TERSİNİR YÜKLER ALTINDA DOLGU DUVARLARIN BETONARME ÇERÇEVELERİN RİJİTLİK, DAYANIM, ÖTELENME PROFİLİ ve DOĞAL FREKANSLARINA ETKİSİ

M.A. Çankaya[1] ve C. Dönmez[2]

[1]*Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir*
[2]*Yardımcı Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir*
E-mail: cemalettindonmez@iyte.edu.tr

ÖZET:

Dolgu duvarlar tipik olarak yapı davranışını doğrudan etkilemeyen ikincil yapı elemanı olarak görülürler. Davranışlarının modellenmesindeki zorluktan ve tam anlaşılmamış olmaktan dolayı da mevcut yapı şartnamelerinin birçoğunda yer almazlar. Bu çalışmada dolgu duvarların tekrarlı tersinir yükler altında betonarme çerçevelerin rijitlik, dayanım, ötelenme profili ve doğal frekanslarına olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla ölçekli, dört katlı, tek açıklıklı çerçeveler kullanılmıştır. Çalışmanın değişkenleri dolgu duvarın mevcudiyeti ve sünek veya gevrek davranışa yol açacak şekilde seçilmiş donatı detayıdır. Her bir çerçeve kat seviyelerinden uygulanan yatay yüklerle ters üçgen yükleme profiline maruz bırakılarak önceden belirlenen ötelenme seviyelerine ulaştırılmıştır. Deneyler sırasında sistemlerde oluşan hasar, kat seviyelerindeki yükler ve ötelenmeler kaydedilmiştir. Ayrıca her bir hasar seviyesinde darbe çekici uyarıları verilerek çerçevelerin dinamik değişkenlerinin kestirilmesi amacıyla veriler alınmıştır. Beklenildiği üzere dolgu duvarların çerçevelerin rijitlik ve yanal yük dayanımlarını arttırdığı gözlenmiştir. Diğer taraftan uygulanan yüke karşılık ötelenme değerleri düşmekle beraber şekil değiştirme birinci kata odaklanmış ve bu katta yoğunlaşan bir hasara neden olmuştur. Kolonlardaki erken göçmelerin engellenebilmesi durumunda rijitlik ve dayanımdaki artış ile beraber dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin deprem talepleri altında görece elverişli bir duruma geçebileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmada yapılan dinamik ölçümlerden doğal frekansların artan hasarla birlikte düştüğü ve çerçeve frekanslarının dolgu duvarlardan büyük ölçüde donatı detayından ise zayıf bir şekilde etkilendiği gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Dolgu Duvar, Betonarme Çerçeve, Tersinir Yükler, Doğal Frekanslar

1. GİRİŞ

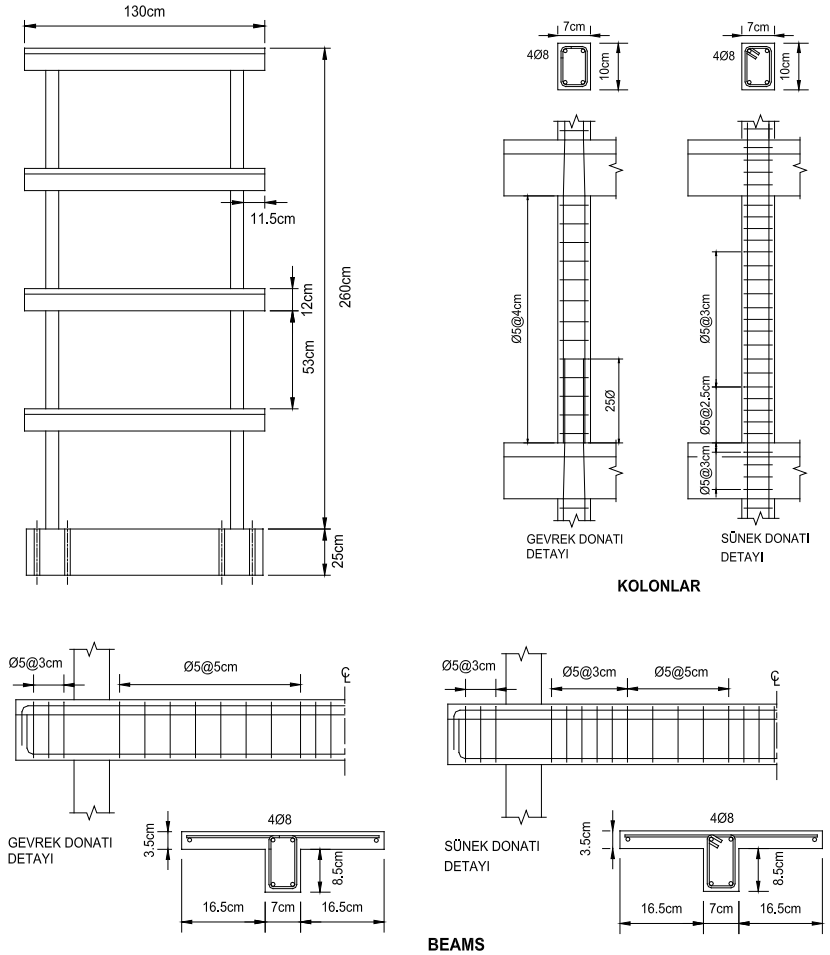
Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışları uzun yıllardır inceleniyor olmakla beraber, konu üzerinde henüz tam bir fikir birliği sağlanabilinmiş değildir. Yapılan çalışmalar genellikle sistemlerin rijitlik, dayanım, enerji sönümleme, dolgu duvar yerleşimi ve dolgunun şekli üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmaların sonucunda dolgu duvarların yapıların rijitliğini artırarak periyotlarını düşürdüğü, enerji emme kapasitesinin artırdığı ve bu sebeplerle yapıya gelen yük taleplerini azaltma potansiyeli ile beraber yanal yük taşıma kapasitelerini de artırdığı görülmüştür. (Negro P. ve Colombo A. 1996, Mosalam K. M. ve ark. 1997, H.S. Lee ve Woo S. W. 2001, Hashemi ve Mosalam 2006). Bu değişimlerin yapısal davranışı olumlu yönde etkilemekle birlikte dolgu duvarlı sistemlerin ötelenme kapasitesinde önemli ölçüde bir azalma olduğu, yanal yük taşıma kapasitesinin ve yüksek rijitlik değerlerinin görece erken ötelenme değerlerinden sonra korunamadığı gözlemlenmiştir. (Mehrabi ve ark. 1996, Dolsek ve Fafar 2008, Pujol ve Dick 2010).

