

MERKEZİ BASINÇ ALTINDAKİ ÇİFT KONSOL YÜKSEK DAYANIMLI BETON NUMUNE DAVRANIŞLARI ÜZERİNDE BOYUT ETKİSİ

Varol KOÇ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55139,
Kurupelit/ Samsun, kvarol@omu.edu.tr

Geliş Tarihi: 05.01.2009 Kabul Tarihi: 05.06.2009

ÖZET

Yüksek dayanımlı betondan hazırlanan çift konsol elemanlara, konsol eksenlerine paralel basınç yüklemesi uygulanmıştır. Yüklemeler iki farklı mesnetlenme durumunda uygulanarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Numune kalınlıkları sabit olup $t=30$ mm' dir. Diğer boyutlar büyük numuneden küçük numuneye doğru 4:2:1 benzerlik oranlarına sahiptir. Her numunede 2 yatay ve 1 düşey yerdeğiştirme ölçülmüş, konsol uçlarında ölçülen yatay yerdeğiştirmelerin toplanmasıyla açılma yerdeğiştirmesi bulunmuştur. Her numuneye ait yük- açılma yerdeğiştirmesi eğrilerinin altında kalan alanlardan, enerji yutma kapasiteleri tesbit edilmiştir. Deney sonuçları boyut etkisi eğrileri şeklinde düzenlenmiş ve boyut etkisi parametreleri elde edilmiştir. Deneylerin Ansys 5.4 sonlu elemanlar programıyla benzeşimi yapılmış, yine bu program yardımıyla elemanların kırılma toklukları bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Beton boyut etkisi, Çift konsol elemanı, Kırılma enerjisi, Kırılma mekaniği, Kırılma tokluğu, Mod I göçmesi

SIZE EFFECT ON BEHAVIORS OF DOUBLE CANTILEVER HIGH STRENGTH CONCRETE SPECIMENS UNDER THE CENRIC PRESSURE

ABSTRACT

Double cantilever beams elements which prepared from high strength concrete are applied compressive loads paralel to cantilever axes. Loadings are applied to two different supported and compared with each other. Specimen thickness t is constant and 30 mm. Other sizes are geometrically similar with ratio is from large specimens to little specimens 4:2:1. Two horizontal and one vertical displacements are measured for each specimens and opening displacements are found for adding to horizontal displacements for each cantilever ends. Energy absorbed capacities are determined by utilizing from each specimen area of under the load- opening displacement curve. Test results are arranged for size effect curve and size effect parameters are obtained. Experiments are simulated with Ansys 5.4 finite element programs and though fracture toughnesses are found with helping this program.

Key Words: Concrete Size Effect, Double Cantilever Beams, Fracture Energy, Fracture Mechanic, Fracture toughness, Mod-I failure.

1. GİRİŞ

Doğrusal elastik kırılma mekaniğinin (DEKM) betona ilk uygulanması Kaplan tarafından yapılmıştır [1]. Daha sonraki yıllarda betonun kırılma mekaniği üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına karşın elde edilen sonuçlar, projelendirmede kullanılmamıştır. Bunun en önemli nedeni betonun kırılmasının DEKM esasına göre bulunan gerilme şiddet çarpanının kritik değeri gibi tek bir parametreyle ifade edilememesi, diğer bir deyişle DEKM nin betona doğrudan uygulanamamasıdır. Laboratuarda kullanılacak boyuttaki deney numuneleri ile numune boyutundan ve geometrisinden bağımsız olarak DEKM esasına dayalı bir kırılma parametresinin elde edilemeyeceği Shah ve McGary tarafından ortaya konmuştur [2]. Bunu izleyen yıllarda DEKM geliştirilerek veya doğrusal olmayan kırılma mekaniği modelleri uygulanarak çok sayıda araştırma yapılmıştır [3-5]. DEKM nin kullanılmaya başlanmasından hemen sonra bu yöntemin ancak çok gevrek malzemelerde iyi sonuçlar verdiği

ortaya çıkmıştır. Bir başka deyişle çatlamanın başlamasına kadar geçen süre içerisinde malzeme kesinlikle doğrusal davranış göstermelidir. Kopmadan önce çatlak tepesinde büyük bir plastik bölge oluşan, çelik gibi maddelerde göçme bu şekilde olur. Diğer bir çok malzeme için davranış böyle değildir. Bu uyumsuzluğun nedeni çatlak tepesindeki kırılma bölgelerinin büyüklükleridir. Daha sonra birbirine benzer pek çok doğrusal olmayan kırılma mekaniği kuramları elde edilmiştir. Elasto-plastik kırılma mekaniğinden ayrı olarak bağlı çatlak modeli ve eşdeğer elastik çatlak modeli gibi farklı modeller geliştirilmiştir [6,7]. Betonun heterojen yapısı, DEKM teorisine ve Weibull'un olasılıksal kuramına tam olarak uymamaktadır. Bu nedenle Bazant ve Carpinteri tarafından betonun mekanik davranışına ve doğasına daha uygun yöntemler geliştirilmiştir [8-10]. Boyut etkisi, kırılma mekaniğinin tasarım kriteri olarak kullanılma gereğinin en temel nedenlerinden biridir. Plastik limit analiz veya bir başka teoriye göre gerilme veya birim boy değişimi boyut etkisi içermez. Halbuki yapılan deneysel ve teorik araştırmalar elemanların gerilme ve birim boy değişimlerinde boyutun etkili olduğunu göstermiştir.

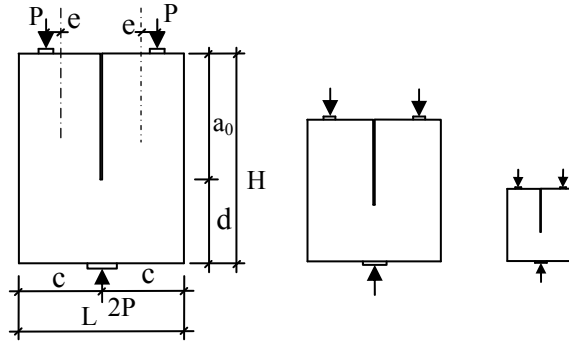
Boyut etkisi yöntemi, kırılma enerjilerinin hesabı ve kırılma bölgesi hakkında bilgiler vermesi bakımından en kolay uygulanan yöntemdir. Çünkü sadece en büyük yük değerlerinin ölçülmesi yeterlidir. Tepe noktasının sapması ve boşaltma rijitliğinin hesaplanmasına veya çatlak ucu durumunun incelenmesine gerek yoktur. Aynı zamanda, kullanılan aletlerin de aşırı rijit veya kapalı devre yerdeğiştirme kontrollü sistemler olması gerekmez. Bununla birlikte betonda çatlakların dağılımında kusurlar etkili bir rol oynuyorsa bu durum boyut etkisini etkileyecektir. Ancak çalışmalar böyle bir etkiyi ortaya koymamışlardır [11]. Bu çalışmada Bazant'ın Boyut Etkisi, bağıntılarından yararlanılmıştır. Beton kırılma mekaniğiyle ilgili son dönem literatüründeki bazı çalışmalar şunlardır: Öngerilmeli beton kirişlerin diyagonal kesme göçmesinde [12] direkt ve indirekt yüklemelerde spirallı sargılı ve sargısız aderans eki deneylerinde [13] eğilmeye maruz lifli beton çubuklarda [14] çelik lifli ve lifsiz çentikli kirişlerin eğilme göçmesinde [15] boyut etkisi araştırılmıştır. Beton malzeme mikro yapısında boyut etkisi incelenmiştir [16]. 4 nokta yüklemesine maruz çentikli çelik lifli beton elemanın kırılma tokluğu bulunmuştur [17].

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Kırılma mekaniğinde çift konsollar, klasik olarak açılma modu (mod I) kırılma parametrelerini bulma amacıyla, konsol uçlarından çekme kuvveti uygulanarak incelenirken, bu çalışmada, basınç yüklemesi altında incelenmiştir. Çif konsol elemanına, konsol eksenlerine paralel doğrultuda basınç yüklemesi uygulanmış, basınç yükünün oluşturduğu momentle mod-I (açılma) göçmesi elde edilmiştir. Çift konsola yük uygulanması, daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, çentik üzerinde ilerleyen çatlağın çentik üstü bölgeyi boydan boya katetmesine kadar sürdürülmüştür [18-20]. Böylece gelişen çatlağın çift konsolları iki ayrı parçaya ayırması sağlanmıştır. Bu çalışmada çift konsollar, konsol uçlarındaki mesnet şartları simetrik ve asimetrik olacak şekilde iki farklı mesnetlenme durumu için denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çift konsollar beton eleman ortasında açılan derin çentiklerle elde edilmiştir. Çentikler, kalıplara, beton dökümü sırasında konan ve ön prizden sonra sökülen yağlanmış plastik parçalarla yapılmıştır. Yüksek dayanımlı betondan hazırlanan numuneler, kalınlıkları $t = 30$ mm olarak dökülmüştür. c konsol genişliği olmak üzere, konsol ekseninden konsol dış yüzüne doğru, $e = c/5$ dışmerkezliğiyle yüklenmişlerdir. Numuneler, H başlangıç harfi ile simgelenmiştir. Simetrik mesnetlenme şartına sahip numunelerde H başlangıç harfinden sonra S harfi konulmuştur. İsimlendirmede kullanılan son karakter ise, numune numarasını göstermektedir. Geometrik olarak benzer elemanlarda, numune boyutu bir numuneden diğerine 2 çarpanı ile büyütülerek değiştirilmiştir. Böylece en büyükten en küçüğe numune boyutları oranı, $4 : 2 : 1$ şeklinde alınmıştır. Bu sayede boyut etkisi incelenebilmiştir. (Şekil 1) ve (Çizelge 1)' de, numune boyutları gösterilmiştir. Yüksek dayanımlı beton karışım oranları çimento/çakıl/kum/su/süper akışkanlaştırıcı/silis dumanı = $1/2/2/0.55/0,015/0,11$ olarak alınmış, Portland Kompoze Çimentosu (PKÇ/B 32.5R) kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı olarak sikament 500 kullanılmıştır. Karışımlarda en büyük agrega çapı 9.5 mm, en büyük kum çapı 4.8 mm' dir. Betonun basınç dayanımlarını elde etmek ve burada da boyut etkisini görmek için her bir karışımdan 3'er adet 150×300 mm, 75×150 mm ve 37.5×75 mm boyutlarında kontrol silindirleri dökülmüştür. Silindir basınç deneylerinden, asimetrik mesnetli elemanlar için karakteristik basınç dayanımı 55,58 MPa, standart sapma 4,61 MPa, varyasyon katsayısı 0,083; simetrik mesnetli elemanlar için karakteristik basınç dayanımı 50,69 MPa, standart sapma 4,35

MPa, varyasyon katsayısı 0,086 olarak elde edilmiştir. Bütün numuneler, olasılıksal dağılım etkilerini en aza indirmek için aynı bir karışımdan dökülmüş ve kür havuzunda 28 gün bekletilmişlerdir.

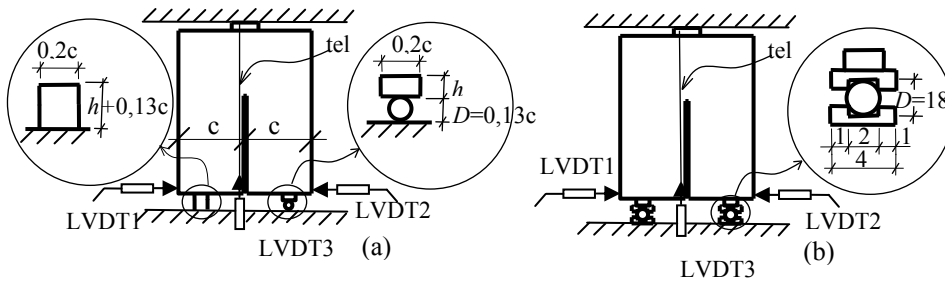


Şekil 1. Numune Şekli

Çizelge1. Çift Konsol Boyutları

Numune	H (mm)	L (mm)	d (mm)	a ₀ (mm)	c (mm)	t (mm)	e=c/5 (mm)
H1- 3, HS1- 3	300	260	120	180	127,5	30	25,5
H4- 6, HS4- 6	150	130	60	90	62,5	30	12,5
H7- 9, HS7- 9	75	65	30	45	30	30	6

Deneylerin yapıldığı yükleme çerçevesinde denenebilir numune uzunluğu 80 cm' dir. Bu çerçeve, 4 köşede St-I (S220) çeliğinden L 100.100.10 korniyerle yapılmıştır. Toplam kesit alanı 7600 mm² ve çekme dayanımı $\sigma_{em}=160$ MPa olup bu çerçevede uygulanabilecek en büyük yük 1220 kN, ve çerçevenin katılığı ise 560kN/mm şeklinde verilebilir. Yüklemler yük kontrollü yapılmış olup, göçme yüklerine bütün konsollarda 3 dakikada erişilecek biçimde küçük numunelerde piston uzama hızı yavaş, büyük numunelerde hızlı seçilmiştir. Yükler 225 kN kapasiteli load cell ile ölçülmüştür. Yük okumaları yanında konsol uçlarında yatay yerdeğiştirme (LVDT1 ve LVDT2) okumaları ile, düşey yerdeğiştirme (LVDT3) okumaları data logger ile bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 2). Simetrik olmayan mesnet şartı, numune, yükleme çerçevesine, konsol uçları alta gelecek şekilde yerleştirildiğinde sol mesnet sabit, sağ mesnet hareketli olacak tarzda gerçekleştirilmiştir. Sabit mesnetler, konsol genişliğinin yaklaşık %20 si genişliğe sahip olacak şekilde çelik plakalarla, hareketli mesnetler bu plakaların altına plaka genişliklerinin yaklaşık %60 ı çapında silindir rulolar koyularak gerçekleştirilmiştir. Üst mesnet ise sabit ve hareketli mesnet plaka genişliklerinin 2 katı olarak alınmıştır. Simetrik olmayan mesnetleme durumları (Şekil 2a)' da sunulmuştur. Simetrik mesnetleme durumunda ise, her iki konsolda da simetrik olmayan mesnet durumunda kullanılan sabit mesnet plakaları kullanılmıştır. Numunenin basınç altında sıkışıp zorlanmaması ve basınç yüklemesiyle çift konsollar birbirlerinden ayrıldıktan sonra deneyin sonlanması için, simetrik yükleme durumunda mesnet altlarına, (Şekil2b) 'de görüldüğü gibi U plakalar arasına yerleştirilmiş rulolar koyularak numuneye dönme serbestliği sağlanmıştır. Bütün serilerde aynı aparat kullanılmış, sadece elemana göre, U plakalar üstüne konulan mesnet plakaları değiştirilmiştir.



Şekil 2. Mesnetlenme Şartları

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Boyut Etkisi Analizleri

Araştırmalar sonucu iki ve üç boyutlu geometrik olarak benzer, beton gibi heterojen malzemeden yapılmış yapıların gevrek geçmeleri için Bazant tarafından çıkarılan boyut etkisinin yaklaşık ifadesi şu şekilde verilebilir [21]:

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1-\beta}}, \quad \beta = \frac{D}{D_0} \quad (1)$$

Bu eşitliklerde; σ_N : Göçmedeki nominal gerilme (MPa), B: Yapı biçimine bağlı ampirik bir katsayı, f_t : Betonun çekme dayanımı (MPa), β : Gevreklik katsayısı, D: Yapının karakteristik boyutu (mm), D_0 : Gevrek ve gevrek olmayan davranış arasında geçişi gösteren ampirik katsayı (mm) olarak verilmiştir. D_0 parametresi, boyut etkisi eğrisinde, geometrik olarak yatay asimtot (dayanım teorisine karşı gelen) ile eğimli asimtotun (DEKM'ne karşı gelen) kesim noktasından sapmayı verir. D_0 parametresi, ve elde edilen gevreklik oranı, uygulanan deneyle (eleman şekli, boyutu ve yükleme durumu) yakından ilişkilidir. Geometrik olarak benzer numunelerde B ve D_0 sabittir. Eğer Log σ_N in log D 'ye göre grafik gösterimi yapılırsa (boyut etkisi eğrisi), herhangi bir göçme kriterine (emniyet gerilmeleri yöntemi, taşıma gücü) göre hesap dayanımı, yatay bir çizgi olarak verilir. Taşıma gücü ve emniyet gerilmeleri arasındaki tek fark, yatay çizginin düzeyindedir. Bütün DEKM çözümlerinde ise, σ_N değeri, $D^{1/2}$ değeri ile ters orantılıdır. DEKM' nin logaritmik gerilme- boyut eksenlerinde gösterimi, eğimi -1/2 olan bir doğrudur. Eğer yapı çok küçük ise (1) denkleminde β değeri, 1'in yanında çok küçük olduğundan göz önüne alınmayabilir. Bu durumda σ_N göçme gerilmesi, f_t dayanımı ile orantılıdır ve gerilme hesabında, plastik kuram veya emniyet gerilmeleri yöntemi yeterlidir. Eğer yapı çok büyük olursa, 1 değeri β 'nin yanında göz önüne alınmaz. σ_N göçme gerilmesi, $D^{1/2}$ değeri ile ters orantılıdır. Geçmişte çoğu göçme ölçütü (eğilme, kesme, çekme), dayanım ölçütüne göre (β ihmal edilerek) yapılırken, günümüzde, boyut etkisini içeren bağıntıları verecek araştırmalar devam etmektedir. (1) denklemi, yalnız aynı betondan yapılmış ve aynı en büyük agrega boyutunu içeren yapılara uygulanabilir.

Denklem (1)' de söz konusu yapı karakteristik boyutu (D) çift konsol numunelerde kırılma bölgesi olan, çentik altı bölge yüksekliği (d) olarak alınmış, betonun çekme dayanımı (f_t), TS500'ün [22] verdiği şu bağıntı ile bulunmuştur:

$$f_t = 0.35 \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

Burada; f_{ck} : Beton karakteristik basınç dayanımı (MPa) olarak verilmiştir. Denklem (1)'deki nominal göçme gerilmesi olarak ise, asal gerilmeler kullanılmıştır:

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (3)$$

□ □

Burada, $\sigma=My/I$, $\tau=8P/(td)$, $M=P(e+c/2)/2$ olarak verilmiştir. Bu eşitliklerde; σ : eğilme gerilmesi (MPa), τ : kayma gerilmesi (MPa), M: yükleme sonucu oluşan moment (Nmm), y: kesit ağırlık merkezinden konsol yüzlerinin uzaklığı (mm), I: eylemsizlik momenti (mm^4), P: basınç yükü olarak load cell'den okunan değer (N), t: eleman kalınlığı(mm), d: çift konsol elemanda çentik altı bölge yüksekliği (mm), e: yükün konsol ekseninden dışmerkezliği (mm), c: konsol genişliği (mm) dir.

Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi denklemi (1), farklı regresyon analizleriyle düzenlenebilir [23]. Regresyon analizlerinden, bilinmeyen malzeme sabitleri B ve D_0 elde edilebilir. Bu çalışmada, her seri için Lineer I, Lineer II ve doğrusal olmayan regresyon analizleri yapılmıştır. Lineer I regresyonunda denklem (4), Lineer II regresyonunda denklem (5) kullanılmıştır:

$$Y=AX+C \quad (4)$$

$$Y'=A'X'+C' \quad (5)$$

Burada; $X=D$, $Y=(1/\sigma_N)^2$, $C=(1/Bf_t)^2$, $A=C/D_0$, $X'=1/D$, $Y'=(1/\sigma_N D)^2$, $A'=(1/Bf_t)^2$, $C'=A'/D_0$ olarak alınır. İstatistiksel hesaplarla, C ve A'nın değişimi ω_A ve ω_C ; ve dağılım bandının genişliği m de hesaplanabilir.

Doğrusal olmayan analizde ise, (1) bağıntısının her iki tarafının doğal logaritması alınıp düzenlenir:

$$\ln \sigma_N = \ln \frac{Bf_t \sqrt{D_0}}{\sqrt{D_0 + D}} \quad (6)$$

ve analizi kolaylaştırmak için gerekli değişiklikler yapılır:

$$y = \ln \frac{M}{\sqrt{N + e^x}} \quad (7)$$

Elde edilen son denklemde $x = \ln D$, $y = \ln \sigma_N$, $Bf_t \sqrt{D_0} = M$, $D_0 = N$ olarak alınır.

Bu çalışmada her seri için bahsedilen bu 3 regrasyon analizi de yapılmış, sonuçlar (Çizelge 2) ve (Şekil 3)' de verilmiştir. Bu analizlerden, literatürde en çok kullanılan Doğrusal I analiz sonuçlarından elde edilen B ve D_0 katsayılarının (1) denklemlerinde yerine konulmasıyla, boyut etkisini içeren gerilme formülü bulunmuştur. Denklem (1)' i kullanarak her seri için logaritmik eksen takımında σ_N/Bf_t ve $\beta=D/D_0$ değerleri gösterilebilir. İki serinin (Şekil 4)'de birlikte boyut etkisi eğrileri gösterilmiştir. Bu eğrilerde kesik çizgi ile gösterilen yatay doğru dayanım kriterini gösterir. Dayanım kriterinde eleman dayanımı, değişen boyuta rağmen sabit kalır. Eğimi -1/2 olan kesik çizgiyle gösterilen doğru ise, DEKM'ni simgeler. DEKM' de kuvvetli boyut etkisi görülür. Gerçekte beton nominal dayanımı, bu iki ideal durum arasındadır. Eleman boyutları büyüdükçe ve gevreklik arttıkça, DEKM'ne yaklaşılır.

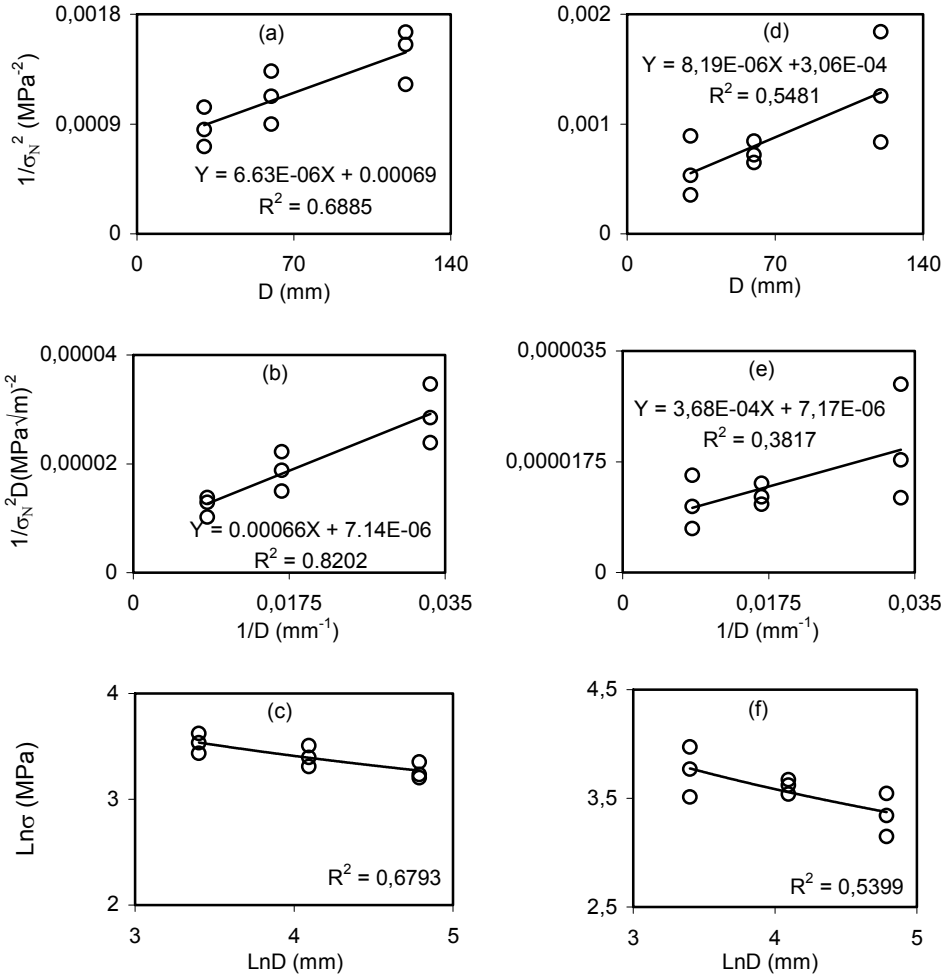
3.2. Deneysel ve Ansys Analizi Sonuçları

Deneysel Ansys 5.4 Nonlinear sonlu elemanlar sayısal analiz programıyla benzeşimi yapılarak yük- deplasman değerleri elde edilmiştir. Beton numuneler Ansys 5.4 programıyla modellenirken Ansys programı eleman tipleri kütüphanesinde tanımlı bulunan Solid65 (3 boyutlu betonarme kabuk) elemanı; mesnetler modellenirken de Solid45 (3 boyutlu yapısal kabuk) elemanı kullanılmıştır. Solid65, beton kabukların 3 boyutlu modellenmesinde kullanılan bir eleman tipidir. Bu eleman tipi, kabukta oluşabilecek çekme kuvveti altında çatlama ve basınç yüklemesinde ezilme özellikleri ile tanımlanmıştır. Eleman, her birinde x,y ve z eksenleri doğrultusunda deplasman serbestliğiyle tanımlanmış 3 serbestlikli 8 düğüm noktasına sahiptir. Solid45 elemanı da Solid65 elemanı ile benzer özelliklere sahiptir ve 3 boyutlu çelik malzeden yapılmış elemanların tanımlanmasında kullanılır. Solid65, Solid45 elemanına ek olarak, çatlama ve ezilme kapasitesine de sahiptir. Bu eleman tipinin en önemli özelliği, nonlinear malzeme davranışını, betonun çatlama, ezilme, plastik deformasyon ve sünme gibi özelliklerini yansımasıdır. Numuneler üçgen sonlu elemanlar ağı ile sonlu elemanlara ayrılmış, böylece hassas sonuç elde etmek için çentik çevresinde yeterli sıklaştırma yapılabilmektedir. Numunelerin Ansys programıyla analizini yaparken uygulanacak yük olarak, aynı boyutlara sahip her üç numuneden deneysel göçme yükü en büyük olanının yükü seçilmiştir. Numune, 6 yükleme adımıyla bu maksimum göçme yüküne kadar yüklenerek, her yükleme adımına ait yük ve deplasman değerleri kaydedilmiş, bu değerlerin yardımıyla yük-yatay açılma eğrileri çizilmiştir. Simetrik mesnetlenme durumuna sahip numunelerin analizi yapılırken simetri ekseninden yararlanılarak numunenin yarısı analiz edilmiş, böylece çözüm stabilitesi artırılmıştır. Örnek olarak H1 ve HS4 elemanlarının bazı Ansys analizi sonuçları (Şekil 5)' de verilmiştir.

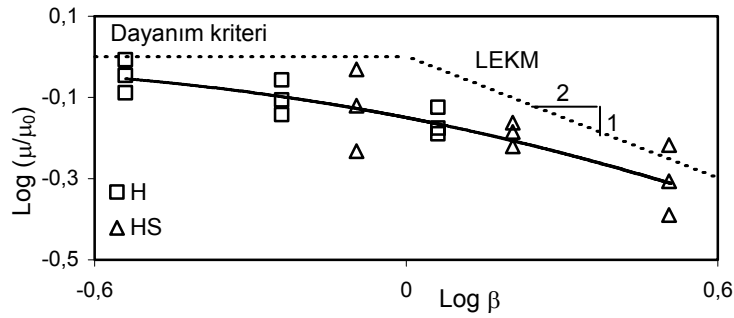
Çizelge 2. Boyut Etkisi Parametreleri

Değişkenler	H Serisi			HS Serisi		
	Linear Analiz I	Linear Analiz II	Nonlinear Analiz	Linear Analiz I	Linear Analiz II	Nonlinear Analiz
A (Ac)	6,63E-06	0,00066	-	8,20E-06	0,000368	-
C (Bc)	0,0006909	7,10E-06	-	0,00031	7,17E-06	-
D ₀ (mm)	104,15	92,42	99,02	37,4	51,29	43,16
Bf _i (Mpa)	38,04	38,92	38,64	57,14	52,16	55,9
R	0,83	0,91	0,82	0,74	0,62	0,73
ω _A (ω _{Ac})	0,25	0,18	-	0,34	0,48	-
ω _C (ω _{Cc})	0,19	0,36	-	0,73	0,54	-
m	0,29	0,32	-	0,63	0,68	-

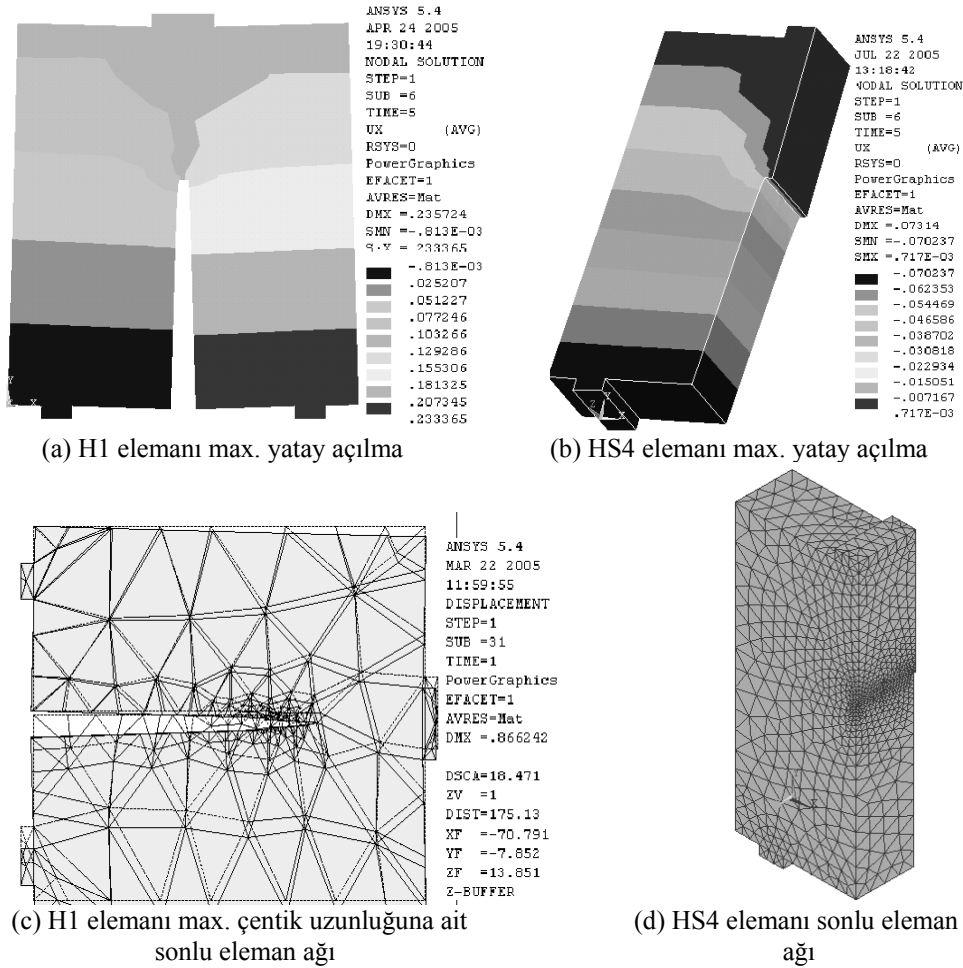
Deney elemanlarının ölçülen göçme yükleri, (Çizelge 3)' de verilmiştir. Numunelere ait deney sonuçlarından elde edilen yük yatay açılma



Şekil 3. H Serisi a) Linear I, b) LinearII, c) Nonlinear; HS Serisi d) Linear I, e) LinearII, f) Nonlinear Boyut Etkisi Regrasyon Analizleri.



Şekil 4. Toplu Boyut Etkisi Eğrileri



Şekil 5. Bazı Ansys Analizi Sonuçları

değerleriyle ANSYS 5.4 programından elde edilen yük yatay açılma değerleri ise (Çizelge 4) ve (Şekil 6)' da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yatay açılma değerleri, konsol uçlarında yapılan LVDT1 ve LVDT2 ölçümlerinin (Bknz. Şekil 2) toplanmasıyla elde edilmiştir. Her numunenin yük- yatay açılma eğrileri altında

kalan alanlardan bulunan enerji yutma kapasiteleri ile enerji yutma kapasitelerinin standart sapma ve varyasyon katsayıları da (Çizelge 3)' de verilmiştir.

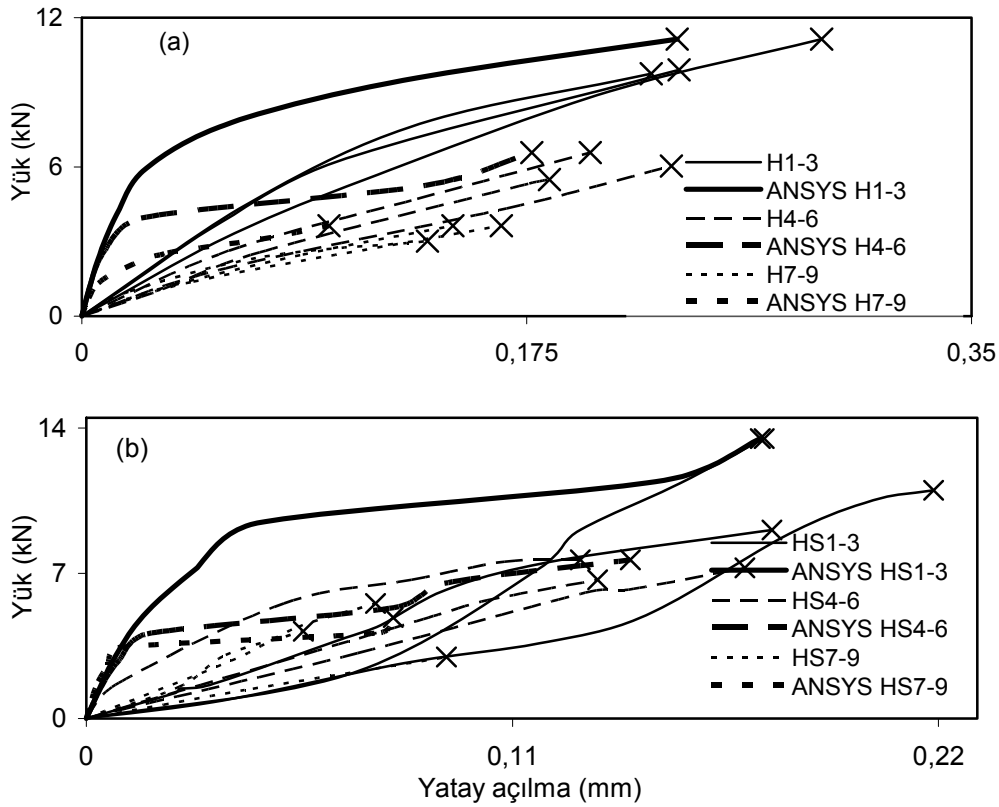
3.3. Gerilme Tokluklarının Bulunması

Eleman yatay açılma- yük değerleriyle çatlak boyları arasında kurulan ilişki, aşağıda açıklandığı şekilde bulunarak, gerilme tokluklarını elde etmek için gerekli olan çatlak boyları bulunur.

(Şekil 7)'de görüldüğü gibi, konsol uçlarında uygulanan P/2 yükünün döndürme etkisiyle çift konsollar, u yerdeğiştirmesi ve Δa çatlak gelişimi göstererek birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Çift konsolun bu davranışı, a toplam çentik boyunu kiriş uzunluğu olarak aldığımız ankastre mesnetli bir kirişin, konsol ucunda, M momenti etkisiyle u sehimi yapmasına denktir. Sonuç itibariyle bu ankastre mesnetli konsolda kiriş boyu a ile yerdeğiştirme u arasında kuracağımız ilişki, basınç yüklü çift konsolda a toplam çentik boyu ile u yerdeğiştirmesi arasındaki ilişkiyi de simgeler [23]. Bu ilişki, virtüel iş prensibinden yararlanılarak şu şekilde verilebilir:

Çizelge 3. Göçme Yükleri ve Yutulan Enerjiler

Eleman Adı	Göçme Yükü kN	Yutulan Enerji kNmm	Standart Sapma kN/mm	Varyasyon Katsayısı
H1	11,134	1,678		
H2	9,742	1,357		
H3	9,897	1,416	0,140	0,094
H4	6,572	0,732		
H5	6,031	0,736		
H6	5,49	0,549	0,087	0,130
H7	3,634	0,335		
H8	3,634	0,298		
H9	3,015	0,273	0,025	0,084
HS1	9,091	0,902		
HS2	11,005	0,995		
HS3	13,493	0,855	0,058	0,063
HS4	7,656	0,684		
HS5	7,273	0,654		
HS6	6,699	0,472	0,094	0,155
HS7	5,550	0,214		
HS8	2,967	0,141		
HS9	4,211	0,119	0,041	0,257



Şekil 6. Yük- Yatay Açılma Değerleri a) H Serisi, b) HS Serisi

Çizelge 4. Deney ve Ansys Yatay Açılma Değerleri

Eleman	Ansys Analizi Sonuçları				Deney Sonuçları	Fark %
	Yük N	Sol konsol yatay yerdeğiştirmesi mm	Sağ konsol yatay yerdeğiştirmesi mm	Açılma Yerdeğişimi mm	Maksimum yatay açılma mm	
H1-3	11134	0,000813	0,233365	0,234178	0,291	20
H4-6	6572	0,001376	0,175591	0,176967	0,2	12
H7-9	3634,3	0,000875	0,096354	0,097229	0,146	33
HS1-3	13493	0,086976	0,086976	0,173952	0,175	0,6
HS4-6	7656	0,070237	0,070237	0,140474	0,128	10
HS7-9	4875	0,039614	0,039614	0,079228	0,075	6

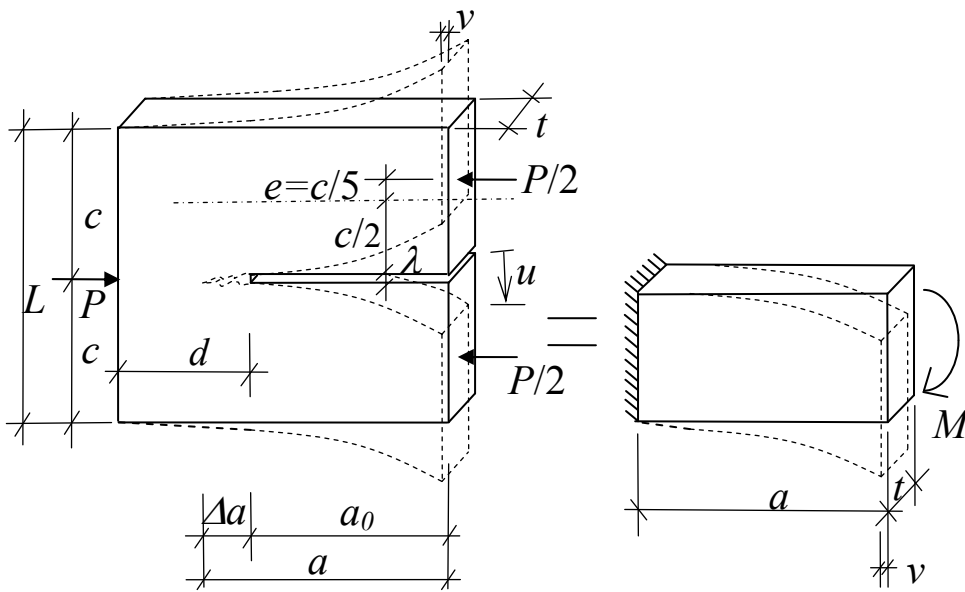
$$u = \frac{Ma^2}{2EI} \quad (8)$$

Burada I eylemsizlik momenti olup, $I = tc^3/12$ olarak alınabilir. Çift konsolda açılma, iki yöndeki u deplasmanlarının toplamı olduğundan, $u = Ma^2/EI$ olur. I eylemsizlik momenti yerine yazılırsa, $u = 12Ma^2/Etc^3$ olarak bulunur. Moment değeri ise, (Şekil 7)'de görüldüğü gibi, $M = 0,5P(0,7c + 0,5\lambda)$ şeklinde hesaplanabilir. Burada λ : çentik genişliğidir. Sonuç olarak $u = 6P(0,7c + 0,5\lambda)a^2/Etc^3$ ve buradan,

$$a = \sqrt{\frac{utc^3E}{6P(0,7c + 0,5\lambda)}} \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece u , yatay açılma değeri, ve a da toplam çentik boyu olmak üzere, yatay açılma değeri ile toplam çentik boyu arasındaki ilişki kurulmuş olur.

Deney datalarından elde edilen yatay açılma - yük değerlerinden, P göçme yükü olmak üzere, yaklaşık $P/10$, $P/2$ ve P değerlerine denk gelen, u , yatay açılma değerleri bulunur. Denklem (9) kullanılarak bu yatay açılma değerleri, a , toplam çentik boylarına dönüştürülür. Böylece istenen yükleme adımıdaki yüke ait çentik boyu bulunmuş olur. Ardından deney elemanı bu çentiğe sahip haliyle ANSYS programında modellenerek gerilme tokluğu bulunur. Böylece elemana ait $P/10$, $P/2$ ve P değerlerine denk gelen üç çentik boyuna karşılık üç gerilme tokluğu değeri elde edilir. Her elemana ait çentik boyları ve gerilme toklukları (Şekil 8)'de sunulmuştur.

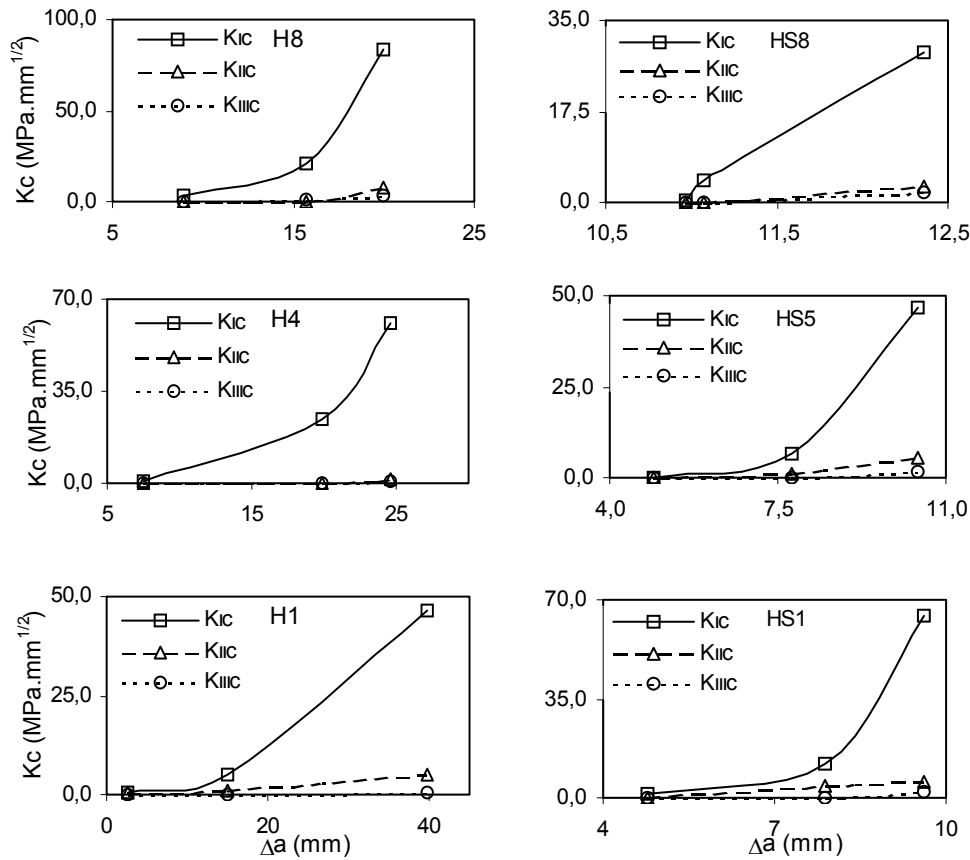


Şekil 7. Çift Konsol Yatay Açılma Yerdeğişimi ve Konsol Kiriş Düşey Yerdeğişimi

4. SONUÇLAR

- 1- Bütün çift konsollu kolonların göçmesi çentiklerin ilerleyerek elemanların iki parça olması ile olmuştur. Bu da tüm numunelerde göçme modlarının aynı olduğunu ve boyut etkisi denkleminin uygulanabileceğini gösterir. Göçmeler, yarı gevrek göçme olup, numune boyutu arttıkça, deneysel eğilme kesme gerilmesinin, elastisite teorisinden hesaplanan gerilmelere oranla azaldığı görülmüştür. Bu durum, denenen yükleme durumu ve eleman geometrisi için boyut etkisinin etkili olduğunu gösterir.
- 2- Deney sonuçlarından elde edilen değerler Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi yasası ile uyumludur. Çift Konsolun basınç göçmesi için, boyut etkisi içeren yaklaşık (1) bağıntısı, asimetric mesnetlenme durumunda $B=14$, $D_0=104$ mm ve simetric mesnetlenme durumunda $B=23$, $D_0=37$ mm olmak üzere önerilebilir. Simetric mesnetlenmede D_0 katsayılarının azaldığı, dolayısıyla β gevrekliğinin arttığı görülmektedir. Bu davranış biçimi, (Şekil 4)'de gösterilen toplu boyut etkisi grafiklerinde, simetric mesnetli elemanların DEKM davranışına daha çok yaklaşmış olmalarından da anlaşılmaktadır. (Çizelge 3)'den de anlaşılacağı üzere, simetric mesnetleme durumunda göçme yükleri büyümektedir. Kırılma yükündeki bu artışın, elemanı daha gevrek bir göçme davranışına götürmüş olduğu düşünülebilir.

- 3- (Şekil 6)' da verilen yatay açılma eğrileri incelendiğinde, her seri içindeki eleman boyutlarının azalmasının elemanı sünek davranışa götürdüğü görülür. Bu durum, deneyler yapılırken büyük boyutlu elemanların daha ani ve gürültülü göçmeleriyle de gözlenmiş olup, boyut etkisinin sadece eleman boyutlarının artmasıyla yalnız göçme yüklerinde gözlenen bir azalma olmayıp, eleman davranışını da önemli ölçüde etkileyen bir öge olduğunun göstergesidir.
- 4- (Şekil 6) ve (Çizelge 4)' ün incelenmesinden, özellikle beton gibi heterojen yarı gevrek bir malzeme için, Ansys analiziyle, deney sonuçlarına yeterli yakınlıkta sonuçlar elde edilebildiği, aralarındaki farkın %0,6 ile %33 arasında olduğu söylenebilir.
- 5- (Şekil 8)'e bakıldığında, kırılma tokluklarının büyükten küçüğe, K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} şeklinde sıralandığı görülür. Bunun nedeni, eleman göçmesinde, basınç yükünün oluşturduğu moment etkisinden dolayı, en çok açılma modunun, ardından kesme modunun ve en az da yırtılma modunun etkili olmasıdır.



Şekil 8. Kırılma Toklukları a) H Serisi, b) HS Serisi

Teşekkür

Bu çalışmanın yapılması için Gazi Üniversitesi'nden 06/2004-20 kodlu "Beton Basınç Göçmesinde Boyut Etkisi" isimli araştırma projesi desteği alınmıştır. Bu desteği sağlayan Gazi Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı temininde yardımlarını esirgemeyen Sika firmasına teşekkür ederim.

KAYNAKÇA

- [1] Kaplan F.M., “Crack propagation and the fracture of concrete”, J. American Concrete Institute, 58, 591-610 (1961).
- [2] Shah, S.P. and McGarry F.J., “Griffith fracture criterion and concrete”, J.Eng. Mech. Div. – ASCE, 97, 1663- 1676 (1971).
- [3] Bazant, Z. P., Oh, B. H. “Crack band theory for fracture of concrete”, Mater. Struct, 16, 155-177 (1983).
- [4] Elices M., Planas J., “Material models in fracture mechanics of concrete Structures”, L.Elfren, ed., Chapman and Hall, London, 16-66 (1989).
- [5] Ouyang, C., Tang T., Shah S.P., “Relationship between fracture parameters from two parameter fracture model and size effect model”, RILEM, Materials and Structure, 29, 79-86 (1996).
- [6] Barenblatt G. I., “Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture”, Advances in Applied Mechanics, Vol.7, Academic Pres 51-129 (1962).
- [7] Tang T., Ouyang C., Shah S.P., “A simple method for determining material fracture parameters from peak loads”, ACI, Materials Journal, 93(2) 147-157 (1996).
- [8] Bazant, Z.P., “Size Effect”, International Journal of Solids Structures, 37, 69-80 (2000).
- [9] Carpinteri A., Chiaia, B., “Size effects on concrete fracture energy: dimensional transition from order to disorder”, RILEM, Materials and Structures, 29, 259-266 (1996).
- [10] Carpinteri A., Chiaia B., “Embrittlement and decrease of apparent strength in large sized concrete structures”, Sadhana, Vol.27/4, 425-448 (2002).
- [11] Carpinteri A., Chiaia B., Ferro G., “Multifractal scaling law for the nominal strength variation of concrete structures in size effect in concrete structures”, E&FN Spon, London 193-206 (1994).
- [12] Bazant Z.P., and Cao Z., “Size effect in shear failure of prestressed concrete beams”, ACI Journal, Proceedings, 83(2), 260-268 (1986).
- [13] Şener, S., “Size effect in bond solices tests”, FIP’92 Symposium, Budapest, Hungary, 357- 362 (1992).
- [14] Wisnom M. R., “Size effects in the testing of fibre- composite materials”, Composites Science and Technology, 59, 1937-1957 (1999).
- [15] Şener S., Begimgil M., Belgin Ç., “Size effect on failure of concrete beams with and without steel fibers”, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 14(5), 436-440 (2003).
- [16] Bazant Z.P., Zaoyang G., “Size effect and asymptotic matching approximations in strain-graded theories of micro-scale plasticity”, International Journal of Solids and Structures, 39, 5633-5657(2002).
- [17] Taha R.M.M., Xiao X., Yi J., Shrive N. G., “Evaluation of flexural fracture toughness for quasi -brittle structural materials using a simple test method”, Can. J. Civ. Eng., Vol.29, 567-575(2002).
- [18] Koç V. ve Şener S., “Lifli Beton Çift Konsolun Basınç Göçmesinde Boyut Etkisi”, Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı II, TÜBİTAK, Konya, 169-172 (2003).
- [19] Koç V. ve Şener S., “Hafif ve normal betondan yapılmış çift konsol numunelerin basınç göçmesinde boyut etkisi”, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi, İstanbul, 137-141(2003).
- [20] Koç V. ve Şener S., “Eksenel doğrultuda basınç yüklü çift konsollarda boyut etkisi”, Advances in Civil Engineering, 6th International Conference, Boğaziçi Ün., İstanbul, 531- 540 (2004).
- [21] Bazant Z. P., “Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal”, J. Eng. Mech. ASCE, 110, 518-535 (1984).
- [22] TS500, “Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12, (2000).
- [23] Bazant Z.P. and Planas, J., “Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle Materials”, CRC Press, Boca Raton, Fla. (1998).