

PREFABRİKE ÇERÇEVELERİN DEPREM DAYANIMI İLE İLGİLİ BİR İRDELEME

SEISMIC BEHAVIOR OF PRECAST FRAME STRUCTURES A CRITICAL LOOK

Uğur Ersoy¹

SUMMARY

In this paper, requirements to be satisfied for earthquake resistant reinforced concrete structures are briefly discussed. The concept of capacity design, ductility and interstorey drift are critically reviewed.

Precast framed structures are classified into three groups; (a) pin-connected structures, (b) structures with moment resisting joints and (c) dual systems. The seismic resistance of each group is discussed and recommendations for design are made. Problems of precast structures with moment resisting joints related to seismic behavior are discussed in the light of METU tests. Findings and conclusion of these tests are stated.

ÖZET

Bu makalede önce depreme dayanıklı betonarme binalarda sağlanması gereken koşullar özetlenmektedir. Kapasite dizaynı, süneklik ve katlararası yer değiştirme kavramları kısaca irdelenmektedir.

Prefabrike çerçeve türü yapılar önce, (a) mafsallı çerçeveler, (b) moment aktarabilen bağlantılara sahip çerçeveler ve (c) perdeli sistemler diye üç gruba ayrıldıktan sonra, her gruptaki yapı sistemleri deprem dayanımı açısından irdelenmekte ve bazı öneriler yapılmaktadır. Moment aktarabilen bağlantılara sahip prefabrike çerçeve türü yapıların deprem davranışı ODTÜ'de yapılan deneylerin ışığında irdelenmektedir. Makalenin sonunda ODTÜ deneylerinde gözlenen sorunlar özetlenmektedir.

¹ Profesör, ODTÜ, İnşaat Müh. Böl., Ankara

1. GİRİŞ

Prefabrike yapı sistemleri son 40 yıldır ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Prefabrikasyon önce, hızlı endüstrileşme sürecinde tek katlı endüstriyel yapılarda kullanılmış, daha sonra, özellikle 80'li yıllarda toplu mkonuta büyük parasal kaynakların aktarıldığı dönemde çok katlı yapılara geçilmiştir.

Prefabrike yapıların birçok avantajı vardır. Bunlardan en önemlileri aşağıda sıralanmıştır.

- Prefabrike betonarme elemanların fabrikada sıkı bir denetim altında üretilmesi, kalitenin daha iyi olmasını sağlamaktadır.
- Kalip maliyeti düşmektedir.
- Beton dökümünün büyük bir oranı fabrikada yapıldığından, bu tür inşaat kötü hava koşullarından daha az etkilenmektedir.
- İnşaat çok daha kısa bir sürede tamamlanabilmektedir.

Tüm bu avantajlara karşın, prefabrike yapı sistemlerinin birdöküm (monolitik) sistemlere göre bazı zayıflıkları olduğu kuşkusuz vardır. Bu kuşku, iki eleman arasındaki bağlantının birdöküm (monolitik) kadar iyi olamayacağı varsayımından kaynaklanmaktadır. Bağlantılar ile ilgili kuşku, özellikle yapının deprem davranışı ve dayanımı ile ilgilidir. bilindiği gibi, şiddetli bir depremde elemanlar ve birleşim bölgeleri elastik sınırlar ötesinde zorlanmakta, donatının yer yer akma konumuna ulaşarak plastik mafsalların oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Ayrıca, depremde oluşan tersinir-tekrarlanır yükleme nedeniyle eleman ve birleşim her iki yönde de zorlanmaktadır. Bu durumda, birdöküme göre zayıf olduğu varsayılan prefabrike elemanlar arasındaki bağlantı, deprem davranışı için sorunlu görülmektedir. Bu kuşukular nedeniyle en aykırı çözüm, prefabrike yapıları 1. ve 2. deprem bölgelerinde yasaklamaktır. İkinci aykırı çözüm ise, Deprem Yönetmeliğine özel hükümler koyarak prefabrike yapıların cezalandırılmasıdır. Örneğin, prefabrike yapıyı sünek kabul etmemek veya bu tür yapılar için süneklik katsayısını azaltarak taban kesme kuvvetini aşırı artırmak gibi çözümler düşünülebilir. Yazarın kanısınca bu tür kestirme ve emniyetli yönde görülen çözümlerle prefabrik yapıları cezalandırma için haklı gerekçeler üretmek zordur. Bağlantının deprem davranış ve dayanımının olumsuz etkilenmesi, bağlantının konumuna ve bağlantı detayına bağlıdır. Bağlantı yeri iyi seçilen ve davranış gözönünde bulundurularak detaylandırılan bir prefabrike çerçevenin, birdöküm çerçeve kadar iyi davranamayacağını savunmak zordur. Bu yazının amacı, prefabrik yapıların, daha doğrusu prefabrike bağlantıların deprem dayanım ve davranışını irdeleyerek, bazı önerilen oluşturmaktır. Yazının başlığından da belli olacağı gibi, bu irdelemenin kapsamı çerçeve türü yapılarla sınırlandırılmıştır.

Prefabrike çerçevelerin deprem davranışını irdelemeden önce, betonarme yapıların deprem davranışını kısaca gözden geçirmek yararlı olacaktır.

2. BETONARME YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞI

Depreme elastik sınırlar içinde karşı koyacak bir betonarme yapı oluşturmak mümkündür. Ancak, bina salt çerçevelerden oluşuyorsa veya karma sistemse, yapının elastik sınırlar içinde kalmasını ekonomik olarak sağlamak mümkün değildir. Bu nedenle, depreme dayanıklı yapı felsefesinde, olma olasılığı düşük şiddetli bir deprem altında yapının elastik sınırlar ötesinde zorlanacağı donatının yer yer akacağı kabul edilmektedir. Bu tür depremler altında amaç, yapının ayakta kalmasını sağlayarak, can kaybını önlemektir. Yapının ayakta kalması yeterli enerji tüketebilmesine bağlıdır. Yapının stabil kalabilmesi ve teçhizat ve mal kaybının en alt düzeyde tutulması da önemlidir. Bu da ancak yanal ötelemenin sınırlandırılması ile mümkündür.

Yukarıda tanımlanan davranışın elde edilebilmesi için, aşağıdaki üç koşulun sağlanması gerekir :

- (i) Yapı gerekli dayanıma sahip olmalıdır.
- (ii) Yeterli süneklik sağlanmalıdır.
- (iii) Yapının katlar arası görelî yer değiştirmesi sınırlandırılmalıdır (rijitlik).

Bu koşullar aşağıda kısaca irdelenecektir.

(i) Dayanım

Bu koşul mühendisin yakından bildiği bir kavrama dayanmaktadır ve düşey yük altında da sağlanması gereken bir koşuldur. Dayanımı doğru olarak hesap etmenin yolu, taşıma gücü yöntemidir. Dayanım iyi bilinen bir kavram olduğundan, burada ayrıntılı olarak irdelenmeyecektir. Ancak bir ilkenin bir kez daha vurgulanmasında yarar vardır. Betonarme eleman taşıma gücüne eğilme altında ulaşmak, bu kapasiteye ulaşılmadan kesme ve aderans gibi gevrek kırılma türlerinin oluşması mutlaka önlenmelidir. Aderans bozulmasını önlemenin en etkili yolu, gerekli kenetlenme boyunun sağlanmasıdır. Yönetmelik (TS-500 ve Deprem Yönetmeliği) uygulandığında, gerekli kenetlenme boyu sağlanacaktır.

Kesme kırılmasını önlemenin en etkili yolu, kolon ve kirişlerin kesme dayanımını, eğilme dayanımından büyük tutmaktır. Bu koşul, Şekil 1 e göre hesaplanan kesme kuvvetlerine göre etriye konması ile sağlanmış olur. Şekil 1 de eleman uçlarında gösterilen momentler, çerçeve çözümlenmesinden elde edilen momentler değildir. Bunlar, malzemelerin karakteristik değerleri kullanılarak hesaplanan gerçek moment kapasiteleridir. Donatıdaki pekleşmeyi de dikkate almak amacıyla, moment kapasitesi hesabında f_{yk} yerine $1.25f_{yk}$ alınmalıdır. Karakteristik malzeme dayanımları kullanılarak ve donatının pekleşmesi de dikkate alınarak hesaplanan moment kapasitesi, M_p olarak gösterilmiştir.

Kirişlerde M_p hesaplanırken, daha kesin hesap yapılmıyorsa, basınç donatısı ihmal edilebilir ve malzeme hesap dayanımları (f_{cd} ve f_{yd}) kullanılarak hesaplanan taşıma gücü momenti M_t temel alınabilir.

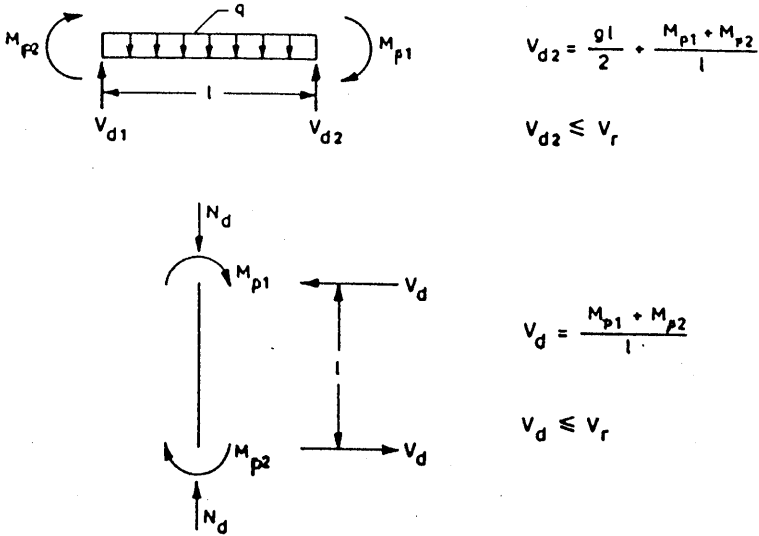
$$\text{Kiriş için} \quad : \quad M_p \approx 1.4 M_r \quad (1)$$

$$M_r = A_s f_{yd} (0.9)d \quad (2)$$

$$\text{Kolon için} \quad : \quad M_p \approx 1.4 M_r \quad (3)$$

Kolon için M_r , en fazla momenti veren eksenel yük altında, f_{yd} ve f_{cd} kullanılarak hesaplanan moment taşıma gücüdür.

V_d nin eleman uçlarındaki moment kapasitelerinden hesaplanma yöntemine, "kapasite dizaynı" denir.



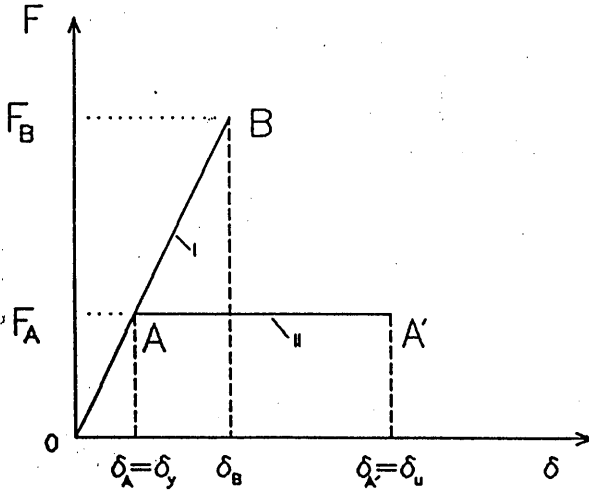
Şekil 1. Kolon ve Kirişte V_d nin Hesabı

(ii) Süneklik

Gerçek deprem kayıtları kullanılarak yapılan dinamik analizlerde, betonarme çerçevelerin bu tür şiddetli depremlere elastik sınırlar içinde karşı koyamayacağı görülmüştür. Çerçeve elastik kaldığı takdirde çerçevenin karşı koymak zorunda kalacağı eylemsizlik kuvvetleri çok büyük mertebelere ulaşmaktadır. Bu durumda çerçevenin ayakta kalabilmesi, yeterli enerji tüketimi ile mümkündür⁽¹⁾. Betonarme yapıda enerjinin çok büyük bir oranı donatı akması ile oluşan plastik mafsallarda tüketilir. Yeterli enerjinin tüketilmesi, plastik mafsallarda büyük dönmelerin oluşması ile mümkündür. Dönme kapasitesi, kesitin sünek olup olmasına bağlıdır.

Süneklik, bir kesit veya bir elemanın yük taşıma kapasitesinde belirgin bir düşme olmadan, büyük deformasyon yapabilme yeteneğidir. Görüldüğü gibi, bir eleman veya kesitin yeterli enerjiyi tüketebilmesi için sünek olması zorunludur.

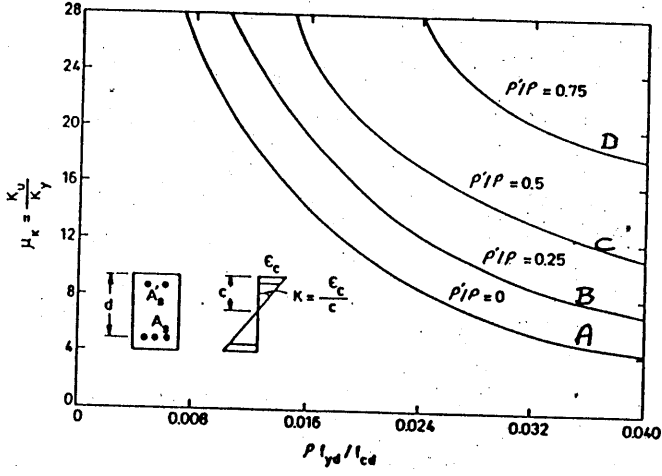
Yönetmeliklerde verilen yatay deprem yükleri gerçek yüklerin 1/4 - 1/5 i mertebesindedir. Bu azaltma, çerçevenin sünek davranacağı varsayımına dayanmaktadır. Şekil 2 de gösterilen iki çerçeveden I nolu çerçeve, depremi elastik sınırlar içinde kalarak karşılamakta, II ise A noktasında plastik mafsallaşma nedeniyle artan deformasyon altında enerji tüketmektedir. Yönetmelikte davranışın II gibi olacağı varsayımı ile, yük olan F_B yerine F_A verilmektedir. Bu nedenle, yönetmeliklerin sünek çerçeveler için öngördüğü F_A yükünü kullanan tasarımcı, bunun önkoşulu olan sünekliği sağlamak zorundadır.



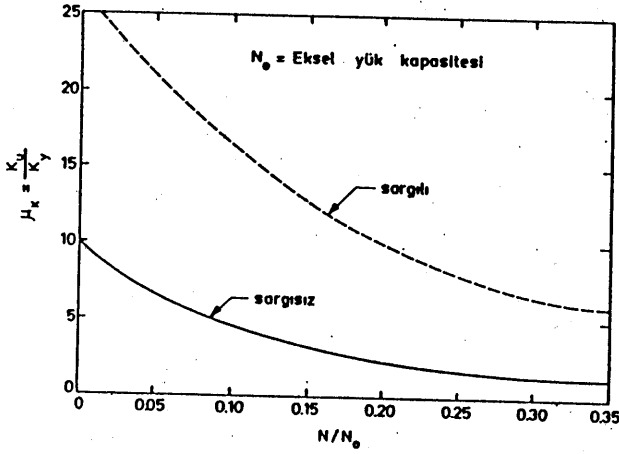
Şekil 2. Süneklik Nedeniyle Yük Azalması

Süneklik, kirişlerde çekme donatısı oranına bağlıdır. Şekil 3 teki A eğrisinden izlenebileceği gibi, donatı oranı arttıkça süneklik azalmaktadır. Eğrinin düşey eksenindeki süneklik katsayısı, en büyük birim dönmenin, akma anındaki birim dönmeye oranıdır. Şekil 3 teki dört eğri karşılaştırıldığında, basınç donatısının çekme donatısına oranının da sünekliği etkileyen önemli bir parametre olduğu görülür.

Kolonlarda süneklik, eksenel yük düzeyi arttıkça azalır. Şekil 4 te süneklik oranının eksenel yük düzeyine göre değişimi gösterilmiştir. N_o , kesitin eksenel yük taşıma kapasitesidir. Şekil 4 teki ikinci eğri sargılı beton içindir. Görüldüğü gibi aynı eksenel yük düzeyinde sargılı betonun süneklik katsayısı, sargısız betona oranla çok daha büyüktür.



Şekil 3. Kirişlerde Donatı Oranının Süneklığe Etkisi

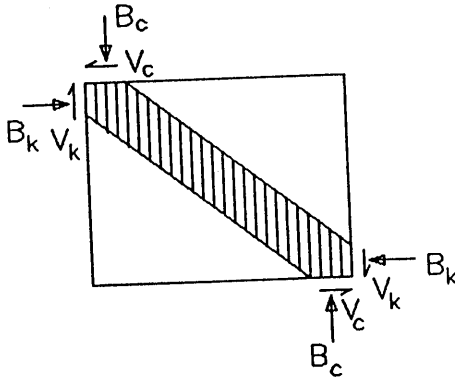


Şekil 4. Kolonlarda Süneklığın Eksenel Yük Düzeyi ile Değişimi

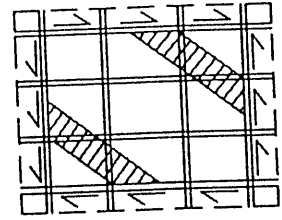
Özetlemek gerekirse, kirişleri sünek yapmak için çekme donatısı oranı küçük tutulmalı ve mutlaka basınç donatısı bulunmalıdır. Kolonlar eksenel yük taşımaları nedeniyle kirişlere oranla daha düşük süneklığe sahiptir. Kolonlarda süneklığı arttırmanın yolu, kesiti olabildiğince büyük tutmak (N/N_0 oranını azaltmak) ve kolon kritik

bölgelerini iyice sargılamaktır (kolon uçları). Sargılamak kiriş uçlarında da mutlaka yapılmalıdır. Bu bölgelerde plastik mafsallaşma oluşacağından, bu bölgelerin dönme kapasitelerini arttırmak zorunludur. Kolon kirişe göre daha az sünek olduğundan, tasarımcı plastik mafsalların kolonlarda değil kirişlerde oluşmasını sağlayacak koşulları sağlamalıdır.

Kolon ve kirişi sünek yapmak yeterli değildir. Kolon-kiriş birleşimleri de moment ve özellikle kesme kuvvetini büyük hasar ve deformasyon oluşmadan aktarabilmelidir. Şekil 5 te gösterildiği gibi, birleşim bölgelerinde kesme kuvvetinin aktarılması, oluşan beton basınç çubuğu ve donatının olduğu kafes aracılığı ile sağlanır. Birleşimine saplanan kirişlerin kolon yüzünde akma konumuna ulaşması, beton basınç çubuğu ile kuvvet aktarımını olumsuz yönde etkiler. Bu aşamada, kuvvet aktarımında donatı kafesi büyük görev üstlenir. Bu nedenle birleşimlerdeki donatı detayı çok önemlidir.



(a) Beton Basınç Çubuğu



(b) Donatı Kafesi

Şekil 5. Kiriş-Kolon Birleşiminde Kesme Kuvveti Aktarımı

(iii) Katlararası Görelî Yer Değiştiriminin Sınırlanması

Yanal ötelemenin artması, kolonlardaki ikinci mertbe momentlerinin büyümesine neden olur. Narin kolonlar ve/veya rijitliği düşük yatay taşıyıcı elemanlardan (örneğin, kirişsiz döşeme) oluşan çerçeve sistemlerinde ve plastik mafsalların herhangi bir nedenle kolon uçlarında olduğu sistemlerde, deprem sırasında ikinci mertbe momentlerinin birkaç katına çıkarak, göçmeye neden olduğu birçok kez gözlenmiştir. Yanal deplasman, çerçeve stabilitesini de çok olumsuz yönde etkiler.

Katlar arası görelî yer değiştirme, teçhizat, bölme duvar, asma tavan v.b. taşıyıcı olmayan, ancak maliyeti yüksek elemanlarda büyük hasara neden olur. Büyük ötelenmeler yapmış bir yapının onarımı çok zordur ve bazı durumlarda olanaksızdır.

Katlar arası yer değiştirme, genelde iki kat arasındaki görelî yer değiştirmenin, kat yüksekliğine bölünmesi ile elde edilen bir endeksle ifade edilir. Bu endeksin gerçek değerinin (gözlenen veya doğrusal olmayan çözümlenmeden bulunan) 0.01 ile sınırlanmasının, hem ikinci mertebeye momentlerini, hem de yapısal olmayan hasarı kabul edilebilir düzeyde tutacağı, depremde yapılan gözlemlerden ve laboratuvar deneylerinden anlaşılmıştır. Yönetmeliğimizde, süneklik nedeniyle azaltılmış yükler temel alınarak yapılan doğrusal çözümlenmeden elde edilen değerlerin 0.0025 ile sınırlanması öngörülmektedir. Süneklik katsayısı 4 kabul edilirse, bu değer uygundur, $0.01/4=0.0025$.

Ülkemizde belki de en hafife alınan bu koşuldur. Gerçekte ise bu koşul en az diğer iki koşul kadar önemlidir ve depremlerde önemli bir hasar nedenidir.

3. PREFABRİKE ÇERÇEVELERİN DEPREM DAYANIMI

Bölüm 2 de betonarme yapıların depremlerde sağlıklı bir davranış göstermesi için sağlanması gereken koşullar kısaca irdelenmiştir. Bu koşulların prefabrike yapılar için de geçerli olacağı doğaldır. Prefabrike yapılarda, birdöküm (monolitik) betonarme yapılardan farklı olarak, iki elemanı birbirine bağlayan bağlantılar vardır. Prefabrike yapıların deprem davranışındaki özel sorunlar da bu bağlantılardan kaynaklanmaktadır. Bu sorunları tam olarak bağlantı türünün kendine özgü sorunları vardır. Bu yazıda önce genel bazı irdelemeler yapılacak, belirli bağlantı türleri örnek olarak kullanılacaktır. Ayrıca, yazının kapsamı çerçeve türü yapılarla sınırlanacaktır.

Genel bir irdeme yapılırken, çerçeve türü prefabrike yapıların üç ana grupta toplanması uygun görülmüştür. Ana başlıkları aşağıda verilen bu sistemler ayrı ayrı ele alınacaktır.

- a. Mafsallı bağlantılı çerçeveler.
- b. Moment aktarabilen bağlantılara sahip çerçeveler.
- c. Perdeli sistemler. Deprem yükünün perde duvarlarla taşındığı, çerçevelerin salt düşey yük taşıyıcı olarak tasarlandığı sistemler.

3.1 Mafsallı Bağlantılı Çerçeveler

Bu tür sistemlerde giriş kolon bağlantıları mafsallıdır. Genelde tek katlı endüstriyel yapılarda kullanılır. Çok katlı yapıldığında, depremden oluşan tüm yatay kuvvetler düzenlenecek perde duvarlarla alınmalıdır. Başka bir deyişle, çok katlı yapılarda mafsallı birleşimli çerçeveler ancak düşey yük taşıma amacı ile kullanılabilir. Bu sistemler, "Perdeli Sistemler" olarak irdelenecektir.

Tek katlı yapılarda, girişlerin her iki ucu da mafsallı olduğundan, girişler deprem momenti almaz, ancak yatay yük aktarırlar. Bu nedenle çerçeveyi mekanizmaya dönüştürecek plastik mafsallar kolonlarda oluşmak zorundadır. Bölüm 2 de gösterildiği ve irdelendiği gibi, kolonların sünekliği girişlere oranla çok daha azdır. Bu nedenle deprem yönetmeliklerinde mafsallaşmanın girişlerde oluşmasını sağlayacak hükümler vardır (örneğin, kuvvetli kolon - zayıf giriş kavramı).

Mafsallaşmanın kolonlarda oluşmasının sakıncası elbette prefabriğe çerçeveler için de geçerlidir. Ancak, sistemin tek katlı olması bu sakıncayı biraz olsun azaltmaktadır. Bilindiği gibi tek katlı çerçevelerde kolon eksenel yük düzeyi çok düşük olduğundan bu elemanlar kiriş davranışına yakın bir davranış sergilerler. Bu gerçek gözönünde bulundurularak, yeni deprem yönetmeliği taslağında tek katlı yapılar için mafsallı bağlantılara izin verilmektedir.

Yazar, mafsallı bağlantılı çerçeveler için, tek katlı da olsa bazı ek koşulların getirilmesine taraftardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

- a. Kolon boyutları büyük seçilmelidir. Yazarın kanısınca, $A_c \geq N_d / (0.2f_{cd})$ veya $A_c \geq N_d / (0.3f_{cd})$ koşulu sağlanmalıdır.
- b. Mafsallı birleşimlere sahip çerçeveler, diğer çerçevelere oranla daha fazla yanal ötelenme yaparlar. Ayrıca, kolonun temel düzeyinde oturduğu çanakların tam ankastrelik sağladığını savunmak olanaksızdır. Bu nedenle, tabanda oluşacak dönmeler, yanal ötelenmeyi büyük ölçüde artırabilir. Yazar bu konuda kaygılıdır. Bu nedenle, doğrusal çözümlemede yanal ötelenmeler mutlaka kontrol edilmelidir. Yazarın kanısına göre, bu konuda yapılacak araştırmalar tersini kanıtlanmadığı sürece, bulunan yanal ötelenme 1.5 ile çarpılmalı ve bulunan ötelenmenin (δ/h) , 0.0025 i geçmediği kanıtlanmalıdır.
- c. Mafsallaşmanın kolon tabanında oluşması kaçınılmaz olduğundan, kolonlar bu bölgede özenle sargılanmalıdır.
- d. Yanal ötelenme büyük olacağından, depremde kirişlerin düşmesini önleyecek önlemler alınmalıdır.

3.2 Moment Aktarabilen Bağlantılara Sahip Çerçeveler

Depremde en sorunlu noktalardan biri, kolon-kiriş birleşim bölgeleridir. İyi detaylandırılmadığında, birdöküm çerçevelerde bile deprem sırasında büyük sorunlar çıkmaktadır. En önemli sorun, kesme kuvvetinin bu bölgede aktarımı sorunudur. Aktarma, Şekil 5 de gösterildiği gibi beton basınç çubuğu ve birleşim bölgesindeki donatı kafesi ile sağlanmaktadır. Ancak daha önce söylendiği gibi, birleşime saplanan kirişlerde, hemen kolon yüzünde oluşan mafsallaşma nedeniyle, beton aktarımının etkisi azalmakta, donatı kafesinin önemi artmaktadır. Bu bölgede mutlaka düşey çubuklar bulundurulmalı ve bunlar sargılanmalıdır. Böyle bir detay birdöküm birleşimlerde bile pratik birçok sorun çıkarmaktadır.

Yukarıdaki irdelemenin ışığında, kiriş-kolon bağlantılarının sorunlu birleşim bölgesi dışında yapılmasının en sağlıklı çözüm olacağı açıktır. Böylece iki zayıflığın aynı noktada oluşması önlenmiş olur. Bu öneri en ideal çözüm olmasına karşın, pratikte bazı sakıncalar içermektedir. Bu sakıncalar montaj zorluğundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle ülkemizde yaygın olarak kullanılan bu tür birçok bağlantı, birleşim bölgesinde yapılmaktadır. Bu durumda birleşim bölgesi ve bağlantı detayının çok iyi tasarlanması

ve yapılması gerekmektedir. Bu yapılırken, şiddetli bir depremde tersinmenin kaçınılmaz olacağı (kiriş alt yüzünde çekme) hiçbir zaman unutulmamalıdır.

ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Yapı Mekaniği Laboratuvarında, bu tür bağlantıları içeren kiriş-kolon birleşimleri denendiğinde, yukarıda sözü edilen sorunların ne denli önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca deneyler, bağlantı ne denli iyi yapılırsa yapılırsa, rijitliğin birdöküme oranla daha hızlı azaldığını ve dolayısıyla yer değiştirmelerin daha büyük olduğunu göstermiştir. Bu nedenle yazar, prefabrike yapılar için hesaplanan yanal ötelenmenin %25 büyütülmesini önermektedir.

3.3 Perdeli Sistemler

Perdeli sistemde deprem yükünün tümünü karşılayacak dayanım ve rijitliğe sahip perdeler oluşturulmalıdır. Bu durumda prefabrike çerçeveler salt düşey yük taşıyıcı elemanlar olarak düşünülebilir ve bunların süneklik koşulunu sağlaması beklenmez. Eski Doğu Bloku ülkelerinde bu sistem yaygın olarak kullanılmıştır. Bazı sistemlerde kolon-kiriş bağlantılarının mafsalı yapılması bile sakıncalı görülmemiştir.

Yazar bu tür sistemler için aşağıdaki koşulların sağlanmasını uygun görmektedir.

- Öngörülen deprem kuvvetlerinin tamamının perdelerde rahatlıkla karşılanabileceği kanıtlanmalıdır.
- Prefabrike çerçeveler TS-500 de öngörülen koşullara göre boyutlandırılıp, detaylandırılmalıdır.
- Sistemdeki yanal ötelenme hesaplanmalı ve prefabrike çerçevelerin bu yanal deplasmanın iki katında sağlıklı davranacağı kanıtlanmalıdır.

4. MOMENT AKTARABİLEN BAĞLANTILAR

Daha önce belirtildiği gibi, bağlantıların kolon-kiriş birleşim bölgelerinin uzağında düzenlenmesi en sağlıklı çözümdür. Bu pratik nedenlerle yapılamadığında, iki zayıflık biraraya geleceğinden, bu bölgelerin detaylandırılması büyük önem taşır. Tasarımda, daha önce birdöküm birleşimler üzerinde yapılan deneylerde gözlenen davranış ve bu konuda oluşturulmuş ilke ve öneriler titizlikle izlenmelidir. Ancak bu yeterli değildir, çünkü prefabrik bir bağlantının nasıl davranacağını, deneysel veriler mevcut değilse, analitik olarak kestirmek mümkün değildir. Bu nedenle, eğer o tür bağlantı ile ilgili deneysel veri yoksa, bu bağlantıyı kapsayan kiriş-kolon birleşimleri mutlaka test edilmelidir. Deneyde, birdüze (monotonik) yükleme kesinlikle yeterli olmayacağından, depremi benzeştiren, tersinen-tekrarlanan bir yük programı uygulanmalıdır. Bu deneylerde davranışı, dolayısıyla bağlantıların zayıflıklarını saptamak ve bunları geliştirmek mümkün olur. Ayrıca elde edilen yük-yerdeğiştirme, moment-birim eğrilik, kesme kuvveti-kesme deformasyonu ilişkileri analitik çözümlemede kullanılabilir. Deneylerde ayrıca, rijitlik azalması, enerji tüketimi gibi özellikler de

öğrenilmiş olur.

Bu yazıda, ODTÜ'de bu konuda yapılmış deneylerden bazı örnekler verilmesi uygun görülmüştür. Ancak bu yapılmadan önce, kiriş-kolon bağlantısında kullanılan yöntemlerin kısaca irdelenmesi yararlı olacaktır. Kullanılan bağlantı yöntemleri üç ana grupta toplanabilir.

a. Kuru Bağlantılar

Kuru bağlantılarda kiriş, kolona veya kolondan çıkan bir konsola çelik plakalarla bağlanmaktadır. Bağlantı, civatalarla veya plakaları kaynaklayarak yapılabilir. Kirişin doğrudan kolona bağlanması yerine, kolondan çıkan bir konsola bağlanması tercih edilmelidir. Böylece bağlantı birleşim bölgesinin uzağına kaydırılmış olur.

Depremden bağımsız olarak, bu tür bağlantılarla ilgili dört önemli sorun vardır; (a) çelik plakanın görüntüsü (mimari sakınca), (b) paslanma, (c) yangına karşı duyarlı olma ve (d) arazide yapılan kaynağın kalitesi?.

b. Yaş Bağlantılar

Bu tür birleşimlerde, prefabrike elemanlar arazide uç uca getirildikten sonra iki eleman arasındaki donatının sürekliliği sağlanır ve o bölge yerinde dökme betonla doldurulur. Kalıp ve montajı pratik kılmak amacıyla, bu tür bağlantılar genelde kolon-kiriş birleşim bölgesinde yapılmaktadır. Daha önce de söylendiği gibi, bu tür bir uygulama deprem davranışını olumsuz yönde etkilemektedir. Burada sözü edilen bağlantı detayının diğer bir dezavantajı da, bağlantı bölgesi ile ilgili donatı detayının ve betonun arazide yapılmasıdır.

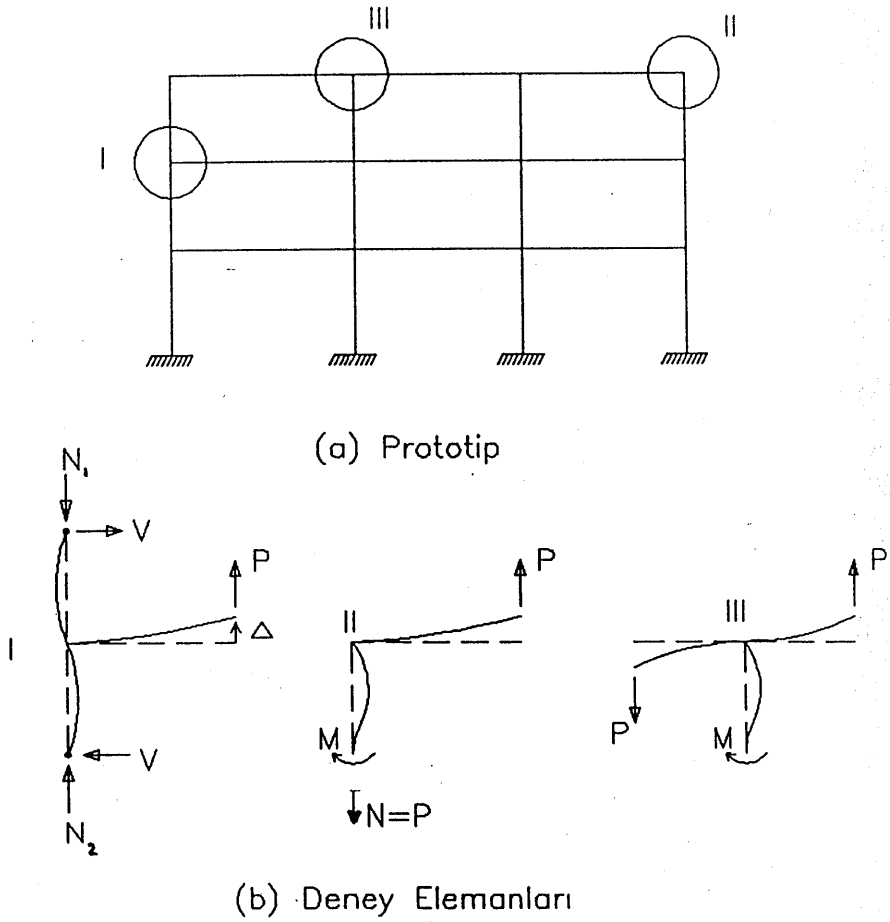
c. Ardgermeli Bağlantılar

Bu bağlantı türünde iki elemanın birbirine bağlanması ardgerme ile yapılmaktadır. Montajda ardgerme operasyonu, gerekli teçhizat ve organizasyonun şantiyeye taşınmasını gerektirir. Ayrıca uygulama deneyimli elemanlarla yapılmalıdır. Bu yöntem ülkemizde yaygın olarak kullanılan bir yöntem değildir.

5. ODTÜ DENEYLERİNİN ÖĞRETTİKLERİ

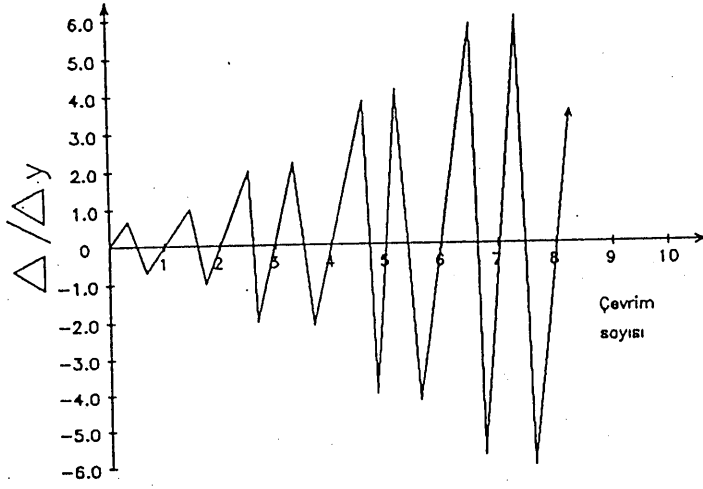
Bundan yaklaşık üç yıl önce, ülkemizde kullanılan bağlantıları içeren kiriş-kolon birleşimlerinin depremi benzeştiren yükler altındaki davranışını izlemek amacıyla, ODTÜ de kapsamlı bir deney programı başlatılmıştır. Bu deney programı TÜBİTAK, PREFABRİK BİRLİĞİ ve ODTÜ tarafından desteklenmiştir⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

Deneylerde, prototipin denenmesi sözkonusu olmadığından, Şekil 6 da I, II ve III olarak gösterilen elemanlar, tersinen ve tekrarlanan P yükü altında denenmiştir. I tipi deney elemanı için uygulanan yük programı Şekil 7 de gösterilmiştir.

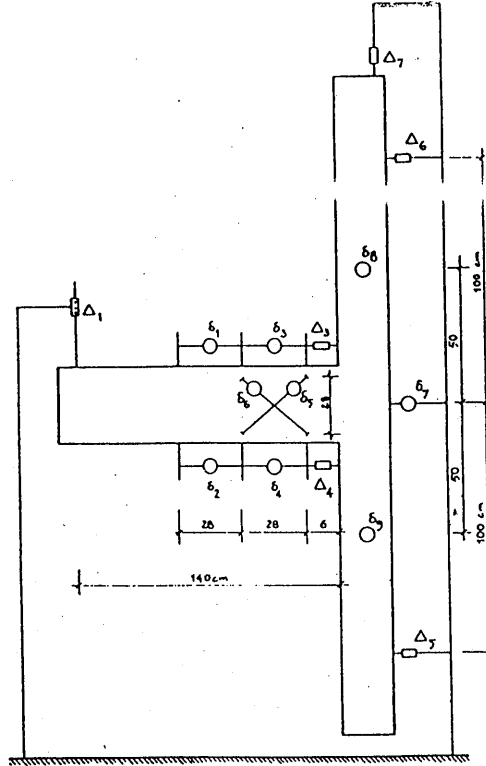


Şekil 6. Deney Elemanları

Şu anda tamamlanma aşamasında gelen bu araştırma projesinde, ülkemizde kullanılan dört ayrı tür bağlantı denenmiştir. Her deney dizisinde prefabrik elemanın yanısıra, aynı boyut ve donatıya sahip bir de birdöküm (monolitik) eleman denenmiştir. Bu elemanlardan elde edilen sonuçlar prefabrike eleman davranışı ile karşılaştırılarak bağlantılar ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Her deney dizisinde önce bugün kullanılmakta olan bağlantı detayı hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır. Bu deneyde yapılan gözlemler ve elde edilen sonuçlara göre, bağlantı detayı geliştirilerek, elemanlar imal edilmiş ve denenmiştir.



Şekil 7. Yükleme Programı

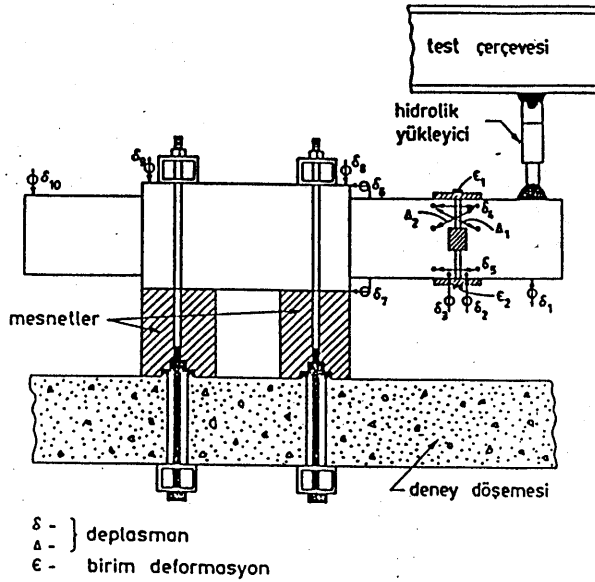


Şekil 8. Ölçüm Düzenegi

Bu deneylerden son derece ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanısıra, tersinen-tekrarlanan zorlamalar altında ne gibi sorunlar çıkacağı gözlenmiş ve böylece iyi bir deneyim birikimi oluşmuştur. Deneylerde, prefabrike ile ilgisi olmayan, birdöküm birleşimler için de geçerli olacak ilginç sorunlar gözlenmiştir. Gözlenen sorunlar özetlenmeden önce, sözkonusu deneylerin yapılmasının ne denli önemli olduğunu kanıtlamak amacıyla, iki deney dizisi ile ilgili bazı gözlemler örnek olarak verilecektir.

5.1 Kuru Bağlantı Örneği

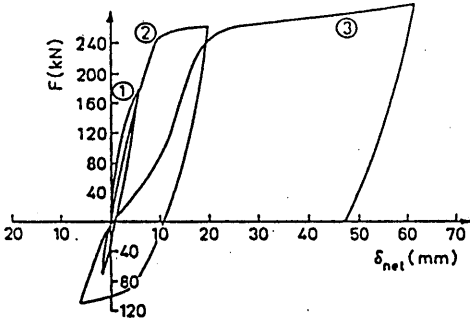
Bir firmamız tarafından 4-5 katlı binalarda kullanılması tasarlanan bağlantı Şekil 9 da gösterilmiştir. Bu sistemde kiriş, kolondan çıkan konsola alt ve üstte kaynaklanan plakalarla bağlanmaktadır. Plaka kalınlığı, momenti oluşturan kuvvet çiftini ve kesme kuvvetini taşıyabilecek dayanımda seçilmiştir. Sözü edilen orijinal detayda Şekil 9 da gösterilen ara gövde plakası yoktur. Yazar ve arkadaşlarının bu detaya karşı çıkmaları üzerine bir deney dizisi yapılması kararlaştırılmıştır. Karşı çıkmanın nedeni (a) kesmenin, maksimum kesmenin olduğu bölgenin uzağında taşınmaya çalışılması ve (b) tersinen-tekrarlanan yük altında deformasyon sorunuydu. Yazar ve arkadaşları, hem deformasyon açısından, hem de kesmenin sağlıklı taşınması açısından bir gövde plakası önermiştir, Şekil 9.



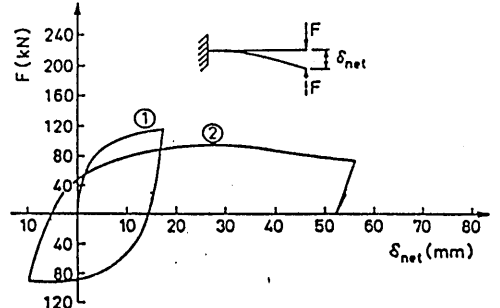
Şekil 9. Önerilen Bağlantı Detayı

Tersinen-Tekrarlanan yükleme altında tasarlanan bağlantı detayının büyük deformasyonlar yaparak sağlıklı bir davranış sergileyemediği gözlenmiştir. Yazar ve arkadaşları tarafından önerilen detay ise çok sağlıklı bir davranış sağlamıştır⁽²⁾. Bunun sonucu, yapılan binalarda önerilen detay kullanılmıştır.

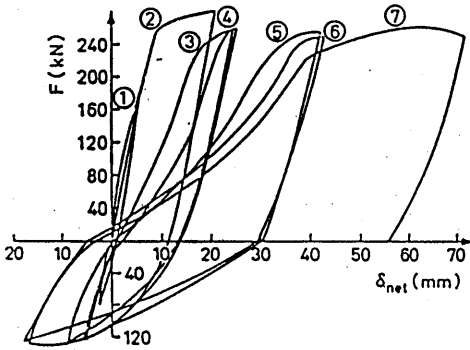
Şekil 10 da, birdöküm, ara plakasız ve ara plakalı prefabrike elemanların yük-deformasyon dönüşümleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ara plakasız bağlantı birdöküme göre hem büyük deformasyonlar yapmış, hem de taşıması gereken yükün ancak yarısını taşıyabilmiştir. Buna karşın, ara plakalı bağlantıya sahip eleman birdöküm kadar iyi davranmış ve onun kadar yükü tersinen tekrarlanan zorlamalar altında taşımaya devam etmiştir.



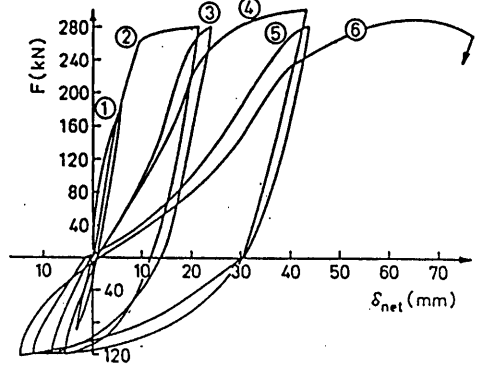
a) TR-1 Birdöküm (birleşim yok)



b) T3 - Gövde plakasız



c) T4 - Gövde plakalı - aralık = 30 mm

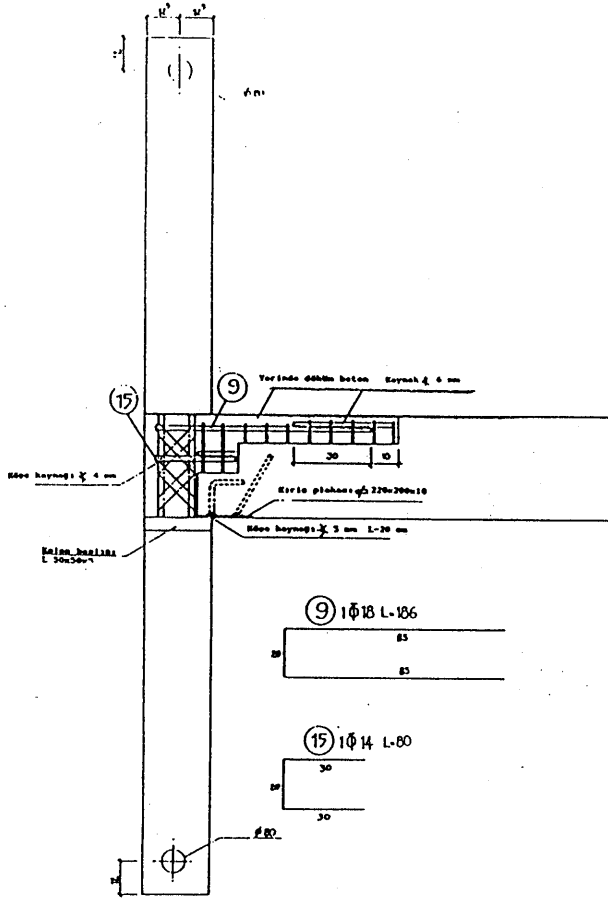


d) Gövde plakalı - aralık = 20 mm

Şekil 10. Yük-Deformasyon Eğrileri (Birdöküm ve Kuru Birleşim)

5.2 Yaş Bağlantı Örneği

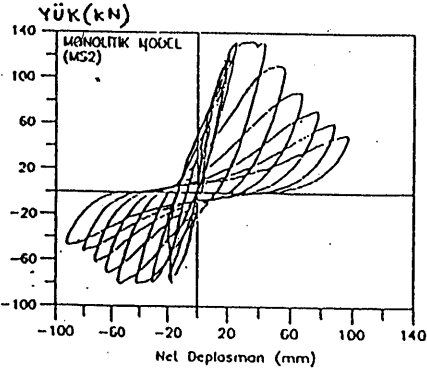
Denenen bağlantı türlerinden biri, Şekil 11 de gösterildiği gibidir. Bu sistemde alt ve üst kolon sürekli. Bu süreklilik, yerinde döküm bölgesinde (kiriş-kolon birleşim bölgesi) çelik bir kafesle sağlanmıştır. Kiriş alt kolonun üstüne oturtulduktan sonra, kiriş alt plakası kolon başlık plakasına kaynaklanmıştır. Üste ise kirişten çıkan filiz, yerinde döküm bölgesine yerleştirilen bir firkete donatıya bindirilerek kaynaklanmıştır. Birleşim bölgesine ayrıca bir adet daha firkete yerleştirilerek, bu bölgenin olabildiğince sargılanmasına çalışılmıştır.



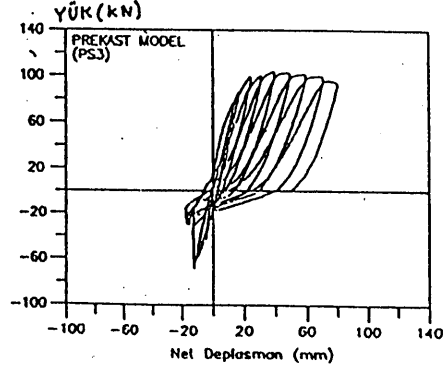
Şekil 11. PS2 Prefabriğe Elemanı Bağlantı Detayı

Deneyde, tersinen tekrarlanan yük altında bu bağlantıda önemli zayıflıklar gözlenmiştir. En önemli sorun, ters yönde uygulanan yüklemeye sırasında ortaya çıkmıştır (kiriş alt yüzünde çekme). Bu aşamada kiriş alt plakasının ankraj çubukları kaynak yakınında kopmuş ve böylece kiriş ve kolon arasındaki bağlantı yok olmuştur. Ayrıca birleşim bölgesi büyük hasar görmüş ve eleman taşıma kapasitesine bu nedenle ulaşmıştır. Bu kabul edilebilir bir davranış değildir. Deneyden elde edilen yük-deformasyon dönüşümleri Şekil 12(b) de gösterilmiştir (Deney elemanı PS3). Bu davranışı birdöküm eleman davranışı ile karşılaştırabilmek amacıyla Şekil 12(a) da birdöküm eleman (MS2) deneyinden elde edilen eğriler de gösterilmiştir.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ Görüldüğü gibi, özellikle ters yönde yüklemeye altında prefabrike eleman çok yetersiz kalmıştır. Ayrıca düz yöndeki yüklemeye de istenen yük düzeyine ulaşamamıştır. Prefabrike elemanın rijitliği ve enerji tüketimi de birdöküme oranla daha azdır.

Bundan sonraki deneyde, bağlantı detayında yapılan iyileştirmelerle daha sağlıklı bir davranış elde edilmiştir.



a. Monolitik deney elemanı. MS2



b. Öndökümlü deney elemanı. PS3

Şekil 12. Birdöküm ve Prefabrik Eleman Yük-Deformasyon Eğrileri

5.3 Deneylerde Gözlenen Sorunlar

Deneylerde gözlenen sorunlar aşağıda özetlenmiştir. Görüleceği gibi, gözlenen sorunlardan bir bölümü bağlantılarla ilgili değildir ve birdöküm sistemler için de geçerlidir.

- a. Prefabrike elemanların bağlantılarının kiriş-kolon birleşim bölgesinde yapılması büyük sorunlar yaratmaktadır. Bu bağlantıların detayı değiştirilerek daha sağlıklı bir çözümün ek külfet getirdiği unutulmamalıdır.
- b. Bağlantı detayı ne kadar iyi olursa olsun, prefabrike kiriş-kolon birleşimlerinde tersinen-tekrarlanır yüklenme altında gözlenen rijitlik azalması, öndöküme oranla daha fazla olmaktadır. Bu nedenle prefabrike yapılarda daha fazla yanıl ötelenme beklenmelidir.
- c. Kaynaklı bağlantılar sorun yaratmaktadır. Özellikle donatının plakaya kaynaklandığı yerlerde önemli zayıflıklar gözlenmektedir. Yapılan incelemede, bunun genellikle donatı niteliğinden kaynaklandığı gözlenmiştir. Kullanılan BÇ-III kaynaklanmaya uygun nitelikler içermemektedir. TS-708 de bu konuda büyük bir boşluk vardır.
- d. Yapılan tasarımlarda genelde yük tersinmesi gerektiği gibi dikkate alınmamıştır.
- e. Bazı elemanlarda donatı ucunda bulunan 90° kancalar, yönetmeliğin öngördüğü biçimde belirli bir çap etrafında bükülerek yapılmamıştır. Bunun sonunda donatı düşük gerilmeler altında o noktada kopmuştur. Yapılan ek deneylerde, yönetmeliğe göre bükülmeyen çubukların, akma kapasitesinin %20 sinde kırıldığı gözlenmiştir. Bu çok kritik bir sorundur!.
- f. BÇ-III olarak kullanılan bazı donatı çubuklarının, metalurjik özelliklerinin bozuk olması nedeniyle son derece gevrek olduğu gözlenmiştir. Bu deprem dayanımı açısından çok büyük bir sakıncadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler sonunda elde edilen sonuçlar ve oluşturulan öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- Prefabrike kiriş-kolon bağlantılarının deprem davranışını anlamının ve bunları geliştirmenin en etkili yolu, bunları depremi benzeştiren yükler altında denemektir. Bu zorunlu duruma getirilmelidir.
- Mafsallı kiriş-kolon bağlantılarına izin verilen tek katlı prefabrike yapılar için ek koşullar getirilmelidir. Bu tür yapılarda yanıl ötelenme büyük sorunlar yaratabilir.
- Kiriş-kolon bağlantısı olabildiğince birleşim bölgesinden uzaklaştırılmalıdır.
- Prefabrike yapılarda rijitlik, birdöküme oranla daha düşük alınmalıdır (örneğin, birdökümün %80 i).

- Tasarım aşamasında, bağlantı detayları oluşturulurken yük tersinmesi mutlaka dikkate alınmalı ve sistemin tersinen yük altında o yöndeki giriş kapasitesine kadar zorlanacağı unutulmamalıdır.
- Plakaya kaynaklanan donatı çubukları varsa, bu çubukların kaynaklanabilir olduğu deneylerle kanıtlanmalıdır.
- Donatının belirli bir çap etrafında bükülmesine özen gösterilmelidir.
- Kullanılacak donatı çubukları için gerekli, (a) çekme deneyi, (b) bükme deneyi ve (c) metalurjik deneyler mutlaka yapılmalıdır. Piyasadaki donatı çeliği ile ciddi kuşkular vardır.
- TS-708, kaynaklanabilir çelik çubuklar konusunda revize edilmelidir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

1. Park, R., "General Earthquake Resistant Design, Considerations for Prefabricated R/C Building Systems", Report Submitted to UNIDO, 1984.
2. Ersoy, U., and Tankut, T., "Precast Concrete Members with Welded Plate Connections Under Reversed Cyclic Loading", PCI Journal, July-August 1993, Precast Concrete Inst.
3. Ersoy, U.b, Tankut, T., ve Baysal, M.Z., "Türkiye'de Kullanılan Önüretimli Bir Kolon-Kiriş Birleşiminin Deprem Davranışı", Prefabrik Dergisi, Nisan 1992.
4. Yağcı, S., "Behavior of an Improved Exterior Precast Beam-Column Joint Under Reversed Cyclic Loading", MS Thesis, METU Civil Eng. Dept., Ankara, 1993.
5. Bengi, U., "Prefabrike B/A Kiriş Kolon Birleşimlerinin Deprem Davranışı", Y. Lisans Tezi, Gazi Üniv., İnşaat Blm., 1993.
6. Öztuğ, C., "Seismic Performance and Improvement of an External Precast Concrete Connection", MS Thesis, METU Civil Eng. Dept., 1994.
7. Dönmez, C., "Seismic Performance of a Precast Concrete Connection Used in Single Storey Buildings", MS Thesis, METU Civil Eng. Dept., 1994.