İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KESME AÇISINDAN YETERSİZ BETONARME KISA KOLONLARIN LİFLİ POLİMERLER İLE DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. İsmail Hakkı BAŞEĞMEZ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KESME AÇISINDAN YETERSİZ BETONARME KISA KOLONLARIN LİFLİ POLİMERLER İLE DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. İsmail Hakkı BAŞEĞMEZ
(501031903)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Alper İLKİ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Zekai CELEP (İ.T.Ü.)
Yrd.Doç.Dr. Şevket ÖZDEN (K.O.Ü.)

OCAK 2007

ÖNSÖZ

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

Değerli katkıları için, Prof. Dr. Nahit Kumbasar'a; çalışma süresince yanımda olan İdris Bedirhanoğlu'na, Yasin Candan'a, Orkun İncecik'e, Cem Demir'e, Doğan Akgün'e, Ozan Göray'a, Yılmaz Kaya'ya, Yapı ve Deprem Laboratuarı personeline ve adlarını burada zikredemediğim tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Lisans öğrenimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile her zaman yanımda olan, Prof. Dr. Abdurrahman Güner'e ve Prof. Dr. Şükran Dilmaç'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı destekleyen, BASF-YKS 'ye, Betonsa'ya ise teşekkürü bir borç bilirim.

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

OCAK 2007 İsmail Hakkı BAŞEĞMEZ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ v
ŞEKİL LİSTESİ vi
SEMBOL LİSTESİ viii
ÖZET x
SUMMARY xi

1. GİRİŞ **1**

2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR **4**

3. NUMUNE VE MALZEME ÖZELLİKLERİ **8**
3.1. Giriş 8
3.2. Numunelerin Üretilmesi 8
3.2.1. Boyutlar ve Donatı İskeletinin Oluşturulması 8
3.2.2. Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması 10
3.2.3. Kalıpların Hazırlanması 12
3.2.4. Beton Dökümü 12
3.2.5. Kür Uygulaması 13
3.3. Numunelerin Özellikleri 13
3.4. Onarım ve Güçlendirme 15
3.4.1. Onarım 15
3.4.1.1 S-LS-O-1 Numunesi Onarımı 15
3.4.1.2 S-LS-O-2 Numunesi Onarımı 17
3.4.2. Güçlendirme 18
3.5. Malzeme Özellikleri ve Malzeme Deneyleri 20
3.5.1. Beton 20
3.5.2. Donatı Çeliği 24
3.5.3. Onarım ve Güçlendirme Malzemeleri 28

4. DENEY DÜZENEĞİ **33**
4.1. Yükleme Sistemi 33
4.2. Ölçüm Sistemi 36
4.2. Yükleme Patronu 43

5. DENEY SONUÇLARI **45**
5.1. Giriş 45
5.2. Numune S-LS-O-1 47
5.3. Numune S-LS-O-2 53
5.4. Numune S-LS-G-1-2Sides 57
5.5. Numune S-LS-C-1-1/2 61
5.6. Numune S-LS-G-1-1/2 66
5.7. Numune S-LS-C-1-1 71

5.8. Numune S-LS-G-1-1 76
5.9. Numune S-LS-G-2-1 81
5.10. Numune S-LS-G-3-1 85
5.11. Numune S-LS-O-1-R-R 89
5.12. Numune S-LS-O-2-R-R 93
5.13. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 96

6. KESME GÜÇLENDİRMESİ İÇİN TEORİK YAKLAŞIMLAR 109
6.1. Mevcut Yönetmelikler 109
6.1.1. DBYBHY-06 109
6.1.2. ACI-440 110
6.1.3. FIB 113
6.1.4. CSA S806-02 114
6.1.5. CONCRETE SOCIETY TR-55 115
6.2. Diğer Modeller 116
6.2.1. Etkin Birim Şekildeğiştirme Modeli 116
6.2.2. Aderans Kuvveti Modeli 117
6.3. Yönetmeliklerin Karşılaştırılması 118
6.4. Numunelerin Teorik Olarak Performansının İncelenmesi 119

7. SONUÇLAR 123

KAYNAKLAR 126

EK A. DENEY NUMUNELERİNİN KAPASİTE HESABI 129

ÖZGEÇMİŞ 132

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Numune Özellikleri 14
Tablo 3.2: Beton Karışımı 20
Tablo 3.3: Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları 21
Tablo 3.4: Standart Silindir Basınç Deneylerinin Sonuçları 24
Tablo 3.5: Boyuna Donatı Çekme Deneyi Sonuçları 25
Tablo 3.6: Enine Donatı Çekme Deneyi Sonuçları 27
Tablo 3.7: Emaco S88 C Tamir Harcı Malzemesinin Teknik Özellikleri 28
Tablo 3.8: Concresive 1302 Epoksi Enjeksiyon Malzemesinin Teknik Özellikleri 29
Tablo 3.9: BASF-YKS Primerin Mekanik Özellikleri 30
Tablo 3.10: BASF-YKS Rasatura Puttynin Mekanik Özellikleri 30
Tablo 3.11: BASF-YKS Saturantın Mekanik Özellikleri 31
Tablo 3.12: Karbon ve Cam LP Tabakaların Mekanik ve Geometrik Özellikleri 32
Tablo 4.1: Yerdeğiştirmeölçer ve Şekildeğiştirmeölçerlerin Özellikleri 41
Tablo 4.2: Donatı Şekildeğiştirmeölçerleri 42
Tablo 5.1: Numune Özellikleri 46
Tablo 5.2: Deney Sonuçları 47
Tablo 5.3: S-LS-O-1 Numunesinin Davranışının Özeti 48
Tablo 5.4: S-LS-O-2 Numunesinin Davranışının Özeti 53
Tablo 5.5: S-LS-G-1-2Sides Numunesinin Davranışının Özeti 57
Tablo 5.6: S-LS-C-1-1/2 Numunesinin Davranışının Özeti 61
Tablo 5.7: S-LS-G-1-1/2 Numunesinin Davranışının Özeti 66
Tablo 5.8: S-LS-C-1-1 Numunesinin Davranışının Özeti 71
Tablo 5.9: S-LS-G-1-1 Numunesinin Davranışının Özeti 76
Tablo 5.10: S-LS-G-2-1 Numunesinin Davranışının Özeti 81
Tablo 5.11: S-LS-G-3-1 Numunesinin Davranışının Özeti 85
Tablo 5.12: S-LS-O-1-R-R-C-1/2 Numunesinin Davranışının Özeti 89
Tablo 5.13: S-LS-O-2-R-R-G-1 Numunesinin Davranışının Özeti 93
Tablo 5.14: Hasar Özeti 104
Tablo 5.15: Enine Şekildeğiştirme Değişimi 105
Tablo 5.16: Diyagonal Şekildeğiştirme Değişimi 106
Tablo 5.17: Tüm Numuneler İçin Çeşitli Öteleme Oranlarına Ait Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkileri Altında Kalan Alanlar 107
Tablo 6.1: γ_f Bölgesel Güvenlik Faktörü Değerleri 114
Tablo 6.2: γ_{mE}, γ_{mf} ve γ_{mm} Katsayı Değerleri 117
Tablo 6.3: Yönetmeliklerin Karşılaştırılması 119
Tablo 6.4: V_c ve V_s Teorik Değerleri 121
Tablo 6.5: V_f Teorik Değerleri 122
Tablo 6.6: Analitik ve Deneysel Kesme Kapasiteleri 123

Tablo A.1: Toplam Kesme Kuvveti Kapasitesi 132

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: Numunelerin Genel Görünümü 8
Şekil 3.2: Numunelerde Donatı Detayı 10
Şekil 3.3: Donatı İskeletlerinin Görünümü 10
Şekil 3.4: Enine Donatılara N-1 Uygulaması 11
Şekil 3.5: Boyuna Donatılara N-1 Sürülmesi ve VM Bant Sarılması 11
Şekil 3.6: Kalıpların hazırlanması 12
Şekil 3.7: Beton dökümü 13
Şekil 3.8: S-LS-O-1 Numunesinin Onarım Öncesi Durumu (Alt Kolon) 16
Şekil 3.9: Hasar Görmüş Betonun Dökülmesi 16
Şekil 3.10: Emaco S88C Uygulaması 16
Şekil 3.11: Epoksi Esaslı Tamir Harcı Uygulaması 17
Şekil 3.12: Enjeksiyon Uygulaması 18
Şekil 3.13: Numunelerin Köşelerinin Yuvarlatılması 19
Şekil 3.14: Çift Bileşenli Astar Karışımı Sürülmesi ve Çift Bileşenli Epoksi Macun Sürülmesi 19
Şekil 3.15: Epoksi Esaslı Yapıştırıcı Sürülmesi ve LP Kompozit Sarılması 20
Şekil 3.16: Standart Silindir Deneyi 21
Şekil 3.17: 28 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri 22
Şekil 3.18: 90 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri 22
Şekil 3.19: 180 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri 23
Şekil 3.20: 360 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri 23
Şekil 3.21: Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (Φ20) 26
Şekil 3.22: Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (Φ20) 26
Şekil 3.23: Enine Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (ϕ8) 27
Şekil 3.24: Enine Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (ϕ8) 28
Şekil 4.1: Numune ve Yükleme Sisteminin Genel Görünümü 33
Şekil 4.2: Eksenel Yük Düzeneği ve Numune 35
Şekil 4.3: Diyagonal Doğrultuda Yerleştirilen Yerdeğiştirmeölçerlerin Ön Yüzdeki Düzeni 37
Şekil 4.4: Diyagonal Doğrultuda Yerleştirilen Yerdeğiştirmeölçerlerin Arka Yüzdeki Düzeni 38
Şekil 4.5: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Önden Görünümü 39
Şekil 4.6: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Arkadan Görünümü 40
Şekil 4.7: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Üstten Görünümü 40
Şekil 4.8: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Alttan Görünümü 40
Şekil 4.9: Yükleme Patronu 44
Şekil 5.1: İlk Kesme Çatlağı (Alt Kolon Ön Yüz) 49

Şekil 5.2: Maksimum Yatay Yük Değeri (S-LS-O-1) 49
Şekil 5.3: S-LS-O-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} \cong 0$) 50
Şekil 5.4: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-1) 50
Şekil 5.5: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 51
Şekil 5.6: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 51
Şekil 5.7: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI52) 51
Şekil 5.8: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31) 52
Şekil 5.9: S-LS-O-2 Numunesi (δ=2.25mm, ötelenme oranı=%0.25) 54
Şekil 5.10: S-LS-O-2 Numunesi Deney Sonu Görünümü 54
Şekil 5.11: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-2) 55
Şekil 5.12: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 55
Şekil 5.13: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 56
Şekil 5.14: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI52) 56
Şekil 5.15: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31) 56
Şekil 5.16: S-LS-G-1-2Sides (δ=9.00 mm, ötelenme oranı=%2.0) ……..58
Şekil 5.17: S-LS-G-1-2Sides Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -6.17mm$) ……..59
Şekil 5.18: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-1-2Sides) 59
Şekil 5.19: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 60
Şekil 5.20: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 60
Şekil 5.21: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG44) 60
Şekil 5.22: S-LS-C-1-1/2 Numunesi İlk Kesme Çatlakları 62
Şekil 5.23: Üst Kat Ön Yüz Orta Şerit Yırtık Başlangıcı 62
Şekil 5.24: S-LS-C-1-1/2 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -12.4mm$) 63
Şekil 5.25: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-C-1-1/2) 63
Şekil 5.26: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 64
Şekil 5.27: EnineDonatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 64
Şekil 5.28: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43) 64
Şekil 5.29: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35) 65
Şekil 5.30: S-LS-G-1-1/2 Numunesi C Kayma Çatlağı (δ=2.25 mm, öteleme oranı=%0.5) ……..67
Şekil 5.31: Üst Kolon Orta Cam LP Şeridi (δ=22.50 mm, öteleme oranı=%5.0) 67
Şekil 5.32: S-LS-G-1-1/2 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -12mm$) 68
Şekil 5.33: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-1-1/2) 68
Şekil 5.34: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 69
Şekil 5.35: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 69
Şekil 5.36: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG45) 69
Şekil 5.37: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35) 70
Şekil 5.38: S-LS-C-1-1 Numunesi (δ= -22.50 mm, öteleme oranı=%-5.0) 72
Şekil 5.39: S-LS-C-1-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -21.3mm$) 73
Şekil 5.40: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-C-1-1) 73
Şekil 5.41: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 74
Şekil 5.42: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 74
Şekil 5.43: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43) 74
Şekil 5.44: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35) 75
Şekil 5.45: S-LS-G-1-1 Numunesi Hasar Durumu (δ=40.5 mm, Öteleme oranı=%9.0) 78

Şekil 5.46: S-LS-G-1-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -24.75mm$)..... 78
Şekil 5.47: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-1-1) 79
Şekil 5.48: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 79
Şekil 5.49: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 80
Şekil 5.50: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43) 80
Şekil 5.51: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35) 80
Şekil 5.52: S-LS-G-2-1 Hasar Durumu (δ=27.00 mm, öteleme oranı=%6.0)..... 82
Şekil 5.53: S-LS-G-2-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -14.5mm$)..... 82
Şekil 5.54: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-2-1) 83
Şekil 5.55: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 83
Şekil 5.56: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi 84
Şekil 5.57: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI52) 84
Şekil 5.58: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31) 84
Şekil 5.59: S-LS-G-3-1 Hasar Durumu (δ=27.00 mm, öteleme oranı=%6.0)..... 86
Şekil 5.60: S-LS-G-3-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -20.95mm$) ……..86
Şekil 5.61: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-3-1) ……87
Şekil 5.62: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi ……87
Şekil 5.63: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi ……88
Şekil 5.64: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43) ……88
Şekil 5.65: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D33) ……...88
Şekil 5.66: S-LS-O-1-R-R-C-1/2 Hasar Durumu (δ=18.00 mm, öteleme oranı=%4.0) ……89
Şekil 5.67: S-LS-O-1-R-R-C-1/2 Numunesi Deney Sonu Görünümü ……....90
Şekil 5.68: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-1-R-R-C-1/2) ……91
Şekil 5.69: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi ……92
Şekil 5.70: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi ……..92
Şekil 5.71: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG46) 92
Şekil 5.72: S-LS-O-2-R-R-G-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ……94
Şekil 5.73: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-2-R-R-G-1) ……...94
Şekil 5.74: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi ……95
Şekil 5.75: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi ……...95
Şekil 5.76: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI54) ……...95
Şekil 5.77: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31) ……96
Şekil 5.78: S-LS-O-1, S-LS-O-2 ve S-LS-G-1-2Sides Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri ……98
Şekil 5.79: S-LS-C-1-1/2, S-LS-G-1-1/2, S-LS-O-1-R-R-C-1/2 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri ……99
Şekil 5.80: S-LS-C-1-1, S-LS-G-1-1, S-LS-O-2-R-R-G-1 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri ……..101
Şekil 5.81: S-LS-G-1-1, S-LS-G-2-1, S-LS-G-3-1 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri ……102
Şekil 5.82: S-LS-G-1-2Sides, S-LS-G-1-1/2, S-LS-G-1-1 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri ……..102
Şekil 5.83: Tüm Numuneler İçin Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri ……103
Şekil 5.84: Tüm Numuneler İçin Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkileri Altında Kalan Alan Artşları (%) …… …..109

Şekil 6.1: Şeritler ile Güçlendirme Durumunda wf, sf ve α Tanımları..... 112
Şekil 6.2: Güçlendirme Tipleri 112

SEMBOL LİSTESİ

A_g : Toplam kesit alanı
A_s : Çekme donatısı kesit alanı
A_s' : Basınç donatısı kesit alanı
A_{sh} : Enine donatı enkesit alanı
b : Kesit genişliği
b_w : Minumum kesit genişliği
d : Eleman faydalı yüksekliğini
E_c : Sarılmamış beton için elastisite modülü
$E_{c,ort}$: Sarılmamış beton için ortalama elastisite modülü
E_f : LP elastisite modulü
E_s : Çelik elastisite modülü
f_c : Beton basınç gerilmesi
f'_c : Sarılmamış beton silindir basınç dayanımı
$f'_{c,ort}$: Sarılmamış beton ortalama silindir basınç dayanımı
f'_{cj} : j günlük beton için standart silindir basınç dayanımı
f_{fe} : LP tabakasında oluşan çekme gerilmesi
f_{fu} : LP kompozit kopma gerilmesi
f_s : Donatı gerilmesi
f_y : Boyuna donatı akma dayanımı
f_{yh} : Enine donatı akma dayanımı
h : Kesit yüksekliği
k : Azaltma faktörü
k_v : Aderans azaltma faktörü
L_e : Aktif aderans boyu
N : Eksenel kuvvet
n_f : Tek yüzdeki LP sargı tabaka sayısı
t_f : Bir tabaka LP için etkili kalınlık
s : Enine donatı aralığı
s_f : LP şeritlerin, eksenden eksene olmak üzere aralıkları
V : Kesme kuvveti
V_f : Kesme kuvveti dayanımına LP sargının katkısı
w_f : LP şerit genişliği
w_{fe} : LP kompozit etkin genişliği
ϕ_e : Enine donatı çapı
ϕ_f : Dayanım faktörü
ρ : Boyuna donatı oranı
ρ_f : LP kompozit oranı
ρ_{sh} : Hacimsel enine donatı oranı
ε : Şekildeğiştirme

ε_{fe} : LP etkin birim uzama sınırı
ε_{fu} : LP kopma birim uzaması
ε_{h} : Enine şekildeğiştirme
ε_{l} : Diyagonal şekildeğiştirme
ε_{s} : Çelik şekildeğiştirmesi
α : LP kompozit uygulama açısı
θ : Diyagonal çatlak açısı
γ_{f} : Bölgesel güvenlik faktörü
ζ_{bu} : Ortalama aderans dayanımı
ν : Kesit eksenel yük kapasite oranı
δ_{y} : Akma yerdeğiştirmesi

KESME AÇISINDAN YETERSİZ BETONARME KISA KOLONLARIN LİFLİ POLİMERLER İLE DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, kesme açısından yetersiz düşük beton dayanımlı betonarme kısa kolonların, lifli polimer kompozitler ile güçlendirme öncesi ve sonrası sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında davranışı incelenmiştir. Numuneler, ülkemizdeki mevcut göreli olarak eski betonarme yapıların karakteristiklerini yansıtmak amacıyla, düşük beton kalitesi ve yetersiz enine donatı kullanılarak üretilmiştir. Numunelerin güçlendirilmesinde, karbon ya da cam lifli polimerler kullanılmıştır. 7 adet numune doğrudan güçlendirilmiş olup, 2 adet numune herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmadan, referans davranışı gözlemlemek amacıyla denenmiştir. Bu 2 adet referans numunesi; onarılıp, güçlendirilmiş ve yeniden test edilmişlerdir. Bu şekilde, deney programı kapsamında toplam 11 adet numune deneye tabi tutulmuştur. Ağırlıklı olarak diyagonal basınç gerilmelerinin etkileri sebebiyle, eğilme kapasitesine ulaşamayan güçlendirilmiş numuneler, referans numunelerine kıyasla, dayanım ve deformasyon kabiliyeti açısından daha iyi bir performans sergilemişlerdir. Deney sonuçları, ilgili yönetmelikler ile birlikte, etkin şekildeğiştirme ve aderans mekanizmasına dayanan iki analitik model kullanılarak elde edilen teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, aynı zamanda Araş. Gör. İdris Bedirhanoğlu'nun doktara tez çalışmasının bir bölümünü oluşturmaktadır.

SEISMIC RETROFIT OF SHEAR DEFICIENT REINFORCED CONCRETE SHORT COLUMNS WITH FRP COMPOSITES

SUMMARY

In this study, the behavior of shear critical low strength reinforced concrete columns are investigated under constant axial load and reversed cyclic lateral loads before and after retrofitting with fiber reinforced polymer composite sheets. For this purpose, eleven specimens, which were constructed using low quality concrete and insufficient transverse reinforcement, intentionally for reflecting the characteristics of relatively older existing buildings, were tested. External jackets of different thickness and details mode of carbon or glass fiber reinforced polymer sheets were used to retrofit the specimens. While seven specimens were directly retrofitted, two specimens were tested without any retrofit process for representing the reference behavior, then these two specimens, one of which was severely and the other slightly damaged, were retested after repair and retrofit process. The retrofitted specimens, while not being able to reach flexural capacity due to the effects of excessive diagonal compression stresses, exhibited much better performance with respect to reference specimens both in terms of strength and deformability. The experimental results are compared with the related code regulations and two analytical models which are based on the effective strain and bond mechanism, respectively. It should be note that this study is also a part of doctorate thesis of Research Assistant Idris Bedirhanoglu.

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı kavramına göre, depremin şiddetine göre belirli bir miktar hasarın meydana gelmesi normal bir durum olarak kabul edilir. Bu kavrama göre; kolon, kiriş, perde gibi yapı elemanları, yapının ekonomik ömrü içinde olabilecek hafif şiddetteki depremlerde dikkate değer hasar görmemelidir. Bu süre içinde orta şiddetteki depremlerde, taşıyıcı olan elemanlarında onarılabilir düzeyde hasar görülebileceği gibi yapının taşıyıcı olmayan bölümlerinde de hasarlar görülebilir. Yapının ekonomik ömrü içinde en çok bir kez olabilecek çok şiddetli depremde ise taşıyıcı elemanlar onarılamayacak derecede hasar görebilir. Fakat bu durumda bile can kaybı meydana getirecek yıkımlar olmamalıdır. Normal olarak depreme dayanıklı bir yapı, bu kavrama uyan bir yapı olarak kabul edilir. Yapının yönetmelik esaslarına göre yapılmaması halinde ise, hafif veya orta şiddetteki depremlerde bile yapıda büyük hasarlar görülebilir. Tasarım ve yapım sırasında gerekli özenin gösterilmemesi, ihmaller, kusurlar depremde hasarının büyümesine neden olur. Yurdumuzda deprem hasarlarının fazla olmasının ana sebepleri; beton dayanımının düşük olması, etriye, donatı ekleri ve ankraj konusundaki yetersizlikler şeklinde sıralanabilir. Tüm bu durumların önüne geçebilmek için; yeni yapılar, yönetmeliklerde yer alan şartlar doğrultusunda inşa edilmeli, mevcut yetersiz yapılar ise uygun teknikler kullanılarak güçlendirilmeli ya da yıkılarak yeniden inşa edilmelidir.

Güçlendirmenin hedefi, yapıyı yalnızca deprem öncesi sahip olduğu güvenliğe ulaştırmak değildir. Amaç, yapının şiddetli yer hareketlerine karşı koyabilecek performansa ulaştırılmasıdır.

Hasar görmüş bir kolonun deprem etkilerini taşıyabilir duruma getirilmesi veya yatay yük taşıma kapasitesinin arttırılması için güçlendirilmesi gerekebilir. Kolonun kesme kuvveti dayanımı ve sünekliği, geleneksel olarak enine donatı sıklaştırmasıyla arttırılır. Aynı zamanda kesme kapasitesinde arzu edilen bu artış, lif takviyeli polimer (LP) kompozitler ile güçlendirilmek suretiyle de sağlanabilir. Bu metotla kolon

rijitliğinde önemli bir değişiklik oluşmadığı için, taşıyıcı sistemde bir iç kuvvet değişimi ortaya çıkmaz, [1].

Günümüzde, yapıların güçlendirilmesi için birçok farklı teknik uygulanmakla beraber, dış yüzeye, lif takviyeli polimer (LP) kompozit malzemeler yapıştırılarak güçlendirme bu tekniklerden bir tanesidir. Yüksek dayanım, yüksek dayanıklılık, düşük öz ağırlık ve kolay uygulanabilir olma gibi avantajlara sahip olan lif takviyeli polimer (LP) kompozit malzemelerin inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanlar karbon lif takviyeli (Karbon LP), Cam lif takviyeli (Cam LP) ve Aramid lif takviyeli (Aramid LP) polimer kompozitlerdir. Farklı durumlar için, farklı mekanik özelliklere sahip olan bu malzemelerden birinin kullanımı diğerine göre daha uygun olabilmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak, konu ile ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmiştir. İlgili yönetmelikler ile birlikte, etkin şekildeğiştirme ve aderans mekanizmasına dayanan iki analitik model kullanılarak elde edilen teorik sonuçlar sunulmuştur, (6. Bölüm).

Numuneler, mevcut yapılarımızda bulunan kusurları yansıtmak üzere; beton basınç dayanımı düşük, enine donatısı yetersiz olacak şekilde üretilmiştir. Çalışma kapsamında, mevcut kısa kolonlarda sıkça karşılaşılan zayıf kesme performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Numunelerin üretiminde kullanılan malzemeler ile üretim aşamalarına dair bilgiler 3. Bölüm'de özetlenmiştir. Farklı sarım sayılarında ve tiplerinde karbon veya cam kompozitler (Karbon veya Cam LP) ile güçlendirileren numunelerin, sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında davranışları incelenmiştir. 7 adet numune doğrudan güçlendirilmiş olup, 2 adet numune herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmadan, referans davranışı gözlemlemek amacıyla denenmiştir.

Daha sonra, deney düzeneğine ait bilgiler; yükleme sistemi, ölçüm sistemi ve yükleme patronu anlatılmıştır. Yükleme ve ölçüm sisteminde yer alan aletlere ait detaylar ilgili tablolar ve şekiller ile açıklanmıştır.

9 adet numuneye ait deney sonuçları (11 adet test) 5. Bölüm'de sunulmuştur. Hasar modları ve dağılımına ilişkin bilgiler verilmiştir. Ayrıca her bir numuneye ait kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri verilmiş olup, ölçülen enine ve diyagonal yerdiğiştirmelere değinilmiştir. Ağırlıklı olarak diyagonal basınç gerilmelerinin

etkileri sebebiyle, eğilme kapasitesine ulaşamayan güçlendirilmiş numuneler, referans numunelerine kıyasla, dayanım ve deformasyon kabiliyeti açısından daha iyi bir performans sergilemişlerdir.

Son olarak deney sonuçlarına ait değerlendirmeler global olarak 7. Bölüm'de sunulmuştur.

2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Triantafillou [2], 1000×100×70 mm (Uzunluk×Yükseklik×Genişlik) boyutlarında 11 adet numune üretmiş, 9 adet numuneyi Karbon LP kompozitlerle güçlendirmiş ve dört nokta yükleme tekniği ile denemiştir. Deney sonuçlarından yararlanarak, LP kompozitin, kesme kapasitesine katkısının elde edilebileceği bir model oluşturmuştur. Eurocode yönetmeliğinde yer alan model bu çalışmaya dayanmaktadır. Deney sonucunda; güçlendirme tekniğinin etkinliğinin, FRP eksenel rijitliği ile doğrusal artış gösterdiği görülmüştür.

Khalifa ve diğ. [3], LP kompozitler ile güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme kapasitesini hesap eden 2 adet model önermişlerdir. Etkin birim şekildeğiştirme modeli, çekme gerilmeleri sebebiyle LP kompozitin koptuğu gerilme seviyesini tahmine, aderans kuvveti modeli ise beton yüzeyinden LP kompozitin sıyrıldığı yük seviyesini tahmine dayanmaktadır. 6.Bölüm'de bu iki model detaylı şekilde açıklanmıştır.

Yoshimura ve diğ. [4], 8 adet 1000×150×150 mm(Uzunluk×Yükseklik×Genişlik) boyutlarına sahip betonarme kısa kolon numunesi üretmişlerdir. Numuneler çeşitli kat ve tipte karbon LP mantolar ile güçlendirilmiştir. Numuneler enine donatı kullanılmadan üretilerek sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında test edilmiştir. Boyuna donatı oranı, beton basınç dayanımı ve kullanılan karbon LP oranı incelenen başlıca değişkenlerdir. Deneyler sonucunda, karbon LP kompozitlerle güçlendirilen numunelerde, gevrek kesme göçmesi gözlenmemiştir. Aynı zamanda, küçük ölçekli numunelerden elde edilen deney sonuçlarının gerçeğe uygun bir şekilde yorumlanmasının güç olduğu vurgulanmıştır.

Ye ve diğ. [5], 7 adet betonarme kolon üretmiş, 6 adedini karbon LP kompozitleri şerit halinde uygulayarak güçlendirmişlerdir. Kolon enine kesiti 200×200 mm ve enine donatı oranı 0.0014'tür. Bu çalışmada, kayma açıklığı, uygulanan güçlendirme malzemesi miktarı ve eksenel yük oranı incelenen başlıca değişkenlerdir. Enine donatı oranı yetersiz olan numunelerde, karbon LP kompozit kullanılarak genel

davranışın olumlu şekilde iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Karbon LP kompozitin, diyagonal kesme çatlaklarının oluşmasından hemen sonra etkin hale geldiği görülmüştür. Basınç bölgesindeki betonun kesme ve basınç gerilmeleri altında ezilmesi sonucunda güçlendirilen numunenin referans kolon numunesi ile hemen hemen aynı performansı gösterdiği görülmüştür.

Machida ve diğ. [6], ilgili yönetmelikleri (JSCE, ACI ve FIB) geliştirmek amacıyla yönetmelik kabullerini karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, söz konusu 3 yönetmeliğe göre kesme ve eğilme kapasitelerini arttırmak için ekstra LP kompozit takviyesi gerektiği ve eleman dayanımlarını hesap eden modellerin temelde aynı konsepte dayandığı (ε_{fe}) vurgulanmıştır. LP kompozitlerin uzun süreli özellikleri ve betona aderansı gibi durabilite açısından çok önemli olan faktörler üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği söylenmiştir.

Ghobarah ve diğ. [7], 914 mm uzunluğunda, 305×305 mm enkesit alanına sahip 3 adet kısa kolon numunesi (SC1, SC2 ve SC3) üretmişlerdir. Tüm numuneler için boyuna donatı olarak, 8 adet 20 mm çaplı nervürlü donatı kullanılmıştır, ρ=0.026. SC1 ve SC2 numunelerinde 0.0024 ve SC3 adlı numunede 0.005 oranında enine donatı kullanılmıştır. SC2 ve SC3 numuneleri 3 kat karbon LP kompozit kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilen numunelerde, ezilecek beton sebebiyle kolon yüzlerinde oluşması muhtemel şişkinliklerin önüne geçmek ve LP kompoziti etkin bir şekilde sargılamak amacıyla ankraj uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla SC2 numunesinde, kolon 4 noktadan delinerek 12 mm çaplı çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Bu çelik çubuk uçlarına ise 8 adet 75×150×6 mm boyutlarında çelik plaka her iki yüzden bulonlar yardımıyla sabitlenmiştir. SC3 numunesinde ise kolon yüzlerine açılan 75 mm derinliğe sahip deliklere karbon LP kompozitleri çiçek şeklinde açılarak yapıştırılmıştır. 3 adet numune sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda; referans numunede gevrek kesme göçmesi gözlenmiştir, enine donatı oranı yüksek olan (SC3) numunede gevrek kesme göçmesi gözlenmemiş, süneklik ve enerji yutma kapasitesinde ciddi bir artış sağlanmıştır. Enine donatı oranı düşük olan (SC2) numunede uygulanan ankraj detayı, sünekliği ve enerji yutma kapasitesini geliştirmiştir.

Furuta ve diğ. [8], LP kompozitler ile (Sürekli Sarım) güçlendirilen betonarme kolonların kesme kapasitesini hesap eden bir model önermişlerdir. Lif gerilmeleri,

kafes-kiriş modeli kullanılarak hesaplanmış olup, daha önce yapılan deney sonuçlarından faydalanılmıştır. 43 adet karbon LP ile güçlendirilmiş ve 22 adet aramid LP ile güçlendirilmiş numuneye ait veri kullanılmıştır. Söz konusu bu numunelerin boyuna donatılarının akmadığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan LP kompozit oranı ile şekildeğiştirme enerjisi arasındaki ilişkiye bağlı olarak kesme kapasitesi tahmin edilmiştir. Tahmin edilen göçme modlarının deney sonuçlarına göre %70 oranında uyuştuğu gözlenmiştir.

Teng ve diğ. [9], FRP kompozitlerin kesme kapasitesine katkısını veren bir model oluşturmuş ve mevcut yönetmeliklerdeki modeller ile karşılaştırmıştır. Geleneksel güçlendirme metotlarının yanında, öngerilmeli FRP şerit ve NSM (Yüzeye yapıştırılan) FRP çubuk kullanarak yeni iki teknik denemiştir. Tamamen ya da üç tarafından sarılarak güçlendirilen numunelerde göçme LP kompozitlerin yırtılması ile gerçekleşirken, iki yüze yapıştırılarak güçlendirilen numunelerde göçme LP kompozitlerin sıyrılması ile oluşmuştur. Önerilen modelden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla uyuştuğu görülmüştür.

Hsu ve diğ. [10], 11 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. 152.4×228.6 mm (genişlik×yükseklik) enkesit alanına sahip numunelerden 5 adedi 1220 mm, 6 adedi ise 1830 mm uzunluğa sahiptirler. 3 adet numune hiçbir güçlendirme işlemine tabi tutulmadan referans davranışı görmek amacıyla test edilmiştir. 8 adet numune kiriş eksenine göre sırasıyla 0^0, 45^0 ve 90^0 açıyla uygulanan karbon LP kompozit şeritler ile güçlendirilmiştir. Ayrıca, her iki gruptan birer numune her iki yüze ağ şeklinde karbon LP kompozitler yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, uygun güçlendirme detayı seçildiği takdirde süneklik ve maksimum kesme dayanımı açısından önemli ölçüde artış sağlanabileceği vurgulanmıştır. Şeritler ile güçlendirilen numunelerde göçme, beton yüzünden şeritlerin sıyrılması ile gerçekleşirken, her iki yüze ağ şeklinde karbon LP uygulanan numunelerde ise göçme, karbon LP kompozit liflerinin kopması ile gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, şerit uygulamasının kesme dayanımını daha fazla arttırdığı ve diyagonal şerit uygulaması ile (enine şerit uygulamasına kıyasla) kesme çatlaklarının daha az dağılım gösterdiği gözlenmiştir.

İlki ve diğ. [11], Bu deneysel çalışmada, kesme açısından yetersiz düşük beton dayanımlı betonarme kısa kolonların, lifli polimer kompozitler ile güçlendirme

öncesi ve sonrası sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında davranışı incelenmiştir. Numunelerin güçlendirilmesinde, cam LP kompozitler kullanılmıştır. 1 adet numune herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmadan, referans davranışı gözlemlemek amacıyla denenmiştir. 4 adet numuneden, S-LS-G-1-Strip 100 mm net aralıkla 100 mm'lik şeritler ile bir kat, S-LS-G-1-1 kayma açıklığı boyunca bir kat sürekli, S-LS-G-2-1 kayma açıklığı boyunca iki kat sürekli ve S-LS-G-3-1 kayma açıklığı boyunca üç kat sürekli olarak mantolanmıştır. Deneyler sonucunda, referans numunesinde kesme etkileri sebebiyle gevrek bir göçme modu gözlenmiştir. Ağırlıklı olarak diyagonal basınç gerilmelerinin etkileri sebebiyle, eğilme kapasitesine ulaşamayan güçlendirilmiş numuneler, referans numunelerine kıyasla, dayanım ve deformasyon kabiliyeti açısından daha iyi bir performans sergilemişlerdir.

3. NUMUNE VE MALZEME ÖZELLİKLERİ

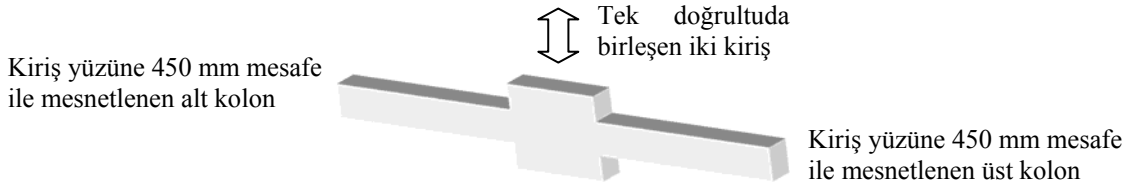
3.1. GİRİŞ

Bu tez çalışması kapsamında, mevcut kısa kolonlarda sıkça karşılaşılan ve düşük beton dayanımı ile yetersiz enine donatı kullanımı gibi nedenlerden doğan zayıf kesme performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla enine doğrultuda LP kompozitler ile güçlendirilen kısa kolonların sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında incelenmesi öngörülmüştür. Çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği ve Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler özdeş iki kısa kolonu temsil etmektedir.

