

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİTLERDE KİL ORANININ DİNAMİK DAVRANIŞA
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve ÇETİN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK

Kasım 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLTLERDE KİL ORANININ DİNAMİK DAVRANIŞA
ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve ÇETİN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 10.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Aşkın ÖZOCAK
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Murat Emre KARTAL
Üye


Doç. Dr.
Ertan BOL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Merve ÇETİN

08.11.2016

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a ve Doç. Dr. Ertan BOL, Doç. Dr. Sedat SERT ve Arş. Gör. Mustafa ÖZSAĞIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen laboratuvar görevlisi Recep EYÜPLER'e ve çalışma arkadaşlarımla aynı zamanda meslektaşlarımla Yadigar ALTUNDAĞ ve Nasrudin Mahamoud MUSE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, iyi bir birey olarak yetişmem için gayret eden canım aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | v |
| TABLolar LİSTESİ | vii |
| ÖZET | viii |
| SUMMARY | ix |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ | 1 |
| BÖLÜM 2. | |
| ZEMİNİN DİNAMİK/SİSMİK DAVRANIŞI | 3 |
| 2.1. Dinamik Zemin Özelliklerini Etkileyen Faktörler | 4 |
| 2.2. Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Mukavemet Özellikleri | 6 |
| 2.3. Dinamik zemin parametrelerinin Laboratuarda deneysel olarak belirlenmesi | 7 |
| BÖLÜM 3. | |
| SİTLİ ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI | 8 |
| BÖLÜM 4. | |
| ÜÇ EKSENLİ DİNAMİK DENEY (CTX) | 11 |
| 4.1. Doyurma Aşaması | 13 |
| 4.2. Doyurma Aşaması | 13 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 4.3. Kesme Aşaması | 13 |
| BÖLÜM 5. | |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 15 |
| 5.1. Giriş | 15 |
| 5.2. Numune Hazırlanması | 15 |
| 5.3. Fiziksel Deneyleler | 19 |
| 5.4. Dinamik Deneyleler | 23 |
| BÖLÜM 6. | |
| DENEY SONUÇLARI | 30 |
| BÖLÜM 7. | |
| SONUÇ VE ÖNERİLER | 38 |
| KAYNAKLAR | 40 |
| ÖZGEÇMİŞ | 42 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|----------------|---|
| Ac | : Konsolidasyon aşamasından sonra numunenin kesit alanı |
| C | : Kil yüzdesi |
| CTX | : Dinamik üç eksenli dinamik deney |
| CSR | : Çevrimsel gerilme oranı |
| ε | : Eksenel birim deformasyon (%) |
| G | : Kayma Modülü |
| Ip | : Plastisite indisi |
| LL | : Likit limit |
| MI | : Orta plastisiteli silt |
| ML | : Düşük plastisiteli silt |
| N | : Çevrim sayısı |
| η | : Sönüm Oranı |
| Pc | : Numuneye uygulanan tahmini dinamik yük |
| ru | : Boşluk suyu basıncı |
| σ_{dev} | : Deviatör gerilme |
| σ'_{3c} | : Konsolidasyon basıncı |
| WL | : Likit limit |
| WP | : Plastik limit |
| γ | : Birim kayma |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 4.1. Dinamik deneylerin yapıldığı CTX sistemi | 12 |
| Şekil 4.2. CTX sistem ekipmanları | 12 |
| Şekil 4.3. CTX deneyde yükleme ve oluşan gerilmeler..... | 14 |
| Şekil 5.1. Silt numunenin el arabasıyla laboratuvara taşınması..... | 16 |
| Şekil 5.2. Silt numunenin 40 nolu elekten elenmesi işlemi | 16 |
| Şekil 5.3. 40 nolu elekten geçirilen silt numunenin kurutulması için serilme işlemi | 17 |
| Şekil 5.4. Çöktürme tekniği aşamaları | 18 |
| Şekil 5.5. Farklı oranlarda kil ve silt içeren numunelerin hazırlanması | 19 |
| Şekil 5.6. Elek analizi deneyi..... | 20 |
| Şekil 5.7. Casagrande yöntemi ile likit limit deneyi | 21 |
| Şekil 5.8. Koni düşürme yöntemi ile likit limit deneyi | 21 |
| Şekil 5.9. Plastik limit deneyi | 22 |
| Şekil 5.10. Hidrometre ve pipet deneyi numuneleri | 22 |
| Şekil 5.11. Hidrometre deneyi | 23 |
| Şekil 5.12. Pipet deneyi..... | 23 |
| Şekil 5.13. Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan deney numunesi..... | 24 |
| Şekil 5.14. Hazırlanan numuneye vakum uygulama..... | 24 |
| Şekil 5.15. Hazırlanan numuneyi plastik tüpe yerleştirme | 25 |
| Şekil 5.16. Numunenin 1 kg ağırlığında 24 saat bekletilmesi..... | 26 |
| Şekil 5.17. Numunenin 100 kPa ağırlığında konsolide edilmesi | 26 |
| Şekil 5.18. Dondurulmuş deney numunesi | 27 |
| Şekil 5.19. Dondurulmuş deney numunesinin hücreden çıkarılması..... | 27 |
| Şekil 5.20. CTX deney cihazına yerleştirilen deney numunesi | 28 |
| Şekil 5.21. Deney sonu numunenin görünüşü..... | 29 |
| Şekil 5.22. Etüvden çıkan numunelerin görünüşü | 29 |
| Şekil 6.1. %40 kil katkılı numunenin CTX deney verileri..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Şekil 6.2. $N=15$ için boşluk suyu basıncı oranının kil oranı ile değişimi | 35 |
| Şekil 6.3. Aksel deformasyon seviyelerinde çevrim sayısı-kil oranı grafiği | 36 |
| Şekil 6.4. $r_u=0,9-0,8-0,7$ için çevrim sayısı-kil oranı grafiği | 37 |

TABLolar LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Tablo 5.1. Hazırlanan numunelerin silt ve kil ağırlıkları | 19 |
| Tablo 5.2. Numunelerin fiziksel özellikleri | 20 |
| Tablo 6.1. Numunelerin CTX deney sonuçları | 35 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: Silt, kil oranı, CTX, dinamik davranış, sıvılaşma

Siltli zeminlerin deprem performansı için Çin kriteri olarak bilinen bilgiler özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında çeşitli araştırmacılar tarafından yeniden değerlendirilmekte olup sürekli güncellenmektedir. İnce daneli zeminlerde kumlarda olduğu gibi başlangıç sıvılaşmasına kolaylıkla erişilememesi kum ve iri silt daneleri arasında oluşan “kil köprüleri”nin geçirimsizliği azaltıp boşluk suyu basıncı rejimini kısıtlaması yanında, karışımın kalıntı direncinin aşırı düşük kalmamasından kaynaklanmaktadır. 1964 Alaska depreminden sonra 1999 Marmara depreminde Adapazarı’nda görülen zemin yenilmelerinin kaynağı olarak siltli zeminler gösterilmiştir. Bu çalışmada kil ve kum içeriği ayıklanan silt numune ile bu numuneden ayırtlanmış kil kullanılarak farklı kil oranlarında hazırlanan siltli numunelerin dinamik davranışı dinamik üç eksenli (CTX-Cyclic Triaxial Test) deneyleri yardımı ile incelenmiştir.

Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında hazırlanan farklı kil yüzdeleri içeren siltli zeminler 100 kPa gerilme altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyonunu tamamlayan numuneler dinamik deney hücresine yerleştirilebilme amacıyla dondurulmuştur. Dondurulmuş numuneler dinamik üç eksenli kesme aletine (CTX) yerleştirilerek 0,35 CSR ve 0,5 Hz frekans değerlerinde dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir. Dinamik deneyler farklı kil oranlarındaki numuneler üzerinde yapılmış ve kil oranının dinamik davranışa olan etkisi deneysel sonuçlar yardımıyla incelenmiştir.

Farklı kil oranına sahip siltli zeminlerde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarına göre numune içerisindeki kil oranı azaldıkça 15. çevrimdeki boşluk suyu basınçlarının yüksek kil oranına sahip numunelere oranla daha hızlı artış gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde deformasyon büyüklüğü de azalmaktadır. Bu noktadan hareketle zemin içerisindeki kil oranının siltli zeminin dinamik davranışı üzerinde etkin bir parametre olduğunu yüksek kil oranına sahip numunelerin daha zor sıvılaşma eğilimi göstereceği anlaşılmaktadır.

EFFECT OF CLAY CONTENT ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF SILTY SOILS

SUMMARY

Keywords: Silt, clay content, CTX, dynamic behaviour, liquefaction

Approaches based on Chinese Criteria for seismic performance of silty soils have been re-evaluated and updated continuously by various researchers especially 1999 Marmara Earthquake. Initial liquefaction can not be reached easily like sands, because clay bridges occurred between the sand and granular silt grains decrease the hydraulic conductivity so limits the pore pressure regime and residual resistance of the mixture stays in extremely low values. Silty soils have been shown as the source of the soil failure after the 1964 Alaska Earthquake and 1999 Marmara Earthquake. In this study, dynamic behavior of silty soils which reconstituted in different clay contents were investigated with dynamic triaxial tests (CTX).

Silty soil samples with different clay contents have been consolidated under 100 kPa pressure at Geotechnic Laboratory of Sakarya University. After consolidation samples were frozen in fridge to keep their form for one day before placing them in the cell of dynamic test system. Dynamic tests have been conducted by applying an appropriate stress ratio on the frozen samples placed in a triaxial test system (CTX-Cyclic Triaxial Test). The affect of clay contents on dynamical behavior of silty soils have been analyzed.

