T.C. ERCİYES ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİNLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Tezi Hazırlayan Çiğdem TİPİ

Tez Danışmanı Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBT 3033 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ağustos 2010 KAYSERİ

T.C. ERCİYES ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİNLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Tezi Hazırlayan Çiğdem TİPİ

Tez Danışmanı Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBT 3033 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ağustos 2010 KAYSERİ Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA danışmanlığında Çiğdem TİPİ tarafından hazırlanan "Zeminlerin Dinamik Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi" adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

08.09.2010

JÜRİ:

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA

Üye : Prof. Dr. Tefaruk HAKTANIR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hacı Bekir KARA

Xeo

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 2010, 2010, 34-11 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

24.109.12010.

Prof.Dr. Necmettin MARASI

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen tez danışmanın Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA' ya, çalışmamda kullandığım programın yazımı ile desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Tefaruk HAKTANIR' a ve bana her konuda yardımcı olan bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Hacı Bekir KARA' ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca eğitim hayatımın her aşamasında ve çalışmam sırasında bana her zaman destek olan annem başta olmak üzere aileme teşekkür ederim.

ZEMİNLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Çiğdem TİPİ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2010 Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA

ÖZET

Günümüz dünyasının enerji gereksinimlerinin hızlı artışı; açık denizlerde petrol ve doğal gaz işletilmesini, büyük boru hatları ve depolama tesisleri ile nükleer santrallerinin yapımını, büyük barajların inşaasını zorunlu ve ekonomik hale getirmiştir. Tüm bu gelişmelerin beraberinde getirdiği en önemli mühendislik problemlerinden biri de; yapıların temelini oluşturan zeminlerin tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki gerilmeşekil değiştirme ve mukavemet davranışının belirlenmesi, kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişimlerin bulunması, elde edilen değerlerin mühendislik yapılarının projelendirilmesinde ve uzun süreli stabilite hesaplarında kullanılmasıdır. Ülkemizin aktif bir deprem kuşağında bulunması, bu konuların önemini daha da arttırmaktadır. Zemin tabakalarının taşıma kapasitelerindeki düşüş ve tekrarlı yükler altındaki olabilecek sıvılaşma parametreleri önceden belirlenmelidir. Bu amaçla zemin tabakalarının gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini belirlemek için dinamik laboratuar ve arazi deneyleri geliştirilmiştir.

Tekrarlı yüklemeler esnasında zemin tabakalarının göstereceği davranışı önceden bilmek ve doğru ölçülmesi zemin dinamiği problemlerinin çözümünde önemli bir yer tutmaktadır. Bu araştırmada yüksek su muhtevasında hazırlanarak konsolide edilen kaolin zeminlerin tekrarlı yüklemelere tabii tutulduğu dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney verileri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda dinamik yükleme frekansı ve genliğinin, kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklere etkisi ön planda tutulmuş ve elde edilen deney verilerinde birim kayma ile eksenel birim boy değişiminin kayma modülü ve sönüm oranı ile değişimi incelenmiştir.

Tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan kayma deformasyonu tekrarlı gerilme oranına ve frekansa bağlı olduğu belirlenmiştir. Tekrarlı gerilme oranı ve frekans arttıkça kayma deformasyonu artmıştır. Tekrarlı yüklemeler sonucunda gerek örselenmiş gerekse örselenmemiş kil numunelerinde kayma mukavemetinde değişimler olmuştur. Artan deformasyonlarla beraber kayma modülü azalmış ve sönüm oranı artmıştır ve elde edilen sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla paralellik göstermiştir.

Anahtar Kelimeler : Dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, tekrarlı gerilme oranı, birim deformasyon, eksenel birim boy değişimi, kayma modülü, sönüm oranı

DETERMINATION OF SOIL DYNAMIC STRENGHT PROPERTIES

Çiğdem TİPİ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences M. Sc. Thesis, August 2010 Thesis Supervisor: Assist. Prof. Zülküf KAYA

ABSTRACT

Because of the continuously increasing energy demands in the world, it became necessary to construct big dams, nuclear power plants and off shore petroleum platforms in occeans. The soil layers under such buildings dams, power plants, off shore platformsa re subjected to cyclic and transient loadings due to earthquakes, wind, wave action. It is very crucial to know the effects of cyclic loadings on soil layers and to implement these effects in the design and construction of structures. The behaviour of soil layers under cyclic loading is important for the structures that are built on these layers. The decrease in the bearing capacity of these soil layers and probable settlements under cyclic loading must be predicted before. For this purpose dynamic laboratory, insitu experimental methods have been developed and the stress-strain and dynamic strength properties of the soil layers have been predicted with these methods.

Structural damage can be minimized by taking the necesssary precoutions if the response of soils can be estimated during dynamic loading. Being our country is on active earthquake zone increases the importance of research about this issue. The main purpose in this thesis is to study the behaviour of cohesive soils subjected to cyclic loads based on dynamic shear and dynamic triaxial tests. In experimental methods, the effect of dynamic cyclic loading frequency and amplitude on dynamic properties of cohesive soils were prioritized and with obtaining experimental data was examined shear modulus, damping ratio, shear strain and axial length difference.

Shear strain induced by cyclic loading was dependent on the cyclic stress ratio and frequency. Shear strain increased by increasing cyclic stress ratio and frequency. As a result loading the undrained shear strength of undisturbed and disturbed clay samples

was changed. Shear modulus decreased and damping ratios increased with increased shear straining.

Keywords : Dynamic simple shear, dynamic triaxial system, cyclic stress ratio, strain, axial strain, shear modulus, damping ratio.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜRLER	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	V
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMA VE SİMGELER	ix
TABLOLAR LİSTESİ	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı ve Temel Yaklaşım	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
2. BÖLÜM	
ZEMİNLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ	5
2.1. Giriş	5
2.3. Sönüm Oranı	9
2.4. Zeminlerin Dinamik Özelliklerini Etkileyen Faktörler	10
2.5. Sonuç	34
3. BÖLÜM	
ZEMİNLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.	35
3.1. Giriş	35
3.2. Arazi Deneyleri	36
3.2.1. Sismik Kırılma Deneyi	36
3.2.2. Kuyudan-Kuyuya Sismik Deneyi	36
3.2.3. Sismik Kuyu Aşağı (Kuyu Yukarı) Deneyi	38
3.2.4. Standart Penetrasyon Deneyi	39
3.3. Laboratuar Deneyleri	39
3.3.1. Rezonant Kolon Deneyi	40
3.3.2. Ultrasonik Pals Deneyi	41
3.3.3. Bender Elemanı Deneyi	41
3.3.4. Tekrarlı Burulmalı Kesme Deneyi	42
3.3.5. Sarsma Tablası Deneyleri	43

3.3.6. Dinamik Üç Eksenli Deney	44
3.3.7. Dinamik Basit Kesme Deneyi	47
3.4. Sonuç	
4. BÖLÜM	
ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY SİSTEMLERİ, MALZEME VE	
ÖZELLİKLERİ	
4.1. Giriş	
4.2. Deney Sistemleri	
4.2.1. Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi	
4.2.1.1. Deney Hücresi	
4.2.1.2. Basınç Tablosu	53
4.2.1.3. Yükleme Ünitesi	56
4.2.1.4. Ölçüm ve Kayıt Birimleri	56
4.2.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi	57
4.2.2.1. Deney Hücresi	57
4.2.2.2. Hidrolik Yükleme Ünitesi	
4.2.3. Çamur Konsolidasyon Aleti	
4.3. Deney Malzemesi ve Numunelerin Hazırlanması	60
4.4. Deneylerin Yapılışı	
4.4.1. Dinamik Basit Kesme Deneyi	
4.4.2. Dinamik Üç Eksenli Deneyi	63
4.5. Sonuç	64
5. BÖLÜM	
KAYMA MODÜLÜ VE SÖNÜM ORANININ BELİRLENMESİ	65
5.1. Giriş	65
5.2. Kayma Modülü ve Sönüm Oranı	65
5.3. Sonuç	76
KAYNAKLAR	78
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	119

KISALTMA VE SİMGELER

АКО	: Aşırı konsolidasyon oranı
DGO	: Dinamik gerilme oranı
KDO	: Kaba dane oranı
D	: Sönüm oranı
Dr	: Relatif sıkılık
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
G	: Dinamik kayma modülü
G_{maks}	: Maksimum dinamik kayma modülü
G/G _{maks}	: Dinamik kayma modülü oranı
Ν	: Çevrim sayısı
μ	: Poisson oranı
ΔH	: Düşey boy değişimi
ΔL	: Yatay yer değiştirme
3	: Birim şekil değiştirme, düşey deformasyon
γ	: Kayma deformasyonu
γc	: Birim kayma deformasyonu
$\sigma_{\rm v}$: Düşey gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
τ_d	: Tekrarlı kayma gerilmesi
φ	: Kayma mukavemeti açısı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Normal konsolide ve aşırı konsolide killerde G_{maks} , G/G_{maks} ve D ' nir değişik faktörlerle değişimi	ı 13
Tablo 3.1.	Zeminlerin dinamik özelliklerini ölçmek için arazi deneyleri	51
Tablo 3.2.	Çeşitli laboratuar deneylerinin avantajları ve dezavantajları	52
Tablo 4.1.	Kaolin mineral özellikleri	61
Tablo 4.2.	Kaolin endeks özellikleri	61
Tablo 4.3.	Kaolin numunelerinin geoteknik özellikleri	62
Tablo 4.4.	Kaolin numunelerinin mukavemet özellikleri	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Gerilme kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi7
Şekil 2.2.	Deformasyon kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi7
Şekil 2.3.	Farklı şekil değiştirme genliklerindeki histeritik gerilme – şekil değiştirme ilişkisi
Şekil 2.4.	Basit kesme şartlarında kayma modülünün tanımı9
Şekil 2.5.	<i>G</i> _{sec} 'in kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini gösteren omurga Eğrisi
Şekil 2.6.	Tekrarlı kayma gerilmesi altında oluşan histerisis ilmikleri10
Şekil 2.7.	Kayma modülü azalım eğrilerine çevrim sayısının etkisi15
Şekil 2.8.	Bir, üç ve beşinci çevrime ait kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri 15
Şekil 2.9.	Farklı rölatif sıkılık değerlerindeki kayma modülü azalım eğrileri16
Şekil 2.10.	Tekrarlı gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi17
Şekil 2.11.	Tekrarlı gerilme oranı birim kayma gerilmesi ilişkisi
Şekil 2.12.	Tekrarlı gerilme oranı normalize boşluk suyu basıncı ilişkisi19
Şekil 2.13.	Dinamik kayma modülü çevrim sayısı ilişkisi19
Şekil 2.14.	Sönüm oranı değerlerinin gerilme genliklerine göre değişimi20
Şekil 2.15.	Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zeminde kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi
Şekil 2.16.	Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi21
Şekil 2.17.	Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi22
Şekil 2.18.	Farklı frekanslarda % 10 çift yönlü eksenel birim boy değişim genliğine ulaşılması için çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı CSR23
Şekil 2.19.	Farklı frekanslarda dinamik üç eksenli deney uygulamasıyla elde edilen boşluk suyu basıncı oranı ile dinamik gerilme oranı CSR23
Şekil 2.20.	Kayma deformasyonlarının üç kademe boyunca dinamik gerilme oranı, τ / σ'_{v} ile değişimi

Şekil 2.21.	Boşluk suyu basınçlarının üç kademe boyunca dinamik kayma gerilm oranı τ / σ'_v ile değişimi	ie .25
Şekil 2.22.	Boşluk oranı maksimum dinamik kayma modülü değişimi	.25
Şekil 2.23.	Arazi ve laboratuar dinamik kayma modülün değişimi	.26
Şekil 2.24.	Zeminin dinamik davranışı K.O.= %100	.27
Şekil 2.25.	Zeminin dinamik davranışı K.O.= %100	.27
Şekil 2.26.	Zeminlerin dinamik gerilmeler altındaki davranışları	.28
Şekil 2.27.	Kuru kumlar için kayma modülü ve kayma gerilmesi arasındaki ilişki	.29
Şekil 2.28.	Kuru kumlar için sönüm oranı ve kayma gerilmesi arasındaki ilişki	.30
Şekil 2.29.	Kuru kumlar için kayma modülü ve kayma gerilmesi üzerinde frekansın etkisi	.30
Şekil 2.30.	Kuru kumlar için sönüm oranı ve kayma gerilmesi üzerinde frekansın etkisi	.31
Şekil 2.31.	Farklı plastisite indislerinde kayma modülü ve gerilme eğrileri	.32
Şekil 2.32.	Farklı efektif basınçlarında sönüm oranı, kayma gerilmesi ve gerilme eğrileri PI = 65	.32
Şekil 2.33.	$G_{eq} / F(e)$ ' nin f = 0.1Hz de çevrimsel gerilme ile değişimi	.33
Şekil 2.34.	$G_{eq} / F(e)$ ' nin f = 1.0 Hz de çevrimsel gerilme ile değişimi	.33
Şekil 2.35.	Çevrimsel gerilmenin sönüm oranına etkisi	. 34
Şekil 2.36.	Kayma modülünün kayma gerilmesi ile değişimi	.34
Şekil 2.38.	Sönüm oranının kayma gerilmesi ile değişimi	.35
Şekil 3.1.	Sismik kırılma deney düzeneği	.38
Şekil 3.2.	Kuyudan kuyuya sismik deneyi : (a) iki kuyu düzenini kullanarak doğrudan ölçüm; (b) üç kuyu düzenini kullanarak aralık ölçümü	.38
Şekil 3.3.	(a) Sismik kuyu yukarı ve (b) sismik kuyu aşağı deneyi	. 39
Şekil 3.4.	San Fransisco Körfez bölgesinde bir kuyu aşağı deneyine ait varış zamanı eğrisi	.40

Şekil 3.5.	Tipik rezonant kolon deney düzeneği: (a) yükleme sisteminin tepeden görünümü, ve (b)yükleme sistemi ve zemin numunesi profil görünümü41		
Şekil 3.6.	Piyezoelektrik bender elemanı		
Şekil 3.7.	İçi boş silindir düzeneği44		
Şekil 3.8.	Dinamik zemin deneyinde kullanılan zemin hazneli sarsma tablası45		
Şekil 3.9.	Arazi zemin elemanı ile laboratuar üç eksenli dinamik deney numunesi üzerine etkiyen gerilmelerin benzeşimi		
Şekil 3.10.	Üç eksenli düzeneği47		
Şekil 3.11.	Tekrarlı basit kesme düzeneği48		
Şekil 3.12.	Arazideki bir zemin elemanı ile laboratuvar basit kesme deneyi numunesi üzerinde etkiyen gerilmelerin benzeşimi		
Şekil 3.13.	Tekrarlı yüklerin oluşturduğu gerilme şekil değiştirme davranışı		
Şekil 3.14.	Dinamik basit kesme deneyi sırasında oluşan gerilme durumu		
Şekil 4.1.	Dinamik basit kesme deney sisteminin şematik çizimi		
Şekil 4.2.	Dinamik deney sistemleri basınç tablosu		
Şekil 4.3.	Dinamik üç eksenli deney hücresi		
Şekil 4.4.	Çamur konsolidasyon aleti60		
Şekil 5.1.	Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi		
Şekil 5.2.	Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi		
Şekil 5.3.	Dinamik basit kesme deneyi izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi		
Şekil 5.4.	Dinamik basit kesme deneyi izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi		
Şekil 5.5.	Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi		
Şekil 5.6.	Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi		

Şekil 5.7.	Dinamik üç eksenli deneyinde izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi
Şekil 5.8.	Dinamik üç eksenli deneyinde izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi
Şekil 5.9.	Dinamik basit kesme deneyinde kayma modülü oranının frekansa göre değişimi
Şekil 5.10.	Dinamik basit kesme deneyinde sönüm oranının frekansa göre değişimi
Şekil 5.11.	Dinamik üç eksenli deneyinde kayma modülü oranının frekansa göre değişimi
Şekil 5.12.	Dinamik üç eksenli deneyinde sönüm oranının frekansa göre değişimi
Şekil 5.13.	Dinamik basit kesme deneyinde kayma modülü oranının gerilme oranına göre değişimi
Şekil 5.14.	Dinamik basit kesme deneyinde sönüm oranının gerilme oranına göre değişimi
Şekil 5.15.	Dinamik üç eksenli deneyinde kayma modülü oranının gerilme oranına göre değişimi
Şekil 5.16.	Dinamik üç eksenli deneyinde sönüm oranının gerilme oranına göre değişimi

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı ve Temel Yaklaşım

Her türlü mühendislik yapısı ömrü boyunca statik ve özellikle dinamik yüklemelere cevap verecek şekilde inşaa edilmektedir. Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi enerji gereksinimlerinin artmasına yol açmıştır. Son yıllarda meydana gelen ve yaşanması beklenen büyük depremler ile yapıların uygun olmayan zemin tabakaları üzerinde özellikle yumuşak killerde ve denizlerde inşaa edilmeye başlanması; yapıların stabilitelerinde statik yüklemelerin yanında tekrarlı yükleme durumlarının da dikkate alınması zemin dinamiğini önemli bir konuma getirmiştir. Ayrıca depremler sırasında meydana gelen sıvılaşma problemleri de zemin dinamiği alanında gerekli ve hızlı büyümeyi gerektirmiştir.