3.2. NUMUNELERİN ÜRETİLMESİ

3.2.1. Boyutlar ve Donatı İskeletinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında toplam 9 adet numune üretilmiştir. Özdeş iki kısa kolonu temsil eden numunelerde; her bir kısa kolon 450 mm boyunda, 150 mm genişliğinde ve 200 mm derinliğindedir. Bu kolonlara tek doğrultuda birleşen iki kiriş parçası ise 150 mm genişliğinde ve 600 mm yüksekliğindedir. Numunelerin genel görünümü Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1: Numunelerin Genel Görünümü

Kolonlarda boyuna donatı olarak toplam 4 adet 20 mm çapında nervürlü donatı, enine donatı olarak ise test bölgesinde 200 mm ara ile 8 mm çapında düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. Değerlendirmeyi zorlaştırmamak üzere davranışın karmaşık olmaması ve hasarın beklenen deney bölgesinde (kayma açıklığında) yoğunlaşması

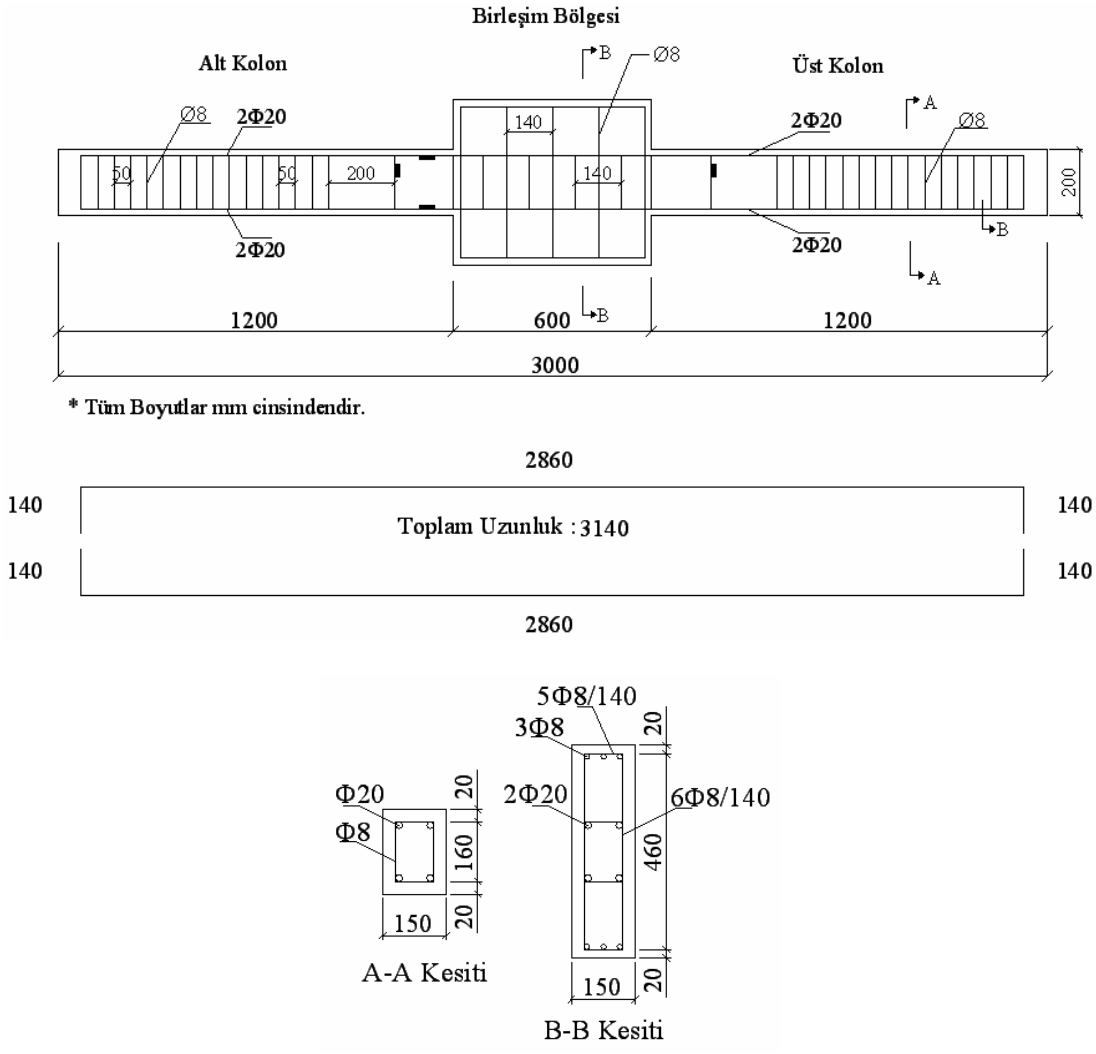
istendiğinden kolon-kiriş birleşim bölgesinde ve mesnetlerde enine donatı oranı artırılmıştır. Birleşim bölgesinde enine donatılar birleşim kesitinden 20 mm mesafede başlanmak suretiyle 140 mm ara ile yerleştirilmiştir. Mesnet bölgelerinde ise enine donatılar 50 mm ara ile yerleştirilmiştir. Enine donatıların kancaları, 90^0 ve uzunluğu 100 mm olacak şekilde bükülmüştür. Enine donatı yüzünden 20 mm beton örtüsü (pas payı) bırakılmıştır. Boyuna donatı oranı (ρ) Denklem 3.1 ve hacimsel enine donatı oranı (ρ_{sh}) Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır. Bu bağıntılarda A_s, $A_s^{'}$, b, h, b_c, h_c, s ve ϕ_e sırası ile çekme donatısı kesit alanı, basınç donatısı kesit alanı, kesit genişliği, kesit yüksekliği, enine donatı genişliği, enine donatı yüksekliği, enine donatı aralığı ve enine donatı çapıdır.

$$\rho = \frac{A_s + A_s^{'}}{b.h} \tag{3.1}$$

$$\rho_{sh} = \frac{\frac{\pi \phi_e^2}{4} 2(b_c + h_c)}{b.h.s} \tag{3.2}$$

Bu çalışma kapsamında denenen numunelerde, bu bağıntılar yardımıyla belirlenen boyuna donatı oranı $\rho = 0.04$, hacimsel enine donatı oranı $\rho_{sh} = 0.005$'tir.

Numune donatı detayı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Donatı iskeletleri Şekil 3.2'de verilen donatı çizimleri dikkate alınarak İTÜ Yapı ve Deprem Laboratuvarında imal edilmiştir.



Şekil 3.2: Numunelerde Donatı Detayı

3.2.2. Şekildeğiştirmeölçerlerin Yapıştırılması

Donatı iskeletinin hazırlanmasından sonra hasarın en fazla oluşmasının beklendiği kayma açıklığında boyuna ve enine donatılar üzerine şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmıştır. Şekil 3.3'de donatı iskeletlerinin görünümü verilmiştir.



Şekil 3.3: Donatı İskeletlerinin Görünümü

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 cyanoacrylat esaslı bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve ardından su ve nem yalıtımı ile mekanik koruma sağlamak için iki kat kimyasal yalıtım malzemesi (N-1, water proofing material), bir kat bitum esaslı bant (VM Tape, a vinyl/mastic for insulating and moisture sealing) ve bunun üzerine izolebant sarılmıştır. Tüm şekildeğiştirmeölçerlerin kablolarının ucuna konumunu, cinsini belirtmek üzere numaralar ve notlar yazılmıştır. Kablolar en kısa mesafeden beton yüzeyine çıkacak şekilde demetlenmiştir. Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması ile ilgili bazı aşamalar Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.4: Enine Donatılara N-1 Uygulaması



Şekil 3.5: Boyuna Donatılara N-1 Sürülmesi ve VM Bant Sarılması

3.2.3. Kalıpların Hazırlanması

Elemanların üretiminde kullanılan kalıpların hazırlanması için, laboratuvarda bulunan malzemelerden yararlanılmıştır. Numunelerin beton dökümü sırasında kullanılmak üzere 20 mm kalınlığında plywood malzemesi ile daha önce oluşturulmuş olan özel kalıplar içlerine poliüretan köpükler yerleştirilmek suretiyle hazırlanmıştır, (Şekil 3.6). Poliüretan köpük uygulaması ile 200x300 mm en kesit alanına sahip plywood kalıplar 150x200 mm en kesit alana kavuşturulmuştur. Donatı iskeletleri yerleştirilmeden önce kalıplar özel kalıp yağı ile yağlanmış ve donatı iskeletlerindeki enine donatılara istenen 20 mm kalınlığındaki net beton örtüsünün oluşturulabilmesi amacı ile hazır plastik paspayları takılmıştır.



Şekil 3.6: Kalıpların Hazırlanması

3.2.4. Beton Dökümü

Betonsa tarafından hazırlanan, 28 günlük standart silindir basınç dayanımı yaklaşık 7 MPa olan hazır beton; tüm elemanlar için aynı gün ve şartlarda kalıplara dökülmüştür, Şekil 3.7. Betonun kalıplara mümkün olduğunca iyi yerleşmesini sağlamak amacıyla, döküm sırasında vibrasyon uygulanmıştır. Farklı yaşlardaki betonun mekanik özelliklerini belirlemek üzere, 14 adet standart silindir (150x300) beton örneği alınmıştır. Numunelerin kalıptan çıkarılması ve taşınması amacı ile, beton dökümünden önce numune içinde bırakılan 10 mm çapında nervürlü donatılardan oluşturulan kancalar kullanılmıştır. Beton dökümü sırasında şekildeğiştirmeölçerlerin kablolarına zarar verilmemesi için özen gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Beton Dökümü

3.2.5. Kür Uygulaması

Beton dökümünü izleyen 7 gün boyunca, olası büzülme çatlaklarının önüne geçebilmek için, elemanların üzeri amerikan beziyle örtülüp sabah ve akşam birer kez sulanarak kür uygulanmıştır.

3.3. NUMUNELERİN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışma kapsamında numunelerin bazıları orijinal olarak denenerek referans numuneleri teşkil edilmiştir. Kalan numuneler doğrudan güçlendirilip test edilirken, referans numuneleri onarılıp güçlendirildikten sonra tekrar test edilerek performansları incelenmiştir. Tüm numunelerin özellikleri Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Numunelerin kesit boyutları, boyuna ve enine donatı özellikleri ve kayma açıklığı belirlenirken; numunelerin kesme açısından yetersiz olması hedeflenmiştir. Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde, bu konuda hedeflenen amaca ulaşıldığı görülmektedir. Referans numunelerinin kesme kritik olmasını sağlamak üzere, numunelerin imalatından önce yapılmış olan numune tasarımına ait hesaplar EK A'da verilmiştir. Bu hesaplarda referans numuneler ve güçlendirilmiş numuneler için önceden hesaplanmış olan kesme kapasiteleri ve referans numuneler için hesaplanmış olan eğilme kapasitesi verilmiştir. Bu hesapların diğer bir amacı da referans numunelerin veya güçlendirilmiş numunelerin dayanımlarının, yükleme sisteminin kapasitesini aşmamasıdır.

Tablo 3.1: Numune Özellikleri

Numune adı	LP Tipi	LP Kat Adedi	Güçlendirme Şekli	ρ_{LP}	Ön Hasar Durumu
S-LS-O-1	-	-	-	-	-
S-LS-O-2	-	-	-	-	-
S-LS-G-1-2Sides	Cam LP	1	İki Yüze	0.0022	-
S-LS-C-1-1/2	Karbon LP	1	Şerit	0.0015	-
S-LS-G-1-1/2	Cam LP	1	Şerit	0.0011	-
S-LS-C-1-1	Karbon LP	1	Sürekli	0.0022	-
S-LS-G-1-1	Cam LP	1	Sürekli	0.0031	-
S-LS-G-2-1	Cam LP	2	Sürekli	0.0062	-
S-LS-G-3-1	Cam LP	3	Sürekli	0.0093	-
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	Karbon LP	1	Şerit	0.0015	Ağır Hasarlı
S-LS-O-2-R-R-G-1	Cam LP	1	Sürekli	0.0022	Hafif Hasarlı

Numune isimleri verilirken, numunelerin özelliklerini yansıtacak ifadelerin kullanılmasına özen gösterilmiştir. Örneğin S-LS-C-1-1/2 isimli numunede, S kesme kritik numuneyi, LS düşük beton dayanımını, C güçlendirme için kullanılan kompozitin adını (Karbon LP), 1 kompozit ile sarım sayısını, 1/2 ise şeritler halinde kompozit sarımını ifade etmektedir. Aynı şekilde S-LS-O-2-R-R-G-1 isimli numunede, 2 ikinci orijinal numuneyi, ilk R onarım işlemini, ikinci R güçlendirme işlemini, G güçlendirme için kullanılan kompozitin adını (Cam LP), 1 ise sürekli sarımı ifade etmektedir.

S-LS-C-1-1/2, S-LS-G-1-1/2 ve S-LS-O-1-R-R-C-1/2 100 mm genişliğe sahip (w_f) şeritler ile mantolanmıştır. Şerit merkezinden diğer şerit merkezine net 200 mm (s_f) açıklık ile kompozit malzemeler uygulanmıştır.

S-LS-G-1-2Sides kayma açıklığı boyunca yalnızca iki yüzünden cam LP kompozit uygulanmak suretiyle güçlendirilmiştir.

Diğer tüm numuneler kayma açıklığı boyunca sürekli şekilde karbon ya da cam LP kompozit ile çeşitli katlarda mantolanmıştır.

3.4. ONARIM VE GÜÇLENDİRME

3.4.1. Onarım

Bu tez çalışması kapsamında, hasar görmüş yapı elemanlarının da onarılıp karbon ve cam LP kompozitler ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirildikten sonra performansının incelenmesi yer almaktadır. Bu amaçla daha önce orijinal olarak test edilen S-LS-O-1 ve S-LS-O-2 numuneleri onarılıp güçlendirilmiştir.

3.4.1.1 S-LS-O-1 Numunesi Onarımı

S-LS-O-1, %4.5 öteleme oranına kadar test edilmiştir, bu seviyede yük itmede 11.15 kN değerine kadar düşmüştür. Deney tamamlandığında, alt kolon kayma açıklığında beton tamamen bütünlüğünü kaybetmiştir. Üst kolon kayma açıklığında ise kayma çatlakları oluşmuş, %2.5 öteleme oranına erişildikten sonra hasar gelişimi durmuştur. Bu sebeple, alt kolon kayma açıklığında beton tamamen dökülmüştür. Üst kolon bölgesinde ise yalnızca çatlak civarındaki beton dökülmüştür. Şekil 3.9'da hasar görmüş betonun dökülmesine ait fotoğraflar sunulmuştur. Bu işlemden sonra alt ve üst kolon yüzleri temizlenmiştir. Alt kolon strafor cinsi bir malzeme ile kalıba alınmış, BASF-YKS tarafından üretilen yüksek dayanımlı, büzülme yapmayan, rötresiz çimento esaslı, polimer ve fiber takviyeli, silis dumanı içeren tamir harcı ile (Emaco S88C) dökülen betonların yeri doldurulmuştur, Şekil 3.10. Dökülen beton yüzeyinin üzeri pürüzlü olduğundan ayrıca bir işlem yapılmamıştır. Tamir harcı su ile karıştırılıp hazırlandıktan sonra kalıba bir seferde dökülmüştür. Böylece hava sıkışması önlenmeye çalışılmıştır. Üst kolon test bölgesinde ise epoksi esaslı tamir harcı (Concressive 1406) ile tüm kesit sıvanmıştır. Betonun düşük dayanımlı olması sebebiyle epoksi esaslı tamir harcı uygulamasına gidilmiştir. Son olarak, betondaki

kılcal çatlakların doldurulması amacıyla enjeksiyon işlemi uygulanmıştır. Bu amaçla çok düşük viskoziteli, çift bileşenli epoksi enjeksiyon malzemesi (Concressive 1302) kullanılmıştır. Özellikle çatlak bölgelerine yakın noktalardan delikler açılmıştır. Deliklere enjeksiyon pompası bağlanmış ve basınç yavaşça artırılmıştır. Enjeksiyon malzemesi diğer delikten ve çatlak bölgesinden çıkmaya başladığında ilk delik kapatılmıştır. Bu sayede beton içinde bulunan kılcal çatlaklar onarılmıştır. Şekil 3.8'de onarım öncesi numune durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.8: S-LS-O-1 Numunesinin Onarım Öncesi Durumu (Alt Kolon)



Şekil 3.9: Hasar Görmüş Betonun Dökülmesi



Şekil 3.10: Emaco S88C Uygulaması

3.4.1.2 S-LS-O-2 Numunesi Onarımı

S-LS-O-2 numunesi %2.5 öteleme oranına kadar test edilmiştir. Bu seviyede alt ve üst kolonlarda hasar dağılımının simetrik olduğu gözlenmiştir. Deney sonunda, alt ve üst kolon test bölgelerinde kayma çatlakları oluşmuştur. Alt ve üst kolon bölgelerinde çatlak civarındaki beton dökülmüştür. Toz numune yüzlerinden arındırıldıktan sonra epoksi esaslı tamir harcı (Concressive 1406) ile alt ve üst kolon test bölgeleri sıvanmıştır, Şekil 3.11. Betonun düşük dayanımlı olması sebebiyle epoksi esaslı tamir harcı uygulamasına gidilmiştir. Betondaki kılcal çatlakların doldurulması amacıyla çok düşük viskoziteli, çift bileşenli epoksi enjeksiyon malzemesi (Concressive 1302) kullanılmıştır. Özellikle çatlak bölgelerine yakın noktalardan delikler açılmıştır. Deliklere enjeksiyon pompası bağlanmış ve basınç yavaşça artırılmıştır. Enjeksiyon malzemesi diğer delikten ve çatlak bölgesinden çıkmaya başladığında ilk delik kapatılmıştır. Böylece, kılcal çatlaklar doldurularak onarım işlemi tamamlanmıştır. Epoksi enjeksiyonu ile ilgili bazı aşamalar Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.11: Epoksi Esaslı Tamir Harcı Uygulaması



Şekil 3.12: Enjeksiyon Uygulaması

3.4.2. Güçlendirme

9 adet numune güçlendirilmiş olup; 7 adet numune doğrudan güçlendirilerek ve 2 adet orijinal numune test edildikten sonra (ön hasar ile) onarılıp güçlendirilerek deneye hazırlanmışlardır. Numuneler Tablo 3.1'de özetlendiği üzere LP kompozit ile enine doğrultuda sarılarak güçlendirilmiştir. LP kompozit uygulaması kiriş yüzeyinden yaklaşık 10 mm boşluk bırakılarak yapılmıştır. Numunelerin ilk önce yüzey hazırlıkları yapılmıştır. Dikdörtgen enkesitli kolonlarda gerilmelerin düzgün dağılmadığı, köşelerde gerilme yığılmalarının olduğu bilinmektedir. Bu sebeple köşelerde yuvarlatma işlemi yapılmıştır. Bu çalışmada dikdörtgen enkesitli kolonların köşeleri 25 mm yarıçaplı bir çeyrek daire formuna getirilmiştir. Şekil 3.13'de köşelerin yuvarlatılması gösterilmiştir. Yuvarlatma işleminden sonra yüzeyler kir, toz, yağ ve benzeri maddelerden arındırılmıştır. LP kompozit ile beton yüzeyi arasında yapışmanın daha iyi sağlanabilmesi için çift bileşenli epoksipolyamin (BASF-YKS Primer) astar karışımı sürülmüştür. Bu karışım ağırlıkça %77 epoksi reçine ve %23 epoksi sertleştirci olacak şekilde hazırlanmıştır. Astar karışımı sürülen numuneler diğer aşamaya geçilmeden önce 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra yüzeyin FRP uygulamasına tamamen hazır hale gelmesi, yüzeyde bulunan boşluklar, ezik ya da kopmuş parçaların doldurulması için çift bileşenli epoksi esaslı macun karışım (BASF-YKS Rasatura Putty Base, %78 epoksi

reçine ve %22 epoksi sertleştirici) sürülmüştür. Böylece esnek, pürüzsüz ve yapışmaya uygun bir yüzey elde edilmiştir.



Şekil 3.13: Numunelerin Köşelerinin Yuvarlatılması

LP uygulamasına geçilmeden önce kumaş halindeki malzeme numuneler için güçlendirme tipine göre uygun genişlik ve boylarda kesilerek hazır hale getirilmiştir. Bu kesim aşamasında kompozitin sargısı sonunda oluşturulacak bindirme boyu da ihmal edilmemiştir. Tüm numuneler için bindirme boyu 150 mm olup üst ve alt kat kolonlarında numune üst yüzünde bırakılmıştır. LP kompozitin numune yüzeyine ve birbirine yapışmasını sağlamak için çift bileşenli epoksi yapıştırıcı (Saturant, %76 epoksi reçine ve %24 epoksi sertleştirici) kullanılmıştır. İlk LP kompozit yapıştırılmadan önce yapıştırıcı yüzeye sürülmüş ve ardından kompozit özenli bir şekilde yapıştırılmıştır. Her tabaka için aynı işlem tekrarlanmıştır. Yapıştırma işleminin başarılı olması için, her tabaka yapıştırıldığında el ya da demir rulo yardımıyla hava kabarcıklarının çıkması ve yapıştırıcının eşit bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Belirlenen boy sarıldıktan sonra bir kat daha yapıştırıcı sürülerek güçlendirme işlemi tamamlanmıştır. Kullanılan epoksi bazlı malzemelerin dayanımını kazanmaları için kür süresi kadar zaman bırakılmıştır. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de güçlendirme işleminin bazı aşamaları verilmiştir.



Şekil 3.14: Çift Bileşenli Epoksipolyamin Astar Karışımı Sürülmesi ve Çift Bileşenli Epoksi Macun Sürülmesi



Şekil 3.15: Epoksi Esaslı Yapıştırıcı Sürülmesi ve LP Kompozit Sarılması

3.5. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ

3.5.1. Beton

Betonsa tarafından üretilen, 28 günlük standart silindir dayanımı yaklaşık 7 MPa olan hazır beton; tüm elemanlar için aynı şartlarda, 23.07.2004 tarihinde, kalıplara dökülmüştür. Beton karışımı Tablo 3.2'de verilmiştir. Su/çimento oranı 1.4 olan karışımda, Akçansa PÇ 42.5 portland çimentosu kullanılmıştır. Sinpaş Ocağı'ndan elde edilmiş 1 No'lu kırma taşın maksimum tane çapı 12 mm'dir. Karışımda ayrıca, Akpınar Sülün Ocağı'ndan elde edilen maksimum tane çapı 0.5 mm olan kum kullanılmıştır.

Tablo 3.2: Beton Karışımı

Malzemeler	Çimento	Kum	Su	Kırma Taş I
Miktar (kg/m^3)	150	923	210	1074

Taze betonda kıvamı belirlemek amacı ile 3 ayrı çökme (slump) deneyi yapılmıştır. Çökme konisi 3 aşamada doldurulmuş ve her aşamanın ardından uzun demir bir çubukla betonun 25 defa şişlenmesiyle iyi bir yerleşme sağlanmıştır. Tamamı

doldurulan koninin yavaşça çekilmesiyle oluşan çökme, çelik şerit metre yardımıyla ölçülmüştür. Taze betonda yapılan çökme deneyi sonuçları Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3: Taze Beton Çökme Deneyi Sonuçları

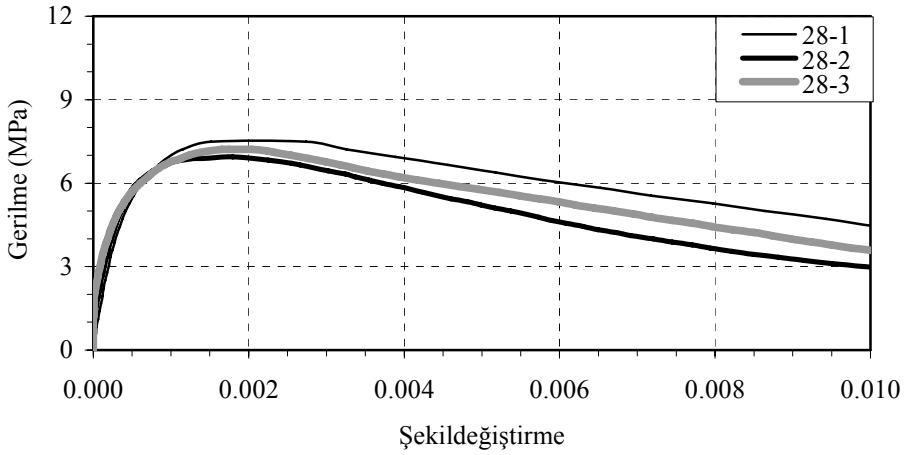
Deneme	1	2	3
Çökme (mm)	64	75	66

Beton dayanımını belirleyebilmek amacı ile alınan 14 adet standart silindir (150×300 mm) beton örneğine, güçlendirme çalışması kapsamındaki elemanlarla aynı şartlarda (7 gün, nemli bezle) kür uygulanmıştır. Bu silindirlere, 5000 kN kapasiteli Amsler yükleme aygıtı kullanılarak; 28., 90., 180. ve 360. günlerde, standart silindir basınç deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sırasında gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenebilmesi amacıyla TML CM–15 ölçüm çerçevesi (kompresometre) kullanılmıştır. Standart silindirin ölçüm boyundaki (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) yerdeğiştirmeleri ölçmek üzere, ölçüm çerçevesine bağlı konumdaki iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP–5), tüm boydaki (300 mm) yerdeğiştirmeleri ölçmek üzere de iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP–25) kullanılmıştır. CDP-25 türündeki yerdeğiştirmeölçerler, standart silindire 100 mm mesafede yerleştirilmişlerdir, Şekil 3.16. Elektronik veri toplayıcı yardımıyla (TML TDS-303) kaydedilen veriler, bilgisayar ortamında değerlendirilmiştir.

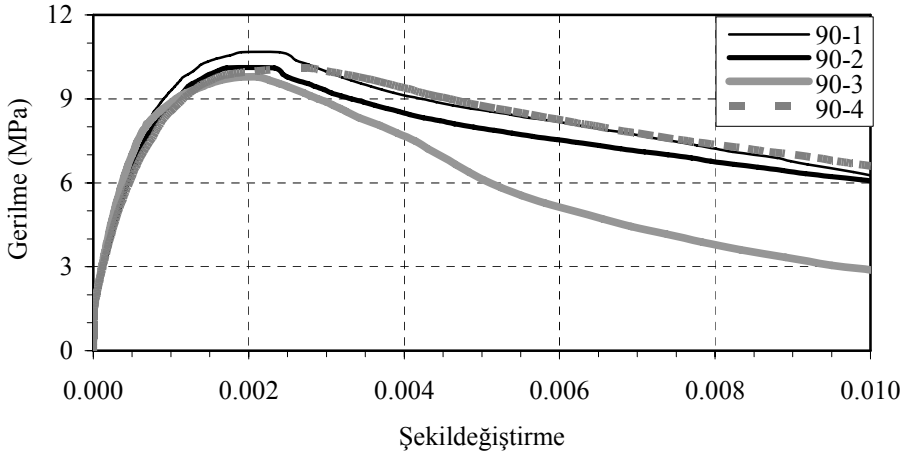


Şekil 3.16: Standart Silindir Deneyi

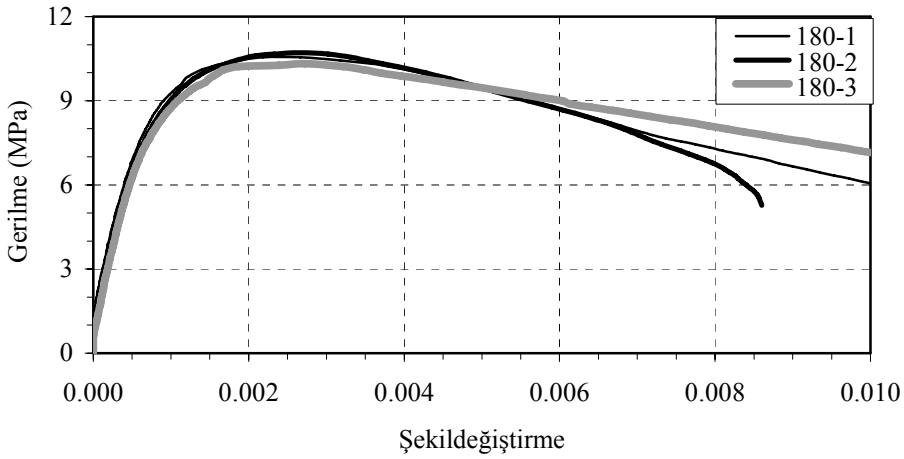
28, 90, 180 ve 360 günlük betonun, standart silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri, sırasıyla; Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verilmiştir. Grafiklerdeki eksenel şekildeğiştirmelerin hesabı için orta bölgeden (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılmıştır.



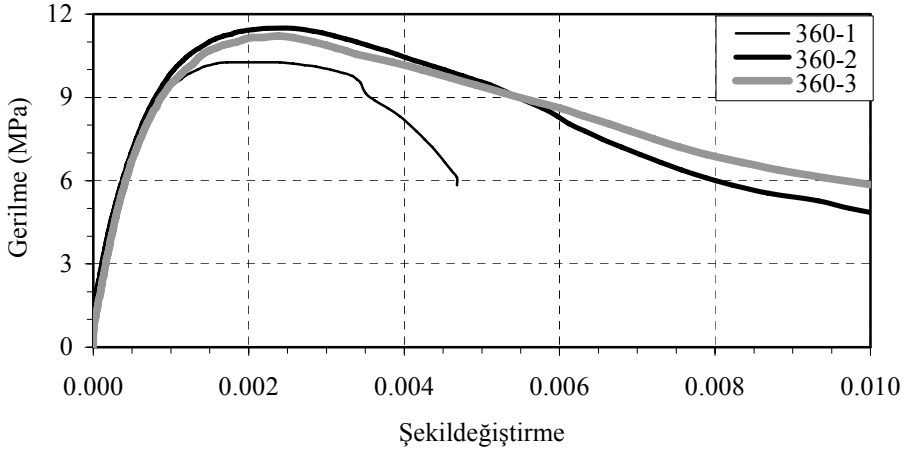
Şekil 3.17: 28 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 3.18: 90 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 3.19: 180 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri



Şekil 3.20: 360 Günlük Betonun Standart Silindir Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkileri

Numuneler için elastisite modülü belirlenirken, gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinde yaklaşık olarak dayanımın %5 ve %45'i arasında elde edilen deneysel noktalar arasından en küçük kareler yöntemi kullanılarak bir doğru geçirilmiş, belirlenen doğrunun eğimi elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Standart silindirlerin basınç deneylerinden elde edilen beton mekanik özellikleri Tablo 3.4'de özetlenmiştir. Beton basınç dayanımının 360 günden sonra değişmediği kabul edilerek daha sonraki günler için bu değer olan 11 MPa kullanılmıştır.

Tablo 3.4: Standart Silindir Basınç Deneylerinin Sonuçları

Standart Silindir	Beton Yaşı (Gün)	Basınç Dayanımı f'_c (MPa)	Ort. Basınç Dayanımı $f'_{c,ort}$ (MPa)	Elastisite Modülü E_c (MPa)	Ort. Elastisite Modülü $E_{c,ort}$ (MPa)
28-1	28	7.5	7.2	14034	14029
28-2	28	6.9		14422	
28-3	28	7.2		13632	
90-1	90	10.7	10.2	15130	14089
90-2	90	10.1		13471	
90-3	90	9.8		15025	
90-4	90	10.1		12728	
180-1	180	10.6	10.5	15024	14200
180-2	180	10.7		14062	
180-3	180	10.3		13515	
360-1	360	10.3	11.0	15039	14678
360-2	360	11.5		14334	
360-3	360	11.2		14660	

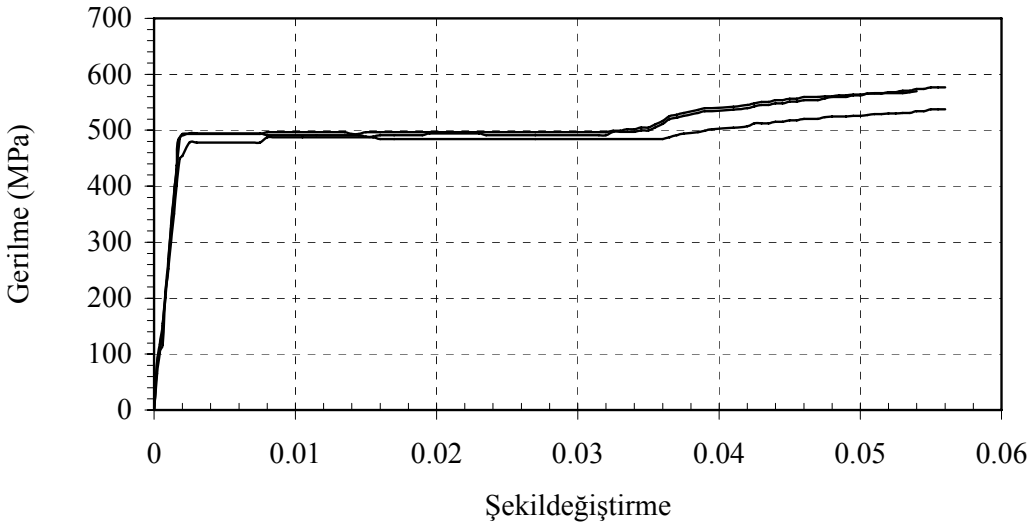
3.5.2. Donatı Çeliği

Tüm numunelerde boyuna donatı için nervürlü, enine donatı için ise düz yüzeyli donatı çeliği kullanılmıştır. Boyuna donatı olarak 20 mm çapında ortalama 491 MPa akma dayanımına sahip, enine donatı olarak ise 8 mm çapında ve ortalama 348 MPa akma dayanımına sahip donatı çeliği kullanılmıştır. Çelik çekme deneyleri İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında 20 t kapasiteli Amsler mekanik çekme cihazı kullanılarak TS708 standardına [12] uygun olarak yapılmıştır. Boyuna donatı çeliği için yapılan çelik çekme deneyi sonuçları Tablo 3.5'de, gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de verilmiştir. Tabloda E_s, donatı elastisite modülünü göstermektedir. Enine donatı çeliği için yapılan çelik çekme

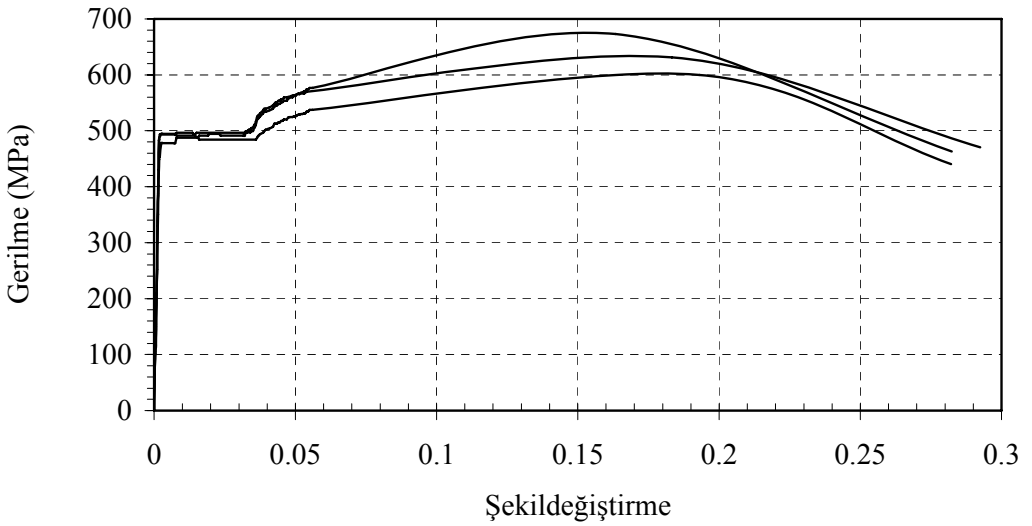
deneyi sonuçları Tablo 3.6'da, gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'de verilmiştir.

