

Deprem Sırasında Boşluk Suyu Basıncı Oluşumu Üzerine İnceleme

¹Nazile Ural and ^{*2}Burak Görgün

¹Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Bilecik Seyh Edebali University, Turkey

^{*2}Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Bilecik Seyh Edebali University, Turkey

Özet

Aktif bir deprem kuşağında bulunan ülkemizde yıllardır yıkıcı depremler ile karşılaşmaktadır. Deprem gibi yüksek genlikli ve kısa periyotlu tekrarlı gerilmeler altında zeminlerin boşluklarında bulunan su dağılamayarak gittikçe artan bir basınca sebep olmaktadır. Zeminlerin belirli bir yük altında şekil değiştirmesi, sıkışması ve kayma gerilmelerine karşı direnci gibi davranışları efektif gerilmeler tarafından kontrol edilmektedir. Dolayısıyla deprem sırasında drenajsız koşullarda tekrarlı yüklemeye maruz kalan zeminlerde efektif gerilme boşluk suyu basıncının artmasıyla giderek azalacaktır. Bu durum zeminin mekanik özelliklerini de etkileyecektir ve zeminlerin rijitliğinde azalma meydana gelecektir. Depremler sırasında suya doygun kumlar ve düşük plastisiteli siltler sıvılaşırken, yumuşak plastik siltler ve killer taşıma gücü kaybına uğramaktadır. Bu çalışmada tekrarlı gerilmeler altında zeminlerin davranışı ve bu davranışın yapılar üzerindeki etkisi üzerine tartışılmıştır.

Key words: Boşluk suyu basıncı, deprem, sıvılaşma, deformasyon

Review on Pore Pressure Generation During Earthquake

Abstract

Destructive earthquakes have been encountered for years in our country which has an active earthquake zone Under high-amplitude and short-period cyclic stresses such as earthquakes, water in the pores of the soils doesn't able to dissipation so pore pressure become more increase. The behavior of the soils under a certain load, such as deformation, compression and resistance to shear stresses, is controlled by effective stresses. Therefore, during the earthquake under undrained conditions effective stress will gradually decreases with increasing pore pressure in the soil exposed to cyclic loading. This will also affect the mechanical properties of the soils and it will reduce the rigidity of these soils. During the earthquakes, saturated sands and low plasticity silt are liquefying, the soft plastic silts and the clays are suffering loss of carrying power. In this study, the behavior of the soils under repeated stresses and the effect of this behavior on the structures has been discussed.

Key words: Pore water pressure, earthquake, liquefaction, deformation

1. Giriş

İnşaat mühendisliğinde, yapıların inşası için hem yüksek bütçelere hem de uzun sürelere ihtiyaç duyulmaktadır. Taşıma kapasitesi ve izin verilebilir oturma miktarı güvenli bir yapı için gerekli

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: caglar@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955752

olan parametrelerdir. Yapıda oturmaların oluştuğu durumlarda farklı yükleme koşulları meydana gelmektedir. Bu yüzden yapının oturmasından mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Kum zeminlerde oturma elastik oturma şeklinde gerçekleşmektedir. Kil zeminlerde ise oturma zamana bağlı bir fonksiyon olarak gerçekleşmektedir ve buna konsolidasyon oturması denmektedir. Terzaghi 1925 yılında klasik konsolidasyonun içeriğini geliştirmiştir [1]. Teoride her boşluk oranında maksimum bir efektif gerilme olduğu ve bunun zemin daneleri ile desteklendiği varsayılmıştır. Zemin danelerine belirli bir boşluk oranında taşıyabileceklerinden fazla bir yük verildiğinde bu yükü zeminin içinde bulunan suyun taşıyacağı ve bu durumun boşluk suyu basıncını arttıracaklarını ileri sürmüştür. Boşluklarda bulunan su partikülleri Darcy (1856) yasalarına uygun olarak dışarı çıkacak ve bu durum zemindeki boşluk oranının azalmasını sağlayacaktır [2]. Bunun sayesinde zemin daneleri gelen yükü taşıyacak hale gelebilecektir. Bu süreç tüm boşluk suları çıkıncaya ve zemin daneleri uygulanan tüm yükü taşıyana kadar devam edecektir. Ancak bu durum zeminlerde sadece drenajın geçerli olduğu yükleme koşullarında gerçekleşecek bir durumdur. Dünyada ülkemizin de içinde bulunduğu birçok bölgede aktif deprem kuşağı bulunduğundan kuvvetli yer hareketleri meydana gelmektedir. Kuvvetli yer hareketleri zeminlerde tekrarlı yükleme koşulları oluşturmaktadır. Drenajsız koşulların gerçekleştiği tekrarlı gerilmeler altında zeminin içerisinde bulunan boşluk suyu basıncı giderek artmakta ve bu durum farklı zemin problemleri ortaya çıkartmaktadır. Tekrarlı yüklemeler esnasında zemin tabakalarının göstereceği davranışın önceden bilinmesi, gerekli önlemlerin alınmasını ve bu tabakalar üzerindeki yapılarda oluşabilecek hasarların azalmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada tekrarlı gerilmeler altında zeminlerde oluşan boşluk suyu basınçlarının zeminlere etkisi ve alınması gereken önlemler incelenmiştir.

2. Tekrarlı Gerilmelerin Zeminlere Etkisi

Tekrarlı gerilmeler zeminlerde efektif gerilmenin azalmasına dolayısıyla drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliğin azalmasına sebep olmaktadır. Tekrarlı gerilmeler esnasında silt ve kum zeminlerde bu durum sıvılaşmaya sebep olurken kil zeminlerde drenajsız kayma mukavemetinin azalmasına sebep olmaktadır. Sıvılaşma, tekrarlı gerilmeler altında boşluk suyu basıncının sürekli olarak artması sonucu çevre basıncına çok yakın hale gelmesiyle efektif gerilmenin çok küçük bir değere düşmesi nedeniyle zeminin kayma mukavemetinin kaybolması ve çok büyük şekil değiştirmeler ile akmaların oluştuğu durumdur [3]. Zemin tabakalarına deprem veya bir başka sismik kuvvet geldiğinde kum daneleri arasındaki denge bozulmakta ve ince daneler su ile birlikte yukarıya hareket ederek zemin yüzeyine çıkmaktadır. Bu tür bir etki geldiğinde doymuş ve gevşek zemin daneleri daha sıkı duruma geçme eğilimine girerler. Drenajsız koşulda gerçekleşecek bu hacimsel azalmaya daneler arasındaki su engel olmaya çalışmakta, ancak suyun sıkışabilirliği düşük olduğundan boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Boşluk suyu basıncının artmasıyla daneler birbirinden ayrılma eğilimine girmekte, daneler su içinde askıda kaldığından ortam sıvı gibi davranmaya başlamaktadır [4]. Sıvılaşmanın oluşumunda birçok geoteknik faktör etkili olsa da genel olarak zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını belirleyen etkenler zeminin özellikleri, jeolojik şartlar ve en önemlisi ise yer hareketleridir. Kuvvetli yer hareketleri esnasında kum zeminlerde sıvılaşma problemi yıllarca gözlenmesine rağmen ilk kez Hazen 1920'li yıllarda deprem sırasında Calavera barajında meydana gelen yenilmeyi sıvılaşma olarak tanımlamıştır [5]. Yine aynı yıllarda kaynaklanan önemli temel hasarlarının ise 1959 Meksika [6] ve 1964 Japonya Niigata [7] depremlerinde görüldüğü rapor edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. 1964 Niigata derpreminde orta sıkı kum zeminde sıvılaşma problemi [8]

Her ne kadar silt ve kum zeminlerde tekrarlı yüklemeler sebebiyle boşluk suyu basıncının artışıyla meydana gelen sıvılaşma problemi çok önemli olsa da boşluk suyu basıncı artışı sadece bu zeminlerde sıvılaşma problemine neden olmaz [9]. Do ve diğ. (2017) farklı kum ve çakıl yüzdelerini karıştırarak yapmış oldukları deneylerde moment büyüklüğü 7'nin üzerinde ve pik zemin ivmesi 0.2g'nin üzerinde olan yer hareketlerinde ($M_w > 7$ ve $PGA > 0.2 g$) Zemin türü ne olursa olsun sıvılaşma olabileceğini söylemişlerdir [10].

Tekrarlı gerilmelerin zeminlerde oluşturacağı hasar incelenirken yapılan çalışmalar genellikle kum ve silt zeminlerde sıvılaşma problemine odaklanmıştır. Deprem sırasında kil, kum ile karşılaştırıldığında istikrarlı olarak kabul edilmiştir [11]. Buna rağmen yapılan incelemelerde kalın kil tabakalarında ciddi yapı hasarları meydana geldiği görülmüştür [12, 13]. Deprem sırasında sismik hareket büyümesi nedeniyle oluşan büyük deformasyonların kil zeminin bir özelliği olduğu farkedilmiştir. Deprem dalgalarının genliğinde yüzeye yakın yumuşak zemin tabakalarından geçerken meydana gelen artış, yapısal hasar üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir. Ayrıca 1964 yılında Niigata depremi ve 1978 yılında Miyagiken-oki depremi sırasında, Japonya'da bir çok bölgede zeminde çökme meydana geldiği görülmüştür [14]. Yatay katmanlı kil zeminlerde deprem sırasında oluşacak çevrimsel kayma dayanımı ciddi bir stabilite sorununa yol açmazken bu durum boşluk suyu basıncının yükselmesini tetikleyerek oturmalara sebep olmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. 1906 San Francisco depreminde siltli kil zeminde boşluk suyu basıncından kaynaklı oturmalar [15]

Killerde, tekrarlı gerilmeler sonucunda oluşan oturmalar depremden hemen sonra oluşabileceği gibi (ekil 3) zemin profilinin özelliğine bağlı olarak depremden uzun bir süre sonra da görülebilmektedir [16]. Bu oturma genellikle konsolidasyon oturması olarak gerçekleşir ve deprem sırasında tekrarlı yükler altında oluşan boşluk suyu basıncının sönümlendiği durumda ortaya çıkmaktadır [17].



Şekil 3. 1989 Loma Prieta depreminde dk plastisiteli kil zeminde boşluk suyu basıncından kaynaklı oturmalar [18]

2.1. Silt ve Kum Zeminlerde Sıvılaşma Problemi

Chang ve diğ. (1982), düşük plastisiteli siltli zeminler üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu araştırmacılar kil içerikli numunelerin sıvılaşma yenilme limitini %10 çift yönlü eksenel deformasyon olarak tanımlamışlardır. Temiz kumlarda gelişen boşluk suyu basıncı artışı plastik özellikli numunelerle karşılaştırıldığında temiz kumlarda ilk çevrimsel hareketlilik olmaksızın %100 boşluk suyu basıncının geliştiği, plastik siltlerde ise %100 boşluk suyu basıncı kaydedilmeden önce çevrimsel hareketliliğin geliştiği gözlenmiştir [19].

Koester (1994) farklı plastisitede siltlerde deney yapmıştır. Sıvılaşma yenilmesini boşluk suyu basıncı oranının %100' e yükselmesi veya %2.5 çift yönlü eksenel deformasyon olarak tanımlamıştır. %100 boşluk suyu basıncı oranının öncelikle düşük plastisiteli siltlerde belirlediği ve %2.5 çift yönlü eksenel deformasyonun plastikliği yüksek siltlerde olduğu öne sürülmüştür [20].

Singh (1994), Prakash ve Puri (1982) gibi siltli zeminlerin sıvılaşması üzerinde çalışmıştır. Bu gurubun görüşüne göre de plastik olmayan (NP) siltli zeminlerin boşluk suyu basıncının artması ve çevrimsel hareketliliğin oluşması genellikle temiz kumlarınkiyle aynıdır. Boşluk suyu basıncının artması ve çevrimsel hareketlilik özellikleri plastik silt ve plastik kumlarda benzerdir. Bu çalışmalarda örselenmemiş löslerde kil içeriğinin boşluk suyu basıncı artışını geciktirdiği belirlenmiştir [21, 22].

Pradhan ve diğ. (1995), üç farklı tipte kum numuneleri (Toyoura, Sengenyama ve Narita) üzerinde drenajsız dinamik üç eksenli deneyler yapmış ve ince içeriğinin sıvılaşma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan deney sonuçlarından, ince içeriğinin %15' e kadar sıvılaşma potansiyeli üzerinde önemli bir değişim göstermediğini, sıklığın bozulmasıyla oluşan akma deformasyonunun boşluk suyu basıncının yüksek olduğu değerlerde görüldüğünü, sıvılaşma süresince kumdaki ince yüzdesinin akma deformasyonuna direnç gösterdiğini ve ince içeriği fazla olan kumlarda sıvılaşma ile yitirilmiş rijitliğin daha hızlı olarak geri kazanıldığını bildirmişlerdir [23].

