Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development
UMAGD, (2020) 12(2), 380-387.
10.29137/umagd.697870
Cilt/Volume:12 Sayı/Issue:2 Haziran/June 2020
Araştırma Makalesi / Research Article

Açılı CFRP Ankrajlı Şeritler ile Beton Yüzey Arasındaki Gerilme-Deformasyon Davranışı için Yeni Bir Model Önerisi

A New Novel Model Proposal For Bond-Slip Behavior Between Angular CFRP Fan Type Anchoraged CFRP Strip and Concrete Surface

Rahim Ghoroubi [1], Ömer Mercimek [2], Özgür Anıl [3]

[1]*Çankaya Üniversitesi,Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, TÜRKİYE*
[2]*Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, TÜRKİYE*
[3]*Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, TÜRKİYE*

***Başvuru/Received**: 26/02/2020 **Kabul / Accepted**: 06/03/2020 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 19/04/2020*
***Son Versiyon/Final Version**: 30/06/2020*

Öz

Betonarme, çelik veya yığma yapılar birçok farklı nedenden dolayı güçlendirilmeleri yeya onarılmaları gerekmektedir. Karbon takviyeli elyaf kumaşlar (CFRP) deprem performansı yetersiz yapıların onarım ve güçlendirme çalışmalarında son 20 yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. CFRP ile geliştirilen onarım ve güçlendirme detaylarında önemli olan tasarım kriterlerinden biri CFRP elemanların yüzeyden soyulmalarını geciktirmektir. Bu amaçla CFRP ile geliştirilen güçlendirme detaylarında ankrajların kullanılması artış göstermiştir. Güçlendirme detaylarında kullanılan fan tipi CFRP ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili gerilme-kayma deplasmanı modellerinin ankrajsız CFRP şeritlere göre çok daha sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu konudaki sınırlı sayıdaki çalışmada ankrajlar CFRP şeritlere uygulanan eksenel çekme kuvvetine göre 90° açılı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yapılan literatür taramasında eksenel yüke göre değişik açılarda yerleştirilen ankrajlı CFRP şeritlerin eksenel kuvvet taşıma gücü ve gerilme kayma deplasmanı modelleri ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle deneysel bir çalışma düzenlenmiş ve 28 adet beton yüzeyine yapıştırılan açılı ankrajlı CFRP şerit deney elemanı eksenel çekme kuvveti etkisinde yazarlar tarafından tasarlanan bir deney düzeneği kullanılarak test edilmiştir. Deneysel çalışmada incelenen değişkenler CFRP şerit genişliği ve CFRP şeritler üzerindeki CFRP fan tipi ankrajların açılarıdır. Deneysel çalışma sonucunda açılı ankrajlı CFRP şeritlerin maksimum taşıma gücü değerlerinin hesaplanması için bir denklem ve yeni bir gerilme kayma deplasmanı modeli önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"CFRP, Güçlendirme, Açılı Fan Tipi CFRP Ankraj, Gerilme- Kayma Deplasmanı Modeli"

Abstract

In the reinforced concrete, masonry or steel structures should be strengthened or repaired. Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) have been widely used for the last 20 years for repairing and strengthening of inadequate earthquake performance of the structures. One of the most important developed design criteria in the retrofit and strengthening details are using CFRP to delay the debonding of the CFRP reinforcement elements. For this reason, the uses of anchors in the reinforcement details developed by using CFRP and also researches on this subject have increased substantially. In the literature, research on bond-slip models developed for fan type CFRP anchors and anchored CFRP strips used in reinforcement details are limited in comparison to non-anchored strips. However, in studies on this subject, anchors are placed at 90° to the axial tensile force applied to the CFRP strips. Axial force-bearing strength and bond-slip models of CFRP strips with the different anchored angle under axial tensile strengths have not been found in the literature. For this reason, an experimental study was carried out and 28 specimens of angled anchored CFRP strip test specimen, which was bonded to the concrete surface, was tested under the influence of axial tensile force with an experimental setup designed by the authors. The variables studied in the experimental study are the CFRP strip width and the fan type CFRP anchor angle placed on the CFRP strip. As a result of the experimental study, an equation was proposed for calculating the bearing strength values of angled anchored CFRP strips and a new proposal for the bond-slip model was developed.

Key Words

"CFRP, Strengthening, Angular Fan Type CFRP Anchor, Bond-slip Model"

***Sorumlu Yazar:** rahimghoroubi@cankaya.edu.tr*

1. Giriş

Karbon takviyeli elyaf kumaşlar ağırlıklarının hafif olması, çok yüksek mekanik dayanımları, ince olmaları nedeniyle uygulandıkları yapı elemanının mimari geometrik boyutlarını değiştirmemeleri, yapıya ek bir ağırlık oluşturmamaları nedeniyle yapının dinamik karakteristiklerini değiştirmemeleri, çevresel etkilere karşı yüksek dirençleri gibi birçok sebepten dolayı güçlendirme ve onarım uygulamalarında tercih edilen bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Karbon takviyeli elyaf kumaşlar (CFRP) ile geliştirilen güçlendirme detaylarında dikkat edilmesi gerekli olan önemli noktaların başında, güçlendirilecek yapıya yapıştırılan CFRP elemanların yüzeyden soyulmasını geciktirerek, CFRP'nin yüksek mekanik dayanım değerlerinin avantajlarından mümkün olan en büyük oranda yararlanılması gelmektedir. Bu nedenle araştırmalar bu konuya yönelmiş ve CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarında çeşitli türde ankrajlar kullanılarak CFRP güçlendirme bileşenlerinin yüzeyden soyulmalarını geciktirmeye yoğunlaşılmıştır. Yapılan araştırmalar özellikle CFRP kullanılarak geliştirilen güçlendirme detaylarında gerilme birikmelerinin meydana geldiği, yapıştırılan CFRP bileşenlerinin uç bölgeleri, bindirme bölgeleri, yapı elemanlarının kesit değiştirdiği bölgeler, köşe bölgeleri gibi yerlerde yapıştırılan CFRP elemanların yüzeyden soyuldukları ve güçlendirme amacıyla geliştirilen detaydan istenilen performans elde edilemeden çok daha düşük kapasitelerde bu soyulma olayının meydana geldiğini göstermiştir. Özellikle CFRP elamanlar ile yapılan güçlendirmenin düşük çekme ve kayma dayanımına sahip bir yapı elemanı yüzeyine uygulanması durumunda yüzeyden soyulmanın çok daha düşük kapasite değerlerinde ve ani bir şekilde meydana geldiği yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu konularda yapılan araştırmalar CFRP ile uygulanan güçlendirme detaylarında yüzeyden soyulmanın geciktirilmesi için değişik türde ankraj uygulamaların kullanılabileceğini göstermiş ve çalışmalar bu konuda yoğunlaşmaya başlamıştır (Anıl ve Belgin, 2010; Anıl ve Belgin, 2009; Anıl vd., 2010; Baran ve Anıl, 2010; Mertoğlu vd., 2016).

