

PREFABRİK YAPILARDA MOMENT AKTARABİLEN SÜNEK KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİ

DUCTILE CONNECTIONS IN PRE-CAST CONCRETE MOMENT RESISTING FRAMES

Onur ERTAŞ¹ ve Şevket ÖZDEN²

ÖZET

Bu çalışma kapsamında deprem bölgelerinde kullanılmak üzere dört farklı moment aktarabilen prefabrik kolon-kiriş birleşim detayı deplasman kontrollü ve tersinir tekrarlı yükler altında test edilmiş ve monolitik sistem deneyi ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadaki birleşimler ıslak birleşimler, kaynaklı kompozit birleşim ve bulonlu birleşim olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Islak birleşimlerde birleşim yeri olarak kolon veya kiriş uç bölgesi seçilmiştir. Kompozit birleşim detayı ise Türk prefabrik sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan bir birleşim detayıdır. İki adet bulonlu birleşim detayı ise gusesiz olarak tasarlanmıştır. Tüm birleşimler aynı yükleme patronu ve test düzeneğinde test edilmiş ve sonuçlar kapasite, süneklik ve enerji tüketim performanslarına göre kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar test edilen tüm birleşim detaylarının deprem bölgelerinde kullanılabilirliğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton Prefabrik, Prefabrikte Elemanlar, Kolon-Kiriş Düğüm Bölgesi, Sünek Birleşimler, Tersinir-Tekrarlı Yükleme

ABSTRACT

This paper presents the test results of four types of ductile moment resisting pre-cast concrete frame connections and one monolithic connection, all designed for use in high seismic zones. The performance of precast concrete connections under displacement control reversed cyclic loading is compared with that of the monolithic subassembly. Precast concrete specimens of the current presentation may be subdivided into three groups, namely cast-in-place, composite with welding, and bolted connections. The location of the cast-in-place connection in precast concrete subassemblies was either in the beam or in the column. The composite connection tested within this study was a common detail in the Turkish precast concrete industry. Two bolted specimens without corbels were also tested. These tests created a chance to compare the response of different connection types under the same loading pattern and test configuration. Comparisons on the performance parameters, such as energy dissipation and comparisons on ease of fabrication reveals that all connections may well be used in high seismic zones.

Keywords: Precast Concrete Members, Beam-Column Connection, Ductile Connections, Reversed Cyclic Loading,

GİRİŞ

Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra yapılan saha incelemeleri ve analitik çalışmalar deprem bölgesindeki prefabrik yapıların önemli bir kısmının deprem güvenliğini tam olarak sağlayamadığını göstermiştir (Özden, 2003). Bahis konusu bu yapıların ortak özelliklerine bakıldığında, taşıyıcı sistemde kolonların soket temele mesnetlenmiş olduğu ve üst kısmın mafsallı ağır çatı makasları ile tasarlandığı görülmektedir. Bu tip prefabrik taşıyıcı sistemler genellikle Batı

¹ Dr.Müh., OTS İnşaat Mühendislik Mimarlık Ltd.Şti, İstanbul, ertas@otsinsaat.com

² Yrd.Doç.Dr. Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, sevketozen@yahoo.com

Avrupa ülkelerinde geliştirilmiş olup düşey yük taşıma amaçlıdır (Ersoy 1999). Bu türdeki çerçeve sistemleri Türkiye’de her şirket kendine özgü metodlarla revize etmiş, yatay yükleri taşıyabilecek şekilde yeniden tasarlamaya çalışmıştır (Posada, 2001).

Deprem sonrası prefabrik yapıların hasar ve yıkım sebepleri araştırıldığında, kolonların narın olması, yapının yeterli yatay rijitliğe sahip olmaması neticesinde çok büyük kat ötelenmelerine açık olmaları, bunun yarattığı ikinci merteye etkileri, çatı seviyesinde rijit diyafram detaylarının eksik olması, ve farklı oturma ve dönmelere izin verebilen yumuşak zemin şartları ortak kanı olarak görülmektedir (Çolakoğlu, 2001; Posada, 2001; Meydanlı 2003, Ataköy 2000). Birleşim bölgelerinde oluşan hasar sebepleri irdelendiğinde ise, kiriş alt donatısının tersinir tekrarlı yüklemeler düşünülmediğinden sürekliliğinin olmayışı, yetersiz bindirme boyu ve ya kaynak boyu ve donatı çeliğinin kalitesine ve işçiliğe bağlı olan bazı kaynak problemleri olduğu görülmektedir (Ersoy, 2000; Tankut, 1998).

MEVCUT ÇALIŞMALAR

Moment aktarabilen prefabrik birleşimler kuru ve ıslak birleşimler olarak iki ana başlık altında toplanabilirler. Kuru birleşimler, bulonlu, kaynaklı ve ya ard-germeli olabilirken, ıslak birleşimlerde, birleşim bölgesinin betonu inşaat sahasında dökülmesiyle yapılmaktadır (Ataköy, 1998).

Kaynaklı birleşimler, kolay uygulanabilmesi ve düşük maliyetlerinden dolayı oldukça sık tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar doğru detaylandırıldıklarında kaynaklı birleşimlerin de monolitik sistemler gibi yeterli dayanım, süneklik ve rijitliğe sahip olabileceğini göstermiştir (Bhatt, 1985; Pillai, 1981). Bu tip birleşimlerin davranışları oldukça başarılı olmasına rağmen, bu başarı seçilen kaynak tekniği ve kullanılan donatı çeliğinin kaynaklanabilir olması ile doğrudan ilgilidir. Doğru imalat ve sahada kaynak kalite kontrolü sistemin iki önemli adımı olarak görülebilir.

Bulonlu birleşimler ucuz üretim tekniği ve montaj kolaylığı gibi avantajlarından dolayı tercih edilen bir birleşim detayıdır (French, 1989). Bu tip birleşimlerin tasarımı yapılırken, kesme kuvvetlerinin yaratacağı bozulmanın yanında bulonların yetersiz kenetlenme boyundan dolayı sıyrılıp gelmesi gibi problemler dikkate alınmalıdır (French, 1989-2).