Robertson ve Wride (1998) sıvılaşma terimlerini akma sıvılaşması ve çevrimsel yumuşama olarak ikiye ayırmıştır. Çevrimsel yumuşamayı ise kendi içinde çevrimsel sıvılaşma ve çevrimsel hareketlilik olarak ayırmıştır. Akma sıvılaşmasını, drenajsız yükleme durumunda deformasyon yumuşaması olarak vermiştir. Bu olayı tekdüze ve dinamik yüklemenin tetikleyebileceğini söylemiştir. Çevrimsel yumuşama, deformasyon yumuşaması ve deformasyon pekleşmesi (genleşme) olarak verilmiştir. Çevrimsel sıvılaşmanın drenajsız dinamik yükleme ile efektif gerilmenin sıfıra ulaşması veya kayma gerilmesinin ters yöne dönmesi durumunda geliştiğini belirtirken, diğer yandan çevrimsel hareketliliği drenajsız dinamik yükleme ile kayma gerilmesinin daima sıfırdan büyük veya kayma gerilmesinin geri dönmemesi olarak vermiştir [24].

Atukorala ve diğ. (2000), çalışmalarında yedi farklı yerden alınan zeminlerde dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneyleri yaparak siltli ve kumlu zeminlerin dinamik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Siltli zeminlerin dinamik davranışının kumlu zeminlerinkinden farklı olduğu ve siltli zeminlerde boşluk suyu basıncı ve deformasyonun çevrim sayısı ile aşamalı olarak arttığı, kumlarda ise bu artışın aniden gerçekleştiği bildirilmiştir [25].

Hoeg ve diğ. (2000), aynı boşluk oranı ve çevre basıncında, silt ve siltli kumların örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanmış numuneleriyle drenajsız gerilme-deformasyon-direnç davranışlarının farklılıklarını belirlemek üzere deneyler yapmışlardır. Örselenmemiş numunelerde genleşme (dilation) ve yumuşama görülürken, aynı boşluk oranında laboratuvarında hazırlanan numunelerin birkaçında hacim azalması (contractive) ve gevrek (brittle) davranış görülmüştür. Çalışmada hidrolik dolgu olarak kullanılan siltli kumun yanında, flüviyal silt birikintilerinden ıslak tokmaktama yöntemiyle numune hazırlanmıştır. Ayrıca, karşılaştırma yapabilmek için diğer numune hazırlama yöntemleri olan bulamaç ve suda yağmurlama yöntemiyle de numune hazırlanmıştır. Tüm siltli numuneler %73 gibi yüksek D_r de hazırlanmasına karşın düşük direnç ve gevrek davranış sergilerken, D_r si %66 olan örselenmemiş numunelerin genleştiği gözlemlenmiştir [26].

Sunitsakul (2004), siltli zeminlerde fazla boşluk suyu basıncının oluşmasını ve büyük deformasyonların gelişmesini araştırmıştır. Daha önceki depremlerde sıvılaştıran veya zemin yenilmesi görülen yerlerden elde edilen verileri incelemiş ve son yıllardaki çoğu araştırmanın aksine kumu çok olan zeminlerin sıvılaştırma hassasiyetinde silt içeriğinin etkisini vurgulamıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarından, kumlu zeminlerin aksine siltli zeminlerin davranışının yüklenme frekansı ve büyüklüğünden etkilendiği belirlenmiştir. Aşırı konsolide ve plastikliği fazla olan siltler deformasyon ve boşluk suyu basıncının gelişmesine daha dirençlidir. Laboratuvarında hazırlanan numuneler için, dinamik direncin plastisite indisi 8' den küçük olan siltli zeminlerde artmadığı, ancak örselenmemiş numunelerde dinamik direncin IP' nin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir [27].

2.2. Kil Zeminlerde Deformasyon Problemi

France ve Sangrey (1977) yaptıkları çalışmada suya doygun killi zeminlerde çevrimsel yükler altında bir efektif gerilme modeli tanımlamışlardır. Çalışmalarında gerilme kontrollü üç eksenli basınç deneyini kullanmışlardır. Çalışmalarında ıslak tokmaktama metodu ile hazırladıkları illit kili kullanmışlardır. Kullandıkları kil numunesi likit limiti %57, plastic limiti %26, su muhtevası %39.5 ve özgül ağırlığı 2.78 değerlerine sahiptir. Normal ve aşırı konsolide olarak hazırlanan numunelerini çevrimsel gerilmeye tabi tutulmuşlardır. Her bir döngüde yükün sönümlenmesi esnasında numunelerde drenaja izin verilmiştir. Çevrimsel yüklenme numuneler yenilmeye uğruyana kadar veya bir denge oluşana kadar devam edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda normal konsolide killerde suyun drenajı hacimlerinin azalmasına ve drenajsız kayma mukavemetinde belirgin bir artışa sebep olmuştur. Ancak aşırı konsolide killerde ise ilk çevrimden sonra daneler arasında drene olamayan sular kalmıştır. Bu durum negatif boşluk suyu basıncına sebep olmuştur. Negatif boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için daneler arasındaki sular numunenin içine dağılmıştır. Sonuçta numunenin hacmi ve su muhtevasında artış olmuştur ve bu yüzden numunede belirgin bir mukavemet kaybı gözlemlenmiştir [28].

Ansal ve Erken (1989) dinamik basit kesme cihazı ile $G_s = 2.65$, $LL = \%65$ ve $PL = \%25$ değerlerine sahip normal konsolide kil zeminler üzerinde boşluk suyu basıncından kaynaklanan eksenel ve yatay şekil değiştirmeleri incelemişlerdir. Deneylerinde kullandıkları numunelerin bir kısmını bulamaç çamuru ile diğer kısmını ise numunede homojenlik sağlamak adına ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlamışlardır. Frekans değeri olarak 1 Hz, 0.5 Hz, 0.1 Hz, 0.01 Hz

kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda boşluk suyu basıncının oluşmayacağı eşik bir çevrimsel kayma gerilmesi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu kayma gerilmesinin üzerine çıkıldığında numunelerde boşluk suyu basınçları gözlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar kayma gerilmesi genliği azaldıkça ve çevrim sayısı arttıkça frekansın etkisinin azaldığını söylemişlerdir. Depremlerde olduğu gibi, çevrimsel davranışın değerlendirilmesinde nispeten az sayıda çevrim kullanılırsa, frekansın etkisi belirgin olarak gözükmemektedir. Bu durum hem bulamaç çamuru hem de ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan numunelerde görülmektedir. Islak tokmakalama yöntemiyle hazırlanan numuneler çevrimsel kayma gerilmesine karşı daha dayanıklıdır. Her iki numune hazırlama yöntemiyle yapılan deneylerde boşluk suyu basınçlarında artış oluşmuştur ancak ıslak tokmaktama ile hazırlanan numunelerde daha yüksek boşluk suyu basıncı oluşma eğilimi gözlenmiştir [29].

O'Reilly ve diğ. (1991) LL = %32, PL = %17 değerlerine sahip siltli kil zemin numunelerini bulamaç çamuru yöntemiyle hazırlayarak 0.1 Hz frekansta dinamik üç eksenli deneyi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında statik koşullar altında drene olan normal konsolide siltli kil zeminin, drenajsız çevrimsel yüklemeler altında davranışının belirlenmesini hedeflemişlerdir. Numuneler arazideki bir zemini modelleyebilmek için K_0 konsolidasyonuna tabi tutulmuştur. Numunelerin drejansız kayma gerilmesinin %30, %50 ve %70'i çevrimsel deviatör gerilme olarak deneyde kullanılmıştır. Anizotropik konsolidasyondan sonra her numuneye 6 saat boyunca 5 periyot halinde 2160 drenajsız çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Her yükleme periyodunda numune %90 konsolidasyonunu tamamlayacak şekilde 18 ile 66 saat arasında drenajlı koşullarda dinlenmeye bırakılmıştır. Numunelere dört farklı deney tipi uygulanmıştır. Bunlardan ilk üçü numunelerin drejansız kayma gerilmesinin %30, %50 ve %70'i çevrimsel deviatör gerilme olarak uygulanmasıdır. Dördüncü deney tipinde ise numunelere sırayla artan ve azalan deviatör gerilme uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda anizotropik konsolide edilmiş normal konsolide siltli kil zeminler drenajsız çevrimsel gerilmeye tabi tutulduğunda boşluk suyu basıncındaki artış zeminin yenilmesine yol açmıştır. Zeminin yenilmesi için gerekli olan çevrim sayısı çevrimsel gerilme arttıkça azalmıştır. Drenaj periyotları numunenin güçlenmesini sağlamıştır. Her bir drenajlı dinlenme periyodundan sonra bir önceki periyotta ulaşılan boşluk suyu basıncına ulaşabilmek için daha fazla çevrimsel yükleme gerekmiştir. Zeminin çevrimsel gerilmelerden sonra konsolidasyona izin verilmesiyle numune güçlenmiştir [30].

Ansari ve diğ. (2001) Haliç'in altında bulunan CH-OH sınıfı normal konsolide killeri kullanarak drejansız koşullarda gerilme kontrollü burulmalı üç eksenli deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, gerilme-şekil değiştirme ve kesme mukavemeti karakteristiğindeki değişimleri eşik çevrimsel kayma gerilmesi ve çevrimsel akma gerilmesinde açısından değerlendirmek için burulmalı üç eksenli deneyi yapmışlardır. Farklı plastisite indisine sahip zeminlerde eşik çevrimsel kayma gerilmesinin değerlendirilebilmesi üzere her bir numune için maksimum kayma modülleri ve modül azalma eğrileri belirlenmiştir. Sonrasında numuneler farklı kayma gerilmesi büyüklüklerinde bir dizi çevrimsel basit kesme deneyine tabi tutuldu. Çevrimsel yüklemelerden sonra oluşan davranışın incelenmesi için bazı başka deneyler de yapıldı. Bu deneylerde, numuneler dreneje izin verilmeden K_0 gerilme koşullarında 1 saat tutularak boşluk suyu basınçlarının dağılarak dengeye gelmesi beklenmiştir. Bundan sonra numuneler drejansız koşullarda şekil değiştirme kontrollü olarak kesilmiştir. Başka bir grup deneyde ise çevrimsel kayma gerilmeleri esnasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönmelenmesine izin verilerek çevrimsel gerilme

sonrasında konsolidasyon oturması incelenmiştir. Araştırmacılar çevrimsel gerilmeye maruz kalan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarında birbirini izleyen üç aşama olduğunu belirtmişlerdir. İlk aşamada numune kayma mukavemeti ve gerilme-şekil değiştirmesi etkilenmeden herhangi bir belirgin bozulma olmaksızın elastik tepki gösterecektir. Zemine uygulanan çevrimsel gerilme küçüktür bu yüzden herhangi bir şekil değiştirme olmamıştır. Elastik eşik aşıldığında ise zemin elasto-plastik davranış sergileyecektir. Bu ikinci aşamadır. Bu aşamada oluşan şekil çevrimsel kayma gerilmesinden oluşan şekil değiştirmeler dane yapısının bozulmasına, boşluk suyu basıncı oluşması ve plastik eşığe kadar kayma mukavemeti ile gerilme-şekil değiştirme davranışlarında hızlı bir bozulmaya neden olur. Plastik eşığın aşılmasından sonra numunede dinamik kayma modülündeki önemli azalma sebebiyle büyük şekil değiştirmeler oluşacaktır. Bu zeminlerdeki üçüncü evre olan plastik evredir. Kil zeminler genel itibariyle yüksek elastik özellik gösteren zeminlerdir ancak bu zeminlerde çevrimsel gerilmelerden kaynaklı oluşan şekil değiştirmeler kritik seviyeyi aşar ve plastik evreye ulaşırsa dane yapısının bozulmasının yanı sıra, aşırı boşluk suyu basınçları önemli derecede artarak kayma mukavemetinde şiddetli azalmaya sebep olacaktır [31].

Hanna ve Javed (2008) drenajlı ve drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli deneyi ile Kanada'nın Quebec bölgesinden elde ettikleri normal konsolide duyarlı killer üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Kullandıkları kil zemin CH sınıfına ait olup, LL değeri %69, PL değeri %25, PI değeri 44 ve Gs değeri 2.74'tür. Çevrimsel gerilmeden uygulanmadan önce numuneler 207 kPa'lık ön konsolidasyon basıncına eşdeğer bir basınç altında konsolide edilmiştir. Statik üç eksenli deneyi sonrasında elde edilen yenilme gerilmesinin % 33, % 35 ve % 67'sine eşdeğer olacak şekilde numunelere çevrimsel gerilme uygulanmıştır. Çevrimsel deviatör gerilme saatte 4 çevrim olacak şekilde 0.001 Hz frekansta uygulanmıştır. Bu frekans yüksek yapılarak gelen rüzgar dalgalarını modellemek amacıyla kullanılmıştır. Drenajlı koşullarda test edilen numunelerin drenajsız koşullardaki numunelere kıyasla yenilmesi için, daha fazla çevrim sayısı ve daha yüksek çevrimsel gerilmeler gerekmiştir. Hem drenajlı koşullardaki hem de drenajsız koşullardaki numunelerin yenilmesi için çevrimsel deviatör gerilme genliği arttıkça daha az çevrim sayısı gerekmiştir. Düşük gerilme genliklerinde kil zemin yenilmeye uğramadan yarı esnek bir hale gelmiştir. Drenajsız koşullarda drenajlı koşullara kıyasla boşluk suyu basıncı daha hızlı artmış ve daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Drenajlı koşullarda ise boşluk suyu basıncı ancak 10. çevrimden sonra ortaya çıkmıştır. Yazarlar çalışma sonucunda hassas killerde çevrimsel gerilme sonucunda ortaya çıkan bu boşluk suyu basıncının danelerin yapısını bozarak kayma mukavemetinde ciddi azalmalar olacağını belirtmişlerdir. Bu durumda zeminlerde büyük çökmeler meydana geleceğini, zeminin taşıma kapasitesinin tümüyle kaybolacağını ve felaket niteliğinde yenilmeler meydana geleceğini söylemişlerdir [32].

Sonuç

Geçmişte yaşanan depremler ve yapılan çalışmalar göstermektedir ki tekrarlı gerilmeler altında zeminlerde etki eden aşırı boşluk suyu basınçlarının ortaya çıkması çok ciddi zararlara sebebiyet vermektedir. Bu etkinin ortadan kaldırılması amacıyla yapının temelini oluşturan yapı elemanları artan boşluk suyu basıncını karşılayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca farklı oturmalarından mümkün olduğunca kaçınılması adına doğru modelleme yapılmalıdır. Boşluk suyu basınçlarının artmasıyla birlikte temellere etki edecek statik ve dinamik yüklere ilave olarak yatay yönde ekstra

yükler ve eğilme momentlerinin göz önüne alınarak temel dizaynının yapılması gerekmektedir. Özellikle, temellerde, zeminin içinde gömülü durumda bulunan atık su şebekesi ve su borusu gibi alt yapı elemanlarının sıvılaşmadan kaynaklanabilecek hareketlerden ve oturmalardan etkilenmemesi için bunların bağlantılarının mümkün olduğunca esnek olmasına özen gösterilmelidir. Kısaca, zeminlerin dinamik özelliklerinin önceden belirlenerek temel hesaplarının yapılması gerekmektedir.

Referanslar

- [1] Terzaghi K. Principles of soil mechanics, IV—Settlement and consolidation of clay. Engineering News-Record. 1925 Nov;95(3):874-8.
- [2] Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application. Victor Dalmont; 1856.
- [3] Seed HB, Pyke R, Martin GR. Effect of multi-directional shaking on liquefaction of sands. Earthquake Engineering Research Center, University of California; 1975 Dec.
- [4] Ural N. İnce daneli zeminlerde kil oranının sıvılaşmaya etkisi. Sakarya Üniversitesi. Doktora tezi. 2008.
- [5] Wang SM. Liquefaction of triaxial sand damples under different frequencies of cyclic loading. Yüksek lisans tezi. Western Ontario Üniversitesi. 1972.
- [6] Marsal RJ. Behavior of a sandy uniform soil during the Jalisco earthquake, Mexico. InProc. V Intern. Conf. Soil Mech. and Foundation Eng 1961 (Vol. 1, pp. 229-233).
- [7] Seed HB, Idriss IM. Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1967 May;93(3):83-108.
- [8] Ishihara K, Koga Y. Case studies of liquefaction in the 1964 Niigata earthquake. Soils and foundations. 1981 Sep 15;21(3):35-52.
- [9] Gratchev IB, Sassa K, Osipov VI, Sokolov VN. The liquefaction of clayey soils under cyclic loading. Engineering geology. 2006 Jul 25;86(1):70-84.
- [10] Do J, Heo S B, Yoon YW, Chang I. Evaluating the liquefaction potential of gravel soils with static experiments and steady state approaches. KSCE Journal of Civil Engineering. 2017;21(3), 642-651.
- [11] Lee KL, Fitton JA. Factors affecting the cyclic loading strength of soil. InVibration effects of earthquakes on soils and foundations 1969 Jan. ASTM International.
- [12] Seed B. An LFA-3 cDNA encodes a phospholipid-linked membrane protein homologous to its receptor CD2. Nature. 1987 Oct;329(6142):840.
- [13] Mendoza MJ, Auvinet G. The Mexico earthquake of September 19, 1985—behavior of building foundations in Mexico City. Earthquake spectra. 1988 Nov;4(4):835-53.
- [14] Brady AG. An investigation of the Miyagi-ken-oki, Japan, earthquake of June 12, 1978. US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards; 1980.
- [15] Lawson AC, Leuschner AO, Gilbert GK, Reid HF, Branner JC, Davidson G, Burkhalter C, Campbell WW. The California Earthquake of April 18, 1906, report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Institution of Washington.
- [16] Kramer SL. Geotechnical earthquake engineering. In prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics. Prentice-Hall, New Jersey. 1996.
- [17] Ansal AM, Tuncan M. Consolidation in clays due to cyclic stresses. InProceedings 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1989 (pp. 3-6).

- [18] [US Geological Survey] <https://earthquake.usgs.gov/hazards/urban/sfbay/liquefaction/sfbay/>
Available: 19 May 2018
- [19] Chang NY, Yeh ST, Kaufman LP. Liquefaction potential of clean and silty sands. In Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference 1982 Jun (Vol. 2, pp. 1017-1032).
- [20] Koester JP. The influence of fines type and content on cyclic strength. In Ground failures under seismic conditions 1994 Oct 9 (pp. 17-33). ASCE.
- [21] Singh S. Liquefaction characteristics of silts. Geotechnical & Geological Engineering. 1996 Mar 1;14(1):1-9.
- [22] Prakash S, Puri VK. Liquefaction of loessial soils. In Third international earthquake microzonation conference, Seattle, June 1982.
- [23] Pradhan TBS, Kiku P, Sato K. Effect of fines content on behaviour of sand during the process to liquefaction. First Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering 1995 Vol 1 pp(823-828).
- [24] Robertson PK, Wride CE. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal. 1998 Jun 1;35(3):442-59.
- [25] Atukorala UD, Wijewickreme D, McCammon NR. Some observations related to liquefaction susceptibility of silty soils. In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering 2000 Jan (pp. 1-8).
- [26] Heg K, Dyvik R, Sandbkken G. Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2000 Jul;126(7):606-17.
- [28] Sunitsakul J. Dynamics Behavior of Silty Soils. Doktora Tezi. Oregon State Üniversitesi. 2004.
- [28] France JW, Sangrey DA. Effects of drainage in repeated loading of clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1977 Jul;103(ASCE 13081).
- [29] Ansal AM, Erken A. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses. Journal of Geotechnical Engineering. 1989 Jul;115(7):968-83.
- [30] O'Reilly MP, Brown SF, Overy RF. Cyclic loading of silty clay with drainage periods. Journal of Geotechnical Engineering. 1991 Feb;117(2):354-62.
- [31] Ansal A, Iyisan R, Yildırım H. The cyclic behaviour of soils and effects of geotechnical factors in microzonation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2001 Jul 1;21(5):445-52.
- [32] Hanna AM, Javed K. Design of foundations on sensitive Champlain Clay subjected to cyclic loading. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2008 Jul;134(7):929-37.