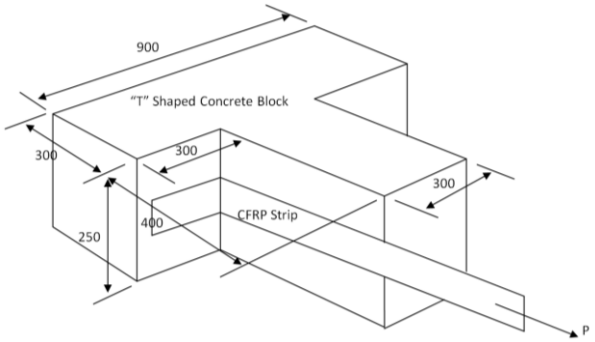
CFRP ile geliştirilen güçlendirme detayının uygulandığı yapı elemanı veya sisteminin taşıma gücü gibi özelliklerini ne ölçüde artırdığının doğru bir şekilde tespit edilmesi için uygulanan güçlendirme detayının ne kadar kapasitesi olduğunun doğru bir şekilde hesaplanabilmesi son derece önemlidir. Aynı şekilde yüzeyden soyulmayı geciktirerek taşıma gücünü artırmak için ankraj kullanılan CFRP güçlendirme detayları için de taşıma gücünün doğru bir şekilde hesaplanabilmesi önemli bir araştırma konusudur. Yapılan araştırmalar son yıllarda bu konulara yoğunlaşmış ve güçlendirme amacıyla yapıştırılan yapı ile CFRP bileşenlerin ara yüzeyindeki gerilme dağılımları, CFRP güçlendirme elemanlarının taşıma gücü ve yüzey ile CFRP arasındaki bond-slip malzeme modelleri konularında çalışmalar artmıştır. Yüzeylere yapıştırılan ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili de bu konulardaki araştırmalar ankrajsız CFRP şeritlere göre çok daha sınırlı sayıda olmasına rağmen literatürde yer almaktadır (Anıl ve Belgin, 2010; Anıl ve Belgin, 2009; Anıl vd., 2010; Baran ve Anıl, 2010; Mertoğlu vd., 2016). Ancak ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili araştırmalar incelendiğinde çalışmaların kapsamında CFRP şeritlere uygulanan eksenel çekme kuvvetlerine 90° açı ile dik olarak yerleştirilen ankrajların incelendiği görülmektedir. Geliştirilen güçlendirme detaylarının türüne ve uygulama yerlerine göre CFRP şeritlerin yüzeyden soyulma risklerinin yüksek olduğu konumlara yerleştirilen ankrajların her zaman CFRP şeritlere etkiyen çekme kuvvetlerine dik olarak konumlanması mümkün olmamaktadır. CFRP şeritler üzerine yerleştirilen ve şerit ekseni ile belirli açılar yapan ankrajların CFRP şerit taşıma gücüne olan etkileri, CFRP şerit ile yapışma yüzeyi arasındaki gerilme dağılımı üzerinde meydana getirdiği değişiklikler ve yapışma yüzeyi ile CFRP şerit arasındaki bond-slip modeli gibi konular incelenmesi gerekli olan önemli araştırma konularıdır. Yapılan literatür taraması sonucunda açılı ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle deneysel bir çalışma planlanarak bu konuların incelenmesi amaçlanmıştır. Literatürde yapılan incelemeler özellikle kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin ve tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin güçlendirilme uygulamalarında açılı CFRP şeritlerin yaygın bir şekilde kullanıldığı ve tercih edildiğini göstermiştir. Bu tür güçlendirme detaylarında kullanılan açılı CFRP şeritlerin taşıma güçlerinin hesaplanabilmesi için bu konudaki yapılan çalışmaların literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Yürütülen deneysel çalışma kapsamında beton yüzeyine yapıştırılan açılı ankrajlı CFRP şeritlerin davranışının incelenmesi amacıyla 28 adet, "T" şeklinde kütle betonu üzerine "L" şeklinde CFRP şeritler yapıştırılarak eksenel çekme kuvveti etkisi altında monotonik yükleme uygulanarak test edilmiştir. Beton kütlenin "T" şekilde üretilmesi ve CFRP şeritin "L" şeklinde yapıştırılması, şerit eksenine paralel olarak uygulanan çekme kuvvetine göre değişik açılarda CFRP fan tipi ankraj yerleştirilmesine imkan sağlamıştır. Deneysel çalışmada ankraj türü olarak literatürde de yaygın olarak tercih edilen CFRP fan tipi ankraj seçilmiştir. Araştırma kapsamında değişken olarak şeritlerin yapıştırıldığı beton basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve uygulanan CFRP fan tipi ankrajın sayısı ile kuvvet eksenine göre açısı incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda açılı ankrajlı CFRP şeritlerin yük-deplasman davranışı, maksimum taşıma güçleri, CFRP şerit ile beton yüzey arasındaki gerilme dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak CFRP şeritler üzerinde kullanılan açılı ankrajların şerit taşıma gücü üzerindeki etkileri yorumlanmış ve maksimum taşıma gücü ile ilgili bir eşitlik önerilmiştir. Ayrıca açılı ankrajlı CFRP şeritler ve beton yüzey arasındaki gerilme-kayma deformasyonu davranışı ile ilgili bir model oluşturulmuştur.