Zemin dinamiği; depremler, dalga yükleri, makine temel titreşimleri, trafik yükleri gibi tekrarlı yüklere maruz kalan zemin davranışları ile zemin tabakalarının yükleme sırasında ve yükleme sonrası mukavemet özellikleri, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin ortaya çıkarılması ve kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişimler gibi konuları içermektedir.

<u>Tekrarlı Yükler</u>

Hardin ve Black (1968) birçok dinamik inşaat mühendisliği problemlerini zeminin tepkisi olarak yüklemelere dayandırarak iki grupta sınıflandırmışlardır. İlk grup; yükleme ve boşaltmanın tekil uygulamasıyla meydana gelen gerilme-birim deformasyonlarını içerir. Bu grup genellikle nükleer saldırı, patlama ya da çok yakın deprem kaynağı ile ilgilidir. İkinci grup ise küçük genlikler ile belli bir çevrim için

zeminin tekrarlı yükleme ve boşaltmasını içerir. Bu tür zemin titreşimi deprem, patlama, makine temelleri, trafik ya da gelgit dalgaları ile meydana gelebilir [1].

Deprem Titreşimi

Depremin neden olduğu titreşimler zemin dinamiğindeki en önemli konulardan biridir. Yer kayması, yapısal çökmeler, sedde ve toprak barajların çökmesi depremlerin meydana getirdiği olayların başında gelir [2]. Deprem boyunca, anakayanın hareketi zemin profilinden zemin yüzeyine doğru iletilir. Zeminin dinamik kayma gerilmesi çevrimsel yükleme boyunca aşılması durumunda doğal yamaçların ve seddelerin kayması gerçekleşir. Benzer şekilde bu yüklemeler altında zeminin kırılması sonucu olarak bina temelleri çökebilir [3].

Makine Temellerinin Titreşimi

Makinelerin çalışması sırasında merkezkaç veya delme çakma gücü gibi etkilerden dolayı meydana gelen temel titreşimleri zemin dinamiğinin en genel problemlerinden biridir. Bu rastgele yükler makine temellerinden zemine doğru iletilirken zeminin yeteri kadar destek sağlayamaması temel bloklarında aşırı salınım hareketlerine sebep olabilir [3].

Meydana gelecek salınım hareketleri hem çalışan personel için hem de makine ve tesisat sistemleri için olumsuz koşullar ve en önemlisi olarak çeşitli oturmalar doğurabilir. Ayrıca kalibrasyon test stantları, antenler ve radar sistemleri gibi bütün hassas araç ve gereçlerin istenilen güvenliği ile çalışmayı sağlamak için titreşimsiz sabit temeller gereklidir [3].

Geçici Titreşimler

Nükleer, atomik yada kimyasal patlamaların neden olduğu titreşimler geçici titreşimlerdir. Bütün bu titreşimlerin sahip olduğu ortak özellik sürekli olmayışları ve etki alanlarının geniş olmasıdır. Çevrelerindeki yapılar büyük etki alanına maruz kalırken ayrıca güçlü hareketlere karşı koymaları gerekmektedir [3].

Sığınak ve tüneller gibi yeraltı yapılarının tasarım aşamasında bu gibi patlamalar da göz önüne alınmalıdır. Ayrıca kazık çakarak sıkıştırma ya da kompaksiyon gibi inşaat çalışmalarının meydana getirdiği titreşimler, tekrarlı geçici gerilme dalgalarına neden olurlar [3].

Su Dalgalarının Meydana Getirdiği Titreşimler

Deniz aşırı yapıların dayanıklılığı veya kıyısal erozyonlar tamamen su dalgalarının periyodik etkisiyle alakalıdır. Geçmiş yıllardan beri petrol arama amaçlı olarak yapılan büyük yapılar ve çalışma platformları açık denizlerde inşa edilmektedir. Bu yapıların inşa ve çalışma süreçlerinde, meydana gelebilecek büyük dalgalar ve güçlü rüzgarlar gibi titreşimler göz önünde bulundurulmalıdır [3].

Yapıların çok kısa sürede ve nadiren de olsa ömrü boyunca karşılaşabileceği ilave yüklerden en önemlisi depremlerden meydana gelen tekrarlı yüklerdir. Bu yükler karşısında yapının kendi davranışının yanında oturduğu zeminin davranışı da bilinmelidir. Depremler sırasında oluşan titreşimlerden dolayı zemin tabakalarında meydana gelen hacim ve şekil değiştirmeler; kayma dalgaları şeklinde ana kayadan yukarı zemin profili boyunca yayılarak temel zeminine ulaşmaktadır. Kayma dalgaları, değişik genlik ve frekans özelliklerine sahip titreşimlerin etkisinde kalan zeminde tekrarlı fakat düzensiz genlikler altında kayma gerilmelerine, şekil değiştirmelerine, boşluk suyu basınçlarında artışlara, sıvılaşmalara, oturmalara ve göçmelere neden olmaktadır.

Farklı zeminler üzerinde yapılmış aynı mühendislik yapıları bir deprem sırasında farklı hasarlara uğrayabileceklerinden dolayı projelendirme aşamasında zemin dinamik özellikleri göz önüne alınmalıdır. Birçok parametreye bağlı olan zemin özellikleri her koşul için ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi çok yönlü ve geniş kapsamlı bir problem olup pratiğe dönük çalışmalarda karışık görünmektedir [4].

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri olmak üzere iki gruba ayrılır. Dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ile bunların birim şekil deformasyonlara göre değişimleri gerilme-şekil değiştirme özellikleri; büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ise mukavemet özellikleri şeklinde açıklanabilir. Her grup özelliklerin incelenmesinde genellikle aynı deneylerden yararlanılır. Deneylerden ulaşılan verilere bağlı olarak da elde edilen ampirik bağıntılar veya nümerik modeller ile zeminlerin arazideki davranış biçimleri yaklaşık olarak bulunabilir. Bu sayede yapıların tasarımında tekrarlı yüklere ve depremlere karşı gereken koruyucu önlemler alınabilir.

Tekrarlı yüklerin zeminlerde yol açtığı deformasyonların ve boşluk suyu basınçlarının oluşturduğu değişimler dinamik mukavemet özelliklerinin incelenmesinde gereklidir. Sabit belirli bir periyodik yük altında bir zemin numunesinin çevrim sayısı arttıkça şekil değiştirmelerde ve boşluk suyu basınçlarında artışlar meydana gelir.

Titreşimin devir sayısı yeterince tekrarlandığında ya boşluk suyu basıncı çevre basıncına ulaşarak zeminin taşıma gücü kaybolmakta ve sıvılaşma meydana gelmekte ya da şekil değiştirmeler müsaade edilen seviyelerin üzerine çıkarak göçme oluşmaktadır [5]. Dinamik gerilme oranı ve çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren eğrilerin elde edilmesi için de deneysel çalışmalardan yararlanılmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada H. Bekir KARA tarafından yapılan doktora tezi kapsamında Uşak bölgesinden alınan kil zemin numuneleri üzerinde yapılan dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney verileri bilgisayar ortamına aktarılarak dinamik özellik olan kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) dinamik özellikleri fortran dilinde yazılan bir program yardımıyla belirlenmiş ve elde edilen sonuç farklı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümünde tez konusunda ele alınan konu hakkında temel yaklaşımlar sunulmuştur. İkinci bölümde zeminlerin dinamik mukavemet özellikleri ve literatür çalışmaları hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde dinamik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan arazi ve laboratuar deneyleri hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise verilerin elde edilmesinde kullanılan deney araçları ve deneylerin yapılışları detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Son bölüm olan sonuçlar kısmında ise deney verilerinden elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir.

2. BÖLÜM

ZEMİNLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ

2.1. Giriş

Tekrarlı yüklemelere bağlı olarak zeminlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre zeminlerin uğrayacakları deformasyonlar ve yapılacak farklı mühendislik yapıları için zeminden kaynaklanan dinamik etkiler derecesi farklı olacaktır. Bundan dolayı yeraltı ve yerüstü yapılarının ya da yapı-zemin etkileşiminin, farklı yöntemlerle yapılan dinamik analizlerinde önemli konularından biride, zeminin tekrarlı yükler altında birimşekil değiştirme ve mukavemet davranışının incelenmesi ve modellenmedir.

Zeminlerin özellikle depremler gibi maruz kaldıkları tekrarlı yüklemeler altındaki dinamik davranışı büyük ölçüde gerilme-birim şekil değiştirme özelliklerinin parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler:

- 1) Maksimum dinamik kayma modülü G_{maks} ,
- 2) Dinamik kayma modülü oranı G/G_{maks} ve tekrarlı birim kayma genliği γ_a arasındaki ilişki,
- 3) Sönüm oranı D ve tekrarlı birim kayma genliği γ_a arasındaki ilişki

şeklinde sıralanabilir [6].

Zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışı zemin cinsi, çevre basıncı, gerilme geçmişi, yük etkisi gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Dinamik davranışların karmaşık olmasından dolayı uygulamalarda çalışmalardan elde edilen basit kabuller ve geliştirilen ampirik bağıntılar kullanılmaktadır.

2.2 Dinamik Kayma Modülü

Laboratuarda yapılan dinamik deneylerde, bir yükleme çevriminde zemin numunelerinde oluşan gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 'de gösterilen histerisis ilmiği şeklindedir. Bu eğrinin karakteristik özellikleri ilmiğin eğimi ve alanıdır [4].



Şekil 2.1. Gerilme kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi [4]



Şekil 2.2. Deformasyon kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi [4]

Gerilme kontrollü deneylerde histerisis ilmikleri çevrim sayısının artmasıyla büyümekte ve yatıklaşarak eğimi azalmaktadır. Deformasyon kontrollü gerçekleşen deneylerde ise

eğim artan çevrim sayılarına karşılık belirli bir şekil değiştirme seviyesinin üzerinde aynı kalmaktadır [4].

Şekil 2.3 'deki histerisis ilmiğinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi dinamik kayma modülü, G, olarak ifade edilir.



Şekil 2.3. Farklı şekil değiştirme genliklerindeki histeritik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [7]

Şekil 2.4'de gösterildiği gibi kayma modülü ve tekrarlı birim kayma genliği; τ tekrarlı kayma gerilmesi, δ_h yatay deformasyon olmak üzere ;

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{2.1}$$

ve

$$\gamma = \frac{\delta_h}{L} \tag{2.2}$$

şeklinde tanımlanabilir [1].

Histerisis eğrisinin uç noktalarından geçen ve kayma gerilmesi ile birim kayma genliğinin fonksiyonu olan eğri omurga eğrisi olarak tanımlanabilir (Şekil 2.5). Omurga eğrisine orijinden teğet geçen doğrunun eğimi de dinamik kayma modülü G_{maks} , dır [8].



Şekil 2.4. Basit kesme şartlarında kayma modülünün tanımı [1]

Belirli birim kayma genliği değerine zeminlerin lineer-elastik ve lineer olmayan elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Bu aralıkta kayma modülü değeri en büyük değerinde olup, sabittir. Diğer taraftan laboratuar ve arazi deneyleri, birim kayma genliğinin 10^{-5} veya daha az olması durumunda kayma dalgası hızının da sabit kaldığını göstermektedir [6]. Maksimum kayma modülü arazi sismik deneyler kullanılarak ρ zeminin yoğunluğu, v_s kayma dalgası hızı olmak üzere;

$$G_{maks} = \rho v_s^2 \tag{2.3}$$

şeklinde hesaplanabilir [6],[9].



Şekil 2.5. G_{sec} 'in kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini gösteren omurga eğrisi [8]

2.3. Sönüm Oranı

Tekrarlı yükler altındaki meydana gelen şekil değiştirmeler ile zemin elemanlarındaki enerji kaybı sönüm oranı olarak tarif edilebilir. Bir malzemenin zeminin sönümünün küçük yada büyük olması dinamik yüklere etkisi ile yutulan enerjiyle alakalıdır [4]. Şekil 2.6' da gösterildiği gibi sönüm oranı tanımında da histerisis ilmiklerinden yararlanılmaktadır ve sönüm oranı;

$$D = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{Histerisis \, \zeta ember \, Alani}{E \, \breve{g}rinin \, Altında \, Kalan} \\ \ddot{U} \zeta genin \, Alani} \right)$$
(2.4)

şeklinde ifade edilir. Eğrinin altında kalan üçgenin alanı histerisis ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun yatayla yapmış olduğu OAB üçgeninin alanı kastedilmiştir [10].



Şekil 2.6. Tekrarlı kayma gerilmesi altında oluşan histerisis ilmikleri [4]

Histerisis çemberin alanı (W_D) yutulan enerji, üçgenin alanı ise maksimum birim kayma (W_S) olarak tanımlanırsa sönüm oranı,

$$D = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{W_D}{W_S} \right) \tag{2.5}$$

şekline dönüştürülebilir [11].

2.4. Zeminlerin Dinamik Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Hardin ve Richart (1963); küçük gerilmelerde daneli zeminlerin kayma dalgası hızlarını ölçmek için rezonant kolon deneyini kullanmışlardır. Esas olarak örselenmiş zeminlerin kayma gerilmeleri üzerinde durmuşlardır. Araştırmalarda; boşluk suyu oranı, su muhtevası ve dane özelliklerinin kayma dalgası hızı ve kayma modülü üzerinde etkileri görülmüştür. Örselenmiş zeminler kayma modülünün daha çok izotropik çevre basıncıyla, kayma dalgası hızının ise boşluk suyu oranı ile değiştiği sonucuna varmışlardır[12].

Zeminlerdeki dinamik mukavemet özelliklerinin değişimlerini açıklayabilmek zemin davranışlarını etkileyen birçok nedenden dolayı karmaşık olmaktadır. Bir zemin elemanının tek bir mukavemet değeri olmayacağı gibi tek bir dinamik kayma modülü veya sönüm oranı değeri de yoktur. Hardin ve Black (1968) örselenmiş ve örselenmemiş zeminlerde parametre etkileri üzerinde yaptıkları çalışmalarla kayma modülü *G* ' nın aşağıdaki gibi birçok özelliğe bağlı olarak değişebileceğini bulmuşlardır [2]:

$$G = f(\sigma_0, e, H, S_r, \tau_0, C_g, A_p, F, T, O, T_k)$$
(2.6)

Burada,

 σ'_0 = Efektif normal gerilme

e = Boşluk oranı

H = Gerilme geçmişi ve çevre gerilmesi

 S_r = Doygunluk derecesi

 τ_0 = Başlangıç Kayma Gerilmesi

 C_g = Dane özellikleri; dane çapı, dane şekli, derecelenme ve minerolojisi

 A_p = Titreșim genliği

F = Titreşim frekansı

T = Zamana bağlı (ikincil konsolidasyon gibi) etkiler

O = Zemin yapısı

 $T_k = Sicaklik$

olarak tanımlanabilir [2].

Hardin ve Drnevich (1972) zeminlerin kayma modülü ve sönüm oranını etkileyen faktörleri incelemişler ve parametreleri, çok önemli, önemli ve kısmen önemsiz olarak üç gruba ayırmışlardır. Gerilme genliği, efektif gerilme, boşluk oranı, çevrim sayısı ve doygunluk derecesi en önemli beş faktördür [2].

Dobry ve Vucetic (1987), birçok çalışmalarında kohezyonlu zeminlerde maksimum dinamik kayma modülü, G_{maks} , normalize edilmiş kayma modülü, G/G_{maks} ve sönüm oranında değişik faktörlerin etkisini araştırmışlar. Sonuçlar Tablo 2.1' de özetlenmiştir ve dokuz faktörün etkileri listelenmiştir [2].

Okur (2002), zeminlerin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini belirlemek için dinamik üç eksenli deneyler yapmıştır. Deney numuneleri; plastisite indisi PI = %9-40, su muhtevası $w_0 = \%25-51$ ve dane birim hacim ağırlığı $G_s = 2.68 - 2.71$ arasında değişen büyük bir kısmı normal konsolide bir bölümü de hafif aşırı konsolide (AKO=1.5-2) yüksek ve düşük plastisiteli kil-silt zeminlerinden oluşmaktadır [6].

