

Küp numunelerin yarmada-çekme dayanımında agrega granülometrisinin boyut değişimi üzerine etkisi

Senem YILMAZ ÇETİN^{*1}, Ragıp İNCE²

¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

² Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ

Makale Gönderme Tarihi: 23.05.2016

Makale Kabul Tarihi: 02.12.2016

Öz

Beton ve betonarme yapılarda göçme analizi yapılırken birçok lineer ve lineer olmayan yaklaşımlar kullanılmaktadır. Betonarme bir yapıyı kırılma mekaniğine göre analiz edebilmek için ilk önce, kullanılan malzemenin kırılma parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Betondaki neme ve zamana bağlı olarak mekanik sabitlerin değişmesi ve boyut etkisinden dolayı, Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM), kırılma parametrelerinin tespitinde yetersiz kalmıştır. Bunun nedeni çatlağın ucunda yer alan diğer malzemelere göre daha büyük bir yer işgal eden kırılma süreci bölgesinin (KSB) var olmasıdır. Betonun kırılma parametrelerini belirlemek için şartnameler ve araştırmacılar tarafından birçok lineer olmayan kırılma mekaniği modelleri önerilmektedir. Bu lineer olmayan yaklaşımlardan Bazant (1984) boyutun dayanım üzerindeki etkisini inceleyerek betonda daha büyük bir KSB olduğunu öne sürmüş ve 'Boyut Etkisi Kanunu' geliştirmiştir. Betonun kırılma mekaniğinde giriş numuneler yaygın olarak kullanılmakla birlikte, taşınabilirlik ve hafiflik açısından bazı avantajlara sahip olduğundan küp ve silindir numuneler son zamanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte karşılıklı basınç kuvveti uygulanan küp yarma testi ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Sunulan bu çalışmada, su/çimento oranı 0.6 olan, maksimum agrega çapı 8 mm'lik kesikli ve sürekli granülometreli beton karışımları hazırlanmıştır. Aynı geometriye sahip farklı boyutlu (4:2:1) küp numuneler üzerinde boyut etkisi incelenmiştir. 50x50x50 mm³, 100x100x100 mm³, 200x200x200 mm³'lük küp numunelerin 28 günlük yarmada-çekme dayanımları belirlenmiş, elde edilen deney sonuçları Bazant'ın "Boyut Etkisi Kuralı"na göre analiz edilmiştir. Sonuç olarak kesikli granülometriye sahip betonların daha sünek davrandığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton; boyut etkisi kanunu; kırılma mekaniği; yarmada-çekme dayanımı.

Giriş

İnsanlık var olduğu günden beri malzemedeki kırılma davranışı; tasarım hataları, malzeme hataları, beklenmeyen yükler gibi nedenlerden dolayı yaşamı olumsuz etkilenmiştir. Bu hataların temeline inildiğine malzeme özellikleri ve davranışlarının olduğu görülmektedir. Teorik olarak hesaplanan dayanım, pratikte elde edilememektedir. Malzeme yakından tanınarak meydana gelen hasarın neden ve nasıl oluştuğu incelenmeli ve tekrarlanmaması için önlemler alınmalıdır. Kırılma mekaniği bu kusurlar sonucu oluşan hasarları inceleyerek tasarımların malzemeye göre yapılmasının önemini ve mühendislik bakımından önemli bir yere sahip olduğunu gösterir. Bu alandaki gelişmeler; meydana gelecek olası tehlikelerin bir kısmının engellenebilmesine yardımcı olmakla birlikte, kırılma mekaniğinin kullanılması beton ve betonarme yapı tasarımlarında güvenlik açısından ve uygun malzeme seçimi ile maliyeti düşürücü yönde önemli yararlar sağlayacaktır. Kırılma mekaniği temelde, malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yoğunluğunu arttıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. İlk olarak Griffith (1920) tarafından temeli atılan LEKM teorisi, daha sonraki yıllarda Kaplan (1961) yarı gevrek ve heterojen malzeme olan beton için uygulanmıştır. Yapılan araştırmalarda bu klasik teorinin beton için yetersiz olduğunu vurgulanarak betona doğrudan uygulanamayacağı, bunun nedeninin ise çatlağın ucunda yer alan diğer malzemelere göre daha büyük bir yer işgal eden kırılma süreci bölgesinin var olmasından kaynaklanmakta olduğu görülmüştür (Kesler vd., 1972). Yapı şartnameleri ve LEKM tarafından ihmal edilen bu bölge, metallerde plastik bölgenin yanında çok küçük olmasına karşın, betonda 100 mm'nin üzerinde değerler alarak büyük yer işgal ederler (Hillerborg vd., 1976). Yapılan araştırmalar sonucunda beton davranışında lineer olmayan kırılma mekaniği prensiplerinin kullanılması ile daha iyi açıklanabileceği görülmüştür. Bazant (1984) geometrik olarak benzer numunelere uygulanan boyut analizi ve çatlağın yayılması başlangıcındaki enerji dengesine dayanarak Boyut Etkisi Kanunu

