

**TUĞLA DOLGULU SÜNEK OLMAYAN
BETONARME ÇERÇEVELERİN
ÇELİK ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

Yağmur KOPRAMAN

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2010

ANKARA

Yağmur KOPRAMAN tarafından hazırlanan TUĞLA DOLGULU SÜNEK OLMAYAN BETONARME ÇERÇEVELERİN ÇELİK ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sinan ALTIN

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüsnü CAN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Sinan ALTIN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Uğurhan AKYÜZ

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özgür ANIL

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 22 / 06 / 2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yağmur KOPRAMAN

**TUĞLA DOLGULU SÜNEK OLMAYAN
BETONARME ÇERÇEVELERİN
ÇELİK ŞERİTLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ
(Doktora Tezi)**

Yağmur KOPRAMAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2010**

ÖZET

Ülkemiz mevcut yapı stokunun büyük bir kısmı tuğla dolgu duvarına sahip sünek olmayan betonarme çerçeve türü yapılardan oluşmaktadır. Yeterli yanal rijitlik, dayanım ve enerji tüketim kapasitesine sahip olmayan bu yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde betonarme dolgu duvarları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, güncel güçlendirme uygulamaları binanın boşaltılmasını gerektirmekte ve binanın tekrar kullanıma girmesi uzun bir imalat süresi sonrasında mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada betonarme çerçeve içerisindeki tuğla dolgu duvarı çelik şeritlerle güçlendirilerek yapının sismik performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bir tanesi güçlendirilmemiş referans eleman olmak üzere toplam dokuz adet deney elemanı deprem yüklerini benzeştiren tersinir tekrarlanır yatay yük ve düşey yük altında test edilmiştir. Çalışmada test edilen tek katlı tek açıklıklı betonarme çerçeve deney elemanları ülkemizdeki betonarme yapılarda karşılaşılan önemli yapı kusurlarını içerecek şekilde üretilmiştir. Çelik şeritlerin betonarme çerçeveye bağlantı biçimleri, uygulanan çelik şerit deseni ve uygulama yönünün deney elemanlarının yatay yük kapasitesi, göçme biçimi, rijitliği ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Test sonuçları çelik şeritlerle güçlendirilen tuğla dolgu duvarın, betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini, rijitliğini ve enerji tüketimini önemli oranlarda arttırdığını

göstermiştir. Tez çalışmasının analitik çalışma kısmında ise, önerilen güçlendirme yöntemi kullanılarak yapılacak güçlendirme işleminin tasarımı için pratik önerilerde bulunulmuştur.

Bilim Kodu : 911.1.144

Anahtar Kelimeler : Betonarme çerçeve, tuğla dolgu duvar, güçlendirme, çelik şerit

Sayfa Adedi : 164

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Sinan ALTIN

**STRENGTHENING OF NON-DUCTILE MASONRY INFILLED
RC FRAMES BY MEANS OF STEEL STRIPS**

(Ph.D. Thesis)

Yağmur KOPRAMAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2010

ABSTRACT

Major part of Turkey's existing building stock consists of non-ductile brick infilled reinforced concrete frames. This kind of structures does not have sufficient capacity in order to withstand the strong earthquakes. The most popular strengthening method for such buildings in order to satisfy adequate lateral stiffness, strength and energy demands reinforced concrete infill walls are introduced in the bare frames. However, this seismic rehabilitation method requires evacuation of the building. In this study, infill walls are strengthened with steel strips in order to support non-ductile brick infilled reinforced concrete frames. In order to improve the seismic performance of the structure while avoiding long term evacuation and changing architectural partitions. In experiments, single-storey single-span reinforced concrete frames are tested. As one of the unstrengthened test specimen been tested as a reference member total of nine test specimens were tested. Tests are done under reverse cyclic lateral load which simulates the earthquake loads. The frames had common defects similar to the Turkish building stock. Such as poor concrete quality, improper reinforcement layout and inadequate sections. Steel strips to the reinforced concrete frame connection, strengthening layout and symmetry aspects effecting the test frames' experimental lateral load capacity, initial stiffness, and energy absorption are investigated. According to the test results, strengthened brick infilled reinforced concrete frames gained lateral load carrying capacity,

rigidity and significant energy consumption. In the analytical part for the study for the strengthening method proposed, some practical suggestions were made and a reliable way of modeling the strengthened structure was introduced.

Science Code : 911.1.144
Key Words : RC frame, strengthening, masonry infill wall, steel strip
Page Number : 164
Adviser : Prof. Dr. Sinan ALTIN

TEŞEKKÜR

Bu araştırmayı planlayıp yöneten, çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla çalışmayı yönlendiren Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince, manevi desteğini sürekli hissettiğim eşim Eda'ya, annem Ayfer KOPRAMAN'a ve babam Kâzım Yaşar KOPRAMAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ	1
2. GEÇMİŞTE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	7
3. DENEY ELEMANLARI VE TEST TEKNİĞİ.....	18
3.1. Genel	18
3.2 Deney Elemanları.....	19
3.3. Malzemeler.....	34
3.4. Deney Elemanlarının Üretimi	41
3.5. Güçlendirme Tekniği ve Uygulama	47
3.5.1. Güçlendirme tekniği	47
3.5.2. Güçlendirme tekniğinin uygulanışı	62
3.6. Test Tekniği	65
3.6.1. Yükleme tekniği	65
3.6.2. Ölçüm aletleri ve ölçüm düzeni.....	69

Sayfa

3.6.3. Ölçümlerin değerlendirilmesi	70
4. DENEYLER.....	72
4.1. Deney Elemanı-1.....	73
4.2. Deney Elemanı-2.....	78
4.3. Deney Elemanı-3.....	83
4.4. Deney Elemanı-4.....	88
4.5. Deney Elemanı-5.....	93
4.6. Deney Elemanı-6.....	97
4.7. Deney Elemanı-7.....	102
4.8. Deney Elemanı-8.....	107
4.9. Deney Elemanı-9.....	111
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	117
5.1. Dayanım ve Davranış	117
5.2. Süneklik	124
5.3. Rijitlik	128
5.4. Enerji Tüketimi	131
6. ANALİTİK ÇALIŞMA.....	135
6.1. Tuğla Dolgu Duvarın Eşdeğer Diyagonal Çubuk Olarak Modellenmesi	135
6.1.1. Tuğla dolgu duvar için eşdeğer çubuk modeli.....	136
6.1.2. Donatı, beton ve çelik Şeritlerin Modellenmesi	142
6.3. Taghdi ve ark.'nın Önerdiği Makro Ölçekli Model	143
6.4. Bilgisayar Modeli Oluşturulması ve İtme Analizi	146

	Sayfa
6.4.1. Zarf eğrileri.....	148
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	155
7.1. Sonuçlar	156
7.2. Öneriler	159
KAYNAKLAR	161
ÖZGEÇMİŞ	164

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Deney programı ve test değişkenleri	20
Çizelge 3.2. Donatı dayanımları	34
Çizelge 3.3. Test çerçevesi beton karışım oranı	35
Çizelge 3.4. Test çerçevesinin ortalama beton basınç dayanımları	35
Çizelge 3.5. Sıva ve harç karışım oranı	36
Çizelge 3.6. Sıva ve harç için ortalama basınç dayanımları	37
Çizelge 3.7. Dolgu duvar üretiminde kullanılan tuğlaların ortalama basınç dayanımları	39
Çizelge 3.8. Sikadur-31'in özellikleri	40
Çizelge 3.9. Çelik şerit ve bağlantı çubuklarının akma ve kopma dayanımları	41
Çizelge 3.10. Çekme deneyi sonuçları	54
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti	118
Çizelge 5.2. Deney elemanlarının deplasman süneklilik oranları.....	126
Çizelge 5.3. Deney elemanlarının rijitlikleri	129
Çizelge 5.4. Deney elemanlarının birikimli enerji tüketimleri	132
Çizelge 6.1. Deney sonuçlarının itme analizi sonuçları ile karşılaştırılması.....	148

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Güçlendirme teknikleri.....	4
Şekil 2.1. Dolgulu çerçevelerin göçme mekanizmaları.....	15
Şekil 3.1. Test çerçevesinin geometrik boyutları ve donatı düzeni.....	21
Şekil 3.2. Kolon ve kiriş donatıları.....	22
Şekil 3.3. Betonarme çerçeve ve tuğla duvar detayları.....	23
Şekil 3.4. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-2.....	25
Şekil 3.5. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-3.....	26
Şekil 3.6. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-4.....	27
Şekil 3.7. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-5.....	29
Şekil 3.8. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-6.....	30
Şekil 3.9. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-7, Deney Elemanı-8.....	32
Şekil 3.10. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-9.....	33
Şekil 3.11. Tuğla birimin boyutları.....	38
Şekil 3.12. Çapraz ve düşey çelik şerit boyutları ve detayları.....	48
Şekil 3.13. Deney Elemanı-5’de kullanılan kiriş uç bağlantısına ait detay.....	50
Şekil 3.14. Kiriş uç bağlantı tipine ait serbest cisim diyagramı.....	51
Şekil 3.15. Deney Elemanı-6’da denenen tip bağlantı detayı.....	56
Şekil 3.16. Panel kenarları boyunca yapılan bağlantı tipine ait serbest cisim diyagramı.....	57
Şekil 3.17. Deney Elemanı-8’de denenen tip bağlantı detayı.....	60
Şekil 3.18. Kolon-kiriş birleşiminde geliştirilen bağlantı tipine ait serbest cisim diyagramı.....	61

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19.	Kolon-kiriş birleşiminde geliştirilen bağlantı tipi detayı..... 63
Şekil 3.20.	Deney ve yükleme düzeneği..... 68
Şekil 3.21.	Deney elemanı üzerinden alınan LVDT ölçümleri. 70
Şekil 4.1.	Deneylerin anlatımında kullanılan yükleme yönü ve doğrultu kabulü. 73
Şekil 4.2.	Deney Elemanı-1'e ait yük-çevrim grafiği..... 73
Şekil 4.3.	Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-1 77
Şekil 4.4.	Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-1 77
Şekil 4.5.	Deney Elemanı -2'e ait yük-çevrim grafiği..... 78
Şekil 4.6.	Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-2 82
Şekil 4.7.	Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-2 82
Şekil 4.8.	Deney Elemanı -3'e ait yük-çevrim grafiği..... 83
Şekil 4.9.	Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-3 87
Şekil 4.10.	Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-3 87
Şekil 4.11.	Deney Elemanı-4'e ait yük-çevrim grafiği..... 88
Şekil 4.12.	Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-4 92
Şekil 4.13.	Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-4 92
Şekil 4.14.	Deney Elemanı-5'e ait yük-çevrim grafiği..... 93
Şekil 4.15.	Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-5 96
Şekil 4.16.	Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-5 96
Şekil 4.17.	Deney Elemanı-6'ya ait yük-çevrim grafiği..... 97
Şekil 4.18.	Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-6 101
Şekil 4.19.	Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-6 101

Şekil	Sayfa
Şekil 4.20.	Deney Elemanı-7'ye ait yük-çevrim grafiği..... 102
Şekil 4.21.	Yük–Deplasman grafiği, Deney Elemanı-7 106
Şekil 4.22.	Kesme Kuvveti–Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-7 106
Şekil 4.23.	Deney Elemanı-8'e ait yük-çevrim grafiği..... 107
Şekil 4.24.	Yük–Deplasman grafiği, Deney Elemanı-8 110
Şekil 4.25.	Kesme Kuvveti–Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-8 110
Şekil 4.26.	Deney Elemanı-9'a ait yük-çevrim grafiği..... 111
Şekil 4.27.	Yük–Deplasman grafiği, Deney Elemanı-9 116
Şekil 4.28.	Kesme Kuvveti–Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-9 116
Şekil 5.1.	Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5'e ait zarf eğrileri 120
Şekil 5.2.	Deney Elemanı-1, 5, 6, 8 ve 9'a ait zarf eğrileri 120
Şekil 5.3.	İdealleştirilmiş yük-deplasman zarf eğrisi ve süneklik hesaplanırken kullanılan parametreler..... 125
Şekil 5.4.	Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5'e ait Birikimli Enerji Tüketimi-Çevrim grafiği 133
Şekil 5.5.	Deney Elemanı-1, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9'a ait Birikimli Enerji Tüketimi-Çevrim grafiği 134
Şekil 6.1.	Çerçeve ve dolgu duvarın eşdeğer bir çubuk olarak modellenışı. 136
Şekil 6.2.	Yatay kuvvet etkisi altında deformasyon biçimi abartılmış çerçeve. 137
Şekil 6.3.	Dolgu duvarın karşılıklı iki köşesinde oluşan basınç bölgesi ve köşeleri birleştiren bant bölge içinde meydana gelen sanal basınç çubuğu 137
Şekil 6.4.	Sıvalı tuğla dolgu duvarı benzeştiren, elasto-plastik basınç çubuğunun gerilme-birim şekil değişim grafiği 141
Şekil 6.5.	Basitleştirilmiş çubuk taşıyıcı sistem 145

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5.	Güçlendirilmiş çerçeveye ait analitik model. 147
Şekil 6.6.	Deney Elemanı-1'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 149
Şekil 6.7.	Deney Elemanı-2'ye ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 150
Şekil 6.8.	Deney Elemanı-3'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 150
Şekil 6.9.	Deney Elemanı-4'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 151
Şekil 6.10.	Deney Elemanı-5'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 152
Şekil 6.11.	Deney Elemanı-6'ya ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 153
Şekil 6.12.	Deney Elemanı-8'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 153
Şekil 6.13.	Deney Elemanı-9'a ait deneysel ve analitik zarf eğrileri 154

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Tuğla birime basınç testi uygulanışı	39
Resim 3.2. Çelik kalıbın laboratuvar ortamında görünüşü	42
Resim 3.3. Kalıp içine yerleştirilmiş beton dökümüne hazır çerçeve donatısı	43
Resim 3.4. Dökümü tamamlanmış test çerçevesi	44
Resim 3.5. Test çerçevesi içerisine tuğla dolgu duvar örülmesi.....	45
Resim 3.6. Test çerçevesinin sıvanışı	46
Resim 3.7. Kimyasal ankrajlara uygulanan çekme deneyi.	53
Resim 3.8. Beton blok içerisinden sıyrılan çelik çubuklar	53
Resim 3.9. Dolgu duvarda deliklerin açılması.....	64
Resim 3.10. Çelik elemanların bağlantısı tamamlanmış olan Deney Elemanı-5'e ait görünüm.	65
Resim 3.11. Deney düzeneğinin rijit platform üzerindeki genel görünüşü	67
Resim 3.12. Yatay yük uygulama düzeneği	69
Resim 4.1. 7. çevrim ileri yarı çevrim sonrası gelişen diyagonal çatlak.	76
Resim 4.2. Deney sonrası Deney Elemanı-1	76
Resim 4.3. Kolon-kiriş birleşiminde çatlak.	79
Resim 4.4. Çelik şeritte burkulma.	80
Resim 4.5. Deney sonrası Deney Elemanı-2'nin genel görünüşü	81
Resim 4.6. 19. yük çevrimi sonrası sol kolon bindirme bölgesi hasarı	85
Resim 4.7. 31. çevrim sonu burkulma detayı	86
Resim 4.8. Deney sonrası Deney Elemanı-3'e ait görünüm.....	86

Resim	Sayfa
Resim 4.9.	14. çevrim sonrası kiriş uç hasarı 90
Resim 4.10.	15. ileri yarı çevrim sonrası arka yüzde burkulma detayı..... 90
Resim 4.11.	Deney sonrası Deney Elemanı-4'e ait görünüm..... 91
Resim 4.12.	16. çevrim sonu kolon-kiriş birleşim hasarı 94
Resim 4.13.	Deney sonunda Deney Elemanı-5'e ait görünüm..... 95
Resim 4.14.	13. çevrim sonrası meydana gelen kolon alt ucu ezilme detayı 98
Resim 4.15.	18. çevrim sonunda Deney Elemanı-6'ya ait genel görünüm 99
Resim 4.16.	19. çevrim sonrası burkulma detayı..... 100
Resim 4.17.	20. çevrim sonunda Deney Elemanı-6'ya ait genel görünüm 100
Resim 4.18.	9. çevrim sonunda sağ kolon alt ucunda çatlak gelişimi 104
Resim 4.19.	13. çevrim sonunda sağ kolon-temel birleşiminde gelişim gösteren hasar 104
Resim 4.20.	15. ileri yük çevrimi sonunda sol kolon alt uç detayı..... 105
Resim 4.21.	15. geri yük çevrimi sonunda L profili temele bağlayan çelik çubuklarda gerçekleşen aderans kaybı detayı..... 105
Resim 4.22.	16. çevrim sonunda sol ve sağ kolon alt ucundaki hasar..... 108
Resim 4.23.	20. çevrim ileri yarı yüklemesi sonunda sol diyagonal şeritte meydana gelen burkulma detayı 109
Resim 4.24.	Deney sonunda Deney Elemanı-8'e ait genel görünüm 109
Resim 4.25.	12. çevrim sonunda sol ve sağ kolon birleşim hasarları 112
Resim 4.26.	16. çevrim sonunda sağ alt köşe yırtılma detayı..... 113
Resim 4.27.	19. çevrim sonunda sol kolon alt uçta burkulma detayı 114
Resim 4.28.	21. çevrim sonunda sağ kolon donatılarında gözlenen burkulma..... 114
Resim 4.29.	Deney sonunda Deney Elemanı-9'a ait genel görünüm. 115

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Düşey ve çapraz doğrultudaki çelik şeritlerle güçlendirilen duvar elemanı	144

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$A_{\text{çapraz}}$	Çapraz doğrultudaki çelik şeridin alanı
$A_{\text{düşey}}$	Düşey doğrultudaki çelik şeridin alanı
A_{shi}	i. sıradaki yatay donatının alanı
A_{si}	i. sıradaki düşey donatının alanı
d	Dolgu duvarın köşegen uzunluğu
$D1$	Ölçülen kat deplasmanı
$D2$	Temelin ölçülen yatay deplasmanı
$D3$	Temelin sol uçundan alınan düşey deplasman ölçümü
$D4$	Temelin sağ uçundan alınan düşey deplasman ölçümü
d_i	i. sıradaki düşey donatının moment kolu
d_v	Düşey şeritler arasındaki uzunluk
E_{dolgu}	Dolgu duvarın elastisite modülü
E_{kolon}	Çerçeve kolonunun elastisite modülü
E_m	Dolgunun elastisite modülü
f_c	Betonunun basınç dayanımı
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_m	Eşdeğer basınç çubuğunun basınç dayanımı
f_{su}	Donatı Kopma Dayanımı
f_y	Kolon boyuna donatısının akma dayanımı
f_y'	Bindirme böl. parametresine göre azaltılmış donatı akma dayanımı
f_y''	Düz donatı parametrelerine göre azaltılmış donatı akma dayanımı
f_{yp}	Çelik şeritlerin akma dayanımı
h	kolon yüksekliği
h'	Dolgu duvarın yüksekliği
H'	Temel ile kiriş orta eksenindeki yükseklik

Simgeler	Açıklama
h_i	i. sıradaki yatay donatının moment kolu
I_{kolon}	Çerçeve kolonunun eğilme yönündeki atalet momenti
I_{kolon}	Kolonun atalet momenti
k	Basınç çubuğunun eksenel rijitliği
l	Dolgu duvarın uzunluğu
l'	D3 ve D4 numaralı LVDT'ler arasındaki uzaklık
P	Çubuk taşıyıcı sisteme etkileyen toplam düşey yük
t	Dolgu duvarın kalınlığı
V_U	Güçlendirme sonrası ulaşılmaması tasarlanan kesme kuvveti
V_{U0}	Güçlendirilmemiş duvarın yatay yük taşıma kapasitesi
Δ_1	Düzeltilmiş kat yatay deplasmanı
Δ_{01}	Dönme dolayısıyla kiriş orta yüksekliğinde ölçülen yatay deplasman
θ	Tanjantı dolgu duvarın h/l oranını veren açı

Kısaltmalar Açıklama

FEMA	Federal Emergency Management Agency
LVDT	Elektronik doğrusal deplasman ölçer
ODTÜ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi

1. GİRİŞ

Türkiye’de 1900 ile 2006 yılları arasında meydana gelen 90 büyük depremde, resmi verilere göre 82 bin 372 kişi hayatını kaybetmiş, önemli ekonomik kayıplara da neden olmuştur. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı tarafından 1996 yılında geliştirilen Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası’na göre Türkiye yüzölçümünün %42’si birinci derecede deprem riski taşımaktadır. Yine 1996 yılı verilerine göre Türkiye nüfusunun %45’inin birinci derece deprem riski taşıyan bölgede yaşadığı belirlenmiştir. Ülkemizde 2000 yılı öncesinde meydana gelen en şiddetli deprem 1939 yılında Erzincan’da kaydedilmiştir. 7,9 büyüklüğünde yaşanan ve 35 binin üzerinde can kaybına yol açan depremin ardından ilk kez deprem zararlarının azaltılması amacıyla, önlemlerin tartışılmasına başlanmıştır. Ancak, kayıpları azaltacak önlemlerin ciddi olarak ele alınmasına 1999 yılında 17 bin 480 kişinin öldüğü Marmara depremi sonrası başlanmıştır. Ülkemizde mevcut yapı stoku envanteri hazırlama çalışmaları devam etmekte ve olası bir deprem sonrasında hizmet vermesi gerekli binalar önem sırasına göre güçlendirilmektedir. Deprem sonrası yapılan incelemeler, tamamen göçen veya ağır hasar alan binaların, yeterli yanal rijitlik, dayanım ve enerji tüketim kapasitesine sahip olmayan yapılar olduğunu ortaya koymuştur. Bu yapıların da hemen hepsinin benzer karakteristiklerde taşıyıcı sistem zayıflıkları taşıdıkları belirlenmiştir. Ülkemiz yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturan bu tür yapıların sahip olduğu sismik performans seviyesi, güncel yapı şartnameleri ve deprem yönetmeliğine göre yetersizdir. Yetersiz yapıların yönetmeliklerin öngördüğü seviyeye çıkarılması amacıyla güçlendirilmeleri, gelecekteki depremlerde can kaybının ve ekonomik kayıpların azaltılması bakımından büyük önem taşımaktadır. Deprem kuvvetlerine karşı yetersiz yapılarda kusurlarının belirlenip güçlendirilmesi, yapım aşamasında gerekli olan mühendislik hizmetinden daha fazlasını gerektirmektedir.

Türkiye’de mevcut yapılardaki yetersizlikler genel olarak; a) mimari ve taşıyıcı sistemin tasarımı sırasında yapılan hatalardan, b) yapım sırasında yapılan kusurlardan, c) kalitesiz ve kusurlu malzeme kullanımından kaynaklanmaktadır. Bu kusurlar ve hatalar nedeniyle ülkemizdeki mevcut yapılar deprem kuvvetlerine karşı

yeterli yanal rijitlik, yatay dayanım ve sünekliğe sahip değildir. Bu yapılarda eleman düzeyinde güçlendirme ile sismik riskin azaltılamayacağı ve ekonomik olmayacağı gibi nedenlerden dolayı Türkiye koşullarında taşıyıcı sistem güçlendirmesi ön plana çıkmaktadır. Türkiye’de kullanılan en yaygın taşıyıcı sistem güçlendirme yöntemi, çerçeve taşıyıcı sistemine betonarme dolgu duvar ilave edilmesidir. Yanal rijitliği ve süneklik düzeyi yüksek olmayan betonarme çerçevenin içerisine yerleştirilen rijit betonarme dolgu duvar, yapının deprem davranışının iyileştirilmesinde başarılı olmaktadır. 1969’dan bu yana ODTÜ Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda ve 1990’dan beri Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda sürdürülen araştırmalar çerçevelerin betonarme panellerle doldurulması ile oluşturulan dolgulu çerçevelerin, binanın yatay yük taşıma kapasitesini ve yatay rijitliğini önemli oranda artırdığını göstermiştir [1-5]. Yapılan çalışmalar betonarme duvar eklenmesi yönteminin etkinliğini vurgulamasına rağmen bu yöntemin uygulanmasının çoğu zaman pratik olmadığını belirtmektedir. Binanın mimarı planında yapılması kaçınılmaz değişiklikler ve oldukça zahmetli yapım aşaması binanın uzun süre boşaltılmasını gerekli kılmaktadır. Sürekli hizmet vermesi gereken okul, hastane gibi binaların bu yöntem kullanılarak güçlendirilmesi bu güçlükler nedeniyle çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Uygulamada betonarme dolgu duvar eklenerek güçlendirilen binalar, çoğunlukla depremde hafif veya orta derecede hasar görmüş, boşaltılmış binalardır [6]. Yöntemin bu zayıf yönü nedeniyle, betonarme çerçevelerin davranışını iyileştirmeye yönelik farklı güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Günümüzde de sistem güçlendirmesi konusunda araştırmalar alternatif tekniklerin geliştirilmesine odaklanmıştır.

Sismik Rehabilitasyon Stratejisi ve Teknikleri

Sismik rehabilitasyon, depreme karşı yetersiz bir binanın onarımı, güçlendirmesi, sismik iyileştirmesi veya yapıya eski sismik performansının geri kazandırılması anlamında kullanılabilen geniş kapsamlı bir kavramdır. 1978 Japonya, 1985 Meksika ve 1989’da Amerika Birleşik Devletleri’nde meydana gelen, birçok binanın hasar gördüğü, nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgeleri etkileyen şiddetli depremler sonrasında sismik rehabilitasyon stratejileri ve güçlendirme teknikleri üzerinde

uluslararası ölçekte çalışmalar yoğunlaşmıştır. Yetersiz veya hasarlı yapıların sismik rehabilitasyonu üzerine yapılan çalışmalardaki ortak amaçlar, a) yapıdan beklenen yeterli sismik davranışın uygulanan güçlendirme ile elde edilebilmesi, b) öngörülen sismik etki karşısında hasarın azaltılması ve önlenmesi, c) binanın yapısal performansını hasar öncesi seviyesine çıkarılmasıdır [7].

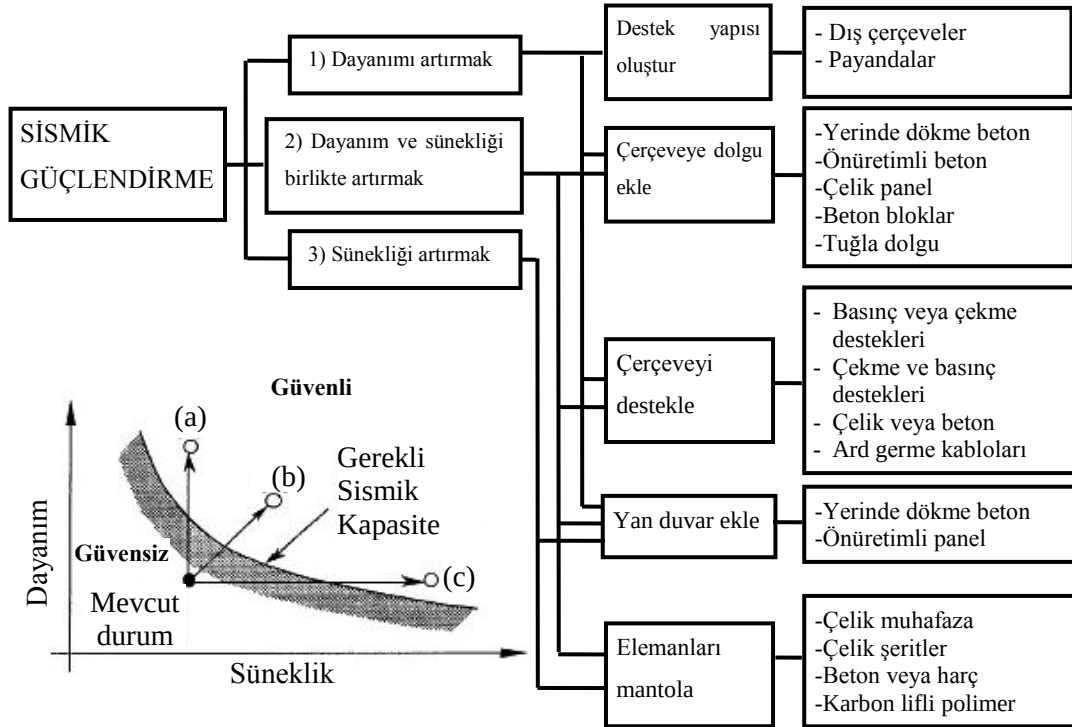
Hasar görmüş bir yapının, ilk durumdaki sismik performansını tekrar kazanabilmesi yapının hasarlı kısımlarının uygun malzemeler kullanılarak tamir edilmesi ile veya hasar gören kısmın taşıyıcı sisteme yeni eklenen elemanlar ile değiştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Rehabilitasyon öncesi yapılacak titiz bir çalışma ile belirlenecek yöntem bir başka yapı için uygun olmayabilir. Uygulanacak güçlendirme tekniği, yapının mevcut kusurlarını gidermeye yönelik ve aynı zamanda yapının kullanım amacı ile uyumlu olmalı ve yapının fonksiyonlarını engellememelidir.

Sismik güçlendirme ile sismik performansı yetersiz bir yapının a) dayanımın, b) sünekliğin, c) hem dayanımın hem de sünekliğin, güvenli bir sismik performans seviyesine kadar artırılması amaçlanmaktadır. Sugano, güvenli sismik kapasite seviyesine, dayanım ve süneklik arasında iyi ayarlanmış bir strateji ile erişilmesinin uygun olduğunu önermektedir [7]. Sugano [7], en çok tercih edilen güçlendirme tekniklerini Şekil 1.1’de özetlemiştir.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Türkiye’de yaygın bir kanı olarak, tuğla dolgu duvar mimari bir eleman olarak kabul edilmektedir. Çoğu tasarım çerçeve içerisindeki tuğla dolgu duvarı, yalnız yük olarak değerlendirmekte, kolon ve kirişler ile kenarları boyunca temas eden tuğla dolgu duvarın çerçeve içinde rijit bir diyafram davranışı gösterdiği göz ardı edilmektedir. Oysa çerçeve içerisindeki tuğla dolgu duvarının yüksek başlangıç rijitliği, yatay yüklerin taşınmasında etkin bir rol üstlenmektedir. Sismik yükleme etkisindeki tuğla dolgulu çerçeve, boş çerçeveye göre daha düşük ötelenme oranına ve daha yüksek yatay yük taşıma gücüne sahiptir. Bu nedenle sismik tasarım ve yapı taşıyıcı sistemi

için güçlendirme amacıyla yapılan çalışmalarda tuğla dolgu duvarlar yapıda yatay davranış açısından ihmal edilmemesi gereken önemli bir elemandır.



Şekil 1.1. Güçlendirme teknikleri [7].

Mevcut birçok güçlendirme yöntemi tuğla dolgulu çerçevelerin yatay yükler altındaki davranışını iyileştirmeye yönelik çeşitli öneriler sunmaktadır. Güncel uygulamada karbon lifli polimerlerin kullanımı, çerçeve içerisine eklenen önüretimli beton paneller veya dolgu üzerine katman eklenmesi yöntemleri tuğla dolgulu çerçevelerin mevcut güçlendirme teknikleri olup 2007 yılında revize edilen Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY) [8] içinde de yer almıştır.

Bu çalışmanın amacı, tuğla dolgu duvarlı sünek olmayan betonarme çerçevelerin, içindeki tuğla dolgu duvarların çelik şeritlerle güçlendirilerek deprem kuvvetlerine karşı yatay performansının artırılmasıdır. Bu amaçla betonarme çerçeve içindeki tuğla dolgu duvarlar çeşitli düzenlerde tasarlanan çelik şeritlerle güçlendirilmiştir. Çelik şeritler hem tuğla dolgu duvara hem de betonarme çerçeveye çeşitli düzenlerde bağlanmıştır.

Çalışmada geliştirilen yöntemde, tuğla dolgulu sünek olmayan betonarme çerçeveye çelik elemanlar eklenerek, dolgulu çerçevenin sismik davranışının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada 9 adet birbirine özdeş 1/3 geometrik ölçekli, tek katlı tek açıklıklı tuğla dolgulu betonarme çerçeve üretilmiştir. Betonarme çerçevelerden biri referans deney elemanı olarak kullanılmıştır. Referans deney elemanına güçlendirme uygulanmadan test edilmiş ve diğer deney elemanları ile karşılaştırmalarda kullanılmıştır. Diğer 8 deney elemanı çeşitli düzenlemelerde çelik elemanlar kullanılarak güçlendirildikten sonra test edilmiştir.

Deney elemanlarının hepsi deprem yüklerini benzeştiren tersinen tekrarlanan yatay yüklemeler altında test edilmiştir. Tüm deney elemanlarının kolonlarına test süresince sabit tutulan eksenel yük tatbik edilmiştir. Deney elemanlarında kullanılan betonarme çerçeve, Türkiye yapı stokundaki sismik performansı yetersiz binaların çerçevelerinde gözlenen ortak karakteristik kusurlarını yansıtacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Deney çerçevesinin tasarım ve üretimine yansıtılan kusurlar şunlardır:

- Güçlü kiriş-zayıf kolon birleşimi.
- Kolon ve kirişte yetersiz sargılama.
- Sargısız kolon-kiriş birleşimi.
- Kolon boyuna donatısında yetersiz kenetlenme boyu.
- 90° bükülmüş açık etriye ile sargılama.
- Basınç dayanımı düşük beton.
- Uçları kancasız boyuna donatı.

Deneysel çalışma kapsamında,

- Çelik şerit uygulaması
 - Simetrik (dolgu duvarı sargılayan)
 - Dolgu duvarın tek yüzünden

- Çelik şerit düzeni
 - Çapraz
 - Çapraz ve düşey şeritler
- Çelik elemanların, betonarme çerçeve ile bağlantı biçimi

deneysel değişkenler olarak seçilmiş ve güçlendirilen deney elemanlarının dayanım, davranış farklılıkları incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler ve yapılan gözlemlerle, deney elemanlarının davranış, süneklik, rijitlik ve enerji tüketme kapasitesi karşılaştırılmıştır. Ayrıca, deney elemanlarının iki boyutlu analitik modeli Drain-2Dx elastik olmayan analiz programı ile modellenerek itme analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır.

2. GEÇMİŞTE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi ve onarımı amacıyla ile ilgili birçok yöntem geliştirilmiş ve pratikte de uygulanmaktadır. Literatürde betonarme çerçevelerin farklı yöntemlerle güçlendirildiği çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Ancak betonarme çerçeve içindeki tuğla dolgu duvarın çelik şeritlerle güçlendirmesini konu alan bir araştırmaya literatürde rastlanmamıştır. Literatür taramasının kapsamı çelik elemanlarla güçlendirilen çerçeveler hakkındaki çalışmalarla kısıtlı tutulmuştur. Bölümde ayrıca, tuğla duvar ve dolgulu çerçeveler üzerinde yapılmış bazı temel çalışmalara da yer verilmiştir. Taranan çalışmalara ait özet bilgi tarihsel gelişim sırası içinde özetlenmiştir.

Smith [9], araştırmasında beton dolgulu çelik çerçeveler üzerinde deney yapmıştır. Araştırmacı elde ettiği deneysel veriyi, denge ve enerji denklikleri ile hesapladığı, çerçeve ile dolgu arasındaki temas uzunluğu olarak adlandırdığı αh , ifadesini elde etmekte kullanmıştır. α , Eş. 2.1.'de, çerçeve rijitliğinin dolgu rijitliğine oranlandığı Eş. 2.2.'de verilen λh boyutsuz parametresi cinsinden sunulmuştur.

$$\alpha = \frac{\pi}{2\lambda} \quad (2.1)$$

$$\lambda h = h \times \sqrt[4]{\frac{E_{\text{dolgu}} \times t}{4 \times E_{\text{kolon}} \times I_{\text{kolon}} \times h'}} \quad (2.2)$$

Eşitliklerde,

E_{dolgu}	Dolgu duvarın elastisite modülü,
t	Dolgu duvarın kalınlığı
E_{kolon}	Çerçeve kolonunun elastisite modülü
I_{kolon}	Çerçeve kolonunun eğilme yönündeki atalet momenti
h'	Dolgu duvarın yüksekliği
h	Kolon yüksekliği'dir.

Smith [10] yüksekliği açıklığına eşit, beton dolgulu yumuşak çelik malzemeden imal edilmiş çerçeveler üzerinde bir seri test yapmıştır. Testlerde çerçeve ile dolgunun birbirinden, dolgunun temas ettiği kenar boyunun %75'i uzunluğundaki bir kesit boyunca ayrıldığı gözlenmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda araştırmacı, dolgunun sadece yüklü köşelere temas eden basınç çubuğu biçiminde modellenebileceği fikrini ortaya atmıştır. Araştırmacı, diyagonal doğrultuda yüklenmiş dolgular üzerinde de deneyler yapmış, diyagonal üzerinde birim şekil değişim ölçümleri almıştır. Deneyler sonucunda, sonlu farklar metodunu kullanarak ve birkaç düğüm noktasını dikkate alarak, deneysel verilerle iyi uyum sağlayacak en uygun gerilme fonksiyonunu çözmeye çalışmıştır. Teorik sonuçlar derlenerek etkin genişlik olarak adlandırılan kavram ortaya atılmıştır. Etkin genişlik ifadesinin, sadece dolgunun yükseklik/açıklık oranına bağlı olduğu varsayımının, yapılan diğer deneyler sonucunda tamamen yanlış olduğu ortaya konmuştur. Etkin genişliğin, başlı başına çerçevenin ve dolgunun rijitlikleri oranına bağlı olan çerçeve ile dolgu arasındaki temas uzunluğu ile ilişkisi ifade edilmiştir.

Smith ve Carter [11], dikdörtgen biçimli dolgular üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar, kare dolguların hesaplanışı ile benzer şekilde, geliştirdikleri λh ifadesini dikdörtgen biçimli dolgulara uyarlamışlardır. Eş. 2.3.'de λh şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\lambda h = h \times \sqrt[4]{\frac{E_{\text{dolgu}} \times t}{4 \times E_{\text{kolon}} \times I_{\text{kolon}} \times h}} \times \sin(2\theta) \quad (2.3)$$

Yukarıdaki ifadede θ , dolgu diyagonalinin yatayla yaptığı açıdır. Araştırmacılar, panel ve çerçeve elemanlarının sahip olacağı dayanıma göre panelin,

- Yüklenen diyagonal doğrultusunda gelişen çekme çatlakları dolayısıyla,
- Çerçeve ile dolgunun temas ettiği köşelerde bölgesel olarak,
- Tuğla ile harç arasındaki derzin kesme dayanımının aşılması,

gibi üç göçme mekanizmasına sahip olacağını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar kolon rijitliğinin, dolgu rijitliği ve dayanımına kirişlerden daha fazla etkide bulunduğu sonucuna varmışlardır. Araştırmacılar, kiriş rijitliği ne olursa olsun yaklaşık olarak kiriş açıklığının yarısının her zaman dolgu ile temas ettiğini belirtmişlerdir.

Goel ve Lee [12], 2/3 geometrik orana sahip, iki katlı tek açıklıklı betonarme bir çerçeve üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Deney çerçevesi UBC(1985)'in ön gördüğü şartları sağlamayacak şekilde, kolon-kiriş düğümlerinde ve kolon boyunca yetersiz sargı donatısı olması ve güçlü kiriş-zayıf kolon birleşimi gibi detaylar ile üretilmiştir. Deney çerçevesi, 1. ve 2. kat kirişi hizasından uygulanan tersinir tekrarlanır yatay yük altında test edilmiştir. İkinci kat kesme yükünün birinci kat kesme yüküne oranı deney boyunca sabit 0,56 olacak biçimde çerçeveye yük uygulanmıştır. 2. kat kirişi %2 ötelenme oranına ulaştığında deneye son verilmiştir. Deneysel programın ilk testinde betonarme çerçevenin 2. kat kirişi %2 ötelenme oranına ulaşınca kadar betonarme deney çerçevesine yük uygulanmıştır. Daha sonra çerçeveye tuğla dolgu duvar örülerek tekrar tersinir tekrarlanır yatay yükleme ile aynı ötelenme oranına kadar test tekrarlanmıştır. Uygulanan iki test sonrasında çerçevenin hasar gören bölgeleri onarılmış ve betonarme çerçeveye dıştan çelik elemanlar bağlanarak çerçeve güçlendirilmiştir. Yatay çelik elemanlar, 1. kat kirişinin alt ve üst yüzüne, 2. kat kirişinin ise sadece alt yüzüne bulonlarla sabitlenmiştir. Düşey çelik elemanlar kolonlara tutturulmamış, basitçe kolonları sargılayacak biçimde konumlandırılmıştır. Çerçeve içerisine ters V biçiminde çelik çaprazlar ilave edilerek, oluşturulan çelik-betonarme çerçeve aynı yükleme programı ile test edilmiştir.

Badoux ve Jirsa [13], betonarme çerçevelerin çelik çaprazlarla sismik güçlendirmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çelik diyagonal ile güçlendirilecek binanın mevcut durumunun değerlendirilmesi gerekliliği üzerinde durmuşlardır. Güçlendirmenin uygulanabilir olup olmadığını değerlendirmek için, bir akış şeması ile çapraz sistemin tasarımını özetlemişlerdir. Sünek olmayan çerçevelere uygulanmış çapraz çelik sistemlerin deneysel çalışmalarından elde edilmiş bilgilere çalışmada yer verilmiştir. Çalışmada ayrıca deneysel verileri benzeştiren analitik bir çalışma

yapılmıştır. Araştırmacılar, sismik güçlendirme amacıyla güçlü kiriş ve zayıf kolonlara sahip çerçevelerde, diyagonal çelik elemanların kullanımının uygunluğu üzerinde durmuşlardır. Yatay rijitliği olmayan bu tür çerçevelerde doğrusal olmayan davranışı iyileştirmeye yönelik tavsiyelerde bulunmuşlardır. Çalışmanın sonucunda çelik çapraz sistemin, taşıyıcı olmayan elemanlar, yapısal uyumluluk, elastik olmayan burkulma ve yatay rijitliği düşük olan çerçeveler üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Bush ve ark. [14], 2 katlı ve 2 açıklıklı bir betonarme çerçeveyi çelik çaprazlarla güçlendirmişlerdir. Deney çerçevesi 7 katlı gerçek bir yapının 3., 4. ve 5. kat kirişlerini temsil etmekte olup, 2/3 geometrik oranına sahiptir. Binanı dış aksından alınan deney çerçevesi, derin kirişler ve kısa, eğilme kapasitesi yüksek kolonlardan oluşmaktadır. Yatay yük etkisinde çerçeve kolonlarının kesme kapasitesi, kolon eğilme kapasitesinin %40'ı, kiriş eğilme kapasitesinin ise %30'u seviyesinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Dolayısıyla, deney çerçevesinin kesme göçmesi davranışı göstermesi planlanmıştır. Düşey yüklere göre tasarımı yapılan deney elemanının, yatay yüklere karşı dayanım gösterebilmesi amacıyla deney çerçevesi, X biçiminde düzenlenmiş olan çelik elemanlarla güçlendirilmiştir. Araştırmacılar deney elemanını göçme dayanımının altındaki bir yük seviyesine kadar deneyip, daha sonra çelik güçlendirme çerçevesini modele ilave etmişlerdir. Çelik elemanlar, kolon ve kiriş dış yüzünden epoksi yapıştırıcı ile ankre edilerek çerçeveye sabitlenmiştir. Düşey çelik elemanlar katlar arası bağlantıyı sağlayacak biçimde kolonların her iki yüzüne boydan boya, yatay çelik elemanlar ise kat döşemesi seviyesinde dış kirişe ankre edilmiştir. Döşeme ile aynı düzlemde çerçeveye sabitlenen yatay çelik elemanların, çerçeveye etki eden tüm yatay yükü doğrudan çelik taşıyıcılar etki ettirmesi planlanmıştır. Uygulanan güçlendirme ile çerçevenin yatay yük altındaki davranışı, iyileştirilmiş, göçmeye çapraz elemanlarda oluşan burkulma, çelik ve betonarme elemanlardaki birleşim ve kolonlardaki kesme hasarı sebep olmuştur. Araştırmacılar uygulanan güçlendirme ile çelik çapraz düzeneğinin başlangıç rijitliğini %150, kolonların kesme kapasitesini %50 ve çerçevenin taşıma kapasitesini ise %224 artırdığını bildirmişlerdir.

Maheri ve Sahebi [15], çelik elemanlarla yapılacak güçlendirmenin, betonarme çerçeve üzerinde uygulanışı ve çerçeveye sağladığı kazanım üzerine çalışmışlardır. Kendilerinden önceki çalışmaların aksine güçlendirme amacıyla kullandıkları çelik çaprazların doğrudan betonarme çerçeveye yük aktarmasını sağlamışlar, diğer çalışmaların aksine betonarme çerçeve içerisinde kullanılan çelik çerçeveyi güncelliğini yitirmiş bir fikir ve maliyet artırıcı bir unsur olarak değerlendirmişlerdir. Deneylere kullandıkları betonarme çerçevenin kenarları birbirine eşit olup 580 mm'dir ve tüm betonarme elemanların kesitleri 100 x 100 mm'dir. Araştırmacılar, X biçiminde düzenlenmiş çelik elemanlar kullanmışlardır. Güçlendirme amacıyla çerçeveye bağlanan çelik elemanların boyutlandırılmasında çerçeve toplam kesme yükünün %75'inin çelik elemanlar tarafından karşılanması amaçlanmıştır. Deneylerde eşit kollu 25 x 25 mm çelik L-profil kullanılmıştır. Çelik elemanların betonarme çerçeveye sağladığı katkıyı ortaya koyabilmek amacıyla araştırmacılar boş çerçeve, çekme çubuğu, basınç çubuğu ve basınç+çekme çubuğu ile güçlendirilen olmak üzere toplam 4 tip deney elemanı üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar ayrıca iki farklı çelik eleman-betonarme çerçeve arası bağlantı tipi üzerinde tam ölçekli deneyler yapmışlardır. Çalışma sonucunda, sadece çekme veya basınç çubuğu ile güçlendirilen betonarme çerçevenin, düzlem kuvvetlerinin büyük bir kısmının, çerçeve elemanlarının karşıladığı momentler ile taşındığını belirtmişlerdir. Buna karşın, her iki diyagonal doğrultusunda da çelik çubuklarla güçlendirilen çerçevede, sistem davranışı üzerinde betonarme elemanların değil çelik elemanın etkin olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, X deseni ile güçlendirilmiş çerçevede, birbirine dik doğrultudaki çekme ve basınç çubuğunun farklı büyükte yük taşıdığı belirlenmiştir. Denenmiş olan iki farklı yük aktarım biçiminin, daha da geliştirilmeye açık bir konu olduğu çalışmada belirtilmiştir. Çelik elemanlar ile betonarme çerçeve arasında sağlanan yük aktarım başarımı kaybedildikçe, çekme kuvvetlerini karşılayan çelik elemanlarda akma yüküne ulaşılamadığı bildirilmiştir.

Crisafulli [16], tuğla dolgu betonarme çerçevelerin sismik davranışı üzerine yoğunlaşmıştır. Tuğla ve bileşen malzemelerinin özellikleri gözden geçirilmiştir. Dolgu betonarme çerçevelerin analizine yönelik çalışmada iki teorik yöntem önerilmiştir. İlk metod, tuğla dolgu duvarda kesme-sürtünmesi ve diyagonal basınç göçmesi

durumlarının sırasıyla etkidiği iki farklı göçme durumuna karşı dolgulu çerçevenin yatay dayanımını tahmin etmeye imkan sağlayan eşdeğer kafes mekanizmasına dayanan basit bir yaklaşımdır. Diyagonal çubuğun basınç dayanımı Mann ve Müller teorisinin modifiye edilmesiyle elde edilen kesme göçmesi zarf eğrisinin dönüştürülmesiyle değerlendirilmiştir. İkinci yöntem, çerçeve üzerinde tuğla panelin etkisini daha detaylı göstermek için çoklu çubuk formülasyonuna bağlı makro ölçekli bir modeldir. Model, çift kafes mekanizması ve her bir yönde bir kesme yayı kullanarak tuğla panelin basınç ve kesme davranışını ayrı ayrı hesaplamaktadır.

Dolgu çerçevelerin sismik davranışını incelemek için bir test programı uygulanmıştır. Deneysel programın en önemli sonucu, plastik deformasyonlar yapının seçilen bölgelerinde yoğunlaşıyorken tuğla dolgulu betonarme çerçeve davranışının tuğla panellerin deformasyonunu azaltmayı amaçlayan gerçekçi bir tasarımla önemli oranda iyileştirilebileceği olmuştur.

Tagdi ve ark. [17], yaptıkları deneysel çalışmada yüksekliği ve uzunluğu birbirine eşit 1800 mm olan 6 adet deney elemanını sabit düşey yük ve tersinir tekrarlanır yatay yük altında test etmişlerdir. Deney programındaki ilk dört deney elemanı 200x200x400 mm boyutunda gerçek ölçekli briketler kullanılarak imal edilmiştir. Diğer iki deney elemanı ise minimum donatı oranına sahip olacak biçimde imal edilen betonarme duvardır. Briket duvar deney elemanında, briketler arasındaki yatay ve düşey derzler 10 mm olacak biçimde düzenlenmiştir. Hazırlanan iki briket duvar deney elemanının içerisine, düşey ve yatay doğrultuda parçasal olarak donatı yerleştirilmiştir. Deney elemanlarının 3 tanesi, referans olarak karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Donatısız ve parçasal donatılı briket duvar deney elemanları simetrik biçimde düşey doğrultuda 80 mm genişliğinde, 3,81 mm kalınlığında şeritlerle ve çapraz doğrultuda 220 mm genişliğinde, 3,81 mm kalınlığında şeritlerle güçlendirilmiştir. Çelik şeritler, 150 x 150 x 16 mm boyutunda eşit kollu L-profillere kaynaklanarak birleştirilmiştir. Çelik L-profiller, her köşede alt ve üst kirişe ankre edilen 3'er adet yüksek dayanımlı çubuğa vidalanmıştır. Deney programındaki betonarme duvar deney elemanları ile referans, onarım ve güçlendirme olmak üzere toplam 3 adet deney yapılmıştır. Referans amacıyla denenen duvar elemanına, %2

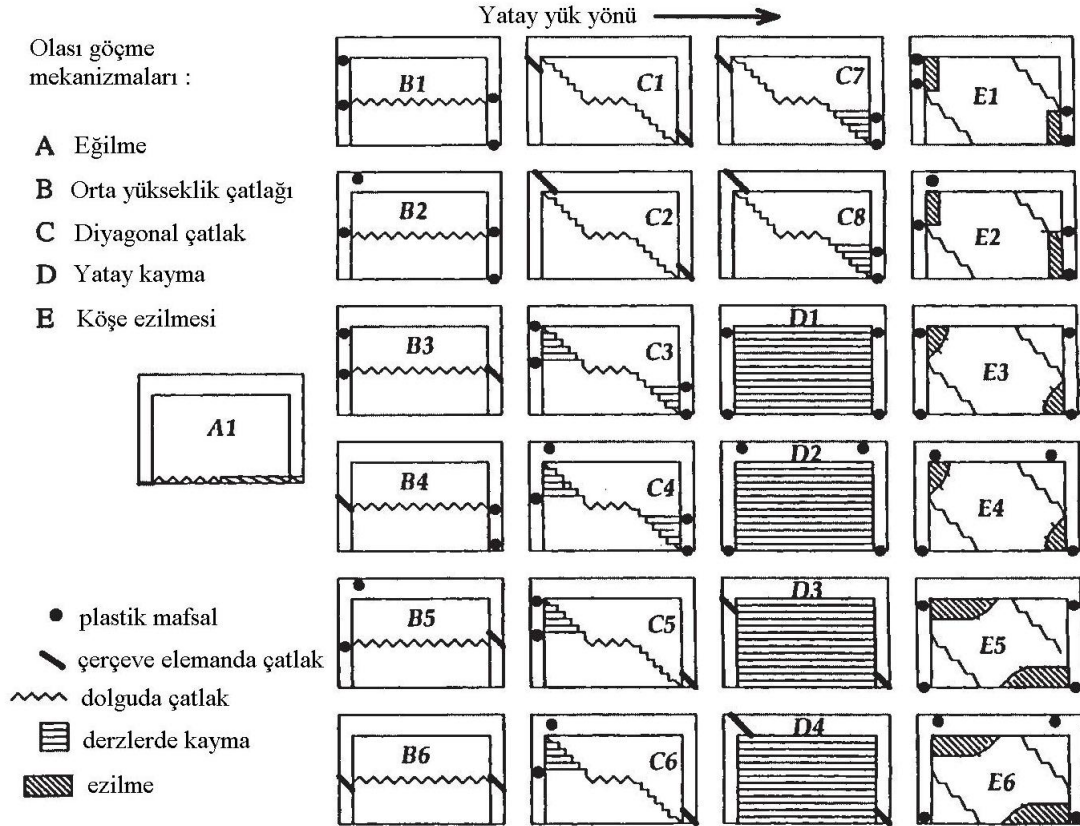
ötelenme oranına kadar hasar verilmiş, düşey donatılarında burkulma gözlemlendiği anda henüz yük kapasitesinde azalma meydana gelmeden deneye son verilmiştir. Hasarlı deney elemanı, simetrik biçimde düşey doğrultuda 160mm genişliğinde 4,8 mm kalınlığında çelik şeritler kullanılarak onarılmış ve göçene kadar denenmiştir. Hasar verilmemiş olan betonarme duvar elemanı ise briket duvar elemanları ile özdeş biçimde güçlendirilerek test edilmiştir. Elde edilen aşağıda verilmiştir.

- Çalışma, tek katlı duvar ve betonarme duvarların güçlendirilmesi için önerilen yöntemin, yapılan deneylerin sonucunda, deney elemanlarının yatay yük dayanımını, sünekliğini ve enerji tüketim kapasitesini önemli bir biçimde artırdığını göstermiştir. Elemanlar birbirinden bağımsız olarak düşünüldüğünde çelik şeritlerin, yatay yük taşıma kapasitesini yaklaşık olarak 300kN artırdığı gözlemlenmiştir. Referans elemanlarla kıyaslandığında, donatısız beton briket duvarın %450, parçasal donatılı briket duvarın %280 ve betonarme duvarın %192 taban kesme kuvvetinde artış sağladığı görülmüştür.
- Diyagonal ve düşey şeritlerden oluşan sistemin bütün deney elemanlarında düzlem içi dayanımı artırdığı, az donatılı veya donatısız briket duvarlarla, minimum donatılı betonarme duvarların sünekliğini artırdığı sonucuna varılmıştır.
- Süreklilik sağlanması amacıyla duvar ve kirişler arasında kullanılan bağlantı detayları da sistemin kayma sürtünme dayanımını artırmıştır.
- Çalışma kapsamında düzlem dışı davranış incelenmemiş olmasına rağmen, yazarlar şeritler kullanılarak her iyi yüzden yapılan bu güçlendirme metodunun düzlem dışı dayanımı artırmak ve deplasmanları azaltmak için kullanılabileceğini düşünmektedir.
- Sonuç olarak, betonarme veya tuğla duvarların uç bölgesindeki düşey donatıya takviye olarak eklenen düşey şeritlerin, erken burkulmayı önlediği görülmüştür. Ancak, sadece düşey şeritler kullanılarak güçlendirilen deney elemanlarında, yatay yük taşıma kapasitesi sünek olmayan kesme göçmesi nedeniyle kısıtlandığı için güçlendirme verimli olamamıştır.

Tagdi ve ark. [18], araştırmacılar daha önceki deneysel çalışmalarından elde ettikleri verilere dayalı olarak önerdikleri güçlendirme yöntemi için basit bir kapasite hesabı hakkında bilgi sunmuşlardır. Hesap temelini iki boyutta yaptıkları bir yapısal analize dayandırmaktadırlar. Daha önceki çalışmalarında yapmış oldukları güçlendirme desenini çubuk taşıyıcı sistem gibi modellemişlerdir. Modelde basınç kuvveti taşıyan elemanları ihmal etmişler sadece çekme kuvveti taşıyan elemanları dikkate almışlardır. Oluşturdukları iki boyutlu modeldeki, herhangi bir çubukta akma oluşturan yük seviyesini, modelin yatay yük taşıma kapasitesi olarak kabul etmişlerdir. Ancak makro ölçekli bu iki boyutlu model deformasyon kapasitesi bakımından tasarımcıya bir bilgi vermemektedir. Modelden elde edilen hesaplanmış kapasitelerle, deneysel verilerin uyumluluğu vurgulanmıştır. Çalışmacıların önerdikleri güçlendirme yönteminin örnek bir yapı üzerinde uygulaması çalışmaya dâhil edilmiştir.

Shing ve Mehrabi [19], tuğla dolgu duvarın çerçeve içerisindeki davranışını ve çerçeve ile dolgu arasındaki etkileşimin tahmin edilebilmesi amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, tuğla dolgulu çerçeveler üzerinde kapsamlı bir literatür araştırması yapmışlardır. Araştırmacılar, dolgulu çerçevenin dayanımının ayrı ayrı dolgu ve çerçevenin toplamlarından oluşmadığını sonucuna varmışlardır. Çalışmada, çerçeve ile dolgunun birbiri arasındaki etkileşiminin davranışı oldukça değiştirdiği belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından düşük yatay yük düzeylerinde, dolgulu çerçeve monolitik davranışın hâkim olduğunu, yatay yük düzeyindeki artış dolgunun kendisini çevreleyen çerçeveden ayrılmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Tuğla dolgu duvarın, çerçeve içerisinde bir basınç çubuğu gibi davrandığını, bu davranışın Smith [9]'in çalışmalarında da belirtildiğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar, dolgunun çerçeveye göre sahip olduğu dayanım farklılığı, yük taşıma mekanizmasının belirlenmesinde kilit rol oynadığını, dolgu çerçeveye göre zayıfladıkça, artan yatay yük düzeyine rağmen, baskın bir diyagonal çubuk mekanizmasından söz edilemeyeceğini vurgulamışlardır. Çalışmada, dayanımlar arasındaki göreceli farklılıkların, dolgulu çerçeveler için temelde 5 farklı göçme tipi oluşturduğu ve göçme tiplerinin 25 farklı göçme mekanizmasına neden olduğu belirtilmiştir. Şekil

2.1’de Shing ve Mehrabi’ye göre dolgulu çerçevelerin göçme mekanizmaları sunulmuştur.



Şekil 2.1. Dalgulu çerçevelerin göçme mekanizmaları [19].

