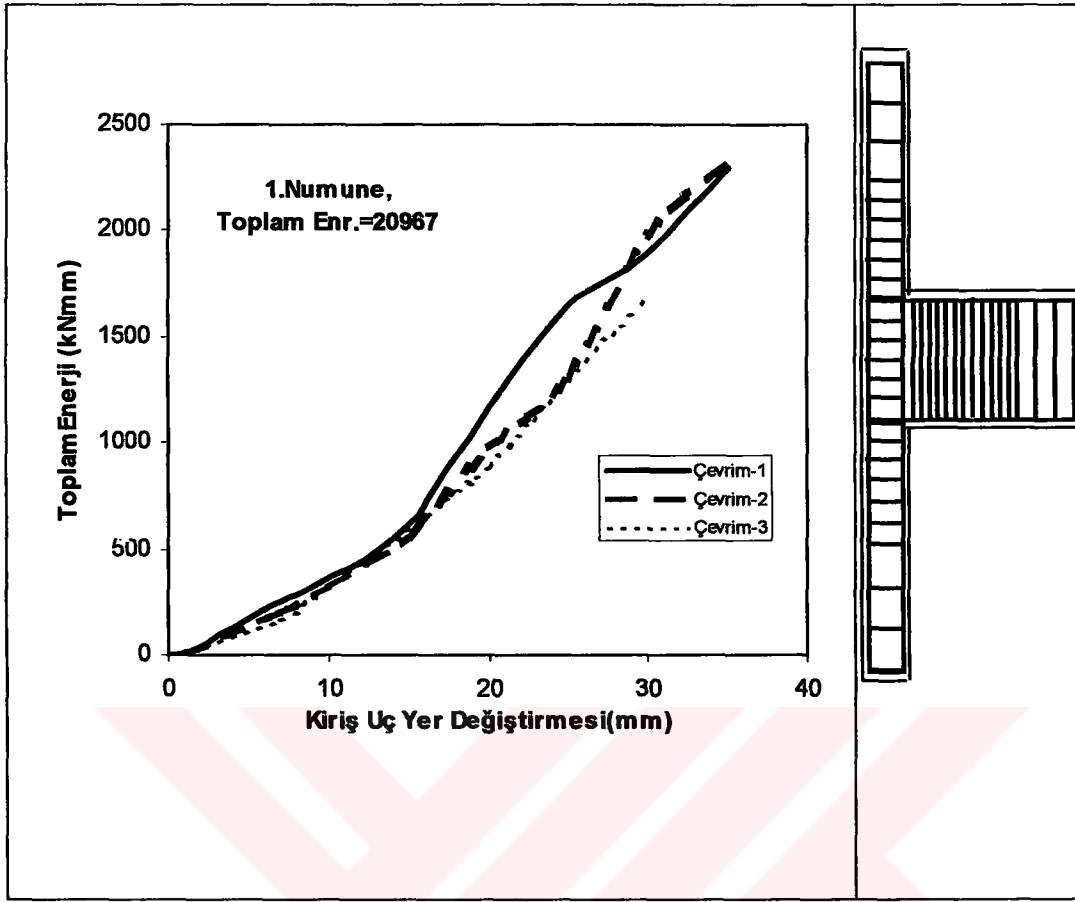
Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerleri, her bir hedef yer değiştirme seviyesi için yapılan üç farklı çevrimin her birine ait olmak üzere itme ve çekme durumunda kiriş uç yer değiştirmesinin en büyük değerine kadar yük-yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alan olarak hesapta dikkate alınmıştır. Buna göre iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında numunenin yutmuş olduğu enerji miktarı üç farklı çevrim için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu enerji miktarlarının kiriş uç yer değiştirmesine göre değişimini gösteren eğriler üç ayrı çevrim için şekil-2.13'de verilmiştir.



şekil-2.11: Birinci numunenin a) kiriş uç yer değistirmesi(mm)-kiriş uç kuvveti (kN) değişimi, b) kolon yüzündeki kiriş eksenini dönmesi(rad)-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti(kNm) değişimini gösteren evrimler



Şekil-2.12: Birinci numunenin a) kiriş plastik mafsalsal bölgesi orta kesitinin eğriliği(rad/mm)-kiriş plastik mafsalsal bölgesi orta kesitinin momenti(kNm), b)deney sonunda numune çatlak dağılımındaki genel görünüş



Şekil-2.13: İki yönlü tekrarlı yükler altında, birinci numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri

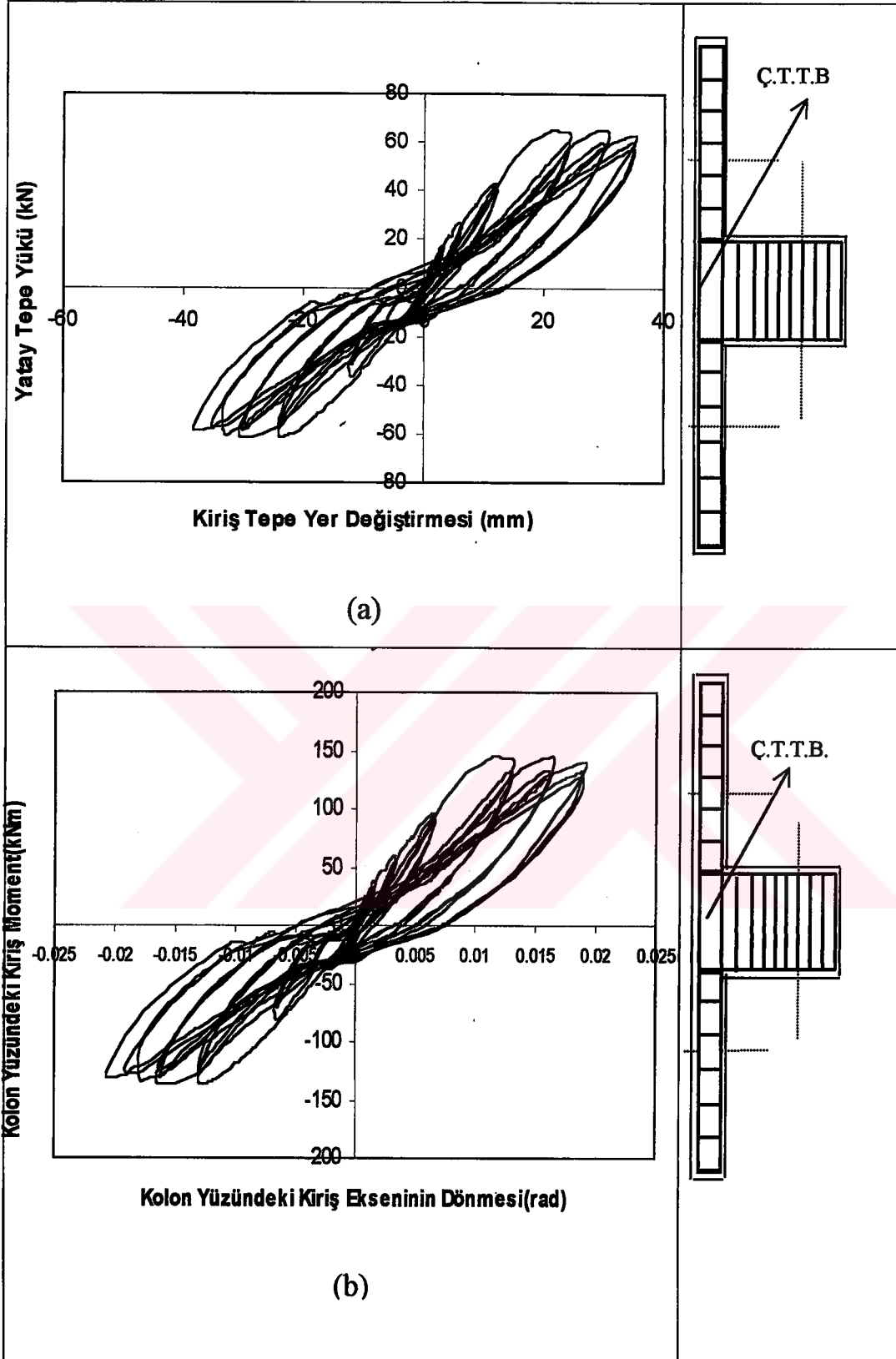
Numune-2: Kolon-kiriş birleşim bölgesinde bir adet enine donatı bulunup diğer bölgelerde enine donatı aralıkları daha büyük tutulmuş olmasına karşılık birleşim bölgesi ve sarılma bölgelerinde çelik tel takviyeli beton kullanılmıştır. Numune-1'e benzer şekilde deney yapılmıştır. Ancak hedef olarak belirlenmiş olan 3mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinde yanlış yükleme nedeni ile numunede 30mm kiriş uç yer değiştirmesi yapılmış ve numune göçmüştür. Bundan dolayı bu numunenin benzeri tekrar üretilmiş olup, bu numune değerlendirmede göz önüne alınmamıştır.

Numune-3: Kolon-kiriş birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı bulunmamasına ve şartnamenin öngördüğü sarılma bölgesinde de sargı donatısı olarak ilave enine donatıların bulunmamasına karşılık kolon-kiriş birleşim bölgesi ile sarılma bölgesinin tamamında Ç.T.T.B. kullanılmıştır. Bu numuneye ait kullanılan normal beton ve Ç.T.T.B. silindir basınç dayanımları ile prizma eğilme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5 de verilmiştir.

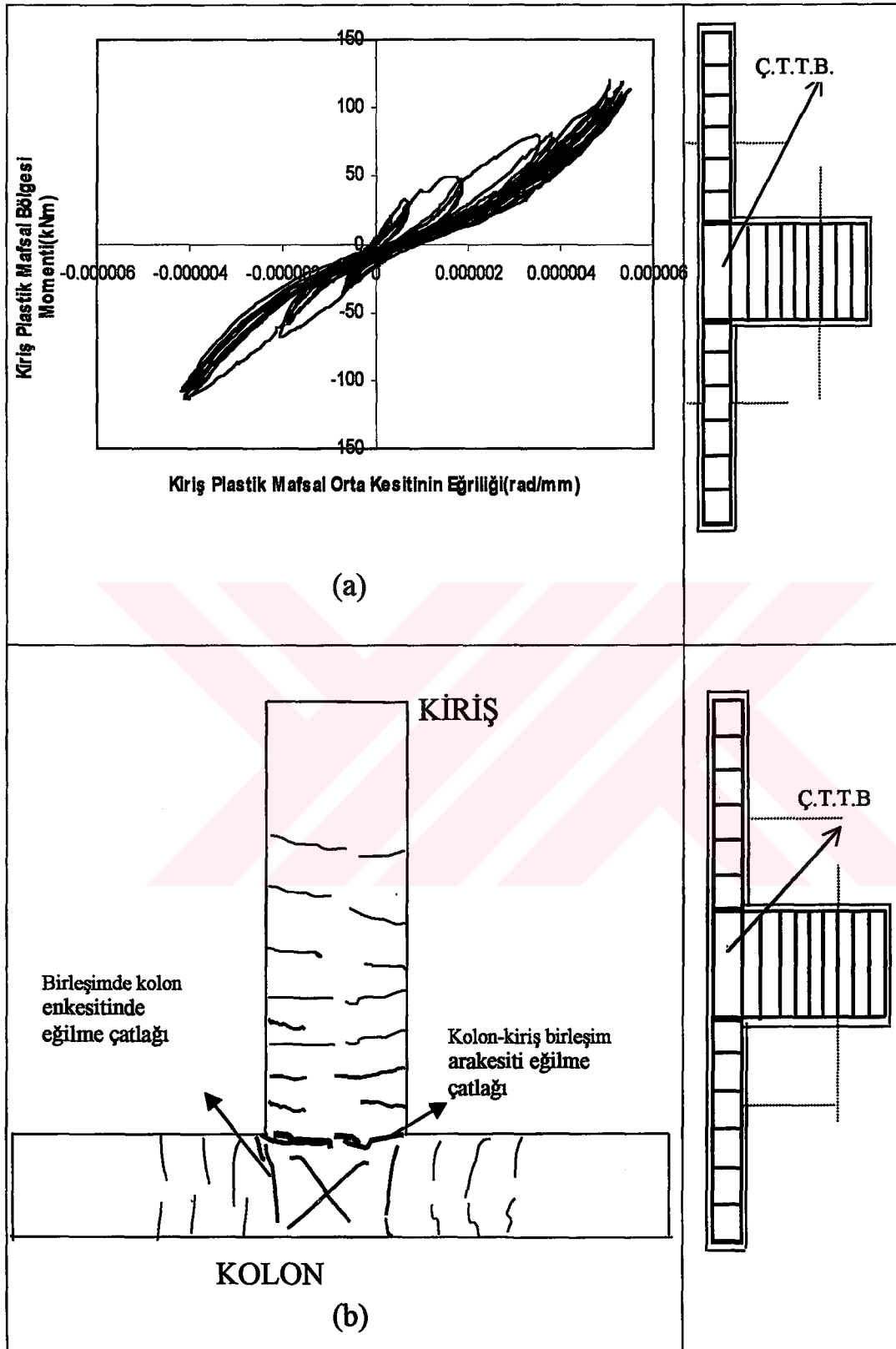
Birinci ve ikinci numunenin deneyinde karşılaşılan zorluklar nedeniyle bu deneyden itibaren data logger olarak bilinen veri toplayıcıya ve kayıtların saklandığı bilgisayar programına, her bir ölçüm aletinden deneyde alınmış elektriksel verileri ilgili birimlere (kuvvet ve uzunluk) dönüştüren katsayılar tanımlanmıştır. Böylece yer değiştirme kontrollü olarak yapılan deneyleri daha sağlıklı bir şekilde kontrol etme olanağı bulunmuştur.

Bu numunede ilk çatlak, kiriş uç kuvveti itme durumunda ve kiriş uç yer değiştirmesi de 1.5mm.'de iken kirişte, kolon-kiriş birleşim arakesitinden 25cm. mesafede kesitin çekme lifinde meydana gelmiştir. Aynı yer değiştirme seviyesine ait çevrimde kuvvet çekme durumunda iken yaklaşık aynı kesitin kuvvet yönüne göre çekme lifinde bir önceki çatlağı birleştiren başka çatlak oluşmuştur. Kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlak ise, kiriş uç yer değiştirmesinin 3mm olduğu çevrimde ve kiriş uç kuvveti itme durumunda iken oluşmuştur. Aynı çevrimde ve aynı kesitte, kiriş uç kuvveti çekme durumunda iken yeni bir çatlak meydana gelmiştir. Kolon-kiriş birleşim arakesitinin solunda ve sağında oluşmuş olan kiriş çatlağı, kiriş uç kuvvetinin itme ve çekme durumunda ilerleyerek 6mm.'lik kiriş uç yer değiştirmesinde birleşmiştir. Bu çatlağın birleşmesine ve birleştikten sonra da yaklaşık 0.5mm açılmasına kadar kirişin muhtelif kesitlerinde başka eğilme çatlakları oluşmuştur.

Kolonda çatlakların gelişimi ise; 12mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinin üçüncü çevriminde, kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı 0.5mm kadar açılmasından sonra birleşimde kiriş enkesitinin bulunduğu kesitte düşey eğilme çatlağı oluşmuştur. Bununla birlikte kolonda birleşim bölgesi dışında düşey kılcal eğilme çatlakları da oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 24mm. olduğu ikinci çevrimde ve kuvvet itme durumunda iken, birleşim bölgesinde yatayla yaklaşık 45^0 açı yapan kayma çatlağı, aynı çevrimin kuvvet çekme durumunda iken bir önceki kayma çatlağını hemen hemen dik kesen başka kayma çatlağı oluşmuştur. Böylece etriyenin bulunmadığı birleşim bölgesinde X şeklinde iki eğik çatlak meydana gelmiştir. Bu çatlakların genişliği deney sonuna kadar, çok yavaş ve az değişmiştir.



Şekil-2.14: Üçüncü numunenin a) kiriş uç yer değiştirmesi (mm)- kiriş uç kuvveti (kN), b) kolon yüzündeki kiriş ekseninin dönmesi (rad)-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti (kNm) arasındaki değişimi gösteren çevrimler

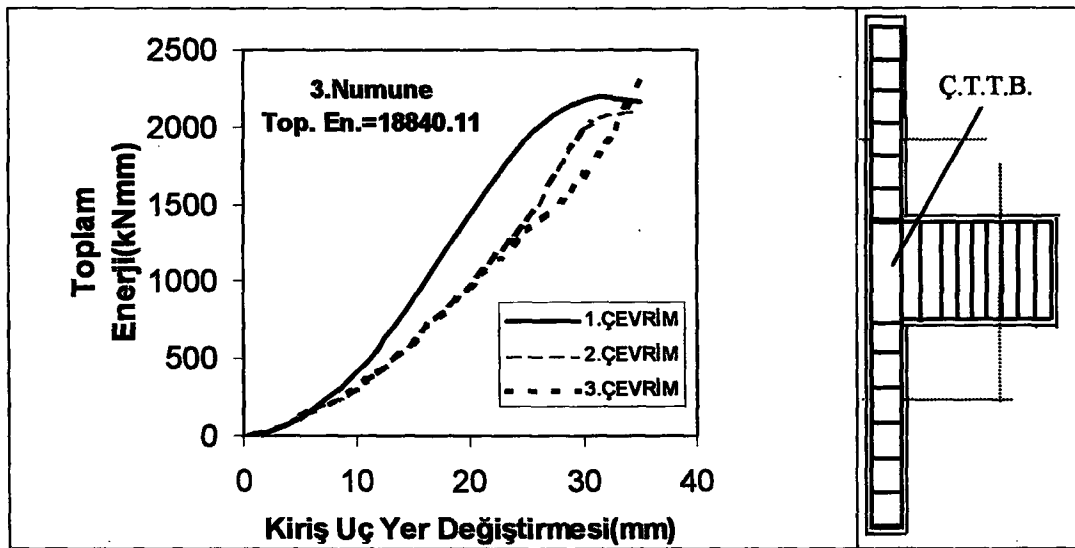


Şekil-2.15: Üçüncü numunenin a) kiriş plastik mafsai bölgesi orta kesitinin eğriliği(rad/mm)-aynı kesite ait eğilme moment(kNm) arasındaki değişimi gösteren çevrimler, b) deney sonunda numunedeki çatlak dağılımlarının genel görünüşü

Deney, yaklaşık 35mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinin üçüncü çevriminde bitmiştir. Bu aşamada kirişin kolon yüzündeki kesitin sol tarafındaki eğilme çatlağı, yaklaşık 8mm kadar açılmış. Bu bölgeden beton parçasının düşmüş olmasına rağmen aynı kesitin sağ tarafındaki eğilme çatlağını dik kesen çelik tellerin bulunması nedeniyle bu bölgedeki çatlak 3.5mm kadar açılmıştır. Yine bu çevrimde birleşim bölgesindeki X çatlağında da yaklaşık 1mm kadar açılma gözlenmiştir. Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil 2.15b' de gösterilmiştir.

Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi (rad) - kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm), kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğrilmesi (rad/mm) - kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğilme momenti (kNm) aralarındaki değişimi gösteren çevrimler sırasıyla Şekil-2.14a, b ve 2.15a'da verilmiştir.

Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerleri numunenin söz konusu yüklemeler altında yuttuğu enerji miktarı olarak düşünülmüş ve bu enerji miktarlarının her bir çevrim için kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.16'da verilmiştir.



Şekil-2.16: İki yönlü tekrarlı yükler altında, üçüncü numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri

Numune-4 : Pratik uygulamalarda A.B.Y.Y.H.Y. koşullarına uygunluk açısından en yakın olan ve sık karşılaşılan bir kolon-kiriş birleşim detayı olarak düşünülen bu numunede, birleşim bölgesinde kolon enine donatısı hiç yerleştirilmemiştir. Bununla birlikte sarılma bölgesinde sargı donatıları kullanılarak etriye sıklaştırması yapılmıştır. Numunenin her yerinde normal beton kullanılmıştır. Bu numunede kullanılan betonun silindirik basınç dayanımı ile beton prizmanın eğilme çekme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5’de verilmiştir.

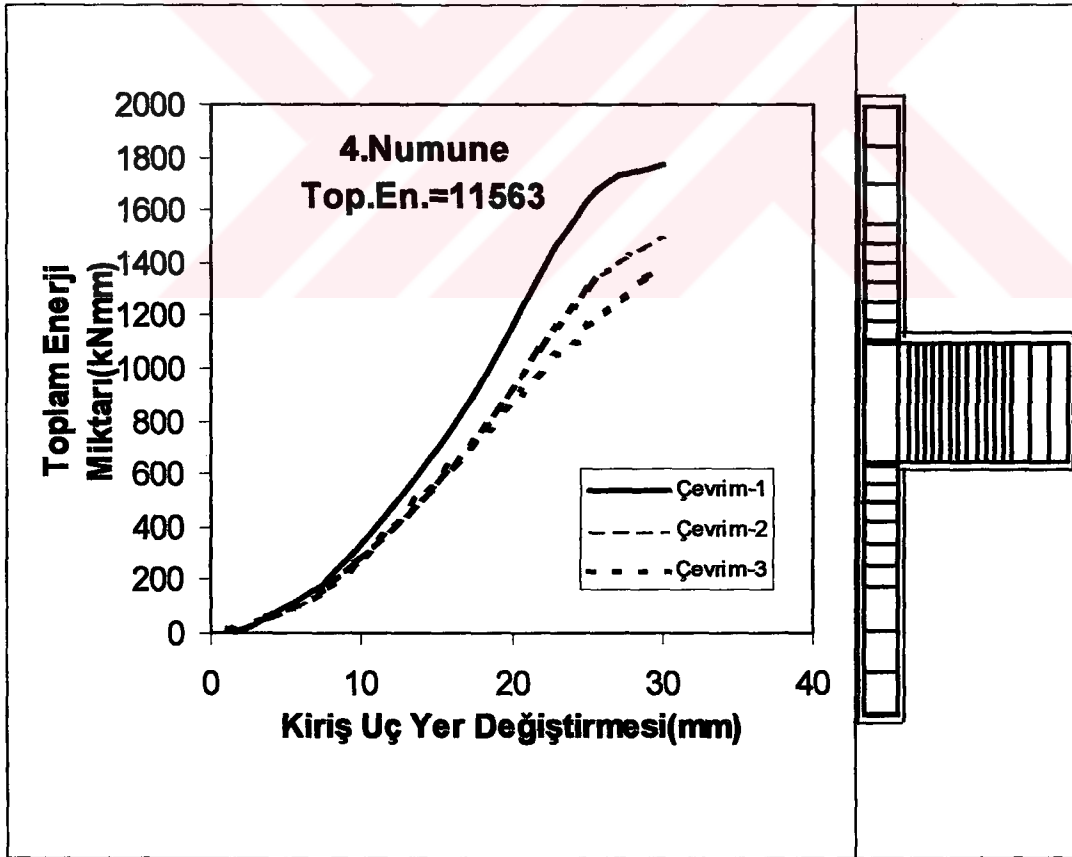
Kiriş uç yer değiştirmesi 3.7mm ve kiriş uç kuvveti itme durumunda iken kuvvete göre kolon- kiriş birleşimi arakesitinin çekme lifindeki eğilme çatlakları ile aynı kesitten kolona doğru eğik olarak ilerlemiş 5cm uzunluğunda kayma çatlakları meydana gelmiştir. Aynı yüklemde kirişte, kolon yüzünden 22cm ve 65cm mesafedeki kesitlerde de eğilme çatlakları oluşmuştur. Aynı çevrimde kuvvet ters yönde yani çekme durumunda iken kolon- kiriş birleşimi arakesitinde bir önceki yüklemde oluşan çatlakları birleştiren bir başka çatlak oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 16mm olduğu çevrimde, kolon- kiriş birleşimi arakesitinde oluşan çatlakların 1.2mm açılana kadar kirişin muhtelif kesitlerinde kuvvetin itme ve çekme durumlarında birbirlerini birleştiren eğilme çatlakları oluşmuştur.

Kiriş uç yer değiştirmesinin 16mm.’lik çevrimlerinde kuvvet sırasıyla itme ve çekme durumunda iken kiriş-kolon birleşiminin kiriş kesitlerinde düşey eğilme çatlakları ile kolonun alt kenarından başlayan ve yatayla 45^0 açı yapan eğik çatlak da meydana gelmiştir. Bu eğik çatlakla dik yönde başka bir çatlak da aynı çevrimde kuvvet ters yönde iken oluşmuştur. Bu çatlaklara ilaveten aynı yüklemelerde birleşim bölgesi dışında kolonda düşey eğilme çatlakları da oluşmuştur.

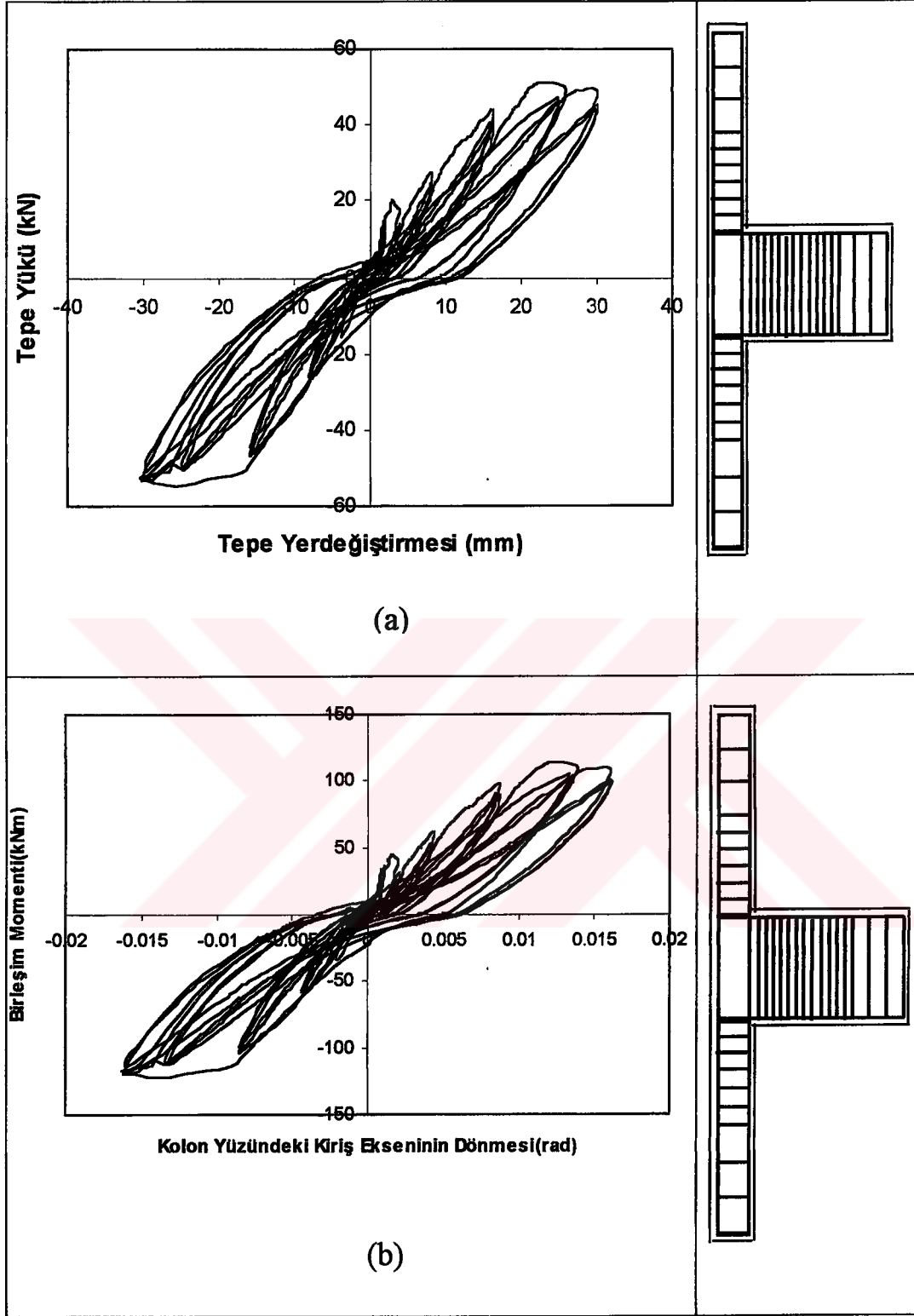
Kiriş uç yer değiştirmesi 25mm.’nin üçüncü çevriminde, kuvvetin yönü çekme durumunda ve şiddeti de sabit kaldığı halde kolon- kiriş birleşimi arakesitinde oluşan çatlak aniden genişleyip birleşim bölgesinin kiriş kesitindeki düşey çatlakla birleşerek beton parça atmaya başlayınca kiriş uç yer değiştirmesi de aniden 30mm.’ye ulaşmıştır. Numunenin davranışındaki bu ani değişiklikten dolayı kiriş uç yer değiştirmesinin 30mm. olması durumunda üç çevrim yapılarak deney bitirilmiştir. Bu çevrimlerin sonunda kirişin kolon yüzündeki çatlak da yaklaşık

10mm. kadar açılmıştı. Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil 2.19b' de gösterilmiştir.

