

YAPILAR DEPREMLERDE NASIL YORULUR?

İnş. Yük. Müh. Nejat BAYÜLKE

YAPI DEPREM DAVRANIŞI

Deprem davranışını açıklanacak yapı, 1- Bugünün deprem yönetmeliğine (2007) uygun tasarlanmış ve yapılmış; 2- Yakın bir tarihte 1975-2007 arası deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmış ve yapılmış ve 3- Hiçbir deprem kaygısı olmadan yapılmış bugünün ya da 1968 öncesinin yapısı olabilir. 1968 ilk kez dinamik analize eşdeğer statik deprem analizinin öngörüldüğü ve etriye sıklaştırması gibi sünek davranış ilkeleri içeren deprem yönetmeliğinin geçerli olduğu yıldır. 1975 deprem dayanıklı sünek yapı tasarım kurallarını büyük ölçüde içeren deprem yönetmeliğinin yılıdır. 2007 ise şu anda geçerli olan deprem yönetmeliğidir ve depreme dayanıklı yapı koşullarının 1975'e göre önemli boyutta daha ağırlaştırıldığı yönetmeliğin yürürlüğe girdiği yıldır.

Yapının yapıldığı tarihte geçerli olan inşaat mühendisliği pratiği de yapının deprem davranışını belirleyicidir. İki tür yapının deprem davranışı açıklanacaktır. Birinci tür yapı aşağıda sayılan ve deprem dayanımı olan ve depreme istenilen davranışı sağlayacak özellikleri olan yapıdır. İkinci tür yapı ise bu gün ya da uzak geçmişte depreme dayanıklı yapı kurallarının bilinmediği bir dönemde yapılmış ya da kuralların çok iyi bilindiği bir dönemde bu kurallara uyulmadan yapılmış bir yapıdır.

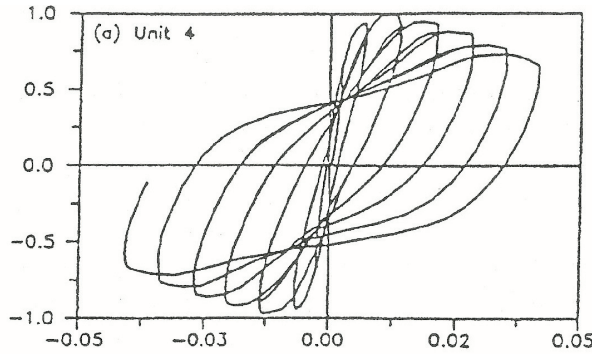
Yapının deprem davranışı etkiyen deprem yükünün düzeyine bağlıdır. Deprem yükü yapının elastik davrandığı yük düzeyini altındadır yada üzerindedir. Bir diğer önemli nokta yapının elastik davranış bölgesi ötesine deprem süresi içinde kaç kez geçmiş olmasıdır. **Şekil 1'**de yapı elemanı ya da yapı deprem davranışı bir yük-ötelenme ilişkisi olarak verilmektedir.

Şekil 1- Yapının elastik davranacağı bölge (1) nin sınır yatay yükü F_y olarak tanımlanır. F_y 'den büyük yük etkiğinde yapı bu yük düzeyinde ötelenir. (2) bölgede çatlama kalıcı ötelenme başlar: deprem yükü geçtikten sonra yapı eski hasar öncesi konumuna dönmez. Bu bölümde donatıda pekleşme



ile yük taşıma düzeyinde küçük de olsa artışlar olabilir. Bölge (2)'de aynı ötelenme miktarının yinelenmesi (artçı depremler gibi) yük taşıma gücünde küçük azalmalara yol açar. Ancak yapı hasar ve çatlaklara karşı temel olarak taşıma gücünden önemli bir şey yitirmemiştir. Bu durum bu yapının ana sarsıntıdan sonra olan kuvvetli artçı sarsıntılardan çok az etkileneyeceği biçiminde yorumlanabilir. Bölge (2) deprem dayanımı ve deprem tasarımı "iyi" yapılarda çok daha geniş olabilir. Daha şiddetli ve daha uzun süren bir depremde F_y 'den çok daha büyük yatay kuvvetler altında yapının ötelenmeleri yapının Bölge (3)'deki gibi davranmasına neden olabilir. Büyük ötelenmelerin tekrarlanması yapının yük taşıma gücünde önemli azalmaya neden olur ve yapı yıkılmaya doğru gider. Yapının Bölge (2) davranışının daha uzun olması daha büyük miktarda ötelenmeyi yük taşıma gücü çok az azalarak yapması istenir. Bölge (3) davranışı gösteren yapılar genellikle deprem dayanımı ya da bir diğer deyişle sünekliği az olan yapılardır.

