Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.
Cilt 22, No 2, 441-449, 2007

J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.
Vol. 22, No 2, 441-449, 2007

DÜZLEM DIŞI YÜKLERE MARUZ YIĞMA DUVARLARIN DEPREM DAVRANIŞLARININ ANALİTİK VE DENEYSEL DEĞERLENDİRİLMESİ

Recep KANIT
Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Teknikokullar, Ankara
rkanit@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 10.05.2006; Kabul/Accepted: 19.09.2006)

ÖZET

Düzlem dışı yüklenen yığma duvarın kırılma davranışı, analitik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Deprem yüklerine maruz yığma duvarlarda düzlem içi ve düzlem dışı sismik zorlanmalar oluşur. Maksimum düzlem içi zorlanmalar zemin kat duvarlarında oluşurken, maksimum düzlem dışı zorlanmalar ise çatı katı düzeyindeki duvarlarda oluşur. Etkin yer ivmesi zemin düzeyinden etkili kütle merkezine taşınırken büyüme gösterir. Çatı katı düzeyindeki duvara etkiyen ivme, duvarın ve duvarın mesnetlendiği döşemenin doğal periyotlarının oranına göre, bir büyüme daha gösterir. Bunun sonucu olarak, düzlem dışı yüklenen çatı katı duvarın ivmesi, düzlem içi yüklenen duvarın ivmesinden çok daha büyük olur. Böylece, yığma binanın çökmesi, genellikle, çatı katı düzeyindeki duvarın düzlem dışı kırılmasıyla başlar. Düzlem dışı yüklenen yığma duvarın kırılma davranışı, gerçekçi boyutlara sahip bir prototip duvar üzerinde deneysel olarak araştırılmıştır. Deprem etkisini modelleyen tersinir düzlem dışı yükler altında yığma duvar, betonarme döşemede oluşan akma çizgilerine benzer kırılma çizgileri oluşturarak kırılır. Kırılma türü gevrektir ve akma çizgilerinin işaret ettiği sünekliğe sahip değildir.

Anahtar Kelimeler: Yığma duvar, deprem zorlaması, düzlem dışı kırılma, deprem riski.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF SEISMIC BEHAVIOR OF MASONRY WALLS SUBJECT TO OUT-OF-PLANE FORCES

ABSTRACT

The out-of-plane failure of a load bearing unreinforced masonry wall is investigated, both analytically and experimentally. Subject to seismic action, the walls of a load bearing masonry building are loaded by in-plane and out-of-plane inertia forces. The maximum in-plane actions occur on walls at the basement level and the out-of-plane actions occur at the roof level. The ground acceleration is magnified as it is transferred from the ground level to the level of the modal effective mass. The acceleration of the load bearing wall at the roof level is further magnified, depending on the fundamental periods of the face loaded wall and the supporting slab diaphragms at the bottom and top, respectively. As a result, the wall at roof level is subject to much greater out-of-plane accelerations, as compared to any wall which experience in-plane accelerations. Consequently, the load bearing unreinforced masonry building generally begins to fail at the roof level under the action of inertia forces that act out-of-plane. The nature of out-of-plane failure of an unreinforced masonry wall is investigated experimentally on a wall which is a prototype. Under reversing out-of-plane forces which are meant to simulate seismic action, the wall fails by forming “fracture lines”, very similar to yield lines of a reinforced concrete slab. The failure is quite brittle and lacks the inherent ductility the term “yield lines” indicates.

Keywords: Masonry walls, seismic, out-of-plane failure, vulnerability.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yığma yapılarda, betonarme veya çelik yapılar kadar deprem riskine maruzdur. Ancak, Türkiye'de deprem araştırmaları betonarme ve çelik yapılar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunun bir sonucu olarak, proje mühendisinin yığma binaların deprem davranışı hakkında bilgisi oldukça yetersizdir. Böylece, yığma binaların deprem riskinin saptanması ve sismik güçlendirme girişimleri istenilen düzeye ulaşamamaktadır.

Türkiye'nin kırsal kesimde geleneksel yapı tipi yığma binalardır. Deprem bölgelerinde yer alan çok büyük sayıda yığma bina da, deprem afetine karşı güçlendirilmeyi beklemektedir.

İyileştirme ve güçlendirme çabalarına başlamadan önce, depreme maruz yığma binanın deprem davranışı ve göçme mekanizması iyi bilinmelidir. Yığma binanın deprem davranışında, betonarme binaya göre benzerlik olduğu kadar farklılıklar da vardır.

En çarpıcı farkın, yığma duvarın düzlem dışı kırılması olduğu söylenebilir. Betonarme binaların dolgu duvarlarında da, düzlem dışı kırılmalar görülür (Şekil 1). Ancak, doğal olarak, dolgu duvarların bir taşıyıcılık görevi yoktur ve bunların düzlem dışı kırılması, yapının çökmesine neden olmaz.

Ancak, yığma binanın duvarları düşey ve yatay yüklerin taşınmasında ana görevler üstlenmişlerdir. Rüzgar ve deprem gibi yatay yükler, yığma duvarlarda düzlem içi ve düzlem dışı zorlamalara neden olurlar.



Şekil 1. Betonarme çerçeveli yapıda dolgu duvarların düzlem dışı kırılması (Out-of-plane failure of infill walls)

Yatay yükler altında, yığma duvarda kesme kuvvetleri ve momentler oluşur. Bunun sonucu olarak, yığma duvarın düzlem içi kırılması, momentin oluşturduğu basınç/çekme eksenel kuvvetler ve/veya kesme kuvvetinin oluşturduğu eğik asal gerilmeler etkisi ile meydana gelir.

Gerek kavram, gerekse de analitik olarak, Türkiye'de proje mühendisinin yığma duvarın düzlem dışı davranışı ve bu davranışın yol açtığı çökme potansiyeli hakkında bilgisi zayıftır (Şekil 2).