Tablo 3.5: Boyuna Donatı Çekme Deneyi Sonuçları

Φ20	No.1	No.2	No.3	Ortalama
Donatı Çapı (mm)	19.8	20	19.9	19.9
Akma Gerilmesi (MPa)	496	484	494	491
Akma Şekildeğ.	0.002	0.002	0.002	0.002
Pekleşme Gerilmesi (MPa)	504	501	511	505
Pekleşme Şekildeğ.	0.036	0.037	0.036	0.036
Maksimum Gerilme (MPa)	631	600	673	635
Maksimum Gerilmeye Karşı Gelen Şekildeğ.	0.183	0.193	0.163	0.18
Kopma Gerilmesi (MPa)	471	441	463	458
Kopma Şekildeğ.	0.292	0.282	0.282	0.29
E_s (MPa)	192234	202294	198703	197744



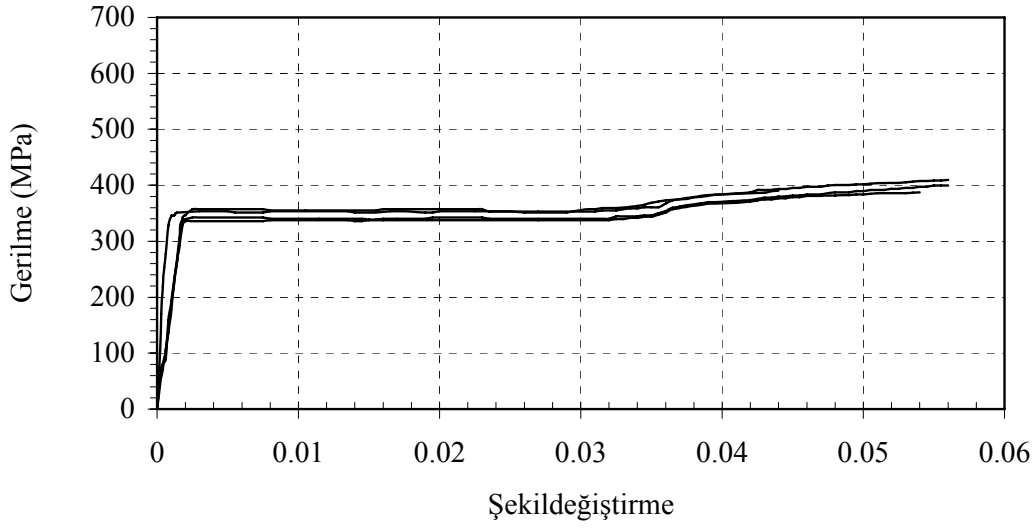
Şekil 3.21: Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (Φ20)



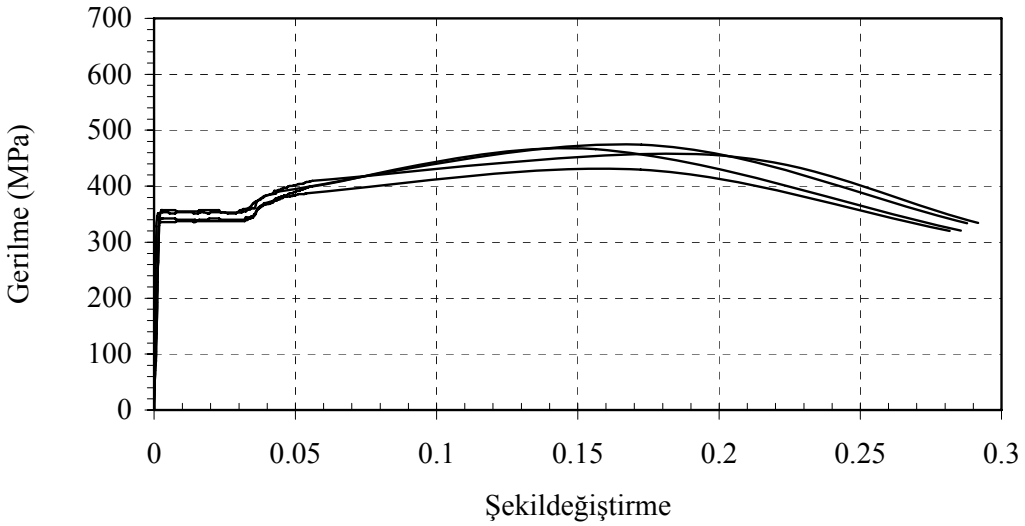
Şekil 3.22: Boyuna Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (Φ20)

Tablo 3.6: Enine Donatı Çekme Deneyi Sonuçları

ϕ8	No.1	No.2	No.3	No.4	Ortalama
Donatı Çapı (mm)	8.0	7.9	8.0	8.0	8.0
Akma Gerilmesi (MPa)	338	357	342	353	348
Akma Şekildeğ.	0.0018	0.002	0.002	0.002	0.002
Pekleşme Gerilmesi (MPa)	348	367	346	365	357
Pekleşme Şekildeğ.	0.035	0.036	0.034	0.034	0.035
Maksimum Gerilme (MPa)	430	456	466	474	456
Maksimum Gerilmeye Karşı Gelen Şekildeğ.	0.172	0.197	0.156	0.173	0.174
Kopma Gerilmesi (MPa)	320	335	321	334	328
Kopma Şekildeğ.	0.282	0.292	0.286	0.288	0.287
E_s (MPa)	192234	202294	198703	188975	195551



Şekil 3.23: Enine Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (ϕ8)



Şekil 3.24: Enine Donatı Gerilme-Şekildeğiştirme İlişkisi (ϕ8)

3.5.3. Onarım ve Güçlendirme Malzemeleri

Orijinal olarak test edilen numunelerin onarımında BASF-YKS tarafından üretilen, polimer ve lif katkılı, silis dumanı içeren, yüksek dayanımlı, klor ve sülfata dayanıklı rötresiz çimento esaslı tamir harcı (Emaco S88 C) kullanılmıştır. Bu malzemenin uygulaması oldukça kolay olup, sadece su ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Üreticiden alınan bilgilere göre malzeme astarsız kullanılır, çelik ve betona iyi aderans sağlar. Ayrıca akışkan kıvamlı, kolay işlenebilir, ayrışma yapmayan, geçirimsiz bir özelliğe sahiptir. Ürünün firma tarafından verilen özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7: Emaco S88 C Tamir Harcı Malzemesinin Teknik Özellikleri

Karışımın yoğunluğu (kg/lt)	2.23
Eğilme Dayanımı (MPa)	8
Basınç Dayanımı (MPa)	70
Çekme Dayanımı (MPa)	2
Elastisite Modülü (MPa)	28000

Diğer bir onarım malzemesi, çok düşük viskoziteli Concresive 1302 epoksi enjeksiyon malzemesidir. Concresive 1302, genişliği 0.2-1.0 mm olan çatlakların onarımı için kullanılır. Üreticiden alınan bilgiye göre, kılcal çatlaklara penetrasyonu ve betona aderansı uygun olan bir malzemedir. Çok düşük viskoziteye sahip olduğundan düşük basınçta da enjekte edilebilir. Ürünün firma tarafından verilen özellikleri Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8: Concresive 1302 Epoksi Enjeksiyon Malzemesinin Teknik Özellikleri

Hacimsel katı madde oranı (%)	100
Karışımın yoğunluğu (kg/lt)	1.06 ± 0.05
Eğilme Dayanımı (MPa)	75
Basınç Dayanımı (MPa)	110
Çekme Dayanımı (MPa)	45
Elastisite Modülü (MPa)	3100-3300
Viskozite (mPa.s)	700
Genleşme (%)	2.5-3

Güçlendirme aşamasında ise, uygulanacak LP malzemenin betona aderansını tam olarak sağlamak için ilk olarak BASF-YKS Primer kullanılmıştır. BASF-YKS Primer, iki bileşenli düşük viskoziteli, katı madde oranı %100 olan epoksipolyamin bir üründür. Karışım oranı ağırlıkça; %77 epoksi reçine ve %23 epoksi sertleştirici olarak belirlenmiştir. İlk olarak epoksi reçine mekanik olarak karıştırılmış, ardından epoksi sertleştirici homojen bir karışım elde etmek için yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır. Özgül ağırlığı 1.08 ± 0.024 kg/lt, uygulama kalınlığı 90 μm'dir. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9: BASF-YKS Primerin Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü (MPa)		Çekme Dayanımı (MPa)	
Çekme	> 700	Direk	> 12
Eğilme	> 580	Eğilme	> 24

BASF-YKS Primer uygulamasının ardından BASF-YKS Rasatura Putty kullanılmıştır. BASF-YKS Rasatura Putty, güçlendirilecek elemanların yüzeylerinin düzeltilmesi amacı ile kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 1.26 ± 0.024 kg/lt'dir. Karışım oranı ağırlıkça; %78 epoksi reçine ve %22 epoksi sertleştirici olarak belirlenmiştir. İlk olarak epoksi reçine mekanik olarak karıştırılmış, ardından epoksi sertleştirici homojen bir karışım elde etmek için yaklaşık 3 dakika karıştırılmıştır. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10: BASF-YKS Rasatura Puttynin Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü (MPa)		Çekme Dayanımı (MPa)		Maksimum Uzama (%)
Çekme	> 1800	Direk	> 12	1.6
Eğilme	> 900	Eğilme	> 26	

LP tabakaların betona ve birbirlerine yapışmasını sağlamak için BASF-YKS Saturant kullanılmıştır. BASF-YKS Saturant, katı madde oranı yüksek, iki bileşenli, özgül ağırlığı 1.02 ± 0.024 kg/lt olan özel bir yapıştırıcıdır. Karışım oranı ağırlıkça; %76 epoksi reçine ve %24 epoksi sertleştirici olarak belirlenmiştir. İlk olarak epoksi reçine mekanik olarak karıştırılmış, ardından epoksi sertleştirici homojen bir karışım elde etmek için yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır. Üretici firma tarafından verilen bazı mekanik özellikler Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11: BASF-YKS Saturantın Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü (MPa)		Çekme Dayanımı (MPa)		Maksimum Uzama (%)	Basınç Dayanımı (MPa)
Çekme	> 1800	Direk	> 12	1.6	> 80
Eğilme	> 900	Eğilme	> 26		

Bu tez çalışmasında güçlendirme malzemesi olarak MBrace FRP C1-30 türü karbon lifli polimer ve MBrace G-60AR türü cam lifli polimer tabakaları kullanılmıştır. LP uygulamaları günümüzde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Beton, çelik, taşıyıcı tuğla ve ahşap elemanların eğilme, çekme, kesme ve basınca karşı dayanımlarının artırılması amacı ile kullanılır. LP ile güçlendirmede kolon rijitliğinde önemli bir değişiklik oluşmadığı için, taşıyıcı sistemde bir iç kuvvet değişimi ortaya çıkmaz. LP malzemeler kopma dayanımına ulaşana kadar doğrusal bir gerilme şekildeğiştirme ilişkisi gösterirler. Tablo 3.12'de sırası ile C1-30 türü karbon lifli ve G-60AR türü cam lifli polimer tabakaların mekanik ve geometrik özellikleri verilmiştir.

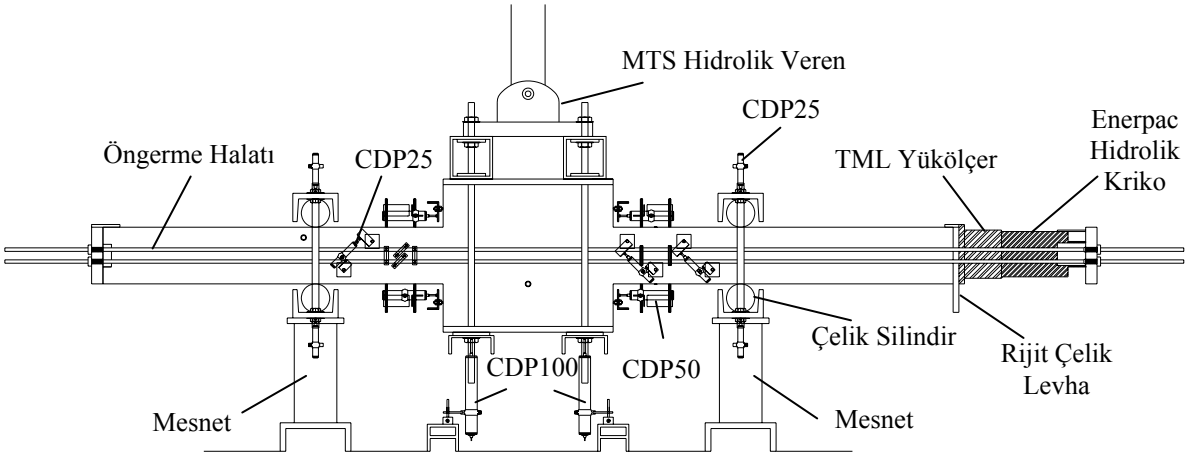
Tablo 3.12: Karbon ve Cam LP Tabakaların Mekanik ve Geometrik Özellikleri

Özellikler	C1-30 Karbon LP	G-60AR Cam LP
Elastisite Modülü (MPa)	230000	65000
Maksimum Uzama (%)	1.5	2.8
Karakteristik Kopma Dayanımı (MPa)	3430	1700
20 cm Bindirme İle Eklenme Durumunda Kopma Dayanımı (MPa)	3430	1700
Birim Hacim Ağırlığı (kg/m^3)	1820	2600
Etkili Tabaka Kalınlığı (mm)	0.165	0.23
Tabaka Örgü Şekli	Tek Yönlü	Tek Yönlü

4. DENEY DÜZENEĞİ

4.1. YÜKLEME SİSTEMİ

Deney düzeneği kapalı ve rijit bir yükleme çerçevesi içinde çelik profiller, levhalar, yüksek mukavemetli bulonlar, öngerme halatları ve kabloların sabitlenmesi için kullanılan çenelerle oluşturulmuştur. Deney düzeneği şematik olarak Şekil 4.1'de verilmiştir. Numuneler iki kenarından deney düzeneğine basit mesnetli olarak bağlanarak, sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler etkisinde denenmişlerdir. Numuneler deney düzeneği içerisine yatay konumda yerleştirildiği için, yatay yükler düşey doğrultuda uygulanmıştır. Numune ve yükleme sisteminin genel görünümü Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Numune ve Yükleme Sisteminin Genel Görünümü

Deprem esnasında yapı elemanları dinamik yön değiştiren tekrarlı eğilme ve kesme kuvvetlerinin yanı sıra değişken eksenel kuvvetlerin etkisindedir. Ancak bu durumun laboratuvar ortamında modellenmesi oldukça zor olduğundan yükler statik olarak etkitilmiştir. Statik yüklemeli deneylerin en büyük avantajı yüklemenin adım adım ve geniş bir zaman aralığında gerçekleşmesi nedeniyle eleman davranışının ve hasar durumunun çok daha sağlıklı ve detaylı bir şekilde gözlenebilmesidir.

Yükleme çevrimleri numuneye adım adım uygulanan yerdeğiştirmeler ile gerçekleştirilmiştir. Her bir yerdeğiştirme adımı 7 saniyelik sürede verilmiştir. Bu sürenin ilk 2 saniyesinde hedeflenen yerdeğiştirme artışı gerçekleşmektedir. Sonraki 1 saniyede yükleme sistemi veri toplama sistemine sinyal göndermekte, son 4 saniyede ise ölçüm cihazlarından alınan veriler toplanmaktadır. Veri toplama sistemi 1 kanaldan 0.06 saniyede veri alabilmektedir. Her bir yükleme adımında verilen yerdeğiştirme artışı genel olarak o çevrimdeki hedef yerdeğiştirmenin 1/10'u kadar olacak şekilde belirlenmiştir. Ancak büyük hedef yerdeğiştirmelere ulaşıldığında yükleme hızı hiç bir zaman 1 mm/adım seviyesinin üzerine çıkarılmamıştır.

Eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşturmak üzere uygulanan yatay yükler bilgisayar kontrollü MTS hidrolik veren kullanılarak etkitilmiştir. Tekrarlı ve yön değiştiren yatay yük numunelerin ortasında bulunan 200x600 mm enkesitli kiriş parçasına etkitilmiştir. Hidrolik veren itme ve çekmede 250 kN yük kapasitesine ve toplam 600 mm yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir. Tüm deneyler yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmış ve kontrol sisteminde MTS verenin yerdeğiştirme aralığı ±150 mm olarak tanımlanmıştır. Yükleme hem itme, hem çekme yönünde yapılmış ve mesnetlerde numunenin alt ve üstüne yerleştirilen 100×200 mm boyutlarında dolu gövdeli çelik silindirler basit mesnet koşullarını sağlamıştır. Çelik silindirler U profillerin içine yerleştirilmiş ve profiller birbirlerine yüksek dayanımlı bulonlarla bağlanmıştır.

Eksenel yükün uygulanması için numune, yükölçer ve hidrolik kriko, iki kalın çelik levha arasına 4 adet 4 m boyunda 3/4 inch çapında öngerme kablosu ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Daha sonra hidrolik krikoya yük verilerek, numuneye öngerme kabloları aracılığı ile eksenel kuvvet etkitilmesi sağlanmıştır. Eksenel yükleme düzeneğini Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Eksenel Yük Düzeneği ve Numune

Tasarımın başında beton basınç dayanımının 10 MPa olacağı düşünülmüş ve Denklem 4.1'e göre eksenel yük hesabı yapılmıştır, [13]. Bu bağıntıda ν, N, f'_c, b ve h sırasıyla eksenel yük oranı, eksenel yük, beton basınç dayanımı, kolon enkesit genişliği ve kesit yüksekliğidir.

$$\nu = \frac{N}{f_c' bh} \tag{4.1}$$

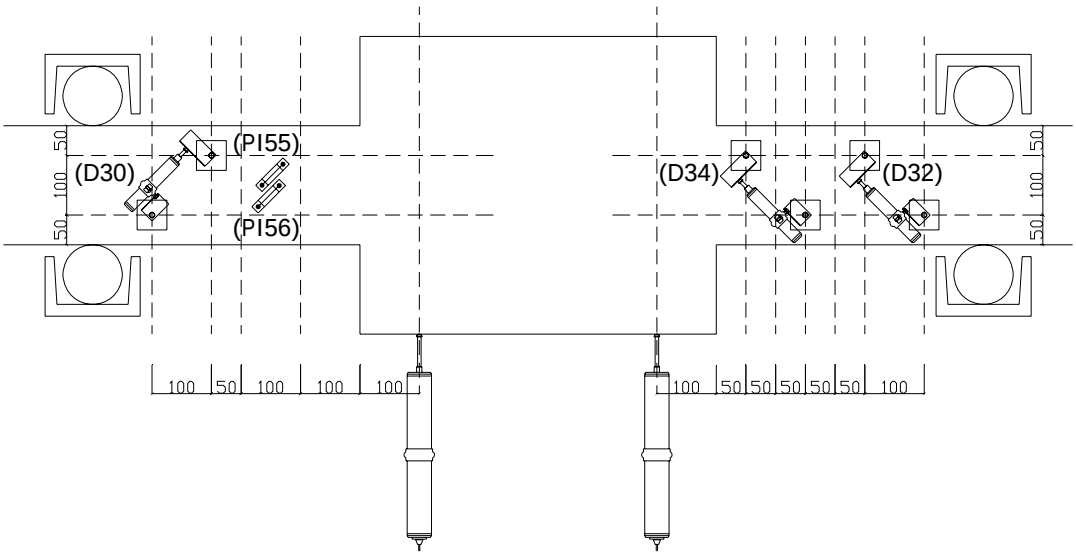
Eksenel kuvvet 600 kN kapasiteli Enerpac hidrolik kriko kullanılarak uygulanmıştır. Deney süresince numuneye 63 kN'luk sabit eksenel yük uygulanmıştır. Bu eksenel yük miktarı 10 MPa'lık beton dayanımına göre eksenel yük kapasitesinin %21'ine karşı gelmektedir. Deney boyunca numune ile kriko arasına yerleştirilen 1000 kN kapasiteli TML (CLP-100CMP) yükölçer aracılığı ile eksenel yük seviyesi kontrol edilmiş ve gerektiğinde kriko kullanılarak eksenel yükün 63 kN'da sabit kalması sağlanmıştır. Eksenel yükün numune üzerinde üniform dağılmasını sağlamak amacıyla numunenin iki ucunda 10 mm kalınlığında çelik levhalar yerleştirilmiştir. Ayrıca eksenel yük dağılımın üniform olup olmadığı donatılara yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerler yardımıyla kontrol edilmiştir. Deney öncesinde bir miktar eksenel yük verilerek şekildeğiştirme dağılımı gözlenmiş, şekildeğiştirme dağılımın üniform olmaması halinde öngerme halatlarının gerginliği değiştirilerek dağılımın mümkün olduğunca düzgün olması sağlanmıştır.

4.2. ÖLÇÜM SİSTEMİ

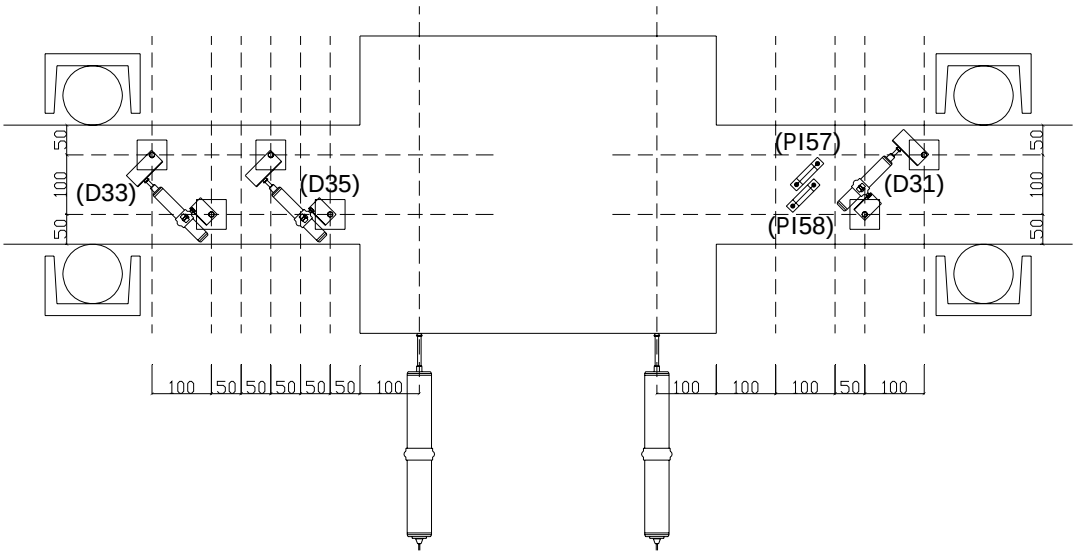
Ölçüm sistemi TML yerdeğiştirmeölçerler, TML YFLA-5, FLA-3 ve PL-60 tipi şekildeğiştirmeölçerler ve 1000 kN kapasiteli TML yükölçer ile MTS verenin dahili yükölçeri ve yerdeğiştirme ölçerinden oluşmaktadır. Bu ölçme cihazlarından gelen veriler TML ASW-50C veri çoğaltma kutusuna ardından TML TDS 303 veri toplayıcıya ulaşmaktadır. Toplanan veriler daha sonra işlenmek üzere bilgisayara aktarılmaktadır. Alt ve üst kolon kayma açıklıklarında ortalama kesit eğriliklerini belirleyebilmek üzere 100 mm ve 200 mm ölçüm boylarında toplam 8 adet CDP50 tipi yerdeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir. Alt kolon ölçüm bölgesine, 100 mm ölçüm boyunda H11, H12 ve 200 mm ölçüm boyuna H21, H22 numaralı yerdeğiştirmeölçerler, aynı şekilde üst kolon ölçüm bölgesine, 100 mm ölçüm boyunda H13, H14 ve 200 mm ölçüm boyunda H23, H24 numaralı yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Bu yerdeğiştirmeölçerler betona 5 cm gömülen 10 mm çapında bulonlara mesnetlendirilmiştir. Ölçüm boyları belirlenirken enine ve boyuna donatının konumlarına dikkat edilmiştir.

Eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisi altındaki elemanlarda iki eksenli bir gerilme durumu ortaya çıkar. Yalnız, kayma gerilmesinin bulunması durumunda asal basınç ve çekme gerilmeleri eşit olarak 45^0 eğimle elemanda gelişmektedir, [14]. Bu sebeple, diyagonal doğrultudaki şekildeğiştirmeleri belirleyebilmek için bazı ölçüm aletleri numune üzerine 45^0'lik bir açıyla sabitlenmişlerdir. Diyagonal şekildeğiştirmelerin ölçümü için, alt kolon ölçüm bölgesine, 4 adet PI-2-50 tipi yerdeğiştirmeölçer ve 2 adet CDP 25 tipi yerdeğiştirmeölçer, üst kolon ölçüm bölgesine ise 4 adet CDP 25 tipi yerdeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir. PI-2-50 tipi yerdeğiştirmeölçerler, kendi pirinç ayakları macunlanarak, 50 mm açıklıklı metal şablonlar yardımıyla hassas bir şekilde numune yüzüne sabitlenmişlerdir. Alt kolon ölçüm bölgesinde, ön yüze PI55, PI56 numaralı yerdeğiştirmeölçerler, aynı şekilde arka yüze ise PI56, PI58 numaralı yerdeğiştirmeölçerler yerleştirilmiştir. Kare şeklindeki metal bir parçaya kaynaklanmış 8 mm çaplı bulonlara, CDP 25 tipi yerdeğiştirmeölçerler mesnetlendirilmişlerdir. Bu yerdeğiştirme ölçerlerin uçları için (stroke), 45^0'lik açıyla 8 mm çaplı bulonlara tutturulan L şeklindeki korniyerler üst mesnet olarak kullanılmıştır. Alt kolon ölçüm bölgesinde, ön yüze D30 numaralı yerdeğiştirmeölçer , arka yüze ise D31 numaralı yerdeğiştirmeölçer sabitlenmiştir. Üst kolon ölçüm bölgesinde, ön yüze D32 ve D34 numaralı yerdeğiştirmeölçerler,

arka yüze ise D33 ve D35 numaralı yerdeğiştirmeölçerler sabitlenmiştir. Ön yüz'de bulunan, D30,D32 ve D34 numaralı CDP25 tipi yerdeğiştirmeölçerler ile PI55 ve PI56 numaralı PI-2-50 tipi şekildeğiştirmeölçerler itme yönünde kısalmaktadır. Arka yüz'de bulunan, D31,D33 ve D35 numaralı CDP25 tipi yerdeğiştirmeölçerler ile PI57 ve PI58 numaralı PI-2-50 tipi şekildeğiştirmeölçerler itme yönünde uzamaktadır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de, diyagonal şekildeğiştirmeleri ölçen alet sistemi yalnız olarak numune üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Diyagonal Doğrultuda Yerleştirilen Yerdeğiştirmeölçerlerin Ön Yüzdeki Düzeni

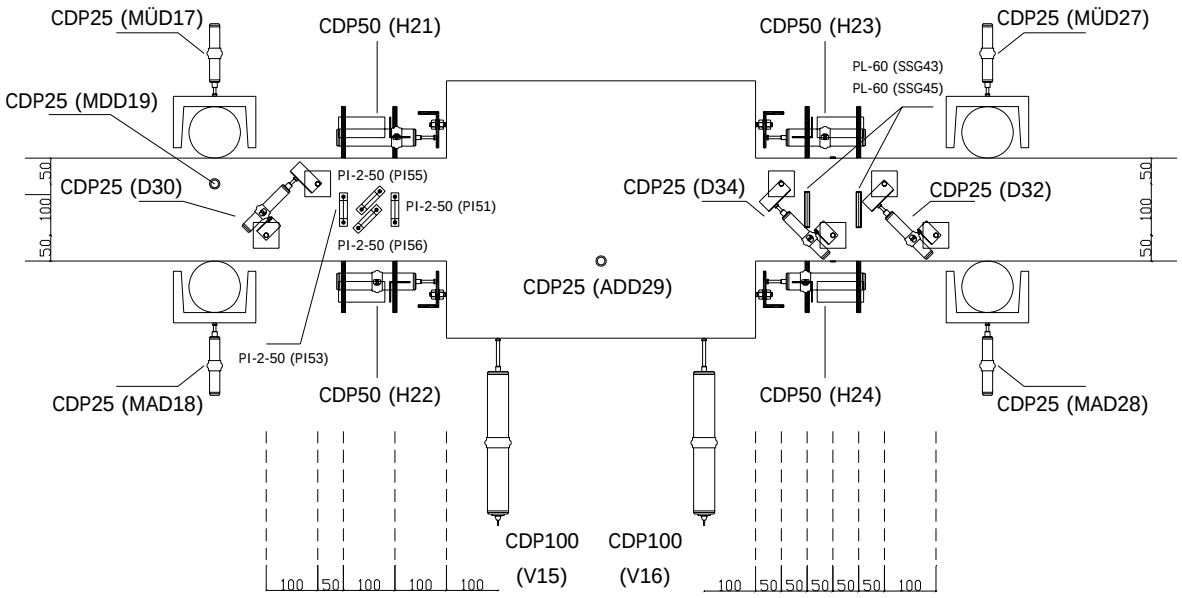


Şekil 4.4: Diyagonal Doğrultuda Yerleştirilen Yerdeğiştirmeölçerlerin Arka Yüzdeki Düzeni

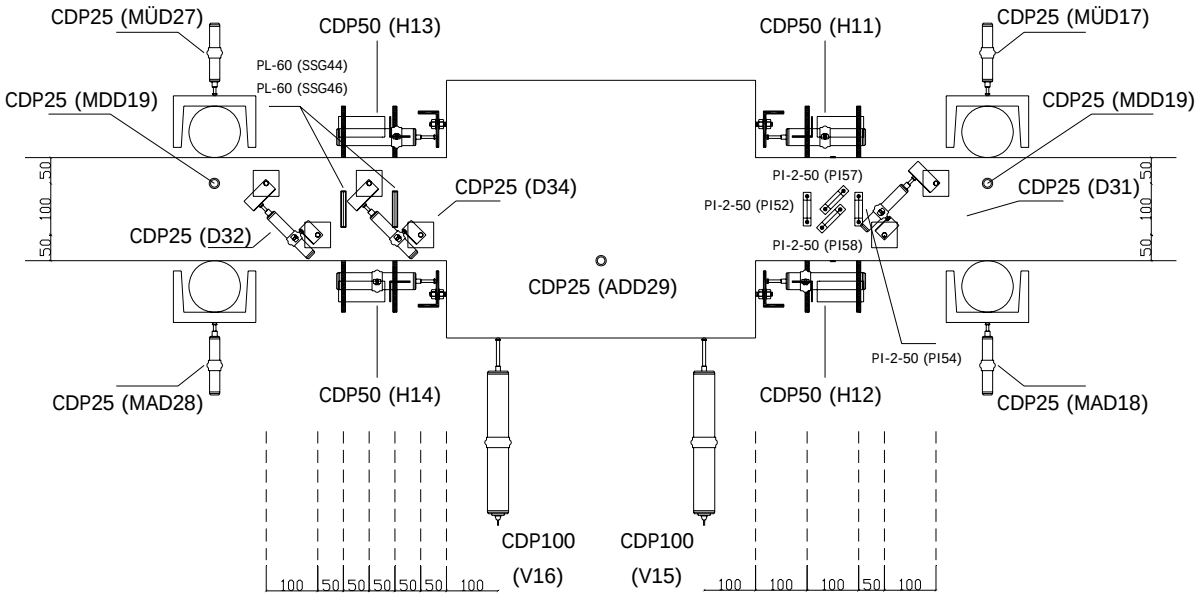
Enine doğrultudaki şekildeğiştirmeleri ölçebilmek için PI-2-50 tipi yerdeğiştirmeölçerler ve PL-60 tipi şekildeğiştirmeölçerlerden yararlanılmıştır. Alt kolon ölçüm bölgesine, birleşim kesitinden 100 mm mesafede PI51, PI52 ve 200 mm mesafede PI53, PI54 numaralı PI-2-50 tipi yerdeğiştirmeölçerler, üst kolon ölçüm bölgesine ise birleşim kesitinden 100 mm mesafede SSG43, SSG44 ve 200 mm mesafede SSG45, SSG46 numaralı PL-60 tipi şekildeğiştirmeölçerler kesit orta yüksekliklerinde olmak kaydıyla yapıştırılmışlardır. Ayrıca, numune üst kenarına birleşim kesitinden 150 mm mesafede SSG41 numaralı PL-60 tipi şekildeğiştirmeölçer ve numune alt kenarına 150 mm ölçüm boyunda SSG42 numaralı PL-60 tipi şekildeğiştirmeölçerler yerleştirilmişlerdir, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8.

Deneyler yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirildiğinden, numunenin orta noktasının yaptığı düşey yerdeğiştirme kontrol yerdeğiştirmesi olarak esas alınmıştır. Bu amaçla tüm numunelerde numunenin alt yüzüne düşey konumda CDP100 tipi, V15 ve V16 yerdeğiştirmeölçerleri yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinin sağlıklı olarak kurulup kurulmadığını ve yüklemenin sağlıklı olarak sürdürülüp sürdürülmediğinin kontrol edilmesi amacı ile ilave yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Düzlem dışı hareketin kontrolü için deney düzeneğinden bağımsız çerçeveler kullanılarak numune açıklık ortasına ve sol mesnette CDP25 yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Mesnetlerin düşey yönde hareketinin kontrolü

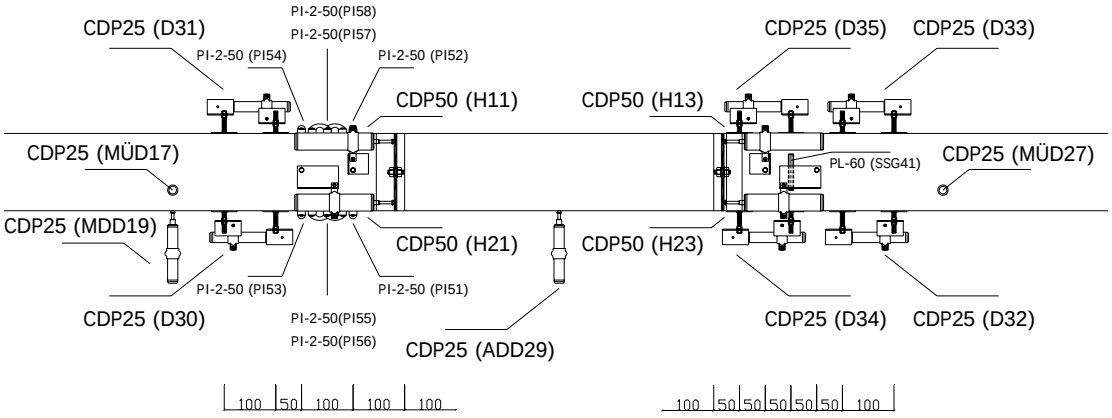
için ise sol ve sağ mesnetlerin altına ve üstüne CDP25 yerdeğiştirmeölçerleri yerleştirilmiştir. Ölçüm sistemi şematik olarak Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sunulmuştur. Deneylerde kullanılan yerdeğiştirmeölçerlerin ve şekildeğiştirmeölçerlerin özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Örneğin, yer, amaç, doğrultu sütununda; alt kolon üst yatay - eğrilik (100 mm) ifadesinde alt kolon üst yatay ilgili aletin pozisyonunu, eğrilik ilgili aletin ölçüm amacını ve (100 mm) ise birleşim kesitine olan mesafesini göstermektedir. Diyagonal ölçüm sistemi için birleşim kesitine olan mesafeler ilgili alet merkezine olan uzaklıktır, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4.



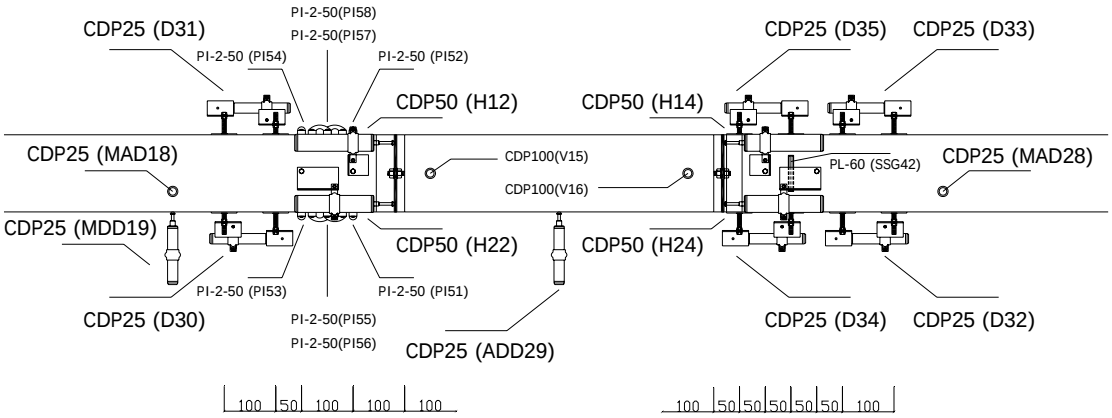
Şekil 4.5: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Önden Görünümü



Şekil 4.6: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Arkadan Görünümü



Şekil 4.7: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Üstten Görünümü



Şekil 4.8: Ölçüm Aletlerinin Pozisyonlarının Alttan Görünümü

Tablo 4.1: Yerdeğiştirmeölçer ve Şekildeğiştirmeölçerlerin Özellikleri

İsim	Cins (TML)	Kapasite (mm)	Hassasiyet 10^{-6} (μs/mm)	Yer, amaç, doğrultu
H11	CDP50	50	200	Alt kolon üst yatay- eğrilik (100 mm)
H12	CDP50	50	200	Alt kolon alt yatay– eğrilik (100 mm)
H13	CDP50	50	200	Üst kolon üst yatay– eğrilik (100 mm)
H14	CDP50	50	200	Üst kolon alt yatay– eğrilik (100 mm)
H21	CDP50	50	200	Alt kolon üst yatay- eğrilik (200 mm)
H22	CDP50	50	200	Alt kolon alt yatay– eğrilik (200 mm)
H23	CDP50	50	200	Üst kolon üst yatay– eğrilik (200 mm)
H24	CDP50	50	200	Üst kolon alt yatay– eğrilik (200 mm)
V15	CDP100	100	100	Orta kesit düşey – yükleme kontrol
V16	CDP100	100	100	Orta kesit düşey – yükleme kontrol
D30	CDP25	25	500	Alt kolon ön yüz– diyag. (300 mm)
D31	CDP25	25	500	Alt kolon arka yüz– diyag. (300 mm)
D32	CDP25	25	500	Alt kolon ön yüz– diyag. (300 mm)
D33	CDP25	25	500	Alt kolon arka yüz– diyag. (300 mm)
D34	CDP25	25	500	Alt kolon ön yüz– diyag. (100 mm)
D35	CDP25	25	500	Alt kolon arka yüz– diyag. (100 mm)
PI51	PI-2-50	2	2000	Alt kolon ön yüz– enine (100 mm)
PI52	PI-2-50	2	2000	Alt kolon arka yüz– enine (100 mm)
PI53	PI-2-50	2	2000	Alt kolon ön yüz– enine (200 mm)
PI54	PI-2-50	2	2000	Alt kolon arka yüz– enine (200 mm)
PI55	PI-2-50	2	2000	Alt kolon ön yüz– diyag. (140 mm)
PI56	PI-2-50	2	2000	Alt kolon ön yüz– diyag. (160 mm)
PI57	PI-2-50	2	2000	Alt kolon arka yüz– diyag. (140 mm)
PI58	PI-2-50	2	2000	Alt kolon arka yüz– diyag. (160 mm)
SSG41	PL-60	1.2	20000	Üst kolon üst kenar–enine (150mm)
SSG42	PL-60	1.2	20000	Üst kolon alt kenar–enine (150mm)
SSG43	PL-60	1.2	20000	Üst kolon ön yüz–enine (100mm)
SSG44	PL-60	1.2	20000	Üst kolon arka yüz–enine (100mm)
SSG45	PL-60	1.2	20000	Üst kolon ön yüz–enine (200mm)
SSG46	PL-60	1.2	20000	Üst kolon arka yüz–enine (200mm)
MÜD17	CDP25	25	500	Sol mesnet üst düşey – düzenek kontrol
MAD18	CDP25	25	500	Sol mesnet alt düşey – düzenek kontrol
MDD19	CDP25	25	500	Sol mesnet düzlem dışı yatay
MÜD27	CDP25	25	500	Sağ mesnet üst düşey – düzenek kontrol
MAD28	CDP25	25	500	Sağ mesnet alt düşey – düzenek kontrol
ADD29	CDP25	25	500	Açıklık düzlem dışı yatay

Donatıların şekildeğiştirmelerini belirlemek için iki farklı tipte (YFLA-5, FLA-3) şekildeğiştirmeölçer kullanılmıştır. İki tip şekildeğiştirmeölçer arasındaki en önemli fark YFLA-5 tipi şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırıldıkları donatıların akmasından sonra da sağlıklı ve güvenilir sonuç vermesidir. YFLA-5 ve FLA-3 türü şekildeğiştirmeölçerler boyuna ya da enine donatılara yapıştırılmıştır. Kesme etkilerine dayanamayarak göçmesi beklenen numunelerde enine donatılara YFLA-5 tipi, boyuna donatılara ise FLA-3 tipi şekildeğiştirmeölçer uygulanmıştır. Eğilme tesirleriyle göçmesi beklenen numunelerde ise enine donatılara FLA-3 tipi, boyuna donatılara YFLA-5 tipi şekildeğiştirmeölçer uygulanmıştır. Şekildeğiştirmeölçerlerin konumları tüm numuneler için aynıdır. Boyuna donatılara alt kolon bölgesinde 2 adet şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler boyuna donatılara kiriş yüzünden yaklaşık 100 mm mesafeye gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Enine donatılarda bulunan şekildeğiştirmeölçerler tüm numunelerde aynı konumda olup, 2 adet alt kat bölgesinde ve 2 adet üst kat bölgesinde toplam 4 adettir. Bu şekildeğiştirmeölçerler, alt ve üst kolonlarda kayma açıklığının ortasında bulunan enine donatının çekme etkilerine çalışan iki kolunun üzerine üst kenardan yaklaşık 75 mm mesafeye gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Tablo 4.2'de numunelerde kullanılan şekildeğiştirmeölçer tipleri sunulmuştur.

