



PhD Research Article / Doktora Çalışması Araştırma Makalesi
EARTHQUAKE BEHAVIOR OF BREAKWATERS SEATED ON
LIQUEFIABLE SOILS

Murat E. SELÇUK*, Kutay ÖZAYDIN, Mehmet BERİLGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler-İSTANBUL

Received/Geliş: 05.01.2012 Accepted/Kabul: 22.05.2012

ABSTRACT

One of the most important problems seen in soils under the influence earthquake motion is liquefaction phenomena. Liquefaction problems were widely observed in 1999 Kocaeli Earthquake in our country. After this devastating earthquake great loss of life and property and large effects to economy took place. Not only do port structures support country's economy which is surrounded by water on three sides, but also will have a great responsibility in enabling aid to be delivered after the expected Marmara earthquake. For this reason it is very important for the breakwaters to fulfill their duties, which is to protect the port structures, after earthquakes. In this study, behavior of breakwaters built on liquefiable soils under earthquake effects is investigated. 1g scaled model experiments are done on a shaking table built in the laboratory. According to model experiment results, liquefaction is observed in the first cycles of cyclic horizontal displacement motion when the magnitude of input acceleration is sufficiently high. Moreover, failure occurs at the toe of breakwater due to liquefaction.

Keywords: Liquefaction, breakwater.

SIVILAŞABİLEN TABAKALAR ÜZERİNDE İNŞA EDİLEN DALGAKIRANLARIN DEPREMLER
SIRASINDAKİ DAVRANIŞI

ÖZET

Deprem sarsıntısı altında zeminlerde görülen en önemli problemlerden birisi de sıvılaşma olgusudur. Sıvılaşma problemleri 1999 Kocaeli depreminde ülkemizde yaygınca görülmüştür. Yaşanan yıkıcı deprem sonrası büyük miktarda can ve mal kayıpları oluşmuş, ülke ekonomisine de büyük etkileri olmuştur. Üç tarafı denizlerle çevirili ülkemizde liman yapılarının beklenen Marmara depremi sonrasında işlevine devam etmesi hem ekonomiyi destekleyecek hem de olası yardımların ülkemize ulaşmasında büyük sorumluluk taşıyacaktır. Bu nedenle liman yapılarını koruyan dalgakıranların deprem sonrasında görevini yerine getirebiliyor olması çok önemlidir. Bu çalışma kapsamında sıvılaşabilen zeminler üzerine inşa edilmiş dalgakıranların deprem etkileri altındaki davranışı incelenmiştir. Laboratuvar ortamında oluşturulan büyük bir sarsma tankı yardımıyla 1g ölçekli model deneyler gerçekleştirilmiştir. Model deney sonuçlarına göre tabanda uygulanan ivme büyüklüğü arttıkça, çevrimsel yatay deplasman hareketin ilk çevrimlerinde sıvılaşma görülmeye başlamaktadır. Ayrıca dalgakıran kesitinde topuk bölgesinde sıvılaşmaya bağlı olarak göçme yaşanmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Sıvılaşma, dalgakıran.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: meselcuk@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 52 33

1. GİRİŞ

Büyük depremler oluşması ender olaylar olmalarına karşın, endüstrileşme ile birlikte artan nüfus ve yerleşim nedeniyle can kaybının yanında ekonomik olarak da büyük zararlar vermektedir. Bu nedenle, depremlerin yarattığı zararları azaltmak ve deprem performanslı yapılar inşa etmek için tüm dünya genelinde çalışmalar yürütülmekte, tasarım şartnameleri hazırlanmaktadır. Sıvılaşma ile ilgili ilk çalışmalar 1964 Alaska Depremi ve 1964 Niagata Depremleri sonrasında başlamıştır.

Sıvılaşma, zeminlerin deprem gibi tekrarlı yükler altında boşluksuyu basıncı artışları sonucu efektif gerilmelerin sıfır değerine yaklaşması sonucu viskoz sıvı gibi davranması olayına denir. Tekrarlı yükleri tanımlamak gerekirse depremler, patlama ve şevlerin ani göçmesi anında oluşacak şok etkileri, dalga etkileri sayılabilir. Bu yüklerle maruz kalacak zeminlerde büyük deformasyonlar, şev stabilitesi kayıpları, sıvılaşma, gömülü yapılarda artan eğilme momentleri gibi değişik problemler ile karşılaşmaktadır. [1, 2]. Zeminin sıvılaşmasıyla boru hatları yüzeye doğru çıkar, liman yapıları deniz tabanına batar. Kum kaynamaları, zemin fissürleri ve yanal ötelenmeler sıvılaşma kanıtlarıdır[3].

Geçmiş depremlerde deniz yapılarında sıvılaşma kaynaklı hasarlar görülmüştür. Örneğin 1995 Hyogo-ken Nanbu depreminde deniz yapılarında da büyük hasarlar gözlemlenmiştir. (Şekil 1)



Şekil 1. Sıvılaşma Örnekleri. a) Dayanma yapısındaki göçme ve yanal yayılma, Kobe 1995
b) Rıhtım yapısının yanal ötelenmesi, Port Island, Kobe 1995 (www.ce.washington.edu)

2. KONUYA İLİŞKİN ÇALIŞMALAR

Deniz yapılarının ve özel olarak dalgakıranların deprem performansları ve sıvılaşma ile ilişkisi konularında çalışmalar oldukça sınırlıdır. Depremlerde dalgakıranlarda oluşan hasarlar iki nedenden kaynaklanmaktadır: Birincisi hidrodinamik kuvvetler, ikincisi ise sismik kuvvetler. Ancak dalgakıranların tasarımlarında sismik kuvvetler dikkate alınmadan stabilite analizleri yapılmaktadır. Geri dönüşüm periyotlarına göre dalga yüksekliği tahmini sonrasında izin verilecek hasar seviyesine göre stabilite katsayısı ve ona bağlı olarak kullanılacak taş, xbloc, coreloc vs malzeme büyüklükleri hesap edilmektedir. Dalga etkileri nedeniyle zamana bağlı hasarlar oluşabilmekte, gelişen hasar boyutuna göre dalgakıran üzerine yeni taşlar konarak hasar giderilmektedir. Sismik etkiler altında gösterdiği davranış hakkında detaylı araştırmalar yapılmamıştır. Bu duruma karşın, toprak dolgular ve barajlar gibi benzer yapıların sismik davranışları ise daha iyi bilinmektedir. Dalgakıranlar ile barajlar arasındaki en önemli fark,

barajların sert zemin veya iyileştirilmiş zemin üzerine inşa edilmeleri, dalgakıranların ise yumuşak deniz tabanı üzerine inşa edilmeleridir[4].

Depremlerin barajlara olan etkileri birçok araştırmacı [5,6] tarafından incelenmiştir. Toprak dolgular ve barajların sismik davranışlarının santrifüj deneyleri ile araştırılması [1,7,8,9] çalışmaları yapılmıştır. Deniz yapılarında deprem kaynaklı sıvılaşma ile ilgili çalışmaların yapıldığı ülkeler ise [10], Şili; [11,12], Japonya; Hall [13], Amerika; [14], Taiwan; [15,16], Türkiye; Yunanistan; [17] olarak sıralanabilir.