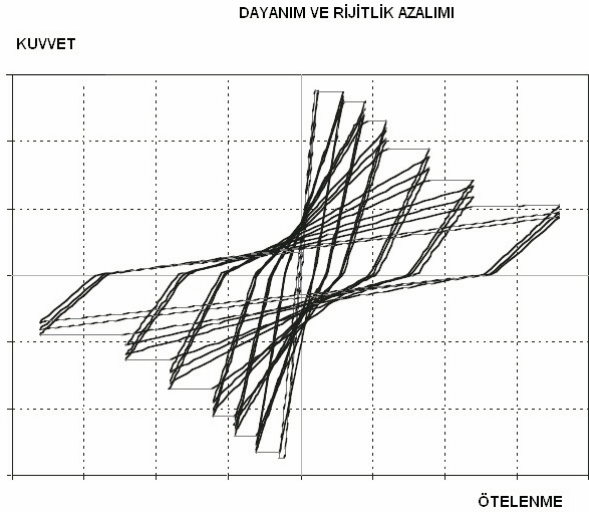
Şekil 2'de deprem dayanımı ve davranışı çok daha iyi olan bir yapı elemanı ya da yapının kuramsal yatay yük ötelenme ilişkisi verilmektedir. **Şekil 3'**de ise deprem davranışı çok "kötü" olan bir yapı elemanı ya da yapının yatay yük ötelenme ilişkisi verilmektedir.



Şekil 2- Deprem dayanımı "iyi" bir yapının kuramsal yatay yük ötelenme ilişkisi. Tersinir yüklemenin yinelenmesi ile dayanımı artışı azalma çok sınırlı bir düzeyde.

DEPREME DAYANIKLI YAPI TASARIMININ "ÖZÜ"

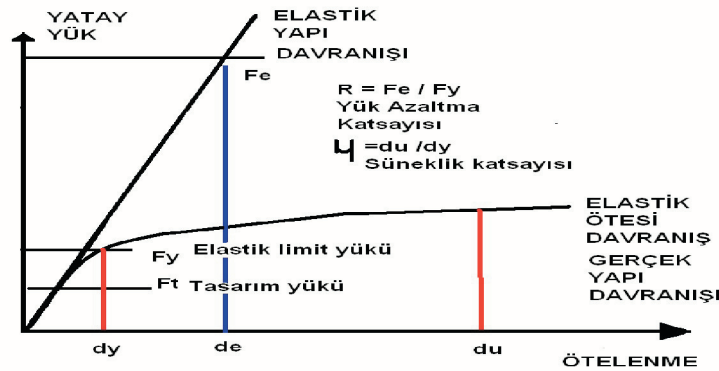
Depreme dayanıklı betonarme yapı deprem tehlike derecesine göre belirlenmiş tasarım yatay yükünü hiçbir çatlak ve hasar olmadan taşıyacak biçimde tasarlanır, hesaplanır. 1'inci derece deprem tehlike bölgesinde deprem tasarım yatay yükü (F_d) yapı ağırlığının % 10-15'i kadardır. Deprem dayanımı için sık aralıklı enine donatılar (etriyeler). Ortalama 15 cm aralıkla 8 mm çapında etriye; Kolon ve kiriş boyuna demirleri çaplarının 50-60 katı kadar uzunlukta bindirmeli, ya da kolon-kiriş birleşim yerine gömülü (ankrajlanmalı) olarak uzanmalıdır. Depremde çok fazla ötelenip şakilden çok uzaklaşmaması için yapıda yatay ötelenmeyi kısıtlayan perde duvarlar da olmalıdır. Ötelenme kısıtlaması yapı içindeki bölme duvar ve



Şekil 3- Deprem dayanımı "kötü" yapının yatay deprem yükleri etkisinde kuramsal davranışı. Tersinir yükleme ile hızlı ve büyük ölçüde azalan yatay yük dayanımı.

eşya hasarını da önler. Beton ve demir de projede öngörülen dayanımda olmalıdır. Bu nitelikteki yapı "sünek", kopmadan önce çok miktarda uzayan, ya da salınım yapabilen yapıdır.

