İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKRARLI YÜKLER ALTINDA KİLLERİN MUKAVEMETİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Sanem KAYALI

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ZEMİN MEKANİĞİ ve GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKRARLI YÜKLER ALTINDA KİLLERİN MUKAVEMETİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Sanem KAYALI
(501041321)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Hüseyin YILDIRIM

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Ayfer ERKEN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Erol GÜLER (B.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum çalışmada yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hüseyin Yıldırım, tez çalışmam süresince bana her konuda yardımcı olan Araş. Gör. Dr. Atila Sezen, Araş. Gör. Ahmet Şener ve Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Laboratuarının tüm çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca eğitim hayatımın her döneminde bana her zaman yardımcı olan başta annem olmak üzere aileme, sonsuz anlayışı ve sevgisiyle her zaman yanımda olan Murat Yükselen'e en içten şekilde teşekkür ederim.

HAZİRAN, 2008 Sanem KAYALI

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ xii
ÖZET xiv
SUMMARY xvi

1. GİRİŞ 1

2. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI 3
2.1. Giriş 3
2.2. Tekrarlı Yükler ve Zemin Gerilmeleri 3
2.3. Dinamik Gerilme Deformasyon Davranışı 6
2.4. Dinamik Mukavemet Davranışı 17
2.5. Sonuç 33

3. KULLANILAN DENEY SİSTEMİ VE ZEMİN NUMUNELERİ 35
3.1. Giriş 35
3.2. Basit Kesme Kavramı 35
3.3. Dinamik Basit Kesme Deneyinin Avantajları 36
3.4. Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi 38
3.4.1. Deney hücresi 38
3.4.2. Basınç tablosu 41
3.4.3. Tekrarlı yük uygulama birimi 43
3.4.4. Ölçüm, veri toplama ve kayıt ünitesi 43
3.5. Deneylerde Kullanılan Zeminin Özellikleri 44
3.6. Numune Hazırlanması 45
3.7. Deneylerin Yapılışı 46
3.7.1. Numunenin kurulması 46
3.7.2. Suya doyurma aşaması 50
3.7.3. Konsolidasyon 51
3.7.4. Tekrarlı yükleme 51
3.7.5. Statik kesme 52
3.8. Sonuç 53

4. DENEY SONUÇLARI **54**
4.1. Giriş 54
4.2. Tekrarlı Yüklemelerin Zeminin Dinamik Davranışına Etkisi 54
4.3. Dinamik Mukavemet Davranışı 57
4.4. Kayma Deformasyonu Davranışı 60
4.5. Boşluk Suyu Basıncı Davranışı 62
4.6. Konsolidasyon Oturmaları 65
4.7. Sonuç 66

5. GENEL SONUÇLAR **68**

KAYNAKLAR **72**

EKLER **76**
EK A Dinamik Yüklemeli Deney Grafikleri 77
EK B Statik Yüklemeli Deney Grafikleri 99

ÖZGEÇMİŞ **105**

KISALTMALAR

AKO : Aşırı Konsolidasyon Oranı
CSR : Tekrarlı Gerilme Oranı
DKGO : Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı
DSS : Direkt Basit Kesme
NGI : Norveç Geoteknik Enstitüsü
SGI : İsveç Geoteknik Enstitüsü

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan zemin numunelerinin özellikleri..….....**46**
Tablo 4.1 Bu çalışmada uygulanan deneylerin özellikleri……..**55**
Tablo 4.2 Yapılan deneylerde drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi…….**58**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Zeminin önemli büyüklükteki tekrarlı gerilmelere maruz kaldığı durumlar (O'Reilly ve Brown, 1991)……..4

Şekil 2.2 : Potansiyel bir kayma yüzeyi boyunca zemin elemanlarının basitleştirilmiş gerilme koşulları (O'Reilly ve Brown, 1991)…….5

Şekil 2.3 : Kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisini gösteren histerisis ilmiği……...…7

Şekil 2.4 : Tekrarlı gerilme oranı - eksenel düşey deformasyon ilişkisi (Özay ve diğerleri, 2000)……8

Şekil 2.5 : Bentonit için boşluk oranı dinamik kayma modülü ilşkisi (Humpries ve Wahls, 1968)…….……8

Şekil 2.6 : Birim deformasyon genliğinin kayma modülü üzerindeki etkisi (Anderson ve Richart, 1976).....……9

Şekil 2.7 **:** Birincil konsolidasyon sonrası normalize kayma modülü (Kagawa, 1992)……..10

Şekil 2.8 **:** Normal konsolide numunelerde kayma deformasyonu kayma modülü ilişkisi (Kokusho ve diğerleri, 1982)……..……..11

Şekil 2.9 **:** Normal konsolide ve aşırı konsolide zeminlerde birim deformasyon G/G_{maks} ilişkisi (Vucetiv ve Dobry, 1991)……..….11

Şekil 2.10 **:** Normal konsolide ve aşırı konsolide zeminlerde birim deformasyon sönüm oranı ilişkisi (Vucetiv ve Dobry, 1991)……12

Şekil 2.11 **:** Sönüm oranı boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi (Okur ve Ansal, 2002)……13

Şekil 2.12 **:** Kıvamın azalım eğrilerine etkisi (Özay ve diğerleri, 2000)……...13

Şekil 2.13 **:** Dinamik kayma modülü ve sönüm oranının birim kayma deformasyonuyla ilişkisi (Özay ve diğerleri, 2000)……...14

Şekil 2.14 **:** Dinamik kayma modülü için çizilen referans eğrisi (Yıldırım, 1987)……..……....15

Şekil 2.15 **:** Monotonik tekrarlı yükleme durumunda dinamik kayma modülü için çizilen referans eğrisi (Yıldırım, 1987)……...16

Şekil 2.16 **:** Başlangıç kayma gerilmesi uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda dinamik kayma modülünün birim kayma deformasyonu ile değişimi (Yıldırım, 1987)… …… 17

Şekil 2.17 **:** Farklı tipteki deneylerde tekrarlı kayma deformasyonu ile efektif kayma gerilmesi arasındaki ilişki (Andersen, 1976)……..18

Şekil 2.18 **:** Tekrarlı birim deformasyon oranı tekrarlı mukavemet oranı ilişkisi (Koutsoftas, 1978)……..19

Şekil 2.19 **:** İzotropik ve anizotropik olarak konsolide edilmiş killerin farklı birim deformasyon genliklerinde tekrarlı mukavemet değerleri (Yasuhara ve diğ., 1982)……19

Şekil 2.20 **:** Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Ansal ve Erken, 1985)……..20

Şekil 2.21 : Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Ansal ve Erken, 1989)……..21
Şekil 2.22 : Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1991)……...23
Şekil 2.23 : Tekrarlı gerilme oranı normalize boşluk suyu basıncı ilişkisi (Okur ve Ansal, 2002)……... 24
Şekil 2.24 : Plastisitenin birim boy değişimi dinamik gerilme ilişkisine etkisi (Özay ve Erken, 2003).:……25
Şekil 2.25 : Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Özay ve Erken, 2003)……...26
Şekil 2.26 : Plastisite indisi tekrarlı gerilme oranı ilişkisi (Okur ve Ansal, 2004)……26
Şekil 2.27 : Dinamik gerilme oranının birim kayma gerilmesi ve normalize boşluk suyu basıncı ile değişimi (Okur ve Ansal, 2004)……..27
Şekil 2.28 : Yapay karışımlar için tekrarlı kayma gerilmesi oranı plastisite indisi ilişkisi (Gratchev ve diğ., 2006)……...…27
Şekil 2.29 : Doğal zeminler için tekrarlı kayma gerilmesi oranı plastisite indisi ilişkisi (Gratchev ve diğ., 2006)……28
Şekil 2.30 : Drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısı ve gerilme oranıyla değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2006)……....28
Şekil 2.31 : Kayma deformasyonlarının gerilme oranı ve çevrim sayısıyla değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2006)……29
Şekil 2.32 : Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2006)……..29
Şekil 2.33 : Farklı gerilme oranlarında boşluk suyu basıncının değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2007)……..30
Şekil 2.34 : Tekrarlı gerilme oranının boşluk suyu basıncı davranışına etkisi (Yıldırım, 1987)……31
Şekil 2.35 : Tekrarlı gerilme oranının dinamik kayma gerilmesine etkisi (Yıldırım, 1987)……31
Şekil 2.36 : Tekrarlı gerilme oranının dinamik kayma gerilmesine etkisi (Yıldırım, 1987)……32
Şekil 2.37 : Tekrarlı gerilme oranının dinamik kayma gerilmesine etkisi (Yıldırım, 1987)……33
Şekil 2.38 : Drenajsız statik ve dinamik kayma mukavemetleri arasındaki farkın birim kayma deformasyonu ile değişimi (Yıldırım, 1987)……..34
Şekil 3.1 : Bir zemin elemanındaki normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri (Das, 1993)……35
Şekil 3.2 : Genel ve basit kesme deformasyon durumları (Biscontin, 2001)…....36
Şekil 3.3 : Deprem sırasında yüzey seviyesindeki zemin elemanında idealize edilmiş gerilme-deformasyon koşulları (Hsu, 2002)……37
Şekil 3.4 : Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi……38
Şekil 3.5 : Deney hücresi ve tekrarlı yük uygulama birimi……39
Şekil 3.6 : Numuneye düşey gerilme uygulamakla görevli pistonlar……..40
Şekil 3.7 : Dinamik basit kesme deney sisteminde konsolidasyon sırasında numune üzerindeki gerilme durumu (Yıldırım, 1987)…… ..41
Şekil 3.8 : Basınç tablosu……..43
Şekil 3.9 : Yatay yük uygulama kontrol birimi……44
Şekil 3.10 : Veri toplama ünitesi……45
Şekil 3.11 : Ring içindeki numunenin alt başlık üzerine yerleştirilmesi……47

Şekil 3.12 : Membranın numune alt başlığına geçirilmesi…….47
Şekil 3.13 : Beyaz renkli yarı esnek parçanın numune alt başlığı üzerine yerleştirilmesi…… 48
Şekil 3.14 : Mavi metal parçanın alt kaideye bağlanması……..48
Şekil 3.15 : Teflon ringlerin numune çevresine yerleştirilmesi……..49
Şekil 3.16 : Numune üst başlığının numune üzerine yerleştirilmesi……..49
Şekil 3.17 : Hücre üst başlığının şeffaf silindir üzerine yerleştirilmesi……..50
Şekil 3.18 : Statik yük uygulama birimi……52
Şekil 4.1 : Kayma gerilmesi ve kayma deformasyonunun çevrim sayısıyla değişimi (3D-3 deneyi)……..56
Şekil 4.2 : Gerilme-deformasyon ve boşluk suyu basıncı davranışları (2C-3 deneyi)……....57
Şekil 4.3 : Dinamik mukavemetin dinamik kayma gerilmesi oranı, τ/τ_f ile değişimi……..59
Şekil 4.4 : Dinamik mukavemetin dinamik kayma gerilmesi oranı, τ/σ'_v ile değişimi……..60
Şekil 4.5 : Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerime deformasyon eğrileri (3D grubu deneyleri)……...61
Şekil 4.6 : Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerime deformasyon eğrileri (2C grubu deneyleri)……....61
Şekil 4.7 : 3D-1 deneyine ait histerisis ilmikleri…….. 62
Şekil 4.8 : Kayma deformasyonlarının üç kademe boyunca dinamik gerilme oranı, τ/σ'_v ile değişimi……..63
Şekil 4.9 : 2C-1 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi…… 63
Şekil 4.10 : 2C-3 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi……...64
Şekil 4.12 : 3D-2 deneyinde üç kademe tekrarlı yüklemede meydana gelen oturmaların efektif gerilme ile değişimi……65
Şekil 4.13 : Hacimsel deformasyonun üç kademe boyunca dinamik gerilme oranı, τ/σ'_c ile değişimi……66
Şekil A.1 : 1C-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri……...77
Şekil A.2 : 1C-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……..78
Şekil A.3 : 1C-2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri……...79
Şekil A.4 : 1C-2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……..80
Şekil A.5 : 1D-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri…….81
Şekil A.6 : 1D-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……..82
Şekil A.7 : 2C-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri…….83
Şekil A.8 : 2C-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları…….…….....84
Şekil A.9 : 2C-2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri…….85

Şekil A.10 **:** 2C-2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……...86
Şekil A.11 **:** 2C-3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri……..87
Şekil A.12 **:** 2C-3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……...88
Şekil A.13 **:** 1B-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri….....89
Şekil A.14 **:** 1B-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……...90
Şekil A.15 **:** 3D-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri….....…91
Şekil A.16 **:** 3D-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……...92
Şekil A.17 **:** 3D-2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri….....93
Şekil A.18 **:** 3D-2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……...94
Şekil A.19 **:** 3D-3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri…….....95
Şekil A.20 **:** 3D-3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları……...96
Şekil A.21 **:** 3D-4 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri……..97
Şekil A.22 **:** 3D-4 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları….....98
Şekil B.1 **:** 1C tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……... .99
Şekil B.2 **:** 1C-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……... .99
Şekil B.3 **:** 1C-2 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi…..... .99
Şekil B.4 **:** 1D tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...100
Şekil B.5 **:** 1D-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……... 100
Şekil B.6 **:** 2C tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...100
Şekil B.7 **:** 2C-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……... 101
Şekil B.8 **:** 2C-2 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……... 101
Şekil B.9 **:** 2C-3 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……... 101
Şekil B.10 **:** 1B tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...102
Şekil B.11 **:** 1B-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...102
Şekil B.12 **:** 3D tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...102

Şekil B.13 **:** 3D-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...103
Şekil B.14 **:** 3D-2 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...103
Şekil B.15 **:** 3D-3 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi…….....103
Şekil B.16 **:** 3D-4 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi……...104

SEMBOL LİSTESİ

a : Çevrim sayısına bağlı katsayı
b : Çevrim sayısına bağlı katsayı
b : Malzeme parametresi
B : Suya doygunluk derecesi
C'_c : Tekrarlı yükleme sonrası sıkışma indisi
D : Sönüm oranı
ΔG : Dinamik kayma modülü değişimi
ΔH : Düşey boy değişimi
$\Delta\tau_a$: Yapı ağırlığından kaynaklanan kayma gerilmesi
Δu : Boşluk suyu basıncı değişimi
$\Delta u/\sigma'_v$: Boşluk suyu basıncı oranı
e : Boşluk oranı
E : Elastisite modülü
ε : Düşey deformasyon
ε_{da} : Düşey birim boy değişimi genliği
G : Dinamik kayma modülü
G_{maks} : En büyük dinamik kayma modülü
G_p : Birincil konsolidasyon sonrası maksimum dinamik kayma modülü
γ : Kayma deformasyonu
γ_c : Birim kayma deformasyonu
γ_n : Doğal birim hacim ağırlığı
γ_s : Dane birim hacim ağırlığı
H : Numune başlangıç boyu
I_c : Kıvam indisi
I_p : Plastisite indisi
k : Malzeme sabiti
K : Dinamik kayma modülü katsayısı
K_0 : Yatay toprak basıncı katsayısı
m : Boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı grafiğinden elde edilen eğrinin eğimi
m : Malzeme parametresi
μ : Poisson oranı
N : Çevrim sayısı
p : Malzeme sabiti
p' : Efektif konsolidasyon basıncı
SR : Boşluk suyu basıncının artmaya başladığı tekrarlı gerilme oranı eşiği
σ_v : Düşey gerilme
σ'_v : Düşey efektif gerilme
σ'_0 : Efektif konsolidasyon basıncı
τ : Kayma gerilmesi
τ_0 : Arazi kayma gerilmesi
τ_a : Ortalama kayma gerilmesi
τ_{cy} : Tekrarlı kayma gerilmesi

τ_d : Tekrarlı kayma gerilmesi
τ_f : Statik deneyde göçme anındaki kayma gerilmesi
τ_{TGO} : Tekrarlı gerilme oranı
τ_s : Başlangıç statik kayma gerilmesi
τ_{su} : Tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti
τ/σ'_c : Tekrarlı gerilme oranı
τ/τ_f : Tekrarlı gerilme oranı
τ_d/τ_f : Tekrarlı mukavemet oranı
τ_{scm} : Eş zamanlı uygulanan statik ve tekrarlı kayma gerilmeleri
u : Boşluk suyu basıncı
u_N : Normalize boşluk suyu basıncı
W :Yapı ağırlığı
ω_n : Doğal su muhtevası
ω_L : Likit limit
ω_P : Plastik limit

ÖZET

Zemin dinamiğinin en önemli konularından biri, zeminlerin depremler, kazık çakma, trafik, makina temelleri, okyanus dalgaları gibi tekrarlı yükler altındaki davranışıdır. Tüm mühendislik yapılarında temellerin oturduğu taşıyıcı bir malzeme olduğu gibi aynı zamanda doğrudan inşaat malzemesi olarak da kullanılan zeminlerin dinamik yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Tekrarlı yüklemeler esnasında zemin tabakalarının göstereceği davranışı önceden bilmek, gerekli önlemlerin alınmasını ve bu tabakalar üzerindeki yapılarda oluşabilecek hasarların azaltılabilmesini sağlar. Ülkemizin aktif bir deprem kuşağında bulunması bu konuda yapılacak çalışmaların önemini daha da arttırmaktadır.

Bu deneysel araştırmada İzmit'te yapılan sondajlar sırasında alınmış örselenmemiş tabii kil numuneler dinamik basit kesme deney aletinde tekrarlı yüklemelere tabi tutulmuş ve bu yükler etkisi alında dinamik gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Deney programı İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında yürütülmüştür.

Tüm tekrarlı yüklemeli deneyler farklı tekrarlı gerilme genliklerinde, gerilme kontrollü çift yönlü sinüzoidal dalga yükü kullanılarak yapılmıştır. Tekrarlı yükleme frekansı 0.1 Hz olarak sabit tutulmuştur. Yapılan deneylerde numunelere üç kez tekrarlı yük uygulanmış ve ilk iki kademede oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenebilmesi amacıyla drenaja izin verilmiştir. Üçüncü tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmeden numune statik olarak kesilmiştir ve drenajsız kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Drenajsız statik deneyler saatte %6.5 deformasyon hızında, deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Her statik ve tekrarlı yükleme deneyinde yatay yük, boşlık suyu basıncı, yatay ve düşey deformasyon değerleri gözlemlenmiş ve bir veri toplama ünitesi kullanılarak kaydedilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda drenajsız tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimine maruz kalmış örselenmemiş tabii killerde ilk kademede göreceli olarak yüksek boşluk suyu basınçları meydana geldiği belirlenmiştir. Daha sonraki yükleme kademelerinde bir önceki kademeye göre daha küçük değerde boşluk suyu basınçları oluşmuştur ve boşluk suyu basıncı değerleri son iki yükleme kademesinde birbirine yakın olmuştur. Kayma deformasyonu davranışı boşluk suyu basıncı davranışına benzemektedir. Tekrarlı yükleme serileri bir kademedeki kayma deformasyonu değerinin bir önceki kademedekinden küçük olmasına neden olmuştur. Konsoliadsyon oturmaları da her kademede bir öncekine göre azalım göstermiştir.

Tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu ve konsoliadasyon oturmalarının tekrarlı gerilme oranına bağlı olduğu belirlenmiştir. Tekrarlı gerilme oranı arttıkça boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu ve konsoliadsyon oturmaları da artmıştır.

Tekrarlı yüklemeler sonucunda örselenmemiş tabii kil numunelerin drenajsız kayma mukavemetlerinde değişimler olmuştur. Tekrarlı gerilme oranı, $\tau/\tau_f \geq 0.34$ olduğu durumda numunelerin drenajsız kayma mukavemetlerinde artış gözlenmiştir. Bu tekrarlı gerilme oranı eşik seviyesinin altında ise numunelerin drenajsız kayma mukavemetleri azalmıştır. Drenajsız kayma mukavemeti azalan numunelerin davranışı incelendiğinde tekrarlı kayma gerilmesi oranı arttıkça drenajsız kayma mukavemeti arttığı belirlenmiştir.

STRENGHT OF CLAYS UNDER CYCLIC LOADING

SUMMARY

One of the important issues in soil dynamics is behavior of soils under cyclic loads caused by earthquakes, pile driving, traffic, machine foundations and ocean waves. It is a necessity to determine the stress-strain and shear strength characteristics of soils which support all engineering structures and also used as the basic material in many engineering structures.

Structural damage can be minimized by taking the necessary precautions if the response of soils can be estimated during dynamic loading. Being our country is on an active earthquake zone increases the importance of research about this issue.

In this experimental study undisturbed clay samples taken from İzmit were subjected to cyclic loads by using cyclic simple shear testing system and cyclic stress strain behaviour and shear strength properties of these samples under these loads were investigated. The testing programme was executed at the Soil dynamics Laboratory of Civil Engineering Faculty of Istanbul Technical University.

All cyclic tests were performed with stress controlled two-way sinusoidal wave loading with different shear stress amplitudes. Cyclic frequency was taken constant as 0.1 Hz. The samples were subjected to three consecutive series of cyclic loading. Drainage was applied between first two cyclic loading stages in order to dissipate the pore water pressure. The samples were statically sheared without allowing drainage at the end of the third cyclic loading and undrained strength of the samples was determined. The undrained static tests were run strain controlled with approximately 6.5% shear strain per hour. Horizontal load, pore water pressure, horizontal and vertical deformation were monitored and recorded using a data acquisiton system during each static and cyclic test.

As a result of experimental study, a relatively high pore water pressures were observed for undisturbed clays subjected to undrained cyclic loading at the first stages of cyclic loading. At the following stages of cyclic loading, pore water pressures became smaller than the previous stages and the pore pressure values for the last two loading stages became close to each other. There is a similarity between shear strain and pore pressure behaviour under consecutive series of cyclic loading. This cyclic loading series caused the subsequent shear strains to become smaller compared to the previous stage of cyclic loading. Consolidation settlements were also decrease in every cyclic loading stage.

Degree of pore water pressure, shear strain and consolidation settlement induced by cyclic loading was dependent on the cyclic stress ratio. Pore pressure, shear strain and consolidation settlement increased by increasing cyclic stress ratio.

As a result of cyclic loading the undrained shear strength of undisturbed clay samples was changed. When a threshold level of cyclic stress ratio was exceeded as in the case of $\tau/\tau_f \geq 0.34$, the post-cyclic undrained shear strength increased. Below this threshold level, the post-cyclic undrained static strength decreased.

1. GİRİŞ

Deprem yükleri, açık deniz dalgaları, yüksek binalara etkiyen rüzgar yükleri, makine temel titreşimleri, trafik yükleri gibi tekrarlı yüklemeler altında zemin davranışının incelenmesi zemin dinamiğinin önemli konularından birini oluşturur. Bu tip yüklemelere maruz kalan zemin tabakalarında gerilme-şekil değiştirme davranışının ve kayma mukavemetinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Zeminlerin temel dinamik gerilme-şekil değiştirme parametreleri dinamik kayma modülü ve sönüm oranıdır. Tek boyutlu analizlerde gerilme şekil-değiştirme bağıntısının belirlenmesi için bu parametrelerin şekil değiştirme ve efektif gerilme seviyesine göre değişimlerinin bilinmesi yeterli olmaktadır.

Tekrarlı yükler altında zemin davranışının incelenmesinde önemli bir diğer konu olan zeminlerin dinamik mukavemeti, bu yüklerin neden olduğu boşluk suyu basıncı artışlarına bağlıdır. Dinamik yükler nedeniyle meydana gelen mukavemet kaybı, kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma, kohezyonlu zeminlerde ise aşırı deformasyonlar ve göçme olarak ortaya çıkmaktadır.

Zeminler, yapıların üzerine oturduğu temel altı malzemesi ve bununla beraber başlı başına bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, zemine uygulanan çeşitli tekrarlı yüklemeler altında davranış özelliklerinin önceden bilinmesi, üst yapıda meydana gelebilecek hasarların azaltılabilmesi ve ortadan kaldırılabilmesi açısından çok büyük önem teşkil etmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarla zeminlerin dinamik kayma modülü ve sönüm oranı, büyük deformasyonlara veya göçmeye neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısı bulunabilmektedir. Regresyon analizleri yapılarak bu verilere bağlı olarak geliştirilecek bağıntılar yardımı ile zeminlerin arazideki davranış biçimleri tabaka ve sınır şartlarına göre yaklaşık olarak belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada örselenmemiş tabii kil numuneler üzerinde dinamik basit kesme deney aleti kullanılarak tekrarlı yükleme deneyleri yapılmış ve yüklemeler sonucu meydana gelen gerilme şekil değiştirme ve kayma mukavemeti değişimleri incelenmiştir.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır ve bu bölümlerde sırasıyla, ince daneli zeminlerin dinamik davranışı, deney sistemi ve zemin numuneleri, deney sonuçları ve son olarak genel sonuçlar bulunmaktadır.

İkinci bölümde zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları anlatılmakta ve kohezyonlu zeminlerin gerilme deformasyon ve mukavemet davranışları ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalar sunulmaktadır.

Üçüncü bölümde bu çalışmada kullanılan deney sisteminin detayları ayrıntılı olarak bulunmaktadır. Ayrıca deneylerde kullanılan zemin numunelerinin özellikleri ve deneyin yapılışı sunulmaktadır.

Dördüncü bölümde yapılan deneylerin sonuçlarının incelenmesi, uygulanan farklı büyüklükteki tekrarlı yüklemelerin zeminin mukavemet, kayma deformasyonu, boşluk suyu basıncı ve konsolidasyon oturması davranışlarına etkisi sunulmaktadır.

Beşinci bölümde ise uygulanan deneylerden elde edilen genel sonuçlar bulunmaktadır.

2. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI

2.1 Giriş

Zeminler ve zemin yapıları deprem, patlayıcı maddeler, inşaat çalışmaları, madencilik faaliyetleri, makine temelleri, trafik, rüzgar ve dalga hareketlerinin sonucunda oluşan tekrarlı yüklerden etkilenirler. Zeminlerin bu gibi dinamik yüklemeler altındaki gerilme şekil değiştirme davranışları statik yükleme altındaki davranışlarından farklılık gösterir.

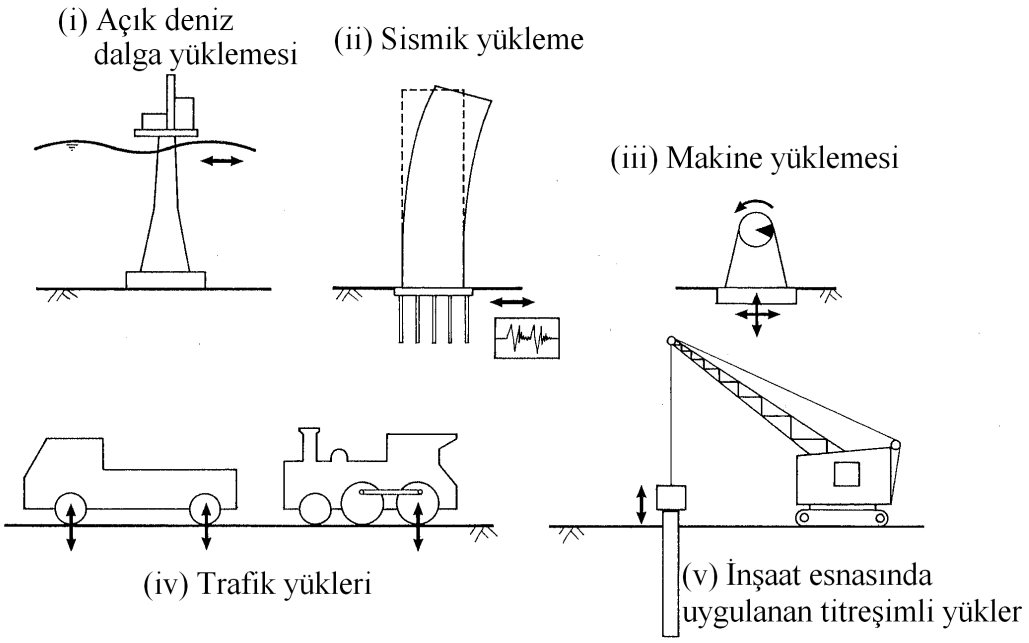
Zemin dinamiği, tekrarlı yüklere maruz kalan zeminlerin davranışlarını ve zemin yapılarının stabilite analizlerini konu almaktadır. Deprem sırasında meydana gelen sıvılaşma problemleri, nükleer enerji santrallerinin yoğun güvenlik gereksinimleri, kıyı yapılarının temel tasarımı gibi faktörler zemin dinamiği alanında hızlı bir büyümeyi de beraberinde getirmiştir.

Zeminlerin dinamik özellikleri, gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet davranışları olarak iki ana başlık altında incelenmektedir. Tekrarlı yüklemeye maruz kalan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarına bağlı olarak belirlenen iki önemli parametre dinamik kayma modülü, G ve sönüm oranı, D'dir. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli laboratuvar ve arazi deneyleri uygulanmaktadır. Laboratuvarda kullanılan dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme, dinamik burulmalı kesme ve rezonant kolon deney sistemleriyle arazi gerilme-deformasyon durumları modellenebilmektedir.

2.2 Tekrarlı Yükler ve Zemin Gerilmeleri

Tüm yapılar tekrarlı yüklere maruz kalırlar. Bazı durumlarda bu yüklerin ihmal edilebilir olmasının yanında, deniz üstü yapılarına etkiyen dalga yükleri, ağır makine temelleri, sismik yükler ve trafik yüklerinin söz konusu olduğu durumlarda

yüklemenin tekrarlı bileşeni ihmal edilemeyecek kadar büyük olmaktadır. Şekil 2.1'de tekrarlı yüklemenin önem kazandığı durumlar görülmektedir.



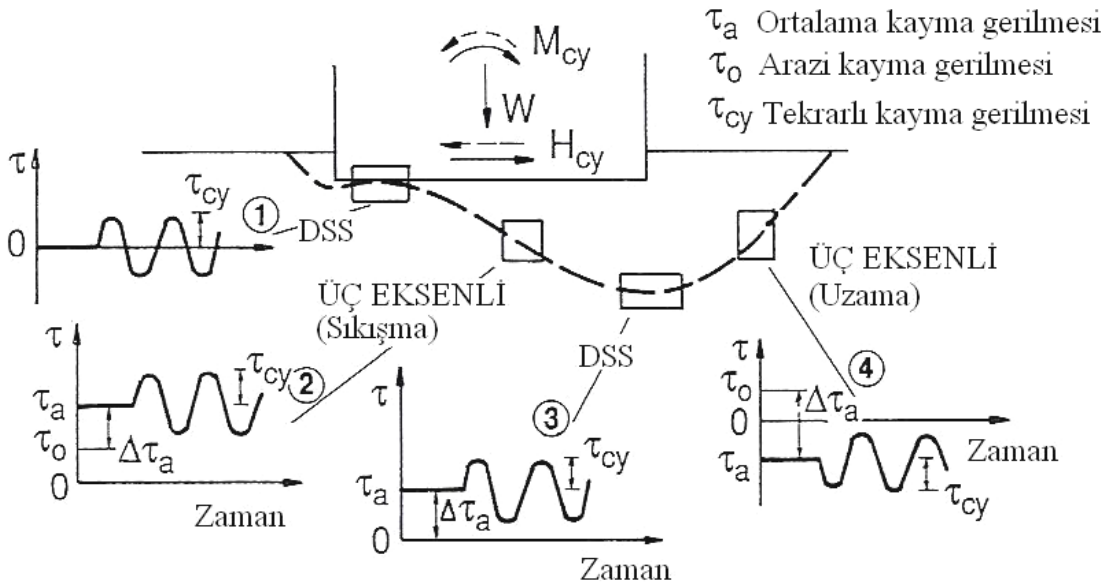
Şekil 2.1: Zeminin önemli büyüklükteki tekrarlı gerilmelere maruz kaldığı durumlar (O'Reilly ve Brown, 1991).

Yüklemenin tekrarlı bileşeninin küçük ve yükleme hızının düşük olduğu durumlarda statik analizleri veya zeminin monotonik yükleme esnasındaki davranışını model alan analizleri kullanmak uygun olmaktadır. Fakat bu analizler, yükleme çevrimleri veya frekansı arttıkça güvenli ve ekonomik bir tasarım için yetersiz kalmaktadır.

Statik ve tekrarlı yük kombinasyonlarına maruz kalan yapıların temel zeminlerinde oluşan gerilmelerin karmaşıklığı nedeniyle bu gerilmeleri hesaplayabilmek için uygun bir zemin modeli oluşturmak oldukça zordur. Şekil 2.2'de bir kayma yüzeyi boyunca zemin elemanlarındaki kayma gerilmelerinin farklı deneylerle modellendiği görülmektedir.

Zemin elemanları farklı gerilme izlerini takip etmekte ve ortalama kayma gerilmeleri, τ_a, ve tekrarlı kayma gerilmelerinin, τ_{cy}, farklı kombinasyonlarına maruz kalmaktadır. 2 numaralı zemin elemanında, yapının ağırlığı, W, nedeniyle düşey yükleme esnasında zemin elemanı sıkışma eğiliminde olmaktadır. 4 numaralı zemin elemanı pasif bölgede olduğu için yapının ağırlığı, W, düşey gerilmeden daha büyük bir yatay gerilmeye neden olur ve tekrarlı yükleme esnasında zemin elemanı yatay

doğrultuda sıkışma ve düşey doğrultuda uzama eğilimde olmaktadır. Bu nedenle 2 numaralı zemin elemanı üç eksenli sıkışma ve 4 numaralı zemin elemanı üç eksenli uzama deneyiyle model edilebilmektedir.



Şekil 2.2: Potansiyel bir kayma yüzeyi boyunca zemin elemanlarının basitleştirilmiş gerilme koşulları (O'Reilly ve Brown, 1991).

1 ve 3 numaralı zemin elemanlarında kayma yüzeyinin yatay doğrultuda olması sebebiyle bu elemanlar basit kesme deneyiyle model edilebilmektedir.

Zemin, drenajlı koşullarda aktif hale geçen arazi kayma gerilmesi, τ_0, altında konsolide olur. Yapının ağırlığından kaynaklanan kayma gerilmesi, $\Delta\tau_a$, ilk önce drenajsız koşullar altında, daha sonra zeminin yapı ağırlığına bağlı olarak konsolide olduğu durumda drenajlı koşullarda oluşur.

Deniz üstü yapılarında dalga yükleri, tekrarlı kayma gerilmelerini, τ_{cy}, meydana getirir. Bir fırtına esnasında dalga yüksekliği ve periyodu bir dalgadan diğerine sürekli olarak değiştiği için tekrarlı kayma gerilmeleri de bir çevrimden diğerine sürekli olarak değişir.

Dalga yükleri dışında diğer tekrarlı yükler de tekrarlı kayma gerilmeleri oluşturur. Bu tekrarlı yüklemelerin dalgalardan kaynaklanan tekrarlı yüklemelerden farkı yük periyodu ve çevrim sayısıdır. Bir depremin periyodu 0.1-1.0 saniye iken dalga yüklerinin periyodu 5-20 saniye aralığında değer alır. Çevrim sayısı bir depremde

10-100 arasında değişirken bir deniz fırtınası binlerce çevrim içerir. Bu fark zemin parametrelerinin sayısal değeri üzerinde bir etkiye sahiptir ama zeminlerin tekrarlı yükler altındaki temel davranışını etkilememektedir (O'Reilly ve Brown, 1991).

2.3 Dinamik Gerilme Deformasyon Davranışı

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışını incelemek için kullanılan en önemli iki parametre dinamik kayma modülü, G ve sönüm oranı, D'dir. Sönüm oranı malzemede bir çevrimde sönümlenen enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Bu parametrelerin elde edilebilmesi için dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme gibi deney sistemleri kullanılmaktadır.

Dinamik basit kesme deneyinde numuneye kayma gerilmeleri uygulandığı için dinamik kayma modülü herhangi bir ara işleme ihtiyaç olmaksızın deney sonuçlarına göre çizilen kayma gerilmesi deformasyon grafiğinden direkt olarak belirlenmektedir. Kayma gerilmeleri ve bunlara karşılık gelen kayma deformasyonlarının grafiği histerisis ilmiklerinden oluşmaktadır. Şekil 2.3'de gerilme-deformasyon ilişkisini gösteren tek bir histerisis ilmiği görülmektedir. Bu grafikten yararlanılarak zeminin kayama modülü ve sönüm oranı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$G = \frac{\text{Tekrarlı kayma gerilmesi, } \tau}{\text{Tekrarlı kayma deformasyonu, } \gamma} \qquad \textbf{(2.1)}$$

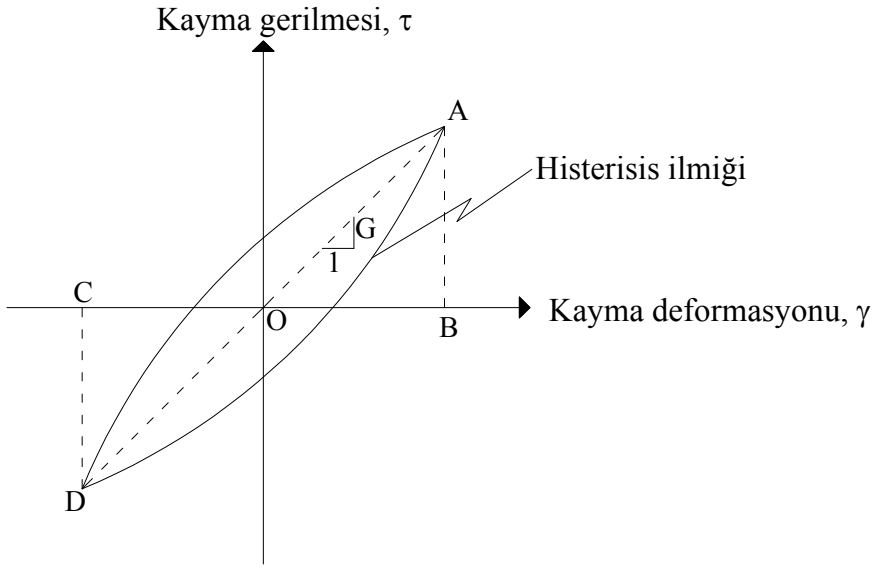
$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{Histerisis ilmiğinin alanı}}{\text{OAB ve OCD üçgenlerinin alanı}} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Dinamik üç eksenli deney aletiyle elde edilen gerilme düşey deformasyon ilişkisi de histerisis ilmikleri şeklinde olmaktadır (Şekil 2.4). Histerisis ilmiğinin iki uç noktasını birleştiren doğrunun eğimi elastik modül olarak tanımlanır ve (2.3) bağıntısıyla ifade edilir. Dinamik kayma modülü ve birim kayma deformasyonu, $\mu =$ poisson oranı olmak üzere, sırasıyla (2.4) ve (2.5) ifadelerinden hesaplanmaktadır.

$$E=\frac{\text{Tekrarlı gerilme oranı, } \sigma_d/2\sigma_c}{\text{Düşey deformasyon, } \varepsilon} \quad \textbf{(2.3)}$$

$$G=\frac{E}{2(1+\mu)} \quad \textbf{(2.4)}$$

$$\gamma=(1+\mu)\varepsilon \quad \textbf{(2.5)}$$

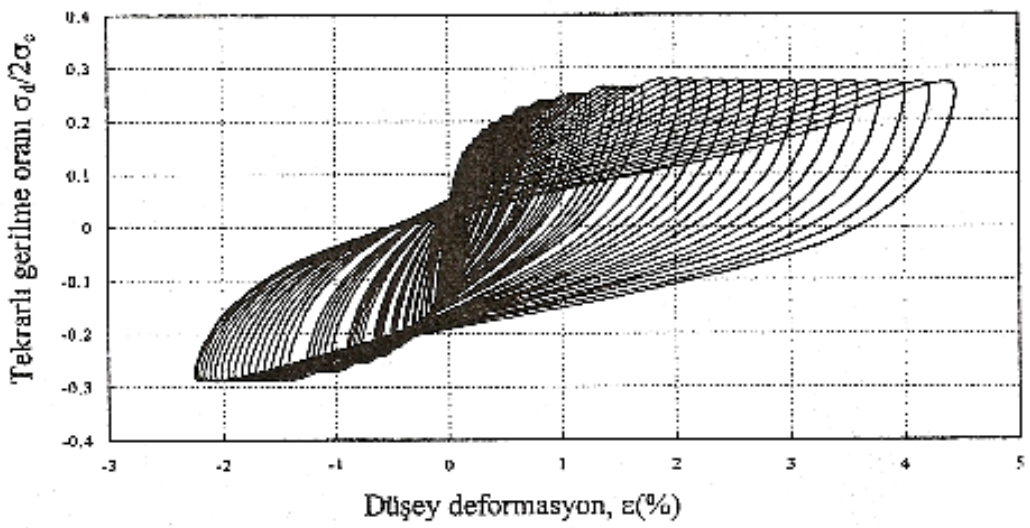


Şekil 2.3: Kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisini gösteren histerisis ilmiği.