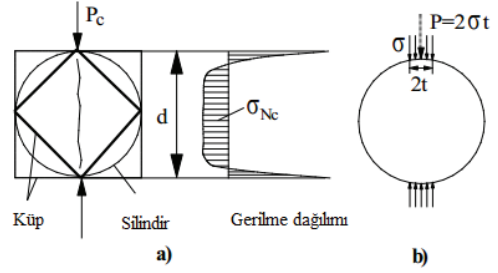
(BEK) geliştirmiştir. Sonradan yapılan bazı deneysel çalışmalar boyut etkisi kanununun yetersiz olduğunu gösterince yeni teoriler geliştirilmiştir. Kim ve Eo (1990) Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kanunu ve Carpinteri (1995) maksimum yükte çatlak yüzeyinde meydana gelen hasarı, fraktal geometri ile modellenerek boyut etkisi kavramına geometrik olarak yaklaşarak Çok Fraktallı Boyut Etkisi Kanunu önermiştir. Betonun kırılma parametrelerinin hesaplanmasında standartlaşmış yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden kohezif çatlak modelleri kırılma süreci bölgesini çatlak ucunda azalan çatlağa basınç yapan bir gerilme bloğu ile modellerken, eşdeğer çatlak modelleri ise başlangıç çatlak uzunluğundan büyük bir efektif çatlak uzunluğu kullanarak beton yapılar da göçmeyi modellemektedir (Alyamaç ve İnce, 2007). Kohezif çatlak modelleri Fiktif Çatlak Modeli (Hillerborg,1976) ve Çatlak Bant Modelidir (Bazant ve Oh,1983). Eşdeğer Çatlak Modelleri ise İki Parametrelili Model (Komplians Metodu (Jenq ve Shah, 1985) ve Pik Yük Metodu (Tang vd., 1996)), Efektif Çatlak Model (Nallathambi ve Karihaloo,1986), Boyut Etkisi Modeli (Tek boyut ancak değişken çentikli numune metodu (Tang vd., 1999)), Çift-K Modeli (Xu ve Reinhardt, 1999a, b, c) ve Çift-G Modelidir (Zhao ve Xu, 2002). Son zamanlarda, betonun kırılma parametreleri belirlenirken çentikli üç noktalı eğilme numuneleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte yarma tipi numunelerin betonun kırılma malzeme parametrelerinin tayininde kullanılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Brühwiler ve Wittmann, 1990; Rocco vd, 1995; Tang vd; 1992, 1994; İnce, 2010, 2012a, 2012b). Çentikli küp ve silindirik numuneler kompakt ve hafif olması, kalıpları mukavemet belirlemede kullanılan numune kalıpları ile aynı olduğundan şantiyede kullanım rahatlığına sahip olması ve kırılma parametreleri belirlenirken numune ağırlığı ihmal edildiğinden kiriş numuneler göre daha avantajlıdır (Brühwiler ve Wittmann, 1990). Bu çalışmada TS 802 (1985)'ye uygun beton karışımları hesaplanarak kesikli granülometrilili betonlar üretilmiştir. Çentiksiz beton küp numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre yarmada-çekme deneyi

uygulanarak Bazant'ın Boyut Etkisi Kanunu (BEK) (Bazant, 1984) incelenmiştir. Çentiksiz üretilen beton küp numunelerde beton karışımları hazırlanırken maksimum agrega çapı 8 mm olarak seçilmiştir. Bütün numunelerin üretiminde aynı tip çimento kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.60'da sabit tutulmuştur. Sertleşmiş beton özellikleri 28 gün üzerinden belirlenmiştir. Çentiksiz küp numune deneyi için toplam 2 seri üretilmiştir. Hazırlanan karışımlardan 150x150x150 mm³, 200x200x200 mm³, 100x100x100 mm³, 50x50x50 mm³ lük küp numuneler üretilmiştir.

Yarma Deneylerine Tarihsel Genel Bakış

Betonun çekme dayanımının bilinmesi, çatlakların ve yapıyla ilgili analizlerin yapılabilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır. Kütle betonlarında, su depolarında, nükleer santrallerde, hava alanlarında, öngörülmesi betonlarda ve yol yapımlarında çatlak oluşmaması için çekme dayanımı büyük bir önem arz etmektedir. Yarmada-çekme deneyi, Brezilya Standardizasyon Konferansında Carniero ve Barcellos (1953) tarafından silindir yarma deneyi betonun çekme mukavemetinin tayini için önerilmiştir. Daha sonra küp (Nilsson, 1961) ve prizma şekilli numunelerde, yarmada-çekme mukavemetini belirlemek için kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterilen deney numunesinin (küp, diyagonal küp ve silindir numune) alt ve üst kısımlarına uzunlukları boyunca genişliği çeşitli standartlara göre değişen levha yerleştirilir. Böylece yükleme noktaları ezilmez ve birden fazla çatlama önlenir. Şekil 1'de deney cihazına yerleştirilen numuneye yük uygulanır. Numuneye uygulanan çizgisel yük boyunca basınç gerilmelerine dik yönde çekme gerilmeleri oluşur (Neville, 2011). Beton yükün uygulandığı yerde kısılma, orta bölgede yatay eksende uzamaya maruz kalmaktadır. Uygulanan yük altında numune yüklemeye doğrultusuna paralel olarak kırılıncaya kadar devam eder ve kırılma yükü (P_c) ölçülür. Kenar yarma ve diyagonal yarma deneylerinde

yük kademeli olarak arttıkça ilk çatlak merkezde ve dikey yönde oluşmaktadır (Rocco, 1999; Ince, 2010; Ince, 2012a) ve birincil çatlaktan sonra oluşan çatlak numune boyutun ve yük taşıyan şeritlerin relatif genişliğinden bağımsızdır (Rocco, 1999).



Şekil 1. Yarmada-çekme deneyi

Elastisite teorisine göre yarma-çekme örneklerinde nominal çekme dayanımı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Timoshenko ve Goodier, 1970).

$$\sigma_{Nc} = \frac{2P_c}{\pi b d} \quad (1)$$

Burada; P_c : kırılma yükü, b : numune genişliği, d : numune boyutu ve $\beta = (t/d)$ Yük taşıyan şeritlerin relatif genişliğidir. Yük taşıyan şeritlerin relatif genişliği (t/d) standartlara bağlı olarak % 0 ile % 25 aralığında olabilir (Rocco vd., 1999; Ince, 2010a; Ince 2012a). Tang (1994) silindir numunelerde maksimum çekme gerilmesini analitik yöntemlerle aşağıdaki şekilde hesaplamıştır:

$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi b d} (1 - \beta^2)^{3/2} \quad (2)$$

Rocco vd. (1995) çentiksiz kare prizmatik numuneler için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak aşağıdaki formülü önermiştir:

$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi b d} (1 - \beta^2)^{5/3} - 0.0115 \quad \beta \leq 0.20 \quad (3)$$

Rocco vd. (1999) numune boyu, şekli ve yük taşıyan şeritlerin relatif genişliğini dikkate alarak kohezif çatlak modelini kullanmışlardır. İnce (2010) çentiksiz diyagonal küplerde çekme mukavemeti için sınır elamanlar metodu ile Denklem 4'ü önermiştir.

$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi b d} \left(\frac{1}{0.931 + 38.931 \beta^{4.778}} \right) \quad \beta \leq 0.25 \quad (4)$$

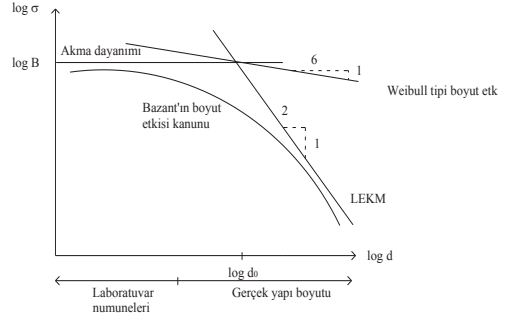
Diğer yarma numunelerinden farklı olarak diyagonal yarma küp numunelerde maksimum gerilme için $\beta \leq 0.15$ relatif genişliğinde $1/0.931$ çarpanı yeterli yaklaşım sağlamaktadır (İnce, 2012b). Bununla beraber silindirik numunelere kıyasla küp numuneler özellikle diagonal küplerle yapılan çalışmalar sınırlıdır (İnce, 2012a; İnce vd, 2015; Neville, 2011).

Beton ve Betonarme Yapılarda Boyut Etkisi

Kani (1967) beton yapılara boyut etkisini ilk uygulayanıdır. Geometrik benzer betonarme kiriş numunelerde boyut arttıkça kesme taşıma gücü azaldığını gözlemlemiştir. Numune boyutu arttıkça numune içindeki kusurların bulunma olasılığı artmaktadır (Weibull, 1939). Kırılma mekaniğinin betona uygulanmasında en önemli nedenlerinden biri geometrik olarak benzer, fakat farklı boyutlu elemanlarda göçmedeki gerilmenin boyut arttıkça azalmasıdır. Büyük boyutlu beton yapılarda nominal çekme dayanımı düşmekte boyut küçüldükçe nominal çekme mukavemeti yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bazant (1984) en büyük yükte çatlağın ilerlemesi sonucu serbest kalan enerji ile beton tarafından absorbe edilen enerji arasındaki basit dengeyi boyut analizi (Buckingham Pi teoremi) yardımıyla kurarak boyut etkisi teorisini geliştirmiştir. Boyut etkisi iki kavrama bağlıdır; bunlardan birincisi malzemenin homojen olmayışı, ikincisi ise çatlak ve çentiklerin var olmasıdır. Boyut etkisi, sünek malzemelerde görülmekle birlikte gevrek malzemelerde çok daha belirgindir. Bazant, kırılma mekaniğinde nominal dayanım σ_N ile numune boyutu d arasındaki ilişki şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\sqrt{1+d/d_0}} \quad (5)$$

Burada; f_t : malzeme çekme dayanımı, B : boyutsuz bir sabit, d_0 : birimi uzunluk olan bir sabit, d : hesaplarda kullanılan karakteristik boyut ve $\beta = d/d_0$: değeri gevreklik sayısıdır.



Şekil 2. Bazant'ın (2002) boyut etkisi teorisi

β kırılma şeklini belirlerken, eğer $d \ll d_0$ ise $\beta = d/d_0$ değeri 1'in yanında çok küçük bir değer olduğu için ihmal edilebilir. $\text{Log} \sigma_N - \text{Log} d$ arasındaki ilişki yatay bir doğru şeklinde olup dayanım kriteri veya akma kriteri geçerli olur. $d \gg d_0$ olduğunda ise $\text{Log} \sigma_N - \text{Log} d^{-1/2}$ Lineer Elastik Kırılma Mekaniği teorisi geçerli olur. Weibull (1939) teorisinde bu ilişkiyi $\text{Log} \sigma_N - \text{Log} d^{-1/6}$ tanımlamıştır. Gerçekte ise mühendislik yapıları bu iki durum arasındadır. Bazant (1984) bu durumu geçiş eğrisi olarak tanımlamıştır, boyut etkisi kanunu küçük boyutlarda, akma dayanım kriterine ve büyük boyutlarda ise LEKM boyut etkisine asimptot kalmakta ve sınırlı bir boyut aralığında geçerli olmaktadır. Bazant'ın (1984)'ın BEK, aynı zamanda numunenin malzeme özelliklerine bağlı olarak sünek veya gevrek davrandığının göstergesi olarak da kullanılmaktadır (İnce vd., 2015a, 2015b).

Deneysel çalışma

Deneylein tamamı, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Beton karışımlarda Elazığ Altınova

Çimento San. T.A.Ş.'nin ürettiği CEM I 42.5 N tipi yüksek dayanımlı çimento kullanılmıştır. Karışımlar hazırlanırken $d_{max}=8$ mm ile hazırlanan kesikli granülometrilili karışımda (0-2) ve (4-8) elek aralığında bulunan nehir agregası kullanılmıştır. Boyut değişim oranları 1:4 olan $d=50, 100$ ve 200 mm beton küp numuneler kullanılmıştır. Karışım oranları hesaplanırken su/çimento oranı 0.6, çimento dozajı 400 kg/m^3 , çimentonun özgül ağırlığı $\gamma_c = 3.1 \text{ gr/cm}^3$ alınmıştır. Çentiksiz küp numune yarma deneyleri için özel olarak tasarlanmış, çelik döküm malzemeden imal edilmiş kalıplar kullanılmıştır. Basınç dayanımı için ise 150 mm 'lik küp kalıplar kullanılmıştır. Her boy numuneden 3 adet dökülmüştür. Küp numuneler bir gün kalıpta bekletildikten sonra 28 gün boyunca yaklaşık 20° de kür havuzunda bekletilmiştir. Sudan çıkarılan küp numunelerin yüzeylerine kenarları baz alınarak, birer cm geçecek şekilde 3 mm kalınlığında duralit şeritler karşılıklı yerleştirilmiştir. Kırırma hazır hale gelen numuneler yarmada- çekme ve basınç deneyleri için 2000 kN kapasiteli dijital makinedeki çelik başlıklar içine yerleştirilip kırılarak tepe yükleri kaydedilmiştir. Ortalama olarak küp numunelerin maksimum yüke ulaşması $2 \text{ dk. } \pm 30 \text{ sn}$ olacak şekilde yüklenmiştir. Küp numunelerin üzerine sabitlenen duralitler numunenin bir düzlem boyunca ikiye bölünmesi sağlamıştır. Her küp numune deney cihazına yerleştirilmeden önce yeni bir duralit çubuk yerleştirilmiştir. Tablo 1 de başarılı 17 adet küp numuneye ait boyutlar ve onlara karşılık gelen deney sonuçlarından elde edilen maksimum yük ve nominal dayanım değerleri verilmiştir.

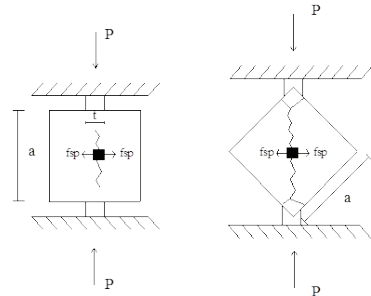
Deney Sonuçları

Betonun 28 günlük basınç dayanımı $\beta = 0.1$ için 41 MPa ve $\beta = 0.16$ için ise 42 MPa olarak tespit edilmiştir. Tipik olarak yük arttıkça ilk çatlak merkezde ve dikey yönde oluşmaya başlamıştır. Diyagonal-yarma küplerinde maksimum yüke ulaşıldıktan sonra Şekil 3'te görüldüğü gibi tam ortadan ikiye bölünerek elmas şekilli kamalar (İnce vd., 2015a)

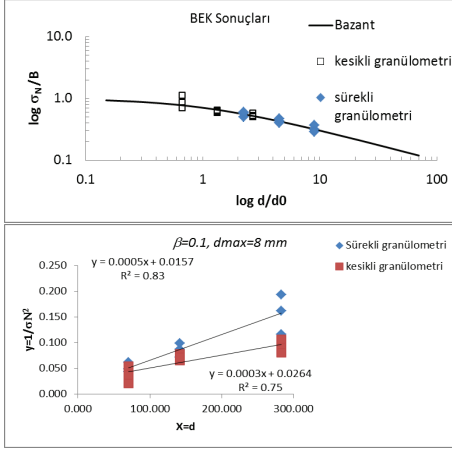
oluşurken, bu çalışmada ise benzer şekilde kenar-yarma küplerinde kamalar oluştuğu gözlenmiştir. Benzer kırılma modları Rocco vd., (1995) ve İnce (2004, 2012a)'nin çalışmalarında bulunmuştur. İnce vd., (2013)'de yaptıkları çalışmada $\beta = 0.1$ için diyagonal yarma küplerinin kesikli ve sürekli granülometrik karışımlarını karşılaştırmış ve kesikli granülometri ile üretilen serinin daha sünek çıktığı gözlenmiştir (Şekil 4).

Tablo 1. Deney sonuçları

β	d(mm)	Kesikli granülometri		Sürekli granülometri (İnce, vd., 2015)	
		P_k (kN)	σ_N (MPa)	P_k (kN)	σ_N (MPa)
0.1	50	19.7	5.017	16.7	4.253
	50	16.8	4.278	15	3.820
	50	-	-	18.7	4.762
	100	52.8	3.361	48.2	3.069
	100	58.4	3.718	52.9	3.368
	100	61.9	3.941	50.5	3.215
	200	192.7	3.067	157	2.499
	200	203.3	3.236	188.7	3.003
	200	206.8	3.291	170.6	2.715
	200	223.5	3.557	172.9	2.752
0.16	50	17.6	4.482	21.1	5.373
	50	20.5	5.220	17.5	4.456
	50	18.4	4.686	18.9	4.813
	100	62.4	3.973	59.4	3.782
	100	63.8	4.062	55.4	3.527
	100	64.2	4.087	62	3.947
	200	216.1	3.439	210.1	3.344
	200	226.1	3.598	183	2.913
	200	223.5	3.557	172.9	2.752

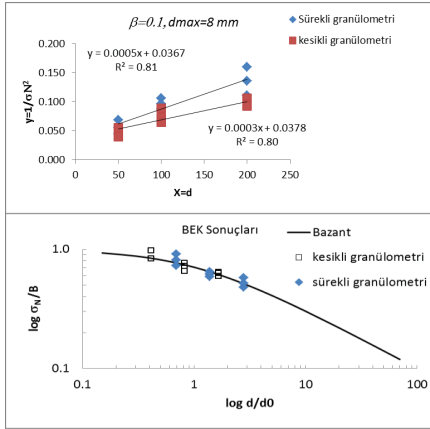


Şekil 3. Kenar-yarma ve diyagonal yarma küplerinde çatlak modeli

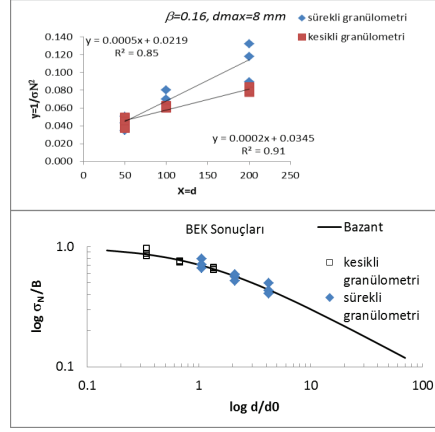


Şekil 4. Diagonal-yarma numunelerinde $\beta=0.1$ için Bazant'ın boyut etkisi kanunu uygulamaları İnce vd., (2013).

Kenar-yarma küp numuneleri için A ve C regresyon sabitleri $Y = (1/\sigma_N^2)$ ve $X = (d)$ doğrusal analizleri sonucu $Y = AX + C$ doğrusundan elde edilir. B ve d_0 ise $Y = (f_t/\sigma_N)^2$ ve $X = (d)$ olmak üzere $Y = AX + C$ doğrusundan $B = (1/C)^{1/2}$ ve $d_0 = C/A$ şeklinde elde edilen ampirik sabitlerdir.



Şekil 5. Kenar-yarma numunelerinde $\beta=0.1$ için Bazant'ın boyut etkisi kanunu uygulamaları.



Şekil 6. Kenar-yarma numunelerinde $\beta=0.16$ için Bazant'ın boyut etkisi kanunu uygulamaları

Şekil 5 ve Şekil 6'da lineer regresyon analizleri ve çift logaritmik düzlemdeki boyut etkisi analizleri sırasıyla verilmiştir. Ayrıca grafikler üzerinde korelasyon katsayıları gösterilmiştir.

Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalarda, betonun kırılma davranışında maksimum agrega çapının ve agrega tipinin etkili olduğu tespit edilmiştir. Yarma-çekme deneyine tabi tutulan çentiksiz küp numunelerde, numune çapı arttıkça nominal dayanımlar azalmış ve oldukça güçlü bir boyut etkisi görülmüştür. Bununla beraber gerçek yapı boyutunda davranışın nasıl olacağı hala teorik olarak belirsizliğini korumaktadır. Boyut etkisi çalışmalarında yarmada-çekme deneylerinde standartlarda şimdiye kadar $\beta = (t/d)$ yükleme şerit genişliği/numune boyutu ilişkisi dikkate alınmamakla birlikte literatürdeki bilimsel çalışmalarda bunun önemi birçok kez vurgulanmıştır. Bu çalışmada ise $\beta = 0.10$ ve 0.16 alınmıştır. Kesikli granülometrilili ile üretilen çentiksiz küp numune deney sonuçları ile literatürden alınan sürekli granülometri ile üretilmiş analiz sonuçları karşılaştırıldığında, kesikli granülometri ile hazırlanan karışımların mekanik davranışlarının özellikle süneklilik açısından daha iyi oldukları bu çalışmadaki analizde gözlenmiştir.

Kaynaklar

- Alyamaç, K. E. ve İnce, R., (2007). Kür süresinin betonun kırılma parametreleri üzerine etkisinin incelenmesi, 8.Uluslar Arası Kırılma Konferansı Kitabı, İstanbul, Türkiye, 7-9 Kasım, 600-609.
- Bazant, Z. P. and Oh, B. H., (1983). Crack band theory for fracture of concrete, *Materials and Structures*, 16, 155-157.
- Bazant, Z.P., (1984). Size effect in blunt fracture: concrete, rock and metal. *ASCE Journal Engineering Mechanics*, 110, 518-535.
- Bazant, Z. P. (2002) Scaling of Structural Strength. HermesPenton, London.
- Brühwiler, E. and Wittmann, F.H., (1990). The wedge splitting test, a method of performing stable fracture tests, *Engineering Fracture Mechechanics*, 35, 117-126.
- Carneiro, F. L. L. B. and Barcellos, A., (1953). Concrete Tensile Strength, *Union of testing and Research Laboratories for Materials and Structures*, 13, 97-123.
- Carpinteri, A., Chiaia, B. and Ferro, G., (1995). Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder, *Materials and Structures*, 28, 311-317.
- Griffith, A.A., (1920). The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A221, 163-198.
- Hillerborg, A., Modeer, M.A. and Petersson, P.E., (1976). Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement & Concrete Research*, 6, 773-782.
- Ince, R. ve Arıçlı, E., (2004). Size effect in bearing strength of concrete cubes, *Construction and Building Materials*, 18(8), 603-609.
- Ince, R., (2010). Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes, *Engng. Fract. Mech.*, 77, 2233-2250.
- Ince, R., (2012a). Determination of concrete fracture parameters based on peak-load method with diagonal split-tension cubes, *Engng. Fract. Mech.*, 82, 100-114.
- Ince, R., (2012b). Determination of the fracture parameters of the Double-K model using weight functions of split-tension specimens, *Engng. Fract. Mech.*, 96, 416-432.
- Ince R., Gör M., Eren M. E. and Alyamaç K. E., (2015a). The effect of size on the splitting strength of cubic concrete members, *Strain*, 51, 135-146.
- Ince R., Gör M., Alyamaç K. E. and Eren M. E. (2015b). Multi-fractal scaling law for split strength of concrete cubes, *Magazine of concrete research*, 68(3), 141-150.
- Ince, R., Yılmaz, S. and Gör, M. (2013). Size effect in splitting diagonal cubes, Proc. 2nd Inter Balkans Conf. On Chall. Of Civ. Engng, Tirana, Albania, 604-611.
- Jenq, Y. S. and Shah, S. P., (1985a). A two-parameter model for concrete, *ASCE J. Eng. Mec.*, 111(10), 1227-1241.
- Kaplan, M.F., (1961) Crack propagation and the fracture of concrete, *Journal of ACI*, 58, 591-610.
- Kesler, C.E., Naus, D.J. and Lott, J.L., (1971). Fracture mechanics its applicability to concrete, *The Society of Material Science*, 4, 113-124.
- Kim, J. K. and Eo, S. H., (1990). Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks, *Magazine of Concrete Research*, 42, 233-238.
- Nallathambi, P. and Karihaloo, B. L., (1986). Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete, *Magazine of Concrete Research*, 38, 67-76.
- Neville A. M., (2011) Properties of concrete, 5th edn. Pearson Education, Harlow, UK.
- Nilsson S., (1961) The tensile strength of concrete determined by splitting tests on cubes. *RILEM Bulletin*. 11, 63-67.
- Rocco, C., Guineae, G. V., Planas, J. and Elices, M., (1995). The effect of the boundary conditions on the cylinder splitting strength, *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Ed. Folker H. Wittmann, Proceedings FRAMCOS-2, Zurich, Switzerland, 75-84.
- Rocco, C., Guineae, G. V., Planas, J. and Elices, M., (1999). Mechanism of rupture in splitting tests. *ACI Mater. J.* 96, 52-60.
- Rocco, C, Guinea, G. V., Planas, J. and Elices, M., (2001). Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view, *Cement & Concrete Research*, 31, 73-82.
- Tang, T., Quayang, C. and Shah, S. P., (1996). A simple method for determining material fracture parameters from peak loads, *ACI Materials Journal*, 93(2), 147-157.
- Tang, T., Shah, S.P. and Ouyang, C., (1992). Fracture mechanics and size effect of concrete in tension, *ASCE Journal Structural Engineering*, 118(3), 169-3185.

- Tang, T. (1994). Effect of load-distributed width on split tension of unnotched and notched cylindrical specimens, *J. Test. Eval.*, 22, 401-409.
- Tang, T., Yang, S. and Zollinger, D., (1999). Determination of fracture energy and process zone length using variable-notch one-size specimens, *ACI Materials Journal*, 96, 3-10.
- Timoshenko, S. P. and Godier, J. N., (1970) Theory of elasticity. Mc-Graw Hill, New York, USA.
- TS 802, (1985). Beton karışımı hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Xu, S. and Reinhardt, H. W., (1999a). Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation. *International Journal of Fracture*, 98, 111-149.
- Xu, S. and Reinhardt, H. W., (1999b). Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams. *International Journal of Fracture*, 98, 151-177.
- Xu, S. and Reinhardt, H. W., (1999c). Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials, Part III: compact tension specimens and wedge splitting specimens, *International Journal of Fracture*, 98, 179-193.
- Weibull, W., (1939). A statistical theory of the strength of materials, Proc. Royal Swedish Inst. For Eng. Res., Stockholm.
- Zhao, Y. and Xu, S., (2002). An analytical study on the energy in fracture process of concrete, *PhD thesis*. Dalian University of Technology.

Effect of aggregate gradation on size effect in split-tension cubes

Extended abstract

In general, if geometrically similar specimens do not behave similarly for different sizes, this is called a size effect. It is known to structures become more brittle as their size increases, but the classical procedure uses working stresses which are the same in design. Size effects occur in concrete in any loading conditions like tensile or shear loading

Kani was one of the first to demonstrate the size effect in concrete structures. He observed the shear strength of similar concrete beams decreases with increasing beam depth. Due to the fracture in a structural element being driven by stored elastic energy released from the whole structure, this size effect can be well interpreted by fracture mechanics. The fact that the strength of brittle materials is affected by the presence of imperfections is first suggested by Griffith, who is the founder of linear elastic fracture mechanics (LEFM). Due to his conclusion, it can be expected that the value of the ultimate strength will depend upon the size of specimens. As specimen size increases the strength is expected to be decreased since the probability of presence of weak links is increased. Traditionally, the size effect in fracture of concrete structural elements has been explained as Weibull's theory. He showed that if tensile tests are performed on two geometrically similar specimens with different volumes, the corresponding ultimate strengths are different. Weibull's approach has been widely used for estimating safety factor of materials. In the early 1980s, it is realized that neither LEFM nor Weibull's approach were adequate for predicting size effect in cementitious materials.

The experimental investigations on fracture mechanics of cement-based materials until 1970s indicated that classical linear elastic fracture mechanics (LEFM) is invalid for quasi-brittle materials such as concrete. This inapplicability of LEFM is due to existence of an inelastic zone with large scale and full cracks in front of the main crack tip in concrete. This so-called fracture process zone (FPZ) is ignored by LEFM. Consequently, several investigators have developed non-linear fracture mechanics approaches to describe failure of concrete/reinforced concrete structures. deterministic

size effect laws among these non-linear approaches, for instance size effect law (SEL) by Bazant (1984), suggest that size effect on strength is primarily related to a relatively large FPZ in concrete. One of the main requirements in this law is the need to test samples, which are geometrically similar and made of the same material, and which must provide a minimum size range=1:4.

The split-tension test has been used to indirectly test the tensile strength of quasi-brittle materials such as concrete and rock. Recently, concrete splitting specimens have been commonly used in concrete fracture because they have certain advantages, such as compactness and lightness, compared to beams.

Additionally, cubical and cylindrical test specimens have the following advantages:

- a) These specimens are easy to handle, and there is no risk of breaking them during handling.*
- b) The same molds can be used to cast specimens for both fracture and strength tests.*
- c) In determining the fracture parameters of cement-based materials, the contribution of the weight of the specimen can be ignored, unlike notched beams.*

In experimental studies, it was determined that maximum aggregate diameter and aggregate type are effective in fracture behavior of concrete. In the samples without notch subjected to splitting tensile test, it has been seen that as the sample diameter increases, the nominal strengths decreases and there is a very strong size effect. In addition, how it will behave in the actual structure size still remains uncertain theoretically. In size effect studies, $\beta = (t/d)$ is the ratio of the distributed load width to specimen depth not taken into consideration up to now in splitting tensile test, although its importance has been emphasized several times in scientific studies in the literature. β was taken as 0.10 and 0.16 in this study. When the test results of the cube sample without notch produced by gap-graded aggregate granulometry and analysis results produced by continuous aggregate granulometry taken from the literature were compared, it has been observed in this study that the mechanical behaviors of the mixtures prepared by gap-graded aggregate granulometry are better than continuous aggregate granulometry particularly in terms of ductility.

Keywords: concrete, size effect, fracture mechanics, split-tension strength