Yükleme ve drenaj koşullarına göre deneyler üç grupta ele alınmıştır. Birinci grupta numuneler drenajsız koşullarda artan gerilme genliklerinde yüklenmiştir. Deneyler $\pm 2.5-3$ birim kayma genliğine ulaşıldığında durdurulmuştur. İncelenen gerilme-şekil değiştirme davranışı birim kayma genliğinin $10^{-3}-10^{-1}$ değerleri aralığındadır. Burada plastisitenin ince daneli suya doygun zeminlerin davranışında önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlara dayanarak plastisite indisi ve kayma modülü arasında normal konsolide zeminler için (2.7) bağıntısı elde edilmiştir [6].

$$\frac{G}{G_{maks}} = \frac{35.09}{\frac{\gamma_a}{1 - 0.99 \, x \exp x \, (-18.97 \, x \, PI^{-1.27})^{34.74}}}$$
(2.7)

Etkileyen Faktörler	G_{maks}	G / G_{maks}	D
Çevre Basıncı		Sabit kalır	Sabit kalır
σ_0	Artar	ya da artar	ya da azalır
Boşluk Oranı	Azalır	Artar	Azalır
Jeolojik Gecmis			
t	Artar	Artabilir	Azalır
Çimentolanma	Artar	Artabilir	Azalabilir
C A sum V angelides your			
Aşırı Konsolidasyon	Artor	Ethilomoz	Ethilomoz
	Alta	EtKHEIHEZ	EtKHEIHEZ
AKU Diastigita İndigi	AKO > 1 Artor		
Plastistic Indisi	AKO > 1 Altal	Artar	Azalır
	AKO – 1 Saon Kalii	C. arter falset	
T 1 1 D''			
Tekrarlı Birim		G ve G _{maks}	
Deformasyon	-	etkilenmez ise	Artar
γ_c		G/G_{maks}	
		sabit kalır	
Birim Boy			Sabit kalır
Deformasyonu	Artar	Azalır	ya da
γ			artabilir
	Büyük γ_c ' lerin N		Orta
	kez		derecede
Couring Source	tekrarından sonra	tekrarından sonra	
ردور کرد ۱۳	azalır.	Azalır	
IN IN	Fakat daha sonra		değerlerinde
	zamanla		önemlı
	toplar.		degildir.

Tablo 2.1. Normal konsolide ve aşırı konsolide killerde G_{maks} , G/G_{maks} ve D' nın değişik faktörlerle değişimi [2]

Sönümün birim kayma genliğine bağlı olarak değişimi de incelenmiş ve sönüm oranı ile plastisite arasında da (2.8) ifadesi önerilmiştir [6].

$$D = 21.05 x \, 0.99^{PI} \, x (1.17 - \exp\left(-12.75 \, x \, 0.99^{PI} \, \gamma_a\right)) \tag{2.8}$$

İkinci grup deneylerde ise numuneler düzensiz tekrarlı gerilme genliklerinde yüklenmiştir ve her beş çevrimde arttırılan tekrarlı gerilme genlikleri uygulanmıştır. Boşluk suyu basınçları oluşmaya başladığında gerilme seviyesi, başlangıç değerine düşürülmüş ve bu genliklerin arttırılıp azaltılmasıyla elastik sınırın kayma modülünün %90 değerine denk geldiği görülmüştür. Bu noktadan sonra gerçekleştirilen gerilme boşaltmalarında numunede kalıcı deformasyon meydana gelmeye başlamıştır. Böylelikle plastisite indisi ve elastik birim kayma genliği arasında,

$$\gamma_e = \frac{0.035}{1 + 11.92 x \exp x \left(-0.1 x PI\right)} \tag{2.9}$$

şeklinde bir korelasyon önerilmiştir. Aynı şekilde plastik sınır içinde (2.10) korelasyonu önerilmiştir.

$$\gamma_p = \frac{1}{1.39 - 0.33 \, x \, P I^{0.28}} \tag{2.10}$$

Üçüncü grup deneylerde ise dinamik mukavemet parametrelerini araştırmak amacıyla önceki grup çalışmalarına ek olarak sabit gerilme genliklerinde drenajsız deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucu ± 2.5 deformasyon seviyesinde gerilme oranı hesaplanmış ve boşluk oranı, plastisite indisi ve kaba dane oranı gibi faktörlerin etkisi incelenmiştir [6].

Altun (2003), çalışma kapsamında Japonya standart kumu olan Toyoura kumu üzerinde içi boş silindirik dinamik burulmalı kesme aleti ile drenajsız koşullarda 0.1*Hz* sabit frekansta sinüzoidal dinamik yüklemeli deneyler yaparak zeminin gerilme-şekil değiştirme özellikleri farklı çevre gerilmesi ve başlangıç konsolidasyon koşullarında belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.7. Kayma modülü azalım eğrilerine çevrim sayısının etkisi [7]

Şekil 2.7' de G_{maks} ile normalize edilmiş eksen takımından çevre basıncının etkisi görülmektedir. Çevre basıncındaki artışla beraber dinamik kayma modülü azalım eğrisi sağa doğru kaymıştır. Çevrim sayısındaki artışla kayma modülü değerlerinde doğru orantılı bir değişim etkisi yaratırken sönüm oranında ise azalmaya yol açmıştır (Şekil 2.8) [7].



Şekil 2.8. Bir, üç ve beşinci çevrime ait kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri [7]

Şekil 2.9'da da değişik rölatif sıkılıktaki numunelerde yapılan deneyler sonucunda elde edilen $G-\gamma$ eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.9. Farklı rölatif sıkılık değerlerindeki kayma modülü azalım eğrileri [7]

Özay ve Erken (2004), değişik oranlarda kum içeren düşük plastisiteli killi zeminlerin tekrarlı yük altında mukavemet davranışını dinamik üç eksenli basınç deney sistemiyle incelemişlerdir. Afyon ili Dinar ilçesi ve İstanbul ili Silivri ilçesi bölgelerinden alınan numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmış ve ön konsolidasyon basıncı bulunarak numunelerin normal konsolide killer olduğu belirlenmiştir. Yapılan dinamik deney sonuçlarından elde edilen bulgulara göre tekrarlı gerilme genliklerini göstermek için Şekil 2.10' da olduğu gibi düşey eksende tekrarlı gerilme oranı olan $\sigma_d / 2\sigma_c$ değeri, yatay eksende ise düşey birim boy değişimi genliği $\varepsilon = \pm 2.5$ için hesaplanan çevrim sayısı değeri konmuştur [13].

Şekil 2.10'da elde edilen eğriler incelendiğinde kaba dane oranı en az olanların en yüksek gerilme oranına sahip oldukları görülmektedir. Aynı çevrim sayısında yüksek gerilme oranına sahip numuneler daha yüksek mukavemete sahiptir. Kumlu zeminlerde deformasyonlar daha kısa sürede aniden artmakta ve büyük değerlere ulaşmaktadır. Bunun sonucunda da yumuşama meydana gelmekte ve zemin mukavemeti azalmaktadır.



Şekil 2.10. Tekrarlı gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi [13]

Değişik plastisiteli araziden alınan ve laboratuarda hazırlanan siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı Ülker (2004), tarafından dinamik burulmalı kesme deney aletiyle gerilme kontrollü dinamik deneyler ve deformasyon kontrollü statik deneylerle araştırılmıştır. Deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametreler; tekrarlı gerilme seviyesi, birim kayma genliği, çevrim sayısı, kritik birim akma deformasyonu, plastisite indisi, ince dane miktarı, kuru birim hacim ağırlığı, konsolidasyon süresi, yükleme hızı, deney sistemi, numune hazırlama yöntemi ve numune yapısı olarak belirlenmiştir.

Örselenmiş zemin numunelerin \pm %2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar yapılan dinamik deneylerde mukavemetin, laboratuar numunelerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çevrim sayıları arttıkça da boşluk suyu basınçları örselenmemiş numunelerde de sınırlı kalmaktadır. Ayrıca birim kayma deformasyonları hızla artmakta ve belirli bir kayma deformasyonundan sonra numunede kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir [14]

Suya doygun kum zeminlerde daha önce yapılan deneysel çalışmalara bakıldığında kayma modülünün birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimi için boşluk oranı ve efektif çevre gerilmesi faktörleri göz önüne alınarak bazı matematiksel ifadeler geliştirildiği görülmektedir.

Altun ve Ansal (2003) ise kumlu zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini ortaya koymak için burulmalı kesme deney aleti ile inceleme yapmışlardır. İlk aşamada her beş çevrimde bir deney durdurulmadan arttırılan gerilme genlikleriyle tekrarlı yüklemeler uygulanarak küçük deformasyon seviyelerinde dinamik zemin özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. İkinci aşama olaraktan daha büyük gerilme-deformasyon seviyelerinde artan gerilmelerle kalıcı şekil değiştirmelerin olduğu deformasyon seviyelerinde deneyler yapılmış ve kumlu zeminler için başlangıç kayma modülü, boşluk oranı ve çevre basıncı dikkate alınarak e zeminin boşluk oranı, P_a kullanılan birim sistemine uygun atmosfer basıncı ve σ_0 ise kPa cinsinden efektif çevre gerilmesi olmak üzere (2.11) ifadesi elde edilmiştir [15].

$$G_{maks} = 567x e^{-1.28} x P_a^{0.51} x \sigma_0^{0.49}$$
(2.11)

Okur ve Ansal (2006), Okur (2002) ve Okur ve Ansal (2004) çalışmalarında artan gerilme genliklerinde yapılan deneylere ek olarak farklı örselenmemiş numuneler üzerinde sabit tekrarlı gerilme genliklerinde drenajsız dinamik üç eksenli deneyler yaparak \pm %2.5 deformasyon seviyesindeki tekrarlı gerilme oranı hesaplanmış ve boşluk oranı plastisite indisi, tekrarlı gerilme oranı gibi faktörleri incelemişlerdir.



Şekil 2.11. Tekrarlı gerilme oranı birim kayma gerilmesi ilişkisi [16]

Şekil 2.11'de tekrarlı gerilme oranı ve birim kayma genliği ilişkisinin çevrim sayılarına göre değişimi ile Şekil 2.12'de normalize boşluk suyu basıncı ve değişimleri verilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça birim kayma genlikleri ve boşluk suyu basınçlarındaki artış açıkça görülmektedir. Laboratuar deneylerinde üniform gerilme genlikleri numuneye uygulanırken depremler sırasında etki eden gerilmeler düzensiz ve her seferinde farklı olabilmektedir. Bundan dolayı depremlerin düzensiz kayma gerilmeleri; eş değer gerilme genliklerine çevrilerek tasarım depremine eşit bir etki yapacak çevrim sayısına dönüştürmek gerekmektedir [16].



Şekil 2.12. Tekrarlı gerilme oranı normalize boşluk suyu basıncı ilişkisi [16]



Şekil 2.13 Dinamik kayma modülü çevrim sayısı ilişkisi [16]

Dinamik kayma modüllerinin çevrim sayısıyla tekrarlı gerilme oranına göre değişimi de Şekil 2.13' de verilmiştir. Dinamik kayma modülündeki azalış, tekrarlı gerilme genliği oranının %20–%25 değeri arasında artmakta ancak %30–%35 değerleri arasında fazla bir fark görülmemektedir. Dinamik kayma modülü oranları karşılaştırıldığında ise gerilme oranları arasındaki farkların birbirine eşit olduğu görülmektedir ve aynı durum sönüm oranı içinde geçerlidir (Şekil 2.14) [16].



Şekil 2.14. Sönüm oranı değerlerinin gerilme genliklerine göre değişimi [16]

Normal konsolide killer üzerinde dinamik basit kesme deneyi yaparak deney verilerinden zeminin hem bir kez hem de beş kez tekrarlı yüklemeye maruz kalması durumları için çevrim sayısı ve gerilme genliğine bağlı olarak boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, hacimsel değişimi Erşan ve Yıldırım (2006) tarafından incelenmiştir. Son olarak ise beş kez tekrarlı yükleme uygulanan numunelerde tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetinin deney değişkenlerine bağlı değişimleri incelenmiştir [17].

Zeminin maruz kaldığı tekrarlı yükün genliği ve çevrim sayısının artmasıyla kayma deformasyonlarında önemli artışlar meydana getirmektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zeminde kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi [17]

Tekrarlı gerilme oranına göre kayma deformasyonlarının değişimi ve ayrıca çevrim sayısının etkisi de Şekil 2.16' da verilmiştir. İlk gerilme oranlarında deformasyon birbirine çok yakın iken artan gerilme oranlarıyla farklar artmakta ve deformasyon değerleri uzaklaşmaktadır. Belli bir gerilme oranından sonra gerilme oranı artmadan numunede kayma deformasyonları hızlı bir şekilde artmaya başlamakta, ilave çevrimlerde ise büyük deformasyon meydana gelerek numunede tekrarlı yükler altında göçme meydana gelmektedir [17].



Şekil 2.16. Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi [17]
Tekrarlı yüklerin uygulandığı kısa süre içinde, killerin düşük permeabilitesinden dolayı drenajsız koşullar hakim olmaktadır. Tekrarlı yüklemeden sonra ise, zamanla birikmiş artık boşluk suyu basıncı sönümlenir. Kil zeminin boşluk oranı azalır ve zeminde dikkate değer oturmalar gerçekleşir. Şekil 2.17' de gösterildiği gibi hem çevrim sayısı hem de gerilme oranının artışıyla oturmalarda artmaktadır [17].



Şekil 2.17. Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi [17]

Ural ve diğerleri (2007) ise 0.05Hz, 0.5Hz, 1.0Hz gibi farklı frekanslarda dinamik üç eksenli deneylerde frekansın etkisini araştırmışlardır. Silt numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılarak %2.5, %5 ve %10 çift yönlü eksenel birim boy değişim genliğine ulaşılması için gerekli çevrim sayısı ve dinamik gerilme oranı farklı frekans büyüklükleri için karşılaştırılmıştır. 0.05Hz frekans değeri ile yapılan deneyde istenen eksenel birim boy değişim genliğine ulaşılması için gerekli çevrim sayısının en düşük değerde olduğu, frekans değerinin 0.5Hz ve 1Hz olarak arttırılmasıyla numunelerin istenen eksenel birim boy değişim genliğine ulaşınası için gerekli çevrim sayısının giderek arttığı görülmüştür (Şekil 2.18) [18].

Bunun yanında, 1Hz frekansta yapılan deneylerde zemin numunelerinin boşluk suyu basıncı hiçbir zaman $r_u = 1$ değerine ulaşmazken aynı numuneler, 0.5Hz ve 0.05Hz frekanslarda dinamik yüklemeye maruz bırakıldığında %100 boşluk suyu basıncına kolayca ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 2.19). Bu çalışma sonunda Adapazarı zeminleri gibi genç akarsu/göl ortamlarında oluşmuş yumuşak ince daneli zeminler için





Şekil 2.18. Farklı frekanslarda %10 çift yönlü eksenel birim boy değişim genliğine ulaşılması için çevrim sayısı ile dinamik gerilme oranı DGO (CSR) [18]



Şekil 2.19. Farklı frekanslarda dinamik üç eksenli deney uygulamasıyla elde edilen boşluk suyu basıncı oranı ile dinamik gerilme oranı CSR [18]

Kayalı (2008), yüksek lisans tez çalışmasında örselenmiş tabii kil numuneleri üzerinde dinamik basit kesme deneylerinde tekrarlı yükleme frekansı 0.1Hz olarak sabit tutularak üç kez tekrarlı yük uygulanmıştır. İlk iki kademede boşluk suyu basıncı drenajına izin verilmiş üçüncü yüklemede drenaja izin verilmeden numune statik olarak kesilmiştir. Tekrarlı yükleme sonucunda boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu ve konsolidasyon oturmaların tekrarlı gerilme oranına bağlı olduğu ve gerilme oranı arttıkça boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu ve konsolidasyon oturmaların.

Şekil 2.20' de her üç yükleme kademesi için birim kayma deformasyonun dinamik gerilme oranı τ/σ'_v ile değişimi gösterilmiştir. Tüm kademelerde dinamik kayma gerilmesi arttıkça deformasyon artmış ve en yüksek eğim ilk kademeye ait iken en düşük eğim son kademeye aittir. Kademeler arası boşluk suyu basıncı sönümlendiğinden dolayı konsolidasyon oturmaları sağlanmış ve numune mukavemeti arttığından dolayı en küçük deformasyon artışı son kademede gerçekleşmiştir [19].



Şekil 2.20. Kayma deformasyonlarının üç kademe boyunca dinamik gerilme oranı, τ/σ'_{v} ile değişimi [19]

Dinamik kayma gerilmesi oranının, τ/σ'_v , boşluk suyu basıncı , $\Delta u/\sigma'_c$, üzerindeki değişimi Şekil 2.21'de gösterildiği şekildedir. Kayma gerilmesi oranı %30–%40 olan deneylere ait sonuçlara bakıldığında dinamik kayma gerilmesi oranının kayma deformasyonu üzerindeki etkisine benzer şekilde boşluk suyu basıncı artışları meydana gelmiştir [19].

