

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOMENT AKTARAN PREFABRİK
BETONARME KOMPOZİT İÇ KOLON – KİRİŞ
BAĞLANTILARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Sadık Can GİRĞİN

Mayıs, 2014

İZMİR

**MOMENT AKTARAN PREFABRİK
BETONARME KOMPOZİT İÇ KOLON – KİRİŞ
BAĞLANTILARININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Sadık Can GİRGİN

Mayıs,2014

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SADIK CAN GİRGİN, tarafından PROF. DR. SERAP KAHRAMAN yönetiminde hazırlanan “MOMENT AKTARAN PREFABRİK BETONARME KOMPOZİT İÇ KOLON-KİRİŞ BAĞLANTILARININ İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



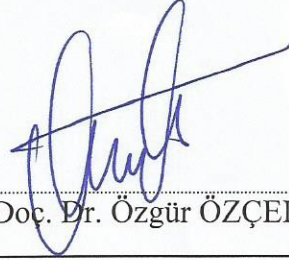
Prof. Dr. Serap KAHRAMAN

Yönetici



Doç. Dr. Binnur Gören KIRAL

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Tez İzleme Komitesi Üyesi



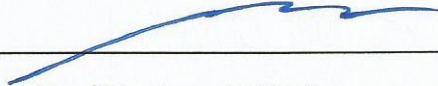
Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Yıldırım ERTUTAR

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın her aşamasında önerileri ile bana hep destek olan ve bilgi birikimi ile çalışmalarına katkılarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Serap KAHRAMAN'a teşekkürü borç bilirim. Görüş ve önerileri ile çalışmama katkı sağlayan Prof. Dr. Türkay BARAN hocama teşekkür ederim.

Tez izleme jürisinde yer alan, araştırmama görüşleri ile destek veren hocalarım Doç. Dr. Özgür ÖZÇELİK, Doç. Dr. Binnur Gören KIRAL, Doç. Dr. Evren TOYGAR ve Prof. Dr. Ömer Zafer ALKU'ya ayırdıkları zaman ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımızın her aşamasında zamanından fedakârlık ederek büyük bir özveri ile yardımlarda bulunan ve dostluğunu her zaman hissettiğim Uzman Dr. İbrahim Serkan MISIR'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların kurgulanması aşamasında değerli görüş ve önerileri ile araştırmama destek veren Doç Dr. Şevket ÖZDEN hocama teşekkür ederim.

Sunulan çalışma Türkiye Prefabrik Birliği tarafından desteklenmiştir. Görüş ve önerilerini paylaşan İnş. Yük. Müh. Hakan ATAKÖY'e ve İnş. Yük. Müh. Günkut BARKA'ya teşekkür ederim.

Sunulan çalışma D.E.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2012.KB.FEN.019 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Tez çalışmamı destekleyen Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Lisans dönemlerinden bu yana stresli zamanlarda desteğini yanımda hissettiğim dostlarım İnş. Müh. Hakkı GÖZENER ve İnş. Müh. Harun SEÇKİN'e teşekkürü borç bilirim.

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Müh. Onur MERTER, İnş. Yük. Müh. Çağlar YALÇINKAYA ve İnş. Müh. Umut YÜCEL'e teşekkür ederim.

Çalışmadaki katkılarından dolayı İnş. Yük. Müh. Erol AR'a ve İnş. Müh. Halis KOÇBULUT'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları sırasındaki yardımlarından dolayı İnş. Yük. Müh. Serhan SARIDOĞAN'a teşekkür ederim. Çalışma kapsamında emeği geçen tüm lisans öğrencilerimize teşekkür ederim.

Hayatımın her anında özverisini esirgemeyen ve her aşamada yanımda olan ve beni yüreklendiren aileme, annem Kadriye GİRGİN, babam Ali GİRGİN, kızkardeşim Selcan GİRGİN ŞEKER ve Muammer ŞEKER'e teşekkür ederim.

Sadık Can GİRGİN

MOMENT AKTARAN PREFABRİK BETONARME KOMPOZİT İÇ KOLON-KİRİŞ BAĞLANTILARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZ

Sunulan çalışmada, ülkemizdeki prefabrik yapılarda yaygın kullanım alanı bulunan prefabrik kompozit (ıslak-kaynaklı) moment aktarabilen iç kolon-kiriş bağlantılarının depremi benzeştiren yer değiştirme kontrollü tersinir-tekrarlı yükler altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir.

Prefabrik bir alışveriş merkezi yapısının zemin katında yer alan iç kolon-kiriş birleşim bölgesini temsil eden 1/2 ölçekli bir adet monolitik (kontrol) ve beş adet prefabrik bağlantı numunesi Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak tasarlanmıştır. Testler sırasında, kiriş alt plakasına kaynaklı boyuna donatılarda oluşan maksimum birim deformasyonların prefabrik kolon-kiriş bağlantılarının hasar modlarını belirlediği gözlenmiştir. Ayrıca plakaya kaynaklanan donatıların birim deformasyon kapasitesinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Donatıların kaynaklanabilirliğini etkileyen ana parametreler; donatı bileşimindeki karbon oranı ve kullanılan elektrot tipidir.

Ard-germeli birleşimlerde, yumuşak donatının erken ötelenme oranlarında kopmasını önlemek için aderans bozulması yaklaşımı uygulanmaktadır. Benzer şekilde, aynı tepe ötelenme oranı taleplerinde plakaya kaynaklı donatıda gelişen en büyük çekme birim deformasyonlarının azaltılması için belli bir bölgede aderans bozulması uygulanarak testler gerçekleştirilmiş ve iyileştirilmiş bir bağlantı önerisi sunulmuştur.

Ayrıca prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin deney sonuçları ile kalibre edilmiş yığılı plastisite ve lif esaslı yaklaşımları ile sayısal modelleri geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: prefabrik yapılar, kompozit kolon-kiriş birleşim bölgeleri, aderans bozulması yaklaşımı

REHABILITATION OF MOMENT-RESISTING PRECAST CONCRETE COMPOSITE INTERIOR BEAM-COLUMN CONNECTIONS

ABSTRACT

In this study, cyclic behaviour of precast moment-resisting composite (wet-welded) interior beam- column connections which have a common application in Turkey were investigated experimentally under quasi-static displacement-controlled loading, representing earthquake effects.

One monolithic (reference) and five precast, half-scale specimens representing an inner connection of the first storey of a precast shopping mall were designed according to the Turkish Earthquake Code. During the tests it is observed that the ultimate strains of beam bottom rebars, welded to the beam end plates, characterized the failure modes of the specimens. Also, decrease in the ultimate strain capacity of rebars welded to the beam plates was observed. The main parameters affecting the weldability of beam rebars to the plates are the carbon content in the steel chemical composition and electrode type.

In post-tensioned precast beam-column connections, debonding approach is used to prevent premature rebar fracture at drift ratios. Similarly, the debonding approach was applied to reduce the peak tension strains of beam longitudinal rebars for the same top drift demands and an improved connection solution is proposed.

Moreover, numerical models calibrated with the experimental results for the precast specimens were developed with lumped plasticity and fiber-based modeling approaches.

Keywords: Composite beam-column connections, precast concrete structures, debonding approach

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	v
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xvi

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Giriş	1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	2
1.2.1 Amaç	2
1.2.2 Kapsam.....	3
1.3 Tezin Ana Hattı	4

BÖLÜM İKİ – PREFABRİK YAPILARDA MOMENT AKTARABİLEN BİRLEŞİMLER 5

2.1 Giriş	5
2.2 Kuru Birleşim Bölgeleri.....	7
2.2.1 Ard-germeli Birleşim Bölgeleri	7
2.2.2 Bulonlu Birleşim Bölgeleri.....	10
2.2.3 Kaynaklı Birleşim Bölgeleri	11
2.3 Benzeştirilmiş (Islak) Moment Aktarabilen Birleşim Bölgeleri	12
2.4 Kompozit (Islak-Kaynaklı) Moment Aktarabilen Birleşim Bölgeleri.....	14
2.4.1 Donatıların Kaynaklanabilirliği	18

BÖLÜM ÜÇ – DENEYSEL ÇALIŞMA 20

3.1 Giriş	20
3.2 Aderans Bozulması Yaklaşımı	21
3.2.1 Hedeflenen Ötelenme Oranındaki Eğriliğin Belirlenmesi	22
3.2.2 Boyuna Donatının Maksimum Birim Deformasyonu ve Toplam Uzamasının Belirlenmesi	23
3.2.3 Aderans Bozulma Boyunun Belirlenmesi	24
3.3 Deney Numuneleri.....	25
3.3.1 N0 Numunesi	26
3.3.2 N1 ve N2 Numuneleri	27
3.3.3 N3 ve N4 Numuneleri	31
3.3.4 N5 Numunesi	32
3.4 Malzeme Özellikleri	34
3.4.1 Beton	34
3.4.2 Donatı çeliği.....	35
3.5 Test Kurulumu.....	37
3.6 Test Yöntemi.....	39
3.7 Ölçerlerin Yerleşimi	40
3.7.1 Yerdeğiştirme Ölçerler	40
3.7.2 Gerinim Pulları	41
3.8 Veri Toplama Sistemi	41

BÖLÜM DÖRT – DENEY SONUÇLARI 44

4.1 Monolitik Numune (N0)	44
4.2 N1 Numunesi	48
4.3 N2 Numunesi	51
4.4 N3 Numunesi	53
4.5 N4 Numunesi	58
4.6 N5 Numunesi	60

BÖLÜM BEŞ – DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....65

5.1 Giriş	65
5.2 Dayanım.....	65
5.2.1 N0-N2 Numuneleri	66
5.2.2 N0, N3-N5 Numuneleri.....	69
5.2.3 ACI 374.1-05’e göre değerlendirme	71
5.3 Yerdeğiştirme Sünekliği	72
5.4 Rijitlik Azalması.....	74
5.4.1 Sekant Rijitliği	74
5.4.2 N0, N1 ve N2 Numuneleri.....	76
5.4.3 N0, N3-N5 Numuneleri.....	77
5.5 Enerji Tüketimi	79
5.5.1 Tüketilen Birikimli Enerji	79
5.5.2 Göreli Enerji Tüketimi	80
5.5.3 Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı.....	82

BÖLÜM ALTI – SAYISAL MODEL ÇALIŞMALARI.....85

6.1 Giriş	85
6.2 Mevcut Çalışmalar.....	86
6.2.1 Yığılıl Plastisite Yaklaşımı.....	86
6.2.2 Lif (Fiber) Esaslı Model.....	90
6.3 Yığılıl Plastisite Yaklaşımı ile Sayısal Model	91
6.4 Lif Esaslı Yaklaşım ile Sayısal Model.....	94
6.4.1 Donatı Çeliği.....	95
6.4.2 Beton	98

BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....101

7.1 Tez Çalışmasından Elde Edilen Genel Sonuçlar.....	101
7.2 Gelecek Çalışmalar için Öneriler	103

KAYNAKLAR.....105

EKLER.....113

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Prefabrik yapılarda moment aktarabilen kolon – kiriş birleşim bölgeleri.....	6
Şekil 2.2Ard- germeli kolon – kiriş birleşim bölgesi detayı	9
Şekil 2.3 Bulonlu sünek birleşim detayı	11
Şekil 2.4 Kaynaklı bağlantı detayı.....	12
Şekil 2.5 Benzeştirilmiş birleşim detayı	14
Şekil 2.6 Kompozit dış kolon-kiriş birleşim bölgesi numunesi	16
Şekil 2.7 Kaynaklı – ıslak birleşim detayı	18
Şekil 3.1 Ard-germeli birleşimlerde yumuşak donatıda aderans bozulma boyunun bırakılması.....	21
Şekil 3.2 N0 numunesi boyutları ve (a) Kiriş en kesiti, (b) Kolon en kesiti.....	27
Şekil 3.3 N1 ve N2 birleşim bölgesi numunesi ve (a) Kiriş (b) Kolon ve (c) Kısa konsol en kesiti	28
Şekil 3.4 Prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin montajı.....	29
Şekil 3.5 PL1 plaka detayı (a) N1 numunesi, (b) N2 numunesi.....	30
Şekil 3.6 N1 ve N2 numunelerinde donatı-plaka, etriye-plaka kaynak detayı.....	30
Şekil 3.7 N2 numunesinde donatı-plaka kaynak bitiminden itibaren aderans bozulma boyunun bırakılması.....	30
Şekil 3.8 N3, N4 ve N5 numunelerinin boyutları.....	31
Şekil 3.9 N3 ve N4 numunelerinin (a) Kiriş, (b) Kolon en kesit boyutları.....	32
Şekil 3.10 N5 numunesinin (a) Kiriş, (b) Kolon en kesit boyutları.....	33
Şekil 3.11 N5 numunesinde çelik kılıf kullanılarak aderans bozulma boyu bırakılması	33
Şekil 3.12 PL1 plaka detayı (a) N3, N4 numuneleri, (b) N5 numunesi.....	34
Şekil 3.13 N3 ve N4 numunelerinde donatı-plaka, etriye-plaka kaynak detayı.....	34
Şekil 3.14 $\phi 10$ donatısının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	36
Şekil 3.15 $\phi 18$ donatısının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	36
Şekil 3.16 $\phi 22$ donatısının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	37
Şekil 3.17 Deney numunesinin sistem içerisindeki konumu.....	38

Şekil 3.18 Deney düzeneğinin genel görünümü: (1) Eksenel yükleme çerçevesi, (2) Hidrolik krik, (3) Mafsal, (4) Hidrolik verin, (5) Yık hücresi, (6) Referans çerçeve, (7) Pandül ayak, (8) Yık hücresi, (9) Sabit mesnet, (10) Düzlem dışı çerçeve, (11) Çelik çerçeve	38
Şekil 3.19 Kolon – kiriş birleşimine tepe yer değıştirmesi uygulanması	39
Şekil 3.20 Yıkeme profili	40
Şekil 3.21 (a) Epoksi esaslı yapıştırıcılar ile ekilen metal çubuklar, (b) Yerdeğıştirme ölçerlerin yerleşimi	41
Şekil 3.22 Prefabrik numunelerde gerinim pullarının yerleşimi	42
Şekil 3.23 Monolitik (N0) numunede gerinim pullarının yerleşimi	42
Şekil 3.24 Gerinim pullarının ve yer değıştirme ölçerlerin veri toplama sistemine bağlanması.....	43
Şekil 4.1 N0 numunesinde kirişte boyuna donatılarının birim deformasyonları	44
Şekil 4.2 N0 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı	45
Şekil 4.3 N0 numunesinin % 2,75 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	45
Şekil 4.4 N0 numunesinin % 5,0 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	46
Şekil 4.5 N0 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi	47
Şekil 4.6 N0 numunesinin moment-kesit dönmesi ilişkisi.....	47
Şekil 4.7 Prefabrik numunelerde gerinim pullarının yerleşimi	48
Şekil 4.8 N1 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları	49
Şekil 4.9 N1 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı	49
Şekil 4.10 N1 numunesinde % 3,5 ötelenme oranındaki hasar dağılımı	50
Şekil 4.11 N1 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi	50
Şekil 4.12 N2 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları.....	51
Şekil 4.13 N2 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı	52
Şekil 4.14 N2 numunesinin % 2,75 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	52
Şekil 4.15 N2 numunesinin % 5,0 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	53
Şekil 4.16 N2 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi	54
Şekil 4.17 N2 numunesinin moment-kesit dönmesi ilişkisi.....	54
Şekil 4.18 N3 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı	55
Şekil 4.19 N3 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları.....	55
Şekil 4.20 N3 numunesinin % 2,20 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	56

Şekil 4.21 N3 numunesinin % 3,5 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	57
Şekil 4.22 N3 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi	57
Şekil 4.23 N2 numunesinin moment-kesit dönmesi ilişkisi.....	58
Şekil 4.24 N4 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı	59
Şekil 4.25 N4 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları....	59
Şekil 4.26 N4 numunesinin % 2,20 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	60
Şekil 4.27 N4 numunesinin % 4,0 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	61
Şekil 4.28 N4 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi	61
Şekil 4.29 N5 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı	62
Şekil 4.30 N5 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları....	63
Şekil 4.31 N5 numunesinin % 2,75 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	63
Şekil 4.32 N5 numunesinin % 3,5 ötelenme oranındaki hasar durumu.....	64
Şekil 4.33 N5 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi	64
Şekil 5.1 Çevrimsel dayanım oranının (α_i) tanımlanması.....	66
Şekil 5.2 N0, N1 ve N2 birleşim numunelerinin dayanım zarfı eğrileri.....	66
Şekil 5.3 N0, N1 ve N2 birleşim numunelerinin histeretik zarf eğrilerinin kıyaslanması.....	67
Şekil 5.4 N0, N1 ve N2 numuneleri için 3. yükleme çevrimlerinde çevrimsel dayanım oranları (α_3)	68
Şekil 5.5 N0, N3-N5 birleşim numunelerinin dayanım zarfı eğrileri	69
Şekil 5.6 N0, N3, N4 ve N5 birleşim numunelerinin histeretik zarf eğrilerinin kıyaslanması	70
Şekil 5.7 N0, N3, N4 ve N5 numuneleri için 3. yükleme çevrimlerinde çevrimsel dayanım oranları (α_3)	71
Şekil 5.8 Deney numunelerinin başlangıç rijitliği (K_1) ve etkili süneklik (μ_{eff}) değerlerinin belirlenmesi.....	73
Şekil 5.9 Sekant rijitliğinin hesabı.....	75
Şekil 5.10 N0-N2 numunelerinin sekant rijitlikleri	76
Şekil 5.11 N0-N2 numunelerinin normalize edilen sekant rijitlikleri	77
Şekil 5.12 N0,N3-N5 numunelerinin sekant rijitlikleri	78
Şekil 5.13 N0,N3-N5 numunelerinin normalize edilen sekant rijitlikleri.....	78

Şekil 5.14 N0-N2 numunelerinde tüketilen birikimli enerjinin ötelenme oranına bağlı değişimi	79
Şekil 5.15 N0, N3-N5 numunelerinde tüketilen birikimli enerjinin ötelenme oranına bağlı değişimi	80
Şekil 5.16 N0-N2 numunelerinde görelî enerji tüketimi oranlarının değişimi.....	81
Şekil 5.17 N0, N3-N5 numunelerinde görelî enerji tüketimi oranlarının değişimi	82
Şekil 5.18 Eşdeğer viskoz sönümün belirlenmesi	83
Şekil 5.19 N0, N1, N2 numuneleri için eşdeğer viskoz sönüm oranları.....	84
Şekil 5.20 N0, N3, N4 ve N5 numuneleri için eşdeğer viskoz sönüm oranları	84
Şekil 6.1 (a) Çevrim sıkışmasının bulunmadığı, b) Çevrim sıkışması davranışı görülen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen çevrimsel döngüler	86
Şekil 6.2 Giberson tek kiriş bileşeni ile kolon- kiriş birleşimlerinin modellenmesi ..	87
Şekil 6.3 Kolon-kiriş birleşimleri için önerilen analitik model.....	87
Şekil 6.4 Dönel yay modeli ile kolon-kiriş birleşiminin davranışının analitik olarak modellenmesi.....	88
Şekil 6.5 Çevrimsel modeller için iskelet eğrileri	89
Şekil 6.6 Pik-eğilimli histeretik model	89
Şekil 6.7 Lif eleman düzeni	90
Şekil 6.8 N4 ve N5 numuneleri için yığılı plastisite modeli	92
Şekil 6.9 N4 numunesi deney verisi ile IMK modelinin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırılması.....	93
Şekil 6.10 N5 numunesi deney verisi ile IMK modelinin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırılması.....	93
Şekil 6.11 N4 numunesi için lif esaslı model; (a) kiriş, (b) kolon, (c) kısa konsol en kesiti.....	94
Şekil 6.12 Donatı çeliği için Histeretik malzeme modeli	95
Şekil 6.13 Donatı Modeli-1 için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri.....	96
Şekil 6.14 Donatı Modeli-2 için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri.....	97
Şekil 6.15 Monotonik testler sonucu normalize edilen gerilme-birim deformasyon ilişkileri	97
Şekil 6.16 Donatı modeli-1’de basınç yönü için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi.....	98

Şekil 6.17 Beton malzeme modeli için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri.....	99
Şekil 6.18 N4 numunesi deney verisi ile lif esaslı modelin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırılması.....	100

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Deney numunelerinin özellikleri.....	26
Tablo 3.2 Beton karışım oranları.....	35
Tablo 3.3 Rötresiz harç karışım oranları.....	35
Tablo 3.4 Donatı çeliği örneklerinin çekme testi altında elde edilen değerleri.....	35
Tablo 4.1 N1 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri.....	48
Tablo 4.2 N2 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri.....	51
Tablo 4.3 N3 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri.....	53
Tablo 4.4 N4 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri.....	58
Tablo 4.5 N5 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri.....	60
Tablo 5.1 Numunelerin dayanımlarının ACI 374.1.05'e göre değerlendirilmesi	72
Tablo 5.2 Numunelerin yerdeğiştirme sünekliği	74
Tablo 5.3 Numunelerin % 3,5 ötelenme oranındaki sekant rijitlikleri	75
Tablo 6.1 Pik eğilimli histeretik modelin parametreleri	92

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Avrupa’da II. Dünya Savaşı sonrasında, ekonomik ve sosyal gelişmelere bağlı endüstriyel gelişimin hızlanması ile birlikte endüstriyel yapıların önemli bir kısmı prefabrik betonarme olarak inşa edilmiştir (Şenel ve Palancı, 2013). İnşaat yapım yöntemi olarak prefabrikasyon, yapı elemanlarının fabrika ortamında seri bir şekilde üretiminin ardından, üretilen bu elemanların fabrika ortamından şantiyeye taşınması ve elemanların montajıyla biten süreç olarak tanımlanabilir (Doğruöz, 2005). Prefabrikasyonun genel amacı, şantiyeye en az sayıda iş bırakacak şekilde fabrikadaki işçilik kalitesini ve kapasitesini kontrol ederek çalışma şartlarında belirli bir kalite düzeyini ve standartlaşmayı sağlamaktır. Prefabrik yapılar düşük maliyet, yüksek kalite ve hızlı üretim açısından sağladıkları avantajları ile A.B.D. ve Japonya’da rağbet görmektedir. Türkiye’de 1990’lı yıllardan itibaren inşa edilen endüstriyel yapıların % 90’ını prefabrik yapılar oluşturmaktadır (Karaesmen, 2001). Tek katlı endüstriyel yapıların yanı sıra ülkemizde çok katlı prefabrik yapılarda da uygulanmaya başlamıştır. Özellikle büyük şehirlerdeki artan konut ve ofis ihtiyacına paralel olarak prefabrik yapı sistemleri ön plana çıkacağı söylenebilir (Ertaş ve diğer., 2006).

Batı Avrupa’da prefabrik yapı sistemleri yalnızca düşey yükleri karşılamak üzere tasarlanmıştır (Ersoy ve diğer.,1999). Ülkemizde prefabrik yapıların hesap ve tasarımında depreme etkileri de göz önüne alınmaktadır (Posada, 2001). Prefabrik betonarme yapılar, monolitik sistemlerin dayanım ve davranış özelliklerini sağlamayı amaçlamaktadır. Eleman üretiminde bu amaca ulaşılsa da birleşimlerde aynı özellikleri sağlamak mümkün olamamaktadır. Prefabrik betonarme birleşimlerin uygulandığı sistemlerle monolitik birleşimler kıyaslandığında, prefabrik birleşimlerin rijitliğinin tam olarak sağlanamadığı ve monolitik birleşimler kadar süneklik sağlayamayıp erken dayanım kaybına uğradıkları rapor edilmiştir (Sucuoğlu ve diğer., 1995). Depreme dayanıklı prefabrik yapı tasarımının gerçekleştirilebilmesi

ancak tersinir – tekrarlı deprem yükleri altında moment ve kesme kuvveti bakımından dayanım kaybına uğramadan deformasyon yapabilen ve enerji tüketebilen birleşim bölgelerinin geliştirilmesine bağlıdır. Prefabrik yapılardaki moment aktarabilen tüm bağlantıların monolitik sistem davranışına benzer rijitlik, enerji tüketim, dayanım ve sünekliğe sahip olduklarının analitik yöntemlerle veya deneylerle kanıtlanmış olması gerektiği ortaya konmuştur (Deprem Yönetmeliği, 2007).

1999 Kocaeli ve Düzce Depremleri sonrasındaki saha gözlemlerinde prefabrik yapıların sismik performansının yetersiz olduğu rapor edilmiştir. Birleşim detaylarının ve kolon – kiriş birleşim bölgelerinin zayıflığı, yapıların yetersiz rijitlik ve dayanım göstermesinde, hasarların artışında en belirleyici etken olarak ortaya çıkmaktadır (Özden, 2003; Arslan ve diğer., 2006; Saatçioğlu ve diğer. 2001). Mevcut prefabrik yapıların kırılgenliğini etkileyen en önemli parametrelerin yetersiz rijitlik ve dayanım olduğu rapor edilmiştir (Şenel ve Kayhan, 2010).

Endüstri tipi prefabrik yapılarda geçmiş depremlerde gözlenen başlıca hasarlar:

- Mafsallı kolon – kiriş birleşim bölgelerinde mesnetlerdeki pimlerin kesme dayanımının aşılması veya düşük dayanımlı harç kullanılması nedeni ile oluşacak hasarlar (Doğan ve Kırac,2008).
- Diyaframlardaki hasarlar,
- Kolon alt ucunda gelişen plastik mafsallar, şeklinde sıralanabilir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

1.2.1 Amaç

Sunulmuş olan tez çalışmasındaki amaç;

- Ülkemizdeki prefabrik yapılarda yaygın olarak kullanılan kompozit (ıslak-kaynaklı) moment aktarabilen iç kolon - kiriş birleşim bölgelerinin sabit

eksenel yük ve tersinir – tekrarlı yükler etkisi altında davranışlarının incelenmesi,

- Kompozit birleşim bölgelerinde Deprem Yönetmeliği'nde kaynak hesapları için öngörülen katsayının belirlenmesi,
- Kompozit birleşim bölgelerinde, kaynaklama nedeni ile oluşan ısı etkili bölgede bulunan donatının, öngörülen görelî kat ötelenme oranları öncesinde kopmasını önlemek için çözüm geliştirilmesi,
- Deneysel çalışmada gözlenen numune davranışları ışığında sayısal modeller oluşturularak yapının tüm davranışını temsil edecek parametrelerin belirlenmesi,

olarak özetlenebilir.

1.2.2 Kapsam

Sunulan çalışmada, ülkemizdeki çok katlı prefabrik yapılarda çoğunlukla tercih edilen kompozit (ıslak-kaynaklı) moment aktarabilen bağlantılara örnek oluşturacak iç kolon-kiriş birleşim bölgesi numuneleri deneysel olarak incelenmiştir. Deprem Yönetmeliği'ne uygun tasarlanan bir adet monolitik (kontrol) ve dört adet prefabrik birleşim bölgesi numunesi yer değiştirme kontrollü tersinir-tekarlı yükler altında test edilmiştir. İç kolon-kiriş birleşim bölgesi numuneleri, laboratuvar imkânları dâhilinde 1/2 ölçekli olarak düzenlenmiştir. Monolitik ve prefabrik numunelerin beton dökümü prefabrik üretim tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Prefabrik numunelerin montajı ise Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sırasında numunelerde gelişen hasar modlarına bağlı olarak numune davranışının iyileştirilmesi için kaynaklamada kullanılan elektrot tipi, aderans bozulma boyu ve etriye aralığı deney parametreleri olarak seçilmiştir.

1.3 Tezin Ana Hattı

Prefabrik moment aktarabilen kompozit kolon-kiriş birleşim bölgelerinin deprem etkileri altındaki davranışının incelenmesi ve olası hasar modlarının belirlenerek

iyileştirilmesi amacı ile gerçekleştirilen çalışma yedi bölüm ve eklerden oluşmaktadır.

İkinci bölümde, prefabrik yapılarda moment aktarabilen kolon-kiriş birleşim bölgeleri ile ilgili mevcut deneysel çalışmalar ve sonuçları özetlenmiştir. Kompozit (ıslak-kaynaklı) kolon-kiriş birleşim bölgelerinde donatının kaynaklanabilirliği ile ilgili çalışmalar sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak tasarlanmış 1/2 ölçekli, kompozit iç kolon-kiriş birleşim bölgesi numunelerinin malzeme ve geometrik özellikleri, deney parametreleri, deney yöntemi ve ölçüm sistemi açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, monolitik ve prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin yer değiştirme kontrollü tersinir-tekrarlı yükler etkisi altında artan ötelenme oranlarında hasar modları, tepe yükü – tepe ötelenme oranı ilişkileri sunulmuştur.

Beşinci bölümde, prefabrik birleşim bölgesi numuneleri ACI 374.01-05 ve FEMA 795'e göre değerlendirilmiş ve dayanım, rijitlik, süneklik ve enerji tüketimi açısından monolitik numune ile karşılaştırması yapılmıştır.

Altıncı bölümde, prefabrik numunelerin tersinir yükler etkisindeki histeretik davranışlarının benzeştirilebilmesi amacı ile yığılı plastisite ve lif esaslı modeller ile sayısal modelleri OpenSees yazılımı kullanılarak kurulmuştur.

Yedinci bölümde, tez çalışması kapsamında ulaşılan sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

Ek A'da birleşim bölgesi numunelerinin betonarme hesapları ile donatı-plaka ve plaka-plaka kaynak hesapları yer almaktadır. Ek B'de deney numunelerinin üretim aşamaları verilmektedir. Ek C'de ise prefabrik numunelerin sayısal modelleri için OpenSees veri analiz dosyaları yer almaktadır.

BÖLÜM İKİ

PREFABRİK YAPILARDA MOMENT AKTARABİLEN BİRLEŞİMLER

2.1 Giriş

Prefabrik yapı endüstrisinin gereksinimlerinin belirlenmesi ve problemlerin ortaya konması amacı ile 1986 yılında A.B.D.'de bir seri çalıştay gerçekleştirilmiştir (Englekirk, 1986). Amerikan Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü (NIST, 1987) ve Prefabrik Sismik Yapı Sistemleri (PRESSSS, 1990) araştırma programları ile deprem bölgelerinde inşa edilebilecek yapılarda prefabrik kolon - kiriş birleşim bölgelerinin geliştirilmesi yönünde önemli adımlar atılmıştır (Priestley, 1991). Prefabrik bileşenler arasındaki bağlantıların seçimi prefabrik yapı tasarımının ana bileşenlerinden biridir. Yapısal bileşenlerdeki olası elastik olmayan deformasyonların konumları göz önüne alınarak tasarım yapılmalı ve bağlantı tipleri, sistem içerisinde beklenen davranışa bağlı olarak tanımlanmalıdır. Prefabrik kolon ve kiriş elemanların yapıda kesiştiği düğüm noktaları *birleşim*; birleşimle komşuluğundaki elemanların ara yüzlerinden oluşan bölge *birleşim bölgesi* olarak tanımlanmaktadır. Çerçevelerde bağlantıların oluşturulduğu birleşim bölgeleri, kesitte olası plastik deformasyonun gerçekleşebileceği yerlerdir (ACI 550.2R, 2013).

Moment aktarabilen birleşim bölgeleri, düzlem-içi momentleri yapı elemanlarına transfer edebilmektedir. Yapının yanal rijitliğini arttırmak, kolon- kiriş elemanların kesit boyutlarını azaltmak ve olası göçmeye karşı dayanımı arttırmak için kullanılırlar (Elliot, 2002).

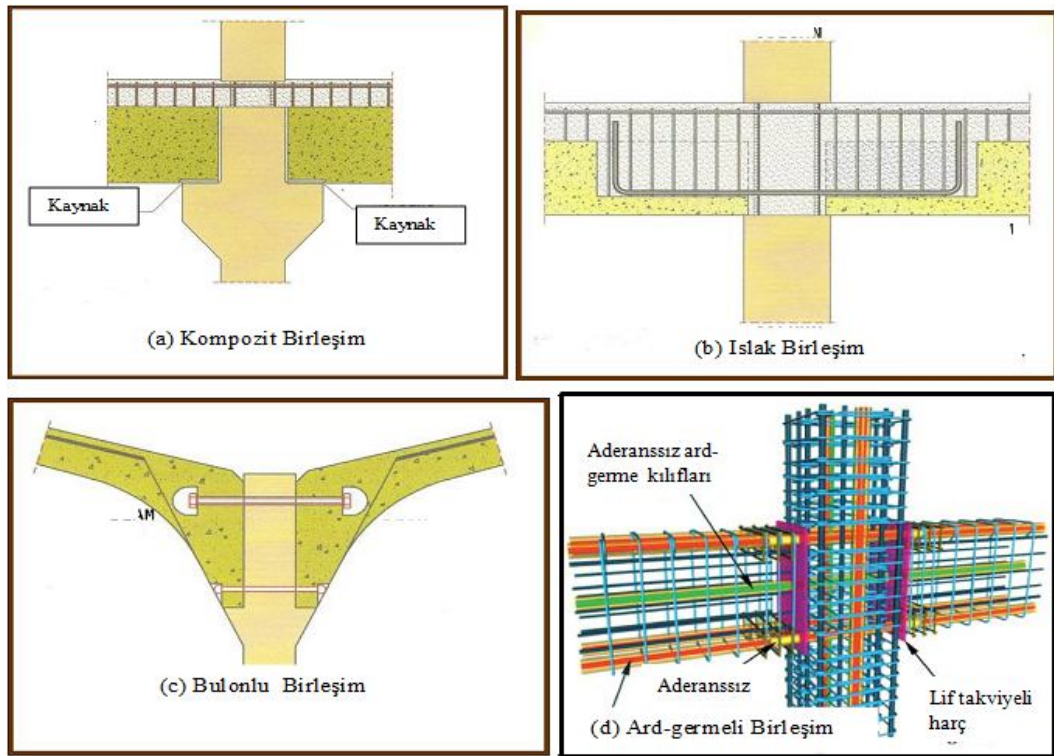
Moment aktarabilen birleşim bölgeleri *kuru* ve *benzeştirilmiş (ıslak)* birleşim bölgeleri olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır (ACI 550.2R, 2013):

- **Kuru Birleşim Bölgeleri:** Bileşenlerin kaynak, bulon, ard-germe ya da pimli olarak birleştirilmesi ile elde edilir. Birleşim bölgesi, genellikle bağlanan prefabrik kolon-kiriş elemanlara göre daha az rijittir.

- **Benzeştirilmiş Birleşim Bölgeleri:** Monolitik betonarme yapı davranışına benzer olacak şekilde prefabrik bileşenlerin her iki ucundan çıkan donatıların birbirine bağlanması, özel teçhizatla birleştirilmesi ya da bindirme ile oluşturulmaktadır.

Kompozit (ıslak-kaynaklı) birleşim bölgeleri ülkemizdeki endüstri tipi prefabrik yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit birleşim bölgesinde kiriş alt boyuna donatıları kiriş uç alt plakasına kaynaklı olup, bu plaka da kolondaki kısa konsola kaynaklanmaktadır. Birleşim bölgesinde kiriş üstünde ve kolonda birleşim üstünde boşluk bırakılmakta ve kiriş süreklilik donatılarının bu boşluktan yerleşimi yapılmaktadır. Döşeme elemanların yerleşimi ile tamamlayıcı beton dökümü yapılarak üretim tamamlanır.

Prefabrik yapılarda yaygın olarak uygulanan moment aktarabilen kolon - kiriş birleşim bölgeleri Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1 Prefabrik yapılarda moment aktarabilen kolon – kiriş birleşim bölgeleri (Ataköy,1998)

Moment aktarabilen birleşim bölgelerinin tasarım ilkeleri:

- Bağlantıların sistemle ilişkilendirilmesi,
- Sistemde yükün izlediği yolun sağlanması,
- Dışmerkezliliklerden kaçınılması,
- Bağlantı davranışının kontrolü için kapasite tasarımının kullanılması,
- Gerekli olan yapı elemanlarında sünekliğin sağlanması,
- Gerekli olan yapı elemanlarında enerji tüketiminin göz önüne alınması,
- İnşa edilebilirliğin sağlanması,

şeklinde sıralanabilir (ACI 550.2R, 2013).

2.2 Kuru Birleşim Bölgeleri

2.2.1 Ard-germeli Birleşim Bölgeleri

Ard-germeli birleşim bölgeleri ile ilgili çalışmalar 1970’li yıllarda başlamıştır. Yapılan bu araştırmalarda, basınç donatısı miktarının süneklik için; ard-germe halatlarının ise kayma dayanımı için etkili olduğu görülmüştür. Ard-germeli birleşimlerde aderanssız ard-germe halatları kılıf içerisinde elastik kalarak yapıda kalıcı deplasmanların oluşumunu önlerken, kiriş kesitinde enerji tüketimi ise kılıf içerisindeki harçla doldurulmuş boyuna donatıların akması ile sağlanmaktadır. Hem ard-germe halatlarının hem de boyuna donatıların etkisi olduğundan ard-germeli birleşimler *hibrit birleşimler* olarak da adlandırılır (ACI T1.02-03,2003).

NIST Araştırma Projesi kapsamında, 1/3 ölçekli hibrit iç kolon-kiriş birleşim bölgeleri test edilmiştir. Çalışmaların sonucunda; hibrit birleşimlerin performansının kapasite, rijitlik ve enerji tüketimi bakımından monolitik numunenin davranışını sağladığı ve kalıcı yer değiştirmelerin sınırlandırıldığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda, donatı ve ard-germenin birlikte kullanıldığı hibrit birleşimlerin belirli tasarım depremi altında sünek davranış sergilediği, sınırlı veya ihmal edilebilir düzeyde hasar ile karşılaşıldığı belirtilmiştir (Cheok ve diğer., 1993).

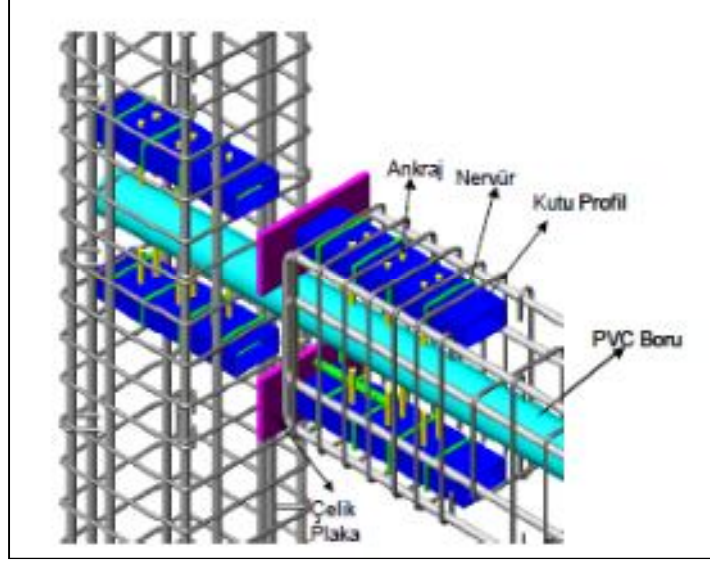
Büyük ölçekli prefabrik yapıların deprem davranışlarını belirlemeye yönelik A.B.D ve Japonya ortaklığındaki Prefabrik Sismik Yapı Sistemleri Araştırma Projesi (PRESSS) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, aderanssız tendonların sünek birleşimlerin sağlanması için geçerli bir çözüm olduğu belirlenmiştir (Priestley ve diğer., 1993).

Pınarbaşı (2000) çalışmasında, dört adet 1/2 ölçekli ard-germeli kolon - kiriş birleşimi deprem yüklerine benzer yükler altında test edilmiştir. Birinci eleman (MR1) monolitik referans elemanı, ikinci eleman orijinal prefabrike elemanıdır (POL). Bu eleman ülkemizde bir firma tarafından uygulanan birleşim türüne göre tasarlanmıştır. Bu birleşimin düşük kapasiteli ve donatısının yetersiz olduğu görülmüştür. Bu yüzden üçüncü prefabrike elemanda (PM1) birleşim donatısı miktarı kayda değer biçimde artırılmıştır. Buna rağmen bu elemanda kirişin öngörülemeyen bölgesinde plastik mafsallık oluşumu gözlenmiştir. İyileştirilen deney elemanında birleşim performansı açısından iyi sonuçlar elde edilmiştir. Deney elemanları yeterli dayanım, süneklik, kabul edilebilir düzeyde enerji tüketimi ve rijitlik göstermiştir. Enerji tüketim kapasitesinin kirişin alt ve üst kenarına yerleştirilen öngermesiz donatı miktarının artması ile arttığı görülmüştür.

Ertaş ve diğer. (2006) çalışmasında, ard-germeli kolon - kiriş birleşim bölgelerinde yumuşak donatının eğilme kapasitesine katkısı deney parametresi olarak seçilmiştir. Numunelerin monolitik numune ile süneklik, rijitlik kaybı, enerji tüketimi ve kalıcı deplasmanları kıyaslanmıştır. Yumuşak donatı miktarının enerji tüketimi için önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır (Şekil 2.2).

Atalay (2010) çalışmasında, tasarlanan ard-germeli birleşim detayında, kirişin alt ve üst yüzlerine yakın yumuşak donatı, orta seviyesinde ise çok yüksek dayanımlı ard-germe bulonları kullanılmıştır. Üç katlı bir yapının ara kat kolon- kiriş birleşim bölgesini temsil edecek biçimde tasarlanan kolon – kiriş birleşim bölgesi numuneleri tersinir – tekrarlı yükler altında deplasman kontrollü olarak test edilmiştir. Birleşim bölgesi numuneleri monolitik ve kiriş alt ve üst donatı oranları değişecek şekilde hibrit birleşimden oluşmaktadır. Prefabrik birleşimlerde başlangıçta monolitik

numuneye benzer rijitlik elde edildiği, kolon – kiriş ara yüzünün açılması ile rijitlik kaybının başladığı belirlenmiştir. Kiriş alt ve üst yüzündeki donatı oranı arttıkça birleşim numunelerinin enerji tüketim davranışının monolitik numuneye yaklaştığı gözlenmiştir.



Şekil 2.2 Ard- germeli kolon – kiriş birleşim bölgesi detayı (Ertaş ve diğer. , 2006).

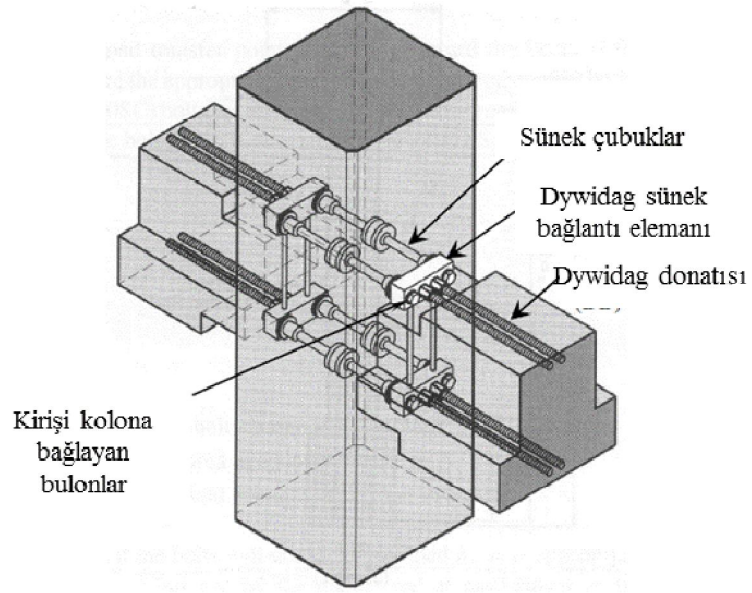
Kaya (2007) çalışmasında, 1/3 ölçekli kirişlerinin üzerinde tamamlayıcı betonu ve kolonlarında kat seviyelerinde kısa konsollar bulunan iki adet monolitik, iki adet ard-germeli kolon- kiriş birleşim bölgesi numunesine deney esnasında kiriş uçlarından başlangıçta yük kontrollü belirli bir aşamadan sonra ise deplasman kontrollü olarak tersinir tekrarlı yükler uygulamıştır. Yapılan deneyler sonucunda, prefabrik elemanlarda ard-germeli birleşimlerin, monolitik birleşimlerle karşılaştırıldığında, düğüm noktasında yeterli moment taşıma kapasitesine ve sünekliğe ulaştığı tespit edilmiştir. Ard-germeli birleşimde tamamlayıcı betonun etkisi çok açık olarak gözlenmiştir. Özellikle tekrarlı yükleme sırasında, tamamlayıcı beton kısmının basınç gerilmeleri etkisinde kaldığı çevrimlerde diğer yüze göre daha yüksek taşıma kapasitesine ulaştığı gözlenmiştir.

2.2.2 Bulonlu Birleşim Bölgeleri

Bulonlu birleşimler prefabrik yapılarda hızlı montaj sağlamaları bakımından avantaja sahip olup tasarımlarında kesme ve sıyrılma etkileri göz önüne alınmalıdır (Ertaş ve diğer., 2006). French ve diğer. (1989) çalışmasında, moment aktarabilen bulonlu kolon-kiriş birleşimlerinin davranışını ve uygunluğunu inceleyebilmek amacıyla yedi farklı birleşim detayı test edilmiştir. Donatının akması ile birleşimde ilk çatlak oluşumu gözlenmiş ve elastik ötesi davranış oluşmaya başlamıştır. Bulonlu birleşimin üretimi kolay bir birleşim tipi olmasından dolayı bu birleşim detayı geliştirilerek yeni bir numune oluşturulmuştur. Geliştirilen birleşim numunesi tasarlanırken kesme kuvvetinin yaratacağı bozulma ile bulonların yerinden sıyrılmasını engellemek amacıyla numunede nervürlü donatılar kolon içerisinde bükülmüş ve kirişten geçirilen dişli çubuklar kolondaki mekanik ankrajlara takılarak plastik mafsallı kolon-kiriş ara yüzünde oluşması istenmiştir. Donatının ankraj içerisinde kayması nedeniyle, birleşim yük artışı olmaksızın büyük yer değiştirmeler göstermiştir ve bu durum numunelerinin düşük enerji yutma kapasitesi göstermesine neden olmuştur.

Prefabrik moment aktarabilen birleşimlerde sünek bağlantı elemanlarının etkinliği Englekirk tarafından araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, prefabrik elemanlar arasında tersinir-tekrarlı yükler etkisi altında plastik deformasyon ve kararlı histeretik yük-deformasyon ilişkisi gösterebilen sünek birleşimlerin sağlanmasıdır (Englekirk, 1995). Şekil 2.3’de verilen birleşimde, hem sünek çubuklar hem de kirişler bağlantı elemanına bulonlarla bağlıdır.

Chang ve diğer. (2007) çalışmasında, birleşimde sünek çubuklar bulunan 4 adet tam ölçekli kolon – kiriş birleşim bölgesi test etmiştir. Çalışmadaki test parametreleri yüksek dayanımlı beton, gömülü sünek çubuklar, ard-germe ve yüksek dayanımlı donatıdır. Numunelerde, kiriş uçlarından yer değiştirme kontrollü yükleme yapılarak ortalama göreceli kat ötelenme oranı belirlenmiştir. % 5.5 göreceli kat ötelenme oranlarına kadar dayanım azalması gözlenmediği rapor edilmiştir.



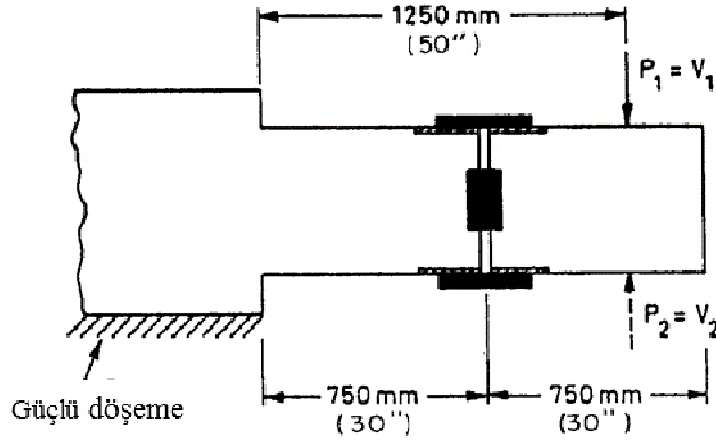
Şekil 2.3 Bulonlu sünek birleşim detayı (Englekirk, 2003).

Ertaş ve diğer. (2006) sahadaki montaj süresini minimuma indirmek amacı ile bulonlu birleşim detayı geliştirmiştir. Birleşimde bulonların yerleştirilebilmesi için kiriş alt ve üstünde kanallar bırakılmış ve yerleştirilme bulonlar 120 Nm'ye kadar tork anahtarları ile sıkılmıştır. Kiriş yüzeyine betonun ezilmesini önlemek için çelik plaka yerleştirilmiş ve birbirine bağlanarak betona ankre edilmiştir. Birleştirme esnasında kolon – kiriş arasında bırakılan 15 mm boşluk rötresiz kendinden yerleşen çimento ile doldurulmuştur. Numune davranışının kapasite, süneklik ve enerji tüketim kriterlerine göre değerlendirildiği çalışmada geliştirilen bulonlu birleşimin monolitik birleşime göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

2.2.3 Kaynaklı Birleşim Bölgeleri

Kaynaklı birleşimler, sahada uygulanabilirlik ve maliyet açısından tercih edilmektedir (Ertaş ve Özden, 2006). Ersoy ve Tankut (1993) çalışmasında, beş adet tam ölçekli kaynaklı, prefabrik kiriş-kiriş bağlantısını test etmiştir. Birleşim bölgesinden 75 cm uzakta teşkil edilen bağlantıda, alt ve üst plakalar kesme etkilerini aktarmak amacı ile kirişteki plakalara kaynaklanmaktadır (Şekil 2.4). Çalışmanın amacı, bağlantıda kirişin iki yanında merkeze yerleştirilen kenar plakaların ve birleşim genişliğinin etkisinin araştırılmasıdır. Deney süresince tersinir- tekrarlı

yükler güçlü döşemeye bağlı kiriş ucundan aktarılmıştır. Kaynaklı birleşimlerde kenar plakaların kullanımının gerekli olduğu ve yalnız alt ve üst plakaları bulunan bağlantılara göre kenar plakaların etkin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.4 Kaynaklı bağlantı detayı (Ersoy ve Tankut, 1993).

Korkmaz ve Tankut (2005), konsol kiriş-kiriş bağlantı testlerini gerçekleştirmiştir. Buna göre kiriş ortasına yakın üst plaka-plaka kaynağı yapıлып, kiriş üzerinde bırakılan boşlukla sahada tamamlayıcı beton dökümü ile bağlantı detayı tamamlanmaktadır. Çalışmada, ülkemizde deprem riski yüksek bölgelerde kullanılmak üzere birleşim detayı geliştirilmesi amaçlanmıştır. 6 adet 2/5 ölçekli birleşim numunesine kiriş ucundan tersinir-tekrarlı yükler uygulanmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlara göre üst donatının kaynaklanması v.b iyileştirme önerileri getirilmiştir.

2.3 Benzeştirilmiş (Islak) Moment Aktarabilen Birleşim Bölgeleri

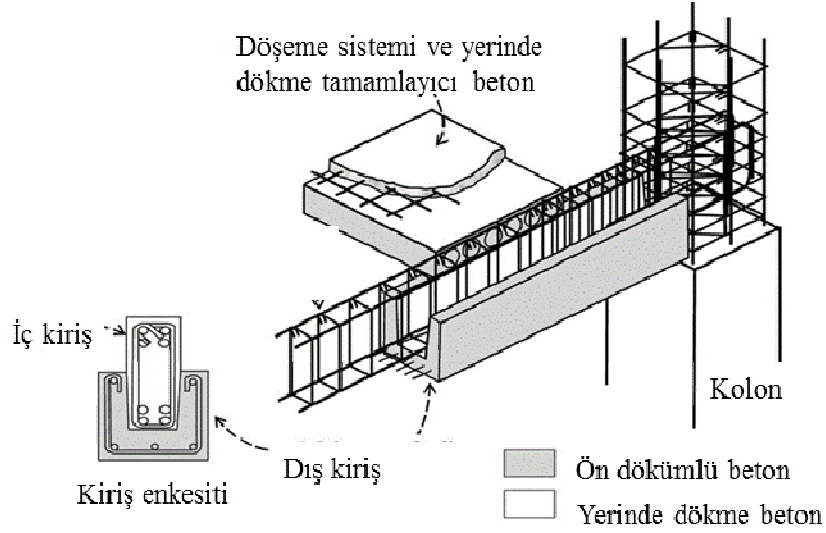
Benzeştirilmiş (ıslak) birleşim bölgeleri için tasarım detayları, birleşim bölgelerinin prefabrik yapının yapısal performansının yerinde dökme betonarme yapı davranışına eşdeğer olacak şekilde oluşturulur (Ericson ve Warnes, 1990). Yeni Zelanda ve Japonya gibi yüksek sismik riskin bulunduğu ülkelerin yönetmeliklerinde benzeştirilmiş birleşim bölgelerinin kullanılması gerektiği belirtilmiştir (ACI 550.1R, 2001).

Benzeştirilmiş birleşim bölgeleri, U en kesitli kirişlerin birleşimde boşluk bırakılan kolonlara kolon pas payı içerisinde mesnetlenerek sahada yerinde beton dökümü ile tamamlanması ile oluşturulabilir (Im ve diğer., 2013). Yaygın olarak kullanılan bu yöntemle ilgili Park ve Bull (1986), öngermeli kirişlerin yerinde dökme beton dökümünde kalıp olarak kullanıldığı, benzeştirilmiş üç adet tam ölçekli dış birleşim bölgesi test etmiştir. Numunelerin ilki yönetmeliklere uygun, ikincisi sadece düşey yüklere göre tasarlanmıştır. Üçüncü numune yönetmeliğe uygun olup, U kirişte plastik mafsallık bölgesi içinde bir bölgede yerinde dökme betonla, prefabrik betonda aderanssız bir bölge bırakılmıştır. Testler sonucunda gözlenen hasar modları ve yapısal performans dikkate alınarak numuneler değerlendirilmiş ve hesap yöntemleri ile ilgili önerilerde bulunulmuştur (Şekil 2.5).

Im ve diğer. (2013) çalışmasında, U en kesitli 5 adet prefabrik iç kolon - kiriş birleşim bölgesi numunesinin tersinir-tekrarlı yükler altında testlerini gerçekleştirilmiştir. Kirişin mesnetlendiği bölgenin uzunluğu, kiriş dayanımı, kabuk betonunda korniyer kullanılması ve başlıklı donatı kullanımı gibi test parametreleri ile numunelerin kontrol numunesine göre performanslarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Deneyler sonucunda, dört adet prefabrik birleşim numunesinin birleşimi içerisinde kiriş boyuna donatısında sıyrılma ve kesme çatlaklarının geliştiği gözlenmiştir. Birleşim bölgesi içinde kirişte devam eden başlıklı donatıların kullanılması ile aderans kayması azaltılmıştır. Kolon – kiriş birleşiminin etkili yüksekliğinin artırılması için kirişin mesnetlendiği bölgenin uzunluğu ve U kiriş kalınlığının azaltılması gerektiği belirtilmiştir.

Moment aktarabilen kolon - kiriş birleşimlerinin deprem performansının ortaya konması amacı ile Türk Prefabrik Birliği'ne üye dört firma tarafından uygulanan dış birleşimler deprem etkilerini benzeştiren tersinir – tekrarlı yüklere maruz olarak test edilmiştir. Benzeştirilmiş birleşim bölgesi numunesinde, birleşimde yer alan diyagonal kesme donatıları, kirişin L şeklindeki üst donatı filizine kaynaklanmaktadır. Alt yüzde kuvvet aktarımı, kiriş alt yüzüne yerleştirilen plaka ile kolon başlık plakasının kaynaklanması ile sağlanmaktadır. Birleşimde hedeflenen davranış, birleşimde mafsallaşma oluşmadan kirişteki plastik mafsallaşmanın

oluşması olmasına rağmen erken dayanım azalması ile karşılaşmıştır. U şeklinde kiriş üst donatısı kaynaklanıp birleşime etriye eklenerek üretilen yeni birleşim numunesinde enerji tüketimi açısından iyileştirme sağlanmıştır (Ersoy ve diğer., 1995).



Şekil 2.5 Benzeştirilmiş birleşim detayı (Park ve Bull, 1986)

SAFECAST Araştırma Projesi kapsamında İ.T.Ü.'de tam ölçekli altı adet prefabrik, moment aktarabilen, ıslak dış kolon - kiriş birleşim bölgesi numunesinin tek yönlü ve iki yönlü yükler altında testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki konut tipi birleşim bölgelerinde, birleşimde boşluk bırakılmaktadır ve kiriş kolon kenarına mesnetlenip, üst kolon alt kolondan çıkan kılavuz elemanının yardımı ile sabitlenerek yerinde beton dökümü ile birleşim tamamlanmaktadır. İlk etapta iki yönlü yükler altında test edilen 2 adet numune ileri ötelenme seviyelerinde çevrim sıkışması ve buna bağlı rijitlik kaybında artış gözlenmiştir. Bu sonuçlara dayalı olarak, kiriş boyuna donatılarında kenetlenme boyu artışı ve donatı çapı azaltılması ile üretilen 2 adet numune kayma oyulmaları azaltılarak rijitlik azalması için iyileştirme sağlanmıştır (Karadoğan ve diğer., 2012).

2.4 Kompozit (Islak-Kaynaklı) Moment Aktarabilen Birleşim Bölgeleri

Islak ve kaynaklı kompozit birleşimlerde, pozitif moment genellikle kaynaklı veya bulonlu birleşimle taşınırken, negatif moment yerinde dökme betonla üretilen ıslak

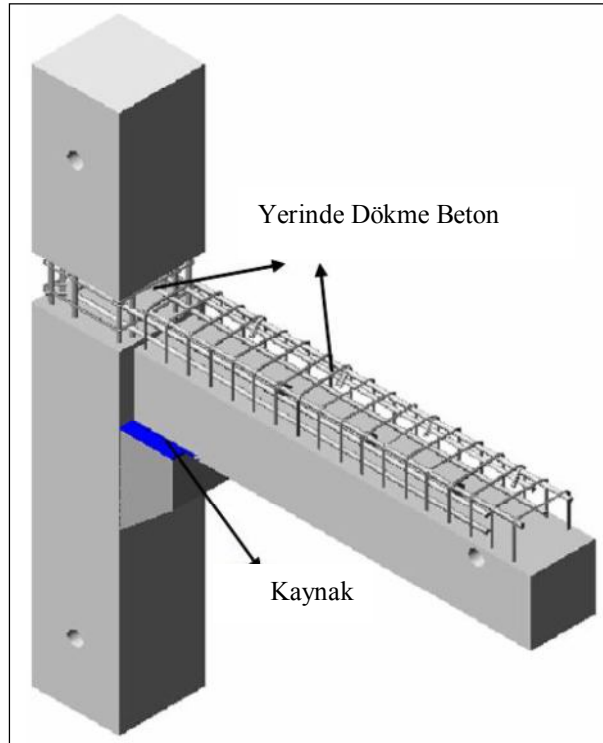
birleşimle taşınmaktadır. Ülkemizde prefabrik yapılarda, prefabrik kirişin kolonda kısa konsoldaki plakaya kaynaklanması, üstte ise ıslak birleşim şeklindeki kompozit tipte moment aktaran kolon-kiriş birleşim detayı günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kenar kolon – kiriş birleşiminde kiriş üstünde ıslak birleşimde kiriş süreklilik donatılarının kolondaki süreklilik donatısına eklenmesi ise kolondan bırakılan filizle kiriş üst donatısının kaynaklanması; ya da kolon yüzünde bırakılan manşona kirişte bu donatının eklenmesi ile mümkün olabilmektedir.

Kompozit kolon – kiriş birleşimlerinin teşkilinde dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Özmen ve Zorbozan, 2010):

- Kullanılan donatıların karbon eşdeğerleri yönetmeliklere uygun olmalıdır,
- Kiriş mesnet alt bölgesi ve kolon konsolunda donatının plakaya kaynaklanması sırasında plakanın buruşmasını önlemek için kaynak şaşırtmalı olarak çekilmelidir.
- Kiriş altındaki plaka ile kısa konsol üstündeki plakanın üst üste gelmesi gerektiğinden imalat aşamasında plakalar kalıba sabitlenmelidir.
- Basınç bloğunun oluşması için tamamlayıcı betonu dökülmeden önce kolon – kiriş arası grout ile doldurulmalıdır. Kiriş altında en az 1 cm'lik yuva bırakılmalıdır,
- Üst kat kolon – kiriş birleşimlerinde, kolon donatısının tamamı birleşim bölgesinde ankraj boyunu sağlayacak şekilde devam ettirilmeli ve bu bölge etriye ile sarılmalıdır,
- Birleşim bölgesinde, kiriş üst mesnet donatısının kolon içindeki uzunluğu ankraj boyunu sağlamalıdır. Kiriş üstündeki boyu ise en elverişsiz moment diyagramı alanını sağlayacak şekilde uzatılmalıdır.
- Kenar kolonlarda kiriş mesnet üst donatısı L ve U şeklinde olup kolon boyuna donatısının çevresinden geçirildiğinden yeterli paspayını sağlamak amacı ile kolonlarda paspayı 2.5 cm değil 4 cm yapılmalıdır.
- Kolon – kiriş birleşiminde kiriş üst donatısının tümü kiriş etriyelerinin içinden geçirilmelidir,

- Kiriş üst mesnet donatılarının yerleştirilmesinde donatılar kiriş üstündeki etriyenin üst kat hizasına kadar kaldırılıp, telle bağlanmalı dolayısıyla hesaplarda göz önüne alınan faydalı yükseklik azaltılmamalıdır.

Ertaş ve diğer. (2006) tarafından yapılan deneysel çalışma kapsamında, Türkiye prefabrike endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, kiriş alt boyuna donatıların çelik plaka ile birbirine kaynatılarak, üst donatıların U şeklinde donatının kolonda bırakılan boşluğa yerleştirilerek ankrajının tamamlandığı ve bu bölgenin beton ile doldurulması ile oluşturulan kompozit birleşim detayı test edilmiştir (Şekil 2.6). Kapasite ve enerji tüketme karakteristiği bakımından deprem bölgesinde kullanılabilirlik performansı sağlayan bu birleşimde kaynaklı tarafın performansı monolitik sistemle kıyaslandığında daha düşük seviyededir. Bu duruma kaynak nedeni ile boyuna donatıların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan olası bozulmaların neden olabileceği düşünülmektedir. Montaj aşamasında ıslak birleşimler az miktarda da olsa kalıp işçiliği içermektedir ve bu durum yapım hızını etkilemektedir. Kompozit birleşimde kullanılan kaynak ise, ilave olarak kalite kontrol maliyeti getirmektedir.



Şekil 2.6 Kompozit dış kolon-kiriş birleşim bölgesi numunesi (Ertaş ve diğer., 2006).

SAFECAST Araştırma Projesi kapsamında İ.T.Ü.'de moment aktarabilen birleşim bölgeleri tek yönlü ve iki yönlü yükler altında testleri gerçekleştirilmiştir. Prefabrik betonarme endüstriyel bir yapıyı temsil eden ½ ölçekli 8 adet kompozit birleşim bölgesi numunesi, kolon, ana taşıyıcı kiriş, tali kirişler, kısa konsollar, döşeme tablası, tamamlayıcı betonu ve kaynaklı birleşimdeki plakalardan oluşmaktadır. Deney numuneleri ana kiriş ucuna bağlı hidrolik veren ile yer değiştirme çevrimleri etkisinde incelenmiştir. Kolona deney süresince eksenel yük taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak % 10'una karşılık gelen sabit bir eksenel kuvvet uygulanmıştır.. İlk etapta iki yönlü yükler altında test edilen 2 adet numunede kiriş plakasına küt kaynaklı etriyelerin ve plakaya köşe kaynaklı kiriş alt boyuna donatısının %2 ötelenme oranında koptuğu gözlenmiştir. Numunelerde hasarın birleşime doğru ilerlediği rapor edilmiştir. Gözlenen hasar modlarına göre revize edilen 2 adet numunede, etriye çapı arttırılmış ve etriyeler yatay plakaya kaynaklı düşey bir plakaya köşe kaynakla bağlanmıştır. Kiriş plakasına kaynaklı boyuna donatıların karbon içerikleri göz önüne alınarak kaynak işçiliğine dikkat edilmiştir. İyileştirilen numunelerde enerji tüketimi ve süneklikte artış sağlanmıştır ve kiriş boyuna donatısının %2.5 ve %3 ötelenme oranlarında koptuğu belirlenmiştir. Çalışmada ileri ötelenme oranlarında, kirişin birleşim bölgesinde oluşan enine ve boyuna donatı hasarlarının azaltılması için yüksek süneklikli çelik kullanılması ve etriye aralığının daha da sıklaştırılması gerektiği belirlenmiştir (Karadoğan ve diğer., 2012).

Zermeno ve diğer. (1992) çalışmasında, Şekil 2.7'de verilen, üç adet prefabrik dış kolon-kiriş birleşiminin tersinir yükler etkisi altındaki davranışını araştırmıştır. Bu birleşim bölgesi Meksika'da prefabrik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Numunelerde kiriş üstünde tamamlayıcı beton dökülmekte, kiriş altında yan taraftaki plakaya kaynaklı donatılarla kirişte sürekliliğin sağlandığı düşünülmüştür. Deney numuneleri kiriş ucuna bağlı hidrolik veren ile yer değiştirme çevrimleri etkisinde incelenmiştir. Birleşim bölgesi numunelerindeki benzer hasar modunun, % 1,8 ötelenme oranında plakaya kaynaklı donatıların kopması olduğu rapor edilmiştir (Rodriguez ve Matos, 2013).

denklemleri ile donatının kimyasal içeriklerine bağlı olarak belirlenmektedir (TS 708, 2010). TS 708 (2010)'da S420 donatı çeliği için karbon oranı üst sınırı (C) % 0.45 olarak verilmiş, ancak *karbon eşdeğeri* (C_{eq}) sınırı verilmemiştir. B420 donatı çeliği için ise karbon oranı üst sınırı % 0.22, karbon eşdeğeri % 0.50 olarak verilmektedir (Ataköy, 2012). Kaynaklamadaki kalite problemleri ile genellikle karbon içeriği % 0.45'ten fazla donatılarda karşılaşılmaktadır (Rodriguez, 2006). Kompozit kolon-kiriş bağlantılarının teşkilinde dikkat edilmesinde de gereken hususlardan biri kullanılan donatıların karbon eşdeğerlerinin yönetmeliklere uygun olmasıdır (Özmen ve Zorbozan, 2010).

Rodriguez ve Rodriguez (2006) çalışmasında, Meksika'da kullanılan donatıların mekanik özelliklerine kaynaklamanın etkilerini araştırmıştır. Küt kaynak ve ark kaynakla doğrudan kaynaklanan farklı çaplardaki donatılar, kopmaya kadar çekme testine tabi tutulmuştur. Kaynaklamanın donatıların mekanik özelliklerine etkileri küt kaynaklı donatılarda gerçekleştirilen çekme testleri ile araştırılmıştır. Elektrot tipi, doğrudan küt kaynağın tipi ve donatıdaki ön ısıtmanın etkileri deney parametreleri olarak seçilmiştir. 25.4 mm, 31.8 mm ve 38.1 mm çapındaki küt kaynaklı donatıların kopma anındaki birim deformasyonları belirlenmiştir. Kaynaklı donatıların mekanik özelliklerini tanımlayan maksimum birim deformasyon, gerilme ve akma gerilmesi değerleri belirlenmiştir. Kaynaklı donatılarda ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) yakınında gevrek kırılma, uzağında ise sünek kırılma gerçekleşmiştir. Çalışmanın sonucunda elektrot tipinin donatının kaynaklanmasında etkili olduğu belirlenmiştir. Ön ısıtma ve donatının düşey konumda kaynaklanması ile iyileştirme sağlamıştır. Buna göre kaynaklanan donatılarda kopma birim deformasyonunda belirgin bir azalma olduğu belirlenmiştir (Rodriguez, 2006).

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Giriş

Ülkemizdeki endüstriyel yapı envanterinin önemli bir bölümünü oluşturan prefabrik yapılarda, monolitik sistemlerin deprem performansını sağlayabilecek nitelikte birleşim bölgelerinin geliştirilmesi konusu güncelliğini korumaktadır. Bu birleşimler tek katlı endüstriyel yapıların yanı sıra ülkemizde çok katlı prefabrik yapılarda da uygulanmaya başlamıştır. Çalışmanın amacı, ülkemizdeki endüstri tipi prefabrik yapılarda yaygın olarak kullanılan kompozit (ıslak-kaynaklı) moment aktarabilen iç kolon-kiriş birleşim bölgelerinin depremi benzeştiren yükler altındaki performansının deneysel olarak araştırılması ve olası hasar modlarının belirlenerek iyileştirme önerilerinin sunulmasıdır.

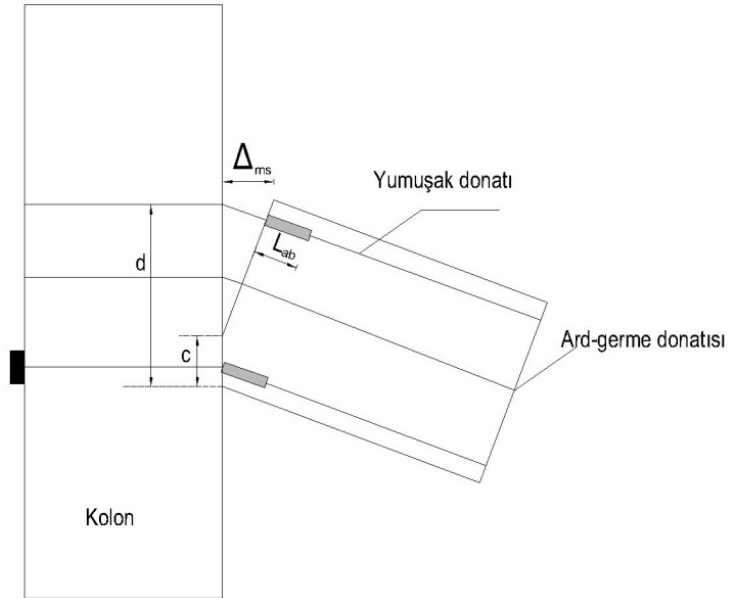
Deprem Yönetmeliği'nde, prefabrik yapılardaki kaynaklı bağlantılarda deprem yükünün 2.0 katsayısı ile artırılarak bağlantı hesaplarının yapılması gerekliliği belirtilmiştir. Deneysel çalışmada, yönetmelikte belirtilen *kaynak katsayısının* parametre olarak dikkate alınması öngörülmüştür. Kaynaklamayı etkileyen diğer parametreler ise *donatının karbon oranı* ve *elektrot tipi* olarak göz önüne alınmıştır. Elektrotların seçimi, kaynaklama işlemi sırasında donatı-plaka bağlantılarında dayanıma doğrudan etki ettiğinden oldukça önemlidir. Bununla beraber, literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, kompozit birleşim bölgelerinde donatı-plaka kaynağının yakınındaki bölgede, donatıda gelişecek maksimum birim deformasyonların numune davranışını belirlediği belirlenmiştir. Hedeflenen göreceli kat ötelenme oranlarından önce donatının kopmasını önlemek için kaynak bitiminden itibaren donatı ile beton arasındaki aderansın bir bölgede bozularak maksimum birim deformasyonların azaltılması amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalar, D.E.Ü. Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışma, D.E.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri (K.B.-FEN 019 no'lu proje ile) ve Türkiye Prefabrik Birliği tarafından desteklenmiştir. Monolitik ve

prefabrik numuneler Dere Prefabrik üretim tesislerinde hazırlanmıştır. Prefabrik numunelerin montajı D.E.Ü. Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.2 Aderans Bozulması Yaklaşımı

Ard-germeli birleşimlerde, boru içerisine alınan ve etrafında harç bulunan yumuşak donatıların sıyrılma davranışı betonarme kesitlerden farklı gelişmektedir. Ard-germeli birleşimlerde, hedeflenen göreceli kat ötelenme oranından önce kiriş boyuna donatısında kopma gerçekleşebilmektedir. Erken kopmayı önlemek için donatı bir kılıf içerisine yerleştirilerek *aderans bozulması* uygulanır. Bu uygulamanın, birim deformasyonların bir bölgede yığılmadığı ve donatıdaki en büyük birim şekil değiştirmeye daha büyük kesit dönmeleri ile ulaşılabildiği gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla gösterilmiştir (Cheok ve Stone, 1994). Ertaş (2005) ve Atalay (2010), ard-germeli kolon-kiriş birleşimlerinin tersinir-tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemiştir. Bu çalışmalarda, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi düşük göreceli kat ötelenme seviyelerinde donatıların kopmasını engellemek için birleşim bölgesinde, kiriş alt ve üst boyuna donatılarında *aderans bozulma boyu* (L_{ab}) bırakılmıştır.



Şekil 3.1 Ard-germeli birleşimlerde yumuşak donatıda aderans bozulma boyunun bırakılması (Atalay, 2010).

Aderans bozulma boyunun tespiti, birleşim bölgesi davranışı açısından oldukça önemlidir (Cheok ve Stone, 1996). Cheok ve diğer. (1994), aderans bozulma boyunun gerekenden kısa olması halinde, birleşim bölgesinin sağlaması gereken görelî kat ötelenme oranlarına ulaşılmalıdır donatıların kopabileceğini, belirlenen boyun gerekenden uzun olması durumunda ise donatıların akmayacağını, enerji tüketme kapasitesinde belirgin bir azalmanın oluşacağını belirtmiştir. ACI 550.2R-13’de *aderans bozulma boyunun* (L_{ab}) 100-200 mm veya kiriş boyuna donatı çapına (d_b) bağlı olarak, $4d_b - 8d_b$ aralığında değerler alabileceği belirtilmektedir. Pampanin ve diğer. (2001) tarafından yapılan çalışmada aderans bozulma boyunu monolitik kiriş analojisini temel alan moment-dönme analizi ile donatı akma dayanımına bağlı olarak hesaplanmıştır.

ACI 374.1.05’e göre, birleşim bölgesi numunelerinin sağlaması gereken görelî kat ötelenme oranı alt limiti % 3.5’tur. Buna göre aderans bozulma boyu, deneylerde birleşim bölgesinin % 4 görelî kat ötelenme oranında, donatıda kopma birim şekil değiştirmesine ulaşıldığı varsayımı ile hesaplanmıştır. Aderans bozulma boyunun hesap adımları aşağıda verilmektedir.

3.2.1 Hedeflenen Ötelenme Oranındaki Eğriliğin Belirlenmesi

Kolon-kiriş birleşim ara-yüzünde kirişte gelişen etkili dönme (θ_b),

$$\theta_b = \frac{\theta}{\left[1 - \frac{h_c}{L}\right]} \quad (3.1)$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu denklemden, h_c , kolon en kesit yüksekliği, L , kiriş açıklığı ve θ , görelî kat ötelenme oranıdır. *Monolitik kiriş analojisine* göre, monolitik kirişle prefabrik kiriş uçlarındaki yer değiştirmelerin elastik ötesi kısımları eşitlenebilir (Pampanin ve diğer., 2001). Buna göre prefabrik kirişte etkili kesit dönmesi (θ_b);

$$\theta_b = \frac{1}{L_{bn}} \left[\frac{\phi_y (L_{bn} - L_p)^2}{3} + \phi_u L_p (L_{bn} - 0.5L_p) \right] \quad (3.2)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Burada; L_{bn} , momentin sıfır olduğu büküm noktalarından çıkarılan kirişin net açıklığı, L_p , kiriş uçlarındaki plastik mafsal boyu ($L_p=0.5h_k$), ϕ_y , akma eğriliği ve ϕ_u maksimum eğriliktir. (3.1) ve (3.2) denklemleri eşitlenerek kesitteki maksimum eğrilik (ϕ_u) elde edilir.

3.2.2 Boyuna Donatının Maksimum Birim Deformasyonu ve Toplam Uzamasının Belirlenmesi

Priestley (2000), performansa dayalı sismik tasarımda, burkulma ve düşük çevrimli yorulma etkilerinin azaltılabilmesi için boyuna donatıda gelişecek maksimum birim deformasyonun (ε_{sm}) kopma birim deformasyonuna (ε_{su}) bağlı olarak,

$$\varepsilon_{sm} = 0.6 \varepsilon_{su} \quad (3.3)$$

ile sınırlandırılmasını önermiştir. Boyuna donatının kopma anında ulaşacağı maksimum birim deformasyon (ε_{sm}),

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cc} = \frac{14 - \frac{4s_h}{3d_b}}{100} \leq 0.5 \varepsilon_{su} \quad \text{ve} \quad \varepsilon_{cc} \leq -0.004 \quad (3.4)$$

denklemleri ile de belirlenebilir (Restrepo, 2012). Burada s_h , etriye aralığı, d_b , kiriş boyuna donatı çapı ve ε_{cc} beton birim kısalmasıdır. Denklem (3.4)'de donatıda gelişebilecek maksimum birim deformasyon (ε_{sm}) hesaplanır ve hedeflenen ötelenme oranında maksimum birim deformasyona bağlı olarak tarafsız eksen (c),

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{sm}}{(d - c)} \quad (3.5)$$

denkleminde çekilerek elde edilebilir. Burada d kirişin faydalı yüksekliği, ϕ_u kirişte gelişecek maksimum eğriliktir.

Pampanin ve diğer. (2001), ard-germeli birleşimlerde yumuşak donatının toplam uzama miktarını (Δ_{ms}), kolon-kiriş ara-yüzünde gelişen ara-yüz çatlaklarına bağlı

olarak ifade etmiştir. Buna göre kirişin faydalı yüksekliği (d), kirişin etkili kesit dönmesi (θ_b), tarafsız eksen derinliği (c) olmak üzere Şekil 3.1’de verilen kirişin boyuna donatısındaki toplam uzama miktarı (Δ_{ms});

$$\Delta_{ms} = \theta_b (d - c) \quad (3.6)$$

ile hesaplanabilir. Buna göre donatıdaki toplam uzama miktarı (Δ_{ms});

$$\Delta_{ms} = \theta_b \frac{\varepsilon_{sm}}{\phi_u} \quad (3.7)$$

ile ifade edilebilir.

3.2.3. Aderans Bozulma Boyunun Belirlenmesi

Betonarme yapılarda birleşim bölgelerinde, kiriş ve kolon eleman uçlarında kesit dönmelerine neden olan etkilerden biri de ankraj deformasyonlarıdır. Ankraj deformasyonları, donatıdaki birim deformasyon penetrasyonundan kaynaklanmakta olup sayısal analizlerde ihmal edilmesi elemanların uç kesit dönmesi değerlerinin düşük tahmin edilmesine neden olabilmektedir (Zhao ve Sritharan, 2007). Ankraj deformasyonları, birleşim bölgesi içinde eğriliğin sabit olduğu uzunluk için tanımlanmaktadır. Ankraj deformasyon boyu (L_{sp}),

$$L_{sp} = 0.022 f_{yk} d_b \quad (3.8)$$

ifadesi ile hesaplanabilir (Priestley ve diğer., 2007). Burada f_{yk} (MPa): donatının akma dayanımı ve d_b (mm): boyuna donatı çapıdır. Temel-kolon birleşimleri için verilen (3.8) denkleminin, kolon-kiriş birleşimlerinde de geçerli olduğu varsayılmıştır. Boyuna donatı için hesaplanan toplam uzama miktarı, aderans bozulma boyu (L_{ab}) ile ankraj deformasyon boyu (L_{sp}) toplamından oluşan bölge içerisinde gerçekleşmektedir. Buna göre donatıdaki birim deformasyon,

$$\varepsilon_{sm} = \left(\frac{\Delta_{ms}}{L_{sp} + L_{ab}} \right) \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. (3.7) denklemi, (3.9) denkleminde yazıldığında, *aderans bozulma boyu* (L_{ab}),

$$L_{ab} = \left(\frac{\theta_b}{\phi_u} - L_{sp} \right) \quad (3.10)$$

ile ifade edilebilir.

3.3 Deney Numuneleri

Çalışma kapsamında, Deprem Yönetmeliği'ne uygun projelendirilmiş çok katlı bir prefabrik alışveriş merkezi yapısının zemin katındaki iç kolon – kiriş birleşimi göz önüne alınmıştır. Prefabrik yapının yüksekliği 4,6 m, açıklıkları ise 7,5 m'dir. Deney numuneleri güçlü kolon-zayıf kiriş tasarım felsefesine göre tasarlanmıştır. Deney numunelerinin betonarme hesapları Ek-A'da yer almaktadır.

Deney numunesi olarak seçilen iç kolon-kiriş birleşim bölgesi, çerçeve sistemin deprem yükleri altında kolon ve kirişin orta bölgelerinde oluşan moment sıfır noktaları arasında kalan iç birleşim bölgesinin çıkarılması ile elde edilmiştir. Monolitik (kontrol) ve prefabrik iç kolon-kiriş birleşim bölgesi numuneleri laboratuvar imkânları dikkate alınarak ½ ölçekli olarak seçilmiştir. ACI 374.1'de deney numuneleri için minimum 1/3 ölçek dikkate alınabileceği belirtilmiştir (ACI 374.1-05, 2005). Buna göre, kiriş en kesit boyutları 300 mm genişlik ve 500 mm yükseklik; kare kesitli kolon boyutları ise 400 mm x 400 mm'dir. Numunelerde kısa konsol boyu kaynak katsayısına bağlı olarak 300 ve 450 mm olarak belirlenmiştir. Monolitik numunede kesme açıklığı / faydalı yükseklik (a/d) oranı 3,45'dir. Prefabrik numunelerin kesme açıklığı kiriş mesneti ile kısa konsol ortasındaki uzaklık olarak dikkate alınmıştır. Prefabrik numunelerde kesme açıklığı / faydalı yükseklik (a/d) oranları 3 ve 3,15'tir. a/d oranlarının düşük olmasının nedeni prefabrik birleşim bölgelerinde kesme etkilerinin dikkate alınmasıdır.

Çalışmanın ilk kısmında, monolitik N0 numunesi ile Deprem Yönetmeliği'ne göre kaynak katsayısı 2,0 alınarak tasarlanan iki adet prefabrik birleşim bölgesi (N1 ve

N2) numuneleri test edilmiştir. N1 ve N2 numuneleri için *karbon oranı* ve *aderans bozulma boyu* deney parametreleridir.

Çalışmanın ikinci kısmında, kaynak katsayısının azaltılarak 1,2 alındığı üç adet prefabrik birleşim bölgesi numunesi (N3, N4 ve N5) test edilmiştir. N3 ve N4 numunelerinde elektrot tipi deney parametresidir. Elektrotlar rutil elektrot (E38) ve bazik elektrot (E42) olmak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır (TS EN 2560, 2013). N5 numunesinde ise N1-N4 numune testleri ışığında iyileştirme önerileri sunulmuştur.

Tablo 3.1’de numunelerde göz önüne alınan deney parametreleri verilmektedir. Kaynak katsayısı (α), kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a/d), kiriş enine donatı oranı (ρ_w), etriye aralığı/boyuna donatı çapı (s_h/d_b) ve aderans bozulma boyu (L_{ab}) Tablo 3.1’de verilmiştir. Bununla beraber, donatının kaynaklanabilirliğinde etkili olan karbon eşdeğeri (C_{eq}), karbon oranı (C) ve elektrot tipi de tabloda verilmektedir.

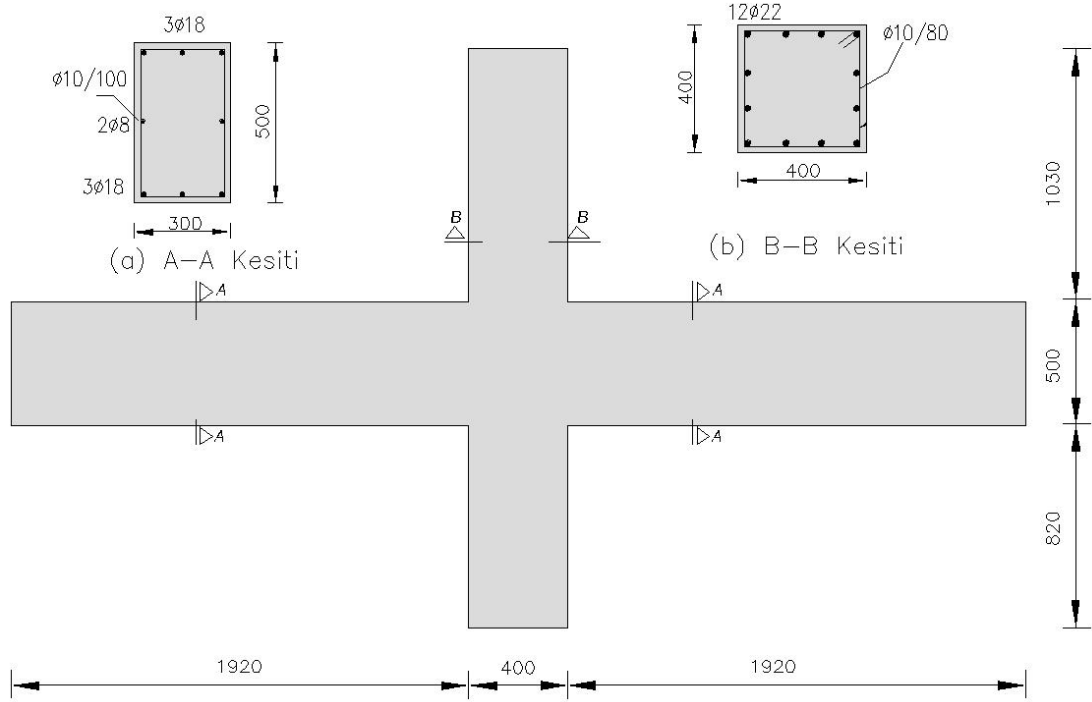
Tablo 3.1 Deney numunelerinin özellikleri ve deney parametreleri

Numune	α	a/d	ρ_w (%)	s_h/d_b	L_{ab} (mm)	Elektrot tipi	Donatı sınıfı	C (%)	C_{eq} (%)
N0	-	3,45	0,52	5,55	-	-	B420C	0,20	0,37
N1	2,0	3,0	0,52	5,55	-	E42	S420	0,31	0,491
N2	2,0	3,0	0,52	5,55	93	E42	B420C	0,194	0,352
N3	1,2	3,15	0,52	5,55	-	E38	B420C	0,20	0,37
N4	1,2	3,15	0,52	5,55	-	E42	B420C	0,196	0,348
N5	1,2	3,15	1,0	4,2	180	E42	B420C	0,19	0,348

3.3.1 N0 Numunesi

N0 numunesi, monolitik kontrol numunesi olup Deprem Yönetmeliği ve TS 500’e göre tasarlanmıştır. Kolonda boyuna donatı oranı % 2,8 olup, kirişte çekme ve basınç

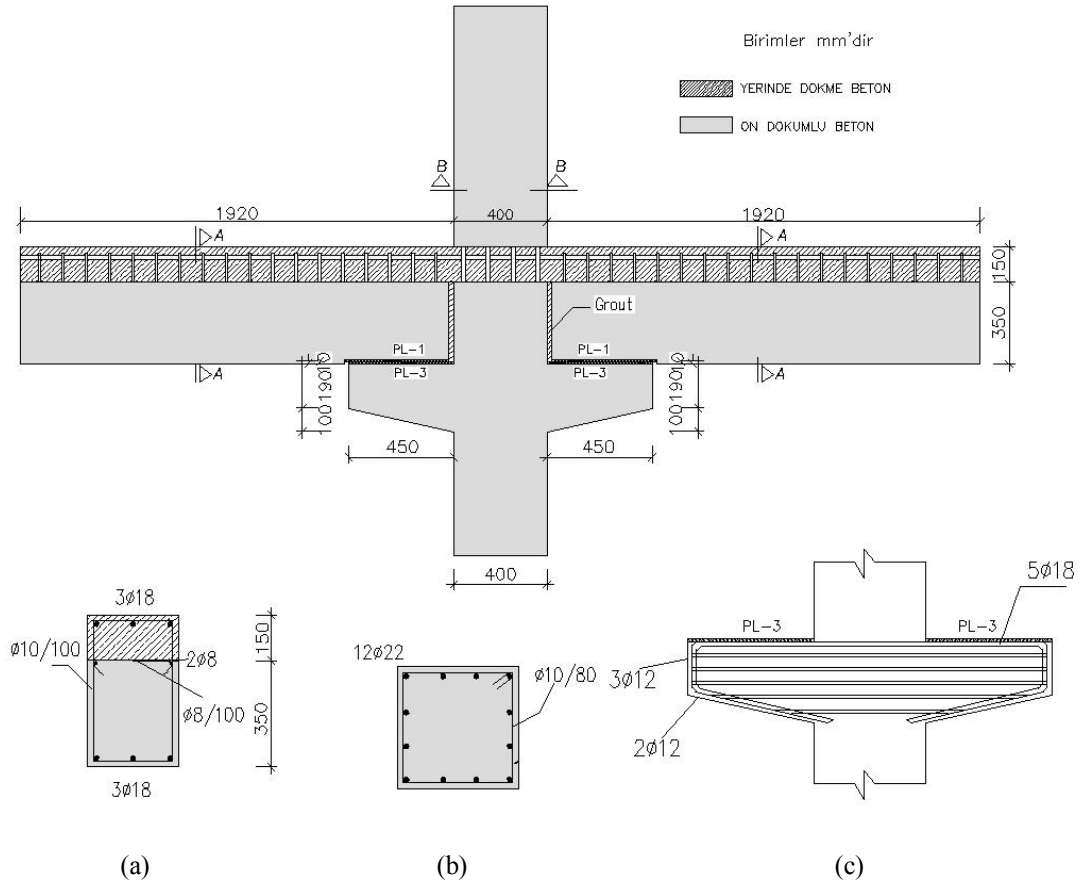
donatısı oranları % 0,55'tir. Etriye aralığı kolonda 80 mm, kirişte ise 100 mm'dir. N0 numunesinin boyutları ile kolon ve kiriş en kesitleri Şekil 3.2'de verilmektedir. N0 numunesi güçlü kolon-zayıf kiriş tasarım felsefesine göre boyutlandırılmıştır.



Şekil 3.2 N0 numunesi boyutları ve (a) Kiriş en kesiti, (b) Kolon en kesiti

3.3.2 N1 ve N2 Numuneleri

N1 ve N2 prefabrik numunelerinde kaynaklı bağlantı hesaplarında Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak kaynak katsayısı 2,0 alınmıştır. Bu sebeple N1 ve N2 numunelerinde oluşturulması gerekli kaynak alanı, kiriş alt boyuna donatısında akmanın geliştiği andaki kuvvet değerinin iki katı alınarak hesaplanmıştır. Kolonda boyuna donatı oranı % 2,8 olup, kirişte çekme ve basınç donatısı oranları % 0,55'tir. Etriye aralığı kolonda 80 mm, kirişte ise 100 mm'dir. N1 ve N2 birleşim bölgesi numuneleri ile kolon ve kiriş en kesitleri Şekil 3.3'de verilmektedir. Kısa konsol boyu, donatı-plaka kaynak hesaplarına göre 450 mm olarak hesaplanmıştır. Kesme açıklığı kiriş mesneti ile kısa konsol ortasındaki mesafe (1375 mm) olarak alınmıştır. Kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a/d) oranı 3'tür.



Şekil 3.3 N1 ve N2 birleşim bölgesi numunesi ve (a) Kiriş (b) Kolon ve (c) Kısa konsol en kesiti

Prefabrik numunelerin montajı D.E.Ü. Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Prefabrik numunelerin üretim aşamaları Ek-B'de verilmektedir. Montaj aşamasında:

- Kirişler kısa konsola mesnetlenerek kirişteki plaka, kısa konsol üstündeki plakaya kaynaklanmıştır.
- Kuvvetlerin birleşime aktarılabilmesi için kolon-kiriş birleşim ara-yüzündeki boşluk rötresiz harç ile kapatılmıştır.
- Kiriş ve birleşim üzerindeki kısım kalıba alınarak tamamlayıcı (topping) beton dökümü yapılmıştır (Şekil 3.4).

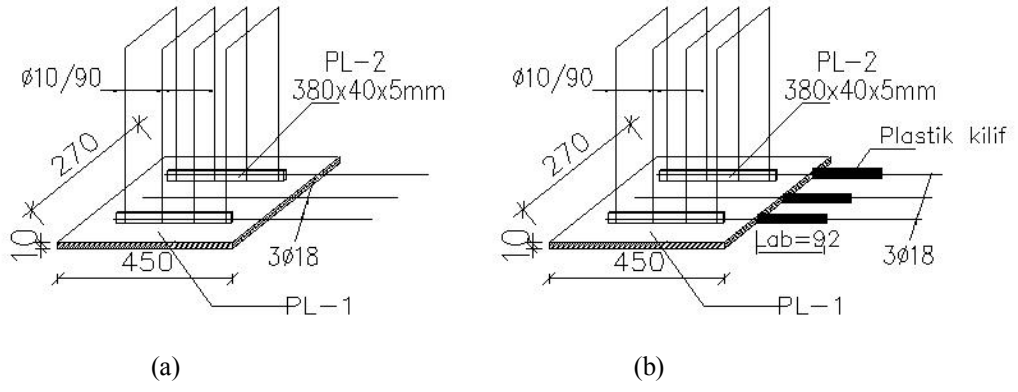
N1 ve N2 numunelerindeki ana değişken, kiriş boyuna donatılarındaki karbon oranıdır. Kiriş boyuna donatılarının kimyasal içeriği KOSGEB/İzmir laboratuvarlarında gerçekleştirilen spektrometrik analizler ile belirlenmiştir. N1 numunesinde donatının karbon oranı (C) % 0.31 olarak belirlenmiş, dolayısıyla bu

numune donatılarının karbon oranı TS 708’de S420 donatı çeliği için verilen koşulları sağlamıştır. N2 numunesinde ise, donatının karbon oranı % 0.19 ve karbon eşdeğeri % 0.46 olarak belirlenmiş, TS 708’de B-420 C donatı çeliği için verilen koşulları sağlamıştır.

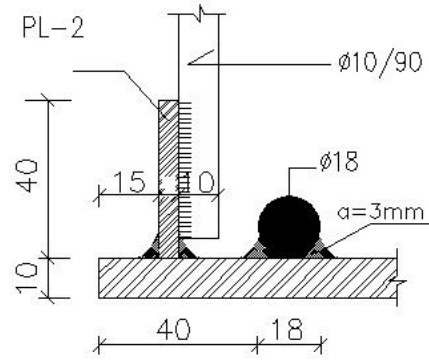


Şekil 3.4 Prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin montajı

N1 ve N2 numunelerindeki tüm kaynaklarda, 3,25 mm çapında E7018 kaynak elektrotu (bazik elektrot) kullanılmıştır. Şekil 3.5a ve 3.5b’de N1 ve N2 numuneleri için PL-1 plaka detayı ve Şekil 3.6’da ise donatı-plaka detayları verilmiştir. N2 numunesinin, kiriş alt boyuna donatısında kaynak bitiminden itibaren belirli bir bölgede aderans bilinçli olarak bozulmuştur (Şekil 3.4b). SAFECAST Araştırma Projesi kapsamında İTÜ’de gerçekleştirilen testlerde (Karadoğan ve diğer., 2012), etriyelerin küt kaynak yerine yardımcı bir düşey plakaya (PL-2) kaynaklanmasının numunelerin davranışını oldukça olumlu yönde etkilediği görüldüğünden N1 ve N2 numunelerinin oluşturulması sırasında da Şekil 3.6’da görülen boyuna donatı-plaka ve etriye-plaka kaynak detayları kullanılmıştır. Aderans bozulma boyu 92 mm olarak hesaplanmış ve bu bölgedeki donatının nervürlü kısmı cam macunu ile doldurulup üzerine plastik kılıf konularak sağlanmıştır (Şekil 3.7)



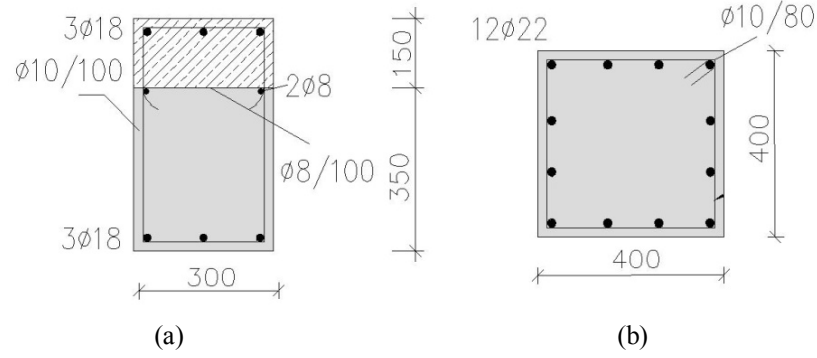
Şekil 3.5 PL1 plaka detayı (a) N1 numunesi, (b) N2 numunesi



Şekil 3.6 N1 ve N2 numunelerinde donatı-plaka, etriye-plaka kaynak detayı



Şekil 3.7 N2 numunesinde donatı-plaka kaynak bitiminden itibaren aderans bozulma boyunun bırakılması



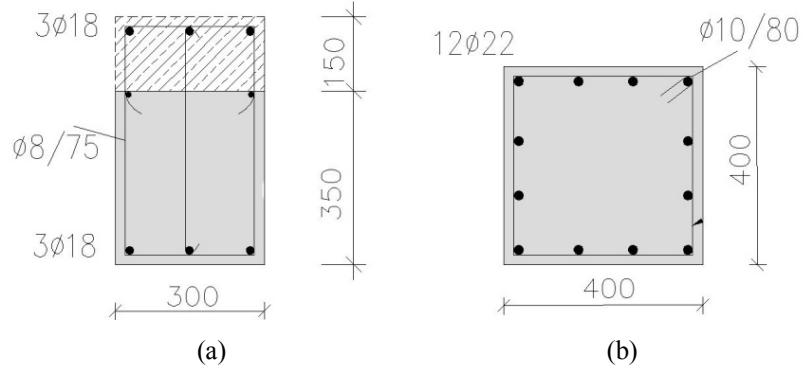
Şekil 3.9 N3 ve N4 numunelerinin (a) Kiriş, (b) Kolon en kesit boyutları

3.3.4 N5 Numunesi

N5 numunesi, N4 numunesi ile eleman boyutları açısından benzerdir (Şekil 3.10). N1-N4 numune testleri sırasında kiriş alt boyuna donatısının tersinir-tekrarlı yükler etkisi ile burkulduğu gözlenmiştir. Bununla beraber, boyuna donatının burkulmasını etkileyen temel faktörün etriye aralığı/boyuna donatı çapı (s_h/d_b) oranı olduğu önceki deneysel çalışmalarda belirlenmiştir (Monti ve Nuti, 1992; Restrepo ve diğer., 1994; Rodriguez ve diğer., 1999).

N1-N4 numunelerinde kirişte etriye aralığı/boyuna donatı çapı (s_h/d_b) oranı 5,55'dir. N5 numunesinde kiriş alt boyuna donatısındaki burkulmanın azaltılabilmesi için iyileştirme önerileri yapılmıştır. İyileştirme önerileri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- N5 numunesinde *etriye aralığının azaltılması* ile etriye aralığı/boyuna donatı çapı (s_h/d_b) oranı 4,2 alınmıştır.
- Kiriş alt orta boyuna donatısının burkulmasını önlemek için *çiroz* konulmuştur.
- Boyuna donatıda burkulmayı önlemek için burkulmanın gelişebileceği bölgeye *çelik kılıf* konulmuştur. Çelik kılıfın uzunluğu $10d_b = 180$ mm olarak alınmıştır.
- Çelik kılıf konulması ile *aderans bozulması* gerçekleştirilmiştir ve maksimum gerilmelerin azaltılması amaçlanmıştır (Şekil 3.11).

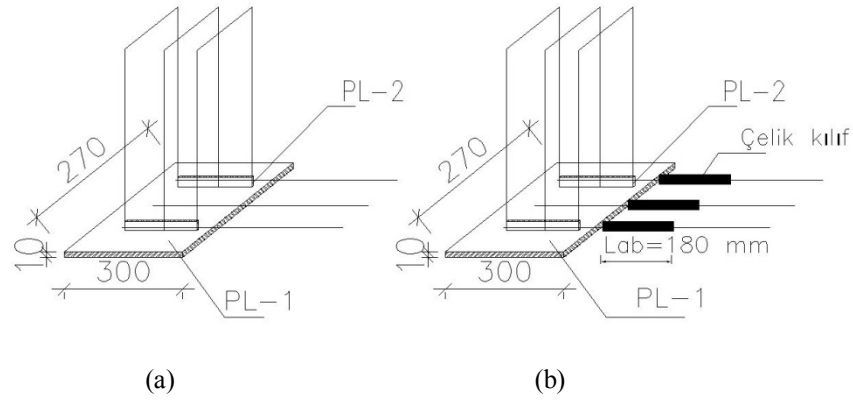


Şekil 3.10 N5 numunesinin (a) Kiriş, (b) Kolon en kesit boyutları

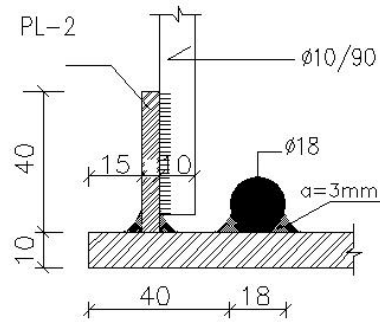


Şekil 3.11 N5 numunesinde çelik kılıf kullanılarak aderans bozulma boyu bırakılması

N3, N4 ve N5 prefabrik numunelerinde B420 C sınıfı donatı çeliği kullanılmıştır. Şekil 3.12a ve 3.12b’de numuneler için PL-1 plaka detayı ve Şekil 3.13’de ise donatı-plaka ve etriye-plaka detayları verilmiştir.



Şekil 3.12 PL1 plaka detayı (a) N3, N4 numuneleri, (b) N5 numunesi



Şekil 3.13 N3 ve N4 numunelerinde donatı-plaka, etriye-plaka kaynak detayı

3.4 Malzeme Özellikleri

3.4.1 Beton

Prefabrik sektöründe tercih edilen beton basınç dayanımı yaklaşık olarak 40 MPa değerlerini almaktadır. Kolon-kiriş birleşim bölgesi numunelerinde hedeflenen beton basınç dayanımı 35 MPa olup, maksimum agrega çapı 22 mm'dir. Beton karışım oranları Tablo 3.2'de verilmektedir. Birleşim bölgesi numunelerinin beton basınç dayanımları, deney günü test edilen küp numunelerin ortalama basınç dayanımları silindir numune dayanımına çevrilerek elde edilmiştir. Buna göre prefabrik kiriş elemanlar için ortalama 40 MPa; kolon elemanlar için ortalama 45 MPa basınç dayanımı belirlenmiştir. Tamamlayıcı beton için hedeflenen beton basınç dayanımı 30 MPa olup, küp numunelerin ortalama basınç dayanımları silindir numune dayanımına çevrilerek 35 MPa olarak belirlenmiştir. Kolon ve kiriş ara yüzüne yakın

2 cm'lik kısım rötresiz harç ile doldurulmuştur. Harç karışım oranları Tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.2 Beton karışım oranları

Malzeme	Miktar (kg/m ³)
Çimento CEM II 42.5R	330
Su	152
Akışkanlaştırıcı katkı	3,30
Kırmataş tozu (0-3)	1007
Kırmataş tozu (4-16)	481
Kırmataş tozu (11,2-22)	501
Uçucu Kül	70

Tablo 3.3 Rötresiz harç karışım oranları

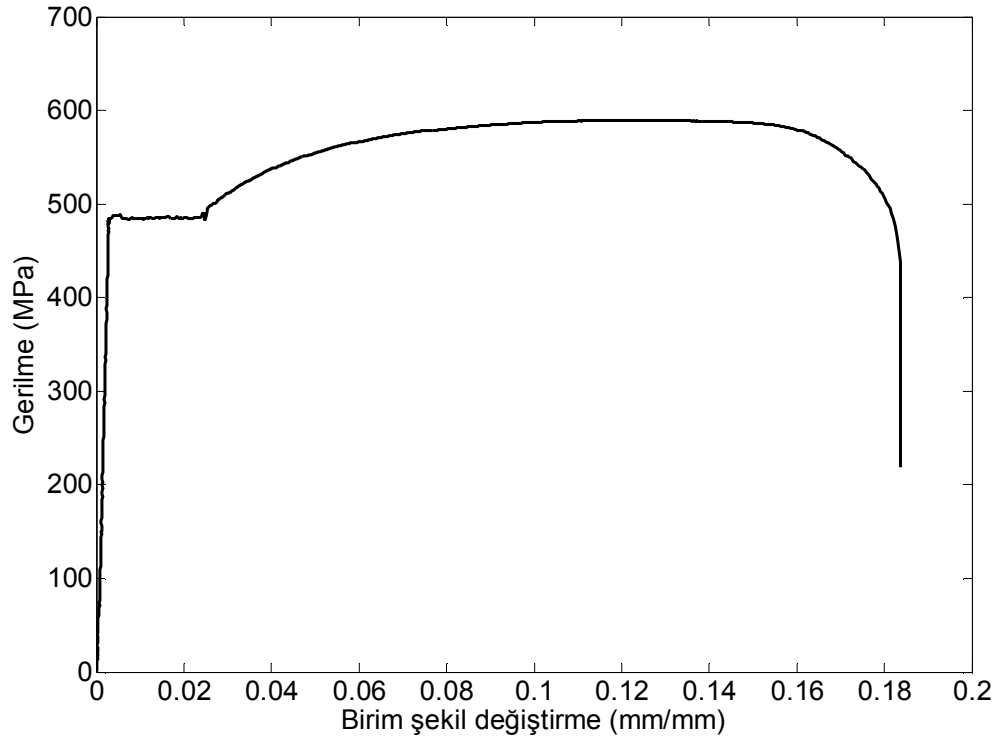
Malzeme	Miktar (kg/dm ³)
Rötresiz harç miktarı	2,2
Su	0,25

3.4.2 Donatı çeliği

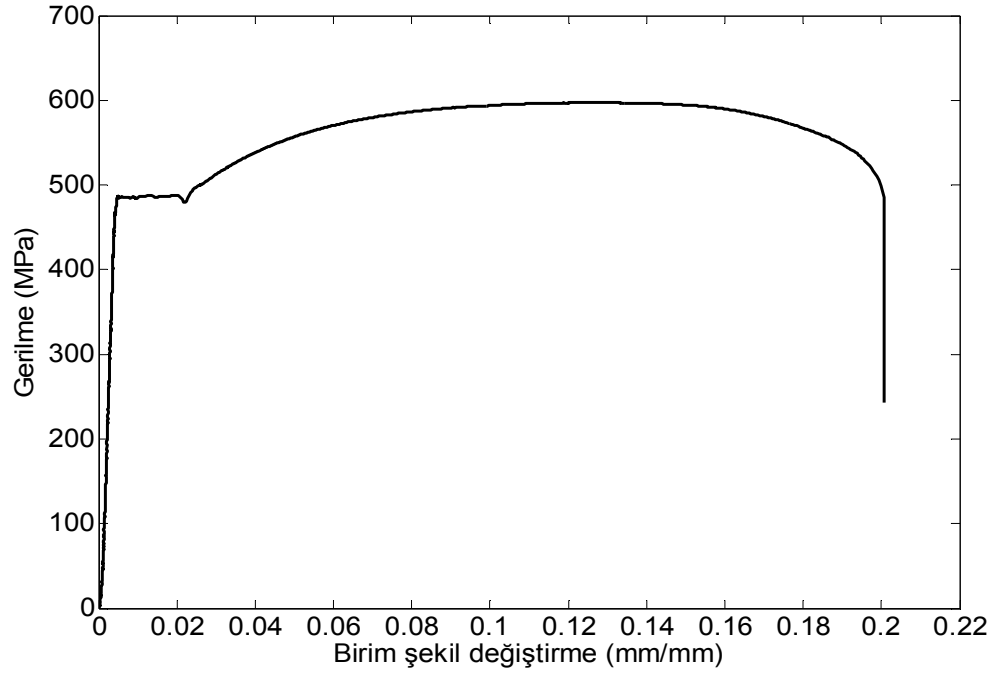
Monolitik ve prefabrik tüm numunelerde kullanılan $\phi 10$, $\phi 18$ ve $\phi 22$ donatı çeliklerinin çekme testleri D.E.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Kolon ve kirişte boyuna donatı oranı sırasıyla % 2,8 ve % 0,55 olup, kirişte alt ve üst sıralara $\phi 18$ donatı yerleştirilmiştir. Donatıların çekme testleri ile belirlenen karakteristik değerleri Tablo 3.4'de verilmiştir. Kullanılan donatı çeliklerinin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.14-16'da verilmektedir.

Tablo 3.4 Donatı çeliği örneklerinin çekme testi altında elde edilen değerleri

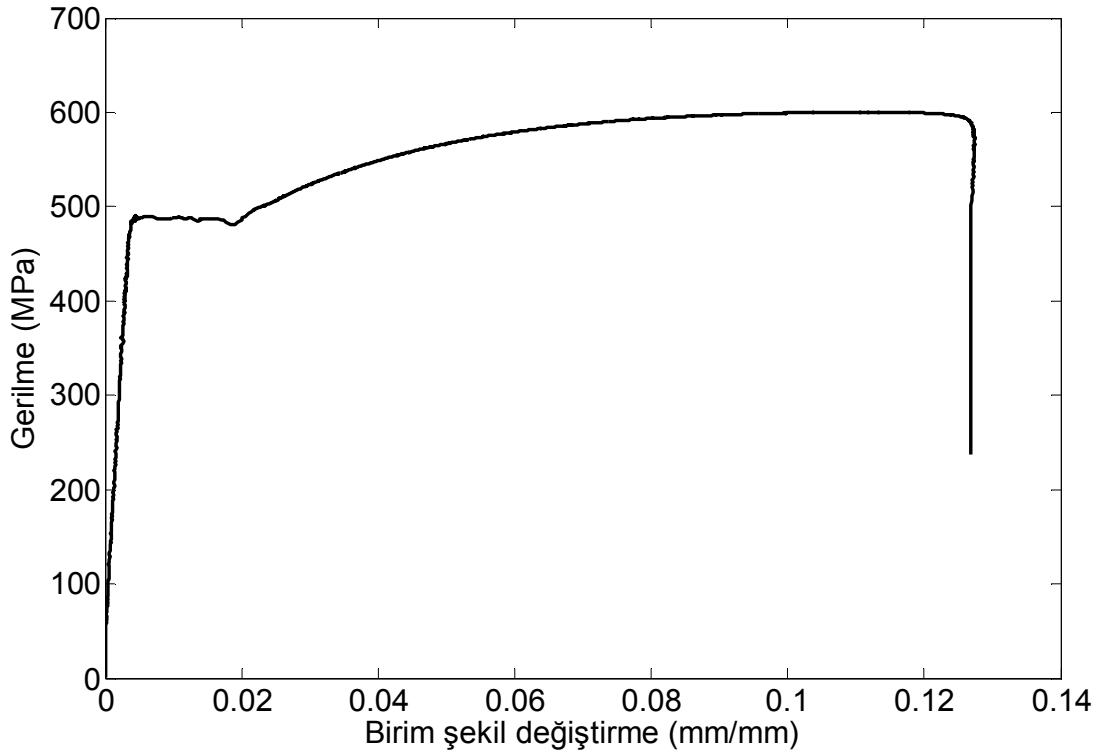
Donatı	f_y (MPa)	ϵ_y	f_u (MPa)	ϵ_u
$\phi 10$	485	0.0025	589	0,12
$\phi 18$	461	0.0024	596	0,12
$\phi 22$	490	0.0024	600	0,11



Şekil 3.14 $\phi 10$ donatısının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi



Şekil 3.15 $\phi 18$ donatısının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

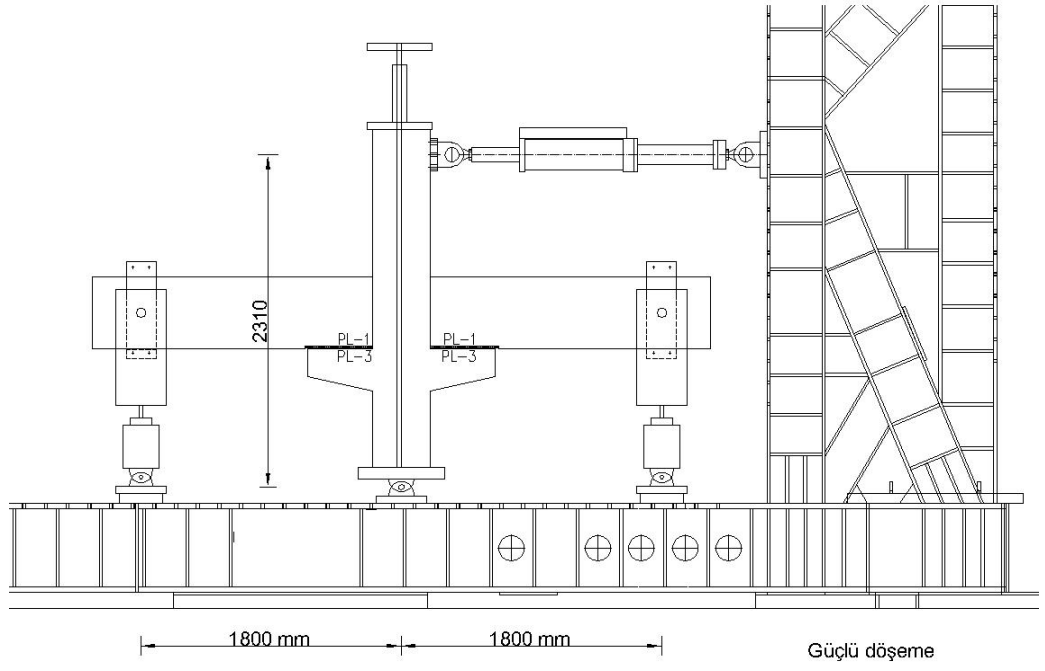


Şekil 3.16 $\phi 22$ donatısının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

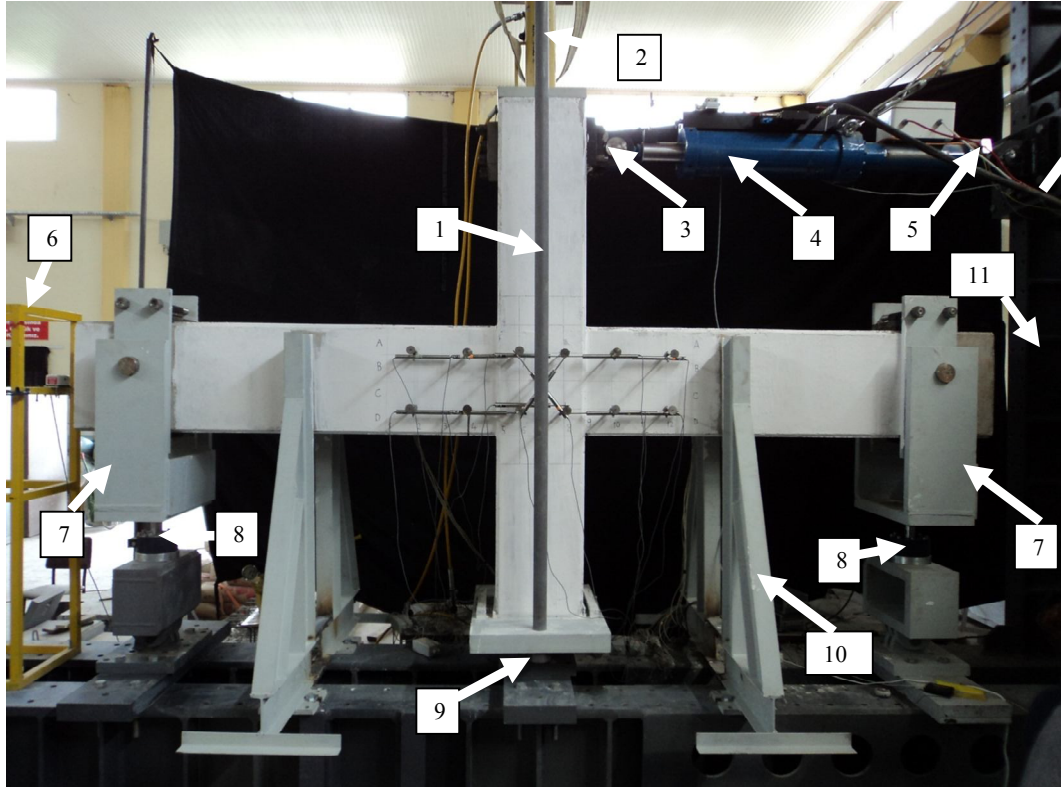
3.5 Test Kurulumu

Monolitik ve prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin testleri D.E.Ü. Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin sistem içerisindeki konumu Şekil 3.17'de verilmektedir. Birleşim bölgesi numuneleri, Şekil 3.18'de görülen ACI 374.1.05'e uygun şekilde oluşturulan deney düzeneği üzerine yerleştirilerek test edilmiştir.

Kolon altında yer alan metal plaka yükleme doğrultusunda mafsallı olup, güçlü çelik çerçeveye bağlanmıştır. Kiriş elemanların serbest uçları, uygulanan tepe yükü doğrultusunda serbestliği bulunan pandül ayaklar üzerine mesnetlenmiştir. Kolon elemana, deney süresince eksenel yük kapasitesinin % 10'u düzeyindeki basınç yükü uygulanmıştır.



Şekil 3.17 Deney numunesinin sistem içerisindeki konumu

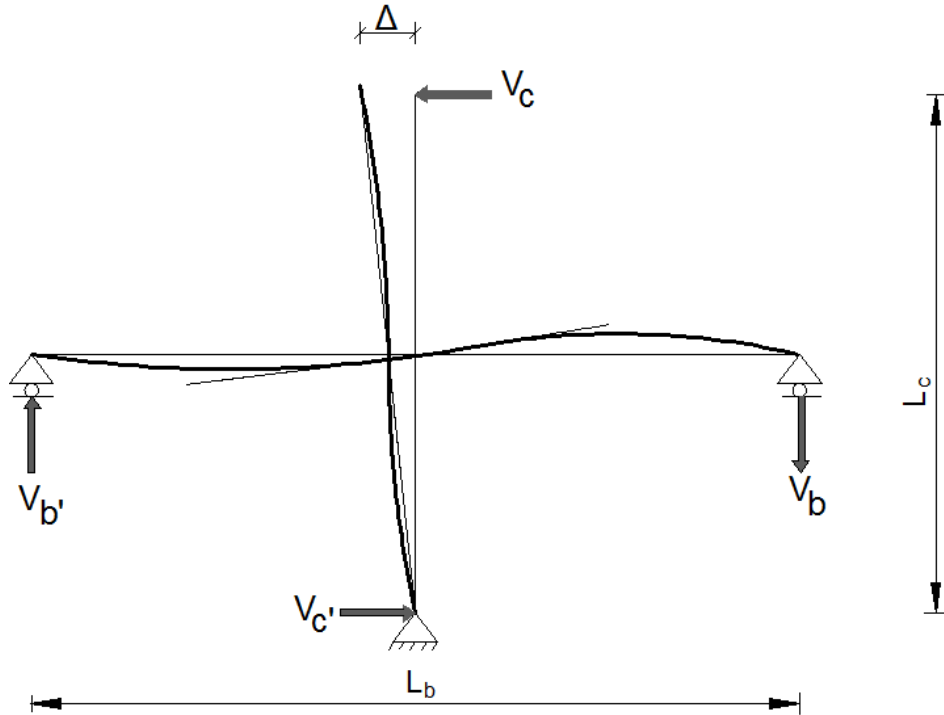


Şekil 3.18 Deney düzeneğinin genel görünümü: (1)Eksenel yükleme çerçevesi, (2) Hidrolik krik, (3) Mafsal, (4) Hidrolik veren, (5) Yük hücresi, (6) Referans çerçeve, (7) Pandül ayak, (8) Yük hücresi, (9) Sabit mesnet, (10) Düzlem dışı çerçeve, (11) Çelik çerçeve

3.6 Test Yöntemi

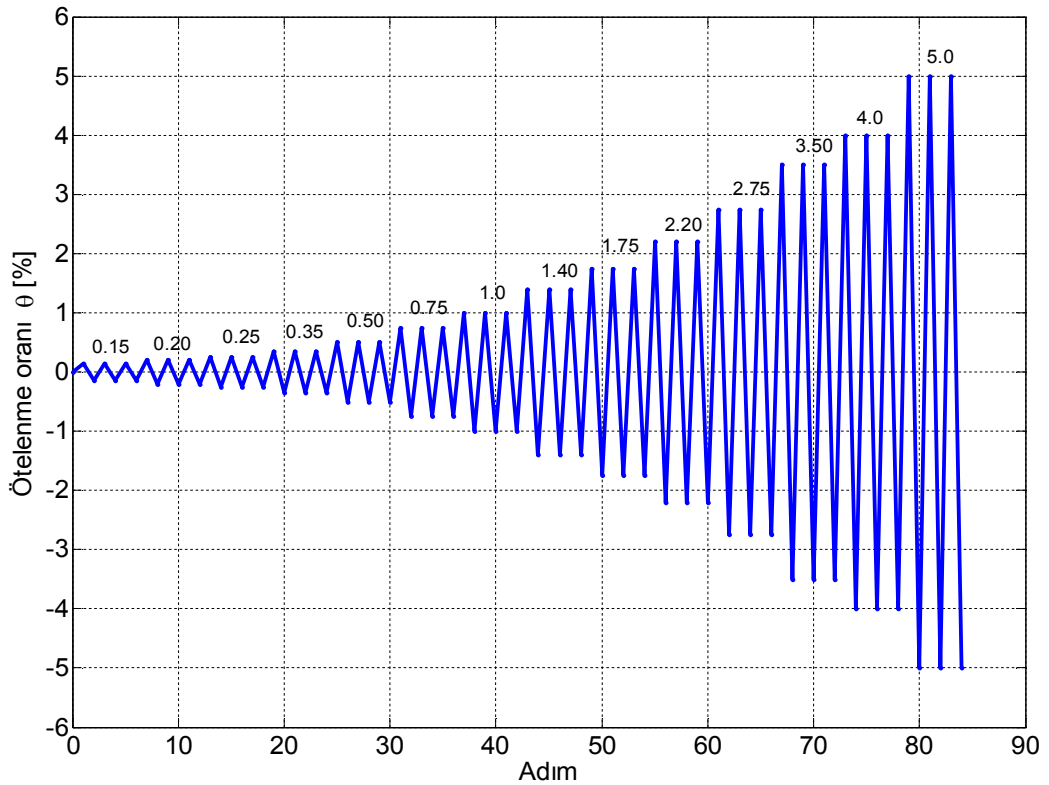
Kolon – kiriş birleşim bölgesi testleri ACI 374.1-05 ‘te verilen *minimum* şartları sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Buna göre;

- Test modülündeki birleşim numuneleri prototip yapı içerisindeki yük aktarım mekanizmalarını benzeştirebilecek şekilde en az 1/3 ölçekli olmalıdır,
- Test modülüne beklenen deprem etkileri altındaki kat ötelenme oranlarına bağlı yer değiştirme- kontrollü çevrimler uygulanmalıdır (Şekil 3.19),
- Her kat ötelenme oranına karşılık gelen yer değiştirme üç kez tam çevrim sağlayacak şekilde uygulanmalıdır,
- Ardışık kat ötelemeleri arasındaki oran 1,25 den az, 1,5 ‘ten fazla olmamalıdır,
- Başlangıç ötelenme oranları numunenin lineer elastik bölgede kalmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir,
- Testler, kademeli olarak artan yükleme ile en az % 3,5 kat ötelenme oranına kadar devam ettirilmelidir.



Şekil 3.19 Kolon – kiriş birleşimine tepe yer değiştirmesi uygulanması (Lee ve diğer., 2009)

Birleşim bölgesi numunelerinde, yer değiştirmeler kolon tepe ucuna tersinir-tekrarlı üçer adet tam çevrim olarak, ACI 374.1.05'e uygun, ötelenme oranları cinsinden uygulanmıştır (Şekil 3.20). Ötelenme oranları, net tepe yer değiştirmesinin, kolon üst ucu-mafsalsal arası mesafeye (2310 mm) bölünmesi ile elde edilmektedir. Deneylerin, numunelerin elastik ötesi davranışlarının ortaya konabilmesi amacı ile % 5 görel kat ötelenme oranına kadar sürdürülmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.20 Yükleme profili (Ertaş, 2005)

3.7 Ölçerlerin Yerleşimi

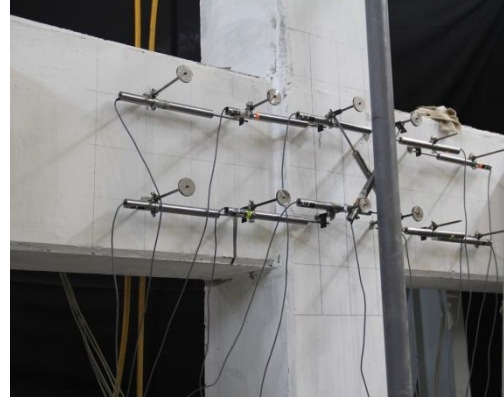
3.7.1 Yerdeğiştirme Ölçerler

Deney süresince kirişte plastik mafsalsal bölgesi yakınında gelişecek deformasyonların izlenebilmesi amacıyla yerdeğiştirme ölçerler (LVDT) kullanılmıştır. Çalışmada, TWL marka DC tip yerdeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Yükleme sistemine dik belirli aralıklarla kirişlere epoksi ile metal çubuklar yerleştirilmiş (Şekil 3.21a) ve bu çubuklar arasına Şekil 3.21b'de görülen yer

değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Numunelerde birleşim bölgesinde 12 adet yer değiştirme ölçer ve kiriş uçlarına birer adet, kolon üst ucuna 2 adet ipli sensör yerleştirilmiştir. Birleşim paneline birleşimde gelişebilecek kayma deformasyonlarının belirlenebilmesi amacı ile 2 adet yerdeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir.



(a)



(b)

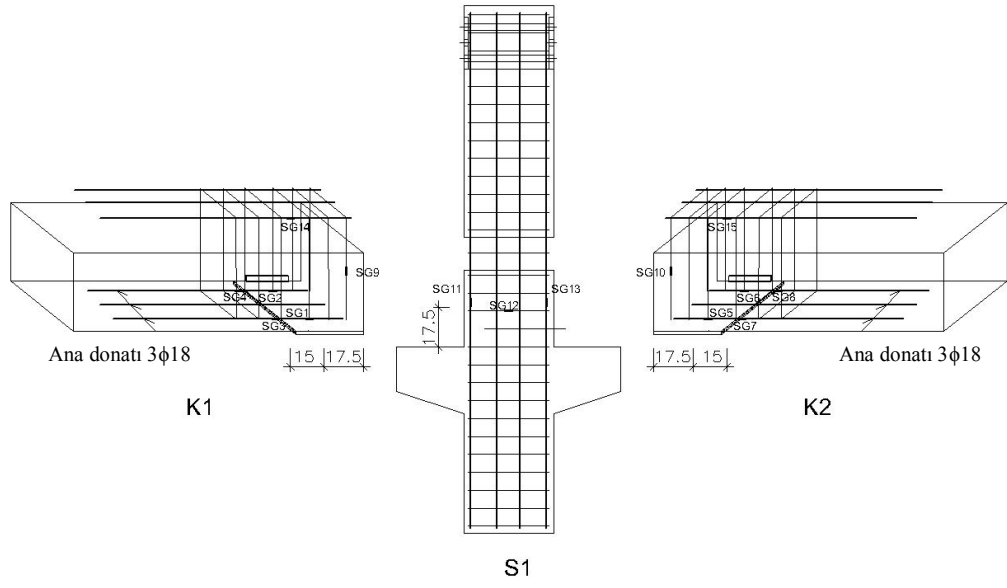
Şekil 3.21 (a) Epoksi esaslı yapıştırıcılar ile ekilen metal çubuklar, (b) Yer değiştirme ölçerlerin yerleşimi

3.7.2 Gerinim Pulları

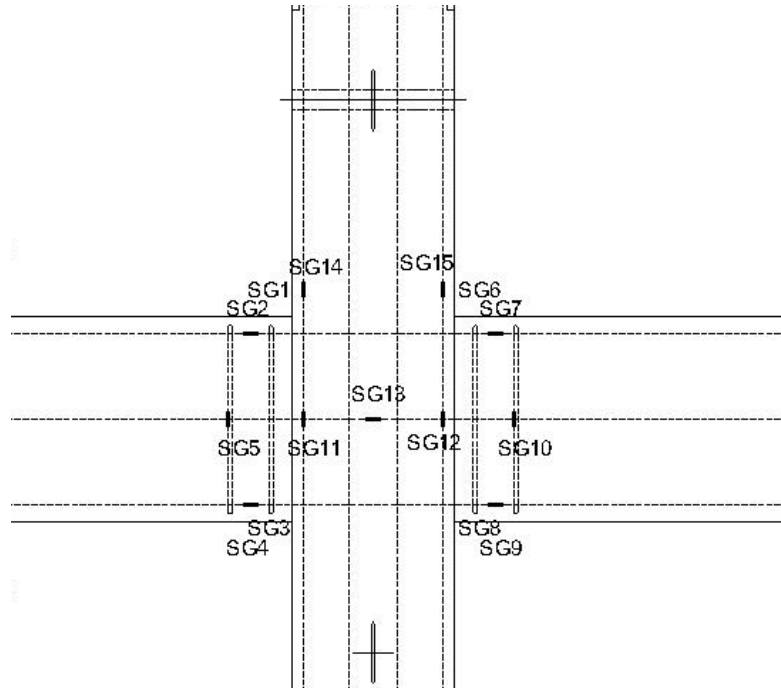
Deneyler sırasında donatıdaki birim deformasyonların belirlenmesi amacı ile Şekil 3.22 ve 3.23’de görülen gerinim pulları prefabrik ve monolitik kolon – kiriş birleşim bölgesi numunelerindeki kritik kesitlere yerleştirilmiştir. Çalışmada, TML marka FLA 10-11 tipi, % 15 birim deformasyon kapasitesine sahip 120 Ω gerinim pulları kullanılmıştır. Gerinim pulları veri toplama sistemine çeyrek köprü tamamlama kabloları ile bağlanmıştır.

3.8 Veri Toplama Sistemi

Yer değiştirme, şekil değiştirme ve yük ölçümleri Şekil 3.24’de verilen 5 adet TDG Testbox 1001 veri toplama sistemi ile gerçekleştirilmiştir. TestlabBasic yazılımı kullanılarak toplam 40 adet kanaldan 125 ms aralıklarla veri kaydedilmiştir.



Şekil 3.22 Prefabrik numunelerde gerinim pullarının yerleşimi



Şekil 3.23 Monolitik (N0) numunede gerinim pullarının yerleşimi



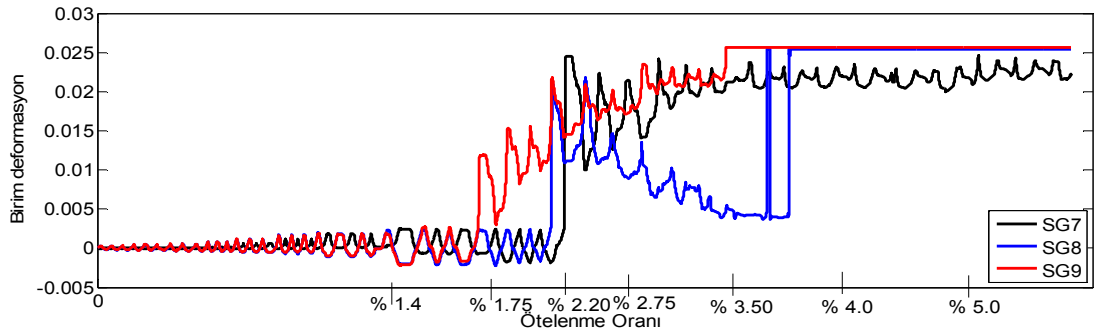
Şekil 3.24 Gerinim pullarının ve yer değıştirme ölçerlerin veri toplama sistemine bağlanması

BÖLÜM DÖRT

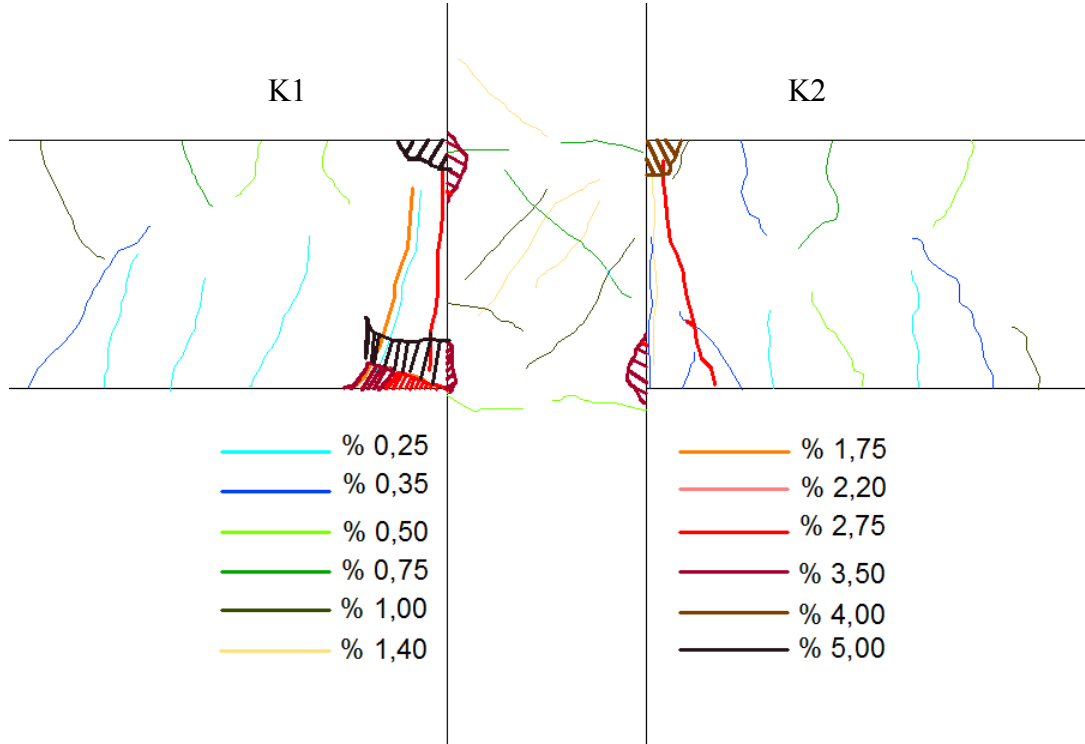
DENEY SONUÇLARI

4.1 Monolitik Numune (N0)

Monolitik (N0) numune hasarlar birleşim bölgesinde ve kiriş uçlarında yoğunlaşmıştır. % 0,25 ötelenme oranına kadar numune davranışı elastik düzeyde kalmıştır. % 0,25 ötelenme oranının ilk çevriminde, K1 kirişinde ilk eğilme çatlakları kolon yüzünden 20 cm ötede, oluşmuştur. Kolon-kiriş birleşim ara yüzündeki ilk çatlak % 0,25 ötelenme oranının ilk çevriminde, % 0,35 ötelenme oranında K2 kirişinde gelişmiştir. Kolon-kiriş birleşiminde ilk kılcal çatlak % 0,75 ötelenme oranında, oluşmuştur. Kiriş boyuna donatılarında deney süresince gerinim pulları (Şekil 3.22) ile ölçülen birim deformasyonlar Şekil 4.1’de verilmektedir. Buna göre, birleşim bölgesinde kiriş uçlarında, boyuna donatıları % 1,0 ötelenme oranında akma birim deformasyonuna ulaşmıştır. % 1,4 ötelenme oranına kadar birleşimdeki diyagonal çatlakların sayısında artış gözlenmiştir. % 2,2 ötelenme oranında kiriş üstünde betonda ezilmeler gelişerek % 2,75 ötelenme oranında K1 kirişi alt yüzünde kabuk betonunda dökülme görülmüştür. % 3,5 ötelenme oranında birleşimde, kolon köşelerinde kabuk betonunda dökülmeler meydana gelmiştir. Şekil 4.2’de numune deney süresince gelişen hasarlar verilmektedir. %2,75 ve % 5,0 ötelenme oranlarında numunedeki hasarlar Şekil 4.3 ve 4.4’de görülmektedir.



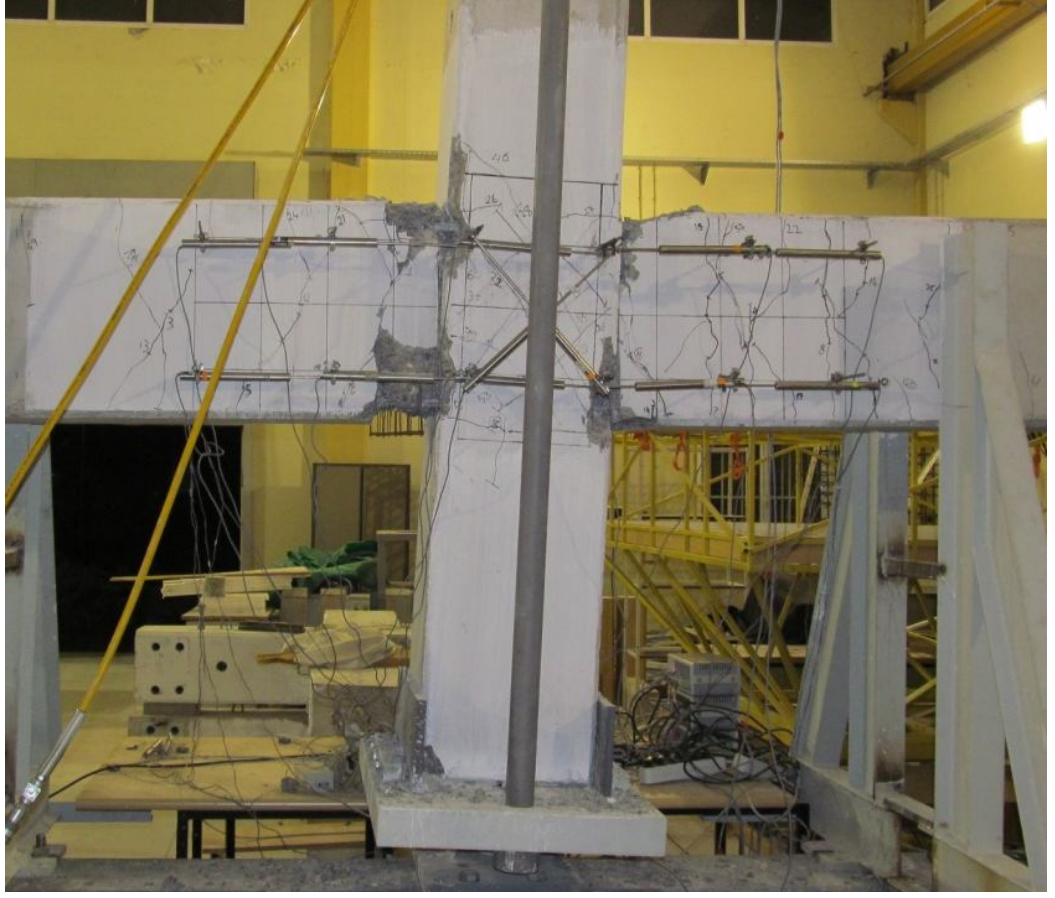
Şekil 4.1 N0 numunesinde kirişte boyuna donatılarının birim deformasyonları



Şekil 4.2 N0 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı

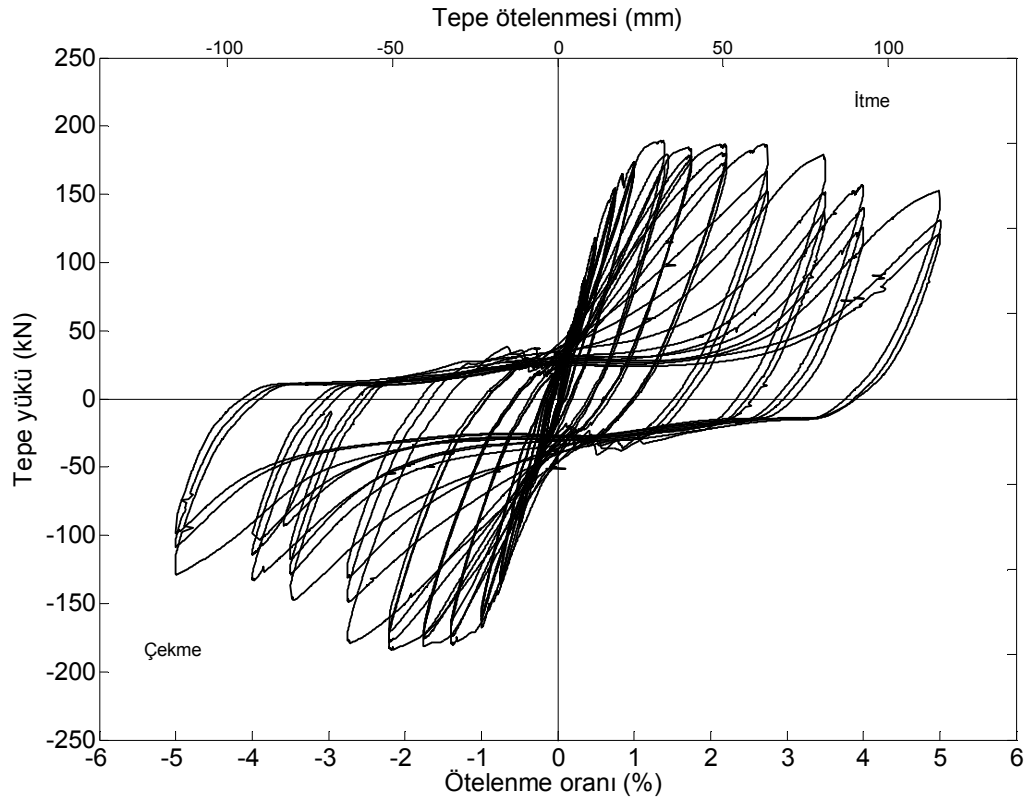


Şekil 4.3 N0 numunesinin % 2,75 ötelenme oranındaki hasar durumu

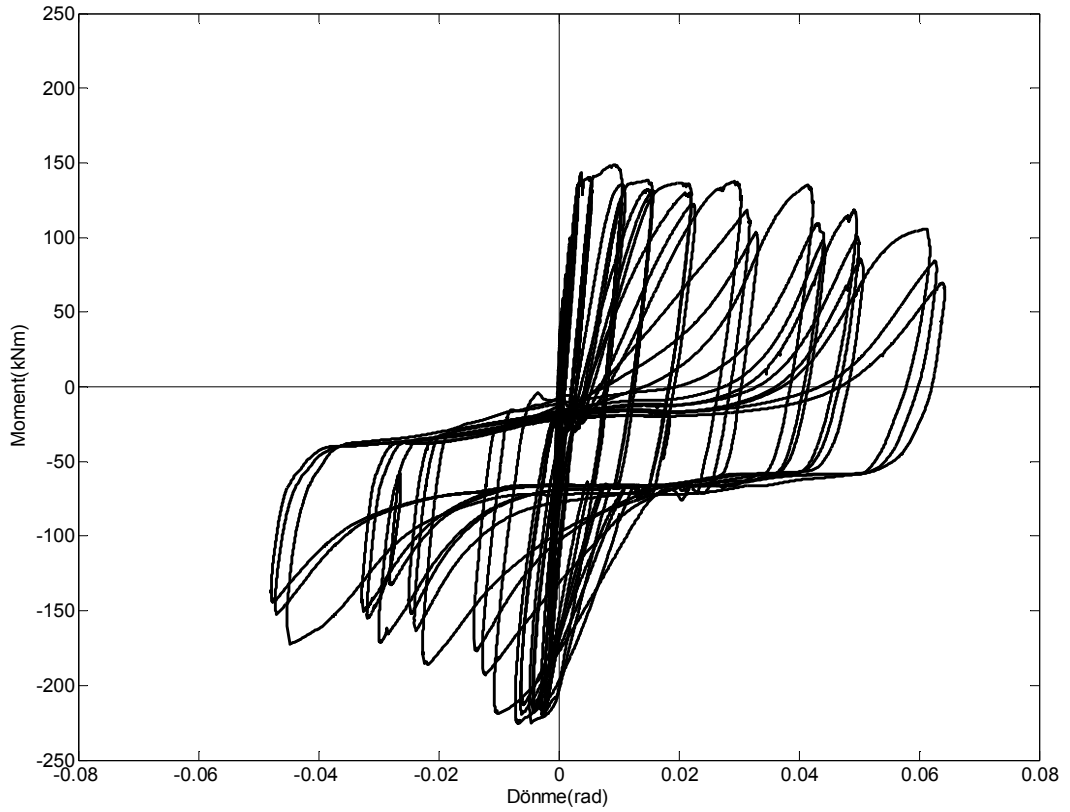


Şekil 4.4 N0 numunesinin % 5,0 ötelenme oranındaki hasar durumu

N0 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi Şekil 4.5’de verilmektedir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma % 1,75 ötelenme oranında ulaşılmıştır. İleri ötelenme seviyelerindeki davranışın gözlenmesi amacıyla monolitik numunenin testi % 5,0 ötelenme oranına kadar devam ettirilmiştir. Numune birleşiminde kiriş boyuna donatılarının sıyrılması nedeni ile % 2,75 ötelenme oranı sonrasındaki ötelenme oranlarında çevrim sıkışması (pinching) gelişmiştir. Bu durum özellikle rijitlikte ve enerji tüketiminde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Numune dayanımında % 4,0 ötelenme oranına kadar % 20 oranında azalma gözlenmiştir. Numunenin K1 kirişi ile birleşim ara yüzündeki kesit dönmesi hesaplanarak, moment-kesit dönmesi ilişkisi Şekil 4.6’da verilmektedir.



Şekil 4.5 N0 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi



Şekil 4.6 N0 numunesinin moment-kesit dönmesi ilişkisi

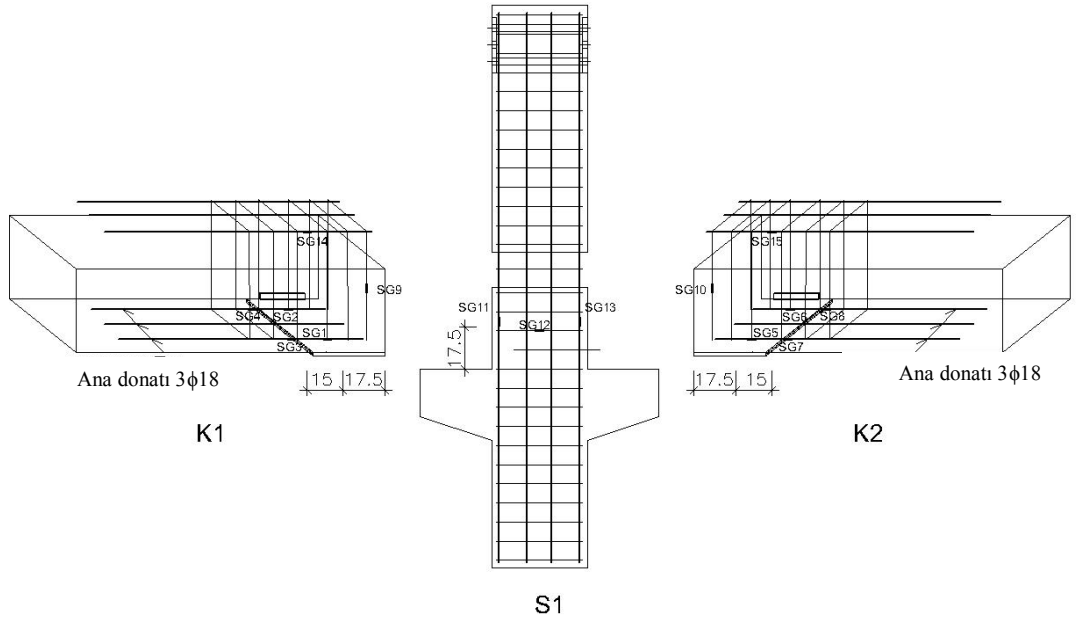
4.2 N1 Numunesi

N1 numunesi için göz önüne alınan deney parametreleri ve özellikleri Tablo 4.1’de verilmektedir.

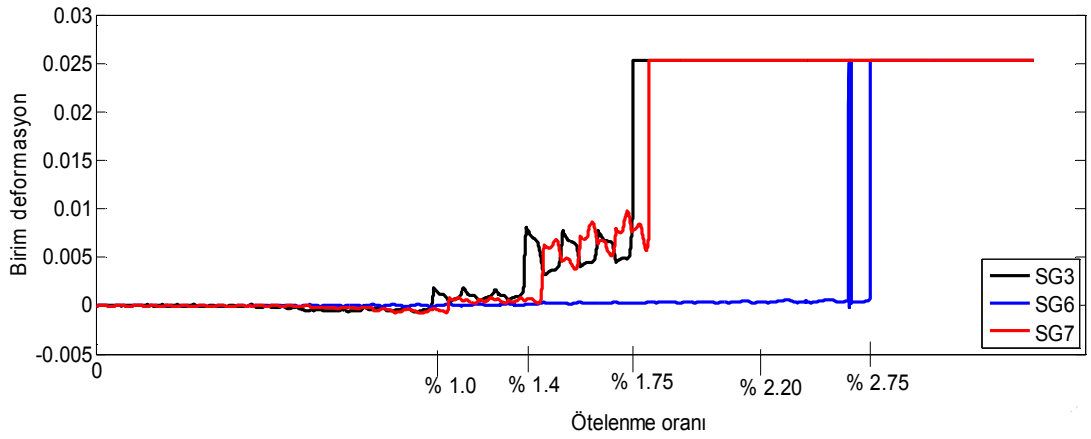
Tablo 4.1 N1 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri

Numune no	Kaynak katsayısı (α)	L_{ab} (mm)	Elektrot tipi	Donatı sınıfı
N1	2,0	-	Bazık	S420

N1 numunesinde, kiriş açıklıklarında ilk eğilme çatlakları % 0,25 ötelenme oranında gözlenmiş, kısa konsol bitiminden birleşim bölgesine doğru ilerleyen ilk eğik çekme çatlakları % 1,0 ötelenme oranında gelişmiştir. Prefabrik numunelerde gerinim pullarının yerleşimi Şekil 4.7’de verilmektedir. Kiriş plakasına kaynaklı alt boyuna donatıların gerinim pulları ile ölçülen birim deformasyonları Şekil 4.8’de verilmektedir. Kiriş alt boyuna donatılarının akma birim deformasyonuna % 1,0 ötelenme oranında ulaştığı belirlenmiştir.

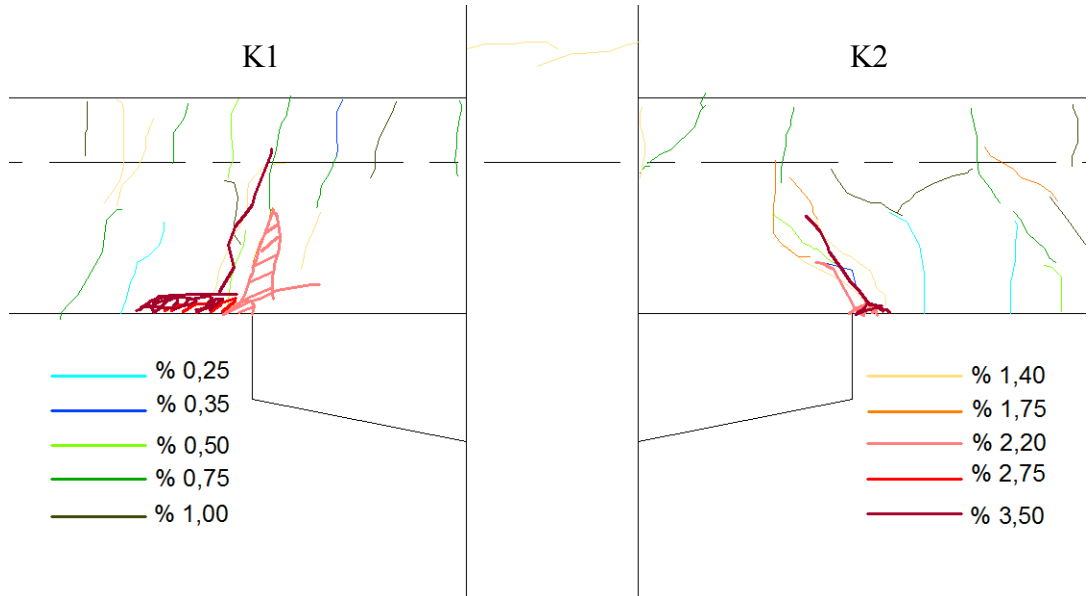


Şekil 4.7 Prefabrik numunelerde gerinim pullarının yerleşimi



Şekil 4.8 N1 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları

Deney süresince N1 numunesinde gelişen hasar dağılımı Şekil 4.9’da görülmektedir. Hasarlar kısa konsol bitiminden itibaren kiriş alt kısmında yoğunlaşmıştır. K1 kirişinde % 2,2 ötelenme oranında kısa konsol bitiminden itibaren kabuk betonunda dökülme ve bağlantının üst kısmında kirişte kesme çatlakları belirginleşmiştir. Ayrıca kiriş alt donatısında burkulma gözlenmiş, K2 kirişinin alt boyuna donatıları % 2,2 ötelenme oranının ikinci çevriminde kopma birim deformasyonuna ulaşarak kaynaklandıkları plakadan kopmuştur. N1 numunesinde test itme yönünde % 3,5 ötelenme oranına, çekme yönünde % 2,75 ötelenme oranına kadar sürdürülmüştür ve deney sonunda gelişen hasarlar Şekil 4.10’da verilmektedir.

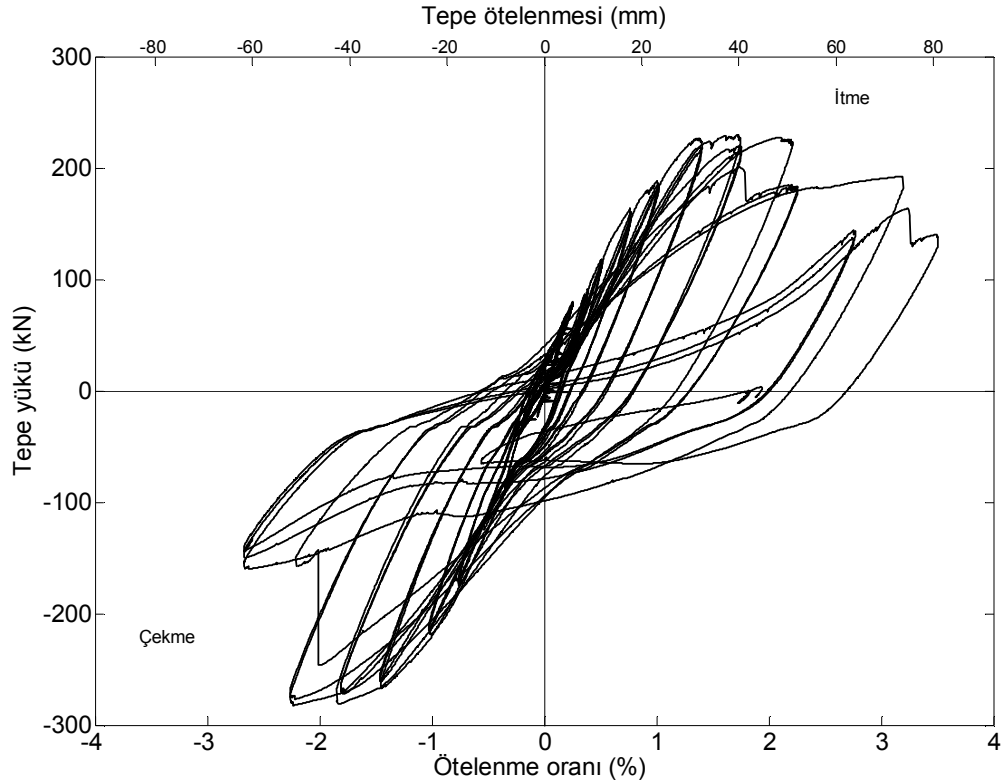


Şekil 4.9 N1 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı

N1 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği Şekil 4.11’de verilmektedir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmıştır. Kiriş alt boyuna donatılarının kaynaklandıkları plakadan kopması, çekme yönünde dayanımda % 40 oranında azalmaya sebep olmuştur.



Şekil 4.10 N1 numunesinde % 3,5 ötelenme oranındaki hasar dağılımı



Şekil 4.11 N1 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi

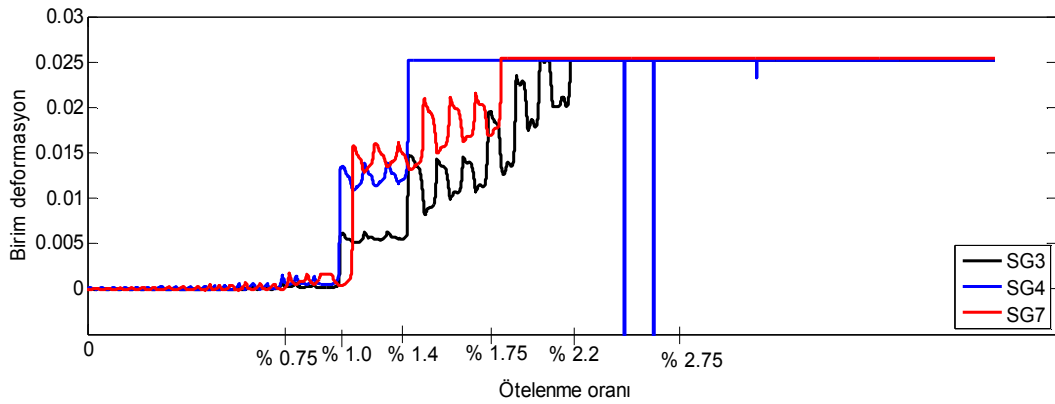
4.3 N2 Numunesi

N2 numunesi için göz önüne alınan deney parametreleri ve özellikleri Tablo 4.2’de verilmektedir.

Tablo 4.2 N2 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri

Numune no	Kaynak katsayısı (α)	L_{ab} (mm)	Elektrot tipi	Donatı sınıfı
N2	2,0	93	Bazık	B420 C

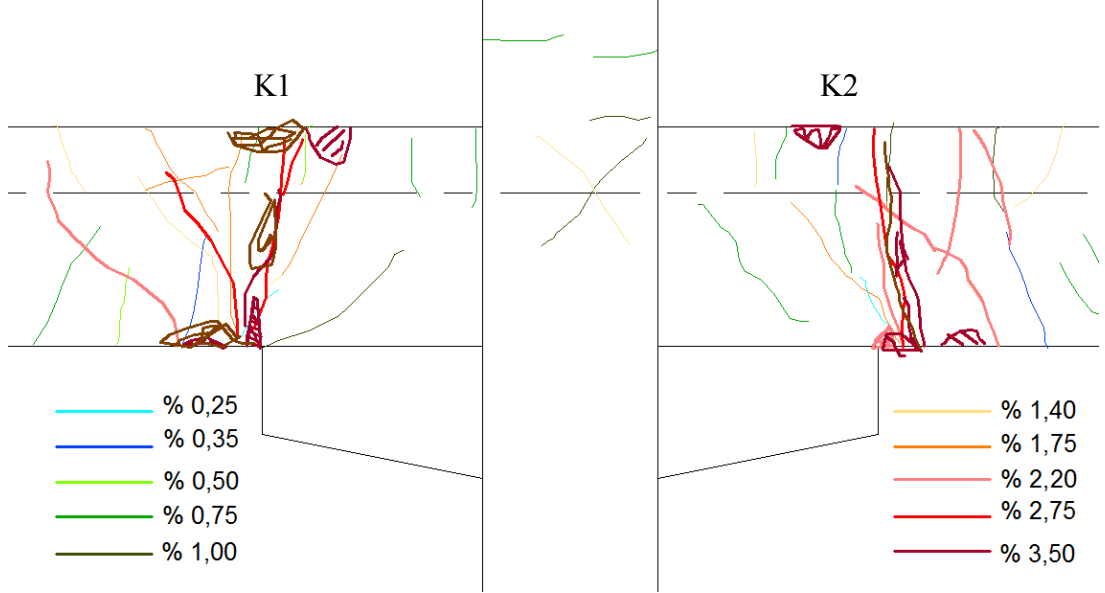
N2 numunesinde, kiriş açıklıklarında ilk eğilme çatlakları % 0,25 ötelenme oranında gözlenmiş, kısa konsol bitiminden birleşim bölgesine doğru ilerleyen ilk eğik çekme çatlakları ise % 1,4 ötelenme oranında gelişmiştir. Kiriş plakasına kaynaklı alt boyuna donatıların gerinim pulları ile ölçülen birim deformasyonları Şekil 4.12’de verilmektedir. Kiriş alt boyuna donatılarının akma birim deformasyonuna % 0,75 ötelenme oranında ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 4.12 N2 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları

N2 numunesinin deney süresince gelişen hasar dağılımı Şekil 4.13’de verilmektedir. % 2.75 ötelenme oranında K1 ve K2 kirişlerinde tamamlayıcı betonda ezilme ve bağlantının üst kısımlarında kirişte kesme çatlakları meydana gelmiştir. K1 kirişinde, *aderans bozulma boyu* içerisindeki bölgede donatıda kopma meydana gelmemiş; K2 kirişinde ise, *aderans bozulma boyu* içerisindeki bölgede kılıfın sıyrılması ile % 3,5 ötelenme oranında kiriş alt boyuna donatısı kaynağın bittiği

noktadan kopmuştur. Numunede % 2,75 ve % 5,0 ötelenme oranlarında gelişen hasarlar Şekil 4.14 ve 4.15’de verilmektedir.



Şekil 4.13 N2 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı



Şekil 4.14 N2 numunesinin % 2,75 ötelenme oranındaki hasar durumu



Şekil 4.15 N2 numunesinin % 5,0 ötelenme oranındaki hasar durumu

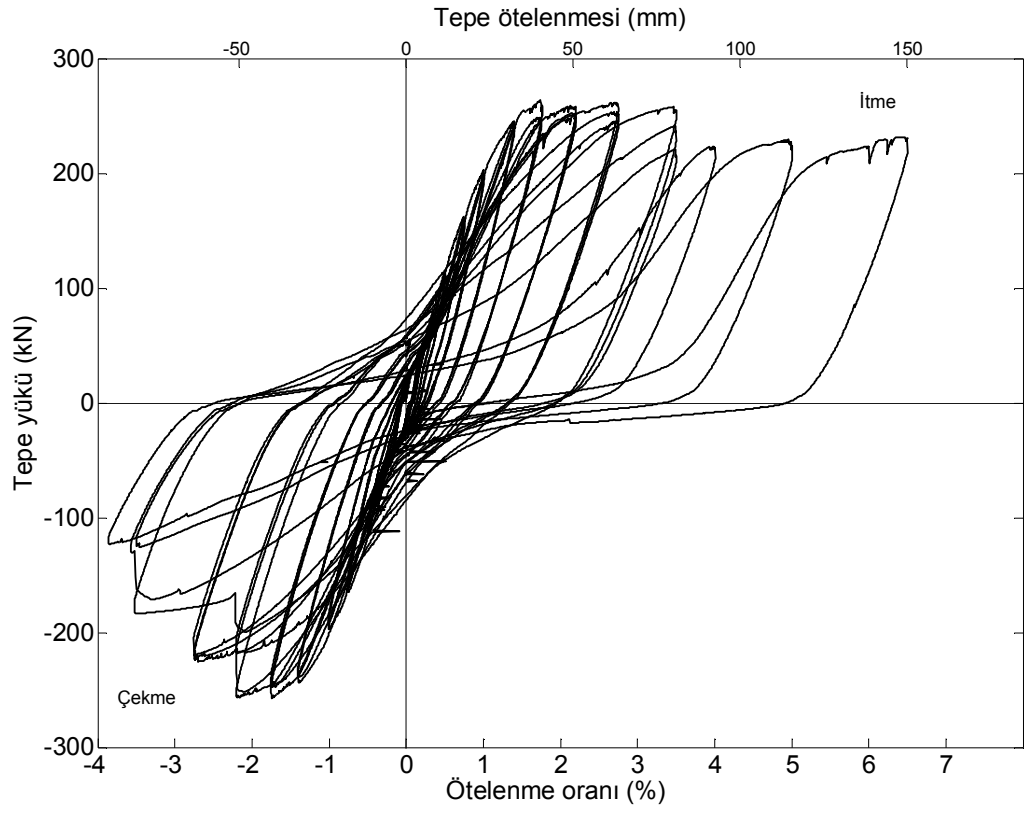
N2 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği Şekil 4.16’da verilmiştir. Test sırasında numuneye tam çevrim olarak uygulanan en büyük ötelenme oranı itme yönünde % 4,0; çekme yönünde ise % 3,8 olarak gerçekleşmiştir. İtme yönünde % 3,5 ötelenme oranından sonra % 4 bir adet tam çevrim ve % 5, % 6,25 ötelenme oranları ise bir adet yarım çevrim olarak uygulanmıştır. Çekme yönünde K1 kirişinin boyuna donatısının kopması ile, % 3,5 ötelenme oranı sonrasında dayanımda % 45 oranında azalma gözlenmiştir. İtme yönünde ise % 3,5 ötelenme oranında K1 kirişinde belirgin donatı burkulması sonucu itme yönünde % 20 dayanım azalması gözlenmiştir. Numunenin K1 kirişi ile birleşim ara yüzündeki kesit dönmesi hesaplanarak, moment-kesit dönmesi ilişkisi Şekil 4.17’de verilmektedir.

4.4 N3 Numunesi

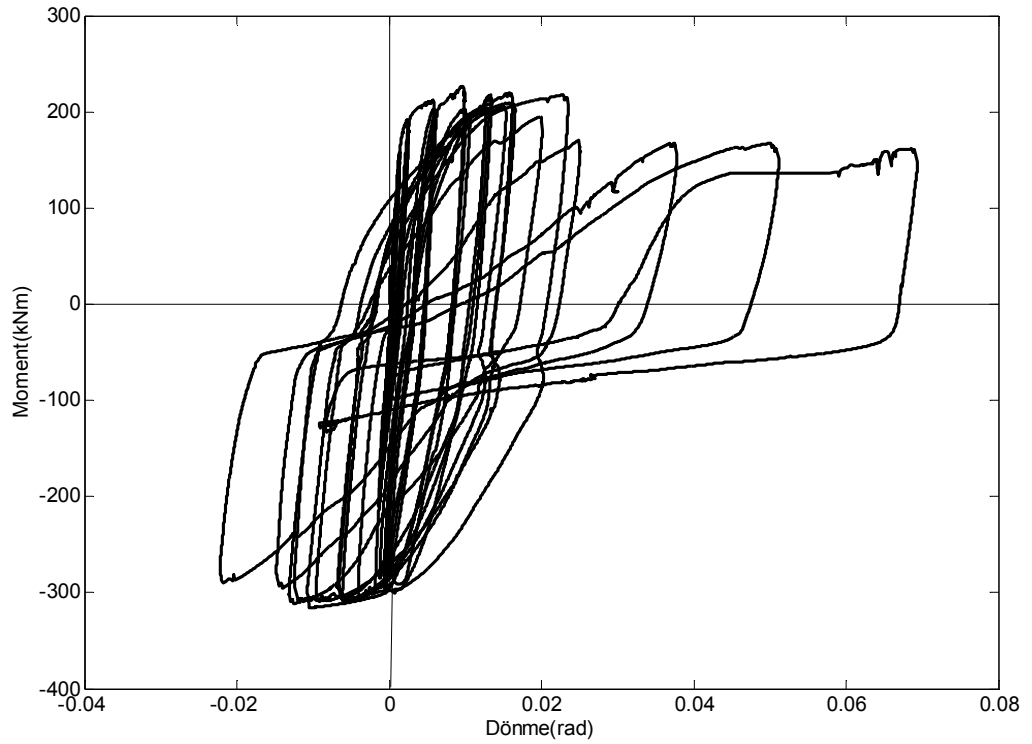
N3 numunesi için göz önüne alınan deney parametreleri ve özellikleri Tablo 4.3’de verilmektedir.

Tablo 4.3 N3 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri

Numune no	Kaynak katsayısı (α)	L_{ab} (mm)	Elektrot tipi	Donatı sınıfı
N3	1,2	-	Rutil	B420 C

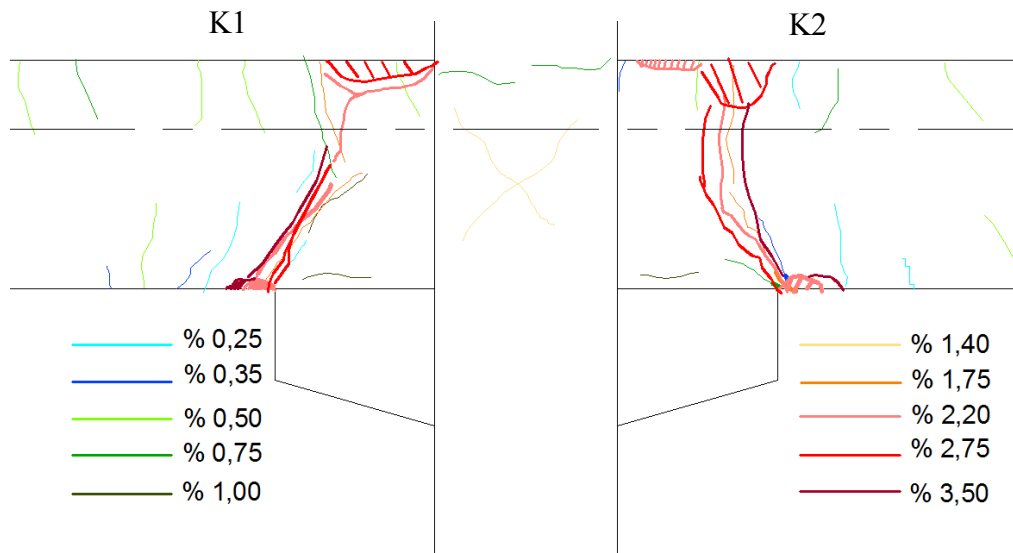


Şekil 4.16 N2 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi

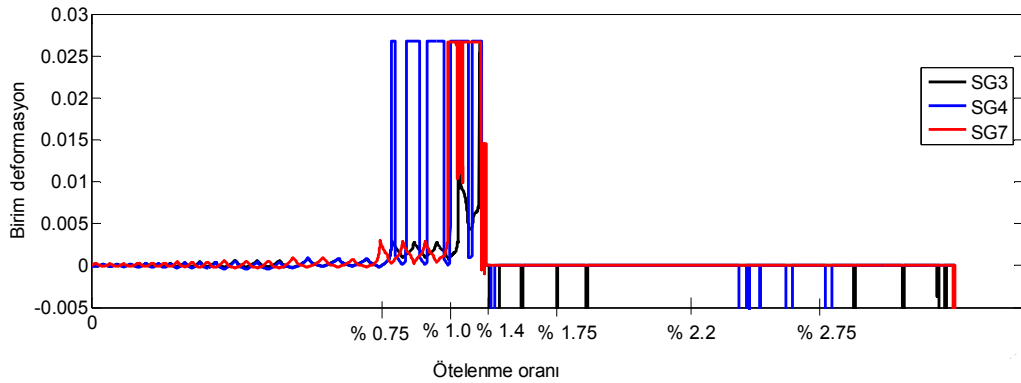


Şekil 4.17 N2 numunesinin moment-kesit dönmesi ilişkisi

Prefabrik N3 numunesinde hasarlar kısa konsol yüzünden itibaren kirişte yoğunlaşmıştır. Deney süresince gelişen numune hasarları Şekil 4.18’de verilmiştir. Numune davranışı % 0.20 ötelenme oranına kadar elastik düzeyde kalmıştır. % 0,25 ötelenme oranında kirişlerde kılcal düzeyde çatlaklar gözlenmiştir. % 0,75 ötelenme oranında kiriş alt boyuna donatıları akma birim deformasyonuna ulaşmıştır. Kiriş boyuna donatılarının birim deformasyonlarının deney süresince değişimi Şekil 4.19’da verilmektedir. Kısa konsol üstünde birleşime doğru ilerleyen eğik çekme çatlakları % 1,4 ötelenme oranında gelişmiştir. Bununla beraber, kolon-kiriş birleşiminde diyagonal çatlaklar da % 1,4 ötelenme oranında oluşmuştur. % 1,75 ötelenme oranında, kısa konsol üstünde eğik çekme çatlakları yayılma göstermiştir. % 2,2 ötelenme oranının 2. çevriminde, çekme yönünde K2 kiriş alt boyuna donatısı kaynaklandığı plakadan kopmuştur.

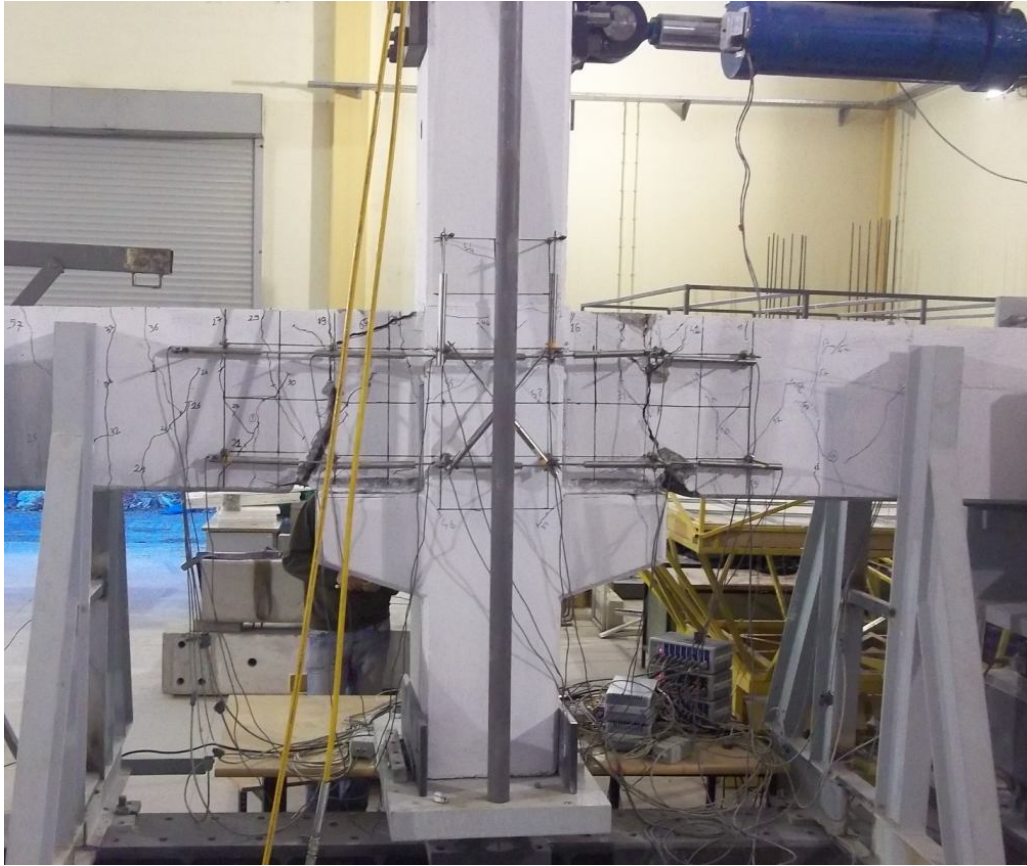


Şekil 4.18 N3 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı



Şekil 4.19 N3 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları

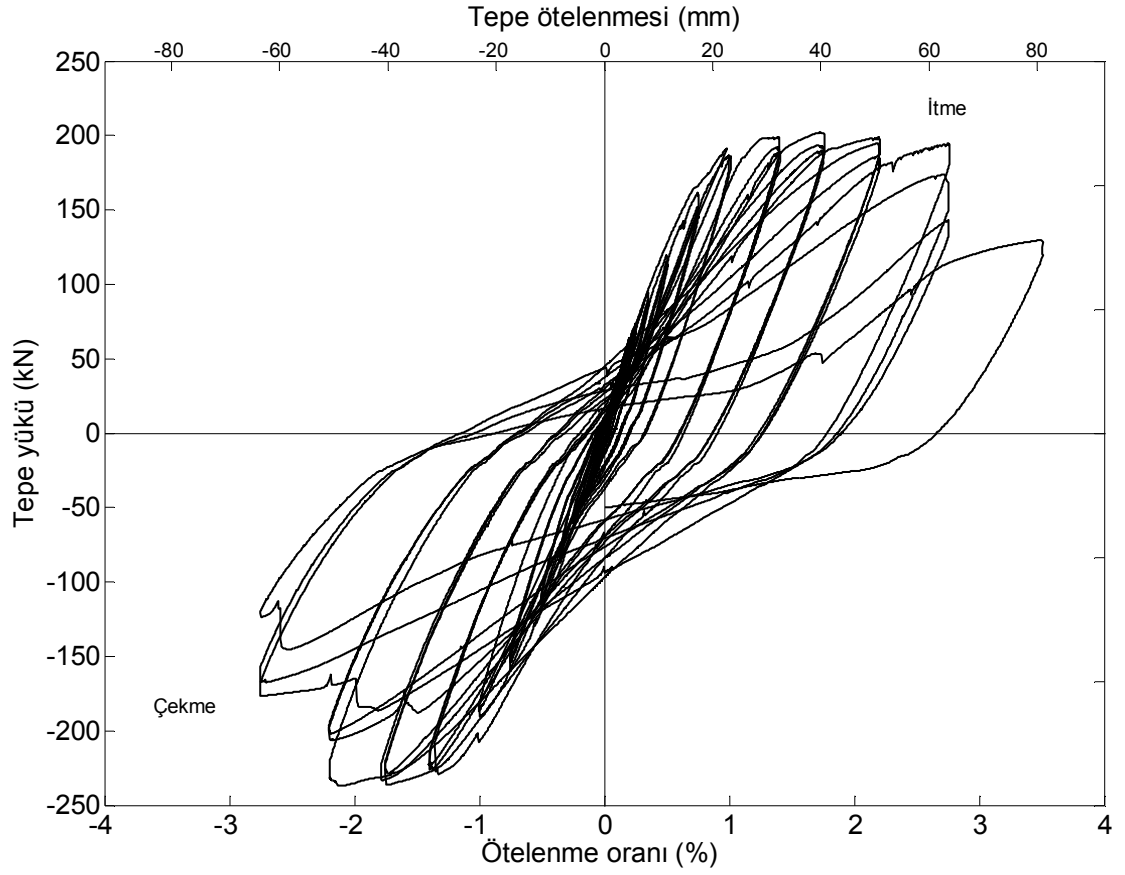
Numunede % 2,2 ve % 3,5 ötelenme oranlarındaki hasar dağılımı Şekil 4.20 ve 4.21’de verilmektedir. N2 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir. Maksimum tepe yüküne %2,2 ötelenme oranında ulaşılmıştır. Test sırasında numuneye uygulanan en büyük ötelenme oranı itme yönünde % 3,75; çekme yönünde ise % 2,75 olarak gerçekleşmiştir. Çekme yönünde % 2,2 ötelenme oranı sonrasında dayanımda azalma meydana gelmiştir. K1 kirişinde boyuna donatının kopması ile % 2,75 ötelenme oranında maksimum tepe yükünde yaklaşık % 50 oranında azalma gözlenmiştir. Numunenin K1 kirişi ile birleşim ara yüzündeki kesit dönmesi hesaplanarak, moment-kesit dönmesi ilişkisi Şekil 4.23’de verilmektedir.



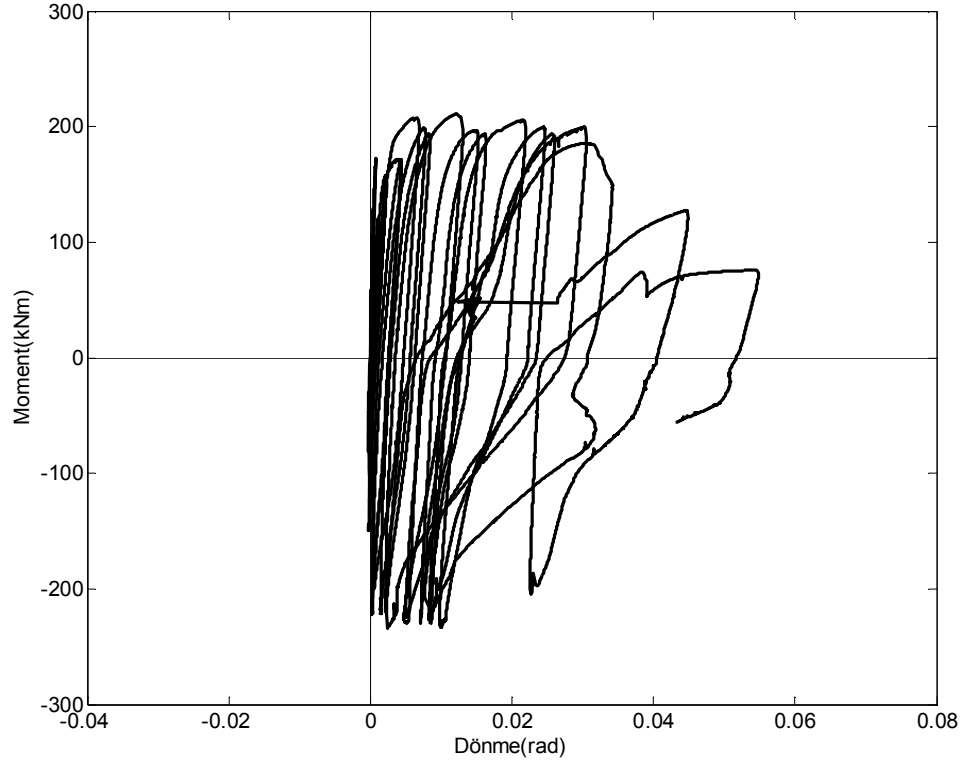
Şekil 4.20 N3 numunesinin % 2,20 ötelenme oranındaki hasar durumu



Şekil 4.21 N3 numunesinin % 3,5 ötelenme oranındaki hasar durumu



Şekil 4.22 N3 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi



Şekil 4.23 N3 numunesinin moment-kesit dönmesi ilişkisi

4.5 N4 Numunesi

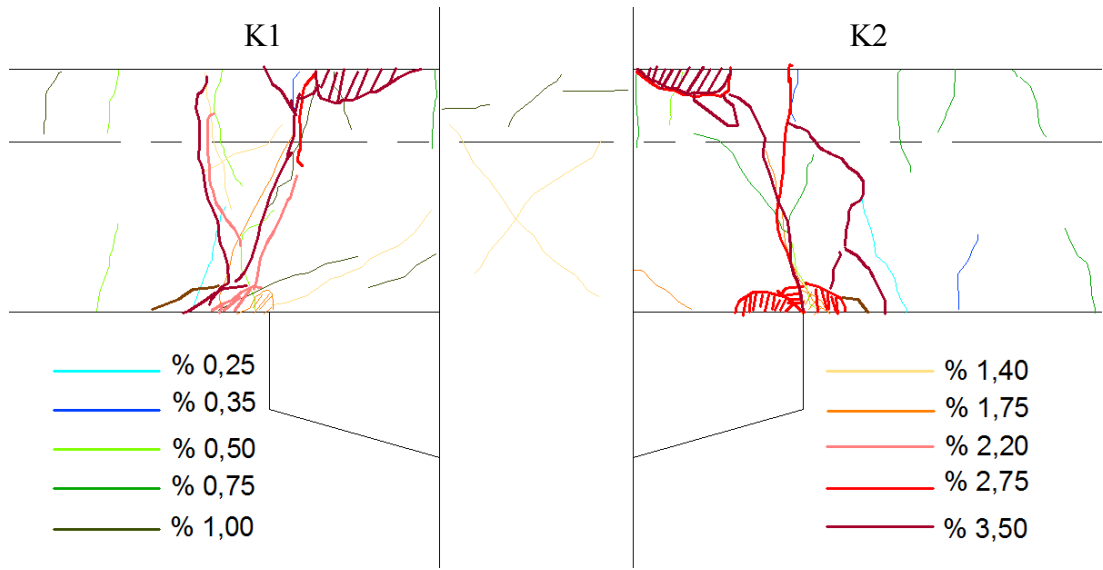
N4 numunesi için göz önüne alınan deney parametreleri ve özellikleri Tablo 4.4’de verilmektedir.

Tablo 4.4 N4 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri

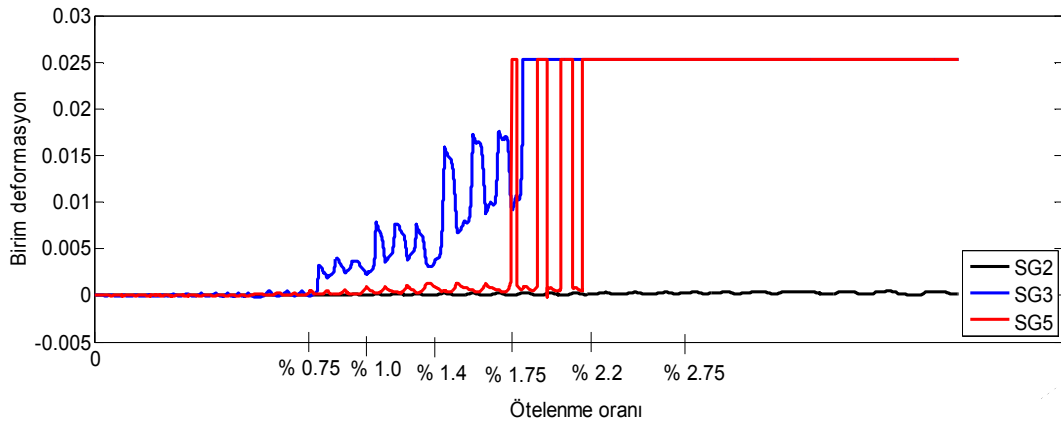
Numune no	Kaynak katsayısı (α)	L_{ab} (mm)	Elektrot tipi	Donatı sınıfı
N4	1,2	-	Bazık	B420 C

N4 numunesinde, kiriş açıklıklarında ilk eğilme çatlakları % 0,25 ötelenme oranında gözlenmiş, kısa konsol bitiminden birleşim bölgesine doğru ilerleyen ilk eğik çekme çatlakları % 1,0 ötelenme oranında gelişmiştir. N4 numunesinde deney süresince gelişen hasarlar Şekil 4.24’de verilmiştir. Kiriş alt boyuna donatılarının akma birim deformasyonuna % 0,75 ötelenme oranında ulaştığı belirlenmiştir. Kiriş plakasına kaynaklı alt boyuna donatıların gerinim pulları ile ölçülen birim

deformasyonları Şekil 4.25’de verilmektedir. N4 numunesinde kolon-kiriş birleşimindeki ilk diyagonal çatlaklar % 1,4 ötelenme oranında oluşmuştur. K1 kirişinde % 2,75 ötelenme oranında kısa konsol bitiminden itibaren kabuk betonunda dökülme ve bağlantının üst kısmında kirişte kesme çatlakları belirginleşmiştir. Ayrıca kiriş alt donatısında burkulma gözlenmiş, K2 kirişinin alt boyuna donatıları % 3,5 ötelenme oranının ilk çevriminde, kopma birim deformasyonuna ulaşarak kaynaklandıkları plakadan kopmuştur. % 2,2 ve % 4,0 ötelenme oranlarındaki hasar dağılımı Şekil 4.26 ve 4.27’de verilmektedir.

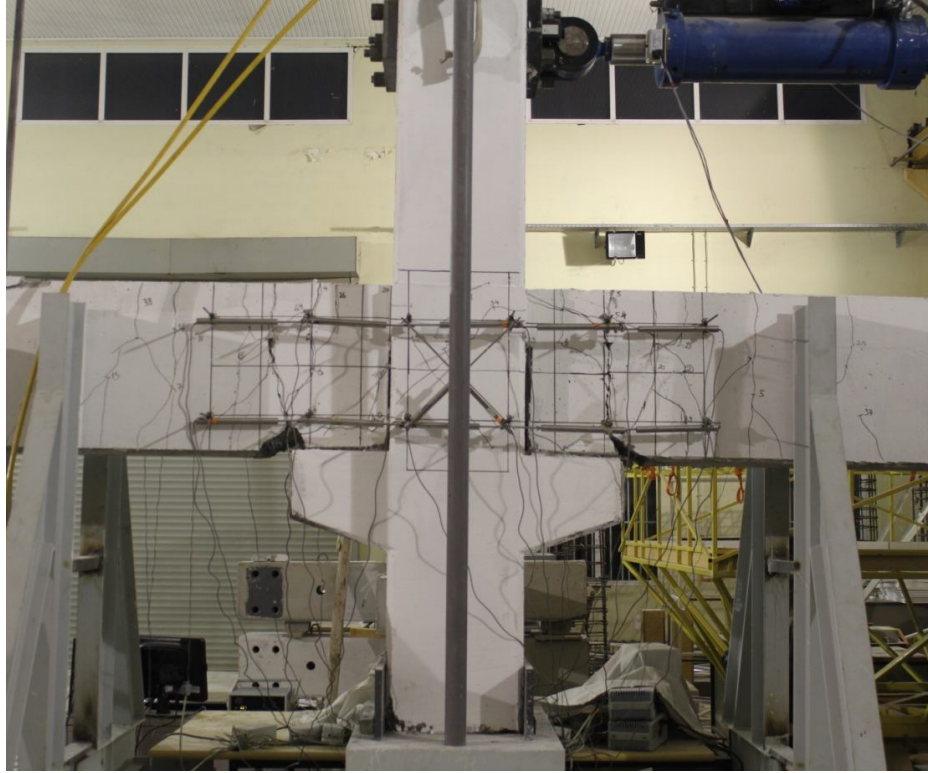


Şekil 4.24 N4 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı



Şekil 4.25 N4 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları

N4 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği Şekil 4.28’de verilmektedir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmıştır. % 4,0 ötelenme oranında kiriş alt boyuna donatılarının kaynaklandıkları plakadan kopması, çekme yönündeki dayanımda % 40 oranında azalmaya sebep olmuştur.



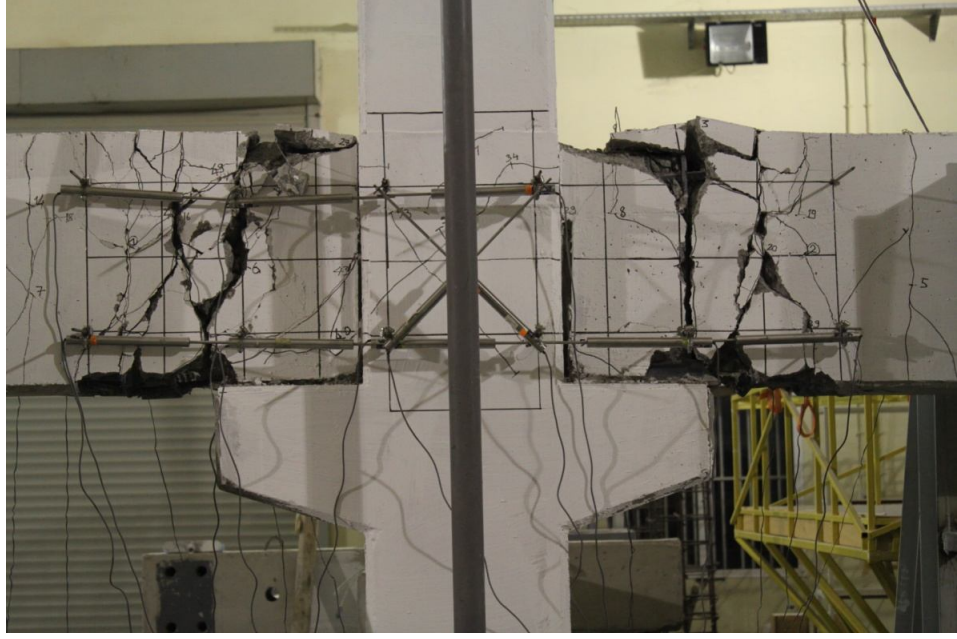
Şekil 4.26 N4 numunesinin % 2,20 ötelenme oranındaki hasar durumu

4.6 N5 Numunesi

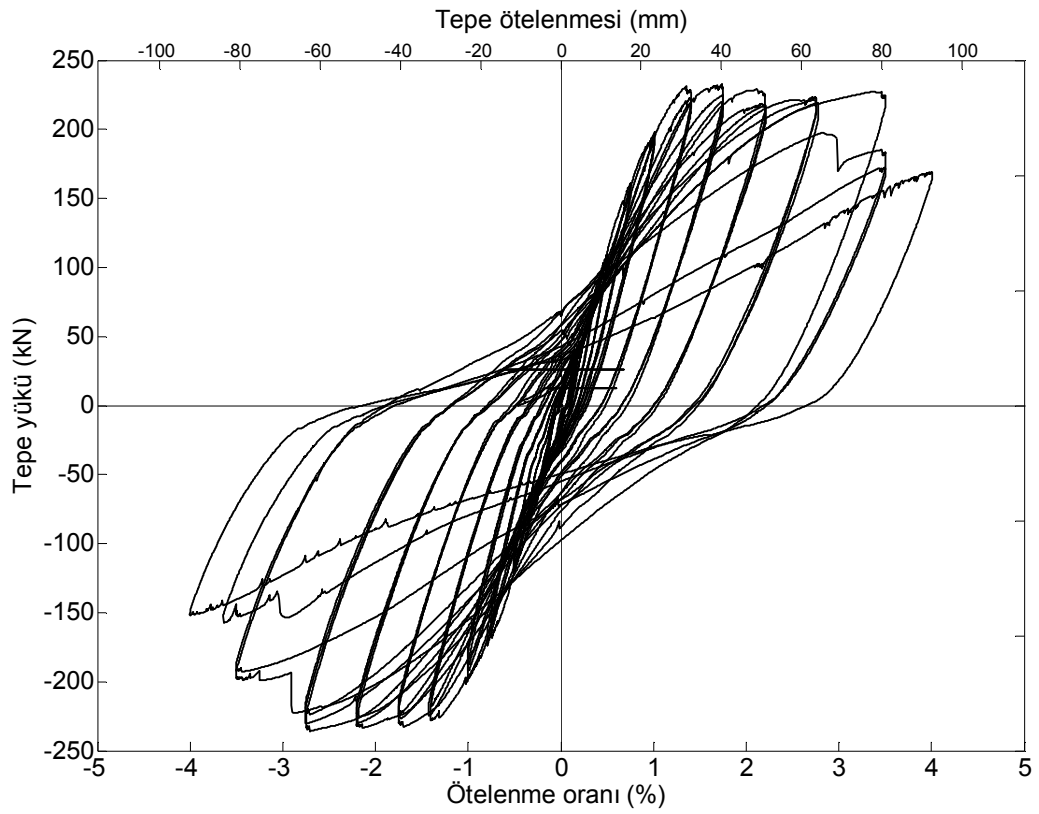
N5 numunesi için göz önüne alınan deney parametreleri ve özellikleri Tablo 4.5’de verilmektedir.

Tablo 4.5 N5 numunesinde göz önüne alınan deney parametreleri

Numune no	Kaynak katsayısı (α)	L_{ab} (mm)	Elektrot tipi	Donatı sınıfı
N5	1,2	180,0	Bazık	B420 C



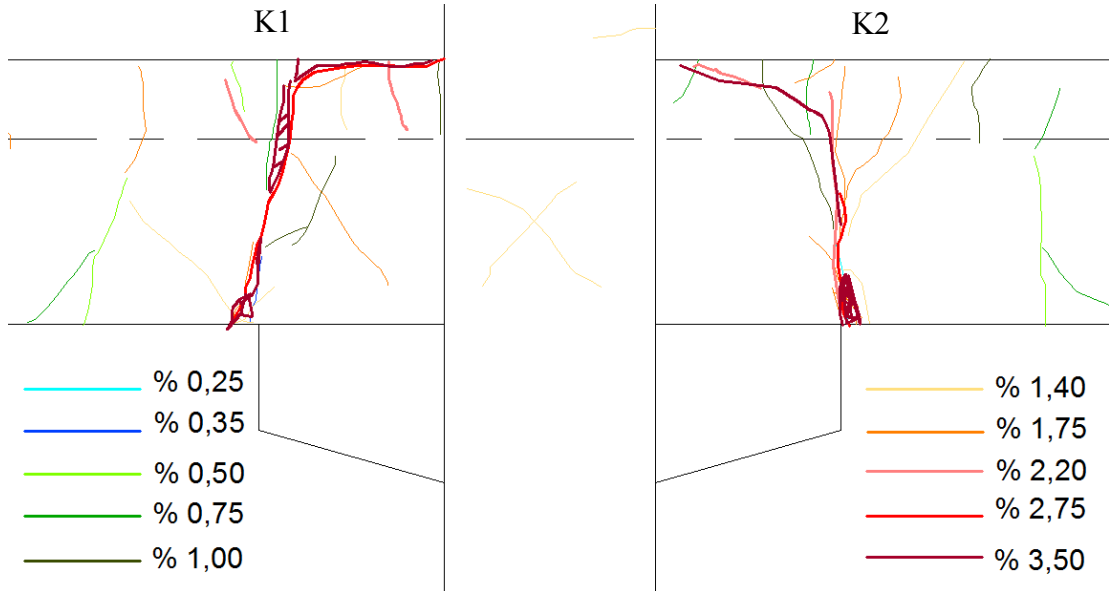
Şekil 4.27 N4 numunesinin % 4,0 ötelenme oranındaki hasar durumu



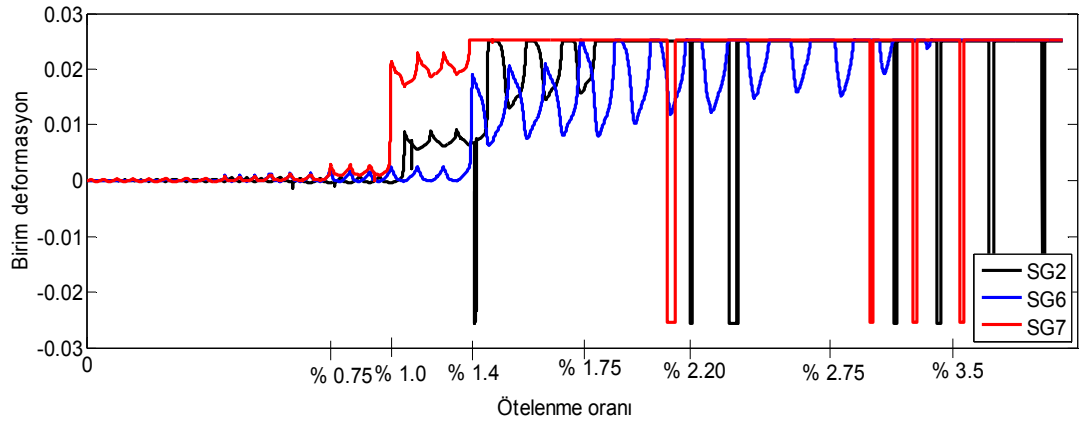
Şekil 4.28 N4 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi

N5 numunesinde deney süresince gelişen numune hasarları Şekil 4.29'da verilmiştir. N5 numunesi, N1-N4 prefabrik numunelerinin testlerinde gelişen hasar modları dikkate alınarak üretilmiştir. Numune davranışı % 0,35 ötelenme oranına kadar elastik düzeyde kalmıştır. % 0,35 ötelenme oranında kirişlerde kılcal düzeyde çatlaklar gözlenmiştir. % 0,75 ötelenme oranında kiriş alt boyuna donatıları akma birim deformasyonuna ulaşmıştır (Şekil 4.30). Etriye aralığının sıklaştırılarak, orta boyuna donatıda çiroz kullanımı ile kiriş alt donatılarında burkulmanın gelişmesi önlenmiştir.

Kolon-kiriş birleşiminde kılcal diyagonal çatlaklar % 1,4 ötelenme oranında oluşmuştur. % 2,2 ötelenme oranında K2 kirişinde kısa konsol üstünde kabuk betonunda ezilme meydana gelmiştir. % 2,75 ötelenme oranında K1 kirişi üstünde tamamlayıcı betonda ezilmeler gelişmiştir. Numunede % 2,75 ve % 3,5 ötelenme oranlarındaki hasar dağılımı Şekil 4.31 ve 4.32'de verilmektedir. N5 numunesinde, kaynaklı bağlantının üst kısmında kabuk betonundaki dökülme sargı etkisindeki artış ile önlenmiştir. K1 kirişinde % 3,5 ötelenme oranında kiriş alt donatısı kopma birim deformasyonuna ulaşmıştır.

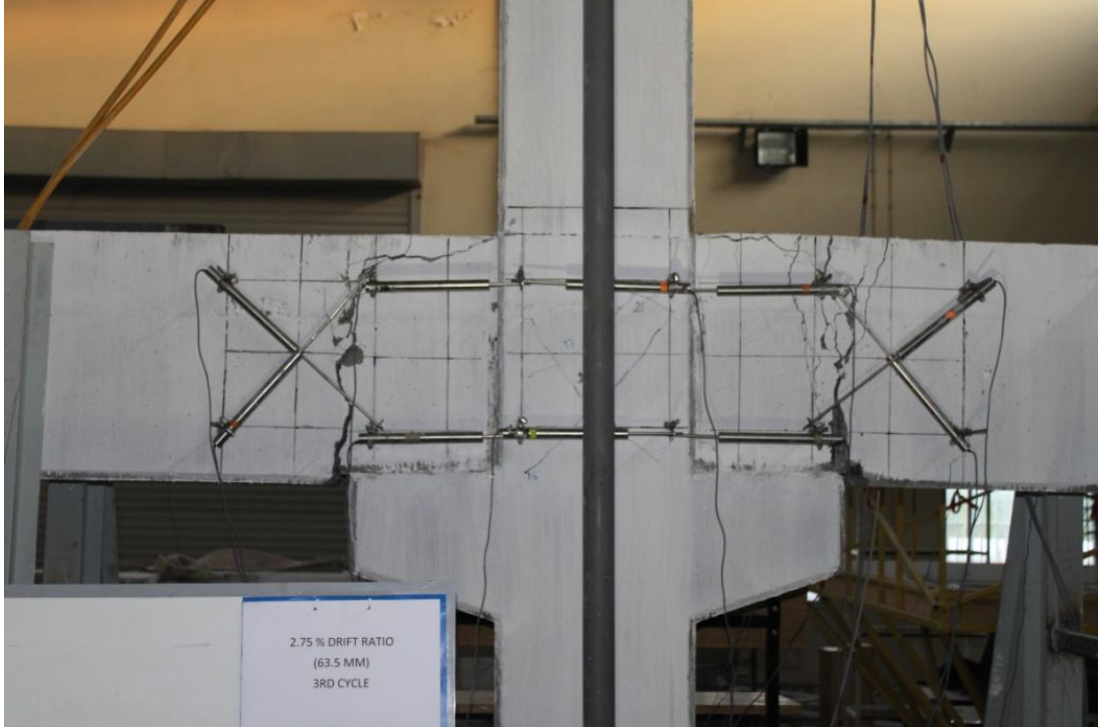


Şekil 4.29 N5 numunesinde deney süresince gelişen hasar dağılımı

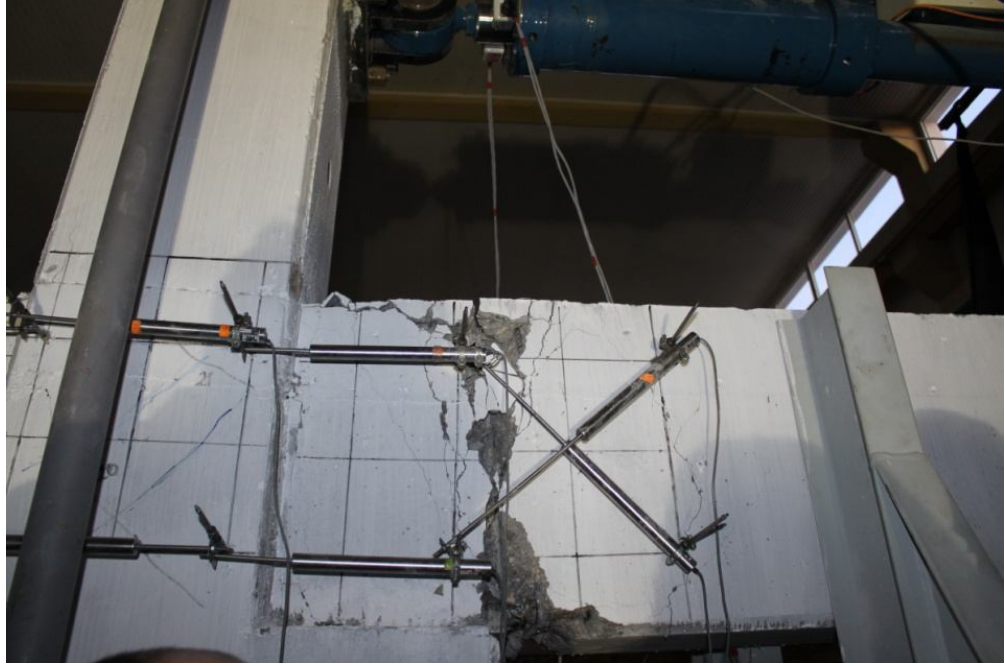


Şekil 4.30 N5 numunesinde kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları

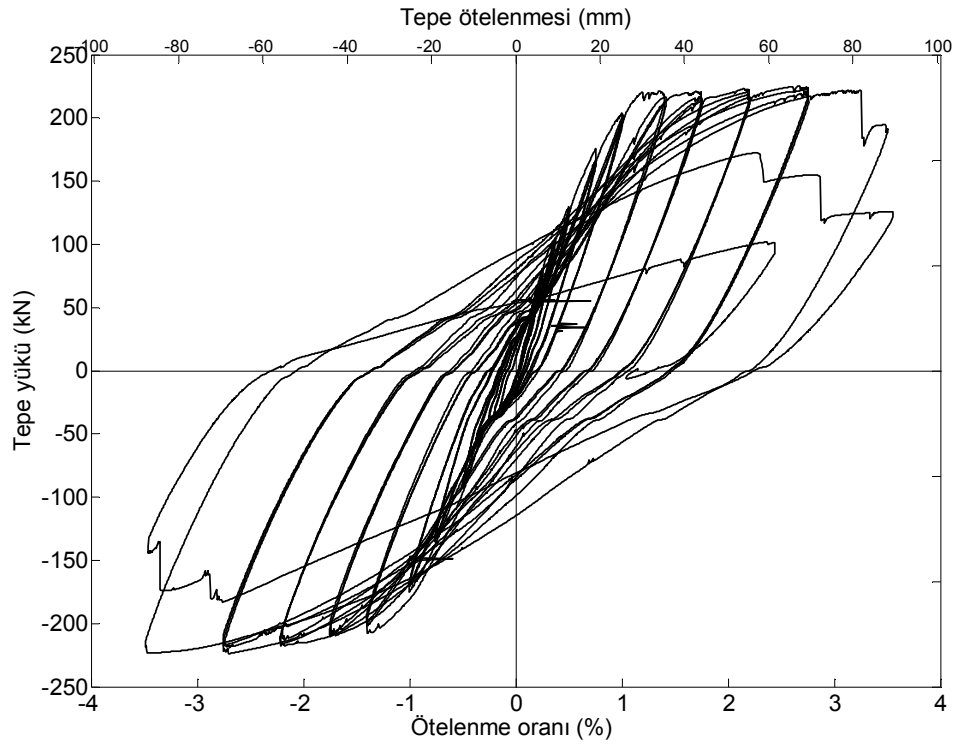
N5 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği Şekil 4.33’de verilmektedir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmıştır. % 3,5 ötelenme oranının ikinci çevrimine kadar dayanımda azalma gözlenmemiştir. Bununla beraber, kiriş alt boyuna donatısının kopması ile çevrim içi dayanım azalması yaklaşık % 35’dir.



Şekil 4.31 N5 numunesinin % 2,75 ötelenme oranındaki hasar durumu



Şekil 4.32 N5 numunesinin % 3,5 ötelenme oranındaki hasar durumu



Şekil 4.33 N5 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı ilişkisi

BÖLÜM BEŞ

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

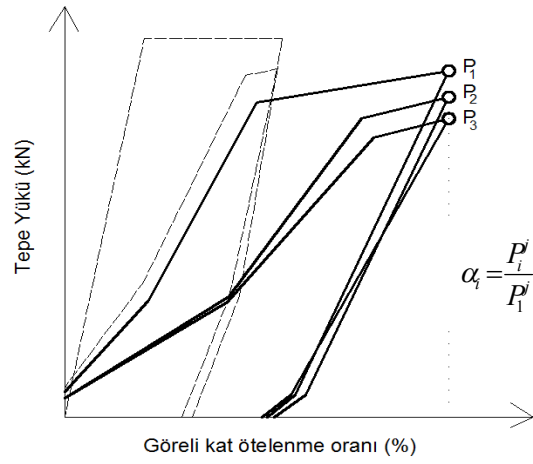
5.1 Giriş

Bu bölümde monolitik ve prefabrik kolon - kiriş birleşim numunelerinin deney sonuçları, dayanım, rijitlik, göçme modu, süneklik ve enerji tüketimi bakımından değerlendirilmiştir. Değerlendirmede moment çerçevelerinin yapısal testleri için kabul kriterlerini öneren ACI 374.1-05 (2005) ve FEMA P-795'te (2011) yer alan *Bileşen Eşdeğerlik Yöntemi* esas alınmıştır. N1 ve N2 numuneleri için kesme açıklığı/ faydalı yükseklik (a/d) oranı 3,0'dür. N3, N4 ve N5 numunelerinin kesme açıklığı/ faydalı yükseklik (a/d) oranları 3,15'dir. Buna göre birleşim numuneleri, kesme açıklığı/ faydalı yükseklik (a/d) oranlarına göre iki grupta değerlendirilmiştir.

5.2 Dayanım

Monolitik ve prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin dayanımı, dayanım zarf eğrilerinin ve çevrimsel dayanım azalmasının değerlendirilmesi olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Monolitik ve prefabrik birleşim numunelerinin tepe yükü-görelî kat ötelenmesi ilişkileri, her ötelenme oranının ilk çevrimindeki maksimum yük değerlerinin birleştirilmesi ile elde edilmiştir.

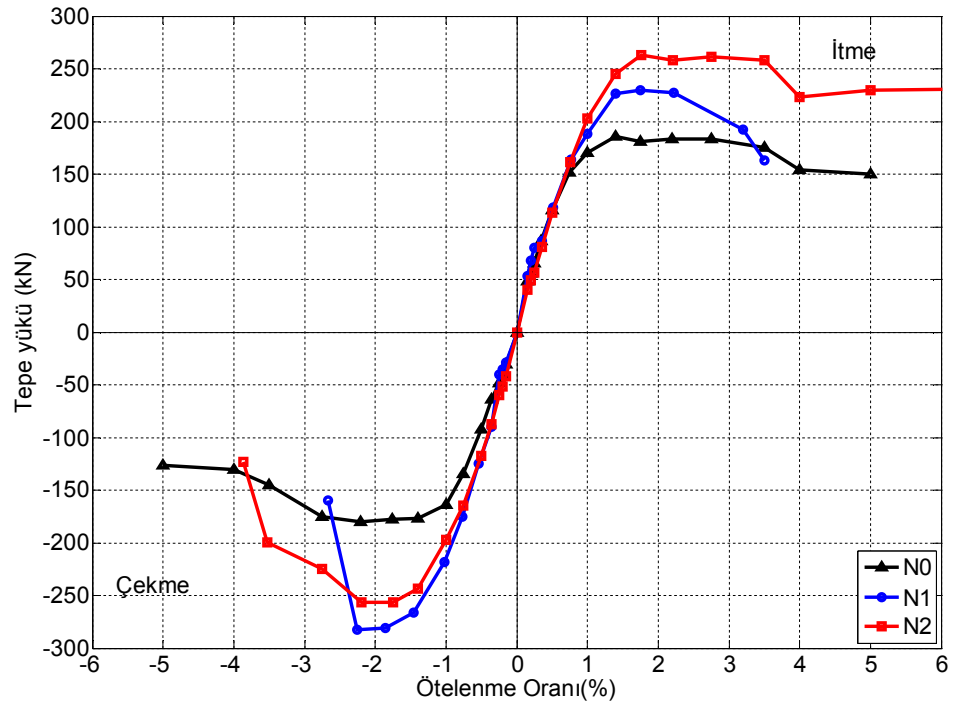
Çevrimsel dayanım azalması, yapısal bileşenlerde veya sistemlerde tersinir-tekrarlı yükleme durumunda oluşan elastik olmayan yer değiştirmelere bağlı olarak aynı ötelenme oranında karşılaşılan yanal dayanımdaki azalmayı ifade eder (FEMA 440). Şekil 5.1'de aynı görelî kat ötelenme oranında tekrarlı çevrimsel yüklemeye maruz sistem için çevrimsel dayanım oranı (α_i) tanımlanmıştır. Buna göre çevrimsel dayanım oranı (α_i); j no'lu görelî kat ötelenme oranının i no'lu çevrimindeki yük değerinin, aynı görelî kat ötelenme oranının ilk çevrimindeki yük değerine oranı olarak tanımlanmıştır (İm ve diğer.,2013). Monolitik ve prefabrik numuneler için, α_3 : 3. çevrimde ulaşılan tepe yükünün, ilk çevrimde ulaşılan tepe yüküne oranları verilmiştir.



Şekil 5.1 Çevrimsel dayanım oranının (α_i) tanımlanması

5.2.1 N0-N2 Numuneleri

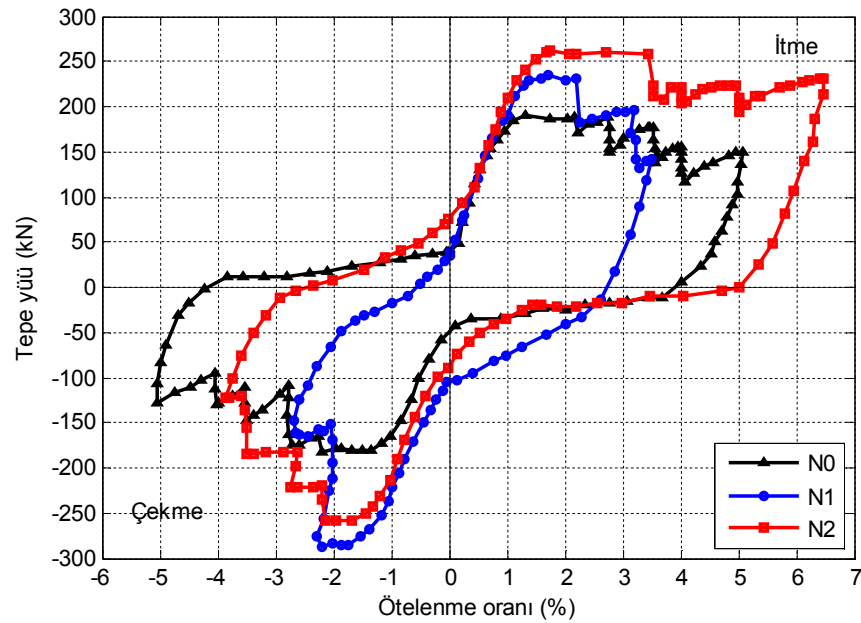
Şekil 5.2’de N0 monolitik birleşimi ile N1 ve N2 numunelerinin itme ve çekme yönleri için elde edilen dayanım zarfı eğrileri verilmektedir.



Şekil 5.2 N0, N1 ve N2 birleşim numunelerinin dayanım zarfı eğrileri

N0 numunesinde ilk akmaya % 0,7 ötelenme oranında, maksimum dayanıma ise % 1,75 ötelenme oranında ulaşılmıştır. İleri ötelenme seviyesindeki davranışın gözlenmesi amacıyla N0 numunesinin testi % 5,0 ötelenme oranına kadar devam ettirilmiştir. N1 numunesinde, ilk akmaya % 0,7 ötelenme oranında, maksimum dayanıma ise % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmıştır. N2 numunesinde ilk akmaya % 1,0 ötelenme oranında, maksimum dayanıma ise % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmıştır. N1 ve N2 numunelerinin her ikisinde de çekme yönündeki yükleme sırasında kiriş boyuna donatısında kopma gözlenmiştir. Bu sebeple testler itme ve çekme yönlerinde farklı ötelenme oranlarına kadar sürdürülmüştür. N1 numunesinde uygulanan en büyük ötelenme oranı itme yönünde % 3,5; çekme yönünde ise % 2,75'tir. Aderans bozulması bulunan N2 numunesinde uygulanan en büyük ötelenme oranı ise itme yönünde % 5 ve çekme yönünde % 3,8 olarak gerçekleşmiştir. N2 numunesinde N1 numunesine göre dayanımda bir miktar artış sağlanmıştır.

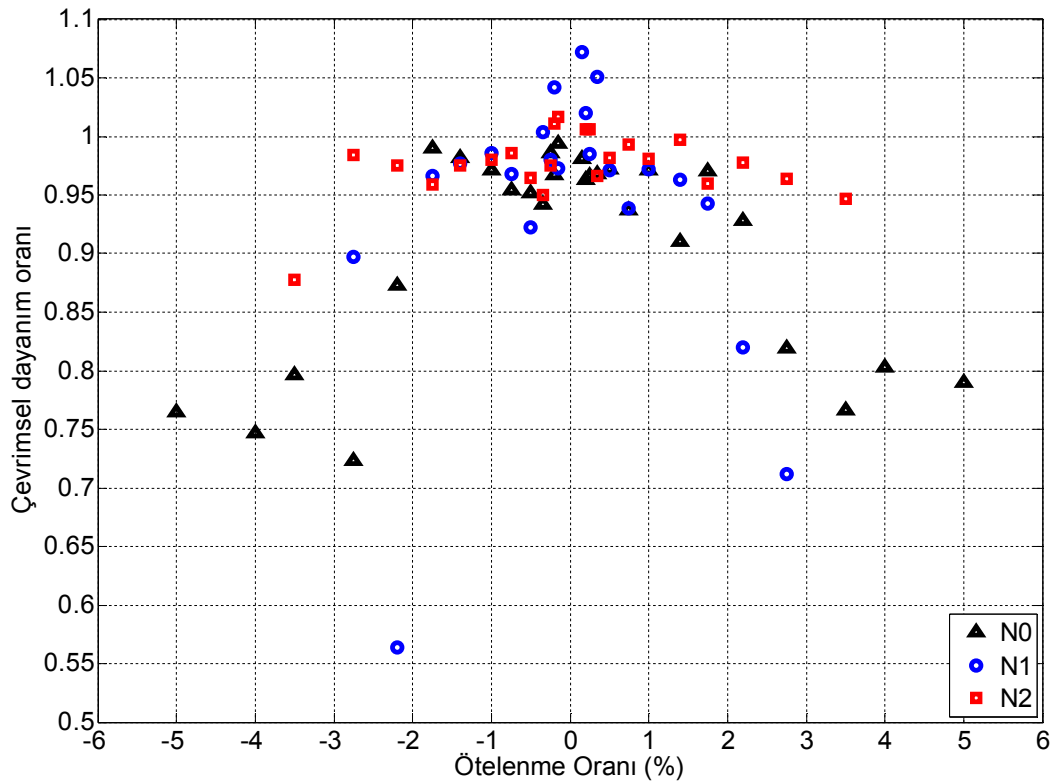
Şekil 5.3'de N0, N1 ve N2 numunelerinin histeretik zarf eğrileri verilmektedir. Birleşim numunelerinin deney süresince son göreceli kat ötelenme değerleri göçme moduna bağlı olarak farklılık gösterdiğinden histeretik zarf eğrilerinde değişim bulunmaktadır. Buna göre N0 birleşiminde kiriş boyuna donatılarındaki aderans kaymasına bağlı olarak çevrim sıkışması prefabrik numunelere göre daha belirgindir.



Şekil 5.3 N0, N1 ve N2 birleşim numunelerinin histeretik zarf eğrilerinin kıyaslanması

Tepe yükü-tepe yer değiştirmesi grafiklerinde gelişen çevrim sıkışması ile numunelerdeki enerji tüketimi azalmaktadır. N2 numunesinde itme yönünde % 3,5 ötelenme oranı sonrasında kiriş alt boyuna donatısında burkulma belirgin hale gelmiş, bağlantının bulunduğu bölgenin üstünde kesme hasarları yoğunlaşmıştır. Bu durum, beraberinde N2 numunesinin histeretik eğrilerinde çevrim sıkışmasına neden olmuştur.

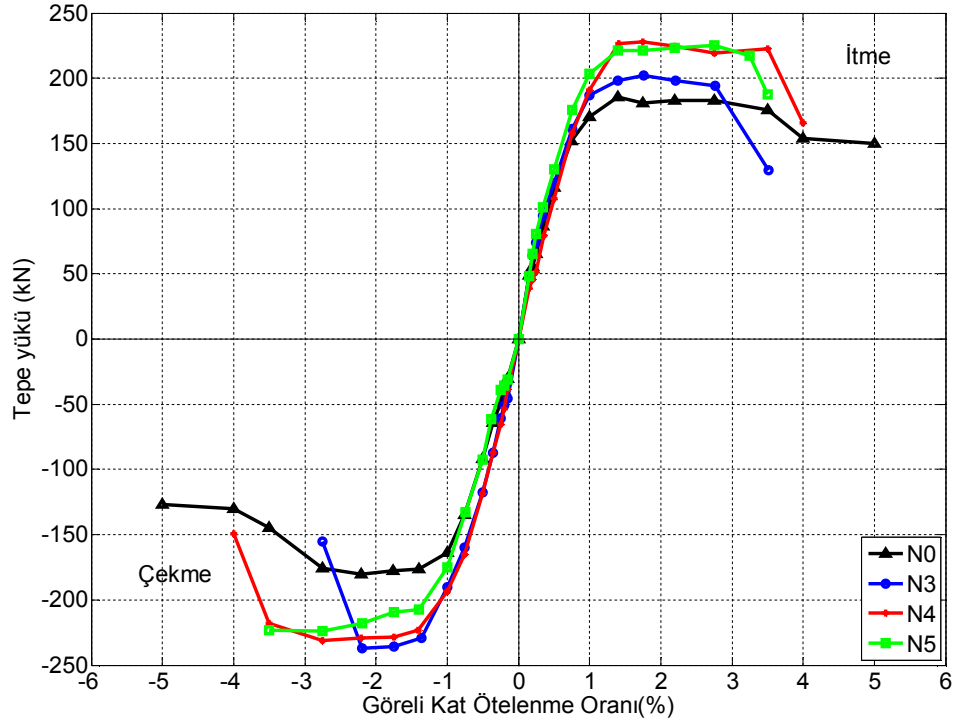
N0, N1 ve N2 numunelerinde, 3. çevrim için çevrimsel dayanım oranları (α_3) hesaplanarak Şekil 5.4’de verilmektedir. % 2,2 ötelenme oranına kadar numunelerde çevrimsel dayanım oranı 1,0 civarındadır. N0 numunesinde, % 3,5 ötelenme oranına kadar kademeli bir azalma göstermiştir. N1 numunesinde % 2,2 ötelenme oranında çevrimsel dayanım oranı 0,57’dir. Aderans bozulması bulunan N2 numunesinde ise çevrimsel dayanım azalması diğer numunelere göre daha azdır.



Şekil 5.4 N0, N1 ve N2 numuneleri için 3. yükleme çevrimlerinde çevrimsel dayanım oranları (α_3)

5.2.2. N0,N3-N5 Numuneleri

Şekil 5.5’de N0 monolitik birleşimi ile N3, N4 ve N5 numunelerinin itme ve çekme yönleri için elde edilen dayanım zarfı eğrileri verilmektedir.



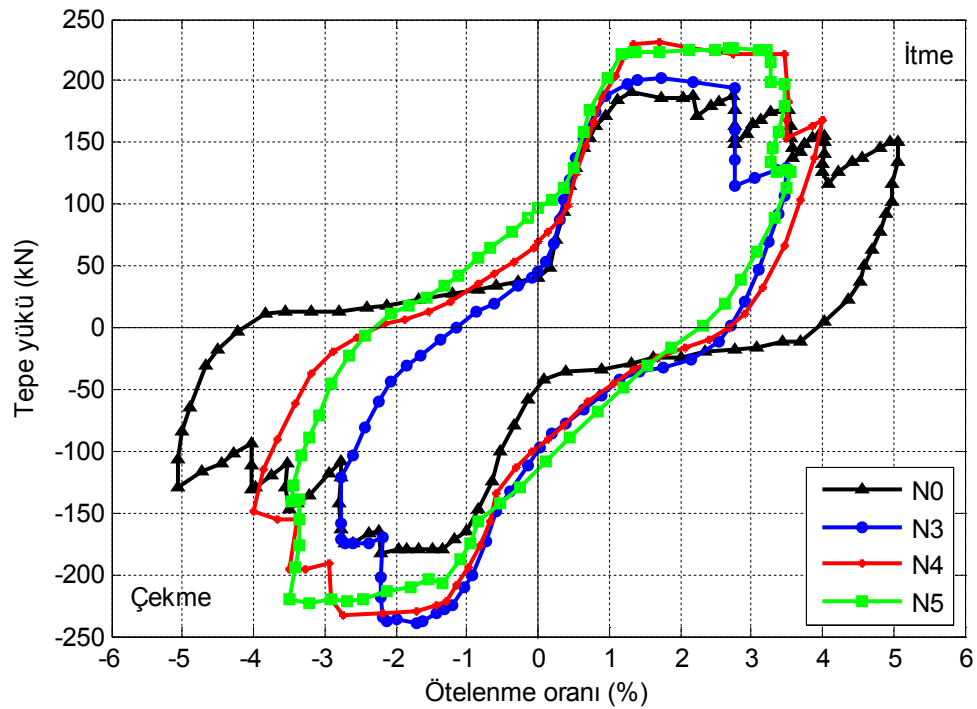
Şekil 5.5 N0, N3-N5 birleşim numunelerinin dayanım zarfı eğrileri

N3 numunesinde, ilk akmaya % 0,7 ötelenme oranında, maksimum dayanıma ise % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmıştır. N3 birleşim numunesinde, donatı-plaka ve plaka-plaka kaynaklarında rutil elektrot kullanılmıştır. Bu numunede kiriş alt boyuna donatısının, plaka ile kaynaklandığı noktadan kopmasının % 2,2 görelî kat ötelenme seviyesinde gözlenmesinin ardından, % 2,75 ötelenme oranında dayanımda % 35 azalma meydana gelmiştir.

N4 numunesinde, ilk akmaya % 0,9 ötelenme oranında, maksimum dayanıma ise % 1,75 ötelenme oranında ulaşılmıştır. N4 numunesinde donatı-plaka ve plaka-plaka kaynaklarında bazik elektrot kullanılmıştır. N4 numunesinde donatının kopması % 3,5 görelî kat ötelenme oranında meydana gelmiş ve donatıda kopmanın ileri ötelenme oranında meydana gelmesi sağlanmıştır. N4 numunesinde dayanımda

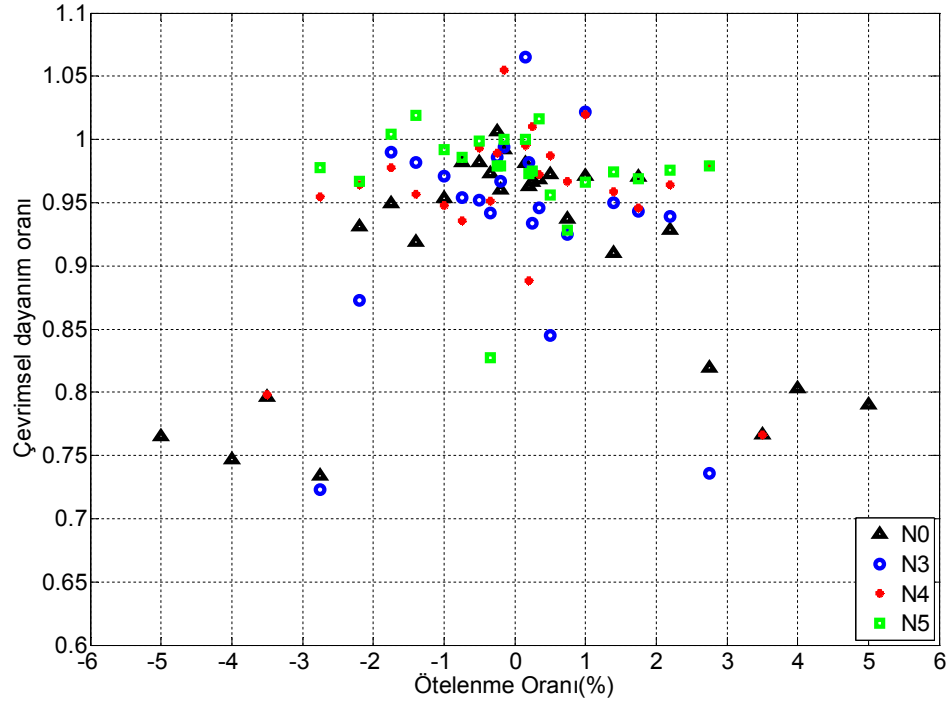
% 35'lik azalma % 4,0 ötelenme oranında gelişmiştir. N3 numunesine göre N4 numunesinde gelişen bu azalma ileri ötelenme seviyesinde meydana gelmiştir.

N5 numunesinde ise, ilk akmaya % 0,9 ötelenme oranında, maksimum dayanıma ise % 2,75 ötelenme oranında ulaşılmıştır. Şekil 5.5'deki dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, N4 ve N5 numunelerinin dayanımlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Öte yanda Şekil 5.6'da verilen histeretik zarf eğrileri incelendiğinde, N5 numunesinin, N3 ve N4 numunelerine göre enerji tüketimi açısından daha iyi bir davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 5.6 N0, N3, N4 ve N5 birleşim numunelerinin histeretik zarf eğrilerinin kıyaslanması

N3, N4 ve N5 numunelerinde, 3. çevrim için hesaplanan çevrimsel dayanım oranları (α_3) Şekil 5.7'de verilmektedir. N3 numunesinde % 2,2 ötelenme oranından sonra dayanımda azalma gözlenmiştir ve % 2,75 ötelenme oranında çevrimsel dayanım oranı 0,73'dür. N4 numunesinde dayanım oranı % 2,75 ötelenme oranına kadar 1,0 civarındadır ve % 3,5 ötelenme oranında çekme yönünde 0,8'e azalmıştır. N5 numunesinde ise çevrimsel dayanım oranı % 2,75 ötelenme oranına kadar 1,0 civarındadır.



Şekil 5.7 N0, N3, N4 ve N5 numuneleri için 3. yükleme çevrimlerinde çevrimsel dayanım oranları (α_3)

5.2.3. ACI 374.1-05'e göre değerlendirme

Kullanılması önerilecek yeni bir betonarme birleşim bölgesi çözümünün deneysel olarak incelenmesi gerektiği ACI 318-99 (1999) 'da da belirtilmiştir. ACI 374.1.05 (2005) "Moment çerçevelerinin yapısal testleri için kabul kriterleri" dokümanı bu amaçla kullanılabilir. ACI 374.1.05'te test edilecek birleşim bölgesi alt sistemlerinin sağlaması gereken uygun ötelenme oranı limitleri güçlü yer ivmeleri ve yapısal özelliklerdeki belirsizlikler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Buna göre testler, birleşim bölgelerinin elastik ötesi davranışlarını karakterize edebilmek için kademeli artan bir şekilde en az % 3,5 görece kat ötelenme oranına kadar devam ettirilmelidir (ACI 374.1.05, 2005). Moment çerçevelerinin yapısal testlerindeki kabul kriterlerine göre, birleşim bölgesi deney elemanı dayanım bakımından;

aynı yükleme doğrultusunda, % 3,5 görece kat ötelenme oranındaki yük değeri ulaşılan maksimum tepe yükünün % 25'inden az olmamalı
koşulunu sağlamalıdır.

Tablo 5.1’de tüm numunelerin % 3,5 ötelenme oranının son çevriminde ulaştıkları tepe yükü ($Q_{3,5}$) verilmektedir. Buna göre N0 numunesi bu koşulu hem itme, hem de çekme yönleri için sağlamıştır. N1 ve N3 numunelerinin testleri, % 3,5 ötelenme oranının ilk çevriminin sonuna kadar gerçekleştirildiğinden çekme yönündeki tepe yükü değeri bulunmamaktadır. N2 numunesinde çekme yönünde kiriş alt boyuna donatısının kopması ile birlikte % 3,5 ötelenme oranında dayanımda azalma görüldüğünden verilen koşul sağlanamamıştır. N4 numunesinde de her iki yükleme doğrultusu için bu koşul sağlanamamıştır. N5 numunesinde ise, % 3,5 ötelenme oranının 2. çevriminde itme yönünde dayanımda belirgin bir azalma olduğundan bu koşul sağlanamamıştır.

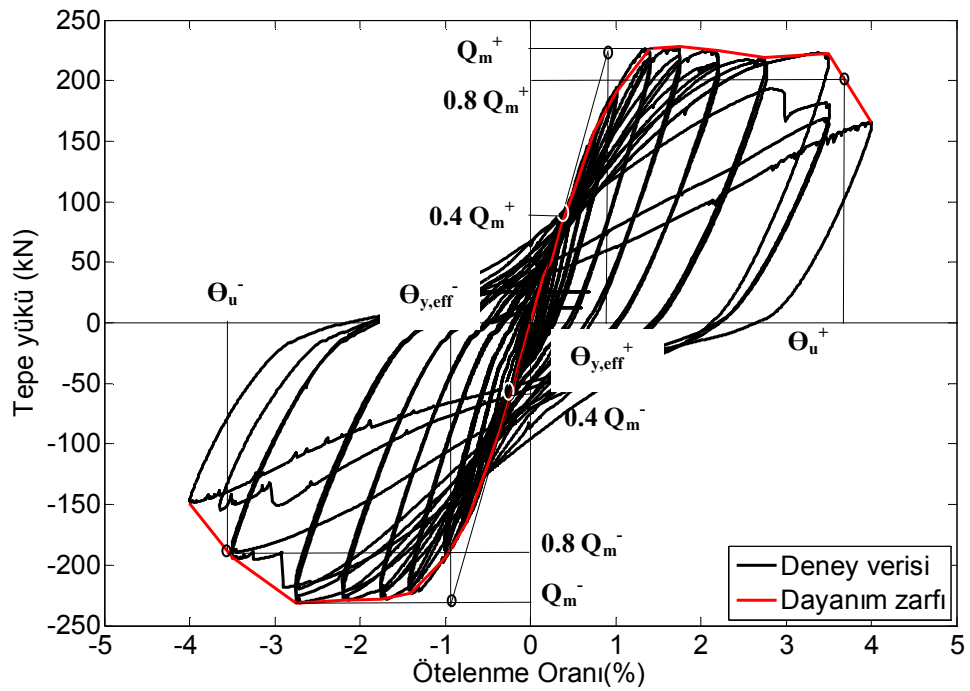
Tablo 5.1 Numunelerin dayanımlarının ACI 374.1.05’e göre değerlendirilmesi

Numune	Yükleme yönü	Maksimum tepe yükü Q_M (kN)	0.75 Q_M (kN)	$Q_{3,5}$ (kN)
N0	İtme	189,3	142,0	175,5
	Çekme	183,8	137,9	144,8
N1	İtme	231,6	173,7	140,3
	Çekme	287,8	215,9	-
N2	İtme	268,5	201,4	210,6
	Çekme	262	196,5	130,6
N3	İtme	205,9	154,4	129,8
	Çekme	241,6	181,2	-
N4	İtme	231,2	173,4	168
	Çekme	235,8	176,9	154,5
N5	İtme	225,7	169,3	125,7
	Çekme	228,2	171,1	173,2

5.3 Yerdeğiştirme Sünekliği

Yerdeğiştirme sünekliği, yapı elemanında ya da sisteminde başlangıçtaki akma dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği en büyük şekil değiştirmenin akma şekil değiştirmesine oranıdır. Yerdeğiştirme sünekliğinin belirlenmesinde Park tarafından önerilen *eşdeğer elastoplastik enerji kriteri* kullanılabilir (Park, 1989).

Bununla beraber, FEMA P-795'te *Bileşen Eşdeğerliği Yöntemi*'ne göre, bir yapı sistemini temsil edebilecek alt sistemlerin performans kriterlerinin belirlenmesi gereklidir. Bu performans kriterlerinden biri olan *etkili yerdeğiştirme sünekliği* (μ_{eff}) elde edilmesi için, Şekil 5.8'de verilen tepe yükü-ötelenme oranı grafiğindeki tepe yükü ve yer değiştirmesi/ ötelenme oranı değerlerinin belirlenmesi gereklidir. Buna göre deney verisinde her ötelenme oranının ilk çevrimine karşı gelen tepe yükü değerleri birleştirilerek dayanım zarf eğrisi elde edilir. Dayanım zarf eğrisinde, maksimum tepe yükünün (Q_m) % 40'ına karşı gelen tepe yükünden çizilen doğru kesiştirilir ve etkili akma ötelenme oranı ($\theta_{y,eff}$) belirlenir. Başlangıç rijitliği, maksimum tepe yükünün (Q_m) % 40'ına karşı gelen tepe yükünden çizilen doğrunun eğimidir. Maksimum tepe yükünün (Q_m) % 80'ine karşı gelen tepe yükü değerinin yatay eksendeki izdüşümü ile maksimum ötelenme oranı (θ_u) elde edilir.



Şekil 5.8 Deney numunelerinin başlangıç rijitliği (K_i) ve etkili süneklik (μ_{eff}) değerlerinin belirlenmesi

Monolitik ve prefabrik numunelerin FEMA P-795'te verilen yönteme göre hesaplanan etkili yer değiştirme süneklikleri (μ_{eff}), Tablo 5.2'de verilmektedir. Buna göre ortalama yerdeğiştirme süneklikleri (μ_{ort}), göz önüne alındığında, iyileştirilen N5 numunesi N0 numunesi ile benzer süneklik değerlerine ulaşmıştır. Aderans bozulma boyu bulunan N2 numunesi, N1 numunesi ile kıyaslandığında, aderans

bozulmasının süneklik açısından da artış sağladığı görülmektedir. N4 numunesinde kaynaklamanın iyileştirilmesi ile N3 numunesine göre süneklikte artış sağlanmıştır.

Tablo 5.2 Numunelerin yerdeğiştirme sünekliği

Numune	Yüklemeye yönü	Q_M (kN)	$\Theta_{Y,eff}$ (%)	Θ_U (%)	μ_{eff}	μ_{ort}
N0	İtme	189,3	0,8	4,0	5,0	4,33
	Çekme	183,8	0,96	3,5	3,65	
N1	İtme	231,6	0,86	3,3	3,79	3,12
	Çekme	287,8	1,0	2,5	2,45	
N2	İtme	268,5	1,1	5,0	4,55	4,10
	Çekme	262	0,96	3,5	3,65	
N3	İtme	205,9	0,67	3,14	4,69	3,50
	Çekme	241,6	1,0	2,31	2,31	
N4	İtme	231,2	0,9	3,69	4,3	4,2
	Çekme	235,8	0,9	3,7	4,1	
N5	İtme	225,7	0,68	3,5	5,1	4,3
	Çekme	228,2	1,0	3,5	3,5	

5.4 Rijitlik Azalması

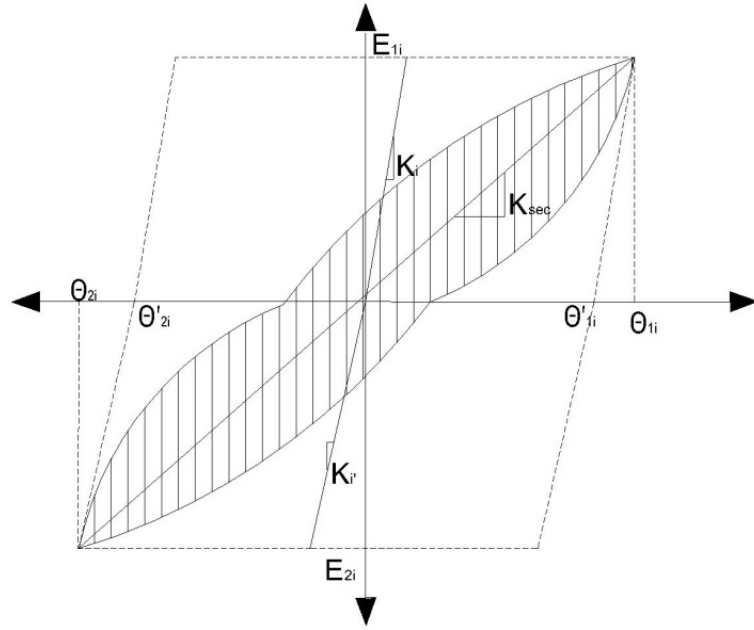
5.4.1 Sekant Rijitliği

Sekant rijitliği, bir yükleme çevrimi içerisinde pozitif ve negatif doğrultular için maksimum yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme ikililerini birleştiren doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.9).

Moment çerçevelerinin yapısal testlerindeki kabul kriterlerine göre (ACI.374.1.05), birleşim bölgesi deney elemanlarında rijitlik bakımından;

% 3,5 göreceli kat ötelenme oranının son çevriminde, $\pm$ % 0,35 ötelenme oranı aralığında itme ve çekme yönleri için hesaplanan sekant rijitlikleri ($K_{3,5}$), ilgili yönlerdeki başlangıç rijitliklerinin % 5'inden az olmamalıdır,

koşulu sağlanmalıdır. Tablo 5.3'de numunelerin başlangıç rijitlikleri ve $\pm$ % 0,35 ötelenme oranı aralığında hesaplanan sekant rijitlikleri ($K_{3,5}$) verilmektedir.



Şekil 5.9. Sekant rijitliğinin hesabı

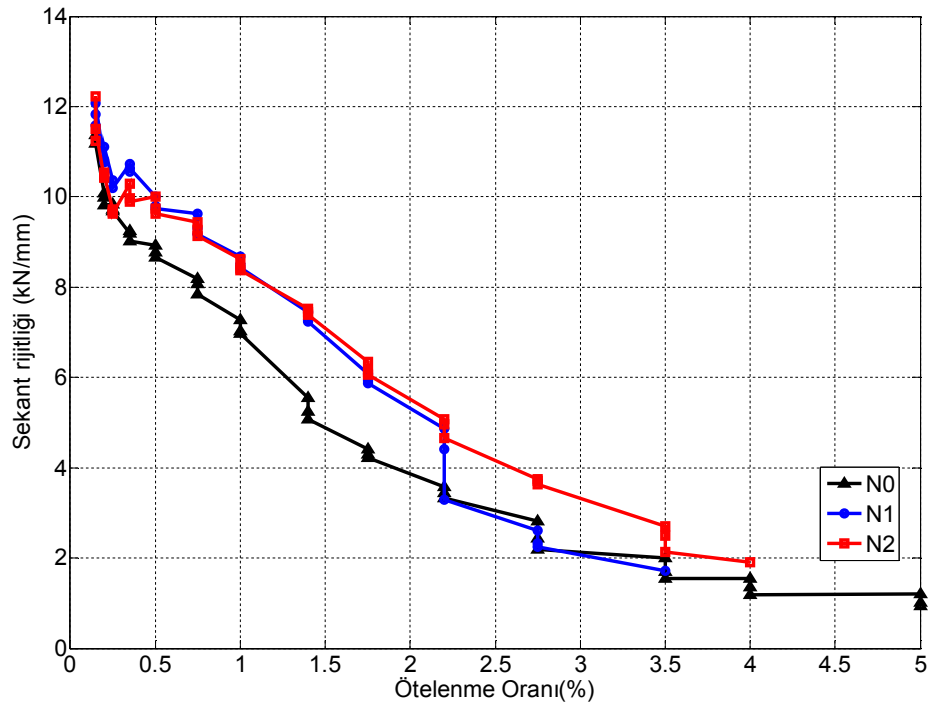
Tablo 5.3 Numunelerin % 3,5 ötelenme oranındaki sekant rijitlikleri

Numune	Yükleme yönü	K_I (kN/ mm)	$0.05 K_I$	$K_{3.5}$
N0	İtme	10,2	0,51	0,50
	Çekme	8,3	0,42	0,45
N1	İtme	11,7	0,59	0,89
	Çekme	12,5	0,63	0,28
N2	İtme	10,6	0,53	1,52
	Çekme	11,8	0,59	1,05
N3	İtme	13,3	0,67	0,55
	Çekme	10,46	0,52	0,46
N4	İtme	11,1	0,56	1,58
	Çekme	11,34	0,57	1,08
N5	İtme	15,7	0,79	1,93
	Çekme	8,2	0,41	1,78

Buna göre, % 3,5 ötelenme oranında N1 numunesinde itme yönünde, N3 numunesinde ise her iki yükleme doğrultusu için belirlenen sekant rijitliklerinin başlangıç rijitliğinin % 5'inden daha az olduğu belirlenmiştir. N1 ve N3 numuneleri ACI 374.1.05'de verilen bu koşulu sağlamamaktadır.

5.4.2 N0, N1 ve N2 Numuneleri

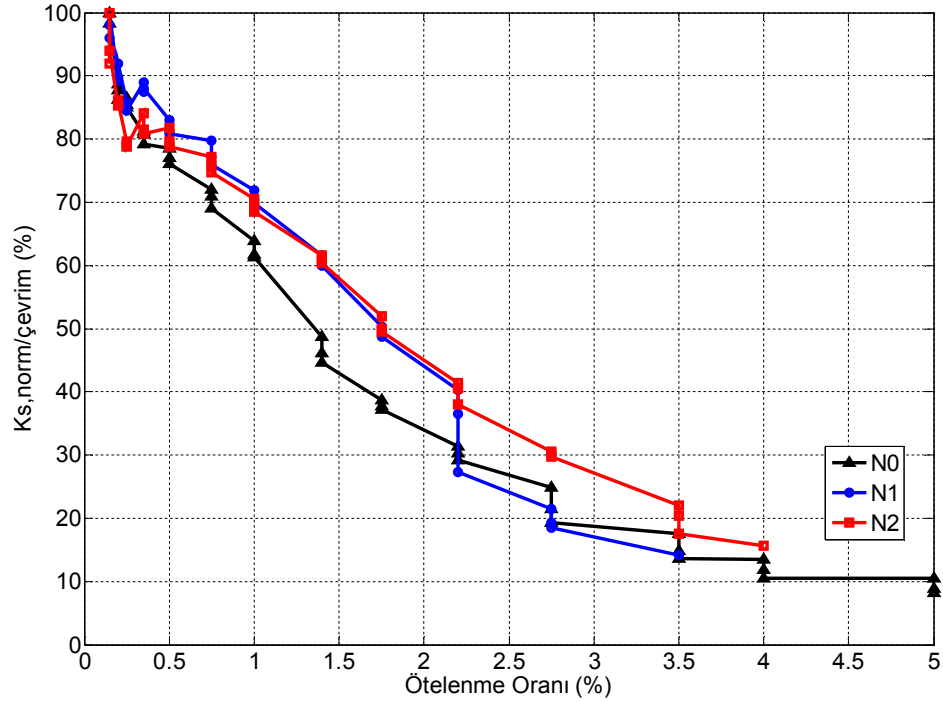
N0, N1 ve N2 numunelerinin rijitliğinde azalmanın değerlendirilebilmesinde her göreceli kat ötelenme oranındaki çevrimler için elde edilen sekant rijitlikleri Şekil 5.10'da verilmektedir. Numunelerde, artan tepe ötelenmeleri altında sergiledikleri farklı hasar modlarına bağlı olarak rijitlik bakımından farklı azalış ilişkilerinin geçerli olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10 N0-N2 numunelerinin sekant rijitlikleri

Numunelerin % 0,15 ötelenme oranının ilk çevrimindeki rijitlik dikkate alınarak normalize edilen sekant rijitlikleri Şekil 5.11'de verilmiştir. Buna göre monolitik numunenin rijitliğindeki azalma prefabrik numunelere göre % 2,0 ötelenme oranına kadar daha hızlıdır. N1 ve N2 numunelerinde ise % 2,2 ötelenme oranına kadar rijitlikte % 60 azalış görülmüştür. N1 numunesinde % 2,2 ötelenme oranında

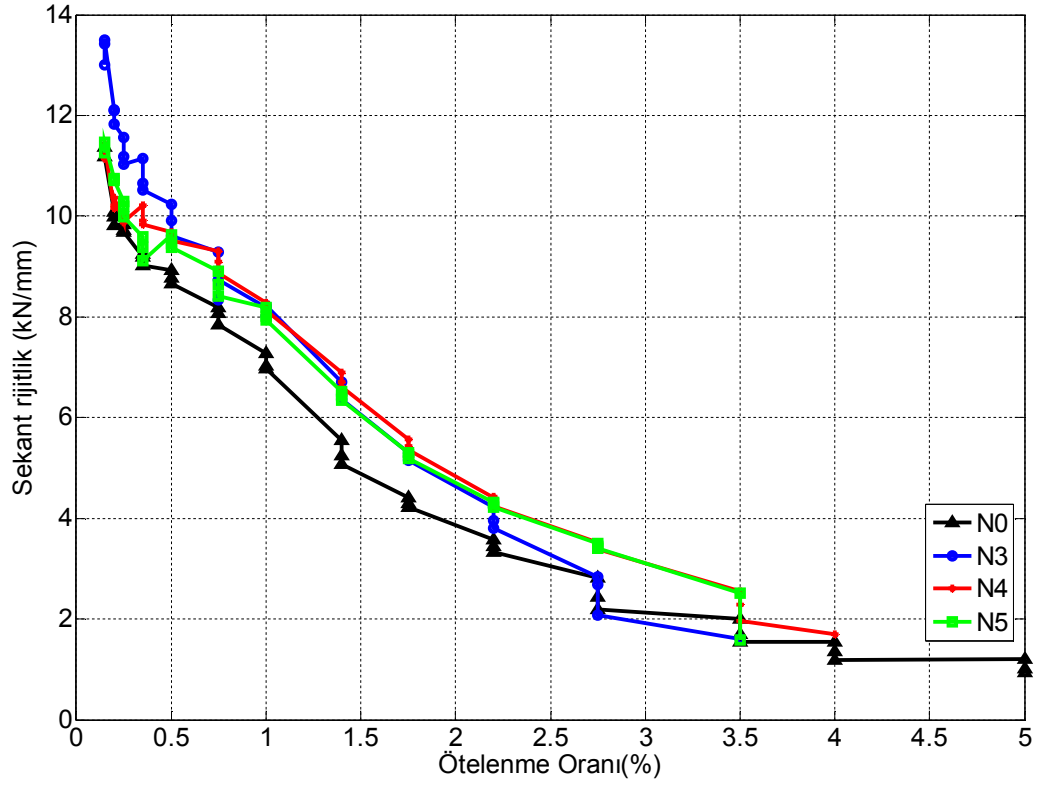
gelişen hasarlara bağlı olarak ani bir azalma, N2 numunesinde ise % 3,5 ötelenme oranına kadar kademeli bir azalma gözlenmiştir. % 3,5 ötelenme oranında N1 numunesinin rijitliğindeki azalma % 85 iken, N2 numunesinde % 77 olarak belirlenmiştir.



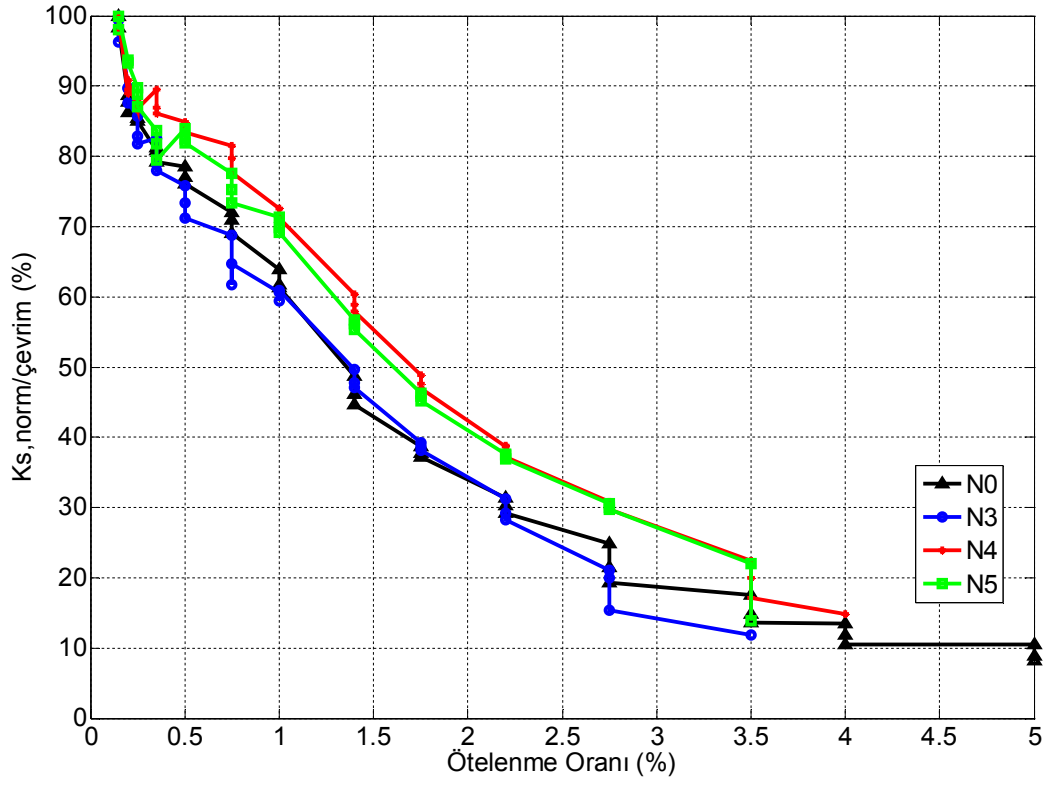
Şekil 5.11 N0-N2 numunelerinin normalize edilen sekant rijitlikleri

5.4.3 N0, N3-N5 Numuneleri

N0, N3, N4 ve N5 numunelerinin rijitliğinde azalmanın değerlendirilebilmesinde her görel kat ötelenme oranındaki çevrimler için elde edilen sekant rijitlikleri Şekil 5.12'da verilmektedir. Numunelerin % 0,15 ötelenme oranının ilk çevrimindeki rijitlik dikkate alınarak normalize edilen sekant rijitlikleri de Şekil 5.13'de verilmiştir. N3 numunesinde N0 numunesine göre rijitlikte azalma daha hızlı gerçekleşmiştir ve % 2,75 ötelenme oranında rijitlikte % 85 azalma olduğu belirlenmiştir. N4 ve N5 numunelerinde % 3,5 ötelenme oranına kadar kademeli bir azalma gözlenmiştir. % 3,5 ötelenme oranında N4 numunesinde % 82 iken, N5 numunesinde bu oran % 86'dır.



Şekil 5.12 N0,N3-N5 numunelerinin sekant rijitlikleri

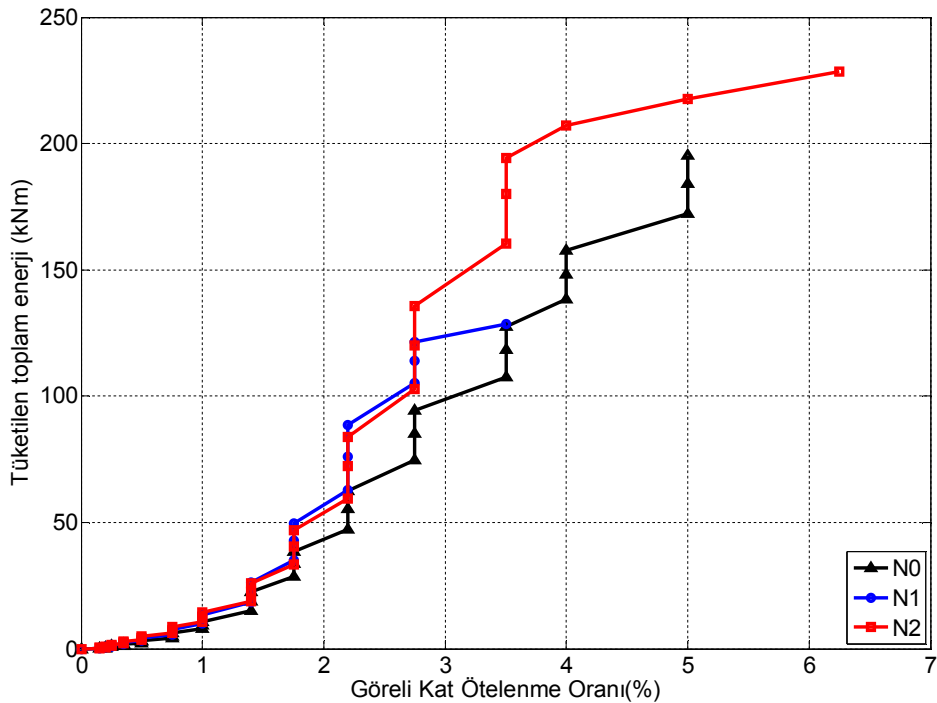


Şekil 5.13 N0,N3-N5 numunelerinin normalize edilen sekant rijitlikleri

5.5 Enerji Tüketimi

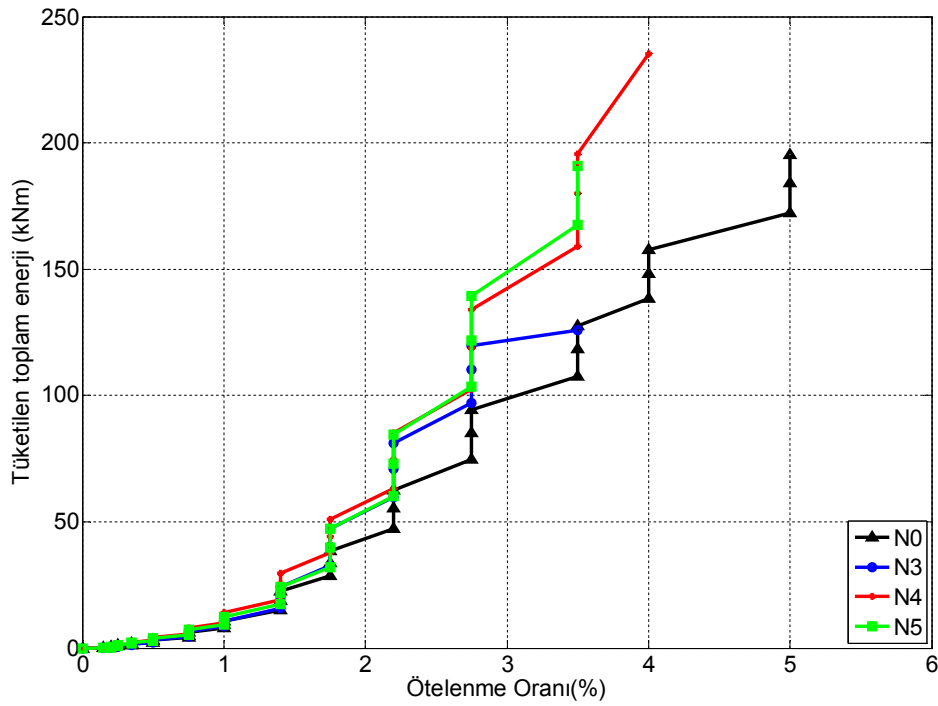
5.5.1 Tüketilen Birikimli Enerji

Bir yapının sismik etkiler altındaki davranışını belirleyen temel faktörlerden biri de enerji tüketim kapasitesidir. N0, N1 ve N2 numunelerinin artan ötelenmeler boyunca tükettiği enerjinin birikimli değerleri Şekil 5.14’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. % 2,2 ötelenme oranına kadar tüm numunelerin tükettiği enerji birbirine yakındır. Monolitik numunede kiriş boyuna donatılarının birleşim içerisindeki aderansının bozulmasına bağlı olarak % 2,2 ötelenme oranı sonrasında tepe yükü-tepe yer değiştirmesi grafiklerinde çevrim sıkışması gelişmiştir. Bu sebeple monolitik birleşimin enerji tüketimi prefabrik numunelere göre daha düşüktür. % 2,2 ötelenme oranı sonrasında gelişen hasara bağlı olarak N1 numunesinin de enerji tüketiminde ani bir azalma görülmüştür. N2 numunesi ise % 3,5 ötelenme oranına kadar diğer numunelere kıyasla önemli miktarda enerji tüketmiş, sonrasında ise artış hızında belirgin bir azalma olmuştur.



Şekil 5.14 N0-N2 numunelerinde tüketilen birikimli enerjinin ötelenme oranına bağlı değişimi

N0, N3, N4 ve N5 numunelerinin artan ötelenmeler boyunca tükettiği enerjinin birikimli değerleri Şekil 5.15’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. % 2,75 ötelenme oranına kadar prefabrik numunelerin tükettiği enerji birbirine yakındır. N3 numunesinde bu ötelenme oranından sonra gelişen hasarlarla enerji tüketiminde azalma gelişmiştir. Bu nedenle N3 numunesinin enerji tüketimi N4 ve N5 numunelerine göre daha düşüktür. N4 ve N5 numunelerinde birikimli enerji tüketimi birbirine yakındır. N0 numunesinde ise enerji tüketimi prefabrik numunelere göre düşüktür.



Şekil 5.15 N0, N3-N5 numunelerinde tüketilen birikimli enerjinin ötelenme oranına bağlı değişimi

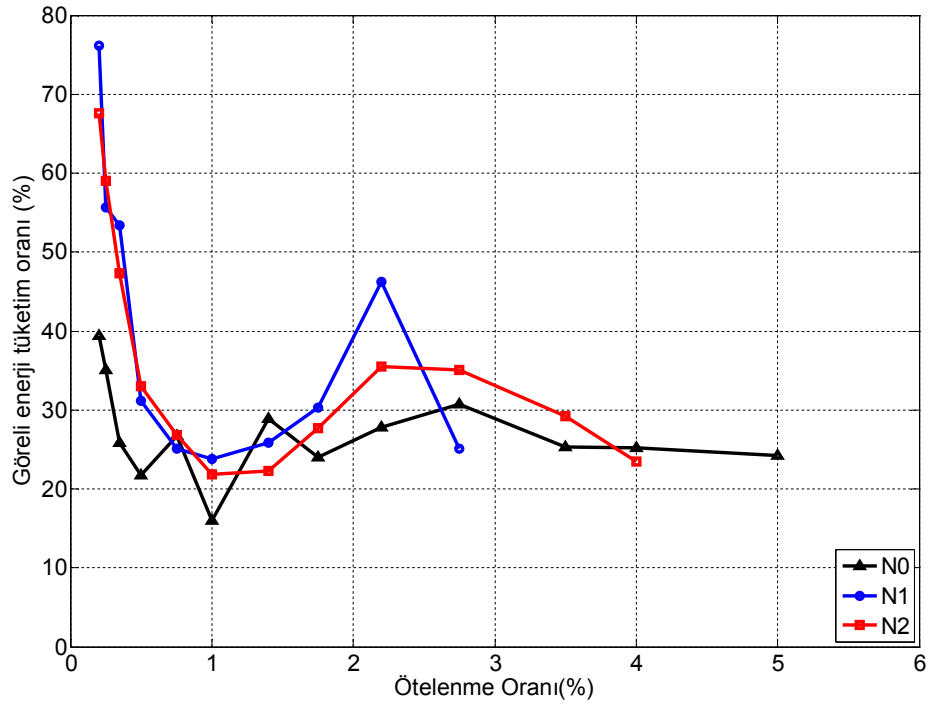
5.5.2 Görelî Enerji Tüketimi

Artan ötelenmeler altında rijitlik ve dayanımları farklı gelişen test numunelerinin enerji tüketim değerlerinin kıyaslanabilmesi için numunelerin *görelî enerji tüketim oranı* (β_i) ACI.374.1.05’te tanımlandığı şekilde hesaplanmıştır. Buna göre görelî enerji tüketim oranı (β_i), deney süresince her bir ötelenme oranının son çevriminde tüketilen enerjinin (Şekil 5.9’da verilen taralı alan), ideal enerji tüketimine (paralelkenarın alanı) oranı olarak tanımlanmaktadır;

$$\beta_i = \frac{A_{hi}}{(E_{1i} + E_{2i})(\theta_{1i}' + \theta_{2i}')} \quad (5.1)$$

Burada A_{hi} , i nolu tepe ötelenmesinin üçüncü çevrimindeki kapalı eğrinin alanı, $E_{1,i}$ ve $E_{2,i}$ itme ve çekme yönlerindeki tepe yükleri, $\theta_{1,i}'$ ve $\theta_{2,i}'$ ise itme ve çekme yönlerindeki elastik ötesi tepe ötelenme oranlarıdır.

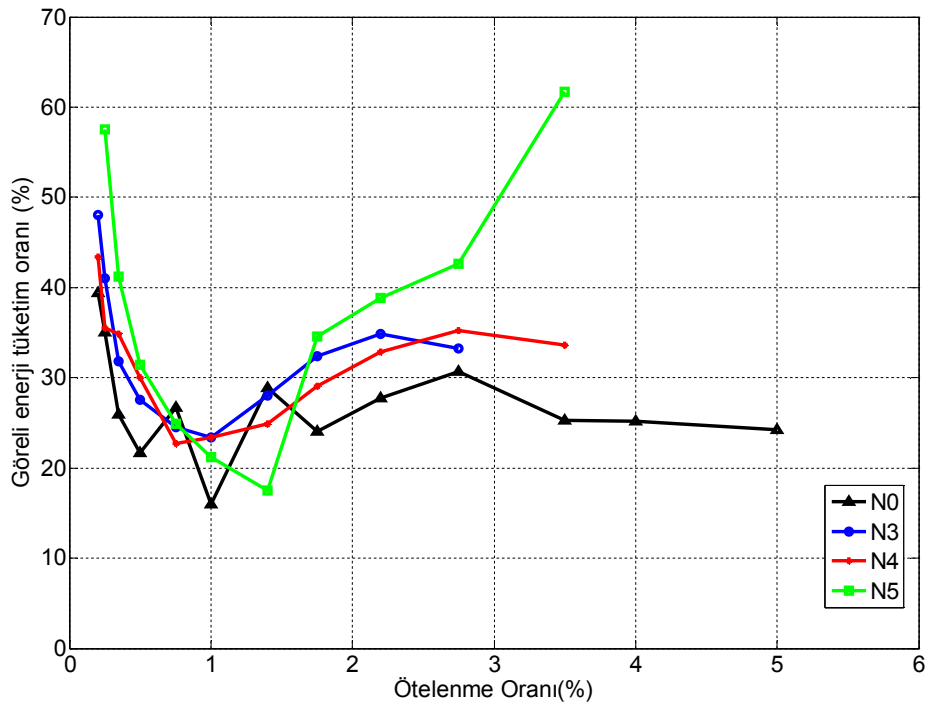
Şekil 5.16'da N0, N1 ve N2 numuneleri için görel enerji tüketim oranlarının değişimi verilmektedir. % 1,0 ötelenme oranına kadarki küçük ötelenmeler bölgesinde kılcal düzeydeki ilk çatlaklar sonrası azalma eğilimi gösteren eğriler, bu ötelenme sonrasında donatıdaki akma ve diğer hasar mekanizmaları ile tekrar artış eğilimine girmektedir. N1 numunesinde % 2,2 ötelenme oranında donatıların kopması ile gözlenen ani düşüş belirgin düzeydedir.



Şekil 5.16 N0-N2 numunelerinde görel enerji tüketimi oranlarının değişimi

Şekil 5.16'da N0, N3, N4 ve N5 numuneleri için görel enerji tüketim oranlarının değişimi verilmektedir. % 1 ötelenme oranına kadar numunelerde görel enerji tüketimi oranı azalma eğilimindedir. Bu ötelenme oranı seviyesinden sonra gelişen

çatlaklarla birlikte numunelerde % 1,75 ötelenme oranına kadar enerji tüketiminde artış gözlenmiştir; ancak N0, N3 ve N4 numunelerinde bu ötelenme oranından sonra görel enerji tüketiminde önemli bir değişim olmamıştır. Aderans bozulma boyu ve etriye sıklaştırması bulunan N5 numunesinde ise, görel enerji tüketiminde önemli oranda artış sağlanmış ve numune elastik bölgedeki görel enerji tüketimi oranına ulaşmıştır.



Şekil 5.17 N0, N3-N5 numunelerinde görel enerji tüketimi oranlarının değişimi

ACI 374.1.05'e göre test edilen numunelerde, % 3,5 ötelenme oranının son çevrimi için hesaplanacak görel enerji tüketim oranının % 12,5 değerinden yüksek olması öngörülmektedir. Tüm numunelerde bu koşul sağlanmıştır.

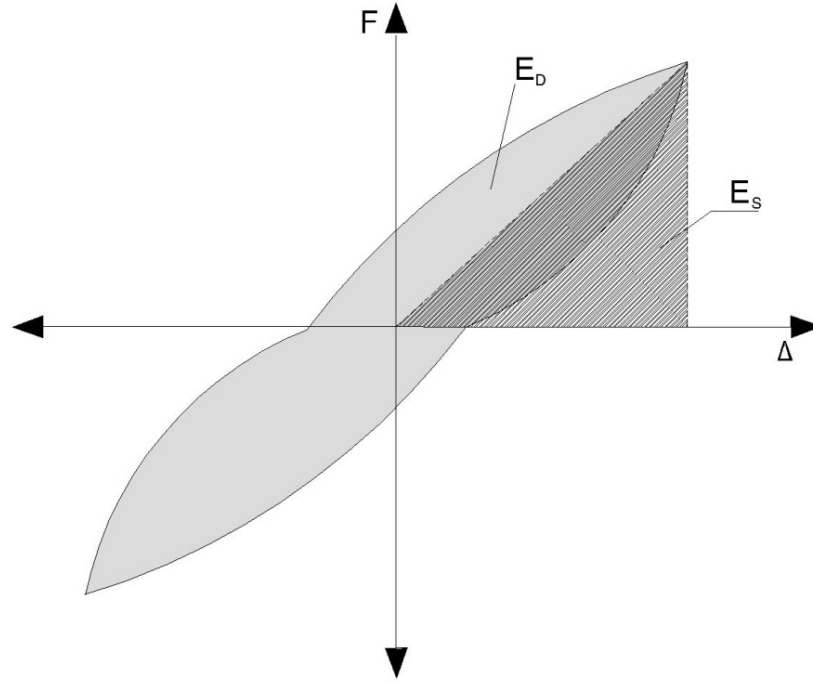
5.5.3 Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı

Kolon-kiriş birleşim bölgesi numunelerinde enerji tüketiminin belirlenebilmesi için eşdeğer viskoz sönüm oranı (ζ_{eq}) göz önüne alınmaktadır. Eşdeğer viskoz sönümün belirlenmesinde en yaygın yöntem, tersinir-tekrarlı yükler altındaki yapı

elemanları için elde edilen tepe yükü-tepe yer değıştirmesi grafiklerinde tüketilen enerjinin eşdeğer viskoz sisteme eşitlenmesidir. Buna göre eşdeğer sönüm oranı (ξ_{eq});

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (5.2)$$

ile hesaplanır (Chopra, 2007). Burada E_D tüketilen enerjiye karşılık gelen çevrimsel döngü içerisindeki alandır. E_S birim şekil değıştirme enerjisidir (Şekil 5.18).

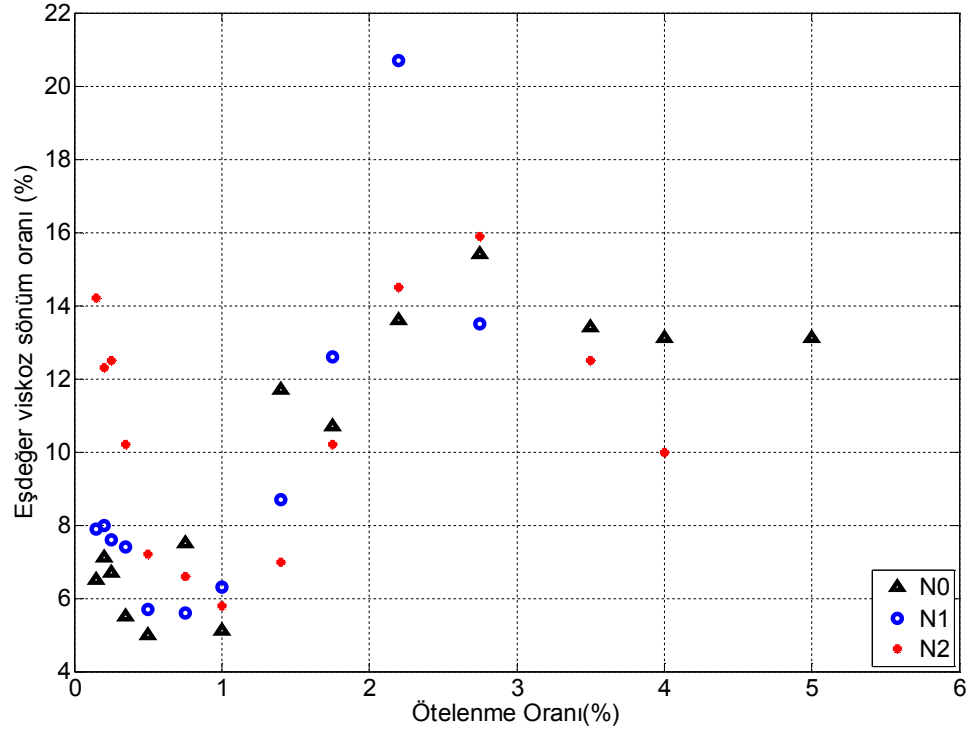


Şekil 5.18 Eşdeğer viskoz sönümün belirlenmesi

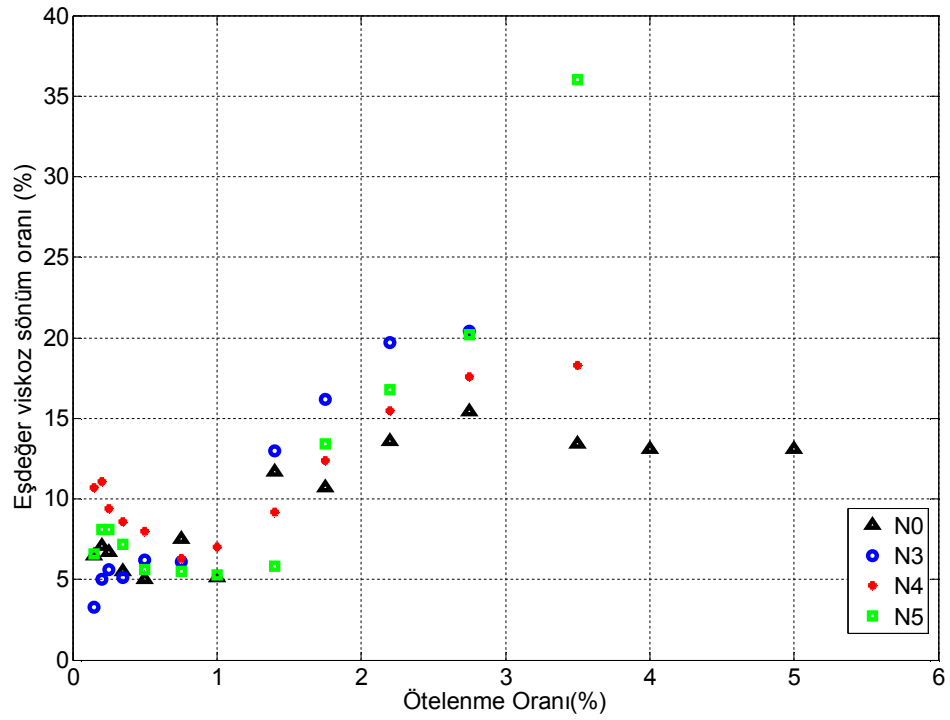
N0, N1 ve N2 numunelerinde her ötelenme oranının 2. çevrimlerine karşılık gelen eşdeğer viskoz sönüm oranları Şekil 5.19’da verilmektedir. Buna göre % 0,5 ötelenme oranına kadar N0 ve N1 numunelerinde eşdeğer viskoz sönüm oranı % 6 iken, aderans bozulması bulunan N2 numunesinde % 12’dir. % 1,0 ötelenme oranından sonra numunelerin sönüm oranlarında artış % 2,75 ötelenme oranına kadar devam etmiştir.

N0, N3, N4 ve N5 numunelerinin eşdeğer viskoz sönüm oranları Şekil 5.20’de verilmektedir. Numunelerde % 1 ötelenme oranından sonra sönüm oranlarında artış % 2,75 ötelenme oranına kadar devam etmiştir. % 3,5 ötelenme oranında çevrim

sıkışmasının azaldığı N5 numunesinde eşdeğer viskoz sönüm oranının % 36 seviyesine ulaştığı gözlenmiştir. N0 ve N4 numunelerinde, eşdeğer viskoz sönüm oranı % 3,5 ötelenme oranında sırasıyla % 18 ve % 14 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.19 N0, N1, N2 numuneleri için eşdeğer viskoz sönüm oranları



Şekil 5.20 N0, N3, N4 ve N5 numuneleri için eşdeğer viskoz sönüm oranları

BÖLÜM ALTI

SAYISAL MODEL ÇALIŞMALARI

6.1 Giriş

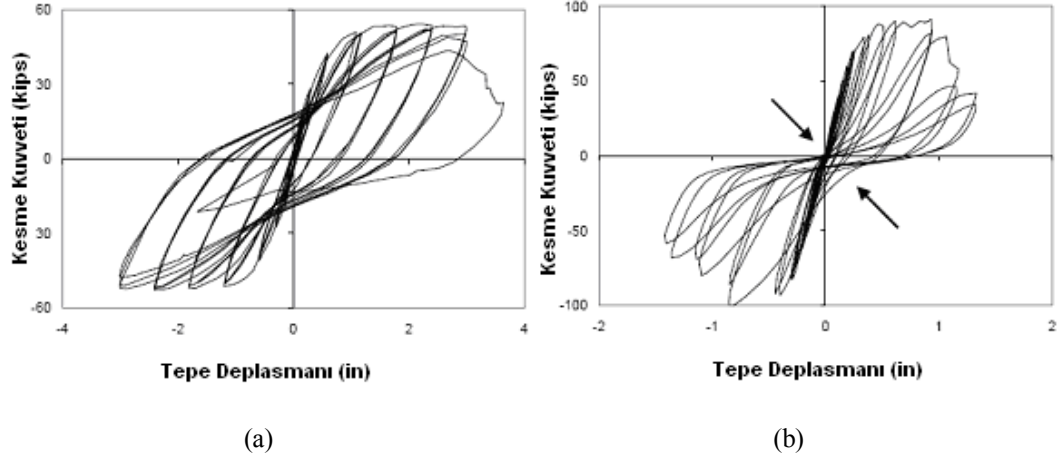
Betonarme yapıların performansa dayalı sismik değerlendirilmesinde, kapsamlı bir değerlendirmenin sağlanması açısından uygun analitik modellerin kurulması gereklidir. Yapıdaki toptan göçmenin değerlendirmesi de, deneysel çalışmalarda gözlenen önemli hasar modlarını yeterli ölçüde temsil edebilen çevrimsel modellerin kurulmasına bağlıdır (Ibarra ve diğer., 2005).

Yapı elemanlarının sismik etkiler altındaki tepkilerinin analitik olarak tahmin edilmesi, deneysel çalışmaların ana bileşenlerinden biridir. Analitik modellerin, yapı elemanlarının ya da alt sistemlerinin testler sırasında gösterdikleri davranış temsil edebilmesi için rijitlik azalması, dayanım azalması, enerji tüketimi ve çevrim sıkışması parametrelerini yansıtabilmesi gerekir.

Kolon-kiriş birleşimlerinin ve birleşim bölgelerinin göçme mekanizmalarını benzeştirebilmek amacıyla, donatı sıyrılması ve çevrim sıkışması davranışları da göz önüne alınarak basit amprik yaklaşımlardan sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmasına kadar analitik modellerin geliştirilmesi çalışmaları sürdürülmektedir. Şekil 6.1 incelendiğinde tersinir yüklere maruz betonarme elemanlarda çevrim sıkışması görülmekte ve çevrimsel yüklemeye bağlı olarak eleman rijitliğindeki azalmayı, hemen akabinde orijine yakın noktalarda artış izlemektedir.

Bu bölümde prefabrik deney numunelerinin tersinir-tekrarlı yükler altındaki davranışının benzeştirilebilmesi için yığılı plastisiteyi temsil eden *yay modeli* ve *lif esası* modellere başvurulmuştur. Tüm analizlerde OpenSees yapısal simülasyon programı kullanılmıştır. OpenSees, Pacific Deprem Deprem mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından yapı ve geoteknik alanında araştırmacıların yararlanabileceği ve katkıda bulunabileceği uygulama ve araştırma simülasyon yazılımı olarak geliştirilmiştir. Simülasyon programı, birbiri ile bağlantılı modeller,

sınıflandırılan elemanlar, çözüm algoritmaların, sistem düzenleyiciler, denklem çözümler ve veritabanının bir araya getirilmesinden oluşmaktadır (McKenna ve diğer., 2000).



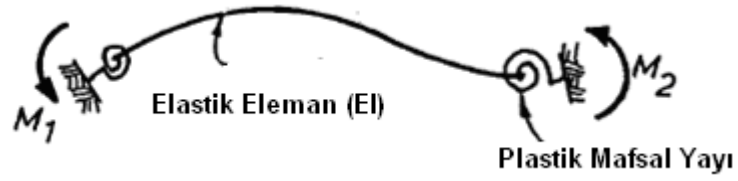
Şekil 6.1 (a) Çevrim sıkışmasının bulunmadığı, b) Çevrim sıkışması davranışı görülen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen çevrimsel döngüler (Barin ve Pinchiera, 2002).

Prefabrik kolon –kiriş birleşim bölgelerinin yığılı plastisite ve lif esaslı modelleri için numunelerin tepe yükü – tepe yer değiştirmeleri, tek eksenli statik yer değiştirme kontrollü algoritma ile hesaplanmıştır. Deneyde uygulanan tepe yer değiştirmeleri sayısal analizlerde de uygulanmıştır. Çözüm algoritması altı adet Newton-Raphson iterasyonu ile başlayıp her iterasyondaki artık hata, enerji artımı ile hesaplanmıştır. Buna göre Newton-Raphson iterasyonu sağlanamadığında döngü içerisinde yer alan bağıl tolerans ve iterasyon değerleri ile analiz gerçekleştirilmiştir. Yığılı plastisite ve lif esaslı modeller için analiz dosyaları Ek-C’de verilmektedir.

6.2 Mevcut Çalışmalar

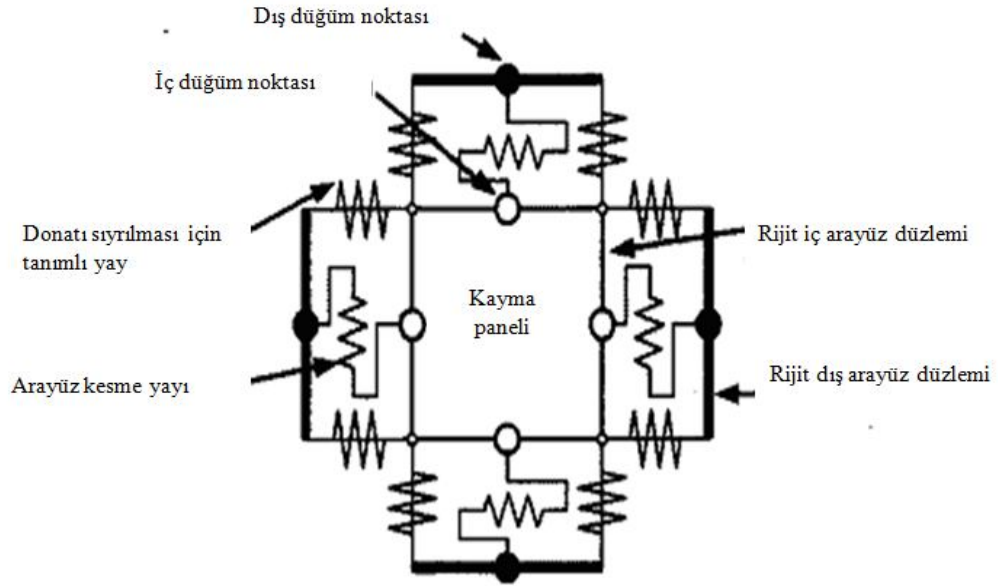
6.2.1 Yığılı Plastisite Yaklaşımı

Kolon-kiriş birleşimlerinin ve çerçeve elemanların elastik olmayan davranışı Giberson (1969) tarafından yığılı plastisite yaklaşımına göre elastik eleman uçlarına atanan dönel yaylarla tanımlanmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Giberson tek kiriş bileşeni ile kolon- kiriş birleşimlerinin modellenmesi (Giberson, 1969).

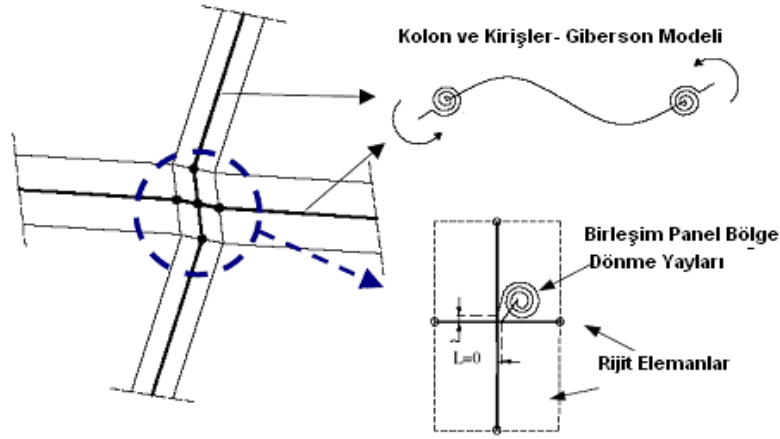
Lowes ve Altoontash (2003) tarafından önerilen analitik modelde, tersinir çevrimsel yüklemeye maruz kolon – kiriş birleşimleri için önerilen model; kesme paneli, donatı için sekiz adet yay ve dört adet ara yüz elemanından oluşmaktadır (Şekil 6.3). Birleşimdeki her yüzde öteleme için iki adet yay, dönme için ise bir adet yay tanımlanmıştır. Çalışmada, kolon- kiriş birleşimlerinin kesme etkileri altında davranışı *basınç alanları teorisi*'ne dayalı olarak tanımlanmış ve çevrimsel yüklemeye sırasındaki davranışın modellenmesinde mevcut deneysel veriler kullanılmıştır. Modelin, birleşimin temel karakteristiklerini temsil etmede oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 6.3 Kolon-kiriş birleşimleri için önerilen analitik model (Lowes ve Altoontash, 2003).

Pampanin ve diğer. (2003) tarafından önerilen analitik modelde, kolon ve kirişlerin bağıl dönmelerini kontrol eden eşdeğer dönme yayı ile birleşim davranışını belirleyen kesme etkileri dikkate alınmaktadır. Eşdeğer dönme yaylarının moment-dönme karakteristiklerinin tanımlanmasında birleşimin komşuluğundaki kolon ve

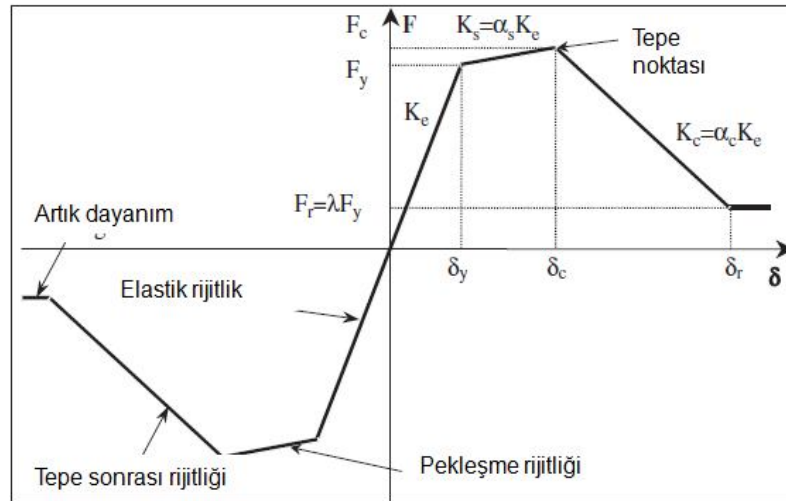
kirişlerin eğilme momentleri hesaba katılmıştır. Birleşimde donatı sıyrılması ve kesme çatlakları ile çevrim sıkışması etkilerine bağlı olarak tanımlanan çevrimsel prensip Şekil 6.4’de verilmektedir.



Şekil 6.4 Dönel yay modeli ile kolon-kiriş birleşiminin davranışının analitik olarak modellenmesi (Pampanin ve diğer., 2003).

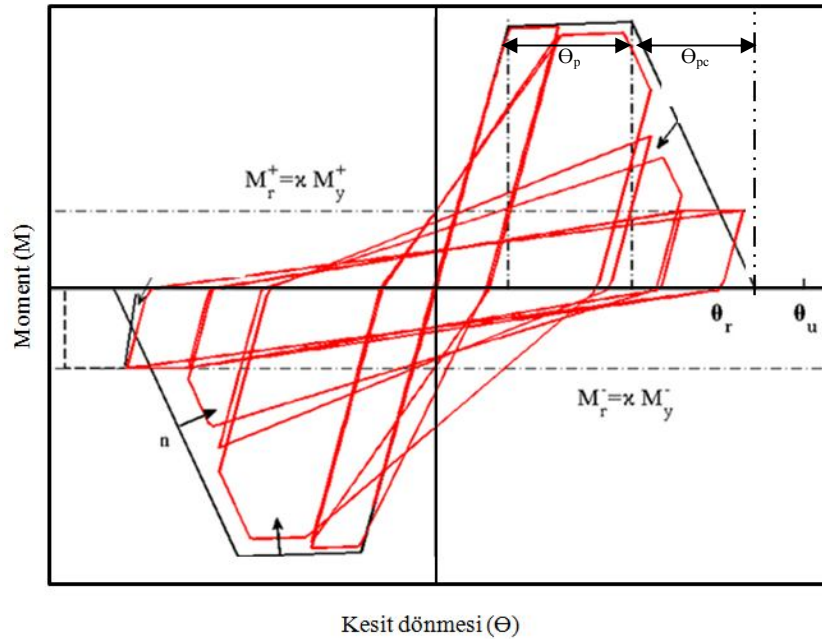
Favvata ve diğer. (2008) tarafından, dış kolon-kiriş birleşimleri için geliştirilen modelde, iki düğüm noktası ile tanımlanan yay elemanı yalnızca düğüm noktalarının bağıl dönmelerinden etkilenmektedir. Elemandan birleşime iletilen moment, kirişten kolona aktarılan momenttir. Önerilen model; kolon- kiriş birleşimlerinin çevrimsel yüklemeler altında gerçek tepkilerinin modellenmesinde başlangıç rijitliği, beton basınç dayanımı, dayanım azalması ve çevrim sıkışması etkilerini de dikkate alan temel karakteristikleri de tanımlamaktadır.

Ibarra ve diğer. (2005) tarafından yapı elemanlarında gelişecek hasara bağlı parametreleri tanımlayan *iki doğrulu, pik-eğilimli ve çevrim sıkışması* histeretik modelleri önerilmiştir. Çevrimsel modellerin tek yönlü artan (monotonik) yükleme altında davranışı Şekil 6.5’de verilen iskelet eğrileri ile tanımlanmıştır. Buna göre F_y akma dayanımı, F_c maksimum dayanım, F_r artık dayanım olarak tanımlanmıştır. Rijitlik ve yer değiştirme için; K_s pekleşme rijitliği, K_c tepe sonrası rijitliği, δ_y akma yer değiştirmesi, δ_c maksimum tepe yüküne karşılık gelen yer değiştirmesi ve δ_r artık yer değiştirme olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.5 Çevrimsel modeller için iskelet eğrileri (Ibarra ve diğer., 2005).

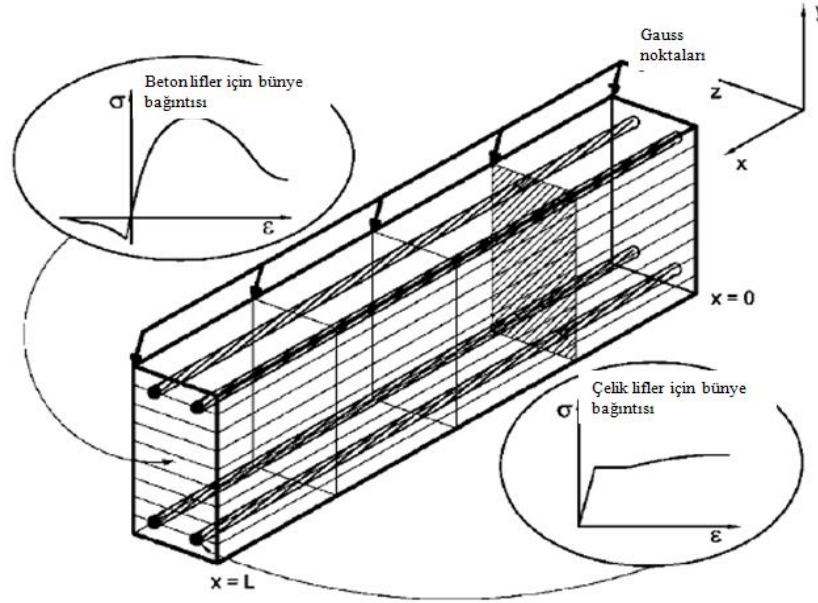
Modifiye edilmiş Ibarra-Medina-Krawinkler (Mod-IMK) *pik-eğilimli* ve *çevrim sıkışması* histeretik modelleri deprem yüklerine maruz yapı sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Yığılı plastisite yaklaşımında kolon ve kiriş elemanlar elastik iken Moment (M)- Kesit dönmesi (θ) ilişkisi Şekil 6.6'da verilen histeretik modelde dayanım ve rijitlik için çevrimsel bozulma parametreleri çevrimsel davranışı belirlemektedirler. *Pik-eğilimli histeretik modelde* kolon ve kiriş eleman uçlarına sıfır-uzunluğa sahip dönel yaylar atanmaktadır (Lignos ve Krawinkler, 2013).



Şekil 6.6 Pik-eğilimli histeretik model (Lignos ve Krawinkler, 2012)

6.2.2 Lif (Fiber) Esaslı Model

Lif esaslı modeller, ilk olarak 1970'li yıllarda geliştirilmeye başlamıştır. Lif esaslı model, betonarme yapılarda iki boyut kiriş elemanında enkesitin sıra halinde katmanlara ya da üç boyutlu kiriş elemanlarda liflere ayrıştırılmasına dayalıdır (Şekil 6.7) (Ranzo ve Petrangeli, 1998).



Şekil 6.7 Lif eleman düzeni (Ranzo ve Petrangeli, 1998).

Kolon- kiriş elemanlar uzunlukları boyunca lif elemanlarla temsil edilen dilimlere ayrılmış olup kesitlerin Bernoulli-Navier hipotezine uygun olduğu kabul edilmektedir. Kesitteki her lif beton ya da boyuna donatı alanına karşılık gelmektedir ve tersinir-tekrarlı yüklerin modellenmesi için uygun malzeme özellikleri tanımlanmaktadır. Kolon-kiriş elemanlarda davranışın benzeştirilmesi için histeretik başka bir modelin kullanılması gerekmemektedir. Eleman uzunluğu boyunca integrasyon noktalarının tanımlı olduğu dilimler arasında, malzemedeki gerilmelerin sabit olduğu varsayılır (Priestley ve diğer., 2007). Enkesit düzeyinde beton ve donatı için tek eksenli malzeme özellikleri tanımlanırken eksenel yük ve eğilme etkilerinin üç boyutlu olarak dikkate alınması ise lif gerilmelerinin integrasyonu ile sağlanır (Ceresa ve diğer., 2007). Lif esaslı modelleme ile eğilme-etkin kolon ve kiriş elemanların tepkileri için oldukça iyi sonuçlar elde edilebilmektedir (Pinho ve Elnashai, 2000).

Lif esaslı modelde, kayma gerilmeleri dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle kesme kuvvetleri ve burulma etkileri, normal kuvvetlerdeki gibi integre edilememektedir. Bununla beraber, kesme-eğilme etkileşimine maruz narinliği az betonarme kolon ve perde elemanlarda kayma deformasyonları ihmal edilebilir düzeyde değildir (Ceresa ve diğer., 2009). Lif esaslı modellerdeki bu sınırlamanın aşılabilmesi için lif yaklaşımına Timoshenko kiriş teorisi dikkate alınarak kayma deformasyonlarının dâhil edilmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır (Sarıtaş, 2006; Ranzo ve Petrangeli, 1998).

Ceresa ve diğer. (2009) çalışmasında, tersinir-tekrarlı yüklere maruz betonarme çerçeve tipi yapılarda kolon- kiriş elemanların kesme etkilerinin tahmin edilebilmesi için *lif esaslı kolon-kiriş modeli* sunulmuştur. Bu modelde düzlem Timoshenko lif kolon-kiriş elemanı geliştirilmiş, kesme-eğilme etkileşimi bulunan betonarme elemanların tersinir yükler altındaki davranışı yeterli yaklaşıklıkla benzeştirilebilmiştir.

Mostafaei ve Vecchio (2009), tek yönlü artan yükler altında kesme, eğilme ve eksenel yük etkilerine maruz betonarme kolonların performansa dayalı analizi için *tek eksenli kesme-eğilme modelini* geliştirmiştir.

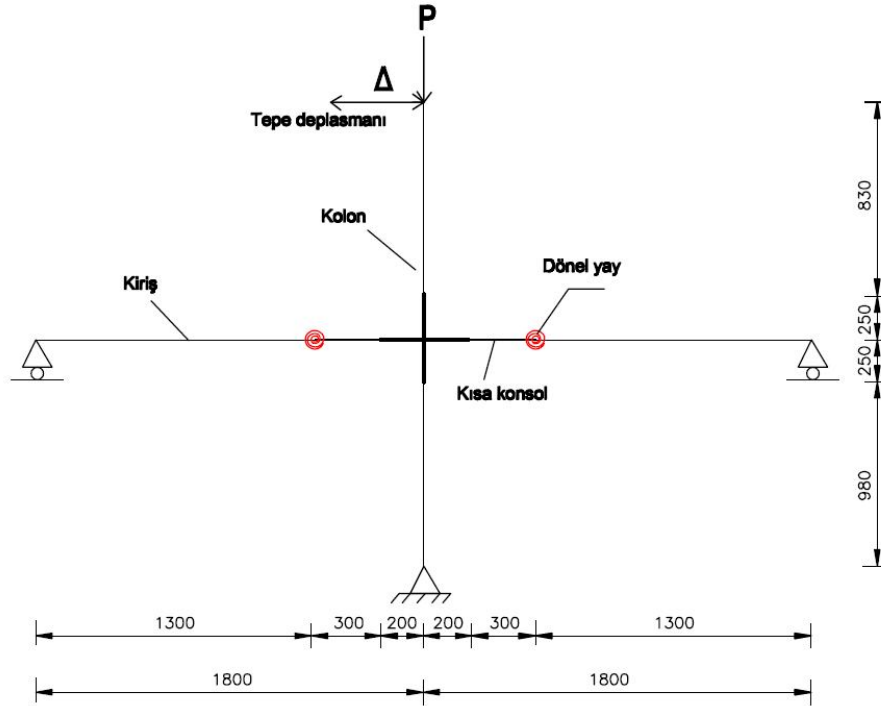
6.3 Yığılı Plastisite Yaklaşımı ile Sayısal Model

N4 ve N5 birleşim bölgesi deney numunelerinin testler sırasındaki çevrimsel davranışlarının benzeştirilebilmesi amacıyla yığılı plastisite yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre Şekil 6.8’de sayısal modeli verilen kolon- kiriş birleşim bölgesi numunesinde, kısa konsol yüzünde kiriş ucunda sıfır uzunlukta dönel bir yay tanımlanmıştır. Kolon, kiriş ve kısa konsolun elastik olarak kaldığı kabul edilmiştir. N4 ve N5 numunelerinin kiriş uçlarındaki dönel yaylar için Şekil 6.6’da verilen *Mod-IMK pik-eğilimli histeretik model* parametreleri, Lignos ve Krawinkler (2013) çalışmasındaki duyarlılık analizleri dikkate alınarak tanımlanmıştır. Moment-kesit

dönmesi ilişkileri ise deneysel çalışmadan belirlenmiştir. Dönel yaylara tanımlı *pik-eğilimli histeretik modelin* parametreleri Tablo 6.1’de verilmektedir.

Tablo 6.1 Pik-eğilimli histeretik modelin parametreleri

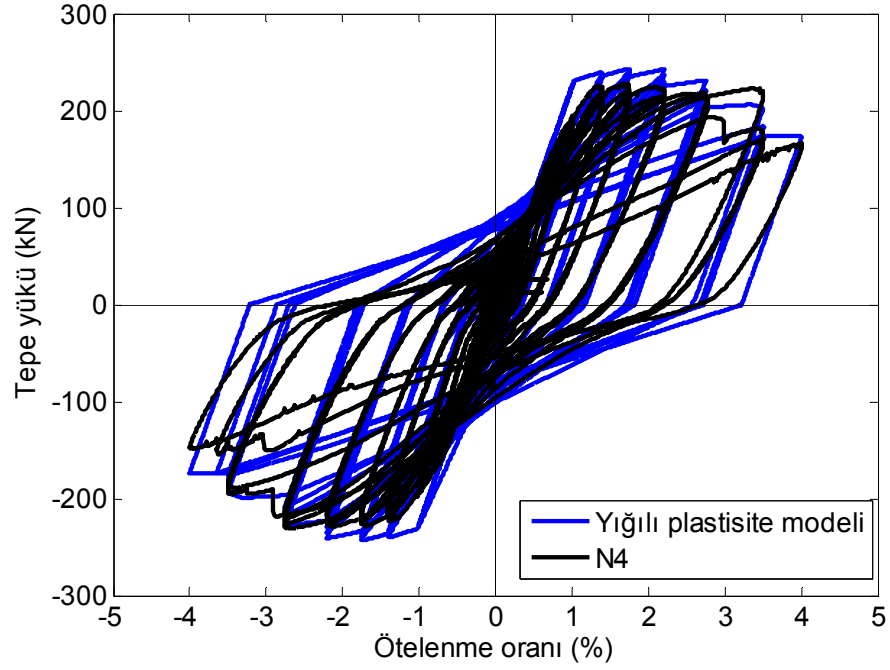
	Pekleşme oranı a_s	Çevrimsel hasar parametresi λ_s	Yükleme/ Boşaltma rijitliği oranı c_k	Pik öncesi kesit dönmesi Θ_p	Pik sonrası kesit dönmesi Θ_p	Max. Kesit dönmesi Θ_u	Artık Dayanım Oranı χ
N4	0,15	1,0	2,0	0,035	0,1	0,4	0,75
N5	0,10	1,0	2,0	0,02	0,001	0,05	1,0



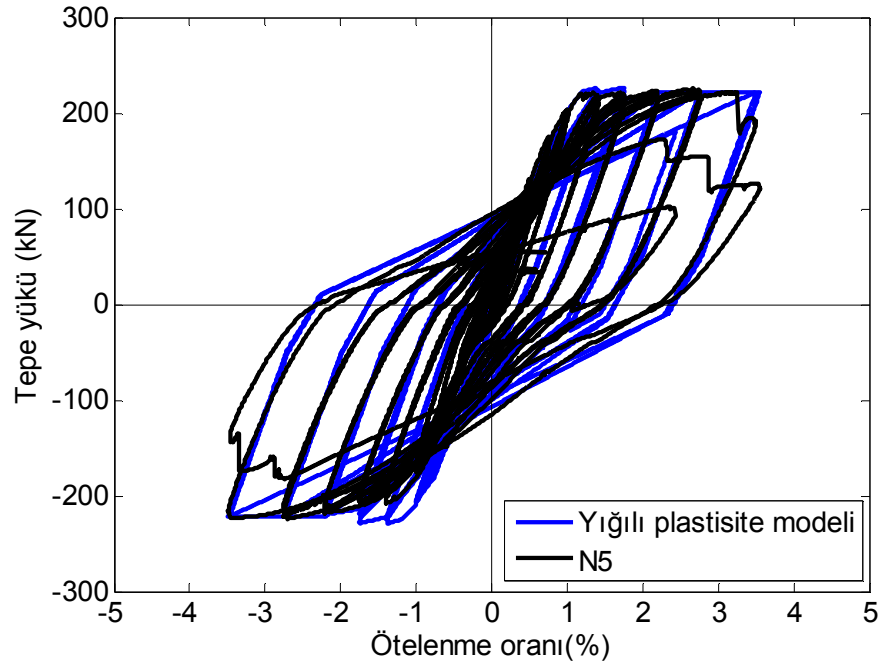
Şekil 6.8 N4 ve N5 numuneleri için yığılı plastisite modeli

N4 numunesinin tepe yükü- tepe ötelenme oranı ilişkisi ile yığılı plastisite yaklaşımına göre elde edilen modeli Şekil 6.9’da verilmektedir. Buna göre numunede özellikle her çevrimdeki tepe yükü, çevrim içi dayanım azalması ve rijitlik azalması yönünden numune davranışına benzeştirilmiştir. N5 numunesinin tepe yükü- tepe ötelenme oranı ilişkisi ile yığılı plastisite yaklaşımı ile elde edilen modeli Şekil 6.10’da verilmektedir. Buna göre % 3,5 ötelenme oranının ikinci çevrimine

kadar olan ötelenme oranlarında tepe yükü, enerji tüketimi ve rijitlik azalması açısından oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Öte yanda % 3,5 ötelenme oranının 2. çevriminde kiriş alt boyuna donatısının kopması ile dayanımdaki % 35’lik azalma gözlenmiştir. Ancak son çevrimdeki bu azalma modelde sağlanamamıştır.



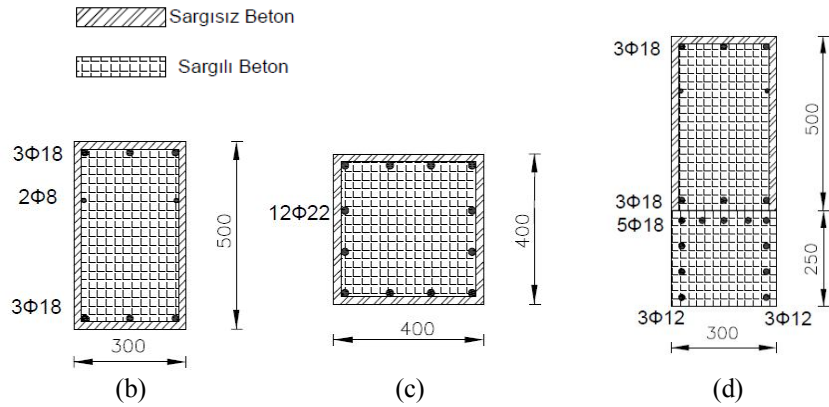
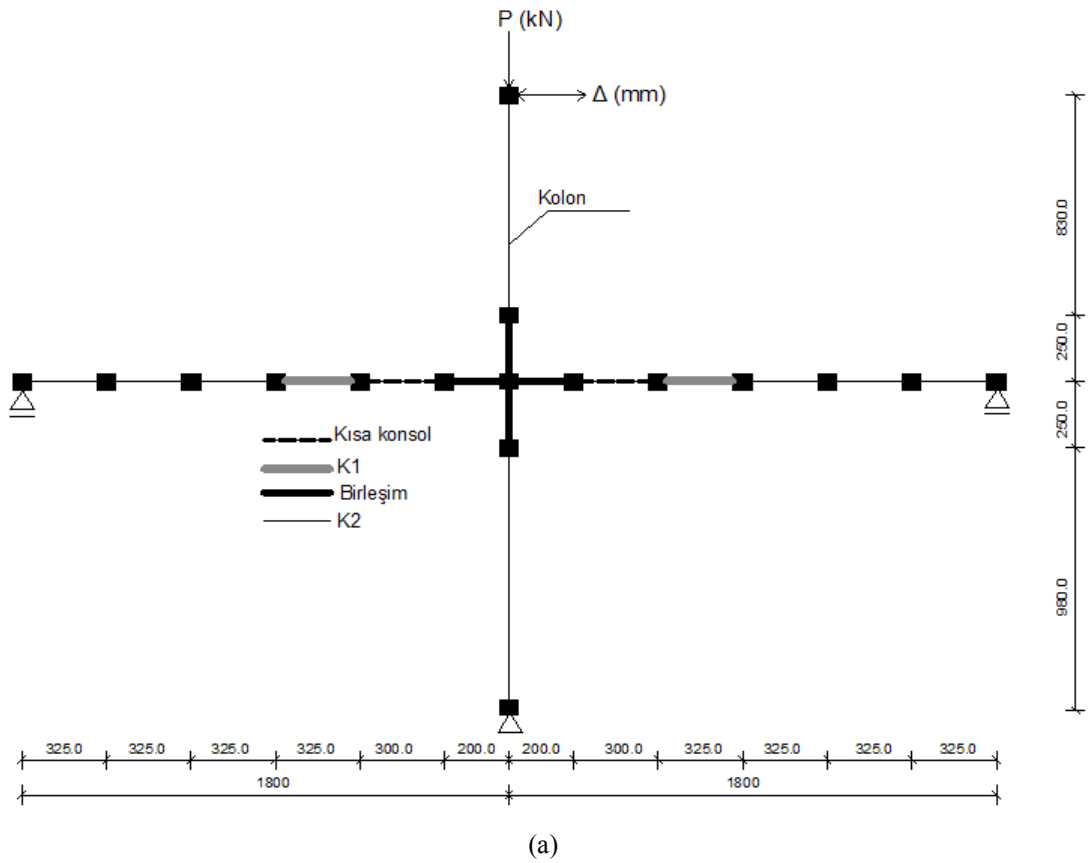
Şekil 6.9 N4 numunesi deney verisi ile IMK modelinin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırılması



Şekil 6.10 N5 numunesi deney verisi ile IMK modelinin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırılması

6.4 Lif Esaslı Yaklaşım ile Sayısal Model

N4 birleşim bölgesi deney numunesinin testler sırasındaki çevrimsel davranışının benzeştirilebilmesi amacıyla *lif esaslı model* kullanılmıştır. Şekil 6.11’de hesap modeli verilen numune kolon ve kiriş elemanlar *kuvvet-esaslı kolon-kiriş elemanı* olarak tanımlanmıştır. Kolon ve kiriş elemanlarda iki adet integrasyon noktası tanımlanmıştır.

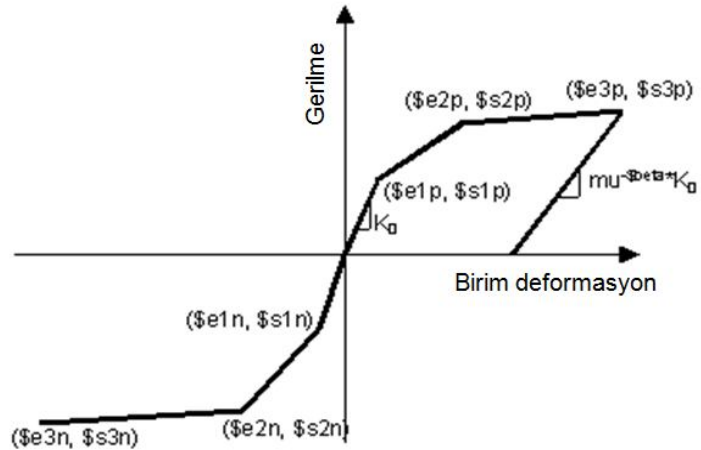


Şekil 6.11 (a) N4 numunesi için lif esaslı model; (b) kiriş, (c) kolon, (d) kısa konsol en kesiti

Şekil 6.11a'daki lif esaslı hesap modelinde, K1 ve K2 olmak üzere iki adet kiriş enkesiti verilmektedir. K1 kiriş enkesitinde, plakaya kaynaklı kiriş alt boyuna donatılarının birim deformasyonları, kopma birim deformasyon kapasitesi sınırlandırılan bir donatı modeli ile tanımlanmıştır. K2 kiriş enkesitinde ve K1 kirişi üst boyuna donatılarında ise, donatı çekme testlerine göre kalibre edilen donatı modeli kullanılmıştır. Birleşimin kolon içerisinde kalan kısmının hasarları deney sırasında sınırlı kaldığından, bu bölge elastik kolon-kiriş elemanları kullanılarak modellenmiştir. Şekil 6.11b ve Şekil 6.11c'de verilen kolon ve kiriş en kesitlerinde kabuk betonu sargısız beton, çekirdek betonu ise sargılı beton olarak modellenmiştir. Şekil 6.11d'de kısa konsolun kiriş ve kısa konsoldan oluşan lif eleman en kesiti verilmektedir.

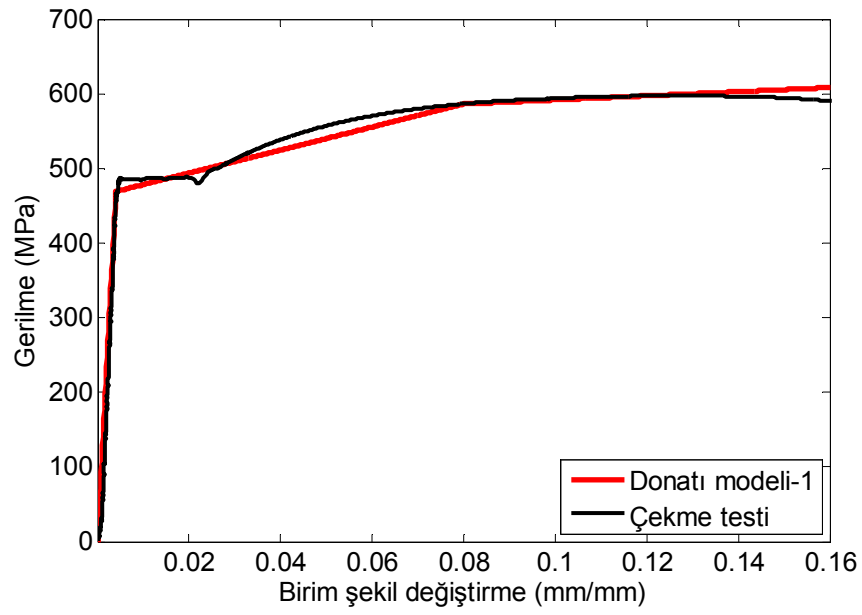
6.4.1 Donatı Çeliği

Lif esaslı modelde donatı çeliği için tek eksenli *histeretik malzeme modeli* kullanılmıştır. Kiriş boyuna donatılarının gerilme – birim deformasyon ilişkisi histeretik malzeme modelindeki köşe noktalar tanımlanarak kalibre edilmiştir. Histeretik malzeme modelinde, çevrim sıkışması parametreleri 0,5 olarak alınmıştır (McKenna ve diğer., 2000).



Şekil 6.12 Donatı çeliği için Histeretik malzeme modeli

Lif esaslı modellemede, kirişlerde iki tipte donatı modeli tanımlanmıştır. *Donatı modeli-1*, Şekil 6.13'de verilen kiriş üst boyuna donatısı için tanımlanan malzeme modelidir.

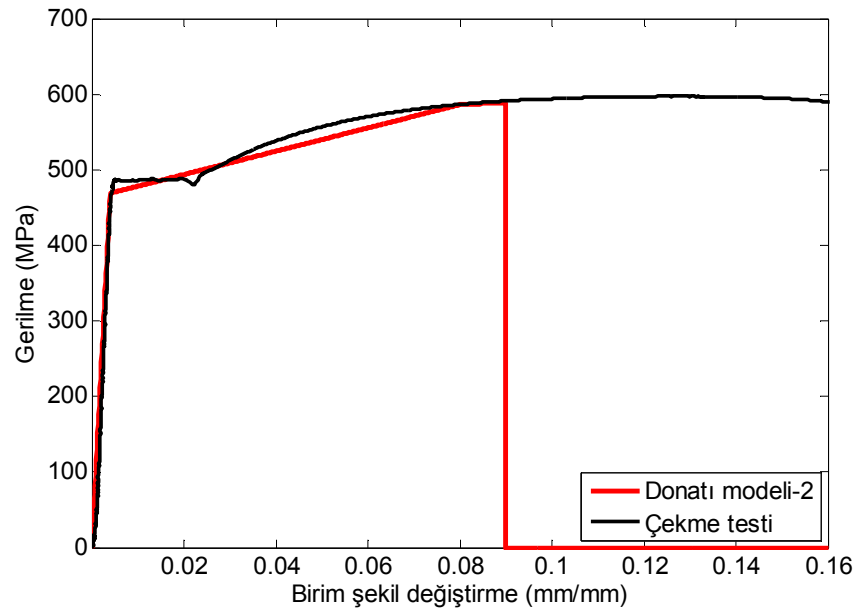


Şekil 6.13 Donatı Modeli-1 için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Prefabrik kirişin uç plakasına kaynaklı alt boyuna donatısında ise Şekil 6.14’de verilen *Donatı modeli-2* tanımlanarak maksimum birim şekil değiştirme (ϵ_{sm}), maksimum birim deformasyon $\epsilon_{su} = 0.15$ olmak üzere Priestley (2000) tarafından önerilen

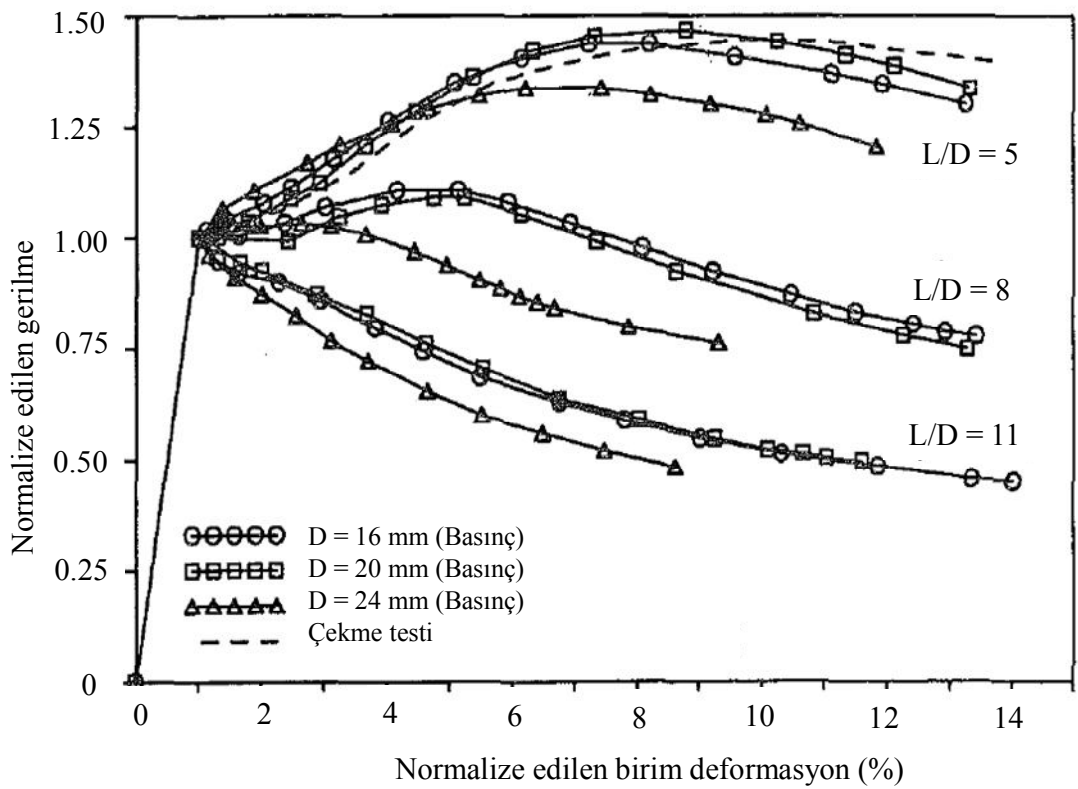
$$\epsilon_{sm} = 0.6 \epsilon_{su} \quad (6.1)$$

denkleminde göre $\epsilon_{sm} = 0.09$ ile sınırlandırılmıştır.



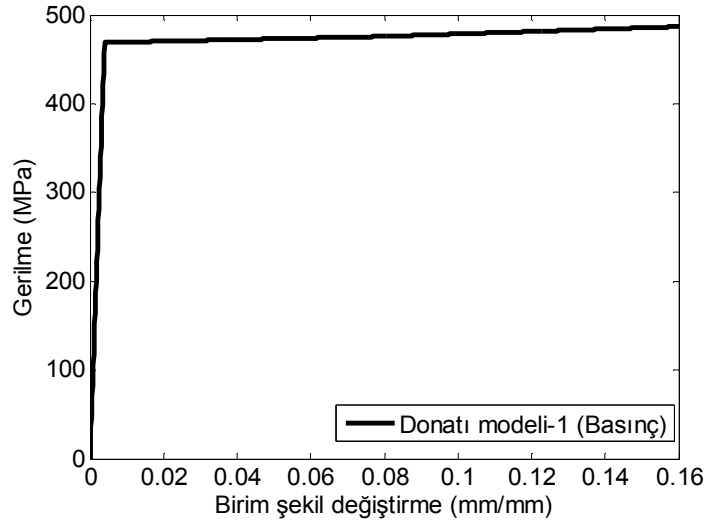
Şekil 6.14 Donatı Modeli-2 için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Prefabrik numunelerde kaynaklı bağlantının yakınında boyuna donatıda burkulma ve sonrasında plakadan kopma gerçekleşmiştir. Monti ve Nuti (1992) çalışmasında, donatılarda elastik olmayan burkulma etkileri araştırılmış, monotonik ve çevrimsel yükler etkisinde testler gerçekleştirilmiştir. İki ucu ankastre mesnetli donatıların uzunluğu L , çapı D olmak üzere, L/D oranı arttıkça burkulma etkilerinin daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Şekil 6.15’de farklı L/D oranları için normalize edilen gerilme-birim deformasyon ilişkileri verilmektedir.



Şekil 6.15 Monotonik testler sonucu normalize edilen gerilme-birim deformasyon ilişkileri (Monti ve Nuti, 1992).

N4 numunesinde etriye aralığı/boyuna donatı çapı (s_h/d_b) 5,55’tir. *Donatı modeli-1*’de burkulma etkilerinin göz önüne alınabilmesi için basınç yönünde, normalize edilen gerilme – birim deformasyon ilişkileri göz önüne alınarak kalibre edilmiş olup Şekil 6.16’da verilmektedir.



Şekil 6.16 Donatı modeli-1’de basınç yönü için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

6.4.2 Beton

Lif esaslı modelde kolon ve kiriş elemanlardaki beton malzeme modeli Şekil 6.17’de verilmektedir. Burada f_c' sargısız betonun $\varepsilon_0 = \% 0.2$ ’deki basınç dayanımıdır. Betonun basınç dayanımı Fujii beton modeline göre,

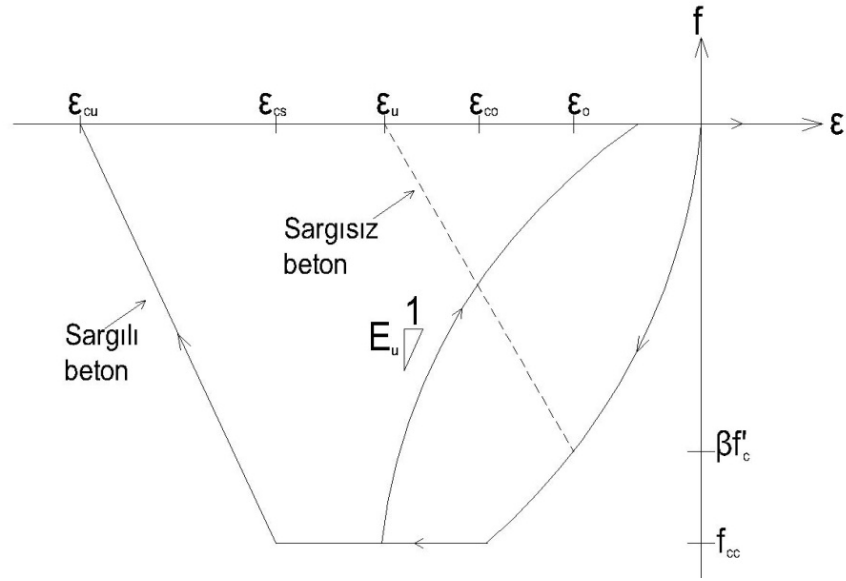
$$f(\varepsilon) = \begin{cases} E_c \varepsilon + 0.5 \left(\frac{f_c' - E_c \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right) \varepsilon^2 & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \\ \frac{f_c' - f_{cc}}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{c0})^3} (\varepsilon_0 - \varepsilon_{c0})^3 + f_{cc} & \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \end{cases} \quad (6.2)$$

denklemleri ile hesaplanır (Hoshikuma ve diğer., 1997). Betonun başlangıç elastisite modülü:

$$E_c = 5000 \sqrt{f_c'} \text{ (MPa)} \quad (6.3)$$

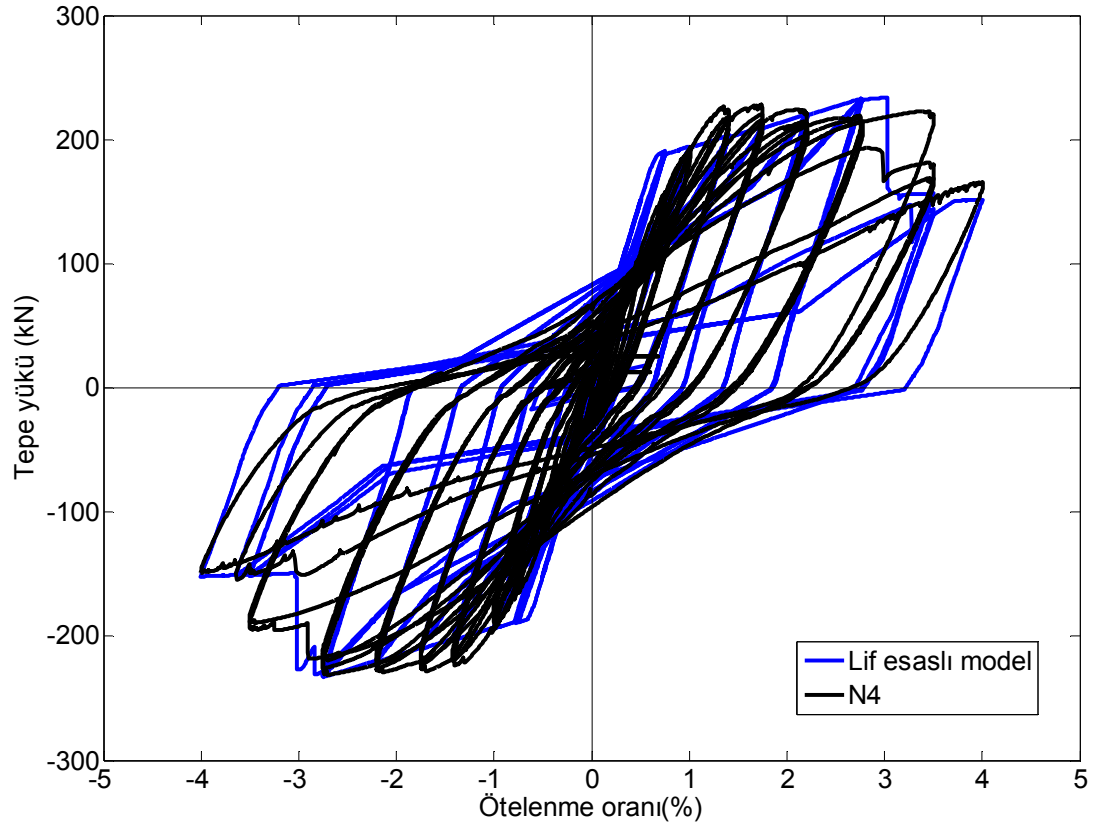
ile elde edilir. Opensees yazılımı kullanılarak kurulan sayısal modeller için Lu ve Panagiotou (2012) tarafından geliştirilen *Concretewbeta* adlı malzeme modeli kullanılmıştır.

Sargısız betonda, betonda gerilme beton basınç dayanımına (f_c') ulaştıktan sonra doğrusal olarak azalarak $\epsilon_u = \% 0,4$ birim şekil değiştirmesinde sıfıra ulaşır. Sargılı betonda maksimum beton gerilmesi (f_{cc}), ϵ_{cc} birim şekil değiştirmesinde oluşmaktadır ve ϵ_{cs} birim şekil değiştirmesinde betonda yumuşama başlamaktadır. Sargılı betonun gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi sargısız betondaki davranışa benzer şekilde f_c' gerilmesine kadar benzerdir. Mander ve diğer. (1988) çalışmasında verilen ifadelerle ilgili olarak kirişte sargılı beton için $\epsilon_{cc} = \% 0,3$; $\epsilon_{cu} = \% 1,1$ ve $f_{cc} = 49,7$ MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.17 Beton malzeme modeli için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

N4 numunesi için lif esaslı model kurularak tepe yükü-tepe yer değiştirmesi ilişkisi elde edilmiştir. Şekil 6.18'de N4 numunesi ile lif esaslı modelin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırması verilmiştir. N4 numunesi testinde plakaya kaynaklı boyuna donatılar % 3,5 ötelenme oranında plakadan kopmuştur. Lif esaslı modelde de her iki yönde bu ötelenme oranı sonrasında çevrim içi dayanım azalmasının sağlandığı görülmektedir. Ayrıca model deneysel çalışmada gözlenen dayanım ve rijitlik azalmasını yansıtabilmektedir.



Şekil 6.18 N4 numunesi deney verisi ile lif esaslı modelin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırılması

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, ülkemizdeki prefabrik yapılarda yaygın bir kullanım alanı bulan kompozit (ıslak-kaynaklı) moment aktarabilen kolon-kiriş birleşimlerini temsil eden numuneler deneysel olarak incelenmiş, prefabrik ve monolitik numunelerin dayanım, rijitlik ve enerji tüketimi bakımından karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmıştır. Prefabrik numunelerin tersinir-tekrarlı yükler altındaki davranışının benzeştirilebilebilmesi ve prefabrik yapılarda uygulanabilmesi açısından sayısal modeller kurulmuştur.

7.1 Tez Çalışmasından Elde edilen Genel Sonuçlar

- Monolitik birleşim bölgesi numunesinde, birleşimde donatının sıyrılması nedeni ile % 3,5 ötelenme oranından itibaren tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiklerinde çevrim sıkışması gelişmiş, % 3,5 ötelenme oranından itibaren % 5 ötelenme oranına kadar numunenin rijitlik ve enerji tüketiminde azalma meydana gelmiştir.
- Prefabrik numunelerin kiriş alt boyuna donatı-kiriş plakası kaynak hesaplarında Deprem Yönetmeliği (2007)'de verilen *kaynak katsayısı* (α) test değişkeni olarak alınmıştır. Kaynak katsayısı 1,2 ve 2,0 alınan prefabrik numunelerde, ileri ötelenme oranlarındaki davranışın kiriş alt boyuna donatısında gelişen birim deformasyonlardaki artışa bağlı olduğu belirlenmiştir.
- Prefabrik numunelerde hasarların kesme ve eğilme etkilerine bağlı olarak kısa konsol bitiminden itibaren kirişte yoğunlaştığı gözlenmiştir. Birleşimde çatlaklar sınırlı düzeyde kalmıştır.
- Donatıların kaynaklanabilirliğini etkileyen faktörler kimyasal içeriğinde yer alan karbon oranı ve karbon eşdeğeridir. Deneysel çalışmada birleşim bölgesi numuneleri için karbon oranı ve karbon eşdeğeri sınırlandırılan B420 C donatı sınıfının kullanılması öngörülmüştür. Prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin testleri gerçekleştirildikten sonra kaynaklı bağlantılarda alınan donatı numunelerinin kimyasal analiz testleri yaptırılmıştır. Ancak kimyasal analiz testleri sonucunda N1 numunesinde, kiriş alt boyuna donatısının karbon oranının

B420 C donatı sınıfını sağlamadığı, S420 donatı sınıfını sağladığı belirlenmiştir. N1 numunesinde diğer prefabrik numunelere göre kiriş boyuna donatılarındaki karbon oranının yüksek olması bu donatıların kaynaklanabilirliğini etkilemiş ve kaynaklama sırasında mekanik özellikleri bozulan donatının % 2,2 tepe ötelenme oranlarında kopmasına neden olmuştur.

- Aderans bozulma boyu yaklaşımı ile donatının kaynaklandığı plakadan kopmasının ileri tepe ötelenme oranlarına taşınması amaçlanmıştır. N2 numunesinde, kiriş alt boyuna donatısında gelişen en büyük çekme birim şekil değiştirmeleri aderans bozulma boyu bırakılarak belirgin şekilde azaltılmıştır ve donatılar kaynaklandıkları plakadan % 3,5 ötelenme oranında kopma birim deformasyonuna ulaşmıştır.
- N1,N2,N3 ve N4 prefabrik birleşim bölgesi numunelerinde, tersinir-tekrarlı yükler etkisi altında kaynaklı bağlantının 20 cm yakınındaki bölgede kiriş alt plakasına kaynaklı boyuna donatılarda burkulma meydana gelmiştir.
- N1-N4 prefabrik birleşim bölgesi numune testleri göz önüne alınarak N5 numunesi oluşturulmuştur. Bu numunede burkulma etkilerini önlemek için kiriş etriye aralıkları azaltılmış ve orta boyuna donatıları çirozlar ile mesnetlenmiştir. Ayrıca aderans bozulma boyu da revize edilerek boyuna donatı çapının 10 katı ($10d_b$) olarak alınmıştır. N5 numunesinde donatının aderans bozulma boyunun çelik kılıf içerisinde bulunması ve kirişte sargının artması ile kısa konsol yüzünden itibaren boyuna donatıların burkulması önlenmiş, kesme hasarları azaltılmıştır. N5 numunesinde % 3,5 ötelenme oranının ikinci çevrimine kadar dayanım azalması gözlenmemiştir. Öte yanda % 3,5 ötelenme oranının ikinci çevriminde donatının kaynaklandığı plakadan kopması ile dayanım % 35 oranında azalmıştır.
- N3 ve N4 numunelerindeki donatı-plaka kaynaklarında elektrot tipi parametre olarak seçilmiştir. Bazik elektrot (E42) kullanılan N4 numunesinde rutil elektrot (E38) kullanılan N3 numunesine göre dayanım ve enerji tüketimi açısından daha iyi sonuç elde edilmiştir.
- Prefabrik numunelerin testler sırasında gösterdikleri çevrimsel davranışlarının benzeştirilmesi için N4 ve N5 numuneleri dikkate alınarak yığılı plastisite yaklaşımı ve lif esaslı yaklaşımla sayısal model çalışmaları yapılmıştır. Yığılı

plastisite yaklaşımında, kiriş uçlarında moment-kesit dönmesi ($M-\Theta$) çevrimsel ilişkileri tanımlanmıştır. Lif esaslı modelde ise, kaynaklı donatılar için birim deformasyonların sınırlandırıldığı ve burkulma etkilerini dikkate alan bir donatı modeli önerilerek analizlerde kullanılmıştır. Her iki yaklaşımda da modellerin deney verilerini rijitlik ve dayanım azalması bakımından yansıttığı belirlenmiştir. Kompozit (ıslak-kaynaklı) bağlantıları bulunan prefabrik yapılarda, çalışmada yığılı plastisite yaklaşımı veya yayılı plastisite yaklaşımına dayalı lif esaslı modellerle elde edilen parametreler kullanılarak deprem etkisi altındaki analizler gerçekleştirilebilir.

7.2 Gelecek Çalışmalar için Öneriler

- Monolitik iç birleşimlerde donatı sıyrılmasına bağlı çevrim sıkışmasının azaltılabilmesi için donatı sayısı artırılıp, çapı azaltılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
- Deprem Yönetmeliği'nde kaynaklı bağlantıların hesabında iç kuvvetlerin 2,0 katsayısı ile artırılması gerektiği belirtilmiştir. Kaynak katsayısı değişken alınarak üretilen numunelerde, donatıda birim deformasyon kapasitesinde azalma olduğu saptanmıştır. Bu nedenle kaynaklı bağlantı hesaplarında, yalnızca kuvvet esaslı yöntemlerle hesap yerine donatı birim deformasyonları sınırlandırılarak şekil değiştirme esaslı yöntemler de kullanılmalıdır.
- Kaynaklı işlem gerektiren prefabrik yapılarda kullanılacak donatıların, karbon oranı ve karbon eşdeğeri için yönetmeliklerce üst limit getirilen donatı sınıflarının kullanılması uygun olacaktır.
- Prefabrik birleşim bölgelerinde kirişlerde boyuna donatının burkulmasını önlemek için etriye aralığı/boyuna donatı çapı (s_h / d_b) oranının azaltılması uygun olacaktır. Deprem yönetmeliği (2007)'de süneklik düzeyi yüksek kirişler için Madde 3.4.4'de sarılma bölgesindeki etriye aralığı en küçük boyuna donatı çapına bağlı ($s_k \leq 8\phi$) olarak verilmiştir. Madde 3.4.4 koşulunun kompozit (ıslak-kaynaklı) bağlantıları bulunan prefabrik birleşim bölgelerindeki kirişler için *“etriye aralıkları kiriş yüksekliğinin 1/4'ünü, en küçük boyuna donatı çapının 4 katını ve 100 mm'yi aşmayacaktır”* şeklinde düzenlenmesi uygun olabilir.

- Yalnız eğilme etkilerinin dikkate alındığı lif esaslı modellerde, kesme etkilerinin de dâhil edilerek sayısal model çalışmalarının yapılması uygun olacaktır.
- Prefabrik yapılarda taşıyıcı sistem davranış katsayısının (R) belirlenmesi için, çalışmada elde edilen lif esaslı ve yığılı plastisite yaklaşımına dayalı modeller kullanılabilir. Bu amaçla, sayısal modeller kullanılarak *Yapı Sismik Performans Faktörlerinin Belirlenmesi* (FEMA P-695, 2009) dokümanında belirtilen yöntemlerle taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- American Concrete Institute (2001). *ACI 550.1R-01 Emulating cast-in-place detailing in precast concrete structures*. Michigan, U.S.A.
- American Concrete Institute (2003). *ACI T1.02-03 Special hybrid moment frames composed of discretely jointed precast and post-tensioned concrete members*. Michigan, U.S.A.
- American Concrete Institute (2005). *ACI 318.05 Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute. Michigan, U.S.A.
- American Concrete Institute (2005). *ACI 374.1.05 Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*. Michigan, U.S.A.
- American Concrete Institute. (2013). *ACI 550.2R-13 Design guide for connections in precast jointed systems*. Michigan, U.S.A.
- Arslan, M. H., Korkmaz, H. H., ve Gulay, F. G. (2006). Damage and failure pattern of prefabricated structures after major earthquakes in Turkey and shortfalls of the Turkish Earthquake Code. *Engineering Failure Analysis*, 13 (4), 537–557.
- Ataköy, H. (2012). Ülkemizde üretilen donatı çeliklerindeki kalite problemleri ve TS 708 (2010). *Beton Prefabrikasyon*, 103, 5-10.
- Atalay, H. M. (2010). *Moment aktarabilen prefabrike kolon-kiriş birleşimlerinin tersinir yükler etkisindeki performansı*. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Barin, B., ve Pinchiera, J. (2002). *Influence of modelling parameters and assumptions on the seismic response of existing RC building*. A report sponsored by the U.S. National Science Foundation.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik*. 26454 Sayılı Resmi Gazete, Ankara.

Ceresa, P., Petrini, L., ve Pinho, R. (2007). Flexure-shear fiber beam-column elements for modeling frame structures under seismic loading — State of the art. *Journal of Earthquake Engineering*, 11 (1), 46-88.

Ceresa, P., Petrini, L., Pinho, R. ve Sousa, R. (2009). A fibre flexure-shear model for seismic analysis of RC-framed structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 565-586.

Chang, B., Hutchinson, T. C. ve Englekirk, R. E. (2008). *Experimental seismic performance evaluation of innovative beam-column subassemblies*. SSRP Report No. 08/01, University of California, San Diego.

Cheok, G. S., Stone, W. C., ve Lew, H. S. (1993). *Performance of 1/3-scale model precast concrete beam-column connections subjected to cyclic inelastic loads* – Report No.3, NISTR 5246, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, MD.

Cheok, G. S., ve Stone, W. C. (1994). *Performance of 1/3 scale model precast concrete beam column connection subjected to cyclic inelastic loads*. Report No. 4. Report No. NISTIR 5436, Building and Fire Research Laboratory, NIST, Gaithersburg, MD, 59.

Cheok, G. S., Stone, W. C., ve Nakaki, S. D. (1996). *Simplified design procedure for hybrid precast concrete connections*. NISTIR 5765; 92, February 1996.

Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of structures* (3rd ed.). USA: Prentice Hall.

Doğruöz, İ. (2005). *Prefabrike endüstri yapılarının tasarımı, onarımı güçlendirilmesi ve maliyet karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Elliot, K. S. (2002). *Precast concrete structures* (1st ed.). Britain: Butterworth-Heinemann.
- Englekirk, R. E. (1986). Overview of PCI workshop on effective use of precast concrete for seismic resistance. *PCI Journal*, 31 (6), 48-58.
- Englekirk, R. (1995). Development and testing of a ductile connector for assembling precast concrete beams and columns, *PCI Journal*, 40 (4), 36-51.
- Englekirk, R. (2003). *Seismic design of reinforced and precast concrete buildings* (1st ed.). USA:Wiley.
- Ericson, A. C., ve Warnes, C. E. (1990). Seismic technology for precast concrete systems,” *Concrete Industry Bulletin*, Concrete Industry Board, Inc., Spring.
- Ersoy, U., ve Tankut, T. (1993). Precast concrete members with welded plate connections under reversed cyclic loading. *PCI Journal*, 94-100.
- Ertas, O. (2005). *Ductile beam-column connections in precast concrete moment resisting frames*. Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Ertas, O., Özden, Ş. ve Özturan, T. (2006). *Prefabrik yapılarda moment aktarabilen sünek kolon – kiriş birleşimleri*, Araştırma Raporu. Türkiye Prefabrik Birliği.
- Favvata, M., Izzuddin, B., ve Karayannis, C. G. (2008). Modelling exterior beam-column joints for seismic analysis of RC frame structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37 (13), 1527-1548.
- Federal Emergency Management Agency (2005). *FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington DC.
- Federal Emergency Management Agency (2009). *FEMA P-695 Quantification of building seismic performance factors*, Washington DC.

- Federal Emergency Management Agency (2011). *FEMA P-795 Quantification of building seismic performance factors: Component equivalency methodology*, Washington DC.
- French, C. W., Amu, O., ve Tarzikhah, C. (1989). Connection between precast elements failure outside connection region. *Journal of Structural Engineering*, 115 (2), 316- 340.
- Giberson, M.F. (1969). Two nonlinear beams with definition of ductility. *Journal of the Structural Division*, 95 (ST2),137–157.
- Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., ve Taylor, A. W. (1997). Stress- strain model for confined reinforced concrete in bridge piers, *Journal of Structural Engineering*, 123(5), 624-633.
- Ibarra, L. F., Medina, R. A., ve Krawinkler, H. 2005. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1489-1511.
- Im, H., Park, H., ve Eom, T. (2013). Cyclic loading test for reinforced-concrete-emulated beam-column connection of precast concrete moment frame. *ACI Structural Journal*, 110 (1), 115-125.
- Karadoğan , F., Yüksel ve E., ve Bal, İ. E. (2012). SAFECAST Araştırma Projesinin bir parçası olarak iki tip prefabrike dış kolon – kiriş birleşim bölgesi. *Beton Prefabrikasyon*, 102, 7-61.
- Kaya, M. (2007). *Prefabrike yapılarda ard çekmeli kolon-kiriş birleşimlerinin tersinir yükler altında performansının incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Korkmaz, H. H., ve Tankut,T. (2005). Performance of precast concrete beam-to-beam connection subject to reversed cyclic loading. *Engineering Structures*, 27, 1392-1407.

- Lignos, D.G., ve Krawinkler, H. (2013). Development and utilization of structural component databases for performance-based earthquake engineering. *Journal of Structural Engineering*, 139, 1382-1394.
- Lowes, L. N. ve Altoontash A (2003). Modeling reinforced-concrete beam–column joints subjected to cycling loading. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 129 (12), 1686–1697.
- Lu, Y., ve Panagiotou, M. (2013). Three-dimensional cyclic beam-truss model for non-planar reinforced concrete walls, *Journal of Structural Engineering, ASCE Journal of Structural Engineering*, published online April 13, 2013.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., ve Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Division (ASCE)*, 114 (8), 1804-1826.
- McKenna, F., Fenves, G. L., ve Scott, M. H. (2000). *Open system for earthquake engineering simulation*, Berkeley, CA., University of California. <<http://opensees.berkeley.edu>>.
- Megenes, G. ve Pampanin, S. (2004). Seismic response of gravity-load design frames with masonry infills. *13th World Conference on Earthquake Engineering. Canada* August 1-6, 2004.
- Monti, G., ve Nuti, C. (1992). Nonlinear behaviour of reinforcing bars including buckling. *Journal of Structural Engineering*, 118 (12), 3268-3284.
- Mostafaei, H., ve Vecchio, F.J. (2008). Uniaxial shear-flexure model for reinforced concrete elements. *Journal of Structural Engineering*, 134, 1538-1547.
- Özden, Ş. ve Meydanlı, H. (2003). *Seismic response of pre-cast industrial buildings during 1999 Kocaeli earthquake*, SE-40EEE, Skopje Earthquake 40 Years of European Earthquake Engineering, Skopje, Macedonia.

- Özmen, G. ve Zorbozan, M. (2010). *Bir Prefabrike Yapı Tasarımı* (1. Baskı). Ankara: Türkiye Prefabrik Birliği.
- Park, R., ve Bull, D. K. (1986). Seismic resistance of frames incorporating precast prestressed concrete beam shells, *PCI Journal*, 31(4), 54-93.
- Park, R. (1989). Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 22 (3) 55–166.
- Pampanin, S., Priestley, M. J. ve Sritharan, S. (2001). Analytical modeling of the seismic behaviour of precast concrete frames designed with ductile connections. *Journal of Earthquake Engineering*, 5 (3), 239-367, 2001.
- Pınarbaşı, S., (2000). *Development and seismic performance of a precast concrete beam– column connection by post tensioning*. Yüksek Lisans Tezi. Middle East Technical University, Ankara.
- Pinho, R, ve Elnashai, A.S. (2000). Dynamic collapse testing of a full-scale four storey RC frame. *ISET Journal of Earthquake Engineering*, 37 (4), 143–164.
- Posada, M. ve Wood, S. (2002). Seismic performance of precast industrial buildings in Turkey. *Proceedings of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, July 21-25, 2002, Boston, MA.
- Priestley, M.J.N. (2000). Performance based seismic design. *Proc. 12 World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, paper No 2831.
- Priestley, M. J. N. (1991). Overview of PRESSS research program. *PCI Journal*, 36 (4), 50-57.

- Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. ve Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures* (1st ed.). Italy: IUSS Press.
- Ranzo, G., ve Petrangeli M. (1998). A fibre finite beam element with section shear modelling for seismic analysis of RC structures. *Journal of Earthquake Engineering* 2, 443–473.
- Restrepo, J. I., Dodd, L. L., Park, R., ve Cooke, N. (1994). Variables affecting cyclic behavior of reinforcing steel. *Journal of Structural Engineering*, 120 (11), 3178-3196.
- Restrepo, J., Advanced Seismic Design of Structures, Lecture Notes, University of California, San Diego, 2012.
- Rodriguez, M.E. , Botero, J.C. ve Villa, J. (1999). Cyclic stress-strain behavior of reinforcing steel including effect of buckling. *Journal of Structural Engineering*, 125 (6), 605-612.
- Rodriguez, M. E., ve Rodriguez, A. (2006). Welding of rebars in reinforced concrete structures in seismic zones of Mexico must be avoided, *Revista de Ingenieria Sismica, Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica*, 75, 69-95.
- Rodriguez, M. E., ve Matos, M. T. (2013). Seismic behavior of a type of welded precast concrete beam-column connection. *PCI Journal, Summer*, 81-94.
- Saatcioglu, M., Mitchell, D., Tinawi, R., Gardner, N.J., Gillies, A.G., Ghobarah, A. ve Lau, D. (2001). The August 17, 1999 Kocaeli (Turkey) earthquake-damage to structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28 (4), 715–737.
- Saritas, A. (2006). Mixed formulation frame element for shear critical steel and reinforced concrete members. Doktora Tezi, University of California, Berkeley, USA.

- Senel, S. M., ve Kayhan, A. H. (2010). Fragility based damage assessment in existing precast industrial buildings: A case study for Turkey. *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, 34(1), 39–60.
- Senel, S., ve Palanci, M. (2013). Structural aspects and seismic performance of 1-story precast buildings in Turkey. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27 (4), 437-449.
- Sucuoğlu, H. (1995). *Öndökümlü Beton Yapı Birleşimlerinin Deprem Dayanımı*. Proje Raporu, TÜBİTAK INTAG 501 (MAG 739/A).
- TS 708 (2010). *Çelik- betonarme için donatı çeliği*
- TS EN ISO 2560 (2013). *Kaynak sarf malzemeleri –alaşımsız ve ince taneli çeliklerin elle yapılan metal ark kaynağı için örtülü elektrotlar- Sınıflandırma*
- Zermeno, M., Fuentes, A., ve Aire, C. (1992). *Cyclic lateral load response of beam-column connections for precast construction*. Internal report 1704. Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico City, Mexico.
- Zhao, J., ve Sritharan, S. (2007). Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures. *ACI Structural Journal*, 104 (2), 133-141.

EKLER

EK-A. NUMUNELERİN BETONARME HESAPLARI

EK-B. DENEY NUMUNELERİNİN ÜRETİM AŞAMALARI

EK-C. OPENSEES VERİ ANALİZ DOSYALARI

EK A. NUMUNELERİN BETONARME HESAPLARI

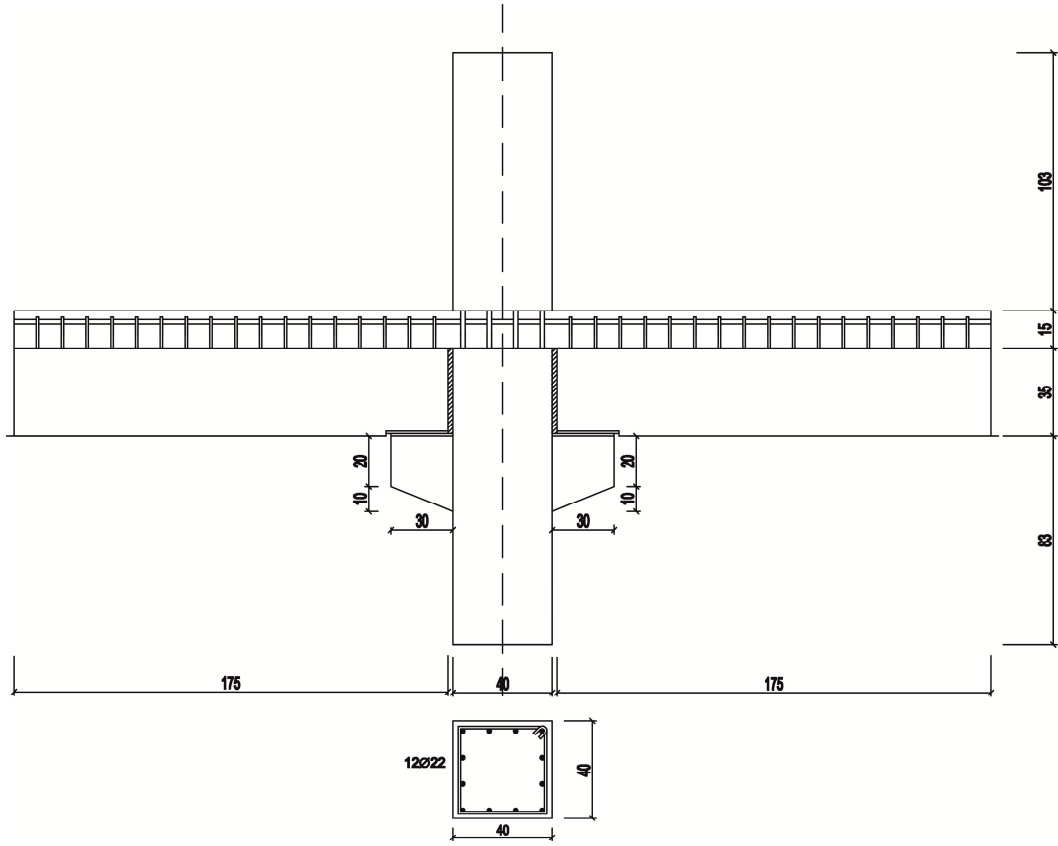
A.1. Numunelerin Özellikleri

Beton sınıfı: C35,

Donatı sınıfı: B420 C, S420

N1,N2 Numuneleri ($\alpha=2.0$),

N3,N4 VE N5 Numuneleri ($\alpha=1,2$)



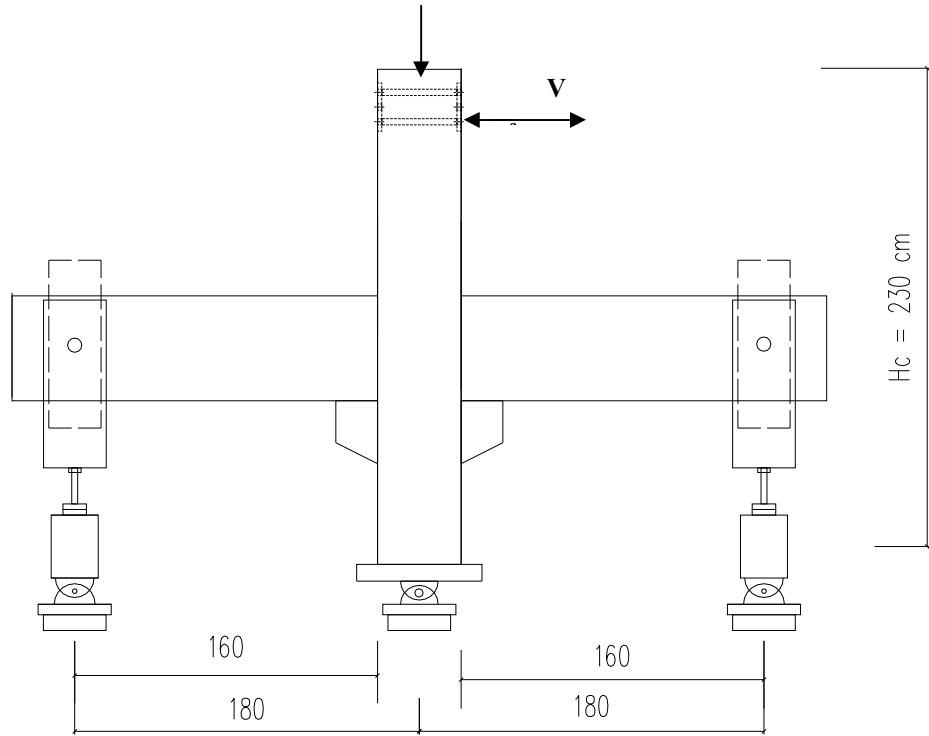
Şekil A.1 Prefabrik numuneler

A.2. Betonarme Hesaplar

A.2.1 Kesit Moment Kapasiteleri

Kolon moment – eğrilik ilişkileri elde edilerek Şekil 2’de verilmiştir. Birleşim numunelerine kolon eksenel yük kapasitesinin % 10’u oranında eksenel yük deney süresince uygulanacaktır. Kolon Moment – Eğrilik ilişkileri bu yük değeri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Kiriş taşıma gücü momenti: $M_r = 150 \text{ kNm}$, $M_p = 210 \text{ kNm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil A.2 Prefabrik numuneler

Kolon yüzünde kirişte plastik mafsall geliştiği anda kiriş ve kolonda gelişen uç kuvvetleri:

$$V_b \times 1.6^m = 210 \text{ kNm}; V_b = 131 \text{ kN}$$

A.2.1 Kiriş Kesme Hesabı

$$\left. \begin{array}{l} s_c \leq \frac{50}{4} = 12.5cm, \\ s_c \leq 8\phi_l = 8.1,8 = 14.4cm, \end{array} \right\} \text{Kiriş sarılma bölgesinde TDY koşulları}$$
$$s_c \leq 15cm$$

$$V_b = 131 \text{ kN}$$

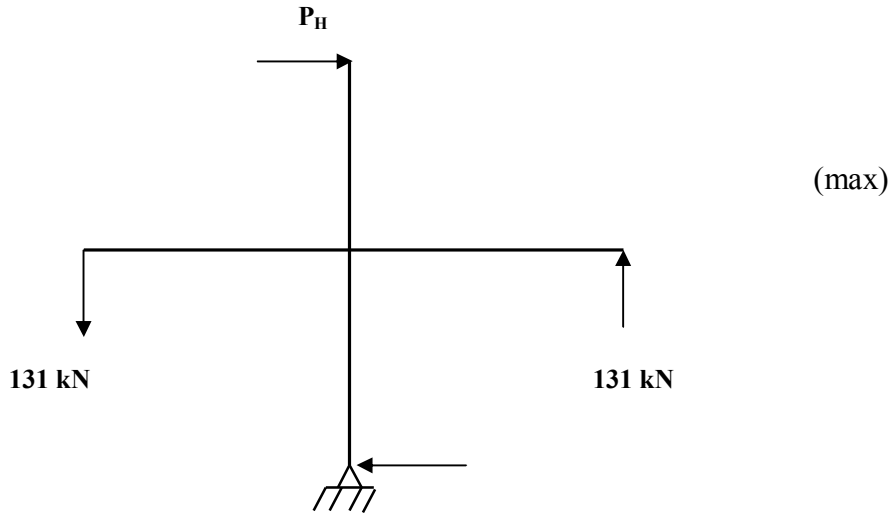
$$\text{Seçilen etriye: } \phi 10/10; \frac{A_{sw}}{s} = 1.58mm$$

$$V_s = A_s x f_{yk} x \frac{d}{s} = 2x78.5x420x \frac{350}{100} = 230 \text{ kN (yalnızca etriyeler dahi yeterli)}$$

$$V_c = 0.8x0.65x0.35x\sqrt{35}x300x450 = 143 \text{ kN (Kesme çatlakları } M_p \text{'ye ulaşıldığında belirginleşir)}$$

$$\text{Buna göre seçilen } \phi 10/10; \frac{A_{sw}}{s} = 1.58mm \text{ uygundur.}$$

A.2.2 Kolon Kesme Hesabı



$$P_H = \frac{2 \times 1.8 \times 131}{2.3} = 205$$

$$\text{Beton katkısı : } V_c = 0,8 \cdot 0,65 \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d \cdot \left(1 + 0,07 \cdot \frac{N_d}{A_c} \right);$$

$N_d = 600 \text{ kN}$ (deney süresince kolona uygulanacak aksenal yük) olmak üzere,

$$\frac{N_d}{A_c} = \frac{600000^N}{(400^{mm} \times 400^{mm})} = 3,75^{MPa} < 7^{MPa} \text{ (uygun)}$$

$$V_c = 0.8 \times 0.65 \times 0.35 \times \sqrt{35} \times 400 \times 350 = 150 \text{ kN}$$

$$\frac{A_{sh}}{s} = \frac{(V_e - V_c)}{f_{ywk} \cdot d} = \frac{(313200 - 0)}{420.360} = 2.38 \text{ mm}$$

Sarılma bölgesinde :

$$b_k = (40 - 2.2 - 2.0 \cdot 8/2) = 35 \text{ cm}$$

$$A_{ck} = (35 \times 35) = 1225 \text{ cm}^2, A_c = (40 \times 40) = 1600 \text{ cm}^2$$

$$\frac{A_c}{A_{ck}} = \frac{1600}{1225} = 1,306 > 1,25 \text{ buna göre;}$$

- Deprem Yönetmeliği 3.3.4'te $N_d \leq 0,2 A_{ck} f_{ck}$ olması durumunda (a) ile (b) ile verilen ifadelerden en az 2/3'ü minimum enine donatı olarak kullanılacaktır.

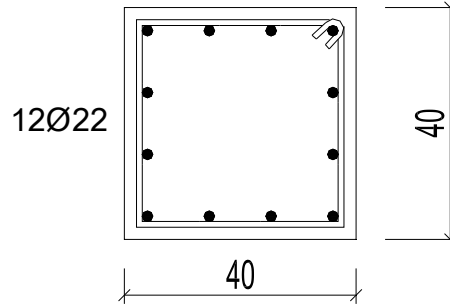
$$\text{a) } \frac{A_{sh}}{s} \geq 0,30 x b_k x \left(\frac{A_c}{A_{ck}} - 1 \right) x \frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \quad \text{ve} \quad \text{b) } \frac{A_{sh}}{s} \geq 0,075 x s x b_k x \frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \text{ olmalıdır.}$$

$$\text{a) } \frac{A_{sh}}{s} \geq 0,30 x 350 x (1,306 - 1) x \frac{35}{420} x \frac{2}{3} = 1,78 \text{ mm ;}$$

$$\text{b) } \frac{A_{sh}}{s} \geq 0,075 x 350 x \frac{35}{420} x \frac{2}{3} = 1,46 \text{ mm}$$

$$\frac{A_{sh}}{s} \geq 1,78 \text{ mm olmalıdır; } s=80 \text{ mm ve } \phi 10 \text{ seçilirse (Tek dış etriye, n=2)}$$

$$\text{Seçilen etriye: } \phi 10 / 80^{mm}; A_{sh} = 158 \text{ mm}^2$$



Şekil A.3 Kolon en kesiti

A.2.3 Kolon – Kiriş Birleşimlerinin Kırma Güvenliđi

$$V_e = [1,25 \cdot f_{yk} \cdot (A_{s1} + A_{s2}) - V_{kol}] ; V_{kol} = \min (V_a, V_{\ddot{u}}),$$

$V_{kol} = 200 \text{ kN}$ alınırsa;

$$V_e = [1,25 \times 420 \times (762 + 762) - 200] = 587,5 \text{ kN}$$

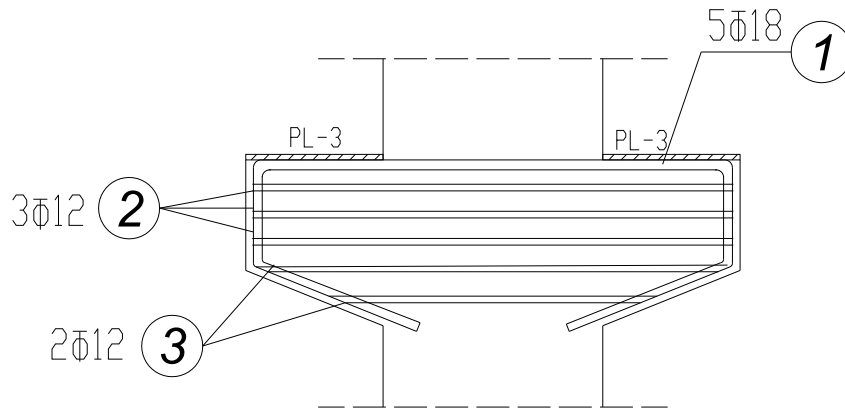
$$V_e \leq 0,45 \cdot b_j \cdot h \cdot f_{cd} \text{ (Kuşatılmamış birleşimlerde)}$$

$$b_j = 2 \cdot \min(b_1, b_2), b_1 = b_2 = 200 \text{ mm}$$

$$b_j = 400 \text{ mm}$$

$$V_e = 587,5 \text{ kN} < 0,45 \times 400 \times 400 \times 35 = 2520 \text{ kN} \text{ (sağlanmıştır)}$$

A.2.4 Kısa Konsol Hesabı:



Şekil A.3 Kısa konsol

A.3 Kaynak Hesapları

A.3.2 N1 ve N2 Numuneleri

A.3.2.1 Ana Donatı – Plaka Kaynak Hesapları:

Alt donatının aktığı anda gelişen kuvvet değeri: $F_{sy} = 320 \text{ kN}$

Alt donatı – plaka kaynak boyunun belirlenmesindeki kuvvet değeri donatının aktığı anda gelişen F_{sy} kuvvetinin 2 katı olarak alınmıştır.

$$T_i = \frac{T_{\max} \cdot x A_i}{\Sigma A_i}, T_1 = \frac{320 \times 2}{3} = 213.3 \text{ kN}$$

Kaynak kalınlığı : $a \leq 0.3x\phi$ ve $a \leq 0.7xt$

$$a \leq 0.3 \times 18 = 5.4 \text{ mm}, a \leq 0.7 \times 10 = 7 \text{ mm}$$

$$a_{\text{seç}} = 3 \text{ mm}$$

$$l_{\text{kaynak}} \geq \frac{T_{i,\max}}{2 \times a \times \tau_{k,\text{hes}}}, \tau_{k,\text{hes}} = \tau_{k,\text{em}} = 110 \text{ MPa}$$

$$l_{\text{kaynak}} \geq \frac{213300^N}{2 \times 3 \times 110} = 323.2 \text{ mm}$$

$$\min l_{T,\text{kaynak}} = 323.2 + 2 \times 3 = 329 \text{ mm}$$

$$\text{Seçilen } l_{T,\text{kaynak}} = 340 \text{ mm} > 329 \text{ mm}$$

Numuneler için kısa konsol boyu 450 mm seçilmiştir.

A.3.2.2 Levhalar Arası Kaynak Hesabı

Levha Kalınlığı (t) : 10 mm

Kaynak kalınlığı (a) : $\leq 0.7t_{\min} = 0.7 \times 10 = 7 \text{ mm}$

$$a_{\text{seç}} = 7 \text{ mm}$$

$$T_{\max} = 3 \times 213 = 639 \text{ kN}$$

$$l_{k,hes} \geq \frac{T_{\max}}{ax\tau_{k,hes}} = \frac{639000^N}{(7 \times 110)} = 830 \text{ mm}$$

$$l_k = (2 \times 430 - 4 \times 7) = 832 \text{ mm}$$

$$l_k = 832 \text{ mm} > l_{k,hes} = 830 \text{ mm}$$

A.3.2 N3-N5 Numuneleri

A.3.1.1 Ana Donatı – Plaka Kaynak Hesapları:

Alt donatının aktığı anda gelişen kuvvet değeri: $F_{sy} = 320 \text{ kN}$

Alt donatı – plaka kaynak boyunun belirlenmesindeki kuvvet değeri donatının aktığı anda gelişen F_{sy} kuvvetinin 1.2 katı olarak alınmıştır.

$$T_i = \frac{T_{\max} \times A_i}{\Sigma A_i}, T_1 = \frac{320 \times 1.2}{3} = 128 \text{ kN}$$

Kaynak kalınlığı : $a \leq 0.3x\phi$ ve $a \leq 0.7xt$

$$a \leq 0.3 \times 18 = 5.4 \text{ mm}, a \leq 0.7 \times 10 = 7 \text{ mm}$$

$$a_{se\check{c}} = 3 \text{ mm}$$

$$l_{kaynak} \geq \frac{T_{i,max}}{2ax\tau_{k,hes}}, \quad \tau_{k,hes} = \tau_{k,em} = 110 \text{ MPa}$$

$$l_{kaynak} \geq \frac{128000^N}{2x3x110} = 193.9 \text{ mm}$$

$$\min l_{T,kaynak} = 193.9 + 2x3 = 199.9 \text{ mm}$$

$$\text{Se\c{c}ilen } l_{T,kaynak} = 200 \text{ mm} > 199.9 \text{ mm}$$

A.3.1.2 Levhalar Arası Kaynak Hesabı:

Levha Kalınlığı (t) : 10 mm

Kaynak kalınlığı (a) : $\leq 0.7t_{\min} = 0.7 \times 10 = 7 \text{ mm}$

$$a_{se\check{c}} = 7 \text{ mm}$$

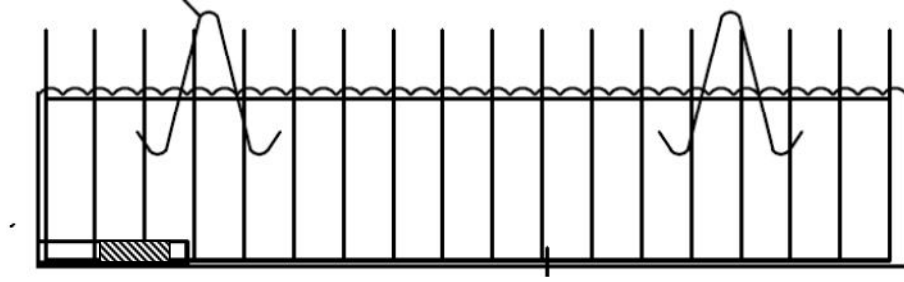
$$T_{\max} = 3 \times 128 = 384 \text{ kN}$$

$$l_{k,hes} \geq \frac{T_{\max}}{ax\tau_{k,hes}} = \frac{384000^N}{(7x110)} = 498.7 \text{ mm}$$

$$l_k = (2 \times 270 - 4x7) = 512 \text{ mm}$$

$$l_k = 512 \text{ mm} > l_{k,hes} = 498.7 \text{ mm}$$

A.4 Aderans Bozulma Boyu Hesabı



Şekil A.4 Prefabrik N3 numunesinde aderans bozulma boyu bırakılması

Δ : % 4 görelî kat ötelenme oranında kolon – kiriş ara yüzünde açılmaya bağı donatıdaki uzama

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta}{L_{sp} + L_{unb}} \leq \varepsilon_{su} ,$$

$$L_{sp} = 0.022 f_{yk} d_{bl}$$

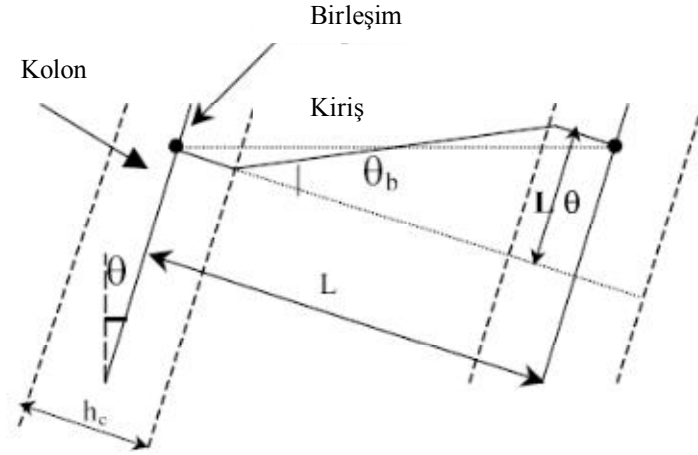
1.Donatının kopma birim deformasyon limiti

$$\varepsilon_s - \varepsilon_{cc} = \frac{14 - \frac{4s_h}{3d_b}}{100} \leq \frac{\varepsilon_{su}}{2} \quad \text{denklemler ile}$$

$$\varepsilon_s = -0.004 + \frac{14 - \frac{4 \times 100}{3 \times 18}}{100} ,$$

$$\varepsilon_s = 0.062 < \frac{0.15}{2} = 0.075$$

2.Kirişte %4 görelî kat ötelenme oranına bağlı max. Eğrilik



Şekil A.5 Görelî kat ötelenme oranı - kiriş uç dönmesi ilişkisi (Pampanin v.d. 2001)

$$\theta_b = \frac{\theta}{\left[1 - \frac{h_c}{L}\right]}$$

$$\theta_b = \frac{0.04}{\left[1 - \frac{400}{3600}\right]} = 0.045$$

$$\theta_b = \frac{1}{L_{bn}} \left[\frac{\phi_y (L_{bn} - L_p)^2}{3} + \phi_u L_p (L_{bn} - 0.5L_p) \right]$$

$$0.045 = \frac{1}{1.6^m} \left[\frac{0.01 (1.6 - 0.25)^2}{3} + \phi_u 0.25 (1.6 - 0.125) \right]$$

$$\phi_u = 0.179 (1/m)$$

3.Donatıda %4 görelî kat ötelenme oranındaki uzama

Donatının kopma birim deformasyon limitinin max eğriliğın olduğu anda oluştuğú dikkate alınırsa;

$$\frac{\varepsilon_s}{(d-c)} = \phi_u$$

$$\frac{0.062}{(0.46-c)} = 0.179; \quad c = 0.114 \, m$$

$$\Delta = \theta_b (d-c)$$

$$\Delta = 0.045(0.46-0.114) = 0.016 \, m$$

4.Aderanssız Boy (L_{unb}) belirlenmesi

$$L_{sp} = 0.022 f_{yk} d_{bl} \, (MPa)$$

$$L_{sp} = 0.022 \times 420 \times 18 = 166.3 \, mm$$

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta}{L_{sp} + L_{unb}} \leq \varepsilon_{su}$$

$$0.062 = \frac{16}{166.3 + L_{unb}} ,$$

$$L_{unb} = 91.8 \, mm$$

EK-B. DENEY NUMUNELERİNİN ÜRETİM AŞAMALARI

Dere Prefabrik üretim tesislerinde monolitik ve prefabrik numunelerin hazırlıkları yapılmıştır.

- Kiriş alt boyuna donatılarının ve etriyelerin plakaya kaynaklanması

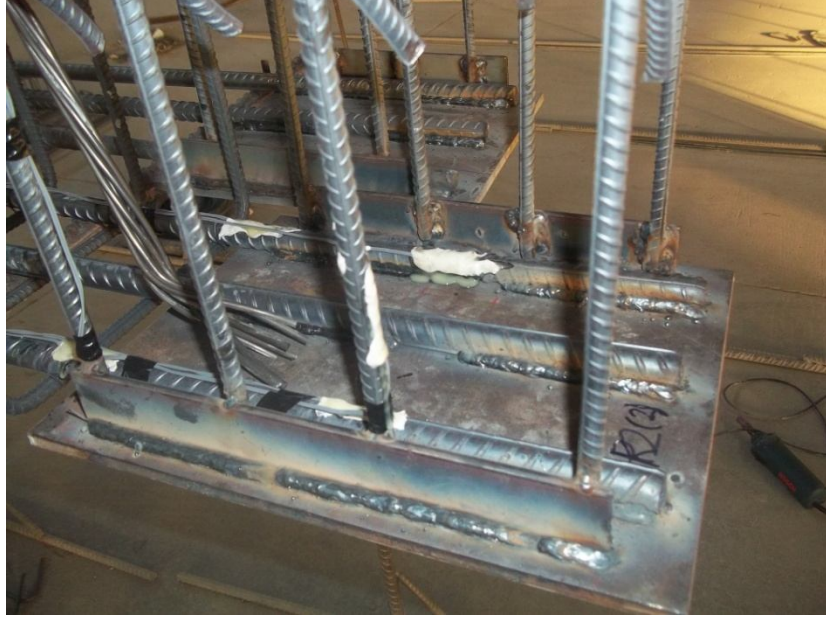


Şekil B.1 Kiriş boyuna donatılarının plakaya kaynaklanması



Şekil B.2 Kiriş etriyelerinin ek plakalara kaynaklanması

- Gerinim pullarının (strain gauge) kolon ve kiriş elemanlarda hasarların yoğunlaşabileceği olası kesitlere yerleşimi



Şekil B.3 Kirişte alt boyuna donatılarda gerinim pullarının yerleşimi



Şekil B.4 Kolonda birleşime gerinim pullarının yerleşimi

- Kolon ve kiriş elemanların beton dökümü



Şekil B.5 Kolonda beton dökümü



Şekil B.6 Kirişlerin beton dökümü

- Prefabrik birleşim bölgesi numunelerinin D.E.Ü. Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda montajı



Şekil B.7 Kolonun düşey konuma getirilmesi ve kirişlerin mesnetlenmesi



Şekil B.8 Kirişlerin kısa konsol plakalarına kaynaklanması

- Tamamlayıcı beton (topping betonu) dökülmesi



Şekil B.9 Kirişlere ve birleşime tamamlayıcı beton için kalıp hazırlığı



Şekil B.10 Tamamlayıcı beton dökümü

EK-C. OPENSEES VERİ ANALİZ DOSYALARI

C1. YIĞILI PLASTİSİTE MODELİ (N3 Numunesi)

```
# Remove existing model
```

```
wipe
```

```
#####  
#####
```

```
#      Set Up & Source Definition
```

```
#####  
#####
```

```
# UNITS kips, inch
```

```
# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 2 DOF/node)
```

```
model basic -ndm 2 -ndf 3;
```

```
set dataDir datafiber; # opening data file
```

```
file mkdir $dataDir;
```

```
source DisplayPlane.tcl;          # procedure for displaying a plane in model
```

```
source DisplayModel2D.tcl;        # procedure for displaying 2D perspective of model
```

```
source rotSpring2DModIKModel.tcl; # procedure for defining a rotational spring (zero-length  
element)
```

```
#      Define Analysis Type
```

```
set ltype "Cyc"; set dispfile [open "Cyc.txt" r];          # Imposed Displacement History
```

```
#      Define Building Geometry, Nodes, and Constraints
```

```
#nodes
```

```
node 1      0.      0.;
```

```
node 2 -71. 48.5;
```

```
node 3      71. 48.5;
```

```
node 4      0      91.;
```

```
node 5      0.      38.5;
```

```
node 6     -20. 48.5      ;
```

```
node 7     -20. 48.5      ;
```

```
node 8      -8. 48.5 ;
```

```

node 9      8. 48.5 ;
node 10     20. 48.5 ;
node 11     20. 48.5;
node 12     0. 58.5;
node 13     0. 48.5;

```

```
# Assigning parameters for displacement control
```

```

set IDctrlNode 4;
set IDctrlDOF 1;

```

```
# fix supports at the base of the column
```

```

fix 1 1 1 0;
fix 2 0 1 0;
fix 3 0 1 0;

```

```
# define geometric transformation: performs a linear geometric transformation of beam stiffness and
resisting force from the basic system to the global-coordinate system
```

```

set ColTransfTag 1;          # associate a tag to column transformation
geomTransf Linear $ColTransfTag;

```

```
# define geometric transformation: performs a linear geometric transformation of beam stiffness and
resisting force from the basic system to the global-coordinate system
```

```

set BeamTransfTag 2;        # associate a tag to column transformation
geomTransf Linear $BeamTransfTag;

```

```
# element connectivity:
```

```

element elasticBeamColumn 1 1 5 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 2 12 4 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 3 2 6 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 4 11 3 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 5 7 8 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 6 8 13 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 7 13 9 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 8 9 10 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 9 5 13 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;
element elasticBeamColumn 10 12 13 1000 100000 100000 $ColTransfTag;;

```

Define Rotational Springs for Plastic Hinges

```
# define rotational spring properties and create spring elements using
"rotSpring2DModIKModel" procedure

# rotSpring2DModIKModel creates a uniaxial material spring with a peak-oriented hysteretic
response based on Modified Ibarra Krawinkler Deterioration Model

# references provided in rotSpring2DModIKModel.tcl
set K0 120000.;          # elastic stiffness
set as_Plus 0.1;         # strain hardening ratio for positive loading direction
set as_Neg 0.15;         # strain hardening ratio for negative loading direction
set My_Plus 1700.;       # effective yield strength for positive loading
direction
set My_Neg -1700.;       # effective yield strength for negative loading
direction (negative value)
set Lamda_S 1.0;         # Cyclic deterioration parameter for strength deterioration [see
definitions in Lignos and Krawinkler (2011)]
set Lamda_C 1.0;         #Cyclic deterioration parameter for post-capping strength
deterioration [see definitions in Lignos and Krawinkler (2011)]
set Lamda_A 1.0;         #Cyclic deterioration parameter for acceleration reloading stiffness
deterioration [see definitions in Lignos and Krawinkler (2011)]
set Lamda_K 1.0;         # Cyclic deterioration parameter for unloading stiffness
deterioration [see definitions in Lignos and Krawinkler (2011)]
set c_S 1.0;             #rate of strength deterioration. The default value is 1.0.
set c_C 1.0;             #rate of post-capping strength deterioration. The default value is 1.0.
set c_A 2.0;             #rate of accelerated reloading deterioration. The default value is 1.0.
set c_K 2.0;             #rate of unloading stiffness deterioration. The default value is 1.0.
set theta_p_Plus 0.035;  # pre-capping rotation for positive loading direction
(often noted as plastic rotation capacity)
set theta_p_Neg 0.035;   # pre-capping rotation for negative loading direction
(often noted as plastic rotation capacity) (must be defined as a positive value)
set theta_pc_Plus 0.1;   # post-capping rotation for positive loading direction
set theta_pc_Neg 0.1;    # post-capping rotation for negative loading direction (must be
defined as a positive value)
set Res_Pos 0.75;        # residual strength ratio for positive loading direction
set Res_Neg 0.75;        #residual strength ratio for negative loading direction (must be
defined as a positive value)
set theta_u_Plus 0.4;     # ultimate rot capacity for pos loading
set theta_u_Neg 0.3;     # ultimate rot capacity for neg loading
```

```

set D_Plus 1.0;                                # rate of cyclic deterioration for pos loading
set D_Neg 1.0;                                # rate of cyclic deterioration for neg loading

# define beam springs

#beam springs at Floor 2
rotSpring2DModIKModel 100 6 7 $K0 $as_Plus $as_Neg $My_Plus $My_Neg $Lamda_S
$Lamda_C $Lamda_A $Lamda_K $c_S $c_C $c_A $c_K $theta_p_Plus $theta_p_Neg
$theta_pc_Plus $theta_pc_Neg $Res_Pos $Res_Neg $theta_u_Plus $theta_u_Neg $D_Plus $D_Neg;
#Rotational Spring Procedure
rotSpring2DModIKModel 101 10 11 $K0 $as_Plus $as_Neg $My_Plus $My_Neg $Lamda_S
$Lamda_C $Lamda_A $Lamda_K $c_S $c_C $c_A $c_K $theta_p_Plus $theta_p_Neg
$theta_pc_Plus $theta_pc_Neg $Res_Pos $Res_Neg $theta_u_Plus $theta_u_Neg $D_Plus $D_Neg;

set P 100.;

pattern Plain 1 Constant {
load 4 0 [expr (-$P)] 0
}

# Define RECORDERS
recorder Node -file $dataDir/DFree.out -load -node $IDctrlNode -dof 1 disp;
# displacements of free nodes
recorder Node -file $dataDir/RBase.out -time -node 1 -dof 1 reaction;
# support reaction

# Gravity-analysis parameters -- load-controlled static analysis
set Tol 1.0e-6;                                # convergence tolerance for test
constraints Plain;                              # how it handles boundary conditions
numberer Plain;                                # renumber dof's to minimize band-width (optimization), if you
want to
system BandGeneral;                            # how to store and solve the system of equations in the analysis
test NormDispIncr $Tol 6 ;                    # determine if convergence has been achieved at the end
of an iteration step
algorithm Newton ;                             # use Newton's solution algorithm: updates tangent
stiffness at every iteration
set NstepGravity 10;                          # apply gravity in 10 steps
set DGravity [expr 1./$NstepGravity];         # first load increment;
integrator LoadControl $DGravity; # determine the next time step for an analysis

```

```

analysis Static;                                # define type of analysis static or transient
analyze $NstepGravity;                          # apply gravity
# ----- maintain constant gravity loads and reset time to zero
loadConst -time 0.0

# Define DISPLAY -----
DisplayModel2D nil;

puts "Model Built"

proc rotSpring2DModIKModel {eleID nodeR nodeC K asp asn Myp Myn LS LC LA LK cS cC cA
cK th_pp th_pn th_pcp th_pcn Resp Resn th_up th_un Dp Dn} {
#
# Create the zero length element

uniaxialMaterial ModIMKPeakOriented $eleID $K $asp $asn $Myp $Myn $LS $LC $LA $LK $cS
$cC $cA $cK $th_pp $th_pn $th_pcp $th_pcn $Resp $Resn $th_up $th_un $Dp $Dn;

    element zeroLength $eleID $nodeR $nodeC -mat $eleID -dir 6

# Constrain the translational DOF with a multi-point constraint
#
# retained constrained DOF_1 DOF_2 ... DOF_n
    equalDOF $nodeR $nodeC 1 2

# Static Reversed - Cyclic Analysis

source precast2.tcl

# Assigning parameters for displacement control

set IDctrlNode 4;
set IDctrlDOF 1;

# APPLY IMPOSED DISPLACEMENTS -----
puts "Apply imposed displacements ....."

set H 1.0;

```

```

set iPushNode "4";

pattern Plain 2 Linear {

foreach PushNode $iPushNode {

    load $PushNode [expr ($H)] 0 0;
    }
}

source LibAnalysisStaticParameters.tcl;
# PARAMETERS OF LOADING DISPLACEMENT -----
-----

set D1 0.0;
set Nstep 1;
set fmt1 "%s Cyclic analysis: CtrlNode %.3i, dof %.1i, Disp=%.4f %s";      #      format      for
screen/file output of DONE/PROBLEM analysis

# LOOP FOR DISPLACEMENT CONTROL -----
-----

while {[gets $dispfile temp] > 0} {
    foreach D2 $temp {
        set DLoad [expr {($D2 - $D1)/$Nstep}];
        puts [expr {$D1 + $Nstep*$DLoad}];

        test EnergyIncr 1.e-6 6
        algorithm Newton
        integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $DLoad
        analysis Static
        set ok [analyze 1]

        # -----if convergence failure-----
        -----

        if {$ok != 0} {
            # if analysis fails, we try some other stuff
            # performance is slower inside this loop      global
maxNumIterStatic;      # max no. of iterations performed before "failure to converge" is ret'd
            if {$ok != 0} {
                puts "Trying Newton with Initial Tangent .."
            }
        }
    }
}

```

```

test EnergyIncr 1.e-6 200
algorithm Newton -initial
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF

$DLoad

analysis Static
set ok [analyze 1]
}
if {$ok != 0} {
    puts "Trying Newton with Initial Tangent 1/10 dincr.."
    for {set j 0} {$j < 10} {set j [expr $j + 1]} {
        test EnergyIncr 1.e-6 400
        algorithm Newton -initial
        integrator DisplacementControl $IDctrlNode

$IDctrlDOF [expr $DLoad/10.];

analysis Static
set ok [analyze 1]
if {$ok != 0} {
    puts "Trying Newton with Initial
Tangent 1/100 dincr .."

    for {set jj 0} {$jj < 10} {set jj [expr $jj
+ 1]} {

        test EnergyIncr 1.e-4 800
        algorithm Newton -initial
        integrator DisplacementControl

$IDctrlNode $IDctrlDOF [expr $DLoad/100.];

analysis Static
set ok [analyze 1]
if {$ok != 0} {
    test EnergyIncr 1.e-3

2000 1

algorithm Newton -

integrator

DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF [expr $DLoad/100.];

analysis Static
set ok [analyze 1]
}
if {$ok != 0} {

```

```

set putout [format
$fmt1 "PROBLEM" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF] $LunitTXT]
puts $putout
remove recorders;
return;
}; # end if
}
}
}
}
if {$ok != 0} {
set putout [format $fmt1 "PROBLEM" $IDctrlNode
$IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF] $LunitTXT]
puts $putout
remove recorders;
return;
}; # end if
}; # end if
# -----
-----

set D1 $D2;          # move to next step

};          # end i
};

if {$ok != 0} {
puts [format $fmt1 "PROBLEM" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode
$IDctrlDOF] $LunitTXT]
} else {
puts [format $fmt1 "DONE" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF]
$LunitTXT]
}
remove recorders

```

C2. LİF ESASLI MODEL (N4 Numunesi)

```
# Remove existing model
wipe
#####
#####
#      Set Up & Source Definition

#####
#####

# Create ModelBuilder (with two-dimensions and 2 DOF/node)
model basic -ndm 2 -ndf 3;
set dataDir datafiber; # opening data file
file mkdir $dataDir;
source DisplayPlane.tcl;          # procedure for displaying a plane in model
source DisplayModel2D.tcl;       # procedure for displaying 2D perspective of model

# Define units

set in 1.;                      # define basic units -- output units
set kips 1.;                    # define basic units -- output units
set sec 1.;                     # define basic units -- output units
set LunitTXT "in";              # define basic-unit text for output
set FunitTXT "kips";            # define basic-unit text for output
set TunitTXT "sec";             # define basic-unit text for output
set PI [expr 2*asin(1.0)];

#####
#####
#      Define Analysis Type

#####
#####

set ltype "Cyc"; set dispfile [open "Cyc.txt" r];          # Imposed Displacement History

#####
#####
#      Define Building Geometry, Nodes, and Constraints

#####
#####

#nodes
node 1      0.      0.;
node 2 -70.9 48.4;
node 3      70.9 48.4;
node 4      0.      90.9;
node 5     -58.1 48.4;
node 6     -45.3 48.4;
node 7     -32.5 48.4 ;
node 8     -19.7 48.4 ;
node 9      -7.9 48.4;
node 10      0.      48.4;
node 11      7.9 48.4;
node 12     19.7 48.4 ;
```

```

node 13      32.5 48.4      ;
node 14      45.3      48.4;
node 15      58.1      48.4;
node 16      0.      38.6;
node 17      0.      58.3;

# Assigning parameters for displacement control
set IDctrlNode 4;
set IDctrlDOF 1;

# fix supports at the base of the column

fix 1 1 1 0;
fix 2 0 1 0;
fix 3 0 1 0;

#####
#####
#      Define Materials
#####
#####
# MATERIAL PROPERTIES

# Concrete
#Core concrete
# uniaxialMaterial ConcretewBeta $matTag $fpc $ec0 $fcint $ecint $fcrs $ecrs $ft $ftint $etint
$ftres $etres <-lambda $lambda> <-alpha $alpha> <-beta $bint $ebint $bres $ebres> <-M $M> <-E
$Ec> <-conf $fcc $ecc>
# uniaxialMaterial Concrete01 1 -8. -0.004 -5. -0.015;
uniaxialMaterial ConcretewBeta 1 -8.0 -0.004 -5.0 -0.015 -5.0 -0.015 0. 0. 0. 0. 0.;

# uniaxialMaterial ConcretewBeta $matTag $fpc $ec0 $fcint $ecint $fcrs $ecrs $ft $ftint $etint
$ftres $etres <-lambda $lambda> <-alpha $alpha> <-beta $bint $ebint $bres $ebres> <-M $M> <-E
$Ec> <-conf $fcc $ecc>
# uniaxialMaterial Concrete01 2 -6. -0.002 0. -0.005;
uniaxialMaterial ConcretewBeta 2 -6.0 -0.002 -3.0 -0.003 0. -0.005 0. 0. 0. 0. 0.;

# Steel
# uniaxialMaterial Steel02 $matTag $Fy $E $b $R0 $cR1 $cR2

# uniaxialMaterial Hysteretic $matTag $s1p $e1p $s2p $e2p <$s3p $e3p> $s1n $e1n $s2n $e2n
<$s3n $e3n> $pinchX $pinchY $damage1 $damage2 <$beta>
# uniaxialMaterial Hysteretic 8 71. 0.004 85. 0.1 -71. -0.004 -71. -0.1 1. 1. 0.0 0.0;

# uniaxialMaterial Hysteretic $matTag $s1p $e1p $s2p $e2p <$s3p $e3p> $s1n $e1n $s2n $e2n
<$s3n $e3n> $pinchX $pinchY $damage1 $damage2 <$beta>
uniaxialMaterial Hysteretic 8 68. 0.004 85. 0.08 87. 0.13 -68. -0.004 -68. -0.08 -68. -0.13 0.5 0.5
0.0 0.0;

uniaxialMaterial MinMax 9 8 -max 0.09

```

```

#####
#####
#       Define Sections

#####
#####
# set some paramaters
set colWidth 16.;
set colDepth 16.;

set cover 2.;
set As1 0.589; # area of 18 mm rebars

# set some paramaters
set beamWidth 11.8;
set beamDepth 19.7;

# set some paramaters
set corbelWidth 11.8;
set corbelDepth 27.5;

set cover 1.5;

set As2 0.394; # area of 18 mm rebars

# some variables derived from the parameters
set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

set y2 [expr $beamDepth/2.0]
set z2 [expr $beamWidth/2.0]

set y3 [expr $corbelDepth/2.0]
set z3 [expr $corbelWidth/2.0]

section Fiber 1 {

    # Create the concrete core fibers
    patch rect 2 10 1 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover]

    # Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
    patch rect 2 10 1 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
    patch rect 2 10 1 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
    patch rect 2 2 1 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover]
    patch rect 2 2 1 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

    # Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
    layer straight 10 4 $As1 [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1]
    layer straight 10 2 $As1 [expr 2.2] [expr $z1-$cover] [expr 2.2] [expr $cover-$z1]
    layer straight 10 2 $As1 [expr -2.2] [expr $z1-$cover] [expr -2.2] [expr $cover-$z1]
    layer straight 10 4 $As1 [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover] [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1]
}

section Fiber 2 {

    # Create the concrete core fibers

```

```

patch rect 2 10 1 [expr $cover-$y2] [expr $cover-$z2] [expr $y2-$cover] [expr $z2-$cover]

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
patch rect 2 10 1 [expr -$y2] [expr $z2-$cover] $y2 $z2
patch rect 2 10 1 [expr -$y2] [expr -$z2] $y2 [expr $cover-$z2]
patch rect 2 2 1 [expr -$y2] [expr $cover-$z2] [expr $cover-$y2] [expr $z2-$cover]
patch rect 2 2 1 [expr $y2-$cover] [expr $cover-$z2] $y2 [expr $z2-$cover]

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
layer straight 10 3 $As2 [expr $y2-$cover] [expr $z2-$cover] [expr $y2-$cover] [expr $cover-$z2]
layer straight 10 3 $As2 [expr $cover-$y2] [expr $z2-$cover] [expr $cover-$y2] [expr $cover-$z2]
}

section Fiber 3 {

# Create the concrete core fibers
patch rect 2 10 1 [expr $cover-$y3] [expr $cover-$z3] [expr $y3-$cover] [expr $z3-$cover]

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
patch rect 1 10 1 [expr -$y3] [expr $z3-$cover] $y3 $z3
patch rect 1 10 1 [expr -$y3] [expr -$z3] $y3 [expr $cover-$z3]
patch rect 1 2 1 [expr -$y3] [expr $cover-$z3] [expr $cover-$y3] [expr $z3-$cover]
patch rect 1 2 1 [expr $y3-$cover] [expr $cover-$z3] $y3 [expr $z3-$cover]

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
layer straight 8 3 $As2 [expr $y3-$cover] [expr $z3-$cover] [expr $y3-$cover] [expr $cover-$z3]
layer straight 8 3 $As2 [expr -3.35] [expr $z3-$cover] [expr -3.35] [expr $cover-$z3]
layer straight 8 2 $As2 [expr $cover-$y3] [expr $z3-$cover] [expr $cover-$y3] [expr $cover-$z3]
layer straight 8 2 $As2 [expr -5.85] [expr $z3-$cover] [expr -5.85] [expr $cover-$z3]
layer straight 8 2 $As2 [expr -8.55] [expr $z3-$cover] [expr -8.55] [expr $cover-$z3]
layer straight 8 2 $As2 [expr -11.25] [expr $z3-$cover] [expr -11.25] [expr $cover-$z3]
layer straight 8 2 $As2 [expr -13.9] [expr $z3-$cover] [expr -13.9] [expr $cover-$z3]
}

section Fiber 4 {

# Create the concrete core fibers
patch rect 2 10 1 [expr $cover-$y2] [expr $cover-$z2] [expr $y2-$cover] [expr $z2-$cover]

# Create the concrete cover fibers (top, bottom, left, right)
patch rect 2 10 1 [expr -$y2] [expr $z2-$cover] $y2 $z2
patch rect 2 10 1 [expr -$y2] [expr -$z2] $y2 [expr $cover-$z2]
patch rect 2 2 1 [expr -$y2] [expr $cover-$z2] [expr $cover-$y2] [expr $z2-$cover]
patch rect 2 2 1 [expr $y2-$cover] [expr $cover-$z2] $y2 [expr $z2-$cover]

# Create the reinforcing fibers (left, middle, right)
layer straight 10 3 $As2 [expr $y2-$cover] [expr $z2-$cover] [expr $y2-$cover] [expr $cover-$z2]
layer straight 10 1 $As2 [expr $cover-$y2] [expr $z2-$cover] [expr $cover-$y2] [expr $cover-$z2]
layer straight 9 2 $As2 [expr $cover-$y2] [expr $z2-$cover] [expr $cover-$y2] [expr $cover-$z2]
}

```

```

# define geometric transformation: performs a linear geometric transformation of beam stiffness
and resisting force from the basic system to the global-coordinate system
set ColTransfTag 1;          # associate a tag to column transformation
geomTransf Linear $ColTransfTag;

# define geometric transformation: performs a linear geometric transformation of beam stiffness
and resisting force from the basic system to the global-coordinate system
set BeamTransfTag 2;        # associate a tag to column transformation
geomTransf Linear $BeamTransfTag;

# element connectivity:
set np 2;                    # number of
integration points for force-based element
element forceBeamColumn 1 1 16 $np 1 $ColTransfTag -iter 50 1e-4;
element forceBeamColumn 2 17 4 $np 1 $ColTransfTag -iter 50 1e-4;

element forceBeamColumn 3 2 5 $np 2 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;
element forceBeamColumn 4 5 6 $np 2 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;
element forceBeamColumn 5 6 7 $np 2 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;
element forceBeamColumn 6 7 8 $np 4 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;

element forceBeamColumn 7 8 9 $np 3 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4; #Corbel
element forceBeamColumn 8 11 12 $np 3 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4; #Corbel

element forceBeamColumn 9 12 13 $np 4 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;
element forceBeamColumn 10 13 14 $np 2 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;
element forceBeamColumn 11 14 15 $np 2 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;
element forceBeamColumn 12 15 3 $np 2 $BeamTransfTag -iter 50 1e-4;

# element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A $E $Iz $transfTag <-mass $massDens>
element elasticBeamColumn 13 9 10 570 5800 61000 $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 14 10 11 570 5800 61000 $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 15 10 16 570 5800 61000 $ColTransfTag;
element elasticBeamColumn 16 10 17 570 5800 61000 $ColTransfTag;

set P 100.;

pattern Plain 1 Constant {
load 4 0 [expr (-$P)] 0
}

# Define RECORDERS
recorder Node -file $dataDir/DFree.out -load -node $IDctrlNode -dof 1 disp;
# displacements of free nodes
recorder Node -file $dataDir/RBase.out -time -node 1 -dof 1 reaction;
# support reaction

# Gravity-analysis parameters -- load-controlled static analysis
set Tol 1.0e-6;             # convergence tolerance for test
constraints Plain;          # how it handles boundary conditions
numberer Plain;             # renumber dof's to minimize band-width (optimization),
if you want to
system BandGeneral;         # how to store and solve the system of equations in the analysis
test NormDispIncr $Tol 6 ;  # determine if convergence has been achieved at the end
of an iteration step
algorithm Newton ;          # use Newton's solution algorithm: updates tangent
stiffness at every iteration
set NstepGravity 10;        # apply gravity in 10 steps

```

```

set DGravity [expr 1./$NstepGravity]; # first load increment;
integrator LoadControl $DGravity;    # determine the next time step for an analysis
analysis Static;                     # define type of analysis static or transient
analyze $NstepGravity;               # apply gravity
# ----- maintain constant gravity loads and reset time to zero
loadConst -time 0.0

# Define DISPLAY -----
DisplayModel2D nill;

puts "Model Built"

# Static Reversed - Cyclic Analysis

source p1.tcl

# Assigning parameters for displacement control

set IDctrlNode 4;
set IDctrlDOF 1;

# APPLY IMPOSED DISPLACEMENTS -----
--
puts "Apply imposed displacements ....."

set H 1.0;

set iPushNode "4";

pattern Plain 2 Linear {
    foreach PushNode $iPushNode {
        load $PushNode [expr ($H)] 0 0;
    }
}

source LibAnalysisStaticParameters.tcl;
# PARAMETERS OF LOADING DISPLACEMENT -----
-----
set D1 0.0;
set Nstep 1;
set fmt1 "%s Cyclic analysis: CtrlNode %.3i, dof %.1i, Disp=%.4f %s"; # format for
screen/file output of DONE/PROBLEM analysis

# LOOP FOR DISPLACEMENT CONTROL -----
-----
while {[gets $dispfile temp] > 0} {
    foreach D2 $temp {
        set DLoad [expr {($D2 - $D1)/$Nstep}];
        puts [expr {$D1 + $Nstep*$DLoad}];

        test EnergyIncr 1.e-6 200
        algorithm Newton -initial
        integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $DLoad
        analysis Static
    }
}

```



```

                                if {$ok != 0} {
                                    set putout [format $fmt1 "PROBLEM" $IDctrlNode
$IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF] $LunitTXT]
                                    puts $putout
                                    remove recorders;
                                    return;
                                }; # end if
                            }; # end if
                        # -----
-----
                                set D1 $D2;                                # move to next step
                            };
                        # end i
                    };

    if {$ok != 0} {
        puts [format $fmt1 "PROBLEM" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode
$IDctrlDOF] $LunitTXT]
    } else {
        puts [format $fmt1 "DONE" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF]
$LunitTXT]
    }
    remove recorders

```