2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma kapsamında açılı ankrajlı CFRP şeritlerin eksenel çekme kuvveti etkisindeki yük-deplasman davranışları, eksenel çekme kuvveti kapasiteleri, yapıştırıldıkları beton yüzey ile CFRP şerit arasındaki gerilme dağılımları, yapışma yüzeyi bond-slip modeli ile ilgili araştırmaların yapılması için 28 adet deney elemanı üretilmiş ve test edilmiştir. Deneysel çalışmada incelenen değişkenler açılı ankrajlı CFRP şeritlerin yapıştırıldığı kütle betonunun basınç dayanımı, CFRP şerit genişliği ve CFRP şerit üzerinde kullanılan ankraj sayısı ile ankrajların uygulanan eksenel çekme kuvvet doğrultusu ile yapmış olduğu açıdır. Deneysel çalışmada test edilen elemanların özellikleri **Tablo 1'de** verilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında açılı ankrajlı CFRP şeritlerin test edilebilmesi amacıyla "T" şeklinde kütle betonları üretilmiştir. Her "T" kesitli kütle betonu üzerine 2 adet "L" şeklinde CFRP şerit yapıştırılarak her seferinde yazarlar tarafından üretilmiş özel bir single pull-out deney düzeneği kullanılarak

bir adet CFRP şerit monotonik artan eksenel çekme yüklemesi etkisinde test edilmiştir. Üretilen deney elemanlarının geometrik boyutları **Şekil 1'de** verilmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde hedef beton basınç dayanımı olarak 25 MPa ve 10 MPa olarak iki farklı beton sınıfı seçilmiştir. Deney elemanlarının üretildiği beton karışımlarından her eleman için 5 adet 150x150 mm boyutlarında standart küp numunesi alınarak test gününe kadar deney elemanları ile aynı kür şartlarında saklanmıştır. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları hedeflenen dayanım değerlerine oldukça yakın elde edilmiş olup, standart sapma ve varyasyon değerleri çok düşüktür. Deneysel çalışmada CFRP şerit genişliği olarak 50 mm ve 100 mm değerleri seçilmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde tek doğrultulu taşıyıcı liflere sahip Sika© firması tarafından üretilen CFRP ve yine aynı firma tarafından önerilen iki bileşenli epoksi malzemeleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan CFRP ve epoksi malzemesinin üretici firma tarafından verilen mekanik dayanım özellikleri **Tablo 2'de** verilmiştir.



Şekil. 1. Testlerin Gerçekleştirildiği Beton Deney Elemanı (Ölçüler mm'dir.)

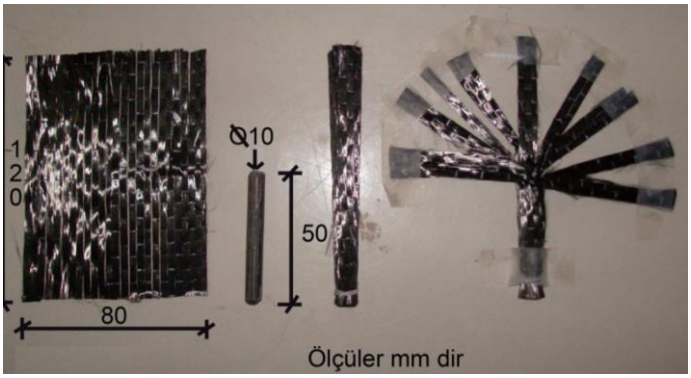
Tablo 1. Deney elemanlarının özellikleri

Deney El. No	f_C (MPa) Beton Basınç Dayanımı	CFRP Şerit Genişliği	Ankraj Sayısı	Ankraj Açısı
1	25.7		Referans	
2	24.5		1	90
3	25.2		1	0
4	26.4	50	1	45
5	24.7		2	45/90
6	26.8		2	0/90
7	24.9		2	90/90
8	25.3		Referans	
9	25.7		1	90
10	24.5		1	0
11	25.2	100	1	45
12	26.4		2	45/90
13	24.7		2	0/90
14	26.8		2	90/90
15	8.6		Referans	
16	9.5		1	90
17	8.5		1	0
18	8.5	50	1	45
19	9.6		2	45/90
20	9.8		2	0/90
21	10.2		2	90/90
22	9.4		Referans	
23	8.6		1	90
24	9.5		1	0
25	8.5	100	1	45
26	8.5		2	45/90
27	9.6		2	0/90
28	9.8		2	90/90

Deney elemanlarının üretilmesinde güçlendirme çalışmalarında da yaygın olarak tercih edilen CFRP fan tipi ankraj seçilmiştir. Deney elemanlarında kullanılan fan ankrajları, 50 mm uzunluğunda 10 mm çapındaki donatıya, 80 mm genişliğinde 120 mm uzunluğunda CFRP şerit sarılarak üretilmiştir. CFRP ankrajlarda donatının dışında kalan 70 mm'lik kısım 10 mm genişliğinde 8 adet parçaya fan olarak yapıştırılacak şekilde ayrılmıştır. Ankraj uygulaması yapılması için 14 mm çapında 50 mm derinliğinde delikler açılmıştır. Çalışmada kullanılan CFRP fan tipi ankrajın özellikleri ve geometrik boyutları **Şekil 2'de** verilmiştir.