Okur ve Ansal (2009), İstanbul Avcılar bölgesinde yapılan sondajlarla elde edilmiş numuneler kullanılarak yapılan dinamik üç eksenli deneylerde maksimum dinamik kayma modülüne boşluk oranı, çevre basıncı, plastisite indisi, likidite indisi ve kaba dane oranı etkilerini incelemişler. Deneye tabii tutulan numunelerin tabii su muhtevası, $w_0 = \%25-30$, likit limit değeri, LL = %40-55, plastisite indisleri PI = %10-30, boşluk oranları, $e_0 = 0.72-1.2$, uygulanan çevre basınçları $\sigma_c = 70-250$ kPa değerleri arasında değişmekte ve zemin sınıflandırmasına göre yüksek plastisiteli kil (CH), siltli kil sınıfına girmiştir [20].



Şekil 2.21.Boşluk suyu basınçlarının üç kademe boyunca dinamik kayma gerilme oranı τ / σ'_{v} ile değişimi [19]

Farklı boşluk oranına sahip numuneler için hesaplanan maksimum kayma modülü değişimleri Şekil 2.22' de verilmiştir. Şekildeki eğriler, ortalama çevre basıncı değerleri için boşluk oranı ile maksimum kayma modülü değeri herhangi bir çevre basıncında maksimum kayma modülü boşluk oranı arttıkça azalmaktadır.



Şekil 2.22. Boşluk oranı maksimum dinamik kayma modülü değişimi [20]

Literatürde arazi ve laboratuar deneylerinin korelasyonu sonucu elde edilen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Arazi kayma dalgası hızları standart penetrasyon değerleri için (2.12) bağıntısıyla hesaplanmıştır.

$$V_{\rm s} = 51.5 \, x \, N^{0.516} \tag{2.12}$$

Laboratuarda elde edilen sonuçlar arazide elde edilenlerin % 40 değerindedir. Bundan yola çıkarak laboratuar ve arazi sonuçları arasında (2.13) şeklinde bir bağıntı tanımlanmıştır.

$$(G_{maks})_{arazi} = 2.67 x (G_{maks})_{lab}^{0.95}$$
(2.13)

Ayrıca bu bağıntı kullanılarak arazi kayma modülünün ve laboratuar kayma modülünün birim kayma genliğine göre değişimi Şekil 2.23' de gösterilmiştir. Arazi ve laboratuar sonuçları arasında numune hazırlama sırasında meydana gelen örselenme ve deney sistemlerinin sınırlı olması nedeniyle yaklaşık 2.5 kat kadar fark bulunmaktadır [20].



Şekil 2.23. Arazi ve laboratuar dinamik kayma modülün değişimi [20]

İstanbul Kemerköy katı atık toplama sahasına yakın olan ve dolgularda kullanılan siltli kil tabakasından elde edilmiş zemin ile çöp dolgu sahasından alınmış çöp sızıntı suyunun %5, %20, %50 ve %100 karıştırılması ile elde edilen zeminlerin kıvam limitleri Erken ve diğerleri (2009) tarafından incelenmiştir. Araştırmanın ikinci

aşamasında çamur konsolidasyon deney aletinde hazırlanmış örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır.

Zemin numunelerine büyük deformasyon oluşmasına imkan verebilecek seviyede eksenel yükler uygulanmış ve boşluk suyu basıncı değişimleri ile deformasyon değişimleri kaydedilmiştir. Şekil 2.24 ve Şekil 2.25' de bir grup zemin numunesine ait eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile artışı gösterilmiştir. Artan çevrim sayısı ile boşluk suyu basıncı ve eksenel deformasyon artmıştır. N=16 çevrimde eksenel birim deformasyon $\varepsilon = \pm \% 2.5$ seviyesine ulaşmış, boşluk suyu basıncı $r_u = 1.0$ olmuştur [21].



Şekil 2.24. Zeminin dinamik davranışı K.O.= %100 [21]



Şekil 2.25. Zeminin dinamik davranışı K.O.= %100 [21]



Şekil 2.26. Zeminlerin dinamik gerilmeler altındaki davranışları [21]

Şekil 2.26' da dinamik eksenel gerilme oranı $\sigma_d/2\sigma_c = \pm 0.260 - 0.270$ arasında uygulanmış temiz ve kür oranı (K.O) %5, %20, %50 ve %100 olan örselenmemiş zemin numunelerinin dinamik davranışları gösterilmiştir. $\varepsilon = \pm$ %40 deformasyon seviyesine kadar kür oranı arttıkça zeminde daha sınırlı deformasyonlar oluşurken bu seviyeden sonra ise aynı çevrim sayısında kür oranı arttıkça daha büyük deformasyonlar

oluştuğundan bu seviyede numunenin yapısında değişiklerin olduğu bir eksenel birim deformasyon seviyesi olmaktadır. Aynı çevrim sayısında ise kür oranı arttıkça boşluk suyu basıncında daha fazla artma olmuştur. $\varepsilon = \pm \%2.5$ deformasyon seviyesinde temiz zeminde boşluk suyu basıncı oranı $r_u = 0.9$ seviyelerinde iken farklı kür ortamlarında hazırlanmış zemin numunelerinde $r_u = 1.0$ olmuştur

RaviShankar ve Sitharam (2005), kuru ve doygun zemin örnekleri üzerinde büyük kayma gerilmesi seviyelerinde gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Relatif sıkılıkları %30, %50 ve %70 olan farklı numunelere tekrarlı yükler direk uygulanmış ve frekanslar ile relatif sıkılıkların etkisi araştırılmıştır. Kuru kumlarda %0.27 ve %3.32 gerilme oranlarında artan kayma gerilmeleriyle kayma modülü azalmıştır (Şekil 2.27). En büyük kayma modülü değerleri, en yüksek relatif sıkılığa sahip zeminlerdedir ve relatif sıkılığın, kayma modülündeki etkileri açıkça görülmektedir.



Şekil 2.27. Kuru kumlar için kayma modülü ve kayma gerilmesi arasındaki ilişki [22]

Şekil 2.28' deki gibi sönüm oranı artan kayma gerilmesi oranlarıyla birlikte artmaktadır. Fakat relatif sıkılığın %0.27 ve %3.32 kayma gerilmesi aralığında sönüm oranı üzerindeki etkisi görülmemiştir. Doygun kumlarda da kuru kumlarda olduğu gibi relatif sıkılığın değişen gerilme oranlarına karşılık sönüm oranı ve kayma modülündeki etkileri aynıdır [22].



Şekil 2.28 Kuru kumlar için sönüm oranı ve kayma gerilmesi arasındaki ilişki [22]

Frekansın %30 relatif sıkılık ve 100kPa çevre basıncındaki kuru kumun dinamik özelliklerine etkisi de Şekil 2.29 ve Şekil 2.30' da gösterilmiştir. Kayma modülünün çevrimsel yüklemenin frekansına bağlı olmaksızın artan kayma gerilmeleriyle azaldığı açıktır. Fakat sönüm oranı belirli bir aralıkta yükleme frekansından etkilenmektedir. En yüksek sönüm oranlarına ise en yüksek frekans değerlerinde ulaşılmaktadır. Aynı davranışlar doygun kumlar içinde geçerlidir.



Şekil 2.29. Kuru kumlar için kayma modülü ve kayma gerilmesi üzerinde frekansın etkisi [22]



Şekil 2.30. Kuru kumlar için sönüm oranı ve kayma gerilmesi üzerinde frekansın etkisi [22]

Çabalar (2009); çeşitli plastisiteye sahip doygun killerin dinamik özelliklerinde Stokoe rezonant kolon deneyini kullanarak değişen çevre basıncının etkilerini incelemek için bir çalışma yapmıştır. Kayma modülü ve sonüm oranı %0.001 ve %0.1 gerilme oranlarında ölçülmüş ve daha sonra nonlineer modüller ve sönüm eğrileri karşılaştırılmıştır. Görülmüştür ki PI indisi arttığında aynı efektif gerilmesinde kayma modülü artmakta ve sonüm oranı ise azalmaktadır. Efektif gerilme arttığında ise aynı tip killerde kayma modülü artmakta sönüm oranı ise azalmaktadır. Çalışma plastisite indisinin ve çevre basıncının kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisini incelemek için yapılmıştır. Bunun için boşluk suyu basıncı 300kPa sabit tutularak 350-450 kPa çevre basıncının altındaki çeşitli killerde drenajsız konsolidasyonlu burulmalı rezonans kolon deneyleri yapılmıştır [23].

Deney verileri; tekrarlı kayma parametrelerinin mühendislik hesaplarında plastisitenin önemli bir yeri olduğunu açıkça göstermiştir. Eğer plastisite indisi değeri artarsa kayma modülü artar ve sönüm oranı azalır. Küçük gerilmelerde plastisitenin killerin kayma modülü ve sönüm oranı oranı üzerindeki etkisi artan kayma gerilmesi seviyeleri ile daha da önemli olmaktadır (Şekil 2.31).

Çevre basıncının kayma modülü ve sönüm oranı üzerinde etkileri de incelenmiştir. Kayma modülü başlangıçta daha düşük çevre basınçlarında daha küçük iken aynı numune için artan çevre basıncı oranlarında artmaktadır. Sönüm oranında ise artan çevre basınçları ile azalma eğilimi gözlemlenmiştir (Şekil 2.32).



Şekil 2.31. Farklı plastisite indislerinde kayma modülü ve gerilme eğrileri [23]



Şekil 2.32. Farklı efektif basınçlarında sönüm oranı, kayma gerilmesi ve gerilme eğrileri PI = 65 [23]

Teachavorasinskun ve diğerleri (2002), örselenmemiş Bangkok kil örnekleri üzerinde dinamik üç eksenli basınç deneyleri yaparak %0.01 seviyelerine kadar gerilme deformasyon ilişkilerini ölçmüşlerdir. Yükleme frekansının, başlangıç konsolidasyon basıncının ve küçük genlikli çevrimsel gerilme geçmişinin etkileri araştırılmıştır. Eşdeğer kayma modülü yükleme frekansından (f = 0.1 ve f = 1.0 Hz) veya küçük genlikli çevrimsel gerilme geçmişinden önemli derecede etkilenmemektedir. Fakat sönüm oranı, yükleme frekansı artıkça dikkate değecek şekilde artmaktadır. Çevrimsel yükleme öncesinde ve sonrasında elde edilen eşdeğer kayma modülleri Şekil 2.33 ve Şekil 2.34' de gösterilmiştir. Kayma modülünde boşluk oranı değişimleri dikkate alınmıştır ve G_{eq} , e' nin boşluk oranı olduğu F(e) fonksiyonu ile normalize edilmiştir. Ayrıca gerilme geçmişinin normalize edilmiş kayma modülü ve sönüm oranı üzerinde etkisinin olmadığı Şekil 2.34 ve Şekil 2.35' de görülmektedir [24].



Şekil 2.33. $G_{eq} / F(e)$ ' nin f = 0.1Hz de çevrimsel gerilme ile değişimi [24]



Şekil 2.34. $G_{eq} / F(e)$ ' nin f = 1.0 Hz de çevrimsel gerilme ile değişimi [24]



Relatif sıkılıkları %30 ve %70 olan siltli kumlarda dinamik özellikleri ve sıvılaşma

potansiyellerini araştırmak amacıyla Sitharam ve diğerleri (2004) tarafından dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Relatif sıkılığın doygun zeminlerin özelliklere etkisi aynı çevre basıncında (100 kPa) farklı iki relatif yoğunlukla açıklanabilir. Şekil 2.36 ve Şekil 2.37 siltli kum için kayma gerilmesinin bir fonksiyonu olan kayma modülü ve sönüm oranı değişimlerini göstermektedir.



Şekil 2.36. Kayma modülünün kayma deformasyonu ile değişimi [11]

Kayma modülündeki düşüş ve sönüm oranındaki artış kayma gerilmesinin %0.053 - %5 aralığında daha çok görülmektedir. Başlangıçta rijit (katı) olan zemin, çevrimsel

yükleme sayısının artmasıyla boşluk suyu basınçlarında meydana gelen artışlar nedeniyle rijitliğini kaybeder. Çevrimsel yüklemedeki ilerleme, kayma modülündeki şiddetli azalma ile daha yüksek boşluk suyu basınçlarına sebep olur. Daha yüksek relatif sıkılığa sahip zemin örnekleri, kayma gerilmesinin %0.053 - %5 aralığında daha yüksek kayma modülü sergiler. Fakat daha fazla veya daha az aynı kayma modülü değerleri, zeminin başlangıçtaki sıkılığına bakılmaksızın %0.5 kayma gerilmesi seviyesi civarlarında olur [11].



Şekil 2.38. Sönüm oranının kayma deformasyonu ile değişimi [11]

2.5. Sonuç

Bu bölümde zeminlerin dinamik mukavemet özellikleri ve özellikleri etkileyen faktörler hakkında bilgilere ve tekrarlı yükler altında zeminlerin davranışı ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Özellikle killer olmak üzere zeminlere dinamik burulmalı kesme, rezonant kolon deneyleri, dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneyleri yapılarak birçok araştırmacı tarafından zeminlerin dinamik mukavemet özellikleri farklı koşullarda incelenmiştir.

3. BÖLÜM

ZEMİNLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1. Giriş

Geoteknik deprem mühendisliği problemlerinin çözümünde zeminlerin dinamik özelliklerinin ölçülmesi son derece önemli bir aşamadır. Bu konuda birçok değişik arazi ve laboratuar yöntemleri olup her biri zeminin değişik özelliklerini ölçmek için tasarlanmıştır. Dinamik zemin özelliklerinin ölçümü için seçilen deney teknikleri, araştırılan problemin dikkatli bir şekilde ele alınmasını ve anlaşılması gerektirir.

Seçilen deney türü ve sınır koşulları zeminin arazideki mevcut durumunu, gerilme tarihçesini, konsolidasyon durumunu gerçekçi olarak yansıtmalı ve ayrıca tekrarlı yük genliği ve frekansını uygun laboratuar koşulları ile sağlaması gerekmektedir.

Zemin dinamiği çalışmaları kapsamında arazi ve laboratuvar koşullarında aşağıdaki dinamik zemin özellikleri belirlenmeye çalışılır [7].

- Gerilme-şekil değiştirme ve birim deformasyona bağlı olarak belirlenen kayma mukavemeti,
- 2.) Dinamik kayma modülü ve elastisite modülü,
- 3.) Poisson oranı,
- 4.) Sönüm oranı,
- 5.) Sıvılaşma parametreleri; tekrarlı kayma gerilmesi oranı, dinamik şekil değiştirme ve artan boşluk suyu basıncı.

Bu özelliklerden kayma modülü ve sönüm oranı hesabı tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelen problemleri etkileyen parametrelere oranla problem çözümünde daha büyük önem taşır.

3.2. Arazi Deneyleri

Arazi deneyleri zemin özelliklerinin yerinde ölçülmesine imkan verir. Dinamik özelliklerin arazide ölçülmesinin birçok faydası vardır. Arazi deneylerinde numune alınmasına gerek yoktur. Bundan dolayı numune alımıyla meydana gelebilecek gerilme, kimyasal, termal ve yapısal değişim durumları gerçekleşmemiş olur. Arazi deneylerinin çoğu büyük hacimli zemin kütleleri üzerinde yapılır ve böylelikle, ölçülebilen özelliğin küçük ve temsilci olmayan numune üzerinde yapılmasından ileri gelen hatalar minimuma indirilmiş olur [12], [25].

Bazı arazi deneyleri zemin yüzeyinde bazıları ise kuyu açılarak yada deney cihazlarının zemin içine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Yüzeyde yapılan deneyler hem kısa zaman aralığında yapılır hem de maliyet açısından avantajlıdır. Sondaj yapılmasının veya numune alınmasının zor olduğu deneylerde çok yararlıdırlar. Kuyu deneylerinde ise istenilen bilgilerin doğrudan elde edilmesi ve yüzey deneylerine göre daha doğru bilgiye ulaşılması şeklinde avantajlar söz konusudur. Böylelikle zemin özelliklerinin laboratuarda tanımlanması, belirlenmesi ve benzer bilgilerin elde edilmesi mümkündür.

Arazide en çok kullanılan başlıca deneyler aşağıda kısaca anlatılmıştır.

3.2.1. Sismik Kırılma Deneyi

Sismik kırılma deneyinde, belirli bir jeofona gelen dalganın geliş yolunun hiçbir önemi olmaksızın, ilk geliş zamanları kullanılmak suretiyle sismik yansıma deneyindeki en önemli kısıtlama ortadan kalkmış olur (Şekil 3.1). Deneyde, kaynakta bir pals ile oluşturulan P veya S dalgalarının, kaynaktan farklı mesafelerinde bulunan ve zemin yüzeyinde bir hat üzerine yerleştirilmiş olan jeofonlara geliş zamanları ölçülür [8].