Dinamik kayma modülü ve sönüm oranına etkiyen faktörlerle ilgili birçok araştırmacı değişik deney sistemleriyle çalışmalar yapmıştır. Humphries ve Wahls (1968), laboratuar ortamında hazırlanmış, plastisite indisi, I_P=%35 olan kaolin ve I_P=%60 olan bentonit üzerinde rezonant kolon deneyleri yaparak bu killerin gerilme geçmişlerinin dinamik kayma modülleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları regresyon analizleri sonucunda dinamik kayma modülünü, p' efektif konsolidasyon basıncı, e boşluk oranı ve OCR aşırı konsolidasyon oranı olmak üzere, kaolin için (2.6) ve bentonit için (2.7) bağıntılarıyla ifade etmişlerdir.

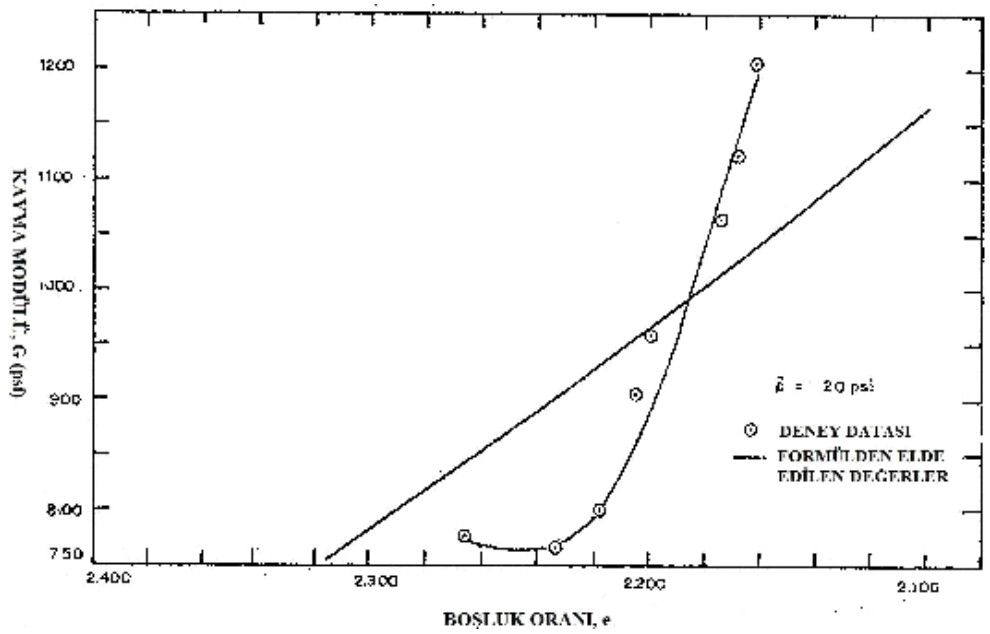
$$G = 235.839p' - 2.3267p'^2 + 0.01091p'^3 - 11938e + 17655.6 \quad \textbf{(2.6)}$$

$$G = 16.44p' - 0.3681\,p'^2 + 0.00252p'^3 - 1943e + 24.0\ln(OCR) + 5.060.7 \quad \textbf{(2.7)}$$



Şekil 2.4: Tekrarlı gerilme oranı - eksenel düşey deformasyon ilişkisi (Özay ve diğerleri, 2000).

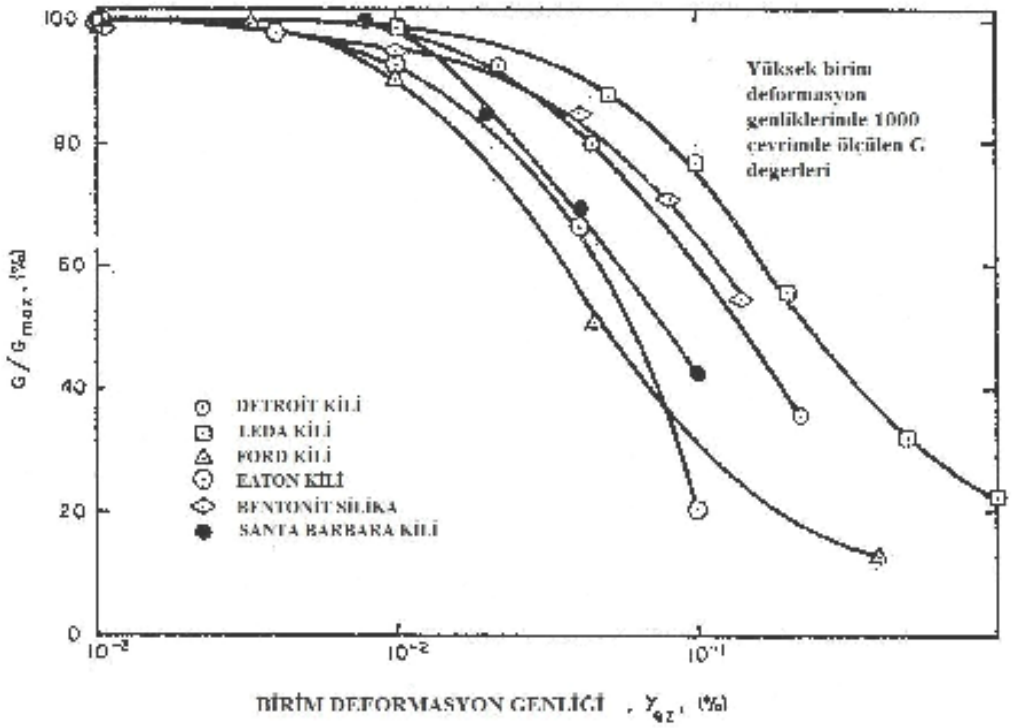
Her iki kil için de dinamik kayma modülünün, artan efektif konsolidasyon basıncı ve azalan boşluk oranı ile arttığını belirlemişlerdir. Kayma modülünün belirlenmesinde kaolin için deney esnasındaki konsolidasyon basıncı ve boşluk oranı gerekli olurken, bentonit için konsolidasyon basıncı gerekli olmamaktadır. Çünkü bentonitin kayma modülü ön konsolidasyon basıncına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.5'te bentonit için sabit efektif çevre basıncı altında dinamik kayma modülünün boşluk oranı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 2.5: Bentonit için boşluk oranı dinamik kayma modülü ilişkisi (Humpries ve Wahls, 1968).

Kohezyonlu zeminlerin dinamik kayma modülü, birim deformasyon genliğine bağlı olarak değişmektedir. Kovakcs ve diğ. (1971), Hardin ve Drnevich (1972) ve Taylor ve Parton (1973) yaptıkları çalışmalarda kayma modülü ve birim deformasyon arasında lineer olmayan bir ilişki olduğunu ve birim deformasyonun eşik değeri aşıldıktan sonra, artan birim deformasyon genliğiyle kayma modülü arttığını belirlemişlerdir.

Anderson ve Richart (1976), rezonant kolon deney sistemiyle yüksek birim deformasyon genliklerinde deneyler yapmışlardır. Birim deformasyon genliğinin %0.001-%0.01 aralığında olması durumunda kayma modülünün birim deformasyon genliğinden bağımsız olduğunu göstermişlerdir. Bu birim deformasyon seviyesinden sonra kayma modülü değerinde %10-%80 oranında bir azalma meydana gelmektedir (Şekil 2.6).

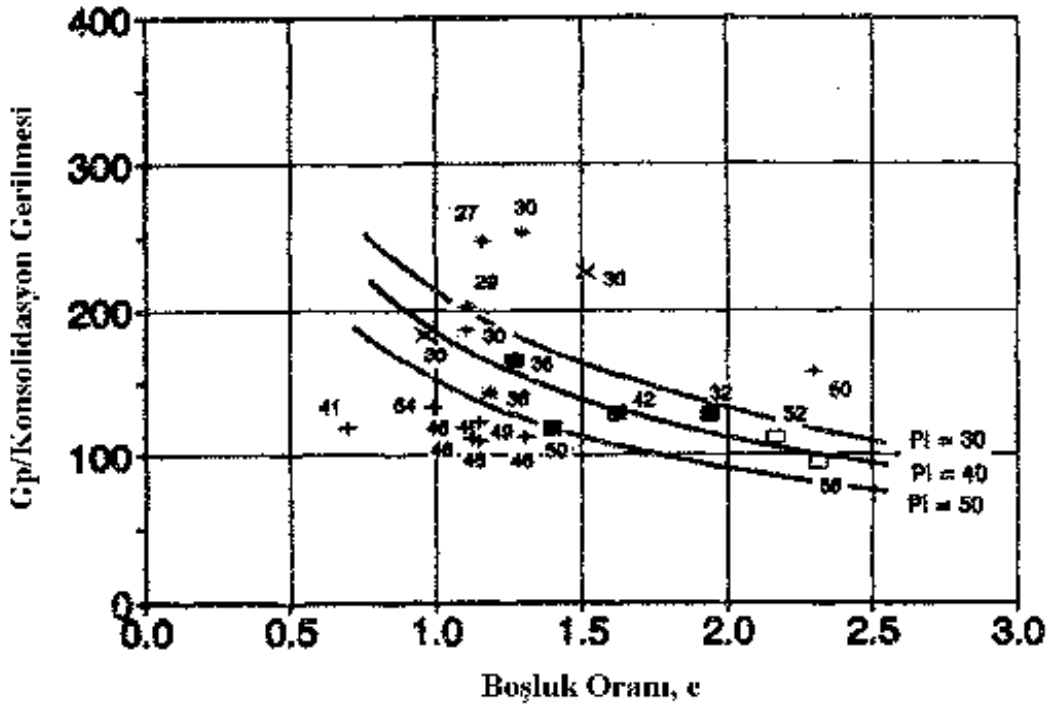


Şekil 2.6: Birim deformasyon genliğinin kayma modülü üzerindeki etkisi (Anderson ve Richart, 1976).

Kagawa (1992), su muhtevaları, w_n = % 36-86 ve plastisite indisleri, I_P = %30-%50 arasında değişen normal konsolide yumuşak deniz killeri üzerinde dinamik basit kesme ve rezonant kolon deneyleri yapmıştır. Birincil konsolidasyon sonrası değerlerden elde edilen sonuçlara göre plastisite indisindeki artışın maksimum

dinamik kayma modülünde bir azalma, ikincil konsolidasyon sonrası değerlere göre ise bir artış meydana getirdiğini belirlemiştir. Şekil 2.7'de değişik plastisite indislerine sahip numunelerin konsolidasyon basıncına göre normalize edilmiş birincil konsolidasyon sonrası maksimum dinamik kayma modüllerinin boşluk oranıyla değişimi görülmektedir. Birincil konsolidasyon sonrası maksimum dinamik kayma modülü G_p'yi belirlemek için, e boşluk oranı, PI plastisite indisi ve σ'_0 efektif konsolidasyon basıncı olmak üzere, (2.8) bağıntısı önerilmiştir.

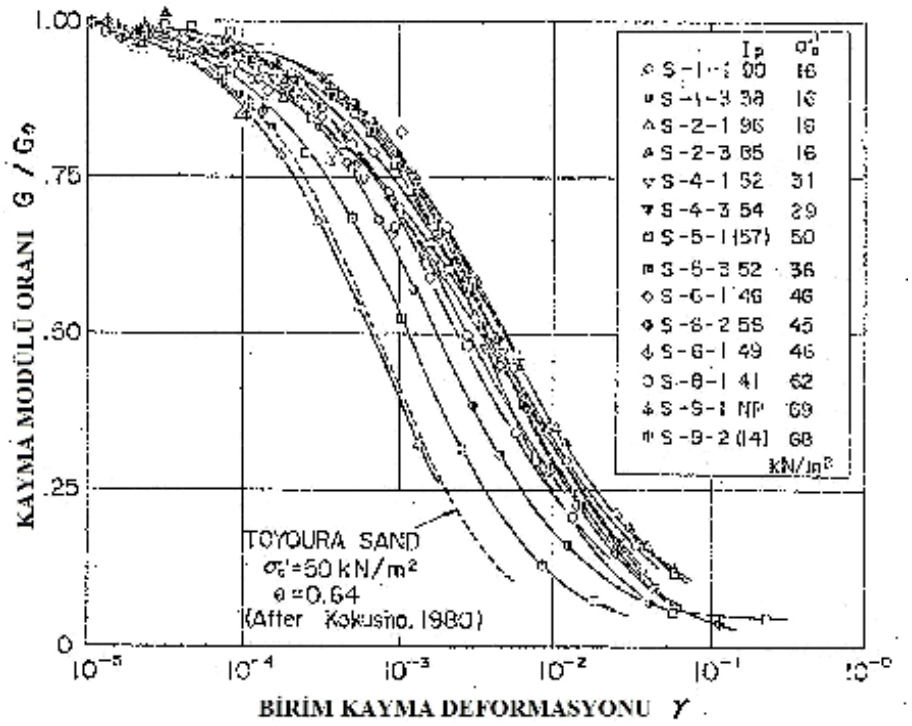
$$G_p = \frac{(358-3.8PI)}{(0.4+0.7e)} \times \sigma'_0 \qquad \textbf{(2.8)}$$



Şekil 2.7: Birincil konsolidasyon sonrası normalize kayma modülü (Kagawa, 1992).

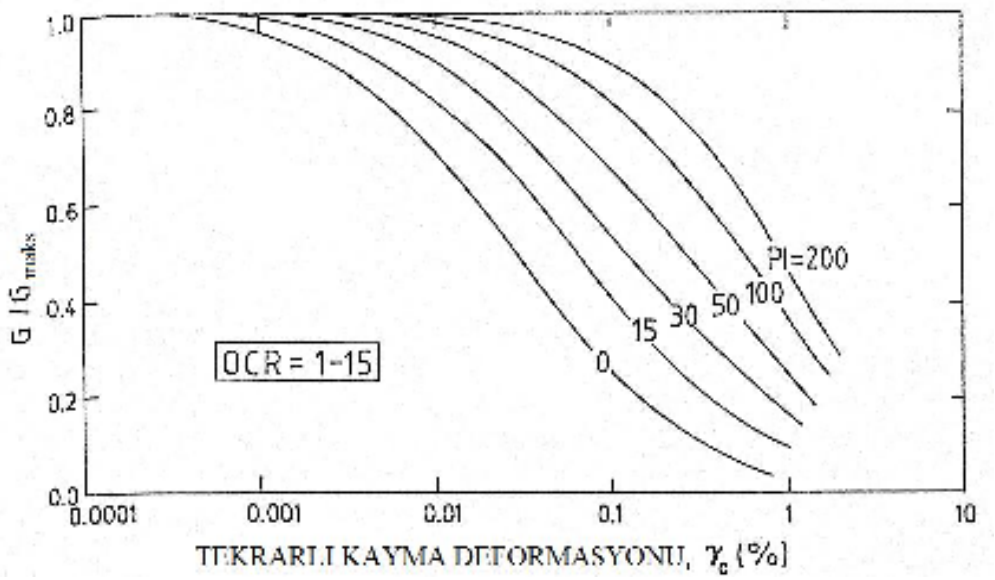
Kokusho ve diğerleri (1982), dinamik üç eksenli deney sistemini kullanarak farklı boşluk oranı ve plastisite indisine sahip örselenmemiş tabii killer üzerinde çalışmalar yapmışlardır. İnce daneli zeminlerin plastisite indisleri arttıkça dinamik kayma modüllerinin de arttığı ve kaba daneli zeminlerle kıyaslandığında birim kayma deformasyonuna bağlı kayma modülü ve sönüm oranı değişimlerinin çok daha çeşitli olduğu sonucuna varmışlardır (Şekil 2.8).

Vucetic ve Dobry (1991), aşırı konsolidasyon oranı, OCR=1-15 arasında değişen normal konsolide ve aşırı konsolide killer üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda

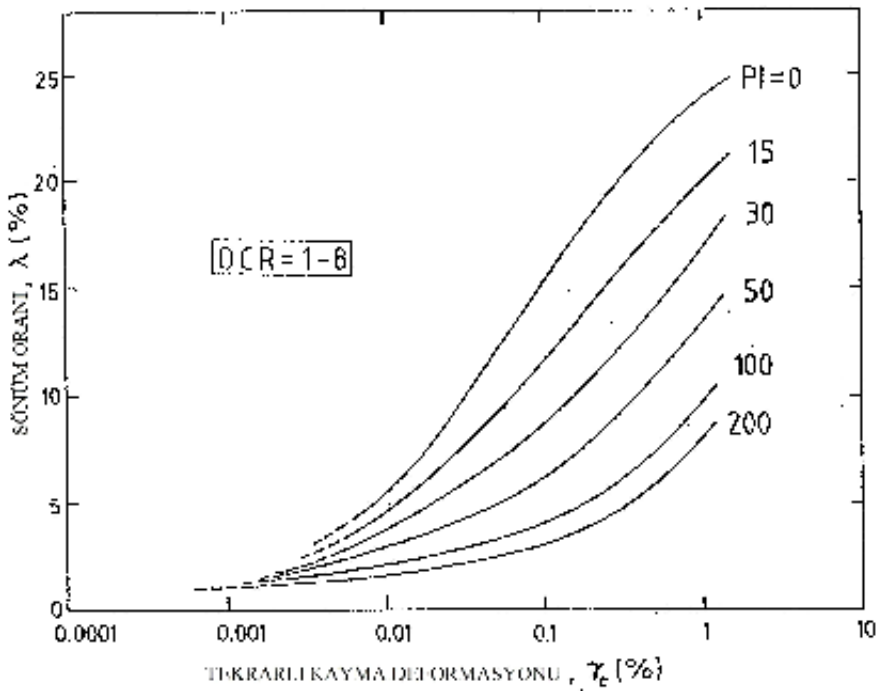


Şekil 2.8: Normal konsolide numunelerde kayma deformasyonu kayma modülü ilişkisi (Kokusho ve diğerleri, 1982).

kayma modülü ve sönüm oranı üzerinde en etkili faktörün plastisite indisi olduğunu belirlemişlerdir. Yüksek plastisiteli zeminler daha lineer bir tekrarlı gerilme-deformasyon davranışı göstermektedir. Ayrıca Şekil 2.9 ve 2.10'da görüldüğü gibi plastisite indisi arttıkça kayma modülü artmakta, sönüm oranın azalmaktadır.



Şekil 2.9: Normal konsolide ve aşırı konsolide zeminlerde birim deformasyon G/G_{maks} ilişkisi (Vucetic ve Dobry, 1991).

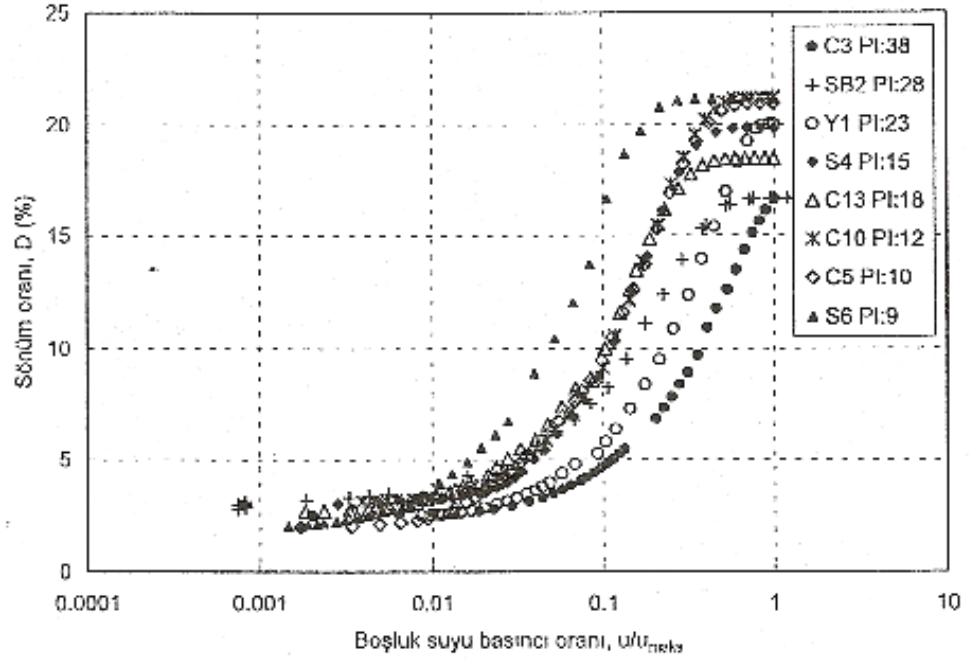


Şekil 2.10: Normal konsolide ve aşırı konsolide zeminlerde birim deformasyon sönüm oranı ilişkisi (Vucetic ve Dobry, 1991).

Vucetic (1992), yüksek plastisiteli killerin 10^{-4} mertebesindeki birim deformasyon seviyesine kadar lineer davranış gösterdiğini ve plastisite arttıkça zeminin lineer davrandığı eşik seviyesinin arttığını belirlemiştir.

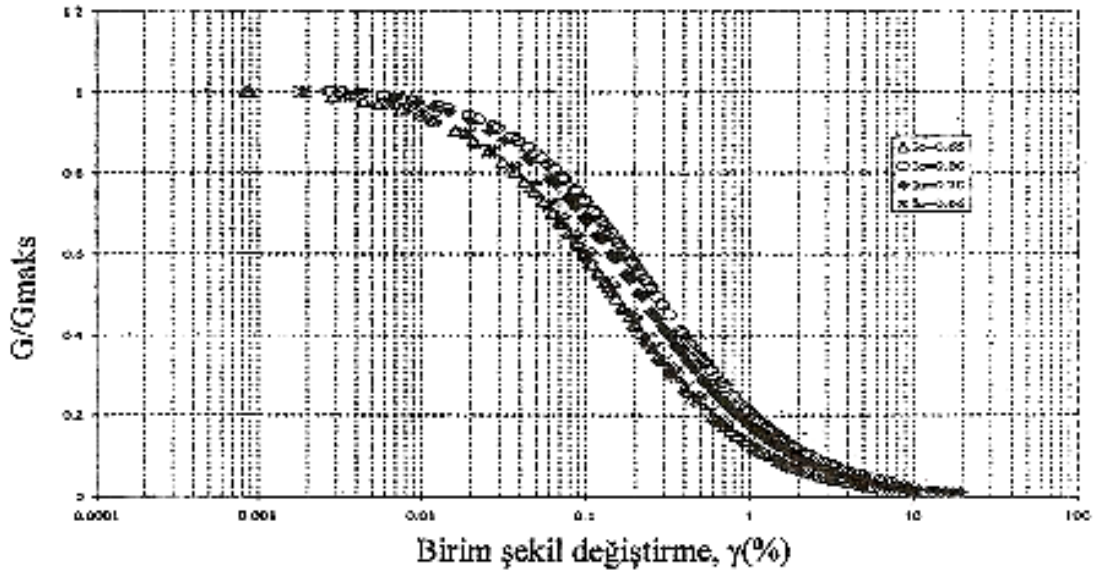
Okur ve Ansal (2002) örselenmemiş ince daneli zeminler üzerinde dinamik üç eksenli deney sitemiyle yaptıkları çalışmada plastisite indisi arttıkça aynı boşluk suyu basıncı oranı için sönüm oranı değerinin azaldığını göstermişlerdir (Şekil 2.11). Plastisite indisi arttıkça, boşluk suyu basıncı artsa da malzeme elastik davranmaya devam emekte ve meydana gelen sönüm miktarı plastisitesi düşük olan zemine göre daha küçük olmaktadır.

Özay ve diğerleri (2000), dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde yapılan deneyler ile kıvamın dinamik kayma modülü ve sönüme etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, 1995 Dinar depreminden sonra Dinar şehrinde yapılan geoteknik çalışmalar sırasında alınan örselenmemiş numuneler kullanılmıştır. Numunelerin plastisite indisleri, I_p=19-36 ve kıvam indisleri, I_c=0.5-1 arasında değişmektedir. Yapılan deneyler sonucunda plastisiteleri aynı kıvamları farklı numunelerde en büyük kayma modülü, G_{maks} değerinin kıvamla birlikte arttığı belirlenmiştir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi kıvam arttıkça eğriler sağa doğru kaymakta ve maksimum

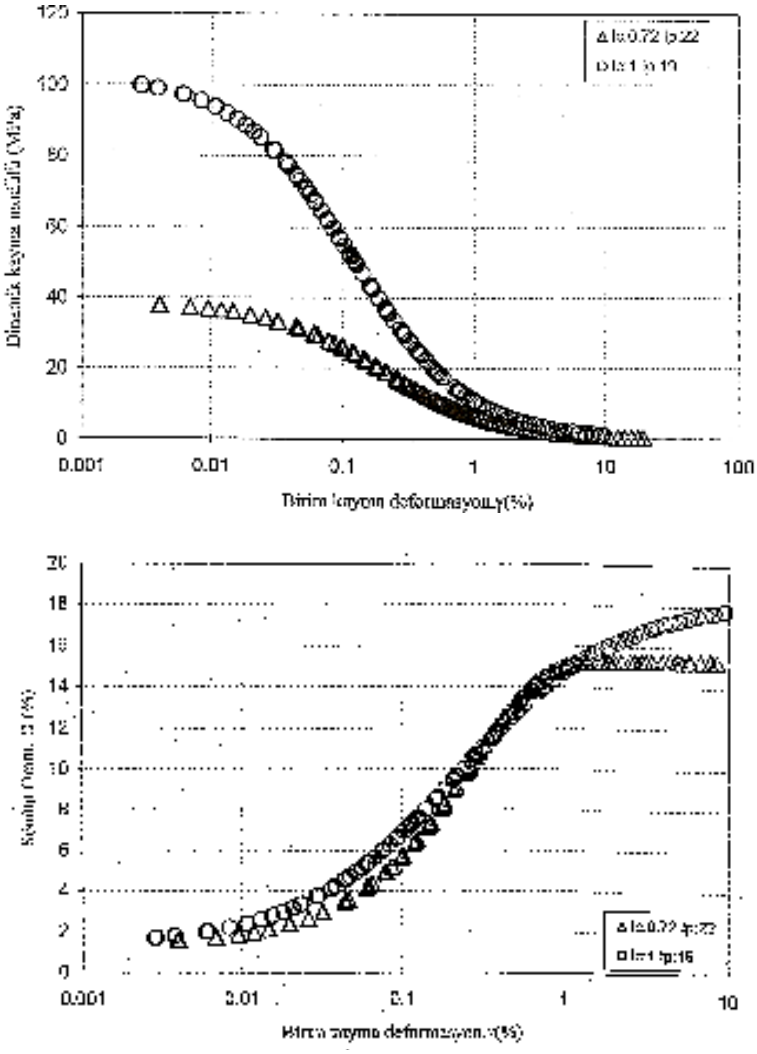


Şekil 2.11: Sönüm oranı boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi (Okur ve Ansal, 2002).

dinamik kayma modülüne göre normalize edilen dinamik kayma modülü değerleri artmaktadır. Ayrıca yapılan bu çalışma sonucunda artan birim kayma deformasyonuyla dinamik kayma modülünün azaldığı ve sönüm oranının arttığı belirlenmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.12: Kıvamın azalım eğrilerine etkisi (Özay ve diğerleri, 2000).

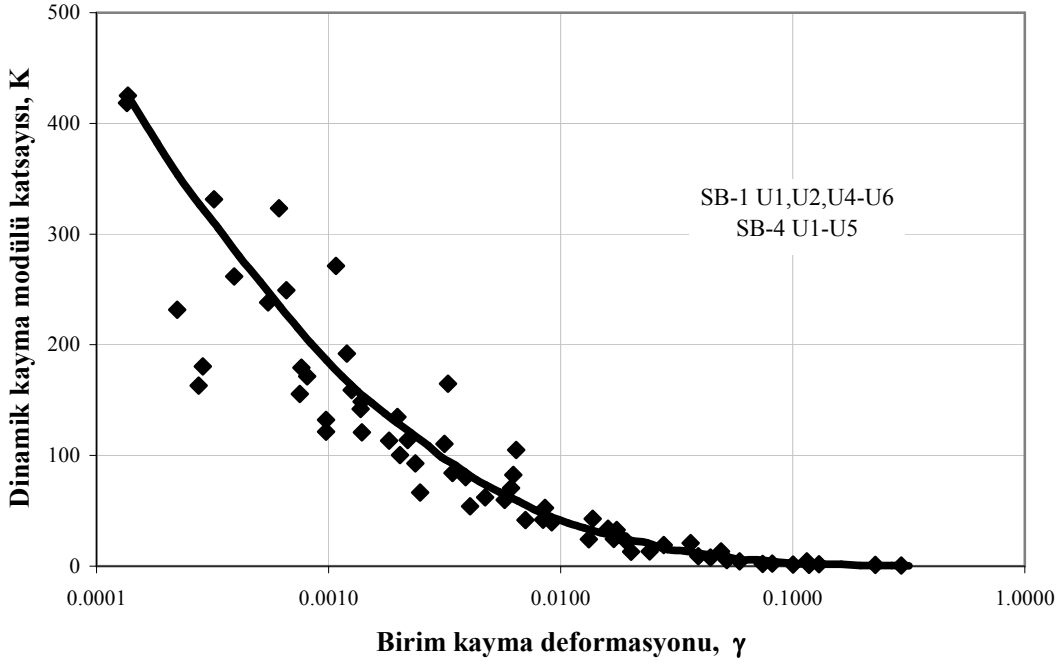


Şekil 2.13: Dinamik kayma modülü ve sönüm oranının birim kayma deformasyonuyla ilişkisi (Özay ve diğerleri, 2000).

Yıldırım (1987), yaptığı çalışmada dinamik basit kesme deney sistemini kullanarak İstanbul'un Haliç bölgesinden alınan örselenmemiş tabii kil numunelerin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Amaçlarına göre beş gruba ayrılan deneylerin ilk iki grubu gerilme-şekil değiştirme davranışının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

Birinci grup deneylerde, dinamik kayma modülü için bir korelasyon elde edebilmek amacıyla, numunelere sabit frekansta, çevrim sayısı, N=5 olan, artan tekrarlı kayma gerilmeleri, τ_d uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre belirlenen dinamik kayma modülleri, $G=K(\sigma'_v)^{1/2}$ ilişkisi kullanılarak efektif düşey gerilme σ'_v'ye göre normalize edilmiş ve Şekil 2.14'de görülen referans eğrisi çizilmiştir. Bu eğri

örselenmemiş tabii killerin dinamik kayma modülünü belirlemek için bir referans eğrisi olarak kullanılabilir.



Şekil 2.14: Dinamik kayma modülü için çizilen referans eğrisi (Yıldırım, 1987).

Dinamik kayma modülü katsayısı, K ve birim kayma deformasyonu arasındaki en uygun korelasyon, $K=b.\gamma^m$ olarak seçilmiştir. Regresyon analizleri yardımıyla malzeme parametreleri olan b ve m belirlenerek aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$K = 41.5\gamma - 0.887 \qquad \textbf{(2.9)}$$

Dinamik kayma modülü ise,

$$G = 41.5\gamma - 0.887(\sigma'_v)^{1/2} \qquad \textbf{(2.10)}$$

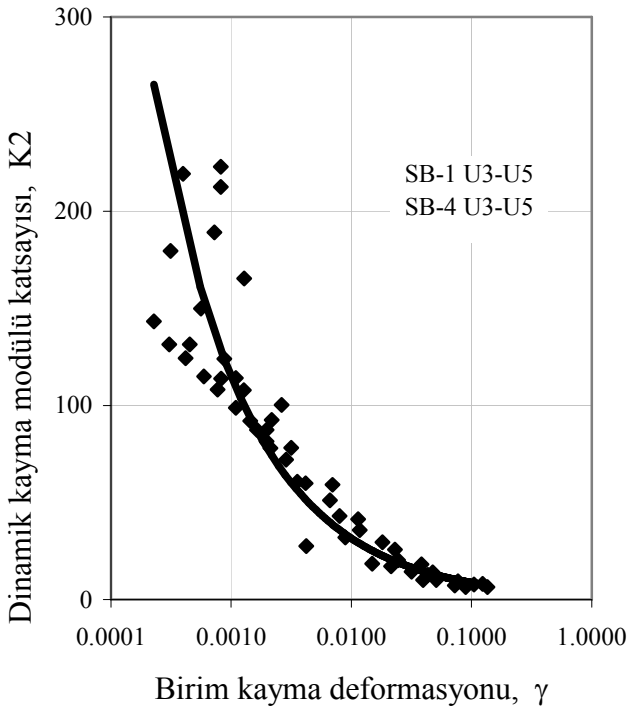
olarak ifade edilmiştir.

İkinci grup deneylerde, başlangıç statik kayma gerilmelerine maruz kalan zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışını belirlemek amaçlanmıştır. Monotonik tekrarlı yükleme modeli seçilmiş ve numunelere sabit frekansta, drenajsız kayma mukavemetinin %25'i kadar bir başlangıç statik kayma gerilmesi, τ_s uygulanarak dinamik kayma modülleri belirlenmiştir. Bu yükleme modeli şev ve tepelerdeki zeminleri model etmek için kullanılmaktadır. Bu deneylerde de dinamik kayma

modülündeki değişim için bir korelasyon elde edebilmek amacıyla bir referans eğrisi çizilmiştir (Şekil 2.15). Başlangıç kayma gerilmeleri uygulanırken drenaja izin verildiği için bu aşamada ek boşluk suyu basıncı oluşmamıştır. Tekrarlı kayma gerilmeleri ise N=5 çevrim sayısında ve her yükleme kademesinde arttırılarak uygulanmıştır. Dinamik kayma modülü katsayısı birim kayma deformasyonu ilişkisi ve kayma modülüne ait bağıntılar şu şekilde belirlenmiştir:

$$K = 23.6\gamma - 0563 \quad \textbf{(2.11)}$$

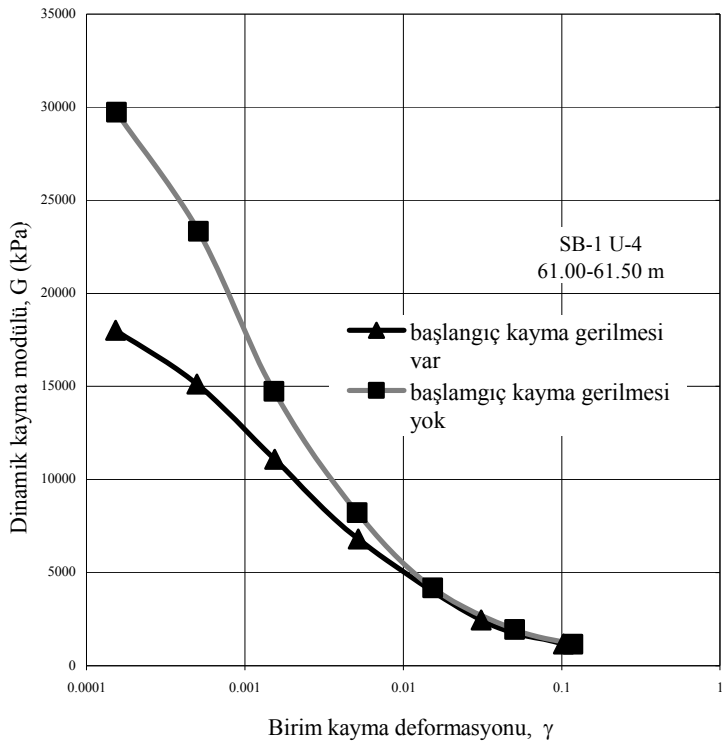
$$G = 23.6\gamma - 0.563(\sigma'_v)^{1/2} \quad \textbf{(2.12)}$$



Şekil 2.15: Monotonik tekrarlı yükleme durumunda dinamik kayma modülü için çizilen referans eğrisi (Yıldırım, 1987).

Şekil 2.16'da görüldüğü gibi başlangıç kayma gerilmeleri ilk başta dinamik kayma modülünde % 40 oranında bir azalma yaratmakta ama bu azalma değeri birim kayma gerilmeleri uygulandıkça normalize olmaktadır. Birim kayma deformasyonu ve dinamik kayma modülü azalımı arasındaki bağıntı şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\Delta G = 24.35 - 6.79\ln\gamma \quad \textbf{(2.13)}$$

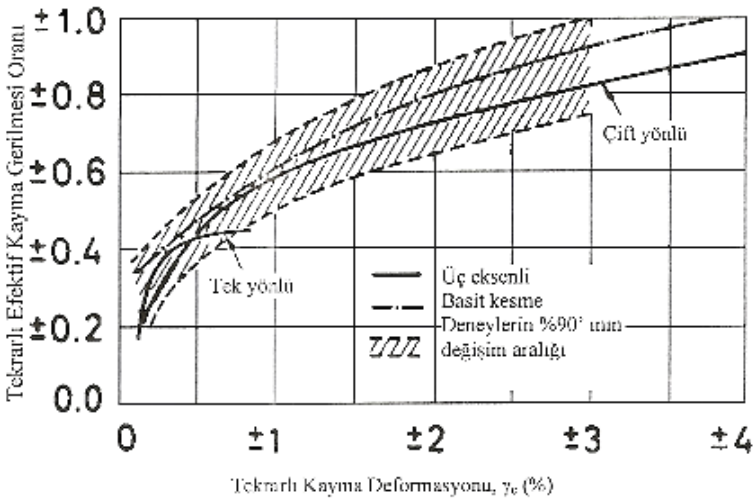


Şekil 2.16: Başlangıç kayma gerilmesi uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda dinamik kayma modülünün birim kayma deformasyonu ile değişimi (Yıldırım, 1987).