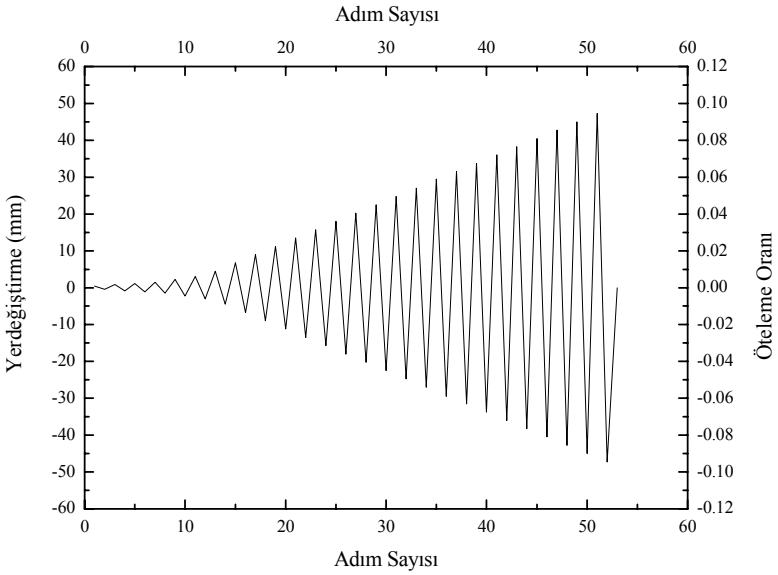
Tablo 4.2: Donatı Şekildeğiştirmeölçerleri

Numune	Enine Donatı	Boyuna Donatı
S-LS-O-1	YFLA-5	FLA-3
S-LS-O-2	YFLA-5	FLA-3
S-LS-G-1-2Sides	YFLA-5	FLA-3
S-LS-C-1-1/2	YFLA-5	FLA-3
S-LS-G-1-1/2	YFLA-5	FLA-3
S-LS-C-1-1	FLA-3	YFLA-5
S-LS-G-1-1	YFLA-5	FLA-3
S-LS-G-2-1	FLA-3	YFLA-5
S-LS-G-3-1	FLA-3	YFLA-5
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	YFLA-5	FLA-3
S-LS-O-2-R-R-G-1	YFLA-5	FLA-3

4.3. YÜKLEME PATRONU

Tüm deneyler yerdeğiştirme kontrollü statik yükleme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Yükleme, adım adım gerçekleştirildiğinden her adımdan sonra numunenin davranışı göz önüne alınmış ve bir sonraki yükleme adımına karar verilmiştir. Bu yükleme adımları arasında numunenin hasar durumunun gözlenmesi için yeterli zaman olmasından dolayı hasar oluşumunun ve numunenin davranışının sağlıklı gözlenebilmesi mümkün olmuştur. Numuneye deprem yükünü yansıtmak üzere itme ve çekme yönünde tekrarlı yatay yerdeğiştirmeler uygulanmıştır. Numunenin orta noktasının yaptığı düşey yerdeğiştirme (kontrol yerdeğiştirmesi, δ), kiriş yüzünden mesnede kadar olan L boyuna bölündüğü takdirde elde edilen oran ötelenme oranı (δ/L) olarak tanımlanır. İşte bu ötelenme oranının katları seçilerek yükleme adımları belirlenmiştir. Yükleme patronunun içerdiği hedef yerdeğiştirme değerlerine karşı gelen ötelenme oranları; ±0.0010 (±0.45 mm), ±0.0020 (±0.90 mm), ±0.0025 (±1.13 mm), ±0.0033 (±1.50 mm), ±0.0050 (±2.25 mm), ±0.0067 (±3.00 mm), ±0.0100 (±4.50 mm), ±0.0150 (±6.75 mm), ±0.0200 (±9.00 mm), ±0.0250 (±11.25 mm), ±0.0300 (±13.50 mm), ±0.0350 (±15.75 mm), ±0.0400 (±18.00 mm), ±0.0450 (±20.25 mm), ±0.0500 (±22.50 mm), ±0.0550 (±24.75 mm), ±0.0600 (±27.00 mm), ±0.0650 (±29.50 mm), ±0.0700 (±31.50 mm), ±0.0750 (±33.75 mm), ±0.0800 (±36.00 mm), ±0.0850 (±38.25 mm), ±0.0900 (±40.50 mm), ±0.0950 (±42.75 mm), ±0.1000 (±45.00 mm) ve ±0.1050 (±47.25 mm) şeklinde uygulanmıştır. Her bir yerdeğiştirme seviyesinde tek bir çevrim yapılmıştır. Örneğin, ±0.0010 (±0.45 mm) çevriminde, önce +0.45 mm itme değerine gidilmiş ardından -0.45 mm çekme değerine gidilerek bir çevrim tamamlanmıştır.

Referans numuneler için; S-LS-O-1 numunesine ağır hasar, S-LS-O-2 numunesine ise hafif hasar verilmiştir. Diğer tüm numunelerde önemli dayanım kaybı olana kadar yüklemeye devam edilmiş olup, tüm numunelere özdeş yükleme patronu uygulanmıştır. Sekil 4.9'da yükleme patronu gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Yükleme Patronu

5 DENEY SONUÇLARI

5.1 Giriş

Deprem etkisinde yapı elemanlarının yön değiştiren tekrarlı yüklere maruz kaldığı bilinmektedir. Betonarme elemanların, yön değiştiren tekrarlı yükler altında elastik ötesi şekildeğiştirmelere ulaşması sonucu elemanda dayanım ve rijitlik kaybı oluşmaktadır. Ayrıca ileri şekildeğiştirme seviyelerinde çevrim sıkışması görülebilmekte ve bundan dolayı yapının yutabildiği enerji miktarı da önemli ölçüde azalabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, orijinal ve kayma açıklıkları enine doğrultuda LP kompozitler ile sarılarak güçlendirilmiş kolonların sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı kesme etkileri altında performansları incelenmiştir. Deneyler sırasında uygulanan yatay yük, MTS hidrolik veren tarafından uygulanan yük olup, verenin dahili yükölçeri ile belirlenen yük değeri kullanılmıştır. Yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen deneylerde, numunenin orta noktasının yaptığı düşey yerdeğiştirme kontrol yerdeğiştirmesi olarak esas alınmıştır. Bunun için numunenin altına iki adet CDP100 tipi yerdeğiştirmeölçer yerleştirilmiştir. Deneysel kesme kuvveti yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkileri, yukarıda sözü edilen veren dahili yükölçeri ile elde edilen yük değerleri ve numune orta noktasında ölçülen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, boyuna ve enine donatı şekildeğiştirmeleri ile LP kompozit yüzeyindeki enine ve diyagonal şekildeğiştirmelere ait grafikler sunulmuştur. Tablo 5.1'de numunelere ait genel özellikler verilmiştir. Tablo 5.2'de ise deney sonuçlarına ait sayısal büyüklükler sunulmuştur. Maksimum kesme kuvveti değerinin %85 oranına ($0.85V_{max}$) karşı gelen yerdeğiştirmenin ($\delta_{0.85Vmax}$), maksimum kesme kuvveti değerine (V_{max}) karşı gelen yerdeğiştirmeye (δ_{Vmax}) oranı süneklik katsayısı (μ) olarak tanımlanmıştır, Denklem 5.1.

$$\mu = \delta_{0.85Vmax} / \delta_{Vmax} \tag{5.1}$$

Tablo 5.1: Numune Özellikleri

Numune	Deney Günü	Numune Yaşı (Gün)	ν	Std. Sil. Basınç Day. (MPa)	Eleman Basınç Day. (MPa)	Güçlendirme Detayı	ρ_{LP}
S-LS-O-1	20.06.05	332	0.19	10.9	9.3	-	-
S-LS-O-2	11.08.05	384	0.19	11.0	9.4	-	-
S-LS-G-1-2Sides	05.08.05	378	0.19	11.0	9.4	İki Yüze, 1Kat (Karbon LP)	0.0022
S-LS-C-1-1/2	07.07.05	349	0.19	11.0	9.4	Şerit, 1Kat (Karbon LP)	0.0015
S-LS-G-1-1/2	05.07.05	347	0.19	11.0	9.4	Şerit, 1Kat (Cam LP)	0.0011
S-LS-C-1-1	25.07.05	367	0.19	11.0	11.0	Sürekli, 1Kat (Karbon LP)	0.0022
S-LS-G-1-1	19.07.05	361	0.19	11.0	9.4	Sürekli, 1Kat (Cam LP)	0.0031
S-LS-G-2-1	28.07.05	360	0.19	11.0	11.0	Sürekli, 2Kat (Cam LP)	0.0062
S-LS-G-3-1	02.08.05	375	0.19	11.0	11.0	Sürekli, 3Kat (Cam LP)	0.0093
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	10.08.06	748	0.19	11.0	11.0	Şerit, 1Kat (Karbon LP)	0.0015
S-LS-O-2-R-R-G-1	08.08.06	746	0.19	11.0	11.0	Sürekli, 1Kat (Cam LP)	0.0022

Tablo 5.2: Deney Sonuçları

Numune	Maksimum Kesme Kuvveti (kN)		Toplam Yutulan Enerji (kN.mm)	Süneklik Katsayısı (μ)	Enine Şek. (Ö.O.%1)	Diyagonal Şek. (Ö.O.%1)
	İtme	Çekme				
S-LS-O-1	44.2	- 47.4	2424	1.58	9.7×10^{-3}	5.5×10^{-3}
S-LS-O-2	50.5	- 45.5	887	1.25	6×10^{-3}	3.8×10^{-3}
S-LS-G-1-2Sides	55	- 52	3821	1.13	2.5×10^{-3}	1×10^{-4}
S-LS-C-1-1/2	68.5	- 66.5	10638	1.76	1.5×10^{-3}	2.9×10^{-3}
S-LS-G-1-1/2	64	- 64	7338	1.74	1×10^{-3}	3×10^{-3}
S-LS-C-1-1	80	- 76	11792	1.84	9.7×10^{-4}	2.3×10^{-3}
S-LS-G-1-1	71.5	- 71.5	24065	2.13	1.4×10^{-3}	2.7×10^{-3}
S-LS-G-2-1	80	- 78	10217	1.98	1.4×10^{-3}	1.2×10^{-3}
S-LS-G-3-1	84.5	- 80	25995	2.04	1×10^{-3}	3.8×10^{-4}
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	66	- 61.5	9327	1.65	1.7×10^{-3}	1.1×10^{-4}
S-LS-O-2-R-R-G-1	70.5	- 62.5	19716	1.66	4.7×10^{-3}	7.8×10^{-3}

5.2 Numune S-LS-O-1

Bu numune birinci referans numunedir. S-LS-O-1 numunesinin davranışının daha kolay izlenebilmesi ve diğer numunelerle karşılaştırılması için deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3: S-LS-O-1 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.1 / δ = ± 0.45	6.2 /-6.4	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (0.1mm)
ÖO = %0.33 / δ = ± 1.50	16.2/-18.1	Alt ve üst kolon ön ve arka yüzlerde ilk kesme çatlakları (0.15mm)
ÖO = %1.5 / δ = ± 6.75	42.2/-44.2	150 mm'lik bölgedeki kesme çatlaklarında gelişme (2.2mm), numune üst yüzünde eğilme çatlakları
ÖO = %2.0 / δ = ± 9.00	44.2/-47.4	Karşılanan en büyük kesme kuvveti, 100 mm'lik bölgedeki kesme çatlaklarında gelişme (4mm)
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	37.3/-40.6	Alt kolon kesme çatlakları artarken (5.5mm) diğer çatlaklarda hasar gelişimi durdu
ÖO = %4 / δ = ± 18.00	37.3/-40.6	Hedef yerdeğiştirmeye gidilirken alt kolon ön yüzde beton blok halinde döküldü
ÖO = %4.5 / δ = ± 20.25	11.2/-20.7	Kesme kuvveti kapasitesinde düşme, deney sonlandırıldı

İlk kesme çatlakları 1.50 mm'lik (Öteleme Oranı=%0.33) hedef yerdeğiştirmesine ulaşıldığında, alt ve üst kolon, ön ve arka yüzlerde oluşmuştur, Şekil 5.1. İlk kesme çatlakları öncelikle kiriş yüzünden yaklaşık 100 mm ile 300 mm'lik mesafe arasındaki bölge içinde oluşmakla beraber, ileri çevrimlerde ise kiriş yüzünden yaklaşık 100 mm'lik bölge içinde yoğunlaşmıştır.



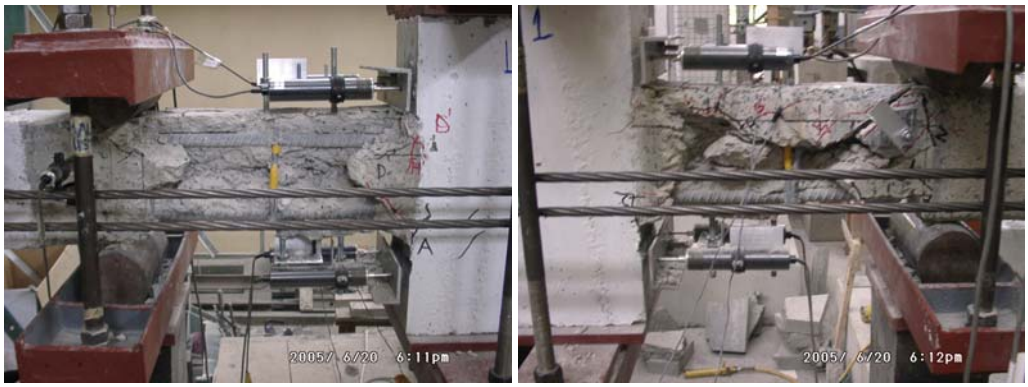
Şekil 5.1: İlk Kesme Çatlağı (Alt Kolon Ön Yüz)

δ= -6.75 mm'de (Öteleme oranı=%-1.5), özellikle alt kolonda, kiriş yüzünden 150 mm'lik bölge içinde kesme çatlakları yoğunlaşmış olup numune üst yüzünde de eğilme çatlakları oluşmuştur. Gözlenen maksimum yatay yük değeri, itmede 44.2 kN ve çekmede -47.4 kN olup, ±9.00 mm'lik (Öteleme oranı=%±2.0) hedef deplasman değerine ulaşıldığında kaydedilmiştir, Şekil 5.2. δ=11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldıktan sonra yatay yükte düşme başlamıştır. Bu seviyeden sonra özellikle alt kat kolonunda, kiriş yüzünden yaklaşık 150 mm'lik bölge içinde oluşan çatlakların genişlikleri artarken diğer çatlaklarda kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Yine bu yerdeğiştirme seviyesinde itme ve çekme çevrimlerinde beton basınç bölgelerinde ezilme başlamıştır.



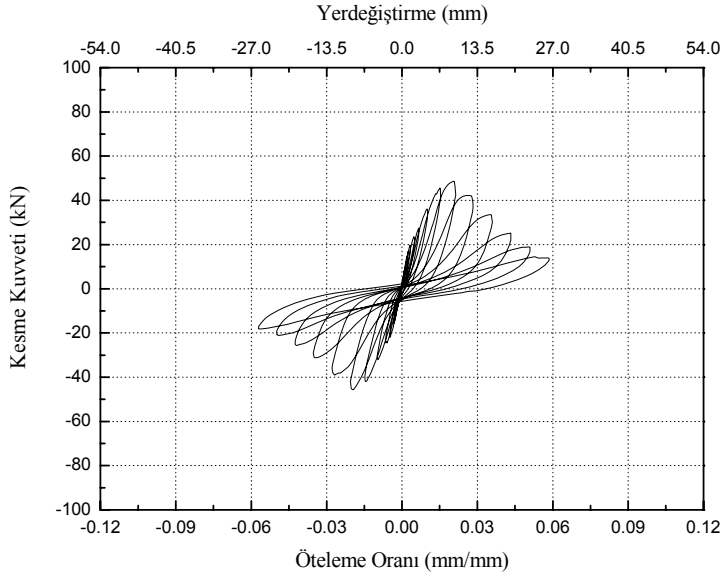
Şekil 5.2: Maksimum Yatay Yük Değeri (S-LS-O-1)

Numune, δ=18.00 mm (Öteleme oranı=%4.0) hedef yerdeğiştirme değerine ulaşırken, alt kolonda, ön yüzde kiriş yüzünden 150 mm mesafe içindeki beton blok halinde dökülmüştür. Sonraki çevrimde (δ=20.25mm, öteleme oranı=%4.5), hasar yoğunlaştığı ve kesme kuvveti kapasitesi itmede 11.2 kN ve çekmede -20.7 kN'a düşmesi sebebiyle deneye son verilmiştir. Şekil 5.3'de numunenin deney sonundaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.3: S-LS-O-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} \cong 0$)

Şekil 5.4'de S-LS-O-1 numunesine ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi verilmiştir.

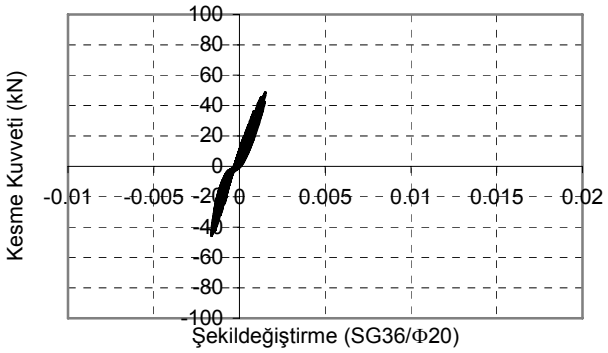


Şekil 5.4: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-1)

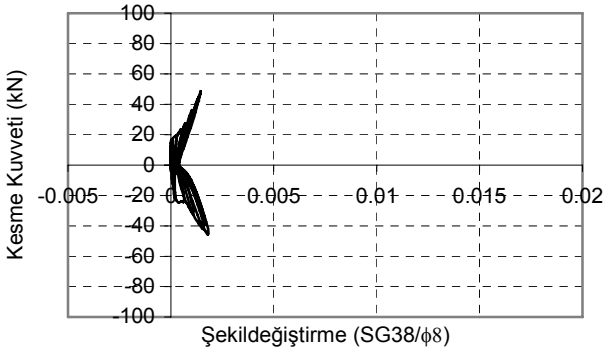
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

Şekil 5.7'de PI52 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. Maksimum şekildeğiştirme değerlerinin kaydedildiği, başka bir deyişle hasarın yoğunlaştığı bölgelerden ölçüm alınan şekildeğiştirmeölçerlere ait sonuçlar sunulmuştur. A ve B simgeleri sırasıyla, %0.5 ve %1.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

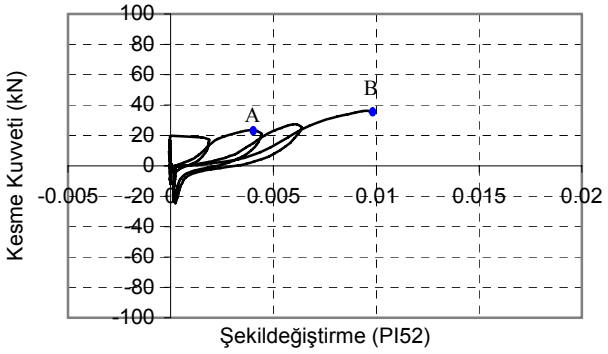
Şekil 5.8'de D31 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. Diyagonal şekildeğiştirme ilişkileri verilirken, daha uzun süre ve sağlıklı şekilde ölçüm alınan CDP 25 türü yerdeğiştirmeölçerlere ait sonuçlar tercih edilmiştir. A, B ve C simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0 ve %3.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



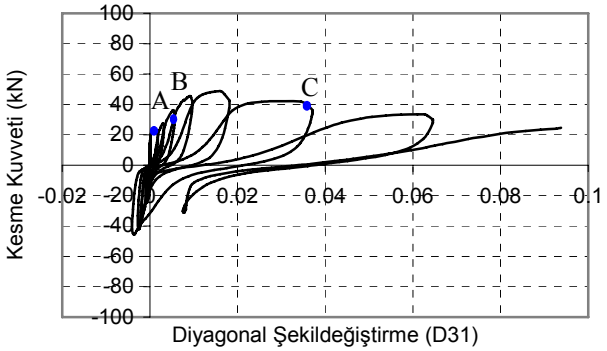
Şekil 5.5: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.6: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.7: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI52)



Şekil 5.8: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31)

5.3 Numune S-LS-O-2

Bu numune ikinci referans numunesi olup, oluşan hafif hasar sonrası deney durdurulmuştur, (δ=±11.25mm, öteleme oranı=%±2.5). S-LS-O-2 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4: S-LS-O-2 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.1 / δ = ± 0.45	8 /-6	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (0.1mm)
ÖO = %0.25 / δ = ± 1.13	16.5/-14	Üst kolon ön yüzde kiriş yüzüne 200mm mesafede ilk kesme çatlağı (0.1mm)
ÖO = %0.5 / δ = ± 2.25	25.5/-28.5	Alt ve üst kolon ön ve arka yüzlerde kesme çatlakları (0.2mm), bu çatlaklar kiriş yüzünden 100mm ile 300mm'lik mesafe içinde oluştu
ÖO = %2.0 / δ = ± 9.00	50.5/-45.5	Karşılanan en büyük kesme kuvveti, kesme çatlak genişlikleri itme yönünde 0.4mm, çekme yönünde 0.8mm
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	46.5/-40	Enine donatıda akma (δ_y=11.25mm, Ö.O.=%2.5), eğilme çatlakları (0.7 mm), kesme çatlakları (2.7mm), bu çevrim tamamlanarak deney sonlandırılmıştır

İlk kesme çatlağı, 1.13 mm (Öteleme oranı=%0.25) hedef yerdeğiştirmesine gidilirken, üst kolonda, ön yüzde, kiriş yüzüne 200 mm mesafede ve kesit orta noktasında 0.1 mm kalınlığında oluşmuştur. δ=2.25 mm, Ötelenme oranı=%0.5, çevrimi tamamlandığında üst ve alt kolonlarda, tüm yüzlerde itme ve çekme yönlerinde kesme çatlakları oluştu. Kesme çatlaklarının, kesit orta noktası civarında oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 5.9'da, δ=2.25 mm hedef yerdeğiştirmesine erişildiğinde numunenin görünümü sunulmuştur.

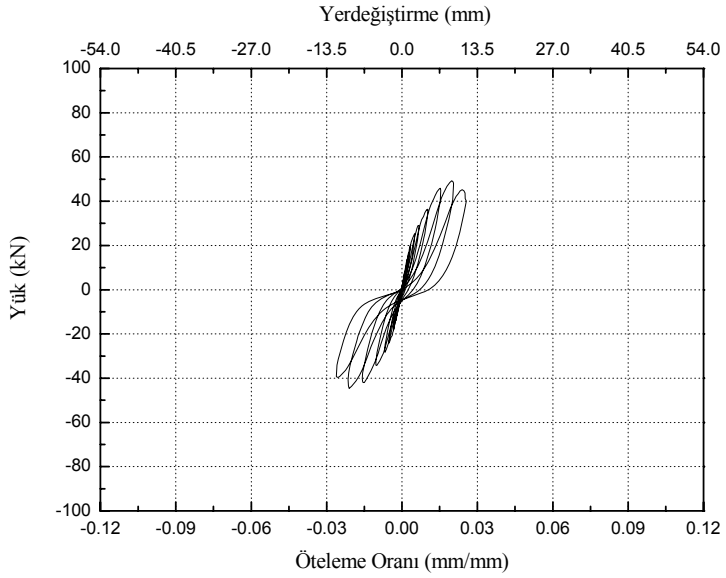


Şekil 5.9: S-LS-O-2 Numunesi (δ=2.25mm, ötelenme oranı=%0.25)

δ=9.00 mm (Öteleme oranı=%2.0) hedef yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında, maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 50.5 kN ve çekmede -45.5 kN olarak tesbit edildi. Bu deplasman seviyesinde ve daha sonraki çevrimde (δ=11.25mm, öteleme oranı=%2.5) hasarın daha çok üst kolon bölgesinde toplandığı görülmüştür. δ=11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) hedef yerdeğiştirme seviyesinde enine donatının aktığı tespit edilmiştir. Deneyin bu son çevriminde kesme kuvveti kapasitesi, itmede 46.5 kN ve çekmede -40 kN olarak kaydedilmiştir. Şekil 5.10'da deney sonunda S-LS-O-2 numunesinin görünümü verilmiştir. Numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.10: S-LS-O-2 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} \cong 0$)

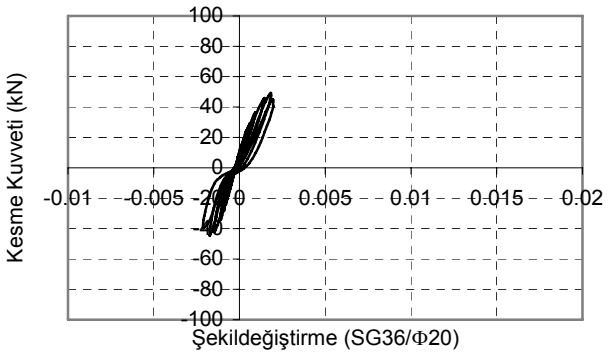


Şekil 5.11: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-2)

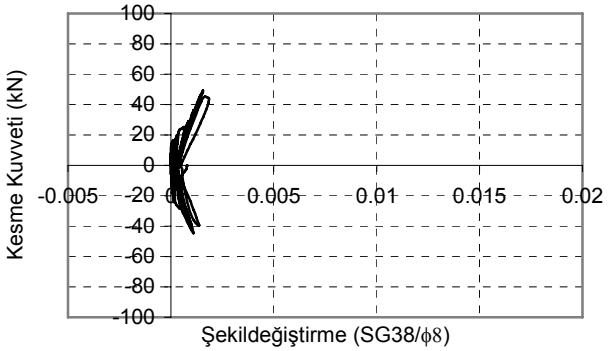
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

Şekil 5.14'de PI52 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A ve B simgeleri sırasıyla, %0.5 ve %1.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

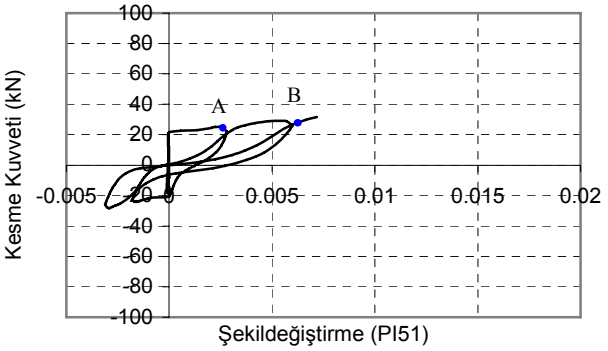
Şekil 5.15'de D31 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A ve B simgeleri sırasıyla, %0.5 ve %1.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



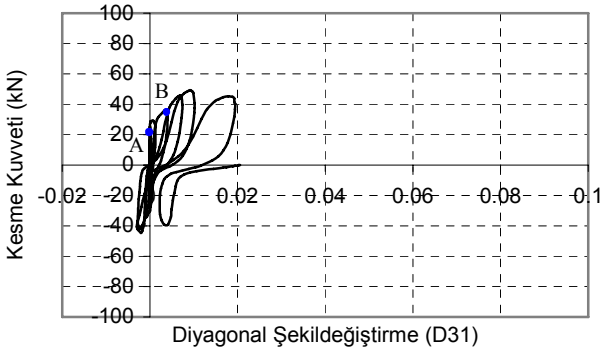
Şekil 5.12: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.13: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.14: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI52)



Şekil 5.15: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31)

5.4 Numune S-LS-G-1-2Sides

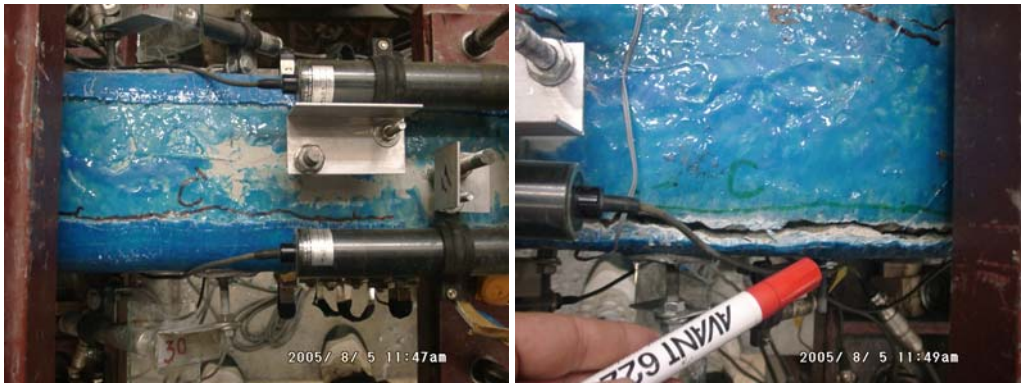
Bu numune, kiriş yüzünden 10 mm boşluk bırakılarak iki adet 500 mm uzunluğunda cam LP kompozitin ön ve arka yüzlere yapıştırılması ile güçlendirilmiştir. S-LS-G-1-2Sides numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5: S-LS-G-1-2Sides Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.1 / δ = ± 0.45	7.5/-6.5	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (<0.1mm)
ÖO = %0.67 / δ = ± 3.00	35/-33	δ=0.3mm yerdeğiştirme seviyesinde eğilme çatlakları 0.3mm, δ=-0.3mm yerdeğiştirme seviyesinde eğilme çatlakları 0.35mm kalınlığında
ÖO = %0.5 / δ = ± 6.75	55/-52	Karşılanan en büyük kesme kuvveti, üst kolon üst yüz ile ön yüz birleşiminde mesnetten kiriş yüzüne kadar betonda boyuna doğrultuda çatlak (0.55mm), Boyuna donatıda akma (δ_y=-6.75mm, Ö.O.=%-0.5)
ÖO = %2.0 / δ = ± 9.00	48.5/-50	Alt kolon alt yüz ile arka yüz birleşimi hariç tüm köşe bölgelerinde boyuna doğrultuda çatlak (3.5mm)
ÖO = %3.0 / δ = ± 13.50	28/-29.5	Hasar üst kolon bölgesinde yoğunlaştı

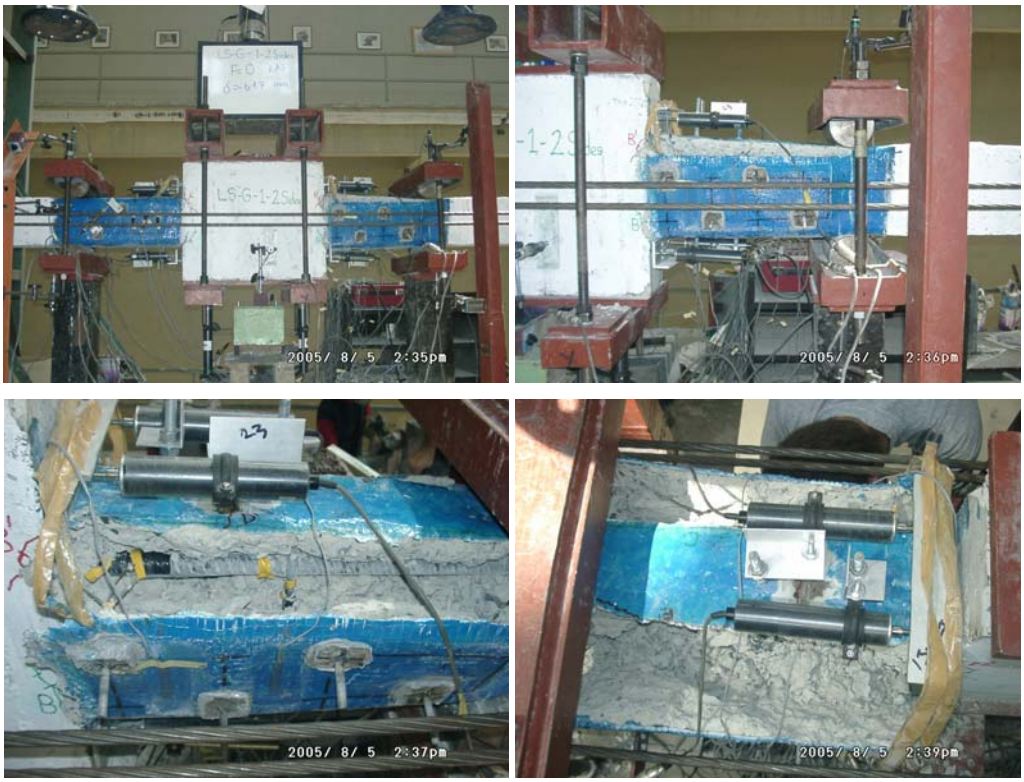
İlk hedef yerdeğiştirme değeri olan δ=0.45 mm'ye (Öteleme oranı=%0.1), ulaşıldığıda alt kat ve üst kat kolonlarıyla kiriş birleşim bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. δ=6.75 mm'lik (Öteleme oranı=%1.5) hedef yerdeğiştirmesine gidilirken, üst kolon bölgesinde, üst yüz ile ön yüz birleşiminde, cam LP kompozitin hemen üstünden, mesnetten kiriş yüzüne kadar 0.55 mm kalınlığında bir çatlak oluşmuştur. Bu yerdeğiştirme seviyesinde, maksimum kesme kuvveti kapasitesine erişilmiş olup, itmede 55 kN ve çekmede -52 kN olarak kaydedilmiştir. δ=-6.75

mm'lik (Öteleme oranı=%-1.5) hedef yerdeğiştirmesine ulaşıldığında ise boyuna donatının aktığı gözlenmiştir. δ=9.00 mm'lik (Öteleme oranı=%2.0) hedef deplasmana gidilirken ise alt kolon bölgesinde, alt yüz ile arka yüz birleşimi hariç, tüm köşe bölgelerinde boyuna doğrultuda uzayan çatlaklar oluşmuştur. Böylece %1.5'lik öteleme oranına kadar hiç kayma çatlağı oluşmamasına rağmen, cam LPkompozit malzemenin beton yüzeyinden ayrılmasına sebep olan boyuna çatlaklar sebebiyle kesme kuvveti kapasitesi daha fazla artamadan düşüşe geçmiştir. Bu boyuna çatlaklara ait resimler Şekil 5.16'da sunulmuştur.

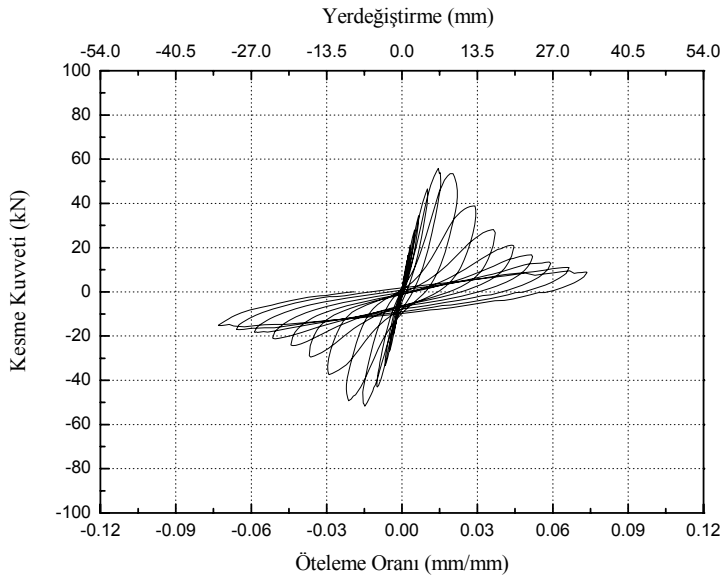


Şekil 5.16: S-LS-G-1-2Sides (δ=9.00 mm, ötelenme oranı=%2.0)

Son hedef yerdeğiştirme değeri olarak (δ=24.75 mm, öteleme oranı%5.5) uygulanmıştır ve bu seviyede kesme kuvveti kapasitesi itmede 9 kN ve çekmede -15 kN olarak kaydedilmiştir. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.17'de verilmiştir. Numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.18'de verilmiştir.