Maheri ve ark. [20], kolon kesitleri 120 x 120 mm, kiriş kesiti 160 x 120 mm olan, kare biçimli kenar boyutu dıştan dışa 1000 mm olan 1/3 geometrik ölçekli betonarme çerçeveler üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar literatürdeki mevcut çalışmaların aksine, makalelerinde sünek bir çerçeve içerisindeki, doğrudan betonarme çerçeveye bağlanan çelik çapraz elemanlar üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında güçlendirilmemiş çerçeveler ile çapraz çelik elemanlarla ve dirsekli bağlantı tipi kullanılarak güçlendirilmiş çerçeveler üzerinde yük kapasitesi, rijitlik, süneklik ve performans faktörü gibi bazı sismik tepki ve tasarım parametrelerini üzerinde karşılaştırma yapmayı amaçlamışlardır. Maheri, daha önceki çalışmasında da kullandığı X biçiminde düzenlenmiş çelik elemanları tercih etmiştir. Çapraz

doğrultudaki çelik elemanlar, betonarme çerçevenin köşelerine, dirsekli ve doğrudan olmak üzere iki farklı tipte yük aktarmaktadır. Araştırmacılar, her iki köşe bağlantı tipinin de güçlendirilmiş çerçevenin yatay yük dayanımını, boş çerçeveye göre yaklaşık olarak 2,5 ile 3,5 kat arasında artırdığını belirtmişlerdir. Köşeden köşeye yapılan bağlantı tipinin, sünek bir betonarme çerçeveye uygulanması durumunda, sistem sünekliliğini azalttığı fakat rijitlik artışı sağladığı sonucunu elde etmişlerdir. Bağlantının dirsekli tipte seçilmesi ise, sünek bir betonarme çerçevenin, süneklilik düzeyinin istenilen düzeyde ayarlanmasına imkân sağladığı, hasar-düzeyine göre yürütülecek olan sismik güçlendirme amacına uygun olduğu sonuca varmışlardır.

Maheri ve Hadjipour [21], tam ölçekli 3 tip çelik eleman–betonarme çerçeve köşe bağlantısı üzerine deneyler yapmıştır. Çelik bağlantı elemanları kopana kadar eksenel yüklenmiştir. Deneyler sonucunda önerilen üç farklı tipteki köşe bağlantısının da, kolon-kiriş birleşim düğümünde aktarılacak yükleri destekleyebilecek kapasitede olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, güncel yönetmelikler yardımı ile yapılan dayanım tahminlerinin deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir.

Maheri ve Akbari [22], çelik elemanlarla güçlendirilen betonarme çerçevelerin, sismik performans davranış katsayısının, çelik elemanların betonarme çerçeveye yük aktarış biçimine göre değişimi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, yükü doğrudan betonarme çerçevenin düğümüne aktaran X düzenlemesine sahip çelik elemanlarla, yükü dolaylı olarak, dirsekli bağlantı ile çerçeveye aktaran yine X düzenindeki çelik elemanlı betonarme çerçeveler üzerinde yapılan deneysel ve analitik sonuçlar sunulmuştur. Araştırmacılar, yapının doğrusal olmayan tasarım dayanımının, elastik yapı dayanımı sınırı içerisinde kalmasını sağlayan, dayanımlar arasındaki oran olarak ifade ettikleri, davranış katsayısının, temel olarak sistemin süneklilik karakteri ve tasarımında dikkate alınan dayanım farkına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, doğrusal olmayan itme analizi için model geliştirmişler ve deneysel verilerle uyum içerisinde sonuçlar elde etmişlerdir.

Deneyler sonucunda araştırmacılar, narin ve sünek olmayan ağır hasar görmüş betonarme çerçevelerin, sünek çelik çaprazlarla güçlendirilmesinin oldukça etkili bir yöntem olduğunu, betonarme çerçevenin dayanımının, sünekliğinin ve enerji tüketiminin arttığını bildirmişlerdir.

Perera ve ark. [23], yeterli sismik performansa sahip olamayan, tuğla dolgu duvarlı bir betonarme çerçeveyi, K tipinde uyguladıkları düşeyde kesme bağlantısı barındıran bir çelik eleman düzenlemesi ile güçlendirmeyi amaçlamışlardır. Yükleme tersinir tekrarlanır biçimde yatay olarak deney çerçevesine uygulanmıştır. Araştırmacılar, deneysel çalışmayı tam ölçekli 4 katlı 3 açıklı bir bina çerçevesi üzerinde denemişlerdir. Deney çerçevesinin 2 katındaki orta açıklıktaki çerçeve boşluğu güçlendirme yöntemin uygulanması için seçilmiştir. Çerçeve mevcut bulunan tuğla duvar kırılarak alınmış, yerine önerilen düzendeki çelik elemanlar yerleştirilmiştir. Güçlendirmenin her iki tarafında bulunan komşu açıklıklardaki tuğla duvarlara hasar verilmemiştir. Deneysel veriler, tuğla dolgu duvar yerine yerleştirilen düşey kesme bağlantılı dış merkezli çaprazlarla güçlendirilen çaprazların yatay sismik kuvvet karşısında mükemmel bir enerji tüketim kapasitesine sahip olduğu göstermiştir. Araştırmacılar, elde edilen deney verileriyle uyum sağlayacak sayısal yapısal hasar modeli için basit bir önerme sunmuşlardır. Çalışmada elde ettikleri deneysel veri ile sayısal modeli kalibre ederek, uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

3. DENEY ELEMANLARI VE TEST TEKNİĞİ

3.1. Genel

Tuğla dolgulu sünek olmayan çerçevelerin yatay yüklere karşı güçlendirilmesi üzerinde çalışmaların yürütüldüğü güncel bir konudur. Bu çalışmalarda birçok farklı güçlendirme yöntemi araştırılmıştır. Sismik güçlendirmenin çelik elemanlarla yapıldığı çalışmaların tümünde, güçlendirme boş çerçeve üzerinde uygulanmıştır. Bu çalışmada, betonarme çerçevenin içerisindeki tuğla dolgu duvarın güçlendirilmesine yönelik olarak, çeşitli düzendeki çelik şeritler ve bağlantı tipi uygulamalarıyla, yeni bir güçlendirme tekniği geliştirilmesi için deneysel araştırma yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, tuğla dolgu duvar üzerine uygulanan düşey ve çapraz doğrultudaki çelik şerit düzenlemesi ve çelik elemanların farklı biçimlerde betonarme çerçeveye yük aktarımı üzerinde çalışılmıştır. Deney programında üretilen betonarme çerçeveler, tek katlı ve tek açıklıklı olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Deney elemanlarının boyutları ve geometrik ölçeği, mevcut bilgi birikimine katkı sağlaması ve elde edilecek deneysel bulguların karşılaştırılabilmesi bakımından, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yapılmış önceki çalışmalarda kullanılan eleman boyutları dikkate alınarak seçilmiştir.

Deney elemanları geometrik boyut, donatı düzenlemesi ve malzeme kalitesi bakımından özdeş olarak üretilmiştir. Test çerçevesi, ülkemizdeki sismik performansı yetersiz yapı stokunda gözlenen benzer kusurlara sahiptir. Test çerçevesinde güçlü kiriş-zayıf kolon birleşimi mevcuttur. Deney elemanı kesme dayanımı yetersiz kiriş ve kolonlardan oluşmuştur. Test çerçevesinin kolon boyuna donatısının kenetlenme bölgesi kolon alt ucunda yetersiz bindirme ile oluşturulmuştur. Kiriş ve kolon etriyelerinin kancaları 90° bükülmüştür. Betonarme çerçeve üretiminde basınç dayanımı düşük beton kullanılmıştır.

Deney elemanları deprem yüklerini benzeştiren tersinen tekrarlanan yatay yük ve çerçeve düşey yükünü temsil eden sabit düşey yük altında test edilmiştir.

3.2 Deney Elemanları

Deney programında geometrik ölçeği 1/3 olan 9 adet deney elemanı test edilmiştir. Test çerçevesi tüm deney elemanlarında özdeştir.

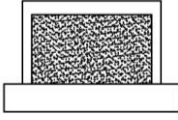
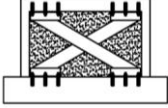
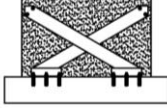
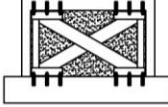
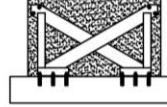
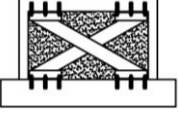
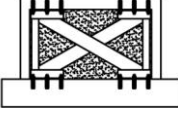
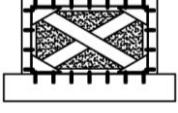
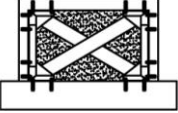
Test Çerçevesi

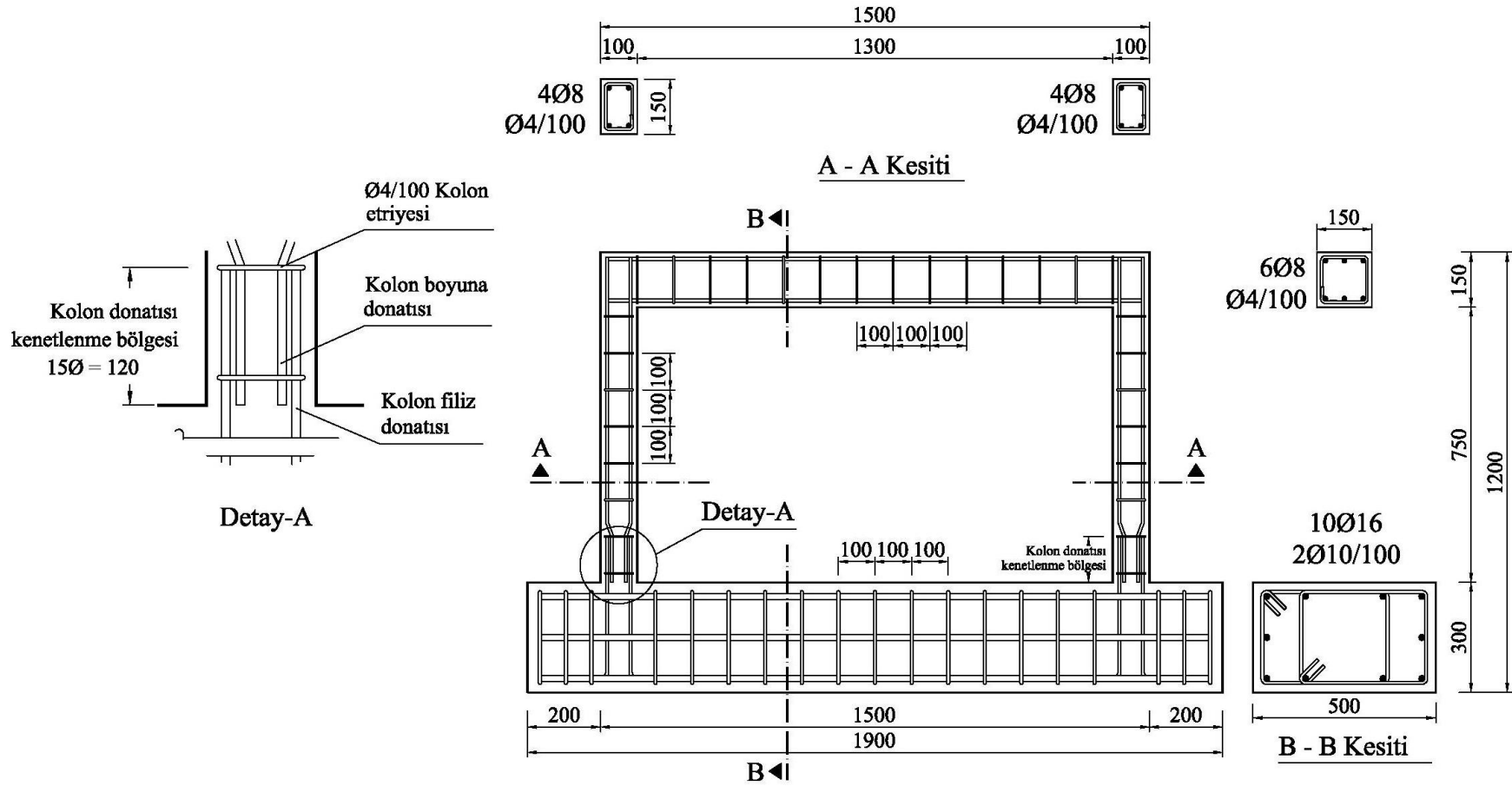
Test çerçevesinin geometrik boyutları ve donatı detayları Şekil 3.1’de verilmiştir. Çerçevenin kolon orta noktaları arasındaki açıklığı 1400 mm, temel üstünden giriş orta noktasına kadar olan yüksekliği 825 mm’dir. Kolon kesiti 100 x 150 mm, giriş kesiti 150 x 150 mm’dir. Test çerçevesi 1900 mm uzunluğundaki, 300 x 500 mm kesitli, temele mesnetlenmiştir.

Betonarme çerçevenin kolonlarında, 4 adet Ø8 mm çapında düz demir boyuna donatı olarak donatı kullanılmıştır. Kolonlardaki boyuna donatı oranı $P_{kolon}=0,0134$ olup TS500’ün [31] öngördüğü kolon minimum boyuna donatı oranı olan 0,01’e oldukça yakındır. Pratikte kolon donatıları kat hizalarında bindirmeli ekli yapılmaktadır. Bu bindirmeli ekler genellikle yetersiz kenetlenme boyunda olup, kenetlenme bölgeleri sargısız bırakılmaktadır. Uygulamayı yansıtmak için test çerçevesinin kolon boyuna donatısında temel üzerinde sonlandırılmıştır. Sonlandırılan kolon boyuna donatısının ucuna kanca yapılmamıştır. Kolon boyuna donatısı ile temelden çıkarılan kolon filiz donatısı arasında 15Ø (120 mm)’lik kenetlenme bölgesi oluşturulmuştur. Kolon alt ucunda oluşturulan kenetlenme bölgesinde etriye sıklaştırılmamıştır. Test çerçevesinin girişinde 6 adet Ø8 mm çapında düz donatı boyuna donatı olarak kullanılmıştır. Test çerçevesinin girişinde boyuna donatı oranı $P_{giriş}=0,0134$ ’dür. Çerçevenin kolon ve giriş etriyelerinde, Ø 4 mm çapındaki düz donatı kullanılmıştır. Kolon ve girişte sargı donatısı eleman boyunca 100 mm aralıklı biçimde düzenlenmiştir. Kolon etriyeleri kolon giriş birleşim bölgelerinde devam ettirilmemiştir. Açık sargı donatısı oluşturulmuş, etriyelerin kancası 90o bükülerek bırakılmıştır. Şekil 3.2’de test çerçevesine ait kolon ve giriş kesitleri ve kesitlerdeki donatı yerleşimi detaylı olarak gösterilmiştir. Test çerçevesinin temelinde, boyuna

donatı olarak 10 adet Ø16 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Ø10 mm çapındaki nervürlü donatıdan üretilmiş olan temel etriyesi, temel kirişi boyunca 100 mm aralıkla yerleştirilmiştir.

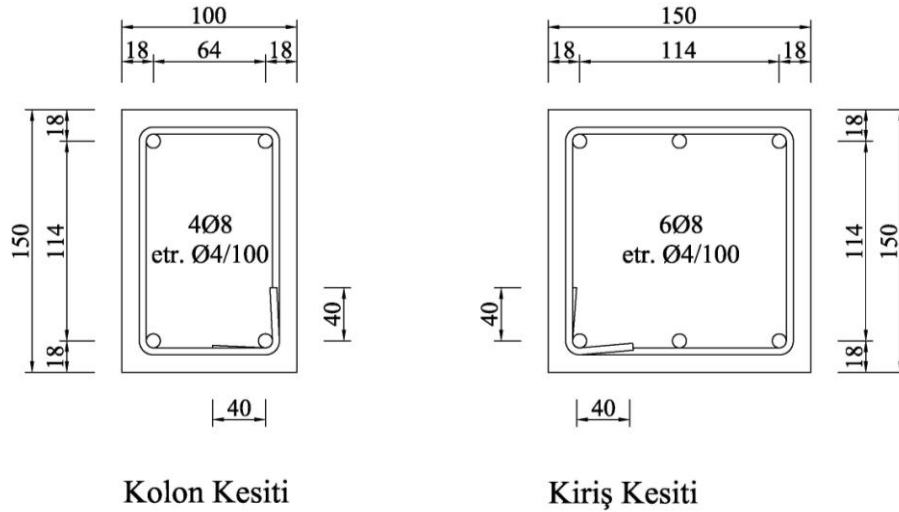
Çizelge 3.1. Deney programı ve test değişkenleri

Deney Elemanı No	Güçlendirme Biçimi	Şerit Düzenlemesi	Çerçeve ile Bağlantısı
1		Referans Deney Elemanı	
2	  İç Yüz Dış Yüz	Simetrik çapraz şeritler	Kirişe
3	  İç Yüz Dış Yüz	Simetrik çapraz ve düşey şeritler	Kirişe
4		İç yüze çapraz şeritler	Kirişe
5		İç yüze çapraz ve düşey şeritler	Kirişe
6		İç yüze çapraz şeritler	Kiriş ve kolon boyunca
7		İç yüze çapraz şeritler	Kiriş ve kolon boyunca
8	7 nolu deney elemanı ile özdeştir.		
9		İç yüze çapraz ve düşey şeritler	Kolon-kiriş birleşimine



Not : Tüm ölçüler mm'dir

Şekil 3.1. Test çerçevesinin geometrik boyutları ve donatı düzeni



Not : Tüm ölçüler mm'dir

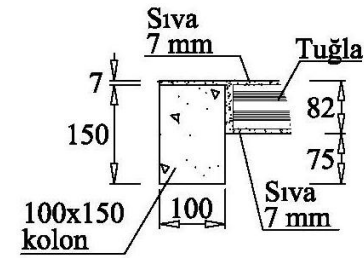
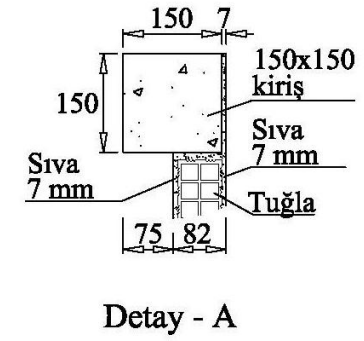
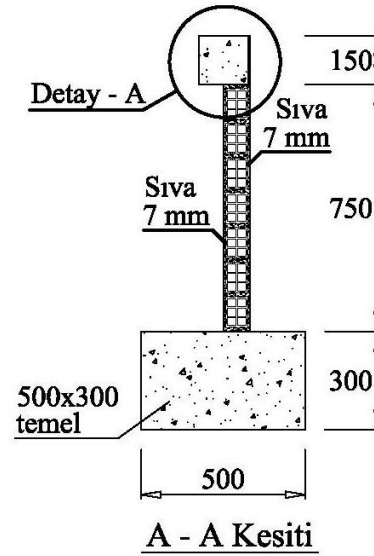
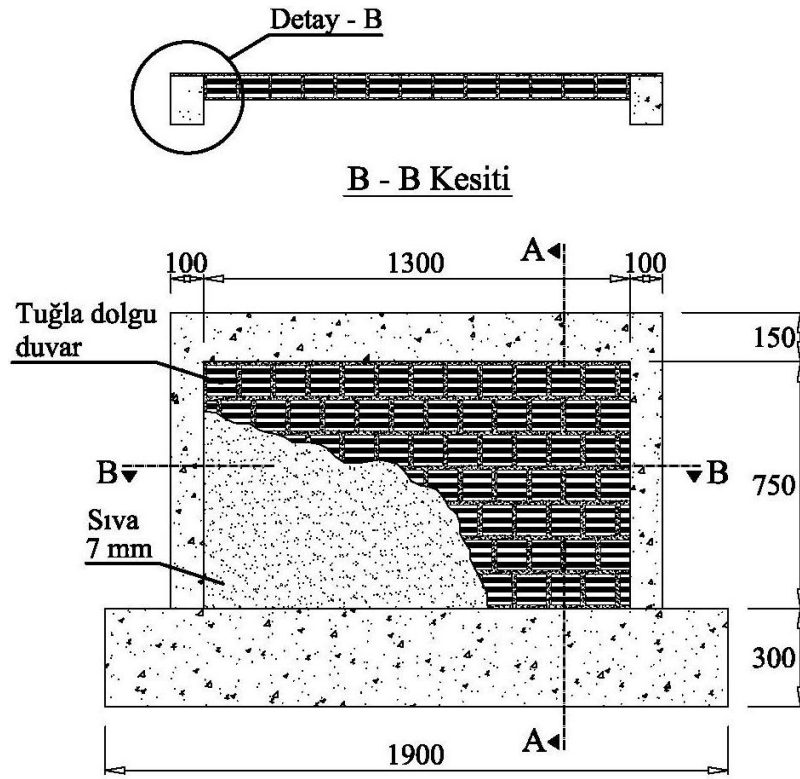
Şekil 3.2. Kolon ve kiriş donatıları

Deney Elemanı-1

Referans elemanıdır. Deney Elemanı-1'in geometrik boyutları ve donatı detayı Şekil 3.3'de verilmiştir. Deney programındaki deney elemanlarının tümü donatı düzenlemesi, geometrik boyutlar ve malzeme kalitesi bakımından Deney Elemanı-1 ile özdeşdir.

Deney Elemanı-2

Deney elemanı, panel köşegenleri doğrultusundaki hem iç hem de dış yüzden, simetrik biçimde, tuğla dolgu duvar üzerine vidalanan çelik şeritlerle güçlendirilmiştir. Dolgu duvar üzerinde 4 adet birine özdeş 150 mm genişliğinde, 4 mm kalınlığında çelik şerit kullanılmıştır. Güçlendirilmiş deney elemanlarının tümünde, Deney Elemanı-2'de kullanılan çapraz şerit ile özdeş geometrideki çapraz şeritler kullanılmıştır. Tuğla dolgu duvarın her iki yüzüne eklenen çelik şeritler, birbirlerine tuğla dolgu duvarı delip geçen Ø16 mm çapındaki sonsuz dişli çubukla bağlanmıştır. Çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarının tümünde çapraz doğrultudaki şeritler, tuğla dolgu duvara geçen Ø16 mm çapındaki sonsuz dişli çubuklarla bağlanmıştır.



Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.3. Betonarme çerçeve ve tuğla duvar detayları

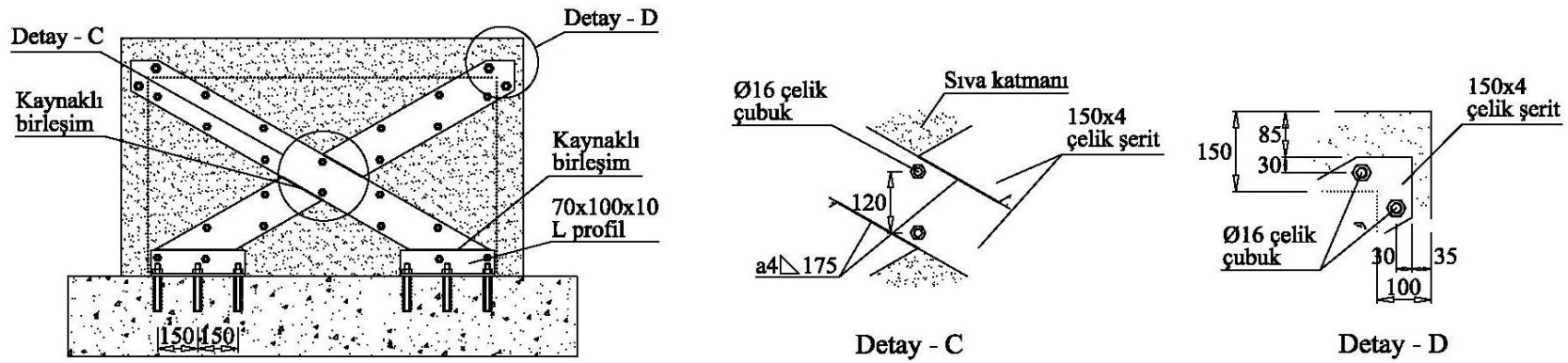
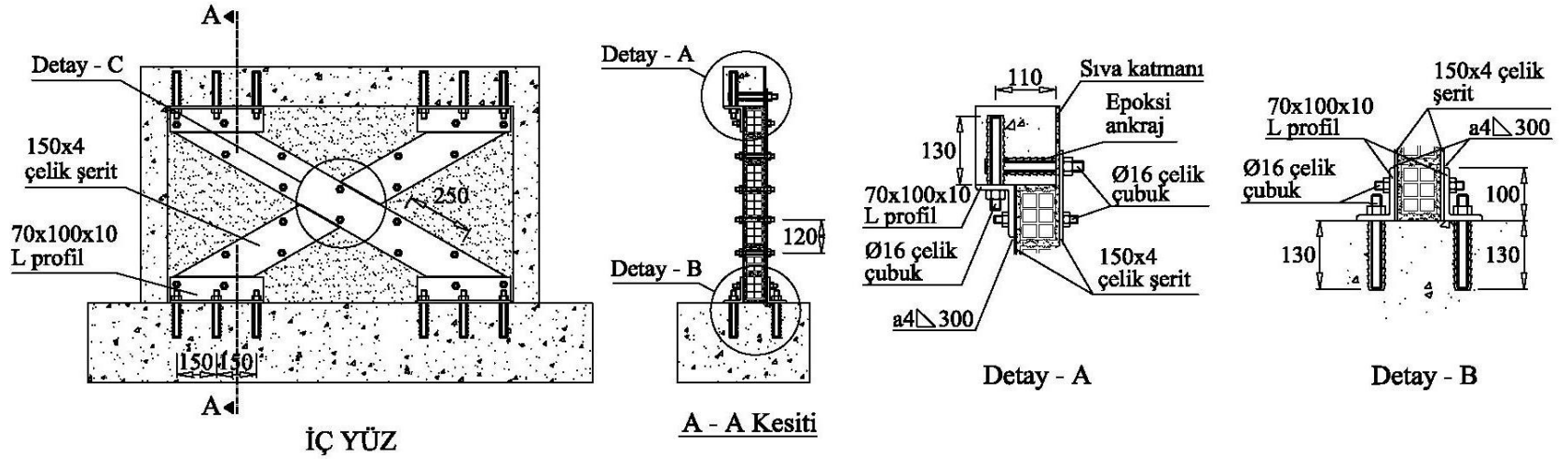
Çelik şeritler, betonarme çerçeveye kiriş uçlarında oluşturulan bağlantı aracılığı ile yük aktarmaktadır. Deney Elemanı-2’de uygulanan bu bağlantı tipi, tüm kiriş uçunda bağlantı tipi detayına sahip deney elemanlarında özdeştir. Çapraz doğrultudaki çelik şeritler, kiriş ve temele kimyasal ankraj ile sabitlenen kesit boyutları 70x100x10 mm olan çelik L-profillere kaynaklanmıştır. Deney Elemanı-2’de ve tüm çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında çelik şeritler, birinin diğerinin üstünden geçtiği panel orta bölgesinde, birbirlerine temas ettiği kenarlar boyunca kaynaklanmıştır. Deney Elemanı-2’ye ait güçlendirme detayı Şekil 3.4’de sunulmuştur.

Deney Elemanı-3

Deney Elemanı-3 simetrik biçimde güçlendirilmiştir. Deney elemanının dolgu duvarı üzerinde, tuğla dolgu duvarın çaprazı doğrultusundaki şeritlerle birlikte, dolgu duvarın düşey kenarı boyunca yerleştirilen düşey çelik şeritler mevcuttur. Tuğla dolgu duvarın, kolon ile komşu olduğu kenar boyunca 4 mm kalındığında, 50 mm genişliğinde düşey şerit tuğla dolgu duvara vidalanmıştır. Düşey şeritler, tuğla dolgu duvara Ø10 mm çapındaki sonsuz dişli çubuklarla bağlanmıştır. Deney Elemanı-3’ün tuğla dolgu duvarına yerleştirilen çelik elemanlar, betonarme çerçeveye kiriş uçlarında bulunan bağlantı ile yük aktarmaktadır. Deney Elemanı-3’e güçlendirme detayı Şekil 3.5’de sunulmuştur.

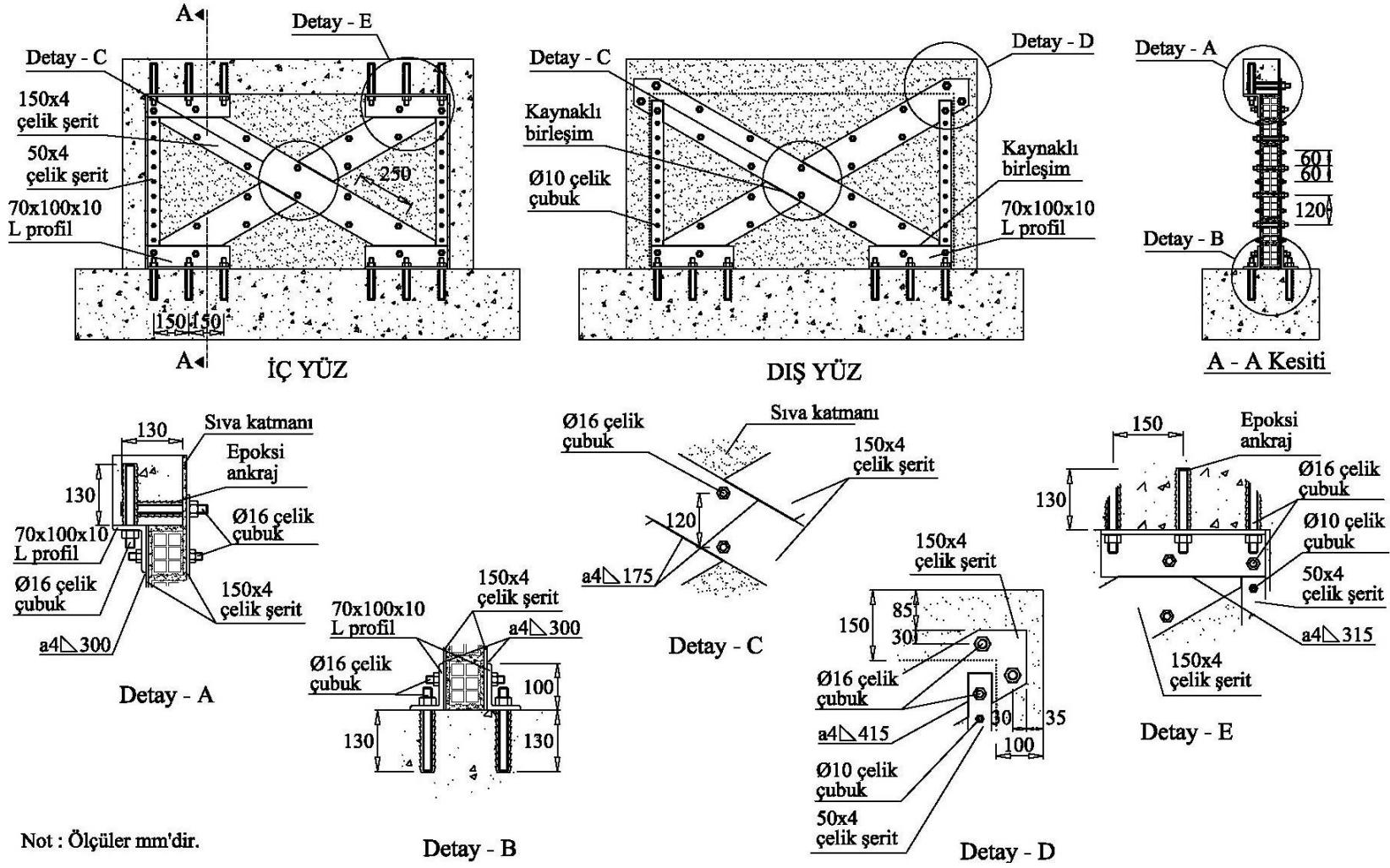
Deney Elemanı-4

Deney Elemanı-4 tuğla dolgu duvarın iç yüzünden, çapraz doğrultudaki çelik şeritlerle güçlendirilmiştir. Böylece, mimari sebeplerle her iki yüzden de güçlendirmenin mümkün olamadığı binalar ya da makine ve teçhizatın müsaade etmediği asansör boşluğu gibi bölgelerin deneysel olarak benzetimi sağlanmıştır. Deney elemanı üzerindeki çelik şeritler, tuğla dolgu duvarın dış tarafına sonsuz dişli çelik çubuklarla geçirilip, diğer tüm tek taraftan güçlendirilen deney elemanları gibi panel üzerindeki sıva katmanına mekanik olarak sabitlenmiştir. Çelik elemanların betonarme çerçeveye bağlantısı kiriş uç bölgesi aracılığı ile sağlanmıştır. Deney Elemanı-4’e ait güçlendirme detayı Şekil 3.6’da sunulmuştur.

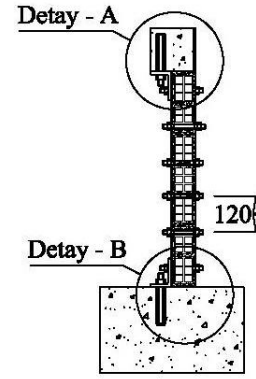
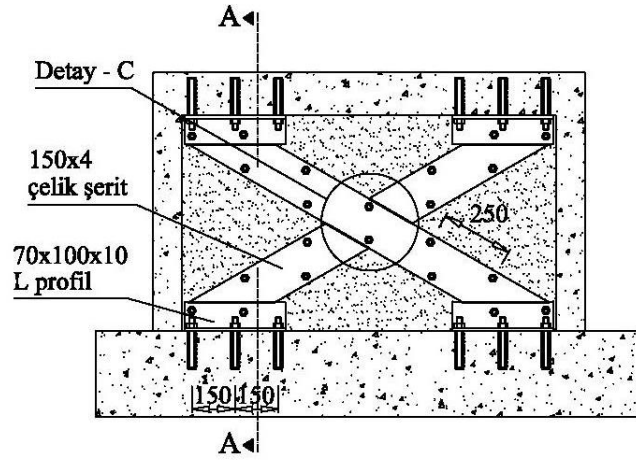


Not : Ölçüler mm'dir.

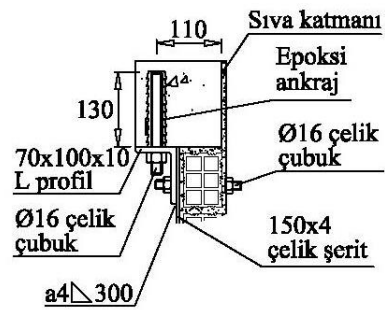
Şekil 3.4. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-2



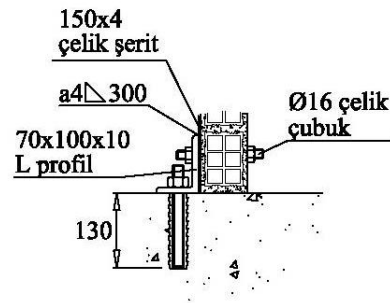
Şekil 3.5. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-3



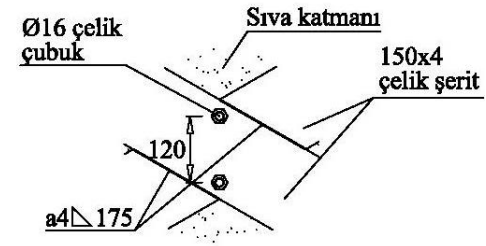
A - A Kesiti



Detay - A



Detay - B



Detay - C

Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.6. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-4

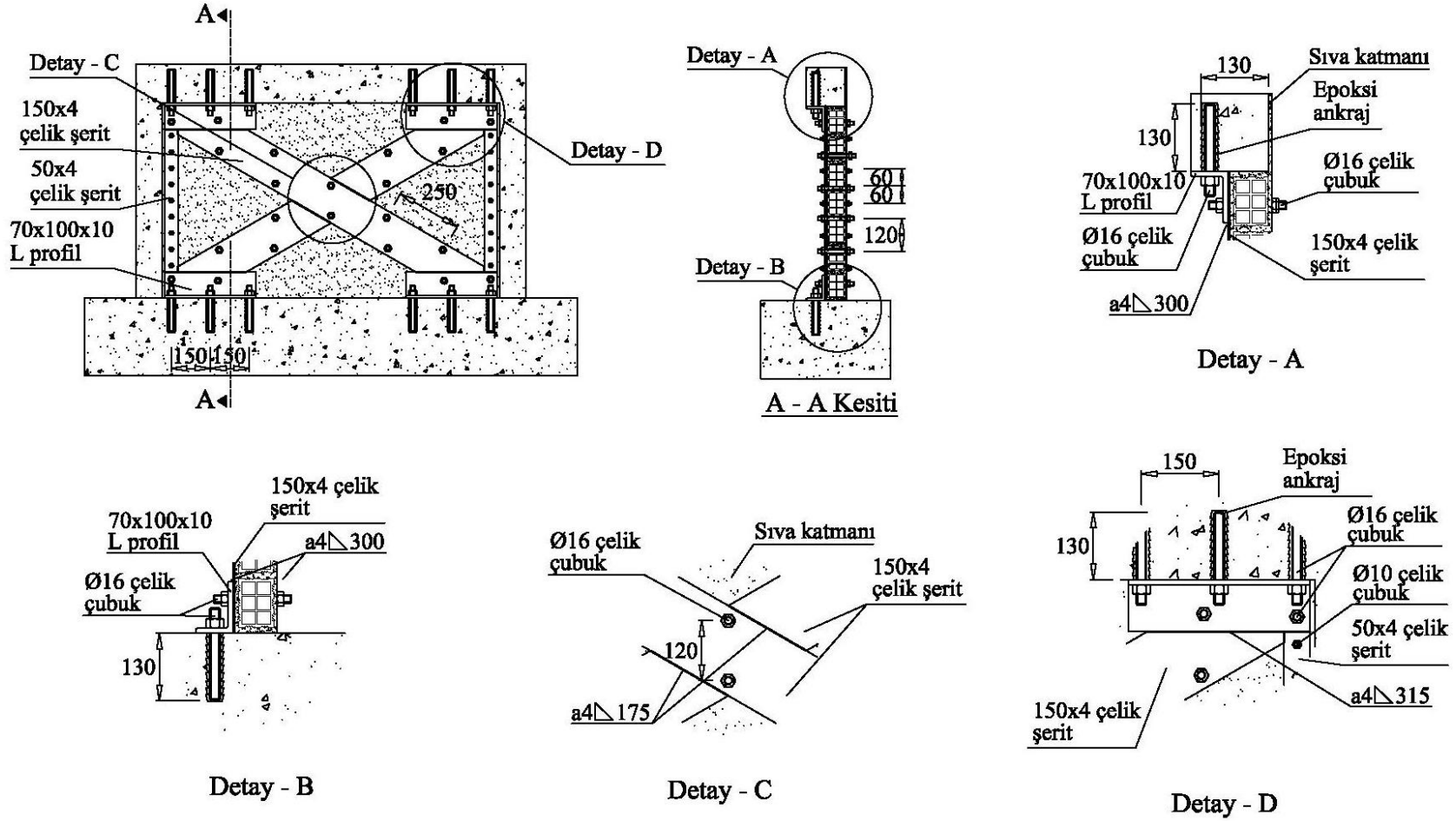
Deney Elemanı-5

Deney Elemanı-5, tuğla dolgu duvarın iç yüzünden çapraz ve düşey doğrultudaki çelik şeritlerle güçlendirilmiştir. Çelik elemanlar, betonarme çerçeveye kiriş uçlarında oluşturulan bağlantılar aracılığı ile yük aktarmaktadır. Deney Elemanı-5'e ait güçlendirme detayı Şekil 3.7'de sunulmuştur.

Deney Elemanı-6

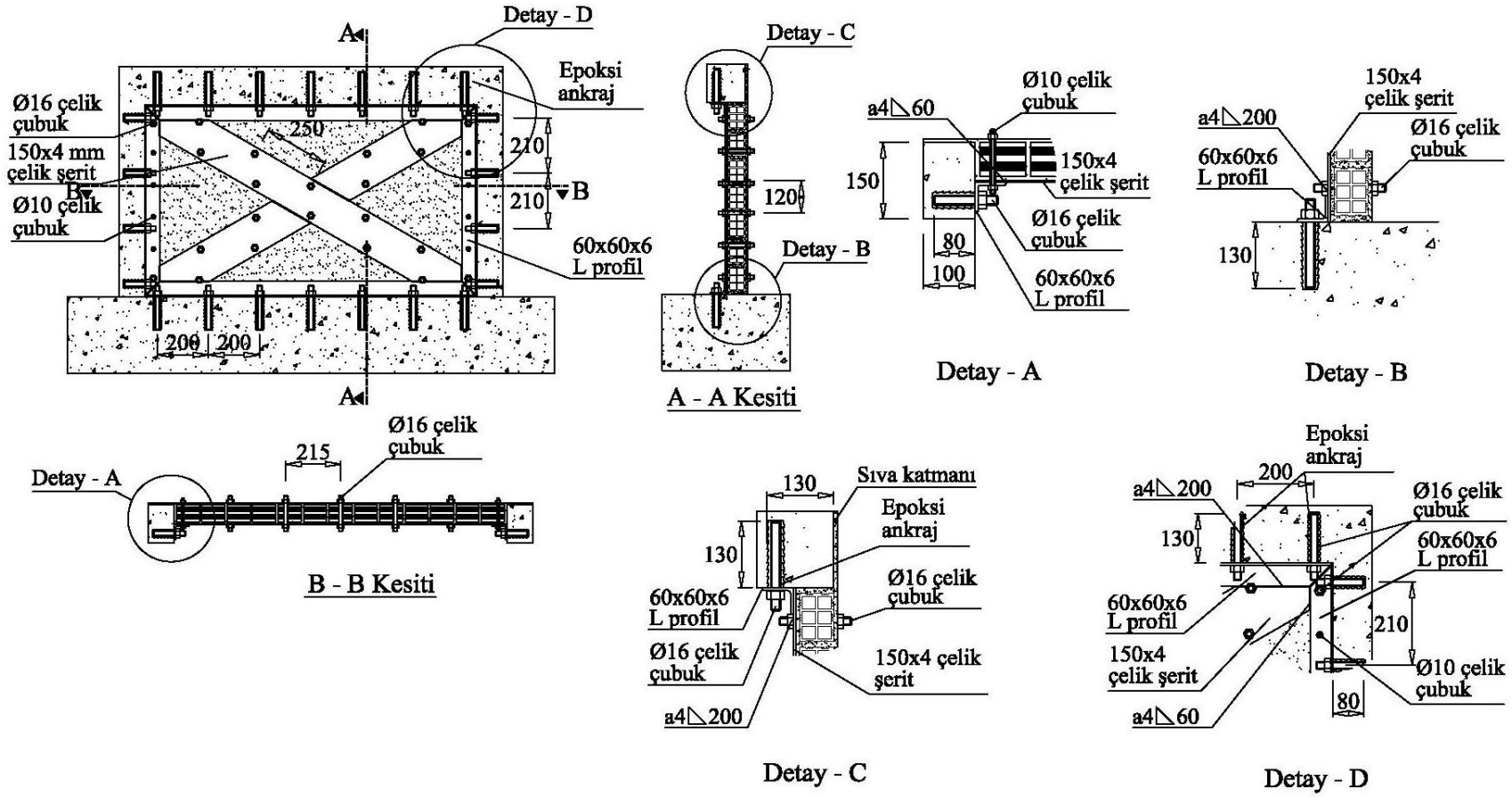
Deney Elemanı-6, tuğla dolgu duvarın iç yüzünden güçlendirilmiştir. Deney elemanının tuğla dolgu duvarı üzerine çapraz doğrultudaki 2 adet çelik şerit, Ø16 mm çapında sonsuz dişli çubuklarla sabitlenmiştir. Deney Elemanı-6'da, diğer deney elemanlarından farklı bir yük aktarım detayı test edilmiştir. Deney Elemanı-6'nın kiriş, temel ve kolon iç yüzüne betonarme elemanlar boyunca uzanan, kesit boyutları 60x60x6 mm olan eşit kollu çelik L-profiller kimyasal ankrajlarla sabitlenmiştir. Test çerçevesinin kolon-kiriş ve kolon-temel birleşimine kadar uzanan çapraz çelik şeritler, kolon ve kiriş iç yüzüne sabitlenen çelik L-profillere detayı Şekil 3.8'de gösterildiği gibi kaynaklanmıştır.

Deney elemanında, kolon iç kenarında mevcut bulunan çelik L-profil nedeniyle, uygulanan güçlendirme detayında düşey çelik şerit bulunmamaktadır. Deney Elemanı-6'nın kolon iç yüzüne sabitlenen çelik profilin, düşey şeride göre daha güçlü olması sebebiyle bu durum deney elemanında bir zayıflık oluşturmamaktadır. Aksine, diğer elemanlarda daha sık biçimde tuğla duvara vidalarla bağlanan düşey çelik eleman, Deney Elemanı-6 da daha seyrek biçimde duvara vidalanmıştır. Ancak, tıpkı çapraz şeritlerde uygulandığı gibi, düşey çelik eleman da tüm tuğla sıralarına vidalanmıştır. Deney Elemanı-6'ya ait güçlendirme detayı Şekil 3.8'de sunulmuştur.



Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.7. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-5



Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.8. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-6

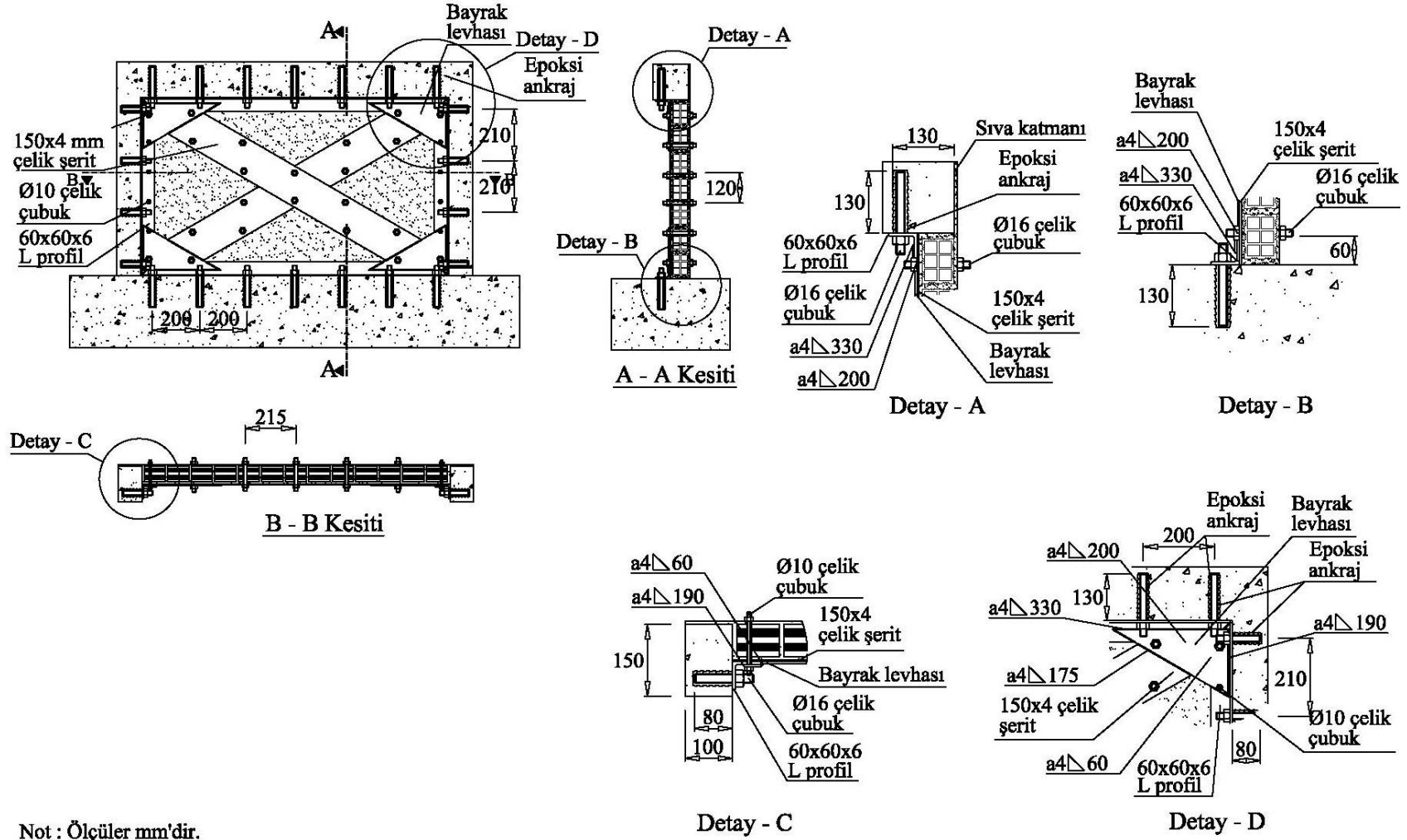
Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-8

Deney Elemanı-7, tuğla duvarın iç yüzünden güçlendirildiği, çelik elemanlarının betonarme çerçeve ile bağlantısının kiriş ve kolon boyunca yapıldığı deney elemanıdır. Deney Elemanı-7’de, Deney Elemanı-6’nın deney sonucunda yetersizliği anlaşılan köşe kaynak detayı geliştirilmiştir. Kaynak ile panel köşesi birleşiminin, kesme kapasitesini artırılması amacıyla, Deney Elemanı-7’nin, kolon-kiriş ve kolon-temel birleşimlerinde yapılan kaynaklı birleşim 4 mm’lik bayrak levhası ile takviye edilmiştir. Şekil 3.9’da deney elemanının takviye edilen kaynak detayı verilmiştir.

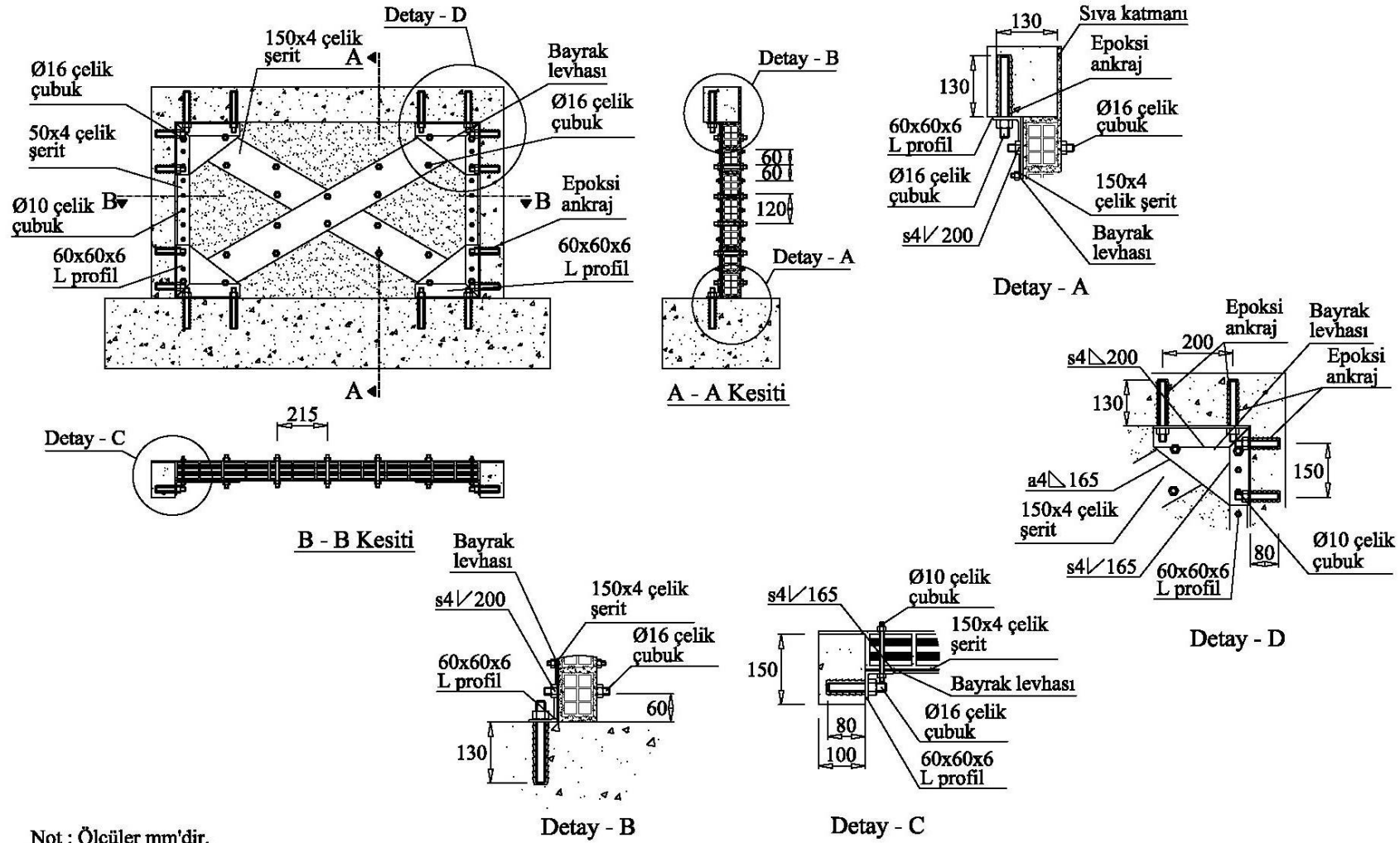
Deney Elemanı-8, Deney Elemanı-7 ile özdeş güçlendirme detaylarına sahiptir. Deney Elemanı-7’de, temel kirişi ile tuğla dolgu duvarın alt kenarı boyunca yerleştirilen yatay L-profil birleştiren, 7 adet 130 mm derinliğindeki Ø16 mm’lik sonsuz dişli çubuk, deneyin erken aşamasında betondan sıyrılarak, deney elemanının tasarlanan yük kapasitesine ulaşamamasına neden olmuştur. Olası bir işçilik hatası ihtimaline karşı, Deney Elemanı-7 tekrar üretilmiş, yeni üretilen eleman ise Deney Elemanı-8 olarak adlandırılmıştır. Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-8’e ait güçlendirme detayı Şekil 3.9’da sunulmuştur.

Deney Elemanı-9

Deney Elemanı-9’da tuğla dolgu duvar iç yüzünden güçlendirilmiştir. Tuğla dolgu duvar üzerinde, çapraz ve düşey doğrultudaki çelik şeritlerden oluşmuş şerit düzenlemesi denenmiştir. Deney Elemanı-9’da, betonarme çerçeve ile çelik takviye arasındaki yük aktarımı kolon-kiriş ve kolon-temel düğümünde sağlanmıştır. Deney elemanının kolon-kiriş ve kolon-temel birleşim bölgelerinde üretim detayı Şekil 3.10’da sunulmuş olan 60 x 60 x 6 mm kesitli eşit kollu L-profiller Ø16 mm çaplı çelik çubuklar aracılığı ile betonarme çerçeveye bağlanmıştır. Birleşim bölgesindeki kaynağın kesme kapasitesini artırmak amacıyla, köşe bağlantısına bayrak levhası ilave edilmiştir. L-profiller, bayrak levhası ve şeritler birbirlerine, temas ettikleri hat küt kaynak dikişi ile kaynaklanmıştır. Deney elemanı-9’a ait güçlendirme detayı Şekil 3.10’da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-7, Deney Elemanı-8



Şekil 3.10. Güçlendirme detayları, Deney Elemanı-9

3.3. Malzemeler

Donatı

Test çerçevesinin kolonlarında ve kirişinde Ø8 mm çapında düz donatı boyuna donatı olarak kullanılmıştır. Kiriş ve kolonlarda Ø4 mm çapındaki düz donatı etriye üretiminde kullanılmıştır. Temel kirişinde, boyuna donatı için Ø16 mm çapındaki nervürlü donatı, Ø10 mm çapındaki nervürlü donatı ise etriye için kullanılmıştır. Deney elemanlarına ait donatıların tümü bir seferde tek üretim serisinden alınmıştır. Donatıların çekme deneyleri Gazi Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Donatıların ortalama akma ve kopma dayanımları Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Donatı dayanımları

Donatı Çapı (mm)	Donatı Tipi	Kullanımı	Akma Dayanımı f_y (MPa)	Kopma Dayanımı f_{su} (MPa)
4	Düz	Kolon ve kiriş sargı donatısı	357	491
8	Düz	Kolon ve kiriş boyuna donatısı	330	457
10	Nervürlü	Temel kirişi etriyesi	480	715
16	Nervürlü	Temel kirişi boyuna donatısı	445	683

Beton

Deprem riski altındaki ülkemiz yapı stokunun önemli bir bölümünde beton basınç dayanımı çeşitli nedenlerden dolayı projede öngörülen beton basınç dayanımdan düşük dayanımda bulunmaktadır. Pratikte karşılaşılan bu durum, test çerçevesinde $f_c=12$ MPa basınç dayanımına sahip kalitesiz beton karışımı kullanılarak temsil edilmiştir. Tüm deney elemanlarının çerçevesi Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Beton karışımında KPÇ 32.5 Portland Çimentosu kullanılmıştır. Betonun kürüne gerekli özen gösterilmiş, deney elemanlarının üzerleri hidratasyon için ideal sıcaklık ve nem ortamını koruyabilmesi

için ıslatılmış kumaşlarla sarılmıştır. Beton basınç dayanımının belirlenebilmesi amacıyla her çerçevenin 6'sar adet standart silindir numune alınmıştır. Silindir numuneler çerçeveler ile özdeş kür koşulunda 28 gün korunmuşlardır. Çerçeve betonuna ait karışım oranı Çizelge 3.3'de sunulmuştur. Karışımında kullanılan malzemeler 1 m³ beton için karışımdaki ağırlıkları oranınca verilmiştir. Silindir numunelerin pürüzlü yüzeylerine kükürt başlığı yapıldıktan sonra İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda test edilmiştir. Deney elemanlarının ortalama beton basınç dayanımları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Test çerçevesi beton karışım oranı

Malzeme	Ağırlık, (kg)	Ağırlıkça Oran, (%)
Çimento	270	12,0
Çakıl(7-15 mm)	885	39,5
Kum (0-7 mm)	885	39,5
Su	202	9,0
Su/Çimento	---	75
Toplam	2242	100

Çizelge 3.4. Test çerçevesinin ortalama beton basınç dayanımları

Deney Elemanı No	Beton Basınç Dayanımı, f _c , (MPa)
1	12,4
2	12,2
3	12,6
4	12,0
5	13,0
6	13,4
7	12,0
8	12,4
9	13,5
Ortalama	12,6

Sıva ve Harç

Çerçeve içerisine örülen dolgu duvarda, gerek tuğlaları birbirine bağlama amaçlı kullanılan harç ve gerekse de duvarın dış yüzünün sıvanmasında aynı karışım oranı kullanılmıştır. Harç karışımında KPÇ 32,5 Portland Çimentosu ve SKK 80T tipi söndürülmüş kireç kullanılmıştır. ASTM C270 [24] farklı kum, çimento ve kireç oranlarına sahip harç karışımlarını basınç dayanımı, bağlayıcılık ve yalıtım gibi amaçlar doğrultusunda sınıflandırmıştır. Test çerçevesinin dolgusunda kullanılan tuğla dolgu duvarda ASTM C270 [24], N tipi olarak adlandırılan günlük kullanıma uygun harç kullanılmasını tavsiye etmiştir. Çimento, kireç ve kum hacim oranlarının sırasıyla 1/1/6 biçiminde öngörüldüğü bu harç tipinde, karışımında kullanılacak su miktarı uygulayıcının inisiyatifine bırakılmıştır. Pratik uygulamada duvar örücüleri, harcın uzun süre işlenebilir kalması için karışıma uygulama sırasında fazladan kireç ve su eklemektedirler. Bu durum, aynı duvar içerisinde farklı basınç dayanımına sahip harç derzlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Diğerlerine göre daha zayıf bir derzin oluşması tuğla dolgu duvarda öngörülemeyecek çatlak gelişimine sebep olacağından, tuğla duvar örümü sırasında işlenebilirliğini kaybeden harç derhal yeni karışım ile değiştirilmiştir. Tuğla dolgu duvarda kullanılan harç ve sıva karışımına ait bileşenlerin ağırlıkça oranları Çizelge 3.5’de sunulmuştur.

