

AĞIRLIK DUVARLARIN DİNAMİK YÜKLER ALTINDA PERFORMANSININ SARSMA TABLASI İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF GRAVITY RETAINING WALLS UNDER DYNAMIC LOADS USING A SHAKING TABLE

Kaan YÜNKÜL¹, Ayhan GÜRBÜZ², Sarper DEMİRDÖĞEN³

ÖZET

Bu çalışmada, geleneksel ağırlık duvarların dinamik yükler altındaki performansını incelemek amacıyla, 75 cm yüksekliğinde, 1/6 ölçekli model ağırlık duvar ve kohezyonsuz dolgu zemini kullanılarak bir dizi sarsma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. Yer hareketi olarak; yer pik ivmesi 0.05g'den 0.6g'ye kadar her 4,2 saniyede bir 0,05g kademeli artım gösteren sinüzoidal dalga tercih edilmiştir. Yer pik ivmesinin ve duvar arkası şev eğiminin duvar üzerinde oluşan ivme amplifikasyonları, duvar arkasında meydana gelen yatay dinamik toprak basınçları ve atalet kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şev eğiminin ve yer pik ivmesinin artmasına bağlı olarak, ivme amplifikasyonlarının ve yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı değerleri artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, mevcut tasarım yönetmelikleri tarafından önerilen ivme amplifikasyon değerlerinden daha yüksek ivme amplifikasyonları gözlemlenmiştir. Ayrıca, geleneksel Mononobe-Okabe (M-O) yöntemi veya diğer psödo-statik limit denge yöntemlerinin; atalet kuvvetler ile dinamik toprak basıncı arasındaki faz farkını dikkate almaması ve zeminin bir blok şeklinde yenildiğini varsaymalarından dolayı ağırlık duvarlarda aşırı tasarımlara neden olduğu da elde edilen bir diğer sonuç olarak rapor edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağırlık duvar, Sarsma tablası, Atalet kuvvet, Dinamik toprak basıncı, Faz farkı

ABSTRACT

In this study, a series of shaking table tests were conducted to investigate the performance of conventional gravity retaining walls under dynamic loads using a 75 cm high, 1/6 scale model gravity wall and cohesionless backfill soil. The sinusoidal seismic excitation was initially set at 0.05g and increased by 0.05g every 4.2 seconds until the peak value of 0.6g was reached, which was preferred as the input motion. The effect of peak ground acceleration and inclination angle of the backfill material on the acceleration amplifications

¹ Dr, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye, kaanyunkul@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, agurbuz@gazi.edu.tr

³ Doktora adayı, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, sarper.demirdogen@gazi.edu.tr

on the wall, horizontal dynamic earth pressures behind the wall and inertia forces were investigated. Acceleration amplifications and horizontal dynamic earth pressure values acting increased with increasing inclination angle of the backfill material and peak ground acceleration. It was observed that higher acceleration amplifications were observed in the experimental results compared to those in current design codes. Additionally, it has been reported as another result obtained that the traditional Mononobe-Okabe (M-O) method or other pseudo-static equilibrium methods cause over-designs in gravity retaining walls due to not considering the phase difference between inertial forces and dynamic soil pressure, and assuming the soil yields as a block.

Keywords: Gravity retaining wall, Shaking table, Inertia force, Dynamic earth pressure, Phase difference

1. GİRİŞ

İstinat duvarlarının dinamik yükler altında performansı; sismik yer hareketine, istinat yapısının rijitliğine, türüne ve geometrisine, duvar dolgu malzemesinin özelliklerine ve şev eğimine, duvar temeli zemininin özelliklerine, duvarın mesnet koşullarına, duvarda oluşan atalet kuvvetlere ve sürşarj gerilmesine bağlı kompleks bir zemin-yapı etkileşimi problemidir. Ekonomik ve güvenli tasarımların yapılabilmesi için; duvar arkasında oluşan dinamik toprak basıncı dağılımlarının ve değerlerinin gerçekçi olarak tahmin edilmesi inşaat mühendisleri için oldukça önem arz etmektedir. Bu yüzden yaklaşık doksan yıldır, istinat yapılarının dinamik yükler altında performansları çeşitli araştırmacılar tarafından araştırılmaktadır.

1923 yılında meydana gelen Kanto Depremi'nde sonra istinat duvarlarına etki eden dinamik kuvvetlerin veya toprak basınçlarının belirlemek için yapılan çalışmalar geoteknik literatüründe ön plana çıkmıştır. Okabe (1924) tarafından önerilen ve Mononobe ile Matsuo (1929) tarafından geliştirilen Mononobe-Okabe (M-O) yöntemi, istinat duvarlarına etki eden dinamik kuvveti belirlemede kullanılan en eski ve en yaygın psödo-statik limit denge yöntemidir. M-O yöntemi bazı kabulleri bulunmaktadır. Bu yöntem, kohezyonsuz dolgu zeminleri için önerilmiştir ve zeminin rijit, mükemmel plastik özellik gösterdiğini varsaymıştır. M-O yöntemi, sismik hareket sonucunda duvar arkasında bir blok şeklinde düzlemsel bir yenilme yüzeyi oluştuğunu ve bu yüzeye etki eden ivme dağılımının üniform olduğu kabulüne dayanmaktadır. Ayrıca, $\phi < \alpha + \tan^{-1}(k_h/(1 - k_v))$ olması durumunda M-O yönteminde yakınsama hatası meydana gelmektedir ve duvarda oluşan atalet kuvvetlerinin etkisi M-O yöntemi tarafından ihmal edilmektedir. M-O tarafından önerilen eşitliğin hesaplama yönteminin basit ve tasarımcılar tarafından anlaşılabilir olmasından dolayı birçok yönetmelik (Eurocode 7, 2004; NCHRP, 2008; TBDY, 2018; AASHTO, 2020) tarafından istinat duvarların tasarımında önerilmektedir. Ayrıca, çeşitli araştırmacılar (Seed ve Whitman, 1970; Richards ve Shi, 1994; Dewaikar ve Halkude, 2002; Mylonakis vd. 2007) M-O yönteminin modifiye ederek birçok psödo-statik limit denge yöntemi önermişlerdir.

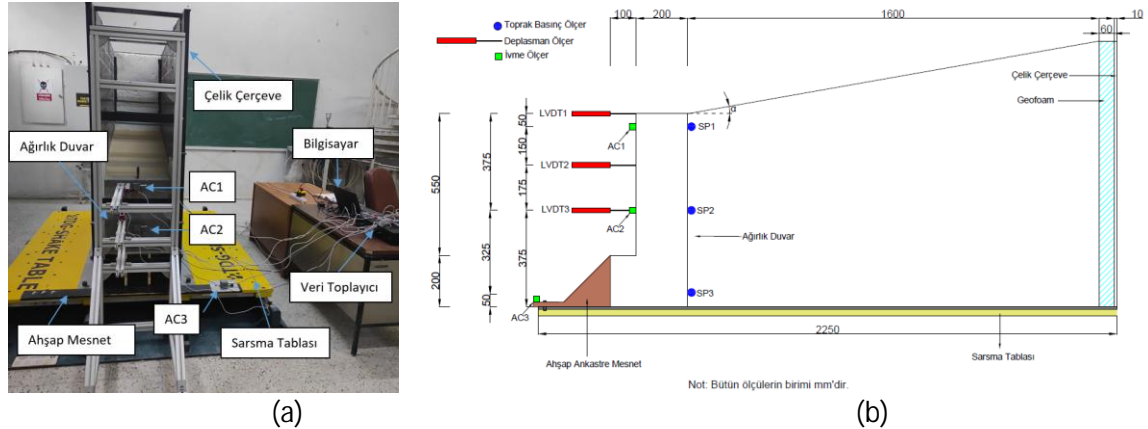
Son yıllarda yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarda (Al Atik ve Sitar, 2010; Athanasopoulos-Zekkos vd. 2013; Singh vd. 2023), geleneksel M-O yöntemi tarafından önerilen ağırlık ve konsol duvarların arkasına etki eden dinamik kuvvet değerlerinin ölçüm veya analiz sonuçlarından oldukça yüksek olduğu araştırmacılar tarafından gözlemlenmiştir.