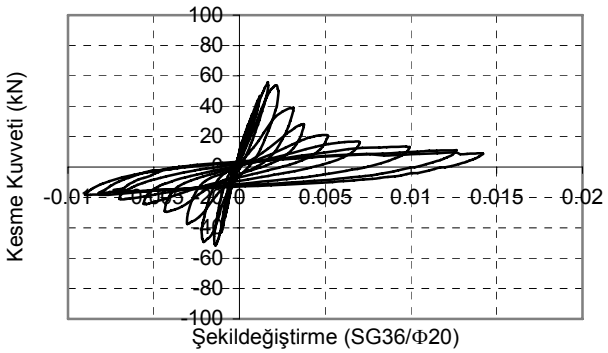
Şekil 5.17: S-LS-G-1-2Sides Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -6.17mm$)



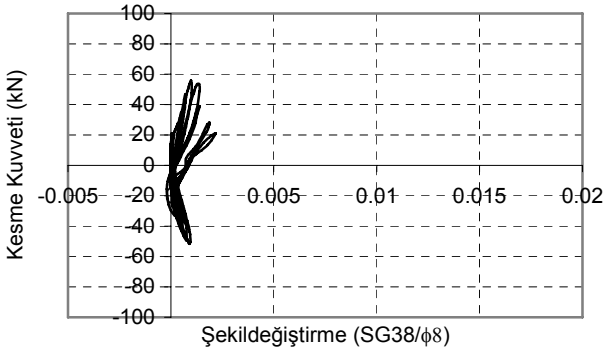
Şekil 5.18: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-1-2Sides)

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

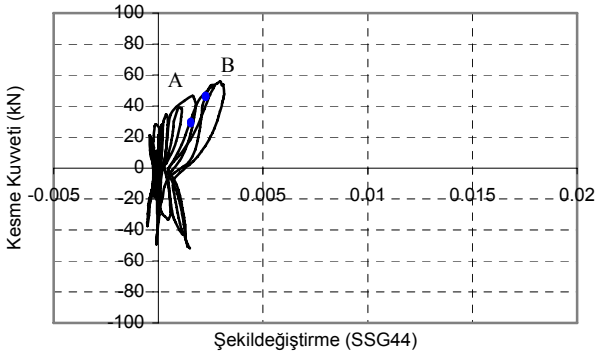
Şekil 5.21'de SSG44 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A ve B simgeleri sırasıyla, %0.5 ve %1.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.19: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.20: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.21: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG44)

5.5 Numune S-LS-C-1-1/2

Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 100 mm genişliğe sahip 3'er adet karbon LP şerit kompozit ile 100 mm net açıklık bırakılıp, tek kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-C-1-1/2 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6: S-LS-C-1-1/2 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.1 / δ = ± 0.45	9.5/-8	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (<0.1mm)
ÖO = %0.5 / δ = ± 2.25	31/-30	Alt kolon bölgesinde ön yüzde kiriş yüzüne 150mm mesafede ilk kesme çatlağı oluştu (0.2mm)
ÖO = %1.0 / δ = ± 4.50	47.5/-46.5	Alt ve üst kolonlarda tüm yüzlerde kesme çatlakları oluştu (0.3mm), eğilme çatlakları ise 0.4mm mertebesindedir
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	48.5/-50	δ=-11.25mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde boyuna ve enine donatıda akma gözlendi, kesme çatlakları (1mm), eğilme çatlakları (1.3mm)
ÖO = %3.0 / δ = ± 13.50	68.5/-66.5	Karşılanan en büyük kesme kuvveti
ÖO = %5.5 / δ = ± 24.75	54/-53.5	Üst kolonda orta karbon LP şeridi ön yüzden yırtılmaya başladı, F=54kN
ÖO = %6.0 / δ = ± 27.00	47.5/-47	Üst kolonda orta karbon LP şeridi arka yüzden yırtılmaya başladı, F=47.5kN

İlk kesme çatlağı, δ=2.25 mm (Öteleme oranı=%0.5) yerdeğiştirmesinde alt kolon bölgesinde, ön yüzde kiriş yüzüne yaklaşık 150 mm mesafede oluştu. δ=±4.50 mm, ötelenme oranı %±1.0 çevrimi tamamlandığında, alt ve üst kolon bölgelerinde, ön ve

arka yüzlerde, yaklaşık olarak 150 mm mesafede kesme çatlakları oluşmuştur. Boyuna ve enine donatının akmasına neden olan yerdeğiştirme seviyesi, δ_y=-11.25 mm (Öteleme oranı=%-2.5) olarak gözlenmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde, kayma çatlakları mesnede yakın olan karbon LP ile sarılmamış beton yüzüne (kiriş yüzüne ortalama 350 mm mesafede) yayılmıştır. Şekil 5.22'de alt kolon ön yüzde oluşan ilk kesme çatlakları gösterilmiştir.



Şekil 5.22: S-LS-C-1-1/2 Numunesi İlk Kesme Çatlakları

Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 68.5 kN ve çekmede -66.5 kN olarak, δ=±13.50 mm (Öteleme oranı=%3.0) çevriminde kaydedilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinden sonra yatay yük kapasitesi düşmeye başlamıştır. δ=24.75 mm (Öteleme oranı=%5.5) hedef yerdeğiştirme gidilirken, üst kolon bölgesinde, orta karbon LP şeridi ön yüzden yırtılmaya başlamıştır, F=54 kN, Şekil 5.23. δ=27.00 mm (Öteleme oranı=%6.0) hedef yerdeğiştirme değerinde ise üst kolon bölgesinde, orta karbon LP şeridi arka yüzden yırtılmaya başlamıştır, F=47.5 kN. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.24'de verilmiştir.

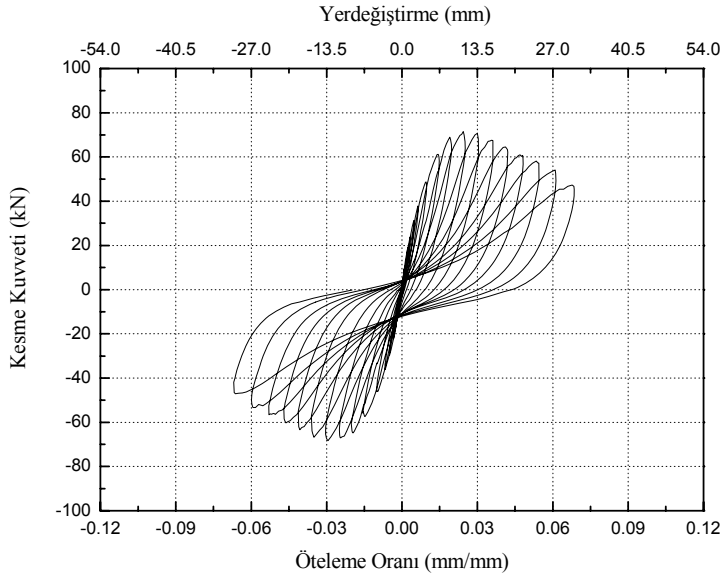


Şekil 5.23: Üst Kat Ön Yüz Orta Şerit Yırtık Başlangıcı



Şekil 5.24: S-LS-C-1-1/2 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -12.4mm$)

Son hedef yerdeğiştirme değeri olarak (δ=29.25 mm, öteleme oranı%6.5) uygulanmıştır ve bu seviyede kesme kuvveti kapasitesi itmede 47.5 kN ve çekmede -47 kN olarak kaydedilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde üst kolon bölgesinde, orta karbon LP şeridinin kopması ve hasarlı betonun dökülmesi ile etriye kancasının açıldığı tespit edilmiştir. Numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.25'de verilmiştir.



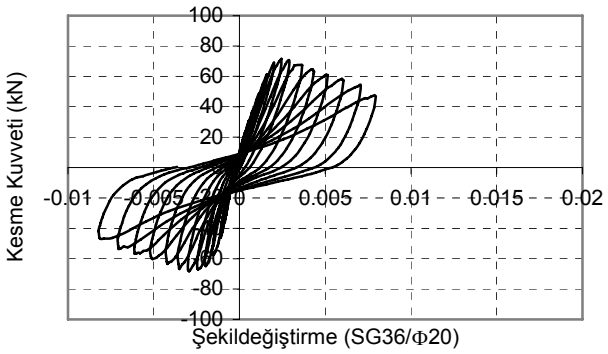
Şekil 5.25: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-C-1-1/2)

Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

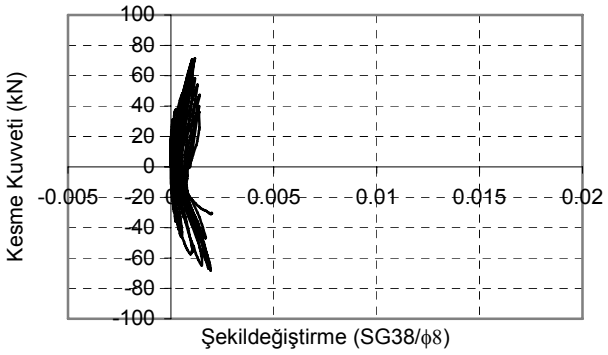
Şekil 5.28'de SSG43 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5,

%1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

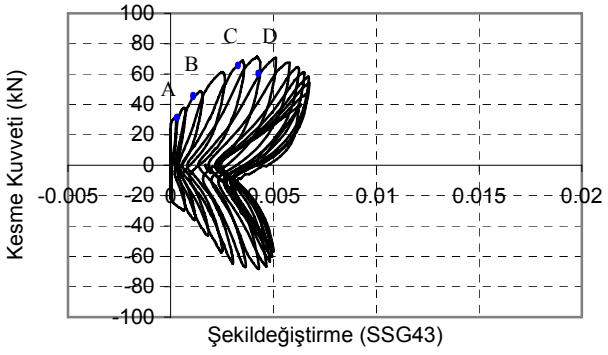
Şekil 5.29'da D35 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B ve C simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0 ve %3.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



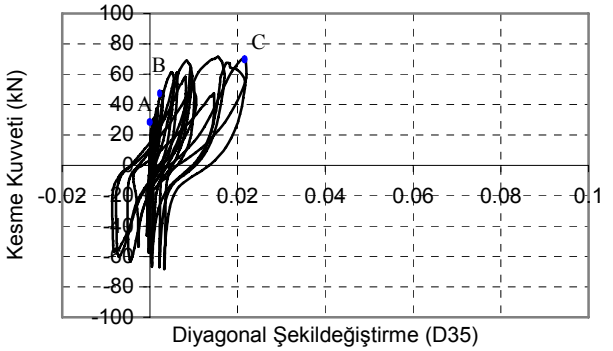
Şekil 5.26: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.27: EnineDonatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.28: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43)



Şekil 5.29: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35)

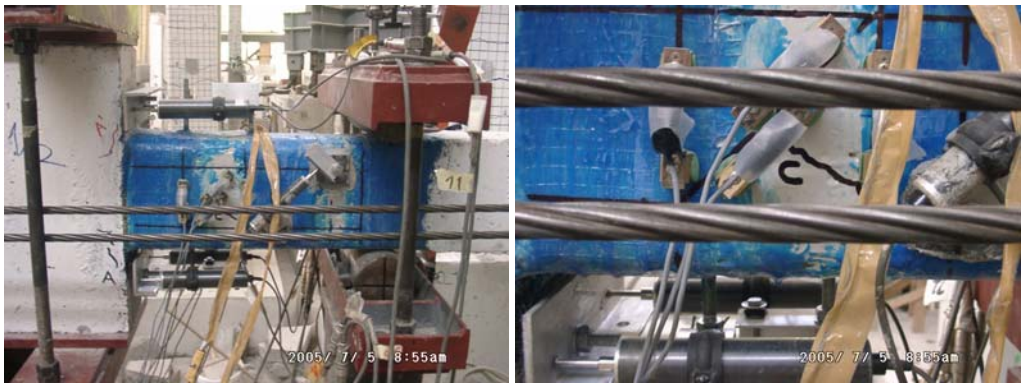
5.6 Numune S-LS-G-1-1/2

Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 100 mm genişliğe sahip 3'er adet cam LP şerit kompozit ile 100 mm net açıklık bırakılıp, tek kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-G-1-1/2 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7: S-LS-G-1-1/2 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.25 / δ = ± 1.13	19.5/-18.5	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (0.1mm)
ÖO = %0.5 / δ = ± 2.25	31/-30	Alt ve üst kolon bölgesinde ön ve arka yüzlerde kiriş yüzüne yaklaşık 150mm mesafede ilk kesme çatlakları oluştu (0.1mm)
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	64/-64	Karşılanan en büyük kesme kuvveti
ÖO = %4.0 / δ = ± 18.00	57.5/-59	Üst kolonda orta karbon LP şeridi ön yüzden yırtılmaya başladı, F=57.5kN
ÖO = %4.5 / δ = ± 20.25	51/-54.5	Üst kolonda orta karbon LP şeridi arka yüzden yırtılmaya başladı, F=-54.5kN
ÖO = %5.0 / δ = ± 22.50	39/-41.5	Üst kolonda orta karbon LP şeridi ön yüzden koptu, F=39kN
ÖO = %6.5 / δ = ± 29.25	16.5/-22.5	Aşırı hasar sebebiyle bu çevrim tamamlanıp deney durdurulmuştur

İlk kesme çatlakları, δ=±2.25 mm (Öteleme oranı=%±0.5) çevrimi tamamlandığında, alt ve üst kolon bölgelerinde, ön ve arka yüzlerde, kiriş yüzüne yaklaşık 150 mm mesafede oluştu. Şekil 5.30'da alt kolonda, arka yüzde oluşan bir kayma çatlağı gösterilmiştir.



Şekil 5.30: S-LS-G-1-1/2 Numunesi C Kayma Çatlağı (δ=2.25 mm, öteleme oranı=%0.5)

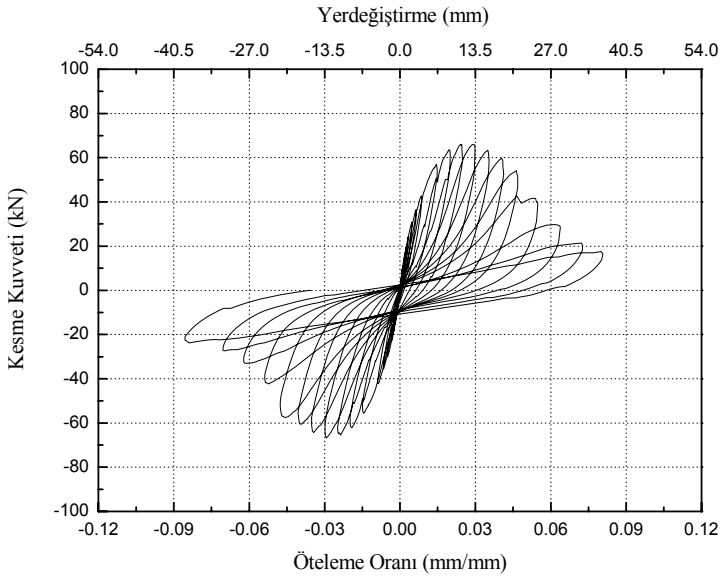
Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 64 kN ve çekmede -64 kN olarak, δ=±11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) çevriminde kaydedilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinden sonra kesme kuvveti kapasitesi düşmeye başlamıştır. δ=18.00 mm (Öteleme oranı=%4.0) hedef yerdeğiştirmesine gidilirken, üst kolon bölgesinde, orta cam LP şeridi ön yüzden yırtılmaya başlamıştır, F=57.5 kN. δ=-20.25 mm (Öteleme oranı=%-4.5) hedef yerdeğiştirme değerinde ise üst kolon bölgesinde, orta cam LP şeridi arka yüzden yırtılmaya başlamıştır, F=-54.5 kN. δ=22.50 mm (Öteleme oranı=%5.0) hedef yerdeğiştirmesine erişilirken üst kolonunda, orta cam LP şeridi ön yüzden kopmuştur, F=39 kN, Şekil 5.31. Aynı zamanda bu seviyede, alt ve üst kolonlarda, kiriş yüzüne 100 mm mesafede bulunan ilk cam LP şeritleri yırtılmaya başlamıştır. Daha sonraki çevrimlerde üst kolon orta cam LP şeridinin kopmuş olması sebebiyle hasar tamamen üst kolonda toplanmıştır. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.32'de ve kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.33'de verilmiştir.



Şekil 5.31: Üst Kolon Orta Cam LP Şeridi (δ=22.50 mm, öteleme oranı=%5.0)



Şekil 5.32: S-LS-G-1-1/2 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -12mm$)

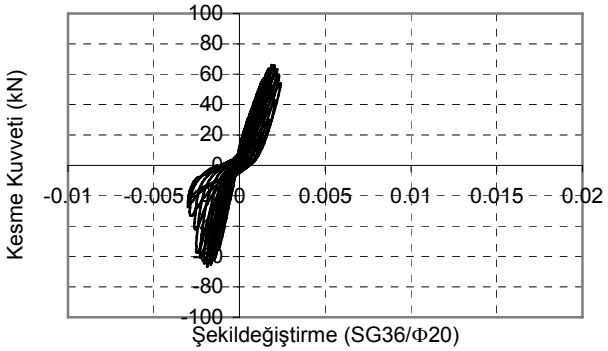


Şekil 5.33: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-1-1/2)

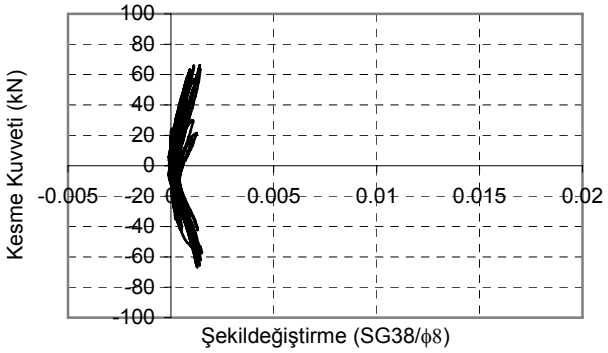
Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

Şekil 5.36'da SSG45 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

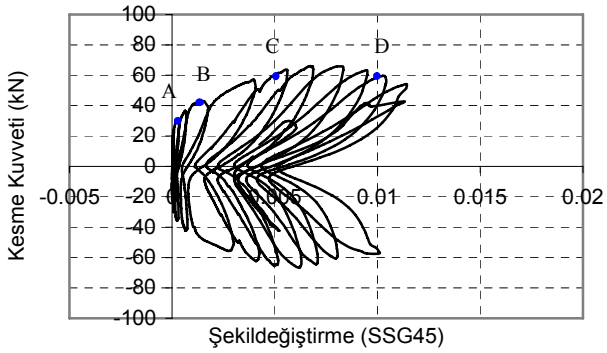
Şekil 5.37'de D35 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



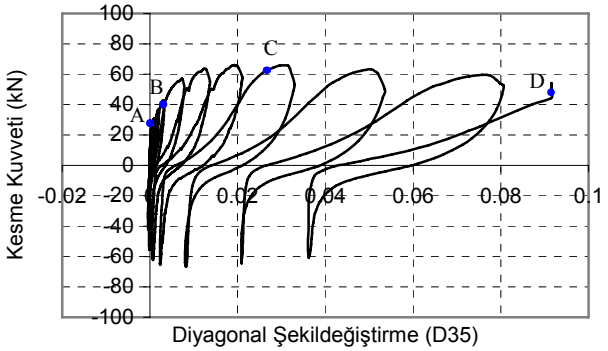
Şekil 5.34: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.35: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.36: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG45)



Şekil 5.37: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35)

5.7 Numune S-LS-C-1-1

Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 500 mm genişliğe sahip 1'er adet karbon LP kompozit ile 10 mm kiriş yüzünden boşluk bırakılırak, tek kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-C-1-1 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.8'de verilmiştir.

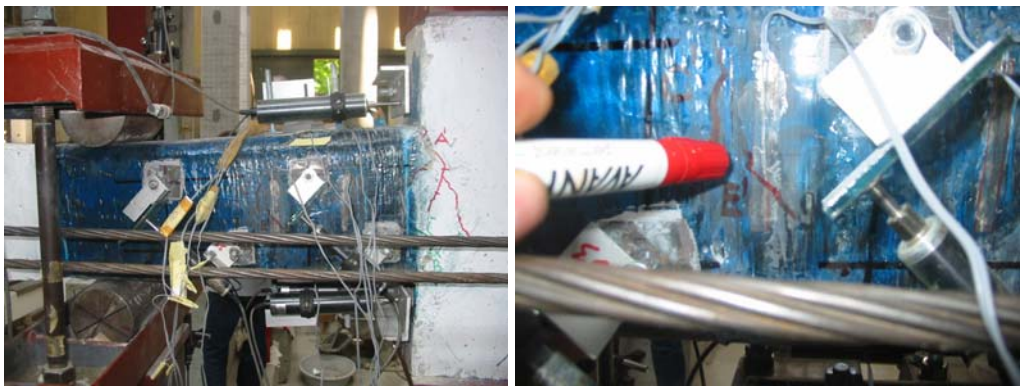
Tablo 5.8: S-LS-C-1-1 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.1 / δ = ± 0.45	11.5/-8	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (<0.1mm)
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	76/-73.5	δ=11.25mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde boyuna donatıda akma gözlendi (F=76kN), eğilme çatlak genişlikleri 0.65mm ile 1.15 mm arasındadır
ÖO = %3.0 / δ = ± 13.50	80/-76	Karşılanan en büyük kesme kuvveti
ÖO = %3.5 / δ = ± 15.75	78.5/-74	Alt kolon bölgesinde ön yüzde birleşim kesitine yaklaşık 175mm mesafede epoksi üzerinde eğik bir çatlak oluştu (0.15mm), alt kolonda karbon LP kompozitte düşey doğrultuda ayrılmalar gözlendi (0.1mm)
ÖO = %4.0 / δ = ± 18.00	76/-73	Üst kolonda karbon LP kompozitte düşey doğrultuda ayrılmalar gözlendi (0.15mm)
ÖO = %5.0 / δ = ± 22.50	70.5/-66.5	Üst kolon arka yüzde kiriş yüzüne 200mm mesafede 0.4mm kalınlığında kesme çatlağı
ÖO = %7.0 / δ = ± 27.00	48.5/-52.5	Bu çevrim tamamlanıp deney durdurulmuştur

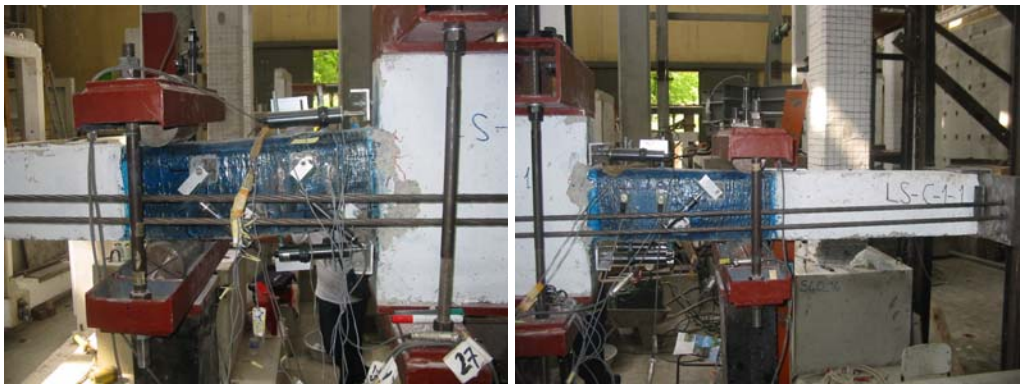
İlk eğilme çatlakları, δ=±0.45 mm (Öteleme Oranı=%±0.1) çevrimi tamamlandığında, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde oluşmuştur. Boyuna donatının

akmasına neden olan yerdeğiştirme seviyesi, δ_y=11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) olarak gözlenmiş olup, bu seviyede hiçbir kesme çatlağı oluşmazken, eğilme çatlak kalınlıkları 0.65 mm ile 1.15 mm arasında değişmektedir.

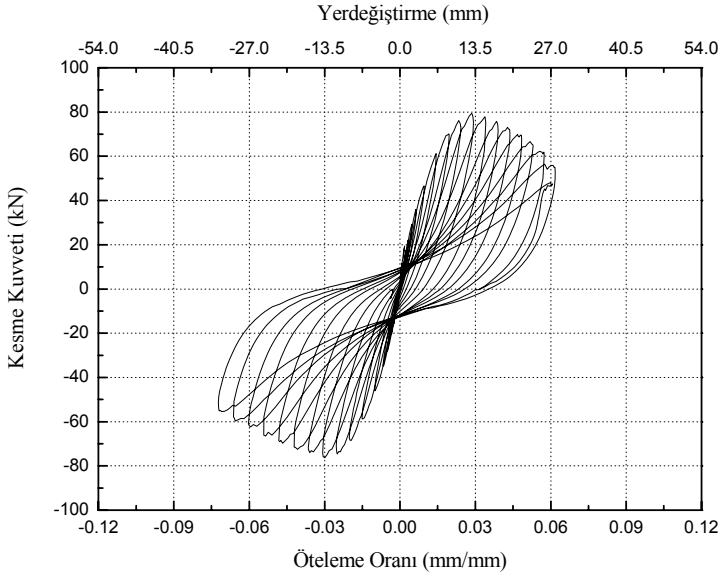
Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 80 kN ve çekmede -76 kN olarak, δ=±13.50 mm (Öteleme oranı=%3.0) çevriminde kaydedilmiştir. Bir sonraki yerdeğiştirme hedefi olan, δ=15.75 mm (Öteleme oranı=%3.5) değerine gidilirken, alt kolon bölgesinde, ön yüzde ve kiriş yüzüne yaklaşık olarak 175 mm mesafede, epoksi üzerinde 0.15 mm kalınlığında eğik bir çatlak tespit edilmiştir, F=78.5 kN. Aynı zamanda bu seviyede, eğik çatlağın hemen yanında düşey doğrultuda karbon LP kompozitte ayrılmalar baş göstermiştir. δ=±18.00 mm (Öteleme oranı=%±4.0) çevrimi tamamlandığında bu düşey doğrultudaki ayrılmalar üst kolonda da gözlenmiştir, itmede F=76 kN ve çekmede F=-73 kN. δ= -22.50 mm (Öteleme oranı=%-5.0) hedef yerdeğiştirme değerinde ise üst kolon bölgesinde, arka yüzde ve kiriş yüzüne 200 mm mesafede, 0.4 mm kalınlığında kesme çatlağı (epokside) oluşmuştur, Şekil 5.38. Son çevrim olarak, δ=±31.50 mm (Öteleme oranı=%±7.0) hedefine gidilmiştir. Bu adımdan sonra yatay yük değeri sıfırlanarak deney bitirilmiştir. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.39'da ve kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.40'da verilmiştir.



Şekil 5.38: S-LS-C-1-1 Numunesi (δ= -22.50 mm, öteleme oranı=%-5.0)



Şekil 5.39: S-LS-C-1-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -21.3mm$)

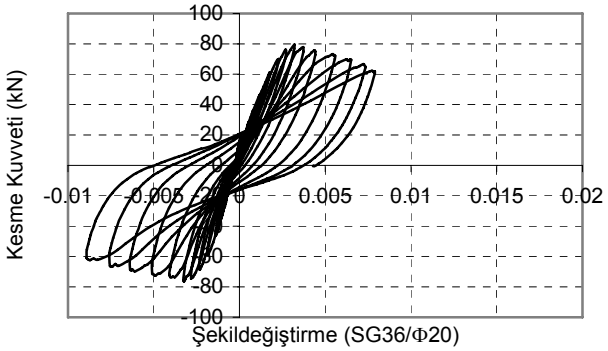


Şekil 5.40: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-C-1-1)

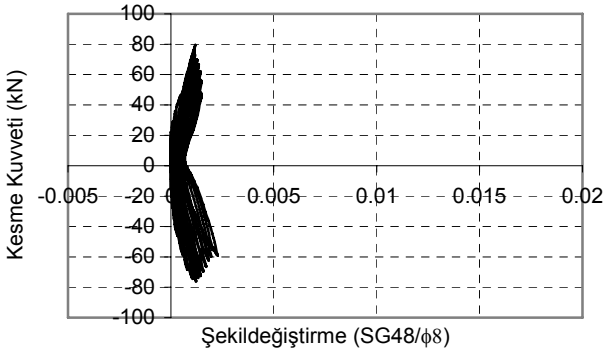
Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

Şekil 5.43'de SSG43 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

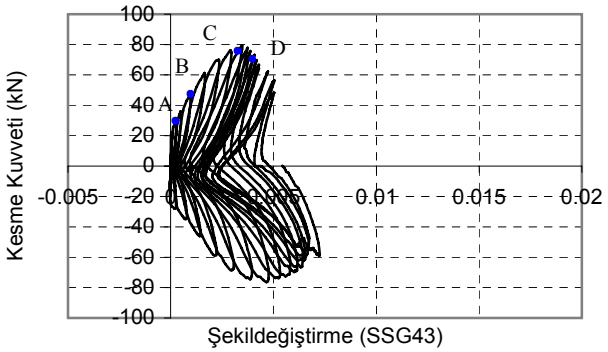
Şekil 5.44'de D35 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



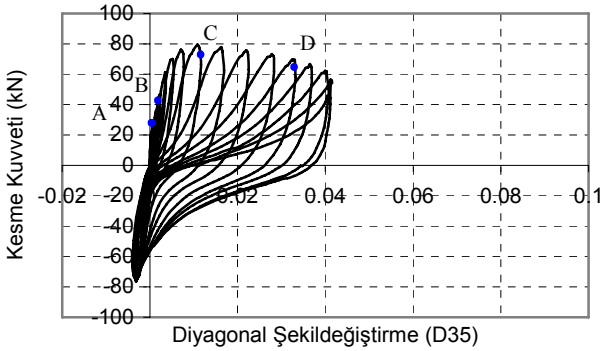
Şekil 5.41: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.42: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.43: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43)



Şekil 5.44: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35)

5.8 Numune S-LS-G-1-1

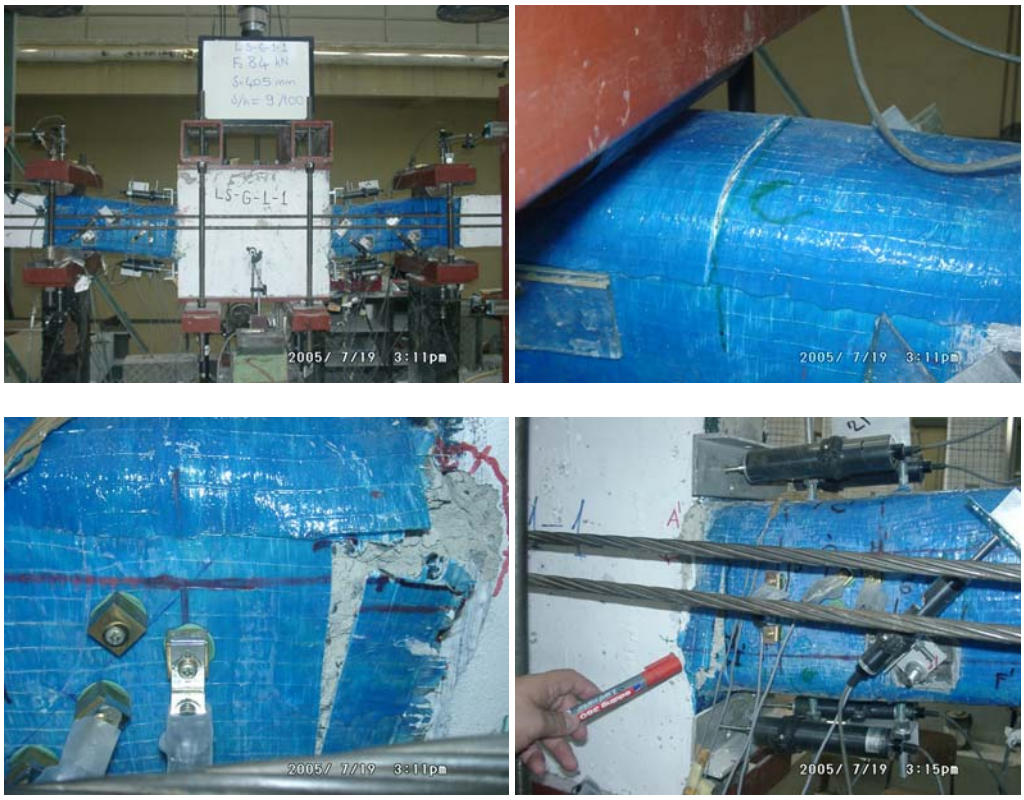
Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 500 mm genişliğe sahip 1'er adet cam LP kompozit ile 10 mm kiriş yüzünden boşluk bırakılırak, tek kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-G-1-1 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9: S-LS-G-1-1 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %2.0 / δ = ± 9.00	66.5/-65.5	δ=-9.00mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde boyuna donatıda akma gözlendi (F=-66.5kN), eğilme çatlak kalınlıkları 0.85mm ile 1.3mm arasında değişmektedir
ÖO = %3.0 / δ = ± 13.50	71.5/-71.5	Karşılanan en büyük kesme kuvveti, δ=-13.50mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde enine donatıda akma gözlendi (F=-71.5kN)
ÖO = %4.0 / δ = ± 18.00	69/-69	Alt kolon bölgesinde üst yüzde mesnedin hemen yanında cam LP kompozit enine doğrultuda ayrılmıştır (0.3mm), alt kolonda karbon LP kompozitte düşey doğrultuda ayrılmalar gözlendi (0.1mm)
ÖO = %4.5 / δ = ± 20.25	67.5/-67	Alt kolon bölgesinde üst yüzde cam LP kompozit enine doğrultuda ayrılmaya başlamıştır
ÖO = %6.5 / δ = ± 29.25	57/-58	Üst kolon bölgesinde ön ve arka yüzlerde cam LP kompozit enine doğrultuda ayrılmaya başlamıştır
ÖO = %8.0 / δ = ± 36.00	48.5/-51	Hasar alt kolonda yoğunlaştı, enine ayrılmalar (4mm)
ÖO = %9.0 / δ = ± 40.50	42/-46.5	Alt kolonda ön ve arka yüzlerde birleşim kesitinden cam LP kompozit yırtılmaya başlamıştır

δ=±0.45 mm'ye (Öteleme Oranı=%± 0.1) gidilirken, alt ve üst kolonda, birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Enine donatının akmasına neden olan yerdeğiştirme seviyesi, δ_y=-9.00 mm (Öteleme oranı=%-2.5) olarak gözlenmiş olup, bu seviyede hiçbir kesme çatlağı oluşmazken, eğilme çatlak kalınlıkları 0.85 mm ile 1.30 mm arasında değişmektedir. δ=-13.50mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde ise enine donatıda akma gözlendi.

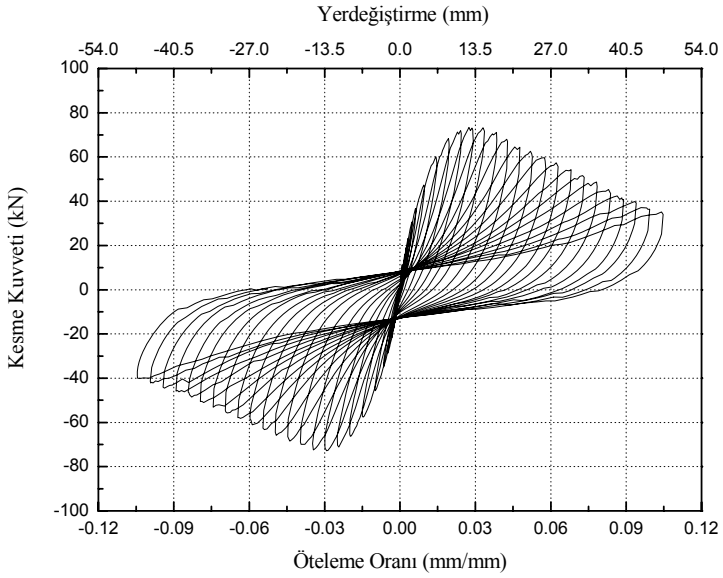
Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 71.5 kN ve çekmede -71.5 kN olarak, δ=±13.50 mm (Öteleme oranı=%3.0) çevriminde kaydedilmiştir. δ=18.00 mm (Öteleme oranı=%3.5) hedef yerdeğiştirme değerine gidilirken, alt kolon bölgesinde, üst yüzde ve mesnedin hemen yanında, cam LP kompozit enine doğrultuda ayrılmaya başlamıştır, F=69 kN. Bir sonraki çevrim olan, δ= ±20.25 mm (Öteleme oranı=%±4.5) hedefi tamamlandığında bu düşey doğrultudaki ayrılmalar alt kolonda, alt yüzeyde ve kirişe 250 mm mesafede gözlenmiştir, itmede F=67.5 kN ve çekmede F=-67 kN. δ= 29.25 mm (Öteleme oranı=%6.5) hedef yerdeğiştirme değerinde ise üst kolon bölgesinde, ön ve arka yüzlerde ve kiriş yüzüne yaklaşık 225 mm mesafede, enine doğrultuda ayrılmalar başlamıştır. δ= ±36.00 mm (Öteleme oranı=%±8.0) çevrimi tamamlandığında, hasarın alt kolonunda arttığı ve enine ayrılmaların yaklaşık 4 mm kalınlığına ulaştığı kaydedilmiştir. δ=40.5 mm (Öteleme oranı=%9.0) hedef yerdeğiştirme değerinde ise alt kolonunda, ön ve arka yüzlerde, birleşim kesitinden cam LP kompozit yırtılmaya başlamıştır, Şekil 5.45. Bu numune için ulaşılan en büyük yerdeğiştirme seviyesi δ=±47.25 mm (Öteleme oranı=%10.5) olmuştur. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.46'da ve numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.47'de verilmiştir.