2.4 Dinamik Mukavemet Davranışı

Andersen (1976) tarafından yapılan çalışmada farklı deney tipleri için dinamik kayma deformasyonları ve dinamik kayma gerilmesi oranı arasındaki ilişkiyi incelenmiştir. Kil numuneler üzerinde tek yönlü üç eksenli ve çift yönlü basit kesme deneylerleri yapılarak tekrarlı kayma seviyesi ile tekrarlı kayma deformasyonları arasındaki ilişkinin çevrim sayısından bağımsız olduğu ve dinamik yükleme altında kilin davranışının efektif gerilmelere bağlı olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.17).

Koutsoftas (1978), dinamik üç eksenli deney sistemini kullanarak aşırı konsolidasyon oranı plastisite indisi, I_p=40 olan, aşırı konsolidasyon oranı, OCR=3.5-6 arasında değişen plastik kil ve plastisite indisi, Ip=18 olan, aşırı konsolidasyon oranı, OCR=5-9 arasında değişen siltli kil üzerinde deneyler yapmıştır. Numunelere belirli birim kayma genliklerine ulaşılıncaya kadar drenajsız olarak tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır ve oluşan boşluk suyu basınçlarının



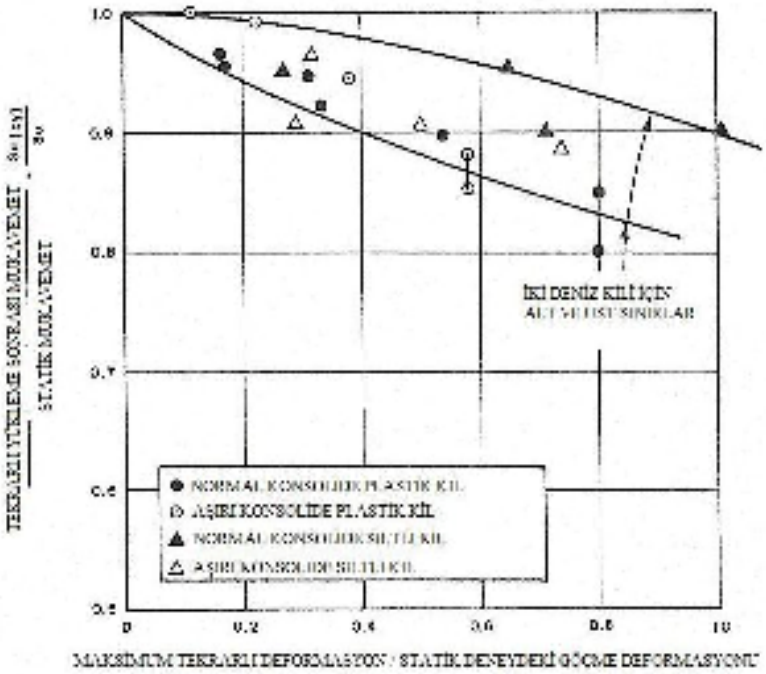
Şekil 2.17: Farklı tipteki deneylerde tekrarlı kayma deformasyonu ile efektif kayma gerilmesi arasındaki ilişki (Andersen, 1976).

dengelenmesi için drenaja izin verilmiştir. Daha sonra numune göçme gerçekleşinceye kadar monotonik olarak yüklenmiştir. Her iki kil için de %4-%5 tekrarlı birim deformasyon genliğinde, drenajsız kayma mukavemetinde statik drenajsız kayma mukavemetinin %10'undan daha az kayıp olmuştur.

Plastik kil için aynı birim deformasyon genliğinde, aşırı konsolide numunelerde daha az boşluk suyu basıncı artışı meydana geldiği ve aşırı konsolide numunelerdeki mukavemet kaybının normal konsolide numunelere oranla daha az olduğu belirlenmiştir. Siltli kil için de aynı birim deformasyon genliğinde, aşırı konsolide numunelerde daha az boşluk suyu basıncı artışı meydana gelmesine rağmen mukavemet kayıplarının normal konsolide ve aşırı konsolide numunelerde hemen hemen aynı değerde olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.18'de plastik kil ve siltli kil için tekrarlı birim deformasyon oranı tekrarlı mukavemet oranı ilişkisi görülmektedir.

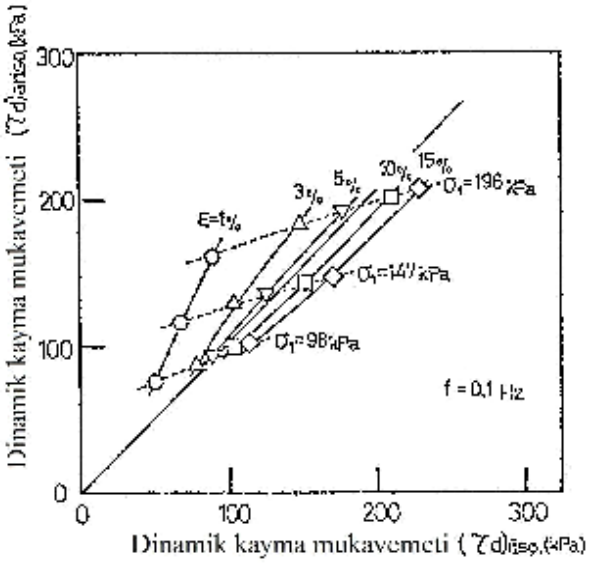
Yasuhara ve diğ. (1982), plastisite indisi, I_p=58 olan yoğrulmuş kil numunelerin dinamik davranışını dinamik üç eksenli deney sistemini kullanarak efektif ve toplam gerilmeler yönünden incelemişlerdir. Numuneleri izotropik veya anizotropik olarak konsolide ettikten sonra göçme meydana gelene kadar drenajlı veya drenajsız olarak tekrarlı gerilmeler uygulamışlardır. Drenajsız dinamik mukavemetlerinin frekans değerinden ve tekrarlı yükleme süresinden bağımsız olduğunu göstermişlerdir.

Birim deformasyon genliği, γ<%10 olduğu durumda anizotropik olarak konsolide edilen numunelerin tekrarlı kayma mukavemetleri, izotropik olarak konsolide

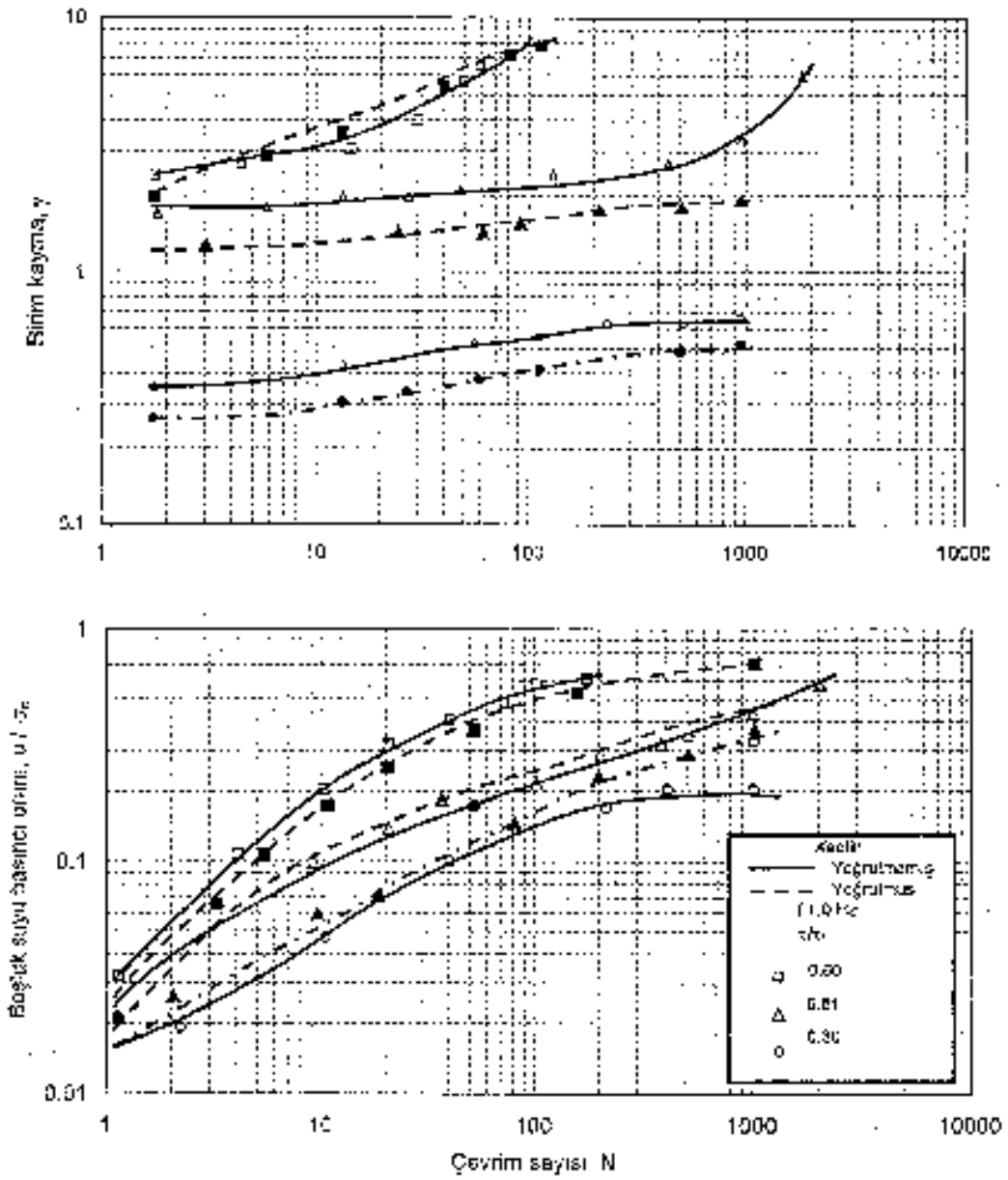


Şekil 2.18: Tekrarlı birim deformasyon oranı tekrarlı mukavemet oranı ilişkisi (Koutsoftas, 1978).

edilenlere göre daha büyük olmakta fakat birim deformasyon genliği, γ=%15 olduğunda bu fark ortadan kalkmaktadır (Şekil 2.19). Bu nedenle izotropik olarak konsolide edilen zeminlerin mukavemet davranışından yola çıkarak anizotropik olarak konsolide edilmiş zeminlerin mukavemet davranışı hakkında fikir edinmenin oldukça zor olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.19: İzotropik ve anizotropik olarak konsolide edilmiş killerin farklı birim deformasyon genliklerinde tekrarlı mukavemet değerleri (Yasuhara ve diğ., 1982).

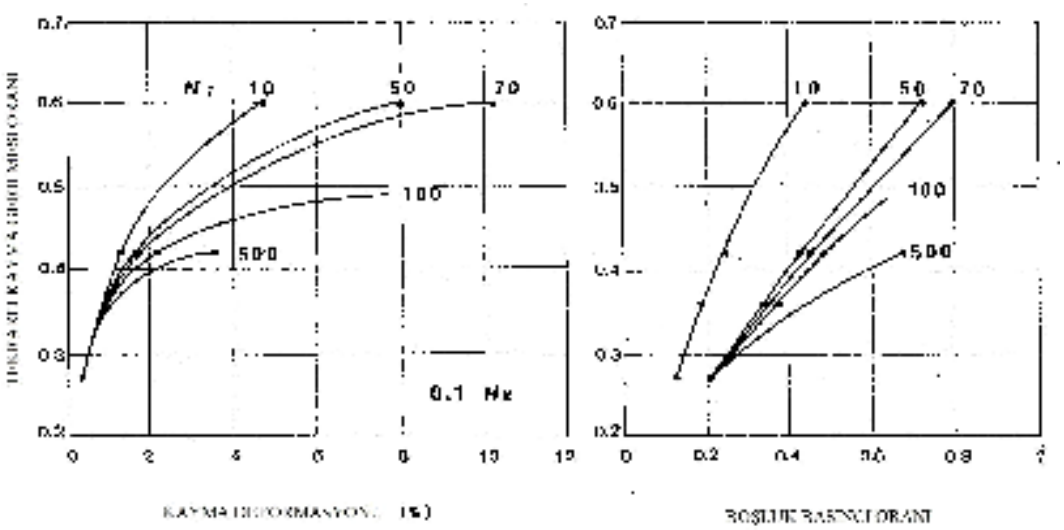


Şekil 2.20: Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Ansal ve Erken, 1985).

Erken ve diğ. (1987), normal konsolide killer üzerinde dinamik üç eksenli deney sistemiyle yaptıkları deneyler sonucunda, aynı frekansta farklı konsolidasyon basıncı ve birim boy değiştirme genliklerinde numunelerin aynı çevrim sayısında kırıldığını gözlemlemişlerdir.

Ansal ve Tuncan (1989), dinamik basit kesme deney sistemini kullanarak killerin konsolidasyon davranışını araştırmışlardır. Numunelere tekrarlı yükleme drenaj çevrimleri uygulanmıştır. Aşırı konsolide kil numunelerde oluşan oturma değerlerinin normal konsolide killere oranla oldukça küçük olduğu belirlenmiştir.

Ansal ve Erken (1989), laboratuar ortamında hazırlanan, likit limiti, ω_L=%65 ve plastik limiti, ω_P=%25 olan iki grup kaolin kili üzerinde dinamik basit kesme deney sistemiyle farklı gerilme genliği ve frekanslarda deneyler yapmışlardır. İki grup numune de likit limit değerinin çok az üstünde su muhtevasında hazırlanarak 100 kPa basınç altında tek boyutlu olarak konsolide edilmiştir. İkinci grup numuneler konsolidasyon aşamasından sonra ilave olarak yoğrulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda kayma gerilmesi oranının belirli bir değeri altında boşluk suyu basınçlarında artış olmadığını ve kayma deformasyonlarının sınırlı kaldığını belirlemişlerdir. 0.1 Hz frekansta yapılan deneyler için bu kritic gerilme oranı τ/τ_f=0.50 olarak verilmiştir. Bu frekansta yapılan deneyler sonucunda belirlenen gerilme deformasyon ve boşluk suyu basıncı deformasyon ilişkileri Şekil 2.21'de verilmiştir.



Şekil 2.21: Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Ansal ve Erken, 1989).

Tekrarlı kayma mukavemeti oranını, a ve b malzeme özelliklerine bağlı katsayılar olmak üzere, (2.14) bağıntısıyla ifade etmişlerdir.

$$\left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)_y = a - b\log N \qquad \textbf{(2.14)}$$

Boşluk suyu basıncını ise, $(S.R.)_t$ boşluk suyu basıncının artmaya başladığı tekrarlı gerilme oranı eşiği ve m boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı grafiğinden elde edilen eğrinin eğimi olmak üzere (2.15) bağıntısıyla tanımlamışlardır. Bağıntıdaki m ise

yapılan regresyon analizi sonucu belirlenmiştir ve k ve p malzeme sabitleri olmak üzere (2.16) bağıntısıyla verilmiştir.

$$u = \left[\frac{\tau}{\tau_f} - (S.R.)_t \right] m \qquad \textbf{(2.15)}$$

$$m = k + p\log N \qquad \textbf{(2.16)}$$

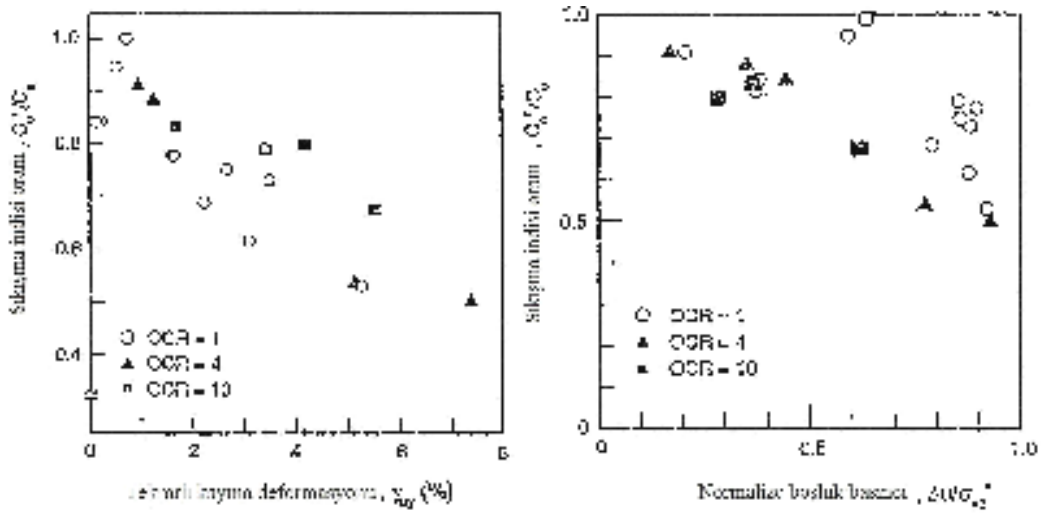
Yasuhara ve Andersen (1991), tekrarlı yüklemelere maruz kalan normal konsolide killerin oturma davranışını dinamik basit kesme deney sistemini kullanarak yaptıkları iki grup deneyle incelemişlerdir. Numunelere tekrarlı gerilmeler uygulayarak boşluk suyu basıncının artmasını ve daha sonra drenaja izin vererek bu basıncın sönümlenmesini sağlamışlardır. A grubu deneylerde tek yükleme drenaj çevrimi uygulanırken, B grubu deneylerde beş kere uygulanmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek amacıyla numuneler üzerinde odömetre deneyleri de yapılmıştır. Sonuçta numunelerin drenajsız kayma mukavemetlerinde artış olduğunu belirlenmiştir.

B grubu deneylerde tekrarlı yüklemeler esnasında şişme görülmezken odömetre deneylerinin yük boşaltma aşamasında şişmeler gözlenmiştir ve tekrarlı yüklemedeki toplam oturma miktarı daha fazla olmuştur. Ayrıca tekrarlı yükleme sonrası sıkışma indisi C_c', birim deformasyon genliği ve boşluk suyu basıncının artmasıyla azalmaktadır (Şekil 2.22).

Tekrarlı yükler, üzerinde bir yapı bulunan zeminlerde hacim azalmasına neden olur. Kil üzerindeki yapıların tekrarlı yüke maruz kalması durumunda boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için yeterli bir süre bulunmaz. Bu durumda drenajsız koşullar geçerli olup efektif gerilmelerde azalmaya neden olacak şekilde artık boşluk suyu basıncı oluşur. Tekrarlı yükten dolayı efektif gerilmelerdeki azalma, kayma deformasyonlarının ve drenajsız yükleme esnasında yapıdaki oturmaların artmasına neden olur (Yasuhara ve Andersen, 1991).

Tekrarlı kayma gerilmeleri altında suya doygun kumlu ve siltli zemin tabakalarında oluşan boşluk suyu basınçlarının efektif çevre basıncına eşit olması durumunda bir göçme durumu olan sıvılaşma oluşmaktadır. İnce daneli zeminler daha düşük permeabiliteye sahiptir ve daneler arasındaki suyun drene olabilmesi için yeterli zaman bulunmamaktadır. Bu nedenle ince daneli zeminlerde oluşan boşluk suyu

basınçları ve buna bağlı oturmalar dolayı kumlarla kıyaslandığında daha düşük seviyelerde olmaktadır. (Yasuhara ve Andersen, 1991).



Şekil 2.22: Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1991).

Tekrarlı yüklemeler sonucu belli bir çevrim sayısı değerinin üzerinde boşluk suyu basıncı oluşur ve drenaja izin verilmediği durumlarda sönümlenmez. Normal konsolide zeminlerde boşluk suyu basınçları her zaman pozitifken aşırı konsolide zeminlerde negatif olabilmektedir (Vucetic, 1988).

Andersen ve diğ. (1980), aşırı konsoliadsyon oranı, OCR=1-50 arasında değişen plastik Dramen kili üzerinde dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney sistemlerini kullanarak deneyler yapmışlardır. Birim kayma deformasyonun, γ_c=±%3 değerinde meydana gelen göçmeye neden olan çevrim sayısının aşırı konsolidasyon oranına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Aynı tekrarlı gerilme oranında normal konsolide killerde, aşırı konsolide killere göre daha büyük çevrim sayısında göçme meydana gelmiştir.

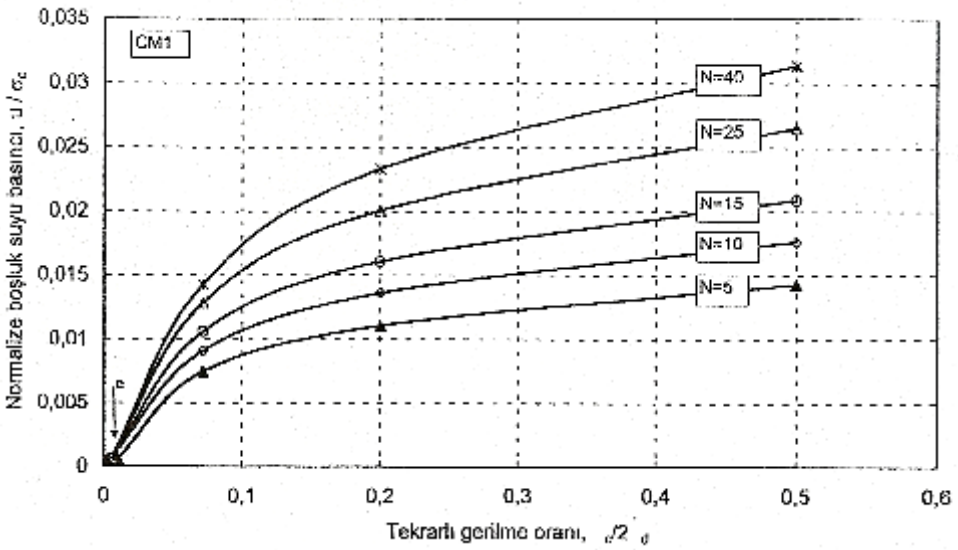
Okur ve Ansal (2002), dinamik üç eksenli deney sistemini kullanarak ince daneli zeminlerin boşluk suyu basıncı davranışını inceleyerek bu davranışı tekrarlı gerilme oranı cinsinden modellemişlerdir. Şekil 2.23'de çevrim sayısına bağlı olarak normalize boşluk suyu basıncı, u_N, tekrarlı gerilme oranı, σ_{TGO}, ilişkisini gösteren eğrilerin denklemi şu şekilde ifade edilmiştir:

$$u_N = a + b\ln(\sigma_{TGO}) \quad \textbf{(2.17)}$$

a ve b katsayıları çevrim sayısına bağlı sabitler olup şu bağıntılarla belirlenmiştir:

$$a_{f(N)} = 0.009N^{0.38} \quad \textbf{(2.18)}$$

$$b_{f(N)} = 0.0019N^{0.42} \quad \textbf{(2.19)}$$

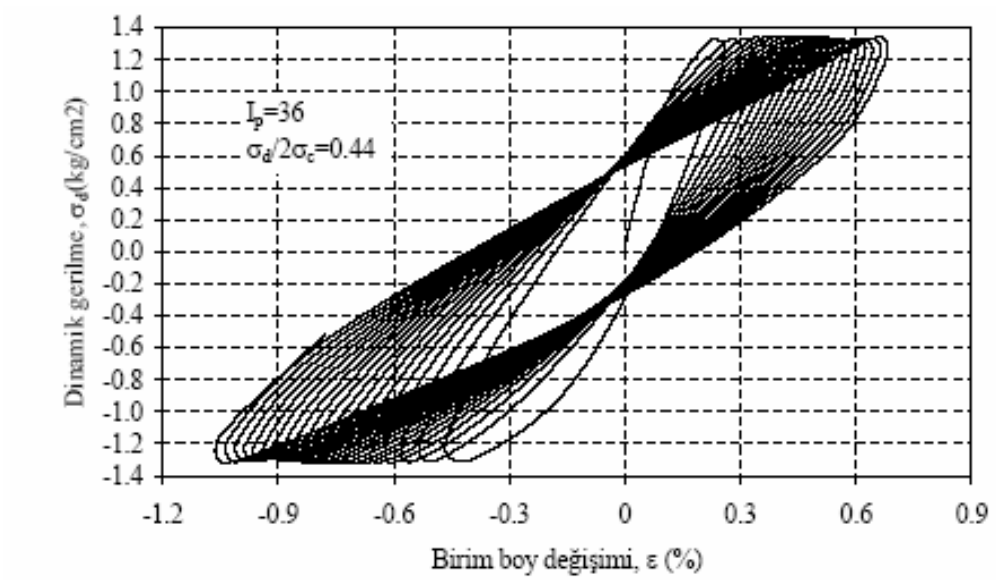


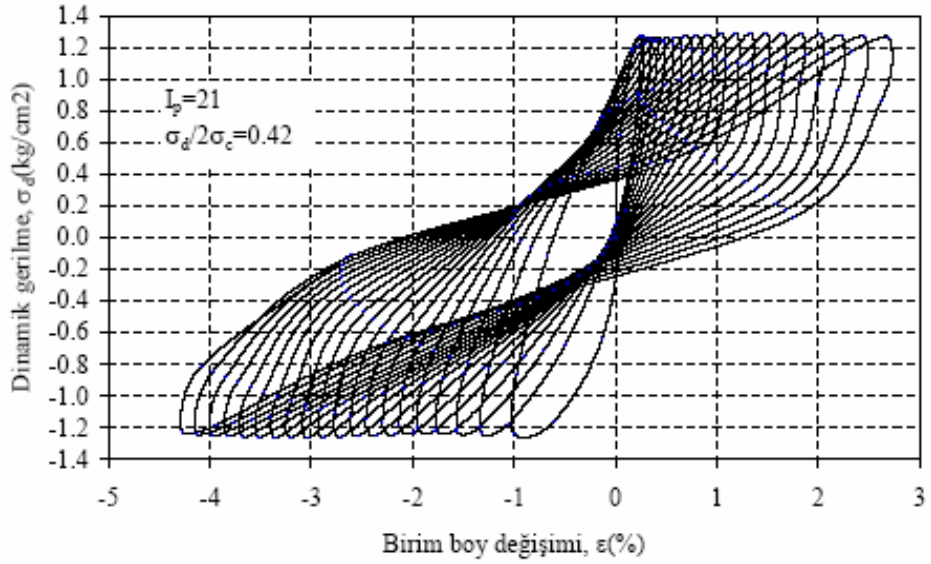
Şekil 2.23: Tekrarlı gerilme oranı normalize boşluk suyu basıncı ilişkisi (Okur ve Ansal, 2002).

Özay ve Erken (2003), killi zeminlerin plastisitesinin dinamik mukavemet üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla dinamik üç eksenli basınç aletiyle deneyler yapmışlardır. Düşey birim boy değişimi genliği, ε_{da}=%5 değeri için dinamik kayma gerilmesi oranı, DKGO ve çevrim sayısı, N değimleri oluşturulmuştur. Yüksek plastisiteli numunelerin tekrarlı yük altında rijitlik ve dinamik kayma modülü kayıplarının daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Yaklaşık aynı dinamik kayma gerilmesi oranına, $\sigma_d/2\sigma_c$=0.4 sahip numunelerden plastisitesi yüksek olan numunede birim boy değişimleri sınırlı kalmasına rağmen plastisitesi düşük olan numune N=20 çevrim sonunda ε_{da}=%7 birim boy değişim genliğine ulaşmıştır (Şekil 2.24). Şekil 2.25'de görüldüğü gibi aynı basınçta konsolide edilen numunelerden plastisitesi yüksek olanlar daha yüksek dinamik kayma gerilmesi oranına sahiptir. Ayrıca kıvamın da dinamik kayma gerilmesi

üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Yumuşak kıvamlı numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranının daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

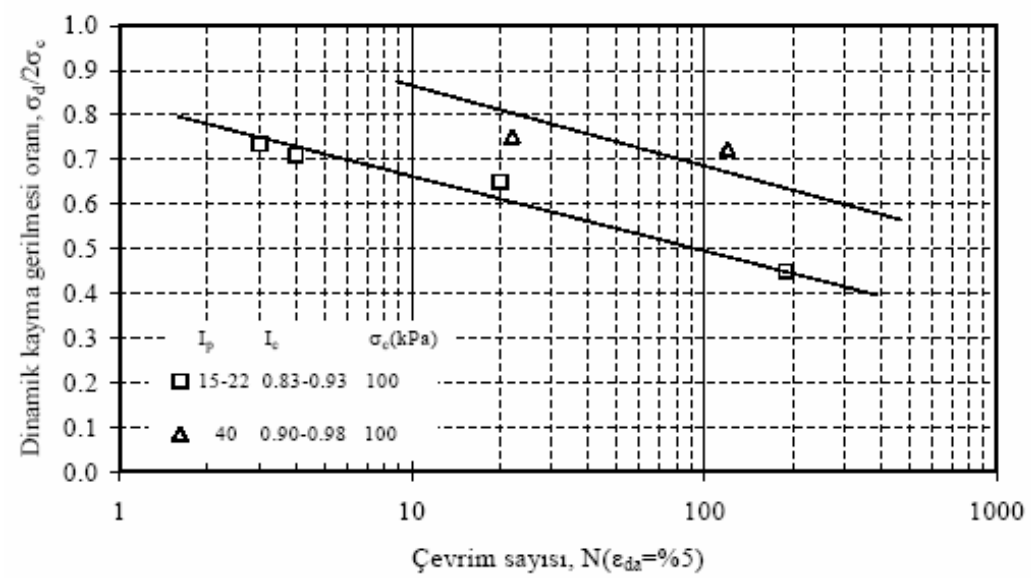




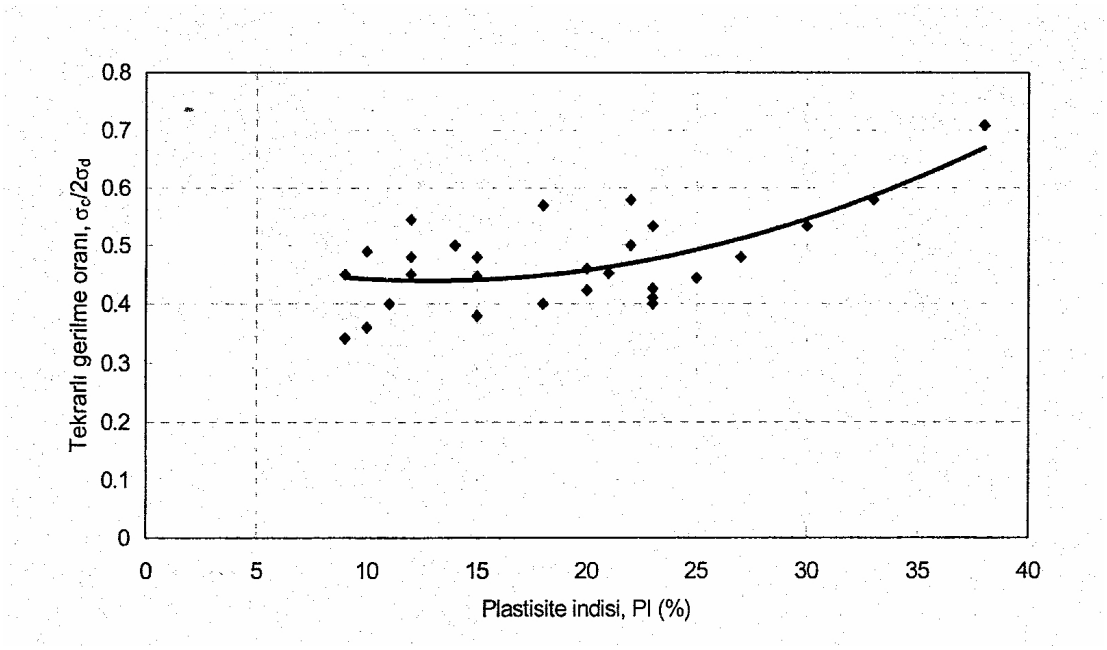
Şekil 2.24: Plastisitenin birim boy değişimi dinamik gerilme ilişkisine etkisi (Özay ve Erken, 2003).

Okur ve Ansal (2004), farklı boşluk oranı ve plastisitelere sahip örselenmemiş numuneler üzerinde gerilme genliği oranı, boşluk oranı, plastisite indisi ve tekrarlı gerilme oranı etkisini araştırmışlardır. Dinamik üç eksenli deney sistemiyle yapılan deneylerde ±%2.5 deformasyon genliği göçme sınırı olarak kabul edilmiş, 100 çevrim sonunda numune bu değere ulaşmamış ise deney durdurularak bir üst gerilme genliğinde deneye devam etmek üzere çevre basıncı arttırılarak numune

konsolidasyona bırakılmıştır. Şekil 2.26'da görüldüğü plastisite indisi arttıkça tekrarlı gerilme oranının da arttığı belirlenmiştir.

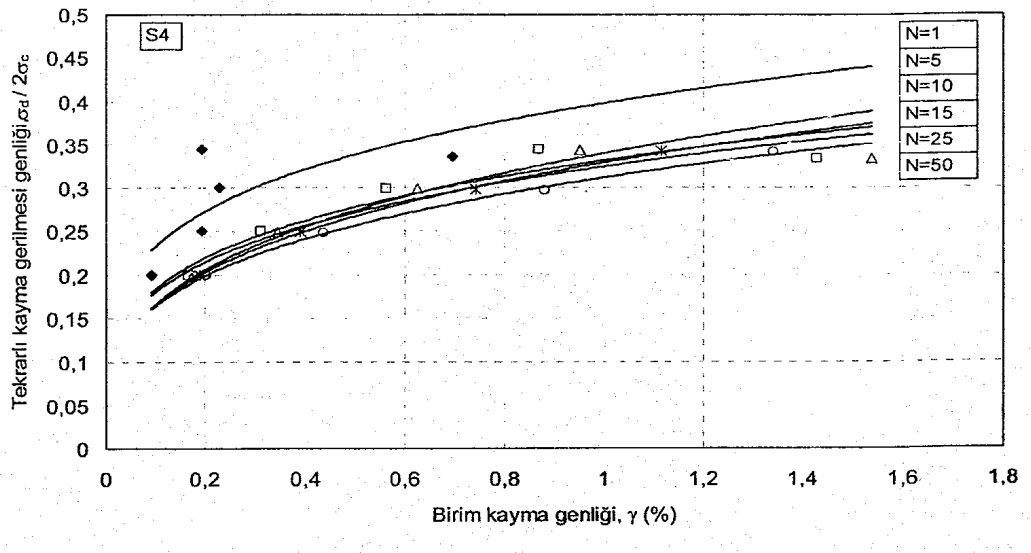


Şekil 2.25: Birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısıyla değişimi (Özay ve Erken, 2003).



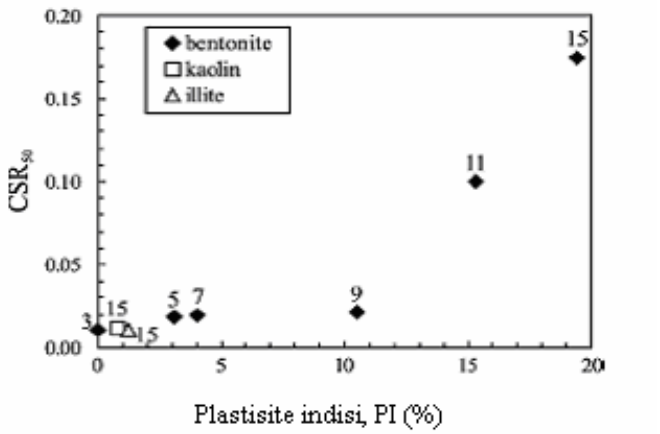
Şekil 2.26: Plastisite indisi tekrarlı gerilme oranı ilişkisi (Okur ve Ansal, 2004).

Birim kayma genliği ve normalize boşluk suyu basıncının tekrarlı gerilme oranıyla olan değişimi benzerlik göstermektedir. Şekil 2.27'de çevrim sayıları artışına bağlı olarak birim kayma gerilmelerindeki artış görülmektedir.

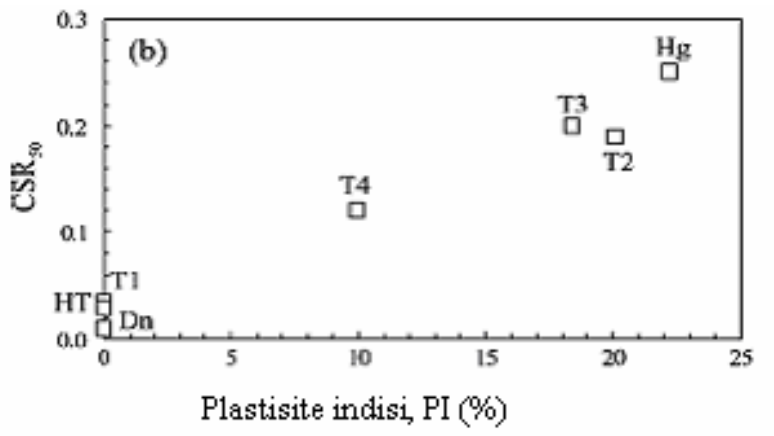


Şekil 2.27: Dinamik gerilme oranının birim kayma gerilmesi ve normalize boşluk suyu basıncı ile değişimi (Okur ve Ansal, 2004).

Gratchev ve diğ. (2006), killi zeminlerin sıvılaşma özelliğiyle ilgili olarak yaptıkları çalışmanın sonucunda killerin sıvılaşmasının killerin içeriğine ve minerolojisine bağlı olabileceği sonucuna varmışlardır. Plastisite indisi ve kayma gerilmesi oranı arasındaki ilişkinin yapay karışımlar ve doğal zeminler için çok benzer olması, plastisite indisinin killerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede bir kriter olabileceğini göstermektedir (Şekil 2.28 ve şekil 2.29).

