

**BETON İLE CFRP ŞERİTLER ARASINDAKİ KAYMA GERİLMESİ
DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Yasin Fırat KURTİPEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2007

ANKARA

Yasin Fırat KURTİPEK tarafından hazırlanan “Beton ile CFRP Şeritler Arasındaki Kayma Gerilmesi Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi”. Adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. Emin TUNA

Mimarlık Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof.. Dr. Tekin GÜLTOP

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Öğr. Gör. Dr. Sabahattin AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih : 21/9/2007

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

Prof. Dr. Nermin ERTAN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yasin Fırat KURTİPEK

**BETON İLE CFRP ŞERİTLER ARASINDAKİ KAYMA GERİLMESİ
DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Yasin Fırat KURTİPEK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ağustos 2007**

ÖZET

Karbon elyaflar ile güçlendirilmiş kumaşlar (CFRP) betonarme yapıların güçlendirilmesi için son yıllarda çok yaygın olarak kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. CFRP ile güçlendirilen elemanların dayanımı, rijitliği, göçme şekli ve davranışını etkileyen en önemli etken betonarme elemanlar ile aralarındaki gerilme dağılımıdır. Gerilme değerinin doğru olarak belirlenmesi analitik hesaplamalar ve tasarım için de çok önemlidir. Yürütülen çalışmada çentik üzerine yapıştırılan ve eğilme momenti uygulanarak dolaylı olarak eksenel kuvvet etkisinde test edilen CFRP şeritler ile beton elemanlar arasındaki gerilme dağılımı incelenmiştir. Çalışmada incelenen değişkenler CFRP şerit genişliği, CFRP şerit etkili yapıştırma uzunluğu ve beton basınç dayanımıdır. Ayrıca gerilme dağılımının çentik olarak modellenen çatlaktan nasıl etkilendiği incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen gerilme dağılımları Chen ve Teng'in analitik modeli ile karşılaştırılmıştır [1].

Bilim Kodu : 911.1.144
Anahtar Kelimeler : Beton, kiriş, güçlendirme, CFRP, aderans
Sayfa Adedi : 71
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Özgür ANIL

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHEAR STRESS DISTRIBUTION
BETWEEN CONCRETE AND CFRP STRAPS**

(M.Sc. Thesis)

Yasin Fırat KURTİPEK

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

August 2007

ABSTRACT

Bonding of carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) has become a popular technique for strengthening concrete structures in recent years. The bond stress between concrete and CFRP is the main factor that was determining the strength, rigidity, failure mode and behavior of the reinforced concrete member strengthening with CFRP. The accurate evaluation of the stress is required for analytical calculations and design process. In this study, the stress between concrete and bonded CFRP straps across the notch is tested. Indirect axial tension is applied to CFRP bond by four point bending tests. The variables studied in this research are CFRP strap width, bonding length and the concrete compression strength. Furthermore the effect of a crack- modeled as a notch- on the stress distribution is studied. It is observed that the stress in the CFRP to concrete interface reaches its maximum values near the crack tips. It is also observed that lengthening the CFRP strap more than a certain value does not affect the strength and the stress distribution of the bonding. The stress distributions obtained from experiments are compared to Chen and Teng's analytical model.

Science Code	:911.1.144
Key Words	:CFRP, bonding Stress, bonded joints, debonding
Page Numbers	:71
Advisor	:Assist. Prof. Dr. Özgür ANIL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr Özgür ANIL' a, Çalışmalarım boyunca bana yardım eden değerli arkadaşlarım Vladimir KANKOV ve Ali Baran DOĞAN'a ve laboratuardaki çalışmalarda emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin her aşamasında desteklerini esirgemeyen Anne ve Babama sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. DENEY ELEMANLARI VE LABORATUAR TEKNİĞİ.....	6
2.1. Modellerin Tasarımı.....	6
2.2. Malzeme Özellikleri.....	9
2.2.1. Beton özellikleri.....	9
2.2.2. CFRP şeritlerin özellikleri.....	11
2.2.3. CFRP şeritlerin yapıştırıcısının özellikleri.....	12
2.3. Deney Elemanların Hazırlanması.....	12
2.3.1. Beton kirişlerin hazırlanması.....	13
2.3.2. CFRP'lerin yapıştırılması.....	14
3. LABORATUAR TEKNOLOJİSİ.....	17
3.1. Genel.....	17
3.2. Yükleme ve Deney Düzeneği.....	17
3.3. Ölçüm Düzeneği.....	19

	Sayfa
4. DENEY SONUÇLARI.....	22
4.1. Genel.....	22
4.2. Göçme Modları ve Yük Deplasman Davranışları.....	22
4.3. CFRP Şeritlerindeki Gerilme Dağılımları.....	26
4.4. Deneysel Değişkenlerin Gerilme Dağılımına Etkisi.....	26
4.5. Deney Elemanı 1.....	32
4.6. Deney Elemanı 2.....	34
4.7. Deney Elemanı 3.....	36
4.8. Deney Elemanı 4.....	38
4.9. Deney Elemanları 5.....	40
4.10. Deney Elemanı 6.....	42
4.11. Deney Elemanı 7.....	44
4.12. Deney Elemanı 8.....	46
4.13. Deney Elemanı 9.....	48
4.14. Deney Elemanı 10.....	50
4.15. Deney Elemanı 11.....	52
4.16. Deney Elemanı 12.....	54
4.17. Deney Elemanı 13.....	56
4.18. Deney Elemanı 14.....	58
4.19. Deney Elemanı 15.....	60
4.20. Deney Elemanı 16.....	62
5. DEĞERLENDİRMELER.....	64
5.1. Sonuçların Analitik Hesaplamalarla Karşılaştırılması.....	64

	Sayfa
6. SONUÇLAR.....	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Deney elemanların özellikleri.....	7
Çizelge 2.2. Beton üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranları.....	9
Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama basınç dayanımları.....	10
Çizelge 2.4. Sikawrap 230 C malzemesi özellikleri.....	11
Çizelge 2.5. Sikadur 330 yapıştırıcı malzemesi özellikleri.....	12
Çizelge 4.1. Deney sonuçları.....	24
Çizelge 5.1. Deney sonuçları ve analitik sonuçları karşılaştırılması.....	65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Deney elemanına ait geometrik özellikler.....	8
Şekil 2.2. Test modelinde uygulanan çatlağın diğer bazı güçlendirme İşlemlerindeki örnekler.....	8
Şekil 2.3. CFRP şeritlerin yapıştırılma detayları.....	16
Şekil 3.1. Yükleme düzeneği şematik görünüşü.....	18
Şekil 4.1. Göçme anında ortalama maksimum gerilme- CFRP şerit boyu grafiği.....	25
Şekil 4.2. 1,2,3 ve 4 numaralı deney elemanlarına ait yük deplasman grafiği.....	28
Şekil 4.3. 5,6,7, ve 8 numaralı deney elemanlarına ait yük deplasman grafiği.....	29
Şekil 4.4. 9,10,11 ve 12 numaralı deney elemanlarına ait yük deplasman grafiği.....	30
Şekil 4.5. 13,14,15 ve 16 numaralı deney elemanlarına ait yük deplasman grafiği	31
Şekil 4.6. 1. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği.....	33
Şekil 4.7. 2. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	35
Şekil 4.8. 3. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	37
Şekil 4.9. 4. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	39
Şekil 4.10. 5. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	41
Şekil 4.11. 6. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	43
Şekil 4.12. 7. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	45
Şekil 4.13. 8. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. 9. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	49
Şekil 4.15. 10. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	51
Şekil 4.16. 11. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği.....	53
Şekil 4.17. 12. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği	55
Şekil 4.18. 13. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği.....	57
Şekil 4.19. 14. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği.....	59
Şekil 4.20. 15. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği.....	61
Şekil 4.21. 16. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği.....	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Standart silindir numunenin test edilmesi.....	10
Resim 2.2. Betonun kalıplara yerleştirilmesinin ardından yüzeyinin düzeltilmesi.....	14
Resim 2.3. CFRP şeritlerin beton kirişlere yapıştırılması.....	15
Resim 3.1. Deney elemanı test düzeneği.....	18
Resim 3.2. $d_{CFRP}=180\text{mm}$ ve 7 adet deformasyon ölçer bağlanmış numune.....	20
Resim 3.3. $d_{CFRP}=300\text{mm}$ ve 11 adet deformasyon ölçer bağlanmış numune.....	20
Resim 3.4. Deneylerin yapıldığı laboratuvar ortamından bir görünüş.....	21
Resim 4.1. 1. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	32
Resim 4.2. 2. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	34
Resim 4.3. 3. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	36
Resim 4.4. 4. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	38
Resim 4.5. 5. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	40
Resim 4.6. 6. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	42
Resim 4.7. 7. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	44
Resim 4.8. 8. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	46
Resim 4.9. 9. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	48
Resim 4.10. 10. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	50
Resim 4.11. 11. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	52
Resim 4.12. 12. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	54
Resim 4.13. 13. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	56

Resim	Sayfa
Resim 4.14. 14. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	58
Resim 4.15. 15. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	60
Resim 4.16. 16. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Kiriş kesme açıklığı
b_C	Kiriş genişliği
b_{CFRP}	CFRP şerit genişliği
d	Kesit etkili yüksekliği
E_{CFRP}	CFRP elastisite modülü
f_c	Beton basınç dayanımı
L_{CFRP}	CFRP şerit yapıştırma boyu
L_e	Etkili CFRP şerit boyu
P	Elemanlara yüklenen yük
P_{cal}	Elemanların hesaplanan göçme yükü
P_U	Elemanların deney sonucundaki göçme yükü
t_{CFRP}	CFRP şerit kalınlığı
α	Cheng and Teng[12] deneylerindeki regresyon katsayısı
β_w	Kiriş ve CFRP şerit genişliği düzeltme katsayısı
β₁	CFRP şerit etkili yapıştırma boyu düzeltme katsayısı

1.GİRİŞ

Güçlendirme işlemi bir yapı veya yapı elemanının öngörülen bir güvenlik düzeyine çıkarmak için yapılan işlemdir. Günümüzde betonarme binaların güçlendirilmesi ve/veya onarılmasını gerektiren birçok neden vardır. Yapı kullanım amacının değişmesi nedeni ile daha büyük yüklerin etkimesi, rötre nedeniyle betondaki çatlaklara dolan suların donatıları korozyona uğratması, tasarım aşamasında veya yapım aşamasında yapılan hatalar, standartların gelişmesi sonucu yeni şartnamelere uyma zorunluluğu ve deprem sonucu oluşan hasarların giderilmesi gibi ve daha bir çok nedenden dolayı güçlendirme ve/veya onarım işlemi yapılabilmektedir.

CFRP malzemesi betonarme yapıların güçlendirilmesinde yüksek çekme dayanımı, hafif olması, uygulanma kolaylığı, korozyona ve çevre etkilerine karşı dayanıklılığı, uygulandığı betonarme elemanların geometrik ölçülerini değiştirmemesi ve farklı güçlendirme detaylarında kullanılabilecek çok çeşitli türlerinin piyasada hazır olarak bulunabilmesi gibi nedenlerden dolayı son 10 yıl içerisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Literatürde yer alan deneysel çalışmalar incelendiğinde CFRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanlarda üç farklı göçme türü yaygın olarak görülmektedir [3-10]. Gözlemlenen göçme mekanizmaları yapıştırılan CFRP'nin betonarme elemanın yüzeyinden soyulması, kullanılan epoksinin kayma gerilmesi sınırının aşılması yüzeyden ayrılması ve CFRP elemanın kopması olarak sayılabilir. CFRP eksenel çekme dayanımı çok yüksek bir malzeme olması nedeniyle kopması son derece zordur. Ayrıca bu göçme modu malzemenin tüm performansının kullanıldığının ve geliştirilen güçlendirme detayının amaçlanan başarıya ulaştığının önemli bir göstergesidir. Ancak literatürde yer alan bir çok çalışmada bu göçme mekanizması meydana gelmeden çok önce göçmenin CFRP'nin beton yüzeyinden soyulması veya epoksinin kayma gerilmesinin aşılması CFRP elemanın yüzeyden ayrılması şeklinde meydana geldiği gözlenmiştir. Bu iki göçme mekanizmasından en çok gözlenen ise CFRP'nin yapıştırıldığı beton yüzeyinin hemen bir kaç mm aşağısından kesme gerilmesi etkisiyle soyulması sonucunda meydana gelen göçme modudur.

CFRP elemanların beton yüzeyinden soyulması ile gerçekleşen göçme sonucunda geliştirilen güçlendirme yöntemlerinden istenilen performans elde edilememektedir. Sözü edilen göçme mekanizmasını etkileyen en önemli faktör beton basınç dayanımıdır. Ayrıca CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarının dayanım ve rijitliğini etkileyen diğer önemli parametreler ise CFRP yapıştırma alanı yani şerit genişliği ve etkili yapıştırma boyu olarak sayılabilir. CFRP kullanılarak geliştirilen bir güçlendirme detayının dayanımı ve rijitliği gibi önemli değerler göçme moduna bağlıdır. Eğer göçme beton yüzeyinden soyulma şeklinde meydana gelecek ise geliştirilen güçlendirme detayının kapasitesinin hesaplanmasında CFRP ile beton yüzeyini arasındaki gerilme dağılımının bilinmesi son derece önemlidir. Bu nedenle literatürde CFRP ile beton yüzeyi arasındaki gerilme dağılımının belirlenmesine yönelik çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır [1-5,7,11,12]. Gerilme dağılımının bilinmesinin tasarlanan güçlendirme detaylarının kapasitelerinin hesaplanması için gerekli olduğu yürütülen çalışmalarda vurgulanmıştır [12]. Bu amaçla geliştirilen deneysel çalışmaları davranış biçimlerine göre sınıflandırsak, bunlar; tek taraflı kesme testi [13-17], çift taraflı kesme testi [18-25], kiriş testi [25-27]. Bu alanda yapılan değişik deneysel çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar; a) çift taraflı çekme testi b) çift taraflı itme testi c) tek taraflı çekme testi d) tek taraflı itme testi e) eğilmeli kiriş testi olarak sınıflandırılabilir [12].

Gerilme dağılımlarının incelenmesi için geliştirilmiş deney düzeneklerinden ilk dördü bir çok özel aparat içeren oldukça karmaşık düzeneklerdir. Bu düzeneklerde CFRP elemanlara uygulanan kuvvetin tam olarak eksenel çekme kuvveti şeklinde uygulanmasını sağlamak için deney düzeneklerine karmaşık mekanik sistemler eklenmesine rağmen CFRP elemana tam olarak eksenel çekme kuvvetinin uygulanması oldukça zordur. Ayrıca CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarında kullanılan CFRP elemanların sadece eksenel çekme altında kaldığı durum son derece sınırlıdır. Örneğin eğilmeye karşı güçlendirmede kullanılan CFRP elemanlar betonarme kirişin alt yüzeyine yapıştırılır ve bu bölgedeki CFRP elemanlar hem eğilme momenti hem de eksenel çekme kuvveti etkisinde kalır. Güçlendirme ve onarım amacıyla kullanılan CFRP elemanlarda genellikle bileşik gerilme durumu mevcuttur.

Beton yüzeyine yapıştırılan CFRP elemanların birim deformasyon değerlerinin artmaya başlaması, kullanıldığı elemanın dayanım ve rijitliğine katkı göstermesi yapıştırıldığı betonarme elemanda çatlaklar oluşması ile meydana gelir. Betonda meydana gelen çatlağın CFRP elemanın altından geçmesi sonucunda CFRP elemanda meydana gelen gerilme dağılımında önemli değişiklikler olduğu düşünülmektedir. Gerçekteki uygulamalarda da meydana gelen durum yukarıda tarif edildiği gibidir. Kılcal düzeyde bile olsa çatlaksız betonarme eleman olması mümkün değildir. Ayrıca CFRP elemanlar genellikle dayanımı yetersiz betonarme elemanları güçlendirmek veya hasar görmüş elemanları onarmak amacıyla kullanıldıkları için bu elemanlarda çatlak olmaması mümkün değildir. Bu nedenle yürütülen çalışmada çatlağı modellemek amacıyla suni olarak oluşturulmuş çentikli beton bir eleman ile CFRP elemanlar arasındaki gerilme dağılımı incelenmiştir. CFRP eleman çentikli kısmın üzerine yapıştırılarak çatlağın gerilme dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada beton dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP etkili yapıştırma uzunluğu incelenen temel değişkenlerdir. Araştırma sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilerek elemanların yük-deplasman davranışları ve gerilme dağılımı profilinin çalışmada incelenen temel değişkenlerden nasıl etkilendiği incelenmiştir. Deneysel sonuçlar Chen ve Teng'in [1] analitik modeli ile karşılaştırılmış ve çatlaklı beton elemanlar için incelenen değişkenlerin analitik modele olan uygunluğu araştırılmıştır.

Konuyla İlgili Daha Önceki Benzer Çalışmalar

Hasar görmüş yapı elemanlarının onarılmasında veya yetersiz dayanımdaki elemanların güçlendirilmesi işlemine ilişkin literatürde bulunan çalışmalarda genelde CFRP şeritler veya çelik levhalar olmak üzere iki tür malzeme kullanılarak güçlendirme yapılmaktadır. Çelik levhaların betona dışarıdan yapıştırılması yöntemi 1960'lardan beri uygulanan bir yöntemdir. Son yıllarda CFRP kumaşları özellikleri sebebi ile çelik levhaların yerine kullanılmaya başlanmıştır. Dünya literatürüne geçmiş bu çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

J.F. Chen ve J.G. Teng (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kesme kuvvetleri altında CFRP – Beton ve Çelik – Beton bağlı elemanların mevcut ankraj dayanım modelleri incelenmiştir. Literatürden toplanan deneysel veriler yardımı ile bu modeller değerlendirilmiştir. Literatürden toplanan 56 adet tekil veya çift kesme deney sonuçları kullanılmıştır. Mevcut kırılma mekaniği modelinde yapılan basitleştirmelerle yeni bir model ortaya konulmuştur. Bu model bütün ankraj davranışını kapsamaktadır. CFRP şerit etkili yapıştırma boyu bu model yardımı ile doğru bir şekilde saptanabilmektedir [1].

H.N. Garden ve arkadaşları (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada betonarme kirişlere dört nokta yüklemesi uygulanmıştır. Bu çalışmada CFRP malzemesi ile güçlendirilmiş değişik açıklık / genişlik oranına sahip kirişlerin kapasite ve kırılma modları incelenmiştir. Açıklık / genişlik oranı değiştirilerek her durum için ayrı ankraj uzunlukları elde edilmiştir. Ayrıca CFRP şeritlerin ucunda oluşan deformasyon değişimi şerit boyunca oluşan kesme gerilmeleri ile ilişkilendirilmiş ve bu gerilmeler değişik durumlar için birbirleri ile karşılaştırılmıştır [28].

Björn Taljsten (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada beton prizmalara yapıştırılmış çelik ve karbon fiber elyafı ile güçlendirilmiş (CFRP) plakaları ile ilgili deneyler yürütülmüştür. Ayrıca her iki malzeme içinde gerekli olan ankrajlama bağları ortaya konulmuş ve göçme halinde betonda oluşan kritik deformasyon seviyesi kriterleri elde edilmiştir. Plakaya aksenal çekme uygulanarak moment taşımayan bir bağlantı elemanı yardımı ile kuvvet çelik plakaya iletilmiştir. Bu deneyler ile elde edilen sonuçlar Volkersen teorisi ile karşılaştırılmıştır. Teorinin kesme kuvvetlerini tahmin etmede uygun sonuçlar vermediği gözlenmiştir. Ancak bu ortalama yük seviyeleri için geçerlidir. Sonuçlar ayrıca betonun kırılmaya başladığı kritik bir deformasyon seviyesi olduğunu göstermiştir. Bu seviye ise 800 μs – 1000 μs seviyesinde olmaktadır [17].

Tim Stratford ve John Cadei (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada CFRP şerit ve kiriş arasındaki yapıştırma bölgesinde oluşan elastik kesme gerilmelerinin tespiti için öneriler öne sürülmüştür. Geliştirilen bu metodun açıklığı boyunca kesit özelliği

değişen kirişlerin güçlendirilmesi için kullanılması amaçlanmıştır. Yapıştırma bölgesindeki gerilmelerin önemine dikkat çekmek için bazı tipik yükleme durumları ve geometrik özelliklerin sonuçları gösterilmiştir [29].

S.K. Sharma ve arkadaşları (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada değişik CFRP ve metal levhalar bağlanan prizmalar üzerinde yapılan 36 tekil kesme deneyi yapılmıştır. Böylelikle verilen bir beton levha ara birleşim yüzünde maksimum gerilmeleri taşımak için gerekli kritik bağlanma boyu ve bağlanma kuvveti bulunmuştur. Yine bu çalışmada geliştirilen tasarım ilkeleri herhangi bir tip plaka – beton bağlanma dayanımını ve uzunluğunu yeterli doğrulukla vermelidir. Sonuçlar literatürden alınan çok sayıda deney sonucu ile doğrulanmıştır [30].

J.G. Teng ve arkadaşları (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada CFRP plakasının iki uçtan çekme kuvvetine maruz bırakıldığı durumlarda CFRP – Beton bağlantısındaki ayrılma durumu için analitik bir çözüm öne sürülmektedir. Bu amaçla gerçekçi bilineer lokal bağlantı – ayrılma ilişkisi kullanılmıştır. Yapıştırma boyunun yapıştırma bölgesinin davranışını nasıl etkilediğini göstermek için analitik çözümden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır [12].

2. DENEY ELEMANLARI VE LABORATUVAR TEKNİĞİ

2.1. Modellerin Tasarımı

Deney programında 16 adet dikdörtgen kesitli çentikli beton kiriş deney elemanı üretilmiş ve monotonik yükleme altında test edilmiştir. Deney elemanları donatısız üretilmiştir. Deney elemanlarının geometrik özellikleri Şekil 2.1’de verilmiştir. Betonarme elemanların, özellikle güçlendirme ihtiyacı duyan betonarme elemanların çoğunlukla çatlaklı bir yapıya sahip olduğuna daha öncede değinilmişti bu yüzden, deney elemanlarında çatlağın, betonarme ve CFRP arasındaki gerilme dağılımı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla açıklık ortasında 20 mm genişliğinde bir çentik bırakılmıştır. 150x200 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli üretilen deney elemanı 1300 mm boyundadır. Deney elemanının mesnetleri arasındaki mesafe ise 1200 mm dir. Deney elemanının simetri ekseninde bırakılan çentik 20x50 mm boyutlarındadır. Yükleme dört nokta yüklemesi şeklinde monotonik olarak uygulanmıştır.