Şekil 5.45: S-LS-G-1-1 Numunesi Hasar Durumu (δ=40.5 mm, Öteleme oranı=%9.0)



Şekil 5.46: S-LS-G-1-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -24.75mm$)

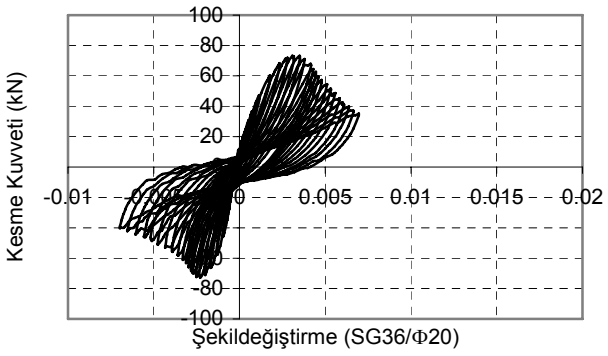


Şekil 5.47: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-1-1)

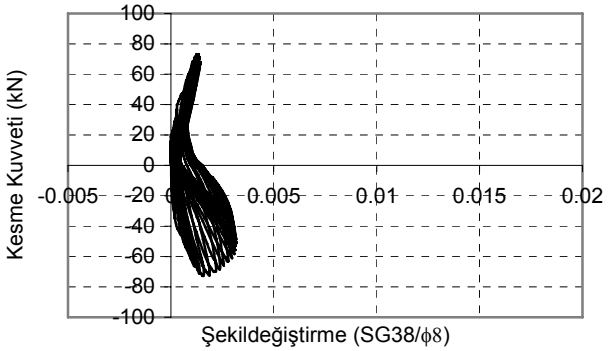
Şekil 5.48 ve Şekil 5.49'da sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

Şekil 5.50'de SSG43 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

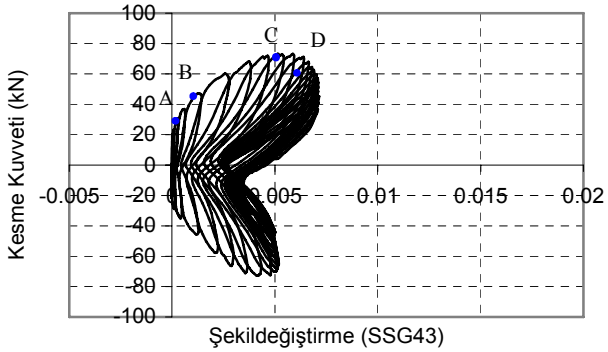
Şekil 5.51'de D35 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C, D ve E simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0, %5.0 ve %7.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



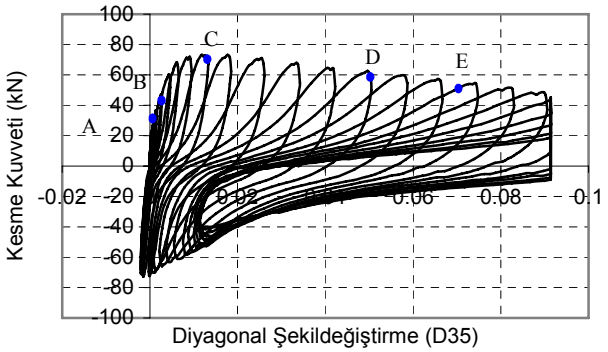
Şekil 5.48: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.49: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.50: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43)



Şekil 5.51: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D35)

5.9 Numune S-LS-G-2-1

Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 500 mm genişliğe sahip 1'er adet cam LP kompozit ile 10 mm kiriş yüzünden boşluk bırakılırak, iki kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-G-2-1 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5.10: S-LS-G-2-1 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.2 / δ = ± 0.90	14.5/-12	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (<0.1mm)
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	75/-75	δ=-11.25mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde boyuna donatıda akma gözlendi (F=75kN), eğilme çatlak kalınlıkları 1.2mm
ÖO = %4.0 / δ = ± 18.00	80/-78	Karşılanan en büyük kesme kuvveti, eğilme çatlak kalınlıkları ortalama 2mm
ÖO = %5.0 / δ = ± 22.50	73.5/-73.5	Alt kolon bölgesinde alt yüzde mesnede 100mm mesafede cam LP kompozit enine doğrultuda ayrılmıştır (0.15mm), alt kolonda karbon LP kompozitte düşey doğrultuda ayrılmalar gözlendi (0.1mm)
ÖO = %6.0 / δ = ± 27.00	60/-66	Hidrolik verenin bağlandığı kirişte dönme gözlendi
ÖO = %6.5 / δ = ± 29.25	57/-58	Üst kolon bölgesinde alt yüzde cam LP kompozit enine doğrultuda ayrılmaya başlamıştır

δ=±0.90 mm (Öteleme Oranı=%±0.2) çevrimi tamamlandığında, alt ve üst kolonda, birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Boyuna donatının akmasına neden olan yerdeğiştirme seviyesi, δ_y=11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) olarak

gözlenmiş olup, bu seviyede hiçbir kesme çatlağı oluşmazken, eğilme çatlak kalınlıkları ortalama olarak 1.2 mm'dir.

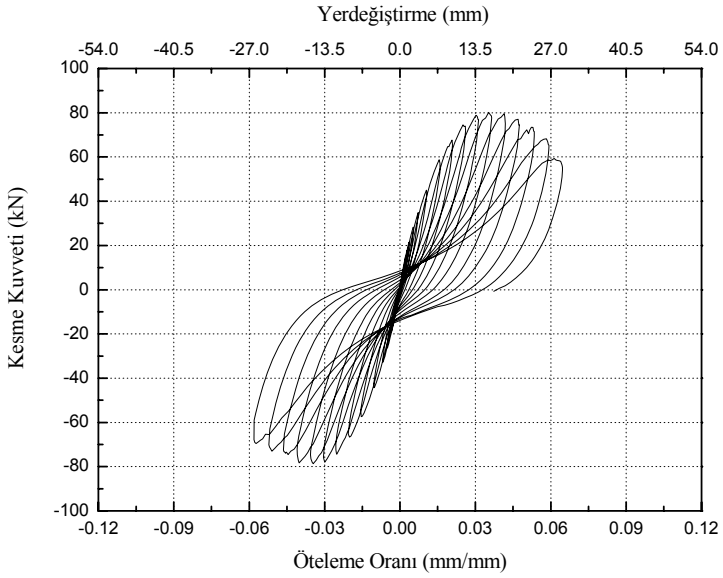
Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 80 kN ve çekmede -78 kN olarak, δ= ±18.00 mm (Öteleme oranı=%4.0) çevriminde kaydedilmiştir. δ=22.50 mm (Öteleme oranı=%5.0) değerine gidilirken, alt kolon bölgesinde, alt yüzde ve mesnede yaklaşık olarak 100 mm mesafede, cam LP kompozit üstünde enine doğrultuda ayrılma (0.15 mm) tespit edilmiştir, F=73.5 kN. Bir sonraki hedef olan, δ=24.75 mm'ye (Öteleme oranı=%5.5) gidilirken hidrolik verenin bağlandığı kirişte dönme görülmüştür. δ=27.00 mm (Öteleme oranı=%6.0) hedef yerdeğiştirme değerinde, üst kolonda ve alt yüzde, kiriş yüzüne yaklaşık 150 mm mesafede cam LP kompozitte düşey ayrılma gözlenmiştir, Şekil 5.52. Bu adımdan sonra yatay yük değeri sıfırlanarak deney bitirilmiştir. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.53'de ve numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.54'de verilmiştir.



Şekil 5.52: S-LS-G-2-1 Hasar Durumu (δ=27.00 mm, öteleme oranı=%6.0)



Şekil 5.53: S-LS-G-2-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -14.5mm$)

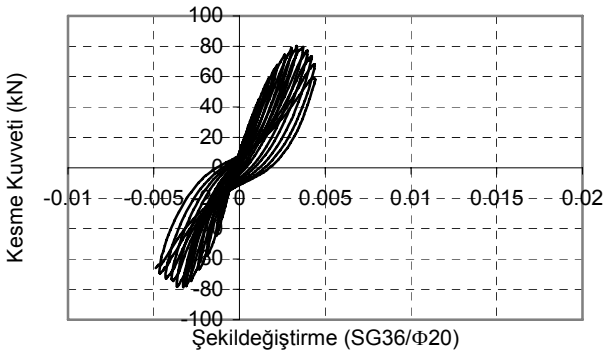


Şekil 5.54: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-2-1)

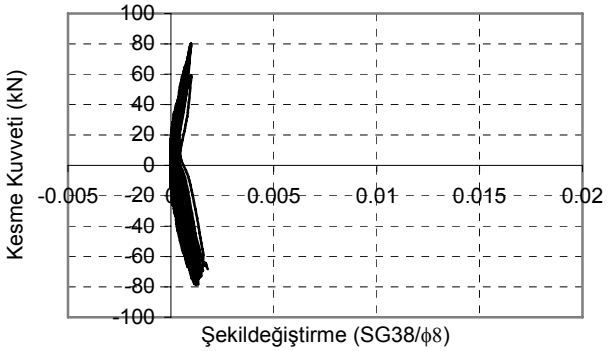
Şekil 5.55 ve Şekil 5.56'da sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

Şekil 5.57'de PI52 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B ve C simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0 ve %3.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

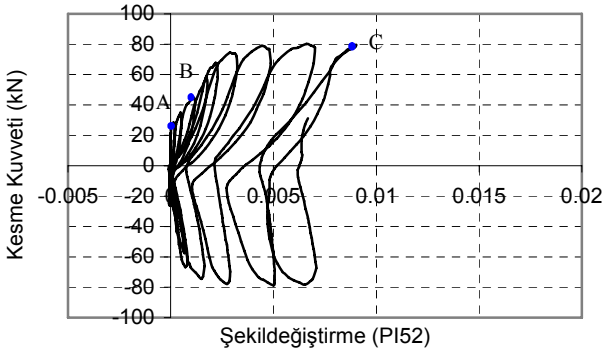
Şekil 5.58'de D31 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



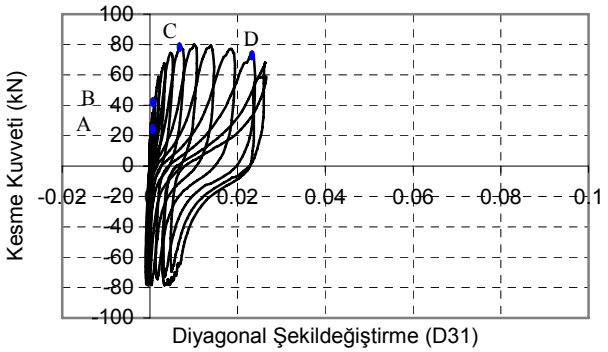
Şekil 5.55: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.56: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.57: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI52)



Şekil 5.58: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31)

5.10 Numune S-LS-G-3-1

Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 500 mm genişliğe sahip 1'er adet cam LP kompozit ile 10 mm kiriş yüzünden boşluk bırakılırak, üç kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-G-3-1 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.11'de verilmiştir.

Tablo 5.11: S-LS-G-3-1 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.2 / δ = ± 0.90	15/-14.5	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (<0.1mm)
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	80/-75	δ=-11.25mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde boyuna donatıda akma gözlendi (F=75kN), eğilme çatlak kalınlıkları itmede 1.3mm çekmede ise 1.5mm mertebesindedir
ÖO = %4.0 / δ = ± 13.50	84.5/-80	Karşılanan en büyük kesme kuvveti, eğilme çatlak kalınlıkları ortalama 2mm, alt kolon alt yüzey cam LP kompozit üzerinde eğilme çatlağı
ÖO = %6.0 / δ = ± 27.00	74/-71	Üst kolonda üst yüz ile kiriş birleşiminde cam LP kompozitte yırtılma başlangıcı
ÖO = %6.5 / δ = ± 29.25	66.5/-67.5	Üst kolonda alt yüz ile kiriş birleşiminde cam LP kompozitte yırtılma başlangıcı

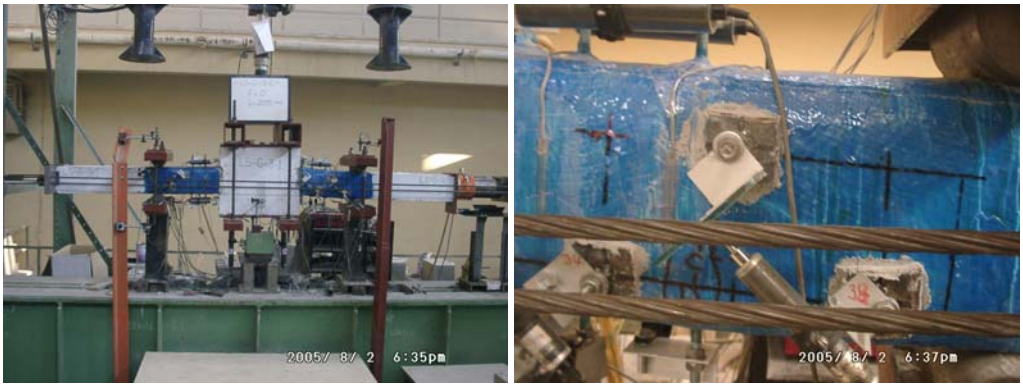
δ=0.90 mm'ye (Öteleme Oranı=%0.2) gidilirken, alt ve üst kolonda, birleşim kesitinde e ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Boyuna donatının akmasına neden olan yerdeğiştirme seviyesi, δ_y=11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) olarak gözlenmiştir.

Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 84.5 kN ve çekmede -80 kN olarak, δ=±13.50 mm (Öteleme oranı=%3.0) çevriminde kaydedilmiştir. Ayrıca bu yerdeğiştirme seviyesinde, alt kolonda ve alt yüzde, mesnede yaklaşık 70 mm

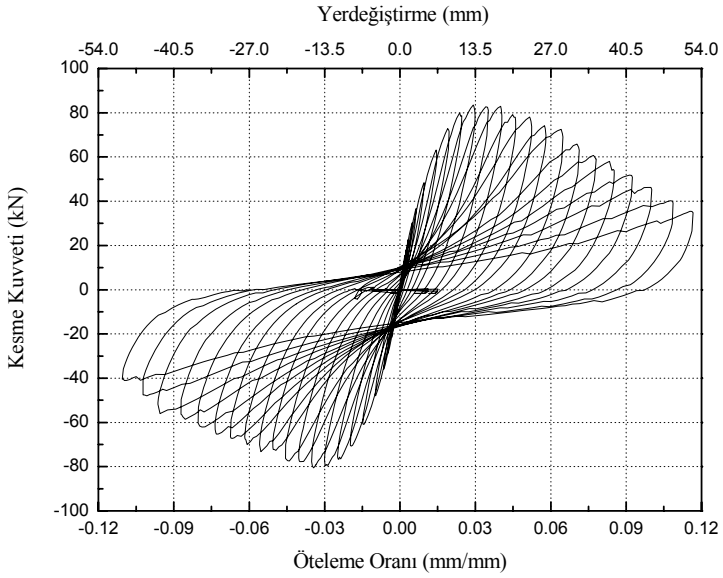
mesafede cam LP kompozit üzerinde bir eğilme çatlağı oluşmuştur. δ=27.00 mm (Öteleme oranı=%6.0) değerine gidilirken, üst kolon bölgesinde, üst yüz ile kiriş birleşiminde, cam LP kompozit yırtılmaya başlamıştır, F=74 kN, Şekil 5.59. Bir sonraki hedef olan, δ=29.25 mm'ye (Öteleme oranı=%6.5) gidilirken üst kolon bölgesinde, alt yüz ile kiriş birleşiminde, cam LP kompozit yırtılmaya başlamıştır, F=66.5 kN. Son çevrim olarak, δ=±42.75 mm (Öteleme Oranı=%±9.5) değeri tamamlanmıştır. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.60'da ve numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.61'de verilmiştir.



Şekil 5.59: S-LS-G-3-1 Hasar Durumu (δ=27.00 mm, öteleme oranı=%6.0)



Şekil 5.60: S-LS-G-3-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü ($\delta_{pl} = -20.95mm$)

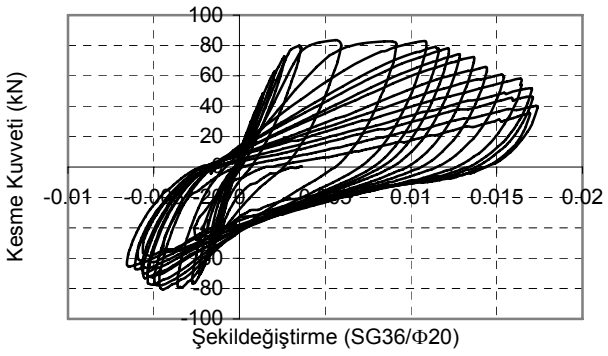


Şekil 5.61: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-G-3-1)

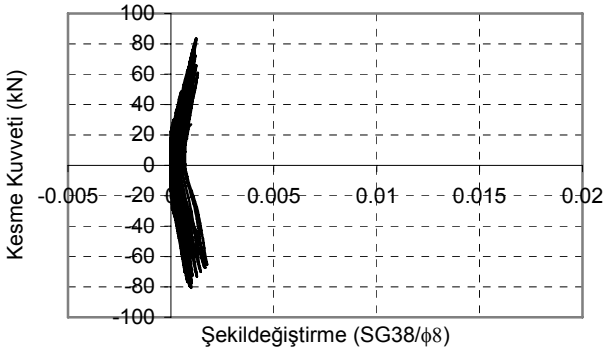
Şekil 5.62 ve Şekil 5.63'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

Şekil 5.64'de SSG43 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

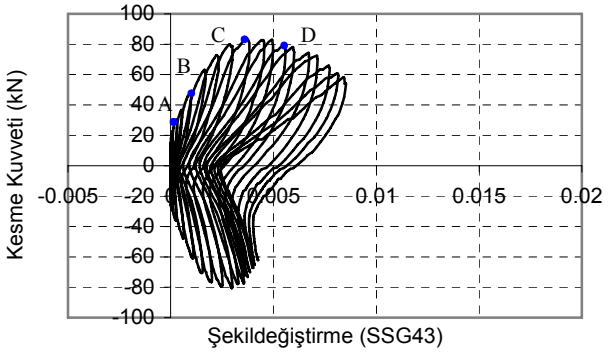
Şekil 5.65'de D33 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C, D ve E simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0, %5.0 ve %7.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



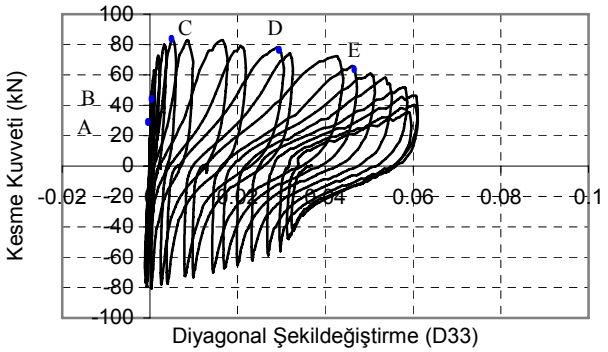
Şekil 5.62: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.63: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.64: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG43)



Şekil 5.65: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D33)

5.11 Numune S-LS-O-1-R-R-C-1/2

Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 100 mm genişliğe sahip 1'er adet cam LP şerit kompozit ile 100 mm net açıklık bırakılıp, tek kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-O-1-R-R-C-1/2 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12: S-LS-O-1-R-R-C-1/2 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.1 / δ = ± 0.45	13/-8.5	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (<0.1mm)
ÖO = %0.5 / δ = ± 2.25	25/-18.5	Üst kolon bölgesinde ön ve arka yüzlerde kiriş yüzüne 150mm mesafede ilk kesme çatlakları oluştu (0.1mm)
ÖO = %1.0 / δ = ± 4.50	47.5/-46.5	Alt ve üst kolonlarda tüm yüzlerde kesme çatlakları oluştu (0.3mm), eğilme çatlakları ise 0.4mm mertebesindedir
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	68.5/-61.5	Karşılanan en büyük kesme kuvveti, δ=-11.25mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde boyuna donatıda akma gözlendi, kesme çatlakları (0.7mm), eğilme çatlakları (1.1mm)
ÖO = %3.0 / δ = ± 13.50	66/-61	Üst kolonda ilk karbon LP şeridi arka yüzden yırtılmaya başladı (F=66kN), δ=-13.50mm yerdeğiştirmesine erişildiğinde enine donatıda akma gözlendi
ÖO = %4.0 / δ = ± 18.00	51.5/-49.5	Üst kolonda orta karbon LP şeridi ön yüzden yırtılmaya başladı, F=51.5kN
ÖO = %5.5 / δ = ± 24.75	27.5/-29.5	Üst kolonda orta karbon LP şeridi arka yüzden yırtılmaya başladı, F=27.5kN

İlk kesme çatlağı, δ=2.25 mm (Öteleme oranı=%0.5) yerdeğiştirmesinde üst kolon bölgesinde, ön ve arka yüzlerde, kiriş yüzüne yaklaşık 150 mm mesafede oluştu, F=25 kN. δ=4.50 mm (Ötelenme oranı %1.0) hedef yerdeğiştirmesine erişilirken, alt kolon bölgesinde de, ön ve arka yüzlerde, yaklaşık olarak 150 mm mesafede kesme çatlakları oluşmuştur, F=42.5 kN. Boyuna donatının akmasına neden olan yerdeğiştirme seviyesi, δ_y=11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) olarak gözlenmiştir.

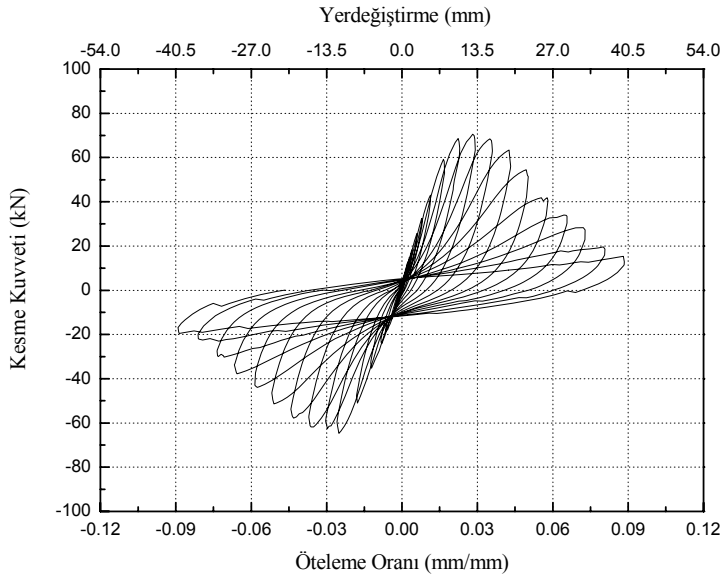
Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 68.5 kN ve çekmede -61.5 kN olarak, δ= ±11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) çevriminde kaydedilmiştir. δ=13.50 mm (Öteleme oranı=%3.0) hedef yerdeğiştirmesinde, üst kolonda, arka yüzden kiriş yanındaki ilk karbon LP şeridi yırtılmaya başlamıştır. δ=-13.50 mm (Öteleme oranı=%-3.0) hedef yerdeğiştirmesine gidilirken enine donatılar akmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinden sonra tamir harcı ile doldurulan alt kolonda hasar daha fazla artmamıştır. δ=18.00 mm (Öteleme oranı=%4.0) hedef yerdeğiştirmesine gidilirken, üst kolon bölgesinde, orta karbon LP şeridi ön yüzden yırtılmaya başlamıştır, F=51.5 kN, Şekil 5.66. δ=24.75 mm (Öteleme oranı=%5.5) hedef yerdeğiştirme değerinde ise üst kolon bölgesinde, orta karbon LP şeridi arka yüzden yırtılmaya başlamıştır, F=27.5 kN. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.67'de ve numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.68'de verilmiştir.



Şekil 5.66: S-LS-O-1-R-R-C-1/2 Hasar Durumu (δ=18.00 mm, öteleme oranı=%4.0)



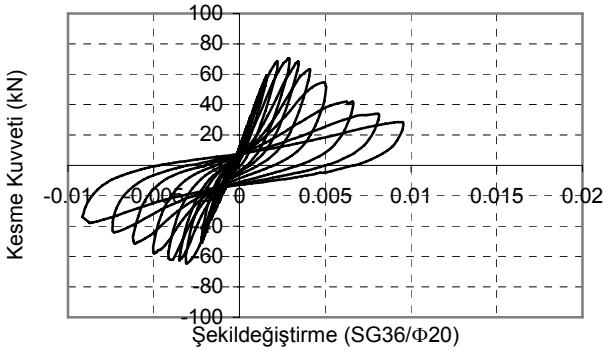
Şekil 5.67: S-LS-O-1-R-R-C-1/2 Numunesi Deney Sonu Görünümü



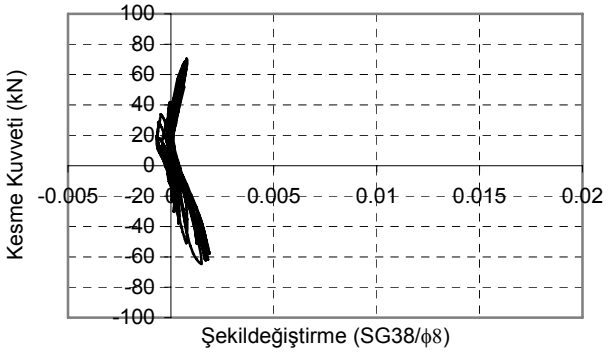
Şekil 5.68: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-1-R-R-C-1/2)

Şekil 5.69 ve Şekil 5.70'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

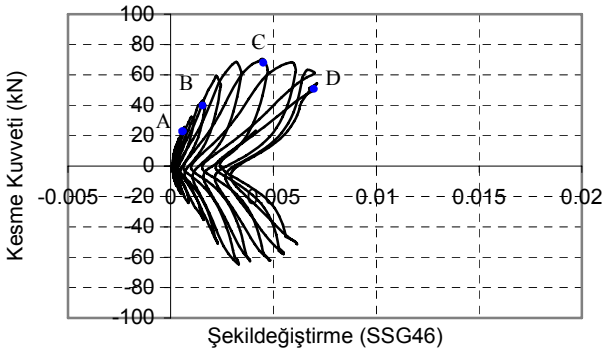
Şekil 5.71'de SSG46 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.69: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.70: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.71: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (SSG46)

5.12 Numune S-LS-O-2-R-R-G-1

Bu numune, üst ve alt kolon bölgesinde, 500 mm genişliğe sahip 1'er adet cam LP kompozit ile 10 mm kiriş yüzünden boşluk bırakılırak, tek kat sarılmak suretiyle güçlendirilmiştir. S-LS-O-2-R-R-G-1 numunesinin deney sırasındaki davranışı özet olarak Tablo 5.13'de verilmiştir.

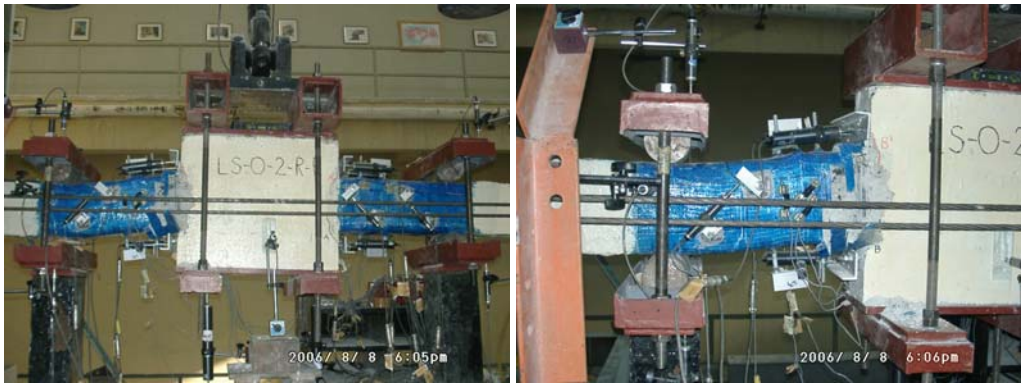
Tablo 5.13: S-LS-O-2-R-R-G-1 Numunesinin Davranışının Özeti

Öteleme Oranı / Yerdeğiştirme (mm)	**V_{max} (kN)**	**Numunenin Durumu**
ÖO = %0.25 / δ = ± 1.13	13/-11	Kolon-kiriş birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları (0.1mm)
ÖO = %2.5 / δ = ± 11.25	69/-58.5	Eğilme çatlak kalınlıkları 0.9mm, alt kolonda üst yüzde cam LP kompozitte eğilme çatlağı (0.4mm)
ÖO = %3.0 / δ = ± 15.75	70.5/-62.5	Karşılanan en büyük kesme kuvveti
ÖO = %7.0 / δ = ± 31.50	46.5/-40	Alt kolon bölgesinde üst yüzde mesnedin hemen yanında cam LP kompozit enine doğrultuda ayrılmıştır

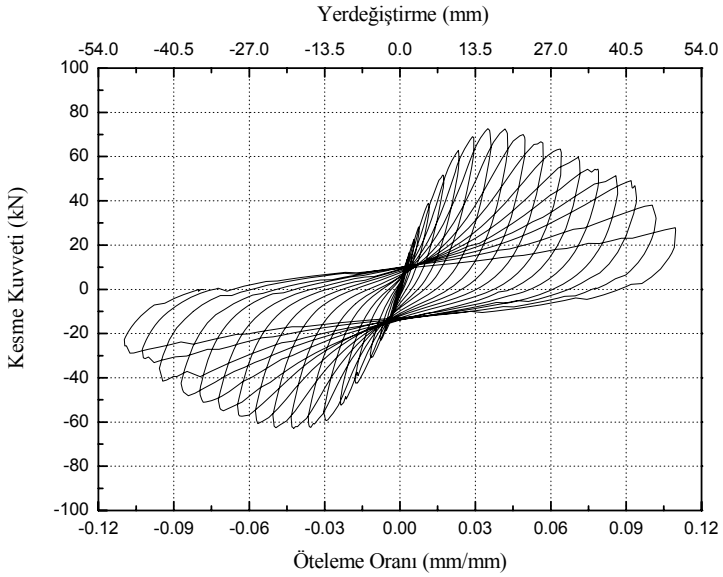
δ=±1.13 mm (Öteleme Oranı=%±0.1) çevrimi tamamlandığında, üst kolonda, birleşim kesitinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. δ=11.25 mm (Öteleme oranı=%2.5) yerdeğiştirme değerinde, alt kolonda ve kiriş yüzüne yaklaşık 50 mm mesafede numune üst yüzünde cam LP kompozit ayrılmaya başlamıştır, bu eğilme çatlağı 0.4 mm kalınlığında ölçülmüştür.

Maksimum kesme kuvveti değeri, itmede 70.5 kN ve çekmede -62.5 kN olarak, δ=±15.75 mm (Öteleme oranı=%±3.5) çevriminde kaydedilmiştir. δ=-31.50 mm (Öteleme oranı=%-7.0) hedef yerdeğiştirme değerine gidilirken, alt kolon bölgesinde, üst yüzde ve mesnedin hemen yanında, cam LP kompozit yırtılmıştır, F=-40 kN. Bu çevrimden sonra yatay yük kapasitesi itmede %45 oranında, çekmede %29 oranında azalmıştır. Bu numune için ulaşılan en büyük yerdeğiştirme seviyesi δ=±36.00 mm

(Öteleme Oranı=%±8.0) olmuştur. Numunenin deney sonrasında görünümü Şekil 5.72'de ve numuneye ait kesme kuvveti, yerdeğiştirme ve öteleme oranı ilişkisi Şekil 5.73'de verilmiştir.



Şekil 5.72: S-LS-O-2-R-R-G-1 Numunesi Deney Sonu Görünümü



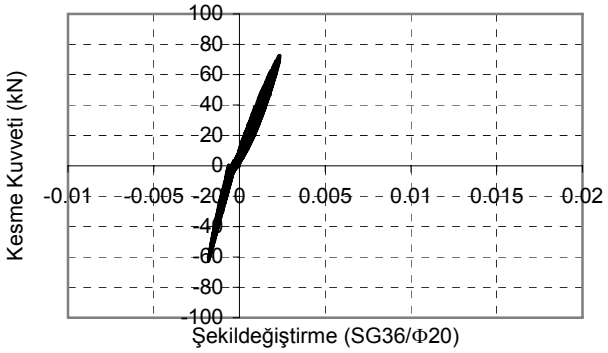
Şekil 5.73: Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkisi (S-LS-O-2-R-R-G-1)

Şekil 5.74 ve Şekil 5.75'de sırasıyla boyuna donatı, enine donatı için kesme kuvveti-şekildeğiştirme ilişkileri gösterilmiştir.

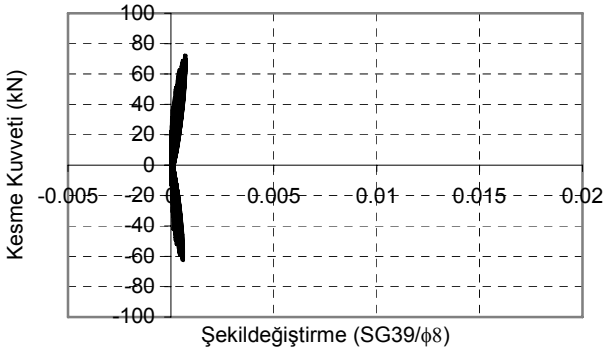
Şekil 5.76'da PI54 numaralı şekildeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B ve C simgeleri sırasıyla, %0.5, %1.0 ve %3.0 öteleme oranı seviyelerindeki şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.

Şekil 5.77'de D31 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen kesme kuvveti-diyagonal şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir. A, B, C ve D simgeleri sırasıyla,

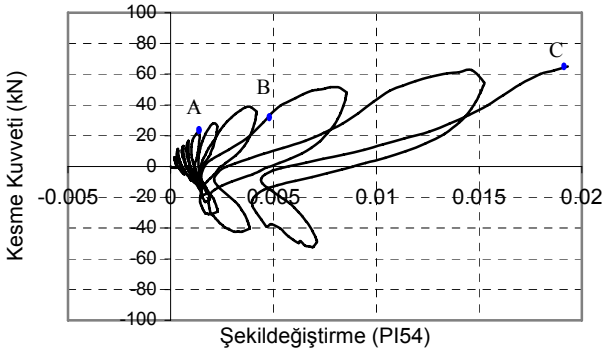
%0.5, %1.0, %3.0 ve %5.0 öteleme oranı seviyelerindeki diyagonal şekildeğiştirme değerlerini göstermektedir.



