



Dynamic response of caisson type quay wall

Hülya Karakuş Cihan^{1*} , Kubilay Cihan²

¹ Yüksel Proje Birlik, 450. Street No:23, 06610, Çankaya, Ankara, Turkey

²Department of Civil Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, 71450, Turkey

Highlights:

- Damage levels based on displacement of caisson.
- Instantaneous friction coefficients between caisson and gravel foundation
- Calculation of displacements by sliding block method.

Keywords:

- Caisson,
- Earthquake,
- Friction coefficient,
- Stability
- Displacement

Article Info:

Research Article
Received: 28.01.2020
Accepted: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.680927

Acknowledgement:

This research was funded by the TUBITAK under the Project Number: 111Y006

Correspondence:

Author: Kubilay Cihan
e-mail: kcihan@kku.edu.tr
phone: +90 318 357 4242

Graphical/Tabular Abstract

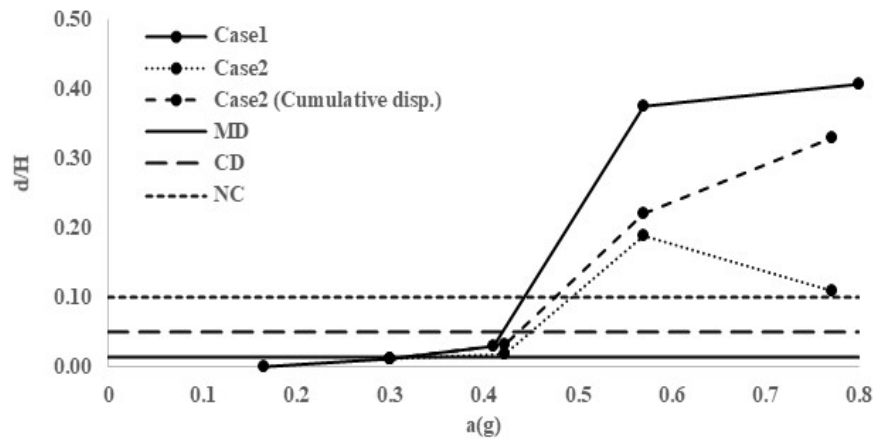


Figure A Relative displacement of Case 1 and Case 2 versus measured maximum accelerations of cyclic loadings (MD:Min.Damage; CD:Contr Damage; NC:Near Collapse)

Purpose: The aims of the study are to investigate the damage level of caisson quay wall under cyclic loading experimentally and determine instantaneous dynamic friction coefficient between structure and gravel foundation.

Theory and Methods:

A series of 1g shaking table tests were carried out to investigate the dynamic response of caisson type quay wall. Non-liquefied granular materials were used as backfill material. The stability of caisson type quay wall considering the displacements were investigated for two different cases: in the first case (Case1), cyclic motion was applied to the caisson type quay wall (structure) and the displacement (damage) on the structure was measured then the damage was repaired and experiments were performed with different cyclic motions in similar way. In the second case (Case2), different cyclic motions were applied on structure successively without repairing the damages on structure and the displacement (damage) on the structure was measured.

Results:

The displacement values in Case2 are considerably lower than in Case1. This is due to the compression of the backfill as a result of the previous cyclic motion, as well as the reduction of the structure-soil interaction as a result of movement of the caisson. This type structures can be stable against to cyclic loadings which have acceleration up to 0.40 g with minor repairing. During cyclic loading, friction coefficient between structure and rubble cannot remain equal to static friction coefficient, it varies instantaneously depend on inertia force of structure.

Conclusion:

Coastal structures may be subjected to earthquake effects more than once during their service life. It was investigated whether there is a difference in the behavior of the structures exposed to different earthquake effects successively.



Keson yanaşma yapılarının dinamik davranışı

Hülya Karakuş Cihan^{1*}, Kubilay Cihan²

¹Yüksel Proje Birlik, 450. Cadde No:23, 06610, Çankaya, Ankara, Türkiye

²Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Kesonun yer değiştirmeye bağlı hasar seviyeleri
- Keson ve temel malzemesi arasındaki anlık sürtünme katsayıları
- Kayan blok yöntemi ile yer değiştirmelerin hesaplanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.01.2020

Kabul: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.680927

Anahtar Kelimeler:

Keson,
deprem,
sürtünme katsayısı,
stabilite,
yer değiştirme

ÖZ

Keson tip yanaşma yapılarının stabilite (dayanımları) yer değiştirmeler göz önüne alınarak iki farklı durum için incelenmiştir: Birinci durumda, farklı frekanslara sahip döngüsel yükleme keson tip yanaşma yapısına uygulanmış ve yapı üzerindeki yatay deplasmanlar (hasar) ölçülmüştür sonrasında döngüsel yükleme sonucunda oluşan hasar görmüş kesit her deneyden sonra onararak deneyler benzer şekilde gerçekleştirilmiştir; ikinci durumda, birinci durum için kullanılan döngüsel yükleme yapıya peş peşe ve yapı onarılmadan uygulanmış ve yapı üzerindeki yer değiştirmeler ölçülmüştür. Her iki durum için yapılan deneyler tamamlandıktan sonra, ölçülen yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre aynı döngüsel yükleme için ikinci durumdaki yer değiştirmelerin birinci durumdaki yer değiştirmelerden daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca, birinci durum için beton ve temel malzemesi arasındaki anlık dinamik sürtünme katsayısı deney sonuçları kullanılarak hesaplanmıştır. Anlık dinamik sürtünme katsayısı ile statik sürtünme katsayısı arasındaki oranın 1 değeri etrafında salındığı görülmüştür. Rölatif ivme değerlerinin iki kere integrasyonu ile hesaplanan yer değiştirmeler ve deneyler sırasında ölçülen yer değiştirmeler arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.

Dynamic response of caisson type quay wall

H I G H L I G H T S

- Damage levels based on displacement of caisson
- Instantaneous friction coefficients between caisson and gravel foundation
- Calculation of displacements by sliding block method

Article Info

Research Article

Received: 28.01.2020

Accepted: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.680927

Keywords:

Caisson,
earthquake,
friction coefficient,
stability,
displacements

ABSTRACT

The stability of caisson type quay wall considering the displacements were investigated for two different cases: in the first case, cyclic loading with different frequency was applied to the caisson type quay wall and the horizontal displacement (damage) on the structure was measured then by repairing the damage due to cyclic loadings after each experiment, experiments were performed with different cyclic loadings in similar way ; ii: in the second case, same cyclic loadings used in first case were applied on structure successively and without repairing the damages on structure and the displacement (damage) on the structure was measured. After completion of the experiments for two different cases, the measured displacements were compared. Based on the experiment results, it was seen that for same cyclic motion, displacements of the second case were less than those in the first case. In addition, using experimental results for the first case, the instantaneous dynamic friction coefficient between concrete and the gravel base was calculated. It was found that ratio between calculated instantaneous dynamic friction coefficient and static friction coefficient oscillates around 1. Displacements, calculated by using double integration of the relative acceleration, were in compatible with the measured displacements during the experiments.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Keson tip yavaşma yapıları limanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yapılar stabilitelelerini temel malzemesi ile yapı arasındaki sürtünme kuvveti ile sağlamaktadırlar. Rijit yapı-geri dolgu-su-temel zemini olarak adlandırılan dört temel bileşen keson tipi yavaşma yapılarının stabilitesi üzerinde etkin rol oynamaktadırlar. Döngüsel bir yüklemeye böyle bir sistem üzerine etkidiğinde, bu bileşenlerin karmaşık yapısından dolayı komplike problemler ortaya çıkmaktadır. Keson tip yavaşma yapılarının tasarımı, stabilitesi, hizmet verebilirliği, güvenliği ve ekonomik olması göz önüne alınarak yapılmalıdır. Özellikle dinamik yüklemeler altındaki tasarım için şartnamelerde gerekli öneriler verilmektedir. Bu şartnameler basitten daha karmaşık uygulamaları içeren çeşitli yaklaşımları kullanırlar. Bu yaklaşımlar temel olarak iki yöntemi içermektedir: geleneksel sismik tasarım yöntemi ve performans dayalı tasarım yöntemi. Geleneksel sismik tasarım yöntemleri, tasarım sismik kuvvetine dayanma kapasitesi sağlamaya dayanır, ancak kuvvet dengesi sınırının aşılması durumunda yapının performansı hakkında bilgi vermezler. Geleneksel sismik tasarım yönteminde, oluşma olasılığı düşük bir sismik olayla ilişkili nispeten güçlü yer hareketlerinin dikkate alınması durumunda, kuvvet dengesi tasarımı çok yüksek inşaat maliyetlerine neden olabilir. Kuvvet dengesi tasarımı oluşma olasılığı daha yüksek bir sismik harekete göre yapılacaksa, tasarımda kullanılanlardan daha büyük yer hareketlerine maruz kaldığında yapının sismik performansını tahmin etmek zor olduğundan, yapının hasar riski çok yüksek olmaktadır [1]. Performansa dayalı tasarımda, yapının önemine göre parametreler (deformasyon; dönme, yatay ve düşey yer değiştirmeler) tasarım aşamasından önce tanımlanır ve bu parametreler "tasarım parametreleri" olarak kullanılır.

Sugano vd. [2] 1995 Hyogoken-Nanbu Depremi'nde Kobe Limanı'nda 250'den fazla keson tipi rıhtım duvarının hasar gördüğünü bildirmiştir. Keson duvarların yer değiştirmelerinin ortalama 3 m ve yapılarıdaki düşey yer değiştirmelerin de yaklaşık 1 m olduğu belirtilmiştir. Sumer vd. [3] sismik hareketten dolayı oluşan sivilaşmanın deniz yapılarında oluşturacağı hasar konusunu incelemiştir. Bu çalışmada 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde kıyı yapılarında oluşan sivilaşma kaynaklı hasarların listesi verilmiştir. Araştırmaya göre yavaşma yapıları ve kazıklı yapılar denize doğru yer değiştirme yapmışlardır. Ayrıca, Derince Limanı'nda blok tipi rıhtım duvarı 0-0,50 m denize doğru hareket etmiş ve yapı arkasındaki geri dolgu malzemesinde 0,5-1 m mertebelerinde oturma oluşmuştur. Cihan vd. [4] iki bloktan oluşan bloklu bir rıhtım duvarının sismik tepkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Yüksel vd. [5], sivilaşmayan geri dolgu malzemesi için sağlam bir temel üzerinde keson ve L tipi rıhtım duvarlarının performanslarını deneysel olarak incelemiştir. Bunlara ek olarak, özellikle sismik yüklemeye altında keson tipi yavaşma yapılarının stabilitesini anlamak için yapılan çok sayıda sayısal ve deneysel çalışmalar bulunmaktadır; Woodward ve

Griffiths [6], ağırlık tipi yapıların davranışını pseudo-statik ve dinamik sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak incelemiştir. Aktif toprak basıncı katsayısının hesaplanması için pseudo-statik analiz ve analitik yöntemler arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Pseudo-statik analizde, bileşke aktif kuvvetin uygulama noktasının arttığı belirtilirken, dinamik analizde, uygulama noktasındaki değişimin duvar deformasyon tipinin bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Ghalandarzadeh vd. [7], ağırlık tipi yavaşma yapılarının deprem etkisindeki davranışını 1g sarsma tablası deneyleri ile incelemiştir. Yapıdaki hasar, yer hareketi ve yapının üzerine oturduğu zemin tabakasında oluşan boşluk suyu basınçlarındaki artış ile geliştiğini belirlemiştir. Yapının yer değiştirmesi, titreşimin artması ve yapının yerleştirildiği zemin sıklığının azalmasıyla arttığı ifade edilmiştir. Zeng [8] ağırlık tipi yavaşma yapılarının sismik davranışını santrifüj deneyleri ile araştırmış, boşluk suyu basıncındaki artışın bu yapıların sismik davranışı üzerinde önemli etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Madabhushi ve Zeng [9] ağırlık tipi yavaşma yapılarının sismik davranışını, kuru ortamda ve geri dolgunun suya doygun olması durumunda sayısal modelleme yöntemi ile incelemiştir. Dewoolkar vd. [10], sivilaşabilen geri dolgu malzemesi için istinat duvarlarının statik ve sismik davranışını santrifüj deneyleri ile incelemiştir. Santrifüj deneyleri sonunda sivilaşmadan kaynaklı olarak geri dolgunun statik itme değerinde %50'lik artış olduğunu göstermişlerdir. Kim vd. [11] analitik ve deneysel çalışmaları ile ağırlık tipi yavaşma yapıları üzerinde deprem sırasında oluşan kuvvet bileşenlerini incelemiştir. Bu kuvvetleri yüksek ve düşük boşluk suyu basıncı oluşumu durumunda belirlemeye çalışmışlardır. Kim vd. [12], deprem sebebiyle ağırlık tipi yavaşma yapılarında oluşacak yer değiştirmeyi elde edebilmek için boşluk suyu basıncının etkisini göz önüne alan yeni bir yöntem önermişlerdir. Lee [13], ağırlık tipi yavaşma yapılarının sismik davranışını farklı permeabilitelelere sahip geri dolgu malzemeleri durumunda santrifüj deneyleri ile incelemiştir. Yapı titreşiminin etkisiyle geri dolgu malzemesinin denize doğru sızması hasarın artmasına sebep olduğu ifade edilmiştir. Choudhury ve Ahmad [14] ağırlık tipi yavaşma yapılarının stabilitesini tsunami ve deprem etkisini aynı anda göz önüne alarak incelemiştir. Tsunami ve deprem etkisinin aynı anda etkimesi durumunda, yapı stabilitesinin belirgin şekilde azaldığını belirlemiştir. Choudhury ve Ahmad [15], limit denge yöntemi ve pseudo-statik yaklaşımı kullanarak yavaşma yapılarının arkasındaki geri dolgunun güçlendirilmesi durumu için bir tasarım metodolojisi önermişlerdir. Yapının kayma ve dönme hasar modları geosentetikler ile güçlendirilmiş durum için incelenmiştir. Sonuçlar, kaymanın devrilmeye göre daha kritik olduğunu ve bu nedenle gerekli dikkatin verilmesi gerektiğini göstermektedir. Na vd. [16], bir keson tipi yavaşma yapısının dinamik davranışını, geoteknik parametreler ve yer hareketlerinin belirsizliklerine odaklanarak 2 boyutlu doğrusal olmayan sismik analizler ile araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre tasarım kriterlerini sunmuşlardır. Moghadam vd. [17], şekil değiştirebilen panellerin ağırlık

tipi yavaşma yapılarının sismik davranışı üzerindeki etkisini, 1g sarsma tablası yöntemini kullanarak deneysel olarak incelemiştir. Ayrıca deneyler sırasında ölçülen veriler kullanılarak, şekil değiştirebilen panellerin etkisi sayısal modelleme ile incelenmiştir. Moghadam vd. [18] bir kesonun arkasına yerleştirilen yer değiştirme azaltıcı panel ve yer değiştirme azaltıcı elemanlar olmak üzere iki farklı uygulamanın kesonun sismik davranışı üzerine etkisini, 1 g sarsma tablası deneyleri ile araştırmışlardır. Her iki yöntemin de kesonun yer değiştirmesini, oturmasını ve dönmesini belirgin şekilde azalttığını göstermişlerdir. Maleki ve Mahjoubi [19] sonlu elemanlar modeli kullanarak istinat duvarlarının sismik davranışını incelemişler, farklı geri dolgu malzemesi ve sınır koşulları için yeni bir geri dolgu basınç dağılımı önermişlerdir. Tiznado ve Roa [20], ticari bir yazılım olan PLAXIS programını kullanarak istinat duvarlarının sismik davranışı incelemiştir. İstinat duvarlarının kalıcı yer değiştirmelerinin geri dolguda ve temel zemininde oluşan sismik büyümeye bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ayrıca duvar arkasındaki geri dolguda oluşacak ivme büyütmesinin, yapı üzerine geri dolgunun yaptığı yatay basınç artışa sebep olacağını göstermişlerdir. Torisu vd. [21], dinamik yüklem altında dolgu barajların sismik davranışını 1g sarsma tablası deneyleri ile incelemiştir. Rölatif sıklığın azalmasının baraj gövdesindeki hasarı artırdığını göstermişlerdir.

Sürtünme katsayısı, ağırlık tipi yavaşma yapılarının sismik tasarımının analizi için önemli parametrelerden biridir. Sürtünme katsayıları ile ilgili son çalışmalar, statik durumun zamanla değişmeyen bir sistemi tanımladığını, ancak dinamik durumun hareket halindeki bir sistemi tanımladığını göstermektedir. Böylece, sadece statik (sabit) sürtünme katsayılarının kullanılması ağırlık tipi yavaşma yapılarının sismik tasarımı için yanıltıcı sonuçlara neden olabilmektedir. Mendez vd. [22], yerçekimi etkisi altında eğimli bir düzlemde kayan bir blok için statikten kinetik sürtünmeye geçişin nasıl geliştiğini araştırmak amacıyla sarsma tablası deneyleri yapmışlardır. Bu deneylerde ayrıca ivmeyi ölçmek için, ivme ölçerler ve yer değiştirmelerin belirlenmesi için doğrusal değişken diferansiyel transformatörler kullanılmıştır. Sabit sürtünme katsayısı, Coulomb sürtünme yasası ve önerilen bir sürtünme yöntemi olmak üzere üç durum analiz edilmiş ve sonuçlar sarsma tablası deneylerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen sürtünme katsayısı yönteminin kayan blok analizini tanımlamak için güvenilir olduğu belirtilmiştir. Hsieh vd. [23], üç farklı malzemenin (alüminyum, kumtaşı ve sentetik kumtaşı) dinamik sürtünme katsayısını tanımlamak için sarsma tablası deneylerini ve statik sürtünme katsayısını tanımlamak için eğme (tilting) testlerini yapmışlar ve sonuçları tartışmışlardır.

Yukarıda açıklanan önceki çalışmalarda, kıyı yapılarına sismik yüklem yapıldıktan sonra, hasar görmüş kıyı yapıları yeniden inşa edilmiş ve deprem etkisini anlamak için farklı bir döngüsel yüklem için deneyler yapılmıştır. Tüm deneylerin sonunda, kıyı yapılarının hasar seviyeleri her deney için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Ancak, kıyı yapıları

hizmet ömürleri boyunca birden fazla deprem etkisine maruz kalabilmektedirler. Peş peşe farklı deprem etkilerine maruz kalan yapıların davranışlarında bir fark olup olmadığı araştırılmalıdır. Memos ve Protonotarios, [24], Yunanistan'ın batısında Ro-Ro limanı olarak hizmet veren Patras Limanı'nın dalgakıranının deprem etkisi altındaki davranışını araştırmışlardır. Şubat 1984'te Patras Körfezi'ndeki dalgakıranın bulunduğu alanın yakınında 3.5 ila 4.5 büyüklüğünde bir dizi deprem meydana gelmiştir. Deprem serisinden sonra dalgakıranın ağır hasar gördüğü tespit edilmiştir. Keson tipi yavaşma yapılarında da benzer bir durum sonucunda hasarların meydana gelebilme ihtimali bulunmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada keson tipi rıhtım duvarının sismik davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler iki farklı durum için gerçekleştirilmiştir. İlk durumda (Durum1), deneyler seçilen döngüsel yüklemeler için gerçekleştirilmiş ve model bir sonraki deneyden önce onarılarak yeniden oluşturulmuştur. İkinci durumda (Durum2), birinci durumda kullanılan aynı döngüsel yüklemeye için deneyler yapıldıktan sonra, model onarılmamış ve hasarlı modele daha büyük bir döngüsel yüklemeye uygulanmıştır. Böylece daha önce görece daha küçük peş peşe sismik hareketlere maruz kalmış bir keson yapısına etkileyen büyük bir sismik hareket ile bu büyük sismik hareketin yapıya tek seferde etkimesi sonucunda oluşacak yer değiştirmeler ve hasar seviyeleri belirlenmeye çalışılmıştır. Hasar seviyesine ek olarak, keson ve temel arasındaki anlık dinamik sürtünme katsayısı Mendez vd. tarafından önerilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir [22].

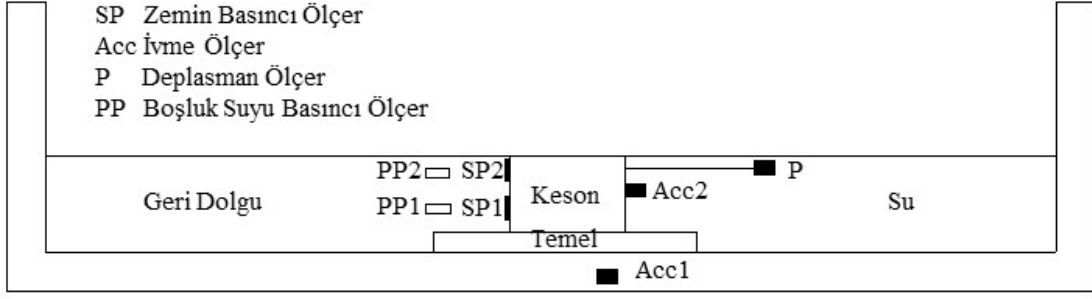
2. DENEY SİSTEMİ (EXPERIMENTAL SET-UP)

Keson tip yavaşma yapısının dinamik davranışını inceleyebilmek için 1g sarma tankı deneyleri Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı Liman Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bir serbestlik dereceli sarsma tankının boyutları 400 cm-100 cm- 100 cm'dir. Tank 4 ton yük kapasitesine sahiptir. Tank sadece yatay doğrultuda hareket edebildiğinden elde edilen ivmeler yalnızca yatay doğrultudaki ivme değerleridir. Diğer yönlerde harekete izin verilmemektedir. Deney sisteminin şematik görünüşü Şekil 1'de gösterilmektedir.

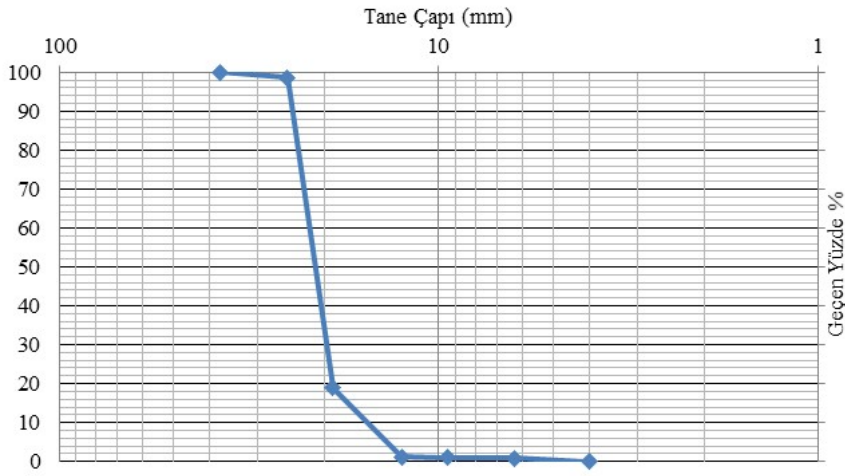
2.1. Malzemeler (Materials)

Sıvılaşmayan granüler malzeme, keson arkasındaki geri dolgu için kullanılmıştır. Bu malzeme üniform bir derecelendirmeye sahiptir ve fiziksel özellikleri Şekil 2 ve Tablo 1'de verilmiştir. Geri dolgu malzemesi ile keson modelinin tabanına 5 cm kalınlıklı bir çakıl temel oluşturulmuştur. Keson model betonon imal edilmiştir ve özgül ağırlığı 23 kN/m^3 'tür. Keson, 0,3 m uzunluğa (L), 0,25 m genişliğe (W) ve 0,2 m yüksekliğe (H) sahiptir.

Deneylerde keson arkasına yerleştirilen geri dolgu malzemesinin her deneyde aynı rölatif sıklığa (D_r) sahip olması için yağmurlama sistemi kullanılmıştır. Porozite, zemin tanelerini serme hızı, düşü yüksekliği rölatif sıklık için en önemli parametrelerdir. Düşü yüksekliği 65 cm



Şekil 1. Deney sistemi (Experimental set-up)



Şekil 2. Çakılın tane boyutu dağılım eğrisi (Grain size distribution curve of gravel)

olarak belirlenmiş ve her aşamada yağmurlama sistemi otomatik olarak kaldırılarak sabit tutulmuştur. Rölatif sıklık %70 olarak belirlenmiştir Yağmurlama sistemi bir dijital panel ile kontrol edilebilmektedir. Ayrıca yatay ve düşeyde istenilen miktarda hareket edebilmektedir. Şekil 3'te yağmurlama sistemi görülmektedir.

Tablo 1. Geri dolgu malzemesinin özellikleri
(Soil parameters for backfill)

Başlık	Değer
Özgül ağırlık (γ) (kN/m^3)	26,5
Maksimum boşluk oranı (e_{mak})	0,887
Minimum boşluk oranı (e_{min})	0,557
Boşluk oranı (e)	0,65
Eğrisellik katsayısı (C_c)	0,658
Üniformluk katsayısı (C_u)	2,875
İçsel sürtünme açısı (Φ) ($^\circ$)	40
Nominal çap (D_{n50}) (cm)	2,2

2.2. Modelin Hazırlanması (Model preparation)

Deneylerde aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Sarsma tablasının eni ikiye bölünerek 4m uzunluğa, 0,37 m genişliğe ve 1 m yüksekliğe sahip olan bölüm model

deneyleri için kullanılmıştır. Keson modeli sarsma tankına yerleştirildikten sonra geri dolgu malzemesinin serileceği bölümün uzunluğu 1,2 m olarak sabitlenmiştir.

- Keson modeli tank içine yerleştirmeden önce kesonun prototip şartlarındaki durumunu benzeştirebilmek için tankın her iki yanına betondan imal edilmiş 5 cm genişliğinde bloklar yerleştirilmiştir. Keson model bu blokların arasına konumlandırılmıştır.
- Keson model üzerine geri dolgu malzemesi basınç ölçer sensörleri yerleştirilmiştir (Şekil 1).
- Geri dolgu malzemesi yağmurlama sistemi yardımıyla serilmiştir (Şekil 1).
- İvme ölçerler ve deplasman ölçerler model üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 1).
- Sarsma tankı deneyleri sırasında tank yüzeylerinden suyun yansımaları engellemek için sönümlendiriciler tanka yerleştirilmiş ve sonrasında tank istenilen seviyeye kadar su ile doldurulmuştur. Deneylerde kullanılan su seviyesi kesonun üst seviyesine kadardır (Şekil 1).

Deneyler iki durum için gerçekleştirilmiştir. Birinci durumda, seçilen döngüsel yükleme için deneyler gerçekleştirilmiş ve bir sonraki deneyden önce model onararak yukarıdaki adımlar izlenmiştir. İkinci durumda ise, seçilen döngüsel yükleme için deney gerçekleştirildikten

sonra model onarılmamış, hasar görmüş model üzerine daha büyük etkiye sahip döngüsel yüklemeler peş peşe uygulanmıştır. Böylece bu tip bir yapıya peş peşe döngüsel yükleme uygulanması durumunda oluşacak yer değiştirme ölçümleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Durum14f deneyi gerçekleştirildikten sonra model yeniden inşa edilmeden sırasıyla 5 Hz, 6 Hz ve 7 Hz frekansa sahip döngüsel yüklemeler peş peşe uygulanmıştır. Tablo 2’de deney koşulları verilmiştir.



Şekil 3. Yağmurlama sistemi ve sarsma tankı (Raining system and shaking table)

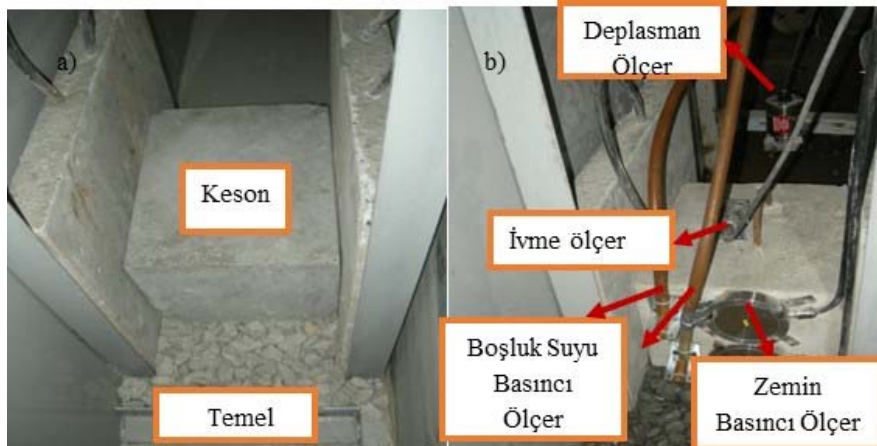
Tablo 2. Deneyler (Experiments)

Deneyler	Frekans (f) (Hz)
Durum13f	3
Durum14f	4
Durum15f	5
Durum16f	6
Durum17f	7
Durum24f	4
Durum25f	5(4 Hz sonrası)
Durum26f	6(4+5 Hz sonrası)
Durum27f	7(4+5+6 Hz sonrası)

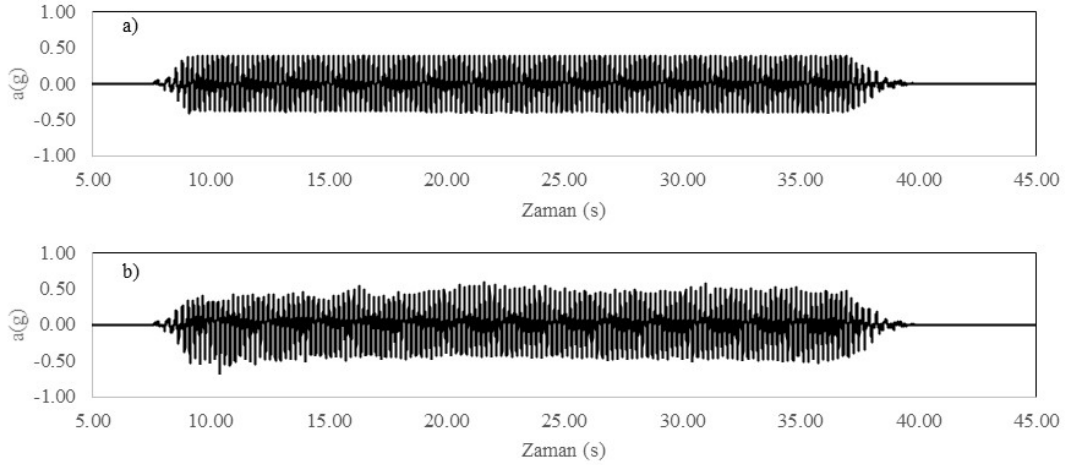
2.3. Ekipmanlar (Equipment)

Sarsma tankı deneyleri sırasında ivme ölçerler (PCB Piezotronics, IMC 626B13), geri dolgu malzemesi basınç ölçerleri (Tokyo Sokki Kenkyujo, KDE-200-KPA), deplasman ölçerler (UniMeasure, HX-PA serisi HX-PA-SS-L5M) ve boşluk suyu basıncı ölçerler (DRUCK-PDCR81) olmak üzere dört tip ölçüm cihazı kullanılarak model performansı ölçülmüştür. Veri kaydedici olarak 32 analog girişi olan bir IMC sistemi (Spartan-2) kullanılmıştır. Kesondan oluşan model için, Şekil 4a ve Şekil 4b’de gösterildiği gibi iki ivme ölçer, iki geri dolgu malzemesi basınç ölçeri, iki deplasman ölçer ve iki boşluk suyu basıncı ölçer kullanılmıştır. Tüm deneyler için ivme ölçerlerden biri, döngüsel yüklemenin taban ivmesini kaydetmek için model tankının dış yüzünde modelin altına yerleştirilmiştir, diğer ivme ölçer ise keson ivmesini kaydetmek için kesonun üzerine monte edilmiştir.

Geri dolgu malzemesi olarak granüler malzeme kullanılmıştır. San Antonia Limanı’nda bulunan blok tipi yanaşma yapısının geri dolgu malzemesi kütlesi 5-100 kg olan malzeme kullanılırken, Kalamata Limanı’ndaki blok tipi yanaşma yapısının geri dolgu malzemesi 1-50 kg’lık granüler malzemeler kullanılmıştır (PIANC [1]). Ayrıca, CUR [25]’de San Pedro Limanı’ndaki blok tipi yanaşma yapısının geri dolgu malzemesi 3-50 kg’lık malzeme ile oluşturulmuştur. Bu örnekler sonucunda pratikteki uygulamalarda geri dolgu malzemesinin nominal çapının $7 \text{ cm} < D_{n50} < 34 \text{ cm}$ olarak alınabileceği görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan malzemenin prototipteki karşılığı 22 cm’dir. Model ölçeği olarak 1/10 seçilmiştir ve kesonun prototipteki boyutları 3 m-2 m-2,5 m’dir. Model ve prototip arasındaki benzeşim için Iai [26] tarafından verilen benzeşim kuralları kullanılmıştır. 1g model deneyinde ölçek faktörünü basitleştirmek için hem prototip hem de model için geri dolgu malzemesi özgül ağırlığı prototipteki malzemenin modelde kullanılmasıyla sabit tutulmuştur. Bu deneyde kullanılan prototip ve model arasındaki benzeşim ilişkileri Tablo 3’te gösterilmektedir.



Şekil 4. Keson model ve ölçüm cihazları (Caisson model and instruments)



Şekil 5. Durum15f için ölçülen ivme ölçer tarihçeleri Durum15f a) Taban ivmesinin zamansal kaydı b) Keson ivmesinin zamansal kaydı (Recorded acceleration time histories for Case15f) a) Acceleration time history of base b) Acceleration time history of the caisson)

Tablo 3. Sunulan modeldeki ölçek faktörü (Scaling factors in present model)

Başlık	Ölçek faktörü	Prototip/model
Uzunluk	λ	10
Zaman	$\lambda^{0,75}$	5,62
İvme	1	1
Yer değiştirme	$\lambda^{1,5}$	31,62
Kuvvet	λ^3	1000
Özgül kütle	1	1
Basınç	λ	10

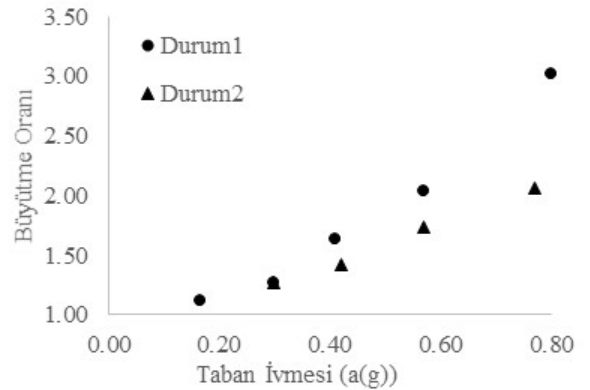
2. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. İvme (Acceleration)

Taban ivmesi ve keson ivmesini kaydetmek için iki ivme ölçer kullanılmıştır. Konumları Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 5'te deney sırasında kaydedilen tipik bir ivme kaydı (Durum15f) gösterilmektedir. Deneysel sonuçların değerlendirilmesinde, taban ivmesini belirlemek için, maksimum mutlak ivme olarak tanımlanan pik yer ivmesi $|PGA|$ kullanılmıştır. Pik yer ivmesi (PGA), pik ivme veya maksimum ivme ($|a_{(g)bmak}|$) olarak da adlandırılır (PIANC, 2001) [1]. Taban ivmesinin tanımına benzer şekilde, kesonun ivmesini tanımlamak için, deney sırasında ölçülen kesonun maksimum mutlak ivmesi ($|a_{(g)cmak}|$) kullanılmıştır. Tablo 4'te taban ve kesonun ivme değerleri döngüsel yükleme frekanslarına göre verilmiştir. Tablo 4'te verilen sonuçlara göre, döngüsel yükleme frekansının artması ile taban ve kesonun ivmesi artmaktadır. Bununla birlikte, tüm deneyler için büyütme oranları $|a_{(g)cmak}| / |a_{(g)bmak}|$ ile hesaplanmıştır. Durum1 ve Durum2'nin büyütme oranları Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi büyütme oranları, artan taban ivmesi değeri ile artmaktadır. Bununla birlikte, Durum1 için büyütme oranlarındaki artış Durum2'den daha fazladır.

Tablo 4. Sarsma karakteristikleri (Characteristics of shaking)

Deney (Karakus, (2013))	Frekans (f) (Hz)	$ a_{(g)bmak} $	$ a_{(g)cmak} $
Durum13f	3	0,166	0,186
Durum14f	4	0,300	0,380
Durum15f	5	0,410	0,670
Durum16f	6	0,570	1,160
Durum17f	7	0,800	2,410
Durum24f	4	0,300	0,380
Durum25f	5(4 Hz sonrası)	0,422	0,601
Durum26f	6(4+5 Hz sonrası)	0,570	0,986
Durum27f	7(4+5+6 Hz sonrası)	0,771	1,589



Şekil 6. Durum1 ve Durum2 için büyütme oranları (Amplification ratios for Case1 and Case2)

3.2. Boşluk suyu basıncı oluşumu (The excess pore pressure generation)

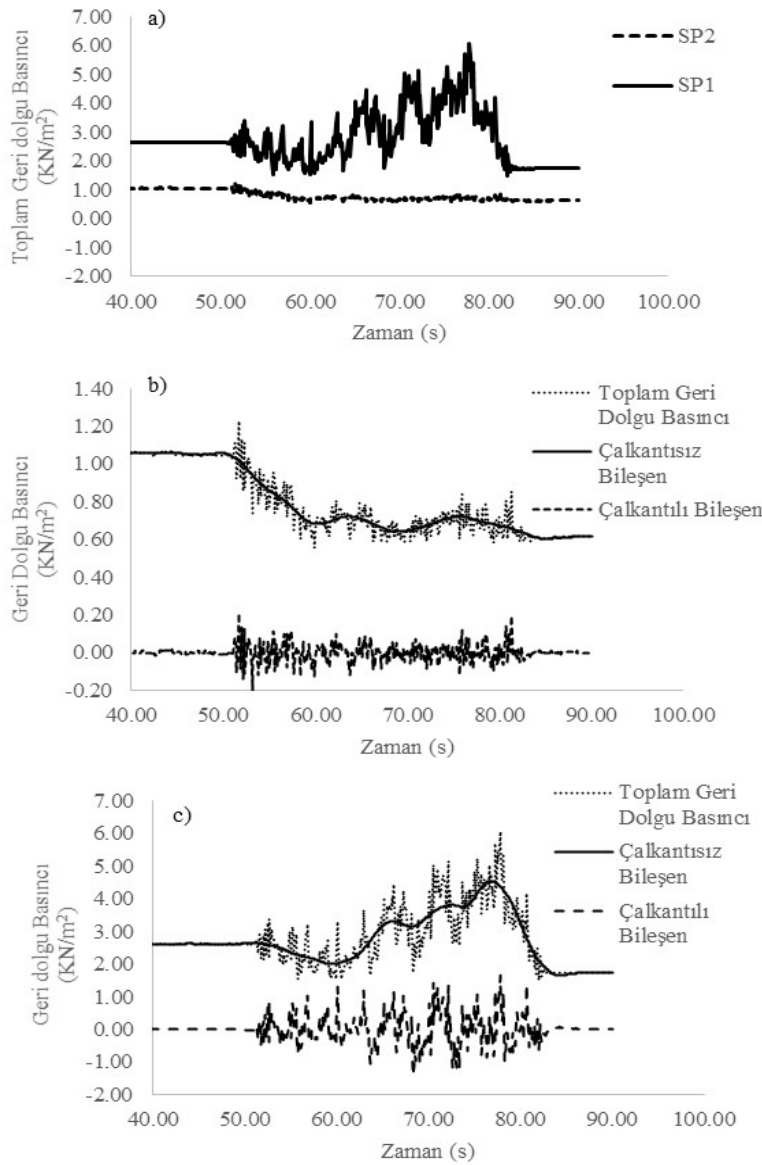
Boşluk suyu basıncının artması, geri dolgu malzemesi basıncı ve döngüsel yükleme altındaki yapıların yatay yer değiştirmeleri üzerinde önemli etkileri vardır. Kim vd. [12] boşluk suyu basıncı arttıkça geri dolgu malzemesinin giderek

bir akışkan gibi davrandığını, dolayısıyla geri dolgu malzemesinin hareketliliğinin arttığını belirtmiştir. Öte yandan, deneysel, sayısal ve analitik sonuçlar geçirgenlik arttığında boşluk suyu basıncı artışının yüksek değerlere çıkmadığını göstermiştir. Bu çalışmada, dolgu malzemesinde çakıl kullanılmıştır ve çakıl malzeme permeabilitesi yüksek olduğu için, önemli ölçüde boşluk suyu basıncı artışı oluşmamaktadır. Bu nedenle, boşluk suyu basıncı artışı ihmal edilmiştir.

3.3. Basıncı Dağılımları (Pressure Distributions)

Deneyler sırasında, keson üzerinde etkili olan geri dolgu malzemesi basınçları Durum1 ve Durum2 için iki geri dolgu

malzemesi basınç ölçeri ile ölçülmüştür. Basıncı ölçerlerin yüzey merkezleri kesonun üst kotundan 5 cm ve 15 cm altta ve kesonun taban seviyesi kesonun üst kotundan 20 cm alttadır. Kesonun taban seviyesinde meydana gelen geri dolgu malzemesi basıncı doğrusal ekstrapolasyon yöntemi ile hesaplanmıştır. Elde edilen geri dolgu malzemesi basıncı değerleri iki bileşene ayrılmıştır: çalkantılı ve çalkantsız bileşenler. Şekil 7a, SP1 ve SP2'de ölçülen toplam geri dolgu malzemesinin basınç kayıtlarını birlikte gösterirken, Şekil 7c, SP1 ve Şekil 7b SP2 için Durum16f'de ölçülen tipik bir toplam geri dolgu malzemesi basınç kaydını (doğru toplam geri dolgu malzemesi basıncı + hidrostatik ve hidrodinamik basınçlar) ve çalkantılı-çalkantsız bileşenleri göstermektedir. Şekil 7b'de görüldüğü gibi SP2 için toplam



Şekil 7. Durum16f'de ölçülen toplam geri dolgu malzemesi basıncı, çalkantsız basınç bileşeni ve çalkantılı basınç bileşeni a) SP1 ve SP2'de ölçülen toplam geri dolgu basıncı zaman serileri b) SP2'de ölçülen geri dolgu malzemesi basıncı zaman serileri c) SP1'de ölçülen geri dolgu malzemesi basıncı zaman serileri

(Total backfill pressure, non-fluctuating component and fluctuating component measured in Case16f a) is measured total backfill pressures in SP1 and SP2 b) is measured backfill pressure time series in SP2 c) is measured backfill pressure time series in SP1)

geri dolgu malzemesi basınç değerleri döngüsel hareketin başlamasıyla birlikte azalmaya başlamaktadır. Bu durum geri dolgu malzemesinin sıklığının artmasıyla oluşmaktadır. Bununla birlikte Şekil 7c'de SP1 için döngüsel hareketin başlamasıyla birlikte toplam zemin basınç değerlerinin öncelikle bir miktar azaldığı sonrasında ise ani olarak artışa geçtiği görülmektedir. Sadrekarimi vd. [27] yaptıkları çalışmada benzer durumla karşılaşmışlardır. Sadrekarimi vd. [27]'ne göre bu durumun sebebi sarsma hareketinin başlamasından sonra geri dolgu malzemesi basıncındaki hızlı artış ile duvarın yer değiştirmesi nedeniyle oluşan negatif aşırı boşluk suyu basıncının oluşmasıdır. 1g model testlerinde düşük gerilme seviyeleri altında genişleyen geri dolgu ve geçici olarak drenajsız koşullar oluşması nedeniyle dolgunun genişleme davranışı boşluk suyu basınçlarını azaltmaktadır.

Maksimum toplam kuvvetin meydana geldiği anı bulabilmek için anlık geri dolgu malzemesi basınç kayıtları kullanılarak, keson yüzeyinde oluşan geri dolgu malzemesi itki kuvveti zamansal olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu kuvvetlerin maksimum olduğu andaki çalkantılı ve çalkantısız basınç bileşenleri kullanılarak düşey doğrultuda oluşan basınç dağılımları elde edilmiştir. Şekil 8, farklı döngüsel yükleme Durum1 ve Durum2 için efektif çalkantısız basınç bileşenlerinin düşey dağılımını göstermektedir. Efektif çalkantısız basınç bileşenleri, statik su basınçlarının çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Aşağıdaki şekillerde görülebileceği gibi, Durum1'de ölçülen basınç dağılımı 7 Hz hariç Durum2'den daha büyüktür. Bunun nedeni, önceki döngüsel yükleme nedeniyle dolgu malzemesinin sıklığının artması ve yapı ile dolgu arasındaki etkileşimin Durum2'de azalmasıdır. Şekil 7'de görüldüğü gibi, suya doygun

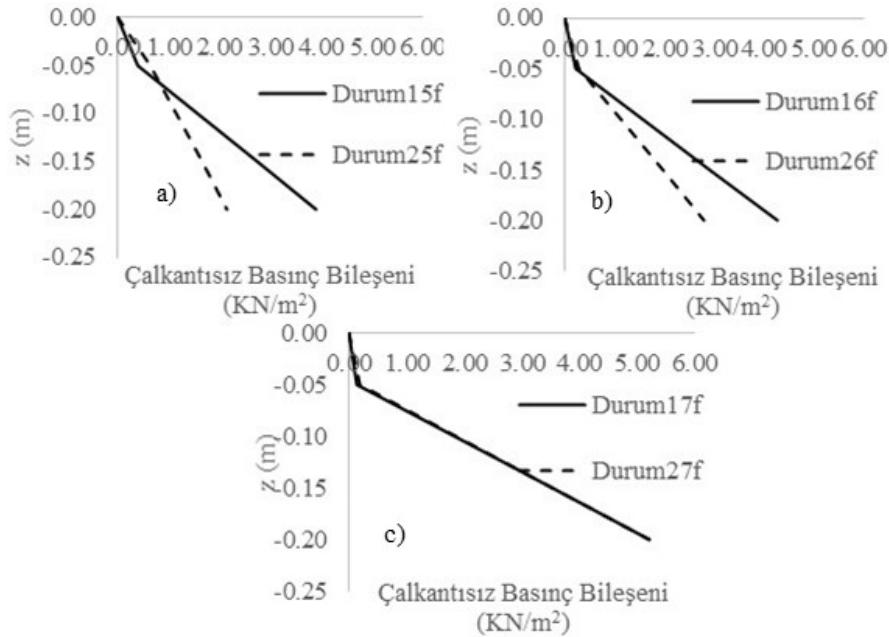
durumdaki geri dolgu malzemesinin statik basınçlarının döngüsel yüklemeye önce ve sonraki değerleri karşılaştırılırsa, doygun statik geri dolgu malzemesi basıncının yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı azaldığı görülmektedir.

Şekil 9, kesona etki eden toplam geri dolgu malzemesi basıncının maksimum olduğu anda meydana gelen basıncın çalkantılı bileşenini göstermektedir. Toplam çalkantısız bileşenlere benzer şekilde, Durum1'de üretilen basınç değerleri Durum2'den daha yüksektir.

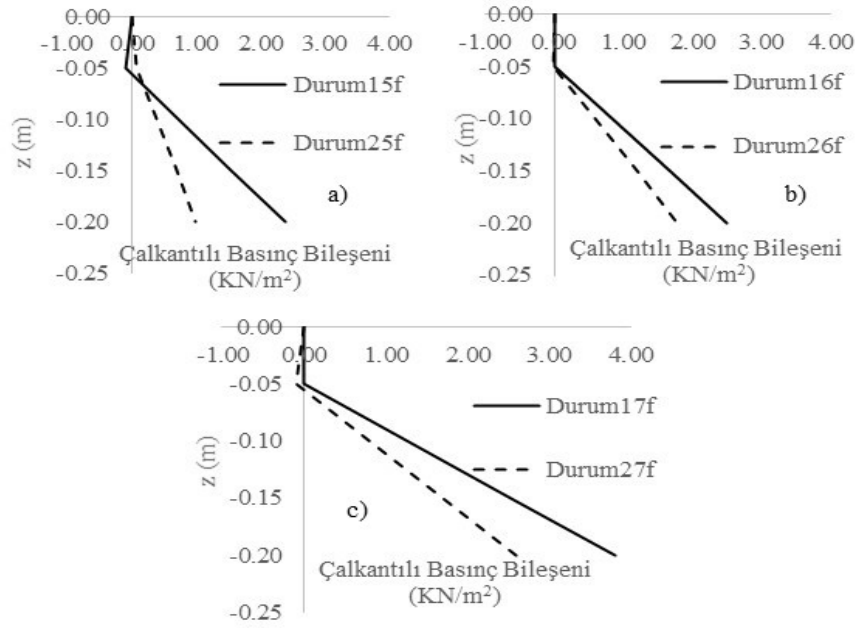
3.4. Yatay Yer Değiştirmeler ve Hasar Seviyeleri (Horizontal Displacements and Damage Levels)

Deneylerde anlık yatay yer değiştirmeleri kaydetmek için keson üzerine deplasman ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 1). Deney süresi Durum1 için 30 s ve Durum2 için 20 s olarak seçilmiştir. Tablo 5, Durum1 ve Durum2 için 20 s sonunda ölçülen yatay yer değiştirmeleri göstermektedir. Şekil 10, Durum15f için tipik anlık yer değiştirme kaydını göstermektedir. Şekil 11, ivmelere karşılık gelen rölatif (d/H) yer değiştirmeleri göstermektedir. Durum2'deki yer değiştirme değerleri Durum1'den belirgin bir şekilde daha düşüktür. Bunun nedeni, önceki döngüsel yüklemenin bir sonucu olarak geri dolgu malzemesinin sıkışması ve ayrıca keson hareketinin bir sonucu olarak yapı-zemin etkileşiminin azalmasıdır. Tablo 5, deney koşullarını ve yer değiştirme ölçümlerini göstermektedir.

Deney sonuçlarından d/H kullanılarak kesonun yatay yer değiştirmelerini dikkate alan hasar seviyeleri elde edilmiştir. d yer değiştirme ve H kesonun yüksekliğidir. Şekil 11'de



Şekil 8. Durum1 ve Durum2 için Efektif çalkantısız basınç bileşeninin düşey dağılımı
(Vertical distributions of the effective non-fluctuating component for Case1 and Case2)



Şekil 9. Durum1 ve Durum2 için çalkantılı basınç bileşeninin düşey dağılımı
(Vertical distributions of fluctuating component for Case 1 and Case2)

Tablo 5. Sonuçların özeti (Summary of the results)

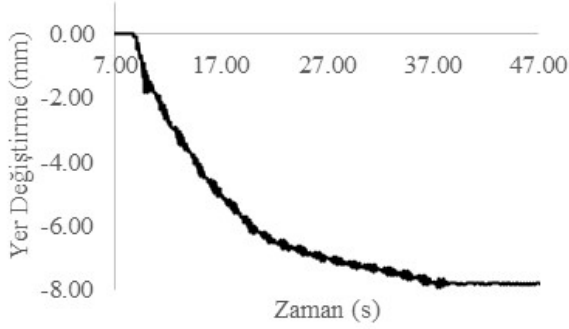
Deney (Karakus, (2013))[28]	Frekans (f) (Hz)	Taban İvmesi (a_g)	Yer değiştirme (d) (mm) (20.s sonunda)	Kümülatif Yer değiştirme (mm)	Rölatif yer değiştirme (d/H)	Kümülatif Rölatif yer değiştirme (d/H)
Durum13f	3	0,166	0,127	-	0,0006	-
Durum14f	4	0,300	2,396	-	0,012	-
Durum15f	5	0,410	6,248	-	0,031	-
Durum16f	6	0,570	74,960	-	0,375	-
Durum17f	7	0,800	81,560	-	0,408	-
Durum24f	4	0,300	2,396	2,396	0,012	0,012
Durum25f	5(4 Hz sonrası)	0,422	4,039	6,435	0,020	0,032
Durum26f	6(4+5 Hz sonrası)	0,570	37,660	44,095	0,188	0,220
Durum27f	7(4+5+6 Hz sonrası)	0,771	22,017	66,112	0,110	0,331

deney sonuçlarına göre kesonun hasar seviyeleri gösterilmiştir. PIANC [1]'de ağırlık tipi yanaşma yapılarının performans sınırları, kalıcı yer değiştirmenin ağırlık tipi yanaşma yapısının yüksekliğine oranı olarak verilmiştir (% d/H). Bu tanıma göre, minimum hasar (MH) $d/H = 0,015$ olduğunda ve kontrollü hasar (KH), $d/H = 0,015 - 0,05$ olduğunda, $d/H = 0,05-0,10$ olduğunda ileri hasar (İH) ve $d/H > 0,10$ olduğunda göçme hasar durumu (GH) meydana gelmektedir. Şekil 11'den görüldüğü gibi, taban ivmesi 0,3g civarında iken minimum hasar seviyesi, her iki durumda taban ivmesi 0,4g civarında iken kontrollü hasar seviyesine ulaşmaktadır. İvme değerleri 0,4 g'dan yüksekse, hasar tüm durumlar için hızla göçme seviyesine ulaşmaktadır.

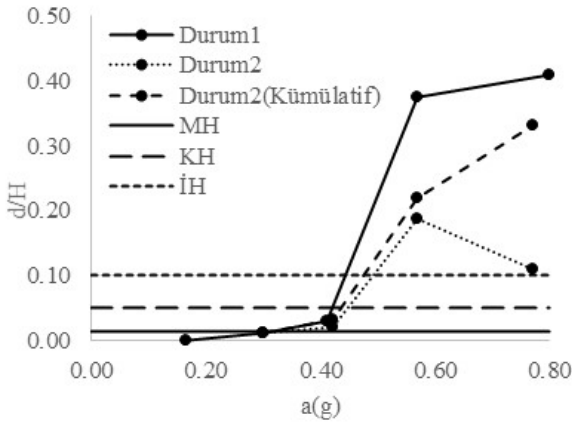
Özellikle Durum1 için keson hasarı Durum2'den daha yüksektir.

3.5. Dinamik Sürtünme Katsayısı (Dynamic Friction Coefficient)

Beton keson ve geri dolgu malzemesi arasındaki dinamik sürtünme katsayıları 1 g sarsma tankı deney sonuçları değerlendirilerek hesaplanmıştır. İvme ölçümleri, yer değiştirmeler Mendez vd., [22] tarafından önerilen bir yöntem kullanılarak dinamik sürtünme katsayılarını hesaplamak için kullanılmıştır. Şekil 12 eğimli bir düzlemde kayan rijit bloklar üzerinde etkili olan kuvvetleri göstermektedir.

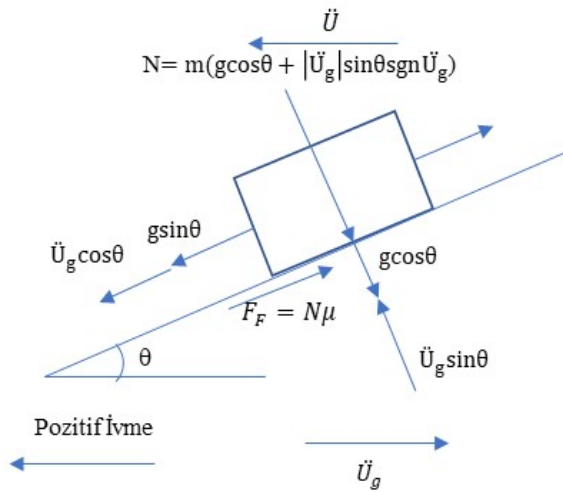


Şekil 10. Anlık yer değiştirme kaydı (Durum15f)
(Instantaneous displacements record (Case15f))



Şekil 11. Durum1 ve Durum2'nin rölatif yer değiştirmelerine karşı döngüsel yüklemenin ölçülen maksimum ivmesi (MH: Min. Hasar, KH: Kontrollü hasar, İH: İleri hasar)

(Relative displacements of Case1 and Case2 versus measured maximum accelerations of cyclic loadings (MD:Min.Damage; CD:Contr Damage; NC:Near Colapse))



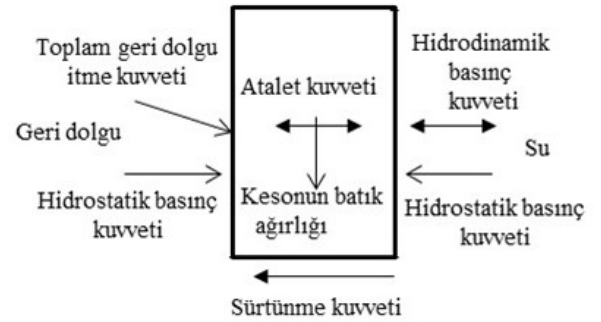
Şekil 12. Eğimli bir düzlemdeki rijit blok üzerine etkili kuvvetler (Mendez vd. 2009)

(Forces acting on rigid block sliding on an inclined plane (Mendez et al, [22]))

N normal kuvvet, m kayan bloğun kütlesi, g yerçekimi ivmesi, θ eğim açısı, $\ddot{U}_g(t)$ tabanda mutlak zamansal ivme ve $\ddot{U}(t)$ kayan bloğun mutlak zamansal ivmesi, $\mu(t)$ anlık dinamik sürtünme katsayısı, μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Statik sürtünme katsayısı (μ_s), eğilme testi ile 0,55 olarak belirlenmiştir. Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği'nde [29] ve OCDI'da [30] verilen 0,6 değerine yakındır. Mendez vd. [22] anlık sürtünme katsayısını ($\mu(t)$) belirlemek için aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$\mu(t) = (\mu_s - \tan\theta) - \frac{(|\ddot{U}_g(t)| - |\ddot{U}(t)|) \cos\theta - g \sin\theta}{Nm^{-1}} \quad (1)$$

Bu çalışmadaki deney koşulları kesonun arkasında dolgu malzemesini ve kesonun her iki tarafında keson üst kotuna kadar olan suyu içermektedir. Ayrıca keson ve geri dolgu malzemesi düz bir zemine yerleştirilmiştir. Şekil 13'te, döngüsel yüklemeye sırasında keson üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Buna göre, ortaya çıkan geri dolgu malzemesi itme kuvveti, hidrodinamik kuvvet ve direnç kuvvetlerinin bileşkesi kesonun atalet kuvvetine eşit olacaktır.



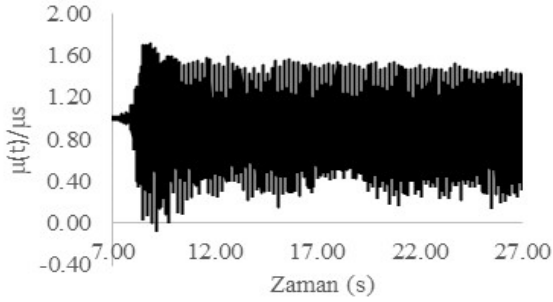
Şekil 13. Kesona etkili kuvvet bileşenleri
(Force components acting on caisson)

Deneylerde, kesonun anlık ivme kayıtları deney çıktısı olarak alındığından, Eş. 1'de $\mu(t)$ hesaplamasında sadece keson ve taban ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu eşitlikte, kesonun batık ağırlığı, N, 195 N, kesonun kütlesi, m, 35 kg, yer çekimi ivmesi, g, 9,81 m/s², eğim açısı, θ , 0°, tabanda mutlak zamansal ivme, $|\ddot{U}_g(t)|$ ve kayan bloğun mutlak zamansal ivmesi, $|\ddot{U}(t)|$, keson için 1 g sarsma tablası deney sonuçlarına göre belirlenmiştir. Eş. 2 kullanılarak, bu çalışmadaki deney şartlarına göre anlık sürtünme katsayısı zamansal olarak elde edilmiştir.

$$\mu(t) = (\mu_s - \tan\theta) - \frac{(|\ddot{U}(t)| - |\ddot{U}_g(t)|)}{Nm^{-1}} \quad (2)$$

Şekil 14'te, hesaplanan anlık sürtünme katsayıları ile statik sürtünme katsayısı arasındaki oranın 1 civarında salındığı görülmektedir. Keson ivmesi taban ivmesinden daha yüksekse, bu oran 1'den düşüktür, aksi takdirde 1'den yüksektir. Şekil 14, anlık sürtünme katsayısının statik sürtünme katsayısından daha yüksek veya daha düşük olabileceğini göstermektedir. Özellikle geri dolgu malzemesinin varlığı liman tarafına doğru keson hareketini

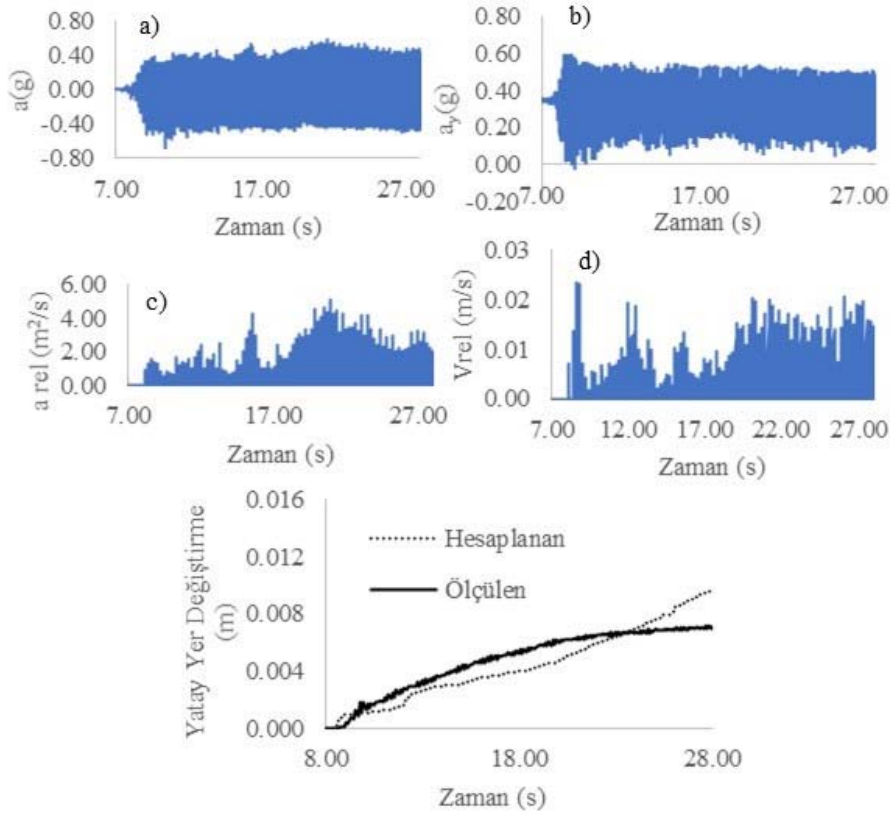
kısıtladığından anlık sürtünme katsayısı statik sürtünme katsayısından daha yüksek olacaktır. Öte yandan, keson deniz tarafına doğru hareket ettiğinde, anlık sürtünme katsayısı azalmakta ve statik sürtünme katsayısından daha düşük değerlere eşit olmaktadır. Mendez vd. [22], taban ivmesi keson ivmesinden çok büyük değerler aldığı, keson ve taban yüzeyi arasındaki sürtünmenin yok olabileceğini ve bu durumda sürtünme katsayılarının negatif değerlerinin ortaya çıkabileceğini belirtmişlerdir. Bu noktada sürtünme katsayısı sıfıra yakın bir değerin etrafında salınmaya başlamaktadır.



Şekil 14. Durum15f için rölatif anlık sürtünme katsayıları (Relative instantaneous friction coefficient for Case15f)

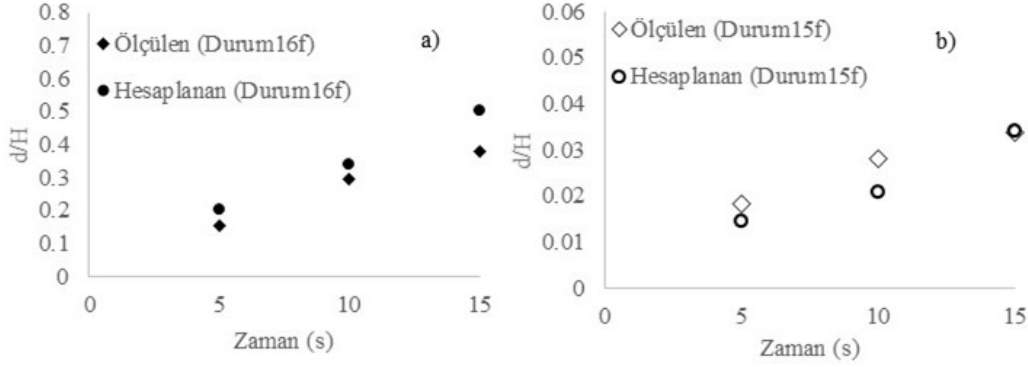
Newmark kayan blok yöntemi, deprem sırasında meydana gelen yapı yer değiştirmelerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır, çünkü sadece duvarın ağırlığı, dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı ve temel malzemesi ile yapı arasındaki sürtünme katsayısı gibi temel tasarım parametreleri kullanılarak uygulanmaktadır. Richard ve Elms ve Whitman ve Liao [31, 32], duvarın sismik yer değiştirmesini belirlemek için Newmark kayan blok yöntemine dayanan basitleştirilmiş dinamik analizler önermişlerdir. Newmark kayan blok yöntemi, kayma için güvenlik faktörünün 1,0 olduğu andaki ivme değerini, yenilme ivmesi (a_y) olarak tanımlamaktadır. Daha sonra duvarın yer değiştirmesi, yenilme ivmesini aşan taban ivmesinin iki kez integralinin alınmasıyla elde edilmektedir (Kim vd. [12]). Bu çalışmada keson deplasmanları, hesaplanan anlık yenilme ivmelerini aşan keson ivmesinin iki kez integralinin alınmasıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, kesonun sadece denize doğru hareket edebileceği ve rölatif sıklığı yüksek olan temel tabakasındaki hasarların ihmal edilebilir olduğu varsayılmıştır.

Bu çalışmada, keson yer değiştirmesi elde edilirken aşağıdaki adımlar izlenmiştir;



Şekil 15. a) Durum15f için ölçülen keson ivme kaydı, b) Hesaplanmış anlık yenilme ivmesi, c) Anlık rölatif ivme, d) Anlık keson hızları ve e) anlık yer değiştirmeler

a) the measured caisson acceleration record for Case15f, b) instantaneous calculated yield acceleration, c) instantaneous relative acceleration, d) instantaneous caisson velocities and e) instantaneous displacement)



Şekil 16. a) Durum16f için hesaplanan ve ölçülen rölatif yer değiştirmelerin zamana göre değişimi b) Durum15f için hesaplanan ve ölçülen rölatif yer değiştirmelerin zamana göre değişimi a) Time variation of calculated and measured relative displacements for case16f b) variation with time of calculated and measured relative displacements for case15f

1- Sürtünme kuvvetlerini elde etmek için anlık sürtünme katsayıları keson ağırlığı ile çarpılmış ve sürtünme kuvveti keson kütlesine bölünerek, sürtünme kuvvetine eşit olacak atalet kuvvetini veren ivme değeri bulunmuştur. Bu ivme değeri, hareketin başlangıcını temsil eden yenilme ivmesini ifade etmektedir.

2- Rölatif ivme değerleri, hesaplanan anlık yenilme ivmesinden kesonun ölçülen ivme değerlerinin çıkarılmasıyla hesaplanmıştır (Eş. 3).

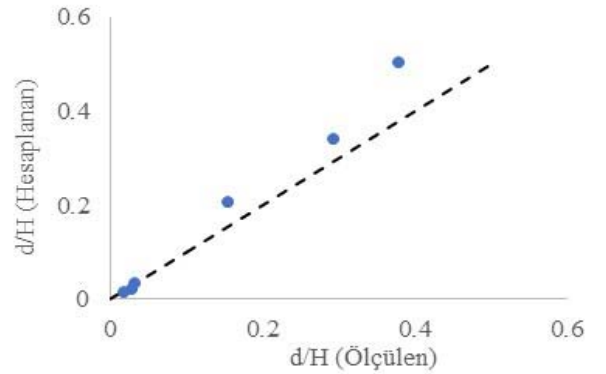
$$a_{rel}(t) = a(t) - a_y(t) \quad (3)$$

Eğer $a_{rel} > 0$ ise, keson deniz tarafına doğru hareket etmekte, aksi takdirde keson hareketsiz kabul edilmektedir.

3- Kesonun yatay yer değiştirmesi, kesonun zamansal rölatif ivmelerinin (a_{rel}) iki kere integralinin alınmasıyla elde edilmiştir.

Şekil 15a-Şekil 15e, sırasıyla Durum15f için ölçülen keson ivme kaydını, anlık hesaplanan yenilme ivmesini, anlık rölatif ivmeyi, anlık keson hızlarını ve anlık yer değiştirme değerlerini göstermektedir. Şekil 15'de kesonun hesaplanan ve ölçülen yatay yer değiştirmelerinin keson hareketinin başlangıcından itibaren 10 saniye içinde birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Ölçülen ve hesaplanan keson yer değiştirmeleri arasındaki uyumluluk, deney süresinin yaklaşık 15. saniyesinde azalmaktadır. Bunun nedenleri şu şekilde açıklanabilir; 15. s'den sonra geri dolguda oluşan deformasyonlar ve kesonun deniz tarafına doğru yaptığı yer değiştirmelerden kaynaklı olarak yapı-geri dolgu etkileşimi oldukça azalmıştır. Bu sebepten dolayı döngüsel hareket devam etmesine rağmen, geri dolgu etkileşimi azaldığından kesonun yer değiştirme hızı oldukça azalmaktadır. Bunun sonucunda, hesaplama yöntemine göre elde edilen yer değiştirmeler ile ölçülen yer değiştirmeler arasındaki fark giderek artmaktadır. 15 s'lik döngüsel hareket prototip koşullarında gerçek bir deprem durumunu temsil edebilecek uzunluğa sahiptir. Şekil 16a, 16b ve Şekil 17, ölçülen ve hesaplanan rölatif yer değiştirmeler arasındaki ilişkiyi

göstermektedir. Durum15f ve Durum16f için hesaplanan yer değiştirmeler ile deneylerde ilk 15 s içinde ölçülen yer değiştirmeler arasındaki fark sırasıyla %25 ve %32'dir. Bu değerlere göre, ilk 15 saniyede ölçülen ve hesaplanan yer değiştirmeler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Durum14f'de hesaplanan yer değiştirmeler düşük taban ivmesi nedeniyle çok düşüktür, Durum17f'de ise hesaplanan yer değiştirmeler yüksek taban ivmesi nedeniyle ölçülen yer değiştirmelere göre oldukça fazla çıkmıştır. Bu iki deney için, hesaplanan ve ölçülen rölatif yer değiştirmeler arasında uyum yakalanamamıştır. Öte yandan, Durum17f'de keson üzerinde ölçülen ivme değerleri, çok kısa döngüsel yüklenme süresinde göçme hasar seviyesine neden olmuş ve kısa sürede geri dolgu malzemesinde büyük hasar meydana gelmiştir. Bu nedenle rölatif ivme değerlerinin iki kere integrasyonu ile yer değiştirme hesaplamalarının uygulanabilirliği bu durum için geçerli değildir. Bu sonuçlar ışığında, keson ve geri dolgu malzemesi arasındaki sürtünme katsayısının, döngüsel yüklenme sırasında statik sürtünme katsayısı olarak tanımlanan sabit bir sürtünme değerine sahip olmadığı ve anlık sürtünme katsayısının statik sürtünme katsayısından daha büyük veya daha küçük olabildiği söylenebilmektedir.



Şekil 17. Durum15f ve Durum16f için 5, 10, 15. s'lerde ölçülen ve hesaplanan yer değiştirmeler arasındaki ilişki (Relation between measured and calculated relative displacements for 5, 10, 15. s of test duration for Case15f and Case16f)

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada keson tipi rıhtım yapısının döngüsel yüklemeye altındaki davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla iki farklı Durum ele alınmıştır. Durum1, kesona farklı frekanslarda döngüsel yüklemeler uygulanmış ve hasarlı yapı (yer değiştirme ölçümlerine göre) her deneyden sonra onarılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Durum2’de, Durum1’de kullanılan döngüsel yüklemeler hasarlı yapı onarılmadan art arda uygulanmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak, şu sonuçlara varılmıştır:

- Durum1’de ölçülen geri dolgu malzemesi basınçlarının çalkantsız ve çalkantılı bileşenleri Durum2’de oluşan çalkantılı ve çalkantsız basınç değerlerine göre daha yüksektir. Bunun nedeni, Durum2’de modelin peş peşe döngüsel yüklemeye maruz bırakılmasından dolayı geri dolgu malzemesi sıklığının artması ve yapı-zemin etkileşiminin azalmasıdır.
- Durum2’deki yer değiştirme değerleri Durum1’den önemli ölçüde daha düşüktür. Bunun nedeni, önceki döngüsel yüklemenin bir sonucu olarak geri dolgu malzemesinin sıkışması ve ayrıca hareketin sonucu olarak yapı-zemin etkileşiminin azalmasıdır. Bu tip yapılar, küçük onarımlarla 0,40 g’a kadar olan döngüsel yüklemelere karşı stabil olabilmektedirler. Öte yandan, Durum1’in yer değiştirmeleri Durum2’den daha yüksek olmasına rağmen, PIANC [1] tarafından tanımlanan hasar kriterlerine göre 0,40 g’a kadar stabil kalabilmektedirler.
- μ_s olarak gösterilen geri dolgu malzemesi-keson arasındaki statik sürtünme katsayısı sürtünme testi ile yaklaşık 0,55 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, hesaplanan anlık dinamik sürtünme katsayıları ve statik sürtünme katsayısı arasındaki oran 1 civarında salınmaktadır. Bu durum döngüsel yüklemeye sırasında, yapı ve geri dolgu malzemesi arasındaki sürtünme katsayısının statik sürtünme katsayısına eşit kalamayacağı anlamına gelmektedir. Keson ivmesi, taban ivmesinden daha yüksekse, bu oran 1’den düşüktür, aksi durumda ise 1’den yüksektir. Diğer yandan, frekansı yüksek döngüsel yüklemeye, düşük dinamik sürtünme katsayısına neden olmaktadır.
- Durum15f ve Durum16f için rölatif ivmenin iki kere integralinin alınmasıyla hesaplanan yer değiştirmeler ile deneylerde ilk 15 sn içinde ölçülen yer değiştirmeler arasındaki fark sırasıyla %25 ve 32’dir. Ancak 20. s’de bu farklar sırasıyla %40 ve %80’e yükselmektedir. Bu sebeple hesaplanan ve ölçülen yer değiştirmelerin ilk 15 s’lik süre içinde uyumlu olduğu söylenebilir. Bu deney süresi, 1/10 model ölçeği dikkate alınarak prototipteki döngüsel yüklemeye için anlamlı olmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, “Blok Tipi Yanaşma Yapılarının Basitleştirilmiş Dinamik Analizi” projesine sponsor olan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TÜBİTAK) teşekkür eder. (Proje No: 111Y006).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. PIANC, Seismic design guidelines for port structures, Rotterdam: Balkema, 2001.
2. Sugano, T., Morita, T., Mito, M., Sasaki, T. ve Inagaki, H. Case Studies of Caisson Type Quay Wall Damage by 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Eleventh world conference on earthquake engineering, Elsevier Science Ltd., 1996
3. Sumer, B. M, Ansal, A., Cetin, K.O, Damgaard, J., Gunbak, A.R, Hansen, N.O, Sawicki, A., Synolakis, C.E, Yalciner, A.C., Yuksel, Y., Zen, K., Earthquake-Induced Liquefaction around Marine Structures, Journal of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering © ASCE, 133 (1), 55-82, 2007.
4. Cihan, H. K, Ergin, A., Cihan, K., Guler, I., Dynamic responses of two blocks under dynamic loading using experimental and numerical studies, Applied Ocean Research, 49, 72-82, 2015.
5. Yuksel, Y., Yuksel, Z. T., Cevik, E., Orhan, K., Berilgen, M., Evaluation of the seismic performance of a caisson and an L-type quay wall, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92, 537–550, 2017.
6. Woodward PK, Griffiths DV., Comparison of the pseudo-static and dynamic behavior of gravity retaining walls, J Geotech Geol Eng, 14:269–90, 1996.
7. Ghalandarzadeh A, Orita T, Towhata I, Yun. F., Shaking table tests on seismic deformation of gravity quay walls, Soils Found, 38 (2), 115–32 (Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, Hyogoken-Nambu Earthquake), 1998.
8. Zeng X., Seismic response of gravity quay walls—I: centrifuge modeling, J Geotech Geoenviron Eng; 124 (5), 406–17, 1998.
9. Madabhushi SPG, Zeng X., Seismic response of gravity quay walls—II: numerical modeling, J Geotech Geoenviron Eng; 124 (5), 418–27, 1998.
10. Dewoolkar MM, Ko HY, Pak RYS., Experimental developments for studying static and seismic behavior of retaining walls with liquefiable backfills, Soil Dyn Earthq Eng, 19, 583–93, 2000.
11. Kim SR, Kwon OS, Kim MM., Evaluation of force components acting on gravity type quay walls during earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 853–66, 2004.
12. Kim SR, Jang IS, Chung CK, Kim MM., Evaluation of seismic displacements of quay walls, Soil Dyn Earthq Eng, 25, 451–9, 2005.
13. Lee CJ., Centrifuge modeling of the behavior of caisson-type quay walls during earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 117–31, 2005.
14. Choudhury D, Ahmad SM., Design of waterfront retaining wall for the passive case under earthquake and tsunami, Appl Ocean Res, 29, 37–44, 2007.
15. Choudhury D, Ahmad SM., External stability of waterfront reinforced soil structures under seismic conditions using a pseudo-static approach, Geosynth Int, 16 (1), 1–10, 2009.

16. Na UJ, Chaudhuri SR, Shinozuka M., Probabilistic assessment for seismic performance of port structures, *Soil Dyn Earthq Eng*, 28, 147–58, 2008.
17. Mostafavi Moghadam AA, Ghalandarzadeh A, Towhata I, Moradi M, Ebrahimian B, Haji Alikhani P., Studying the effects of deformable panels on seismic displacement of gravity quay walls, *Ocean Eng*, 36, 1129–48, 2009.
18. Mostafavi Moghadam AA, Ghalandarzadeh A, Moradi M, Towhata I, Haji Alikhani P, Displacement reducer fuses for improving seismic performance of caisson quay walls, *Bull Earthquake Eng* 9, 1259-1288, 2001.
19. Maleki S, Mahjoubi S., A new approach for estimating the seismic soil pressure on retaining walls, *Sci Iran*, 17 (4), 273, 284, 2011.
20. Tiznado F, Roa R., Seismic lateral movement prediction for gravity retaining walls on granular soils, *Soil Dyn Earthq Eng*, 31, 391–400, 2011.
21. Torisu SS, Sato J, Towhata I, Honda T., 1-g model tests and hollow cylindrical torsional shear experiments on seismic residual displacements of fill dams from the view point of seismic performance-based design, *Soil Dyn Earthq Eng*, 30, 423–37, 2010.
22. Mendez, B.C., Botero, E., Romo, M.P., A New Friction Law for Sliding Rigid Blocks Under Cyclic Loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 874–882, 2009.
23. Hsieh, Y.M., Lee, K.C., Jeng, F.S., Huang, T.H., Can Tilt Tests Provide Correct Insight Regarding Frictional Behavior of Sliding Rock Block Under Seismic Excitation? *Engineering Geology*, 122 (1), 84-92, 2010.
24. Memos, C.D. and Protonotarios, J. Patras breakwater failure due to seismic loading, 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, Chapter 225, 3343-3356, 1992.
25. Center for Civil Engineering research and Codes (CUR), Quay Wall Hand Book, 717 Pages, published by CUR, PO Box 420, 2800 AK, Gouda, The Netherland, ISBN 0 415 364396, 2005.
26. Iai, S., Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *Soils and Foundations*, 29 (1), 105-118, 1989.
27. Sadrekarimi, A., Ghalandarzadeh, A., Sadrekarimi, J., Static and Dynamic Behavior of Hunchbacked Gravity Quay Walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 99–117, 2008.
28. Karakus, H., Experimental And Numerical Studies On Block Type Quay Walls Under Dynamic Loading, PhD Thesis, Middle East Technical University, 2013.
29. Turkish Seismic Code for Coastal and Harbor Constructions, Railway, Airport Constructions, Official Gazette No. 26617 and 27092, 2008.
30. The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (OCDI), Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan [Goda Y, Tabata T, Yamamoto S, Trans.], Daikousha Printing Co., Ltd.; 2009.
31. Richards R, Elms D. Seismic behavior of gravity retaining walls, *J Geotech Eng Div*, 105 (4), 449–64, 1979.
32. Whitman RV, Liao S. Seismic design of retaining walls, Miscellaneous paper GL-85-1, US Army engineer waterways experiment station, Vicksburg, MS, 1985.