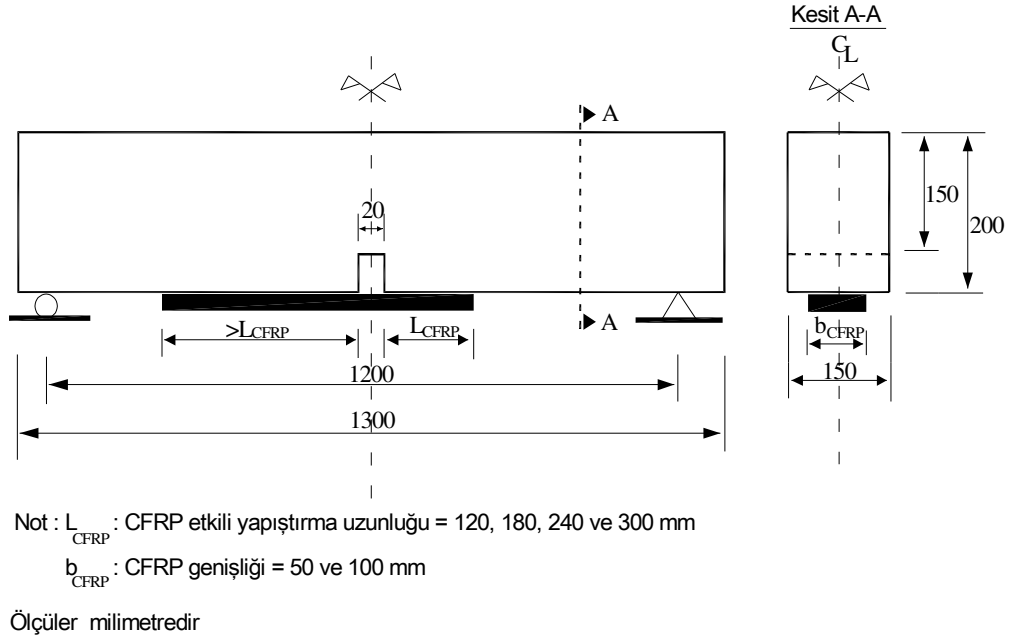
Deneysel çalışmada beton basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP etkili yapıştırma uzunluğu incelenen temel değişkenlerdir. Deney elemanlarının özellikleri Çizelge 2.1’de sunulmuştur. İki farklı beton basınç dayanımında iki farklı CFRP şerit genişliğinde ve 4 farklı CFRP şerit etkili yapıştırma boyuna sahip (2x2x4) toplam 16 adet deney elemanı üretilmiştir. Üretilen deney elemanlarının beton basınç dayanımlarının 15 MPa ve 25 MPa olması planlanmıştır. Deney elemanlarının standart silindir basınç deneylerinden elde edilen beton basınç dayanımları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Her iki farklı beton için kullanılan karışım oranları ise Çizelge 2.2’de sunulmuştur. Deney elemanlarına yapıştırılan CFRP şerit genişlikleri 50 mm ve 100 mm olarak seçilmiştir. CFRP etkili yapıştırma uzunlukları ise sırası ile 120 mm, 180 mm, 240 mm, 300 mm şeklinde belirlenmiştir.

Deney elemanları üretilirken aynı beton basınç dayanımına sahip olan deney elemanı serisi tek seferde dökülmüştür. Üretilen deney elemanlarına 14 gün süre ile kür uygulanmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamında 14 gün daha kurumaya bırakılan deney elemanları 28 gün sonunda CFRP şerit yapıştırma işlemine hazır hale

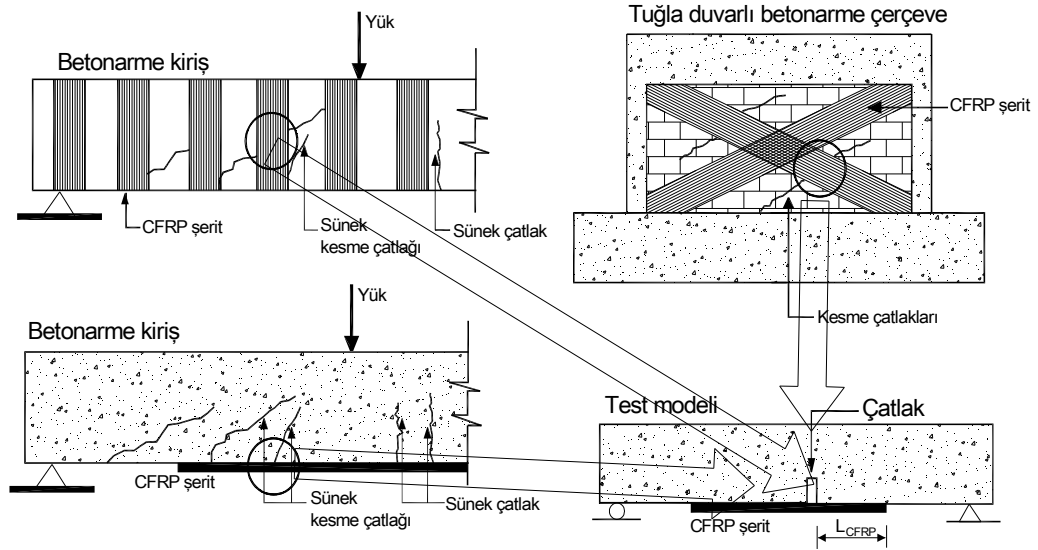
gelmiştir. Deney elemanlarına deneysel değişkenlere uygun şekilde CFRP şeritleri yapıştırılmıştır. CFRP şeritlerin birim deformasyon ölçerler ile ölçüm alınacağı etkili yapıştırma boyu dikkatlice ölçülerek yapıştırılmıştır. CFRP şeritlerin ölçüm alınmayacak olan diğer kısmı etkili yapıştırma boyundan daha uzun tutularak deney elemanlarında göçmenin ölçüm alınan bölgede meydana gelmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Yapıştırılan CFRP şeritler ile ilgili detaylar ise Şekil 2.2’de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının özellikleri

Deney Elemanı	Ortalama Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)	CFRP Şerit Genişliği (mm)	CFRP Şerit Yapıştırma uzunluğu (mm)
1	15.2	50	120
2	14.8		180
3	14.4		240
4	15.6		300
5	15.8	100	120
6	14.2		180
7	14.7		240
8	15.3		300
9	25.0	50	120
10	26.0		180
11	24.0		240
12	25.2		300
13	24.8	100	120
14	24.4		180
15	25.6		240
16	25.0		300



Şekil 2.1. Deney elemanına ait geometrik özellikler



Şekil 2.2. Test modelinde uygulanan çatlakın diğer bazı güçlendirme işlemlerindeki örnekleri

2.2. Malzeme Özellikleri

Deney elemanı olarak imal edilen kirişler donatısız üretilmiştir. İki değişik dayanıma sahip beton imal edilmiş olup, deney sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirileceği göz önüne alınarak sağlıklı değerlendirmeler elde etmek için özen gösterilmiştir. Bu kısımda kullanılan malzemeler ile ilgili detaylı bilgi sunulacaktır.

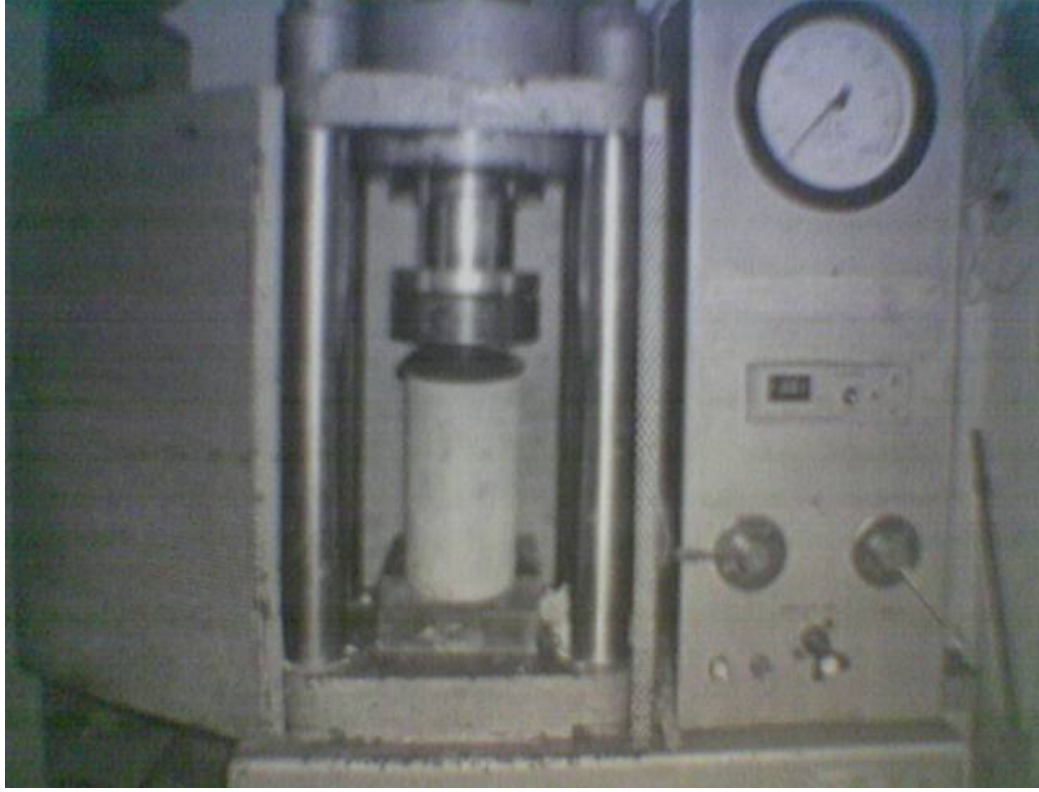
2.2.1. Beton özellikleri

Deney elemanlarında kullanılan betonun 28 günlük basınç dayanımının tasarım değerleri doğrultusunda 15 MPa ve 25 MPa olması amaçlanmıştır. Bu amaçla hazırlanan her iki tür betonun ağırlıkça karışım oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımları her bir elemandan beton dökümü sırasında alınan 3 adet standart silindir numunenin (R = 150 mm, H = 300 mm) test edilmesi ile bulunmuştur (Resim 2.1). deney elemanlarının ortalama basınç dayanımları Çizelge 2.3’de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Beton üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranları

Amaçlanan Ortalama Beton Basınç Dayanımı	Malzeme	Ağırlıkça yüzde (%)
15	0-7 mm Agregası	49
	7-15 mm Agregası	33
	Çimento	9
	Su	9
25	0-7 mm Agregası	30
	7-15 mm Agregası	45
	Çimento	17
	Su	8



Resim 2.1. Standart silindir numunenin test edilmesi

Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ortalama basınç dayanımları

Deney Elemanı	Ortalama Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)	Deney Elemanı	Ortalama Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)
1	15.2	9	25.0
2	14.8	10	26.0
3	14.4	11	24.0
4	15.6	12	25.2
5	15.8	13	24.8
6	14.2	14	24.4
7	14.7	15	25.6
8	15.3	16	25.0

2.2.2. CFRP şeritlerin özellikleri

Beton kirişlerin CFRP şeritler ile güçlendirilmesi işleminde Sika firmasının Sikawrap 230C karbon lifli dokuma malzemesi kullanılmıştır. Sikawrap 230C betonarme, yığma ve ahşap yapı elemanları için dışarıdan uygulamalı, tek doğrultulu, örülü ve karbon lifli güçlendirme malzemesidir. Malzemeye ait özellikler Çizelge 2.4’de sunulmuştur.

Sikawrap 230C betonarme, yığma ve ahşap yapıların eğilme ve kayma dayanımını arttırmak için kullanılır. Çok hafif bir malzeme olup kompleks şekilli yapılara uygulanabilmektedir (kolonlar, kirişler, duvarlar, kazıklar, bacalar). Kimyasal etkilere ve çevre şartlarına karşı dayanıklıdır. Yüksek dayanımlıdır ve çelik de olduğu gibi korozyon riski de yoktur.

Çizelge 2.4. Sikawrap 230 C malzemesi özellikleri

Sikawrap 230 C Karbon lifli Dokuma Malzemesi	
Lif Yapısı	Ana doğrultu : Karbon lifleri (toplam ağırlığın %99’u), Destekleyici (enine) doğrultuda : Isıya dayanıklı plastik lifler (toplam ağırlığın %1’i)
Birim Alan Ağırlığı (gr/m ²)	220 ± 10
Birim Hacim Ağırlığı (gr/m ³)	1.78 x 10 ⁶
Kalınlık (mm)	0.12
Çekme Dayanımı (MPa)	4100
Elastisite Modülü (MPa)	231000
Kopmadaki Maksimum Uzama (%)	1.7
Dokuma Uzunluğu (m)	50
Dokuma Genişliği (mm)	600

2.2.3. CFRP şeritlerin yapıştırıcısının özellikleri

Dıştan uygulanacak CFRP şeritlerin deney elemanlarına yapıştırılmasında Sikadur 330 marka yapıştırıcı kullanılmıştır. Sikadur 330 iki bileşenli, suya dayanıklı, yüksek dayanımlı solventsiz yapıştırma harcıdır. Sikadur 330 malzemesine ait bazı özellikler Çizelge 2.5’de sunulmuştur.

Sikadur 330’ un bir çok kullanım alanı olup beton, taş, metal, ağaç, ve bir çok yapı malzemesi için çok iyi bir yapıştırıcı malzemedir ve uygulaması kolaydır. Uygulamadan önce, sonra ve kür sonrası neme dayanıklıdır. Yüksek mukavemete sahiptir ve sürekli yükler altında iyi bir sünme dayanımı göstermektedir. Sıcaklık ve aşınma dayanımları yüksek olup darbelere karşı dayanıklıdır. Sikawrap karbon lifli dokuma malzemesi ile tamamen uyumludur.

Çizelge 2.5. Sikadur 330 yapıştırıcı malzemesi özellikleri

Sikadur 330 Yapıştırma Malzemesi	
Yoğunluk (kg/l)	1,31
Karışım Oranı	A/B = 4/1
Uygulama Sıcaklığı (C ⁰)	(+10) – (+35)
Çekme Dayanımı (MPa)	30
Elastisite Modülü (MPa)	3800

2.3. Deney Elemanlarının Hazırlanması

Deney elemanlarının test edilmek üzere hazır hale getirilmesi için gereken tüm işlemler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyler kısaca beton kirişlerin hazırlanması, CFRP şeritlerin yapıştırılması, deney ölçüm düzeneğinin hazırlanmasının ardından test aşamasına geçilmesi şeklinde olmaktadır.

2.3.1. Beton kirişlerin hazırlanması

İlk olarak beton kirişler için 8 adet ahşap malzemeden üretilmiş kalıp temin edilmiştir. Kalıplar laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Deneysel programda 16 adet deney elemanı yer almaktadır. Ancak daha öncede değindiğimiz gibi iki farklı basınç dayanımına sahip beton kiriş imal edeceğimizden bunlardan, 15 MPa basınç dayanımlı olan 8 tanesi önce dökülmüş, iki gün beklendikten sonra diğer 8 adet 25 MPa basınç dayanımlı beton kalıplara dökülmüş ve iki gün bekledikten sonra kalıplar sökülüştür. Beton dökümü ve vibrasyonu sırasında kalıpların açılmasını ve deplasman yapmasını engellemek amacıyla kalıplar profillerle desteklenerek sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıbın iç yüzeyi betonun yapışmasını önlemek amacıyla yağlanmıştır. Beton kirişte daha önce bahsettiğimiz gibi 20x50 mm boyutlarında bir çentik oluşturabilmek için bu ebatlarda birer demir prizma yerleştirilmiştir.

Bütün bu işlemlerden sonra beton döküm aşamasına gelinmiştir. Laboratuvarda betonyer yardımı ile hazırlanan beton dikkatlice kalıplara yerleştirilmiş ve bu esnada beton içerisindeki boşlukları en aza indirmek için vibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Vibrasyon işleminin ardından mala ile beton yüzeyi düzeltilmiştir (Resim 2.2). Beton içerisindeki malzemelerin ağırlıkça karışım oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir. Kalıplarda bekleyen numunelere iki gün süresince kür uygulanmış ve yeterli sertliğe geldikten sonra kalıplar sökülüştür. Bu işlemin ardından kalıplardan çıkartılan kiriş ve silindir numuneler ıslak çuvallarla sarılarak 28 gün daha kür işlemine devam edilmiştir. 28 günün sonunda beton kirişler deney için hazır hale gelmiştir. Kirişlerin hedeflenen 15 MPa ve 25 MPa’lık basınç dayanım değerlerine ulaşp ulaşmadığını kontrol etmek amacıyla silindirik numuneler basınç testine tabi tutulmuştur (Resim 2.1). Elde edilen sonuçları ise Çizelge 2.3’den kontrol verilmiştir.



Resim 2.2. Betonun kalıplara yerleştirilmesinin ardından yüzeyinin düzeltilmesi

2.3.2. CFRP şeritlerin yapıştırılması

Beton dökümü ve kürü tamamlanan deney elemanlarına CFRP şeritlerinin yapıştırılma işlemine 28 gün sonra geçilmiştir. Yapıştırma işlemine başlamadan önce kiriş yüzeyi iyi bir yapışma sağlaması amacıyla yüzeyi taşlanmış ve pürüzsüz bir hale getirilmiştir. Beton yüzeyindeki toz ve artık maddeler fırça ve ardından basınçlı hava püskürtülerek temizlenmiştir. CFRP şeritlerin yapıştırılacağı yüzeyler kiriş üzerine renkli bir kalemle işaretlenmiştir. Ardından bu yüzeyler ıslak bir bezle silinmiş, bir miktar kurummasının ardından tekrar basınçlı hava püskürtülerek yapışmaya hazır hale getirilmiştir.

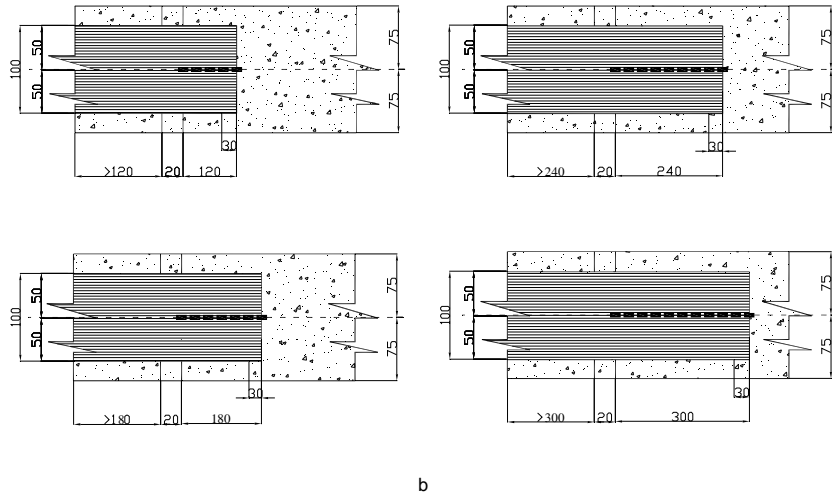
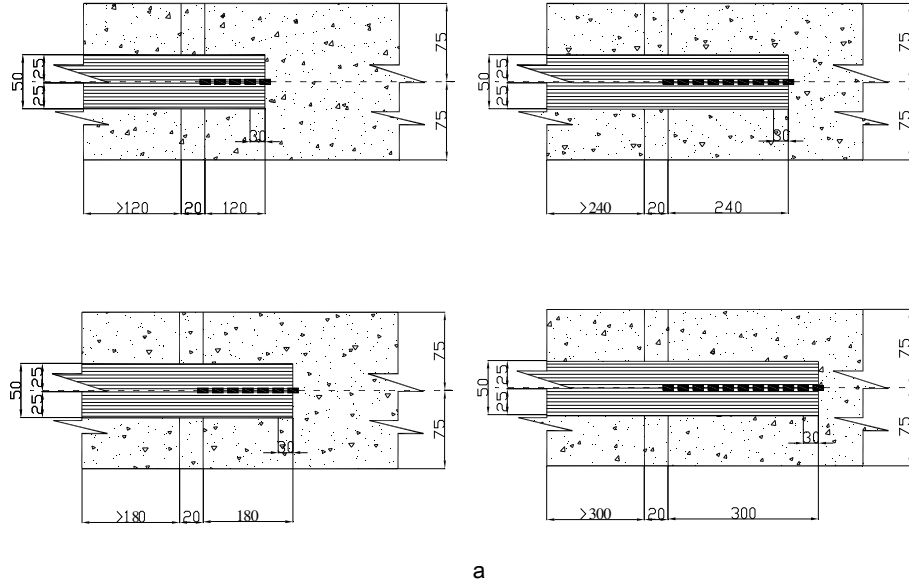
Yapıştırıcı malzemeyi hazırlamak için Sikadur 330 malzemesinin her iki bileşeni önce kaplarında karıştırılmışlardır. Daha sonra bileşenler $A / B = 4 / 1$ oranında alınarak başka bir kaba yerleştirilmişlerdir. Hava sürüklenmesine izin vermeyecek

bir şekilde üç dakika boyunca homojen bir karışım elde edinceye kadar karıştırılmıştır.

Hazırlanan yapıştırıcı malzeme kiriş üzerinde belirlenmiş bölgelere yaklaşık 1,5 mm kalınlığında sürülmüştür (Resim 2.3). CFRP şeritler bu yüzeylere yerleştirilerek üzerlerine CFRP şeritlerin liflerine paralel bir şekilde kuvvet uygulanarak CFRP şeritlerin beton yüzeye tamamen yapışması sağlanmıştır. Son aşamada CFRP şeritlerin üzerine bir kat daha 1,5 mm kalınlığında yapıştırıcı malzemeden sürülmüştür. Test aşamasına kadar CFRP şeritlerin yapıştırılmasını sağlayan epoksinin kuruması için 7 günlük kür süresi uygulanmıştır. Yapıştırılacak olan CFRP şeritler değişik boyutlarda olup, yapıştırma düzeni ve boyutlar Şekil 2.3’de sunulmuştur. CFRP şeritlerin yapıştırılması çok önemli bir işlemdir. CFRP şeritlerin kirişe iyi yapışması için her türlü özen gösterilmiştir.



Resim 2.3. CFRP şeritlerin beton kirişlere yapıştırılması



Şekil 2.3. CFRP Şeritlerin Yapıştırılma Detayları

- a) 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerinin yapıştırma düzeni ve gerilme ölçerlerin bağlanacağı yerler
- b) 100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerinin yapıştırma düzeni ve gerilme ölçerlerin bağlanacağı yerler (ölçüler mm'dir)

3. LABORATUVAR TEKNOLOJİSİ

3.1. Genel

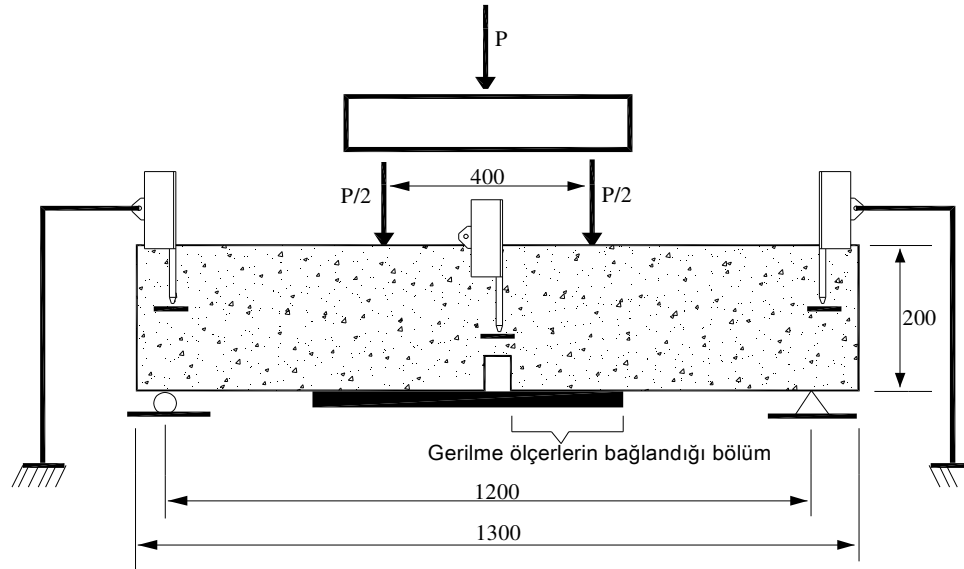
Deneysel çalışma programındaki deney elemanları Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında hazırlanmıştır. Deney elemanlarının üretiminden, testine kadar tüm aşamalar laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarının nasıl teste tabi tutulduğu, hangi teknolojilerin kullanıldığı ve verilerin nasıl elde edildiği bu bölümde özetlenmiştir.