Duvardan, sıva ve harç için ayrı ayrı 6’şar adet standart silindir numunesi alınmıştır. Alınan numuneler ve deney elemanları ile aynı nem ve ısı koşulunda korunmuştur. Deney elemanlarının tümünün ortalama sıva ve harç için ortalama basınç dayanımları ise Çizelge 3.6’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Sıva ve harç karışım oranı

Bileşen	Kum	Çimento	Kireç	Su	Toplam
Ağırlık (%)	70	14	6	10	100

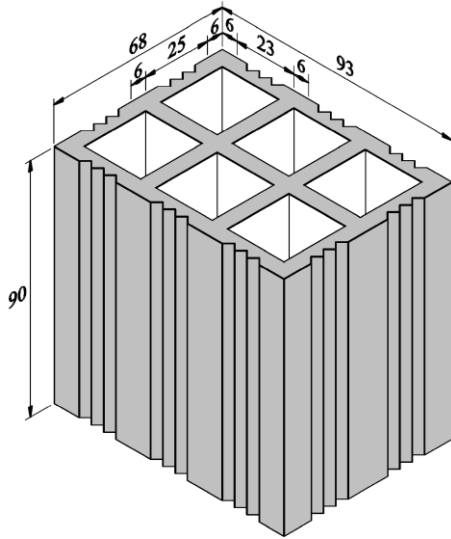
Çizelge 3.6. Sıva ve harç için ortalama basınç dayanımları

Deney Elemanı No	Basınç Dayanımı (MPa)	
	Sıva	Harç
1	3,8	4,2
2	4,7	3,8
3	6,2	5,2
4	5,2	6,1
5	4,9	5,7
6	4,4	3,9
7	3,9	4,3
8	4,8	4,5
9	4,5	5,8
Ortalama	4,7	4,8

Tuğla

Dolgu duvarın üretiminde kullanılan boşluklu tuğlalar, test çerçevesinin geometrik oranı ile uyumlu olacak biçimde özel olarak üretilmiştir. 1/3 geometrik oranına sahip olan tuğlanın boyutları Şekil 3.11’de verilmiştir. Tuğlaların basınç dayanımının belirlenebilmesi amacıyla sıvalı ve sıvasız tuğla numuneleri üzerinde basınç testi yapılmıştır. Toplam 20 adet tuğla 4 deney grubuna ayrılarak eksenel basınç kuvveti altında test edilmiştir. Her bir grupta 5 adet tuğla denenmiş, elde edilen değerlerin ortalaması alınarak, yükün uygulandığı doğrultudaki eksenel basınç dayanımı hesaplanmıştır. Eksenel yük tuğla birimin, dış yüzlerine dik ve boşluk doğrultusuna paralel olmak üzere üç farklı biçimde uygulanmıştır. Eksenel yükün tuğlanın boşluklarına paralel doğrultuda uygulandığı deneylerde, sıvalı ve sıvanmamış numunelerden oluşan 2 grup numune test edilmiştir. Diğer iki yükleme doğrultusundaki dayanımın belirlenmesi için birer grup sıvanmamış tuğla denenmiştir. Sıva, tuğla dolgu duvar içerisindeki tuğlalara uygulandığı biçimde,

karşılıklı iki geniş yüzeye 7 mm kalınlığında uygulanmıştır. Sıva karışımında Deney Elemanı-2’de kullanılan sıva karışımı kullanılmıştır. Bu karışımın basınç dayanımı 4,7 MPa’dır. Paneldeki tuğla yerleşimi ile benzerlik göstermesi nedeniyle boşluk doğrultusundaki yükleme için sıvanmış numunelerin kullanılması, daha sonraki bölümde kurulacak olan matematiksel modelde sıvalı tuğla dayanımı hakkında deneysel bilgi sağlamıştır. Tüm tuğla numunelerde, eksenel yükün etkiyeceği yüzeye yüksek dayanımlı çimento harç kullanılarak başlık yapılmıştır. Böylece eksenel yükün tuğla kesitine homojen dağıtılması sağlanmıştır. Test sonuçları Çizelge 3.7’de sunulmuştur. Tuğla birime eksenel yük uygulaması Resim 3.1’de gösterilmiştir.



Not : Tüm ölçüler mm'dir

Şekil 3.11. Tuğla birimin boyutları



Resim 3.1. Tuğla birime basınç testi uygulanışı

Çizelge 3.7. Dolgu duvar üretiminde kullanılan tuğlaların ortalama basınç dayanımları

Yükleme Doğrultusu		Tuğla Yapısı	Yüzey Alanı (mm ²)	Basınç Dayanımı (MPa)
Tuğla boşluklarına paralel yönde		Sıvasız	2475	49,6
		Sıvalı	3896	34,9
Karşılıklı iki dış yüzeye dik yönde		Sıvasız	8370	2,8
		Sıvasız	6120	2,6

Epoksi Yapıştırıcı

Çelik şeritlerin betonarme çerçeveye bağlantısı için kullanılan yüksek dayanımlı çelik çubuklar, epoksi (Sikadur-31) kullanılarak çerçeveye ankre edilmiştir. Ankrajda kullanılan Sikadur-31, solvent içermeyen, neme toleranslı, tiksotropik, 2 bileşenli, epoksi reçineler ve özel dolgular içeren, yapısal yapıştırma ve tamir harcıdır [25]. Epoksi üretici firma (SIKA) kullanım kılavuzundaki karışım oranına ve hazırlama adımlarına uygun olarak deney elemanlarına uygulanmıştır [25]. Harcın tam dayanımına ulaşması için 10 gün beklenmiştir. Çizelge 3.8’de Sikadur-31’in üretici katalogundan alınan mekanik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Sikadur-31’in özellikleri (Üretici katalogundan alınmıştır [25].)

Basınç Dayanımı (MPa)	65
Çekme Dayanımı (MPa)	20
Beton Yüzeye Yapışma Dayanımı (MPa)	3,5
Çeliğe Yapışma Dayanımı (MPa)	15

Çelik Elemanlar: Çelik şerit, köşebent ve sonsuz dişli çubuklar

Çelik Şeritler

Çelik şeritler, 4 mm kalınlığında ST37-A1 tipi çelik plakadan ölçülerinde kesilerek imla edilmiştir. Deney elemanlarında kullanılan çelik şeritler tek bir levhadan kesilerek elde edilmiştir. Şeritlerin alındığı plakaların tümünden 40 mm genişliğinde numuneler alınarak Gazi Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı’nda çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Çelik şeritlerin imal edildiği ST37 malzemesinden alınan toplam 10 adet numuneye ait ortalama çekme dayanımı Çizelge 3.9’da sunulmuştur.

L Profiller (60x60x6 mm ve 70x100x10 mm)

Betonarme çerçeve ile çelik şeritlerin bağlantısında kullanılan çelik profiller 70x100x10 ve 60x60x6 mm kesit boyutlarına sahiptir ve ST37 çeliğinden imal edilmişlerdir.

Çelik Çubuklar

Çelik elemanların bağlantılarında kullanılan çubuklar, 1 m uzunluğundaki yüksek dayanımlı standart üretim sonsuz dişli çubukların uygun boylarda kesilmesiyle temin edilmiştir. Tüm deney elemanları için yeterli sayıdaki sonsuz dişli çubuk tek seferde alınmıştır. Sonsuz dişli çubukların, mekanik özelliklerini belirlemek için 20 çubuktan alınan 40 cm uzunluğundaki numuneler çekme deneyine hazırlanmıştır. Deney elemanlarında kullanılan 10 mm ve 16 mm çapındaki çubuklar torna tezgâhında ile işlenerek, sırasıyla 5 ve 10 mm çapında çekme deneyinde dikkate alınacak ölçüm bölgesi uzunluğunda düzgün dairesel kesitli çubuklar elde edilmiştir. Böylece çekme deneyi sırasında numunelerin kalınlığı ve uzunluğu belirlenmiş bölge içerisinde deformasyon yapması sağlanmıştır. Sonsuz dişli çubuklara ait ortalama akma ve kopma dayanımları Çizelge 3.9’da sunulmuştur.

Çizelge 3.9. Çelik şerit ve bağlantı çubuklarının akma ve kopma dayanımları

Tip	Kesit Boyutları	Akma Dayanımı f_{sy} , (MPa)	Kopma Dayanımı f_{su} , (MPa)
Çelik Şerit	40 mm x 4 mm	303,8	418,6
Çubuk	Ø10 mm	580,3	640,2
Çubuk	Ø5 mm	636,4	710,1

3.4. Deney Elemanlarının Üretimi

Deney elemanları, Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvar’ında üretilmiştir. Test çerçevelerinin betonu çelik kalıp kullanılarak yatay konumda dökülmüştür.

Üretilen çelik kalıbın laboratuvar ortamındaki görünümü Resim 3.2’de verilmiştir. Çelik kalıp 4 mm kalınlığındaki çelik plakaların birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Kalıbın deforme olmaması amacıyla kalıbın tüm parçaları 30x30x3 mm boyutunda kutu profillerle takviye edilmiştir. Kalıp alt yüzeyine yan kapaklar cıvatalarla monte edilmiştir. Kolon ve kiriş yan kapakları birbirlerine sonsuz dişli çubuklarla vidalanmıştır.



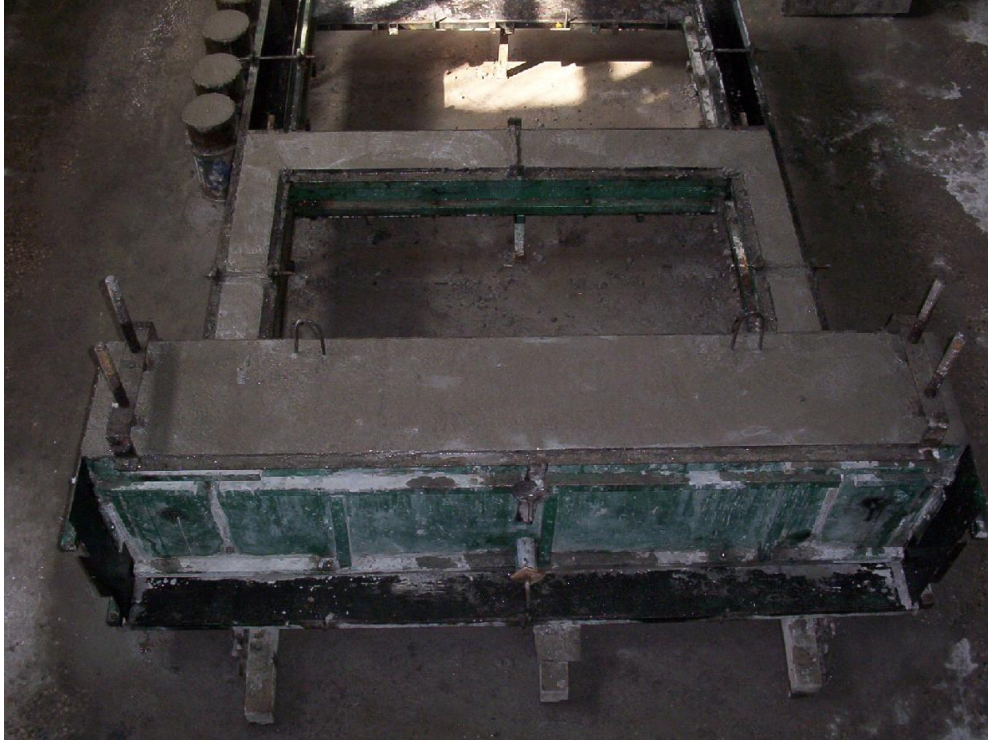
Resim 3.2. Çelik kalıbın laboratuvar ortamında görünüşü

Uygun boylarda kesilen donatılar işlenerek test çerçevesinin donatıları üretilmiştir. Bağ teli ile bağlanan parçalar donatı kafesini oluşturmuştur. Donatı kafesi kalıba yerleştirilmeden önce çelik kalıp özel kalıp yağı ile yağlanmıştır. Beton dökümüne hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilen donatı kafesinin kalıp iç yüzüne temas etmesi engellenmiştir. Test çerçevesini test düzeneğine ve düzlem dışı hareketi engelleyen çelik kafese sabitleyen çubukların bağlanabilmesi için önceden planlanan yerlere pvc borular yerleştirilerek beton içinde silindirik boşluklar oluşturulmuştur. Beton dökümüne hazır hale gelen çerçeve donatısı ve kalıp Resim 3.3’de görülmektedir.



Resim 3.3. Kalıp içine yerleştirilmiş beton dökümüne hazır çerçeve donatısı

Çerçeve betonu için gerekli karışım, yapı mekaniği laboratuvarında 250 dm^3 hacimli betoniyerde hazırlanmıştır. Betoniyerin bir çevrimde üretebileceği beton kapasitesine göre ayrı kaplarda hazırlanmış miktarlardaki kum ve agrega önceden kurutulmuştur. Hazırlanan beton kalıba vibratörle yerleştirilmiştir. Dökümü tamamlanan her çerçeveden 6 adet standart silindir numune alınmıştır. Beton dökümü tamamlanmış bir test çerçevesi Resim 3.4’de gösterilmiştir. Döküm tamamlandıktan sonra kalıp ve silindir numuneler plastik örtü ile kapatılıp betonun nem kaybetmesi engellenmiştir. Kalıbın yan kapakları ve alınan silindir numuneler dökümden sonraki gün açılmış, betonun üzerine ıslak çuval ve plastik örtü örtülerek betonun kürüne devam edilmiştir. 28 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra, test çerçevesi kalıp üzerinden alınarak tuğla dolgu duvarın örüleceği yere taşınmıştır.



Resim 3.4. Dökümü tamamlanmış test çerçevesi

Tuğla dolgu duvar test çerçevesi düşey konuma getirildikten sonra örülmüştür. Tuğla dolgu duvar, deney elemanlarının gerçek bir yapının dış aks çerçevesini benzeştirmesi amacıyla, test çerçevesinin dış yüzüne bitişik konumlandırılmıştır. Deney elemanı içerisindeki tuğla duvar yerleşimi ve geometrik boyutları Şekil 3.12’de, tuğla dolgu duvarın örülüşü Resim 3.5’de gösterilmiştir. Tuğla dolgu duvarın örümü sırasında tüm tuğla birimlerinin boşlukları yatay olacak biçimde konumlandırılmıştır. Tuğla birimler arasındaki yatay ve düşey derzler imalat boyunca titizlikle denetlenmiştir. Derz aralığının yatay ve düşey doğrultuda 7 mm kalınlığında olmasına özen gösterilmiştir. Böylece gerçek bir binadaki duvar örümü benzeştirildiği gibi, tuğla boşlukları içerisine harcın dolması ve panelde bölgesel dayanım farkının oluşmasının önüne geçilmiştir. Tuğla dolgu duvarın her iki yüzüne eşit kalınlıkta olmasına dikkat edilerek sıva uygulanmıştır. Tuğla dolgu duvar, betonarme çerçevenin dış yüzüne bitişik örüldüğü için iç yüzde sadece dolgu duvara sıvanmış, dış yüzde tuğla dolgu duvarla beraber kiriş ve kolonlar birlikte sıvanmıştır. Tuğla dolgu duvar test çerçevesi ve dolgu duvarda kullanılan tuğlanın geometrik

ölçeği ile uyumlu olacak biçimde, 7 mm kalınlığında sıvanmıştır. Sıva kalınlığı iç yüzde kolon ve kiriş yüzeyinden alınan ölçümlerle, dış yüzde her iki kolonun dışına sabitlenen ahşap ölçüm şablonları ile denetlenmiştir. Resim 3.6’da tuğla dolgu duvarın iç ve dış yüzlerine sıva uygulanışı gösterilmiştir.



Resim 3.5. Test çerçevesi içersine tuğla dolgu duvar örölmesi.



(a) Dolgu duvarın iç yüzünün sıvanışı



(b) Dolgu duvarın dış yüzünün sıvanışı

Resim 3.6. Test çerçevesinin sıvanışı

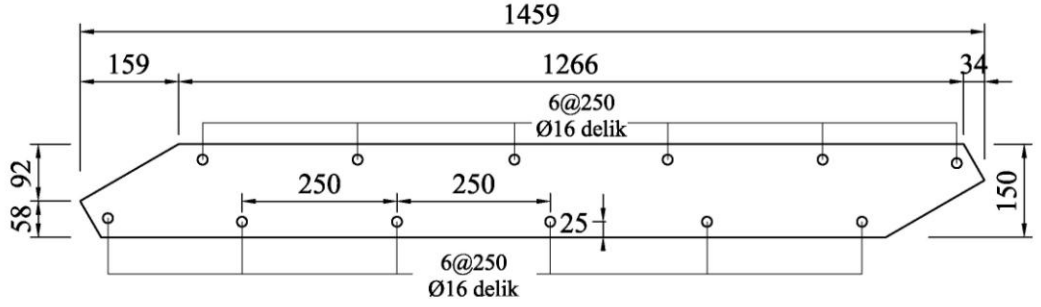
3.5. Güçlendirme Tekniği ve Uygulama

3.5.1. Güçlendirme tekniği

Bu bölümde, tek katlı tek açıklıklı tuğla dolgu sünek olmayan betonarme çerçevenin sismik performansını iyileştirmeye yönelik geliştirilen güçlendirme tekniği hakkında detaylı bilgi sunulacaktır. Yöntem temel olarak, kesme dayanımı ve yatay rijitliği yetersiz bir betonarme çerçeve içerisindeki, tuğla dolgu duvar üzerine vidalanan diyagonal ve düşey doğrultudaki çelik şeritlerin, başarılı bir biçimde betonarme çerçeveye yük aktarımını hedeflemiştir. Bu amaçla, 8 adet deney elemanı güçlendirilerek, tersinir tekrarlanır yatay yük ve sabit düşey yük altında test edilmiştir. Deney elemanları üzerinde; a) Simetrik veya tek yüzden yapılan güçlendirmenin eleman davranış ve dayanımına olan etkisi, b) Çelik şeritlerin, tuğla dolgu duvar üzerinde farklı biçimlerde düzenlenişi ile sağlanan davranış değişimi, c) Kesme dayanımı yetersiz kolon, kiriş ve birleşimlerden oluşan betonarme çerçevenin, artan sistem kapasitesini karşılayabileceği bağlantı detaylarının oluşturulması üzerinde çalışılmıştır.

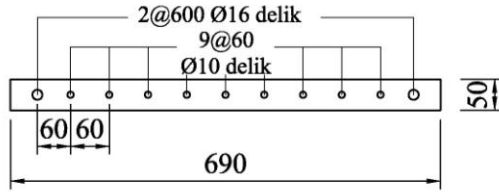
Tek katlı tek açıklıklı bir betonarme çerçeve içerisindeki tuğla duvar üzerine eklenen diyagonal şeritlerle, yatay kuvvet etkisi altındaki dolgu duvarın diyagonal çekme göçmesini ve basınç ezilmesini engellemek, düşey şeritler yardımı ile çerçeveye ilave kararlı sünek bir davranış sağlanması amaçlanmıştır. Güçlendirilen deney elemanlarının tümünde boyutları Şekil 3.12’de verilen çelik şeritler kullanılmıştır.

Dolgu duvar üzerine tek ya da çift yüzden vidalanan şeritler, bağlantının sağlandığı sonsuz dişli çubuklar aracılığı ile tuğla dolgu duvarı sargılamaktadır. Çelik şerit boyutları ile tuğla dolgu duvarın mekanik özellikleri arasında bir ilişki olmalıdır. Birçok araştırmacı ve yapı yönetmelikleri [5, 9-11, 19, 26, 34] tarafından, çerçeve içerisindeki tuğla dolgu duvarın bir basınç çubuğu gibi modellenmesi genel kabul görmektedir.



a) Çapraz çelik şerit

Kalınlık 4 mm'dir.



b) Düşey çelik şerit

Kalınlık 4 mm'dir.

Not : Tüm ölçüler mm'dir

Şekil 3.12. Çapraz ve düşey çelik şerit boyutları ve detayları.

Birçok tuğla birimi ve derz hattının bir araya gelmesiyle oluşan dolgu duvarının, basınç dayanımı ve boyutlarının Smith ve Carter [11] tarafından önerilen ifade ile belirlenen basınç çubuğu gibi hesaplanması, modellemeyi oldukça basitleştirmektedir. Önerilen ifadeler ile mevcut çalışmadaki tuğla dolgu duvarına ait etkin basınç çubuğu genişliği 150 mm olarak hesaplanmıştır. Bu hesabın detayı Bölüm 6.2'de sunulmuştur. Tuğla, harç ve sıva malzemesi ve tuğla dolgu duvar boyutları dikkate alındığında hesaplanan 150 mm'lik genişliğin dışında kalan bölgenin dayanıma bir etkisi olmadığı kaynaklarda belirtilmektedir. Bu sebeple, panel diyagonalı doğrultusundaki çelik şeridin genişliği 150 mm olarak seçilmiştir.

Düşey şeridin boyutlandırmasında, Tagdi [18]'nin çalışmasında önerdiği yaklaşım izlenmiştir. Araştırmacı, yaklaşık bir hesap yöntemi kullanarak, düşey şeritlerin orta yüksekliğe sahip bir duvarın yatay yük taşıma kapasitesine olan katkısını, elde ettiği deneysel veriler ile uyumlu bir biçimde hesaplayabilmiştir. Ayrıca araştırmacı, düşey şeritlerin, sistem davranışına sağladığı olumlu etki hakkında gözlemlerini aktarmıştır.

Bu çalışmada da deney elemanının geometrik ölçeği ve diyagonal şerit boyutu göz önüne alınarak, düşey şeridin güçlendirme düzenlemesinde bir değişken olarak ele alınması uygun bulunmuştur. Çelik şeritlerin kalınlığı, Taghdi'nin [18] çalışmasında önerilen güçlendirilmiş sistemin kesme yükü kazanımının ifade edildiği yaklaşımla belirlenmiştir. Güçlendirilmiş sistemde yaklaşık olarak 200 kN kesme kuvveti artımı hedeflenerek, 4 mm'lik şeritlerin kullanılması uygun bulunmuştur. Taghdi ve ark.'nın [18] analitik yaklaşımı hakkında Bölüm 6.3'de detay verilmiştir.

Çapraz çelik şeritler 16 mm, düşey şeritler ise 10 mm çapındaki çelik çubuklarla tuğla dolgu duvara vidalanmıştır. Çapraz şeritlerde eksenel basınç kuvveti doğrultusundaki iki vida arasındaki mesafe şerit boyunca sabit olup, 250 mm'dir. Düşey şeritlerde tercih edilen eksenel basınç kuvveti doğrultusundaki serbest açıklık, kesitin burkulmaya karşı daha narin olmasından dolayı 60 mm'ye düşürülmüştür. Her iki doğrultudaki şeritler için, tuğla duvara bağlantıyı sağlayan çelik çubukların serbest açıklıkları, çelik eleman tasarım şartnamesinin [27] önerdiği narinlik sınırları dikkate alınarak vida deliklerinin koordinatları hesaplanmıştır.

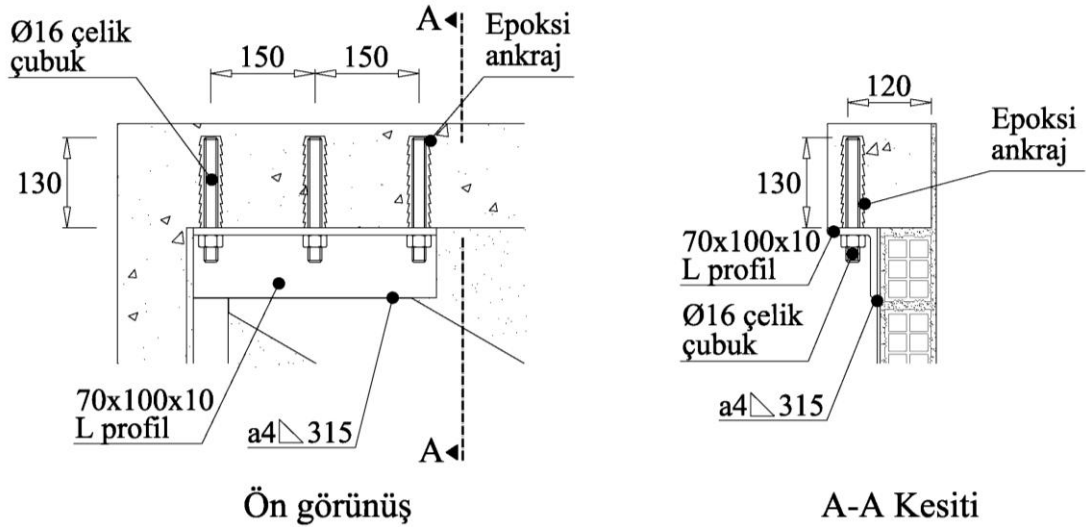
Ülkemiz yapı stoku, kesme dayanımı yetersiz kolon-kiriş birleşimi kusuruna sahip birçok binayı barındırmaktadır. Dolayısı ile test çerçevesi de benzer kusur ile üretilmiştir. Yeterli kesme dayanımına sahip olmayan, kolon-kiriş birleşiminin dolgu duvarın köşegeni doğrultusunda oluşan çekme ve basınç kuvvetlerini, karşılayabilmesi mümkün değildir. Bu sebeple, deneysel çalışma kapsamında 3 farklı tipte çelik eleman-betonarme çerçeve bağlantısı geliştirilmiştir.

Kiriş uç bağlantı tipi:

Deney Elemanı-2, 3, 4 ve 5'de kiriş uç bağlantı tipi denenmiştir. Bu bağlantı tipine ait detay çizim Şekil 3.13'de verilmiştir. Panel köşesine kadar uzanan çapraz ve/veya düşey şerit, 70x100x10 mm kesitli 350 mm uzunluğundaki çelik L-profil ile temas ettiği çizgi boyunca, derinliği 4 mm olan köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Çelik L-profil, beton içerisine 130 mm derinliğinde gömülen epoksi yapıştırıcı enjekte edilmiş 3 adet Ø16 mm çapındaki çubukla sabitlenmiştir. L-profili beton yüzeye

sabitleyen kimyasal ankrajların delik merkezleri arasında 150 mm mesafe bırakılmıştır.

Deney elemanının dış yüzünde kiriş için çelik L-profilin bağlanabileceği 70 mm derinliğinde bir diş mevcut olmadığından, diyagonal şeritler doğrudan 16 mm çapındaki kayma çivileri ile çerçeveye yük aktarmaktadır. Dış yüzdeki düşey şeritler, kayma çivilerinin tuttuğu diyagonal şeritlere kaynaklanmıştır. Dolgu duvarın dış yüzünde, çapraz şeritlerin alt ucunda temel üstü bağlantı, iç yüzdeki bağlantı tipindedir.



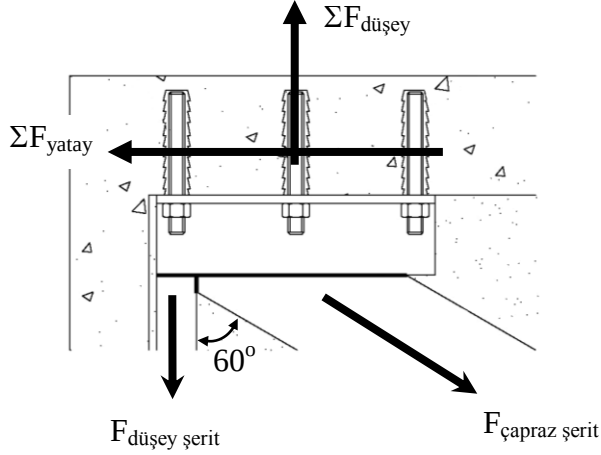
Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.13. Deney Elemanı-5’de kullanılan kiriş uç bağlantısına ait detay.

Kiriş ucunda çelik elemanlar ile betonarme arasında yük aktarımı sağlayan bağlantının ön tasarımı

Bağlantı uç noktalarında kullanılan 70x100x10 kesitli L-profil betonarme çerçeveye bağlayan 3 adet Ø16 mm çapındaki çelik çubuk, çapraz ve eğer varsa düşey şeritlerin akma kuvvetini karşılayabilecek detaylandırmaya sahip olmalıdır. Uç detay tasarımı Şekil 3.14’de sunulmuş olan serbest cisim diyagramında çizilen kuvvet dağılımı,

deney elemanındaki kullanılan malzeme dayanımları ve kesit boyutları dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 3.14. Kiriş uç bağlantı tipine ait serbest cisim diyagramı.

$$F_{\text{çapraz şerit}} = 150 \cdot 4 \cdot f_{yp} = 600 \cdot 304 = 182,4 \text{ kN}$$

$$F_{\text{düşey şerit}} = 50 \cdot 4 \cdot f_{yp} = 200 \cdot 304 = 60,8 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_{\text{yatay}} = F_{\text{çapraz şerit}} \cdot \sin 60^\circ = 182,4 \cdot 0,87 \cong 159 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_{\text{düşey}} = F_{\text{düşey şerit}} + F_{\text{çapraz şerit}} \cdot \cos 60^\circ = 60,8 + 182,4 \cdot 0,5 = 152 \text{ kN}$$

TS648/80 [28] kontrol edilmeyen elektrot kaynaklarında, kayma ve çekme dayanımının 90 MPa alınmasını tavsiye etmiştir. Birleşimde 315 mm uzunluğunda 4 mm boğaz derinliğinde köşe kaynağı yapılmasına uygun birleşim kesiti mevcuttur. Dolayısıyla, L-profil ile çelik şeritler arasında kaynak ile karşılanan kayma ve çekme kuvveti,

$$F_{\text{kaynak}} = 315 \cdot 4 \cdot 90 = 113,4 \text{ kN} < \Sigma F_{\text{düşey}} < \Sigma F_{\text{yatay}} \text{ 'dır.}$$

Bu nedenle çapraz ve düşey şeritler birer adet Ø16 mm çapındaki yüksek dayanımlı çelik çubuk ile L-profile vidalanmıştır. Düşey şeridin olmadığı Deney Elemanı-2 ve 4'de çapraz şerit birleşiminde iki adet çelik çubuk kullanılmıştır. Birleşimin yatay ve düşey kuvvetlere karşı dayanımı, yapılan köşe kaynağı ile sağlanan dayanıma ilave

olarak eklenen iki adet Ø16 mm çapındaki çelik çubuk ile artırılmıştır. Kesme kuvveti etkisi altındaki cıvataların kayma taşıma gücü, üretici firma katalogunda belirtildiği gibi 60 kN olarak kabul edilmiştir. Tüm cıvatalı çelik eleman birleşimlerinde TS648/80 [28]'de şart koşulan delik açma mesafelerine uyulduğundan, deliklerde yırtılma durumu dikkate alınmamıştır.

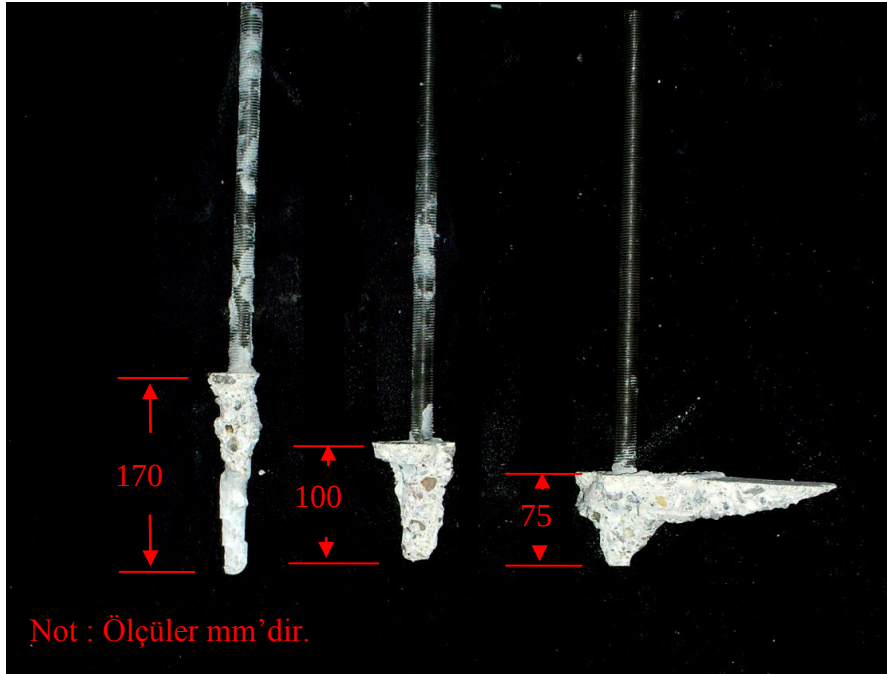
$$\begin{aligned}\text{Çelik elemanlar arası birleşim dayanımı} &= F_{\text{kaynak}} + 2 \cdot F_{\text{cıvata}} \\ &= 133,4 \text{ kN} + 2 \cdot 60 \text{ kN} \\ &= 253,4 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Yatay Dayanım} \cong \text{Düşey Dayanımı} &\geq \Sigma F_{\text{yatay}} = 159 \text{ kN} \\ &\geq \Sigma F_{\text{düşey}} = 152 \text{ kN} \quad \text{şartı sağlanmıştır.}\end{aligned}$$

Betonarme çerçeve ile çelik elemanlar arasındaki yük aktarımını sağlayan Ø16 mm çapındaki kimyasal ankrajların çekme dayanımı, kullanımlarından önce eksenel çekme deneyleri ile deneysel olarak belirlenmiştir. Deney çerçevesi ile özdeş beton basınç dayanımına ve donatı düzenlemesine sahip betonarme bir kiriş içerisine Ø18 mm çapında, 3 farklı derinlikteki boşluğa Ø16 mm çapındaki çelik çubuklar epoksi harç ile gömülmüştür. Resim 3.7'de çelik çubuklara uygulanan eksenel çekme deneyi gösterilmektedir. Bu deneyler sonucu elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 3.10'da sunulmuştur. Çekme deneyleri sonucuna göre kirişte, temelde ve kolonlarda kullanılan kimyasal ankrajların çekme dayanımı belirlenmiştir. Deney sonrası beton blok içerisinden sıyrılan numuneler Resim 3.8'de gösterilmiştir.



Resim 3.7. Kimyasal ankrajlara uygulanan çekme deneyi.



Resim 3.8. Betonarme kiriş içerisinde sıyrılan çelik çubuklar

Çizelge 3.10. Çekme deneyi sonuçları

Ankraj Derinliği	Yük (kN)	Göçme Biçimi
75	68,5	Sıyrılma + Konik kırılma
75	72,2	Sıyrılma + Konik kırılma
100	97,2	Sıyrılma + Konik kırılma
100	105,4	Sıyrılma + Konik kırılma
170	117,3	Sıyrılma + Konik kırılma
200	120,2	Çubukta akma

Betonarme çerçeve ile çelik elemanlar arasındaki yük aktarımını sağlayan 3 adet çelik çubuk, birbirine eşit kesme ve çekme kuvveti taşıdığı varsayımı yapılmıştır. Bağlantıda ön tasarım aşamasında hesapları basitleştirebilmek amacı ile moment etkisi göz ardı edilmiştir. 130 mm derinliğindeki kimyasal ankrajın çekme kapasitesi bilinen 100 mm ve 170 mm derinliğindeki ankrajlar arasında kurulan doğrusal önerme ile 108 kN olarak hesaplanmıştır. Çubukların kesme kapasitesi, çubuk adedi ile yüksek dayanımlı çubuğun kayma taşıma gücü olan 60 kN çarpılması ile hesaplanmıştır.

$$(F_{\text{ankraj}})_{\text{düşey}} = 3 \cdot 108 = 324 \text{ kN} \geq \Sigma F_{\text{düşey}} = 152 \text{ kN}$$

$$(F_{\text{ankraj}})_{\text{yatay}} = 3 \cdot 60 \text{ MPa} = 180 \text{ kN} \geq \Sigma F_{\text{yatay}} \cong 159 \text{ kN}$$

Simetrik biçimde güçlendirilen Deney Elemanı-2 ve 3 için deney elemanının arka yüzünde kiriş kesitinde bu bağlantı tuğla dolgu duvarın dış aksa bitişik imal edilmesi nedeniyle uygulanamamıştır. Şerit uçları kiriş ve kolon-kiriş birleşimine 2 adet Ø20 mm çapındaki yüksek dayanımlı çelik çubuk ile birleştirilmiştir. Bu birleşimde kullanılan çelik çubuklarda, birleşim bölgesindeki düşey ve yatay doğrultudaki

kuvvetler kayma gerilmeleri oluşturmaktadır. Her biri 95 kN kesme yükü taşıyabilen 2 adet çelik çubuk bağlantı için yeterli olmuştur.

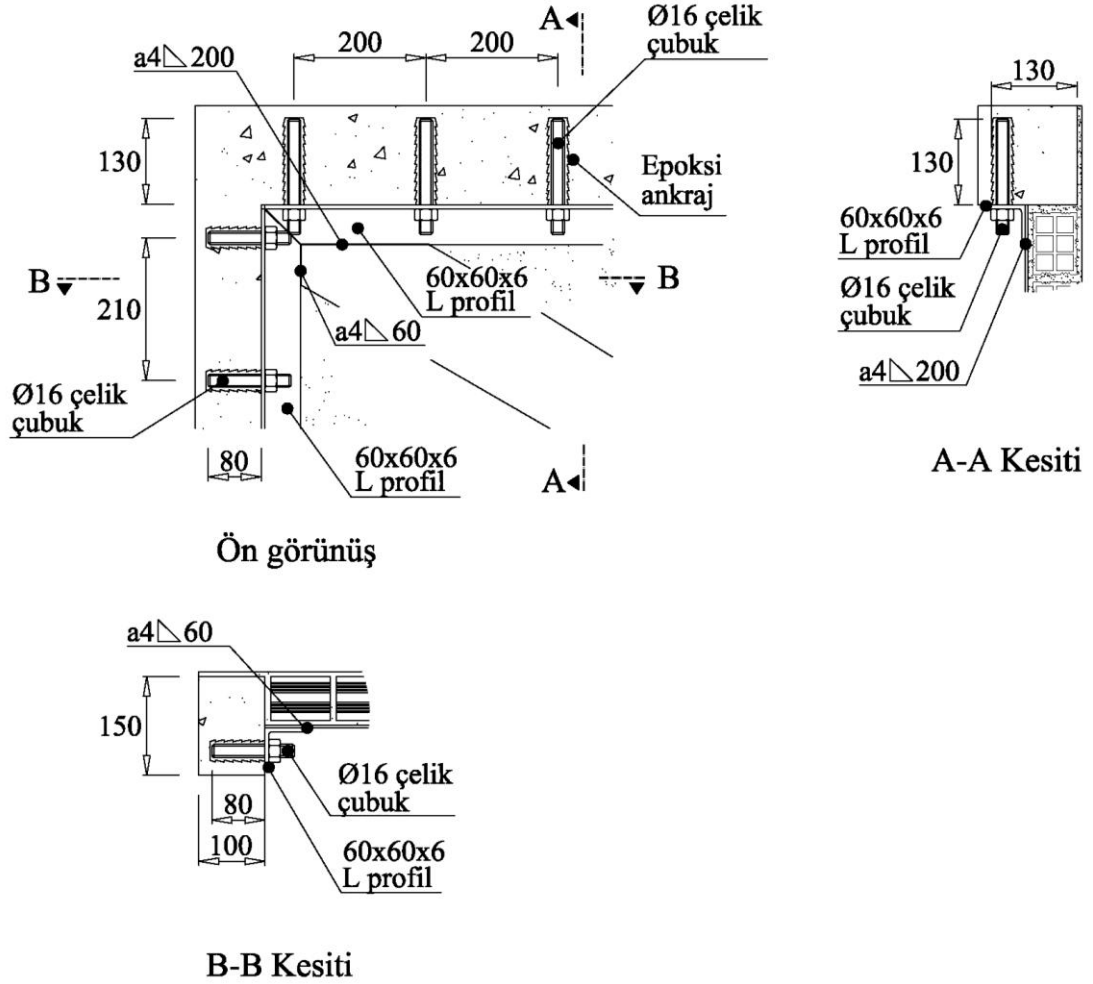
Ön tasarım aşaması ve bağlantı elemanları anlatılan kiriş uç bağlantı tipinin uygulandığı deney elemanlarında, birleşim noktasından kaynaklanan herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Deney sonuna kadar çelik eleman yüklerini betonarme çerçeveye başarılı biçimde aktarmıştır.

Panel kenarları boyunca yapılan bağlantı tipi:

Bu tür bağlantı Deney Elemanı-6, 7 ve 8 ile denenmiştir. Kiriş, temel ve kolon iç yüzlerine yapılan bu bağlantıda 60x60x6 mm boyutunda çelik L-profil kullanılmıştır. L-profiller, beton yüzeye temel ve kirişte 130 mm, kolonda ise 80 mm yapılan Ø16 mm çapındaki kimyasal ankrajlarla bağlanmıştır. Kiriş ve temelde 7'şer adet, her bir kolonda da 4 adet olmak üzere toplam 22 adet Ø16 mm çapındaki çubukla çelik elemanlar betonarme çerçeveye bağlanmıştır. Ankraj deliklerinin merkezleri arasındaki mesafe kolonda 210 mm, temel ve kirişte ise 200 mm'dir. Çelik şeritler, 60x60x6 mm kesitindeki L-profile temas ettiği çizgi boyunca derinliği 4 mm olan köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Bu bağlantıda yetersizliği anlaşılan kaynak detayı Deney Elemanı-7 ve 8'de köşe birleşimine eklenen bayrak levhası ile güçlendirilmiştir. Deney Elemanı-6, 7 ve 8'de köşe birleşiminde uygulanan kaynak detayı dışında kalan betonarme çerçeve bağlantı tipi özdeştir. Deney Elemanı-6 ve Deney Elemanı-8'de uygulanan tip bağlantı detayları ait çizim sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.17'de verilmiştir.

Panel kenarları boyunca çelik elemanlar ile betonarme çerçeve arasında yük aktarımı sağlayan bağlantıların ön tasarımı

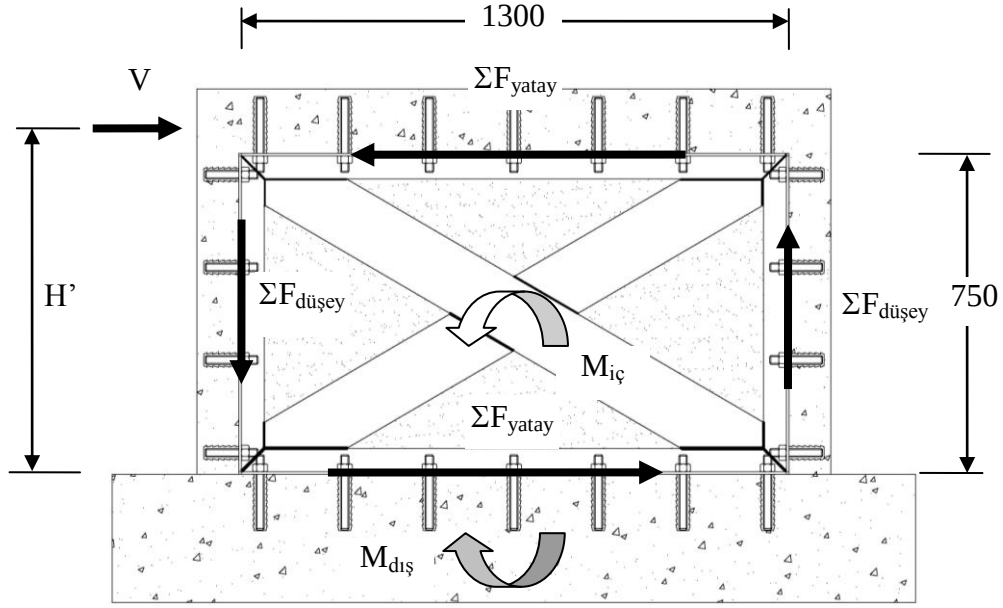
Bağlantılar Şekil 3.16'da sunulan serbest cisim diyagramı ve kuvvet dağılımına göre tasarlanmıştır. Kiriş ve temel boyunca 200 mm aralıklı 7 adet, her iki kolonda ise 210 mm aralıklı 4 adet yüksek dayanımlı Ø16 mm çapında çelik çubuk kullanılmıştır.



Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.15. Deney Elemanı-6'da denenen tip bağlantı detayı.

Çelik elemanları birleştirmekte kullanılan elektrot kaynağının çekme ve kayma dayanımı birbirine eşit kabul edilmiştir. Çelik elemanları birleştiren çelik çubuklara eşit miktarda çekme ve kesme kuvvetinin etkidiği varsayılmıştır. Birleşim tasarımında momentin etkisi ihmal edilmiştir. Köşe birleşiminde birbiri ile kesişen bütün çelik elemanlar 4 mm kalınlığındaki köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynağın çekme ve kayma dayanımı birbirine eşit olarak kabul edildiğinden, yatay doğrultu için hesaplanan kaynak dikişi uzunluğu düşey doğrultu için de aynı olmaktadır. Birleşimde 260 mm uzunluğunda bir hat üzerinde kaynak yapılabilmektedir. Dolayısıyla, L-profil ile çelik şeritler arasında kaynak ile karşılanan kayma ve çekme kuvveti,



Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.16. Panel kenarları boyunca yapılan bağlantı tipine ait serbest cisim diyagramı.

$$H' = 825 \text{ mm} ; V = 300 \text{ kN}$$

$$M_{dış} = V \cdot H' = 247\,500 \text{ kNmm}$$

$$\begin{aligned} \text{Dengeden, } M_{iç} &= M_{dış} \quad \rightarrow \quad M_{iç} = \Sigma F_{yatay} \cdot 750 = \Sigma F_{düsey} \cdot 1300 \\ \Sigma F_{yatay} &= 330 \text{ kN} \\ \Sigma F_{düsey} &= 190,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$F_{kaynak} = 260 \cdot 4 \cdot 90 \cdot 2 = 187,2 \text{ kN} < \Sigma F_{düsey} < \Sigma F_{yatay} \text{ 'dır.}$$

Kaynak alanı, bir kuvvet doğrultusunda iki birleşim noktası olması nedeniyle 2 ile çarpılmıştır. Kaynak kapasitesinin gerekli yatay ve düşey kuvvet bileşenini karşılayamaması sebebiyle çapraz çelik şerit, düşey L-profile bir adet Ø16 mm çapındaki yüksek dayanımlı çelik çubuk vidalanmıştır. Kesme kuvveti etkisi altındaki cıvatanın kayma dayanımı, üretici katalogunda belirtildiği gibi 60 kN olarak kabul edilmiştir. Tüm cıvatalı çelik eleman birleşimlerinde TS648 [27]'de şart

koşulan delik açma mesafelerine uyulduğundan, deliklerde yırtılma durumu dikkate alınmamıştır.

$$\begin{aligned}\text{Çelik elemanlar arası birleşim dayanımı} &= F_{\text{kaynak}} + 2 \cdot F_{\text{cıvata}} \\ &= 187,2 + 2 \cdot 60 \text{ MPa} \\ &= 307,2 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Yatay Dayanım} &\cong \text{Düşey Dayanımı} \cong \Sigma F_{\text{yatay}} = 330 \text{ kN} \\ &\geq \Sigma F_{\text{düşey}} = 190,4 \text{ kN} \text{ şartı sağlanmıştır.}\end{aligned}$$

Birleşimdeki çelik çubukların adedi, doğrultularına dik yöndeki kesme kuvvetini taşıyabilmelerine yetecek miktara göre hesaplanmıştır. Her bir çubuğun kesme kuvveti dayanımı 60 kN olarak kabul edilmiştir. Böylece çubuk adetleri,

$$\begin{aligned}\text{Yatay doğrultu için, } n_{\text{yatay}} &= \Sigma F_{\text{yatay}} / 60 = 330 \text{ kN} / 60 \text{ kN} = 5,5 \\ n_{\text{yatay}} &= 7 \text{ adet}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Düşey doğrultu için, } n_{\text{düşey}} &= \Sigma F_{\text{düşey}} / 60 = 190,4 \text{ kN} / 60 \text{ kN} = 3,2 \\ n_{\text{düşey}} &= 4 \text{ adet}\end{aligned}$$

olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, çubukların eksenel yük etkisi altında dayanımları irdelendiğinde,

$$(F_{\text{ankraj}})_{\text{düşey}} = 7 \cdot 108 = 756 \text{ kN} \geq \Sigma F_{\text{düşey}} = 190,4 \text{ kN}$$

$$(F_{\text{ankraj}})_{\text{yatay}} = 4 \cdot 78,9 \text{ MPa} = 315,6 \text{ kN} \cong \Sigma F_{\text{yatay}} \cong 330 \text{ kN}$$

değerleri öngörülmüştür. Yatay doğrultuda kimyasal ankrajların çekme kapasitesi gerekli dayanıma çok yakın olmakla beraber istenilen seviyenin bir miktar altında kalmıştır. Ancak, kapasiteyi artırıcı doğrultudaki bir önleme, gerek ön tasarımın ilk aşamasındaki yatay yük kapasitesinin oldukça üst seviyede seçilmesi gerekse de,

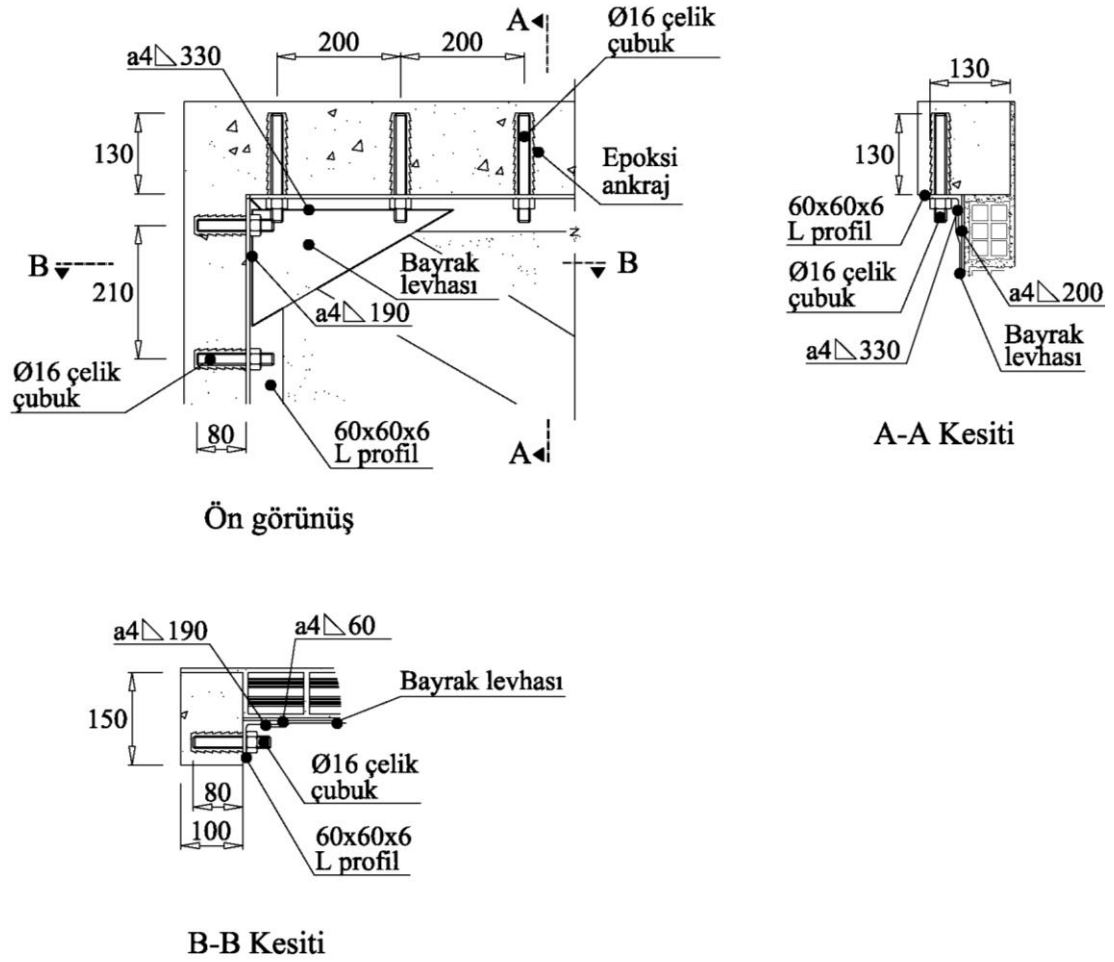
yüksekliği 750 mm olan kolonun iç yüzünde oldukça sık bir biçimde 5 adet Ø18 mm çapındaki deliğin fayda yerine zarar getireceği öngörüsü nedeniyle gerek duyulmamıştır. Kolon kesiti içerisine 80 mm gömülen yatay doğrultudaki çelik çubukların çekme dayanımı, Çizelge 3.10'daki deney sonuçları kullanılarak yaklaşık olarak 78,9 kN hesaplanmıştır.

Ön tasarım aşaması anlatılan panel kenarları boyunca betonarme çerçeve ile çelik elemanlar arasında yük aktaran bağlantı tipinin denendiği Deney Elemanı-6'da panel alt köşelerindeki kaynaklı birleşim 181,2 kN yatay yük seviyesinden sonra kırılmıştır. Bu duruma engel olması için konulan Ø16 mm çapındaki çelik çubuğun yeterli bir önlem olmadığı kaynak bölgesinin dayanımının artırılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Böylece Deney Elemanı-7 ve 8 için kaynaklı birleşime bayrak levhası eklenerek kaynak boyu geliştirilmiştir. Deney Elemanı-6'da denenen birleşimde sağlanan kaynak dikişi uzunluğu 260 mm'den 780 mm'ye çıkarılmıştır. Böylece Deney Elemanı-7 ve 8 için,

$$F_{\text{kaynak}} = 780 * 4 * 90 * 2 = 561,6 \text{ kN} \geq F_{\text{yatay}} \geq F_{\text{düşey}} \quad \text{şartı sağlanmıştır.}$$

Kolon-kiriş birleşiminde geliştirilen bağlantı tipi

Bu bağlantı tipi Deney Elemanı-9'da uygulanmıştır. Bu tip bağlantıda hem kolon hem de kiriş ucunda parçasal, 60x60x6 mm kesitli L-profil kullanılmıştır. L-profiller, kolon ve kiriş kesitine kolonda 80 mm ve kiriş ve temelde 130 mm derinliğinde gömülen Ø16 mm çapındaki çelik çubuklarla sabitlenmiştir. Ankrajların merkezleri arasında, kolonda 150 mm, kirişte ise 200 mm mesafe vardır. Panelin her bir köşesinde 4 adet Ø16 mm çapında çubuk kolon ve kiriş içerisine epoksi harç kullanılarak gömülmüştür. Kesit boyutları 60x60x6 mm olan L-profil bayrak levhasına 4 mm derinliğindeki küt kaynak ile, çelik şeritler köşe birleşimine temas ettiği çizgi boyunca 4 mm derinliğindeki köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Birleşim detayına ait çizim Şekil 3.19'da sunulmuştur.

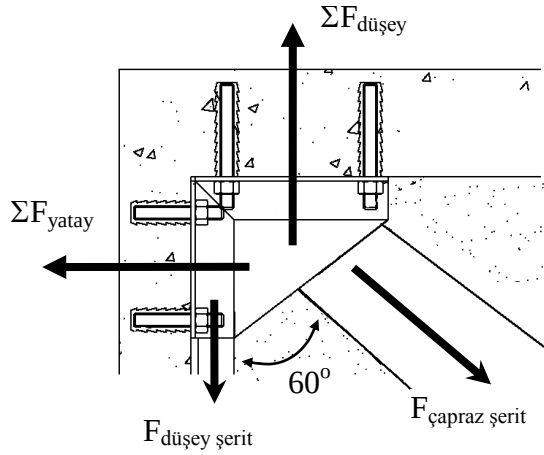


Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.17. Deney Elemanı-8’de denenen tip bağlantı detayı.

