mühendislikdergisi
Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Cilt: 7, Sayı: 3, 409-420
Eylül 2016

İdeal göçme mekanizması için enerji esaslı yapı taban kesme kuvvetinin belirlenmesi

Onur MERTER[*,1], Taner UÇAR[2],

[1]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35160, Buca, İzmir*
[2]*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 35160, Buca, İzmir*

Makale Gönderme Tarihi: 22.04.2016 Makale Kabul Tarihi: 13.06.2016

Öz

Bu çalışmada, klasik iş-enerji bağıntısı ve yapı için önceden hedeflenen ideal bir göçme mekanizmasının esas alınması ile deprem etkileri altında doğrusal elastik ötesi davranış gösteren betonarme çerçeve türü yapılar için genel enerji denkleminden hareketle taban kesme kuvveti hesaplanmaktadır. Yapısal sönümden dolayı, depremle birlikte yapı sistemlerine giren enerji bir katsayı ile modifiye edilmekte ve enerji denge denklemi değiştirilmiş şekli ile yazılmaktadır. Enerji denkleminde yer alan plastik enerji, yapısal elemanların çevrimsel davranışlarının daha gerçekçi bir şekilde hesaba katılmasının gerekliliğinden, belirlenen bir katsayı ile azaltılmaktadır. Plastik ve giren enerjiler için azaltma faktörleri literatürdeki farklı çalışmaların esas alınması ile belirlenmektedir. Yapı için belirlenen taban plastik dönmesi için yatay dış yükler tarafından yapılan dış iş, Türk Deprem Yönetmeliği'ndeki eşdeğer statik yatay yük dağılımının dikkate alınması ile hesaplanmaktadır. Plastik enerji ifadesi ile dış iş ifadelerinin eşitlenmesi sonucunda enerji esaslı taban kesme kuvvetlerini veren denklemler, farklı azaltma faktörleri için türetilmektedir. Enerji esaslı tasarım taban kesme kuvveti değerleri dört ve yedi katlı betonarme çerçeve yapılar için hesaplanmaktadır. Aynı çerçeveler için Z2 yerel zemin sınıfına ait elastik tasarım ivme spektrumuna uyumlu olacak şekilde ölçeklenen deprem ivme kayıtları ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerden elde edilen en büyük taban kesme kuvvetlerinin ortalaması enerji esaslı taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılmakta ve sonuçlar yorumlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *İdeal göçme mekanizması; enerji denge denklemleri; plastik enerji; enerji esaslı taban kesme kuvveti; zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz*

Giriş

Yapıların deprem tasarımında can güvenliği sağlanmak koşuluyla, şiddetli depremlerde taşıyıcı sistem elemanlarında belirli düzeyde hasara bilerek izin verilmektedir. Bu nedenle, deprem etkisi altındaki yapı sistemlerinin tasarım ve değerlendirmesinde uygun göçme mekanizmasının belirlenmesi oldukça önemli bir araştırma konusudur. Genellikle lokal ve global türde incelenen göçme mekanizmaları, yapı taşıyıcı sistemlerinin doğrusal olmayan davranıştaki hasar bölgeleri ile ilişkilendirilebilmektedir (Priestley, 1996). Lokal türdeki göçme mekanizmaları genel olarak yapıların ayakta kalamamasına neden olabilen, istenmeyen tipteki mekanizmalardır. Global göçme mekanizmaları ise deprem etkisi altında tercih edilebilecek olan mekanizma türü olup, güçlü kolon zayıf kiriş koşulunu sağlamasından dolayı kısmi veya toptan göçmeyi önleyecek olan bir mekanizmadır ve yeni yapılacak olan yapıların tasarımında global türdeki ideal hasar mekanizmaları esas alınabilir (Leelataviwat ve Goel, 2002; Liao, 2010; Bai ve Ou, 2012).

Günümüz deprem yönetmeliklerinde yer alan geleneksel yapı tasarımı yöntemleri, dayanım ve yer değiştirme esaslı yöntemlerdir (Priestley vd., 2007). Bu yöntemler, yapının dayanım ve yer değiştirme kapasitesinin depremin talep ettiği dayanım ve yer değiştirmeden az olmaması esasına dayanmaktadır. Şiddetli depremlerin etkisi altında genellikle doğrusal olmayan davranış göstermesi beklenen yapı sistemleri için enerjiye dayalı tasarım yöntemlerinin kullanılması, diğer yöntemlere bir alternatif olarak gelişmiştir (Leelataviwat ve Goel, 2002; Akbaş ve Shen, 2003). Bu yöntemlerde deprem etkisindeki sistemlerin ayakta kalması, yapının enerji tüketme kapasitesi ile depremin talep ettiği enerjinin dengesi açısından düşünülmektedir. Deprem hareketi yapılara enerji girişi şeklinde yorumlanmakta ve daha rasyonel bir analiz yöntemi esas alınmış olmaktadır (Housner, 1956; Akiyama, 1985, Uang ve Bertero, 1990; Leelataviwat vd., 2009; Lopez-Almansa vd., 2013).

Yapı elemanlarının çevrimsel tekrarlı yükler altında histeretik davranışlarının gerçekçi bir şekilde modellenmesi de, yapıların doğrusal olmayan davranışı açısından oldukça önemlidir. Doğrusal olmayan davranışta yapı enerji kapasitelerinin belirlenmesinde, yapıların histeretik özellikleri büyük önem taşımaktadır (Bai ve Ou, 2012; Kazantzi ve Vamvatsikos, 2012). Bu özellikler, taşıyıcı sistem elemanlarında tersinir-tekrarlı yükler altında elde edilen ve dayanım ve rijitlik azalması ve çevrim sıkışması gibi özellikleri de barındırabilen doğrusal olmayan dayanım-yer değiştirme ilişkileridir (FEMA P440A, 2009). Bu nedenle; enerji esaslı yapısal analizlerde de, yapıya ait bu tip çevrimsel karakteristikler önemsenmeli ve hesaplarda dikkate alınmalıdır.

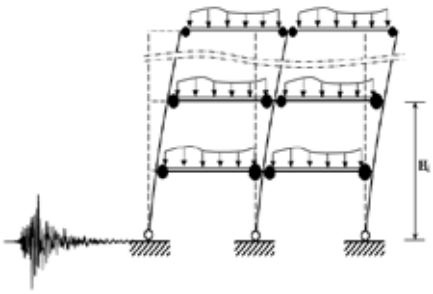
Bu çalışmada, güçlü kolon zayıf kiriş oluşumunu dikkate alan ideal (global türde) göçme mekanizması esas alınmaktadır. Plastik mafsal bölgelerin kiriş elemanların uçlarında ve zemin kat kolon tabanlarında konumlandığı kabul edilmektedir. Deprem etkisi altında çerçeve türü yapı için yazılan enerji denge denklemlerinde, yapı taşıyıcı elemanlarına uygun histeretik modeller dikkate alınmaktadır. Çok serbestlik dereceli (ÇSD) sisteme depremle birlikte giren enerji, eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) sistemin *n*'inci moduna ait katkılarının enerji toplamı şeklinde varsayılmaktadır. Enerji denge denklemindeki plastik enerji ifadesi için, gerçekçi histeretik modelin dikkate alınması amacıyla bir azaltma faktörü kullanılmaktadır. Giren enerji ifadesi için, sönüm etkilerinden dolayı azalacak olan enerjiden dolayı bir azalım çarpanı dikkate alınmaktadır. Yapılarda tüketilen plastik enerji ifadesi, enerji denge denkleminden belirlenmekte ve yatay dış kuvvetlerin sistem üzerinde gerçekleştirdiği işe eşitlenmektedir. Yapılar için toplam tasarım taban dönme değeri hedeflenerek, klasik iş-enerji eşitliğinden enerji esaslı taban kesme kuvveti ifadesi elde edilmektedir. Plastik enerji (Gülkan ve Sözen, 1974; Kowalsky, 1994; Priestley, 2003; Dwairi vd., 2007) ve giren enerji (Akiyama, 1985; Kuwamura ve Galambos, 1989; Fajfar ve Vidic,

1994; Benavent-Climent vd., 2002; Benavent-Climent vd., 2010) azaltma çarpanları için literatürdeki farklı ifadelerin esas alınması ile, farklı histeretik modeller için taban kesme kuvveti değerleri belirlenmektedir. Çerçevelerin yatay yer değiştirme süneklik oranları, iki doğru parçası ile idealleştirilen artımsal itme eğrilerinden elde edilmekte ve taban plastik dönmeleri aynı itme eğrisindeki yer değiştirme değerlerinden hesaplanmaktadır. Enerji esaslı taban kesme kuvvetleri, gerçek deprem kayıtları ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerden elde edilen ortalama taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmaktadır.

İdeal Göçme Mekanizması

Yapıların doğrusal olmayan davranışları sonucu tüketilen enerjinin hesaplanması, plastik mafsal bölgelerinin adedi ve özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Doğrusal olmayan davranışta, yapısal elemanlardaki plastik mafsal bölgelerinin modellenmesine ait farklı hipotezler mevcuttur. Birçok yapı mühendisliği uygulaması için, geleneksel yığılı plastisite hipotezinin kullanılması uygun ve pratik bir çözüm olabilmektedir.

Göçme mekanizmaları, deprem etkileri altındaki yapıların stabilite ve kullanılabilirlik seviyelerinin bir göstergesi sayılabilir. Deprem etkileri altında yapı sistemleri; lokal göçme mekanizması, yumuşak kat mekanizması veya global göçme mekanizması gibi farklı göçme durumlarına sahip olabilir (Bai ve Ou, 2012). Global göçme mekanizmaları plastik mafsalların genellikle kiriş uçlarında ve kolon diplerinde oluştuğu bir mekanizma olup, dış yükler altında yapı sistemlerinin bu mekanizmaya sahip olmaları tercih edilmektedir. Bu türdeki bir mekanizmada, birçok deprem yönetmeliğinde de yer alan güçlü kolon-zayıf kiriş koşulu sağlanmakta ve yapı sistemlerinde toptan göçme engellenmektedir. Bu çalışma kapsamında, deprem etkileri altındaki çerçeve yapılarda Şekil 1'de gösterilen global göçme mekanizmasının oluşması hedeflenmekte ve bu ideal mekanizma üzerinden enerji denge denklemleri yazılarak, taban kesme kuvveti ifadesi türetilmektedir.



Şekil 1. Çok katlı bir yapı sistemine ait ideal göçme mekanizması

Yapısal Tasarımda Enerji Kavramı

Yapı ve deprem mühendisliği açısından enerji dinamik tabanlı bir kavramdır ve bu nedenle enerji ile ilgili analizlerde yapı sistemlerine ait dinamik hareket denkleminin incelenmesi önemlidir. TSD bir sisteme ait genel hareket denklemi, klasik yapı dinamiğinden şu şekilde yazılabilir (Chopra, 1995):

$$m\cdot\ddot{u}+c\cdot\dot{u}+f_s(u)=-m\cdot\ddot{u}_g(t) \qquad (1)$$

Burada; u, $\dot{u}$ ve $\ddot{u}$: TSD sistemin rölatif yer değiştirmesi, hızı ve ivmesi, m: sistemin kütlesi, c: sönüm katsayısı, $f_s(u)$: doğrusal olmayan sistemdeki direnç kuvveti ve $\ddot{u}_g(t)$ güçlü yer ivmesidir. TSD bir sisteme ait genel enerji denklemi, dinamik hareket denkleminin yer değiştirme üzerinden entegre edilmesi ile elde edilebilir. Denklem, yer hareketinin süresi: t_0 cinsinden ifade edilecek olursa;

$$\int_0^{t_0} m\cdot\ddot{u}\cdot\dot{u}\,dt+\int_0^{t_0} c\cdot\dot{u}^2dt+\int_0^{t_0} f_s(u)\cdot\dot{u}\,dt=\int_0^{t_0}-m\cdot\ddot{u}_g(t)\cdot\dot{u}\,dt \qquad (2)$$

eşitliği elde edilir. İntegralli terimler; E_K: kinetik enerji, E_ξ: sönüm enerjisi, E_S: sistemin direnç kuvvetinin enerjisi ve E_I: depremle birlikte giren enerji cinsinden yazılırsa;

$$E_K + E_\xi + E_S = E_I \quad (3)$$

eşitliğine ulaşılır. (3) nolu ifadede, E_S enerjisi, E_{Se}: elastik şekil değiştirme enerjisi ve E_p: plastik enerji bileşenlerinin toplamı cinsinden yazılabilir:

$$E_K + E_\xi + [E_{Se} + E_p] = E_I \quad (4)$$

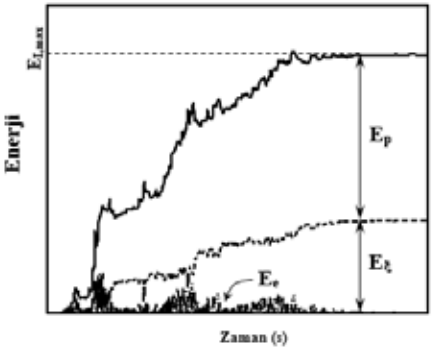
Burada; $\{E_K + E_{Se}\}$ enerjilerinin toplamı, E_e: sistemin toplam elastik enerjisi olarak ifade edilecek olursa, (4) nolu eşitlik şu şekilde yeniden yazılabilir (Şekil 2):

$$E_e + E_\xi + E_p = E_I \quad (5)$$

(5) nolu eşitlikte, sönüm enerjisi E_ξ terimi denklemin sağ tarafına alındığında $[E_I - E_\xi]$ enerjisinin E_D: yapısal hasara neden olan enerji türü olarak ifade edilerek (Housner, 1956; Bai ve Ou, 2012; Lopez-Almansa vd., 2013), toplam giren enerji E_I'nın bir λ katı kadar olduğunun kabul edilmesi ile;

$$E_e + E_p = [E_I - E_\xi] = E_D = \lambda E_I \quad (6)$$

eşitliği yazılabilir. λ: sistemin sönüm oranı ve sünekliğine (μ) bağlı olan, giren enerji düzeltme katsayısıdır (Bai ve Ou, 2012). Şekil 2'de; bir TSD sistemin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi sonucu elde edilen enerji-zaman geçmişi grafiğinde, yukarıda açıklanan enerji türleri gösterilmektedir.



Şekil 2. Deprem etkisi altında TSD bir sistemin enerji-zaman geçmişi grafiği ve enerji türleri

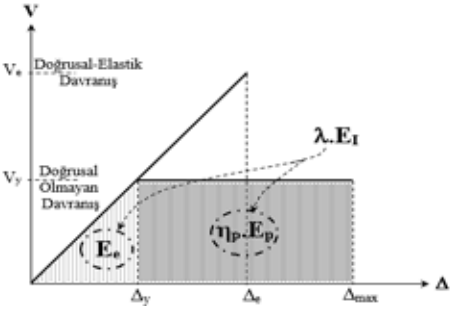
Plastik enerji düzeltme katsayısı

Bu çalışmada taban kesme kuvvetinin türetilmesi, hedeflenen göçme mekanizmalarında oluşan plastik mafsallarda tüketildiği varsayılan enerjinin, hedeflenen yer değiştirmeyi sağlayan tasarım dış yüklerinin yaptığı işe eşitlenmesi esasına dayanmaktadır. (Leelataviwat ve Goel, 2002; Liao, 2010; Bai ve Ou, 2012). Deprem gibi tersinir ve tekrarlı bir yatay yükün etkisi altında betonarme yapı elemanlarının çevrimsel yük-yer değiştirme ilişkilerinde, dayanım azalması ve çevrim sıkışması gibi özellikler görülebilmektedir. Bu nedenle yapı elemanlarının gerçekçi histeretik özellikleri, çalışmalarda esas alınan bazı ideal davranış modellerinden azaltılarak esas alınmalıdır (Bai ve Ou, 2012). Bu amaçla plastik enerji ifadesi, η_p ile ifade edilen bir düzeltme katsayısıyla çarpılmış olarak şu şekilde dikkate alınmaktadır (Şekil 3):

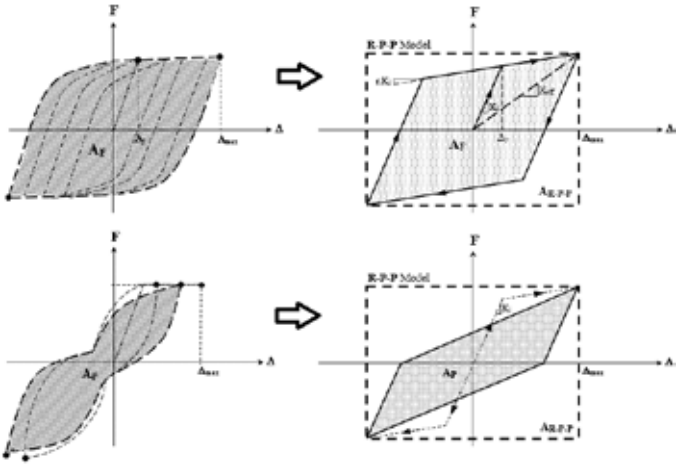
$$E_e + \eta_p E_p = \lambda E_I \quad (7)$$

Burada; η_p: plastik enerji düzeltme katsayısıdır. Şekil 4'de verilen A_F ve A_P alanları sırasıyla: dayanım azalması ve çevrim sıkışması gibi etkilerin dikkate alınmadığı (ideal) ve dikkate alındığı çevrimsel yük-yer değiştirme (histeretik) eğrilerinin alanlarıdır. A_F ve A_P alanlarının kullanılması ile η_p katsayısı şu şekilde ifade edilebilir (Bai ve Ou, 2012):

$$\eta_p = \frac{A_p}{A_F} = \frac{A_{RPP}}{A_F} \cdot \frac{A_p}{A_{RPP}} = \left[\frac{\mu \cdot (1 + r \cdot \mu - r)}{(\mu - 1) \cdot (1 - r)}\right] \cdot \frac{A_p}{A_{RPP}} \quad (8)$$



Şekil 3. Plastik enerjinin yatay yük-yer değiştirme (V-Δ) grafiğinde gösterimi



Şekil 4. Dayanım azalması ve çevrim sıkışması olmayan ve olan (A_F ve A_P) çevrimsel modeller

(8) nolu ifadede; A_{RPP}: çevrimsel yük-yer değiştirme eğrisi rijit-tam plastik (RPP) olarak modellenen grafiğin toplam alanıdır (Şekil 4). η_p katsayısı; μ: sistemin yer değiştirme sünekliği ($\mu=\Delta_{max}/\Delta_y$), r: pekleşme bölgesinin eğimi ve A_P/A_{RPP} alanlarının oranı cinsinden ifade edilmektedir. (8) nolu eşitlikte yer alan A_{RPP}/A_F oranı, geometriden μ ve r cinsinden belirlenmiştir. A_P/A_{RPP} alanları oranı içinse, Jacobsen (1930) tarafından harmonik yükleme etkisindeki çevrimsel davranış için verilen histeretik sönüm (ξ_H) ifadesinden yararlanılarak; "$A_P \,/\, A_{RPP} = (\pi / 2)\cdot\xi_H$" eşitliğinin yazılması ile, (8) nolu eşitlik ξ_H histeretik sönümüne bağlı olarak şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$\eta_p = \frac{\pi\cdot\mu\cdot(1+r\cdot\mu-r)}{2\cdot(\mu-1)\cdot(1-r)}\cdot\xi_H \qquad (9)$$

Bu çalışmada, enerji esaslı tasarım taban kesme kuvvetinin türetilmesinde kullanılacak enerji denge denklemlerinde, ξ_H sönüm ifadesi için geçmiş literatürdeki bazı eşitliklerden faydalanılmıştır. Gülkan ve Sözen (1974), Kowalsky (1994), Priestley (2003) ve Dwairi vd. (2007) tarafından verilen ξ_H ifadeleri, bu çalışmada η_p katsayısının belirlenmesinde esas alınmıştır.

Yapı Sistemine Giren Enerji

Bu çalışma kapsamında, eşdeğer TSD sisteme depremle birlikte giren toplam enerji (E_I), Housner (1956)'in en temel ifadesi ile;

$$E_{I(TSD)n} = \frac{1}{2}\cdot M_n\cdot S_{V,n}^2 = \frac{1}{8}\cdot\frac{M_n\cdot T_n^2}{\pi^2}\cdot S_{a,n}^2 \qquad (10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. M_n: n. modun genelleştirilmiş kütlesi, $S_{V,n}$: elastik hız spektrumu, T_n: n. moda ait titreşim periyodu ve $S_{a,n}$: elastik ivme spektrumudur. (10) nolu eşitlik ÇSD sistemler için ifade edildiğinde, hız spektrumu ifadesi $\Gamma_n S_{V,n}$ şeklinde yazılabilir (Uang ve Bertero, 1990). Γ_n: n. moda ait modal katılım payıdır (Chopra, 1995). ÇSD bir sisteme giren toplam enerji, n modun dikkate alınması ile şu şekilde ifade edilebilir (Bai ve Ou, 2012):

$$E_{I(ÇSD)} = \sum_{n=1}^{N} E_{I(TSD)n}\cdot\Gamma_n^2 \qquad (11)$$

Süperpozisyon ilkesinin doğrusal olmayan sistemlerde geçerli olmamasına karşın, n modu dikkate alan (11) nolu yaklaşım giren enerjinin tahmin edilmesinde yakınsak sonuçlar vermektedir (Bai ve Ou, 2012).

Eşitlik (11) ile hesaplanan giren enerji, (6) ve (7) nolu eşitliklerde verilen λ düzeltme katsayısı ile azaltılmaktadır. Bu katsayının belirlenmesinde, literatürde Akiyama (1985), Kuwamura ve Galambos (1989), Fajfar ve Vidic

(1994) ve Benavent-Climent vd. (2002) tarafından verilen ve süneklik ve sönüm oranlarına bağlı olan ifadeler kullanılmıştır.

Elastik Enerji

Elastik enerji, yapı sistemlerinin elastik davranışı sonucunda ortaya çıkan ve diğer yapısal enerji türlerinin yanında çok önemli olmayan bir enerji türüdür (Şekil 2). Bu çalışmada elastik enerjinin hesaplanmasında, Akiyama (1985) tarafından verilen;

$$E_e = \frac{1}{2} \cdot V_y \cdot \Delta_y = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \left[\frac{T_e}{2\pi} \cdot \frac{V_y}{W} \cdot g \right]^2 \qquad (12)$$

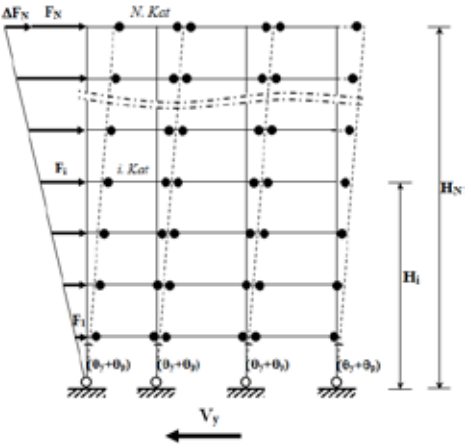
eşitlik esas alınmıştır. V_y ve Δ_y: sırasıyla akma taban kesme kuvveti ve akma yer değiştirmesi değeridir (Şekil 3). M ve W: sismik kütle ve ağırlık, g: yer çekimi ivmesi ve T_e: elastik sistemin hakim titreşim periyodudur.

Yatay Kuvvetlerin Sistem Üzerinde Yaptığı Dış İş

Hedeflenen global göçme mekanizması için enerji denge denkleminden belirlenecek olan tasarım taban kesme kuvveti kat seviyelerine eşdeğer deprem yükü olarak dağıtılabilir. Bu çalışmada Türk Deprem Yönetmeliği (2007)'ndeki Eşdeğer Deprem Yükü yöntemine göre, taban kesme kuvveti dağıtılması yapılmıştır. Buna göre; yatay kuvvetler tarafından yapılan dış iş (=plastik enerji):

$$E_p = \left(\sum_{i=1}^{N.Kat} F_i \cdot H_i + \Delta F_N \cdot H_N \right) \cdot \theta_p \qquad (13)$$

şeklinde yazılabilir. F_i ve Δ_{FN} sırasıyla, i. ve N. kat seviyelerine etkiyen yatay yükler olup, H_i ve H_N, i. ve N. katın toplam yüksekliğidir (Şekil 5).



Şekil 5. Çok katlı bir çerçeve sisteme etkiyen tasarım yatay kuvvetleri

(13) nolu eşitlik; $\Delta F_N = 0.0075 N V_y$ ve $F_i = \alpha_i . V_y$ yazılması ile (14) nolu eşitlikteki gibi gösterilebilir. Enerji eşitliklerinde; θ_p: çerçevenin plastik hedef ötelenme (taban dönmesi) değeridir ve hedeflenen toplam dönmeden, akma dönmesinin çıkarılması ile elde edilebilir ($\theta_p = \theta_u - \theta_y$).

$$E_p = V_y \cdot \theta_p \cdot \left[\sum_{i=1}^{N.Kat} \alpha_i \cdot H_i + 0.0075 \cdot N \cdot H_N \right] \qquad (14)$$

Enerji Esaslı Tasarım Taban Kesme Kuvvetinin Türetilmesi

Çerçeve yapılara etkiyen tasarım taban kesme kuvveti denklemi, gerekli ifadelerin yazılmasıyla elde edilen (7) nolu genel enerji denge denkleminden E_p plastik enerji ifadesinin çekilerek, (14) nolu dış iş (=plastik enerji) ifadesi ile eşitlenmesi sonucu elde edilir (Bai ve Ou, 2012). Literatürdeki farklı η_p ve λ cinsinden elde edilen taban kesme kuvveti denklemleri Tablo 1'de sunulmuştur. Denklemler A, B, C^*, D, F, G, H ve J olarak adlandırılan belirli katsayılar cinsinden yazılmıştır (Tablo 2). W: yapı ağırlığını, ξ: sönüm oranını, μ: yer değiştirme sünekliğini ve r: pekleşme bölgesinin eğimini ifade etmektedir ve $\eta = E_H / F_y . \Delta_y$'dir.

Tablo 1. Farklı η_p ve λ cinsinden tanımlanan katsayılar cinsinden elde edilen (on altı farklı) enerji esaslı tasarım taban kesme kuvveti ifadesi (V_y)

		λ			
		Akiyama (1985)	Kuwamura ve Galambos (1989)	Fajfar ve Vidic (1994)	Benavent vd. (2002, 2010)
η_p	ξ_H: (Gülkan ve Sözen, 1974)	**1)** $-A+\sqrt{A^2+B}$	**5)** $-A+\sqrt{A^2+G}$	**9)** $-A+\sqrt{A^2+H}$	**13)** $-A+\sqrt{A^2+J}$
	ξ_H: (Kowalsky, 1994)	**2)** $-C^*+\sqrt{C^{*2}+B}$	**6)** $-C^*+\sqrt{C^{*2}+G}$	**10)** $-C^*+\sqrt{C^{*2}+H}$	**14)** $-C^*+\sqrt{C^{*2}+J}$
	ξ_H: (Priestley, 2003)	**3)** $-D+\sqrt{D^2+B}$	**7)** $-D+\sqrt{D^2+G}$	**11)** $-D+\sqrt{D^2+H}$	**15)** $-D+\sqrt{D^2+J}$
	ξ_H: (Dwairi vd., 2007)	**4)** $-F+\sqrt{F^2+B}$	**8)** $-F+\sqrt{F^2+G}$	**12)** $-F+\sqrt{F^2+H}$	**16)** $-F+\sqrt{F^2+J}$

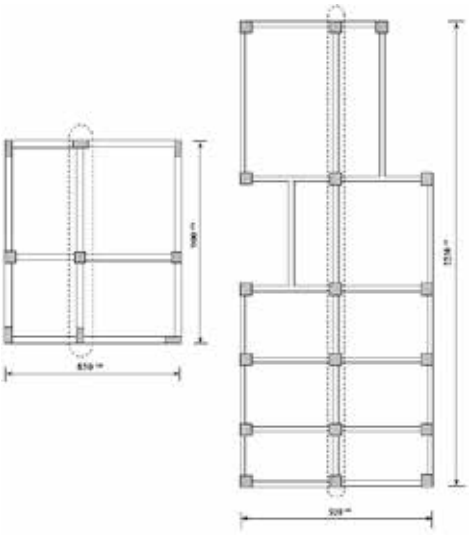
Tablo 2. Enerji esaslı tasarım taban kesme kuvvetinin belirlenmesinde kullanılan katsayılar

A, ***B***, ***C****, ***D***, ***F***, ***G***, ***H*** ve ***J*** ifadeleri
$$A=\frac{0.4W\pi^3\cdot\sqrt{\mu}\cdot(1+r\mu-r)\cdot(\sum_{i=1}^{N.Kat}\alpha_i H_i+0.0075NH_N)\cdot\theta_p}{T_e^2 g\cdot(\sqrt{\mu}+1)\cdot(1-r)}$$
$$B=\frac{8W\pi^2\cdot(\sum_{n=1}^{N.Mod}E_{1(SDOF)n}\cdot\Gamma_n^2)}{T_e^2 g\cdot(1+3\xi+1.2\sqrt{\xi})^2}$$
$$C^*=\frac{2W\pi^2\cdot\sqrt{\mu}\cdot(1+r\mu-r)\cdot(\sqrt{\mu}-r\mu+r-1)\cdot(\sum_{i=1}^{N.Kat}\alpha_i H_i+0.0075NH_N)\cdot\theta_p}{T_e^2 g\cdot(\mu-1)\cdot(1-r)}$$
$$D=\frac{2.4W\pi^2\cdot\sqrt{\mu}\cdot(1+r\mu-r)\cdot(\sum_{i=1}^{N.Kat}\alpha_i H_i+0.0075NH_N)\cdot\theta_p}{T_e^2 g\cdot(\sqrt{\mu}+1)\cdot(1-r)}$$
$$F=\frac{2CW\pi^2\cdot(1+r\mu-r)\cdot(\sum_{i=1}^{N.Kat}\alpha_i H_i+0.0075NH_N)\cdot\theta_p}{T_e^2 g\cdot(1-r)}$$
$$G=\frac{8W\pi^2\cdot(\sum_{n=1}^{N.Mod}E_{1(SDOF)n}\cdot\Gamma_n^2)}{T_e^2 g}\cdot\left[\frac{\eta\cdot(\eta+10)}{(\eta+0.15)\cdot(\eta+10+60\xi+24\sqrt{\xi})}\right]^2$$
$$H=\frac{7.2W\pi^2\cdot(\sum_{n=1}^{N.Mod}E_{1(SDOF),n}\cdot\Gamma_n^2)}{T_e^2 g}\cdot\frac{(\mu-1)^{0.95}}{\mu}$$
$$J=\frac{10.58W\pi^2\cdot(\sum_{n=1}^{N.Mod}E_{1(SDOF),n}\cdot\Gamma_n^2)}{T_e^2 g}\cdot\left[\frac{\eta}{(0.75+\eta)\cdot(1+3\xi+1.2\sqrt{\xi})}\right]^2$$

Bu çalışma kapsamında, Tablo 2'de verilen katsayıların kullanılması ile Tablo 1'de verilen on altı farklı taban kesme kuvveti ifadesi türetilmiştir. F denkleminde yer alan "C" katsayısı Dwairi vd. (2007)'nin ξ_H ifadesinde yer alan ve farklı histeretik modellere göre değişen bir katsayıdır. Bu çalışmada, Takeda Modeline uygun C katsayısı seçilmiştir.

Betonarme çerçeve yapılar

Bu çalışmada, 4 ve 7 katlı betonarme çerçevelerin enerji esaslı taban kesme kuvveti değerleri hesaplanmıştır. Çerçevelerin çıkarıldığı yapıya ait kalıp planları Şekil 6'da verilmiştir. Malzeme sınıfı C25/S420'dir. 4 katlı 2 açıklıklı çerçevede açıklıklar sırası ile 3.10 ve 5.50 metre ve 7 katlı 5 açıklıklı ikinci çerçevede ise sırası ile 3.00, 4.00, 4.00, 5.00 ve 6.00 metredir. Kat yükseklikleri sabit ve 3.00'er metredir. Tasarım düşey yükleri 4 katlı yapıda; ilk açıklıkta G=30.3$^{kN/m}$ sabit ve Q=6.5$^{kN/m}$ hareketli yük olup, ikinci açıklıkta G=36.4$^{kN/m}$ ve Q=9.5$^{kN/m}$'dir. 7 katlı yapıda ilk 5 açıklıktaki sabit yükler sırası ile; 30.0, 34.3, 34.3, 36.1 ve 38.3$^{kN/m}$'dir. Aynı yapıdaki hareketli yükler ise açıklık sırası ile; 5.8, 7.9, 7.9, 8.8 ve 9.9$^{kN/m}$'dir. Çatı katında yükler %80 oranında azaltılmıştır. Kolonlarda, kalıp planları üzerinden hesaplanan tasarım eksenel yükleri dikkate alınmıştır. Betonarme çerçeveler Türk Deprem Yönetmeliği (2007) ve TS500/2000 standardına uygun olarak SAP2000 v.18 (2015) programında boyutlandırılmıştır. 4 katlı çerçevede tüm kirişler 25x60^{cm} ve 7 katlı çerçevede ise 30x60^{cm}'dir. 4 katlı çerçevede ilk üç aksın tüm katlardaki kolon boyutları sırası ile; 30x60^{cm}, 45x45^{cm} ve 60x30^{cm}'dir. 7 katlı 5 açıklıklı ikinci çerçevede ise tüm kolonlar kare kesitli olup boyutları 60x60^{cm}'dir. Toplam yapı ağırlıkları sırası ile; 2298.4^{kN} ve 11627.2^{kN}'dur. Yapıların 1. derece deprem bölgesinde ve *Z2* türü zemin sınıfı üzerinde bulunduğu varsayılmaktadır (DBYBHY, 2007). Yapılar için hesaplanan çatlamamış kesitli 1. doğal titreşim periyotları (T_1) sırası ile; 0.47^{sn} ve 0.69^{sn}'dir. Kütle katılım oranları 1. mod için 4 katlı çerçevede %85.70 ve 7 katlı çerçevede ise %81.37'dir. 4 katlı 2 açıklıklı çerçevede kolon donatıları tüm katlarda aynı ve akslarda soldan sağa doğru sırası ile; 8Φ18, 10Φ18 ve 8Φ18'dir. 7 katlı 5 açıklıklı çerçevede tüm kare kolon donatıları 12Φ20 olarak seçilmiştir. 4 katlı çerçevenin birinci katında soldan sağa ilk iki açıklıktaki üst ve alt donatılar aynı olup, 3Φ18'dir. Aynı çerçevenin 2 ve 3. katlarında ve her iki açıklıkta üst ve alt donatılar sırası ile 3Φ18 ve 2Φ18'dir. Son katta ise bu değerler 3Φ16 ve 2Φ16'dır. 7 katlı çerçevede; ilk 6 katın bütün açıklıklarındaki üst ve alt donatı 5Φ18 ve 3Φ18'dir. Son katta ise; üst ve alt donatı yine tüm açıklıklarda aynı ve 4Φ18 ve 3Φ16'dır. Tüm kirişlerde enine donatı Φ10/10cm tek etriye olup, kolonlarda orta bölgede Φ10/8cm, sıklaştırma bölgesinde Φ10/5cm'dir.



Şekil 6. 4 ve 7 katlı betonarme çerçeveler

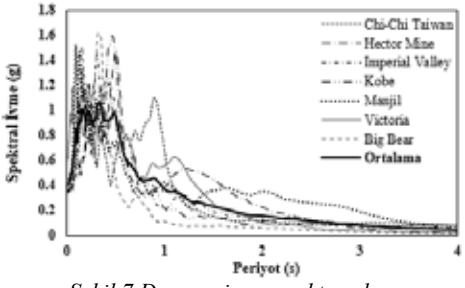
Kullanılan deprem kayıtları

Z2 yerel zemin sınıfına uygun olarak (zeminin kayma dalgası hızının esas alınması ile: 360<V_{S30}<760 m/s) moment büyüklüğü *Mw*:6-7.5 aralığında olan 7 adet gerçek deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Tablo 3'de yer alan ivme kayıtları için *PGA*, *PGV* ve *PGD*, sırasıyla: en büyük yer ivmesi, hızı ve yer değiştirmesi değerleridir. Doğrultu atımlı faylanma

mekanizmasına sahip ve yakın fay etkisi içermeyen depremler seçilmiştir. İvme kayıtları Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nin internet sitesinden elde edilmiştir (PEER, 2015). Deprem kayıtları Türk Deprem Yönetmeliği'nde (DBYBHY, 2007) yer alan Z2 tasarım ivme spektrumuna göre zaman tanım alanında ölçeklenmiş ve doğrusal olmayan analizlerde kullanılmıştır. SeismoSpect v2.1.2 (2015) spektrum programı kullanılarak, depremlere ait %5 sönümlü elastik ivme spektrumları elde edilmiş ve ortalama spektrum grafiği ile birlikte Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 3. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları

Deprem	M_w	*PGA* (g)	*PGV* (cm/s)	*PGD* (cm)
Chi-Chi, Tayvan-04, 1999 (CHY080)	6.20	**0.132**	14.63	4.03
Hector Mine, 1999 (Hector)	7.13	**0.337**	41.76	14.00
Imperial Valley-06, 1979 (Cerro Prieto)	6.53	**0.169**	11.59	4.26
Kobe, 1995 (Nishi-Akashi)	6.90	**0.509**	37.19	9.34
Manjil, İran, 1990 (Abbar)	7.37	**0.497**	50.74	22.43
Victoria, Mexico, 1980 (Cerro Prieto)	6.33	**0.645**	33.63	6.71
Big Bear-01, 1992 (Big Bear Lake)	6.46	**0.481**	28.16	4.32



Şekil 7 Deprem ivme spektrumları

Enerji analizleri

Taban kesme kuvveti denklemlerinde yer alan yatay yer değiştirme süneklik oranları, çerçevelerin hakim mod şekli ile orantılı yatay yük dağılımının kullanıldığı artımsal itme analizleri sonuçlarına dayanarak belirlenmiştir. İtme eğrileri iki doğru parçası ile idealleştirilmiş ve süneklik oranlarının belirlenmesine esas değerler bu eğriler yardımıyla hesaplanmıştır. Taban plastik dönme değerleri, *50* yılda aşılma olasılığı *%10* olan deprem için *0.02* olarak kabul edilebilen (Liao, 2010) değerden akma dönmesinin çıkarılması ile elde edilmiştir. Yapı sistemlerine giren deprem enerjisinin hesaplanmasında Şekil 7'de verilen ortalama ivme spektrumu kullanılmıştır.

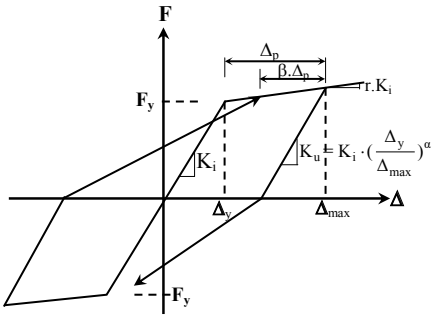
Enerji denklemlerine girdi sağlayan çatlamış kesitli periyot değerleri SAP2000 v.18 (2015) programı kullanılarak, 4 katlı yapının ilk 3 modu için sırası ile T_1=0.69 s, T_2=0.22 s ve T_3=0.12 s olarak elde edilmiştir. 7 katlı yapı için bu değerler; T_1=1.01 s, T_2=0.32 s ve T_3=0.18 s'dir. Modal katılım faktörleri, en üst katların genliğine göre normalize edilen mod vektörleri kullanılarak 4 katlı yapıda; Γ_1=1.293, Γ_2= -0.425 ve Γ_3=0.177, 7 katlı yapıda ise; Γ_1=1.300, Γ_2= -0.465 ve Γ_3=0.270 olarak hesaplanmıştır. 4 katlı yapı için tasarımda kullanılacak maksimum giren deprem enerjisi değeri, ilk 3 modun dikkate alınması sonucu E_I=32.91 kNm ve 7 katlı yapı için ise E_I=175.99 kNm hesaplanmıştır. Hesaplanan enerjilerin kullanılması ile Tablo 1'e göre belirlenen enerji esaslı taban kesme kuvveti değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Enerji esaslı taban kesme kuvvetleri

η_p ve λ Yaklaşımı (Tablo 1)	4 Katlı Yapı V_y (kN)	7 Katlı Yapı V_y (kN)
1)	*266.04*	*808.68*
2)	*257.64*	*782.47*
3)	*144.64*	*435.31*
4)	*153.53*	*568.86*
5)	*218.03*	*684.92*
6)	*211.03*	*662.48*
7)	*117.77*	*367.18*
8)	*125.05*	*480.40*
9)	*365.00*	*1114.75*
10)	*353.86*	*1079.55*
11)	*201.06*	*606.09*
12)	*213.26*	*789.68*
13)	*274.12*	*942.91*
14)	*265.49*	*912.70*
15)	*149.20*	*509.81*
16)	*158.36*	*665.34*

Zaman tanım alanında analizler

Eğilme momenti-eğrilik ilişkileri belirlenen kesitlere ait zarf eğriler Şekil 8'de gösterilen Takeda histeretik modeline ait parametreler kullanılarak çok parçalı moment-dönme ilişkisi olarak ilgili eleman uçlarına atanmıştır. Plastik mafsal boyu L_p=0.5h alınmıştır. Zaman tanım alanında analizlerde, sönümün kütle ve rijitliklerle orantılı olduğu Rayleigh sönüm modeli esas alınmıştır. Betonarme çerçeve sistemler için modal sönüm oranı %5 olarak alınmıştır. SAP2000 (2015) ile gerçekleştirilen analizlerde kat seviyelerinin yatay düzlemde rijit diyafram etkisi gösterdiği kabul edilerek, doğrudan integrasyon yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 8 Zaman tanım alanında analizlerde kullanılan Takeda histeretik modeli

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlere ait en büyük taban kesme kuvvetleri ve bunların ortalaması Tablo 5'de verilmiştir. DBYBHY (2007)'ye göre belirlenen taban kesme kuvvetleri 4 katlı yapı için V_y=252.53 kN ve 7 katlı yapı için V_y=939.62 kN'dur.

Tablo 5. Zaman tanım alanında analizlerden elde edilen taban kesme kuvveti sonuçları

Deprem	*4 Katlı Yapı V_y (kN)*	*7 Katlı Yapı V_y (kN)*
Chi-Chi	*245.91*	*933.97*
Hector Mine	*238.91*	*961.20*
Imperial Valley	*216.11*	*845.86*
Kobe	*222.46*	*656.82*
Manjil	*241.05*	*907.80*
Victoria	*237.47*	*893.92*
Big Bear	*189.89*	*906.73*
Ortalama	*227.40*	*872.33*

Değerlendirme ve sonuçlar

Bu çalışmada, ideal göçme mekanizması için enerji esaslı taban kesme kuvvetleri belirlenmektedir. Deprem yönetmeliklerinde taban kesme kuvveti beklenen bir yer değiştirme sünekliği için hesaplanmaktadır. Bu tarz bir yaklaşımda, histeretik sönüm ve davranış tam olarak dikkate alınamamaktadır. Bu çalışmadaki enerji esaslı yaklaşımdan elde edilen taban kesme kuvvetleri, yönetmelik esaslı taban kesme kuvvetlerine göre doğrusal olmayan davranışı daha net içermektedir.

Plastik enerji düzeltme katsayısı η_p büyüdükçe, enerji esaslı taban kesme kuvveti değerleri küçülmektedir. Giren enerji düzeltme katsayısı λ büyüdükçe, enerji esaslı taban kesme kuvveti değerleri büyümektedir. Her iki durum için bulunan oranlar, taban kesme kuvvetlerinin oranlarına oldukça yakındır.

Farklı düzeltme katsayılarının esas alınması ile elde edilen enerji esaslı taban kesme kuvvetleri, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerden elde edilen taban kesme kuvveti sonuçlarının bazı yaklaşımlar için altında ve bazı yaklaşımlar için üzerinde kalmaktadır. En büyük taban kesme kuvvetini veren denklemin, her iki yapı için de Tablo 1'deki 9 nolu ifade olduğu elde edilmiştir. Tablo 1'de yer alan 7 nolu denklemden ise en küçük enerji esaslı taban kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Tasarım taban kesme kuvvetlerindeki farklılık, hesaplarda kullanılan enerji düzeltme katsayılarında histeretik modellerin farklı araştırmacılar tarafından farklı şekillerde formüle edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Hedeflenen ideal göçme mekanizmasının, yönetmeliğe göre boyutlandırılmış betonarme çerçevelerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinden sağlanmadığı görülmüştür. Başlangıçta belirlenen dağılımdan kısmen farklı olarak bazı eleman uçlarında da plastik mafsallar oluşmaktadır. Enerji esaslı tasarım taban kesme kuvvetleri dikkate alınarak çerçevelerin yeniden boyutlandırılması, ideal mekanizmanın sağlanmasına yönelik gerçekleştirilmesi gereken bir işlemdir. Bu durum, ilerleyen çalışmalarda incelenebilir.

Kaynaklar

Akbaş, B. ve Shen, J., (2003). "Earthquake resistant design and energy concepts", Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers, 14, 2, 2877-2901.

Akiyama, H., (1985). "Earthquake-resistant limit-state design for buildings", The University of Tokyo Press, Japan.

Bai, J. ve Ou, J., (2012). "Plastic limit-state design of frame structures based on the strong-column weak-beam failure mechanism", Proceedings, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, September 24-28, Lisboa.

Benavent-Climent, A., Pujades, L.G. ve Lopez-Almansa, F., (2002). "Design energy input spectra for moderate seismicity regions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 5, 1151-1172.

Benavent-Climent, A., Lopez-Almansa, F., ve Bravo-Gonzales, D.A., (2010). "Design energy input spectra for moderate-to-high seismicity regions based on Colombian earthquakes", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 11, 1129-1148.

Chopra, A.K., (1995). "Dynamics of structures, Theory and applications to earthquake engineering", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Computers and Structures Inc., (2015). "SAP2000 Ultimate: Integrated Solution for Structural Analysis and Design, Structural Analysis Program", Version 18.0.1, Berkeley, CA.

DBYBHY, (2007). "Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Dwairi, H.M., Kowalsky, M.J. ve Nau, J.M., (2007). Equivalent damping in support of direct displacement-based design, Journal of Earthquake Engineering, 11, 4, 512-530.

Fajfar, P. ve Vidic, T., (1994). "Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy, Earthquake Engineering and Structural Dynamics", 23, 5, 523-537.

FEMA P440A, (2009). "Effects of strength and stiffness degradation on seismic response", Applied Technology Council, Redwood City.

Gülkan, P. ve Sözen M.A., (1974). "Inelastic responses of reinforced concrete structures to earthquakes motions", ACI, 71, 12, 604-610.

Housner, G.W., (1956). "Limit design of structures to resist earthquakes", Proceedings, The First World Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, California, USA.

Kazantzi, A.K. ve Vamvatsikos, D., (2012). "A study on the correlation between dissipated hysteretic energy and seismic performance", Proceedings, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, September 24-28, Lisboa.

Kowalsky, M.J., (1994). "Displacement based design: a methodology for seismic design applied to RC bridge columns", MSc Thesis, University of California, San Diego.

Kuwamura, H. ve Galambos, T., (1989). "Earthquake load for structural reliability", Journal of Structural Engineering, 115, 6, 1446-1462.

Leelataviwat, S., Goel, S.C. ve Stojadinovic, B., (2002). "Energy-based seismic design of structures using yield mechanism and target drift", Journal of Structural Engineering, 128, 8, 1046-1054.

Leelataviwat, S., Saewon, W. ve Goel, S.C., (2009). "Application of energy balance concept in seismic evaluation of structures", Journal of Structural Engineering, 135, 2, 113-121.

Liao, W.C., (2010). "Performance-based plastic design of earthquake resistant RC moment frames", PhD Thesis, The University of Michigan.

Lopez-Almansa, F., Yazgan, A.U. ve Benavent-Climent, A., (2013). "Design energy input spectra for high seismicity regions based on Turkish registers", Bulletin of Earthquake Engineering, 11, 4, 885-912.

Priestley, M.J.N., (1996). "Displacement-based seismic assessment of existing reinforced concrete buildings", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Eng, 29, 4, 256-272.

Priestley, M.J.N., (2003). "Myths and fallacies in earthquake engineering, revisited", The Ninth Mallet Milne Lecture, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Rose School, Pavia, Italy.

Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. ve Kowalsky, M.J., (2007). "Displacement-based seismic design of structures", IUSS Press, Pavia, Italy.

SeismoSpect v2.1.2, (2015). Seismosoft Ltd, İtalya.

TS500, (2000). "Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları", Türk Standartları Enstitüsü.

Uang, C.M. ve Bertero, V.V., (1990). "Evaluation of seismic energy in structures", Earthquake Eng. and Structural Dynamics, 19, 1, 77-90.

Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER), "PEER Strong Motion Database", http://ngawest2.berkeley.edu/, Son erişim tarihi: 12 Aralık 2015.

Determination of energy-based base shear for ideal collapse mechanism

Extended Abstract

Depending upon different geophysical and structural factors, earthquakes cause several damages to buildings. The duration and the magnitude of the ground motion, soil type or fault properties may affect the structural damage. However, the most important parameter for the damage is to build structures poorly engineered. Even though there may exist moderate, heavy or major damages on structures under seismic effects, the crucial aspect for structural engineering is to prevent the total collapse. Therefore, when new structures are designed the yield mechanism of structures under seismic effects should be considered in detail.

A nonlinear static procedure to estimate base shears of reinforced concrete frame structures is presented in the study considering global collapse state and energy concepts. Since global failure mechanism, where plastic hinges occur at beam ends and column bases, is a preferable collapse mode for structures under seismic effects to prevent the total collapse, this type of failure mechanism is targeted at the beginning of derivation of equations. Given the pre-selected failure mechanism, the energy-balance equality is written for frames.

Earthquake resistant structural design procedures in current seismic design codes are traditionally strength-based and direct displacement-based. The strength and displacement capacity of structural members are not desired to be less than seismic demands of earthquakes in these procedures. However, energy-based structural design which considers the earthquake as an energy input to structures may be a more rational approach.

In energy-balance equality written for frames, the seismic input energy and plastic energy is modified with a factor. Input energy is modified due to structural damping and the energy which contributes to structural damage is considered in the equality. The plastic energy is decreased with a factor, too, to consider the reduced hysteretic properties. The reduction factors are obtained from literature which are expressed by former researchers. Four different factors are considered and sixteen different base shear forces are obtained for RC frames by taking combinations of these factors.

Plastic target drift needs to be estimated while the energy balance equality is set up. It can be obtained from the difference of maximum drift between the yield drift for the structure. For the probability level of exceedance 10% in fifty years period, the maximum story drift ratio is suggested as 2% for the design earthquake within the study. This is the performance criteria of the considered procedure.

Selecting a suitable post-yield stiffness ratio is an important issue for performance-based structural design. The appropriate post-yield stiffness ratios for structural members are selected for calculation of energy-based base shears. From literature and experimental studies, the post-yield stiffness ratio is assumed as 0.10 for RC members.

Seven real earthquake records, which are scaled in time domain according to the Z2 type soil class, are chosen to perform nonlinear time history analyses of four- and seven-story RC frames. The maximum base shear forces are compared with the results of the energy-based method.

It can be seen from the study that the energy-based base shears are directly proportional with the input energy modification factor and inversely proportional with the plastic energy modification factor. Proportions of plastic and input energy modification factors are obtained very close to proportions of base shear forces, which are calculated by using these modification factors.

Design base shear forces in current seismic codes are generally calculated for a constant displacement ductility of structures. Therefore, hysteretic behaviors of structural members and hysteretic damping are not included directly in these type of calculations. However, in this study, the design base shear forces for structures are obtained from energy balance concept and nonlinear properties of structural members are considered more detailed.

Keywords: *Failure mechanism, energy-balance equality, plastic energy, energy-based base shear force, RC frame.*