3.2.2. Kuyudan-Kuyuya Sismik Deneyi

Kuyudan-kuyuya sismik deneylerinde yatay yöndeki dalga yayılma hızlarını ölçmek için iki veya daha fazla sondaj kuyusu gereklidir. En basit deney düzeneğinde biri enerji kaynağını diğeri de alıcıyı ihtiva eden iki sondaj kuyusu vardır (Şekil 3.2). Kuyulardaki kaynağı ve alıcıyı aynı derinlikte yerleştirmek suretiyle, iki kuyu arasındaki malzemenin

o derinlikteki dalga yayılma hızı ölçülür. Değişik derinliklerde deney yapmak suretiyle bir hız profili elde edilebilir [8].



Şekil 3.1. Sismik kırılma deney düzeneği [8]

Tetikleme zamanı ölçümü, muhafaza borusu ve arka dolgusunda kaynaklanan olası hataları azaltmak için, mümkün olan durumlarda ikiden fazla kuyu açılabilir. Dalga yayılma hızları böyle durumlarda birbirine komşu iki kuyu arasındaki geliş zamanı farklarından hesaplanabilir. Varış zamanı, kayıtlardaki yaygın faz noktalarının gözle tespit edilmesiyle veya petrol aramalarında yaygınca kullanılan çapraz korelasyon teknikleri (Roesler, 1977) vasıtasıyla belirlenebilir [8].



Şekil 3.2. Kuyudan kuyuya sismik deneyi : (a) iki kuyu düzenini kullanarak doğrudan ölçüm; (b) üç kuyu düzenini kullanarak aralık ölçümü [8]

Zeminlerin materyal sönümleme oranını hesaplamada, üç veya daha fazla kuyuda yapılan genlik sönümlenme ölçümleri kullanılmaktadır (Hoar ve Stokoe, 1984; Mok vd. 1988; EPRI, 1993). Bu yöntemde kuyu cidarı ile iyi eşleşmiş, hassas bir şekilde kalibre edilmiş ve yönlendirilmiş alıcılara gerek vardır. Bir yayılma şekli varsayarak, materyal sönümlemesinden kaynaklanan atenasyonu elde etmek için, geoteknik sönümlenmenin (radyasyon sönümlenmesinin) etkileri ölçülmüş atenasyondan ayrılabilir. Gerekli varsayımlar bu yaklaşımların basit geometrili ve homojen zemin şartlarından oluşan sahalara en iyi şekilde uymasını sağlar [8].

3.2.3. Sismik Kuyu Aşağı (Kuyu Yukarı) Deneyi

Sismik kuyu-aşağı (veya kuyu-yukarı) deneyleri sadece bir kuyuda yapılabilmektedir. Kuyu-aşağı deneyinde dinamik enerji kaynağı yüzeyde ve kuyunun hemen yakınındadır. Değişik derinliklere kaydırılabilen bir alıcı veya çoklu alıcılardan oluşan bir kablo sistemi kuyu cidarına sabitlenir ve bir alıcıda enerji kaynağının hemen yanında bulunur (Şekil 3.3). Tüm alıcılar, çıktılarının zamanın fonksiyonu olarak ölçülebilmesi için, yüksek hızlı bir kaydediciye bağlıdır.



Şekil 3.3. (a) Sismik kuyu yukarı ve (b) sismik kuyu aşağı deneyi [8]

Kuyu-aşağı (veya kuyu-yukarı) deneyin amacı, enerji kaynağından P veya S dalgalarının alıcıya (veya alıcılara) varış zamanını ölçmektir. Alıcı pozisyonlarını uygun şekilde düzenlemek suretiyle bir zaman-derinlik grafiği (Şekil 3.4) oluşturulabilir. Grafiğin herhangi bir derinlikteki eğimi sıfır derinlikteki dalga yayılma hızını temsil eder. S dalgalarının oluşturulması kuyu-yukarı deneyine kıyasla kuyu-aşağı deneyinde daha kolaydır. Bu yüzden de kuyu-aşağı deneyi daha çok tercih edilmektedir [8]

3.2.4. Standart Penetrasyon Deneyi

Bu deney (SPT), geoteknik mühendisliğinde kullanılan yerinde deneyler arasında en eski olanı ve en çok kullanılanıdır. Geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bir SPT deneyinde, ortadan ayrılabilir numune alıcı kuyu tabanındaki zemine çakma suretiyle sürülür [8].

Numune alıcı zemine genellikle 45 cm sürülür ve son 30 cm' lik kısmı çakmak için gerekli darbe sayısı standart penetrasyon direnci, N olarak kaydedilir. N değeri zemin türüne, çevre basıncına ve zemin yoğunluğuna bağlı olarak değişir ve ayrıca deney düzeneği ile kullanılan yöntemlerden de etkilenir.



Şekil 3.4. San Fransisco Körfez bölgesinde bir kuyu aşağı deneyine ait varış zamanı eğrisi [8]

3.3. Laboratuar Deneyleri

Laboratuar deneyleri daha çok büyük zemin kütlelerini temsil eden küçük numuneler üzerinde yapılmaktadır. Dinamik laboratuar deneylerinde en önemli problem zemin numunelerinin örselenmiş veya örselenmemiş olmasından dolayı test sonuçlarının birbirinden farklı olacağıdır. Dolgu olarak kullanılacak zeminlerin tepkisi ile ilgili problemlerde numune hazırlama işlemi, yığın şeklinde veya örselenmiş örneklerin laboratuarda olabildiğince temsili bir kompaksiyon işlemine tabi tutulmasıyla yapılmaktadır. Ancak, mevcut bir zemin ile ilgili özelliklere gereksinim duyulduğunda problem daha da güçleşmektedir. Mevcut zeminlere ait deneyler örselenmemiş veya yeniden yapılandırılmış numuneler üzerinde yapılabilir. Ancak, yoğunluklar ve uygulanan gerilmeler aynı olsa bile, doğal zeminlerdeki doku ile yeniden yapılandırılmış numunenin dokusu arasındaki farklılıklardan dolayı, bu deneylerde elde edilen sonuçlar çoğu zaman farklı olmaktadır [1].

Rezonant kolon deneyi, ultrasonik pals deneyi, piyezoelektrik bender elemanı deneyi,tekrarlı üç eksenli deney, tekrarlı doğrudan basit kesme deneyi, tekrarlı burulmalı kesme deneyi, sarsma tablası deneyi ve santrifüj deneyleri zeminlerin özelliklerinin bulunmasında yararlanılan başlıca deneylerdir.

3.3.1. Rezonant Kolon Deneyi

Zeminlerin düşük deformasyon özelliklerinin ölçülmesinde en yaygın olarak kullanılan deney sistemidir. Bu deneyde, içi delik veya dolu olan silindirik numuneler elektromanyetik yükleme sistemi vasıtasıyla harmonik burulma veya eksenel yüklemeye maruz bırakılırlar (Şekil 3.5) [8].



Şekil 3.5. Tipik rezonant kolon deney düzeneği: (a) yükleme sisteminin tepeden görünümü, ve (b) yükleme sistemi ve zemin numunesinin profil görünümü (EPRI, 1993)

Rezonant kolon numunesi hazırlanıp konsolide edildikten sonra tekrarlı yükleme başlatılır. Yükleme frekansı, başlangıçta küçük bir değerde tutulur ve sonra tepki (birim deformasyon genliği) maksimuma erişene kadar devamlı şekilde arttırılır. Tepkinin lokal olarak maksimuma ulaştığı en düşük frekans, numunenin esas frekansıdır. Esas frekans zeminin düşük deformasyon rijitliğinin, numune geometrisinin ve rezonant kolon düzeneğinin belirli bir fonksiyonudur.

Rezonant kolon deneyi kontrollü şartlar altında rijitlik ve sönümleme özelliklerinin ölçülmesine izin verir. Efektif çevre basıncı, birim deformasyon genliği ve zamanın etkileri kolaylıkla incelenebilmektedir. Ancak, boşluk suyu basıncı ölçülmesi güçtür ve malzeme özellikleri genellikle çoğu deprem hareketi frekanslarının üzerinde ölçülmektedir [8].

3.3.2. Ultrasonik Pals Deneyi

Dalga iletme hızları, laboratuarda ultrasonik pals deneyiyle ölçülebilmektedir (Lawrence, 1963; Nacci ve Taylor, 1967). Numunenin her ucuna ultrasonik verici ve alıcılar yerleştirilerek, aralarındaki mesafe dikkatlice ölçülür. Verici ve alıcılar, yüzeylerinde bir voltaja maruz kaldığında boyutları değişen ve yamuldukları zaman voltaj üreten piyezoelektrik malzemeden üretilmiştir. Vericiye uygulanan yüksek frekanslı bir elektrik frekansı vericinin süratle deforme olmasına neden olur ve numune içinde alıcıya doğru ilerleyen bir gerilme dalgası üretir. Gerilme dalgası alıcıya ulaştığında ölçülebilir bir voltaj palsı üretir. Verici ile alıcı arasındaki mesafe voltaj palsları arasındaki zaman farkına bölünerek dalga yayılma hızları elde edilir. Ultrasonik pals deneyi, numune tüpün içinden çıkarılmamış durumda iken yapılabildiğinden, özellikle deniz tabanı çökelleri gibi birçok yumuşak malzemelerde kullanışlı bir deneydir [8].

3.3.3. Bender Elemanı Deneyi

Laboratuar deneyleri arasında kesme dalgası hızı ölçmeye yarayan diğer bir deneyde bender elemanlarını kullanmaktır. Bender elemanları iki piyezoelektrik malzemesinin, yüzeylerine voltaj uygulandığında biri genişlerken diğeri de büzülecek şekilde ve elemanın tamamının Şekil 3.6'daki gibi eğilmesine neden olacak şekilde bağlanmasıyla oluşturulur. Benzer şekilde, bender elemanının yanal olarak örselenmesi bir voltaj üretir ve bu şekilde bender elemanları hem S dalgası vericileri ve hem de alıcıları olarak kullanılabilir. Bender elemanları geleneksel ve kübik üç eksenli deney düzenekleri, doğrudan basit kesme cihazları, ödometreler ve model deneyleri ile birlikte kullanılmaktadır. Bender elemanı deneyi sırasında numune örselenmediğinden, numune bu deneyden başka zemin özellikleri için de test edilebilmektedir [8].



Şekil 3.6. Piyezoelektrik bender elemanı. Pozitif voltaj elemanın bir tarafa; negatif voltaj da diğer tarafa eğilmesine neden olur [8]

3.3.4. Tekrarlı Burulmalı Kesme Deneyi

Tekrarlı üç eksenli ve tekrarlı doğrudan kesme deneylerinde karşılaşılan güçlüklerin çoğu, silindirik numuneleri burulmalı şekilde yüklemek suretiyle giderilmektedir. Tekrarlı burulma kesme deneyleri izotrop veya anizotrop başlangıç gerilme şartlarına izin verir ve asal gerilme eksenleri devamlı surette dönecek şekilde kayma gerilmelerinin yatay düzleme uygulanmasını sağlar. Geniş bir aralıktaki deformasyon düzeylerinde rijitlik ve sönümleme özelliklerinin ölçülmesinde en çok kullanılan deney türüdür.

Ishihara ve Li (1972), örselenmiş ve örselenmemiş numunelerin kullanılabildiği burulmalı kesme deney aleti geliştirmişlerdir. Dobry vd. (1985) deformasyon kontrollü tekrarlı burulmalı yüklemeyle birlikte gerilme kontrollü eksenel yüklemeyi de kullanmıştır. Eksenel yüklemeli deneyde, sıvılaşma davranışının ölçümünde kullanışlı olduğu ispat edilmiş olan CyT-CAU deneyini geliştirmek için kullanılan içi boş olmayan numuneler kullanılmıştır. Ancak, içi boş olmayan numunelerin burulmalı

deneyinde numunenin ekseninde sıfırdan başlayıp dış yüzeyinde maksimuma çıkan kayma deformasyonları oluşmaktadır. Kayma birim deformasyonlarının yatay yöndeki üniformluğunu attırmak için, başka araştırmacılar içi boş silindirik burulmalı kesme düzenekleri geliştirmişlerdir (Şekil 3.7). Çok iyi bir üniformluk sağlayan ve gerilme ile drenajları da çok iyi kontrol eden içi boş silindir deneylerinde numune hazırlanması zordur ve ayrıca yaygınca bulunan türden bir ekipman değildir [7], [8].



Şekil 3.7. İçi boş silindir düzeneği. Numune, iç ve dış basınçların birbirinden bağımsız olarak uygulanabileceği iç ve dış membranlar içine yerleştirilir. [8].

3.3.5. Sarsma Tablası Deneyleri

Geoteknik deprem mühendisliğinin ilk zamanlarında dinamik deneylerin tamamı sarsma tablası üzerinde yapılmaktaydı. Sarsma tablaları ile sıvılaşma, deprem sonrası oturma, temel tepkisi ve yatay zemin basıncı problemlerinde önemli aşamalar kaydedilmiştir.

Araştırmalarda çok değişik boyutlarda sarsma tablaları kullanılmıştır. Bunlardan bazıları birkaç metrelik boyutlardaki modellerin denenmesini sağlayacak kadar büyüktür. Bu nedenle, genellikle küçük ölçekli model deneylerinde küçük tane boyuna sahip zeminlerden numune hazırlanırken, sarsma tablalarında çoğu zaman gerçek prototip zeminler kullanılmaktadır (Şekil 3.8). Bu büyük modellerde zeminlerin yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve içine alet yerleştirilmesi oldukça kolaydır [8].



Şekil 3.8. Dinamik zemin basıncı deneyinde kullanılan zemin hazneli sarsma tablası [8]

3.3.6. Dinamik Üç Eksenli Deney

Dinamik üç eksenli deney sistemi ile zeminlerin dinamik özelliklerinin araştırılmaya başlanması 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Statik üç eksenli deney hücrelerinin kullanılabilmesi ve deney yönteminin basit oluşu kullanımı yaygınlaştırmıştır.

Dinamik üç eksenli deneyler deprem etkisi ile zemin kütlelerine uygulanan yükleri modellemek için yapılır. Arazideki zemin kütlesine uygulanan deprem yükleri ile dinamik üç eksenli deney sisteminde numuneye uygulanan yükler arasında farklar vardır. Ayrıca birkaç faktör, dinamik üç eksenli basınç deney numunesinde meydana gelen sıvılaşmaya karşı direnci etkileyebilir ve arazide meydana gelebilecek olandan farklı olabilir. Bu farklılıklar, araziden alınan zemin numunesinin örselenmesi sonucu yapısının bozulması, numunenin relatif sıkılığı, zeminin dane çapı ve dağılımı, numunenin boyutları, yükleme fonksiyonunun şekli, yükleme fonksiyonun uygulama frekansı ve numunedeki doygunluk derecesidir [19], [26].

Şekil 3.9' da laboratuarda dinamik üç eksenli deney numunesi ile arazi elemanı arasındaki ilişki görülmektedir. Deneyler genellikle suya doygun zeminlerde, drenajsız ve sabit çevre basıncı altında, numuneye eksenel tekrarlı yüklemeler uygulanarak yapılır ve eksenel boy değişimleri ile boşluk suyu basıncı değişimleri bulunur. Üç eksenli deney numunesi, arazi anizotropik gerilme koşullarına uygun asal gerilme oranları (K_c)

altında denge durumuna getirilmeli ve ondan sonra $+\sigma_{dp}$ gibi periyodik tekrarlı yüklemelere tabi tutulmalıdır. Şekil 3.9.b' de statik ve periyodik yükleme durumları Mohr daireleri ile gösterilmiştir. Belirli seviyedeki dinamik gerilmeler yeterince tekrarlanınca, başlangıç gerilme durumuna bağlı olarak göçme meydana gelmekte ve bu şekilde farklı gerilme seviyelerinde yapılan çok sayıda deney sonucu mukavemet zarfi elde edilebilmektedir [27]



Şekil 3.9. Arazi zemin elemanı ile laboratuvar üç eksenli dinamik deney numunesi üzerine etkiyen gerilmelerin benzeşimi [4]

Üç eksenli deneylerde silindirik bir zemin numunesi ince kauçuk bir membran ile kuşatılmış olarak iyi yükleme plakası arasına yerleştirilir (Şekil 3.10). Numuneye çoğu zaman hava basıncı şeklinde uygulanan bir yatay gerilme ile eksenel gerilme uygulanır. Numune üzerindeki asal gerilmeler bu sınır koşullarından dolayı her zaman yatay ve düşey konumdadır [8].

Eksenel ve yatay gerilmeler arasındaki fark deviatör gerilme olarak adlandırılır. Tekrarlı üç eksenli deneyde deviatör gerilme ya gerilme kontrollü şartlar altında ya da deformasyon kontrollü şartlar altında uygulanır. Numunedeki basınç ve boşluk suyu basınçları arasındaki deviatör yükleme sayısı artarken, efektif gerilme azalır ve numunede eksenel birim şekil değiştirmeler meydana gelir. Dinamik yükleme sırasında boşluk suyu basıncı konsolidasyon basıncı değerine eşit (yani efektif gerilme sıfır olduğu zaman) yada eksenel birim şekil değiştirmeler istenilen bazı seviyelere ulaşması durumunda ($\pm 2,5$) numunenin göçtüğü kabul edilir [8].