Kolon-kiriş birleşiminde çelik elemanlar ile betonarme çerçeve arasında yük aktarımı sağlayan bağlantının ön tasarımı

Bağlantı uç noktalarında kullanılan 70x100x10 kesitli L-profil betonarme çerçeveye bağlayan 3 adet Ø16 mm çapındaki çelik çubuk, çapraz ve eğer varsa düşey şeritlerin akma kuvvetini karşılayabilecek detaylandırmaya sahip olmalıdır. Uç detay tasarımı Şekil 3.18’de sunulmuş olan serbest cisim diyagramında çizilen kuvvet dağılımı, deney elemanındaki kullanılan malzeme dayanımları ve kesit boyutları dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 3.18. Kolon-kiriş birleşiminde geliştirilen bağlantı tipine ait serbest cisim diyagramı.

$$F_{\text{çapraz şerit}} = 150 \cdot 4 \cdot f_{yp} = 600 \cdot 304 = 182,4 \text{ kN}$$

$$F_{\text{düşey şerit}} = 50 \cdot 4 \cdot f_{yp} = 200 \cdot 304 = 60,8 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_{\text{yatay}} = F_{\text{çapraz şerit}} \cdot \sin 60^\circ = 182,4 \cdot 0,87 \cong 159 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_{\text{düşey}} = F_{\text{düşey şerit}} + F_{\text{çapraz şerit}} \cdot \cos 60^\circ = 60,8 + 182,4 \cdot 0,5 = 152 \text{ kN}$$

TS648 [27] kontrol edilmeyen elektrot kaynaklarında, kayma ve çekme dayanımının 90 MPa alınmasını tavsiye etmiştir. Köşe birleşimindeki 2 adet L-profil ve bayrak levhası birbirine 365 mm uzunluğunda 4 mm kalınlığındaki küt kaynak ile birleştirilmiştir. Çapraz ve düşey çelik şerit ise bu 3 parçaya 480 mm uzunluğundaki 4 mm kalınlığında köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. L-profil ve çelik şeritler arasındaki kaynak ile karşılanan kayma ve çekme kuvveti,

$$(F_{\text{kaynak}})_{\text{şerit}} = (F_{\text{kaynak}})_{\text{L-profil}} = 480 \cdot 4 \cdot 90 = 172,8 \text{ kN} \geq F_{\text{yatay}} \geq F_{\text{düşey}} \text{ 'dir.}$$

Çelik elemanlarla betonarme çerçeve arasındaki yük aktarımı 4 adet çelik çubukla sağlanmıştır. Çelik çubukların iki tanesi kolon ucuna, aralarında 150 mm bulunan iki adet 80 mm derinliğindeki kimyasal ankraj ile yerleştirilmiştir. Diğer iki çelik çubuk kiriş kesitindedir. Kiriş kesitindeki ankrajlar 130 mm derinliğinde ve aralarında 200 mm mesafe vardır. Kimyasal ankrajların, gömülme boyu ile çekme kapasiteleri

hakkında bilgi sunan Çizelge 3.10'a göre 130 mm derinliğindeki ankrajlar 108 kN, 80 mm derinliğindeki ankrajlar 78,9 kN çekme kapasitesine sahiptir. Kesme kuvveti etkisi altındaki Ø16 mm çapındaki yüksek dayanımlı cıvataların kayma taşıma gücü, üretici firma katalogunda belirtildiği gibi 60 kN olarak kabul edilmiştir. Tüm cıvatalı çelik eleman birleşimlerinde TS648'de [27] şart koşulan delik açma mesafelerine uyulduğundan, deliklerde yırtılma durumu dikkate alınmamıştır. Betonarme çerçeveye yük aktaran ankrajların kapasiteleri,

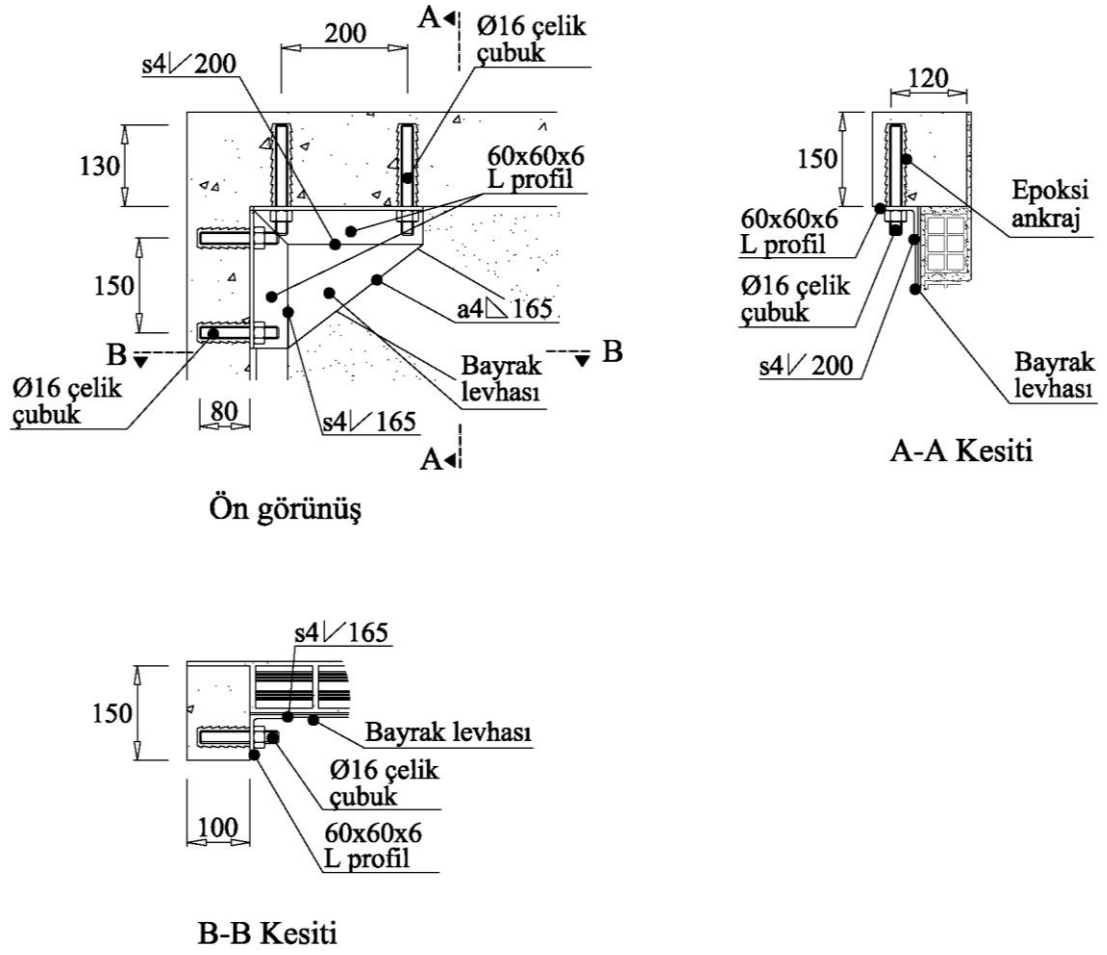
$$(F_{\text{ankraj}})_{\text{düşey}} = 2 * 108 + 2 * 78,9 = 373,8 \text{ kN} \geq \Sigma F_{\text{düşey}} = 152 \text{ kN}$$

$$(F_{\text{ankraj}})_{\text{yatay}} = 2 * 78,9 + 2 * 108 = 373,8 \text{ kN} \geq \Sigma F_{\text{yatay}} \cong 159 \text{ kN}$$

olarak hesaplanmıştır. Ön tasarım aşaması hakkında bilgi sunulan kolon-kiriş birleşiminde yük aktaran bağlantı tipinin denendiği Deney Elemanı-9'da, birleşim noktasından kaynaklanan herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Birleşim detayı, deney sonuna kadar çelik elemanlar yüklerini betonarme çerçeveye başarılı biçimde aktarmıştır.

3.5.2. Güçlendirme tekniğinin uygulanışı

Test çerçevesi ve içerisindeki sıvanmış tuğla dolgu duvar hata payı oldukça düşük bir üretim sonrası geometriye sahiptir. Gerek beton dökümünün yapıldığı çelik kalıbın elemanın kendi ağırlığı altında deformasyona izin vermemesi gerekse de tuğla duvar örümü ve sıvası yapılırken kullanılan şablonlar yardımıyla bütün deney elemanları birbiriyle olabildiğince özdeş boyutta üretilmesi sağlanmıştır. Böylece standart delik koordinatına ve yerleşime sahip çapraz ve düşey şeritlerin deney elemanlarının tuğla panelleri üzerinde konumlandırılması aşamasında kâğıt üzerine çıktısı alınan tam ölçekli şablonların kullanılması uygun olmuştur. Resim 3.9'de tuğla duvar üzerine yapıştırılan şablon yardımı ile panel üzerindeki deliklerin açılması ve Resim 3.10'da çelik şerit yerleşimi tamamlanmış deney elemanı gösterilmektedir.



Not : Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.19. Kolon-kiriş birleşiminde geliştirilen bağlantı tipi detayı.



Resim 3.9. Dolgu duvarda deliklerin açılması

Panele sabitlenen şeritlerin çerçeve ile bağlantısını sağlayan L-profiller, şablon ve daha önceden şerit üzerinde açılan delikler yardımıyla konumlandırılmış ve çelik şeride kaynaklanmıştır. Birleştirilen çelik elemanlar, çerçeve betonuna ankre edilen Ø16 mm çapındaki çubuklarla, test çerçevesine sabitlenmiştir. Güçlendirilen test çerçevelerinin tümünde temele ve kirişe 130 mm, kolonlara ise 80 mm derinliğindeki, Ø20 mm çapındaki delikler matkapla açılmış, içerisine epoksi yapıştırıcı doldurularak, Ø16 mm çapındaki çubuklar için gerekli kenetlenme şartı sağlanmıştır. Epoksi yapıştırıcı uygulanmadan önce beton yüzey fırça ve basınçlı hava kullanılarak temizlenmiştir. Epoksi yapıştırıcının dayanımını tamamıyla kazanabilmesi için ürün katalogunda tavsiye edilen kür süresine uyulmuştur. Bu sürenin sonunda, çelik parçaları bağlayan tüm somunlar sıkılarak test çerçevesi deneye hazır hale getirilmiştir. Deneye hazır durumdaki Deney Elemanı-5 Resim 3.9'da gösterilmektedir.



Resim 3.10. Çelik elemanların bağlantısı tamamlanmış olan Deney Elemanı-5'e ait görünüm.

3.6. Test Tekniği

3.6.1. Yükleme tekniği

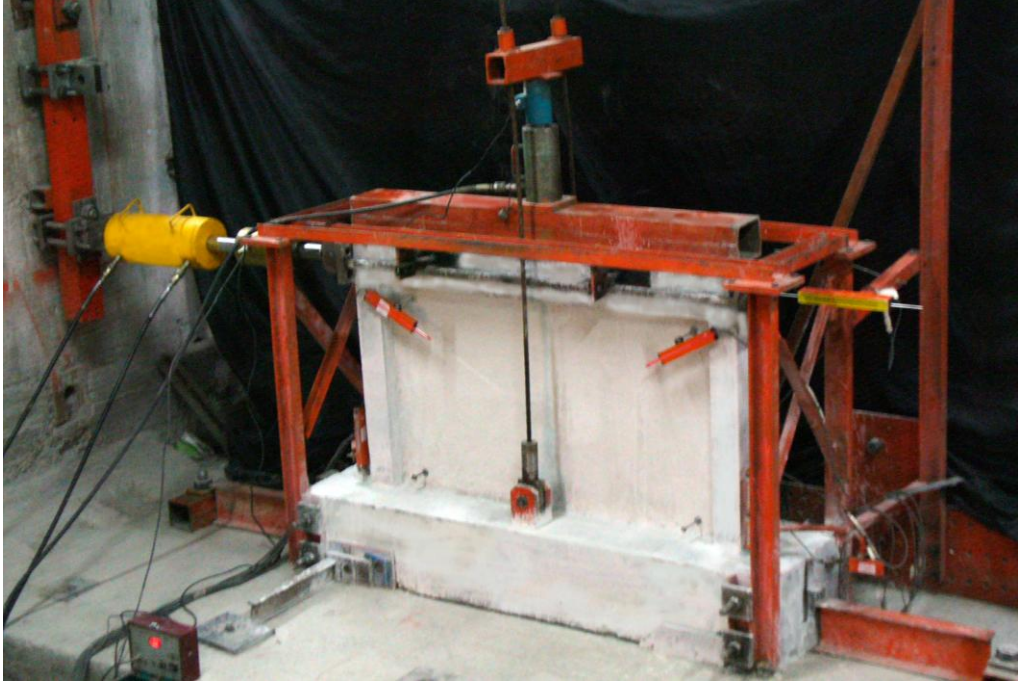
Deneyler Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan deney platformunda gerçekleştirilmiştir. Deney platformu 400 mm kalınlığında rijit döşeme ve yükleme duvarından oluşmaktadır. Platform üzerinde 800 mm aralıklı 45 mm çapında delikler bulunmaktadır. Deney elemanı bu deliklerden geçen iki ucuna dış açılmış 42 mm çapında yüksek dayanımlı çelik çubuklarla temel kirişinden deney platformuna bağlanmıştır.

Deney elemanına deprem yüklerini benzeştiren tersinir tekrarlanır yatay yük kiriş seviyesinden etki ettirilmiştir. Yatay yük, el kumandalı hidrolik bir pompa tarafından kontrol edilen çift etkili hidrolik kriko ile uygulanmıştır. Deneylere maksimum yük

seviyesine kadar yük kontrollü, maksimum yükten sonra deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Yükleme hidrolik pompa aracılığı ile düzenli ve oluşacak çatlak gelişimini gözleyebilecek bir hızda gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin laboratuvar ortamından görünüşü Resim 3.11’de verilmiştir.

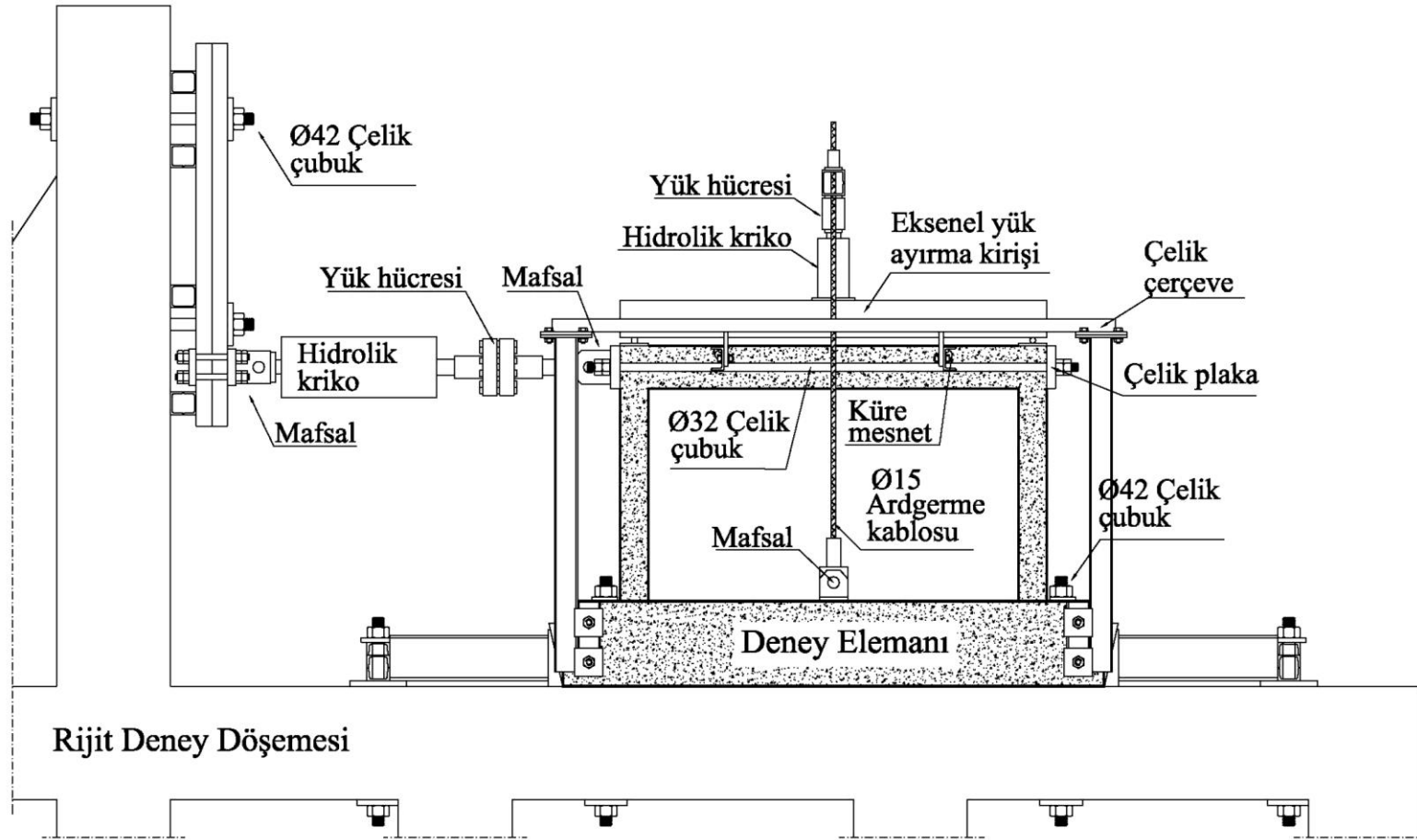
Yatay yük krikosu, deney platformunun rijit duvarına 2 adet U120 mm profilden oluşturulan bir kutu profil ile bağlanmıştır. Özel olarak imal edilen kutu profil iki adet 42 mm çapında çelik çubukla deney platformunun rijit duvarına sabitlenmiştir. Kutu profile 4 adet çelik çubuk ile bağlanan mafsal, yatay yükün uygulanacağı hidrolik krikoyu deney platformunun rijit duvarına mesnetlemekte kullanılmıştır. Krikonun ucuna çekme ve basınç kapasitesi 500 kN olan yük hücresi yerleştirilmiştir. Yatay yükü, deney elemanına aktaran son ara eleman deney platformunun duvarına yatay yük krikosunu mesnetleyen mafsalın diğer eşidir. Bu şekilde yatay yükün bir pandül ile kirişe aktarımı sağlanmıştır.

İtme etkisini test çerçevesine kiriş seviyesinde temas ederek sağlayan mafsal, çekme kuvvetini test çerçevesine iletebilmesi amacıyla, kirişin diğer ucunda bulunan kalın bir plakaya Ø32 mm çapında 2 adet yüksek dayanımlı çubuk ile vidalanmıştır. Test çerçevesini kiriş seviyesinde sağ ve sol uçlarından tutan, plaka ve mafsalı birbirine bağlayan çubuklar, kirişte ard germe kuvveti oluşturmayacak biçimde yatay yük aktarma bileşenlerine vidalanmıştır. Yükleme düzeneğinin detay çizimi Şekil 3.17’de verilmiştir. Resim 3.12’de yatay yük düzeneğinin bir fotoğrafı sunulmuştur.



Resim 3.11. Deney düzeneğinin rijit platform üzerindeki genel görünüşü

Test sırasında deney elemanında meydana gelebilecek düzlem dışı hareketi engellemek amacıyla üç parçadan oluşan bir çelik kafes üretilmiştir. Deney elemanları bu çelik kafesin içerisine yerleştirilerek test edilmiştir. Kafesin yan parçaları iki adet U80 mm profilin arasına diyagonal doğrultuda 2 adet 50x50x5 mm boyutlarında L profilin kaynakla birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Üst parçası ise iki adet U80 mm profilin arasına iki noktadan 500 mm boyunda 2 adet U80 mm profilin kaynakla birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Üst parça yan parçalara dört köşesinden bulonlarla birleştirilerek çelik kafes meydana getirilmiştir. Yan parçalarla üst parçanın birleşim yerlerine 180 x 180 mm boyutlarında 10 mm kalınlığında alümin levhaları kaynaklanmıştır. Her birleşimde 4 adet 12 mm çapında bulon kullanılmıştır. Çelik kafes, deney elemanına temel kirişinden 4 adet 22 mm çapında iki ucuna dış açılmış yüksek dayanımlı çelik çubuklarla bağlanmıştır. Çelik kafesin üst parçasına yerleştirilen küre biçimli 4 adet bakalit küresel mesnet, deney elemanının kirişine ön ve arka yüzlerinden temas ederek, çerçeveyi sadece yükleme düzleminde hareket edebilecek şekilde kısıtlamıştır.

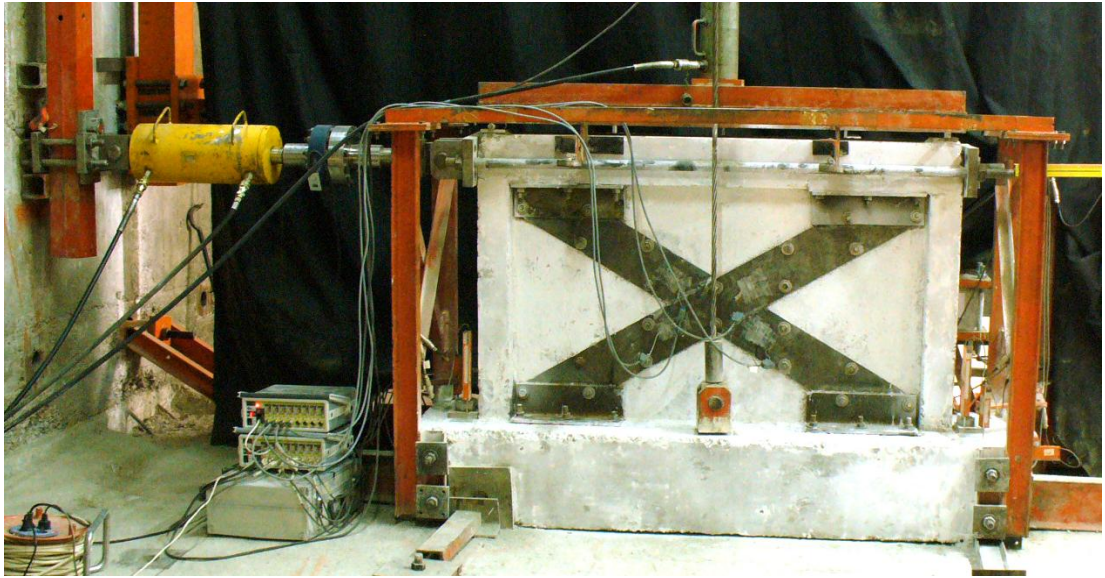


Ölçüler mm'dir.

Şekil 3.20. Deney ve yükleme düzeneği

Küresel mesnedin, kirişe temas ettiği bölgeye elastik silikon kullanılarak 30 mm yüksekliğinde 140 mm uzunluğunda çelik levha yapıştırılmıştır. Test öncesi mesnetler, kirişe yapıştırılan çelik levhalara serbestçe temas edecek biçimde sabitlenmiş, bakalit mesnetler ile çelik levhaların arasına gres yağı sürülmüştür. Böylece, sürtünme azaltılarak, deney elemanının yükleme düzleminde serbest hareketi sağlanmıştır.

Deney elemanına, yatay yük ile birlikte düşey yük aynı anda etki ettirilmiştir. Düşey yükleme düzeneğinde, tek etkili bir hidrolik kriko ve elle kumanda edilen bir hidrolik pompa kullanılmıştır. Eksenel yük, Şekil 3.20’de gösterilmiş olan iki adet NPU120’nin birleştirilmesi ile oluşturulmuş 1500 mm uzunluğundaki eksenel yük ayırma kirişi ile her iki kolona da birbirine eşit olacak biçimde dağıtılmıştır. Her bir kolona deney boyunca, kolon eksenel yük taşıma kapasitesinin %10’u kadar, yaklaşık 20 kN sabit eksenel kuvvet uygulanmıştır.



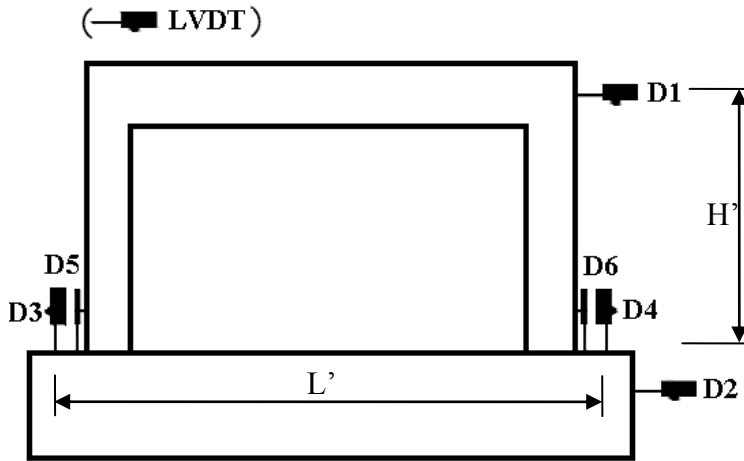
Resim 3.12. Yatay yük uygulama düzeneği

3.6.2. Ölçüm aletleri ve ölçüm düzeni

Deplasmanlar elektronik deplasman ölçüm aletleri kullanılarak ölçülmüştür. Alınan ölçümler veri toplayıcı aracılığı ile bilgisayara aktarılıp bilgisayarda kullanılan bir

yazılımla kaydedilmiştir. Deney elemanlarının yatay deplasmanı kirişe yatay yerleştirilen bir adet LVDT (Linear Variable Differential Transformer) kullanılarak ölçülmüştür. Deney elemanlarının kolonlarının alt ucundan boy değişim ölçümü alınmıştır. Ölçüm temel kirişi üzerinden başlayan 150 mm yüksekliğindeki bir bölgeden ölçülmüştür.

Deney elemanının rijit kütle hareketleri temel üzerinden alınan 3 doğrultudaki LVDT ile ölçümü ile kayıt altına alınmıştır. Alınan ölçümlerden 2 adedi deney elemanının deney platformun üzerindeki dönme miktarını, üçüncüsü ise deney elemanının yük doğrultusunda yaptığı ötelenmenin belirlenebilmesi amacıyla ölçüm sistemine dahil edilmiştir. Deney elemanlarında ölçüm aletlerinin yerleşimi ve düzenleri Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21. Deney elemanı üzerinden alınan LVDT ölçümleri.

3.6.3. Ölçümlerin değerlendirilmesi

Yatay deplasmanın hesabı:

Şekil 3.18’de yerleşimi gösterilmiş olan D1, D2, D3 ve D4 numaralı LVDT’ler ile deney elemanlarının yatay deplasmanı hesaplanmıştır. D1 ölçümünün içinde mevcut

bulunan rijit kütle hareketleri Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 kullanılarak düzeltilmiş, kirişin yatay deplasmanı hesaplanmıştır.

$$\Delta_{\theta 1} = \frac{(D3 - D4)}{L'} \times H' \quad (3.1)$$

$$\Delta_1 = D1 - D2 - \Delta_{\theta 1} \quad (3.2)$$

Eşitliklerde;

D3, D4	Temelin sol ve sağ uçlarının düşey deplasmanları, mm
D2	Temelin ölçülen yatay deplasmanı, mm
$\Delta_{\theta 1}$	Temelin dönmesinden dolayı kiriş orta yüksekliğinde ölçülen yatay deplasman, mm
D1	Ölçülen kat deplasmanı, mm
Δ_1	Düzeltilmiş kat yatay deplasmanı, mm
L'	D3 ve D4 numaralı LVDT'ler arasındaki uzaklık, mm
H'	Temel ile kiriş orta eksen arasındaki yükseklik, mm

Kolon bindirme bölgesinde çatlak genişliği ölçümleri:

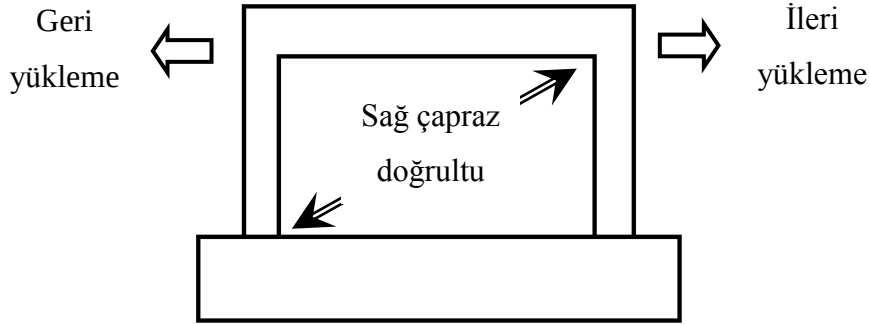
Kolonlardaki bindirme bölgesi yüksekliği 15Ø'dir. Boyuna donatı çapı Ø8 mm olduğuna göre bindirme bölgesi kolon alt ucunda 120 mm uzunluğunda bir bölgede bulunmaktadır. Bindirme bölgesinde gelişen çatlakların genişliğinin kayıt altına alınabilmesi amacıyla, elemanların sağ ve sol kolonunun alt uçlarına, kolon dış yüzünde, kolon alt ucunda 150 mm uzunluğunda bir bantta düşey ölçüm alabilen D5 ve D6 numaralı LVDT'ler yerleştirilmiştir. LVDT'lerin ölçtüğü boy değişimi hiçbir düzeltmeye gerek duyulmadan doğrudan deneylerin anlatıldığı 4. bölümde sunulan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiklerinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

4. DENEYLER

Bu bölümde deney elemanlarının testleri önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleriyle anlatılmıştır. Deney elemanlarının dayanımlarının birbirinden farklı olması elemanlar için özdeş bir yükleme programının uygulanmasına olanak vermemiştir. Yükleme programı iki aşamadan oluşmuştur. Deney elemanlarının taşıyabildiği maksimum yük düzeyine kadar yük kontrollü, bu yükten sonra deplasman kontrollü yükleme programı kullanılmıştır. Yük kontrollü aşamada yüklemeye 10 kN kesme kuvveti ile başlanmış ve ardışık her çevrimde 10 kN'luk yük artırımlarıyla devam edilmiştir. Her yük düzeyi elemana sadece bir kez uygulanmıştır. Deney elemanı taşıma gücüne ulaştıktan sonraki aşamada, %0,60 ötelenme oranı artırımlarıyla deplasman kontrollü olarak deneylere devam edilmiştir. Deplasmanların %2,5 ötelenme oranına ulaşması ile teste son verilmiştir. Deney elemanlarına uygulanan yük programı yük-çevrim grafiği olarak deney gözlemlerinin anlatıldığı bölümlerde verilmiştir. Deney elemanlarının kesme kuvvetine karşılık ölçülen yatay deplasmanı, kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği olarak sunulmuştur. Ayrıca deney elemanlarının kolonlarında boyuna donatıların ek yapıldığı kolon alt ucunda, kolon dış yüzünden düşey doğrultuda deplasman ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerle kolon alt ucunda gelişen çatlakların takibi sağlanmıştır. Ayrıca, kolon boyuna donatısında oluşturulan yetersiz kenetlenme sonucunda kolonda gelişen ayrılmaların ölçülmesi sağlanmıştır. Ölçümler kesme kuvveti-çatlak genişliği grafikleri olarak sunulmuştur.

Testler sırasında çekilen detay fotoğraflar testlerin anlatıldığı bölümlerde verilmiştir. Testlerin anlatımında, ileri ve geri olmak üzere yük çevrimi iki kısma ayrılmıştır. İleri yük çevrimi önden bakıldığında deney elemanının sağına doğru; bir başka deyişle, yatay yük yükleme düzeneğinden uzağa doğru; yatay ötelenme meydana getiren yükleme yarı çevrimi için kullanılmıştır. Çevrimin tamamlayıcısı olan geri yükleme çevrimi ise deney elemanının sol tarafına doğru; yatay yükleme düzeneğine yaklaşan; ötelenme oluşturan yükleme çevrimi anlamındadır. Panel üzerindeki şerit ve çatlak durumu için kullanılan sağ ve sol kavramları da yükleme ile benzer yöndeki doğrultuyu kastetmektedir. Örneğin, üst ucu deney elemanının sağ kolon-kiriş

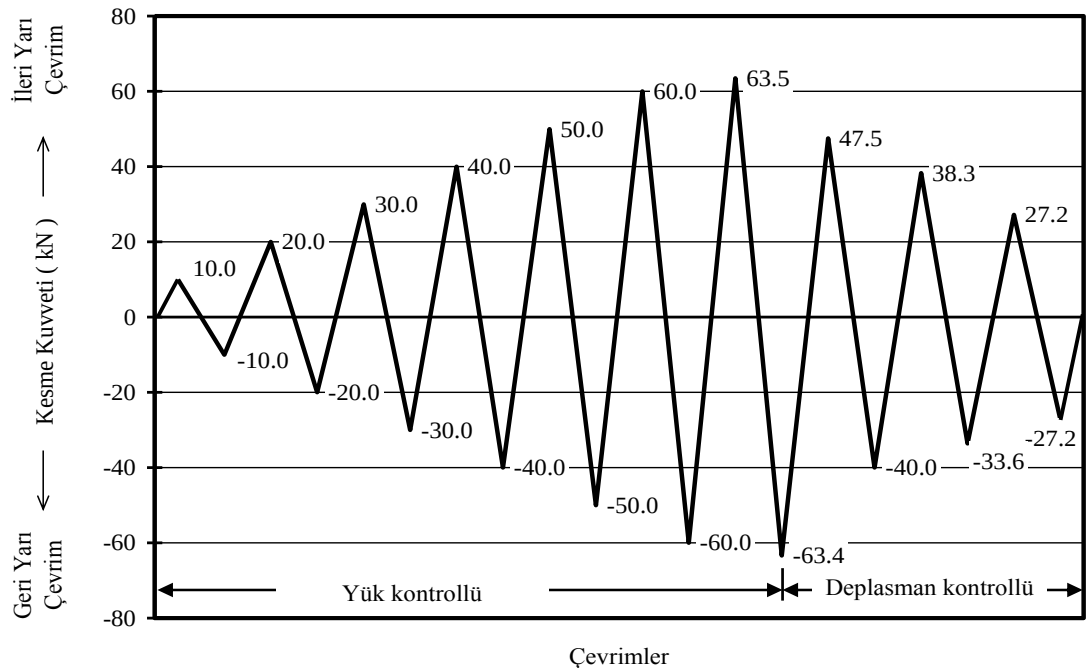
birleşimini işaret eden çapraz şerit veya panel doğrultusu sağ çapraz olarak adlandırılmıştır. Yön ve doğrultu kabulü Şekil 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Deneyle ilgili anlatımında kullanılan yüklemeye yönelik yön ve doğrultu kabulü.

4.1. Deney Elemanı-1

Deney elemanı Şekil 4.2’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 10 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.3’de, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Deney Elemanı-1’e ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk iki çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

3. çevrim: 25 kN yük seviyesinde, çekmede kalan kolonun bindirme bölgesinde ilk eğik çatlak gözlenmiştir. İleri çevrim sonunda, ilk eğik çatlak bölgesinde yeni eğik çatlaklar oluşmuştur. Geri yarı yüklemede, elemanda simetrik davranış görülmüş yaklaşık 25 kN yük seviyesinde çekme etkisindeki sağ kolonda kenetlenme bölgesinde eğik çatlak görülmüştür.

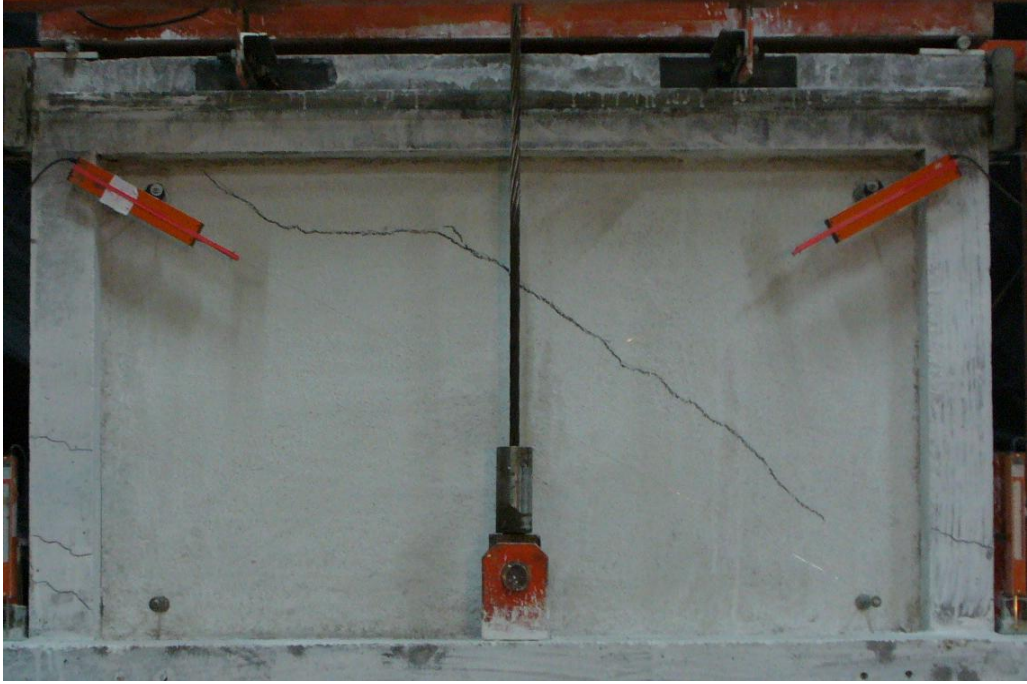
5. çevrim: 45 kN yük seviyesinde temel ile tuğla dolgu duvar arasında, temel üzerinden 600 mm uzunluğunda ayrılma çatlağı gelişmiştir. 50 kN yük seviyesinde sol kolon ile tuğla duvar arasındaki ayrılma çatlağının üst kirişe kadar uzandığı görülmüştür. Sol kolonda 50 kN yük seviyesine ulaşıldığı çevrimde eğik çatlak sayısında artış olmuştur. Sol kolon, temel kirişinden ayrılmış, kenetlenme bölgesindeki sıyrılma ölçümlerinde artış meydana gelmiştir. Geri yarı çevrimde, dolgu duvar, temel kirişi ile sağ kolondan ayrılmış, kolon alt ucunda gelişen ayrılma çatlağı dışında yeni çatlak oluşmamıştır.

7. çevrim: İleri yarı çevrim 63,5 kN yük seviyesinde, tuğla dolgu duvarda diyagonal doğrultuda boydan boya ilerleyen eğik çatlak meydana gelmiştir. Panelde gelişen diyagonal çatlak sebebiyle, ani bir yük kaybı meydana gelmiştir. Gelişen çatlak, 63,5 kN'luk yatay yükün ani biçimde 50,9 kN'a düşmesine sebep olmuştur. Bu yük seviyesinde kat ötelenme oranı yaklaşık %0,30 olarak gerçekleşmiştir. Gelişen diyagonal çatlak sonucunda sağ kolon alt ucunda paneldeki çatlağı takip eden yeni bir kesme çatlağı oluşmuştur. Deney elemanının bu aşaması Resim 4.1'de gösterilmiştir. Geri çevrim yüklemede, ileri yarı çevrimde açılan çatlaklar kapanmış, taşıyıcı elemanlarda ezilme oluşmadığı için kesme yükünde artış meydana gelmiştir. Geri yarı çevrimde 63,4 kN'luk yük düzeyinde, tuğla dolgu duvar diğer diyagonalinin doğrultusunda kesilmiş ve tekrar ani bir yük kaybı meydana gelmiştir. Bu yarı çevrimde de tuğla duvar %0,30'luk kat ötelenme oranı altında göçmüştür.

Sağ ve sol kolona ait kesme kuvvet-çatlak genişliği grafikleri paneldeki diyagonal çatlak gelişimi ile birlikte kolonlar bindirme bölgesinde gelişen çatlakların genişliklerinin bu çevrimden sonra arttığını belirtmektedir. Her iki çapraz doğrultusunda çatlayan panel her iki kolonda basınç ve çekme kuvvetleri altında boy değişimi oluşmasına neden olmuştur.

8. çevrim: Bu çevrimde önceden planlanmış olan deney yükleme programı gereğince deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Her bir çevrim tepe noktasına, yatay deplasmanın %0,60'lık ötelenme oranı artırımıyla ulaşılabacaktır. Üst kolon-kiriş birleşiminde gelişen ilk eğik kesme çatlağı bu çevrimin ileri yarı yüklemesinde, 45 kN yatay yük seviyesinde %0,82 ötelenme oranında iken meydana gelmiştir. Çatlak, çekme etkisi altındaki sol kolonda oluşmuştur. Çevrimin tamamlandığı %0,90 ötelenme oranında, tuğla dolgu duvarın sol üst köşesinde oluşan ezilme sebebiyle, çok sayıda yeni eğik çatlak oluşmuştur. Ancak, bu yük seviyesine kadar sıva katmanında herhangi bir kayıp olmamıştır. Geri yükleme yarı çevriminde, çekmede kalan kolonun üst kolon – kiriş birleşiminde eğik kesme çatlağı, 40 kN yük ve %0,91 ötelenme oranında oluşmuştur. Benzer bir şekilde bu yarı çevrimde de tuğla dolgu duvar sağ üst köşede ezilerek, tuğla elemanların kırılmasına sebep olmuştur.

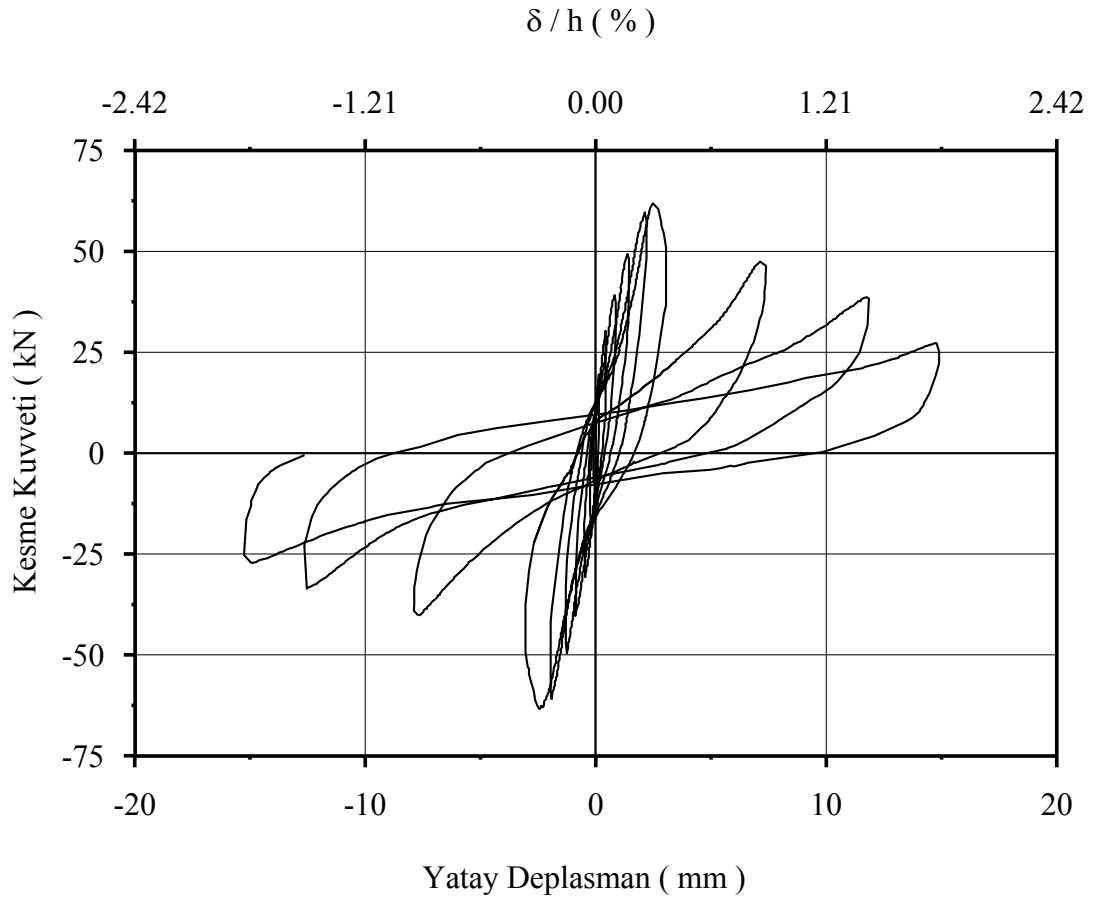
9. çevrim: İleri yarı çevrimde, %1,50, geri yarı çevrimde %1,52 ötelenme oranı hedeflenmiştir. Yükleme sırasında daha önceki yükleme adımında, ezilen tuğla dolgu tamamen dökülerek boşluk oluşmuştur. Tuğla dolgu duvar üzerinde gelişen mevcut çatlaklar, kolona girişim göstermiş, sol kolon üst düğüm bölgesinde yeni kesme çatlakları oluşturmuştur. Geri yarı yüklemeye, deney elemanı ileri yükleme çevrimi ile benzer bir davranış sergilemiştir. Sağ kolon üzerinde eğik çatlak sayısında artış olmuştur. Sağ kolonun üst kolon-kiriş birleşiminde çatlak sayısı artmıştır.



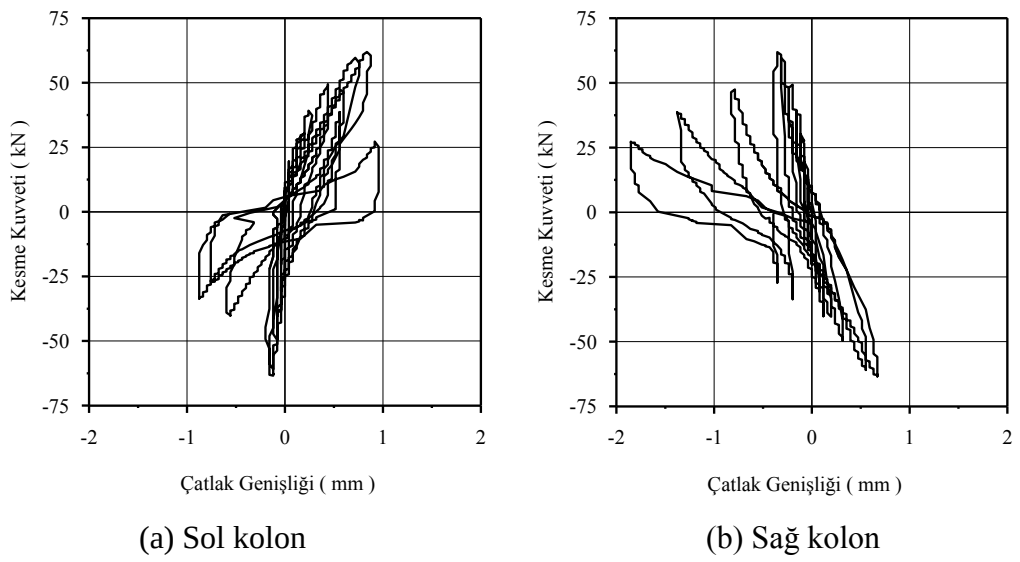
Resim 4.1. 7. çevrim ileri yarı çevrim sonrası gelişen diyagonal çatlak.



Resim 4.2. Deney sonrası Deney Elemanı-1



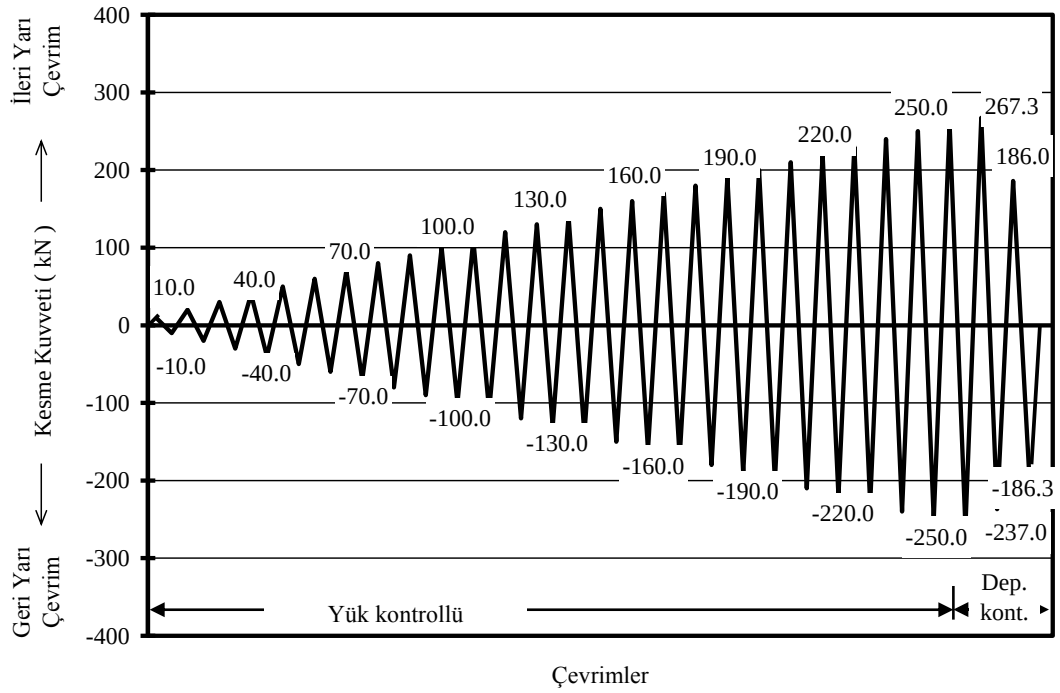
Şekil 4.3. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-1



Şekil 4.4. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-1

4.2. Deney Elemanı-2

Deney elemanı Şekil 4.5’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 28 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.6’da, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu deneyde sol kolon için sağlıklı çatlak genişliği ölçümü alınamamıştır. Alınabilen ölçüme grafik biçiminde sunulmuş ancak yorumlanamamıştır.



Şekil 4.5. Deney Elemanı -2’e ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk beş çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

6. çevrim: İleri yarı yükleme aşamasında 65kN yük seviyesinde, çekmede kalan kolonun kenetlenme bölgesinde ilk eğik meydana gelmiştir. Bu yük seviyesine kadar,

betonarme elemanlarda ve tuğla dolgu duvarda çatlak gelişimi olmamıştır. Çevrimin geri yarı yüklemesinde, deney elemanı üzerinde yeni çatlak oluşmamıştır.

8. çevrim: 7. çevrimin tamamında ve 8. çevrimin ileri yarı çevriminde deney elemanı üzerinde kayda değer bir gelişme olmamıştır. Tuğla duvar ve betonarme elemanlar üzerinde yeni bir çatlak gelişmemiştir. Bu çevrimin geri yüklemesi 80kN yük seviyesinde tamamlandığında, deney elemanının çekmede kalan kolonunun temel kirişi ile birleştiği bölgede, ilk eğik çatlak görülmüştür.

12. çevrim: Çevrimin ileri yarı yüklemesi sırasında, kirişin sol düğümünde, çelik şeritlerin bağlandığı L profilin kirişe sabitlendiği yüksek dayanımlı çelik çubukların düğümüne en yakın olanı hizasında betonda kılcal eğik çatlaklar gözlenmiştir. Oluşan çatlak, kesiti tamamen kesememiş ve çatlak kılcal düzeyde kalmıştır. Bu çevrimin geri yüklemesi esnasında 115 kN yatay kuvvet altında, çekmede kalan kolonun kenetlenme bölgesinde ikinci eğik çatlak gelişim göstermiştir. Çevrim 120 kN da tamamlandığında kirişin sağ düğümünde rijit L-profilini bağlayan düğümüne en yakın somun üzerinden başlayarak düğümüne doğru ilerleyen eğik çatlaklar gelişmiştir.



Resim 4.3. Kolon-kiriş birleşiminde çatlak.

13. çevrim: İleri yarı çevrim sırasında, sol üst L-profilini betonarme çerçeveye bağlayan çelik çubuklar zorlanmış, kirişte enine doğrultuda ve düğümüne doğru ilerleyen kesme çatlakları gelişmiştir. Bu çevrimin geri yüklemesi sırasında da, diğer

doğrultudaki gözlemlere benzer davranış sergilenmiş olup, sağ üst L-profil bağlantıları üzerinde gelişen kılcal düzeyde çatlaklar meydana gelmiştir.

14. çevrim: İleri yarı yüklemede kirişin sol ve sağ uçlarındaki ankraj bölgesinde eğilme çatlakları oluşumu artmıştır. Geri çevrim sırasında panelin sol üst köşesi yaklaşık 300 mm uzunluğunda kılcal düzeyde bir çatlak biçiminde kolon yüzeyinden ayrılmıştır.

15. çevrim: İleri yarı çevrim sırasında sol kolonun, temelle birleştiği bölgede ilk eğilme çatlağı 145 kN yük seviyesinde oluşmuştur. Aynı bölgede panelin kolondan yarı yüksekliğe kadar ayrıldığı gözlenmiştir. Geri yarı çevrim sırasında basınçta kalan çapraz şeridin kiriş bağlantısında betonda kabarma meydana gelmiştir. Ancak çevrimin sonunda ön yüzde gelişen burkulma sebebiyle betondaki kabarma ilerlememiştir.



Resim 4.4. Çelik şeritte burkulma.

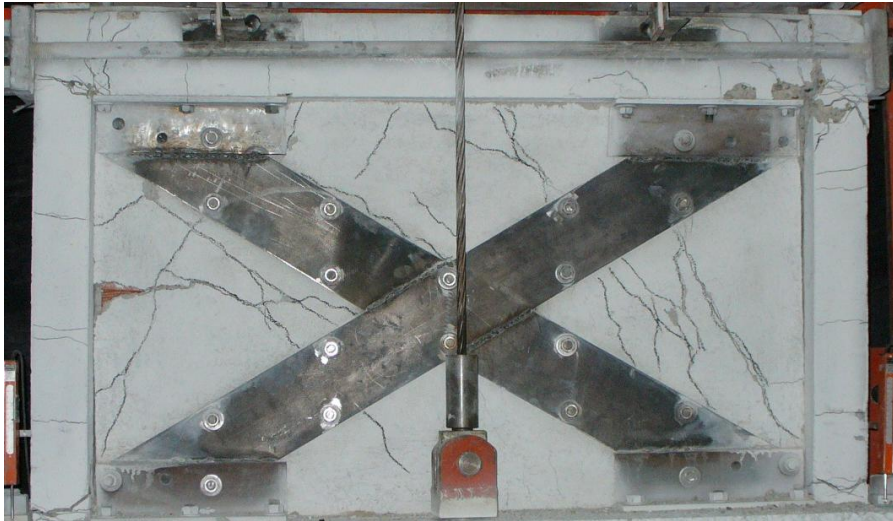
20. çevrim: Bu çevrime kadar her iki kolonda da eğilme çatlaklarının sayısında artış ve çatlak kalınlıklarında gelişme olmuştur. İlk defa bu çevrimde duvar ile kolon ciddi bir biçimde ayrılmış, tuğla dolgu duvarda eğik çatlak gelişmiştir. 200 kN'luk ileri yük çevrimi tamamlandığında çapraz şeritlerde burkulma başlangıcı gözlenmiştir.

Sağ kolon bindirme bölgesindeki çatlak genişliği Deney Elemanı-1’de göçme anında gözlenen çatlak genişliği değerine ulaşmıştır.

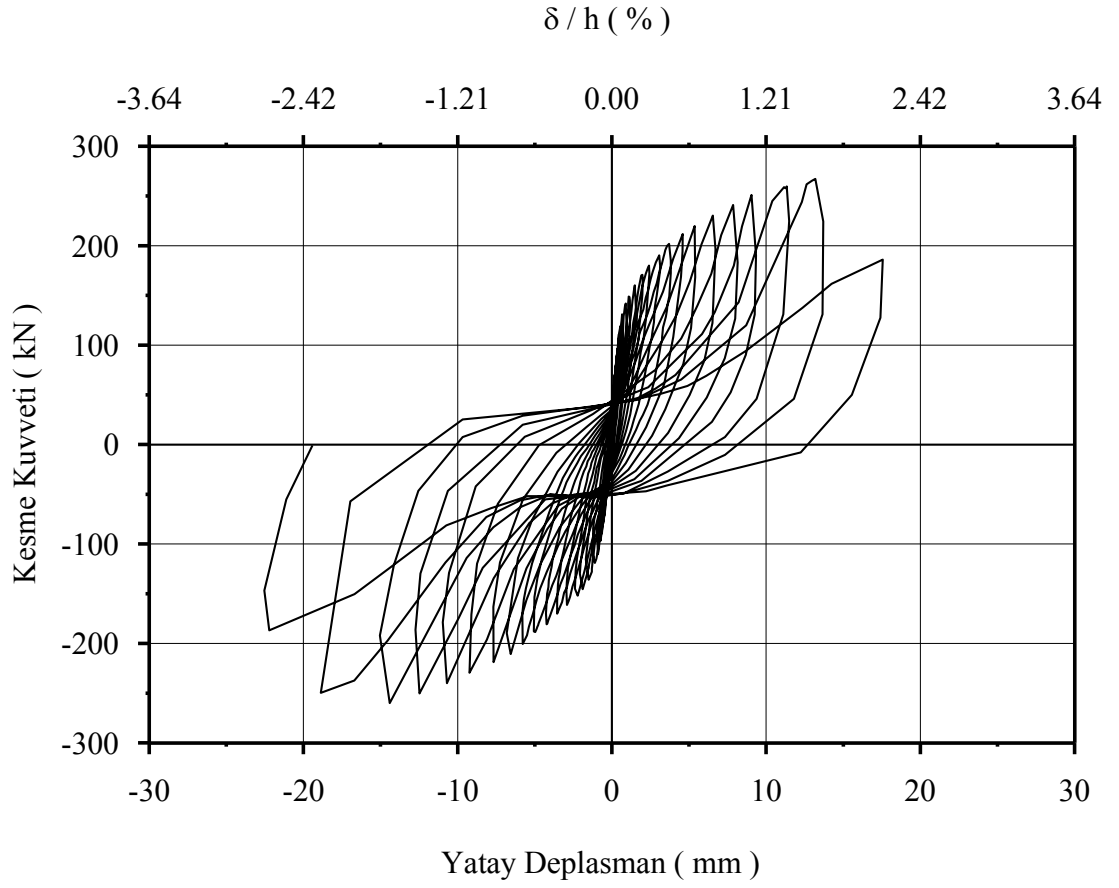
21. çevrim: İleri yarım çevrimde bir önceki çevrimin ileri yüklemesinde burkulma belirtisi gösteren çapraz şerit belirgin bir biçimde burkulmuştur. Geri yükleme çevriminde ise diğer yöndeki çapraz şeritte burkulma gözlenmiştir. Şeritlerin burkulması her iki kolonda da çatlak genişliğinin artmasına neden olmuştur. Çatlak genişlikleri çekme gerilmesi oluşturan yükleme doğrultusunda gelişmiştir. Şekil 4.7 (b)’de gösterildiği gibi panelin çelik şerit ile güçlendirilmesi kolonun eksenel basınç kuvveti altında ezilmesi engellemiştir.

22., 23., 24., 25., ve 26. çevrim: bu yük çevrimleri için kolonlar ve duvar arasında ezilen bölgeler, dökülerek boşluklar gelişmiştir. Bu çevrimlerde yük deplasman grafiğinde rijitlikte düşüş meydana gelmiştir. Duvarı yatay ve diyagonal doğrultuda oluşan çatlakların sayısında artış olmuştur. .