3.2. Yükleme ve Deney Düzeneği

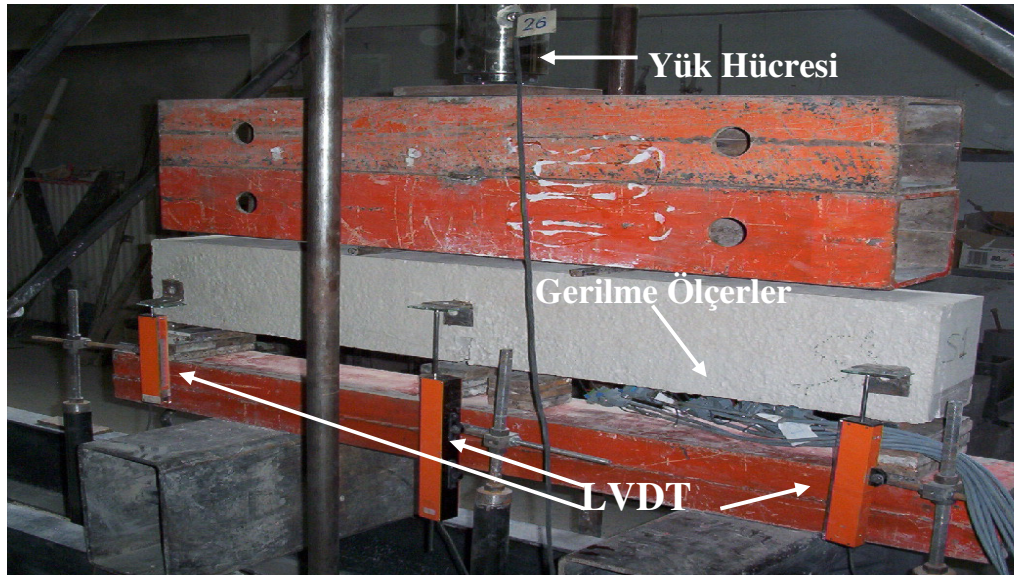
Deney elemanına yapıştırılan CFRP şeritlerin 7 günlük kür süresinin dolmasının ardından teste hazır hale gelmiştir. Deformasyon ölçerlerin bağlandığı deney elemanları Resim 3.1’de görüldüğü gibi deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Düzeneğin en alt kısmında oldukça rijit bir yapıya sahip birbirine kaynaklanmış çelik U profili bulunmaktadır. Mesnet bölgesinde ise kirişin yapabileceği mesnet çökmelerine karşı kalın çelik plakalar yerleştirilmiştir. Kirişin mesnet bölgesindeki temas noktalarında ise yükleme anında izostatik davranışı sağlamak için biri silindirik, diğeri ise prizmatik çelik mesnet elemanları yerleştirilmiştir.

Deney elemanları 400 kN kapasiteli kapalı eğilme çerçevesinde 300 kN kapasiteli bir hidrolik krika ile monotonik yükleme uygulanarak test edilmiştir. Deney ve ölçüm düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 3.1’de verilmiştir. Deney elemanlarına yükleme dört nokta yüklemesi şeklinde yük kontrollü olarak uygulanmıştır. Tüm deney elemanlarında kesme açıklığının ($a=400$ mm), kiriş etkili yüksekliğine ($d=200$ mm) oranı $a/d = 2.0$ dır. Deney elemanlarına hidrolik pompa vasıtasıyla uygulanan yükleme 400 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Deneyler yükün kiriş orta nokta deplasmanına karşı çizildiği grafikler takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Her bir elemanın test edilmesi sırasında sıfır okumaları alınarak yüklemeye başlanmış,

deney elemanlarında göçme gerçekleşene kadar yük monotonik olarak arttırılmış, elemanın göçmesinin ardından yük boşaltılmıştır.



Şekil 3.1. Yükleme düzeneği şematik görünüşü (ölçüler mm'dir)



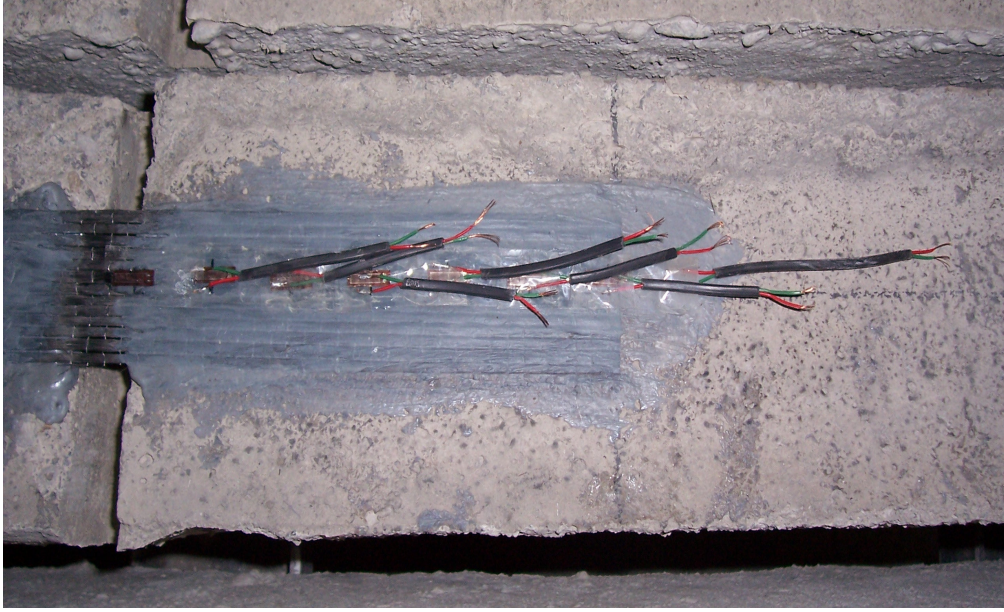
Resim 3.1. Deney elemanı test düzeneği

3.3. Ölçüm Düzenegi

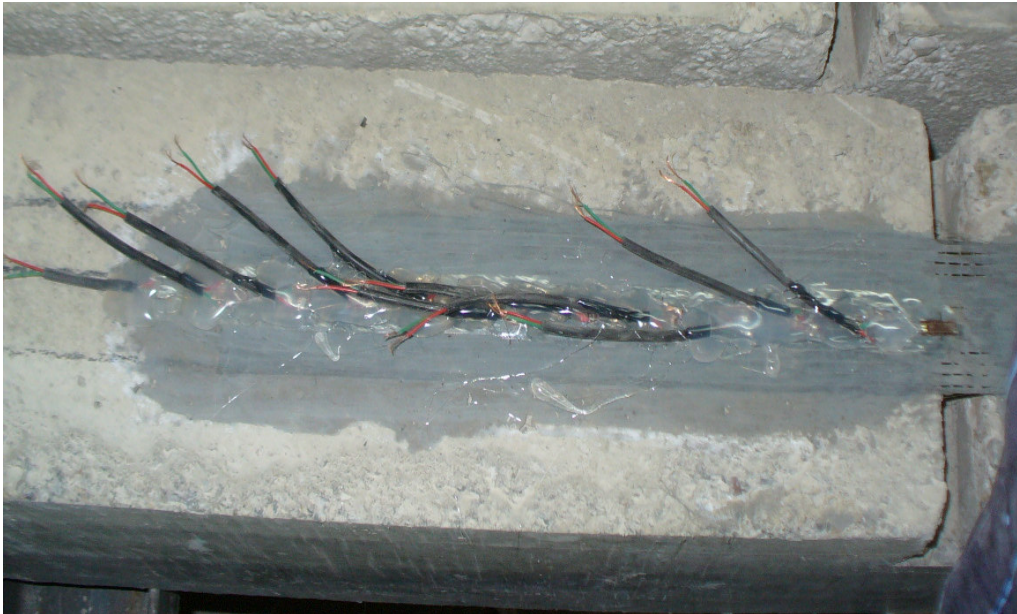
Beton yüzeyi ile CFRP şerit arasındaki gerilme dağılımı profilinin ölçülmesi amacıyla CFRP şerit üzerine 30 mm aralıklarla yapıştırılan 120 Ω 'luk birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Etkili yapıştırma boyu 120, 180, 240, 300 mm olan deney elemanlarından sırası ile 5, 7, 9 ve 11 adet birim deformasyon ölçümü alınması amaçlanmıştır. Öncelikle birim deformasyon ölçerlerin yüzeydeki yapıştırılması planlanan noktalar belirlendikten sonra CFRP şeritlerin yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir. Pürüzsüz hale getirilen yüzeyler solventli bir malzeme ile temizlenmiştir. Daha sonra birim deformasyon ölçerler hızlı şekilde kuruyan bir yapıştırıcı yardımı ile yüzeye yapıştırılmıştır. Ardından yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerin dirençleri kontrol edilerek çalışıp çalışmadığı test edilmiştir. Birim deformasyon ölçerler CFRP şerit eksenine simetrik olarak ana taşıyıcı CFRP lif doğrultusunda yapıştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerler 30 mm eşit aralıklarla CFRP şerit efektif yapıştırma uzunluğu boyunca, şerit simetri ekseninde çentiğe kadar yapıştırılmıştır. Teste hazır hale gelmiş ve birim deformasyon ölçerleri yapıştırılmış deney elemanlarından alınmış bir fotoğraflar Resim 3.2, Resim 3.3 ve Resim 3.4'de sunulmuştur.

Deney elemanlarında mesnet çökmesi ve kiriş orta noktası deplasmanı değerleri elektronik deplasman ölçerler (LVDT – Linear Variable Displacement Transducer) ile ölçülmüştür. Bu ölçüm aletleri 0.0001 mm'ye kadar olan deplasman değişimlerini elektronik olarak ölçebilmektedir. Kiriş orta noktası deplasmanı mesnet çökmesi değerleri kullanılarak daha sonra düzeltilmiş ve eğilme momenti etkisi ile oluşan esas kiriş deplasman değeri hesaplanmıştır.

Birim deformasyon ölçerler ve LVDT'ler data toplayıcıya bağlandıktan sonra deneye hazır hale gelmiştir. Her bir elemanın test edilmesi sırasında sıfır okumaları alınmış tekrardan tüm kontroller yapıldıktan sonra hidrolik krika vasıtası ile yük uygulanmış ve göçme anına kadar gerekli tüm değerler elde edilmiştir. Alınan ölçümler bilgisayar kontrollü bir veri toplayıcı ile toplanıp bilgisayar ortamında depolanmıştır.



Resim 3.2. $L_{CFRP}=180$ mm ve 7 adet birim deformasyon ölçer bağlanmış numune



Resim 3.3. $L_{CFRP}=300$ mm ve 11 adet birim deformasyon ölçer bağlanmış numune



Resim 3.4. Deneylerin yapıldığı laboratuvar ortamından bir görünüş

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Genel

Bu bölümde deney sonuçları ve yapılan gözlemler ayrıntılı olarak incelenmiş ve anlatılmıştır. Deney elemanlarında meydana gelen yük - yerdeğiştirme davranışı, CFRP şerit üzerindeki birim deformasyon dağılımı incelenecek ve göçme modları yorumlanacaktır. Deney elemanlarında gözlemlenen göçme modları beton yüzeyin CFRP şeridin birkaç mm aşağısından soyulması ile gerçekleşen göçme ve kullanılan yapıştırıcının yüzeyden ayrılması ile gerçekleşen göçme olarak sayılabilir. Bir diğer göçme modu olan CFRP şeridin eksenel çekme dayanımına ulaşarak kopması durumu bizim deney elemanlarımızda gerçekleşmemiştir. CFRP eksenel çekme dayanımı çok yüksek bir malzeme olması nedeni ile kopması son derece zordur. Ayrıca bu göçme modu malzemenin tüm performansının kullanıldığının ve geliştirilen güçlendirme detayının zaten amaçlanan başarıya ulaşmış olduğunu gösterir. Dünya literatüründe yapılan deneysel çalışmalara baktığımızda CFRP ile güçlendirilen betonarme veya beton elemanlarda göçmenin çok nadiren bu şekilde gerçekleştiği görülür. Daha sonra elemanların yük deplasman davranışları ve CFRP şerit birim deformasyon dağılımları genel olarak ele alınacak ve daha sonrada her bir deney elemanı ayrı ayrı incelenecektir.

4.2. Göçme Modları ve Yük – Deplasman Davranışları

Karakteristik özellikleri önceden ifade edilmiş olan toplam 16 adet deney elemanının göçme şekli ve göçmeden sonra oluşan değişiklikler incelenmiştir. Bu elemanlardan 13'ünde göçme şekli CFRP şeridinin elemanın yüzeyinin yaklaşık birkaç mm aşağısından beton tabakasını soyarak ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Diğer 3 elemanda ise kullanılan epoksi reçinesinin oluşan maksimum kayma birim deformasyonuna dayanım gösteremeyip yüzeyden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Maksimum birim deformasyon değerleri ve göçme modları Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Deney elemanı, CFRP şerit genişliği ve etkili yapıştırma boyu

verilerine göre Şekil 4.2, - 4.5'deki yük - deplasman grafiklerinden elemanların bu değişkenlerden nasıl etkilendiği incelenebilir.

100 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin maksimum yükleme kapasiteleri, 50 mm genişliğindeki CFRP şeritlerin maksimum yükleme kapasitelerinden ortalama olarak % 59 daha fazla olduğu gözlenmiştir. Farklı uzunluklardaki CFRP şeritler hemen hemen birbirine yakın yükleme değerlerinde göçmeye uğramışlardır. Beton basınç dayanımındaki farklılıkların da göçme yükü değerlerine etkisi olduğu gözlenmiştir. Buna göre 50 mm CFRP şerit genişliğine sahip olan ve 15 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerin, aynı CFRP şerit genişliği ve 25 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerden %6 daha düşük yük kapasitesine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bu fark 100 mm CFRP şerit genişliğine sahip numunelerde % 7 oranında ölçülmüştür.

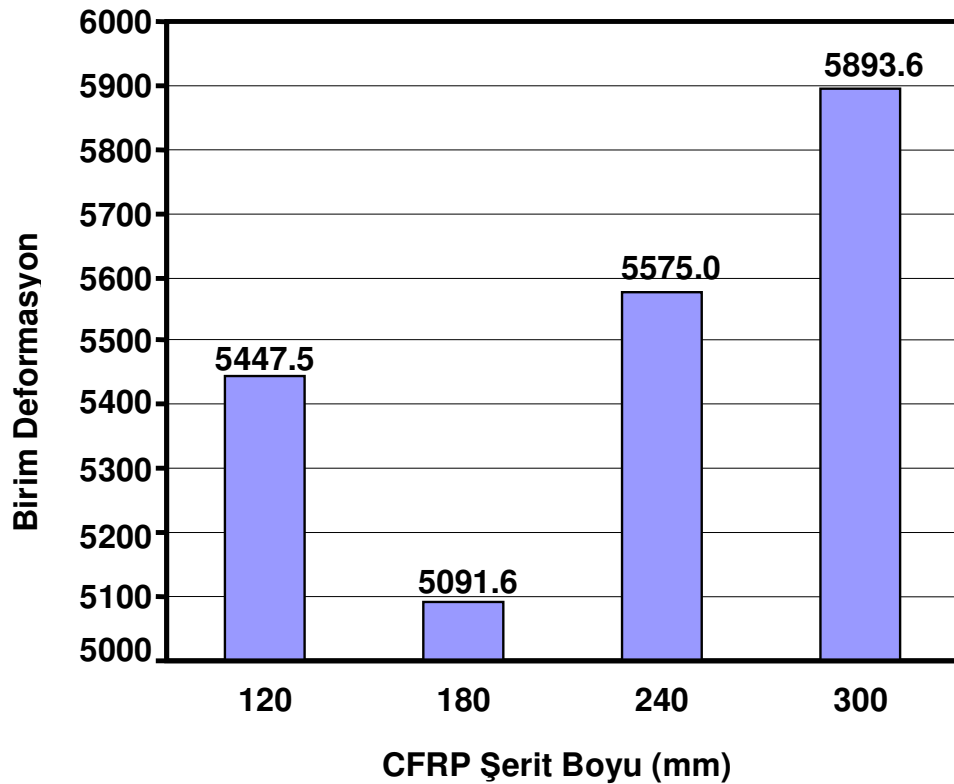
Deney esnasında her iki göçme modu ilgili veriler eşliğinde dikkatlice incelenmiş. Daha öncede belirtildiği gibi bunlardan bir tanesi CFRP şeridin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak ayrılması ile oluşmuş, diğer göçme türü ise kullanılan epoksi reçinesinin oluşan kayma birim deformasyonuna dayanamayarak yapışkan bölgenin ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. 1, 2 ve 6'ncı numuneler yapıştırıcı maddenin ayrılması sonucu göçmüştür. Diğer numunelerin göçme durumu ise betonun oluşan kayma birim deformasyonu sonucu CFRP ile birlikte bir parça betonun da numuneden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçmeden sonra çekilmiş bazı fotoğraflar ilerleyen sayfalarda verilmiştir. Diğer 13 elemanda oluşan göçme sonrası eleman yüzeyinden CFRP ile beraber ayrılan beton tabakası kalınlığı 1.0-3.5 mm aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Bu kalınlık numune üzerinde oluşan birim deformasyon dağılımına göre farklılıklar göstermektedir. Burada gözlenen olay giriş ortasında bulunan çentiğin kenarındaki gerilme yoğunlaşması nedeni ile bu bölgelerden kopan beton yüzeyi kalınlığı diğer bölgelere göre daha fazla olmaktadır. Hatta bu bölgeden oldukça büyük beton parçaları CFRP şerit beraberinde deney elemanından ayrılmıştır. Genel olarak CFRP şeritle beraber ayrılan beton yüzeyi kalınlığı çentik kenarında CFRP şerit uç noktasına gidildikçe bir azalma göstermektedir. Kopan beton tabakası kalınlığının artmasının temel nedeni olarak o

bölgedeki kayma gerilme dağılımının artması olarak sayılabilir. Bir diğer önemli gözlem ise CFRP şerit yapıştırma boyunun artması ile elemandan kopan beton tabakası, çentik ağzından CFRP şeridinin bittiği yere kadar daha üniform bir kalınlığa sahip olmasına ve kalınlığın azalmasına neden olmuştur. Kopan beton yüzeyi kalınlığının CFRP şerit genişliği arttıkça arttığı görülmüştür. Ancak CFRP şeridi beraberinde ayrılan beton kalınlığının her durumda çentik kenarından uzaklaştıkça azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney sonuçları (BYA, Beton Yüzeyin Ayrılması; YYA, Yapıştırıcı yüzeyinin ayrılması)

Deney Eleman 1 #	Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)	CFRP Şeridi		Maksimum Yük (kN)	CFRP maksimum birim deformasyon ($\mu\epsilon$)	Göçme Modu
		Genişlik (mm)	Yapıştırma Uzunluğu (mm)			
1	15	50	120	9.32	4776.54	YYA
2			180	8.78	4691.09	YYA
3			240	8.92	5213.68	BYA
4			300	8.65	5953.60	BYA
5		100	120	14.19	5951.16	BYA
6			180	15.00	4446.89	YYA
7			240	14.08	5667.66	BYA
8			300	13.50	6080.10	BYA
9	25	50	120	9.61	5504.27	BYA
10			180	8.92	5201.47	BYA
11			240	9.32	5919.41	BYA
12			300	10.09	5660.37	BYA
13		100	120	14.54	5557.99	BYA
14			180	14.43	6026.86	BYA
15			240	16.96	5499.39	BYA
16			300	14.62	5880.34	BYA

CFRP şerit genişliği ve yapıştırma uzunluğunun artması elemanların daha uzun sürede maksimum yük kapasitesine ulaşmasını sağlamıştır. Daha kısa yapıştırma boyuna sahip ve genişliği daha az olan CFRP şeritlerde daha ani göçme meydana geldiği gözlemlenmiştir. CFRP şeritlerin yapıştırma boyunun artması çatlakların da daha uzun bir bölge boyunca oluşmasına neden olmuştur. Şekil 4.1’de CFRP şerit boyuna göre, göçme anında maksimum birim deformasyon değerleri verilmiştir. 1, 2 ve 6 nolu deney elemanlarında oluşan göçme modu olan epoksi reçinesinin beton yüzeyinden ayrılması sadece 15 MPa’lık beton basınç dayanımına sahip deney elemanlarında gerçekleşmiştir. Bu göçme modunda ölçülen yük ve birim deformasyon değerlerinin bir önceki göçme şekline kıyasla olduk küçük değerler olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.1. CFRP şerit yapıştırma boyu – göçme anında ortalama maksimum birim deformasyon

4.3. CFRP Şeritlerindeki Gerilme Dağılımları

CFRP şeritlere 30 mm aralıklarla bağlanmış olan gerilme ölçerlerden elde edilen veriler grafikler halinde ilerleyen sayfalarda verilecektir. Birim deformasyon değerleri 5 farklı yük düzeyine göre düzenlenmiş şekilde verilmiştir. Birim deformasyon grafiği bilinen yöntemlerle değerlendirildiğinde deneysel değişimlerden bağımsız olarak incelenebilir. Burada açıkça görülen özellik maksimum birim deformasyon değerlerinin her zaman çentik kenarına çok yakın bir noktada kaydedilmiş olmasıdır. Bir diğer dikkat çeken durum ise birim deformasyon değeri % 50 mertebesine yavaş yavaş çıkmasının ardından göçme yükü seviyesine kadar birim deformasyonun daha hızla ilerlemesi olmuştur.

