

Yüksek Dayanımlı Beton Elemanlarda Donatı Kenetlenmesi

Vedat YERLİCİ*

Uğur ERSOY**

Turan ÖZTURAN***

Murat TÜRK****

Şevket ÖZDEN*****

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, yüksek dayanımlı beton elemanlarda kenetlenme özelliklerini incelemek ve sonuçlarını normal dayanımlı betonunki ile karşılaştırmaktır. Araştırma, nervürlü BÇ III-a çeliği ile donatılmış, yüksek ve normal dayanımlı 42 beton eleman üzerinde yapılmış aksel ve dışmerkezli çekip çıkarma deneyi içermektedir. Bu deneylerde kenetlenme boyu, donatı çapı, beton örtü kalınlığı ve etriye miktarı değişkenler olarak alınıp, uygulanan kuvvet ile elemanların çekilen ve serbest uçlarındaki donatı sıyrılmaları ölçülmüştür. Sonuçta, yüksek dayanımlı betonlarda gerekli kenetlenme boyunun normal dayanımlılarınkinden daha kısa, oluşacak maksimum çatlak genişliklerinin de daha küçük olduğu görülmüştür. Kritik yük altındaki yüksek dayanımlı betonlarda aderans gerilmelerinin normal dayanımlı betonlardaki kadar düzgün dağılmadığına dair ciddi ipuçları elde edilmiştir. Dolayısıyla, maksimum aderans gerilmeleri kenetlenme boyunca eşite yakın biçimde dağılan normal dayanımlı betonlar için geliştirilmiş kenetlenme boyu formüllerini yüksek dayanımlı betonlar için doğrudan kullanmanın sakıncalı olacağı kanısına varılmıştır.

ABSTRACT

Anchorage of Reinforcement in High-Strength Concrete Elements

The purpose of this study is to investigate the bonding properties of high strength concrete and compare them to that of normal strength concrete. For this purpose, both concentric and eccentric pull-out bond tests have been conducted on 42 high and normal strength concrete specimens reinforced with deformed BÇ-IIIa type of steel bars. The pull-out force and the reinforcing bar slip at the loaded and at the free

Not : Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 22.3.1995 günü ulaşmıştır

- 30 Ekim 1995 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Prof.Dr. B.Ü. İnş. Müh. Böl. Bebek İstanbul

** Prof.Dr. ODTÜ İnş. Müh. Böl. Ankara

*** Doç.Dr. B.Ü. İnş. Müh. Böl. Bebek İstanbul

**** Yük.Müh. B.Ü. İnş. Müh. Böl. Bebek İstanbul

***** Yük.Müh. B.Ü. İnş. Müh. Böl. Bebek İstanbul

ends of these specimens were measured. The test variables were the reinforcing bar diameter, anchorage length, thickness of the concrete cover and transverse reinforcement ratio. Data obtained showed that the essential development length for high strength concrete is shorter and maximum crack widths are narrower than the development length and maximum crack widths of normal strength concrete. There was strong evidence, that in high-strength concrete near ultimate load, the ultimate bond stresses are not as evenly distributed along the anchorage length as in normal strength concrete. Therefore it has been concluded that the development length expressions formulated for normal strength concrete and based on uniform distribution of maximum bond stresses should not be directly applicable to high strength concrete.

1. GİRİŞ

Yüksek dayanımlı beton (YDB) nun son zamanlara kadar pek az kullanılmasının nedeni zor işlenebilir olması idi. Ancak işlenebilirliği önemli ölçüde arttıran süper akışkanlaştırıcıların piyasaya çıkması bu tür betonlara olan talebi arttırıp YDB na ilişkin araştırmalara güncellik kazandırmıştır. Normal dayanımlı beton (NDB) temel alınarak hazırlanmış bazı yönetmelik hükümlerinin yer yer yetersiz kaldığının görülmesi böyle çalışmaları daha da önemli kılmıştır. YDB ile ilgili deneylerden elde edilen verilerin belirli bir düzeye erişmesi beton ve betonarme yönetmelik veya standartlarında gerekli değişikliklerin yapılabilmesine olanak sağlayacaktır.

Boğaziçi Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada YDB ile nervürlü çelik donatı arasındaki kenetlenme davranışı bazı yönlerden incelenmiştir.

2. YDB'DA KENETLENME KONUSUNDA YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Bu konuda ilk çalışma Bürge tarafından 1982'de yayınlanmıştır [1]. Eksenel çekip çıkarma deneylerine dayanan bu araştırmanın amacı YDB'a karıştırılan silis dumanı oranının kenetlenmeye etkisini saptamaktır. Daha sonra Ezeldin ve Balaguru YDB'a katılan çelik liflerin aderans üzerindeki etkisini incelemiştir [2]. Ayrıca De Larrard ve Malier, Tomaszewicz ve arkadaşları ve Azizinamini ve arkadaşlarının yayınlanan deneysel araştırmalarında bünyesel çatlama ve aderans gerilmesi-sıyırılma ilişkilerinin saptanmasına çalışılmıştır [3], [4], [5]. Bunların amacı, daha önce, çatlak ve aderans-sıyırılma mekanizmalarına ilişkin geliştirilmiş matematiksel modeller için veri elde etmek olarak özetlenebilir.

3. BU ARAŞTIRMANIN AMAÇ VE KAPSAMI

Bu araştırmanın amacı, YDB'nun donatı kenetlenme boyuna olan etkisini ve NDB'lar için geliştirilmiş kenetlenme boyu formül ve kurallarının YDB'lar için ne derece geçerli olduğunu araştırmaktır. O nedenle NDB ve YDB'la dökülen elemanlar üstünde çekip çıkarma deneyleri yapılarak aderans özelliklerinin göreceli olarak araştırılmasına çalışılmıştır [6]. Araştırma iki dizi deney içermektedir. İlk dizi normal ve yüksek dayanımlı betonlar için aderans gerilmeleri ve gerekli kenetlenme

boyunu karşılaştırmak için yapılmış bir çalışmadır. Bunda, basit aksenal çekip-çıkarma deneylerinden yararlanılmıştır. Deney elemanları pratikte yaygın biçimde kullanılan 12, 16 ve 20 mm çapında çubuklar ile donatılmıştır. Başlangıçta yapılan ön deneylerde, donatı çapının 20 katı (20 \emptyset) kenetlenme boyuna sahip elemanların bile taşıma gücüne donatının akması ile eriştiği görüldüğünden, esas deneylerde 20 \emptyset 'den daha kısa kenetlenme boylarını kullanma yoluna gidilmiştir. Araştırmanın sonuna doğru da, muhakkak surette yarıma kırılması gözlemek ve YDB için bir ortalama aderans dayanımı elde edebilmek amacıyla 20 mm çapında donatıya sahip ve kenetlenme boyları 3 \emptyset , 6 \emptyset , ve 9 \emptyset olan üç YDB eleman daha denenmiştir.

İkinci dizi deneyde amaç, YDB ile NDB'larda aderans davranışını karşılaştırmanın yanında, YDB için gerekli kenetlenme boyunun saptanmasıdır. Burada, kırış-lerdeki kenetlenme davranışını daha gerçekçi yansıttığı düşünülen dışmerkezli çekip-çıkarma yöntemi kullanılmıştır. Denenen elemanlarda beton örtü kalınlığı, donatı çapı ve etriye bulunup bulunmaması değişken parametreler olarak ele alınmıştır. Birinci dizide olduğu gibi 20 \emptyset 'lik kenetlenme boyu fazla görüldüğünden, kenetlenme boyu 15 ve 10 \emptyset 'ye kadar indirilmiştir.

Bütün deneylerde donatının sıyırılması ölçülerek donatı ve aderans gerilmesi-sıyırılma eğrileri elde edilmiş ve taşıma gücüne ulaşan elemanların davranışı izlenmiştir. Ayrıca deney elemanlarında Türkiye imalatı donatı çubukları kullanıldığı için, yerel nervür geometrisi koşulundan ötürü kenetlenme davranışında doğabilecek değişiklikleri gözleme olanağı da dolaylı şekilde sağlanmıştır.

4. DENEY ELEMANLARI VE DENEY DÜZENİ

Deney elemanları 150 \times 150 mm² kesitinde, kesite göre aksenal veya dışmerkezli tek bir çelik çubukla donatılmış betonarme prizmalardan oluşmuştur. Dışmerkezli donatılı elemanlar normal olarak etriyesiz olup, 15 mm kalınlığında beton örtüsüne sahiptirler. Ancak, beton örtü kalınlığı ve etriyenin kenetlenme üstündeki etkisini kabaca izlemek amacıyla bunların NDB'dan dökülmüş olanlarından bazılarında beton örtü kalınlığı 25 mm'ye çıkartılmış, bazılarında da etriye konulmuştur.

Deney eleman betonlarının yapımında PÇ 42.5 portland çimentosu, agrega olarak da doğal dere kum ve çakılı ile I ve II numara bazalt kırmataşı kullanılmıştır. YDB elde edebilmek için ise ayrıca Force 1000 silis dumanı ile Daracem 200 süperakış kanlaştırıcıdan yararlanılmıştır.