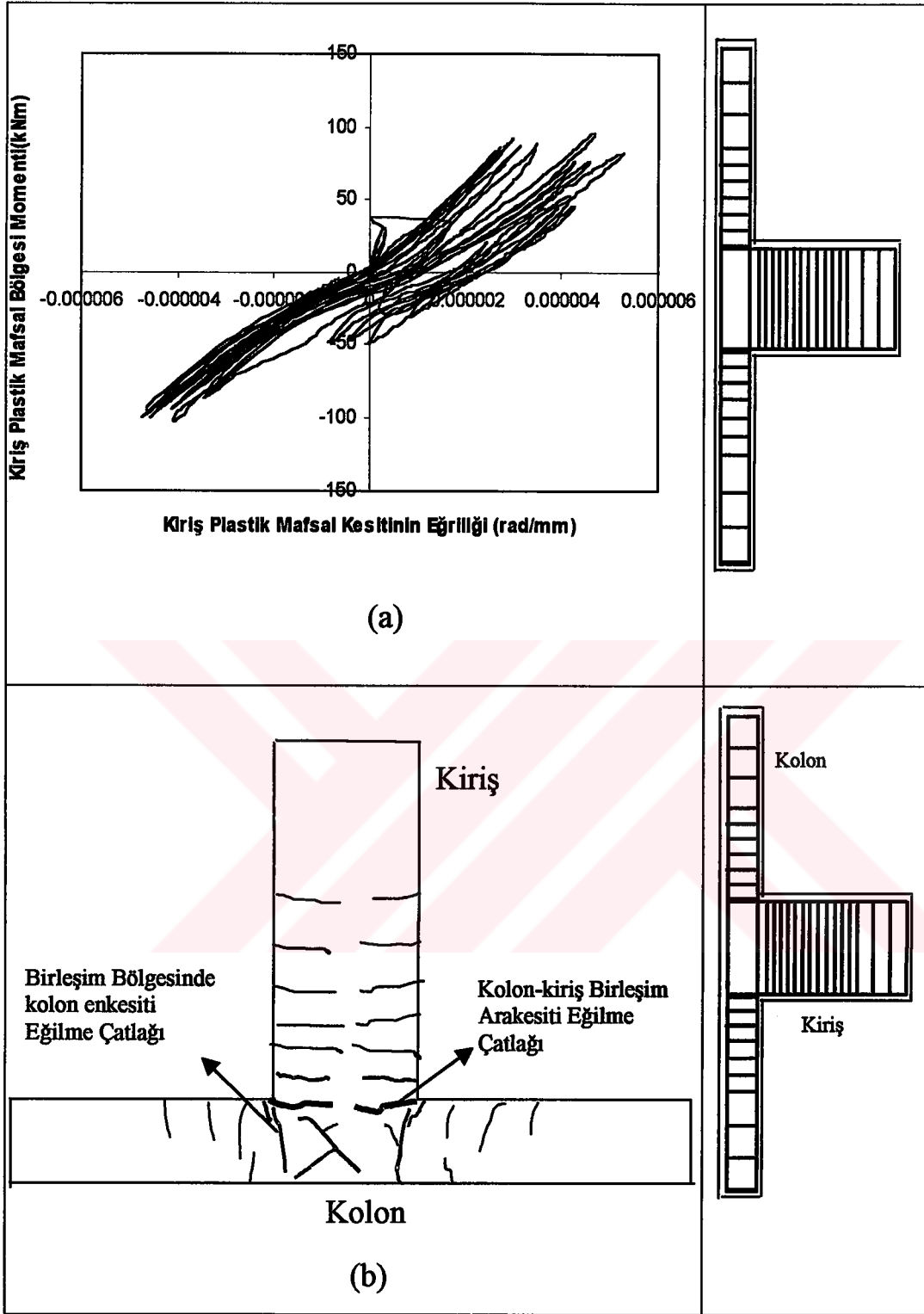
Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi (rad) – kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm), kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğrilmesi (rad/mm) – kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğilme momenti (kNm) aralarındaki değişimi gösteren çevrimler sırasıyla Şekil-2.18a, b ve 2.19a'da verilmiştir. Ayrıca kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerleri numunenin söz konusu yüklemeler altında yuttuğu enerji miktarı olarak düşünülmüş ve bu enerji miktarlarının her bir çevrim için kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.17'de verilmiştir.



Şekil-2.17: İki yönlü tekrarlı yükler altında, dördüncü numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri



Şekil-2.18: Dördüncü numunenin a) kiriş uç yer değiştirmesi(mm)-kiriş uç kuvveti (kN) eğrisi, b) kolon yüzündeki dönme(rad)-kolon yüzündeki moment(kNm) eğrisi



Şekil-2.19: Dördüncü numunenin a)kiriş plastik mafsalsal bölgesi orta kesitinin eğriliği(rad/mm)- kiriş plastik mafsalsal bölgesi orta kesitinin eğilme momenti(kNm), b)deney sonunda numunenin çatlak dağılımındaki genel görünüşü

Numune-5: Bu numunede, kolon-kiriş birleşim bölgesi ile kirişte kolon yüzünden itibaren 60cm($h_{kiriş}$), kolonda kiriş üst ve alt yüzünden itibaren 50cm($2b_{kolon}$) kadar bir bölgede Ç.T.T.B., diğer bölgelerde normal beton kullanılmıştır. Buna karşılık numunede enine donatı sıklaştırması yapılmamış olup, kolon-kiriş birleşim bölgesinde sadece bir adet kolon enine donatısı kullanılmıştır. Bu numunede kullanılan betonun silindirik basınç dayanımı ile beton prizmanın eğilme çekme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5’de verilmiştir.

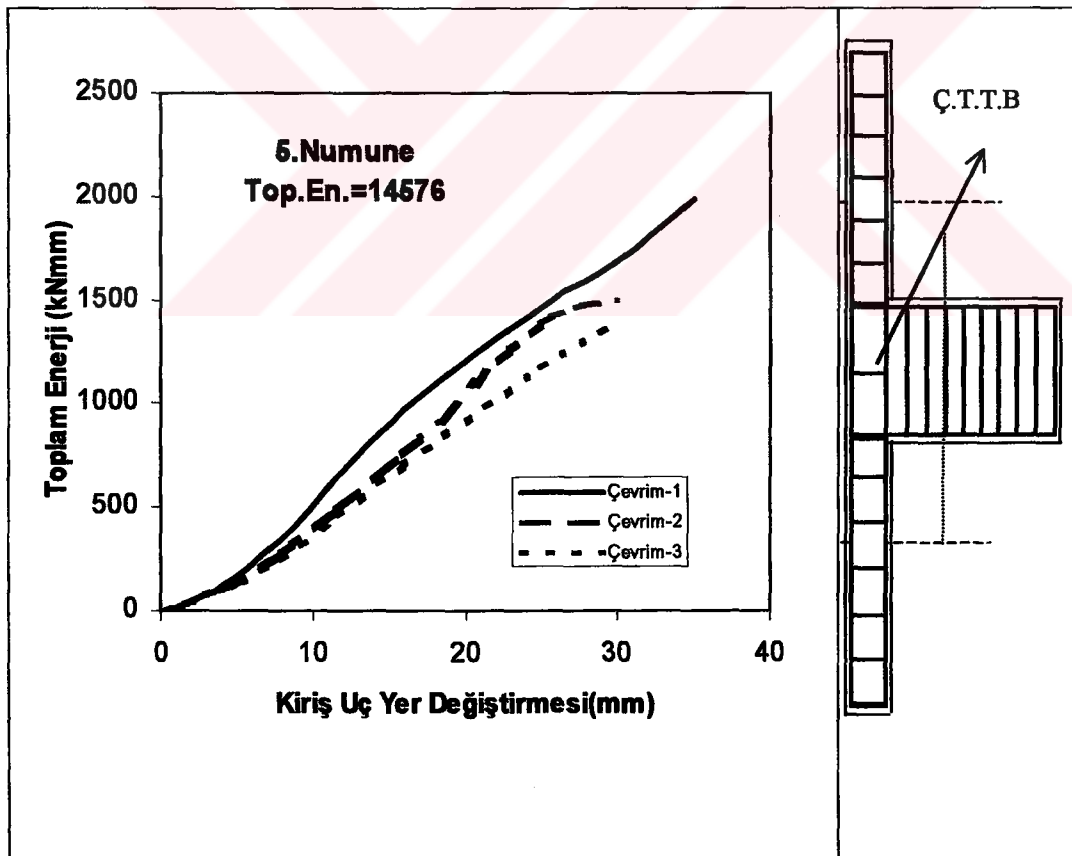
Kiriş uç yer değiştirmesi 4mm ve kiriş uç kuvveti itme durumunda iken kolon-kiriş birleşim arakesitinin çekme lifinde eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Aynı kiriş uç yer değiştirmesi seviyesi aynı değerde, kuvvet çekme yönünde iken aynı kesitin diğer kenarında bir önceki çatlağı birleştirecek şekilde bir başka çatlak oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 8mm olduğu çevrimlerde, kiriş uç kuvvetinin itme ve çekme olması durumlarında kirişin muhtelif kesitlerinde birbirini bağlayan eğilme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlaklarla birlikte aynı yer değiştirme seviyesinin ikinci ve üçüncü çevrimlerinde, kolon-kiriş birleşim arakesitinde oluşan çatlağın yaklaşık 0.3mm açılmasından sonra, kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş kesitinde eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 16mm olduğu çevrimlerde daha önceki çatlaklar biraz daha açılırken kirişin farklı kesitlerinde farklı eğilme çatlaklarının oluşumu devam etmiştir.

Ancak aynı yer değiştirme seviyesinin üçüncü çevriminde ve kuvvet çekme yönünde iken kirişin kolon yüzündeki çatlağı yaklaşık 1.5mm kadar genişlemiş ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde yaklaşık yatayla 45^0 açı yapan eğik kayma çatlağı oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 25mm olduğu ilk iki çevrimde, kirişin kolon yüzündeki çatlağı 2mm., son çevrimde ise aynı çatlak kesit ortasında 9mm., kenarda 4mm. kadar genişlemesiyle birlikte daha önce birleşim bölgesinde oluşmuş eğik kayma çatlağına dik yönde bir başka eğik kayma çatlağı oluşmuştur. 30mm.’lik kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinin üçüncü çevriminde kirişin kolon yüzündeki çatlaktan beton parça düşmüştür. Bu çatlaklara ilaveten kolonda birleşim bölgesi yakınında başka çatlaklar da oluşmuştur. Kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağının aşırı genişlemesinden dolayı ölçüm aletlerinin zarar görebileceği düşünülerek 35mm.’lik kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinin birinci çevriminde deneye son verilmiştir. Deney

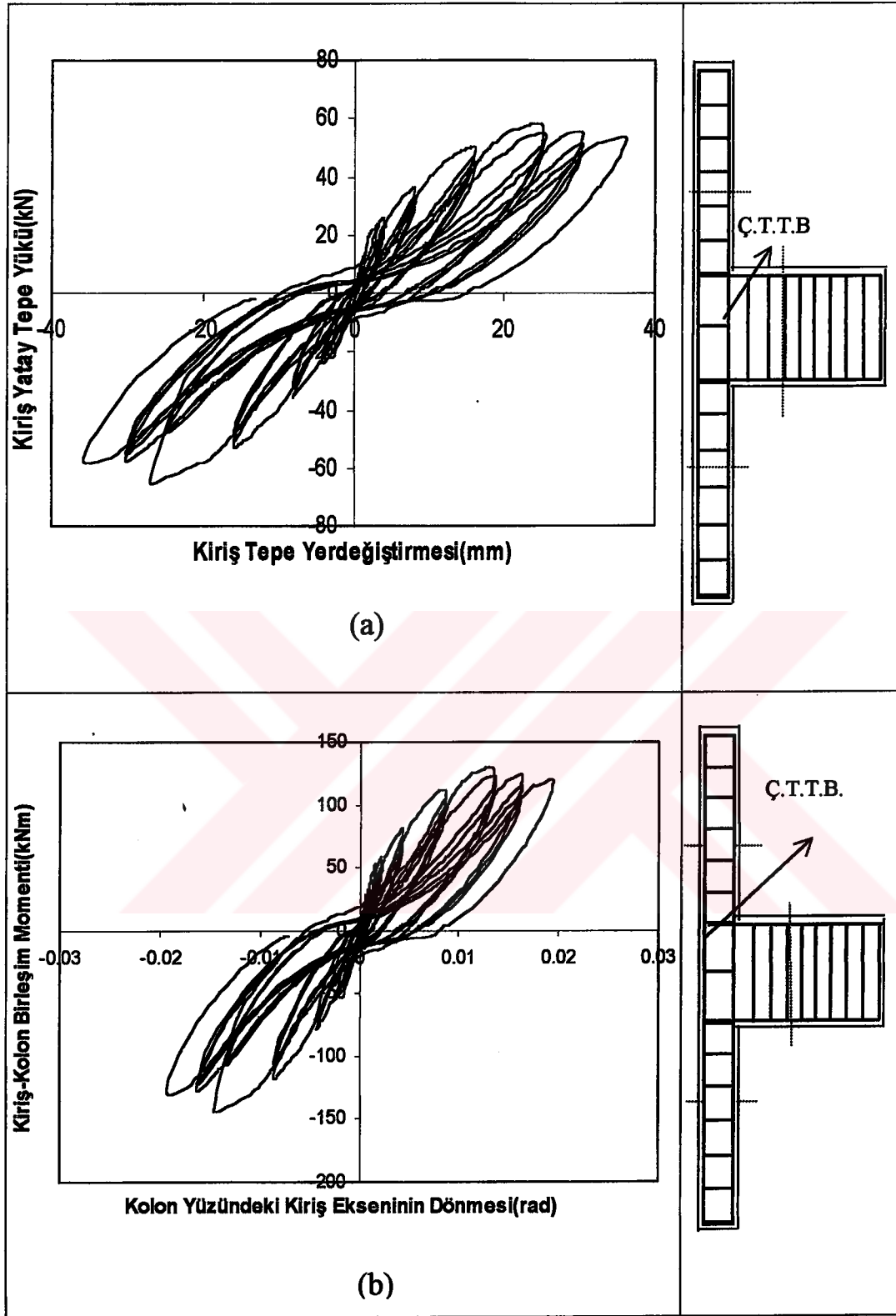
neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil 2.22b' de gösterilmiştir.

Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi (rad) – kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm), kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği (rad/mm) – aynı kesite etkiyen eğilme momenti (kNm) aralarındaki değişimi gösteren çevrimler Şekil-2.21a,b ve 2.22a' da verilmiştir.

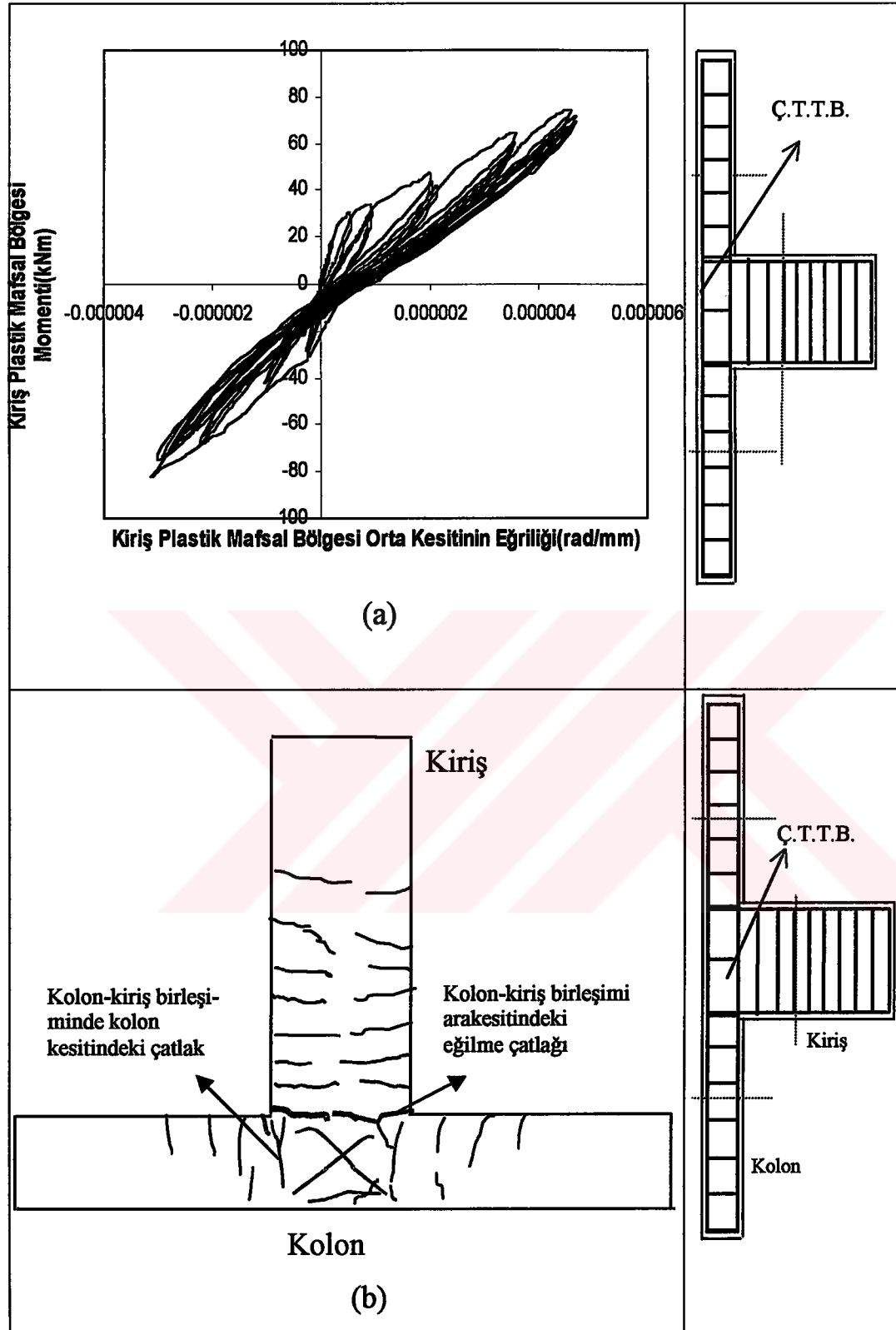
Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerlerini numunenin söz konusu yüklemeler altında yuttuğu enerji miktarı olarak düşünülerek aşağıda kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.20' de verilmiştir.



Şekil-2.20: İki yönlü tekrarlı yükler altında, beşinci numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri



Şekil-2.21: Beşinci numunenin a) kiriş uç yer değiştirmesi(mm)- kiriş uç yüğü(kN)
b) kolon yüzündeki kiriş eksenini dönmesi(rad)- kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm) eğrileri



Şekil-2.22: Beşinci numunenin kiriş plastik mafsal bölgesi orta kesitinin eğriliği (rad/mm)- aynı kesite etkiyen eğilme momenti (kNm) arasındaki çevrim eğrileri, b) deney sonunda numunede oluşan çatlakların dağılımının genel görünüşü

Numune-6 : İkinci numunenin yanlışlıkla tek çevrimde aniden göçmesinden dolayı ikinci numuneye benzer parametrelerle altıncı numune üretilmiştir. Bu numunede kullanılan betonun silindirik basınç dayanımı ile beton prizmanın eğilme çekme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5’de verilmiştir.

Bu numunenin de önceki numunelere benzer olarak yüklenmesiyle numunede ilk çatlak, kiriş uç yer değiştirmesinin 2.5mm.’lik seviyesinde ve kiriş uç kuvvet itme durumunda iken, kolon-kiriş birleşim arakesitinde ve bu arakesitten 12cm mesafedeki kiriş kesitlerinde meydana gelmiştir. Bu numunedeki çatlakların gelişimi ise; genelde kiriş uç kuvveti itme durumunda iken, çatlaklar kuvvete göre kiriş kesitinin çekme liflerinde daha önce oluşmuş, daha sonra kiriş uç yer değiştirmesi 10mm.’den itibaren kuvvet çekme yönünde iken daha önceki çatlakları birleştiren yeni çatlakların oluşumu gözlenmiştir. Bu durum daha önceki numunelerden farklı olmuştur. Çünkü birbirini birleştiren çatlaklar genelde aynı yer değiştirme seviyelerindeki kuvvetin itme ve çekme durumlarında birbirini takip ederek meydana gelmiştir. Kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlağın kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 10mm. olduğu üçüncü çevrimde 0.5mm kadar açılmasına kadar çatlaklar genelde kirişin muhtelif kesitlerinde oluşmuştur.

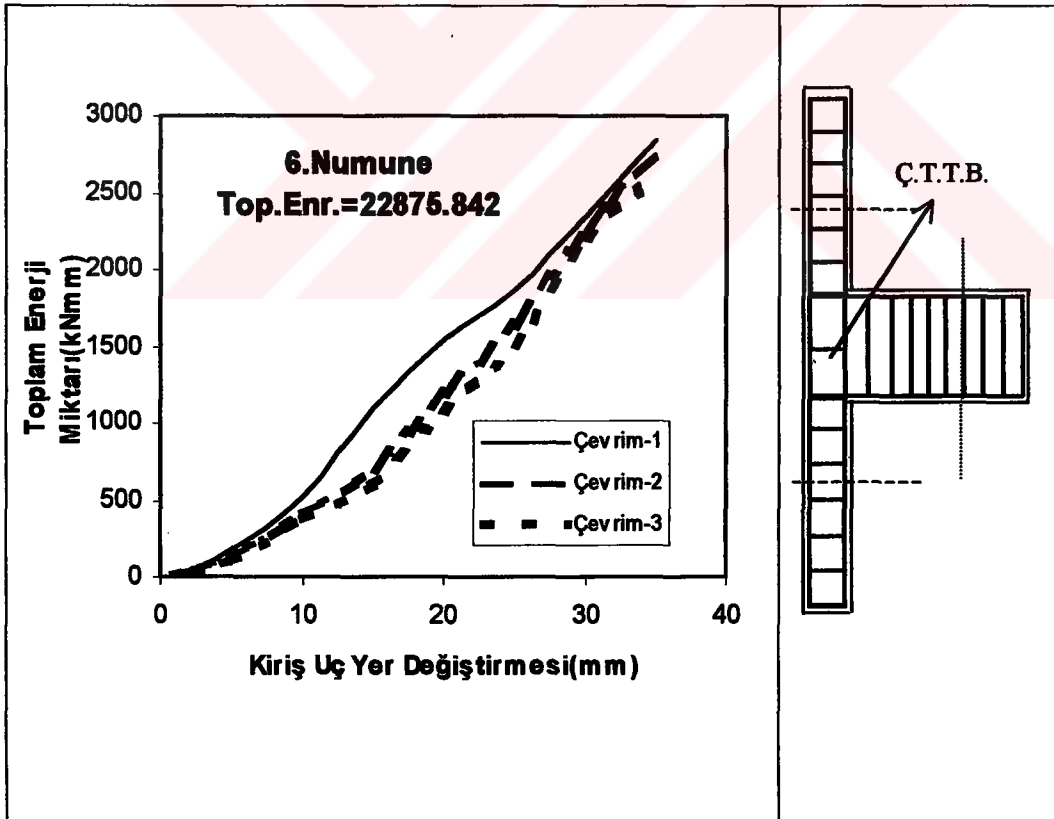
Söz konusu yer değiştirme seviyesinin(10mm.) son çevriminde kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş kesitlerinde düşey çatlaklar oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 20mm. olduğu çevrimlerde, kolon yüzündeki kiriş çatlağı yaklaşık 1.6mm. genişlemesiyle beraber kolon-kiriş birleşim bölgesinde yatayla yaklaşık 45° açı yapan eğik kayma çatlağı oluşmuştur. Bu çatlağı dik kesen diğer eğik kayma çatlağı ise kiriş uç yer değiştirmesinin 25mm. olduğu üçüncü çevrimde meydana gelmiştir.

Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 35mm. olduğu üçüncü çevrimde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlağın kesitin ön kenarında bir tarafta 12mm., diğer tarafta 10mm., aynı kesitin arka kenarında 2mm. kadar açıldığı ve kolon kesitine doğru ilerlediği gözlenmiştir. Kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlakların bu mertebelerde açılması ve önceki numunelerle karşılaştırmalar açısından benzer mertebelerde kiriş uç yer değiştirmelerine sahip olması düşüncesiyle deney bu

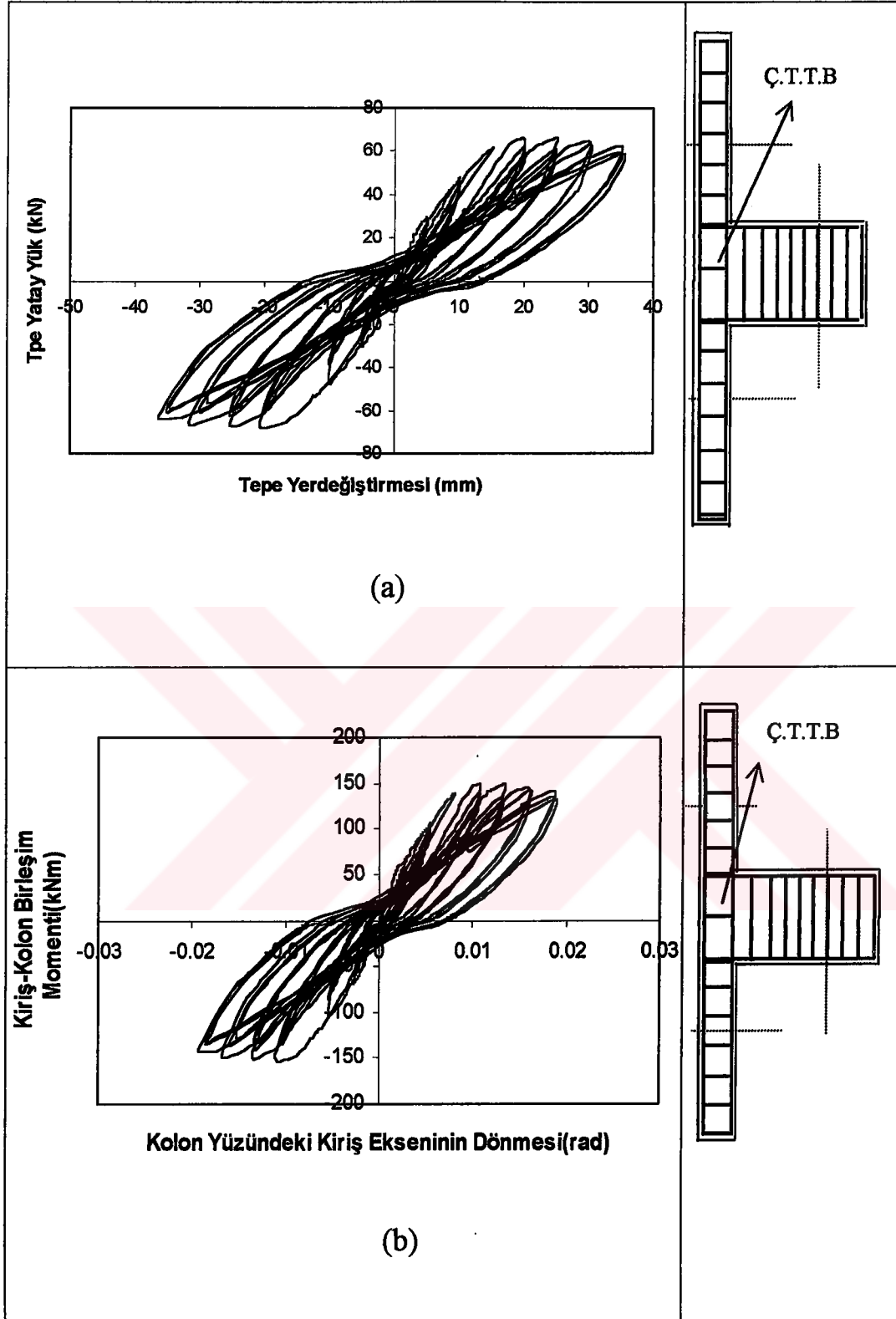
aşamada bitirilmiştir. Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil-2.25b' de gösterilmiştir.

Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi (rad) – kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm) ve kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği (rad/mm) – kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine etkiyen eğilme momenti (kNm) arasındaki değişimi gösteren çevrimler Şekil-2.24a,b ve 2.25a'da verilmiştir.

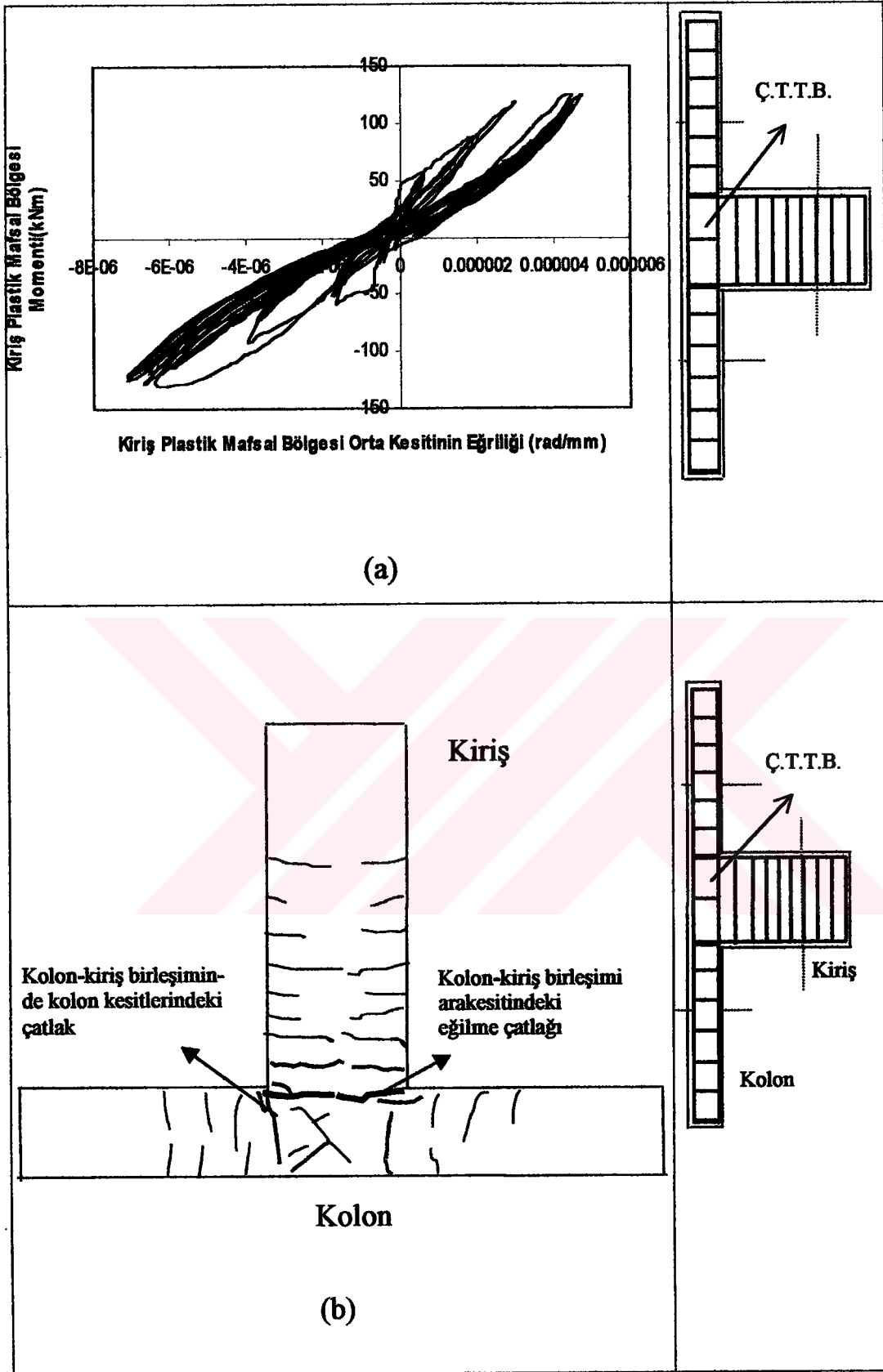
Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerlerini iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında söz konusu numune için toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.23'de verilmiştir.



Şekil-2.23: İki yönlü tekrarlı yükler altında, altıncı numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri



Şekil-2.24: Altıncı numunenin a)kiriş uç yükü(kN)-kiriş uç deplasmanı(mm), b)kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti(kNm)- kolon yüzündeki kiriş eksenî dönmesi(rad)

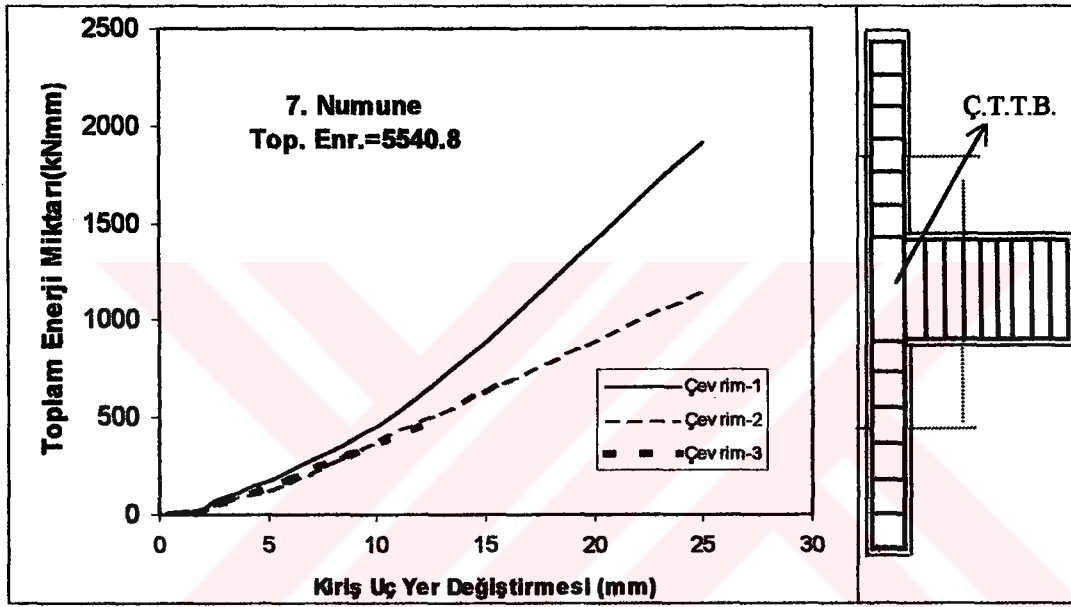


Şekil-2.25: Altıncı numunenin a) kiriş plastik mafsai bölgesi orta kesitinin eğriliği(rad/mm)-aynı kesite etkiyen eğilme momenti (kNm), b) numunenin deney sonundaki çatlak dağılımlarının genel görünüşü

Numune-7 : Bu numunede, kolon-kiriş birleşim bölgesi ile kirişte, kolon yüzünden itibaren $60\text{cm}(h_{\text{kiriş}})$, kolonda, kiriş üst ve alt yüzünden itibaren $50\text{cm}(2b_{\text{kolon}})$ kadar bölgede Ç.T.T.B. kullanılmıştır. Bu bölgenin dışında kalan bölümlerde normal beton kullanılmıştır. Bununla birlikte numunenin kolon-kiriş birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı yerleştirilmemiş olup, geri kalan bölgelerdeki enine donatılarda da sıklaştırma yapılmamıştır. Betonun kalıba hatalı yerleştirilmesinden dolayı kirişin muhtelif bölgelerinde ve kolon-kiriş birleşim arakesitinde kiriş yüksekliği doğrultusunda(moment yönüne göre) boşluklar oluşmuştur. Boşlukların bulunduğu bölgelerdeki ayrışan agregalar kırıldıktan ve bu bölgeler iyice yıkanıp temizlendikten sonra yüksek çimento dozajlı ve ince daneli agregaya sahip betonla sıkıştırılarak doldurulmuştur. Bu betonun da sertleşmesinden sonra numune kaldırılıp yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Bu numunede kullanılan betonun silindir basınç dayanımı ile beton prizmanın eğilme çekme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5’de verilmiştir.

Bu numunede ilk çatlak kiriş uç yer değiştirmesinin 1.5mm olduğu çevrimde kuvvet itme durumunda iken kolon-kiriş birleşim arakesitinin önyüzünde çekme lifinde eğilme çatlağı olarak meydana gelmiştir. Aynı yer değiştirme seviyesinde, aynı kesitte kuvvet ters yönde yani çekme durumunda iken daha önce oluşmuş çatlağı birleştiren yeni bir eğilme çatlağı oluşmuştur. Bu çatlağın olduğu kesitin ön yüzünde imalat esnasında betonun hatalı yerleştirilmesinden kaynaklanan boşluk oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirme seviyesi 3mm olduğu zaman kuvvetin itme ve çekme durumunda bir önceki çatlakların bulunduğu kesitin arka yüzünde çatlaklar meydana gelmiştir. Aynı yer değiştirme seviyesinin son çevriminde kolon-kiriş birleşim arakesitinden yaklaşık 5cm ve 55cm mesafedeki kiriş kesitinde yeni çatlaklar oluşmuştur. Yüklemin ileri aşamalarında kirişin muhtelif kesitlerinde, kuvvetin itme ve çekme durumlarında birbirini birleştiren eğilme çatlakları oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 12mm olduğu çevrimlerde kolon-kiriş birleşim arakesitinden 5cm mesafedeki kiriş kesitinin ön yüzünde, çatlak yaklaşık 1mm. , arka yüzünde 2.5mm. , kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlak, kesitin ön yüzünde 0.9mm. , arka yüzünde 2.5mm kadar genişlemiştir. Aynı yer değiştirme seviyesinde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlağın hemen altında ve bu çatlağa paralel çatlakla beraber, kolon-kirişin birleşim bölgesinde kiriş kesitlerinde düşey çatlaklar meydana gelmiştir. Ancak kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinin 24mm.

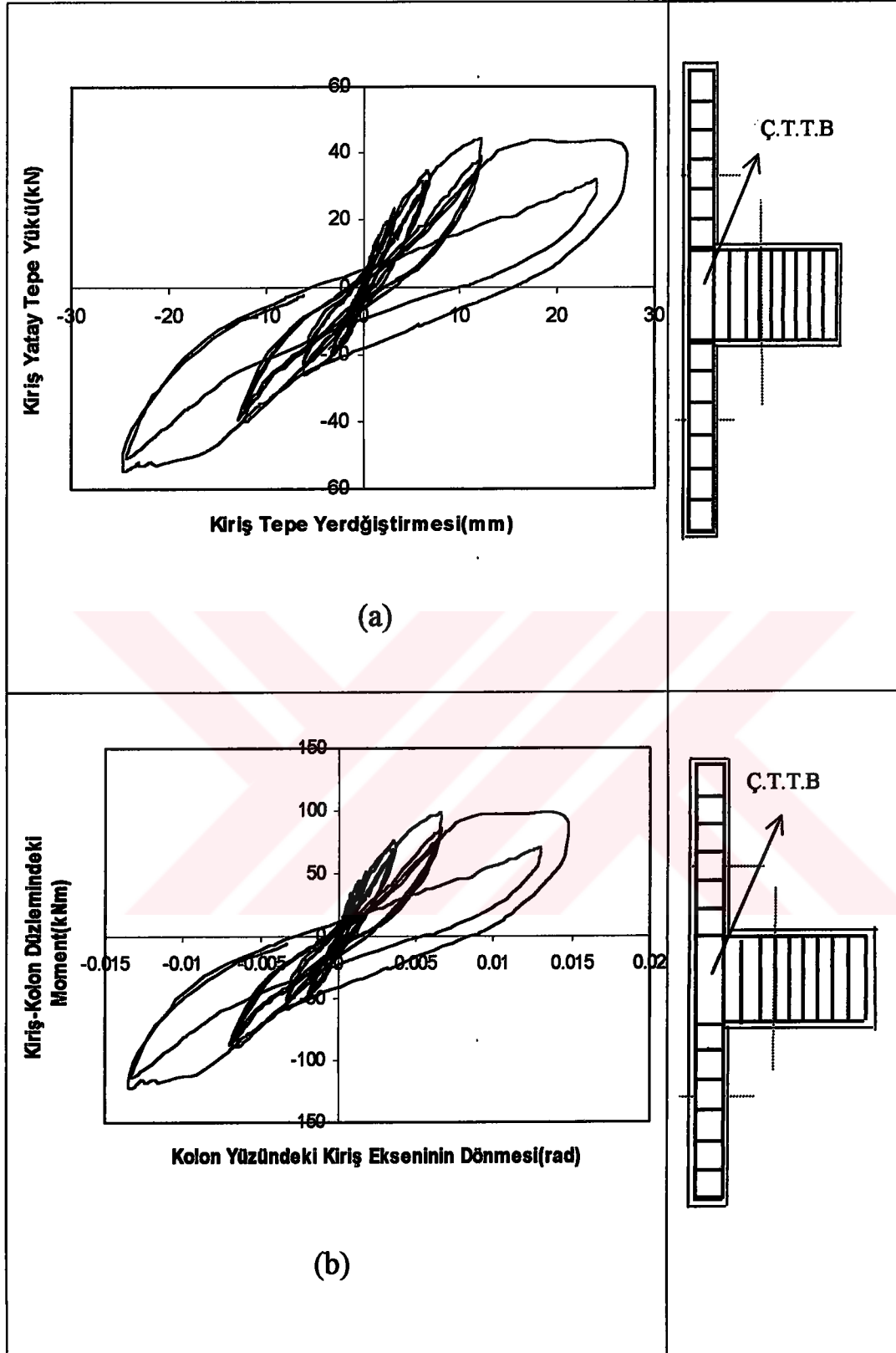
olduğu ikinci çevrimde, kolon-kiriş birleşim arakesitindeki ve bu kesitin 5cm üzerindeki tamir harcı ile doldurulmuş boşlukların bulunduğu kesitlerde daha önce oluşan çatlaklar aniden sırasıyla 6 mm ve 8 mm kadar genişlemiştir. Aynı zamanda kolonda, kirişin birleşim bölgesini sınırladığı kolon kesitindeki çatlak genişliği yaklaşık 1.5 mm olmuştur. Kiriş ve kolon kesitlerindeki çatlakların aniden çok fazla genişlemesinden dolayı deney bu aşamadan sonra devam ettirilmemiştir. Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil 2.28b' de gösterilmiştir.



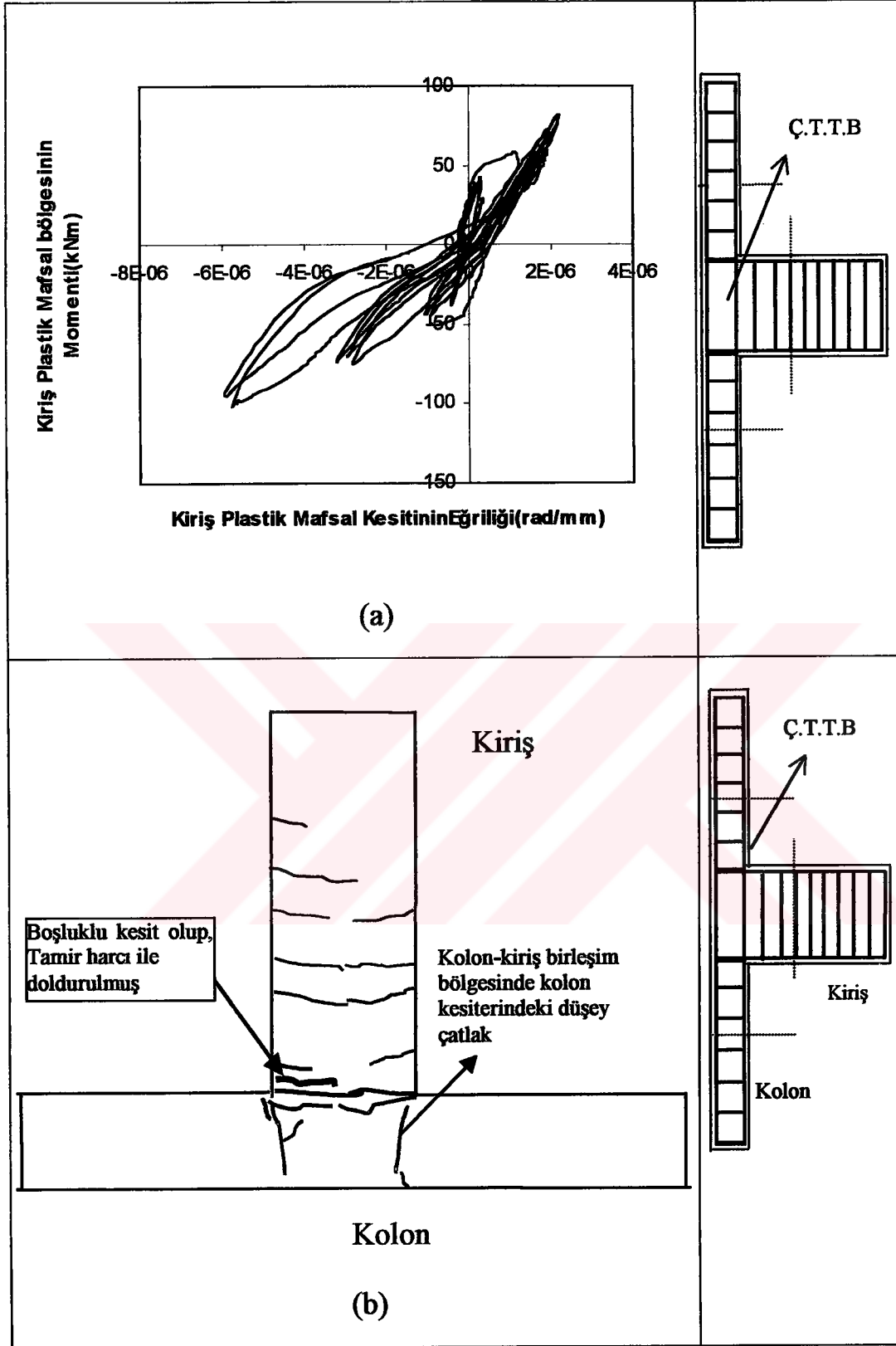
Şekil-2.26: İki yönlü tekrarlı yükler altında, yedinci numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri

Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi (rad) – kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm) ve kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği (rad/mm) – kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine etkiyen eğilme momenti (kNm) arasındaki değişimi gösteren çevrimler Şekil-2.27a,b ve 2.28a'da verilmiştir.

Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerlerini iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında söz konusu numune için toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.26'da verilmiştir.



Şekil-2.27: Yedinci numunenin a) kiriş uç yer değiştirmesi(mm)-kiriş uç kuvveti(kN), b) kolon yüzündeki kiriş eksenini dönmesi(rad)-kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti (kNm)



Şekil-2.28: Yedinci numunenin a) kiriş plastik mafsal bölgesi orta kesitinin eğriliği(rad/mm)- kiriş plastik bölgesi orta kesitinin momenti (kNm), b) deney sonrasında numunedeki çatlak dağılımının genel görünüşü

Numune-8: Bu numune, hatalı yükleme sonucu erken göçen ikinci numunenin aynısı olarak, beşinci numune ile birlikte üretilmiştir. Ancak bu numunede de betonun yanlış yerleştirilmesi neticesinde kirişin yarı uzunluğuna kadar ve genişliği doğrultusunda boşluklar oluşmuştur. Boşlukların bulunduğu bölgelerdeki ayrışan agregalar kırıldıktan ve bu bölgeler iyice yıkayıp temizlendikten sonra yüksek çimento dozajlı ve ince daneli agregaya sahip betonla sıkıştırılarak doldurulmuştur. Bu betonun da sertleşmesinden sonra numune kaldırılıp yükleme çerçevesine yerleştirilmiştir. Sekizinci numunede kullanılan betonun silindir basınç dayanımı ile beton prizmanın eğilme çekme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5’de verilmiştir.

Bu numunede ilk çatlak kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 3 mm. olduğu çevrimde kuvvet çekme yönünde iken kolon-kiriş birleşimi arakesitinde meydana gelmiştir. Bu çatlağın karşısı ise yer değiştirme seviyesinin 4 mm. olduğu çevrimde kuvvet itme durumunda iken oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesi 8 mm. olduğu çevrimlerde kolon-kiriş birleşimi arakesitine yakın kesitlerden kirişin yarı uzunluğuna kadar muhtelif kesitlere dağılan eğilme çatlakları oluşmuştur.

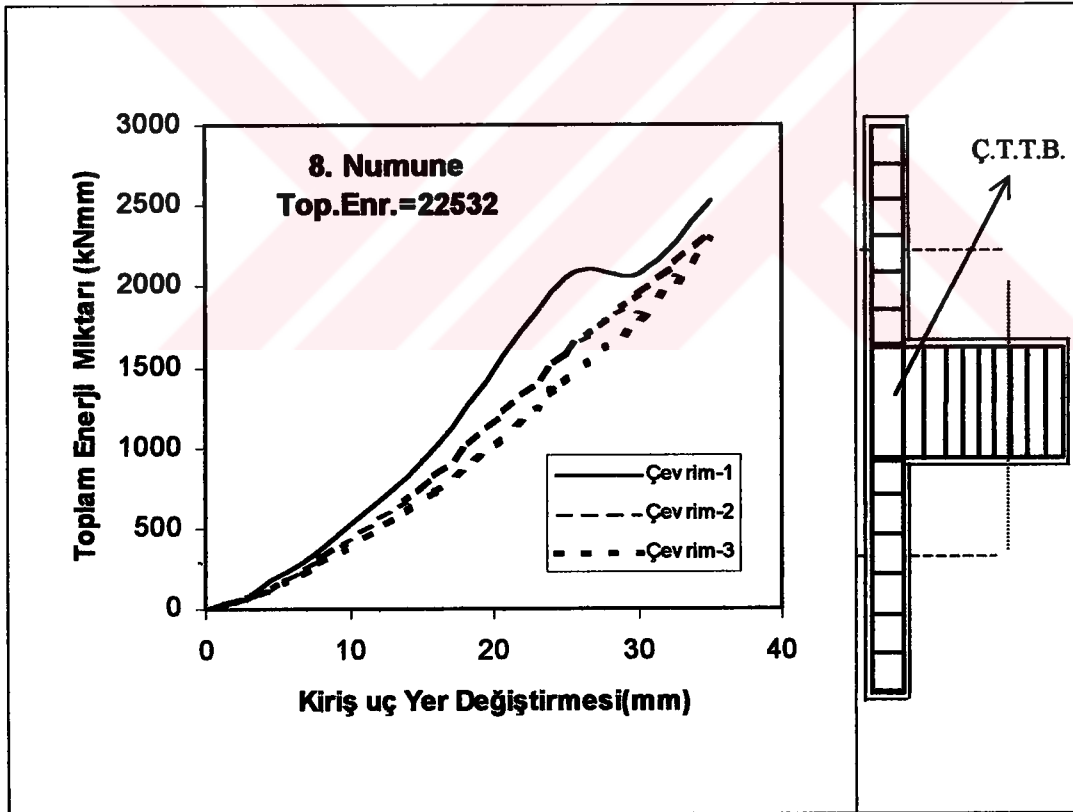
Aynı yer değiştirme seviyesinde, kirişin kolon yüzünden başlayan kolona doğru ilerleyen bir çatlakla kolon-kiriş birleşimi arakesitindeki eğilme çatlağına paralel kolonda da bir başka çatlak oluşmuştur. Kolondaki bu çatlaklara ilaveten kolon-kiriş birleşim bölgesinin kiriş kesitinde ve birleşim bölgesi dışındaki kolonun muhtelif kesitlerinde de eğilme çatlakları oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 16mm olduğu çevrimlerin başlangıcında, kolon-kiriş birleşimi arakesitindeki eğilme çatlağı 0.4 mm, bu çatlağı paralel olan kolon çatlağı, 0.2 mm., son çevrimde 0.5 mm kadar genişlemiştir. Kolondaki bu çatlaklara ilaveten birleşim bölgesinde kirişe yakın yerlerde uzunluğu kısa olan eğik çatlaklar da oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesi 30mm. olduğu yüklemenin ileri aşamalarında, aynı çatlaklardan kirişteki eğilme çatlağı 8 mm., kolondaki çatlağı 7 mm., birleşim bölgesindeki eğik çatlak da kiriş yüzüne doğru ilerlerken yaklaşık 3 mm. kadar genişlemiştir.

Bu numunenin de kiriş uç yer değiştirmesinin 35 mm. olduğu üçüncü çevrimde kolon yüzündeki kiriş çatlağı kesitin ön yüzünde bir tarafta 12 mm., diğer tarafta kesitin arka yüzünde 5 mm. kadar genişlemiştir. Bu aşamadan sonra deneye devam

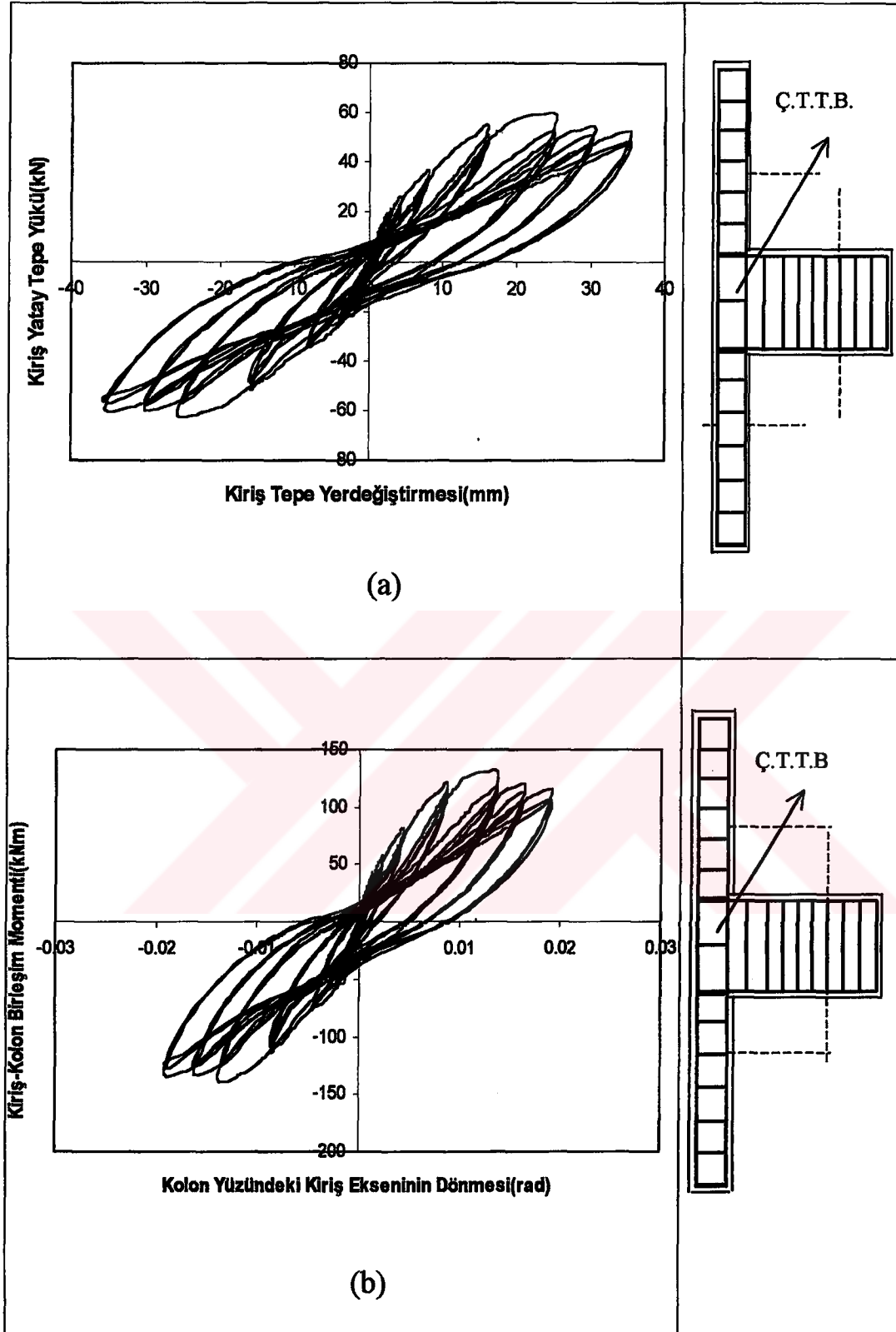
edilmemiştir. Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil 2.31b’de gösterilmiştir.

Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi (rad) – kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm), kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğrilmesi (rad/mm) – kiriş plastik mafsallık kesitinin eğilme momenti (kNm) aralarındaki çevrimleri gösteren grafikler de aşağıda verilmiştir.

Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerlerini iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında söz konusu numune için toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.29’da verilmiştir.



Şekil-2.29 İki yönlü tekrarlı yükler altında, sekizinci numune için toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri



Şekil-2.30 Sekizinci numunenin a) kiriş uç yer değiştirmesi(mm)–kiriş uç kuvveti(kN), b) kolon yüzündeki kiriş ekseninin dönmesi (rad) – kolon yüzündeki moment(kNm)

Numune-9 : Yedinci numunenin kolon-kiriş birleşim arakesitinde, kiriş yüksekliği doğrultusundaki boşluklar nedeniyle 24 mm.'lik kiriş uç deplasmanında ani gevrek göçme meydana gelmiştir. Bundan dolayı yedinci numunenin benzeri olarak dokuzuncu numune üretilmiştir. Bu numunede Ç.T.T.B. kolon-kiriş birleşim bölgesi ile kirişte kolon yüzünden 60 cm ($h_{kiriş}$), kolonda kiriş üst ve alt yüzünden 50cm.($2b_{kolon}$) kadar bir mesafedeki bölgelerde kullanılmış olup, sadece bu numunede betonun beklenen miktardan az gelmesinden dolayı Ç.T.T.B. karışımındaki tel miktarı, beton karışım hacminin %3'ü kadar olmuştur. Çelik tel miktarının bu kadar yüksek olmasına rağmen numunede herhangi bir boşluk oluşmamıştır. Bu numunede kullanılan betonun silindir basınç dayanımı ile beton prizmanın eğilme çekme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5'de verilmiştir. Kolon-kiriş birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı kullanılmamış olup, diğer bölgelerde de enine donatı aralıkları sıklaştırılmamıştır.

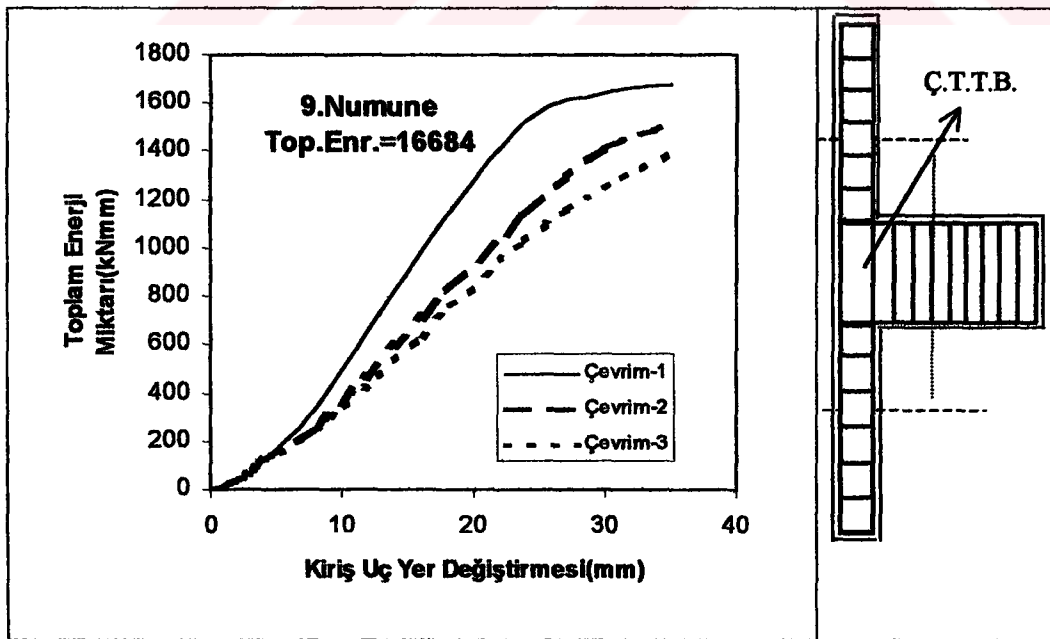
Bu numunede ilk çatlak, kiriş uç deplasmanı 2 mm. olduğu çevrimde, kuvvet çekme yönünde iken kirişte, Ç.T.T.B.'nun kullanıldığı bölgenin sınırında, bir başka söylemle kolon-kiriş birleşim arakesitinden 60 cm kadar mesafede meydana gelmiştir. Kiriş uç yer değiştirmesi 8mm. olduğu çevrimde, kuvvet itme durumunda iken bu çatlağı birleştiren yönde yeni çatlak ile beraber kolon-kiriş birleşim arakesitinden yaklaşık 25cm mesafede kirişte yeni bir eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Bununla birlikte kolon-kiriş birleşim arakesitinde başlayıp kolona doğru ve kiriş enkesitine paralel ilerleyen çatlak da aynı yer değiştirme seviyesinde oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 16 mm. olduğu üçüncü çevrimde, kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlağın 0.6mm, kirişte oluşan ilk çatlağın da 0.2mm açılmasına kadar kirişin muhtelif kesitlerinde genel olarak eğilme çatlakları meydana gelmiştir.

Kolonda çatlakların oluşumu ve dağılımı ise; kiriş uç yer değiştirmesinin 16mm olduğu çevrimlerde kolon-kiriş birleşim bölgesinde kiriş kesitlerinde düşey olarak meydana gelmişti. Kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinin 24mm. olduğu çevrimlerde kuvvet çekme yönünde iken kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlağın 3mm., bu çatlağa paralel olan kolondaki çatlağın da yaklaşık 2mm. kadar genişlemesiyle birleşim bölgesinde yatayla 45^0 açı yapan birbirine paralel üç adet eğik kayma çatlağı oluşmuştur. Kuvvet ters yönde yani itme durumunda iken de bu eğik çatlaklara dik

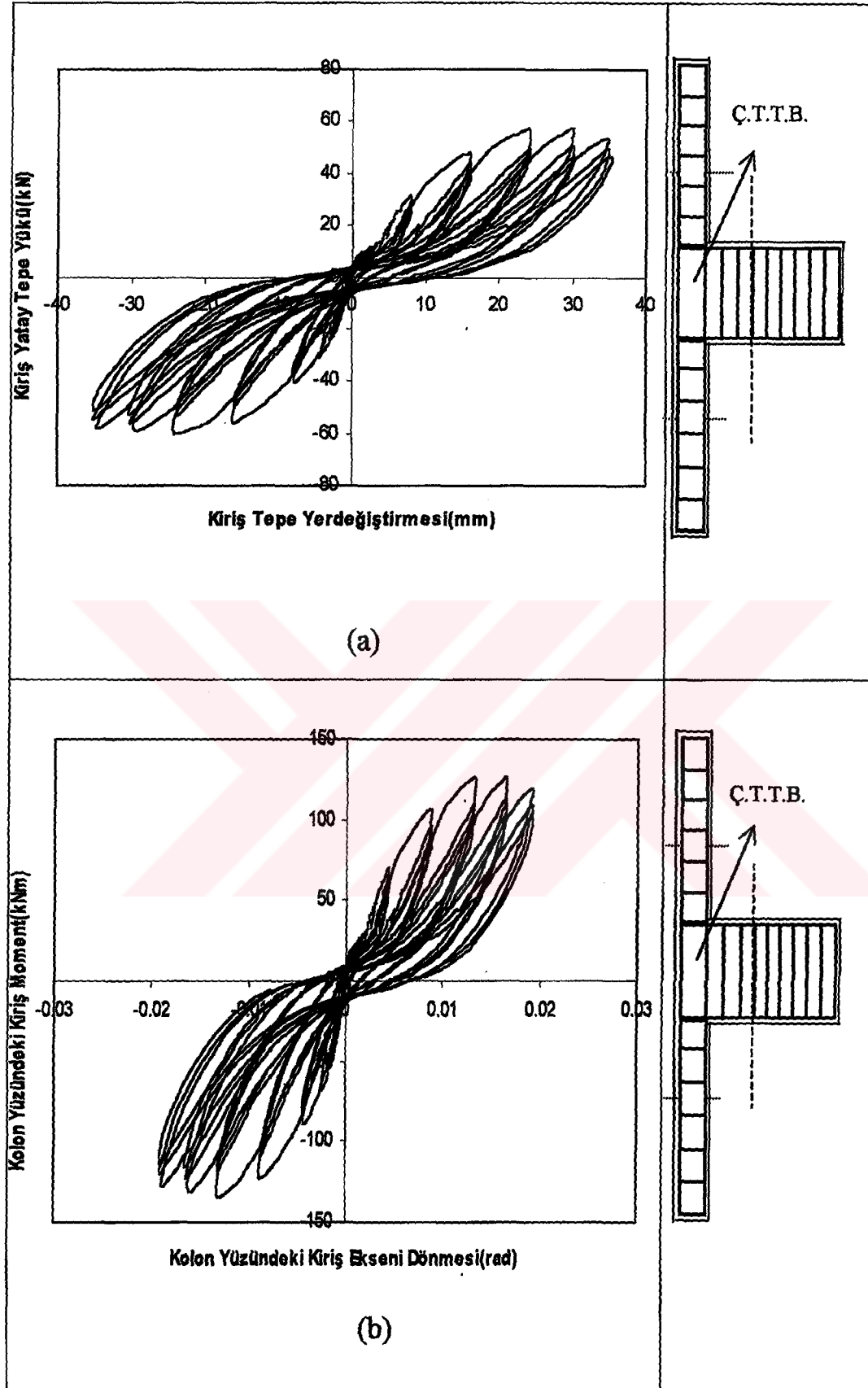
olan başka eğik çatlaklar da oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 35mm olduğu üçüncü çevrimde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı kesitin ön yüzünde bir tarafta 10mm., kuvvet ters yönde iken kesitin diğer tarafında 5mm. kadar genişlemiştir. Aynı çatlaklar numunenin arka yüzünde sırasıyla 6mm ve 2.5mm. kadar genişlemiştir. Bu çatlakların çok fazla genişlemesinden dolayı deney bu yer değiştirme seviyesinde bitirilmiştir. Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil- 2.34b’de gösterilmiştir.

Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kiriş ekseninin kolon yüzündeki dönmesi (rad) – kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm), kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği (rad/mm) – kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine etkiyen eğilme momenti (kNm) arasındaki değişimi gösteren çevrimler Şekil-2.33a,b ve 34a’da verilmiştir.

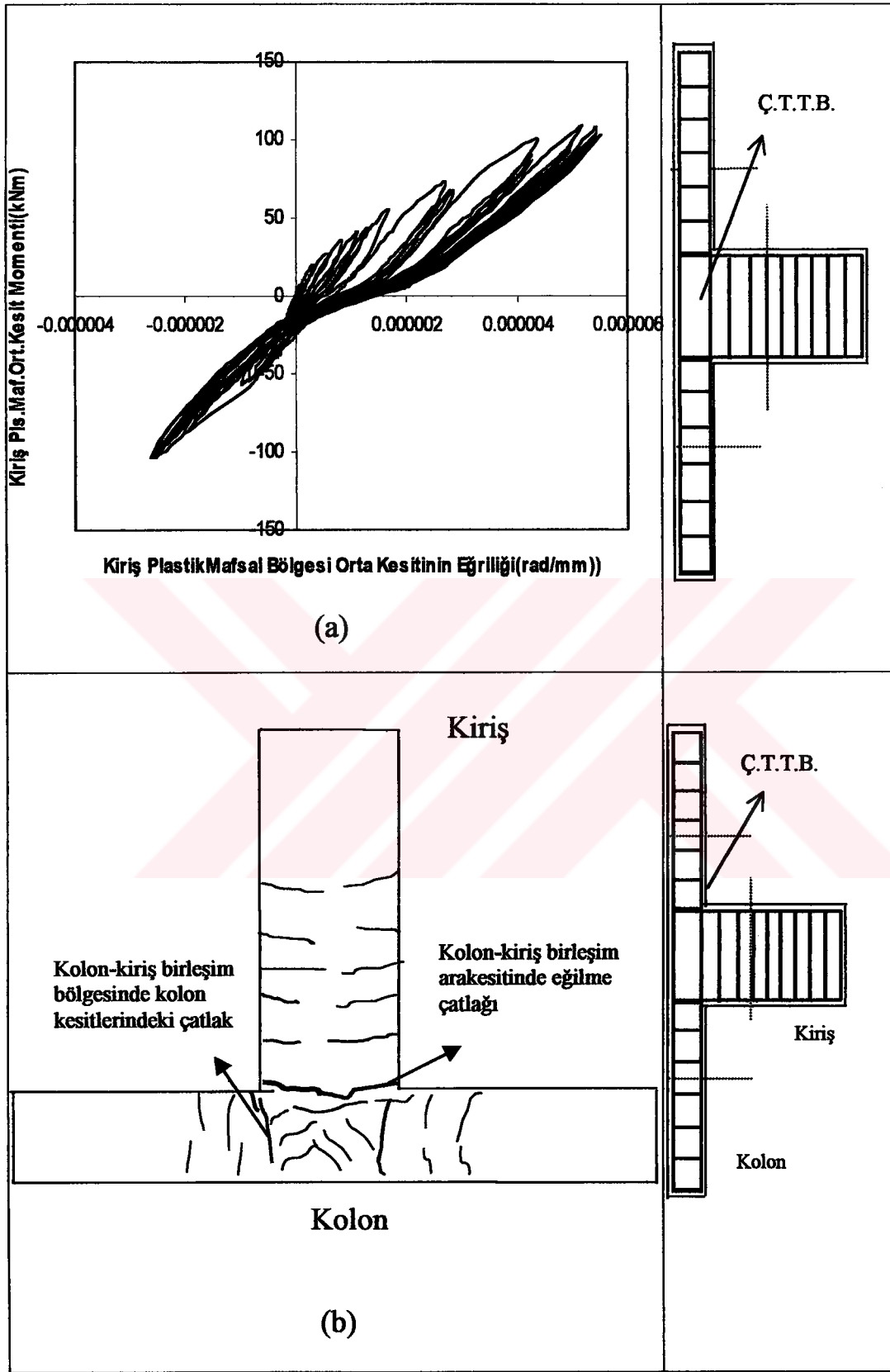
Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerlerini iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında söz konusu numune için toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.32’de verilmiştir.



Şekil 2.32 İki yönlü tekrarlı yükler altında, dokuzuncu numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri



Şekil-2.33 Dokuzuncu numunenin a) kiriş uç yer değiştirmesi(mm)–kiriş uç kuvveti(kN), b) kolon yüzündeki kiriş eksenî dönmesi (rad) – kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti(kNm)



Şekil-2.34 Dokuzuncu numunenin a) kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğriliği(rad/mm)-kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitindeki moment(kNm), b) deney sonunda numunedeki çatlak dağılımlarının genel görünüşü

Numune –10 : Bu numunede Ç.T.T.B. kolon-kiriş birleşim bölgesi ile kirişte kolon yüzünden 30cm($h_{kiriş}/2$), kolonda kiriş üst ve alt yüzünden 50cm($2b_{kolon}$) kadar mesafedeki bölgede kullanılmıştır. Geri kalan bölgelerde ise normal beton kullanılmıştır. Bu numunede kullanılan betonun silindir basınç dayanımı ile beton prizmanın eğilme çekme dayanımları sırasıyla Bölüm-2.4 ve 2.5’de verilmiştir. Bununla birlikte birleşim bölgesinde sadece bir adet kolon enine donatı yerleştirilmiş olup, diğer bölgelerde enine donatı aralıkları sıklaştırılmamıştır.

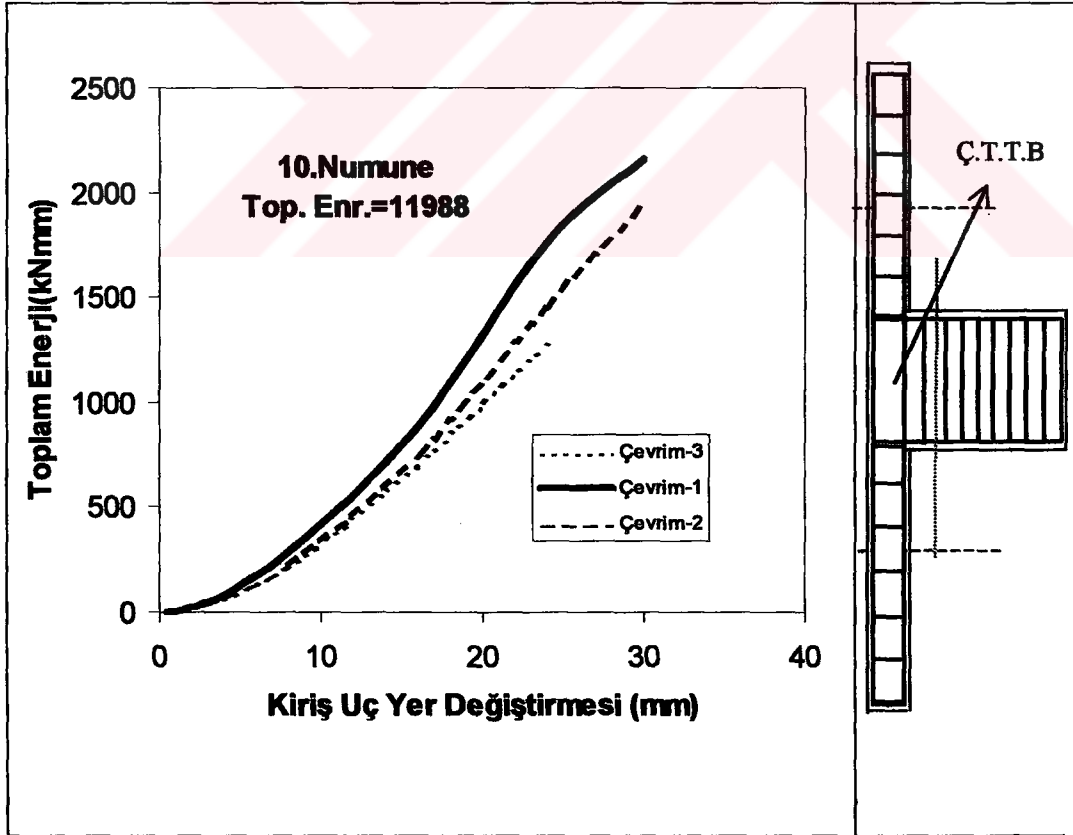
Kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinin 2.5mm. olduğu çevrimde ve kuvvet çekme durumunda iken kirişte Ç.T.T.B. ile normal betonun arakesit bölgesinde bir eğilme çatlağı oluşmuştur. Bir sonraki adım olan yer değiştirme seviyesinin 4mm. olduğu birinci çevrimde kuvvetin itme olması durumunda aynı kesitte bir önceki çatlağı birleştiren bir başka eğilme çatlağı oluşmuştur. Bu yer değiştirme seviyesinin üçüncü çevriminde kolon-kiriş birleşim arakesitinde eğilme çatlakları ile bu çatlakların yakınında ve paralel olan kolon kesitinde de çatlaklar oluşmuştur. Yüklemin ileri adımlarında kirişin muhtelif kesitlerinde kuvvetin yönüne göre birbirini birleştiren eğilme çatlakları oluşmuştur. Bu numunedeki çatlakların gelişimi ve genişlemesi, önceki numunelerden farklı olmuştur. Çünkü yüklemenin ileri aşamalarında önceki numunelerde genelde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlaklar genişleyerek deneyin sürecinde belirleyici olurlarken, bu numunede kolon yüzünden yaklaşık 30cm mesafedeki kiriş çatlağı deney sonuna kadar her deplasman aşamasında sürekli genişlemiştir. Söz konusu bu çatlağın kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 16mm. olduğu çevrimlerde 0.3mm., kolon-kiriş birleşim arakesitindeki çatlağın da 0.4mm. kadar genişlemesiyle kolon-kirişin birleşim bölgesindeki kiriş kesitlerinde düşey çatlaklar oluşmuştur. Birleşim bölgesinde yatayla yaklaşık 45^0 açı yapan eğik kayma çatlakları da kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 24mm olduğu çevrimlerde meydana gelmiştir. Bu yer değiştirme seviyesinde kolon-kiriş birleşim arakesitinden 30cm mesafedeki kiriş eğilme çatlağı 2mm. kadar genişlemiştir.

Kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinin 30mm olduğu birinci çevrimde kirişte Ç.T.T.B. ile normal beton kullanıldığı farklı bölgelerin arakesitindeki çatlak 6mm., aynı deplasman seviyesinin ikinci çevriminde bu çatlak aniden 12mm. kadar genişlemiştir. Çatlağın bu kadar genişlemesinden dolayı deneye devam edilmemiştir.

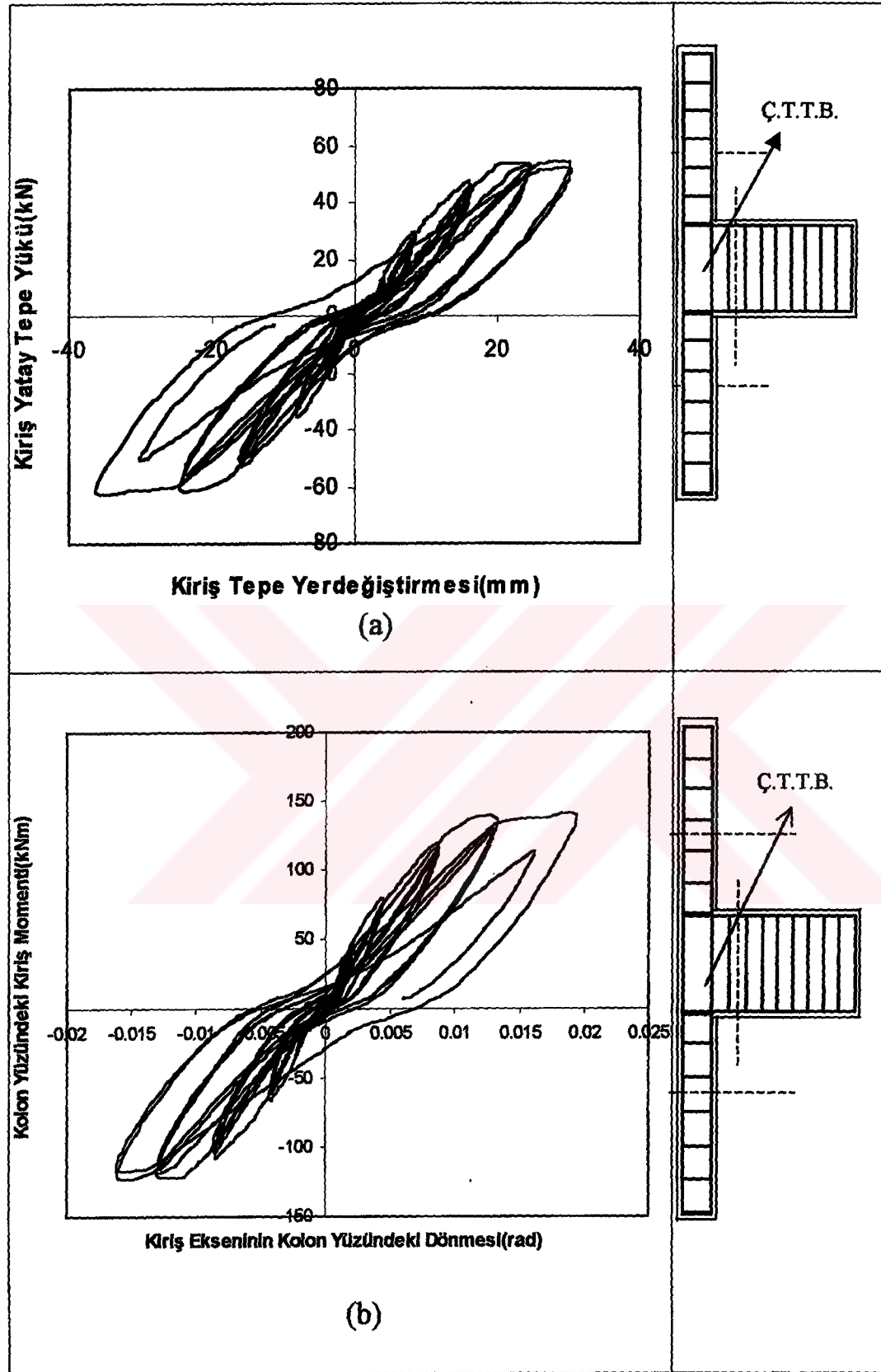
Deney neticesinde numunede oluşan çatlaklar genel olarak numune krokisi üzerinde Şekil-2.37b’de gösterilmiştir.

Bu numuneye ait deneyden elde edilen verilerle; kiriş uç yer değiştirmesi (mm) - kiriş uç kuvveti (kN), kirişin kolon yüzündeki dönmesi (rad) – kirişin kolon yüzündeki eğilme momenti (kNm) ve kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin eğrilmesi (rad/mm) – kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine etkiyen eğilme momenti (kNm) arasındaki değişimi gösteren çevrimler Şekil-2.36a,b ve 2-37a’da verilmiştir.

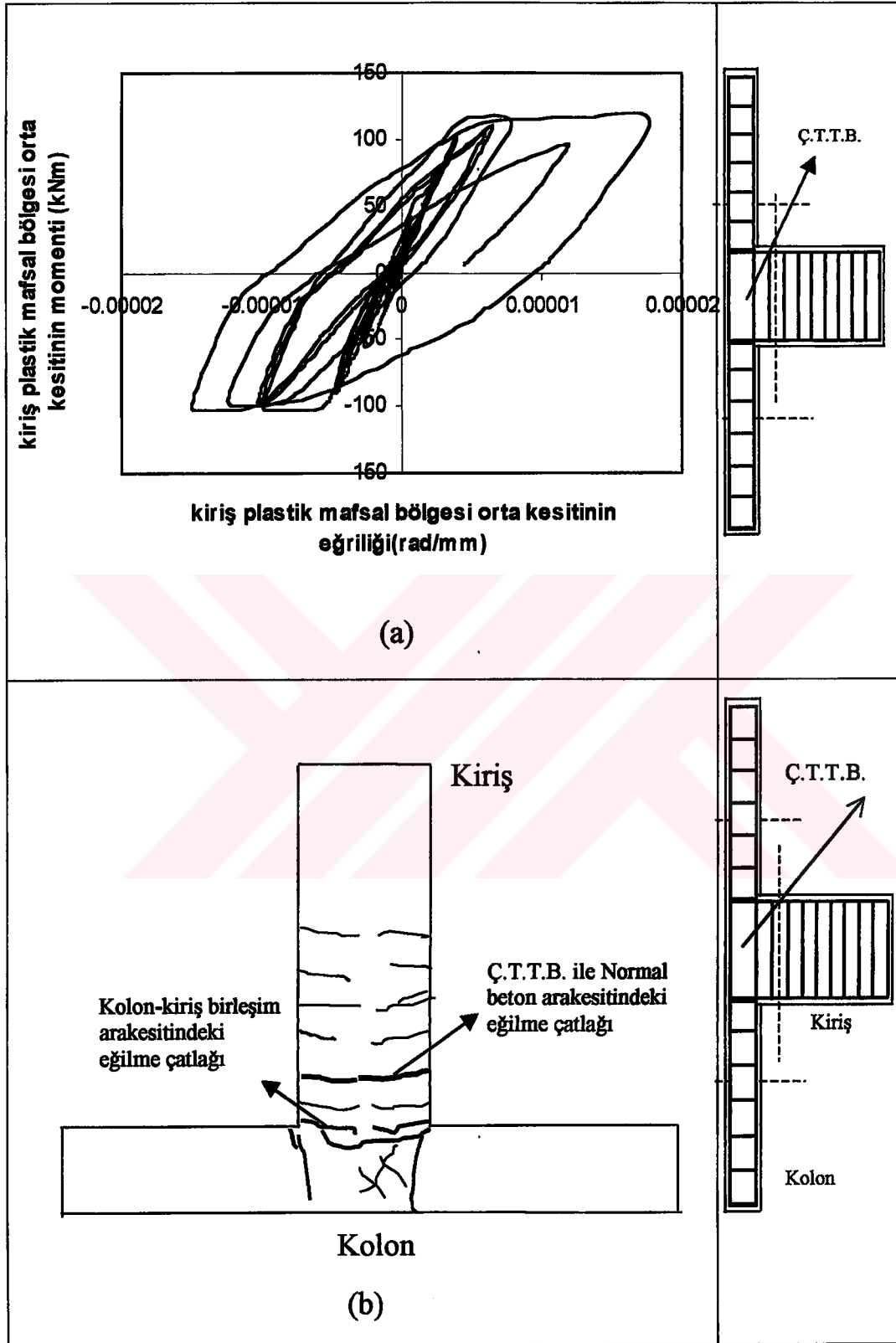
Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tekrarlı yüklerin kiriş uç yer değiştirmesine göre yapmış oldukları iş değerleri her bir yükleme çevrimi için hesaplanmıştır. Bu iş değerlerini iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında söz konusu numune için toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi seviyelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil-2.35’de verilmiştir.



Şekil-2.35 İki yönlü tekrarlı yükler altında, onuncu numuneye ait toplam enerji miktarının kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğri



Şekil-2.36 Onuncu numunenin a) kiriş uç yer değıştirmesi(mm)–kiriş uç kuvveti(kN), b) kolon yüzündeki kiriş ekseninin dönmesi (rad) – kolon yüzündeki kiriş eğilme momenti(kNm)



Şekil-2.37 Onuncu numunenin a) kiriş plastik mafsalsal bölgesi orta kesitinin eğriliği(rad/mm)-kiriş plastik mafsalsal bölgesi orta kesitindeki moment(kNm), b)deney sonunda numunedeki çatlak dağılımlarının genel görünüşü

2.7 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

2.7.1. Numunelerin Hasar Dağılımları

Numunelerdeki hasar dağılımı iki grupta incelenmiştir. Bu gruplardan biri, numune yüklenmeden önce, hatalı beton dökümü ve yerleştirilmesinden kaynaklanan ve uygulamada sıkça rastlanan segregasyon neticesindeki numunede oluşan boşluklar, diğeri ise her bir yükleme çevrimi sonucunda oluşan çatlakların gelişimidir.

Birinci gruba dahil edilmiş yedinci ve sekizinci numunelerde, deney öncesi segregasyondan kaynaklanan boşluklar iyice temizlendikten sonra yüksek çimento dozajlı harç ile doldurulup, sıkıştırılmıştır. Bu tamir harcı sertleştikten sonra numune deneye tabi tutulmuştur. Bu iki numunedeki segregasyon boşluklarının yeri deney sonuçlarını çok etkilemiştir. Yedinci numunede, kiriş eğilme momentine göre kiriş kesitinin 60cm'lik yüksekliği doğrultusunda ve kirişte moment etkisinin en büyük olduğu birleşim arakesitinde boşluk oluşmuştur. Bu numunede kiriş uç yer değiştirmesinin 24mm olduğu ikinci çevrimde sözkonusu boşluğun civarında önceki yükleme adımlarında oluşan çatlağın aniden 8 mm kadar genişlemesi ile deneye son verilmiştir.

Böyle bir kusura sahip olan ikinci numune ise sekizinci numune olmuştur. Bu numunedeki segregasyon boşlukları daha derin ve daha büyük çapta kiriş kesitinin 25cm'lik derinliği doğrultusunda oluşmuş olup, yine bu boşluklar tamir harcı ile doldurulup, sıkıştırıldıktan sonra beton sertleşince numune deneye tabi tutulmuştur. Benzer yükleme aşamalarına maruz kalan bu numune, 35mm'lik hedef kiriş uç yer değiştirmesinin üçüncü çevriminde göçmüştür. Bu numune ile benzer özelliklere sahip altıncı numune karşılaştırıldığı zaman çatlak dağılımı açısından çok büyük farklar oluşmamıştır. Ancak sekizinci numunenin yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma miktarının azaldığı gözlenmiştir.

Numunelere uygulanan iki yönlü tekrarlı yüklemeler sonucunda oluşan çatlakların konumu ve gelişimi Bölüm 2.6'da ayrıntılı açıklanmıştır. Bu hususlar aşağıda kısaca tekrar açıklanmış olup, bu açıklamalara göre değerlendirmeler maddeler halinde sunulmuştur.

a) A.B.Y.Y.H.Y.'de süneklik seviyesi yüksek kolon-kiriş birleşim koşullarına uygun olarak hazırlanmış olan normal betonlu *birinci numune*de, deney sonuna kadar oluşmuş çatlakların tamamı eğilme çatlakları türünden olup, ilk eğilme çatlağı 2.5mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinde kolon-kiriş birleşim arakesitinden 20cm uzaktaki kiriş kesitinde oluşmuş, deneyin bitirilmesinde etkili olan kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı ise 4mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinde oluşmuştur. Aynı kesitte oluşan çatlakların, genelde itme ve çekme etkilerinde birbirini bağlayacak şekilde ilerledikleri grlmştr. Kirişin kolon yüzündeki eğilme çatlağı 35mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinde yaklaşık 7mm kadar genişlemiş ve bu çatlağın hemen üstündeki başka çatlakla birleşerek kirişten beton parçanın düşmesiyle deneye son verilmiştir. Bu numunede hiçbir eğik kayma çatlağının oluşmamış olmasından dolayı kayma donatısının yeterli olduğu dşnlmştr.

b) Birleşim bölgesinde hiçbir enine donatının bulunmadığı, birleşim ve sarılma bölgelerinde .T.T.B.'nun kullanıldığı *nc numune*de, ilk çatlak, eğilme çatlağı olup, kiriş uç yer değiştirmesinin 1.5mm olduğu çevrimde kolon-kiriş birleşim arakesitinden 25cm mesafede meydana gelmiştir. Deneyin sonuçlanmasında etkili olan kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı ise 3mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinde oluşmuştur. 12mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinin üçüncü çevriminde, kolon-kiriş birleşim bölgesinin kiriş kesitlerinde düşey eğilme çatlağı oluşmuştur. Aynı aşamada, kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı yaklaşık 0.5mm kadar genişlemiştir. Bu atlakdan sonra 24mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinin ikinci çevriminde, birleşim bölgesinde yatayla yaklaşık 45° açı yapan eğik kayma çatlağı da meydana gelmiştir. Aynı evrimin ters yönlü yüklemede bir önceki eğik atlağa dik yönde başka eğik kayma çatlağı oluşmuştur. 35mm'lik kiriş uç yer değiştirmesinin üçüncü çevriminde, kirişin kolon yüzündeki çatlak, kirişin bir yüzünde 8mm kadar genişlerken, diğer yüzünde çatlağı dik kesen elik tellerin etkisi ile aynı çatlak 3.5mm kadar genişlemiştir. Aynı çevrimde birleşim bölgesindeki X kayma çatlağının ise yaklaşık 1mm kadar genişlemiş olduğu gözlenmiştir.

Bu numunenin yüklenmesi sonucunda oluşan çatlakların oluşumuna ve gelişimine göre, kolon ve kirişte genel olarak eğilme çatlakları oluşmasına

karşılık birleşim bölgesinde X şeklinde birbirini dik kesen iki adet kayma çatlağı oluşmuştur. Ancak birleşim bölgesinde oluşan 1mm genişliğindeki X kayma çatlağı, eğilme çatlaklarının iyice genişlemesinden sonra yüklemenin ileri aşamasında meydana gelmiştir. Birleşim bölgesindeki X kayma çatlağının gelişiminde, çelik tel takviyeli betonların çekme dayanımının normal betona göre daha yüksek olmasının etkili olduğu kanısına varılmıştır. Bu numunede görülen bir başka özellik ise, çatlak genişliklerinin büyümesinde beton karışımındaki çelik tellerin pozisyonu olmuştur. Çatlağı dik kesen çelik tellerin bulunduğu kesitlerde çelik teller çatlağın açılmasını engellemiştir.

- c) Kolon ve kirişin sarılma bölgesinde enine donatısının sık bulunmasına karşılık, birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı bulunmayan **dördüncü numunede**, ilk çatlak olarak, 3.7mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesinde kolon-kiriş birleşim arakesitinde eğilme çatlağı ile aynı kesitten kolona doğru ilerleyen eğik çatlak meydana gelmiştir. Kiriş uç yer değiştirmesinin 16mm olduğu kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı 1.2mm kadar genişleyip, kolon-kiriş birleşim bölgesinin kiriş kesitlerinde, düşey eğilme çatlağı oluşmuştur. Aynı uç yer değiştirme seviyesinin son çevriminde de birleşim bölgesinde X şeklinde birbirini dik kesen eğik kayma çatlakları da meydana gelmiştir. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 25mm olduğu üçüncü çevrimde kiriş uç kuvveti çekme durumunda iken; kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı, kolon- kiriş birleşim bölgesinde kiriş kesitlerindeki düşey çatlakla birleşmiş olup, bu durumda kiriş uç kuvveti sabit iken kiriş uç yer değiştirmesi aniden 30mm. değerine ulaşmıştır. Bu ani değişiklik nedeni ile bu numunede 30mm.kiriş uç deplasmanında üç çevrim tamamlanarak deney bitirilmiştir. Normal betonun kullanıldığı bu numunedeki yükleme neticesinde oluşan çatlakların gelişimine göre; kolon ve kirişin sarılma bölgelerinde enine donatı sıklaştırılması yapılmış olsa da birleşim bölgesinde hiçbir enine donatının bulunmamasından dolayı normal betonun kullanıldığı bu numune gevrek davranış göstermiş olup, diğer numunelerden daha erken göçmüştür. Dolayısıyla birleşim bölgesinde yönetmeliğe uygun kolon enine donatısı yerleştirmenin önemi bu numunede gözlenmiştir.

- d) Kirişte $h_{kiriş}$ kolonda ise $2b_{kolon}$ kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton kullanılan, birleşim bölgesinde bir adet enine donatı bulunan *beşinci numune*de, ilk çatlak kiriş uç yer değiştirmesinin 4mm olduğu çevrimde kolon-kiriş birleşim arakesitinde eğilme çatlağı şeklinde meydana gelmiştir. Kiriş uç yer değiştirmesinin 8mm olduğu çevrimlerde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağının 0.3mm kadar genişlemesiyle birlikte kolon-kiriş birleşim bölgesinin kiriş kesitlerinde düşey eğilme çatlakları oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 16mm olduğu üçüncü çevrimde kuvvet itme yönünde iken, birleşim bölgesinde yatayla yaklaşık 45^0 açı yapan eğik kayma çatlağı oluşmuştur. Bu çatlağa dik yönde diğer eğik kayma çatlağı ise kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 25mm olduğu çevrimlerde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağının yaklaşık 9mm kadar genişlemesiyle birlikte oluşmuştur. 35mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesinin ilk çevriminde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağının yaklaşık 9mm kadar çok genişlemesi ve parça dökülmesi nedeni ile deney bitirilmiştir.

Birleşim bölgesinde eğik kayma çatlağı oluşumunun dördüncü numuneye göre biraz daha ileri yük aşamalarında olmasının ve bu çatlağın genişliğinin daha küçük olmasından dolayı birleşim bölgesinde enine donatı ile çelik tel takviyeli betonun birlikte kullanılmasının etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte birleşim bölgesindeki X kayma çatlağı oluşumunu önlemekte bir etriyenin yetersiz kaldığı da gözlenmiştir. Üçüncü numune olduğu gibi bu numune 35 mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesinde üç çevrim yapılamamıştır. Böyle bir davranışın kirişte çelik tel takviyeli beton dökülen bölgenin üçüncü numuneye göre daha küçük olmasından kaynaklanmış olabildiği kanısına varılmıştır.

- e) Birleşim bölgesi ile kolon ve kirişin sarılma bölgelerinde Ç.T.T.B.'nin kullanıldığı, enine donatı aralığının sıklaştırılmadığı, birleşim bölgesinde sadece bir adet enine donatının bulunduğu *altıncı numune*de, ilk çatlak eğilme çatlağı olup, kiriş uç yer değiştirme seviyesi 2.5mm iken kolon-kiriş birleşim arakesitinde ve bu kesitten 12cm mesafede meydana gelmiştir. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 10mm olduğu üçüncü çevrimde, kolon-kiriş birleşim bölgesinin kiriş kesitinde düşey eğilme çatlağı oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 20mm olduğu çevrimlerde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki

çatlağını dik kesen diğer eğik kayma çatlağı ise 25mm uç yer değiştirme seviyesinde meydana gelmiştir. 35mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesinin üçüncü çevriminde kirişin kolon yüzündeki kesitin, bir tarafında çatlak 10mm~12mm kadar genişlemesine karşılık aynı kesitin diğer tarafındaki çatlak 2mm~3mm kadar genişlemiştir. Bu numunede de kolon yüzünde genişleyen kiriş eğilme çatlağını dik yönde kesen beton karışımındaki çelik tellerin varlığı nedeniyle çatlak genişliğinin artmadığı gözlenmiştir.

f) Yedinci numunede, hatalı beton dökümünden kaynaklanan segregasyon boşluklarının deney sonuçlarını etkilemiş olduğu bu bölüm başında ifade edilmiştir. Burada bu boşluklar tamir harcı ile doldurulduktan sonra yükleme neticesindeki çatlakların oluşumu ve gelişimi ise, 12mm. kiriş uç yer değiştirme seviyesi çevrimlerine kadar daha önceki numunelere benzer tarzda olmuştur. Ancak bir sonraki hedef yer değiştirme seviyesi olan 24mm'lik uç yer değiştirmesinin ikinci çevriminde segregasyon boşluğu civarında ve kolon yüzündeki kiriş kesitinde bulunan çatlaklar aniden yaklaşık 8mm kadar genişlemiştir. Bu çatlakların ani genişlemesinden dolayı da deneye bu çevrimden sonra devam edilememiştir. Dolayısıyla bu numunede 35mm'lik hedef kiriş uç yer değiştirmesine ulaşamamıştır. Kirişte moment etkisinin en büyük olduğu kesitte ve kesitin yüksekliği doğrultusunda oluşan boşluğun, numunenin bu şekilde daha önceki numunelerden daha erken göçmesinde ve gevrek davranış göstermesinde etkili olmuştur.

g) Altıncı numunenin benzeri olan ve hatalı üretimden kaynaklanan nedenlerle kiriş kesitinin derinliği doğrultusunda yedinci numuneye göre daha büyük boşlukları olan sekizinci numunede, ilk çatlak, 3mm. kiriş uç yer değiştirme seviyesinde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı şeklinde meydana gelmiştir. 8mm'lik kiriş uç yer değiştirmesi seviyesindeki çevrimlerde kolonun kirişe yakın kesitinde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağına paralel bir başka çatlak oluşmuştur. Birleşim bölgesindeki X kayma çatlakları kılcal boyutta olup, 20mm ve 25mm'lik kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinde oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 35mm olduğu çevrimlerde kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı, kirişin ön yüzünde 12mm, arka yüzünde 5mm kadar genişlemiş olup, bu aşamada deneye devam edilememiştir.

Bu numunenin yüklenmesi sonucunda oluşan çatlakların oluşumu ve gelişimi bu numuneye benzer olan altıncı numuneden çok farklı olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla hatalı beton yerleştirilmesinden kaynaklanan segregasyon boşluklarının, büyüklüğünden çok kesitte bulunduğu yerin, numunelerin davranışı üzerinde etkili olduğu bu numune ile yedinci numunenin deneyleri sonucunda gözlenmiştir.

- h) Dokuzuncu numune, yedinci numuneye benzer üretilmiş, fakat beton karışımındaki çelik tel miktarı, beton hacminin %1 i olması gerekirken yanlışlıkla %3 ü olmuştur. Bu numunede ilk çatlak, 2mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesinde, Ç.T.T.B. kullanılan bölgenin sınırında meydana gelmiştir. Ayrıca kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı ile bu çatlağın yakınında ve paralelinde kolondaki çatlak ise 8mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesinde meydana gelmiştir. 16mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesinde kolon yüzündeki çatlak yaklaşık 0.6mm kadar genişlemiş ve kolon-kiriş birleşim bölgesinin kiriş kesitinde düşey eğilme çatlağı oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 24mm olduğu çevrimlerde ise kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağının yaklaşık 3mm., bu çatlağa paralel kolondaki çatlağın da 2mm kadar genişlemesiyle birlikte birleşim bölgesinde yatayla yaklaşık 45^0 açı yapan birbirine paralel üç adet eğik kayma çatlakları oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirmesinin 35mm. olduğu üçüncü çevrimde kolon yüzündeki kiriş çatlağı kirişin bir yüzünde yaklaşık 10mm, diğer yüzünde 6mm kadar genişlemiş ve deney bu aşamada bitirilmiştir.

Bu numunede beton karışımındaki çelik tel miktarının çok olmasına bağlı olarak Ç.T.T.B.nun çekme dayanımının yüksek olmasından dolayı ilk çatlak normal beton ile Ç.T.T.B. arakesitinde meydana gelmiştir. Daha sonraki çatlak oluşumu ve gelişimi ise önceki numunelerin benzeri olup, beton karışımında daha fazla çelik tel miktarı bulunmasına rağmen birleşim bölgesinde hiçbir enine donatının bulunmamasından dolayı bu bölgede X eğik kayma çatlağı oluşmuştur.

- i) Onuncu numunede, Ç.T.T.B., kolon-kiriş birleşim bölgesi ile, kirişin $h_{kiriş}/2$, kolonun $2b_{kolon}$ kadar bir bölgesinde kullanılmıştır. Bu numunede ilk çatlak, 2.5mm'lik kiriş uç yer değiştirmesi seviyesinde, kirişte Ç.T.T.B. ile normal beton kullanılan bölgenin arakesitinde eğilme çatlağı şeklinde oluşmuştur. Kiriş uç yer

değiştirme seviyesinin 4mm olduğu çevrimlerin birincisinde bir önceki çatlağı birleştiren çatlak, son çevrim olan üçüncü çevrimde ise kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı ve bu kesite paralel kolon kesitinde de eğilme çatlakları oluşmuştur. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 16mm olduğu çevrimlerde Ç.T.T.B. bölgesi ile normal beton kullanılan bölgenin arakesitindeki eğilme çatlağı yaklaşık 0.3mm, kolon-kiriş birleşim arakesitindeki eğilme çatlağı ise 0.4mm kadar genişlemiş olmasıyla birlikte, kolon-kiriş birleşim bölgesinin kiriş kesitlerinde düşey eğilme çatlakları da meydana gelmiştir. 24mm'lik kiriş uç yer değiştirme seviyesindeki çevrimlerde kolon-kiriş birleşim arakesitinden 30cm mesafedeki (Ç.T.T.B. bölgesi sınırı) çatlak, yaklaşık 2mm kadar genişlemiş olup, aynı çevrimde, kolon-kiriş birleşim bölgesinde yatayla yaklaşık 45^0 açı yapan eğik kayma çatlağı da meydana gelmiştir. Kiriş uç yer değiştirme seviyesinin 30mm olduğu birinci çevrimde Ç.T.T.B. kullanılan bölgenin sınırındaki eğilme çatlağı yaklaşık 6mm, ikinci çevrimde bu çatlak aniden 12mm kadar genişlemiştir. Çatlak genişliğinin ani değişiminden dolayı deney bu çevrimde bitirilmiştir.

Bu numunede iki yönlü tekrarlı yüklemeler altında eğilme momenti etkisinin de büyük olduğu kolon yüzünden yaklaşık $h_{kiriş}/2$ kadar mesafedeki kesitte bulunan çatlağın oluşumunun ve gelişiminin, Ç.T.T.B. nun kullanıldığı bölgedeki kesitin rijitliği ile normal beton kullanılan bölgedeki kesitin rijitliği arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu çatlağın durumuna göre, iki yönlü tekrarlı yükler altında kenar kolon-kiriş birleşimlerinde Ç.T.T.B.'nin kullanılacağı bölgenin, kirişte, kolon yüzünden yaklaşık $h_{kiriş}/2$ uzaklığından daha büyük olmasının gerektiği bu numunedeki deney sonucundan görülmüştür.

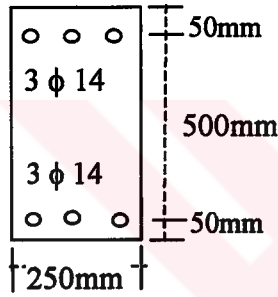
2.7.2. Kiriş Plastik Mafsal Bölgesinin Orta Kesitindeki Rijitlik Azalmaları

Kenar kolon-kiriş birleşim numunelerinin iki yönlü tekrarlı yüklemelerinde, kiriş uç kuvvetinin itme durumuna ait her bir çevrimdeki hedef kiriş uç yer değiştirmesinde, kiriş plastik mafsal bölgesinin orta kesitindeki moment etkisi ile bu kesitin alt ve üst lifindeki ölçülen ortalama uzama-kısalmalardan eğrilik elde edilmiştir. Moment ile eğrilik arasındaki ilişkiden kesitin sözkonusu yer değiştirme seviyesindeki rijitliği elde edilmiştir. Her bir çevrimin itme durumuna ait eğrilik, moment ve rijitlik değerleri hesaplanarak moment(kNm)-eğrilik(rad/m) ve rijitlik(kNm²)-hedef kiriş uç

yer değiştirmesi(mm) grafikleri çizilmiştir. Bu işlemler her numune için ayrı ayrı yapılmıştır.

Normal betonun ve .T.T.B. nun kullanıldığı numunelerde iki ayrı kiriş enkesiti için; ortalama beton basınç dayanımı ve kesit özellikleri esas alınıp, kesitin davranışındaki üç ayrı aşamaya ait teorik moment ve eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Bu üç aşamadaki moment ve eğrilik değerlerine bağlı olarak kesitin rijitliği hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

Normal beton kullanılan numunelerde kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine ait moment eğrilik eğrisinin elde edilmesi için beton silindir basınç dayanımı ortalama olarak $f_{ck}=27$ Mpa, beton prizmaların eğilme deneylerinden elde edilen ortalama eğilme çekme dayanımı $f_{ctk}=1.8$ Mpa alınmıştır. Buna göre;



BS27/BIIIa
 $f_{ck}=27$ Mpa
 $f_{yk}=520$ Mpa
 $f_{ctk}=1.8$ Mpa
 $E_s=2 \times 10^5$ Mpa
 $A_s=A_s'=462$ mm²
 $d'/d=0.09$
 $\rho'=\rho=0.00336$
 $E_c=30900$ Mpa

a) atlamadan önce; tüm malzemelerin elastik bölgede kalacağı kabulü ile,

$$n=E_s/E_c=6.47$$

$$A_i=250 \times 600 + (6.47-1) \times (462+462)=155056.58 \text{ mm}^2$$

Kesit ağırlık merkezinin yeri; $y=300$ mm

Kesit eylemsizlik momenti;

$$I_i=250 \times 600^3/12 + (6.47-1) \times (462+462) \times 250^2 = 48.159 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

Beton ekme dayanımına ulaştığı zaman çekme lifinde çatlak oluşacaktır. Bu durumda,

$$f_r = \frac{M_{cr}}{I_i} \times y \longrightarrow f_r = 2 \times f_{ctk}$$

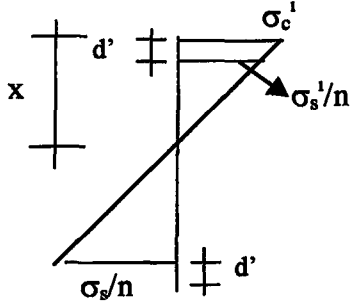
$$M_{cr} = \frac{I_i}{y} \times f_r = \frac{481589 \times 10^8}{300} \times 3.6 = 57.79 \text{ kNm}$$

$$\text{Eğrilik, } \phi_{cr} = \frac{f_r/E_c}{y} = \frac{3.6/30900}{300} = 3.883 \times 10^{-7} \text{ rad/mm} = 3.883 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$$

Rijitlik, $EI_{cr}=148820 \text{ kNm}^2$

b) Çatlamadan sonra, akma başlangıcında

$\sigma_{ci} < 0.7 \times f_{ck}$, olması durumunda betonun elastik davrandığı kabulü ile



Denge Denklemleri

$$1/2 \times \sigma_c^i \times b \times x + A'_s \times \sigma_s^i = A_s \times \sigma_s$$

$$\frac{\sigma_c^i}{x} = \frac{\sigma_s^i/n}{x-d'} \rightarrow \sigma_s^i = n \times \sigma_c^i \times \frac{x-d'}{x}$$

$$\sigma_s = n \times \sigma_c^i \times \frac{d-x}{x}$$

denge denkleminde bu eşitlikleri ve donatı oranı ifadeleri yerleştirilip, gerekli kısaltmalar yapılırsa,

$$k^2 x + 0.0896 \times k_x - 0.04739 = 0$$

ifadesinden $k_x=0.1785$ ve tarafsız eksen yeri; $x=98.175 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_y = \frac{f_{yk}}{E_s} = \frac{520}{200 \times 10^3} = 2.6 \times 10^{-3} \rightarrow \varepsilon_c^i = \varepsilon_y \times \frac{x}{d-x} = 0.565 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_c^i = 0.565 \times 10^{-3} \times 30900 = 17.457 \text{ Mpa} < 0.7 \times 27 = 18.9 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_s^i = n \times \sigma_c^i \times \frac{x-d'}{x} = 55.42 \text{ Mpa} < f_{yk}$$

$$F_c = 0.5 \times 17.457 \times 250 \times 98.175 \times 10^{-3} = 214.23 \text{ kN}$$

$$F_s = 462 \times 520 = 240.2 \text{ kN}$$

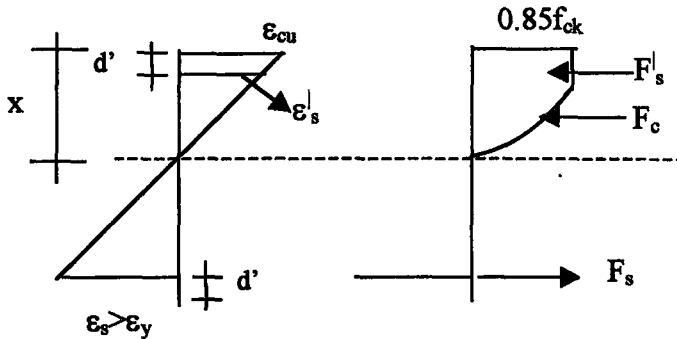
$$F_s^i = 462 \times 55.42 = 25.6 \text{ kN}$$

Donatının akma anındaki momenti

$$M_y = F_c \times (d - \frac{x}{3}) + F_s^i \times (d - d') = 123.616 \text{ kNm}$$

$$\text{Eğrilik, } \phi_y = \frac{\varepsilon_c^i}{x} = 5.755 \times 10^{-6} \text{ rad/mm} = 5.755 \times 10^{-3} \text{ rad/m}$$

c) Kesit çatladıktan sonra nihai yükte,



Yatay kuvvet dengesi, $0.85 \times f_{ck} \times b \times x \times \alpha + A_s' \times \sigma_s' = A_s \times \sigma_s$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_s'} = \frac{x}{x - d'} \longrightarrow \varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \times \frac{x - d'}{x} \longrightarrow \sigma_s' = \varepsilon_s' \times E_s$$

bu ifadeler ve donatı oranı ifadeleri, bilinen değerler yatay denge denkleminde yerine konulursa,

$$1.7855 \times k_x^2 + 0.9408 \times k_x - 0.24192 = 0 \longrightarrow k_x = 0.09$$

tarafsız eksenin yeri, $x = k_x \times d = 51.458 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_s' = 3 \times \frac{51.458 - 50}{51.458} = \%0.085 < \varepsilon_y = \%0.26$$

nihai yükte kesitin eğriliği,

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{0.003}{51.458} = 5.83 \times 10^{-5} \text{ rad/mm} = 5.83 \times 10^{-3} \text{ rad/m}$$

nihai moment,

$$M_u = F_c \times (d - k_a \times x) + F_s' \times (d - d') = 125.44 \text{ kNm}$$

Özetle,

$M_{cr} = 57.79 \text{ kNm}$	$\phi_{cr} = 3.883 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$	$EI_{cr} = 148\,828 \text{ kNm}^2$
$M_y = 123.616 \text{ kNm}$	$\phi_y = 57.55 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$	$EI_y = 21\,480 \text{ kNm}^2$
$M_u = 125.44 \text{ kNm}$	$\phi_u = 583 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$	$EI_u = 2152.0 \text{ kNm}^2$

Ç.T.T.B. kullanılan numunelerde de benzer hesap adımları aşağıda sunulmuştur.

	BS27/BÇIIIa
	$f_{ck} = 27 \text{ Mpa}$
	$f_{yk} = 520 \text{ Mpa}$
	$f_{ctk} = 1.8 \text{ Mpa}$
	$E_s = 2 \times 10^5 \text{ Mpa}$
	$A_s = A_s' = 462 \text{ mm}^2$
	$d'/d = 0.09$
	$\rho' = \rho = 0.00336$
	$E_c = 30900 \text{ Mpa}$

a) K.H.Tan ve arkadaşları[42] tarafından yapılan çalışmada, Ç.T.T.B. kullanılan betonarme kesitin çatlamadan önce, davranışına ait ifadeler

$$f_{rf} = 0.843 \times f_r \times V_m + 2.93 \times V_f \times \frac{l_f}{d_f} \longrightarrow f_r = 0.622 \times \sqrt{f_{ck}} = 4.895 \text{ Mpa}$$

$$E_{ef} = (1 - \eta_1 \times \eta_0 \times V_f) \times E_c + \eta_1 \times \eta_0 \times V_f \times E_f \longrightarrow E_e = 4.73 \times \sqrt{f_{ck}}$$

olarak verilmiştir. Buradaki η_l , η_0 , η'_0 değerini veren ifadeler ise [28] de verilmiştir.

$$\eta_l = 0.5 \longrightarrow l_f < l_c \quad \text{veya} \quad \eta_l = 1 - \frac{l_c}{2 \times l_f}, \longrightarrow l_f > l_c$$

$$\rho = \sin^{-1}(b/l_f) \leq \pi/2 \Rightarrow \theta = \sin^{-1}(h/l_f) \leq \pi/2$$

$$b=250\text{mm}, \quad h=600\text{mm}, \quad l_f=60\text{mm}$$

$$\eta_0 = \frac{\int_0^\rho \int_0^\theta \cos^4 \theta \times \cos^4 \rho \times d\theta d\rho}{\int_0^\rho \int_0^\theta d\theta \times d\rho} = \frac{9}{64} \cong 0.141$$

$$\eta'_0 = \frac{\int_0^\rho \int_0^\theta \cos \theta \times \cos \rho \times d\theta d\rho}{\int_0^\rho \int_0^\theta d\theta \times d\rho} = \frac{\sin \theta \times \sin \rho}{\theta \times \rho} = \frac{4}{\pi^2} \cong 0.405$$

$V_m = 99\%$, $V_f = 1\%$, $l_f = 60\text{mm}$, $d_f = 0.8\text{mm}$ olarak deneylerde alınmıştır. Buna göre

$$n_f = \frac{E_s}{E_{cf}} = \frac{200000}{31100} = 6.43 \Rightarrow I_g = \frac{(b \times h^3)}{12} + (n_f - 1) \times [A'_s \times y^l + A_s y] \cong 48.14 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$M_{cr} = \frac{f_{cf} \times I_g}{y_t} = \frac{4.895 \times 48.14 \times 10^8}{300} = 78542439 \text{ Nmm} = 78.54 \text{ kNm}$$

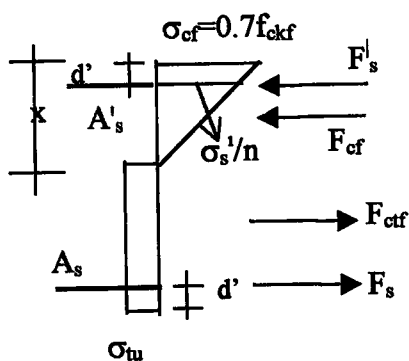
$$\phi_{cr} = \frac{f_{cf} / E_{cf}}{y_t} = \frac{4.895 / 31100}{300} = 5.246 \times 10^{-7} \text{ rad/mm} = 5.246 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$$

$$EI_{cr} = \frac{M_{cr}}{\phi_{cr}} = 149700 \text{ kNm}^2$$

b) Donatının akmaya başladığı, çatlama sonrası durumu;

$\sigma_{ci} < 0.75 \times f_{ckf}$, olması durumunda beton halen elastik davranır kabulü ile

Denge Denklemi



$$1/2 \times \sigma_{cf} \times b \times x + A'_s \times \sigma'_s = A_s \times f_{yk} + \sigma_{tu}(h-x)b$$

$$\frac{\sigma_{cf}}{x} = \frac{\sigma'_s / n_f}{x - d'} \Leftrightarrow \sigma'_s = n_f \times \sigma_{cf} \times \frac{x - d'}{x}$$

$$\sigma_u = \eta_l \eta_0 V_f l_f \frac{\tau_u}{2r^l} \longrightarrow r^l = \frac{\pi d_f^2 / 4}{\pi d_f} = \frac{d_f}{4} = \frac{0.8}{4} = 0.2$$

$$\tau_u = 5.08 \text{ Mpa} \Rightarrow \sigma_u = 2.31 \text{ Mpa}$$

σ_{tu} , [42] de verilmiştir.

$$\varepsilon_y = 0.0026 \Rightarrow \varepsilon_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_{cf}} = 0.00016 \longrightarrow \varepsilon_y > \varepsilon_{cr} \text{ olduğu için kesit çatlamıştır.}$$

$\rho = \rho^l = 0.00336$ ve $d^l/d = 0.09$ $x = k_x \times d$ olarak alınması durumunda yukarıda yazılmış bulunan denge denklemi ise,

$$1/2 \times \sigma_{cf} \times b \times x + A_s^l \times \varepsilon_s^l \times E_s = A_s \times f_{yk} + \sigma_{tu}(h-x)b \quad (1), \quad \varepsilon_s^l = \varepsilon_c \times (x-d^l)/x$$

$$\sigma_{cf} = 0.75 \times 27 = 20.25 \text{ Mpa} \longrightarrow \text{Ç.T.T.B. nun } \sigma-\varepsilon \text{ eğrisinden } \varepsilon_c = 0.00146$$

Yukarıdaki değerler, kesit boyutları ve eşitlikler (1) ifadesinde yerine yazıldığı zaman, tarafsız eksenin yerini veren aşağıdaki ikinci dereceden denklem elde edilmiştir.

$$3108.75x^2 - 451836x - 6745200 = 0 \longrightarrow x = 158.98 \text{ mm}$$

$$\text{Bu durumda } \varepsilon_s = 0.00359 > \varepsilon_y \longrightarrow \varepsilon_s^l = 0.001 < \varepsilon_y, \quad \sigma_s^l = 200.16 \text{ Mpa}$$

Kesit Tesirleri,

$$F_s^l = 462 \times 200.16 = 92.476 \times 10^3 \text{ N} = 92.476 \text{ kN}$$

$$F_c = 0.5 \times 0.75 \times 27 \times 250 \times 158.98 = 402.418 \text{ kN}$$

$$F_s = 462 \times 520 = 240.24 \text{ kN}$$

$$F_{cf} = 2.31 \times (600 - 158.98) \times 250 = 254.69 \text{ kN}$$

Yatay Denge ise; $F_c + F_s^l \cong F_s + F_{cf}$ olmaktadır.

Çekme donatısının hizasına göre moment dengesi yazılarak, kesitin basit eğilme etkisindeki taşıyabileceği moment,

$$M_{ry} = F_c \times (d-x/3) + F_s^l \times (d-d^l) - F_{cf} \times ((h-x)/2 - d^l) = 192.15 \text{ kNm}$$

Kesitin dönmesi ; $\phi_y = \varepsilon_c / x = (\varepsilon_c + \varepsilon_s) / d = (1.46 + 3.59) \times 10^{-3} / 550 = 9.18 \times 10^{-6} \text{ rad/mm}$ veya $9.18 \times 10^{-3} \text{ rad/m}$ dir.

Kesitin rijitliği, $EI_y = M_{ry} / \phi_y = 20931.37 \text{ kNm}^2$ dir.

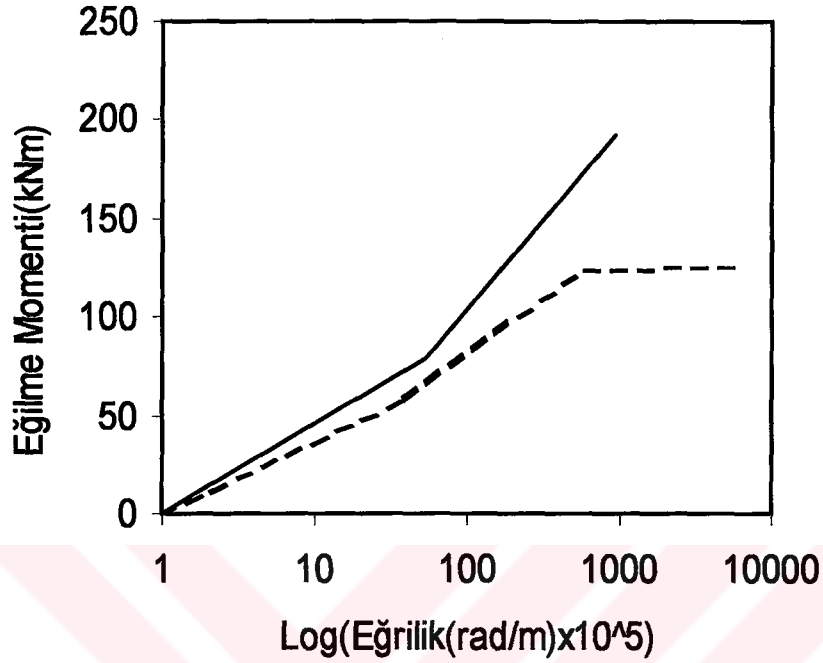
Özetle,

$$M_{cr} = 78.54 \text{ kNm} \quad \phi_{cr} = 5.246 \times 10^{-4} \text{ rad/m} \quad EI_{cr} = 149700 \text{ kNm}^2$$

$$M_y = 192.15 \text{ kNm} \quad \phi_y = 9.18 \times 10^{-3} \text{ rad/m} \quad EI_y = 21480 \text{ kNm}^2$$

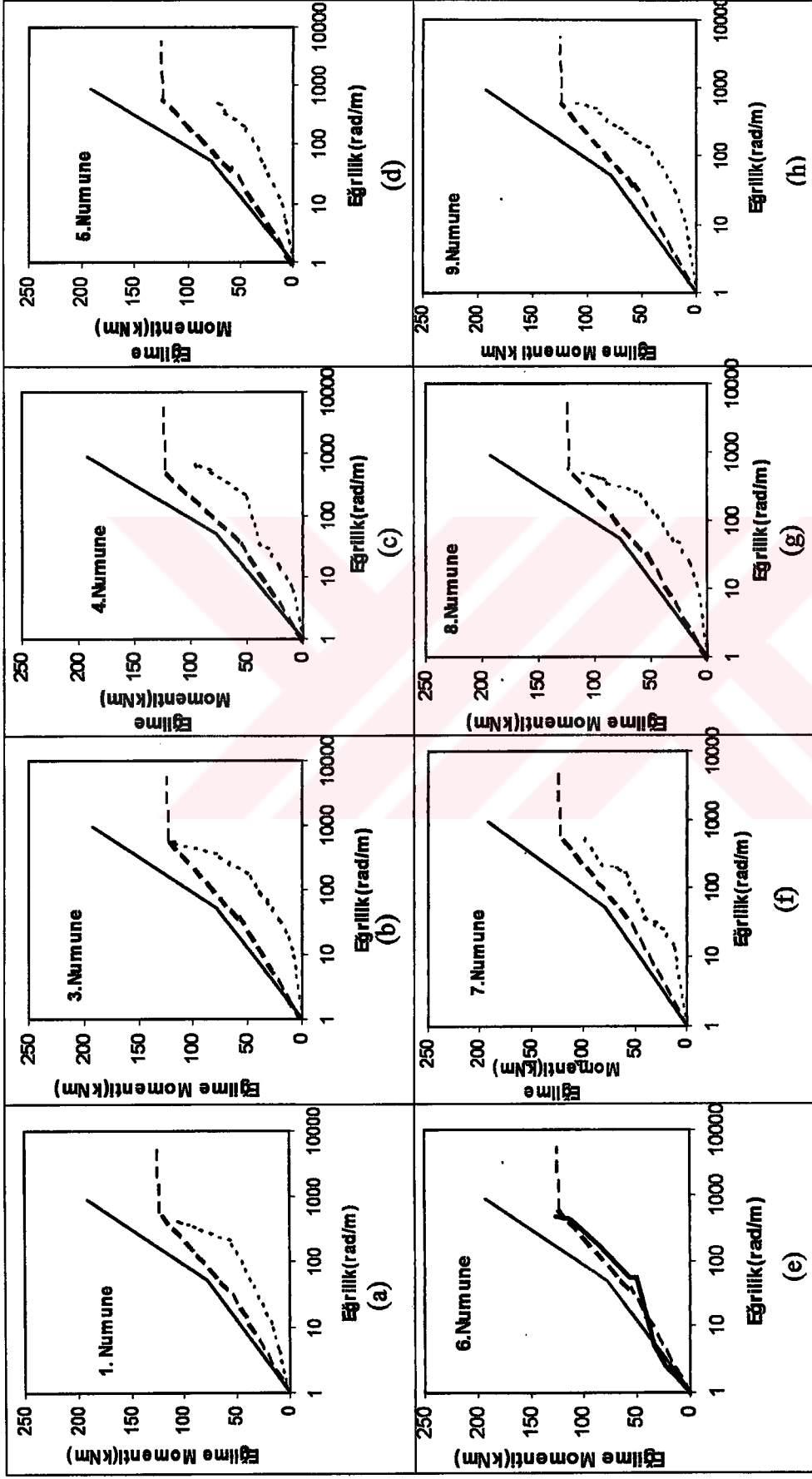
Basınç ve çekme donatısının akması durumunda, yatay denge denkleminin sağlanamayacağı için incelenmemiştir. Hem normal beton kullanılan hem de

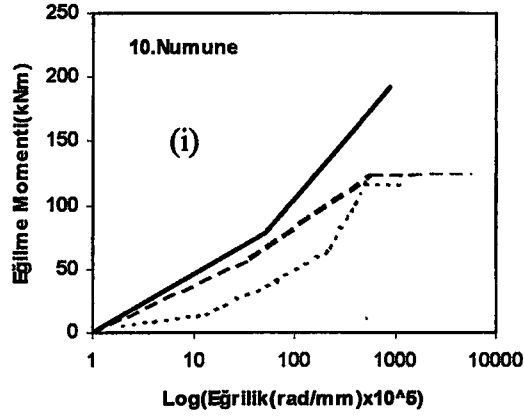
Ç.T.T.B. kullanılan kiriş kesitleri için moment-eğrilik değişimi Şekil-2.38’ de gösterilmiştir.



Şekil-2.38 : Normal beton ve Ç.T.T.B. kullanılan kesitlerin eğrilik-eğilme momenti ilişkileri

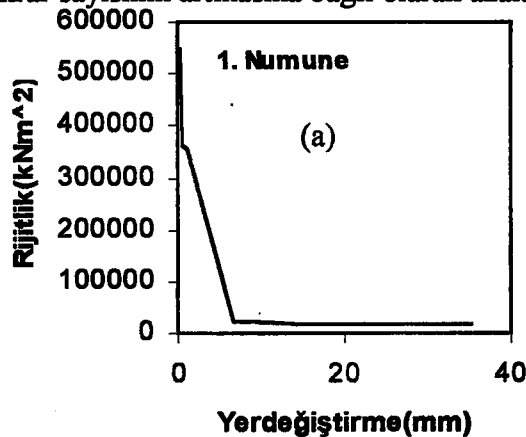
Bu teorik çalışmaların verdiği sonuçlar ile kirişin plastik mafsallık bölgesinin orta kesitine ait deneyden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler söz konusu kesitin moment-eğrilik ilişkilerini gösteren grafikler Şekil-2.39’da gösterilmiştir.

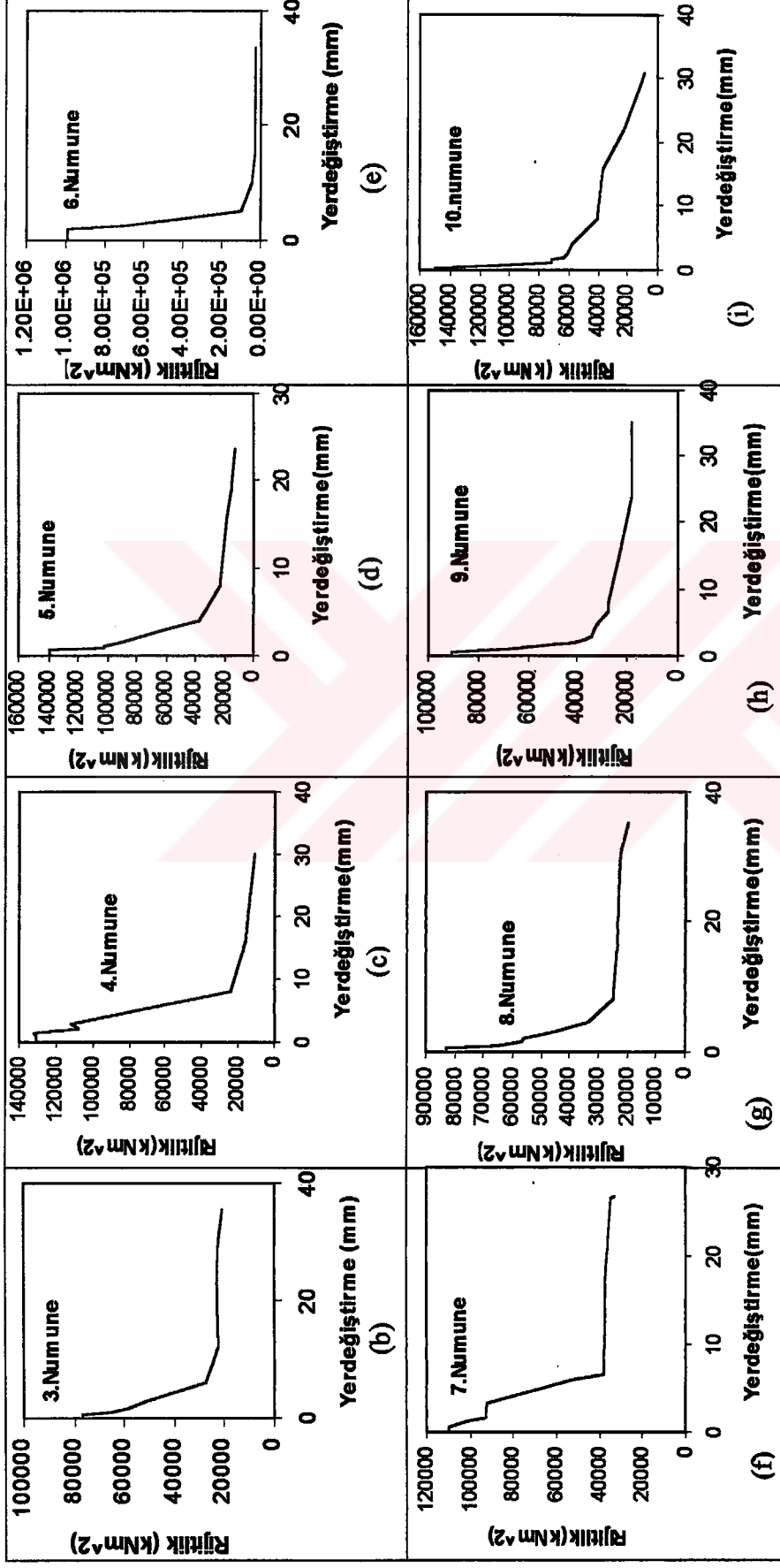




Şekil-2.39 Numunelerin kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine ait eğilme momenti(kNm)-log(eğrilik(rad/m) $\times 10^5$) eğrileri ile her bir eğride çelik tel takviyeli betonarme kesitin(sürekli çizgi) ve normal betonarme kesitin(uzun kesikli çizgi) teorik moment(kNm)-log(Eğrilik(rad/m) $\times 10^5$) eğrileri (a,...i)

Kiriş uç kuvvetinin, itme olması durumunda her yükleme adımında kiriş plastik mafsallık bölgesinin orta kesitine etkiyen eğilme momentleri yüklemelerin birinci çevrimi için elde edilmiştir. Yine bu yükleme adımlarındaki söz konusu kesitin alt ve üst liflerindeki uzama ve kısalmalar ise deneydeki ölçümlerden elde edilmiştir. Bu veriler çerçevesinde ele alınan kesitin yukarıda moment-eğrilik değişiminden yararlanılarak, tüm numunelerin her bir yükleme adımlarındaki rijitliğin yer değiştirme ile değişimi de elde edilmiş ve Şekil-2.40'da gösterilmiştir. Bu rijitlik değişimleri yüklemelerin sadece birinci çevrimleri için verilmiştir. İkinci ve üçüncü çevrimlerde kiriş uç kuvvetinde birinci çevrime göre azalma olmuş buna bağlı olarak kesite etkiyen momentte azalma olmuştur. Buna karşılık kesitin eğriliği de biraz daha artmış olmasından dolayı ikinci ve üçüncü çevrimlerde söz konusu, kesitin rijitliği de birinci çevrimdeki rijitlik değerine göre daha küçük olduğu görülmüştür. Bu çerçevede, iki yönlü tekrarlı yüklemelerde, kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin rijitliği, etkiyen kuvvetin tekrar sayısının artmasına bağlı olarak azalabilmektedir.





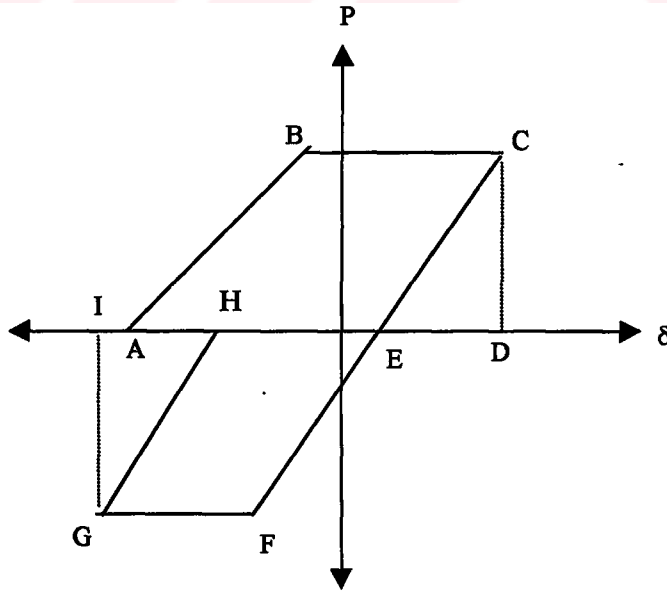
Şekil-2.40: Her bir deney numunesine ait kiriş plastik mafsalsal bölgesi orta kesiti eğilme rijitliğinin kiriş uç yer değiştirmesi ile değişimini gösteren eğriler

2.7.3. İki Yönlü Tekrarlı Yüklemler Altında Kolon-kiriş birleşim Numunelerine Ait Toplam Enerji Miktarı

Numunelerin iki yönlü tekrarlı yüklemelerde yutmuş olduğu enerji miktarının belirlenmesi için her bir kiriş uç kuvveti-kiriş uç yer değiştirmesi histeresis çevrimlerinin pik değerlerinin altında kalan alanlar tek tek hesaplanmıştır. Her bir çevrime ait bu değerler, numunenin yüklemeler altında elastik ve plastik davranış göstererek yutmuş olduğu toplam enerji miktarını vermektedir. Buna göre bir çevrime ait enerji miktarı Şekil-2.41'de gösterilen örnek çevrim üzerindeki alanlar çerçevesinde hesaplanmıştır. Bu alanlar ise; kuvvet itme yönünde iken A(ABCD) ile kiriş uç kuvveti çekme yönünde iken A(EFGI) yamuklarının alanları toplamıdır. A(ABCE) ve A(EFGH) olarak belirtilen çevrimin içinde kalan alan değeri ise numunenin bir çevrimde yutmuş olduğu enerji miktarı olarak hesaplanmış olup, yutulan enerji olarak isimlendirilmiştir. Burada, A(CDE) ve A(GHI) üçgenlerinin alanları ise yükleme yapıldıktan sonra numune üzerindeki yükü boşaltırken elastik davranışı ile numunenin yutmuş olduğu enerjinin geri verildiği değerler olup, depolanan enerji olarak isimlendirilmiştir.

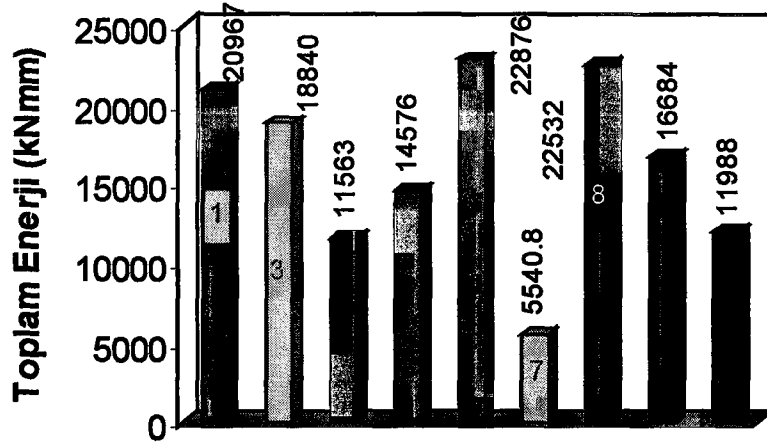
$$\text{Toplam Enerji} = A(ABCD) + A(EFGI)$$

$$A(ABCD) = A(ABCE) + A(CDE) = \text{Yutulan Enerji} + \text{Depolanan Enerji}$$



Şekil-2.41: Örnek yük-deplasman histeresis çevriminden numune için toplam enerji miktarının hesap şekli

Daha sonra, her bir çevrim için hesaplanan bu değerler toplanarak her bir numune için toplam enerji miktarı hesaplanmıştır. Böylece her bir kenar kolon-kiriş birleşim numunesinin tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki toplam enerji miktarı belirlenmiştir. Bu değerler, numunelere göre Şekil-2.42'de gösterilmiştir.



Şekil-2.42: İki yönlü tekrarlı yüklemelerin etkisi altında deney numunelerinin herbiri için toplam enerji miktarı

Şekil-2.42'den görüldüğü gibi, kolon ve kiriş sarılma bölgesinde sargı donatılarının ihmal edilip, yerine bu bölgeye çelik tel takviyeli beton kullanılan altıncı numune ile bu numuneye benzer ve bünyesinde büyük boşlukları olan sekizinci numune en çok toplam enerji kapasitesine sahip numuneler olmuştur. Bu numunelerin toplam enerji değerinden, hemen sonra şartname koşullarına uygun olarak hazırlanmış olan birinci numunenin toplam enerji değeri gelmiştir. Kirişin kolon yüzündeki kesitinde segregasyon neticesi oluşan boşluktan dolayı yedinci numune, gevrek davranış göstererek daha küçük deplasman seviyesinde göçme durumuna gelmiştir. Bu nedenle yedinci numunenin yutmuş olduğu enerji miktarı da en düşük olmuştur. Yedinci numune, değerlendirme dışında bırakılması durumunda sırasıyla dördüncü ve onuncu numunelerin toplam enerji kapasitelerinin en düşük olduğu görülmüştür.

A.B.Y.Y.H.Y.nin süneklik seviyesi yüksek kenar kolon-kiriş birleşim koşullarına uygun hazırlanmış olan birinci numunenin toplam enerji kapasitesi üçüncü numune ile altıncı ve sekizinci numunenin toplam enerji kapasiteleri arasında kalmaktadır. Buna göre kolon-kiriş birleşim bölgesinde hiçbir etriyenin kullanılmadığı, sarılma

bölgesinde sargı donatılarının ihmal edildiği ve bunlara karşılık bu bölgelerde çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı üçüncü numunede çelik tel miktarının biraz daha büyük olması durumunda birinci numunenin enerji yutma kapasitesine ulaşılabilir. Ayrıca birleşim bölgesinde sadece bir etriyenin kullanıldığı, sarılma bölgesinde sargı donatılarının ihmal edildiği, bu bölgelerde çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı altıncı ve sekizinci numunelerde enerji yutma miktarları birinci numuneden biraz daha büyük olmasından dolayı bu numunelerde kullanılan çelik tel miktarı biraz daha azaltılabilir. Enerji yutma kapasiteleri açısından en uygun çelik tel takviyeli beton kullanılan bölgeyi elde etmek amacıyla yukarıda belirtilen iki numune türünde biraz düzenlemeler yapılarak elde edilmesi mümkün olabilir. Sekizinci numune, altıncı numunenin tamamen benzeri olmakla beraber bu numunede yanlış beton yerleştirilmesinden dolayı moment doğrultusuna göre kiriş ve kolonun genişliklerinde boşluklar oluşmuş ve bu boşluklar tamir harcı ile sıkıca doldurulmuştur. Bu olumsuz durumlara rağmen sekizinci numunenin enerji yutma kapasitesi, aynı özelliklere sahip altıncı numunenin enerji yutma kapasitesine çok yakın bir değere sahip olmuştur. Buna göre çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı numunelerin hata toleransına sahip olabildiği de söylenebilir.

Yedinci numuneyi değerlendirme kapsamı dışında bırakılırsa en az enerji yutma kapasitesine, birleşim bölgesinde hiçbir enine donatının bulunmadığı, sarılma bölgesinde sargı donatılarının bulunduğu, normal betonun kullanıldığı, dördüncü numune olmuştur. Buna göre, kolon-kiriş birleşim bölgesinde enine donatının bulunması numunenin enerji yutma kapasitesini ve süneklik seviyesini artırdığı görülmüştür.

Ayrıca, kolon-kiriş birleşim bölgesinde sadece bir etriyenin bulunması ve kirişin birleşim bölgesinde kolon yüzünden itibaren $h_{kiriş}/2$ kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton kullanılması numunenin gevrek davranışını önleyememiştir. Dolayısıyla bu numunenin enerji yutma kapasitesi, dördüncü numunenin enerji yutma kapasitesinden biraz daha büyük olmasına rağmen sünek numunelerden çok daha düşük olmuştur. Buna göre kirişin birleşim bölgesinde kolon yüzünden itibaren $h_{kiriş}/2$ kadar bir bölgede, beton karışım hacminin %1 oranında çelik tellerin bulunduğu çelik tel takviyeli beton kullanılması durumunda birleşimin enerji yutma kapasitesi açısından yeterli olmadığı görülmüştür.

Beşinci numunenin enerji yutma kapasitesi de birinci numunenin enerji yutma kapasitesine göre oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bu numunenin enerji yutma kapasitesini artırmak için çelik tel takviyeli betonun kullanıldığı bölge biraz artırılabilir veya beton karışımındaki çelik tel miktarı biraz daha artırılabilir.

2.7.4 Numunelerin Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranları

Yapıların dinamik analizindeki hesap modellerinde kullanılan sönüm oranı, genellikle eşdeğer viskoz sönüm oranı ile ifade edilir. Böyle bir sönüm oranı, kuvvet-deplasman histeresis çevriminin içindeki alanla hesaplanmış olan yapının yutmuş olduğu enerji miktarını, harmonik titreşimin bir çevriminde viskoz sönüm ile yutulmuş enerji miktarına eşitleyerek elde edilebildiği A.K. Chopra tarafından [42] de ifade edilmiştir. Buna göre, harmonik titreşimin bir çevriminde viskoz sönüm oranı ile yutulmuş enerji miktarı ;

$$E_D = 2\pi\zeta \frac{\omega}{\omega_n} k u_0^2$$

şekil değiştirme enerjisi olarak $E_{s0} = k u_0^2 / 2$ olarak alınıp gerekli eşitlik yazılırsa,

$$4\pi\zeta_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} E_{s0} = E_D \quad \text{veya} \quad \zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\omega_n}{\omega} \frac{E_D}{E_{s0}}$$

elde edilmiştir. Sistemin dış kuvvete olan tepkisinin sönüme en hassas olduğu $\omega = \omega_n$ andaki kuvvet-deplasman histeresis çevriminin içinde kalan alan değeri (sistemin yuttuğu enerji) E_D ele alınırsa,

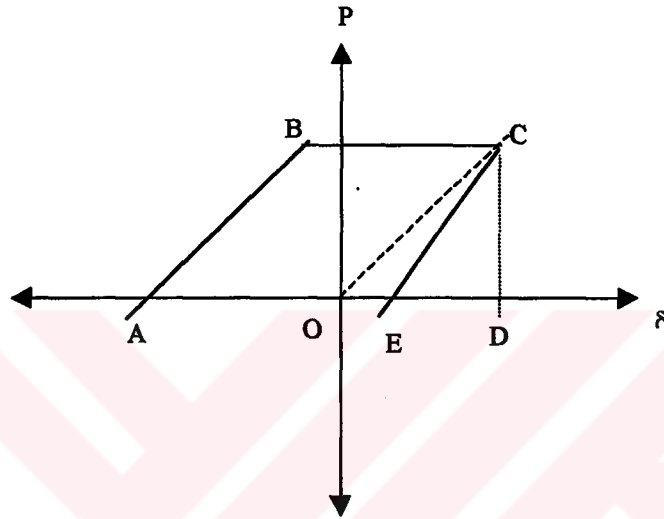
$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{s0}}$$

elde edilmiştir.

Kitayama ve diğerleri[4], kiriş boyuna donatısındaki aderans bozulmasının neden olduğu histeresis eğrilerindeki sıkışma (pinching) davranışını gösterebilmek için kullanmış olduğu Takeda-Slip Histeresis modelinde yarı çevrim için aşağıdaki viskoz sönüm oranı ifadesini vermiştir.

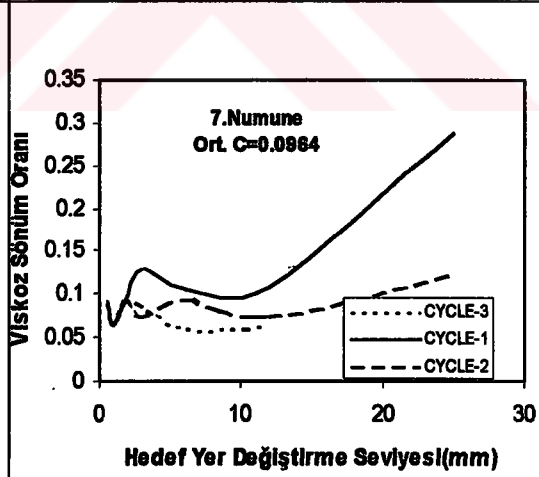
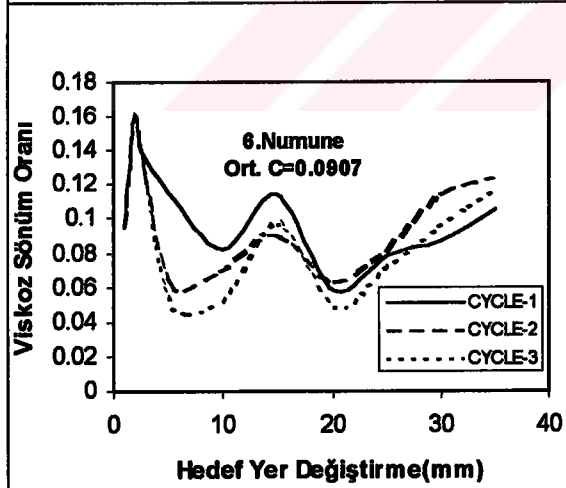
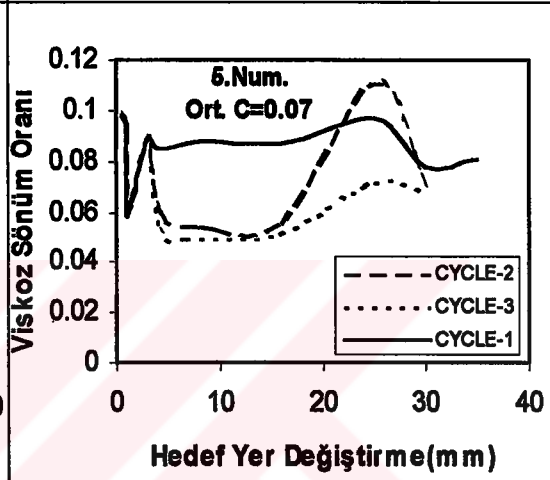
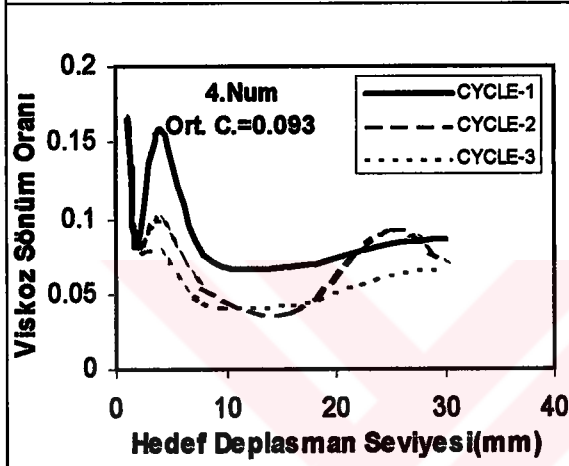
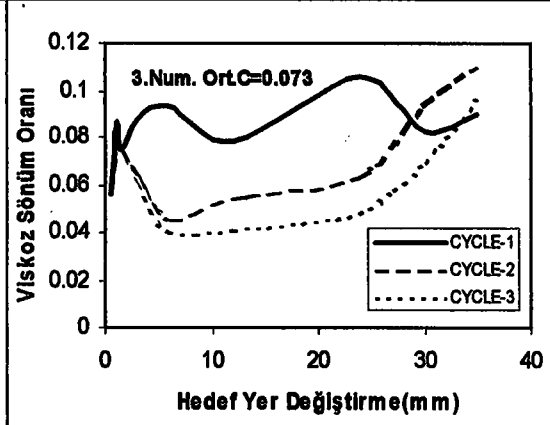
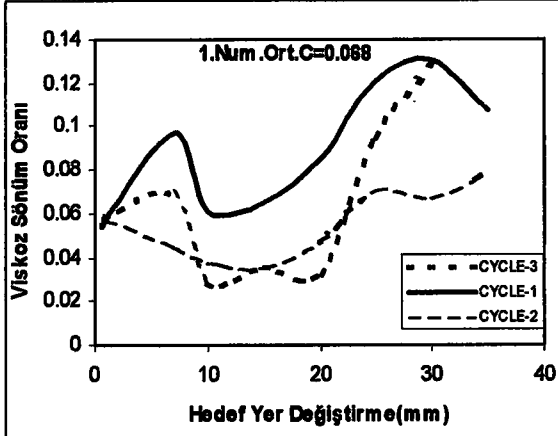
Şekil-2.44’de verilen deney numunelerine ait viskoz sönüm oranı değişimleri ve bu değişimlerden elde edilen ortalama viskoz sönüm oranları, da aşağıda verilmiş olan ifade esas alınarak hesaplanmıştır.

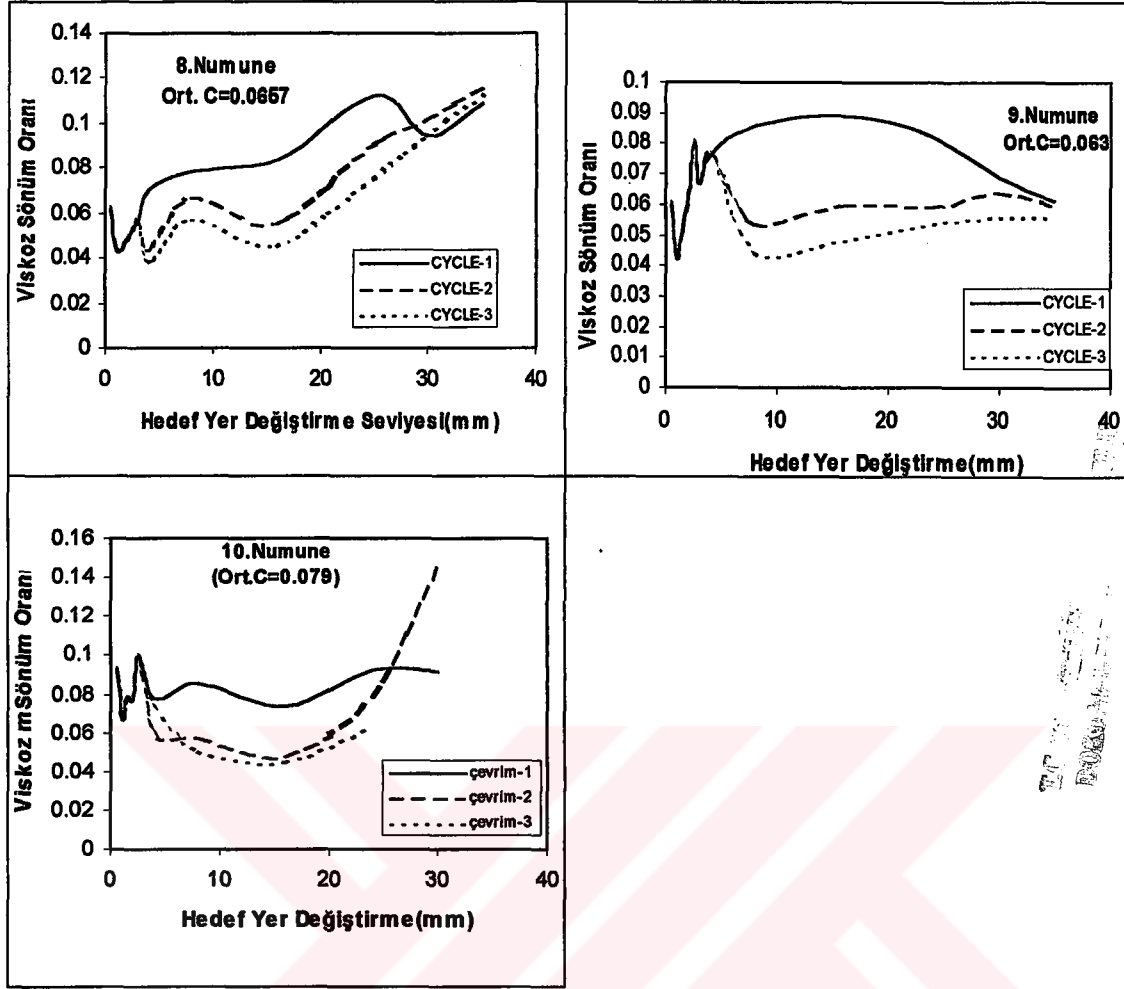
$$c = \frac{1}{2\pi} \frac{A(ABCE)}{A(OCD)}$$



Şekil –2.43: Eşdeğer viskoz sönüm oranı hesaplamalarında kullanılan örnek yarı çevrim alanlarını göstermektedir.

Ortalama viskoz sönüm oranlarına göre değerlendirme yapıldığı zaman, gevrek davranış göstererek erken göçme durumuna gelmesinden dolayı dördüncü, yedinci ve onuncu numuneler dikkate alınmadığı zaman altıncı numunenin en yüksek ortalama sönüm oranına sahip olduğu söylenebilir. Numunelerin elastik davranış gösterdiği bölgelerde yüksek viskoz sönüm oranına, bu bölgeden sonra bu değerlerde hızlı bir azalma, daha sonra numunelerin kayma dayanımlarına bağlı olarak tekrar artan bir viskoz sönüm oranları elde edilmiştir. Ayrıca normal betonlu ve deprem şartnamesinde belirtilen yüksek süneklik seviyesine sahip birinci numunenin göçme durumundaki viskoz sönüm oranında bir önceki yükleme adımıdaki viskoz sönüm oranına göre hızlı bir düşüşün olduğu görülürken, Ç.T.T.B. kullanılan üçüncü , altıncı ve sekizinci numunelerde aynı giriş uç yer değiştirmesi seviyesindeki viskoz sönüm oranı artan eğilimde olduğu görülmüştür.





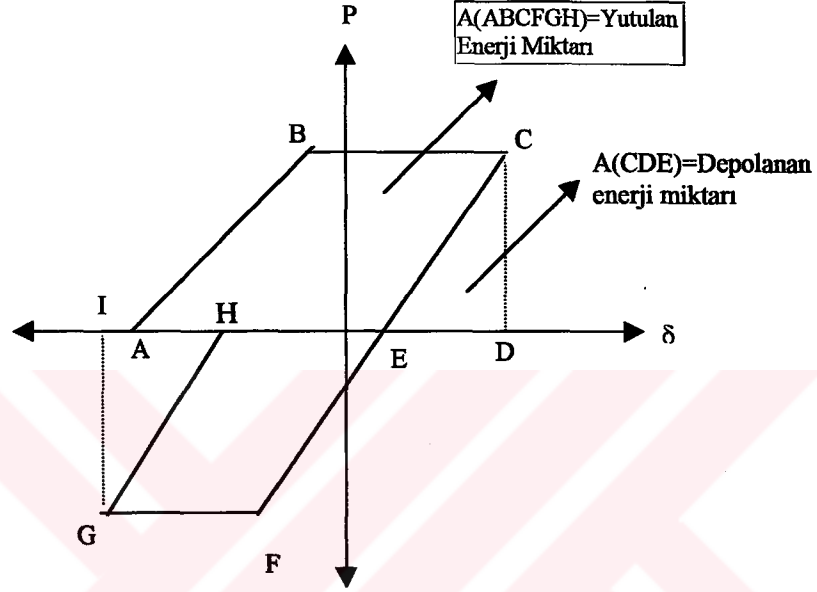
Şekil-2 44: Her bir numunenin eşdeğer viskoz sönüm oranlarının yer değiştirme(mm) ile değişimini ve ortalama sönüm oranlarını göstermektedir.

Ortalama eşdeğer viskoz sönüm oranları numuneden numuneye 0.065 ile 0.1 arasında değiştiği de görülmüştür.

2.7.5. Numunelerin Elastik ve Plastik Davranışıyla Yutmuş Olduğu Enerji Miktarlarına Göre Süneklik

Hasgür Z. ve Gündüz N. tarafından [43] de süneklik, yapının mukavemetinde önemli ölçüde azalma ile kararsız denge olmaksızın deprem sırasında ortaya çıkan enerjinin oldukça büyük kısmını, elastik sınırın ötesinde elastik olmayan davranışla ve tersinir, dönüşümlü büyük şekil değiştirmelerle yutma yeteneği olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma göre; deney numunelerinin elastik bölgenin dışında plastik davranışı ile

yutmuş olduğu toplam enerji miktarlarını karşılaştırarak numunelerin sünekliği hakkında değerlendirme yapılmasının mümkün olabileceği görülmüştür. İki yönlü tersinir tekrarlı yüklemelere maruz kalan deney numunelerine ait kuvvet-deplasman eğrilerinin herhangi bir çevriminde, her bir numunenin plastik davranışı ile yutmuş olduğu enerji miktarına, yutulan enerji olarak tanımlanmıştır. Bu miktar, çevrimin içinde kalan alan miktarı olup, örnek bir çevrim olarak Şekil 2.45’de gösterilmiştir.

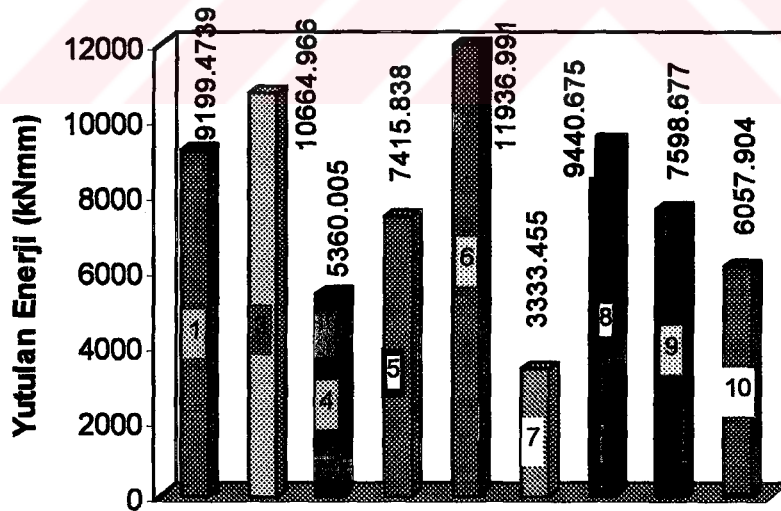


Şekil-2.45 : Deney numuneleri tarafından yutulan ve depolanan enerji miktarının örnek bir çevrimde gösterimidir.

Bu hesaplamalar her bir numunenin tüm çevrimleri için yapılarak toplanmış ve iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında her numunenin plastik davranışı ile yutmuş olduğu toplam enerji miktarları Şekil 2.46’da gösterilmiştir. Buna göre;

- kiriş ve kolonun sarılma bölgeleri ile birleşim bölgesinde, beton karışım hacminin %1’i oranında çelik tellerin kullanıldığı, sarılma bölgelerindeki sargı donatısı denilen ilave enine donatıların (etriyelerin) ihmal edildiği ve birleşim bölgesinde sadece bir etriyenin bulunduğu altıncı numunenin yutmuş olduğu enerji miktarı diğer numunelerin yutmuş olduğu enerji miktarından daha büyük olduğu,

- b. birleşim bölgesinde hiçbir enine donatının bulunmaması dışında altıncı numune ile benzer özelliklere sahip olan üçüncü numunenin yutmuş olduğu enerji miktarı, ulusal deprem şartnamemizdeki süneklik seviyesi yüksek kenar kolon-kiriş birleşimleri için öngördüğü koşullara uygun olarak hazırlanmış normal betonlu birinci numunenin yutmuş olduğu enerji miktarından biraz daha büyük olduğu,
- c. yedinci numuneyi daha önceki bölümlerde belirtilen nedenlerden dolayı değerlendirmeye katılmaması durumunda sarılma bölgesinde sık enine donatıların bulunduğu (sarılma bölgeleri için şartnamenin öngördüğü miktarda), ancak birleşim bölgesinde hiçbir enine donatının bulunmadığı dördüncü numunenin yutmuş olduğu enerji miktarının diğer numunelerden daha küçük olduğu,
- d. tamamen altıncı numuneye benzer özelliklere sahip olmakla beraber imalat esnasındaki hatalı beton yerleştirilmesi sonucu oluşan segregasyon ve boşlukların büyük olduğu, bu boşlukların yüksek çimento dozajlı betonla sıkıca doldurulduğu sekizinci numunenin plastik davranış ile yutmuş olduğu enerji miktarı ise birinci numunenin yutmuş olduğu enerji miktarından biraz daha büyük olduğu,

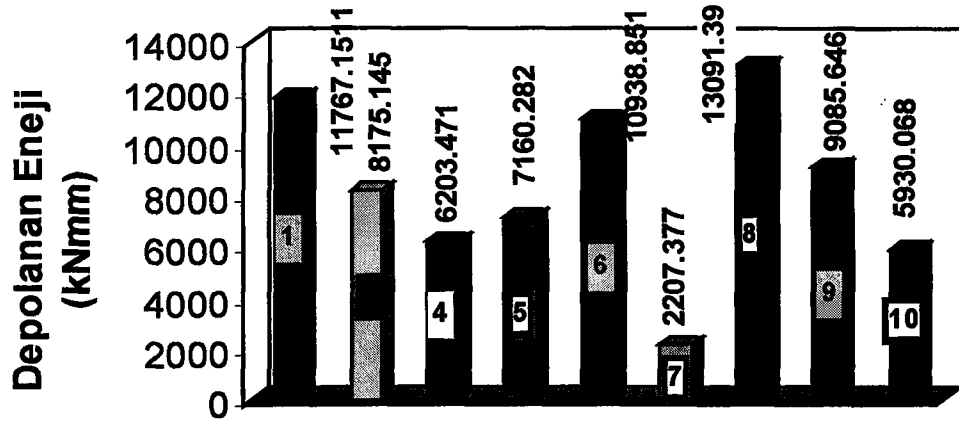


Şekil 2.46: Her bir numunenin plastik davranış ile yutmuş olduğu toplam enerji miktarı

- e. elik tel takviyeli betonların kirişte en küçük bölgede kullanıldığı onuncu numunenin plastik davranış ile yutmuş olduğu enerji miktarı ise, dördüncü numunenin plastik davranış ile yutmuş olduğu enerji miktarından daha büyük olduğu görülmektedir.

Bu değerlendirmelere göre, beton karışım hacminin %1i oranında karışıma elik tel ilave edilerek oluşturulan elik tel takviyeli beton kullanılan altıncı, sekizinci ve üçüncü numunelerin plastik davranışla yutmuş olduğu enerji miktarları, ulusal deprem şartnamemizdeki süneklik seviyesi yüksek kenar kolon-kiriş birleşimleri için öngördüğü koşullara uygun olarak hazırlanmış normal betonlu birinci numunenin plastik davranış ile yutmuş olduğu enerji miktarından daha büyük olduğu grlmştr. Deprem yükleri gibi tersinir tekrarlı yüklemeler altında betonarme yapıların süneklik tanımı bu konunun başlangıcında belirtilmiştir. Bu tanıma göre, kirişin belli bölgelerinde elik tel takviyeli betonun kullanıldığı, sargı donatısının ihmal edildiği altıncı, sekizinci ve üçüncü numunelerin diğer numunelere göre daha sünek davrandığı ifade edilebilir. Bu ifadeye göre de, sünek betonarme kolon-kiriş birleşimleri için gerekli olan ve sargı donatısı olarak bilinen ilave enine donatıların yerine elik tel takviyeli betonların kullanılmasının mümkün olabileceği, hatta daha sünek kolon-kiriş birleşimlerinin elde edilebilmesinin mümkün olduğu söylenebilir. Sekizinci numunenin imalatı esnasında yanlış beton yerleştirilmesinden kaynaklanan nedenlerle numunede segregasyon ve boşluklar oluşmuştur. Bu olumsuz durumlara rağmen, sekizinci numunenin plastik davranışla enerji yutma kabiliyetinin yüksek olmasına bağlı olarak, elik tel takviyeli betonların imalattan kaynaklanan hatalara karşı hata toleransının da yüksek olduğu bu değerlendirmeden de görülebilir.

Tüm numuneler, her bir çevrimin pik yükün altındaki alan değerlerinin toplamı toplam enerji miktarı olup, bu değerin bir bölümünü üzerindeki yük boşaltılırken numunenin elastik davranışı ile geri verilen depolanan enerji miktarıdır. Böyle bir enerji miktarı ise, yüklemenin her bir çevriminde numunenin toplam enerji miktarından yutulan enerji miktarı çıkarılarak hesaplanmıştır. Bu şekilde her bir numune için hesaplanan bu enerji miktarı, depolanan enerji miktarı olarak tanımlanmıştır. Depolanan enerji miktarları her bir numune için şekil-2.47’de gösterilmiştir.



Şekil-2.47: Tüm numunelerin elastik davranış ile yutmuş olduğu toplam enerji miktarı

Buna göre, hem toplam enerji yutma kabiliyeti hem plastik davranışla enerji yutma kabiliyeti yüksek olan numunelerin elastik davranışla yutmuş olduğu enerji miktarını geri verme kabiliyetleri de yüksek olduğu görülmektedir. Böyle bir özelliğe sahip olan birinci, altıncı ve sekizinci numunelerin elastik davranışla yutmuş olduğu enerji miktarının diğer numunelere göre daha büyük olduğu görülebilmektedir.

Numune	Max. Kırış $F_{max}(kN)$		Uç Yüklü		Max.Depl. (mm)		Başlangıç Rijitliği kNm^2	Nihai Rijitlik kNm^2	Rijitlik Değişimi %	Ort.Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı	Yutulan Toplam Enerji kNmm	Plastik Dav.YutTop. Enerji kNmm
	İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme						
1	56.81	55.34	35.24	35.10	550068		26187	4.76	0.068	20967	9199.5	
3	65.20	61.70	35.38	38.36	76815		20798	27.08	0.073	18840	10665	
4	50.80	54.60	30.02	30.44	130468		11406	8.74	0.093	11563	5360	
5	57.90	63.90	35.94	35.44	139038		13061	9.39	0.07	14576	7416	
6	65.60	67.10	35.50	36.46	988000		25400	2.57	0.091	22876	11937	
7	44.20	54.20	26.68	24.78	97048		17485	18.02	0.096	5541	3334	
8	59.20	61.90	35.32	35.44	82761		23017	27.81	0.059	22532	9441	
9	57.20	60.50	35.10	35.16	90960		18599	20.45	0.063	16684	7599	
10	30.16	36.14	54.20	61.30	111031		8913	8.03	0.079	11988	6058	

Tablo-2.1:Deney numunelerini genel değerlendirme tablosu

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırmanın amacı, kenar kolon-kiriş birleşimlerinde çelik tel takviyeli betonun etkili bir şekilde kullanıldığı bölgenin deneysel olarak belirlenmesidir. 1998 yılında yürürlüğe giren deprem yönetmeliğimizde süneklik seviyesi yüksek kenar kolon-kiriş birleşimleri için gerekli koşullara uyularak hazırlanmış olan birinci numunenin dayanım ve davranışı, bu bölgenin belirlenmesine esas teşkil etmiş ve bu özelliğinden dolayı birinci numune baz numune olarak isimlendirilmiştir. Bu amaçla iki adet normal betonlu, sekiz adet kolon ile kirişin birleşim bölgesinde, kolonun sarılma bölgesinde ve kirişin değişik üç bölgesinde çelik tel takviyeli beton kullanılan kenar kolon-kiriş birleşim numunesi olmak üzere toplam on adet deney numunesi üretilmiştir. Normal betonlu numunelerden biri, yukarıda açıklanan birinci (baz) numune olup, diğeri, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde kolon enine donatıları bulunmamakla beraber kolon ve kirişin sarılma bölgelerinde sık enine donatıları bulunan üçüncü numunedir. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde enine donatı aralıkları sık olmayan çelik tel takviyeli beton kullanılan numuneler iki tip olarak üretilmiştir. Bu iki tip numuneden birinde, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde (düğüm noktasında) bir adet enine donatı bulunmakta, diğeri tip, numunelerin birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı yerleştirilmemiştir. Kenar kolon-kiriş birleşim numuneleri, kiriş uç yer değiştirmesine göre deplasman kontrollü olarak, iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında deneye tabi tutulmuştur. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar yardımıyla araştırmanın amacına yönelik bazı değerlendirmeler Bölüm-2'nin son bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu değerlendirmelere göre;

- Beton karışıma ilave edilen çelik tellerin betonarme elemanlar içindeki dağılım yönleri, yüklemeler sonucu kolonda ve kirişte oluşan çatlakların genişlemesinde çok önemli rol oynamaktadır. Çatlağın oluştuğu kesitte çatlağı dik yönde kesen çelik tellerin bulunması çatlak genişliğinin büyümesine engel olabilmektedir.

Çelik tel takviyeli beton kullanılan numunelerde, kolon yüzündeki kiriş eğilme çatlağı, kesitin bir yüzünde yaklaşık 10mm kadar genişlerken, kesitin diğer yüzünde oluşan eğilme çatlağını dik kesen çelik tellerin bulunmasından dolayı aynı çatlak 3mm kadar genişlemiştir. Betonarme elemanların davranışına, yükleme koşullarına göre sözkonusu elemanda oluşabilecek muhtemel çatlakların yönlerini tahmin etmek mümkündür. Dolayısıyla beton karışımındaki çelik telleri, oluşacak çatlaklara dik yönde olacak şekilde yönlendirme imkanlarına ait araştırmalar yapılması önerilebilir.

- Çelik tel takviyeli beton kullanılan ve birleşim bölgesindeki enine donatının miktarına göre iki tip olan numunelerde yüklemeler neticesi meydana gelen çatlaklar, genellikle eğilme çatlağı şeklinde oluşmuştur. Kirişte, kolon yüzünden itibaren kesit yüksekliğinin yarısına kadar bir bölgede çelik tel takviyeli beton kullanılan onuncu numune dışında, tüm numunelerde, kirişin kolon yüzündeki eğilme çatlağının yaklaşık 10mm kadar genişlemesiyle deneyler bitirilmiştir. Ayrıca iki yönlü tersinir tekrarlı yükler altında çelik tel takviyeli beton kullanılan numunelerin deneyler sonucunda çatlak dağılımı incelendiği zaman, bu numunelerin kolon ile kiriş birleşim bölgesinde (düğüm noktasında) X kayma çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. Birleşim bölgesinde bir adet enine donatı ile birlikte çelik tel takviyeli beton kullanılan numunelerin kolon-kiriş birleşim bölgesindeki X kayma çatlağı, yüklemenin ileri adımlarında oluşmuş ve çatlak genişliği de kılcal boyutlarda kalmıştır.
- Çelik tel takviyeli beton, kolon-kiriş birleşim bölgesi arakesitinden kiriş kesiti yüksekliğinin yarısı kadar bir bölgede kullanılan onuncu numune, 35mm.lik hedef kiriş uç yer değiştirmesine ulaşılmadan 30mm.lik kiriş uç yer değiştirmesinin ikinci çevriminde göçme durumuna gelmiştir. Göçmeye neden olan çatlağın yeri, diğer numunelerdeki göçme çatlağının yerine göre oldukça farklı olmuştur. Onuncu numunenin göçmesine neden olan çatlak, kirişte, çelik tel takviyeli beton ile normal beton kullanılan iki bölgenin arakesiti civarındaki eğilme çatlağı aniden genişlemiş ve bu aşamada deney bitirilmiştir. Göçmeye neden olan çatlağın bulunduğu kesit civarındaki iki farklı beton karışımından dolayı kiriş, iki farklı eğilme rijitliğine sahiptir. Bundan dolayı göçmeye neden olan eğilme çatlağı, eğilme rijitliğinin daha küçük olduğu bölge civarında aniden

genişlemiştir. Bu numunedeki göçmeye neden olan çatlağın oluşum yeri ve gelişimi dikkate alınarak, iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemelere maruz kalan kenar kolon-kiriş birleşim numunelerinde beton karışım hacminin %1 oranında çelik tellere sahip olan çelik tel takviyeli betonun, kirişte, kolon-kiriş birleşim bölgesi arakesitinden itibaren kiriş kesiti yüksekliğinin yarısından daha büyük bir bölgede kullanılmasının uygun olacağı kanısına varılmıştır. Bu sonuca göre, beton karışıma ilave edilen farklı çelik tel miktarları ve çelik tel takviyeli beton kullanılan kirişin $0.75h_{kiriş}$ gibi farklı bölgeleri ele alınarak benzer çalışmanın genişletilmesi önerilebilir.

- Kiriş ucuna etkiyen iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında, çelik tel takviyeli beton kullanılan tüm kenar kolon-kiriş birleşim yük taşıma kapasitelerinin, moment taşıma kapasitelerinin, deprem yönetmeliğinin sünek kenar kolon-kiriş birleşimleri için önerdiği koşullara uygun olarak hazırlanmış olan birinci numuneden daha büyük olduğu görülmüştür (hatalı beton yerleştirilmesi nedeniyle kolon yüzüne yakın bölgede, bir boşluğa sahip olan yedinci numune dışında). Buna göre, birçok araştırmanın ortak sonucuna paralel olarak çelik tel takviyeli beton kullanılan betonarme elemanların yük taşıma kapasitelerinin arttığı, bu çalışmada da görülmüştür. Ç.T.T.B. kullanılan numunelere, normal beton kullanılan numunelerin boyuna donatılarından daha az boyuna donatı yerleştirilip, benzer koşullarda deney yapılması önerilebilir. Böylece, Ç.T.T.B. kullanılan elemanların eğilme kapasitelerindeki değişim de incelenebilir.
- Her numune aynı hedef kiriş uç yer değiştirmesinde ve aynı çevrim sayısında göçmediği için tüm numunelerin birinci çevrimlerine ait deney sonuçları ele alınarak, nihai hedef kiriş uç yer değiştirmesindeki kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitinin rijitlik değişimleri ise; sünek davranış gösteren numunelerin (dördüncü, yedinci ve onuncu numuneler dışında) nihai rijitlik değerleri birbirine yakın olup, diğer numunelerin rijitlik değerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Kiriş plastik mafsallık bölgesi orta kesitine ait eğilme rijitliğinin kiriş uç yer değiştirmesine göre değişimi incelendiği zaman; kesit çatladıktan ve kirişte kalıcı deplasmanların başlamasından sonra tüm numunelerde sözkonusu rijitlik hızla azalmıştır.

- Tüm deney numunelerinin iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında yutmuş olduğu toplam enerji miktarları Bölüm-2.7.3' te ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Bu bölümde sunulan Şekil-2.42'e göre; kolon ile kirişin birleşim bölgesinde(düğüm noktasında) ve sarılma bölgesinde ilave enine donatılar ihmal edilerek yerine çelik tel takviyeli beton kullanılan altıncı ve sekizinci numunelerin diğer numunelere göre daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Deprem yönetmeliğinin süneklik seviyesi yüksek olan yapıların kenar kolon-kiriş birleşimleri için önerdiği koşullara uygun olarak hazırlanmış bulunan birinci numunenin enerji yutma kapasitesi de altıncı ve sekizinci numunenin enerji yutma kapasitelerinden daha az olmuştur. Bu sonuca göre, süneklik seviyesi yüksek kolon-kiriş birleşimleri için gerekli olan ilave enine donatıların yerine çelik tel takviyeli beton kullanılmasının mümkün olacağı görülmüştür. Ayrıca, kolon ile kirişin birleşim bölgesinde hiçbir enine donatı bulunmamasına ve kolon ile kirişin sarılma bölgelerinde enine donatı aralıklarının sıklaştırılmamasına karşılık, bu bölgelerde çelik tel takviyeli beton kullanılan üçüncü numunenin yutmuş olduğu toplam enerji miktarı, birinci numunenin yutmuş olduğu enerji miktarından biraz daha az olmuştur. Bununla birlikte kolon ile kirişin birleşim bölgesinde enine donatı bulunmayan, sarılma bölgesinde sık enine donatıları bulunan ve normal betonlu dördüncü numunenin enerji yutma kapasitesi ise diğer numunelere göre oldukça düşük olmuştur. Bu sonuçlara göre, süneklik seviyesi yüksek olan betonarme yapılarda, kolon ile kirişin birleşim bölgelerinde kolon enine donatılarının sık olarak devam ettirilmesi gerekir. Deprem gibi iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında, kolon-kiriş birleşim bölgelerinin sünek davranabilmesi için kolon ile kirişin birleşim bölgesinde kolon enine donatılarının sık olarak devam ettirilmesinin zorunlu olduğu koşulu deprem yönetmeliğinde mevcuttur. Ancak kolon ile kirişin birleşim bölgesinde gerekli olan bu enine donatıların yerleştirilmesinde işçiliğin zor olmasından dolayı pratikte genellikle kolon ile kirişin birleşim bölgelerine enine donatıların yerleştirilmediği, Erzincan 1992, Adana-Ceyhan 1998 ve Kocaeli 1999 depremleri sonrasında ağır ve orta hasarlı binalarda sıkça görülmüştür. Dördüncü numune ile birinci numunenin deprem etkilerine benzer iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altındaki davranışları ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığı zaman kolon ile kirişin birleşim bölgesinde kolonda devam eden sık enine donatıların ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

- İki yönlü tersinir tekrarlı yüklemeler altında kenar kolon-kiriş birleşim numunelerinin elastik ötesi plastik davranışla yutmuş oldukları toplam enerji miktarlarına göre numunelerin süneklik değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu çerçevede, kuvvet-deplasman histeresis eğrilerinin içinde kalan alan değerleri her bir numunenin plastik davranışla yutmuş olduğu enerji miktarı olarak hesaplanmıştır. Buna göre, plastik davranışla çelik tel takviyeli beton kullanılan altıncı, sekizinci ve üçüncü numuneler, normal beton kullanılan ve deprem yönetmeliği koşullarına uygun olarak sünek kenar kolon-kiriş birleşimi olarak hazırlanmış olan birinci numuneden daha fazla enerji yutmuştur. Dolayısıyla çelik tel takviyeli beton kullanılan numuneler daha sünek davranış göstermiş olup, Ç.T.T.B. kullanılmasıyla kolon-kiriş birleşimlerinin süneklik seviyeleri artırılabilir.
- Bu araştırmada, suda çözülebilen yapıştırıcılarla birbirine yapıştırılmış çelik teller kullanılmıştır. Bundan dolayı çelik teller, topaklanmadan beton karışımında homojen bir şekilde dağılmıştır. Bununla birlikte deneyler esnasında normal akışkanlaştırıcının kullanıldığı ve içinde çelik tellerin bulunduğu beton karışımlarının kalıba çok zor yerleştirildiği görülmüştür. Son iki numunenin beton karışımında süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile bu sorun giderilmiştir. Dolayısıyla çelik tel takviyeli beton karışımlarının kalıba kolay ve iyi yerleştirilebilmesi için mutlaka beton karışımında süper akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır.
- Bugüne kadar yapılan araştırmalarda, çelik tel takviyeli beton kullanılan betonarme elemanların moment taşıma kapasitelerinin, kayma dayanımlarının, zımbalama dayanımlarının, betonun çekme dayanımlarının, elemanın sünekliğinin, enerji yutma kapasitelerinin arttığı, çatlağı dik kesen çelik teller çatlak üzerinde köprü görevi göstererek yük aktardığı gibi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak çelik tel takviyeli beton kullanılan betonarme elemanların dayanımları ve davranışlarına ait basit ve yaygın bir hesap modeli henüz elde edilememiştir. Bundan dolayı betonarme yapıların taşıyıcı sistem elemanlarında sık kullanılmamaktadır. Basit ve yaygın bir hesap modeli olamamasının nedeni ise, beton karışımına ilave edilen çelik tellerin karışım içinde rastgele dağılmasından dolayı çelik tellerin betonarme elemanlar içindeki pozisyonlarının

açıkça tahmin edilemediğindendir. Literatürde verilen birçok hesap modelinde bu durum, deney sonuçlarına bağlı ampirik ifadeler veya değerler olarak dikkate alınmaktadır.

- Günümüzde, çelik tel takviyeli betonlar, genellikle endüstriyel zeminlerde ve uçakların iniş pistinde, püskürtme beton (shotcrete) şeklinde tünel inşaatlarında, ve büyük çaplı dairesel beton boruların üretiminde çok sık kullanılmaktadır. Çelik tel takviyeli beton kullanılan betonarme kesitlerin davranışına ait basit ve tasarım mühendisleri tarafından kolayca uygulanabilen hesap modelleri geliştirildikçe monolitik betonarme yapıların taşıyıcı sisteminde ve prefabrik inşaatlarda yaygın olarak kullanılabilecektir.
- Bu çalışmanın kapsamında olduğu gibi çelik tel takviyeli betonu sadece kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kullanmanın inşaat tekniği açısından çok pratik bir uygulama olmadığı bilinmektedir. Ancak, deprem gibi iki yönlü tersinir tekrarlı yüklemelere maruz kalan betonarme çerçevelerde, kolon ve kiriş iç kuvvetlerinin çok yoğun olduğu kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, çelik tel takviyeli betonun etkili olacağı minimum bölgenin tespit edilmesi gerekeceği düşünülerek böyle bir araştırma yapılmasının uygun olacağı kanısına varılmıştır. Çelik tel takviyeli beton kullanılan betonarme elemanların, normal beton kullanılan elemanlara göre daha yüksek çekme dayanımına, kayma dayanımına, eğilme momenti taşıma kapasitesine ve sünekliğe sahip olduğu gözönüne alınarak, bugüne kadar yapılan araştırmalar, tüm taşıyıcı sistem elemanlarında, çelik tel takviyeli beton kullanılmakla betonarme yapıların dayanım ve davranışlarında birçok avantajların mümkün olabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **CELEP Z., KUMBASAR N.,** 1998. Betonarme Yapılar, Sema Yayıncılık, İstanbul.
- [2] **Recommendations For Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures Reported by ACI-ASCE Committee 352, 1991. ACI Journal May-June.**
- [3] **PESSİKİ S.P.** 1990. Seismic Behavior of Lightly Reinforced Concrete Column And Beam-Column Joints Details. Technical Report NCEER-90-0014 August.
- [4] **KUROSE, Y., GUIMARES, G.N., LIU, Z., KREGER, M.E.** 1988. Study of Reinforced Concrete Beam-Column Joints Under Uniaxial and Biaxial Loading, Report No. 88-2, Phil M.Ferguson Laboratory, The University of Texas at Austin, December.
- [5] **KITAYAMA K., OTANI S. and AOYAMA H.,** 1991. Design of Beam-Column Criteria for Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints, Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance, SP-123 ACI, Detroit, 97-123.
- [6] **NEW ZEALAND STANDART CODE OF PRACTISE FOR DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES, NZ3101, 1982.**
- [7] **AOYAMA H.,** 1985. Problems Associated With "Weak Beam " Design of Reinforced Concrete Frames, Journal of The Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Vol.38, No:2, 75-105.

- [8] **ACI Committee 318, 1989. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-89), ACI, Detroit.**
- [9] **BONACCI J., PANTAZOPOLOU S., 1993. Parametric Investigation of Joint Mechanics, ACI Structural Journal, V.90, No: 1, Jan.- Feb., 61-71**
- [10] **FUJI S., and MORITA S., 1991. Comparison Between Interior and Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joint Behavior, Design of Beam-Column Joints for Seismic Resistance, SP-123 ACI, Detroit, 145-165.**
- [11] **PAULAY T., PARK R., and PRISTLEY M.J.N., 1989. Reinforced Concrete Beam-Column Joints Under Seismic Actions, ACI Journal Proceedings V. 75, N0:11, Nov. 585-593.**
- [12] **PAULAY T., 1989. Equilibrium Criteria for Reinforced Concrete Beam-Column Joints, ACI Structural Journal, V.86, No:6, Nov. 635-643.**
- [13] **PARK R., and PAULAY T., 1975. Reinforced Concrete Structures, John Willey & Sons Inc., 716-761.**
- [14] **BAYINDIRLIK İMAR VE İSKAN BAKANLIĞI DEPREM ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ BAŞKANLIĞI, 1998. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik.**
- [15] **SP-44, American Concrete Institute 1974. Fiber Reinforced Concrete, Detroit, Michigan, 554.**
- [16] **RAMAKRISHNAN, V., BRANDSHAUG, T., COYLE, W. V., SCRADER, E.K. 1980. A Comparative Evaluation of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Deformed End Fibers Glued Together into Bundles, ACI Journal, May-June 135-143.**

- [17] **ZOLO, R.,F.** 1984. Collated Fibrillated Polypropylene Fibers in FRC, Fiber Reinforced Concrete International Symposium, SP-81, ACI Detroit, Michigan, 397-409.
- [18] **BALAGURU, P. N., SHAH, S.P.** 1992. Fiber Reinforced Cement Composites, Mc Graw - Hill, Inc., A.B.D..
- [19] **CRAIG R. J.,** 1984. Structural Applications of Reinforced Fibrous Concrete, ACI Concrete International, V.6, 75-88
- [20] **KORMELING, H.A., REINHARDT, H.W., SHAH, S.P.,** 1980. Static and Fatigue Properties of Concrete Beams with Continuous Bars and with Fibers, ACI Journal, Proceedings, Jan-Feb 1980, 36-43.
- [21] **SWAMY, R.N. and ALI S.A.R.,** 1982. Punching Shear Behavior of Reinforced Slab-Column Connections Made with Steel Fiber Concrete, ACI Journal Proceedings V.79, No.5, Sept.-Oct., 392-406.
- [22] **CHENG T., HSU T., LINDA R. and EZELDIN A.S.,** 1992. Load-Deformation Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, Nov.- Dec., 650-657.
- [23] **SHIAH, T.W. and EZELDIN, A.S.,** 1993. Optimum Design of SFRC Based on Strength and Toughness, Concrete 2000 Economic and Durable Concrete through Excellence, The Proceedings of the International Conference in Dundee, 1519-1528
- [24] **MOENS, J. and NEMEGER, D.,** 1991. Designing Fiber Reinforced Concrete Based on Toughness Characteristics, Concrete International, Nov. 1991, 38-43

- [25] **EZELDIN, A.S., and BALAGURU, P.,N.,** 1992. Normal and High Strength Fiber-Reinforced Concrete Under Compression, ASCE Journal of Materials In Civil Engineering, Nov., 415-429.
- [26] **DWARKANATH, H.V. and NAGARAJ, T.S.** 1992. Comparative Study of Flexural Strength of Steel Fiber Concrete, ACI Structural Journal , Nov.-Dec., 714-720.
- [27] **CRAIG, R.,** 1987. Flexural Behavior and Design of Reinforced Fiber Concrete Members, SP-105, ACI , Detroit, 517-563
- [28] **LIM T.Y., PARAMASIVAM, P., and LEE, S.L.** 1987. Behavior of Reinforced Steel Fiber Concrete Beams in Flexure, ASCE Journal of Structural Engineering, Dec. , 2439-2459
- [29] **BATSON G., JENKINS E., and SPATNEY R.,** 1972. Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams, ACI Journal Proceedings, Oct., 640-644.
- [30] **SWAMY R.N., and BAHIA H.M.,** 1979. Influence of Fiber Reinforcement on The Dowel Resistance to Shear, ACI Journal Proceedings, Feb., 327- 355.
- [31] **SWAMY R.N., and BAHIA H.M.,** 1985. The Effectiveness of Steel Fibers as Shear Reinforcement, ACI Concrete International, March, 225-287.
- [32] **EL-NIEMA, E.I.,** 1991. Reinforced Concrete Beams with Steel Fibers Under Shear, ACI Structural Journal , March-April, 178-183.
- [33] **SHARMA A.K.** 1986. Shear Strength of Steel Reinforced Concrete Beams, ACI Journal Proceedings, July-August, 624-628.

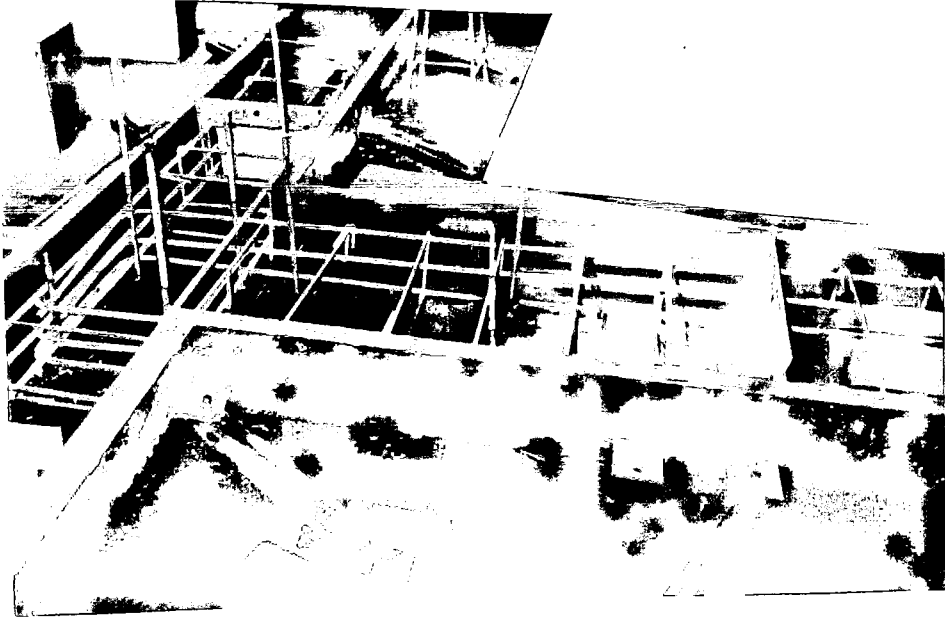
- [34] **WRIGHT, P.J.F.** 1955. Comments on an Indirect Tensile Test on Concrete Cylinders, Magazine of Concrete Research (London), July, 87-96.
- [35] **NARAYANAN, R. and DARWISH, I.Y.S.** 1986. Use of Steel Fibers As Shear Reinforcement, ACI Structural Journal, 624-628 .
- [36] **TAN, K.H., MURUGAPPAN, K., and PARAMASIWAM, P.** 1993. Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, Jan-Feb., 3-11.
- [37] **JINDAL, R.,L. and HASAN, A.K.** 1984. Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam-Column Connections, Fiber Reinforced Concrete International Symposium, ACI SP-81, Detroit, 107-123.
- [38] **CRAIG, R.; MAHADEV, S.; PATEL, C.C.; VITERI and KERTESZ C.** 1984. Behavior of Joints Using Reinforced Fibrous Concrete, Fiber Reinforced Concrete Beam-Column Connections, Fiber Reinforced Concrete International Symposium, ACI SP-81, Detroit, 125-167.
- [39] **KATZENSTEINER, B.; FILIATRAULT, A.; MINDESS, S. and BANTHIA, N.,** 1992. Use of Steel Fibrous Concrete in Seismic Design, Fourth RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete, Sheffield, England, July.
- [40] **FILIATRAULT, A.; LADICANI, K. and MASSICOTTE, B.** 1994. Seismic Performance of Code Designed Fiber Reinforced Concrete Joints, ACI Structural Journal, Sep.-Oct., 564-571.
- [41] **FILIATRAULT, A.; PINEAU, S. and HOUDE, J.** 1995. Seismic Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints, ACI Structural Journal, Sep.-Oct., 543-552.

- [42] **TAN, K.H., PARAMASIVAM, P., TAN, K.C.** 1994. Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, July-August, 384-393.
- [43] **HASGÜR Z., GÜNDÜZ, A.N.** 1996. Betonarme Çok Katlı Yapılar, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.

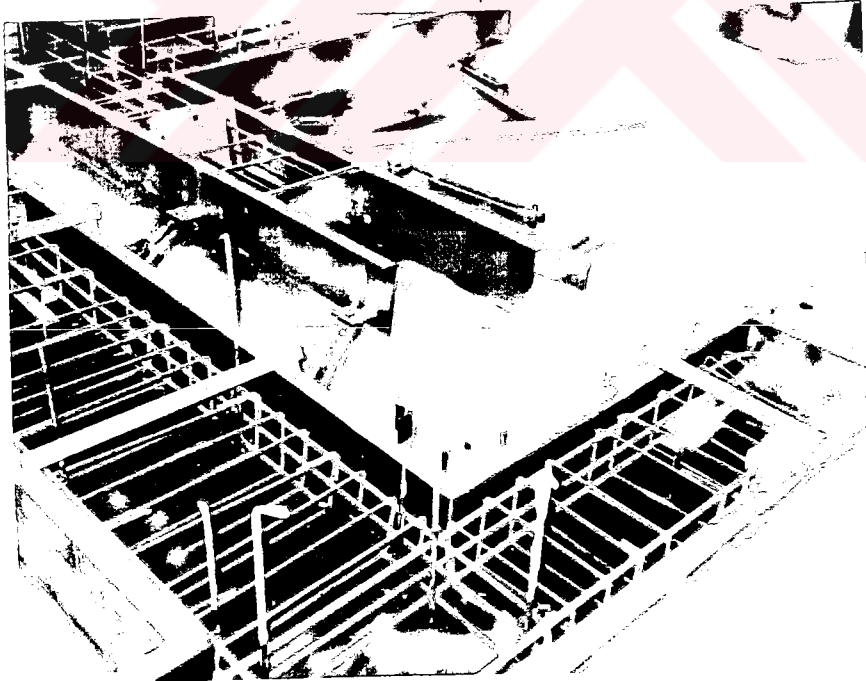


EK

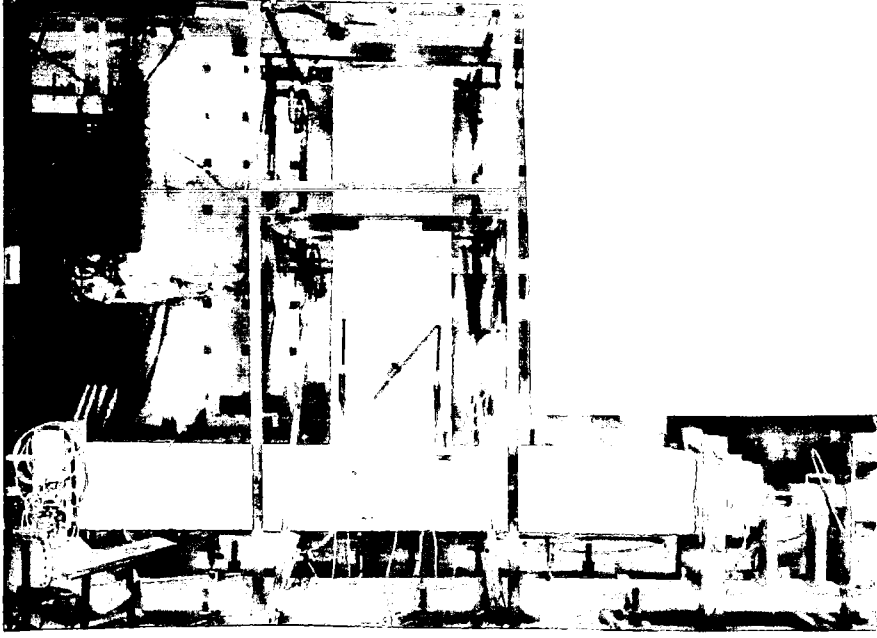
DENEYLERLE İLGİLİ FOTOĞRAFLAR



Şekil-Ek.1: Çelik tel takviyeli beton kullanılan kenar kolon-kiriş birleşim numunesinin kalıbı ve donatılarının yerleşiminden görünüm



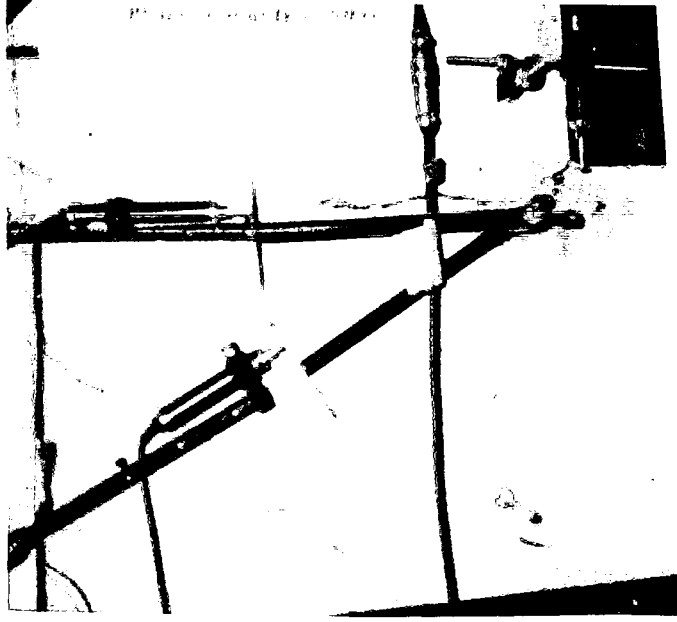
Şekil-Ek.2: Normal beton kullanılan kenar kolon-kiriş birleşim numunesinin kalıbı ve donatılarının yerleşiminden görünüm (dördüncü numunenin)



Şekil-Ek.3: Deney düzeneğinden genel görünüm



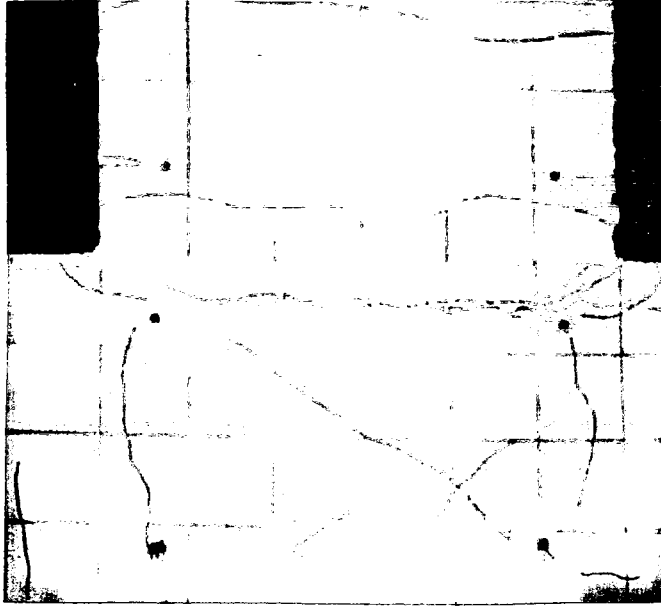
Şekil-Ek.4: Birinci numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü
“Normal beton kullanılan ve deprem yönetmeliğine uygun sünek kenar kolon-
kiriş birleşim numunesi”



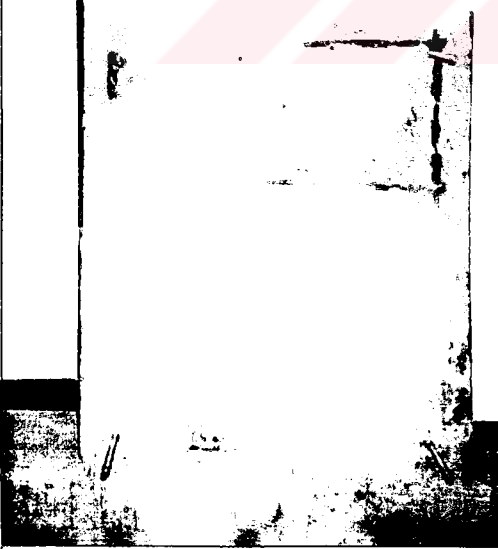
Şekil-Ek.5: Dördüncü numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü
“Normal beton kullanılan ve birleşim çekirdeğinde(düğüm nok.) etriye bulunmayan, kolon ve kiriş sarılma bölgelerinde sık etriye bulunan numune”



Şekil-Ek.6: Beşinci numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü
“Çelik tel takviyeli beton (kirişte 60cm, kolonda 50cm.) kullanılan ve birleşim çekirdeğinde(düğüm nok.) bir tane etriye bulunan numune”



Şekil-Ek.7: Altıncı numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü
 “Çelik tel takviyeli beton (kirişte 120cm, kolonda 50cm) kullanılan ve birleşim
 çekirdeğinde(düğüm nok.) bir tane etriye bulunan numune”

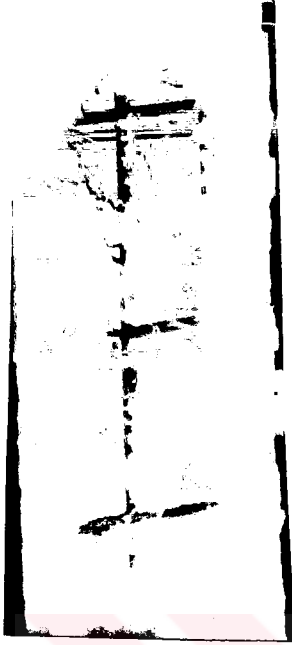


Şekil-Ek.8a: Yedinci numunedeki
 segregasyon boşluklarından görünüm

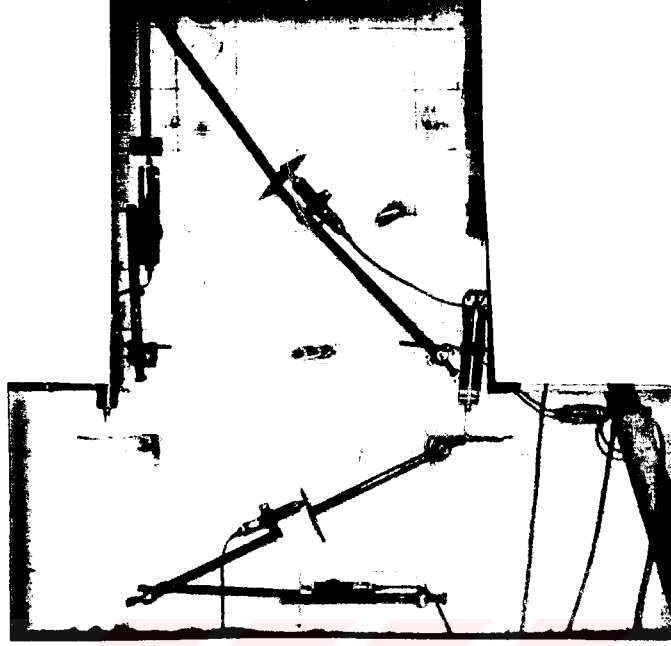


Şekil-Ek.8 b: Yedinci numunenin
 deney sonrası çatlaklarının görünümü

“Çelik tel takviyeli beton (kirişte 60cm, kolonda 50cm) kullanılan ve birleşim
 çekirdeğinde(düğüm nok.) etriye bulunmayan numune”



Şekil-Ek.9a: Sekizinci numunedeki segregasyon boşluklarından görünüm

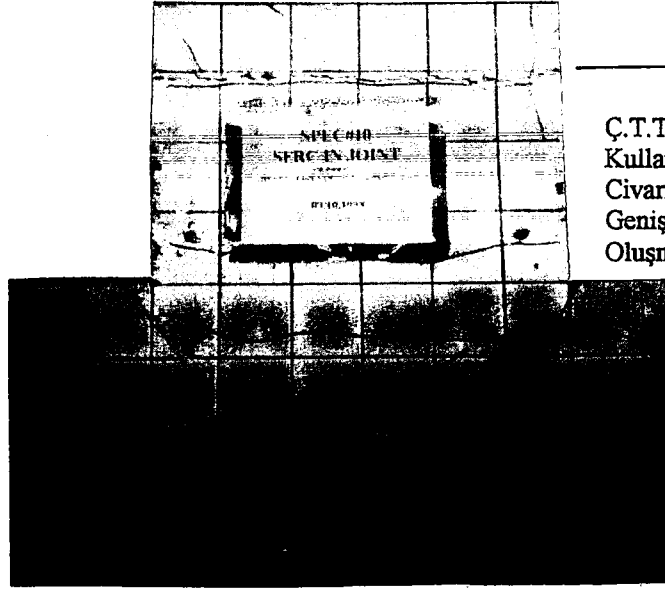


Şekil-Ek.9b: Sekizinci numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü

“Çelik tel takviyeli beton (kirişte 120cm, kolonda 50cm) kullanılan ve birleşim çekirdeğinde(düğüm nok.) bir tane etriye bulunan numune”



Şekil-Ek.10: Dokuzuncu numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü
“Çelik tel takviyeli beton (kirişte 60cm, kolonda 50cm) kullanılan ve birleşim çekirdeğinde(düğüm nok.) etriye bulunmayan numune”



Ç.T.T.B. ile Normal Beton
Kullanılan Bölgelerin Arakesiti
Civarındaki Çatlak Aniden
Genişleyerek Göçme
Oluşmuştur.

Şekil-Ek.11: Onuncu numunenin deney sonrası çatlaklarının görünümü
“Çelik tel takviyeli beton (kirişte 30cm, kolonda 50cm) kullanılan ve birleşim
çekirdeğinde(düğüm nok.) bir tane etriye bulunan numune”

ÖZGEÇMİŞ

1965 yılında Kayseri'de doğan Mustafa Gençoğlu ilk ve ortaöğrenimini Kayseri'de tamamlamıştır (1983). İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1987 yılında mezun olmuş, 1989 yılında Yapı Anabilim Dalı Betonarme Çalışma Grubu'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaya başlamış olup, 1990 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde İnşaat Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği Programını tamamlayarak yüksek lisans derecesini almıştır.

