



Kesme Etkin Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan Kafes Kiriş Analojisi ile Modellenmesi

Sadık Can GİRGİN*

Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

sadik.girgin@deu.edu.tr ORCID: 0000-0002-5224-3122, Tel: (232) 301 70 52

Geliş: 05.07.2019 , Revizyon: 11.09.2019 , Kabul Tarihi: 16.09.2019

Öz

Betonarme elemanların çevrimsel ya da tek doğrultudaki yüklemeler altındaki davranışını yansıtabilecek sayısal modellerin oluşturulması, yapı mühendisliğinde güncelliğini korumaktadır. Depremler sırasında betonarme binalarda gözlenen hasarların kesme, kesme-eğilme etkileşimi gibi etkilere bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, kesme etkilerini doğrudan dikkate alabilen doğrusal olmayan kafes kiriş analojisi yaklaşımının, kesme etkin (kritik) betonarme elemanların sayısal modellenmesinde uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kafes kiriş modelinde doğrusal olmayan kafes elemanlar yatay ve düşey doğrultudaki beton ve donatı alanlarını; diyagonal doğrultuda ise sadece beton alanlarını tanımlamaktadır. Diyagonal çubuklarda betonun basınç dayanımına diğer doğrultuda gelişen çekme dayanımının etkileri de dikkate alınmaktadır. Ayrıca donatılı beton çubuklarda çekme güçlenmesi, donatı bulunmayan elemanlarda ise çekme dayanımı azalımı ilişkileri tanımlanmıştır. Kafes kiriş modelleri, farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş, kesme donatıları yetersiz plak şeridi testi ile kolon-kiriş birleşimi testlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Plak şeridi için oluşturulan sayısal modellerde eleman boyut etkisi ile diyagonal çubuğun yatayla yaptığı açı değişimi incelenmiştir. Enine donatısı bulunmayan kolon-kiriş birleşimi modelinde ise, birleşim için kafes kiriş modeli, diğer elemanlar için kesit hücresi (lif) yayılı plastisite modeli uygulanmıştır. Sayısal modelleri, deneysel çalışma ile karşılaştırıldığında, dayanım, başlangıç rijitliği ve dayanım azalması bakımından yeterli yaklaşıklıkla davranışı yansıttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kafes kiriş analojisi; betonarme plak; kesme etkin; kolon-kiriş birleşimi

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Betonarme yapı elemanlarının, deprem etkilerine bağlı çevrimsel yüklemeler ya da tek yönlü yükler etkisi altında doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesine yönelik deneysel ve analitik çalışmalar yapı mühendisliğinde güncelliğini korumaktadır. Deneysel çalışmalar ışığında yapısal elemanlarının ve sistemlerin değerlendirilmesinde uygulanacak analitik yöntemlerin, elemanlarda gelişecek kesme, eğilme, kesme-eğilme gibi hasar modlarını yansıtabilmesi gereklidir.

Ülkemizde, 1970 öncesi inşa edilen betonarme binaların kolon-kiriş elemanlarında ve birleşimlerinde enine donatıların bulunmaması, yetersiz beton dayanımı ve yetersiz sargılamanın bina performansını oldukça olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir (Bedirhanoglu v.d., 2010; Mısır, 2011; Mısır ve Kahraman, 2013; Şeker ve Bedirhanoglu, 2019). Deprem etkilerine karşı yetersiz detaylandırılmış betonarme elemanlarda ve birleşimlerde hasarların kesme veya eğilme-kesme etkileşimine bağlı olduğu önceki depremlerdeki saha gözlemlerinde belirlenmiştir. Eğilme-kesme etkileşimi, aksenal yük, eğilme ve kesme kuvvetlerinin birleşimi nedeniyle yapı elemanlarında gelişen doğrusal olmayan davranışı tanımlamaktadır (Panagiotou v.d., 2012).

Betonarme yapıların sayısal benzeştirilmesinde uygulanan modelleme yaklaşımları; yığılı plastisite, yayılı plastisite, sonlu eleman modelleri ve kafes sistem modelleri olmak üzere dört ana başlıkta toplanabilir. Yığılı plastisite modelleri kolon ve kiriş eleman uçlarında eğilme ve kesme yaylarının belirli bir çevrimsel kurala uygun tanımlanması ile oluşturulmaktadır (Lee ve Elnashai, 2001; Xu ve Zang, 2011). Yayılı plastisite yaklaşımı yalnızca eğilme etkilerini dikkate almakta ve betonarme kesitler tek eksenli beton ya da donatı çeliği malzeme modelleri ile tanımlanan kesit hücrelerine ya da liflere ayrılmaktadır. Mostafaei ve Vecchio (2008), ortalama aksenal birim şekil değişimleri ve beton

basınç birim şekil değişimlerini dikkate alarak tek yönlü yüklemeye altındaki betonarme elemanlar için tek eksenli kesme-eğilme modeli geliştirmiştir. Ceresa v.d. (2009) iki boyutlu Timoshenko lif esaslı kiriş-kolon elemanı önermiştir ve çevrimsel yüklemeye altındaki betonarme kolon-kiriş elemanları için eğilme-kesme modeli geliştirmiştir.

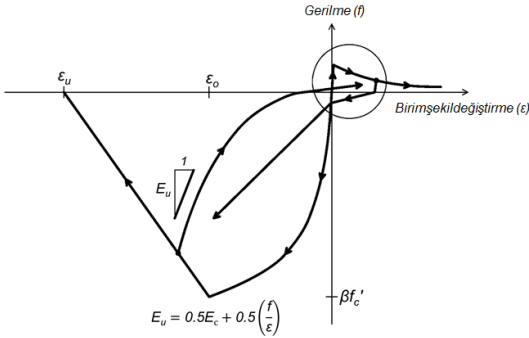
Kafes kiriş analogisi betonarme elemanlarda kesme etkilerinin modellenebilmesi amacı ile geliştirilmiştir. Kim ve Mander (1999) betonarme kolonların tek yönlü ve çevrimsel yüklemeye altındaki davranışları için kafes sistem modelini geliştirdi. Miki ve Niwa (2004) betonarme elemanların iki eksenli tepkileri için üç boyutlu bir kafes sistem modeli önermiştir. Bu modelde betonarme kolonlarda kesme dayanımı mekanizmasını temsil etmek için kolon üst kısmından alt ucuna kadar kemer elemanlar yer almaktadır. To v.d. (2009) monolitik iç kolon-kiriş birleşimlerinin kafes sistem modelleri ile çevrimsel yüklemeye etkileri altında analizlerini gerçekleştirmiştir. Betonarme perdelerin çevrimsel davranışının modellenmesinde Lu ve Panagiotou (2014) tarafından sonlu eleman boyut etkilerini dikkate alan bir kafes kiriş modeli geliştirilmiştir. Moharrami v.d. (2015) kesme etkilerine karşı yetersiz detaylandırılmış betonarme kolonlarda agrega kenetlenmesinin kesmeye katkısını dikkate alan kafes sistem modeli geliştirmiştir.

Doğrusal olmayan kafes kiriş analogisi ile modelleme yaklaşımı, deney verisine dayalı model parametreleri gerektirmediğinden, çalışma kapsamında kesme donatısı bulunmayan betonarme elemanların modellenmesinde uygulanmıştır. Kafes kiriş modelinde beton çubuklar diyagonal, yatay ve düşey doğrultularda yer almakta, donatı çubukları ise enine ve boyuna donatıları tanımlamaktadır. Diyagonal doğrultudaki beton çubuklarda asal gerilmelere bağlı basınç dayanımındaki azalma dikkate alınmaktadır. Çalışma kapsamında, bir betonarme plak şeridi ile kolon-kiriş birleşiminde enine donatısı bulunmayan numune

testlerinin sonuçları, oluşturulan sayısal modeller ile karşılaştırılmıştır.

Kafes Kiriş Analojisi ve Malzeme Modelleri

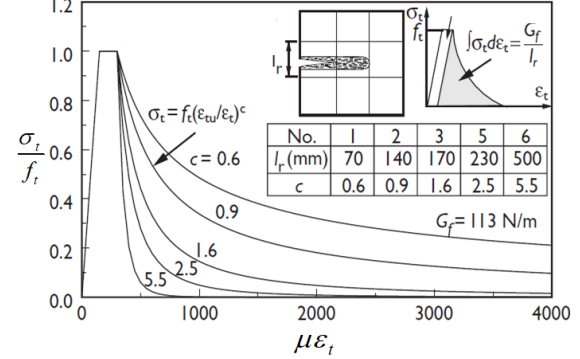
Sayısal model çalışmaları, yapı ve deprem mühendisliğinde kullanılan OpenSees sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellerde göz önüne alınan beton malzeme modeli (Lu ve Panagiotou, 2014) için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 1'de verilmektedir. Beton malzeme modeli, betonun basınç etkilerine dik yönde gelişen çekme birim deformasyonlarına bağlı azalım etkilerini göz önüne alabildiği için *Concretewbeta* olarak seçilmiştir. Sargısız beton basınç dayanımı (f_c'), $\epsilon_o = \%0,2$ birim deformasyonuna karşılık gelmektedir. Basınç bölgesinde ulaşılan basınç dayanımı sonrasında azalan kısımda ϵ_u değeri Lu ve Panagiotou (2014) tarafından verilen yöntemle göre belirlenmiştir. Yatay ve düşeydeki beton kafes elemanlarının çekme dayanımı, $f_t = 0.33\sqrt{f_c'}$ (MPa) olarak alınmıştır.



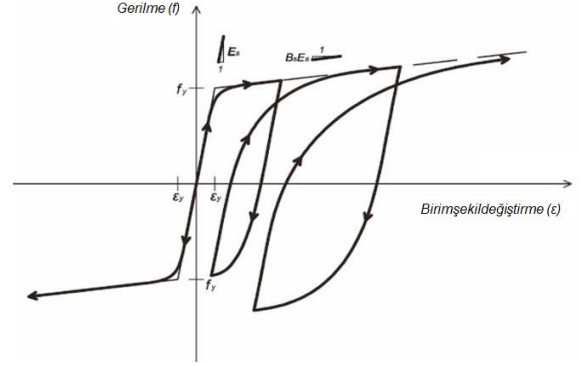
Şekil 1. Beton kafes çubuk elemanları için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Donatı çubuklarının paralelinde yer alan beton çubuklarda çekme dayanımına ulaştıktan sonraki azalma, Stevens (1991) tarafından verilen çekme güçlenmesi denkleminde göre belirlenmiştir. Modeldeki diğer yatay ve düşey kafes çubuklarda ise Maekawa v.d. (2003) tarafından farklı referans eleman uzunluklarındaki beton için önerilen çekme dayanımı azalması ilişkileri Şekil 2'de tanımlanmıştır. Donatı çeliği için

Giuffré-Menegotto-Pinto (GMP) malzeme modeli tanımlanmış olup, malzeme için gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3'te verilmektedir. Donatı çeliği için *Steel02* dikkate alınmıştır.

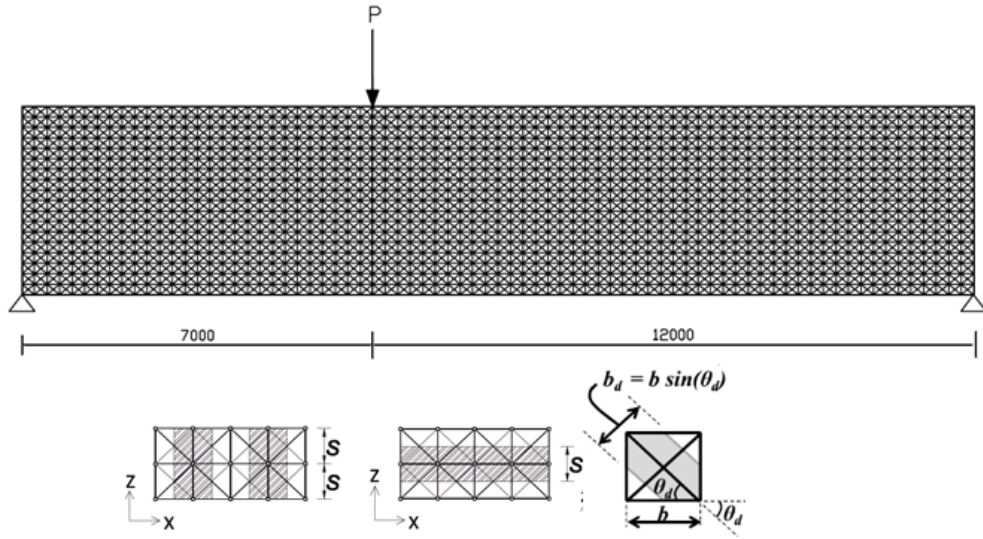


Şekil 2. Beton için çekme dayanımı azalım ilişkileri (Maekawa v.d., 2003)



Şekil 3. Donatı için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Doğrusal olmayan kafes kiriş modelleme yaklaşımında beton ve donatı kafes çubukları yatay, düşey ve diyagonal doğrultularda tanımlanmaktadır. Donatı bulunan kafes çubuklara paralel tanımlanan beton çubuklarda ise çekme güçlenmesi etkileri, diğer beton çubuklarda ise çekme dayanımında azalma dikkate alınmaktadır. Diyagonal beton çubuklarda beton basınç dayanımının enine doğrultudaki çekme birim deformasyonlarına bağlı değişimi, Vecchio ve Collins (1986) çalışmasındaki deneysel gözlemlere göre dikkate alınmıştır. Diyagonal çubuklarda çekme dayanımı ise sıfır alınmıştır. (Moharrami v.d., 2015). Şekil 4'te betonarme plak şeridi için kafes kiriş modeli ile düşey, yatay ve diyagonal doğrultularda etki alanlarına göre belirlenen çubuk elemanlar yer almaktadır.



Şekil 4. Betonarme plak şeridi için kafes kiriş modeli ve düşey, yatay ve diyagonal doğrultulardaki çubuk elemanlar

Yatay ve düşey beton çubukların alanları, kesit genişliği, B ile düşey ya da yatay çubuk genişliklerinin ise sırasıyla, b_v ve b_h ile çarpımıdır. Diyagonal kafes çubukların enkesit alanı, A_d , yatay eleman boyutu, b , diyagonal eleman boyutu, b_d ve diyagonal eleman açısı θ_d olmak üzere;

$$A_d = b_d B = b \sin \theta_d B \quad (1)$$

ile hesaplanmıştır.

Plak Şeridi Testinin Modellenmesi

Yüksek yapıların temellerinde ya da baraj yapılarında kalın plaklar uygulanmakta olup bu plakların kesme dayanımının belirlenmesi amacıyla Collins v.d. (2015) tarafından deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi için bir plaktan çıkarılan şeridin genişliği 25 cm, yüksekliği 4 m ve açıklığı 19 m'dir (Şekil 5). Test numunesinin sol mesnetten (W eksen) 7 m uzaklıktaki noktada (P eksen) tek yönlü (monotonik) yük etkisi altında yük-deformasyon ilişkileri elde edilmiştir. Plak şeridinde enine donatıların aralıkları 1.5 m olup, sadece kesme açıklığı, a/d 3.12 olan tarafında yer almaktadır. Ortalama beton basınç dayanımı 40 MPa ve en

büyük agrega çapı 14 mm olup, kesitte üstte altta ise boyuna donatı yer almaktadır. Enine donatılar ise tek kollu olup 19.5 mm çaplı donatıdan oluşmakta, donatı çekme dayanımları ise eğilme donatısı için 573 MPa, enine donatı için 522 MPa'dır. Deneysel çalışmada düşey yönde artan yüklemeler 2-2 eksen boyunca uygulanmıştır. Test numunesi yükün sağ tarafındaki açıklıkta kesme nedeni ile göçme yüküne (685 kN) ulaşmıştır. Çalışmadaki sonuçlar, yönetmeliklerde (ACI 318-08) yer alan denklemlerin, minimum kesme donatısına bağlı artışı daha düşük değerlerde tahmin ettiği belirlenmiştir (Collins v.d., 2015). Çalışma kapsamında numunenin göçme anında ulaşacağı yük ve hasar modlarının tahmini için farklı ülkelerde endüstriden ve akademiden 66 ekibin katılımıyla dayanım tahmini yarışması düzenlenmiştir. Cervenka v.d. (2018) tarafından oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile hem yük bakımından hem de ulaşılan göçme modunun tahmini açısından en yakın sonuçları elde etmiştir.

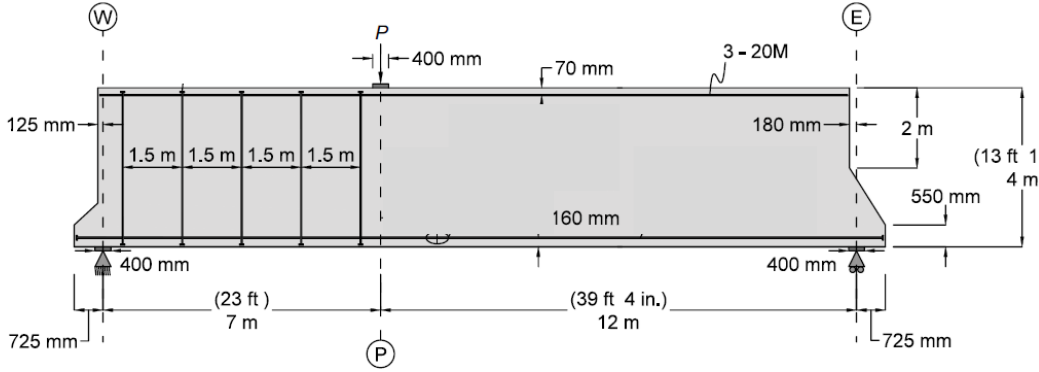
Eleman Boyut Etkisi

Kesme-eğilme etkileşimi hasar modlarına sahip betonarme perdelerin çevrimsel davranışının modellenmesi amacıyla gerçekleştirilen kafes kiriş modellerinde, kafes eleman boyutlarındaki artışın diyagonal elemanların kapasitelerine ulaşmasıyla geliştiği belirlenmiştir (Panagiotou

v.d., 2012). Bu çalışmada da kesme etkin elemanlarda eleman boyut etkisini inceleyebilmek için yatay ve düşey eleman boyutları, M1 modeli için 125 mm, 105 mm; M2 modeli için 333 mm, 290 mm olarak seçilmiştir. Modellerin yatayla yaptıkları açılar M1 için 41^0 ve M2 için 40^0 'dir. Modellerdeki beton çubukların enkesit alanları Tablo 1'de verilmiştir.

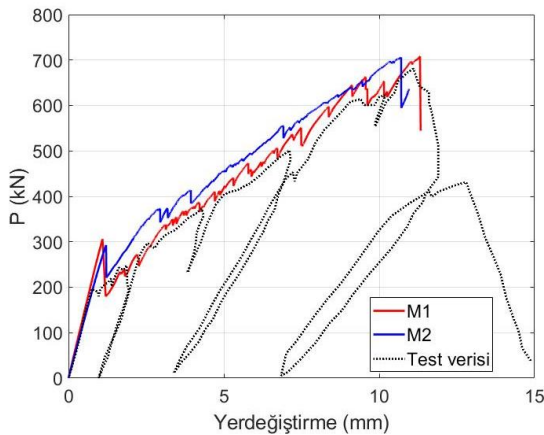
Tablo 1. Kafes kiriş modellerindeki beton çubuklar için enkesit alanları (mm²)

Beton çubuk	M1	M2
DÜŞEY BETON (A_{CV})	83332.5	31250
YATAY BETON (A_{CH})	72500	26180.5
DIYAGONAL BETON (A_D)	54671	20068.5



Şekil 5. Plak şeridinin boyutları (Collins v.d., 2015)

M1 ve M2 modelleri ile hesaplanan düşey yük-yerdeğiştirme ile deneysel çalışmada belirlenen davranış Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre her iki modelde de başlangıç rijitliği deneysel çalışmadaki ile yakın değerde olup yükteki belirgin azalma 1.1 mm de gelişmiştir. Ulaşılan en büyük yük değerleri deneysel çalışma ile kıyaslandığında; M1 modeli ile yük değerinin 1.07 katı, M2 modeli ile 1.18 katı olarak hesaplandığı belirlenmiştir.

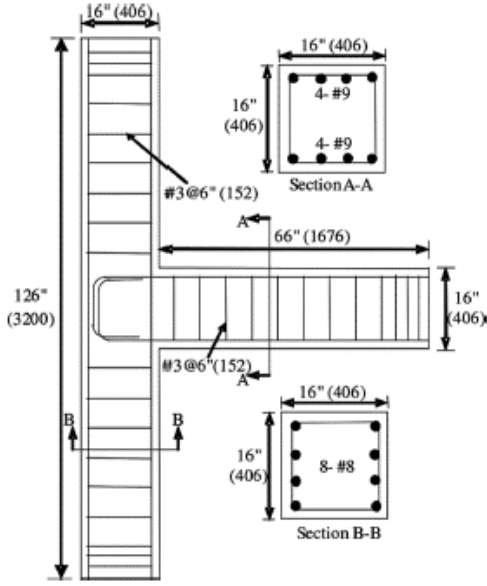


Şekil 6. Plak şeridi testi sonuçları ile sayısal modellerin karşılaştırılması

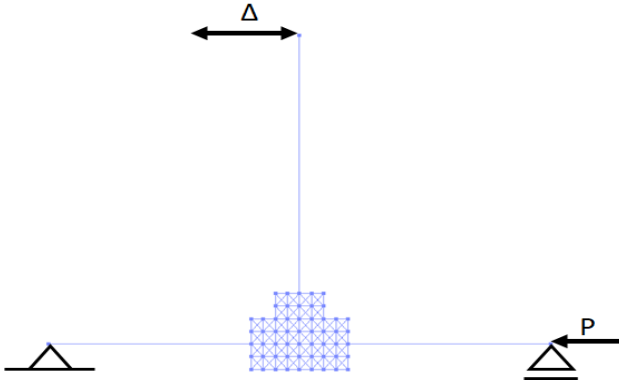
Kolon-Kiriş Birleşimi Testinin Modellenmesi

Deprem etkilerine karşı yetersiz detaylandırılmış kolon-kiriş birleşimleri ile ilgili deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları, mevcut bina değerlendirme çalışmaları açısından güncelliğini korumaktadır. Pantelides v.d. (2002) çalışmasında altı dış kolon-kiriş birleşimini farklı kiriş boyuna donatı oranı ve kolon eksenel yük oranlarına bağlı olarak tersinir tekrarlı yükler altında test etmiştir (Şekil 7). Çalışma kapsamında göz önüne alınan U4 numunesinin, test günündeki ortalama beton basınç dayanımı 31.6 MPa olup, 25 mm ve 29 mm çaplı donatıların akma dayanımları sırasıyla 469 MPa ve 458.5 MPa'dır. Kolon eksenel yük kapasitesinin %25'i değerindeki eksenel yük deney süresince uygulanmıştır. Deneyde boyuna donatıdaki ilk akma %0,5 ötelenme oranında, birleşimdeki belirgin çatlaklar ise % 1.5 ötelenme oranında gözlenmiştir. %5 ötelenme oranında birleşim panelinde kesme hasarları ve betonda dökülmeler meydana gelmiştir.

Kolon-kiriş birleşimi için oluşturulan sayısal modelde, hem doğrusal olmayan kafes kiriş modelleme yaklaşımı, hem de yayılı plastisite yaklaşımı esas alınmıştır (Şekil 8). Hibrit modelde birleşimde kafes kiriş modeli; birleşim bölgesi dışında bulunan kolon ve kiriş elemanlar için doğrusal olmayan kesit hücresi (lif) kolon-kiriş elemanı tanımlanmıştır. Kolon ve kirişlerin rijit elemanlarla kafes sisteme bağlantısı sağlanmıştır (Bowers, 2014).



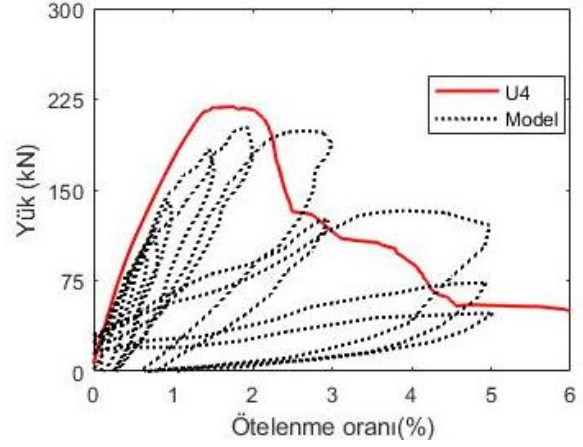
Şekil 7. U4 kolon-kiriş birleşimi numunesinin donatı detayları (Pantelides v.d., 2002)



Şekil 8. Kolon-kiriş birleşimi için oluşturulan hibrit sayısal model (Girgin, 2019)

Kolon- kiriş birleşimine kiriş ucundan tek yönlü (monotonik) olarak yükleme etiketlenen sayısal

model ile elde edilen yük- yerdeğiştirme grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Deneysel çalışmada ulaşılan en büyük yük değeri ile kıyaslandığında sayısal model ile yük değerinin 1.1 katı olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber başlangıç rijitliği ile dayanımın azaldığı yer değiştirmelerin yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 9. Kolon-kiriş birleşimi testi sonuçları ile sayısal modellerin karşılaştırılması

Kafes Kiriş Analojisinde Diyagonal Açılı Değişiminin İncelenmesi

Kafes kiriş analojisinde model oluşturulurken enine veya boyuna donatıların konumları dikkate alınmaktadır. Diyagonal beton elemanların yatayla yaptıkları açının davranışa etkisi bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Diyagonal elemanların yatayla yaptıkları açılarının en küçük değeri ACI 318 (2008)'e göre 25° alınmalıdır. Şekil 5' de verilen plak şeridi için sabit genişlik için (333 mm) diyagonal çubukların yatayla yaptıkları açılar 35° , 41° ve 46° olarak alınmıştır. Tablo 2'de kafes kiriş modellerindeki beton çubukların enkesit alanları yer almaktadır.

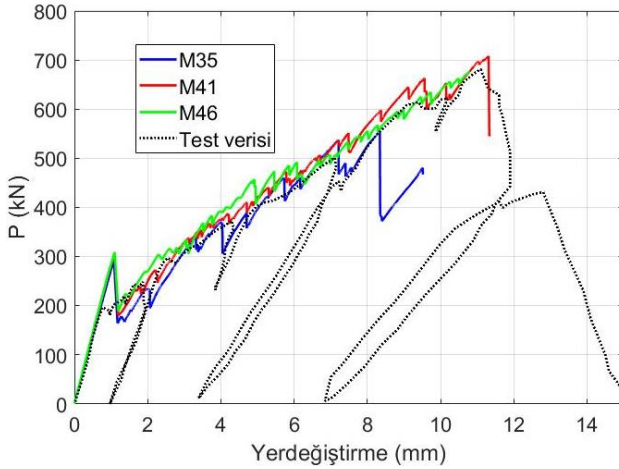
Sayısal modellerle hesaplanan yatay yük yer değiştirme değerleri ile deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar kıyaslandığında yük değerlerinin oldukça yakın değerlere sahip olduğu gözlemlenebilir (Şekil 10). Ancak her modeldeki yük düşmesinin belirgin olduğu andaki analitik hasar

şekillerinin oldukça farklı olduğu belirlenmiştir (Şekil 11).

Tablo 2. Kafes kiriş modellerindeki beton çubuklar için enkesit alanları (mm²)

Beton çubuk	M35	M41 (M1)	M46
DÜŞEY BETON (A _{cv})	83,332.5	83,332.5	83,332.5
YATAY BETON (A _{ch})	58,907.5	72,500	85,682.5
DİYAGONAL BETON (A _D)	47,797.5	54,671	59,945

M35 modelinde 8.3 mm yerdeğiştirmede yatay beton çubukların çekmeye bağlı hasarlarının geliştiği; M46 modelinde yükün sol tarafında diyagonal çubuklarda hasarın geliştiği gözlenmiştir. M41 modelinde ise; deneysel çalışmanın sonunda yüklemenin sağ tarafında gözlenen hasar durumuna benzer hasarların geliştiği belirlenmiştir.



Şekil 10. Farklı diyagonal eleman açısına sahip modellerin yük-yerdeğiştirme grafikleri

Sonuçlar

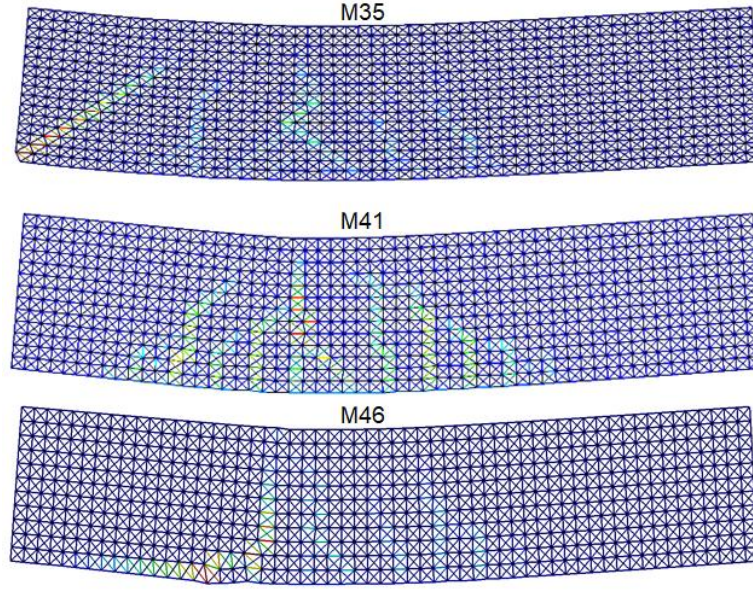
Bu çalışmada kesme etkilerine yetersiz detaylandırılmış betonarme elemanlar için Moharrami v.d. (2015) tarafından önerilen kafes kiriş analogisi, kesme donatısı bulunmayan betonarme elemanların davranışlarının incelenmesinde uygulanmıştır. Bu kapsamda mevcut modele ek olarak beton çekme dayanımı

azalım ilişkileri Maekawa (2003) yaklaşımı ile modellenmiştir. Çalışmada kesme etkin betonarme plak şeridi ve kolon-kiriş birleşimlerinin deney verilerinden yararlanılarak sayısal model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kafes kiriş modelinde, beton gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkilerinde boyut etkisi dikkate alınmaktadır. Çalışmada elde edilen bazı sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Betonarme plak şeridi için oluşturulan M1 ve M2 modellerinin deneysel çalışmada elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri ile karşılaştırıldığında yeterli yaklaşıklıkta oldukları belirlenmiştir.
- Diyagonal elemanın yatayla yaptığı açı değeri arttıkça diyagonal beton çubuklarda ezilmelerin erken yerdeğiştirme seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.
- Kolon-kiriş birleşimi sayısal modelinde, ulaşılan en büyük yük değerinin deneysel çalışmada ulaşılan yük değerinin yaklaşık 1.1 katına karşılık geldiği belirlenmiştir. Sayısal model, birleşim davranışını dayanım azalması bakımından yeterli yaklaşıklıkla yansıtmaktadır.

Teşekkür

- Bu çalışmada plak şeridinin modellenmesi kapsamındaki sayısal modelleme çalışmaları, yazarın burslu olduğu TÜBİTAK 2219 yurtdışı burs programı kapsamında California Üniversitesi Berkeley'de gerçekleştirilmiştir. Yazar, değerli görüşleri ve önerileri için Dr. Marios Panagiotou'ya teşekkürlerini sunmaktadır.



Şekil 11. Farklı diyagonal eleman açısına sahip modellerin analitik hasar şekilleri

Kaynaklar

- ACI Committee, & International Organization for Standardization. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- Bedirhanoglu, I., Ilki, A., Pujol, S. and Kumbasar, N. (2010). Behavior of deficient joints with plain bars and low-strength concrete, *ACI Structural Journal*, 107(3), 300-310.
- Bowers, J.T. (2014). Nonlinear cyclic truss model for beam-column joints of non-ductile RC frames. M.Sc. thesis, Virginia Polytechnic and State University.
- Ceresa, P., Petrini, L., Pinho, R., & Sousa, R. (2009). A fibre flexure–shear model for seismic analysis of RC-framed structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(5), 565-586.
- Cervenka, V., Cervenka, J., & Kadlec, L. (2018). Model uncertainties in numerical simulations of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*, 19(6), 2004-2016.
- Collins, M. P., Bentz, E. C., Quach, P. T., and Proestos, G. T. (2015). The challenge of predicting the shear strength of very thick slabs, *Concrete International*, 123(5), 624-633.
- Girgin, S. C. (2019). Effect of Modeling Beam-Column Joints on Performance Assessment of Columns in Non-Ductile RC Frames. *Teknik Dergi*, 31(6).
- Kim, J. H., and Mander, J. B. (1999). Truss modeling of reinforced concrete shear – flexure behaviour, MCEER Report 99-0005, University at Buffalo, State University of New York.
- Lee, D. H., and Elnashai, A. S. (2001). Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction, *Journal of Structural Engineering*, 127(5), 546:553.
- Lu, Y. and Panagiotou, M. (2014). Three-dimensional cyclic beam-truss model for non-planar reinforced concrete walls, *Journal of Structural Engineering*, 140(3).
- Maekawa, K., Pimanmas, A., and Okamura H. (2003). Nonlinear mechanics of reinforced concrete. New York, NY: Spon Press. 721 pp.
- Miki, T., and Niwa, J. (2004). Nonlinear analysis of RC structural members using 3D lattice model, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), 343-358.
- Mısır, İ. S. (2011). Betonarme yapıların deprem davranışının iyileştirilmesinde çimento şerbeti emdirilmiş lifli beton (SIFCON) kullanımı (Doktora tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Misir, I. S., & Kahraman, S., (2013). Strengthening of non-seismically detailed reinforced concrete beam–column joints using SIFCON blocks, *Sadhana*, 38(1), 69-88.
- Moharrami M., Koutromanos I., Panagiotou M., Girgin S.C. (2015). Analysis of shear-dominated RC columns using the nonlinear truss analogy, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(5), 677-694.

- Mostafaei, H., and Vecchio, F. J. (2008). Uniaxial shear-flexure model for reinforced concrete elements, *Journal of Structural Engineering*, 134(9), 1538-1547.
- Panagiotou, M., Restrepo, J. I., Schoettler, M., and Kim, G., (2012). Nonlinear cyclic truss model for reinforced concrete walls, *ACI Structural Journal*, 109(2), 205-214.
- Pantelides, C.P., Hansen, J., Nadauld, J. and Reaveley, L.D., Assessment of reinforced concrete building exterior joints with substandard details. PEER report, 2002.
- Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., Collins, M. P., and Will, T. G. (1991). Constitutive model for reinforced concrete finite element analysis, *ACI Structural Journal*, 99 (10), 2109-2122.
- Şeker, M., & Bedirhaoğlu, İ. (2019). Düşük dayanımlı betona sahip betonarme kısa kolonların kesme etkileri altında davranışlarının incelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(1), 385-395.
- To, N., Sritharan, S., and Ingham, J. (2009). Strut-and-tie nonlinear cyclic analysis of concrete frames. *Journal of Structural Engineering*., 135:10(1259), 1259-1268.
- Vecchio, F. G. and Collins, M.P. (1986). The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *Journal of the American Concrete Institute*, 83(2), 219-231.
- Xu,S., and Zhang, J. (2011). Hysteretic shear-flexure interaction model of reinforced concrete columns for seismic response assessment of bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40:315-337.

Modeling of Shear-Critical Reinforced Concrete Elements with Nonlinear Truss Analogy

Extended abstract

Experimental and analytical studies to determine the nonlinear behavior of reinforced concrete structural elements under the effect of cyclic loads or unidirectional loads are still a challenging subject in structural engineering. Analytical prediction of the response of a structural element is one of the essential components in structural engineering. Modeling approaches for simulating inelastic behavior structural elements can be classified as lumped plasticity, distributed plasticity and nonlinear truss modeling approaches.

Truss or strut-and-tie models have been proposed in the literature to investigate the strength and stiffness characteristics of RC members during cyclic reversals. Nonlinear concrete trusses are used in the diagonals, accounting for the biaxial effect on the compression behavior. Tension stiffening and softening effects are modeled for all concrete truss elements, accounting for mesh size effects and fracture energy. The concrete material model used for the diagonal truss elements accounts for the bi-axial strain field on the concrete compressive behavior. Both the uniaxial and bi-axial concrete models as well as the four-node truss element used in the diagonals.

This study presents computational modeling of shear-critical reinforced concrete components. For this purpose, nonlinear truss modeling approach was validated by comparing experimental data of a slab strip specimen and a beam-column joint with non-seismic details. The computer program OpenSees was used for all the case studies in this paper.

Thick slabs are applied on the foundations of high-rise structures or dam structures. Collins et al. (2015) tested a slab strip specimen as a part of research on shear strength of thick one-way slabs. The slab strip specimen had 25 cm thickness, 4 m height and 19 m span. The specimen was pinned at west and roller-supported at east directions. During the experimental study, the load was applied monotonically with a hydraulic jack along 7 m from the west support. The specimen failed in shear in the east shear span when the applied load reached 685 kN. The west side of the

specimen showed no indication of being close to failure while containing significant diagonal cracks.

M1 model with 41° and M2 model with 40° angles of diagonals in respect to the horizontals (θ_a) were developed, for the slab strip specimen with different element lengths. Tension softening behaviors of horizontal and vertical concrete truss elements are adjusted due to element lengths for models. The lateral force – lateral displacement responses for experimentally measured and monotonically computed using M1 and M2 models are compared. Both models computed initial stiffness in a good agreement with the experimental data. Computed loads for the models at 4 mm displacement were 1.07 times and 1.18 times the experimentally measured response for M1 and M2 models, respectively.

Pantelides et al. (2002) tested six exterior full-scale beam-column joints without shear reinforcement and non-seismic details. During the test of Unit-4 specimen, first yield in longitudinal reinforcement was observed and initial significant cracking in the joint was observed at at 0.5% and 1.5% drift ratios, respectively. Hybrid numerical model is considered for beam-column joints of non-ductile frames including nonlinear cyclic truss model for connection region and distributed plasticity model for beams and columns. The lateral force– displacement responses for measured and monotonically and cyclically computed using numerical simulation model are compared. The peak strength in numerical model is 1.2 times the experimentally measured.

Besides, the effects of angle of diagonal truss elements are investigated with respect to slab trip specimen tests. M35 model showed significant strength degradation at 8.3 mm displacement due to crushing of horizontals near the west support of the beam. M41 model showed a good agreement with experimental results in terms of strength degradation and load-displacement. M46 model had failures due to crushing of diagonals at the west side of the beam unlike the observed failures in the test.

Keywords: nonlinear truss analogy; reinforced concrete slab; shear-critical; beam-column joint