Araştırmacılar (Al Atik ve Sitar, 2010; Athanasopoulos-Zekkos vd. 2013; Singh vd. 2023) istinat duvarında sismik yer hareketinden kaynaklı oluşan atalet kuvvet ile duvar arkasında oluşan dinamik toprak basıncı değerleri arasında faz farkının meydana geldiğini yapmış oldukları çalışmalarda raporlamışlardır. Ayrıca, geleneksel psödo-statik limit denge yöntemlerinde kullanılan yatay sismik katsayı (k_h) değerlerindeki yönetmeliklerdeki farklılıklar, istinat duvarlarının tasarımda belirsizliklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Lee vd. 2019).

Yapılan bu çalışmada, yer pik ivmesine (PGA) ve duvar arkası dolgu şev eğimine (α) bağlı olarak; kohezyonsuz dolgu zeminlerdeki geleneksel ağırlık duvarların sismik performansı laboratuvar ortamındaki sarsma tablası deneyleri ile incelenmiştir. Bu amaçla 75 cm yüksekliğinde model bir ağırlık duvar imal edilmiştir ve ivme amplifikasyonları, duvarda oluşan atalet kuvvetler, duvar arkasında oluşan dinamik toprak basıncı dağılımları ve yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı katsayı değerleri ölçülmüş ve geleneksel limit denge yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

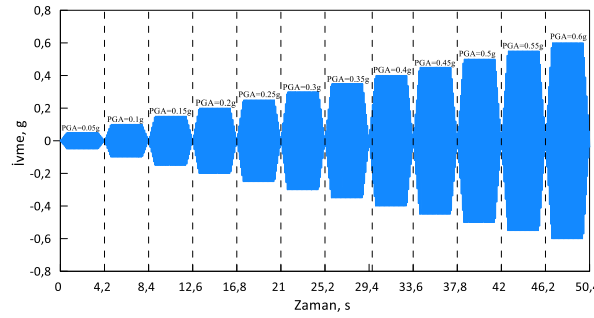
2. SARSMA TABLASI DENEYİ

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan ± 20 cm strok kapasitesine sahip, 2000 mm \times 2250 mm ebadında, 5 ton kapasiteli, bilgisayar kontrollü, tek serbestlik derecesine sahip sarsma tablasında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



Yapılan çalışmada prototipin 1/6 (1/M) oranı ile küçültülmesi ile elde edilen 75 cm yüksekliğindeki model ağırlık duvar kullanılmıştır. Gömülme derinliğinin temsil edilmesi ve duvarın sismik hareket sonucu kaymasının engellenmesi amacı ile de 20 cm yüksekliğinde ahşap rijit mesnet sarsma tablasına monte edilmiştir. Sarsma tablasına bağlanan 54 cm genişliğinde, 190 cm yüksekliğinde ve 210 cm uzunluğundaki çelik rijit çerçeve kullanılarak; dolgu zeminini ve ağırlık duvarı tutan bir sınır oluşturulmuştur. Sismik dalgaların yansımalarının engellemek amacı ile de çelik çerçevenin iç kısmına 6 cm kalınlığında geofoam malzeme yerleştirilmiştir. Dolgu zemini olarak ise % 75 rölatif sıklığa sahip, pik içsel sürtünme açısı değeri 36° olan kötü derecelendirilmiş kohezyonsuz silis kumu kullanılmıştır.

Orta-büyük ölçekli depremlerin hakim frekansları 1-3 Hz ve süreleri 10-30 s arasında değişim göstermektedir (Bathurst ve Hatami, 1998). Yapılan deneysel çalışmada, her bir sismik hareketin hakim frekans değeri 8.33 Hz ve süresi 4.2 s'dir. Wood (2004) tarafından önerilen boyut faktörleri değeri kullanıldığında ise bu sismik hareket; prototip ölçekte 2.193 Hz hakim frekansı ve 15.953 saniyeyi temsil etmektedir. Yer hareketi olarak PGA değeri 0.05g'den 0.6g'ye kadar 0.05g PGA değeri kademeli artım gösteren sinüzoidal dalga tercih edilmiştir (Şekil 2). Ayrıca her bir sismik hareket 25 sabit çevrimden, PGA değerine kadar artış gösteren 5 çevrimden ve PGA değerinde sonra azalış gösteren 5 çevrimden oluşmaktadır. Bu sayede verilen sismik hareket; gerçek deprem kayıtlarındaki artan ve azalan ivme hareketlerine benzetilmiştir.



Şekil 2. Verilen yer hareketi

Duvarda oluşan ivme değerlerinin belirlenmesi için üç adet ivme ölçer (AC1, AC2, AC3) ve duvar arkası dinamik toprak basınçlarının belirlenmesi için ise üç adet toprak basınç ölçer (SP1, SP2, SP3) kullanılmıştır (Şekil 1). Yapılan bu deneysel çalışmada duvar arkası dolgunun şev eğiminin etkisinin incelenmesi amacı ile iki farklı şev eğimi ($\alpha=0^\circ$, 10°) tercih edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

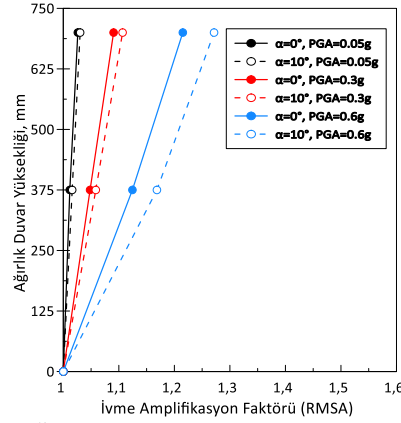
3.1. İvme Amplifikasyonları

Sismik hareket altında ivme değerlerinin ve dağılımların belirlenmesi ağırlık istinat duvarlarının performansında hayati bir öneme sahiptir. Geoteknik deprem mühendisliğinde amplifikasyon faktörü katsayısı (RMSA) kullanılarak, duvar yüksekliği boyunca oluşan ivme tepkilerinin dağılımları ve büyüklükleri basitleştirilmektedir. Yapılan bu çalışmada ağırlık istinat duvarı ve sarsma tablası üzerine yerleştirilen ivme ölçerler (AC1-AC3) kullanılarak; Kramer (1996) tarafından önerilen eşitlikten (Eş 1) amplifikasyon faktörü değerleri hesaplanmıştır.

$$RMSA = \sqrt{\frac{\int_0^{t_d} a(t)^2 dt}{\int_0^{t_d} a_b(t)^2 dt}} \quad (1)$$

Burada; $a(t)$ duvar üzerinde okunan ivmelerin zamana bağlı tepkisini, $a_b(t)$ sarsma tablasında verilen ivmelerin zaman bağlı tepkisini, t_d her bir sismik hareketinin süresini, dt ise zaman aralığını simgelemektedir.

PGA 0.05g, 0.3g ve 0.6g için ölçülen RMSA değerleri Şekil 3'de sunulmuştur. Geleneksel psödo-statik limit denge yöntemleri üniform bir ivme dağılımı önermesine rağmen yapılan deneysel çalışmada PGA değerinin, şev eğiminin ve duvar yüksekliğinin artmasına bağlı olarak RMSA değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Güncel tasarım yönetmelikleri tarafından önerilen RMSA değerleri 0.5 ile 1 arasında değişim göstermesine rağmen (Eş 2) yapılan çalışmada şev eğimine ve PGA değerine bağlı olarak ortalama RMSA değerlerinin 1.011 ile 1.124 arasında değişim gösterdiği raporlanmıştır (Tablo 1).



Şekil 3. Ölçülen ivme amplifikasyon değerleri

$$RMSA = \frac{k_h}{PGA/g} = \frac{1}{r} \quad (2)$$

Burada r duvarda izin verilen kalıcı deplasman değerine bağlı 1 ile 2 arasında değişim gösteren bir katsayıyı simgelemektedir.

Tablo 1. Ağırlık duvarda gözlemlenen PGA değerine bağlı ortalama ivme amplifikasyon değerleri

PGA	Ortalama RMSA değerleri	
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$
0.05g	1.011	1.015
0.1g	1.013	1.017
0.15g	1.016	1.020
0.2g	1.027	1.023
0.25g	1.039	1.031
0.3g	1.048	1.042
0.35g	1.056	1.054
0.4g	1.060	1.067
0.45g	1.077	1.082
0.5g	1.089	1.096
0.55g	1.103	1.101
0.6g	1.124	1.122

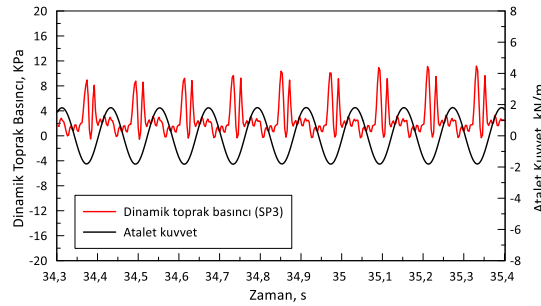
3.2. Dinamik Toprak Basınçları

Sismik hareket sonucu duvar arkasında oluşan dinamik toprak basıncı değerleri ve dağılımları ağırlık duvarların stabilite analizleri için önemli bir rol oynamaktadır. Duvar arkasına yerleştirilen toprak basınç ölçerler (SP1, SP2, SP3) sayesinde sismik hareket boyunca oluşan dinamik toprak basıncı değerleri belirlenmiştir. Ayrıca sismik hareket

boyunca ağırlık duvar üzerine atalet kuvvet (P) de etki etmektedir. Atalet kuvvet; duvar üzerindeki ortalama ivmenin (a_{ort}) negatif değerinin duvar kütlesi (m) ile çarpılması ile elde edilmektedir (Eş 3). Ortalama ivme değeri için duvar ortasına yerleştirilen AC2 ivme ölçerin ivme verileri kullanılmıştır.

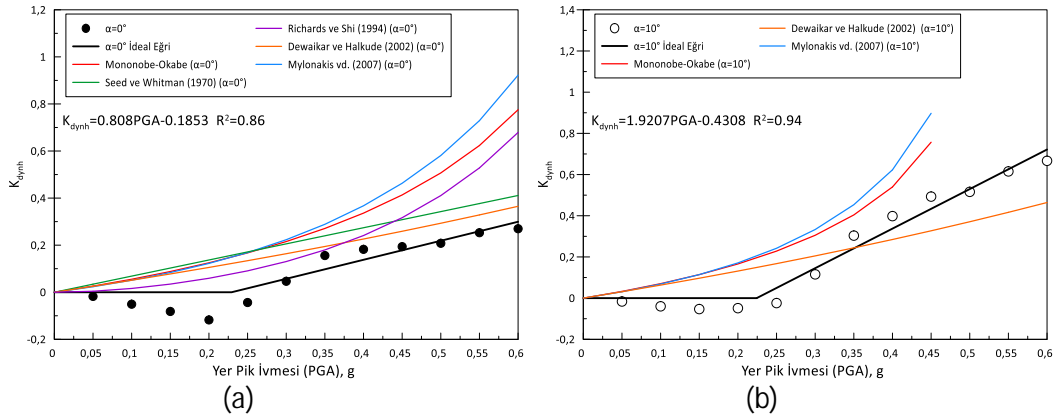
$$P_I = -m \times a_{ort} \quad (3)$$

Şekil 4'de 34.3 ile 35.4 s aralığında duvarda oluşan atalet kuvvet değerleri ile SP3 toprak basınç ölçerden ölçülen dinamik toprak basıncı değerleri karşılaştırılmıştır. Pozitif değerler dolgudan duvara doğru hareket aktif yönü, negatif değerler ise duvardan dolguya hareket eden pasif yönü simgelemektedir. Sismik hareket sonucu duvar ile zemin arasındaki temasın kaybolması veya duvarın dolgu malzemesinden daha fazla yer değiştirmesinden kaynaklı olarak da yapılan çalışmada negatif dinamik toprak basınçları ölçülmüştür. Şekil 4'de görülebileceği gibi atalet kuvvetleri ile dinamik toprak basınçları arasında faz farkları meydana gelmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada düşük yer pik ivmelerinde ($PGA < 0.2g$) SP1 ve SP2'den ölçülen dinamik toprak basıncı ile atalet kuvvet arasında faz farkı meydana gelirken, SP3'den atalet dinamik toprak basıncı ve atalet kuvvet arasında faz farkı meydana gelmemiştir. PGA değerinin $0.2g$ 'den büyük olduğunda ise bu durumun tam tersi gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Şev eğimi 0° için 34.3 ile 35.4 s aralığında SP3 toprak basınç ölçerden ölçülen dinamik toprak basıncı değerleri ile ağırlık duvara etki eden atalet kuvvetin karşılaştırılması

Şekil 5'te geleneksel psödo-statik limit denge yöntemleri tarafından önerilen yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı katsayısı (K_{dynh}) değerleri ile deneysel çalışmadan geri analiz yöntemi ile elde edilen K_{dynh} değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda PGA değerinin $0.2g$ 'den küçük olduğu durumlarda duvar arkasına etki eden toplam kuvvetler statik kuvvetlerden düşüktür ve bu durum sonucunda negatif K_{dynh} değerleri ortaya çıkmıştır. Benzer sonuçlar Al Atik ve Sitar (2010) tarafından da gözlemlenmiştir. PGA değerinin $0.2g$ 'den büyük olması durumunda ağırlık duvarlarda kalıcı deplasmanlar meydana gelerek aktif duruma ulaşmıştır ve bu kritik ivme değerinden sonra K_{dynh} değerlerinde PGA'nın ve duvar arkası şev eğiminin artmasına bağlı olarak ani artışlar meydana gelmiştir. Ölçüm sonuçları geleneksel psödo-statik limit denge yöntemleri ile karşılaştırıldığında ise Mononobe-Okabe (M-O), Seed ve Whitman (1970), Richards ve Shi (1994) ve Mylonakis vd. (2007) tarafından önerilen yöntemlerin aşırı tasarımlara neden olacağı görülürken, Dewaikar ve Halkude (2002) yöntemini duvar arkası şev eğiminin 10° ve PGA değeri $0.25g$ 'den büyük olması durumunda yetersiz olduğu da elde edilen bir diğer sonuçtur. Ayrıca $PGA > 0.45$ ve $\alpha = 10^\circ$ olması durumunda Mononobe-Okabe (M-O) ve Mylonakis vd. (2007) yöntemlerinde yakınsama hataları meydana gelmektedir.

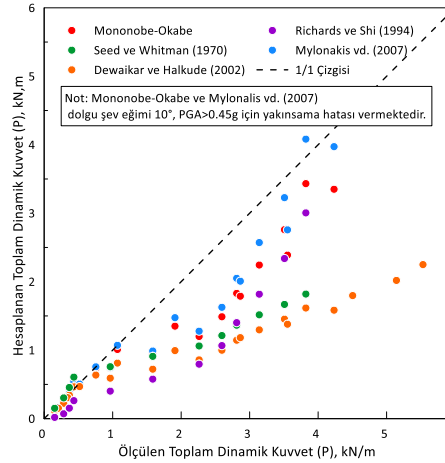


Şekil 5. Deneysel çalışmadan elde edilen yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı katsayılarının geleneksel psödo-statik limit denge yöntemleri ile karşılaştırılması

Sismik hareketten kaynaklı oluşan toplam yatay dinamik kuvvet (P) duvar arkasına yatay yönde etki eden dinamik kuvvet (P_{dynh}) ile atalet kuvvetin (P_I) toplamıdır (Eş 4). Yapılan çalışmada elde edilen toplam kuvvet değerleri geleneksel limit denge yöntemleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6). Elde edilen sonuçlar doğrultusunda sismik hareketten kaynaklı oluşan toplam yatay kuvvet değerini belirlemede $PGA > 0.2g$ olması durumunda bütün psödo-statik yöntemlerin yetersiz olduğu görülmüştür.

$$P = P_{dynh} + P_I \quad (4)$$

$$P_{dynh} = \frac{1}{2} K_{dynh} \gamma H^2 \quad (5)$$



Şekil 6. Deneysel çalışmadan elde edilen yatay yönde etki eden toplam dinamik kuvvet değerleri ile geleneksel psödo-statik limit denge yöntemlerinin karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, ağırlık istinat duvarın sismik performansı sarsma tablası deneyleri ile incelenmiştir. Bu amaçla 1/6 ölçekli 75 cm yüksekliğinde model duvar tasarlanmıştır ve duvar arkası dolgu zemini olarak %75 rölatif sıkılığa sahip kohezyonsuz malzeme kullanılmıştır. Yapılan sarsma tablası deneylerinde dolgu şev eğiminin, ivme

amplifikasyonları, atalet kuvvetler, dinamik toprak basınçları, yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı katsayıları değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Yönetmeliklerin aksine duvar üzerinde üniform bir ivme dağılımı gözlemlenmemiştir. İvme amplifikasyon faktörü değerleri duvarın en üst noktasında maksimum ve duvar yüksekliğinin artması bağlı olarak lineer bir artış eğilimindedir. Şev eğiminin ve yer pik ivmesinin artmasına bağlı olarak amplifikasyon faktörü değerlerinde artışlar meydana gelmektedir. Yönetmelikler tarafından önerilen amplifikasyon değerlerinin, deneysel çalışmadan elde edilen ortalama amplifikasyon değerlerinden küçük olduğu gözlemlenmiştir.
- Duvarda oluşan atalet kuvvetler ile duvar arkasında meydana gelen dinamik toprak basıncı değerleri arasında faz farkları meydana gelebilmektedir.
- Yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı katsayıları, yer pik ivmesinin ve dolgu şev eğiminin artmasına bağlı olarak artmaktadır. Geleneksel psödo-statik limit denge yöntemleri yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı değerleri ölçüm sonuçlarından daha yüksek tahmin etmişlerdir. Bu durumun nedeninin psödo-statik limit denge yöntemlerin yapı-zemin etkileşimini, zeminin lineer olmayan kayma gerilmesi-birim şekil değiştirme davranışını, duvarın mesnet koşullarını dikkate almamasından ve zeminin bir blok şeklinde düzlemsel olarak yenildiğini varsaymasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Sismik hareketten kaynaklı oluşan toplam yatay dinamik kuvvetler karşılaştırıldığında ise sadece geleneksel psödo-statik limit denge yöntemlerinin $PGA > 0.2g$ durumunda yeterli olmadığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda; ağırlık istinat duvarı stabilite analizlerinde hem atalet kuvvetlerin hem de dinamik kuvvetlerin birlikte etki ettirilmesi tasarımcılara önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından desteklenen UDAP-Ç-19-08 başlıklı ve İstinat (Klasik Konsol ve Toprakarme) Duvarlarına Etkiyen Dinamik Yüklerin Belirlenmesi isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerini araştırmacılardan esirgemeyen Öğ. Gör. Dr. Hüseyin KALKAN'a, Karimullah KARIMI'e, Bilal KORKMAZ'a ve Tahsin Ömür BUDAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- AASHTO. (2020), "Bridge Design Specifications", American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al Atik, L., Sitar, N. (2010). "Seismic Earth Pressures on Cantilever Retaining Structures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 136, 1324-1333.
- Athanasopoulos-Zekkos, A., Vlachakis, V.S. ve Athanasopoulos, G.A. (2013), "Phasing Issues in the Seismic Response of Yielding, Gravity-Type Earth Retaining Walls—Overview and Results from A FEM Study", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 55, 59-70.

- Bathurst, R.J., Hatami, K. (1998), "Seismic Response Analysis of a Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Wall", Geosynthetics International, Vol 5, 127-166.
- Dewaikar, D., Halkude, S. (2002), "Seismic Passive/Active Thrust on Retaining Wall-Point of Application", Soils and Foundations, Vol 42, 9-15.
- Eurocode 7. (2004), "Geotechnical Design – Part 1: General Rules", European Committee for Standardization.
- Lee, M.G., Ha, J.G., Manandhar, S., Park, H.J., ve Kim, D.S. (2019), "Evaluation of Performance-Based Seismic Coefficient for Gravity-Type Quay Wall via Centrifuge Tests", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 123, 292-303.
- Mononobe, N., Matsuo, H. (1929), "On Determination of Earth Pressure During Earthquake", World Engineering Congress, Tokyo, Japan, 177-185.
- Mylonakis, G., Kloukinas, P. ve Papantonopoulos, C. (2007). "An Alternative to the Mononobe–Okabe Equations for Seismic Earth Pressures", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 27, 957-969.
- NCHRP. (2008), "Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes, and Embankments", National Cooperative Highway Research Program.
- Okabe S. (1924), "General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam", Civil Engineering Society, Japan, 1277-1323.
- Richards, J.R., Shi, X. (1994), "Seismic Lateral Pressures in Soils with Cohesion". Journal of Geotechnical Engineering, Vol 120, 1230-1251.
- Seed, H., Whitman, R.V. (1970), "Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads", American Society of Civil Engineers Specialty Conference on Lateral Stresses, New York, USA.
- Singh, P., Bhartiya, P., Chakraborty, T. ve Basu, D. (2023), "Numerical Investigation and Estimation of Active Earth Thrust on Gravity Retaining Walls Under Seismic Excitation" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 167, 107798.
- TBDY. (2018), "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
a_{ort}	Duvar üzerine etki eden ortalama ivme	P	Duvar arkasına yatay yönde etki eden dinamik kuvvet
g	Yer çekimi ivmesi	P_{dynh}	Toplam yatay yönde etki eden dinamik kuvvet
H	Duvar yüksekliği	P_I	Atalet kuvvet
Hz	Hertz	PGA	Yer pik ivmesi
K_{dynh}	Yatay yönde etki eden dinamik toprak basıncı katsayısı	r	Sabit katsayı
k_h	Yatay sismik katsayı	s	Saniye
k_v	Düşey sismik katsayı	α	Dolgu şev eğimi
N	Ölçek	γ	Dolgu zeminin birim hacim ağırlığı
m	Duvarın kütlesi	ϕ	Dolgu zeminin içsel sürtünme açısı