Burada sunulan çalışmadaki ana amaç dolgu duvarlı betonarme çerçevede ki yanal yük taşıma dayanımının kat ötelenme dağılımı ile birlikte nasıl değiştiğinin ve dinamik değişkenlerin farklı hasar seviyesindeki değişimlerini incelenmesidir.

2. TEST PROGRAMI

Dört adet tek açıklıklı, dört katlı düzlem çerçevenin tasarım, imalat ve deneyi yapılmıştır. Çerçeveler dolgu duvarlı/duvarsız ve sünek/gevrek donatı detaylı olmak üzere iki ana değişken üzerinden tasarlanmıştır. Burada sünek/gevrek donatı detayı, kiriş ve kolonlardaki etriye aralıklarının, kiriş kolon düğüm bölgesindeki etriyelerin ve kolonlardaki boyuna donatıların bindirme boylarının yönetmeliğe (DBYBHY, 2007) uygun ve uygun olmayan kullanımları ile elde edilmiştir. Her bir çerçeve 1/5 ölçeğinde imal edilmiştir. Çerçeveler herhangi bir orjinal yapıyı örnek almamıştır. Ölçekleme de kolonlardaki eksenel yük seviyesi ve olası doğal frekanslar ana değişkenler olarak alınmıştır. Gerçek hayattaki kütle-rijitlik ilişkisini benzetebilmek için kat seviyelerinde ek kütleler (~1600 kg) eklenmiştir. İlk iki çerçeve dolgu duvarsız olup sırasıyla gevrek ve sünek donatı detaylarına sahiptirler. Diğer iki çerçeve ise dolgu duvarlı olup sırasıyla yine gevrek ve sünek donatı detaylarına sahiptirler.

Çerçevelerin geometrisi ve donatı detayları Şekil 2.1 de verilmiştir. Zemin bağlantısını sağlamak amacıyla kuvvetli bir temel kirişi imal edilmiş ve çerçeveler bağlantı çubuklarıyla laboratuvarın kuvvetli zeminine bağlanmıştır. Birinci çerçeve hariç herbir çerçevenin eleman boyutları eştir. Birinci çerçevenin kiriş ve tabla boyutları daha rahat beton dökümüne izin vermek için değiştirilmiştir (kiriş 5x9 cm, döşeme 40x3cm).



Şekil 2.1 Çerçeve geometrisi ve donatı detayları

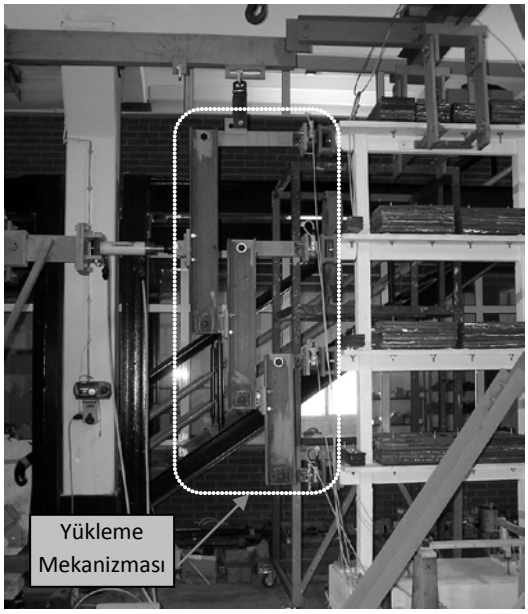
Çerçeve betonları 25 ile 40 MPa (deney günlerinde ölçülmüş) ortalama silindir dayanımlarına sahiptir. Çerçeve ana donatıları S420, etriyeler ise 420 Mpaakma dayanımına sahip soğuk çekilmiş telden imal edilmiştir. Dolgu

malzemesi olarak doluluk oranı %50 civarında olan kil tuğlalar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan 5.7x10x13 cm'lik tuğlalar 13x18.5x28 cm boyutlarındaki ticari tuğlalardan kesilerek elde edilmişlerdir. Üçüncü çerçeve dolgu duvarlarında kullanılan harç 4:4:15 oranlarında, 4. çerçeve dolgu duvarında kullanılan harç ise 4:4:16 çimento:kireç:kum oranlarına sahiptir.
Çerçeveler, heri bir kat döşeme seviyesinden olmak üzere dört noktadan yüklenen ters üçgen bir profile sahip yüke maruz bırakılmıştır. Yükleme profili korunarak arttırılan yük şiddetlerinde çerçeveler sözde statik olarak önceden belirlenmiş ötelenme seviyelerine ulaşan yük döngülerine maruz bırakılmış ve her bir yükleme döngüsünden sonra darbe çekici ile verilen uyarılarla titreşim kayıtları alınmıştır.

3. TERSİNİR YÜKLEME DENEYLERİ

Yüklemeler, sisteme yanal olarak tek noktadan verilen 10 birim yükü en üst döşeme seviyesinden başlamak üzere 4-3-2-1 birim şeklinde kat seviyelerine dağıtabilecek bir yapıda tasarlanan yükleme sistemi kullanılarak uygulanmıştır (Şekil 3.1). Kat seviyelerine yerleştirilen yük hücreleri ve yer değiştirme ölçerler vasıtasıyla katlara gelen yanal kuvvetler ve ötelenmeler izlenmiştir.

Yük seviyesinin belirlenmesinde kullanılan 1. kat katarası ötelenme oranları Tablo 3.1'de verilmiştir. Üçüncü ve 4. çerçevelerin yanal yük kapasitesinde ve rijitliğindeki azalmanın görece daha erken ötelenme yüzdelerinde başlayacağı düşünülerek, katarası ötelenme miktarları ilk iki çerçeveye kıyasla düşük tutulmuştur. Çerçevelerin aynı seviyedeki tekrarlı talepler altında kararlılıklarını izleyebilmek amacıyla her bir döngü grubu için aynı ötelenme seviyesinde iki döngü uygulanmıştır. Birinci çerçevenin ilk iki döngü grubu hariç, yükleme profili başarılı bir biçimde uygulanmıştır.



Şekil 3.2 Yükleme mekanizması

Tablo 3.1 Döngü grupları ve her bir gruptaki 1. kat seviyesinde ulaşılan kat arası ötelenme oranları (%)

	1.Döngü Grubu	*2.Döngü Grubu*	*3.Döngü Grubu*	*4.Döngü Grubu*	*5.Döngü Grubu*	*6.Döngü Grubu*
1. Çerçeve	0.7	1.1	1.5	1.9	-	-
2. Çerçeve	0.7	1.1	1.5	2.1	2.5	3.6
3. Çerçeve	0.1	0.3	0.7	1.0	1.4	1.8
4. Çerçeve	0.1	0.3	0.6	0.9	1.5	2.0

Birinci ve 2. çerçevelerin 1. kat kolonlarında ilk döngü grubundan başlamak üzere eğilme çatlakları gözlemlenmiştir. İkinci döngü gruplarında, özellikle 1. kat kolonlarında oluşmuş eğilme çatlakları ilerleme göstermiştir. Ayrıca, yine 1. kat kiriş-kolon bağlantı bölgelerinde bu döngüde kesme çatlakları gözlemlenmiştir. İkinci çerçevede, 1. çerçeveden farklı olarak bu döngü grubunda eğilme çatlakları 3. kat kolonlarına sirayet etmiştir. Üçüncü döngü gruplarında mevcut çatlakların ilerleyişi ve yeni çatlakların oluşumunun yanısıra 1. kat kolonlarındaki eğilme çatlaklarının bir kısmı eğilme-kesme çatlaklarına dönüşmüştür. Birinci çerçeve 2. kat kolon ve kirişlerindeki eğilme çatlakları ağırlıklı olarak bu döngü grubunda ve ilerleyen gruplarda oluşmuştur. Dördüncü döngü grubu tamamlandığında, 1. çerçevenin 2. ve 3. kat kiriş kolon bağlantı bölgelerinde yeni kesme çatlakları oluşmuştur (Şekil 3.2). Birinci çerçeve deneyi kat seviyelerindeki kütlelerin oluşturduğu risk ve olası gevrek göçme göz önünde alınarak bu seviyede durdurulmuştur. İkinci çerçeve 4. döngü grubu içerisinde 1. kat kolonlarının basınç bölgelerinde betonda ezilmeler gözlemlenmiştir (Şekil 3.2). İkinci çerçeve döngü grupları 1. kat katrası ötelenme oranı %3.4'e ulaşana kadar devam ettirilmiştir.

Birinci ve 2. çerçevelerin 1. kat histeresis eğrileri Şekil 3.3'te sunulmuştur. Donatıların aderansını kaybetmesinin bir işareti olarak ilk olarak 3. döngü grubu histerisis eğrilerinde büzdürme gözlemlenmiştir. İlerleyen döngü gruplarının histeresis eğrilerinde büzdürme giderek daha da belirgin bir hal almıştır. Birinci çerçeve en yüksek yanal yük taşıma kapasitesine 4. döngü grubunda 19.6 kN, 2. çerçeve ise 6. döngü grubunda 19.3 kN yük ile ulaşmıştır.

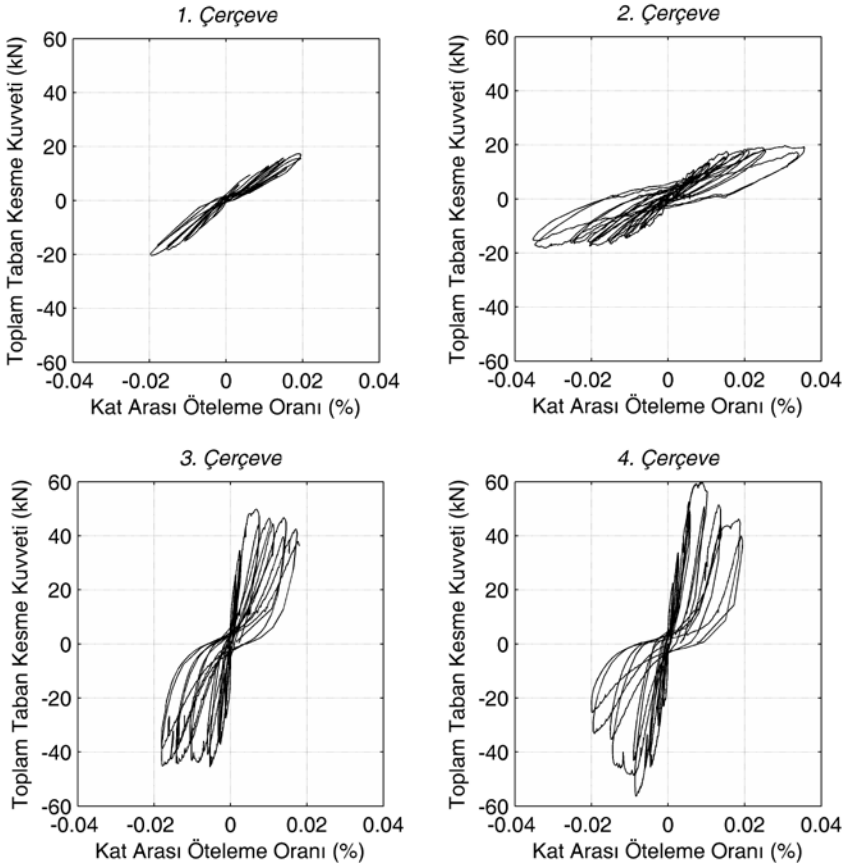
Şekil 3.3 Dördüncü döngü sonrası 1. çerçeve 2. kat kolonunda çatlak oluşumları ve 2. çerçeve 1. kat kolonunda beton ezilmesi

Üçüncü ve 4. çerçevelere altışar yükleme grubu uygulanmıştır. İlk iki çerçeveye benzer şekilde histeresis eğrileri doğrusallığı 3. döngü grubundan itibaren kaybetmeye başlayarak büzdürme etkileri görünmeye başlamıştır.

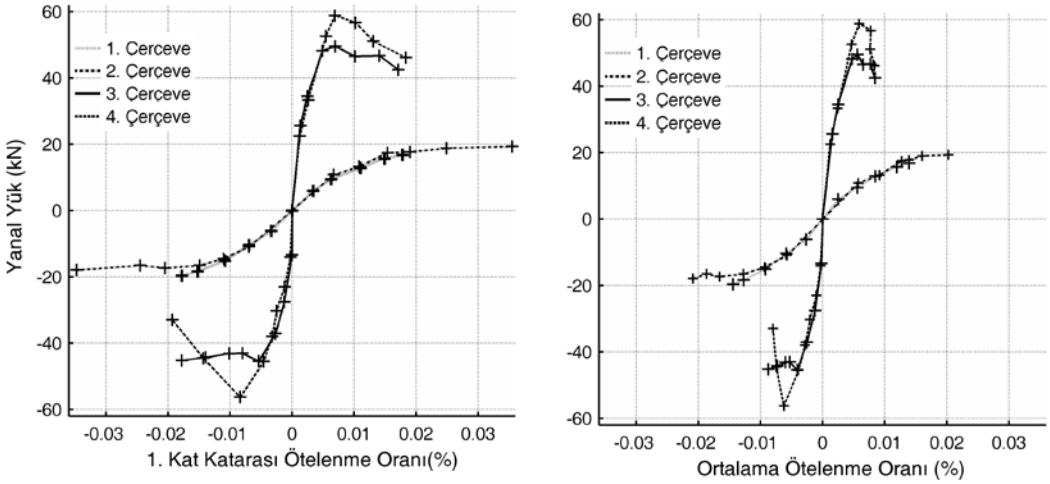
Döngü sayısı aynı olsa da söz konusu döngüde 3. ve 4. çerçeveler 1. ve 2. çerçevelerin 1. katta ulaştığı ötelenmeleri kabaca yarısına ulaşmış durumdadır. Üçüncü çerçeve 1. kat katarası ötelenmesi %0.5'e dördüncü çerçevede %0.9 değerine ulaştığında, taban kesme kuvvetleri en yüksek seviyeye erişmiştir. Birinci katta, ulaşılan bu ötelenme seviyesinde, 3. çerçeve 1. çerçevenin 2.5 katı (49.5kN), 4. çerçeve ise 2. çerçevenin 3 katı (59.7 kN) civarında taban kesme kuvveti seviyelerine ulaşmıştır. Üçüncü çerçeve ulaştığı kapasiteyi görece ufak düşüşlerle (%1 ila 14%) korumuşsa da 4. çerçevenin kapasitesinde zirve değerinden sonra ciddi düşmeler olmuştur (%24 ila %43, Şekil 3.4).

Dolgu duvarların çerçevedeki ötelenme profilini büyük ölçüde etkileyerek, taleplerin birinci katta yoğunlaşmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Dolgulu çerçevelerde 1. katta katarası ötelenme oranlarının %2 seviyelerinde olmasına rağmen, ortalamaya bakıldığında ötelenme oranları %1 seviyelerinin altına inmiştir (Şekil 3.4). Üçüncü çerçevenin gevrek, 4. çerçevenin sünek donatı detaylarına sahip olmasına rağmen çerçeveler benzer ötelenme kapasitelerine ulaşabilmiştir. Bu duruma dolgu duvar göçme modlarının farklılığı ve dolgu duvar ve çerçeve dayanımlarının göreli farklılığı sebep olmuştur. Üçüncü çerçeve dolgu duvarında göçme erken safhalarda başlamış, ağırlıklı olarak tuğlalar arasındaki harç tabakaları üzerindeki yatay eksenlerde kesme kayması şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 3.5). Döngüler esnasında duvar çeperindeki çerçeve yaygın hasara uğramakla birlikte sistemin göçmesi dolgu duvar kaynaklıdır. Hasar ve ötelenme katlar arasında görece daha düzenli dağılmıştır. Söz konusu davranış sonucu Şekil 3.5'de görüleceği üzere 3. çerçeve daha düşük yanal yük kapasitesine ulaşmakla birlikte kapasitesini büyük oranda deney sonlandırılana kadar korumuştur. Dördüncü çerçevede sistemin göçmesine 1. kat kolonlarında kesme ezilme göçmesinin oluşması sebep olmuştur. Bu esnada dolgu duvar görece bütünlüğünü korumuş ancak deneyin son aşamalarında köşelerde ezilme gözlenmiştir. Sistemden talep edilen ötelenmeler söz konusu göçme modu sebebiyle çok büyük oranda 1. kata odaklamıştır.

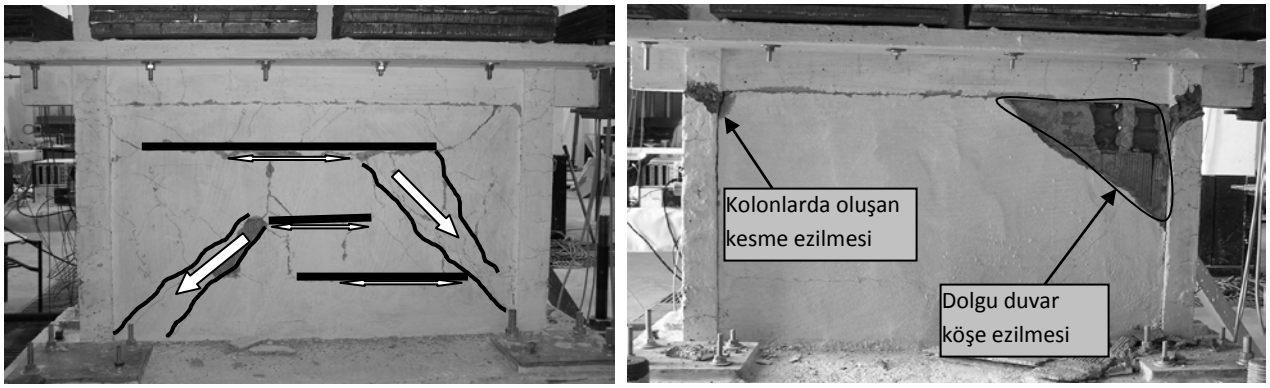
Ötelenmelerin çerçeve yüksekliğince dağılımına bakıldığında bütün çerçevelerde hasarla birlikte alt katlarda bir ötelenme odaklanması görülmekle beraber dolgulu çerçevelerde ki odaklanmanın çok daha etkin olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.6). Dolgu duvarlı çerçeveler arasında 4. çerçevede ötelenmeler 2. ve 3. katta daha da azalarak 1. kata yoğunlaşmıştır.



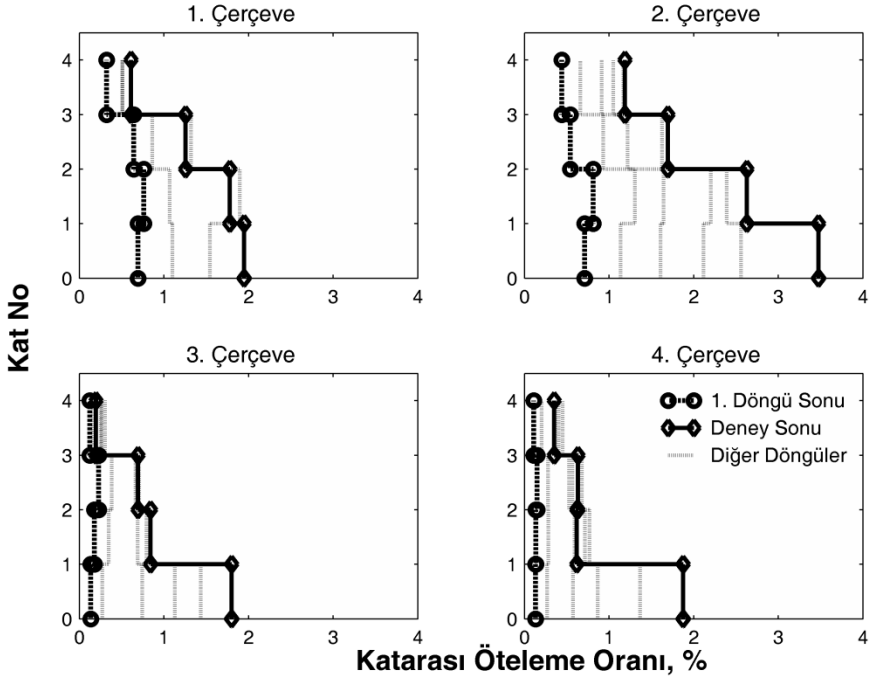
Şekil 3.4 Bütün döngüler için ölçülen 1. kat histeresis eğrileri



Şekil 3.5 Tüm çerçevelerin yük ötelenme zarf eğrileri



Şekil 3.6 Üçüncü ve dördüncü çerçeve 1. kat dolgu duvar ve kolonlarında göçme modları



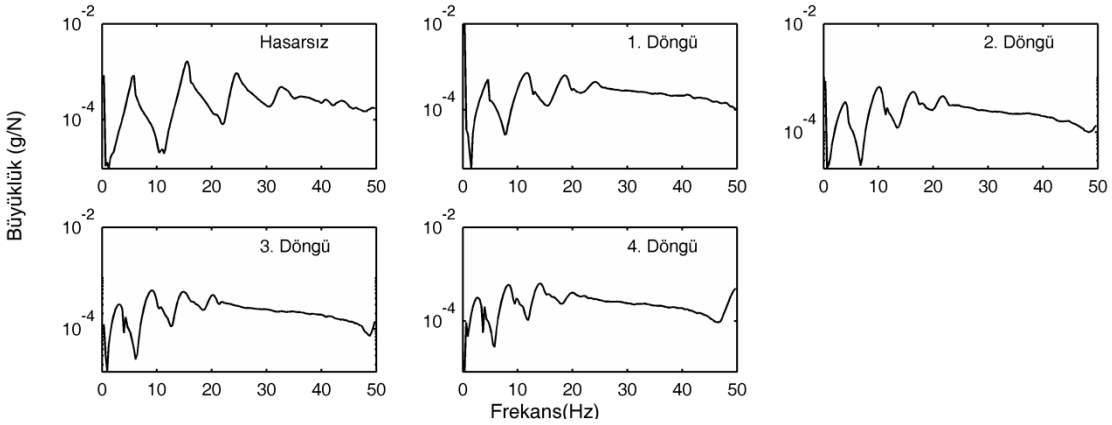
Şekil 3.7 Döngülerin en yüksek yük seviyelerindeki katarası öteleme oranlarının dağılımı

4. DARBE ÇEKİCİ VERİLERİ

Çerçevelerin verilen hasar altında dinamik değişkenlerinin gözlenebilmesi amacıyla her bir döngü grubu sonrası darbe çekici vasıtasıyla titreşim verileri alınmıştır. Çerçevelerin dinamik değişkenlerinin yükleme sisteminden etkilenmesini engellemek amacıyla yanal yükleme mekanizması darbe çekici uyarıları öncesi çerçevelerden ayrılmıştır. Çerçeveler kütlesi 11.5 kg olan darbe çekici ile dördüncü kat döşeme seviyesinden uyarılmıştır. Oluşan titreşimler kat kolonlarının yükseklik ortasına ve döşeme seviyelerine yerleştirilen 9 adet ivme ölçer vasıtasıyla kaydedilmiş ve çerçevelerden elde edilen titreşimler deneysel modal analiz yöntemleriyle işlenmiştir. Bu verilerin modal analiz yöntemiyle işlenebilmesi için modal analizin temel varsayımı olan doğrusallığın doğrulanması gerekir. Hasar görmüş betonarme çerçevelerde doğrusallık kontrolü bir tezat olarak görülse de farklı büyüklükte uyarılar altında kayıt noktalarından alınan veriler kullanılarak oluşturulan frekans yanıt

fonksiyonlarının (FYF) karşılaştırılması sonucu her bir hasar seviyesinde belirli frekanslara kadar çerçevelerin dinamik değişkenler açısından doğrusal kabul edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Doğrusallığın kontrolü ve çerçeveler için yapılan dinamik değişken kestirimleri ile ilgili detaylı bilgi Dönmez ve diğ. 2010'da bulunabilir.

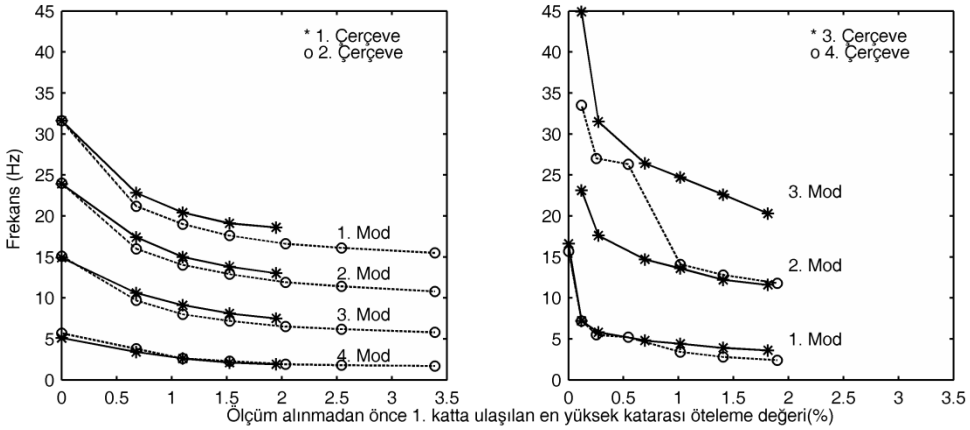
Birinci çerçeve için hasarsız durumda elde edilen 4. kat ivme kaydında sistemin hareketini 5 sn içerisinde sönümlediği ve FYF fonksiyonunda 50Hz altında doğal frekanslara işaret eden dört adet zirve oluştuğu gözlenmiştir. Artan hasar ile birlikte sistem yumuşamış ve zirveler başlangıç noktasına doğru kaymıştır (Şekil 4.1). Diğer çerçeve sistemleri için benzer FYF' lar elde edilerek dinamik değişkenler saptanmıştır. Bu bildiri de sadece doğal frekanslar ile ilgili bilgi verilecektir.



Şekil 4.8 Farklı hasar seviyelerinde 1 çerçeve 4. kat seviyesinden alınan veriler ile oluşturulan FYF

Dolgu duvarsız çerçevelerin doğal frekanslarındaki değişim karşılaştırmalı olarak Şekil 4.2' de sunulmuştur. Burada dolgu duvarsız çerçevelerin donatı detayları ve beton dayanımları haricinde özdeş olmaları göz önünde bulundurulursa doğal frekansların birbirlerine yakın olarak elde edilmesi şaşırtıcı değildir. Doğal frekanslar hasarsız durumdan sonra göreli olarak hızlı bir şekilde düştükten sonra ilerleyen hasar seviyelerinde düşüş miktarı azalma göstermiştir.

Son iki çerçevenin dolgu duvarları sebebiyle doğal frekansları yükseldiğinden söz konusu yeterli uyarı verilememiş ve bazı modlar gözlenememiştir. Üçüncü çerçeve için yalnızca ilk üç hakim frekans ve 4. çerçeve için ise ilk iki hakim frekansın kestirimi mümkün olmuştur. Bu sonuca yüksek frekansların yanı sıra sistemlerin doğrusallıktan sapma miktarının artması sonucu kestirelemeyen modlardaki sinyal gürültü oranlarının düşük olması da sebep olmuştur. Dolgu duvarlı çerçevelerin doğal frekanslarındaki değişim Şekil 4.2'de sunulmuştur. Çerçevelerin 1. modda 4. döngüye kadar frekansları yakın değerlere sahip olup bu döngüden sonra 4. çerçeve 1. kat kolon kafalarında oluşan ağır hasar nedeniyle frekans değerlerinde farklılaşma başlamıştır.



Şekil 4.9 Çerçevelerin hakim frekans değişimi

5. SONUÇ

Yapılan çalışmada dolgu duvarların çerçeve sistemlerin yanal rijitlik ve dayanımlarını önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Sonuçlardan gözlemlenebileceği üzere dolgu duvarların her ne kadar laboratuvar ortamında özdeş olarak üretilmesi planlamış olsa da imal edilen dolgu duvarlar farklı mekanik özelliklere sahip olmuş ve bu sebeple de çerçeveler farklı göçme davranışları sergilemiştir. Üçüncü çerçevede gözlemlendiği üzere harç yatakları boyunca oluşan hatlarda kesme kayması ile göçen dolgu duvarlar dayanımlarını büyük ölçüde koruyarak ötelenmeye izin vermişlerdir. Diğer taraftan 4. çerçevede dolgu duvarlarındaki yüksek kesme kapasitesi sebebi ile göçme kolonlarda oluşmuş ve sistem mevcut sünek donatı detayına rağmen yüksek dayanım kayıplarına uğrayarak erken ötelenmelerde göçmüştür. Dördüncü çerçevede oluşan yumuşak kat, 3. çerçeveye göre daha yüksek ötelenme yoğunlaşmalarına sebep olmuştur. Bu gözlemlere dayanarak betonarme elemanların erken göçmesinin önlenip, dolgu duvarların kontrollü göçmesini sağlayan mekanizmalar yaratılabilmesi durumunda dolgu duvarlı çerçevelerin tersinir yükler altındaki ötelenme davranışlarının iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Alınan titreşim kayıtlarından artan hasar ile birlikte bütün çerçevelerde doğal frekansların düştüğü ama dolgu duvarlı çerçevelerde düşüşün çok daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Yüksek orandaki düşmeye rağmen deney sonlarında dolgulu çerçevelerin doğal frekanslarının dolgusuz çerçevelerden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Donatı detayları arasındaki farkın doğal frekanslarda bir fark yaratmadığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

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

Dolsek, M. ve Fafar, P. (2008). The Effect of Infills on the Seismic Response of a Four-Storey Reinforced Concrete Frame – A Deterministic Assessment. *Engineering Structure,* **30**,1991-2001

Dönmez C., Altınkaya M., Aktaş E., Özen S. (2010) Modal Deney Yöntemi ile Betonarme Yapılarda Taşıyıcı Çerçeve Bölme Duvar Etkileşiminin İncelenmesi, TÜBİTAK Raporu, Proje No: 104I107

Hashemi, A. ve Mosalam, K. M. (2006). Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall. *Earthquake Engineering and Structural Dyn.,* **35**,1827-1852

Lee, H.S. ve Woo, S. W. (2002). Effect of Masonry Infills on Seismic Performance of a 3-Storey R/C Frame with Non-Seismic Detailing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, 353-378

Mehrabi AB, Shing PB, Schuller MP, Noland JL. (1996) Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering (ASCE)* **122:3**, 228-237.

Mosalam K. M., White R. N., Gergeley P. (1997). Static Response of Infilled Frames Using Quasi-Static Experimentation. *Journal of Structural Engineering (ASCE*), **123:11**, 1462-1469

Negro, P. ve Colombo, A. (1997). Irregularities Induced by Non-Structural Masonry Panels in Framed Buildings. *Engineering Structures*, **19:7**, 576-585

Pujol, S. ve Fick, D. (2010). The Test of a Full-Scale Three-Story RC Structure with Masonry Infill Walls. *Engineering Structures*, **32**,3112-311