Donatı olarak BÇIII-a nervürlü çubuklar kullanılmıştır. Avrupa Beton Komitesi kurallarına göre göreceli nervür alanı

$$\alpha_{sb} = \frac{kF_R \sin \beta}{\pi \phi C_s} \quad (1)$$

nın aşağıda belirtilen sınırlara uyması gerekmektedir [7].

$$\begin{array}{ll} 4 < \emptyset < 6mm & \text{için } \alpha_{sb} \geq 0.040 \\ 6 < \emptyset < 12mm & \text{için } \alpha_{sb} \geq 0.045 \\ 12 < \emptyset < 50mm & \text{için } \alpha_{sb} \geq 0.055 \end{array}$$

(1) formülünde, F_R , bir enine nervürün alanı; C_s , enine nervürler arasındaki uzaklık; k , donatı çevresindeki enine nervür sayısı; β , donatı eksenine ile nervür arasındaki açı; \emptyset ise donatının nominal çapıdır. Kullanılan donatı için hesaplanan α_{sb} değerleri Tablo 1’de, deney elemanlarının dökümünde kullanılan beton bileşimleri de Tablo 2’de verilmiştir. Beton basınç dayanımının YDB’lar için 800, NDB’lar için 200 kgf/cm² civarında olması öngörülmüştür.

Çizelge 1. CEP-EIP’e göre Donatı Aderans Özelliklerinin Parametreleri

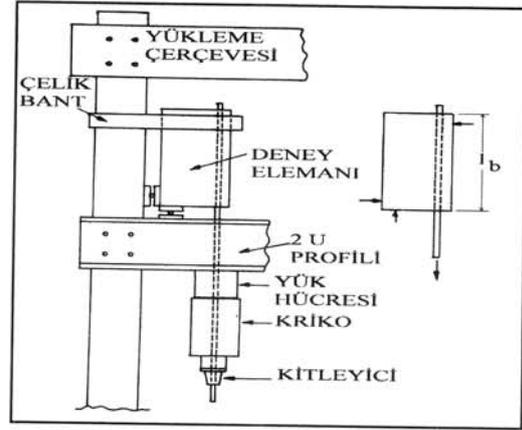
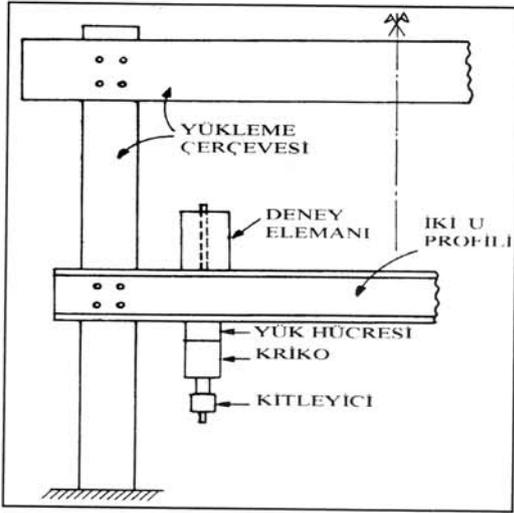
| Donatı Çapı (mm) | k | F_R (mm ²) | β (°) | \emptyset (mm) | C_s (mm) | α_{sb} | CEB |
|------------------|---|--------------------------|-------------|------------------|------------|---------------|-------|
| 12 | 2 | 15 | 60 | 12.15 | 7.28 | 0.09 | 0.045 |
| 16 | 2 | 20.92 | 60 | 15.72 | 10.14 | 0.07 | 0.055 |
| 20 | 2 | 27.9 | 60 | 19.58 | 12.15 | 0.06 | 0.055 |

Çizelge 2. Çekip-Çıkarma Deney Elemanları Yapımında Kullanılan Beton Bileşimleri

| Beton Bileşeni | YDB | NDB |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Çimento | 550 kg/m ³ | 300 kg/m ³ |
| Kum | 787 kg/m ³ | 898 kg/m ³ |
| Çakıl | - | 1031 kg/m ³ |
| I No Kırmataş | 432 kg/m ³ | - |
| II No Kırmataş | 432 kg/m ³ | - |
| Silis Dumanı | 82.5 kg/m ³ | - |
| Süperakışkanlaştırıcı | 22.5 kg/m ³ | - |
| Su | 165 kg/m ³ | 180 kg/m ³ |
| Su/Çimento | 0.30 | 0.60 |
| Çökme | 4 cm | 5 cm |
| Birim Ağırlık | 2500 kg/m ³ | 2450 kg/m ³ |
| 7 Günlük Dayanım | 632 kgf/cm ² | - |
| 28 Günlük Dayanım | 907 kgf/cm ² | 214 kgf/cm ² |

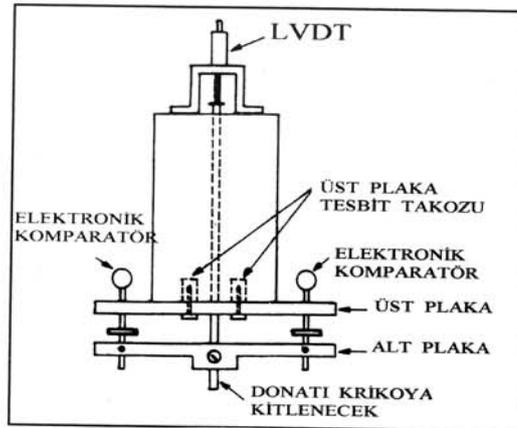
Deney elemanlarının beton basınç mukavemetleri hedeflenen mertebe civarına geldiği zaman elemanlar Şekil 1 ve 2'de görüldüğü gibi çekip-çıkarma deneyine tabi tutulmuşlar ve donatı ile betonları arasında hem yüklenen hem de serbest uçta meydana gelen sıyrılmalar Şekil 3'de görüldüğü gibi ölçülmüştür.

Yukarıda değinilen çekip-çıkarma deneylerinin herbiri için deney elemanının betonundan alınan yeteri sayıda numuneler üstünde, silindir basınç ve Brezilya yarma deneyi yapılmış, ayrıca donatıların akma ve kopma dayanımları ile kopma uzamaları saptanmıştır.



Şekil 1. Eksenel Çekip Çıkarma Deney Düzeneği

Şekil 2. Dışmerkezli Çekip Çıkarma Deney Düzeneği ve Deney Elemanı



Şekil 3. Çekip Çıkarma Deneyi Ölçme Düzeneği

Çekip-çıkarma deney elemanlarının özellikleri Tablo 3 ve 4’de verilmiştir. Burada, f_{yk} ve f_{su} çelik donatının ortalama akma sınırı ile kopma dayanımını, f_{ck} ile f_{cts} ise betonun deney günündeki ortalama basınç ve yarma dayanımlarıdır.

5. DENEY ELEMANLARININ KODU

Eksenel çekip-çıkarma deneylerinde kullanılan elemanların kodlanmasında ilk harf beton dayanımını (D:YDB, N:NDB) göstermektedir. Ondan sonra gelen iki sayı, donatı çapı cinsinden kenetlenme boyunu, ayırma işaretinden sonra kullanılan sayı ise donatı çapını (1 : $\emptyset 12$, 2 : $\emptyset 16$, ve 3 : $\emptyset 20$) vermektedir. Örneğin, D15-1, YDB, kenetlenme boyu 15 \emptyset ve donatı çapı 12mm olan bir elemandır.

Çizelge 3. Eksenel Çekip Çıkarma Deney Elemanlarının Özellikleri

| Eleman | Demir Çapı | Kenet. Boyu | f_{yk} (kgf/cm ²) | f_{su} (kgf/cm ²) | f_{ck} (kgf/cm ²) | f_{cts} (kgf/cm ²) |
|--------|------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| D20-1 | $\phi 12$ | 20 ϕ | 4617 | 7624 | 793 | 41.2 |
| D20-2 | $\phi 16$ | 20 ϕ | 3944 | 5932 | 755 | 55.8 |
| D20-3 | $\phi 20$ | 20 ϕ | 3934 | 6452 | 888 | 39.4 |
| D30-1 | $\phi 12$ | 30 ϕ | 4209 | 7430 | 891 | 52.2 |
| D15-1 | $\phi 12$ | 15 ϕ | 4913 | 7655 | 805 | 64.0 |
| D15-2 | $\phi 16$ | 15 ϕ | 4260 | 7064 | 805 | 64.0 |
| D15-3 | $\phi 20$ | 15 ϕ | 3985 | 6789 | 893 | 50.1 |
| D12-1 | $\phi 12$ | 12 ϕ | 4566 | 6697 | 871 | 65.9 |
| D12-2 | $\phi 16$ | 12 ϕ | 3802 | 6096 | 871 | 65.9 |
| D12-3 | $\phi 20$ | 12 ϕ | 4445 | 7065 | 871 | 65.9 |
| D9-3 | $\phi 20$ | 9 ϕ | 4415 | 7879 | 713 | 57.1 |
| D6-3 | $\phi 20$ | 6 ϕ | 4415 | 7879 | 713 | 57.1 |
| D3-3 | $\phi 20$ | 3 ϕ | 4471 | 7278 | 713 | 57.1 |
| N10-3 | $\phi 20$ | 10 ϕ | 4471 | 7278 | 177 | 18.9 |
| N15-1 | $\phi 12$ | 15 ϕ | 4352 | 5626 | 269 | 27.5 |
| N15-2 | $\phi 16$ | 15 ϕ | 3853 | 6135 | 269 | 27.5 |
| N15-3 | $\phi 20$ | 15 ϕ | 4505 | 7054 | 269 | 27.5 |
| N20-1 | $\phi 12$ | 20 ϕ | 4780 | 7502 | 222 | 26.3 |
| N20-2 | $\phi 16$ | 20 ϕ | 3425 | 5749 | 256 | 26.1 |
| N20-3 | $\phi 20$ | 20 ϕ | 4342 | 6931 | 242 | 25.2 |

Dışmerkezli çekip-çıkarma deneylerinde kullanılan elemanların kodlanmasında ilk iki harf beton dayanımını (DE:YDB, NE:NDB) göstermektedir. Daha sonra gelen iki sayı donatı çapı cinsinden aderans boyunu, üçüncü sayı ise donatı çapını (1 : $\emptyset 12$, 2 : $\emptyset 16$, 3 : $\emptyset 20$) belirtmektedir. Son sayı ise donatı üzerindeki beton örtü kalınlığıdır (1: 1.5 cm, 2:2.5 cm). Örneğin, DE1231, YDB, aderans boyu 12 \emptyset , donatı çapı 20 mm ve beton örtü kalınlığı 1.5 cm olan bir elemandır. Etriyeli elemanlar ise kodlarının sonuna E harfi konmak suretiyle belirtilmişlerdir. Yukarıda belirtilen

kodlamasının yanı sıra, basınç dayanımı öngörülen değerin çok üstüne çıkan üç NDB deney elemanı için kodun sonuna bir 0 eklenmiştir.

Çizelge 4. Dışmerkezli Çekip Çıkarma Deney Elemanlarının Özellikleri

| Eleman | Demir Çapı | Kenet. Boyu | Ortü (mm) | Etriye | f_{yk} (kgf/cm ²) | f_{su} (kgf/cm ²) | f_{ck} (kgf/cm ²) | f_{cts} (kgf/cm ²) |
|----------|------------|-------------|-----------|--------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| DE1511 | φ12 | 15φ | 15 | YOK | 5035 | 6646 | 805 | 59.1 |
| DE1521 | φ16 | 15φ | 15 | YOK | 3628 | 6095 | 931 | 62.1 |
| DE1531 | φ20 | 15φ | 15 | YOK | 4240 | 7380 | 851 | 70.3 |
| DE1211 | φ12 | 12φ | 15 | YOK | 4811 | 7461 | 900 | 55.0 |
| DE1221 | φ16 | 12φ | 15 | YOK | 3975 | 6360 | 900 | 55.0 |
| DE1231 | φ20 | 12φ | 15 | YOK | 4627 | 7288 | 900 | 55.0 |
| DE1212 | φ12 | 12φ | 25 | YOK | 4852 | 7023 | 870 | 66.2 |
| DE1222 | φ16 | 12φ | 25 | YOK | 4597 | 7451 | 870 | 66.2 |
| DE1232 | φ20 | 12φ | 25 | YOK | 4393 | 6941 | 870 | 66.2 |
| DE1011 | φ12 | 10φ | 15 | YOK | 5259 | 8328 | 856 | 57.0 |
| DE1021 | φ16 | 10φ | 15 | YOK | 4006 | 6411 | 856 | 57.0 |
| DE1031 | φ20 | 10φ | 15 | YOK | 2833 | 4638 | 856 | 57.0 |
| NE15110 | φ12 | 15φ | 15 | YOK | 5107 | 7186 | 452 | 41.8 |
| NE15210 | φ16 | 15φ | 15 | YOK | 3527 | 5912 | 460 | 43.8 |
| NE15310 | φ20 | 15φ | 15 | YOK | 4576 | 7278 | 452 | 41.8 |
| NE1511 | φ12 | 15φ | 15 | YOK | 5453 | 8532 | 234 | 27.5 |
| NE1521 | φ16 | 15φ | 15 | YOK | 4016 | 6534 | 234 | 27.5 |
| NE1511E | φ12 | 15φ | 15 | MİN. | 5626 | 8817 | 196 | 22.4 |
| NE1521E | φ16 | 15φ | 15 | MİN. | 3853 | 6493 | 196 | 22.4 |
| NE1531 | φ20 | 15φ | 15 | YOK | 4445 | 5922 | 141 | 18.3 |
| NE1531E1 | φ20 | 15φ | 15 | MİN. | 4719 | 7879 | 141 | 18.3 |
| NE1531 | φ20 | 15φ | 15 | 2×MİN | 4719 | 7808 | 141 | 18.3 |

6. ÇEKİP-ÇIKARMA DENEYLERİ

6.1 Gözlenen Davranış

Gerek eksenel, gerekse dışmerkezli çekip çıkarma deneylerinin her yük aşamasında, yük ile, yüklenmiş ve serbest uçlardaki donatı sıyrılması ölçülmüştür. Deneylerin büyük çoğunluğunda, kapasiteye, betonda yarılma olmadan donatının akması ile ulaşıldığından, serbest uçta çoğu kez belirgin bir hareket gözlenmemiştir. Buna karşılık yüklenmiş uçta, donatı, en düşük yük düzeyinden başlayarak betondan sıyrılmıştır. Donatının akması ile kapasitesine ulaşan elemanlarda akma düzeyine ulaşıldığında, yükün hemen hemen sabit kaldığı, yüklenmiş uçtaki yer değiştirmenin ise hızla arttığı gözlenmiştir. Bu durumda bahis konusu deneye son verilmiştir. Donatısı akarak kapasitesine ulaşan elemanlarda hiçbir çatlak gözlenmemiştir. NDB'la yapılan ve aderans boyu 15φ olan elemanlarda önce donatı akmış, ancak artan şekil değiştirmeler altında numune çekilen uçta V-tipi çatlamlar gözlendikten sonra yarılmıştır. Benzer bir davranış, çapı 20 mm ve aderans boyu 20φ olan numunede de gözlenmiştir. Aderans boyu 10φ'ye indirildiğinde ise donatı akmadan eleman yarılmıştır.

20 mm çapında donatı kullanılarak YDB'dan imal edilen, kenetlenme boyları 9φ, 6φ ve 3φ olan üç eksenel çekip çıkarma elemanı donatıları akma konumuna ulaşmadan yarılarak kırılmıştır. Kenetlenme boyu 9φ olan elemanda yarılma, yüklenen uçtan başlayıp donatı boyunca oluşan çatlağı izlemiştir.

Donatı çapı 20 mm ve kenetlenme boyu 15φ olan üç NDB'lu dışmerkezli çekip-çıkarma deney elemanından birine hiç etriye konmamış, ikincisine TS-500'de

öngörülen minimum, üçüncüsüne ise minimumun iki katı etriye konmuştur [8]. Her üç numune de donatıları akma gerilmesine ulaşmadan yarılarak kırılmıştır. Yarılma oluşmadan önce altta donatı boyunca bir çatlak gözlenmiştir. Daha sonra, yanda donatı düzeyinde ve donatı boyunca oluşan çatlaklar gözlenmiştir. Kırılma, beton örtüsünün yarılması ile oluşmuştur. Etriyenin varlığı, kırılmanın gevrekliğini azaltmış ve beton örtüsünün ayrılmasını önlemiştir.

6.2. Deney Sonuçları

Deney sonuçları, Tablo 5 ve 6'da özetlenmiştir. Tablolarda verilen maksimum aksel yük P_1 , yük şekil değiştirme eğrisinin eğiminin sıfır olduğu noktadaki veya yarılmaya neden olan yüküdür. Eğimin sıfır olduğu noktadaki yük, donatının aktığı yüküdür. Kullanılan ortalama aderans ve donatı gerilmeleri, bu yük temel alınarak hesaplanmıştır. Maksimum ortalama aderans gerilmesi,

$$\tau^* = \frac{P_1}{1_b(\phi\pi)} \quad (2)$$

P_1 değeri, aderans boyu 1_b ve donatı çevresine bölünerek elde edilmiştir. Donatı akması ile sonuçlanan deneylerde bir aderans dayanımı söz konusu olmadığından, maksimum ortalama aderans gerilmesi Denklem (2) kullanılarak yalnızca yarılarak gücü sona eren deney elemanları için hesaplanmıştır. Betonun yarılması ile kapasitelerine ulaşan elemanlar arasında yapılacak karşılaştırmalar için beton çekme dayanımlarındaki farklılık önemlidir. Maksimum ortalama aderans gerilmelerini bu etkiden arındırmak için, betonun çekme dayanımını simgeleyen basınç dayanımının karekökü kullanılarak NDB'lar $f_{ck} = 200 \text{ kgf/cm}^2$ 'ye, YDB'lar ise $f_{ck} = 850 \text{ kgf/cm}^2$ ye göre normalize edilip, dozeltirilmiş gerilme değerleri

$$\tau_b = \tau_b^* \frac{\sqrt{200}}{\sqrt{f_{ck}}} \text{ veya } \tau_b = \tau_b^* \frac{\sqrt{850}}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (3)$$

olarak verilmiştir. Donatı gerilmeleri, P_1 değeri donatı alanına bölünerek bulunmuştur. Bu değerlerin f_{yk} ile karşılaştırılması sonucu donatının akıp akmadığı veya akmaya ne kadar yaklaştığı kolayca görülebilir. Tablo 5 ve 6'nın son kolonunda ise kırılma türü belirtilmiştir.

Deneyler sonucu elde edilen aderans gerilmesi-sıyrılma eğrileri Şekil 4 ve 5'de ve donatı gerilmesi-sıyrılma eğrileri de Şekil 6-16'da verilmiştir. Burada değinilen sıyrılma, yüklenmiş uçtaki sıyrılma olup, Şekil 3'deki gibi donatının betona göre yer değiştirmesini ölçen iki elektronik komparatör (dial gage) okumasının ortalamasından, kenetlenme boyu dışında kalan donatıdaki uzama çıkartılarak hesaplanmıştır.

Elemanların çoğu kapasitelerine donatının akması ile ulaştığından serbest uçta bir hareket kaydedilmemiştir. Ancak, donatı aktıktan sonra, serbest uçta belirgin bir hareket gözlenmiştir. Bu elemanlar için elde edilen bazı tipik aderans gerilmesi-serbest uç sıyrılması eğrileri Şekil 17'de verilmiştir.

Deney elemanları yapımında, Türkiye piyasalarına normal olarak arz edilen nervürlü çelik çubuklar kullanılmıştır. Bunların göreceli nervür alanları Tablo 1'de

gösterildiği gibi 0.093, 0.071 ve 0.062 olup, CEB'nin aderansı yüksek donatı için öngördüğü minimum değerlerin üzerindedir [7]. Dolayısıyla deneylerde kullanılan donatının yüzey karakterinin yüksek aderans niteliği bakımından Avrupa standartlarını karşıladığı söylenebilir.

Çizelge 5. Eksensel Çekip Çıkarma Deney Sonuçları Özeti

| | Maksimum Eksenel Yük P_1 (kgf) | Maksimum Çelik Gerilmesi (kgf/cm ²) | Maksimum Ortalama Aderans Gerilmesi (kgf/cm ²) | Düzeltilmiş Aderans Gerilmesi (kgf/cm ²) | Kırılma Biçimi |
|-------|----------------------------------|---|--|--|----------------|
| D20-1 | 4760 | 4212 | | | AKMA |
| D20-2 | 7000 | 3482 | | | AKMA |
| D20-3 | 12500 | 3980 | | | AKMA |
| D30-1 | 4840 | 4283 | | | AKMA |
| D15-1 | 4780 | 4267 | | | AKMA |
| D15-2 | 6700 | 3333 | | | AKMA |
| D15-3 | 12780 | 4070 | | | AKMA |
| D12-1 | 4820 | 4265 | 88.8 | 87.7 | YARILMA |
| D12-2 | 6640 | 3303 | | | AKMA |
| D12-3 | 12640 | 4025 | | | AKMA |
| D9-3 | 8040 | 2560 | 71.1 | 77.6 | YARILMA |
| D6-3 | 6536 | 2081 | 86.7 | 94.6 | YARILMA |
| D3-3 | 12533 | 806 | 67.1 | 73.3 | YARILMA |
| N10-3 | 6691 | 2130 | 53.2 | 56.6 | YARILMA |
| N15-1 | 4760 | 4212 | | | AKMA |
| N15-2 | 7600 | 3781 | 63.1 | 54.3 | YARILMA |
| N15-3 | 11600 | 3694 | 61.5 | 53.0 | YARILMA |
| N20-1 | 4540 | 4017 | 50.2 | 47.6 | YARILMA |
| N20-2 | 6780 | 3373 | | | AKMA |
| N20-3 | 12540 | 3993 | 49.9 | 45.3 | YARILMA |

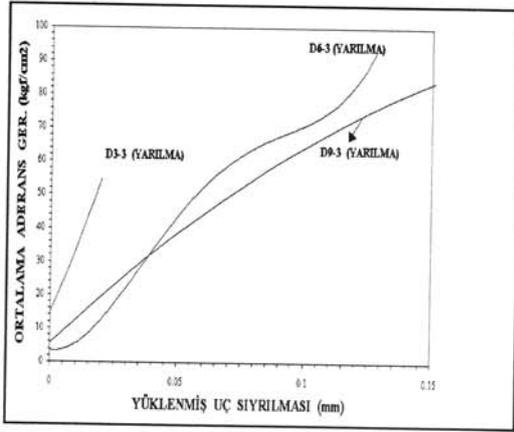
Şekil 6, 7 ve 8'de 120, 150 ve 200'lik kenetlenme boylarına sahip 120, 160 ve 200'lik çubuklarda donatılmış YDB eksenel çekip-çıkarma deney elemanlarında ölçülen uç çelik gerilmesi-sıyırılma ilişkileri verilmiştir. Aynı ilişkiler, 100, 120 ve 150'lik kenetlenme boyu ve 1.5 cm'lik beton örtü kalınlığına sahip YDB dışmerkezli çekip-çıkarma deney elemanları için de Şekil 14, 15 ve 16'da gösterilmiştir. Bu deneylerin biri hariç hepsi donatının akmasıyla sonuçlanmıştır. Elde edilen eğriler, donatı akıncaya kadar uçtaki sıyırılmaların, kenetlenme boyundan bağımsız olarak uç çekme kuvveti ile orantılı biçimde, büyüdüğünü göstermektedir. 100 ile 200 arasında değişken kenetlenme boylarına sahip aynı çapta çelik çubukla donatılmış elemanlar, benzeri yükler altında yaklaşık olarak aynı biçimde davranmışlardır. Bu, kenetlenme boyunun gereğinden uzun olması halinde, deney elemanının çekilen ucundan 1_b uzaklıktaki bir kesitte, çelikle beton arasındaki göreceli yer değiştirmenin,

Çizelge 6. Dışmerkezli Çekip Çıkarma Deney Sonuçları Özeti

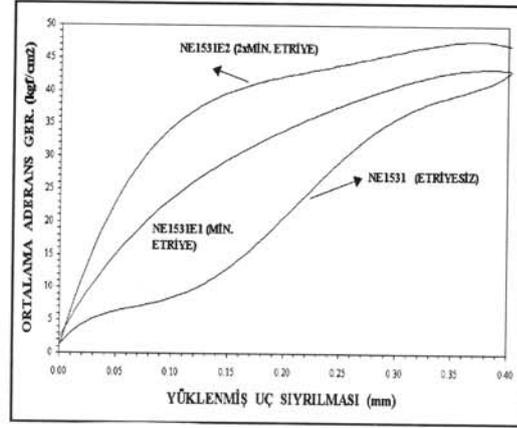
| Eleman | Maksimum Eksenel Yük (kgf/cm ²) | Maksimum Çelik Gerilmesi (kgf/cm ²) | Maksimum Ortalama Aderans Gerilmesi (kgf/cm ²) | Düzeltilmiş Aderans Gerilmesi (kgf/cm ²) | Kırılma Biçimi |
|----------|--|--|---|---|--------------------|
| DE1511 | 5400 | 4778 | | | AKMA |
| DE1521 | 7000 | 3482 | | | AKMA |
| DE1531 | 12000 | 3821 | | | KESME KIRILMASI |
| DE1211 | 5200 | 4601 | | | AKMA |
| DE1221 | 6840 | 3402 | | | AKMA |
| DE1231 | 10000 | 3184 | | | KESME KIRILMASI |
| DE1212 | 4940 | 4407 | | | AKMA |
| DE1222 | 7800 | 3880 | | | AKMA |
| DE1232 | 12000 | 3821 | | | KESME KIRILMASI |
| DE1011 | 5028 | 4449 | | | AKMA |
| DE1021 | 7232 | 3599 | | | AKMA |
| DE1031 | 13034 | 4151 | | | AKMA |
| NE15110 | 5000 | 4425 | | | AKMA |
| NE15210 | 6920 | 3442 | | | AKMA |
| NE15310 | 10200 | 3248 | | | KESME KIRILMASI |
| NE1511 | 5008 | 4330 | | | AKMA |
| NE1521 | 6962 | 3460 | | | AKMA |
| NE1511E | 4757 | 4210 | | | AKMA |
| NE1521E | 6691 | 3330 | | | AKMA |
| NE1531 | 8083 | 2575 | 42.9 | 50.9 | YARILMA |
| NE1531E | 8296 | 2642 | 44.1 | 52.2 | YARILMA |
| NE1531E2 | 9011 | 2869 | 47.8 | 56.7 | YARILMA |

dolayısıyla da aderans gerilmelerinin sıfırlandığını ve donatı ucundaki çekme, akma sınırına ulaştığı zaman tam sıyrılmayı önleyen minimum kenetlenme boyu l_b 'nin $10\emptyset$ 'den küçük olduğunu göstermektedir. Oysa Şekil 4'te görüldüğü gibi $9\emptyset$ ve daha kısa kenetlenme boylarına ve 20 mm çapında donatıya sahip, basınç mukavemeti diğerlerinininkinden yaklaşık yüzde on kadar düşük YDB elemanlar üstünde yapılan eksenel çekip çıkarma deneylerinin üçü de yarılma, yani aderans tükenmesiyle sonuçlanmıştır. Şekil 4 ve 6, 7, 8, 14 15 ve 16'daki tüm veriler birlikte değerlendirildiği takdirde, çapı 20 mm veya daha küçük olan, 1.5 cm veya daha kalın beton örtüsü bulunan, monotonik yük altındaki YDB elemanlar için, $10\emptyset$ uzunluğunda bir kenetlenme boyu yeterli görülmektedir. Ancak gerçek yapıların durumu genellikle deney eleman-

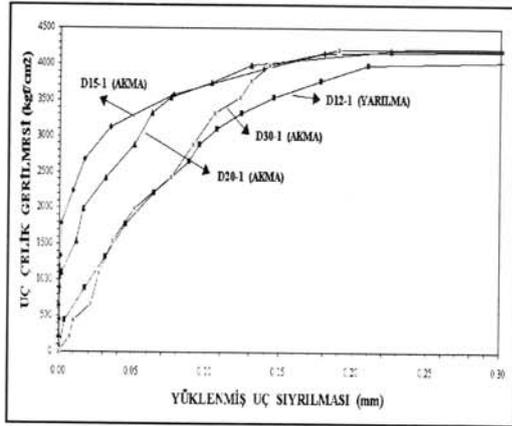
larınkinden farklıdır. Yük tekrarlarına maruz kalırlar, yanyana sıralanmış birden fazla donatı çubuğuna sahiptirler, bünyelerinde moment ve kesme etkisiyle önceden oluşmuş çatlaklar mevcuttur. Bütün bunlar betondaki aderans yarılmasını hızlandıran faktörler olup yukarıda belirtilen kenetlenme boyu için emniyet payı saptanırken göz önüne alınmalıdırlar. Burada, deneyler sırasında diğer elemanlardan farklı bir biçimde yarılarak kırılan, 120'lik kenetlenme boyu ile Ø12'lik donatıya sahip D12-1 elemanın davranışı şüphe ile değerlendirilmelidir, çünkü diğer deneylerde aynı boyda kenetlenmeye sahip elemanların donatısı, çapı çok daha büyük olsa dahi betonu yarmayı başaramadan akmıştır.



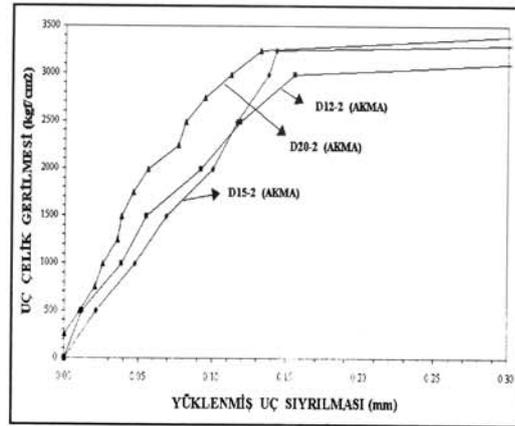
Şekil 4. Ortalama Aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi



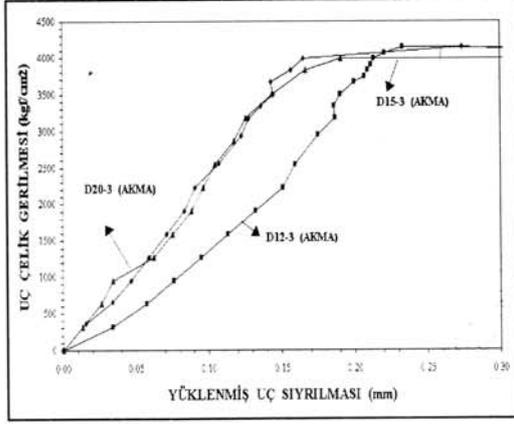
Şekil 5. Ortalama Aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi



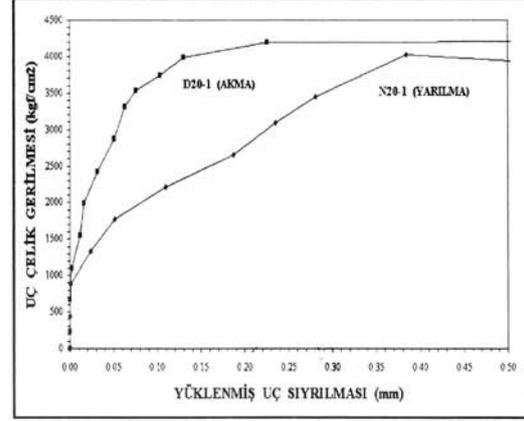
Şekil 6. Değişik kenetlenme boyları için uç çelik-sıyrılma ilişkisi



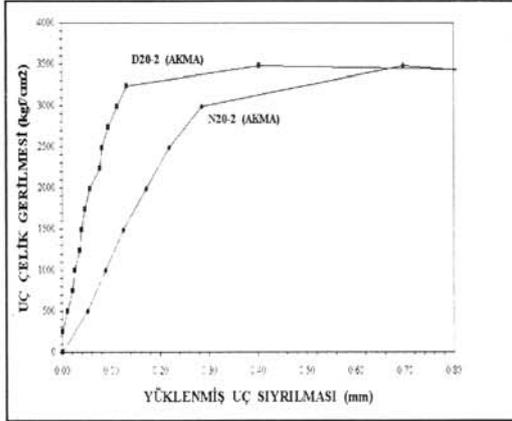
Şekil 7. Değişik kenetlenme boyları için uç çelik gerilmesi-sıyrılma ilişkisi



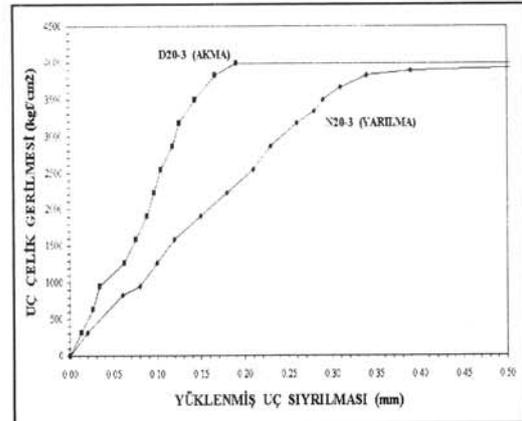
Şekil 8. Değişik kenetlenme boyları için uç çelik gerilmesi-sıyrılma ilişkisi



Şekil 9. NDB ve YDB için uç çelik gerilmesi-sıyrılma ilişkisi



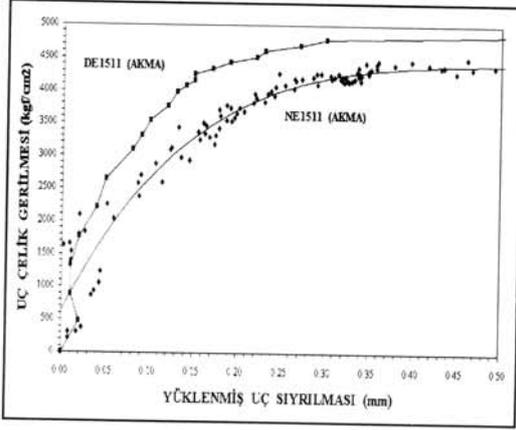
Şekil 10. NDB ve YDB için uç çelik gerilmesi-sıyrılma ilişkisi



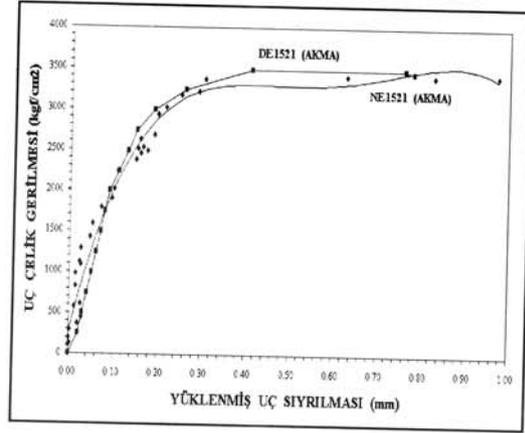
Şekil 11. NDB ve YDB için uç çelik gerilmesi-sıyrılma ilişkisi

NDB elemanların donatı çapı 20 mm olanlarında bile, kenetlenme boyu 20 \emptyset olduğu zaman donatı akma konumuna ulaşmış ancak deformasyon arttırıldığında betonunda yarılarak kırılma meydana gelmiştir. Kenetlenme boyu 15 \emptyset 'ye indirildiğinde ise, donatı çapı 20 mm olan eleman, donatısı akma konumuna ulaşmadan donatı boyunca oluşan bir aderans çatlağından yarılarak kırılmıştır. Kenetlenme boyu 10 \emptyset olan aksel deney elemanı da yine donatısı akmadan yarılarak kırılmıştır. Kenetlenme boyu 10 \emptyset olan aksel deney elemanı da yine donatısı akmadan yarılarak kırılmıştır. Bu deneyler sonucu 20 \emptyset 'lik kenetlenme boyunun NDB için sınır durumu simgelediği

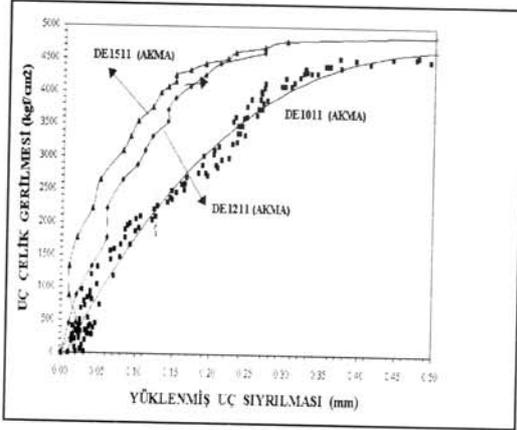
söylenebilirse de emniyet payları saptanırken yukarıda YDB'lar için belirtilen aderans gücünü düşürücü tüm faktörler yine göz önünde tutulmalıdır.



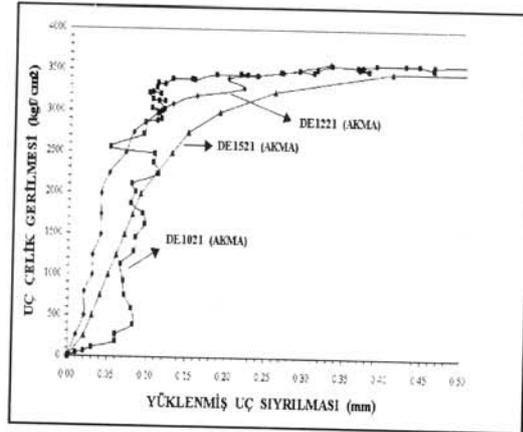
Şekil 12. NDB ve YDB için uç çelik gerilmesi-sıyırılma ilişkisi



Şekil 13. NDB ve YDB için uç çelik gerilmesi-sıyırılma ilişkisi



Şekil 14. Değişik kenetlenme boyları için uç çelik gerilmesi-sıyırılma ilişkisi

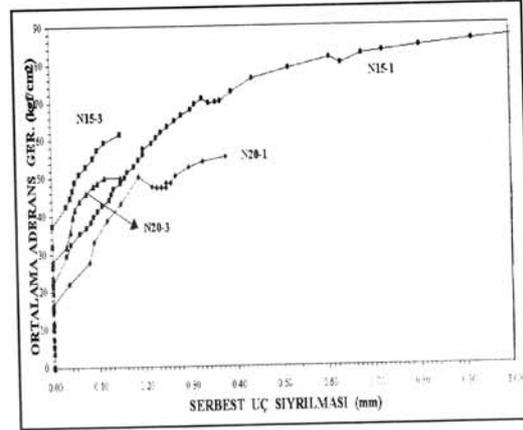
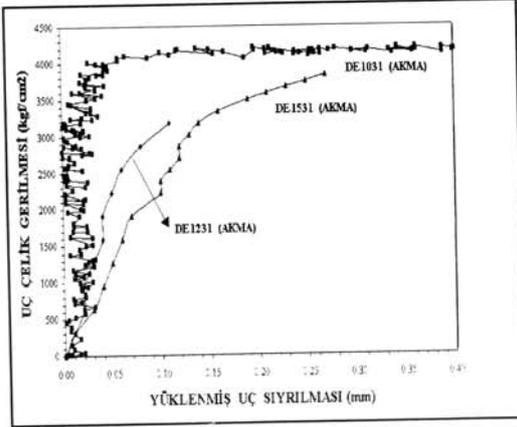


Şekil 15. Değişik kenetlenme boyları için uç çelik gerilmesi-sıyırılma ilişkisi

Betonda bir aderans dayanımı saptayabilmek için aderans kırılmasına yani yarılma ile sonuçlanan deneylere bakmak gerekir. Bu elemanlar için, Denklem (2) de P_1 yerine erişilen maksimum yük, 1_b yerine kenetlenme boyu konarak ortalama maksimum aderans dayanımı hesaplanabilir. Beton yarılma dayanımının bir ölçüsü olan $\sqrt{f_{ck}}$ 'ye bağlı olarak, ortalama maksimum aderans gerilmesi,

$$\tau_b = C\sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bahis konusu deneyler sonucu Denklem (2) ve (4) kullanılarak her eleman için hesaplanan τ_b ve C katsayısının değerleri Tablo 7'de gösterilmiştir.



Şekil 16. Değişik kenetlenme boyları için uç çelik gerilmesi-sıyrılma ilişkisi

Şekil 17. Ortalama aderans gerilmesi-serbest uç sıyrılması ilişkisi

3 \emptyset , 6 \emptyset ve 9 \emptyset 'lik kenetlenme boyuna sahip 20 mm çapında çubukla donatılmış YDB aksenal çekip çıkarma deney elemanları D9-3, D6-3 ve D3-3 üstünde yapılan deneyler yarıma ile sonuçlanmıştır. Bu üç deney 20 mm çapındaki donatı çubukları için YDB'lardaki ortalama aderans dayanımının mertebesi hakkında bir fikir vermesi bakımından önemlidir. Bunlar için saptanan C katsayıları, Denklem (4)'ün sınırlarını YDB'lar için

$$\tau_b = 2.5\sqrt{f_{ck}} \text{ ile } 3.2\sqrt{f_{ck}}$$

olarak vermektedir. Üç deneyin dışında yarılarak kırıldığı gözlenen değişik donatı çapına sahip diğer YDB eleman, D12-1 için de C=3.00 olup, yukarıda belirtilen sınırlar içinde kalmaktadır.

Donatının akması ile sonuçlanan deneylerde, yüklenen uçtan içeri doğru belirli bir uzaklıkta aderans gerilmesi sıfır olmaktadır. Aderans gerilmesinin yayıldığı boy l_b kabul edilirse, bu boy $\tau_b = 2.5\sqrt{f_{ck}}$ ve $\tau_b = 3.2\sqrt{f_{ck}}$ için Denklem (2)'den hesaplanabilir. Bu şekilde hesaplanan l_b/\emptyset değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

Burada kenetlenme boylarının gereğinden uzun olduğu, aderans kırılması olmadan donatılarının akmasından belli olan yirmibir YDB elemandan ikisinin, aderans dayanımının üst sınırını kullanmak suretiyle hesaplanan minimum l_b boyundan daha bile kısa, altısının ise bu boya çok yakın kenetlenmelere sahip oldukları görülmektedir. Yani bu elemanlar için maksimum ortalama aderans gerilmesinin üst sınırı kabul edilen $\tau_b = 3.24\sqrt{f_{ck}}$ emniyetle kullanılabilir. Hatta hesaplanan gerekli minimum kenetlenme boyları gerçekten sahip oldukları 10 \emptyset 'lik kenetlenme boyundan uzun çıkan

DE1011 ve DE 1031 elemanları için Denklem (4)teki C katsayısı, üst sınır 3.2den biraz daha da yukarıda tutulabilir. Aderans dayanımı için alt sınır değeri $\tau_b = 2.5\sqrt{f_{ck}}$ kabul edilerek bulunan 1_b 'lerin ise aşırı uzun olduğu Tablo 8'de açıkça görülmektedir. 90'lik kenetlenme boyuna sahip D9-3 deney elemanının yarılarak kırıldığı göz önüne alınıp deney sonucu donatısı akmış olan, 100'lik kenetlenme boyuna sahip DE1011 elemanının yarılma sınırına çok yakınlaştığı varsayılırsa, τ_b üst sınırı için C=3.8 olur. Tüm durum değerlendirildiğinde, bu çalışmada çekip-çıkarma deneyine tabi tutulan YDB'lar için ortalama maksimum aderans gerilmesinin

$$\tau_b = 3.2 \text{ ile } 3.8\sqrt{f_{ck}}$$

arasında olduğu söylenebilir.

Çizelge 7. Yarılma ile Sonuçlanan Deneylerden Bulunan τ_b Değerleri

| Eleman | Kenetlenme Boyu 1_b | Maksimum Ortalama Adreans Gerilmesi $\tau_b(\text{kgf/cm}^2)$ | $C = \tau/\sqrt{f_{ck}}$ (NDB) | $C = \tau/\sqrt{f_{ck}}$ (YDB) |
|----------|-----------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|
| NE1531 | 15 ϕ | 42.9 | 3.6 | |
| NE1531E | 15 ϕ | 44.1 | 3.7 | |
| NE1531E2 | 15 ϕ | 47.8 | 4.0 | |
| D12-1 | 12 ϕ | 88.8 | | 3.0 |
| D9-3 | 9 ϕ | 71.1 | | 2.7 |
| D6-3 | 6 ϕ | 86.7 | | 3.2 |
| D3-3 | 3 ϕ | 67.1 | | 2.5 |
| N10-3 | 10 ϕ | 53.2 | 3.9 | |
| N15-2 | 15 ϕ | 63.1 | 3.8 | |
| N15-3 | 15 ϕ | 61.5 | 3.7 | |
| N20-1 | 20 ϕ | 50.2 | 3.4 | |
| N20-3 | 20 ϕ | 49.9 | 3.2 | |

NDB'lar için de, C değerinin 3.2 ile 4.0 arasında değiştiği Tablo 7'de görülmektedir. $\tau_b = 3.2\sqrt{f_{ck}}$ ve $4.0\sqrt{f_{ck}}$ kabul etmek suretiyle NDB'lar için hesaplanan maksimum ve minimum $1_b/\emptyset$ değerleri de, gene, Tablo 8'de verilmiştir. NDB elemanlar üstünde yapıp da donatının akmasıyla sonuçlanan 9 deneyden 3 tanesinde kenetlenme boyu, aderans dayanımı için gerekliliği hesapla saptanan minimum 1_b değerlerinden de kısa, 3'ünde de buna çok yakındır. Yani bu elemanlarda maksimum ortalama aderans gerilmesinin üst sınırı olarak kabul edilen $\tau_b = 4.0\sqrt{f_{ck}}$ kullanılabilir. Kenetlenme boyu 1_b değerinden kısa olan NE1511 ve NE1511E elemanları ise (4) ifadesindeki C değerinin 5.01'e kadar yükselebileceğini göstermektedir. Gene Tablo 8'de, NDB'lar için hesaplanan maksimum 1_b değerinin çoğu eleman için gerekenden uzun kaldığı, dolayısıyla fazla bir mana ifade etmediği gözlenmektedir. Tüm durum değerlendirildiğinde bu çalışmada çekip-çıkarma deneyine tabi tutulan NDB'lar için ortalama maksimum aderans gerilmesinin

$$\tau_b = 4.0 \text{ ile } 5.0 \sqrt{f_{ck}}$$

arasında olduğu söylenebilir.

Çizelge 8. Akma ile Sonuçlanan Deney Elemanları İçin Hesaplanan maksimum ve Minimum 1_b Değerleri

| Eleman | Kenetlenme Boyuna/ ϕ | Minimum $1_b/\phi$ | Maksimum $1_b/\phi$ |
|---------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| D20-1 | 20 | 11.53 | 14.88 |
| D20-2 | 20 | 9.77 | 12.61 |
| D20-3 | 20 | 10.29 | 13.29 |
| D30-1 | 20 | 11.05 | 14.27 |
| D15-1 | 30 | 11.49 | 14.83 |
| D15-2 | 15 | 9.06 | 11.69 |
| D15-3 | 15 | 10.49 | 13.55 |
| D12-2 | 12 | 11.13 | 14.37 |
| D12-3 | 12 | 10.51 | 13.57 |
| N15-1 | 15 | 15.99 | 19.85 |
| N20-2 | 20 | 13.11 | 16.43 |
| DE1511 | 15 | 12.98 | 16.76 |
| DE1521 | 15 | 8.80 | 11.36 |
| DE1531 | 15 | 10.10 | 13.04 |
| DE1211 | 12 | 11.82 | 15.26 |
| DE1221 | 12 | 8.75 | 11.29 |
| DE1231 | 12 | 8.18 | 10.56 |
| DE1212 | 12 | 11.42 | 14.74 |
| DE1222 | 12 | 10.14 | 13.09 |
| DE1232 | 12 | 9.98 | 12.89 |
| DE1011 | 10 | 11.72 | 15.13 |
| DE1021 | 10 | 9.48 | 12.25 |
| DE1031 | 10 | 10.93 | 14.12 |
| NE15110 | 15 | 12.95 | 16.25 |
| NE15210 | 15 | 10.08 | 12.65 |
| NE15310 | 15 | 9.51 | 11.93 |
| NE1511 | 15 | 18.02 | 22.59 |
| NE1521 | 15 | 14.09 | 17.70 |
| NE1511E | 15 | 18.69 | 23.42 |
| NE1521E | 15 | 14.79 | 18.53 |

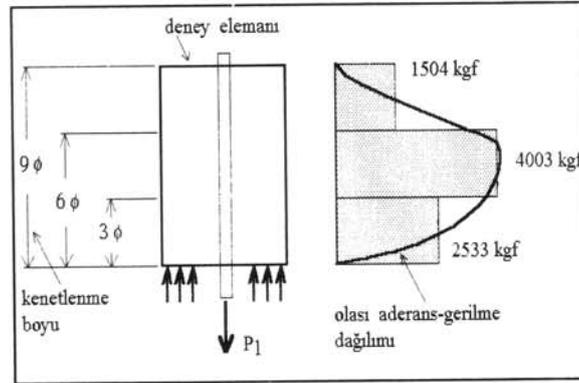
(5) ve (6) ifadelerinde kullanılan C katsayısı, YDB'larda, NDB'lardakine oranla yüzde 20 ile 24 arasında daha düşüktür. Yani, beton basınç dayanımına göre aderans gerilme dayanımı YDB'larda NDB'lara göre daha yavaş artmaktadır. Oysa, araştırma sırasında malzeme kontrolü için yapılan yarma ve basınç deneylerinde,

NDB'lar için ortalama 0.5 civarında olan $f_{cts}/\sqrt{f_{ck}}$ oranının, YDB'larda 0.6 düzeyinin üstüne çıktığı gözlenmiştir. Yani, YDB'ların çekme dayanımı, beton basınç dayanımı arttıkça NDB'a göre daha hızlı artmaktadır. Bu ilginç bir noktadır, çünkü betonun yarıma dayanımı artarken, yarıma dayanımına bağlı olması gereken aderans dayanımı, YDB'larda göreceli olarak azalıyor gibi bir izlenim vermektedir. YDB'lardaki bindirmeli eklemlerde bindirme boylarını inceleyen çalışmalarında benzeri bulgular elde etmiş olan Aziznamini ve arkadaşları olayı, NDB'larda yarımadan önce kenetlenme boyuna eşit yayılan maksimum aderans gerilmelerinin, YDB'larda yüklenmiş uçta yoğunlaştığını varsayan bir hipotezle izah etmişlerdir [5]. Buna göre, aderans dayanımının önemli bir kısmını oluşturan nervürle beton arasındaki ezilmeye karşı direnç, NDB'larda yüksek olmadığından, donatı nervürleri çekilen uçtan itibaren betonu ezerek sıyrılmakta, artan yük gerideki nervürlere binmekte ve sonuçta beton yarılrken maksimum aderans gerilmeleri kenetlenme boyunca az çok eşit biçimde yayılmaktadır. Oysa, YDB'ların ezilme dayanımı yüksek olduğundan, uçtaki sıyrıma, dolayısıyla gerilerdeki beton ezilmesi nisbeten düşük kalmakta, maksimum aderans gerilmeleri ve yarma kuvvetleri yüklenen uç civarında yoğunlaşıp, ilkin bu bölgeyi çatlatarak elemanın yarımasına neden olmaktadır. Kenetlenme boyunun iç kesimlerine doğru aderans gerilmelerinin düşmesini öngören bu varsayım, maksimum ortalama aderans gerilmelerinin, YDB elemanlarda, neden göreceli olarak düşük çıktığını açıklamaktadır. Boğaziçi Üniversitesi deneylerindeki gözlemler de yukarıdaki varsayımı destekler mahiyettedir. Buradaki NDB'la dökülen elemanlarda, donatı nervürlerinin betonu tüm kenetlenme boyunca ezerek sıyırdığı ve elemanın yarımasına yol açan çatlağın bütün kenetlenme boyunu kat ederek oluştuğu gözlenmiştir. Oysa deneyler sonunda yarılan YDB elemanlarda belirgin bir ezilme sıyrılmaları izlenmemiştir. Bu da yarılmaya neden olan çatlağın yüklenen uçta oluştuğu savını desteklemektedir. Ayrıca Şekil 9, 10, 11, 12, 13'de verilen uç çelik gerilmesi-sıyrıma ilişkilerinde, NDB'lara göre YDB'larda gözlenen düşük sıyrılmalar da bunun bir işaretidir.

Deneyler sırasında yarılarak gücü tükenen 90, 60 ve 30'lik kenetlenme boylarına sahip YDB üç elemanda gözlenen maksimum ortalama aderans gerilmeleri sırasıyla 71, 87 ve 67 kgf/cm² dir. Donatıları aynı olup, aynı beton karışımından dökülmüş olan bu elemanların gerilmelerinde gözlenen farklılık ve bu gerilmelerin orta boy elemanda en yüksek değere erişmesi, aderans gerilmelerinin kenetlenme boyuna eşit yayılmadığının bir işareti olarak algılanmalıdır. Dolayısıyla, kırılmada maksimum aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca düzgün yayıldığı varsayımına dayalı, NDB'lar için geliştirilmiş kenetlenme boyu formülleri, YDB'larda doğrudan kullanılmamalıdır. Deneyler bunların tehlikeli yönde yüzde yirmiyi aşan oranlarda yanıltıcı olabileceğini göstermiştir. 90'lik kenetlenme boyuna sahip eleman 8040 kgf, 60 ve 30'lik kenetlenme boyuna sahip olanları ise 6536 ve 2533 kgf. taşımışlardır. Bu, YDB elemanlarda, maksimum aderans gerilme dağılımı farklarının NDB'larinkinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Aksi halde, deney elemanlarının az çok kenetlenme boylarına orantılı yükler taşınması gerekirdi. Ayrıca kenetlenme boyu 90 olan bir elemanın yüklenen uçtan başlayarak herbiri 30 uzunluğunda üç kısımdan oluştuğu düşünülürse, birinci kısımda 30'lik, ilk iki kısımda 60'lik, üç kısmın toplamında da 90'lik kenetlenme boyuna sahip deney elemanının taşıdığı yük kadar aderans

direnci oluşacağı varsayılabilir. Buna göre, 90'lik kenetlenme boyuna sahip elemanın, yarıma anında aderans ile taşıdığı 8040 kgfluk tüm yükün 2533 kgfluk kısmının ilk 30'lik bölgeye, (6536-2533=) 4003 kgfluk kısmının ortadaki 30'lik bölgeye ve son kalan (8040-6536=) 1504 kgfluk kısmının da sondaki 30'lik bölgeye yayılmış olması gerekir. Bu, bahis konusu deney elemanının kenetlenme boyu gerekli minimum kenetlenme boyuna yakın olduğundan, YDB'larda aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca ne şekilde yayılacağı hakkında kaba bir fikir verebilir. Belki de, "aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca Şekil 18'de görüldüğü gibi değişeceği" söylenebilir.

Enine donatının, yani etriyenin kenetlenme ve kenetlenme boyu üzerindeki etkisini araştırmak üzere bir dizi deney yapılmıştır. Bu deneyler, YDB'da gereksinme duyulan kenetlenme boyu çok küçük olduğundan, sadece NDB elemanlar üstünde yapılmış, ancak onların da sadece iki tanesi yarıma, yani aderans kırılmasıyla sonuçlanmıştır. Bunlardan elde edilen ortalama aderans gerilmesi-yüklenmiş uç sıyrılması ilişkileri aynı donatı ve kenetlenme boyuna sahip, etriyesiz NE 1531 elemanınkilerle birlikte Şekil 5'de verilmiştir. Kodunun sonunda E1 bulunan elemanda, TS-500'de öngörülen minimum oranda, E2 bulunanında ise onun iki katı etriye vardır [8]. Kullanılan enine donatı miktarının uç sıyrılması üstündeki olumlu etkisi Şekil 5'de izlenebilmektedir. Buna paralel olarak hem Şekil 5'de hem de Tablo 6'da ortalama aderans dayanımının yükseldiği görülmektedir. Düzeltilmiş aderans gerilmesi, etriyesiz, minimum ve minimumun iki katı etriyeye sahip elemanlar için, sırasıyla, 50.9, 52.2'ye 56.7 kgf/cm² olarak bulunmuştur.



Şekil 18. 90'lik kenetlenme boyuna sahip çekip-çıkarma deney elemanı için olası aderans gerilme dağılımı

Betonarme elemanlarda çatlak genişliği, önemli ölçüde, donatı ile beton arasında çatlakta oluşacak sıyrılmaya bağlıdır. Şekil 9, 10, 11'de kenetlenme boyu 200 olan, sırasıyla Ø12, Ø16 ve Ø20'lik çubuklarla donatılmış YDB ve NDB elemanlar üstünde yapılan aksel çekip-çıkarma deneylerinden elde edilen uç çelik gerilmesi-sıyrılma ilişkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aynı ilişki, 150'lik kenetlenme boyu ve 1.5 cm'lik beton örtü kalınlığına sahip dışmerkezli çekip-çıkarma elemanları için de,

Şekil 12 ve 13'de gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalar, aynı yükleme altında, YDB ile imal edilmiş elemanlarda oluşacak maksimum çatlak genişliğinin NDB ile imal edilmiş elemanlarınkinden önemli ölçüde küçük kalacağını göstermektedir.

7. SONUÇLAR

Bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen sınırlı sayıda deney sonunda elde edilen veriler aşağıdaki gibi yorumlanabilir:

1. Elde edilen veriler 20 mm veya daha küçük çaplı, nervürlü yüksek aderans donatısı için sınır kenetlenme boyunun YDB'larda 100, NDB'larda 200 civarında olduğunu göstermiştir. Bu sonuç ihtiyatla değerlendirilmeli ve emniyet payı ona göre saptanmalıdır, çünkü verilerin dayandığı deneyler monotonik yük altında tek donatı çubuğuna sahip elemanlar üstünde yapılmış olup, aderans dayanımını etkilediği bilinen, birden fazla yükleme, tersinen yükleme, donatı çubuğu sayısı ve çubuk aralığı gibi faktörleri içermemektedir. Beton örtü kalınlığı ve enine donatının aderans üstündeki etkileri ise ancak deneylerin çok sınırlı bir kısmında izlenebilmiştir.

2. YDB'larda, sınır durumundaki aderans gerilmelerinin, NDB'lardaki kadar düzgün yayılmadığına ilişkin kuvvetli deliller vardır. Dolayısıyla, NDB'lar için geliştirilmiş, maksimum aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca eşit yayılacağını varsayan formüller YDB'lar için doğrudan kullanılmamalıdır. Ayrıca, YDB'lar için, aderans dayanımını etkileyen beton çekme dayanımı, NDB'larda yapıldığı gibi basınç dayanımının kare kökünün bir fonksiyonu olarak kabul etmek de doğru olmayabilir.

3. "Aderans kırılması" diye adlandırılabilen olan yarıma, NDB elemanlarda nisbeten yavaş olmasına karşı, YDB'da oldukça hızlı gelişmekte ve eleman adeta patlayarak son derece gevrek ve tahripkar bir biçimde kırılmaktadır.

4. Enine donatı oranında yükselme, NDB'ların aderans dayanımını az da olsa arttırıp, donatı sıyrılmasını azaltarak kenetlenme davranışını olumlu etkilemektedir.

5. Aynı yükleme altında YDB elemanlarda oluşacak maksimum çatlak genişlikleri NDB'larda oluşacaklardan daha küçük olacaktır.

8. TEŞEKKÜR

Yazarlar, TÜBİTAK, Boğaziçi Üniversitesi, Yapı Merkezi Şirketler Grubu ve STFA Kalite Müşavirlik Araştırma Kontrol ve Gözetim Ltd. Şirketi'ne bu araştırma için sağladıkları maddi destekten ötürü teşekkür ederler.

SEMBOLLER

| | |
|---------------|---|
| C_s | : Donatı üzerinde enine nervürler arasındaki uzaklık |
| f_{ck} | : 28 günlük beton silindir basınç dayanımı (kgf/cm ²) |
| f_{cts} | : Betonun silindir yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımı (kgf/c |
| F_R | : Donatı üzerindeki bir enine nervürün alanı |
| f_{su} | : Donatı çeliğinin çekme dayanımı (kgf/cm ²) |
| f_{yk} | : Donatı çeliğinin akma dayanımı (kgf/cm ²) |
| k | : Donatı çevresindeki enine nervür sayısı |
| l_b | : Aderans boyu |
| P_1 | : Maksimum eksenel yük (kgf) |
| α_{sb} | : Donatı çubuğu üzerindeki göreceli nervür alanı |
| β | : Donatı eksenine ile nervür arasındaki açı |
| \emptyset | : Donatı çapı |
| τ | : Aderans gerilmesi (kgf/cm ²) |

Kaynaklar

- [1] Bürge, T.A., "Densified Matrix Improves Bond with Reinforcing Steel" Special Publication, Bond in Concrete, Edited by P. Barfos, Applied Science Publishers, Londra, 1982.
- [2] Ezeldin, A.S., ve Balaguru, P.N., "Bond Behavior of Normal and High Strength Fiber Concrete", ACI Materials Journal, V. 86, No.5, s. 515-524, 1989.
- [3] De Larrad, E. ve Malier, Y., "Propriete Constructive de Beton a Ires Haute Performances" Annales del Inst. Technique du Batiment et des Travaux Publics, Paris 1989.
- [4] Tomaszewicz, A., Thorenfeldt, E. ve Jensen, J.J., "Mechanical Properties of HSC", Proceedings, Utilization of HSC, Symposium Stavanger, Norveç, 1987.
- [5] Azizinamini et al., "bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete" ACI Structural Journal, V.90, No.5, s. 554-561, 1993.
- [6] Yerlici, V., ersoy, U., Özturan, T., Karakoç, C. ve Aşkar (Altay), G., "Yüksek Dayanımlı Beton Elemanlarda Donatı Kenetlenme Özelliklerinin İncelenmesi", TÜBİTAK Proje No. INTAG 509, Ankara, 1994.
- [7] CEB, "Bond Action and Bond Behavior of Reinforcement-State-of-the-Art Report" Bulletin no. 151, Comite Euro-International du Beton, Paris, 1982.
- [8] TSE, "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", TS 500, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985.