Pore pressure ratios have been decreased with clay content was increased at 15th cycle of the dynamic loading that represents the earthquake magnitude of 7,5, for silty soils. Similarly, the value of the deformation also decreases. Therefore it can be said that clay content of silts is an important parameter that it affect the seismic behavior of the silty soil.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde meydana gelen depremler sonucunda zeminlerde kayma direnci kayıpları ve yenilmeler meydana gelmiştir. Deprem etkisi altında zeminlerin ne tür bir davranış sergileyeceği mühendislik ve geoteknik açısından çok önemlidir. Zeminlerin deprem sırasındaki davranışının anlaşılabilmesi ve izlenmesi için çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmeleri zeminlerin farklı mertebelerde şekil değiştirmelerine, farklı davranış göstereceği hallere ulaşmasına neden olmaktadır. Bu şekil değiştirmeler uygulanan kayma gerilmesi genliğine ve yükleme hızına bağlı olarak, zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre zemin içerisinde değişik etkiler bırakmaktadır. Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliğinin temel amacı, zeminlerin tekrarlı yükler altında uğrayacakları deformasyonları belirlemek ve yapılacak farklı mühendislik yapıları için zeminden kaynaklanan dinamik etkilerin derecesini saptamaktır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar, kohezyonlu ince daneli ve kohezyonsuz kaba daneli zeminlerin, tekrarlı yükler altında deformasyonlara uğrayarak mukavemetlerinde önemli oranda kayba uğradığını göstermektedir. Bu kayma direnci kayıpları sonucu oluşan yumuşama ve sıvılaşma nedeniyle, zeminde kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. İçerisinde düşük oranda kil olan siltlerde boşluk suyu basıncı artışının artan deformasyonların yanında kritik değerlere ulaşması sonucu taşıma gücünde önemli miktarda azalma meydana geldiği görülürken, ince daneli kumlarda da artan boşluk suyu basınçları efektif gerilmelerde önemli ölçüde azalmaya yol açmakta, zeminde kalıcı deformasyonlar oluşmasına sebep olmaktadır.

Kumların ve killerin statik ve dinamik davranışları geçmişte birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Siltli zeminlerin dinamik davranışı ile ilgili çalışmalar ise son

15 yılda literatürde yerini almaktadır. 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda görülen zemin yenilmelerinin kaynağı olarak siltler gösterildiği için bu zeminler mercek altına alınmıştır. Özellikle siltli zeminlerin deprem esnasındaki davranışıyla ilgili belirsizlikler ilgiyi bu yöne çekmektedir. Depremlerde tekrarlı kayma gerilmeleri alan zeminler bazı koşullar gerçekleştiğinde işlevlerini yitirirler. Bu kayıplar çevrimsel hareketlenme, sıvılaşma, taşıma gücünü yitirme, aşırı toplam ve farklı oturmalar ve yanal yayılma (akma) biçiminde belirlemektedir. 1964 Alaska depreminden sonra 1999 Marmara depreminde Adapazarı'nda görülen zemin yenilmelerinin kaynağı olarak siltli zeminler gösterilmiştir [1], [2], [3].

Bu çalışmada Adapazarı Yenigün Mah. Tacettin Sert arazisinden alınan siltli zemin numunesinin içerdiği silt boyutundaki daneler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarına getirilip kil ve kum içeriği ayıklanmıştır. Kil ve kum içeriği ayıklanan silt numune ile bu numuneden ayırtlanmış kil kullanılarak farklı kil oranlarında hazırlanan silt numuneler elde edilmiştir. 5 farklı kil yüzdesindeki silt numuneler, % 100 siltli numune, % 100 killi numune ve çöktürülmüş siltli numune olmak üzere 8 farklı numunenin dinamik davranışı dinamik üç eksenli (CTX) deney yardımı ile detaylı olarak incelenmiştir.

BÖLÜM 2. ZEMİNİN DİNAMİK/SİSMİK DAVRANIŞI

Geçmişte dünyanın çeşitli bölgelerinde yaşanmış değişik büyüklüklerdeki depremler ve gelecekte yaşanma ihtimali olan bölgelerde yapılacak olan mühendislik yapılarında gerekli deprem büyüklüklerinin belirlenebilmesi için bu yerlerdeki temel altı zeminlerinin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Zeminlerin statik yükler altındaki davranışlarını önceden tayin etmek ne kadar önemli ise özellikle deprem bölgelerinde inşa edilecek yapıların güvenilirliği açısından boyutlandırmalarda dinamik zemin davranışlarının göz önüne alınması da önem taşır. Bu nedenle, zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özellikleri, farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında yapılacak olan deneylerle belirlenmelidir [4].

Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için 1960'lardan bu yana birçok deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Zeminin dinamik/sismik koşullar altındaki davranışını anlamada en kolay yol zemin yenilmelerinin tanımlanmasıdır. Zemin yenilmesi; batık veya doymuş zeminin deprem sırası ve hemen sonrasında çevrimsel hareketlilik kazanması, sıvılaşması, temel altında taşıma gücünü yitirmesi, eğimli arazide akması, uzun süren deprem sırasında tekrarlı yükleme sonucu aşırı sıkışmalar göstermesi olaylarını kapsar. Bu olayları birbirinden ayırmak da her zaman kolay olmamaktadır [5].

Kumlu ve killi zeminlerin dinamik yükler etkisinde davranışları son yüz yılda çokça incelenmiş olup bu zeminlerde ki yüklemelerin ne tür sonuçlar doğuracağı tahmin edilebilmektedir. Siltli zeminlerde ise bu kadar fazla çalışma yapılmadığından son yıllarda bu alana yönelme olduğunu gözlemlemekteyiz. Özellikle Adapazarı gibi genç akarsu/göl ortamlarında oluşmuş zeminlerin geoteknik özelliklerinin kısa mesafelerde büyük farklılık göstermeleri nedeni ile daha çok laboratuvar çalışmalarının gerekliliği anlaşılmış, suya doymuş kum ve siltlerde görülen ve yapılarda hasarlara neden olan

zemin yenilmesi problemleri nedeniyle dinamik üç eksenli kesme deneylerinin (CTX) önemi artmıştır.

2.1. Dinamik Zemin Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Tekrarlı yükler altındaki zeminlerin davranışı araştırılırken arazideki mevcut zemin koşullarının aynen laboratuvarda modellenmesi gerekmiştir. Buna karşın, araziden alınan zemin numunelerinde gerek numune alımı gerekse numunelerin laboratuvara gelişi sırasında, gerekse laboratuvarda yapılacak deney için numune hazırlanması sırasında meydana gelen örselenme nedeniyle laboratuvar deney sonuçlarının tek başına yorumlanması beraberinde bir takım olumsuzluklar getirebilir. Meydana gelen bu olumsuzlukların en aza indirilmesi için arazide ve laboratuvarda yapılan deneyler birlikte değerlendirilmelidir [4].

Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliği kapsamında yapılan laboratuvar ve arazi deneylerinde genel olarak şu zemin özellikleri belirlenmeye çalışılır.

1. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi; dinamik kayma modülü (elastik kayma deformasyonlarında, G_0 , kayma modülü-birim kayma ilişkisi), elastisite modülü, sönüm oranı,
2. Dinamik kayma mukavemeti özellikleri; dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı,
3. Konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte hacimsel deformasyon değişiminin belirlenmesi,
4. Boşluk suyu basıncı gelişimi.

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları açıklanırken, bunları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri olarak iki gruba ayırabiliriz. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak sönüm oranı ve dinamik kayma modülünün birim şekil değiştirmeye bağlı olarak tanımlanması gerekir. Bu özelliklerin belirlenmesi esnasında laboratuvarda zeminin elastik davranış gösterdiği 10^{-6} 'dan küçük deformasyon seviyelerinde deneyler yapılırken, arazide de zeminin doğal yapısı bozulmadan

yerinde özelliklerinin belirlenmesine çalışılır. Mukavemet özelliklerinin belirlenebilmesi içinde göçme seviyesi olarak belirlenen birim kayma seviyesine ulaşmak için gerekli dinamik kayma gerilmesi oranının ve çevrim sayısının bilinmesi gereklidir [6].

Günümüze kadar yapılan çalışmalar, kohezyonlu, ince daneli ve kohezyonsuz kaba daneli zeminlerin, tekrarlı yükler altında büyük deformasyonlara uğrayarak mukavemetlerinde önemli oranda kayba uğradığını göstermektedir. Bu mukavemet kayıpları sonucu oluşan yumuşama ve sıvılaşma nedeniyle, zeminde kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. İçerisinde belli oranda kil olan siltlerde boşluk suyu basıncı artışının artan deformasyonların yanında sınırlı kalması sonucu taşıma gücünde önemli miktarda azalma meydana geldiği görülürken, ince daneli kumlarda artan boşluk suyu basınçları efektif gerilmelerde önemli ölçüde azalmaya yol açmakta, zeminde kalıcı deformasyonlar oluşmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilenler, diğer araştırmacıların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına etkileyen parametreler, kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmayı doğrudan etkileyen,

1. Dane şekli,
2. Dane boyutları ve dağılımı,
3. Boşluk oranı (relatif sıklık),
4. Birim kayma genliği,
5. Çevre basıncı,
6. Çevrim sayısı,
7. Orta asal gerilme,
8. Efektif konsolidasyon basıncı,
9. Yatay toprak basıncı katsayısı

şeklindedir. Belirli miktarda plastisiteye sahip kohezyonlu zeminlerde ise yumuşamaya bağlı taşıma gücü kaybına etkileyen en önemli parametreler,

1. Su muhtevası,
2. Plastisite indisi,
3. Çevre basıncı,
4. Aşırı konsolidasyon oranı,
5. Yatay toprak basıncı katsayısı,
6. Doğunluk derecesi,
7. Birim kayma genliği,
8. Çevrim sayısı,
9. Efektif konsolidasyon basıncı

olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin doğal zeminlere olan etkisi, yapılan detaylı deneysel araştırmalarla belirlenmiştir. Ayrıca, numune hazırlama yönteminin ve kullanılan deney sisteminin sınır koşulları ve gerilme şekil değiştirme ilişkisi bakımından önemli oranda sonuçları etkilediği belirlenmiştir. Kullanılan deneysel yöntem ve numune özelliklerine bağımlılığı nedeniyle zeminlerin dinamik davranışları modellenirken sınır koşullarının ve yüklenme durumunun etkisi gözönüne alınmalıdır [7].