Şekil 2. Yığma duvarın düzlem dışı kırılması (Bam Depremi, 2004) (Out-of-plane failure of a load bearing masonry wall (Bam Earthquake, 2004))

2. DEPREME MARUZ YIĞMA DUVARIN DÜZLEM DIŞI DAVRANIŞI (OUT-OF-PLANE BEHAVIOUR OF THE MASONRY WALL SUBJECT TO SEISMIC ACTION)

Depreme maruz iki katlı yığma bir bina düşünülsün (Şekil 3).

x-yönünden gelen deprem, x-yönünde ivmeler ve bu ivmelerin neden olduğu sismik kuvvetler oluşturur. Bunun sonucunda (A) Duvarı, düzlem içi tersinir kesme kuvvetleri (V) ve momentlere (M) maruz kalır. Ayrıca, öz yükler, hareketli yükler ve devrilme momentleri etkisi ile eksenel (P) yükü oluşturur.

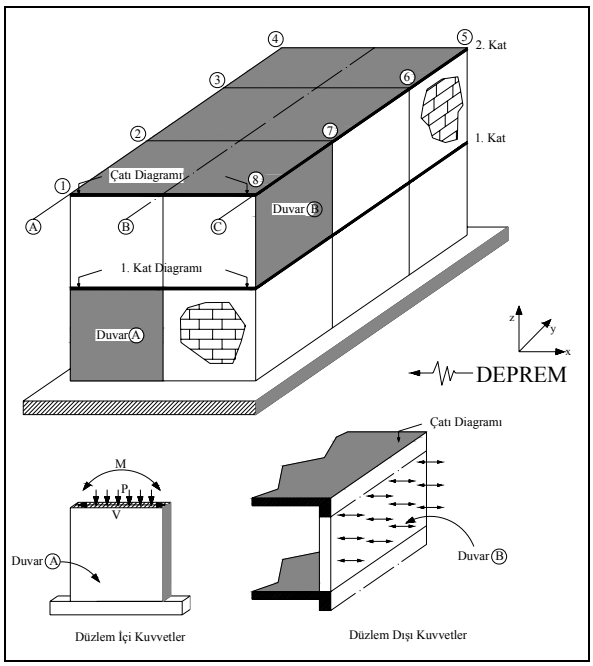
x-yönünden gelen deprem (B) Duvarı'nda, duvar düzlemine dik kuvvetler de oluşturur. Bu sismik kuvvetler, (B) Duvarı'nı düzlem dışı sehim yapmaya zorlar. Sismik kuvvetlerin belli düzeyde bir büyüklüğe gelmesiyle, (B) Duvarı düzlem dışı kırılır ve yük taşıma yeteneğini yitirir. Çatı düzeyindeki duvarlardan bazılarının düzlem dışı kırılmasıyla, bir yük olarak çatı katı döşemesi taşınamaz olur. Sonuç, binanın çökmesidir.

x-yönünden depreme maruz yığma bina, doğal periyoduna (T_o) bağlı olarak, x-yönünde ötelenir (Şekil 4). Yığma binanın depreme karşı göstereceği tepki, eşdeğer tek serbestlik dereceli bir sistem yapılarak ve eşdeğer etkili kütle ile yüksekliği hesaplanarak basitleştirilebilir.

$$m(etk) = \sum_{i=1}^{n} m_1 \tag{1}$$

$$h_e = \frac{\sum_{i=1}^{n} (m_i h_i) x(h_i)}{\sum_{i=1}^{n} m_i h_i} \tag{2}$$

Böylece, basit model üzerinde iki katlı yığma binanın ve Duvar (A) ve Duvar (B)'nin dinamik tepkisini incelemek mümkün olur. Maksimum yer ivmesi (a_g)'dir.



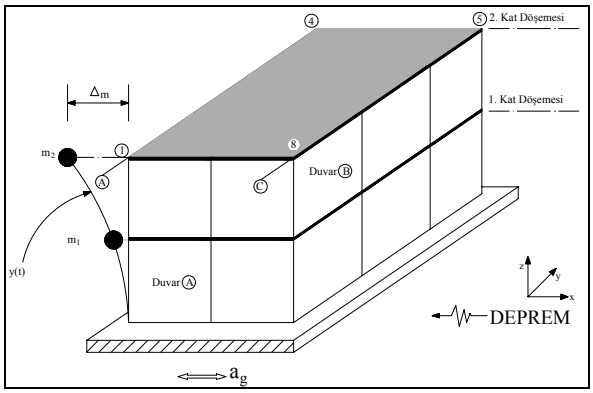
Şekil 3. Depreme maruz yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı yüklenmesi (Walls subject to in-plane and out-of-plane seismic load effects)

Şekil 3'te gösterilen binanın doğal periyodu x-yönünde ise, x-yönünde binaya etki eden ivme profili ötelenmenin 2. zaman türevi alınarak bulunabilir.

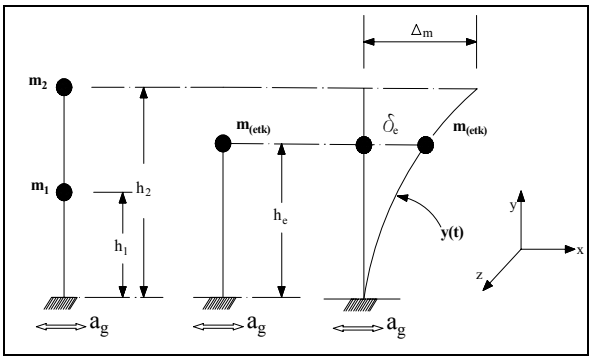
$y(t) = \text{Binanın x-yönündeki ötelenmesi}$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = \text{Binanın x-yönündeki ivmesi}$$

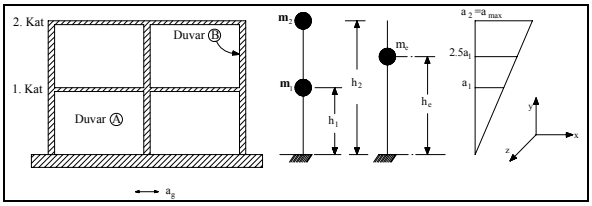
Türk Afet Yönetmeliği (AY-97), Tepki Spektrumu Yöntemi'nde 0.05 Sönümleme Oranı için yer ivmesinin 2.5 kez büyüyerek etkili kütleyi etkileyeceğini varsaymaktadır [1]. Bunun sonucu olarak, temelden çatıya göreli ivme dağılışı Şekil 6'da gösterildiği gibi oluşur.



Şekil 4. Depreme maruz yığma binanın ötelenme profili (Sway profile of the masonry building subject to earthquake)



Şekil 5. Yığma binanın tek serbestlik dereceli modeli (Single-degree-of-freedom model of the masonry building)



Şekil 6. Yığma binanın matematik modeli ve göreli tepki ivmeleri (The mathematical model of the masonry building and the relative response accelerations)

Şekil 6'dan görüleceği gibi, etkili model kütleye ($2.5a_g$) büyüklüğünde ivme etkilemektedir. 1. kata etkiyen ivme (a_1), 2. kata etkiyen ivme ise (a_2)'dir.

Ötelenme profili denkleminin (2) kez zaman türevinin alınmasıyla, göreli tepki ivme profilinin bina yüksekliğince dağılımı doğrusallığa çok yaklaşır. Böylece, tepki ivme profilini doğrusal olduğu kabulü, büyük hataya yol açmaz. Bu kabul doğrultusunda, binanın herhangi bir yüksekliğinde oluşan göreli tepki ivmesi, (a_g)'nin bir işlevi olarak kolayca hesaplanabilir.

$$a_1 = 2.5a_g \frac{h_1}{h_e} \tag{3}$$

$$a_2 = a_{\max} = 2.5a_g \frac{h_2}{h_e} \tag{4}$$

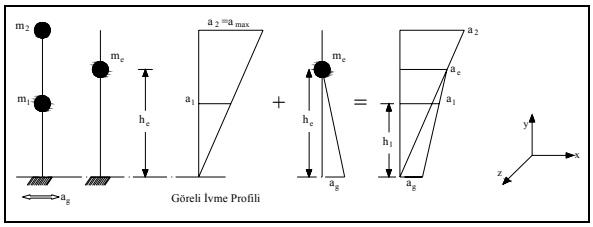
İki katlı yığma binanın doğal periyodunun küçük olduğu ve AY-97 [1]'ye uygun olarak maksimum yer ivmesinin (2.5) kez büyüdüğü varsayımı yapılmıştır.

Temelden çatıya ivme profilinde (Şekil 6), zemin düzeyinde ivmenin sıfır olduğu gösterilmektedir. Bunun anlamı, ivme profilinin (a_g)'ye bağlı göreli ivmeler olduğudur.

Kuşkusuz, yer düzeyinde ivme sıfır değildir; maksimum büyüklüğü (a_g) olan ivme etkimektedir. Öyle ise, göreli ivme profiline maksimum yer ivmesi (a_g) eklenmelidir.

Çatı düzeyinde oluşan (a_{max}) ivmesinin gerçek büyüklüğünü bulmak için, yüksek titreşim modlarının da katkısını içeren Zaman Tanım Alanı Analizi'nin

yapılması gerekir. Normal olarak, maksimum yer ivmesinin oluştuğu anda maksimum 2. kat ivmesinin oluşması ihtimali küçüktür. Paulay ve Priestley'e [2] göre rezonans durumunda, söz konusu ivmelerin maksimum değerlerinin bir arada oluşması olağan değildir. Buradan hareketle, yer ivmesinin maksimum değeri, tepki ivme profiline, zemin ile etkili kütle merkezi (h_e) arasında süperpoze edilmiştir (Şekil 7). Bina temelinin zemine tam ankastre bağlandığı kabulü ile, (a_g)'ye herhangi bir büyütme uygulanmamıştır.

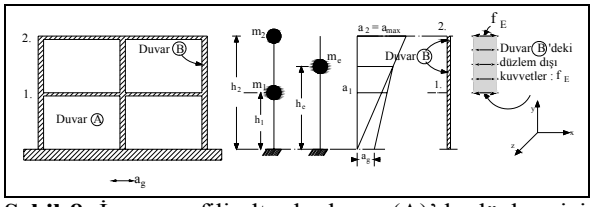


Şekil 7. Maksimum yer ivmesinin göreli tepki ivmeleri profiline süperpozisyonu (Superposition of the peak ground acceleration on the relative accelerations)

Şekil 7'de gösterilen x-yönündeki ivmeler, Duvar (A)'da düzlem içi, Duvar (B)'de ise düzlem dışı sismik kuvvetlere neden olurlar (Şekil 8).

Artık, çok önemli bir sorunun zamanı gelmiştir: Duvar (B) üzerinde etkiyen düzlem dışı sismik kuvvetlerin büyüklüğü nedir?

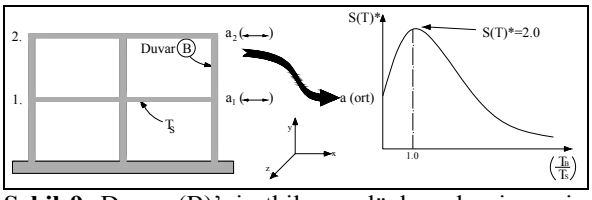
Duvar (B), 1. kat ivmesi (a_2) ve 2. kat ivmesi (a_1)'in zorlamasıyla düzlem dışı titreşimler göstermektedir (Şekil 8).



Şekil 8. İvme profili altında duvar (A)'da düzlem içi duvar (B)'de düzlem dışı sismik kuvvetler oluşur (The acceleration profile cause in-plane inertia forces on wall (A) and out-of-plane inertia forces on wall (B))

Düzlem dışı titreşim yapan Duvar (B)'yi zorlayan ivmeler (a_1) ve (a_2)'dir. Her iki ivmenin, duvar orta yüksekliğindeki ortalama büyüklüğünün Duvar (B)'yi zorlayan ivme olduğu kabul edilebilir. Bu ortalama ivme zorlaması, T_B/T_S oranına bağlı olarak tekrar büyüyecektir (Şekil 9).

T_B = Duvar (B)'nin doğal periyodu
T_S = x-yönünde titreşim yapan kat döşemesinin doğal periyodu



Şekil 9. Duvar (B)'yi etkileyen düzlem dışı ivmenin büyüme göstermesi (Magnification of out-of-plane acceleration of wall (B))

Duvar (B)'yi düzlem dışı titreşimler yapmaya zorlayan ivmenin a(ort.) olduğu varsayılır.

$$a(ort) = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) \tag{5}$$

Duvar (B)'yi düzlem dışı titreşimler yapmaya zorlayan ivmenin büyüklüğü hesaplanır.

$$a(Duv.B) = S(T) * a(ort) \tag{6}$$

Elastik ötesi bilgisayar çözümlerinin yorumlanmasıyla, Paulay ve Priestley [2] düzlem dışı ivmenin büyütme katsayısının S(T)* = olarak alınabileceğini önermişlerdir (Şekil 9).

Böylece, iki katlı yığma binada Duvar (B)'yi düzlem dışı zorlayan maksimum ivme aşağıda gösterilmiştir. I. Derece Deprem Bölgesi için geçerli maksimum yer ivmesi a_g=0.4g kullanılmıştır [9].

$a_g = 0.4g$ Maksimum yer ivmesi (7)

$m_1 = m_2 = m$ Kat kütleleri eşittir (8)

$h_1 = 3m.\quad h_2 = 6m.$ Kat yükseklikleri (9)

$$h_e = \frac{\sum(m_i h_i)h_i}{\sum(m_i h_i)} = \frac{(3)^2 + (6)^2}{3+6} = \frac{45}{9} = 5m$$

Etkili kütlenin yüksekliği (10)

$$a_1 = 2.5(0.4g)\frac{3}{5} + (0.4g)\frac{2}{5} = 0.76g \tag{11}$$

$$a_2 = a_{\max} = 2.5a_g(\frac{h_1}{h_e}) = 2.5(0.4)\frac{6}{5} = 1.2g \tag{12}$$

Anımsanacağı gibi, teorik modal analiz (a_{max}) büyüklüğünü 1.2(g) yerine 4/3(g)=1.33g olarak vermektedir. Ancak, karmaşık deprem olayının mühendisliği yapılırken kullanılan yaklaşıklıklar düşünülürse, yukarıda belirtilen fark kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır. Ortaya çıkan fark, katsayısı 3 ve 4 olduğu durumlarda azalacaktır. Yukarıda yer alan yaklaşık hesap, kat kütlelerinin eşit olmadığı zaman, daha da avantajlı duruma geçecektir.

$$a(ort) = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = 0.98(g) \tag{13}$$

Duvar (B)'yi düzlem dışı titreşim yapmaya zorlayan ivme a(B, max)'tır. Bu ivme, kat döşemesi ile etkileşime girerek daha da büyür.

$a(B,\max) = S(T).a(ort)$ Duvar (B)'nin büyütülmüş düzlem dışı ivmesi (14)

$S(T) = 2.0[a(ort)] = 0.98$
Büyütme katsayısı 2.0'dır. (15)

$a(B,\max) = 0.98(g)(2) = 1.96(g)$ (16)

0.4(g)'lik bir yer ivmesinin büyüyerek Duvar (B)'yi düzlem dışı zorlayan 1.96(g) ivmesine dönüşmesi ilginçtir. Bu ivmenin Duvar (B)'nin düzlemi üzerinde düzgün yayılı olduğu kabulü ile, Duvar (B) üzerinde düzgün yayılı düzlem dışı sismik kuvvetler oluşur.

$$f_e = \frac{w(B)}{g}[1.96(g)] \quad kN/m^2 \qquad (17)$$

$W(B) =$ Duvar (B)'nin birim alan ağırlığı

Deprem güvenli olabilmesi için Duvar (B)'nin dayanımının f_e (kN/m^2) sismik kuvvetlerine göre duvarın dayanımı ne ölçüdedir?

Yukarıdaki soruları cevaplayabilmek için, tuğla yığma bir duvar, büyüklüğü adım adım artan düzlem dışı yükler altında kırılma oluşuncaya kadar yüklenmiştir.

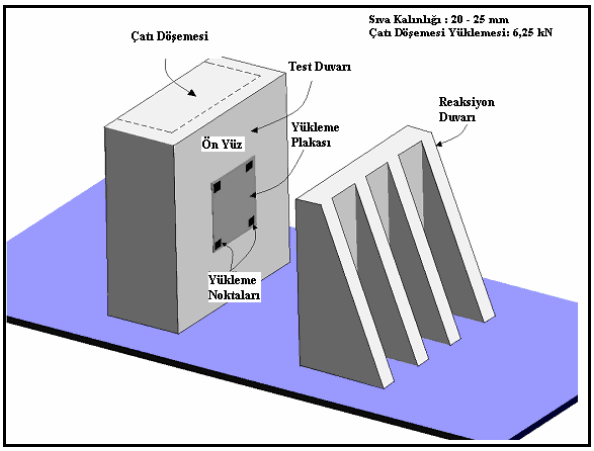
3. DÜZLEM DIŞI YÜKLENEN YIĞMA DUVAR DENEYİ (TEST OF MASONRY WALL LOADED OUT-OF-PLANE)

3.1. Deney Elemanı (The Test Specimen)

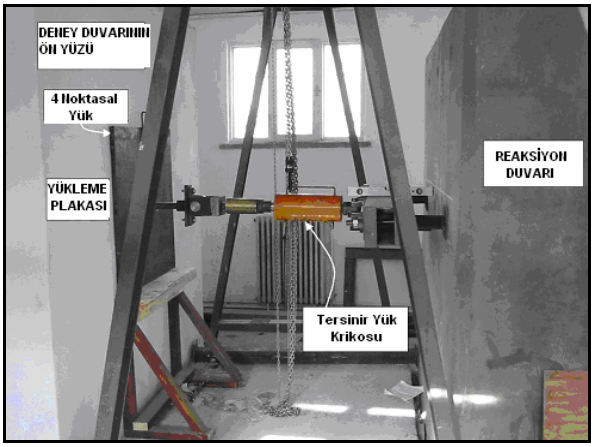
Düzlem dışı yüklenen yığma duvarın davranışının ve kırılma şeklinin anlaşılması için Şekil 10'da gösterilen duvar deneye tabi tutulmuştur.

Yükleme mekanizması Şekil 11'de gösterilmiştir. Yük, 2 yönlü hareketle basınç ve çekme uygulayabilen bir kriko ile verilmiştir. Duvar ortasındaki delikten rijit bir çelik çubuk geçmektedir. Özdeş bir yükleme plakası, duvarın arka yüzünde de mevcuttur. Duvara uygulanan basınç/çekme hareketi ile, sismik kuvvetlerin tersinir etkisi modellenmiştir. Yükleme plakası ile duvarın tam ortasından uygulanan yüklerin, düzgün yayılı yükün oluşturacağı moment dağılımına benzer bir zorlama oluşturacağı kabul edilmiştir.

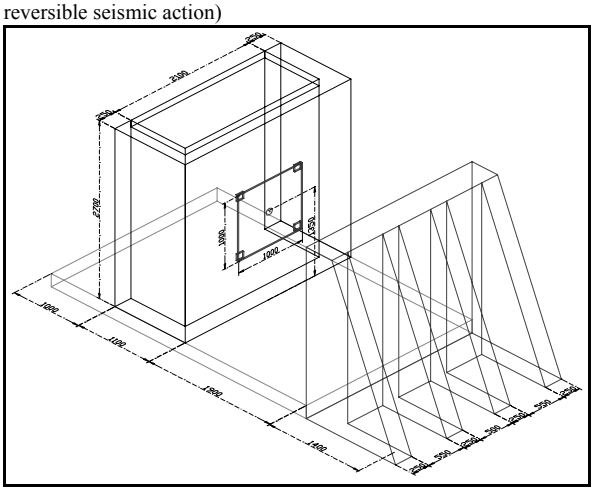
Deney duvarının geometrik özellikleri Şekil 12'de gösterilmiştir. Görüleceği gibi, deney elemanı bir prototip olup, 2.7 x 2.1 m boyutlara sahiptir.



Şekil 10. Yığma duvar deney elemanı ve reaksiyon duvarı (Masonry test unit and the reaction wall)



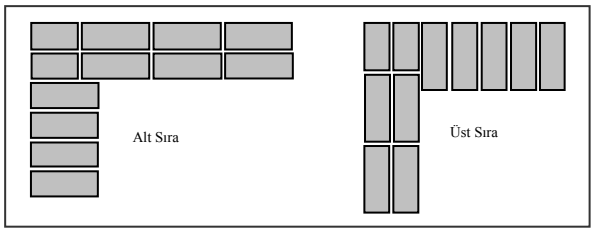
Şekil 11. Tersinir sismik hareketi modelleyen yükleme mekanizması (The loading mechanism to simulate reversible seismic action)



Şekil 12. Yığma duvar deney elemanının geometrik boyutları (Birimler: mm) (Geometric dimensions of the masonry test unit (All dimensions in mm))

3.2. Duvar Örgüsü (Masonry Coursework)

Deney duvarı Şekil 13'te gösterilen tuğla örgüsüne sahiptir.



Şekil 13. Yığma deney duvarının tuğla örgüsü (The brick coursework of the masonry test unit)

Tuğlaların örgüsünde kullanılan harcın bileşimi aşağıda verildiği gibidir:

Örgü Harçı (1 m^3 için) :
Elenmiş ince kum : 1 m^3
Çimento : 0.2 ton
Su : 0.2 m^3

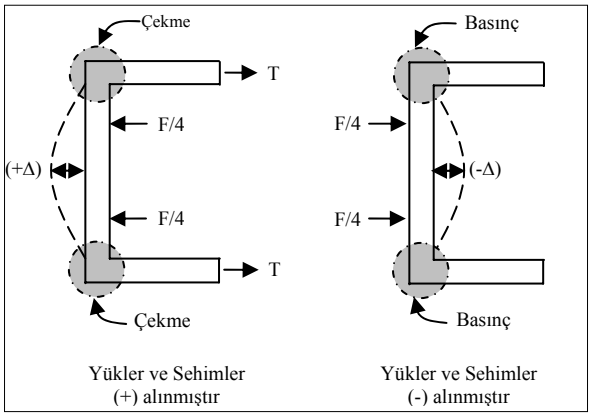
Sıva Harçı (1 m^3 için):
Kaba sıva (20 mm kalınlıkta):
Sönmüş kireç : 0.330 m^3,
Kum : 1 m^3

İnce sıva (10 mm kalınlıkta):
Sönmüş kireç : 0.330 m^3
Kum : 1 m^3
Döşeme betonu : C 16

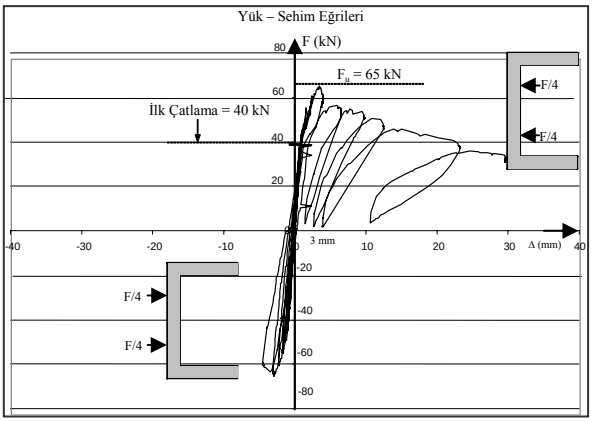
4. GÖZLEMLER VE DEĞERLENDİRMELER (OBSERVATIONS AND DISCUSSION)

Deney duvarında oluşan düzlem dışı sehimler, duvarın ön ve arkasında yer alan yükleme plakasının 4 köşe noktasında ölçülmüştür. 4 sehimin ortalaması, döşeme merkezinde oluşan sehim olarak kabul edilmiştir. Yükün ve sehimin işareti, duvar köşeleri basınç altında kaldığı zaman (+ artı) kabul edilmiştir (Şekil 14).

Şekil 15'te deney duvarının yük-sehim çevirim ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 14. Duvarın yük çevirimlerinde kabul edilen işaret anahtarı (Şekil 15'te) (Sign convention of the hysteretic response shown in Fig. 15)

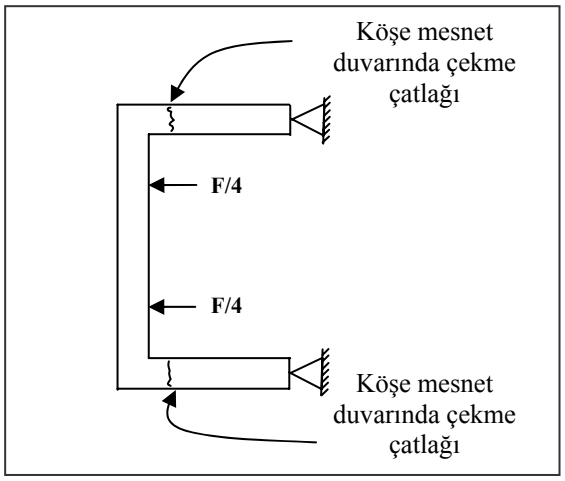


Şekil 15. Düzlem dışı yüklenen deney duvarının çevirim eğrileri (Hysteretic response of the masonry test unit loaded out-of-plane)

Çevirim eğrilerinden aşağıdaki gözlemler yapılabilir:

- **a.** Tersinir yükün işaretine göre, düzlem dışı yüklenen duvarda değişik tepkiler oluşmaktadır.
- **b.** Tersinir yük altında ilk duvar çatlaması elastik sınırlar içinde oluşmaktadır.
- **c.** İlk çatlama, duvar köşelerini çekme altında bırakan yük altında oluşmaktadır.
- **d.** İlk çatlama duvar merkezinde F_{cr} = 40 kN yük altında ve momentin maksimum olduğu bölge içinde oluşmaktadır. Çatlama sonrasında, duvarın rijitliğinde yaklaşık % 50 azalma olmaktadır.
- **e.** Çatlamadan sonra, duvarın doğal periyodu yaklaşık 1.4 kez büyümektedir. Kuşkusuz, bu periyot büyümesi sonucunda, düzlem dışı titreşimler gösteren duvar ile döşeme diyaframı arasındaki enerji alış verişinde bir azalma olmaktadır. Ancak, duvarın doğal periyodundaki uzama oldukça küçük düzeydedir ve duvara düzlem dışı ivme büyümelerini durduracak gibi değildir. Bu sonuca, AY-97'de [1] verilen İvme Tepki Spektrumu incelenerek ve karşılaştırmalar yapılarak ulaşılmıştır.
- **f.** Köşelerde basınç oluşturan (- işaretli) yükleme altında, duvar elastik davranmakta ve çok az sismik enerji tüketebilmektedir. F = -45 kN yük büyüklüğünde çok hafif bir çatlama belirtisi vardır (Şekil 15).
- **g.** Dayanım tükenmesi ve kırılma, duvar köşelerinin çekmeye çalıştığı yükleme durumunda oluşmaktadır. Duvar köşelerinde, düşey köşe çizgisine paralel çatlağın genişliği dikkatle izlenmiştir. Bu, kesinlikle bir çekme çatlağı olup duvar düzlemini köşe mesnetlerinden ayrılmaya zorlamaktadır (Şekil 16).
- **h.** Düzlem dışı yüklenen duvarda oluşan çatlak haritası Şekil 17'de gösterilmiştir. Duvar kırılmasının çekme altındaki köşelerde ve duvarın düzlemi içinde oluştuğu açıkça

görülmektedir. Bu davranış altında, düzlem dışı yüklenen duvarın "bina dışına" doğru kırılacağı sonucuna varılabilir. Şekil 18'de duvar köşelerinde oluşan kırılma çatlakları gösterilmiştir.