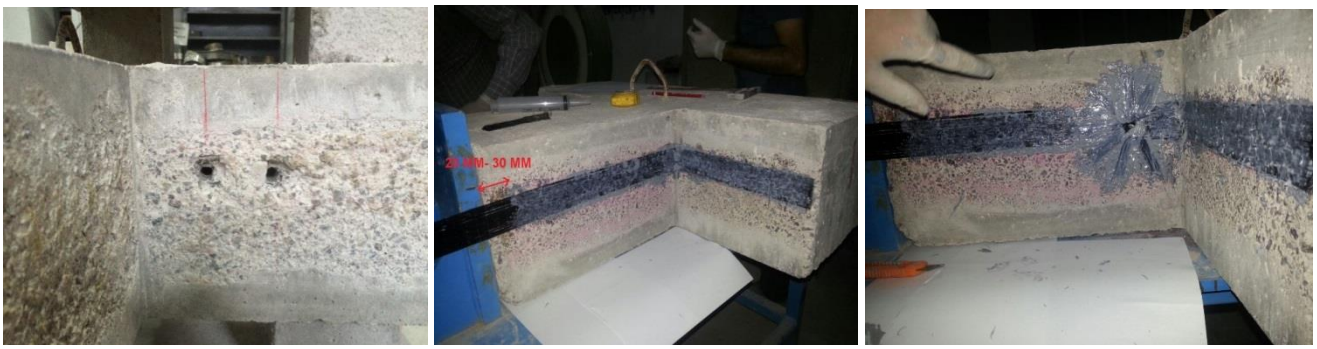
Tablo 2. CFRP ve Epoksi Malzemelerinin Özellikleri

CFRP'nin Özellikleri	
Ağırlık	220 gr/m2
Kalınlık	0,12 mm
Çekme Dayanımı	4100 MPa
Elastisite Modülü	231000 MPa
Kopmadaki Uzama	% 1,7
Lif Yapısı	%99 ana doğrultuda, %1 destekleyici doğrultuda lif
Epoksinin Özellikleri	
Yoğunluk	1,31 kg/lt
Karışım Oranı	Beyaz Reçine:Gri Reçine = 4:1
Uygulama Sıcaklığı	min +10°C, max +35°C
Çekme Dayanımı	30 MPa (+23°C de 23 günlük kürden sonra)
Eğilmede Elastisite Modülü	3800 MPa (+23°C de 23 günlük kürden sonra)



Şekil. 2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Fan Tipi Ankraj Detayı

Deney elemanlarının üretilmesi aşamalarından alınan fotoğraflardan seçilen örnekler **Şekil 3'de** verilmiştir. Uygulama esnasında laboratuvar ortamındaki sıcaklığın 20±2 C° olmasına özen gösterilmiştir. Deney elemanları üretildikten sonra epoksinin tam olarak dayanımını alması için yedi gün süre ile beklenilmiş ve daha sonra testlere başlanılmıştır.

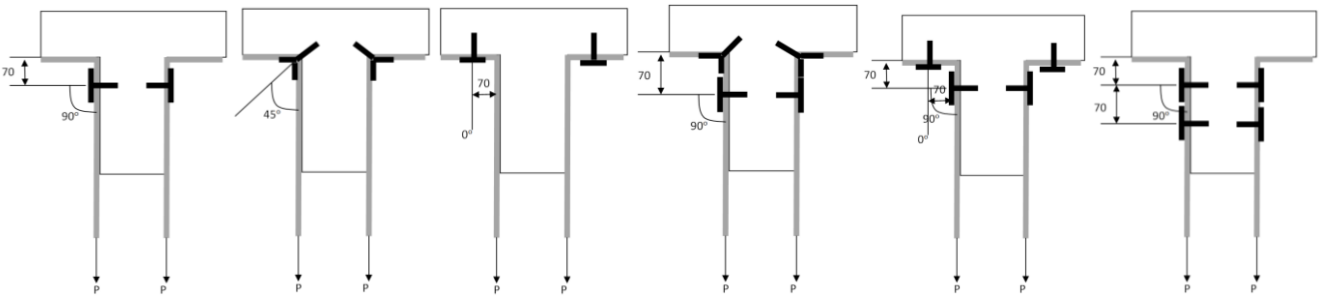


Şekil. 3. Deney Elemanlarının Üretimi Sırasında Alınan Fotoğraflardan Örnekler

Deneysel çalışmada incelenen açılı ankrajların CFRP şeritlerin davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla 1 ve 2 adet ankrajlı 3 farklı açıda ankraj uygulaması yapılarak her seri için ankrajsız bir adet referans elemanı ile birlikte 7 deney elemanı üretilmiştir. Deneysel çalışmada 2 farklı beton basınç dayanımı ve 2 farklı CFRP şerit genişliği için toplam 2x2x7=28 deney elemanı üretilmiştir. Üretilen açılı ankrajların CFRP şerit yükleme eksenine göre açıları 90°, 0° ve 45° olarak seçilmiştir. Deney elemanlarında kullanılan açılı CFRP şeritlerin yerleşimi ile ilgili geometrik boyutlar **Şekil 4'de** verilmiştir. "T" şeklinde beton kütleye yapıştırılan açılı CFRP şeritler monotonik olarak artırılan eksenel çekme kuvveti etkisinde göçme meydana gelene kadar yüklenmiştir. Testler sonucunda açılı CFRP şeritlerin maksimum taşıma gücü değerleri, yük-deplasman davranışları, beton yapışma yüzeyi ile açılı CFRP şeritler arasındaki gerilme dağılımları ve bond-slip davranışları elde edilerek yorumlanmıştır. Deneysel sonuçlar üzerinde incelenen değişkenlerin meydana getirdiği etkiler araştırılmıştır.

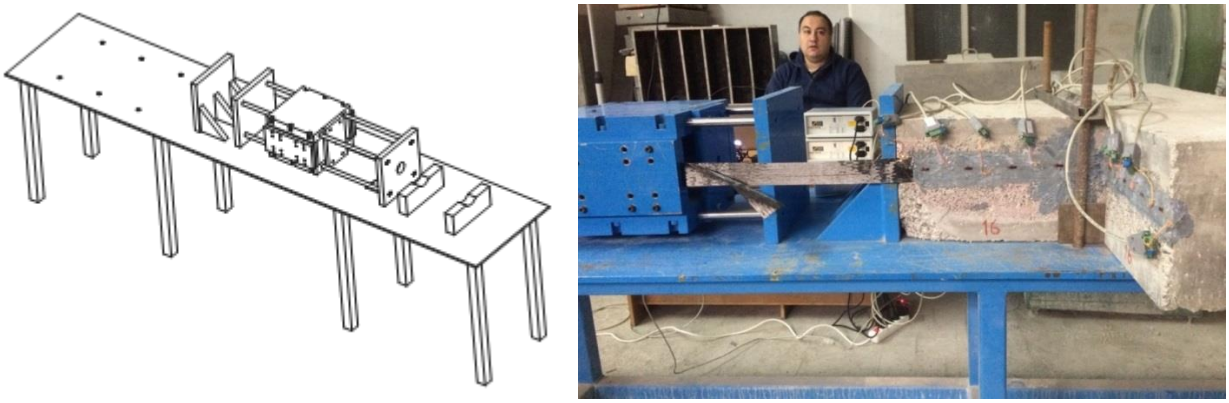
Deney elemanlarının testleri yazarlar tarafından bu tür deneyler için özel olarak tasarlanmış bir single pull-out test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği **Şekil 5'de** verilmiştir. Deney düzeneği üzerine yerleştirilen 500 kN kapasiteli bir hidrolik kriko ile eksenel yükleme test elemanlarına uygulanmış ve 400 kN kapasiteli yük hücresi ile ölçülmüştür. Deneyler de yükleme motorlu ve hızı ayarlanabilen bir hidrolik pompa ile tüm deney elemanlarında özdeş hızda uygulanmış olup, yükleme hızı 0.5 mm/sn olacak şekilde sabitlenmiştir. Deney elemanları CFRP şeritlerinin boysal deplasman değerleri bir elektronik

deplasman ölçer ile ölçülmüştür. CFRP şeritler üzerindeki gerilme dağılımının şerit boyunca değişiminin ölçülmesi için belirli aralıklar ile birim deformasyon ölçerler yapıştırılmıştır. Testler sonucunda deney elemanlarının eksenel yük-deplasman grafikleri ve CFRP şeritler boyunca birim deformasyon dağılımı grafikleri elde edilmiş olup, testler yük-deplasman grafikleri izlenerek yapılmıştır. Deney elemanlarından alınan tüm ölçümler elektronik sensörler ile alınarak bir veri toplama sistemi ile bilgisayara aktarılarak testler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.



a) 2, 9, 16, 23 b) 4, 11, 18, 25 c) 3, 10, 17, 24 d) 5, 12, 19, 26 e) 6, 13, 20, 27 f) 7, 14, 21, 28

Şekil 4. Deney Elemanlarına Uygulanan CFRP Fan Tipi Ankraj Yerleşim Detayları (Ölçüler mm'dir.)



Şekil 5. Deney Düzeneği

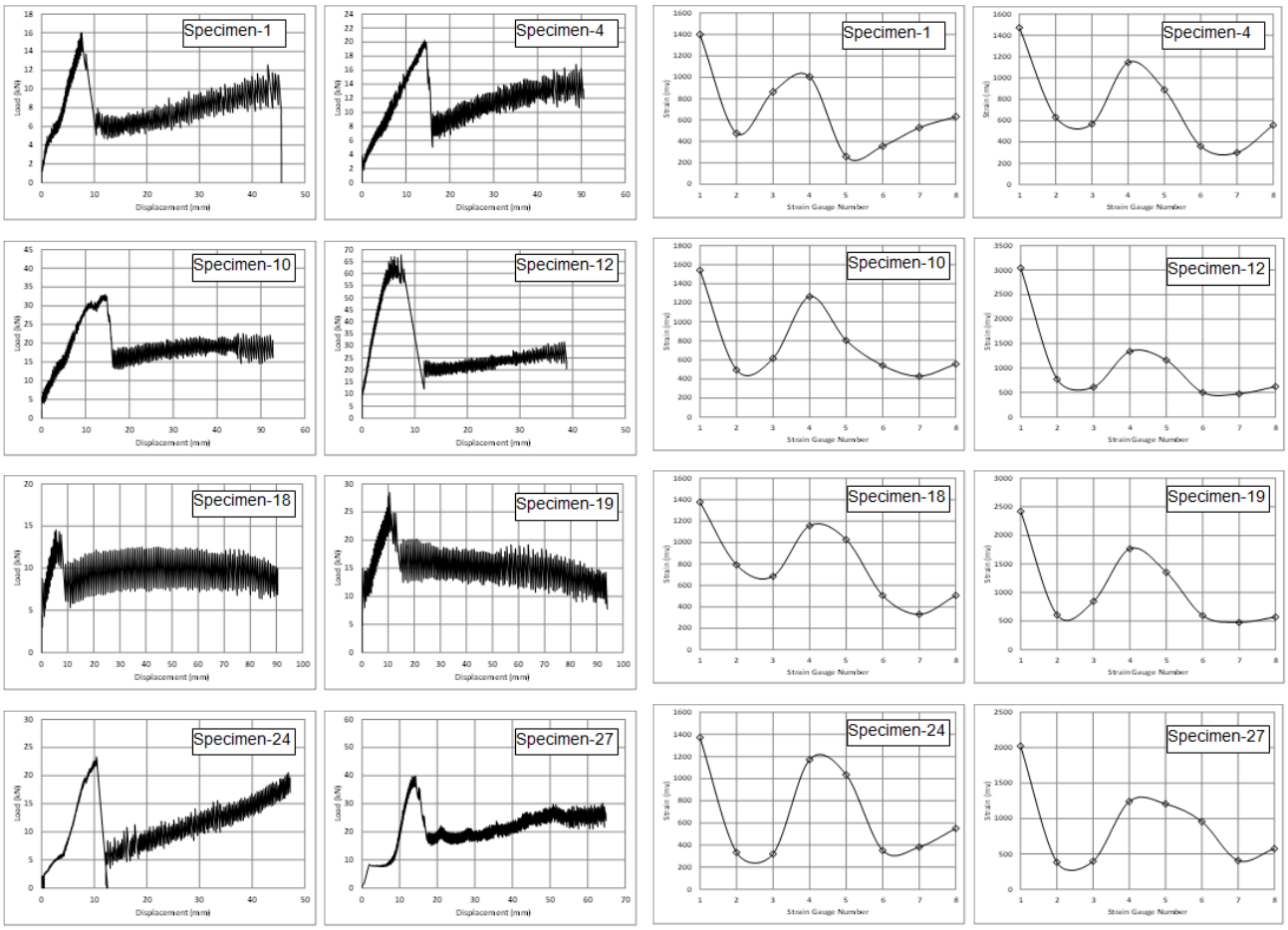
Deney elemanlarının testleri sonucunda CFRP şeritlere uygulanan eksenel yük-kayma deplasmanı grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca CFRP şerit yapışma boyunca birim deformasyon dağılımları da ölçülerek belirlenmiştir. Testler sonucunda elde edilen eksenel kuvvet-kayma deplasmanı ve CFRP şeritler boyunca ölçülen birim deformasyon dağılımı grafiklerinden seçilen örnekler **Şekil 6'da** verilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ise **Tablo 3'de** sunulmuştur. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen maksimum taşıma gücü değerleri CFRP şerit yapışma alanına oranlanarak kayma gerilmesi değerleri hesaplanmış ve Tablo 3'de verilmiştir. CFRP şerit yapışma alanı şerit genişliği ile yapışma boyunun çarpılması ile belirlenmiştir. Ayrıca Tablo 3'de maksimum gerilme değerindeki kayma deplasmanı, enerji kapasitesi ve rijitik değerleri de verilmiştir. Enerji kapasitesi Şekil 6'da verilen yük-deplasman grafiklerinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. Rijitlik değeri ise maksimum taşıma gücü değerinin o noktaki deplasman değerine oranlanması ile hesaplanmıştır.

Tablo 3. Deney Sonuçları

Deney El. No	Maksimum Kapasite (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilmede Deplasman (mm)	Kalıcı Gerilme (MPa)	Kalıcı Gerilmede Deplasman (mm)	Maksimum Deplasmanda Gerilme (MPa)	Maksimum Deplasman (mm)	Enerjj Tüketim Kapasitesi (kN-mm)	Maskimum Kapasitede Rijitlik (kN/mm)
1	16.02	0.80	7.63	0.25	10.39	0.57	45.58	396.25	2.10
2	22.95	1.15	9.22	0.34	11.46	0.72	44.27	510.76	2.49
3	18.76	0.94	7.23	0.38	10.90	0.71	46.44	512.08	2.59
4	20.27	1.01	14.23	0.32	15.90	0.70	50.47	605.91	1.42
5	40.50	2.03	7.68	0.50	11.53	1.27	51.17	1077.29	5.27
6	31.32	1.57	12.48	0.44	13.67	0.88	60.91	1105.59	2.51
7	36.35	1.82	9.13	0.59	13.90	0.92	45.00	890.69	3.98
8	29.54	0.74	7.77	0.22	13.91	0.34	67.99	1059.40	3.80
9	40.99	1.02	10.07	0.37	14.48	0.44	37.04	739.83	4.07
10	33.00	0.82	14.50	0.34	16.31	0.40	52.72	999.99	2.28
11	35.03	0.88	17.21	0.31	22.04	0.47	64.47	1274.40	2.04
12	67.80	1.70	7.41	0.50	11.79	0.70	38.88	1241.95	9.15
13	52.11	1.30	10.32	0.54	13.60	0.62	50.95	1430.39	5.05
14	61.03	1.53	16.81	0.51	18.43	0.71	52.32	1315.82	3.63
15	8.34	0.42	6.04	0.18	7.14	0.51	29.58	156.08	1.38
16	16.38	0.82	8.88	0.26	14.13	0.47	74.96	631.44	1.84
17	12.76	0.64	5.75	0.23	8.08	0.34	65.51	504.24	2.22
18	14.55	0.73	5.51	0.31	9.19	0.34	90.47	911.32	2.64

Tablo 3*(devam).* Deney Sonuçları

Deney El. No	Maksimum Kapasite (kN)	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilmede Deplasman (mm)	Kalıcı Gerilme (MPa)	Kalıcı Gerilmede Deplasman (mm)	Maksimum Deplasmanda Gerilme (MPa)	Maksimum Deplasman (mm)	Enerjj Tüketim Kapasitesi (kN-mm)	Maskimum Kapasitede Rijitlik (kN/mm)
19	28.48	1.42	10.54	0.63	15.77	0.72	93.97	1464.84	2.70
20	22.13	1.11	18.11	0.50	9.99	0.61	103.58	1619.29	1.22
21	25.64	1.28	8.80	0.35	10.53	0.76	47.99	768.27	2.91
22	15.43	0.39	19.48	0.09	21.04	0.17	21.83	185.80	0.79
23	30.17	0.75	9.40	0.13	14.76	0.28	37.66	403.97	3.21
24	23.31	0.58	10.42	0.11	12.22	0.43	47.19	550.82	2.24
25	26.68	0.67	7.95	0.13	13.07	0.28	38.33	390.26	3.36
26	51.60	1.29	12.61	0.46	13.75	1.00	45.85	1422.25	4.09
27	39.81	1.00	14.25	0.42	17.35	0.60	64.85	1361.99	2.79
28	45.71	1.14	18.07	0.45	19.86	0.76	77.02	1908.91	2.53



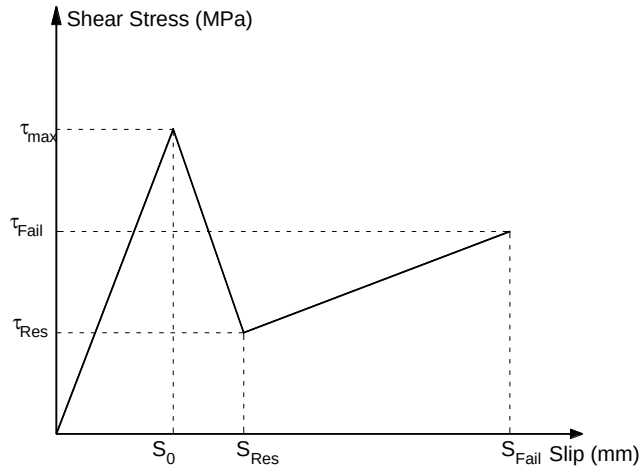
Şekil 6. Deney Elemanlarının Eksenel Kuvvet- Kayma Deplasmanı ve CFRP Şerit Boyunca Ölçülen Birim Deformasyon Dağılımı Grafiklerinden Seçilen Örnekler

3. Ankrajlı Cfrp Şeritler İçin Kayma Gerilmesi-Deplasman Modeli Önerisi

İkinci bölümde sonuçları özetlenen deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak açılı ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzeyi arasında kayma gerilmesi-kayma deplasmanı davranışı için yeni bir matematiksel model önerisi oluşturulması amaçlanmıştır. Yapılan literatür taramasında ankrajsız CFRP şeritler için farklı kayma gerilmesi-kayma deplasmanı modelleri bulunduğu görülmüştür (Bilotta vd., 2011; Chen ve Teng, 2001; Hiroyuki ve Wu, 1997; Khalifa vd., 1998; Maeda vd., 1997; Sato vd., 2001; Tanaka, 1996; Yang vd., 2001; Lu vd., 2005). Ancak açılı ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzeyi arasında bu şekilde bir kayma gerilmesi- kayma deplasmanı matematiksel malzeme modeline literatürde rastlanmamıştır. Bu türdeki malzeme modelleri CFRP ile güçlendirilmiş betonarme elamanlarının sonlu elemanlar modellerinin oluşturulması ve genel yük-deplasman davranışları ile maksimum taşıma güçleri gibi önemli sonuçların elde edilebilmesi için son derece gerekli ve önemlidir.

Açılı ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzeyler arasında yeni bir kayma gerilmesi-kayma deplasmanı matematiksel malzeme modelinin oluşturulması için ankrajsız CFRP şeritler ile ilgili olarak en fazla tercih edilen modellerden biri olan ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımına eklenmiş koheziv ara yüzey malzeme modeli olarak da kullanılan Lu v.d., 2005'in modeli üzerinden bir başlangıç yapılmıştır. Bu modelin açılı ankrajlı CFRP şeritler için kullanılabilmesi için nasıl modifikasyonların yapılması

gerektiği üzerinde yoğunlaşılmıştır. İlk olarak Şekil 6'da verilen eksenel çekme kuvveti-kayma deplasmanı grafikleri incelendiğinde açılı ankrajlı CFRP şeritlerin genel yük-deplasman davranışının ankrajsız olan şeritlerden özellikle maksimum taşıma gücüne ulaşıldıktan sonra önemli farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Açılı ankrajlı CFRP şeritlerin genel yük-deplasman davranışlarında maksimum taşıma gücüne ulaşılıp bağlantı göçmeye ulaştığında ankrajsız şeritlerden farklı olarak kalıcı bir taşıma gücü değeri kalmakta ve kalıcı kapasite belirli bir deplasman değerine kadar korunmaktadır. Ek olarak kalıcı kapasite değerinin maksimum taşıma gücüne ulaşıldıktan sonra kalmasının yanısıra ankraj açısına ve sayısına bağlı olarak, artan kayma deplasmanı değeri ile kalıcı dayanım değerinde artış trendi görülmekte ve maksimum taşıma gücünden sonraki grafiğin kuyruk bölümünde açılı bir kapasite artışı meydana gelmektedir. Ankrajsız CFRP şeritlerin yük-deplasman davranışlarında ise maksimum taşıma gücü değerine ulaşılıp bağlantı göçtükten sonra kapasite sıfıra inerek herhangi bir kalıcı dayanım değeri oluşmamakta, yük-deplasman grafiğinin çift doğrudan oluşacak şekilde modellenmesi mümkün olmaktadır. Buna karşılık açılı ankrajlı CFRP şeritlerin kayma gerilmesi-kayma deplasmanı grafiklerinin genel davranışı kalıcı dayanım bölümünü de modelleyecek şekilde 3 doğrudan oluşacak şekilde modellenmesinin gerektiği görülmüştür. Bu genel davranış farklılığına ek olarak açılı ankrajlı CFRP şeritlerin maksimum gerilme taşıma gücü değerleri ve tüketilen kırılma enerjisi değerleri de ankrajsız CFRP şeritlere göre çok daha büyüktür. İkinci bölümde sonuçları paylaşılan deneysel veriler kullanılarak açılı ankrajlı CFRP şeritler için oluşturulan kesme gerilmesi-kayma deplasmanı matematiksel malzeme modeli önerisi **Şekil 7'de** sunulmuştur.



Şekil 7. Ankrajlı CFRP Şeritler için Önerilen Kesme Gerilmesi-Kayma Deplasmanı Malzeme Modeli

Açılı ankrajlı CFRP şeritler için önerilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı ara yüzey malzeme modelinin tanımlanması için gerekli değerler Eşitlik 1-6'da verilmiş olup, bu değerler Şekil 7'de sunulan genel kantitatif model iskelet grafiği üzerinde gösterilmiştir. Sadece maksimum kesme gerilmesine ulaşıldığında ölçülen S_0 kayma deplasmanı değeri için bir eşitlik önerilmemiş olup, bu değerin hesaplanması için ankrajsız CFRP şeritler için geliştirilen Lu v.d., 2005 tarafından önerilen eşitliğin kullanılabileceği görülmüştür.

$$\tau_{max} = f_1 \tau_{max,0} \quad (1)$$

$$f_1 = \left[\sum_{\emptyset=0}^{\emptyset=90}(0.0024\emptyset + 4.564)\right](f_c')^{-0.32}\,(b_f)^{-0.095} \quad (2)$$

$$\tau_{Res} = \frac{1}{n}\left[\sum_{\emptyset=0}^{90}(0.375 - 0.00068\emptyset)\right]\tau_{max} \quad (3)$$

$$\tau_{Fail} = \frac{1}{n}\left[\sum_{\emptyset=0}^{90}(0.6087 - 0.00084\emptyset)\right]\tau_{max} \quad (4)$$

$$S_{res} = 1.31 \times S_0 \quad (5)$$

$$S_{Fail} = (-0.00018\emptyset^2 + 0.009\emptyset + 4.87) * n^{0.08} S_0 \quad (6)$$

Eşitlik 1'de verilen $\tau_{max,0}$ değeri Lu v.d., 2005 tarafından önerilen ankrajsız CFRP şeritler için önerilen eşitlik ile hesaplanabilen ankrajsız CFRP şerit kesme gerilmesi kapasitesidir. Bu değer f_1 katsayısı ile çarpılarak açılı ankrajlı CFRP şeritlerin kesme gerilmesi değeri hesaplanmaktadır. f_1 çarpanının hesaplanması için geliştirilen eşitlik 2'de beton basınç dayanım, CFRP şerit genişliği ve CFRP şerit açısına bağlı olarak verilmiştir. Eşitlik 3'de verilen kalıcı kesme gerilmesi ve eşitlik 4'de gösterilen göçme kesme gerilmesi değerleri ise eşitlik 1'de verilen açılı ankrajlı CFRP şerit maksimum kesme gerilmesi τ_{max} değerine bağlı olarak verilmiştir. Kalıcı kayma deplasmanı ve göçme kayma deplasmanı değerleri ise maksimum kesme kapsitesinde ulaşılan deplasman değeri S_0'a bağlı olarak eşitlik 5 ve eşitlik 6'da verilmiştir. Eşitlik 6'da n ankraj sayısını, Φ ise ankraj açısını ifade etmektedir.

4. Sonuçlar

Betonarme yapılar ve yapı elemanlarının güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen CFRP malzemesi ile birçok güçlendirme ve onarım detayı geliştirilmektedir. Bu güçlendirme detaylarının yük-deplasman davranışlarının, maksimum taşıma gücü değerlerinin ve gösterecekleri performansın gerçekçi ve tasarım aşamasında kabul edilebilir bir doğrulukta belirlenebilmesi için güçlendirme amacıyla kullanılan CFRP şeritlerin beton yüzeyine bağlantısı ve kapasitelerini belirleyen matematiksel kesme gerilmesi-kayma deplasmanı modellerinin gerçekçi ve deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar verebilecek

şekilde modellenmesi gerektiği unutulmamalıdır. Ankrajsız CFRP şeritler ile ilgili yapılan literatür taraması sonucunda bu konuda araştırmalara ve gerçekçi sonuçlar verebilen CFRP-beton yüzey bağlantı modellerine rastlanmıştır. Ancak CFRP şeritlerin performansını artırmak için son yıllarda çalışılmaya başlanılan ve kullanılan açılı ankrajlı CFRP şeritler için bu şekilde bir kesme gerilmesi- kayma deplasmanı modeline literatürde rastlanmamıştır. Bu nedenle bu araştırma düzenlenerek açılı ankrajlı CFRP şeritler ile ilgili bir deneysel çalışma planlanmış ve bu deneysel çalışmanın sonuçları kullanılarak açılı ankrajlı CFRP şeritler ile beton yüzey arasındaki kesme gerilmesi-kayma deplasmanı bağlantısı matematiksel modeli ile ilgili yeni bir öneri geliştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda önerilen malzeme modelinin açılı ankrajlı CFRP şeritlerin kullanıldığı güçlendirme detaylarının bilgisayar sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında, gerçekçi olarak deneysel sonuçlar ile uyumlu kapasite değerlerinin hesaplanmasında son derece faydalı olacağı ve literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Referanslar

Anıl, Ö., Belgin, Ç. (2010). Anchorages Effects on CFRP-to-Concrete Bond-Strength. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29(4):539-557.

Anıl, Ö., Belgin, Ç. (2009). Review of Bond-Strength Models and Application on CFRP to-Concrete Bonded Joints Across Crack. Science and Engineering of Composite Materials, 15(2):141-158.

Anıl, Ö., Belgin, Ç., Kara, ME. (2010) Experimental Investigation on CFRP to Concrete Bonded Joints Across Crack. Techno Press, Structural Engineering and Mechanics, 35(1): 1-18

Baran A, Anıl Ö. Nonlinear Finite Element Analysis of Effective CFRP Bonding Length and Strain Distribution along Concrete-CFRP Interface. Techno Press, Computers and Concrete an International Journal, 2010, 7(5):427-453.

Bilotta A, Di Ludovico M, Nigro E. FRP-to-concrete interface debonding: Experimental calibration of a capacity model. Department of Structural Engineering, University of Naples ‘‘Federico II’’, Via Claudio 21, Naples, P.O. Box 1-80125, Italy,2011:1-13.

Chen JF, Teng JG. Anchorage strength model for FRP and steel plates attached to concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001:127(7):784-791.

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 3rd International Symposium, Sapporo, Japan, 1997: 287-294.

Khalifa A, Gold WJ, Nanni A, Aziz A. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members. Journal of Composite for construction, ASCE 1998: 2(4): 195-203.

Lu XZ, Teng JG, Ye LP, Jiang JJ. Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. Engineering Structures. 2005, 27(6),920-937

Maeda T, Asano Y, Sato Y, Yeda T, KakutaY. A study on bond mechanism of carbon fibre sheet. Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures,Proceedings of the 3rd International Symposium, Sapporo, Japan, 1997: 279-285.

Mertoğlu Ç, Anil Ö, Durucan C. Bond slip behavior of anchored CFRP strips on concrete surfaces, 2016, 123: 553-564.

Sato Y, Asano Y, Ueda T. Fundamental study on bond mechanism of carbon fiber sheet. Concrete Library International, JSCE,2001: 37: 97-115.

Tanaka T. Shear resisting mechanism of reinforced concrete beams with CFS as shear reinforcement. Graduation Thesis, Hokkaido University, Japan.1996

Yang YX, Yue QR, Hu YC. Experimental study on bond performance between carbon fibre sheets and concrete. Journal of building structures, 2001:22(3): 36-42 (in Chinese).