2.2. Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Kayma Direnci Özellikleri

Zeminlerin dinamik davranış özellikleri ve inceleme yöntemleri yüklenme ile birlikte zeminde oluşan şekil değiştirme miktarının mertebesiyle ilişkilidir. Elastik ve elastoplastik davranış koşullarına bağlı olarak düşük deformasyon seviyelerinde zeminlerin gerilme şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Buna karşın daha düşük deformasyonlarda yük altında zeminde oluşan mukavemet kayıpları, plastik davranış özellikleri önem kazanmaktadır.

Kumlu ve siltli zeminlerin belirli gerilme koşulları altında şekil değiştirme seviyesinin artışıyla beraber çok farklı dinamik davranış özellikleri ortaya koyduğu bilinmektedir. Buna paralel olarak, kumların dinamik davranış özelliklerini tüm yönleriyle inceleyebilmek için, kumların tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yanı sıra artan şekil değiştirme seviyesi ile beraber zeminin mukavemet özelliklerindeki değişiminde belirlenmesi gerekir. Deprem gibi önemli tekrarlı yüklere

maruz kalan zemin tabakaları geniş sınırlar içerisinde değişen genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında kalırlar. Bunun sonucunda, zemin boşluklarındaki suyun yer değiştirebilmesi için yeterli süre olmadığından zemin tabakalarında boşluk suyu artması ve şekil değiştirmeler meydana gelir. Tekrarlı yükler altında zemin tabakalarında meydana gelen bu gerilme durumunu ve davranış biçimini laboratuvarında inceleyebilmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir [8].

Suya doygun kumlu ve siltli zeminler ani yüklemeler altında içerisindeki suyu dışarı atamadıkları için drenajsız koşullarda kayma gerilmelerine maruz kalırlar. Bunun sonucunda böyle bir yükleme ile kum zeminde büyük şekil değiştirmeler oluşmakta ve hatta sürtünme kuvvetleri yenilerek zemin sıvı davranış özellikleri gösterebilmektedir.

2.3. Dinamik Zemin Parametrelerinin Laboratuvarında Deneysel Olarak Belirlenmesi

Depremler sırasında oluşabilecek mertebede yüksek şekil değiştirme seviyelerinde zeminlerin dinamik özelliklerini deneysel olarak belirleyebilmek için, yaygın olarak

1. Dinamik üç eksenli deneyler (Dynamic triaxial test) (drenajlı ve drenajsız kesme)
2. Dinamik basit kesme (Dynamic simple shear test)
3. Burulmalı kesme (Torsional Shear test)
4. Sarsma tablası (Shaking Table)
5. Rezonant kolonu (Rezonant column test) deneyleri kullanılmaktadır.

BÖLÜM 3. SİTLİ ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI

Temel altı zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki davranış özelliklerinin bilinmesi için öncelikle deprem riski taşıyan yerler için önem taşımaktadır. Bu yüzden zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özellikleri farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında yapılacak deneylerle belirlenmelidir. Tekrarlı yük etkisinde ince daneli ve iri daneli zeminler farklı davranışlar sergilemekte, farklı türde yenilmeler meydana gelebilmektedir. Tekrarlı yükler altında; kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma ve kohezyonlu zeminlerde ise çevrimsel yumuşama sonucunda aşırı deformasyonlar ve göçme durumları meydana gelebilmektedir. Sıvılaşmanın sadece gevşek kumlarda meydana geldiği algısı ise son yıllarda meydana gelen depremlerden sonucunda yapılan araştırmalara bakıldığında değişmiş, ince daneli zeminlerde de oluşabildiği gözlemlenmiştir. 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı zeminlerinde meydana gelen yenilmelerin daha çok ince kumlu-siltli zeminlerde yoğunlaştığının fark edilmesi bu görüşü güçlendirmektedir [9].

Kum içerisinde bulunan silt ve kil zeminlerin kumun dinamik davranışını etkilediği 1960'lı yıllardan beri bilinmektedir. İnce dane içeriğinin ve palstisitenin kumluların sıvılaşmaya karşı direncini ne şekilde etkilediği konusunda tam bir fikir birliği sağlanmış değildir. Yapılan bazı çalışmalarda silt içeriğindeki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini arttırdığı sonucuna varılırken, diğer bazı çalışmalarda silt içeriği oranındaki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Siltlerde sıvılaşmanın, en azından başlangıç sıvılaşmasının, kumlarda görülen kolaylıkla oluşmadığı, hatta MI ve MH siltlerde olağan deprem koşullarında ($M_w < 7$, $t < 50s$) belki de hiç belirmediği yolunda kuşku vardır. Buna bağlı olarak da siltlerin kumsu (sand like) ve kilsi (clay like) olarak ayırtlanması ve sıvılaşabilir grubun daha

ziyade kumsular olduğu öne sürülmüştür [10]. Diğer bir deyişle, killi siltte ve killi zeminlerde sadece çevrimsel yumuşama (cycling softening) olası iken kumu karışımlarda tipik sıvılaşıma belirtileri ortaya çıkmaktadır. Kesin yargıya varılamayan birçok durumda da deney yapılması hemen tüm araştırmacılarca önerilmektedir.

Siltli zeminlerin deprem performansı için Çin kriteri olarak bilinen bilgiler özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında çeşitli araştırmacılar tarafından yeniden değerlendirilmekte olup sürekli güncellenmektedir. İnce daneli zeminlerin sıvılaşması konusunda gelinen son nokta Adapazarı Kriteri olarak tanımlanmıştır [11].

İnce daneli zeminlerde kumlarda olduğu gibi başlangıç sıvılaşmasına kolaylıkla erişilememesi kum ve iri silt daneleri arasında oluşan “kil köprüleri”nin geçirimsizliği azaltıp boşluk suyu basıncı rejimini kısıtlaması yanında, karışımın kalıntı direncinin aşırı düşük kalmamasından kaynaklanmaktadır [12]. Bu mantık tutarlı ise, ince daneli zeminin dinamik direncinin artan kil yüzdesi ile yükselmesi gerekecektir. Plastisite indisindeki değişimler aşırı olmadığından kil yüzdesinin CRR üzerindeki etkisinin öncelikle değerlendirilmesi daha tutarlı bir yol gibi gösterilebilir.

Ural siltli zeminlerde sıvılaşmanın deneysel incelemesini yapmıştır. Depremlerin çok değişkenli bir yapıya sahip olduğunu söyleyerek, deprem sonucu meydana gelen sıvılaşmanın kumlarda olan etkisinin kanıtlanabilir bir davranış olduğunu belirterek bunun yanında siltlerde meydana gelebilecek sıvılaşma davranışının henüz net olarak ne tür bir davranışa sahip olduğunu açıklanamadığını dile getirmişlerdir. Çalışmalarını farklı kil yüzdeleri ilavesi ile siltli zeminler üzerine dinamik üç eksenli deneylerle yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları, ince daneli zeminlerin sıvılaşabileceği noktasında kullanılan kriterlerle kıyaslamışlardır [13].

Özay ve Erken killi zemin numunelerinde plastisitesinin dinamik mukavemet üzerinde ne tür değişimler göstereceğini anlamak amacı ile araziden piston numune alıcılarla örselenmemiş numuneler almışlardır. Alınan örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuvarında dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Dinamik deneyleri 0,5 Hz frekans sabitliğinde ve farklı genliklerde yapmışlardır. % 5 düşey boy değişimi değeri

için, dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı ve N değişimleri oluşturmuşlardır. Dene sonuçlarına göre aynı kıvamda ve aynı oranda konsolide edilen numunelerden plastisitesi yüksek olan numunenin dinamik kayma gerilmesi oranının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [14].

Kaya ve arkadaşları Adapazarı zeminlerinin dinamik özellikleri belirlemek adına 17 Ağustos 1999 depremi sonra kent merkezinde sondaj çalışmaları yapmışlar ve alınan numuneler üzerinde deneyler yaparak zeminleri dinamik mukavemet özelliklerini belirlemişlerdir. Almış oldukları örselenmemiş suya doygun silt, kil ve siltli kum numunelerini $f = 0,1$ Hz frekansında değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarında deneylere tabi tutmuşlardır. Tekrarlı yük altında çevrim arttıkça şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncının arttığı, numunelerin plastisitesinin artması ile mukavemetin arttığı sonuçlarına ulaşmışlardır. Adapazarı zeminlerinin düşük dinamik kayma gerilmesi oranlarında sıvılaştığını ve göçtüğünü söyleyerek, bu tür zeminlerde yapılaşma olmadan önce araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir [15]

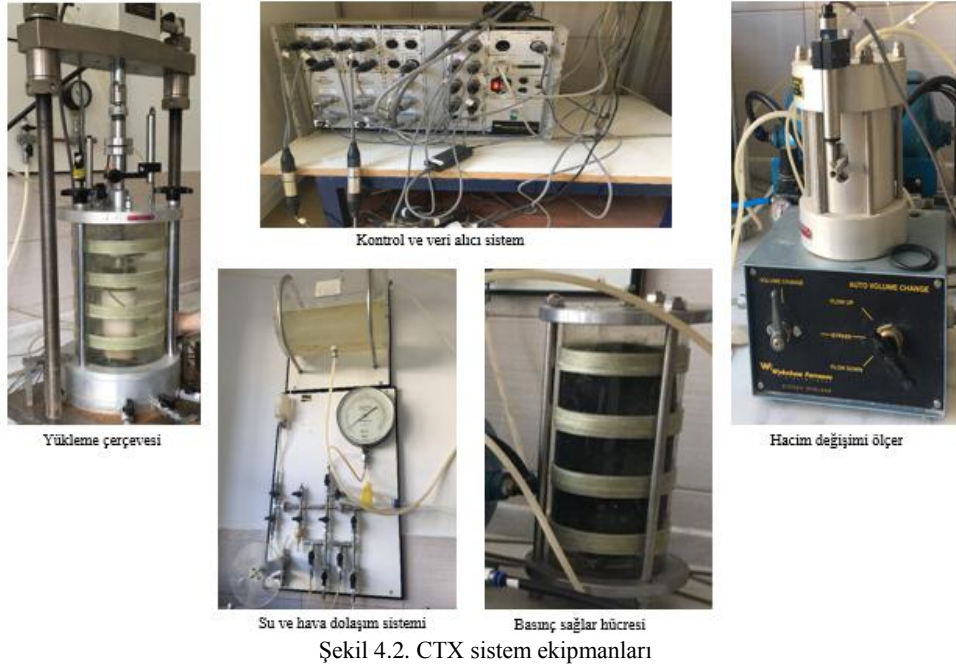
BÖLÜM 4. ÜÇ EKSENLİ DİNAMİK DENEY (CTX)