Şekil 3.10 Üç eksenli düzeneği [8]

Yapılan deney sonuçlarının değerlendirilmesinde aşağıdaki özellikler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Arazide, başlangıçta düşey olan büyük asal gerilme, tekrarlı kayma gerilmesi altında her iki yönde 40° lik açı yapar. Dinamik üç eksenli deneylerde ise her yükleme çevriminde en büyük asal gerilme 90° lik açı değişimi yapar.
- Laboratuarda zemin numunesi, her üç asal gerilme doğrultusunda şekil değiştirmeye uğrarken, deprem yüklemeleri altında basit kaymaya veya tek yönlü deformasyona maruz kalır.
- 3.) Numune ile alt ve üst başlık arasındaki sürtünme, üniform olmayan gerilmeşekil değiştirmeler meydana getirmektedir. Zemin numunesi, yükleme çevrinin eksenel basınç ve çekme bölümlerinde simetrik olmayan davranış göstermekte, eksenel gerilmenin azaldığı kısımlarda numune kesitinde incelme oluşmaktadır. Bu durumlar mukavemet kaybını çabuklaştırmaktadır. Konsolidasyon

aşamasında asal gerilmelerin birbirine eşit olması ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) mukavemet değerini arttırmaktadır [27].

3.3.7. Dinamik Basit Kesme Deneyi

Dinamik basit kesme deneyi ile deprem gerilme şartları tekrarlı üç eksenli deneyde olduğundan çok daha sağlıklı bir şekilde modellenebilmektedir. Sıvılaşma ile ilgili deneylerde en çok kullanılan yöntemdir. Deneylerde kısa ve silindir bir numune, rijit sınır plakaları, tel takviyeli membran ve üst üste yığılmış halkalar ile sınırlandırılmıştır. Tekrarlı yatay kayma gerilmelerini numunenin tabanına veya tepesine uygulamak suretiyle deney numunesi, düşey olarak yayılan S dalgalarının maruz kaldığı zemine çok benzer bir şekilde deforme edilir [8].



Şekil 3.11. Tekrarlı basit kesme düzeneği [8]

Dinamik basit kesme deney sisteminde, arazideki gerilme koşullarının aynen laboratuarda model edilmesi mümkündür. Şekil 3.12' de arazi elemanı ve laboratuvar zemin numuneleri üzerindeki gerilme durumları Mohr dairesi üzerinde gösterilmiştir. Depremden önce σ_{fc} ve τ_{fc} statik gerilmeleri etkisi altında bulunan zemin elemanı üzerinde, deprem sırasında $+\tau_d$ gibi bir tekrarlı gerilme uygulanmakta ve bu gerilmeler altında şekil değiştirmeler ve boşluk suyu basıncı artışları meydana gelmektedir. Dinamik gerilmeler belirli bir seviyeye ulaşınca ($\tau_{f max}$), yeterince tekrarlanması durumunda, Şekil 3.12.b' de gösterilen mukavemet zarfına ulaşılmakta ve göçme meydana geldiği kabul edilmektedir. Mukavemet zarfının deneysel olarak elde edilebilmesi için değişik başlangıç gerilme oranları altında ($\alpha = \frac{\tau_{fc}}{\sigma_{fc}}$) arazideki denge durumuna getirilen numuneler üzerinde tekrarlı yükler uygulanmalı ve göçmeye yol açan dinamik gerilme seviyesi belirlenmelidir [27].



Şekil 3.12. Arazideki bir zemin elemanı ile laboratuvar basit kesme deneyi numunesi üzerinde etkiyen gerilmelerin benzeşimi [4]

Tekrarlı kayma gerilmeleri uygulamadan önce numune arazide etkisinde bulunduğu gerilme koşullarına eşit bir duruma getirilir. Deneyler genellikle drenaja izin verilmeden gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılır. Numune üst başlığına yatay kuvvetin etkimesiyle numunede kayma gerilmeleri ve sonucunda kayma şekil değiştirmeleri oluşur. Dinamik yükleme sonucu zeminde oluşacak şekil değiştirmeler Şekil 3.13 ve 3.14' dekine benzer şekildedir [6].



Şekil 3.13. Tekrarlı yüklerin zeminin oluşturduğu gerilme şekil değiştirme davranışı [6]



Şekil 3.14. Dinamik basit kesme deneyi sırasında oluşan gerilme durumu [6]

Dinamik basit kesme deney tekniği, her tip zeminde uygulanabilmesi ve arazideki basit kayma koşullarını çok iyi model etmesine rağmen bazı eksiklikleri mevcuttur:

- Zemin numunesine uygulanan yatay kuvvet alt üst yüzeylerde kayma gerilmeleri oluşturmaktadır. Fakat düşey yüzlere kayma gerilmesi uygulama olanağı yoktur. Bu durum köşelere yakın olan yerlerde üniformluğun bozulmasına neden olmaktadır.
- Numune kesitinde kayma gerilmesi yayılımının üniformluğu, alt ve üst başlık özelliklerine bağlı olmakta ve kesin olarak sağlanamamaktadır.
- Numune boyunca birim kayma değişimlerinin üniform olmaması, şekil değiştirmelerin en zayıf olan kesitte toplanmasına neden olmaktadır [4].

Yukarıda özetlenen nedenlerden dolayı, gerilme-şekil değiştirme yayılışlarının üniform olmaması zemin numunesinde mukavemet kaybına ve kolay kırılmalara neden olmaktadır. Dolayısıyla arazi deneyleri ile belirlenen kayma modülü değerleri, dinamik basit kesme deneyleri ile bulunan değerlerden daha büyüktür Bu olumsuz yönlerine rağmen dinamik basit kesme deney tekniği, büyük deformasyonların oluştuğu depremlerin incelenmesinde başarıyla kullanılmaktadır [4].

3.4. Sonuç

Çalışmanın bu bölümünde zeminlerin dinamik kayma modülü, sönüm oranı birim deformasyon gibi dinamik özelliklerini bulmak için kullanılan deneyler anlatılmıştır. Bahsedildiği gibi gerek arazide gerekse laboratuarda kullanılacak birçok deney bulunmaktadır. Burada önemli olan eldeki zemin dikkate alınarak uygun deney yöntemi seçmektir. Zeminin arazideki durumu, deformasyon geçmişi, jeolojik ve fiziksel özellikleri, yapısı ve özellikle laboratuar deneyleri için numunenin arazi koşullarındaki gerçeği yansıtması göz önüne bulundurulmalıdır.

Arazi ve laboratuar deneylerinin avantaj ve dezavantajları sistemlerin özellikleri dikkate alınarak Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 'de verilmiştir.

Arazi Deneyleri	Avantajları	Dezavantajları
Sismik Kırılma Deneyi		Küçük gerilme
	Yüzeyde ve geniş alanlarda	genliklerinde çalışır.
	çalışır. Ön çalışma	Kıyılara yakın zayıf
	niteliğindedir.	bölgelerin özellikleri
		ölçülür.
		İki yada daha fazla kuyuya
Kuyudan Kuyuya Sismik	Dalga yöntemiyle belli	ve ayrıca dikeylik için
Deney	alanlarda çalışılır	gözlem kuyularına ihtiyaç
		vardır.
Sismik Kuyu Aşağı (Kuyu Yukarı) Deneyi	Sadece bir kuyu gereklidir.	Ortalama vaklasık hız
	Belirli bir alanda çalışır.	ölcer
	Düşük hızlara uygundur.	olçei.
SPT	Eskiden beri kullanılır ve	Standardizasvona ihtivac
	geniş kullanım alanına	vardır
	sahiptir.	Y UI UI II.

Tablo 3.1. Zeminlerin dinamik özelliklerini ölçmek için arazi deneyleri [12]

T T T	Birim		
Laboratuar	Deformasyon	Avantajları	Dezavantajları
Tekniği	Aralığı		
Rezonant Kolon Deneyi	% 10 ⁻⁵ - %10 ³	Zeminlerin kayma modülünü ve sönüm oranını bulmak için kullanılan en güvenilir ve pratik yöntemlerden biridir.	Zeminlerin analizi doğrusal ve elastik yaklaşımlara dayanmaktadır. Test verilerinin analizi sadece geçerli küçük bir gerilme için geçerlidir.
Bender Eleman Deneyi	% 10 ⁻⁵ - %10 ³	Úç eksenli kayma ve ödometre deneyleri olarak da kullanılır. Resonant kolon deneyine göre daha kolay ve çabuktur. Düşük gerilmelerde zeminin dinamik kayma modülünü ölçmek için basit bir yoldur.	Sönüm oranı doğrudan hesaplanamaz. Kayma modülü ise yüksek gerilmeler de hesaplanamaz.
Dinamik Üç Eksenli Deneyi	% 10 ⁻⁵ - %1	Sönüm oranı gerilme kontrollüdür.	Kayma modülü direk olarak hesaplamaz.
Dinamik Basit Kesme Deneyi	% 10 ⁻⁵ - %5	Zemin numunelerinin K ₀ şartlarında konsolidasyonu sağlandığından dolayı arazi koşullarını daha fazla temsil etmektedir. Geniş gerilme genliklerinde yürütülür. Boşluk suyu basıncı ölçülebilir.	-

Tablo 3.2. Çeşitli laboratuar deneylerinin avantajları ve dezavantajları [12]

4. BÖLÜM

ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEY SİSTEMLERİ, MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

4.1. Giriş

Bu tez çalışmasında kullanılan deney verileri Hacı Bekir Kara' nın "Normal Konsolide Killerin Tekrarlı Yükler Etkisi Altındaki Davranışı" adlı doktora tezinden alınmıştır. Bu bölümde de doktora tezinden yararlanılarak kullanılan deney aletleri, deney malzemesi, numunelerin hazırlanması ve deneylerin yapılışı kısaca anlatılacaktır.

4.2. Deney Sistemleri

4.2.1. Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi

Yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan verilerin bir kısmı İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği laboratuarındaki Japon Seiken Inc. firmasının geliştirmiş olduğu dinamik basit kesme deney sistemleri kullanılarak elde edilmiştir. Deney aleti; deney hücresi, basınç tablosu, yükleme ünitesi ve ölçüm-kayıt birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 4.1).

4.2.1.1. Deney Hücresi

Deney hücresi ϕ 250 mm çapında, 160 mm yüksekliğinde ve 20 mm et kalınlığına sahip sert ve şeffaf pleksiglastan yapılmış bir silindirdir. Numune, K₀ şartlarında deney yapmayı sağlayacak şekilde yatay düzlemde genişlemeyi engelleyen donatılı bir membran içine veya sadece normal esnek bir membran içine yerleştirilir [4].

Çelikten yapılmış alt ve üst başlık arasına yerleştirilir. Alt başlık numunenin yükseltilmesi ve konsolidasyon oturmalarının sağlanması amacıyla sadece düşey yönde hareket edebilecek, üst başlık ise statik ve dinamik kayma gerilmelerinin uygulanabilmesi için yatay doğrultuda hareket edebilecek şekilde birer şaft bağlanmışlartır. Numune alt ve üst başlığın içinde, numunenin kaymasını önlemek için poroz taşları da vardır. Ayrıca suya doygunluğu sağlamak için ters basınç uygulanabilmesine ve drenaja olanak veren tüp çıkışları hücre dışında yer alan vanalar bulunmaktadır [4].

Tekrarlı ve statik yükleme esnasında meydana gelen yatay yer değiştirmeler, hücre dışında yatay şaftın hücre çıkışına bağlanmış bir deplasman ölçer ile deney sırasında meydana gelen düşey yöndeki yer değiştirmeler de düşey şafta bağlanmış bir deplasman ölçer ile ölçülmektedir. Ayrıca düşey şaft üzerinde, numunelerin konsolidasyonu sırasında oluşan boy değişimlerinin 0.01 mm hassasiyetle okunmasını sağlayan deformasyon saati bulunmaktadır [19]

4.2.1.2. Basınç Tablosu

Basınç tablosu, deneylerde düzenli olarak su ve hava basıncı uygulamak ve numunede oluşacak hacim değişimlerini ölçmek için kullanılmaktadır. Şekil 4.1.' de harflerle gösterilmiş sekiz üniteden oluşmaktadır [4].

- A. Çevre basınç ünitesi
- B. Ters basınç ünitesi
- C. Düşey basınç ünitesi
- D. Dengeleme ve düşey basınç ünitesi
- E. Vakum ünitesi
- F. Sistem hava basıncı üretim ünitesi
- G. Sistem suyu sağlama ünitesi
- H. Numune hacim değişimi ölçüm ünitesi

Basınç tablosunun genel görünüşü Şekil 4.2' de gösterildiği gibidir. Yukarıdaki ünitelerde, sistem hava basıncı ana girişi, çevre, ters, düşey dengeleme ve sistem ana su tankı için altı adet basınç regülatörü ve altı adet basınç saati vardır. Basınç regülatörleri,

yüksek hava basıncını kontrol ederek basıncın sabit olarak uygulanmasını sağlarlar. Bunlardan ikisi (çevre ve dengeleme basınç regülatörleri), diğer basınç regülatörleri ile bağlanarak eşit basınç artışları için ortak beslenebilirler [4].



Şekil 4.1. Dinamik basit kesme deney sisteminin şematik çizimi [4]



Şekil 4.2. Dinamik deney sistemleri basınç tablosu [4]

Vakum uygulayabilmek için birer adet vakum pompası, vakum saati ve küçük bir su tankı kullanılır. Küçük su tanklarından birincisi vakum tankı olup, numuneden gelen suyu tutarak vakum pompasına girmesini engeller ve ikinci tank ise ters basınç tankı olup, hava basınç regülatörü tarafından kontrol edilen hava basıncını, tankı içerisindeki lastik bir balon ile su basıncına dönüştürür. Ayrıca sistem verimliliğini arttırmak için çok sayıda iğne vanalar ve su tutucu filtreler yerleştirilmiştir. Su tutucu filtreler hava basınç borusundan gelebilecek kondense suları tutarak regülatörlere ve sisteme girmesini önlerler. İğne vanaların görevi ise, hava devresini açmak ya da kapatmaktır [4].

4.2.1.3. Yükleme Ünitesi

Deney hücresindeki numuneye uygulanan statik ve dinamik yatay gerilmeler ile statik düşey gerilmeleri numuneye aktaran ünite, yatay yükleme birimi ve düşey yükleme birimi olmak üzere iki ana birimden oluşmaktadır [4].

Yatay yükleme birimi; dinamik yükleme pistonu, statik yükleme pistonu ve hava basınç ileticisinden oluşur. Hava basınç ileticisi, yatay yükleme biriminden gelen hava basıncını, hücre içindeki bir yük ölçer ve bir şaft ile şaftın bağlı olduğu kayıcı rulmanlı üst başlıktan numune üst düzeyine kayma gerilmesi uygular. Deney sırasında, numune üst yüzeyine uygulanan statik ve dinamik kayma gerilmeleri "Havalı Yükleme Birimi" tarafından kontrol edilir [4].

Düşey yükleme birimi, iki pistonlu bir silindirden oluşur. Pistonların birinin görevi, kendi ağırlığını dengelemek ve numuneyi yükselterek üst başlığın yatay yükleme şaftıyla bağlantısını sağlamaktır. İkinci pistonun görevi ise, numuneye farklı yatay ve düşey gerilmeler uygulanacağı zaman düşey gerilmenin uygulanmasını sağlamaktır. Bu düşey şafta yerleştirilmiş deplasman ölçer ile numunedeki boy değişimleri ölçülebilir [4].

Bu birim yardımıyla ile sinüzoidal, kare ve iki tip üçgen kesitli kontrollü yükleme yapılabilmektedir. Titreşim frekans aralığı, 0,0001-9999 çevrim/sn arasında değişmekte ve üzerinde yer alan dinamik basınç ölçerin gösterdiği değerden büyük olmamaktadır. Farklı genlik ve frekanslarda deneyler yapıldığında belirli kayma gerilmeleri altında akma ve değişik hızlarda gerilme kontrollü monotonik kesme deneyleri de yapılabilmektedir [4].

4.2.1.4. Ölçüm ve Kayıt Birimleri

Dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneyleri sırasında numunelere uygulanan gerilmeleri, gerilmeler sonucu oluşan yatay ve düşey deplasmanları, oluşan boşluk suyu basınçları, sistemdeki basınç ölçer ve deplasman ölçerden gelen elektrik sinyallerinin ayarlanması ve istenilen ölçekte büyütülmesi ile bağlı oldukları amplifikatör göstergelerinden okunabilmektedir. Ayrıca üç kanallı x-y çizici ile yatay eksende deplasmanlar düşey eksende uygulanan kuvvet ve boşluk suyu basıncı
çizdirilebilmektedir. Japon San-ei Instrument firmasının SL30 model olarak ürettiği altı kanallı mor ötesi oscillograph çizici ile özel kağıda deney süresince sürekli olarak zamana bağlı boşluk suyu basıncı, yatay deplasman, düşey deplasman ve uygulanan yük değerleri çizdirilebilmektedir [4].

4.2.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Sistemi

Deney verilerinin bir kısmının da elde edildiği dinamik üç eksenli deneyler, Japon Seiken Inc. firması tarafından geliştirilmiş "Dinamik üç eksenli deney hücresi" ve basınç tablosu ile Amerikan Stractural Behavior Laboraties firması tarafından geliştirilmiş yükleme sistemi ile yapılmıştır. Deney sistemindeki basınç tablosu, ölçüm ve kayıt birimleri dinamik basit kesme deneyinde anlatılmıştır. Bu kısımda deney hücresi ve hidrolik yükleme ünitesi açıklanmaktadır.

4.2.2.1. Deney Hücresi

Üç eksenli deney hücresi 695 mm yüksekliğinde olup ϕ 200 mm' lik çelik bir tabana oturmaktadır. Bu ana tabanın 70 mm üzerinde yine çelikten yapılmış hücre taban platformu yer alır (Şekil 4.3). Hücre silindiri 15 mm et kalınlığında ϕ 200 mm çapında saydam pleksiglastan imal edilmiş olup, alt taban üzerindeki lastik ring üzerine oturur. Üst bağlantısı, çelikten yapılmış kapama ringinin yerleştirilip, üst gövdeye vidalanması ile sağlanır. Üst başlık üstünde 2000 KN düşey yük ölçme kapasiteli bir yük ölçer ile numunede deney sırasında oluşabilecek küçük deplasmanları ölçmek için bir deplasman ölçer bulunmaktadır [4].

Hücre üstünde, çevre basıncı ve düşey basınç uygulamak için iki giriş vardır. Bu kısımlar basınç tablosundan gelen hava hattı ile beslenir. Ayrıca hücreye su doldurulması sırasında hücre içinde sıkışan havayı dışarı atmak için bir vida vardır. Alt başlıkta dört adet su giriş-çıkış vanası vardır. Bunlar, hücreye su almak, numuneye ters basınç uygulamak ve drenaj için kullanılır. Çıkış devrelerinin birine boşluk suyu basıncını ölçmek için basınç ölçer yerleştirilmiştir [4].



Şekil 4.3. Dinamik üç eksenli deney hücresi [4]

4.2.2.2. Hidrolik Yükleme Ünitesi

Dinamik yükleme ile ilgili büyüklüklerin ayarlanıp numuneye aktaran ünite, elektronik kontrol bölümü, hidrolik güç bölümü ve yükleme çerçevesinden oluşur.

Yükleme sisteminin çalışması kısaca şu şekildedir: Hidrolik pompa tarafından oluşturulan basınç, fonksiyon üreticisi tarafından istenilen şekilde çıkartılan dalga biçiminde ve frekansında servo vanaya, servo kontrol birimi tarafından iletilir. Servo vanadan geçen bu basınç yükleme pistonunu hareket ettirir ve numuneye belirli bir yük uygulanır. Uygulanan yük, geri besleme ileticisi ile servo kontrol ünitesine sinyal yollar. Bu elektronik sinyal uyarısı ile servo kontrol ünitesi, hidrolik güç ünitesini yeniden harekete geçirir ve yükleme tekrar edilir [4].

4.2.3. Çamur Konsolidasyon Aleti

Deneylerde kullanılan numuneler çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmıştır. Aletin hücre kısmı 800 mm yüksekliğinde ϕ 100 mm çapında olup PVC'den yapılmıştır. Bu hücre metal bir muhafaza içerisine alınmış olup dört ayakla yerden 20 cm yükseltilmiştir. Üst kapama başlığı içinden düşey kuvvet uygulama pistonu kılavuzlanarak geçer. Piston içine poroz taş yerleştirilmiş olup su çıkışı için drenaj musluğu konulmuştur. Hücre alt poroz taşının altında da bir drenaj musluğu vardır. Düşey yük, kuvvet pistonu üzerine geçirilen askıya ağırlık konularak uygulanır (Şekil 4.4.) [4].



Şekil 4.4 Çamur konsolidasyon aleti [4]

4.3. Deney Malzemesi ve Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde İstanbul Yıldız Porselen fabrikasından temin edilen Uşak kaolini kullanılmıştır. Uşak kaolinin M.T.A Enstitüsü tarafından yapılmış analiz sonuçları Tablo 4.1'de ve endeks özelliklerini belirlemek için yapılan laboratuar deney sonuçları da Tablo 4.2'de verilmiştir.

Mineral	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cao	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Ateş Kaybı
%	58.30	24.25	0.45	0.70	0.26	0.20	7.00	0.11	6.62

Tablo 4.1 Kaolin mineral özellikleri [4]

Tablo 4.2 Kaolin endeks özellikleri [4]

Likit	Plastik	Plastisite	Dane Birim	Dane Çapı	Aktivite	Zemin
Limit	Limit	İndisi	Hacim Ağr.	$< 2\mu$ %		Cinsi
%	%	%	kN/m ³			
65.0	25.0	40.0	27.0	49.0	0.82	СН

Düzlemsel izotropik (örselenmemiş) ve izotropik (örselenmiş) zemin örneklerine 800 kN/m² kadar yükleme ve 100 kN/m² de konsolidasyon deneyleri yapılmış, elde edilen geoteknik büyüklüklerde Tablo 4.3'de gösterilmektedir.

Ayrıca numuneler üzerinde statik basit kesme ve üç eksenli deneyler yapılarak %20 deformasyon mertebesine kadar devam edilmiş ve Tablo 4.4.' de gösterilen değerler elde edilmiştir.

Numuneler çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmıştır. Kurutulan kaolin ahşap tokmakla dövülüp No: 40 (ASTM) eleğinden elenip başlangıç su muhtevası w = %250 olacak şekilde çamur elde edilene kadar saf su ile karıştırılmış ve numune aletinde 12 cm çapında, 80 cm yüksekliğinde yerleştirilip hücre altındaki ve üstündeki poroz taşlarına filtre kağıtları konulmuştur.

Konsolidasyon Basıncı	Düzlemsel İzotropik	İzotropik
$\sigma_c = 100 kN / m^2$	Numune	Numune
Hacimsel Sıkışma Katsayısı (m^3 / kN)	0.051	0.070
Permeabilite Katsayısı (cm/sn)	0.78 x 10 ⁻⁸	1.48 x 10 ⁻⁸
Konsolidasyon Katsayısı (cm^2 / sn)	1.53 x 10 ⁻⁴	2.13 x 10 ⁻⁴
Boşluk Oranı	1.07	1.18
Su Muhtevası (%)	45.0	46.0

Tablo 4.3 Kaolin numunelerinin geoteknik özellikleri [4]

Hücre içindeki pistonun kollarına asılan ağırlıklar kademeli şekilde basınç gerilmesi uygulamış ve alt ve üst drenaj musluklarından çıkan su miktarları ve oturma ölçümleri ile konsolidasyon kontrol edilmiştir. Konsolidasyon basıncı $P = 100 \text{ kN/m}^2$ ye ulaştığında zaman numune aletten çıkartılmıştır. Yaklaşık 20 cm yüksekliğinde w = % 45 su muhtevasında zemin numunesi elde edilmiştir.

Tablo 4.4 Kaolin numunelerinin mukavemet özellikleri [4]

DENIEV/		Düzlemsel İzotropik	İzotropik	
DENEI/.	INUMUINE	Numuneler	Numuneler	
Basit Kesme	$\phi \mathrm{cm} \left({}^{0} \right)$	16 ⁰	19 ⁰	
Deneyi	τ_{maks} (kN/m ²)	28	33	
Üç Eksenli	$\phi \operatorname{cm}(^{0})$	14 ⁰	18^{0}	
Basınç Deneyi	$\Delta \sigma_{maks}$ (kN/m ²)	70	87	

Deneylerde hem düzlemsel izotropik hem de izotropik numuneler kullanılmıştır. Dinamik basit kesme deneyinde numune hazırlamada 70 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde çelik ring kullanılmıştır. Düzlemsel izotropik numuneler çelik ringin çamur konsolidasyon aletinden çıkan hazırlanmış zemine dik olarak bastırılarak alınmıştır. İzotropik numuneler ise artan malzemenin yoğrulup çelik ringe doldurulmasıyla elde edilmiştir. Dinamik üç eksenli deneylerde ise düzlemsel izotropik deney numuneleri ana numuneden 100 mm yüksekliğinde kesilmiştir. Üst tabana 50 mm çapında üç adet şablon yerleştirilip 120⁰ lik açılar ile üç dilime ayrılmış ve bu elde edilen dilimlerden de 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde numuneler elde edilmiştir. İzotropik numunelerde yine artan malzemenin yoğrulup ringe yerleştirilmesi ile hazırlanmıştır.

4.4. Deneylerin Yapılışı

4.4.1. Dinamik Basit Kesme Deneyi

70 mm çapında, 30 mm yüksekliğinde hazırlanan ve tartılan numune deney hücresine yerleştirilip çelik silindir yardımı ile esnek membran geçirilmiştir. Daha sonra üst başlık yerleştirilip silindir çıkartılarak başlıklarla membran arasına suyun sızmasını önlemek için ikişer ring takılmıştır. Bu işlemler yapılırken numune içerisinde hava kalmamasına dikkat edilmiştir. Gerekli olduğu durumlarda, numune içerisinden su geçirilerek veya vakum uygulanarak havanın dışarı atılması sağlanır [4].

Numunenin yerleştirilmesinden sonra düşey dengeleme basıncı 60 kN/m², ye yükseltilip numune kaldırılmış ve üst başlığın yatay şaftıyla bağlantı vidaları sıkıştırılmıştır. İlk yükseklik boy uzaması okunup kayıt yapılmıştır ve hücreye, numune üst başlığına kadar su alınıp üst kapama vidaları takılıp sisteme basınç verilecek duruma getirilmiştir. Ters basınç vanaları açılıp çevre basıncı 50 kN/m², ye yükseltilmiştir. Sistemde ters basınç, çevre basıncı ve düşey dengeleme basınçları birbirine bağlıdır ve ters basınç regülatöründen kumanda edilmektedir. Regülatör yavaş yavaş çekilerek numuneye izotropik gerilme uygulanmıştır. 300 kN/m² basınç değerine ulaşıldığında çevre basıncı bağımsız olarak arttırılıp 400 kN/m², ye çıkarılmıştır. Böylelikle numune $\sigma_c = 100kN/m^2$ ters basınç altında konsolidasyona bırakılmıştır. Bu durumda çevre basıncı 400 kN/m², ters basınç 300 kN/m², düşey dengeleme basıncı ise 460 kN/m² değerini göstermiştir [4].

Deney numunesi yaklaşık 24 saat 100 kN/m² efektif basınç altında tutulmuştur. Konsolidasyonun tamamlanıp, basınçların denge durumuna gelmesiyle numunenin suya doygunluğunun kontrolü yapılır. Bunun için ters basınç vanaları kapatılır, $\Delta \sigma = 100 kN/m^2$ arttırılır. Çevre basıncındaki bu artış boşluk suyu basınçlarına yansır. $B = \Delta U / \Delta \sigma > \%$ 95 ise numuneler suya doygun kabul edilerek dinamik deneylere geçilmek için ters basınç vanası açılır ve oluşan boşluk suyu basıncı dengelenmesi beklenir [4].

Deney için tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra drenajlar kapatılıp çizici ve kayıt edici çalıştırılarak yükleme ünitesi serbest bırakılarak deney başlatılmıştır. Deney sırasında belirli çevrimlerde histerisis ilmikleri çizdirilmiş ve ayrıca amplifikatörlerden alınan okumalar kayıt edilmiştir. Deneyler düşük gerilme seviyelerinde boşluk suyu basıncı sabitleştiğinde, yüksek gerilme seviyelerinde ise deformasyonlar %20 mertebesine ulaştığında sona erdirilmiştir. Deney sonunda dinamik yükleme kapatılmıştır. Yatay şaft bağlantısı açılarak yük düşürülerek üst başlık tesbit civatası sıkıştırılıp hücre içindeki su boşaltılmıştır. Son olarak numune çıkartılıp tartılmıştır. Su muhtevasının belirlenmesi için etüve konmuştur.

4.4.2. Dinamik Üç Eksenli Deneyi

Hazırlanmış 100 mm yüksekliğinde 50 mm çapındaki numunelere, drenaj boyunu kısaltmak amacı ile delikli filtre kağıdı sarılıp çelik silindirik yardımı ile esnek membran numune etrafına geçirilmiştir. Alt ve üst başlıklar ile drenaj hatlarında hava kalmaması için su geçirilmiştir. Numune hücre içerisine yerleştirilip başlıklarla membran arasından suyun sızmasını önlemek için lastik halka takılarak yük uygulama pistonu kilitlenmiştir [4].

Hücre silindiri geçirilip üst boşluk çerçevesi takılarak cıvata bağlantıları yapılmıştır. Hücre içerisine üst başlığa kadar su doldurulmuştur ve hava sıkışmasını önlemek için hava alma vidası açık tutulmuştur. Bundan sonra ise numuneye basınç uygulanmıştır. Dinamik basit kesme deneyinde olduğu gibi numune 100 kN/m² efektif basınç altında konsolidasyona bırakılmıştır. Konsolidasyon sonrası suya doygunluk kontrolü yapılır ve doygunsa deneye başlanır. Alttan sıkıştırma ile bağlanan dinamik üç eksenli deney hücresi üstten vida bağlantısı ile yük pistonundan çerçeveye kolon-kiriş çerçevesine tesbit edilmiştir [4].

Yükleme şekli, genliği ve frekansı ayarlanmış, diğer taraftan amplifikatör, çizici ve osilograftada gerekli kontrol ve düzenlemeler yapılmıştır. Deney ile ilgili tüm

hazırlıklar tamamlandıktan sonra çizici ve kayıt alıcılar çalıştırılmış, drenajlar kapatılmış ve dinamik yük uygulanmıştır [4].

Deneyleri sona erdirme kriteri, dinamik basit kesme deneyinde olduğu gibi alınmıştır. Deney sonunda dinamik yük uygulamasına son verilmiş, numune çıkartılıp tartım ve boy ölçümü yapılmış ve su muhtevasını belirlemek için etüve konmuştur.

4.5. Sonuç

Bu tez çalışmasında kullanılacak deney verileri; dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli sistemlerinin kullanıldığı gerilme kontrollü deneylerden elde edilmiştir. Deney malzemesi olarak Uşak kaolin'i kullanılmıştır ve dinamik deneyler değişik frekans ve genliklerde düzlemsel izotropik (örselenmemiş) ve izotropik numuneler üzerinde yapılmıştır. Dinamik deneylerden başka endeks özelliklerini, geoteknik ve mukavemet parametrelerini belirlemek için standart laboratuar deneyleri de yapılmıştır. Verilerden elde edilecek kayma modülü ve sönüm oranı hem kayma modülü-birim deformasyon ile sönüm oranı-birim deformasyon eğrilerinde kullanılacaktır.

5. BÖLÜM

KAYMA MODÜLÜ VE SÖNÜM ORANININ BELİRLENMESİ

5.1. Giriş

Normal konsolide killerin tekrarlı yükler etkisi altındaki dinamik mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla, tekrarlı sinosoidal yükleme biçimi kullanılarak farklı gerilme genliklerinde ve frekanslarda dinamik basit kesme ile dinamik üç eksenli aletlerinde yapılmış deney verileri elde edilmiştir. Verilerin elde edildiği deneyler iki farklı şekilde hazırlanmış. Birinci grup deneyler çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmış düzlemsel izotropik (örselenmemiş) numuneler üzerinde yürütülmüş, ikinci grup deneyler ise yine çamur konsolidasyon aletinden çıkan numunelerden yoğrularak hazırlanmış izotropik (örselenmiş) numuneler üzerinde yapılmış.

5.2. Kayma Modülü ve Sönüm Oranı

Dinamik basit kesme deneyinde, düzlemsel izotropik ve izotropik olarak hazırlanmış deney numuneleri $\sigma_c = 100 \, KN/m^2$ hücre basıncında konsolide edildikten sonra dinamik basit kesme deneyinde 0.01, 0.10, 0.50 Hz frekanslarına ve farklı kayma gerilmesi genliklerinde deneye tabii tutulmuştur. Dinamik üç eksenli deney numuneleri ise $\sigma_c = 100 \, KN/m^2$ hücre basıncında konsolide edilerek 0.02, 0.01, 0.10, 0.50, 1.00 Hz frekanslarında ve farklı dinamik gerilme oranlarında deneye tabii tutulmuştur. Hem basit kesme hem de üç eksenli deneylerinde deney sonuçları olarak histerisis ilmikleri üç kanallı x-y çiziciyle kaydedilmiştir. Çizdirilen histerisis ilmiklerinde yatay ölçek birim boy değişimlerine, $\Delta L(mm)$, düşey ölçek ise uygulanan yüke, P(kg), karşılık gelmektedir. Dinamik basit kesme deneylerinde çizdirilmiş her histerisis ilmiklerinde okunan boy değişimi, ΔL , numune yüksekliğine; P yükü numune kesit alanına oranlanarak her eğri için birim deformasyon γ , ve kayma gerilmesi τ , değerleri 6.1 ve 6.2 bağıntıları kullanılarak elde edilmiştir. Dinamik basit kesme deneyinde numuneye kayma gerilmeleri uygulandığı için dinamik kayma modülü herhangi bir ara işleme ihtiyaç duyulmadan deney sonuçlarına göre çizilen kayma gerilmesi deformasyon grafiğinden direk olarak belirlenmektedir.

$$\gamma = \frac{\Delta L}{H} \tag{6.1}$$

$$\tau = \frac{P}{A} \tag{6.2}$$

Dinamik üç eksenli deneylerinde ise çizdirilmiş her histerisis ilmiklerinin okunan düşey boy değişimi $\Delta H(mm)$, numune yüksekliğine; P yükü numune kesit alanına oranlanarak düşey deformasyon ε , dinamik tekrarlı gerilme σ , değerleri 6.3, 6.4 ve 6.5 bağıntıları yardımıyla edilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \tag{6.3}$$

$$\gamma = (1 + \mu)\varepsilon \tag{6.4}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{6.5}$$

Her eğri için deformasyon ve gerilme değerleri elde edildikten sonra fortran dilinde yazılan bir program yardımıyla eğrilerin alanı ile eğrinin iki ucunu birleştiren doğrunun altında kalan üçgenin alanı ve doğrunun eğimi hesaplanmıştır. Bu şekilde her biri bir çevrimi temsil eden farklı gerilme oranlarında ve frekanslardaki histerisis ilmiklerinden kayma modülü ve sönüm oranı hesaplanmıştır.

$$G = \frac{Tekrarlı kayma gerilmesi, \tau}{Tekrarlı kayma deformasyonu, \gamma}$$
(6.6)

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{Histerisis İlmiğinin Alanı}{Eğrinin Altında KalanÜçgenin Alanı}$$
(6.7)

Dinamik üç eksenli deneyinde, gerilme düşey deformasyon ilişkisini gösteren histerisis ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun eğimi elastik modülü olarak tanımlanır ve ayrıca kayma modülü 6.8 ve 6.9 bağıntılarından elde edilebilir.

$$E = \frac{Tekrarlı \, Gerilme \, Oranı, \sigma_d / 2\sigma_c}{Düşey \, Deformasyon, \varepsilon}$$
(6.8)

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{6.9}$$

 μ poisson oranı olup zemin özelliğine bağlı bir değerdir ve bu çalışmada 0.50 alınmıştır.

Zeminin dinamik mukavemet özellikleri kayma modülü ve sönüm oranı her iki deney türü için ayrı ayrı hesaplanıp birim kayma deformasyonu ile ilişkisi incelenmiştir. Birim kayma üzerinde plastisitenin önemli bir etkisi olmamakla beraber yapılan deney takımlarında plastisite sabit tutularak deney yönteminin, zemin yapısının, gerilme oranının ve frekansın etkisi üzerinde durulmuştur.

İlk grup grafiklerde her deney grubu için birim kayma ile kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi frekans değerlerine ve gerilme oranlarına göre ayrı ayrı verilmiştir. Dinamik basit kesme deneylerin büyük bir kısmında birim kayma genlikleri % 0,001 değerinin üstünde kalmışken üç eksenli deneylerde ise birim kayma genlikleri % 0,001 değerinden alt değerlerden başlamıştır. G_{max} ile normalize edilmiş grafiklerde son çevrimlerdeki oturmaların azalması nedeniyle birim kaymada meydana gelen değişimlerim azalmasıyla eğrilerin yatıklaşmış ve noktalar eğrilerin son kısımlarına doğru sıklaşmıştır. Her frekans değerinde ve her gerilme oranında artan birim kaymaya karşılık kayma modülünde azalım, sönüm oranında ise artışlar meydana gelmiştir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2' de frekansın 0.50 Hz ve gerilme oranının 0.70 olduğu dinamik basit kesme deneyinden elde edilen birim kaymanın kayma modülü oranı ve sönüm oranı ile ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.1 Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil 5.2 Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi

Aynı gerilme oranında dinamik basit kesme deneyinde izotropik numune üzerinde frekansın 0.10 Hz olduğu deney yapılmış ve elde edilen kayma modülü ve sönüm oranı sonuçları Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' de verilmiştir.



Şekil 5.3 Dinamik basit kesme deneyi izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil 5.4 Dinamik basit kesme deneyi izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi

Dinamik üç eksenli deney sisteminde gerçekleştirilen frekansın 0.1 Hz ve 1.00 Hz ile gerilme oranının 0.40 olduğu deneyin sonuçları ise Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8' de verilmiştir.



Şekil 5.5 Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil 5.6 Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi

Elde edilen ayma modülü oranı ve sönüm oranının birim kayma ile ilişkisini gösteren eğrilerden en iyi sonuç frekansın 1.00 Hz olduğu deneyden elde edilmiştir. Kayma modülü; % 0.0001 - % 0.001 aralığında artan deformasyon ile birlikte azalım göstermiştir. Yine aynı deformasyon aralığında sönüm oranı artan deformasyonla birlikte artış gösterip %35 seviyelerine çıkmıştır.



Şekil 5.7 Dinamik üç eksenli deneyinde izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil 5.8 Dinamik üç eksenli deneyinde izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi

Artan frekans değerlerine göre kayma modülü oranı ve sönüm oranı değişimine bakılırsa da dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sonuçları paralellik göstermekte ve artan frekans değerlerinin katkısı çok açık olmamakla beraber hem kayma modülünde hem de sönüm oranında artış meydana gelmektedir (Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12)

Deneyler, frekans değerinde farklı gerilme oranlarında ayrıca aynı da gerçekleştirilmiştir. Gerilme oranının etkisini incelemek amacıyla dinamik kayma modülü oranı ve sönüm oranı eğrileri her değer için ayrı ayrı çizilmiştir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' de dinamik basit kesme deneyi için gerilme oranlarının dinamik kayma modülü oranı ve sönüm oranı ile değişimi görülmektedir. Gerilme oranının etkisi ise frekansın etkisinden daha açık şekilde görülmekte ve artan gerilme oranıyla daha büyük deformasyonlar meydana gelmektedir. Bundan dolayı artan gerilme oranıyla kayma modülü oranı-birim kayma, $G/G_{max} - \gamma$, ve sönüm oranı-birim kayma, $D - \gamma$, ilişkilerini gösteren eğriler sağa doğru kaymaktadır. Aynı durum Şekil 5.15 ve Şekil 5.16' de dinamik üç eksenli deneyler için de gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Dinamik basit kesme deneyinde kayma modülü oranının frekansa göre değişimi



Şekil 5.10 Dinamik basit kesme deneyinde sönüm oranının frekansa göre değişimi



Şekil 5.11 Dinamik üç eksenli deneyinde kayma modülü oranının frekansa göre değişimi







Şekil 5.13 Dinamik basit kesme deneyinde kayma modülü oranının gerilme oranına göre değişimi



Şekil 5.14 Dinamik basit kesme deneyinde sönüm oranının gerilme oranına göre değişimi



Şekil 5.15 Dinamik üç eksenli deneyinde kayma modülü oranının gerilme oranına göre değişimi



Şekil 5.16 Dinamik üç eksenli deneyinde sönüm oranının gerilme oranına göre değişimi

5.3. Sonuç

Zemin dinamiğinin en önemli konularından biri tekrarlı yüklemeler altındaki zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin nasıl ve hangi koşulların etkisiyle ne şekilde değiştiğidir. Bu konu ile alakalı olarak hem laboratuar ve arazi çalışmalarıyla deneysel hem de teorik olarak birçok çalışma ve araştırma yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında da kullanılan deney verileri, Uşak kaolini numuneleri üzerinde değişik başlangıç ve deneysel koşullarda yapılmış olan dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneylerinden elde edilmiştir. Yükleme frekansının, gerilme oranının ve numune yapısının etkisi incelenmiştir ve daha önce yapılan aynı tür çalışmalarla paralel sonuçlar elde edilmiştir. Boşluk suyu basınçlarının artmasının da etkisiyle aynı frekansta gerilme oranındaki artımlar oluşan birim kaymaları arttırmaktadır. Artan çevrim sayıları, oluşan boşluk suyu basınçlarını ve birim kaymaları arttırmaktadır.

Deney verilerinin değerlendirilmesiyle gözlenen ilk özellik zemin ana dizilimden dolayı düzlemsel izotropik numunelerin izotropik numunelerden daha fazla deformasyon yapması ve kayma gerilmesi altındaki davranışlarda daha düşük mukavemet göstermeleridir.

Frekansın ve gerilme oranının da dinamik mukavemet özellikleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça tüm çevrimlerde oluşan deformasyonlar artmıştır. Birim kaymalar her kademede artmış fakat kademeler arasındaki boşluk suyu basıncı sönümlemesinden dolayı konsolidasyon oturmaları nedeniyle numune mukavemet kazanmış ve en küçük deformasyon artışları son çevrimlerde meydana gelmiştir. Bununla beraber birim kaymaların artmasıyla kayma modülünde azalış sönüm oranında ise artış gerçekleşmiştir. Frekansın etkisi ise düşük gerilme seviyelerinde görülmektedir fakat gerilme oranının artması ile frekansın önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Park D., Evaluation of Dynamic Soil Properties; Strain Amplitude Effects on Shear Modulus and Damping Ratio, Ph. D. Thesis, Cornell University, NewYork, 1998.
- 2. Hwang S. K., Dynamic Properties of Natural Soils, Ph. D. Thesis, The University of Texas, Austin, 1997.
- Luh G., An Experimantal Study of The Dynamic Behavior of Soils, Ph. D. Thesis, The University of Wisconsin, Madison, 1980.
- Kara H. B., Normal Konsolide Killerin Tekrarlı Yükler Etkisi Altındaki Davranışı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1990.
- Zhang J., Characterizing The Dynamic Properties of South Carolina Soils For Ground Motion Evaluation, Ph. D. Thesis, The Graduate School of Clemson University, Clemson, 2004.
- Okur V., Farklı Dinamik Gerilme Genlikleri Altında İnce Daneli Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme ve Mukavemet Davranışları, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2002.
- Altun S., Burulmalı Kesme Deney Aleti ile Zeminlerin Dinamik Davranış Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2003.
- Kramer S. L., (Çeviren Kayabalı K.), Geoteknik Deprem Mühendisliği, 191-228, Gazi Kitabevi, Ankara, 2003.
- Mena F., Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils, Ph. D. Thesis, The University of Texas, Austin, 2003.
- Kyle M. R., et al., Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 396-405, 1998.
- Sitharam T. G., et al., Dynamic Properties and Liquefaction Potential of Soils, Current Science, 87 (10), 1370-1378, 2004.
- Chowdhury M. H., Dynamic Properties of Low and High Plasticity Clays Using Resonant Column and Bender Element Testing Techniques, M. Sc. Thesis, The University of Texas, Arlington, 2004.

- Özay R., Erken A., Tekrarlı Gerilme Genlikleri Altında Kumlu Killerin Mukavemeti, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 371-376, 16-17 Eylül, 2004.
- Ülker M.B., Siltli ve Killi Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
- Altun S., Ansal A., Tekrarlı Yükler Altında Kumların Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri ve Kumlarda Dinamik Kayma Modülünün Belirlenmesi, İTÜ Dergisi Mühendislik, Cilt: 2, Sayı: 4, 25-34, 2003.
- Okur V., Ansal A., Doğal İnce Daneli Zeminlerin Dinamik Mukavemet Özelliklerinin Analizi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 387-396, 16-17 Eylül 2004.
- Erşan H., Yıldırım H., Tekrarlı Yükler Altında Zeminlerin Konsolidasyonu, İTÜ Dergisi Mühendislik, Cilt: 5, Sayı: 3, 187-195, 2006.
- Ural N., Özocak A., Önalp A., Dinamik Üç Eksenli Deneylerde Frekansın Etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 289-295, 16-20 Ekim, 2007.
- Kayalı S., Tekrarlı Yükler Altında Killerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- Okur V., Ansal A., Tekrarlı Yük Etkisinde Kil Zeminlerin Lineer Olmayan Elastik Davranışı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt: XXII, Sayı:1, 169-185, 2009.
- Erken A., Yaşargün A., Şener A., Çöp Suyu ile Kirlenmiş Örselenmemiş Düşük Plastisiteli Killerin Dinamik Davranışı, 3.Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, 459-470, 3-4 Aralık, 2009.
- 22. RaviShankar B.V., et al., Dynamic Properties of Ahmedabad Sands at Large Strains, IGC-2005, 369-372, Ahmedabad- India, 17-19 December, 2005.
- Çabalar A. F., Dynamic Properties of Various Plasticity Clays, EJGE, Vol :14, 2009.
- 24. Teachavorasinskun S., et al., Shear Modulus and Damping of Soft Bangkok Clays, NRC Research Press, J.39, 1201-1208, 2002.
- Kurtuluş A., Field Measurements of The Linear and Nonlinear Shear Moduli of Soils Using Drilled Shafts as Dynamic Cyclindrical Sources, Ph. D. Thesis, The University of Texas, Austin, 2006.

- 26. Potts D. M., Zdravkovic L., Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Application, Thomas Telford Publishing, 6-15, London, 2001.
- 27. Özaydın K., Zemin Dinamiği, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları No:1, İstanbul, 1982.
- Çetin K.Ö., Unutmaz B., Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı, Türkiye Mühendislik Haberleri, 430, 32-37, 2004.
- 29. Kaya Z., Depremler Sırasında Zeminlerin Davranışına Bağlı Olarak Meydana Gelen Zemin Deplasmanlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- 30. Ural N., Gündüz Z., Zeminlerde Sıvılaşma ve Taşıma Gücü Kayıpları, International Earthquake Symposium, 506-509, Kocaeli, 2007.
- Erken A., et al., Depremler Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Taşıma Gücü Kayıpları, Türkiye Mühendislik Haberleri, 431, 20-26, 2004.

EK: DENEY SONUÇLARI



Şekil Ek 1. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 2. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 3. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 4. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 5. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.70 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 6. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.70 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 7. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.85 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 8. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.85 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 9. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 10. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 11. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.55 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 12. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.55 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 13. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 14. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 15. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.70 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 16. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.70 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 17. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 1.11 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 18. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 1.11 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 19. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 20. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 21. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.55 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 22. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.55 sönüm oranı birim kayma ilişkisi


Şekil Ek 23. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 24. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 25. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.70 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 26. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.70 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 27. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.90 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 28. Dinamik basit kesme deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.90 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 29. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.40 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 30. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.40 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 31. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.45 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 32. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.45 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 33. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 34. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 35. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 36. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 37. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.70 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 38. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.70 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 39. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.52 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 40. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.52 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 41. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 42. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 43. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.70 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 44. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.70 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 45. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.40 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 46. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.40 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 47. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 48. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 49. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 50. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 51. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.70 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 52. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.70 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 53. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.80 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 54. Dinamik basit kesme deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.80 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 55. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.02 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 56. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.02 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 57. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.40 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 58. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.40 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 59. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 60. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 61. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 62. Dinamik üç eksenli deneyi düzlemsel izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 63. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 64. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 65. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 66. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 67. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.50 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 68. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.01 Hz gerilme oranı 0.50 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 69. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.60 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 70. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.10 Hz gerilme oranı 0.60 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 71. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.40 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 72. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 0.50 Hz gerilme oranı 0.40 sönüm oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 73. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 1.00 Hz gerilme oranı 0.40 kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi



Şekil Ek 74. Dinamik üç eksenli deneyi izotropik frekans 1.00 Hz gerilme oranı 0.40 sönüm oranı birim kayma ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Çiğdem TİPİ, 06.05.1984 yılında Kayseri' de doğdu. İlkokul öğrenimini Elazığ' da Tuncay Küçük Özer İlkokulu'nda, ortaokulu öğrenimini Atatürk Ortaokulu' nda ve lise öğrenimini Elazığ Anadolu Lisesi' nde tamamladı. 2003 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nü kazandı. 1 yıl İngilizce hazırlık öğretimi de alarak 2008 yılında mezun oldu. Mezun olduğu yıl Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı. Şubat 2009 yılında Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı' na araştırma görevlisi olarak atandı ve halen aynı göreve devam etmektedir.

- Adres : Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 66100 – YOZGAT
- e-posta : cigdem.tipi@bozok.edu.tr