DİNAMİK BENZERİ DENEYLERLE YETERLİ DAYANIMA SAHİP BİR BETONARME ÇERÇEVENİN BİRLEŞİM BÖLGELERİNİN PERFORMANSININ İRDELENMESİ

B. Burak[1] ve M. Ünal[2]

[1] *Yardımcı Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Pennsylvania State Üniversitesi, University Park, PA*
Email: burcubc@metu.edu.tr

ÖZET:

Yapısal çerçeve elemanlarının sismik performansı betonarme çerçevenin deprem yükleri etkisinde gösterdiği performanstan hayli farklı olabilir. Göreli kat ötelemesi değerleri yüksek olmasa bile kirişler, kolonlar veya birleşim bölgelerinde görülen deformasyonlar nedeniyle bir göçme mekanizması oluşabilir. Bu nedenle, her bir elemanın sismik performansının çerçevenin davranışından bağımsız olarak araştırılması gerekmektedir. Bu deneysel araştırmada 1/2-ölçekli, üç katlı, üç açıklıklı bir betonarme çerçevenin bir iç, bir dış kuşatılmamış kolon-kiriş birleşim bölgesinin sismik performansı incelenmiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007) ve ACI-ASCE Committee 352 Recommendations (ACI 352-02) dökümanlarında belirtilen kurallar göz önünde bulundurularak tasarlanan deney elemanına dinamik benzeri deney sistemi kullanılarak 1999 Düzce yer hareketi dört farklı ölçekte arka arkaya uygulanmıştır. Deney sonunda, artan deprem yükleri altında taşıyıcı elemanların kapasitelerinin aşıldığı ve bir göçme mekanizmasının oluştuğu gözlenmiştir. Kolon-kiriş düğüm noktasındaki kesme deformasyonları yumuşak zemin üzerinde 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yükü etkisinde bile çok yüksek seviyelere çıkmıştır. Bu çalışmada, kiriş ve birleşim bölgelerinin hasar seviyeleri arasındaki etkileşim, birleşim bölgelerinin performansının çerçeve davranışına katkısı ve farklı zemin koşullarının sismik davranış üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : Kolon-kiriş birleşim bölgesi, dinamik benzeri deney yöntemi, sismik performans

1. GİRİŞ

Betonarme moment çerçeve binaların davranışlarının değerlendirilmesinde, sadece yapının genel performansının değerlendirmesi yeterli değildir, çünkü taban kesme kuvvetine karşı çatı ötelemesi davranışı deprem yükünün özelliklerine bağlı olarak önemli ölçüde etkilenmese bile yapısal elemanların davranışı belirgin şekilde değişebilir. Kolonlar, kirişler ve kolon-kiriş birleşim bölgeleri betonarme bir binanın en önemli yapısal elemanlarıdır ve bu elemanların sismik performanslarının çerçevenin davranışından bağımsız olarak araştırılması gerekmektedir. Bu inceleme artan deprem yükleri altında yapılabilir. Mevcut yönetmelikler olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007), ASCE SEI 41-06 (ASCE 2006) ve FEMA 356 (FEMA 2000) dökümanlarında performans seviyeleri Minimum Hasar Sınırı, Güvenlik Sınırı ve Göçme Sınırı olarak tanımlanır ve bu seviyeler gözlenen hasar ve deplasman düzeylerine göre belirlenir.

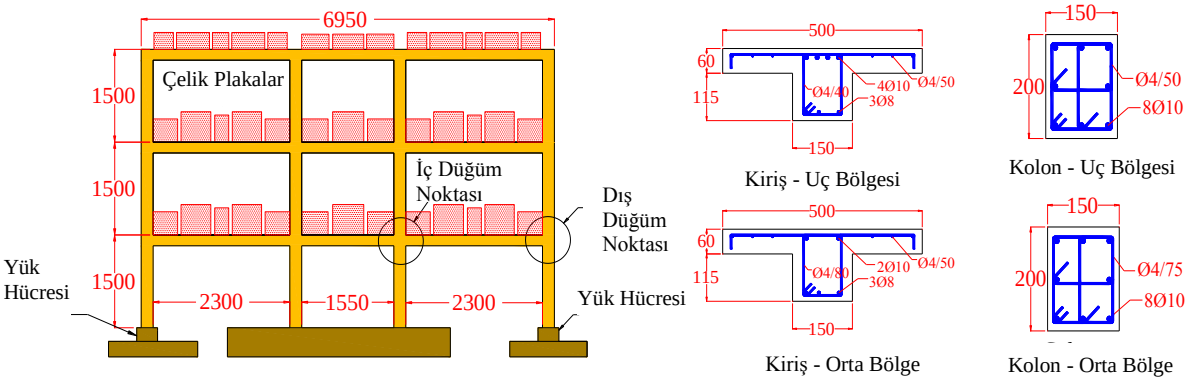
Dinamik deneyler binaların sismik performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan önemli araçlardır. Günümüzde, yapı mühendisliği uygulamalarında en sık kullanılan dinamik deney yöntemleri, Sarsma Tablası ve Dinamik Benzeri Deney yöntemlerdir. Sarsma tablası deneylerinde, yapılara deprem ivme kayıtları uygulanır ve bu sayede atalet etkileri gerçekçi bir şekilde temsil edilir. Diğer yandan, Dinamik Benzeri Deney yönteminde deplasman-zaman tarihçesi gerçek zamanda serbestlik derecelerine uygun olarak oluşturulmuş olan hareket denklemi adım adım integrasyon yöntemi ile çözülerek oluşturulur.

Bu çalışmada, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007) ve ACI-ASCE Committee 352 Recommendations (ACI 352-02) dökümanlarında belirtilen kurallar göz önünde bulundurularak tasarlanmış, 1/2 ölçekli, üç katlı, üç açıklıklı bir betonarme çerçeveye dinamik benzeri deney sistemi kullanılarak 1999 Düzce yer hareketi dört farklı ölçekte arka arkaya uygulanmıştır. Yer hareketleri sert zemin için 50 yılda aşılma olasılığı %50, %10 ve %2 olan 3 adet spektrumdan ve zemin etkisini gözlemlemek amacıyla 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan yumuşak zemini temsil eden bir adet spektrumdan oluşmaktadır. Deney sonuçları kullanılarak çerçevenin davranışına ek olarak kolon-kiriş birleşim noktalarının performans değerlendirmesi yapılmıştır. Numunenin iç birleşim bölgesinde gözlemlenen ileri seviyedeki kesme deformasyonları nedeniyle göçme mekanizması oluşmuştur. Bu mekanizma nedeniyle düğüm noktaları kapasitelerine ulaştığından DBYBHY 2007 ve ACI 352-02 dökümanlarına göre birleşim bölgelerinin mukavemetleri karşılaştırılmıştır.

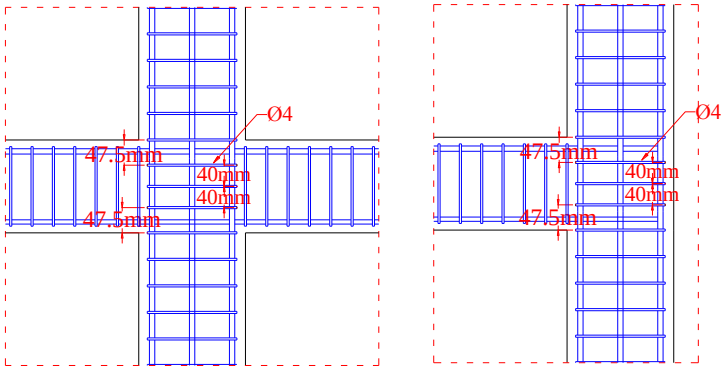
2. DENEY YÖNTEMİ

Bu araştırmada 1/2-ölçekli, üç katlı, üç açıklıklı bir betonarme çerçeve dinamik benzeri deney sistemi kullanılarak incelenmiştir. Çerçeve, DBYBHY 2007 kullanılarak tasarlanmış, birleşim bölgesi donatı detayları ACI 352-02 minimum kriterlerini sağlayacak şekilde arttırılmıştır. Tasarım sonucu elde edilen donatı detayları Şekil 1'de gösterilmektedir. Döşemenin kiriş davranışına ve birleşim bölgesine uyguladığı sargılama etkisini göz önünde bulundurmak ve aynı zamanda çelik plakalarla uygulanan düşey yükleri güvenli bir şekilde taşımak için T-kesitli kirişler kullanılmıştır. Deney elemanlarında beton basınç dayanımı 20 MPa, boyuna ve enine donatıların akma ve nihai dayanımları sırasıyla 434 MPa, 630 MPa, 250 MPa ve 370 MPa olarak ölçülmüştür.

Bu çalışmada davranışları irdelenen iç ve dış kolon-kiriş birleşim bölgeleri Şekil 1'de ve bu elemanların donatı detayları Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekillerde de görüleceği üzere iç ve dış düğüm noktalarında 4 mm çapında etriyeler 40 mm aralıkla yerleştirilmiştir.

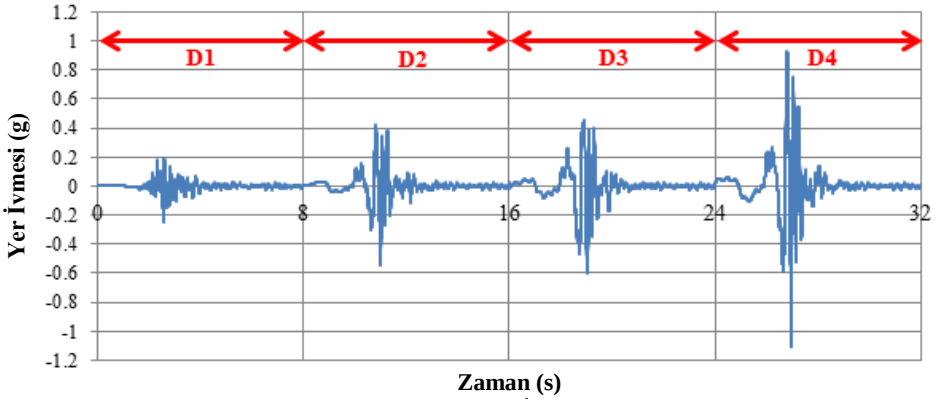


Şekil 1. Deney Numunesi ve Donatı Detayları (Tüm uzunluklar mm'dir.)



Şekil 2. İç ve Dış Birleşim Bölgelerinin Donatı Detayları

Her kat seviyesine yerleştirilen deplasman kontrollü hidrolik pistonlar sayesinde Düzce kenti için sentetik olarak üretilen ivme-zaman tarihçeleri numunelere uygulanmıştır. Farklı hasar seviyelerini temsil eden dört ardışık depremin özelliklerini özetlemek gerekirse; D1, D2 ve D4 sırasıyla 50 yılda %50, %10 ve %2 aşılma olasılığı olan ve sert zemin için üretilen deprem kayıtları iken, D3 yumuşak zemin için 50 yılda %10 aşılma olasılığı göz önüne alınarak üretilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Uygulanan Yer Hareketi İvme-Zaman Tarihçeleri

Şekil 4'te deney düzeneği ile kat deplasmanlarını ve elemanlarda görülen deformasyonları ölçmek için kullanılan enstrümentasyon gösterilmektedir. Kiriş ve kolonların uç dönmelerini elde etmek için elemanların her iki yüzüne lineer deformasyon ölçerler takılmıştır. Birinci katta bulunan bir iç ve bir dış düğüm noktasının kesme deformasyonlarını ölçmek için birleşim bölgelerine iki adet dikey yönde, iki adet yatay yönde ve iki adet de çapraz lineer deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Birinci katta dış kolonların altına, temel seviyesinin üstüne, eksenel yükleri, kesme kevvetlerini ve momentleri ölçen iki adet yük hücresi (Canbay ve ark. 2004) bağlanmıştır.

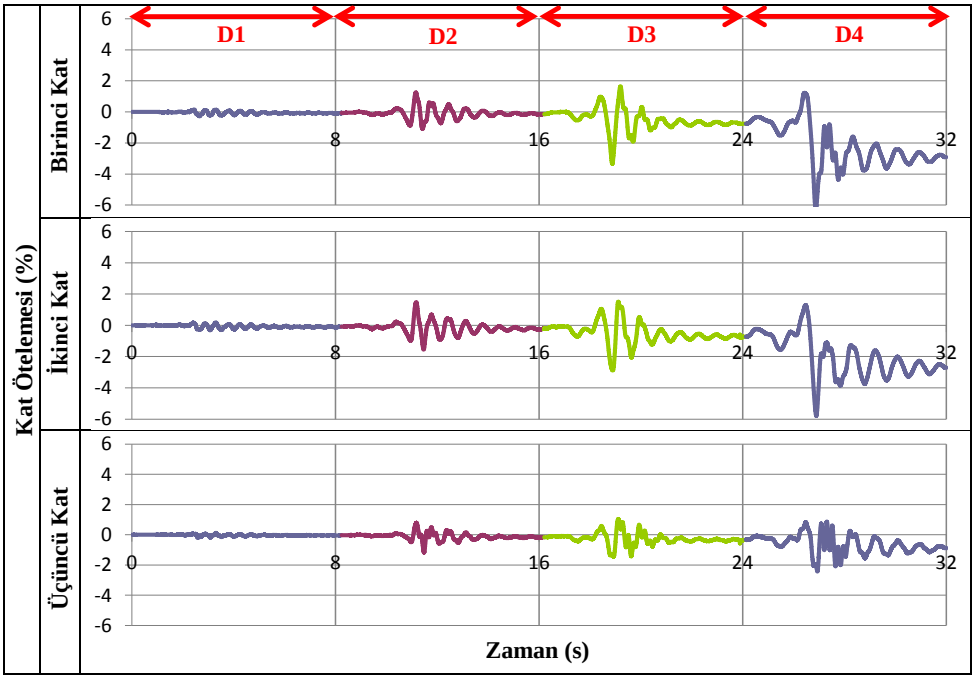
Şekil 4. Deney Düzeneği ve Enstrümentasyon

3. DENEY SONUÇLARI

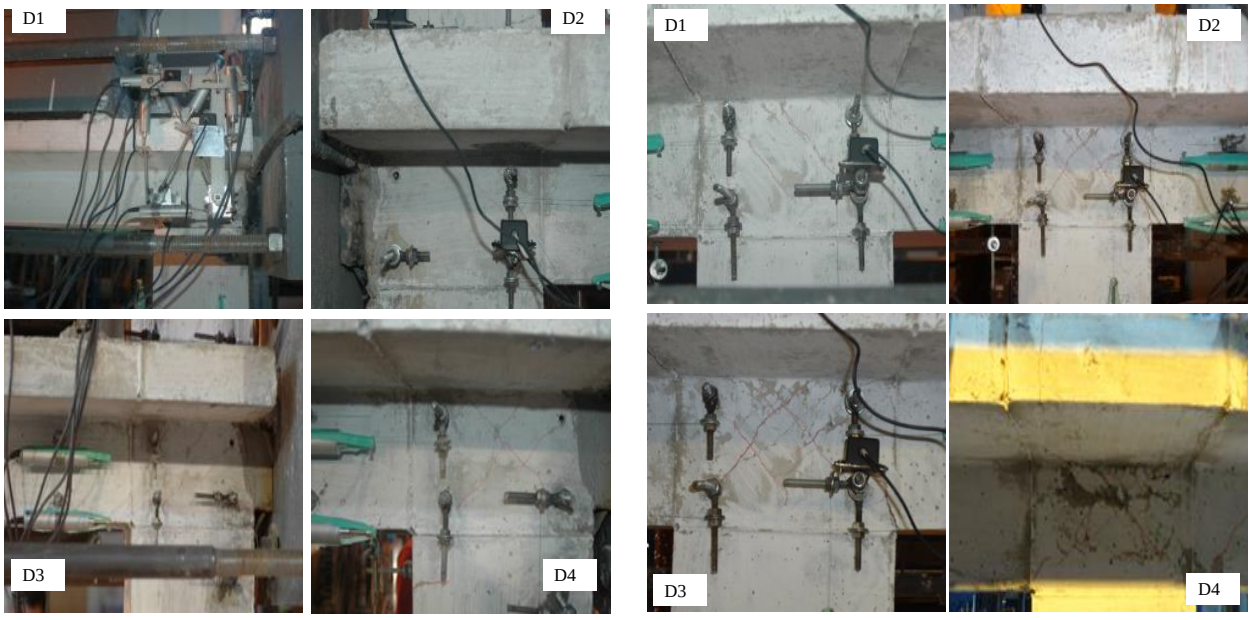
3.1 Kat öteleme değerleri ve gözlenen hasar

Kat ötelemeleri, üst ve alt kat deplasmanlarının farkının kat yuksekliğine oranı olarak hesaplanmış ve zamana göre değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. D1 yer hareketi çerçeveye uygulandığında kat öteleme değerleri çok düşük seviyeler olan -%0,3 ve %0,2 arasında kalmıştır. D2 yer hareketi sırasında da tüm katlar için kat öteleme değerleri DBYBHY 2007'nin üst sınırı olan %2'den düşüktür. Aynı aşılma olasılığına sahip, yumuşak zemin için üretilen D3 yer hareketi çerçeveye uygulandığında kat ötemeleri %2-%3 aralığında kalmıştır. D4 depremi uygulandığında ise, yer hareketinin pik ivme değerinde iç düğüm noktasında göçme mekanizması oluştuğu için tüm kat ötemeleri belirgin biçimde artmıştır.

Şekil 6 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere birleşim bölgelerindeki kesme çatlaklarının sayısı ve genişliği uygulanan deprem şiddeti arttıkça artmaktadır. D1 yer hareketi için, birinci katın iç birleşim bölgesinde kılcal çatlaklar gözlenmiş, fakat dış birleşim bölgesinde ya da üst katlardaki birleşim bölgelerinde hiç bir çatlak oluşmamıştır. D2 yer hareketi uygulandığında, çatlak sayısı birinci katın iç birleşim bölgesinde artmış, ancak çatlaklarda genişleme olmamıştır. İç birleşim bölgelerinde kirişle kolonun kesiştiği yüzeyde kılcal çatlaklar oluşmuştur. Birinci katın dış birleşim bölgesinde az sayıda çatlak gözlenmiştir. D3 yer hareketi uygulamasında, birinci katın iç birleşim bölgesinde çatlak sayısı ve genişliği belirgin ölçüde artmış ve kabuk beton dökülmeye başlamıştır. Ayrıca, kirişle kolonun kesiştiği yüzeydeki çatlaklar genişlemiş, iki elemanın birbirinden ayrıldığı gözlenmiştir. İkinci kat iç birleşim bölgelerinde çapraz kılcal çatlaklar oluşmuştur. Birinci katın dış birleşim bölgelerinde çatlak sayısı artmış, ancak çatlak genişliklerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. D4 yer hareketinin uygulanması sırasında birinci katın iç birleşim bölgelerinde çatlak sayısı ve genişliği artmaya devam etmiş, hem birleşim bölgesinde hem de kirişle kolonun kesiştiği yüzeyde kabuk betonun belirgin bir şekilde döküldüğü gözlemlenmiş ve sonuç olarak iç birleşim bölgesinde bir göçme mekanizması oluşmuştur. Birinci katın dış birleşim bölgelerinde çapraz çatlakların sayısı artmış, fakat genişlikleri iç birleşim bölgesindekilerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde küçük kalmıştır. İkinci katın iç birleşim bölgelerinde de çatlak sayısı ve genişliği artmıştır. Eğilme ve kesme çatlakları çoğunlukla ilk katın elemanlarında yoğunlaşmış, ikinci katta daha az ve dar çatlaklar gözlemlenmiş ve üçüncü katta hiç bir çatlağa rastlanmamıştır.



Şekil 5. Kat Ötelemeleri



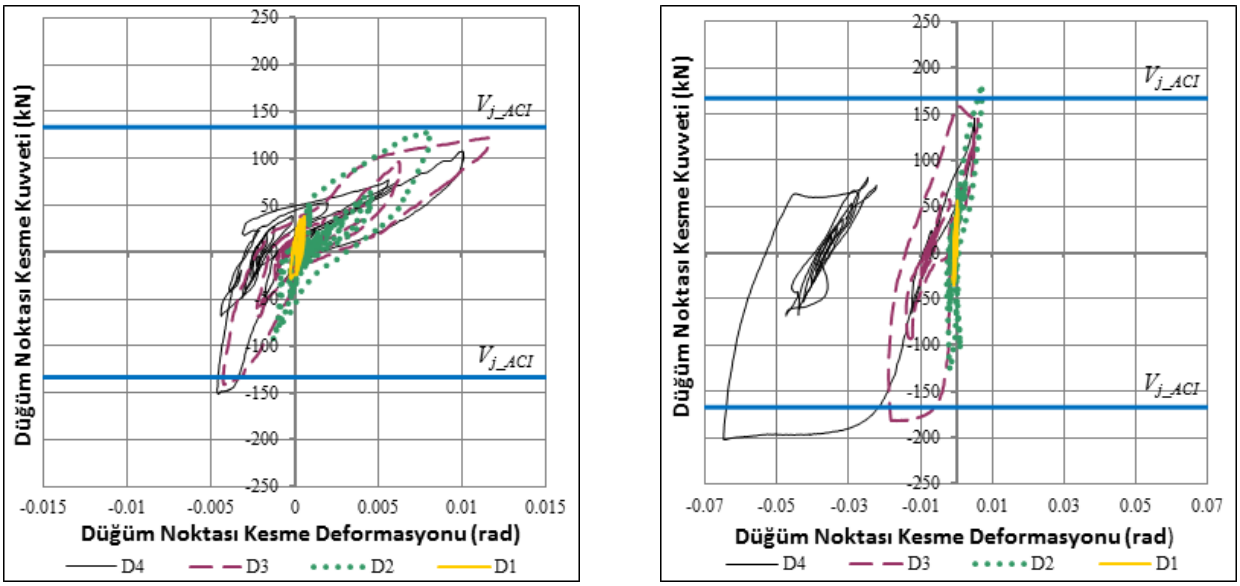
Şekil 6. (a) Dış, (b) İç Birleşim Bölgelerindeki Hasar

3.2 Düğüm Noktalarının Kesme Kuvvetine Karşı Kesme Deformasyonu İlişkileri

Düğüm noktalarındaki kesme deformasyonları bu bögeye yerleştirilen dikey, yatay ve çapraz lineer deplasman ölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak ve kosinüs kanunundan yararlanılarak (Denklem 1) elde edilmiştir. Bu denklemde, γ_j , düğüm noktasının kesme deformasyonudur. L'_h, L'_v ve L'_d , sırasıyla, yatay, dikey ve çaprazda orijinal uzunluğa lineer deplasman ölçerlerden elde edilen deformasyon değerleri eklenerek bulunur.

Düğüm noktalarının kesme kuvveti, kirişlere yerleştirilen lineer deplasman ölçerlerden ve kolonların altına yerleştirilen yük hücrelerinden elde edilen veri kullanılarak hesaplanmıştır. Düğüm noktalarının kesme kuvvetine karşı kesme deformasyonu ilişkileri Şekil 7 (a) ve (b)'de verilmiştir.

$$\gamma_j = -\frac{\pi}{2} + \arccos\left(\frac{L'_v{}^2 + L'_h{}^2 + L'_d{}^2}{2\,L'_h\,L'_v}\right) \tag{1}$$



Şekil 7. (a) Dış, (b) İç Düğüm noktalarının kesme kuvvetine karşı kesme deformasyonu ilişkileri

Düğüm noktalarının kesme dayanımları (V_j) DBYBHY 2007'ye göre hesaplanırsa, hem iç hem dış birleşim bölgeleri kuşatılmamış olarak tanımlanacağından Denklem 2 kullanılarak dayanım 270 kN olarak elde edilmiştir. Bu değer, Şekil 7'de görüleceği üzere, deneyde elde edilen kesme kuvvetlerinden çok yüksektir. Bu da, DBYBHY 2007'de önerilen denklemin düğüm noktalarının kesme mukavemetlerini gerçekçi bir şekilde yansıtmadığını göstermektedir. Bu nedenle, kesme dayanımının ACI 352-02 dökümanında önerilen Denklem 3 kullanılarak hesaplanması daha güvenli olacaktır.

$$V_j = 0.45\, b_j\, h_c\, f_{cd} \text{ (MPa)} \tag{2}$$

$$V_j = 0.083\gamma\sqrt{f_{cd}}\, b_j\, h_c \text{ (MPa)} \tag{3}$$

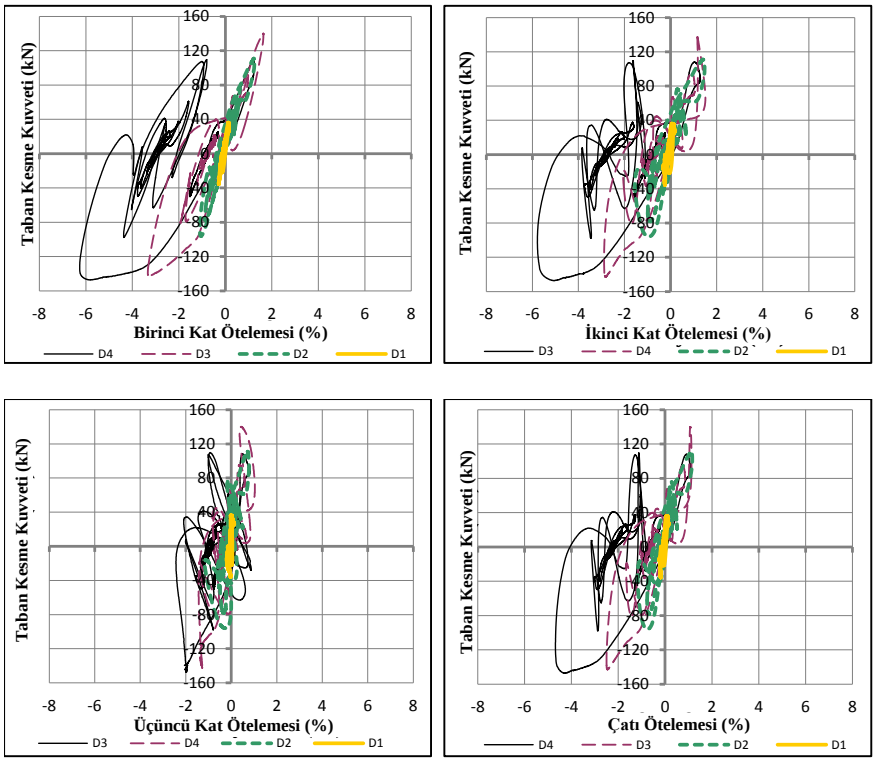
Bu denklemlerde, γ, birleşim bölgesine iki yönde bağlanan kirişler tarafından sağlanan sargılama etkisini gösteren katsayı, h_c, yükleme yönündeki kolon enkesit boyutu ve b_j, efektif düğüm noktası genişliğidir. ACI 352-02 dökümanında b_j, DBYBHY 2007'den farklı olarak Denklem 4'te verilen değerlerin en küçüğü olarak tanımlanmaktadır.

$$b_j = \frac{b_b + b_c}{2}; \quad b_j = b_b + \sum\frac{m\cdot h_c}{2}; \text{ ve } b_c \tag{4}$$

Bu denklemde, b_b, kirişin gövde genişliği, b_c, kolonun yükleme yönüne dik enkesit boyutu ve m, kolon ve kirişin ağırlık merkezleri arasındaki eksantrisiteye bağlı katsayıdır. Eksantrisite b_c/8'i geçtiğinde m=0.3, diğer bütün durumlarda, m=0.5 olarak alınır.

D1 depreminin uygulanması sonucu tüm elemanlar üzerinde sadece kılcal çatlaklar oluşması nedeniyle çerçeve minimum hasar performans seviyesine sahip görünmektedir. Ayrıca, ilk deney sonunda kesme deformasyonları dış (Şekil 7-a) ve iç (Şekil 7-b) birleşim bölgelerinde sırasıyla % 0.1 ve % 0.2'den az olup çok düşük seviyelerdedir.

D2 depremi uygulandığında, çerçeve güvenlik performans seviyesinde kabul edilebilir, çünkü yük taşıyan elemanlarda ileri derecede hasar gözlenmemiştir. Dış ve iç birleşim bölgelerinde kesme deformasyonları kritik seviye olarak tanımlanabilecek %1 sınırının altındadır. Ayrıca, tüm kat ötelemeleri ve çatı ötelemesi %2'den daha düşüktür (Şekil 8). D3 ve D2 yer hareketleri aynı aşılma oranına sahip olmakla birlikte, D3 depremi yumuşak zemin için üretildiğinden, bu deprem uygulandığında elemanlarda D2 depremine kıyasla daha belirgin deformasyonlar görülmüştür. Daha önce de belirtildiği gibi, çatlak sayısı ve genişliği önemli ölçüde artmış ve kabuk betonun döküldüğü gözlenmiştir. Kesme deformasyonları dış birleşim bölgesinde %1'i aşmış, iç birleşim bölgesindeyse %2'ye ulaşmıştır. Şunu belirtmek gerekir ki, iç kirişin kolonla kesiştiği yüzeyde gözlenen çatlakların genişlemesinden dolayı, iç birleşim bölgesine bağlanan iç kirişin uç dönmesi, aynı birleşim bölgesine bağlanan dış kirişin uç dönmesinden daha fazladır. Birinci ve ikinci katların kat ötelemeleri ve çatı ötelemesi, DBYBHY 2007'nin %2 sınırını aşmış, fakat çerçeve yük taşıma kapasitesinde bir azalma görülmemiştir. Son uygulanan yer hareketi olan D4 depremi sırasında, iç birleşim bölgesinde kesme deformasyonu belirgin bir biçimde artmış ve göçme mekanizması oluşmasına neden olmuştur. Bunun üzerine, çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde azalmıştır (Şekil 8). Dış birleşim bölgesinin kesme deformasyonu D3 depremindeki değere kıyasla azalmış ve hiç yeni çatlak oluşmamıştır. Bunun nedeninin dış kirişin uç dönmesindeki artış olduğu düşünülmektedir; bu da, kirişlerle birleşim bölgelerinde görülen plastik deformasyonların birbirini etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, birleşim bölgeleri ve kirişlerin performans değerlendirmelerinde her iki elemandaki deformasyonlar göz önüne alınmalıdır.



Şekil 8. Taban kesme kuvvetine karşı Kat Ötelemeleri İlişkileri

4. SONUÇLAR

Bu makalede, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Yapı Mühendisliği Laboratuvarında betonarme çerçeve binalar üzerine yapılan performans değerlendirme araştırmalarının bir parçası olarak, kolon-kiriş birleşim bölgelerinin sismik davranışı incelenmiştir. 1/2-ölçekli, üç katlı, üç açıklıklı betonarme çerçevenin bir dış ve bir iç birleşim bölgesi kesme deformasyonlarını elde etmek amacıyla lineer deplasman ölçerlerle donatılmıştır. Numune çerçeveye dinamik benzeri deney sistemi kullanılarak 1999 Düzce yer hareketi dört farklı ölçekte arka arkaya uygulanmıştır. Birleşim bölgelerinde gözlenen kesme deformasyonları ve hasara bağlı olarak bu bölgelerin performansları değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- DBYBHY 2007 ve ACI 352-02 dökümanlarında belirtilen kurallara uygun olarak tasarlanan bir çerçevede bile düğüm noktasında görülen ileri seviyedeki kesme deformasyonları nedeniyle göçme mekanizması oluşabilmektedir. Bu da, tasarımda ve doğrusal olmayan analizlerde birleşim bölgelerinin yalnızca mukavemetlerinin değil, deformasyonlarının da hesaba katılması gerektiğinin önemli bir göstergesidir.
- İç birleşim bölgesinde artan kesme deformasyonları nedeniyle göçme mekanizması oluşmasına ve çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesinin azalmasına rağmen, uygulanan düşey yük taşınabilmiştir.
- Kat ötelemeleri ve çatı ötelemesi DBYBHY 2007'de verilen limitin altında kaldığı yüklemelerde bile taşıyıcı elemanların bazılarında ileri seviyede hasar gözlenmiştir. Bu nedenle, yapının performans değerlendirmesinde eleman davranışları, birleşim bölgeleri de dahil olmak üzere, ayrı ayrı kontrol edilmelidir.
- Bu çalışmada, zemin tipinin etkisi de incelenmiş ve aynı aşılma olasılığına sahip depremler için, daha yumuşak zeminlerin, taşıyıcı elemanların sismik performansında olumsuz etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.
- Deney sonuçları, birleşim bölgelerinin kesme deformasyonları ile kiriş uç dönmeleri arasında bir etkileşim olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, kirişlerin sismik performansı değerlendirilirken uç dönmelerini doğru tahmin edebilmek için birleşim bölgelerindeki kesme deformasyonlarının etkileri analitik modellere dahil edilmelidir.

KAYNAKLAR

ACI-ASCE Committee 352 (2002). Recommendations for design of beam-column connections in monolithic reinforced concrete structures. *ACI 352R-02*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (2006). Seismic rehabilitation of existing buildings. *ASCE SEI 41*, Reston, Virginia.

Canbay, E., Ersoy, U., Tankut, T., (2004). A three-component force transducer for RC structural testing, *Engineering Structures*, 26, 257–265.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) (2007). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *FEMA 356*, Washington, D.C.