Islak birleşim detaylarının ağırlıklı olarak Yeni Zelanda ve Japonya’da kullanıldığı görülmektedir. Plastik mafsallaşma bölgesinin prefabrik elemanda veya birleşim bölgesinde oluşmasına göre detaylandırılması önem kazanmaktadır. Yeni Zelanda’da sıklıkla kullanılan ıslak birleşim detaylarında, kiriş kolon pas payına oturtulmakta (Sistem 1) veya birleşim kiriş ve kolon orta bölgelerinde yapılmaktadır (Sistem 2). Sistem 1’de, prefabrike kiriş kolonun pas payının üstüne oturtulmaktadır ve böylelikle kalıp işçiliği minimize edilmiş olmaktadır. Dezavantajı ise prefabrike kiriş altından gelen boyuna donatılar düğüm bölgesinde kenetlenmek zorundadır. Sistem 2’deki yöntem ise T veya H şeklindeki prefabrik elemanların kolon ve kiriş ortalarında birleştirilmesidir. Bu sistem tamamen prefabrik elemanlardan oluşup saha işçiliği minimum seviyede tutulmuştur. En büyük dezavantajı, prefabrik elemanların büyük ve ağır olmasından kaynaklanan ağır tonajlı vinç kullanılması gerekliliğidir (Park, 1995). Bir başka ıslak birleşim tipi de özellikle Avrupa’da kullanılan U prefabrike kirişlerdir. Bu birleşim detayında U kiriş içerisine yerleştirilen ve kolona doğru uzatılan boyuna donatılar sayesinde birleşim sağlanmaktadır. En büyük avantajı kalıp işçiliğini ortadan kaldırmasıdır. Bu tipteki birleşimlerde çelik ve polypropilen lif takviyesiyle ıslak birleşimler gerçekleştirildiği ve başarılı sonuçlar elde edildiği raporlanmıştır (Soubra, 1993; Vasconez, 1998).

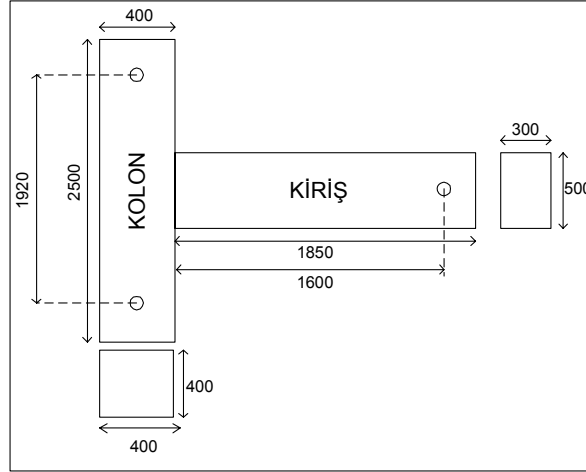
DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, bulonlu, yerinde dökümlü ve kompozit birleşim detayları test edilmiş ve monolitik birleşim deneyi ile karşılaştırılmıştır (Ertaş, 2005). Test edilen numunelerden bulonlu birleşim bu çalışma kapsamında geliştirilen yeni detaylar içermektedir. Kompozit birleşim detayında ise, Türkiye’de yaygın olarak kullanılmasına rağmen performans kriterlerinin detaylı

olarak bilinmemesinden dolayı bu aşamadan elde edilen sonuçlar oldukça önem kazanmaktadır. Yerinde dökümlü birleşim testlerinin benzerleri literatürde de yer almaktadır. Buna karşın farklı birleşim tiplerinin aynı koşullarda test edilip birbirleri ile kıyaslanmasına literatürde rastlanmamıştır (Ertaş, 2006).

Deney Numunesi ve Malzeme Özellikleri

Deney numunesi çok katlı bir yapının ikinci kat dış kolon-kiriş birleşimini temsil etmektedir. Deney elemanları yaklaşık ½ ölçekli olarak üretilmiştir. Test numunesinde, Şekil 1’de gösterildiği gibi, kiriş en kesiti 300x500 mm, kolon kesiti 400x400 mm, kolon yüksekliği 1920 mm, ve kiriş temiz açıklığı 1600 mm’dir.



Şekil 1. Test numunesinin boyutları (mm)

Prefabrik yapılarda genellikle beton sınıfı C35 ve ya C40’a göre tasarım yapıldığı için üretilen deney numunelerinde de nominal beton dayanımı 40 MPa olarak seçilmiştir. Yerinde dökümlü birleşimlerde de beton sınıfı aynı olup, ayrıca bu karışıma hacimsel olarak yüzde 0.5 oranında 40 mm boyunda 0.6 mm çapında çelik lif katılmıştır.

Kompozit deney elemanı haricinde diğer tüm numunelerde aynı tip yumuşak nervürlü donatı kullanılmıştır. Kompozit deney numunesinde ise kaynaklanabilir donatı tipi seçilmesinden dolayı farklı özellikte donatı kullanılmıştır. Tüm deney elemanlarında etriyeler için nervürlü $\Phi 10$, boyuna donatılar için ise nervürlü $\Phi 20$ donatı çeliği kullanılmıştır. Tablo1 verilmiştir.

Tablo 1. Donatı çeliğinin özellikleri (Kompozit numune hariç)

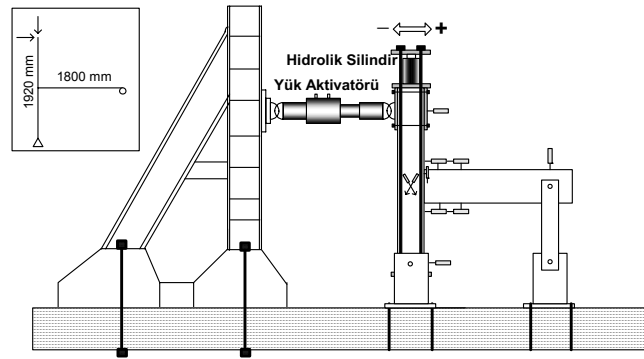
Tip	Yumuşak Donatı	Yumuşak Donatı
Çap (mm)	10	20
Net alan (mm ²)	78.5	314
f_y (MPa)	500	472
f_u (MPa)	560	574
E_s (MPa)	200000	200000
ϵ_v (mm/mm)	0.0025	0.0024
ϵ_{sh} (mm/mm)	0.04	0.023
ϵ_{II} (mm/mm)	0.13	0.14
ϵ_r (mm/mm)	0.19	0.20

Deney Düzenegi ve Prosedürü

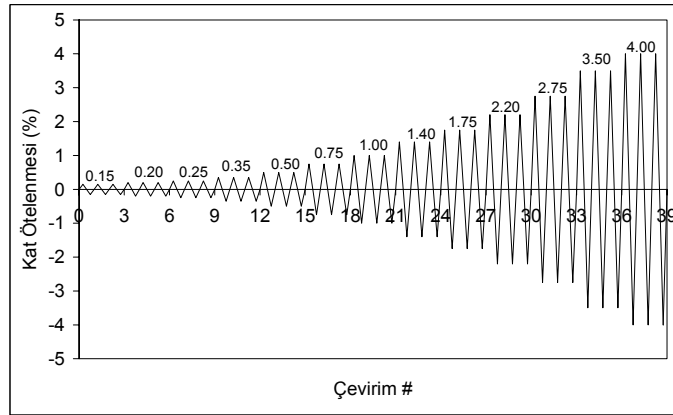
Deney düzenegi ACI T1.01’e (ACI T1.01, 2001) uygun olarak tasarlanmıştır. Şekil 2’de gösterildiği gibi, kolon alt ucundan basit mesnet olarak bağlanmış, kolon üst ucu ise yükleme

yapıldığı noktada serbest ve dönmeye açık bırakılmıştır. Kiriş ucu ise kayıcı mesnet olarak tasarlanmıştır. Kolona aksel yük olarak basınç altındaki taşıma kapasitesinin yüzde 10'u kadar hidrolik basınç silindiri ile yük verilmiştir. Deney esnasında oluşan deformasyonları kayıt etmek amacıyla kolon üst ve alt ucuna, kiriş ucuna ve birleşim bölgesine Şekil 2'de gösterildiği gibi deformasyon ölçerler konulmuştur. Yatay yüklenme deplasman kontrollü olup kat ötelenme seviyelerine bağlı tersinir tekrarlı olarak yapılmıştır. Yükleme patronu yine ACI T1.01'den (ACI T1.01, 2001) aynen alınmıştır ve her bir kat ötelenme seviyesinde üç tam çevirim yapılmıştır. Bu yükleme patronu Şekil 3'te gösterilmiştir. İlk çevirim lineer bölgede olacak şekilde yapılmış ve yükleme adımları kademeli olarak artırılıp deney elemanları yüzde 4.00 kat ötelenmesine kadar test edilmiştir. Net tepe deplasmanı ise kolon tepe deplasmanı (Δ_{ct}), kolon alt ucundaki mesnette oluşan kayma deplasmanı (Δ_{cb}) ile kiriş ucunda düşeyde oluşan oturma deplasmanları (Δ_{bv}) dikkate alınarak Denklem 1'e göre hesaplanmıştır.

$$\Delta_{cnet} = \Delta_{ct} - \Delta_{cb} - \left(\frac{1920}{1800} \times \Delta_{bv} \right) \quad (1)$$



Şekil 2. Deney düzeneği



Şekil 3. Yükleme patronu

Deney Parametreleri ve Birleşim Detayları

Prefabrik eleman deneyleri olarak yerinde dökümlü ıslak birleşimler (CIPC, CIPB), kompozit (CMP-W) ve bulonlu birleşim (B, Mod-B) testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar monolitik numune (M) deneyi ile kıyaslanmıştır.

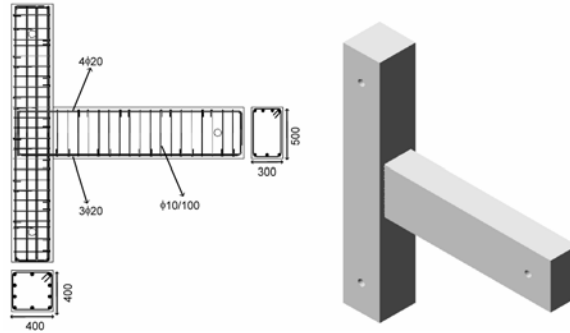
Monolitik Numune (M)

Monolitik numune şahit numune olarak Türk deprem yönetmeliğine (ABYYHY, 1998) göre tasarlanmıştır. Kolondaki boyuna donatı oranı yüzde 2.00, etriye aralığı ise birleşim bölgesinde 100

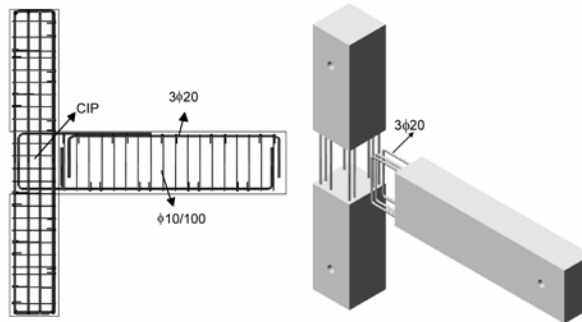
mm dir. Bu değerler tüm test numunelerinde aynı tutulmuştur. Şekil 4'te gösterildiği gibi, kiriş üstünde $4\phi 20$ altında ise $3\phi 20$ boyuna donatı yerleştirilmiştir. Düşey yüklerin etkisinden dolayı alt taraftaki boyuna donatı yüzdesi daha düşük seçilmiştir. Numune beton basınç dayanımı 40 MPa dır.

Yerinde Dökümlü Kolonda Birleşim Numunesi (CIPC)

Deney setinde prefabrik olarak üretilen ilk deney elemanı ıslak birleşim detayı olup birleşim bölgesi kolonda ve düğüm noktasında gerçekleştirilmiştir. Prefabrike kolon üretilirken kolonun orta kısmında yaklaşık 50 cm yüksekliğinde bir boşluk bırakılmıştır. Prefabrike kiriş üretiminde ise $3\phi 20$ U şeklinde donatılar Şekil 5'te de gösterildiği gibi ilave edilmiştir. Bu donatıların haricinde prefabrike kirişte gövde donatısı olarak alt ve üstte $3\phi 20$ boyuna donatı mevcuttur. Prefabrike elemanların basınç dayanımları 52 MPa dır. Birleşim esnasında prefabrike kiriş bu boşluğa doğru oturtulmuş ve bu bölge çelik lifli beton ile doldurulmuştur. Lifli betonun basınç dayanımı 53 MPa olarak ölçülmüştür. Çelik lif kullanılmasının iki ana sebebi vardır. Birincisi, çok dar bir bölgede kiriş donatılarının kenetlenmesi gerektiğinden betonun aderans özelliğini artırması isteğidir. Bir diğeri de, birleşim esnasında kapalı etriyeler montaja imkan vermediği için kapalı etriye yerine çirozlar kullanılmış, düğüm bölgesinin kesme kuvvetlerine karşı dayanımın artırılması içinde çelik lifin katkısından faydalanılmıştır.



Şekil 4. Monolitik numune detayı (M)



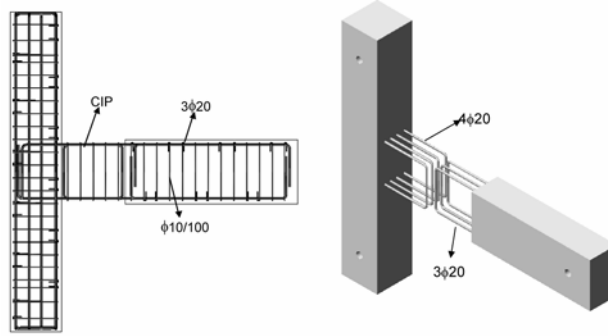
Şekil 5. CIPC numune detayı

Yerinde Dökümlü Kirişte Birleşim Numunesi (CIPB)

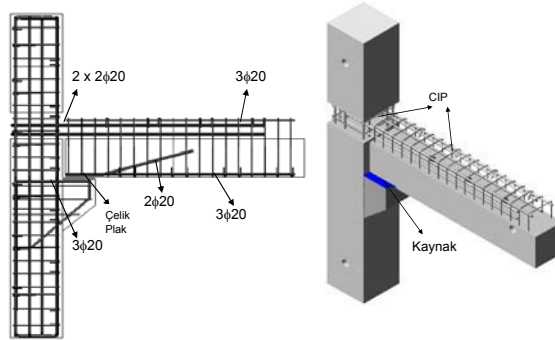
Bu detayda CIPC numunesine benzer bir mantıkla tasarım yapılmış ve birleşim bu kez kiriş ucuna taşınmıştır. Şekil 6'da görüleceği gibi prefabrike kolonun ortasından $4\phi 20$ U şeklinde donatı çıkarılmış, kirişten ise aynı şekilde $3\phi 20$ donatı açıkta bırakılmıştır. Birleşim esnasında bu U şeklindeki boyuna donatılar birbirinin içine geçecek şekilde yerleştirilmiş ve yine daha önceden açıklanan sebeplerden dolayı basınç dayanımı 49 MPa olarak ölçülen çelik lifli beton ile doldurulmuştur. Birleşim bölgesinin uzunluğu 50 cm olarak tasarlanmış olup prefabrike elemanların basınç dayanımı 40 MPa dır.

Kompozit Birleşim Numunesi (CMP-W)

Bu detay Türk prefabrik endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Detay hem kaynak hem de ıslak birleşim içerdiğinden dolayı kompozit birleşim olarak adlandırılmıştır. Şekil 7’de görüldüğü gibi, kiriş alt boyuna donatıları çelik plaka vasıtasıyla birbirine kaynatılarak, üst donatılar ise U şeklindeki donatıların kolon bölgesinde bırakılan boşluğa ankre edilip bu bölgenin beton ile doldurulması ile bağlantı gerçekleştirilmektedir. Öndökümlü kirişin enkesit boyutları 300x300 mm, kolon boyutu ise 400x400 mm dir. Kiriş üstünde 200 mm yüksekliğinde bir boşluk sahada doldurulmak üzere boş bırakılmıştır. Kiriş altında 3 ϕ 20 boyuna donatı kiriş uç kısmına yerleştirilen çelik plakaya kaynatılmıştır. Buna ek olarak, 2 ϕ 20 donatısı yatayla 20 derecelik bir açı yaparak bu plakaya ankraj ve ilave donatı olarak eklenmiştir. Kiriş üstünde ise 2 sıra U şeklinde ϕ 20 donatı montaj aşamasında yerleştirilmiştir. Montaj esnasında prefabrike kiriş kolondan gelen guseye oturtulmuştur. Bu gusenin detayında ise 3 ϕ 20 boyuna donatı kolona ankre edilmiş ve bu donatılar yine çelik plakaya kaynak ile bağlanmıştır. Birleşim esnasında gusedeki plaka ile kiriş ucundaki çelik plaka boydan boya kaynatılmıştır. Üst taraf ise U şeklindeki mesnet donatıları yerleştirildikten sonra betonlanmıştır. Kullanılan donatılar kaynaklanabilir donatılar olup akma ve kopma dayanımları 503 ve 662 MPa dır. Beton basınç dayanımları ise prefabrike elemanlarda 57 MPa, yerinde dökümlü betonun ise 55 MPa dır.



Şekil 6. CIPB numune detayı

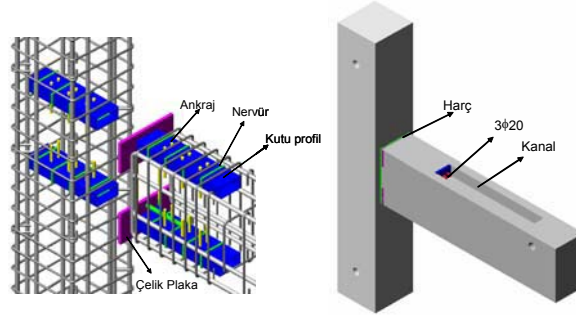


Şekil 7. CMP-W numune detayı

Bulonlu Birleşim Numunesi (B, Mod-B)

Bulonlu birleşimin amacı sahadaki montaj süresini minimuma indirmektir. Bu birleşim detayında bulonların geçeceği boşluklar çelik boru yerine tolerans paylarını arttırmak için kutu profil kullanılarak oluşturulmuştur. Bu tip bir detay çoğunlukla kısa açıklıklı ve düşey yüklerden kaynaklanan kesme yüklerinin düşük seviyelerde olduğu birleşimlerde daha uygundur. Bu birleşimin donatı ve genel görünüşü Şekil 8’de verilmiştir. Bu birleşimde bulonları yerleştirebilmek için kiriş alt ve üstünde kanallar bırakılmıştır. Bu kanallara bulonlar yerleştirilmiş ve tork anahtarı ile 120 Nm’ye kadar sıkılmıştır. Bu işlem birleşim yüzeyinde 1.4 MPa gerilme yaratmaktadır. Bu aşamadan sonra kutu profil çimento harcı ile doldurulmuştur. Bu bulonlu birleşim detayında (B)

kutu profiller etriyelere doğrudan punto kaynağı ile tutturulmuş olup yükleme esnasında prefabrik kirişe rölatif olarak kaymıştır. Bu problemi gidermek amacıyla, kutu profilin yüzeyine donatı çubukları kaynatılmış, ayrıca içindeki çimento harcının profile rölatif kaymasını da önlemek amacıyla kutu profili boydan boya delip geçen vidalar yerleştirilmiştir. Bu revize edilen birleşim detayından (Mod-B) oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. Prefabriğe elemanların basınç dayanımları yaklaşık 36 MPa dır.



Şekil 8. Mod-B numune detayı

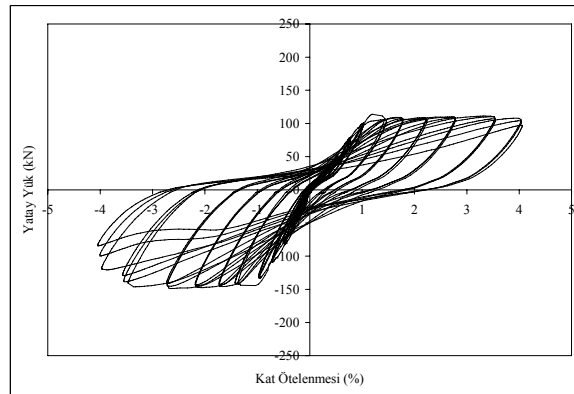
DENEY SONUÇLARI

Monolitik Numune (M)

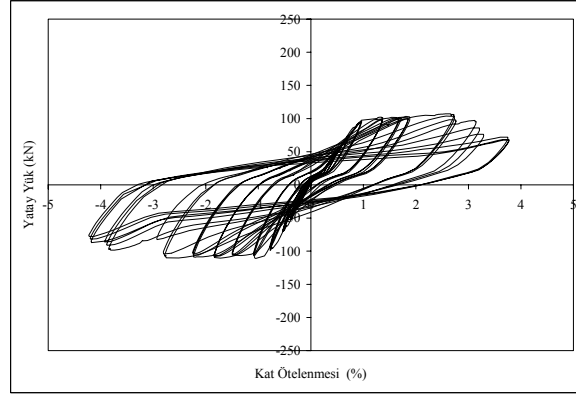
İlk iki çevrimde M numunesi lineer davranış sergilemiş olup yüzde 0.25 kat ötelenme seviyesinde, kolon yüzeyinden 25 cm ötede kirişte kılcal eğilme çatlakları gözlenmiştir. Yüzde 0.75 kat ötelenme seviyesinde ise düğüm bölgesinde ilk diyagonal çatlak kayıt edilmiştir. Kiriş betonunda ezilme ve pas payının atması yüzde 3.50 kat ötelenme seviyesinde olmuştur. Deneyden elde edilen yatay yük-kat ötelenmesi grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Ölçülen maksimum yatay yük itme esnasında 114 kN, çekme de ise -149 kN dur.

Kolonda Islak Birleşim Numunesi (CIPC)

İlk eğilme çatlakları yüzde 0.25 kat ötelenme seviyesinde kolon-kiriş birleşim arayüzünde oluşmuştur. Düğüm bölgesinde deney boyunca herhangi bir diyagonal çatlak oluşmamıştır. Hasar ağırlıklı olarak kiriş ucuna birikmiştir. Test numunesinin genel davranışı Şekil 10'da da görüldüğü gibi yüzde 2.75 seviyesine kadar M numunesine çok benzerdir. Bu seviyeden sonra kapasite ve rijitlik düşüşü M numunesine göre daha hızlıdır. Bunun sebebi pas payının bozulması ve boyuna donatıların burkulmasıdır. Ölçülen maksimum yatay yük itmede 107 kN çekme esnasında ise 111 kN dur. Plastik mafsallaşma kiriş ucunda oluşmuştur ve yüzde 3.50 seviyesinde de prefabriğe kiriş kolona göre rölatif yaklaşık 15 mm kaymıştır.



Şekil 9. M numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı



Şekil 10. CIPC numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Kirişte Islak Birleşim Numunesi (CIPB)

İlk çatlak kolon-kiriş birleşim arayüzünde yüzde 0.25 kat ötelenme seviyesinde ortaya çıkmıştır. Çatlaklar genelde kolon-kiriş ara yüzü ile ıslak birleşimin kiriş arayüzünde yoğunlaşmıştır. Yüzde 2.75 seviyesinde kolon-kiriş arayüzündeki açılma yaklaşık 8 mm olarak ölçülmüş bu seviyeden sonra hasar birleşimin diğer ucuna, kirişe kaymış ve hasar ıslak birleşim-kiriş arayüzünde birikmiştir. Deney esnasında ölçülen maksimum yatay yük Şekil 11’de de verildiği gibi itme esnasında 142 kN, çekmede ise -151 kN ölçülmüştür.

Kompozit Birleşim Numunesi (KMP-W)

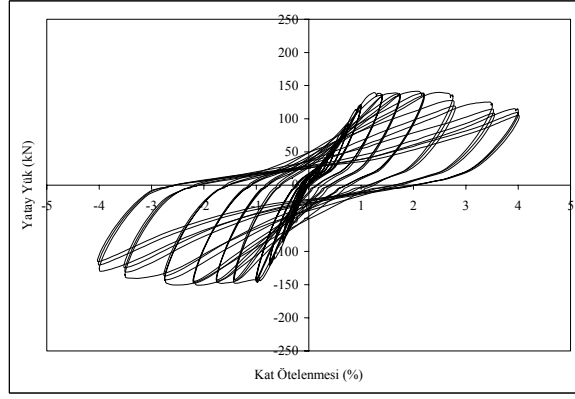
Bu numunede ilk çatlak yüzde 0.50 kat ötelenme seviyesinde kiriş üzerinde olup gusenin bittiği noktada görülmüştür. Yüzde 1.40 kat ötelenme seviyesine gelindiğinde ise kolon-guse birleşim bölgesinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yüzde 1.75 kat ötelenme seviyesinde çatlak sayısı ve genişlikleri oldukça yoğunlaşmıştır. Düğüm bölgesinde diagonal çatlaklar yüzde 2.20 kat ötelenme seviyesinde ortaya çıkmış olup yüzde 3.50 seviyesinde ise kiriş alt boyuna donatıların aniden kopmasıyla deney sonlandırılmıştır. Deney esnasında ulaşılan maksimum yatay yük itmede 226 kN, çekmede ise -209 kN dur. Şekil 12’de KMP-W numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı verilmiştir.

Bulonlu Birleşim Numuneleri (B ve Mod-B)

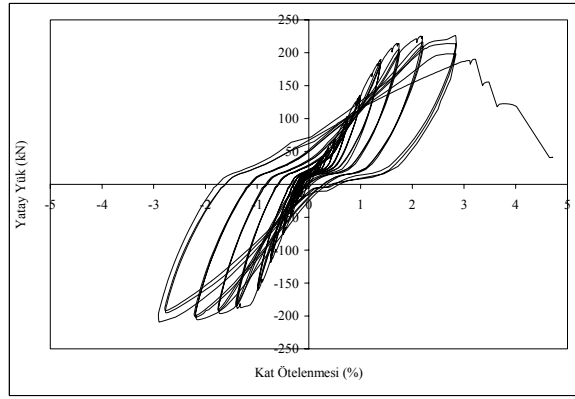
Şekil 13’de verildiği gibi bulonlu birleşimin (B) gösterdiği davranış ilk aşamada oldukça başarısızdır. Yüzde 0.50 kat ötelenme seviyesine kadar oldukça iyi davranan sistemde, bu seviyeden sonra kiriş içine yerleştirilen çelik kutu profilde kiriş betonuna rölatif kaymalar gözlenmiştir. Bu sorun bir sonraki numunede giderilmiş ve tekrar test edilmiştir. Tüm hasar kolon-kiriş ara yüzüne toplanmıştır. Prefabriğe kolon ve kirişte ciddi çatlaklar oluşmamış ve prefabriğe kiriş yüzeyine yerleştirilen çelik plakalar ile kiriş betonunun ezilmesini önlemiştir. Yüzde 3.50 kat ötelenme seviyesinde ise, kiriş üst bulonları kopmuştur. Ölçülen maksimum yük itmede 110 kN, çekme de ise -116 kN dur. Şekil 14’de Mod-B numunesinin tersinir tekrarlı yükleme altındaki yatay yük-kat ötelenmesi davranışı verilmiştir.

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

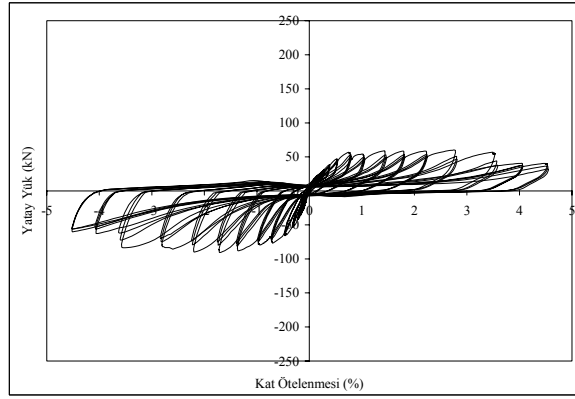
Test edilen Monolitik (M), CIPC, CIPB, KMP-W, B ve Mod-B numuneleri kapasite tahmini, süneklik, rijitlik kaybı, enerji tüketimi gibi kriterler ile birbirleriyle kıyaslanmıştır. B numunesi gösterdiği yetersiz performans sebebiyle bu kıyaslama dışında bırakılmıştır.



Şekil 11. CIPB numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı



Şekil 12. KMP-W numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı



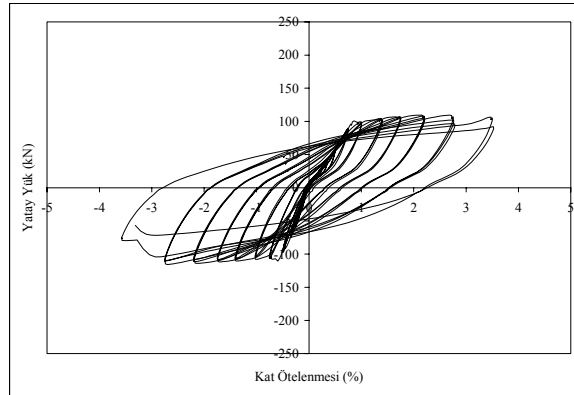
Şekil 13. B numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Dayanım, Göçme Tipi ve Süneklik

Test numunelerinin akma ve maksimum eğilme kapasite tahmini deneyden önce itme (+) ve çekme (-) yönleri için yapılmış ve deneyden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmış ve Tablo 2’de verilmiştir. Kapasite tayini birleşimin performansını göstermesi açısından oldukça önemlidir. Deneyden elde edilen moment kapasiteleri plastik mafsallaşmanın olduğu bölgelere aittir.

Test sonuçları ile teorik sonuçlar kıyaslandığında Mod-B numunesi haricinde teorik eğilme kapasiteleri deney sonuçlarından bir miktar daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi araştırıldığında, M, CIPC, CIPB ve KMP-W numunelerinde prefabrik kırışte kılcal boyutta da olsa kesme çatlağı olduğu tespit edilmiştir. Prefabrike kırışlerde a/d oranının 3.5 civarında olması bu kesme çatlağının ortaya çıkmasına ve moment kapasitesinin azalmasına sebep olduğu

düşünülmektedir. KMP-W numunesinin çekme esnasında oluşan moment değerleri teorik değerlerinden yüksektir. Bunun nedeni ise kolonda bulunan guseden kaynaklanmaktadır. Çünkü çekme esnasında basınç bloğu yalnızca kirişte değil aynı zamanda gusede de oluşmakta ve moment kolu değeri daha büyük bir değere ulaşmaktadır.



Şekil 14. Mod-B numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Tablo 2. Numunelerin kapasite kıyaslaması

Numune Adı	M	CIPC	CIPB	GOK-W	Mod-B
f_c' (MPa) (1)	40	52	49	55	30
f_v (MPa) (2)	472	472	472	503	472
f_u (MPa) (3)	574	574	574	662	574
Alt-Donatı (4)	3 ϕ 20	3 ϕ 20	3 ϕ 20	(3+2) ϕ 20	3 ϕ 20
Üst-Donatı (5)	3 ϕ 20	3 ϕ 20	3 ϕ 20	3 ϕ 20	3 ϕ 20
a (mm) (6)	200/200	200/200	700/700	450/200	200/200
M_{c-v} (kNm) (7)	176/-243	168/-183	172/-178	309/-313	171/-180
M_{c-u} (kNm) (8)	195/-255	183/-190	175/-186	326/-357	188/-199
μ (9)	4+	4	4	2	5
M_{cal-v} (kNm) (10)	188/-248	190/-190	188/-188	340/-262	173/-173
M_{cal-u} (kNm) (11)	221/-279	221/-221	221/-221	379/-328	190/-190
(7)/(10) (12)	0.94/0.98	0.88/0.96	0.91/0.95	0.91/1.19	0.99/1.04
(8)/(11) (13)	0.88/0.91	0.83/0.86	0.79/0.84	0.86/1.09	0.99/1.05

Türk Deprem Yönetmeliği'nde prefabrik yapılarda moment aktaran birleşimler ile ilgili olarak, bu tip birleşimlerin kapasite ve süneklik bakımından monolitik sisteme eş olduğu ispatlayacak analitik ve ya deneysel veri istenmektedir. CIPC ve CIPB numuneleri zarf eğrileri M referans numunesine yüzde 2.75 kat ötelenme seviyesine kadar çok benzerdir. KMP-W numunesinin süneklik değeri 2 civarında olup bunun sebebi numunenin düşük kat ötelenme seviyelerinde göçmesidir. Mod-B numunesinde ise bağlantı bulonlarına tork anahtarları ile ön gerilme verildiği için yüzde 0.50-0.75 kat ötelenme seviyelerinde bulonlar akmaya başlamıştır. Süneklik düzeyi 5 civarındadır.

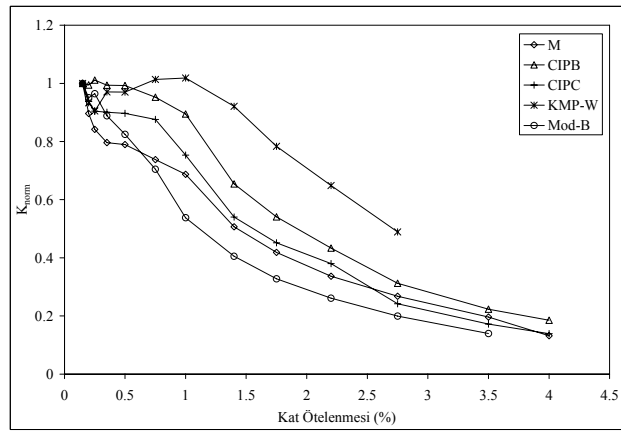
Rijitlik Kaybı

Numunelerin kat ötelenmelerine bağlı rijitlik kaybı, numunelerin sekant rijitlik değişimleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sekant rijitlik değerleri ise her kat ötelenme seviyesindeki üçüncü çevrimin iki tepe noktasından hesaplanmıştır ve bu değerler yüzde 0.15 kat ötelenme seviyesindeki rijitlik değerine göre normalize edilmiştir. KMP-W numunesi yüzde 3.50 kat ötelenmesi seviyesinin ilk çevriminde göçtüğü için yüzde 2.75'e kadar rijitlik değeri hesaplanmıştır. Mod-B numunesinde de, yüzde 3.50 kat ötelenme seviyesinde ikinci çevrimde bulonlar koptuğu için rijitlik değeri ilk çevrimden alınmıştır. Şekil 15'te görüldüğü üzere, M, CIPC ve CIPB deney elemanlarının kat ötelenmesine bağlı rijitlik kaybı davranışları birbirine çok yakındır. Öte yandan KMP-W numunesinde ise yüzde 1.00 kat ötelenme seviyesine kadar ciddi anlamda bir rijitlik kaybı gözlenmemiştir. Deneyin sonunda ise yalnızca başlangıçtaki rijitliğin yüzde 50'sini kaybetmiştir.

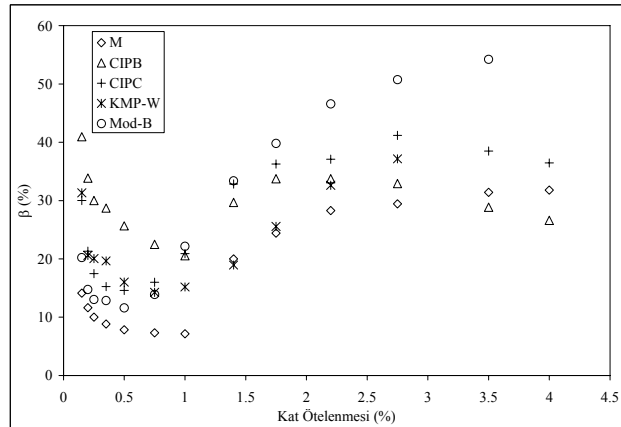
Mod-B numunesinin başlangıçtaki rijitliği yüksek olmasına rağmen kolon-kiriş ara yüzeyinin açılması ile birlikte rijitliğini hızla kaybetmiştir.

Enerji Tüketimi

Numunelerin enerji tüketim performanslarını kıyaslayabilmek için ACI T1.1-01'de yer alan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde tanımlanan elasto-plastik davranışa göre enerji tüketimlerinin hesaplanması ve normalize edilmesidir. Normalize edilmiş enerji tüketim değeri (β), herhangi bir kat ötelenme seviyesinin üçüncü çevirimindeki döngünün içinde kalan alanın, ilk rijitlik değerine göre çizilen elasto-plastik paralelin alanına oranıdır. Şekil 16'da numunelerin normalize edilmiş enerji tüketimleri kat ötelenmesine bağlı olarak verilmiştir. Bu şekillerden kat ötelenme seviyesi arttıkça sistemin enerji tüketim performansının arttığı gözlenmektedir. M, CIPC, CIPB ve KMP-W numunelerinin enerji tüketim performansları birbirine benzer iken Mod-B deney elemanı en yüksek performans değerlerini vermiştir.



Şekil 15. Kat ötelenmesine bağlı rijitlik kaybı



Şekil 16. Kat ötelenmesine bağlı, normalize edilmiş enerji tüketim değerleri

SONUÇLAR

Prefabrike kolon-kiriş düğüm bölgelerinin incelendiği bu deneysel çalışmadan alınan verilerin yorumlanması ve deney esnasında yapılan gözlemlerin ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Test edilen CIPC, CIPB, KMP-W ve Mod-B numuneleri kapasite ve enerji tüketim performansları bakımından deprem bölgelerinde kullanılabilir.

- Mod-B numunesi bu deney fazındaki numuneler içinde kapasite, süneklik ve enerji tüketim kriterlerine göre en iyi performansı göstermiştir.
- Islak ve bulonlu birleşimlerin tersinir tekrarlanır davranışları monolitik sisteminkine çok yakındır. Kompozit birleşim detayında ise kaynaklı tarafın performansı monolitik sistemle kıyaslandığında daha düşük seviyededir. Bu durumun sebebi olarak yoğun kaynak işçiliğinin boyuna donatıların mekanik özelliklerini bozmuş olma ihtimali düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkılarından dolayı TUBİTAK'a, Boğaziçi ve Kocaeli Üniversitelerine, Sn. Hakan Ataköy'e, Sn. Güntül Barka'ya, AFA Prefabrik'e ve GÖK İnşaat'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- ACI T1.1-01, Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing, ACI.
- Ataköy, H., (2000), "17 Ağustos Marmara Depremi ve TPB Üyelerince Yapılan Prefabrik Yapılar, Beton Prefabrikasyon," 52: 5-14.
- Ataköy, H.(1998) "Prefabrik Taşıyıcı Sistem Birleşim Teknikleri" Prefabrik Yapılar ve Deprem Çalıştayı, Türkiye Prefabrik Birliği:14-50.
- Bhatt P. ve Kirk, D.W., (1985 "Test on an Improved Beam Column Connection for recast Concrete ACI Journal" 82(6): 834-843).
- Çolakoğlu, H. K., (2001), Seismic Resistant Design of Precast Industrial Building, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- Ersoy U., Özcebe, G. ve Tankut, T., (2000) "1999 Marmara ve Düzce Depremlerinde Gözlenen Önüretimli Yapı Hasarları Deprem ve Prefabrik" 10. Prefabrik Sempozyumu, 1-10, İstanbul
- Ersoy, U., Tankut, T. ve Özcebe, G., (1999), "Damages Observed in the Precast Framed Structures in the 1998 Ceyhan Earthquake and their Rehabilitation", ODTÜ.
- Ertaş, O. (2005), Ductile Beam-Column Connections In Precast Concrete Moment Resisting Frames, PhD Thesis, Boğaziçi Üniversitesi.
- Ertaş, O., Özden, Ş., Özturan T., (2006) "Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames", PCI Journal, 51(3): (66-76).
- French, C. W., Amu, O. ve Tarzikh, C., (1989), "Connections between Precast Elements Failure Outside Connection Region", Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(2): 316-340..
- French, C. W., Hafner, M. ve Jayashankar, V., (1989), "Connection Between Precast Elements – Failure within Connection Region", Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(12): 3171-3192
- Meydanlı, H., (2003), Prefabrik Lambda Tipi Endüstri Yapıların Deprem Etkisi Altındaki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- Özden, Ş. ve Meydanlı, H. (2003), "Seismic Response of Pre-Cast Industrial Buildings During 1999 Kocaeli Earthquake", SE-40EEE, Skopje Earthquake 40 Years of European Earthquake Engineering, Skopje , Macedonia.
- Park, R., A (1995), "Perspective on the Seismic Design of Precast Concrete Structures in New Zealand", PCI Journal, 40(3): 40-59.
- Pillai, S. U. ve Kirk, D. W., (1981) "Ductile Beam-Column Connection in Precast Concrete", ACI Journal, 8(6): 480-487.
- Posada, M. ve Wood, S.L., (2001), "Seismic Performance of Precast Industrial Buildings in Turkey", http://ccee.oregonstate.edu/workshops/tubitak/reports/posada_evaluation_of_seismic.pdf.
- Soubra, K. S., Wight, J.K. ve Naaman, A.E., (1993), "Cyclic Response of Fibrous Cast-in-Place Connections in Precast Beam-Column Subassemblies", ACI Structural Journal, 90(3): 316-323
- Tankut, T. (1998), "Önüretimli Yapı Bağlantılarının Deprem Davranışı", Prefabrik Yapılar ve Deprem Çalıştayı, Türkiye Prefabrik Birliği:116-126
- Vasconez, R.M., Naaman, A.E. ve Wight, J.K., (1998), "Behavior of HPFRC Connections for Precast Concrete Frames Under Reversed Cyclic Loading," PCI Journal, 43(6): 58-71.