

TEK EKSENLİ ÇEKME ALTINDAKİ KARMA LİFLİ BETONLARIN KIRILMASINDA BOYUT ETKİSİ

Burcu AKÇAY

Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
burcu.akcay@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Karma lifli betonların kırılmasındaki boyut etkisi çalışmasında, farklı lif içerikli numuneler (kısa ve uzun liflerin karışımı) tek eksenli çekme ile yüklendi. Dört farklı boyuttaki köpek kemiği şeklindeki numuneler 1:8 boyut aralığında test edildi. Çalışma, nominal dayanım ve kırılma süreci üzerindeki boyut etkisinin belirlenmesine yoğunlaştı. Deneyler, tepe yükten önce oluşan çoklu çatlakların, tepe yükten sonra tek bir ana çatlağa yerleştiğini gösterdi. Çoklu çatlama ince kısa liflerin miktarının artırılması ile elde edilebilirken uzun lifler yerleşmiş makro-çatlağın köprülenmesini çoğaltır. Azalan dayanım ile dayanım üzerindeki boyut etkisinin arttığı görüldü. Nominal çekme dayanımı üzerindeki boyut etkisinin artan malzeme sünekliği ile azaldığı belirlendi. Sonuçların analizi gözlemlenen boyut etkisinin istatistiksel, malzeme ve yapı boyut etkilerinin bir kombinasyonu olarak düşünebileceğini gösterdi.

ABSTRACT

In a study of the size effect on fracture properties of hybrid fibre concrete, specimens with varying fibre content (mixtures of short and long fibres) were loaded in uniaxial tension. Dog-bone shaped specimens of four different sizes in a size range of 1:8 were tested. Focus of the study was the determination of the size effect on nominal strength and fracture processes. Experiments showed that multiple cracks, which formed before the peak, localized into one major crack beyond peak. Multiple cracking could be obtained by increasing the amount of thin short fibres whereas the large fibres can enhance the bridging of localized macrocracks. With decreasing strength, the size effect on the strength appears to increase. It is observed that the size effect on nominal tensile strength decreases with increasing material ductility. Analysis of the results showed that the observed size effect can be considered as a combination of statistical, material and structural size effects.

1. Giriş

Lineer Elastik Kırılma Mekanîği teorileri, çatlak ucundaki elastik olmayan bölge olarak tanımlanan kırılma süreci bölgesi nedeniyle yarı gevrek olan betona uygulanamamaktadır. Betonun kırılma davranışının boyuta bağlı olduğu ilk olarak Walsh tarafından 1972'de gösterilmiş ve laboratuarda deney yapılan boyuttaki numunelerin sonuçlarını gerçek boyuttaki mühendislik yapılarında kullanırken çok dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiştir [1]. Kırılma dayanımının ve enerjisinin boyuta bağlı olması çatlak ilerleme yolu boyunca üniform olmayan kırılma enerjisi dağılımının varlığı ile açıklanabilir [2, 3]. Bilindiği gibi boyut etkisi, davranışlarının sünek veya gevrek olmasına bakılmaksızın her malzeme için geçerlidir. Son yıllarda, çeşitli hesaplamalı ve deneysel çalışmalar yapılmış ve değişik boyut etkisi teorileri önerilmiştir. İlk teori olan Weibull teorisi (1939, 1951) büyük yapıların daha çok kusur içerebilme olasılığına dayanır [4, 5]. Daha sonra, Boyut Etkisi Kuralı [2] ve Çoklu-Fraktal Boyut Kuralı [3] adıyla iki çok iyi bilenen yaklaşım sunulmuştur. Bu makroskobik yaklaşımların yanı sıra, latis modeli [6] gibi mezo-düzeyde modellerle boyut etkisini tahmin etmek de mümkündür.

Kırılma süreci bölgesi, boyut etkisinin ana nedeni olmasına rağmen mikro-yapısal etkiler ile makroskobik boyut arasında net bir ilişki kurulamamıştır. Diğer yandan, özellikle heterojen malzemelerde yerel dayanımının rastgeleliği, malzemenin hacmi ile artar ve Gaussian gerilme dalgalanması, numune boyutunun logaritmasının karekökü ile azalan çekme dayanımı olan boyut etkisine neden olur [7]. Bu yerel gerilme yığılmaları (mikro-) çatlakların oluşumuna neden olur. Küçük olmalarına rağmen bu çatlaklar boyut etkisinden sorumludurlar. Bu durumda ortaya çıkan ilk soru kritik çatlak boyutu ile numune/yapı boyutları arasındaki ilişki ile ilgilidir. Bazant yaklaşımında büyük numuneler için Lineer Elastik Kırılma Mekanîği geçerliliği varsayılır ve küçük boyutlu numune/yapılar için sabit dayanım kabul edilir [2, 8].

Bu yaklaşım düzgün yüzeyli çatlaklar için $\sigma \propto D^{-1/2}$ şeklinde basit bir ilişki verirken fraktal yüzeyli çatlaklar için üstel daha yüksek olacaktır. Fraktalitenin nominal dayanım üzerindeki etkisi Carpinteri ve diğerleri tarafından yine bir üstel fonksiyon olan Çoklu-Fraktal Boyut Kuralı olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir [3]. Boyutun kırılma dayanımı üzerindeki etkisi olan bu iki yaklaşım geçmişte birçok kereler tartışılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi henüz boyut etkisinin mikroskobik nedenleri tam olarak açıklanamamıştır. Bu iki makroskobik yaklaşım mevcut deneysel verilerin aralığında doyurucu sonuçlar vermiş ve boyut etkisine geçici kılavuzluk etmiştir. Tartışma karşı eğilimler verdiği görülen küçük ve büyük numunelerdeki asimptotlar üzerinedir. Çoklu-Fraktal Boyut Kuralında malzeme yapısı ve kırılma dayanımındaki boyut etkisi arasındaki ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Daha önce bahsedilen mezo-boyut yaklaşımında, giriş latis modeli analizi ile $\log(\text{nominal dayanım}) - \log(\text{boyut})$ diyagramı eğiminin malzeme kompozisyonu ile değiştiği gösterilmiştir [9]. Makroskobik modellerde ise böyle detayları yakalamak imkansızdır. Buradan, boyut etkisi çalışmalarında kırılma sürecine ve kırılma mekanîğinin mikro-yapı değişimleri ile ilişkilerine daha yakın bakılması gerektiği görülmektedir.

Betonun mekanik ve kırılma özelliklerini çeşitli boyut, tip ve miktarlarda lifler kullanarak biçimlendirmek mümkündür. Kırılma dayanımındaki boyut etkisi yalın beton ve donatılı betonda birçok araştırmacı tarafından çalışılmasına rağmen lifli betonlarda incelenmemiştir. Sünek bir malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışının Lineer Elastik Kırılma Mekanîği ya da Lineer Olmayan Elastik Kırılma Mekanîği (kohezif modeller) ile tanımlanmasının çok

zor olacağı açıktır. Van Mier [10, 11] bu tip malzemenin davranışının dört ayrı bölgede incelenmesini önermiştir. Bu bölgeler elastik, mikro-çatlama (stabil), makro-çatlama (stabil olmayan) ve köprülenme olarak tanımlanır. Bilindiği gibi kısa ince lifler tepe yükü öncesi mikro-çatlama bölgesindeki mikro-çatlakları önler ve köprülerken, uzun lifler köprülenme bölgesindeki makro-çatlakları önlerler. Bu iyileştirmelerin kombinasyonu ile karma lifli betonlar, gelişmiş mekanik ve kırılma özellikleri gösterirler.

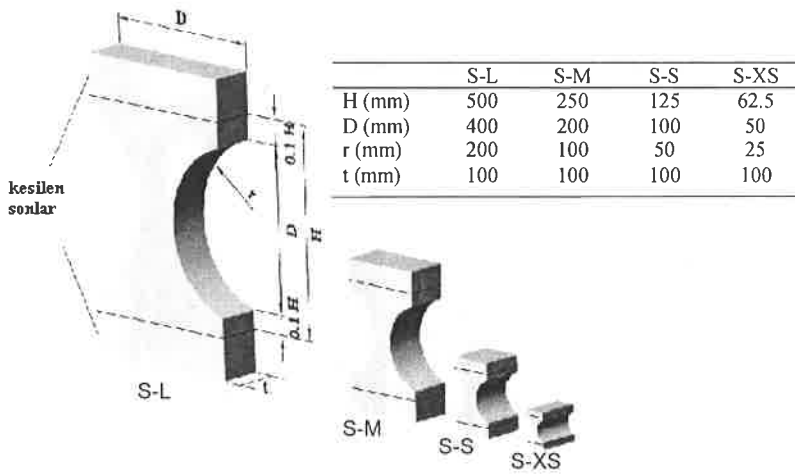
Beton kırılma parametrelerindeki boyut etkisinin incelenmesi, birçok beton için en kötü durum olan ve yapı davranışını güçlü etkileyen tek eksenli çekme yüklemeleri altında yapılması gereklidir. Belirgin bir toklaşma bölgesi gösteren lifli betonlarda kırılma davranışını inceleyebilmek için yapısal etkiler azaltılmalı ve serbest dönebilen mesnetli, tek eksenli çekme deneyi yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada üç farklı lif içeriğindeki karma lifli betonların kırılma özelliklerindeki boyut etkisini deneysel olarak inceleyebilmek için, köpek-kemiği şeklindeki dört farklı boyuttaki numuneler tek eksenli çekme ile yüklendi. Kırılma davranışları ve boyut etkisi incelendi.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Numune Özellikleri ve Karışım Tasarımı

Numunelerin üç boyutlu ölçeklendirilmesi ideal olsa da, uygulamada birçok probleme neden olduğu için tercih edilmemektedir. Bu çalışmada da yükleme çerçevesinin kapasitesi de göz önünde bulundurularak 500 mm yüksekliğindeki tam boyuttaki en büyük numunenin (L), 1/2'si (M), 1/4'ü (S) ve 1/8'i (XS) yüksekliğinde numuneler üretildi ve numune kalınlığı 100 mm sabit olarak seçildi yani iki boyutlu ölçeklendirme yapıldı ve her bir boyutta en az altı numune test edildi. Numunelerin geometrileri Şekil 1'de gösterilmiştir.

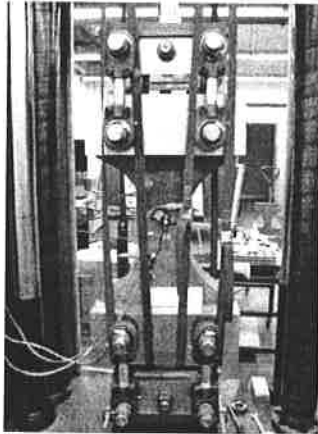


Şekil 1. Test edilen numunelerin geometrileri.

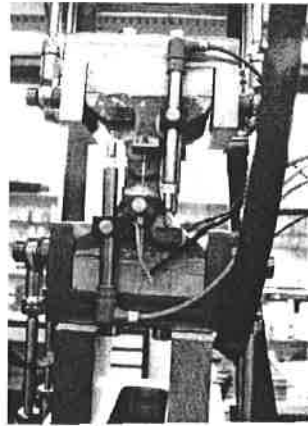
Benzer matriste ancak hacimce %3, 4 ve 5 gibi farklı miktarlarda lif içeren üç değişik karışım hazırlanmıştır. Düz uçlu benzer çekme dayanımında (2400 MPa) olan çelik lifler, iki farklı geometrik narinlik oranında kullanılmıştır. Kısa liflerin çapları 0.15 mm ve boyları 6 mm iken uzun liflerin çapları 0.2 mm ve boyları 12 mm'dir. Daha yüksek sünekliğe ulaşmak için daha uzun liflerin kullanılması gerektiği bilinmesine rağmen XS numunelerin en küçük kesitlerinin 12.5×100 mm olması nedeniyle 12 mm'den daha uzun lif kullanılmamıştır. Su/çimento oranı (0.23) ve su/bağlayıcı oranı (0.18) sabit olan matris, CEM I 52.5 çimentosu, silis dumanı ve uçucu külden üretilmiş ve süperakışkanlaştırıcılar ile kendiliğinden yerleşen betonlar elde edilmiştir. İlk karışım (M 1) %2 kısa lif ve %1 uzun lif içerirken, ikinci karışım (M 2) %2 kısa ve %2 uzun lif içermektedir. Üçüncü karışım (M 3) ise %4 kısa lif ve %1 uzun lif ilavesi ile üretilmiştir.

2.2. Deney Düzenegi

Van Mier ve diğerleri, sabit sınır şartları altında tek eksenli çekme deneyindeki çekme dayanımı değerinin serbestçe dönebilen sınır şartlarındaki deney düzeneginde bulunan değerden daha yüksek olduğunu ve gerilme-şekil değiştirme davranışlarının da farklı olduğunu göstermişlerdir [12]. Serbestçe dönebilen mesnetlerin kullanımı yapısal etkileri azaltsa da sonuçlar hala geniş bir aralıkta dağılır. Bunun olası nedeni, küçük kusurların çatlak oluşmasına ve ilerlemesine neden olması ve doğal olarak bu etkinin deneyi yönlendirmesidir. Diğer yandan sabit sınır şartlarında, çatlak ilerleme sonrasında gerilme dağılımı nedeniyle kısıtlama oluşur. Boyut etkisi incelemelerinde yapısal etkilerin olabildiğince azaltılması ve doğadakine benzer davranışın elde edilmesi gerekir. Bu yüzden bu çalışmada özel pandül çubuk sistemi serbest dönebilen mesnet elde edebilmek için tasarlandı (Şekil 2). Aynı yüklem çerçevesinde iki farklı boyutta mafsalsal sistemi ile deneyler yapılmıştır. Numunelerin, kırılmanın olacağı boyun bölgesinin her iki yüzüne toplam 6 tane şekil değiştirme ölçerler yerleştirildi.



Büyük deney düzenegi



Küçük deney düzenegi

Şekil 2. Çekme deneyi için pandül çubuk sistemleri.

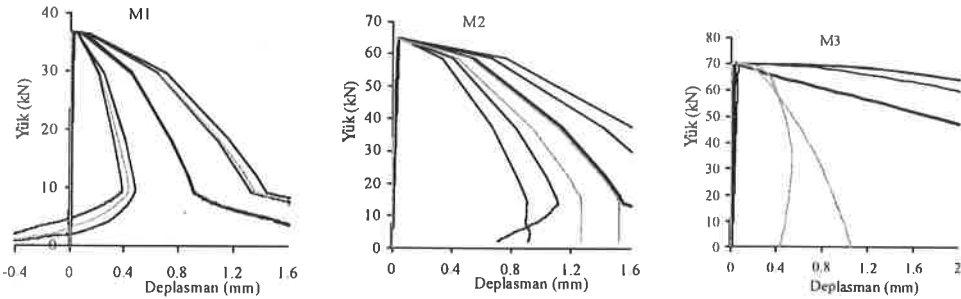
3. Sonuçların İrdelenmesi

3.1 Yük-Deplasman Eğrileri

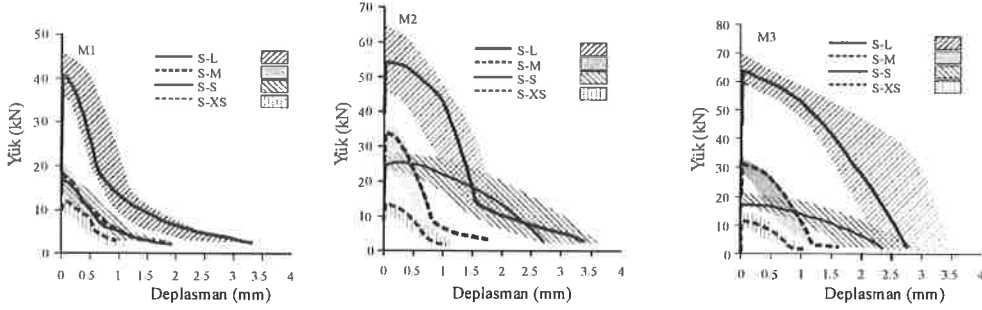
Her bir karışımı temsil eden yük-deplasman eğrileri en büyük numune için (S-L) Şekil 3'te gösterilmiştir. Numunenin eğilme nedeniyle göçtüğü görülmektedir; çatlak bir yüzden başlamış ve diğer yüze doğru kesit boyunca ilerlemiştir. Özellikle tepe yükten sonra açılma yüzündeki şekil değiştirme ölçerlerin büyük şekil değiştirme kayıtları verirken diğer yüzdekilerin çok küçük şekil değiştirme değerleri vermesi bu durumu belirgin hale getirmektedir. Bazı durumlarda ise bu yüzdeki deformasyonların negatif olması malzemenin basma altında olduğunu göstermektedir. Bu doğal davranışın serbest dönebilen mesnet şartları ile elde edilebildiği açıktır.

Beklenildiği gibi, tepe yükteki deplasman ve tepe yük sonrası köprülenme bölgesi artan lif miktarı ile artmaktadır. Bu üç beton benzer matrise sahip olsa da, çatlama alanındaki artan lif miktarı daha fazla lif köprülenmesi ile sonuçlandı. Diğer yandan, sıyrılan lif miktarı çatlama mekanizmasındaki diğer bir faktördür. Çekip-çıkarma süreci rijitliği azaltır ve yük-deplasman eğrisinde tepe yükten önce lineer olmayan davranışa neden olur. Birinci ve ikinci karışımlar (M1 ve M2) arasındaki fark artan uzun lif miktarıdır ve bu artış çekme dayanımında ve deplasmanlarda artış ile sonuçlandı. Diğer yandan kısa liflerin %2 değerinden %4 değerine artması (birinci karışımdan üçüncü karışıma) tepe yükte büyük bir artışa neden oldu.

Şekil 4, üretilen tüm karışımların ve her boyut numune için yük-deplasman eğrilerini göstermektedir. Sonuçlar, artan lif miktarı ile tepe yükün tüm boyutlardaki numuneler için arttığını göstermektedir. Azalan numune boyutu ile tepe yükünden sonraki deformasyonların daha büyük olduğu ve eğrilerin giderek birbirlerine yaklaştığı görülmektedir. Sonuçlar, aynı zamanda S-S ve S-M eğrilerinin de birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Bu durumun olası nedeni S-M numunelerinin büyük deney düzeneğinde S-S numunelerinin ise küçük deney düzeneğinde fakat aynı çerçeve içinde yüklenmiş olmaları ve iki düzeneğin rijitlik farklarının sonuçlara etkilemesidir.



Şekil 3. En büyük numuneleri (S-L) temsil eden yük-deplasman eğrileri.



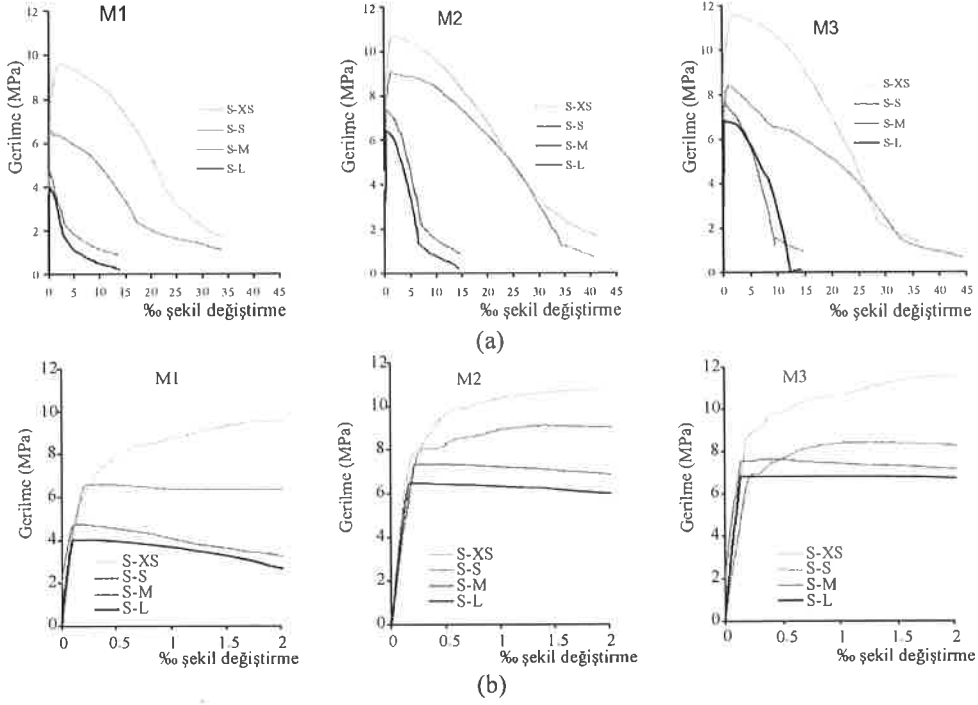
Şekil 4. Tüm karışımların yük-deplasman eğrileri (taralı alanlar dağılımı göstermektedir).

Farklı süneklığe sahip olan malzemenin boyut etkisinin de farklı olduğu gözükmektedir. Eğrinin tepe yükünden sonraki bölümü birçok araştırmacı tarafından yeterince incelenmiştir. Yapısal etkiler, köprülenme gerilmelerinin daha büyük olması nedeniyle lifli betonda normal betona göre daha önemsizdir. Diğer yandan, tepe öncesi kısım çatlakların oluştuğu ve aynı zamanda dayanımın tariflendiği önemli bir kısımdır. Tepe öncesinde oluşan malzemenin ilk geçmesinin ardından tepe sonrasında yerleşme oluşması nedeniyle bu kısmın incelenmesi gerekmektedir.

3.2. Boyut Etkisi

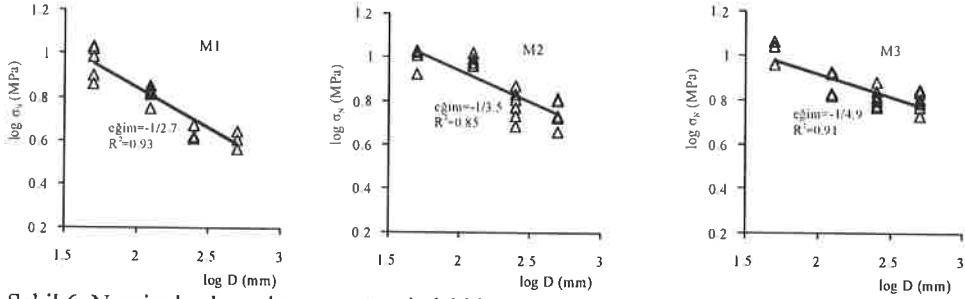
Şekil 5a'da her bir seriyi temsil eden gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. Bu gösterimde tepe öncesi kısım hemen hemen lineer olarak görülmektedir. Ancak Şekil 5b'deki gibi eğriler %0.2 şekil değiştirme derecesine kadar incelenirse lineer kısmın gerçekte çok küçük olduğu görülmektedir. Liflerin mikro-çatlaklar durdurması nedeniyle plastisite görülmüştür. Normal betonda, sadece agregalar bir miktar mikro-çatlakları önleyebilir ve bu yüzden malzeme tepe öncesi lineer kabul edilebilir.

Şekil 5b'de görüldüğü gibi her karışım benzer elastik kısma sahiptir. Numune boyutu azaldıkça malzeme daha stabil mikro-çatlama bölgesi göstermektedir. Ayrıca, bu bölgenin beton matris fazına daha fazla lif ilave ederek geliştirilebileceği görülmektedir. Tepe öncesi davranışın geliştirilmesi dayanımın ve süneklığın artmasına neden olabilir. Elastik kısımda çatlakların, stabilitesini bozulmadan ve kritik eşiğe gelmeden önce lifler tarafından tutulması gerekir. Diğer yandan, bu sürecin de boyuta bağlı olduğu görülmektedir. Küçük numunelerde, mikro-çatlama ve çoklu-çatlamanın fazla olması yüksek süneklığe neden olmaktadır.

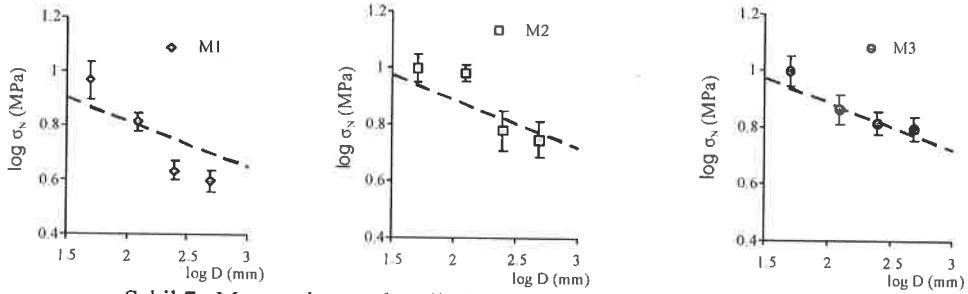


Şekil 5.a) Her bir seriyi temsil eden gerilme-şekil değiştirme eğrileri b) %0.2 şekil değiştirme derecesine kadar gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Belirlen nominal dayanım üzerindeki boyut etkisi ikili logaritmik diyagramda Şekil 6'da görülmektedir. Artan süneklik ile çekme dayanımı üzerindeki boyut etkisinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, artan lif hacmi ile negatif eğimlerin arttığı görülmektedir. Boyut etkisindeki istatistiksel etkenler malzemenin artan hacmi ile zayıf elaman sayısının artması esasına dayanır ve Weibull Boyut Etkisi Teorisini oluşturur [4, 5]. Bu teorinin beton kırılmasına uygulanması sonucunda $\sigma_N \propto D^{-1/6}$ şeklinde karakteristik boyut ile nominal dayanım arasında ilişki bulunmuştur [13]. Karma lifli betonlardan elde edilen sonuçlar için bu ilişki Şekil 7'de verilmiştir. Deney sonuçlarının Weibull Teorisi ile uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle artan lif miktarı ve dolayısıyla artan süneklik ile bu uyum daha belirgin hale gelmektedir. Buradan karma lifli betonların nominal dayanımı üzerindeki boyut etkisinin bir kısmının istatistiksel boyut etkisi olduğu söylenebilir. Ancak karma lifli betonlarda ilk çatlak sonrasında, lifler sayesinde gerilme dağılımları değişmektedir ve özellikle Şekil 5b'de görüldüğü gibi tepe yükü öncesi lineer olmayan kısım nedeniyle alternatif yaklaşımlara da ihtiyaç olacaktır.

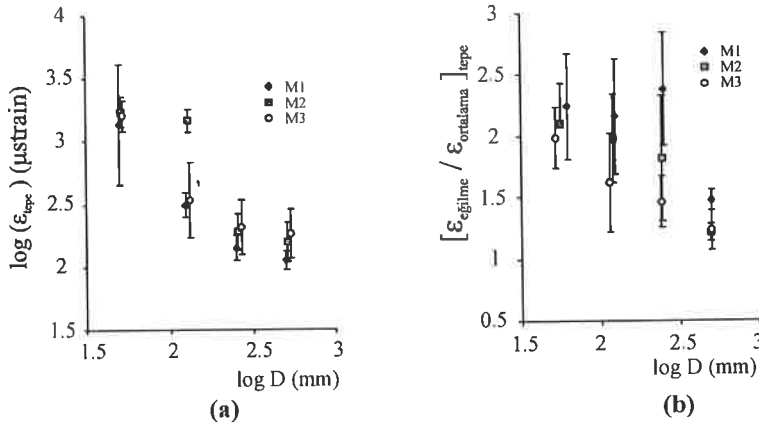


Şekil 6. Nominal çekme dayanımı üzerindeki boyut etkisinin çift logaritmik eksen takımında gösterimi.



Şekil 7. Mevcut deneysel verilerin Weibull Teorisi ile karşılaştırılması

Tepe yükündeki şekil değiştirmeler standart sapmaları ile beraber her bir seri için Şekil 8a'da gösterilmiştir. En küçük boyuttaki numunelerin boyun bölgesindeki kesit alanında bulunan lif sayısının en önemli parametre olması nedeniyle standart sapmaları diğer serilerden daha yüksek çıkmıştır. Beton matris fazına lif ilavesi ile tepe yükteki şekil değiştirmeler artmıştır. Şekil 8b'de tepe yükteki en büyük şekil değiştirmenin ortalama şekil değiştirmeye oranı olarak tanımlanan eğilme büyüklüğü üzerindeki boyut etkisi görülmektedir. Sabit olmayan bu büyüklüğün artan süneklik ya da başka bir deyişle artan tepe şekil değiştirmesi ile azaldığı görülmektedir. Artan numune boyutu ile eğilme değerleri çok az bir miktarda düşmektedir. Buradan kullanılan deney düzeneği ile boyut etkisinin yapısal etkilerden daha çok malzemenin kendisinden oluştuğunu belirler.



Şekil 8. a)Tepe yükündeki şekil değiştirmelerde ve b) eğilme miktarındaki boyut etkisi ve dağılım çubukları.

4. Sonuçlar

- Yapısal etkileri en aza indirecek şekilde tasarlanan deney düzeneği ile üç farklı lif içeriğindeki karma lifli betonlarda tek eksenli çekme yüklemeleri ile çatlama numunenin bir yüzünde başlamış ve göçme en doğal formunda sürmüştür. Artan uzun lif miktarı ile deplasmanlar artmıştır. Kısa lif miktarının artması ise büyük miktarlarda tepe yükün artması ile sonuçlanmıştır. Çatlama alanındaki toplam lif miktarının artması ise liflerin köprülenmesi ve dolayısıyla çoklu-çatlama ile sonuçlanmıştır.
- Numune boyutu küçüldükçe malzeme daha sünek davranmaktadır. Nominal dayanım ve tepe yükteki şekil değiştirmelerin numune boyutundan etkilendiği görülmüştür. Malzemenin sünekliği arttıkça nominal dayanım üzerindeki boyut etkisinin azaldığı görülmüştür. Tepe yükü öncesi kısmın incelenmesi ile numune boyutu azaldıkça malzemenin daha fazla mikro-çatlama gösterdiği görülmüştür. Bu kısımdaki mikro-çatlamaların beton matris fazına daha fazla lif ilavesi ile artırılabilceği görülmüştür.
- Regresyon analizleri lif miktarı ile nominal dayanım-boyut diyagramındaki negatif eğimin azaldığını ve Weibull Teorisi ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Gösterilen boyut etkisinin karma lifli betonlarda malzeme kompozisyonuna ve mikro yapıya bağlı olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmadaki deneyler ETH-Zurich, Institute for Building Materials laboratuvarlarında sürdürülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Walsh P.F., “Fracture of plain concrete” *Indian Concr J* 46 (11), 469–476, 1972.
- [2] Bazant, Z.P., “Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal”, *ASCE J Engng Mech* 110 (4), 518–535, 1984.
- [3] Carpinteri A., Chiaia B., Ferro G., “Multifractal scaling law for the nominal strength variation of concrete structures”. In: H. Mihashi, H. Okamura and Z.P. Bazant (Eds), *Size effect in concrete structures*. E&FN Spon, 173–185, 1994.
- [4] Weibull W., “A statistical theory of the strength of materials”, *Royal Swedish Academy of Engng Sci Proc* 151, 1–45, 1939.
- [5] Weibull W., “A statistical distribution function of wide applicability”, *J Appl Mech* 18 (9), 293–297, 1951.
- [6] Van Mier J.G.M. and Van Vliet M.R.A., “Influence of microstructure of concrete on size/scale effects in tensile fracture” *Engng Fract Mech*, 70 (16), 2281–2306, 2003.
- [7] Dyskin A., Van Vliet M.R.A, Van Mier J.G.M., “Size effect in tensile strength caused by stress fluctuations”, *Int J Fract* 108 (1), 43–61, 2001.
- [8] Bazant Z.P., “Scaling laws in mechanics of failure”, *J Engng Mech* 119 (9), 1828–1844, 1993.
- [9] Man H.K. and Van Mier J.G.M., “Influence of particle density on 3D size effects in the fracture of (numerical) concrete”, *Mech Mater* 40 (6), 470–486, 2008.
- [10] Van Mier J.G.M., “Reality behind the fictitious crack?” In: V.C. Li, Ch. K.Y. Leung, K.J. Willam, S.L. Billington (Eds), *Proc. of Int. Conference on Fracture of Concrete and Concrete Structures-FraMCoS 5*, Evanston, Illinois, 11–30, 2004.
- [11] Van Mier J.G.M., “Framework for a generalized four-stage fracture model of cement-based materials”, *Engng Fract Mech* 75 (118), 5072–5086, 2008.
- [12] Van Mier J.G.M, Schlangen E., Vervuert A., “Tensile cracking in concrete and sandstone. Part II-effect of boundary conditions”, *Mater Struct* 29 (186), 87–96, 1996.
- [13] Zech B., Wittmann F.H., “A complex study on the reliability assessment of the containment of a PWR. Part II Probabilistic approach to describe the behaviour of materials”, *Nuc Engng Des* 48 (2-3) 575–584, 1978.