Depreme dayanıklı yapılmış betonarme yapının deprem davranışı Şekil 4'de şematik olarak gösterilmektedir: Tasarım yükü F_d 'nin yaklaşık 1.5-2.0 katı olan F_y yatay deprem yüküne kadar davranış "elastik" hasarsızdır: F_y 'den küçük bir yatay yükün etkideği depremlerde taşıyıcı sistemde hasar olmaz. F_y 'yi



Şekil 4- Depreme dayanıklı SÜNEK yapı: Depremde hiç çatlamayan yapının deprem yükü (F_e) etkisinde yaptığı (d_e) ötelenmesi, sünek yapının çatlayarak ama taşıma gücü azalmadan yapabileceği ötelenme (d_u)'den küçük ise yapı depreme "dayanır". Amaç (d_u)'unun ve (d_e) - (d_u) aralığının olabildiğince büyük olması, yapının, sünek, kopmadan ötelenebilmesidir.

aşmayan yükün etkideği depremlerin çok sayıda yinelenmesi de bu yük düzeyinde yapı çatlama ve hasar olmayacak biçimde tasarlandığı için yapıda bir kalıcı hasar ya da “yorulma” yapmayacaktır.

Fy yükünün aşıldığı depremde çatlak başlar. Çatlak demirlerde uzama ve pekleşme etkisi ile yük taşıma gücünü biraz artırır. Yapı bu deprem yükü ile ötenir. Yapı elastik ötesi davranış bölgesindedir. Yük taşıma gücü azalmadan ve çatlamış olmasına karşın gidip gelerek depreme karşı koyar.

VAN'DA 23 EKİM'DE YIKILMAYAN YAPILAR 9 KASIM'DA NEDEN YIKILDI?

BAYRAM OTELİ ÖRNEĞİ

Başlangıçta söylendiği gibi yapının deprem davranışını belirlemede yapım koşulları da önemlidir. Van'da 9 Kasım'daki ikinci depremde yıkılan yapıların simgesi olan Bayram Oteli'nin 1962'de hangi koşullarda yapıldığı özel olarak bilinmese de 1962'nin genel yapım koşulları bilinmektedir:

1962'de deprem hesap yükü yapı ağırlığının % 6'sı kadardır: 1962 yapılarında yada deprem hesabı olmayan yapılarda Fy ancak % 10 kadar olabilir. 1975 öncesi yapılarda, 6 mm çapında 30 cm aralıklı etriye bugün en az 8 mm çapında 15 cm aralıkla yaklaşık 3.6 kat daha çok etriye konulur. Şu anda en küçük kolon boyutu olan 25 cm x 30 cm, 1962'de 20 cm x 20 cm olabirdi: yaklaşık 2 kat daha büyük en kesit. Bugün en az kolon boyuna demiri % 1 oranında, 1962'de % 0.5 oranındadır. Demirlerin yüzeyleri düzdür, nervürlü demirlerin yaygınlaşması için daha bir 30 yıl beklemek gerekiyor. Bugünkü depreme dayanıklı yapı tasarımının en önemli bir bileşeni olan tasarım yükleri altında yapının ötelenme miktarının sınırlanması koşulu ve bunun sonucu olan yapıları perde duvarlı yapmak 1962 yılındaki Türkiye'de 1961 deprem yönetmeliğinde yoktur.

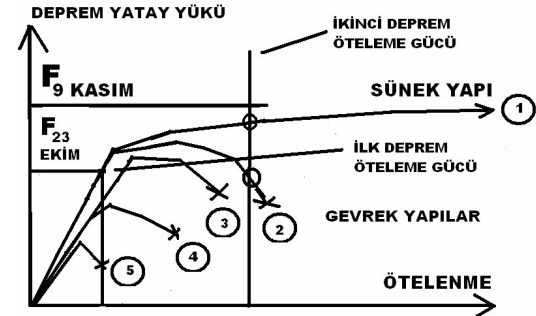
1962 yılında hazır beton Türkiye'de hiç yok, betonlar betoniyele bile karıştırılmıyor. Van'a hazır beton 2000'li yılların başında ulaşmış. Beton sokakta kürekle karıştırılıp yapı cephesine kurulmuş bir ahşap iskele merdivenleri ile kürekle basamak basamak üst kata atılıyor, atılırken de karıştırılmış oluyor! Vibratörle beton sıkıştırmayı İstanbul'daki mühendis bile daha pek görmemiş. Kum ve çakılı dereden alındığı gibi kullanıyor. Kum çakıl yıkama ve eleme tesislerine daha birkaç on yıllar var. Etriye sıklaştırması ve perde

duvar yapılması o günlerde ABD'de ve Japonya'da da bilinse bile pek uygulanmıyor. Avrupa'da bilinmiyor. Bu koşullarda yapılmış yapılar **Şekil 3**'de gösterilen “gevrek” yapıların elastik dayanım yükleri Fy hem daha düşük hemde bu yük aşıldıktan sonra gevrek oldukları için birkaç gidip gelmeden sonra yıkılıyorlar; nervürlü demirler iyi yapışmadıkları topraklı betondan kolayca sıyrılıyor.

O günün koşul ve olanaklarının eseri olan 1962'nin yapıları çok da aşağılanmamalı: 17 Ağustos 1999'da yıkılmış pek çok yapı, çok daha gelişmiş olanakların var olduğu daha yakın dönemlerin fen ve teknolojisi gözardı edilerek sanki 1962 yılındaki gibi yapılmış yapılardan farklı durumda değildi.

23 EKİM 2011 DEPREMİ

Ters fay hareketli 7.2 büyüklüğündeki depremde büyük bir olasılıkla Erciş'in bulunduğu kabuk plakası hareket etmiş Van şehrinin üzerinde bulunduğu plaka oynamamış olabilir. Depremin merkezi Van'a daha uzak. Depremin kuvvetli yer hareketi ve yıkımı Erciş



- 1-SÜNEK YAPI İLK DEPREMDE ELASTİK BÖLGEDE İKİNCİ DEPREMDE LİMİT YIKILMA ÖTELENMESİNDEN ÇOK GERİDE SÜNEK YAPI
- 2-İLK DEPREMDE ELASTİK BÖLGEDE İKİNCİ DEPREMDE LİMİT ÖTELENME SINIRI AŞILMIŞ YIKILMIŞ GEVREK YAPI
- 3-İLK DEPREMDE ELASTİK ÖTELENME SINIRINDA İKİNCİ DEPREMDE LİMİT ÖTELENME SINIRI AŞILMIŞ YIKILMIŞ GEVREK YAPI
- 4-İLK DEPREMDE ELASTİK ÖTELENME BÖLGESİNİ AŞIŞ AZ HASARLI YAPI İKİNCİ DEPREMDE LİMİT ÖTELENME SINIRI AŞILMIŞ VE YIKILMIŞ
- 5-İLK DEPREMDE ELASTİK ÖTESİ BÖLGEYE GEÇMİŞ VE LİMİT ÖTELENMESİ DA ÇOK AZ OLAN VE YIKILAN YAPI

Şekil 5- 23 Ekim depreminde Van'daki sünek ya da gevrek yapılara etkiyen yatay deprem yükü bu yapıların elastik davranış yük düzeyinin genellikle altında. Genel olarak yapılarda ya hiç hasar yok ya da çok az çatlak var. 9 Kasım depremi sünek ve gevrek yapıları elastik yük dayanma düzeyinin üzerinde zorladı. Gevrek yapıların elastik bölge ötesinde ötelenme miktarı ve kalıcı hasar bölgesinde yüklemenin tekrarlanmasına karşı koyma sayısı sınırlı. Bu nedenle birkaç salınım sonrasında yıkıldılar.

tarafında çok daha fazla. Bu depremin Van'da kuvvetli yer hareketi kaydı ölçülemedi. Van'da bu depremde yıkılan birkaç bina var. Sünek ya da gevrek olsun çoğu yapıya etkiyen yükler büyük bir olasılıkla F_y yükünün altında kalmış, elastik ötesi bölgeye geçen yapı ya çok az sayıda ya da bu bölgeye geçen yapılar da çok az miktarda elastik ötesi düzeyde zorlanmışlar (**Şekil 5**).

9 KASIM 2011 DEPREMİ

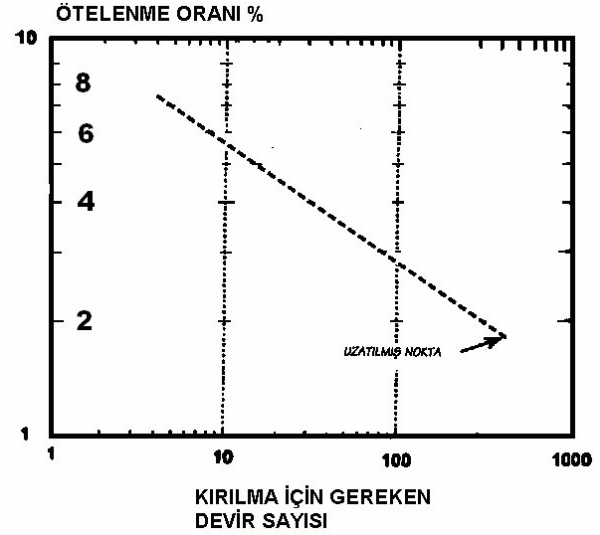
5.6 büyüklüğündeki deprem 7.2'ye göre daha küçük ama Van'a daha yakında olduğu için, 23 Ekim'e göre yapılara etkiyen yük daha büyük. Van'da yer çekimi ivmesinin % 25'i kadar bir uç ivme ölçülmüş, "1962" tipi betonarme yapının elastik dayanım yükü olan F_y 'nin (% 10) çok çok üzerinde, bu yapılar hemen elastik ötesi bölgeye geçmişler ve gevrek oldukları ve bu bölgede de az sayıda salınım yapabildikleri için yıkılmışlar (**Şekil 5**).

YAPININ YORULMASI

Özellikle düşey atımlı faylarda olan depremlerin artçıları çok daha uzun bir süre devam eder. Artçı depremler ana sarsıntıda az ya da çok hasarlı yapıları birçok kez zorlar. Bu durum yazı başlığındaki konunun, "Yapının bu çok sayıda hafif ve orta şiddetli depremde tekrarlanan yükleme etkisinde yorulması", güncelliği son Van depremi ile ilgili olduğu için bu uzunca giriş bölümü gerekmiştir.

Şekil 6'da betonarme kolon ötelenme miktarı ve hasar görmeden kaç kez ötelenebilir deneysel ilişkisi (El Bahy ve diğerleri 1999a ve 1999b) verilmektedir. Bu bir tür yorulma deneyidir. Belli bir yük düzeyinin ya da buna karşılık olan ötelenme oranının kaç kez hasar olmadan tekrarlanabileceğini vermektedir. Artçı sarsıntılar büyüklüklerine göre yapı için bir tür yükleme düzeyi ya da ötelenme oranı olarak algılanabilir.

Şekil 6'ya göre 3.00 metre yüksekliğindeki kolon binlerce kez 3 cm ($3 \text{ cm}/300 \text{ cm} = \%1$ oranında) ötelenmiş ve hasar olmamıştır. Diğer bir deyişle kolonun ya da yapının bu ötelenme oranında zorlanmasına neden olan büyüklükte artçı sarsıntının çok sayıda tekrarlanması bu kolon ya da yapı için bir hasar artışına neden olmayacaktır yorumu yapılabilir. Aynı kolon 15 cm (% 5 oranında) ötelenmeye ise 10-15 kez dayanmıştır. Benzer bir yorumla % 5 oranında ötelenmeye neden olan bir artçı sarsıntıda 10-15 kez gidip gelen yapıda hasar olacaktır.



Şekil 6- Betonarme bir kolonun yorulma eğrisi. Kolon % 2 ötelenme oranına en az 500 kez karşı koyarken, % 5 ötelenme oranında 10 yükleme tekrarından sonra kırılmaktadır. (ElBahy ve diğerleri-1999a ve 1999b)

Hafif bir depremde ya da şiddetli deprem sonrasındaki artçı (4-5 büyüklüğünde) depremlerde yapının ötelenme oranı % 1'inde altındadır. Onlarca kez hafif deprem olsa yapı yüzlerce kez gidip gelse de hasar olmayacaktır. Ancak daha çok şiddetli depremin ötelenmesine ise ancak 5-6 kez dayanabilecektir.

Bu deneyde gözlenmiş **Şekil 4**'de verilen ilişki depreme dayanıklı ve günümüz standart ve deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmış kolonlar ya da böyle kolonları olan yapılar için geçerlidir. Her yapı için yapım ve dayanım özelliklerine bağlı benzer ötelenme oranı ve yükleme tekrarlama sayısı ilişkisi vardır. Bugünün yönetmeliklerine göre yapılmamış yapıda hem hasarı başlatan ötelenme oranı küçüktür hem de bu ötelenme oranında yapılacak tersinir yükleme sayısı daha da azdır. 1962 yapıları için ötelenme yüzdeleri ve tekrarlama sayılarını deneylerle belirlemek gerekir ve büyük bir olasılıkla çok daha düşük ötelenme oranlarında çok daha az sayıda salınım sonunda yapı yıkılacaktır.

Yapının "yorulmasının" bir belirtisi olmalıdır. **Şekil 1** yapı elastik ötesi bölgeye geçince giderek kalıcı ötelenme ve çatlakların artacağını ve yük taşıma gücünün azalacağını göstermektedir. Yorulmanın belirtisi çatlak ve kalıcı ötelenmelerin artmasıdır. Hasar artışı yük düzeyinin artması ve yüklemenin çok sayıda tekrarlanması ile olmaktadır.

Ancak ana şokun etkisi bittikten sonra yapıya artçı depremlerde etkiyen kuvvetler ana sarsıntıdaki yüklerden daha küçüktür. Yükün tekrarlanma sayısı da daha azdır. Hasarlı ya da hasarsız yapı artçıların etkisinde **Şekil 1**'deki 2'nci bölge olan hatta 1'inci bölgeden olan yük-ötelenme ilişkisine göre davranacaktır. Yapı artçı depremlerde 1'inci davranış aralığında etkiyen düzeyde deprem yüklerini, elastik deprem yatay yük düzeyi F_y altındaki düzeydeki yükleri, çatlama hasar görmeden taşıyorsa, artçı depremlerin bu düzey yüklerini yorulmadan hasarı artmadan ya da hiç hasar olmadan taşıyacak gibi görünmektedir. Deneyler bu mertebeden yüklerin çok sayıda tekrarlanmasının da kırılmaya yol açmadığını göstermektedir.

Ana sarsıntıda hasarı olmayan ya da çok kısıtlı hasarı olan bir yapının yatay yük düzeyi ana şokun çok altında olan artçı depremlerin yüklerini hasarı artmadan defalarca taşıyacaktır; çok sayıda olan artçıların yapının hasarını artırmaz; artçı depremlerin yükü ana sarsıntının çok altındadır. Ana sarsıntının Büyük yatay deprem yükü hasar yapmamış ise bu yapının yukarıda **Şekil 6**'da açıklandığı gibi yapıya çok daha düşük yatay yük uygulayan artçı sarsıntılar hasarı nasıl artırabilir?

YAZININ AMACI VE SONSÖZ

Yazının amacı ilk depremde yıkılmayan yapıların neden ikinci depremde yıkıldığı ya da ilk depremde çok az hasar görmesine karşın çok sayıda artçı depremlerde hasarı artmayan ya da çok az artan yapıların dayanımının ne kadar olduğunu niteliksel olarak açıklamaktır.

1- İlk depremde yıkılan yapı yatay yük dayanma düzeyi çok düşük ya da hemen hiç olmayan ve süneklik özelliği de olmayan yapıdır.

2- İlk depremde yıkılmayan çok az ya da hiç hasarı olmayan yapı 2'nci depremde yıkılmış ise elastik ötesi bölgeye geçmiştir. Bu bölgede de salınım yapma gücü "sünekliği" yaktır.

3- İlk depremde çok az hasarı olan ya da hiç hasarı olmayan yapı ikinci depremde çatlakları biraz artsa da yıkılmamış ise ve artçı depremlerde de durumunda önemli bir değişiklik yoksa bu yapı elastik ötesi bölgeye geçmesine karşı yeterli sünekliğe sahip olan bir yapıdır. Bir depremden sonra elastik davranış bölgesinin ötesine geçmemiş ve bu nedenle çatlağı olmayan ya da elastik davranış bölge ötesine geçmiş ve hafif

çatlakları olan yapıların kuvvetli artçılarda ya da şiddetli bir başka depremde nasıl davranacağı nasıl kestirilebilir? Diğer bir deyişle yapı **Şekil 2** ya da **Şekil 3**'te gösterildiği gibi mi davranacağı nasıl anlaşılabilir?

Yapı yakın tarihli bir deprem yönetmeliğine göre mi tasarlanmış? Eğer Saray Oteli gibi 1962'de yapılmış bir yapı ise sık tekrarlanan artçı depremlerde ya da ikinci bir şiddetli depreme karşı koyması güçtür ve yapıya hasarı hiç olmasa da güvenliğinin yetersiz olabileceği düşüncesi ile yaklaşılmalıdır.

1968 yönetmeliği sonrasındaki yapılarda elastik davranış bölgesinin ötesine geçilmesine, yapıda kılcal çatlaklar olmasına karşın yeterli süneklik olabilir ve artçı depremlerin ve kuvvetli bir ikinci depremin yapının hasarını artırmayacağı varsayılabilir. Ancak 1968 sonrası yapısı deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmamış ya da projesine göre yapılmamış da olabilir. O zaman bu yapılar da 1962 yılında yapılmış bir yapıdan farksızdır ve onun gibi davranacaktır.

Deprem sonrası hasar tesbitinde ve yapının durumunun artçı depremlerde nasıl gelişebileceği, gözlenen çatlakların genişliği ve yaygınlığı kadar yapıda görünmeyen süneklik niteliğinin bulunup bulunmadığı da irdelenmelidir.

Betonarme doğrusal elastik bir malzeme değildir. Doğrusal elastik olduğu varsayılan yük aralığı aşıldıktan sonra çatlakları olsa da taşıma gücü azalmadan ötelenmelere karşı koyabilir. Kılcal çatlaklı durumda kullanım yüklerini yıllarca taşıyan yapılar vardır. Taşıma gücünün önemli boyutta azalmasının göstergesi kalıcı ötelenmenin artması ve çatlak genişliğinin santim boyutlarını aşmasıdır. Eğer eleman yeterli süneklikte ise çatlaklı durumda da çok sayıda salınım yapabilir. Elastik ötesi davranış bölgesine az sayıda geçiş çok önemli değildir. Yatay yük düzeyi (F_y) az olan yapılar elastik ötesi bölgeye daha çok sayıda geçmekte ve eğer süneklikleri de çok az ise yıkılmaktadır.

KAYNAK

Elbahi, A, S. Kunnath, W.C. Stone, A.W. Taylor, (1999a) "Cumulative Seismic Damage of Circular Bridge Columns: Benchmark and Low Cycle Fatigue Tests" ACI Structural Journal Vol.96, No 4 August-July.

Elbahi, A, S. Kunnath, W.C. Stone, A.W. Taylor, (1999b) "Cumulative Seismic Damage of Circular Bridge Columns: Variable Amplitude Tests" ACI Structural Journal Vol.96, No 5 September-October.