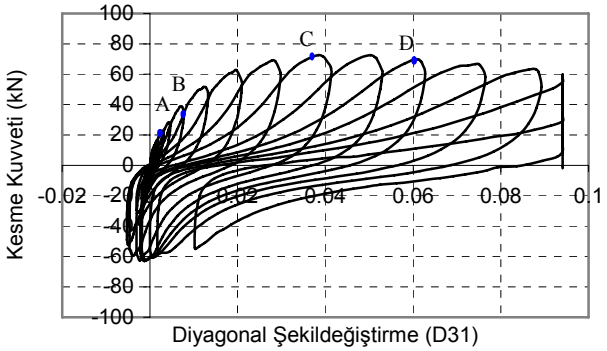
Şekil 5.74: Boyuna Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.75: Enine Donatı İçin Kesme Kuvveti-Şekildeğiştirme İlişkisi



Şekil 5.76: Kesme Kuvveti-Enine Şekildeğiştirme İlişkisi (PI54)



Şekil 5.77: Kesme Kuvveti-Diyagonal Şekildeğiştirme İlişkisi (D31)

5.13 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

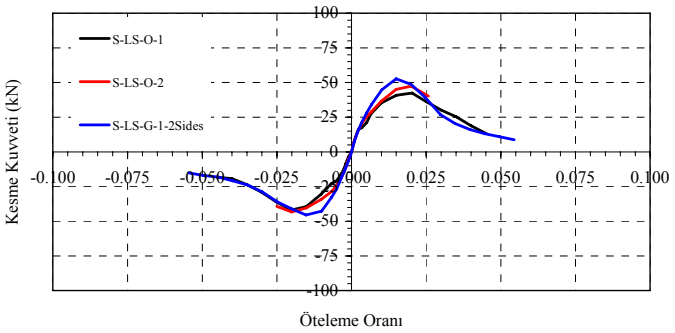
Çalışma kapsamında denenen numunelere ait değişkenlerin, deney sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi için bu bölümde karşılaştırma grafikleri olarak kesme kuvveti-teleme oranı ilşkileri sunulmuştur. Numunelere ait kesme kuvveti-enine ve diyagonal şekildeğiştirme ilişkilerine ait sayısal değerler tablolar halinde verilmiştir. Numunelerin göçme modlarına ve hasar düzeylerine ilişkin yorumlar yapılmıştır. LP kompozitler ile güçlendirilen numunelerde incelenen değişkenler:

- ✓ Referans – Güçlendirilmiş
- ✓ LP Kompozit Türü [Karbon / Cam]
- ✓ LP Kompozit Kat Sayısı [1 / 2 / 3]
- ✓ Uygulama Detayı [Sürekli / Şerit / İki Yüze]

Orijinal kısa kolon deneyleri sonucunda numunelerin davranışları incelendiğinde, ağırlıklı olarak diyagonal çekme gerilmeleri sebebiyle eğilme kapasitelerine ulaşamayan S-LS-O-1 ve S-LS-O-2 numunelerinde, gevrek kesme göçmesi gözlenmiştir. Her iki numunede de maksimum kesme kuvveti değerine erişilinceye kadar, üst ve alt kolonlarda itme-çekme doğrultularında kesme çatlaklarının (diyagonal yönde) oluştuğu gözlenmiştir. δ=11.25 mm (Ö.O.=%2.0) hedef yerdeğiştirme değerinden itibaren, S-LS-O-1 numunesinde hasarın tamamen alt kolonda yoğunlaştığı ve üst kolonda oluşmuş çatlakların kalınlık ve boy bakımından gelişmediği görülmüştür. S-LS-O-2 numunesi için ise δ=11.25 mm (Ö.O.=%2.0) hedef yerdeğiştirme değeri deneyin son adımı olmuştur. S-LS-O-1 numunesi için δ=11.25 mm (Ö.O.=%2.0) hedef yerdeğiştirme değerinde, alt kolonda birleşim kesiti

ile mesnet arasındaki ön yüz betonu, ezilerek bütünlüğünü kaybetmiş olması sebebiyle blok halinde dökülmüştür. İşte bu bölgede, büyük şekildeğiştirme değerlerine ulaşıldığı birleşim kesitine 100 mm mesafede bulunan PI-2-50 ve CDP 25 tipi yerdeğiştirmeölçerler ile tespit edilmiştir. S-LS-O-1 numunesinde, öteleme oranı %1'e ulaştığında (35.4 kN) enine şekildeğiştirme değeri 9.7×10^{-3}, diyagonal şekildeğiştirme değeri 3.7×10^{-2} değeri olarak kaydedilmiştir, Tablo 5.14, Tablo 5.15. Her iki numunede de boyuna donatılar akmamıştır ve S-LS-O-2 numunesinde enine donatılar akmıştır.

S-LS-G-1-2Sides numunesi iki yüzünden cam LP kompozitler yapıştırılarak güçlendirilmiş olmasına karşın, orijinal kısa kolon numunelerinin performansının üstüne çıkamadığı gözlenmiştir. δ=6.75 mm (Ö.O.=%1.5) hedef yerdeğiştirme değerine erişildiğinde, üst ve alt kolonda cam LP kompozitin hemen bitiminden başlayan, birleşim kesitinden mesnede kadar uzanan boyuna çatlakların betonda oluştuğu görülmüştür. Böylece, cam LP kompozit beton örtüsünüde alarak devre dışı kalmıştır. Bir sonraki hedef yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında (δ=9.00 mm, Ö.O.=%1), δ=6.75 mm (Ö.O.=%1.5) hedef yerdeğiştirme seviyesine göre yaklaşık %40 oranında bir dayanım kaybı yaşanmıştır. Aynı zamanda cam LP kompozitin betonu da alarak numune yüzünden ayrılması ile enine ve diyagonal şekildeğiştirme değerleri 2.5×10^{-3} ve 2.8×10^{-3} şeklinde ölçülmüştür, Tablo 5.14, Tablo 5.15. Görüldüğü gibi elde edilen şekildeğiştirme değerleri referans numunelerine kıyasla daha küçüktür. Bu durum, düşük dayanımlı betonda, LP kompozitlerin elemanın dört tarafını saracak şekilde uygulanmasının gerekliliğini kanıtlamaktadır. S-LS-G-1-2Sides numunesi, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti kapasitesi bakımından %12 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %21 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.78. Bu numunenin, referans numunelerine göre şekildeğiştirme yapabilme yeteneğinin %20 oranında daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 5.78: S-LS-O-1, S-LS-O-2 ve S-LS-G-1-2Sides Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri

Karbon veya cam LP kompozit şeritler ile güçlendirilen numunelerde, ilk olarak şeritler arasındaki beton bölgelerde kesme çatlaklarının oluştuğu, ilerleyen çevrimlerde ise bu çatlakların boy ve kalınlık bakımından gelişerek LP kompozitin çatlağın dayandığı noktadan yavaş yavaş yırtıldığı gözlenmiştir.

S-LS-C-1-1/2 numunesinde, δ=24.75 mm (Ö.O.=%5.5) hedef yerdeğiştirmesinde orta karbon LP şeridi, üst kolon ön yüzden diyagonal bir çatlağın bitiminden yırtılmaya başlamıştır. Bir sonraki hedef olan δ=29.25 mm (Ö.O.=%6.5) yerdeğiştirmesinde orta karbon LP şeridi, arka yüzden yırtılmaya başlamış ve deneyin sonunda kopmuştur. Orta şerit üzerinde bulunan SSG45 numaralı şekildeğiştirmeölçerden %5 öteleme oranı ve 60.8 kN kesme kuvveti yük değerinde (göçme öncesi) elde edilen enine şekildeğiştirme değeri 6.5×10^{-3} ve D33 numaralı yerdeğiştirmeölçerden %3 öteleme oranı ve 68.3 kN kesme kuvveti yük değerinde, elde edilen diyagonal şekildeğiştirme değeri ise 2.2×10^{-2}'dir, Tablo 5.14, Tablo 5.15.

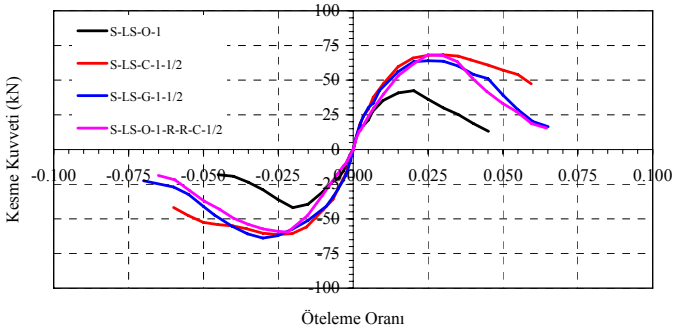
S-LS-O-1-R-R-C-1/2 numunesinde δ=13.50 mm (Ö.O.=%3.0) hedef yerdeğiştirmesinde ilk karbon LP şeridi, üst kolon arka yüzden yırtılmaya başlamıştır. δ=18.00 mm (Ö.O.=%4.0) hedef yerdeğiştirmesinde ise orta karbon LP şeridi, üst kolon ön yüzden yırtılmaya başlamıştır. Bu orta karbon şeridinin üzerinde bulunan SSG46 numaralı şekildeğiştirmeölçerden %5 öteleme oranı ve 51.3 kN kesme kuvveti seviyesinde (göçme öncesi) elde edilen enine şekildeğiştirme değeri 6.8×10^{-3}'dür, Tablo 5.14. Diyagonal ölçüm sistemi hasarın üst katta toplanması sebebiyle erken devre dışı kalmıştır. Numune %6.5 öteleme oranına kadar test edilmiştir.

S-LS-G-1-1/2 numunesinde δ=-20.50 mm (Ö.O.=%-4.5) hedef yerdeğiştirmesinde orta karbon LP şeridi, üst kolon arka yüzden yırtılmaya başlamış ve δ=22.50 mm (Ö.O.=%5.0) seviyesinde kopmuştur. Üst kolon orta karbon şeridinin üzerinde bulunan SSG43 numaralı şekildeğiştirmeölçerden %5 öteleme oranı ve 51 kN kesme kuvveti değerinde (göçme öncesi) 9.2×10^{-3} değeri elde edilmiştir, Tablo 5.14. Aynı zamanda, ve δ=22.50 mm (Ö.O.=%5.0) yerdeğiştirmesinde üst ve alt kolonda ilk cam LP şeritleri yırtılmaya başlamıştır. Üst kolon ilk karbon şeridinin üzerinde bulunan D35 numaralı yerdeğiştirmeölçerden elde edilen diyagonal şekildeğiştirme değeri %5 öteleme oranı ve 51 kN kesme kuvveti seviyesinde ise 9.1×10^{-2}'dir, Tablo 5.15.

S-LS-C-1-1/2 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %45, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %25 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %72 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.79.

S-LS-G-1-1/2 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %35, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %23 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %60 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.79.

S-LS-O-1-R-R-C-1/2 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %45, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %16 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %23 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.79.



Şekil 5.79: S-LS-C-1-1/2, S-LS-G-1-1/2, S-LS-O-1-R-R-C-1/2 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri

Karbon veya cam LP kompozitler ile sürekli sargılama yapılarak güçlendirilen numunelerde, özellikle numune üst ve alt yüzlerinde LP kompozit üzerinde eğilme çatlakları gözlenmiştir.

S-LS-C-1-1 numunesinde, δ=15.75 mm (Ö.O.=%3.5) hedef yerdeğiştirmesine gidilirken, alt kolonda ve ön yüzde birleşim kesitine yaklaşık 175 mm mesafede epoksi üzerinde bir kesme çatlağı gözlenmiştir. δ=18.00 mm (Ö.O.=%4.0) hedef yerdeğiştirmesinde üst ve alt kolonlarda karbon LP kompozitte eğilme çatlakları tespit edilmiştir. δ=-22.50 mm (Ö.O.=%-5.0) hedef yerdeğiştirmesinde ise, üst kolonda ve arka yüzde karbon epoksi üzerinde kesme çatlağı oluşmuştur. Çatlağa en yakın konumda olan D35 numaralı yerdeğiştirmeölçerden %5 öteleme oranı ve 69.4 kN kesme kuvveti seviyesinde (göçme öncesi) elde edilen diyagonal şekildeğiştirme değeri ise 3.3×10^{-2}'dir, Tablo 5.15. Aynı seviyede ise enine şekildeğiştirmeler (göçme öncesi) 4.1×10^{-3}'dür, Tablo 5.14.

S-LS-G-1-1 numunesinde, δ=13.50 mm (Ö.O.=%3.0) hedef yerdeğiştirmesine gidilirken, alt kolonda ve üst yüzde cam LP kompozitte eğilme çatlakları görülmüştür. δ=40.50 mm (Ö.O.=%9.0) seviyesinde, alt kolonda ön ve arka yüzlerde cam LP kompozit birleşim kesitinde numune köşesinden yırtılmaya başlamıştır. Bu hasar gören bölgeye en yakın ölçüm aletlerinden alınan, enine şekildeğiştirme değeri %5 öteleme oranı ve 60 kN kesme kuvveti seviyesinde (ağır hasar öncesi) 6.9×10^{-3} (Tablo 5.14), olarak ölçülmüştür. Diyagonal şekildeğiştirme değeri ise %7 öteleme oranı ve 50.8 kN kesme kuvveti seviyesinde (göçme öncesi) 7.4×10^{-2}'dir, Tablo 5.15.

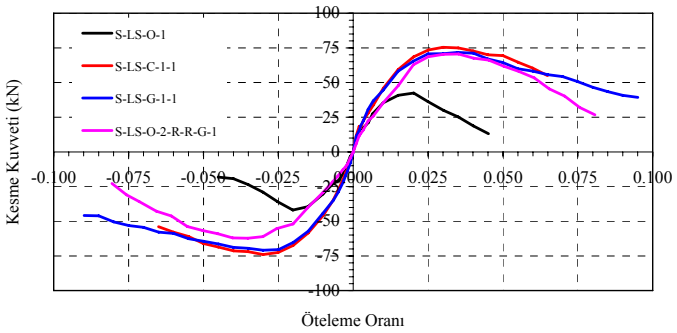
S-LS-O-2-R-R-G-1 numunesinde, δ=11.20 mm (Ö.O.=%3.0) hedef yerdeğiştirmesinde, alt kolonda ve üst yüzde cam LP kompozitte eğilme çatlakları görülmüştür. δ=-31.50 mm (Ö.O.=%-7.0) seviyesinde, alt kolonda cam LP kompozit birleşim kesitinde numune köşesinden yırtılmıştır. Bu hasar gören bölgeye en yakın ölçüm aletlerinden alınan, enine şekildeğiştirme değeri %3 öteleme oranı ve 68.6 kN kesme kuvveti seviyesinde (ağır hasar öncesi) 1.6×10^{-2}'dir, Tablo 5.14. Diyagonal şekildeğiştirme değeri ise %5 öteleme oranı ve 67.5 kN kesme kuvveti seviyesinde (göçme öncesi) 6.2×10^{-2}'dir, Tablo 5.15.

S-LS-C-1-1 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %61, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %30 ve kesme

kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %52 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.80.

S-LS-G-1-1 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %51, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %50 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %58 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.80.

S-LS-O-2-R-R-G-1 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %45, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %18 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %22 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.80.



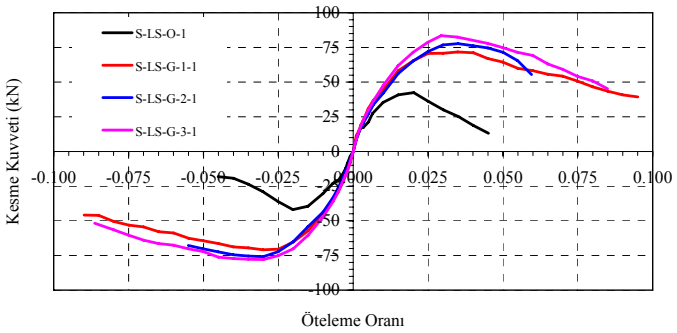
Şekil 5.80: S-LS-C-1-1, S-LS-G-1-1, S-LS-O-2-R-R-G-1 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri

S-LS-G-2-1 numunesinde, yalnızca numune alt ve üst yüzlerinde cam LP kompozit üzerinde eğilme çatlakları gözlenmiştir. Cam LP kompozit üzerinde oluşan bu eğilme çatlakları haricinde ağır bir hasar gözlenmemiştir. Alt kolonda hasarın toplanması sebebiyle, alt kolona sabitlenen PI52 ve D31 numaralı yerdeğiştirmeölçer sonuçları sunulmuştur. Enine şekildeğiştirme değeri %3 öteleme oranı ve 76.8 kN kesme kuvveti seviyesinde (ağır hasar öncesi) 8.6×10^{-3}'dir, Tablo 5.14. Diyagonal şekildeğiştirme değeri ise %5 öteleme oranı ve 71.5 kN kesme kuvveti seviyesinde (göçme öncesi) 2.4×10^{-2}'dir, Tablo 5.15.

S-LS-G-3-1 numunesinde, yalnızca üst kolonda birleşim kesitinin hemen yanından cam LP kompozitte ufak bir yırtık gözlenmiştir. SSG43 ve D33 numaralı aletlerden alınan enine şekildeğiştirme %5 öteleme oranı ve 74.8 kN kesme kuvveti seviyesinde (ağır hasar öncesi) 6×10^{-3} iken, diyagonal şekildeğiştirme değeri ise %7 öteleme oranı ve 63.1 kN kesme kuvveti seviyesinde (göçme öncesi) 2.4×10^{-2}'dir.

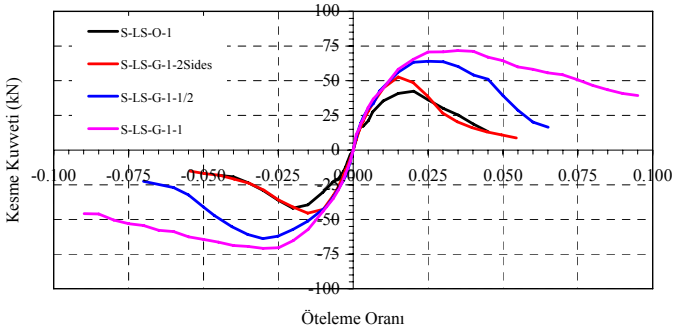
S-LS-G-2-1 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %65, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %39 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %52 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.81.

S-LS-G-3-1 numunesinde, referans numunelerine göre maksimum kesme kuvveti bakımdan %78, şekildeğiştirme yapabilme yeteneği bakımından %44 ve kesme kuvveti-yerdeğiştirme ilişkileri altında kalan alan bakımından %58 oranında artış sağlanmıştır, Şekil 5.81.



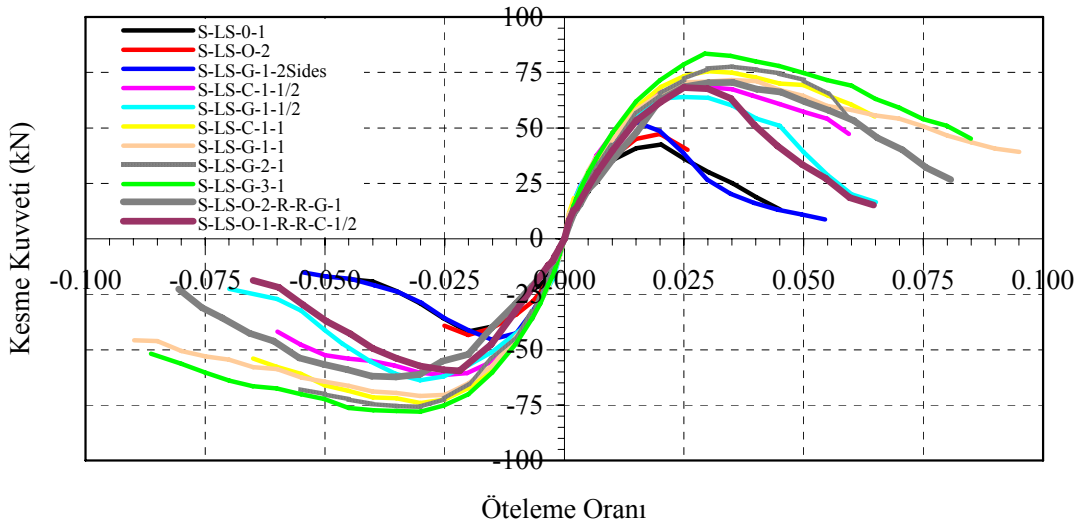
Şekil 5.81: S-LS-G-1-1, S-LS-G-2-1, S-LS-G-3-1 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri

Şekil 5.82'de ise iki yüze cam LP yapıştırma, tek kat cam LP kompozit ile sürekli sarım ve üç kat cam LP kompozit ile sürekli sarım teknikleri karşılaştırılmıştır. S-LS-G-1-1 numunesi kesme dayanımı, süneklik ve şekildeğiştirme kabiliyeti açısından en iyi performansı göstermiştir.



Şekil 5.82: S-LS-G-1-2Sides, S-LS-G-1-1/2, S-LS-G-1-1 ve S-LS-O-1 Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri

Tüm numuneler için kesme kuvveti-öteleme oranı ilişkileri için zarf eğrileri Şekil 5.83'te verilmiştir.



Şekil 5.83: Tüm Numuneler İçin Numuneleri İçin Kesme Kuvveti-Öteleme Oranı Zarf İlişkileri

Tablo 5.17'de tüm numuneler için %1, %3, %5, %7, %9 öteleme oranlarına ve numunelerin yaptığı maksimum yerdeğiştirmeye ulaşıncaya kadar hesaplanmış alanlar (kN.mm) ve güçlendirilmiş numunelerin orjinal numuye kıyasla alan artışları verilmiştir. Bu alan artışları, %3 öteleme oranı için; referans numunelerin ortalama değerleri esas alınarak hesaplanmıştır, Şekil 5.84. Enerji yutma kapasiteleri açısından en iyi performansı S-LS-C-1-1-/2 numunesi göstermiş olup, S-LS-G-1-1/2, S-LS-G-1-1 ve S-LS-G-3-1 numuneleri yaklaşık aynı performansı göstermişlerdir, Şekil 5.84. Toplam yutulan enerjiye gre karşılaştırma yapıldığında ise, S-LS-G-1-1 ve S-LS-G-3-1 numuneleinin diğer numunelere göre daha fazla enerji sönümledikledikleri görülmektedir, Tablo 5.17.

Kesme kuvveti-enine şekildeğiştirme ilişkileri tüm numuneler için karşılaştırılacak olursa, referans numuneler ile S-LS-G-2-1 numunesinden alınan ölçümler PI-2-50 tipi yerdeğiştirmeölçerlere aittir, Tablo 5.15. Bu tablodan görüldüğü gibi PI-2-50 tipi yerdeğiştirmeölçerlerden alınan şekildeğiştirme değerleri, PL-60 tipi şekildeğiştirmeölçerlerden alınan şekildeğiştirme değerlerine göre daha yüksektir.

S-LS-G-1-1/2 numunesinde ilk cam LP kompozit üzerinde oluşan yırtığa en yakın bulunan şekildeğiştirmeölçerden elde edilen değer 9.2×10^{-3} mertebesindedir. PL-60

tipi şekildeğiştirmeölçerlerin PI-2-50 tipi yerdeğiştirmeölçerlere göre daha düşük değerler verdiği gözönüne alınırsa kesitteki gerçek şekildeğiştirme değerlerinin daha yüksek olduğu söylenebilir, Tablo 5.15.

Diyagonal şekildeğiştirme değerleri LVDT tipi yerdeğiştirmelçerlerden alınmıştır. Tablo 5.16'da görüldüğü gibi en yüksek şekildeğiştirme değerleri bu tip yerdeğiştirmeölçerden elde edilmiştir.

Tablo 5.14: Hasar Özeti

Numune	**Hasar Özeti**
S-LS-O-1	Eğilme ve kesme çatlakları, betonda ezilme
S-LS-O-2	Eğilme ve kesme çatlakları, enine donatıda akma
S-LS-G-1-2Sides	Eğilme çatlakları, cam LP kompozitin bitiminden başlayan birleşim kesitinden mesnede kadar uzanan boyuna çatlaklar, boyuna donatıda akma
S-LS-C-1-1/2	Eğilme ve kesme çatlakları, üst kolonda şeritler arası beton bölgesinde ezilme, üst kolonda orta karbon LP şeridinde kopma, boyuna ve enine donatıda akma
S-LS-G-1-1/2	Eğilme ve kesme çatlakları, üst kolonda şeritler arası beton bölgesinde ezilme, üst kolonda orta karbon LP şeridinde kopma, alt ve üst kolonda ilk karbon LP şeritlerinde yırtılma
S-LS-C-1-1	Eğilme çatlakları, alt ve üst kolonda ön-arka yüzlerdekarbon LP kompozitte düşey doğrultuda ayrılmalar, alt kolon ön yüzde epoksi üzerinde kesme çatlağı, boyuna donatıda akma
S-LS-G-1-1	Eğilme çatlakları, alt ve üst kolonda ön-arka yüzlerde karbon LP kompozitte eğilme çatlağı, alt kolon ön-arka yüzlerde birleşim kesitinin hemen yanından cam LP kompozitte yırtılma, boyuna ve enine donatıda akma
S-LS-G-2-1	Eğilme çatlakları, alt ve üst kolonda üst-alt yüzlerde karbon LP kompozitte eğilme çatlakları, boyuna donatıda akma
S-LS-G-3-1	Eğilme çatlakları, üst kolonda ön-arka yüzlerde karbon LP kompozitte düşey doğrultuda ayrılmalar, üst kolon ön yüzden birleşim kesitinin hemen yanından cam LP kompozitte yırtılma, boyuna donatıda akma
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	Eğilme ve kesme çatlakları, üst kolonda şeritler arası beton bölgesinde ezilme, üst kolonda orta karbon LP şeridinde ön-arka yüzlerden yırtılma, üst kolonda ilk karbon LP şeridinde arka yüzden yırtılma, boyuna ve enine donatıda akma
S-LS-O-2-R-R-G-1	Eğilme çatlakları, alt ve üst kolonda ön-arka yüzlerde karbon LP kompozitte düşey doğrultuda ayrılmalar, alt kolon ön yüzde birleşim kesitinin hemen yanından cam LP kompozitte yırtılma

Tablo 5.15: Enine Şekildeğiştirme Değişimi

Numune / Alet Tipi	ε_h (Uzama)			
	(Ö.O.=%0.5) A	(Ö.O.=%1) B	(Ö.O.=%3) C	(Ö.O.=%5) D
S-LS-O-1 / PI	4.4×10^{-3}	9.7×10^{-3}	-	-
S-LS-O-2 / PI	2.5×10^{-3}	6×10^{-3}	-	-
S-LS-G-1-2Sides / SG	1.2×10^{-3}	2.5×10^{-3}	-	-
S-LS-C-1-1/2 / SG	2.7×10^{-4}	1.5×10^{-3}	5×10^{-3}	6.5×10^{-3}
S-LS-G-1-1/2 / SG	3.2×10^{-4}	1×10^{-3}	6.5×10^{-3}	9.2×10^{-3}
S-LS-C-1-1 / SG	2.7×10^{-4}	9.7×10^{-4}	3.5×10^{-3}	4.1×10^{-3}
S-LS-G-1-1 / SG	2.7×10^{-4}	1.4×10^{-3}	5.4×10^{-3}	6.9×10^{-3}
S-LS-G-2-1 / PI	4.9×10^{-4}	1.4×10^{-3}	8.6×10^{-3}	-
S-LS-G-3-1 / SG	3×10^{-4}	1×10^{-3}	3.7×10^{-3}	6×10^{-3}
S-LS-O-1-R-R-C-1/2 / SG	7.7×10^{-4}	1.7×10^{-3}	4.6×10^{-3}	6.8×10^{-3}
S-LS-O-2-R-R-G-1 / SG	1.8×10^{-3}	4.7×10^{-3}	1.6×10^{-2}	-

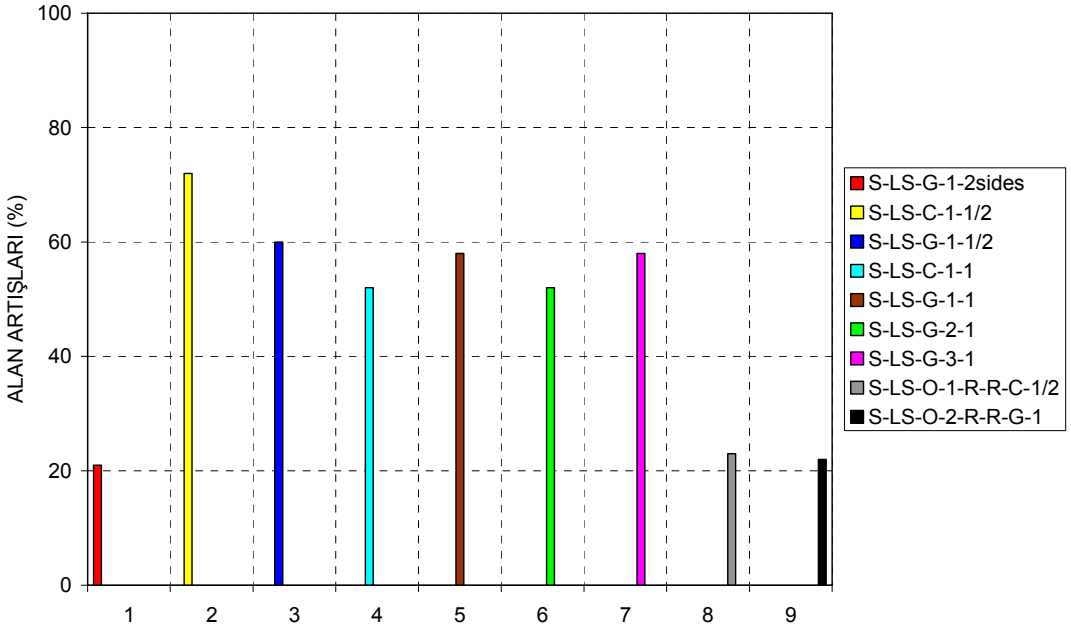
Tablo 5.16: Diyagonal Şekildeğiştirme Değişimi

Numune/ Alet Tipi	ε_l (Uzama)				
	(Ö.O.=%0.5) A	(Ö.O.=%1) B	(Ö.O.=%3) C	(Ö.O.=%5) D	(Ö.O.=%7) E
S-LS-O-1 / LVDT	1.9×10^{-3}	5.5×10^{-3}	3.7×10^{-2}	-	-
S-LS-O-2 / LVDT	1.5×10^{-5}	3.8×10^{-3}	-	-	-
S-LS-G-1-2Sides / LVDT	1.1×10^{-4}	2.7×10^{-3}	-	-	-
S-LS-C-1-1/2 / LVDT	1×10^{-3}	2.9×10^{-3}	2.2×10^{-2}	-	-
S-LS-G-1-1/2 / LVDT	1×10^{-3}	3×10^{-3}	3.2×10^{-2}	9.1×10^{-2}	-
S-LS-C-1-1 / LVDT	9.2×10^{-4}	2.3×10^{-3}	1.1×10^{-2}	3.3×10^{-2}	-
S-LS-G-1-1 / LVDT	9.3×10^{-4}	2.7×10^{-3}	1.3×10^{-2}	5×10^{-2}	7.4×10^{-2}
S-LS-G-2-1 / LVDT	2.9×10^{-4}	1.2×10^{-3}	7.6×10^{-3}	2.4×10^{-2}	-
S-LS-G-3-1 / LVDT	1×10^{-4}	3.8×10^{-4}	5.2×10^{-3}	3×10^{-2}	4.7×10^{-2}
S-LS-O-1-R-R-C-1/2 / LVDT	1.2×10^{-4}	2.8×10^{-3}	3.2×10^{-3}	-	-
S-LS-O-2-R-R-G-1 / LVDT	2.9×10^{-3}	7.8×10^{-3}	2.9×10^{-2}	6.2×10^{-2}	-

Tablo 5.17: Tüm Numuneler İçin Çeşitli Öteleme Oranlarına Ait Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkileri Altında Kalan Alanlar

Numune	Öteleme Oranı (%)					T.A	A.A %
	1	3	5	7	9		
S-LS-O-1	118	796	-	-	-	2424*	-
S-LS-O-2	123	885	-	-	-	885	-
S-LS-G-1-2Sides	121	1013	2005	-	-	3820	21
S-LS-C-1-1/2	139	1450	3792	10638	-	10638	72
S-LS-G-1-1/2	126	1346	3350	5810	-	7338	60
S-LS-C-1-1	113	1275	4848	11792	-	11792	52
S-LS-G-1-1	126	1332	5718	9889	16859	24065	58
S-LS-G-2-1	127	1282	3666	10216	-	10216	52
S-LS-G-3-1	109	1331	5277	10224	16778	25995	58
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	136	1039	3333	6443	9326	9326	23
S-LS-O-2-R-R-G-1	144	1028	3543	7941	11901	19716	22

A.A: Alan Artışı (%)
T.A: Toplam Alan (kN.mm)
* : Alan artışları, %3 öteleme seviyesinde referans elemanlarına ait değerlerin ortalaması esas alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.84: Tüm Numuneler İçin Kesme Kuvveti-Yerdeğiştirme İlişkileri Altında Kalan Alan Artşları (%)

6. KESME GÜÇLENDİRMESİ İÇİN TEORİK YAKLAŞIMLAR

6.1. MEVCUT YÖNETMELİKLER

Bu bölümde, LP kompozitlerin, betonarme elemanların kesme kapasitesine katkısı DBYBHY-06 [15], ACI-440 [16], EUROCODE-8 [17], CSA S806-02 [19] yönetmeliklerine ve FIB [18], CONCRETE SOCIETY TR-55 [20] teknik raporlarına ait modeller kullanılarak irdelenecektir. EUROCODE-8 ve FIB yaklaşımlarının paralel olması sebebiyle aynı başlık altında anlatılmışlardır.

6.1.1. DBYBHY-06

LP tabakasının kolonların çevresine, lifler enine donatılara paralel olacak şekilde, sarılması ve yapıştırılması ile sargılama sağlanır. LP sargısı ile betonarme kolonların kesme kuvveti dayanımları arttırılır. LP sargılama ile yapılan güçlendirmelerde tam sargı (tüm kesit çevresinin sarılması) yöntemi kullanılmalıdır. LP ile yapılan sargılamalarda sargı sonunda en az 200 mm bindirme yapılmalıdır. LP sargısı dikdörtgen kolonlarda kolon köşelerinin en az 30 mm yarıçapında yuvarlatılması ile uygulanır. Kesme kuvveti dayanımına LP sargının katkısı V_f sargılamanın sürekli olması durumunda Denklem 6.1 ile hesaplanır.

$$V_f = 2n_f t_f E_f \varepsilon_{fe} d \tag{6.1}$$

Denklem 6.1'de n_f tek yüzdeki LP sargı tabaka sayısını, t_f bir tabaka LP için etkili kalınlığı, E_f LP elastisite modulünü, ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırını, d ise eleman faydalı yüksekliğini göstermektedir. Etkin birim uzama değeri Denklem.6.2'ye göre dikkate alınacaktır. ε_{fu} LP kopma birim uzamasıdır.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fe} &\le 0.004 \\ \varepsilon_{fe} &\le 0.50\,\varepsilon_{fu} \end{aligned} \tag{6.2}$$

Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı V_c, enine donatının katkısı V_s ve asal basınç gerilmelerini sınırlamak üzere tanımlanan V_{max} değerleri TS-500 [13]

tarafından önerilen denklemler ile, mevcut malzeme dayanımları kullanılarak hesaplanacaktır. Denklem 6.4, Denklem 6.6 ve Denklem 6.7'de sırasıyla V_c, V_s ve V_{max} değerleri gösterilmiştir. V_{cr} betonarme bir kesitin kesmede çatlama dayanımı olup, Denklem 6.3 ile bulunur. $f_{ct}^{'}$ ise betonun eksenel çekme dayanımını ifade eder, Denklem 6.5. $f_c^{'}$, N, h, A_{sw}, s ve f_{yw} sırasıyla beton basınç dayanımı, eksenel yük, kesit yüksekliği, enine donatı toplam kesit alanı, enine donatı aralığı ve enine donatı akma dayanımıdır. γ_c beton malzeme katsayısı olup 1.5'tir. γ_s çelik malzeme katsayıdır, 1.15.

$$V_{cr} = 0.65 f_{ct}^{'} bd(1 + 0.07 \frac{N}{bh}) \tag{6.3}$$

$$V_c = 0.8 V_{cr} \tag{6.4}$$

$$f_{ct}^{'} = 0.35 \sqrt{\frac{f_c^{'}}{\gamma_c}} \tag{6.5}$$

$$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} d}{s \gamma_s} \tag{6.6}$$

$$V_{max} = 0.22 f_c^{'} bd \tag{6.7}$$

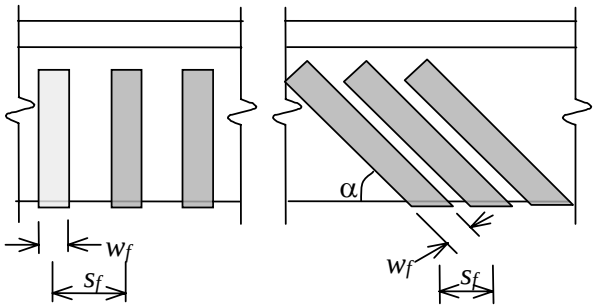
6.1.2. ACI-440

LP tabakasının kesme dayanımına katkısı, lif yönlendirmesine ve varsayılan bir çatlak seyrine dayanmaktadır. LP tabakası tarafından sağlanan kesme dayanımı, varsayılan çatlak boyunca LP tabakasında çekme gerilmesi sonucu oluşan kuvvetin hesaplanması ile bulunur. Kesme kuvveti dayanımına LP sargının katkısı V_f Denklem 6.8 ile hesaplanır.

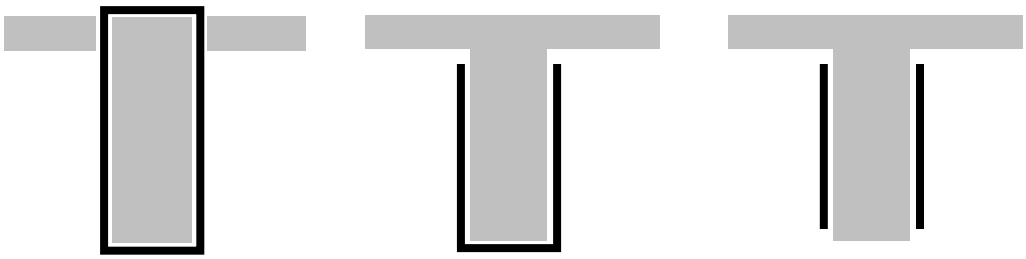
$$V_f = \Psi_f \frac{2 n_f t_f w_f f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d}{s_f} \tag{6.8}$$

Denklem 6.8'de Ψ_f azaltma katsayını, w_f LP şeridinin genişliğini, s_f LP şeritlerin, eksenden eksene olmak üzere aralıklarını ve α ise güçlendirilen eleman eksenine göre LP kompozit uygulama açısını göstermektedir, Şekil 6.1. Ψ_f azaltma katsayısı tamamen sargılama durumunda 0.95, u tipi sargılama ya da iki yüze yapıştırma

durumunda ise 0.85 alınacaktır, Şekil 6.2. Sargılamanın sürekli yapılması durumunda, $w_f = s_f$ alınacaktır. LP tabakasında oluşan çekme gerilmesi f_{fe} ise E_f LP elastisite modulü ile ε_f LP etkin birim uzama sınırının çarpımına eşittir, (Denklem 6.9). E_f LP elastisite modulünün birimi MPa'dır. w_f, s_f, t_f ve d mm cinsinden alınmalıdır.



Şekil 6.1: Şeritler ile Güçlendirme Durumunda w_f, s_f ve α Tanımları



Şekil 6.2: Güçlendirme Tipleri

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \tag{6.9}$$

ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırı, maksimum yük seviyesinde LP tabakasında erişilen maksimum şekildeğiştirme değeri olarak tarif edilir. Tüm kesit çevresinin sarıldığı durumda, ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırı Denklem 6.10'daki gibi alınır.

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \le 0.75\varepsilon_{fu} \tag{6.10}$$

ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırı, U tipi sargılamada veya iki yüzden LP tabakayı yapıştırma durumunda LP tabakanın beton yüzeyden sıyrılması ile göçme meydana geldiğinden dolayı bir k_v aderans azaltma faktörü (Denklem 6.12) kullanılarak belirlenir, Denklem 6.11.

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \tag{6.11}$$

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11.900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \tag{6.12}$$

L_e etkin aderans boyu olup, aderans gerilmelerinin büyük bir bölümünün iletildiği uzunluktur. Denklem 6.13 ile L_e mm cinsinden bulunur. Aynı zamanda, k_v aderans azaltma faktörü, sırasıyla beton dayanımını ve sargılama şeklini hesaba katan iki modifikasyon faktörüne (k_1, k_2) bağlıdır. Denklem 6.14 ve 6.15'de bu düzeltme faktörleri tanımlanmıştır. 28 günlük ortalama beton basınç dayanımı ise $f_c^{'}$ (MPa) olarak tanımlanmıştır.

$$L_e = \frac{23.300}{\left(n\ t_f E_f\right)^{0.58}} \tag{6.13}$$

$$k_1 = \left(\frac{f_c^{'}}{27}\right)^{2/3} \tag{6.14}$$

$$k_2 = \begin{cases} \dfrac{d - L_e}{d} & \text{U Tipi Sargılama} \\ \dfrac{d - 2L_e}{d} & \text{İki Yüze Yapıştırma} \end{cases} \tag{6.15}$$

Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı V_c ve enine donatının katkısı V_s değerleri ACI-318 [21] tarafından önerilen denklemler ile, mevcut malzeme dayanımları kullanılarak hesaplanacaktır. Denklem 5.16 ve Denklem 5.17'de sırasıyla V_c ve V_s değerleri gösterilmiştir.

$$V_c = 2(1 + \frac{N}{2000bh})\sqrt{f_c^{'}}bd \tag{6.16}$$

$$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} d}{s} \tag{6.17}$$

6.1.3. FIB - EUROCODE-8

FIB ve EUROCODE-8 modellerine ait formülasyon aynı başlık altında irdelenecektir. Her iki yönetmeliğe göre, LP kompozitin kesme kapasitesine katkısını veren model aynı olmakla beraber, bu iki yönetmelik arasındaki farklara

değinilecektir. LP kompozitlerin, Denklem 6.18'de kesme kapasitesine katkısını veren model sunulmuştur.

$$V_f = 0.9(k\varepsilon_{fe}/\gamma_f)E_f\rho_f bd(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha \tag{6.18}$$

ρ_f, LP kompozit oranı olup, sürekli sargılama yapılan elemanlarda $2t_f \sin\alpha / b$ şeklinde hesaplanırken, şeritler halinde sargılama yapılması durumunda $(2t_f / b)(w_f / s_f)$ şeklinde hesaplanır. b minimum kesit genişliğini, θ diyagonal çatlak açısını (45^0), α güçlendirilen eleman eksenine göre LP kompozit uygulama açısını, k azaltma faktörünü (0.8), γ_f ise bölgesel güvenlik faktörünü göstermektedir. Tablo 6.1'de γ_f değerleri gösterilmiştir.

Her iki yönetmelik için, ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırı 0.006'dır. k ve γ_f azaltma faktörleri EUROCODE-8 modelinde yer almamaktadır. Bu durum FIB modelinde, karbon LP kompozit ile sargılamada %60, cam LP kompozit ile sargılamada ise %53 oranında ε_{fe} değerini azaltmaktadır.

Tablo 6.1: γ_f Bölgesel Güvenlik Faktörü Değerleri

LP Tipi	Karbon LP	Aramid LP	Cam LP
γ_f	1.35	1.45	1.50

ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırına ait denklemler, Denklem 6.19, 6.20 ve 6.21 aşağıda verilmiştir. Aşağıdaki denklemlerde f_c' MPa ve E_f GPa birimiyle kullanılmalıdır.

$$\varepsilon_{fe} = 0.17\left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f\rho_f}\right)^{0.30} \quad \varepsilon_{fu} \text{ Tamamen Sargılama - Karbon LP} \tag{6.19}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min\left[0.65\left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f\rho_f}\right)^{0.56} \times 10^{-3}, 0.17\left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f\rho_f}\right)^{0.30} \varepsilon_{fu}\right] \tag{6.20}$$

U Tipi veya İki Yüzeye Yapıştırma – Karbon LP

$$\varepsilon_{fe} = 0.048\left(\frac{f_c'^{2/3}}{E_f \rho_f}\right)^{0.47} \varepsilon_{fu} \text{ Tamamen Sargılama - Aramid LP} \quad (6.21)$$

Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı V_c ve enine donatının katkısı V_s değerleri sırasıyla Denklem 6.22 ve Denklem 6.23 kullanılarak hesaplanacaktır. ρ_l, çekme bölgesindeki boyuna donatı oranı olup, A_s / bd ve 0.02 değerlerinden minimum olanı kullanılacaktır. k ise eleman boyut etkisini hesaba katan bir katsayı olup, (1.6-d) ve 1 değerlerinden maksimum olanına eşittir. γ_c beton malzeme katsayısı olup 1.5'tir. γ_s çelik malzeme katsayıdır, 1.15.

$$V_c = \left[\left(\frac{0.25(0.21 f_c'^{2/3})}{\gamma_c}\right) k(1.2 + 40\rho_l) + \left(\frac{0.15N}{bh}\right)\right] bd \quad (6.22)$$

$$V_s = 0.9\frac{A_{sw} f_{yw} d}{\gamma_s s} \quad (6.23)$$

6.1.4. CSA S806-02

LP tabaka, uygulanacağı eleman eksenine göre $\alpha \geq 75^0$'lik bir açı ile uygulanmalıdır. LP sargısı dikdörtgen kolonlarda kolon köşelerinin en az 20 mm yarıçapında yuvarlatılması ile uygulanır. Kesme kuvveti dayanımına LP sargının katkısı V_f Denklem 6.24 ile hesaplanır.

$$V_f = 2\phi_f f_{fe} t_f d \quad (6.24)$$

ϕ_F dayanım faktörü olup, 0.75 olarak alınır. LP tabakasında oluşan çekme gerilmesi f_{fe} ise Denklem 6.25 yardımıyla hesaplanır. f_{fu}, LP kompozite ait kopma gerilmesi değeridir.

$$f_{fe} = 0.004E_f \leq \phi_f f_{fu} \quad (6.25)$$

Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı V_c ve enine donatının katkısı V_s değerleri sırasıyla Denklem 6.26 ve Denklem 6.27 kullanılarak hesaplanacaktır. ϕ_c ve ϕ_s azaltma faktörleri olup sırasıyla 0.60 ve 0.85 alınacaktır. λ ise beton yoğunlu için düzeltme faktörü olup, normal yoğunluğa sahip betonlarda 1.00, yarı düşük

yoğunluğa sahip betonlarda 0.85 ve düşük yoğunluğa sahip betonlarda 0.75 alınacaktır.

$$V_c = 0.2\lambda\phi_c\sqrt{f_c'}(0.8bh) \tag{6.26}$$

$$V_s = \frac{\phi_s A_{sw} f_{yw} d}{s} \tag{6.27}$$

6.1.5. CONCRETE SOCIETY TR-55

Bu modele göre, LP tabakasının kesme dayanımına katkısı Denklem 6.28 ile hesaplanacaktır. γ_{mE} ve γ_{mF} güvenlik faktörleri olup, $\gamma_{mF} = \gamma_{mf} \times \gamma_{mm}$ şeklinde iki değişkene bağlıdır, Tablo 6.2. γ_{mm} değeri uygulama yöntemine bağlı olan ek bir güvenlik faktörüdür. ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırı, Denklem 6.29, Denklem 6.30 ve Denklem 6.31 ile hesaplanan değerlerden minumum olanıdır. w_{fe} değeri Denklem 6.32 ile hesaplanacaktır. Sürekli sargılama durumunda $w_{fe} = s_f$ şeklinde alınacaktır.

L_e etkin aderans boyu için Denklem 6.33 kullanılmalıdır. ρ_f şeritler halinde güçlendirme durumunda $(2t_f / b)(b_f / s_f)$ şeklinde, sürekli sargılama durumunda ise $2t_f / b$ şeklinde hesaplanacaktır. E_f kN/mm^2, f_c ise MPa cinsinden alınacaktır.

$$V_f = \frac{1}{\gamma_{mF}} \frac{2t_f w_{fe}(E_f / \gamma_{mE})\varepsilon_{fe} \sin\alpha(1+\cos\alpha)d}{s_f} \tag{6.28}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \tag{6.29}$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fu}[0.5622(\frac{\rho_f E_f}{\gamma_{mE}})^2 - 1.2188(\frac{\rho_f E_f}{\gamma_{mE}}) + 0.778]$$
$$\frac{\rho_f E_f}{\gamma_{mE}} \le 1.1MPa \tag{6.30}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.0042[(0.835 f_c)^{2/3} w_{fe}]/(\frac{t_f E_f}{\gamma_{mE}})^{0.58} d \tag{6.31}$$

$$w_{fe} = \begin{cases} d - L_e & \text{U Tipi Sargılama} \\ d - 2L_e & \text{İki Yüze Yapıştırma} \end{cases} \tag{6.32}$$

$$L_e = 461.3/(\frac{t_f E_f}{\gamma_{mE}})^{0.58} \tag{6.33}$$

Tablo 6.2: γ_{mE}, γ_{mf} ve γ_{mm} Katsayı Değerleri

LP Tipi	Karbon LP	Aramid LP	Cam LP
γ_{mE}	1.1	1.1	1.8
γ_{mf}	1.4	1.5	3.5
γ_{mm}	1.4	1.4	1.4

Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı V_c ve enine donatının katkısı V_s değerleri sırasıyla Denklem 6.34 ve Denklem 6.35 kullanılarak hesaplanacaktır. γ_c, beton malzeme katsayısı olup 1.25'tir. Asal basınç gerilmelerini sınırlamak üzere tanımlanan V_{max} değeri Denklem 6.36 ile hesaplanacaktır. ν_{max} ise $0.8\sqrt{f_c}$ ve 5 MPa değerlerinden minimum olanı kullanılacaktır.

$$V_c = \left[\frac{0.79}{\gamma_c} (100 A_s / bd)^{1/3} (400/d)^{1/4} \right] bd \tag{6.34}$$

$$V_s = 0.87 \frac{A_{sw} f_{yw} d}{s} \tag{6.35}$$

$$V_{max} = \nu_{max} bd \tag{6.36}$$

6.2. DİĞER MODELLER

6.2.1. Etkin Birim Şekildeğiştirme (ε_{fe}) Modeli

Bu model, Triantafillou (1998) tarafından geliştirilen ve EUROCODE-2 yönetmeliğinde kabul edilen ε_{fe} LP etkin birim uzama sınır değerinin geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Bir azaltma faktörü olarak tanımlanan R, LP tabakası eksenel rijitliğinin ($\rho_f E_f$) polinomu olarak hesaplanır, Denklem 6.37.

$$R = 0.5622(\rho_f E_f)^2 - 1.2188(\rho_f E_f) + 0.778 \leq 0.50 \tag{6.37}$$

ε_{fe} etkin birim uzama sınırının ε_{fu} kopma uzama sınırına oranı R'yi vermektedir, Denklem 6.38. Etkin çekme gerilmesi ise kopmaya kadar Karbon LP lineer elastik davranış gösterdiği için benzer şekilde Denklem 6.39'da gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$\varepsilon_{fe} = R\varepsilon_{fu} \tag{6.38}$$

$$f_{fe} = Rf_{fu} \tag{6.39}$$

6.2.2. Aderans Kuvveti Modeli

Bu model, Maeda ve diğ. (1997) yılında gerçekleştirdiği deneysel çalışma verilerine dayanmaktadır. LP tabakasının rijitliği arttıkça etkin aderans boyu artmaktadır. L_e , t_f etkili kalınlığı ile E_f elastisite modulünün bir fonsiyonu olarak Denklem 6.40'dan hesaplanır.

$$L_e = e^{6.134-0.58\ln(t_f E_f)} \tag{6.40}$$

Göçme anındaki aderans kuvvetinin, rijitliğin lineer bir fonksiyonu olduğunu pek çok deneysel veri doğrulamaktadır. Maeda ve diğ. (1997)'ne göre ortalama aderans dayanımı τ_{bu} Denklem 6.41'den hesaplanır. k deneysel bir sabit olup $110.2\text{x}10^{-6}$ 1/mm'ye eşittir. $f_c^{'}$ ortalama beton basınç dayanımını ifade etmektedir.

$$\tau_{bu} = k(f_c^{'}/42)^{2/3} E_f t_f \tag{6.41}$$

Etkin genişlik w_{fe} ise sargılama şekline göre hesaplanır, Denklem 6.42. Sonuç olarak, LP tabakanın kesme kapasitesine katkısı Denklem 6.43'ten bulunur.

$$\begin{aligned} w_{fe} &= d_f && \text{Tamamen Sargılama} \\ w_{fe} &= d_f - L_e && \text{U Tipi Sargılama} \\ w_{fe} &= d_f - 2L_e && \text{İki Yüze Yapıştırma} \end{aligned} \tag{6.42}$$

$$V_f = \frac{2L_e w_f \tau_{bu} w_{fe}}{s_f} \tag{6.43}$$

6.3. YÖNETMELİKLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Yönetmelik kabullerinin karşılaştırılması Tablo 6.3'de kısaca özetlenmiştir. İlgili yönetmeliklere göre; izin verilen güçlendirme tipi, ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırları, asal basınç gerilmelerini sınırlamak üzere tanımlanan V_{max} değerleri, gerilme yığılmalarını engellemek amacıyla şart koşulan köşe yarıçap değerleri ve aktif aderansı sağlamak için tanımlanan bindirme boyu değerleri Tablo 6.3'de sunulmuştur.

Tablo 6.3: Yönetmeliklerin Karşılaştırılması

Yönetmelikler	**Güçlendirme Tipi**	**ε_{fe} Sınırı (mm/mm)**	**V_{max}**	**Köşe Yarıçapı**	**Bindirme Boyu**
DBYBHY-06	Sürekli	0.004	$0.22 f_c^{'} bd$	30 mm	200 mm
ACI-440	Sürekli, U tipi, İki yüze yapıştırma	0.004	-	-	-
FIB	Sürekli, U tipi, İki yüze yapıştırma	0.006	-	-	-
EUROCODE-8	Sürekli, U tipi, İki yüze yapıştırma	0.006	-	-	-
CSA S806-02	Sürekli	0.004	-	20 mm	-
CONCRETE SOCIETY TR-55	Sürekli, U tipi, İki yüze yapıştırma	0.004	$0.8\sqrt{f_c^{'}} bd$	-	-

6.4. NUMUNELERİN TEORİK OLARAK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Kesme kuvveti dayanımına betonun katkısı V_c, enine donatının katkısı V_s teorik değerlerine ait yönetmelik sonuçları Tablo 6.4'de gösterilmiştir. CSA S806-02 yönetmeliğine göre beton katkısı 19.9 kN olarak hesaplanmıştır. Formülde bulunan 0.2 azaltma katsayısı sebebiyle bu değer elde edilmiştir. Tablo 6.5'de ise LP kompozitin kesme kuvveti dayanımına katkısına ait değerler tüm numuneler için verilmiştir. S-LS-G-1-2Sides numunesi için FIB ve EUROCODE-8 ile elde edilen V_f değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Etkin aderans boyu hesaplanarak ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırının azaltıldığı ACI-440 ve CONCRETE SOCIETY TR-55 yönetmeliklerinde ise yakın sonuçlar elde edildiği gözlenmektedir. FIB ve EUROCODE-8 yönetmelikliklerinde, ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırı 0.006'dır. k ve γ_f azaltma faktörleri EUROCODE-8 modelinde yer almamaktadır. Bu durum FIB modelinde, karbon LP kompozit ile sargılamada %60, cam LP kompozit ile sargılamada ise %53 oranında ε_{fe} değerini azaltmaktadır. Aynı şekilde güvenlik katsayıları sebebiyle, CONCRETE SOCIETY TR-55 yönetmeliğinde karbon LP kompozit ile sargılamada %46 oranında V_f değeri azalmaktadır. En yüksek değerlere DBYBHY-06 yönetmeliğinde erişildiği gözlenmektedir. Temelde bütün yönetmelikler aynı prensibe dayanmaktadır. ε_{fe} LP etkin birim uzama sınırı ile E_f LP elastisite modulü çarpılarak bir çekme gerilmesi hesaplanmaktadır. Bu gerilmeyi karşılayan alan ile çekme gerilmesi değeri çarpılarak LP kompozitin kesme kuvveti dayanımına katkısı bulunmaktadır.

Etkin birim şekildeğiştirme modeli ile yapılan hesapta, S-LS-C-1-1 numunesi için V_f = 72.11 kN hesap edilirken, S-LS-C-1-1/2 numunesi için V_f = 36.06 kN değeri hesaplanmaktadır. %17 oranında EUROCODE-8 yönetmeliğine göre daha yüksek sonuç vermektedir.

Aderans kuvveti modeline göre yapılan hesapta, S-LS-C-1-1 numunesi için V_f = 62.79 kN hesap edilirken, S-LS-C-1-1/2 numunesi için V_f = 31.4 kN değeri hesaplanmaktadır. %21 oranında ACI-440 yönetmeliğine göre daha yüksek sonuç vermektedir.

Tablo 6.4: V_c ve V_s Teorik Değerleri

Yönetmelikler	**V_c (kN)**	**V_s (kN)**
DBYBHY-06	23.4	31.5
ACI-440	26.8	31.5
FIB	28.4	28.3
EUROCODE-8	28.4	28.3
CSA S806-02	19.9	31.5
CONCRETE SOCIETY TR-55	24.6	27.4

Tablo 6.5: V_f Teorik Değerleri

Numune	V_f (kN)					
	DBY.	**ACI.**	**FIB**	**EUR.**	**CSA.**	**CO.S.**
S-LS-O-1	-	-	-	-	-	-
S-LS-O-2	-	-	-	-	-	-
S-LS-G-1-2Sides	-	2.4	10.3	19.3	-	2.2
S-LS-C-1-1/2	27.3	25.9	21.9	36.9	-	12.7
S-LS-G-1-1/2	10.8	10.3	8.6	14.5	-	10.8
S-LS-C-1-1	54.6	51.9	36.4	61.5	41	25.3
S-LS-G-1-1	21.5	20.4	15.5	23.3	16.1	21.5
S-LS-G-2-1	43	40.1	31	46.6	32.2	43
S-LS-G-3-1	64.5	61.3	46.5	69.9	48.3	64.5
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	10.8	10.3	21.9	36.9	41	12.7
S-LS-O-2-R-R-G-1	21.5	20.4	15.5	23.3	16.1	21.5

Son olarak, Tablo 6.6'da analitik ve deneysel kesme kapasiteleri gösterilmiştir. 6 yönetmeliğe göre hesaplanan toplam ile deneysel kesme kapasiteleri sunulmuştur. Asal basınç gerilmelerini sınırlamak üzere tanımlanan V_{max} değerleri TS-500'e göre hesaplanırken, $f_c^{'}$ beton basınç dayanımı yerine $f_{cc}^{'}$ sarılmış beton basınç dayanımı İlki ve diğ. (2004) kullanılmıştır. TS-500 yönetmeliğine göre $V_{max.}$ = 65.3 kN'dur.

Tablo 6.6: Analitik ve Deneysel Kesme Kapasiteleri

Numune	f_c' (MPa)	f_{cc}' (MPa)	V_{Toplam} (kN)						V_{max} (kN)	$V_{den.}$ (kN)
			DBY.	ACI.	FIB	EUR.	CSA.	CO.S.		
S-LS-O-1	10.9	10.9	54.9	58.3	56.7	56.7	47.4	52	63.3	44.2
S-LS-O-2	11	11.4	54.9	58.3	56.7	56.7	47.4	52	63.3	50.5
S-LS-G-1-2Sides	11	12.2	54.9	60.7	67	76	47.4	54.2	72.5	55
S-LS-C-1-1/2	11	11.4	82.2	84.2	78.6	93.6	47.4	64.7	66.2	68.5
S-LS-G-1-1/2	11	11.4	65.7	68.6	65.3	71.2	47.4	62.8	66.2	64
S-LS-C-1-1	11	15.9	109.5	110.2	93.1	118.2	92.4	77.3	94.5	80
S-LS-G-1-1	11	11.8	76.4	78.7	72.2	80	67.5	73.5	68.5	71.5
S-LS-G-2-1	11	12.9	97.9	98.4	87.7	103.3	83.6	95	74.9	80
S-LS-G-3-1	11	14.1	119.4	119.6	103.2	126.6	99.7	116.5	81.9	84.5
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	11	11.4	82.2	84.2	78.6	93.6	92.4	64.7	67.7	66
S-LS-O-2-R-R-G-1	11	11.8	76.4	78.7	72.2	80	67.5	73.5	70.1	70.5

7. SONUÇLAR

İstanbul Teknik Üniversitesi Laboratuvarında, betonarme kısa kolonların sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında davranışı incelenmiştir. Numuneler kesme açısından yetersiz olacak şekilde tasarlanmıştır. Deney numuneleri, ülkemizdeki mevcut yapıların özelliklerini yansıtmak üzere beton dayanımı düşük ve enine donatısı yetersiz olarak üretilmiştir. Numuneler özdeş iki kısa kolonu ve kolon-kiriş birleşim bölgesini yansıtacak şekilde üretilmiştir. Deneysel çalışma referans numuneler ile birlikte güçlendirilmiş ve onarılıp güçlendirilmiş numuneleri kapsamaktadır. Üretilen 9 adet numune (S-LS-O-2 numunesi hariç), göçmeye kadar zorlanmış, dayanım, şekildeğiştirme yapabilme ve enerji yutma değişimleri ile hasar oluşumları incelenmiştir. Bu bölümde, elde edilen önemli sonuçlar özetlenmiştir.

1. Referans numunelerinde ve S-LS-G-1-2Sides numunesinde, yetersiz enine donatı sebebiyle diyagonal çekme (gerilmeleri) etkileri karşılanamayarak gevrek kesme göçmesi gözlenmiştir.
2. Güçlendirilen numunelerde, LP kompozit sargılamak suretiyle diyagonal çekme (gerilmeleri) etkileri karşılanmıştır, fakat diyagonal basınç etkileri sebebiyle betonun ezilerek teorik eğilme kapasitesine ulaşılamadığı gözlenmiştir.
3. LP kompozitin kesme etkisine karşı sağladığı katkı ve oluşturduğu pasif sargılama etkisi, numunelerin performansını geliştirmiştir. Güçlendirilen tüm numunelerin dayanım ve yerdeğiştirme kapasitelerinde gelişim sağlanmıştır.
4. LP kompozitin sağladığı sargılama etkisi sonucu, enine donatılara gelen yanal gerilmeler ve dolayısıyla kesitin enine genişlemesi nisbeten azalmıştır. Fakat diyagonal basınç (gerilmeleri) etkileri sonucu beton bütünlüğünü koruyamamış ve ileri düzeydeki yerdeğiştirmelere ulaşılırken teorik eğilme kapasitesine yaklaşılamamıştır.

5. Deneyler tamamlandığında, test bölgelerinde hasar görmüş beton dökülerek boyuna ve enine donatıların durumu kontrol edilmiştir. Bu gözlem sonucunda, donatılarda herhangi bir kesit kaybı ve burkulma tesbit edilmemiştir. Referans numuneleri ile S-LS-O-2-R-R-G-1 numunesinde boyuna donatıların aktığı tespit edilmezken, diğer tüm numunelerde boyuna donatıların aktığı görülmüştür. Teorik eğilme kapasitesine ulaşılmadığı halde perçin etkisi sonucu boyuna donatıların aktığı söylenebilir.

6. Onarılıp güçlendirilen numuneler (S-LS-O-1-R-R-C-1/2 ve S-LS-O-2-R-R-G-1), kesme kuvveti dayanımı ve şekildeğiştirme yapabilme yeteneği açısından, hasarsız olup doğrudan güçlendirilen numunelere (S-LS-C-1-1/2 ve S-LS-G-1-1) kıyasla daha düşük bir performans sergilemişlerdir. Onarım sırasında, enjeksiyon işlemi ile çatlakların tamamen doldurulması sağlanamamıştır.

7. Enerji yutma kapasiteleri bakımından değerlendirme yapılırken, tüm numunelerin eriştiği %3 öteleme oranı seviyesine göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Enerji yutma kapasiteleri bakımından en iyi performansı S-LS-C-1-1/2 ve S-LS-G-1-1 numunelerinin sergilediği gözlenmiştir.

8. Cam LP kompozit ile sürekli sargılama yapılan numunelerde, sarım sayısının artırılması önemli bir avantaj getirmemiştir. Sonuç olarak 1 kat LP kompozit ile bu çalışmada incelenen numuneler için en etkili performansın sağlandığı kanısına varılmıştır. S-LS-G-3-1 numunesinde beton dayanımının düşük olması sebebiyle diyagonal basınç etkileri altında ezilerek betonun bütünlüğünü kaybetmesi sonucu cam LP kompozit hasar görmüş ve S-LS-G-1-1 numunesine yakın bir performans göstermiştir.

9. İki yüze LP kompozit yapıştırılarak güçlendirilen numunede referans numunelere kıyasla daha düşük bir performans gözlenmiştir. Cam LP kompozitin herhangi bir ankraj tekniği kullanılmadan uygulanması sonucunda kompozit ince bir beton tabakası alarak numunden ayrılmış ve etkisiz hale gelmiştir. Bu sebeple; LP kompozit ile güçlendirme işleminde kesinlikle ankraj uygulamasına gidilmelidir.

10. Kesme açısından yetersiz olarak tasarlanan numunelerde, enine ve diyagonal şekildeğiştirmelerin mertebesini tayin edebilmek amacıyla çeşitli tipte

şekildeğiştirmeölçerler ve yerdeğiştirmeölçerlerden faydalanılmıştır. Bilindiği üzere ilgili yönetmeliklerde, LP kompozit etkin birim uzama sınır seviyesi olarak 0.004 ve 0.006 değerleri öngörülmüştür. Bu değer DBYBHY-06 yönetmeliğinde ise 0.004'tür. Deneysel olarak elde edilen ortalama enine şekildeğiştirme değeri 0.006 olmuştur. Bu çalışma sonucunda, güvenli tarafta kalabilmek amacıyla 0.005 değeri, LP kompozit etkin birim uzama sınır seviyesi olarak önerilmektedir.

11. İlgili yönetmeliklerden, yalnızca ikisinde (DBYBHY-06, COCRETE SOCIETY TR-55) kesme kuvveti üst sınır değeri için atıfta bulunulmaktadır. Sarım sayısı arttırılsa bile betonun ezilmesi ile göçme gerçekleşecektir. Bu sebeple, tüm yönetmeliklerde kesme kuvveti üst sınır değeri tanımlanmalıdır ya da iligili standartlara atıfta bulunulmalıdır.

12. İki yüze LP kompozit yapıştırılarak güçlendirme uygulanması halinde, LP katkısı hesap edilirken; aktif aderans boyu hesaplanarak etkin birim uzama katsayı değeri azaltılmalıdır. Bu hesap yalnızca, ACI-440 ile COCRETE SOCIETY TR-55 yaklaşımlarında yer almaktadır. Böylece, FIB ve EUROCODE-8 yaklaşımları ile LP katkısı çok yüksek hesaplanmaktadır. Aktif aderans boyu hesaplanarak, güçlendirme detayı ve beton dayanımının dikkate alındığı yaklaşım daha doğrudur.

Deneyler sonunda yapılan değerlendirmeler sadece bu çalışmada denenen 9 adet numune içindir. Daha genel bilgiye sahip olmak için yapı elemanlarının yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altındaki performansını değiştirebilecek diğer parametreler kullanılarak deney sayıları artırılmalıdır. Beton kalitesi arttırılarak, farklı güçlendirme detayları ile teknikleri kullanılmak suretiyle çalışmalar sürdürülmelidir. Sarım sayısı arttırılarak davaranışa etkisinin incelenmesi düşünülebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Celep, Z ve Kumbasar, N.,** 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Rehber Matbaacılık., İstanbul.

[2] **Triantafillou, T.C.,** 1998. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites. *ACI Structural Journal*. **95(2),** 107-115.

[3] **Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A., and Abdel Aziz, M.I.,** 1998. Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members. *ASCE Journal of Composites for Construction*. **2(4),** 195-203.

[4] **Yoshimura, K., Kikuchi, K., Kuroki, M., Ozawa, K., and Masuda, Y.,** 2000. Experimental Study on Seismic Behavior of RC Short Columns Strengthened by CarbonFiber Sheets. *Composite and Hybrid Structures: Proceedings of the 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, Los Angeles, California*. 927-934.

[5] **Ye, L., Yue, Q., Zhao, S., and Li, Q.,** 2002. Shear Strength of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Sheet. *ASCE Journal of Structural Engineering*. **128(12),** 1527-1534.

[6] **Machida, A., and Maruyama, K.,** 2002. Design Code Development for Fibre-Reinforced Polymer Structures and Repairs. *New Materials In Construction*. **4,** 149-160.

[7] **Ghobarah, A., and Galal, K.E.,** 2003. Seismic Rehabilitaion of Short Recrangular RC Columns. *Journal of Earthquake Engineering*. **8(1),** 45-68.

[8] **Furuta, T., Kanakubo, T., and Fukuyama, H.,** 2003. Evaluation of Shear Capacity of RC Columns Strengthened by Continuous Fiber. *6th FRPRCS Conference,* Singapore, China, July 8-10.

[9] **Teng, J.G., Lam, L., and Chen, J.F.,** 2004. Shear Strengthening of RC Beams with FRP Composites. *New Materials In Construction*. **6,** 173-184.

[10] **Zhang, Z., and Hsu, C.T.,** 2005. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates. *ASCE Journal of Composites for Construction*. **9(2),** 158-169.

[11] **Ilki, A., Bedirhanoglu, I., Basegmez, I.H., Demir, C., and Kumbasar, N.,** 2006. Shear Refrofit of Low Strength Reinforced Concrete Short Columns with GFRP Composites . *The 3rd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Miami, Florida*.

[12] **TS 708 Beton Çelik Çubukları,** 1985. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[13] **TS 500 Betonarme Yapıların Yapım ve Hesap Kuralları,** 2000. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[14] **Celep, Z ve Kumbasar, N.,** 2001. Betonarme Yapılar, Rehber Matbaacılık., İstanbul.

[15] **DBYBHY-06 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik,** 2006. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[16] **ACI-440 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,** 2001. Amerikan Concrete Institute, Farmighton Hills, USA.

[17] **EUROCODE-8 Desing of Structures for Earthquake Resistance,** 2003. Europeen Committee for Standardization, Brussels.

[18] **FIB Externally Bonded FRP Reinrorcement for RC Structures,** 2001. Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland.

[19] **CSA S806-02 Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers,** 2002. Canadian Standarts Association, Toronto, Ontario.

[20] **CONCRETE SOCIETY TR-55 Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials** 2000. Tecnical Repot Institute, UK.

[21] **ACI-318 Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary,** 2002. Amerikan Concrete Institute, Detroit, Mich.

EK A. DENEY NUMUNELERİNİN KAPASİTE HESABI

Eğilme Kapasitesi:

Çekme ve basınç donatılarının aktığı kabul edilerek hesap yapılırsa,

$$F_s = A_s f_y = 628.491 = 308348N = 308.3kN$$

$$F_{s'} = A_{s'} f_y = 628.491 = 308348N = 308.3kN$$

$$F_c = 0.85 \cdot f_c^{'} \cdot b \cdot a = 0.85 \cdot 11 \cdot 150 \cdot a = 1403a$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad \Rightarrow \quad F_c + F_s^{'} + N - F_s = 0$$

$$1403a + 63000 = 0 \quad \Rightarrow \quad x = 81mm \Rightarrow a = 0.85x = 69mm$$

Basınç ve çekme donatısının akıp akmadığının kontrolü yapılırsa,

$$\varepsilon_s = \frac{(180-81)0.003}{81} = 0.0037 \geq 0.002$$

$$\varepsilon_s^{'} = 0.003\frac{81-20}{81} = 0.0021 \geq 0.002$$

donatının aktığı görülür. Bu durumda a=69 mm'dir.

$$M_r = F_c(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) + F_s^{'}(\frac{h}{2} - d^{'}) + F_s(\frac{h}{2} - d^{'})$$

$$M_r = 63342 \cdot (\frac{200}{2} - \frac{69}{2}) + 308348 \cdot (\frac{200}{2} - 20) + 308348 \cdot (\frac{200}{2} - 20)$$

$$M_r = 53.5 \ kNm$$

$$P_r = \left(M_r \times 4\right) / l$$

P_r = 107 kN'dur.

Bu yüke karşı gelen kesme kuvveti değeri 214 kN'dur.

Kesme Kapasitesi:

$$V_{cr} = 0.65\, f_{ctd} b_w d (1 + 0.07 \frac{N}{bh})$$

$$f_{ctd} = 0.35\sqrt{f_c^{'}} = 0.35\sqrt{11} = 1.16MPa$$

$$V_{cr} = 0.65 \cdot 1.16 \cdot 150 \cdot 180 \cdot (1 + 0.07 \frac{63000}{150 \cdot 200}) = 23.4kN$$

$V_c = 0.8V_{cr}$ tasarım yapılmadığı için $V_c = 23.4kN$ alınmıştır,

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} d = \frac{100.48}{200} \cdot 348 \cdot 180 = 31.5kN$$

$$V = V_c + V_w = 23.4 + 31.5 = 54.9kN$$

Kesme kuvvetinin oluşturacağı moment, $M_V = 54821.1100 = 60.3kNm$

$$m = \frac{M_d}{bh^2 f_{cd}^{'}} = \frac{60.3 \times 10^6}{150.200^2.11} = 0.9$$

$$n = \frac{N_d}{bhf_{cd}^{'}} = \frac{60.3 \times 10^6}{150.200^2.11} = 0.2$$

$$A_s = A_s^{'} = \frac{\rho_m bh}{(f_{yd} / 0.85 f_{cd})} = \frac{0.85.150.200}{(491/11)} = 571mm^2$$

Kolonlarda boyuna donatı olarak toplam 4 adet 20 mm çapında nervürlü donatı, enine donatı olarak ise test bölgesinde 200 mm ara ile 8 mm çapında düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. Tablo A.1'de tüm numunelere ait toplam kesme kapasitesi değerleri verilmiştir.

$$V_f = 2n_f t_f E_f 0.004 d \frac{w_f}{s_f}$$

$S - LS - G - 1 - 2Sides \quad V_f = 2.4kN \quad (ACI - 440)$

$S - LS - C - 1 - 1/2 \quad V_f = 2 \times 1 \times 0.165 \times 230000 \times 0.004 \times 180 \times 1/2 = 27.3kN$

$S - LS - G - 1 - 1/2 \quad V_f = 2 \times 1 \times 0.23 \times 65000 \times 0.004 \times 180 \times 1/2 = 10.8kN$

$S - LS - C - 1 - 1 \quad V_f = 2 \times 1 \times 0.165 \times 230000 \times 0.004 \times 180 = 54.6kN$

$S-LS-G-1-1 \quad V_f = 2\times1\times0.23\times65000\times0.004\times180 = 21.5kN$

$S-LS-G-2-1 \quad V_f = 2\times2\times1\times0.23\times65000\times0.004\times180 = 43kN$

$S-LS-G-3-1 \quad V_f = 2\times3\times1\times0.23\times65000\times0.004\times180 = 64.5kN$

Tablo A.1: Toplam Kesme Kuvveti Kapasitesi

Numune	V_c (kN)	V_s (kN)	V_f (kN)	$V_c+V_s+V_f$ (kN)
S-LS-O-1	23.4	31.5	0	54.9
S-LS-O-2	23.4	31.5	0	54.9
S-LS-G-1-2Sides	23.4	31.5	2.4	57.3
S-LS-C-1-1/2	23.4	31.5	27.3	82.2
S-LS-G-1-1/2	23.4	31.5	10.8	65.7
S-LS-C-1-1	23.4	31.5	54.6	109.5
S-LS-G-1-1	23.4	31.5	21.5	76.4
S-LS-G-2-1	23.4	31.5	43.0	97.9
S-LS-G-3-1	23.4	31.5	64.5	119.4
S-LS-O-1-R-R-C-1/2	23.4	31.5	27.3	82.2
S-LS-O-2-R-R-G-1	23.4	31.5	21.5	76.4

Not: S-LS-G-1-2Sides numunesi için V_f değeri ACI-440 yönetmeliğine göre hesaplanmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

İsmail Hakkı Başeğmez, 1981 yılında İstanbul'da doğmuştur. 1999 yılında Pertevniyal Lisesi'nden mezun olduktan sonra aynı sene Trakya Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazanmış ve 2003 senesinde bu bölümden mezun olmuştur. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği (Yapı Analizi ve Tasarımı) programında yüksek lisansa başlamıştır.