

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK DAYANIMLI DÜZ DONATILI BETONARME ELEMANLARIN
LİFLİ POLİMER MALZEMELER KULLANILARAK EĞİLME
KAPASİTESİNİN ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper POLAT

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Alper İLKİ

EKİM 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK DAYANIMLI DÜZ DONATILI BETONARME ELEMANLARIN
LİFLİ POLİMER MALZEMELER KULLANILARAK EĞİLME
KAPASİTESİNİN ARTTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alper POLAT
(501061012)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Eylül 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Ekim 2009

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Alper İLKİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Ercan YÜKSEL (İTÜ)**

EKİM 2009

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan sayın hocam Doç. Dr. Alper İlki' ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecindeki değerli katkıları için; Araş. Gör. Cem Demir'e, Yük. İnş. Müh. Çağlar Göksu'ya, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı personeline, Yapı Malzemesi Laboratuvarı personeline, sevgili arkadaşlarım Yük. İnş. Müh. Kayhan KOLCU, End. Müh. Murat AMANGELDİYEVE ve Yük. İnş. Müh. Rauf BİLGİN'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim için vermiş olduğu maddi destekten ötürü TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na, çalışmayı destekleyen ART-YOL Mühendislik Mimarlık İnşaat Taahhüt Ltd. Şti. ve İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İSTON) firmalarına, teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteği gösteren aileme, tüm kalbimle teşekkür ederim.

Eylül 2009

Alper POLAT

İnş. Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Özeti	3
2. BETONARME ve GÜÇLENDİRME.....	15
2.1 Betonarme	15
2.1.1 Beton.....	15
2.1.2 Çelik.....	16
2.1.3 Aderans	16
2.1.4 Donatının kenetlenmesi	16
2.2 Güçlendirme.....	17
2.2.1 Lifli polimerlerle güçlendirme tasarım önerileri	18
2.2.2 Malzeme özellikleri	19
2.2.2.1 Epoksiler	19
2.2.2.2 Lifler	20
3. NUMUNELERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ.....	21
3.1 Numunelerin Tasarlanması	21
3.2 Numunelerin Özellikleri	23
3.3 Malzeme Özellikleri	26
3.3.1 Beton.....	26
3.3.2 Donatı	30
3.4 Tasarımın Güncellenmesi	33
3.5 Numunelerin Üretimi.....	37
3.5.1 Temeller	37
3.5.2 Kolonlar	40
3.5.3 Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması	41
4. NUMUNELERİN GÜÇLENDİRİLMESİ.....	45
4.1 Güçlendirme Tasarımı	45
4.1.1 LS-CON-Rebar numunesinde teorik hesap	45
4.1.2 LS-CON-Laminate numunesinde teorik hesap	52
4.2 Güçlendirme Uygulaması	59
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	75
5.1 Giriş	75
5.2 Deney Düzeneği	77

5.3 Yükleme Patronu	78
5.4 Deneyler	78
5.4.1 LS-CON-REF1 numunesi	78
5.4.2 LS-CON-REF2 numunesi	85
5.4.3 LS-CON-Rebar numunesi	91
5.4.4 LS-CON-Laminate numunesi	98
5.5 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	106
5.5.1 Yük-yerdeğiştirme ilişkisi	106
5.5.2 Enerji yutma kapasitesi	111
5.5.3 Rijitlik.....	114
5.5.4 Kapasite ve dayanım tükenmesi	115
5.5.5 Kalıcı yerdeğiştirme	118
5.5.6 Moment-eğrilik ilişkisi	120
5.5.7 Şekildeğiştirme profili.....	123
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	129
KAYNAKLAR.....	133
EKLER	135

KISALTMALAR

NSM	: Near Surface Mounted (Yüzeye yakın güçlendirme)
EBR	: Externally Bonded Reinforcement (Paspayı dökülerek güçlendirme)
TRM	: Textile Reinforced Mortar (Dokuma sargı malzemesi)
b	: Kolon enkesit genişliği
h	: Kolon enkesit yüksekliği
f_c'	: Beton basınç dayanımı
f_{ck}	: Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{cd}	: Beton tasarım basınç dayanımı
ϵ_s	: Çekme donatısındaki birim uzama
ϵ_s'	: Basınç donatısındaki birim uzama
ϵ_{cu}	: Betonda en büyük birim kısalma
ϵ_{frpeff}	: Çekme bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirme
ϵ_{frpeff}'	: Basınç bölgesindeki lifli polimer efektif şekildeğiştirme
ϵ_y	: Donatıda akma birim uzama ve kısalması
ϵ_{frpult}^*	: Lifli polimer kopma şekildeğiştirme
$\epsilon_{frpulteff}$	: Lifli polimer efektif kopma şekildeğiştirme
ϵ_{bi}	: Çekme bölgesinde en alt lifteki başlangıç şekildeğiştirme
ϵ_{bi}'	: Basınç bölgesinde en alt lifteki başlangıç şekildeğiştirme
E_s	: Donatı elastisite modülü
E_{frp}	: Lifli polimer elastisite modülü
A_s	: Çekme donatısı alanı
A_s'	: Basınç donatısı alanı
A_{frp}	: Çekme bölgesindeki lifli polimer enkesit alanı
A_{frp}'	: Basınç bölgesindeki lifli polimer enkesit alanı
F_s	: Çekme donatısının oluşturduğu iç kuvvet
F_s'	: Basınç donatısının oluşturduğu iç kuvvet
F_c	: Beton basınç kuvveti
F_{frpeff}	: Çekme bölgesindeki lifli polimer efektif iç kuvveti
F_{frpeff}'	: Basınç bölgesindeki lifli polimer efektif iç kuvveti
x	: Tarafsız eksen derinliği
d'	: Beton örtüsü (paspayı)
d	: Kolon enkesiti faydalı yükseklik
d''	: Lifli polimer üzeri tamir harcı kalınlığı
d'''	: Lifli polimer faydalı yükseklik
k_1	: Beton basınç blok derinliğinin tarafsız eksen derinliğine oranı
M	: Kesitin eğilme momenti kapasitesi
V_d	: Tasarım kesme kuvveti
h	: Kolon yüksekliği
V_r	: Kesitin kesme kuvveti kapasitesi
V_w	: Etriyenin kesme kuvveti dayanımına katkısı
V_{frp}	: Lifli polimer sargının kesme kuvveti dayanımına katkısı
V_c	: Beton kesitin kesme kuvveti dayanımına katkısı
V_{cr}	: Eğik çatlamayı oluşturan kesme kuvveti
V_{ret}	: Güçlendirilmiş kolon en büyük kesme kuvveti

P_{ret}	: Güçlendirilmiş kolon yatay yük kapasitesi
M_{ret}	: Güçlendirilmiş kolon en büyük moment
M_r	: Kolon moment kapasitesi
n	: Etriye kol sayısı
A_0	: Etriye donatısı enkesit alanı
n_f	: Lifli polimer kumaş kat sayısı
t_f	: Lifli polimer kumaş kalınlığı
w_f	: Lifli polimer kumaş genişliği
s_f	: Lifli polimer kumaş sargı aralığı
f_{ywd}	: Etriye donatısı tasarım akma dayanımı
f_{ywk}	: Etriye donatısı karakteristik akma dayanımı
s	: Etriye aralığı
V_{max}	: Kesme kuvveti üst sınırı
l_b	: Kenetlenme boyu
f_y	: Donatı akma dayanımı
f_{yd}	: Donatı tasarım akma dayanımı
f_{ctd}	: Beton tasarım çekme dayanımı
Δl_b	: Kanca veya fiyonglu donatılarda kenetlenme boyundaki kısalma
l_{bk}	: Kanca veya fiyonglu donatılarda kenetlenme boyu
$\emptyset$	: Donatı çapı
k_1	: Dikdörtgen basınç bloğunun tanımlanmasında kullanılan katsayı
C_E	: Çevresel etki katsayısı
κ_m	: Lifli polimer aderans katsayısı
$\emptyset$	: Dayanım azaltma katsayısı
σ	: Standart sapma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Betonarme kolon numunelerin isimlendirmesi (Barros ve diğ., 2006)...	7
Çizelge 2.1 : Lif özellikleri	20
Çizelge 3.1 : Deney numunelerinin tasarım özellikleri	24
Çizelge 3.2 : 1 m ³ betonda bulunan malzeme miktarları.....	27
Çizelge 3.3 : Betonun farklı yaşlardaki dayanımı	29
Çizelge 3.4 : Enine ve boyuna donatı özellikleri	33
Çizelge 3.5 : Kolon boyuna donatısındaki şekil değiştirmeölçer yerleşim planı.....	43
Çizelge 3.6 : Kolon etriyesinde kullanılan şekil değiştirmeölçer yerleşim planı.....	44
Çizelge 4.1 : Tüm numunelerin teorik hesap özeti.....	58
Çizelge 4.2 : Boyuna güçlendirme elemanları şekil değiştirmeölçer yerleşim planı ..	65
Çizelge 4.3 : Sargılama üzerindeki şekil değiştirmeölçer yerleşim planı.....	72
Çizelge 4.4 : Güçlendirme uygulama şeması.....	73
Çizelge 5.1 : Numune bilgileri	76
Çizelge 5.2 : LS-CON-REF1 numunesi deney özeti.....	85
Çizelge 5.3 : LS-CON-REF2 numunesi deney özeti	91
Çizelge 5.4 : LS-CON-Rebar numunesi deney özeti	96
Çizelge 5.5 : LS-CON-Laminate numunesi deney özeti	104
Çizelge 5.6 : Numunelerin öteleme oranlarında ulaştığı tepe yükleri	111
Çizelge 5.7 : Numunelerin öteleme oranlarında ulaştığı enerji yutma kapasiteleri ..	112
Çizelge 5.8 : Numunelerin öteleme adımlarındaki rijitlikleri.....	114
Çizelge 5.9 : Numunelerde oluşan kalıcı hasarlar	119

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Deney düzeneği şematik görünüşü	9
Şekil 1.2 : Güçlendirilmemiş köprü ayağının davranışı (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)	10
Şekil 1.3 : Güçlendirilmiş kolonun davranışı (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)	10
Şekil 1.4 : Köprü ayağının üst bölgesindeki çatlak (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)	11
Şekil 1.5 : Köprü ayağının alt bölgesindeki çatlak (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)	11
Şekil 3.1 : Kolon şekil değiştirme-gerilme dağılışı	22
Şekil 3.2 : Numune izometrik görünüşü	24
Şekil 3.3 : Numune plan görünümü	25
Şekil 3.4 : Numune boy kesiti	25
Şekil 3.5 : Donatı açılımları	26
Şekil 3.6 : 28 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	27
Şekil 3.7 : 60 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	28
Şekil 3.8 : 168 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ..	28
Şekil 3.9 : 232 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ..	29
Şekil 3.10 : Beton yaşı-dayanım ilişkisi	30
Şekil 3.11 : Enine donatı gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Ø10)	31
Şekil 3.12 : Boyuna donatı gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Ø14)	31
Şekil 3.13 : Enine donatı tam gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Ø10)	32
Şekil 3.14 : Boyuna donatı tam gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Ø14)	33
Şekil 3.15 : Referans numunelerinde kolon şekil değiştirme-gerilme dağılışı	34
Şekil 3.16 : Ahşap kalıplar ve temel donatısı	37
Şekil 3.17 : Taşıma kancaları	38
Şekil 3.18 : Plastik boru yerleşimi	38
Şekil 3.19 : Temel betonu dökümü	38
Şekil 3.20 : Temel betonu dökümü sonrası	39
Şekil 3.21 : Vibrasyon yapılması	39
Şekil 3.22 : Standart silindir numunesi	39
Şekil 3.23 : Standart silindir numunesi	40
Şekil 3.24 : Temele uygulanan kimyasal kür	40
Şekil 3.25 : Kolon kalıpları	40
Şekil 3.26 : Kolon numunelerinin beton dökümü ve kimyasal kür uygulanması	41
Şekil 3.27 : Şekil değiştirmeölçerler	42
Şekil 3.28 : Şekil değiştirmeölçer yerleşimi	42
Şekil 4.1 : LS-CON-Rebar numunesinde kolon şekil değiştirme-gerilme dağılışı	45
Şekil 4.2 : Konsol kolon modeli	49
Şekil 4.3 : LS-CON-Laminate numunesinde kolon şekil değiştirme-gerilme dağılışı ..	52
Şekil 4.4 : Konsol kolon modeli	56
Şekil 4.5 : Paspayı sıyrılan kolon numunesi	59
Şekil 4.6 : Paspayı sıyrılan kolonun sulanması	60
Şekil 4.7 : Hazırlanan astar malzemesi	60
Şekil 4.8 : Astar uygulaması	61
Şekil 4.9 : Tamir harcı uygulaması	61

Şekil 4.10 : Tamir harcı uygulaması sonrası ve sulanması	62
Şekil 4.11 : Temele ankraj deliklerinin açılması ve kompresör ile temizlenmesi	63
Şekil 4.12 : Şerit plaka ve çubuklara şekildeğiştirmeölçer yapıştırılması	64
Şekil 4.13 : Şerit plaka ve çubuklar üzerindeki şekildeğiştirmeölçer yerleşimi	65
Şekil 4.14 : Astar uygulaması sonrası	66
Şekil 4.15 : Lamine Adesivo karışımı	66
Şekil 4.16 : Karbon lifli polimer şerit plaka ve çubukların yapıştırılması	67
Şekil 4.17 : Karbon lifli polimer kumaşlar ile ankraj uygulaması	68
Şekil 4.18 : Son kat yapısal tamir harcı uygulaması	68
Şekil 4.19 : Astar malzemesi sürülmesi	69
Şekil 4.20 : Karbon lifli polimer kumaş malzeme	69
Şekil 4.21 : Sargılama uygulaması	70
Şekil 4.22 : Sargılama üzerindeki şekildeğiştirmeölçer yerleşimi	71
Şekil 5.1 : Yerdeğiştirmeölçer yerleşim planı	77
Şekil 5.2 : Yükleme patronu	78
Şekil 5.3 : LS-CON-REF1 numunesinin deney başlangıcı	79
Şekil 5.4 : LS-CON-REF1 numunesi %4 itme sonrası	80
Şekil 5.5 : LS-CON-REF1 numunesi %6 itme sonrası	80
Şekil 5.6 : LS-CON-REF1 numunesi %6 itmede paspayı dökülmesi	81
Şekil 5.7 : LS-CON-REF1 numunesi %6 çekmede betonun ezilmesi	81
Şekil 5.8 : LS-CON-REF1 numunesi %6 çekme sonrası	82
Şekil 5.9 : LS-CON-REF1 numunesi %8 itme sonrası	82
Şekil 5.10 : LS-CON-REF1 numunesi %8 çekme sonrası	83
Şekil 5.11 : LS-CON-REF1 numunesi deney sonrası ($P=0$, $\delta=-107.62$ mm)	83
Şekil 5.12 : LS-CON-REF1 numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi	84
Şekil 5.13 : LS-CON-REF2 numunesinin deney başlangıcı	86
Şekil 5.14 : LS-CON-REF2 numunesi %3 çekme sonrası	86
Şekil 5.15 : LS-CON-REF2 numunesi %6 itme sonrası	87
Şekil 5.16 : LS-CON-REF2 numunesi %6 itme sonrası (arka yüz)	87
Şekil 5.17 : LS-CON-REF2 numunesi %6 çekme sonrası	88
Şekil 5.18 : LS-CON-REF2 numunesi %8 itme sonrası (arka yüz)	88
Şekil 5.19 : LS-CON-REF2 numunesi %8 çekme sonrası	89
Şekil 5.20 : LS-CON-REF2 numunesi deney sonrası ($P=0$, $\delta=-107$ mm)	89
Şekil 5.21 : LS-CON-REF2 numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi	90
Şekil 5.22 : LS-CON-Rebar numunesinin deney başlangıcı	91
Şekil 5.23 : LS-CON-Rebar numunesi %8 itme sonrası	92
Şekil 5.24 : LS-CON-Rebar numunesi %8 itmede çekme bölgesi ankrajları	93
Şekil 5.25 : LS-CON-Rebar numunesi %8 çekmede çekme bölgesi ankrajları	93
Şekil 5.26 : LS-CON-Rebar numunesi deney sonrası ($P=0$, $\delta=-109$ mm)	93
Şekil 5.27 : LS-CON-Rebar numunesi deney sonrası çatlak kontrolü	94
Şekil 5.28 : LS-CON-Rebar numunesi deney sonrası ankraj kontrolü	95
Şekil 5.29 : LS-CON-Rebar numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi	95
Şekil 5.30 : İlave ankraj yapılması	99
Şekil 5.31 : LS-CON-Lamine numunesinin deney başlangıcı	100
Şekil 5.32 : LS-CON-Lamine numunesi %8 itmede çekme bölgesi ankrajları	101
Şekil 5.33 : LS-CON-Lamine numunesi %8 itmede ilave ankrajlar	101
Şekil 5.34 : LS-CON-Lamine numunesi %8 çekmede çekme bölgesi ankrajları	101
Şekil 5.35 : LS-CON-Lamine %8 çekmede ilave ankrajlar	102
Şekil 5.36 : LS-CON-Lamine numunesi deney sonrası ($P=0$, $\delta=-107$ mm)	102
Şekil 5.37 : LS-CON-Lamine numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi	103

Şekil 5.38 : Numunelerin dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi	107
Şekil 5.39 : LS-CON-REF1 numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi	108
Şekil 5.40 : LS-CON-REF2 numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi	108
Şekil 5.41 : LS-CON-Rebar numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi	109
Şekil 5.42 : LS-CON-Laminate numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi	109
Şekil 5.43 : Numunelerin zarf eğrisi	110
Şekil 5.44 : Numunelerin enerji yutma kapasitesi.....	113
Şekil 5.45 : Numunelerin rijitlik değişimi	114
Şekil 5.46 : Numunelerin kapasite-öteleme oranı ilişkisi.....	116
Şekil 5.47 : Numunelerin dayanım tükenmesi-öteleme oranı ilişkisi	117
Şekil 5.48 : Numunelerin kalıcı hasar-öteleme oranı ilişkisi	118
Şekil 5.49 : LS-CON-REF1 numunesi 0-20 mm arası moment-eğrilik ilişkisi	120
Şekil 5.50 : LS-CON-REF2 numunesi 0-20 mm arası moment-eğrilik ilişkisi	121
Şekil 5.51 : LS-CON-Laminate numunesi 0-20 mm arası moment-eğrilik ilişkisi	121
Şekil 5.52 : Kolon tabanı 20-150 mm arası moment-eğrilik ilişkisi	122
Şekil 5.53 : Kolon tabanı 150-300 mm arası moment-eğrilik ilişkisi	123
Şekil 5.54 : İtmede çekme bölgesi lifli polimer çubuk şekildeğiştirme profili.....	124
Şekil 5.55 : İtmede çekme bölgesi lifli polimer şerit plaka şekildeğiştirme profili	124
Şekil 5.56 : Çekmede çekme bölgesi lifli polimer çubuk şekildeğiştirme profili	125
Şekil 5.57 : Çekmede çekme bölgesi lifli polimer şerit plaka şekildeğiştirme profili	125
Şekil 5.58 : İtmede çekme bölgesi şekildeğiştirme profili	126
Şekil 5.59 : Çekmede çekme bölgesi şekildeğiştirme profili.....	126
Şekil A.1 : LS-CON-REF1 numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	137
Şekil A.2 : LS-CON-REF1 numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	137
Şekil A.3 : LS-CON-REF1 numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	137
Şekil A.4 : LS-CON-REF1 numunesi 14.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	138
Şekil A.5 : LS-CON-REF1 numunesi 15.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	138
Şekil A.6 : LS-CON-REF1 numunesi 16.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	138
Şekil A.7 : LS-CON-REF1 numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	139
Şekil A.8 : LS-CON-REF1 numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	139
Şekil A.9 : LS-CON-REF1 numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	139
Şekil A.10 : LS-CON-REF1 numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	140
Şekil A.11 : LS-CON-REF1 numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	140
Şekil A.12 : LS-CON-REF1 numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	140
Şekil A.13 : LS-CON-REF1 numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	141
Şekil A.14 : LS-CON-REF1 numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	141
Şekil A.15 : LS-CON-REF1 numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	141
Şekil A.16 : LS-CON-REF1 numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi	142
Şekil A.17 : LS-CON-REF1 numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	142
Şekil A.18 : LS-CON-REF1 numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi	142
Şekil A.19 : LS-CON-REF2 numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	143
Şekil A.20 : LS-CON-REF2 numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	143
Şekil A.21 : LS-CON-REF2 numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	143
Şekil A.22 : LS-CON-REF2 numunesi 14.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	144
Şekil A.23 : LS-CON-REF2 numunesi 15.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	144
Şekil A.24 : LS-CON-REF2 numunesi 16.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	144
Şekil A.25 : LS-CON-REF2 numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	145
Şekil A.26 : LS-CON-REF2 numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	145
Şekil A.27 : LS-CON-REF2 numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	145

Şekil A.28 : LS-CON-REF2 numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	146
Şekil A.29 : LS-CON-REF2 numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	146
Şekil A.30 : LS-CON-REF2 numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	146
Şekil A.31 : LS-CON-REF2 numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	147
Şekil A.32 : LS-CON-REF2 numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	147
Şekil A.33 : LS-CON-REF2 numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	147
Şekil A.34 : LS-CON-REF2 numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi	148
Şekil A.35 : LS-CON-REF2 numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	148
Şekil A.36 : LS-CON-REF2 numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi	148
Şekil A.37 : LS-CON-Rebar numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	149
Şekil A.38 : LS-CON-Rebar numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	149
Şekil A.39 : LS-CON-Rebar numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	149
Şekil A.40 : LS-CON-Rebar numunesi 14.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	150
Şekil A.41 : LS-CON-Rebar numunesi 15.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	150
Şekil A.42 : LS-CON-Rebar numunesi 16.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	150
Şekil A.43 : LS-CON-Rebar numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	151
Şekil A.44 : LS-CON-Rebar numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	151
Şekil A.45 : LS-CON-Rebar numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	151
Şekil A.46 : LS-CON-Rebar numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	152
Şekil A.47 : LS-CON-Rebar numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	152
Şekil A.48 : LS-CON-Rebar numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	152
Şekil A.49 : LS-CON-Rebar numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	153
Şekil A.50 : LS-CON-Rebar numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	153
Şekil A.51 : LS-CON-Rebar numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	153
Şekil A.52 : LS-CON-Rebar numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi	154
Şekil A.53 : LS-CON-Rebar numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	154
Şekil A.54 : LS-CON-Rebar numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi	154
Şekil A.55 : LS-CON-Rebar numunesi KB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	155
Şekil A.56 : LS-CON-Rebar numunesi KB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	155
Şekil A.57 : LS-CON-Rebar numunesi KB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi	155
Şekil A.58 : LS-CON-Rebar numunesi GB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	156
Şekil A.59 : LS-CON-Rebar numunesi GB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	156
Şekil A.60 : LS-CON-Rebar numunesi GB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi	156
Şekil A.61 : LS-CON-Rebar numunesi G10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	157
Şekil A.62 : LS-CON-Rebar numunesi G20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	157
Şekil A.63 : LS-CON-Rebar numunesi G33 yük şekildeğiştirme ilişkisi	157
Şekil A.64 : LS-CON-Rebar numunesi B10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	158
Şekil A.65 : LS-CON-Rebar numunesi B20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	158
Şekil A.66 : LS-CON-Rebar numunesi B33 yük şekildeğiştirme ilişkisi	158
Şekil A.67 : LS-CON-Rebar numunesi K10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	159
Şekil A.68 : LS-CON-Rebar numunesi K20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	159
Şekil A.69 : LS-CON-Rebar numunesi K33 yük şekildeğiştirme ilişkisi	159
Şekil A.70 : LS-CON-Rebar numunesi D10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	160
Şekil A.71 : LS-CON-Rebar numunesi D20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	160
Şekil A.72 : LS-CON-Rebar numunesi D33 yük şekildeğiştirme ilişkisi	160
Şekil A.73 : LS-CON-Laminate numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	161
Şekil A.74 : LS-CON-Laminate numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	161
Şekil A.75 : LS-CON-Laminate numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	161
Şekil A.76 : LS-CON-Laminate numunesi 14.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	162
Şekil A.77 : LS-CON-Laminate numunesi 15.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi	162

Şekil A.78 :	LS-CON-Laminate numunesi 16.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi.....	162
Şekil A.79 :	LS-CON-Laminate numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi.....	163
Şekil A.80 :	LS-CON-Laminate numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi.....	163
Şekil A.81 :	LS-CON-Laminate numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi..	163
Şekil A.82 :	LS-CON-Laminate numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi..	164
Şekil A.83 :	LS-CON-Laminate numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi..	164
Şekil A.84 :	LS-CON-Laminate numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi..	164
Şekil A.85 :	LS-CON-Laminate numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi..	165
Şekil A.86 :	LS-CON-Laminate numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi..	165
Şekil A.87 :	LS-CON-Laminate numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	165
Şekil A.88 :	LS-CON-Laminate numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	166
Şekil A.89 :	LS-CON-Laminate numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	166
Şekil A.90 :	LS-CON-Laminate numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	166
Şekil A.91 :	LS-CON-Laminate numunesi KB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	167
Şekil A.92 :	LS-CON-Laminate numunesi KB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	167
Şekil A.93 :	LS-CON-Laminate numunesi KB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi	167
Şekil A.94 :	LS-CON-Laminate numunesi GB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	168
Şekil A.95 :	LS-CON-Laminate numunesi GB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi	168
Şekil A.96 :	LS-CON-Laminate numunesi GB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi	168
Şekil A.97 :	LS-CON-Laminate numunesi G10 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	169
Şekil A.98 :	LS-CON-Laminate numunesi G20 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	169
Şekil A.99 :	LS-CON-Laminate numunesi G33 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	169
Şekil A.100 :	LS-CON-Laminate numunesi B10 yük şekildeğiştirme ilişkisi	170
Şekil A.101 :	LS-CON-Laminate numunesi B20 yük şekildeğiştirme ilişkisi	170
Şekil A.102 :	LS-CON-Laminate numunesi B33 yük şekildeğiştirme ilişkisi	170
Şekil A.103 :	LS-CON-Laminate numunesi K10 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	171
Şekil A.104 :	LS-CON-Laminate numunesi K20 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	171
Şekil A.105 :	LS-CON-Laminate numunesi K33 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	171
Şekil A.106 :	LS-CON-Laminate numunesi D10 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	172
Şekil A.107 :	LS-CON-Laminate numunesi D20 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	172
Şekil A.108 :	LS-CON-Laminate numunesi D33 yük şekildeğiştirme ilişkisi.....	172

DÜŞÜK DAYANIMLI DÜZ DONATILI BETONARME ELEMANLARIN LİFLİ POLİMER MALZEMELER KULLANILARAK EĞİLME KAPASİTESİNİN ARTTIRILMASI

ÖZET

Büyük bir kısmı deprem riski altında bulunan ülkemizin mevcut yapılarının çoğunluğu gerek önceki gerekse şu an yürürlükte bulunan Deprem Yönetmeliği'nin bazı koşullarını sağlamamaktadırlar. Bu yüzden mevcut yapıların çoğunluğu deprem etkilerine karşı yetersizdir ve güçlendirme ihtiyacı duymaktadırlar.

Ülkemizdeki güçlendirme ihtiyacı duyulan yapıların ortak kusurlarından bazıları, yetersiz ve düz yüzeyli donatı kullanımı, düşük beton dayanımı ve yetersiz süneklikteki kesitler olarak kabul edilebilir. Çeşitli güçlendirme yöntemleriyle bu eksikliklerin giderilme imkanı vardır.

Bu çalışmada betonarme kolonların moment kapasitelerinin boyuna doğrultuda karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılar ve şerit plakalar yapıştırılarak artırılması incelenmiştir. Ayrıca artan moment kapasitesi neticesinde kolona gelen ilave kesme kuvvetini taşımak ve sargılama etkisi yaratmak amacıyla da enine doğrultuda karbon lifli polimer malzeme ile sargı yapılmıştır. Kolon numuneler tersinen tekrarlanan yatay yükler etkisinde test edilmiştir.

Yapılan çalışmada, dikdörtgen en kesitli (200 x 300 mm) dört adet kolon numune imal edilmiştir. Numuneler ülkemizdeki güçlendirme gereksinimi duyulan yapıların çoğunluğunu yansıtmaları açısından düşük beton dayanımına sahip, düz donatılı ve sargılama bölgesinde etriye sıklaştırması yapılmadan üretilmiştir. Güçlendirme aşamasına kadar aynı tipte imal edilen dört adet kolon numunesinden iki tanesi referans numunesi (LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2) olarak kullanılmak amacıyla güçlendirilmemiştir. Diğer iki adet kolon numunesine güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Güçlendirilen numunelerin ikisi de paspayı sıyrılarak güçlendirilmiştir. Fakat ilk numune (LS-CON-Laminate) dört adet boyuna doğrultuda karbon lifli polimer şerit plaka ile, diğeri (LS-CON-Rebar) ise dört adet karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme sırasında karbon lifli polimer elemanlar numunenin yükleme yönüne göre karşılıklı olarak yapıştırılmış ve bu uygulama sırasında ankraj detayına da özen gösterilmiştir. Ankraj için kullanılan karbon lifli polimer kumaş malzemenin miktarı, LS-CON-Rebar numunesi için karbon lifli polimer dairesel çubuk donatının taşıyabileceği en büyük çekme kuvvetinin 1.5 katı güvenlikte, LS-CON-Laminate numunesi içinse karbon lifli polimer şerit plakanın taşıyabileceği en büyük çekme kuvvetinin 1.5 katı güvenlikte hesaplanmıştır. Bu anlamda deney öncesi, karbon lifli polimer boyuna donatıların temele yapılan ankrajlarının kritik olmayacağı tahmin edilmiştir. Ancak deney sırasında, LS-CON-Rebar numunesinde oluşan ankraj hasarlarından dolayı LS-CON-Laminate numunesindeki ankraj miktarı 2 katına çıkarılmıştır. Boyuna doğrultuda güçlendirilen iki adet kolon numunesinin üzerine de iki kat karbon lifli polimer sargı

yapılmıştır. Deney sonuçları dayanım, süneklik, enerji yutma kapasitesi, rijitlik, kalıcı deformasyonlar ve göçme modları bakımından değerlendirilmiştir.

Karbon lifli polimer malzemelerin kullanıldığı güçlendirme teknikleri için yönetmeliklerde kirişler için verilmiş olan hesap yaklaşımlarını dikkate alarak yapılan teorik çalışmada güçlendirilen numunelerin moment kapasitelerinin referans numunesinin 2.5 katı mertebesinde olduğu görülmüştür. Ancak kolonlara eklenen karbon lifli polimer boyuna donatıların temele ankrajı için teorik olarak gerekenden daha fazla karbon lifli polimer malzeme kullanılmasına rağmen temele yapılan ankrajların hasar görmesi sonucu, öngörülen dayanım artışının ancak bir bölümünün sağlanabildiği gözlenmiştir. Sağlanan dayanım artışının ancak %2 öteleme oranına kadar korunabildiği görülmüştür.

Temele yapılan ankrajlarda oluşan sıyrılma neticesinde, karbon lifli polimer boyuna donatılar yeterli verimlilikte kullanılamamıştır. Ancak, ankraj miktarı 2 katına çıkarılan LS-CON-Laminate numunesi, LS-CON-Rebar numunesine göre daha sünek bir davranış göstererek kendi içerisinde sıyrılan ankrajlara rağmen diğer numunelere oranla %25 daha fazla yük taşımıştır. Bu nedenlerle, ilave edilen karbon lifli polimer boyuna donatıların temele ankrajında daha farklı detayların kullanılmasının gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

FLEXURAL STRENGTHENING OF LOW STRENGTH REINFORCED CONCRETE MEMBERS WITH PLAIN BARS BY USING FIBER REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT

SUMMARY

In our country with large area of earthquake risk, most of the existing structures do not comply with some of the provisions of neither previous nor the current Earthquake Code. Therefore, most of these existing structures are vulnerable to earthquake effects and need retrofitting.

Some of the common deficiencies of existing structures that needs retrofitting are: usage of inadequate and plain bars, concrete of low compressive strength and insufficiently ductile sections. The deficiencies may be overcome by various retrofitting techniques.

Main purpose of this study is to investigate the behaviour of reinforced concrete columns subjected to reversed cyclic lateral loads before and after retrofitting by carbon fiber reinforced polymers. Firstly, columns were retrofited with longitudinally carbon fiber reinforced polymer laminates and rebars. Furthermore, columns were confined with transversally carbon fiber reinforced polymer sheets.

Four pieces of rectangular cross-sectional (200 x 300 mm) column specimens were produced in this study. In order to reveal the situations about strengthening requirements of buildings in our home country, specimens were produced from low strength concrete, with plain bars and without stirrup condensation in the joint region. Two of the four same type produced column specimens were not strengthened to be used as reference specimens (LS-CON-REF1 and LS-CON-REF2). Remaining two specimens were strengthened with same method but with different materials. Retrofited specimens were strengthened by stripping the concrete cover. One of specimens (LS-CON-Laminate) was strengthened with four pieces of longitudinal carbon fiber reinforced polymer laminates, and the other specimen (LS-CON-Rebar) was strengthened with four pieces of longitudinal carbon fiber reinforced rebars. During the strengthening operation, carbon fiber reinforced polymers were adhered oppositely according to the loading direction and anchorage details were carefully determined. Amount of carbon fiber reinforced polymer sheet used for anchorage is secure as the 1.5 times of maximum tensile force of carbon fiber reinforced polymer rebar for the specimen LS-CON-Rebar, and secure as the 1.5 times of maximum tensile force of carbon fiber reinforced polymer laminate for the specimen LS-CON-Laminate. Therefore, base anchorages of the carbon fiber reinforced polymer longitudinal bars as assumed as noncritical. But the amount of anchorages used for specimen LS-CON-Laminate is doubled because of damages occurred on anchorages of specimen LS-CON-Rebar during the experiment. Longitudinally strengthened column specimens were confined with two layers of carbon fiber polymer sheet.

The results of this study are evaluated in terms of strength, ductility, failure modes, energy dissipations, residual plastic deformations and rigidity of specimens.

According to the theoretic study done by taking into account the calculation approaches for columns of regulations about retrofitting techniques done by using carbon fiber reinforced polymers, it is observed that the moment capacities of strengthened specimens are 2.5 times greater than the reference specimen. Besides the usage of more carbon fiber reinforced polymers from theoretically needed amount for the anchorage of carbon fiber reinforced polymer longitudinal bars to the base of columns, it is seen that only a part of strength increasement is observed from expected value because of base anchorage damages. It is observed that the obtained strength increasement was protected till only the %2 of the drift ratio. Carbon fiber reinforced polymer longitudinal bars were not be able to use effectively as a result of debonding occurred on base anchorages.

However, the specimen LS-CON-Laminate, whose anchorage amount is doubled, displayed more ductile behaviour according to the specimen LS-CON-Rebar and carried %25 more load according to the other specimens besides the slipped anchorages in itself. Because of all these reasons, more different details should be used for the anchorage of the additional carbon fiber reinforced polymer longitudinal bars to the base of columns.

1. GİRİŞ

Önceden bir uyarı olmadan meydana gelmesi yönünden deprem, doğal afetler arasında kendine has bir özelliğe sahiptir. Deprem meydana gelmeden önce bazı ön işaretler görülebilirse de, günümüzde depremin önceden tahmin edilmesi konusunda güvenilir sonuçlar henüz mevcut değildir. Bugüne kadar pek çok deprem önceden beklenmeden meydana gelmiş veya yapılan deprem tahminleri doğru çıkmamıştır. Güvenilir bir uyarı sisteminin henüz mevcut olmaması, yapıların depreme karşı dayanıklı düzenlenerek, depremin etkilerinden korunmanın sağlanması gereğini ortaya çıkarmıştır.

Doğal afetlerin en önemlilerinden biri olan deprem, yerkabuğunun bir titreşimi olduğu için, yapıların mesnetlerinde zamana bağlı bir yerdeğiştirme hareketi doğurarak dinamik bir etki oluşturur. Depreme dayanıklı yapı tasarımının önemli iki adımından biri yapının iyi düzenlenmesi ve yeterli kalitede olması, diğeri ise, bu yapıda depremin oluşturması beklenen kesit zorlarının yeterli yaklaşıklıkla belirlenerek karşılanmasıdır. Deprem etkisi, yapıları alışılmış yüklerin üzerinde zorlayarak, yapının tasarımında ve uygulanmasında yapılmış hataları ortaya çıkarır.

Ülkemizin önemli bir bölümü birinci derece deprem kuşağında yer almaktadır. Yakın geçmişimiz incelendiğinde, 1939 Erzincan $M_s=8$, 1970 Gediz $M_s=7.7$, 1975 Lice $M_s=6.7$, 1992 Erzincan $M_s=6.8$, 1995 Dinar $M_s=6.0$, 1998 Adana-Ceyhan $M_s=6.3$, 1999 Kocaeli $M_s=7.4$ ve 1999 Düzce $M_s=7.2$ gibi çok büyük oranda can ve mal kaybına sebep olan depremlerle karşılaşmaktadır. Bu depremlerde bu derece can ve mal kaybı yaşanması, depremlerin büyüklüklerinin yanında yapıların yönetmeliklere uygun olmaması, denetimsizlik ve ihmâl gibi unsurları da içermektedir. Mevcut yapılarımızın büyük bölümünün deprem etkisinde istenilen performansı gösteremeyeceği bilinmektedir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımının deprem etkilerini lineer elastik karşılayacak şekilde yapılmasının ekonomik olmadığı bilinmektedir. Deprem yapının ömrü boyunca karşılaştacağı en ağır yük olabilir, aynı zamanda yapının bu etki altında kalma olasılığı fazla değildir. Bu sebeple özel yapılar dışında toptan göçmeye neden olmayacak şekilde hasar oluşmasına izin veren, optimum bir çözüm bulunmalıdır. Yapının elastik sınırlarının ötesinde plastik şekildeğiştirme yapabilmesi betonarme elemanların belirli bir dayanıma sahip olmasının yanında süneklik kapasitesinin de yüksek olmasına bağlıdır. Özellikle taşıyıcı elemanlarda betonun, enine donatılar ile sarılması durumunda bu elemanların dayanım kaybına uğramadan büyük plastik yerdeğiştirmelere gidebileceği bilinmektedir.

Bir yapının rijitliğini, dayanımını ve sünekliğini mevcut durumun üzerine çıkarmak için yapılan uygulamaya güçlendirme denilmektedir. Ülkemizin mevcut yapı durumu incelendiğinde, depreme dayanıklı yapı tasarımının yanında güçlendirme yöntemlerinin de özel olarak ilgilenilmesi gereken konuların başında geldiği anlaşılmaktadır. Güçlendirilmesi planlanan betonarme bir yapıda deprem etkilerini karşılayabilecek dayanıma sahip taşıyıcı elemanlarının bulunmaması durumunda yaygın olarak kullanılan başlıca uygulamalar; binada bulunan mevcut taşıyıcı sistemin kesitlerini arttırma (betonarme manto uygulamaları) ve yapıya yeni taşıyıcı elemanlar (betonarme perde) eklemektir. Günümüzde ise yeni teknolojiler kullanılarak farklı güçlendirme yöntemleri geliştirilmektedir. Lifli polimerler, son yıllarda üzerinde en çok durulan ve kullanımı yaygınlaşmaya başlayan malzemelerdendir.

Bu malzemeler ile çok sayıda deney yapılmış ve bunların sonucunda, özellikle tasarım ve uygulanmasında çok dikkatli olunmasının gerekliliği vurgulanarak, yapıda kullanılabilirliği ispatlanmıştır. Lifli polimerler, içinde kullanılan malzeme ile kullanılan tek tip malzemenin değişik doğrultuda yönlendirilmesine göre çeşitlilik göstermektedirler. Yapı elemanlarının dış yüzeyine yapıştırılması ya da kesite dışarıdan sarılarak yapıştırılması en çok rastlanan uygulamalardır. Bu sayede kesitte var olan donatı ile beraber çekme kuvvetlerine karşı kullanılmaktadır. Bunlarla birlikte, lifli polimerlerden üretilen donatıların, klasik çelik donatının yerini almaya başladığı, hatta ön gerilmeli betonda da uygulandığı görülmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Yapıların deprem etkisinde davranışının anlaşılabilmesi için betonarme elemanların tekrarlı ve yön değiştiren yükler altında incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ilk olarak günümüze kadar konu ile ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. Dünyanın deprem bölgelerinde yer alan birçok ülkesinde ilgili yönetmeliklere uygun olarak inşa edilmeyen yapıların güçlendirilmesini konu alan ve bunu amaçlayan çalışmalar incelenmiş ve farklı açılardan değerlendirilerek yapılacak deneysel çalışmada dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın deneysel fazında amaç; kolonların eğilme dayanımlarının boyuna doğrultuda yapıştırılan lifli polimer malzeme ile arttırılmasıdır. Enine doğrultuda kesme dayanımının arttırılması ve sargılama oluşturmak amaçlı lifli polimer malzeme kullanılmıştır. Numuneler, mevcut yapılarımızda bulunan kusurları yansıtmak amacıyla kolon beton basınç dayanımı düşük, kolon donatısı düz yüzeyle (S220) olup sargılama bölgesinde etriye sıklaştırması yapılmadan üretilmiş; tersinen tekrarlanan yatay yükler etkisinde test edilmiştir. Davranışı karmaşıklştırmamak için, kolonlar üzerine eksenel yük uygulanmamış, böylece uygulanan güçlendirme detayının sisteme ve davranışına etkisini daha net görebilmek amaçlanmıştır. Bunun yanında deneysel çalışmada amaç kolonun eğilme dayanımını arttırmak olduğundan numunelerin farklı göçme şekillerini engellemek için tasarım aşamasında bazı durumlar mevcut yapıların aksine daha güvenli tarafta kalacak şekilde seçilmiştir. Bu şekilde deney aşamasında değerlendirilmek istenilen parametrelere eksiksiz ulaşmak amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Çalışma konusunda sadece son yıllarda basılmış olan az sayıda güncel kaynak bulunmaktadır.

Triantafillou ve diğ. (2009), NSM (Near Surface Mounted - Yüzeye Yakın Güçlendirme) metoduyla eğilmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kolonların yapay deprem yükü etkisindeki davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan farklı güçlendirme malzemelerinin kapasite, yatay yerdeğiştirme, enerji yutma ve rijitlik gibi parametreler bazında karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu değerlendirmeler sırasındaki değişkenler; karbon veya cam lifli polimerler ile paslanmaz çelik

donatılar, NSM uygulama şekli, ankraj dolgu malzemesi ve sargılama malzemesi ile kullanımı olarak belirlenmiştir.

Aynı geometriye sahip 11 adet konsol kolon numunesi (250 x 250 x 1600 mm) tersinen tekrarlı yatay yük ve sabit eksenel yük etkisinde test edilmişlerdir. Numunelerde eski tip yapıları yansıtması açısından düz donatı kullanılmıştır. Boyuna donatılar bir numune hariç 4Ø14 (diğer numune 4Ø12), enine donatılar tamamında Ø8/200 seçilmiştir. Beton dayanımı ise ortalama 25.8 MPa olarak kabul edilebilir. Güçlendirmede kullanılacak boyuna elemanların temele ankraj boyu ise 300 mm hesaplanmıştır.

NSM uygulamasında donatı olarak; karbon lifli polimer şerit plaka, cam lifli polimer dairesel çubuk donatı ve paslanmaz çelik donatı kullanılmıştır (karbon lifli polimer şerit plakalar kolon eksenine dik ve paralel olacak şekilde iki farklı tipte uygulanmıştır). Aynı zamanda güçlendirmede kullanılan donatı oranı da değişken tutulmuştur. Ankraj dolgu malzemesi olarak epoksi reçinesi veya çimento bazlı harç kullanılmıştır. Son değişken ise kolon alt bölgesinin (kritik bölge) TRM (Textile Reinforced Mortar – Dokuma Sargı Malzemesi) ile sargılanmış veya sargılanmamış olmasıdır.

Deney sonuçlarına göre; güçlendirilen numunelerin eğilme dayanımı referans numunesine oranla %25 ile %100 arasında artmıştır. Güçlendirilen numuneler itme ve çekmede simetrik hareket etmemişlerdir. Boyuna donatılar temel tabanına ulaştıktan sonra gönye yapılmadan kancayla sonlandırıldığı için donatılarda sıyrılma meydana gelmiştir.

Referans numunesi boyuna donatıların burkulması ile göçmüştür. Güçlendirilen numuneler ise; karbon lifli polimer şerit plakaların kırılması veya sıyrılması, cam lifli polimer dairesel çubuk donatıların burkulması, paslanmaz çelik donatıların burkulması veya kopması, ankrajların sıyrılması gibi farklı şekillerde göçmüşlerdir.

Yapılan değerlendirmede; rijitlik ve enerji yutma miktarları paslanmaz elik ile güçlendirilen numunede diğerlerine oranla daha yüksek değerlere ulaşmıştır. NSM’de kullanılan güçlendirme donatısı oranı arttıkça dayanımda artış olduğu gözlenmiştir. Mevcut kolon donatı oranının azalması NSM donatısının verimini arttırmaktadır. Karbon lifli polimer şerit plakaların doğrultusu kolon eksenine dik olanlar paralel olanlara oranla daha verimli olmuştur. TRM ile sargılama yapılan kolonların da yapılmayanlardan daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir. Paslanmaz elik donatılarda ankraj dolgu malzemesi olarak kullanılan iki farklı tip malzemeden epoksi reçinesinin imento bazlı harca göre daha verimli olduğu grlmştir.

Sonuç olarak, NSM metoduyla lifli polimer malzeme veya paslanmaz elik donatılar kullanarak güçlendirilen betonarme kolonların deprem yükleri etkisinde eğilme kapasitesinin ciddi şekilde arttığı ve bu metodun uygulanabilir bir çözüm olduğu söylenmiştir.

Perrone ve diğ. (2009), NSM metoduyla boyuna doğrultuda güçlendirilen düşük dayanımlı betonarme kolonların sabit eksenel yük ve tersinen tekrarlı yatay yükler etkisinde eğilme ve enerji yutma kapasitelerindeki değişimi incelemişlerdir. Boyuna güçlendirme malzemesi olarak kullanılan karbon lifli polimer şerit plakalarla kolonun eğilme dayanımı, üzerine uygulanan karbon lifli polimer sargılama ile de betonun basınç dayanımı ve plastik mafsallarda boyuna donatıların ve şerit plakaların burkulma ve sıyırılma dirençlerini arttırmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada; güçlendirilmiş, güçlendirilmemiş ve test edildikten sonra güçlendirilmiş kolonların, farklı boyuna donatı oranına sahip kolonların, farklı beton basınç dayanımına sahip kolonların, farklı miktarda karbon lifli polimer sargılama yapılan kolonların ve farklı sayıda karbon lifli polimer şerit plaka kullanılan kolonların kapasite, enerji yutma ve rijitlik bakımından karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

Aynı geometriye sahip 8 adet konsol kolon numunesi (250 x 250 x 1500 mm) retilmiştir. Numunelerde eski tip yapıları yansıtmaması açısından kolon boyuna donatıları 260 mm bindirmeli olarak, beton dayanımı da bir numune hariç 8 MPa olacak şekilde imal edilmiştir (diğer numune 29 MPa). Enine donatı oranı $\phi 6/250$ olarak seçilmiştir. Boyuna donatı oranı ise değişkenlerden birisi olduğundan 4 $\phi 10$, 4 $\phi 12$ ve 4 $\phi 16$ olarak seçilmiştir.

Güçlendirme aşamasında ise itme ve çekme yüzlerine 2, 3 ve 4'er adet karbon lifli polimer şerit plaka konulmuştur. Karbon lifli polimer şerit plakaların temele ankraj boyu da 120 mm ile 150 mm aralığı olarak belirlenmiştir. Son olarak karbon lifli polimer sargılama kat sayısı 2 veya 3 olarak seçilmiştir.

Deney verilerine göre; hasar gördükten sonra güçlendirilen kolon numunelerinin yük taşıma kapasitelerinin %38 ile %55 aralığında arttığı görülmüştür. Karbon lifli polimer şerit plakaların ankraj bölgesi çevresindeki betonun yarım koni şeklinde çatladığı ve bunun yükü düşürdüğü gözlenmiştir. Bunun bir sonucu olarak düşük beton dayanımının güçlendirmenin verimini düşürdüğü söylenmiştir. Daha büyük yerdeğiştirmelere gidildikçe karbon lifli polimerlerin katkısının arttığı ve kolonun rijitliğinin referans numunesine oranla arttığı gözlenmiştir (bu durum başlangıç rijitliği referans numunesinden düşük olan numuneler için geçerli).

Betonarme imalattan sonra güçlendirilen kolon numunelerinin ise yük taşıma kapasitelerinin %63 ile %70 aralığında arttığı gözlenmiştir. Daha büyük öteleme adımlarına gidildikçe enerji yutma kapasitesi referans numunesine oranla %40 ile %87 aralığında artmıştır. Bu numunelerde boyuna donatı oranı arttıkça enerji yutma kapasitesinin de arttığı gözlenmiştir. Hasar gördükten sonra güçlendirilen numunelerle benzer şekilde daha büyük öteleme oranlarına gidildikçe kolonun rijitliğinin referans numunesine oranla arttığı görülmüştür (bu durum da başlangıç rijitliği referans numunesinden düşük olan numuneler için geçerli).

Genel olarak yapılan değerlendirmelerde ise karbon lifli polimer sargılama kat sayısının artması kolonun yük taşıma kapasitesini fazla etkilemezken, enerji yutma kapasitesinde ciddi bir artış sağlamıştır. Beton dayanımı yüksek olan numunenin ise yük taşıma kapasitesinde %39, enerji yutma kapasitesinde de %109'luk artış sağlanmıştır.

Sonuç olarak yapılan çalışma, deprem etkilerine karşı bu metodla sağlanan güçlendirmenin betonarme kolonların eğilme ve enerji yutma kapasitesini arttırmada uygun bir çözüm olduğunu göstermiştir.

Barros ve diğ. (2006), betonarme kolonların NSM metoduyla karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılar ve şerit plakalar kullanılarak güçlendirilmesi sonucu elemanın davranışındaki değişimi gözlemlemek istemişlerdir. Bu amaçla NSM metodunun verimliliğini kanıtlayan bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma için ortalama beton basınç dayanımı 16.7 MPa (28 günlük) olan 12 adet dikdörtgen kesitli kolon numunesi üretilmiştir (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1 : Betonarme kolon numunelerin isimlendirmesi (Barros ve diğ., 2006)

Boyuna Donatı Oranı	NON ^a	PRE ^b	POS ^c
4Ø10	P10a_NON	P10a_PRE	P10a_POS
	P10b_NON	P10b_PRE	P10b_POS
4Ø12	P12a_NON	P12a_PRE	P12a_POS
	P12b_NON	P12b_PRE	P12b_POS

^a Güçlendirilmemiş numune

^b Güçlendirilmiş numune

^c Test edilen NON^a numunelerin güçlendirilmesi ile elde edilen numune

Güçlendirme işleminde ise, ilk olarak kolonun her iki yüzüne boyuna doğrultuda 3'er adet 4-5 mm genişlik ve 12-15 mm derinlikte oluklar açılmıştır. Daha sonra bu oluklar basınçlı hava ile temizlenip epoksi ile doldurulmuştur. Epoksi ile doldurulan bu oluklara karbon lifli polimer şerit plakalar boyuna doğrultuda gömülmüştür. Bu işlem sırasında kolonun temele birleştiği bölgede karbon lifli polimer şerit plakalar temele 100 mm derinliğinde ankrajlanmıştır. Güçlendirmesi de bu şekilde yapılan numunelere 150 kN statik eksenel yük ve tersinen tekrarlanan yatay yük etkilerek deneye tabi tutulmuştur.

Deney verileri değerlendirildiğinde güçlendirilen numunelerin güçlendirilmeyen numunelere göre yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Güçlendirilen tüm numunelerde lifli polimer donatı oranı aynı fakat çelik donatı oranı 4Ø10 ve 4Ø12 için 2 farklı tiptedir. Bu durum göz önüne alındığında, lifli polimer malzeme ile güçlendirmenin düşük çelik donatı oranına sahip numunelerde daha etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca PRE^b ve POS^c tipi güçlendirilen numunelerin yük taşıma kapasitelerinin de birbirine benzer olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, eğilmede göçen kolonların NSM metoduyla lifli polimer şerit plaka kullanılarak güçlendirilmesi sonucu elemanın yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artış olduğu söylenebilir.

Szabo ve Balazs (2006), NSM metoduyla ilgili yaptıkları araştırmada konuyla alakalı bazı çalışmaları değerlendirmişlerdir. Bunun sonucunda lifli polimer dairesel çubuk donatılar kullanılarak NSM metoduyla yapılan güçlendirmenin faydalarını ortaya koymuşlardır. Bunlar;

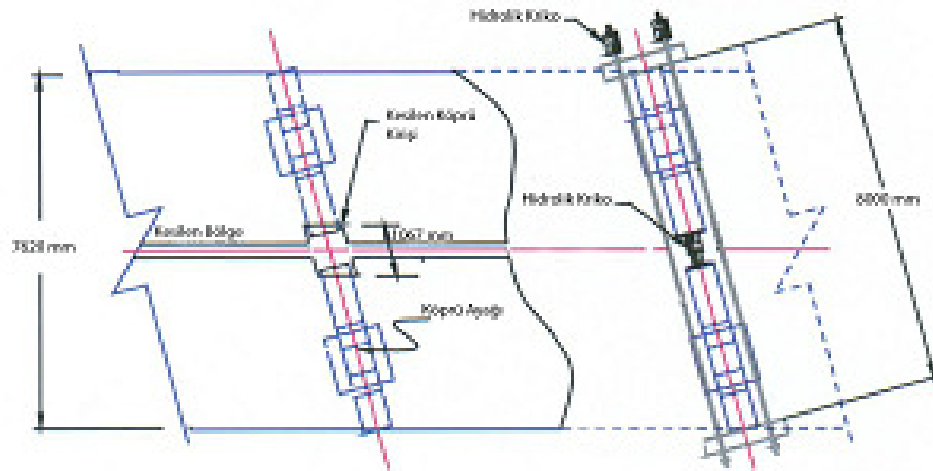
- Lifli polimer malzemenin yüksek mukavemetli ve korozyona karşı dirençli olmasından dolayı uygulama için açılacak oluğun çok küçük boyutlarda olabilmesi,
- İyi ve dayanıklı ankraj imkanı verebilmesi,
- Elemanın dayanımında kesin artış sağlaması,
- Lifli polimer hafif bir malzeme olduğundan NSM metodunda uygulama kolaylığı sağlaması olarak sıralanabilir.

Sonuç olarak EBR (Externally Bonded Reinforcement – Paspayı Dökülerek Güçlendirme) metoduna göre daha yeni bir yöntem olan NSM metodunda, aynı oranda güçlendirme yapıldığında EBR metoduna göre yük taşıma ve şekildeğiştirme kapasitesinde daha büyük artışlar olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda NSM metodunda EBR’ye göre lifli polimer malzemenin daha fazla yapışma yüzeyi ve daha büyük ankraj kapasitesine sahip olduğu ve bunun istenmeyen bazı göçme tiplerini de engellediği söylenmiştir.

Alkhrdaji ve Nanni (1999), betonarme köprü ayaklarının (NSM metoduyla) karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılar ve sargılama kullanılarak eğilme kapasitesinin artırılmasını amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Deneye tabi tutulacak köprü 1930’lu yıllarda Amerika’da inşa edilen “Bridge J857” isimli köprüdür. Dikdörtgen kesitli köprü ayaklarının yapılan incelemesinde kesmeye karşı yeterli, eğilmeye karşı yetersiz dayanımda olduğu anlaşılmış, ve güçlendirme detayları buna göre belirlenmiştir.

Köprünün denenecek 4 ayağından 3 tanesi farklı detayda güçlendirilmiştir. Köprü ayaklarından bir tanesine 14 adet Ø11 karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı iki yüzüne 7’şer tane gelecek şekilde NSM metoduyla 14 mm genişlik ve 19 mm

Güçlendirme işlemi tamamlanan köprü ayakları ve referans olarak kullanılacak olan köprü ayağına tersinen tekrarlı yatay yük etkiltilmiştir. Aynı zamanda sistem, köprü ayaklarının taşıdıkları döşeme ve kirişlerden gelen statik eksenel yükün de etkisindedir (Şekil 1.1).



Deney verileri ve göçme modları değerlendirildiğinde güçlendirilmemiş köprü ayağının temelinde zemin davranışına bağlı olarak dönme meydana gelmiştir. Bunun yanında köprü ayağının üstten 1/3 yüksekliğinde büyük bir çatlak görülmüştür (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 : Güçlendirilmemiş köprü ayağının davranışı (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)

14 adet karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı kullanılarak ve sargılanarak güçlendirilen köprü ayağında ise köprü ayağı ilk olarak rijit cisim dönmesi yapmış ve bunun sonucunda üst bölgesinde büyük bir çatlak meydana gelmiştir. Bu çatlak meydana geldikten sonra donatı akmaya başlamış ve plastik mafsalları oluşumu gerçekleşmiştir. Plastik mafsalları oluşumundan sonra sisteme gelen momentler sonucu, köprü temelinde, zeminin taşıyıcılığını kaybetmesiyle dönme meydana gelmiş ve köprü ayağı yük taşıyamaz hale gelmiştir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 : Güçlendirilmiş kolonun davranışı (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)

6 adet karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı kullanılarak ve sargılanarak güçlendirilen köprü ayağında ise ilk olarak en üst ve en alt bölgede iki büyük çatlak meydana gelmiştir. Bu köprü ayağının temeli sağlam zemine oturduğu için temelde dönme görülmemiştir. Bunun sonucu olarak temelin gelen momente karşı dönme rijitliği çok fazla olduğundan köprü ayağının temele birleştiği nokta çok daha fazla momente maruz kalmıştır (Şekil 1.4 ve Şekil 1.5).



Şekil 1.4 : Köprü ayağının üst bölgesindeki çatlak (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)



Şekil 1.5 : Köprü ayağının alt bölgesindeki çatlak (Alkhrdaji ve Nanni, 1999)

6 kat cam lifli polimer sargılama yapılan köprü ayağı ise temelinin oturduğu zeminin yeterince sağlam olmaması nedeniyle rijit cisim dönmesi yaparak göçmüştür.

Deney sonuçları göstermiştir ki, bu güçlendirme yöntemi köprü ayakları gibi düşey elemanların eğilme dayanımını arttırmada verimli olmuştur. Fakat düşey eleman eğilmeye karşı güçlendirilirken temel-kolon, kiriş-kolon birleşimleri de bu artışa ayak uyduracak kapasitede olmalıdır. Kısacası sistemin eğilme kapasitesini

arttırırken diğ er sınır değerlerinde tahkiki iyi bir şekilde yapılarak sistemin istenen eğilme kapasitesine ulaşması sağlanabilir.

Seible ve diğ. (1997), mevcut k opr  kolonları ve bunların karbon lifli polimer malzeme ile g   lendirilmesi ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadan önce teorik bir çalışma yürüterek g   lendirme için gerekli lifli polimer malzeme kalınlığı üzerine bir takım bağıntılar geliştirmişlerdir. Farklı göçme şekilleri (kesme, eğilme, aderans kaybı) oluşacak şekilde kolonlarda yapılacak g   lendirme işlemi için farklı kalınlıkta lifli polimer malzemeye ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Her farklı durum için de uygulanacak lifli polimer malzeme kalınlığı kolon boyunca değişiklik göstermektedir. Geliştirilen kıstaslara göre g   lendirilen kolonların performansı önemli oranda iyileşmiştir. Teorik olarak hesaplanan yatay yük taşıma kapasitesinin üzerine çıkılmış, yerdeğiştirme sünekliği büyük    de artmış ve aderans çözülmesi  nlenmiştir.

Sato ve Ko (2007), betonarme kolonlarda kullanılan kesme donatısının ve lifli polimer malzeme sargısının kolon boyuna donatısının burkulma davranışına olan etkisini tersinen tekrarlı yatay yükler altında inceledikleri deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada; lifli polimer sargılama yapılmayan betonarme kolonlarda, boyuna donatıların basınç taşıma kapasitesinin burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0.3 mm'den az olduğu durumlarda azalmaya başladığı g r lm ştir. Boyuna donatının yüklemenin yarısına gelindiğinde en büyük basınç gerilmesine ulaştığı ve burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0.6 mm'den fazla olduğu durumlarda sabitlendiği ve artmadığı g r lm ştir. Bu yüzden, boyuna donatıların burkulma boyu ve burkulma şeklinin burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafesinin 0.3 mm ile 0.6 mm arasında olduğu durumlarda daha dengeli olduğu g r lm ştir.

Aksine, yüksek elastisiteli lifli polimer (karbon lifli polimer) sargılı betonarme kolonlarda, boyuna donatıların basınç gerilmelerinin çok daha büyük burkulmada normal eksen merkezinden sapma mesafelerinde bile artmaya devam ettiği gözlemlenmiştir.

Kesme donatılarının rijitliğini arttırmak veya yüksek elastisiteli lifli polimer malzemenin sınır gerilmesini arttırarak verimli bir şekilde burkulmada normal eksen merkezinden sapma hareketinin sınırlanabileceği g r lm ştir.

Bu deneyde kullanılan numuneler için, boyuna donatının burkulması sırasında kesme donatısının (etrijelerin) uzayarak akmaya başladığı bölgenin uzunluğunun burkulma boyuna oranının 0.45 ile 0.76 aralığında olduğu görülmüştür.

2. BETONARME ve GÜÇLENDİRME

2.1 Betonarme

Beton gibi çekme dayanımı düşük bir malzemedan taşıyıcı sistemler oluşturmak zor ve ekonomik olmayan çözümler gerektirir. Akla gelen ilk çözüm, eski çağlarda taşın kullanımına benzer bir biçimde, eleman veya sisteme, kesitlerde yalnız basınç oluşturacak bir form vermektir. Ancak, bu tür yapı geometrileri bir çok durumda fonksiyonel ve ekonomik olmayabilir. Akla gelen ikinci çözüm, çekme gerilmelerinin betonun içine yerleştirilen, çekme dayanım ve sünekliği yüksek başka bir malzeme tarafından karşılanmasıdır. Bu ikinci çözüm mühendislik açısından çok daha uygun bir çözümdür. Bu amaçla betonda çekme gerilmelerini karşılamak için çelik donatı kullanılır. Çelik donatı ve betondan oluşan kompozit malzemeye “betonarme” denir. Çelik donatı ve betondan oluşan malzemenin betonarme olabilmesi için, bu iki malzemenin birbirleriyle kaynaşmış olarak birlikte çalışmaları gerekir. Başka bir deyişle, donatının ve çevresindeki betonun deformasyonunun farklı olmaması için donatı, etrafındaki beton kütleyle sağlam bir şekilde kenetlenmelidir. Beton ve çeliğin birlikte çalışmasını sağlayan bu olay “kenetlenme” veya “aderans” olarak adlandırılır (Ersoy ve Özcebe, 2004). Beton ve donatı arasındaki aderansın herhangi bir sebeple azalması ve/veya tamamen ortadan kalkması, betonarme yapıda büyük sorunları beraberinde getirir.

2.1.1 Beton

Beton, agrega, çimento ve suyun homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup, şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir.

Betonun mutlak hacmini %70 oranında agrega (kum, çakıl, mıcır), %10 oranında çimento, % 20 oranında su oluşturur.

Agrega; betonun fiziksel yapısını oluşturan bir dolgu maddesi olarak kullanılır. Çimento ve su ise aralarında oluşturdıkları kimyasal işlemler sonucunda, ayrı halde bulunan agrega tanelerini birbirlerine yapıştırarak betonu oluştururlar.

2.1.2 Çelik

İçerisinde %1.7'ye kadar karbon, %1'e kadar mangan, %0.5'e kadar silisyum bulunan kükürt ve fosfor oranı da %0.05'ten az olan demir karbon alaşımıdır.

Betonun çekme dayanımı yaklaşık olarak basınç dayanımının 1/10'u kadardır. Bu yüzden yapıdaki çekme kuvvetlerini karşılamak için donatı yani çelik gereklidir.

2.1.3 Aderans

Beton ile donatı meydana gelen etkiler nedeni ile şekil değiştirirler. Bu sırada iki malzeme arasında gerilmelerin geçişi meydana gelir. Arada sıyrılma olmadan bu tür gerilme geçişinin meydana gelmesine aderans denir.

Aderans olarak adlandırılan beton ve donatı arasındaki bağın, üç temel nedene dayandığı kabul edilmektedir. Bunlar;

- Donatı çubuğunun yüzeyi ile çimento harcı arasında oluşan ve kolayca çözülebilen kimyasal yapışma
- Beton içindeki çubuk yüzünde meydana gelen sürtünmeden ortaya çıkan kuvvet
- Nervürlü çubuklarda oluşturulan dişlerde oluşan kuvvet olarak sıralanabilir.

Beton ve donatı arasındaki aderansın herhangi bir sebeple azalması ve/veya tamamen ortadan kalkması yapıda büyük sorunları beraberinde getirir. Ülkemizdeki mevcut yapılarda, dayanım ve aderans kayıpları deprem güvenliği açısından büyük tehlike arz eden faktörlerin başında gelir.

2.1.4 Donatının kenetlenmesi

Betonarme bir elemanın gerektiği gibi davranabilmesi için donatının betona kenetlenmesi gereklidir. Kenetlenme, aderansın tam anlamıyla sağlanabilmesi için oldukça önemlidir.

Donatının betona kenetlenmesi çeşitli biçimlerde sağlanabilir. Bunlar, düz kenetlenme ile, manşon ve benzeri mekanik bağlantılarla veya kanca ile sağlanabilir.

2.2 Güçlendirme

Güçlendirme, bir yapının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini veya bunlardan bazılarını hasar öncesi veya mevcut durumun üzerine çıkarmak amacıyla yapılan değişiklik olarak tarif edilmiştir. Güçlendirme için yapının hasar görmüş olması gerekmez.

Yapılarda güçlendirme gereksinimi;

- Yapının kullanım amacının değişmesiyle,
- Yönetmelik değişmesi nedeniyle,
- Yapı malzemelerinin kullanım ömrünü doldurması nedeniyle,
- Deprem, darbe ve patlama gibi etkenler nedeniyle,
- Mevcut yapının standardın altında olması nedeniyle ortaya çıkabilir.

Yapının kullanım amacının değişmesiyle yapıya düşey yönde etkiyen hareketli yüklerin ve yapının kütlelerinin artışı söz konusu olur. Yapı kütlelerinin artması deprem esnasında yapıya yatay yönde etkiyen deprem kuvvetlerinin artmasına neden olur. Bunun sonucunda yapı öngörülenden daha büyük kesit zorlarına maruz kalır ve güçlendirme gereksinimi ortaya çıkabilir.

Yönetmelik değişmesiyle yapıya yatay yönde etkiyen deprem kuvvetlerinin hesap yöntemi değişebilir. Ülkemizde 1975 yılında yürürlüğe giren deprem yönetmeliği ile 1998 yılında yürürlüğe giren ve daha sonra 2007 yılında güncellenen deprem yönetmelikleri arasında ciddi farklılıklar vardır. Mevcut yapılarımızın büyük bir kısmı güncel olan deprem yönetmeliğimizin şartlarını sağlamamaktadır. Bu durum taşıyıcı elemanların aksel yük, kesme kuvveti, eğilme momenti taşıma kapasitelerini ve sünekliklerini olumsuz etkilemekte ve deprem esnasında beklenenden kötü bir davranış göstermesine neden olmaktadır.

Yapılar çeşitli çevresel etkiler nedeniyle zaman içinde hasar görebilir. Korozyon, donma-çözünme etkisi, klor etkisi gibi nedenlerle yapıda durabilite problemi ortaya çıkar. Bu da yapı malzemelerinin kullanım ömrünü erken doldurmasına ve yapının öngörülen servis ömrünün azalmasına neden olur.

Deprem, darbe ve patlama gibi hasarlar yapıda tasarım ve uygulama aşamasındaki hataları ortaya çıkarır. Eğilme elemanlarında çekme bölgesinde donatı yetersizliği eğilme hasarlarına neden olur. Özellikle kolon ve kiriş gibi taşıyıcı elemanlarda etriye sıklaştırmasının yapılmaması deprem esnasında gevrek göçmeye neden olur ki gevrek güç tükenmesi istenmeyen bir durumdur. Uygulama aşamasında donatıda yetersiz bindirme boyu bırakılması nedeniyle deprem esnasında donatının betondan sıyrılmasına neden olabilir. Konstrüktif hatalardan kaynaklanan hasarlar nedeniyle de yapıda güçlendirme gereksinimi ortaya çıkabilir.

2.2.1 Lifli polimerlerle güçlendirme tasarım önerileri

Karbon, cam, aramid gibi fabrikasyon olarak üretilmiş çok yüksek mukavemetli liflerin epoksi emdirilerek yapı elemanlarının yüzeylerine farklı metodlarla ve farklı şekillerde yapıştırılması suretiyle elde edilen güçlendirme sistemidir.

Lifli polimer güçlendirme sistemleri betonarme, çelik, taşıyıcı tuğla ve ahşap elemanların eğilmeye, kesme etkilerine, eksenel yüklere ve darbelere karşı dayanımlarının ve/veya sünekliklerinin arttırılmasında kullanılır.

Lifli polimer güçlendirme sistemlerinin en önemli avantajları:

- Çok yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahiptirler.
- Çelik veya betonarme mantolama gibi geleneksel güçlendirme yöntemlerine göre çok daha kolay ve hızlı uygulanırlar.
- Güçlendirme uygulamalarında yapının boşaltılmasına gerek duyulmadan, kısmi düzenlemelerle yapı – endüstriyel tesis servis verirken, güçlendirme işlemlerine devam edilir.
- Çok hafif olmaları nedeniyle yapıda ilave yük artışına neden olmazlar.
- Asidik ve alkali ortamlara ve korozyona mükemmel dayanıklılık sağlarlar.

2.2.2 Malzeme özellikleri

2.2.2.1 Epoksiler

Epoksi reçineler, polimer kimyasından 40 yılı aşkın bir süredir yer alan ve çok farklı uygulama alanlarına sahip yüksek performanslı ürünlerdir. Epoksi reçineleri yalnız başlarına kullanılmazlar. Sertleştirici adı verilen farklı kimyasal özelliklere sahip maddelerle polimerize olarak ve çapraz bağlanarak değişik özelliklerde termoset yapıda plastik madde oluştururlar. Reçine ve sertleştiricinin kimyasal reaksiyonu sonucunda sert ve geri dönüşü olmayan bir malzeme meydana gelmektedir.

Epoksilerin en genel özellikleri:

- Farklı yüzeylerde iyi yapışma kabiliyeti
- Gelişmiş elektriksel özellikler
- Yüksek aşınma dayanımı
- Hacimsel stabilite (büzülme yapmazlar)
- Alkali, asit vb. kimyasallara karşı dayanıklılık
- Düşük sıcaklıklarda dahi yüksek performans
- Yüksek mekanik dayanımlar
- Kullanım amacına uygun kıvrımlar elde edilebilmesi

Yukarıdaki özellikler nedeniyle epoksi reçinelerden oluşan yapıştırıcılar, metal, cam, ahşap, seramik, beton, karbon vb. malzemelere daha iyi yapışma sağlarlar. Aşırı agresif olmayan kimyasal ortamlarda uzun süre dayanıklılık gösterirler.

Sahip olduğu bazı özellikler nedeniyle epoksi yapıştırıcılar lifli polimer sistemlerde de kompozit malzemenin oluşturulmasında matriks görevi görürler. İstenilen kompozit malzemenin elde edilebilmesi için matriks olarak kullanılacak yapıştırıcının aşağıdaki özelliklere sahip olması gereklidir.

- Düşük viskozite ($\mu < 3000 \text{ Mpa.s}$)
- Yeterli rijitlik ($E = 5-10 \text{ Gpa}$)
- Yüksek eğilme dayanımı ($> 50 \text{ Mpa}$, TSEN 196)

Düşük viskoziteli epoksi yapıştırıcı liflerin etrafını tamamen sararak kesintisiz homojen bir matriks oluşumunu, sahip olduğu mekanik özellikler (elastisite modülü ve eğilme dayanımı) ile de uygulandığı yüzeylerden gelecek gerilmelerin lifler arasında kesintiye uğramadan aktarılmasını sağlayacaktır. Bu nedenle lifli polimer uygulamalarında epoksi yapıştırıcı seçiminde dikkatli olunmalı, sahada uygulanan malzemenin gerekli kompozit yapıya sahip olmasında kullanılan epoksi yapıştırıcının ve uygulama kalitesinin çok önemli olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

2.2.2.2 Lifler

Lifler asıl yük taşıyıcı bileşenlerdir. Karbon, cam veya aramid esaslı olabilirler (Çizelge 2.1). Lifli polimer güçlendirme sisteminde performans ihtiyacına ve servis koşullarına bağlı olarak kullanılacak lifli polimer tipine karar verilmelidir.

- Aramid, kurşun geçirmez yeleklerin imalatında kullanılan çok sert bir malzemedir. Çok sert bir malzeme olması ve enerji yutma özelliği nedeniyle darbe ve patlama etkilerine karşı güçlendirme uygulamalarında aramid esaslı lifli polimerler tercih edilir.
- Karbon esaslı lifli polimerler, yüksek elastisite modüllü olup sürekli yük etkileri altında yüksek sünme dayanımı gösterirler. Çevrimsel yük etkisi altında yüksek yorulma dayanımına sahiptirler. Donatı çeliği gibi korozyona uğramazlar, donma-çözünme etkilerine ve agresif kimyasal ortamlara karşı yüksek dayanıma sahiptirler.
- Yüksek alkali dayanımlı cam esaslı lifli polimerler karbon esaslı lifli polimerlere oranla daha düşük elastisite modülüne sahiptirler. Sünme ve yorulma dayanımları da nispeten daha düşüktür. Her türlü asit, tuz ve alkali ortamlara karşı yüksek direnç gösterirler.

Çizelge 2.1 : Lif özellikleri

Fiber Tipi	Elastisite Modülü (kN/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
Karbon	230 – 640	2500 - 4000
Aramid	120 – 130	2900
Cam	70 – 90	2000
Çelik St37	210	370

3. NUMUNELERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

3.1 Numunelerin Tasarlanması

Yapılacak deneysel çalışmada kullanılmak üzere 720 x 720 x 550 mm boyutlarında bir temel üzerine konsol bir kolon tasarlanmıştır. Kolonun yapısı Türkiye'deki mevcut yapıların durumu dikkate alınarak, mühendislik açısından eksik yönleri olacak şekilde, düşük beton dayanımlı, düz donatılı ve sargılama bölgesinde etriye sıklaştırması yapılmadan tasarlanmıştır.

Kullanılacak betonun ortalama basınç dayanımı 10 MPa, donatı sınıfı S220 olarak belirlenmiştir. Üretimden önce yapılan hesaplamalar ve kontroller bu bilgiler doğrultusunda yapılmıştır (Şekil 3.1). Kontroller numuneler eğilmeden geçecek şekilde yapılmıştır.

Kolon enkesit genişliği $b = 200$ mm

Kolon enkesit yüksekliği $h = 300$ mm

Beton örtüsü (Paspayı) $d' = 37$ mm

Kolon enkesiti faydalı yükseklik $d = 263$ mm

28 günlük ortalama silindir beton basınç dayanımı $f_c' = 10$ N/mm²

Boyuna donatı adet ve çapı 4Ø14

Boyuna donatı sınıfı S220

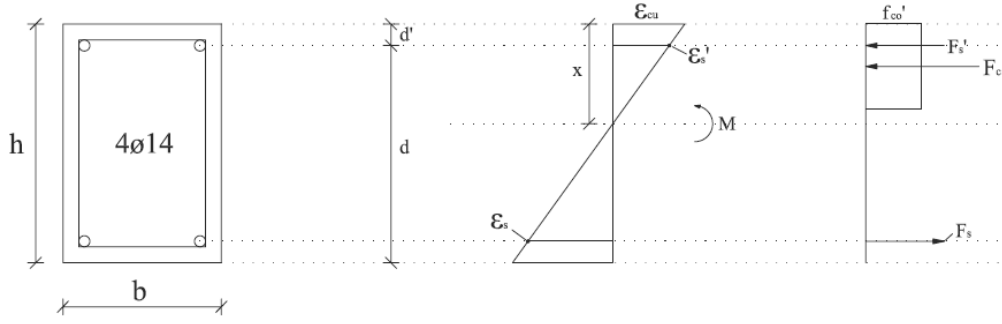
Boyuna donatı ortalama akma dayanımı $f_y = 300$ N/mm² (kabul)

Enine donatı çap ve aralığı (deney bölgesinde) Ø10/200

Enine donatı çap ve aralığı (deney bölgesi dışında) Ø10/100

Enine donatı sınıfı S220

Enine donatı akma dayanımı $f_y = 300$ N/mm²



Şekil 3.1 : Kolon şekildeğiştirme-gerilme dağılışı

Çekme bölgesinde donatının aktığı kabulü ile yatay denge denklemi için;

$$F_s = f_{yd} \times A_s \quad (3.1)$$

$$F_s = 300 \times \frac{2 \times \pi \times 14^2}{4} = 92363 \text{ N}$$

$$F_s' = A_s \times E_s \times \varepsilon_s' = A_s \times E_s \times \varepsilon_{cu} \times \frac{(x - d')}{x} \quad (3.2)$$

$$F_s' = \frac{2 \times \pi \times 14^2}{4} \times 200000 \times 0.003 \times \frac{(x - 37)}{x}$$

$$F_c = f_c \times b \times k_1 \times x \quad (3.3)$$

$$F_c = 10 \times 200 \times 0.85 \times x$$

$$F_s = F_c + F_s' \quad (3.4)$$

$$\Rightarrow x = 41.8 \text{ mm}$$

Alt donatıya göre moment alınarak moment kapasite hesabı yapıldığında;

$$M_r = 22.24 \text{ kNm}$$

olarak bulunmuştur.

Kayma hesabı;

Moment kapasitesine karşı gelen tasarım kesme kuvveti hesaplanırken, kolon boyu olarak yatay yükün etkidiği noktanın merkezinin temelden yüksekliği alınmıştır.

$$V_d = \frac{M_r}{h} = \frac{22240}{1.65} = 13479 \text{ N}$$

Kesme kuvveti kapasitesi ise;

$$V_r = V_w + V_c \quad (3.5)$$

$$V_{cr} = 0.65 \cdot 0.35 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot (h - d') \quad (3.6)$$

$$V_{cr} = 0.65 \cdot 0.35 \cdot \sqrt{10} \cdot 200 \cdot (300 - 37) = 37841 \text{ N}$$

$$V_c = 0.8 \times V_{cr} \quad (3.7)$$

$$V_c = 30273 \text{ N}$$

$$V_w = \frac{n \times A_0 \times d \times f_{ywd}}{s} \quad (3.8)$$

$$V_w = \frac{2 \times \pi \times 10^2}{4 \times 200} \times 263 \times 300 = 61968 \text{ N}$$

$$V_r = 30273 + 61968 = 92241 \text{ N}$$

$$V_r = 92.24 \text{ kN} \geq V_d = 13.48 \text{ kN}$$

Yapılan kontroller sonucunda üretilecek numunelerin kesme güvenliğinin sağlandığı görülmüştür.

3.2 Numunelerin Özellikleri

Enkesitleri 200 x 300 mm ve yüksekliği 1950 mm olan konsol kolonlar, boyutları 720 x 720 x 550 mm olan bir temel üzerine oturtulmuştur.

Numunelerin kolon bölgesi için düşük dayanımlı beton ve S220 (BÇ I) kalitesinde düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. Ayrıca kolon sarılma bölgesinde etriye sıklaştırması yapılmamıştır. Temelde ise düşük dayanımlı beton ve S420 (BÇ III) donatısı kullanılmıştır. Tüm bu numunelerde kolon donatısı sürekli olacak şekilde kullanılmıştır.

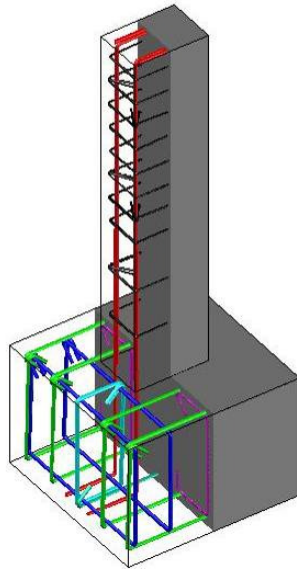
LS; düşük dayanımı (Low Strength), CON; kolon boyuna donatısının sürekli olduğunu, REF1, REF2, Rebar ve Lamine ifadeleri ise güçlendirme uygulanan veya uygulanmayan farklı numune tiplerini göstermektedir. REF1, 1 numaralı referans numunesi, REF2, 2 numaralı referans numunesi olarak güçlendirilmemiştir. Rebar, kolonda boyuna doğrultuda güçlendirmede kullanılan karbon lifli polimer dairesel çubuktur. Lamine ise kolonda boyuna doğrultuda güçlendirmede kullanılan karbon lifli polimer şerit plakadır. Bu düşünceyle numune isimlendirmesinde, kullanılan malzemenin ismi (Rebar ve Lamine) kullanılmıştır.

Numunelere ait beton ve donatı özellikleri ile güçlendirme durumu Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Deney numunelerinin tasarım özellikleri

Numune adı	Beton basınç dayanımı	Beton basınç dayanımı	Temel donatıları	Kolon donatıları	Güçlendirme tipi
	Kolon (MPa)	Temel (MPa)			
LS-CON-REF1	10	10	S420	S220	Yok
LS-CON-REF2	10	10	S420	S220	Yok
LS-CON-Rebar	10	10	S420	S220	Rebar
LS-CON-Lamine	10	10	S420	S220	Lamine

İmal edilen numunelerin izometrik görünüşü Şekil 3.2’de, planda görünüşü Şekil 3.3’te, boy kesitleri Şekil 3.4’te ve kullanılan donatı açılımları Şekil 3.5’te gösterilmiştir.

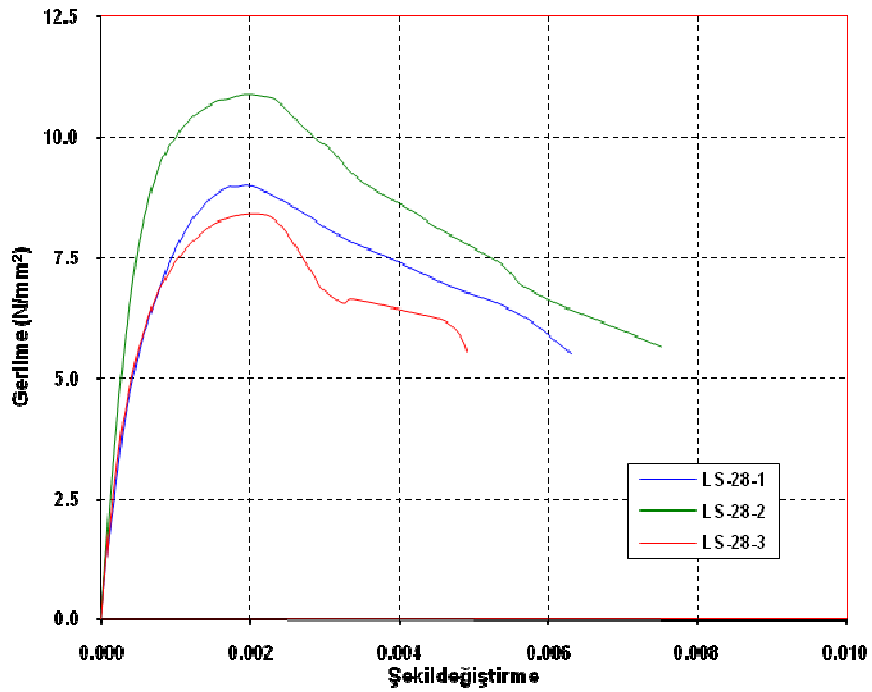


Şekil 3.2 : Numune izometrik görünüşü

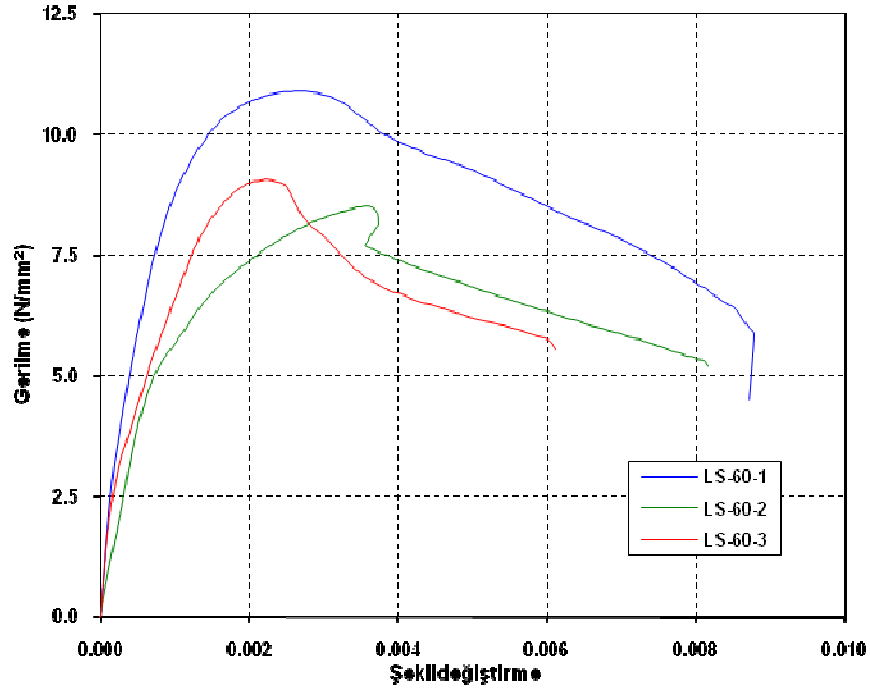
Çizelge 3.2 : 1m³ betonda bulunan malzeme miktarları

	Miktar (kg)	Tolerans (%±3)	
		En büyük	En küçük
Çimento miktarı (SDÇ 32.5)	197.4	203.4	191.5
No I mıcır	851.7	877.2	826.1
Deniz kumu (0-4 mm)	563.3	580.2	546.4
No II mıcır	0.0	0.0	0.0
Taş tozu	271.6	279.8	263.5
Su	231.2	238.1	224.2
Toplam	2115.2	2178.7	2051.7

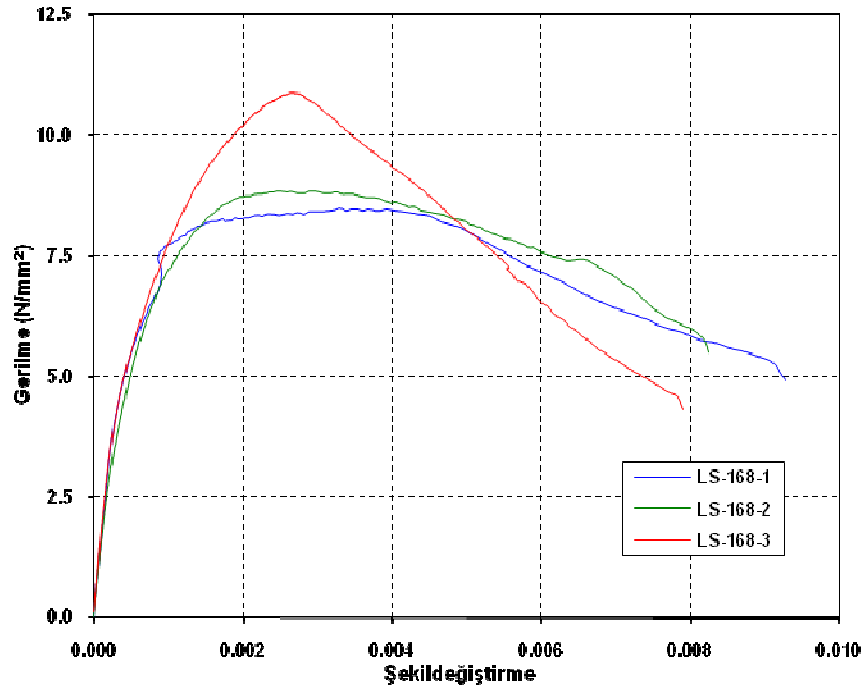
Yukarıdaki karışım oranlarına göre üretilen betonun dökümü sırasında alınan standart silindir numunelerin 28, 60, 168, 232 günlük gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri sırasıyla Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



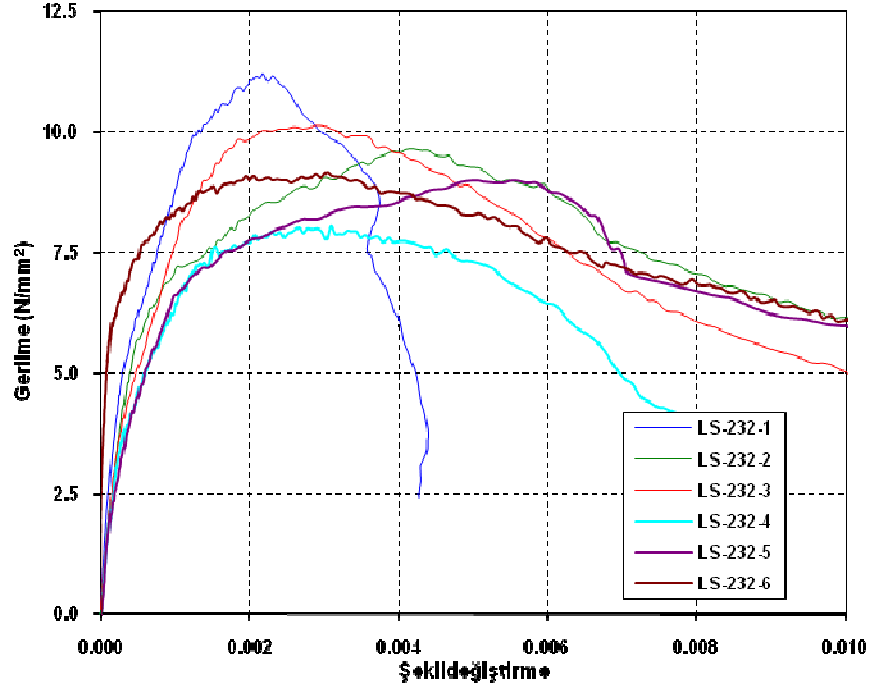
Şekil 3.6 : 28 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.7 : 60 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.8 : 168 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil 3.9 : 232 günlük beton silindir numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

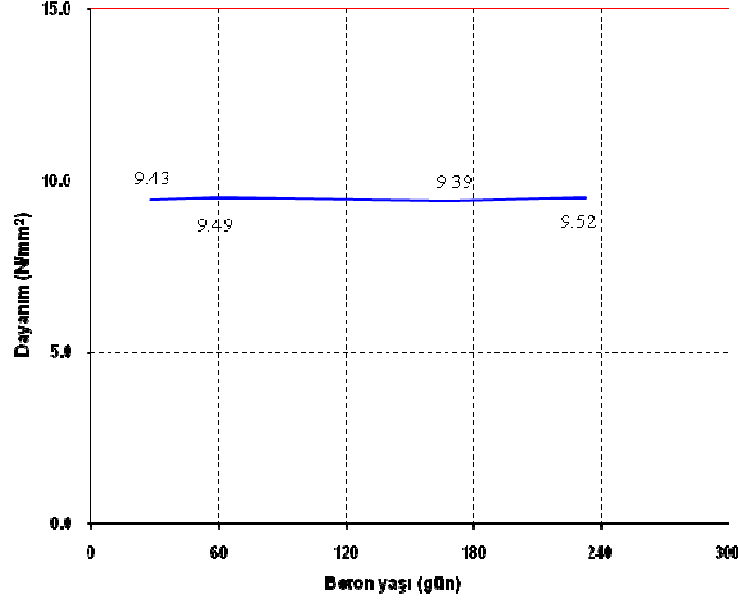
Yukarıdaki grafiklere göre farklı beton yaşlarına ait ortalama beton basınç dayanımlarını bulmak için her yaş için ayrı ayrı numunelerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

Bu şekilde elde edilen farklı yaşlardaki beton basınç dayanımları Çizelge 3.3’de sunulmuştur.

Çizelge 3.3 : Betonun farklı yaşlardaki dayanımı

Tarih	Numune yaşı (gün)	Dayanım (N/mm ²)	Elastisite modülü (N/mm ²)
03.02.2009	28	9.43	15084
05.03.2009	60	9.49	9569
22.06.2009	168	9.39	12992
25.08.2009	232	9.52	21064

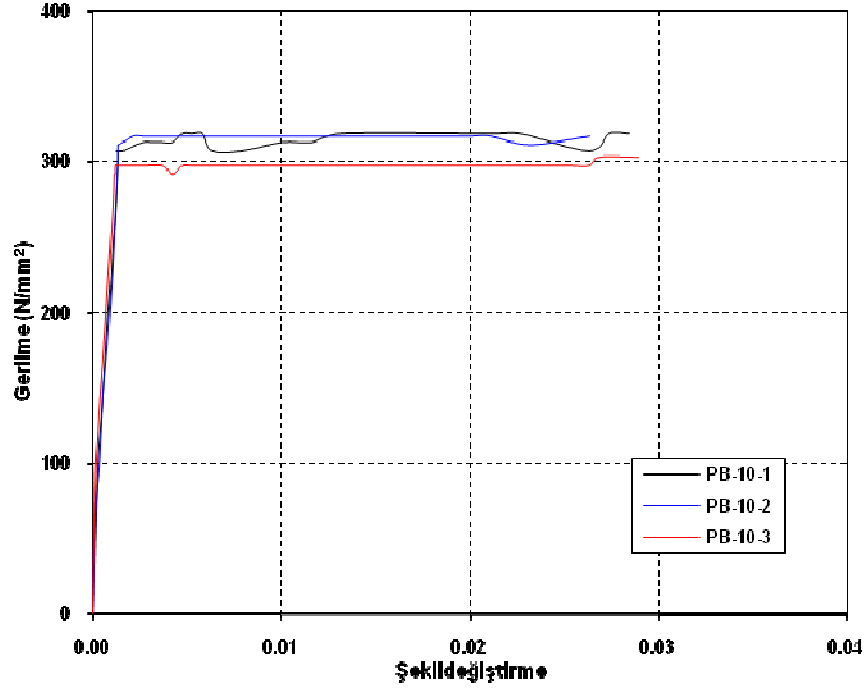
Betonun yaşına bağlı olarak dayanımındaki değişimi gösteren eğri ise Şekil 3.10’da verilmiştir.



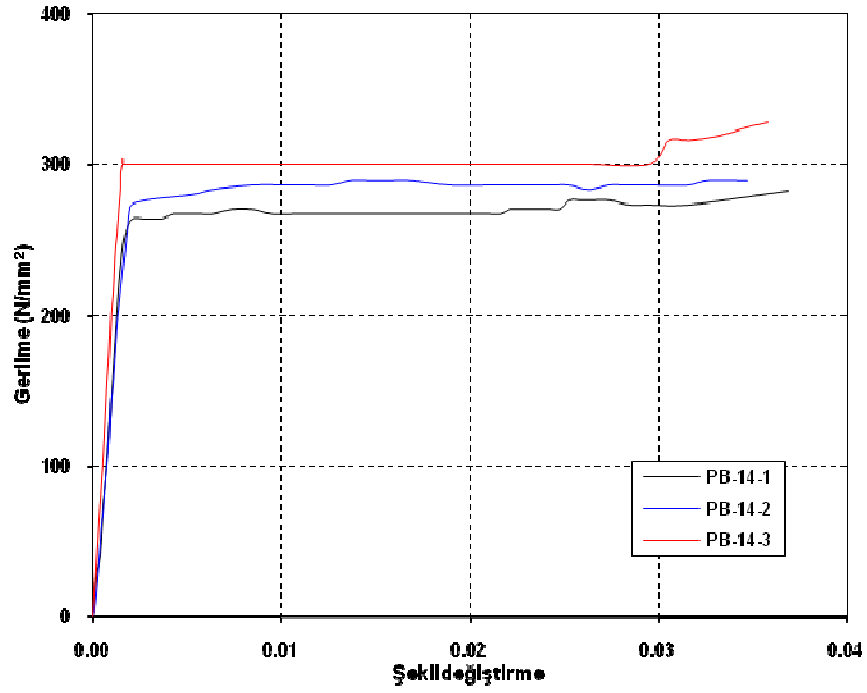
Şekil 3.10 : Beton yaşı-dayanım ilişkisi

3.3.2 Donatı

Çelik, çekme ve basınç altında (burkulma engellendiği sürece) benzer özellikler gösteren bir malzemedir. Çeliğin gerilme-şekildeğiştirme özellikleri, genellikle çekme deneylerinden elde edilir (Ersoy ve Özcebe, 2004). Çalışmanın amacına uygun olması bakımından kolonlarda hem boyuna, hem de enine donatı için düz yüzeyli S220, temellerde ise hem boyuna, hem de enine donatı için S420 kalitesinde nervürlü donatı çeliği kullanılması öngörülmüştür. Tasarım ve numune üretimi öncesinde kullanılacak çeliğin beklenen dayanıma sahip olup olmadığını anlamak üzere standartlara uygun olarak (TS 708 (1996), Beton Çelik Çubukları) 20.05.2008 tarihinde çelik çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneylerinde 200 kN kapasiteli Alfred J. Amsler marka mekanik çekme cihazı kullanılmıştır. 14 mm ve 10 mm çaplı düz yüzeyli donatıların herbiri için 3'er adet çekme deneyi yapılmıştır. Her donatının gerçek çapı kumpas ile üç farklı noktasından iki doğrultuda ölçülerek bulunmuştur. Çekme deneyi sırasında donatılarda oluşan uzamaları okuyabilmek için ekstansometre kullanılmıştır. Ekstansometrenin ölçüm boyu 100 mm, hassasiyeti 1/100 mm'dir. Ekstansometrede okunan belli yerdeğiştirme seviyelerinde etkililen çekme kuvveti deney boyunca elle kaydedilmiş ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12).

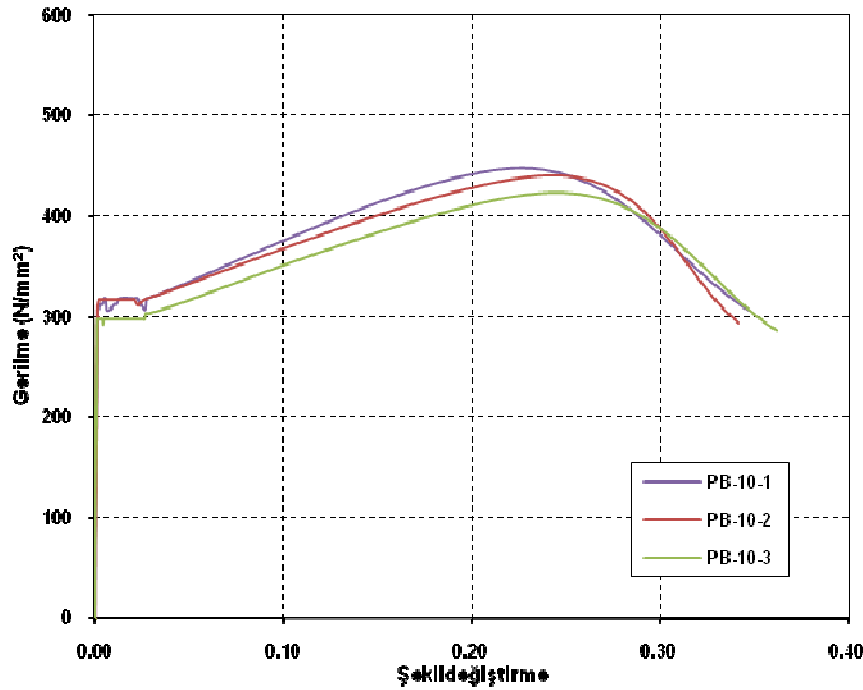


Şekil 3.11 : Enine donatı gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (Ø10)



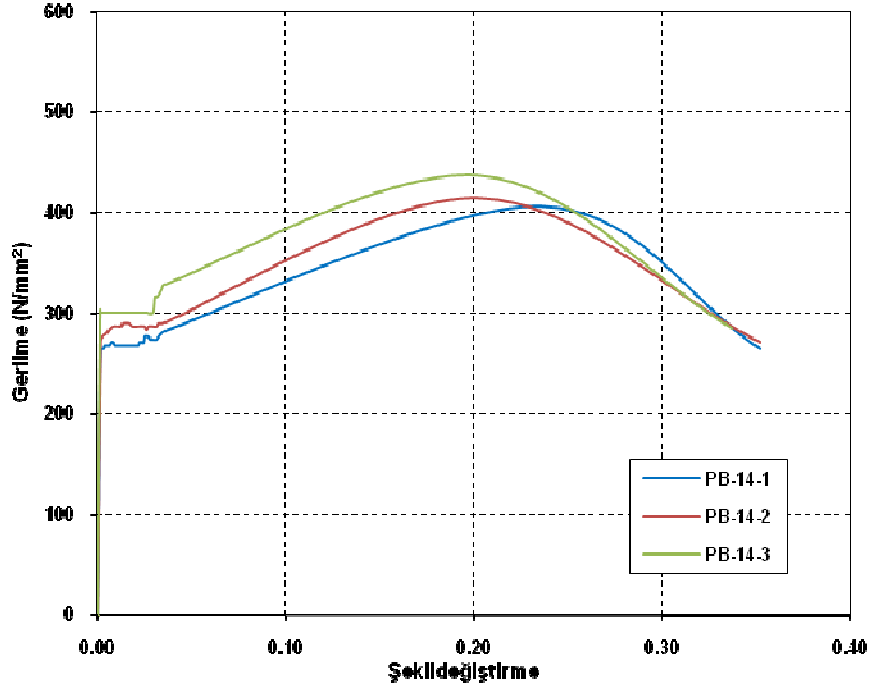
Şekil 3.12 : Boyuna donatı gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (Ø14)

Donatı çeliğinin akma sınırı, elastik bölge geçildikten sonra yükün sabitlenip, donatı üzerindeki şekil değiştirmelerin hızla artmaya başlaması ile belirlenir. Bu andaki gerilme değeri akma dayanımı (f_y) ve buna karşı gelen şekil değiştirme değeri ise akma şekil değiştirmesi (ϵ_y) olarak tanımlanır. Akma bölgesi geçildikten sonra donatı çeliği üzerindeki gerilmelerin tekrar artmaya başlamasıyla pekleşme meydana gelir. Bu bölgede en büyük yüke ulaşılan kadar donatı çeliğinin her noktasında oluşan uzamalar uniform kabul edilir. En büyük yüke erişildikten sonra donatı çeliği üzerindeki gerilmeler tekrardan düşmeye başlarken çubuğun bir noktasında kesit küçülmeye başlar ve bu noktada oluşan aşırı uzamaların sonucunda kopma meydana gelir. Enine ve boyuna donatı çelikleri için elde edilen tam gerilme-şekil değiştirme ilişkileri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.13 : Enine donatı tam gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Ø10)

Kopma uzaması ve uniform bölge uzamasının belirlenmesinde deney öncesinde donatı üzerine 1 cm aralıklarla çizilen çentikler kullanılmıştır. Deney sonrasında uniform bölge uzaması hesaplanırken donatı çapının 10 katı uzunluğundaki orta bölgenin dışında kalan kısımdaki şekil değiştirmelerin ortalaması alınmıştır. Kopma uzaması ise aşırı uzamanın meydana geldiği kopma bölgesinde hesaplanan şekil değiştirme değeri olarak alınmıştır.



Şekil 3.14 : Boyuna donatı tam gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (Ø14)

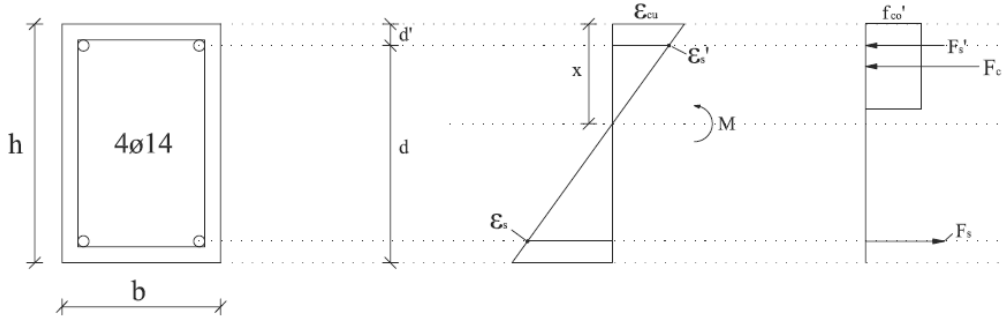
Donatıların elastisite modülleri belirlenirken, akma dayanımının %20'si ile %60'ı arasında kalan elastik bölgedeki noktalardan geçirilen doğrusal eğilim çizgisinin eğimi elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Bahsedilen bilgiler ışığında enine ve boyuna donatılar için elde edilen özellikler Çizelge 3.4'deki gibidir.

Çizelge 3.4 : Enine ve boyuna donatı özellikleri

Donatı	Donatı birim akma uzaması	Kopma birim uzaması	En büyük yükteki donatı birim uzaması	Donatı akma dayanımı (N/mm ²)	Donatı kopma dayanımı (N/mm ²)	Donatının ulaştığı en büyük gerilme (N/mm ²)	Donatı elastisite modülü (N/mm ²)
Ø10	0.0017	0.350	0.240	307	295	437	181913
Ø14	0.0016	0.347	0.214	285	273	419	182732

3.4 Tasarımın Güncellenmesi

Üretimden önce yapılan hesaplamalar ve kontroller, imalat sonrası elde edilen bilgiler doğrultusunda güncellenmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Referans numunelerinde kolon şekildeğiştirme-gerilme dağılışı

Kolon enkesit genişliği $b = 200$ mm

Kolon enkesit yüksekliği $h = 300$ mm

Çekme donatısı alanı (2Ø14)

$$A_s = \frac{2 \times \pi \times 14^2}{4} = 307.88 \text{ mm}^2$$

Basınç donatısı alanı (2Ø14)

$$A_s' = \frac{2 \times \pi \times 14^2}{4} = 307.88 \text{ mm}^2$$

Beton örtüsü (Paspayı) $d' = 37$ mm

Kolon enkesiti faydalı yükseklik $d = 263$ mm

Ortalama silindirik beton basınç dayanımı $f_c' = 9.43$ Mpa

Donatı akma dayanımı $f_y = 285$ N/mm²

Donatı elastisite modülü $E_s = 200000$ N/mm²

Betonda en büyük birim kısalma $\epsilon_{cu} = 0.003$

Betondaki doğrusal olmayan gerilme dağılımına eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunun tanımlanmasında kullanılan katsayı (ACI 318) $k_1 = 0.85$

İç kuvvet yatay denge denklemi;

$$F_s = F_c + F_s' \quad (3.9)$$

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b \quad (3.10)$$

$$F_s' = \varepsilon_s' \times E_s \times A_s' = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{(x - d')}{x} \right) \times E_s \times A_s' \quad (3.11)$$

Çekme bölgesindeki donatıların aktığı kabulüyle,

$$F_s = f_y \times A_s \quad (3.12)$$

Yukarıdaki değerler denklemlerde yerine yazılarak yatay denge denklemi çözüldüğünde;

Tarafsız eksen yüksekliği $x = 41.7$ mm olarak bulunmuştur.

Bulunan tarafsız eksen yüksekliği kullanılarak yapılan kontrollerde;

Basınç donatısındaki birim uzama,

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \times \frac{x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{41.7 - 37}{41.7} = 0.00034$$

Donatıda akma birim uzama ve kısalması,

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{285}{200000} = 0.00143$$

Çekme donatısındaki birim uzama,

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \times \frac{h - x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{300 - 41.7 - 37}{41.7} = 0.01591$$

Yapılan kontroller,

$$\varepsilon_s' = 0.00034 < \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.01591 > \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.01591 > 0.005$$

sağlanmıştır.

Kesitin moment kapasitesi için,

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b = 9.43 \times 0.85 \times 41.7 \times 200 = 66871 \text{ N}$$

$$F_s' = \epsilon_s \times E_s \times A_s' = 0.00034 \times 200000 \times 307.88 = 20873 \text{ N}$$

Hesaplandıktan sonra alt donatıya göre moment alırsak,

$$M_r = F_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_s' \times (d - d') \quad (3.13)$$

$$M_r = 66871 \times \left(263 - \frac{35.5}{2} \right) + 20873 \times (263 - 37) = 21118944 \text{ Nmm}$$

$$M_r = 21.12 \text{ kNm}$$

Kesme kuvveti kapasitesi hesabı;

$$V_r = V_w + V_c \quad (3.14)$$

$$V_{cr} = 0.65 \cdot 0.35 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot (h - d') \quad (3.15)$$

$$V_{cr} = 0.65 \cdot 0.35 \cdot \sqrt{9.43} \cdot 200 \cdot (300 - 37) = 36747 \text{ N}$$

$$V_c = 0.8 \times V_{cr} \quad (3.16)$$

$$V_c = 29398 \text{ N}$$

$$V_w = \frac{n \times A_0 \times d \times f_{ywk}}{s} \quad (3.17)$$

$$V_w = \frac{2 \times \pi \times 10^2}{4 \times 200} \times 263 \times 307 = 63414 \text{ N}$$

$$V_r = 29398 + 63414 = 92812 \text{ N}$$

$$V_d = \frac{M_r}{h} = \frac{21120}{1.65} = 12800 \text{ N}$$

$$V_r = 92.81 \text{ kN} \geq V_d = 12.8 \text{ kN}$$

Yapılan kontroller sonucunda referans numunelerinin (LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2) kesme güvenliğinin sağlandığı görülmüştür.

3.5 Numunelerin Üretimi

Numuneler 12.08.2008 tarihinde İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında üretilmeye başlanmıştır. 05.01.2009 tarihinde kolon betonu dökülerek üretim sona ermiştir. Üretim iki ana aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numunelere ait temellerin betonları 22.12.2008 tarihinde dökülmüş olup, ikinci aşamada da 05.01.2009 tarihinde kolonlar dökülmüştür. Temel betonu döküldüğünde hava sıcaklığı 5 °C, rölatif nem oranı %85, kolon betonu döküldüğünde ise hava sıcaklığı 7 °C, rölatif nem oranı ise %77'dir.

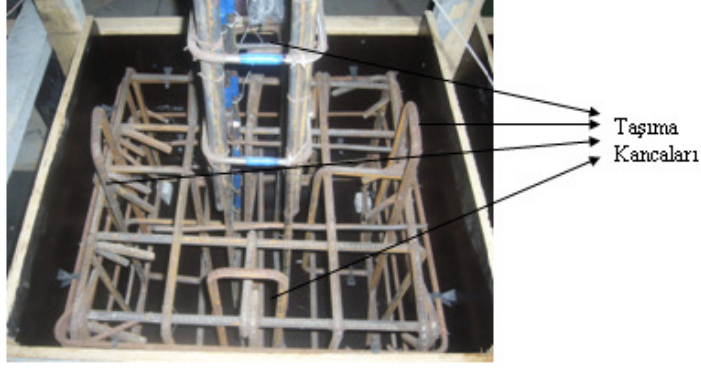
3.5.1 Temeller

Tüm numunelerin temelleri için ahşap kalıplar hazırlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 : Ahşap kalıplar ve temel donatısı

Numuneleri taşımak için temelin dört tarafında bırakılan kancalar, alt uzantıları tüm donatıların altında olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Taşıma kancaları

Laboratuvarda numuneleri adaptör temele monte etmek için temelde, beton dökümünden sonra delik kalmasını sağlayacak şekilde 90 mm çapında 4 adet plastik boru ile delikler bırakılmıştır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 : Plastik boru yerleşimi

Numunelerin temel betonu 22.12.2008 tarihinde dökülmüştür (Şekil 3.19 ve Şekil 3.20).



Şekil 3.19 : Temel betonu dökümü



Şekil 3.20 : Temel betonu dökümü sonrası

Betonun iyi yerleşmesini sağlamak için vibrasyon işlemi yapılmıştır (Şekil 3.21)



Şekil 3.21 : Vibrasyon yapılması

Temel betonu dökülürken basınç dayanımı testi yapmak için 10 adet standart silindir numunesi alınmıştır (Şekil 3.22)



Şekil 3.22 : Standart silindir numunesi

Beton dökümü sırasında altı adet çökme ve yayılma deneyi yapılmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 : Standart silindir numunesi

Temele beton dökümünden bir saat sonra kimyasal kür uygulanmıştır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 : Temele uygulanan kimyasal kür

3.5.2 Kolonlar

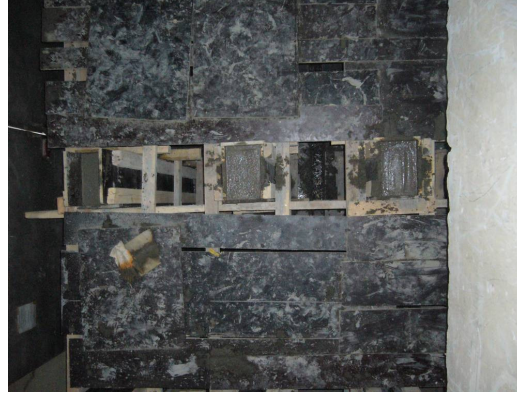
Kolonlar için beton dökümü sırasında kullanılmak üzere 20 mm kalınlığında plywood malzemesinden özel kalıplar hazırlanmıştır. Beton dökümünden önce tüm kalıplar yağlanmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 : Kolon kalıpları

Numunelerin kolon kısımlarının beton dökümü 05.01.2009 tarihinde yapılmıştır.

Betonun iyi yerleşmesini sağlamak amacıyla vibrasyon işlemi yapılmıştır. Kolon betonu dökülürken basınç dayanımı testi yapmak için 18 adet standart silindir numunesi alınmıştır. Beton dökümü sırasında altı adet çökme ve yayılma deneyi yapılmıştır. Kolonların beton dökümünden sonra kolonun kalıp üstünde açık kalan kısmı perdahlanmıştır. Son olarak kolon numunelerine beton dökümünden sonra kimyasal kür uygulanmıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26 : Kolon numunelerinin beton dökümü ve kimyasal kür uygulanması

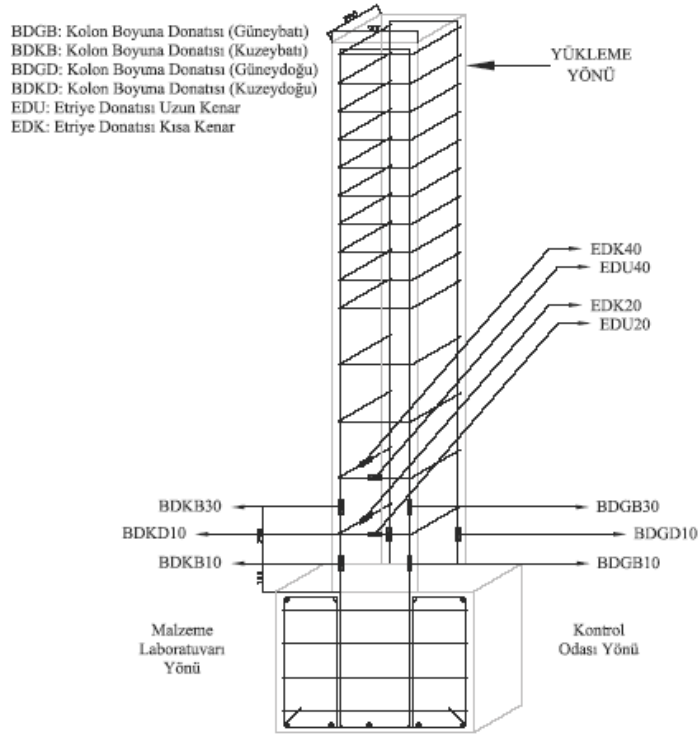
3.5.3 Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması

Temel ve kolon donatı iskeletleri kalıplara yerleştirilmeden önce üzerine şekildeğiştirmeölçerler (strain gage) yapıştırılmıştır (Şekil 3.27). Şekildeğiştirmeölçerleri dış etkilerden korumak için açıkta kalan uçları poşetlerle sarılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmadan önce donatılar üzerinde belirlenen noktalar kalın ve ince zımpara, tel fırça yardımı ile pastan arındırılmış sonra pamuk ve aseton yardımı ile tozlu yüzeyler temizlenmiştir. Tam olarak temizlenmiş bu yüzeylere şekildeğiştirmeölçerler, cyanoacrylate esaslı bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Ardından su ve nem yalıtımını sağlayarak mekanik korumayı gerçekleştirmek için iki kat kimyasal yalıtım malzemesi (N-1, su geçirmez malzeme), bir kat bitüm esaslı bant (VM Tape, nem ve diğer dış etkilere karşı yalıtım sağlayan malzeme) ve bunun üzerine izole bant sarılmıştır. Tüm şekildeğiştirmeölçerlerin kablolarının ucuna konumunu, cinsini belirtmek üzere numaralar ve notlar yazılmıştır. Kablolar en kısa mesafeden beton yüzeyine çıkacak şekilde bir araya getirilmiştir.



Şekil 3.27 : Şekildeğiştirmeölçerler

Tüm numunelerde dört adet kolon etriyesine, altı adet kolon boyuna donatısına olmak üzere toplam on adet şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmıştır. Numunelerde iki çeşit şekildeğiştirmeölçer detayı kullanılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerlerin numune üzerindeki şematik gösterimi Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



Şekil 3.28 : Şekildeğiştirmeölçer yerleşimi

Kolon boyuna donatısında, şekildeğiştirmeölçerlerin hangi numunelerde bulunduğu ve yerleşim planı Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Kolon etriyesinde, şekildeğiştirmeölçerlerin hangi numunelerde bulunduğu ve yerleşim planı Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Kolon boyuna donatısındaki şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı

Kolon boyuna donatısı üzerinde şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı			Bulunduğu kolon			
Şekildeğiştirmeölçer adı	Yapıştırılma mesafesi	Şekildeğiştirmeölçer düzeltme faktörü	LS-CON-REF1	LS-CON-REF2	LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
BDKB10 (YFLA-5-3L)	100 mm	2.10±2 %	VAR	VAR	VAR	VAR
BDGB10 (YFLA-5-3L)	100 mm	2.10±2 %	VAR	VAR	VAR	VAR
BDKD10 (YFLA-5-3L)	100 mm	2.10±2 %	VAR	VAR	VAR	VAR
BDGD10 (YFLA-5-3L)	100 mm	2.10±2 %	VAR	VAR	VAR	VAR
BDKB30 (YFLA-5-3L)	300 mm	2.10±2 %	VAR	VAR	VAR	VAR
BDGB30 (YFLA-5-3L)	300 mm	2.10±2 %	VAR	VAR	VAR	VAR

Çizelge 3.6 : Kolon etriyesinde kullanılan şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı

Kolon etriyesi üzerinde şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı			Bulunduğu kolon			
Şekildeğiştirmeölçer adı	Yapıştırılma mesafesi	Şekildeğiştirmeölçer düzeltme faktörü	LS-CON-REF1	LS-CON-REF2	LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
EDU20 (FLA-3-11-3L)	1.etriyenin uzun kenarı üzerine	2.10±1 %	VAR	VAR	VAR	VAR
EDU40 (FLA-3-11-3L)	2.etriyenin uzun kenarı üzerine	2.10±1 %	VAR	VAR	VAR	VAR
EDK20 (FLA-3-11-3L)	1.etriyenin kısa kenarı üzerine	2.10±1 %	VAR	VAR	VAR	VAR
EDK40 (FLA-3-11-3L)	2.etriyenin kısa kenarı üzerine	2.10±1 %	VAR	VAR	VAR	VAR

Kolon enkesit genişliği $b = 200$ mm

Kolon enkesit yüksekliği $h = 300$ mm

Çekme donatısı alanı (2Ø14)

$$A_s = \frac{2 \times \pi \times 14^2}{4} = 307.88 \text{ mm}^2$$

Basınç donatısı alanı (2Ø14)

$$A_s' = \frac{2 \times \pi \times 14^2}{4} = 307.88 \text{ mm}^2$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı enkesit alanı (2Ø8)

$$A_{frp} = \frac{2 \times \pi \times 8^2}{4} = 100.53 \text{ mm}^2$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı enkesit alanı (2Ø8)

$$A_{frp}' = \frac{2 \times \pi \times 8^2}{4} = 100.53 \text{ mm}^2$$

Beton örtüsü (Paspayı) $d' = 37$ mm

Lifli polimer üzeri tamir harcı kalınlığı $d'' = 12.5$ mm

Lifli polimer faydalı yükseklik $d''' = 287.5$ mm

Kolon enkesiti faydalı yükseklik $d = 263$ mm

Ortalama silindir beton basınç dayanımı $f_c' = 9.43$ Mpa

Donatı akma dayanımı $f_y = 285$ N/mm²

Donatı elastisite modülü $E_s = 200000$ N/mm²

Lifli polimer dairesel çubuk donatı elastisite modülü $E_{frp} = 165000$ N/mm²

Betonda en büyük birim kısalma $\varepsilon_{cu} = 0.003$

Çekme bölgesinde en alt lifteki başlangıç şekildeğiştirilmesi $\varepsilon_{bi} = 0$ ($M_G \ll M_E$, $N = 0$)

Basınç bölgesinde en alt lifteki başlangıç şekildeğiştirilmesi $\varepsilon_{bi}' = 0$ ($M_G \ll M_E$, $N = 0$)

Betondaki doğrusal olmayan gerilme dağılımına eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunun tanımlanmasında kullanılan katsayı (ACI 318) $k_1 = 0.85$

Çevresel etki katsayısı $C_E = 1$

Lifli polimer aderans katsayısı (deney öncesi) $\kappa_m = 1$

Dayanım azaltma katsayısı (deney) $\emptyset = 1$

İç kuvvet yatay denge denklemi;

$$F_c + F_s' + F_{frpeff}' = F_s + F_{frpeff} \quad (4.1)$$

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b \quad (4.2)$$

$$F_s' = \varepsilon_s' \times E_s \times A_s' = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{(x - d')}{x} \right) \times E_s \times A_s' \quad (4.3)$$

$$F_{frpeff}' = \varepsilon_{frpeff}' \times E_{frp} \times A_{frp}' = \left[\left(\varepsilon_{cu} \times \frac{(x - d'')}{x} \right) - \varepsilon_{bi}' \right] \times E_{frp} \times A_{frp}' \quad (4.4)$$

$$F_{frpeff} = \varepsilon_{frpeff} \times E_{frp} \times A_{frp} = \left[\left(\varepsilon_{cu} \times \frac{(d''' - x)}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \right] \times E_{frp} \times A_{frp} \quad (4.5)$$

Çekme bölgesindeki donatıların aktığı kabulüyle,

$$F_s = f_y \times A_s \quad (4.6)$$

Yukarıdaki değerler denklemlerde yerine yazılarak yatay denge denklemi çözüldüğünde;

Tarafsız eksen yüksekliği $x = 70.4$ mm olarak bulunmuştur.

Bulunan tarafsız eksen yüksekliği kullanılarak yapılan kontrollerde;

Basınç donatısındaki birim uzama,

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \times \frac{x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{70.4 - 37}{70.4} = 0.00142$$

Donatıda akma birim uzama ve kısalması,

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{285}{200000} = 0.00143$$

Çekme donatısındaki birim uzama,

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \times \frac{h-x-d'}{x} = 0.003 \times \frac{300-70.4-37}{70.4} = 0.00821$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpeff}' = \varepsilon_{frp}' - \varepsilon_{bi}' = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{x-d''}{x} \right) - \varepsilon_{bi}' = \left(0.003 \times \frac{70.4-12.5}{70.4} \right) - 0 = 0.00247$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frp} - \varepsilon_{bi} = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{d'''-x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} = \left(0.003 \times \frac{287.5-70.4}{70.4} \right) - 0 = 0.00926$$

Lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif kopma şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpulteff} = \varepsilon_{frpult} \times C_E \times \kappa_m = 0.015 \times 1 \times 1 = 0.015 \text{ ise,}$$

$$\varepsilon_s' = 0.00142 < \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.00821 > \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.00821 > 0.005$$

$$\varepsilon_{frpeff}' = 0.00247 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.015$$

$$\varepsilon_{frpeff} = 0.00926 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.015$$

sağlanmıştır.

Güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi için,

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b = 9.43 \times 0.85 \times 70.4 \times 200 = 112799 \text{ N}$$

$$F_s' = \varepsilon_s' \times E_s \times A_s' = 0.00142 \times 200000 \times 307.88 = 87589 \text{ N}$$

$$F_{frpeff}' = \varepsilon_{frpeff}' \times E_{frp} \times A_{frp}' = 0.00247 \times 165000 \times 100.53 = 40922 \text{ N}$$

$$F_{frpeff} = \varepsilon_{frpeff} \times E_{frp} \times A_{frp} = 0.00926 \times 165000 \times 100.53 = 153566 \text{ N}$$

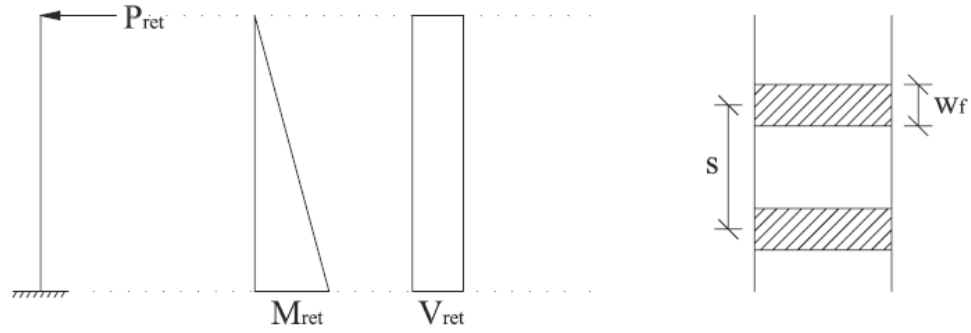
Hesaplandıktan sonra alt donatıya göre moment alırsak,

$$M_r = F_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_s \times (d - d') + F_{f_{peff}} \times (d - d'') + F_{f_{peff}} \times (d' - d'') \quad (4.7)$$

$$M_r = 112798.93 \times \left(263 - \frac{59.8}{2} \right) + 87588.67 \times (263 - 37) + 40922.45 \times (263 - 12.5) + 153565.8 \times (37 - 12.5) = 60101424 \text{ Nmm}$$

$$M_r = 60.10 \text{ kNm}$$

Kesme kuvveti kapasitesi hesabı (Şekil 4.2);



Şekil 4.2 : Konsol kolon modeli

Kolon yüksekliği $h = 1.65 \text{ m}$

Etriye donatısı enkesit alanı,

$$A_0 = \frac{\pi \times 10^2}{4} = 78.54 \text{ mm}^2$$

Kolon enkesit faydalı yükseklik $d = 280 \text{ mm}$

Etriye aralığı Ø10/200-100 $s = 200 \text{ mm}$

Etriye kol sayısı $n = 2$

Etriye karakteristik akma dayanımı $f_{yk} = 307 \text{ N/mm}^2$

Lifli polimer kumaş kat sayısı $n_f = 2 \text{ kat}$

Lifli polimer kumaş kalınlık $t_f = 0.117 \text{ mm}$

Lifli polimer kumaş genişlik $w_f = 300 \text{ mm}$

Lifli polimer kumaş alanı,

$$A_{frp} = 2 \times n_f \times t_f \times w_f = 2 \times 2 \times 0.117 \times 300 = 140.4 \text{ mm}^2$$

Sargı aralığı $s_f = 300 \text{ mm}$ (sürekli)

Lifli polimer kumaş elastisite modülü $E_{frp} = 240000 \text{ N/mm}^2$

Lifli polimer kumaş kopma şekildeğiştirilmesi $\varepsilon_{frpult} = 0.0155$

Beton katkısı ihmal edilerek,

$$V_r = V_w + V_{frp} \quad (4.8)$$

$$V_w = \frac{n \times A_0 \times d \times f_{yw}}{s} = \frac{2 \times 78.54 \times 280 \times 307}{200} = 67513 \text{ N}$$

$$V_w = 67.51 \text{ kN}$$

$$V_{frp} = \frac{A_{frp} \times d \times \varepsilon_{frpult} \times E_{frp}}{s_f} = \frac{140.4 \times 280 \times 0.0155 \times 240000}{300} = 487469 \text{ N}$$

$$V_{frp} = 487.47 \text{ kN}$$

$$V_r = V_w + V_{frp} = 67.51 + 487.47 = 554.98 \text{ kN}$$

$$V_d = V_{ret} = P_{ret}$$

$$P_{ret} = \frac{M_{ret}}{h} = \frac{60.10}{1.65} = 36.43 \text{ kN}$$

$$V_r = 554.98 \text{ kN} \geq P_{ret} = 36.43 \text{ kN}$$

Konsol kolona gelecek en büyük kesme kuvvetini etriye tek başına karşılayabilirken 2 kat sargı ilavesi yapılmıştır. Bu ilave sonucunda sistemin yeni kesme kuvveti taşıma kapasitesi hesaplanarak, tahkik edilmiştir. Bu çalışmada sargılama yapılmasındaki asıl amaç boyuna güçlendirme elemanlarının yüzeyden ayrılmadan çalışmasını, betonun dayanımını ve sünekliği arttırmayı sağlamaktır.

Temele ankraj hesabı;

Ankraj hesabı bir adet boyuna güçlendirme elemanına gelen en büyük çekme kuvvetinin 1.5 katını karşılayacak karbon lifli polimer kumaş genişliği bulunarak yapılmıştır.

Lifli polimer kumaş kalınlık $t_f = 0.117$ mm

Lifli polimer kumaş elastisite modülü $E_{kumaş} = 240000$ N/mm²

Lifli polimer dairesel çubuk donatı enkesit alanı (1Ø8)

$$A_{\text{çubuk}} = \frac{\pi \times 8^2}{4} = 50.27 \text{ mm}^2$$

Lifli polimer dairesel çubuk donatı elastisite modülü $E_{\text{çubuk}} = 165000$ N/mm²

Bir adet lifli polimer çubuğa gelen en büyük çekme kuvveti,

$$F_{\text{çubuk}} = A_{\text{çubuk}} \times \varepsilon \times E_{\text{çubuk}} \quad (4.9)$$

Ankraj malzemesi olan lifli polimer kumaşın taşıyacağı çekme kuvveti,

$$F_{\text{kumaş}} = s_f \times t_f \times \varepsilon \times E_{\text{kumaş}} \quad (4.10)$$

Lifli polimer çubuğa gelen çekme kuvvetinin 1.5 katını karşılayacak lifli polimer kumaş kalınlığını hesaplamak için,

$$F_{\text{kumaş}} = 1.5 \times F_{\text{çubuk}} \quad (4.11)$$

denklemini yazılırsa,

$$s_f \times t_f \times \varepsilon \times E_{\text{kumaş}} = 1.5 \times A_{\text{çubuk}} \times \varepsilon \times E_{\text{çubuk}} \quad (4.12)$$

Bu denklemden lifli polimer kumaş genişliği s_f çekilirse,

$$s_f = \frac{1.5 \times A_{\text{çubuk}} \times E_{\text{çubuk}}}{t_f \times E_{\text{kumaş}}} = \frac{1.5 \times 50.27 \times 165000}{0.117 \times 240000} = 443 \text{ mm}$$

bulunur.

Ankraj uygulamasında kullanılacak karbon lifli polimer kumaşlar uygulama boyunun 2 katı uzunlukta kesilip ikiye katlanarak rulo haline getirileceğinden dolayı yukarıda

Lifli polimer üzeri tamir harcı kalınlığı $d'' = 17.8 \text{ mm}$

Lifli polimer faydalı yükseklik $d''' = 282.2 \text{ mm}$

Kolon enkesiti faydalı yükseklik $d = 263 \text{ mm}$

Ortalama silindir beton basınç dayanımı $f_c' = 9.43 \text{ Mpa}$

Donatı akma dayanımı $f_y = 285 \text{ N/mm}^2$

Donatı elastisite modülü $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$

Lifli polimer şerit plaka elastisite modülü $E_{frp} = 165000 \text{ N/mm}^2$

Betonda en büyük birim kısalma $\varepsilon_{cu} = 0.003$

Çekme bölgesinde en alt lifteki başlangıç şekildeğiştirmesi $\varepsilon_{bi} = 0 \text{ (} M_G \ll M_E, N = 0 \text{)}$

Basınç bölgesinde en alt lifteki başlangıç şekildeğiştirmesi $\varepsilon_{bi}' = 0 \text{ (} M_G \ll M_E, N = 0 \text{)}$

Betondaki doğrusal olmayan gerilme dağılımına eşdeğer dikdörtgen basınç bloğunun tanımlanmasında kullanılan katsayı (ACI 318) $k_1 = 0.85$

Çevresel etki katsayısı $C_E = 1$

Lifli polimer aderans katsayısı (deney öncesi) $\kappa_m = 1$

Dayanım azaltma katsayısı (deney) $\phi = 1$

İç kuvvet yatay denge denklemi;

$$F_c + F_s' + F_{frpeff}' = F_s + F_{frpeff} \quad (4.13)$$

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b \quad (4.14)$$

$$F_s' = \varepsilon_s' \times E_s \times A_s' = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{(x - d')}{x} \right) \times E_s \times A_s' \quad (4.15)$$

$$F_{frpeff}' = \varepsilon_{frpeff}' \times E_{frp} \times A_{frp}' = \left[\left(\varepsilon_{cu} \times \frac{(x - d'')}{x} \right) - \varepsilon_{bi}' \right] \times E_{frp} \times A_{frp}' \quad (4.16)$$

Çekme bölgesindeki donatıların aktığı kabulüyle,

$$F_s = f_y \times A_s \quad (4.17)$$

$$F_{frpeff} = \varepsilon_{frpeff} \times E_{frp} \times A_{frp} = \left[\left(\varepsilon_{cu} \times \frac{(d''' - x)}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \right] \times E_{frp} \times A_{frp} \quad (4.18)$$

Yukarıdaki değerler denklemlerde yerine yazılarak yatay denge denklemi çözüldüğünde;

Tarafsız eksen yüksekliği $x = 70.4$ mm olarak bulunmuştur.

Bulunan tarafsız eksen yüksekliği kullanılarak yapılan kontrollerde;

Basınç donatısındaki birim uzama

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \times \frac{x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{70.4 - 37}{70.4} = 0.00142$$

Donatıda akma birim uzama ve kısalması

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{285}{200000} = 0.00143$$

Çekme donatısındaki birim uzama

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \times \frac{h - x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{300 - 70.4 - 37}{70.4} = 0.00821$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer şerit plaka efektif şekildeğiştirmesi

$$\varepsilon_{frpeff}' = \varepsilon_{frp}' - \varepsilon_{bi}' = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{x - d''}{x} \right) - \varepsilon_{bi}' = \left(0.003 \times \frac{70.4 - 17.8}{70.4} \right) - 0 = 0.00224$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer şerit plaka efektif şekildeğiştirmesi

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frp} - \varepsilon_{bi} = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{d''' - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} = \left(0.003 \times \frac{282.2 - 70.4}{70.4} \right) - 0 = 0.00902$$

Lifli polimer şerit plaka efektif kopma şekildeğiştirmesi

$$\varepsilon_{frpulteff} = \varepsilon_{frpult} \times C_E \times \kappa_m = 0.015 \times 1 \times 1 = 0.015$$

ise,

$$\varepsilon_s' = 0.00142 < \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.00826 > \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.00821 > 0.005$$

$$\varepsilon_{frpeff}' = 0.00224 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.015$$

$$\varepsilon_{frpeff} = 0.00902 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.015$$

sağlanmıştır.

Güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi için,

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b = 9.43 \times 0.85 \times 70.4 \times 200 = 112879 \text{ N}$$

$$F_s' = \varepsilon_s' \times E_s \times A_s' = 0.00142 \times 200000 \times 307.88 = 87658 \text{ N}$$

$$F_{frpeff}' = \varepsilon_{frpeff}' \times E_{frp} \times A_{frp}' = 0.00224 \times 165000 \times 100.8 = 37283 \text{ N}$$

$$F_{frpeff} = \varepsilon_{frpeff} \times E_{frp} \times A_{frp} = 0.00902 \times 165000 \times 100.8 = 150076 \text{ N}$$

Hesaplandıktan sonra alt donatıya göre moment alırsak,

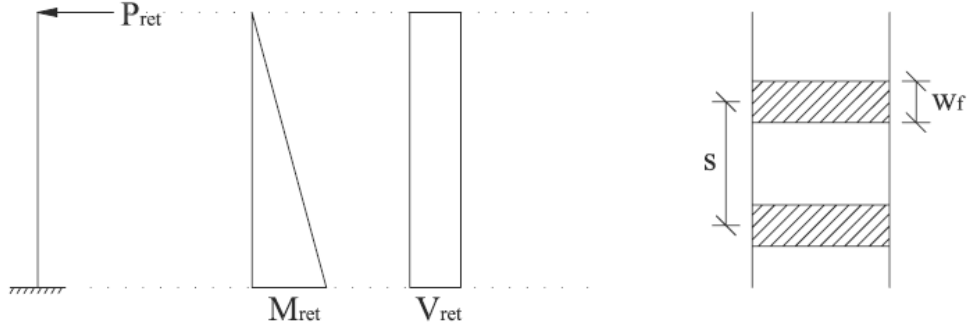
$$M_r = F_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_s' \times (d - d') + F_{frpeff}' \times (d - d'') + F_{frpeff} \times (d' - d'') \quad (4.19)$$

$$M_r = 112879 \times \left(263 - \frac{59.9}{2} \right) + 87658 \times (263 - 37) + 37283 \times (263 - 17.8) +$$

$$+ 150076 \times (37 - 17.8) = 58143140 \text{ Nmm}$$

$$M_r = 58.14 \text{ kNm}$$

Kesme kuvveti kapasitesi hesabı (Şekil 4.4);



Şekil 4.4 : Konsol kolon modeli

Kolon yüksekliği $h = 1.65$ m

Etriye donatısı enkesit alanı

$$A_0 = \frac{\pi \times 10^2}{4} = 78.54 \text{ mm}^2$$

Kolon enkesit faydalı yükseklik $d = 280$ mm

Etriye aralığı Ø10/200-100 $s = 200$ mm

Etriye kol sayısı $n = 2$

Etriye karakteristik akma dayanımı $f_{yk} = 307$ N/mm²

Lifli polimer kumaş kat sayısı $n_f = 2$ kat

Lifli polimer kumaş kalınlık $t_f = 0.117$ mm

Lifli polimer kumaş genişlik $w_f = 300$ mm

Lifli polimer kumaş alanı

$$A_{frp} = 2 \times n_f \times t_f \times w_f = 2 \times 2 \times 0.117 \times 300 = 140.4 \text{ mm}^2$$

Sargı aralığı $s_f = 300$ mm (sürekli)

Lifli polimer kumaş elastisite modülü $E_{frp} = 240000$ N/mm²

Lifli polimer kumaş kopma şekildeğiştirme $\varepsilon_{frpult} = 0.0155$

Beton katkısı ihmal edilerek,

$$V_r = V_w + V_{frp} \quad (4.20)$$

$$V_w = \frac{n \times A_0 \times d \times f_{ywk}}{s} = \frac{2 \times 78.54 \times 280 \times 307}{200} = 67513 \text{ N}$$

$$V_w = 67.51 \text{ kN}$$

$$V_{frp} = \frac{A_{frp} \times d \times \varepsilon_{frpuli} \times E_{frp}}{s_f} = \frac{140.4 \times 280 \times 0.0155 \times 240000}{300} = 487469 \text{ N}$$

$$V_{frp} = 487.47 \text{ kN}$$

$$V_r = V_w + V_{frp} = 67.51 + 487.47 = 554.98 \text{ kN}$$

$$V_d = V_{ret} = P_{ret}$$

$$P_{ret} = \frac{M_{ret}}{h} = \frac{58.14}{1.65} = 35.24 \text{ kN}$$

$$V_r = 554.98 \text{ kN} \geq P_{ret} = 35.24 \text{ kN}$$

Temele ankraj hesabı;

Lifli polimer kumaş kalınlık $t_f = 0.117 \text{ mm}$

Lifli polimer kumaş elastisite modülü $E_{kumaş} = 240000 \text{ N/mm}^2$

Lifli polimer şerit plaka enkesit alanı

$$A_{şerit} = 1.4 \times 36 = 50.4 \text{ mm}^2$$

Lifli polimer şerit plaka elastisite modülü $E_{şerit} = 165000 \text{ N/mm}^2$

Bir adet lifli polimer şerit plakaya gelen en büyük çekme kuvveti,

$$F_{şerit} = A_{şerit} \times \varepsilon \times E_{şerit} \quad (4.21)$$

Ankraj malzemesi olan lifli polimer kumaşın taşıyacağı çekme kuvveti,

$$F_{kumaş} = s_f \times t_f \times \varepsilon \times E_{kumaş} \quad (4.22)$$

Lifli polimer şerit plakaya gelen çekme kuvvetinin 1.5 katını karşılayacak lifli polimer kumaş kalınlığını hesaplamak için,

$$F_{kumaş} = 1.5 \times F_{şerit} \quad (4.23)$$

denklemleri yazılırsa,

$$s_f \times t_f \times \varepsilon \times E_{kumaş} = 1.5 \times A_{şerit} \times \varepsilon \times E_{şerit} \quad (4.24)$$

Bu denklemden lifli polimer kumaş genişliği s_f çekilirse,

$$s_f = \frac{1.5 \times A_{şerit} \times E_{şerit}}{t_f \times E_{kumaş}} = \frac{1.5 \times 50.4 \times 165000}{0.117 \times 240000} = 444 \text{ mm}$$

bulunur.

Ankraj uygulamasında kullanılacak karbon lifli polimer kumaşlar uygulama boyunun 2 katı uzunlukta kesilip ikiye katlanarak rulo haline getirileceğinden dolayı yukarıda hesaplanan kumaş genişliğinin yarısı yeterli olacaktır. Bu düşünceyle ankraj uygulamasında kullanılacak kumaş genişliği 250 mm olarak belirlenmiştir.

Yapılan tüm bu teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçların özeti Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Tüm numunelerin teorik hesap özeti

Numune adı	M_r (kNm)	V_r (kN)	P_r (kN)
LS-CON-REF1	21.12	92.81	12.80
LS-CON-REF2	21.12	92.81	12.80
LS-CON-Rebar	60.10	554.98	36.43
LS-CON-Laminate	58.14	554.98	35.24

4.2 Güçlendirme Uygulaması

Güçlendirme tasarımı yapılan 2 adet kolon numunesinin (LS-CON-Rebar ve LS-CON-Laminate) İ.T.Ü Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında aşama aşama güçlendirme çalışmaları yapılmıştır. Güçlendirme imalatı kapsamında iki kolon arasındaki tek fark boyuna güçlendirme malzemesi olarak ilkinde (LS-CON-Rebar) karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı, diğerinde (LS-CON-Laminate) ise karbon lifli polimer şerit plaka kullanılmasıdır.

Kolon numunelerinin ilk olarak paspayı sıyırılmıştır. Bu aşamada güçlendirme uygulaması yapılacak olan yüzeylerde boyuna donatı açığa çıkana kadar, diğer yüzeylerde ise etriyenin içine kadar sıyırma işlemi yapılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : Paspayı sıyırılan kolon numunesi

Paspayı sıyırılan kolon 2-3 kez suyunu çekene kadar sulanarak tamir harcı uygulamasına hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Paspayı sıyrılan kolonun sulanması

Suya doymuş haldeki kolon numunelere ilk olarak astar uygulaması yapılmıştır (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8). Kolon betonunun sulanması ve astar uygulamasının amacı yapısal tamir harcının içerisindeki suyun kolon betonu tarafından kullanımını azaltmaktır.



Şekil 4.7 : Hazırlanan astar malzemesi



Şekil 4.8 : Astar uygulaması

Astar uygulaması yapılan kolon numunesine yaklaşık yarım saat kadar beklendikten sonra yapısal tamir harcı uygulaması yapılmıştır (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10). Tamir harcı kolon yüzündeki etriyelerle sıfır olacak şekilde uygulanmıştır. Özellikle boyuna güçlendirme elemanlarının uygulanacağı kolon yüzlerinin, etriyeyi de geçerek boyuna donatının içine kadar sıyrılmasının amacı; karbon lifli polimer malzeme ile kolon betonu arasında daha güçlü bir tabaka oluşturmak ve lifli polimer malzemenin tamir harcı ile olan daha iyi yapışma kabiliyetinden faydalanmaktır.



Şekil 4.9 : Tamir harcı uygulaması



Şekil 4.10 : Tamir harcı uygulaması sonrası ve sulanması

Tamir harcının en az 4 gün beklenerek prizini alması sağlanmıştır. Bu süreçte kolonlar sulanarak hava sıcaklığı vs. gibi nedenlerden dolayı oluşacak su ve dayanım kaybı telafi edilmeye çalışılmıştır.

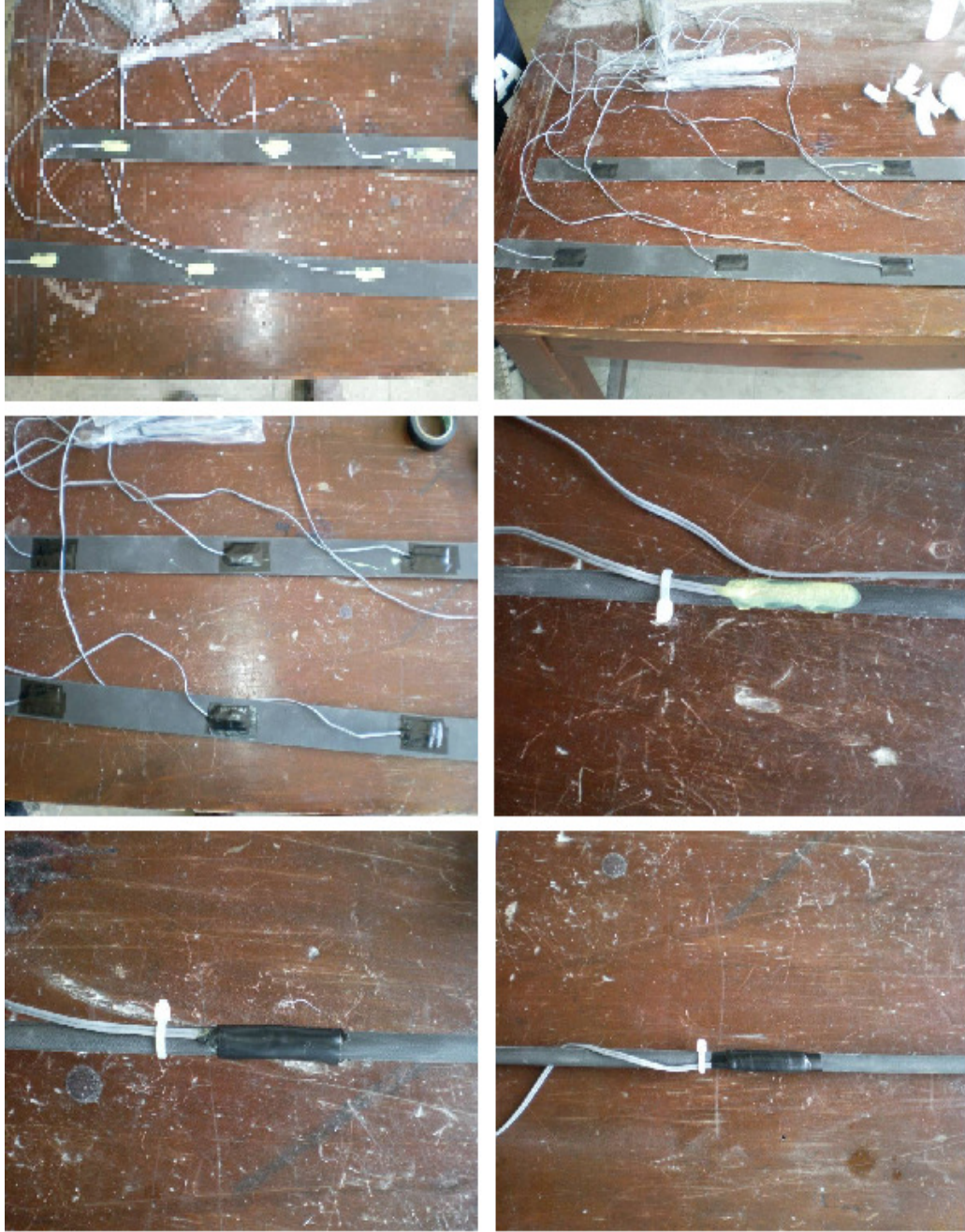
Bunun ardından boyuna güçlendirme sırasında kullanılacak olan ankraj detayı doğrultusunda temel üzerinde açılması gereken ankraj delikleri de matkap yardımıyla açılmıştır. Güçlendirilecek olan 2 adet kolon numunesinin herbiri için yapılan hesaplara göre, olabildiğince kolon yüzeyine yakın, düşey doğrultuda olacak şekilde 20 mm çapında, 20 cm derinliğinde 4 adet ankraj deliği açılmıştır.

Daha sonra uygulamaya yönelik olarak açılan delikler kompresör yardımıyla temizlenerek tozdan arındırılmıştır (Şekil 4.11).



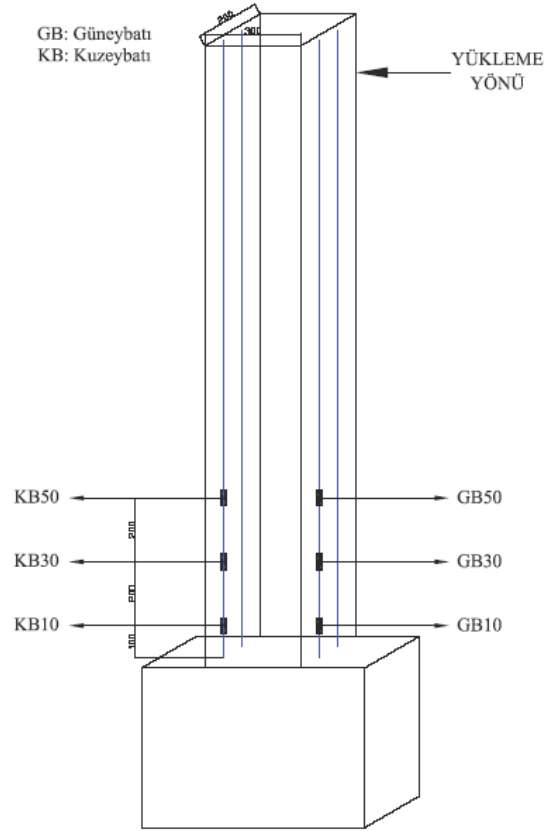
Şekil 4.11 : Temele ankraj deliklerinin açılması ve kompresör ile temizlenmesi

Tamir harcının prizini alması ve temele ankraj deliklerinin açılmasıyla birlikte boyuna doğrultuda güçlendirme elemanlarının kolon yüzüne tatbikine geçilmiştir. Bu aşamada kullanılacak olan karbon lifli çubuklar ve şerit plakalar uygulamaya hazır hale getirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak hesaplar doğrultusunda belirlenen genişlikte kesilen karbon lifli polimer şerit plakalar ve çubukların üzerine şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmadan önce karbon lifli polimer şerit plakalar ve çubuklar üzerinde belirlenen noktalar kalın ve ince zımpara yardımı ile pürüzsüz hale getirilmiş, sonra pamuk ve aseton yardımı ile tozlu yüzeyler temizlenmiştir. Tam olarak temizlenmiş bu yüzeylere şekildeğiştirmeölçerler, cyanoacrylate esaslı bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Ardından su ve nem yalıtımını sağlayarak mekanik korumayı gerçekleştirmek için iki kat kimyasal yalıtım malzemesi (N-1, su geçirmez malzeme), bir kat bitüm esaslı bant (VM Tape, nem ve diğer dış etkilere karşı yalıtım sağlayan malzeme) ve bunun üzerine izole bant sarılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Şerit plaka ve çubuklara şekildeğiştirmeölçer yapıştırılması

Şekildeğiştirmeölçerlerin numune üzerindeki şematik gösterimi ise Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Şerit plaka ve çubuklar üzerindeki şekildeğiştirmeölçer yerleşimi

Boyuna güçlendirme elemanları karbon lifli polimer şerit plaka ve çubuklarda, şekildeğiştirmeölçerlerin hangi numunelerde bulunduğu ve yerleşim planı Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Boyuna güçlendirme elemanları şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı

Boyuna güçlendirme elemanları üzerinde şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı			Bulunduğu kolon	
Şekildeğiştirmeölçer adı	Yapıştırılma mesafesi	Şekildeğiştirmeölçer düzeltme faktörü	LS- CON- Rebar	LS- CON- Laminate
KB10 (YFLA-5-3L)	100 mm	2.10±2 %	VAR	VAR
KB30 (YFLA-5-3L)	300 mm	2.10±2 %	VAR	VAR
KB50 (YFLA-5-3L)	500 mm	2.10±2 %	VAR	VAR
GB10 (YFLA-5-3L)	100 mm	2.10±2 %	VAR	VAR
GB30 (YFLA-5-3L)	300 mm	2.10±2 %	VAR	VAR
GB50 (YFLA-5-3L)	500 mm	2.10±2 %	VAR	VAR

Karbon lifli polimer şerit plakalar ve çubukların uygulamaya hazır hale getirilmesinin ardından kolon yüzeyine tatbiki yapılmıştır. Bu aşamada ilk olarak uygulama yapılacak yüzeylere, yüzeyin tozunu almak ve yapışma kabiliyetini arttırmak amacıyla epoksi esaslı astar malzeme sürülmüştür. Astar malzemesi iki bileşenli (epoksi reçine ve epoksi sertleştirici), düşük viskoziteli bir malzemedir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : Astar uygulaması sonrası

Yapılan hesaplara göre kolonların herbir kısa kenarına (uygulama yüzeyleri) 2 adet çubuk veya şerit plaka yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi için epoksi esaslı yapıştırıcı olarak iki bileşenli (epoksi reçine ve epoksi sertleştirici), yüksek dayanımlı Lamine Adesivo kullanılmıştır (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16).



Şekil 4.15 : Lamine Adesivo karışımı



Şekil 4.16 : Karbon lifli polimer şerit plaka ve çubukların yapıştırılması

Karbon lifli polimer şerit plakalar ve çubuklar düşey ekseninde ankraj zorluğundan dolayı temel yüzeyinden başlayıp kolon tam boyuna yapıştırılmıştır. Ankraj içinse karbon lifli polimer kumaş kullanılmıştır. Hesaplara göre 140 cm uzunluğunda, 25 cm genişliğinde kesilen karbon lifli polimer kumaşlar ikiye katlanarak toplam boyu 70 cm'ye getirilmiştir. Elde edilen çift katlı kumaşın ankre edilecek 20 cm'lik kısmı rulo yapılarak delik içerisine yerleştirilebilir hale getirilmiştir. Dışarıda kalacak 50 cm'lik kısım ise karbon lifli polimer şerit plakalar ve çubukların üzerini kapatacak şekilde yapıştırılmıştır. Ankraj ve kumaşın kolon yüzüne yapıştırılması işleminde epoksi esaslı yapıştırıcı olarak iki bileşenli (epoksi reçine ve epoksi sertleştirici), solventsiz ve yüksek dayanımlı Adesivo (Saturant) kullanılmıştır. Karbon lifli polimer kumaşın kolon yüzeyine yapıştırılması sırasında, epoksi esaslı yapıştırıcı malzemenin akışkan formu ve kumaşın emici özelliği düşünülerek katlanan kumaş parçası yaprak yaprak olacak şekilde lifler doğrultusunda kesilerek her katın üzerine epoksi esaslı yapıştırıcı uygulaması yapılmasına özen gösterilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 : Karbon lifli polimer kumaşlar ile ankraj uygulaması

Ankraj uygulamasından sonra son kat yapısal tamir harcı uygulaması için 2 gün beklenmiştir. Bu süre içerisinde epoksi esaslı malzemenin dayanımını kazanması amaçlanmıştır. Bunun ardından, kolonu orjinal boyutlarına getirmek üzere, sargılama öncesi son kat yapısal tamir harcı uygulaması yapılmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 : Son kat yapısal tamir harcı uygulaması

Son kat tamir harcının prizini alması için 4 gün beklenilmiştir. Güçlendirme uygulamasının son aşaması olan sargılama işlemi için ilk olarak tamir harcı üzerine epoksi esaslı astar malzemesi sürülmüştür (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 : Astar malzemesi sürülmesi

Astar malzemesi sürülmesinden sonra 2 gün beklenilmiştir. Ardından karbon lifli polimer kumaş malzeme ile sargılama yapılmıştır (Şekil 4.20).



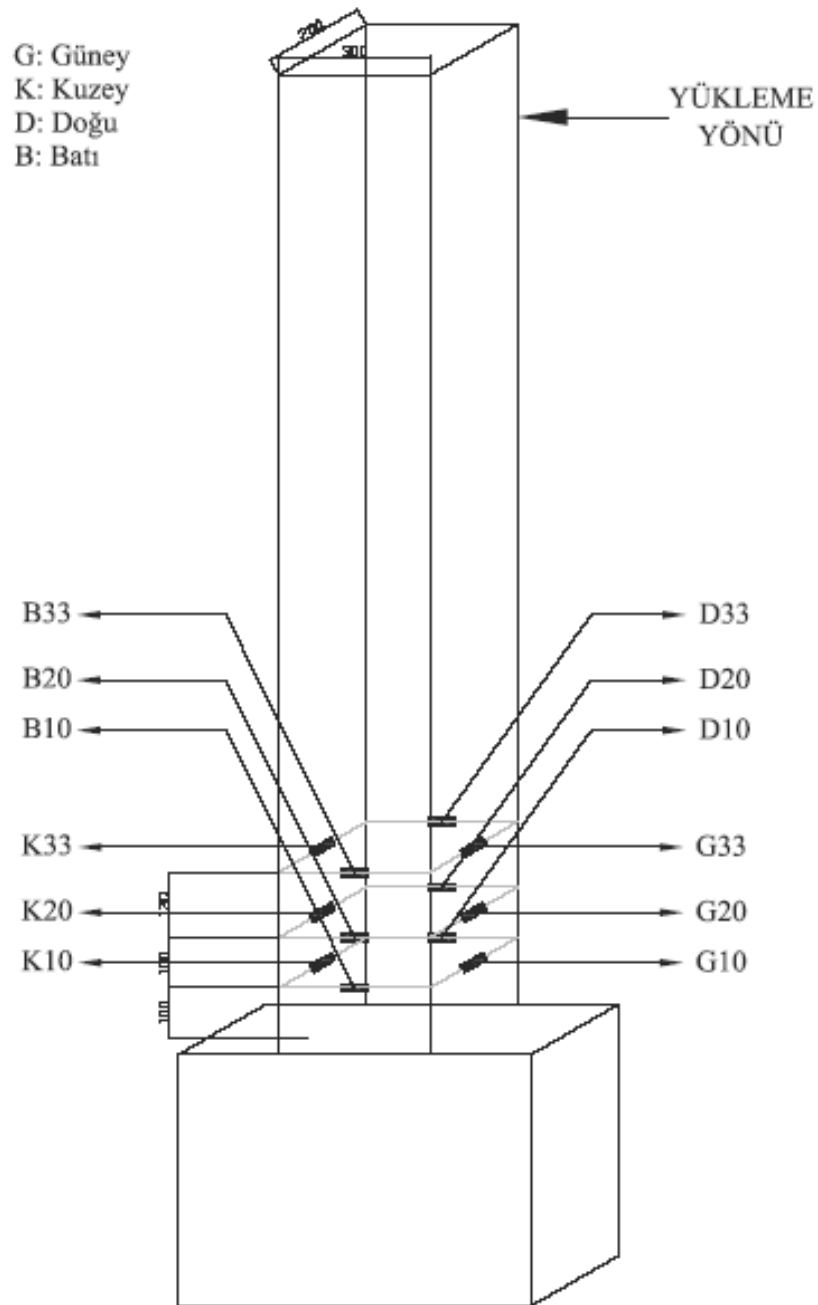
Şekil 4.20 : Karbon lifli polimer kumaş malzeme

Her iki kolon numunesi içinde yapılan hesaplar ve değerlendirmeler doğrultusunda sistemin bütünlüğünü sağlamak amacıyla 2 kat sargılama yapılmıştır. Karbon lifli polimer kumaş, sargılama işleminde 2.kat yapıldıktan sonra kolon uzun kenarı üzerine 15 cm bindirmeli olacak şekilde sonlandırılmıştır. Sargılama yapılırken bindirmelerin herbir sırada farklı kolon yüzünde sonlanmasına dikkat edilmiştir. Bu şekilde herbir sargı sırası şaşırtmalı olarak yapılmıştır (karbon lifli polimer kumaş genişliği 30 cm olduğu için). Sargılama işleminde epoksi esaslı yapıştırıcı olarak iki bileşenli (epoksi reçine ve epoksi sertleştirici), solventsiz ve yüksek dayanımlı Adesivo (Saturant) kullanılmıştır. Epoksi esaslı yapıştırıcı malzeme kolon yüzüne ve herbir kat kumaş üzerine sürülerek yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 : Sargılama uygulaması

Sargılama işlemi yapılan kolon numuneleri yüzeylerine de 12 adet şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmıştır. Burada kolon donatıları, karbon lifli polimer şerit plakalar ve çubukların aksine numunenin dış yüzeyine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerlerin numune üzerindeki şematik gösterimi Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22 : Sargılama üzerindeki şekildeğiştirmeölçer yerleşimi

Şekildeğiştirmeölçerlerin hangi numunelerde bulunduğu ve yerleşim planı ise Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Sargılama üzerindeki şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı

Sargılama üzerinde şekildeğiştirmeölçer yerleşim planı			Bulunduğu kolon	
Şekildeğiştirmeölçer adı	Yapıştırılma mesafesi	Şekildeğiştirmeölçer düzeltme faktörü	LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
K10 (PL60-11-3L)	100 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
K20 (PL60-11-3L)	200 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
K33 (PL60-11-3L)	330 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
G10 (PL60-11-3L)	100 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
G20 (PL60-11-3L)	200 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
G33 (PL60-11-3L)	330 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
B10 (PL60-11-3L)	100 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
B20 (PL60-11-3L)	200 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
B33 (PL60-11-3L)	330 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
D10 (PL60-11-3L)	100 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
D20 (PL60-11-3L)	200 mm	2.12±1 %	VAR	VAR
D33 (PL60-11-3L)	330 mm	2.12±1 %	VAR	VAR

Yukarıda bahsedilen güçlendirme uygulamasına ait tüm işlemleri ve kullanılan malzemeleri gösteren detaylar Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Güçlendirme uygulama şeması

No	Yapılan Uygulama	Kullanılan Malzeme	
		LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
1	Paspayının sıyırılması		
2	Paspayı sıyrılan kolonun sulanması		
3	Astar uygulaması	Masterseal 300T	Masterseal 300T
4	İlk kat yapısal tamir harcı uygulaması	Emaco S88 C	Emaco S88 C
5	Yapısal tamir harcı uygulaması sonrası kolonun sulanması		
6	Temele ankraj deliklerinin açılması		
7	Ankraj deliklerinin kompresör ile temizlenmesi		
8	Astar uygulaması	M-Brace Primer	M-Brace Primer
9	Karbon lifli polimer çubukların yapıştırılması	Laminate + M-Brace Laminate Adesivo	
10	Karbon lifli polimer şerit plakaların yapıştırılması		Rebar + M-Brace Laminate Adesivo
11	Karbon lifli polimer kumaş kullanılarak temele ankraj yapılması	M-Brace Fiber C1-23 + M-Brace Adesivo (Saturant)	M-Brace Fiber C1-23 + M-Brace Adesivo (Saturant)
12	Son kat yapısal tamir harcı uygulaması	Emaco S88 C	Emaco S88 C
13	Astar uygulaması	M-Brace Primer	M-Brace Primer
14	Karbon lifli polimer kumaş kullanılarak enine doğrultuda iki kat sargılama yapılması	M-Brace Fiber C1-23 + M-Brace Adesivo (Saturant)	M-Brace Fiber C1-23 + M-Brace Adesivo (Saturant)

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Giriş

Deprem etkisinde yapı elemanlarının yön değiştiren tekrarlı yüklere maruz kaldığı bilinmektedir. Bu yüzden yapıların deprem etkisinde davranışının anlaşılabilmesi için betonarme elemanların tekrarlı ve yön değiştiren yükler altında incelenmesi gerekmektedir. Betonarme elemanların, yön değiştiren tekrarlı yükler altında elastik ötesi şekildeğiştirmelere ulaşması sonucu elemanda dayanım ve rijitlik kaybı oluşmaktadır. Ayrıca ileri şekildeğiştirme seviyelerinde yapının yutabildiği enerji miktarı da önemli ölçüde azalabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, iki adet referans ve iki adet güçlendirilmiş olmak üzere dört adet numune üretilmiştir. Güçlendirilen numunelerden ilkinde, boyuna doğrultuda karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ve enine doğrultuda ise karbon lifli polimer kumaş kullanılmıştır. Benzer şekilde diğer güçlendirilen numunede de, boyuna doğrultuda karbon lifli polimer şerit plaka ve enine doğrultuda ise karbon lifli polimer kumaş kullanılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak, tasarımı yapılan kolon numunelerinin betonarme imalatı yapılmıştır. Bu süreçte malzeme deneyleri için gerekli olan donatı çeliği ve standart silindir numuneleri alınarak Malzeme Laboratuvarında deneyleri yapılmıştır. Elde edilen bu verilerde kullanılarak teorik hesabı tamamlanan güçlendirme detayının kolonlara uygulaması yapılmıştır.

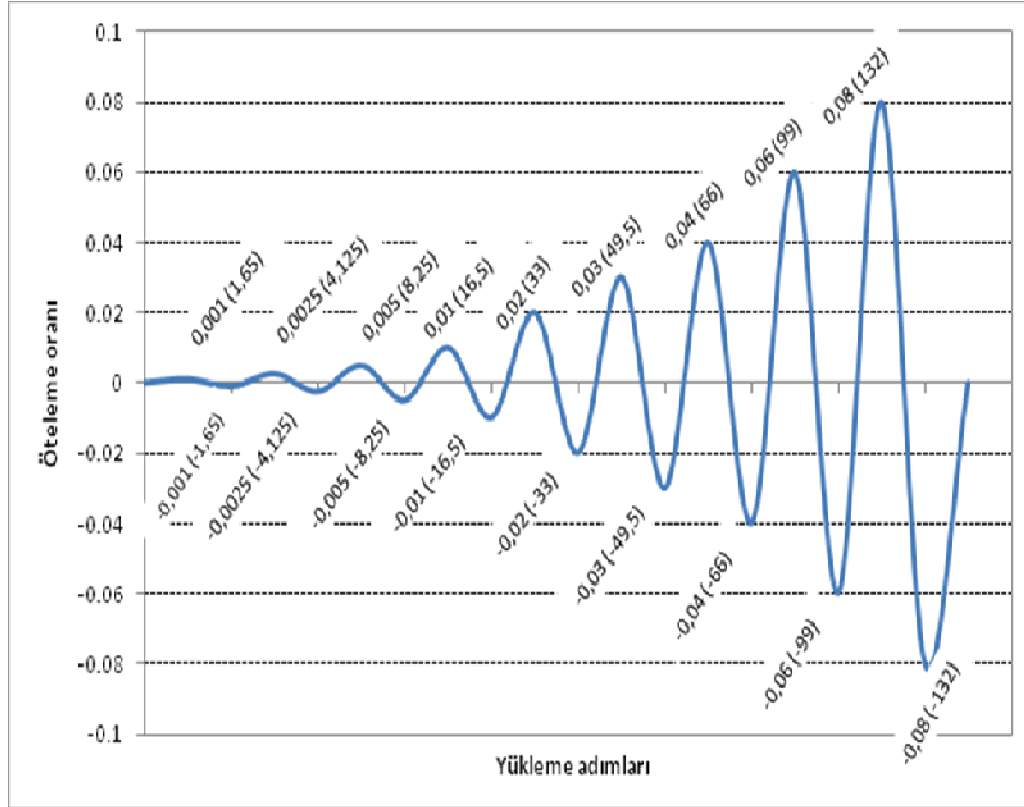
Güçlendirilen iki adet kolonun yön değiştiren tekrarlı yatay yük etkisi altında performansları incelenmiştir. Bu çalışmada davranışı karmaşıktırmamak için, kolonlar üzerine eksenel yük uygulanmamış, böylece uygulanan güçlendirme detayının sisteme ve davranışına etkisini daha net görebilmek amaçlanmıştır. Numunelerin bazı özelliklerini gösteren tablo Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Numune bilgileri

	Numune Tipi	Betonarme İmalat (boyuna donatı)	Betonarme İmalat (enine donatı)	28 Günlük Kolon Beton Basınç Dayanımı (Mpa)	Güçlendirme Şekli (boyuna dağılımda)	Güçlendirme Şekli (enine dağılımda)	Güçlendirme Şekli (ankraj detayı)	Deney Günlüğü Numune Yaşı (gün)	Deney Günlüğü Kolon Beton Basınç Dayanımı (Mpa)	Teorik Moment Kapasite (kNm)	Teorik Yük Kapasite (kN)	Deneysel Yük Kapasitesi (kN)
LS-CON-REF1	Güçlendirilmemiş	Ø10/200-100	4Ø14	9.43	Yok	Yok	Yok	130	9.44	21.12	12.80	13.91
LS-CON-REF2	Güçlendirilmemiş	Ø10/200-100	4Ø14	9.43	Yok	Yok	Yok	186	9.46	21.12	12.80	14.84
LS-CON-Rafar	Güçlendirilmiş	Ø10/200-100	4Ø14	9.43	İtme ve çekmeye maruz kolon yüzlerine ikişer adet Ø8 enkesitli karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı (4Ø8)	İki kat karbon lifli polimer kumaş ile kolon tam boy sargılama	200 mm temele ankre edilip 500 mm kolon yüzüne bindirilecek şekilde 443 mm genişliğinde karbon lifli polimer kumaş katlanarak ankraj (4 adet)	205	9.46	60.10	36.43	29.79
LS-CON-Laminata	Güçlendirilmiş	Ø10/200-100	4Ø14	9.43	İtme ve çekmeye maruz kolon yüzlerine ikişer adet 1.4x36 mm enkesitli karbon lifli polimer serit plaka (4x1.4x36)	İki kat karbon lifli polimer kumaş ile kolon tam boy sargılama	200 mm temele ankre edilip 500 mm kolon yüzüne bindirilecek şekilde 444 mm genişliğinde karbon lifli polimer kumaş katlanarak ankraj (8 adet)	213	9.46	58.14	35.24	26.98

5.3 Yükleme Patronu

Tüm deneyler numuneye deprem yükünü yansıtmak amacıyla itme ve çekme yönünde tekrarlı yerdeğiştirme kontrollü gerçekleştirilmiştir. Belirlenen öteleme oranlarına bağlı kalınarak yükleme adım adım yapılmış ve bu yükleme adımları arasında numunenin hasar durumu gözlenmiştir. Yükleme patronu Şekil 5.2`de verilmiştir.

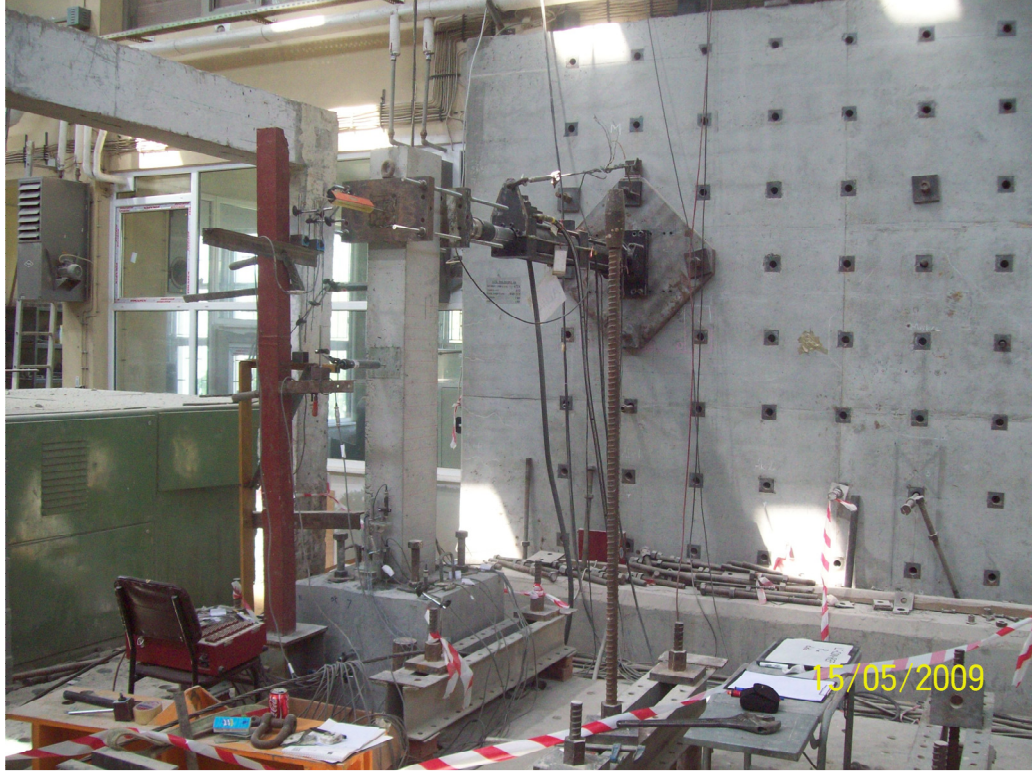


Şekil 5.2 : Yükleme patronu

5.4 Deneyler

5.4.1 LS-CON-REF1 numunesi

Deney, 15.05.2009 tarihinde beton 60-168 yaşları arasında ve silindir beton basınç dayanımı 9.44 MPa iken yapılmıştır. Hazırlanan düzeneğin deney öncesi son hali Şekil 5.3`de görülmektedir.

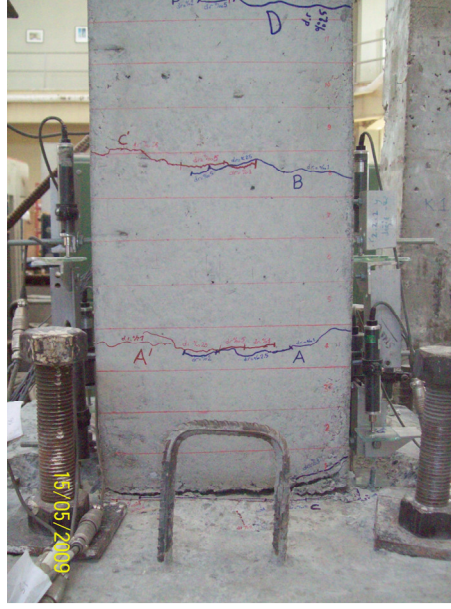


Şekil 5.3 : LS-CON-REF1 numunesinin deney başlangıcı

Deneyin ilk hedef yerdeğiştirmesi olan itmede 1.65 mm'ye (öteleme oranı = %0.1) gelindiğinde 20 cm ve 40 cm'deki etriyeler (1. ve 2.etriyeler) hizasında ve kolon tabanında çekme bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Geri dönülerek çekmede %0.1 öteleme oranına ulaşıldığında çekme bölgesinde benzer eğilme çatlakları görölmüştür. Sonraki adımlarda 100 cm'ye kadar tüm etriyelerin hizasında yeni eğilme çatlakları oluşurken, daha önceki adımlarda oluşan çatlakların da genişlikleri artmıştır.

Bunun yanında %0.5 çekme, %1 itme, %1 çekme aralığında tüm boyuna donatılar akmaya başlamıştır. Donatıların en büyük şekildeğiştirmesi ise 0.030 mertebelerine ulaşmıştır. Enine donatılarda ise akma gözlenmemiştir.

Her öteleme adımından sonra çatlak genişliklerindeki bu artışlar kolon tabanında toplanmaya başlamış ve itmede %4 öteleme oranına ulaşıldığında kolon tabanı temel yüzeyinden tamamen ayrılmış, o bölgede paspayı dökölmesi gözlenmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : LS-CON-REF1 numunesi %4 itme sonrası

Aynı zamanda kolon tabanı çekme bölgesinde paspayı dökülmesi gerçekleşirken, basınç bölgesinde ise betonda ezilme gerçekleşmiştir.

İtmede %6 öteleme oranına gidildiğinde kolon tabanındaki ayrılma daha da artmış ve bununla birlikte ilk adımlarda görülen etriye hizalarındaki eğilme çatlakları neredeyse tamamen kapanmıştır (Şekil 5.5). Aynı zamanda en alt bölgede paspayı tamamen ayrılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.5 : LS-CON-REF1 numunesi %6 itme sonrası



Şekil 5.6 : LS-CON-REF1 numunesi %6 itmede paspayı dökülmesi

Çekmede %6 öteleme oranına gidildiğinde ise itmedekine benzer şekilde kolon tabanındaki ayrılma artarken, aynı bölgede paspayı dökülmesi ve basınç tarafında ise betonda ezilme daha net bir şekilde gözlenmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 : LS-CON-REF1 numunesi %6 çekmede betonun ezilmesi

Fakat çok ilginç bir şekilde basınç bölgesinde 2. etriye hizasındaki (temel üstünden 40 cm yukarısı) eğilme çatlağında konsol kolon davranışına uymayan bir genişleme gözlenmiştir (Şekil 5.8)



Şekil 5.8 : LS-CON-REF1 numunesi %6 çekme sonrası

İtmede %8 öteleme oranına ulaşıldığında kolon tabanındaki davranış aynı şekilde seyrederken, %6 çekmedekine benzer şekilde basınç bölgesinde 2.etriye hizasındaki eğilme çatlağında büyük miktarda genişleme görülmüştür (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 : LS-CON-REF1 numunesi %8 itme sonrası

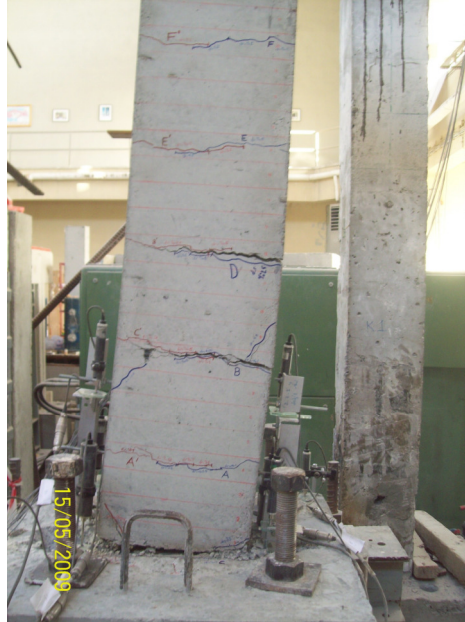
Çekmede %8 öteleme oranına ulaşıldığında da %8 itme ile benzer bir davranış gözlenmiştir. Kolon tabanında çekme bölgesinde çatlak genişlerken, 2. ve 3. etriyeler

hızasında basınç bölgesindeki eğilme çatlaklarında beklenmeyen büyük açılmalar görülmüştür (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 : LS-CON-REF1 numunesi %8 çekme sonrası

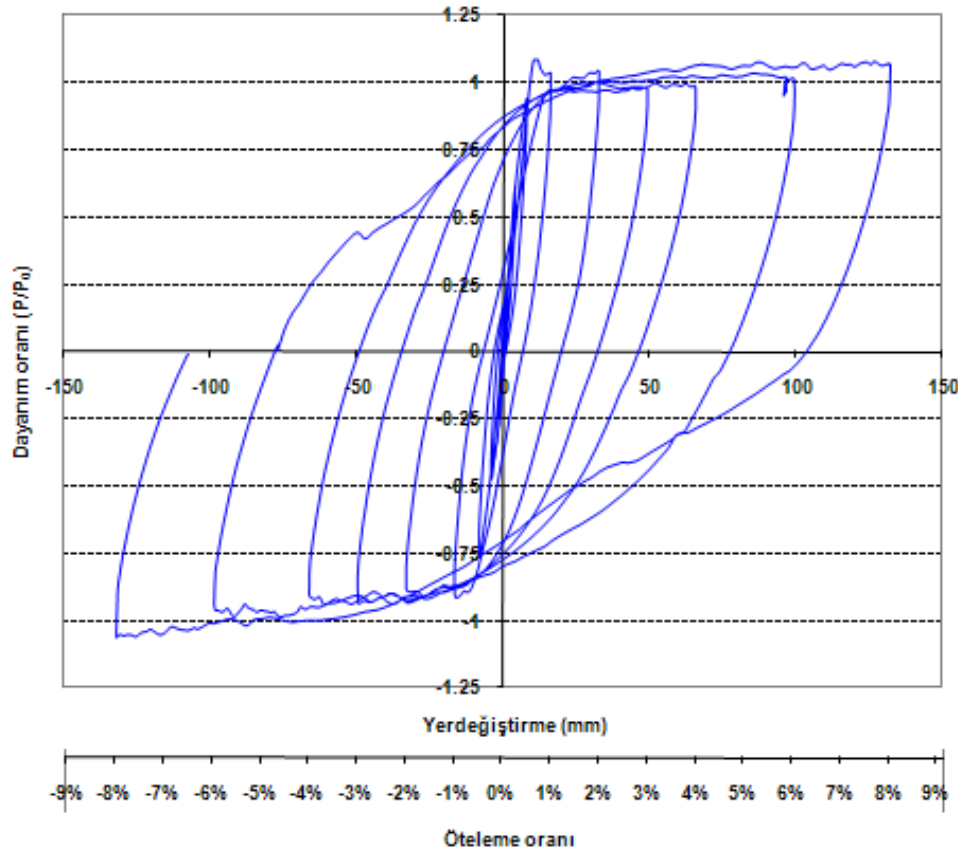
Çekmede %8 öteleme oranından sonra numune üzerindeki yük boşaltılarak kalıcı deformasyonlar ölçülmüştür (Şekil 5.11). Numune üzerindeki yük sıfırlandığı anda kalıcı yerdeğiştirme -107.62 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.11 : LS-CON-REF1 numunesi deney sonrası (P=0, $\delta=-107.62$ mm)

LS-CON-REF1 numunesi deney boyunca eğilme etkilerinin hakim olduğu bir davranış göstermiştir. Kesme kuvveti etkisi önemli bir hasara neden olmamıştır. Özellikle deneyin son adımlarında gözlenen ve konsol kolon davranışına uymayan, basınç bölgesindeki çatlak gelişiminin nedeni, itme ve çekme adımlarında aynı donatılar üzerinde oluşabilecek kalıcı deformasyonların lokal olarak belli bölgelerde yoğunlaşmış olması olabilir.

Numunenin, yatay yükveren ve aynı eksendeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 5.12’de verilmiştir. Bu grafikte düşey eksende yer alan dayanım oranı (P/P_0); deney sırasında kaydedilen yük değerleri, referans numunesinin teorik kapasitesine bölünerek bulunmuştur.



Şekil 5.12 : LS-CON-REF1 numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

LS-CON-REF1 numunesinin davranışının daha kolay anlaşılabilmesi ve diğer numunelerle kıyaslanabilmesi için deney süreci özet olarak Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu çizelgede, deney boyunca itmede ve çekmede gidilen tüm öteleme adımlarında ulaşılan yük ve yerdeğiştirme değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.2 : LS-CON-REF1 numunesi deney özeti

Öteleme oranı	δ (mm)	P (kN)
%0.1	1.65	3.40
-%0.1	-1.65	-3.40
%0.25	4.125	8.00
-%0.25	-4.125	-6.00
%0.5	8.25	12.00
-%0.5	-8.25	-9.50
%1	16.5	13.00
-%1	-16.5	-11.40
%2	33	13.00
-%2	-33	-11.00
%3	49.5	12.50
-%3	-49.5	-11.20
%4	66	12.40
-%4	-66	-11.30
%6	99	12.90
-%6	-99	-11.90
%8	132	13.60
-%8	-132	-13.30

5.4.2 LS-CON-REF2 numunesi

Deney, 10.07.2009 tarihinde beton 168-232 yaşları arasında ve silindir beton basınç dayanımı 9.46 MPa iken yapılmıştır. Hazırlanan düzeneğin deney öncesi son hali Şekil 5.13’de görülmektedir.

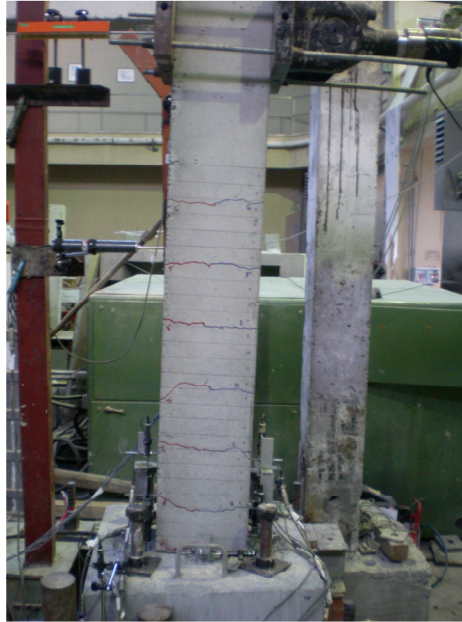
Deneyin ilk hedef yerdeğiştirmesi olan itmede %0.1 ve çekmede %0.1 öteleme oranında çatlak gözlenmemiştir. İlk olarak itmede %0.25 öteleme oranına ulaşıldığında kolon tabanında çekme bölgesinde eğilme çatlakları görülmüştür.

Bunun yanında %0.5 çekme, %1 itme, %1 çekme aralığında tüm boyuna donatılar akmaya başlamıştır. Donatıların en büyük şekildeğiştirmesi ise 0.027 mertebelerine ulaşmıştır. Enine donatılarda ise akma gözlenmemiştir.



Şekil 5.13 : LS-CON-REF2 numunesinin deney başlangıcı

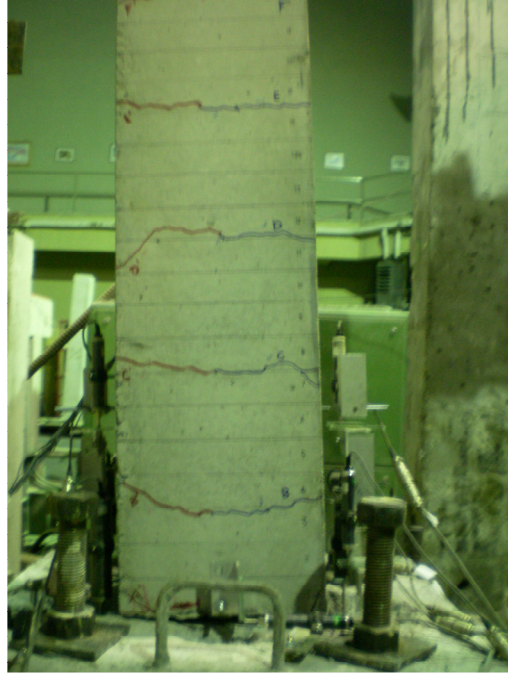
Çekmede %3 öteleme oranına gelindiğinde 120 cm'ye kadar tüm etriyelerin hizasında yeni eğilme çatlakları gelişirken, kolon tabanındaki çatlakta da genişleme devam etmiştir. 120 cm'lik kısımda oluşan eğilme çatlakları genel olarak düşük mertebeli çatlaklardır (Şekil 5.14).



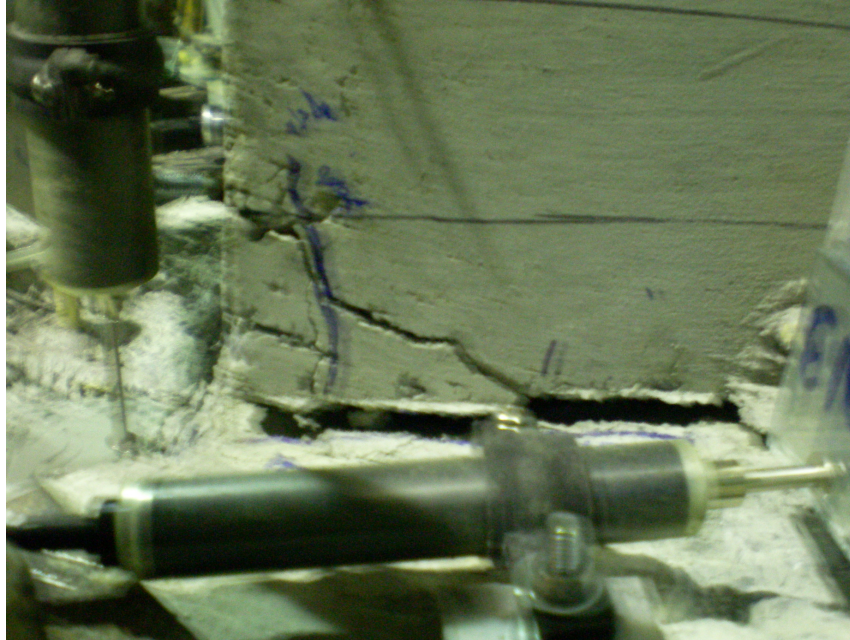
Şekil 5.14 : LS-CON-REF2 numunesi %3 çekme sonrası

İtmede %6 öteleme oranına gelene kadar kolon tabanındaki çatlak daha da büyümüş, çekme bölgesinde paspayı dökülmesi, basınç bölgesinde ise betonda ezilme

gözlenmiştir. Kolon tabanındaki çatlak genişlerken üstteki etriyelerin seviyesindeki eğilme çatlakları kapanmıştır (Şekil 5.15 ve Şekil 5.16).



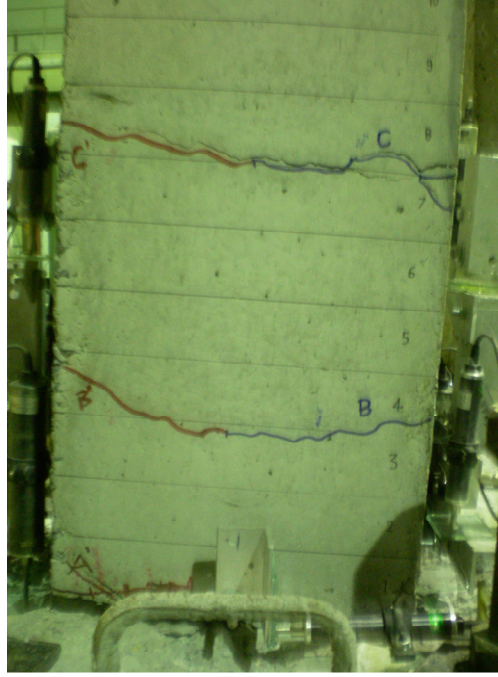
Şekil 5.15 : LS-CON-REF2 numunesi %6 itme sonrası



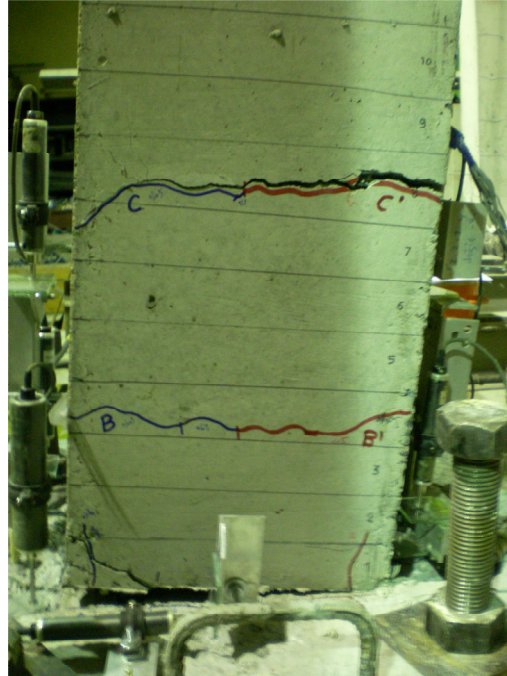
Şekil 5.16 : LS-CON-REF2 numunesi %6 itme sonrası (arka yüz)

Çekmede %6, itmede %8 ve çekmede %8 öteleme oranı aralığında ise kolon tabanındaki ayrılma artmış fakat ilk referans numunesinde olduğu gibi ikinci etriye

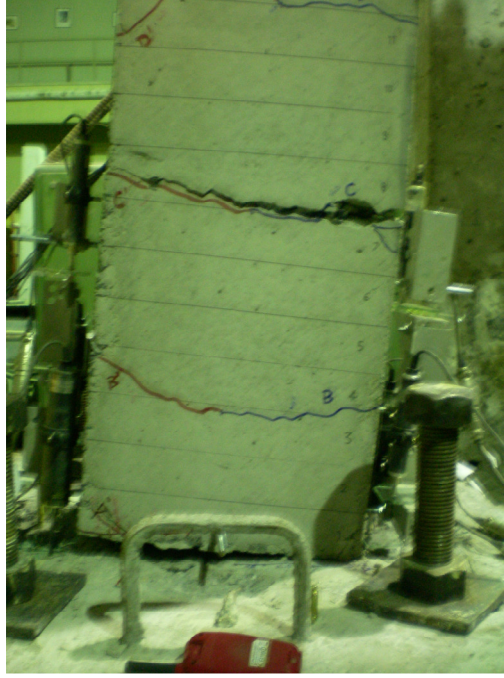
hızasında konsol kolon davranışına uymayan bir şekilde basınç tarafındaki çatlakta açılma meydana gelmiştir (Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19).



Şekil 5.17 : LS-CON-REF2 numunesi %6 çekme sonrası

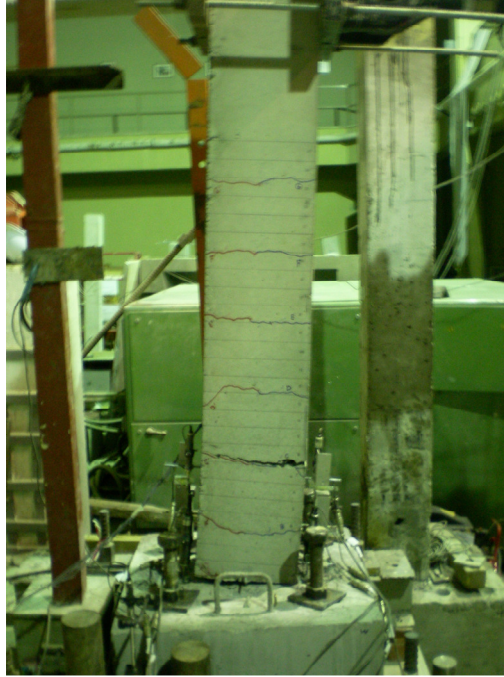


Şekil 5.18 : LS-CON-REF2 numunesi %8 itme sonrası (arka yüz)



Şekil 5.19 : LS-CON-REF2 numunesi %8 çekme sonrası

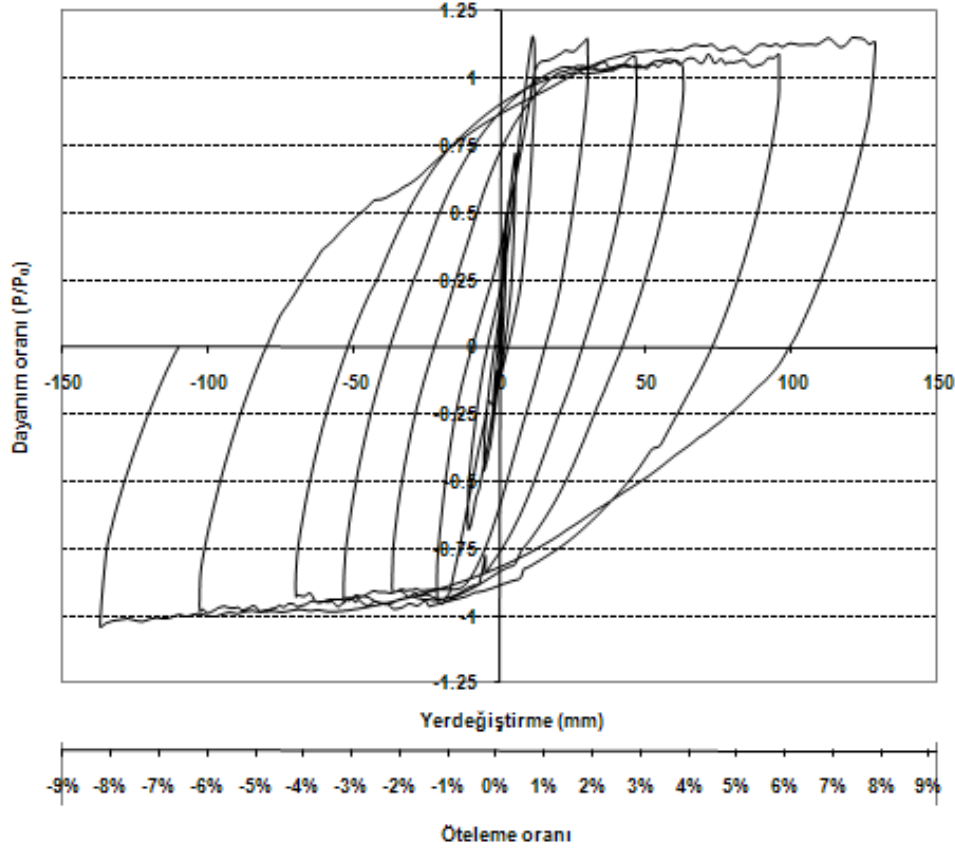
Çekmede %8 öteleme oranından sonra numune üzerindeki yük boşaltılarak kalıcı deformasyonlar ölçülmüştür (Şekil 5.20). Numune üzerindeki yük sıfırlandığı anda kalıcı yerdeğiştirme -107 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.20 : LS-CON-REF2 numunesi deney sonrası ($P=0$, $\delta=-107$ mm)

LS-CON-REF2 numunesi de LS-CON-REF1 ile benzer şekilde deney boyunca eğilme etkilerinin hakim olduğu bir davranış göstermiştir. Kesme kuvveti etkisi önemli bir hasara neden olmamıştır. Özellikle deneyin son adımlarında konsol kolon davranışına uymayan, basınç bölgesinde çatlak gelişimi meydana gelmiştir.

Numunenin, yatay yükveren ve aynı eksendeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 : LS-CON-REF2 numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

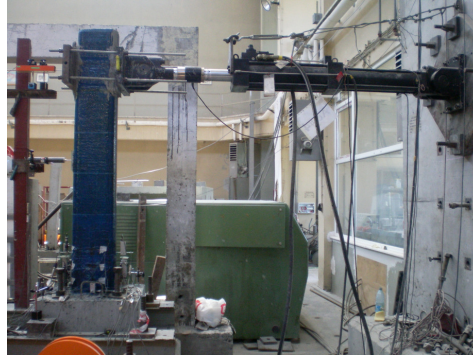
LS-CON-REF2 numunesinin davranışının yük ve yerdeğiştirmeye bağlı özeti ise Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : LS-CON-REF2 numunesi deney özeti

Öteleme oranı	δ (mm)	P (kN)
%0.1	1.65	3.40
-%0.1	-1.65	-3.40
%0.25	4.125	6.40
-%0.25	-4.125	-5.60
%0.5	8.25	9.20
-%0.5	-8.25	-8.50
%1	16.5	14.00
-%1	-16.5	-11.60
%2	33	14.40
-%2	-33	-11.10
%3	49.5	13.50
-%3	-49.5	-11.80
%4	66	13.10
-%4	-66	-11.50
%6	99	13.20
-%6	-99	-12.10
%8	132	14.40
-%8	-132	-12.80

5.4.3 LS-CON-Rebar numunesi

Deney, 29.07.2009 tarihinde beton 168-232 yaşları arasında ve silindirik beton basınç dayanımı 9.46 MPa iken yapılmıştır. Hazırlanan düzeneğin deney öncesi son hali Şekil 5.22’de görülmektedir.

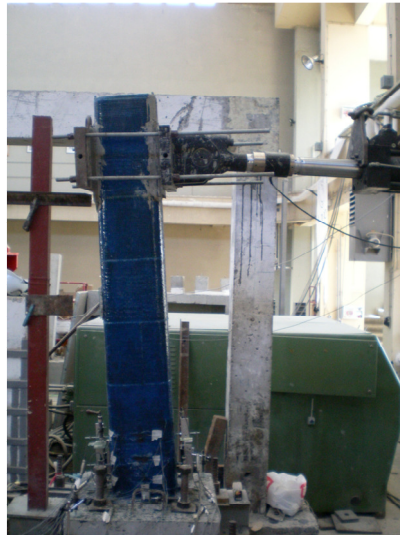


Şekil 5.22 : LS-CON-Rebar numunesinin deney başlangıcı

Deneyin ilk hedef yerdeğiştirmesi olan itmede %0.1 ve çekmede %0.1 öteleme oranında çatlak görölmemiştir. İlk olarak itmede %0.25 öteleme oranına ulaşıldığında kolon tabanında çekme bölgesinde eğilme çatlağı görölmüştür.

Bunun yanında %1 çekme, %2 itme ve %2 çekme aralığında tüm boyuna donatılar akmaya başlamıştır. Donatıların en büyük şekildeğiştirmesi ise 0.029 mertebelerine ulaşmıştır. Enine donatılarda ise akma gözlenmemiştir. Karbon lifli polimer dairesel çubuk donatıların en büyük şekildeğiştirmesi ise 0.0017 değerine çıkmıştır.

İtmede %1 öteleme oranına gelinene kadar kolon tabanı ile temel yüzeyi arasındaki ayrılma dışında bir deformasyon gözlenmemiştir. Ancak çekmede %1 öteleme oranına gidilirken numuneden şiddetli çıtırtılar duyulmuş ve bu çıtırtılardan sonra yükte ani düşme olmuştur. Bu noktada çekme bölgesindeki ankrajlardan bir tanesinde sıyrılma gözlenmiştir. Aynı şekilde itmede %2 öteleme oranına gidilirken de şiddetli çıtırtılar duyulmuş ve yükte ani düşme olmuştur. Çekme bölgesinde bir ankrajın daha sıyrıldığı gözlenmiştir. Bu aşamadan sonra kolonun her iki yüzünde de birer tane ankraj çalışmaya devam etmiştir. İtme ve çekme adımlarında yüksek öteleme oranlarına gidildikçe artan çekme kuvvetlerini tek başına karşılamaya çalışan ankraj liflerinde kopmalar meydana gelmiştir. İtmede %8 ve çekmede %8 öteleme oranlarına gelindiğinde çekme bölgesine denk gelen iki ankraj da tamamen kopmuştur (Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25).



Şekil 5.23 : LS-CON-Rebar numunesi %8 itme sonrası

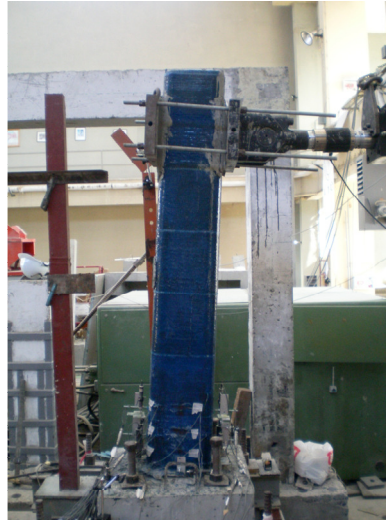


Şekil 5.24 : LS-CON-Rebar numunesi %8 itmede çekme bölgesi ankrajları



Şekil 5.25 : LS-CON-Rebar numunesi %8 çekmede çekme bölgesi ankrajları

Çekmede %8 öteleme oranından sonra numune üzerindeki yük boşaltılarak kalıcı deformasyonlar ölçülmüştür (Şekil 5.26). Numune üzerindeki yük sıfırlandığı anda kalıcı yerdeğiştirme -109 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.26 : LS-CON-Rebar numunesi deney sonrası ($P=0$, $\delta=-109$ mm)

LS-CON-Rebar numunesi %1 ve %2 öteleme oranı mertebesine kadar beklenen davranışı yapmış, donatı çeliği ile birlikte karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılarda da deformasyonlar oluşmuştur. Taşıdığı yük teorik kapasite mertebelerine ulaşamamış olsa da LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2 numunelerine göre %100'e yakın artmıştır. Fakat ankrajların sıyrılması numunenin bu davranışını devam ettirmesini engellemiş ve ileriki adımlarda taşıdığı yükün düşmesine neden olmuştur. Bununla birlikte ankrajların sıyrılmasının etkisiyle numunenin düzlem dışı yerdeğiştirmesi de 30 mm mertebelerine ulaşmıştır.

Deney süresince kolon üzerindeki karbon lifli polimer kumaş sargısından dolayı kolon yüzünde oluşabilecek eğilme çatlakları gözlenememiştir. Bu yüzden deney sonrası kolon yüzünde belirli bir bölge spiral yardımıyla kesilip açılarak çatlak kontrolü yapılmıştır. Yapılan kontrolde kolon yüzeyinde gözle görülür bir çatlığa rastlanmamıştır (Şekil 5.27). Bu da tüm hasarın kolon tabanında yoğunlaştığına işaret etmektedir.



Şekil 5.27 : LS-CON-Rebar numunesi deney sonrası çatlak kontrolü

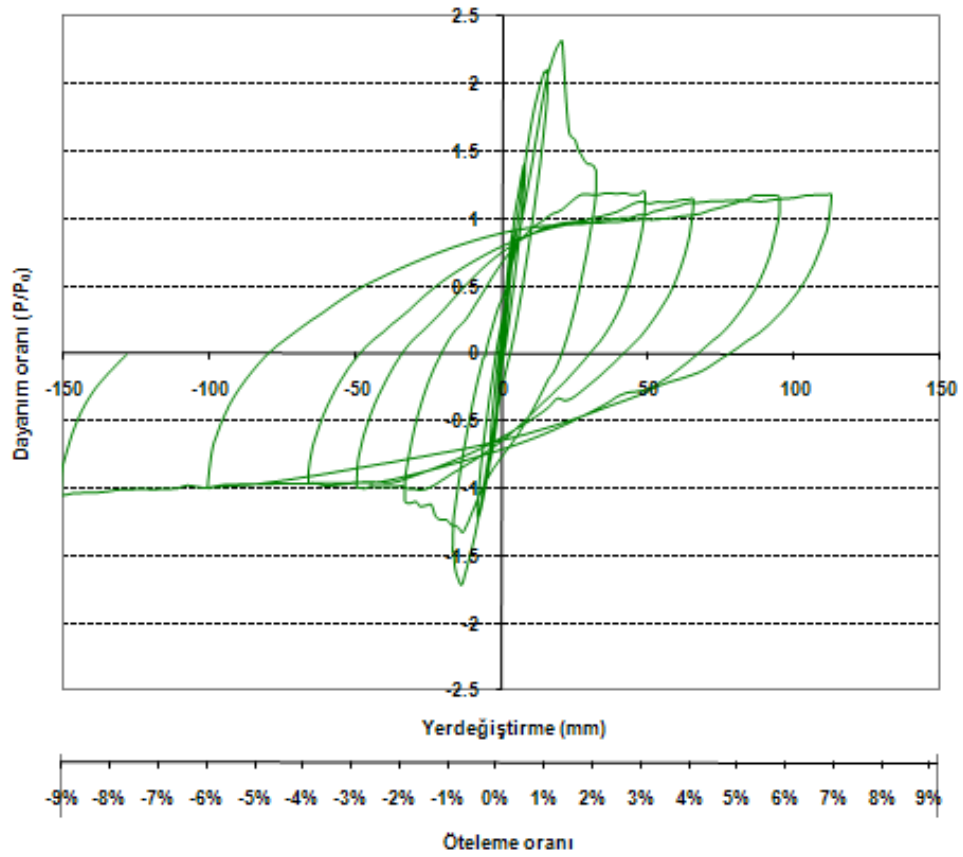
Deneyin gidişatına direk etki eden en önemli olay yapılan ankrajların davranışı olmuştur. Bu yüzden ankrajın sıyrılması ve ankrajın kopması durumlarının daha net görülebilmesi amacıyla temele ankre oldukları 20 cm'lik kısım kırıcı yardımıyla kırılıp açılmıştır. Yapılan kontrollerde ankrajlar arasında uygulama bakımından büyük farklar görülme de göçme şekilleri ve davranışları açısından

değerlendirildiklerinde özellikle sıyrılan ankrajlarda uygulama hatası olduğu söylenebilir (Şekil 5.28).



Şekil 5.28 : LS-CON-Rebar numunesi deney sonrası ankraj kontrolü

Numunenin, yatay yükveren ve aynı eksendeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 5.29’da verilmiştir.



Şekil 5.29 : LS-CON-Rebar numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

LS-CON-Rebar numunesinin davranışının yük ve yerdeğiştirmeye bağlı özeti ise Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : LS-CON-Rebar numunesi deney özeti

Öteleme oranı	δ (mm)	P (kN)
%0.1	1.65	6.30
-%0.1	-1.65	-5.60
%0.25	4.125	11.80
-%0.25	-4.125	-10.00
%0.5	8.25	18.00
-%0.5	-8.25	-15.50
%1	16.5	26.50
-%1	-16.5	-18.50
%2	33	16.80
-%2	-33	-13.50
%3	49.5	15.00
-%3	-49.5	-12.50
%4	66	14.00
-%4	-66	-12.00
%6	99	14.40
-%6	-99	-12.50
%8	132	14.80
-%8	-132	-13.20

Deney sonrası, karbon lifli polimer boyuna donatıların devre dışı kalana kadar yaptığı en büyük şekildeğiştirmeleri dikkate alarak yatay denge denklemi yeniden çözüldüğünde;

Tarafsız eksen yüksekliği $x = 41.7$ mm olarak bulunmuştur.

Bulunan tarafsız eksen yüksekliği kullanılarak yapılan kontrollerde;

Basınç donatısındaki birim uzama,

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \times \frac{x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{41.7 - 37}{41.7} = 0.00034$$

Donatıda akma birim uzama ve kısılması,

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{285}{200000} = 0.00143$$

Çekme donatısındaki birim uzama,

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \times \frac{h - x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{300 - 41.7 - 37}{41.7} = 0.01591$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpeff}' = \varepsilon_{frp}' - \varepsilon_{bi}' = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{x - d''}{x} \right) - \varepsilon_{bi}' = \left(0.003 \times \frac{41.7 - 12.5}{41.7} \right) - 0 = 0.00210$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frp} - \varepsilon_{bi} = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{d''' - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} = \left(0.003 \times \frac{287.5 - 41.7}{41.7} \right) - 0 = 0.01768$$

Lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif kopma şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpulteff} = \varepsilon_{frpult}^* \times C_E \times \kappa_m = 0.0017 \times 1 \times 1 = 0.0017 \text{ ise,}$$

$$\varepsilon_s' = 0.00034 < \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.01591 > \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.01591 > 0.005$$

$$\varepsilon_{frpeff}' = 0.00210 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.0017$$

$$\text{ise } \varepsilon_{frpeff}' = 0.0017$$

$$\varepsilon_{frpeff} = 0.01768 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.0017$$

$$\text{İse } \varepsilon_{frpeff} = 0.0017$$

olarak kabul edilir.

Güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi için,

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b = 9.43 \times 0.85 \times 41.7 \times 200 = 66871 \text{ N}$$

$$F_s' = \varepsilon_s \times E_s \times A_s' = 0.00034 \times 200000 \times 307.88 = 20936 \text{ N}$$

$$F_{frpeff}' = \varepsilon_{frpeff} \times E_{frp} \times A_{frp}' = 0.0017 \times 165000 \times 100.53 = 28199 \text{ N}$$

$$F_{frpeff} = \varepsilon_{frpeff} \times E_{frp} \times A_{frp} = 0.0017 \times 165000 \times 100.53 = 28199 \text{ N}$$

Hesaplandıktan sonra alt donatıya göre moment alırsak,

$$M_r = F_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_s \times (d - d') + F_{frpeff} \times (d - d'') + F_{frpeff} \times (d' - d'') \quad (5.1)$$

$$M_r = 66871 \times \left(263 - \frac{35.5}{2} \right) + 20936 \times (263 - 37) + 28199 \times (263 - 12.5) + 28199 \times (37 - 12.5) = 28873777 \text{ Nmm}$$

$$M_r = 28.87 \text{ kNm}$$

$$P_{ret} = \frac{M_{ret}}{h} = \frac{28.87}{1.65} = 17.5 \text{ kN}$$

5.4.4 LS-CON-Laminate numunesi

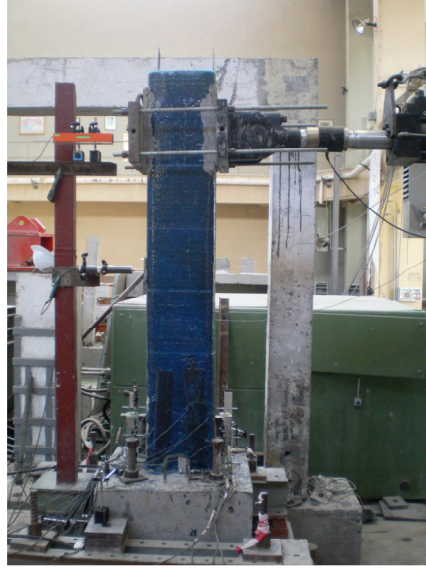
LS-CON-Rebar numunesinin ankrajdan göçmesinin ardından ankraj detayı aynı olan LS-CON-Laminate numunesinin de benzer şekilde ankrajdan göçme olasılığı artmıştır. Daha önce yapılan ankrajlarda işçilikten dolayı yetersizlikler olabileceğinden sargılamanın üzerine gelecek şekilde ilave 4 adet ankraj daha yapılmasına karar verilmiştir. Bu ankrajların mümkün olduğu kadar önceki ankrajlara yakın bölgede olması planlanmıştır. Burada amaç ankrajların en büyük çekme kuvvetinin olduğu bölgeye yakın olması ve var olan ankrajlara en büyük katkıyı verebilmesidir.

Ancak boyuna güçlendirme yapılan kolon yüzlerine yapılacak ilave ankraj uygulaması o bölgedeki mevcut ankrajlara zarar verebileceğinden dolayı kolon köşe noktalarına yakın yan yüzlere yapılmasına karar verilmiştir. Ankraj detayı olarak da mevcut ankrajlarla aynı şekilde yapılmasına karar verilmiştir (Şekil 5.30).



Şekil 5.30 : İlave ankraj yapılması

İlave ankrajları yapılan LS-CON-Laminate numunesinin deneyi, 06.08.2009 tarihinde beton 168-232 yaşları arasında ve silindir beton basınç dayanımı 9.46 MPa iken yapılmıştır. Hazırlanan düzeneğin deney öncesi son hali Şekil 5.31’de görülmektedir.



Şekil 5.31 : LS-CON-Laminate numunesinin deney başlangıcı

Deneyin ilk hedef yerdeğiştirmesi olan itmede %0.1 ve çekmede %0.1 öteleme oranında LS-CON-Rebar numunesine benzer şekilde çatlak gözlenmemiştir. İlk olarak itmede %0.25 öteleme oranına ulaşıldığında kolon tabanında çekme bölgesinde eğilme çatlağı görölmüştür.

Bunun yanında %2 itme, %2 çekme, %3 itme ve %3 çekme aralığında tüm boyuna donatılar akmaya başlamıştır. Donatıların en büyük şekildeğiştirmesi ise 0.030 mertebelerine ulaşmıştır. Enine donatılarda ise akma gözlenmemiştir. Karbon lifli polimer şerit plakaların en büyük şekildeğiştirmesi ise 0.0011 değerine çıkmıştır.

Çekmede %1 öteleme oranına gelinene kadar kolon tabanı ile temel yüzeyi arasındaki ayrılma dışında bir deformasyon gözlenmemiştir. Ancak itmede %2 öteleme oranına gidilirken numuneden çıtırtılar gelmiş ve bu çıtırtılardan sonra yükte küçük ve ani bir düşme olmuştur. Çekmede %2 öteleme oranına gidildiğinde ise benzer çıtırtılar devam etmiştir. Bu durum itme ve çekme adımlarında ankrajların sıyrılmaya başladığını göstermiştir. Ancak LS-CON-Rebar numunesinin aksine bu sıyrılma, yan yüzlere yapılan ilave ankrajlarında katkısıyla numunenin sünek davranışını daha az etkilemiştir.

İtme ve çekme adımlarında yüksek öteleme oranlarına gidildikçe artan çekme kuvvetlerinin etkisiyle itmede ve çekmede %8 öteleme oranlarına gelindiğinde çekme bölgesine denk gelen karşılıklı iki ankraj kolon tabanından kopmuştur. Yan

yüzlere yapılan ilave ankrajlarda ise kopma meydana gelmemiştir. (Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35).



Şekil 5.32 : LS-CON-Laminate numunesi %8 itmede çekme bölgesi ankrajları



Şekil 5.33 : LS-CON-Laminate numunesi %8 itmede ilave ankrajlar

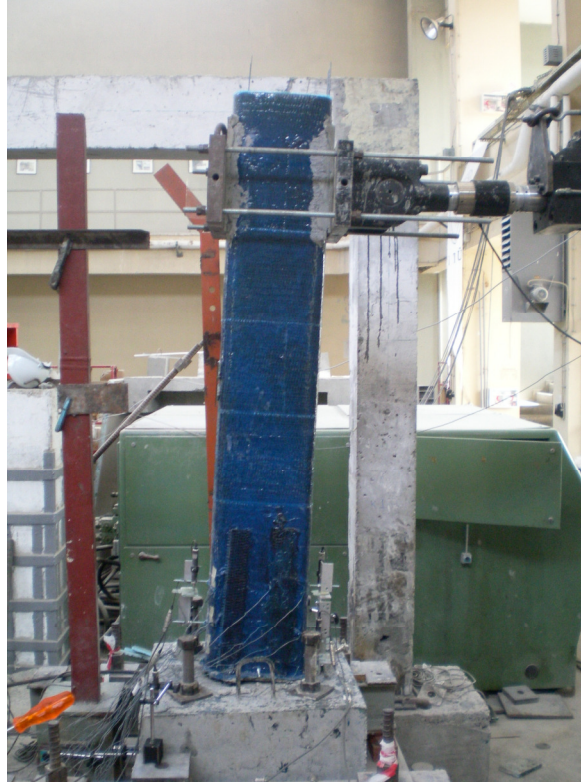


Şekil 5.34 : LS-CON-Laminate numunesi %8 çekmede çekme bölgesi ankrajları



Şekil 5.35 : LS-CON-Laminate %8 çekmede ilave ankrajlar

Çekmede %8 öteleme oranından sonra numune üzerindeki yük boşaltılarak kalıcı deformasyonlar ölçülmüştür (Şekil 5.36). Numune üzerindeki yük sıfırlandığı anda kalıcı yerdeğiştirme -107 mm olarak ölçülmüştür.

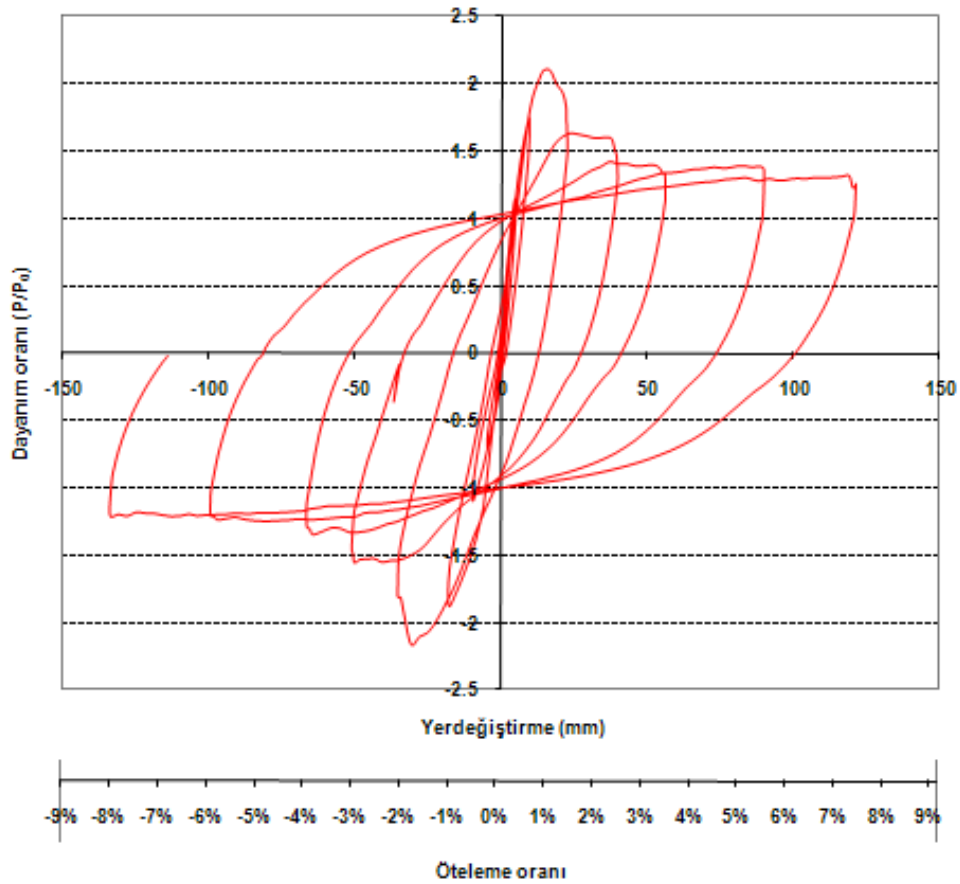


Şekil 5.36 : LS-CON-Laminate numunesi deney sonrası ($P=0$, $\delta=-107$ mm)

LS-CON-Laminate numunesinde bazı ankrajlar sıyrılmasına rağmen LS-CON-Rebar numunesine oranla çevrimler arasındaki yük düşüşleri daha dengeli ve daha sünek olmuştur.

Taşıdığı yük teorik kapasite mertebelerine ulaşamamış olsa da LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2 numunelerine göre %100'e yakın artmıştır. Fakat ankrajların sıyrılması numunenin bu davranışını devam ettirmesini engellemiş ve ileri adımlarda taşıdığı yükün düşmesine neden olmuştur. Bunlara rağmen eğilme kapasitesinde referans numunelerine oranla %25 mertebelerinde artış olmuştur. Yan yüzlere yapılan ilave ankrajlarında katkısıyla LS-CON-Rebar numunesinde görülen büyük düzlem dışı yerdeğiştirmeler kısıtlanmıştır.

Numunenin, yatay yükveren ve aynı eksendeki yatay yerdeğiştirmeölçerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi ise Şekil 5.37'de verilmiştir.



Şekil 5.37 : LS-CON-Laminate numunesine ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

LS-CON-Laminate numunesinin davranışının yük ve yerdeğiştirmeye bağlı özeti ise Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5 : LS-CON-Laminate numunesi deney özeti

Öteleme oranı	δ (mm)	P (kN)
%0.1	1.65	5.10
-%0.1	-1.65	-4.70
%0.25	4.125	9.50
-%0.25	-4.125	-8.80
%0.5	8.25	14.80
-%0.5	-8.25	-13.70
%1	16.5	22.00
-%1	-16.5	-23.50
%2	33	21.50
-%2	-33	-21.80
%3	49.5	18.00
-%3	-49.5	-18.20
%4	66	17.00
-%4	-66	-15.70
%6	99	16.20
-%6	-99	-15.00
%8	132	16.00
-%8	-132	-14.50

Deney sonrası, karbon lifli polimer boyuna donatıların devre dışı kalana kadar yaptığı en büyük şekildeğiştirmeleri dikkate alarak yatay denge denklemi yeniden çözüldüğünde;

Tarafsız eksen yüksekliği $x = 41.7$ mm olarak bulunmuştur.

Bulunan tarafsız eksen yüksekliği kullanılarak yapılan kontrollerde;

Basınç donatısındaki birim uzama,

$$\epsilon_s' = \epsilon_{cu} \times \frac{x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{41.7 - 37}{41.7} = 0.00034$$

Donatıda akma birim uzama ve kısalması,

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{285}{200000} = 0.00143$$

Çekme donatısındaki birim uzama,

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \times \frac{h - x - d'}{x} = 0.003 \times \frac{300 - 41.7 - 37}{41.7} = 0.01591$$

Basınç bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpeff}' = \varepsilon_{frp}' - \varepsilon_{bi}' = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{x - d''}{x} \right) - \varepsilon_{bi}' = \left(0.003 \times \frac{41.7 - 17.8}{41.7} \right) - 0 = 0.00172$$

Çekme bölgesindeki lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpeff} = \varepsilon_{frp} - \varepsilon_{bi} = \left(\varepsilon_{cu} \times \frac{d''' - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} = \left(0.003 \times \frac{282.2 - 41.7}{41.7} \right) - 0 = 0.01730$$

Lifli polimer dairesel çubuk donatı efektif kopma şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_{frpulteff} = \varepsilon_{frpult}^* \times C_E \times \kappa_m = 0.0017 \times 1 \times 1 = 0.0017 \text{ ise,}$$

$$\varepsilon_s' = 0.00034 < \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.01591 > \varepsilon_y = 0.00143$$

$$\varepsilon_s = 0.01591 > 0.005$$

$$\varepsilon_{frpeff}' = 0.00210 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.0017$$

$$\text{ise } \varepsilon_{frpeff}' = 0.0017$$

$$\varepsilon_{frpeff} = 0.01768 \leq \varepsilon_{frpulteff} = 0.0017$$

$$\text{İse } \varepsilon_{frpeff} = 0.0017$$

olarak kabul edilir.

Güçlendirilmiş kesitin moment kapasitesi için,

$$F_c = f_c \times a \times b = f_c \times (k_1 \times x) \times b = 9.43 \times 0.85 \times 41.7 \times 200 = 66871 \text{ N}$$

$$F_s' = \varepsilon_s \times E_s \times A_s' = 0.00034 \times 200000 \times 307.88 = 20936 \text{ N}$$

$$F_{f_{rpeff}}' = \varepsilon_{f_{rpeff}} \times E_{f_{rp}} \times A_{f_{rp}}' = 0.0017 \times 165000 \times 100.8 = 28274 \text{ N}$$

$$F_{f_{rpeff}} = \varepsilon_{f_{rpeff}} \times E_{f_{rp}} \times A_{f_{rp}} = 0.0017 \times 165000 \times 100.8 = 28274 \text{ N}$$

Hesaplandıktan sonra alt donatıya göre moment alırsak,

$$M_r = F_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) + F_s \times (d - d') + F_{f_{rpeff}} \times (d - d'') + F_{f_{rpeff}} \times (d' - d'') \quad (5.2)$$

$$M_r = 66871 \times \left(263 - \frac{35.5}{2} \right) + 20936 \times (263 - 37) + 28274 \times (263 - 17.8) + \\ + 28274 \times (37 - 17.8) = 28484139 \text{ Nmm}$$

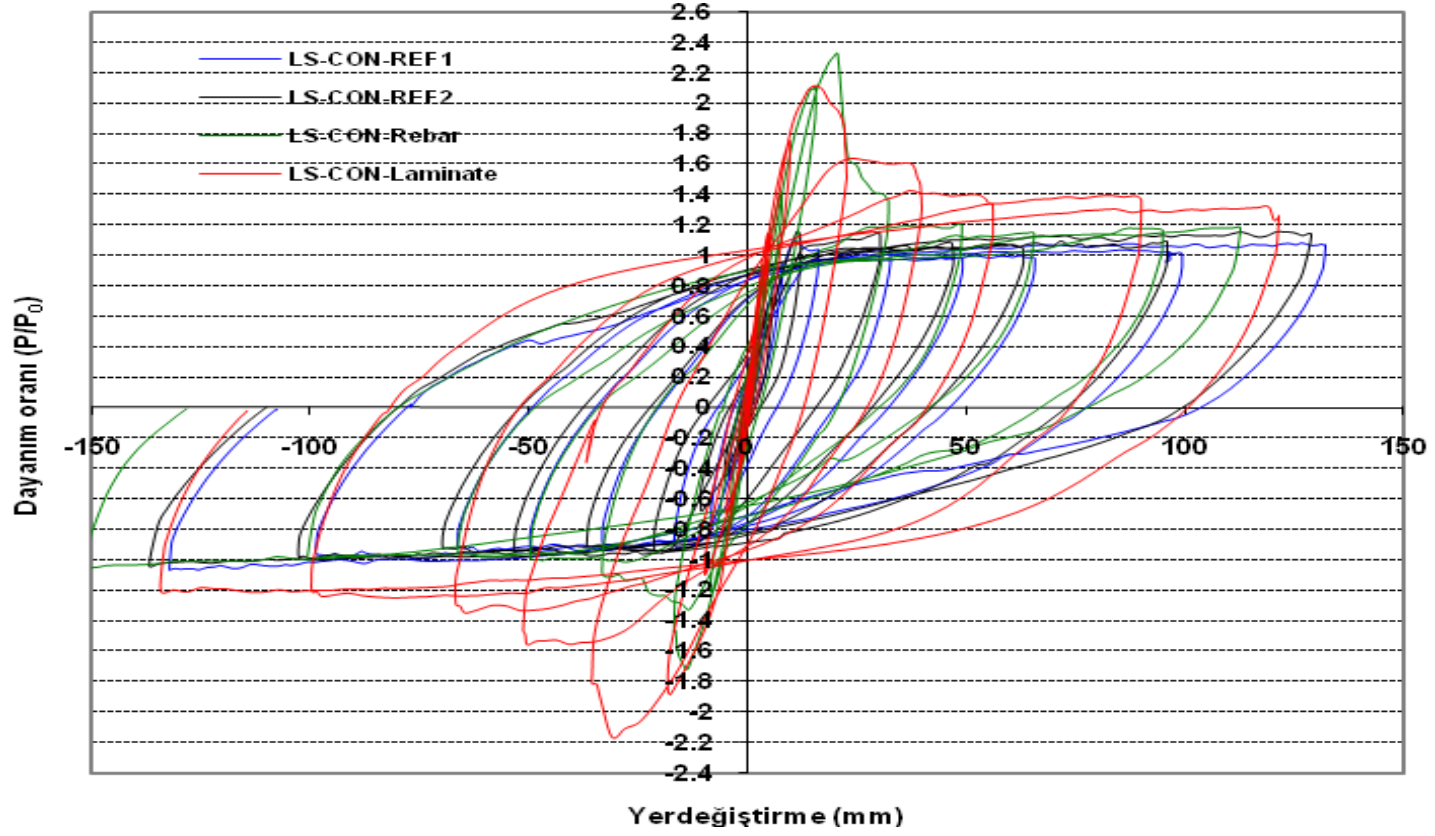
$$M_r = 28.48 \text{ kNm}$$

$$P_{ret} = \frac{M_{ret}}{h} = \frac{28.48}{1.65} = 17.26 \text{ kN}$$

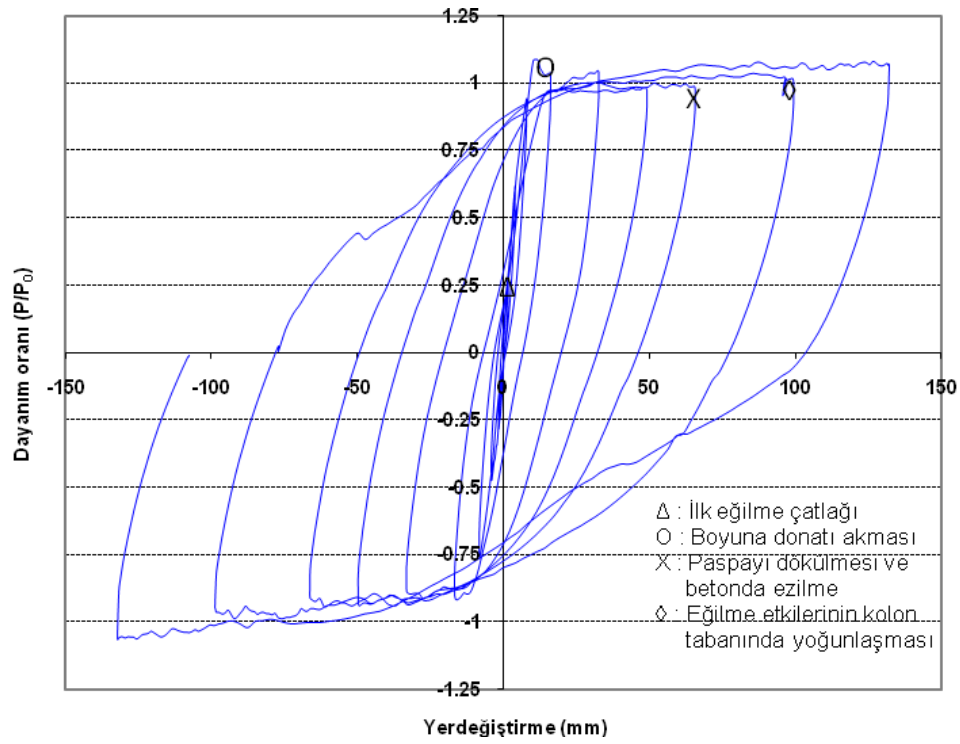
5.5 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

5.5.1 Yük-yerdeğiştirme ilişkisi

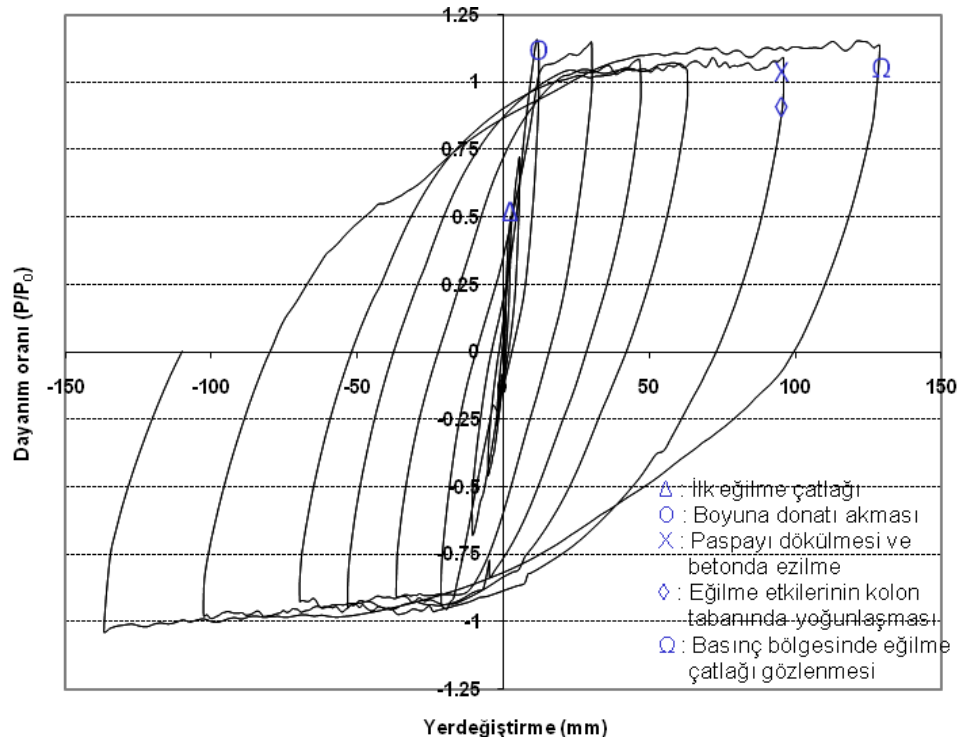
Yatay yükverenin yükleme eksenini hizasına yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerden alınan verilerden temel dönmesi ve temel kayması etkileri çıkarılarak elde edilen yerdeğiştirme değerlerine hangi yüklerde ulaşıldığını gösteren eğriler Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de verilmiştir. Bu grafikte yük eksenini yerine P/P_0 kullanılmıştır. P/P_0 kullanılarak numunelerde istenilen ile üretilen arasındaki farkı görebilmek amaçlanmıştır.



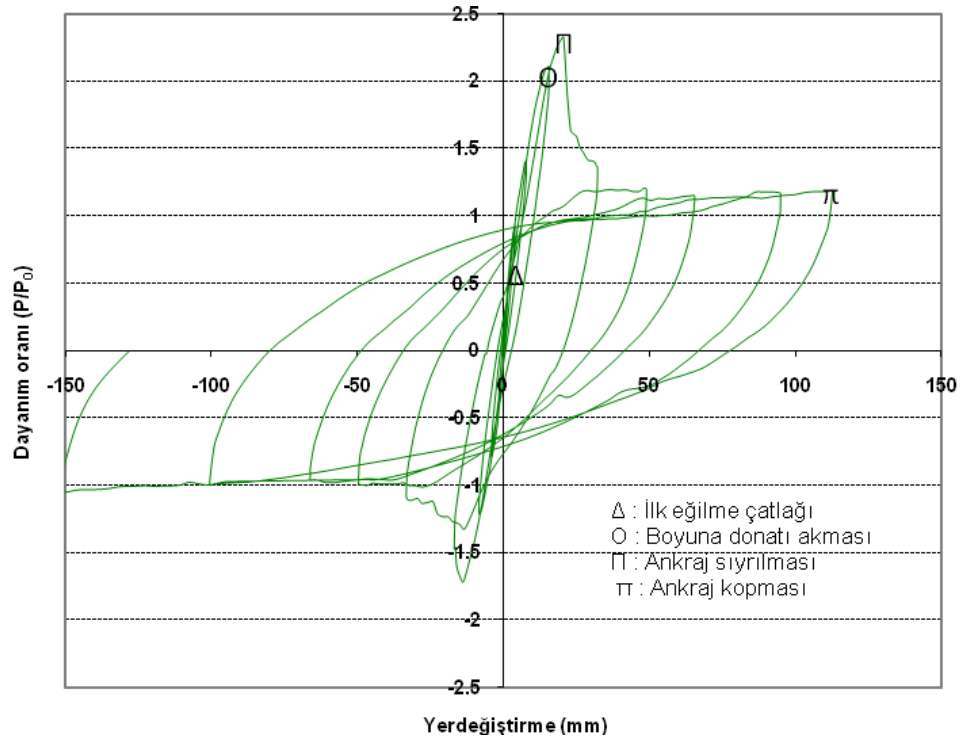
Şekil 5.38 : Numunelerin dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi



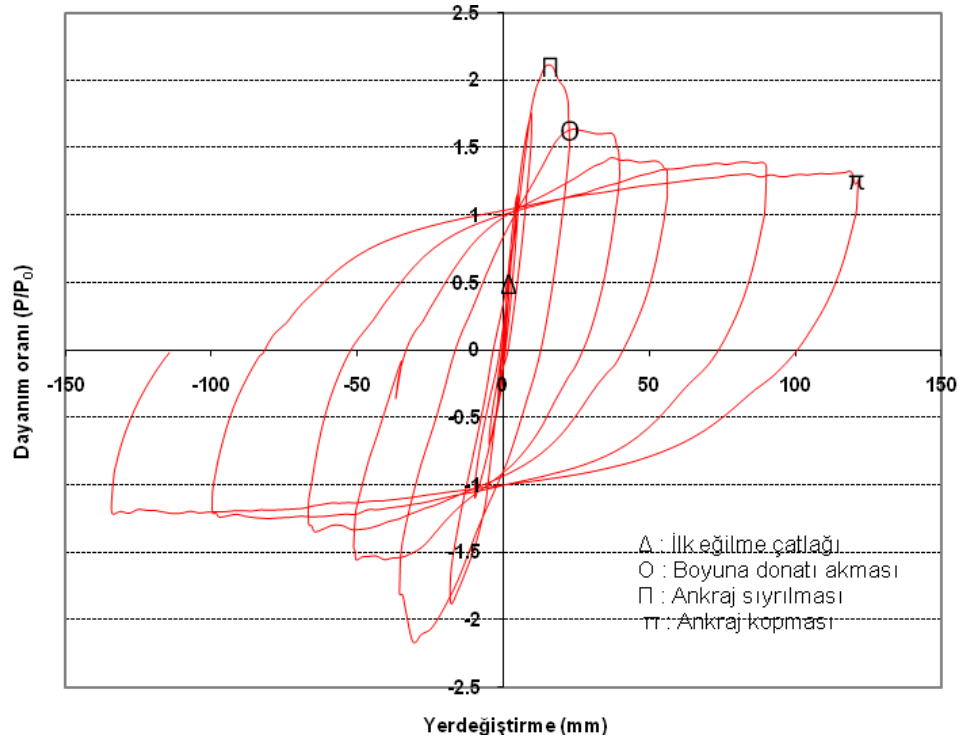
Şekil 5.39 : LS-CON-REF1 numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 5.40 : LS-CON-REF2 numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi



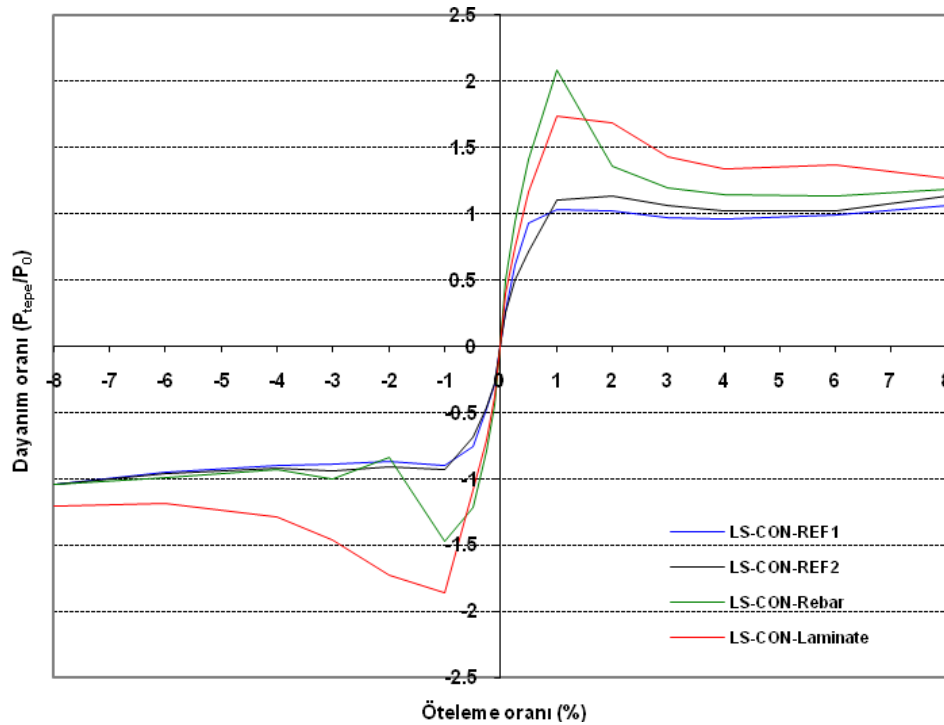
Şekil 5.41 : LS-CON-Rebar numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 5.42 : LS-CON-Laminate numunesi dayanım oranı-yerdeğiştirme ilişkisi

LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2 numuneleri grafikten de görüldüğü üzere teorik yük kapasitesine ulaşmıştır. LS-CON-Rebar numunesi %1 öteleme oranına kadar iyi bir performans göstermiştir. Fakat ankrajların bazılarının sıyırılması sonucu taşıdığı yükte düşme olmuş ve bu noktadan sonra yük taşıma kapasitesi LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2 numuneleri seviyesinde seyretmiştir. LS-CON-Laminate numunesi ise LS-CON-Rebar numunesine oranla daha sünek bir davranış göstermiştir. %2 öteleme oranında sıyrılmaya başlayan ankrajların etkisiyle boyuna güçlendirme elemanlarının eğilme kapasitesine katkısı azalmıştır. Ancak yan yüzlere yapılan ilave ankrajların etkisi ile sistem diğer numunelere göre rijitliğini daha fazla koruyarak deney genelindeki yük taşıma kapasitesini %25 oranında arttırmıştır.

Yük-yerdeğiştirme grafiğindeki öteleme oranlarına denk gelen tepe yük değerlerinin birleştirilmesi ile elde edilen zarf eğrisi de Şekil 5.43’de verilmiştir.



Şekil 5.43 : Numunelerin zarf eğrisi

Yük-yerdeğiştirme grafiğindeki öteleme oranlarına denk gelen tepe yük değerleri de Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Numunelerin öteleme oranlarında ulaştığı tepe yükleri

Öteleme oranı	P/P ₀			
	LS-CON-REF1	LS-CON-REF2	LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
%8	1.062	1.135	1.182	1.265
%6	0.996	1.027	1.133	1.365
%4	0.964	1.021	1.145	1.344
%3	0.968	1.067	1.198	1.427
%2	1.019	1.139	1.363	1.689
%1	1.038	1.107	2.082	1.737
%0.5	0.933	0.718	1.409	1.167
%0.25	0.617	0.502	0.940	0.750
%0.1	0.262	0.260	0.505	0.397
-%0.1	-0.283	-0.275	-0.436	-0.381
-%0.25	-0.472	-0.460	-0.788	-0.700
-%0.5	-0.760	-0.680	-1.217	-1.082
-%1	-0.903	-0.932	-1.477	-1.863
-%2	-0.873	-0.905	-0.838	-1.731
-%3	-0.893	-0.939	-0.998	-1.461
-%4	-0.902	-0.918	-0.930	-1.291
-%6	-0.945	-0.965	-0.996	-1.183
-%8	-1.044	-1.034	-1.040	-1.202

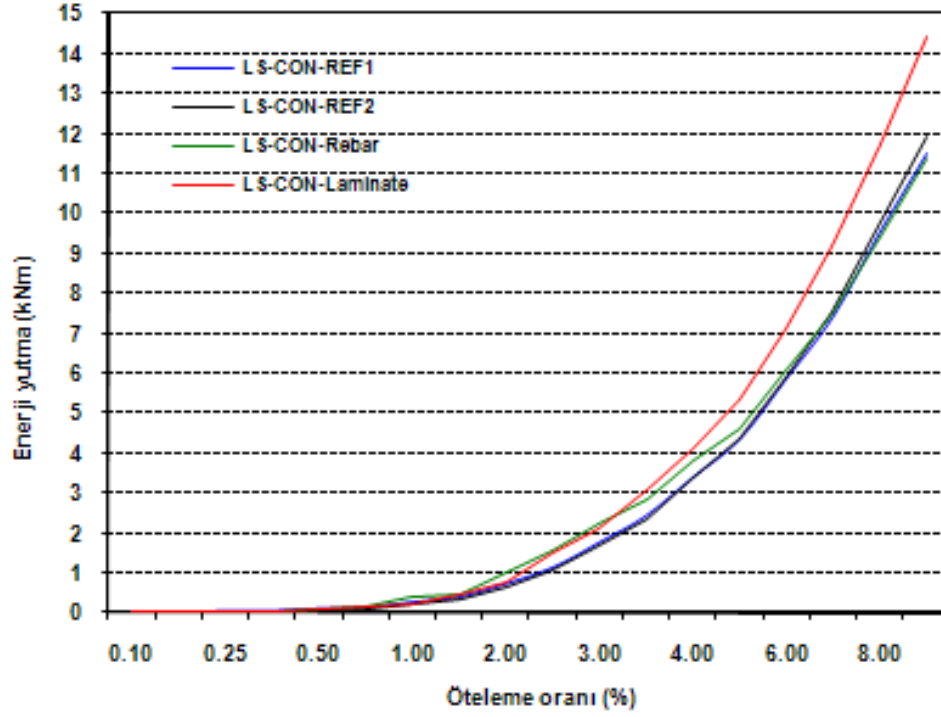
5.5.2 Enerji yutma kapasitesi

Yük-yerdeğiştirme eğrisi üzerinde her iki adım arasında kalan bölgenin alanı hesaplanarak o adımdaki enerji yutma miktarındaki artış bulunmuştur. Bu şekilde her adım için hesaplanan enerji yutma miktarlarının deneyin ilk adımından son adımına kadar kümülatifi alınarak istenilen öteleme adımına denk gelen enerji yutma kapasitesi hesaplanmıştır. Her öteleme adımı için hesaplanan kümülatif enerji yutması Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Numunelerin öteleme oranlarında ulaştığı enerji yutma kapasiteleri

Öteleme oranı	Enerji yutma kapasitesi (kNm)			
	LS-CON-REF1	LS-CON-REF2	LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
%0.1	0.003	0.002	0.006	0.003
-%0.1	0.006	0.006	0.007	0.007
%0.25	0.023	0.014	0.034	0.018
-%0.25	0.028	0.032	0.043	0.039
%0.5	0.083	0.058	0.119	0.068
-%0.5	0.099	0.105	0.146	0.128
%1	0.243	0.197	0.370	0.210
-%1	0.372	0.318	0.483	0.429
%2	0.702	0.649	1.029	0.736
-%2	1.105	1.037	1.529	1.496
%3	1.740	1.675	2.234	2.133
-%3	2.407	2.357	2.854	3.104
%4	3.372	3.355	3.809	4.126
-%4	4.318	4.344	4.619	5.349
%6	5.846	5.903	6.076	7.133
-%6	7.403	7.554	7.469	9.164
%8	9.520	9.760	9.429	11.717
-%8	11.478	11.891	11.366	14.440

Herbir öteleme adımına karşı gelen enerji yutma miktarları ile oluşturulan enerji yutma kapasitesi-öteleme oranı eğrisi Şekil 5.44’de verilmiştir.



Şekil 5.44 : Numunelerin enerji yutma kapasitesi

Özellikle güçlendirilen numunelerde ilerleyen öteleme oranlarında karbon lifli polimer malzemenin katkısı ile sünekliğin artması ve böylece enerji yutma kapasitesinin artması beklenmiştir. Daha büyük öteleme oranlarına gidildikçe karbon lifli polimer malzemenin boyuna donatılara katkısı sıyrılan ankrajların etkisiyle net bir şekilde gözlenememiştir.

LS-CON-Laminate numunesinde yük taşıma kapasitesindeki %25'lik artış deney sonunda enerji yutma kapasitesinin güçlendirilmemiş LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2 numunelerine göre daha fazla olmasını sağlamıştır.

LS-CON-Rebar numunesinin enerji yutma miktarı ise çekmede %4 öteleme oranından sonra güçlendirilmemiş numuneler LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2 ile dengelenmiş ve deney sonuna kadar bu şekilde devam etmiştir.

Özellikle güçlendirilen numunelerde 2 kat karbon lifli polimer sargılamadan dolayı kolon üst bölgesinde eğilme çatlağı oluşmaması kolon tabanındaki eğilmeden kaynaklanan gerilmeleri daha da arttırmıştır. Konsol kolon davranışında en kritik bölge olan kolon tabanında oluşan gerilmelerin artması ankrajların daha fazla zorlanmasına neden olmuştur.

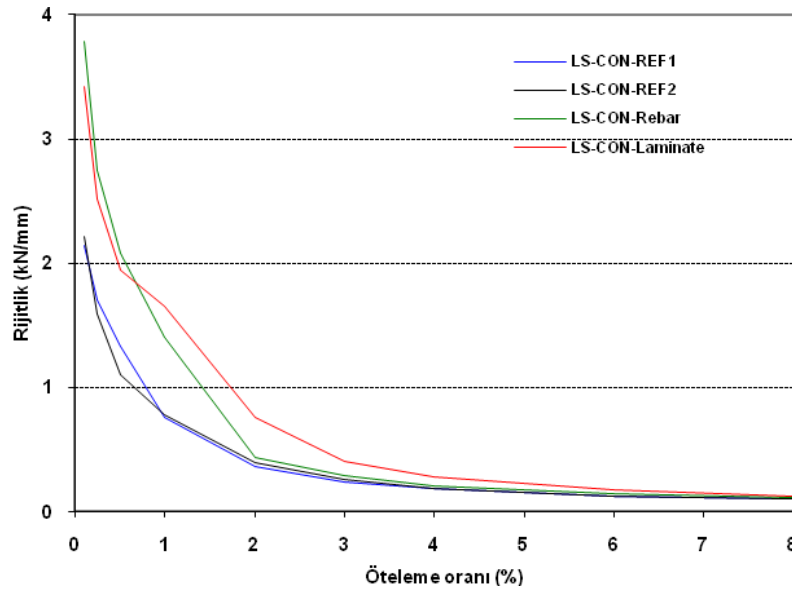
5.5.3 Rijitlik

Yük-yerdeğiştirme eğrisindeki herbir çevrim için tepe noktasındaki toplam yük toplam yerdeğiştirme oranı o çevrime ait rijitliği vermektedir. Bu şekilde hesaplanan herbir çevrime ait rijitlik değeri Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Numunelerin öteleme adımlarındaki rijitlikleri

Öteleme oranı	Rijitlik (kN/mm)			
	LS-CON-REF1	LS-CON-REF2	LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
%0.1	2.139	2.213	3.786	3.421
%0.25	1.707	1.593	2.744	2.515
%0.5	1.335	1.106	2.076	1.947
%1	0.758	0.782	1.405	1.655
%2	0.368	0.390	0.436	0.756
%3	0.241	0.256	0.285	0.407
%4	0.181	0.187	0.202	0.275
%6	0.126	0.128	0.139	0.172
%8	0.102	0.105	0.108	0.124

Çevrim bazında elde edilen rijitlik değeriğine bağı olarak numunelerin rijitlik değışimini gösteren eğri Şekil 5.45’de verilmiştir.



Şekil 5.45 : Numunelerin rijitlik değışimi

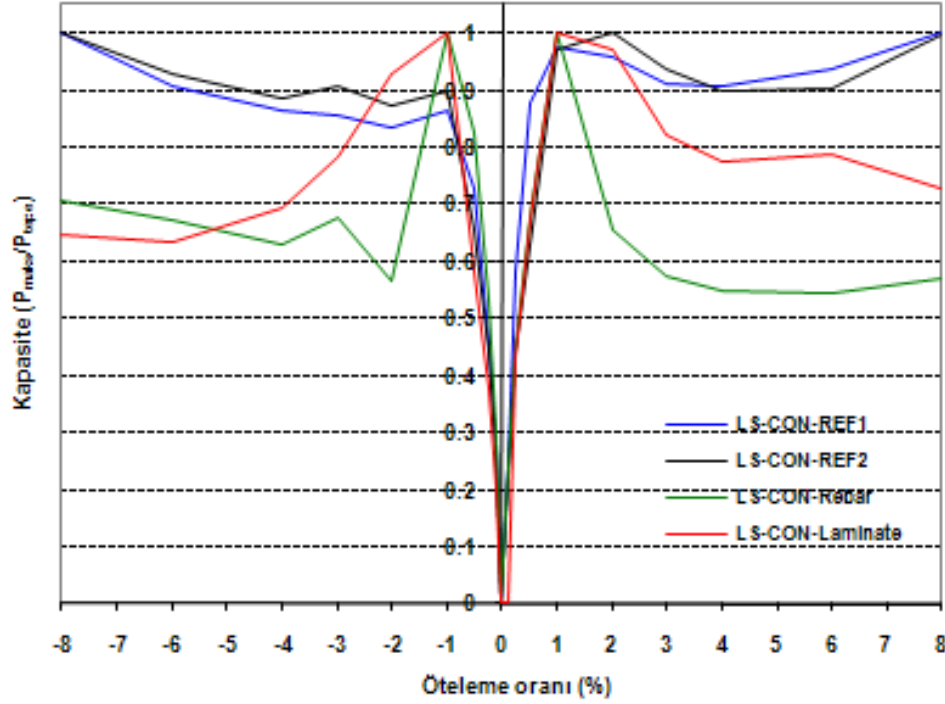
Boyuna güçlendirme elemanları olan karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ve şerit plakalar ve bunların temele yapılan ankrajlarının kolon rijitliğine sağlayacağı katkının yanında yapılan çift kat sargılamının etkisiyle dayanımı yükselen betonunda sistem rijitliğine katkısı olmuştur. Fakat sargılamının bu etkisi kolon üst bölgesinde eğilme çatlaklarının oluşumuna izin vermediğinden dolayı kolon tabanındaki eğilme etkilerinin yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Özellikle deneyin ilk adımlarında, güçlendirilen LS-CON-Laminate ve LS-CON-Rebar numuneleri güçlendirilmeyen numunelere göre daha rijit davranmışlardır. Aynı yerdeğiştirme adımlarına gidildiğinde güçlendirilen numuneler güçlendirilmeyen numunelerin 1.5 katı rijitliğe ulaşmışlardır.

Ancak deneyin ilerleyen adımlarında sıyrılan ankrajlarla karbon lifli polimer malzemenin katkısı ortadan kalkmış, bu aşamadan sonra kolon tabanında artan gerilmeler kolon tabanının temel yüzeyinden tamamen ayrılması ve kopan ankrajlarla güçlendirilen kolonların rijitliği LS-CON-REF1 ve LS-CON-REF2 seviyesine düşmüştür. Ama rijitliğin dayanım öncesi önemli bir davranış özelliği olduğu düşünülürse, kullanılan yöntemin elastik bölgede rijitliği arttırmada etkili olduğu ve bu bölgedeki yükler altında yerdeğiştirmeleri kısıtlamada etkili olduğu söylenebilir.

5.5.4 Kapasite ve dayanım tükenmesi

Deney boyunca tüm itme ve çekme adımlarının sonunda ulaşılan en büyük yük numunenin kapasitesini gösterir. Fakat ulaşılan en büyük yükten daha önemlisi yerdeğiştirme adımları arasındaki yük değişimlerinin dengeli olmasıdır. Genel olarak numune teorikte hesaplanan kapasiteye ulaştıktan sonra deneyin ilerleyen adımlarında yani daha büyük yerdeğiştirmelerde kapasitesini korumalı veya ani ve büyük düşüşler yaşamamalıdır. Bu durum her bir öteleme adımı için olduğu kadar deney geneline de yansımalıdır. Bu açıdan numunelerin hangi öteleme oranında en büyük yüke ulaştığını ve bu yüke oranla kapasitesindeki değişimi gösteren eğri Şekil 5.46'da verilmiştir.



Şekil 5.46 : Numunelerin kapasite-öteleme oranı ilişkisi

Grafikte de görüldüğü üzere LS-CON-REF1 numunesi kapasiteye itmede ve çekmede %8 öteleme oranında ulaşmıştır.

LS-CON REF2 numunesinde ise itmede %2 öteleme oranında, çekmede ise %8 öteleme oranında kapasiteye ulaşılmıştır.

LS-CON-Rebar numunesinde itmede ve çekmede %1 öteleme oranında kapasiteye ulaşılmıştır.

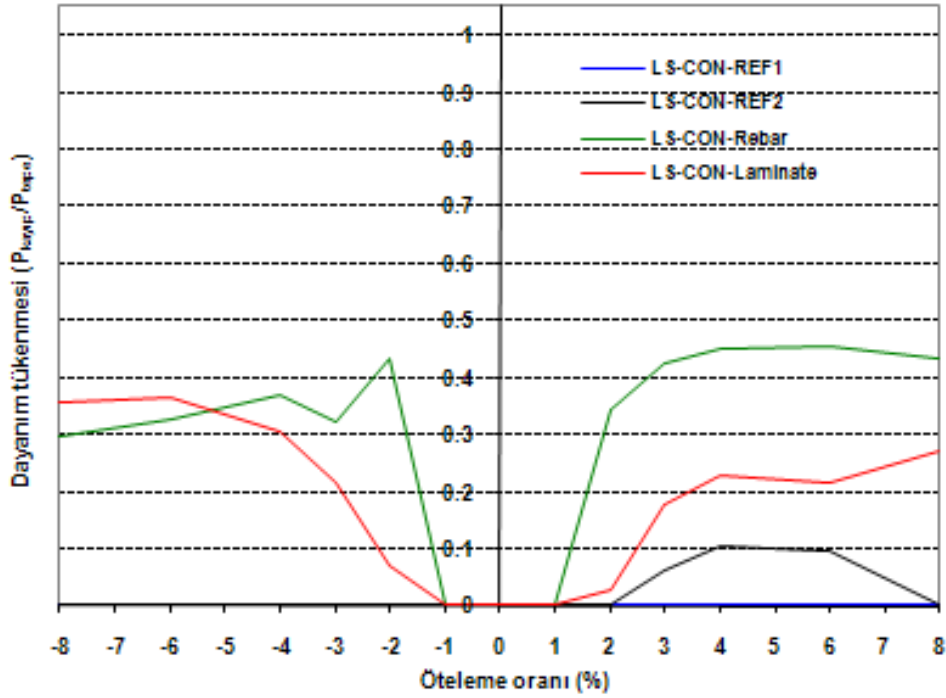
LS-CON-Laminate numunesinde de itmede çekmede %1 öteleme oranında kapasiteye ulaşılmıştır.

Ancak grafiğe bakıldığında LS-CON-Rebar numunesinin en büyük yüke ulaştığı %1 yerdeğiştirmeden sonra %50 oranında kapasitesinde azalma olmuştur. LS-CON-Laminate numunesinde ise bu azalma %25 oranında olmuştur.

Özellikle güçlendirilen numunelerde sıyrılan ankrajların yük taşıyamaması sonucu yükte düşme meydana gelmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi LS-CON-Laminate numunesinde bu düşmenin daha az olmasının nedeni olarak LS-CON-Rebar

numunesine göre daha iyi ankraj uygulaması yapılması ve yan yüzlere yapılan yardımcı ankrajlar gösterilebilir.

Dayanım tükenmesi içinse numunenin taşıdığı yükün azaldığı durumlar öteleme adımları bazında değerlendirilmiştir (Şekil 5.47).



Şekil 5.47 : Numunelerin dayanım tükenmesi-öteleme oranı ilişkisi

LS-CON-REF1 numunesi en büyük yüke son adımda ulaştığı için dayanım tükenmesi gözlenmemiştir.

LS-CON-REF2 numunesi için çekmede benzer durum söz konusuysen, itmede %2 öteleme oranından sonra %10 kadar dayanım kaybı yaşayıp tekrar en büyük yüke yaklaşmıştır.

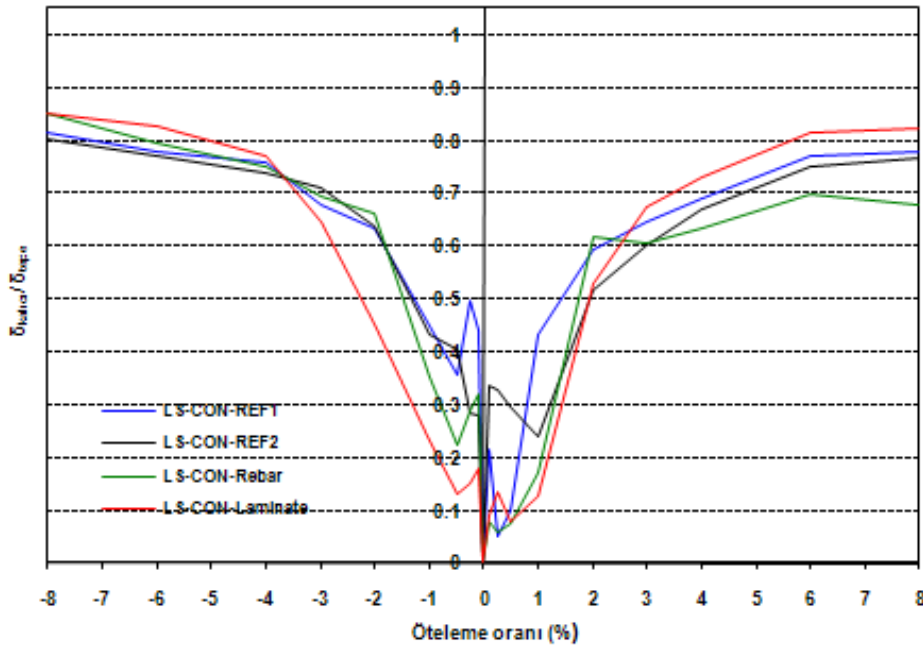
LS-CON-Rebar numunesi, itmede %1 öteleme oranından sonra deney sonuna kadar %45 dayanım kaybı yaşamıştır. Benzer şekilde çekmede de %1 öteleme oranından sonra %45 dayanım kaybına ulaşmış fakat ilerleyen adımlarda bu oran %30'a kadar düşmüştür.

LS-CON-Laminate numunesinde itmede %1 öteleme oranından sonra deney sonuna kadar %30 oranında dayanım kaybı yaşanmıştır. Çekmede ise %1 öteleme oranından sonra deney sonuna kadar %35 oranında dayanım kaybı yaşanmıştır.

Bu durumun en büyük nedeni ankrajların davranışı ve buna bağlı olarak boyuna güçlendirme elemanlarının dayanıma olan katkısının azalmasıdır. Buna dayanarak güçlendirilmiş elemanlarda sünekliğin, referans olanlara oranla azaldığı söylenebilir.

5.5.5 Kalıcı yerdeğiştirme

Deney boyunca tüm yerdeğiştirme adımlarına gidildikten sonra geri dönüşlerde numune üzerindeki yükün sıfırlandığı andaki yerdeğiştirmelerin oluşturduğu kalıcı yerdeğiştirme ile öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.48’de verilmiştir.



Şekil 5.48 : Numunelerin kalıcı hasar-öteleme oranı ilişkisi

Genel olarak öteleme oranı arttıkça numuneler üzerindeki kalıcı yerdeğiştirmelerin de arttığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak kolonların küçük yerdeğiştirmelerde elastik davranış kabiliyetinin yüksek olmasıdır. Fakat daha büyük öteleme oranlarına gidildikçe elastik davranış bölgesinden çıkılarak plastik şekildeğiştirmeler artmaya başlamaktadır.

Deney boyunca tüm yerdeğiştirme adımlarındaki kalıcı hasar miktarları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Numunlerde oluşan kalıcı hasarlar

Öteleme oranı	Kalıcı hasar			
	LS-CON-REF1	LS-CON-REF2	LS-CON-Rebar	LS-CON-Laminate
%8	0.779	0.766	0.677	0.825
%6	0.769	0.751	0.697	0.814
%4	0.688	0.669	0.633	0.731
%3	0.645	0.603	0.607	0.675
%2	0.593	0.516	0.616	0.528
%1	0.433	0.240	0.170	0.126
%0.5	0.098	0.295	0.073	0.080
%0.25	0.049	0.328	0.060	0.137
%0.1	0.217	0.337	0.078	0.090
-%0.1	0.441	0.281	0.320	0.178
-%0.25	0.499	0.282	0.286	0.150
-%0.5	0.355	0.402	0.223	0.129
-%1	0.448	0.434	0.351	0.233
-%2	0.636	0.636	0.662	0.453
-%3	0.679	0.708	0.694	0.644
-%4	0.757	0.736	0.749	0.770
-%6	0.780	0.768	0.794	0.826
-%8	0.814	0.804	0.851	0.853

Eldeki değerkler incelendiğinde, itme adımındaki deformasyonların etkisiyle aynı çevrimin çekme adımında daha büyük kalıcı deformasyonlar gözlenmiştir.

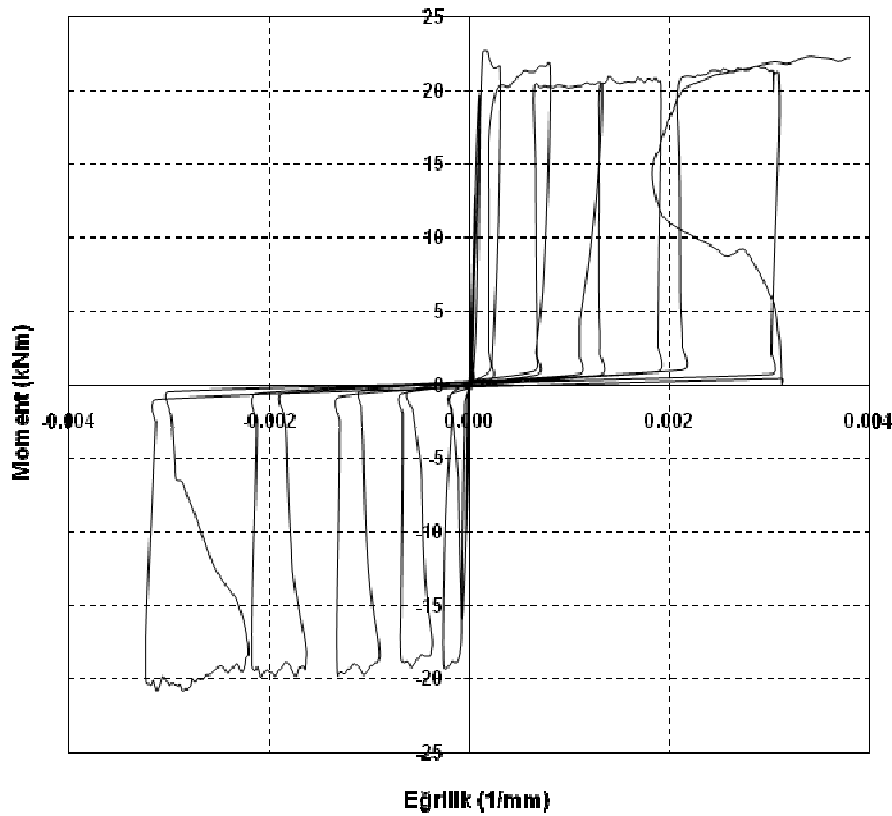
Bununla birlikte güçlendirilen numunelerde güçlendirilmeyen numunelere göre ilk adımlarda çok daha küçük kalıcı deformasyonların olduğu da görölmüştür.

5.5.6 Moment-eğrilik ilişkisi

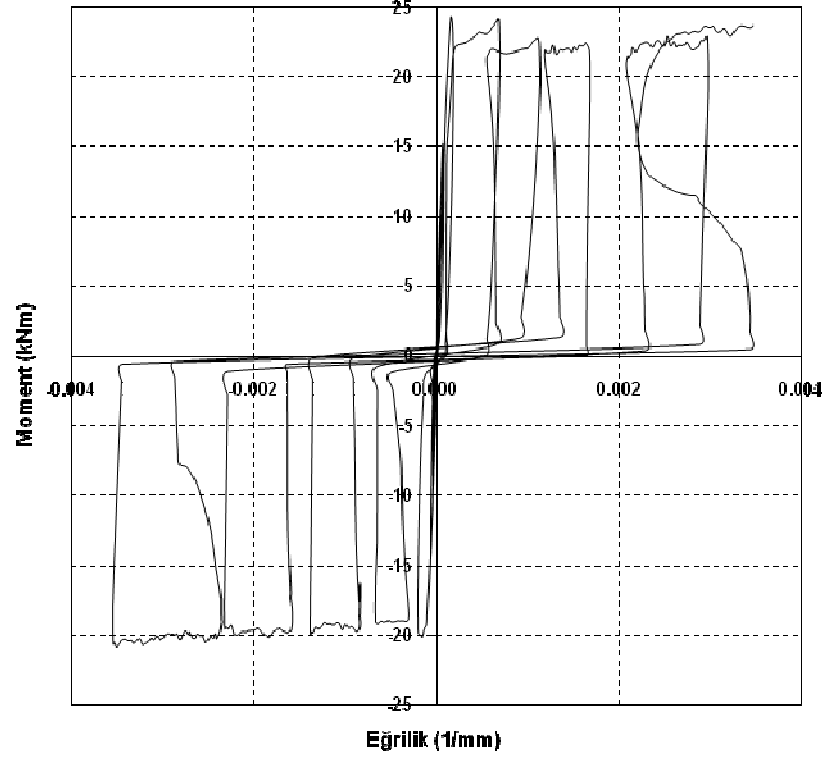
Elastik ötesi şekildeğiştirme yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanan süneklik kapasiteleri bakımından karşılaştırılması ve numune içinde hasar dağılımının daha detaylı anlaşılabilmesi için deneysel moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir.

Moment eğrilik ilişkisi için ilk olarak kolonların itme ve çekme yüzlerinin mümkün olan en alt noktasına (temel yüzeyinden 2 cm yukarı) yerleştirilen düşey yerdeğiştirmeölçerlerden alınan verilerin bulundukları nokta göz önüne alınarak ortalaması hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer temel yüzünden 2 cm yukarısındaki kolon yatay yerdeğiştirmesini vermektedir.

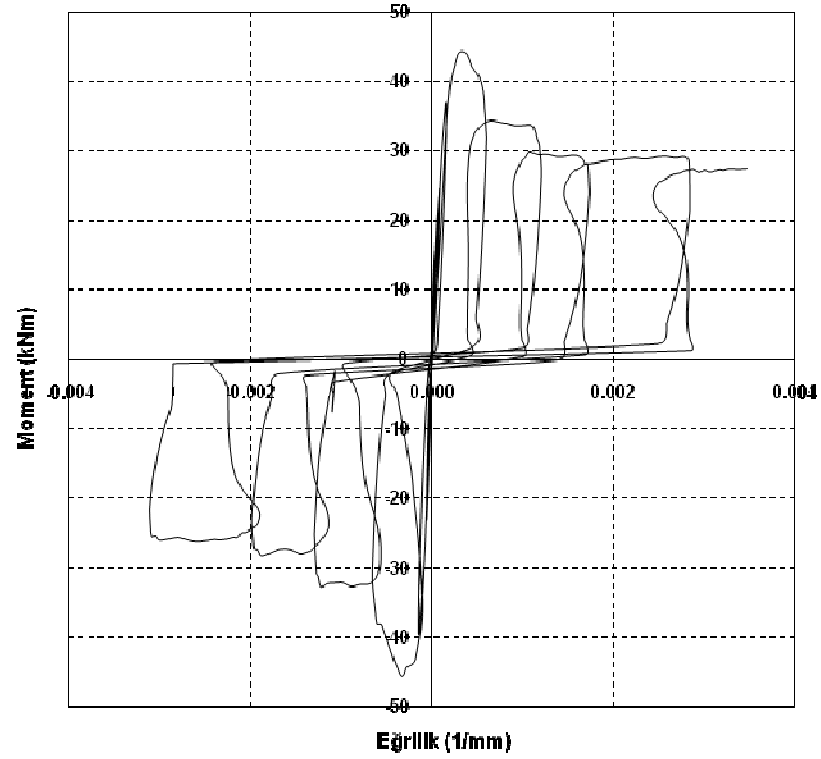
Bu şekilde elde edilen eğrilik ile o noktaya göre alınan momentin ilişkisini veren eğri Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de verilmiştir (LS-CON-Rebar numunesinde eğrilik hesabı için gerekli olan yerdeğiştirmeölçerlerden sağlıklı veri alınamadığından grafiği çizilememiştir).



Şekil 5.49 : LS-CON-REF1 numunesi 0-20 mm arası moment-eğrilik ilişkisi



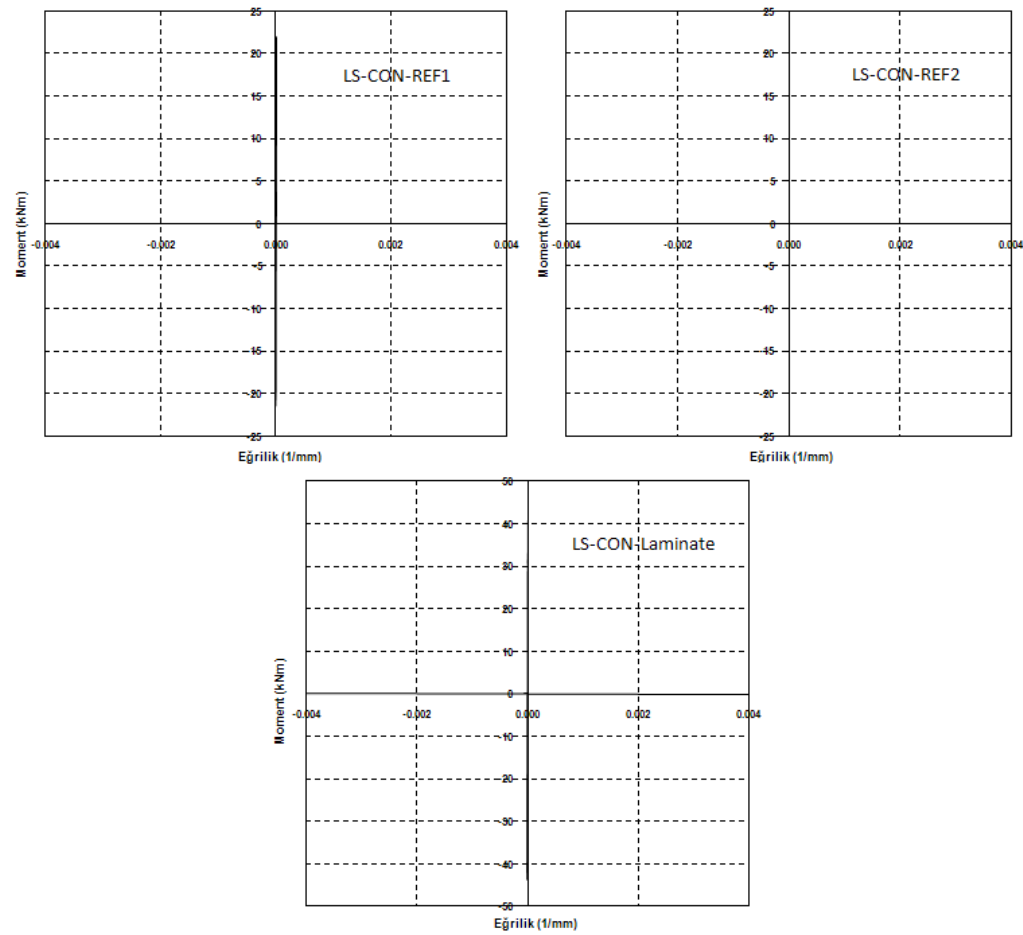
Şekil 5.50 : LS-CON-REF2 numunesi 0-20 mm arası moment-eğrilik ilişkisi



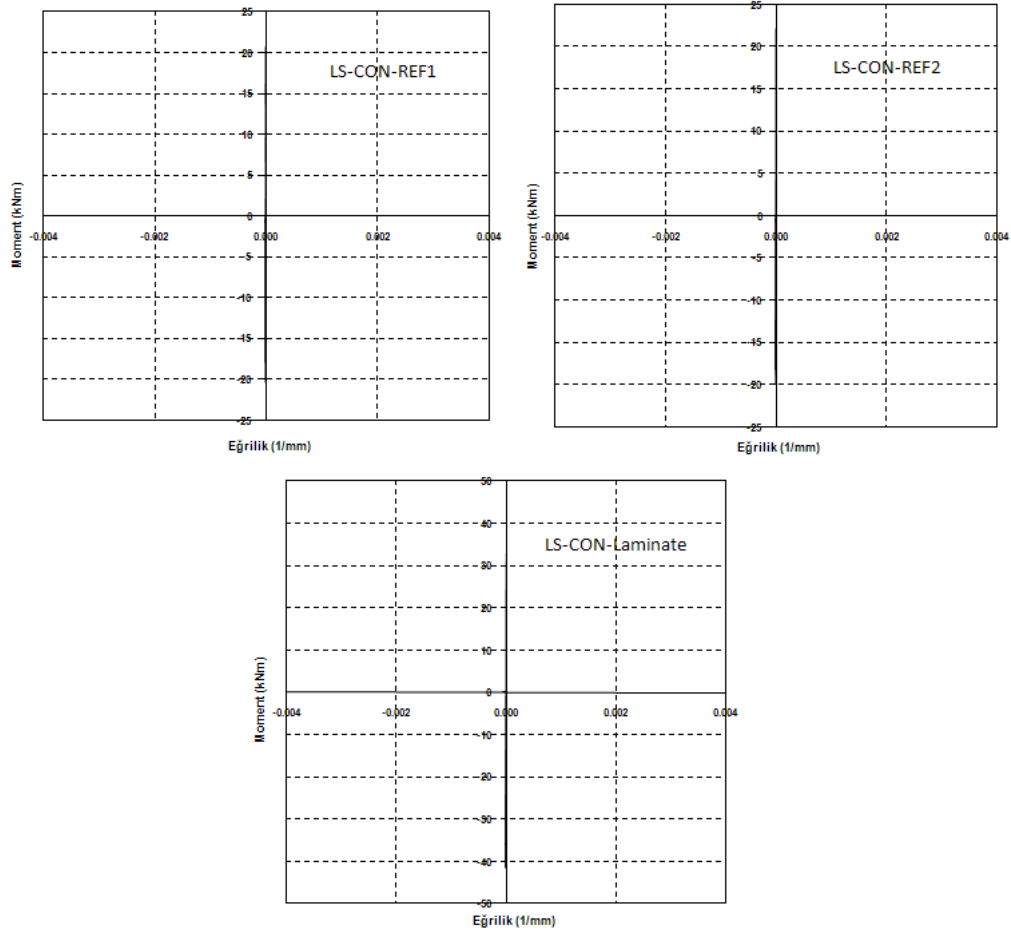
Şekil 5.51 : LS-CON-Laminate numunesi 0-20 mm arası moment-eğrilik ilişkisi

Bu hesaplar sırasında benzer şekilde 150 mm ve 300 mm'ye yerleştirilen yerdeğiştirmeölçerlerden alınan verilerle eğilmeden önce düzlem olan kesitlerin eğilmeden sonra ki durumları ve 2 cm'nin yukarısındaki rölatif eğilmeyi görebilmek amaçlanmıştır. Bu noktalarda elde edilen moment-eğrilik ilişkileri incelendiğinde 2 cm'dekine oranla ihmal edilebilecek kadar küçük değişimler olduğu gözlenmiştir. Dolayısı ile hasarın yığıldığı ve plastikleşmenin yoğunlaştığı bölge kolon tabanında 0-20 mm aralığı olarak söylenebilir.

20-150 mm arası moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.52 ve 150-300 mm arası moment-eğrilik ilişkisi Şekil 5.53'de verilmiştir.



Şekil 5.52 : Kolon tabanı 20-150 mm arası moment-eğrilik ilişkisi



Şekil 5.53 : Kolon tabanı 150-300 mm arası moment-eğrilik ilişkisi

Grafikler incelendiğinde genel olarak güçlendirilmeyen numunelerin daha sünek davrandığı fakat moment kapasitesinin daha az olduğu görülmektedir.

Ayrıca güçlendirilmemiş numuneler teorik moment kapasitesine ulaşırken, güçlendirilmiş numuneler teorik kapasiteye ulaşamadığı gibi ilerleyen öteleme oranlarında moment kapasiteleri ciddi şekilde azalmıştır.

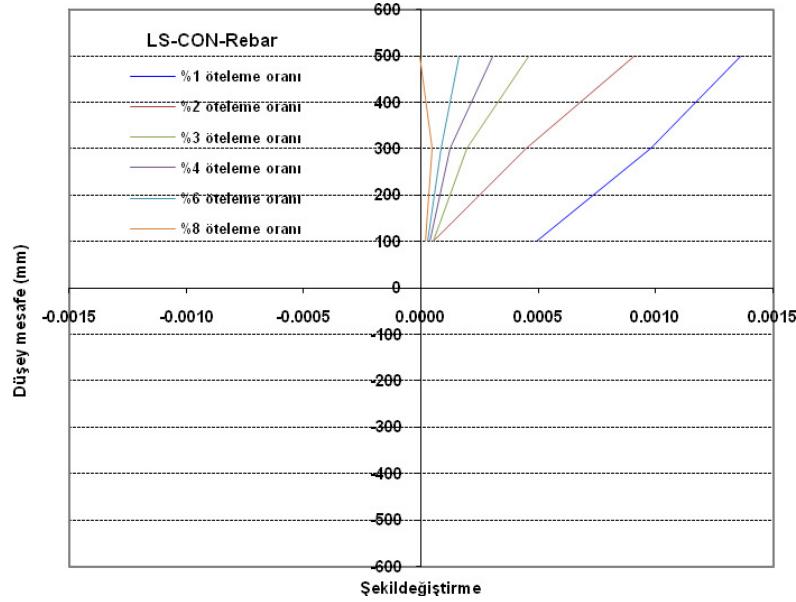
5.5.7 Şekildeğiştirme profili

Bu kısımda numune üzerinde en yoğun hasarın beklendiği test bölgesinde bulunan karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılar ve şerit plakalara yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerler ile bu elemanların şekildeğiştirmeleri ölçülmüştür.

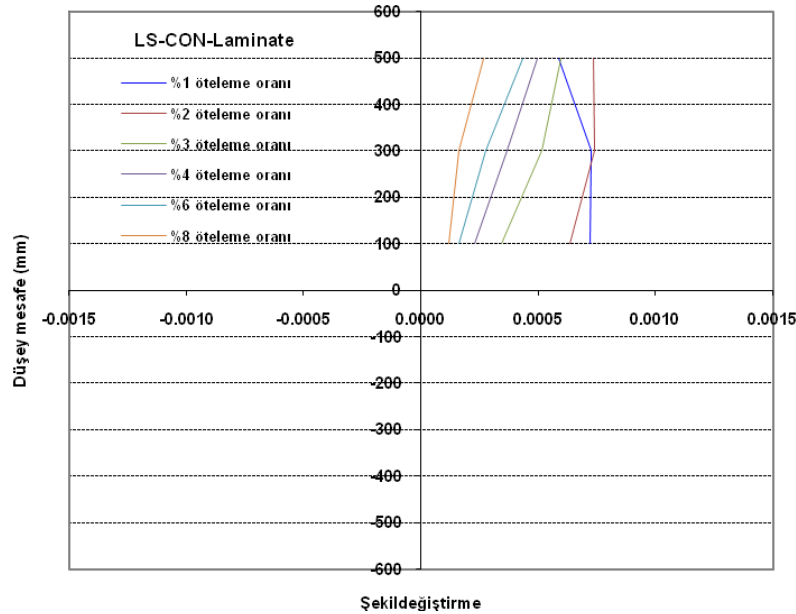
Güçlendirilen kolon numunelerin itme ve çekme yönünde her iki tarafındaki birer karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ve şerit plaka üzerine kolon tabanından itibaren 10, 30 ve 50 cm'ye gelecek şekilde şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır.

Yapılan ölçümler numune bazında ve öteleme oranı bazında olmak üzere iki farklı şekilde değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda yapıştırıldıkları yükseklığe bağlı şekildeğiştirmelerini gösteren şekildeğiştirme profilleri çizilmiştir.

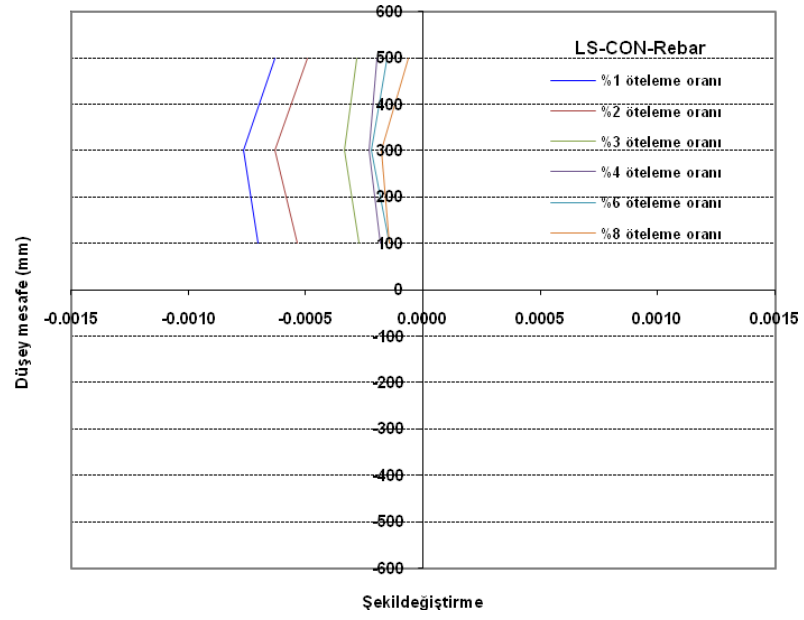
Numune bazında oluşturulan şekildeğiştirme profilleri Şekil 5.54, Şekil 5.55, Şekil 5.56 ve Şekil 5.57’de verilmiştir.



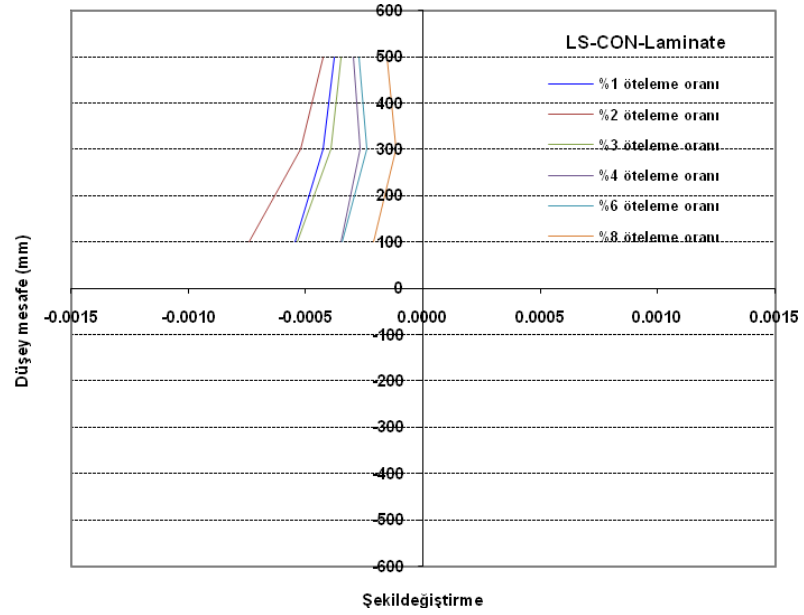
Şekil 5.54 : İtmede çekme bölgesi lifli polimer çubuk şekildeğiştirme profili



Şekil 5.55 : İtmede çekme bölgesi lifli polimer şerit plaka şekildeğiştirme profili

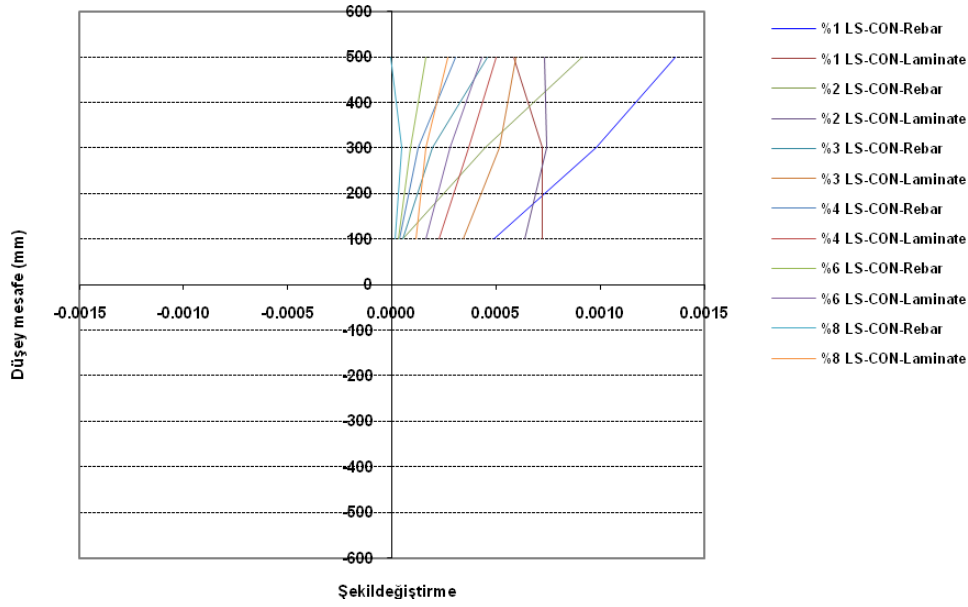


Şekil 5.56 : Çekmede çekme bölgesi lifli polimer çubuk şekildeğiştirme profili

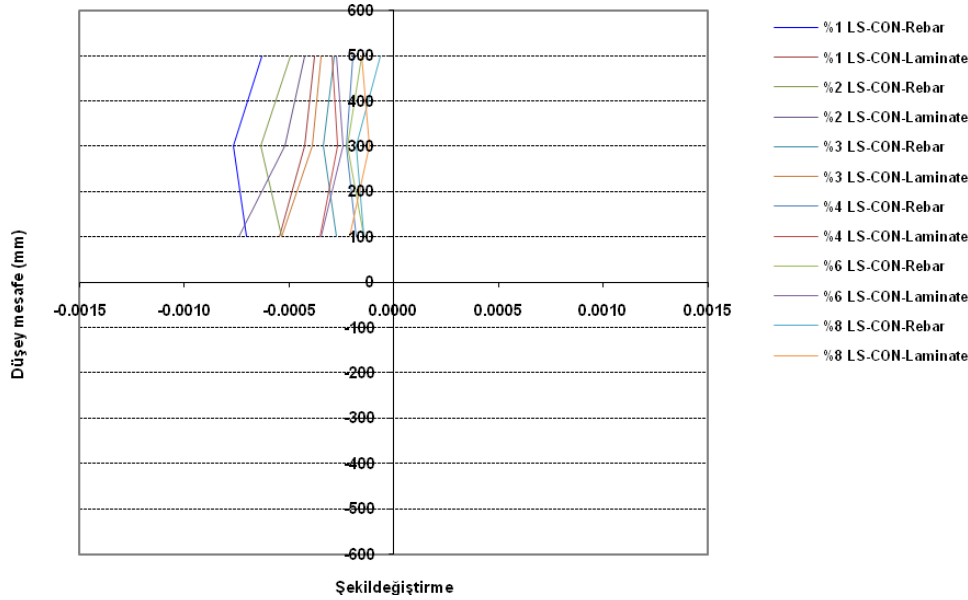


Şekil 5.57 : Çekmede çekme bölgesi lifli polimer şerit plaka şekildeğiştirme profili

Öteleme oranı bazında oluşturulan şekildeğiştirme profilleri ise Şekil 5.58 ve Şekil 5.59'da verilmiştir.



Şekil 5.58 : İtmede çekme bölgesi şekildeğiştirme profili



Şekil 5.59 : Çekmede çekme bölgesi şekildeğiştirme profili

İtmede çekme bölgesi ve çekmede çekme bölgesinde bulunan boyuna güçlendirme elemanlarının şekildeğiştirme profilleri incelendiğinde, genel anlamda itmede çekme bölgesindeki şekildeğiştirme değişiminin lineere daha yakın olduğu görülmüştür. Bunun dışında özellikle küçük yerdeğiştirmelere gidildiğindeki şekildeğiştirmelerin daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise, ankrajların sıyrıldığı %1 ve %2

öteleme oranlarından sonra karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ve şerit plakaların yük taşıma kapasitelerinin düşmesi ve buna bağlı olarak daha düşük gerilmelere maruz kalması sonucu şekildeğıştirmelerin azalmasıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada 200 x 300 mm enkesitli 1950 mm yüksekliğindeki konsol kolon numuneler, aynı metodla fakat farklı tipte karbon lifli polimer malzeme ile güçlendirilmiştir. Betonarme imalat aşamasında, ülkemizdeki mevcut yapıların özelliklerini yansıtmaları açısından kolon donatı çeliği düz yüzeyli, beton dayanımı düşük, etriye sıklaştırması olmayacak şekilde tasarım yapılmıştır. Bunun yanında diğer bir önemli nokta ise, kolon boyuna donatılarının sürekli olacak şekilde temel tabanına kadar inerek gönyelenmesidir. Betonarme imalat aşamasından sonra, boyuna doğrultuda karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ve şerit plakalar ile, enine doğrultuda ise karbon lifli polimer kumaş ile güçlendirilen numuneler ve referans numuneleri tersinen tekrarlanan yatay yükler etkisinde test edilmişlerdir. Kolonun eğilme kapasitesini arttırmayı amaçlayan bu çalışmada incelenen mekanik özellikler; dayanım, süneklik, enerji yutma kapasitesi, rijitlik, kalıcı deformasyonlar ve göçme modları olmuştur. Deneyler sırasında farklı noktalara yerleştirilen şekildeğiştirmeölçer ve yerdeğiştirmeölçerler ile veriler toplanarak, sistemin davranışı detaylı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

Lifli polimer malzemelerin kullanıldığı güçlendirme teknikleri için yönetmeliklerde kirişler için verilmiş olan hesap yaklaşımlarını dikkate alarak yapılan teorik çalışmada güçlendirilen numunelerin moment kapasitelerinin referans numunesinin 2.5 katı mertebesinde olduğu görülmüştür.

Bu bilgiler ışığında yapılan deneysel çalışma sonucunda;

Boyuna güçlendirme elemanları karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ve şerit plakalar istenilen ve yönetmeliklerde verilen şekildeğiştirme değerlerine ulaşamamıştır. Deformasyonlar, bu çalışmada lifli polimer malzeme tasarımında dikkate alınan kopma dayanımı olan 0.015 mertebesine yaklaşamamıştır. Mevcut kolon boyuna çelik donatıları akarken, karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılardaki şekildeğiştirmeler en büyük 0.0017, şerit plakalardaki ise en büyük 0.0011 olmuştur. Karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılarda en büyük şekildeğiştirme değerine %1 çekme adımından %2 itme adımına gidilirken, karbon

lifli polimer şerit plakalarda ise %2 itme adımından %2 çekme adımına gidilirken ulaşılmıştır. İki numunede de boyuna doğrultudaki karbon lifli polimer elemanlar bu şekildeğiştirme değerlerine ulaşana kadar donatı çeliği ile aynı mertebelerde deformasyonlar yapmıştır. Fakat sıyrılan ankrajların etkisiyle özellikle temele yapılan ankraj bölgesinde oluşan aderans kaybı sonucu karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılar ve şerit plakaların şekildeğiştirmeleri azalmıştır. Bunun yanında boyuna donatı çelikleri ise %2-%3 öteleme oranlarına ulaşıldıktan sonra deformasyonları daha da artarak akmışlardır. Enine donatı çelikleri ve karbon lifli polimer kumaş sargı malzemesi ise çok küçük deformasyonlar yapmıştır. Enine doğrultuda çalışan donatıların hiçbirinde akma gözlenmemiştir.

Güçlendirilmemiş referans numunelerinin teorik kapasitesi 12.80 kN olarak hesaplanmıştır. Deney sonucunda ise LS-CON-REF1 numunesi en fazla 13.91 kN, LS-CON-REF2 numunesi ise en fazla 14.84 kN yük taşımıştır. Güçlendirilen numunelerde ise yapılan ankrajların %2 öteleme adımına gelinirken hasar görmesi ile kolonların taşıdığı yükteki düşüşlerden dolayı bu aşamaya kadar bir değerlendirme yapıldığında, LS-CON-Rebar numunesi en fazla 29.79 kN (teorik kapasite 36.43 kN), LS-CON-Laminate numunesi de en fazla 26.98 kN (teorik kapasite 35.24 kN) yük taşımıştır. Referans numuneleri sünek bir davranış göstererek %2 öteleme adımından sonra da taşıdığı yükte ani ve büyük düşüşler yaşamadan dengeli bir şekilde davranmıştır. Ancak güçlendirilen LS-CON-Rebar numunesinde, %2 öteleme adımından itibaren sıyrılan ankrajların etkisiyle temele olan aderans azalarak taşıdığı yükte ani düşmeler yaşanmıştır. İlerleyen adımlarda ise referans numuneleriyle aynı mertebelerde yük taşımıştır. Güçlendirilen LS-CON-Laminate numunesinde ise %2 öteleme adımından itibaren sıyrılan ankraların etkisiyle temele olan aderans azalarak taşıdığı yükte düşüş meydana gelmiştir. Fakat yapılan ilave ankrajların veya ilk ankrajların verdiği katkıyla bu düşüş daha dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. İlerleyen öteleme adımlarında bile referans numunelerine oranla %25 oranında daha fazla yük taşımıştır.

Güçlendirilen numunelerin başlangıç rijitlikleri; iki kat enine doğrultuda karbon lifli polimer kumaş ile sargılama, boyuna doğrultuda kullanılan güçlendirme elemanları ve temele yapılan ankrajların katkısıyla referans numunelerinin 1.5 katı mertebesine ulaşmıştır. Ancak deneyin ilerleyen adımlarında ankrajların sıyrılması ve özellikle kolon hasarlarının kolon tabanına yığılması sonucu rijitlik kayıpları yaşayarak

referans numuneleri seviyesine gelmiştir. Buna dayanarak elastik bölgede yerdeğiştirmelerin sınırlanması açısından güçlendirmenin etkili olduğunu söyleyebiliriz.

Karbon lifli polimer kumaş kullanılarak yapılan ankrajlar teorikte 1.5 kat güvenlikle hesaplanmasına rağmen deney sırasında beklenen performansı gösterememiştir. Boyuna doğrultuda kullanılan güçlendirme elemanlarının temele ankraj zorluğundan dolayı tercih edilen karbon lifli polimer kumaş ile ankraj çözümünün yetersiz kalması, yapılan boyuna güçlendirmenin eğilme dayanımına katkısını büyük oranda etkilemiştir. En önemlisi de karbon lifli polimer dairesel çubuk donatı ve şerit plakaların da ankraj hasarından sonra kolona katkısını neredeyse yok etmiştir.

Deney sırasında temele olan ankrajların bazıları sıyrılmış, ilerleyen adımlarda ise bazıları kopmuştur. Özellikle sıyrılan ankrajlardan sonra çalışmaya devam eden diğer ankrajlara gelen yükler artmış fakat bu ankrajlarda herhangi bir sıyrıлма olayı gözlenmemiştir. Aksine kopana kadar çalışmaya devam etmişlerdir. Bu açıdan baktığımızda, ankrajların uygulaması sırasında hatalar olduğu ve bu yüzden aynı özellikteki ankrajların farklı davranış gösterdiği söylenebilir. Kısacası yapılan ankrajların teorik hesapta yeterli fakat deney sırasında yetersiz gözükmesinin nedeni ankraj imalatındaki hatalar olabilir. Bu yüzden aynı detayda ankraj imalatı daha dikkatli yapılarak iyi bir sonuç alınabilir.

Karbon lifli polimer kumaş ile sargılama da numunenin davranışını etkilemiştir. İki kat sargılama, kolon tabanının yukarıdaki bölgede eğilmeden kaynaklanan deformasyonları azaltarak deformasyonların kolon tabanına birikmesine neden olmuştur. Bu şekilde kolon tabanında artan gerilmelerde ankrajların kısa sürede sıyrılmasına neden olmuştur.

İki kat karbon lifli polimer kumaş ile sargılamanın yukarıda bahsedilen bazı olumsuz etkilerini önlemek amacıyla şerit sargılama yapılabilir. Bu şekilde eğilmeden kaynaklanan deformasyonların kolon tabanında birikmesi biraz olsun azaltılabilir.

Bu değerlendirmelerin bir sonucu olarak kolonlar gibi düşey elemanların boyuna doğrultuda güçlendirilmesi, sistemin moment kapasitesindeki artışa ayak uydurabilmesiyle orantılı olarak gerçekteşebilmektedir. Başka bir deyişle, kolonun moment kapasitesini arttırırken kesme ve ankraj göçmesi gibi diğer göçme

modlarının bir seviyeye kadar engellenmesinin boyuna doğrultuda güçlendirmenin verimini büyük oranda arttırdığı söylenebilir.

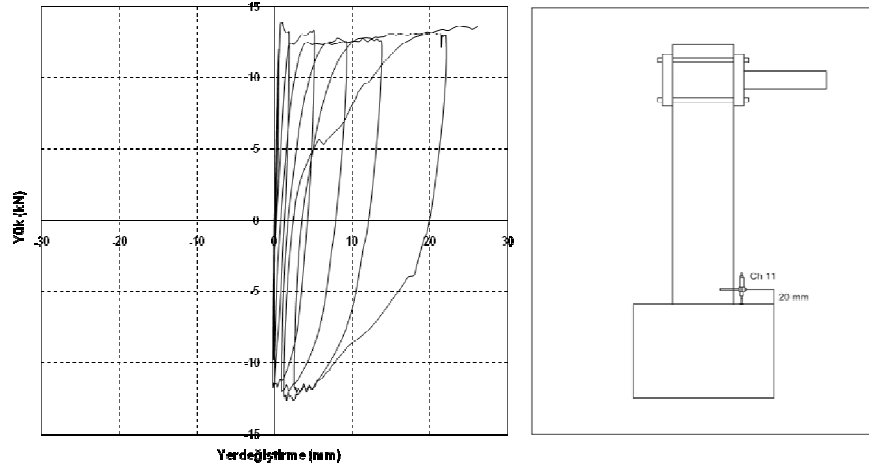
Örneğin, güçlendirme metodu ve kullanılan malzemeler değiştirilmeden ankraj detayı iyileştirilebilir. Bu şekilde kullanılan karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılar ve şerit plakaların performansı arttırılarak daha sünek bir davranış sağlanabilir.

KAYNAKLAR

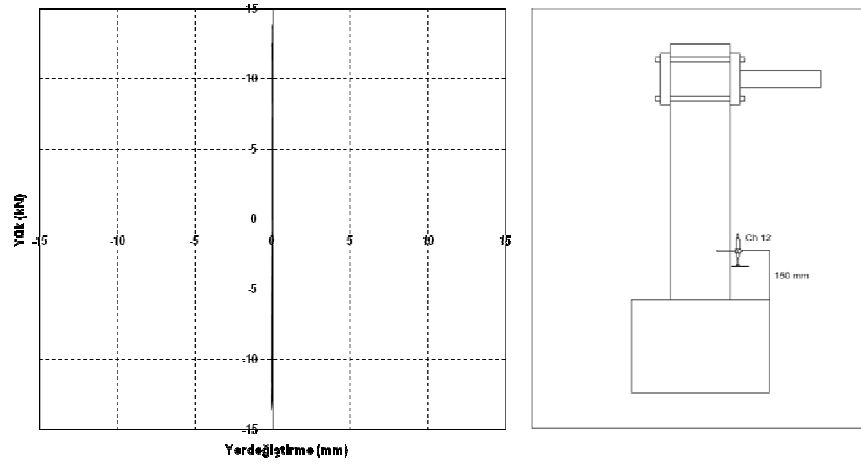
- ACI 440**, 2001. "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI Committee 440.
- ACI 318**, 1999. "Building code requirements for reinforced concrete and commentary", ACI Committee 318.
- Alkhardji, T. and Nanni, A.**, 1999. "Flexural strengthening of bridge piers using FRP composites", Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES), University of Missouri-Rolla.
- Barros, J.A.O., Ferreira, D.R.S.M., Fortes, A.S. and Dias, S.J.E.**, 2006. "Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening", *Construction and Building Materials*, Vol. **20**, pp. 478-491.
- Bournas, D.A., Triantafillou, T.C.**, 2009. "Flexural strengthening of reinforced concrete columns with near surface mounted FRP or stainless steel", *ACI Structural Journal*, Vol. **106**, no. 4, pp. 495-505.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2004. "Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı", İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Profesörleri, İstanbul.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2005. "Betonarme Yapılar", İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Profesörleri, İstanbul.
- DBYBHY**, 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G.**, 2004. "Betonarme", Evrim Yayınları, İstanbul.
- Nanni, A., Alkhardji, T., Chen, G., Barker, M., Xinbao, Y. and Mayo, R.**, 1999. "Overview of testing to failure program of a highway bridge strengthened with FRP composites", Selected Presentation Proc., 4th International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS4), Baltimore, MD, pp. 69-80.
- Perrone, M., Barros, J.A.O. and Aprile, A.**, 2009. "A CFRP based strengthening technique to increase the flexural and energy dissipation capacities of RC columns", *Journal of Composites for Construction*.
- Sato, Y. and Ko, H.**, 2007. "Experimental investigation of conditions of lateral shear reinforcements in RC columns accompanied by buckling of longitudinal bars", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. **36**, pp. 1685-1699.
- Seible, F., Priestley, M.J.N., Hegemier, G.A. and Innamorato, D.**, 1997. "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", *Journal of Composites for Construction*, Vol. **1**, no. 2, pp. 52-62.

- Szabo, Z.K. and Balasz, G.L.,** 2007. “Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures”, Civil Engineering, Periodica Polytechnica.
- TS-500,** 1984. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-500,** 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS-708,** 1996. Beton çelik çubukları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

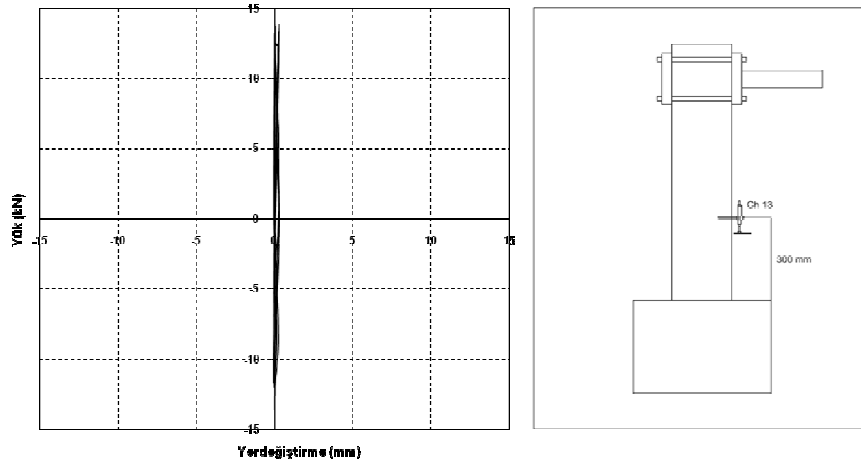
EKLER



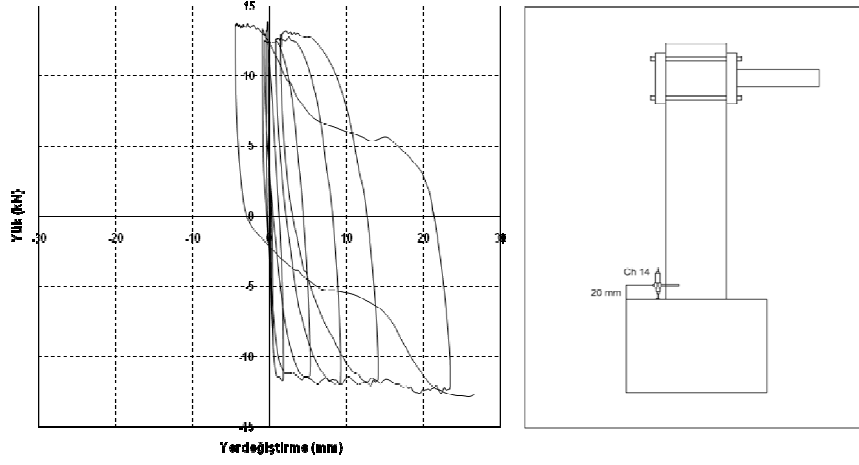
Şekil A.1 : LS-CON-REF1 numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



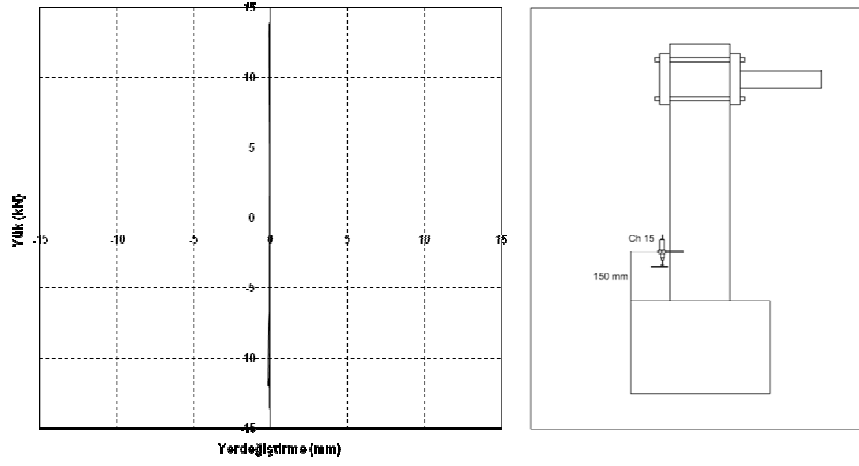
Şekil A.2 : LS-CON-REF1 numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



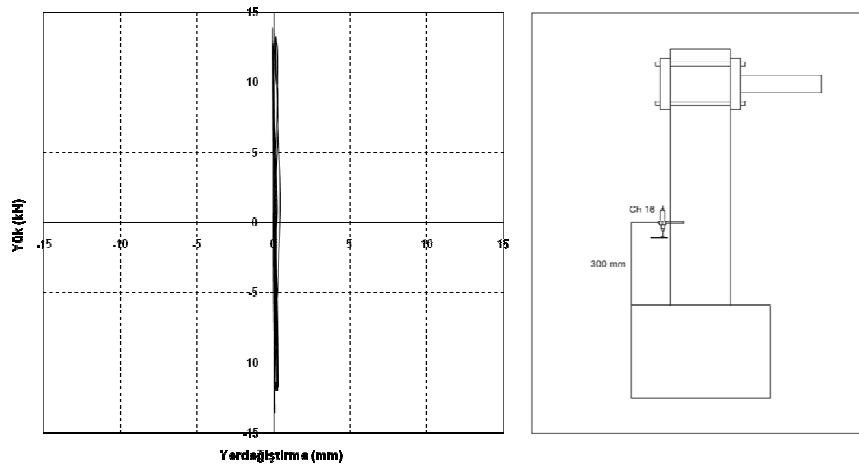
Şekil A.3 : LS-CON-REF1 numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



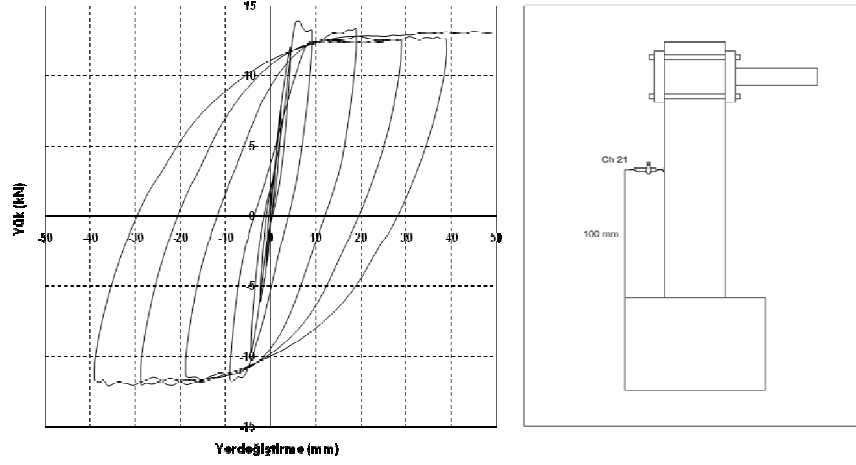
Şekil A.4 : LS-CON-REF1 numunesi 14.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



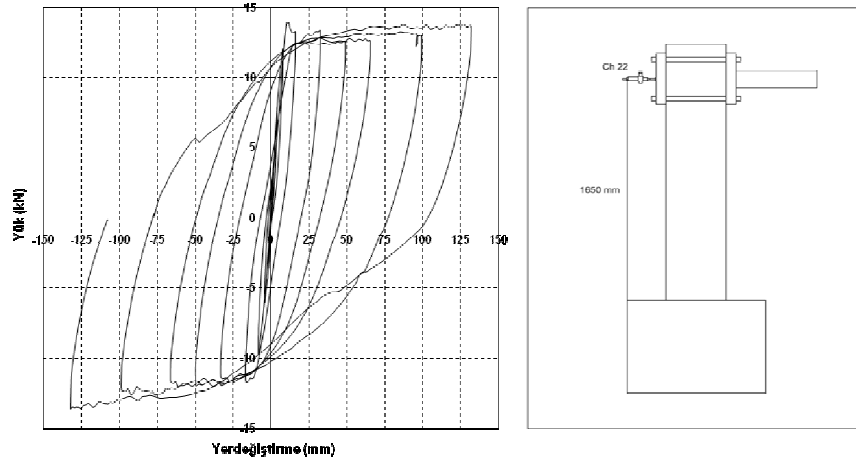
Şekil A.5 : LS-CON-REF1 numunesi 15.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



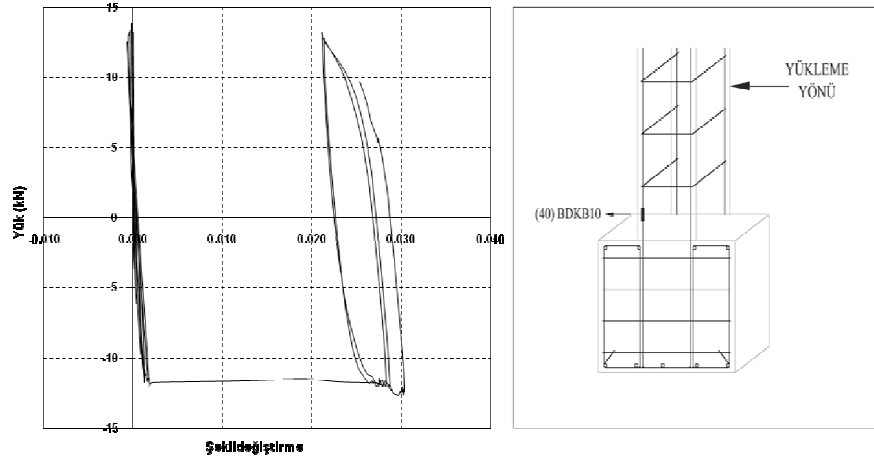
Şekil A.6 : LS-CON-REF1 numunesi 16.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



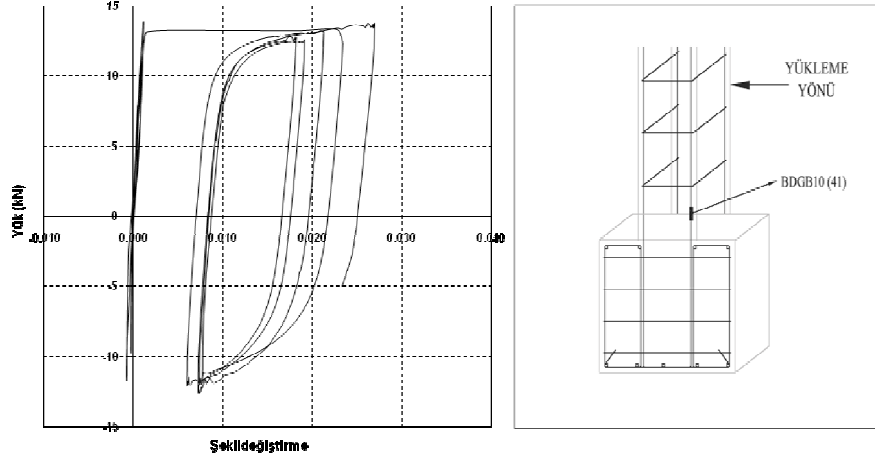
Şekil A.7 : LS-CON-REF1 numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



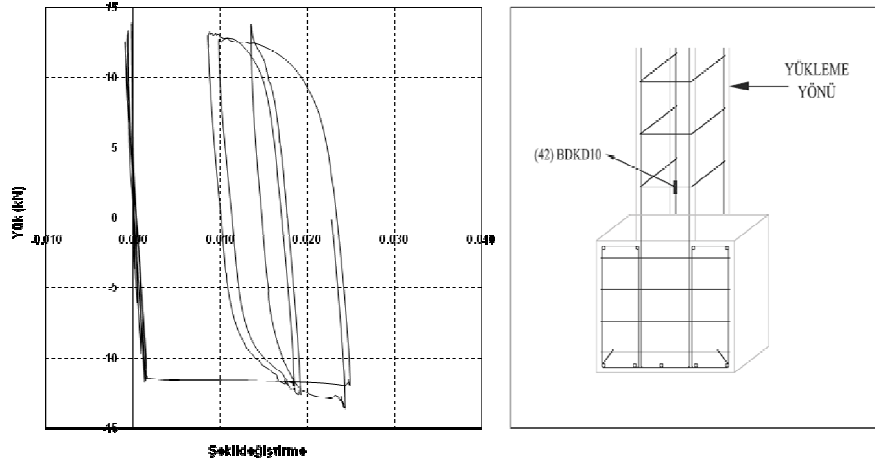
Şekil A.8 : LS-CON-REF1 numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



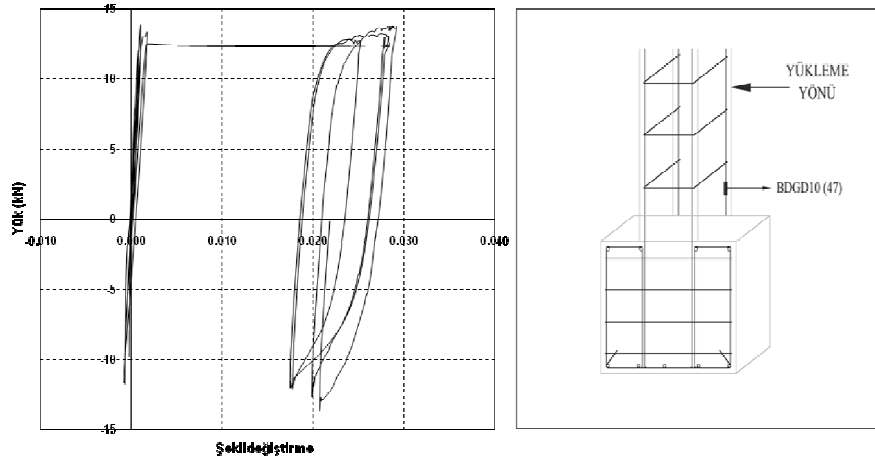
Şekil A.9 : LS-CON-REF1 numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



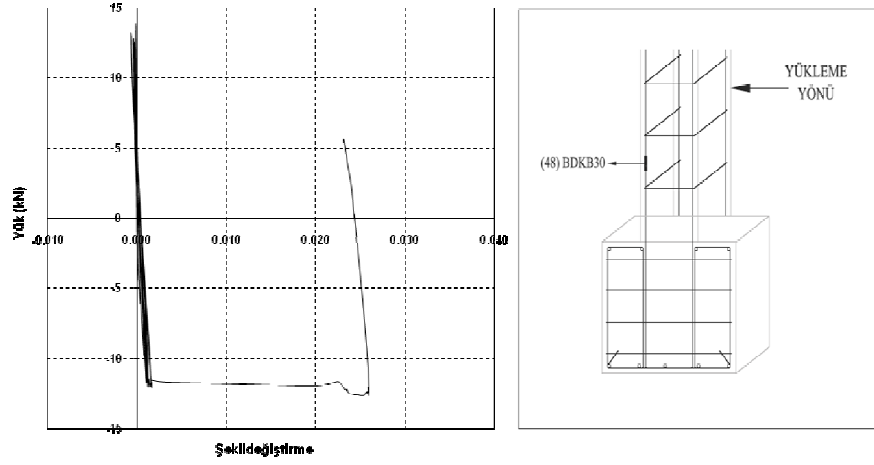
Şekil A.10 : LS-CON-REF1 numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



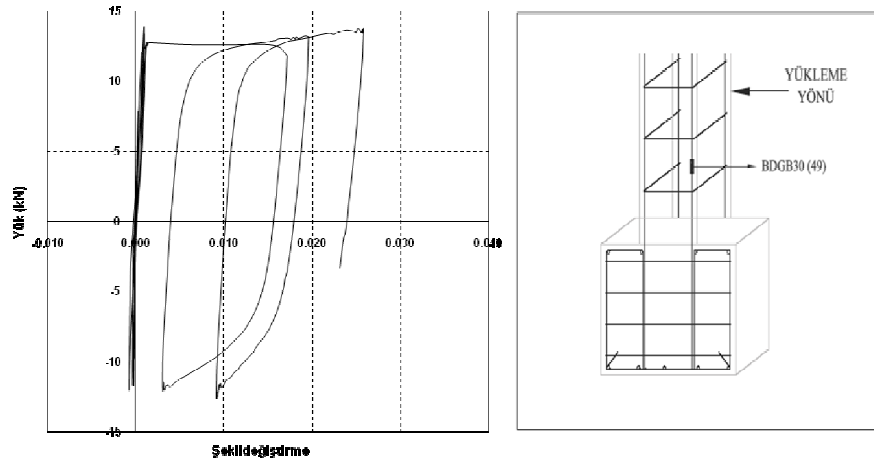
Şekil A.11 : LS-CON-REF1 numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



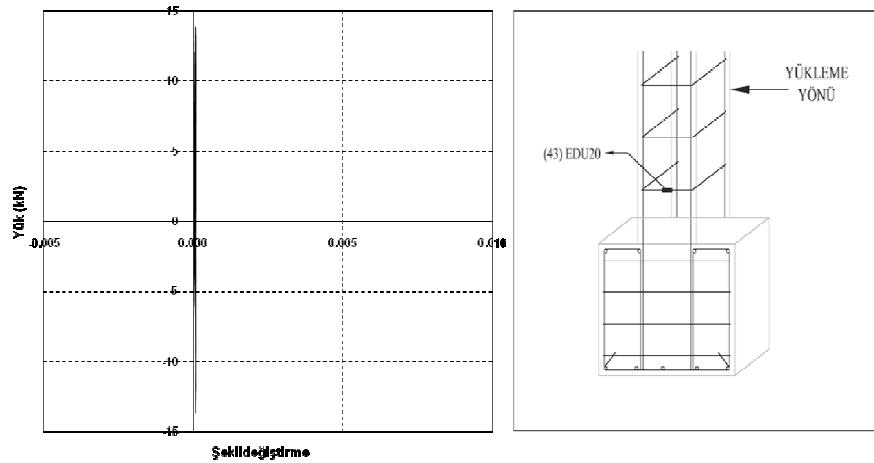
Şekil A.12 : LS-CON-REF1 numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



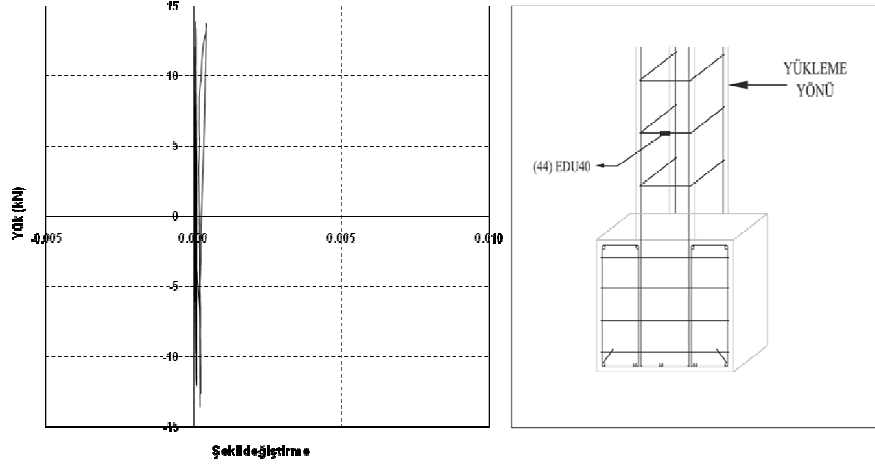
Şekil A.13 : LS-CON-REF1 numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



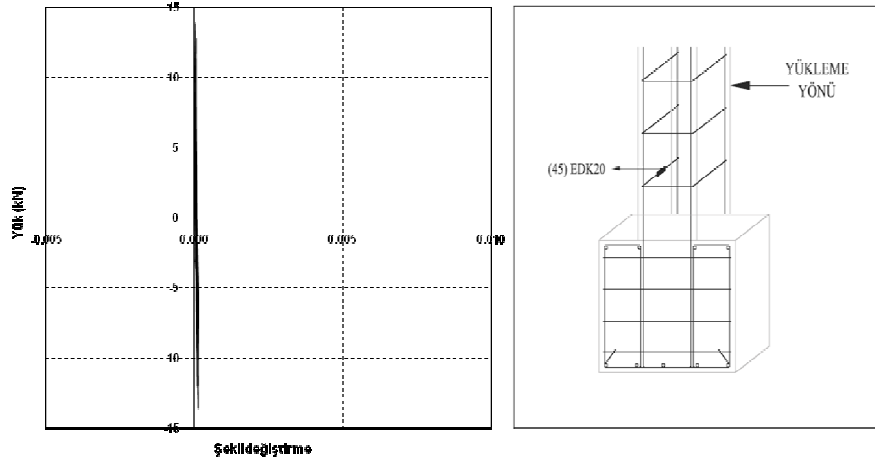
Şekil A.14 : LS-CON-REF1 numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



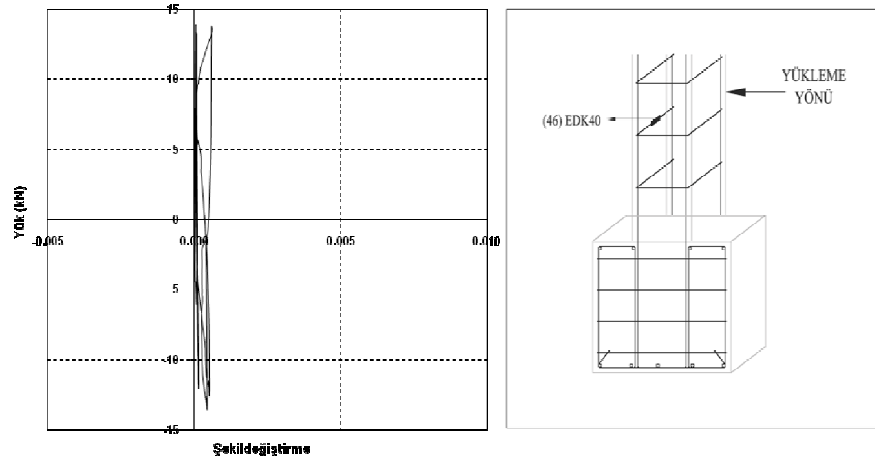
Şekil A.15 : LS-CON-REF1 numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



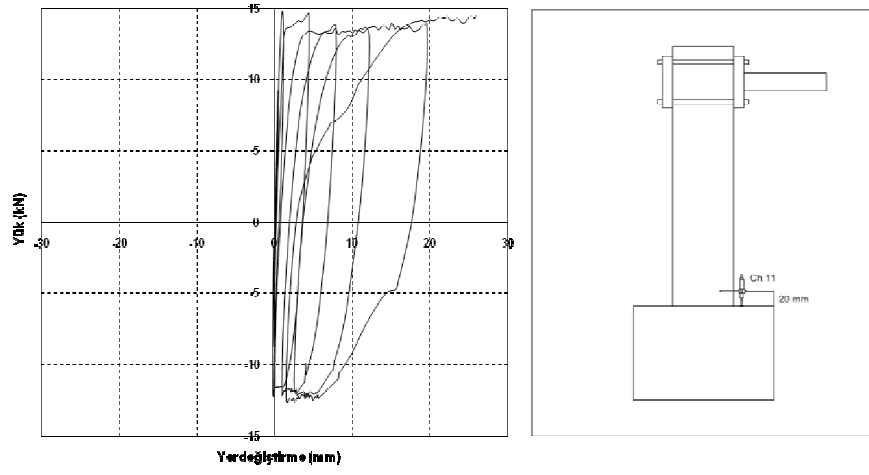
Şekil A.16 : LS-CON-REF1 numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



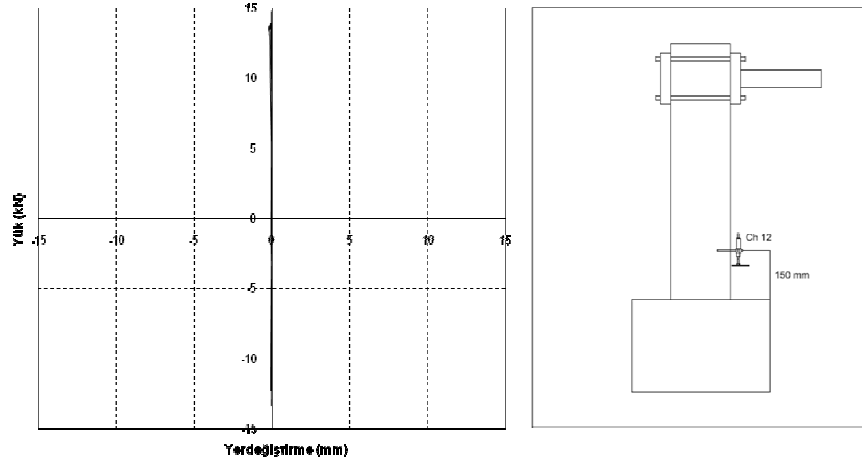
Şekil A.17 : LS-CON-REF1 numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



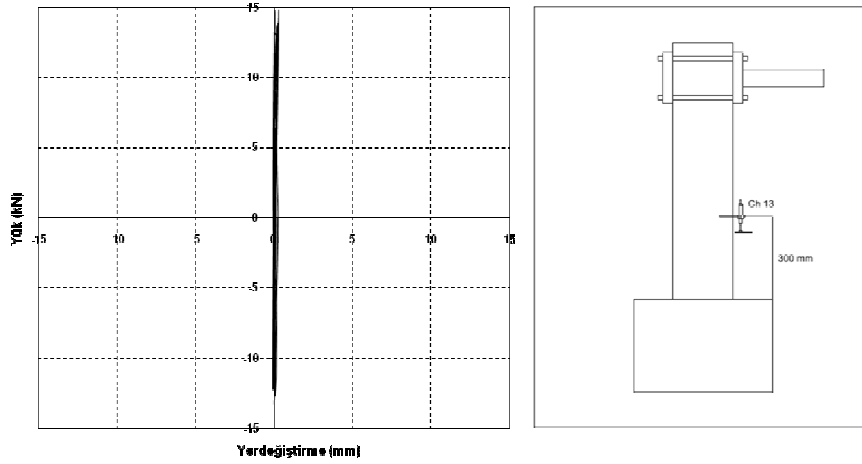
Şekil A.18 : LS-CON-REF1 numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



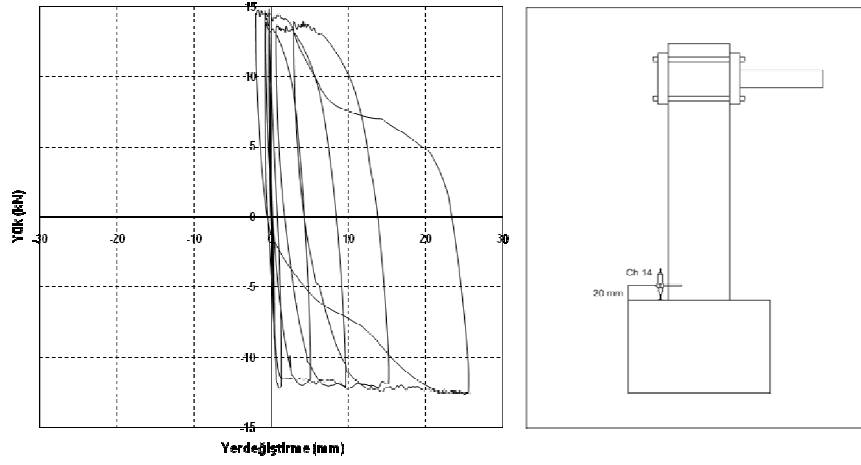
Şekil A.19 : LS-CON-REF2 numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



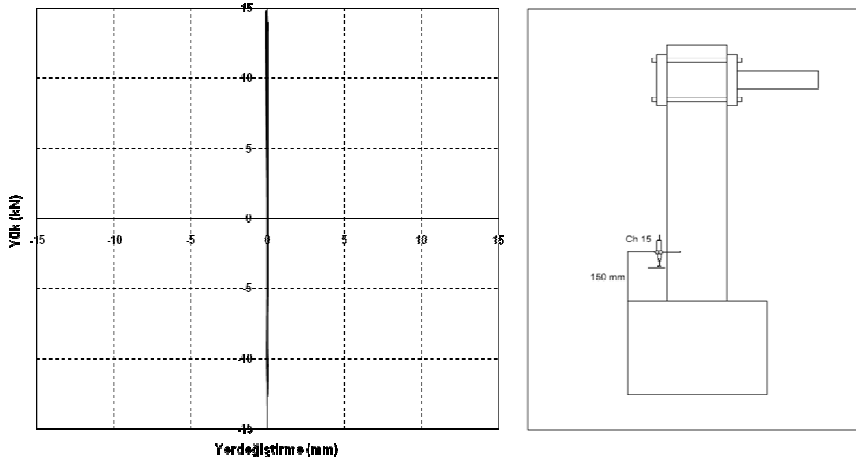
Şekil A.20 : LS-CON-REF2 numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



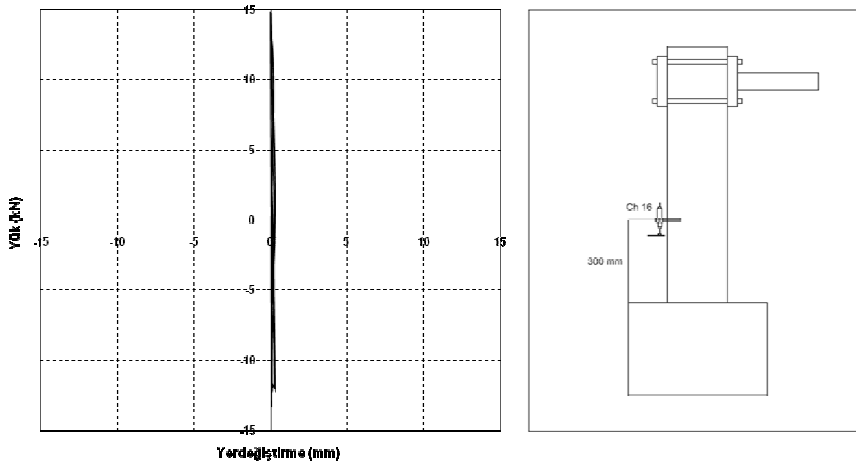
Şekil A.21 : LS-CON-REF2 numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



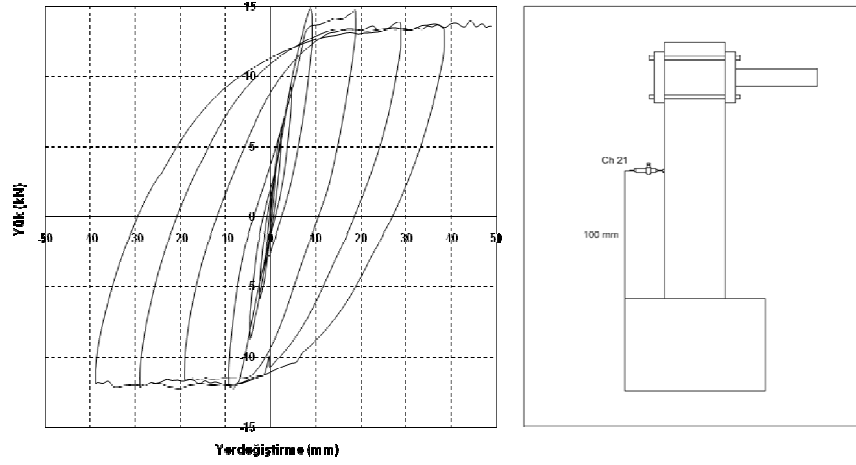
Şekil A.22 : LS-CON-REF2 numunesi 14.kanal yük yer değiştirme ilişkisi



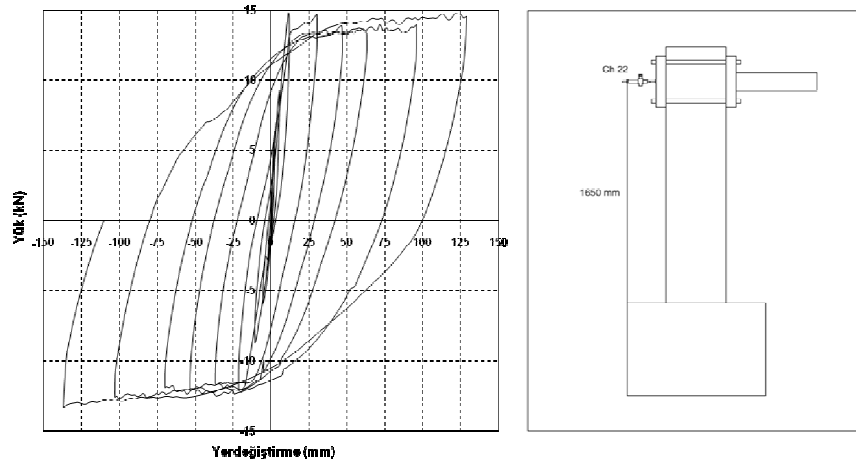
Şekil A.23 : LS-CON-REF2 numunesi 15.kanal yük yer değiştirme ilişkisi



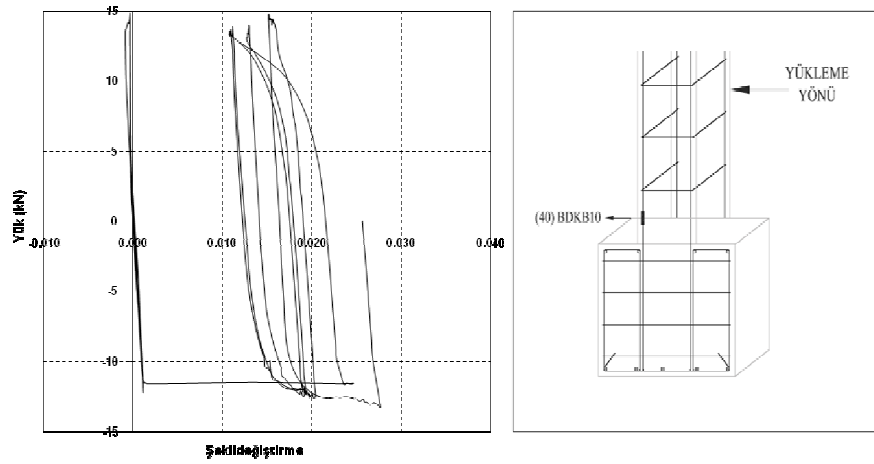
Şekil A.24 : LS-CON-REF2 numunesi 16.kanal yük yer değiştirme ilişkisi



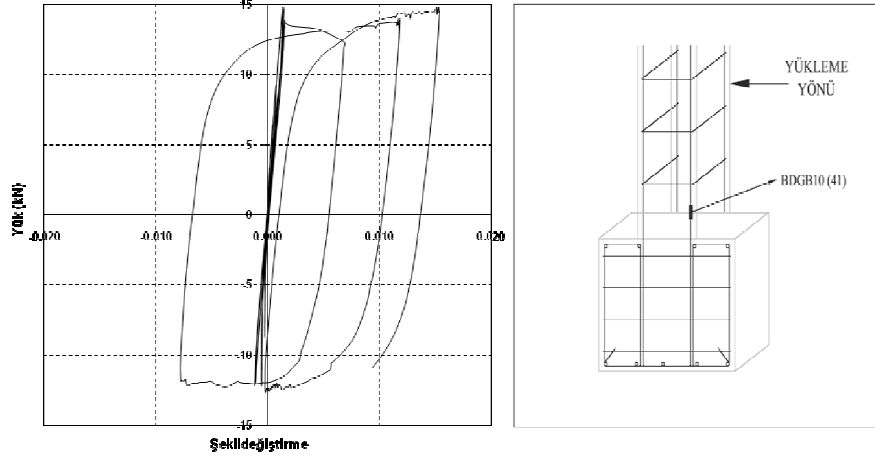
Şekil A.25 : LS-CON-REF2 numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



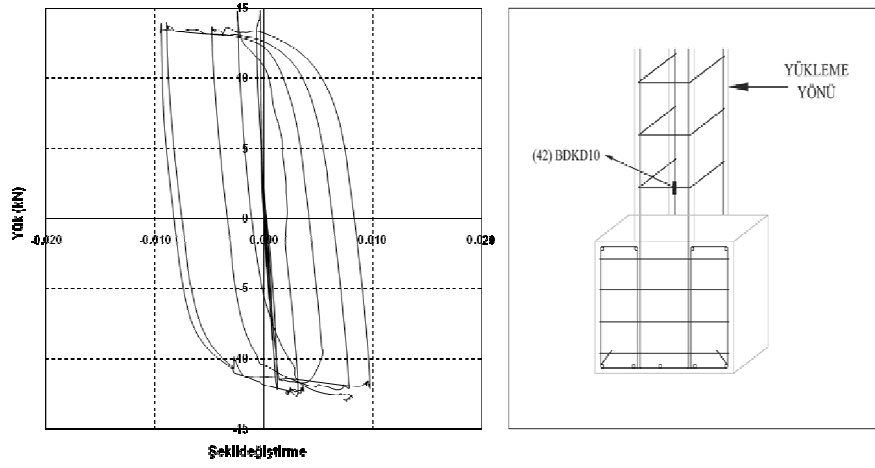
Şekil A.26 : LS-CON-REF2 numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



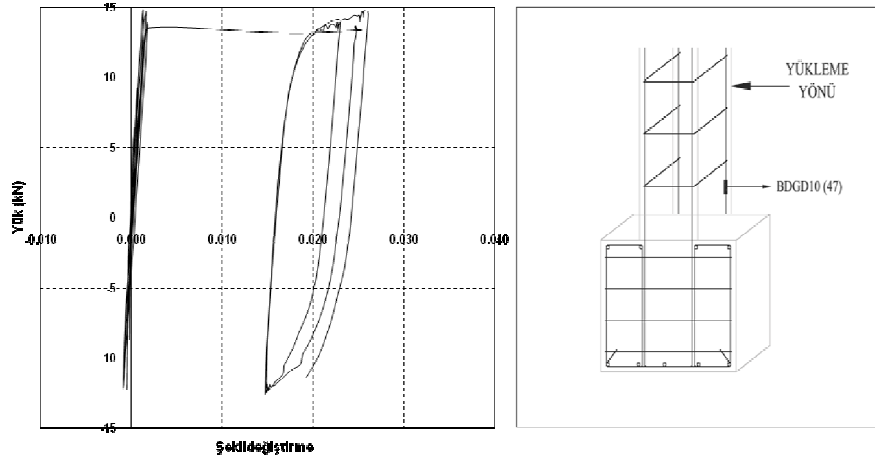
Şekil A.27 : LS-CON-REF2 numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



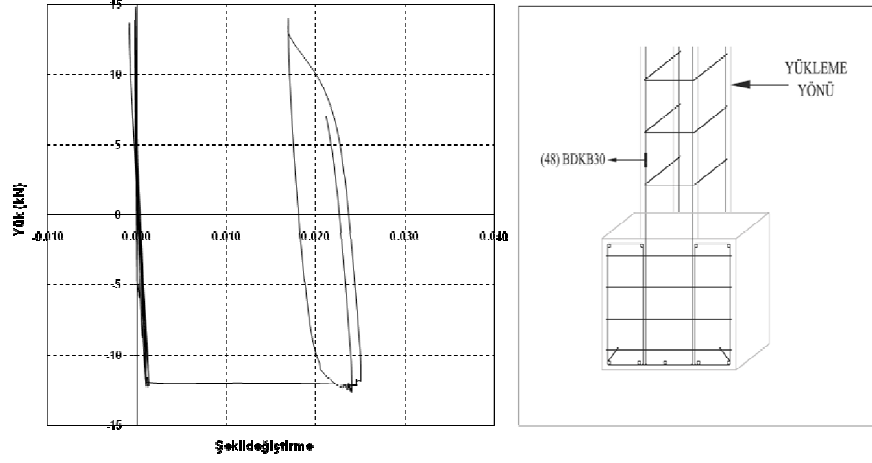
Şekil A.28 : LS-CON-REF2 numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



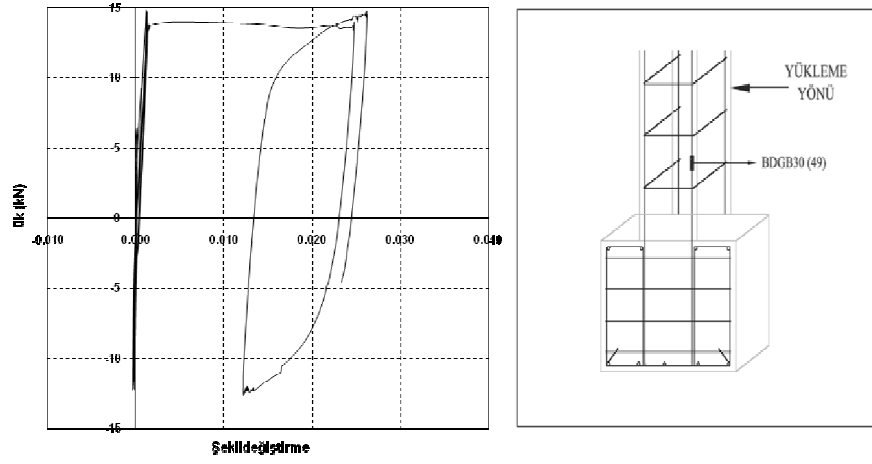
Şekil A.29 : LS-CON-REF2 numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



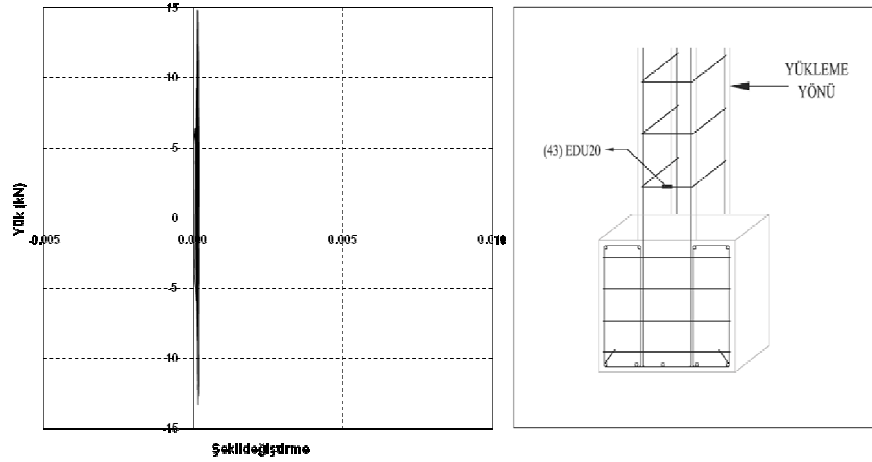
Şekil A.30 : LS-CON-REF2 numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



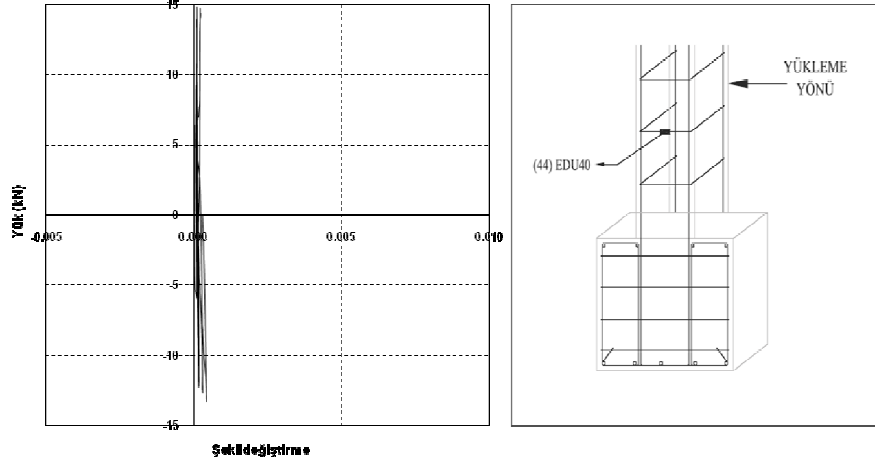
Şekil A.31 : LS-CON-REF2 numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



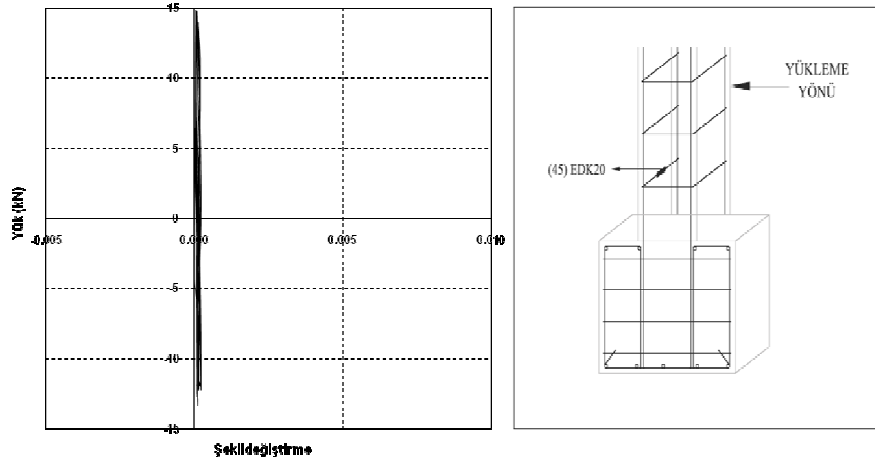
Şekil A.32 : LS-CON-REF2 numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



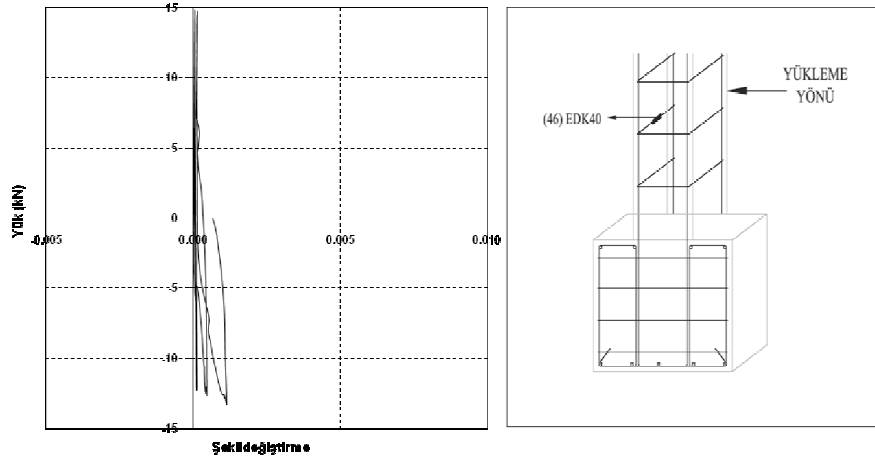
Şekil A.33 : LS-CON-REF2 numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



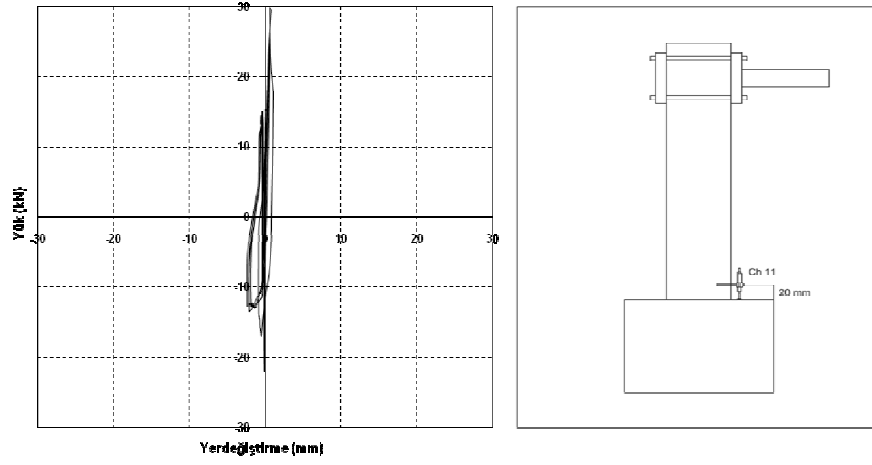
Şekil A.34 : LS-CON-REF2 numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



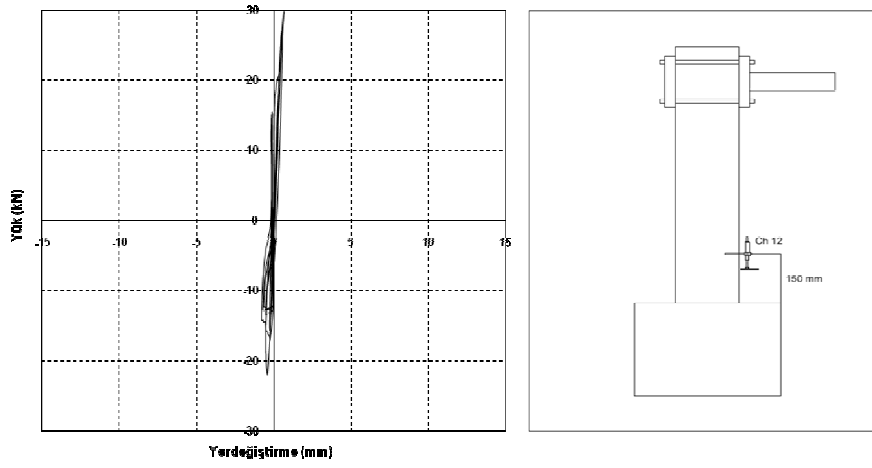
Şekil A.35 : LS-CON-REF2 numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



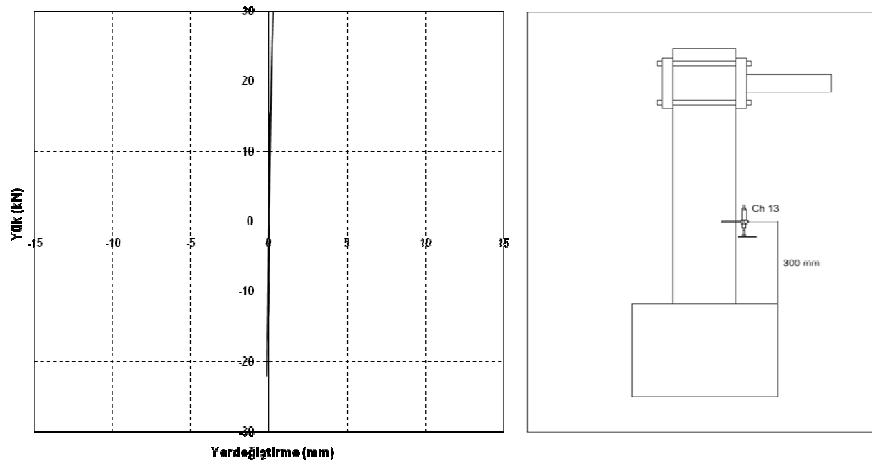
Şekil A.36 : LS-CON-REF2 numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



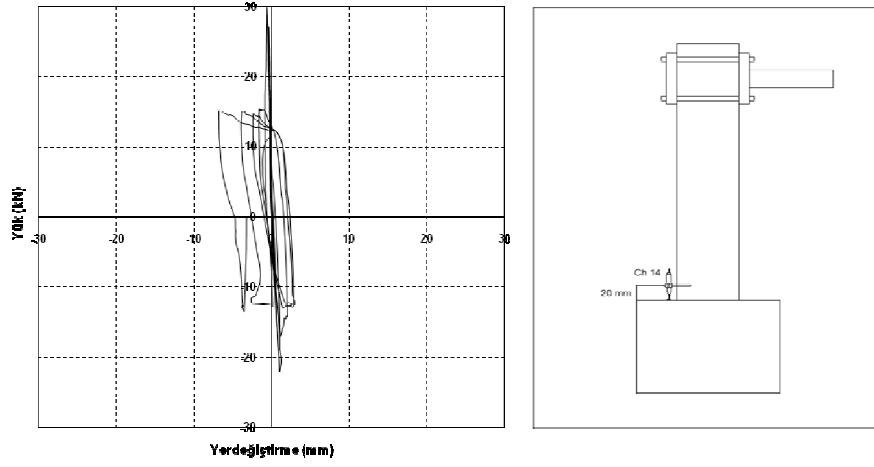
Şekil A.37 : LS-CON-Rebar numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



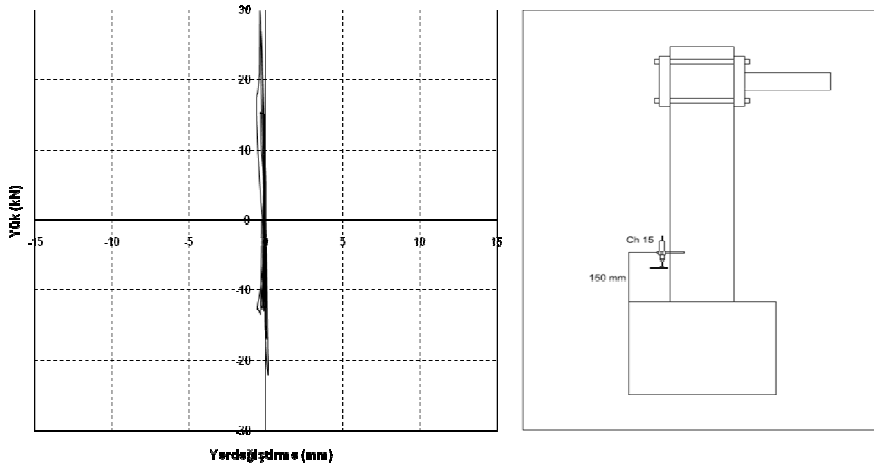
Şekil A.38 : LS-CON-Rebar numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



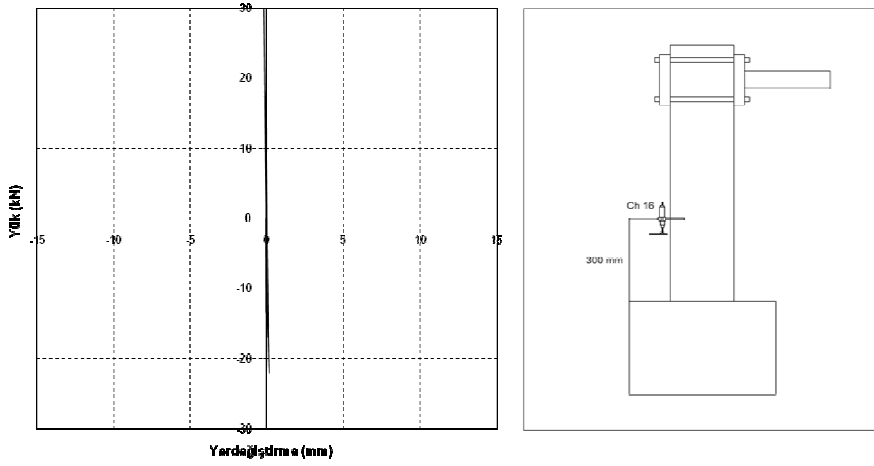
Şekil A.39 : LS-CON-Rebar numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



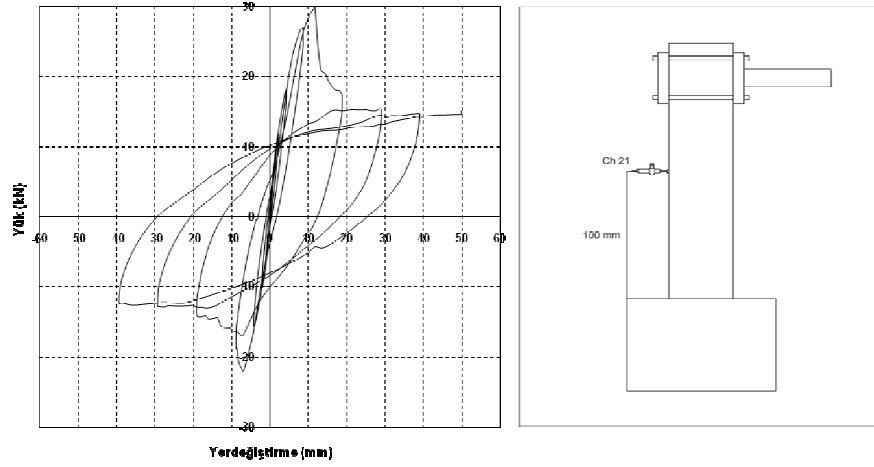
Şekil A.40 : LS-CON-Rebar numunesi 14.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



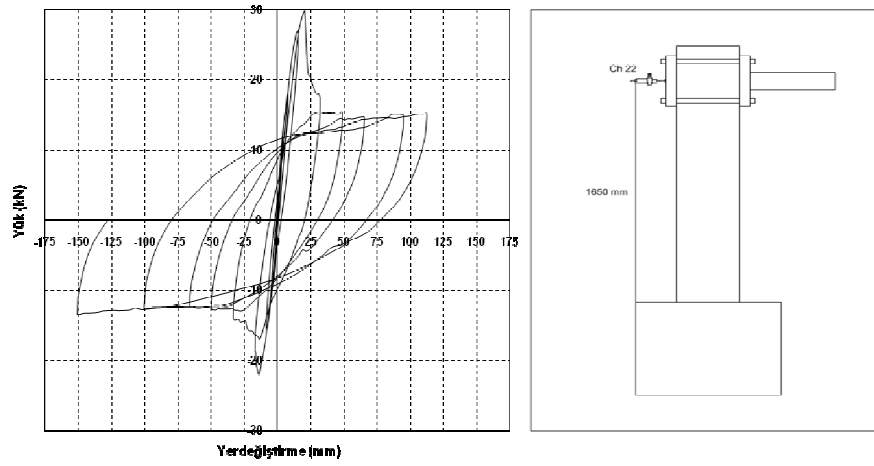
Şekil A.41 : LS-CON-Rebar numunesi 15.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



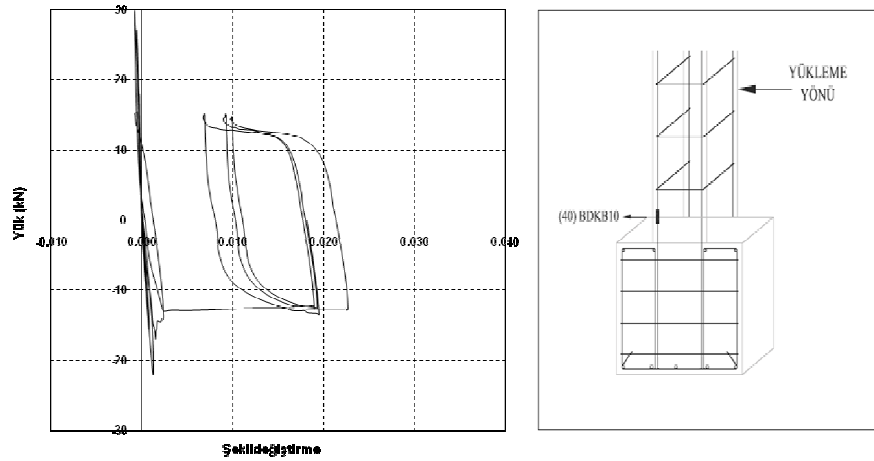
Şekil A.42 : LS-CON-Rebar numunesi 16.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



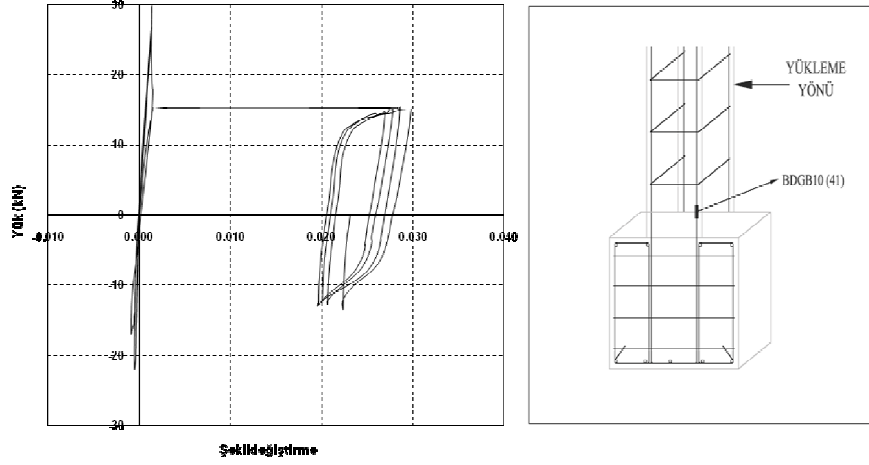
Şekil A.43 : LS-CON-Rebar numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



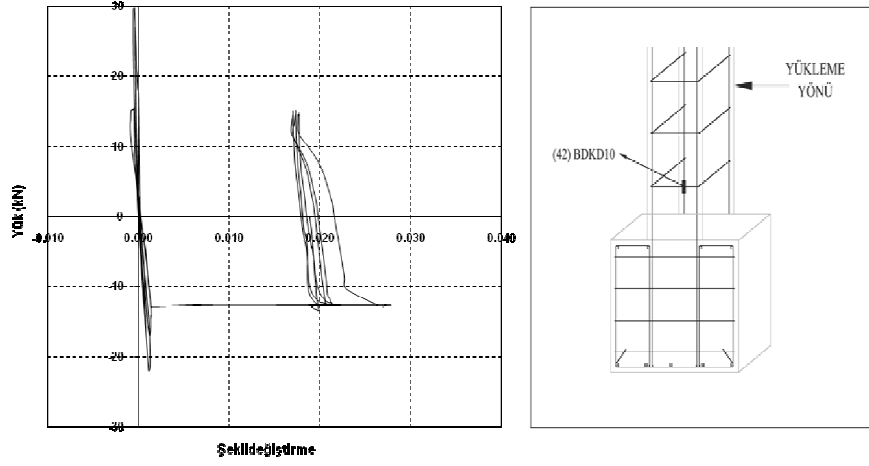
Şekil A.44 : LS-CON-Rebar numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



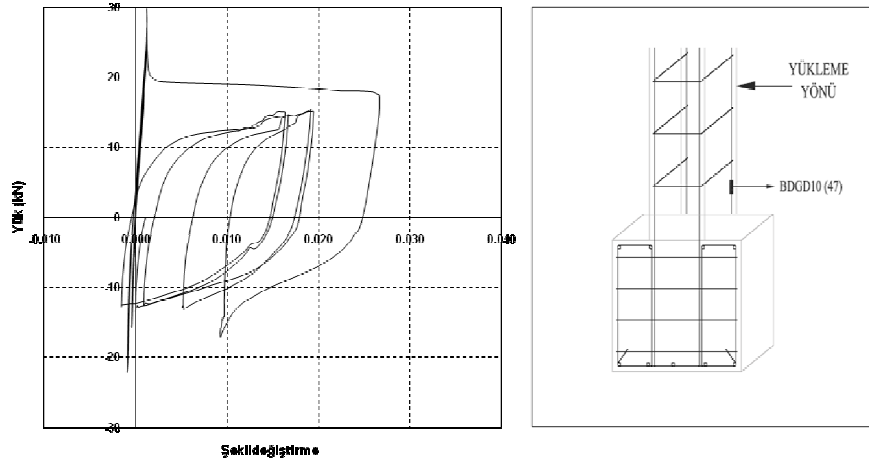
Şekil A.45 : LS-CON-Rebar numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



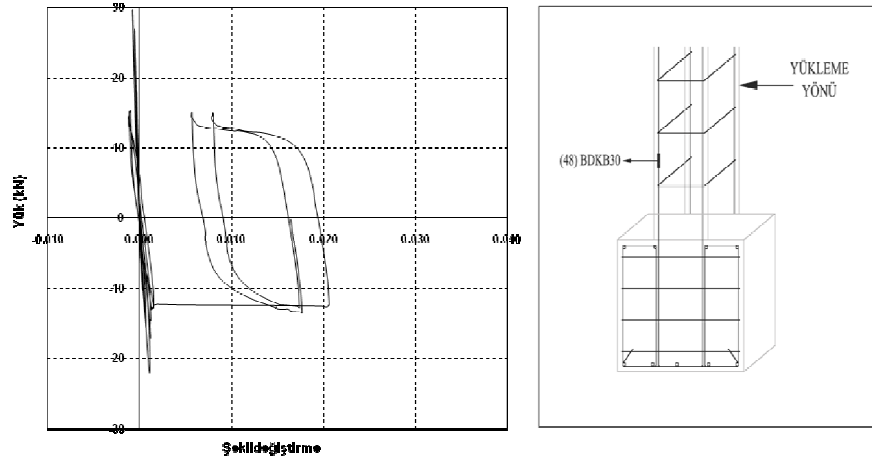
Şekil A.46 : LS-CON-Rebar numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



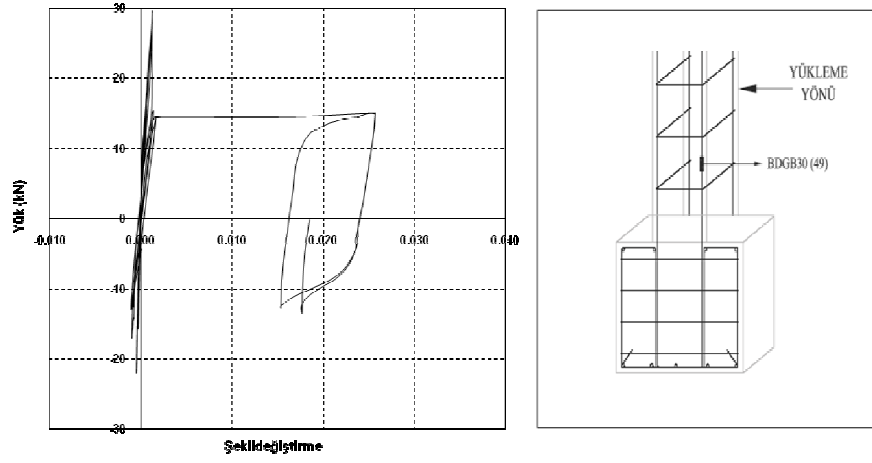
Şekil A.47 : LS-CON-Rebar numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



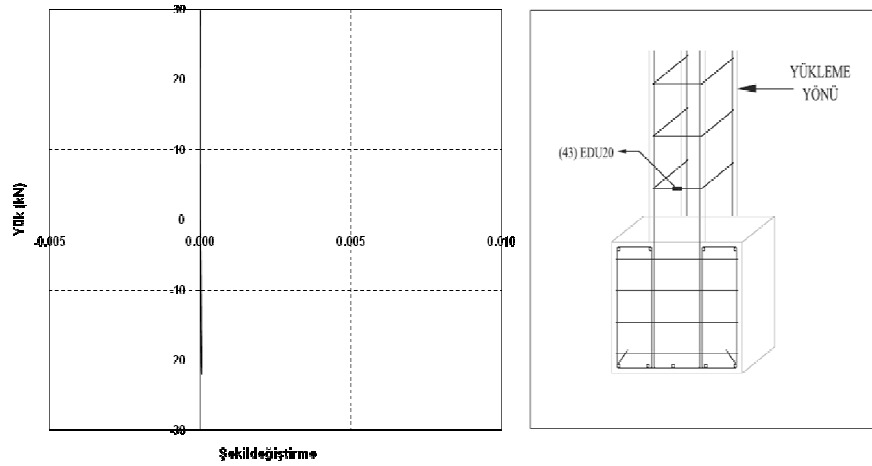
Şekil A.48 : LS-CON-Rebar numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



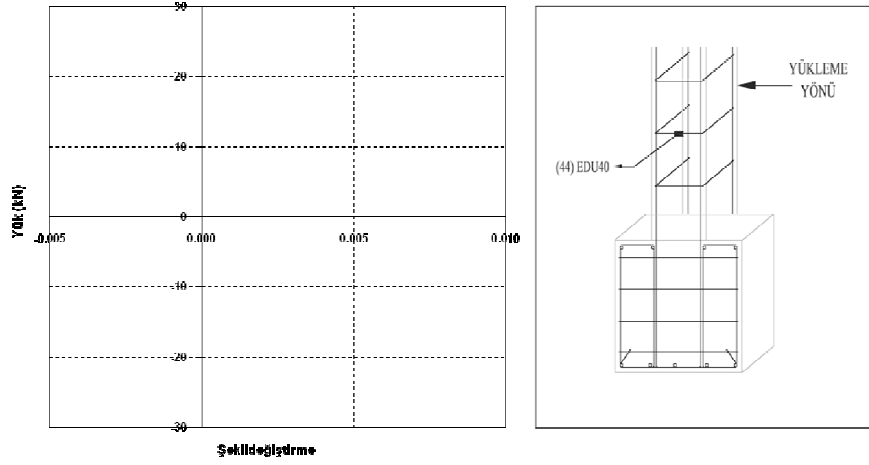
Şekil A.49 : LS-CON-Rebar numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



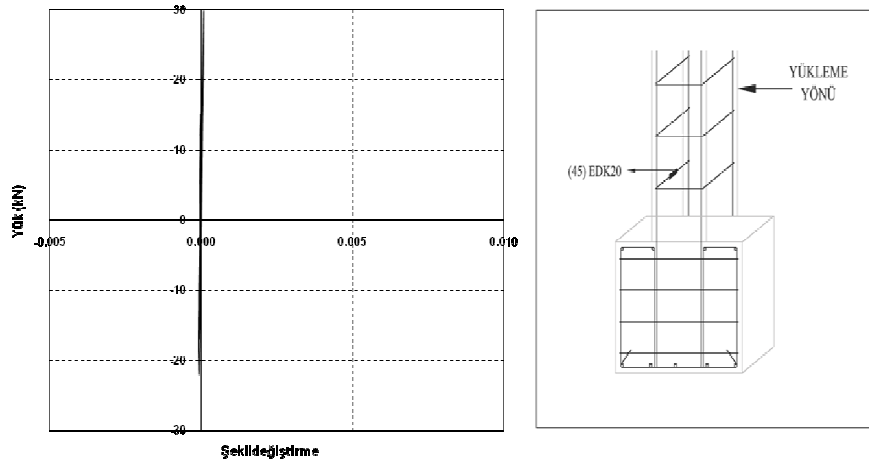
Şekil A.50 : LS-CON-Rebar numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



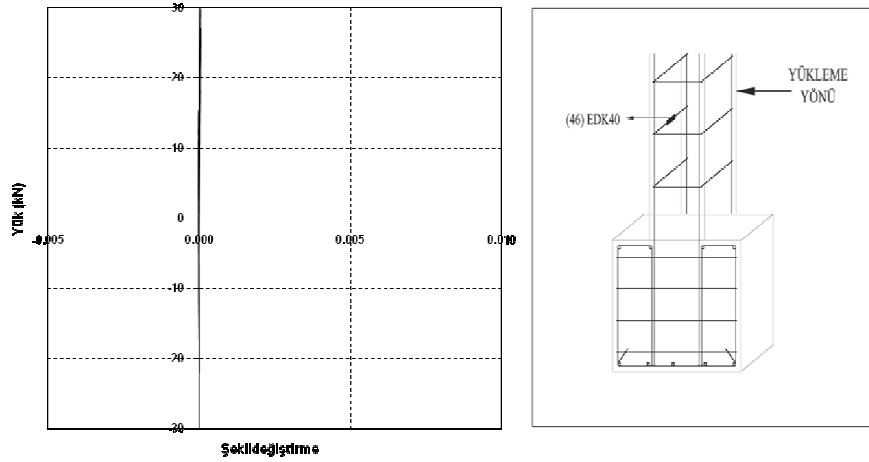
Şekil A.51 : LS-CON-Rebar numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



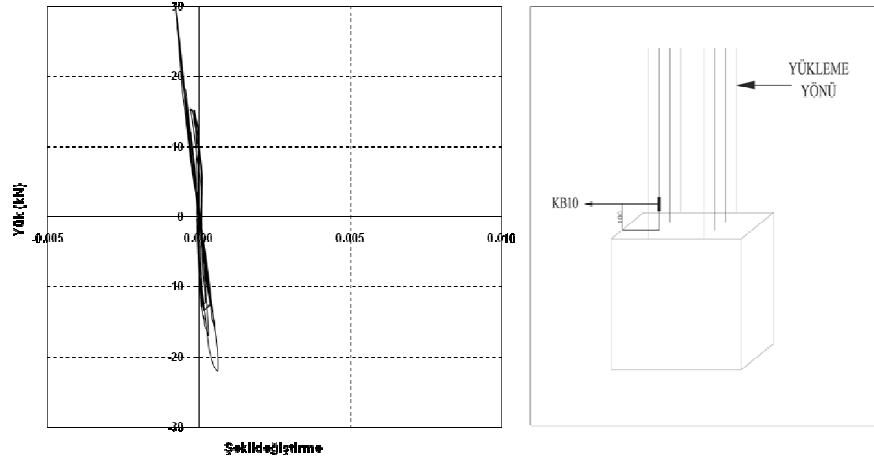
Şekil A.52 : LS-CON-Rebar numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



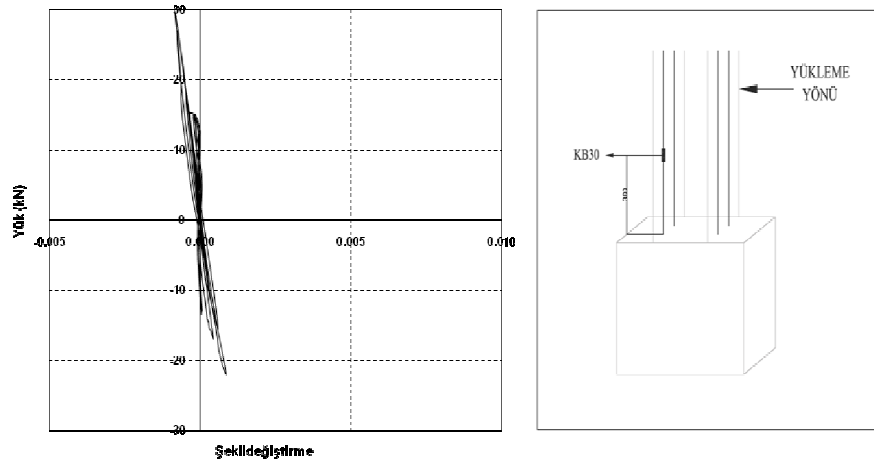
Şekil A.53 : LS-CON-Rebar numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



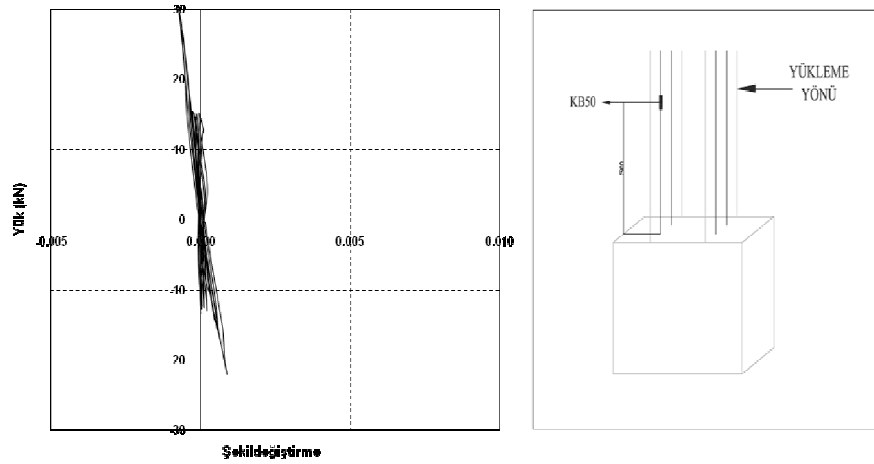
Şekil A.54 : LS-CON-Rebar numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



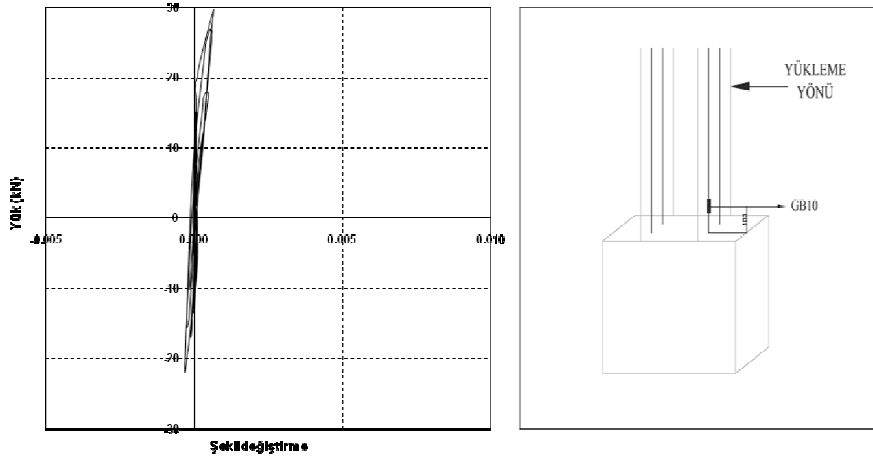
Şekil A.55 : LS-CON-Rebar numunesi KB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



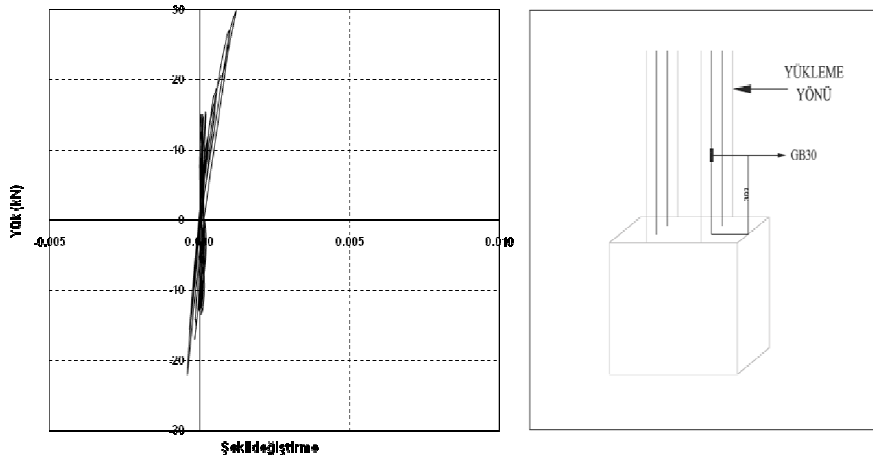
Şekil A.56 : LS-CON-Rebar numunesi KB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



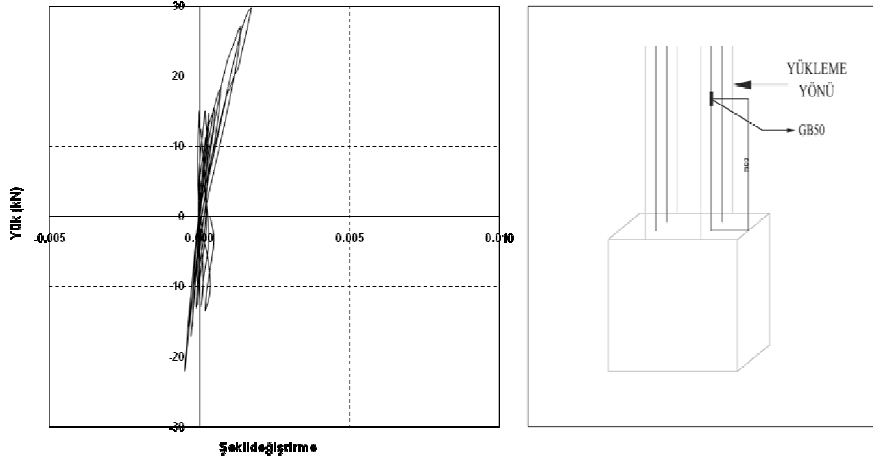
Şekil A.57 : LS-CON-Rebar numunesi KB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi



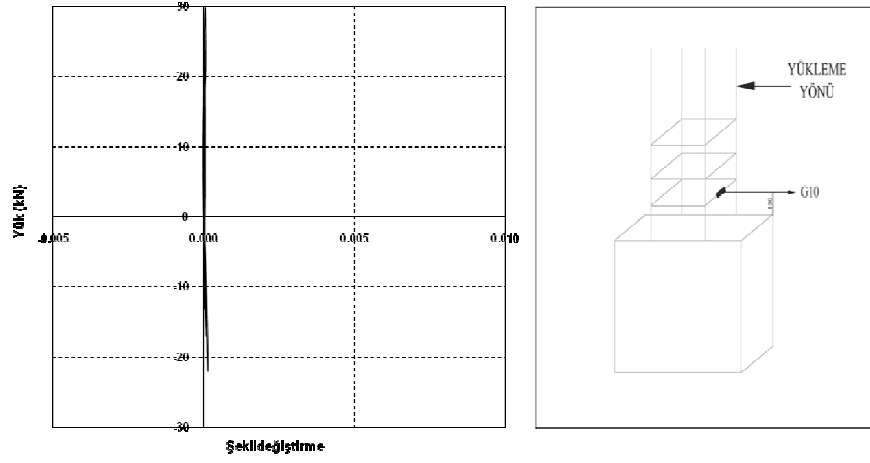
Şekil A.58 : LS-CON-Rebar numunesi GB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



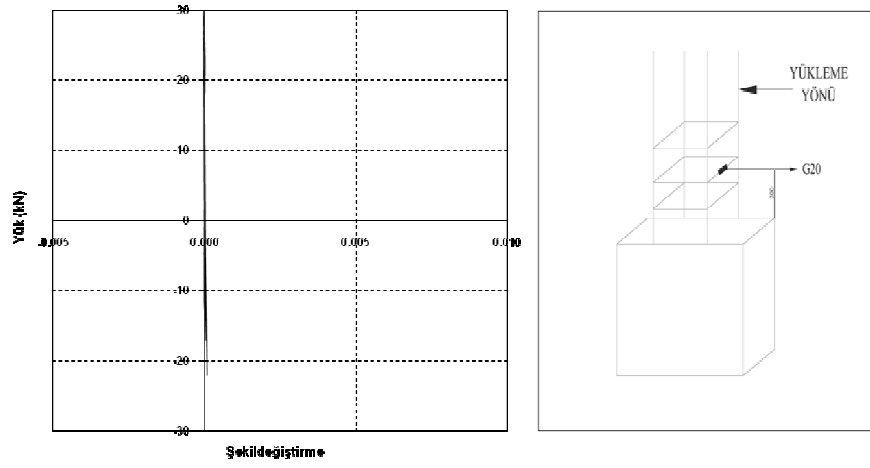
Şekil A.59 : LS-CON-Rebar numunesi GB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



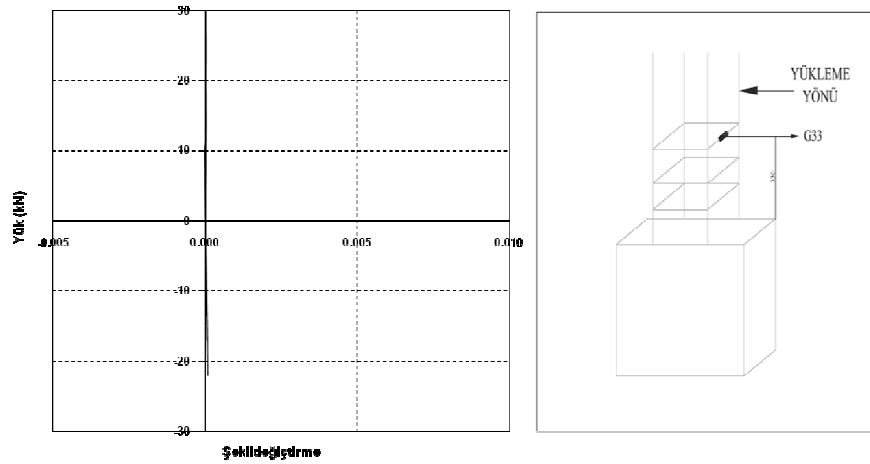
Şekil A.60 : LS-CON-Rebar numunesi GB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi



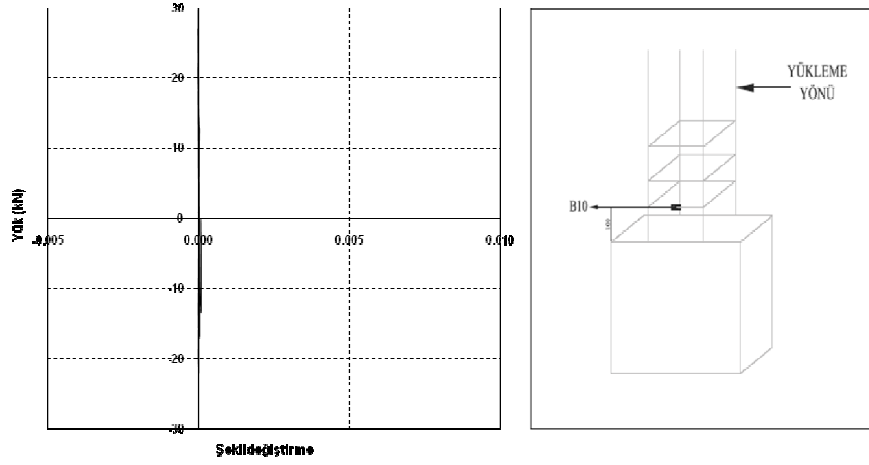
Şekil A.61 : LS-CON-Rebar numunesi G10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



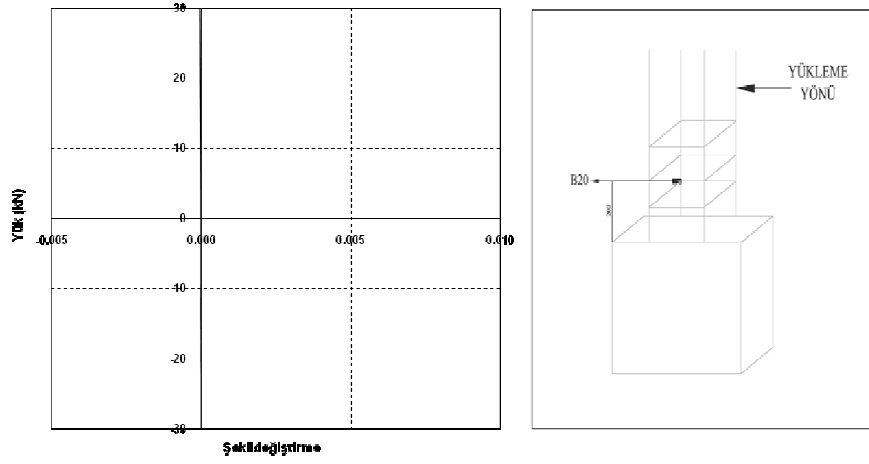
Şekil A.62 : LS-CON-Rebar numunesi G20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



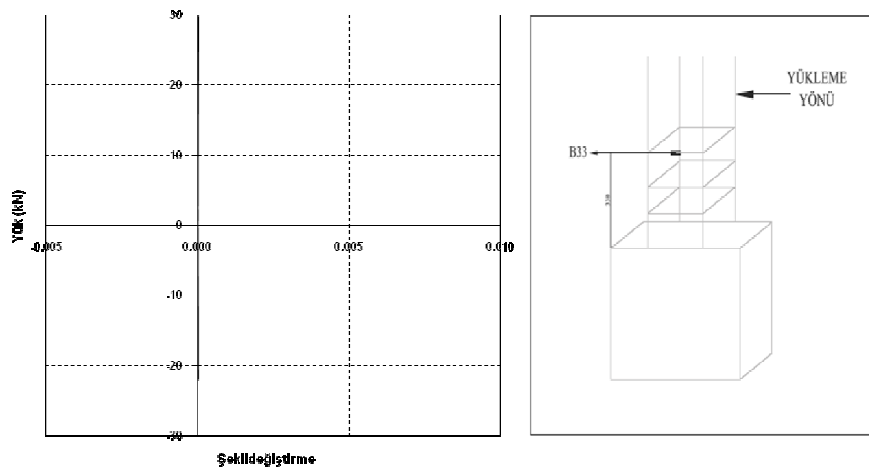
Şekil A.63 : LS-CON-Rebar numunesi G33 yük şekildeğiştirme ilişkisi



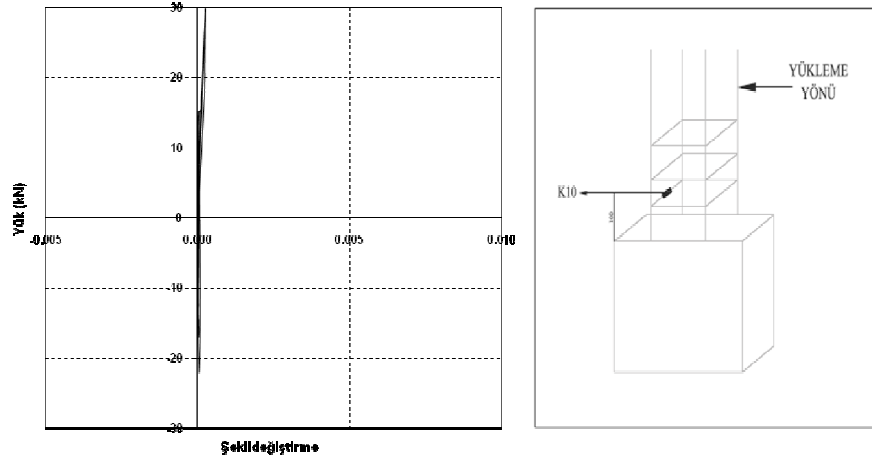
Şekil A.64 : LS-CON-Rebar numunesi B10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



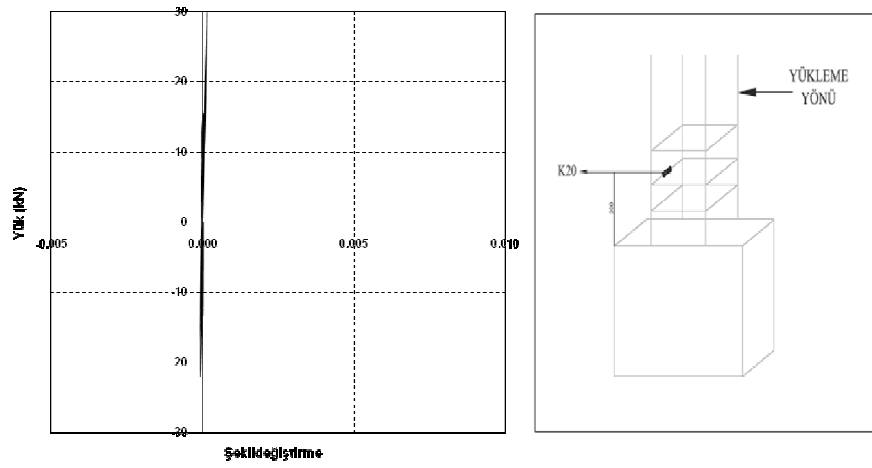
Şekil A.65 : LS-CON-Rebar numunesi B20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



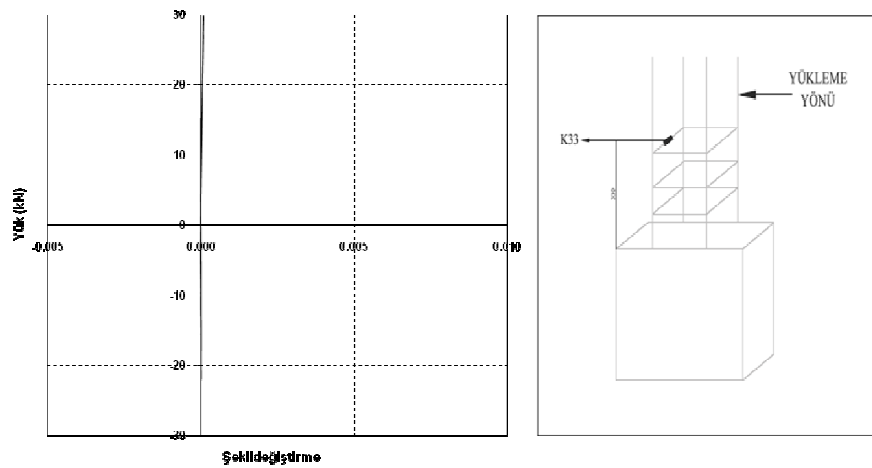
Şekil A.66 : LS-CON-Rebar numunesi B33 yük şekildeğiştirme ilişkisi



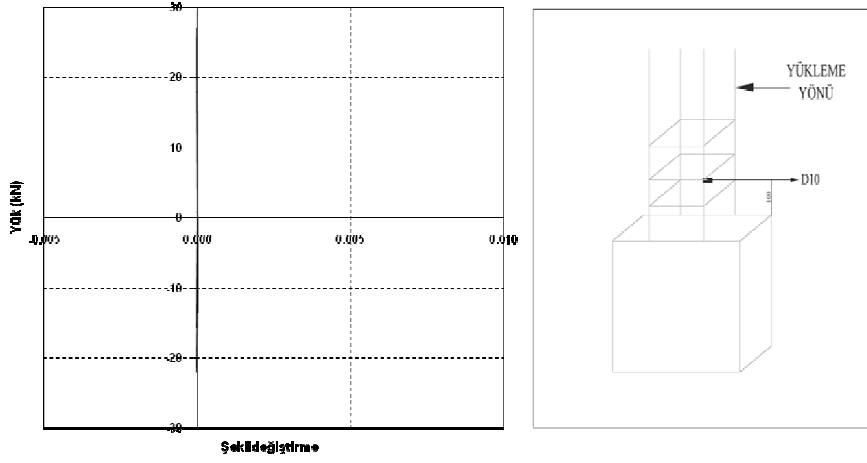
Şekil A.67 : LS-CON-Rebar numunesi K10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



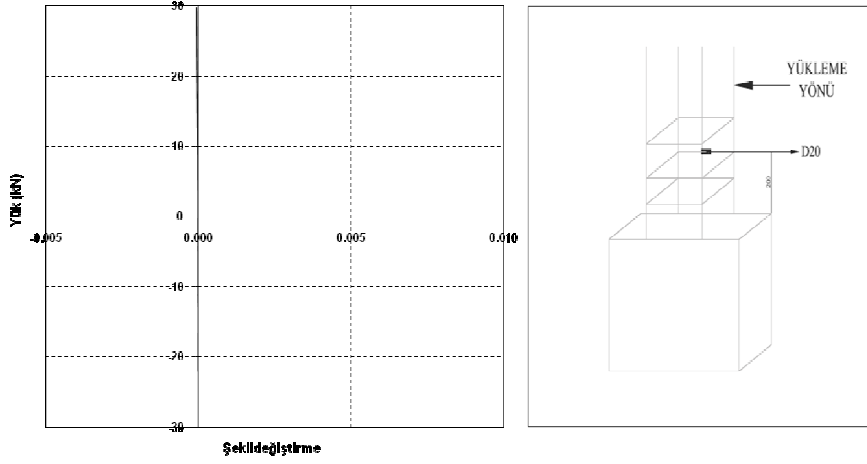
Şekil A.68 : LS-CON-Rebar numunesi K20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



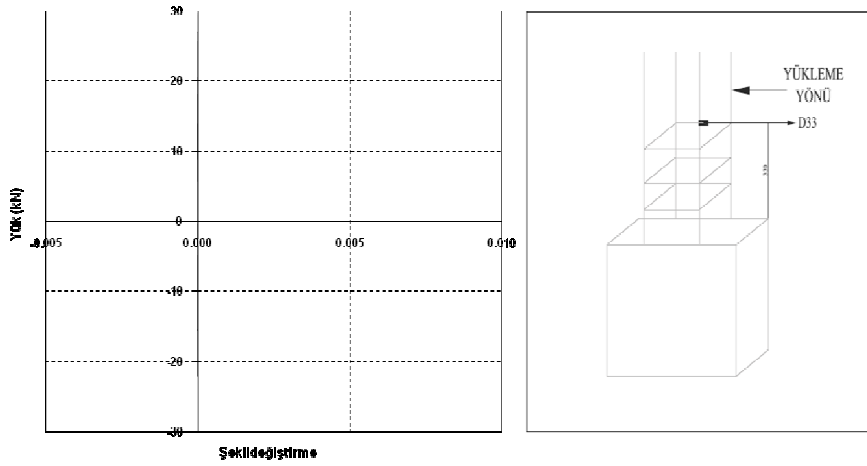
Şekil A.69 : LS-CON-Rebar numunesi K33 yük şekildeğiştirme ilişkisi



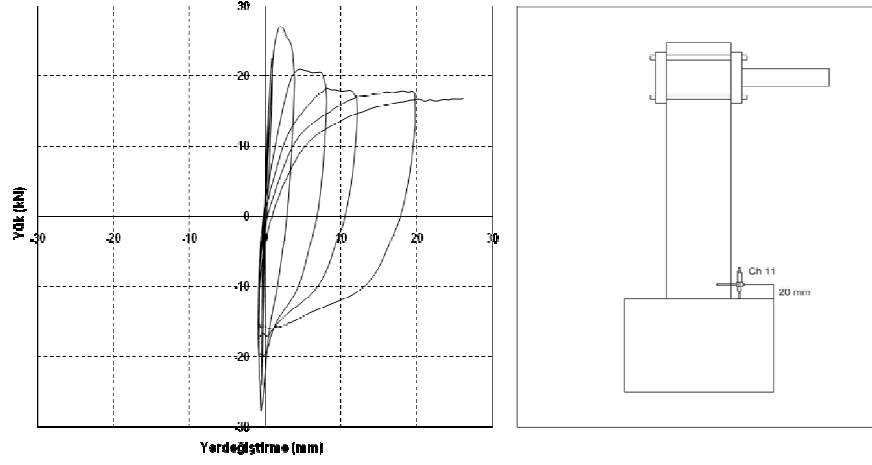
Şekil A.70 : LS-CON-Rebar numunesi D10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



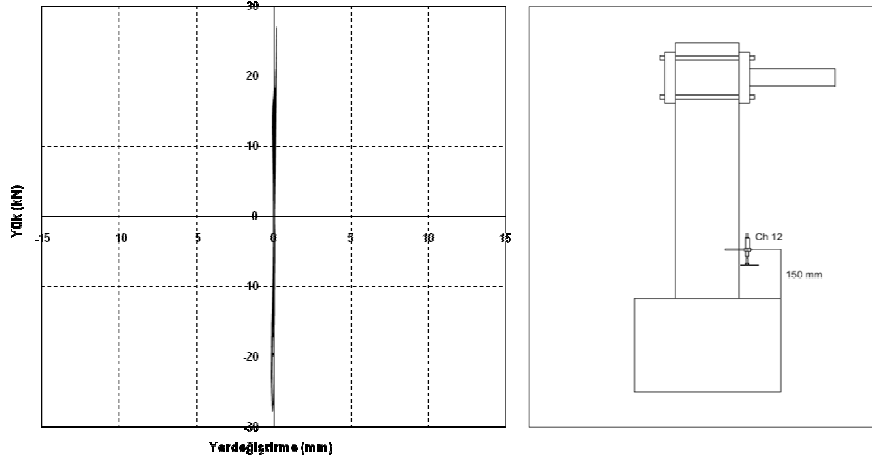
Şekil A.71 : LS-CON-Rebar numunesi D20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



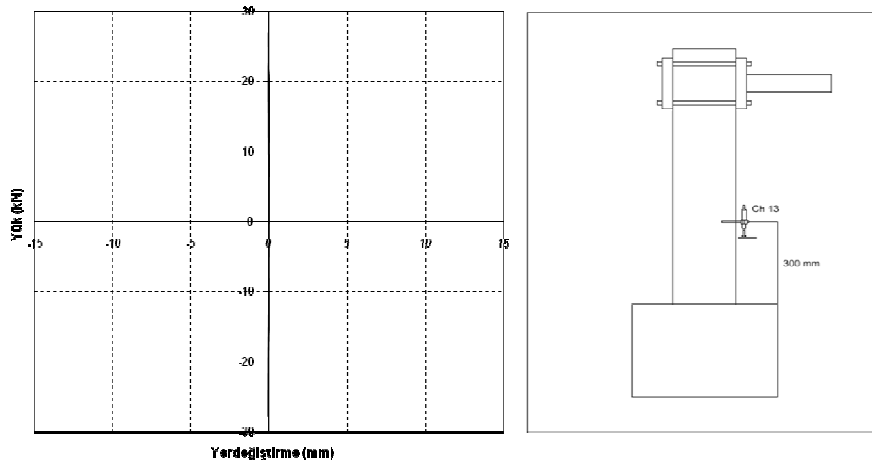
Şekil A.72 : LS-CON-Rebar numunesi D33 yük şekildeğiştirme ilişkisi



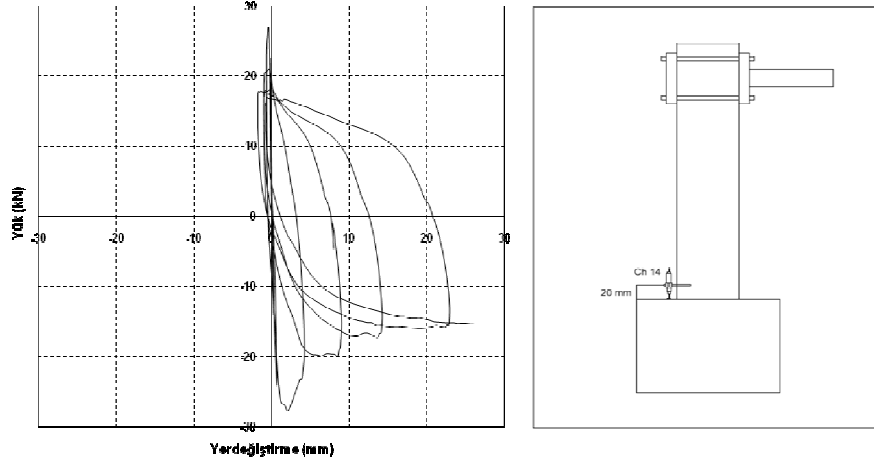
Şekil A.73 : LS-CON-Laminate numunesi 11.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



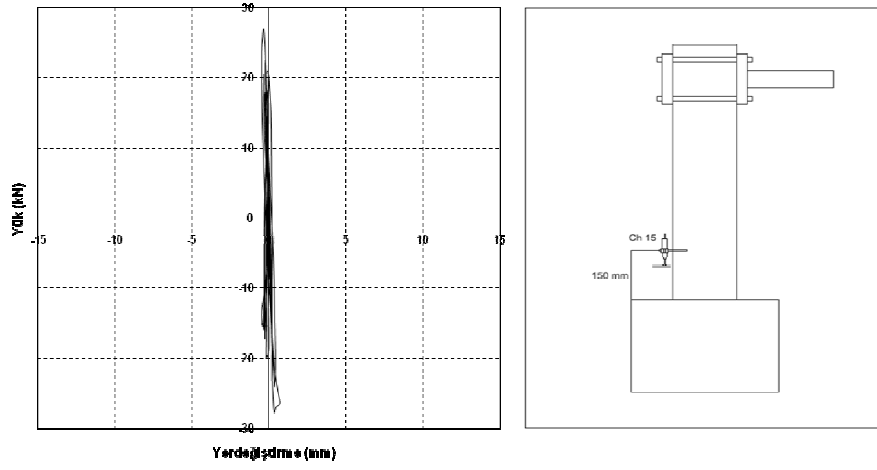
Şekil A.74 : LS-CON-Laminate numunesi 12.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



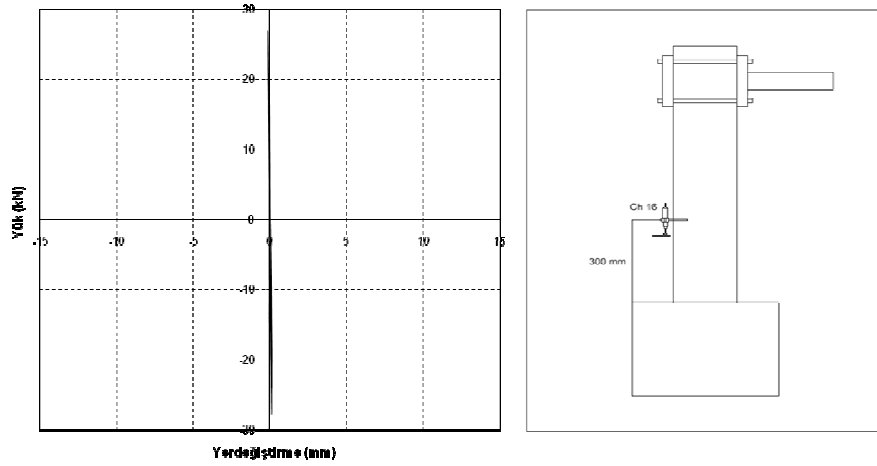
Şekil A.75 : LS-CON-Laminate numunesi 13.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



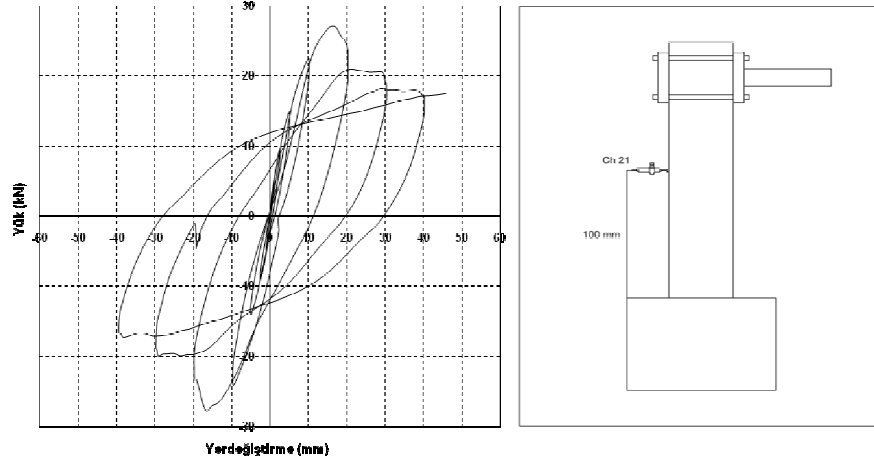
Şekil A.76 : LS-CON-Laminate numunesi 14.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



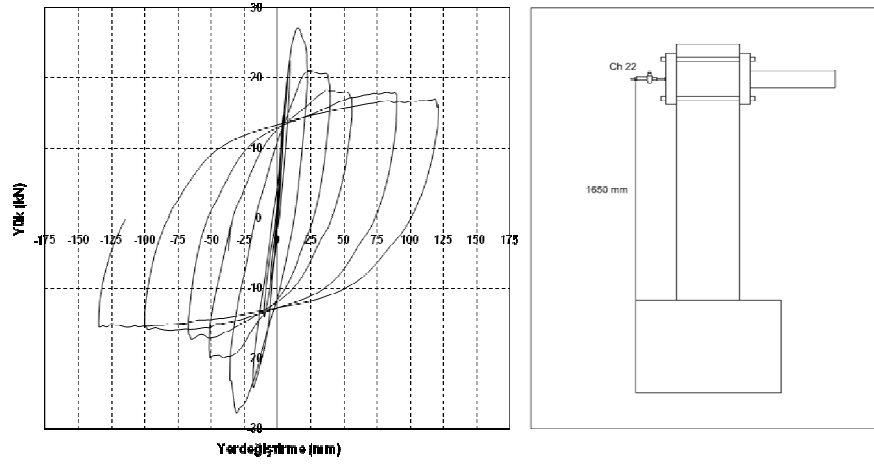
Şekil A.77 : LS-CON-Laminate numunesi 15.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



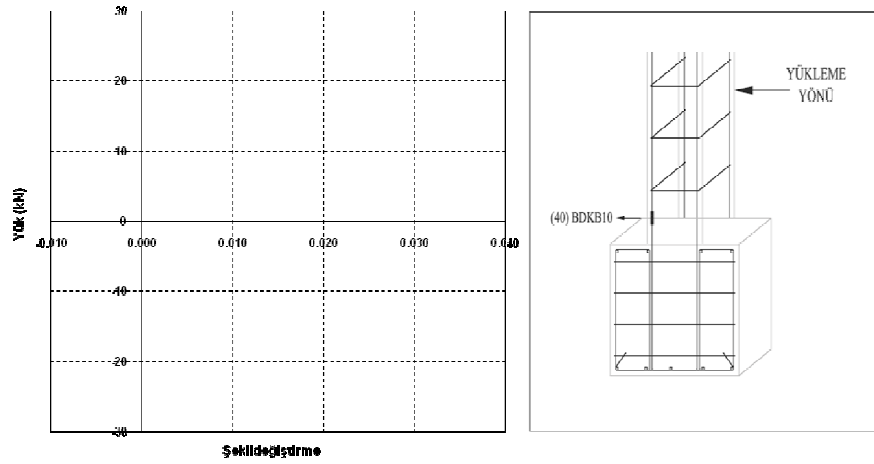
Şekil A.78 : LS-CON-Laminate numunesi 16.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



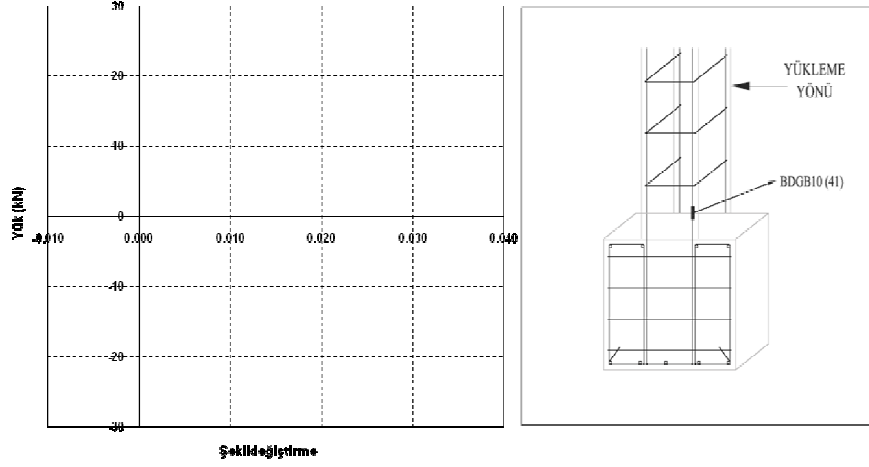
Şekil A.79 : LS-CON-Laminate numunesi 21.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



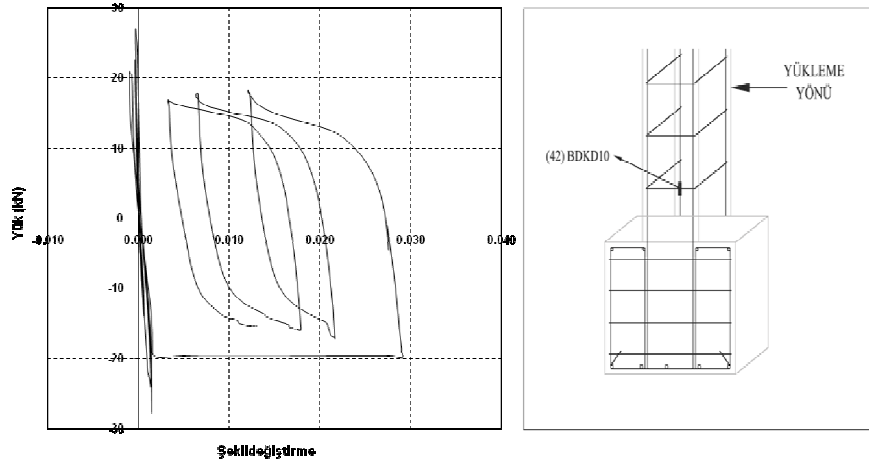
Şekil A.80 : LS-CON-Laminate numunesi 22.kanal yük yerdeğiştirme ilişkisi



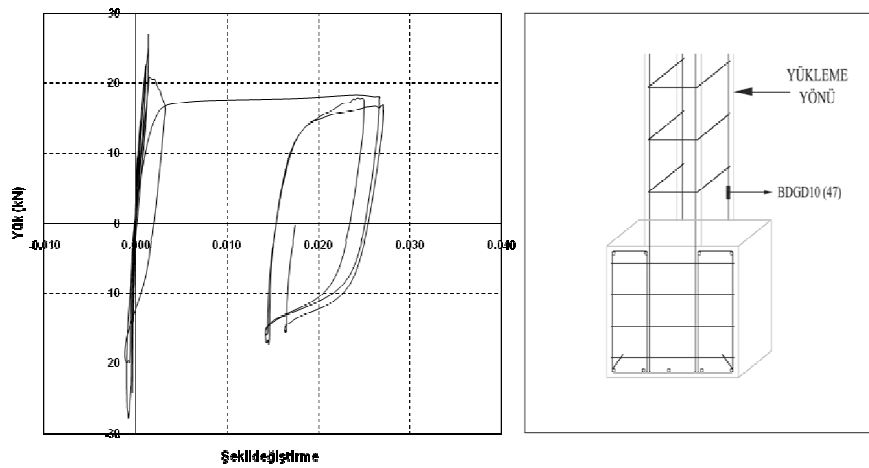
Şekil A.81 : LS-CON-Laminate numunesi BDKB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



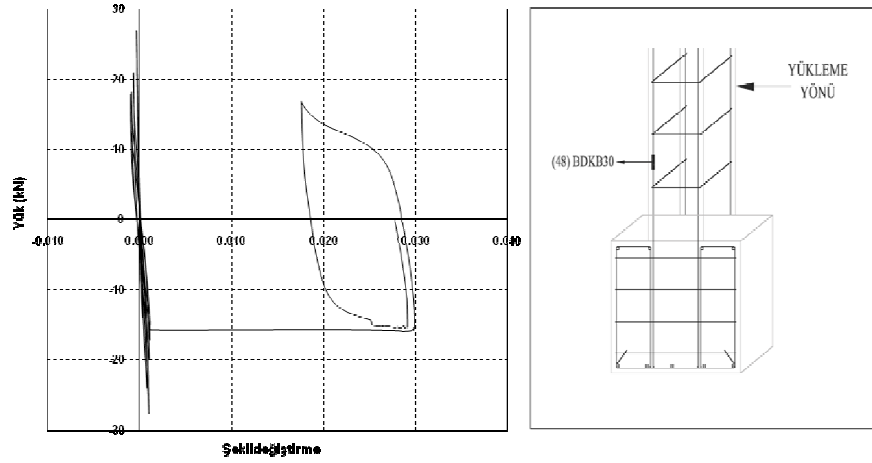
Şekil A.82 : LS-CON-Laminate numunesi BDGB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



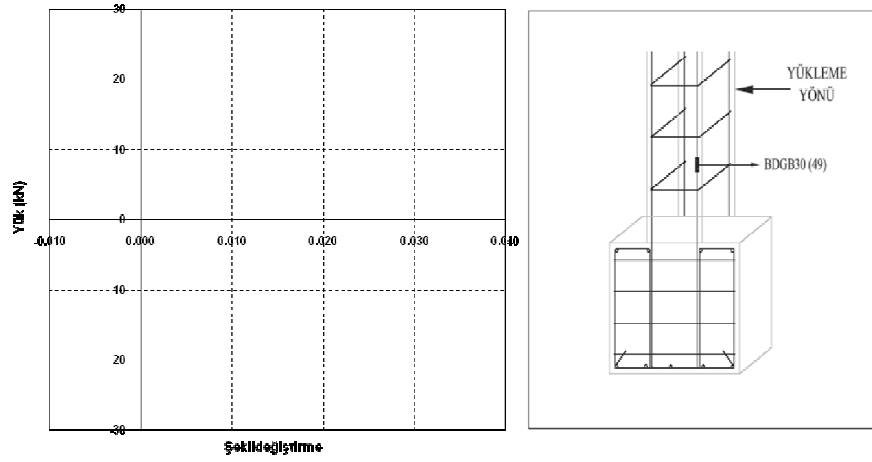
Şekil A.83 : LS-CON-Laminate numunesi BDKD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



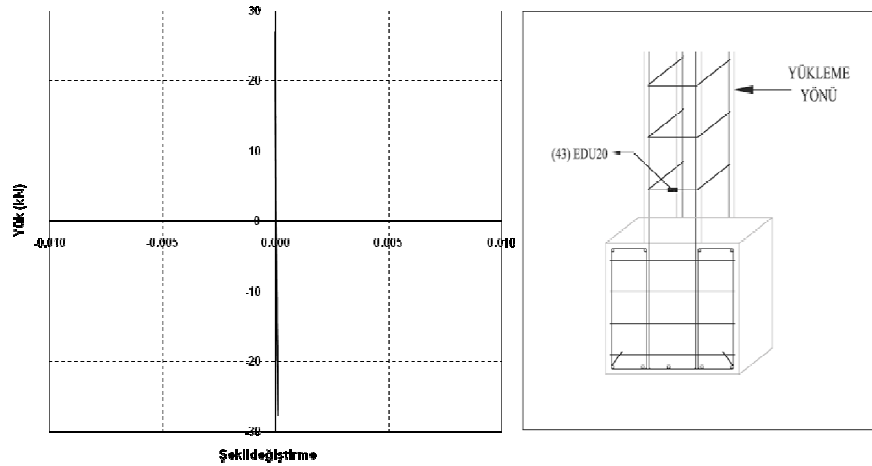
Şekil A.84 : LS-CON-Laminate numunesi BDGD10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



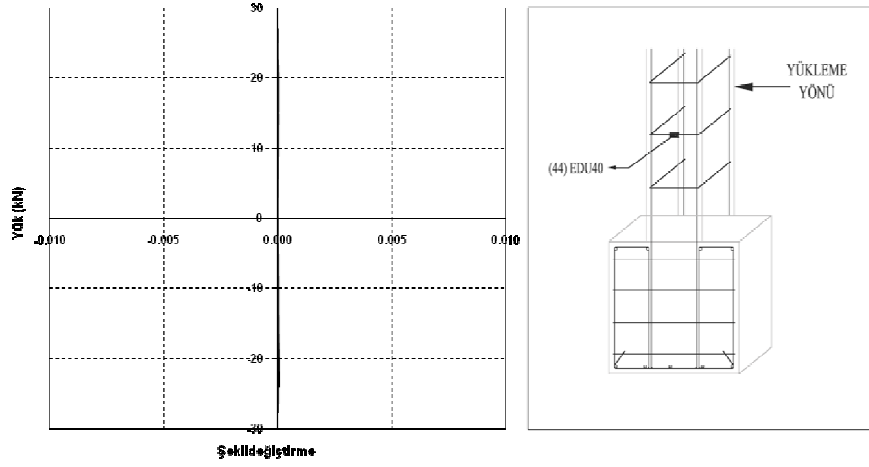
Şekil A.85 : LS-CON-Laminate numunesi BDKB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



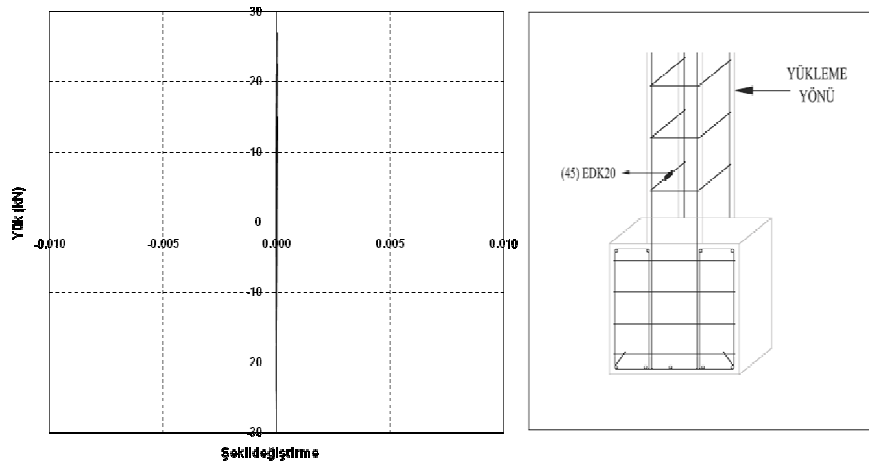
Şekil A.86 : LS-CON-Laminate numunesi BDGB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



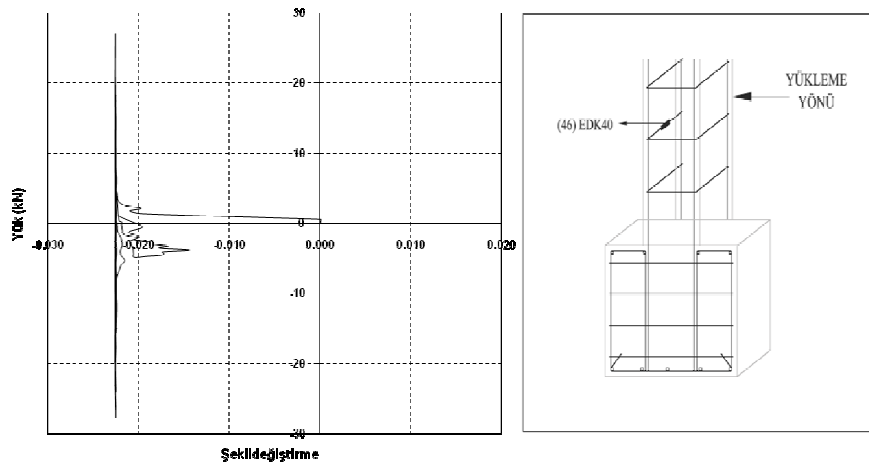
Şekil A.87 : LS-CON-Laminate numunesi EDU20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



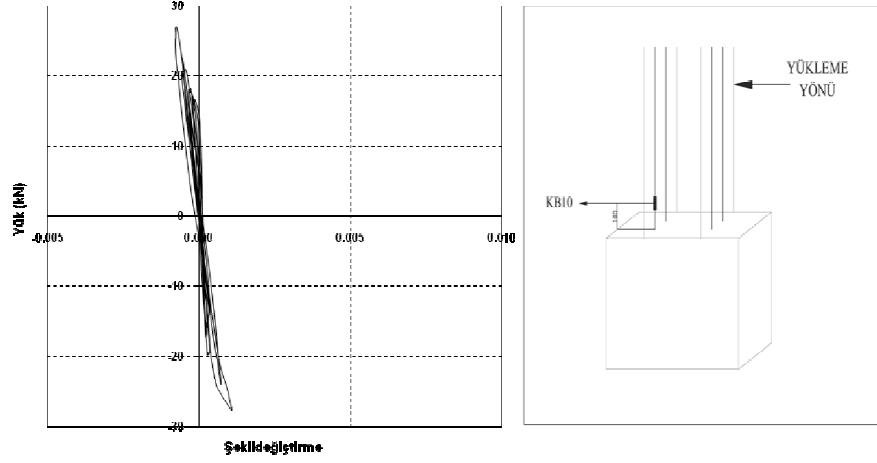
Şekil A.88 : LS-CON-Laminate numunesi EDU40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



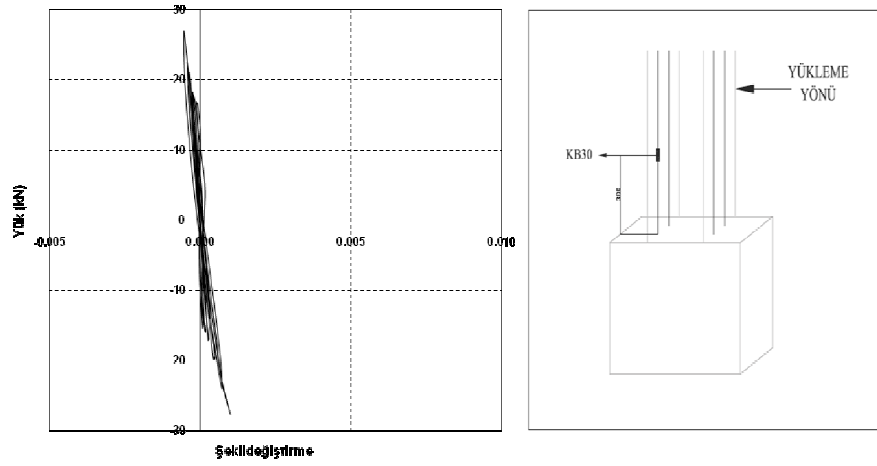
Şekil A.89 : LS-CON-Laminate numunesi EDK20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



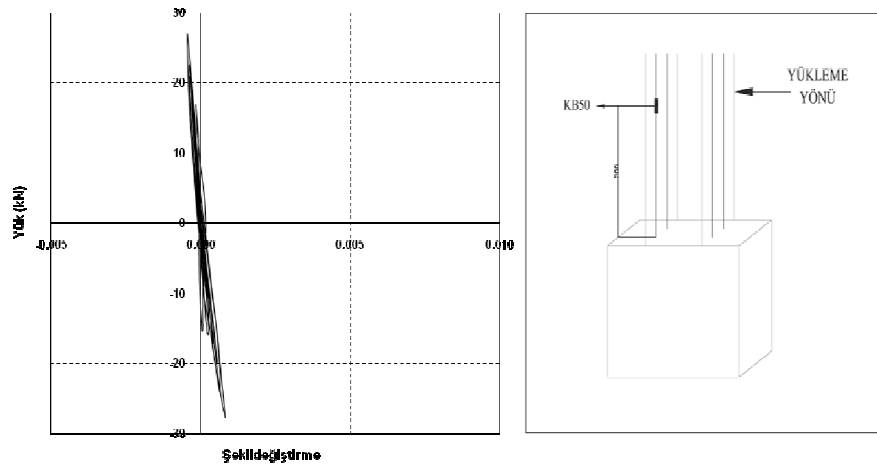
Şekil A.90 : LS-CON-Laminate numunesi EDK40 yük şekildeğiştirme ilişkisi



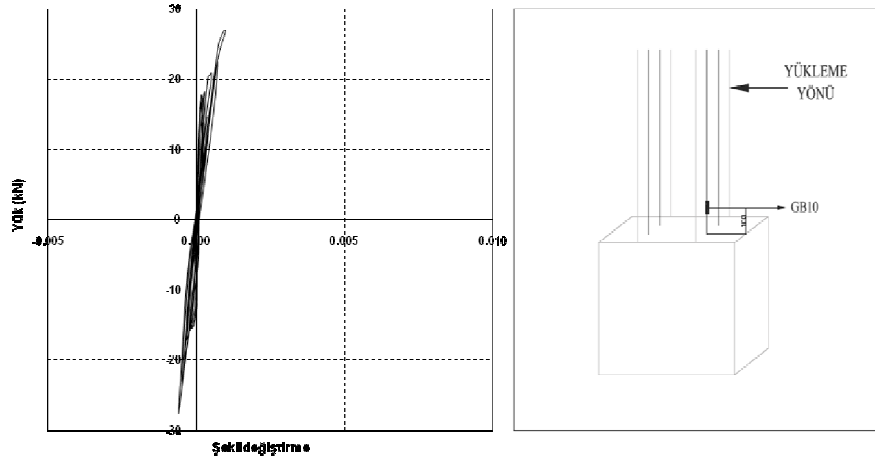
Şekil A.91 : LS-CON-Laminate numunesi KB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



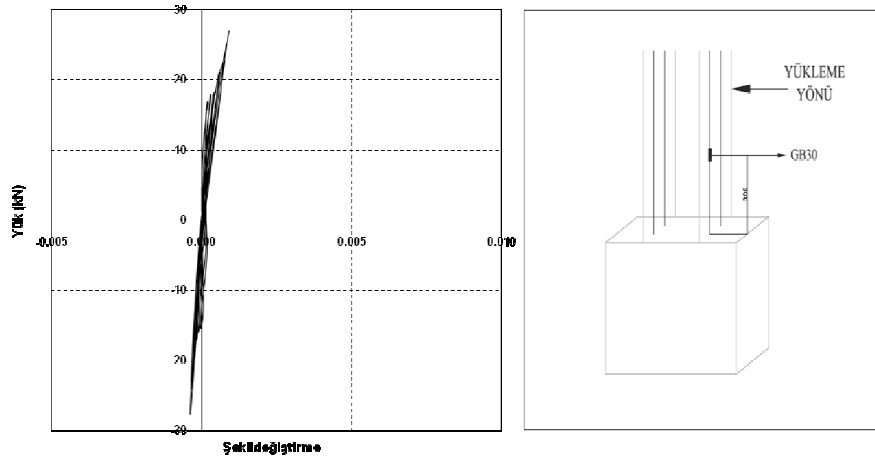
Şekil A.92 : LS-CON-Laminate numunesi KB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



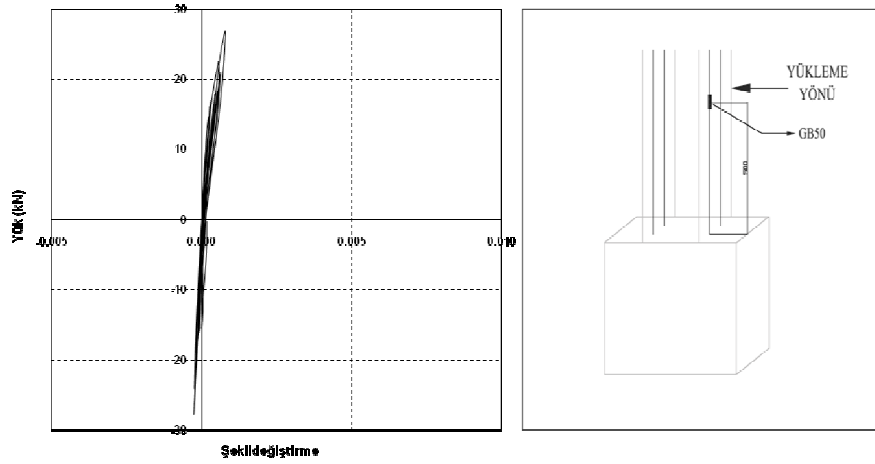
Şekil A.93 : LS-CON-Laminate numunesi KB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi



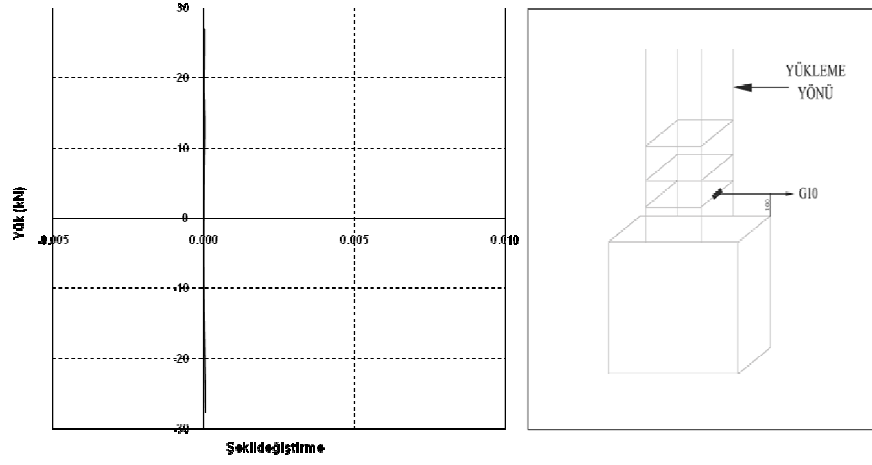
Şekil A.94 : LS-CON-Laminate numunesi GB10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



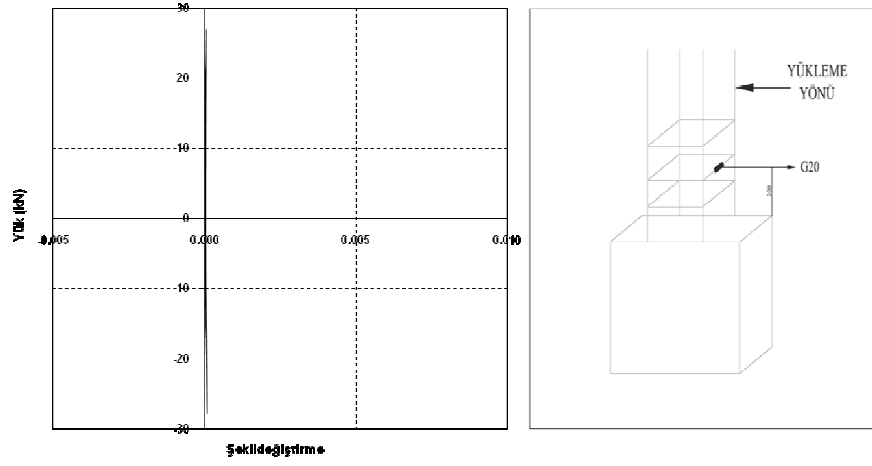
Şekil A.95 : LS-CON-Laminate numunesi GB30 yük şekildeğiştirme ilişkisi



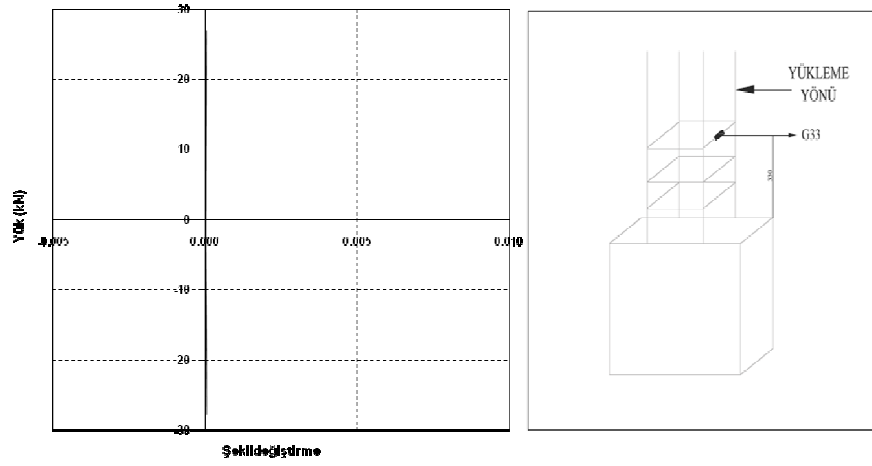
Şekil A.96 : LS-CON-Laminate numunesi GB50 yük şekildeğiştirme ilişkisi



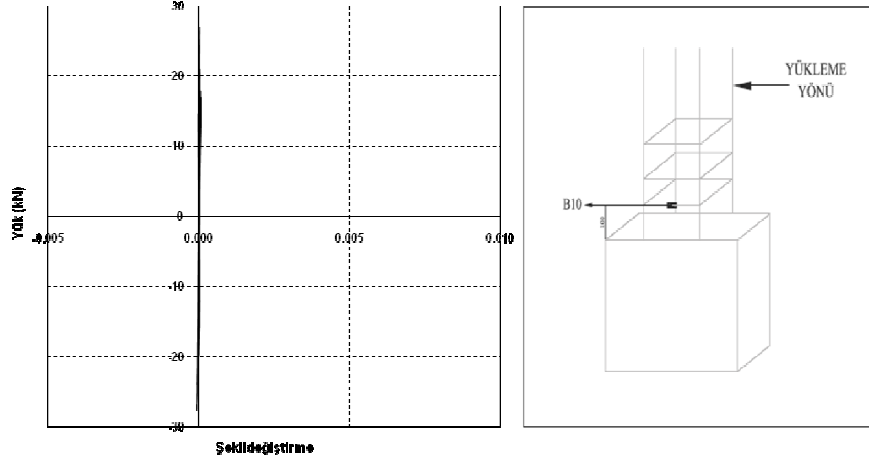
Şekil A.97 : LS-CON-Laminate numunesi G10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



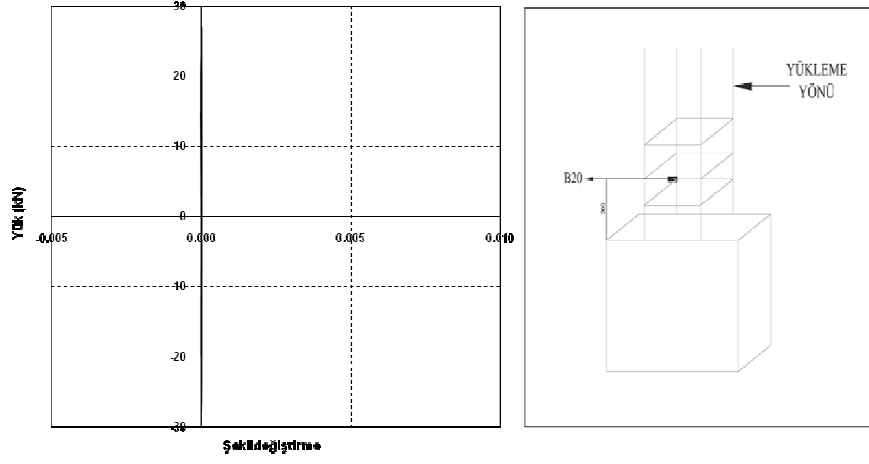
Şekil A.98 : LS-CON-Laminate numunesi G20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



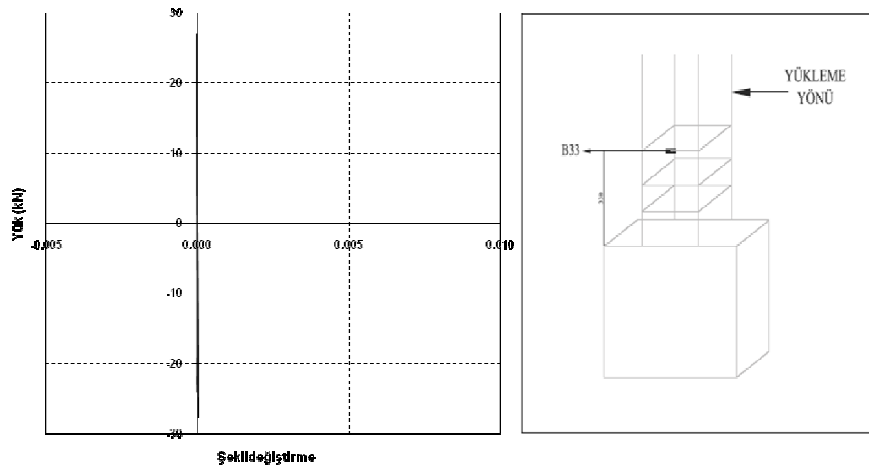
Şekil A.99 : LS-CON-Laminate numunesi G33 yük şekildeğiştirme ilişkisi



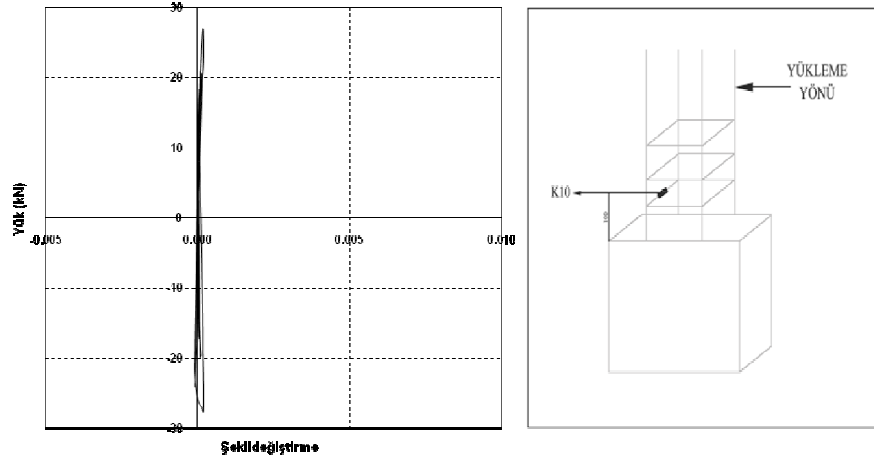
Şekil A.100 : LS-CON-Laminate numunesi B10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



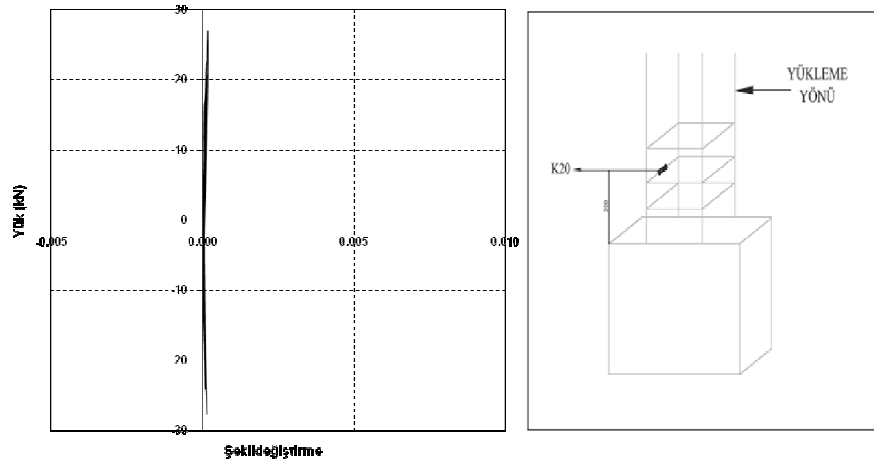
Şekil A.101 : LS-CON-Laminate numunesi B20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



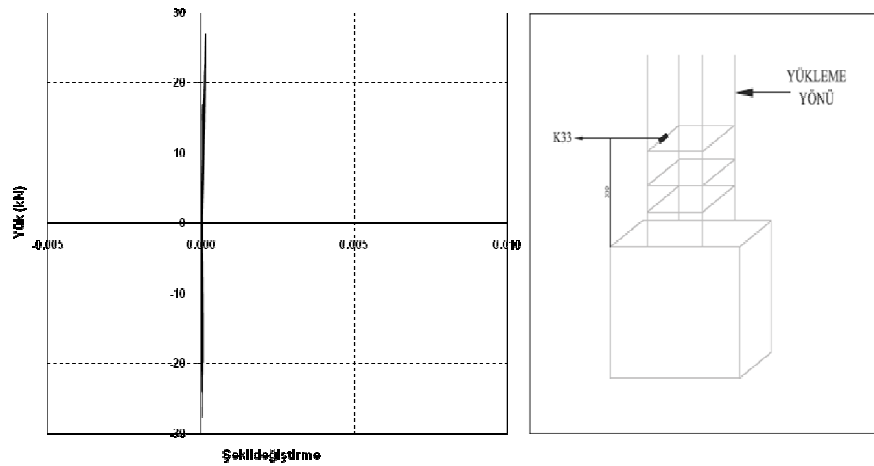
Şekil A.102 : LS-CON-Laminate numunesi B33 yük şekildeğiştirme ilişkisi



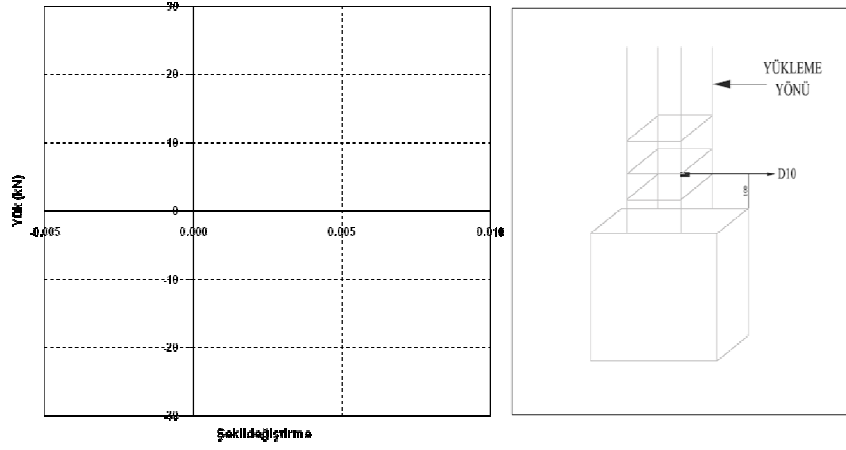
Şekil A.103 : LS-CON-Laminate numunesi K10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



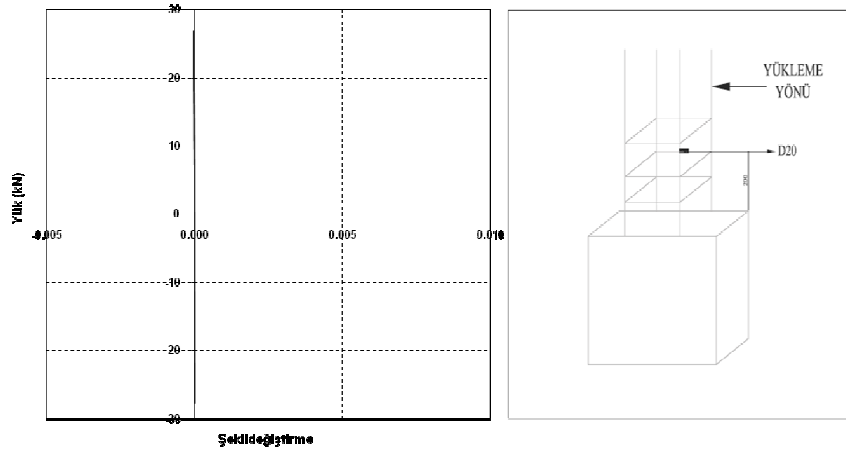
Şekil A.104 : LS-CON-Laminate numunesi K20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



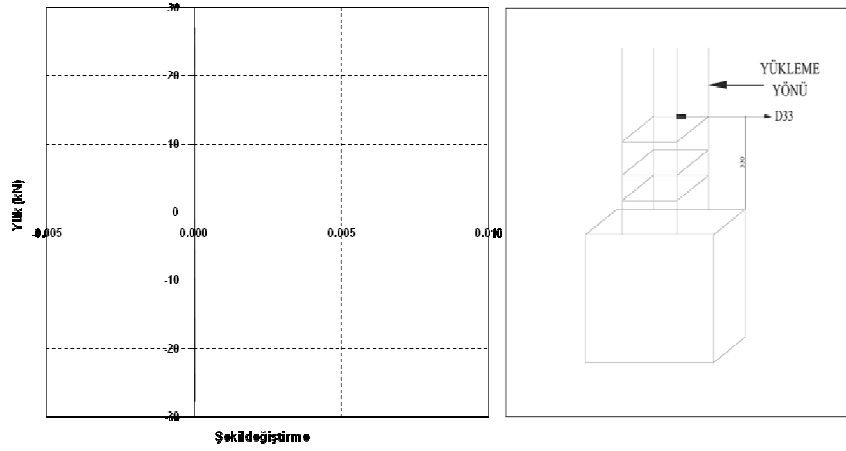
Şekil A.105 : LS-CON-Laminate numunesi K33 yük şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil A.106 : LS-CON-Laminate numunesi D10 yük şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil A.107 : LS-CON-Laminate numunesi D20 yük şekildeğiştirme ilişkisi



Şekil A.108 : LS-CON-Laminate numunesi D33 yük şekildeğiştirme ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Alper POLAT

Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul 01.11.1982

Lisans Üniversite: İTÜ İnşaat Müh.