CFRP şeridinin betondan ayrılması durumunda kaydedilen ortalama birim deformasyon değerleri 5700 $\mu\epsilon$ iken, epoksi reçinesinin ayrılması durumunda ise bu değer ortalama 4640 $\mu\epsilon$ olarak kaydedilmiştir. Göçme anındaki ortalama birim deformasyon değerleri Beton – CFRP ayrılması durumunda, epoksi reçinesinin ayrılması durumuna göre % 23 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

4.4. Deneysel Değişkenlerin Gerilme Dağılımına Etkisi

Bu bölümde beton basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği, CFRP etkili yapıştırma boyu gibi değişkenlerin birim deformasyon dağılımı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Beton basınç dayanımı 25 MPa olan deney elemanlarının maksimum göçme yükleri, beton basınç dayanımı 15 MPa olan deney elemanlarından ortalamada % 6 daha fazla çıkmıştır. Yine CFRP şerit genişliği 100 mm olan deney elemanlarının göçme anındaki ortalama birim deformasyon değerleri CFRP şerit genişliği 50 mm olan deney elemanlarından % 5 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. Bununla beraber CFRP şerit etkili yapıştırma boyunu arttırmak da göçme anındaki maksimum birim deformasyon değerlerini çoğunlukla arttırdığı izlenmiştir. Ancak 180 mm etkili yapıştırma boyuna sahip CFRP şeritlerle güçlendirilmiş 2. ve 6. deney elemanlarındaki birim deformasyon değerleri, 120 mm etkili yapıştırma boyuna sahip CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarından daha düşük çıkmıştır.

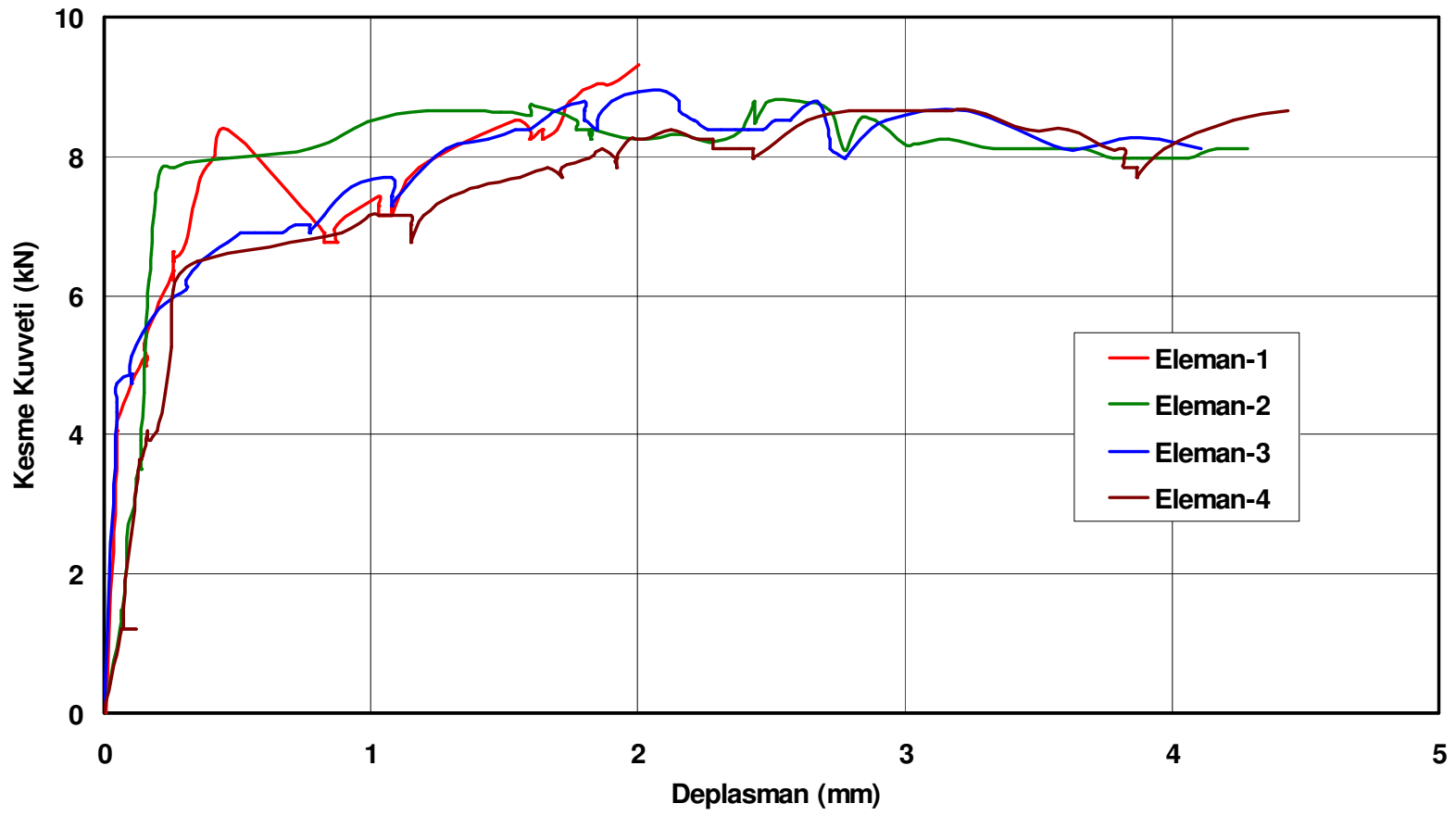
Deney elemanlarından beklenen birim deformasyon değerlerini alabilmek için CFRP'nin bütün yapıştırma yüzeyi boyunca tam olarak aderans sağlaması gerekmektedir. CFRP boyunun değişimine göre değişen birim deformasyon dağılımlarını ilerleyen sayfalardaki grafiklerde sunulmuştur.

Aşağıda verilmiş olan Eş. 4.1 ile CFRP şerit genişliği, Beton basınç dayanımı, CFRP şerit kalınlığı ve Elastisite modülü değerlerini kullanarak CFRP etkili yapıştırma boyunu (L_e) analitik olarak hesaplamak mümkündür.

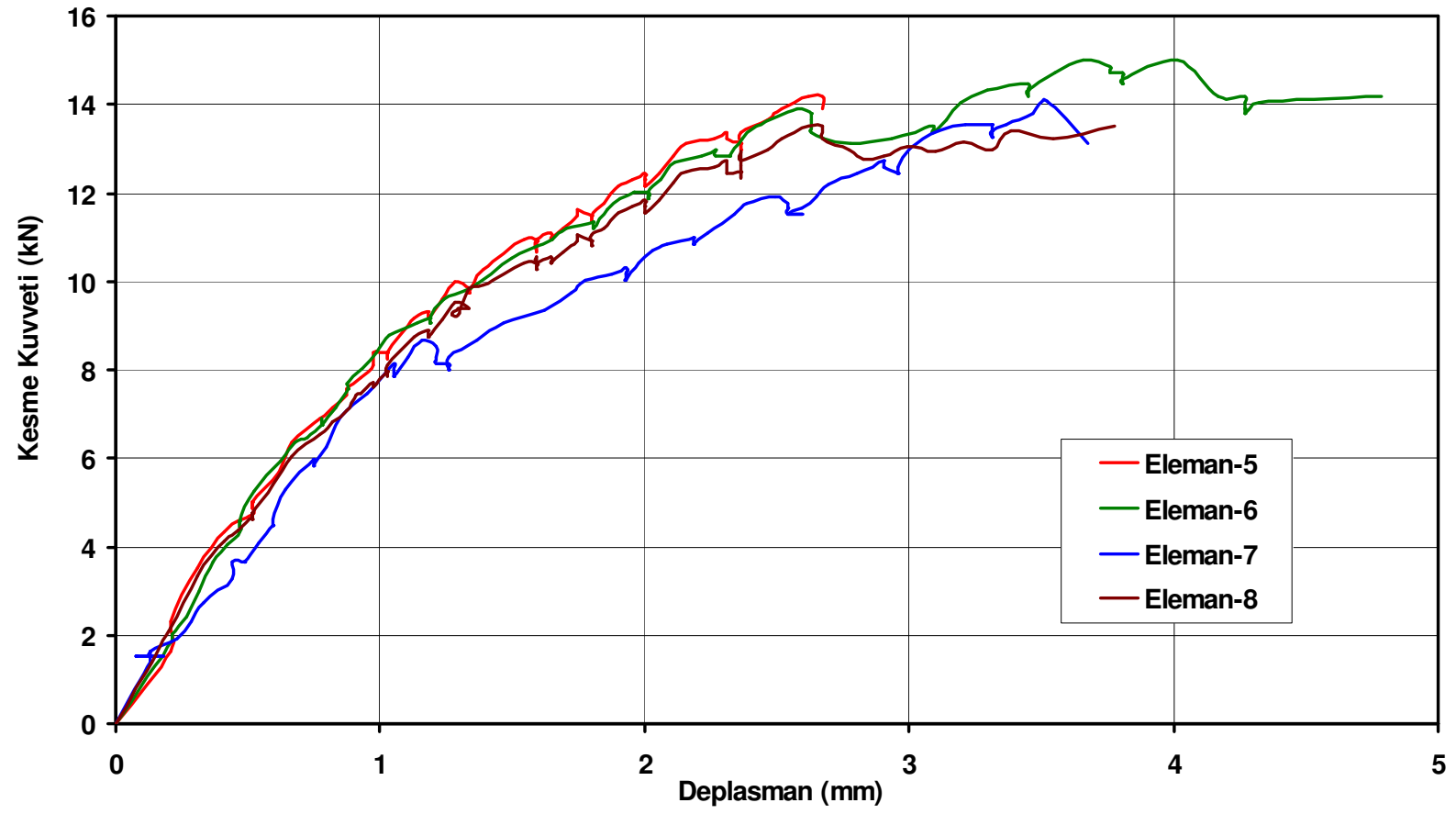
$$L_e = \sqrt{\frac{E_{CFRP} \times t_{CFRP}}{\sqrt{f_c}}} \quad (4.1)$$

Beton basınç dayanımı 15 MPa olan deney elemanları için CFRP etkili yapıştırma boyu 84,6 mm olarak hesaplanmıştır. Beton basınç dayanımı 25 MPa olan deney elemanları için ise CFRP etkili yapıştırma boyu 74,5 mm olarak elde edilmiştir. CFRP ile güçlendirilmiş deney elemanlarının birim deformasyon dağılımlarının incelenmesi göstermiştir ki, Beton basınç dayanımı 25 MPa olan deney elemanlarında, CFRP şeridinin gerilmeleri beton yüzeyine tam olarak transfer edebilmesi için gerekli olan etkili yapıştırma boyu 131,3 mm olarak bulunmaktadır. Beton basınç dayanımı 25 MPa olan deney elemanında ise bu değer, 161,3 mm olarak bulunmaktadır. Beton basınç dayanımı 15 MPa olan deney elemanlarında CFRP etkili yapıştırma boyu %23 oranında daha uzun çıktığı görülmektedir. Buna göre deney elemanının beton basınç dayanımındaki artış, CFRP şeridi etkili yapıştırma boyunun da artmasına neden olmuştur.

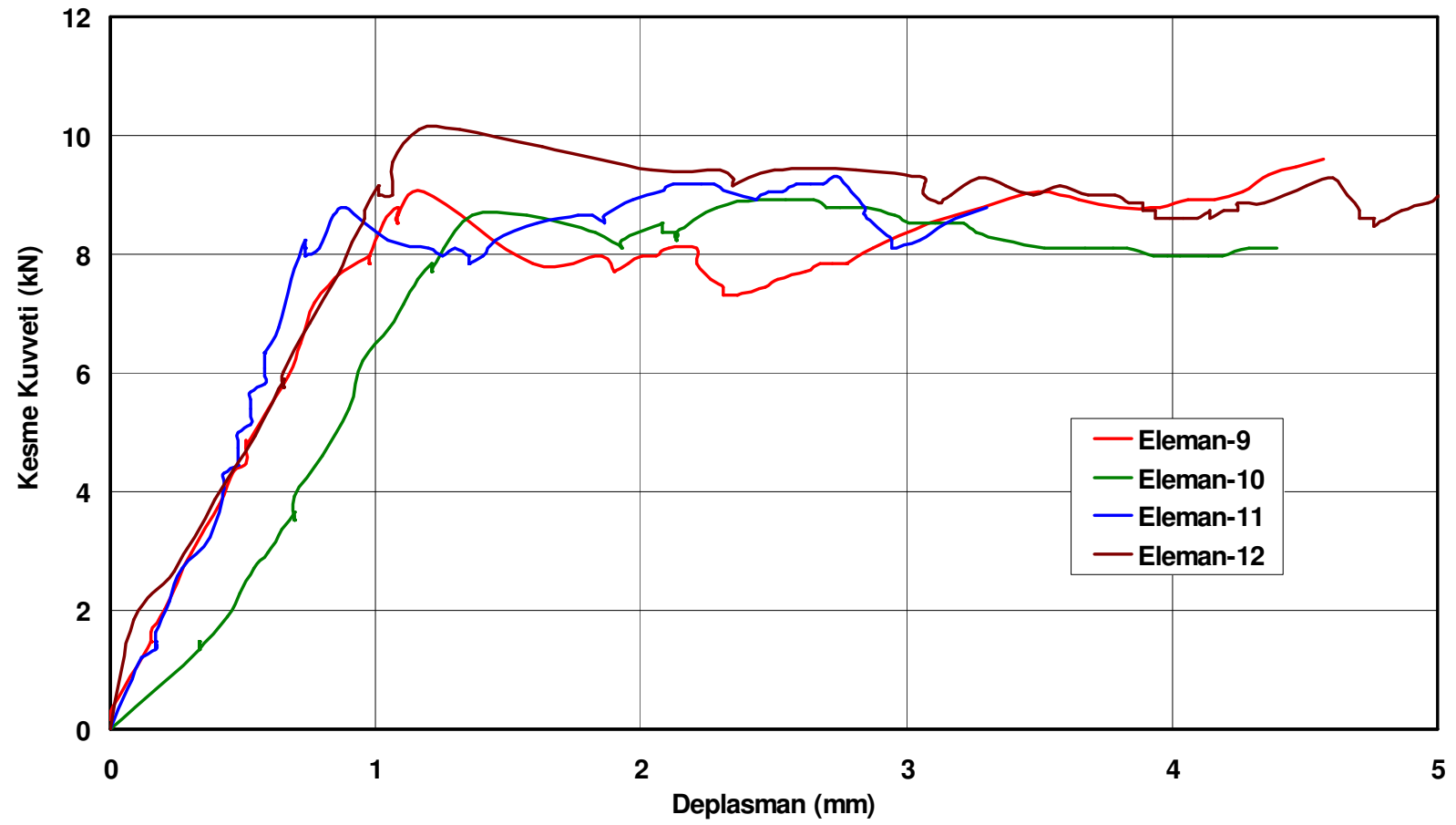
CFRP şerit genişliğinin değişmesi de, CFRP etkili yapıştırma boyunun önemli miktarda değişmesine neden olmuştur. Buna göre CFRP şerit genişliği 100 mm olan deney elemanlarının CFRP etkili yapıştırma boyunun, CFRP şerit genişliği 50 mm olan deney elemanlarından % 17 oranında daha uzun olduğu belirlenmiştir.



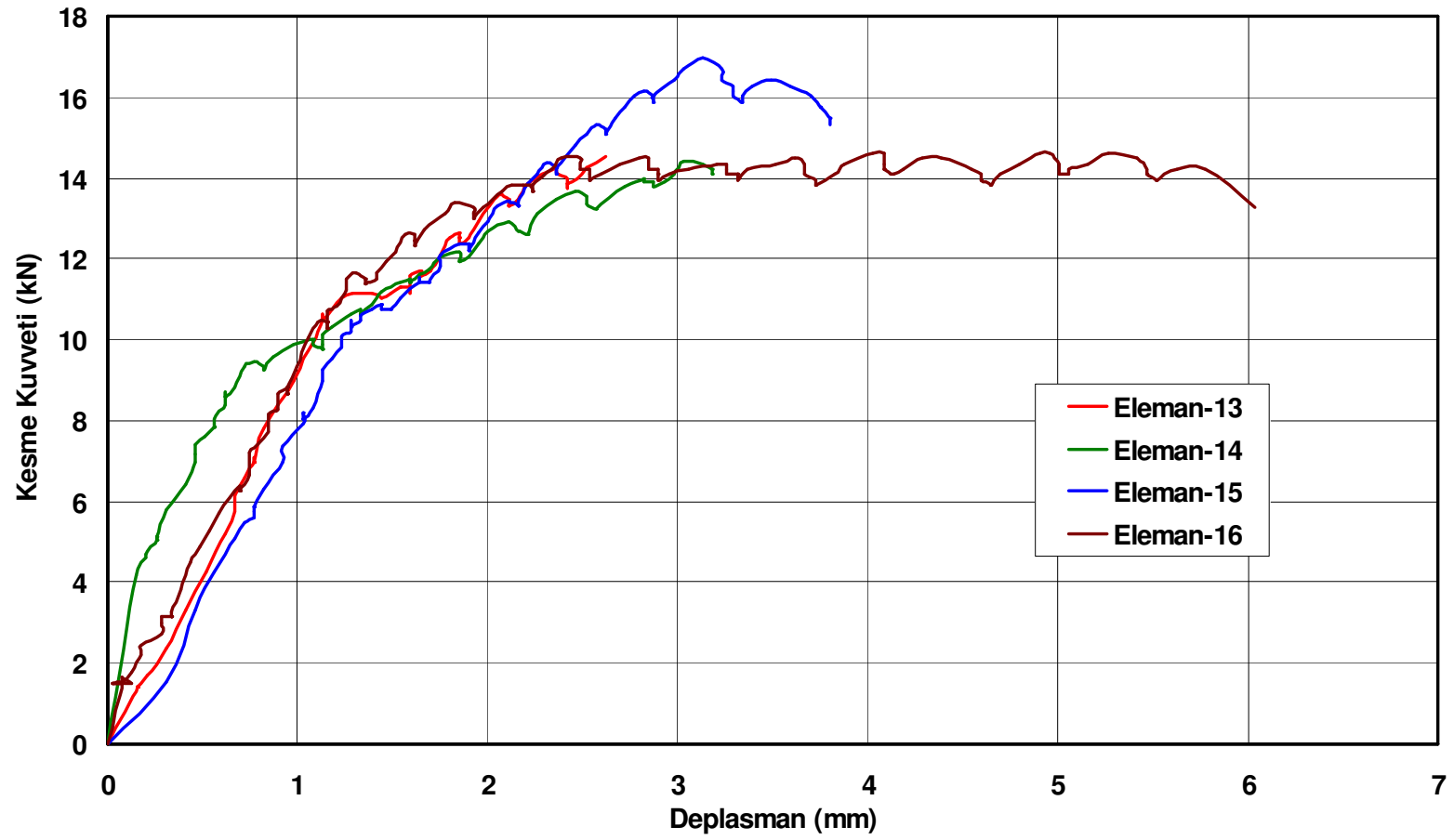
Şekil 4.2. 1,2,3 ve 4 numaralı deney elemanlarına ait Yük - Deplasman grafiği



Şekil 4.3. 5,6,7 ve 8. deney elemanlarına ait Yük - Deplasman grafiği



Şekil 4.4. 9,10,11 ve 12 numaralı deney elemanlarına ait Yük- Deplasman grafiği



Şekil 4.5. 13,14,15 ve 16 numaralı deney elamanlarına ait Yük - Deplasman grafiği

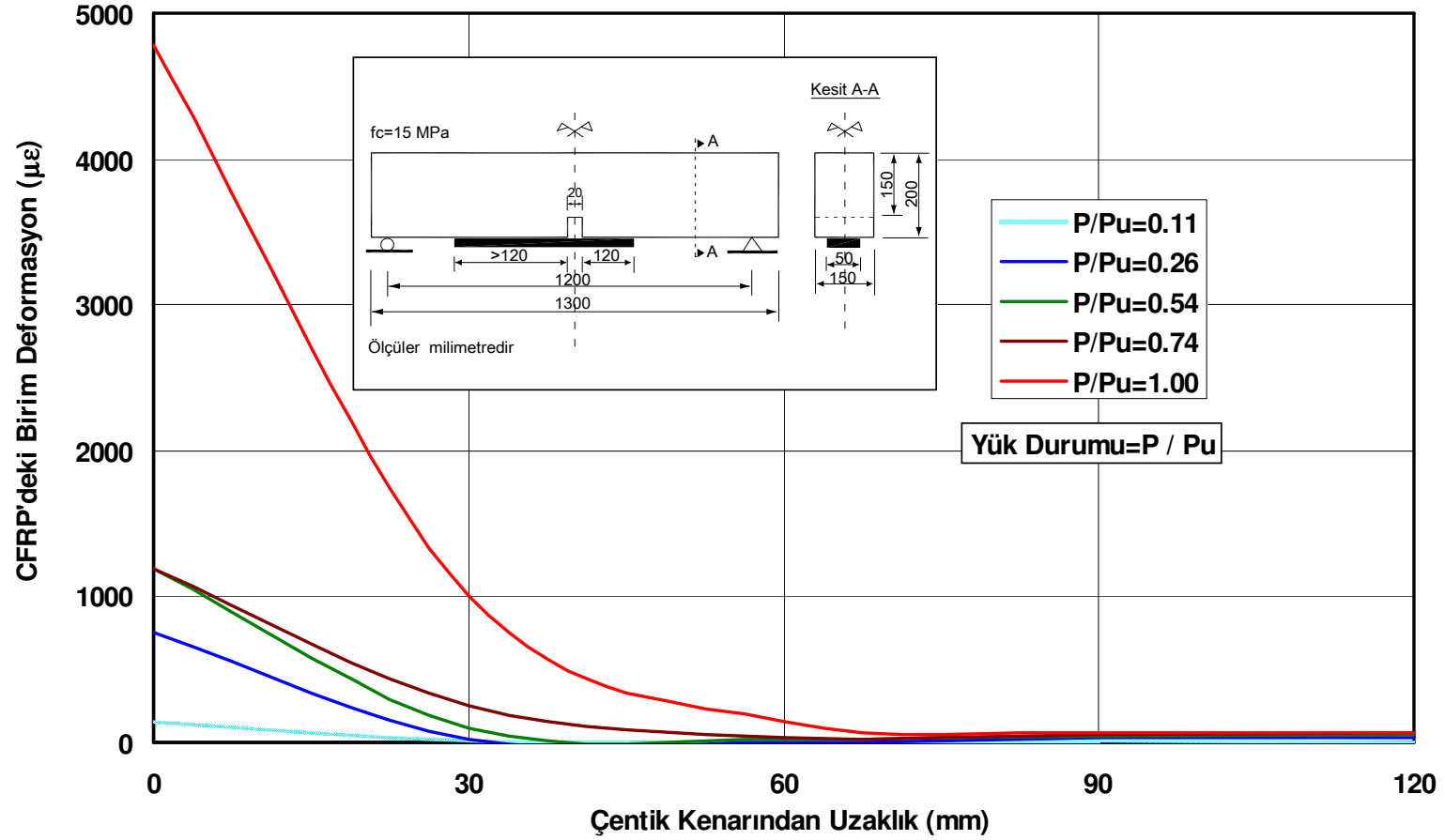
4.5. Deney Elemanı-1

Deneyisel programda ilk test edilen kirişimizin, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 120 mm'dir. Kırılma anında elemana uygulanan maksimum yük 9,32 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine kırılma anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 4776,54 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli kullanılan epoksi reçinesinin aderans bölgesinde oluşan kayma gerilmesine dayanım gösteremeyerek yüzeyden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında sadece 2 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.74$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri 1194 $\mu\epsilon$ mertebesinde iken, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumunda, çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri 4776,54 $\mu\epsilon$ değerine ulaşmıştır. Ayrıca göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinin % 21'i mertebesinde dir. Bu değer 60 mm uzaklıkta % 3'e kadar düşmektedir. Bununla ilgili değerler Şekil 4.6'de grafikte sunulmuştur.