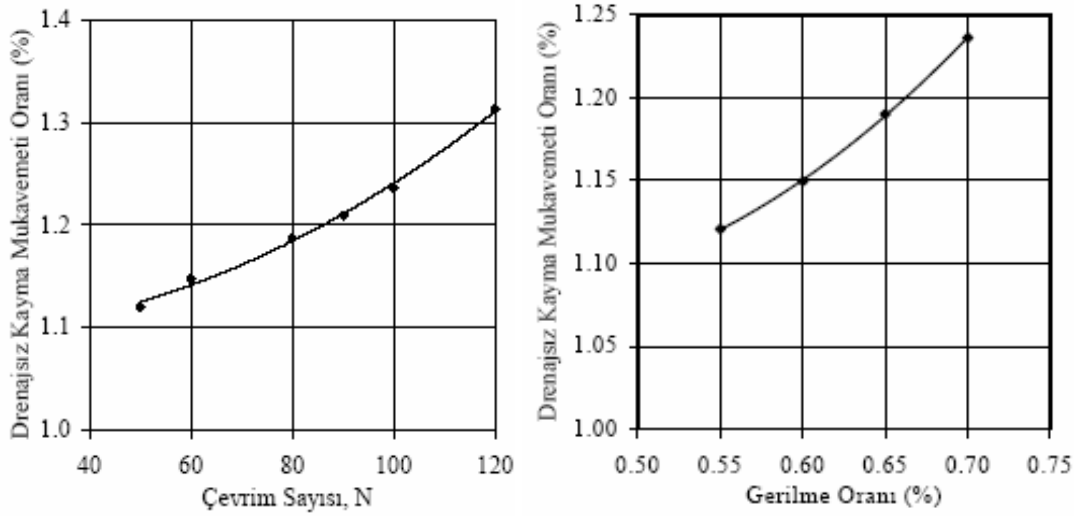


Şekil 2.28: Yapay karışımlar için tekrarlı kayma gerilmesi oranı plastisite indisi ilişkisi (Gratchev ve diğ., 2006).



Şekil 2.29: Doğal zeminler için tekrarlı kayma gerilmesi oranı plastisite indisi ilişkisi (Gratchev ve diğ., 2006).

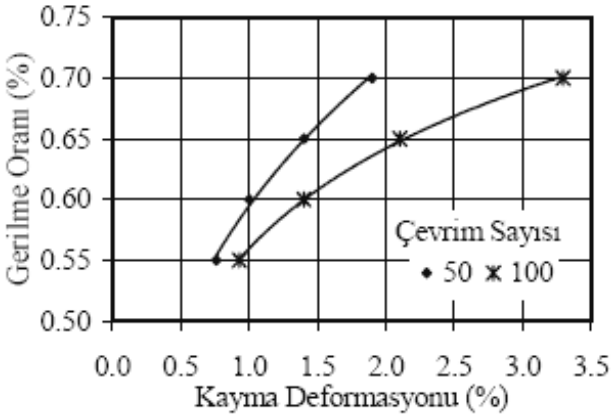
Erşan ve Yıldırım (2006), dinamik basit kesme deney sistemini kullanarak normal konsolide killerin kayma mukavemetlerini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Deney numunelerine 5 kez sabit genlikli sinüzoidal drenajsız tekrarlı yükleme ve her tekrarlı yük sonrası drenaj uygulanmıştır. Tekrarlı yükleme-drenaj çevrimleri sonucunda çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranının artmasıyla drenajsız kayma mukavemetinin de arttığı belirlenmiştir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30: Drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısı ve gerilme oranıyla değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2006).

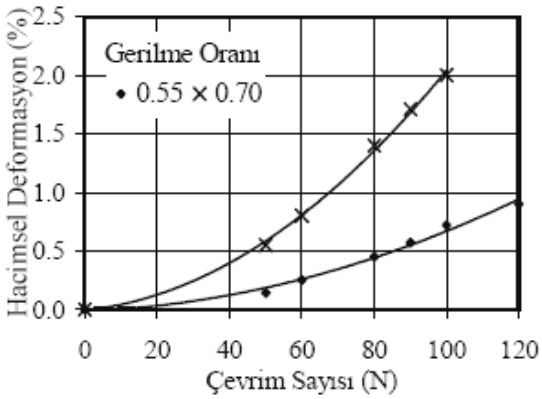
Tekrarlı yükleme drenaj çevrimlerine maruz kalan normal konsolide killerde gözlenen kayma deformasyonu davranışı, boşluk suyu basıncında görülen davranışla benzerlik göstermektedir. Şekil 2.31'de görüldüğü gibi çevrim sayısı ve tekrarlı

gerilme oranı arttıkça, boşluk suyu basıncında olduğu gibi, kayma deformasyonu da artış göstermektedir.



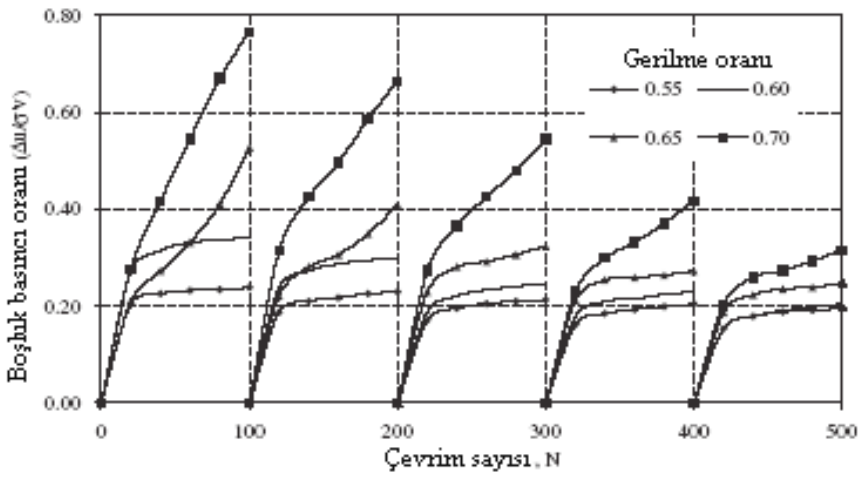
Şekil 2.31: Kayma deformasyonlarının gerilme oranı ve çevrim sayısıyla değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2006).

Tekrarlı yüklerin uygulandığı kısa süre içinde, killerin düşük permeabilitesinden dolayı drenajsız koşullar hakim olmaktadır. Tekrarlı yüklemeden sonraki uzun dönemde ise, zamanla birikmiş artık boşluk suyu basıncı sönümlenir, kil zeminin boşluk oranı azalır ve zeminde dikkate değer oturmalar meydana gelir. Şekil 2.32'de görüldüğü gibi hem çevrim sayısı hem de gerilme oranının artmasıyla oturmalar önemli derecede artmaktadır.



Şekil 2.32: Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2006).

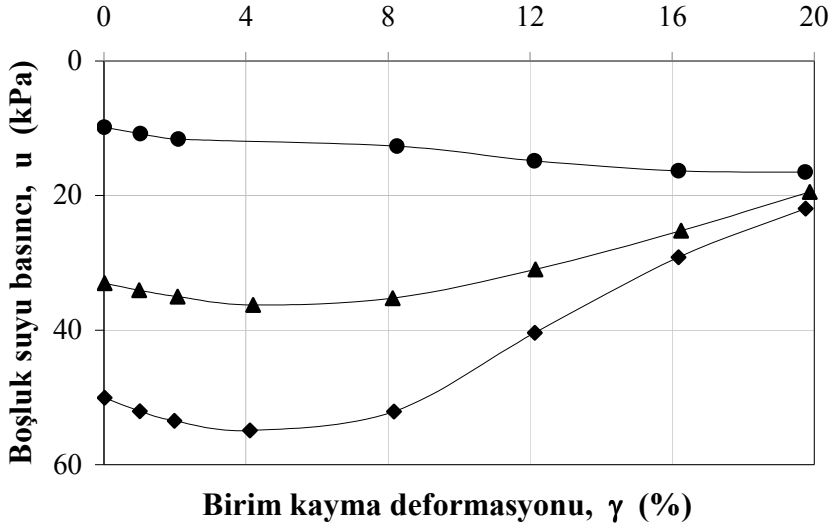
Çevrim sayısı ve gerilme oranı, tekrarlı yüklemelere maruz kalan zeminlerin boşluk suyu basıncına etki eden en önemli faktörlerdir. Şekil 2.33'de görüldüğü gibi çevrim sayısı arttıkça boşluk suyu basıncı da artmaktadır. Bu artış, gerilme oranının daha küçük olduğu durumda daha yavaş gelişmektedir (Erşan ve Yıldırım, 2007).



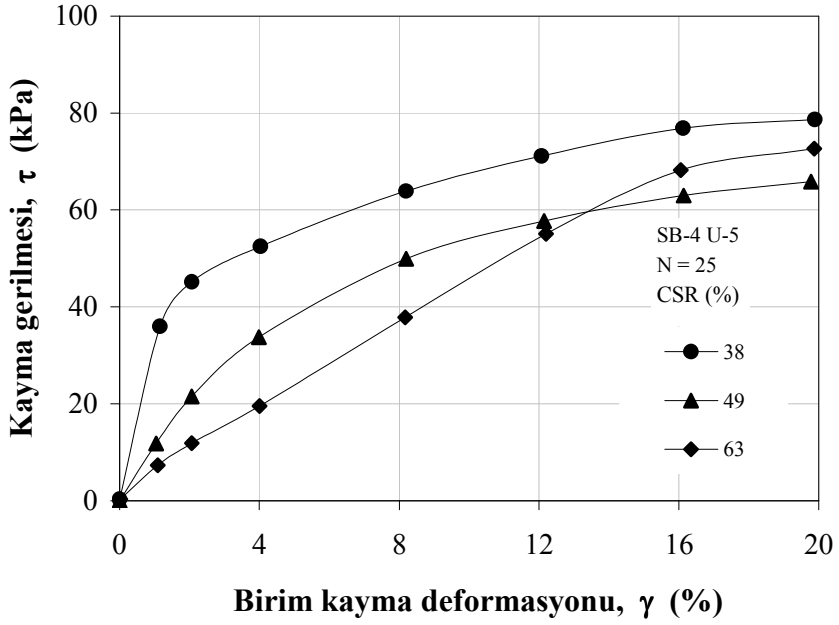
Şekil 2.33: Farklı gerilme oranlarında boşluk suyu basıncının değişimi (Erşan ve Yıldırım, 2007).

Yıldırım (1987), yaptığı çalışmada dinamik basit kesme deney sistemini kullanarak İstanbul'un Haliç bölgesinden alınan örselenmemiş tabii kil numunelerin gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Amaçlarına göre beş gruba ayrılan deneylerin son üç grubu mukavemet davranışının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

Üçüncü ve dördüncü grup deneylerde, gerilme genliği ve çevrim sayısının drenajsız dinamik kayma mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla tekrarlı monotonik yükleme modeli uygulanmıştır. Bu yükleme modeli ile depremden hemen sonra zeminlerde oluşan mukavemet kaybı belirlemektedir. Drenajsız dinamik kayma mukavemeti üzerinde tekrarlı gerilme oranının etkisini belirlemek için, farklı tekrarlı gerilme oranlarında, τ_d/τ_f ve çevrim sayısı sabit olan (N=25) ve çevrim sayısının etkisini belirlemek için de farklı çevrim sayılarında (N=8, 25, 60) ve tekrarlı gerilme oranı sabit olan yüklemeler yapılmıştır. Numunenin drenajsız statik mukavemeti ile dinamik mukavemeti arasında ampirik bir ilişki belirlemek amaçlanmıştır. N=25 sabit çevrim sayısında yapılan deneylerde dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça boşluk suyu basıncı da artmaktadır. Şekil 2.34'de görüldüğü gibi boşluk suyu basıncındaki artış tekrarlı gerilme oranı, CSR>0.50 olan deneylerde oldukça belirgin olmaktadır. Dinamik mukavemetin, tekrarlı gerilme oranı arttıkça azaldığı fakat bu azalımın küçük mertebelerde kaldığı belirlenmiştir (Şekil 2.35).



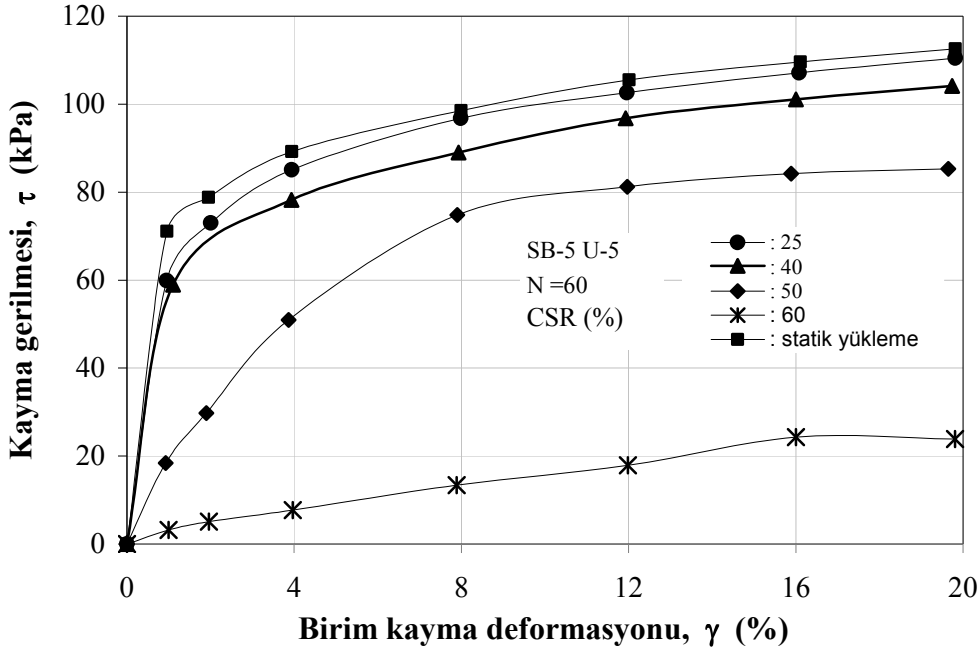
Şekil 2.34: Tekrarlı gerilme oranının boşluk suyu basıncı davranışına etkisi (Yıldırım, 1987).



Şekil 2.35: Tekrarlı gerilme oranının dinamik kayma gerilmesine etkisi (Yıldırım, 1987).

Sabit dinamik gerilme oranlarında yapılan deneylerden çevrim sayısı, N=8 ve 25 olanlarda ve N=60 olup tekrarlı kayma gerilmesi oranı, CSR<0.40 olan deneylerde tekrarlı kayma gerilmesinin dinamik mukavemet üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır (Şekil 2.36). Çevrim sayısı, N=60 ve dinamik kayma gerilmesi oranı,

CSR=0.60 olan deneyde dinamik kayma mukavemetinde oldukça yüksek değerde bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 2.37). Şekilde düşey eksende dinamik yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti, τ_d'nin, tekrarlı yükleme uygulanmadığı durumdaki drenajsız kayma mukavemeti, τ_f'e oranı yer almaktadır.

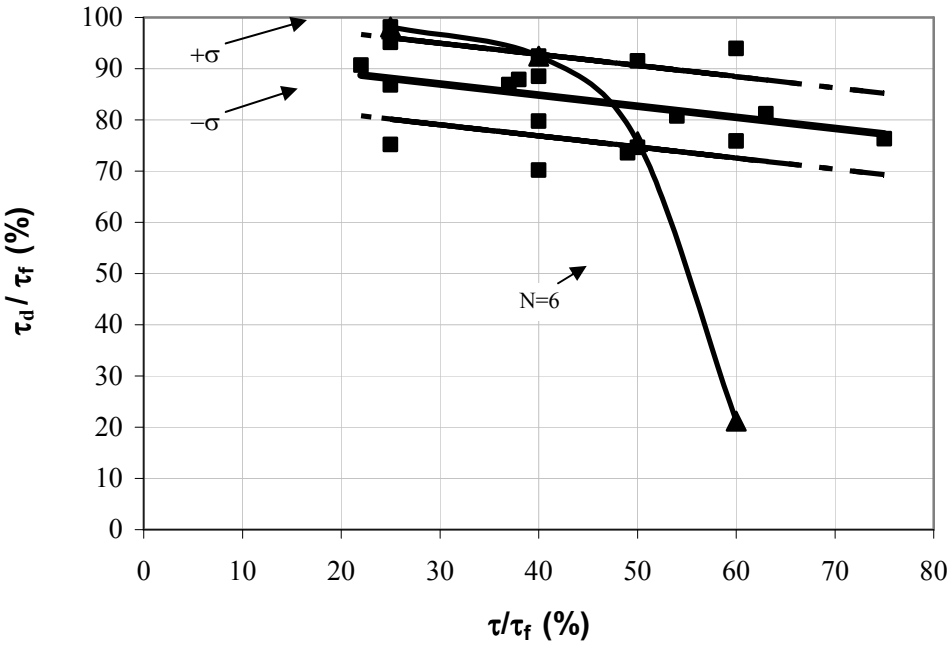


Şekil 2.36: Tekrarlı gerilme oranının dinamik kayma gerilmesine etkisi (Yıldırım, 1987).

Şekil 2.37'de görülen eğri kullanılarak N=60 çevrim sayısında Haliç kili için aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\tau_d / \tau_f = -0.0039(CSR)3+0.40(CSR)2-13.75(CSR)+252.7 \quad \textbf{(2.20)}$$

Beşinci grup deneylerde, numunelere farklı dinamik gerilme oranlarında, eş zamanlı monotonik ve tekrarlı yüklemeler yapılarak bu yükleme modelinin drenajsız statik mukavemet üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu yükleme modeli makine titreşimlerinin etkisine maruz kalan temellerin altındaki veya kazık çakma uygulaması esnasında kazığı çevreleyen zeminin davranışını temsil etmektedir. Bu deneylerin yanı sıra karşılaştırma yapabilmek için numunelere monotonik yükleme de yapılmıştır. Numunelerin statik ve dinamik mukavemetleri arasındaki fark ilk başta %43 oranında olurken %20 birim kayma deformasyonu mertebesinde %25'e kadar düşmektedir (Şekil 2.38). Bu mukavemet kaybını tanımlamak amacıyla yapılan



Şekil 2.37: Tekrarlı gerilme oranının dinamik kayma gerilmesine etkisi (Yıldırım, 1987).

regresyon analizleri sonucunda birim kayma deformasyon değerine bağlı olarak mukavemet kaybı (2.20) bağıntısıyla ifade edilmiştir.

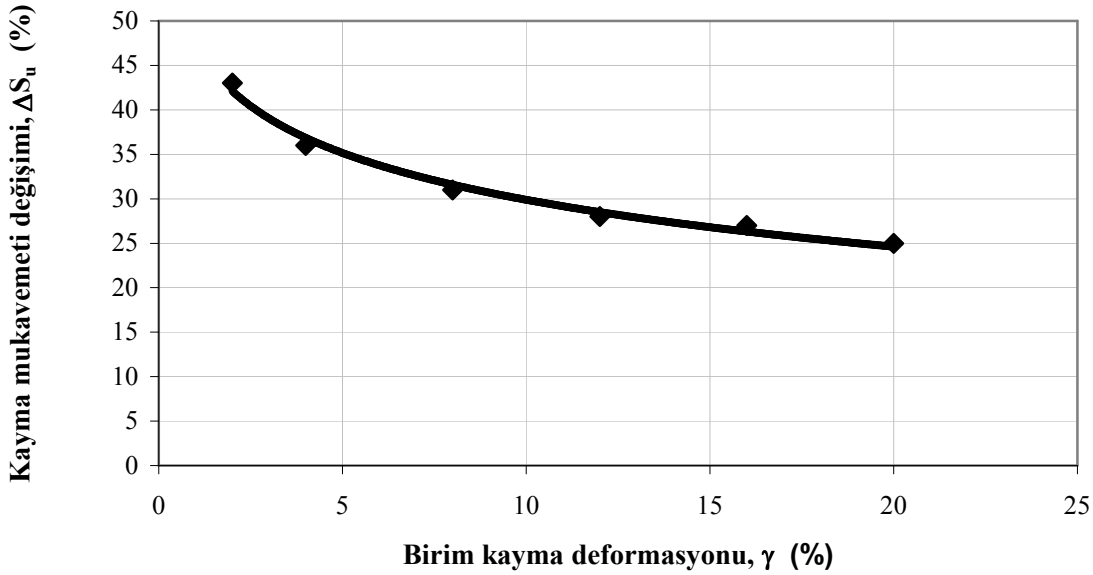
$$\Delta S_u = 47.395 - 7.60 \ln\gamma \qquad \textbf{(2.21)}$$

Ayrıca tekrarlı gerilme oranı, CSR ve eş zamanlı uygulanan statik ve tekrarlı kayma gerilmeleri, τ_{scm} arasındaki ilişkiyi gösteren aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\tau_{scm} / \tau_f = 1.219e\text{-}0.0232CSR \qquad \textbf{(2.22)}$$

2.5 Sonuç

Tekrarlı yükler altında zeminlerin davranışı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde daha çok kum zeminlerin dinamik davranışı üzerinde durulduğu görülmüştür. Killer üzerinde dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme ve rezonant kolon deney sistemlerini kullanarak deney yapan araştırmacılar zeminin dinamik gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özeliklerini farklı yönlerden incelemişlerdir.



Şekil 2.38: Drenajsız statik ve dinamik kayma mukavemetleri arasındaki farkın birim kayma deformasyonu ile değişimi (Yıldırım, 1987).

Zeminin plastisite ve kıvam indisinin, boşluk oranının, gerilme geçmişinin, tekrarlı gerilme oranının dinamik kayma modülü, sönüm ortanı ve drenajsız kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırarak bunlarla ilgili ampirik bağıntılar ortaya koymuşlardır. Ayrıca farklı yükleme modelleri kullanarak arazi gerilme deformasyon durumunu deney sistemlerinde gerçeğe yakın bir şekilde modelleyerek çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bulunan sonuçlar arasında birbirine uyumlu olanlar kadar birbirinden farklı sonuçlar da bulunmaktadır.

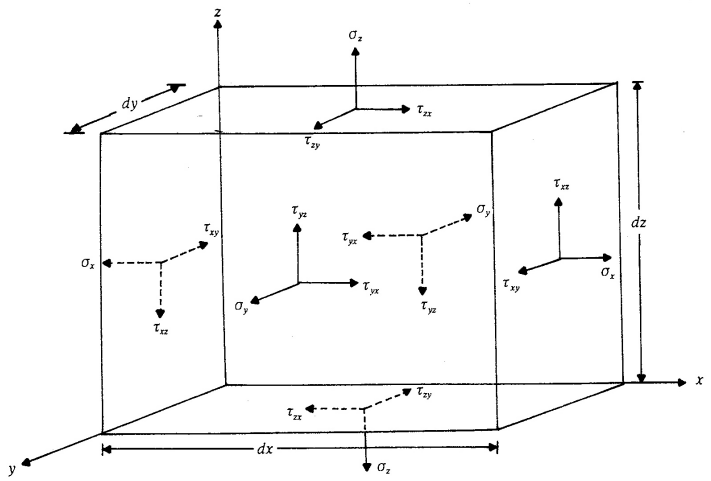
3. KULLANILAN DENEY SİSTEMİ VE ZEMİN NUMUNELERİ

3.1 Giriş

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki gerilme deformasyon ve mukavemet davranışı hakkında bilgi elde etmek ve dinamik zemin parametrelerini belirleyebilmek için dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme ve rezonant kolon deney sistemleri kullanılmaktadır. İlerleyen bölümlerde çok fazla sayıda geoteknik problemin modellenmesini sağlayan dinamik basit kesme deney sistemi ayrıntılı bir şekilde anlatılarak bu sistemle yapılan deneylerde kullanılan numuneler hakkında bilgi verilecektir.

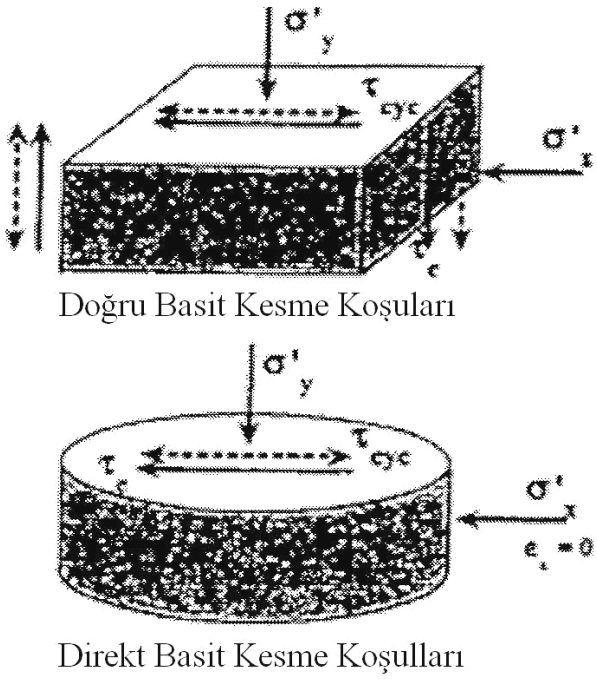
3.2 Basit Kesme Kavramı

Zemin tabakalarının deformasyonu, düzlem deformasyon koşulları altında üst sınırı alt sınırına göre rölatif olarak yer değiştirdiği zaman basit kesme olarak tanımlanır (Potts ve diğerleri, 1987). Şekil 3.1'de bir zemin elemanına etkiyen normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri görülmektedir.



Şekil 3.1: Bir zemin elemanındaki normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri (Das, 1993).

Basit kesme durumunda, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi sadece düşey deformasyon, ε_y ve kayma deformasyonu, γ_{yz} mevcuttur, ε_x, ε_z, γ_{yz} ve γ_{zx} sıfıra eşittir. Sabit hacimli deneylerde düşey deformasyon, ε_y oluşmaz (Biscontin, 2001).



Şekil 3.2: Genel ve basit kesme deformasyon durumları (Biscontin, 2001).

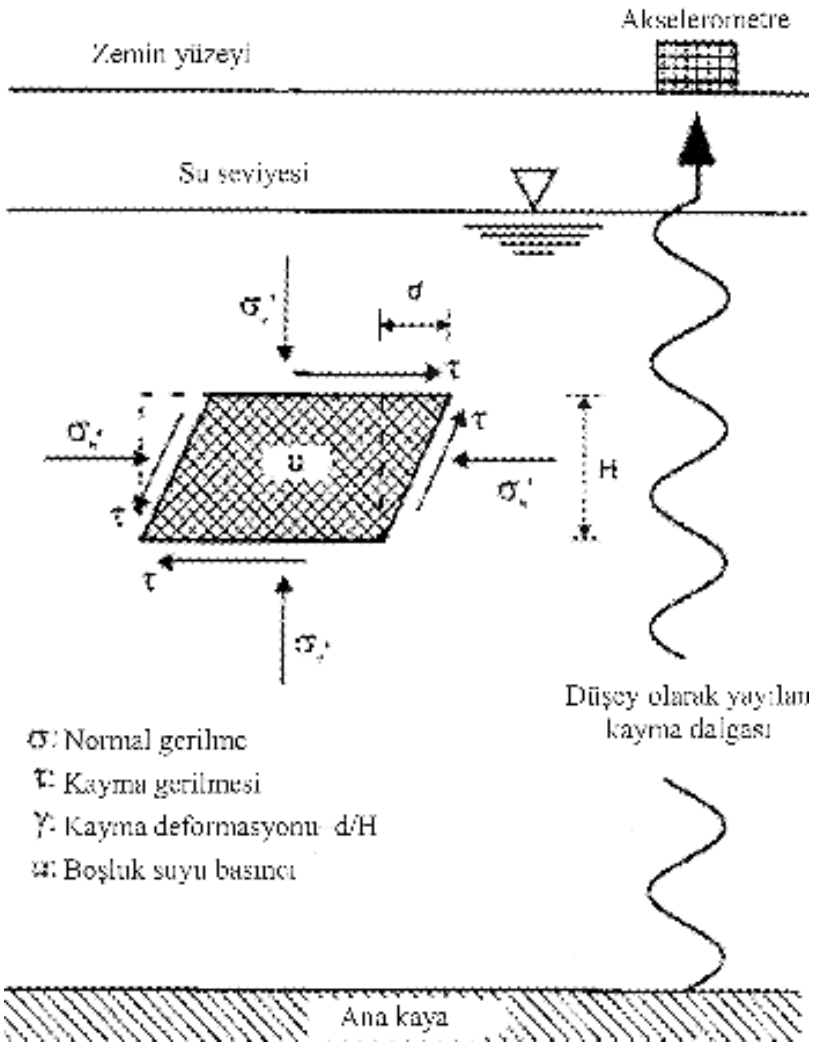
3.3 Dinamik Basit Kesme Deneyinin Avantajları

Dinamik basit kesme deneyi diğer laboratuar deneyleriyle karşılaştırıldığında çeşitli avantajlara sahip olduğu görülmektedir. Bunlardan en önemlisi, deney sırasında zemin numunesi K_0 koşulunda konsolide olduğu için arazi koşullarının gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmesidir.

Ayrıca dinamik basit kesme deneyinde kayma deformasyonları oldukça geniş bir aralıkta değer almaktadır. Rezonant kolon deneyinde kayma deformasyonlarının büyüklüğü $\%10^{-3}$ - %1 arasında değişirken, dinamik basit kesme deneyinde bu aralık $\%10^{-2}$ - %5 olmaktadır. Dinamik basit kesme deneyindeki deformasyon aralığı sismik aktiviteler sırasındaki yer hareketlerinde meydana gelen deformasyon aralığına karşılık gelir (Das, 1993).

Şekil 3.3'de deprem sırasında yüzey seviyesindeki zemin elemanındaki idealize edilmiş gerilme-deformasyon koşulları gösteren, dinamik basit kesme deney aletiyle

modellenmiş bir örnek görülmektedir. Dinamik basit kesme deney sistemindeki gerilme-deformasyon koşulları, kayma dalgalarının zemin tabakalarında yayılımı sırasındaki koşullara benzemektedir. (Hsu, 2002).



Şekil 3.3: Deprem sırasında yüzey seviyesindeki zemin elemanında idealize edilmiş gerilme-deformasyon koşulları (Hsu, 2002).

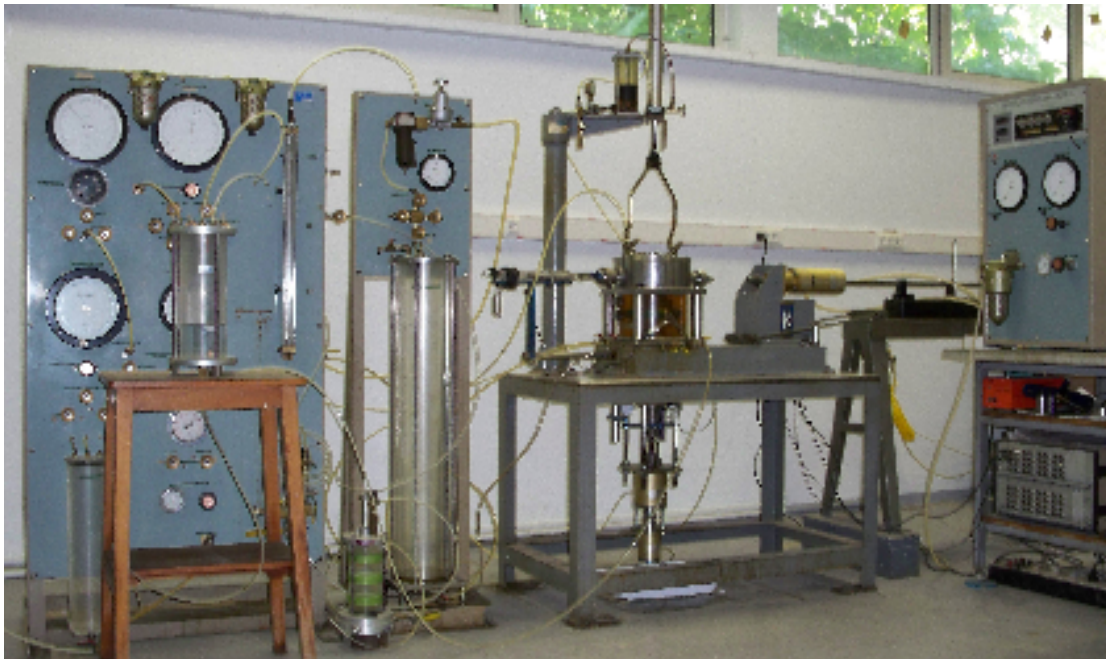
Arazideki gerilme durumları tek bir deney sistemiyle modellenemeyecek kadar karmaşıktır. Buna rağmen dinamik basit kesme deneyiyle çok sayıda geoteknik problemin modellenebilmesi mümkün olmaktadır. Bu problemler şunlardır:

- Dolgu temelindeki zeminin davranışı
- Kumların sıvılaşması
- Trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlı yükler

- Rüzgar ve dalga yüklerine maruz kalan açık deniz yapılarının temellerine etkiyen tekrarlı yükler
- Kazık şaftına yakın zemin elemanındaki kesme
- Katı atıkların mekanik olarak sıkıştırılması sırasındaki davranışı

3.4 Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi

Bu çalışmada Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) ve İsveç Geoteknik Enstitiüsü (SGI) basit kesme deney sisteminin K. Ishihara ve M. Silver tarafından geliştirilmiş ve Japon Seiken Incorporation tarafından üretilmiş bir tipi olan deney sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.4). Sistem hava basıncı ile çalışmakta olup deney hücresi, basınç tablosu, tekrarlı yük uygulama birimi, ölçüm veri toplama ve kayıt birimi olmak üzere çeşitli bölümlerden oluşmaktadır. Bu bölümler aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır.

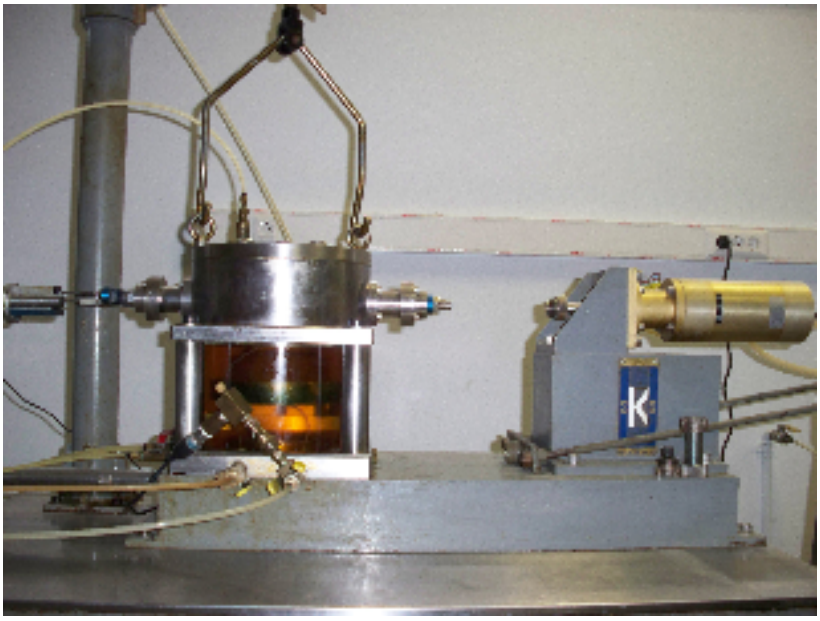


Şekil 3.4 : Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi.

3.4.1 Deney hücresi

Şekil 3.5'de sol tarafta yer alan deney hücresi, 250 mm çapında, 160 mm yüksekliğinde ve 20 mm et kalınlığına sahip sert ve şeffaf pleksiglastan yapılmış bir

silindirdir. Bu silindir sızdırmazlığı sağlayan bir lastik halka ile üzerinde numune alt başlığı bulunan sabit alt kaidenin üzerine oturtulur. Silindir, içerisinde yatay yük ölçer, yatay yükleme ve numune üst başlığının bağlantı mekanizması bulunan ve hidrolik bir sistem aracılığıyla düşey yönde hareket edebilen üst başlık ile kapatılır.



Şekil 3.5: Deney hücresi ve tekrarlı yük uygulama birimi.

Numune, K_0 şartlarında deney yapmayı sağlayacak şekilde yatay düzlemde genişlemeyi engelleyen donatılı bir membran içine veya İsveç Geoteknik Enstitüsü Basit Kesme Deney Sisteminde kullanılan, ortalarında numune çapına eşit delikler bulunan, numune boyunca üst üste numunenin etrafına geçirilen ince sürtünmesiz plakalar içine veya sadece normal esnek bir membran içine konulabilmektedir.

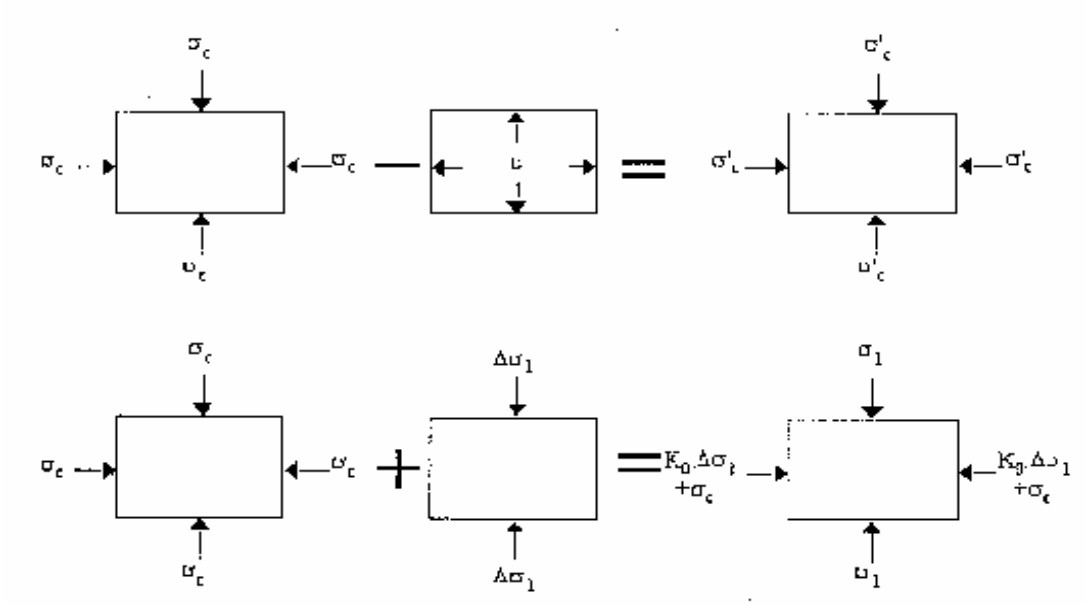
Numune alt ve üst başlığı sadece tek doğrultuda hareket imkanına sahiptir. Alt başlık numunenin yükseltilmesi ve konsolidasyon oturmalarının sağlanması amacıyla düşey doğrultuda, üst başlık ise statik ve dinamik kayma gerilmelerinin uygulanabilmesi için yatay doğrultuda hareket edebilmektedir. Numune alt başlığının altında yer alan şaftta farklı boyutlarda iki adet düşey yük uygulama pistonu bulunmaktadır. Şekil 3.6'da altta yer alan ve diğer pistona göre daha küçük boyutlara sahip olan pistonun görevi, şaftın kendi ağırlığını dengelemek ve numuneyi yükselterek numune üst başlığının, hücre içerisinde bulunan yatay yükleme şaftıyla bağlantısını sağlamaktır. Ayrıca numuneye izotropik çevre gerilmesi uygulanabilmesi için, hücre basıncıyla arasında yer alan bağlantı aracılığıyla numuneye düşey doğrultuda, hücre basıncına

eşit bir basınç aktarmaktadır. Diğer pistonun görevi ise, numuneye farklı yatay ve düşey gerilmeler uygulanması gerektiğinde, öngörülen bu düşey gerilmenin numuneye uygulanabilmesini sağlamaktır. Şekil 3.7'de konsolidasyon aşamasında numune üzerindeki gerilme durumu gösterilmiştir.

Şekil 3.6 : Numuneye düşey gerilme uygulamakla görevli pistonlar.

Numune alt ve üst başlığının içerisinde, deney sırasında başlıklar üzerinde numunenin kaymasını engellemek amacıyla üzerine 1-2 mm yüksekliğinde yedişer adet metal plaka yerleştirilen poröz taşlar bulunmaktadır. Ayrıca başlıklarda yer alan ve numunenin suya doygunluğunun sağlanması amacıyla ters basınç uygulanabilmesine ve aynı zamanda drenaja olanak veren tüp çıkışları hücre dışında yer alan vanalarla kontrol edilebilmektedir. Üst başlığa bağlı olan çıkış üzerinde bir adet vana, alt başlığa bağlı olan çıkış üzerinde iki adet vana ve boşluk suyu basınçlarını ölçebilmek için bir basınç ölçer bulunmaktadır.

Hücre üst başlığının içerisinde yer alan yatay şaft numune üst başlığına sabitlenerek numuneye statik ve tekrarlı kayma gerilmelerinin uygulanmasını sağlamaktadır. Bu gerilmeler hücre üst başlığının içerisinde ve hareketli yatay şaftın üzerinde bulunan



Şekil 3.7 : Dinamik basit kesme deney sisteminde konsolidasyon sırasında numune üzerindeki gerilme durumu (Yıldırım, 1987).

bir yük hücresi ile ölçülmektedir. Yatay yük hücresinin konumu, şaftın hücreye giriş çıkılarında yataklarda oluşan sürtünmenin kayma kuvvetleri okumaları içine dahil edilmesini önlemektedir. Uzantısı hücre dışında bulunan yatay şaftın yatay yükleme pistonuna bağlantısının yapıldığı sırada numuneye ilave yatay yük iletilmesinin önlenmesi amacıyla, numune üst başlığının bağlı bulunduğu yatay şaftın hareketi hücre üst başlığına bağlı bir cıvata yardımı ile engellenmektedir.

Statik veya tekrarlı yükleme sırasında numunede oluşan yatay yer değiştirmeler, hücre dışında, yatay şaftın hücre çıkışına bağlanmış bir deplasman ölçer yardımıyla ölçülmektedir. Numune, üst başlığı vasıtasıyla yatay şafta bağlı olduğu için deney sırasında yatay şaftta oluşan deplasmanlar ile numunede oluşan deplasmanlar aynı olmaktadır. Deney sırasında numunede düşey yönde meydana gelen yer değiştirmeler de düşey şafta bağlanmış olan bir deplasman ölçer yardımıyla ölçülmektedir. Ayrıca düşey şaft üzerinde, numunelerin konsolidasyonu sırasında oluşan boy değişimlerinin 0.01 mm hassasiyette okunabilmesini sağlayan bir deformasyon saati de bulunmaktadır.

3.4.2 Basınç tablosu

Şekil 3.8'de görülen basınç tablosu, deney hücresine, numuneye, yatay ve düşey yük uygulama birimlerine regüle edilmiş hava ve su sağlamaktadır. Basınç tablosu

üzerinde basınç regülatörleri ve basınç saatlerinden oluşan altı adet alt birim bulunmaktadır. Bunlar, tüm deney sisteminin basıncını kontrol eden ana basınç birimi, vakum birimi, deney hücresine hava sağlamakla görevli çevre basıncı birimi, numuneye su sağlamakla görevli ters basınç birimi, düşey yük uygulama birimine basınç sağlayan düşey basınç birimi ve düşey yükleme pistonunun ağırlığını dengelemek ve izotropik yükleme durumunda numuneye hücre basıncına eşit miktarda düşey basınç vermekle görevli dengeleme basıncı birimidir. Ayrıca numuneye su sağlamakla görevli, biri numunenin alt başlığıyla diğeri üst başlığıyla bağlantılı iki adet su tankı ve hücre içerisine doldurulan hint yağı için bir adet yağ tankı bulunmaktadır.

Bu tabloda regülatörler arasında yapılmış olan bağlantılar yardımıyla deney numunesine uygulanacak basınçlar aşamalı ve her seferinde bir tek regülatörden ayarlanabilecek şekildedir. Basınç regülatörleri yüksek hava basıncını kontrol ederek, istenilen basıncın numuneye uygulanabilmesine olanak sağlar. Bunun yanında istenilen regülatörlerin birbirlerine bağlanması suretiyle eşit basınçlar için ortak beslenmeleri sağlanabilir. Bu sistemde, ters basınç regülatörü çevre basıncı regülatörüne, çevre basıncı regülatörü ise düşey dengeleme basıncı regülatörüne bağlanmış durumdadır. Bu sayede numuneye çevre basıncı ile aynı anda düşey dengeleme basıncı ve ters basınç da uygulanmakta ve numunenin basınçların uygulanması sırasında oluşabilecek farklardan etkilenmesi önlenmiş olmaktadır. Ortak çalışmaları halinde, çevre ve düşey dengeleme basıncı regülatörlerinden uygulanan basınçlar arasında, üst başlık bağlantısının yapılabilmesi için önceden, numuneyi yükseltmek amacı ile, düşey dengeleme basıncı regülatöründen uygulanması gereken basınç kadar bir fark vardır. Düşey dengeleme basıncı ise çevre basıncı ve ters basınç regülatörlerinden bağımsız olarak kumanda edilebilir ve bu sayede numuneye istenilen durumlarda farklı düşey ve yanal basınçlar uygulanması mümkün olur. (Yıldırım, 1987).

Sistem için gerekli olan hava basıncı 700-1500 kPa'lık basınç aralığında çalışan bir kompresörden sağlanmaktadır. Numuneye çevre basıncı uygulayabilmek için hücreye 20 litrelik büyük tanktan hint yağı doldurulmaktadır. Hint yağı kullanılmasının nedeni membran ve beloframların bozulmasını ve yataklarda oluşacak paslanmayı önlemektir. Hücrede su kullanılması durumunda, uzun süreli deneylerde ve yüksek çevre basınçları uygulanması durumunda, membranların suyu

geçirebilecekleri de dikkate alınırsa hint yağı kullanılmasının daha uygun olacağı açıktır (Yıldırım, 1987).

Şekil 3.8 : Basınç tablosu.

3.4.3 Tekrarlı yük uygulama birimi

Hava basıncı ile çalışan ve deney numunesine tekrarlı yatay kayma kuvvetleri uygulayan bu birim Şekil 3.5'de deney hücresinin sağında yer almaktadır ve Şekil 3.9'da gösterilen birim ile kontrol edilmektedir. Bu birim yardımı ile sinüzoidal, kare ve iki tip üçgen kesitli olmak üzere dört tip gerilme kontrollü yükleme yapılabilmektedir. Titreşim frekans aralığı, 0,0001 - 9999 çevrim/sn arasında değişmekte ve üzerinde yer alan dinamik basınç ölçerin gösterdiği değerden büyük olmamaktadır. Belirli frekans ve genliklerde deneyler yapılabildiği gibi belirli kayma gerilmeleri altında akma ve değişik hızlarda gerilme kontrollü monotonik kesme deneyleri de yapılabilmektedir.

3.4.4 Ölçüm, veri toplama ve kayıt ünitesi

Statik ve dinamik yüklemelerin yapıldığı deneylerden elde edilen ölçümler Şekil 3.10'da görülen 64 kanallı bir veri toplama ünitesi tarafından toplanmaktadır. Veri

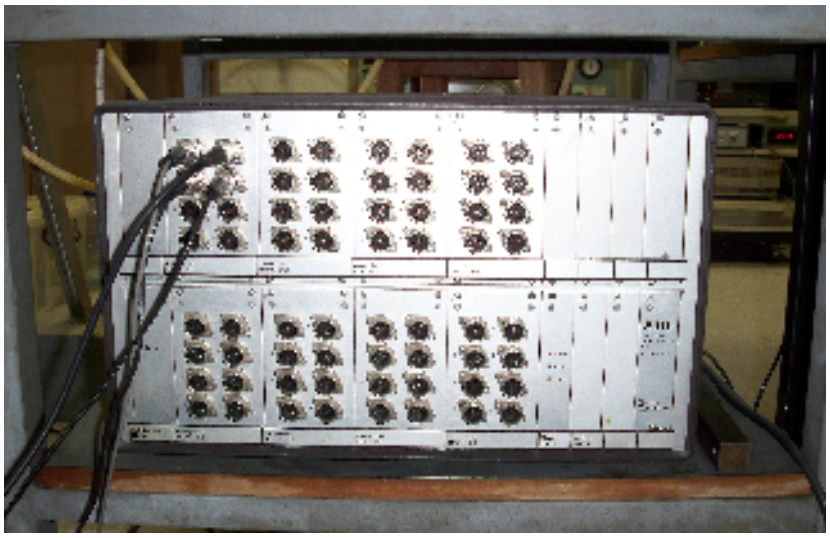
Şekil 3.9: Yatay yük uygulama kontrol birimi.

toplama ünitesi üzerindeki birinci kanal yatay yük, ikinci kanal boşluk suyu basıncı, üçüncü kanal yatay deplasman ve dördüncü kanal düşey deplasman ölçere bağlıdır. Veriler, bu üniteye bağlı olan ve bir program yazılımının yüklü olduğu bir bilgisayar tarafından kaydedilmektedir. Yapılan deneylerde zaman saniye, yatay yük kN, boşluk suyu basıncı kPa, yatay ve düşey yer değiştirmeler mm olarak kaydedilmiştir. Program bir deney için en fazla 10000 satır veri toplayabilmekte ve veri toplama sıklığı kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. Dinamik yüklemeli deneylerde 1 saniyede 5 veri, statik yüklemeli deneylerde 30 saniyede 1 veri alınmıştır.

3.5 Deneylerde Kullanılan Zeminin Özellikleri

Bu çalışmada İzmit bölgesinde yapılan sondajlar sırasında, 80 mm çaplı ve yaklaşık 800 mm yüksekliğe sahip tüplerle alınan örselenmemiş kil numuneler kullanılmıştır.

5 adet tüpten çıkarılan kil numuneler üzerinde dinamik basit kesme deney aletiyle toplam 11 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerde kullanılan numunelere ait bilgiler Tablo 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.10: Veri toplama ünitesi.

3.6 Numune Hazırlanması

Tüplerle alınan numuneler, tabii su muhtevalarında bir değişiklik olmaması amacıyla zemin mekaniği laboratuarında yer alan nem odasında saklanmıştır. Deney yapılacağı zaman, seçilen tüp içerisindeki zemin numunesi, hidrolik bir sistemle çalışan numune çıkarıcı yardımı ile çıkartılmıştır. Tel testere ile uygun boylarda, mümkün olan en fazla sayıda parçaya ayrılmıştır. Bu numuneler ayrı ayrı, önce çok ince plastikten yapılmış film tabakasıyla ardından alüminyum folyoyla sarılmış ve plastik poşetlere konulmuştur. Bu şekilde fazla bekletilmeden nem odasında yer alan desikatörlerin içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlemler sırasında dikkat edilecek en önemli nokta, numuneleri örselememeye özen göstermektir.

Deney numunesinin çapı 70 mm ve yüksekliği 30 mm olarak alınmıştır. Bunu sağlamak için dinamik basit kesme deney aletinin aynı ebatlara sahip olan kendi özel numune hazırlama ringi kullanılmıştır. Ring, numuneye daldırılmadan önce, numune kesme kalıbı kullanılarak numunenin alt kısmı tel testere yardımı ile düzgün bir şekilde kesilmiş ve düzeltilmiştir. Daha sonra numune düzgün bir yüzey üzerine, kesilerek düzeltilmiş olan kısmı alta gelecek şekilde konmuş, bu sırada numunenin

yüksekliğinde deney numunesinin yüksekliği olan 30 mm den biraz fazla olmak üzere kesilmiştir. Daha sonra içerisi hafifçe yağlanmış olan ring, çok yavaş bir şekilde numuneye doğru ittirilerek numunenin örselenmeden ringin içine girmesi sağlanmıştır.

Tablo 3.1: Deneylerde kullanılan zemin numunelerinin özellikleri.

Deney Adı	γ_n (kN/m^3)	γ_s (kN/m^3)	$w_{n(ilk)}$ (%)	$w_{n(son)}$ (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_p (%)	I_c (%)	Zeminin Kıvamı	Zemin Cinsi
1C-1	17.7	27.3	40	38	34	20	14	-0.4	Viskoz sıvı	CL
1C-2	18.0		40	37				-0.4	Viskoz sıvı	
1D-1	17.3	25.3	47	35	54	26	28	0.3	Yarı katı	CH
2C-1	17.3	26.3	47	40	54	27	27	0.3	Yarı katı	CH
2C-2	17.5		46	37				0.3	Yarı katı	
2C-3	17.6		53	41				0.0	Yarı katı	
1B-1	18.5	25.5	37	30	42	26	16	0.3	Yarı katı	CL
3D-1	17.4	26.9	50	32	46	24	22	-0.2	Viskoz sıvı	CL
3D-2	17.1		50	31				-0.2	Viskoz sıvı	
3D-3	17.4		48	32				-0.1	Viskoz sıvı	
3D-4	17.3		51	32				-0.2	Viskoz sıvı	

Numune tam olarak ringe girdikten sonra tel testere ile ringin dışına çıkan fazlalık kısım kesilmek suretiyle hem numunenin boyu 30 mm'ye indirilmiş, hem de numunenin üst yüzeyi düzeltilmiştir. Böylece hazırlanmış olan numune, aynı çapta özel bir piston yardımıyla ittirilerek ringin içerisinden çıkartılmış, su muhtevasının ve birim ağırlığının tayini için tartılmış ve boyu ölçülmüştür. Bundan sonra deneyde kullanılmak üzere deney aletindeki yerine yerleştirilmiştir (Yıldırım, 1987).

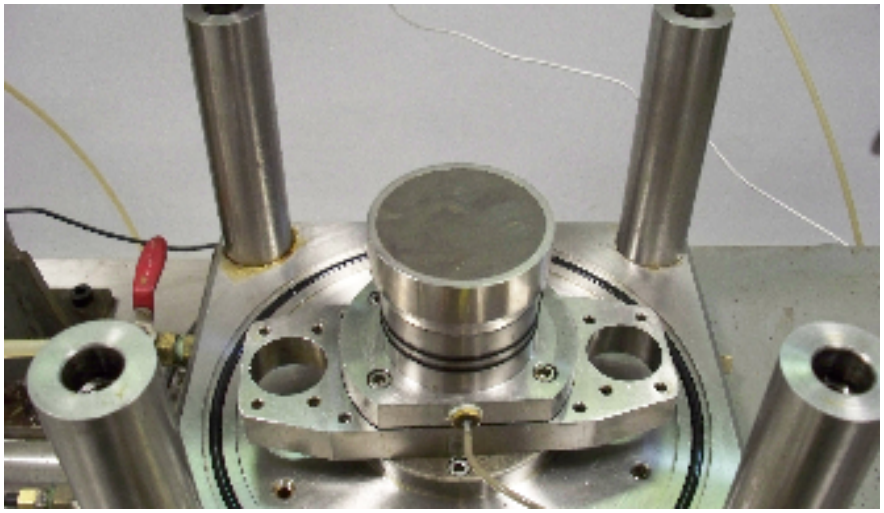
3.7 Deneylerin Yapılışı

Deneyler, numunenin kurulması, suya doyurma, konsolidasyon, tekrarlı yükleme ve statik kesme olmak üzere 5 aşamadan oluşmakta ve bu aşamalar aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

3.7.1 Numunenin kurulması

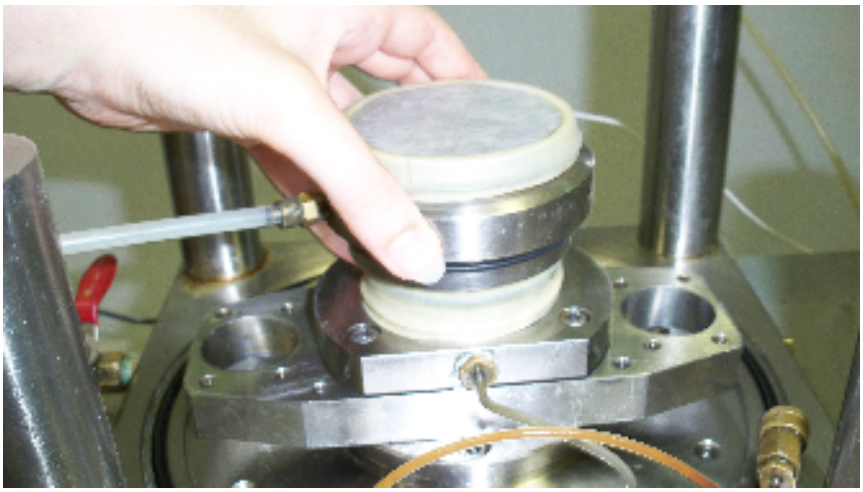
İlk olarak, numuneden daha büyük bir yüksekliğe sahip ve içine vakum uygulanabilen çelik bir silindirin etrafına esnek bir membran geçirilir. Numune alt

başlığının içine yerleştirilmiş olan poroz taş üzerine, önceden numunenin çapında kesilerek hazırlanmış ve ıslatılmış filtre kağıdı konur. 70 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde ringe alınmış numune, üzerine ıslatılmış filtre kağıdı konarak ringden çıkartılarak numune alt başlığının üzerine yerleştirilir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Ring içindeki numunenin alt başlık üzerine yerleştirilmesi.

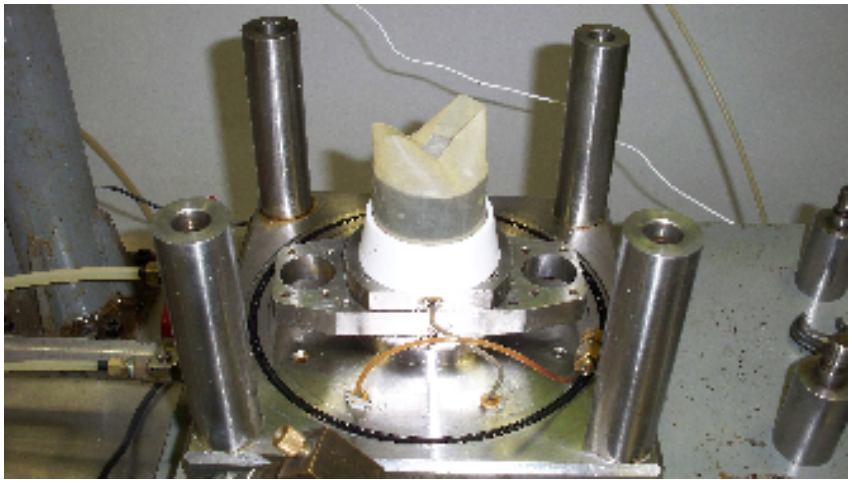
Etrafına membran geçirilmiş çelik silindir numunenin üstünden geçirilerek numuneyi içine alacak şekilde tutulurken, alt kısmındaki membran aşağıya doğru çekilerek numune alt başlığına geçirilir (Şekil 3.12).



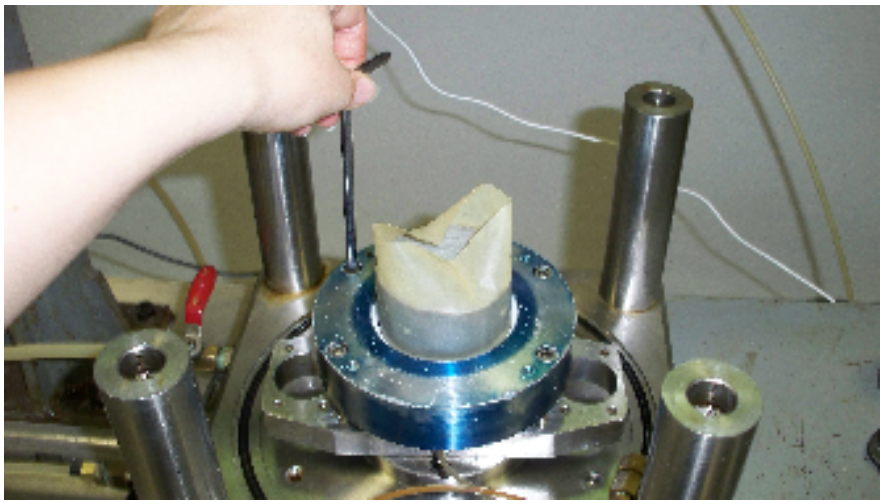
Şekil 3.12: Membranın numune alt başlığına geçirilmesi.

Üst kısımdaki membran parçası serbest bırakılarak çelik silindir, numune ve membranın etrafından çıkarılır. Numunenin alt kısmından membranın sızdırmasını önlemek amacıyla çapı aşağıya doğru genişleyen beyaz renkli yarı esnek bir parça

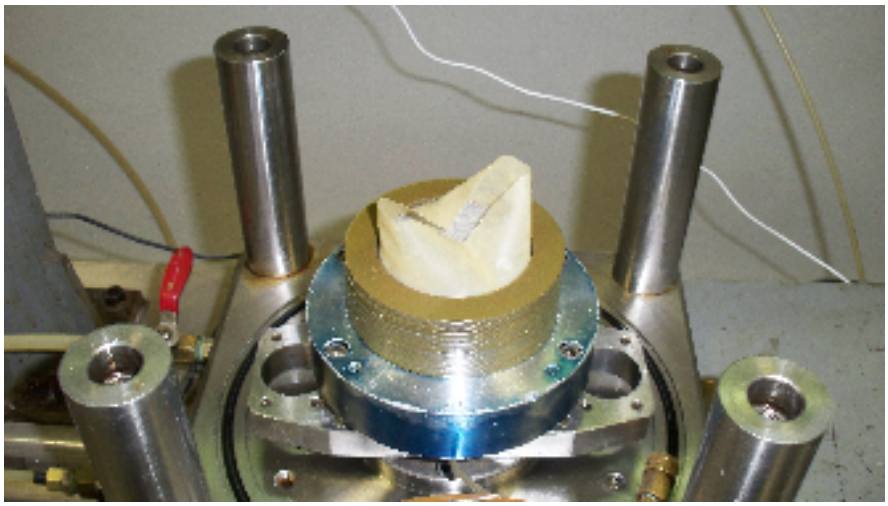
numune üstünden geçirilerek alt kaide üzerine oturtulur (Şekil 3.13). Bu parçanın etrafına da ortasında sızdırmazlığı sağlayan yarı plastik parçanın çapına eşit bir delik bulunan ve belirli bir et kalınlığına sahip, hafif ve paslanmaz bir metalden yapılmış olan mavi renkli ikinci bir parça geçirilir. Bu parça üzerinde bulunan dört uzun vida sıkıştırılarak numunenin alt kaidesinin oturduğu parçaya bağlanır (Şekil 3.14). Vidalar sıkıştırıldıkça yarı plastik parça da sıkışarak sızmayı önleyecek şekilde membranı çepeçevre kuşatır. Daha sonra, ortalarında numune çapına eşit delikler bulunan, ince, rijit ve kaygan plaklar numunenin etrafından geçirilerek metal parçanın üzerine oturtulur (Şekil 3.15). Bu plakların görevi yüklemeler sırasında numunede oluşabilecek yanal şekil değiştirmeleri önleyerek arazideki K_0 şartlarını sağlamaktır.



Şekil 3.13: Beyaz renkli yarı esnek parçanın numune alt başlığı üzerine yerleştirilmesi.

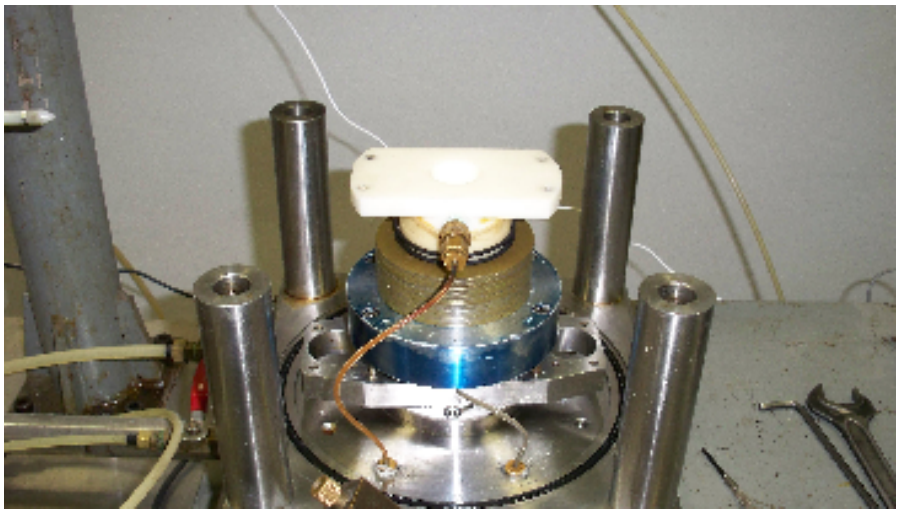


Şekil 3.14: Mavi metal parçanın alt kaideye bağlanması.



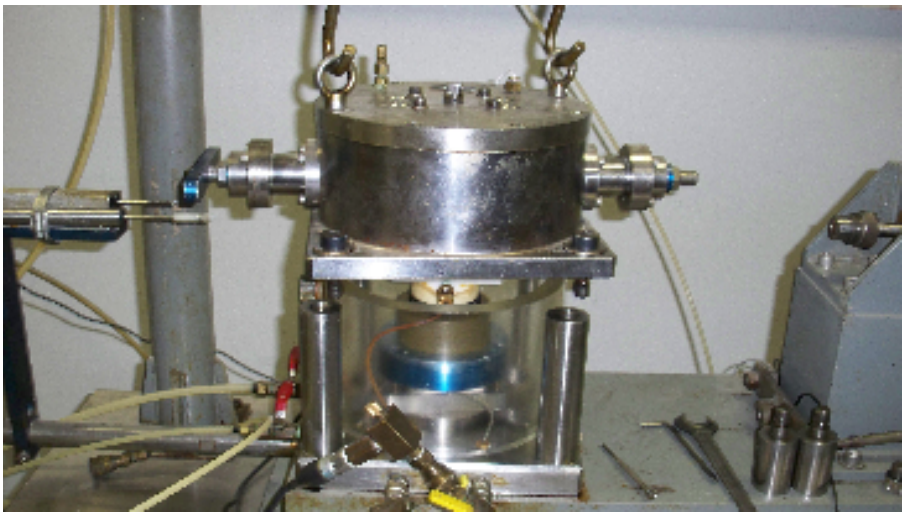
Şekil 3.15: Teflon ringlerin numune çevresine yerleştirilmesi.

Etrafına iki adet lastik o-ring geçirilmiş numune üst başlığı özel bir düzenek yardımıyla numunenin üzerine yerleştirilir. Membran başlık üzerine o-ringler de membranın üzerine geçirilir (Şekil 3.16). O-ringler takıldıktan sonra membran yukarıya doğru iyice çekilerek gerdirilmesine ve içerisinde hava kalmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.16: Numune üst başlığının numune üzerine yerleştirilmesi.

Daha sonra şeffaf pleksiglastan yapılmış silindir, tüm bu düzenek içinde kalacak şekilde alt kaidenin üzerine yerleştirilir. Hücre üst başlığı da bu silindirin üzerine yerleştirilir ve köşelerinde bulunan dört adet cıvata ile alt tablaya bağlanır (Şekil 3.17). Numune üst başlığının yatay yük uygulama şaftına bağlantısının yapılması amacıyla numuneyi yükseltmek üzere dengeleme basıncı verilir. Bu bağlantının yapılabilmesi için numunenin ne kadar yükseltilmesi gerektiği daha önceden



Şekil 3.17: Hücre üst başlığının şeffaf silindir üzerine yerleştirilmesi.

belirlenmiş olup düşey yer değiştirme belirlenen bu değere geldiğinde dengeleme basıncı sabitlenir. Hücre üst başlığında bulunan dört adet delikten ulaşılan vidalar yardımı ile numune üst başlığı yatay şaftla bağlantısı tamamlanır. Daha sonra hücre yağ giriş vanaları açılır, yağ tankına yaklaşık 300 kPa değerinde basınç verilerek numune üstüne kadar hücre hint yağı ile doldurulur ve vanalar tekrar kapatılır. Son olarak hücrenin üst başlığında yer alan dört adet delik cıvatalar ile kapatılır.

3.7.2 Suya doyurma aşaması

Numunenin suya doygun hale getirilmesi için tüm deneylerde 20 kPa değerinde çevre basıncı uygulanmıştır. Bu basıncın küçük seçilmesinin amacı ters basınca yakın olması ve dolayısı ile numunenin suya doygunluğunun daha kolay sağlanmasıdır. Çevre basıncıyla dengeleme basıncı arasındaki bağlantı nedeniyle dengeleme basıncı da ilk değerine göre 20 kPa artmıştır. Numuneye çevre basıncı verildikten sonra ters basınç (u) kademeli olarak 300 kPa değerine yükseltilir. Ters basınç regülatörü düşey basınç hariç diğer basınçları kontrol ettiğinden çevre basıncı (σ_c) 320 kPa değerine yükselmiş, dengeleme basıncı ise ilk değerine göre 300 kPa daha artmıştır. Bu aşamada ters basıncın çevre basıncıyla 20 kPa, dengeleme basıncıyla 320 kPa kadar bir farkı bulunmaktadır. Bu durumda efektif konsolidasyon basıncı $\sigma'_c = \sigma_c - u = 20$ kPa değerindedir.

Numunenin suya doygun olup olmadığının belirlenmesi için ters basınç vanaları kapalı iken çevre basıncı bir miktar (örneğin $\Delta\sigma_c = 50$ kPa) arttırılır. Bu işlem ters

basınç regülatörü ile yapılır, çünkü aralarındaki bağlantı nedeniyle çevre basıncı da aynı miktarda artacak ve vanalar kapalı olduğu için bu artım numuneye ters basınç olarak iletilmeyecektir. Çevre basıncındaki bu artış boşluk suyu basınçlarına yansır. Numune tamamen suya doygunsa bir süre sonra boşluk suyu basıncı da aynı değerde artacaktır. $B = \Delta u / \Delta\sigma > 0.95$ ise numunelerin suya doygun olduğu kabul edilir. Ters basınç vanaları açılarak ters basıncın numuneye iletilmesi ve aynı zamanda doygunluk kontrolünün yapıldığı sırada oluşmuş olan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi sağlanır.

3.7.3 Konsolidasyon

Daha önceden belirlenmiş olan konsolidasyon basıncı düşey yük uygulama regülatörü ile numuneye kademeli olarak verilir ve her kademedeki düşey yer değiştirme okumaları kaydedilir. Son basınç kademesinde numunenin konsolidasyonunu tamamlayıp tamamlamadığını anlayabilmek için drenajlar kapatılarak boşluk suyu basıncındaki değişimler gözlenir. Drenajlar kapatıldığında boşluk suyu basıncında herhangi bir değişimin olmaması konsolidasyonun tamamlandığını gösterir.

3.7.4 Tekrarlı yükleme

Suya doygun kil numunelere tekrarlı kayma kuvveti uygulayabilmek için Şekil 3.6'da görülen yatay yük uygulama kontrol birimi yardımı ile statik yük arttırılarak yatay yükleme birimi kolunun ileriye doğru itilmesi sağlanır ve deney hücresiyle bağlantısı yapılır. Daha sonra, deney sırasında uygulanacak çevrim sayısı, frekans, genlik ve yükleme şekli ile ilgili ayarlar yapılır. Bu işlem sırasında numunenin yatay yük alıp bozulmasına engel olmak için üst başlığın bağlı olduğu yatay yükleme şaftı hücre üst başlığına sabitleştirilmiş durumdadır. Şayet numune üzerinde ilave yük varsa bu yük sıfırlandıktan sonra üst başlık tespit vidası açılarak yatay yükleme şaftı serbest bırakılır. Bu sırada son konsolidasyon okuması alınarak kaydedilir. Veri toplama sistemi açılır ve bilgisayar programı deneye hazır hale getirilir.

Drenajlar kapatılır, verileri kaydetmek için bilgisayardaki program ayarlanarak çalıştırılır ve dinamik yük uygulama biriminde bulunan yükleme düğmesine basılarak deney başlatılır. Dinamik yük uygulaması, birimin sahip olduğu özellikten

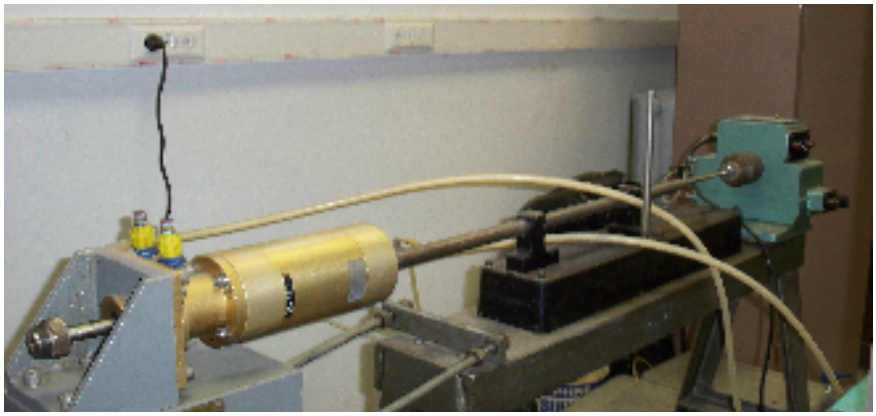
dolayı otomatik olarak önceden belirlenen çevrim sayısı sonunda kendiliğinden kesilir.

Çalışmada her bir numuneye 3 kez dinamik yükleme uygulanmıştır. İlk dinamik yükleme tamamlandıktan sonra hemen veri toplama bilgisayar programı durdurulur ve elde edilen veriler kaydedilir. Deney sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesine izin vermek için drenajlar açılır. Tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ve konsolidasyon oturmalarının tamamlanması için beklenir. Birinci kademe dinamik yüklem sonunda meydana gelen konsolidasyon oturması miktarı kaydedildikten sonra drenajlar kapatılarak ikinci kademe dinamik yükleme yapılır. Bu şekilde yükleme ve drenaj süreçleri 3 kez tekrarlanmış fakat 3. dinamik yüklemeden sonra drenaja izin verilmemiştir. Yalnızca 3D-4 deneyinde son kademeden sonra oluşan artık boşluk suyu drene edilmiştir.

3.7.5 Statik kesme

Dinamik yükleme aşaması tamamlandıktan sonra dinamik yükleme birimiyle numune arasındaki bağlantı açılır ve yatay yük uygulama kontrol birimi yardımı ile statik yük düşürülür. Şekil 3.18'de görülen statik yük uygulama birimi yatay yük uygulama şaftına bağlanır ve deney hızı %20 deformasyonu yaklaşık 2.5 saatte meydana getirecek şekilde ayarlanarak deformasyon kontrollü statik deney yapılır.

Statik kesme 3 kademe dinamik yükten hemen sonra boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesine izin vermeden, drenajsız olarak yapılmıştır. Bu deney sırasında oluşan yatay yük, boşluk suyu basıncı yatay ve düşey yer değiştirme verileri de veri toplama sistemine bağlı bilgisayar programıyla kaydedilmiştir.



Şekil 3.18: Statik yük uygulama birimi.

Deney bittikten sonra statik yük uygulama kolu, yatay şafttan ayrılır. Hücre çıkış vanaları açılarak hint yağı yağ tankına boşaltılır. Bu sırada numunenin su almaması için ters basınç vanalarının kapalı tutulmasına dikkat edilmelidir. Yağ boşaltıldıktan sonra basınçlar sırayla düşürülür. Deney düzeneği sökülüp numune çıkartılır, hemen tartılarak su muhtevasının belirlenmesi için etüve konur.

3.8 Sonuç

Bu çalışmada deneyler dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak uygulanmıştır. Sistem hava basıncı ile çalışmakta olup deney hücresi, basınç tablosu, tekrarlı yük uygulama birimi, ölçüm veri toplama ve kayıt birimi olmak üzere çeşitli bölümlerden oluşmaktadır.

Deneyler aşaması, numunenin kurulmasıyla başlamaktadır. Önceki bölümde ayrıntılı bir şekilde anlatılan numune kurma işlemi tamamlandıktan sonra numuneye gerekli basınçlar verilerek suya doygun hale getirilir ve ardından konsolidasyon basıncı verilerek oturmaların tamamlanması beklenir. Daha sonra numuneye daha önce belirlenen değerde kayma gerilmeleri uygulanarak oluşan kayma deformasyonu, boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyonlar kaydedilir. Tekrarlı yükleme aşaması sona erdiğinde statik basit kesme deney aleti kullanılarak numunenin drenajsız kayma mukavemeti belirlenir.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Giriş

Bu çalışmada dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak örselenmemiş tabii kil numunelerle çevrim sayıları ve tekrarlı yükleme frekansı sabit tutularak farklı dinamik gerilme oranlarında deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmada örselenmemiş tabii kil numuneler kullanıldığı için her birinin konsolidasyon basıncı, birim hacim ağırlıkları, plastisite ve kıvam indisleri birbirinden farklıdır. Deneylerde aynı çevrim sayısı ve gerilme genliğinde üç kez tekrarlı yükleme ve her tekrarlı yükleme arasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi amacıyla değişen sürelerde drenaj uygulanmıştır. Son kademede ise boşluk suyu basınçları sönümlenmeden statik yükleme yapılarak kesilmiştir. Her deneyde zaman, yatay yük, boşluk suyu basıncı, yatay ve düşey deformasyon değerleri kaydedilerek tabii kil zeminlerde tekrarlı yüklemelerin zeminin dinamik davranış özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

4.2 Tekrarlı Yüklemelerin Zeminin Dinamik Davranışına Etkisi

Yapıların üzerine oturduğu temel altı malzemesi ve aynı zamanda başlı başına bir yapı malzemesi olarak da kullanılan zeminler; deprem yükleri, açık deniz dalgaları, yüksek binalara etkiyen rüzgar yükleri, makine temel titreşimleri, trafik yükleri gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalırlar. Zeminlerin ve üzerindeki yapıların bu yükler altındaki davranışı zeminin dinamik gerilme-deformasyon ve mukavemet özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, zemine uygulanan çeşitli tekrarlı yüklemeler altında davranış özelliklerinin önceden bilinmesi, üst yapıda meydana gelebilecek hasarların azaltılabilmesi ve ortadan kaldırılabilmesi açısından çok büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada tekrarlı yüklemelere maruz kalan tabii kil zeminlerin drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişim, bir kademedeki tekrarlı yüklemeler sonunda uygulanan

drenajın daha sonraki kademede meydana gelen davranışa etkileri ve oluşan konsolidasyon oturmaları incelenmiştir.

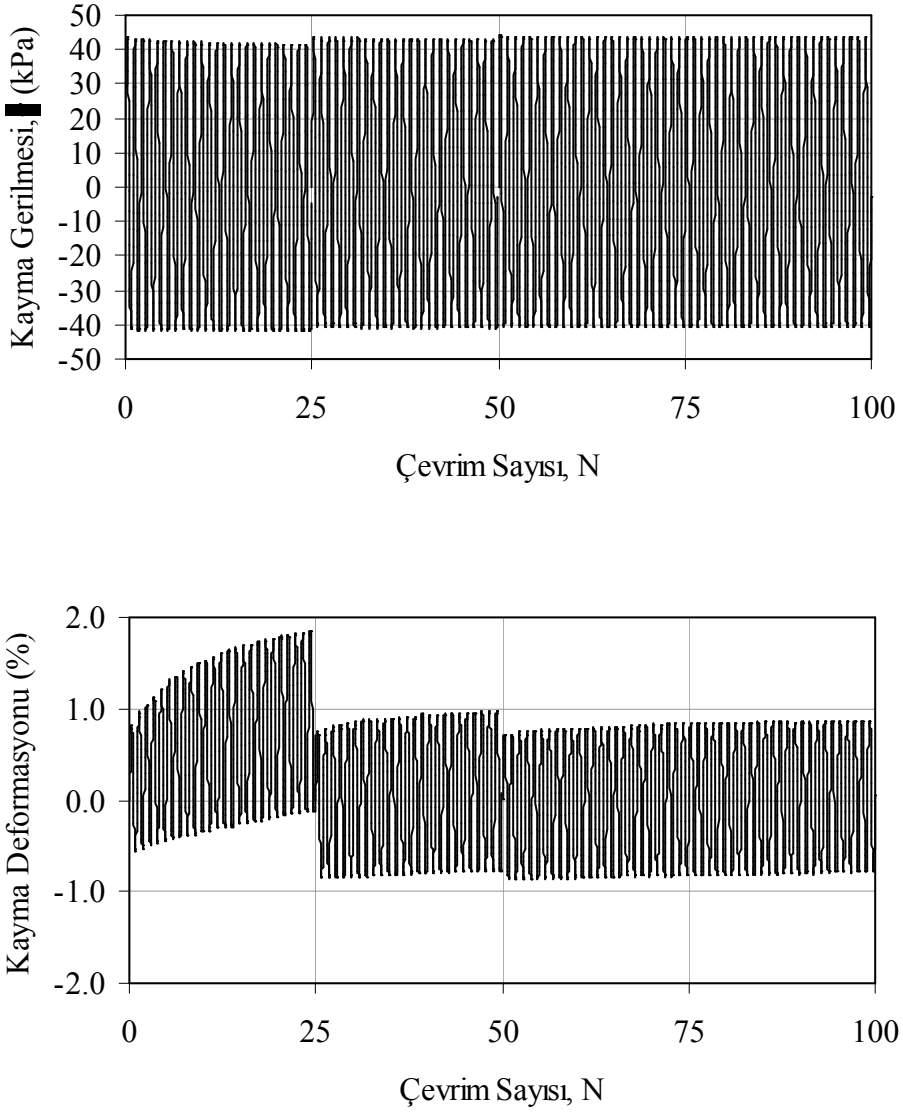
Tablo 4.1'de yapılan deneylerde kullanılan numunelerin ve deney koşullarının özellikleri verilmiştir. Kullanılan numunelerin tabii olması sebebiyle her tüp için bir adet numune üzerinde drenajsız statik basit kesme deneyi yapılabilmiş ve belirlenen değerin bu tüpten elde edilen diğer numunelerin drenajsız kayma mukavemetini temsil ettiği kabul edilmiştir.

Tablo 4.1: Bu çalışmada uygulanan deneylerin özellikleri.

Deney Adı	**Efektif Düşey Gerilme, σ'_v (kPa)**	**Çevrim Sayısı, N**	**Drenajsız Statik Kayma Mukavemeti, τ_f (kPa)**	**Dinamik Gerilme Oranı, τ/σ'_v**	**Dinamik Gerilme Oranı, τ/τ_f**
1C-1	70	25-25-25	52	0.05	0.08
1C-2	68	25-25-25		0.32	0.46
1D-1	116	25-25-25	72	0.19	0.34
2C-1	101	25-25-25	72	0.20	0.31
2C-2	103	25-25-25		0.29	0.47
2C-3	105	25-25-25		0.31	0.50
1B-1	52	25-25-25	65	0.20	0.18
3D-1	125	25-25-40	64	0.31	0.67
3D-2	125	25-25-60		0.48	1.05
3D-3	127	25-25-50		0.30	0.66
3D-4	127	25-25-25		0.49	1.06

Deneylerde uygulanacak olan dinamik kayma gerilmesi oranı, DKGO belirlenirken τ/σ'_v değeri esas alınmıştır. Her bir numuneye, konsolidasyon aşamasında maruz kaldığı efektif düşey gerilmenin, $\sigma'_{v,}$ belirli oranlarında kayma gerilmeleri uygulanmıştır. Daha sonra deneylerden elde edilen sonuçlara göre τ/τ_f değeri hesaplanmıştır.

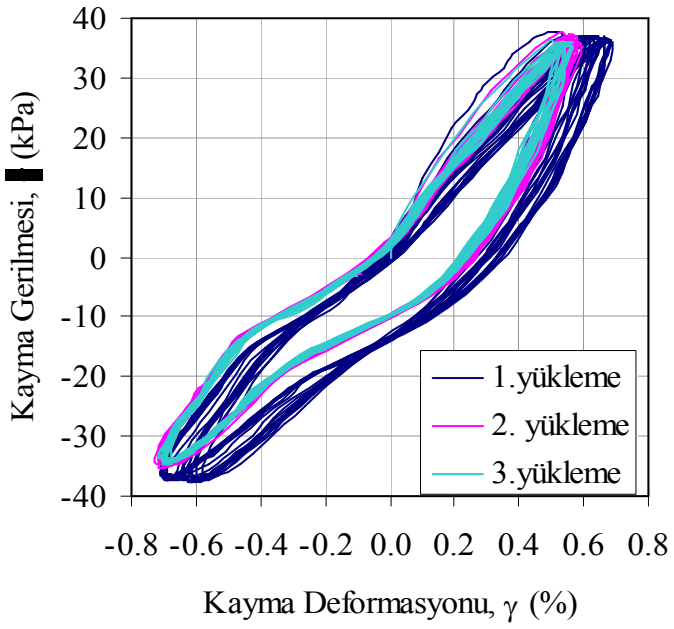
Şekil 4.1 ve 4.2'de deneyler esnasında uygulanan kayma gerilmelerinin ve bunların neden olduğu kayma deformasyonlarının çevrim sayısıyla değişimi görülmektedir. Zeminin gerilme deformasyon davranışı histerisis ilmikleri şeklinde olmaktadır. Bir kademedeki kayma deformasyonlarının değeri artan çevrim sayısıyla büyümekte ve histerisis ilmiklerinin yatıklaşmasına neden olmaktadır. İlerleyen kademelerde ise

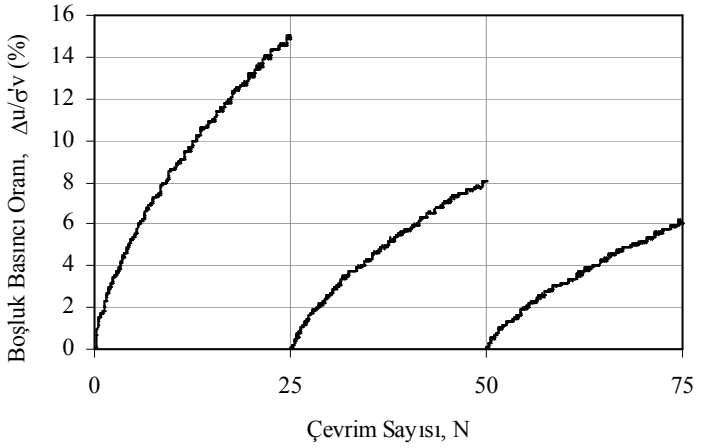


Şekil 4.1: Kayma gerilmesi ve kayma deformasyonunun çevrim sayısıyla değişimi (3D-3 deneyi).

numunenin artık boşluk suyu basıncı sönümlendiği ve oturmalar tamamlandığı için numunenin direnci artmakta ve histerisis ilmiklerinin eğimi büyümektedir. Boşluk suyu basınçları ise artan çevrim sayısıyla artmaktadır.

İlerleyen bölümlerde dinamik mukavemet davranışı, konsolidasyon oturmaları, kayma deformasyonu ve boşluk suyu basıncı davranışı incelenmiştir. Tekrarlı kayma gerilmesi oranlarının dinamik mukavemet özelliklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.





Şekil 4.2: Gerilme-deformasyon ve boşluk suyu basıncı davranışları (2C-3 deneyi).

4.3 Dinamik Mukavemet Davranışı

Kısa süreli drenajsız tekrarlı yüklemelere maruz kaldıklarında belirli bir kayma gerilmesi veya titreşim devir sayısından sonra kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma, kohezyonlu zeminlerde ise göçme meydana gelebilir (Özaydın, 1982).

Killerin tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişim, tekrarlı yükleme çevrimleri arasında geçen sürede drenaja izin verilip verilmemesine bağlıdır. Tekrarlı yüklemeler sırasında efektif gerilmelerde azalma ve boşluk suyu

basıncında artış meydana gelir. İki tekrarlı yükleme arasında oluşan drenaj artık ilave suyu basıncının sönümlenmesini sağlar. Yapılan çalışmalar, normal konsolide zeminlerde tekrarlı yüklemeler arasında drenaja izin verildiği durumlarda zeminin drenajsız kayma mukavemetinde artışlar olduğunu göstermektedir (Erşan, 2005).

Bu çalışmada son tekrarlı yükleme kademesinden sonra drenaja izin verilmediği için kayma drenajsız mukavemeti davranışı sürekli artış yönünde olmamıştır. Numuneler, son kademe tekrarlı yüklemenin ardından drenaja izin verilmeden statik olarak kesilmiştir. Drenajsız statik deneyler, saatte % 6.5 deformasyon hızında deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır.

Tablo 4.2'de bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerden elde edilen drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişim görülmektedir. En büyük artış %65.6 oranıyla 3D-4 deneyinde, en küçük artış ise %6.9 oranıyla 2C-3 deneyinde görülürken, en büyük azalma %34.7 oranıyla 1D-1 deneyinde, en küçük azalma ise %5.8 oranıyla 1C-1 deneyinde görülmüştür.

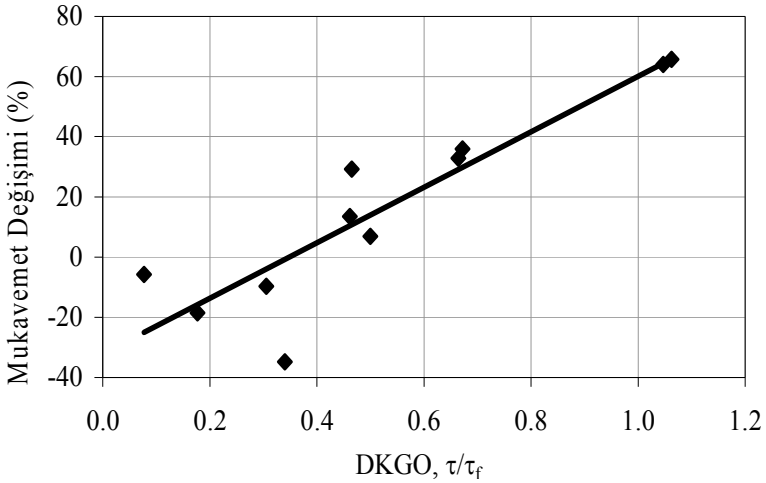
Tablo 4.2: Yapılan deneylerde drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi.

Deney Adı	Çevrim Sayısı, N	Dinamik Gerilme Oranı, τ/σ'_c	Dinamik Gerilme Oranı, τ/τ_f	Drenajsız Dinamik Kayma Mukavemeti, τ_{su} (kPa)	Drenajsız Kayma Gerilmesi Değişimi (%)	Drenajsız Kayma Gerilmesi Oranı, τ_{su}/τ_f
1C-1	25-25-25	0.05	0.08	49	-5.8	0.9
1C-2	25-25-25	0.32	0.46	59	13.5	1.1
1D-1	25-25-25	0.19	0.34	47	-34.7	0.7
2C-1	25-25-25	0.20	0.31	65	-9.7	0.9
2C-2	25-25-25	0.29	0.47	93	29.2	1.3
2C-3	25-25-25	0.31	0.50	77	6.9	1.1
1B-1	25-25-25	0.20	0.18	53	-18.5	0.8
3D-1	25-25-40	0.31	0.67	87	35.9	1.4
3D-2	25-25-60	0.48	1.05	100	56.3	1.6
3D-3	25-25-50	0.30	0.66	85	32.8	1.3
3D-4	25-25-25	0.48	1.06	106	65.6	1.7

Şekil 4.3'de drenajsız kayma mukavemetinin dinamik kayma gerilmesi oranıyla, τ/τ_f değişimi görülmektedir. Drenajsız kayma mukavemetindeki değişimin, deneyden deneye değişmekte olup bazılarında artış bazıların da ise azalma olarak ortaya çıkmasının nedenleri incelendiğinde bu davranışta dinamik kayma gerilmesi oranının

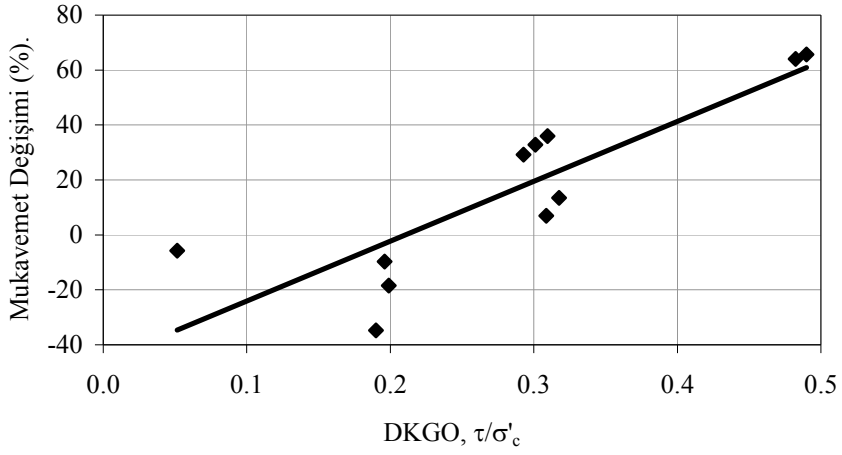
etkisi olduğu belirlenmiştir. Dinamik kayma gerilmesi oranı, $\tau/\tau_f \leq 0.34$ olan deneylerde numunenin dinamik kayma mukavemetinde, genel davranışın aksine azalımlar olmuştur. Bu davranış da kendi içinde incelendiğinde dinamik kayma gerilmesi oranı azaldıkça drenajsız kayma mukavemetindeki değişimin artış yönünde olduğu görülmektedir. Dinamik kayma gerilmesi oranı, $\tau/\sigma'_c \leq 0.20$ için de benzer davranış söz konusudur (Şekil 4.4).

Yıldırım (1987), örselenmemiş tabii kil numunelerle yaptığı çalışmada N=25 sabit çevrim sayısında yaptığı deneylerde dinamik kayma mukavemetinin, tekrarlı gerilme oranı arttıkça azaldığı fakat bu azalımın küçük mertebelerde kaldığını belirlemiştir. Sabit dinamik gerilme oranlarında yaptığı deneylerden çevrim sayısı, N=8 ve 25 olanlarda ve N=60 olup tekrarlı kayma gerilmesi oranı, CSR<0.40 olan deneylerde tekrarlı kayma gerilmesinin dinamik mukavemet üzerinde önemli bir etkisi olmadığını belirlemiştir.



Şekil 4.3: Dinamik mukavemetin dinamik kayma gerilmesi oranı, τ/τ_f ile değişimi.

Şekil 4.5'de 3D grubuna ait tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış kil numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen bir grup gerilme-deformasyon eğrisi görülmektedir. Dinamik yüklemeler sonucu numunenin kayma mukavemeti artmıştır. Ayrıca dinamik olarak yüklenen numunelerde kayma gerilmesi oranının dinamik kayma mukavemetini arttırıcı yönde etkisi olduğu görülmüştür. Tekrarlı yük uygulanmamış numune, 125 kPa değerinde bir düşey yük altında konsolide edilmiş ve drenajsız kayma mukavemeti 64 kPa olarak belirlenmiştir. Konsolidasyon basıncı, tekrarlı gerilme oranı τ/σ_c=0.30 ve τ/σ_c=0.49 olan deneylerde 127 kPa'dır.



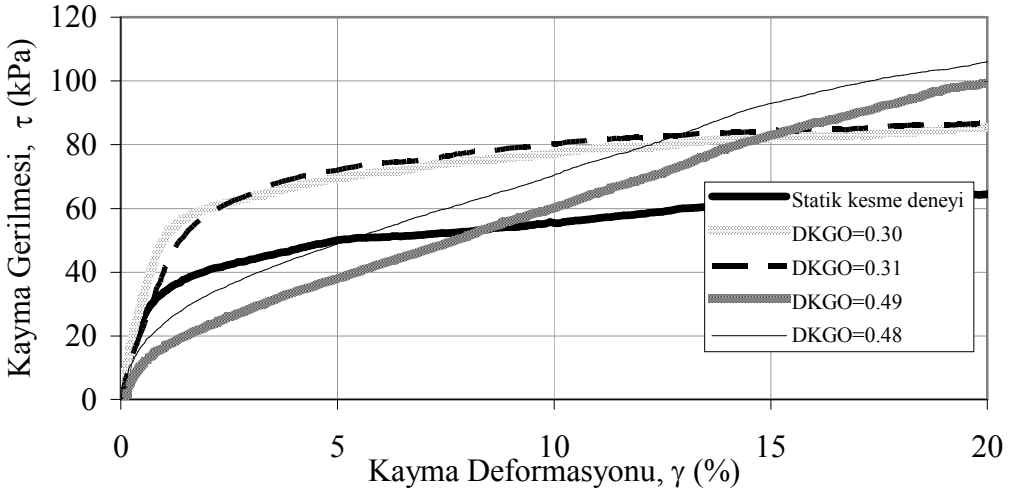
Şekil 4.4: Dinamik mukavemetin dinamik kayma gerilmesi oranı, τ/σ'_v ile değişimi.

Tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti, tekrarlı gerilme oranı τ/σ_c=0.30 olan deneyde %32.8 oranında artarken τ/σ_c=0.49 olan deneyde %56.3 oranında artmıştır. En büyük artış ise %65.6 oranıyla τ/σ_c=0.48 olan deneyde görülmüştür. Bu deneyde, tekrarlı kayma gerilmesi daha küçük olmasına rağmen en fazla artışın görülmesinin nedeni, diğer deneylerden farklı olarak son tekrarlı yükleme kademesinden sonra da drenaja izin verilmesidir.

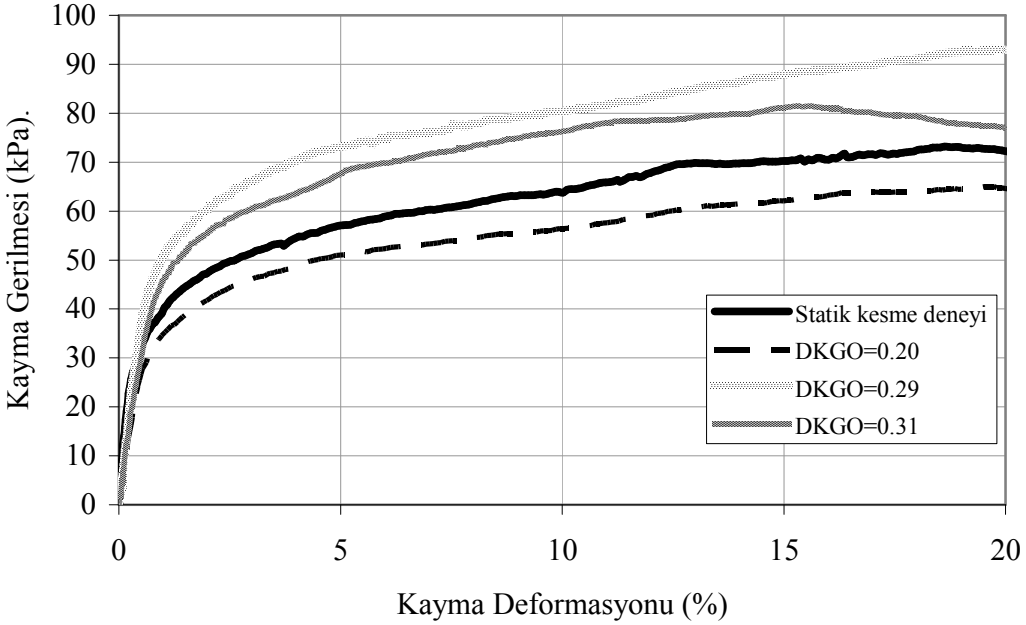
Şekil 4.6'da 2C grubuna ait tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış kil numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen bir grup gerilme-deformasyon eğrisi görülmektedir. Dinamik yüklemeler sonucu kayma mukavemeti bazı numunelerde artarken bazılarında azalmıştır. Tekrarlı yük uygulanmamış numune, 101 kPa değerinde bir düşey yük altında konsolide edilmiş ve drenajsız kayma mukavemeti 72 kPa olarak belirlenmiştir. Konsolidasyon basıncı, tekrarlı gerilme oranı τ/σ_c=0.20 olan deneyde 101 kPa, τ/σ_c=0.29 olan deneyde 103 kPa ve τ/σ_c=0.31 olan deneyde 105 kPa'dır. Tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti, tekrarlı gerilme oranı τ/σ_c=0.20 olan deneyde %9.7 oranında azalırken τ/σ_c=0.29 olan deneyde %29.2 ve τ/σ_c=0.31 olan deneyde %6.9 oranında artmıştır.

4.4 Kayma Deformasyonu Davranışı

Drenajsız tekrarlı yüklemeye maruz kalan zeminde, en büyük kayma deformasyonları ilk kademe tekrarlı yükleme sırasında görülmektedir. Tekrarlı



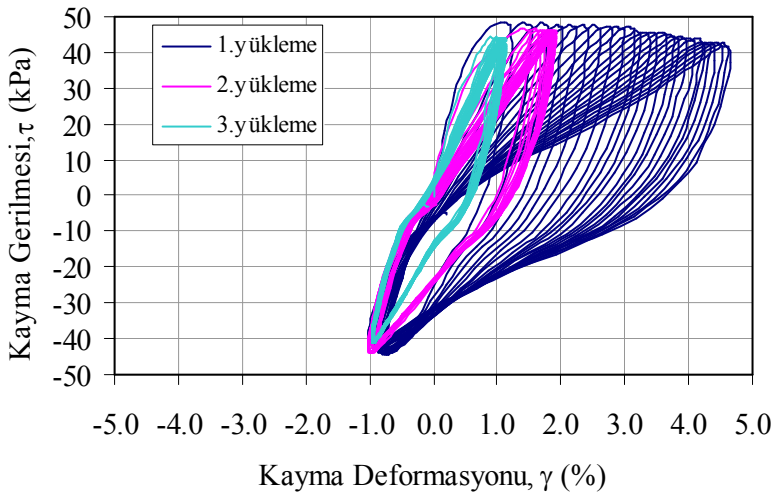
Şekil 4.5: Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerime deformasyon eğrileri (3D grubu deneyleri).



Şekil 4.6: Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerime deformasyon eğrileri (2C grubu deneyleri).

yüklemelerin arasında drenaja izin verilmesi ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ve konsolidasyon oturmalarının gerçekleşmesini sağladığından numunenin mukavemeti artmakta ve ilerleyen tekrarlı yük kademelerinde meydana gelen kayma deformasyonları azalmaktadır. Bunun sonucu olarak histerisis

ilmiklerinin eğimi olarak tanımlanan dinamik kayma modülü artmaktadır. Şekil 4.7'de 3D-1 deneyinde oluşan kayma deformasyonlarının kayma gerilmesiyle değişimi 3 yükleme kademesi için aynı grafikte gösterilmektedir.

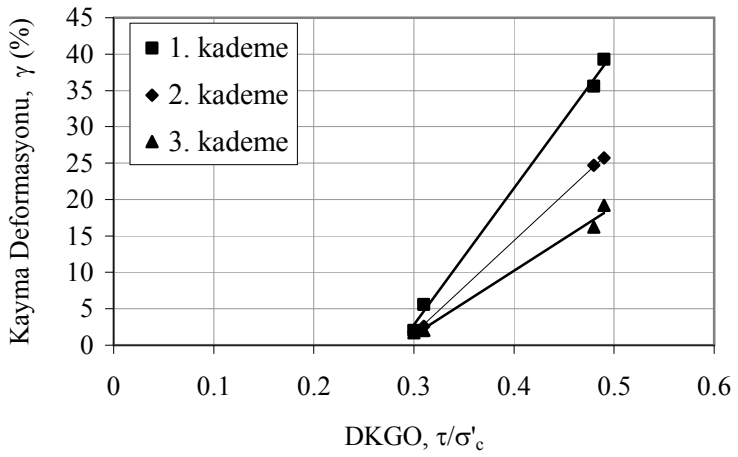


Şekil 4.7: 3D-1 deneyine ait histerisis ilmikleri.

Şekil 4.8'de üç kademedeki birim kayma deformasyonlarının dinamik gerilme oranıyla, τ/σ'_v değişimi görülmektedir. Tüm kademelerde dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça numunelerde oluşan deformasyonlar artmıştır. Şekil incelendiğinde en yüksek eğimin ilk kademeye ait eğriye ve en düşük eğimin ise son kademeye ait eğriye ait olduğu görülmektedir. Kayma deformasyonları tüm kademelerde artmış fakat kademeler arasında artık boşluk suyu basıncının sönümlenebilmesi için drenaja izin verilerek numunenin konsolidasyon oturmasını tamamlaması sağlanmış ve numune mukavemet kazanmış olduğu için en küçük deformasyon artışı son kademede gerçekleşmiştir.

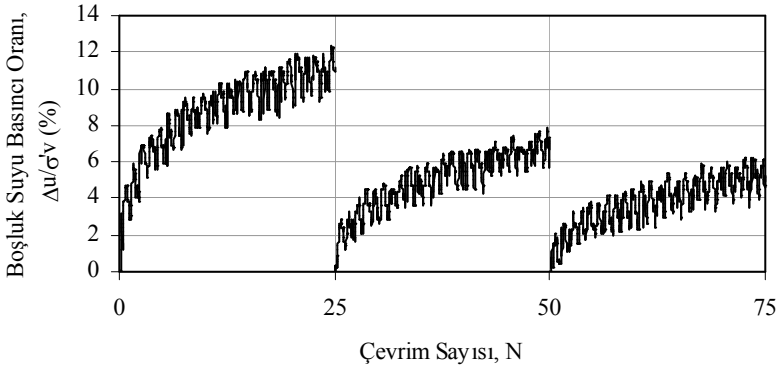
4.5 Boşluk Suyu Basıncı Davranışı

Tekrarlı gerilmeler altında boşluk suyu basıncı davranışı birim kayma deformasyon davranışına benzer özellikler göstermektedir. Bu çalışmada numunelere 3 kademe tekrarlı yük uygulanmış, ilk iki kademe tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmiştir. Fakat 3. tekrarlı yükleme kademesinden sonra drenaja izin verilmeyerek bu yük kademesinde oluşan ilave boşluk suyunun sönümlenmesi ve konsolidasyon oturmalarının gerçekleşmesi engellenmiştir. Şekil 4.9'da 2C-1 deneyinde oluşan

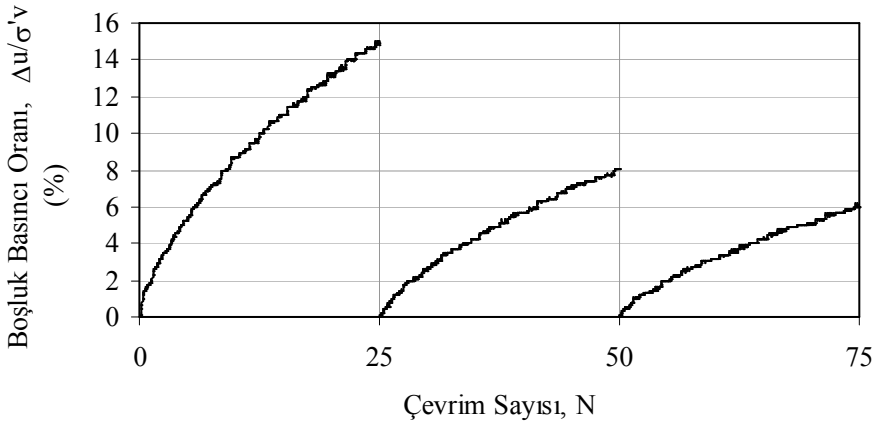


Şekil 4.8: Kayma deformasyonlarının üç kademe boyunca dinamik gerilme oranı, τ/σ'_v ile değişimi.

boşluk suyu basınçlarının her kademe tekrarlı yüklemedeki değişimi görülmektedir. Dinamik gerilme oranı, τ/σ_v=%20 olan bu deneyde her kademede boşluk suyu basıncında bir artış meydana gelmiş ama ilerleyen kademelerde bu artışta azalma gözlenmiştir. Şekil 4.10'da ise gerilme oranı, τ/σ_v=%31 olan 2C-3 deneyine ait boşluk suyu basıncı değişimleri verilmiştir. Önceki deneyde ortaya çıkan eğilime benzer bir eğilim burada da görülmektedir. Bununla beraber bu deneyde boşluk suyu basınçlarındaki artış daha belirgin olmuştur. 2C-1 deneyinde ilk yükleme kademesinde boşluk suyu basıncı oranı %12 iken, sonraki yükleme kademesinde %8'e düşmüştür. Bu deneyde ilk iki yükleme kademesi arasındaki boşluk suyu basıncı oranı farkı %4 iken, 2C-3 deneyinde %7 olduğu belirlenmiştir.

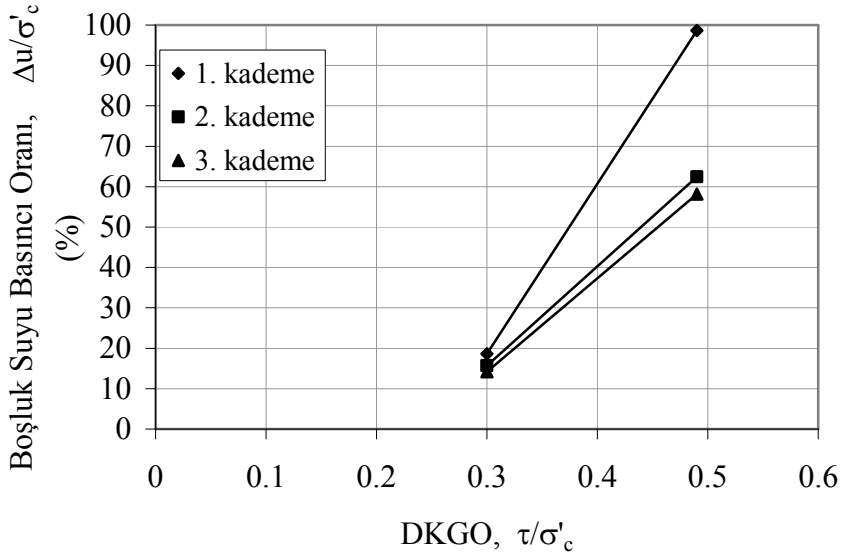


Şekil 4.9: 2C-1 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi.



Şekil 4.10: 2C-3 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi.

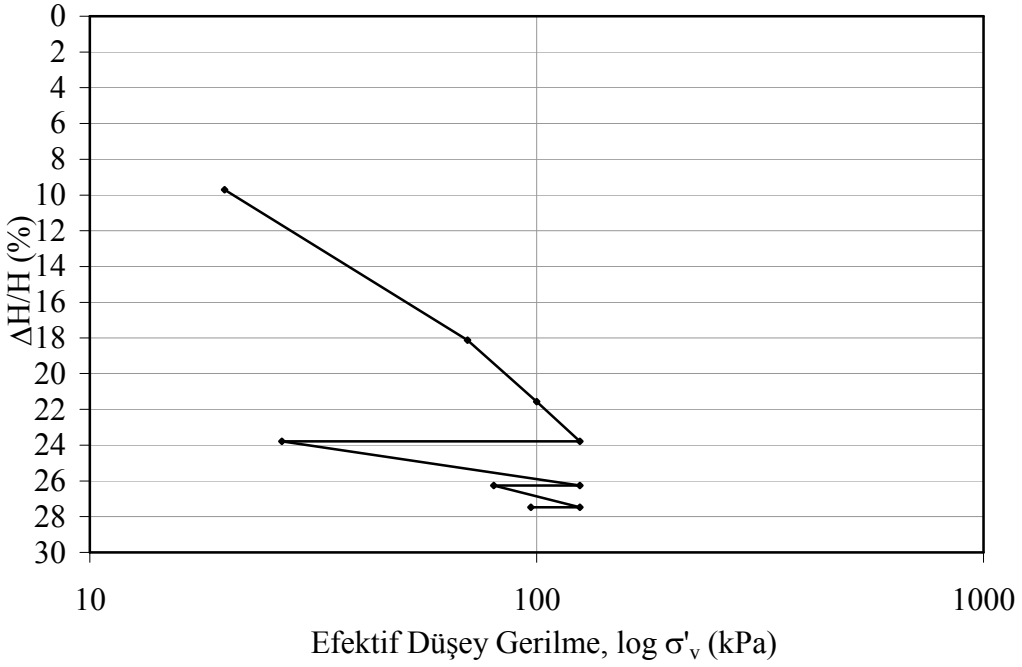
Dinamik kayma gerilmesi oranının, τ/σ'_v boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisini belirlemek için plastisite indisleri aynı olan (I_P=22) 3D grubu deney verilerinden yararlanılmıştır. Şekil 4.11'de dinamik kayma gerilmesi oranı %30 ve %49 olan deneylere ait her üç kademede oluşan boşluk suyu basıncı oranı değerleri görülmektedir. Dinamik gerilme oranının kayma deformasyonu üzerindeki etkisine benzer olarak boşluk suyu basıncını arttırıcı etkisi olduğu görülmüştür. Bu artış ilk kademe tekrarlı yüklemede oldukça belirgin olurken, ikinci ve son kademe tekrarlı yükleme etkisi azalmıştır.



Şekil 4.11: Boşluk suyu basınçlarının üç kademe boyunca dinamik gerilme oranı, τ/σ'_c ile değişimi.

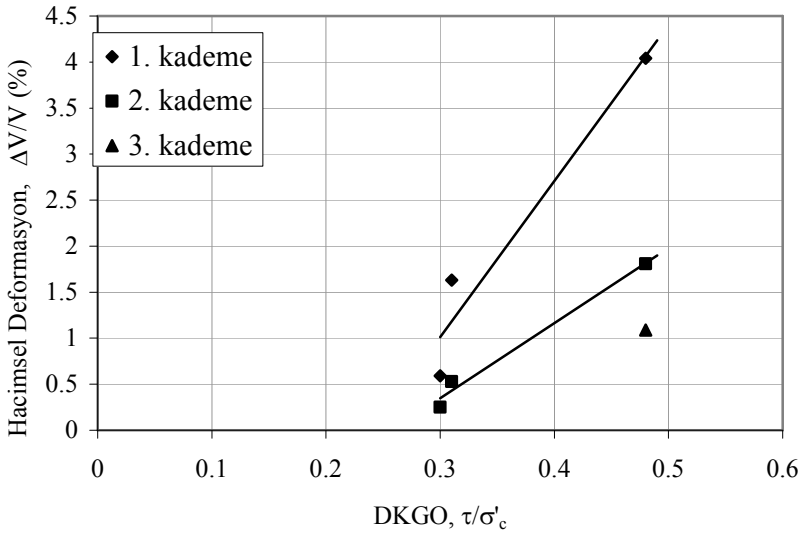
4.6 Konsolidasyon Oturmaları

Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmada son yükleme kademesinde konsolidasyon oturmalarının oluşmasına izin verilmemiştir. Tekrarlı yüklemeler sırasında efektif gerilmelerde oluşan azalma ve boşluk suyu basıncında meydana gelen artımın büyüklüğü, drenaja izin verildiği haldeki konsolidasyon oturmalarını doğrudan etkilemektedir. Şekil 4.12'de 3D-1 deneyinde numune efektif düşey gerilmeyle her kademedeki konsolidasyon oturmaları arasında çizilen tipik bir eğri görülmektedir. Uygulanan ilk kademe tekrarlı gerilme esnasında boşluk suyu basıncı artmış ve efektif gerilme değeri azalmıştır. Yükleme tamamlandıktan sonra drenajlar açılarak numune konsolidasyona bırakılmıştır. Bu aşamada oluşan boşluk suyu basıncı sönümlenirken numunede boy kısalması meydana gelmiştir. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra drenajlar kapatılarak ikinci kademe tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Bu kademede efektif gerilme değerindeki değişim Şekil 4.13'de görüldüğü gibi ilk kademedeki değişim değerinden belirgin bir şekilde daha düşüktür. Takip eden konsolidasyon aşamasında ise oturma değeri bir önceki kademeye göre daha küçük olmuştur.



Şekil 4.12: 3D-2 deneyinde üç kademe tekrarlı yüklemede meydana gelen oturmaların efektif gerilme ile değişimi.

Şekil 4.11'de dinamik kayma gerilmesinin hacimsel deformasyon üzerindeki etkisi görülmektedir. Hacimsel deformasyon, dinamik kayma gerilmesi oranıyla birlikte artmakta ve birim kayma deformasyonu ve boşluk suyu basıncı davranışına benzer bir şekilde Birinci kademe tekrarlı yüklemeyi temsil eden eğrinin eğimi, ikinci kademe eğrisine göre daha yüksek olmaktadır. Üç tekrarlı yük kademesinin arasında toplam iki kere drenaja izin verildiği için her dinamik kayma gerilmesi oranında iki adet hacimsel deformasyon değeri mevcuttur. %48 gerilme oranında yapılan son deneyde, son tekrarlı yükleme kademesinin ardından da drenaja izin verilerek konsolidasyon oturmalarının oluşması sağlandığı için son kademeye ait hacimsel deformasyon değeri elde edilmiştir. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi bu nokta da genel eğilime uygun bir değer aralığında yer almıştır.



Şekil 4.13: Hacimsel deformasyonun üç kademe boyunca dinamik gerilme oranı, τ/σ'_c ile değişimi.

4.7 Sonuç

Bu çalışmada tekrarlı yükleme drenaj çevrimlerine maruz kalan örselenmemiş tabii kil numunelerin gerilme-şekil değiştirme, mukavemet davranışları incelenmiştir. Dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak numunelere 3 kademe yükleme drenaj çevrimi uygulanmıştır. 3D-4 deneyi dışında kalan tüm deneylerde son kademeden sonra drenaja izin verilmeden statik basit kesme deneyi uygulanarak numunelerin drenajsız kayma mukavemetleri belirlenmiştir.

Numunelere uygulanan tekrarlı kayma gerilmeleri kayma deformasyonları ve artık boşluk suyu meydana getirmektedir. Ayrıca kayma gerilmelerinin genliği arttıkça kayma deformasyonları ve boşluk suyu basınçları artmaktadır. Aynı kayma gerilmesi oranında oluşan kayma deformasyonları ve boşluk suyu basınçlarındaki artış miktarı, kademe aralarında numunede oluşan artık boşluk suyu basıncı sönümlendiği ve konsolidasyon oturmaları tamamlandığı için her kademede bir önceki kademeye oranla azalmaktadır.

İlk kademe tekrarlı yüklemeyi takip eden kademelerde oluşan boşluk suyu basıncı bir önceki kademeye göre azaldığı için oturmalarda da azalma meydana gelmektedir. Bir tekrarlı yükleme kademesi sonunda meydana gelen oturma numunenin daha sonraki yükleme kademesindeki davranışını genel olarak olumlu yönde etkilemiştir.

Tekrarlı yükleme drenaj çevrimlerine maruz kalan numunelerin drenajsız kayma mukavemetlerinde düzenli bir değişim görülmemektedir. Bazı numunelerin kayma mukavemetleri artarken bazılarının azaldığı görülmüştür. Dinamik kayma gerilmesi oranı, $\tau/\tau_f \leq 0.34$ olan deneylerde numunenin dinamik kayma mukavemetinde, genel davranışın aksine azalımlar olmuştur. Bu davranış da kendi içinde incelendiğinde dinamik kayma gerilmesi oranı azaldıkça drenajsız kayma mukavemetindeki değişimin artış yönünde olduğu görülmektedir.

5. GENEL SONUÇLAR

Deniz üstü yapılarına etkiyen dalga yükleri, yüksek binalara etkiyen rüzgar yükleri, ağır makine temelleri, deprem ve trafik yükleri gibi tekrarlı yükler altında zeminin gerilme şekil değiştirme davranışında ve kayma mukavemetinde değişimler meydana gelmektedir. Tekrarlı yükler nedeniyle meydana gelen mukavemet kaybı, kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma, kohezyonlu zeminlerde ise aşırı deformasyonlar ve göçme olarak ortaya çıkmaktadır. Bu değişimlerin önceden belirlenmesi üst yapıda meydana gelebilecek hasarlar ortadan kaldırılabilmekte veya azaltılabilmektedir.

Bu çalışmada İzmit bölgesinden alınan örselenmemiş tabii kil numuneler kullanılmıştır. 5 adet tüpten çıkarılan kil numuneler üzerinde dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak toplam 11 adet deney yapılmıştır Tabii numuneler kullanılması sebebiyle her tüp için bir adet numune üzerinde drenajsız statik basit kesme deneyi yapılabilmiş ve belirlenen mukavemet değerinin, bu tüpten alınan ve dinamik basit kesme deneylerinde kullanılan diğer numunelerin drenajsız kayma mukavemetini temsil ettiği kabul edilmiştir.

Bu çalışmada kil numunelere iki kademe tekrarlı yük uygulanmış, bu kademelerden sonra drenaja izin verilmiş ve son olarak bir kademe tekrarlı yük daha uygulanmış ama bu kez drenaja izin verilmeden statik olarak kesilmiştir. Numunelere uygulanan tekrarlı gerilme oranları τ/σ'_c, numunenin konsolide olduğu efektif düşey gerilmeye bağlı olarak belirlenmiştir. Deneyler N=25 çevrim sayısında ve τ/σ'_c=0.05-0.49 arasında değişen tekrarlı gerilme oranlarında yapılmıştır. Deneylerde uygulanacak olan dinamik kayma gerilmesi oranı, DKGO belirlenirken τ/σ'_v değeri esas alınmıştır. Her bir numuneye, konsolidasyon aşamasında maruz kaldığı efektif düşey gerilmenin, σ'_v, belirli oranlarında kayma gerilmeleri uygulanmıştır. Daha sonra deneylerden elde edilen sonuçlara göre τ/τ_f değeri hesaplanmıştır. Çevrim sayısının boşluk suyu üzerindeki etkisini belirleyebilmek için üç deneyde son kademede çevrim sayıları, N=40, 50 ve 60 olarak seçilmiştir.

Kayma gerilmelerinin ve bunların neden olduğu kayma deformasyonlarının çevrim sayısıyla değişimi histerisis ilmikleri şeklinde olmaktadır. Bir kademedeki kayma deformasyonlarının değerinin artan çevrim sayısıyla büyümesi histerisis ilmiklerinin yatıklaşmasına neden olmaktadır. Takip eden kademelerde ise numunenin artık boşluk suyu basıncı sönümlendiği ve oturmalar tamamlandığı için numunenin direnci artmakta ve histerisis ilmiklerinin eğimi büyümektedir.

Bu çalışmada son tekrarlı yükleme kademesinden sonra drenaja izin verilmediği için kayma drenajsız mukavemeti davranışı sürekli artış yönünde olmamıştır. Numuneler, son kademe tekrarlı yüklemenin ardından drenaja izin verilmeden saate %6.5 deformasyon hızında statik olarak kesilmiştir. Drenajsız kayma mukavemetindeki en büyük artış %65.6 oranıyla 3D-4 deneyinde, en küçük artış ise %6.9 oranıyla 2C-3 deneyinde görülürken, en büyük azalma %34.7 oranıyla 1D-1 deneyinde, en küçük azalma ise %5.8 oranıyla 1C-1 deneyinde görülmüştür.

Dinamik olarak yüklenen numunelerde kayma gerilmesi oranının dinamik kayma mukavemetini arttırıcı yönde etkisi olduğu görülmüştür. Tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti, tekrarlı gerilme oranı τ/σ'_c =0.30 olan deneyde %32.8 oranında artarken τ/σ'_c=0.49 olan deneyde %65.6 oranında artmıştır.

Dinamik kayma gerilmesi oranı, $\tau/\tau_f \leq 0.34$ olan deneylerde numunenin dinamik kayma mukavemetinde, genel davranışın aksine azalımlar olmuştur. Bu davranış da kendi içinde incelendiğinde dinamik kayma gerilmesi oranı azaldıkça drenajsız kayma mukavemetindeki değişimin artış yönünde olduğu görülmektedir. Dinamik kayma gerilmesi oranı, τ/σ'_c için de benzer davranış söz konusudur.

Dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça tüm kademelerde oluşan deformasyonlar artmıştır. Kayma deformasyonları tüm kademelerde artmış fakat kademeler arasında artık boşluk suyu basıncının sönümlenebilmesi için drenaja izin verilerek numunenin konsolidasyon oturmasını tamamlaması sağlanmış ve numune mukavemet kazanmış olduğu için en küçük deformasyon artışı son kademede gerçekleşmiştir.

Tekrarlı gerilmeler altında boşluk suyu basıncı davranışı birim kayma deformasyon davranışına benzer özellikler göstermektedir. Bu çalışmada numunelere 3 kademe tekrarlı yük uygulanmış, ilk iki kademe tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmiştir. Fakat 3. tekrarlı yükleme kademesinden sonra drenaja izin verilmeyerek

bu yük kademesinde oluşan ilave boşluk suyunun sönümlenmesi ve konsolidasyon oturmalarının gerçekleşmesi engellenmiştir. Dinamik gerilme oranı, τ/σ'_c=%20 olan 2C-1 deneyinde her kademede boşluk suyu basıncında bir artış meydana gelmiş ama ilerleyen kademelerde bu artışta azalma gözlenmiştir. Gerilme oranı, τ/σ'_c=%31 olan 2C-3 deneyine ait boşluk suyu basıncı değişimleri verilmiştir. Önceki deneyde ortaya çıkan eğilime benzer bir eğilim burada da görülmektedir. Bununla beraber bu deneyde boşluk suyu basınçlarındaki artış daha belirgin olmuştur. 2C-1 deneyinde ilk yükleme kademesinde boşluk suyu basıncı oranı %12 iken, sonraki yükleme kademesinde %8'e düşmüştür. Bu deneyde ilk iki yükleme kademesi arasındaki boşluk suyu basıncı oranı farkı %4 iken, 2C-3 deneyinde %7 olduğu belirlenmiştir.

Dinamik kayma gerilmesi oranının**,** τ/σ'_c boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisini belirlemek için plastisite indisleri aynı olan (I_P=22) 3D grubu deney verilerinden yararlanılmıştır. Dinamik gerilme oranı arttıkça, kayma deformasyonu davranışına benzer olarak boşluk suyu basıncının da arttığı belirlenmiştir.. Bu artış ilk kademe tekrarlı yüklemede oldukça belirgin olurken, ikinci ve son kademe tekrarlı yükleme etkisi azalmıştır.

Kayma gerilmelerinin uygulandığı ilk kademe boyunca boşluk suyu basıncı artmış ve efektif gerilme değeri azalmıştır. Yükleme tamamlandıktan sonra drenajlar açılarak oluşan boşluk suyu basıncı sönümlenmiş ve numunede boy kısalması meydana gelmiştir. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra drenajlar kapatılarak ikinci kademe tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Bu kademede efektif gerilme değerindeki değişim miktarı bir önceki kademeden belirgin bir şekilde daha düşüktür. Bunun sonucu olarak, takip eden konsolidasyon aşamasında oturma değeri bir önceki kademeye göre daha küçük olmuştur.

Hacimsel deformasyon, dinamik kayma gerilmesi oranıyla birlikte artmakta ve birim kayma deformasyonu ve boşluk suyu basıncı davranışına benzer bir davranış göstermektedir. 1. kademe tekrarlı yüklemede oluşan hacimsel deformasyon ikinci kademe göre daha yüksek olmaktadır. Üç tekrarlı yük kademesinin arasında toplam iki kere drenaja izin verildiği için her dinamik kayma gerilmesi oranında iki adet hacimsel deformasyon değeri mevcuttur. %48 gerilme oranında yapılan son deneyde, son tekrarlı yükleme kademesinin ardından da drenaja izin verilerek konsolidasyon oturmalarının oluşması sağlandığı için son kademeye ait hacimsel deformasyon

değeri elde edilmiştir. Bu değer de ikinci yükleme kademesinden sonra oluşan oturma değerinden daha küçük olmuştur.

KAYNAKLAR

Andersen, K.H., 1976. Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading, *Proc. Conf. On Behavior of Off-shore Structures*, Trondheim, August, **1**, 392-403.

Andersen, K.H., Pool, J.H., Brown, S.H. and Rosenbrand, W.F., 1980. Cyclic and static laboratory test on Drammen clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *ASCE*, **106**, No.5, 499-529.

Anderson, D.G. and Richart, F.E., 1976. Effects of straining in shear modulus of clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *ASCE*, **102**, No.9, 975-987.

Ansal, A.M. and Erken A., 1989. Undrained behavior of clay under cyclic shear stress, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, **115**, No.7, 968-983.

Ansal, A.M. and Tuncan, M., 1989. Consolidation in clays due to cyclic stress, *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janerio, 13-18 August, Mexico, p. 3-6.

Ansal, A.M. ve Erken A., 1985. Killerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı, *Deprem Araştırma Bülteni*, **48**, 5-81.

Biscontin, G., 2001. Modelling the dynamic behavior of lightly overconsolidated soil depozits on submerged slopes, *PhD Thesis*, University of California, Berkeley.

Das, B.M., 1993. Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, Boston.

Erken, A., Ansal, A.M. ve Özarda, H., 1987. Killerde deformasyon kontrollü dinamik deneyler, *III. Ulusal Kil Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 22-27 Eylül, s. 343-455.

Erşan, H., 2005. Tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonu, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Erşan, H. ve Yıldırım, H., 2006. Tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonu, , *itü dergisi/d*, **5**, No.3, 187-195.

Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I. and Sokolov, V.N., 2006. The liquefaction of clayey soils under cyclic loading, *Engineering Geology*, **86**, 70-84.

Hardin, B. O., ve Drnevich, V.P., 1972a. Shear Modulus and Damping in Soils: Measurements and Parameter Effects, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* **98**, No.6, 603-624.

Hardin, B. O., ve Drnevich, V.P., 1972b. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equation and Curves, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* **98**, No.7, 667-692.

Hsu, C., 2002. Dynamic and cyclic behavior of soils over the wide range of shear strains in NGI-type simple shear testing device, *Phd Thesis*, University of California, Los Angeles.

Humphries, W.K. and Wahls, H.E., 1968. Stress history effects on dynamic modulus of clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, *ASCE*, **94**, No.2, 371-389.

Kagawa, T., 1992. Moduli and damping factors of soft marine clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, **118**, 1360-1375.

Kokusho, T., Yoshida, Y. and Esashi, Y., 1982. Dynamic properties of soft clay for wide strain range, *Soils and Foundations*, **22**, No.4, 1-18.

Koutsoftas, D.C., 1978. Effect of cyclic loads on undrained strength of two marine clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **104**, No.5, 609-620.

Kovacs, W.D., Seed, H.B. ve Chan, C.K., 1971. Dynamic Modulus and Damping Ratios for a Soft Clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* **98**, No.1, 59-75.

Kovacs, W.D., Seed, H.B. ve Idriss, I.M., 1971. Studies of seismic Response of Clay Banks, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,* **97**, No.1, 441-445.

Okur, V. ve Ansal, A., 2002. Tekrarlı gerilmeler altında ince daneli zeminlerde oluşan boşluk suyu basıncı davranışları, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi,* Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim, s. 393-401.

Okur, V. ve Ansal, A., 2004. Doğal ince daneli zeminlerin mukavemet özelliklerinin analizi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi,* İ.T.Ü., İstanbul, 16-17 Eylül, s. 387-396.

O'Reilly, M.P. and Brown, S.F., 1991. Cyclic loading in geotechnical engineering, Cyclic loading of soils: from theory to design, Edited by O'Reilly, M.P. and Brown, S.F., 1-18, Blackie and Son Ltd., Bishopbriggs, Glasgow.

Özay, R. ve Erken, A., 2003. Killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi, *itü dergisi/d*, **2**, No.1, 55-63.

Özay, R., Okur, V. ve Erken, A., 2000. Örselenmemiş killi zeminlerde kıvamın dinamik kayma modülü ve sönüme etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi,* İ.T.Ü., İstanbul, 26-27 Ekim, s. 437-444.

Özaydın, K., 1982. Zemin Dinamiği, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Potts, D.M., Dounias, G.T. and Vaughan, P.R., 1987. Finite element analysis of the direct shear box test, *Geotechnique*, **37**, No.1, 11-23.

Taylor, P.W. and Parton, J.M., 1973. Dynamic torsion testing of soils, *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, **1**, Part 2, 425-432.

Vucetic, M., 1988. Normalized behavior of offshore clay under uniform cyclic loading, *Canadian Geotechnical Journal*, **25**, No.1, 33-41.

Vucetic, M., 1992. Soil properties and seismic response, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, **3**, 1199-1204.

Vucetic, M. and Dobry, R., 1991. Effect of soil plasticity on cyclic responce, *Journal of Geotechnical Engineering*, *ASCE*, **117**, No.1, 89-107.

Yasuhara, K. ve Andersen, K.H., 1991. Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading, *Soil and Foundations*, **31**, No.1, 83-94.

Yasuhara, K. ve Yamanouchi, T. and Hirao, K., 1982. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay, *Soil and Foundations*, **22**, No.3, 77-91.

Yıldırım, H., 1987. Farklı tekrarlı yükleme biçimleri altında killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

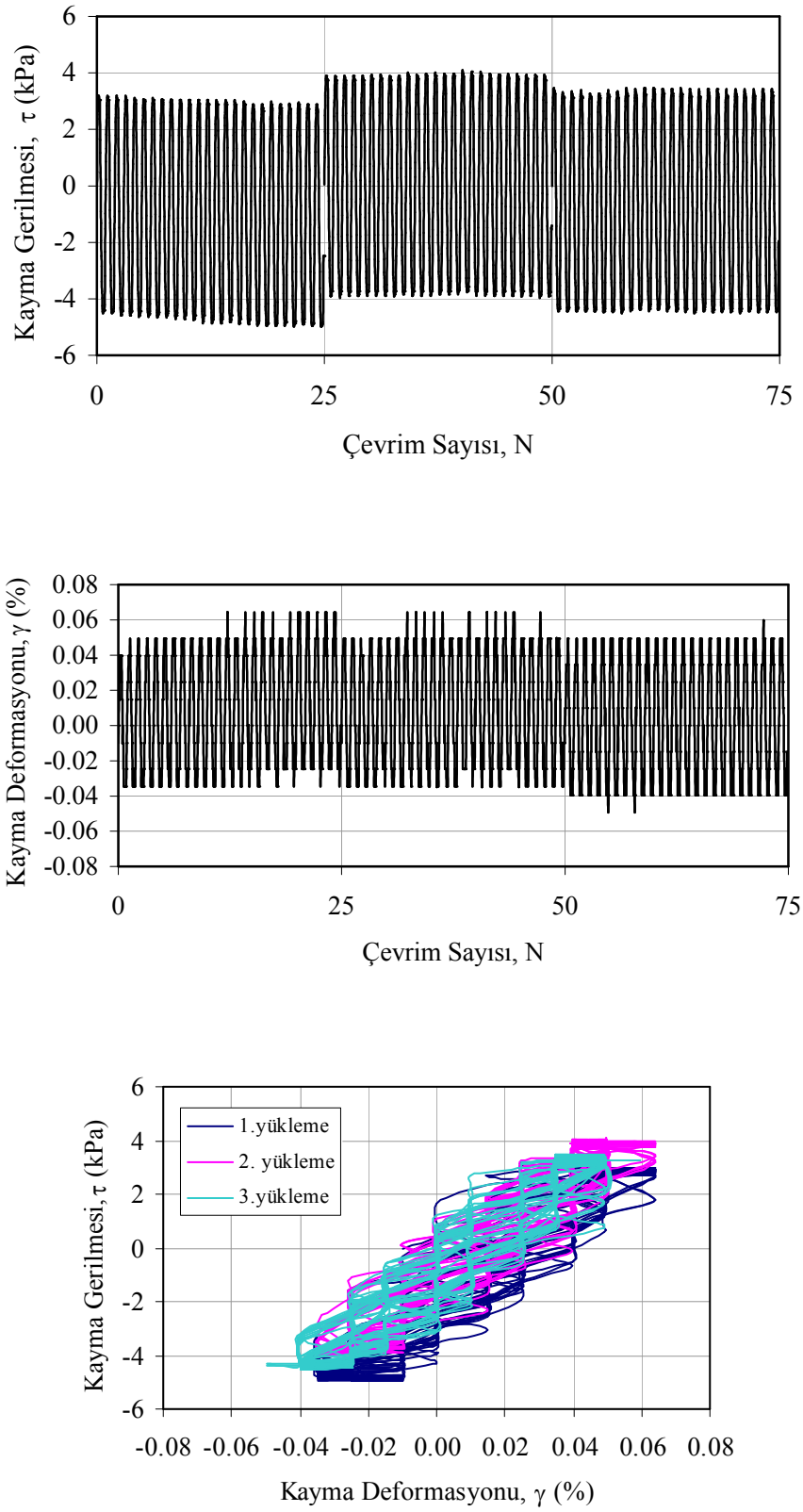
Yıldırım, H. ve Erşan, H., 2007. Settlements under consecutive series of cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**, No.6, 577-585.

EKLER

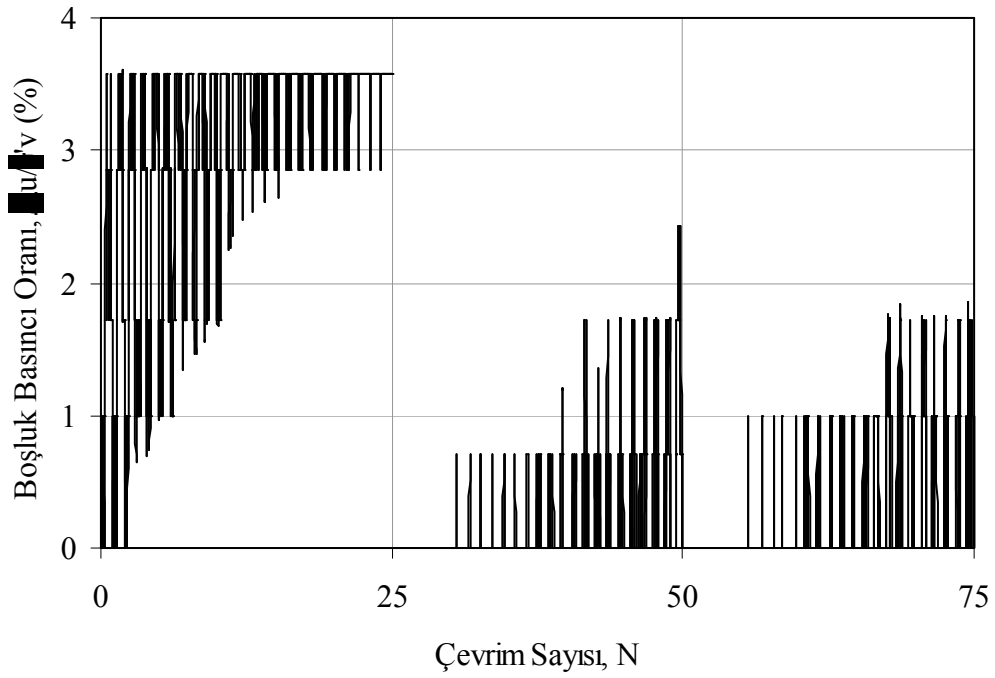
EK A DİNAMİK YÜKLEMELİ DENEY GRAFİKLERİ

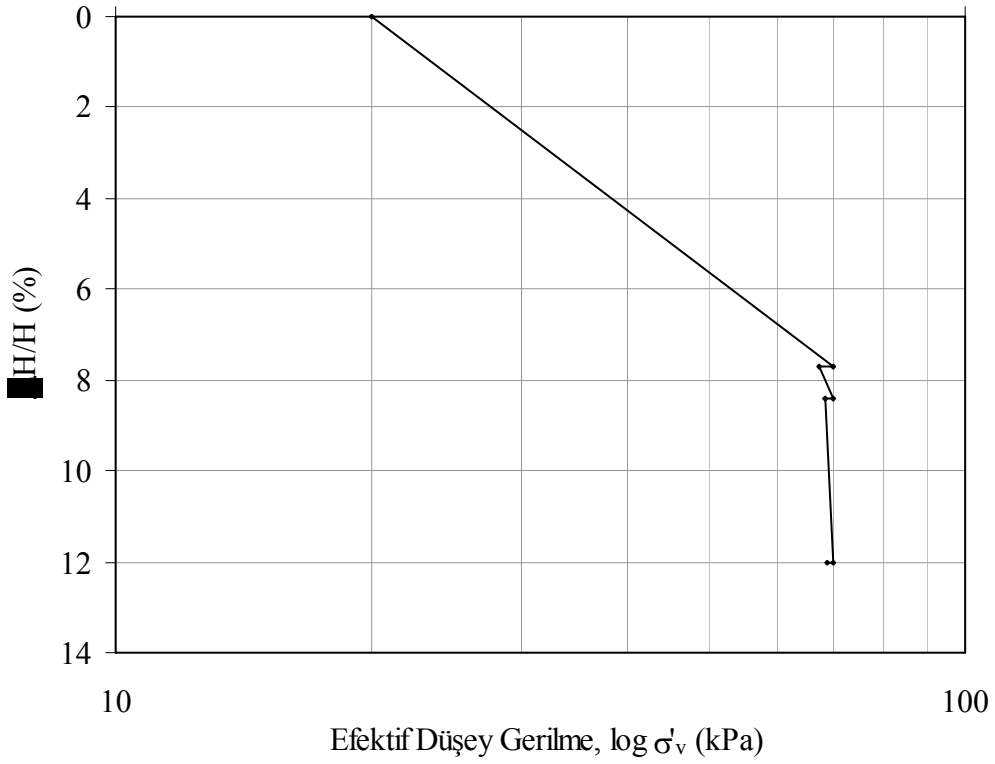
EK B STATİK YÜKLEMELİ DENEY GRAFİKLERİ

EK A DİNAMİK YÜKLEMELİ DENEY GRAFİKLERİ

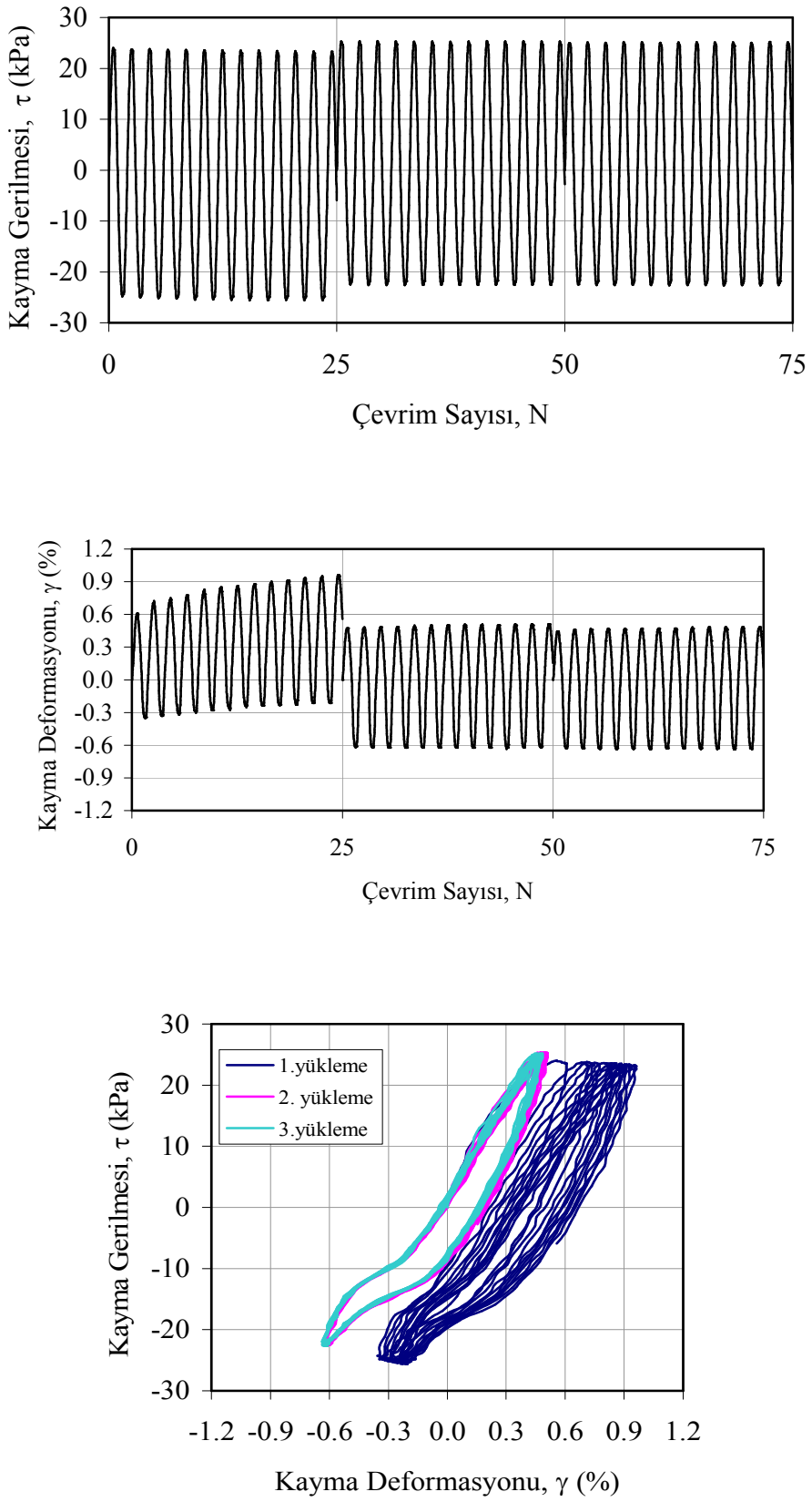


Şekil A.1: 1C-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

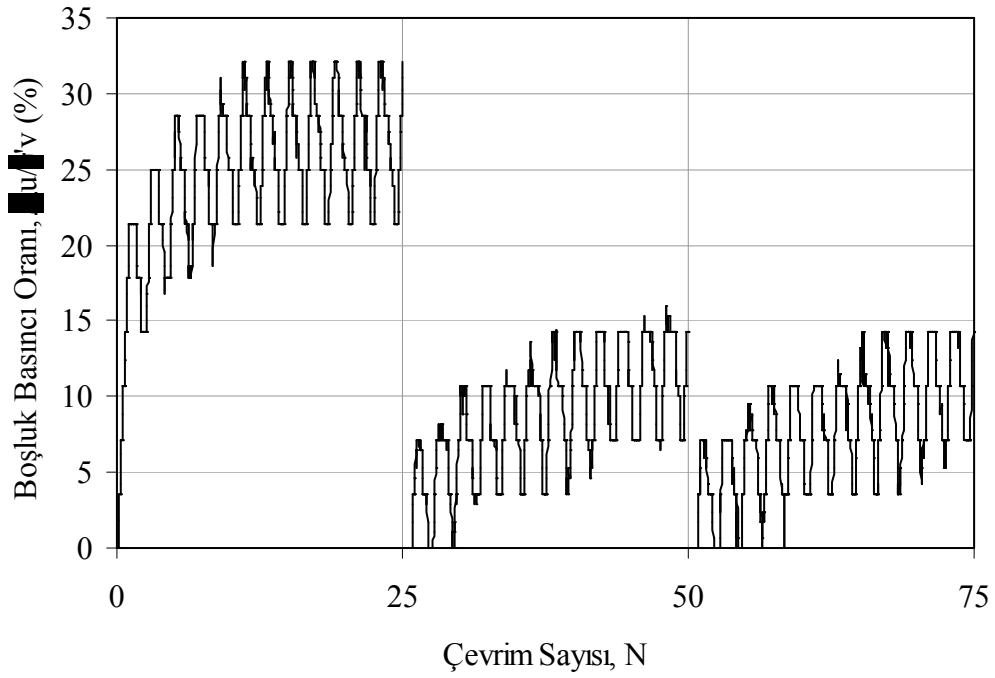


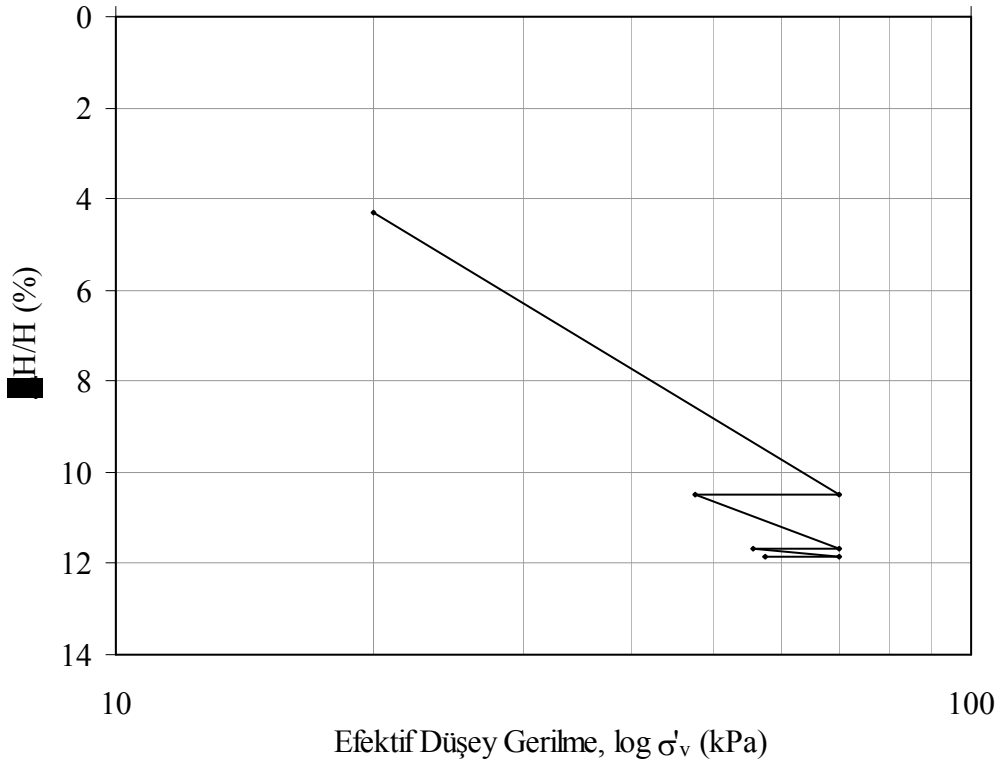


Şekil A.2: 1C-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

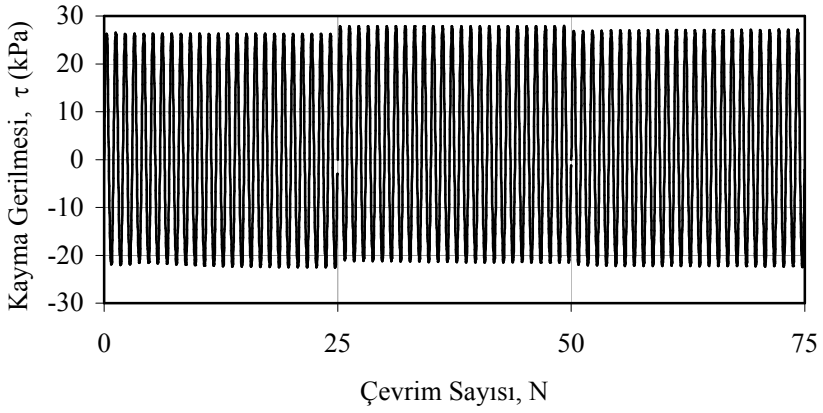


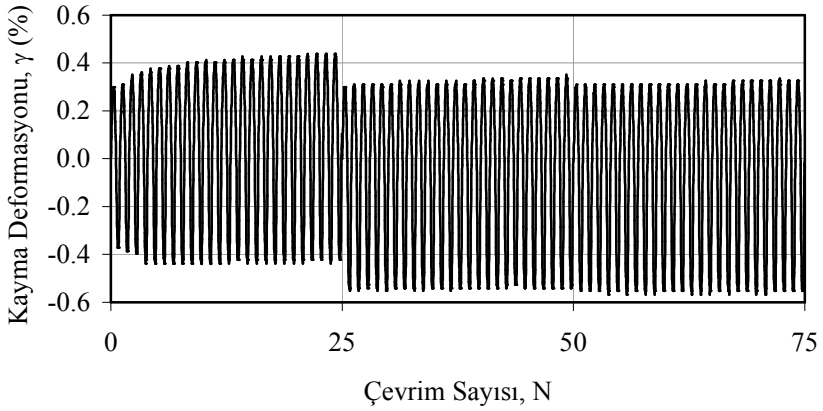
Şekil A.3: 1C-2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

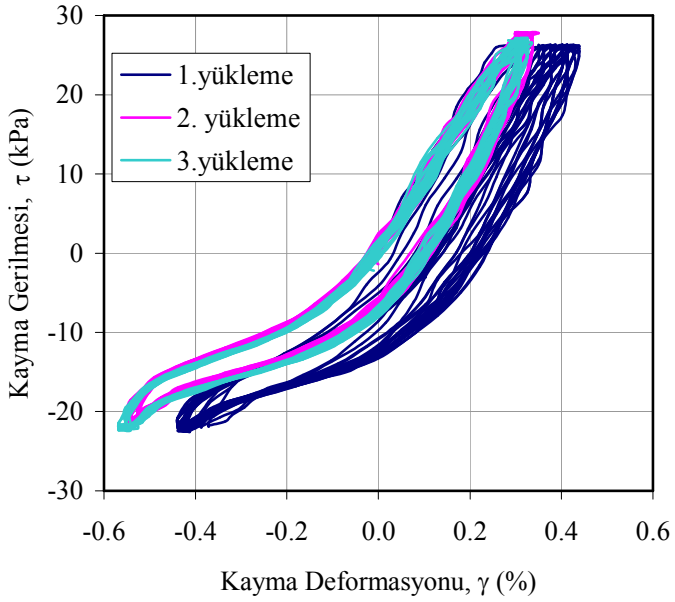




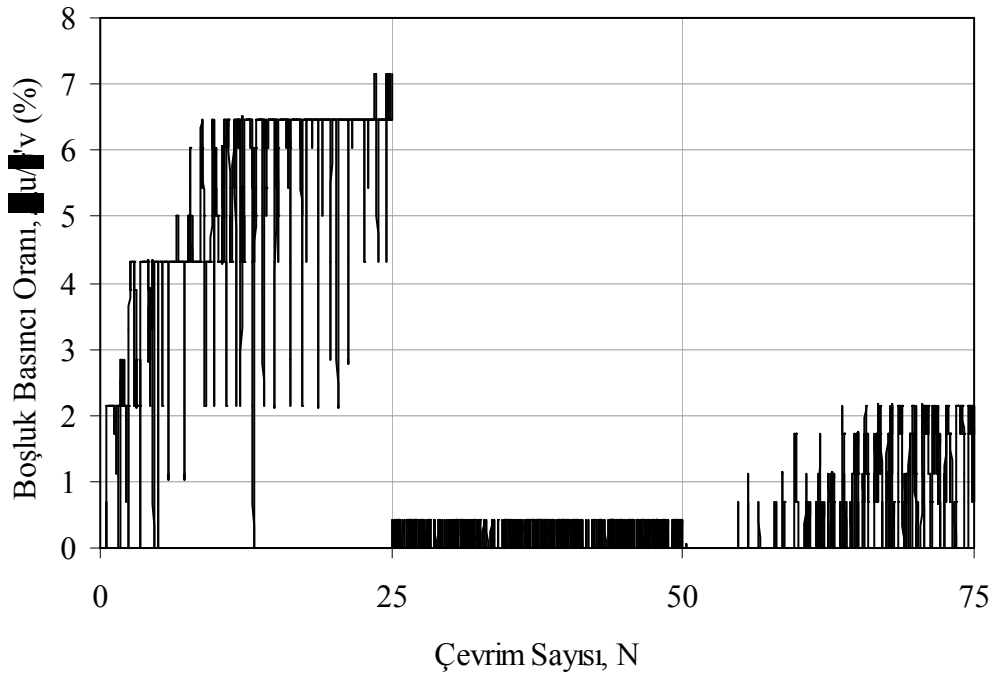
Şekil A.4: 1C-2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