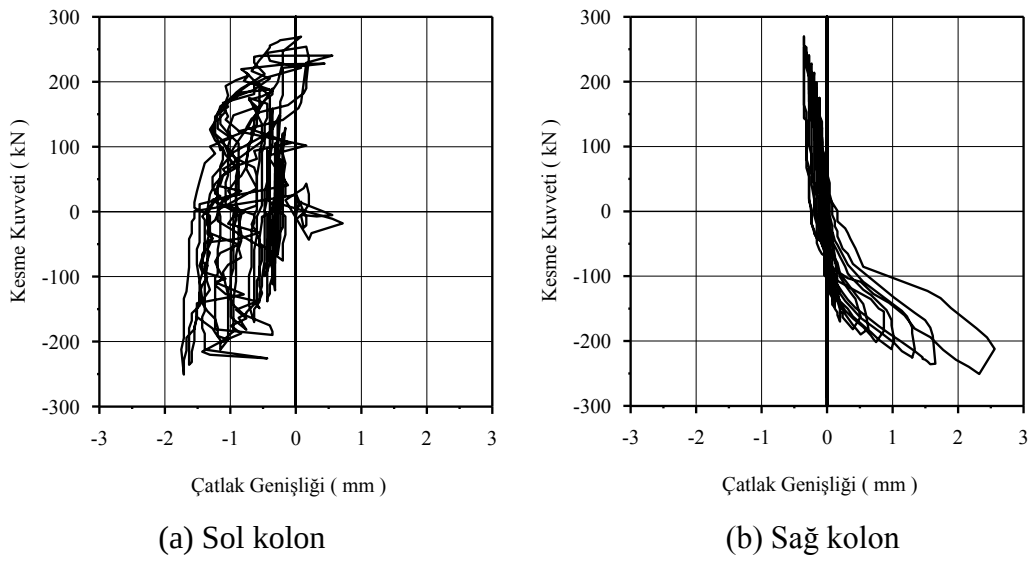
27. çevrim: İleri yükleme sırasında 265kN yük seviyesinde çekmede kalan sol kolonun temel kirişi ile birleştiği alt bölgede sıyrıldığı gözlenmiştir. Çevrim 267,3 kN yük, 12,5 mm yatay deplasmana ulaşıldığında sonlandırılmıştır. Sağ kolon-kiriş birleşiminin kiriş kesitinden, kesiti tamamen çevreleyen bir çatlak gözlenmiştir.



Resim 4.5. Deney sonrası Deney Elemanı-2’nin genel görünüşü



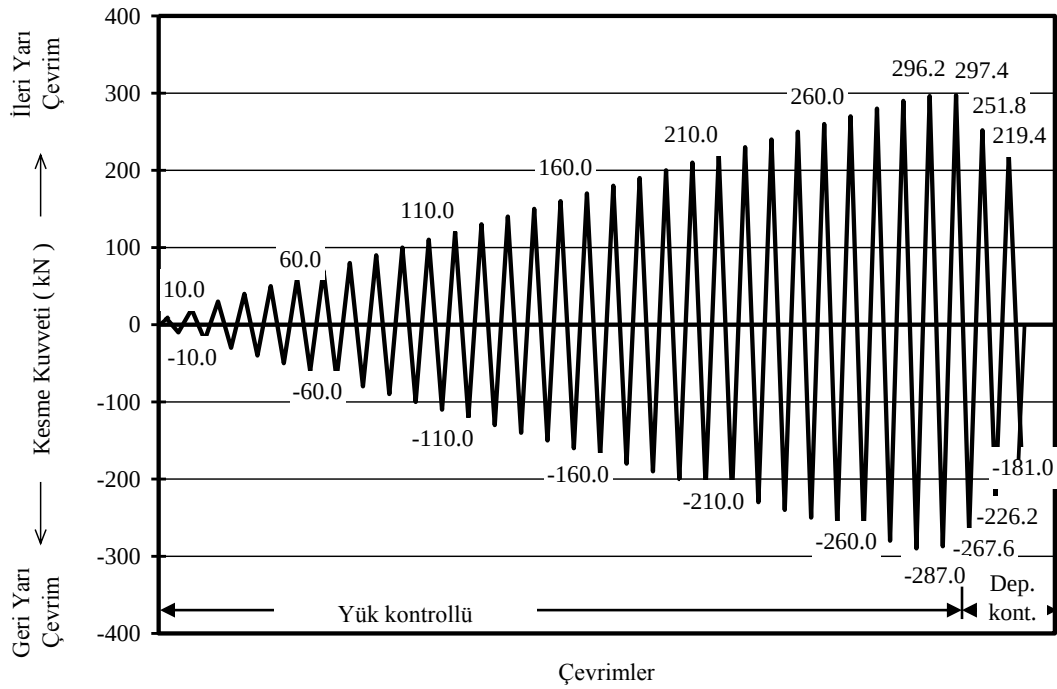
Şekil 4.6. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-2



Şekil 4.7. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-2

4.3. Deney Elemanı-3

Deney elemanı Şekil 4.8’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 33 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.9’da, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.8. Deney Elemanı-3’e ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk on çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

11. çevrim: İleri yarı çevrimde kılcal boyuttaki ilk eğik çatlak, sol kolonun üst ucundan 200 mm aşağıda oluşmuştur. Bu çevrimin geri yüklemesinde herhangi bir çatlak gelişimi olmamıştır.

12. çevrim: Çevrimin ileri yüklemesinde önemli bir gelişim görülmemiştir. Geri yarı çevrimde ise sağ kolonda, sol kolonda oluşan ilk eğik çatlağa simetrik olacak biçimde ilk eğik çatlak gelişim göstermiştir.

13. çevrim: 125 kN yük seviyesinde ileri yarı yüklemde sol kolon-kiriş düğümünde ilk 45°'lik eğik çatlak gelişmiştir.

16. çevrim: İleri yarı yükleme tamamlandığında sol kolonun kenetlenme bölgesinde eğik çatlak oluştuğu ve kolondaki eğik çatlakların sayısında artış olmuştur. Çevrimin geri yüklemesinde 155 kN yük seviyesinde sağ kolonun temel kirişi ile birleştiği kesitte ilk eğilme çatlağı gözlenmiştir.

17. çevrim: İleri yüklemde 165 kN'luk yük seviyesinde, kirişte sol kolona en yakın ankrajı takip eden düşey çatlak gelişmiştir. Sol kolon-kiriş birleşiminde eğik çatlak sayısında artış meydana gelmiştir. 170 kN da çevrim tamamlandığında kiriş ile panelin ayrıldığı gözlenmiştir.

18. çevrim: Sol kolon dibindeki bağlantıda kolona en yakın 2 bulonun eksenel olarak zorlandığını gösteren çatlak oluşmuştur. Sol kolonun alt bölgesinin kolon yarı yüksekliğine kadar tuğla duvardan ayrıldığı gözlenmiştir.

19. çevrim: İleri çevrim sonunda, sol kolonun alt yarı bölgesinde tuğla duvardan belirgin bir biçimde ayrıldığı gözlenmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 185kN yük seviyesinde kirişin sağ ucundaki kolona en yakın ankrajda düşey çatlak oluşmuştur.

28. çevrim: Tuğla panelde ilk eğik çatlak gözlenmiştir. Sol kolon üst ucunda eğik çatlakların sayısında artış meydana gelmiştir. Kirişin basınçta kalan alt yüzünde sol kolona en yakın ankrajlarda kesme çatlağı gözlenmiştir. Geri yükleme sırasında simetrik biçimde çatlak gelişmiştir.

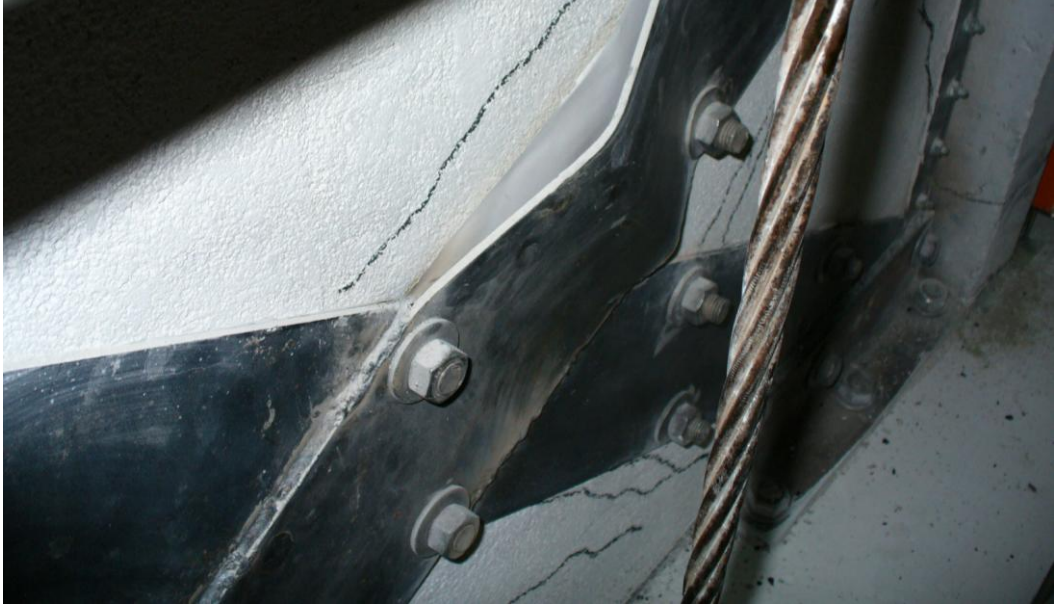


Resim 4.6. 19. yük çevrimi sonrası sol kolon bindirme bölgesi hasarı

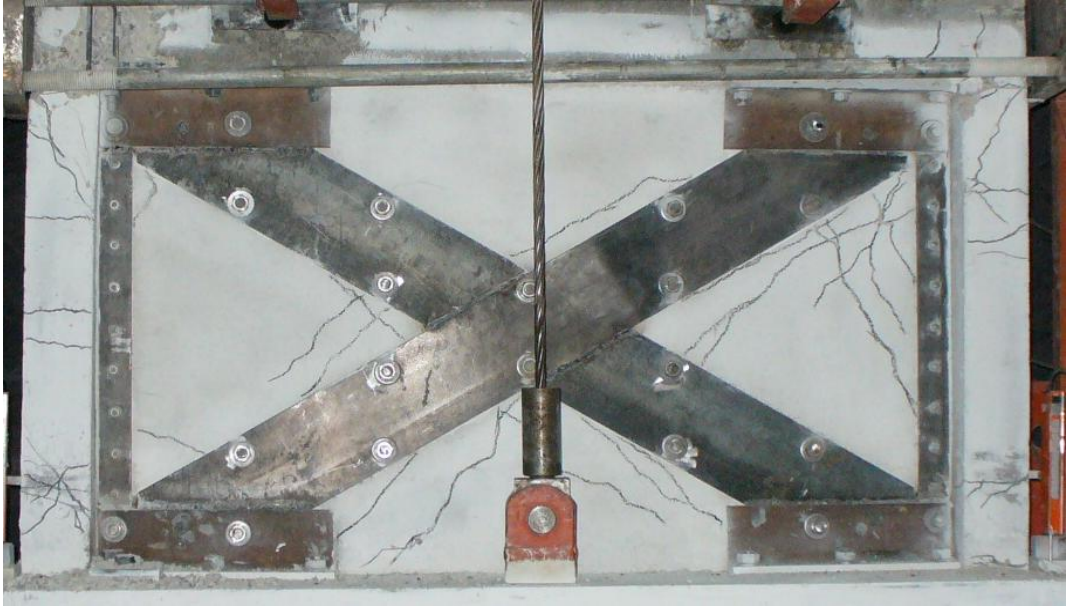
29. çevrim: 280 kN yük seviyesinde sol kolon-kiriş düğümünde gelişen eğik çatlak kirişin sol ucunda kesme kırılmasına sebep olmuştur. Sol kolon-kiriş birleşiminde kolon üst bölgesinin ileri çevrimin tamamlandığı 290 kN yük seviyesinde ezildiği gözlenmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde, panelde gelişen çok sayıda eğik çatlak ile beraber, sağ kolon üst bölgesinde kesme çatlağı meydana gelmiştir. Çelik şeritlerde bu yük seviyesine kadar ön veya arka yüzlerde burkulma gelişmemiştir.

30. çevrim: İleri yarı çevrim sonunda hedeflenen 300 kN'luk yükleme, kiriş sol ucunda gelişen kesme çatlağı sebebiyle, kiriş etriyesinin kopması ve bu gelişmeye bağlı olarak kiriş boyuna donatısının burkulması sebebiyle 296,2 kN yük seviyesinde sonlandırılmıştır. Ayrıca panel arka yüzünde çapraz çelik şerit burkulmuştur.

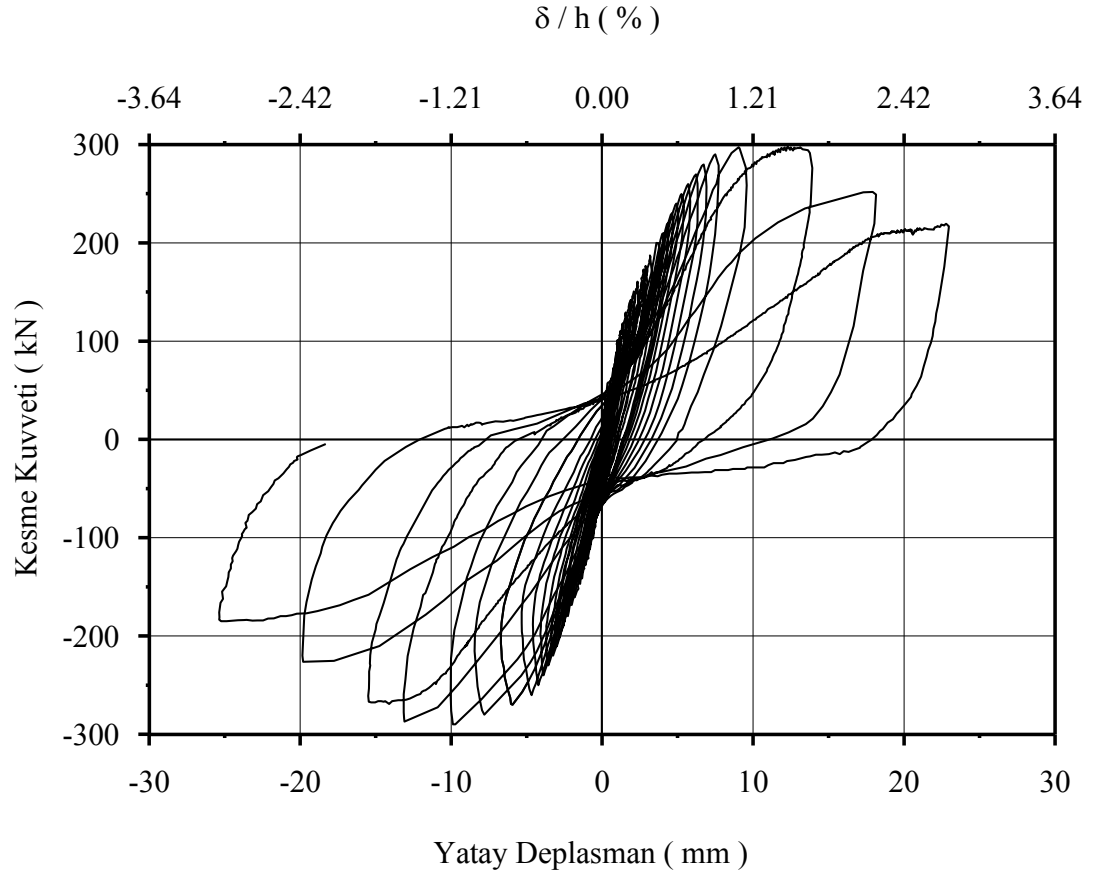
31. çevrim: Deneyde %1,45 ötelenme oranına ulaşılmıştır. Bir önceki çevrimin ileri yarı yüklemesinde taşınan yük seviyesini korumuştur. Çapraz şeritlerde hem arka hem de ön yüzde burkulma gözlenmiştir. Ancak, düşey şeritler henüz burkulmamıştır. Çevrimin geri yüklemesinde, sağ çapraz şeritte deney elemanının ön yüzünde burkulma gözlenmiştir. Kolonda alt ve üst uç bölge haricinde çatlak gelişimi olmamıştır.



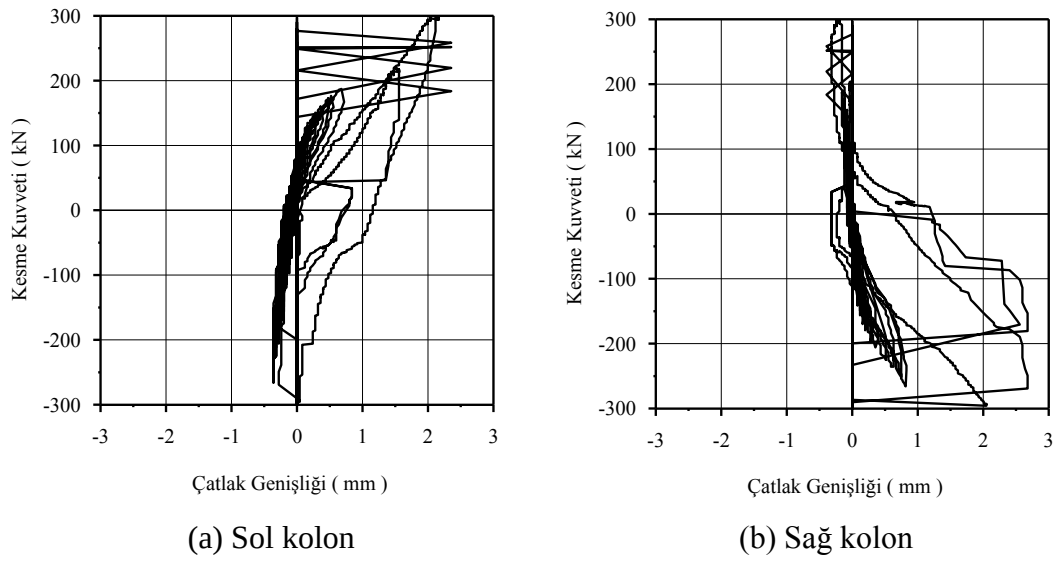
Resim 4.7. 31. çevrim sonu burkulma detayı



Resim 4.8. Deney sonrası Deney Elemanı-3'e ait görünüm



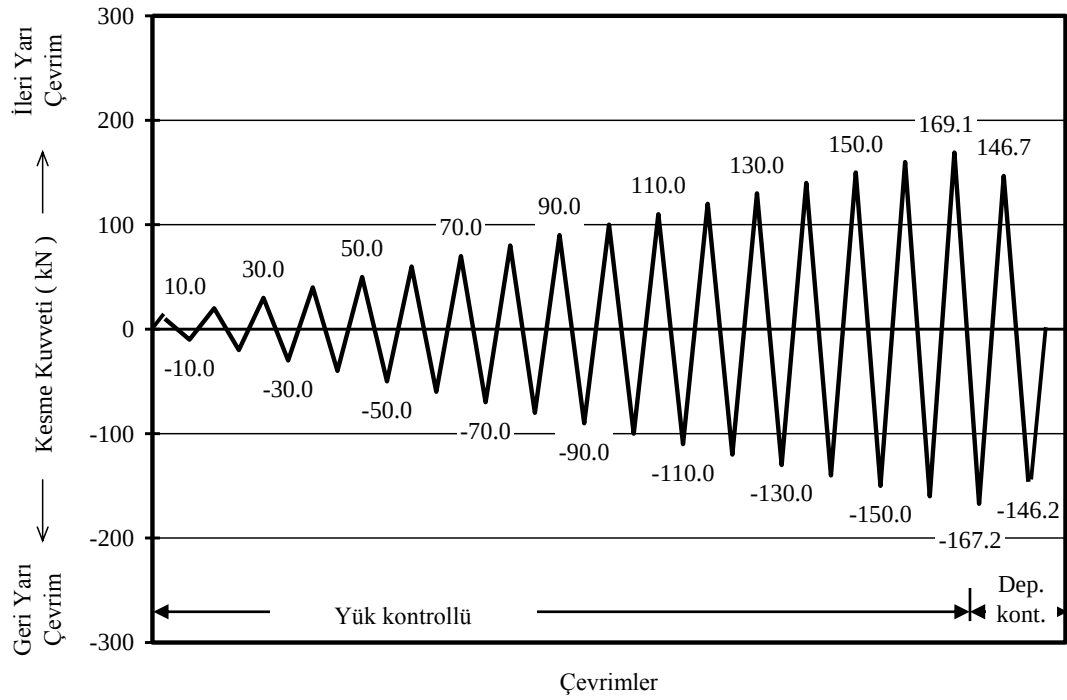
Şekil 4.9. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-3



Şekil 4.10. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-3

4.4. Deney Elemanı-4

Deney elemanı Şekil 4.11’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 18 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.12’de, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Deney Elemanı-4’e ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk dört çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

5. çevrim: İleri yarı çevrim sırasında 45 kN yük seviyesinde, sol kolon kenetlenme bölgesinde ilk eğik çatlak oluşmuştur. Bu çevrimin geri yüklemesinde herhangi bir çatlak gelişimi olmamıştır.

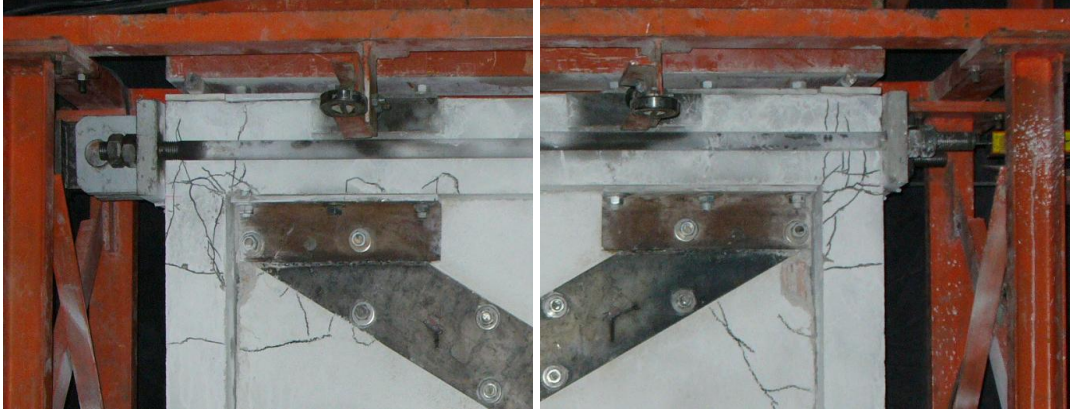
7. çevrim: Çevrimin ileri yarı yüklemede sol kolonda kenetlenme bölgesinde gelişen çatlak tüm kesiti sargılamıştır. Geri yarı yüklemede ise sağ kolonda ilk eğik çatlak gelişimi, sol kolonda gelişen ilk çatlakla simetrik olacak biçimde gözlenmiştir.

9. çevrim: 85 kN yük seviyesinde ileri yarı yüklemede sol kolon-ile panel arasında ilk ayrılma gözlenmiştir. Ayrılma çatlağı kolon yarı yüksekliğine kadar ulaşmıştır. Ancak, kolon ile temel kirişi arasında ayrılma gözlenmemiştir. Çevrimin geri yüklemesi tamamlandığında panel ile sağ kolon arasında simetrik bir ayrılma çatlağının oluşmuştur.

11. çevrim: İleri yüklemede 110 kN'luk yük seviyesinde, kirişte sol kolona en yakın ankrajı takip eden düşey çatlak meydana gelmiştir. Sol kolon-kiriş birleşiminde eğik çatlak sayısında artış meydana gelmiştir. Çevrim tamamlandığında sol kolon ve kirişin panelden tamamen ayrıldığı gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 110 kN yük seviyesinde sağ kolonun üst ucunda oluşan eğik çatlakların tüm kolon kesitini sargılamıştır. Kolona en yakın ankrajda düşey çatlak oluşumu gözlenmiştir. Sağ kolonun panelden tamamen ayrılmıştır.

14. çevrim: Çevrimin ileri yarı yüklemesi sırasında panelde ilk eğik çatlak gelişmiştir. Panelin sol üst köşesinde ezilme oluşmuştur. Sol kolon-kiriş birleşimde de ezilme belirtisi gözlenmiştir. Geri yüklemede panelde belirgin bir çatlak oluşmamıştır.

15. çevrim: 145 kN yük seviyesinde kiriş sağ ucundaki ankrajların zorlandıklarını gösteren düşey çatlaklar kiriş ön yüzünde belirgin bir biçimde gözlenmiştir. Çevrimin tamamlanmasıyla 150 kN yük seviyesinde sol çapraz şeritte burkulma meydana gelmiştir. Çevrimin geri yarı yüklemesinde sağ diyagonal şeritte burkulma olmamıştır. Ancak, panelde oluşan eğik çatlak sayısında artış meydana gelmiş, panelin sağ üst köşesinde sıva katmanı ezilmiştir.

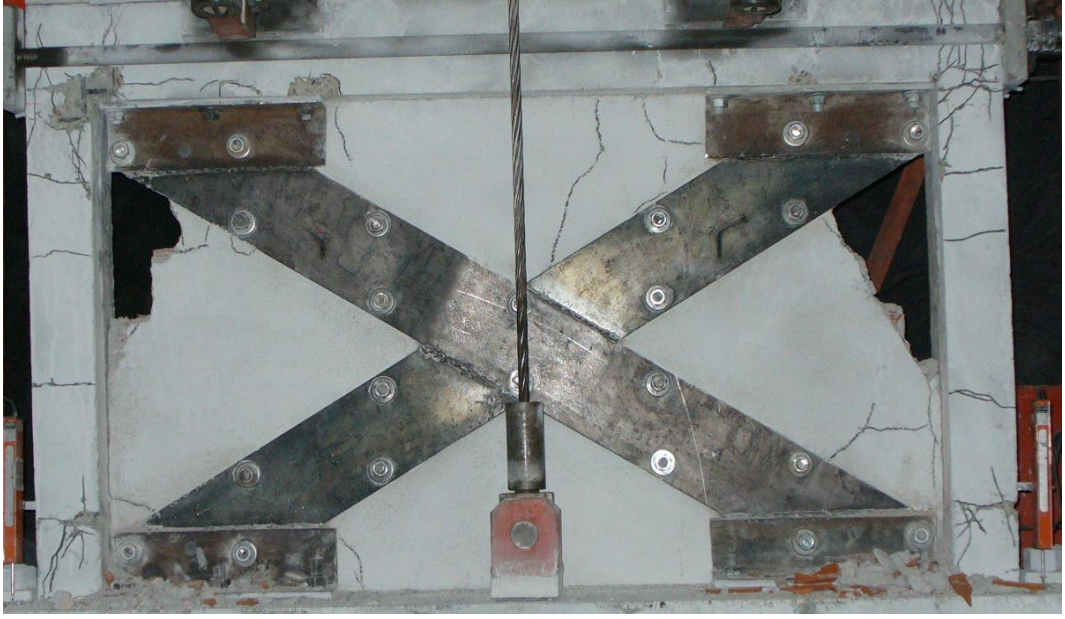


Resim 4.9. 14. çevrim sonrası kiriş uç hasarı

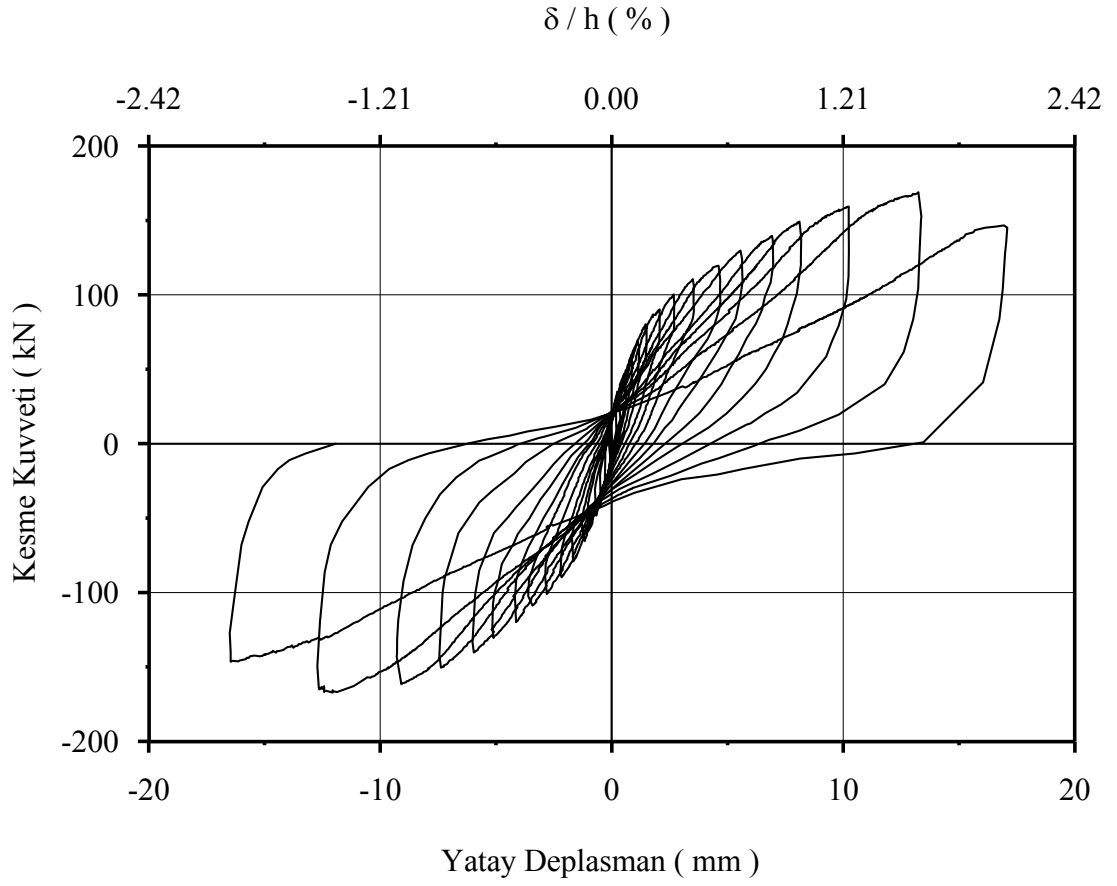


Resim 4.10. 15. ileri yarı çevrim sonrası arka yüzde burkulma detayı

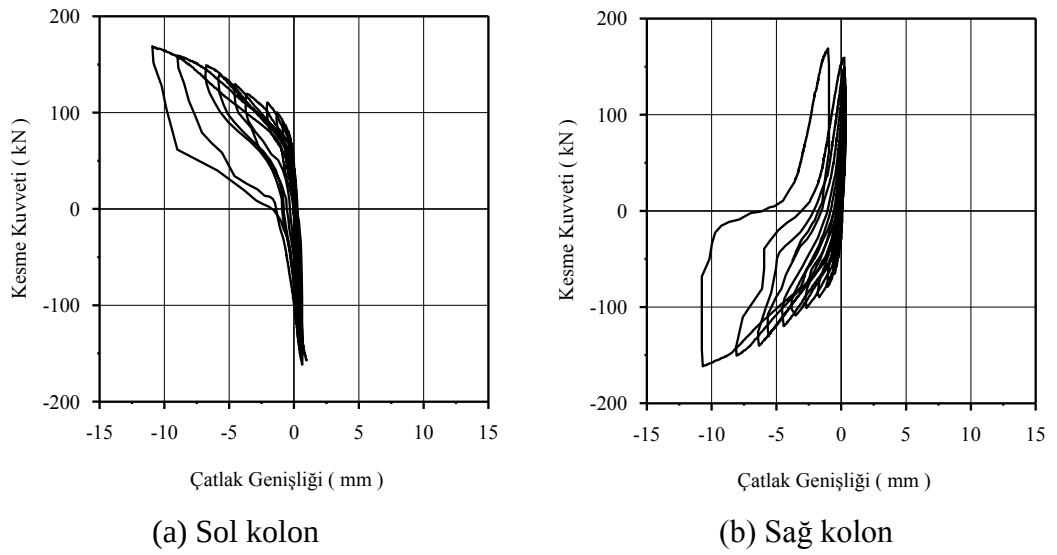
17. çevrim: İleri yarı yükleme sırasında sol kolon-kiriş düğümünde oluşan ezilme ve çatlaklar sonucu beton örtüde kayıplar meydana gelmiştir. Çapraz şeritte meydana gelen burkulma daha da belirgin bir hal almıştır. Hasar panelde yoğunlaşmış, bu çevrimde çerçevede yeni çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Geri çevrimde sağ çapraz şeridin burkulmuş, şeridin burkulması ile panelde çapraz doğrultuda oluşan çatlaklar genişlemiştir. İleri çevrim sırasında kiriş sol ucunda gelişen ezilme, bu yükleme sırasında ankrajlarda oluşan eksenel çatlaklarla birleşmiştir.



Resim 4.11. Deney sonrası Deney Elemanı-4'e ait görünüm.



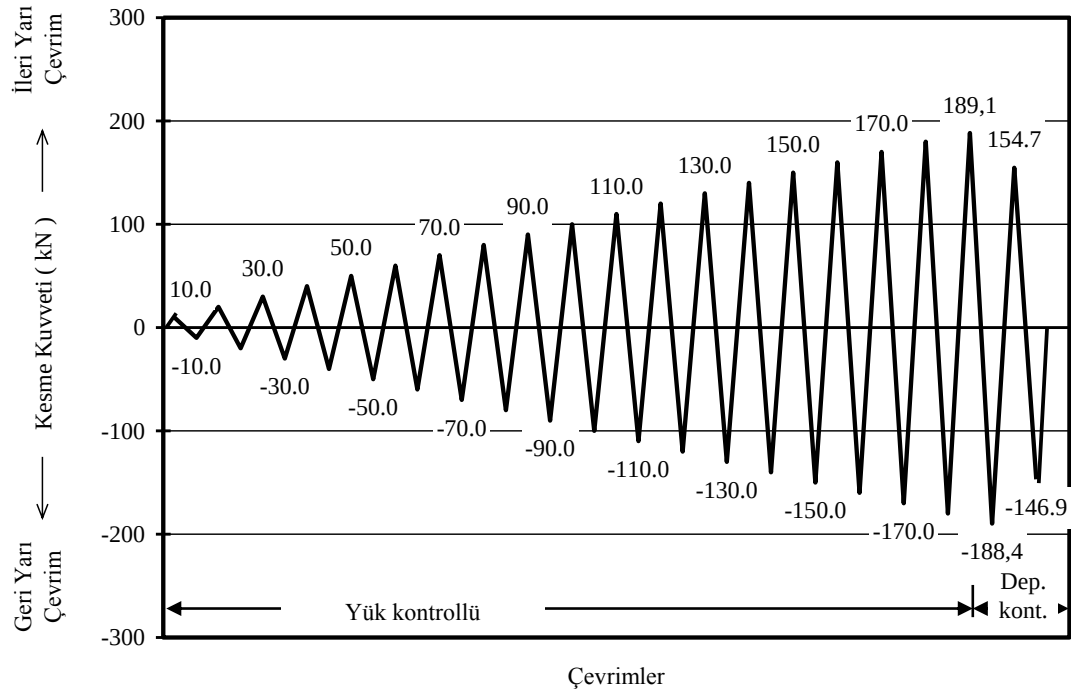
Şekil 4.12. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-4



Şekil 4.13. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-4

4.5. Deney Elemanı-5

Deney elemanı Şekil 4.14’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 20 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.15’de, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.14. Deney Elemanı-5’e ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk altı çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

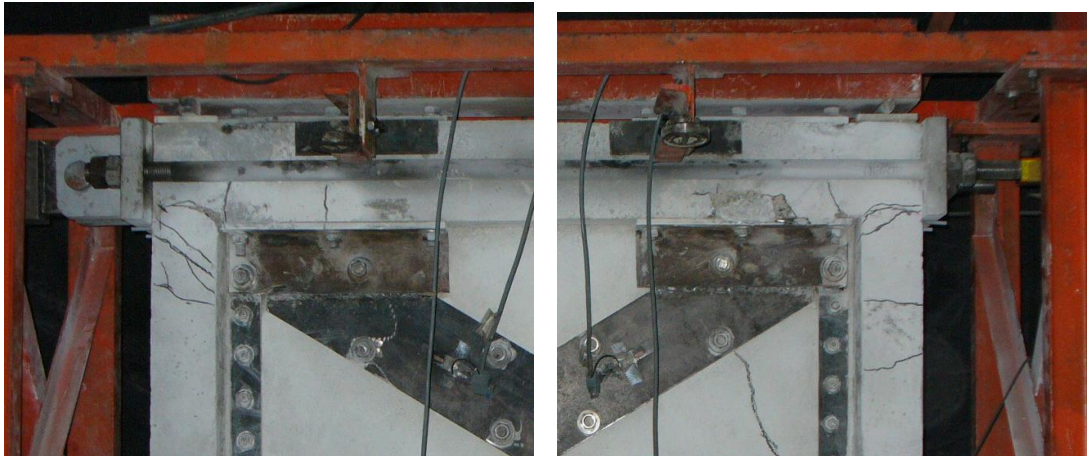
7. çevrim: İleri yarı yüklemede sol kolonun kenetlenme bölgesinde ilk eğik çatlak gelişmiştir. Bu çevrimin geri yüklemesinde simetrik biçimde 70 kN yük seviyesinde sağ kolonun kenetlenme bölgesinde ayrılma çatlağı meydana gelmiştir.

9. çevrim: Çevrimin ileri yüklemesinde sol kolonun alt ucunda temel kirişi ile birleştiği kesitte kılcal düzeyde ilk eğik çatlak gözlenmiştir. Geri yarı yüklemede, her iki kolonun panel ile arasında, kolon yarı yüksekliği boyunca ayrılmıştır.

10. çevrim: 95 kN yük seviyesinde ileri yarı yüklemede sol kolon üst ucunda düğüme doğru gelişen ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. Çevrimin geri yüklemesi tamamlandığında sağ kolonda, kolon-kiriş birleşiminde simetrik bir eğilme çatlağı oluşmuştur.

13. çevrim: İleri yüklemede 125 kN'luk yük seviyesinde, kirişte sol uç bölgeye en yakın ankraj doğrultusunda kılcal düzeydeki düşey çatlak oluşmuştur. Sol kolon-kiriş birleşiminde eğik çatlak sayısında artış meydana gelmiştir. Çevrim tamamlandığında kirişin ve sol kolonun, panelden tamamen ayrıldığı görülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 130 kN yük seviyesinde sağ kolonda iki eğik çatlak, orta bölgede oluşmuştur.

16. çevrim: Çevrimin ileri yarı yüklemesi sırasında sol kolonda oluşan eğik çatlak sayısında artış meydana gelmiştir. Kiriş sağ ucundaki ankrajlarda düşey çatlakların geliştiği görülmüştür. Panelin sol üst köşesinde ezilme oluşmuştur. Sol kolon-kiriş birleşimde de ezilme başlangıcı görülmüştür. Geri yüklemede panelde belirgin bir çatlak gelişimi olmamıştır.

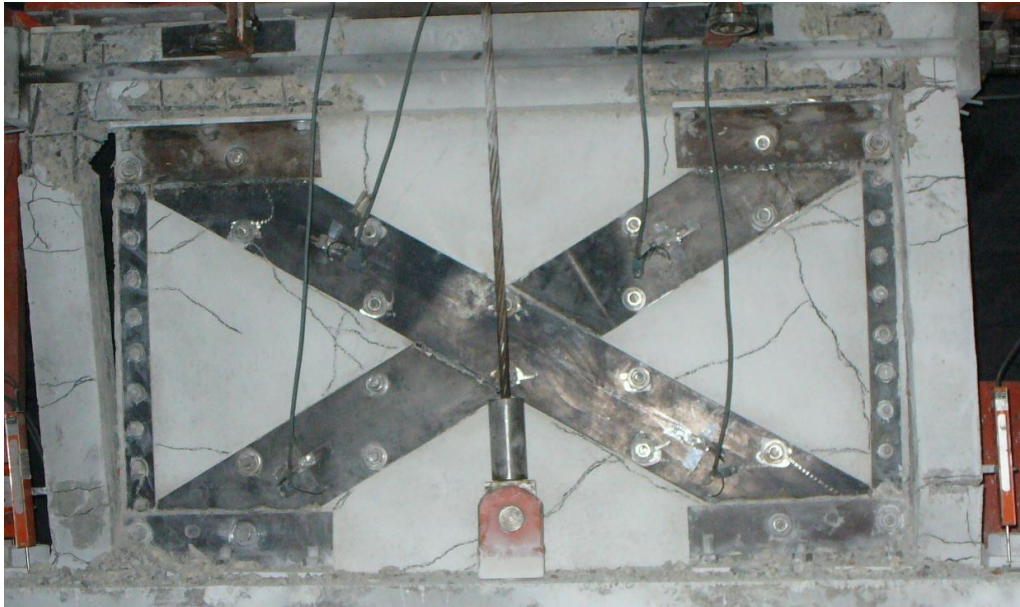


Resim 4.12. 16. çevrim sonu kolon-kiriş birleşim hasarı

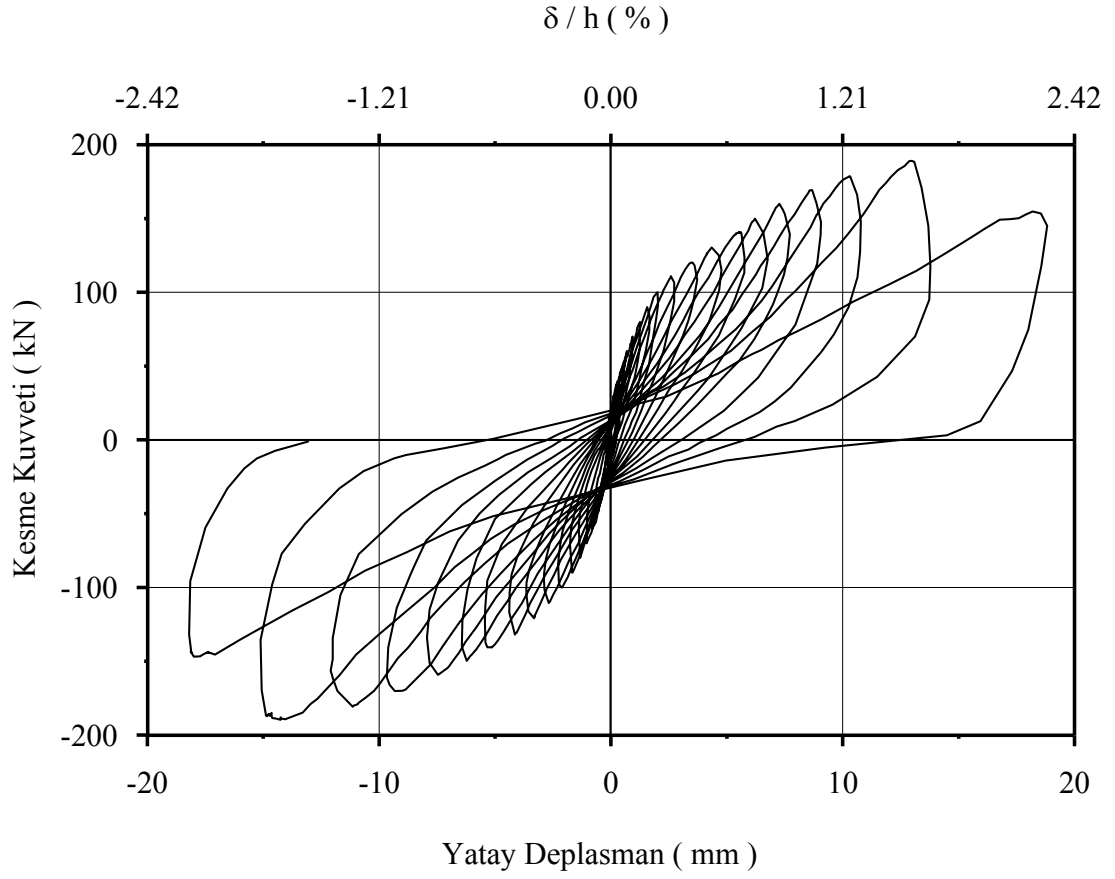
17. çevrim: 145 kN yük seviyesinde kiriş sağ ucundaki ankrajların zorlandığını gösteren düşey çatlaklar kiriş ön yüzünde belirgin bir biçimde gözlenmiştir. Çevrimin tamamlanmasıyla 150 kN yük seviyesinde sol çapraz şerit burkulmuştur. Geri yükleme sırasında sağ çapraz şerit burkulmuştur. Ancak, panelde oluşan eğik çatlak sayısında artış gözlenmiştir.

18. çevrim: İleri yarı yükleme sırasında önemli bir gözlem olmamıştır. Geri çevrimde sağ alt köşede eğik çatlaklar oluşmuştur.

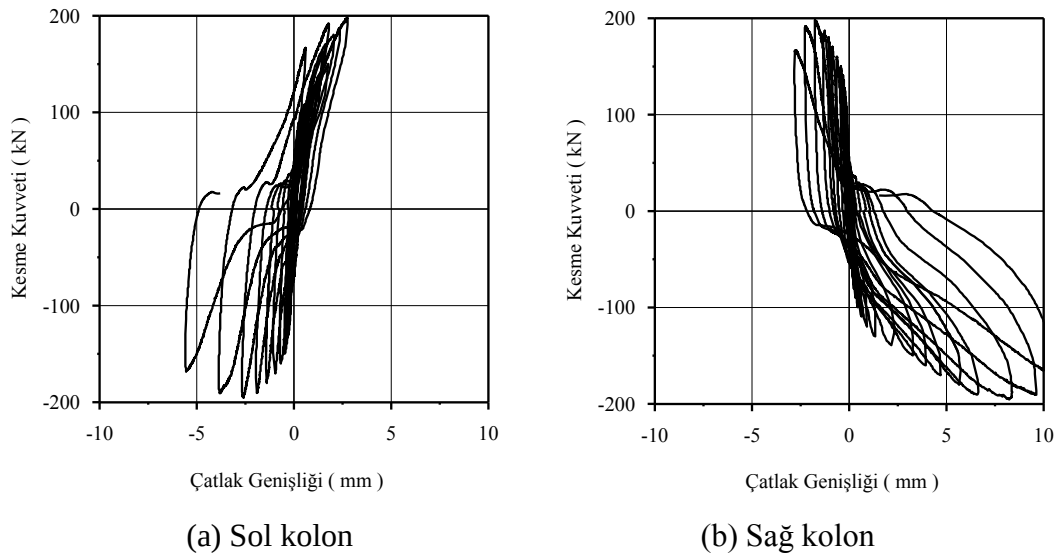
19. çevrim: İleri yükleme sonunda ulaşılan 188,4 kN'luk yük altında sol çapraz şerit burkulmuş, panelde sol üst köşede ezilen tuğla ve sıva dökülerek boşluk oluşturmuştur. Şeritte burkulmanın meydana gelmesi ile birlikte çapraz doğrultuda yeni çatlaklar oluşmuştur. Geri çevrim sırasında deney elemanı simetrik davranış sergilemiştir.



Resim 4.13. Deney sonunda Deney Elemanı-5'e ait görünüm



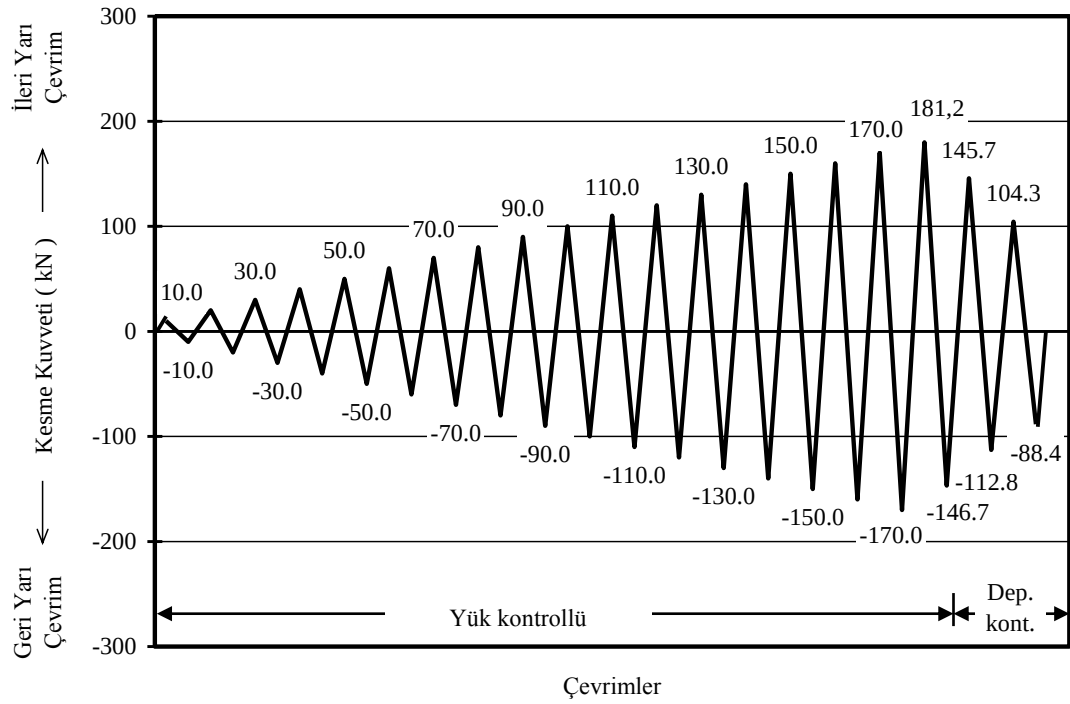
Şekil 4.15. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-5



Şekil 4.16. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-5

4.6. Deney Elemanı-6

Deney elemanı Şekil 4.17’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 20 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.18’de, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.17. Deney Elemanı-6’ya ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk yedi çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

8. çevrim: İleri yarı yüklemede sol kolonun alt ucunda temel kirişi ile birleştiği kesitte kılcal düzeyde ilk eğilme çatlağı gözlenmiştir. Bu çevrimin geri yüklemesinde simetrik biçimde 75 kN yük seviyesinde sağ kolonun kenetlenme bölgesinde ayrılma çatlağı oluşmuştur.

9. çevrim: Çevrimin ileri yüklemesinde ilk eğik çatlak sol kolonun kenetlenme bölgesinde meydana gelmiştir. Geri yarı yüklemde, sağ kolon alt ucunda 150 mm'lik bant içerisinde oluşan eğilme çatlağı sayında artış olmuştur.

10. çevrim: İleri yarı yüklemde sol kolon alt ucunda oluşan çatlakların sayısında artış olmuş, genişleyen çatlakların kesiti çevrelediği görülmüştür. Geri çevrimde sağ kolonda kolon ile temel kirişi birleşiminde simetrik bir çatlak oluşmuştur.

13. çevrim: İleri yüklemde 125 kN'luk yük seviyesinde, sağ kolon alt ucunda beton kabuğunda ezilme meydana gelmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde aynı ezilme sol kolon alt ucunda 130 kN yük altında oluşmuştur.



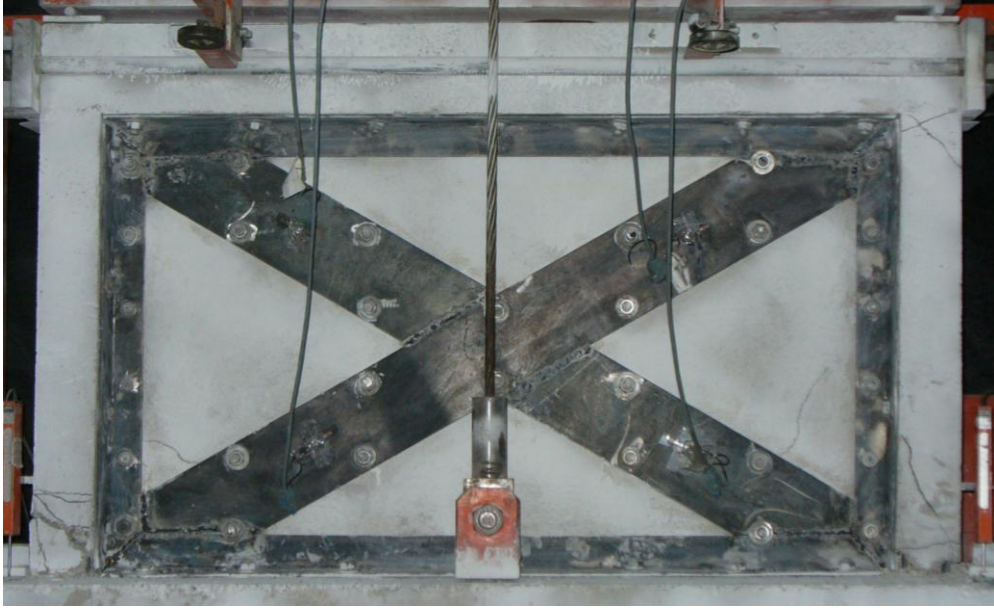
Resim 4.14. 13. çevrim sonrası meydana gelen kolon alt ucu ezilme detayı

15. çevrim: 145 kN'luk ileri yükleme aşamasında panel, temel kirişi üzerinden tamamen ayrılmıştır. Panelin sol alt köşesinde düşey ve yatay L profillerin birleştiği kaynak kesitinde zorlanma belirtisi gözlenmiştir. Geri yüklemde panelde ve çerçevede belirgin bir gelişim meydana gelmemiştir.

17. çevrim: İleri yüklemde panelin alt kenarında, temel kirişine bağlanan yatay L-profil ortasından bükülmüştür. Panelin sağ alt köşesindeki kaynaklı birleşimde zorlanma belirtisi gözlenmiştir. Geri çevrimde panelde ilk eğik çatlak meydana

gelmiştir. Bu yük seviyesine kadar kolon üst uçlarında çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

18. çevrim: İleri yarı yükleme sırasında sağ kolon alt ucundaki kaynağın koptuğu parçaların bütünlüğünün kalmadığı gözlenmiştir. Bu aşamada basınç kuvveti altındaki sol çapraz burkulmuştur. Panelde eğik çatlak sayısında hızlı bir artış meydana gelmiştir. Panelde oluşan çatlaklarla birlikte sağ kolon alt ucunda da kesme çatlağı gelişmiştir. Geri çevrimde sağ kolon üst ucunda ilk eğilme çatlağı gözlenmiştir.

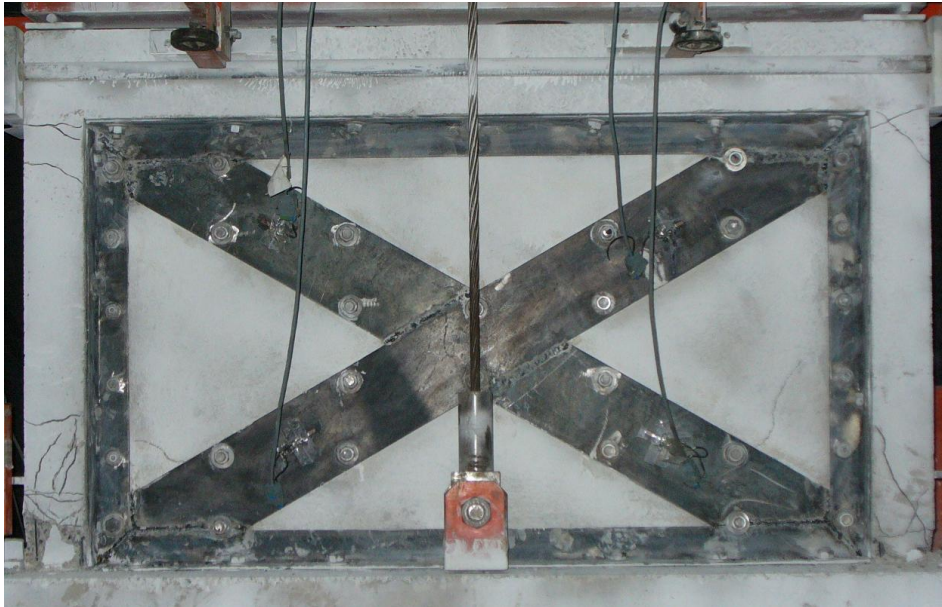


Resim 4.15. 18. çevrim sonunda Deney Elemanı-6'ya ait genel görünüm

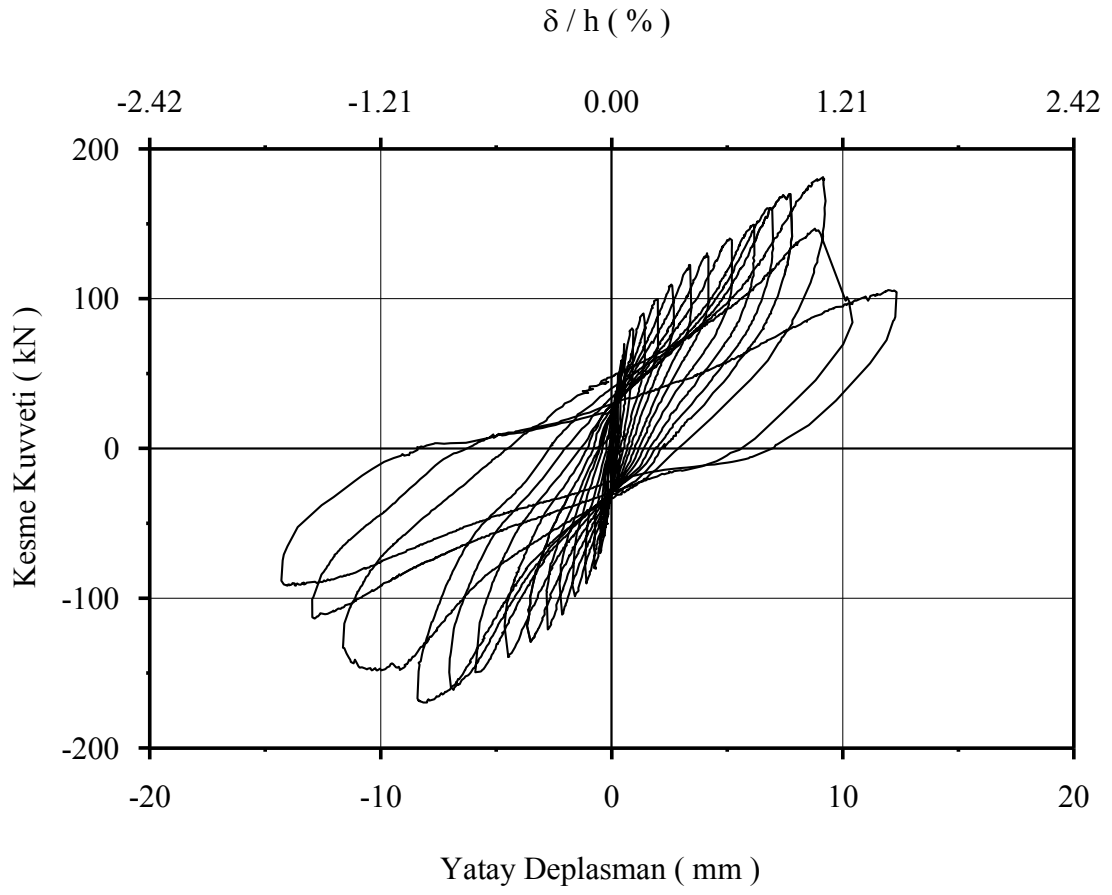
19. çevrim: İleri yükleme sonunda hedeflenen 190 kN'luk yük seviyesine, panelin sol alt ucundaki kaynaklı birleşimin 145,7 kN da aniden kopmasıyla ulaşılamamıştır. Panelin her iki alt köşesindeki kaynakların kopmasıyla deney elemanı bu aşamadan sonra yük tutamaz hale gelmiştir.