Üç eksenli deney ilk defa 1930'lu yıllarda Rendulic tarafından monoton yükleme yapmak üzere geliştirilmiştir. O tarihlerde numuneyi tek düzlemde kesen kesme kutusunun bu düzlemde dahi üniform olmayan gerilmeler oluşturduğu gerekçesi ile üç eksenli deney artan rağbet görmüştür. Kesme kutusundan farklı olarak kayma düzlemlerinde oluşan gerilmelerin bilinmesi yanında, drenajın çift taraflı kontrol edilebilmesi ve boşluk suyu basınçlarının sürekli izlenebilmesi deneyin ek olumlu yanları olarak gösterilmiştir. CTX, statik deney sisteminden esas itibarıyla yük uygulama biçimi ile farklıdır. Burada da numune önce doyurulmakta, sonra makul bir geri basınca ($>200\text{kPa}$) karşı konsolide edilmekte ve kesme aşaması drenajsız olarak gerçekleştirilmektedir. Yükleme tekrarlı olduğundan veri kayıtlarının elektronik olarak izlenmesi zorunluluğu vardır.

Çalışmada Wykeham Farrance (Controls) firması 1999 yılı imalatı CTX sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.1.). Özel yazılımı olan CTX sistem 50-100 mm çaplı numuneye $\pm 5\text{kN}$ duyarlılıkla 50-60 Hz frekansta hidrolik sistemle yükleme yapabilmektedir. Seçilen hücre sıvısı basıncı σ_3 dinamik deneylerde etkili bir değişken olduğundan, Adapazarı deprem koşullarında sıvılaştığı belirlenmiş zeminlerin çoğunlukla üst 10 m' de bulunduğu göz önüne alınarak değişmez $\sigma_3=100\text{ kPa}$ seçimi yapılmıştır. Boşluk suyu basınçları u_w numunenin geri basınçla doyurulmasından sonra tam drenajsız koşulda ölçülmüştür. CTX deneyi sırasında alınan okumalar numunede oluşan konsolidasyon sonucu beliren hacim değişimi (ΔV), boşluk suyu basınçları (u_w), deviator gerilme (σ_d), eksenel birim boy değiştirme (ϵ_z) olarak özetlenebilir. Dinamik yükleme sırasında deney $\epsilon_z = 0,20$ 'ye kadar sürdürülebilmektedir. CTX sistem ekipmanları Şekil 4.2.'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.1. Dinamik deneylerin yapıldığı CTX sistemi



Şekil 4.2. CTX sistem ekipmanları

Dinamik üç eksenli deney;

1. Doyurma aşaması,
2. Konsolidasyon aşaması,
3. Kesme aşaması, olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilir.

4.1. Doyurma Aşaması

Doyurma işlemi geri basınç uygulaması ile yapılmalıdır. Bunun amacı, boşluklarda ve bağlantılarda yer alan ayırık havanın eriyik hale gelmesi ve boşluk suyu basıncı değerinin negatife düşme riskinin ortadan kaldırılmasıdır. Geri basıncı uygularken zemin numunesinin istenmeyen ön gerilmelere maruz kalmaması için basınçlar kademeli olarak arttırılır. Her kademe değişikliğinde boşluk suyu basıncının dengeye gelmesi beklenir ve bu aşamalarda boşluk suyu basıncı parametresi “B” değerinin artışı izlenir ve $B = 0,95-1,00$ değerlerine ulaşması beklenir. Boşluk suyu basıncı parametresi B’ nin değeri 0,95 veya büyükse ve geri basınç artışına rağmen B değeri değişmiyorsa numune doygun duruma gelmiş kabul edilir ve konsolidasyon aşamasına geçilir.

4.2. Konsolidasyon Aşaması

Konsolidasyon aşamasının amacı, numunenin kayma direnci ölçümü sırasında olması gereken efektif gerilme altında denge durumuna erişmesidir. Konsolidasyon aşamasında en az bir logaritmik çevrim tamamlanana kadar veya birincil konsolidasyonun %100’e ulaşmasına dek beklenir. Bu süre zemin numunesinin dane dağılımına göre değişebilmektedir. İstenen dinamik yük yaklaşık olarak aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$P_c = 2\sigma'_{3c} * CSR * A_c \quad (4.1)$$

P_c = Numuneye uygulanan tahmini dinamik yük

σ'_{3c} = Konsolidasyon basıncı

CSR = Hedeflenen dinamik gerilme oranı (%)

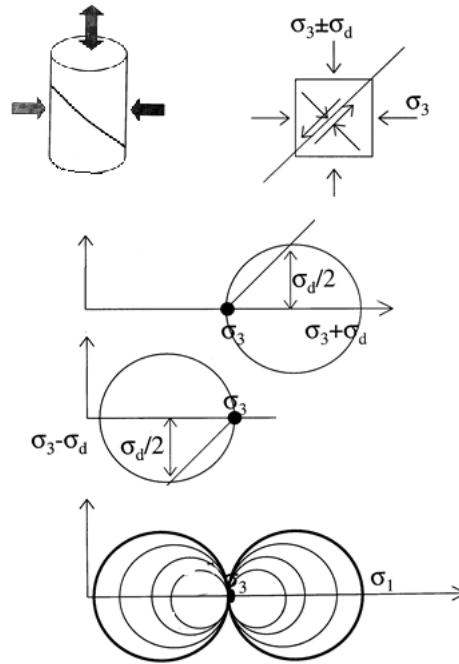
A_c = Konsolidasyon aşamasından sonra numunenin kesit alanı

4.3. Kesme Aşaması

CTX deneyinde kesme sırasında uygulanan ve numunede oluşan gerilmeler Şekil 4.3.'te gösterilmektedir. Buradan tekrarlı uygulanan deviator gerilmenin yön değiştirdiği ve gerilme dairelerinin giderek büyüdüğü izlenebilmektedir. Deviator gerilmenin uygulanması ile numune şekil değiştirmekte, ancak drenaja izin verilmediğinden boşluk suyu basınçları ve aksel birim boy kısaltmalar ϵ_z çevrim sayısı N arttıkça yükselmektedir. Bu durumda olası kayma düzlemindeki çevrimsel gerilme,

$$CSR = \frac{\sigma_{dev}}{2\sigma'_3} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2\sigma'_{3c}} \quad (4.2)$$

ile ifade edilmektedir.



Şekil 4.3. CTX deneyde yükleme ve oluşan gerilmeler

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Bu çalışmada laboratuvar ortamında bulamaç yöntemiyle hazırlanan farklı kil oranına sahip Adapazarı Yenigün mahallesinden elde edilmiş siltli numuneler kullanılmıştır. Silt genel manasıyla su ile taşınan çok ince daneli (2 mikron ile 74 mikron arasında) zeminler olarak tanımlanabilir (TS1500/2000) [16]. Fiziksel deneylerle zemin sınıfları belirlenen bu siltlerin tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemek üzere numuneler üzerinde CTX (Dinamik üç eksenli deney) yapılmıştır. Deneyler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

5.2. Numune Hazırlanması

Adapazarı Yenigün Mah. Tacettin Sert arazisinden alınan siltli doğal numune ham numune olarak alınmıştır. Numune ilk olarak 40 no'lu elekten elenerek büyük iri danelerden arındırılmış, numunenin elek altından geçen kısmı laboratuvar ortamında bekletilerek havada kurutulmuştur.



Şekil 5.1. Silt numunenin el arabasıyla laboratuvara taşınması

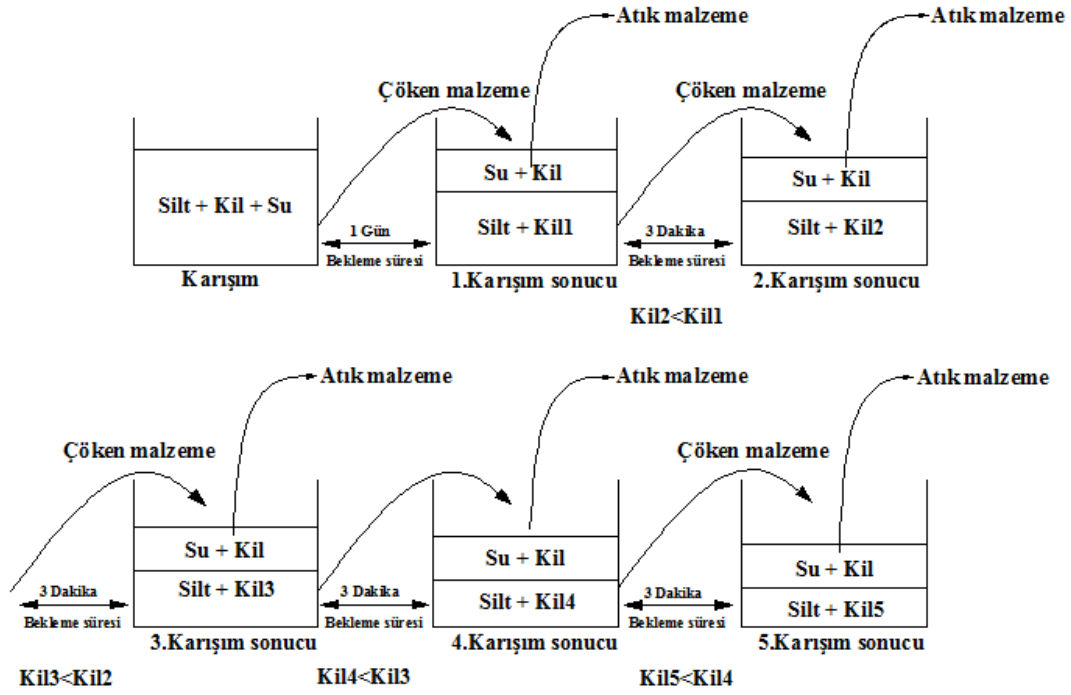


Şekil 5.2. Silt numunenin 40 nolu elekten elenmesi işlemi



Şekil 5.3. 40 nolu elekten geçirilen silt numunenin kurutulması için serilme işlemi