Resim 4.1. 1. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-1



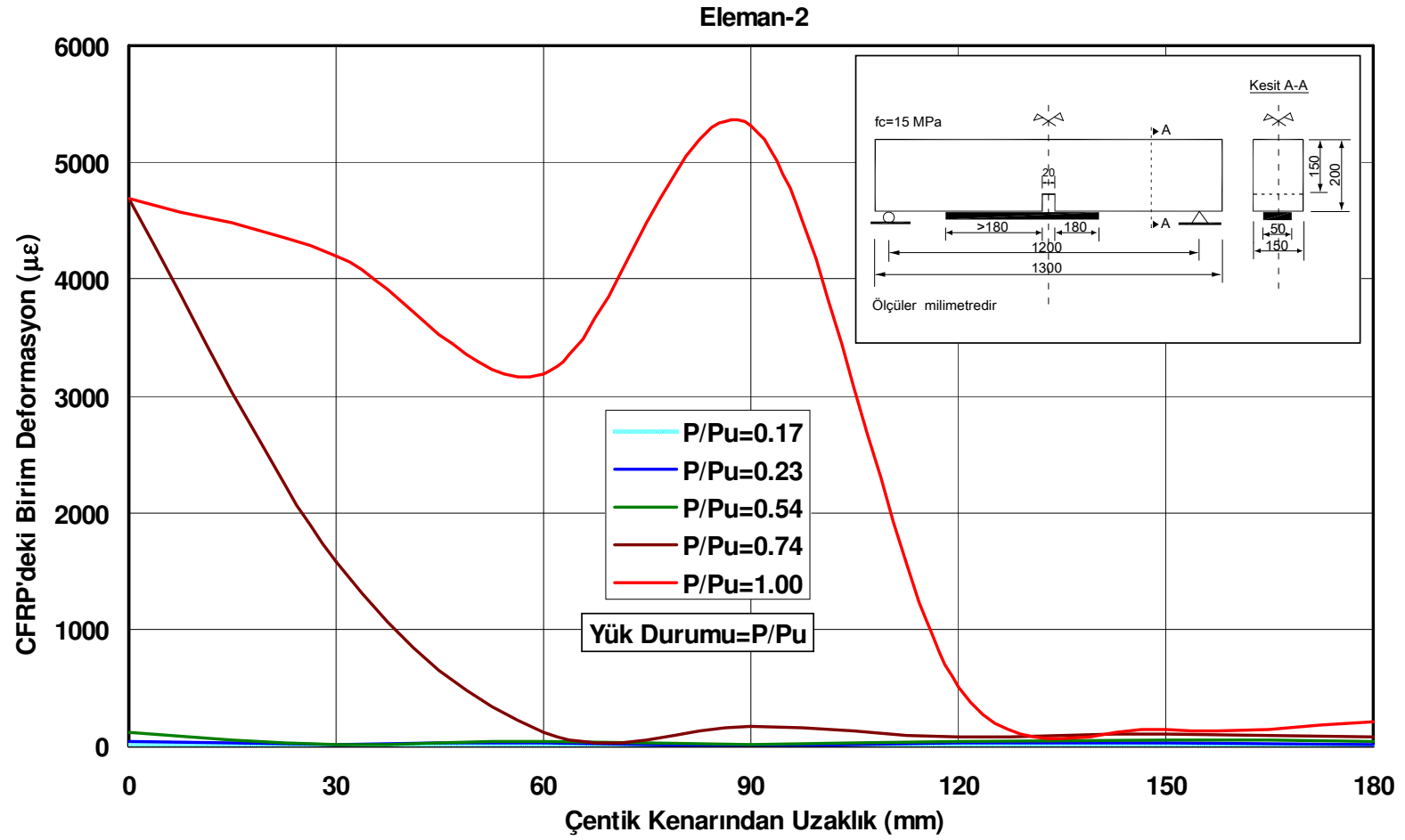
Şekil 4.6. 1. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

4.6. Deney Elemanı-2

Deneysel programda ikinci test edilen kirişimizin, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 180 mm'dir. Kırılma anında elemana uygulanan maksimum yük 8,78 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine kırılma anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 4691,09 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanda da göçme kullanılan epoksi reçinesinin aderans bölgesinde oluşan kayma gerilmesine dayanım gösteremeyerek yüzeyden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 4,28 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u=0.74$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değeri ile aynı olduğu görülmektedir. Ayrıca göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinin % 89'u mertebesinde. Bu değer 60 mm uzaklıkta % 68'e düşmektedir. Buradan anlaşılabileceği üzere 2 nolu deney elemanının davranışı bir önceki deney elemanının davranışına fazla benzememektedir. İlgili değerlere Şekil 4.7'deki grafikten ulaşmak mümkündür.



Resim 4.2. 2. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü



Şekil 4.7. 2. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

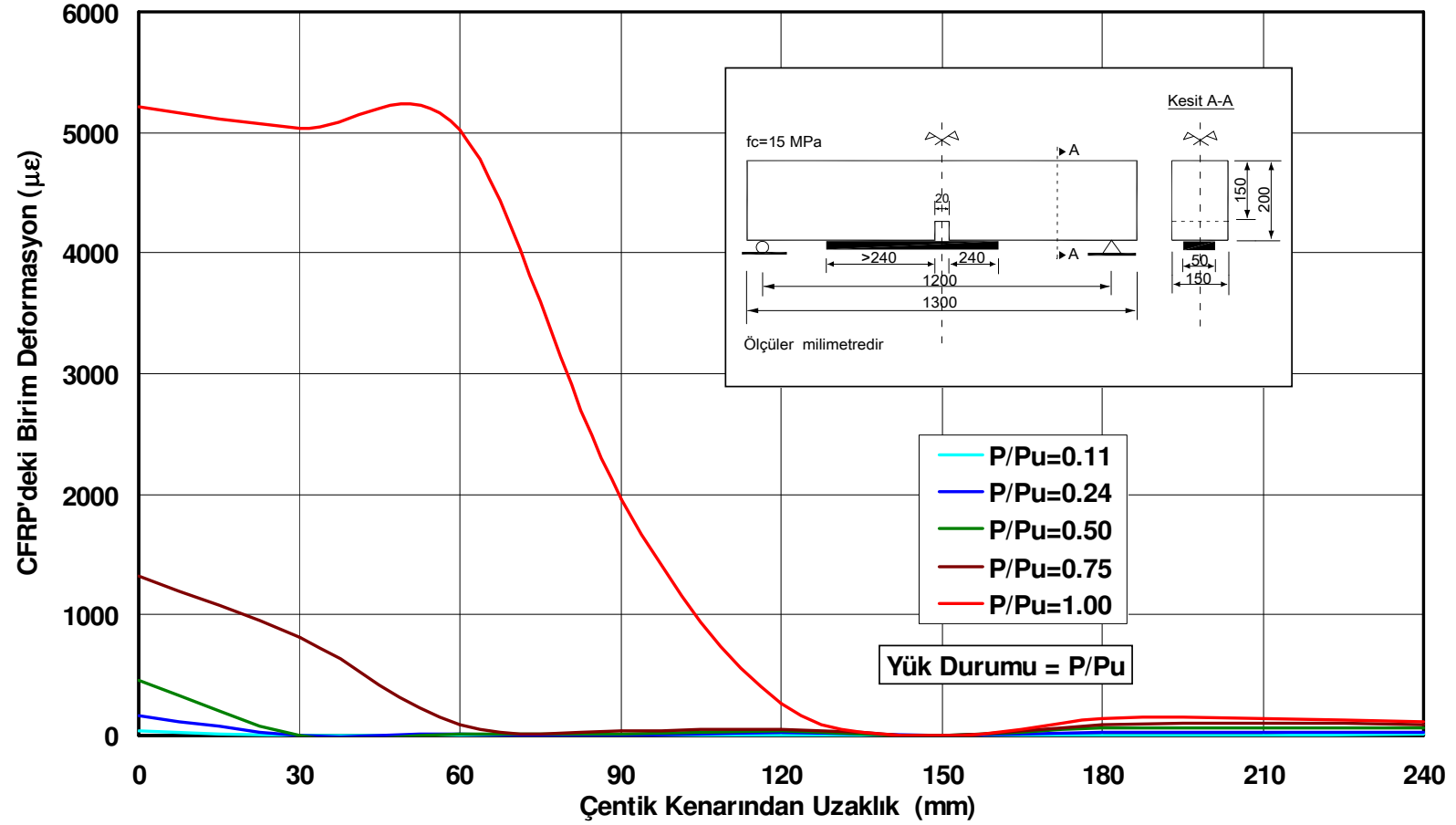
4.7. Deney Elemanı-3

Deneyisel programdaki üçüncü elemanımızın, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 240 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 8,92 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5213,68 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 4,10 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.74$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %25'i kadar olduğu görülmektedir. Ayrıca göçme anında çentiğin 30mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinin % 96'sı mertebesinde. Bu değer 60 mm uzaklıkta da aynı kalmakla beraber bu bölgeden sonraki ölçüm noktalarından alınan değerlerde çentik kenarından uzaklaştıkça birim deformasyon paylaşımında hızlı bir düşüş olduğu gözükmemektedir. 240 mm uzunluğundaki CFRP şeridinin son 120 mm'lik kısmında nerdeyse hiç birim deformasyon oluşmadığı söylenebilir. İlgili değerlere Şekil 4.8'deki grafikten ulaşmak mümkündür.



Resim 4.3. 3. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

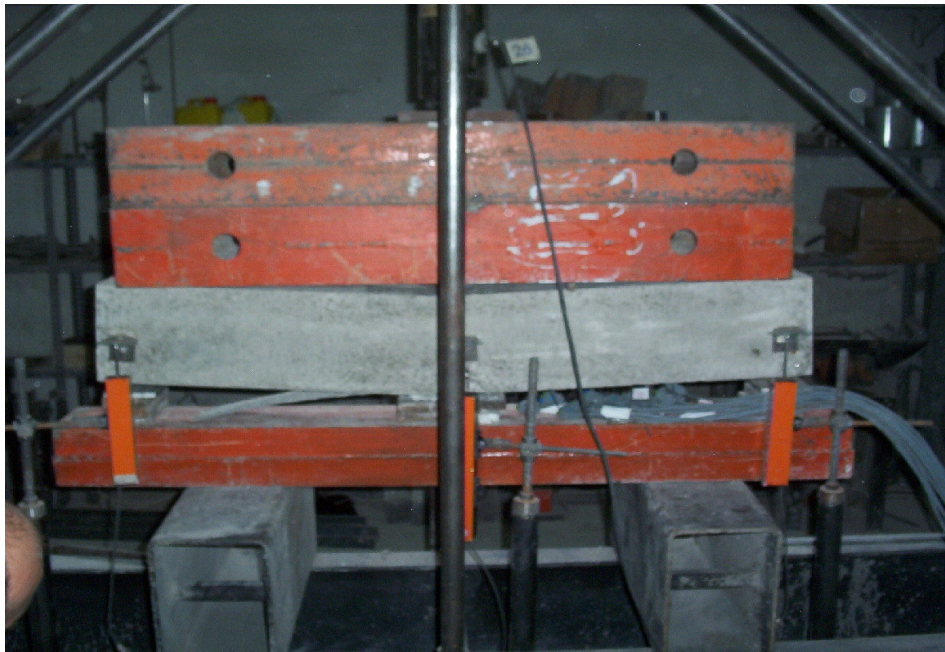
Eleman-3



Şekil 4.8. 3. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

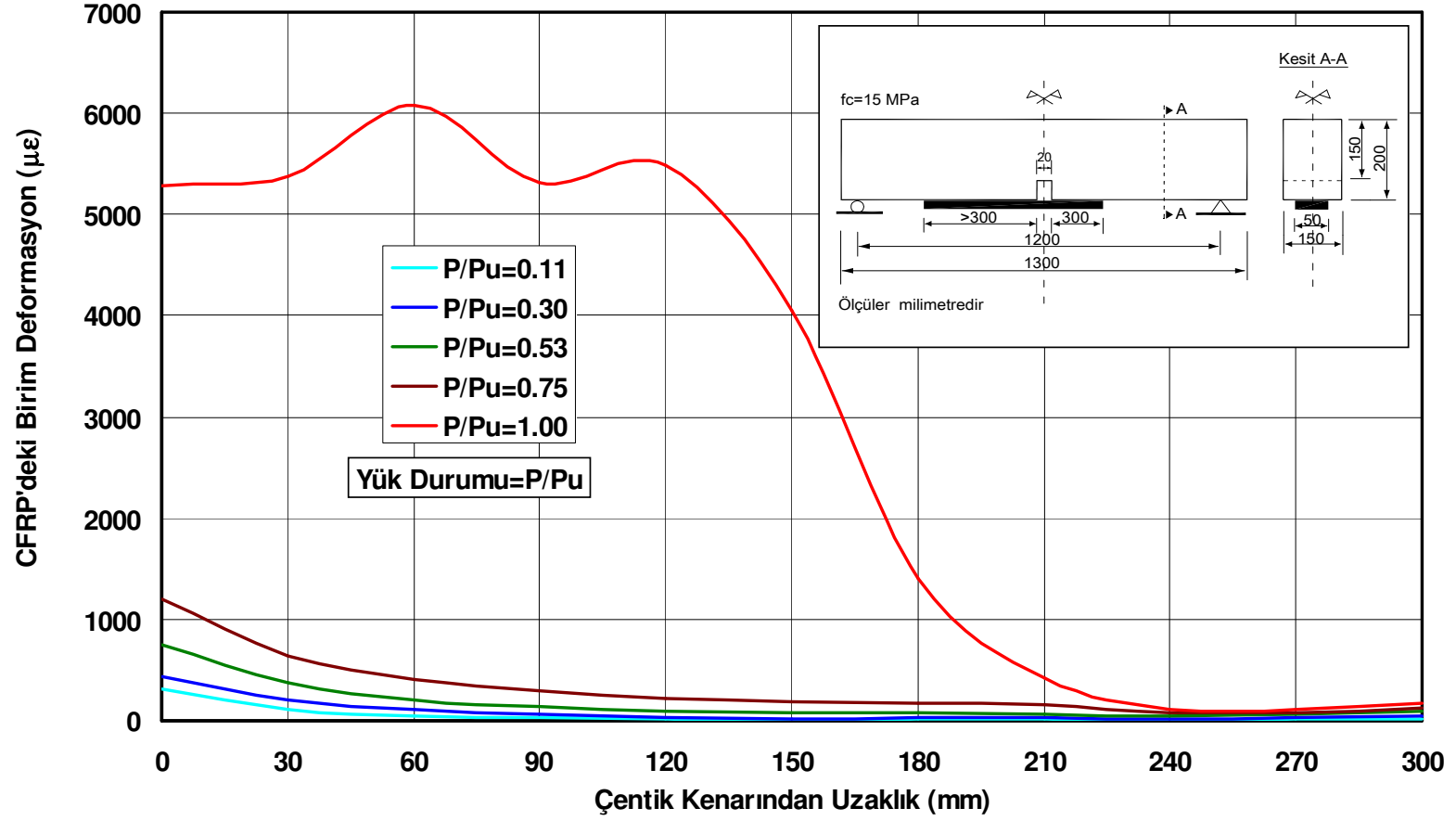
4.8. Deney Elemanı-4

Deneyisel programdaki dördüncü elemanımızın, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 300 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 8,65 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5953,60 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 4,44 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.75$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u=1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %23'ü kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, ilginç bir şekilde çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden % 2 oranında daha fazla çıkmıştır . Bu değer 60 mm uzaklıktaki noktada çentik kenarından % 13 daha fazla çıkmaktadır. 300 mm uzunluğundaki CFRP şeridin son 60 mm'lik kısmında ise çok çok az bir birim deformasyon oluşmaktadır. İlgili değerlere Şekil 4.9'daki grafikten ulaşmak mümkündür.



Resim 4.4. 4. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-4



Şekil 4.9. 4. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

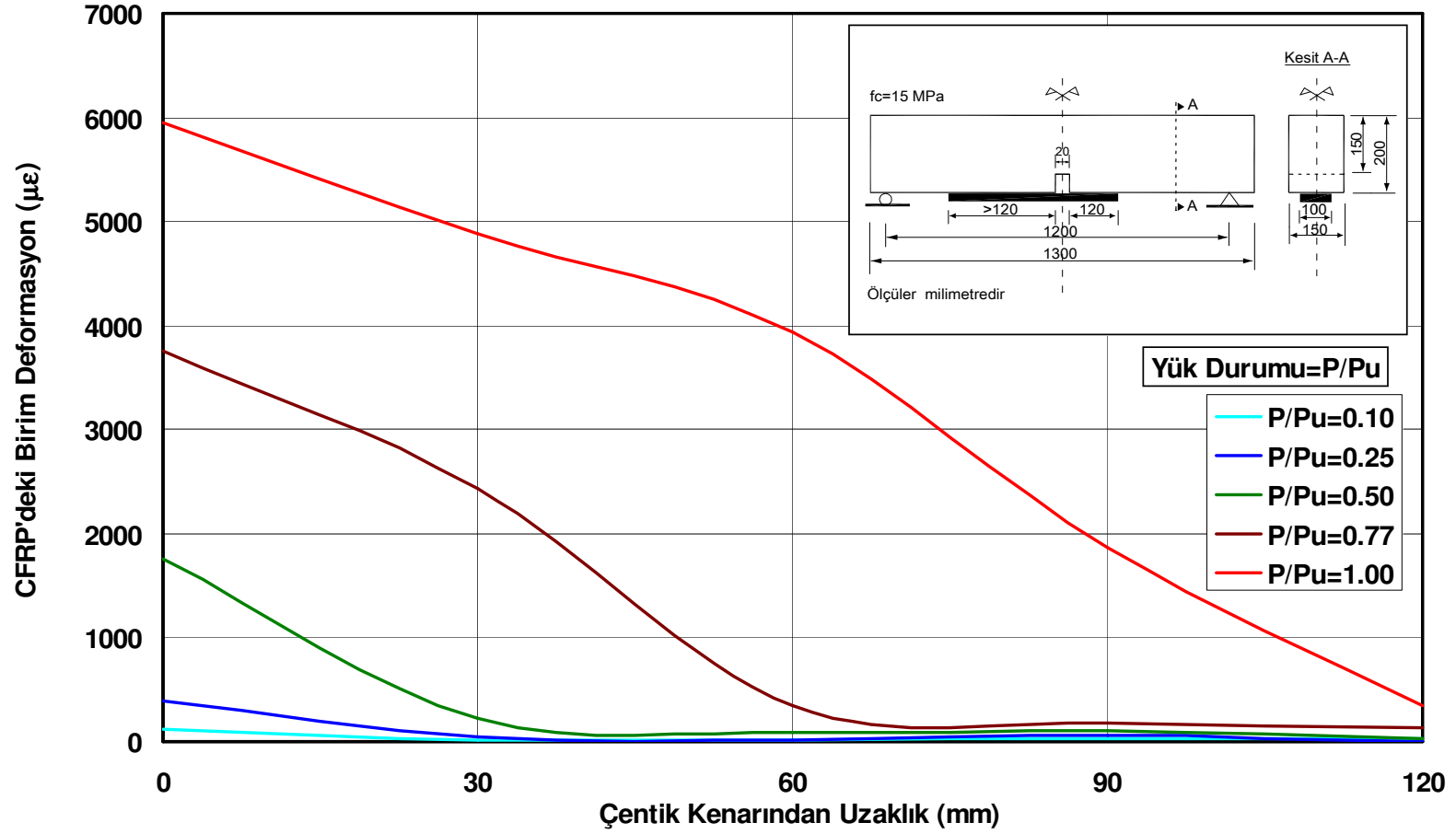
4.9. Deney Elemanı-5

Deneyisel programdaki beşinci elemanımızın, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 120 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 14,19 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5951,16 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 2,67 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u=0.77$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %63'ü kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden % 18 oranında daha az çıkmıştır . Bu değer 60 mm uzaklıktaki noktada, çentik kenarından % 34 daha az çıkmaktadır. 120 mm uzunluğundaki CFRP şeridinin göçme yükü anındaki birim deformasyon değerleri, çentik kenarından CFRP şeridinin son kısmına kadar neredeyse sabit bir oranla azalarak değişmektedir. CFRP şeridinin son kısmında bile 320 $\mu\epsilon$ kadarlık bir birim deformasyon oluşmaktadır. Şekil 4.10'daki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.5. 5. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-5



Şekil 4.10. 5. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

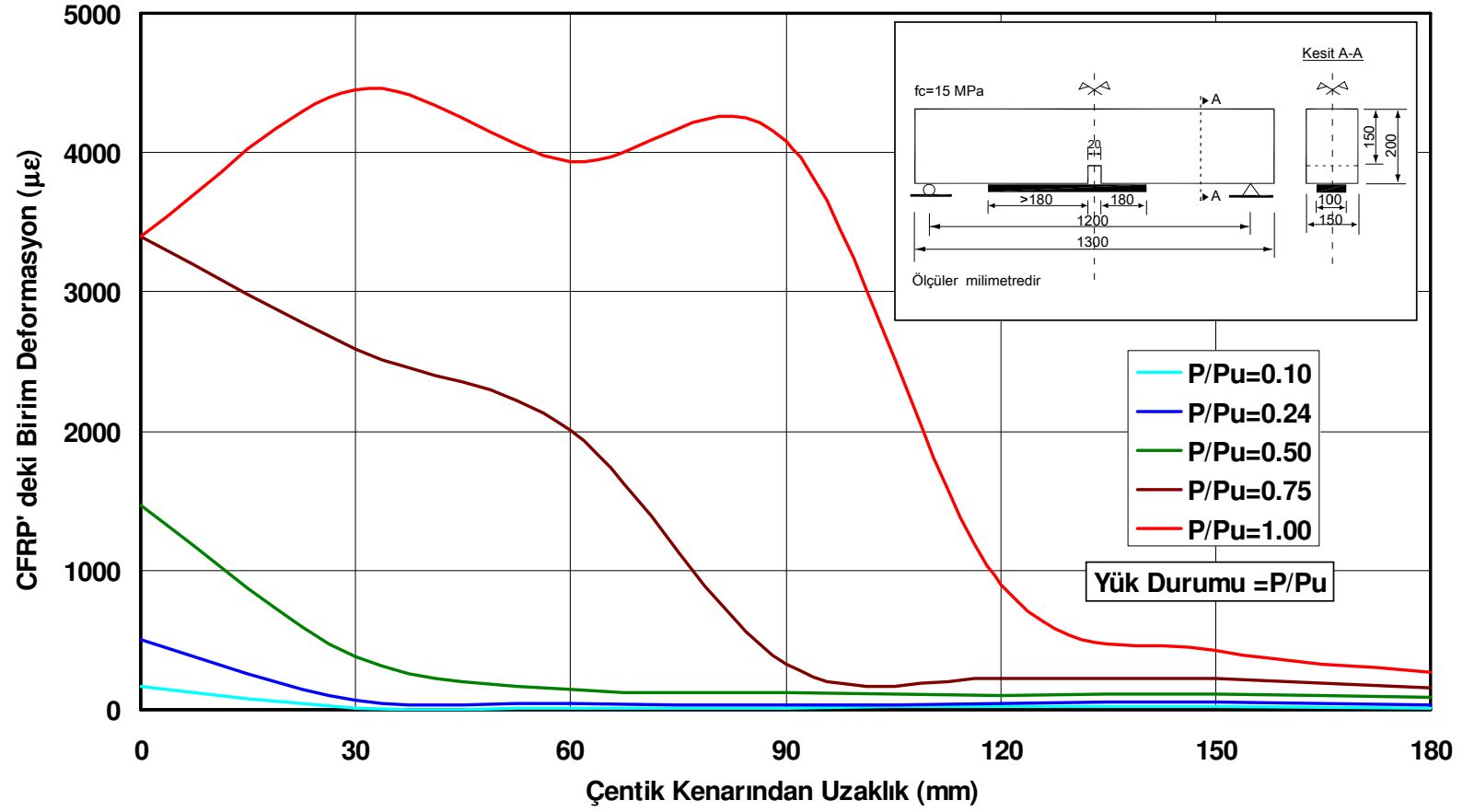
4.10. Deney Elemanı-6

Deneyisel programdaki altıncı elemanımızın, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 180 mm dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 15,00 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 4446,89 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli kullanılan epoksi reçinesinin aderans bölgesinde oluşan kayma gerilmesine dayanım gösteremeyerek yüzeyden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 4,78 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.75$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %43'ü kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden %30 oranında daha fazla çıkmıştır. Bu değer 60 mm uzaklıktaki noktada çentik kenarından, %16 daha fazla çıkmaktadır. 180 mm uzunluğundaki CFRP şeridinin göçme yükü anındaki birim deformasyon değerlerine bakılırsa son 60 mm'lik bölümde çok az bir birim deformasyon oluşmaktadır. Şekil 4.11'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.6. 6. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-6



Şekil 4.11. 6. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

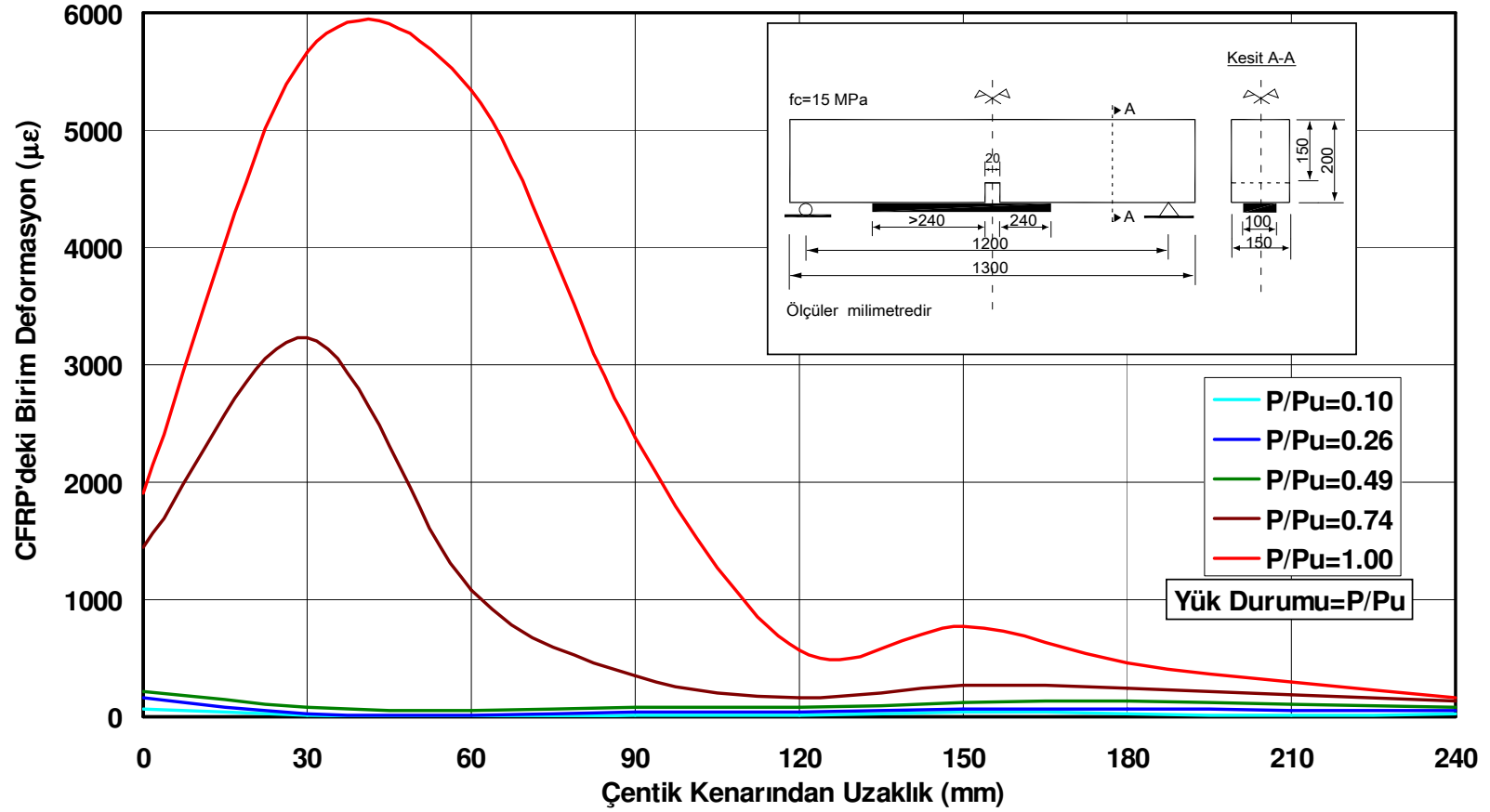
4.11. Deney Elemanı-7

Deneyisel programdaki yedinci elemanımızın, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 240 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 14,08 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5567,66 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 3,67 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u=0.74$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u=1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %75'i kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden yaklaşık 3 kat daha fazla çıkmıştır. Bu noktadan sonraki bölgede fazla bir birim deformasyon oluşumu gözlenmemektedir. 240 mm uzunluğundaki CFRP şeridinin göçme yükü anındaki birim deformasyon değerlerine bakılırsa 150 mm'lik bölümden sonrasında çok çok az bir zorlanma meydana geldiğini görüyoruz. Şekil 4.12'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.7. 7. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-7



Şekil 4.12. 7. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

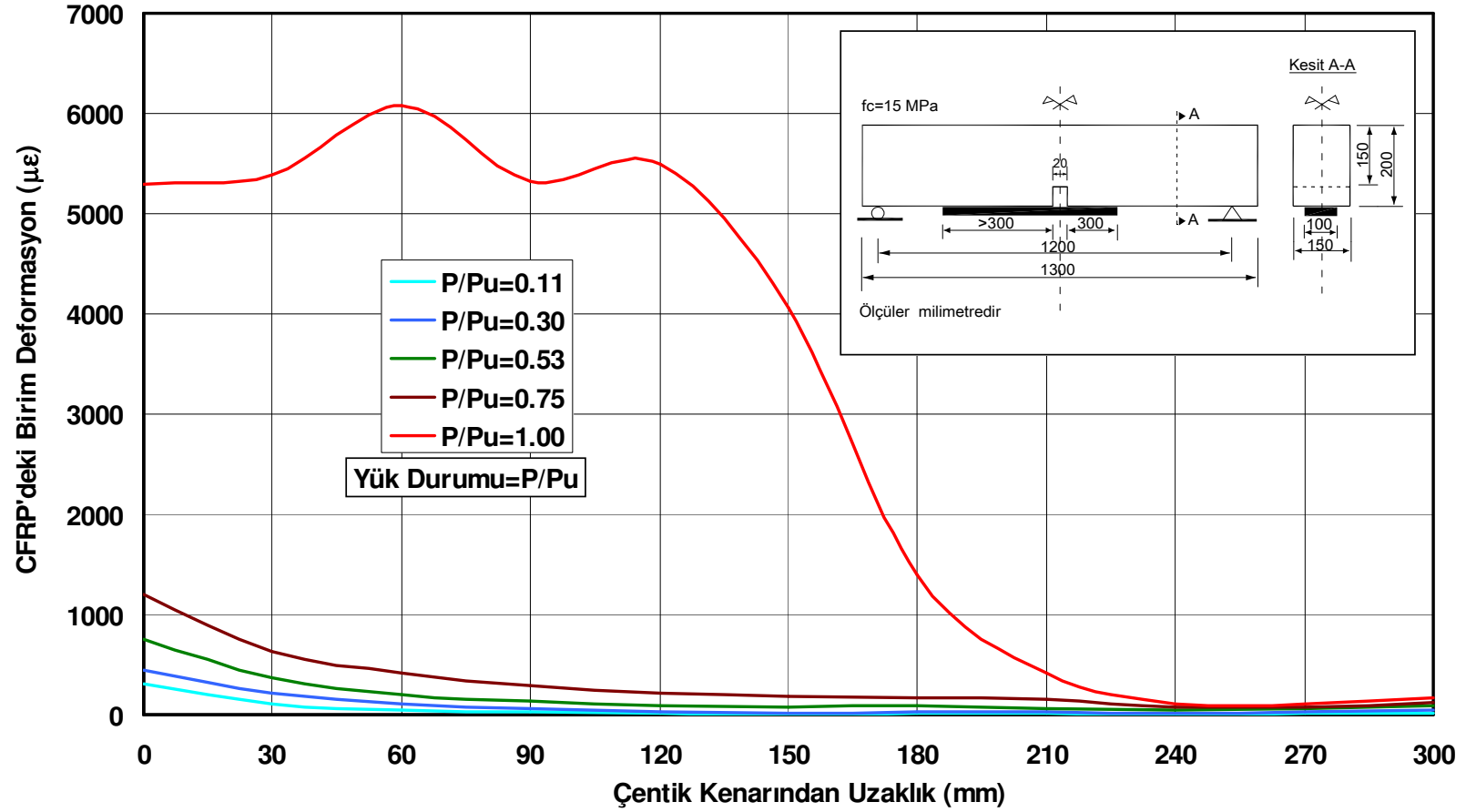
4.12. Deney Elemanı-8

Deneysel programdaki sekizinci elemanımızın, beton basınç dayanımı 15 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 300 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 13,50 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 6080,10 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 3,77 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u=0.75$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u=1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %22'si kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden %2 oranında daha fazla çıkmıştır. 300 mm uzunluğundaki CFRP şeridinin göçme yükü anındaki birim deformasyon değerlerine bakılırsa ilk 150mm lik bölümünde 4000 $\mu\epsilon$ - 6000 $\mu\epsilon$ arasında değişken bir şekilde birim deformasyon değerleri ölçülmüştür. Bu noktadan sonraki bölgede birim deformasyon hızla azalmakta ve son 60 mm'lik bölgede yok denecek kadar azalmaktadır. Şekil 4.13'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.8. 8. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

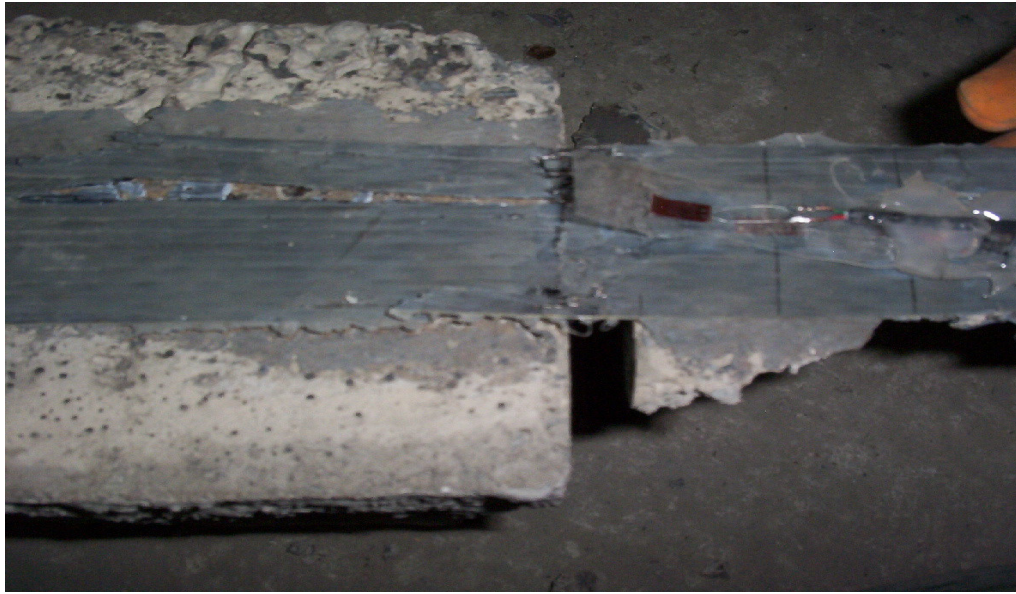
Eleman-8



Şekil 4.13. 8. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

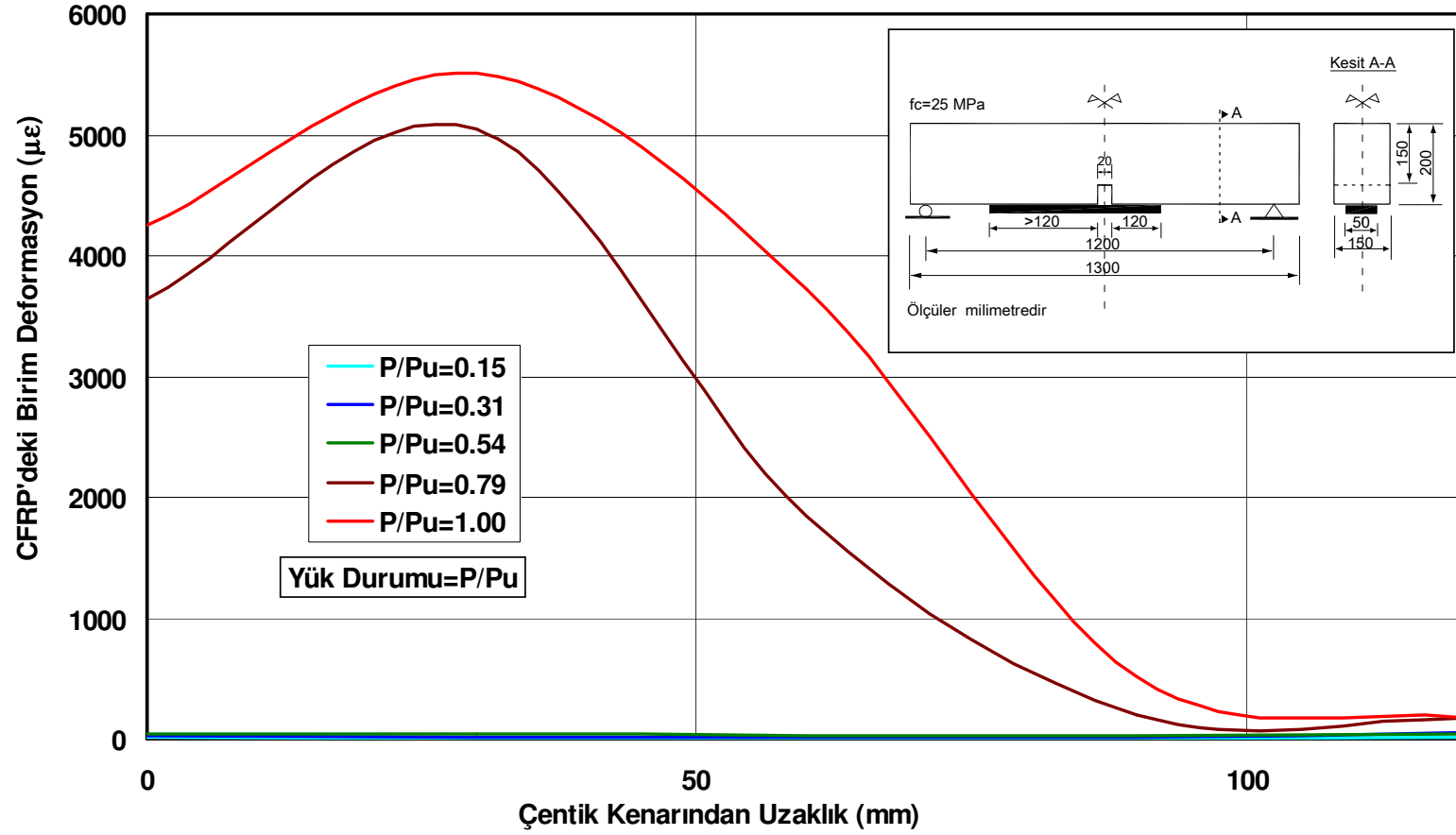
4.13. Deney Elemanı-9

Deneyisel programdaki dokuzuncu elemanımızın, beton basınç dayanımı 25 Mpa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 120 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 9,61 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5504,27 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli, CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 4,57 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.79$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u=1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %85'i kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden % 30 oranında daha fazla çıkmıştır. Yükleme durumu, $P/P_u=0.54$ mertebesine kadar CFRP şeritler neredeyse hiç gerilmeye maruz kalmamıştır. Yükleme arttıkça birden birim deformasyon artışı olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebini betonun o bölgedeki çekme gerilmelerini belli bir yüke kadar karşılamış olabileceğine bağlayabiliriz. Şekil 4.14'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.9. 9. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

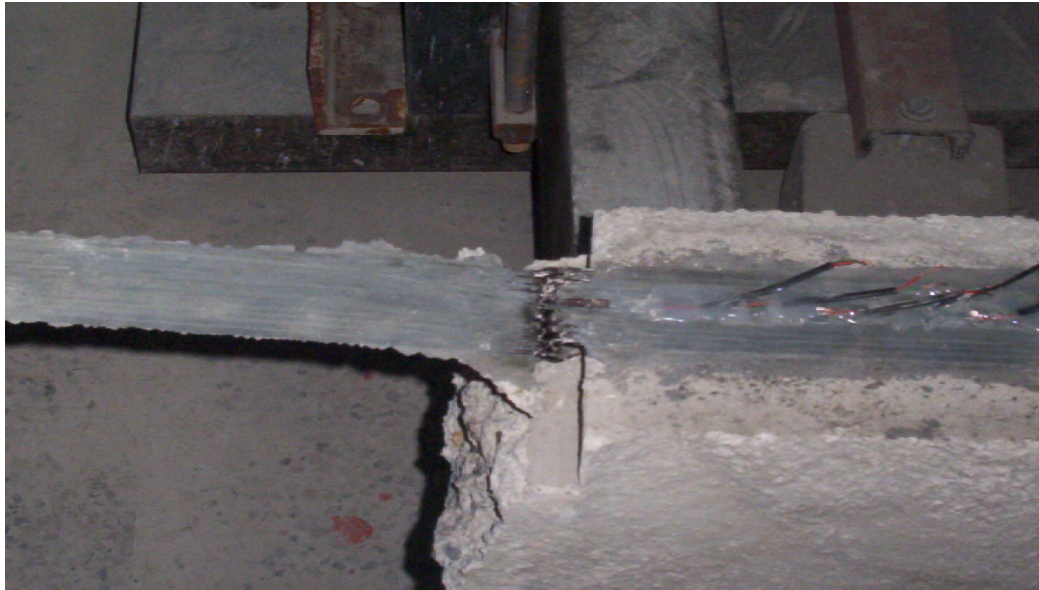
Eleman-9



Şekil 4.14. 9. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

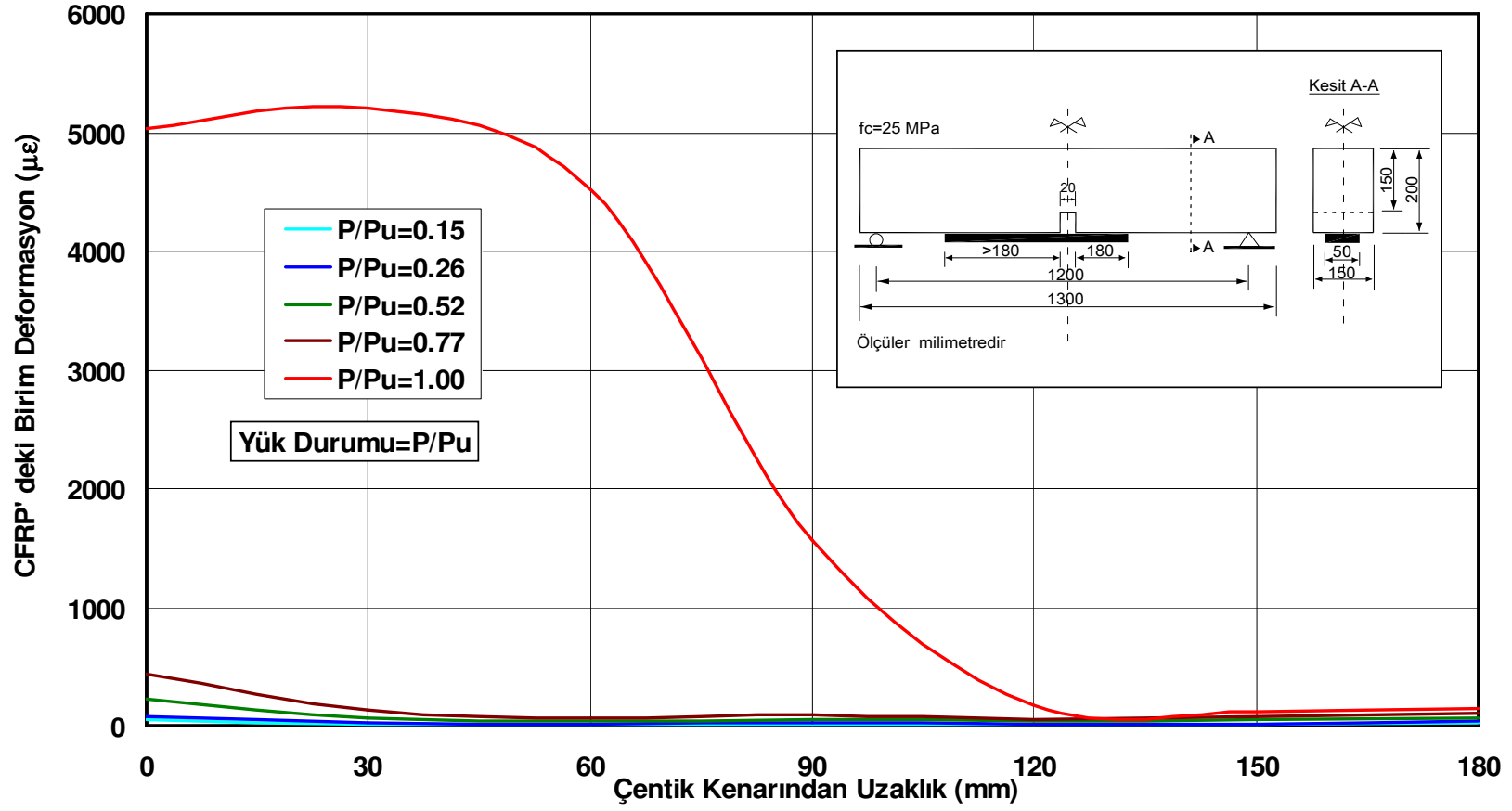
4.14. Deney Elemanı-10

Deneysel programdaki onuncu elemanımızın beton basınç dayanımı 25 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 180 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 8,92 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5201,47 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 4,39 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.77$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %9'u kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden % 4 oranında daha fazla çıkmıştır. Yükleme durumu, $P/P_u = 0.77$ mertebesine kadar CFRP şeritler neredeyse hiç gerilmeye maruz kalmamıştır. Yükleme arttıkça birden birim deformasyon artışı olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebini betonun o bölgedeki çekme gerilmelerini belli bir yüke kadar karşılamış olabileceğine bağlayabiliriz. Şekil 4.15'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.10. 10. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-10



Şekil 4.15. 10. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

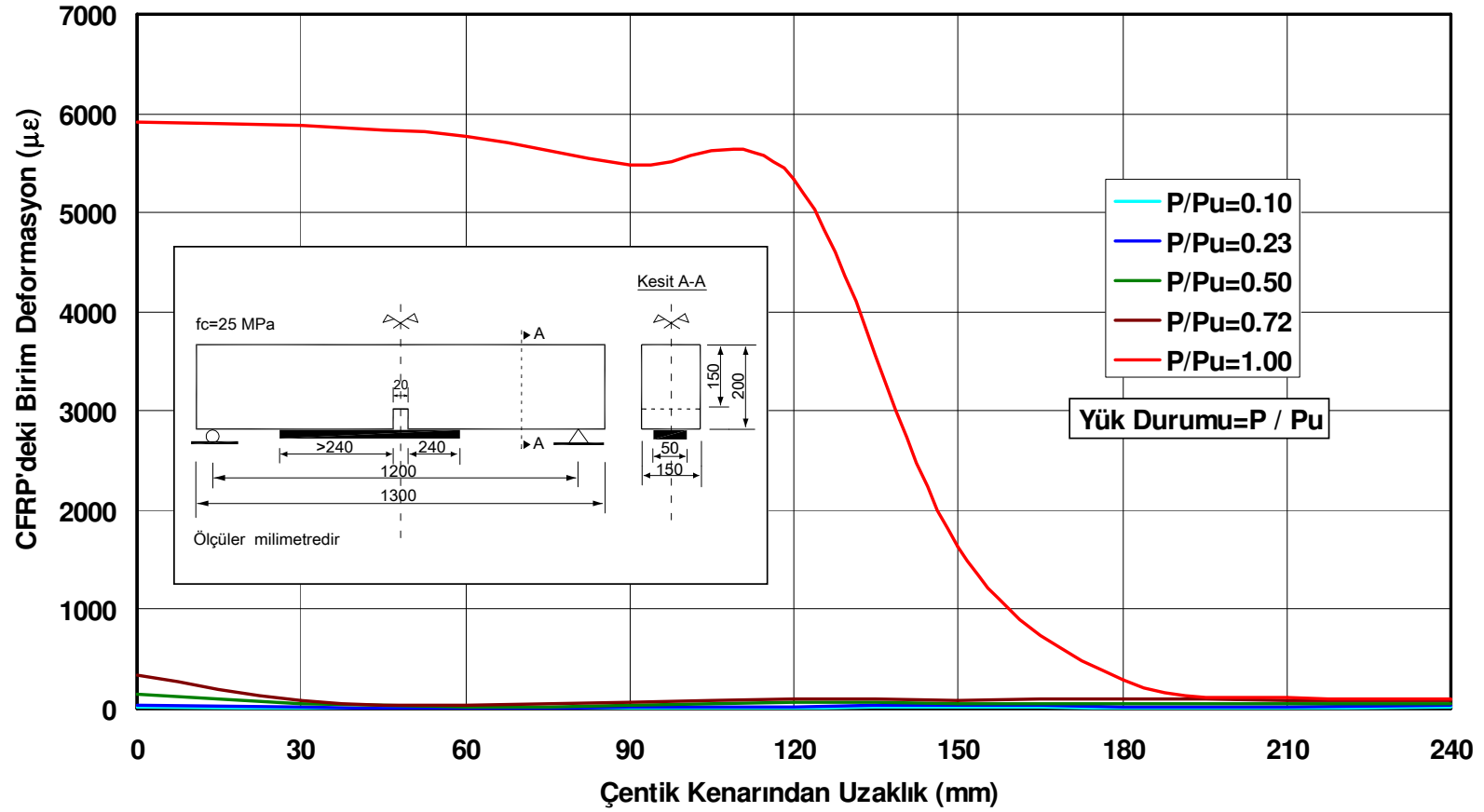
4.15. Deney Elemanı-11

Deneysel programdaki onbirinci elemanımızın beton basınç dayanımı 25 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 240 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 9,32 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5919,41 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 3,30 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.72$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %6'sı kadar olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 60 mm uzağına kadarki bölgede birim deformasyon değerleri hemen hemen birbirine yakın kaydedilmiştir. Yükleme durumu, $P/P_u=0.72$ mertebesine kadar CFRP şeritler neredeyse hiç gerilmeye maruz kalmamıştır. Yüklemenin artması ile ilerleyen yük durumlarında CFRP ani olarak gerilmeye maruz kalmıştır. Bunun sebebini betonun o bölgedeki çekme gerilmelerini belli bir yüke kadar karşılamış olabileceğine durumuna bağlayabiliriz. Şekil 4.16'daki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.11. 11. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-11



Şekil 4.16. 11. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

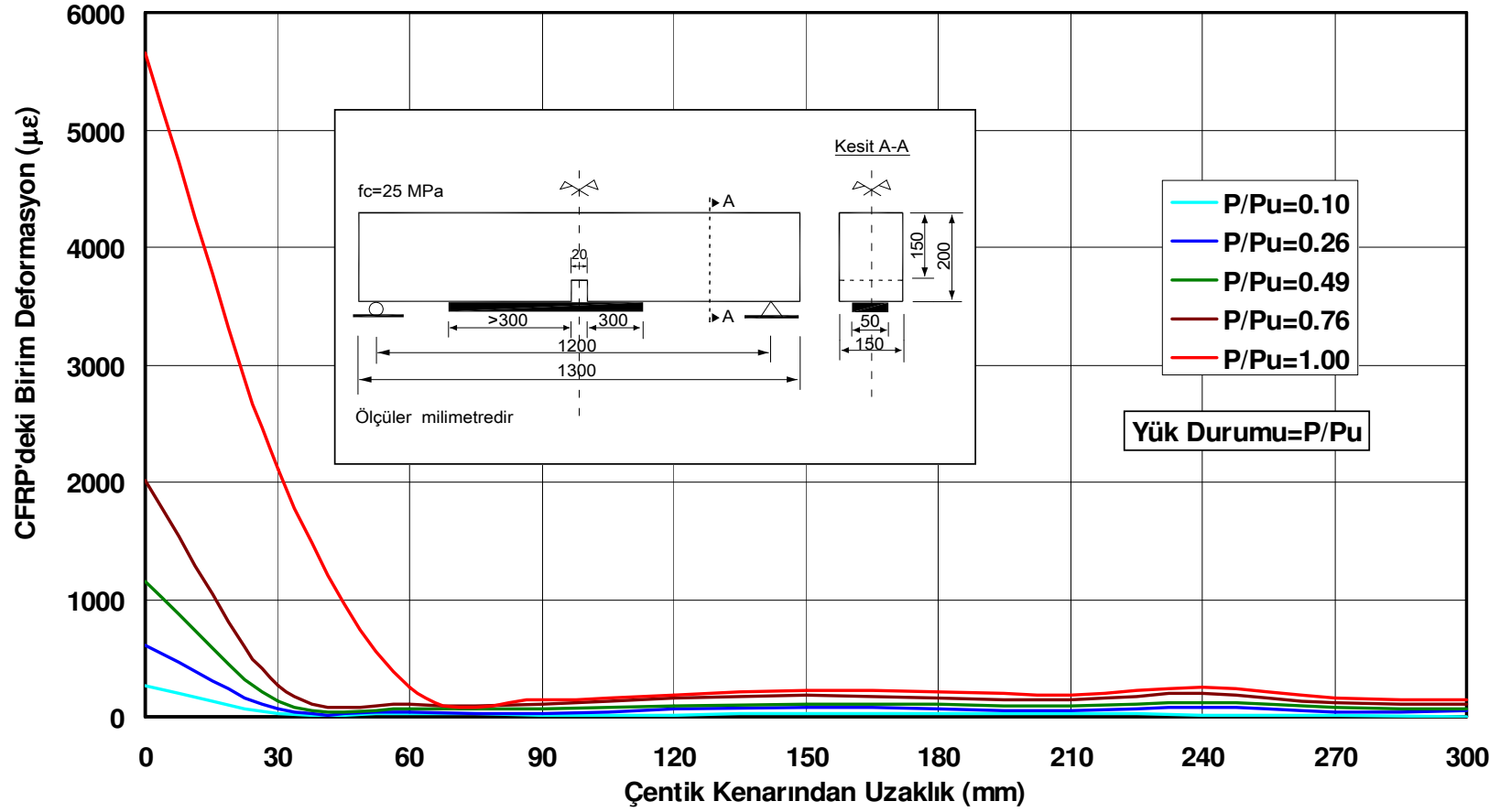
4.16. Deney Elemanı-12

Deneysel programdaki onikinci elemanımızın beton basınç dayanımı 25 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 50 mm, etkili yapıştırma boyu ise 300 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 10,09 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5660,37 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 5,02 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.76$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %35'i kadar olduğu görülmektedir. Bu deney elemanında yüklemenin tüm durumları için CFRP üzerindeki birim deformasyon hep çentiğe çok yakın bir bölgede oluşmuştur. Değişik bir ifade ile, 300 mm yapıştırma boyuna sahip CFRP elemanın son 240 mm'lik bölümünde neredeyse hiç birim deformasyon oluşmamıştır. Şekil 4.17'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.12. 12. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-12



4.17. 12. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

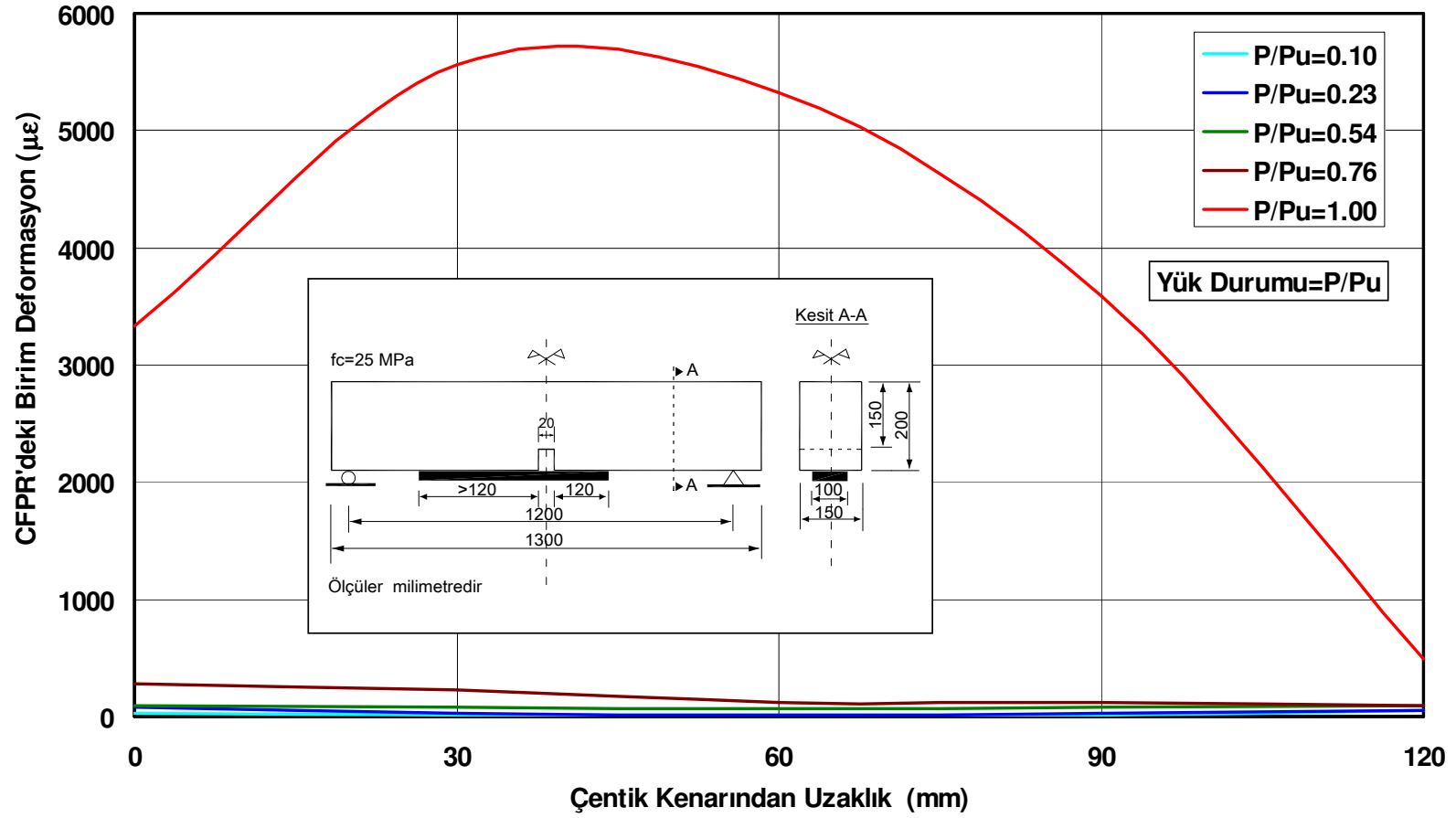
4.17. Deney Elemanı-13

Deneyisel programdaki onüçüncü elemanımızın beton basınç dayanımı 25 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 120 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 14,54 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5557,99 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 2,62 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.76$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %8'i kadar olduğu görülmektedir. Bu deneyde yükleme durumunda, $P/P_u = 0.76$ değerine kadar CFRP şeridinde hemen hemen hiç birim deformasyon oluşmamıştır. Belli bir yükleme düzeyi aşıldıktan sonra beton çatlamış ve birim deformasyon tamamen CFRP şeridine aktarıldığı düşünülmektedir. Şekil 4.18'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.13. 13. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-13



Şekil 4.18. 13. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

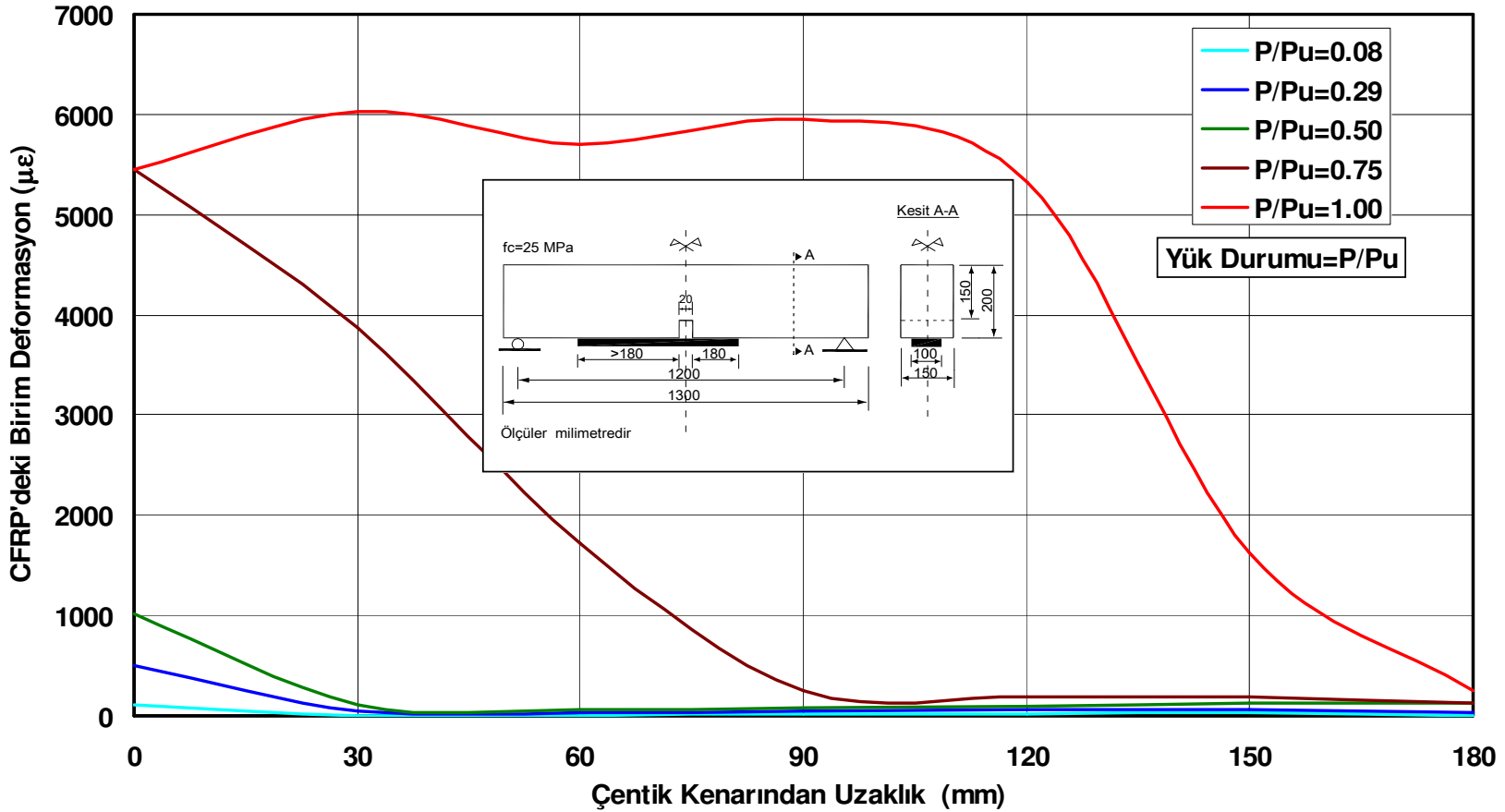
4.18. Deney Elemanı-14

Deneyisel programdaki ondüördüncü elemanımızın beton basınç dayanımı 25 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 180 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 14,43 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 6026,86 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 3,18 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.75$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değeri ile aynı olduğu görülmektedir. Bunun yanında göçme anında çentiğin 30 mm uzağındaki birim deformasyon değeri, çentik kenarındaki birim deformasyon değerinden % 10 oranında daha fazla çıkmıştır. 180 mm'lik CFRP şeridinin göçme anında 120 mm'lik kısmında maksimum birim deformasyon değerine hemen hemen yakın değerler almıştır. Geri kalan bölgede de bir miktar birim deformasyon oluşmuştur. Şekil 4.19'daki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.14. 14. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

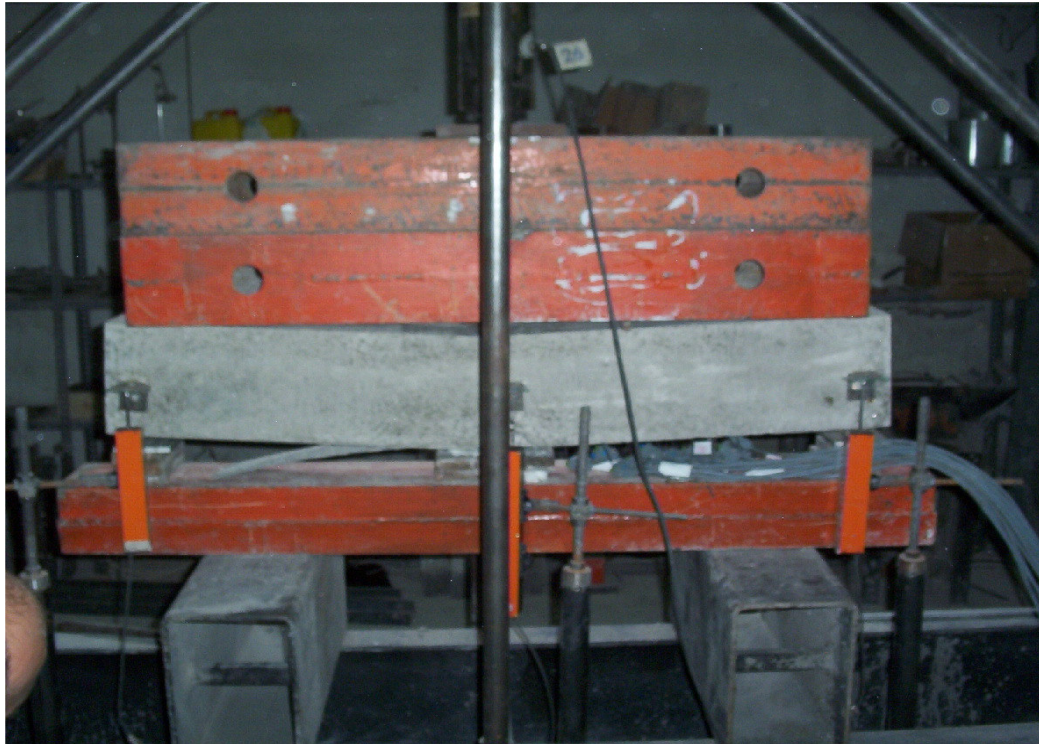
Eleman-14



Şekil 4.19. 14. Elemana ait CFRP gerilme dağılımı grafiği

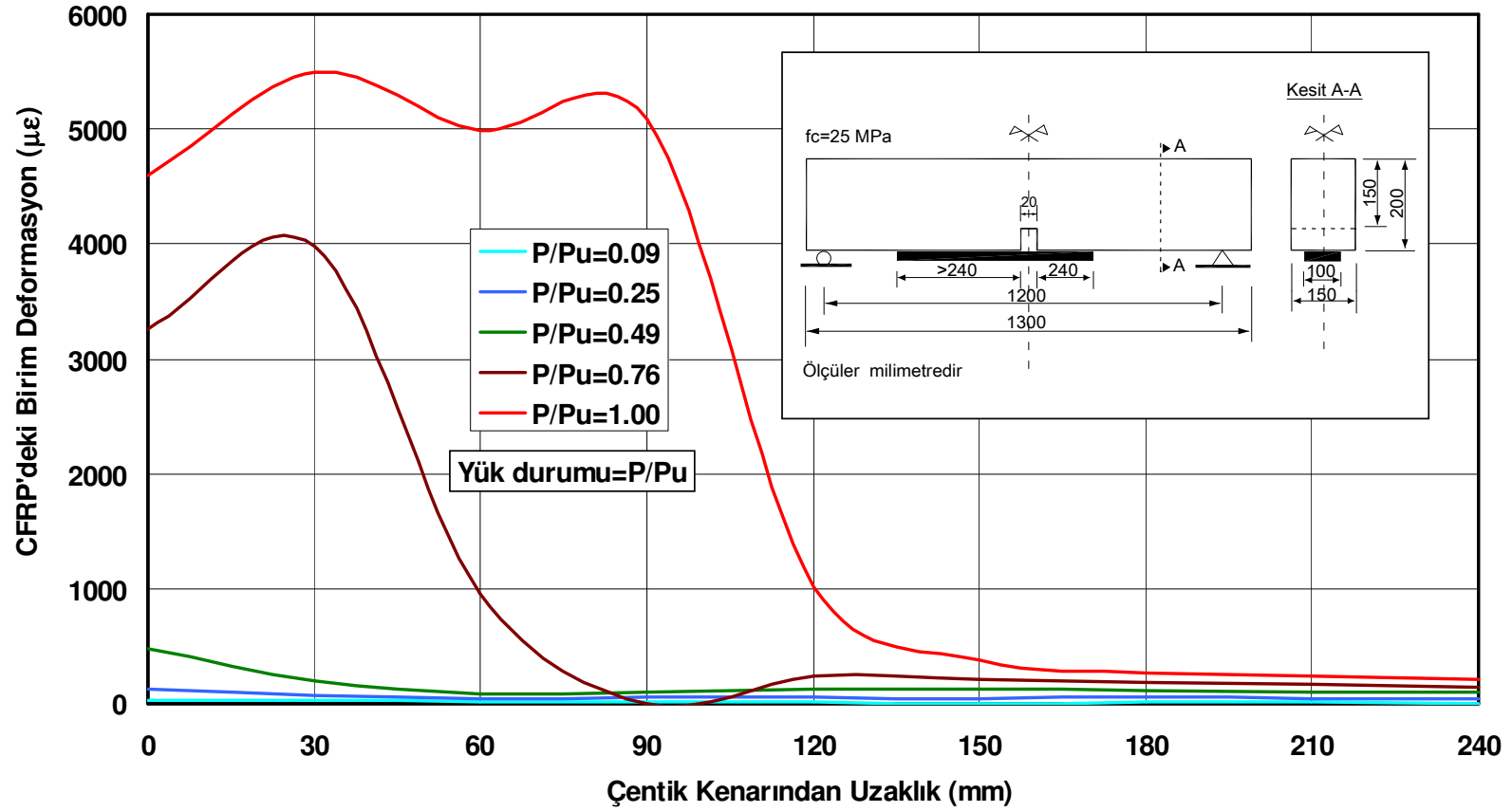
4.19. Deney Elemanı-15

Deneysel programdaki onbeşinci elemanımızın beton basınç dayanımı 25 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 240 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 16,96 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5499,36 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 3,80 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.76$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %71'i kadar olduğu görülmektedir. 240mm'lik etkili yapıştırma boyuna sahip CFRP şeridinin son 90 mm'lik kısmında birim deformasyon değerleri oldukça düşmüştür. İlk 150 mm'lik bölgede ise birim deformasyon dağılımlarının oldukça yoğun olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 4.20'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.15. 15. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-15



Şekil 4.20. 15. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

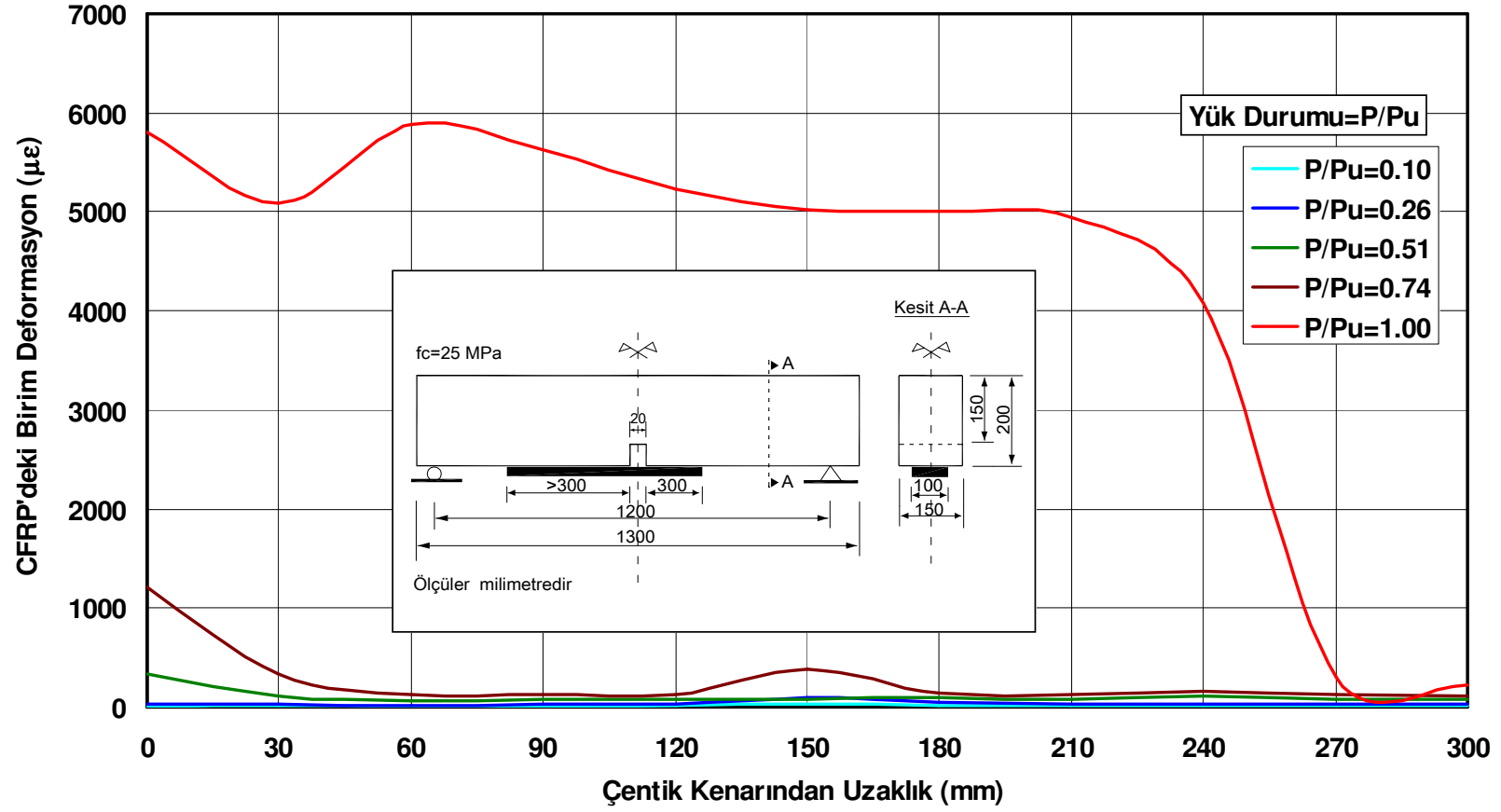
4.20. Deney Elemanı-16

Deneysel programdaki onaltıncı elemanımızın beton basınç dayanımı 25 MPa'dır. Elemana yapıştırılmış olan CFRP şeridin genişliği 100 mm, etkili yapıştırma boyu ise 300 mm'dir. Göçme anında elemana uygulanan maksimum yük 14,62 kN şeklinde ölçülmüştür. Yine göçme anında CFRP şeridinde ölçülen maksimum birim deformasyon değeri 5880,34 $\mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Bu elemanın göçme şekli CFRP şeridinin beton yüzeyini birkaç mm aşağıdan soyarak eleman yüzeyinden ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Göçme anında 6,03 mm'lik bir deplasman oluşmuştur. $P/P_u = 0.74$ yük durumunda iken çentik kenarında oluşan birim deformasyon değeri, $P/P_u = 1$ (Göçme yükü) durumundaki birim deformasyon değerinin %20'si kadar olduğu görülmektedir. 300 mm'lik etkili yapıştırma boyuna sahip CFRP şeridinin sadece son 30 mm'lik kısmında birim deformasyon değerleri oldukça düşük gözükmemektedir. Geri kalan bölgede ise birim deformasyon dağılımlarının maksimum değerlere yakın olduğu görülmektedir. Bu elemanda da yüklemenin belli bir aşamasına kadar CFRP şeridinde birim deformasyon çok çok az olmaktadır. Şekil 4.21'deki grafikten gerekli değerlere ulaşmak mümkündür.



Resim 4.16. 16. Deney elemanının göçmeden sonraki görüntüsü

Eleman-16



Şekil 4.21. 16. Elemana ait CFRP gerilme dağılım grafiği

5. DEĞERLENDİRMELER

5.1. Sonuçların Analitik Hesaplamalarla Karşılaştırılması

Bu bölümde literatürde yaygın olarak kullanılan Ceng&Teng [1 tarafından geliştirilmiş olan analitik denklem ile deney sonuçları karşılaştırılacak ve değerlendirilecektir. Deneysel ve analitik hesaplamalar sonucu elde edilen değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Aşağıda verilmiş olan Eş. 5.1, 5.2 ve 5.3 , tek eksenli kesme testinin sonuçları kullanılarak geliştirilmiştir.

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_{CFRP}}{b_c}}{1 + \frac{b_{CFRP}}{b_c}}} \quad (5.1)$$

$$\beta_l = \begin{cases} 1 & , L_{CFRP} \geq L_e \\ \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_{CFRP}}{L_e} & , L_{CFRP} < L_e \end{cases} \quad (5.2)$$

$$P_{cal} = \alpha \cdot \beta_w \cdot \beta_l \cdot L_e \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_{CFRP} \quad (5.3)$$

β_w :	Kiriş ve CFRP şerit genişliği düzeltme katsayısı
β_l :	CFRP şerit etkili yapıştırma boyu düzeltme katsayısı
b_c :	Kiriş genişliği
b_{CFRP} :	CFRP şerit genişliği
L_{CFRP} :	CFRP şerit yapıştırma boyu
L_e :	Etkili CFRP şerit boyu
f_c :	Beton basınç dayanımı
P_{cal} :	Elemanların hesaplanan göçme yükü
b_{CFRP} :	CFRP şerit genişliği
α :	Cheng and Teng [12] deneylerindeki regresyon katsayısı

Burada Eş. 5.1 ve 5.2 göçme yükü değerini bulmak için kullanılan düzeltme katsayılarıdır. α katsayısı ise Cheng ve Teng' in çalışmalarından alınmış olup, deneysel sonuçların regresyon analizinden elde edilmiştir. Bizim çalışmamızda da bu sayının 0,427 olarak alınabileceği uygun görülmüştür.

Çizelge 5.1'den görülebileceği üzere deney sonuçlarından elde edilen göçme yükleri, analitik hesaplamalarla elde edilen göçme yükü sonuçlarından ortalama % 10 daha fazla çıkmıştır. Bu farkın CFRP etkili yapıştırma boyunun denklemdeki etkisinden kaynaklandığını düşünülmektedir. Deneysel çalışmada, ölçülen birim deformasyon dağılımlarından elde edilen CFRP etkili yapıştırma boyu, analitik hesaplamalar sonucu elde edilen CFRP etkili yapıştırma boylarından daha uzun çıktığı görülmüştür. Bu da deneylerde elde edilen göçme yüklerinin, denklemler ile elde edilen göçme yüklerinden neden daha büyük çıktığını açıklamaktadır.

Çizelge 5.1. Deney sonuçları ve analitik sonuçların karşılaştırılması

Eleman No	DeneySEL Göçme YüKü (kN)	Analitik Hesaplarla Bulunan Göçme YüKü (kN)	*Oran
1	9.32	7.82	1.19
2	8.78	7.82	1.12
3	8.92	7.82	1.14
4	8.65	7.82	1.11
5	14.19	12.51	1.13
6	15	12.51	1.20
7	14.08	12.51	1.13
8	13.5	12.51	1.08
9	9.61	8.89	1.08
10	8.92	8.89	1.00
11	9.32	8.89	1.05
12	10.09	8.89	1.14
13	14.54	14.22	1.02
14	14.43	14.22	1.01
15	16.96	14.22	1.19
16	14.62	14.22	1.03

* Deneydeki göçme yükü değerinin, analitik hesaplarla bulunan göçme yükü değerine oranı

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada çentikli beton kirişlere yapıştırılmış CFRP şeritler ile beton yüzey arasındaki birim deformasyon dağılımı incelenmiştir. Çalışmada incelenen ana değişkenler, beton basınç dayanımı, CFRP yapıştırma boyu ve genişliğidir. 16 adet deney elemanından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Deney elemanları beton kirişlerde bulunabilecek çatlaklı modellemek amacıyla çentikli olarak dökülmüştür. Oluşturulan bu çatlak modeli ile beton yüzeyi ve CFRP şerit arasındaki birim deformasyon dağılımının çatlaktan nasıl etkilendiği araştırılmıştır. CFRP boyunca oluşan gerilme değerleri, her zaman çentik kenarına yakın bölgelerde maksimum değerlerine ulaşmıştır.
- 2) CFRP şerit genişliği, diğer değişkenler olan beton basınç dayanımı ve CFRP yapıştırma boyuna kıyasla göçme yükünün artmasında çok daha etkili olduğu görülmüştür.
- 3) 1, 2 ve 6'ncı deney elemanları hariç, diğer tüm elemanların göçme şekli CFRP şeridinin betondan ayrılması sonucu gerçekleşmiştir. Buda göstermiştir ki, Bu göçme modu, diğer göçme modu olan epoksi reçinesinin ayrılması durumundan daha fazla gerçekleşmektedir. CFRP – Beton ayrılması durumundaki birim deformasyon değerleri, epoksi reçinesinin ayrılması durumundan her zaman daha fazla çıkmıştır.
- 4) CFRP şeridinin betonla beraber ayrılması durumundaki göçmelerde CFRP şeridi ile beraber gelen beton tabakası kalınlığı çentik ağzı kenarında artmaktadır. CFRP şeridinin diğer ucunda ayrılan beton tabakası kalınlığı, yine o bölgede elde edilen birim deformasyon dağılımı ile benzeşmektedir.
- 5) Deney elemanlarındaki değişkenler birim deformasyon dağılımlarında hemen hemen benzer etkiler göstermiştir. Buna göre beton basınç dayanımını ve CFRP şerit genişliğini arttırmak, göçme anındaki birim deformasyon değerlerini % 6

oranında arttırmıştır. 180 mm yapıştırma boyuna sahip CFRP şeritlerle güçlendirilmiş iki adet deney elemanı hariç diğer elemanlarda, CFRP şerit boyunu artırmak, birim deformasyon değerlerini de arttırmıştır. 180 mm yapıştırma boyuna sahip bu iki elemanda beklenenden daha düşük değerlerde göçmesinin nedeni, göçme şeklinin epoksi reçinesinin ayrılmasından dolayı olduğu anlaşılmaktadır. Bu iki elemandan en düşük CFRP yapıştırma boyuna sahip 120 mm'lik diğer elemanlardan daha düşük birim deformasyon değerleri ölçülmüştür. Bu sonuçlar göstermiştir ki, göçme şekli, CFRP ile güçlendirilmiş elemanların performansında oldukça etkilidir.

- 6) Gerilme değerleri göçme yükünün % 50'sine kadar yavaşça artmış, bu noktadan sonra gerilme değerleri hızla yükselmiş ve çentik kenarlarında yoğunlaşmaya başlamıştır.
- 7) Beton basınç dayanımı 25 MPa olan deney elemanlarında etkili CFRP yapıştırma boyu, beton basınç dayanımı 15 MPa olan deney elemanlarından % 23 daha fazla çıkmıştır. Buna göre beton basınç dayanımını yüksek tutmak, Yapıştırılan CFRP şeridinin etkili uzunluğunu arttırmıştır.
- 8) CFRP şerit genişliğinin artması, CFRP şeridinin etkili uzunluğunun da artmasını sağlamıştır. Buna göre 100 mm genişliğindeki CFRP şeritleri, 50 mm genişliğindeki şeritlerden % 17 daha etkili CFRP şerit boyuna sahiptir.
- 9) Deney sonucunda elde edilen göçme yükleri, analitik yöntemle elde edilen değerlerden yaklaşık % 10 civarında fazla çıkmıştır. Bu farkın oluşmasının esas nedeni ise denklemdeki CFRP etkili yapıştırma boyundan kaynaklanmaktadır. Deney sonunda gerilme dağılımları kullanılarak bulunan CFRP etkili yapıştırma boyu, analitik yöntemle elde edilen değerlerden daha uzun çıkmıştır.

KAYNAKLAR

1. Chen, J.F., Teng, J.G., “Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete,” *Journal Structural Engineering*, 127(7):784–791 (2001).
2. Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L., “FRP-strengthened RC structures,” *Chichester Wiley*, (2002).
3. Smith, S.T., Teng, J.G., “FRP-strengthened RC beams-I: review of debonding strength models,” *Engineering Structural* , 24(4):385–395 (2002).
4. Smith, S.T., Teng, J.G., “FRP-strengthened RC beams-II: assessment of debonding strength models,” *Engineering Structural* , 24(4):397–417 (2002).
5. Smith, S.T., Teng, J.G., “Shear-bending interaction in debonding failures of FRP-plated RC beams,” *Advanced Structural Engineering* , 6(3):183–199 (2003).
6. Oehlers, D.J., Moran, J.P., “Premature failure of externally plated reinforced concrete beams,” *Journal Structural Div. Am. Soc. Civil Engineering* ,116(4):978–995 (1990).
7. Teng, J.G., Smith, S.T., Yao, J., Chen, J.F., “Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs,” *Construction and Building Materials* ,17(6–7):447–462 (2003).
8. Mohamed, A. M.S., Oehlers, D.J., Bradford, M.A., “Shear peeling of steel plates bonded to the tension faces of RC beams,” *Journal Structural Engineering* ,127(12):1453–1460 (2001).
9. Mohamed, A. M.S., Oehlers, D.J., Bradford, M.A., “Interaction between flexure and shear on the debonding of RC beams retrofitted with compression face plates,” *Advanced Structural Engineering* , 5(4):223–30 (2002).
10. Oehler, D.J., Park, S.M., Mohamed Ali M.S., “A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs. *Composites: Part A* , 34(12):887–97 (2003).
11. Chen, J.F., Teng, J.G., “Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding,” *Construction and Building Materials* , 17(1):27–41 (2003).
12. Yao, J., Teng, J.G., Chen, J.F., “Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints,” *Composites Part B* , 36(4):99–113 (2005).

13. Bizindavyi, L., Neale, K.W., “Experimental and theoretical investigation of transfer lengths for composite laminates bonded to concrete”. ***Proceedings, Annual Conference of Canadian Society for Civil Engineering***, Canada, 51-60 (1997).
14. Bizindavyi, L., Neale, K.W., “Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete,” ***Journal Composite Construction***, 3(4):153–160 (1999).
15. Chajes, M.J., Finch, Jr., W.W., Januszka, T.F., Thomson, Jr. T.A., “Bond and force transfer of composites material plates bonded to concrete,” ***ACI Structural Journal***, 93(2):209–217 (1996).
16. Chajes, M.J., Januszka, T.F., Mertz, D.R., Thomson, Jr. T.A., Finch, Jr. WW., “Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics,” ***ACI Structural Journal***, 92(3):295–303 (1995).
17. Taljsten, B., “Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete,” ***International Journal of Adhesion and Adhesives***, 17(4):319–327 (1997).
18. Brosens, K., Van, Gemert, D., “Anchoring stresses between concrete and carbon fiber reinforced laminates,” ***Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Proceedings of the Third International Symposium***, Japan Concrete Institute, 271–278 (1997).
19. Fukuzawa, K., Numao, T., Wu, Z., Yoshizawa, H., Mitsui, M., “Critical strain energy release rate of interface debonding between carbon fibre sheet and mortar,” ***Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Proceedings of the Third International Symposium***, Japan Concrete Institute, 295–302 (1997).
20. Hiroyuki, Y., Wu, Z., “Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened member subject to tension. Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures,” ***Proceedings of the Third International Symposium***, Japan Concrete Institute, 287–294 (1997).
21. Kobatake, Y., Kimura, K., Ktsumata, H. A., “Retrofitting method for reinforced concrete structures using carbon fibre. Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications,” ***Elsevier Science***, 435–450 (1993).
22. Maeda, T., Asano, Y., Ueda, T., Kakuta, Y. A., “Study on bond mechanism of carbon fiber sheet,” ***Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Proceedings of Third International Symposium***, Japan, 287–295 (1997).

23. Neubauer, U., Rosta'sy, F.S., "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates," *Proceedings of Seventh International Conference on Structural Faults and Repairs*, Edinburgh, 109–118 (1997).
24. Swamy, R.N., Jones, R., Charif, A., "Shear adhesion properties of epoxy resin adhesives," *Proceedings of International Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete*, London, 741–755 (1986).
25. Van, Gemert, D., "Force transfer in epoxy-bonded steel-concrete joints," *International Journal Adhesion and Adhesives*, (1):67–72 (1980).
26. De Lorenzis, L., Miller, B., Nanni, A., "Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete," *ACI Material Journal*, 98(3):256–264 (2001).
27. Ziraba, Y.N., Baluch, M.H., Basunbul, A.M., Azad, A.K., Al-Sulaimani, G.J., Sharif, I.A., "Combined experimental—numerical approach to characterization of steel-glue-concrete interface", *Material of Structure*, (28): 518–525 (1995).
28. Garden, H. N., Quantrill, R.J., Halloway, L.C., Thorne, A.M., Parke G.A.R., "An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams," *Construction and building materials*, (12): 203-219 (1997).
29. Tim Stratford ve John Cadei, "Elastic analysis of adhesion stresses for the design of a strengthening plate bonded to a beam," *Construction and building materials*, (20): 34-35 (2005).
30. Sharma, S.K., Mohamed Ali, M.S., Goldar, D., Sikdar, P.K., "Plate-concrete interfacial bond strength of FRP and metallic plated concrete specimens," *Composites part B*, (37): 54-63 (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KURTIPEK, Yasin Fırat
 Uyuğu : T.C
 Doğum tarihi ve yeri : 31.07.1982 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0(532)6468566
 e-mail : kurtipek@mynet.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Müh. Bölümü	2007
Lisans	Samsun 19 Mayıs Üniv / İnşaat Müh.Bölümü	2004
Lise	Özel Samanyolu Anadolu Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007	Enka inşaat	Şantiye mühendisliği
2007	Ferdi mühendislik	Betonarme yapıların projelendirilmesi
2006	Kayhan mühendislik	Betonarme yapıların projelendirilmesi
2006	DM mühendislik	Karayollarının projelendirilmesi
2006	SS. Farilya konut kooperatifi	Şantiye kontrol mühendisliği
2006	İlkselka prefabrik yapılar	Çelik yapıların projelendirilmesi
2005	Özdemir mimarlık mühendislik	Betonarme yapıların projelendirilmesi

Yabancı Dil

İngilizce, Rusça

Hobiler

Spor, Müzik, Otomobiller, Bilgisayar teknolojileri, Atıcılık