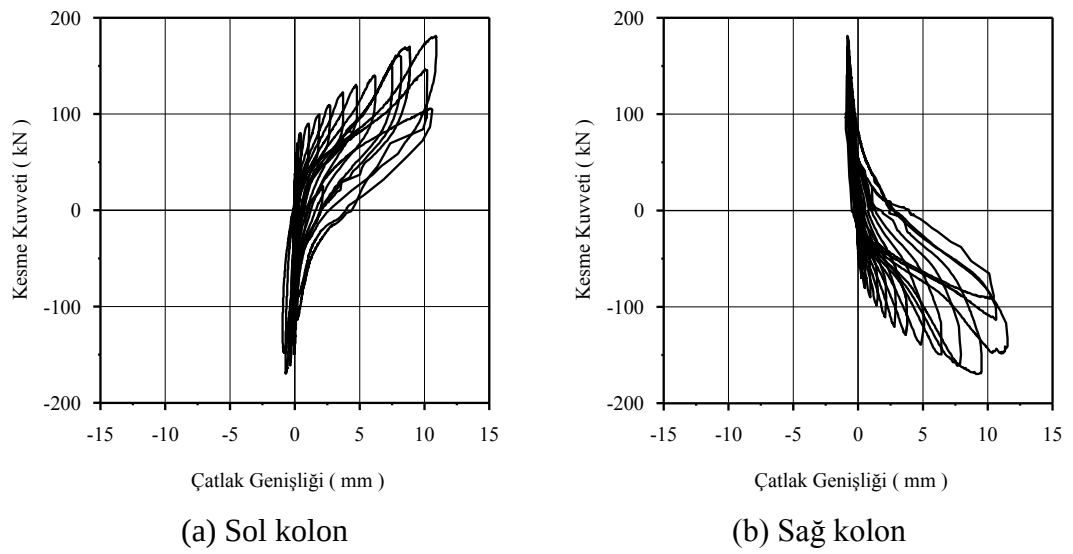
Resim 4.16. 19. çevrim sonrası burkulma detayı.



Resim 4.17. 20. çevrim sonunda Deney Elemanı-6'ya ait genel görünüm



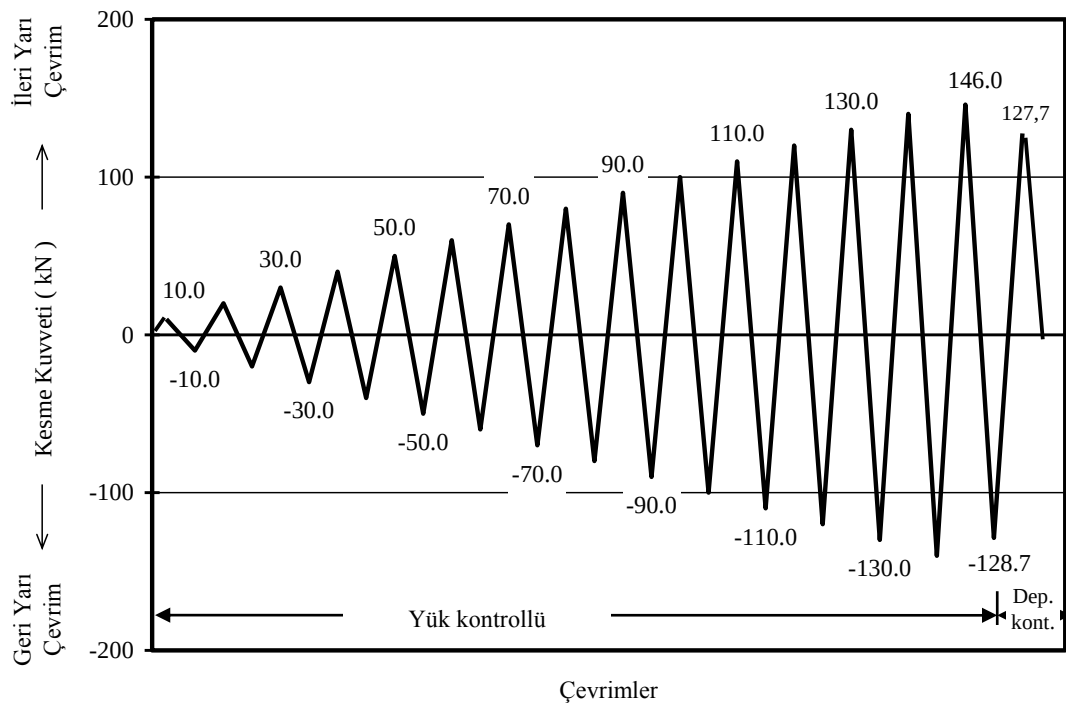
Şekil 4.18. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-6



Şekil 4.19. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-6

4.7. Deney Elemanı-7

Deney elemanı Şekil 4.20’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 16 ileri, 15 geri yarı yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.21’de, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Deney Elemanı-7’ye ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk dört çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

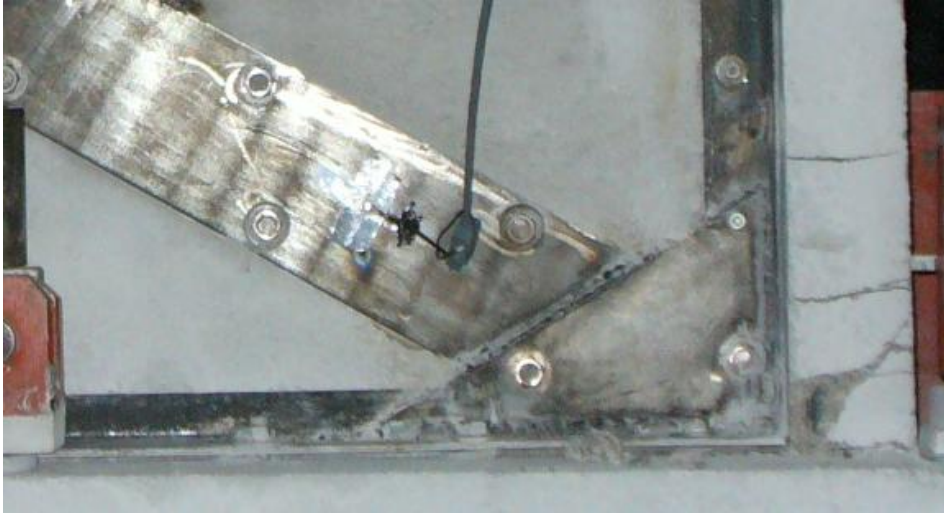
5. çevrim: İleri yarı yüklemede sol kolon-rijit temel birleşiminde ilk çatlak meydana gelmiştir. İleri yarı yüklemenin tamamlandığı 50 kN yük seviyesinde kolonlarda başka bir çatlak gelişimi olmamıştır. Çevrimin geri yarı yüklemesi sırasında sağ kolon alt ucunda, sol kolonda görülen çatlığa simetrik bir çatlak meydana gelmiştir.

6. çevrim: İleri yarı yüklemede sol kolonda, kenetlenme bölgesinin içerisinde kılcal düzeyde kesme çatlağı oluşmuştur. İleri yarı yükleme sonunda, ilk çatlağın 50 mm altında diğer bir kesme çatlağı meydana gelmiştir. Çevrimin geri yüklemesi sonunda, ileri yarı yükleme ile benzer çatlak oluşumu gözlenmiştir. Geri yarı yüklemede ayrıca kolon alt ucundan başlayan 45° 'lik eğik bir çatlak kolon kesitinde ilerlemiştir.

9. çevrim: Bu çevrime kadar önemli bir gözlemin yapılmadığı deney elemanında, 85 kN yük seviyesinde sağ kolon alt ucunda kabuk betonunda dökülme meydana gelmiştir. İleri yarı yüklemenin sonunda, kolonun alt ucundan yaklaşık olarak 300 mm üstte yeni bir kesme çatlağı daha oluşmuştur. Geri yükleme sonrasında sol kolonda kabuk betonunda dökülme olmamıştır. Sol alt köşedeki bayrak levhasının bitiminden başlayan 45° 'lik eğik bir çatlak kolon orta yüksekliğinde gözlenmiştir.

13. çevrim: ileri yarı yükleme sonunda, sağ kolonun alt ucunda eğik çatlak sayısında artış meydana gelmiştir. Sağ kolon alt ucunda kabuk betonu tümüyle dökülmüştür. İleri yarı yükleme sonunda, panelde ve kolon-kiriş düğümünde 130 kN yatay yük etkisi altında henüz bir hasar gözlenmemiştir. Sol kolon alt ucunda çok sayıda eğik çatlak oluşmuştur. Sol kolon alt ucundaki hasar, sağ kolona göre geride kalmıştır. Çevrim sonunda her iki kolonda da kolon-kiriş düğümünde çatlak gelişi olmamıştır.

14. çevrim: İleri yarı yükleme sırasında tuğla dolgu duvarın alt kenarındaki boyunca rijit temele ankre edilen L profilin, temel üzerinden kesme deplasmanı yaptığı gözlenmiştir. Kolon veya panelde, çevrim sonuna kadar bu sebeple hasar gelişmemiştir. L profili betonarme çerçeveye birleştiren çelik çubukların, yatay kuvvet etkisi ile gömüldükleri beton içerisinden çıktıkları gözlenmiştir. Geri yarı yüklemede de benzer davranış gözlenmiştir. Kolon alt uçlarındaki ezilme artmıştır.



Resim 4.18. 9. çevrim sonunda sağ kolon alt ucunda çatlak gelişimi

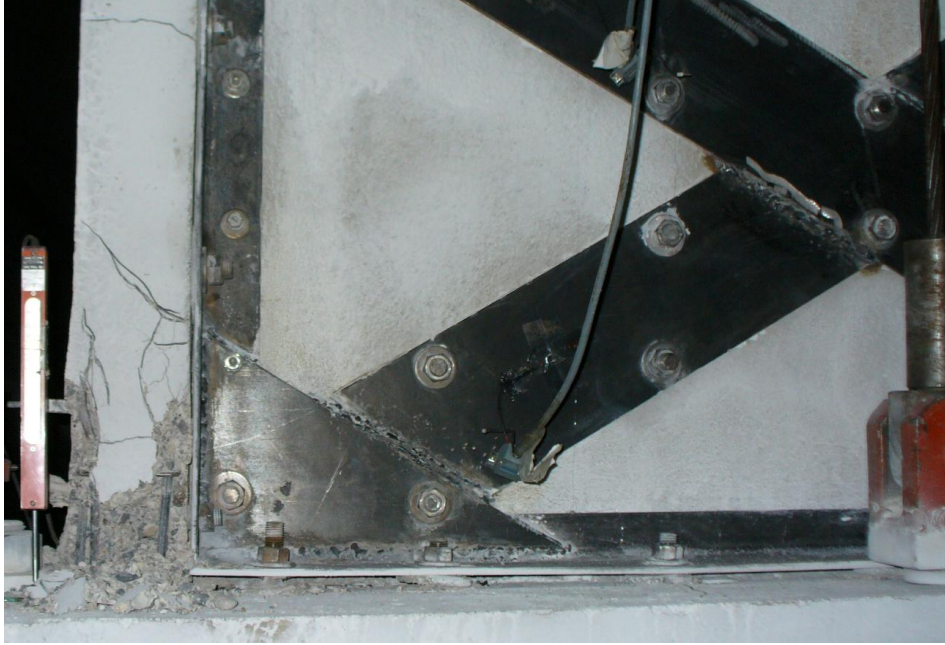


Resim 4.19. 13. çevrim sonunda sağ kolon-temel birleşiminde gelişim gösteren hasar

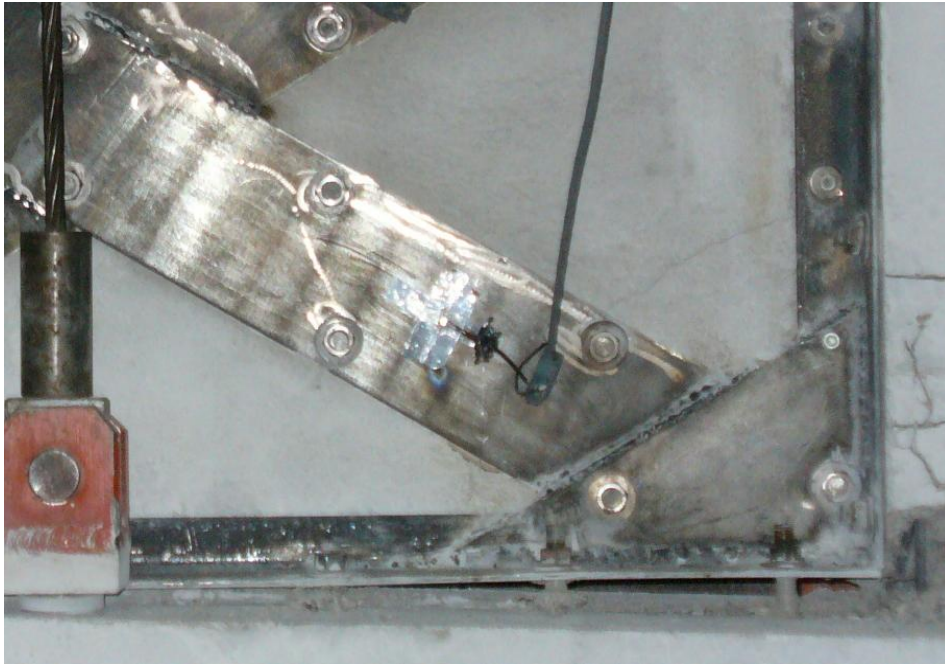
15. çevrim: Deney elemanı sıyrılan çelik çubuklarında dayanımları ile bu çevrimde yatay yük kapasitesinde artış sergilemiştir. Deney elemanı 146 kN luk yatay yük altında taşıma gücüne ulaşmıştır. Deney elemanı geri yarı yüklemede de 128 kN yük taşıyabilmiştir.

16. çevrim: Deney elemanında temel içerisine gömülen çelik çubuklar yeterli dayanımı gösterememiş, deney sisteminin kararlılığını olumsuz etkilemiştir.

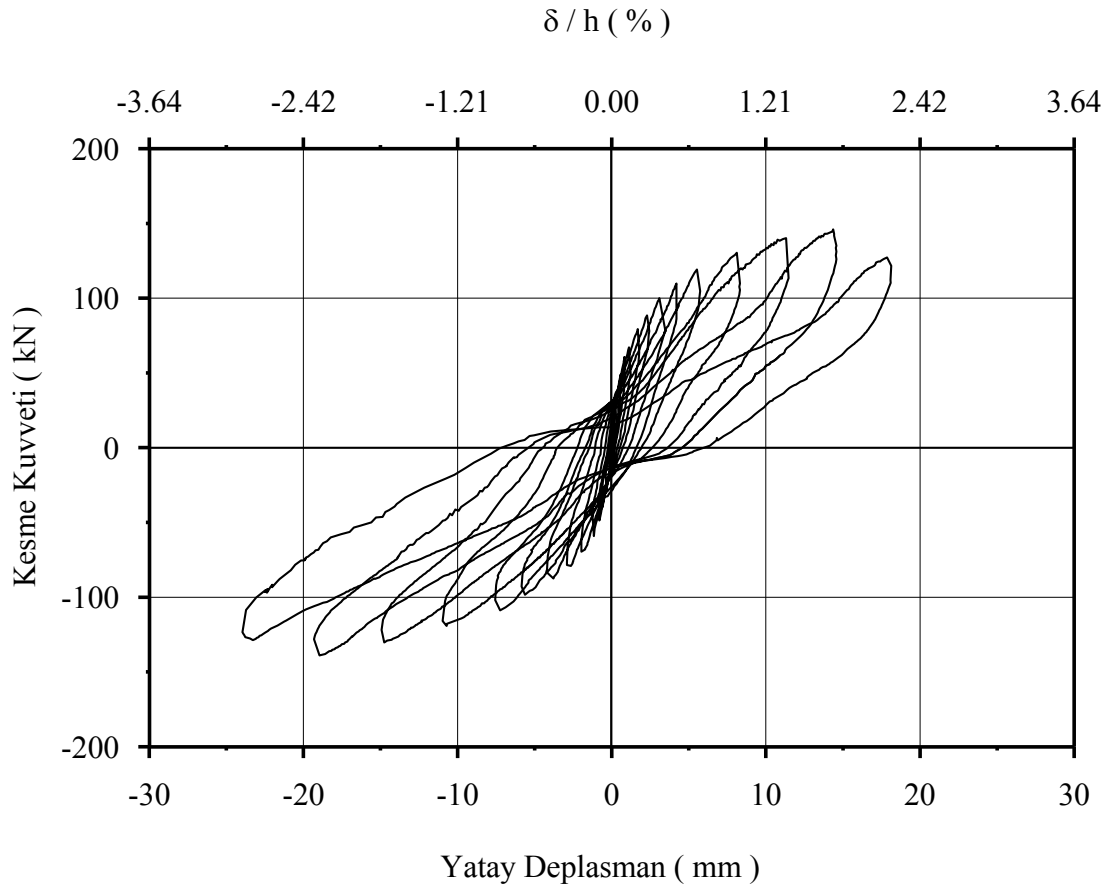
Hedeflemen öteleme oranına ulaşılmadan çevrime son verilmiş, deney elemanına çevrimin geri yarı yüklemesi uygulanmamıştır.



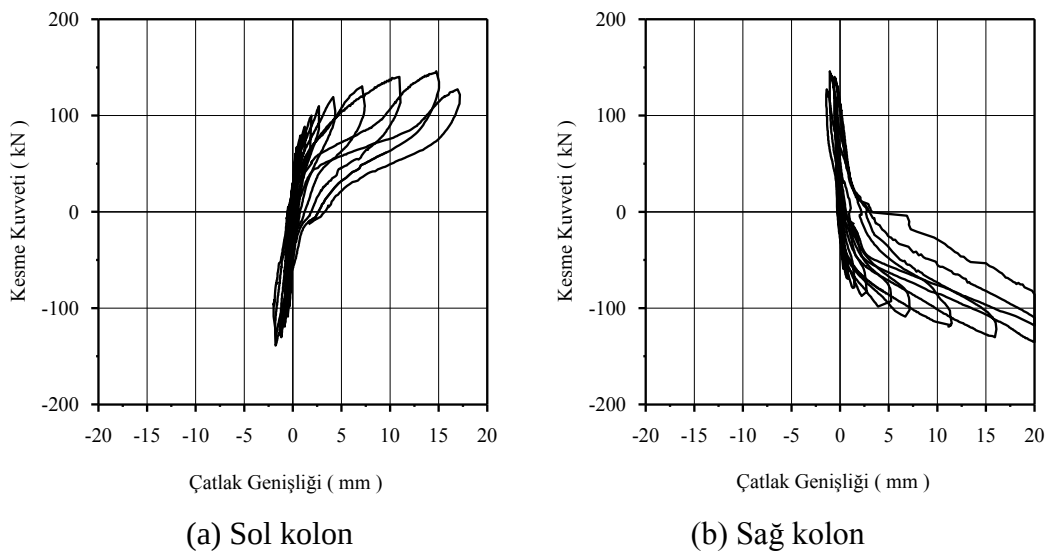
Resim 4.20. 15. ileri yük çevrimi sonunda sol kolon alt uç detayı



Resim 4.21. 15. geri yük çevrimi sonunda L profili temele bağlayan çelik çubuklarda gerçekleşen aderans kaybı detayı



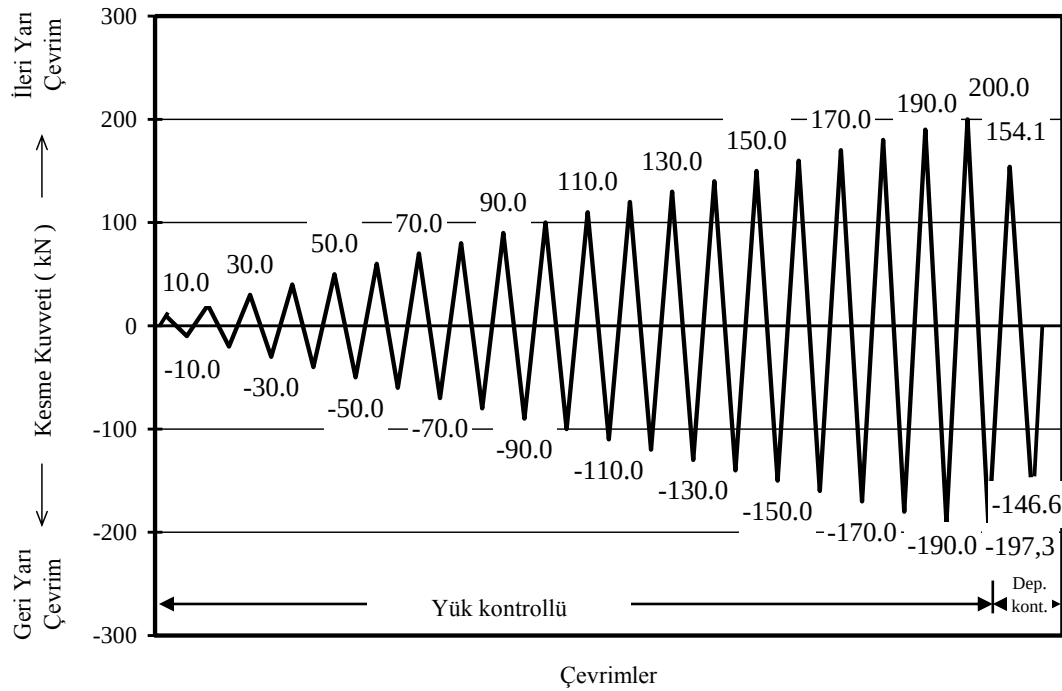
Şekil 4.21. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-7



Şekil 4.22. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-7

4.8. Deney Elemanı-8

Deney elemanı Şekil 4.23’de verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 21 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.24’de, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.23. Deney Elemanı-8’e ait yük-çevrim grafiği

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

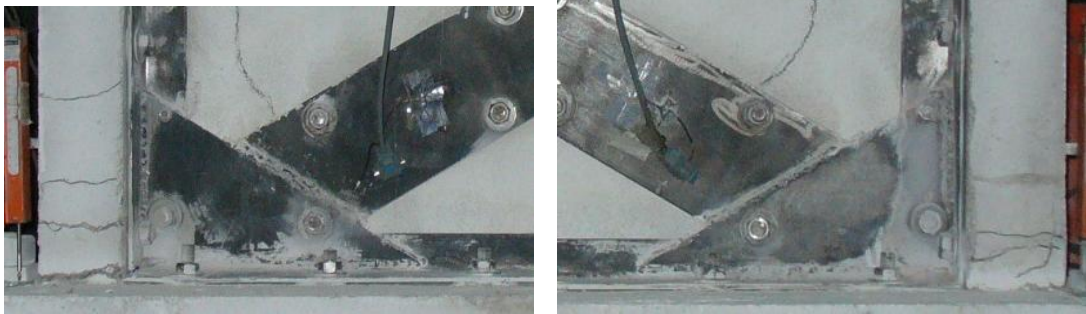
Deneyin ilk yedi çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

8. çevrim: İleri yarı yüklemede sol kolonun kenetlenme bölgesinin yaklaşık 100 mm üzerinde kılcal düzeyde ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. Bu çevrimin geri yüklemesinde çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

9. çevrim: Çevrimin ileri yüklemesinde sol kolonun kenetlenme bölgesinde ikinci eğilme çatlakları oluşmuştur. Geri yarı yüklemde, sağ kolon alt ucunda temel kirişi ile bileştiği kesitte ilk eğilme çatlakları oluşmuştur.

12. çevrim: İleri yarı yüklemde 115 kN yük seviyesinde panelde ilk eğik çatlak oluşmuştur. Geri çevrimde temel kirişi ile tuğla duvarın tamamen birbirinden ayrıldığı gözlenmiştir.

16. çevrim: 155 kN ileri yükleme aşamasında panelin sol alt köşesindeki bayrak levhasının zorlanmış, birleşimi sağlayan kaynaklarda yırtılma oluşmuştur. Panelde ikinci eğik çatlak oluşmuştur. Sağ kolon alt ucunda ezilme başlangıcı ve kabuk betonunda dökülme meydana gelmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde sol kolon alt ucundaki ezilme belirginleşmiştir. Bu yük seviyesine kadar her iki kolonun kolon-kiriş düğümünde de çatlak gelişimi gözlenmemiştir.



Resim 4.22. 16. çevrim sonunda sol ve sağ kolon alt ucundaki hasar

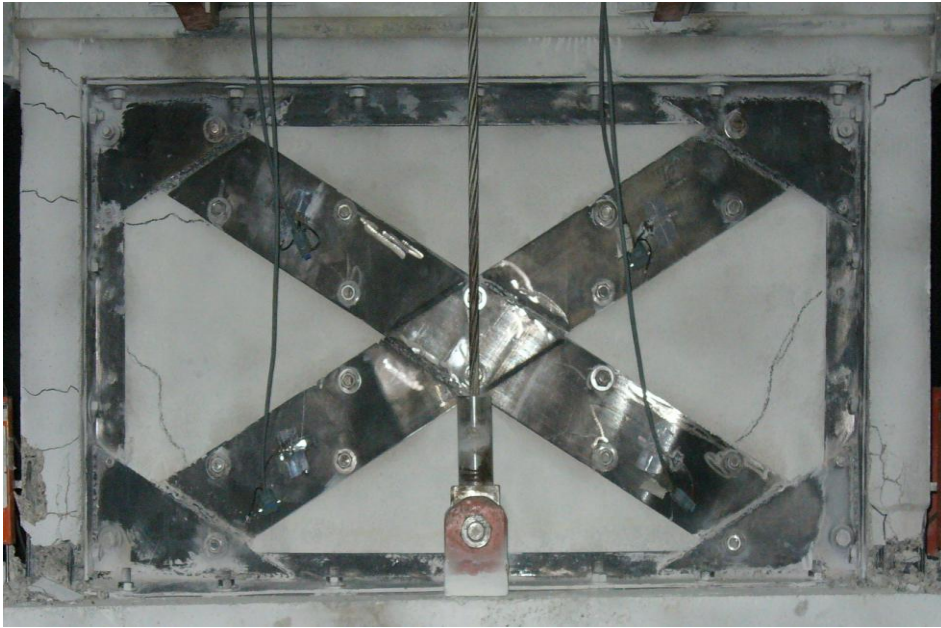
18. çevrim: İleri yarı yüklemde, 175 kN yatay yük etkisi altında sağ kolon alt ucundaki kabuk betonu tamamen dökülmüştür. 180 kN da çevrim tamamlandığında ise sol kolon üst ucunda ilk eğik çatlak oluşmuştur. Geri yüklemde simetrik davranış meydana gelmiştir.

20. çevrim: Çevrimin ileri yüklemesinin sonunda sol diyagonal şerit aniden burkulmuştur. Sağ kolon alt ucundaki kolon boyuna donatısında, çelik elemandaki deformasyonla eş zamanlı biçimde burkulma oluşmuştur. Geri yüklemde benzer

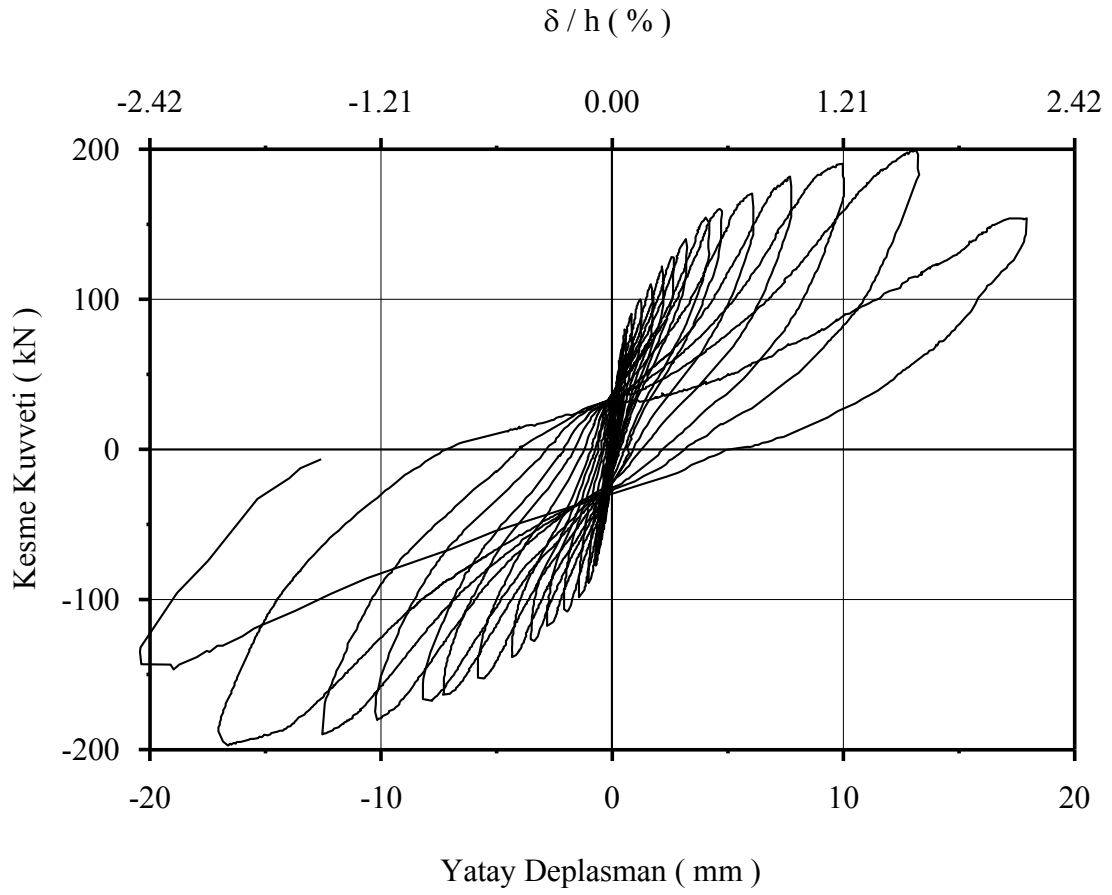
biçimde sol diyagonal şerit burkulmuştur. Her iki yükleme tamamlandığında panelde belirgin bir çatlak oluşmamıştır.



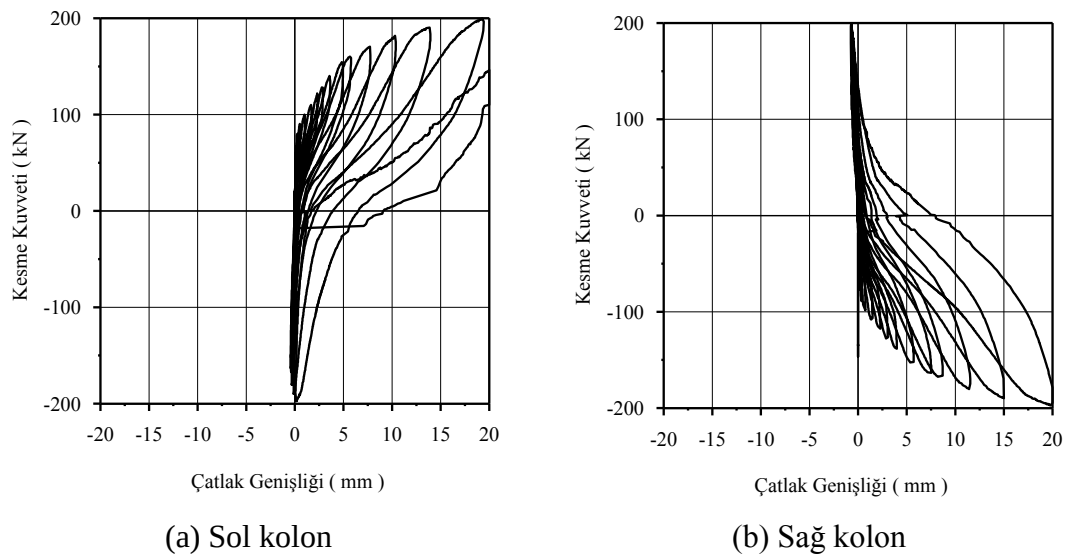
Resim 4.23. 20. çevrim ileri yarı yüklemesi sonunda sol diyagonal şeritte meydana gelen burkulma detayı



Resim 4.24. Deney sonunda Deney Elemanı-8'e ait genel görünüm



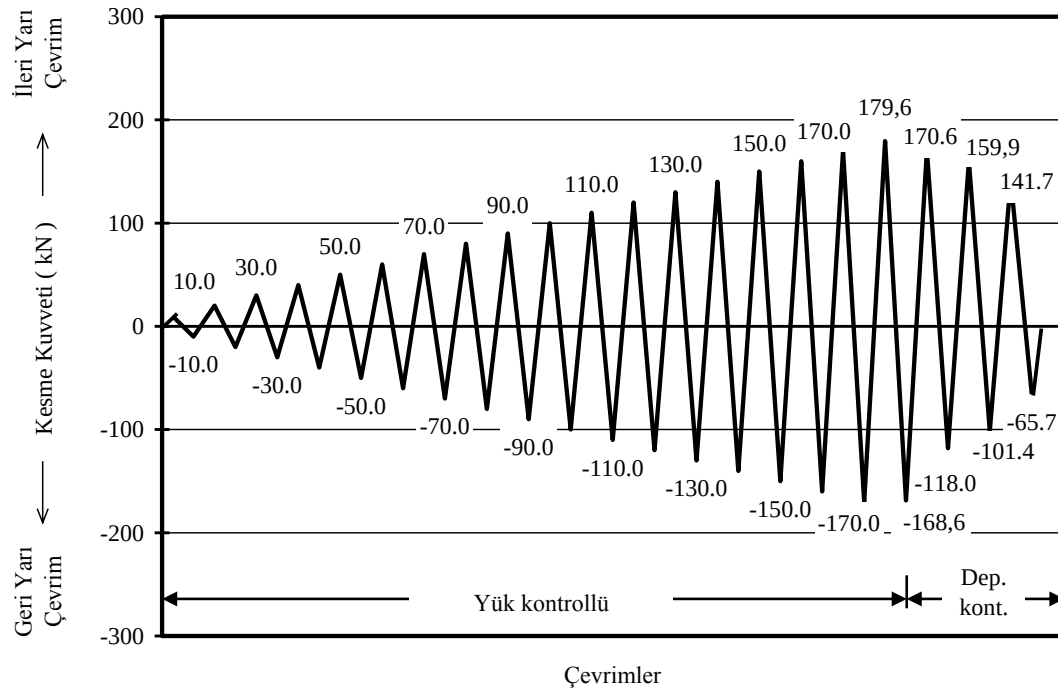
Şekil 4.24. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-8



Şekil 4.25. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-8

4.9. Deney Elemanı-9

Deney elemanı Şekil 4.26’da verilen yük geçmişi altında test edilmiştir. Deney elemanına 21 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney elemanına ait kesme kuvveti-yatay deplasman grafiği Şekil 4.27’de, kolonlardan alınan kesme kuvveti-çatlak genişliği grafiği Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.26. Deney Elemanı-9’a ait yük-çevrim grafiği

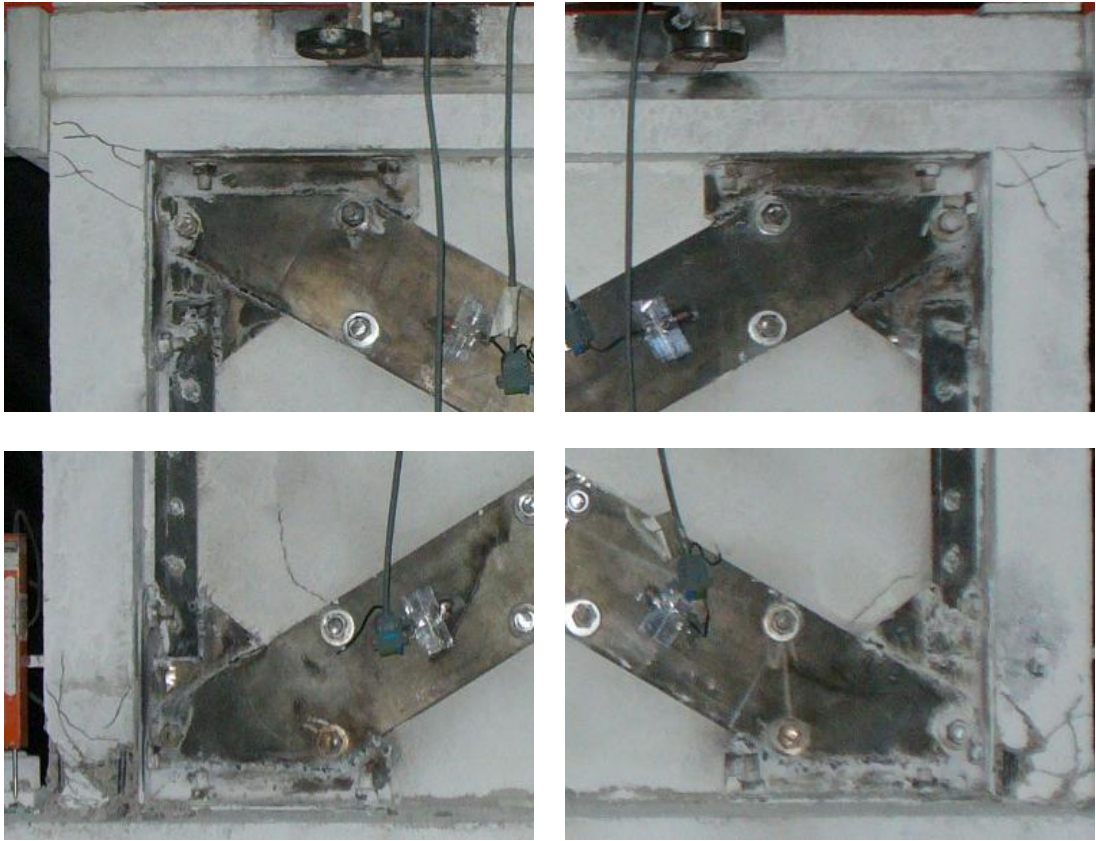
Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

Deneyin ilk yedi çevriminde, deney elemanında herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

8. çevrim: İleri yarı yüklemede sol kolonun kenetlenme bölgesinin yaklaşık 100 mm üzerinde kılcal düzeyde ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. Bu çevrimin geri yüklemesinde çatlak gelişimi gözlenmemiştir.

9. çevrim: Çevrimin ileri yarı yüklemesinde sol kolonun kenetlenme bölgesinde ikinci eğilme çatlağı oluşmuştur. Geri yarı yüklemde, sağ kolon alt ucunda temel kirişi ile bileştiği kesitte ilk eğilme çatlağı oluşmuştur.

12. çevrim: İleri yarı yüklemde 115 kN yük seviyesinde panelde ilk eğik çatlak oluşmuştur. Geri çevrimde temel kirişi ile tuğla duvarın tamamen birbirinden ayrıldığı gözlenmiştir.



Resim 4.25. 12. çevrim sonunda sol ve sağ kolon birleşim hasarları

16. çevrim: 155 kN ileri yükleme aşamasında panelin sağ alt köşesindeki bayrak levhasının zorlandığı birleşimde yırtılma meydana gelmiştir. Panelde ikinci eğik çatlak oluşmuştur. Sağ kolon alt ucunda ezilme başlangıcı ve kabuk betonunda dökülme meydana gelmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde sol kolon alt ucunda ezilme başlamıştır.

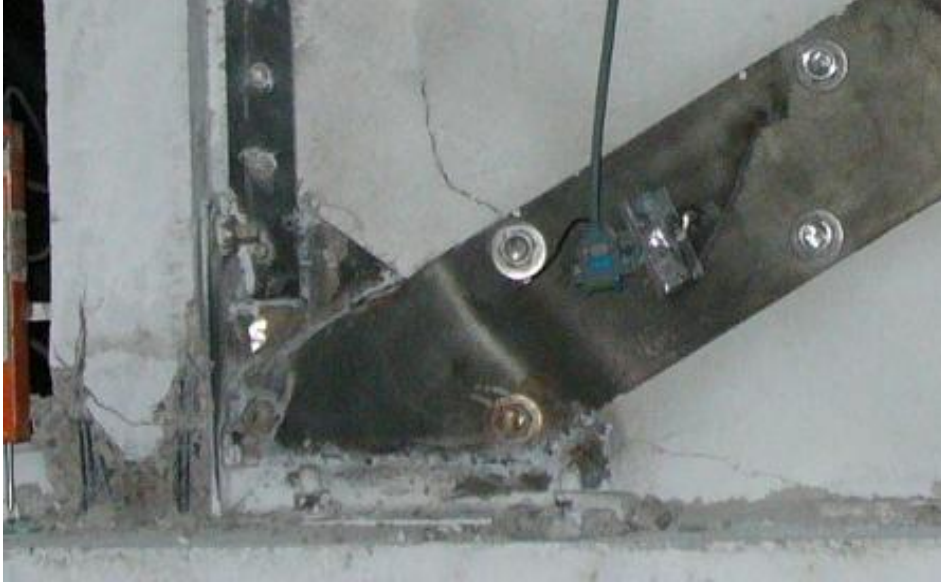


Resim 4.26. 16. çevrim sonunda sağ alt köşe yırtılma detayı

18. çevrim: İleri yarı yükleme sırasında, 175 kN yatay yük etkisi altında sağ kolon alt ucundaki kabuk betonu tamamen dökülmüştür. 180 kN da çevrim tamamlandığında ise sol kolon üst ucunda ilk eğik çatlak geliştiği görülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde deney elemanı simetrik davranış sergilemiştir.

19. çevrim: Çevrimin ileri yüklemesinin sırasında 170,6 kN yatay yük altında sol diyagonal şerit aniden burkulmuştur. Deney elemanı çevrim sonunda hedeflenen 190 kN ulaşamamış, geri yarı yüklemeye geçilmiştir. Geri yüklemde benzer biçimde sol diyagonal şerit burkulmuştur. Çevrim tamamlandığında panelde belirgin bir çatlak oluşmamıştır.

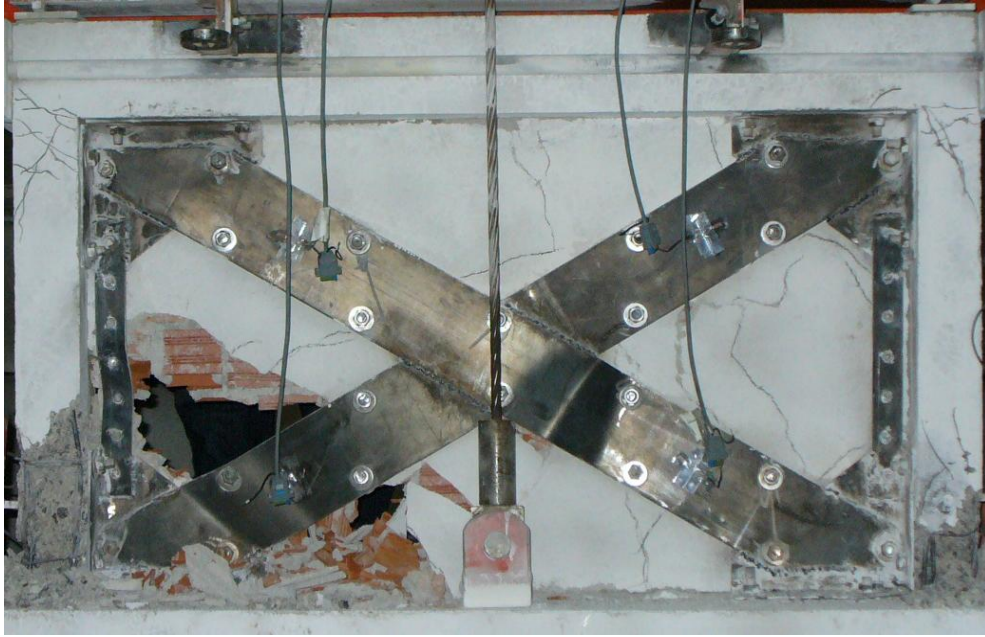
20. çevrim: Deplasman kontrollü yüklemde hedeflenen ötelenme oranı %2,4'dür. Bu çevrimin ileri yarı yüklemesinde, bir önceki çevrimde burkulan diyagonal şeritlerdeki deformasyon artmıştır. Sonuç olarak, burkulan diyagonal şeritler panele hasar vermiştir. Tuğla dolgu panelin köşelerinde görülen kırılma sebebiyle, düşey şeritlerde burkulma meydana gelmiştir. Her iki yarı yüklemde de dökülen kabuk betonu ve bütünlüğünü kaybeden panel sebebiyle kolon boyuna donatılarında burkulma meydana gelmiştir.



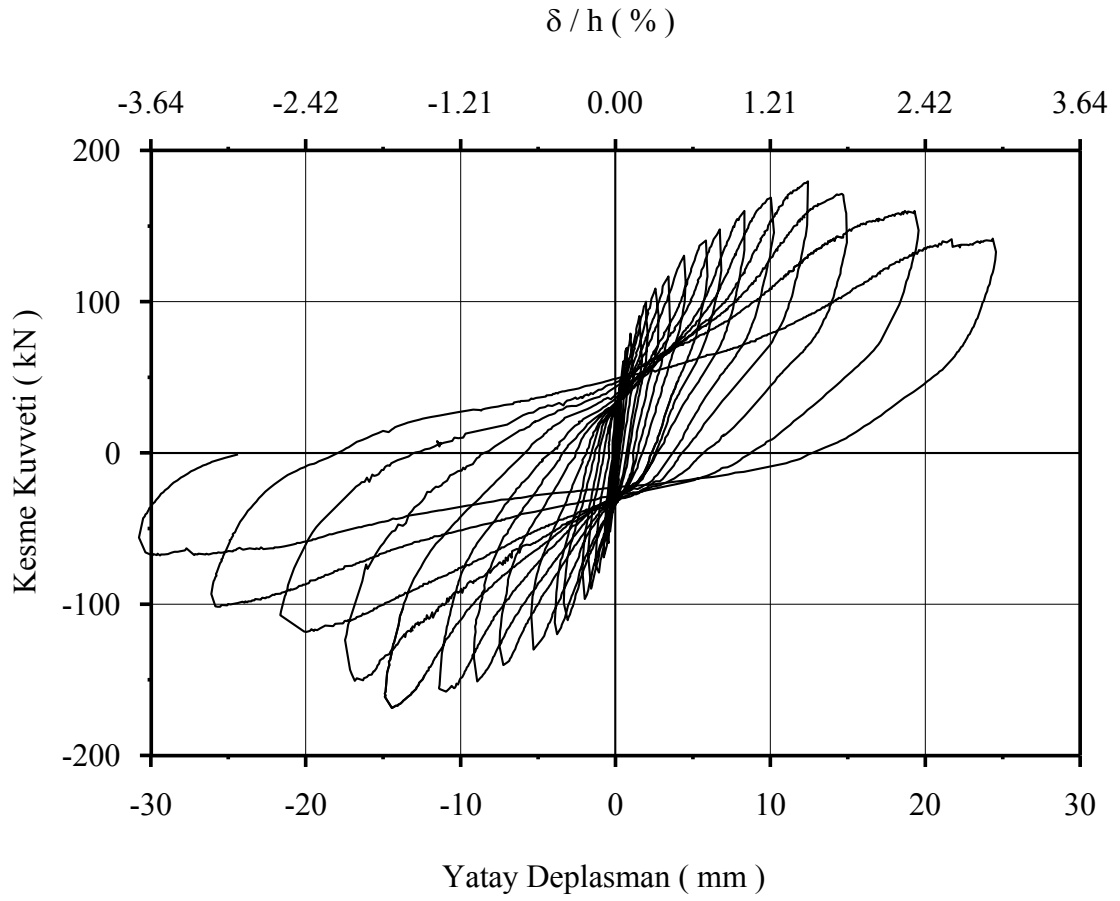
Resim 4.27. 19. çevrim sonunda sol kolon alt uçta burkulma detayı



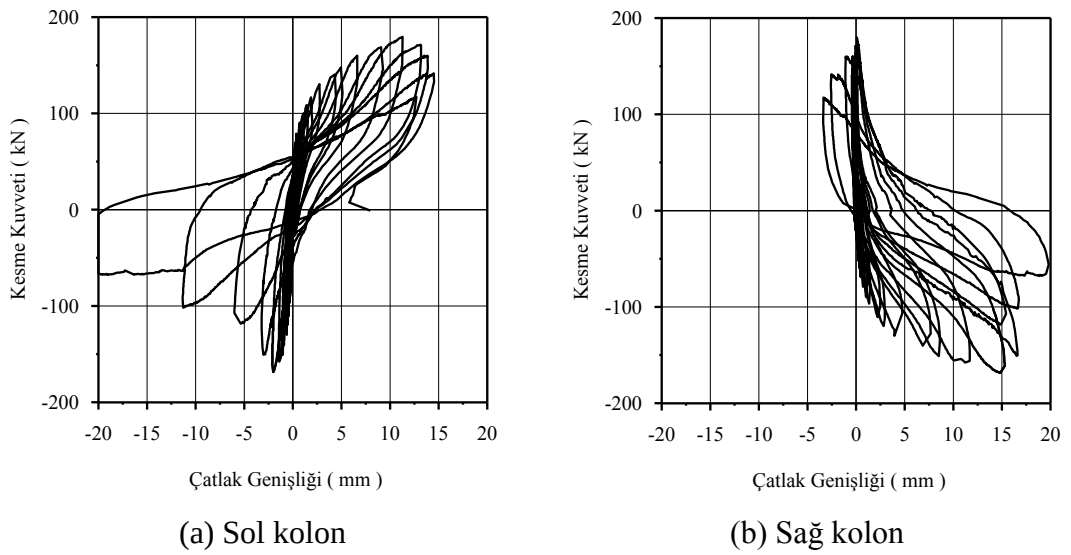
Resim 4.28. 21. çevrim sonunda sağ kolon donatılarında gözlenen burkulma



Resim 4.29. Deney sonunda Deney Elemanı-9'a ait genel görünüm.



Şekil 4.27. Yük-Deplasman grafiği, Deney Elemanı-9



Şekil 4.28. Kesme Kuvveti-Çatlak Genişliği grafikleri, Deney Elemanı-9

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deney elemanlarının göstermiş oldukları davranış; dayanım, süneklik ve rijitlik ana başlıkları altında incelenmiştir. Çelik şeritler ile takviye edilen deney elemanlarına, çelik şeritlerin, uygulanış yönleri, doğrultuları ve betonarme çerçeveye yük aktarma biçimlerine göre sağlamış olduğu katkı, gruplar halinde karşılaştırılan deney elemanları ile irdelenmiştir. Deney elemanları:

- a) Çelik şeritlerin uygulanış yönlerinin ve uygulama doğrultusunun davranışa etkisinin incelenebilmesi amacıyla, Deney Elemanı-1, Deney Elemanı-2, Deney Elemanı-3, Deney Elemanı-4 ve Deney Elemanı-5,
- b) Çelik şeritlerin betonarme çerçeveye yük aktarma biçiminin davranışa etkisinin incelenebilmesi bakımından, Deney Elemanı-5, Deney Elemanı-8 ve Deney Elemanı-9,

olmak üzere iki ana grup altında değerlendirilmişlerdir.

5.1. Dayanım ve Davranış

Deney elemanlarının göstermiş oldukları davranış ve dayanımları, elemanların zarf eğrileri incelenerek yorumlanmıştır. Zarf eğrileri, yük-deplasman grafiğindeki her çevrimin tepe noktasının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Deney elemanları dayanımları arasında karşılaştırma yapılırken, deney elemanlarının malzeme dayanımları birbirine çok yakın olduğu için normalizasyon yapılmasına gerek duyulmamıştır. Deney programı kapsamındaki toplam 9 deney elemanına deney sonuçlarının özeti Çizelge 5.1’de derlenmiştir.

Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının özeti

Deney Elemanı No	Maksimum Yük Noktası (V_u)				$\frac{V_{u,güçlendirme}}{V_{u,referans}}$
	İleri Çevrim		Geri Çevrim		
	Yük (kN)	Ötelenme (%)	Yük (kN)	Ötelenme (%)	
1	64	0,30	-63	-0,30	1,0
2	267	1,60	-237	-2,29	4,2
3	297	1,65	-287	-1,59	4,7
4	169	1,61	-167	-1,52	2,7
5	189	1,59	-188	-1,77	3,0
6	181	1,11	-147	-1,29	2,9
7	146	1,78	-128	-2,20	2,3
8	200	1,59	-197	-2,02	3,1
9	180	1,51	-169	-1,75	2,8

Çizelge 5.1'deki deney elemanlarına ait maksimum yatay yük oranları incelendiğinde, her iki yüzden çelik şeritlerle güçlendirilen Deney Elemanı-3'ün, referans çerçeveye göre 4,7 kat daha fazla dayanım sergilediği görülmektedir.

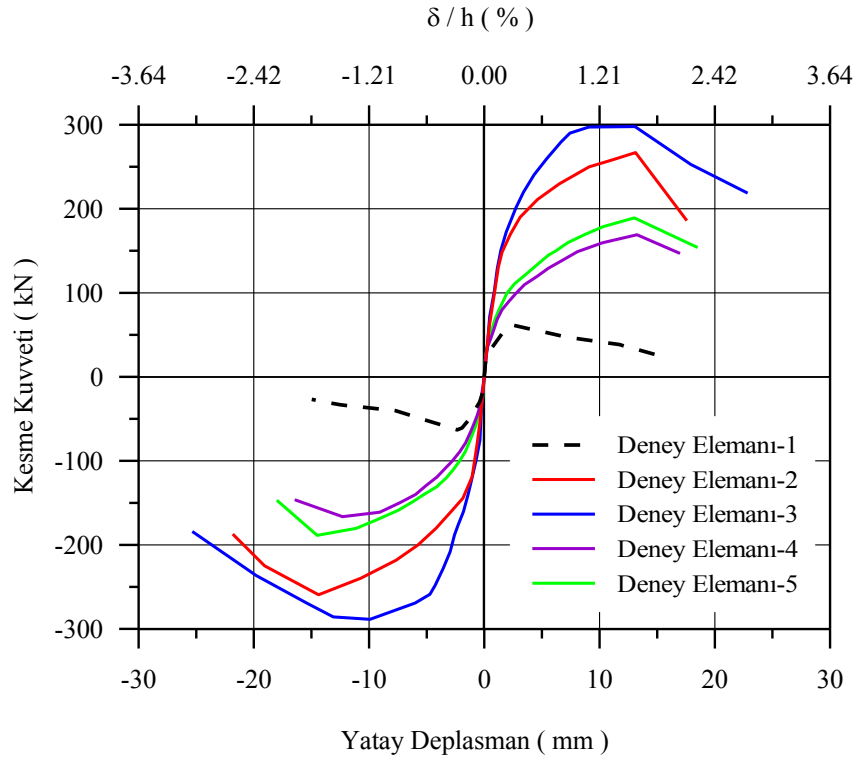
Simetrik biçimde güçlendirilen 2 ve 3 numaralı deney elemanları, tek yönden fakat özdeş şerit düzenlemesine ve çerçeve bağlantı tipine sahip 4 ve 5 numaralı deney elemanlarına göre 1,6 kat daha fazla dayanım göstermiştir. Her iki yüzden güçlendirme yapılan deney elemanında tuğla dolgu duvarda kullanılan çelik miktarı, tek yüzden güçlendirme yapılan deney elemanlarına göre 2 katı olmasına rağmen, taşıma gücünde tek yüzden güçlendirilen deney elemanlarına kıyasla 1,6 katlık kazanım sağlanabilmiştir. Dayanım kaybının nedeninin, tuğla dolgu duvar üzerinde simetrik olarak düzenlenen çelik şeritlerin, uygulamadaki dış merkezlilik sebebiyle eşit miktarda yatay yükü karşılayamaması olduğu düşünülmektedir. Bunun doğal sonucu olarak, dolgu duvarın iki yüzü arasında hasar seviyesinde farklılaşma oluşmaktadır. Deney elemanının her bir yüzünde, gerek tuğla paneldeki özdeş olmayan ezilmeler ve betonarme çerçeveden ayrılmalar, gerekse de çelik şeritlerin eş

zamanlı olarak burkulmaması sebebiyle kapasite artımı ile deney elemanında kullanılan çelik şerit oranı arasındaki doğrusal ilişkinin korunamadığı düşünülmektedir. Uygulama yönünün dayanım üzerindeki etkisini irdeleyen Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5'e ait zarf eğrileri Şekil 5.1'de sunulmuştur.

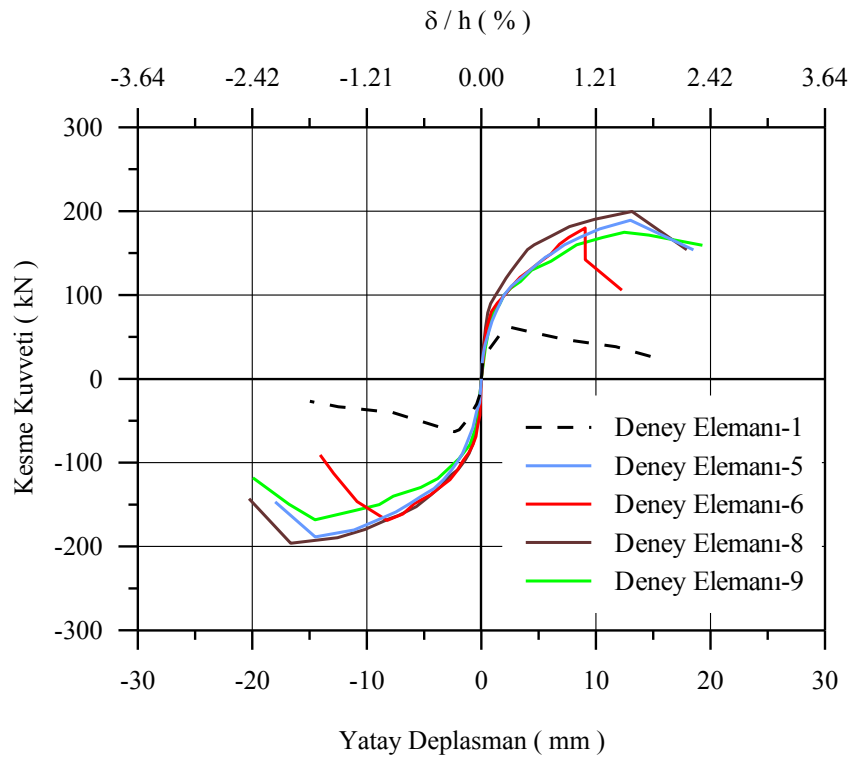
Çapraz doğrultudaki çelik şerit ile birlikte panel kenarında düşey şeridin uygulamaya dahil edilmesi yatay yük taşıma kapasitesinde olumlu bir etki sağlamıştır. Çelik şeridin simetrik uygulandığı Deney Elemanı-2 ile Deney Elemanı-3 arasında güçsüz olan elemana göre %11,2, şeritlerin sadece iç yüzden uygulandığı Deney Elemanı-4 ile Deney Elemanı-5 arasında yine güçsüz olan elemana göre %11,8'lik taşıma gücü farkı mevcuttur. Her iki durumda da birbiriyle uyumlu %11'lik bir taşıma gücü artışı sağlanmıştır.

Çapraz ve düşey çelik şeritlerle, sadece iç yüzden güçlendirilmiş 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı deney elemanları, referans çerçeveye göre sırasıyla 3,0, 2,9, 3,1, 2,8 ve 2,4 kat daha fazla dayanım sergilemiştir. Bu değerler birbirine oldukça yakındır. Dolayısıyla, dayanım üzerindeki asıl etkili parametrenin betonarme çerçeveye yük aktarma biçimi değil, panel üzerine uygulanan çelik şerit düzenlemesi olduğu düşünülmektedir. Deney Elemanı-5, 6, 7, 8 ve 9'a ait zarf eğrileri Şekil 5.2'de sunulmuştur.

Referans çerçeve, öngörüldüğü üzere gevrek bir davranış sergilemiştir. İleri ve geri çevrimlerdeki tepe yük değerleri ve ötelenme oranları uyum içindedir. İleri çevrim için taşıma gücü 64 kN olarak gerçekleşmiştir. Geri çevrimde ise deney elemanının kesme yükü taşıma kapasitesi 63 kN'dur. Maksimum yük noktasında ileri ve geri çevrimler için ötelenme oranları sırasıyla %0,31 ve %0,30'dur. Bu değer FEMA 273'de [26], tuğla dolgulu betonarme çerçeveler için öngörülmüş olan %0,3'lük can güvenliği sınırı ile de uyum içindedir. Referans deney elemanı, tuğla dolgu panelin her iki diyagonalı doğrultusunda gelişen 45° eğimli çatlak gelişimi sonucu anı bir biçimde taşıma gücünü kaybetmiştir. Panelin taşıma gücünü kaybetmesi sonucu, çerçeveye etkiyen kesme kuvveti kolon alt bölgesinde ağır kesme hasarının oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 5.1. Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5'e ait zarf eğrileri



Şekil 5.2. Deney Elemanı-1, 5, 6, 8 ve 9'a ait zarf eğrileri

Tuğla dolgunun her iki yüzüne çelik şerit uygulanan ve çelik elemanların sadece kiriş kesitinde betonarme çerçeveye ilişkilendirildiği 2 ve 3 numaralı numuneler, referans çerçeveye kıyasla en çok taşıma gücü artışının sağlandığı deney elemanlarıdır. Deney Elemanı-3, 2 numaralı deney elemanından farklı olarak bünyesinde panel kenarına yerleştirilmiş düşey şerit bulundurmaktadır. Diğer tasarım özellikleri göz önünde bulundurulduğunda özdeş olan 2 ve 3 numaralı deney elemanlarının maksimum taşıyabildikleri yatay yükler sırasıyla 267 kN ve 297 kN'dur. Maksimum yük seviyelerinde Deney Elemanı-2 ve 3, sırasıyla %1,60 ve %1,65 ötelenme oranına sahiptir. Referans deney elemanına göre, göçme anındaki ötelenme oranı 5,5, maksimum yük ise 4,7 kat artmıştır. Deney Elemanı-3, 2 numaralı deney elemanına göre %11,2 daha fazla yatay yük taşıyabilmiştir. Dayanım farkının, elemanların tek tasarım farklılığından, düşey şerit kullanımından, meydana geldiği düşünülmektedir. Deney elemanlarını göçmeye götüren mekanizma, kolon bindirme bölgesinde, aderans kaybının yaşanması ve kolon boyunca kesme çatlağı oluşumu ile kendini göstermiştir. Daha sonra, panelde oluşan çok sayıda çatlak ve betonarme çerçeve ile panelin birbirinden ayrılması ile sonunda paneldeki basınç diyagonalinde ezilme meydana gelmiştir. Kırılan ve ezilen tuğla birimler daha ileri yük adımlarında çelik şeritleri destekleyememiş ve sonrasında çelik şeritler burkulmuştur. Çapraz çelik şeridin burkulması sonrasında, sistem maksimum yük seviyesini muhafaza edemeyip yük kaybı yaşamıştır. Her iki deney elemanında da, çift yüzden uygulanan çelik şeritler kirişte ağır hasar oluşmasına sebep olmuştur. Deney Elemanı-3'de kolon-kiriş birleşimi kiriş kesitinden kırılmıştır. Deney Elemanı-2'de ise kiriş kesitindeki düğüme yakın etriyelerin koptuğu gözlenmiştir.

Güçlendirmenin sadece iç yüzden yapıldığı, çelik şeritler ile betonarme çerçeveye bağlantısının yine kiriş uçlarında gerçekleştirildiği 4 ve 5 numaralı deney elemanları, uygulama yönünün dayanım ve davranış üzerindeki etkisini, araştırmak üzere deney kapsamına alınmıştır. Deney Elemanı-5 ile 4 numaralı deney elemanı arasındaki tek fark, tıpkı bir önceki deney grubunda olduğu gibi, 5 numaralı deney elemanının panelinde bulunan düşey şerittir. Deney Elemanı 4 ve 5, maksimum yük noktasında sırasıyla 169 kN ve 189 kN'luk yatay yük taşıyabilmişlerdir. Düşey şerit detayı haricinde, özdeş özelliklere sahip 4 ile 5 numaralı deney elemanları arasında,

güçlendirilmemiş elemana göre %11,8'lik dayanım artışı sağlanmıştır. Maksimum yükte 4 numaralı eleman %1,61, 5. deney elemanı ise %1,57'lik ötelenme oranına sahiptir. Grubun en başarılı numunesi olan Deney Elemanı-5, referans çerçeveye göre 3 kat dayanım, 5,2 kat ötelenme oranı artışı sağlamıştır. Ancak, her iki yüzden çelik şerit uygulamasının yapıldığı 3 numaralı deney elemanına göre, tek yüzden uygulama Deney Elemanı-5'in dayanımında %36'lık azalmaya neden olmuştur. Deney Elemanı-4 ve 5'in göçmesine, çapraz doğrultudaki çelik şeritlerin burkulması ve sonucunda panel ve betonarme elemanlarda ilerleyen hasar dolayısıyla yapı bütünlüğünün kaybı sebep olmuştur. Her iki deney elemanında da kolon alt ucundaki bindirme bölgesinde gözlemlenen aderans çatlakları ve daha sonra, artan yük seviyesi ile paralel olarak kolon boyunca artan kesme hasarı gözlemlenmiştir. Panel diyagonal doğrultusundaki çelik şeridin, burkulması ile deney elemanları taşıma kapasitelerine ulaşmıştır.

Deney Elemanı-6'da, tuğla dolgu duvar kenarları boyunca geliştirilen bağlantı tipi denenmiştir. 60x60x6 ebadındaki çelik L-profiller, diyagonal doğrultudaki çelik şeritler ile betonarme çerçeve arasındaki yük aktarımını sağlamaktadır. Çelik şerit uygulaması sadece iç yüzden yapılmıştır. Deney elemanı maksimum yük noktasında 181 kN dayanım ve %1,11 ötelenme oranı sergilemiştir. Çerçevesinin iç kenarları L-profiller ile çevrelenen, kaynaklanmış köşe birleşimi yapılan kafes yapıdaki çelik elemanlar, deney elemanının deformasyon yapabilme kapasitesini sınırlamış ve dayanımını artırmıştır. Rijit bir çubuk gibi davranan deney elemanı, kiriş seviyesinde etkiyen kesme yükünü, doğrudan temel üzerinde sabitlenen çelik çubuklara aktarmıştır. Sistem bütünlüğünün korunduğu yükleme çevrimlerinde panelde çatlak gözlenmemiştir. Deneyde temel üzerindeki 60x60x6 mm kesitli L-profili sabitleyen ankrajlarda zorlanmalar gözlenmiş ancak, deney elemanı göçene kadar bağlantılarda gevşeme olmamıştır. Deney Elemanı-6'nın kolon alt uçlarındaki çelik eleman birleşimlerinde kaynak kırılmaya ve düğüm geometrisi bozulmaya başladıkça, tuğla dolgu duvarda hasar meydana gelmiştir. İlerleyen yük aşamalarında, çerçevenin kolonları, temel kirişi ile birleştiği kesitten ayrılmış, buna karşın bindirme bölgesi ağır hasar almamıştır. 181 kN yük seviyesi deney elemanının yaşabildiği en yüksek yük seviyesi olmuştur. Sonraki yükleme adımlarında, köşelerdeki kaynaklar ani bir

biçimde kesilerek, çerçevenin aniden göçmesine sebep olmuştur. Yük kaybı, betonarme çerçeve kolonlarının alt ve üst uçlarından kesilmesi, panel diyagonalı doğrultusundaki çatlağın oluşumu ve çelik şeridin burkulması ile yaşanmıştır.

Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-8’de, bir önceki deney numunesinin köşe kaynaklarının yetersizliğini ortadan kaldırmak üzere özel bir düğüm detayı denenmiştir. Köşe bölgelerine, yeterli kaynak dayanımının sağlanabilmesi için şerit malzemesi ile aynı özellikte bir bayrak levhası birleşimde bulunan tüm çelik elemanlara köşe kaynağı ile dikilmiştir. Ancak, Deney Elemanı-7, yapılan test sonucunda yeterli yatay dayanımı gösterememiştir. Deney Elemanı-7’de panelin alt kenarında bulunan 70x100x10 mm kesitli L-profilı temele bağlayan 7 adet Ø16 mm çapındaki çubukta aderans kaybı gözlenmiştir. Deney Elemanı-6’da, bu deney elemanında kullanılan çubuklarla aynı derinlikte ve aralıkta ankraj uygulanmasına rağmen, test sonuna kadar çubukların tümünün aderansı bozulmamıştır. Bu sebeple Deney Elemanı 7’de köşe birleşimindeki kaynakları güçlendirme amacıyla eklenen bayrak levhası kaynaklanırken açığa çıkan ısıнын, ankrajlarda kullanılan epoksi harcın mekanik özelliklerini bozduğu düşünülmektedir. Birbiri ardına aderansını kaybeden temel üstü çubuklar sebebiyle çerçeve ve panel birlikte rijit bir bütün gibi davranış sergilemiştir. Panelde hasar oluşmamış, kolon-kiriş birleşiminde çatlak gelişimi ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. Hasar kolon uçlarında yoğunlaşmış, devrilme hareketinin etkisiyle dökülen kolon beton örtüsü altında kolon boyuna donatılarında burkulma gözlenmiştir. Deney Elemanı-7 bu nedenle, deney programı içerisinde en yatay dayanımı en zayıf elemandır. Bu üretim hatası giderilerek deney elemanı tekrar üretilmiş ve Deney Elemanı-8 olarak adlandırılmıştır. Deney Elemanı-8 tek yüzdten güçlendirilmenin yapıldığı bütün deney elemanlarından daha fazla yatay yük kapasitesine ulaşmıştır. Deney numunesi maksimum yük noktasında, 200 kN yük ve %1,59 ötelenme oranına sahiptir. Deneysel çalışma kapsamındaki bir önceki numuneye göre güçlendirilen köşe kaynakları, deney elemanı kapasitesine ulaşincaya kadar başarılı bir şekilde çalışmıştır. Düğüm bütünlüğü ve panel geometrisi deney sonuna kadar korunabildiği için, tuğla dolgu panelde belirgin bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Deney elemanı ilk yükleme adımlarında rijit bir çubuk gibi davranmıştır. İlerleyen yük adımlarında, ilk önce kolon alt uçlarında meydana gelen

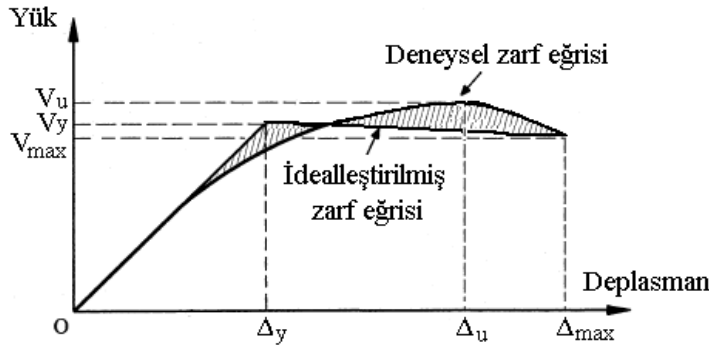
aderans kaybı, daha sonra ise kolon üst düğümünde gözlenen kesme çatlakları çerçevenin yük kaybı yaşamasına neden olmuştur. Deney numunesinde taşıma gücüne panel üzerindeki diyagonal doğrultudaki şeridin burkulması ile ulaşılmıştır.

9 numaralı deney numunesi üzerinde, çelik şeritler ile betonarme çerçeve arasındaki bağlantı farklılığının davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Panel köşelerinde, 2 adet 60x60x6 mm kesitli L-profil ve parçaları birleştiren bir bayrak levhası bulunmaktadır. Düşey ve çapraz doğrultudaki çelik şerit ise oluşturulan köşe bağlantısına kaynaklanmıştır. Köşe bağlantısı, kolon-kiriş ve kolon-temel düğümlerinde betonarme çerçeve ile ilişkilendirilmiştir. Deney Elemanı-9, maksimum yük noktasında %1,51'lik ötelenme yapmıştır. Numunenin göçme anındaki yükü ise 180 kN'dur. Tek yüzden güçlendirilen özdeş çelik şerit düzenlemesine sahip deney çerçeveleri arasında, en düşük taşıma gücüne sahip numune Deney Elemanı-9 olmuştur. Bununla birlikte deney çerçevesi çelikle güçlendirilen deney elemanları arasındaki en düşük ötelenme oranına sahiptir. Deney Elemanı-9'da uygulanan bağlantı tipi ve çelik şerit düzenlemesi ile referans deney elemanına göre, taşıma gücü 2,8, göçme anındaki öteleme oranı da 5 kat iyileştirilmiştir. Düğüm noktaları, panel köşelerinde bulunan L-profil ile takviye edildiği için bu deney elemanının kolonlarında, kesme hasarı serbest kalan gövde bölgesinde gözlenmiştir. Kolon bindirme bölgesindeki yetersizlik nedeniyle kolon alt uçlarında gelişen ayrılma çatlakları, ileri yükleme adımlarında bu bölgenin rijitliğini olumsuz etkilemiştir. Panelde gelişen çatlaklarla eş zamanlı olarak, kolon alt uçlarında ezilme gözlenmiştir. Sonrasında kolon boyuna donatısının burkulması ve panelde gerçekleşen ezilmeler, diyagonal şeridin burkulmasına neden olmuştur. Deney Elemanı-9, çelik şeritte meydana gelen burkulma ile taşıma gücüne ulaşmıştır.

5.2. Süneklik

Süneklik, yapının taşıma gücünde önemli bir kayıp olmaksızın, deplasman yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Bu bakımdan, yapının sismik tasarımı söz konusu olduğunda süneklik önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır. Mevcut çalışmada, sünek biçimde tasarlanmayan bir betonarme çerçeve içerisindeki yine sünek olmayan

tuğla dolgu duvarın alternatif bir yöntem ile güçlendirilmesi hakkındaki deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Deneysel gözlemler sünek olmayan dolgulu bir çerçevenin güçlendirme sonrasında da, taşıyıcı elemanlarının boyuna donatılarında akmanın yaşanmadığı, elemanlarda kesme çatlaklarının geliştiğini ve alışlagelen tanımıyla sünek bir davranış görülmediğini desteklemektedir. Dolayısıyla, sünekliğin irdeleneceği bu bölümde deneysel yük-deplasman zarf eğrisi yerine Maheri ve ark. [20] tarafından önerilen idealleştirilmiş yük-deplasman zarf eğrisi yaklaşımı ile paralel bir zarf eğrisi üzerinden hesaplanacak süneklik değerleri deney elemanlarının birbirleri arasındaki kıyaslamasında kullanılacaktır.



Şekil 5.3. İdealleştirilmiş yük-deplasman zarf eğrisi ve süneklik hesaplanırken kullanılan parametreler.

Şekil 5.3’de gösterildiği gibi akma noktası belirgin olmayan deneysel bir yük-deplasman zarf eğrisi, iki doğrulu bir yük-deplasman eğrisi biçiminde idealleştirmektedir. Deney elemanının yüke karşı göstermiş olduğu ilk tepkiyi benzeştiren sabit eğimli çıkış doğrusu ile deney elemanının göçtüğü noktadan başlayarak çizilen doğrunun kesiştiği nokta Maheri ve ark. [20] tarafından deney elemanında akmanın yaşandığı deplasman, Δ_y , olarak tanımlanmıştır. Çıkış ve iniş doğrularının kesişim noktası, Şekil 5.4’de gösterilmiş olan iki eğri arasında kalan taralı alanları dengeleyen durum bulununcaya kadar sürdürülen iteratif çözüm ile hesaplanmıştır. Δ_{max} , olarak tanımlanan deney elemanının göçtüğü varsayılan aşama için ATC 40 [28] ve Sözen [29] kriterleri benimsenmiştir. ATC 40 [28], betonarme çerçeve türü bir yapının göçme noktasını kat ötelenme oranının %1,5 değerine ulaşıldığı aşama biçiminde tanımlamıştır. Sözen [29] ise, yapıda göçmenin

gerçekleştiği noktayı yatay yük taşıma kapasitesinde meydana gelen %15'lik düşüşün gözlendiği nokta olarak tanımlamaktadır. Bu esasa, bu bölümdeki göçme noktası tanımı için yapılan varsayım, güçlendirilen tüm deney elemanları %1,5 kat deplasman oranından sonra yük kaybı yaşadığı için Sözen [29] kriteri olacaktır. Bir başka deyişle, göçme anındaki deplasman deney elemanının yatay yük kapasitesinde %15 oranına azalmanın meydana geldiği deplasman olarak kabul edilmiştir.

Süneklik, idealleştirilmiş yük-deplasman zarf eğrisi üzerindeki akma noktasında ölçülen kat deplasmanın, maksimum yük düzeyinde ölçülen kat deplasmanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. İdealleştirilmiş yük-deplasman zarf eğrisinden hareketle elde edilen sonuçlar Maheri ve ark. [20] tarafından deney serisi içerisindeki elemanlarının birbiri arasındaki kıyası için uygun olduğu model üzerinden gerçek bir yapı hakkında yorum yapılmasının yanlış sonuçlar ortaya koyabileceği belirtilmiştir. Araştırmacıların yaptığı bu kabul kendi modellerinden hareketle geliştirilen bu model için de geçerlidir. Çizelge 5.2'de sunulmuş olan hesaplamalarda, sadece ileri yük çevrimlerine ait deneysel zarf eğrisi kullanılmıştır.

Çizelge 5.2. Deney elemanlarının deplasman süneklik oranları

Deney Elemanı No	Maksimum Yükte Yatay Dep. Δ_u (mm)	Göçmede Yatay Dep. Δ_{max} (mm)	Akma Deplasmanı Δ_y (mm)	Deplasman Süneklik Oranı
1	2,50	5,52	-	2,05
2	13,12	15,32	1,72	8,91
3	13,64	17,89	1,65	10,84
4	13,24	17,31	1,06	16,33
5	13,09	17,49	0,98	17,85
6	9,20	10,32	0,80	12,90
7	14,78	-	-	-
8	13,12	16,13	0,95	16,98
9	12,43	20,91	1,14	18,34

Deney Elemanı-1, tuğla dolgu panelin diyagonal doğrultuda ezilmesi ile yük kaybetmiştir. İleri ve geri çevrimlerdeki, %0,3 ötelenme oranındaki maksimum yük düzeyinden sonra, yük seviyesini muhafaza edememiştir. Deney elemanında çelik elemanlarla güçlendirme uygulanmadığı için bu elemanın deplasman süneklik oranı göçme yatay deplasmanın maksimum yükteki yatay deplasmana oranlanması ile hesaplanmıştır.

Çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarının tümü, diyagonal doğrultudaki çelik şeritlerin burkulması ile yük kaybı yaşamıştır. Dolayısı ile çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanları taşıma güçlerine ulaştıklarında, betonarme çerçeve ve tuğla dolgu panelin yatay yük paylaşımındaki katkısı giderek azalırken, çelik şeritler davranış üzerinde hâkim olmuş ve göçme biçimini belirlemiştir. Çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında da göçme ani bir biçimde gerçekleşmiştir. Her iki doğrultudaki diyagonal şeritlerin burkulması, tuğla panel ve betonarme çerçeve kapasitesinin çok üzerindeki bir yatay yükün, bir çevrim sonra, ezilmiş tuğla panel ve burkulmuş çelik şeritlerden oluşan taşıma gücünün büyük bir kısmını kaybetmiş bir çerçeve tarafından taşınması durumuna sebep olmuştur. Daha önceki bölümde, maksimum yük noktasından sonra yük kontrollü yüklemeye son verildiği ve deplasman kontrollü yüklemeye geçildiğinden bahsedilmişti. Çizelge 5.2’den de görüleceği üzere Deney Elemanı-9 dışında bir sonraki çevrimde %15’den daha az yük kaybı yaşamış deney elemanı mevcut değildir. Bu sebeple maksimum yükün yaşandığı çevrim ile deplasman kontrollü ile çevrim arasında doğrusal yük kaybı yaşandığı varsayımı yapılmış ve arada kalan %15’lik yük kaybına karşı gelen yatay deplasman, bu iki nokta arasında yapılan doğrusal tahmin ile hesaplanmıştır.

Çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarının deplasman süneklik oranları incelendiğinde, referans deney elemanına göre simetrik biçimde güçlendirilen deney elemanlarının yaklaşık 5, tek yüzden güçlendirilen deney elemanlarının ise yaklaşık olarak 9 kat daha sünek davrandığı görülmektedir. Simetrik biçimde güçlendirilen Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-3, tek yüzden güçlendirilen diğer deney elemanlarına göre daha az süneklik artışı sağladığı görülmektedir. Önerilen yaklaşım ile hesaplanan teorik akma noktası, bu deney elemanlarının yüksek taşıma gücüne,

yüksek başlangıç rijitliğine ve güçlendirilen deney elemanları ile benzer göçme deplasmanına sahip olması sebebiyle tek yüzden güçlendirilen deney elemanlarından daha ileri bir noktada hesaplanmıştır. Bu nedenle, simetrik ve tek yüzden güçlendirilmiş deney elemanları arasında hesaplanan süneklikler ile kıyaslamalı bir yorum yapılması uygun değildir. Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-3 bu bakımdan güçlendirme grubu elemanları içerisinde ayrı yorumlanmalıdır.

Tuğla dolgu duvarın güçlendirmesinde çelik şerit düzenlemesine düşey şeritlerin eklenmesi sünekliği artırmıştır. Düşey şeritler tek yüzden güçlendirilen deney elemanlarında %9, düşey çelik şerit miktarının 2 katına çıktığı simetrik güçlendirilen deney elemanlarında ise %22 oranında süneklikte artış sağlamıştır. Bu bulgu, Taghdi ve ark. [17]'nin düşey şeritlerin duvar göçme mekanizması üzerinde yaptıkları yorumu da desteklemektedir. Çelik elemanların betonarme çerçeveye yük aktarım biçiminin, süneklik üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Panel kenarları boyunca betonarme çerçeveye yük aktarımını sağlayan bağlantı tipinin, rijit yapısı sonucunda süneklik bakımından diğer yük aktarım tiplerinin gerisinde kalmıştır.

5.3. Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlikleri yatay yük–deplasman grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Rijitlikler başlangıç ve maksimum yük düzeyinde hesaplanmıştır. Maksimum yük düzeyindeki rijitlik, maksimum yük düzeyindeki noktanın grafiğin orijinine birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimidir. Başlangıç rijitliği, deney elemanının, ilk ileri çevrim içerisinde yüke karşı yapmış olduğu deplasmanın gerçekleştiği noktanın grafik orijini ile birleştiren doğrunun eğimidir.

Maksimum yük düzeyindeki rijitlik deney elemanına uygulanan ileri ve geri yükleme adımları için hesaplanmıştır. Karşılaştırmalarda maksimum yük düzeyindeki rijitliklerin aritmetik ortalaması kullanılmıştır. Çizelge 5.3'de deney elemanlarının rijitlikleri ve güçlendirilen elemanların rijitliklerinin, referans deney elemanının rijitliklerine oranları da verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney elemanlarının rijitlikleri

Deney Elemanı No	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Maksimum Yük Noktasındaki Rijitlik (kN/mm)			Ortalama $\left(\frac{K_{güçlendirme}}{K_{Referans}} \right)$ oranı	
		İleri Çevrim	Geri Çevrim	Ortalama	Başlangıç	Maksimum Yük
1	45,4	25,9	25,8	25,9	---	---
2	258,0	20,2	12,6	16,4	5,68	0,63
3	305,6	21,8	21,9	21,8	6,73	0,84
4	198,6	12,8	13,4	13,1	4,37	0,51
5	236,5	14,4	12,9	13,7	5,21	0,53
6	260,3	19,7	17,7	18,7	5,73	0,72
7	318,2	-	-	-	7,00	-
8	356,6	15,2	11,8	13,5	7,85	0,52
9	245,4	14,5	11,7	13,1	5,41	0,51

Referans deney elemanının başlangıç rijitliği 45,4 kN/mm, maksimum yükteki ortalama rijitliği 25,9 kN/mm'dir. Deney programındaki en büyük başlangıç rijitliği 356,6 kN/mm, Deney Elemanı-8'e aittir. Deney Elemanı-3, maksimum yük noktasındaki rijitlik bakımından, çelikle güçlendirilen deney elemanları arasında 21,8 kN/mm'lik ortalama rijitlik değeriyle en başarılısı olmuştur. Diğer yedi deney elemanının başlangıç rijitlikleri yaklaşık olarak 200-250 kN/mm aralığında yoğunlaşmıştır.

Çift yüzden çelik şeritlerle güçlendirilmiş Deney Elemanı-2 ve 3'e ait başlangıç rijitliği, çerçeve deney elemanına göre sırasıyla 5,7 ve 6,7 kat artmıştır. Deney Elemanı-3'de düşey şeritlerin eklenmesi, başlangıç rijitliğini Deney Elemanı 2'ye göre %18,5 oranında artırmıştır. Maksimum yük düzeyinden sonra ise, Deney

Elemanı-1'e kıyasla Deney Elemanı-2'de yaklaşık olarak %37, Deney Elemanı 3'de ise yaklaşık olarak %16'lık rijitlik kaybı göstermiştir. Uygulanmış olan güçlendirme biçimi, Deney Elemanı-2 ve 3'de başlangıç rijitliklerinin önemli bir ölçüde artmasını sağlamıştır. Güçlendirilen deney elemanları, daha önceki bölümlerde de bahis edildiği gibi, Deney Elemanı-1'e göre daha ileri ötelenme oranına sahip olduğundan, maksimum yükün o noktadaki yatay deplasmana oranlanması ile hesaplanan maksimum yük noktasındaki rijitlik değerinin düşük hesaplanması olağan bir sonuçtur. Maksimum yük noktasındaki rijitlik bu nokta dikkate alınarak irdelenecek olursa, simetrik güçlendirilen deney elemanlarının Çizelge 6.4'de sunulan ortalama $K_{güçlendirme}/K_{referans}$ oranları, Deney Elemanı-2 ve 3'ün diğer çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarına göre daha yüksek oranlara sahip olmasının sebebi oran değerini artıran eden, paydaki yatay yük değerinin diğer deney elemanlarına göre daha yüksek seviyeye ulaşılmış olmasıdır.

Deney Elemanı-4 ve Deney Elemanı-5'in başlangıç rijitlikleri sırasıyla 198,6 kN/mm ve 236,5 kN/mm'dir. Deney Elemanı-4'ün başlangıç rijitliğine kıyasla, Deney Elemanı-5'de çelik şerit düzenlemesine düşey şeritlerin eklenmesi %19 oranında artış sağlamıştır. Deney Elemanı-4 ve 5 arasındaki maksimum yük noktasındaki ortalama rijitlik, diğer tek yüzden çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında olduğu gibi birbirine oldukça yakındır. İki deney elemanının maksimum yük noktasındaki ortalama rijitlik farkı 0,6 kN/mm'dir.

Deney Elemanı-6'da, yatay yük, kat deplasmanı ve deneysel davranış hedeflerine tam anlamıyla ulaşamadığı, 3. bölümde tartışılmıştır. Deney elemanının sergilemiş olduğu başlangıç rijitliği diğer tek yüzden güçlendirilen deney elemanlarının verisi ile iyi bir uyum içindedir. Deney elemanına ait 260,3 kN/mm başlangıç rijitliği, güçlendirilmiş dolgulu çerçevenin, deneyin ilk aşamasında oldukça iyi bir davranış göstermiş olduğunu ifade etmektedir.

Deney Elemanı-9, 356,6 kN/mm'lik başlangıç rijitliği bakımından, geliştirilen güçlendirme ve bağlantı detayları arasında en iyi performansı gösteren deney elemanıdır. Deney Elemanı-9, deneyin ilk yükleme çevrimlerinde, her iki yüzden

güçlendirilen Deney Elemanı-2 ve 3'den de daha rijit bir davranış göstermiştir. Ancak diğer tek yüzden güçlendirilen deney elemanları gibi yatay yük taşıma kapasitesi sınırlı olduğundan, maksimum yük noktasındaki ortalama rijitliği 13,5 kN/mm seviyesinde kalmıştır. Deney Elemanı-4, 5, 8 ve 9'a ait maksimum yük noktasındaki ortalama rijitliklerin, aritmetik ortalamasının 13,4 kN/mm'dir.

Panel üzerindeki çelik şeritlerin, betonarme çerçeveye kolon ve kiriş düğümünde bağlantısının yapıldığı Deney Elemanı-9'da, başlangıç rijitliği referans deney elemanına göre 5,41 kat artırılmıştır. Çelik şeritlerin sadece kirişlere bağlandığı Deney Elemanı-5'e göre başlangıç rijitliği %3,8 artmıştır. Kolon ve kiriş kenarları boyunca panel bağlantısının sağlandığı Deney Elemanı-8'e göre ise başlangıç rijitliği %31,2 düşüktür. Deney Elemanı-8'in, maksimum yük noktasındaki ortalama rijitliği, deney elemanlarının değerlerinin ortalaması olan 13,4 kN/mm'dan, %2,2 daha düşüktür.

5.4. Enerji Tüketimi

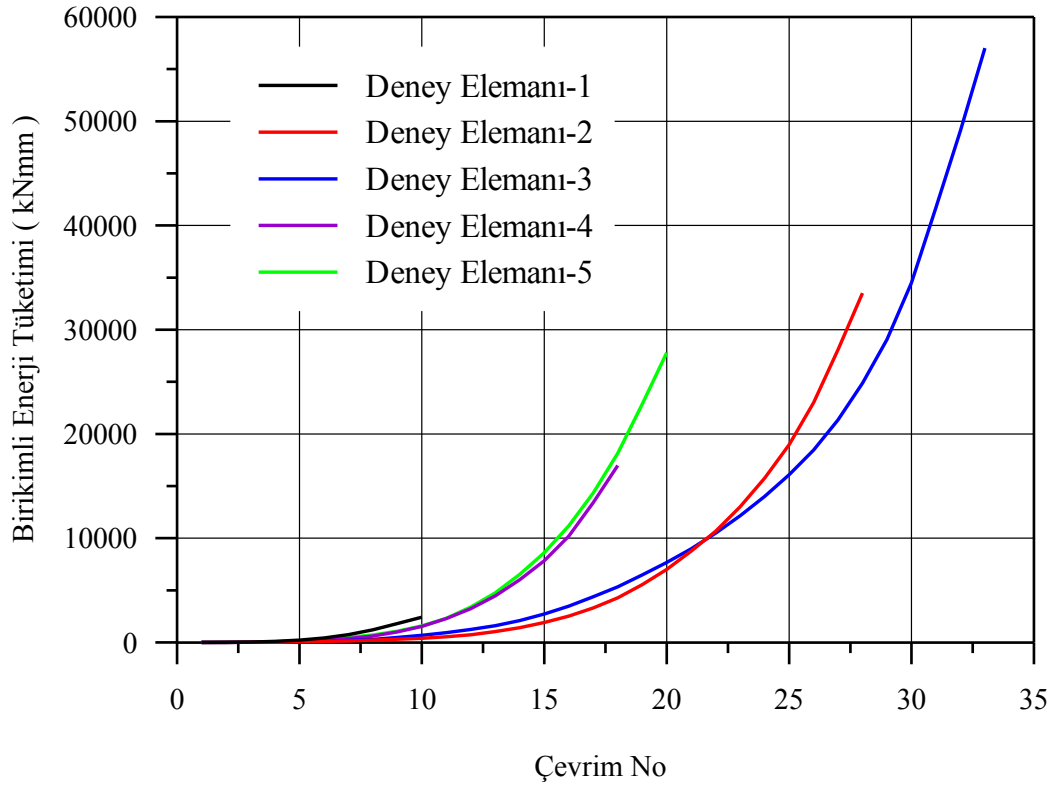
Tüketilen enerji, deney elemanına uygulanan her bir yük çevrimi sonucunda çizilmiş olan yük-deplasman eğrisinin kapattığı alanın hesaplanması ile elde edilmiştir. Deney elemanının enerji tüketimi, her çevrimde tüketilen enerjinin birikimli olarak toplanması ile hesaplanmıştır. Deney elemanının tükettiği enerji ile deneyde uygulanan yük-çevrim geçmişi arasında güçlü bir sebep-sonuç ilişkisi vardır. Bundan dolayı deney elemanları özdeş yük-çevrim geçmişi uygulanarak test edilmişlerdir. Deneylerin deplasman kontrollü aşamasında, deney elemanlarına özdeş yatay deplasman artırımının uygulanmasına özen gösterilmiştir. Birikimli enerji tüketimleri deney elemanı göçme yüküne ulaşıncaya kadar olan bölge için hesaplanmıştır. Göçme yükü, Bölüm 5.2'de kabul edildiği biçimiyle, taşıma gücünde %15'lik yük kaybının yaşandığı ve deney elemanın göçtüğü varsayılan yük seviyesidir. Deney elemanlarının göçme yüküne ulaştıkları aşamaya kadar birikimli enerji tüketimleri Çizelge 5.4'de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Deney elemanlarının birikimli enerji tüketimleri

Deney Elemanı No	Birikimli Enerji Tüketimi (kN.mm)	$\frac{\text{Bir. En. Tük.}_{\text{Güçlendirme}}}{\text{Bir.En.Tük}_{\text{Referans}}}$
1	2400	1,0
2	33500	13,8
3	57000	23,6
4	17000	7,0
5	27800	11,5
6	18400	7,6
7	18300	7,6
8	24700	10,2
9	34500	14,2

Simetrik güçlendirilen Deney Elemanı-3, güçlendirilmemiş deney elemanına göre 23,6 kat daha fazla enerji tüketerek, en fazla enerji tüketen deney elemanı olmuştur. Tek yüzden güçlendirilen deney elemanları içerisinde en fazla enerji tüketen, güçlendirilmemiş deney elemanına göre 14,2 kat enerji tüketimi artışı sağlayan Deney Elemanı-9'dur. Çelik şeritlerin simetrik olarak uygulandığı deney elemanlarında, tek yüzden güçlendirmenin yapıldığı deney elemanlarına göre enerji tüketim kapasitesinde ortalama %100'lük artış sağlanmıştır.

Çapraz doğrultudaki çelik şeritlerin yanı sıra, düşey şeritlerin panele eklenmesi enerji tüketimini %69 iyileştirmiştir. Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5'e ait Birikimli Enerji Tüketimi-Çevrim grafiği Şekil 5.4'te sunulmuştur. Şekil 5.4'de simetrik çelik şerit uygulaması ve güçlendirme desenine düşey şeritlerin eklenmesinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi vurgulanmaktadır. Deney Elemanı-2, 3, 4 ve 5'de çelik elemanlar, betonarme çerçeveye kiriş ucunda yapılan bağlantı ile yük aktarmaktadır.

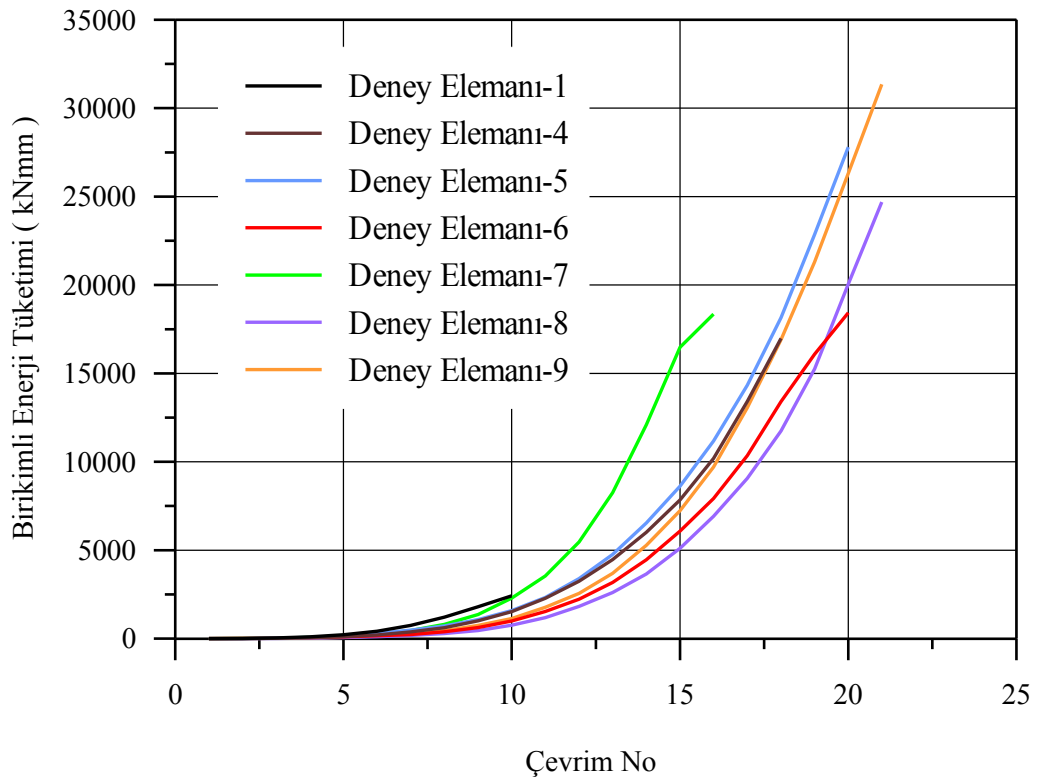


Şekil 5.4. Deney Elemanı-1, 2, 3, 4 ve 5'e ait Birikimli Enerji Tüketimi-Çevrim grafiği

Tek yüzden güçlendirilen deney elemanlarına ait Birikimli Enerji Tüketimi-Çevrim grafiği Şekil 5.5'de verilmiştir. Bu grafiğe göre çelik elemanlar ile betonarme çerçeve bağlantılarında sıyrılmanın gözlemlendiği Deney Elemanı-7 dışındaki diğer deney elemanın birikimli enerji tüketimlerinin dar bir bantta sıkıştığı görülmektedir. Çelik elemanların panel kenarları boyunca betonarme çerçeveye bağlandığı Deney Elemanı-6 ve 8 bu dar bant içerisinde alt kısımda kümeleşmişken, Deney Elemanı-4, 5 ve 9 bandın üst kısmında benzer davranış göstermişlerdir.

Tek yüzden güçlendirilmiş deney elemanları arasında enerji tüketim kapasitesi bakımından en başarılı olan eleman, çelik elemanların kolon-kiriş birleşiminde betonarme çerçeveye yük aktardığı, Deney Elemanı-9 olmuştur. Deney Elemanı-9 ile güçlendirilmemiş deney elemanına göre 14,2 kat enerji tüketimi artışı sağlanmıştır. Benzer çelik şerit düzenlemesine sahip fakat çelik elemanların betonarme çerçeveye kiriş ucundan yük aktardığı Deney Elemanı-5'te, Deney Elemanı-9'a göre enerji

tüketim kapasitesinde %19'luk azalma meydana gelmiştir. Panel kenarları boyunca betonarme çerçeveye yük aktaran Deney Elemanı-8'in enerji tüketim kapasitesi Deney Elemanı-9'a göre %28 azalmıştır.



Şekil 5.5. Deney Elemanı-1, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9'a ait Birikimli Enerji Tüketimi-Çevrim grafiği

6. ANALİTİK ÇALIŞMA

Doğal bir malzeme olan kilin pişirilmesi ile imal edilen tuğla, kür koşulları ve boyutu itibarıyla çok farklı dayanım gösterebilmektedir. Benzer şekilde, beton ile çeliğin birlikteliği ile elde edilen betonarmenin de her yük durumu için matematiksel olarak kesin eşitliklerle, ifade edilebilmesi henüz mümkün olmamıştır. Şu halde, betonarme çerçeve içerisinde dolgu malzemesi olarak kullanılan tuğla duvarı, bir bütün olarak ele alıp deneysel olarak elde edilen davranışı modelleyebilmek kolay bir amaç değildir. Ayrıca, kimyasal ankrajların uygulandığı bağlantı detaylarının çok karmaşık olan çelik şerit ve bağlantı elemanlarının modele dahil edilmesi, sıvalı tuğla dolgu duvar ve betonarme çerçeve ile birlikte, tüm sistemi, deneysel olarak elde edilen nihai davranışı elde etmek bakımından, oldukça karmaşık bir hale getirmektedir. Analitik açıdan ele alındığında ise, çelikle güçlendirilen bu tip çerçeveye üzerinde yapılmış olan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Tuğla dolgu betonarme çerçeveler üzerindeki yapılan ilk çalışmalar 1960’larda, tuğla panel üzerinde yapılan çalışmalar ile başlamıştır [9-11]. Araştırmacılar, çekme ve basınç çubuğu benzetimi [11] ile paneli eşdeğer basınç çubuk gibi ele almış ve çerçeve içerisinde modellemişlerdir. Bu yaklaşım hala yaygın biçimde kabul gören, güvenilir, basit, tasarım amacına uygun makro ölçekli bir tekniktir. Analitik çalışmada, betonarme çerçeve içerisindeki tuğla duvar eşdeğer basınç çubuğu yöntemi ile modellenmiştir. Güçlendirme amacıyla kullanılan çelik şeritlerin panel üzerindeki yerleşimleri de, bu yöntemin tercih edilmesinde etkili olmuştur. Bu bölümde öncelikli olarak tuğla panelin eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenmesi üzerinde durulacak, daha ileride deney elemanlarının modellenmesi ele alınacaktır.

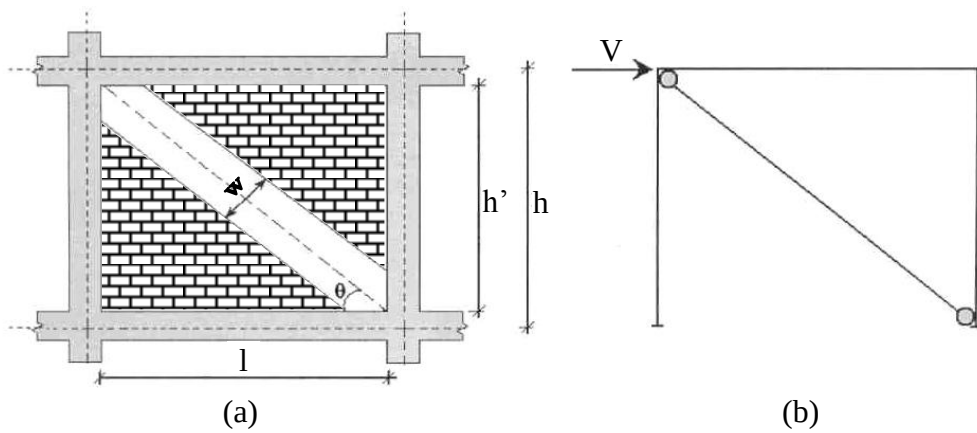
6.1. Tuğla Dolgu Duvarın Eşdeğer Diyagonal Çubuk Olarak Modellenmesi

Kullanılacak matematiksel modellemedeki ilk amaç, yöntemin basit ve güvenilir olmasıdır. Basit ifade ve ilkelerden oluşan kolay bir hesap rutini, önerilen güçlendirme yönteminin kolay uygulanabilir olmasını sağlayacaktır. Yukarıda da bahsedildiği gibi eşdeğer çubuk fikri ilk olarak Smith [9] ve Carter [11] tarafından,

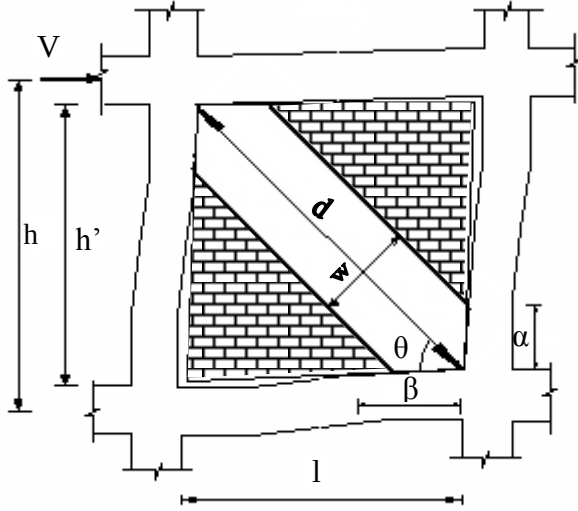
dolgulu çerçevelerin yatay rijitliği ve dayanımının tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Araştırmacılar, dolgunun izotropik ve homojen malzemeden oluştuğunu, çerçeveyi oluşturan elemanların birbirine rijit biçimde bağlı olduklarını ve dolgunun çerçeve elemanlarına ilişkilendirilmediği varsaymışlardır. Benzer bir yaklaşım FEMA273 [26] tarafından da önerilmektedir. Bu nedenle çalışmada, çelik şeritlerle güçlendirilen tuğla dolgu duvar iki adet eşdeğer çubukla modellenmiştir. Çubuklardan ilki, sadece basınç kuvveti taşıyan ve sıvalı tuğla dolgu duvarı benzeştirirken, diğeri sadece çekme kuvvetini karşılayabilen çelik şeritleri benzeştirmek amacıyla kullanılan çubuktur.

6.1.1. Tuğla dolgu duvar için eşdeğer çubuk modeli

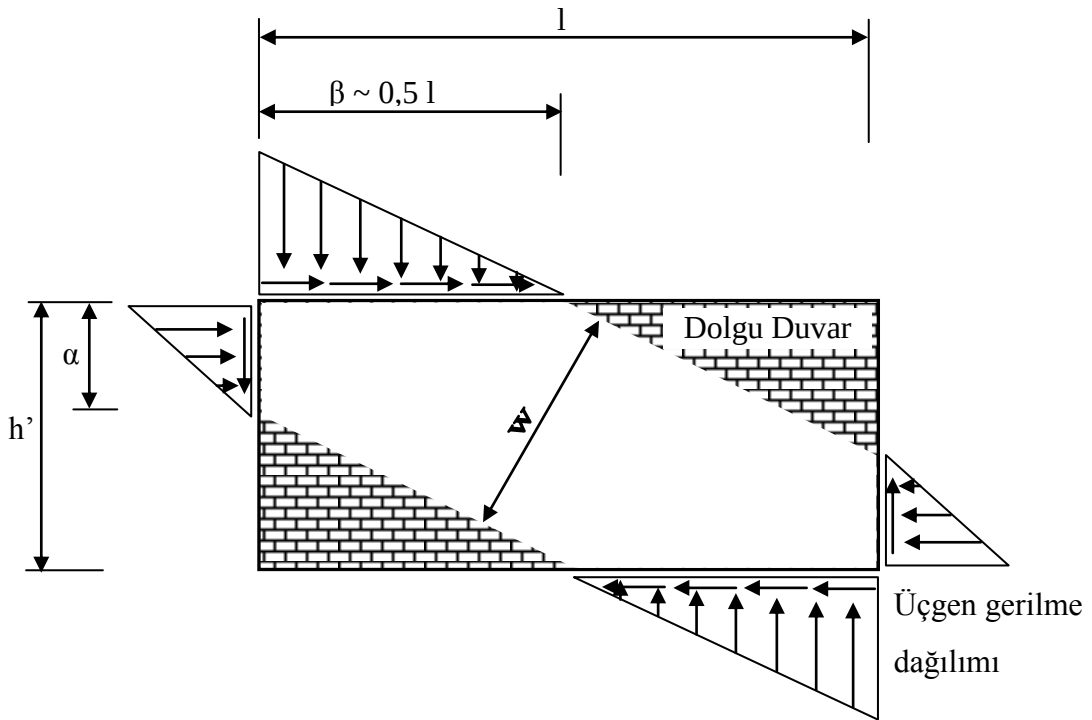
Eşdeğer çubuk metodunun temelinde, araştırmacılar, çerçeve ve dolgunun birbirine bağlı olmadığını varsaymışlardır. Yatay yük etkisi altındaki çerçevenin, içerisindeki panele, panelin karşılıklı iki köşesi boyunca, paneli çevreleyen kolon ve kirişlerinin belli bir bölgesinde temas ettiklerini öne sürmüşlerdir. Çerçeve ve dolgunun model parametreleri ve modelin var saydığı abartılmış deformasyon biçimi Şekil 6.1 ve 6.2’de sunulmuştur. Etkileşim bölgelerinin karşılıklı olarak birleştirilmesi ile panel içinde olduğu varsayılan diyagonal doğrultudaki sanal bant bölge, dolgunun yanal itkiye karşı çerçeveye katkı sağlayan bölümünü sembolize etmektedir.



Şekil 6.1. Çerçeve ve dolgu duvarın eşdeğer bir çubuk olarak modellenmesi.
a) Gerçek yapı, b) Model çerçeve



Şekil 6.2. Yatay kuvvet etkisi altında deformasyon biçimi abartılmış çerçeve.



Şekil 6.3. Dolgu duvarın karşılıklı iki köşesinde oluşan basınç bölgesi ve köşeleri birleştiren bant bölge içinde meydana gelen sanal basınç çubuğu

Araştırmacılar, panelin alt ve üst uçları arasında dönme meydana gelmediği ve Şekil 6.3'de de gösterildiği gibi kolon ile panel arasındaki etkileşim yüzeyi boyunca üçgen gerilme dağılımı olduğu kabulünü yapmışlardır. Gerilme bloğunun çerçeve kirişi

üzerinde oluşan kısmını ifade eden β , panel uzunluğunun yaklaşık olarak yarısı olarak kabul edilmiştir. Dolgu duvar kenarlarında olduğu varsayılan her bir üçgen gerilme bloğunun meydana getirdiği bileşke kuvvet ve bu kuvvetlerin oluşturduğu momentin, iki boyutlu panel düzleminde denge durumunda olması gerekmektedir. Denge şartının yanı sıra, etkileşim bölgelerindeki gerilme dağılımı ve köşegen doğrultusundaki birim şekil değişimleri hesaplanmıştır. Bu amaçla, dolgu duvarın üçüncü boyutu ihmal edilmiş ve sonlu farklar metodu ile dolgu duvar ağının her bir düğümünde, biharmonik denklem çözülmüştür. Yukarıda bahsedilen enerji ve denge denklemlerini yardımı ile araştırmacılar sanal basınç çubuğunun çerçeve kolonuna temas ettiği α boyutunu, dolgu duvarın, kolona göre göreceli rijitliği olarak ifade edilen, boyutsuz bir λh parametresini kullanılarak tanımlamaktadırlar.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_{\text{dolgu}} \times t \times \sin(2\theta)}{4 \times E_{\text{kolon}} \times I_{\text{kolon}} \times h'}} \quad (6.1)$$

Eşitlikte,

E_{dolgu}	Dolgu duvarın elastisite modülü, (MPa)
t	Dolgu duvarın kalınlığı, (mm)
θ	Tanjantı dolgu duvarın h/l oranını veren açı, (Radyan)
E_{kolon}	Çerçeve kolonunun elastisite modülü, (MPa)
I_{kolon}	Kolonun atalet momenti, (mm^4)
h'	Dolgu duvarın yüksekliği. (mm)

Dolgu duvar ile kolonun temas ettiği bölgenin uzunluğu, “elastik zemin üzerine oturan tekil yük etkisi altındaki serbest kiriş” benzetimi ile α/h ve λh parametreleri cinsinden elde edilmiştir.

$$\frac{\alpha}{h} = \frac{\pi}{2 \times \lambda \times h} \quad (6.2)$$

Eşitlikte,

h Kiriş orta yükseklikleri arasında ölçülen, kolon yüksekliği, (mm)

Araştırmacıların deneysel veri ile destekledikleri bu teorik çalışma sonucunda, efektif eşdeğer basınç çubuğu genişliğinin sadece panelin en boy oranına bağlı olmadığı, malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinden de etkilendiği sonucuna varılmıştır. Eşdeğer basınç çubuğunun genişliğini veren ifade Eş. 6.4’de sunulmuştur.

$$d = \sqrt{l^2 + (h')^2} \quad (6.3)$$

$$w = 0,175 \times (\lambda \times h)^{-0,4} \times d \quad (6.4)$$

Eşitliklerde,

l	Dolgu duvarın uzunluğu, (mm)
h'	Dolgu duvarın yüksekliği, (mm)
λ	Eş. 6.1 kullanılarak elde edilmiştir,
h	Kiriş orta yükseklikleri arasında ölçülen, kolon yüksekliği, (mm)
d	Dolgu duvarın köşegen uzunluğu, (mm)

Çalışmada kullanılan malzeme özellikleri ve çerçeve geometrisine göre tuğla dolgu duvarın eşdeğer basınç çubuğuna benzetimi

Tuğla dolgu duvarı, eşdeğer basınç çubuğu biçiminde modelleyebilmek için öncelikle tuğla dolguya ait elastisite modülünü, tuğlanın prizmatik basınç dayanımını ve basınç çubuğunun eksenel rijitliğinin bilinmesi gereklidir. Tuğlanın prizmatik basınç dayanımı hakkında FEMA273’de [26], “Eğer, *Tuğlanın basınç dayanımı ve bağlayıcı tipi biliniyorsa, MSJC (1995a) [36]’daki Çizelge 1 ve Çizelge 2’deki değerlerin çarpımı tuğlanın tahmini basınç dayanımını verir.*” denmektedir. ASTM C270’e [24] göre hazırlanmış olan bağlayıcı harç karışımı, ASTM tarafından *N tipi*

harç olarak tanımlanmaktadır. N tipi harç ve sıvalı tuğla birimin basınç dayanımı olan 34,9 MPa değerleri için, önerilen çizelgelerdeki değerler enterpolasyon yapılırsa, prizmatik tuğla basınç dayanımı 13,1 MPa olarak hesaplanmaktadır.

Basınç dayanımı hesaplanan tuğla dolgu duvarın elastisite modülü yine FEMA273'in [26] önerdiği Eş. 6.5 ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{\text{dolgu}} = 550 f_p' \text{ (MPa)} \quad (6.5)$$

$$E_{\text{dolgu}} = 550 f_p' = 550 \times 13,1 \cong 7200 \text{ MPa}$$

Tuğla dolgu duvar elastisite modülü Eş. 6.1'e yerleştirilerek λ parametresi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Eş. 6.1'de gerekli olan E_{kolon} değeri TS500'de [31] önerilen Eş. 6.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Eş. 6.6'da, istenen karakteristik beton basınç dayanımı Çizelge 3.4'de verilmiş olan deney elemanlarına ait beton basınç dayanımlarının ortalama değeri olan $f_{ck} = 12,6 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır.

$$E_c = 3250 \sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ (MPa)} \quad (6.6)$$

Eşitlikte,

E_c Betonun elastisite modülü, (MPa)

f_{ck} Betonun karakteristik basınç dayanımı, (MPa)

$$E_{\text{kolon}} = 3250 \sqrt{f_{ck}} + 14000 = 3250 \sqrt{12,6} + 14000 \cong 25530 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{7200 \times 82 \times \sin(2 \times 0,52 \text{ } 33^\circ)}{4 \times 25530 \times 12,5 \times 10^{-6} \times 750}} = 4,807 \times 10^{-3} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Hesaplanan λ parametresi Eş. 6.4'e yerleştirilerek eşdeğer basınç çubuğunun genişliği bulunmuştur.

$$d = \sqrt{l^2 + (h')^2} = \sqrt{1300^2 + 750^2} = 1500,8 \text{ mm}$$

$$w = 0,175 \times (\lambda \times h)^{-0,4} \times d = 0,175 \times (4,807 \times 10^{-3} \times 825)^{-0,4} \times 1500,8$$

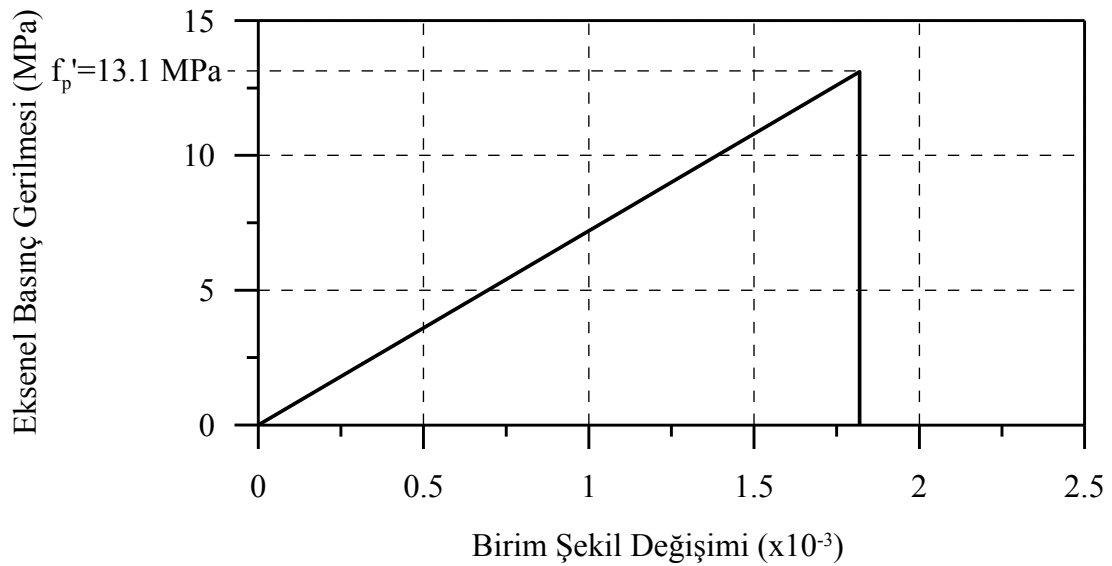
$$w = 151 \text{ mm} \approx 150 \text{ mm}$$

Basınç çubuğunun aksenal rijitliği FEMA 356'da [30] Eş. 6.7 biçimde verilmektedir,

$$k = \frac{w \times t \times E_{\text{dolgu}}}{d} \quad (6.7)$$

$$k = \frac{150 \times 83 \times 7200}{1500,8} \cong 59,7 \text{ kN/mm}$$

Yapılan varsayımlar ve hesaplamalar sonucunda betonarme çerçeve içerisindeki her iki yüzü sıvanmış tuğla dolgu duvar, basınç dayanımı 13,1 MPa, kesit boyutları 83 x 150 mm, aksenal rijitliği 59,7 kN/mm ve gerilme –birim şekil değişim ilişkisi Şekil 6.4'de verilmiş olan eşdeğer basınç çubuğuna dönüştürülmüştür.



Şekil 6.4. Sıvalı tuğla dolgu duvarı benzeştiren, elasto-plastik basınç çubuğunun gerilme-birim şekil değişim grafiği

6.1.2. Donatı, beton ve çelik şeritlerin modellenmesi

Bu bölümde, dolgu duvarı çevreleyen betonarme elemanların ve dolgu duvar üzerindeki çelik şeritlerin, matematiksel modele uyarlanması basit bir şekilde anlatılacaktır. Modellemede kolaylık sağlanması ve üretilen betonların birbirinden çok farklı dayanım göstermemesi sebebiyle, tüm deney elemanlarında tek tip beton dayanımı seçilmiştir. Modeldeki karakteristik beton basınç dayanımı Çizelge 3.4’de verilen deney programındaki tüm elemanlara ait değerlerin aritmetik ortalaması olan 12,6 MPa olarak alınmıştır. Betonarme elemanlara ait elastisite modülü TS 500 [31] de önerilen Eş. 6.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Taşıyıcı elemanlardaki moment-eğrilik ilişkisi, Geliştirilmiş Kent-Park [32] modeli ile hesaplanmış, doğrudan bilgisayar modeline girilmiştir. Kolon boyuna donatısı olarak güncel yapım yönetmeliklerinin kullanılmasını tavsiye etmediği düz donatı seçilmiştir. Bunun başlıca sebebi ilk bölümde de anlatıldığı gibi, mevcut yapı stokunu modelleyebilmektir. Kolonun temel ile birleştiği, kolon alt ucunda 120 mm (15Ø) uzunluğunda bindirme bölgesi mevcuttur. Kolon boyuna donatısındaki bu süreksizlik nedeniyle, kolon boyuna donatısının akma dayanımına ait mevcut yapım yönetmeliklerinde bilgi bulunmamaktadır. Öneri olarak FEMA 273 [26] nervürlü donatı için hesaplanan değer yarıya bölünerek azaltılmasını tavsiye etmektedir. Canbay ve Frosh [33] tarafından yapılan çalışmada nervürlü donatılar için, bindirmeli eke sahip kolon boyuna donatısının akma dayanımı Eş. 6.8’de gösterildiği gibi önerilmiştir. Düz donatının akma dayanımı Eş. 6.8’in yarıya bölünmesi ile Eş. 6.9’daki gibi hesaplanmıştır.

$$f_y' \approx f_y \sqrt{\frac{15\phi}{40\phi}} = 0.61 \times f_y \quad (6.8)$$

ve

$$f_y'' = f_y' \times 0.5 = 0.31 \times f_y \quad (6.9)$$

Eşitlikte,

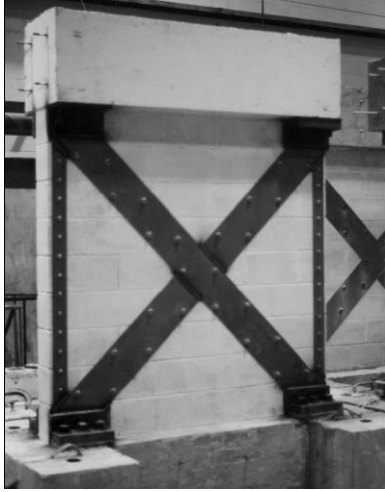
f_y	Kolon boyuna donatısının akma dayanımı, (MPa)
f_y'	15Ø bindirme bölgesi parametresine göre azaltılmış kolon boyuna donatısı akma dayanımı, (MPa)
f_y''	15Ø bindirme bölgesi ve düz donatı parametrelerine göre azaltılmış kolon boyuna donatısı akma dayanımı, (MPa)

Modelde, çelik şeritleri benzeştiren çubuklara çelik şeridin kesit özellikleri ve çelik şerit malzemesinin mekanik özellikleri hiçbir değişiklik yapılmadan, doğrudan atanmıştır. Her iki yüzden çelik şeritler ile güçlendirilen Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-3 için, bilgisayar modelinde, tek yüzden güçlendirme uygulanan deney elemanlarına ait çubuklar için girilen kesit özellikleri iki ile çarpılarak, değiştirilmiştir. Çelik şeritler, pekleşmenin de tanımlandığı 3 doğrulu malzeme modeli ile ifade edilmiştir.

6.3. Taghdi ve ark.'nın [18] Önerdiği Makro Ölçekli Model

Taghdi ve ark. [18] yaptıkları çalışmada, tuğla duvarı güçlendirmekte kullandıkları çelik şeritlerin sistemin yatay yük taşıma kapasitesine olan katkısını bazı varsayımlar yaparak yaklaşık olarak hesaplamışlardır. Araştırmacılar test ettikleri betonarme ve briket duvardan oluşan 6 deney elemanının sonuçlarından hareketle, makro ölçekli iki boyutlu bir model önermişlerdir. Önerilen modelde, Resim 6.1'de gösterilen çelik şeritlerle güçlendirilmiş olan briket duvar elemanı Şekil 6.5(a)'daki gibi iki boyutlu çekme ve basınç çubuklarından oluşan çubuk taşıyıcı sisteme indirgemektedir. Araştırmacılar, çubuk taşıyıcı sistemdeki basınç kuvveti taşıyan elemanları ihmal etmişler, sadece eksenel çekme kuvveti etkisindeki çubukları tasarıma esas olarak dikkate almışlardır. Araştırmacıların, güçlendirilen deney elemanının yatay yük kapasitesini tahmini için önerdikleri ifade Eş. 6.10'da sunulmuştur. Bu ifadede, duvarı güçlendiren çelik şeritlerin yanı sıra betonarme veya briket duvar içerisindeki bulunan yatay ve düşey donatıların da yatay yük kapasitesi üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Mevcut çalışmada, betonarme çerçeve içerisindeki tuğla dolgu duvarın

kapasitesini hesaplayabilmek için Eş. 6.10'daki yatay ve düşey donatı ifadeleri ihmal edilerek model Eş. 6.11'deki yeniden düzenlenmiştir.



Resim 6.1. Düşey ve çapraz doğrultudaki çelik şeritlerle güçlendirilen duvar elemanı [17]

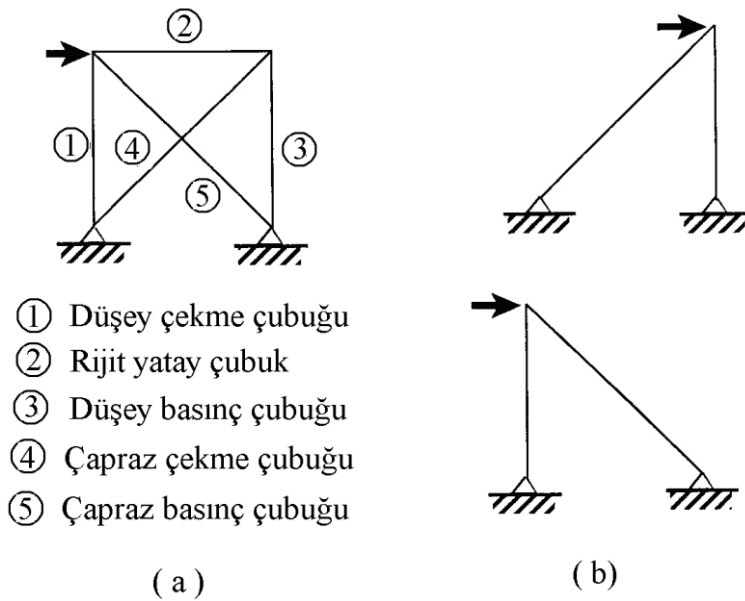
$$V_U = \frac{A_{\text{düşey}} f_{yp} d_v + A_{\text{çapraz}} f_{yp} d_v \sin \theta + 0,5P d_v + \sum A_{shi} f_{yh} h_i + \sum A_{si} f_y d_i}{h'} \quad (6.10)$$

Eşitlikte,

V_U	Güçlendirme sonrası ulaşılmaması tasarlanan kesme kuvveti, (kN)
$A_{\text{çapraz}}$	Çapraz doğrultudaki çelik şeridin alanı, (mm ²)
f_{yp}	Çelik şeritlerin akma dayanımı, (MPa)
d_v	Düşey şeritler arasındaki uzunluk, (mm)
$A_{\text{düşey}}$	Düşey doğrultudaki çelik şeridin alanı, (mm ²)
θ	Tanjantı dolgu duvarın h/l oranını veren açı, (Derece)
P	Çubuk taşıyıcı sisteme etkiyen toplam düşey yük, (kN)
A_{shi}	i. sıradaki yatay donatının alanı, (mm ²)
h_i	i. sıradaki yatay donatının moment kolu, (mm)
A_{si}	i. sıradaki düşey donatının alanı, (mm ²)
d_i	i. sıradaki düşey donatının moment kolu, (mm)
h'	Duvarın yüksekliği, (mm)

$$V_U = \frac{A_{\text{düsey}} f_{yp} d_v + A_{\text{çapraz}} f_{yp} d_v \sin \theta + 0,5 P d_v}{h'} \quad (6.11)$$

Taghdi ve ark. [18], Resim 6.1’de güçlendirilen deney elemanını Şekil 6.5(a)’da verilen çubuk taşıyıcı sisteme dönüştürüp, çubuk taşıyıcı sistemden basınç çubuklarını çıkartarak taşıyıcı sistemin yatay yük taşıma kapasitesine çekme çubuklarının aktığı anda ulaşıldığını kabul etmişlerdir. Eş. 6.11’de verilen kesme kuvveti kapasite ifadesi, çapraz ve düşey çelik şeritlerin akma noktasındaki yatay yük kapasitelerinin toplanması ile elde edilmiştir. Araştırmacılar, Şekil 6.5(b)’de gösterilen düşey ve çapraz doğrultudaki çekme çubuklarını akmaya ulaştıran yatay yük ile çubuk alanı arasındaki ilişkiyi sırasıyla Eş. 6.12 ve Eş. 6.13’deki biçimiyle sunmuşlardır.



Şekil 6.5. Basitleştirilmiş çubuk taşıyıcı sistem

$$A_{\text{capraz}} = \frac{V_U - V_{U0}}{f_{yp} \cos \theta} \quad (6.12)$$

$$A_{\text{düsey}} = \frac{V_U h' - (V_U - V_{U0}) \tan \theta d_v - 0.5 P d_v}{f_{vp} d_v} \quad (6.13)$$

Eşitliklerde,

V_{U0} Güçlendirilmemiş duvarın yatay yük taşıma kapasitesi, (kN)

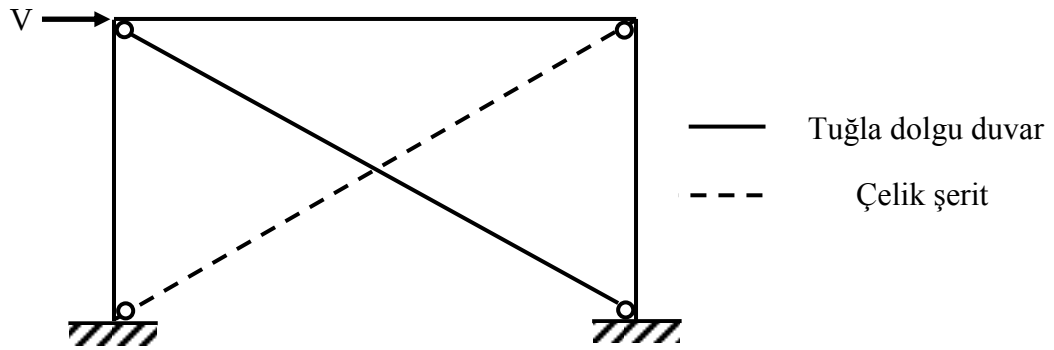
Çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanları için Eş. 6.11'e göre hesaplanmış yatay yük taşıma kapasiteleri Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

6.4. Bilgisayar Modeli Oluşturulması ve İtme Analizi

Analitik model, Drain-2Dx [34] plastik düzlem çerçeve bilgisayar programı ile oluşturulmuştur. Analitik modelde, tuğla duvarı benzeştiren çubuk sadece basınç kuvveti taşıırken, çelik şeridi benzeştiren çubuklar ise sadece çekme kuvveti taşıyacak şekilde düzenlenmiştir. Basınç çubukları ihmal edilerek, model basitleştirilmiştir. Yapılan analitik çalışmanın amacı tek katlı ve tek açıklıklı tuğla dolgu betonarme çerçevelerin kolay ve hızlı bir biçimde, güçlendirme sonrası başlangıç rijitliği ve yatay yük taşıma kapasitesini benzeştirebilmektir. Deneysel göçme biçimi, eleman davranışı veya deplasman karakteristiği bakımından bir benzeşim amacı güdülmemiştir. Bu nedenle, yatay yük kapasitesine çekme kuvveti taşıyan elemanların taşıma gücüne ulaşması ile erişen deney elemanlarının modelinde, basınç çubuklarının ihmal edilmesi sonucu etkilemeyecektir. Çelik şeritlerle duvar güçlendirmesi üzerine çalışmış olan Taghdi'nin [18] önerdiği iki boyutlu çubuk modelinde de basınç çubukları ihmal edilerek, sadece çekme çubukları hesaplara katılmıştır. Taghdi'nin [18] yatay yük kapasitesinin hesabına yönelik olarak önerdiği model yaklaşımı mevcut çalışmaya uyarlandığında deneysel kapasite ile oldukça yakın sonuç elde edilmiştir. Analitik modelde, betonarme çerçeve ile çelik elemanlar arasında yük iletimi amacıyla geliştirilen bağlantı detayları da dikkate alınmamıştır. Bir başka deyişle, bütün deney elemanları için, çelik şeritlerin betonarme çerçeveye bağlanış biçimi ortaktır. 2 boyutlu modelde düzleme dik yöndeki, şeritleri panele bağlayan yüksek dayanımlı çubukların tanımlanması mümkün olmadığından, bu bağlantıların etkisi de ihmal edilmiştir. Drain-2Dx hem yük kontrollü, hem de deplasman kontrollü yükleme uygulayarak, itme analizi gerçekleştirebilmektedir. Ancak, Prakash ve ark. [34], kuvvet kontrollü yükleme adımının rijitlikteki kayıp

dolayısıyla itme analizinde nümerik hataya sebep olabileceğini bildirmişlerdir. Model çerçeve, bu sebepten dolayı deplasman kontrollü olarak yüklenmiştir. Drain-2Dx, modeli yüksüz konumdan başlayarak, göçene kadar yüklemektedir. Bu sebeple deneysel yük-deplasman grafiklerinin zarfında açıkça görülen tersinir tekrarlanan yüklenme çevrimleri sırasında yaşanan rijitlik kaybı modelde tanımlanamamıştır. Bu model varsayımı deney elemanlarının yatay yük kapasitesi üzerinde başarılı bir tahmin yapılmasını etkilememiştir. Bu sebeple model daha sonraki çalışmalar için güçlü bir referans noktası oluşturmaktadır.

Güçlendirilmiş tuğla dolgulu betonarme çerçeveye ait analitik model Şekil 6.5’de sunulmuştur. Çizelge 6.1’de ise çelik şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarına ait deneysel ve analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.5. Güçlendirilmiş çerçeveye ait analitik model.

Çizelge 6.1. Deney sonuçlarının itme analizi sonuçları ile karşılaştırılması.

Deney Elemanı No	V_U [18] (kN)	Maksimum Dayanım, (kN)			Başlangıç Rijitliği, (kN/mm)		
		Deneyssel	Analitik	$\frac{\text{Deneyssel}}{\text{Analitik}}$	Deneyssel	Analitik	$\frac{\text{Deneyssel}}{\text{Analitik}}$
1	-	64	56	1,14	45,4	50,8	0,89
2	444	267	215	1,24	258,0	226,5	1,14
3	550	297	227	1,31	305,6	297,7	1,03
4	222	169	161	1,05	198,6	172,6	1,15
5	275	189	170	1,11	236,5	228,5	1,04
6	275	181	170	1,06	260,3	228,5	1,14
8	275	200	170	1,18	356,6	228,5	1,56
9	275	175	170	1,03	245,4	228,5	1,07

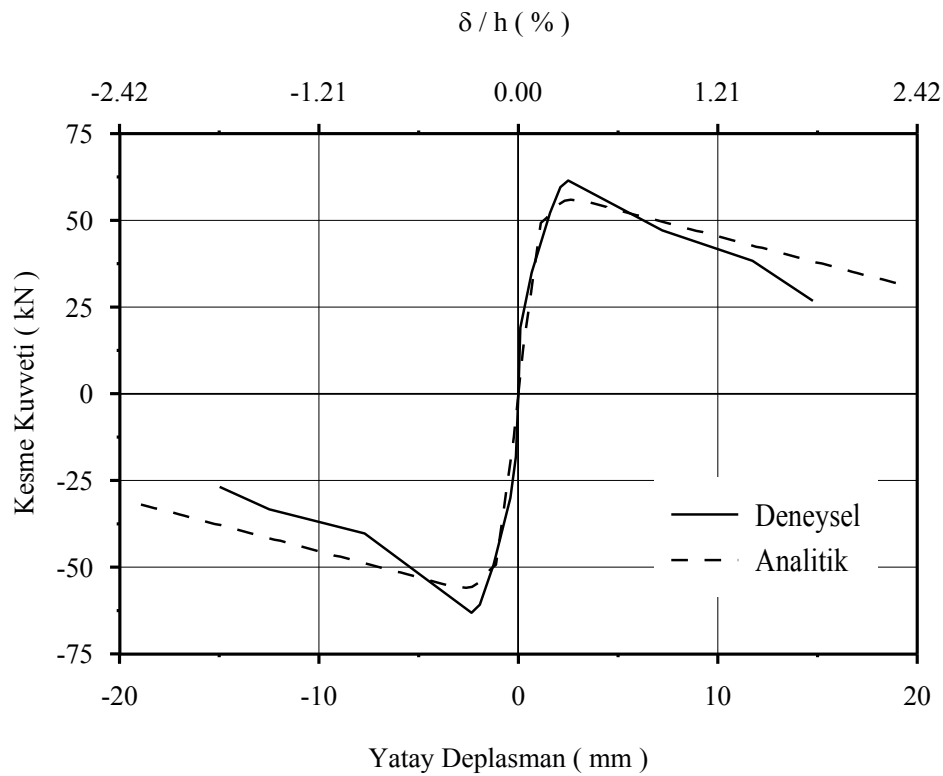
6.4.1. Zarf eğrileri

Deney Elemanı-1

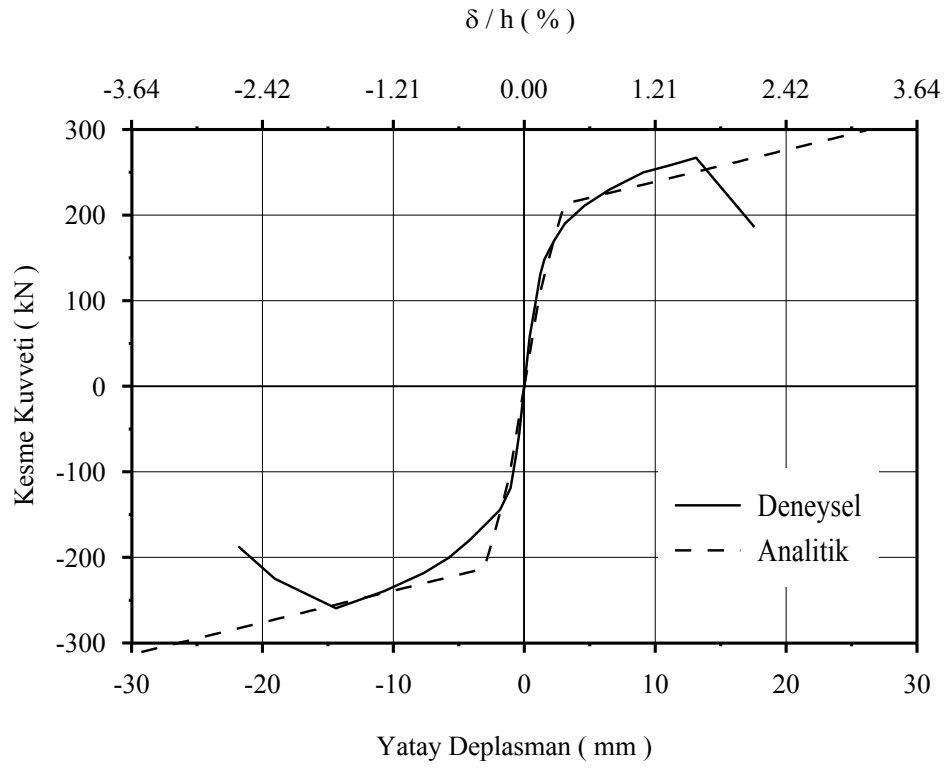
Tuğla dolgulu çerçevenin hesaplanan yatay yük taşıma kapasitesi, deneysel sonuca oldukça yakındır. Analitik model ile deney elemanının başlangıç rijitliği, deneysel rijitliğe göre %12 fazla hesaplanmıştır. Tuğla dolgulu betonarme çerçevenin analitik hesabında oldukça yakın sonuçlar alınabilmesi, yapılan modellemede basınç çubuğu ve kolon akma gerilmesi kabullerinin geçerli olduğunu göstermektedir. Ancak, yatay yük taşıma kapasitesinin, deney sonucundan %12 daha düşük tahmin edilmesinin nedeni basınç çubuğu genişliğinin ve buna bağlı olarak çubuk rijitliğinin hesaplanmasında yapılmış olan düşük düzeydeki hatadır. Bununla birlikte, kolon-kiriş birleşimlerinin moment aktaramaması ve bu tür birleşimin bilgisayar modelinde benzeştirilememesi nedeniyle, deneysel başlangıç rijitliğinin itme analizine göre daha düşük olduğu düşünülmektedir. Deney elemanının zarf eğrisi, itme analizi sonucunda elde edilen zarf eğrisiyle birlikte Şekil 6.6’da verilmiştir.

Deney Elemanı-2 ve 3

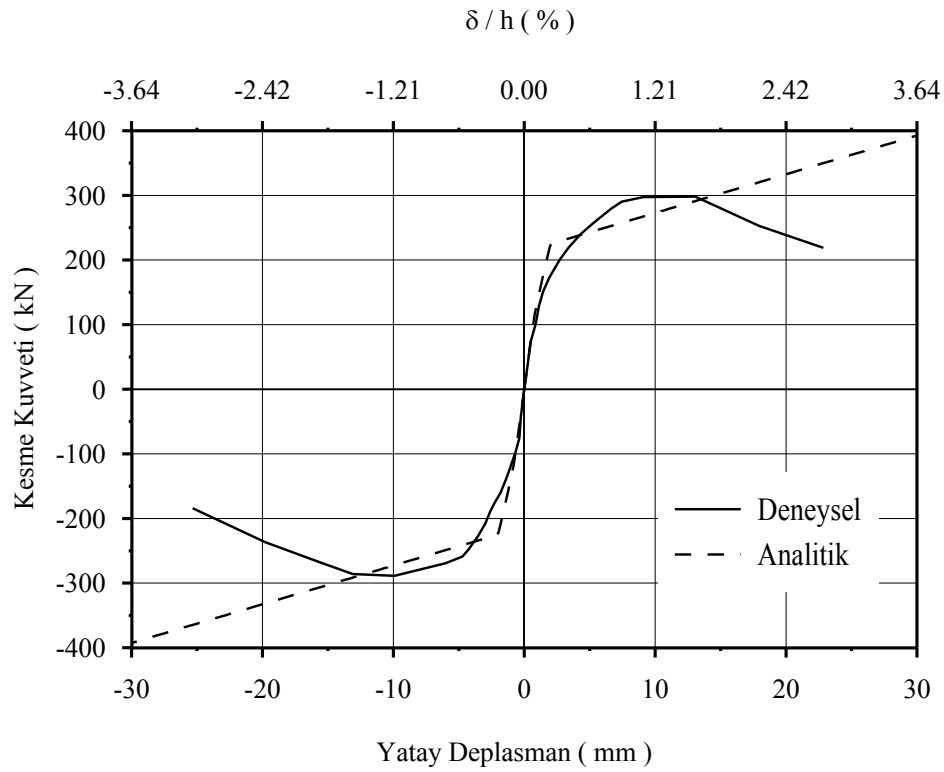
Simetrik biçimde güçlendirilen her iki deney elemanında da tuğla dolgu duvarlı güçlendirilmiş çerçevenin deneysel yatay yük taşıma kapasitesi, hesaplanan sonuçtan fazladır. Çelik şeridi benzeştiren çubukta çekem etkisi ile pekleşmenin meydana gelmesi sonucunda, yaklaşık olarak %1,5'lik ötelenme oranında deneysel ve analitik yatay yük taşıma kapasiteleri birbirine eşit olmaktadır. Analitik model, düğüm noktası daha rijit olan Deney Elemanı-3'ün başlangıç rijitliğini oldukça yakın tahmin etmiştir. Güçlendirme deseninde düşey şeridin eklenmesi analitik olarak taşınan yatay yükü %6 civarında artırmıştır. Deney Elemanı-2 ve 3'ün analitik ve deneysel zarf eğrileri sırasıyla Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de sunulmuştur.



Şekil 6.6. Deney Elemanı-1'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri



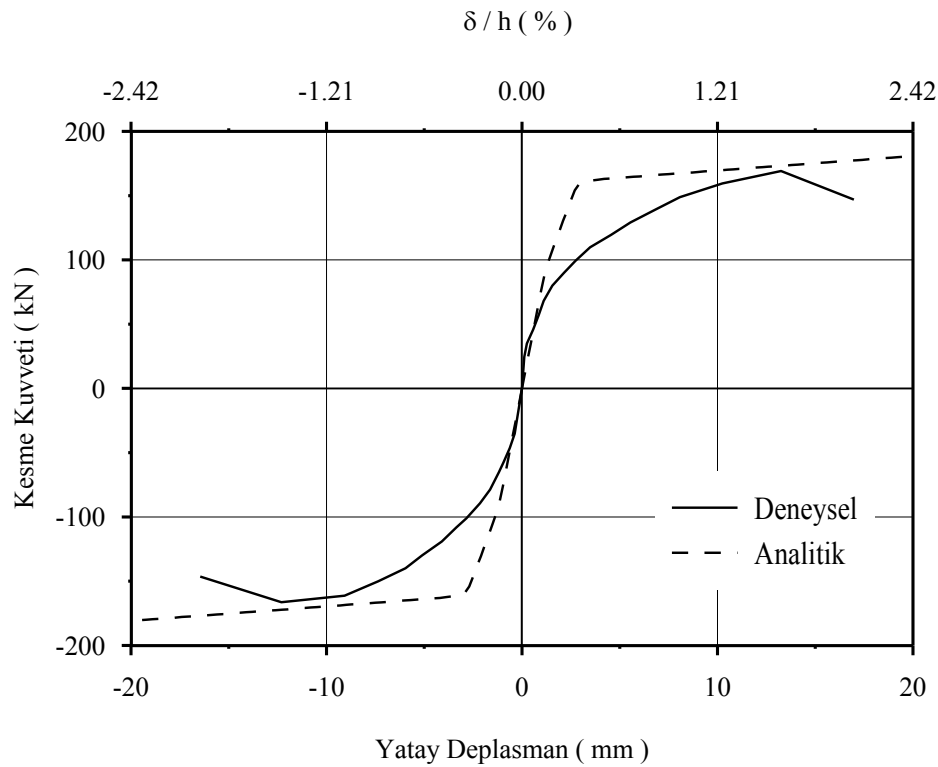
Şekil 6.7. Deney Elemanı-2'ye ait deneysel ve analitik zarf eğrileri



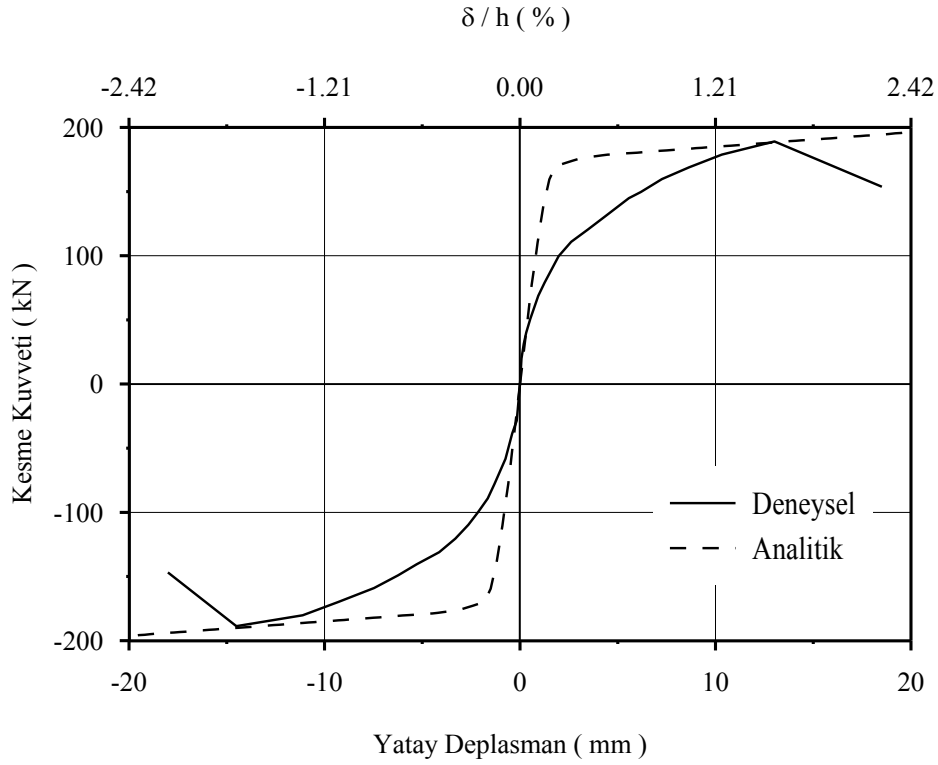
Şekil 6.8. Deney Elemanı-3'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri

Deney Elemanı-4 ve 5

Tek yüzden güçlendirilmiş deney elemanları, her iki yüzden güçlendirilmiş deney elemanlarına kıyasla deneysel sonuca yatay yük kapasitesi bakımından daha yakın sonuç vermiştir. Analitik sonuçlar deney verileriyle en fazla %11’lik bir sapma oranına sahiptir. Kiriş uç bağlantısının denendiği bu deney elemanlarında da %1,5’lik ötelenme oranında analitik yatay yük tahmininin deneysel yatay yük kapasitesi yaklaştığı görülmektedir. Analitik model ile deney elemanının başlangıç rijitliği bu elemanlar için %5-%15 oranında farklı hesaplanmıştır. Güçlendirme düzenlemesinde düşey şerit eklenmesi başlangıç rijitliği tahminini deneysel sonuca yaklaştırmış ve %6 civarında analitik taşıma gücünü artırmıştır. Deney Elemanı-4 ve 5’e ait analitik ve deneysel zarf eğrileri sırasıyla Şekil 6.9 ve 6.10’da sunulmuştur.



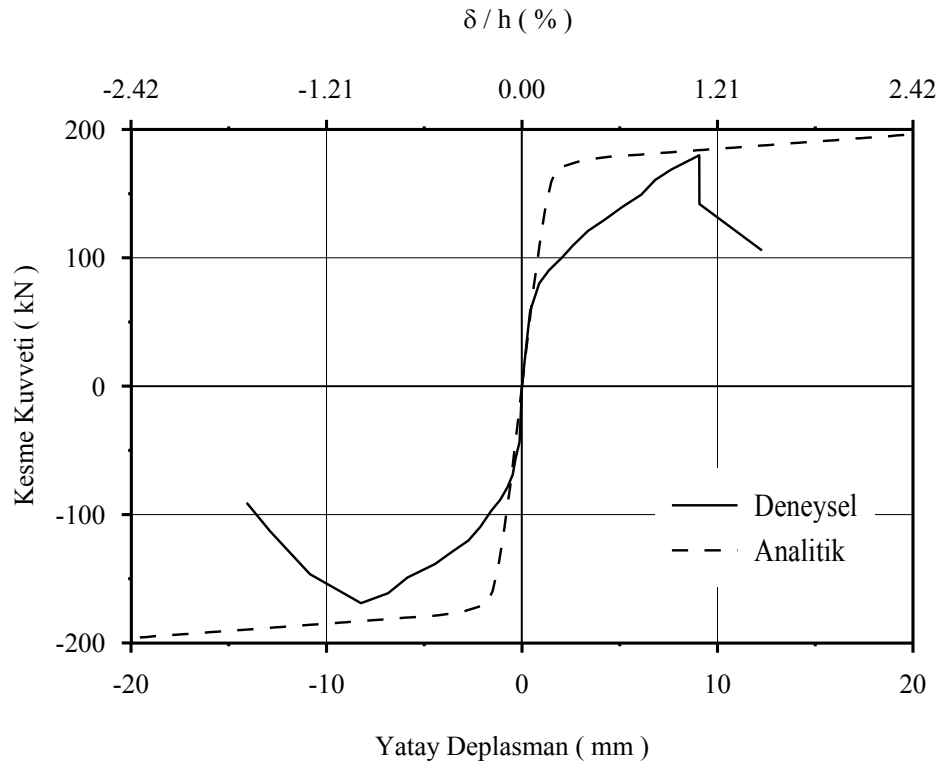
Şekil 6.9. Deney Elemanı-4’e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri



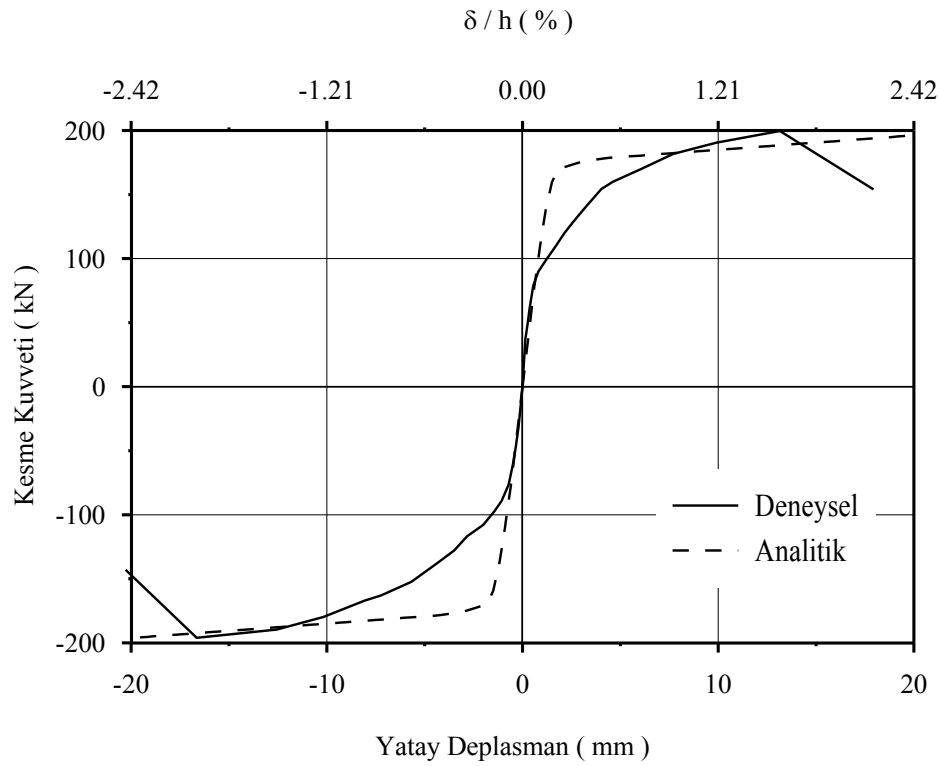
Şekil 6.10. Deney Elemanı-5'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri

Deney Elemanı-6 ve 8

Model kısıtlamaları sebebiyle, Deney Elemanı-5, Deney Elemanı-6, Deney Elemanı-8 ve Deney Elemanı-9 özdeş analitik çıktıya sahiptir. Deney Elemanı-8 için analitik hesap %18 daha az yatay yük taşıma kapasitesi öngörmüştür. Ancak başlangıç rijitliği bakımından analitik sonuç, deneysel veriye göre %50 oranında farklıdır. Bu modelde, rijit köşe kaynaklarının analitik model üzerinde hesaba katılmaması, rijitlik sonucunun büyük oranda tahmin edilememesine sebep olmuştur. Bununla birlikte diğer deney elemanlarının aksine Deney Elemanı-8'de göçme mekanizmasının farklı olması, diğer analitik sonuçlara göre bu deney elemanında hatanın yüksek olmasına etkilidir. Deney Elemanı-6 ve 8'e ait analitik ve deneysel zarf eğrileri sırasıyla Şekil 6.11 ve 6.12'de sunulmuştur.



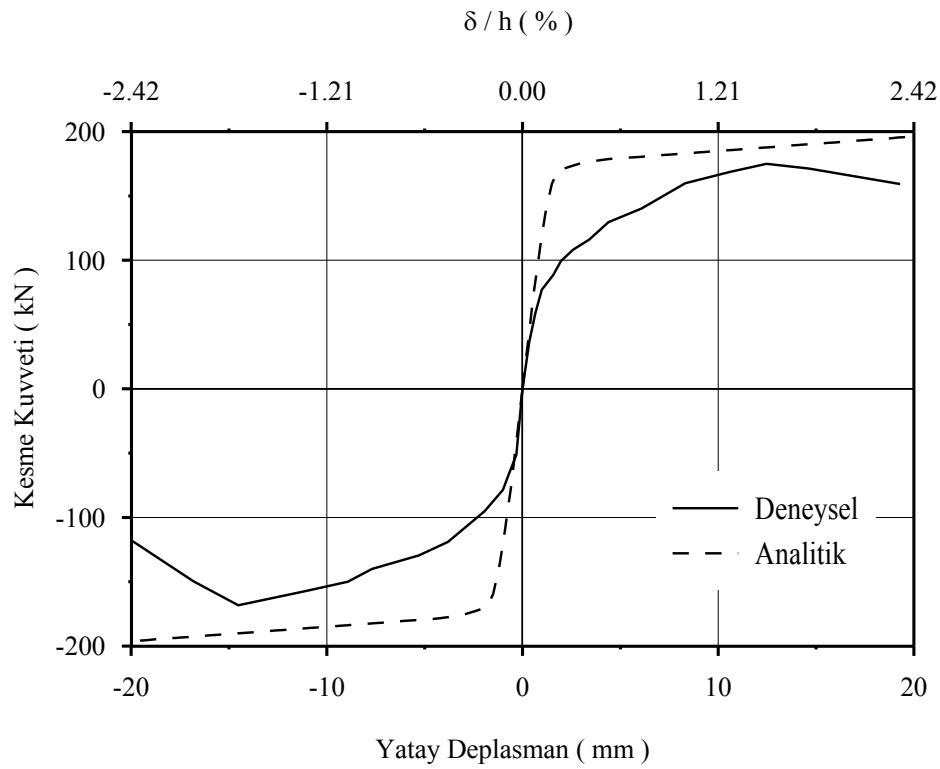
Şekil 6.11. Deney Elemanı-6'ya ait deneysel ve analitik zarf eğrileri



Şekil 6.12. Deney Elemanı-8'e ait deneysel ve analitik zarf eğrileri

Deney Elemanı-9

Deney Elemanı-9 için yapılan analitik hesap, deneysel yatay yük kapasitenin %3 gerisindedir. Başlangıç rijitliği bakımından, deneysel sonuç ile analitik yaklaşım arasında %7'lik bir fark mevcuttur. Kolon-kiriş düğümünde geliştirilen bağlantı detayına sahip Deney Elemanı-9 için analitik model çıktıları ile deneysel sonuçlar oldukça iyi bir uyum içerisindedir. Deney Elemanı-9'a ait analitik ve deneysel zarf eğrileri sırasıyla Şekil 6.13'de sunulmuştur.



Şekil 6.13. Deney Elemanı-9'a ait deneysel ve analitik zarf eğrileri

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Ülkemiz yapı stoku, deprem kuvvetleri karşısında yeterli dayanıma sahip olmayan birçok binayı barındırmaktadır. Birçok nedenle ilişkilendirilen bu eksikliklerin temelinde binaların büyük bir kısmının yeterli mühendislik hizmeti almaması bulunmaktadır. Malzeme, işçilik ve tasarım hataları betonarme çerçeve türü yapıların yatay deprem kuvvetleri karşısındaki dayanımını ve yanal rijitliğini olumsuz etkilemektedir. Yapım aşamasındaki kusurlara ek olarak, ticari kaygı güdülerek yapının kullanım amacı dışında mimari bölmeler oluşturup kat planı veya bina düşey aksı boyunca yük ve rijitlik dağılımı değiştiren uygulamalara sıkça rastlanmaktadır.

Ülkemizin barındırdığı nüfusun karşı karşıya olduğu deprem afetinden korunma amacıyla, yeterli sismik performansı sergilemekten uzak yapıların tespit edilip, bir an önce kısıtlı ülke kaynaklarını israf etmeden, hızlı bir yapım aşamasıyla güçlendirmek öncelikli hedefimiz olmalıdır. Çalışmaya konu olan teknik, ekonomik ve hızlı uygulanabilir olduğu kadar, başarılıdır. Betonarme yapılarda birçok sebepten dolayı kullanılan tuğla dolgu duvarları yıkmak yerine sisteme fayda sağlayabilecek bir unsura çevirmek şüphesiz ki uygulamada bir eksikliği giderecektir. Önerilen güçlendirme yöntemi, diğer popüler güçlendirme yöntemlerinin kaybettirdiği yapının fonksiyonelliğinin korunması ve imalat sırasında yapının hizmet verememesi gibi olumsuzları da çözmektedir.

Yapılan çalışmada sünek olmayan tuğla dolgulu betonarme çerçevelerin çelik şeritlerle güçlendirilmesi araştırılmıştır. Araştırmada güncel yapı stokunun bünyesinde bulundurabileceği en olumsuz çerçeve tipi seçilmiştir. Deney çalışma kapsamında, çelik şeritlerin betonarme çerçeveye bağlantı detayları, güçlendirmenin simetrik ya da tek yüzden uygulanabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır.

Deneysel araştırmada 1/3 geometrik ölçekli tek katlı, tek açıklıklı tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve elemanı kullanılmıştır. Betonarme çerçeve ülkemizde mevcut betonarme yapılarda sıkça karşılaşılan kusurları temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. 9 adet deney elemanı deprem yüklerini benzeştirecek biçimde, tersinen tekrarlanan

yatay yükleme altında test edilmiştir. Deney sonuçları deneysel değişkenler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Taghdi ve ark.'nın [18] önerdiği eşitlikler kullanılarak hesaplanan yatay yük kapasitesi deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca deney elemanları Drain-2Dx ile modellenerek itme analizleri yapılmıştır. Çubuk eleman yaklaşımları sonucunda elde edilen yatay yük ve itme analizi ile elde edilen zarf eğrileri, deney elemanlarına ait deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Kısıtlı sayıdaki elemana ait analitik ve deneysel sonuç karşılaştırıldığında şu öneri ve sonuçlara varılmıştır.

7.1. Sonuçlar

Deneysel çalışmada çelik şeritlerle sekiz adet deney elemanı güçlendirilmiş ve test edilmiştir. Kısıtlı sayıda deney elemanından elde edilen deneysel veriler sonucunda;

- Çelik şeritler, tuğla dolgulu betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini artırmıştır. En büyük yatay dayanım artışı simetrik biçimde güçlendirilen Deney Elemanı-3 ile elde edilmiştir. Deney Elemanı-3, güçlendirilmemiş deney elemanına göre yatay yük taşıma kapasitesinde 4,7 kat artım sağlamıştır. Tek yüzden güçlendirilen deney elemanlarındaki yatay yük kapasitesindeki artış yaklaşık 3 kat dolayında kalmıştır.
- Simetrik ve tek yüzden güçlendirilen deney elemanları arasında, artırılan %100 oranındaki çelik şerit alanına karşılık, yatay yük taşıma kapasitesinde %60 civarında iyileştirme sağlanabilmiştir.
- Eklenen düşey şeritler çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesine yaklaşık olarak %11'lik bir katkı sağlamıştır.
- Birleşim bölgesinde kaynak kırılması nedeniyle taşıma gücünü erken kaybeden Deney Elemanı-6 haricindeki tüm güçlendirilen çerçeveler, referans deney elemanının %0,3 olan göçme anındaki ötelenme oranını, %1,5'in üzerine taşımıştır. Çelik şeritlerle yapılan güçlendirme yöntemi,

deney elemanının ötelenme oranını FEMA 273[26] ve ATC 40'da [28] betonarme çerçeveler için derhal kullanım sınırı olan %1'in üzerine taşımıştır.

- Çelik şeritler güçlendirilen tüm deney elemanlarının panelleri, deney elemanları taşıma güçlerini kaybedinceye kadar çerçeve içerisinde yıkılmadan, bütünlüğünü muhafaza etmiştir. Deprem sırasında taşıyıcı olmayan eleman hasarları nedeniyle yaşacak olası can kaybının önüne geçilmiştir.
- Çelik şeritlerle güçlendirilen sünek olmayan tuğla dolgulu betonarme çerçevelere, deney elemanlarına sağlanan yüksek yatay dayanıma karşın, sünek bir davranış kazandırılmamıştır. Güçlendirme sonucunda, elde edilebilen en büyük deplasman süneklik oranı 1,44 ile tek yüzdenden güçlendirilen Deney Elemanı-9'a aittir.
- Başlangıç rijitliği güçlendirilmemiş deney elemanına göre 4,4 ile 7,9 kat arasında değişen oranlarda artmıştır.
- Çelik şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında, taşıma gücüne çapraz çelik şeridin burkulması ile ulaşılmıştır. Gelişen bölgesel hasar bağlı olarak sadece Deney Elemanı-9'da çapraz şerit ile birlikte düşey şeritte de burkulma gözlenmiştir.
- Güçlendirilen deney elemanlarında kolon bindirme bölgesindeki çatlak gelişimi ve genişliği sınırlı düzeyde kalmıştır. 6, 7 ve 8 nolu deney elemanlarında basınç kuvvetleri etkisindeki kolonda okunan bindirme bölgesi boy değişimi diğer deney elemanlarına göre daha azdır.
- Düşey şeritlerin eklendiği deney elemanlarında, kolon bindirme bölgesinde gelişen hasarlar daha düşük düzeyde kalmıştır. Düşey şeritler kolon bindirme

bölgesinde aderansın kaybedilmesinden sonra tuğla panele eksenel süneklik sağlamıştır.

- Denenmiş olan farklı tipteki betonarme çerçeve ile çelik elemanlar arasındaki bağlantı detayları, deney elemanının yatay yük kapasitesi üzerinde etkili olmamıştır. Uygulanan üç farklı bağlantı detayı deney elemanın başlangıç rijitliği ve enerji tüketimi üzerinde etkili olmuştur.
- Panel kenarları boyunca L-profillerle yapılan bağlantı, deney elemanına en büyük başlangıç rijitliği kazandıran bağlantı olmuştur. Simetrik olarak güçlendirilen deney elemanlarından bile daha büyük başlangıç rijitliği oranına sahip olan Deney Elemanı-8'in, enerji tüketimi 24700 kNmm olarak gerçekleşmiştir. Enerji tüketimi bakımından en başarılı bağlantı tipi Deney Elemanı-9'da denenen kolon-kiriş düğüm bağlantısıdır. Deney Elemanı-9, tek yüzden güçlendirilen bütün deney elemanlarından ve simetrik güçlendirme uygulanan Deney Elemanı-2'den daha fazla enerji tüketmiştir.
- Düşey şeritler, enerji tüketim kapasitesini simetrik güçlendirilen deney elemanında %70, tek yüzden güçlendirilen deney elemanında %64 oranında artırmıştır.
- Drain-2Dx ile yapılan itme analizi sonuçlarına göre, tuğla dolgu duvarın modellenmesinde eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımı başarılı olmuştur. Yapılan iki boyuttaki itme analizi deney elemanlarının deneysel yatay yük taşıma kapasitelerine oldukça yaklaşmıştır. Ancak, programın modelleyemediği yük çevrimleri arasındaki aşamalı rijitlik bozunması ve tepe dayanım sonrası deplasman modellerinin eksikliği deneysel zarf eğrisinin benzeşimini kısıtlamıştır. Yine de güçlendirilmiş deney elemanlarına ait itme analizleri sonucu elde edilen zarf eğrileri %1,3'lük ötelenme oranı seviyesinde kapasite tahminine yönelik oldukça yakın bilgiler sunmaktadır.

- Taghdi ve ark.'na [18] ait çubuk taşıyıcı sistem yaklaşımı ile tek yüzden güçlendirilmiş deney elemanlarının yatay yük kapasiteleri, deneysel yatay yük kapasitesine göre %30 ile %40 arasında değişen oranlarda yüksek tahmin etmiştir. Simetrik güçlendirilen deney elemanlarına ait yatay yük kapasiteleri ise gerçekçi sonuçlar vermekten uzaktır. Maheri'nin [20] çalışmasında değindiği gibi çekme çubukları ile güçlendirilmiş çerçevelerde kazanılan yatay yük kapasitesi, betonarme taşıyıcı elemanlarda gelişen eğilme enerjisi ile karşılanmaktadır. Bu bakımdan sünek olmayan ve düğüm noktaları moment aktaramayan deney çerçevesinde çekme çubuklarının akmış olduğuna dair yapılan yaklaşım gerçekçi olamamaktadır. Ayrıca çalışmada denenmiş olan, çelik elemanlar ile betonarme çerçeve arasında yük aktarımını sağlayan farklı birleşim detayları, deney sonuna kadar hizmet verebilmesine rağmen, birleşime komşu betonarme elemanlarda gelişen bozunmalar dolayısıyla çekme elemanlarını, akmaya ulaştıramamıştır.

7.2. Öneriler

Sünek olmayan tuğla dolgulu betonarme çerçevelerin çelik şeritlerle güçlendirilmesi konusunda yapılan araştırma sonucunda geliştirilen öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Deneylerde, kolon alt ucundaki bindirme bölgesindeki yetersizliğin deneylerde ilk hasar alan kısım olduğu görülmüştür. Tuğla dolgu duvar üzerine yapılan sistem iyileştirmesi, büyük ölçüde betonarme taşıyıcı elemanların yatay rijitliklerine bağlıdır. Bu nedenle, kolon bindirme bölgesinde alınacak bölgesel bir güçlendirme tedbiri ile yöntemden elde edilecek fayda daha üst seviyeye çıkacaktır.
- Tuğla duvar üzerinde kesme kuvvetlerinin taşınmasında etkin olan güçlendirme yönteminin, kesme yetersiz ya da hasarlı betonarme perdeler üzerinde etkinliğinin araştırılması bilgi birikimine katkı sağlayacaktır.

- Tek katlı bir tuğla dolgulu çerçeveye uygulanan yöntemin iki katlı bir deney elemanı üzerinde test edilmesi faydalı olacaktır.
- Boşluksuz tuğla dolgu duvarlar üzerinde denenen bu yöntemin, benzer biçimde boşluklu tuğla duvarlar için denenmesi bilgi birikimine olumlu katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, U., Uzsoy, S., 1971, "The Behaviour and Strength of Infilled Frames," **TUBITAK MAG-205 Report**, Ankara, Turkey, 95, (1971).
2. Altın, S., "Strengthening of Reinforced Concrete Frames with Reinforced Concrete Infills", A Doctor of Philosophy Thesis in Civil Engineering, **Middle East Technical University**, Ankara, (1990).
3. Marjani, F., "Behavior of Brick Infilled Reinforced Concrete Frames under Reversed Cyclic Loading", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, **Middle East Technical University**, Ankara, (1997)
4. Anıl, Ö., "Betonarme Çerçevelerin Boşluklu Betonarme Dolgu Duvarlar ile Güçlendirilmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi**, Ankara, Türkiye, (2002).
5. Baran, M., "Precast Concrete Panel Reinforced Infill Walls for Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Framed Structures", A Philosophy of Doctorate Thesis in Civil Engineering, **Middle East Technical University**, Ankara, (2005).
6. Tankut, T., Ersoy, U., Özcebe, G., Baran, M., Okuyucu, D., "In Service Seismic Strengthening of RC Framed Structures", Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, **International Closing Workshop**, NATO Project Sfp 977231, İstanbul, (2005).
7. Sugano, S., "State - of - the - Art in Techniques for Rehabilitation of Buildings", **Proceedings of the 11th WCEE**, Acapulco, Mexico, Paper No. 2175, (1996).
8. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), **T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı**, Ankara, (2007).
9. Smith, B., S., "Lateral Stiffness of Infilled Frames", **ASCE Journal of Structural Division**, 88(ST. 6): 183-199 (1962).
10. Smith, B., S., "Behaviour of Square Infilled Frames", **ASCE Journal of Structural Division**, 92(ST.1), 1966.
11. Smith, B., S., Carter, C., "A Method of Analysis for Infilled Frames", **Proc. ICE**, 44: 31-48, (1969).
12. S. Goel and H. Lee, "Seismic Strengthening of RC Structures by Ductile Steel Bracing System," **4USNCEE**, Palm Springs, CA, USA, 3, (1990).

13. Badoux, M. and Jirsa, J.O., "Steel Bracing of RC Frames for Seismic Retrofitting," **J. Struct. Eng.**, ASCE, 116(1): 55-74, (1990).
14. Bush, T.D., Jones E.A., and Jirsa, J.O., "Behavior of RC Frame Strengthened Using Structural-Steel Bracing", **J. Struct. Eng-ASCE**, 117(4): 1115-1126, (1991).
15. Maheri, M.R. and Sahebi, A., "Use of Steel Bracing in Reinforced Concrete Frames", **Engineering Structures**, 19(12): 1018-1024, (1997).
16. Crisafulli, F.J., "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills", Ph.D. Thesis, **University of Canterbury**, Christchurch, New Zealand, (1997).
17. Taghdi M., Bruneau M., Saatcioglu M., "Seismic Retrofitting of Low-Rise Masonry and Concrete Walls using Steel Strips", **Journal of Structural Engineering**, 126 (9): 1017-1025, (2000).
18. Taghdi, M., Bruneau, M., Saatcioglu, M. "Analysis and Design of Low-Rise Masonry and Concrete Walls Retrofitted Using Steel Strips," **ASCE Journal of Structural Engineering**, 126(9): 1026-1032, (2000).
19. Shing P. B., Mehrabi A. B., "Behaviour and analysis of masonry-infilled frames," **Prog. Struct. Engng. Mater.**, 4, 320-331, (2002).
20. Maheri, M.R., Kousari, R., and Razazan, M., "Pushover Tests on Steel X-Braced and Knee-Braced RC Frames", **Engineering Structures**, 25(13): 1697-1705, (2003).
21. Maheri, M.R., Hadjipour, A., "Experimental Investigation and Design of Steel Brace Connection to RC Frame", **Engineering Structures**, 25(13): 1707-1714, (2003).
22. Maheri, M.R. and Akbari, R., "Seismic Behaviour Factor, R, for Steel X-Braced and Knee-Braced RC Buildings", **Engineering Structures**, 25(12): 1505-1513, (2003)
23. Perera,R., Gómez,S., Alarcón E., "Experimental and Analytical Study of Masonry Infill Reinforced Concrete Frames Retrofitted with Steel Braces," **J. Struct. Engng.**, 130(12): 2032-2039, (2004)
24. ASTM Standard C270, " Standard Specification for Mortar for Unit Masonry", **ASTM International**, West Conshohocken, PA, (2003).
25. İnternet: "Sikadur®31 Ürün Bilgi Föyü", **Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.**, http://www.sika.com.tr/pdf/products/1236232367_tr.pdf, (2009).

26. FEMA 273, "NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings", **Federal Emergency Management Agency (FEMA)**, (1997).
27. TS 648, "Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (1980).
28. Applied Technology Council (ATC) 40, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," **ATC Publication**, (1996).
29. Sözen, M.A., "Towards A Behaviour Based Design of Reinforced Concrete Frames to Resist Earthquake", **Proceeding of 9th Technical Conference of Turkish Society of Civil Engineering**, Ankara, Turkey, 1: 1-47 (1987).
30. FEMA 356, NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings, **Federal Emergency Management Agency (FEMA)**, (2000).
31. TS 500, "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2000).
32. Ersoy, U., Özcebe, G., "Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap", **Evrin Yayınevi**, İstanbul, (2007).
33. Canbay, E., Frosch, R. J., "Bond Strength of Lap-Spliced Bars", **ACI Structural Journal**, 102(4): 605-614, (2005).
34. Prakash, V., Powell, G. H., Campbell, S., "Drain-2DX Base Program Description and User Guide", Version 1.10, Department of Civil Engineering, **University of California**, Berkeley, California, (1993).
35. TS 3357, "Çelik Yapılarda Kaynaklı Birleşimlerin Tasarım ve İmalat Kuralları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (1979).
36. Building Code Requirements for Masonry Structures and Commentary, "(ACI 530/ASCE 5/TMS 402-92) and Specifications for Masonry Structures and Commentary (ACI 530.1/ASCE 6/TMS 602-92)", **American Concrete Institute**, Detroit, MI, (1992).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KOPRAMAN, Yağmur
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 09.10.1976, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 582 32 24
 e-mail : yagmur@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2010
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	1999
Lise	Özel Yükseliş Koleji	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2001-2010	G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü	Arş. Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce