YAPISAL ÇELİK ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME ÇERÇEVELERİN DİNAMİK BENZERİ DENEY PERFORMANSI

R. Özçelik[1], B. Binici[2], Ö. Kurç[2]
[1] *İnşaat Müh. Bölümü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya,*
[2] *İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara, e-posta: rozcelik@metu.edu.tr*

ÖZET:

Kusurlu betonarme yapıların depreme karşı güçlendirilmesi için iç ters V çelik çapraz (İTVÇÇ) ve iç çelik çerçeve (İÇÇ) olmak üzere iki farklı güçlendirme tekniği dinamik-benzeri (Pseudo-Dynamic) deney yöntemi uygulanarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında bir adet referans çerçevesi ve iki adet güçlendirilmiş çerçeve olmak üzere toplam 3 adet 1/2 ölçekli, iki katlı, üç açıklıklı çerçeveler test edilmiştir. Deney elemanları düz donatı, düşük beton dayanımı, yetersiz sargı donatısı gibi yapıların deprem davranışlarını olumsuz etkileyen ve ülkemizde mevcut kusurlu yapılarda görülen detaylar içerecek şekilde hazırlanmıştır. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) adlı Türk Deprem Yönetmeliğinde (TDY) bulunmayan İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirme teknikleri için kullanılan deney elemanlarına 1999 Düzce yer hareketinin Kuzey-Güney bileşeni % 50, 100, 140, 180 ve 220 olmak üzere beş farklı ölçekte arka arkaya uygulanmıştır. Deney sonuçları referans çerçevesinin %140 ölçekli Düzce deprem kaydı sırasında ağır hasar aldığını göstermiştir. Bunun yanında sözkonusu iki adet güçlendirme yöntemi kullanılarak kusurlu bir yapının yatay yük taşıma kapasitesi, yatay rijitlik ve sünekliğini arttırılabileceği görülmüştür. İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirilen çerçeveler %180 ölçekli Düzce deprem kaydı aldında can güvenliğini sağlayacak performansı başarılı bir şekilde sağladığı görülmüştür. Son olarak farklı güçlendirme yöntemleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Dinamik benzeri deney yöntemi, sismik güçlendirme, iç ters V çelik çapraz, iç çelik çerçeve

1. GİRİŞ

Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Yapı Mekaniği Laboratuvarı, 2005 yılında Avrupa Birliği 6. Çerçeve Programı Desteği ile "Deprem Mühendisliği için Altyapı Oluşturma" isimli bir altyapı projesi almıştır. Alınan bu proje kapsamında laboratuvar altyapısı yenilenerek sürekli dinamik benzeri deney yapabilme kabiliyeti elde edilmiştir. Proje ile iki adet 25 tonluk ve 2 adet 50 tonluk hidrolik kriko, 4 pistonu ayrı ayrı kontrol edebilme imkanı veren kontrol sistemi ve ilgili yazılımlar temin edilmiştir. Sistem Ispra'da bulunan JRC bünyesindeki dinamik benzeri deney ekipmanın en güncel versiyonudur. Kurulan altyapı, pompa ve su soğutma sistemi ile desteklenerek yeni ve eski ekipman arasında uyumun sağlanması ile örnek bir alt yapı geliştirme projesidir. Proje kapsamında kurulan sistem 4 serbestlik derecesine kadar dinamik benzeri deney yapabilme ve 20 serbestlik derecesine kadar elastik alt model oluşturarak deney elemanına entegre edebilme imkanı sunmaktadır.

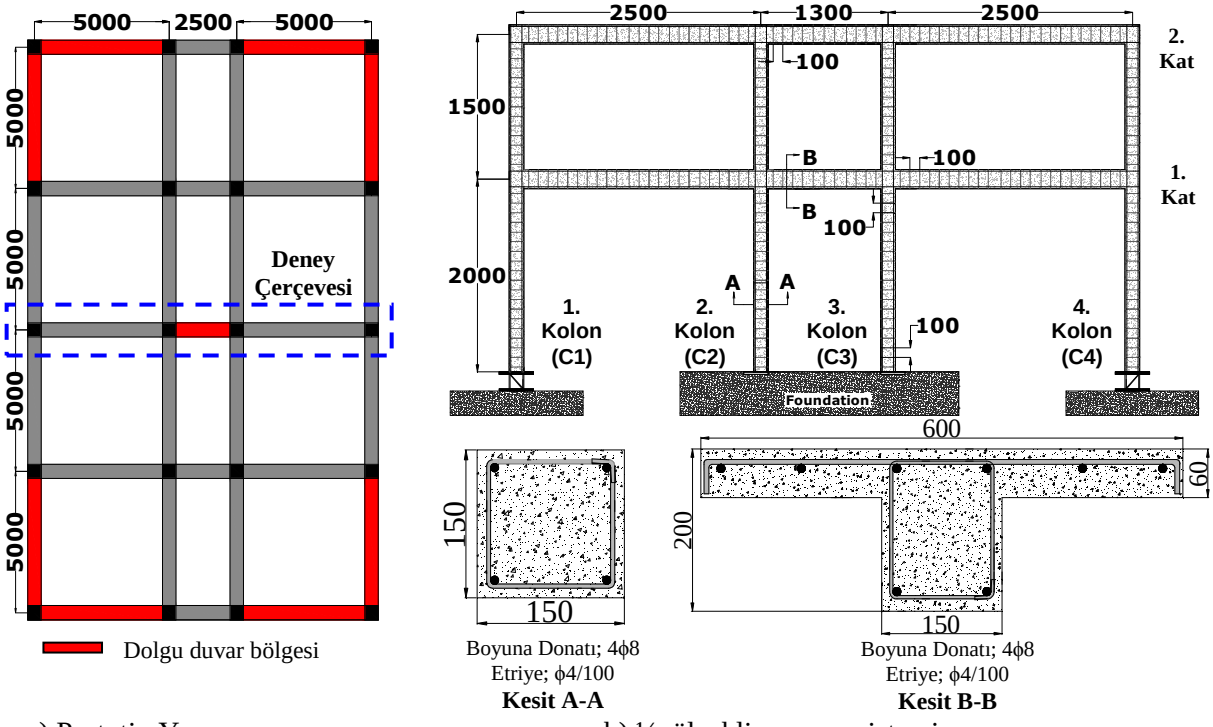
Dinamik benzeri deney sistemi yaklaşık 35 yıl önce (Takanashi, 1975) Japonya'da ilk denemesi gerçekleştirilmiş, sonrasında ABD ve Avrupa'da yaygınlaşmış deprem mühendisliği araştırmalarında kullanılan bir deney sistemidir. Dinamik benzeri deneylerin en büyük cazibesi deprem istemlerinin ivme kayıtları ile sarsma tablası kullanmadan numuneye uygulamaya olanak vermesidir. Sistem dinamik denge denkleminin adım adım integrasyonu esnasında deney elemanında alınan tepki kuvvetlerini ölçerek piston deplasmanlarının belirlenmesi ve deprem kaydı boyunca bu işlemin tekrarı prensibi üzerine kurulmuştur. Dinamik benzeri deneylerin tersinir yükleme deneylerine göre en büyük avantajı doğrudan deprem kayıtlarının yapı veya yapının bir bölümü üzerinde kullanımına olanak vermesidir. Sayısal integrasyon esnasında kütle matrisinin sayısal olarak modellenmesi, laboratuvar ortamında atalet kuvvetlerini yaratacak

kütle yerleştirme zorunluluğunu da ortadan kaldırmaktadır. Bu şekilde deprem istemlerinin yapı elemanları üzerindeki etkileri daha gerçekçi bir şekilde uygulanabilir. ODTÜ Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda kurulan dinamik benzeri sistem, sürekli dinamik benzeri deney yapma imkanı sunmaktadır. Diğer bir deyişle, sayısal integrasyon sürekli olarak devam etmekte ve piston gevşemesi gibi hata arz eden faktörlerin asgariye indirilmesini sağlamaktadır.

Tesis edilen bu altyapı kullanılarak iki adet TUBİTAK destekli proje başarı ile tamamlanmış bir adet TUBİTAK projesi de halen yürütülmektedir. Projelerden ilki, Türk Deprem Yönetmeliğinde önerilen, geçtiğimiz on yıl içerisinde ülkemizde yürütülen deneysel ve kuramsal araştırmalar ile ortaya çıkarılmış Lifli Polimer ve Prekast Panel güçlendirme tasarımlarının "gerçek" deprem performansını araştırmayı hedeflemiştir. Bu projedeki deney sonuçlarını ilişkin detaylar ilgili diğer çalışmalarda (Kurt, 2010; Kurt ve diğerleri, 2011a, 2011b) sunulmuştur. Yürütülen ikinci bir proje ile yapısal çelik elemanlar ile aynı çerçeve sisteminin takviyesi araştırılmıştır. Bu bağlamda İç Çelik Çerçeve (İÇÇ) ve İç Ters V Çelik Çapraz (İTVÇÇ) güçlendirmeleri uygulanan iki ayrı deney elemanı daha test edilmiştir. Bu bildiride, araştırılan bu iki yapısal çelik güçlendirme metoduna ait dinamik benzeri deney sonuçları sunulmaktadır.

2. DENEY PROGRAMI

Deney çerçevesi olarak Türkiye'de 1970'lerde inşa edilmiş sismik tasarım kurallarına uyulmamış yetersiz betonarme bir prototip binanın iki katlı-üç açıklıklı, ½ ölçekli modeli kullanılmıştır (Kurt, 2010). Şekil 1a'da gösterilen aks dikkate alınarak elde edilen deney çerçevesi Şekil 1b'de sunulmaktadır. Test çerçevesinin kolon boyutları 150x150 mm ve kiriş boyutları 150x200 mm'dir (Şekil 1a). Betonarme kirişler 60 mm kalınlığında ve 600 mm genişliğinde döşeme ile birlikte dökülmüştür. Döşeme için her iki yönde düz (nervüzsüz) 6 mm'lik döşeme donatısı 100 mm'lik ara ile kullanılmıştır. Hem kirişler hem de kolonlar için, boyuna donatı olarak 4 adet 8 mm çapında düz demirler kullanılarak yaklaşık %1.6'lık donatı oranı elde edilmiştir. Düz donatı çeliği mekanik özellikleri, akma dayanımı 330 MPa, kapasitesi ise 460 MPa olarak sıralanabilir.



a) Prototip Yapı b) ½ ölçekli çerçeve sistemi

Şekil 1 Betonarme çerçeve ve kolon kiriş kesitleri

Tüm elemanlarda etriyeler için 100 mm aralıkla ve 90 derece kancalı, 4 mm çaplı ve 270 MPa akma dayanımlı düz donatı çeliği kullanılmıştır. Donatı detayları ve 7.5 MPa olan düşük beton dayanımı Türkiye'de yaygın olarak karşılaşılan şartnameye uygun olmayan sismik detaylara benzemektedir. Kolon kiriş birleşim noktalarında etriye bulunmamaktadır. Beton paspayı boyuna donatısının merkezinden beton yüzeyine kadar olan mesafe 18 mm alınmıştır. Kullanılan beton laboratuvar şartlarında üretilmiştir ve beton karışımının en büyük agrega dane çapı 12 mm'dir. Bütün deneylerde özellikleri yukarıda açıklanan ve Şekil 1b'de görülen özdeş çerçeveler kullanılmıştır.

2.1 Rererans Çerçevesi

Bu çalışma kapsamında yeni bir referans çerçevesi test edilmemiş olup, Kurt (2010) tarafından test edilen çerçeve referans çerçevesi olarak kullanılmıştır. Referans çerçevesinin deney düzeneği Şekil 2a'da gösterilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi her iki katta da deney çerçevesinin orta açıklığında dolgu duvarlar bulunmaktadır. Duvarlar delikli tuğladan çerçeve içerisine örülmüştür. Tuğlalar 110 mm × 130 mm × 130 mm, %65 boşluk oranına ve 14 MPa eksenel basınç dayanımına sahiptir (Şekil 2a). Ülkemizdeki yapı pratiğinin doğru yansıtılması adına, tuğla duvarların yüzeyleri sıva ile kaplanmıştır. Tuğla duvar Şekil 2a'da görüldüğü gibi sadece orta açıklıkda mevcuttur ve buradaki tuğla duvar alanı oranı, mevcut yapılardaki orana benzer olarak kat oturma alanının yaklaşık %1'i şeklinde ayarlanmıştır. Betonarme çerçeveler, eksenel yük altında iken duvar örme işlemi gerçekleştirilmiştir. Diğer bir deyişle referans çerçevesindeki tuğla duvar, çelik bloklar vasıtası ile düşey yükler uygulandıktan sonra örülmüştür. Güçlendirilmiş numuneler için ise güçlendirme işlemi, düşey yüklerin uygulanmasını müteakip gerçekleştirilmiştir. Deneye hazır hale gelmiş test numunesinin görünüşü Şekil 2a'da görülmektedir.

2.2 İTVÇÇ'li Çerçeve

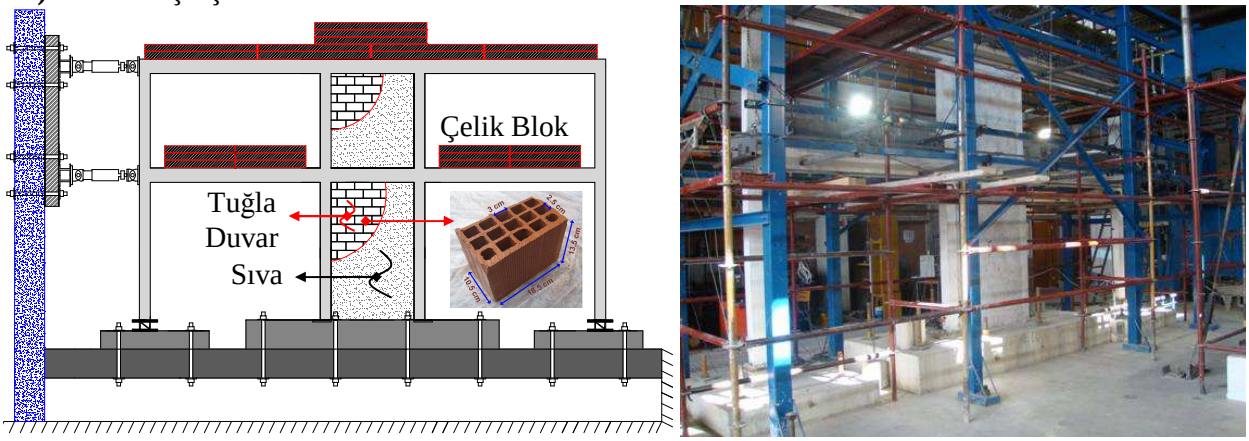
İTVÇÇ'li betonarme çerçeveye ait deney düzeneği Şekil 2b'de sunulmaktadır. Bu şekilden de görüldüğü gibi çelik çapraz yetersiz çerçevenin orta açıklığına eklenmiştir. İTVÇÇ uygulaması ile mevcut dolgu duvarın kaldırılıp yerine çapraz sisteminin yerleştirildiği düşünülmüştür. Çelik çaprazlar (ÇÇ'ler) herbir katta betonarme çerçeveye üç farklı noktadan bağlanmıştır. Çelik ve betonarme elemanlar arasındaki bağlantı; kolon-temel birleşim noktasındaki bağlantı, kiriş orta açıklığındaki bağlantı ve betonarme kolon-kiriş düğüm noktasındaki bağlantı şeklinde oluşturulmuştur. İTVÇÇ uygulamasının en önemli avantajı (X çaprazlara göre) minimum bağlantı noktası sayısı ve düğüm noktalarına asgari istemlerin talep edilmesinin sağlanmasıdır. Bağlantı detaylarının yapım aşamaları Özçelik (2011)'de ve Özçelik ve diğerleri (2011)'de detaylı şekilde açıklanmaktadır.

2.3 İÇÇ'li Çerçeve

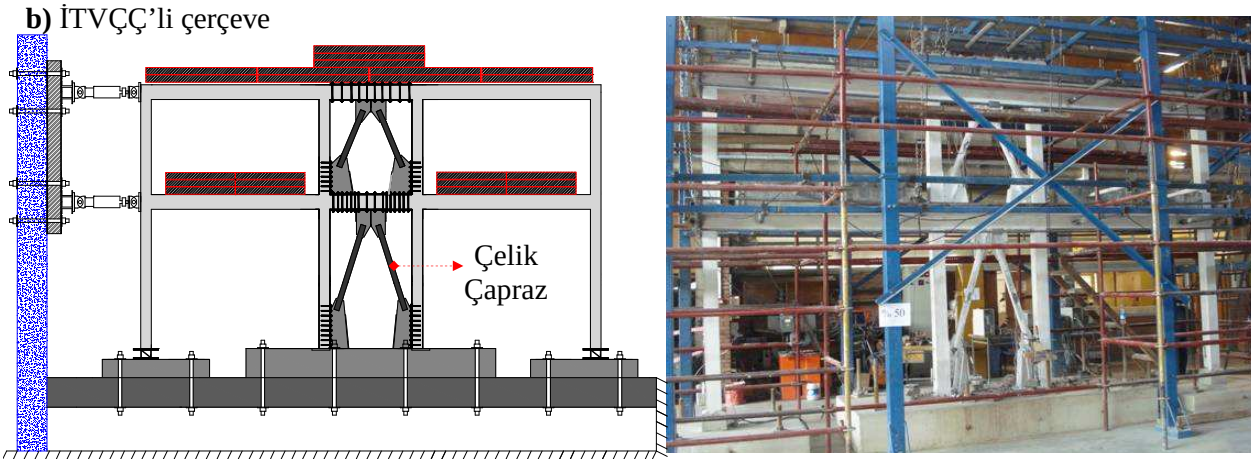
Bu güçlendirme tekniği ülkemiz için kolaylıkla uygulanabilecek ve klasikleşmiş perde duvar uygulamalarına alternatif teşkil edebilecek yöntemlerden birisi olarak görülmektedir. Bu uygulamada, mevcut betonarme çerçeve elemanlarına, ankraj yardımı ile yeni çelik yapı elemanlarının (çelik profil, plaka vb...) eklenmesi ile elde edilen yeni bir yatay yük taşıyıcı sistemin oluşturulması amaçlanmıştır. İÇÇ ile güçlendirme metodundaki temel prensip, mevcut betonarme çerçeve elemanları (kolon ve kiriş) ile sonradan çerçeve sistemine eklenen çelik elemanların (çelik profil ve plaka) birlikte çalışmasını sağlamaktır. Elde edilen yeni taşıyıcı elemanlar, kompozit sistemin parçası olup, yük ve deformasyon kapasiteleri mevcut betonarme ve çelik elemanlardan farklılık içermektedir. Bu bakımdan kompozit bir elemanın doğru bir şekilde tasarlanabilmesi için ilk olarak beton-çelik arasındaki bağlantının yeterli olması gerekmektedir. Bu bağlantı detayları Özçelik (2011)'de ve Salmon ve diğerleri (2009)'da mevcuttur. Güçlendirme işlemi daha önceki deneylerde olduğu gibi düşey yükler yerleştirildikten sonra gerçekleştirilmiş olup saha şartlarını tam olarak temsil etmektedir. Orta açıklıkta mevcut bulunan dolgu duvarın kaldırılması ve yerine güçlendirme sisteminin yerleştirilmesi ile sistem gerçek binalarda uygulanabilirdir. Güçlendirme sonrası hafif ve düzlem dışı devrilme güvenliği bulunan kaplama malzemeleri ile istenmesi halinde rahatlıkla mimari bir kaplama vasıtası ile güçlendirme sistemi görünmez hale getirilebilir. Deneyler esnasında fiziksel hasarın

gözlenebilmesine olanak vermek için böyle bir mimari kaplamaya lüzum görülmemiştir. Bu şartlar altındaki İÇÇ'li çerçeveye ait test düzeneği Şekil 2c'de gösterilmektedir.

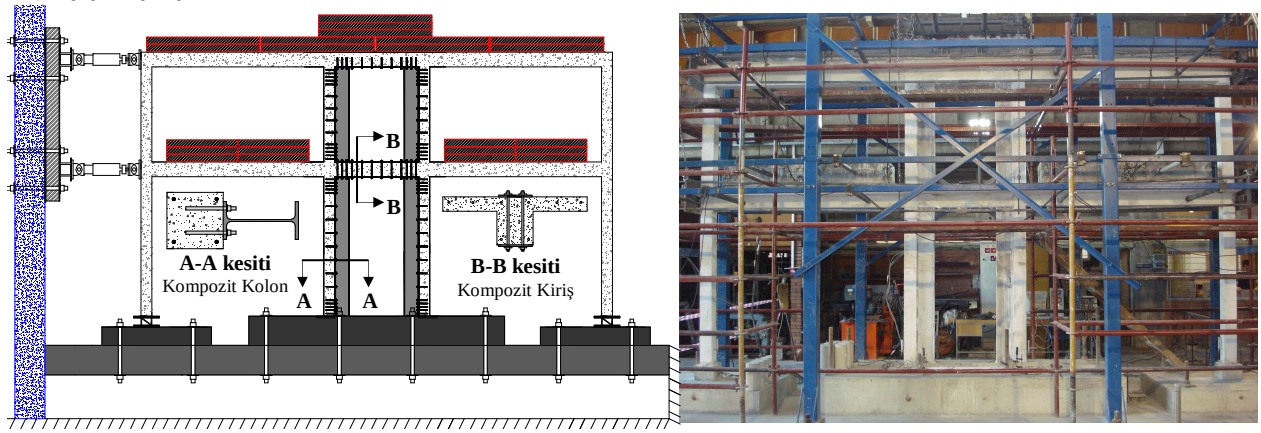
a) Referans Çerçevesi



b) İTVÇÇ'li çerçeve



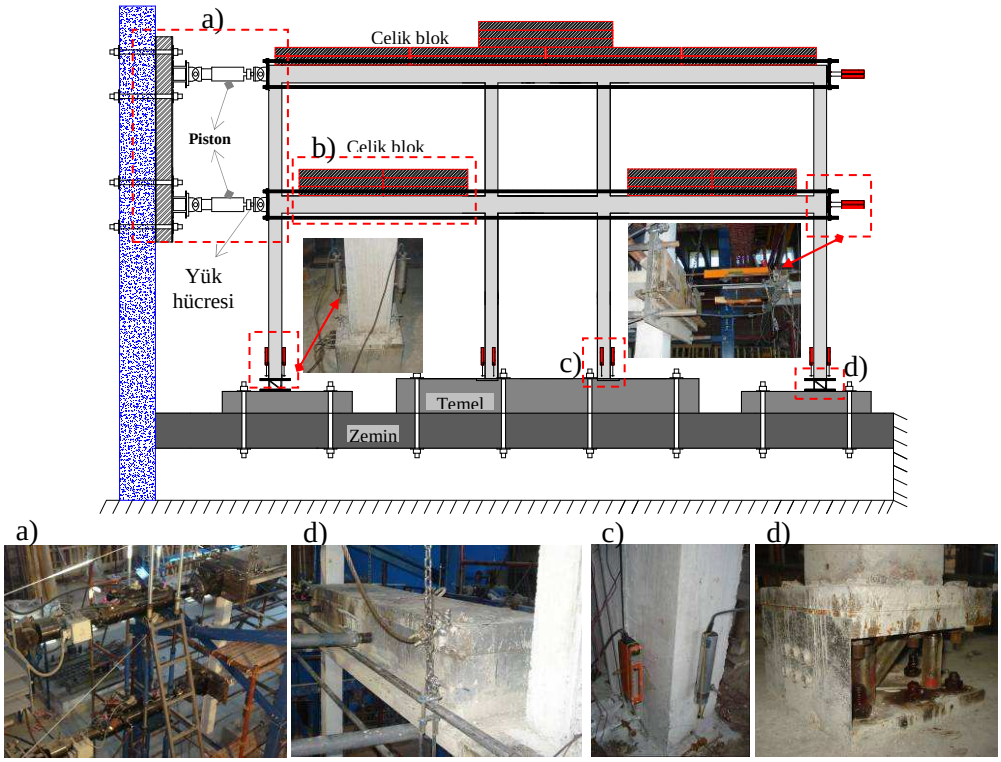
c) İÇÇ'li çerçeve



Şekil 2 Deney düzeneği ve deney elemanları: a) Referans çerçevesi, b) İTVÇÇ'li çerçeve, c) İÇÇ'li çerçeve

2.4 Deney ölçümleri ve deneysel yöntem

Düşey yükler çerçeve numunelere çelik blok ağırlıklar kullanılarak uygulanmıştır. Bu durum gerçek ve mevcut bir bina için yapılacak güçlendirmeden önceki yükleme durumunu yansıtmaktadır. Çelik blok

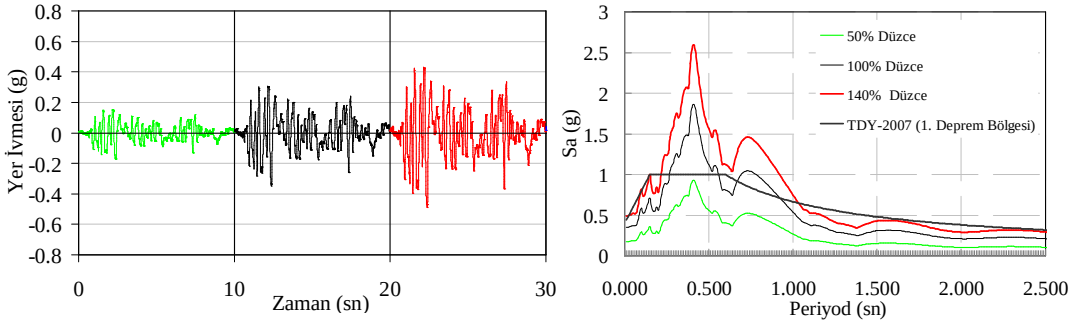


Şekil 3 Yükleme ve ölçüm sistemi

konumları dış ve iç kolonlar için sırasıyla yaklaşık % 13 ve % 23 eksenel yük oranı elde edilecek şekilde ayarlanmıştır. Bu yüklere tekabül eden kütle matrisi ise diyagonal olup birinci kat için 5000 kg, ikinci kat için ise 7000 kg değerlerine sahiptir. Yatay yük, her katta kiriş merkezinden bilgisayar sistemine bağlı iki adet piston ile uygulanmaktadır (Şekil 3). Kolon alt uçlarında iki adet LVDT 150 mm'lik içerisinde ortalama birim uzamayı ölçmek için yerleştirilmiştir (Şekil 3c). Bu bölge, muhtemel plastik mafsallaşma alanı olup buradan elde edilecek ölçümler sayesinde deney esnasında bu bölgede oluşacak eğrilik değerleri de kolaylıkla hesaplanabilmiştir. Katlarda meydana gelen yatay ötelenmeler her bir kata yerleştirilen iki adet LVDT yardımı ile ölçülmüştür (Şekil 3). Buradaki LVDT'ler, piston ve dolayısı ile kiriş merkezi ile çakışmaktadır. Bu yatay ölçümler sayesinde dinamik benzeri sistem deneyi esnasında çerçeveye gelen yatay istemler elde edilmiştir ve değerlerin kat yüksekliğine bölünmesi ile önemli bir mühendislik parametresi olan kat ötelenmesi değerleri hesaplanmıştır. Kat kesme kuvvetine ve deplasmanlarına ek olarak, dış kolonların taban iç kuvvetleri ve eğrilikleri izlenmiştir. Bu amaçla özel bir düzlemsel yük hücresi (Canbay ve diğerleri, 2005) üretilerek, gerekli kalibrasyon yapıldıktan sonra yük hücreleri çerçeve ile temel arasına yerleştirilmiştir (Şekil 3d). Bu sayede, yerel (eğrilikler) ve genel (temel kesme ve katlar arası kayma oranı) deformasyon istemlerine ek olarak yerel eleman kuvvetleri (Eksenel Kuvvet, Moment ve Kesme Kuvveti) de elde edilebilmektedir. Bu yük hücrelerine ek olarak kolon diplerindeki LVDT'ler sayesinde ölçülen eksenel yük-moment-eğrilik ilişkisi dış kolonlar için deneysel olarak elde edilmiştir.

Dinamik benzeri deney yöntemleri ile ilgili detaylı bilgi Molina ve diğ. (1999)'de bulunabilir. Referans çerçevesi, İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirilen çerçeve deneylerinde sentetik bir kayıt yerine ülkemizde yakın zamanda meydana gelmiş Düzce deprem kaydının kuzey-güney bileşeni kullanılmıştır. Düzce depremine ait olan zaman-ivme grafiği Şekil 4'de verilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi Düzce depremi yaklaşık 0.35g'lik maksimum ivmeye sahiptir. Türk Deprem Yönetmeliğinde (TDY, 2007) verilen tasarım spektrumu ile Düzce depremine ait spektrumların karşılaştırılması yine Şekil 4'de sunulmaktadır. Sürekli dinamik-benzeri deney yöntemi Molina ve diğ. (1999) kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sırasında hareket denklemi açık integral alma yöntemi ile çözülmüştür. Dinamik benzeri deneyler gerçek zamanlı harekete göre 1000 kat daha yavaş gerçekleştirilmiştir. İvme kaydı ölçeklenerek üç farklı artımda (%50, %100 ve

%140 (sadece referans çerçevesine)) deney çerçevelerine uygulanmıştır. Bu ölçeklendirmeyle üç farklı tehlike düzeyindeki tepkinin incelenmesi hedeflenmiştir: a) %50 Düzce: %50 Düzce için mevcut çerçevenin doğal periyoduna karşılık gelen spektral ivme değeri referans çerçevenin temel kesme kapasitesi oranıyla (temel kesme kapasitesi bölü yapı ağırlığı) benzerdir (Kurt, 2010). Dolayısıyla dolgu duvarların varlığı dikkate alındığında, yapının akma noktasının altında ya da çok yakınında bulunacağı beklenmektedir. Bu depremin yapılan ön analizler neticesinde hemen kullanım düzeyinde hasara yol açacağı beklenmektedir. b) %100 Düzce: 1999 Adapazarı depreminde kaydedilen gerçek Düzce yer hareketinin kullanımı tehlike düzeyini daha az sıklıktaki olaylar için gerçekçi bir şekilde temsil edebilir (Kurt, 2010). c) %140 Düzce: Bu tehlike düzeyi ciddi ve ender depreme karşılık gelmekte olup, yapının deney öncesi tahmini doğal periyodunun sert zemin koşullarında yaklaşık olarak Türk Deprem Tasarım Spektrumu Bölge 1'le benzer bir spektral ivme değerindedir (Kurt, 2010). Güçlendirilmiş deney elemanlarında bu depremler için göçme elde edilmemesi durumunda %180 (ve %220) ölçeklendirilmesi yapılarak sistemin limit yatay yük ve deplasman yapabilme yeteneği gözlemlenmiştir.



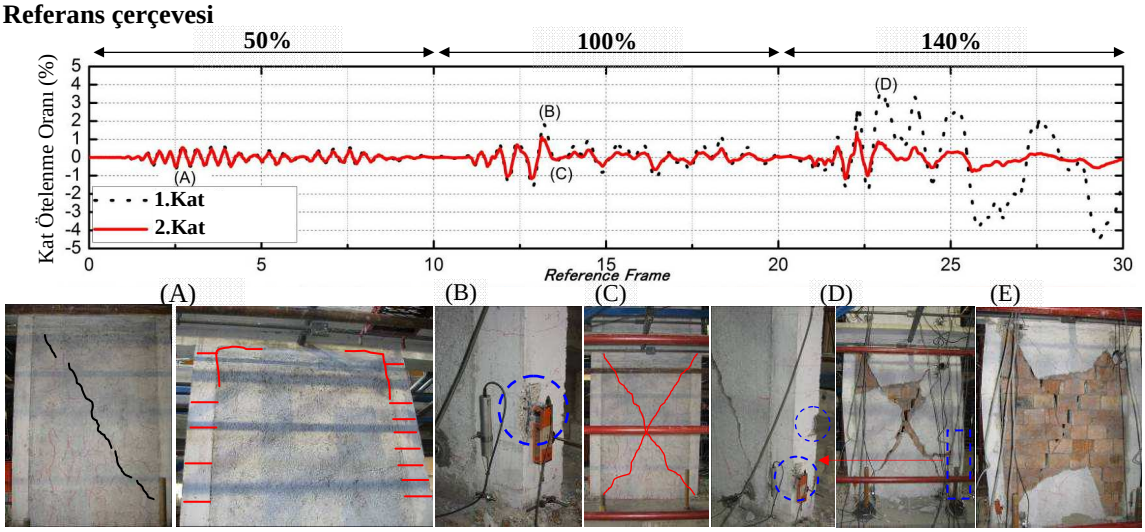
Şekil 4 Düzce hareketin ivme-zaman dizisi ve TDY (2007) ivme spektrumu

3. DENEY SONUÇLARI

Deney sonuçları bu kısımda özet olarak verilmekle beraber ayrıntılı bilgi referans çerçevesi için Kurt (2010) ve İTVÇÇ ve İÇÇ'li çerçeveler için Özçelik (2011)'de bulunmaktadır. Şekil 5'de deney elemanlarının kat ötelenme oranları (KÖO) ve KÖO'larına bağlı olarak çerçevede meydana gelen hasarlar gösterilmektedir. Şekil 6 deneyler esnasında elde edilen azami tepe deplamanları ve taban kesme kuvvetlerinin birleştirilmesi ile elde edilmiş zarf eğrilerini göstermektedir. Tablo 1'de yapılan deneylerde elde edilen azami taban kesme kuvveti, çerçeve davranışını ve diğer önemli bir performans belirleyici parametre olan KÖO değerleri verilmiştir. Tablo 2 deney esnasında birinci kat kolon diplerindeki plastik dönme ve eğrilik sünekliği istemlerini özetlemektedir. İTVÇÇ ve İÇÇ'li çerçeveler için sonuçlar %140 Düzce deneyinin sonuna kadar verilmiş olup diğer ölçekli deney sonuçları Özçelik (2011)'de mevcuttur.

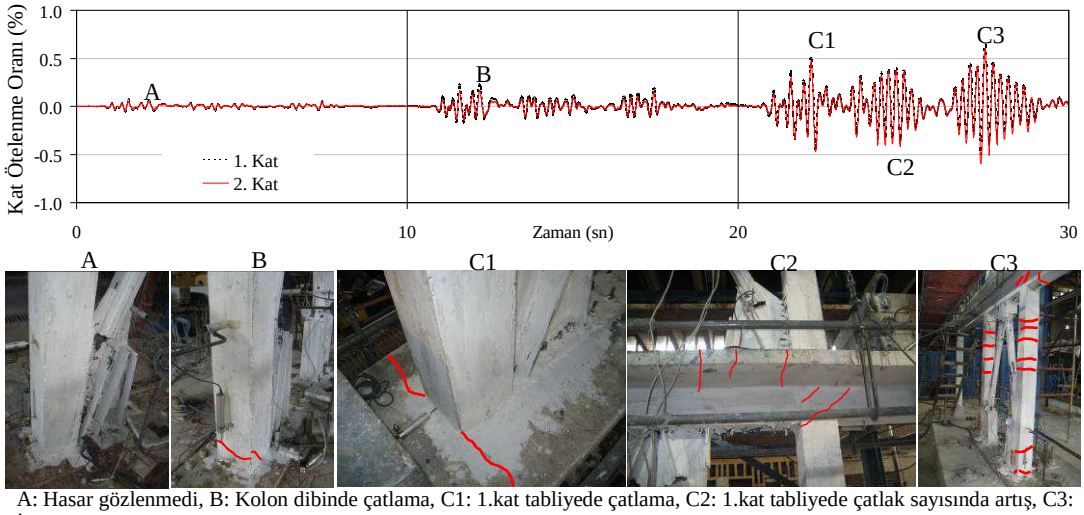
%50 Duzce depremi altında, referans çerçevesinde, dolgu duvarda gözlemlenen diyagonal çatlama ile sınır çerçeve elemanları arasında arayüz çatlaklarının oluşumu gözlemlenen en önemli hasarlardır. Dolgu duvar etrafındaki kolonlarda kılcal eğilme çatlakları haricinde önemli başka hasar gözlemlenmemiştir. Taban kesme kuvveti 60 kN civarına ulaşarak sistem kapasitesinin yaklaşık %90'nına erişmiştir. Kolon alt uçlarında gerçekleştirilen uzama ölçümleri, kolon donatısında akmanın meydana gelmediğine işaret etmektedir. Gözlemlenen hasar hemen kullanım performans seviyesinin bir miktar geçildiğini ancak ciddi bir hasarın oluşmadığı izlenimini uyandırmaktadır. Referans çerçevesi, %100 Duzce depremi altında ciddi hasar görmüştür. Gözlemlenen en önemli hasarlar dolgu duvar elemanında iki diyagonal boyunca gözlemlenen derin çatlaklar ve dolgu duvar çevresindeki kolonların plastik mafsal bölgelerinde kabuk düşmesi sonrası meydana gelen boyuna donatı burkulmasıdır. Referans numunesi için son olarak uygulanan %140 Duzce depremi çerçevenin göçme durumuna ulaşmasına yakın bir hasara sebep olmuştur. Gözlemlenen tepe deplasmanı 94 mm seviyesine ulaşırken, azami KÖO, birinci katta dolgu duvarın göçme konumuna gelmesi ile oluşan yumuşak kat sebebi ile % 4.5 civarındadır. Yatay kapasitenin azami değerinin yaklaşık %30'una düşmesi, ciddi seviyede hasar meydana geldiğine işaret etmektedir.

a) Referans çerçevesi



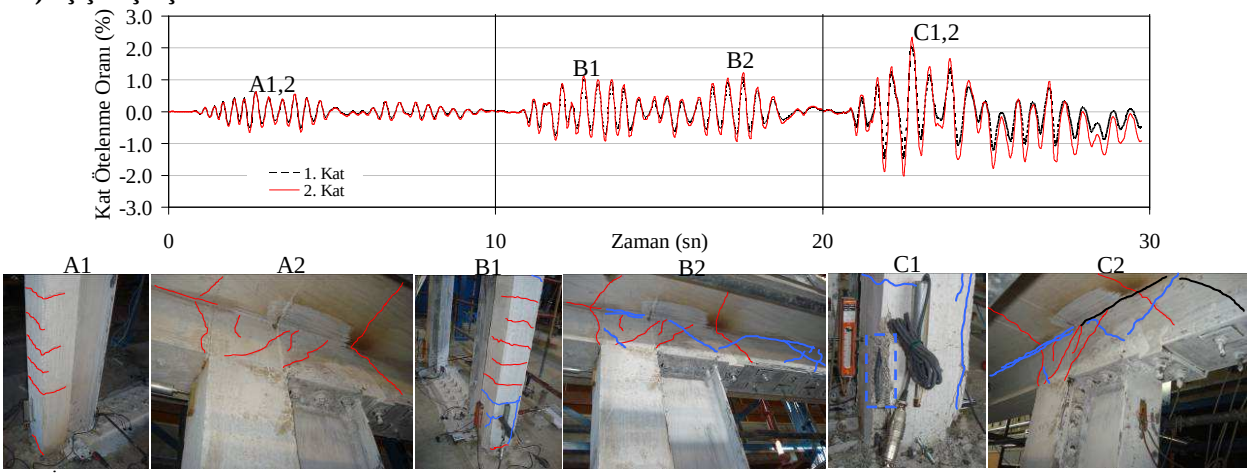
A: Çatlama başlangıcı, B: Beton dökülmesi, Boyuna donatıda burkulma, C: Diyagonal yönde çatlama, D: Boyuna donatıda burkulma, E: Deney sonu

b) İTVÇÇ'li çerçeve



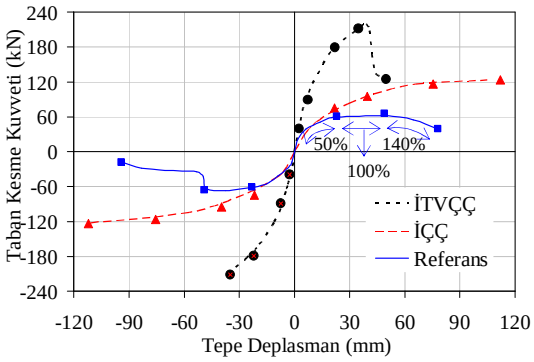
A: Hasar gözlenmedi, B: Kolon dibinde çatlama, C1: 1.kat tabliyede çatlama, C2: 1.kat tabliyede çatlak sayısında artış, C3: İç kolonlarda kolon boyunca eğilme çatlakları

c) İÇÇ'li çerçeve



A1: İç kolonlarda çatlama, A2: Kompozit kolon kiriş birleşiminde çatlama, B1: Kolonlarda çatlak sayısı artışı, B2:Kompozir kolon kiriş birleşim bölgesinde çatlak sayısı artışı, C1: Boyuna donatıda burkulma, C2: Kompozit kolon kiriş birleşim bölgesinde çatlak sayısı artışı

Şekil 5 Deney elemanlarının kat ötelenmeleri ve kat ötelenmeye bağlı gözlenen hasarlar



Şekil 6 %50, 100, 140, 180 ve 220 deneyleri için zarf eğrileri

Tablo 1. Bütün deneylerin taban kesme kuvveti-KÖO değerleri sonuçları

Deprem	Maksimum Taban Kesme Kuvveti İstemi (kN)			Kesme Kuvveti Oranı (kN/kN)			Maksimum Göreli KÖ (%)					
							1. Kat			2. Kat		
	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ
50% Düzce	60.4	39.94	67.6	0.50	0.33	0.56	0.7	0.1	0.6	0.6	0.1	0.7
100% Düzce	67.9	89.12	88.2	0.57	0.74	0.73	1.8	0.2	1.1	1.1	0.2	1.2
140% Düzce	54.5	178.98	116.6	0.45	1.49	0.97	4.5	0.7	2	1.4	0.6	2.3
180% Düzce	-	206.06	123.2	-	1.72	1.03	-	0.9	2.9	-	1.1	3.7

Tablo 2. Kolon uçlarındaki plastik dönme ve eğrilik sünekliği istemleri

Deprem	Kolon İstemleri											
	Kolon C1			Kolon C2			Kolon C3			Kolon C4		
	Plastik dönme (θ_p)			Plastik dönme (θ_p)			Plastik dönme (θ_p)			Plastik dönme (θ_p)		
	Eğrilik sünekliği (μ_ϕ)			Eğrilik sünekliği (μ_ϕ)			Eğrilik sünekliği (μ_ϕ)			Eğrilik sünekliği (μ_ϕ)		
	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ	Referans	İTVÇÇ	İÇÇ
50% Düzce	0	0	0	0.003	0	0	0.001	0	0	0	0	0
	0.3	0	0	1.9	0	0	1.5	0	0	0.6	0	0
100% Düzce	0.004	0	0	0.006	0	0	0.008	0	0	0.006	0	0
	2.0	0	0	2.8	0	0	3.5	0	0	2.6	0	0
140% Düzce	0.038	0	0.001	0.055	0.011	0.001	0.025	0	0.004	0.036	0	0.003
	9.4	0	1.4	16.9	4.4	1.2	8.3	0	2.2	11.5	0	2.0
180% Düzce	-	0	0.005	-	0.013	0.008	-	0.005	0.011	-	0	0.008
	-	0	2.6	-	4.9	3.4	-	2.4	4.5	-	0	3.4

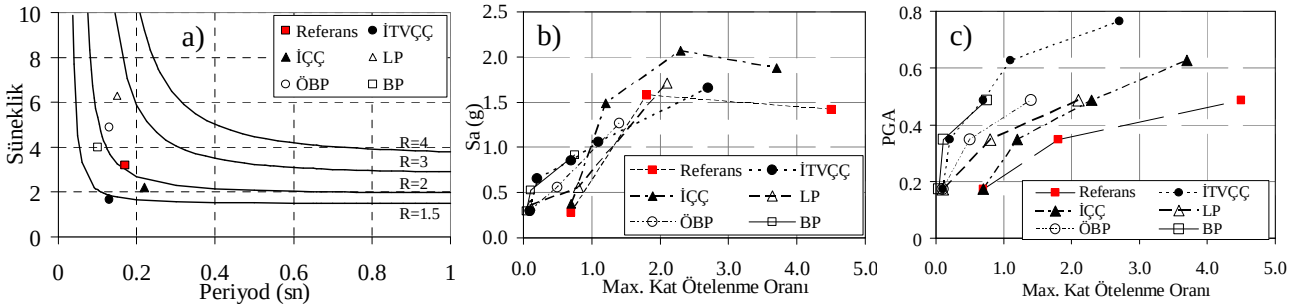
İTVÇÇ'li çerçevede, %50 depreminde Şekil 5'de görüldüğü gibi betonarme elemanlarda, bayrak levhasında ve ÇÇ'lerde herhangibi bir hasar meydana gelmemiştir. Ayrıca Tablo 2'de görüldüğü gibi kolon diplerinde elastik ötesi bir davranış görülmemiş olup göreli kat ötelenme çok sınırlı bir seviyede kalmıştır. Bu depremde çerçevenin elastik bir davranış göstermesi çerçevenin minimum hasar seviyesi içerisinde kaldığı ve bu tür bir yapının depremden sonra hemen kullanılabilir bir seviyede olduğu görülmektedir. %100 depreminde Şekil 5'de görüldüğü gibi çok sınırlı seviyede iç kolon alt uçlarında kılcal boyutta eğilme çatlakları görülmüştür. Bu çatlamaların haricinde çerçevede, bayrak levhasında ve ÇÇ'lerde hasar meydana gelmemiştir. %140 depreminde Şekil 5'den de görüldüğü gibi kılcal boyutda olan eğilme çatlakları kolon boyunca artmıştır. Bunun yanında kiriş tabliyesindede çatlamalar görülmüştür. Bu deprem esnasında bayrak levhası ve ÇÇ'lerde herhangibi bir hasar meydana gelmemiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi sadece iç kolonların birinde plastikleşme meydana gelmiştir. Diğer üç kolonda elastik ötesi bir davranış söz konusu değildir. Bu sonuçlar dikkate alınarak %140 depreminden sonra İTVÇÇ'li çerçevenin minimum hasar seviyesi içinde kaldığı sonucuna varılmıştır. Bu tür bir yapının bu tip bir deprem sonucunda hemen kullanılabilecek bir durumda olduğu düşünülmektedir.

İÇÇ'li çerçevede, %50 depreminde Şekil 5'de görüldüğü gibi kompozit kolonun betonarme kolon tarafında yatay ötelenemeye göre meydana gelen çekme gerilmeleri sayesinde kolon boyunca eğilme çatlakları

oluşmuştur. Bu çatlamalara ek olarak özellikle kolon-kiriş düğüm noktasında deney sonuna doğru eğik çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar bu deprem için kılcal boyutta olup, çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesinde bir azalmaya sebeb olmamıştır. %100 depreminde Şekil 5'de görüldüğü mevcut çatlaklara ek olarak yeni çatlamalar meydana gelmiştir. Özellikle kolon-kiriş düğüm noktasında meydana gelen mevcut çatlakların genişlememesi bu bölgeye yerleştirilen altı adet ankraj çubuğunun bu birleşim noktasını etkili bir şekilde bir arada tutmasında etkendir. Bu deneyde kolon C3'ün dibinde beton pas payı dökülmesi meydana gelmiştir. %140 depreminde diğer depremlere göre belirgin hasarlar meydan gelmiştir. Bu hasarların en önemlisi iç kolonlardan birinde %100 depreminde meydana gelen pas payı dökülmesinin olduğu bölgede boyuna donatıda meydana gelen burkulmadır. Ancak basınç bölgesindeki bu kapasite kaybı tarafsız eksenin içeriye kayması ile kompanse edilmiş ve genel davranışta bir kapasite düşüşü olmamasını sağlamıştır. İç kolonlar boyunca daha önce meydana gelen çatlaklara ek olarak betonarme çerçevenin dış açıklık kirişlerinde de çatlamalar oluşmuştur ve kirişlerdede plastik bir davranışın oluştuğu söylenebilir. Tablo 2'de görüldüğü gibi kolon diplerinde plastikleşme meydana gelmiştir. Bu sonuçlar dikkate alınarak %140 depreminden sonra İÇÇ'li çerçevenin can güvenliği performans sınırı içinde kaldığı sonucuna varılmıştır. Benzer hasar almış bir yapının deprem sonucunda sınırlı düzeyde yapılacak onarımdan sonra kullanılabileceği ve can güvenliği sınır koşullarını sağladığı söylenebilir.

4. DİNAMİK BENZERLİ TEST ÇALIŞMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Dinamik benzerli test yöntemi ile test edilen bir adet referans çerçevesi, İTVÇÇ'li ve İÇÇ'li çerçeve olmak üzere toplam üç adet çerçeveye ait test sonuçları yukarıda kısıca açıklanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak yine aynı çerçeve özellikleri kullanılarak dolgu duvarların lifli polimerler (LP), ön üretimli beton paneller (ÖBP) ve betonarme duvar ile güçlendirme çalışmalarıda yapılmıştır (Kurt, 2010). Tüm deney çerçeveleri artımsal dinamik benzeri yüklemelere tabi tutulmuş ve limit hasar durumları, süneklikleri deneysel olarak elde edilmiştir. İncelenen bu beş değişik güçlendirme sisteminin deprem performansı, deprem mühendisliğinde oldukça sık kullanılan yapı davranış katsayısı *(R)*, deplasman sünekliği (μ) ve yapı periyodu (T) ilişkisi ışığında irdelenmiştir. Şekil 7a, Krawinkler and Nassar (1992) tarafından tek serbestlik derecesi için önerilen *R—μ-T* bağıntıları ile birlikte deneysel elde edilen sistem periyotları ve süneklik istem noktalarını sunmaktadır. Bu şekilden de görüldüğü gibi İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirilen çerçeveler için davranış katsayısı yaklaşık 2, bunun yanında LP, ÖBP ve BP ile güçlendirilen çerçeveler için davranış katsayısı (R) sırarısıyla 4, 3 ve 2 olarak belirlenmiştir. Referans çerçevesi için ise yatay yük kapasitesinin kaybolduğu ana karşılık gelen R değeri yaklaşık 2'dir. Bu sonuçlar tüm güçlendirme sistemlerinin kapasite artırımı hedefleyen ve sınırılı sünekliğe sahip sistemler olduğunu göstermektedir. Referans çerçevesinin de sınırılı sünekliğe sahip bir çerçeve olduğu düşünülürse, güçlendirme yöntemleri süneklik kapasitesini fazla değiştirmeden yapıyı rijitleştirerek kat ötelemelerine mani olmakta ve sisteme ek kapasite sunmaktadır.



Şekil 7 a) Süneklik-periyod, b) Sa-Mak. KÖO ve c) PGA-Mak. KÖO ilişkisi

Artımsal olarak uygulanan depremler için azami yer ivmesi (PGA) ve azami spektral ivme (Sa) değerlerine karşı çizilmiş azami kat ötelenme istemleri Şeki 7b ve 7c'de verilmektedir. Bu şekil, bir anlamda Dimitrios ve Cornell (2003) tarafından önerilmiş artımsal dinamik analiz sonuçlarının deneysel versiyonudur. Görüldüğü üzere güçlendirme sistemleri, azami yer ivmesi ve spektral ivme kapasitelerini artırmakta ancak sistemlerin deformasyon yapabilme yeteneğini düşürmektedir. Bu bağlamda güçlendirme metotları sisteme

süneklik vermekten çok ek kapasite sunarak sınırlı süneklik ile yeterli deprem performansı sağlamayı hedeflemektedir. Sınırlı ve gerektiği kadar süneklik kapasitesi ile işlev gören güçlendirme metotları ekonomik olabilmekte ancak süneklik istemlerinin doğru tahmin edilebilme gerekliliğini de birlikte getirmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, İTVÇÇ ve İÇÇ ile güçlendirme olmak üzere iki farklı güçlendirme metodu dinamik benzeri test yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Gerçek bir deprem kaydının kullanıldığı bu deneyler sonucunda, referans çerçevesi %140 Duzce testi sonunda ağır hasar almış olmasına rağmen İTVÇÇ'li ve İÇÇ'li sistemler bu istem sonucunda sınırlı seviyede hasar almıştır. Bunun yanında, İTVÇÇ'li sistemlerin yatay ötelenmeleri ÇÇ'ler tarafından oldukca sınırlı seviyede tutulduğu görümüştür. İÇÇ'li sistemlerde ise daha sünek bir yapı elde edilmiş ve uygulanan yatay istemlerin İÇÇ ile elde edilen yeni yatay yük taşıyıcı sistem tarafından oldukca başarılı bir şekilde taşındığı görülmüştür. Benzer çerçeve sistemi ve yatay istemler altında dinamik benzeri test yöntemi kullanılarak test edilen LP, ÖBP ve BP ile güçlendirilen çerçevelerin davranış katsayısı, süneklik ve periyot (R–μ-T) değerleri incelenmiştir. İncelenen tüm yöntemlerin güçlendirme sonrası rijit olarak atfedilebilecek yapılarda ciddi kapasite artırımı ve sınırlı süneklik prensibi ile işlev göreceğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR
Yazarlar 106M493 sayılı projeye destek veren TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Canbay, E., Ersoy, U., Tankut, T. (2004). A Three-Component Force Transducer for RC Structural Testing. *Engineering Structures* **26**, 257-265.
DBYBHY (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
Krawinkler, H., and Nassar, A.A. (1992) Seismic Design Based on Ductility and Cumulative Damage Demands and Capacities, Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete buildings, eds. P. Fajfar and H. Krawinkler. *Elsevier Applied Science*.
Kurt E. (2010). Investigation of Strengthening Techniques Using Pseudo-dynamic Testing, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
Kurt E, Binici B, Kurc O, Canbay E, Akpinar U, Ozcebe G. (2011a) Seismic Performance of a Reinforced Concrete Test Frame with Infill Walls, Earthquake Spectra, **27**(3) (basım aşamasında).
Kurt,E.G., Kurc, O., Binici, B., Canbay, E. and Ozcebe, G. (2011b) Performance Examination of Two Seismic Strengthening Procedures by Pseudo Dynamic Testing, ASCE, Journal of Structural Engineering, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000434, In Press.
Molina, F.J., Verzeletti, G., Magonette, G., Buchet, P.H., Géradin, M. (1999). Bi-Directional Pseudodynamic Test of a Full-Size Three-Storey Building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **28**, 1541-1566.
Özçelik, R. (2011). Seismic Upgrading of Reinforced Concrete Frames with Structural Steel Elements, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
Özçelik, R., Binici, B., Kurç. Ö. (2011). Pseudo Dynamic Testing of a RC Frame Retrofitted with Chevron Braces. *Journal of Earthqauke Engineering*, (değerlendirme aşamasında).
Salmon, G.C, Johnson, J.E, ve Malhas, F.A. (2009). Steel Structures, Fifth Edition, Pearson Prentice Hall, NJ, pp: 804.
Takanashi K., Udagawa K., Seki M., Okada T. and Tanaka H. (1975). Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system. Bull. Earthquake resist. Struct. Res. Center, Tokyo, Japan.
Vamvatsikos, D., Cornell, C.A. (2003). Incremental Dynamic Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **31**, 491-514.