Zemin numunesi içerisindeki silt ve kili birbirinden ayırmak için deneysel çalışmanın başında öncelikle çöktürme yöntemi uygulanmıştır. Çöktürme yöntemi ile kile nazaran daha ağır olan siltli zeminin dibe çökmesi ve üst kısımda suda asılı halde kalan killi kısmın ayrıştırılması hedeflenmiştir. Bu yöntemde, zemin numunesi boş bir kova içerisinde koyulmuş ve üzerine su eklenerek karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım bir gün bekletilerek karışımın dinlenmesi ve çökmesi sağlanmıştır [17]. Tamamen çöken zemin numunesi 3 dakika ara ile 5 defa karıştırıcı ile karıştırılmış ve her karıştırma - bekleme aşaması sonunda karışımın bulunduğu kovanın üst kısmındaki killi süspansiyon boşaltılmıştır. Her defasında bu süspansiyon içerisinde kalan kil numuneleri siltli zeminden ayrılmıştır. Böylece sonunda kovaların dibinde mümkün olduğunca az kil oranına sahip siltli zemin elde edilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan sonra elde edilen zemin numunesine sınıflandırma amaçlı hidrometre ve Atterberg deneyleri yapılmış ve elde edilen zemin sınıfı ile kil oranı belirlenmiştir. Uygulanan çöktürme yönteminin aşamaları Şekil 5.4.'te gösterilmiştir [18].



Şekil 5.4. Çöktürme tekniği aşamaları

Adapazarı Yenigün Mah. Tacettin Sert arazisinden alınan siltli zemin numunesinin içerdiği silt boyutundaki daneler mümkün olduğunca ayıklandıktan sonra silt numunesinin içerisine aşağıda verilen oranlarda çöktürme aşamasında süspansiyon bölgesinden alınan killi zemin ilave edilerek 2500 gr ağırlığında 5 farklı homojen karışım hazırlanmaya çalışılmıştır. Ek olarak %100 siltli doğal numune, %100 killi numune ve çöktürülmüş siltli numuneler de hazırlanmış, deneysel çalışma 8 farklı numuneyle yürütülmüştür (Tablo 5.1).



Şekil 5.5. Farklı oranlarda kil ve silt içeren numunelerin hazırlanması

Tablo 5.1. Hazırlanan numunelerin silt ve kil ağırlıkları

| Numune No | Numune Tanımı | Silt Ağırlığı (gr) | Kil Ağırlığı (gr) |
|-----------|---------------------|--------------------|-------------------|
| C52 | Yüzdürülmüş Silt | 2500 | - |
| C65 | %100 Silt | 2500 | - |
| C116 | %10 Kil Katkılı Kil | 2272 | 228 |
| C128 | %20 Kil Katkılı Kil | 2084 | 416 |
| C154 | %30 Kil Katkılı Kil | 1923 | 577 |
| C161 | %40 Kil Katkılı Kil | 1786 | 714 |
| C187 | %50 Kil Katkılı Kil | 1667 | 843 |
| C210 | %100 Kil | - | 2500 |

5.3. Fiziksel Deneyler

Hazırlanan numunelerin fiziksel deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler; elek analizi deneyi, Atterberg (kıvam) limitleri; Casagrande ve koni penetrasyon yöntemleri ile likit limit, plastik limit, hidrometre ve pipet deneyleridir. Elek analizi deneyi Şekil 5.6'de, likit limit deneyleri, Casagrande yöntemi Şekil 5.7'de, koni düşürme yöntemi Şekil 5.8'de, plastik limit deneyi Şekil 5.9'da, dane çapı dağılımının bulunması için hidrometre ve pipet deney numunesi Şekil 5.10'da, hidrometre deneyi Şekil 5.11'de

ve pipet deneyi Şekil 5.12’de gösterilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan bu numunelerin TS 1900/2006 uyarınca belirlenen fiziksel özellikleri Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Numunelerin fiziksel özellikleri

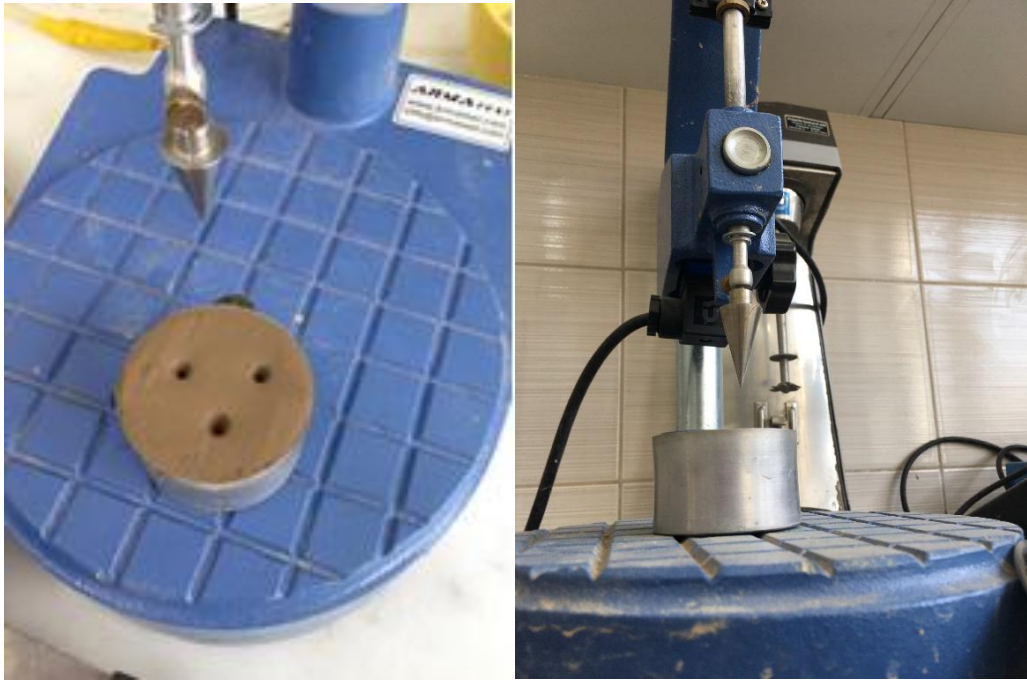
| Num. No | Numune Tanımı | LL _{Cas} | LL _{Koni} | PL | PI | %C _{Hid} | %C _{Pipet} | Sınıf (TS1500) |
|---------|----------------------|-------------------|--------------------|----|----|-------------------|---------------------|----------------|
| C52 | Yüzdürülmüş Silt | 33 | 33 | 28 | 5 | 7,5 | 5,2 | ML |
| C65 | %100 Silt | 33 | 34 | 24 | 9 | 6 | 6,5 | ML |
| C116 | %10 Kil Katkılı Silt | 33 | 36 | 28 | 5 | 11 | 11,6 | ML |
| C128 | %20 Kil Katkılı Silt | 33 | 36 | 29 | 4 | 12,5 | 12,8 | ML |
| C154 | %30 Kil Katkılı Silt | 33 | 37 | 29 | 5 | 14 | 15,4 | ML |
| C161 | %40 Kil Katkılı Silt | 34 | 35 | 30 | 4 | 15,5 | 16,1 | ML |
| C187 | %50 Kil Katkılı Silt | 35 | 35 | 26 | 9 | 17 | 18,7 | MI |
| C210 | %100 Kil | 48 | 50 | 33 | 15 | 20,5 | 21 | MI |



Şekil 5.6. Elek analizi deneyi



Şekil 5.7. Casagrande yöntemi ile likit limit deneyi



Şekil 5.8. Koni düşürme yöntemi ile likit limit deneyi



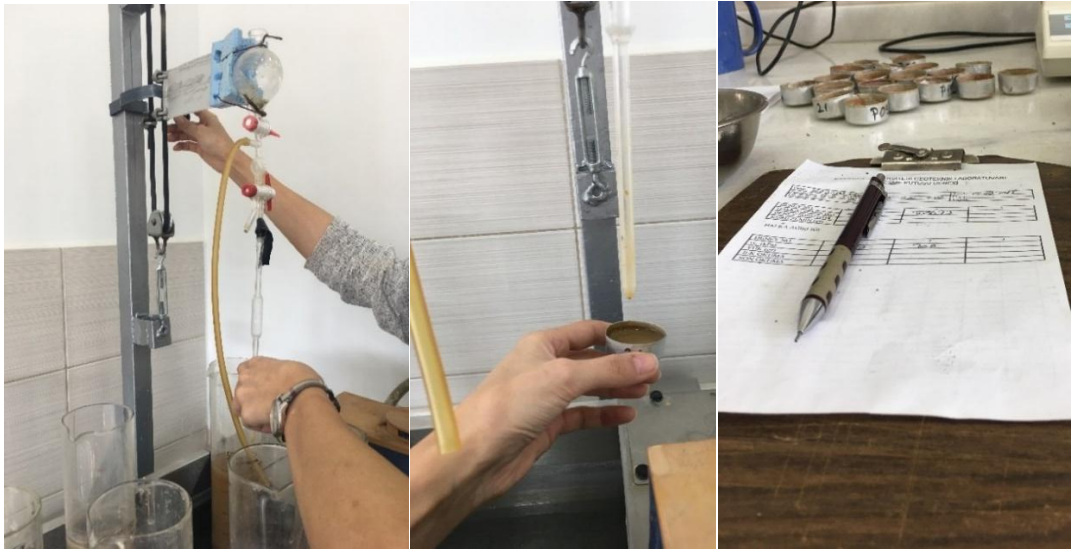
Şekil 5.9. Plastik limit deneyi



Şekil 5.10. Hidrometre ve pipet deneyi numuneleri



Şekil 5.11. Hidrometre deneyi



Şekil 5.12. Pipet deneyi

5.4. Dinamik Deneyler

Bu çalışmada elde edilen siltli numunelerin dinamik deneylere hazırlanması için bulamaç çökeli yöntemi tercih edilmiştir. Günümüzde bulamaç çökeli yöntemi ile numune hazırlama için bir standart yoktur. Bu çalışmada uygulanan yöntemde kuru numuneye su muhtevasını likit limitinin üzerinde bir değere çıkartacak kadar damıttık

su eklenip karıştırılmıştır (Şekil 5.13). 1 kg numune alınarak içerisine su 400 ml su ilave edilerek iyice karıştırılan bulamaç, su muhtevasının homojen bir şekilde numunenin her tarafında eşit olması ve bulamaç içindeki hava kabarcıkları çıkarılması için en az 2 saat boyunca desikatörde vakuma bırakılmıştır. Bu işlem esnasında numune birkaç defa daha karıştırılarak daha iyi bir sonuç alınmaya çalışılmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.13. Bulamaç çökeli yöntemiyle hazırlanan deney numunesi



Şekil 5.14. Hazırlanan numuneye vakum uygulama

Bulamaç haline gelen numuneler 5 cm çaplı hücrelere önce poroz taşı ardından filtre kağıdını takip ederek yerleştirilmiştir. Konsolidasyon için hazır hale getirilen numunelerin boyu konsolidasyon sonunda 10 cm civarında kalacak şekilde 5 cm çapındaki saydam sert plastik tüplere yerleştirilmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. Hazırlanan numuneyi plastik tüpe yerleştirme

Bu aşamada çok yumuşak olduğundan yükleme yapılmadan kendi askı ağırlığı altında yaklaşık 2 kg' da 24 saat bekletilmiştir (Şekil 5.16.). Numune ertesi günden başlayarak sonra yavaş yavaş arttırılan düşey kuvvet ile 4-5 günlük bir süreç içinde 100 kPa altında konsolide edilmiştir (Şekil 5.17.).



Şekil 5.16. Numunenin 1 kg ağırlığında 24 saat bekletilmesi



Şekil 5.17. Numunenin 100 kPa ağırlığında konsolide edilmesi

Konsolidasyon süreci tamamlanan numuneler 24 saat süreyle dondurucuya konulmuştur (Şekil 5.18.).



Şekil 5.18. Dondurulmuş deney numunesi

Yeniden oluşturulan bu numuneler 50x100 mm boyutlarında silindirik şekilde tıraşlanıp CTX deney aletine yerleştirilerek deneye tabi tutulmuşlardır.

Dondurucudan çıkarılan numuneler (Şekil 5.19), CTX deney hücresine numune yerleştirildikten sonra (Şekil 5.20) kontrol programına deney verileri ve numune bilgileri (numune boyutu, dinamik yük değeri, yükleme frekansı) girilmiştir. Deneye başlamak için gerekli düzenlemeler yapıp deney düzeneğinin hazır olduğundan emin olduktan sonra deneyin ilk aşaması olan doyum aşamasına geçilmiştir.



Şekil 5.19. Dondurulmuş deney numunesinin hücreden çıkarılması



Şekil 5.20. CTX deney cihazına yerleştirilen deney numunesi

Doyurma işlemi, numunenin şişmesine müsaade edilmeden ve kayma gerilmelerine maruz bırakmadan tüm boşluklarının su ile doldurulmasıdır. Numunede şişme meydana gelmemesi için hücre basıncı ve geri basınç sürekli birlikte yükseltilerek kontrol altında tutulur. Geri basınç uygulaması sırasında hücre basıncı ile geri basınç arasındaki fark, 35 kPa'ı geçmemelidir. Bu çalışmada doyurma esnasında çevre basıncı ile geri basınç farkı 10 kPa da tutulmuştur. Her doyurma kademesinde de çevre basıncı 50 kPa arttırılmıştır. Numunenin türüne, boşluk yapısına göre doyurma süreci farklı sürelerde tamamlanmaktadır. Doyurma aşaması boşluk suyu basıncı parametresi ($B = \Delta u / \Delta \sigma_3$) değeri 0,95'e ulaştığında sonlandırılmış ve konsolidasyon aşamasına geçilmiştir.

Bu çalışmada hücre basıncı daha önceki çalışmalardan hareketle Adapazarı zeminleri için deprem koşullarında uygun olduğu düşünülen 100 kPa olarak belirlenmiş ve konsolidasyonda bu değerde yapılmıştır.

Konsolidasyon süreci tamamlandıktan sonra dinamik kesme aşamasına geçilmiştir. Bu çalışmada çevrimsel gerilme oranı (CSR) 0,35 olarak sabit alınmış buna karşın her farklı kil yüzdesine sahip numuneler üzerinde 0,50 Hz frekansta deneyler

yürütülmüştür. Deney sonlarında hücreden çıkartılan numuneler (Şekil 5.21.) ağırlığı alındıktan sonra su muhtevası tayini için etüve atılmış, kuru ağırlıkları alınmıştır (Şekil 5.22.).



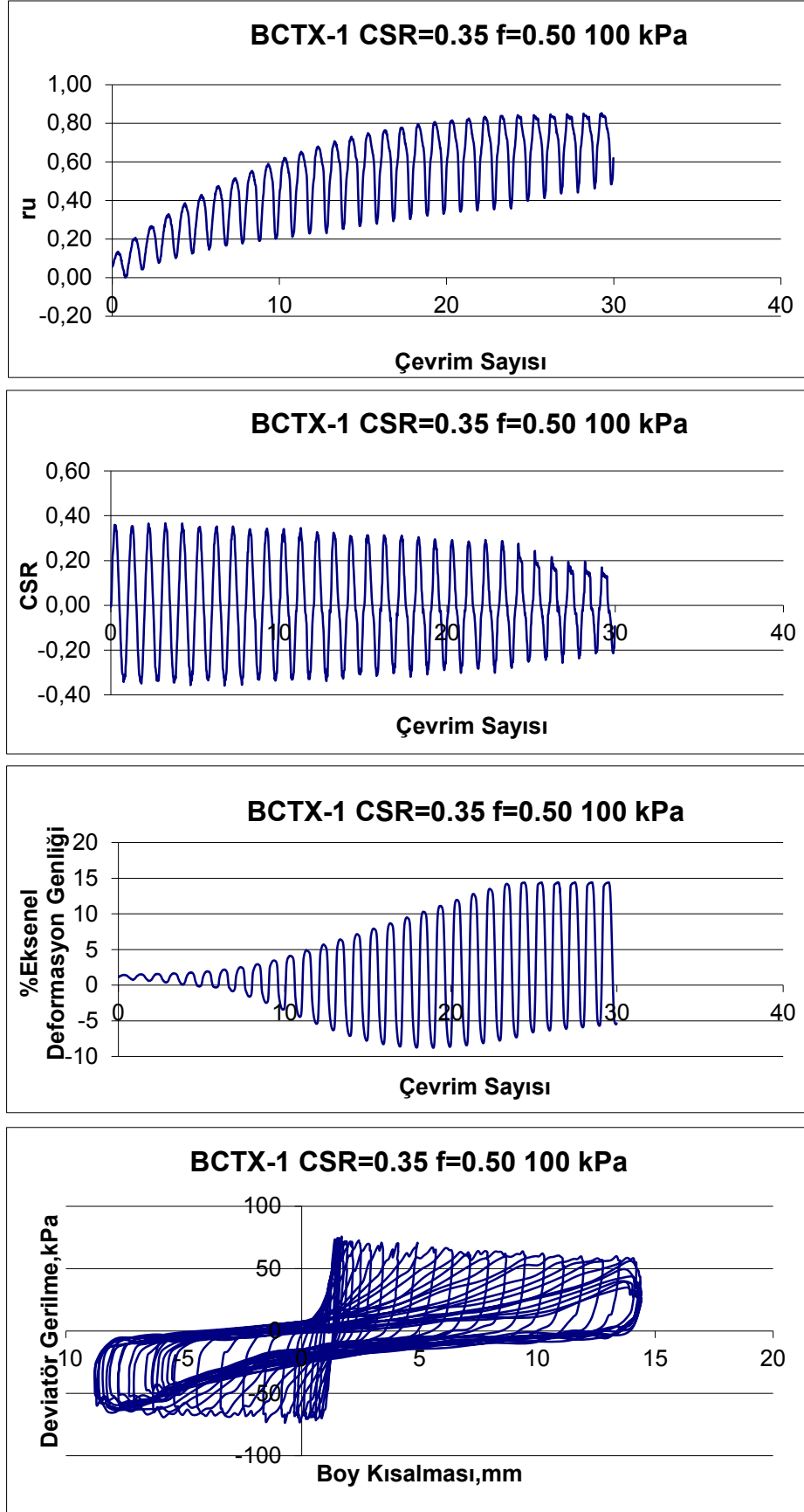
Şekil 5.21. Deney sonu numunenin görüntüsü



Şekil 5.22. Etüvden çıkan numunelerin görüntüsü

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada farklı kil oranlarında laboratuvar ortamında hazırlanmış siltli numunelerin dinamik davranışı incelenmiştir. Yeniden hazırlanmış numuneler üzerinde dinamik üç eksenli hücre kesme deneyleri (CTX) uygulanmıştır. CTX deney verileri aşağıda grafikler halinde verilmektedir. Bu grafiklerde çevrim sayısına karşılık boşluk suyu basıncı oranı (r_u), çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve % eksenel deformasyon genliği değerleri ile deviator gerilme değerine karşılık boy kısalması değerinin değişimi verilmektedir. Şekil 6.1'de C161 nolu numunenin 0,5 Hz frekansta yapılmış olan deney sonuçlarının çıktıları örnek olarak verilmiştir.



Şekil 6.1. %40 kil katkılı numunenin CTX deney verileri

Çöktürülmüş silt olarak hazırlanan C52 nolu numune 0,50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,83 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,89'tir ve maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 14'dur. Bu sonuca göre numunede 0,50 Hz frekans değerinde numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 4. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 5. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 8. çevrimde ulaşıldığı görülmüştür.

%100 siltli numune olarak hazırlanmış C65 nolu numune 0,50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,82 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,94'tür ve maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 12'dur. Bu sonuca göre %100 doğal siltli numunede numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 4. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 6. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 10. çevrimde ulaşıldığı görülmüştür.

%10 killi zemin katılarak hazırlanmış C116 nolu numune 0,50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,77 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,93'tür ve maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 25'dir. Bu sonuca göre C116 nolu sahip numunede numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 5. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 8. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 14. çevrimde ulaşıldığı görülmüştür.

%20 oranda killi zemin katılarak hazırlanmış C128 nolu numune 0.50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,60 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,71'dir ve maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 26'dır. Bu sonuca göre C128 nolu numunede numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 6. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 9. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 16. çevrimde ulaşıldığı görülmüştür.

%30 killi zemin katılarak hazırlanmış C154 nolu numune 0.50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,58 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,70'dir ve maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 30'dur. Bu sonuca göre C154 nolu numunede numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 7. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 6. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 12. çevrimde ulaşıldığı görülmüştür.

%40 oranda killi zemin katılarak hazırlanan C161 nolu silt numune 0,50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,72 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,86'tir maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 29'dur. Bu sonuca göre C161 nolu numunenin 0,50 Hz frekans değerinde boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 8. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 12. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 19. çevrimde ulaşıldığı görülmektedir.

%50 oranda killi zemin katılarak hazırlanmış C187 nolu numune 0,50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,59 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,70'dir maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 29'dur. Bu sonuca göre C187 nolu numunede numunenin boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 9. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 18. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 25. çevrimde ulaşıldığı görülmüştür.

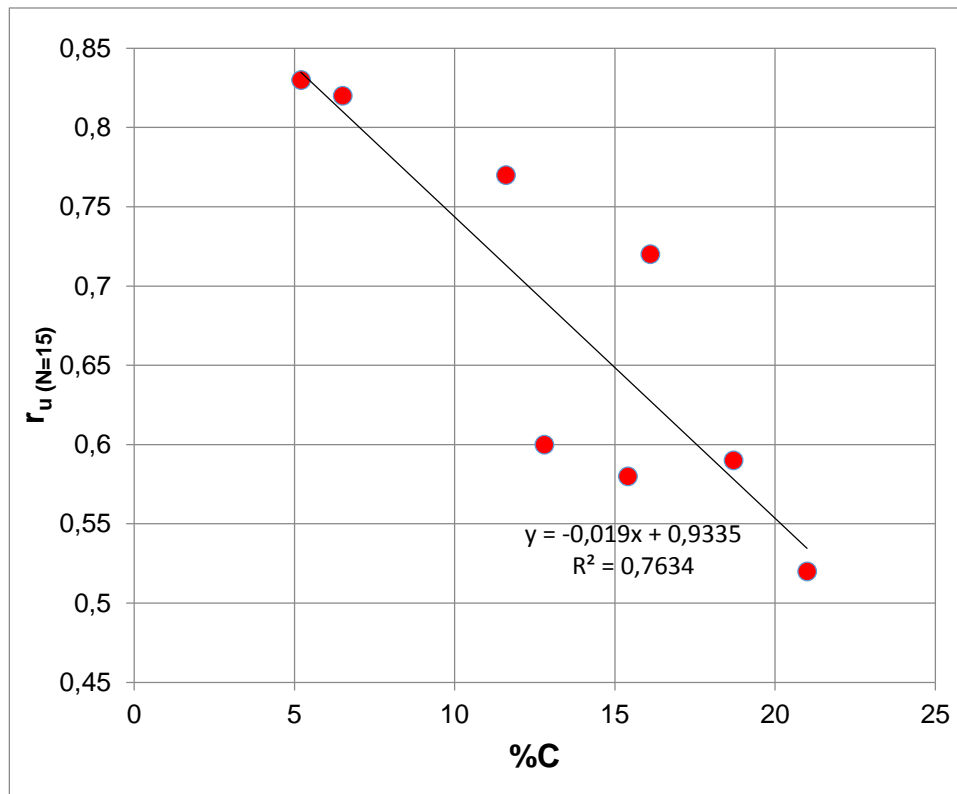
%100 killi numuneden oluşturulmuş C210 nolu numune 0,50 Hz frekans değerinde dinamik üç eksenli deney aletinde kesilmiştir. Bu numunenin 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı oranı (r_{uN15}) 0,52 olmuştur. Bu deneyde numunenin boşluk suyu basıncı oranı 1,00'a ulaşmamıştır. Numunenin maksimum boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u(max)}$) 0,72'dir maksimum boşluk suyu basıncı oranına ulaştığı çevrim sayısı ($N_{u(max)}$) 70'dir. Bu sonuca göre %21 kil oranına sahip C210 nolu numunede boşluk suyu basıncı oranının (r_u) 1,00'a ulaşmadığı ve numunede sıvılaşmanın meydana gelmediği söylenebilir. %2,5 eksenel birim deformasyona (ϵ) 38. çevrimde, % 5 eksenel birim deformasyona 50. çevrimde, %10 eksenel birim deformasyona 59. çevrimde ulaşıldığı görülmüştür.

Şekil 6.1.'e benzer şekilde tüm numuneler için hazırlanmış olan grafiklerden numunelerin farklı boşluk suyu basıncı oranı değerleri ve farklı eksenel deformasyon yüzdesi değerlerine (%2,5, 5 ve 10) ulaşması için gerekli çevrim sayısı değerleri ve 15 çevrim sayısı sonunda ölçülen boşluk suyu basıncı oranı değerleri belirlenmiştir. Bu veriler Tablo 6.1.'de özetlenmiştir.

Tablo 6.1. Numunelerin CTX deney sonuçları

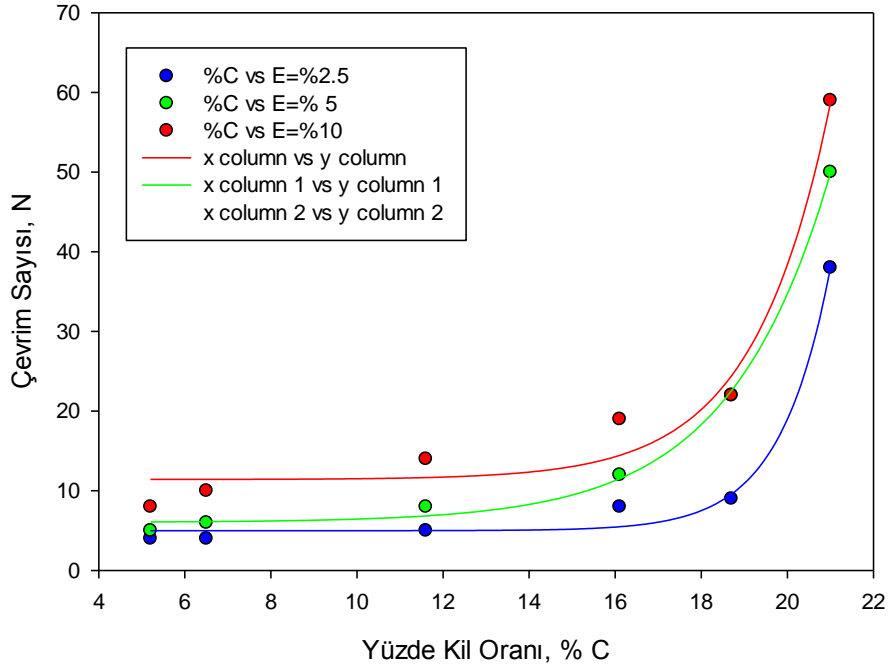
| Num.No | Numune Tanımı | $N_{ru=0,9}$ | $N_{ru=0,8}$ | $N_{ru=0,7}$ | E.d=%2,5 | E.d=%5 | E.d=%10 | N=15 için r_u |
|--------|----------------------|--------------|--------------|--------------|----------|--------|---------|-----------------|
| 1 | Yüzdürülmüş silt | 20 | 14 | 9 | 4 | 5 | 8 | 0,83 |
| 2 | %100 silt | 19 | 14 | 9 | 4 | 6 | 10 | 0,82 |
| 3 | %10 Kil katkılı silt | 23 | 17 | 13 | 5 | 8 | 14 | 0,77 |
| 4 | %20 Kil katkılı silt | 30 | 48 | 27 | 6 | 9 | 16 | 0,6 |
| 5 | %30 Kil katkılı silt | 35 | 28 | 31 | 7 | 6 | 12 | 0,58 |
| 6 | %40 Kil katkılı silt | 37 | 19 | 14 | 8 | 12 | 19 | 0,72 |
| 7 | %50 Kil katkılı silt | 55 | 38 | 24 | 9 | 18 | 25 | 0,59 |
| 8 | %100 Kil | 79 | 66 | 49 | 38 | 50 | 59 | 0,52 |

Şekil 6.2.'de 15. çevrimde ölçülen boşluk suyu basıncı oranının kil oranı ile değişimi çizilmiştir. Bu grafikten kil oranının dinamik davranış üzerindeki önemli etkisi doğrusal bir denklem ile temsil edilmiştir.



Şekil 6.2. N=15 için boşluk suyu basıncı-kil oranı grafiği

Sekil 6.3.'te %2,5, %5, %10 eksenel birim deformasyonun (ϵ) kil oranı ile değişim grafiği verilmiştir. Dinamik üç eksenli deneyi yapılan zemin numunelerinin kil yüzdesinin artmasıyla %2,5, %5, %10 eksenel deformasyon seviyeleri için gerekli çevrim sayısının arttığı görülmektedir.



