

ARD-GERMELİ KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN TERSİNİR TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Onur ERTAŞ ve Şevket ÖZDEN

OTS İNŞAAT Müh.Mim.Ltd.Şti., Kocaeli Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü

ÖZET

Bu çalışma kapsamında deprem bölgelerinde uygulanmak üzere beş adet ard-germeli birleşim detayı tersinir tekrarlı yükler altında test edilmiştir. Test değişkeni, birleşim bölgesindeki yumuşak donatının eğilme kapasitesine katkısı olarak seçilmiştir. Bu donatının katkısı yapılan deneylerde % 0 ile % 65 arasında değişmektedir. Performans kriteri olarak yeterli derecede enerji tüketebilen ve aynı zamanda kalıcı hasarların minimum düzeyde olduğu birleşim detayı amaç edinilmiş ve yumuşak donatının eğilme kapasitesine katkısının yüzde 30 civarında olması durumunda bunun sağlandığı tespit edilmiştir

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 (1). 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 Avrupa ülkelerinde geliştirilmiş olup düşey yük taşıma amaçlıdır (2). Bu türdeki çerçeve sistemlerini Türkiye’de her şirket kendine özgü metodlarla revize etmiş, yatay yükleri taşıyabilecek şekilde yeniden tasarlamaya çalışmıştır (3).

Deprem sonrası prefabrik yapıların hasar ve yıkım sebepleri araştırıldığında, kolonların narin olması, yapıların yeterli yatay rijitliğe sahip olmaması neticesinde çok büyük kat ötelenmelerine açık olmaları, bunun yarattığı ikinci mertebe etkileri, çatı seviyesinde rijit diyafram detaylarının eksik olması, ve farklı oturma ve dönmelere izin verebilen yumuşak zemin şartları ortak kanı olarak görülmektedir (3,4,5,6). 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 (7, 8).

MEVCUT ÇALIŞMALAR

Yapılan literatür taramasında, ard-germeli birleşimler ile ilgili çalışmaların 1970’lerde başladığı ve Blakely ve Park tarafından Yeni Zelanda’da yapıldığı görülmüştür. Yapılan bu araştırmalarda, basınç bölgesindeki donatı çeliğinin sünekliliği arttırdığı ve kiriş ortasına yerleştirilen ard-germe halatlarının düğüm bölgesinin kayma dayanımına da olumlu etki yarattığı görülmüştür (9).

1971 San Fernando depreminde prefabrik birleşimlerde ciddi hasarlar olduğu gözlenmiş ve bu amaçla 1980’li yıllarda Minnesota Üniversitesi’de French tarafından bir seri prefabrik kolon-kiriş

birleşim detayı test edilmiştir. İncelenen birleşimler ard-germeli, bulonlu, kompozit ve kaynaklı detaylardır. Bu birleşim detaylarının hepsi yeterli süneklik ve kapasite performansı gösterdiği araştırmacı tarafından raporlanmıştır (10)

Ard-germeli birleşimler ile ilgili en kapsamlı araştırma ABD’de NIST tarafından yürütülmüştür. 1/3 ölçekle tasarlanan prefabrike iç kolon-kiriş birleşim modelleri dört aşamalı bir program dahilinde test edilmiştir. Birinci aşamada, şahit numune olarak monolitik kolon-kiriş birleşim detayı ACI 352 (11) kriterlerine göre üretilmiş ve test edilmiştir. Buna ek olarak prefabrik numune detayında ise kirişin alt ve üst yüzeyine yakın 25.4 mm çaplı ard-germe bulonları yerleştirilmiş ve çimento şerbeti ile doldurulmuştur. Ard-germe yükü kolon-kiriş ara yüzeyinde 7 MPa gerilme oluşturacak seviyededir. Bu test göstermiştir ki, birleşim detayı yeterli sünekliğe ve dayanıma sahip olmasına rağmen, enerji tüketimi monolitik sisteme göre oldukça daha düşüktür (12). Çalışmanın ikinci safhasında ise, ilk olarak ard-germe bulonları kiriş merkezine doğru yerleştirilmiş sonra da ard-germe bulonu yerine öngerme halatları kullanılmıştır. Her iki tipte de bulonlar ve ya halatlar aderanslıdır ve ard-germe yük seviyesi değişmemiştir. Sonuçta birleşim detayının enerji tüketim performansı birinci faza göre daha da iyileşmiştir. Ancak birinci ve ikinci aşamadaki deneylerde yükleme esnasında sıfır rijitlik davranışı kayıt edilmiş ve kirişin kolona göre rölatif kaydığı gözlenmiştir (13). Bu amaçla, üçüncü aşamada kısmi aderanslı öngerme halatları ile test yapılmıştır (14). Çalışmanın dördüncü evresi iki kademeli olarak tamamlanmıştır. İlk olarak öngerme halatları kiriş merkezine çekilip, kiriş alt ve üstüne yumuşak donatı çeliği yerleştirilmiştir. İkinci bir detayda öngerme halatları aderansız ve yumuşak donatılar ise aderanslı olarak kirişin üst ve altına yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar bu setteki numunelerin enerji tüketim performanslarının monolitik sistemin davranışına yaklaştığını göstermiştir.

Bu çalışmanın ikinci kademesinde ise, yumuşak donatı çeliğinin eğilme kapasitesine etkisi parametre olarak seçilmiştir. Bu deney numunelerinde öngerme halatları kiriş merkezine kısmi aderanslı ve ya aderansız olarak yerleştirilmiş, kirişin üst ve alt yüzeyine de enerji tüketimini arttırmak için yumuşak donatılar konulmuştur. Bu donatılarda düşük kat ötelemelerinde kopmasını engellemek için de bir miktar aderansız boy bırakılmıştır (15). Bu çalışmanın sonuçları göstermiştir ki, hibrit birleşimlerin performansı kapasite, rijitlik ve enerji tüketimi bakımından monolitik şahit numunesinin davranışını yakalamış, ayrıca sistemde oluşan hasar minimum düzeyde kalmıştır. Buna ek olarak, sistemdeki kalıcı deplasmanlar da sıfır değerine yakın seviyelerdedir (15).

Benzer çalışmalar PRESSS kapsamında, Priestley tarafından da büyük ölçekli aderansız kolon-kiriş birleşim elemanları üzerinde yapılmış ve birleşime yumuşak donatı yerleştirilmemiştir. Sistem bi-lineer yay gibi davranmış, süneklik ve dayanım bakımından yeterli performansı sağlarken, enerji tüketimi minimum düzeyde kalmıştır (16).

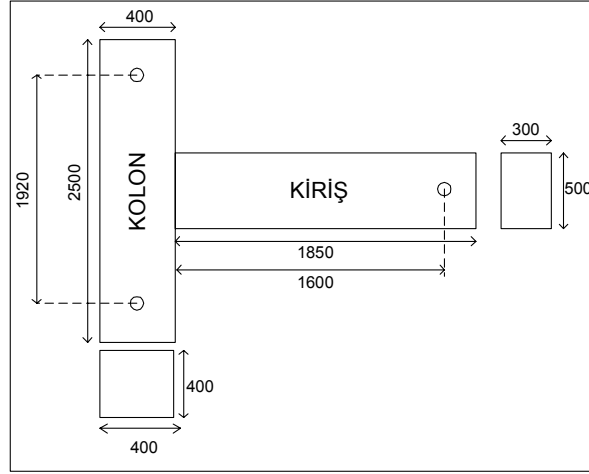
Ard-germeli birleşimler ile ilgili bazı çalışmalar ODTÜ’de de gerçekleştirilmiştir ve birleşim detayının davranışı monolitik elemanın davranışı ile kıyaslandığında tatmin edici bulunmuştur (17).

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, ard-germeli birleşimlerde yumuşak donatının eğilme kapasitesine katkısı deney parametresi olarak seçilmiştir. Çalışma üç temel unsura dayanmaktadır. Birincisi TS3233 (18)’de yer alan ard veya öngermeli sistemlerde eğilme kapasitesinin yüzde 10 miktarı yumuşak donatı ile taşınmalıdır kriterini irdelemektir. Çünkü bununla ilgili herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. İkinci unsur ise, ACI tarafından yayınlanan ard-germeli birleşimlerin tasarım kriterleri (19) sadece PRESSS ve NIST tarafından yapılan kısıtlı sayıdaki bazı deneysel çalışmalara dayanmaktadır. Burada yapılan çalışmalar ile bu yönetmelikteki tasarım kriterlerini irdelenme fırsatı yakalanmış olup burada önerilen bazı katsayılar ile ilgili yorumlar yapılmıştır. Son unsur ise, ard-germeli birleşimlerin performans kriterleri konvansiyonel sistemden oldukça farklılıklar teşkil ettiği için, tasarımcıya yönelik optimum bir detay geliştirilmiştir. (20,21).

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. Numunelerde, Şekil 1’de gösterildiği gibi, kiriş en kesiti 300x500 mm, kolon en 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. Tüm numunelerde aynı tip yumuşak nervürlü donatı kullanılmıştır. Tüm deney elemanlarında etriyeler için nervürlü $\Phi 10$, boyuna donatılar için ise nervürlü $\Phi 20$ donatı çeliği kullanılmıştır ve mekanik özellikleri Tablo1 verilmiştir.

Tablo 1. Donatı çeliğinin özellikleri

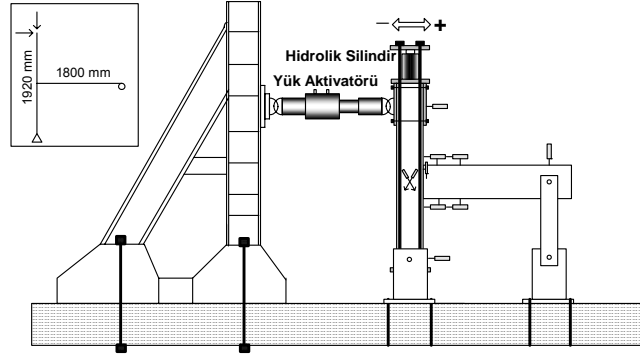
| Tip | Yumuşak Donatı | Yumuşak Donatı |
|-----------------------------|----------------|----------------|
| Çap (mm) | 10 | 20 |
| Net alan (mm ²) | 78.5 | 314 |
| f_v (MPa) | 500 | 472 |
| f_u (MPa) | 560 | 574 |
| E_s (MPa) | 200000 | 200000 |
| ϵ_v (mm/mm) | 0.0025 | 0.0024 |
| ϵ_{sh} (mm/mm) |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

Deney Düzeneği ve Prosedürü

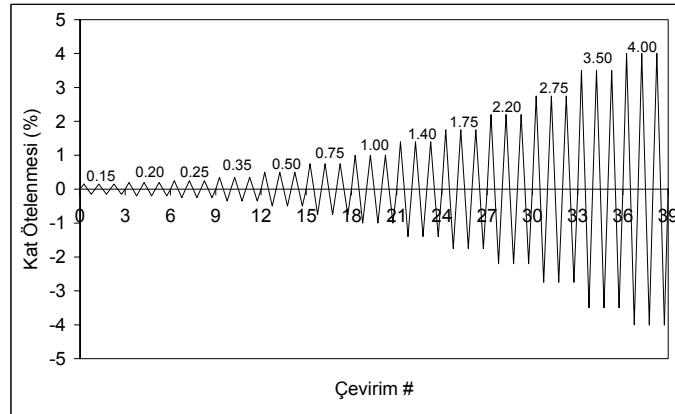
Deney düzeneği ACI T1.01’e (22) uygun olarak tasarlanmıştır. Şekil 2’de gösterildiği gibi, kolon alt ucundan basit mesnet olarak bağlanmış, kolon üst ucu ise yükleme yapıldığı noktada serbest ve dönmeye açık bırakılmıştır. Kiriş ucu ise kayıcı mesnet olarak tasarlanmıştır. Kolona aksel yük olarak basınç 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. öngerme halatlarında oluşan gerilmeleri gözlemlmek için de kiriş uç kısmına bir adet yük hücresi yerleştirilmiştir. Yatay yükleme deplasman kontrollü olup kat ötelenme seviyelerine bağlı tersinir tekrarlı olarak yapılmıştır. Yükleme patronu yine ACI T1.01’den 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



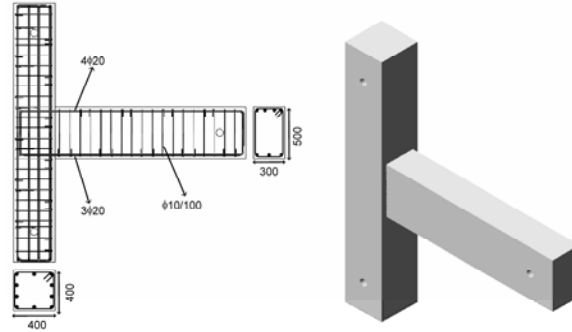
Şekil 3. Yükleme patronu

Deney Parametreleri ve Birleşim Detayları

Deneylerde yumuşak donatının eğilme kapasitesine katkısı temel parametre olarak seçilmiştir ve toplamda beş adet test yapılmıştır. Bu katkı sırasıyla yüzde 0 ile 65 arasında değişmektedir (PTM0, PTM10, PTM30, PTM50, PTM65). Elde edilen sonuçlar monolitik numune (M) deneyi ile kıyaslanmıştır.

Monolitik Numune (M)

Monolitik numune şahit numune olarak Türk deprem yönetmeliğine 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 4Φ20 altında ise 3Φ20 boyuna donatı yerleştirilmiştir. Açıklık yüklerinin etkisinden dolayı üst taraftaki boyuna donatı yüzdesi daha büyük seçilmiştir. Numune beton basınç dayanı 40 MPa dır.

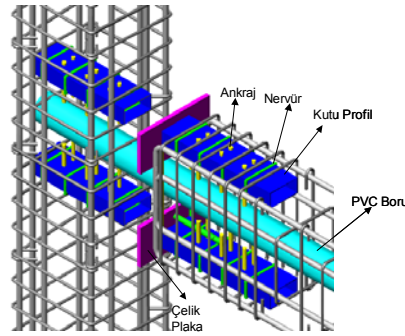


Şekil 4. Monolitik numune detayı (M)

Ard-Germeli birleşim numuneleri (PTM#)

Tüm prefabrik kiriş ve kolonlar PTM0 numunesi haricinde tek tip üretilmiş olup, tek farkları montaj aşamasında birleşim bölgesine konan donatı miktarları olmuştur. İlk üretilen numune PTM0 olarak adlandırılmıştır. Bu numunenin özelliği birleşim bölgesinde yumuşak donatı içermemesidir. İkinci numunede (PTM10) yumuşak donatının eğilme kapasitesine katkısı yüzde 10 mertebesinde olup, bu oran TS3233'e göre alt limit seviyesidir. Bir sonraki numunede bu oran yüzde 30 seviyelerine çekilmiştir (PTM30). Dördüncü numune ACI T1.02-03'de yer alan maksimum yumuşak donatının momente katkısı yüzde 50'yi geçmeyecektir kriterine göre tasarlanmıştır (PTM50). Son deney elemanında ise bu oran yüzde 65 seviyesine çekilerek testi yapılmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi ard-germeli numunelerin geometrik özellikleri ve gövde donatı detayları aynıdır (Şekil 5)

Montaj aşamasında ilk önce kolon-kiriş ara yüzeyinde bırakılan 15 mm boşluk tamir harcı ile doldurulmuş ve bu işlemden 24 saat sonra yumuşak donatılar yerleştirilmiş ve uçlarından somunlar ile bağlanmıştır fakat herhangi bir şekilde öngerme verilmemiştir. Donatıların birleşim bölgesine denk gelen yerlerinde düşük kat ötelenme seviyelerinde kopmasını engellemek için aderansız kısa bir boy bırakılmıştır. Daha sonra donatıların yerleştirildiği çelik kutular çimento harcı ile doldurulmuştur. Bu işlemden sonra öngerme halatları yerleştirilmiş ve ard-germe işlemi yapılmıştır. Bu işlem esnasında oluşan kayıplar ve net yük kiriş ucuna yerleştirilmiş olan yük hücresinden okunmuştur.



Şekil 5. Ard-germeli numunelerin birleşim detayı

- **PTM0:** PTM0 numunesi birleşim bölgesinde yumuşak donatı içermediği için kirişin alt ve üstünde donatı kanalı bırakılmamıştır. Kiriş merkezine yerleştirilen PVC boru içinden 6 adet 13 mm çaplı öngerme halatı geçirilmiştir. Uygulanan ard-germe yükü sonucunda birleşim yüzeyinde oluşan gerilme miktarı 3 MPa dır. Prefabrike elemanların beton basınç dayanımları 60 MPa olup, prefabrike kirişte 2Φ20 gövde donatısı mevcuttur.
- **PTM10:** Bu kez, birleşim bölgesinde kirişin alt ve üstüne 1Φ10 donatısı eğilme kapasitesine yüzde 10'luk katkı yapması için yerleştirilmiştir. Uygulanan ard-germe yükü

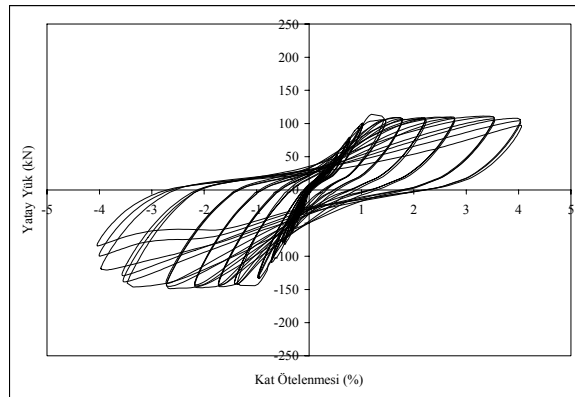
ve halat sayısı PTM0'daki ile aynıdır. Prefabrike elemanlarda kullanılan betonun basınç dayanımı 67 MPa dır.

- *PTM30*: Detay PTM10 ile tamamen aynı olup, yumuşak donatının birleşimin moment kapasitesine katkısını arttırmak için 1Φ10 yerine 1Φ20 donatısı çekme ve basınç bölgelerine yerleştirilmiştir. Betonun basınç dayanımı 52 MPa dır ve uygulanan ard-germe yükü ve halat sayısı PTM0'daki ile aynıdır.
- *PTM50*: Detay PTM30 ile tamamen aynı olup, yumuşak donatının katkısı yüzde 50 seviyesindedir ve donatı olarak 1Φ20 yerine 2Φ20 yerleştirilmiştir. Prefabrike eleman üretiminde kullanılan betonun basınç dayanımı 52 MPa dır ve uygulanan ard-germe yükü ve halat sayısı PTM0'daki ile aynıdır.
- *PTM65*: Bu birleşim detayında yumuşak donatıların birleşimin moment kapasitesine katkısı yüzde 65 olup, ard-germe seviyesi diğer ard-germeli numunelere göre yarı seviyesindedir. Yumuşak donatı miktarı olarak PTM50'de ki gibi 2Φ20 dir. Betonun basınç dayanımı ise 43 MPa olarak ölçülmüştür.

DENEY SONUÇLARI

Monolitik Numune (M)

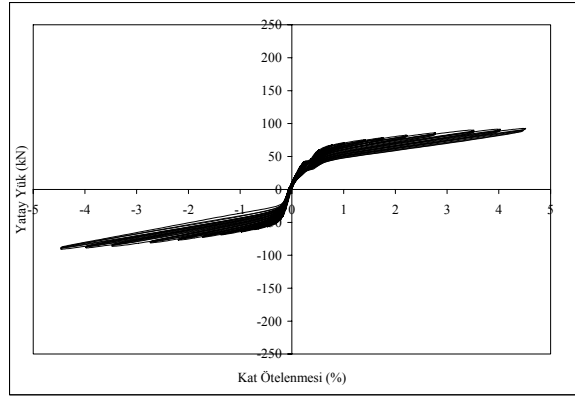
İlk iki çevrimde M numunesi lineer davranış sergilemiş olup yüzde 0.25 kat ötelenme seviyesinde, kolon yüzeyinden 25 cm ötede kirişte kılcal eğilme çatlakları gözlenmiştir. Yüzde 0.75 kat ötelenme seviyesinde ise düğüm bölgesinde ilk diyagonal çatlak kayıt edilmiştir. Kiriş betonunda ezilme ve pas payının 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.



Şekil 6. M numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Ard-Germeli Birleşim-PTM0

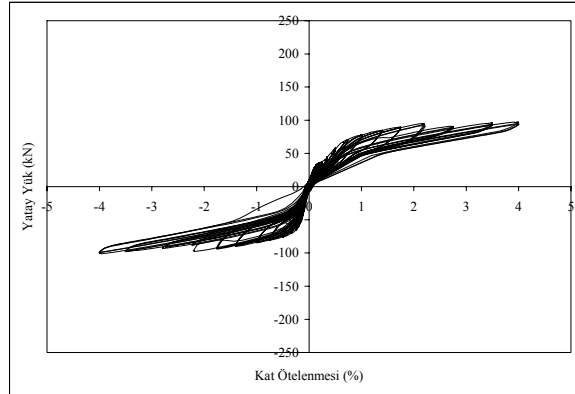
Deney esnasında prefabrike kiriş ve kolonda herhangi bir hasar oluşmamıştır. Yüzde 0.35 kat ötelenme seviyesinde arayüzde ilk kılcal çatlak görülmüştür. Deney sonunda sistemdeki kalıcı deplasman yok denecek kadar azdır. Şekil 7' de yatay yük-kat ötelenmesi ilişkisi gösterilmiştir. PTM0 numunesi bi-lineer yay gibi davranmış hemen hemen yükleme eğrisinin üstünden geri dönmüştür.



Şekil 7. PTM0 numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Ard-Germeli Birleşim-PTM10

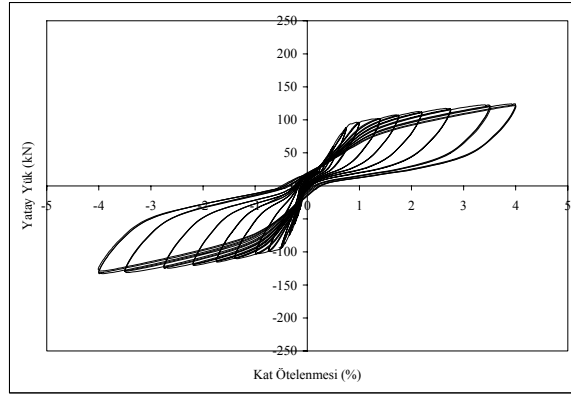
Deney esnasında yüzde 0.25 kat ötelenme seviyesinde kolon-kiriş ara yüzeyinde açılma başlamış olup, yüzde 0.75 seviyesinde ise de prefabrike kirişin kanal bölgesinde kılcal eğilme çatlakları oluşmuştur. Yüzde 1.75 kat ötelenme seviyesinde prefabrike elemanlar da herhangi bir artan hasar tespit edilmemiştir. Kat ötelenmesi yüzde 2.20 seviyesinde iken yumuşak donatı kopmuştur. Bundan sonraki davranışı PTM0 numunesiyle hemen hemen aynıdır. Şekil 8’de deneyden elde edilen histeretik eğri verilmiştir. Kayıt edilen maksimum yük itmede 97 kN, çekmede ise -101 kN dur. Öngerme halatları kapasitelerinin yaklaşık yüzde 68’ine kadar zorlanmıştır. Sistemdeki kalıcı deplasman ise 1 mm’den azdır.



Şekil 8. PTM10 numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Ard-Germeli Birleşim-PTM30

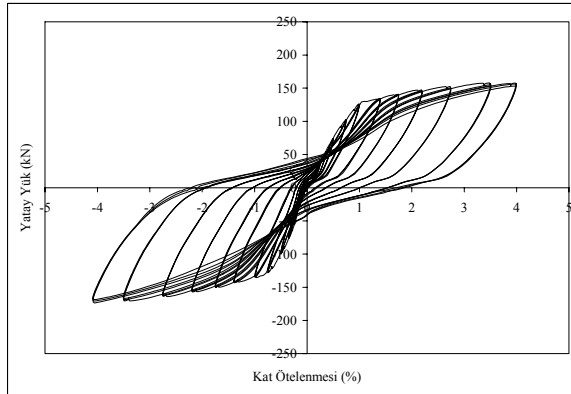
Deney esnasında yüzde 0.75 kat ötelenme seviyesinde kolon yüzeyinden 50 cm ötede kirişte kılcal eğilme çatlakları oluştuğu gözlenmiştir. Bu çatlakların haricinde tüm hasar birleşim yüzeyinde birikmiştir. Şekil 9’da deneyden elde edilen yatay yük-kat ötelenmesi davranışı verilmiştir. Yumuşak donatı miktarının artması ile birlikte numunenin davranışında olumlu yönde ciddi değişiklikler gözlenmiştir. Deney sonunda ise kalıcı deplasman maksimum 7 mm olarak ölçülmüştür. İtme esnasındaki maksimum yatay yük 124 kN, çekmede ise -133 kN dur. Öngerme halatları ise kat ötelenmesinin yüzde 4.00 olduğu seviyede ortalama kapasitesinin yüzde 63’üne kadar zorlanmıştır.



Şekil 9. PTM30 numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Ard-Germeli Birleşim-PTM50

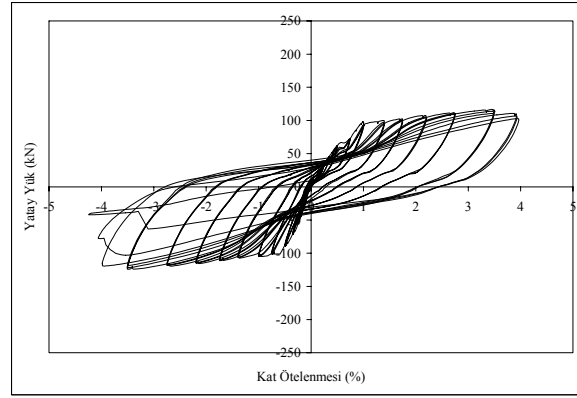
Kılcal eğilme çatlakları yüzde 0.50 kat ötelenme seviyesinde prefabrik kirişte ortaya çıkmıştır. Yüzde 1.75 kat ötelenme seviyesinde prefabrike kiriş üzerinde ince kılcal çatlaklar oluşmuştur. Düğüm bölgesinde ise yüzde 3.50 kat ötelenme seviyesinde ise kılcal diyagonal çatlaklar tespit edilmiştir. PTM50 numunesinde oluşan hasar miktarı diğer üç ard-germeli numuneye oranla daha fazladır. PTM50 numunesinin davranışı Şekil 10'dan anlaşıldığı gibi monolitik numunenin davranışına yaklaşmıştır. Kayıt edilen maksimum yatay yük itmede 158 kN, çekmede ise -174 kN dur. Halatlarda oluşan maksimum gerilme ise kapasitesinin yüzde 60'ı kadardır.



Şekil 10. PTM50 numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

Ard-Germeli Birleşim-PTM65

Kılcal eğilme çatlaklarının yüzde 0.50 kat ötelenme seviyesinde prefabrik kirişin kanal hizasında olduğu gözlenmiştir. Yüksek kat ötelenme seviyelerinde prefabrik kirişteki çatlak sayısının ve genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Yüzde 4.00 kat ötelenme seviyesinde iken halatlarda oluşan maksimum gerilme kapasitesinin yüzde 63'ü kadardır. PTM65 numunesinin tersinir tekrarlı yükleme altındaki davranışı M numunesine çok benzerdir. Şekil 11'de PTM65 test elemanının histeretik davranışı gösterilmiştir. Ölçülen maksimum yatay yük itme ve çekme esnasında sırasıyla 117 kN ve -124 kN dur.



Şekil 11. PTM65 numunesinin yatay yük-kat ötelenmesi davranışı

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Dayanım ve Süneklik

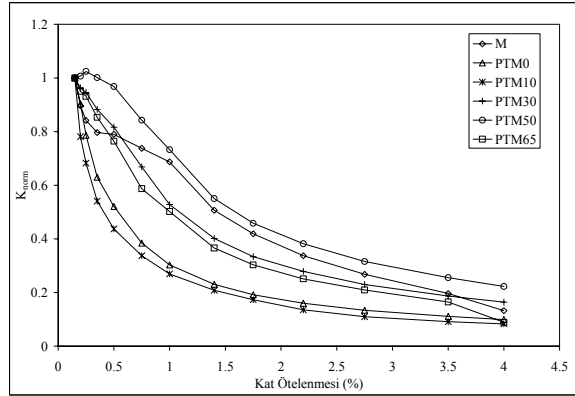
Ard-germeli numunelerin yüzde 4.00 kat ötelenme seviyesindeki eğilme kapasitesi hesapları ACI T1.02-03'deki prosedüre göre yapılmıştır. Bu hesap yöntemindeki en kiritik nokta kolon ile kiriş ara yüzeyinde oluşan açılmanın doğru tahmin edilmesidir. Bu hesap yöntemindeki formülasyonda aderans bozulması kat sayısının 2 ile 5.5 arasında alınması tavsiye edilmektedir. Yapılan deneyler göstermiştir ki bu kat sayı genelde 2~3 civarındadır. Deney elemanlarının kapasite kıyaslamaları ve süneklik değerleri Tablo.2'de verilmiştir. Aynı zamanda bu tabloda halatlarda oluşacak ortalama gerilme tahminleri de yer almaktadır. Deney sonuçlarından elde edilen eğilme kapasitesi ile hesaplanan değerler birbirine yakın sayılabilir. Halatlarda oluşan gerilme tahminlerinde de PTM0, PTM10 ve PTM30 numuneleri için elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile benzeşirken, PTM50 ve PTM65 numuneleri için yüzde 6~8 civarında bir sapma gözlenmiştir. Bununla birlikte bu iki numunenin davranışının ard-germeli sistemden daha çok monolitik sisteme benzemesi ve hasar birikimi ve dağılımının biraz daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Süneklik düzeyleri ise 5 ve üzeri olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Numunelerin kapasite kıyaslaması

| Numune Adı | | PTM0 | PTM10 | PTM30 | PTM50 | PTM65 |
|--------------------------|------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| f_c' (MPa) | (1) | 60 | 67 | 52 | 52 | 43 |
| f_v (MPa) | (2) | - | 472 | 472 | 472 | 472 |
| f_u (MPa) | (3) | - | 574 | 574 | 574 | 574 |
| Alt-Donatı | (4) | - | 1 ϕ 10 | 1 ϕ 20 | 2 ϕ 20 | 2 ϕ 20 |
| Üst-Donatı | (5) | - | 1 ϕ 10 | 1 ϕ 20 | 2 ϕ 20 | 2 ϕ 20 |
| F_{pt} (kN) | (6) | 450 | 450 | 450 | 450 | 225 |
| a (mm) | (7) | | | | | |
| M_c (kNm) | (8) | 158/-152 | 166/-173 | 212/-228 | 271/-298 | 200/-212 |
| f_{pt}/f_{ptu} (%) | (9) | 68/66 | 67/69 | 62/64 | 60/61 | 59/64 |
| μ | (10) | 5+ | 6+ | 6+ | 5+ | 5 |
| M_{cal-c} (kNm) | (11) | 164/-164 | 183/-183 | 228/-228 | 296/-296 | 223/-223 |
| f_{pt-cal}/f_{ptu} (%) | (12) | 66/66 | 66/66 | 65/65 | 64/64 | 68/68 |
| (8)/(11) | (13) | 0.96/0.93 | 0.91/0.95 | 0.93/1.00 | 0.92/1.00 | 0.90/0.95 |
| (9)/(12) | (14) | 1.03/1.00 | 1.02/1.05 | 0.95/0.98 | 0.94/0.95 | 0.87/0.94 |

Rijitlik Kaybı

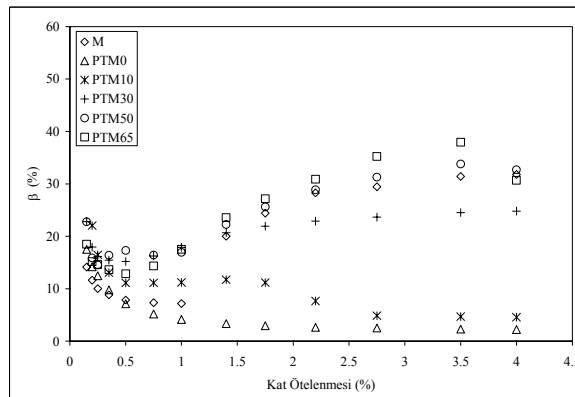
Numunelerin kat ötelenmelerine bağlı rijitlik kaybı, numunelerin sekant rijitlik değişimleri temel alınarak hesaplanmıştır. Sekant rijitlik değerleri ise her kat ötelenme seviyesindeki üçüncü çevrimin iki tepe noktasından hesaplanmıştır ve bu değerler yüzde 0.15 kat ötelenme seviyesinde rijitlik değerine göre normalize edilmiştir. Ard-germeli numunelerin başlangıçtaki rijitlikleri monolitik numuneye oranla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Öte yandan, Şekil 12’de gösterildiği gibi, ard-germeli birleşimlerden kolon-kiriş ara yüzeyinin açılmasıyla rijitlik kaybı hızlanmıştır. Rijitlik kaybındaki düşüş hızı ise birleşimdeki yumuşak donatı miktarı ile ters orantılıdır. Yumuşak donatı miktarı arttıkça, sistemdeki rijitlik kaybı monolitik deney elemanının davranışına yaklaşmaktadır.



Şekil 12. Numunelerdeki rijitlik kaybı

Enerji Tüketimi:

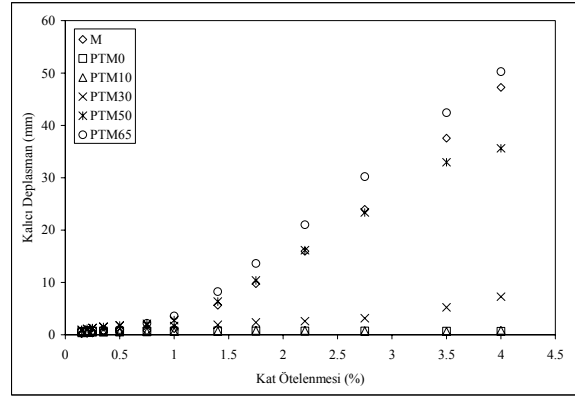
Numunelerin enerji tüketim performanslarını kıyaslayabilmek için ACI T1.1-01’de yer alan metot kullanılmıştır. Bu metot da tanımlanan elasto-plastik davranışa göre enerji tüketimlerinin hesaplanması ve normalize edilmesidir. Herhangi bir kat ötelenme seviyesinin üçüncü çevrimindeki döngünün kapattığı alanın, ilk rijitlik değerine göre ve elasto-plastik davranış baz alınarak çizilen paralelin alanına oranlanarak bulunur. İtme ve çekme esnasındaki ilk rijitlik değerleri ve maksimum yükler farklı değerlere sahip olabilirler. Şekil 13’de normalize edilmiş enerji tüketim değerleri (β) gösterilmiştir. PTM0 ve PTM10 numunelerinin düzeltilmiş enerji tüketim oranları genelde yüzde beşin altında olduğu gözlenmiştir, PTM50 ve PTM65 elemanlarının ki de monolitik sisteminkine benzer bir performans göstermiştir. PTM30 deney elemanının davranışı da bunların orta bölgesinden geçen bir davranışa sahiptir ACI T1.1-01 göre hesaplanan enerji tüketim değerleri, yine bu rapora göre göstermesi gereken minimum değer yaklaşık yüzde 15 oranında olması gerekmektedir. PTM0 ve PTM10 numuneleri bu kriteri sağlamazken, PTM30, PTM50 ve PTM65 deney sonuçları bu kriteri sağlamaktadır.



Şekil 13. İkinci faz numuneler için normalize edilmiş enerji tüketim değerleri

Kalıcı Deplasmanlar

Ard-germeli sistemlerin tasarım felsefesinde herhangi bir deprem sonrasında yapıda kalıcı hasar oluşması istenmemektedir. Şekil 14’de ard-germeli test numunelerinin kat ötelenme seviyelerine bağlı olarak kolonda oluşan kalıcı deplasmanlar gösterilmiştir. PTM0, PTM10 ve PTM30 deney elemanlarındaki kalıcı deplasmanlar ve hasar seviyeleri minimum düzeydedir. PTM30 numunesi yüzde 4.00 kat ötelenmesi çeviriminden sonraki sistemdeki kalıcı hasarı 7 mm civarındadır. Ancak PTM50 ve PTM65 numunelerinin davranışı konvansiyonel sisteminkine daha yakındır. Bu numunelerde yumuşak donatılar akma seviyesine ulaşınca kadar kalıcı deplasman önemsenmeyecek düzeydedir. Deney sonunda ise bu değerler 50 mm’ye kadar ulaşmıştır.



Şekil 5.28. İkinci faz numunelerinde oluşan kalıcı deplasmanlar

SONUÇLAR

1. Test edilen tüm ard-germeli birleşimler yüzde 4.00 kat ötelenme seviyesine kadar, kapasitelerinde herhangi bir düşüş yaşamadan ulaşmışlardır. Eğilme kapasiteleri ve halatlarda oluşan maksimum gerilmeler yaklaşık olarak hesaplanan değerler ile örtüşmektedir.
2. Birleşim bölgesindeki yumuşak donatı miktarının artması ile ard-germeli birleşim detaylarının histeretik davranışları monolitik sisteminkine benzemektedir. Öte yandan, prefabrike kolon ve kirişte oluşan hasar ise minimum düzeydedir.
3. Ard-germeli birleşimlerin ilk rijitlikleri monolitik sisteme oranla daha yüksektir. Ancak, kolon-kiriş ara yüzeyinin açılmaya başlaması ile birlikte bu birleşimlerin rijitlikleri hızla düşmektedir. Bu sebeple bu tip detaylarda performansla ilgili tasarım yapmak en uygun yöntem olabilir.
4. PTM50 ve PTM65 deney elemanlarının normalize edilmiş enerji tüketim değerleri monolitik numuneninkine çok benzerdir. Öte yandan, PTM0 ve PTM10 ard-germeli birleşimleri ise performans kriterlerini yüzde 3.50 kat ötelenme seviyesinde sağlamamaktadır. Bu yüzden TS3233’de yer alan eğilme kapasitesinin yüzde 10’unun yumuşak donatı ile taşınması ibaresi bu değer artırılması yönünde tekrar sorgulanmalı ve Türk deprem yönetmeliğinde de referans edilmelidir..
5. Birleşim bölgesindeki eğilme kapasitesinin yaklaşık yüzde 30 gibi bir oranın yumuşak donatı ile taşınması ard-germeli birleşimin tasarım kriterlerini sağlayabileceğini göstermiştir.
6. Eğilme kapasitesinin yüzde 30’una kadar yumuşak donatıyla moment taşınan ard-germeli birleşimlerde sistemde oluşan kalıcı hasar yok denecek kadar az iken, PTM65 deney numunesinde sistemdeki kalıcı deplasman 50 mm olarak ölçülmüştür.

TEŞEKKÜR

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

KAYNAKLAR

1. 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.
2. Ersoy, U., Tankut, T. ve Özcebe, G., (1999), “Damages Observed in the Precast Framed Structures in the 1998 Ceyhan Earthquake and their Rehabilitation”, ODTÜ.
3. 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.
4. Çolakoğlu, H. K., (2001), Seismic Resistant Design of Precast Industrial Building, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
5. Meydanlı, H., (2003), Prefabrikte Lambda Tipi Endüstri Yapılarının Deprem Etkisi Altındaki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
6. Ataköy, H., (200), “17 Ağustos Marmara Depremi ve TPB Üyeleriyle Yapılan Prefabrikte Yapılar, Beton Prefabrikasyon,” 52: 5-14.
7. 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
8. Tankut, T. (1998), “Önüretimli Yapı Bağlantılarının Deprem Davranışı”, Prefabrikte Yapılar ve Deprem Çalıştayı, Türkiye Prefabrik Birliği:116-126
9. PARK, R. ve Thompson, K., Cyclic Load Test on Prestressed and Partially Prestressed Beam-Column Joints, PCI Journal, 22/5, 84-110, (1977).
10. French, C. W., Amu, O. ve Tarzikhani, C., (1989), “Connections between Precast Elements Failure Outside Connection Region”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(2): 316-340.
11. ACI 352R-02, Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures, ACI-ASCE Committee 352, ACI, (2002).
12. CHEOK, G. S. ve Lew, H. S., Model Precast Concrete Beam to Column Connections Subject to Cyclic Loading, PCI Journal, 38/4, 80-92, (1993).
13. CHEOK, G. ve Lew, H. S., Performance of 1/3 Scale Model Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads, NISTIR 4589, Report No. 2, NIST, (1991).
14. CHEOK, G. ve Stone, W., Performance of 1/3 Scale Model Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads, NISTIR 5246, Report No. 3, NIST, (1993-2)
15. CHEOK, G. ve Stone W., Performance of 1/3 Scale Model Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads, NISTIR 5436, Report No. 4, NIST, (1994).
16. PRIESTLEY, M. J. N., Sritharan, S., Conley, J. ve Pampanin, S., Preliminary Results and Conclusions from the PRESS Five-Story Precast Concrete Test Building, PCI Journal, 44/6, 42-67, (1999).
17. PINARBAŞI, S., Development and Seismic Performance of A Precast Concrete Beam-Column Connection by Post-Tensioning, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ, (2000).
18. TS3233, Öngermeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TSE 1979
19. ACI T1.2-03, Special Hybrid Moment Frames Composed of Discretely Jointed Precast and Post-Tensioned Concrete Members, ACI, (2003).
20. Ertaş, O. (2005), Ductile Beam-Column Connections In Precast Concrete Moment Resisting Frames, PhD Thesis, Boğaziçi Üniversitesi
21. ÖZDEN, Ş. ve Ertaş, O., Behavior of Unbonded Post-tensioned Precast Concrete Connections with Different Percentages of Mild Steel Reinforcement, PCI Journal, 52/2, 32-44, (2007).
22. ACI T1.1-01, Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing, ACI.

Birinci Oturum
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY

1- Mimarlık Eğitiminde Prefabrikasyonun Yeri ve Önemi

Arş. Gör. Mehmet EMİNEL,
Y. Doç. Dr. Cevdet Emin EKİNCİ
Zuhal ÖZÇETİN, Mimar

2- Mimarlık Eğitimi ve Prefabrikasyon

Y. Doç. Dr. Ahmet BULUT

3- Sektörde Uygulama Seminerleri Gereği

Doç. Dr. Haluk GÜNERMAN

İkinci Oturum
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Kaya ÖZGEN

1- Prefabrik Kolonların Tersinir Yükler Etkisindeki Davranışının Modellenmesi

Y. Doç. Dr. Ercan YÜKSEL
Arş. Gör. M. SÜRMELE
Arş. Gör. Serkan Z. YÜCE
Prof. Dr. H. Faruk KARADOĞAN

2- Ard-Germeli Kolon-Kiriş Birleşimlerinin Tersinir Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı

Dr. Onur ERTAŞ
Y. Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

3- Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Hazır Betonarme Plaklı Kompozit Kirişlerin Negatif Moment Bölgesinde Yapısal Davranışı

Doç. Dr. A. Necati YELGİN
H. Yaşar YALMAN, İnş. Y. Müh.

Üçüncü Oturum
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Kemal ÇORAPÇIOĞLU

1- Tematik Konuşma

Altay ÇİZGENAKAT, İnş. Y. Müh.

2- Betonarme Prefabriğe Yapım Yöntemlerinin Çevresel Açından Analizi

Y. Doç. Dr. Nilay COŞGUN
Doç. Dr. Tülay ESİN

3- Stadyumlarda Prekast Beton Elemanların Kullanımı

Günkut BARKA, İnş. Y. Müh.

4- Şişli Taç Projesi Öndökümlü Beton Mimari Eleman Tasarım ve Üretimi

Dr. Müh. Murat ŞENER
Orhan MANZAK, Y. Müh.
N.Hasan YEL, Müh.

Dördüncü Oturum
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Yavuz KOŞANER

1- Ard-Germeli Çok Katlı Bina Yapım Teknolojisi: Ala-Sawa Sistemi ve Bir Uygulama Örneği: IKEA – Bayrampaşa

Fatih SAYAN, Y. Mimar
Biroldo DOYRANLI, İnş. Y. Müh.

2- Betonarme Prefabriğe Cephe Elemanları İçin Üretim Boyutlarının Oluşturulmasına Yönelik Bir Bilgisayar Program Modeli

Dr. Mustafa TOSUN

3- “Yapı Merkezi’nde Çok Yüksek Dayanımlı Betonun Gelişimi: 1989-2007”

Prof. Dr. Müh. Ergin ARIOĞLU
Orhan MANZAK, Y. Müh.
Gözde KURT, Y. Müh.
Adnan DONDURMACI, Müh.

4- Kalıp Ayırıcıların Performans Özellikleri

Dr. Müh. Ali Raif SAĞLAM
Nazmiye PARLAK, Kimya Müh.
Prof. Dr. M. Hulusi ÖZKUL

Beşinci Oturum**Oturum Başkanı:** Köksal ANADOL, Y. Mim.**1- Prefabrikasyonda Doğrular-Yanlışlar**

Mehmet EMİNEL

Y. Doç. Dr. Cevdet Emin EKİNCİ

Zuhal ÖZÇETİN, Mimar

2- Burgu Kazık Temeller

Doç. Dr. Asım GÜRALP

Dr. Şenay ATABAY

3- Tünel Kalıp Sistemlerde Kullanılan Prekast Cephe Panellerinin Taşıyıcı Sisteme Entegrasyonu ve Kalite Bağlamında Değerlendirilmesi

Arş. Gör. Saim KORUR