Deniz yapıları etrafında görülen deprem kaynaklı sıvılaşma ile ilgili geniş değerlendirme çalışmaları Sumer, vd. 2007[18], tarafından açıklanmıştır. Groot, 2006[19], çalışmasında ise deniz yapıları ile ilgilenen geoteknik mühendisi olmayan profesyoneller için sıvılaşma altyapısı oluşturmak amacı ile tanımlamalar yapılmıştır.

2001-2004 yılları arasında Avrupa Birliği 5. Çerçeve Programı kapsamında LIMAS(Liquefaction Around Marine Structures) isimli çalışmada sunulan deniz yapıları etrafındaki sıvılaşmaya ilişkin araştırmalar sunulmuştur. Çalışmada öncelikle deniz yapıları etrafında öncelikle dalga etkisinde sıvılaşma olasılığı incelenmiş ve bir bölüm olarak da 1999 yılımızda ülkemizde gerçekleşen deprem etkilerine deprem hasarlarına özel referansla deniz yapıları altında gerçekleşebilecek sıvılaşma konusu araştırılmıştır.

1999 Kocaeli depreminin deniz yapıları üzerinde hasar verici etkileri olmuştur. (Şekil 2.)



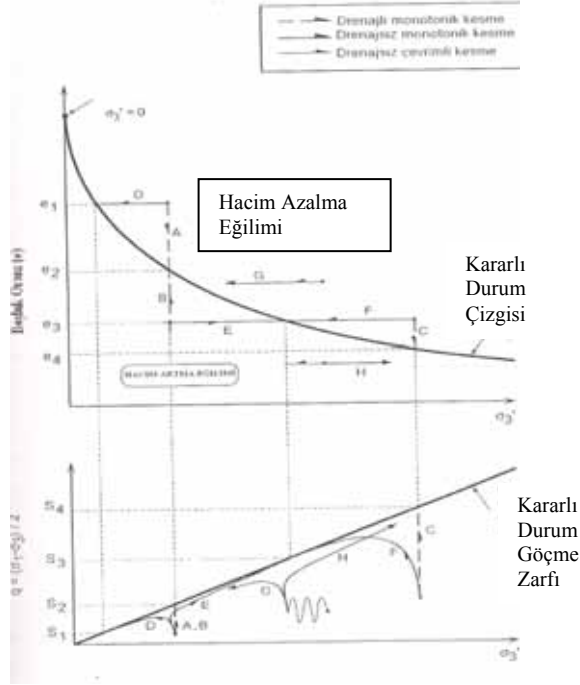
Şekil 2. Derince Limanı Kocaeli Depremi 1999 Sıvılaşma nedeniyle oluşan deformasyon (Limas)

Yüksel, vd.(2003)[20] çalışmasında 1999 Kocaeli Depreminde Körfez bölgesindeki tüm deniz yapılarında oluşan hasar sınıflaması gösterilmiştir. Sumer, vd.(2002)[16] çalışması ise, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde 24 kıyı-liman yapısında oluşan hasarlara ilişkin bir inceleme yayınıdır. Memos vd.(2000)[21] çalışmasında, sarsma tankı üzerinde iki farklı dalgakıran modeli oluşturularak dalgakıranların sismik etkiler altındaki davranış incelenmiştir. Birinci modelde sert bir zemin üzerine oturan dalgakıran modellenmiş, ikinci modelde ise yumuşak bir zemin üzerine oturan dalgakıran modellenmiştir.

3. SUYA DOYGUN ZEMİNLERİN STATİK VE DİNAMİK YÜKLEME ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞI

Kumların yüklemeler altındaki davranışını etkileyen en önemli faktör boşluk oranı ve buna bağlı olarak hesaplanan göreceli sıklık oranıdır. Sıklık oranlarına göre kumlar üç ana sınıfta değerlendirilebilir. $Dr \leq 40$ gevşek, $41 < Dr < 70$ orta sıkı, $Dr \geq 71$ ise sıkı olarak sınıflandırılmaktadır. Boşluk oranı ile ilgili diğer önemli kavram ise kritik boşluk oranıdır.

Cassangrande (1936) [22] aynı çevre basıncına sahip sıkı ve gevşek kum numuneler üzerinde yaptığı drenajlı üç eksenli deney sonuçlarına göre, yüklemeye devam edildiğinde iki numunenin de aynı boşluk oranına ulaşır sabit deformasyona uğradıklarını gözlemiştir. Bu durumda oluşan boşluk oranı kritik boşluk oranı olarak adlandırılmaktadır.



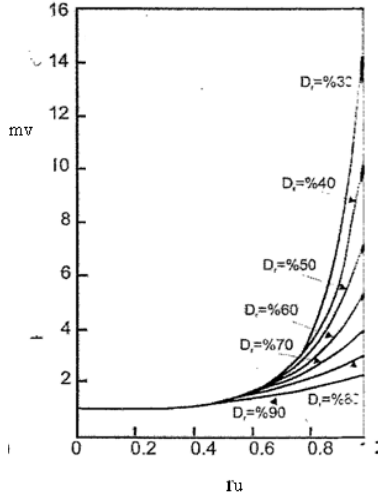
Şekil 3. Kararlı durum çizgisi ve yükleme ilişkileri [23]

Poulos(1981)[24] tarafından kararlı durum teorisine göre, bir zeminde meydana gelen kayma birim deformasyonları sabit boşluk oranında sabit gerilme altında sabit şekil değiştirme hızında meydana geliyorsa bu zeminin kararlı duruma ulaştığı ifade edilmektedir. Zeminlerin dinamik ve statik yüklemeler altında kararlı duruma gelmeleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Statik kesme deneylerinde aynı boşluk oranına sahip iki zeminde (B ve C), daha yüksek çevre gerilmesine sahip olan zeminin daha yüksek kayma mukavemetinde kararlı duruma ulaştığı görülmektedir. Dinamik yüklemelerde ise kararlı durum çizgisinin altındaki H numunesinde hacim artışı beklenmesi gerekirken, çevrimsel hareketlilik gözlemlenmektedir. Buna karşın kararlı durum çizgisinin üzerindeki zeminler çevrimsel yüklendiğinde kayma gerilmesi daha düşük değer almaktadır. Bu durum akma sıvılaşması olarak adlandırılmaktadır[25].

Akma sıvılaşması, suya doymuş kohezyonsuz gevşek zeminlerin başlangıçta kararlı durum çizgisinin üzerinde olması halinde tekrarlı yüklemeler sonucunda zeminin sıvılaşma şekli olarak tanımlanmaktadır.

Depremlerden sonra suya doymuş zeminlerde meydana gelen oturmalar, artık boşluksuyu basıncını sönmülmesi neticesinde oluşan konsolidasyon oturmaları ve danelerin yeniden daha sıkı bir yerleşimde çökelmeleri sonucu meydana gelmektedir. Çevrimli yükleme ile artık boşluksuyu basıncının gelişmesi ve buna bağlı olarak oluşan hacimsel sıkılaşma ilişkilerine yer Şekil 4'te verilmiştir. Seed (1976)'da[26], artık boşluksuyu basıncı oranı r_u ' nun

0.9 olduğu durumlarda rölatif sıkılığın artması ile hacimsel sıkışma katsayısı m_v , büyük azalış göstermektedir.



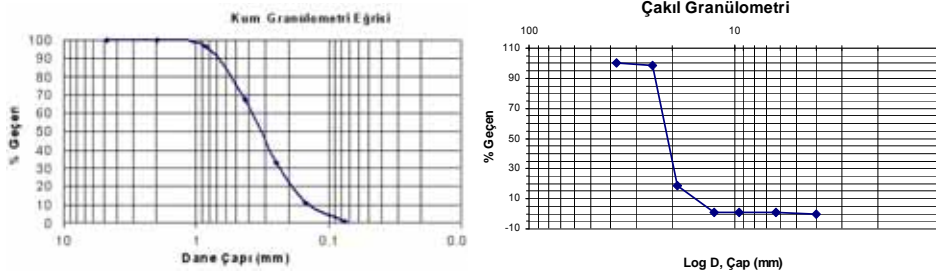
Şekil 4. $R_u - m_v$ ilişkisi[26]

4. MATERYAL VE YÖNTEM

DeneySEL çalışmalarında kullanılan zemine ait mühendislik parametrelerini elde etmek için granülometri, piknometre, direkt kesme, üç eksenli basınç ve basit kesme deneyleri yapılmıştır.

4.1. Zeminlerin İndeks Özellikleri

DeneySEL çalışmalarında model dalgakıranına temel oluşturulması için kullanılan kum Şile yöresinden temin edilmiştir. İndeks özelliklerinin belirlenebilmesi için elek analizleri ve özgül yoğunluk deneyleri yapılmıştır. Elek analizi sonuçları Şekil 5'de görülmektedir. Elek analizi sonuçlarından görüleceği üzere, deneySEL çalışmalarda dalgakıran malzemesi olarak kullanılan çakıl ve kum zeminler USC Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırmasına göre; kötü derecelendirilmiş kum (SP) ve kaba çakıldır. Zeminlerin en küçük ve en büyük boşluk oranı değerleri Çizelge1.'de görülmektedir.



Şekil 5. Kum ve çakıl malzemesine ilişkin elek analizi

Çizelge 1. Kum ve çakıl malzemesinin indeks özellikleri

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP	İri Çakıl %81.04 Çakıl %18.96
Özgül Yoğunluk, G_s	2.65	2.68
En Büyük Boşluk Oranı, e_{max}	0.87	0.64
En Küçük Boşluk Oranı, e_{min}	0.53	0.52

4.2. İçsel Sürtünme Açısı

Model deneyde kullanılan kum malzemesinin içsel sürtünme açılarının elde edilmesi için direkt kesme ve basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Direkt kesme deneyleri $D_r = \%70$ ve $\%50$ rölatif sıklık için, 1.27 mm/dk kesme hızında 25 kPa, 50 kPa ve 100 Pa olan üç farklı konsolidasyon basıncı altında yapılarak içsel sürtünme açıları bulunmuştur. $D_r = \%50$ için $\phi = 35,75^\circ$, $D_r = \%70$ için ise $\phi = 36,35^\circ$ olarak elde edilmiştir.

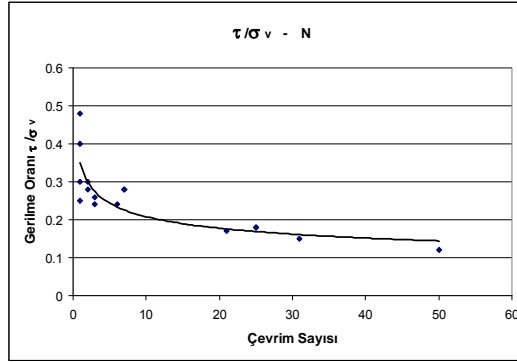
Basit kesme deneylerinde $D_r = \%70$ ve $\%50$ sıklıkta numuneler hazırlanmış ve 50,100, 200 kPa konsolidasyon basınçları altında, her basınç kademesinde iki deney yapılarak kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. $D_r = \%70$ için $\phi = 35,75^\circ$ bulunurken $D_r = \%50$ için ise $\phi = 33,12^\circ$ bulunmuştur.

4.3. Çevrimli Basit Kesme Deneyi

Model deneyde temel zemini olarak kullanılacak kum malzemenin dinamik davranışını belirlemek için YTÜ İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim dalı laboratuvarında bulunan Geocomp marka Çevrimli Basit Kesme deney aletinde gerilme kontrollü deneyler yapılmıştır. Hazırlanan kuru ve su altında numuneler üzerinde değişik τ / σ_v oranları ve farklı frekans değerleri için çevrimli basit kesme deneyleri tekrarlanmıştır.

Deneylerde uygulanacak frekans aralığını belirlemek için 1 Hz ve 0.2Hz frekansında ön deneyler yapılmış, deney sisteminin kullanım kitapçığında belirtildiği üzere de 1 Hz altında olan yüklemelerde kayma gerilmeleri kontrolünün daha iyi sağlandığı görülmüştür. $D_r = \%50$ rölatif sıklıkta hazırlanan kuru ve suya doymun numuneler üzerinde 0.2 Hz -1Hz frekansında, 50 – 100 – 200 – 300 - 400 kPa 'lık düşey gerilmeler altında, 0.1 – 0.5 arasında τ / σ_v gerilme oranlarında ve 50 çevrim sayısında 35 civarında çevrimli basit kesme deneyi yapılmıştır. Kayma şekil değiştirmesinin $\pm \gamma = \%5$ değerine ulaşması durumunda zeminde göçme oluştuğu, kayma dayanımının aşıldığı kabul edilmiştir.

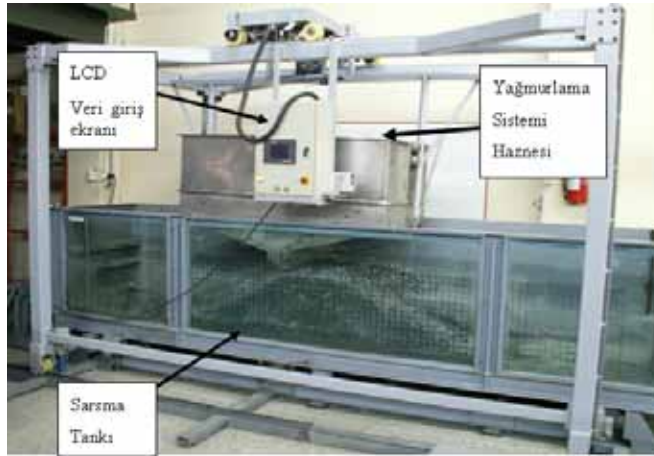
Literatürdeki çalışmalardan da bilindiği üzere büyük gerilme oranlarının ($\tau / \sigma_v > 0.2$) zemine uygulanması mümkün olmamakta, ilk çevrimden itibaren kayma dayanımının aşıldığı görülmektedir. Gerilme oranı ile göçmeye yolaçan çevrim sayısı arasındaki ilişki Şekil 6'da gösterilmektedir. Yüksek gerilme oranlarında kayma dayanımı ilk çevrimlerde aşılmakta, gerilme oranı azaldıkça kayma dayanımının aşılması için daha yüksek çevrim sayılarında yük uygulanması gerekmektedir.



Şekil 6. Gerilme oranı – göçmeye yolaçan çevrim sayısı ilişkisi (Dr=%50)

4.4. Model Deney Sistemi

Model deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı Liman Laboratuvarında mevcut olan 4.5 m uzunluğunda, 1.0 m genişliğinde ve 1.0m yüksekliğinde bir sarsma tankı, 1 mm - 20 mm arasında doğrusal hareket ile farklı frekanslarda bir yönde (x yönünde) salınım verilebilecek şekilde hazırlanan bir güç iletim sistemi, istenen rölatif sıklıkta malzeme yerleştirebilmeyi sağlayan yağmurlama sistemi, ivme ölçer ve boşluksuyu basınç ölçerlerden oluşan bilgisayar destekli ölçüm sisteminden oluşan bir model deney sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.).



Şekil 7. Model deney sistemi- sarsma tankı ve yağmurlama sistemi

Çevrimli yükleme 3 mm genliğinde 20 sn süresince 3 Hz, 4Hz, 5Hz ve 6 Hz frekansa sahip sinuzoidal hareketler uygunlanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ivme değerlerinin model deneyin kütlesine de bağlı olarak 0.1 g-0.6 g arasında değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.

Model deneylerde, yağmurlama sisteminin kapak açıklığı ve düşme yüksekliği ayarlanarak dalgakıran altında homojen bir tabaka oluşturulmuştur. Su altında yapılan deneylerde, 30 cm su yüksekliği üzerine, 20cm yüksekte 1 cm yağmurlama ağız açıklığı ile sabit hızda yağmurlama yapılarak Dr=%40 sıklıkta homojen tabakalar elde edilmiştir.

Model deneylerde, sisteme tabandan uygulanan çevrimli yatay hareket ve model üzerinde oluşan ivmeler dört adet ivme ölçer yardımıyla, çevrimli gerilmeler nedeniyle kum zemin içerisinde oluşacak boşluksuyu basınçları ise altı adet boşluksuyu basınç ölçer aracılığı ile tüm ölçerlerin bağlı olduğu bilgisayarlı veri kayıt sistemine kayıt edilmiştir. Boşluksuyu basınç sensörü olarak DRUCK PDCR81 modeli kullanılmıştır. Deneyler sırasında oluşan ivmelerin ölçülmesi için sarsma tankının alt noktasında ve model deney sistemi içerisinde konumlandırılmış olan PCB Piezotronics ve IMI tarafından üretilen tek eksenli ivme sensörleri kullanılmıştır.

Model deney sırasında sistemde ölçülen dijital boşluksuyu basınç değerleri ile ivme değerleri LABVIEW ortamında hazırlanmış olan veri toplama programı ile bilgisayar ortamına kaydedilmektedir. Volt cinsinden gelen sinyaller sensörlere ait kalibrasyon değerleri ile kPa ve g cinsinden sonuçlara dönüştürülerek gelen sinyaller saniyede 1000 örnekleme ile kaydedilmektedir. Ayrıca, model deney sırasında oluşacak deformasyonların görüntülenebilmesi için 1 saniye aralıklı JPG formatında görüntüler bilgisayar ortamına kaydedilmektedir

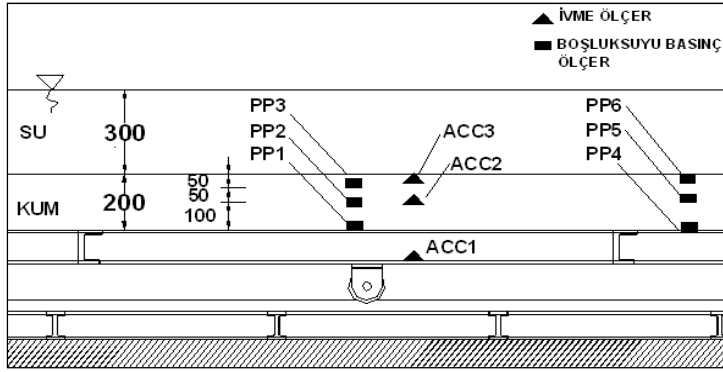
5. MODEL DENEYLER

Model deneyler iki ana çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 20 cm kalınlığında %40 rölatif sıklıkta suya yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış kum tabaka tabanında çevrimli yatay yerdeğiştirme hareketleri uygulanarak suya doygun kum tabakasında oluşan ivme ve boşluksuyu basınçları ölçülmüştür. İkinci aşama deneylerde ise 40 cm kalınlık ve %40 rölatif sıklıkta suya yağmurlama yöntemiyle bir kum tabakası hazırlanmış, daha sonra bu kum tabaka üzerinde ½ kenar şev eğimine sahip 40 cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesiti oluşturulmuştur. Kum tabaka tabanında çevrimli yatay yer değiştirmeler uygulanırken kum temel zemininde oluşan boşluksuyu basınçları birinci aşamada olduğu gibi tabaka tabanı, ortası ve yüzeye yakın bir noktada, ivme ölçümleri ise kesit tabanında, temel tabakası yüzeyi ile dalgakıran şevi ve kreinde kaydedilmiştir.

5.1. Birinci Aşama Deneyler

Birinci aşama model deneyler 20 cm kalınlığında %40 rölatif sıklıkta 30 cm yüksekliğindeki su içine yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış bir kum tabakası üzerinde yapılmıştır. Sisteme tabanında uygulanan tekrarlı yatay yerdeğiştirme hareketinin yolaçtığı ivme değerlerini ölçmek için kesit tabanına, kesit ortasına ve kesit yüzeyine ivme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 8). Boşluksuyu basıncı artışlarını ölçmek için ise kesit tabanına(H), kesit ortasına (H/2) ve kesitin üstten 5 cm 'sine (H/4) olmak üzere üç farklı noktaya boşluksuyu ölçerler yerleştirilerek tekrarlı hareket nedeniyle oluşan boşluksuyu basınçları kayıtları alınmıştır. Ayrıca, kum tabakası içerisinde aynı derinliklerde olmak üzere farklı bir kesitte üç boşluksuyu ölçer daha yerleştirilerek diğer ölçerlerle karşılaştırılması yapılmıştır. İvme ölçerler(ACC) ve boşluksuyu basıncı ölçerlerin(PP) konumları Şekil 8'de gösterilmiştir.

Çevrimsel taban hareketleri 5 Hz frekansında, 3 mm genişliğinde ve 20 saniye süresince uygulanarak oluşan ivme ve boşluksuyu basınçları ölçülmüştür. Çevrimli hareketin öncesinde 5-6 s durağan durumda kayıt alınarak kayıt sistemi kontrol edilmiş, 20 s uygulanan hareket sonrasında da sönümlenmenin gözlemlenmesi için kayıt alınmaya devam edilmiştir.



Şekil 8. Sensörlerin yerleşimi

5.1.1. Deneysel Sonuçları

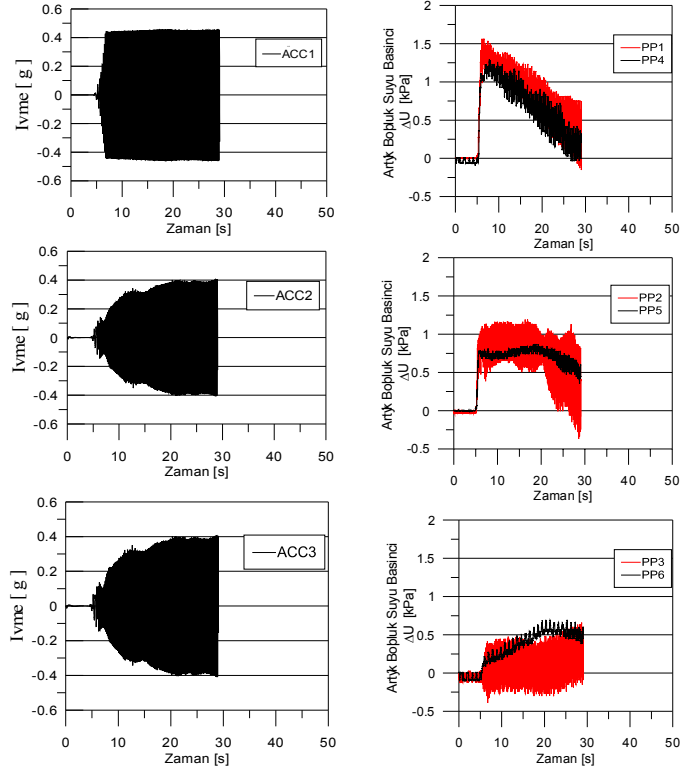
Çevrimsel taban yer değiştirme hareketi sonucunda kesit tabanında ivme genliği 0.45g olan dinamik bir hareket uygulandığı ölçülmüştür (Şekil 9). Kesit ortasında ve yüzeyinde ölçülen ivme değerleri incelendiğinde ivme değerinin 0.40 g seviyesinde olduğu görülmektedir.

5 Hz frekansında uygulanan taban hareketi etkisinde ($a=0.45g$) ölçülen maksimum boşluksuyu basınçları yüzeyde 0.6 - 0.4 kPa, H/2 derinliğinde 1.0 - 0.8 kPa ve tabanda 1.5 - 1.2 kPa olarak ölçülmüştür (Şekil 9). Boşluksuyu basıncı oranı r_u değerlerine bakıldığında ise tabanda ve tabaka ortasında ilk saniyelerde 0.6 ve 0.8 değerlerine çıkıp zamanla azaldığı, yüzeyde ise 15 saniye sonunda 1 değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 9).

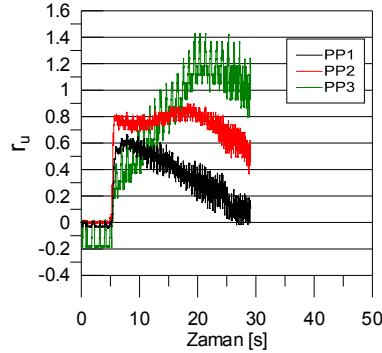
Model deney sistemine uygulanan çevrimli taban yer hareketinin etkisinde kum tabakasında oluşan boşluksuyu basıncı oranı r_u değerinin ilk çevrimlerden itibaren arttığı, yüzeyde hesaplanan r_u değerinin tabandaki r_u değerlerine göre daha büyük olduğu görülmektedir. Yüzeyden 5 cm aşağıda ölçülen artık boşluksuyu basınçları tabanda ölçülen boşluksuyu basınçlarına göre biraz daha az olurken, yüzeye yakın noktada yer alan sensör seviyesinde düşey efektif gerilme çok düşük olduğundan hesaplanan r_u değerleri daha yüksek çıkmaktadır.

5.2. İkinci Aşama Deneyler

İkinci aşama deneylerde 40 cm kalınlığındaki kum zemin tabakası üzerinde 40 cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesiti oluşturularak, temel tabakası tabanında sinuzoidal dinamik yükleme yapılarak model deney gerçekleştirilmiştir. Deneysel sistemde 30 cm su yüksekliği içerisine 20 cm yükseklikten yağmurlama tekniğiyle kum boşaltılarak $D_r=40\%$ sıklıkta 40 cm kalınlığında, 300 cm uzunluğunda ve 100 cm genişliğinde bir kum tabakası oluşturulmuştur. Bunun üzerine 40 cm yüksekliğinde 1:2 kenar şev eğimine sahip bir dalgakıran kesiti yağmurlama tekniği ile yerleştirilmiştir. Dalgakıran kesiti, 30 cm yüksekliğindeki çekirdek ve 10 cm kalınlığındaki anroşman malzemesinden oluşmaktadır. Su yüksekliği ise dalgakıran tabanından 30 cm yukarıdadır (Şekil 11).



Şekil 9. Ölçülen ivme ve boşluksuyu basınçları

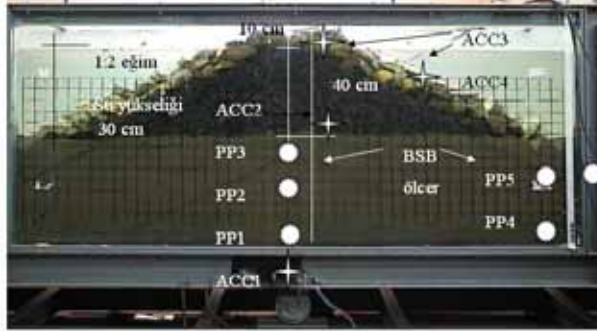
Şekil 10. Sensörlere ait r_u – zaman grafikleri

Model deneylerde, dalgakıran ve kum temel zemininin çevrimsel yüklemeye altındaki davranışını incelemek için üç farklı durum gözönüne alınmıştır. Bunlar:

(1) 40 cm kalınlığında sıvılaşılabilen bir kum tabakası üzerine yerleştirilen 40 cm yüksekliğinde bir dalgakıran kesitinin davranışının incelenmesi,

(2) Daha önce dinamik yüklemeye maruz kalmış bir dalgakıran kesitinin tekrar daha şiddetli bir dinamik dinamik yüklemeye maruz kalması durumundaki davranışının incelenmesi,

(3) Çevrimli yüklemesi sonrası deformasyona uğrayan dalgakıran kesiti onarıldıktan sonra (ekstra malzeme ve yağmurlama tekniği ile yeniden dalgakıran kesitinin oluşturulması) tekrar çevrimsel yüklemeye maruz bırakılması durumundaki davranışının incelenmesi.



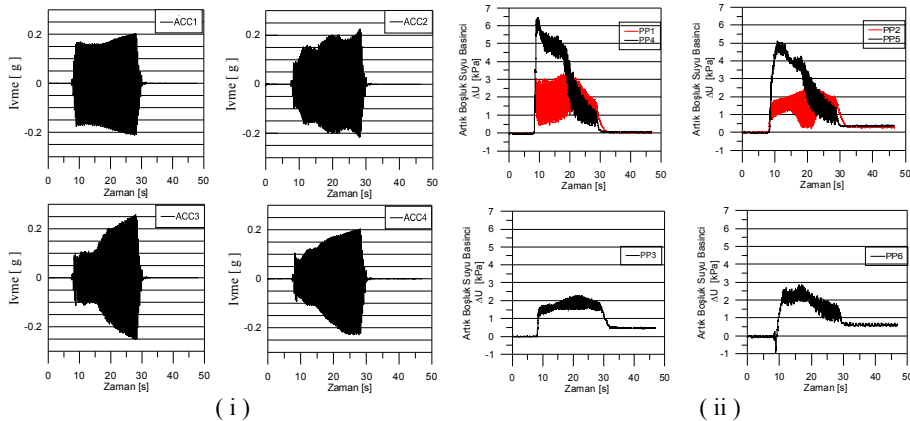
Şekil 11. Model deney kesiti ve sensör yerleşimi

Deney Sonuçları

Deney 1: 3mm genişliğinde 4 Hz frekansında çevrimli taban yer değiştirme hareketine maruz bırakılan sıvılaşılabilen tabaka üzerinde yerleştirilmiş dalgakıran modelinde, 20 sn sonunda kette 25cm mertebesinde düşey oturma, topuk bölgesinde ise sıvılaştıran zemin içerisine batma ve 25cm mertebesinde yatay ötelenme gözlemlenmiştir.

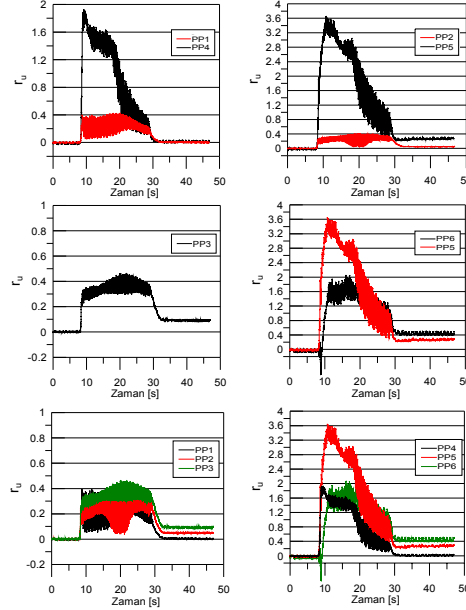
Deney düzeneğinde uygulanan taban hareketinin maksimum ivme değerleri fitrelenmiş olarak Şekil 12’de sunulmuştur. Deney düzeneğinde uygulanan taban hareketinin maksimum ivme değerinin (0.17g) sarsıntı sonunda 0.20g büyüklüğüne ulaştığı görülmektedir. Dalgakıran tabanında (temel tabakası yüzeyinde) en büyük ivme 0.15-0.20g aralığında ölçülmüştür. Dalgakıran kretinde ivme şiddetinin başlangıçtaki 0.10g seviyesinden artarak sarsıntı sonunda 0.25g seviyesine ulaştığı, dalgakıran şevinde ise sarsıntı sonunda 0.20g seviyelerine geldiği görülmektedir.

Dalgakıran orta kesiti altında kum tabaka içinde tabanda, tabaka ortasında ve tabaka yüzeyinde ölçülen maksimum artık boşluksuyu basıncı değerleri sırasıyla 3 kPa, 2.2 kPa ve 1.8 kPa olmuştur. Dalgakıran topuğu altında ölçülen boşluksuyu basıncı değerleri 6kPa ve 5kPa olurken, açık alanda ise 3 kPa olarak ölçülmüştür.



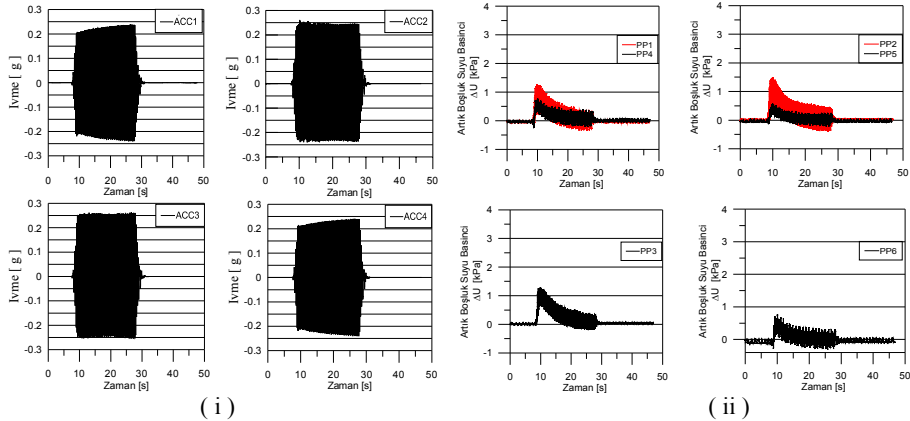
Şekil 12. Dalgakıran kesiti için ölçülen i) ivme değerleri ve ii) boşluksuyu basınçları (Deney 1)

Boşluksuyu basıncı oranı (r_u) değerlerinin zamanla değişimi incelendiğinde ise dalgakıran altındaki kum tabaka içerisinde hesaplanan maksimum r_u değerleri 0.40-0.50 mertebesinde kalırken, topuk altında ise r_u değerlerinin 1.6 ve 3.2 mertebelerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Boşluksuyu basıncı oranı (r_u) değerlerinin zamanla değişimi(Deney 1)

Deney 2: Daha önce çevrimli harekete maruz kalan bir dalgakıranın, daha şiddetli bir sarsıntı altındaki davranışı gözlemleyebilmek için , model daha yüksek ivme değerinde (0.22g) bir taban hareketi etkisinde tekrar çevrimli yüklemeye maruz bırakılmıştır(Şekil 14). Kum tabaka üstünde ve krette ölçülen maksimum ivme değerleri 0.24g ve 0.26g mertebesinde olmuştur. Dalgakıran şevinde ise maksimum ivme değeri 0.24g olarak ölçülmüştür.

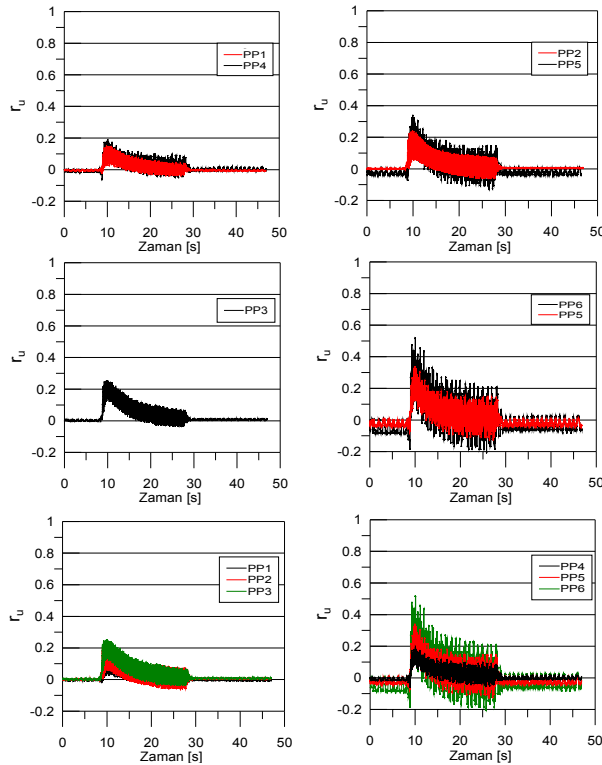


Şekil 14. Dalgakıran kesitinde ölçülen i) ivme değerleri ve ii) boşluksuyu basınçları(Deney 2)

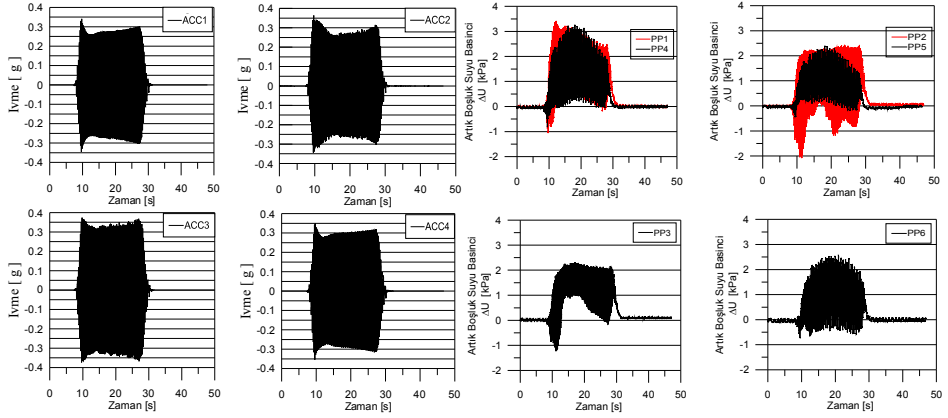
Birinci yükleme sonunda dalgakıran temelini oluşturan kum tabakasının rölatif sıklık oranı arttığından açık alanda ölçülen maksimum boşluksuyu basınçları 1.5 kPa seviyelerinde, dalgakıran altında ise 0.8-1.0 kPa seviyelerinde olmuştur(Şekil 14). Benzer şekilde, r_u değerlerinin rölatif sıklığın artması sonucu düşmüş olduğu, topuk altında ve açık alanda hesaplanan r_u değerinin 1 seviyesine, dalgakıran altında ise 0.2-0.3 değerlerine düştüğü görülmektedir(Şekil 15).

Deney 3: İki kere dinamik yükleme sonucu hasar gören dalgakıranın onarıldıktan sonraki dinamik davranışını incelemek üzere, 2. deney sonrasında dalgakıran kesiti ekstra malzemelerle yeniden oluşturularak (elemanlar çıkarılmadan) 0.27g maksimum ivme değerinde yeniden çevrimli hareket uygulanmıştır(Şekil 16). Dalgakıran tabanında ve krette ölçülen ivme değerleri 0.29g ve 0.34g, seviyesinde olmuştur. Dalgakıran şevinde ise 0.30g maksimum ivme büyüklüğü ölçülmüştür.

Dalgakıran altında ölçülen maksimum boşluksuyu basınçları 2.5-3.0 kPa seviyesinde olurken açık alanda maksimum boşluksuyu basınçları 2 kPa olarak ölçülmüştür(Şekil 16). Onarıldıktan sonra tekrar çevrimli yükleme uygulanan kesitte hesaplanan maksimum r_u değerleri dalgakıran altında 0.35 mertebelerindedir. Açıklıkta hesaplanan maksimum r_u değerlerinin 10 saniye sonunda 0.9 – 1.4 seviyelerine çıktığı görülmüştür(Şekil 17).



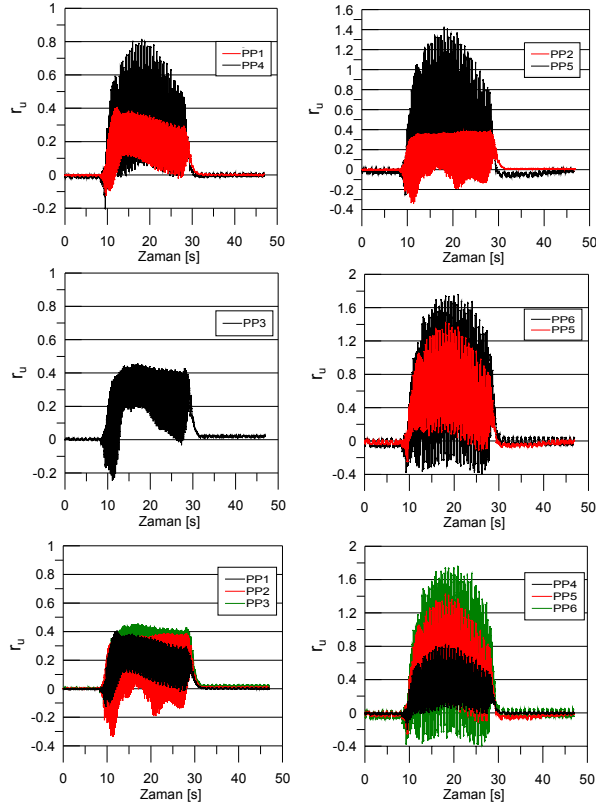
Şekil 15. Boşluksuyu basıncı oranı (r_u) değerlerinin zamanla değişimi(Deney 2)



(i)

(ii)

Şekil 16. Dalgakıran kesitinde ölçülen i) ivme değerleri ve ii)boşluksuyu basınçları(Deney 3)



Şekil 17. Boşluksuyu basınçları oranı (r_u) değerlerinin zamanla değişimi(Deney 3)

6. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışma kapsamında suya doymuş gevşek kumlu bir temel zemini üzerine inşa edilen dalgakıranların deprem esnasında maruz kaldıkları çevrimsel yüklemeler etkisi altındaki davranışları incelenmiş, tekrarlı gerilmeler altında gevşek kum zeminde artık boşluksuyu basıncı artışları nedeniyle oluşabilecek sıvılaşma durumu ve etkileri araştırılmıştır.

İki ana aşamada model deneyler gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada 20 cm kalınlığında $D_r=40\%$ sıklıkta hazırlanmış kum tabakanın davranışı incelenmiş, ikinci aşamada ise 40cm kalınlığındaki kum tabaka üzerine inşa edilen $1/2$ şev eğiminde 40 cm yüksekliğindeki dalgakıranın davranışı incelenmiştir.

Birinci aşama deney sonuçlarına bakıldığında, derinlik arttıkça artık boşluksuyu basıncı değerlerinin arttığı görülmüştür. Deneyde hazırlanan 20 cm kalınlığında kum zemin 30cm yüksekliğinde su altında olduğundan, efektif gerilmelerin çok düşük olduğu tabaka yüzeyine yakın derinliklerde r_u oranları 1.0 değerine ulaşmıştır.

İkinci aşamada yapılan deneylerde, daha yüksek efektif gerilmelerden dolayı, dalgakıran merkezi altında r_u değerleri 1.0 değerinin altında kalmıştır. Topuk altında ve açık alanda ise r_u değerleri 1.0 değerine ulaşmış, topuk altında sıvılaşma gerçekleşmiş, dalgakıran kesitinde büyük oranda göçme yaşanmıştır.

Sıvılaşma sonrası davranış için gerçekleştirilen deneyde, daha önce sarsıntıya maruz kalmış kesit üzerinde daha büyük ivme değerinde(0.22g) tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Daha önceki yükleme altında kum zeminin oturma yapması ve dalgakıran kesitinin zemin içerisine çökmesi sebebiyle boşluk oranları azaldığından dalgakıran kesiti altında r_u oranları 0.2-0.3 seviyelerine düşmüştür.

Üçüncü deneyde ise, çevrimsel yüklemeye maruz bırakıldıktan sonra onarılan kesit üzerinde yeniden 0.27g büyüklüğünde tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Daha önceden maruz kaldığı çevrimli hareket sebebiyle boşluk oranları azalmış olan kesitte dalgakıran tabanında r_u oranları 0.35 seviyelerinde, açık alanda ise 0.9 seviyelerinde hesaplanmıştır.

Sınırlı sayıda model deneylerde gözlemlenen davranışların topluca değerlendirilmesinden: (a) deniz tabanında yer alan gevşek-orta sıkı kum çökellerinde kuvvetli yer sarsıntısı etkisinde sıvılaşma durumu ortaya çıkabileceği; (b) gevşek-orta sıkı kum çökelleri üzerinde inşa edilen dalgakıranların özellikle topuk bölgelerinde sıvılaşmadan kaynaklanan hasarlar oluşabileceği; (c) kum çökelleri üzerinde inşa edilen dalgakıranların bir çok defa çevrimli yüklemelere maruz kalması durumunda, deprem performansının iyileşebileceği ve hasarların daha sınırlı kalabileceği, sonuçlarına ulaşılmıştır.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Adalier, K., Elgamal, A.-W. and Martin, G. R. (1998) "Foundation liquefaction countermeasures for earth embankments," J. Geotech. Geoenviron. Engrg. ASCE 124(6), 500–517.
- [2] Hyodo, M., Hyde, A. F.L., Yamamoto, Y., ve Fujii, T. (1999) "Cyclic Shear Strength of Undisturbed and Remolded Marine Clays" Soils and Foundation, Vol. 39, 45-58.
- [3] Youd, T. L., and Idriss, I.M. (2001). "Liquefaction Resistance of soils: Summary report from the 1999 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Eval. of Liq. Resist. Soils" J. Geotech. And Geoenvir., ASCE, V.27, pp. 297-313.
- [4] Memos C., Protonotarios J N (1992). Patras Breakwater Failure Due To Seismic Loading Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Coastal Engineering
- [5] Zangar, C.N. (1952), "Hydrodynamic Pressures on Dams due to Horizontal Earthquake Effects," USBR Engineering Monograph No. 11.
- [6] Chopra, A. K. (1967). "Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes." J. Eng. Mech. Div., 93(6), 205–223.

- [7] Adalier, K., and Sharp, M. K. (2002a). "Dynamic centrifuge modeling of earth dams on liquefiable ground." Proc., 3rd U.S.–Japan Workshop on Advanced Research on Earthquake Engineering for Dams, San Diego.
- [8] Adalier, K., and Sharp, M. K. (2002b). "Embankment dam on liquefiable foundation—Dynamic behavior and densification remediation." *J. Geotech. Eng.*, in press.
- [9] Yang, Z., Elgamal, A., Adalier, K., and Sharp, M. (2004). "Effect of container boundary on seismic embankment response in centrifuge model tests." Proc., 11th Int. Conf. on soil Dynamics & Earthquake Engineering and 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering,
- [10] Wyllie, L. A., et al. (1986). "The Chile earthquake of March 3, 1985." *Earthquake Spectra*, 2_2_, 293–371.
- [11] Iai, S., et al. _1994_. "Effects of remedial measures against liquefaction at 1993 Kushiro-Oki Earthquake." Proc., 5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Counter Measures against Soil Liquefaction, NCEER-94-0026, National Center for Earthquake Engineering Research, 135–152, Buffalo, N.Y.
- [12] Iai, S., and Kameoka, T. _1993_. "Finite element analysis of earthquake induced damage to anchored sheet pile quay walls." *Soils Found.*, 33_1_, 71–91.
- [13] Hall, J. F., ed. _1995_. "Northridge Earthquake of January 17, 1994." *Reconnaissance Rep.*, Vol. 1, *Earthquake Spectra*, Supplement C to Vol. 11.
- [14] Sugano, T., Kaneko, H., and Yamamoto, S. (1999). "Damage to port facilities. The 1999 Ji-Ji Earthquake, Taiwan, investigation into the damage to civil engineering structures." *J. Japan. Soc. Civ. Eng.*, 5-1–5-7.
- [15] Boulanger, R., Iai, S., Ansal, A., Cetin, K. O., Idriss, I. M., Sunman, B., and Sunman, K. 2000_. "Performance of waterfront structures." 1999 Kocaeli, Turkey, *Earthquake Reconnaissance Rep.*, Chap. 13, Supplement A to *Earthquake Spectra*, Vol. 16, T. L. Youd, J.-P. Bardet, and J. D. Bray, eds., 295–310.
- [16] Sumer, B. M., Kaya, A., and Hansen, N.-E. O. _2002_. "Impact of liquefaction on coastal structures in the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake." Proc., 12th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., KitaKyushu, Japan, Vol. II, 504–511.
- [17] Katopodi, I., and Iosifidou, K. _2004_. "Impact of the Lefkada earthquake _14-08-2003_ on marine works and coastal regions." Proc., 7th Panhellenic Geographical Conf., Mytilene, Greece, 363–370.
- [18] Sümer, B.M., Ansal, A., Cetin, K.O., Damgaard, J., Gunbak, A.R., Hansen, N.-E.O., Sawicki, A., Synolakis, C.E. Yalciner, A.C., Yuksel, Y. and Zen, K., (2007b). Earthquake-Induced Liquefaction around Marine Structures, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, vol. 133, No. 1, 55-82.
- [19] Groot, M. B., Bolton, M. D., Foray, P., Meijers, P., Palmer, A. C., Sandven, R., Sawicki, A. and The, T.C., 2006 a. Physics of Liquefaction Phenomena around Marine Structures, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, vol. 132, No. 4, 227-243.
- [20] Yuksel, Y., Alpar, B., Yalciner, A., Cevik, E., Ozguven, O., and Celikoglu, Y. _2003_. "Effects of the Eastern Marmara Earthquake on the marine structures and coastal areas." Proc., Institution of Civil Eng. (ICE, UK), *Water and Maritime Engineering*, Vol. 156, Issue WM2, 147–163.
- [21] Memos vd, (2000) "Stability of rubble mound breakwaters under Seismic Action" Proceedings of coastal engineering conf. ASCE, Sydney Avustralya
- [22] Cassagnrade, A. (1936). "Characteristics of cohesionless soil affecting the Stability of slopes and Earth fills". *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*
- [23] Rauch, A.F. (1997). "Epolls: An empirical method for predicting surface displacements due to liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes" PhD thesis, Virginia Polytechnique Institute and State Univ., Blacksburg, Va.

- [24] Poulos, S.J., (1981). “The Steady State of Deformation”, Journal of Geotechnical Engineering
- [25] Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice- Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [26] Seed, H.B. (1976).“ Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes”. Liquefaction Problems in Geotech. Eng., ASCE
- [27] Seed, H.B., Idriss, I.M.(1971).“Simplified procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison, ASCE, Vol.97, No.SM9, pp1249-1273.