Şekil 6.3. Eksenel deformasyon seviyelerinde çevrim sayısı-kil oranı grafiği

$$N_{r_u=0,99} = 11,4136 + 0,004 \times \exp^{(0,5607 \times \% \text{kil})}$$

$$R = 0,9870 \quad R^2 = 0,9742$$

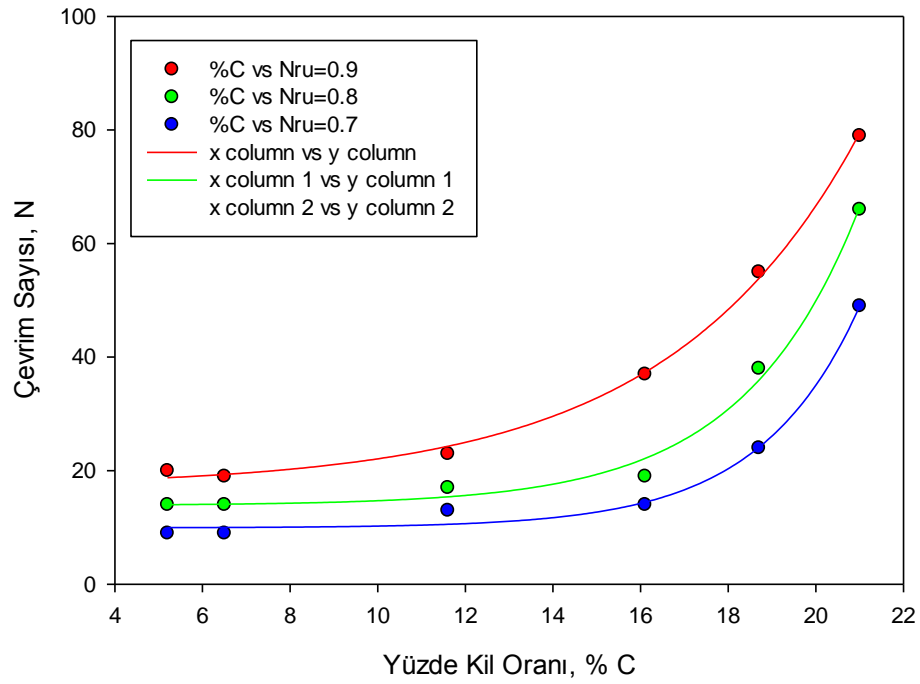
$$N_{r_u=0,8} = 6,0366 + 0,0059 \times \exp^{(0,4246 \times \% \text{kil})}$$

$$R = 0,9990 \quad R^2 = 0,9979$$

$$N_{r_u=0,7} = 4,9906 + 0,00000049 \times \exp^{(0,8576 \times \% \text{kil})}$$

$$R = 0,9951 \quad R^2 = 0,9836$$

Şekil 6.6.'da grafikte görüldüğü gibi $r_u=0,7-0,8-0,9$ değerleri için gerekli çevrim sayıları kil yüzdesi arttıkça artış göstermektedir. Artan kil oranıyla yapılan CTX deneylerde boşluk suyu basıncı artışlarının daha az kil oranına sahip numunelerde, yüksek kil oranına sahip numunelere göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Bu grafiklerden hareketle $r_u=1$ değerinde sıvılaşma olduğu göz önüne alındığında, kil oranı arttıkça sıvılaşma eğiliminde azalma olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 6.4. $r_u=0,9-0,8-0,7$ için çevrim sayısı-kil oranı grafiği

$$N_{r_u=0,99} = 17,1095 + 0,4991 \times \exp^{(0,2299 \times \% \text{kil})}$$

$$R = 0,9991 \quad R^2 = 0,9983$$

$$N_{r_u=0,8} = 13,8783 + 0,0190 \times \exp^{(0,3774 \times \% \text{kil})}$$

$$R = 0,9921 \quad R^2 = 0,9868$$

$$N_{r_u=0,7} = 9,9331 + 0,0037 \times \exp^{(0,4406 \times \% \text{kil})}$$

$$R = 0,9966 \quad R^2 = 0,9886$$

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı kil oranlarında laboratuvar ortamında hazırlanmış siltli numunelerin dinamik davranışı incelenmiştir. Yeniden hazırlanmış numuneler üzerinde dinamik üç eksenli hücre kesme deneyleri (CTX) uygulanmıştır. Deney verileri üzerinde çevrim sayısına karşılık boşluk suyu basıncı oranı (ru), çevrimsel gerilme oranı (CSR) ve % eksenel deformasyon genliği değerleri ile deviator gerilme değerine karşılık boy kısalması değerinin değişimi incelenmiştir.

Farklı kil oranına sahip siltli zeminlerde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçlarına göre numune içerisindeki kil oranı azaldıkça 15. çevrimdeki boşluk suyu basınçlarının yüksek kil oranına sahip numunelere oranla daha hızlı artış gösterdiği görülmektedir. Bu noktadan hareketle zemin içerisindeki kil oranının siltli zeminin dinamik davranışı üzerinde önemli bir parametre olduğunu yüksek kil oranına sahip numunelerin daha zor sıvılaşma eğilimini göstereceği anlaşılmaktadır.

CTX deneylerinde numunelerin ulaşabildikleri maksimum boşluk suyu basıncı oranı 0,93 olmuştur. Bu değer hiçbir numunede bire ulaşamamıştır. Bunda kil içeriğinin yanı sıra transdüşerlerin ölçüm farkları da etkin olmuş olabilir. Numunelerin 15. çevrimde ulaşabildikleri boşluk suyu basıncı oranı değeri en düşük kil oranına sahip numunede 0,83 olmuştur.

Boşluk suyu basıncı oranlarının kil yüzdesi ile azalım gösterdiği görülmüştür. Bu ilişki 2. dereceden bir denklem ile temsil edilmiştir. Artan kil oranıyla yapılan CTX deneylerde boşluk suyu basıncı artışlarının daha az kil oranına sahip numunelerde, yüksek kil oranına sahip numunelere göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Bu grafiklerden hareketle teorik olarak $ru=1$ değerinde sıvılaşma olduğu göz önüne alındığında, kil oranı arttıkça sıvılaşma eğiliminde azalma olduğu yorumu yapılabilir.

Eksenel birim deformasyonun (ϵ) kil oranı ile değişimi incelendiğinde dinamik üç eksenli deneyi yapılan zemin numunelerinin kil yüzdesinin artmasıyla %2,5, %5 ve %10 eksenel deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının arttığı görölmüştür.

İnce daneli zeminlerde kil oranının artmasıyla belirli bir çevrim sayısı sonunda ulaşılan boşluk suyu basıncı değerlerinin azaldığı görölmüştür. Aynı şekilde zeminin sergilediği deformasyon büyüklüğü de azalım eğilimi göstermiştir. Dinamik üç eksenli deney sonuçlarına göre numunelerinin kil yüzdesinin artmasıyla belirli bir deformasyon seviyesi için gerekli çevrim sayısının arttığı görölmektedir.

Boşluk suyu basıncı oranının kil oranı değişimi formülide edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Wang, W.S. Some Findings in Soil Liquefaction. Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, 1979.
- [2] Özocak, A., Önalp, A. Siltlerde Sıvılaşma Davranışına Yapay ve Doğal Numune Kullanımının Etkisi. 7th Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı. 30 Mayıs-3 Haziran 2011, İstanbul, 2011.
- [3] Özocak, A., Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., Duran, İ.B. Siltlerde Sıvılaşma Davranışının İncelenmesinde Dinamik Deney Yönteminin Etkisi. 4. Geoteknik Sempozyumu, 1-2 Aralık 2011, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2011.
- [4] Ansal, A. M., Erken, A. Kohezyonlu Zeminlerin Tekrarlı Gerilmeler Altında Davranışı. Deprem Araştırma Bülteni, 50, 10-53, 1986.
- [5] Özsağır, M. İnce Daneli Zeminlerin Dinamik Özellikleri. SAÜ, FBE, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [6] Tunçok, H. Silt Tabakalı Kum Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Dinamik Davranışları. İ.T.Ü, İnşaat Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [7] Özener, P. İnşaat Mühendisliği Ders Notları. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [8] Ansal, A. M., Yıldırım, H. Killerin Tekrarlı Yükler Altında Kayma Mukavemeti. II. Ulusal Kil Sempozyumu, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 24-27 Eylül, 329-341, 1985.
- [9] Bol, E. Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, 2003.
- [10] Idriss, I.M., Boulanger, R.W. Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 26, 115-130, 2006.
- [11] Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., Özocak, A. Liquefaction of Silts: The Adapazarı Criteria. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:859-873, 2010.

- [12] Mitchell, J.K., Soga, K. Fundamentals of Soil Behaviour. 3rd ed., J.Wiley, New York, 2005.
- [13] Ural, N. İnce Taneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi. Doktora Tezi. SAÜ, FBE, 2008.
- [14] Özay, R., Erken A. Killerde Plastisitenin Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi. İTÜ Dergisi/d mühendislik Cilt:2, Sayı:1, 55-63, 2003.
- [15] Kaya, Z., IRISAWA, T., ERKEN, A. Adapazarı Zeminlerinin Dinamik Davranışı. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2002.
- [16] İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sınıflandırması: TSE1500. Ankara, 2000.
- [17] Tapan, M. Siltlerde Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Yanal Konsolidasyon Özelliğinin Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [18] Onturk, K., Bol E., Ozsagir, M. Doygun Olmayan İnce Taneli Zeminlerin Kayma Direnci. 3rd International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science, Polytechnic University of Valencia, 2015.
- [19] İnşaat Mühendisliği Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1:Fiziksel Özelliklerin Tayini. TSE1900-1, Ankara, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Merve Çetin, 17.05.1992'da İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2009 yılında Nevzat Ayaz Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrencisidir.