



ISSN: 1306-3111/1308-7231
NWSA-Engineering Sciences
NWSA ID: 2013.8.4.1A0350

Status : Original Study
Received: May 2013
Accepted: October 2013

E-Journal of New World Sciences Academy

**Metin Hüsem
Serhat Demir**

Karadeniz Teknik University, Trabzon-Turkey
mhusem52@gmail.com; s.demir@ktu.edu.tr

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2013.8.4.1A0350>

**ÇELİK VE POLİPROPİLEN LİFLERİN GELENEKSEL VE YÜKSEK DAYANIMLI
BETONLARDA KIRILMA VE ÇATLAK GELİŞİMİNE ETKİSİ**

ÖZET

Günümüzde geleneksel betonlar kadar yüksek performanslı betonlar da kolaylıkla üretilebilmektedir. Betonların basınç dayanımının yüksek olması kadar, belli oranda sünek davranış göstermesi de istenmektedir. Bu amaçla, son yıllarda, sünekliği sağlayabilmek için üretimlerinde betonu liflerle takviye etmeye başlamışlar ve bu konuda da birçok araştırma yapmışlardır. Bu liflerin başında çelik lifler gelmektedir. Bu çalışmada çelik ve polipropilen lif katkılı geleneksel ve yüksek dayanımlı betonlar üretilerek, bu betonların merkezi basınç, yarmada çekme dayanımları araştırılarak, çentikli numunelerde betonların, lif tipine bağlı, kırılma ve çatlak gelişimleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik ve Polipropilen Lifler, Geleneksel Beton, Yüksek Dayanımlı Beton, Kırılma, Çatlak Gelişimi

**THE EFFECT OF FRACTURE AND CRACK GROWTH OF STEEL AND POLYPROPYLENE
FIBERS IN THE ORDINARY AND HIGH STRENGTH CONCRETE**

ABSTRACT

Today, high performance concrete can be produced as easily as normal strength concrete. Concretes are expected to have ductile behavior and have compressive strength, as well. In the recent years, in order to have ductile behavior, researchers have started to strengthen concrete using fibers and have done lots of researches. In this study, normal and high strength concrete with steel and polypropylene fiber are produced, the compressive strength and the tensile strength in split of these concrete is investigated and the fracture energy and crack distribution of notching samples are examined.

Keywords: Steel and Polypropylene Fiber, Ordinary Concrete, High Strength Concrete, Fracture, Crack Developments



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonun inşaat mühendisliğinde yaygın biçimde kullanılması nedeniyle bu malzemenin mekanik davranışının daha iyi bilinmesini gerektirmektedir. Betonun çekme dayanımının düşük olmasından dolayı oluşan çatlaklar ve bu çatlakların yayılması hakkında yeterli bilgi birikimine gerek vardır. Özellikle, çatlakların önemli olduğu, reaktörler, barajlar, savunma amaçlı yapılar, korozyonun etkili olabileceği açık deniz yapılarında betonun kullanılması, bu malzemenin çatlama davranışının incelenmesinde ilginin artmasına neden olmuştur [1 ve 2].

Kırılma mekaniğinin başlangıcı, 1920'li yıllarda Griffith'in gevrek bir malzeme olan cam üzerinde yaptığı çalışmalara dayanmaktadır [3]. Daha sonraki yıllarda Orowan ve Irwin, Griffith'in çalışmalarını temel alıp bazı değişiklikler yaparak kırılma mekaniğini gevrek davranış sergilemeyen, sünek malzemelere uygulamışlardır [4]. Son kırk yıl içinde deney tekniklerinde önemli gelişmeler, bilgisayarın sağladığı imkânlar ve sayısal hesaplama yöntemlerinin uygulanmasıyla beton gibi yarı gevrek malzemelerin kırılması alanında önemli gelişmeler olmuştur. Elde edilen tüm bu gelişmelerle kırılma mekaniğinin betona uygulanması mühendisler ve araştırmacılarca kabul görmeye başlanmıştır.

Lineer elastik kırılma mekaniğinin, betona uygulanması 1960'lı yılların başında olmuştur [5]. Daha sonraki yıllarda betonun kırılma mekaniği üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen elde edilen sonuçlar betonarme yapıların projelendirmesinde henüz kullanılamamıştır. Bunun en önemli nedeni, betonun kırılmasının lineer elastik kırılma mekaniği esasına göre bulunan açılma modunda gerilme-şiddet çarpanının kritik değerinin tek bir parametre olarak kabul edilemeyeceği, diğer bir deyişle, betona lineer elastik kırılma mekaniğinin doğrudan uygulanamamasıdır. Laboratuarda kullanılabilecek boyuttaki deney numuneleriyle, boyuttan bağımsız olarak lineer elastik kırılma mekaniği esasına dayalı bir kırılma parametresinin elde edilemeyeceği 1970'li yılların başında ortaya konmuştur [6]. Daha sonraki yıllarda lineer elastik kırılma mekaniği modelleri düzenlenerek ve/ya da nonlinear kırılma mekaniği modelleri kullanarak çok sayıda teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır [7 ve 19].

Bugün, teknolojinin gelişimine bağlı olarak, geleneksel betonlar kadar yüksek dayanımlı betonlar da üretilmektedir. Betonların dayanımlarının artmasıyla sünekliklerinin de azaldığı bilinmektedir. Betonun dayanımı yanında sünekliğini artırmak için, üretimlerinde çelik lifler kullanılmaktadır. Geleneksel betonlara göre daha gevrek olan yüksek dayanımlı betonlarda kırılma enerjileri ve çatlak dağılımlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada çelik ve polipropilen lif katkılı ve lifsiz geleneksel ve yüksek dayanımlı betonlar üretilerek, bu betonların merkezi basınç, yarmada çekme dayanımları araştırılarak, çentikli numunelerde betonların, lif tipine bağlı olarak, kırılma biçimleri ile çatlak dağılımları incelenmiştir. Bu nedenle de, kontrollü kırılmayı sağlamak için, beton numunelere çentik açılmıştır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmada, çelik ve polipropilen lif katkılı ve katkısız geleneksel (normal) ve yüksek dayanımlı betonlarda, lif katkısının çatlak açılımına etkisi araştırılmıştır. Bunun için çelik ve polipropilen lif katkılı ve lif katkısız betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlarda kırılmanın kontrollü olarak oluşmasını sağlamak amacıyla çentikler bırakılmış, bu nedenle de, bu çalışma kapsamında üretilen numune ve çentik boyutları, literatürde kırılma mekaniği

deneyleri için kabul görmüş boyutlardan farklı alınmıştır. Deneylerde, betonların basınç ve çekme dayanımları ile çatlak gelişimi incelenmiştir. Liflerin geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların sünekliğine etkisi irdelenmiştir

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

3.1. Deney Numunelerinin Üretimi (Production of Test Samples)

Bu çalışma kapsamında geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların üretiminde maksimum agrega boyutu 16 mm olan kalker agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın bazı fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Agregaların fiziksel özellikleri
(Table 1. The physical properties of aggregate)

Agrega Boyutu	Gevşek Birim Kütle (kg/m ³)	Kuru Birim Kütle (kg/m ³)	Doğgun Birim Kütle (kg/m ³)	Su Emme (%)
İri (>4 mm)	1438	2706	2718	0.42
İnce (<4mm)	1492	2671	2680	0.52

Betonların üretiminde CEM I 42,5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun bazı özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Portland çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri
(Table 2. The physical and mechanical properties of Portland cement)

Fiziksel özellikler		Mekanik özellikler			
Özgül Kütle (g/cm ³)	3.10	Yaş (gün)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	
Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g	3682	2	5.61	28.7	
Priz süresi (Vicat)	Başlangıç (saat)	2.00	7	7.35	43.7
	Bitiş (saat)	3.58	28	8.55	53.2

Çelik lif katkılı geleneksel ve yüksek dayanımlı betonun üretiminde aynı boyutta çelik lif kullanılmıştır. Kullanılan çelik lifin özellikleri Tablo 3'de, polipropilen liflerin özellikleri ise Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3. Çelik lifin özellikleri
(Table 3. The properties of steel fiber)

Lif Tipi	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Görünüm Oranı (Boy/Çap)	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)
RC 65/35	35	0.55	64	7.85	1100

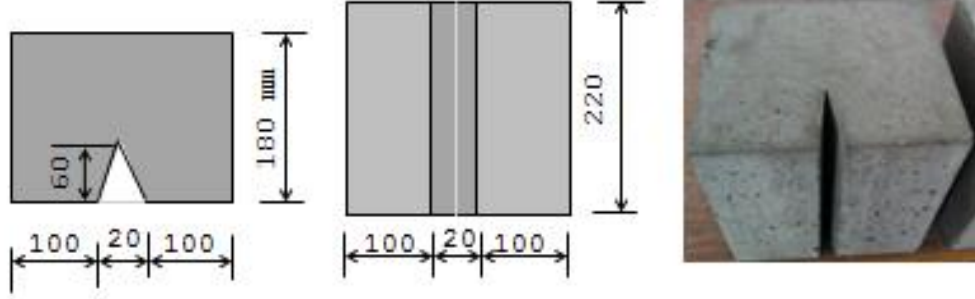
Tablo 4. Polipropilen liflerin özellikleri
(Table 4. The properties of polypropylene fiber)

Lif Tipi	Uzunluk (mm)	Uzama (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)
M19	19	20	0.91	700

3.2. Deneylerin Yapılışı (Experiments)

Çelik ve polipropilen lifli normal ve yüksek dayanımlı betonların kırılma enerjisi ve çatlak dağılımının incelenmesi için yapılan çalışmada üretilen deney numunesinin boyutları Şekil 1'de

verilmiştir. Deney numunelerinde bırakılan çentikler, kırılmanın kontrollü olarak oluşmasını sağlamak amacıyla bırakılmış, bu nedenle de, numune ve çentik boyutları literatürde kırılma mekaniği deneyleri için kabul görmüş boyutlardan farklı alınmıştır.



Şekil 1. Deney numunelerinin boyutları
(Figure 1. The dimension of test specimens)

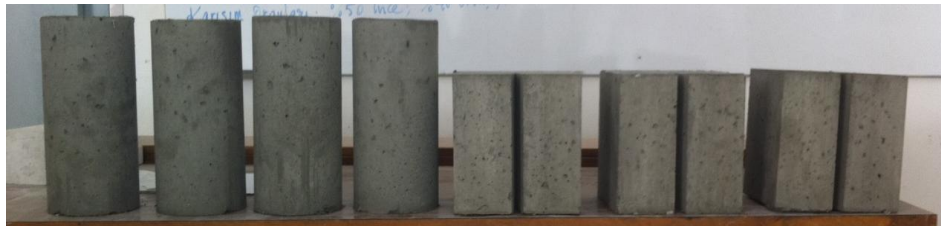
Deney numunelerinin üretiminde kullanılan normal ve lifli betonların bileşimi Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların karışımları
(Table 5. Mix design of ordinary and high strength concretes)

Beton	W/C	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Toplam agrega (kg/m ³)	Emme suyu (kg/m ³)	Katkılar		Lifler (kg/m ³)	
						SP (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	Steel	Poly.
HSC	0.30	500	150	1789	9.5	22	50	10	0.9
OC	0.50	350	175	1829	11.70	-	-	10	0.9

HSC: yüksek dayanımlı beton,
SP : süperakışkanlaştırıcı katkı,
OC: geleneksel beton
SF: Mikro silis

Tabloda verilen miktarlar kullanılarak, 6 adet 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde standart silindir numune ile boyutları şekil 1’de verilen 6 adet çentikli deney numunesi üretilmiştir. Normal ve yüksek dayanımlı beton numunelerden karşılaştırmak amacıyla çelik ve polipropilen lifler kullanılmadan da aynı miktarda beton numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerden bir görünüm Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Üretilen deney numunelerinden bir görünüm
(Figure 2. A view from the test samples)

Üretilen betonlar bir gün sonra kalıplarından çıkartılarak sıcaklığı 22°C±2°C olan suda 28 gün boyunca bekletilmiştir (Şekil 3). Bu süre sonunda sudan çıkartılan numunelerden her bir seri için üç adet standart silindir numuneler merkezi yük etkisinde basınç dayanımının belirlenmesi için, üç adeti ise yarmada çekme dayanımının belirlenmesi için yarma deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 4).



Şekil 3. Deney numunelerinin kürü
(Figure 3. Curing of test samples)

Standart silindir numuneler üzerinde yapılan merkezi basınç ve yarma deneyi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 4. Merkezi basınç ve yarmada çekme deneyleri
(Figure 4. Compressive and tensile at split tests)

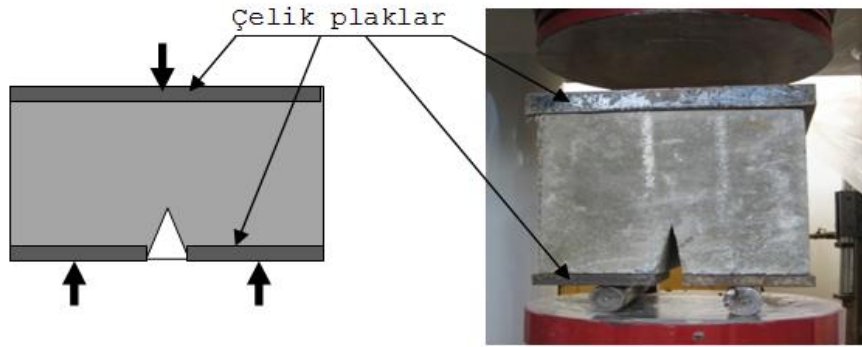
Tablo 6. Deney numunelerinin basınç ve yarmada çekme dayanımları
(Table 6. Compressive strength and tensile strength at split test)

Betonlar	OC	OC-SF	OC-PF	HSC	HSC-SF	HSC-PF
Basınç Dayanımı (MPa)	23.5	25.8	24.2	64.8	72.2	66.7
Çekme Dayanımı (Yarmada) (MPa)	2.29	2.73	2.53	3.96	4.52	4.21
OC-SF: Çelik lifli geleneksel beton OC-PF: Polipropilen lifli geleneksel beton HSC-SF: Çelik lifli yüksek dayanımlı beton SC-PF: Polipropilen lifli yüksek dayanımlı beton						

Çelik ve polipropilen lifli normal ve yüksek dayanımlı betonların kırılma enerjisi ve çatlak dağılımının incelenmesi için üretilen çentikli numuneler üzerinde yapılan deneyde Şekil 5'de verilen yükleme düzeneği kullanılmıştır. Şekilde verilen yükleme düzeneği ile test edilen numunelerde yük-çatlak ağız genişliği ve yük-çatlak uzunluğu ölçülmüştür.

4. BULGULAR VE İRDELEME (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında üretilen normal ve yüksek dayanımlı çelik ve polipropilen lifli ve lifsiz betonların basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Buna göre çelik lifli betonların basınç dayanımı, lifsiz betonlara göre %10, polipropilen lifli betonlarındaki ise %3 oranında artmıştır. Çelik lifin betonun basınç dayanımını az da olsa katkısı olmakla birlikte, polipropilen lif katkısının beton basınç dayanımına önemli sayılabilecek bir etkisi olmamıştır. Çelik lif katkısı geleneksel betonun yarmada çekme dayanımını %19 oranında, polipropilen katkısı ise %10 oranında artırmıştır.



Şekil 5. Çentikli numunelerin yükleme düzeneği
(Figure 5. Test set-up of test samples)

Yüksek dayanımlı betonlarda çelik lif katkısı beton basınç dayanımını %11 oranında, polipropilen lif katkısı ise %3 oranında artırmıştır. Proplopilen katkısı yüksek dayanımlı betonlarda da basınç dayanımını önemli oranda etkilememektedir. Çelik lif katkısı, yüksek dayanımlı betonlarda çekme dayanımını %14, polipropilen katkısı ise %6 oranında artırmıştır. Yüksek dayanımlı betonların davranışı, normal dayanımlı betonlara göre daha gevrek olması nedeniyle lif katkısının etkisi yüksek dayanımlı betonlarda daha az olmuştur. Lifli betonların kırılma şekilleri Şekil 6'da verilmiştir.

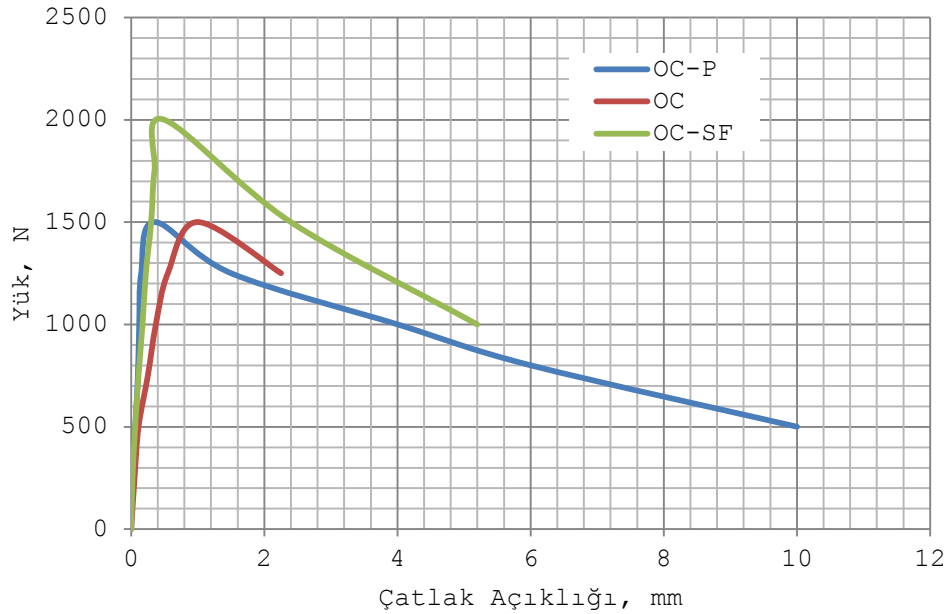


Şekil 6. Normal ve yüksek dayanımlı lifli betonlarda kırılma şekilleri
(Figure 6. Fracture types of ordinary and high performance concrete with fiber)

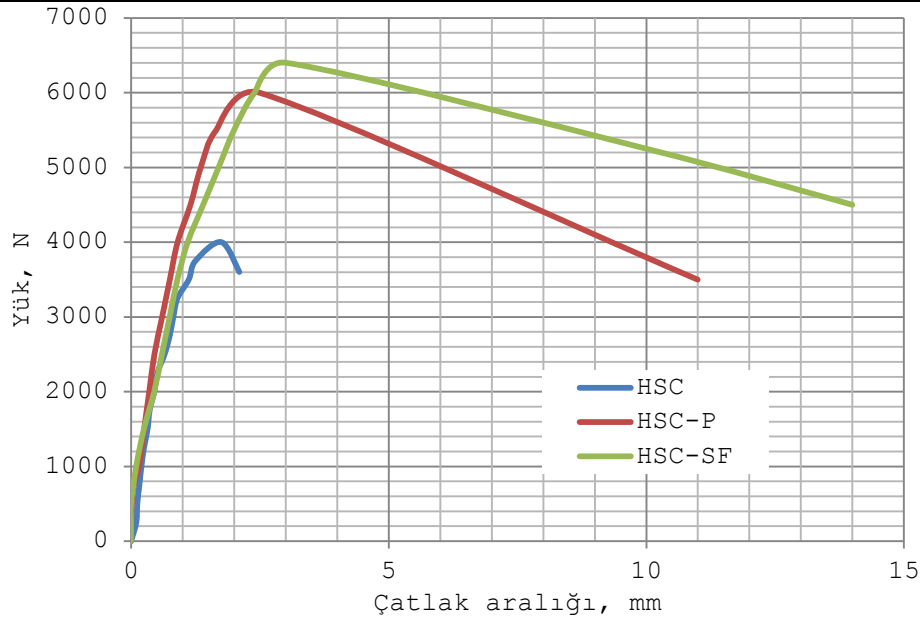
Çelik ve polipropilen lifli normal ve yüksek dayanımlı betonların kırılma enerjisi ve çatlak dağılımının, lif tipine bağlı olarak değişiminin, incelenmesi için üretilen çentikli numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen yük-çatlak eğrisi açıklığı normal dayanımlı betonlar için Şekil 7'de, yüksek dayanımlı betonlar için ise Şekil 8'de verilmiştir.

Bu şekilden görüldüğü gibi, normal dayanımlı betonlarda 4 kN'luk bir yüke kadar çatlak açıklıkları yaklaşık olarak aynı düzeyde

kalırken, bu yükten sonra normal dayanımlı lifsiz betonda çatlak hızla açılmıştır. Lifsiz numuneler, 15 kN'luk yük düzeyinde, çatlak açıklığı 1 mm, bu yük düzeyinden sonra da çatlak açılmaya devam etmiş ve yük 12.50 kN olduğunda çatlak açıklığı 2.25 mm, çatlak boyu ise numunenin üst seviyesine ulaşarak (120 mm) taşıma gücünü gevrek olarak kaybetmiştir. Polipropilen katkılı normal dayanımlı betonda 15 kN'luk yük düzeyine kadar çatlak 0.35mm açılmıştır. Bu yük düzeyinden sonra çatlak genişliği 10 mm olduğunda, çatlak boyu da 120 mm'ye ulaşmış ve taşıma gücünü 5 kN'luk yük düzeyinde sünek olarak kaybetmiştir. Çelik lif katkılı normal dayanımlı betonlarda 20 kN'luk yük düzeyinde, çatlak genişliği 0.3 mm, bu yük düzeyinden sonra çatlak genişliği 5.2 mm olduğunda çatlak boyu 120 mm'ye ulaşmış ve taşıma gücünü 10 kN'luk yük düzeyinde kaybetmiştir. Eğilme etkisindeki bu numunelerde en fazla yük çelik lif katkılı betonlarda, en az çatlak genişliği ile taşınmıştır. Polipropilen lifli ve lifsiz normal dayanımlı numunelerde maksimum yük aynı düzeyde olmasına karşın, maksimum yüke karşılık gelen çatlak açıklığı lifsiz numunelerde olmuştur. Ancak polipropilen lifler maksimum yükten sonra numunenin yavaş kırılmasını sağlamış ve çatlak açıklığı 10 mm olana kadar yük altından yavaşça kaçmıştır. Diğer bir deyişle daha sünek davranış göstermiştir. Çelik lifler de benzer davranış göstermekle birlikte çatlak boyunca sıyrıldıklarından aynı etkiyi göstermemişlerdir.



Şekil 7. Normal dayanımlı betonlarda yük-çatlak açıklığı ilişkisi
(Figure 7. Load-crack opening relation for ordinary concrete)



Şekil 8. Yüksek dayanımlı betonlarda yük-çatlak açıklığı ilişkisi

(Figure 8. Load-crack opening relation for high strength concrete)

Bu şekilden görüldüğü gibi, yüksek dayanımlı betonlarda 20 kN'luk bir yüke kadar çatlak açıklıkları yaklaşık olarak aynı düzeyde kalırken, bu yükten sonra yüksek dayanımlı lifsiz betonda çatlak hızla açılmıştır. Lifsiz numuneler, 40 kN'luk yük düzeyinde, çatlak açıklığı 1.75mm, bu yük düzeyinden sonra da çatlak açılmaya devam etmiş ve yük 36 kN olduğunda çatlak açıklığı 2.1 mm, çatlak boyu ise numunenin üst seviyesine ulaşarak (120 mm) taşıma gücünü gevrek olarak kaybetmiştir. Polipropilen katkılı yüksek dayanımlı betonda 60 kN'luk yük düzeyine kadar çatlak 2mm açılmıştır. Bu yük düzeyinden sonra çatlak genişliği 10 mm olduğunda, çatlak boyu da 120 mm' ye ulaşmış ve taşıma gücünü 35 kN'luk yük düzeyinde sünek olarak kaybetmiştir. Çelik lif katkılı yüksek dayanımlı betonlarda 64 kN'luk yük düzeyinde, çatlak genişliği 3 mm, bu yük düzeyinden sonra çatlak genişliği 14 mm olduğunda çatlak boyu 120 mm'ye ulaşmış ve taşıma gücünü 45 kN'luk yük düzeyinde kaybetmiştir. Eğilme etkisindeki bu numunelerde en fazla yük çelik lif katkılı betonlarda, en fazla çatlak genişliği ile taşınmıştır. Polipropilen lifli yüksek dayanımlı numunelerde maksimum yük, lifsiz numunelerden daha fazla olmuştur. Yüksek dayanımlı betonlarda hem polipropilen lifler hem de çelik lifler maksimum yükten sonra numunenin yavaş kırılmasını sağlamıştır. Yüksek dayanımlı betonlarda, çelik lifler daha fazla yük taşımıştır. Lifler yüksek dayanımlı betonda, betonun boşluk oranının daha az olması nedeniyle beton içinden sıyrılmamış koparak taşıma gücünü kaybetmiştir.

Normal dayanımlı polipropilen lifli betonlarda çatlak ağzı açılmasının, çelik lifli betonlara göre daha fazla olmasının nedeni, çelik lifin beton içinde dağılımının, polipropilen lifler kadar uniform olmaması ve çelik liflerin beton içinden erken sıyrılmış kaynaklanmaktadır (Şekil 9). Yüksek dayanımlı betonlarda ise çelik lifler beton içinden sıyrılmamış, kopmuştur. Bu nedenle de polipropilen lifli yüksek dayanımlı betonlara göre, çatlak ağzı daha fazla olmuştur



Şekil 9. Çelik ve polipropilen liflerin beton içinde dağılımı
(Figure 9. The distribution of steel and polypropylene fibers in concrete)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmadan çıkartılabilecek bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Çelik lifli geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı, lifsiz betonlara göre %10, polipropilen lifli betonlarınki ise %3 oranında artmıştır.
- Çelik lifin, geleneksel ve yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımına az da olsa katkısı olmakla birlikte, polipropilen lif katkısının her iki tür betonun basınç dayanımına önemli sayılabilecek bir etkisi olmamıştır.
- Çelik lif katkısı, geleneksel betonun yarmada çekme dayanımını %19 oranında, polipropilen lif katkısı ise %10 oranında, yüksek dayanımlı betonda ise çelik lif katkısı, yarmada çekme dayanımını %14, polipropilen lif katkısı ise %6 oranında artırmıştır.
- Yüksek dayanımlı betonların davranışının, normal dayanımlı betonlara göre daha gevrek olması nedeniyle, lif katkısının etkisi yüksek dayanımlı betonlarda daha az olmuştur
- Deney numunelerinde, en fazla yük çelik lif katkılı yüksek dayanımlı betonlarda, diğerlerine göre, daha büyük çatlak genişliği ile taşınmıştır. Bu da, çelik lifin beton içinden sıyrılarak değil, akma birim şekildeğiştirmesinden sonra kopmasından kaynaklanmaktadır.
- Polipropilen lifli yüksek dayanımlı numunelerde maksimum yük, lifsiz numunelerden daha fazla olmuştur. Yüksek dayanımlı betonlarda hem polipropilen lifler hem de çelik lifler maksimum yükten sonra numunenin yavaş kırılmasını sağlamıştır. Dolayısıyla da, lifsiz numunelere göre, daha sünek davranış göstermişlerdir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Eser, O.F. and Tasdemir, M.A., (2002). Application of fracture mechanics models to notched concrete disc specimens, ITU Journal/d cilt:1 sayı:2, pp. 63-74.
2. Shah, S.P. and Tasdemir, M.A., (1994). Role of Fracture Mechanics in Concrete Technology, Advances in concrete Technology, Ed. V. M. Malhatra, CANNET, Second Edition, pp.161-202.
3. Shah, S.P. and Mc Grarry, P.J., (1971). Griffith Fracture Criterion and Concrete. Journal of Engineering Mechanics, Division-ASCE, 97, Nb, EMB, pp.1663-1676.
4. Weertman, J., (1978). Fracture Mechanics: A Unified View for Griffith-Irwin-Orowan Cracks. Acta Metallurgica, 26 (11), pp. 1731-1738.



5. Kaplan, M.F., (1961). Crack Propagation and the Fracture of Concrete. Journal of ACI, Vol 58, pp.591-610.
6. Kesler, C.E., Naus, D.J., and Lott, J.L., (1971). Fracture Mechanics its applicability to concrete. The Society of Materials Science, Vol 4, pp.113-134.
7. Strange, P.C. and Bryant, A.H., (1979). Experimental Tests on Concrete Fracture. Proc. ASCE 105, No. EM2, pp.337-342.
8. Strange, P.C. and Bryant, A.H. (1979). The role of aggregate size in the fracture of concrete. Journal of Materials Science, 14, pp.1863-1868.
9. Hillerborg, A., Modeer, M., and Peterson, P.E., (1976). Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements. Cement and Concrete Research, 6, pp.773-782.
10. Bazant, Z.P. and Kazemi, M.T., (1990). Determination of Fracture Energy, Process Zone Length, and Brittleness Number from Size Effect, with Application Rock and Concrete. International Journal of Fracture, 44, pp.111-131.
11. Jeng, Y.S. and Shah, S.P., (1985). Two Parameter Fracture Model for Concrete. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 4, pp.1227-1241.
12. Hillerborg, A., (1985). The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy (G_F) of Concrete. Materials and Structures, 18, 106, pp. 291-296.
13. Hallathambi, P. and Karihaloo, B.L., (1986). Determination of Specimen-Size Independent Fracture Toughness of Plain Concrete. Magazine of Concrete Research, 38, 135, pp.67-76.
14. Swartz, S.E. and Refai, T.M.E., (1988). Influence of Size Effects on Opening Mode Fracture Parameters for Precracked Concrete Beams in Bending'', Fracture of Concrete and Rock, pp.243-254. Springer-Verlag, New York.
15. Tang, T., Shah, S.P., and Ouyang, C., (1992). Fracture Mechanics and Size Effect of Concrete in Tension. Journal of Structural Engineering, ASCE, 118, 11, pp. 3169-3185.
16. Tang, T., (1994). Effects of Load-Distributed Width on Split Tension of Unnotched and Notched Cylindrical Specimens. Journal of Testing and Evaluation, 22, 5, pp.401-409.
17. Tang, T., Ouyang, C., and Shah, S.P., (1992). A Simple Method for Determining Material Fracture Parameters from Peak Loads, ACI Materials Journal, 93, 2 pp.147-157.
18. Yang, S., Tang, T., Zollinger, D.G., and Gurjar, A., (1997). Splitting Tension Tests to Determine Concrete Fracture Parameters by Peak-Load Method. Advance Cement Based Materials, 5, pp. 8-28.
19. Karataş, M., (2009). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Basınç Dayanımı ile Çekme Dayanımı ve E-Modülü İlişkisi. E-Journal of New World Sciences Academy 4(1), 258-270.
(NWSA, DOI:URL:<http://dv.doi.org/10.12739/>)