Şekil 16. Deney duvarının köşelerinde çekme çatlakları (Tension crack at edges of wall)

i. Yükün 40 kN'dan daha büyük değerlere ulaşmasıyla, duvar köşelerinde ve yüzeyinde oluşan çatlakların hem uzunlukları hem de kalınlıkları artmıştır. Güç tüketimi F_u = 65 kN yük büyüklüğünde oluşmuştur. Duvar düzlemindeki çatlak haritası, betonarme plak döşemede oluşan "akma çizgileri"ni andırmaktadır.

j. Oluşan çatlak haritasından, düzlem dışı yüklenen yığma duvarın davranışının betonarme plak döşemenin davranışına benzediği söylenebilir. Öyle ise, düzlem dışı duvar yükünün duvar içinde iki yönde dağılarak kenar mesnetlere ulaştığı söylenebilir. Duvarın tuğla örgüsü ve duvar düzleminin iki yüzüne de uygulanan sıvanın, süreklilik gösteren bir yük dağılımına izin verdiği sonucu çıkarılabilir [3, 4].

k. Güç tükenmesine tekabül eden F_u = 65 kN'a ulaştıktan sonra, yük taşıma yeteneğinde çok süratli bir azalma olur. Duvar, kesme kırılması davranışına benzer şekilde üzerindeki yükü boşaltır [5].

l. Düzlem dışı yüklenen duvar, oldukça gevrek bir kırılma davranışı gösterir ve çok az sismik enerji tüketir. Kırılmaya tekabül eden F_u = 65 kN yükünden sonraki çevirimde yük ancak $F = 0.85F_u$ = 55 kN'a ulaşabilmiştir. Daha da sonraki yük çevirimlerinde, ulaşılabilen yük düzeyi daha da azalır ve güç tüketimi oluşur (Şekil 15).

m. Düzlem dışı yüklenen duvar, betonarme plak döşemedeki akma çizgilerine benzer şekilde, karmaşık bir çatlak haritası oluşturarak güç tüketir. Kuşkusuz, tuğla yığma duvar gibi gevrek bir malzemede, akma çizgilerinin anımsattığı süneklik söz konusu değildir. Benzerlik, yalnız çatlak geometrisinde ve görünüştedir. Bu çatlakları "kırılma çizgileri" olarak tanımlamak daha uygun olabilir [6, 7].



Şekil 17. Güç tüketimi konumunda oluşan çatlak haritası (Cracking pattern of the test wall at failure)



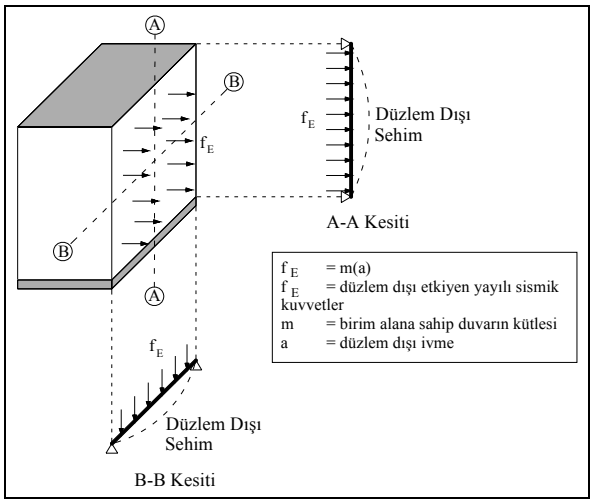
Şekil 18. Güç tüketimi konumunda oluşan köşe çatlakları (Close-up view of corner cracks at failure)

n. Kesin tanımı yapabilecek kırılma gerilmesinden söz etmek mümkün değildir [8]. Kırılmayı başlatan düzlem dışı kuvvetlerin büyüklüğü ve bunlara bağlı düzlem dışı ivmelerin düzeyi gibi tanımlar daha uygun düşmektedir.

5. UYGULAMAYA YANSIMALAR (DESIGN IMPLEMENTATION)

Deney duvarının düzlem dışı ivmelere maruz olduğu düşünülsün. Düzlem dışı ivmelerin maksimum olduğu durumda, duvarı bir plak döşeme gibi sehim yapmaya

ve kırılmaya zorlayan düzlem dışı yayılı kuvvetlerin büyüklüğü de maksimum olacaktır (Şekil 19).



Şekil 19. Düzlem dışı sismik kuvvetlere maruz duvarda oluşan düzlem dışı sehim (Deflection of wall subject to out-of-plane inertia forces)

Düzlem dışı davranışın incelendiği duvar modelinde (Şekil 8), Duvar (B)'ye etkiyen düzlem dışı ivmenin büyüklüğü 1.96g'dir.

$$f_E = (w/g)(1.96g)$$
$$b_w = 250mm = 0.25m$$
$$w = 0.25(1.0)(1.0)20kN/m^3 = 5kN/m^2$$
$$f_E = (5/g)(1.96g) = 9.8kN/m^2$$

Boyutları 2.7 x 2.1 m olan duvara etkiyen toplam yük aşağıdadır.

$$F_E = (9.8)(2.7)(2.1) = 55.6kN$$

Artık, çok önemli bir sorusunun zamanı gelmiştir. Düzlem dışı etkiyen toplam F_E =55.6 kN yük altında, duvarda kırılma oluşacak mıdır?

Sorunun cevabı, F_E = 55.6 kN sismik yük talebini, deneyde elde edilen kritik yük aşamaları ile karşılaştırılarak verilebilir.

$$F_E = 55.6kN > F_{cr} = 40kN$$

F_E = Denklem 13 ile bulunan ve duvara etkiyen toplam sismik kuvvet
F_{cr} = Duvar çatlamasına neden olan toplam deney yükü

İncelenen duvarda kırılma olmayacak ve duvar hala tersinir sismik kuvvetleri taşımayı sürdürecektir. Çatlakların oluşmasından sonra duvarın rijitliği azalmıştır. Bu durumda, düzlem dışı ivmelerin 1.96g düzeyini koruması beklenemez. Böylece, düzlem dışı ivmelerin düzeyi azalacak ve duvarın kırılma riski de azalacaktır. Kuşkusuz, kötü işçilik mevcut ise ve duvara süreklilik sağlayan sıva yapılmamışsa, duvarda bölgesel kırılmalar olabilir (Şekil 20). Dikkat edilirse, Şekil 20'de gösterilen yığma duvarda delikli tuğla kullanılmıştır.



Şekil 20. Bir dolgu duvarın düzlem dışı kırılışı (Out-of-plane failure of an infill wall)

Güç tüketim konumunda, toplam kırılma yükü duvar düzlemine düzlem dışı etkiyen yayılı kuvvet olarak ifade edilebilir.

$$F_u = 65kN$$
$$f_E = 65/(2.1x2.7) = 11.46kN/m^2$$

Bu eşdeğer düzgün yayılı kırılma yükü, aşağıda hesabı gösterilen maksimum yer ivmesine tekabül etmektedir.

Kabul edilen maksimum yer ivmesi = 0.4g
Teorik olarak hesaplanan $f_E = 9.8kN/m^2$ (Denk. 16)
Deneysel olarak bulunan $f_E = 11.46kN/m^2$ (Denk. 17)

$$a_g = 0.4g(11.46/9.8) = 0.468g$$

Deney duvarı 0.468g büyüklüğünde bir ivme altında kırılacaktır. Bu, kabul edilen 0.4g'lik maksimum yer ivmesinden çok az büyüktür. Öyle ise, deney duvarı projede kabul edilen 0.4g'lik yer ivmesi altında, çok küçük bir farkla "güvenilirdir" denilebilir.

AY-97'de yığma duvarlara etkiyen deprem kuvvetlerinin R=2.5 katsayısıyla azaltılması öngörülmektedir. Bu azaltma, şüphesiz, kontrollü bir hasar ve belirli bir süneklik düzeyinin oluşması anlamındadır. Ancak, deney duvarının çevirim ilişkilerinde bu azaltmayı haklı gösterecek düzeyde süneklik oluşmamıştır. Maksimum deney yükü, kırılma oluştuktan sonra süratle ve sürekli olarak azalmıştır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

1. Düzlem dışı ivmelere maruz yığma duvarların kırılma şekli, taşıyıcı yığma binaların hasara ve çökmeye çok açık olduğunu göstermektedir.
2. Deprem titreşimleri yapan yığma yapı, döşemenin oluşturduğu diyafram ve düzlem dışı ivmelere maruz yığma duvar arasındaki dinamik etkileşim sonucunda, yığma duvarda çok büyük düzlem dışı ivmeler oluşur. Bu ivmeler, duvar düzlemine dik etkiyen büyük sismik kuvvetlerin oluşmasına neden olurlar. Bu yayılı sismik kuvvetler, betonarme plak döşemede oluşan "akma çizgileri"ne benzeyen fakat sünekliği olmayan "kırılma çizgileri" oluşturacak duvarın güç tüketimine yol açarlar.
3. Karışımın kaliteli ve iyi uygulanmış sıvanın varlığı, yük aktarımının gerçekleştiği sürekli bir ortam oluşturur. Bundan hareketle, taşıyıcı yığma duvarların deprem güvenliğini artırmak için, duvarın her iki yüzüne de uygulanmış sıva ihmal edilmemelidir.
4. Tersinir deprem yükleri altında düzlem dışı yüklenen duvarda kırılma, çevre mesnetlerin çekmeye çalıştığı yük doğrultusunda oluşur. Kırılmaya neden olan yük doğrultusu tersindiğinde, duvarlarda oldukça elastik sınırlar içinde çalışmaktadır.
5. Düzlem dışı yüklenen duvarda güç tüketimi, kesme kırılmasına benzer şekilde, gevrek olarak oluşmaktadır. Bu gevrekliğin sonucu olarak çok az sismik enerji tüketilmektedir. Bu durumda yığma duvar, binanın çökmesine neden olabilecek büyük deprem tehdidi altındadır.
6. Türk Deprem Yönetmeliği (1), yığma yapılar için Yapı Davranış Katsayısı'nın R=2.5 alınmasını öngörmektedir. Bir adet deneyle sınırlandırılmış olduğu vurgulanarak, Şekil 15'te gösterilen yığma duvarın yük çevirim ilişkisi R=2.5 katsayısının kullanımını haklı çıkaracak yeterli sünekliği göstermemektedir.
7. Maksimum 0.4g'lik bir yer ivmesi oluşturan depreme maruz deney duvarının dayanımı, çok küçük bir deprem güvenliği oluşturmaktadır. Ancak bunun, deney duvarı, malzeme özellikleri ve geometrik boyutlar ile sınırlı olduğu unutulmamalıdır. Değişik malzeme özelliklerine, değişik geometrik boyutlara ve kapı pencere açıklıklarına sahip duvar deneyleri de yapılmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. **Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik**, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1997.
2. Paulay, T., Priestley, M. J. N., **Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings**, John Wiley & Sons Inc, 1992.
3. West, H. W. H., Hasetline, B. A., The Lateral Load Resistance of Brickwork to Lateral Loading Experimental Methods and Results of Tests on Small Specimens and Full Sized Walls, **Structural Engineer**, 55, 411-421, 1977.
4. Hamoush, S., McGinley, M., Mlakar, P., Terro, M. J., **Out-of-Plane Behaviour of Surface Reinforced Masonry Walls, Construction and Building Materials**, Elsevier Science Ltd, 341-351, 2002.
5. Sinha, B. P., Loftus MD and Temple R. Lateral Strength of Model Brickwork Panels, **Proceedings Institution of Civil Engineers**, 67, 191-198, 1979.
6. Sinha, B. P., An Ultimate Load Analysis of Laterally Loaded Model Orthotropic Brickwork Panels of Low Tensile Strength, **Structural Engineer**, 56, 81-84, 1978.
7. Hendry, A. W., **Structural Masonry**, MacMillan Education Ltd, Hong Kong, 1990.
8. Kanıt, R., vd., Depreme maruz yığma duvarın kırılması ve deprem yönetmeliğinin irdelenmesi (Deneysel Çalışma), **Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi**, 232-240, Antalya, 22-24 Eylül 2005.