

Betonarme Perde Duvarların Sonlu Eleman Analizinde Aderans Kaymasının Uygulanması

Application of Bond-Slip in the Finite Element Analyses of Reinforced Concrete Shear Walls

İlker KAZAZ

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum

Geliş Tarihi/Received : 28.07.2011, Kabul Tarihi/Accepted : 02.06.2012

ÖZET

Donatı ve onu çevreleyen beton arasında gerçekleşen yük geçişleri betonarme elemanların davranışını önemli ölçüde etkiler. Bu gerilme geçişleri beton ve çelik arasındaki kenetlenmeye (aderansa) bağlıdır. Düzgün artan yükler altında aderansın kimyasal yapışma sonucu oluşan kısmı kolayca devre dışı kalır ve yük aktarımı nervür dışları etrafında oluşan karmaşık bir gerilme durumunun bileşkesi olarak ortaya çıkan kayma gerilmeleri tarafından sağlanır. Nervür etrafında oluşan bu gerilme yoğunlaşması nervür dışları etrafındaki betonda içsel çatlamların meydana gelmesine neden olur. Bu çalışma, donatıyı saran betonda içsel çatlamlar sonucu beton-çelik ara yüzeyinde oluşan aderans kaymasının sonlu elemanlarla modellenmesini içermektedir. Donatı çeliği gerilmesi-bağ kayması arasındaki ilişki için Mirza ve Houde (1979) tarafından önerilen bir bağıntı sonlu eleman uygulamalarında kullanılmıştır ve sonuçlar özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Aderans kayması, betonarme perde, sonlu eleman yöntemi, ANSYS.*

ABSTRACT

Transfer of tensile forces from reinforcing steel into the surrounding concrete affects the behavior of reinforced concrete members. This transfer relies on the bond action between the steel and the concrete. Under monotonic loading the part of bond strength due to chemical adhesion is easily exhausted and bearing against the lugs is the primary load-transfer mechanism at loads near the ultimate. These stresses cause internal cracking of concrete at the steel-concrete interface. This paper deals with the finite element modeling of the bond-slip and its application due to internal cracking of the first layer of concrete surrounding the bar and the bending and/or cracking of the small concrete teeth near the bar lugs. A previously proposed constitutive steel stress-bond slip relation by Mirza and Houde (1979) was used in finite element analysis of reinforced concrete shear wall specimens and the results were presented.

Keywords: *Bond-Slip, Reinforced concrete shear wall, finite element method, ANSYS.*

1. GİRİŞ

Betonarmenin lineer ötesi davranışının hesaplanmasında kullanılan sonlu eleman yönteminde güvenilir sonuçlar edilebilmesi için, kullanılan malzeme modeline ve sonlu eleman formülasyonuna bağlı birçok parametre ve sabitin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve hesaplara katılması gerekir. Betonun çok eksenli gerilme altındaki karmaşık davranışı, beton-donatı ara yüzeyindeki kaymalar ve aderans çözülmesi, donatı çubuğundaki perçin

etkisi, çatlama betonun basınç dayanımı ve elastiklik modülü gibi mekanik özelliklerindeki değişimler betonarme elemanlar sonlu eleman yöntemiyle modellenirken dikkate alınması gereken unsurlardır.

Deneysel çalışmasını, sonlu eleman yöntemini kullanarak analitik sahaya taşımak isteyen araştırmacıların en sık karşılaştıkları durumlardan birisi de hesaptan çıkan davranış eğrilerinin genelde deneysel sonuçlardan elde edilen eğrilere göre daha rijit ve daha

* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : ilkazaz@gmail.com (İ. Kazaz)

küçük ötelenme elde edilmesi gibi bir eğilim göstermesidir. Bu durum tamamen, kullanılan sonlu elemanların ve malzeme modellerinin beton gibi farklı yüklenme şartlarında farklı davranış biçimleri sergileyen bir malzemeyi tüm yönleriyle modellemede yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Sonlu eleman yöntemi kullanıcısının, her şeyden önce kullandığı elemanın özelliklerini ve malzeme modelini iyi bilmesi, eldeki problemin tüm etkin parametrelerini tam olarak belirlemesi ve modelini ona göre oluşturması gerekir.

Aderans ayrışmaları genelde betonarme sonlu eleman uygulamalarında ihmal edilen bir davranış biçimidir. Bu çalışmada, beton ve çelik temas yüzeyindeki çatlamaların ve ayrışmaların betonarme elemanların düzgün artan (monotonik) yük altındaki davranışına etkisi sonlu eleman yöntemiyle incelenmiştir. Beton ve çelik arasında aderans ayrışmaları lineer olmayan yaylarla donatı davranışından ayrık olarak modellenmiştir. Yayların davranışı için Mirza ve Houde, (1979) tarafından önerilen donatı çeliği gerilmesi-aderans ayrışması modeli kullanılmıştır.

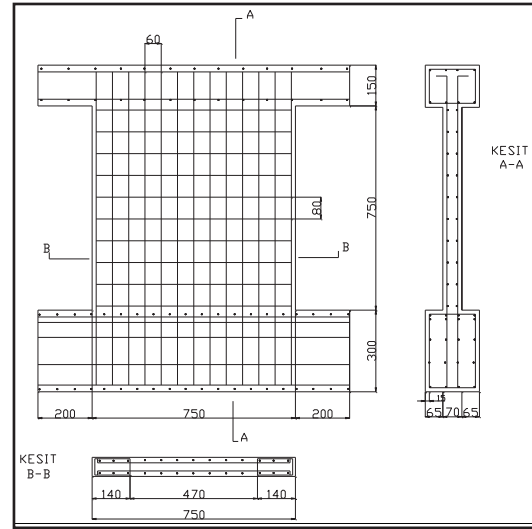
Nümerik uygulama için Lefas v.d., (1990) tarafından düzgün artan yük altında test edilen bir seri betonarme perde elemanı kullanılmıştır. Bu elemanlar birçok çalışmada (Kotsavas v.d., 1992; Selby ve Vecchio, 1997; Kwak ve Kim, 2004) yazarları tarafından önerilen değişik sonlu eleman formülasyonun veya beton malzeme bünye denkleminin nümerik uygulamayla güvenilirliğini test etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmalarda dikkati çeken ana unsur, hesaplamalardan elde edilen yük-yer değiştirme eğrilerinin deneysel eğriye göre daha rijit bir davranış sergilemeleridir.

2. ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEYSEL ELEMANLARIN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, Lefas v.d., (1990) tarafından perde yüksekliği-boyu oranı (h/l), aksel yük seviyesi (P/P_o), beton basınç dayanımı (f_{ck}) ve donatı oranı (ρ) gibi değişik parametrelerin betonarme perde davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için test edilen elemanlardan, h/l oranı 1 olan yedi tanesi kullanılmıştır. Deneysel elemanları sabit aksel yük ve düzgün artan

yatay yük altında yük taşıma kapasitesi aşılan kadar test edilmiştir.

Lefas v.d., (1990) tarafından deneye tabi tutulan perde duvarların boyutları ve donatı detayı Şekil 1’de verilmiştir. Donatı çeliğinin malzeme özellikleri Tablo 1’de, deney elemanlarının beton dayanımı, donatı oranı ve aksel yük oranları ise Tablo 2’de verilmiştir. Lefas v.d., (1990) tarafından eşdeğer küp basınç dayanımı (f_{cu}) olarak verilen beton basınç dayanımları, 0.85 ile çarpılarak karakteristik silindirik basınç dayanımına (f_{ck}) çevrilmiştir. Deneysel elemanları hakkında daha geniş bilgi ve deneysel sonuçlar için Lefas v.d. (1990) ne bakılabilir.



Şekil 1. Deneysel elemanın geometrik ve donatı özellikleri, boyutlar mm'dir.

3. BETON-ÇELİK ARAYÜZEYİNDE GERİLME AKTARIMI VE KAYMA MODELİ

Beton ve çelik yüzeyleri arasındaki yük aktarımı ve gerilme geçişlerine aderans denir. Aderans, beton ve donatı yüzeyleri arasında kimyasal yapışma sonucu oluşan direncin, nervürlü çubuklarda oluşturulan dişlere uygulanan kuvvetin ve yüzeyler arasında meydana gelen sürtünmeden ortaya çıkan kuvvetlerin bir kombinasyonudur. Genellikle monotonik yükler altında beton ve çelik yüzeyleri arasındaki aderansın servis yükleri altında veya betonun büzülmesi sonucu çözüldüğü ve yük taşıma sınır durumuna yaklaşılrken nervür dişleri etrafındaki kuvvetlerin ana yük aktarım mekanizmasını oluşturduğu varsayılır (ACI Committee 408, 1992).

Tablo 1. Donatı çeliği özellikleri (Material properties of reinforcing steel).

Çelik tipi	Akma Dayanımı, f_{sv} (MPa)	Kopma Gerilmesi, f_{su} (MPa)
8 mm nervürlü	470	565
6.25 mm nervürlü	520	610
4 mm düz yüzeyli	420	490

Tablo 2. Perde duvarların malzeme ve deneysel özellikleri.

Eleman	Donatı oranı (%)				Küp dayanımı f_{cu} (MPa)	Eksenel Yük	
	ρ_{yatay}	ρ_{dikey}	ρ_{uc}	$\rho_{sargı}$		P (kN)	$P / f_{ck} b l$ ($f_{ck} = 0.85 f_{cu}$)
SW11	1.1	2.4	3.1	1.2	52.3	0	0.0
SW12	1.1	2.4	3.1	1.2	53.6	230	0.1
SW13	1.1	2.4	3.1	1.2	40.6	355	0.2
SW14	1.1	2.4	3.1	1.2	42.1	0	0.0
SW15	1.1	2.4	3.1	1.2	43.3	185	0.1
SW16	1.1	2.4	3.1	1.2	51.7	460	0.2
SW17	0.37	2.4	3.1	1.2	48.3	0	0.0

Düzgün artan yükler altında tipik olarak iki tür aderans çözülmesi vardır. Bunlardan ilki donatı çubuğuna uygulanan çekme kuvveti sonucu aderans gerilmelerinin yenilerek donatının sıyrılıp çıkması durumudur. Sıyrılma göçmesi ana olarak beton dayanımına, hasarın şekil ve geometrisine bağlıdır. İkinci durum ise kabuk atma olarak adlandırabileceğimiz, nervür kuvvetlerinin enine bileşenlerinin oluşturduğu radyal (merkezsiz) gerilmelerin beton örtüsünün yeterli olmadığı veya gerekli yanal donatının bulunmadığı durumlarda yüzey çatlamlarına yol açması olayıdır.

Bu çalışmada, betonarme elemanların en önemli özelliği olan beton ve çeliğin beraber çalışma prensibini ortadan kaldıran aderansın tamamen çözülmesinden ziyade, donatıya uygulanan küçük yüklerde bile meydana gelebilen beton ve çelik yüzeyleri arasındaki aderans kaymaları işlenmiştir. Dolayısıyla çalışmada bahsedilen kayma değerleri belirtilen durumlarda oluşacak sıyrılma değerlerinden oldukça küçüktür.

Watstein ve Mathey, (1959) yaptıkları deneyde donatıya yakın bir yerde ölçülen beton uzamasının numune yüzeyinde oluşan çatlak genişliğiyle uyumlu olmadığını görmüşlerdir. Betonda donatıya yakın bölgede ölçülen uzamalar göz önüne alındığında yüzeydeki çatlakların çok daha fazla ve geniş olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu durumun olası

tek açıklaması için Şekil 2’de gösterildiği gibi donatıyı saran betonda gerçekleşen iç çatlamlar olduğu tezi ileri sürülmüştür. Bu tür çatlamlar daha sonra başka araştırmacılar tarafından yapılan deneylerde de gözlemlenmiştir (Broms ve Lutz, 1965 ve Goto, 1971).

Beton ile donatı arasındaki gerilme geçişi Şekil 3’de gösterilen deney elemanı ile açıklanabilir (Mirza ve Houde, 1979). Beton içine eksenel olarak yerleştirilmiş donatı çeliğine uygulanan çekme sonucu donatıda oluşan kuvvetler beton ve donatı arasındaki aderans gerilmelerine bağlı olarak devamlı bir şekilde betona aktarılır. Uygulanan kuvvet arttıkça, uçlardan belli bir uzaklıkta betonda oluşan çekme gerilmeleri (s_{ct}), betonun çekme dayanımının (f_{ctk}) aşılmasıyla çatlama neden olur. Çatlayan kesitte beton gerilmesi sıfıra inerken, yatay kuvvet dengesinin sağlanabilmesi için çelik gerilmesi artar. Yükün artmaya devam etmesiyle betonda yeni çatlaklar oluşur.

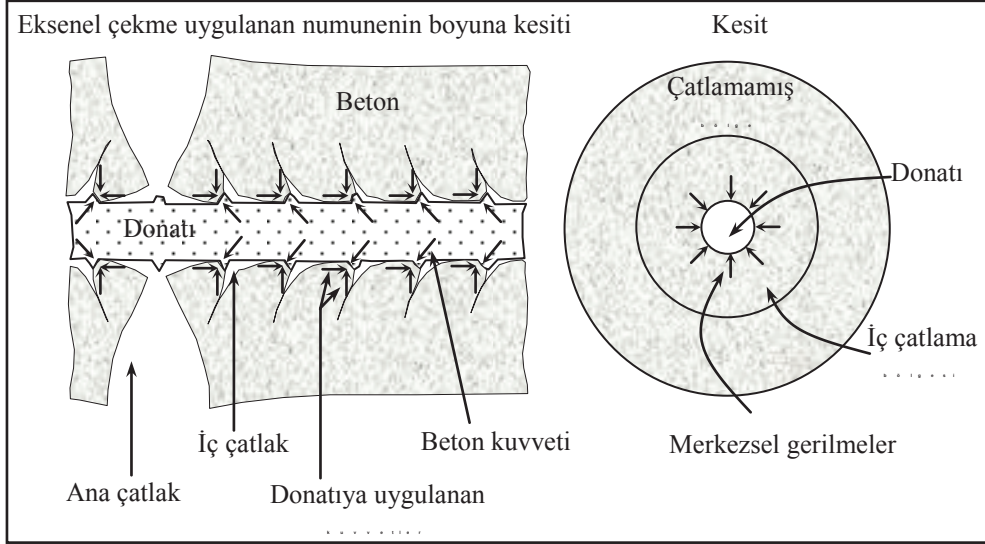
Mirza ve Houde, (1979) Şekil 3’de gösterilen elemanı kullanarak ve beton alanı (A_c) ve donatı alanını (A_s) değişken olarak çekme deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda donatı çeliğindeki gerilme ve ortalama aderans kayması arasındaki ilişki için Denklem 1’de verilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$\Delta_s = 0.0003684 \cdot k_1 f_s^{k_2} (A_c / A_s)^{k_3} \quad (1)$$

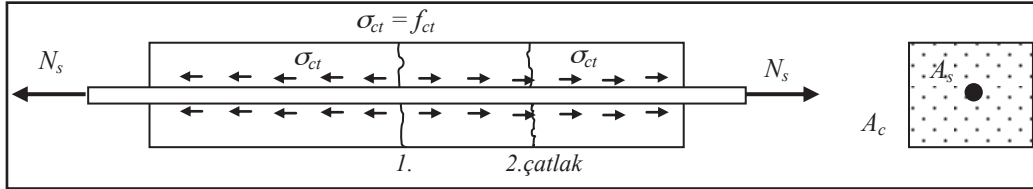
Bu bağıntıda, Δ_s ortalama bağ kayması (mm), f_s donatıdaki anlık gerilme (MPa), A_s donatı çeliği alanı ve A_c donatıyı çevreleyen efektif beton alanıdır (yük katılım alanı). Çelik gerilmesinin kayma üzerindeki etkisi k_2 katsayısına bağlı olarak doğrusala yakın olmakla beraber (k_2 'nin 1.0 ve 1.2 arasında değiştiği önerilmiştir), basitleştirmek için tam doğrusal olarak

alınabileceği ($k_2 = 1.0$) belirtilmiştir. k_3 katsayısı Mirza ve Houde, (1979) tarafından 0.33 olarak bulunmuştur. Çelik gerilmesine bağlı olarak k_1 katsayısı Denklem 2'de verilen bağıntıyla hesaplanabileceği gibi ortalama olarak 0.2 mm/MPa değeri de kullanılabilir.

$$k_1 = 5.690 \cdot 10^{-7} f_s^2 + 6.645 \cdot 10^{-5} f_s + 1.774 \cdot 10^{-1} \quad (2)$$



Şekil 2. Donatı etrafındaki betonda meydana gelen çatlamlar ve gerilme durumu (Mirza ve Houde, 1979).



Şekil 3. Betonla sarılı ve eksenel çekme etkisine maruz donatılı bir elemanda çatlakların oluşum mekanizması.

4. SONLU ELEMAN MODELİ

Lefas v.d., (1990) tarafından test edilen perde elemanlarının modellenmesinde ANSYS v.9.0, (2004) sonlu eleman programı kullanılmıştır. Beton ve çelikteki lineer olmayan davranış modları göz önüne alınmıştır. Beton, donatı ve aderans kaymasını modellemek için farklı elemanlar kullanılmıştır.

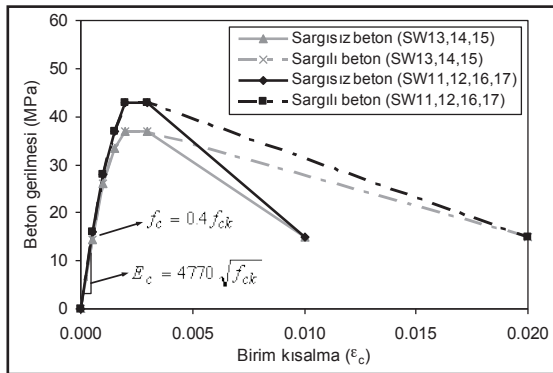
4.1. Betonun Modellenmesi

ANSYS eleman kütüphanesinde bulunan SOLID65 hacimsel elemanı, donatılı ve donatısız betonu modellemek için kullanılmıştır.

Bu eleman sekiz düğüm noktasında x, y ve z eksenlerinde ötelenme serbestlik derecelerine sahip düşük dereceli bir elemandır. Betonun üç eksenli gerilme altında göçme yüzeyini modellemek için Willam ve Warnke, (1975) beton modeli (CONC) kullanılmaktadır. Bu modelde beton çatlayana veya ezilene kadar davranışı lineer izotropik olarak alınmakta, beton ezilme gerilmesini aştıktan sonra ise o noktada her yönde rijitliğin kaybolduğu varsayılmaktadır. Çatlama ise çatlak yüzeyine paralel bir düzlemde gerilmeler sıfır alınır. Aynı noktada birbirine dik üç ekseninde çatlama izin verilir.

Mevcut modellerle basınç altındaki betonun tepe gerilmesi (f_c) aşıldıktan sonraki davranışı dikkate alınmadığından hesaplanan eleman kapasitesi veya davranışı gerçek kapasite veya davranıştan daha az veya düşük olarak tahmin edilir. Betonun basınç davranışını (tek eksenli veya iki eksenli) modellemek için, ANSYS malzeme kütüphanesinde bulunan Drucker-Prager (DP), iki doğrulu (BISO) veya çok parçalı lineer-isotropik pekleşmeli (MISO) plastisite modelleri ile beton malzeme modeli (CONC) bir arada kullanılarak karma bir malzeme modeli elde edilebilir. Betonarme perdelerde iki eksenli çekme-basınç gerilme durumu hakim olduğundan, malzeme modeli sabitleri bu bölgede akma yüzeyini en doğru şekilde hesaplayacak biçimde verilmelidir.

Bu çalışmada betonun basınç davranışını modellemek için çok parçalı lineer-isotropik pekleşmeli (MISO) plastisite modeli Willam-Warnke beton modeliyle beraber kullanılmıştır (CONC + MISO). Geliştirilmiş Kent ve Park modeli (Scott v.d., 1982) kullanılarak sargılı ve sargısız beton için gerilme-birim kısılma eğrileri hesaplanmıştır. Hesaplanan her bir eğri lineer parçalar halinde altı doğrulu duruma getirilmiştir. İlk lineer parçanın eğimi (betonun elastik modülü, E_c) ACI Committee, (2002) yönetmeliğinde önerilen bağıntıya göre hesaplanmıştır. TS-500 (2000)'de önerilen bağıntı ACI yönetmeliğine göre daha büyük değer verdiği için ACI bağıntısı tercih edilmiştir. Tüm elemanlar için hesaplanan sargılı ve sargısız beton eğrileri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Beton gerilmesi-birim kısılma eğrileri.

ANSYS programında Willam-Warnke (CONC) beton malzeme modeli tanımlanırken gerilmesi gereken malzeme sabitlerinden ikisi de, çatlama betonun kesme kuvveti taşıma ve

iletme kapasitesini belirleyen, kesme iletme katsayılarıdır. β_t ve β_c sırasıyla açık ve kapalı çatlaklar için kesme iletme katsayılarıdır. Bu çalışmada β_c katsayısı 1.0 olarak alınmış, β_t hesaplanırken Walraven, (1981) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen beton kesme gerilmesi v_{ci} , çatlak genişliği w ve beton basınç gerilmesi f_{ci} arasında kurulan ilişki kullanılarak Vecchio ve Collins (1986) tarafından önerilen

$$\beta_t = \frac{v_{ci}}{v_{ci\max}} = 0.18 + 1.64 \frac{f_{ci}}{v_{ci\max}} - 0.82 \left(\frac{f_{ci}}{v_{ci\max}} \right)^2 \quad (3)$$

bağıntısı kullanılmıştır. Burada,

$$v_{ci\max} = \frac{\sqrt{f_{ck}}}{0.31 + 24w/(a+16)} \quad (4)$$

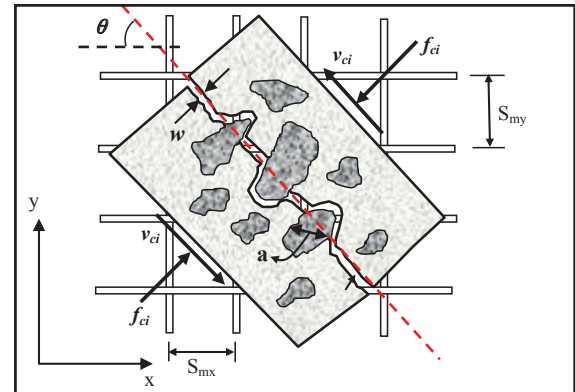
dir ve a en büyük agrega boyutunu (mm) verir. Gerilmeler MPa olarak girilmelidir. Çatlak genişliği w ortalama olarak, asal birim şekil değiştirme ϵ_1 ve çatlaklar arasındaki mesafenin S_θ çarpımı şeklinde hesaplanabilir;

$$w = \epsilon_1 S_\theta$$

Burada,

$$S_\theta = \frac{1}{\frac{\sin \theta}{S_{mx}} + \frac{\cos \theta}{S_{my}}} \quad (6)$$

θ asal birim deformasyonların x eksenine göre yaptığı açı, S_{mx} ve S_{my} sırasıyla x ve y doğrultularındaki donatılara dik olarak oluşan iki çatlak arasındaki uzaklıktır. Yukarıda kullanılan parametrelerin fiziki tanımları Şekil 5'teki çizimde verilmiştir.



Şekil 5. Agrega kilitlemesi yoluyla betonda kesme iletimi ve etkin parametreler.

Yukarıda verilen denklemler, $a = 10 \text{ mm}$, $\theta = 45^\circ$, $\varepsilon l = 0.003$, S_{mx} ve S_{my} için perde gövdesindeki yatay ve düşey yöndeki donatı yerleştirme aralığı değerleri kullanılarak ($S_{mx} = 60 \text{ mm}$ ve $S_{my} = 80 \text{ mm}$) hesaplanırsa, her bir numunenin açık çatlak kesme kuvveti iletme katsayıları Tablo 3'te verildiği şekilde bulunabilir. ANSYS ile yapılan önceki çalışmalarda, açık çatlak kesme iletme katsayısı genelde 0.05-0.25 aralığında verilmektedir (Hemmaty, 1998).

Tablo 3. Açık çatlak kesme iletme katsayısı için hesaplanan değerler.

Eleman	SW11	SW12	SW13	SW14	SW15	SW16	SW17
β	0.18	0.5	0.73	0.18	0.5	0.73	0.18

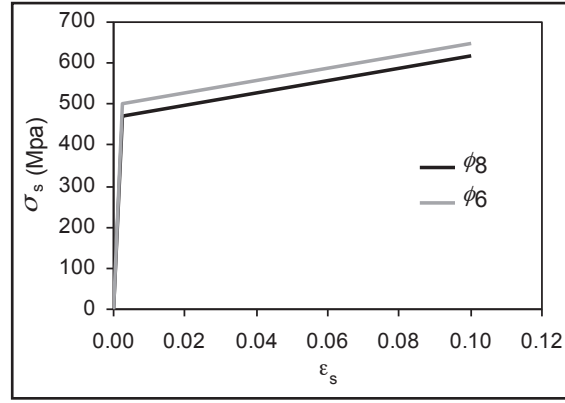
Betonarme panel ve perde gibi yapısal elemanlarda donatı eleman içinde ağ oluşturduğundan düzgün artan yükler altında yapılan analizlerde donatının yayılı olarak modellenebileceği önceki çalışmalarda gösterilmiştir. Ancak bu modelleme yaklaşımı aderans kaymalarının doğrudan modellenmesini olanaksız kılacağı için bu çalışmada donatı ayrı olarak modellenmiştir. Sonlu eleman ağında eleman boyutları ve düğüm noktaları, donatının gerçek deney elemanındaki yerinde ve miktarında ayrı olarak modellenmesine elverecek şekilde belirlenmiştir. İki düğüm noktalı LINK8 çubuk elemanı kullanılarak donatılar modellenmiştir. Link8 elemanında her bir düğüm noktasında x, y, z yönlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesi vardır. LINK8 tek eksenli çekme ve basınç elemanıdır, eğilme ve kesme etkileri hesaba katılmaz. Modelde yalnızca boyuna (düşey ve yatay) donatılar ayrı tanımlanmıştır. Etriye donatısı için ayrı elemanlar oluşturulmamıştır, beton hacmi içerisinde yayılı olarak modellenmiştir.

Gerilme şekil değiştirme eğrileri karşılaştırıldığında, genellikle soğukta işlem görmüş donatı çeliğinin doğal sertlikteki çeliğe göre belirgin bir akma sahanlığına sahip olmadığı görülür. Bu varsayım ışığında, soğukta işlem görmüş nervürlü donatı çeliği malzeme modeli için Şekil 6'da gösterilen iki doğrulu izotropik-pekleşmeli plastisite (BISO) modeli kullanılmıştır. Çeliğin akma dayanımları Tablo 1'de verilmiştir. Çeliğin elastiklik modülü (E_s) ve pekleşme modülü (E_p) sırasıyla 200000 MPa ve 1500 MPa olarak alınmıştır.

Betonun karakteristik çekme dayanımı TS-500 de önerilen $f_{ctk} = 0.35\sqrt{f_{ck}}$ bağıntısıyla hesaplanmıştır.

4.2. Donatının Modellenmesi

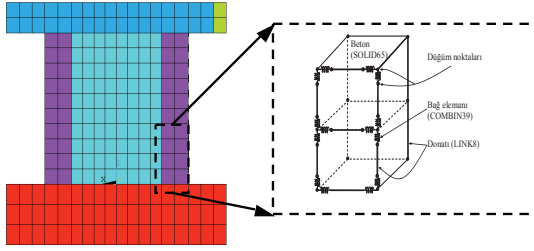
Donatı çubukları SOLID65 elemanı içinde hacimsel yayılı (smeared) olarak modellenebileceği gibi ayrık (discrete) olarak da modellenebilir.



Şekil 6. Çelik gerilmesi-birim kısalma eğrileri.

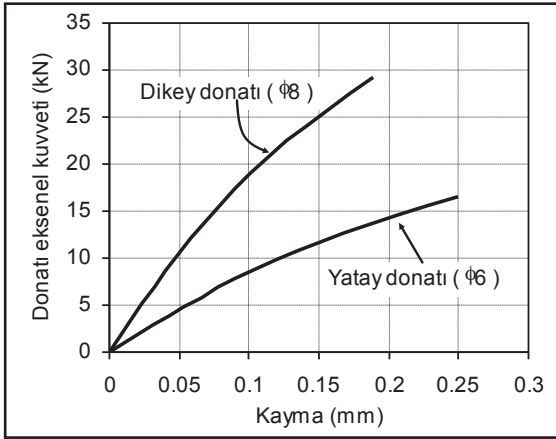
4.3. Donatı ve Beton Arasındaki Aderans Kaymasının Modellenmesi

Beton ve çelik yüzeyleri arasında gerçekleşen aderans kaymasını yaylarla modellemek sonlu eleman uygulamalarında kullanılagelen bir yöntemdir (Thomas ve Ramaswamy, 2006). ANSYS eleman kütüphanesinde bulunan COMBIN39 yay elemanı iki düğüm noktasıyla ve lineer olmayan genel bir yük-deplasman ($F-\Delta$) eğrisiyle tanımlanır. Çekme ve basınçta farklı yük-deplasman eğrileri kullanılabilir. Deney elemanlarının ANSYS ile oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 7'de verilmiştir. Bağ kaymasını modellemek için COMBIN39 elemanı kullanıldığında, bu elemanların boyu çok kısa tutularak SOLID65 ve LINK8 elemanlarının düğüm noktalarının birleştikleri yerde iki düğüm noktası arasına Şekil 7'de gösterildiği şekilde yerleştirilir.



Şekil 7. Perde elemanlarının sonlu eleman modeli.

Yayın yük-deplasman eğrisi, Denklem 1'de donatı çeliği gerilmesine (f_s) karşılık gelen ortalama aderans kaymasını (Δ_s) veren bağıntı kullanılarak hesaplanabilir. Çelik gerilmeleri donatı çubuğu alanı ile çarpılarak kuvvete dönüştürülür. Bu şekilde $\phi 6$ ve $\phi 8$ donatı çubukları ile bunları çevreleyen beton arasındaki kayma davranışı için Şekil 8'de verilen donatı kuvveti-kayma eğrileri elde edilmiş olur.

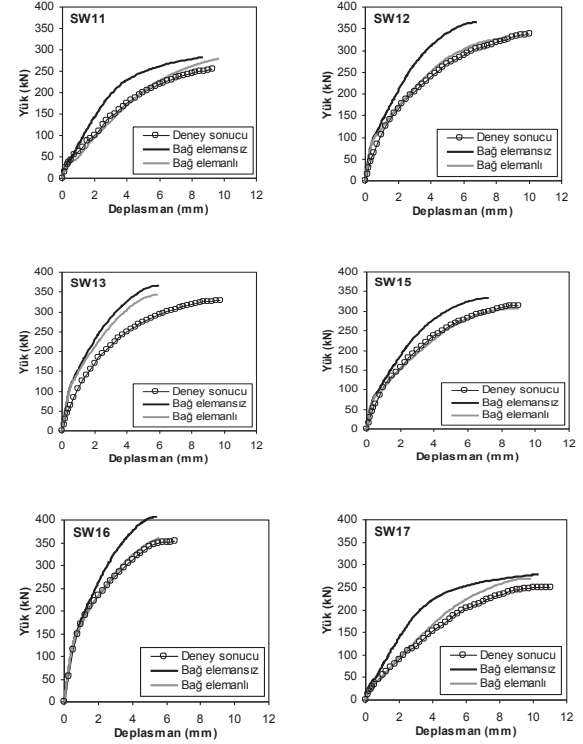


Şekil 8. Yay elemanlarının aksenal yük-kayma ilişkisi.

5. SONLU ELEMAN UYGULAMALARI

Şekil 7'da gösterilen sonlu eleman modeli kullanılarak perdelerin lineer olmayan analizleri yapılmıştır. Düşey ve yatay yükler deneysel çalışmada uygulanan şekliyle modele uygulanmıştır. Düşey (aksenal) yükler üst kirişin perdeyi kaplayan kısmına yayılı olarak, yatay yük ise üst kiriş uç bölgesine uygulanmıştır. Model iki şekilde analiz edilmiştir. İlkinde beton ve çelik arasında tam bir kenetlenme olduğu kabul edilerek, bağ elemanlarına büyük bir rijitlik verilerek, analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçları Şekil 9'de 'Bağ elemansız' olarak tanımlanan yük-deplasman eğrileriyle gösterilmiştir. İkinci analizde ise yay (bağ) elemanlarının davranışı

Şekil 8'de gösterilen aderans kayması-donatı gerilmesi ilişkileri kullanılarak tanımlanmıştır. Bu analiz sonuçları da Şekil 9'da 'Bağ elemanlı' olarak gösterilen yük-deplasman eğrileri ile verilmiştir. Deplasmanlar üst kiriş altında, perde gövdesinin tam ortasındaki düğüm noktasında okunmuştur.

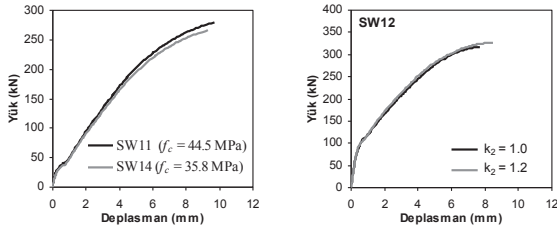


Şekil 9. Bağ elemanlı ve bağ elemansız sonlu eleman modelleriyle hesaplanan yük-deplasman eğrilerinin deneysel kapasite eğrileriyle karşılaştırılması.

Şekil 9'daki yük-deplasman eğrileri incelendiğinde ilk göze çarpan aderans kaymasının betonarme elemanların yük-deplasman davranışı üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahip olduğudur. Aderans kayması içeren modelle yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçların SW 13 elemanı dışında deneysel sonuca oldukça yakın olduğu görülmektedir. Aksenal yük seviyesinin elemanların rijitliğini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Aksenal yük sadece yanal rijitliği arttırmakla kalmayıp aynı zamanda yatay deplasmanları da önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Aksenal yük seviyesine göre SW13, SW16 ile benzer deplasman kapasitesine sahip olması gerekirken daha yüksek deplasmanlara ulaşmıştır. Lefas v.d., (1990) SW 13 elemanının göstermiş olduğu

bu yüksek deplasmanları, eleman deney için hazırlanırken temel kirişinin zemine bağlanması sırasında hasar görmesine bağlamaktadır.

SW14 ve SW11 elemanları birbirinden yalnızca beton basınç dayanımı açısından farklıdır. Deney sonuçları ve nümerik bulgular basınç dayanımının test edilen perdelerin yük taşıma kapasitesi ve deformasyon kapasitesi üzerinde etkili olmadığını göstermektedir. Şekil 10'da her iki elemanın hesaplanan yük-deplasman eğrileri karşılaştırılmıştır. k_2 parametresinin sonuçlara etkisi yine Şekil 10'da SW12 için verilmiştir.



Şekil 10. Beton basınç dayanımının hesaplanan eleman davranışı üzerindeki etkisi.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada betonarme elemanlarda beton ve çelik yüzeyleri arasında gelişen aderans kayması ele alınarak, sonlu eleman uygulamalarında nasıl modellenebileceği ticari bir sonlu eleman programı olan ANSYS aracılığıyla gösterilmiştir. Aderans kayması sonlu eleman modelinde beton ve çelik düğüm noktaları arasına yerleştirilen lineer olmayan yaylarla tanımlanmıştır. Bağ modeli olarak donatı gerilmesi ve aderans kayması arasındaki ilişki için Mirza ve Houde, (1979) tarafından önerilen bağıntı kullanılmıştır. Bunlara ek olarak ANSYS beton malzeme modeli açık çatlak kesme iletim katsayısının hesaplanmasında kullanılmak üzere bir bağıntı önerilmiştir. Uygulama için seçilen betonarme perde elemanlarının bağ elemanı içeren ve içermeyen modelleri oluşturulup yük-deplasman eğrileri çıkarılmıştır. Aderans kayması etkisini içeren modellerle yapılan hesaplamaların deneysel sonuçlara oldukça yakın değerler vermiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında aderans kayması etkisinin betonarme elemanların sonlu eleman analizlerinde gözardı edilmemesi gereken bir unsur olduğu görülmüştür.

7. SEMBOLLER

a	:	En büyük agrega boyu,
A_c	:	Donatıyı çevreleyen beton katılım alanı,
A_s	:	Donatı alanı,
b	:	Perdenin gövde kalınlığı,
E_c	:	Beton elastiklik modülü,
E_p	:	Donatı çeliği akma sonrası pekleşme modülü,
E_s	:	Donatı çeliği elastik modülü,
f_{ci}	:	Çatlak yüzeyindeki beton basınç gerilmesi,
f_{ck}	:	Beton karakteristik basınç dayanımı,
f_{ctk}	:	Betonun çekme dayanımı,
f_s	:	Donatı çeliği gerilmesi,
f_{sy}	:	Çeliğin akma dayanımı,
f_{su}	:	Çeliğin kopma gerilmesi,
h/l	:	Elemanın yüksekliğinin uzunluğuna oranı (aspekt oranı),
k_1, k_2, k_3	:	Kayma gerilmesi hesabında kullanılan katsayılar,
l	:	Perdenin plandaki uzunluğu,
N_s	:	Donatı eksenel çekme kuvveti,
P	:	Perde eksenel yükü,
P_o	:	Perde eksenel yük dayanımı ($f_{ck}bl$),
P/P_o	:	Eksenel yük oranı,
S_θ	:	Eğim açısı θ olan çatlaklar arası uzaklık,
S_{mx}	:	x-yönü donatısına dik yönde çatlaklar arası uzaklık,
S_{my}	:	y-yönü donatısına dik yönde çatlaklar arası uzaklık,
v_{ci}	:	Çatlak yüzeyindeki kesme gerilmesi,
v_{cimax}	:	Belli bir çatlak genişliği için çatlaktaki en büyük kesme dayanımı,
w	:	Çatlak genişliği,
β_t	:	Açık çatlak kesme iletim katsayısı,
β_c	:	Kapalı çatlak kesme iletim katsayısı,
ε_1	:	Beton asal çekme gerilmesi,
Δ_s	:	Donatı ve beton arasında gerçekleşen kayma,
θ	:	Çatlak eğimi,
ρ	:	Donatı oranı,
ρ_{yatay}	:	Yatay gövde donatısının perde gövdesinin dikey kesit alanına oranı,
ρ_{dikey}	:	Dikey gövde donatısının perde gövdesinin yatay kesit alanına oranı,
$\rho_{uç}$:	Perde uç bölgesindeki boyuna donatı alanının perde uç bölgesi alanına oranı,
$\rho_{sargı}$:	Perde uç bölgesi sargı donatısının beton çekirdeğe hacimsel oranı,
σ_{ct}	:	Betonun çekme gerilmesi.

8. KAYNAKLAR

ACI Committe 318, 2002. **Building code requirements for reinforced concrete** (ACI-318-02). American Concrete Institute, Detroit.

ACI Committe 408, 1992. **State-of-the-art report on bond under cyclic loads** (ACI 408.2R-92). American Concrete Institute, Detroit.

ANSYS v.9.0, 2004. Swanson Analysis System.

- Broms, B.B. and Lutz, L.A. 1965. "Effects of arrangement of reinforcement on crack width and spacing of reinforced concrete members", **ACI Journal**, Cilt 62, No 11, 1395-1410.
- Goto, Y. 1971. "Cracks formed in concrete around deformed tension bars", **ACI Journal**, Cilt 68, No 4, 244-251.
- Hemmaty, Y. 1998. "Modeling of the Shear Force Transferred Between Cracks in Reinforced and Fibre Reinforced Concrete Structures", Proceedings of the ANSYS Conference, Vol. 1, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Kotsovas, M.D., Pavlovic, M.N. and Lefas, I.D. 1992. "Two- and three-dimensional nonlinear finite-element analysis of structural walls", In **Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings**, Editörler: Fajfar P. and Krawinkler H., Elsevier, 215-227.
- Kwak, H. G. and Kim, D. Y. 2004. "FE analysis of RC shear walls subject to monotonic loading", **Magazine of Concrete Research**, Cilt 56, No 7, 387-403.
- Lefas, I.D., Kotsovas, M.D. and Ambraseys, N.N. 1990. "Behavior of reinforced concrete structural walls: strength, deformation characteristics, and failure mechanism", **ACI Structural Journal**, Cilt 87, No 1, 23-31.
- Mirza, S.M. and Houde, J. 1979. "Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete", **ACI Journal**, Cilt 76, No 1, 19-46.
- Scott, B.D., Park, R. ve Priestley, M.J.N. 1982. "Stress-Strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates", **ACI Journal**, Cilt 79, No 1, 13-25.
- Selby, R.G. and Vecchio, F.J. 1997. "A constitutive model for analysis of reinforced concrete solids", **Canadian Journal of Civil Engineering**, Cilt 24, 460-470.
- Thomas, J. and Ramaswamy, A. 2006. "Finite element analysis of shear critical prestressed SFRC beams", **Computers and Concrete**, Cilt 3, No 1, 65-77.
- TS-500, 2000. **Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları**. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Vecchio, F.J. and Collins, M.P. 1986. "Modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", **ACI Journal**, Cilt 83, No 2, 219-231.
- Walraven, J.C. 1981. "Fundamental analysis of aggregate interlock", **Journal of Structural Division, ASCE**, Cilt 107, No 11, 2245-2270.
- Watstein, P. and Mathey, R.G. 1959. "Width of cracks in concrete at the surface of reinforcing steel evaluated by means of tensile bond specimens", **ACI Journal**, Cilt 56, No 1, 47-56.
- Willam, K.J. and Warnke, E.D. 1975. "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete", **International Association for Bridge and Structural Engineers Proceedings**, Cilt 19, 174-203.