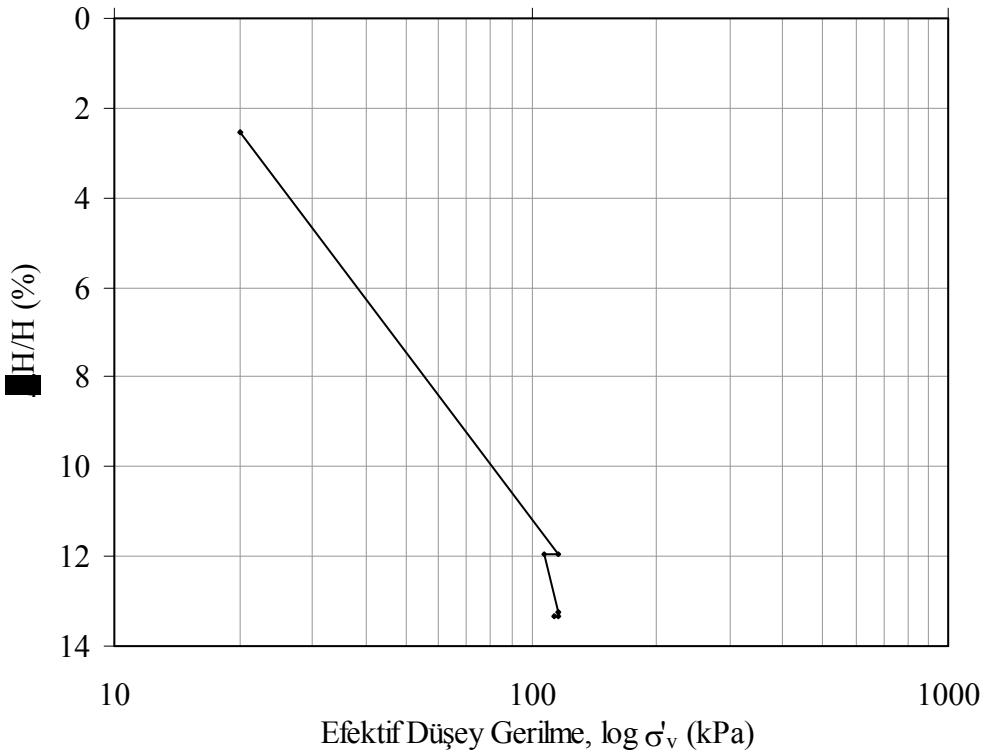




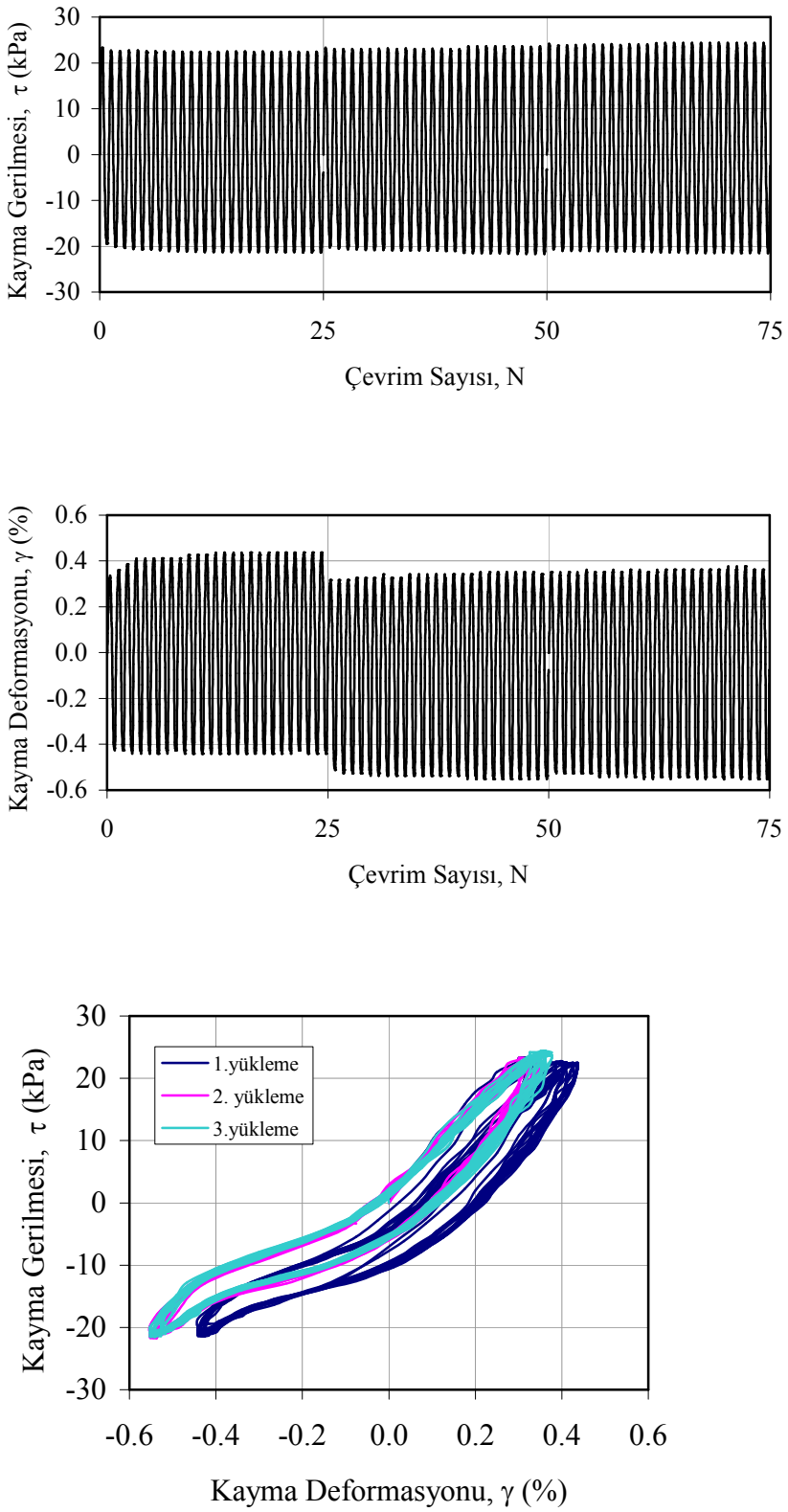


Şekil A.5: 1D-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

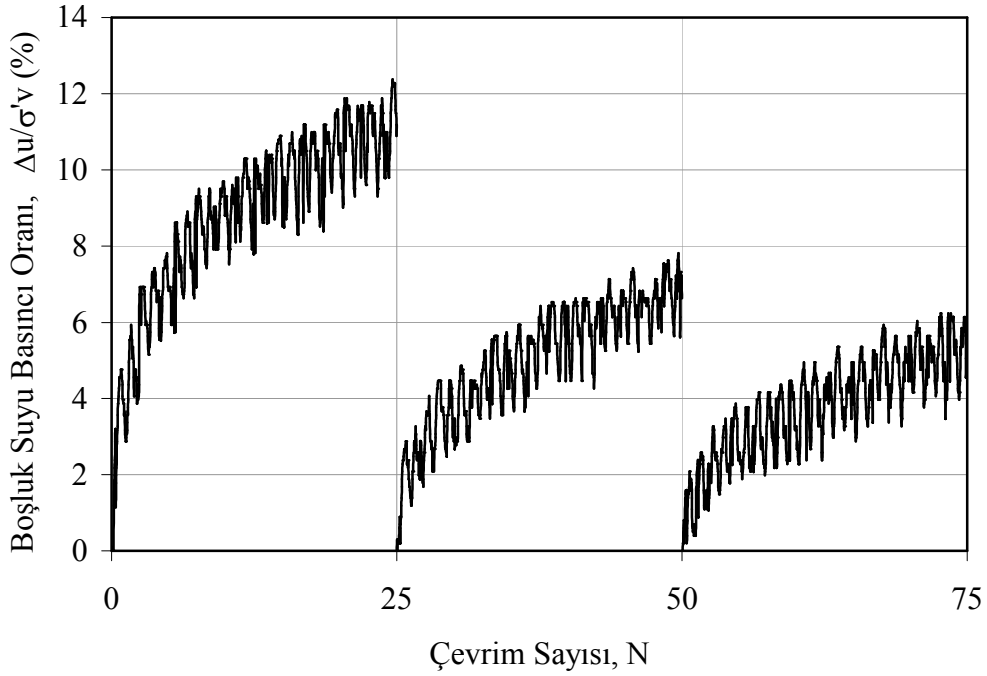


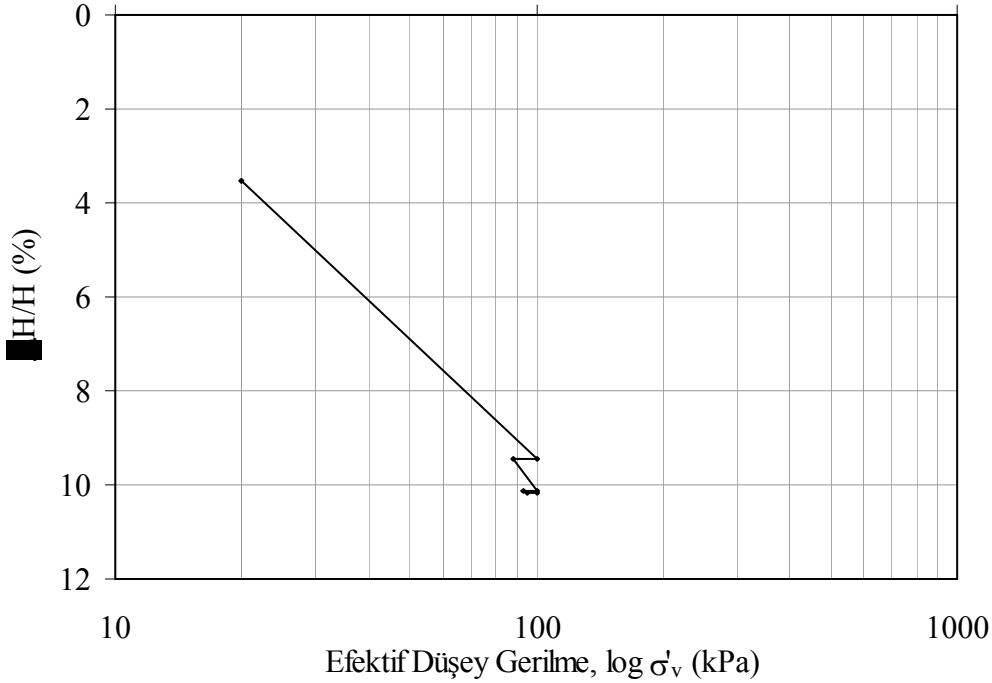


Şekil A.6: 1D-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

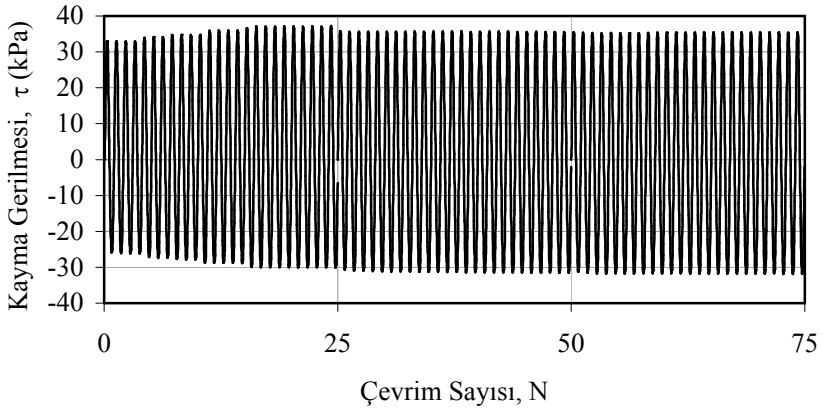


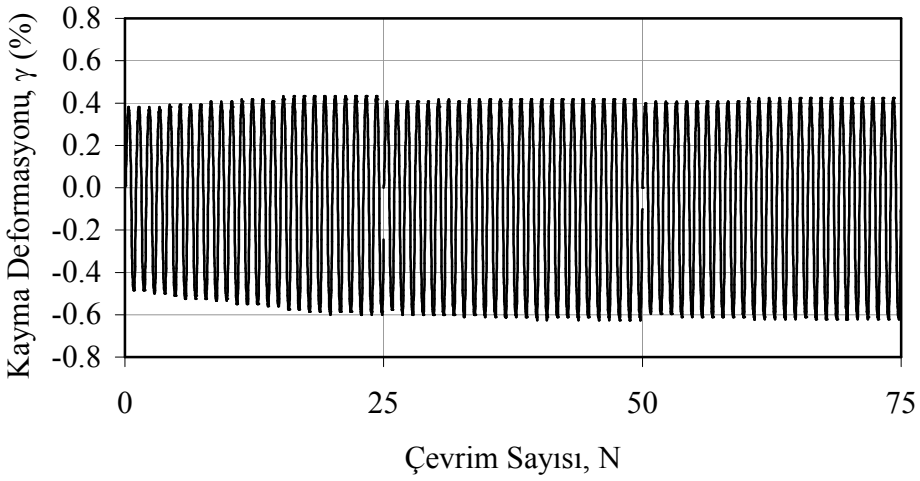
Şekil A.7: 2C-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

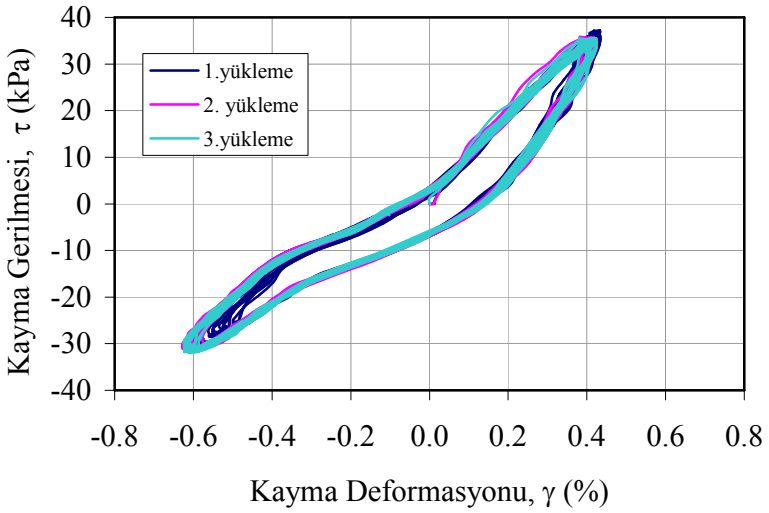




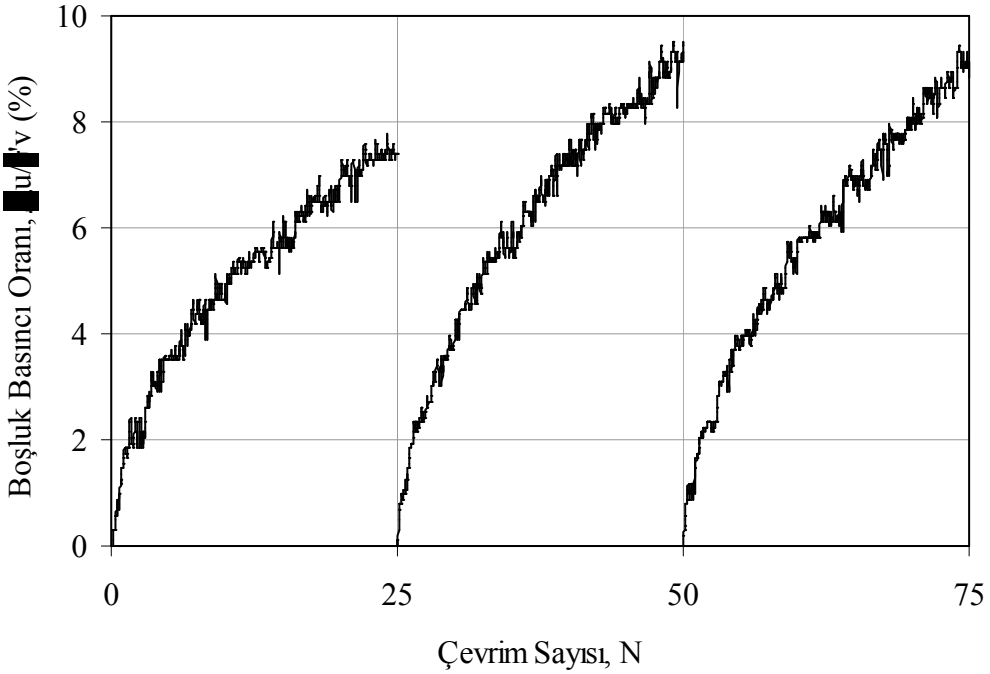
Şekil A.8: 2C-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

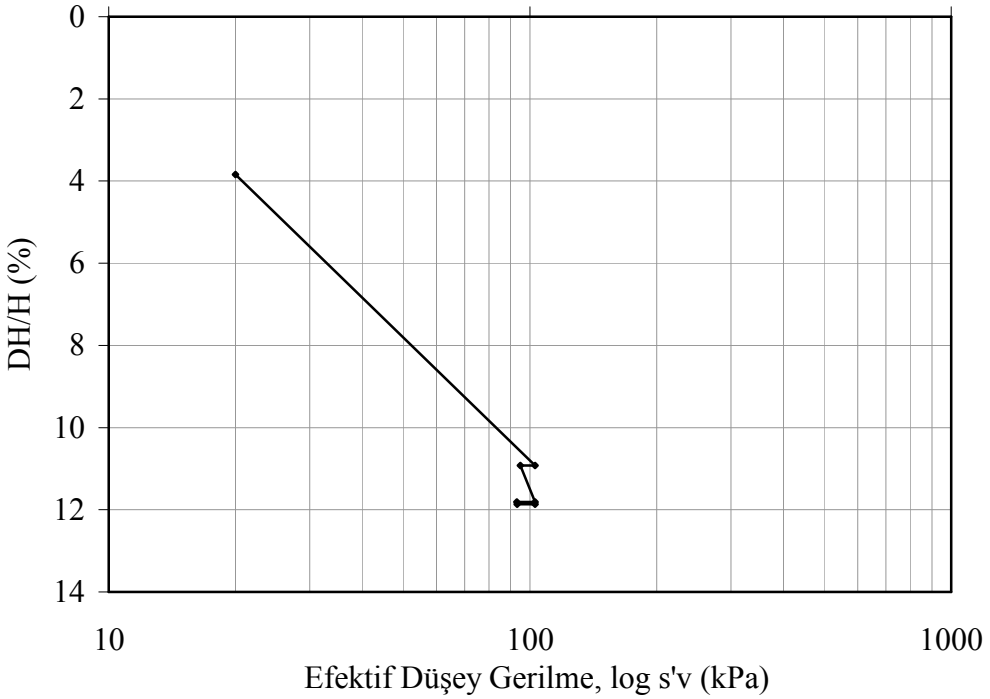




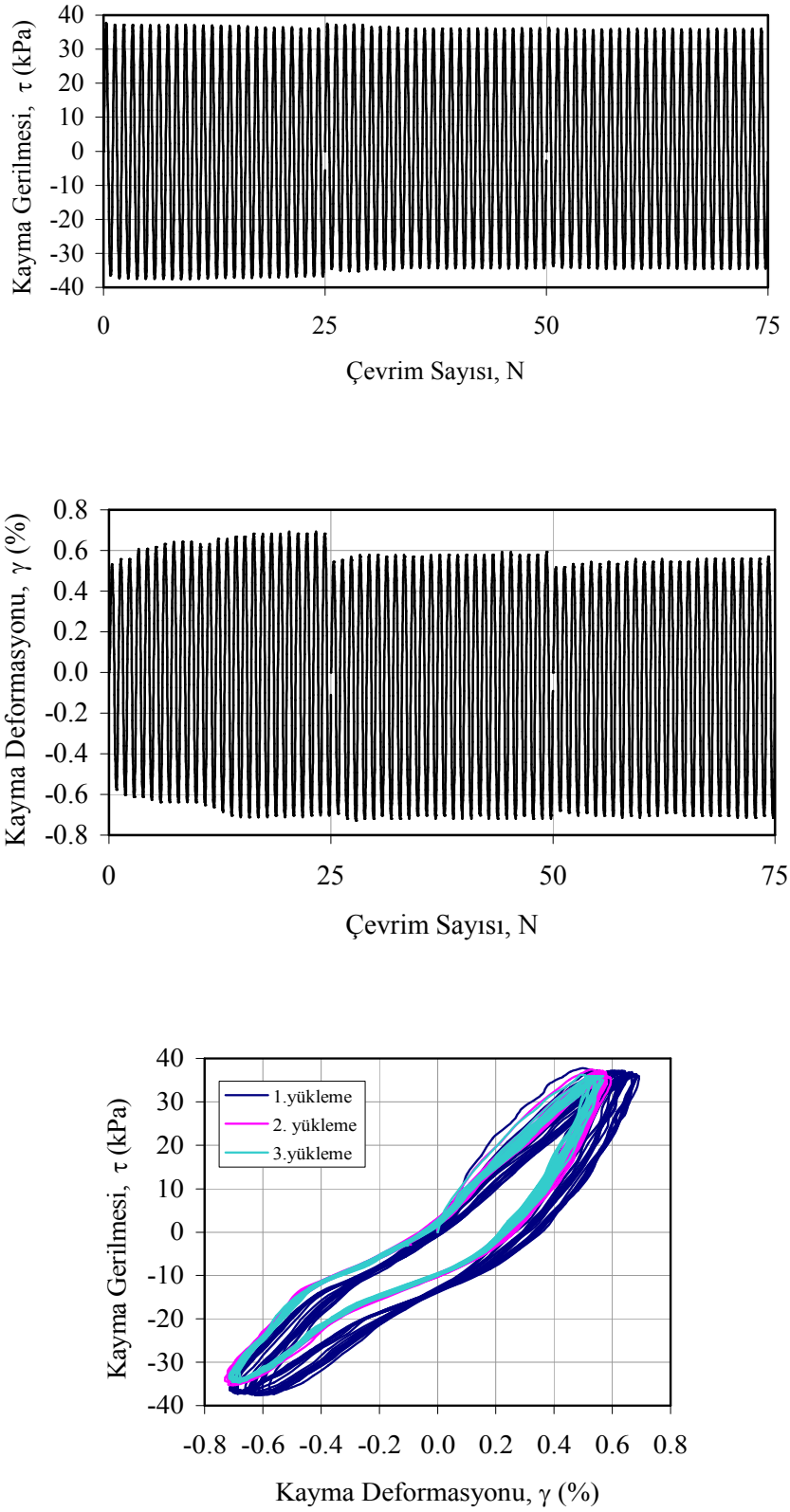


Şekil A.9: 2C-2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

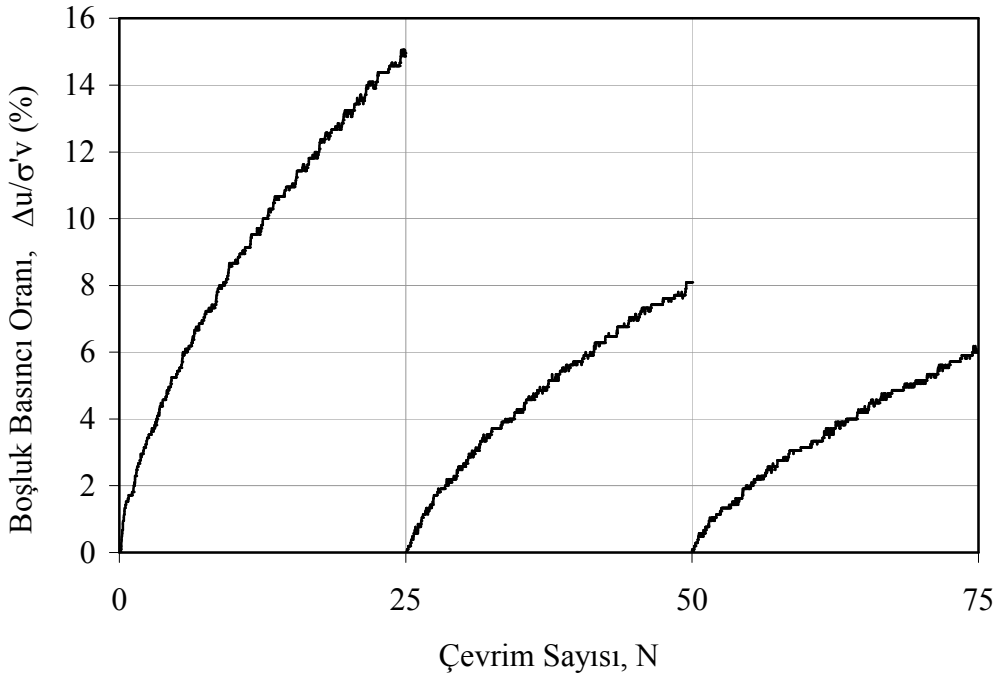


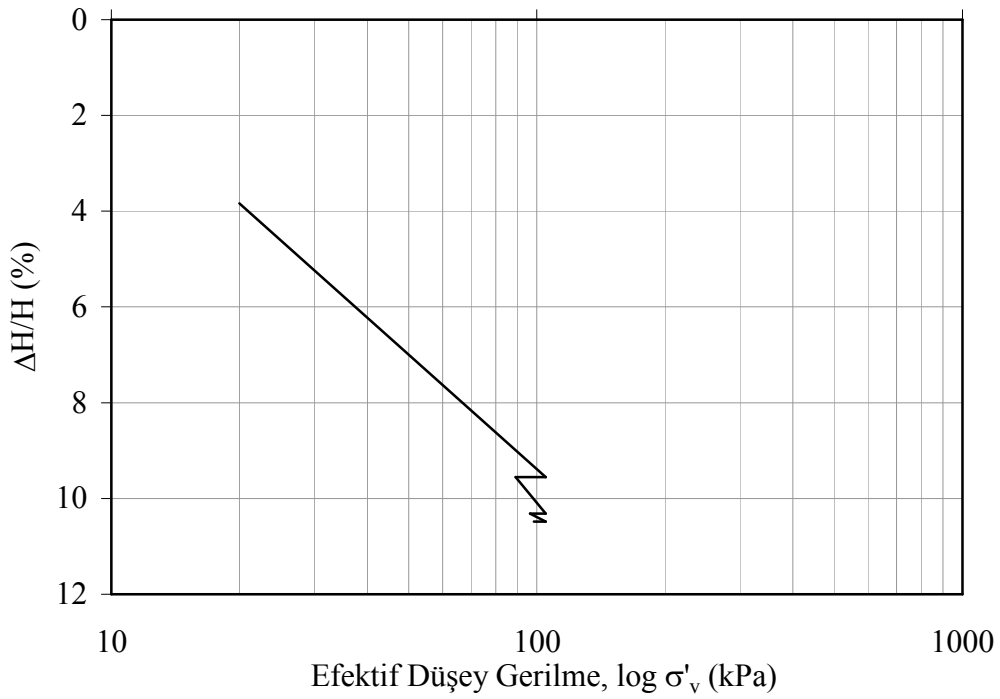


Şekil A.10: 2C-2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

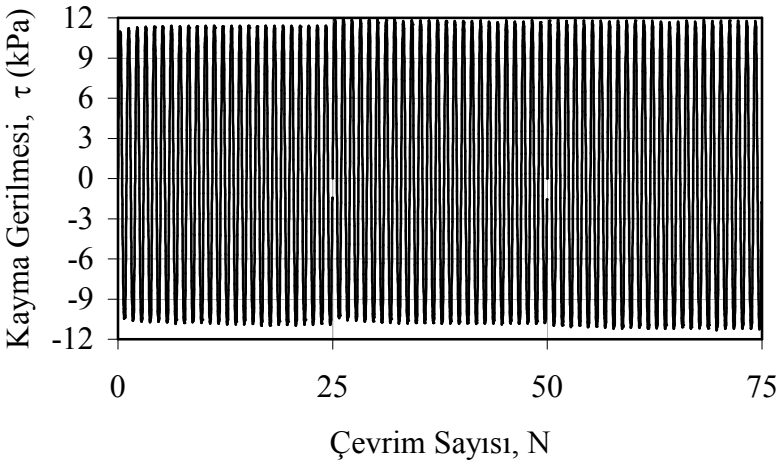


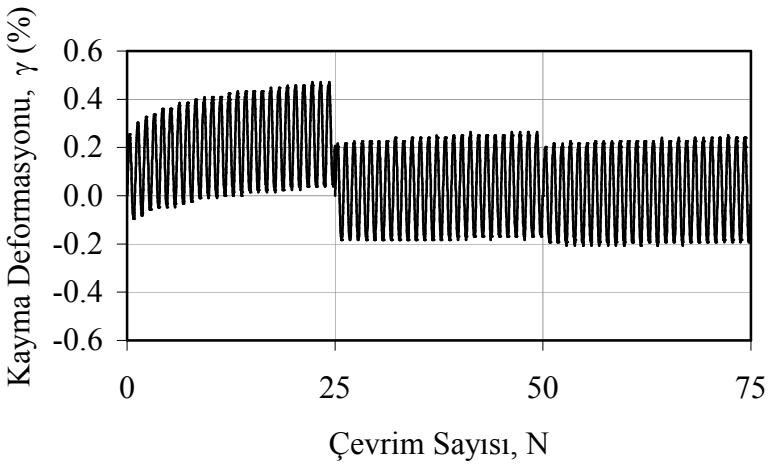
Şekil A.11: 2C-3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

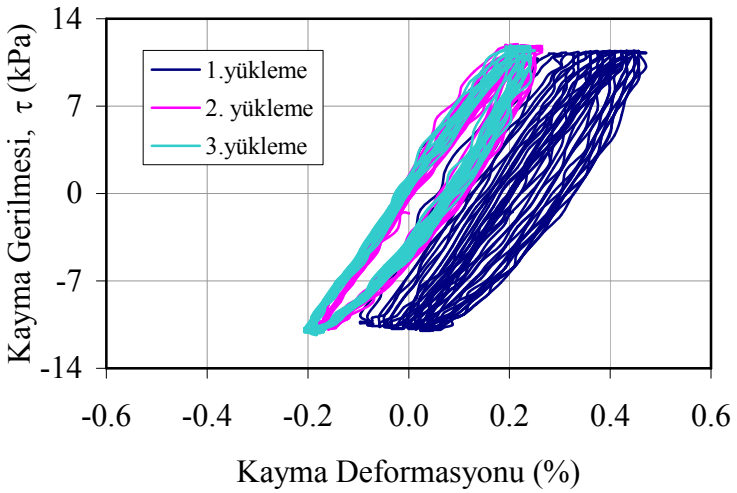




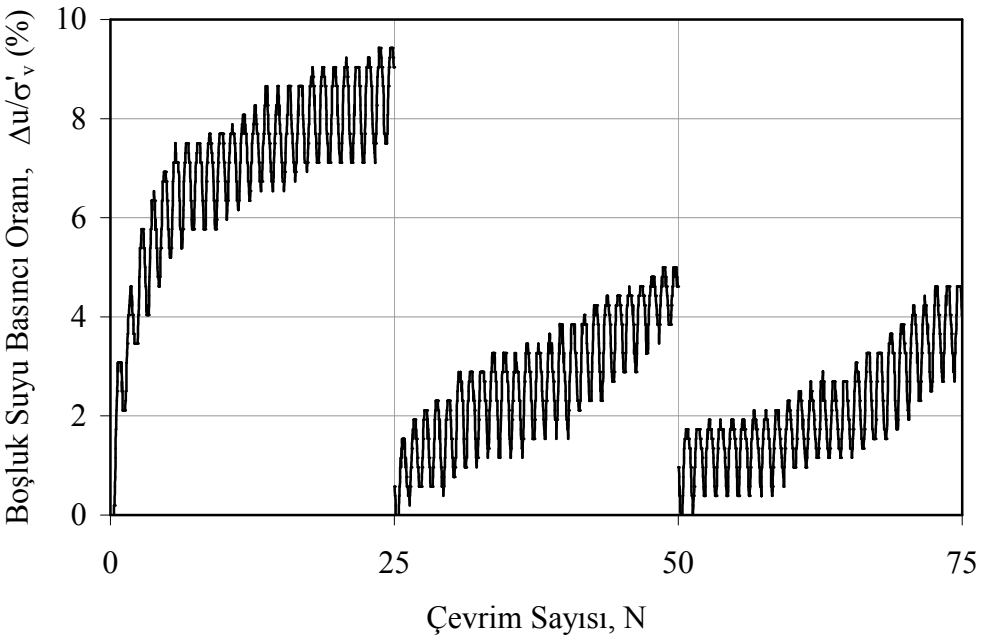
Şekil A.12: 2C-3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

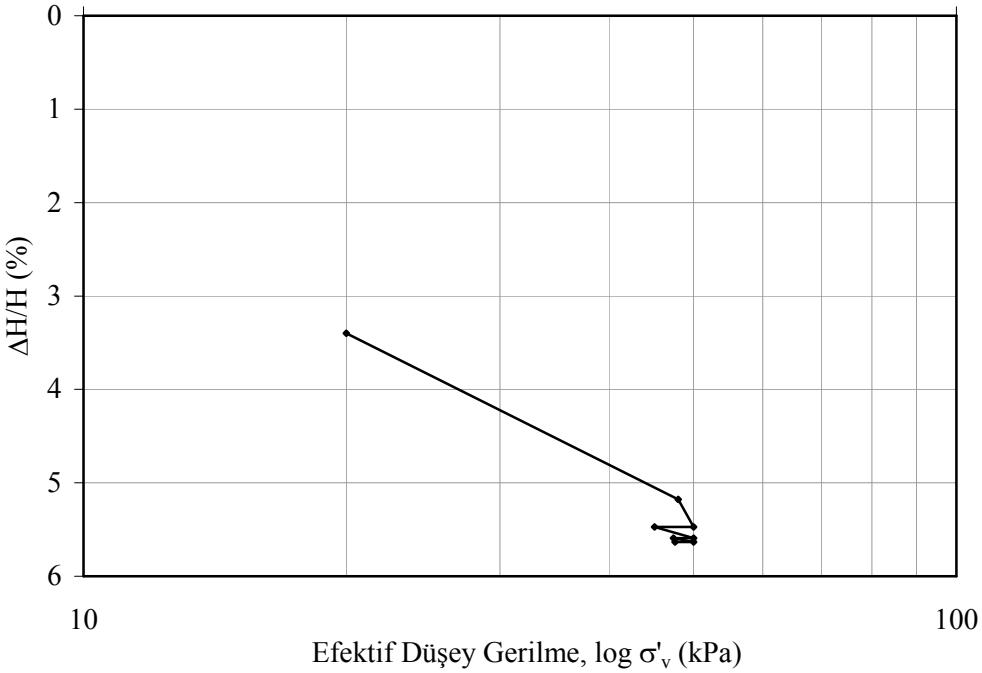




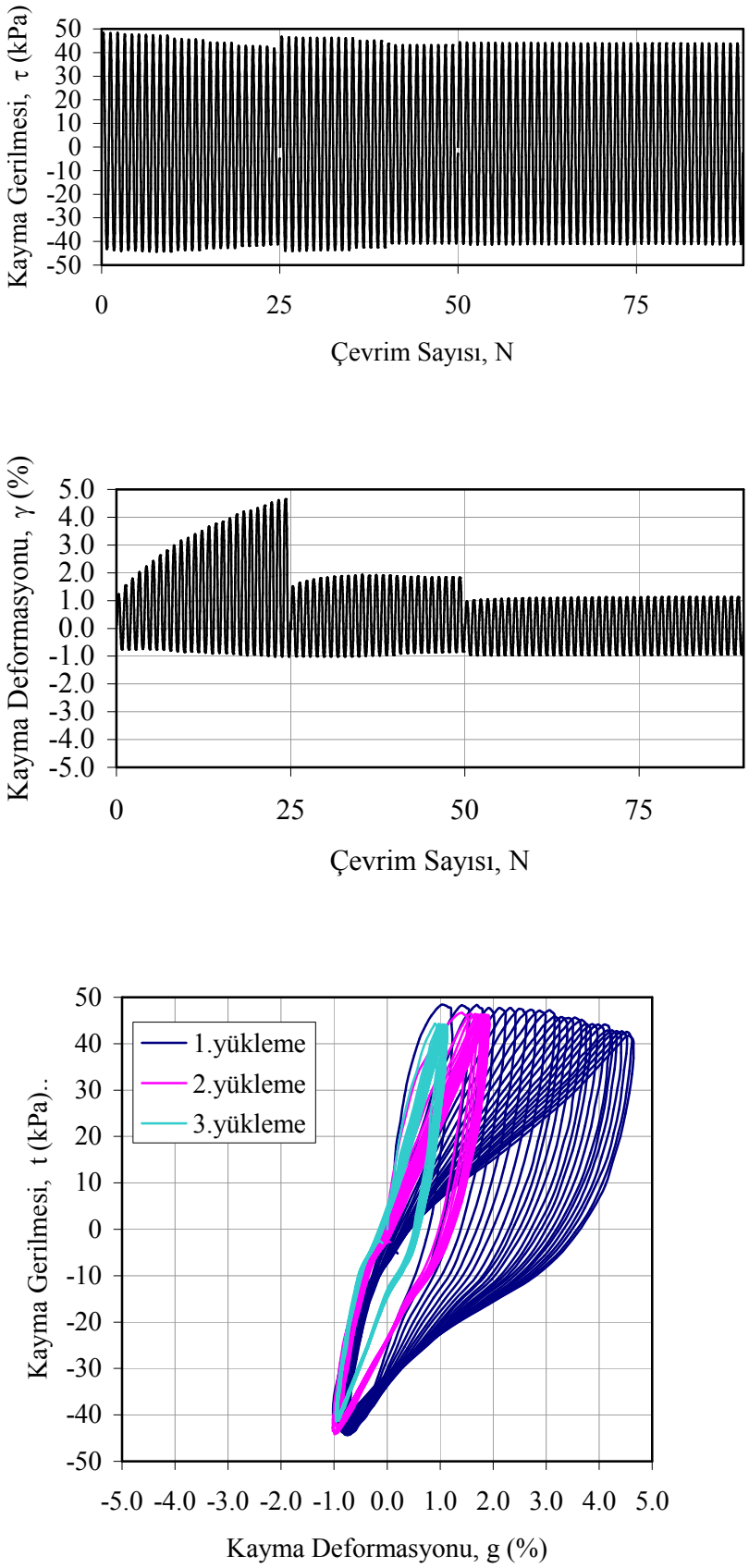


Şekil A.13: 1B-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

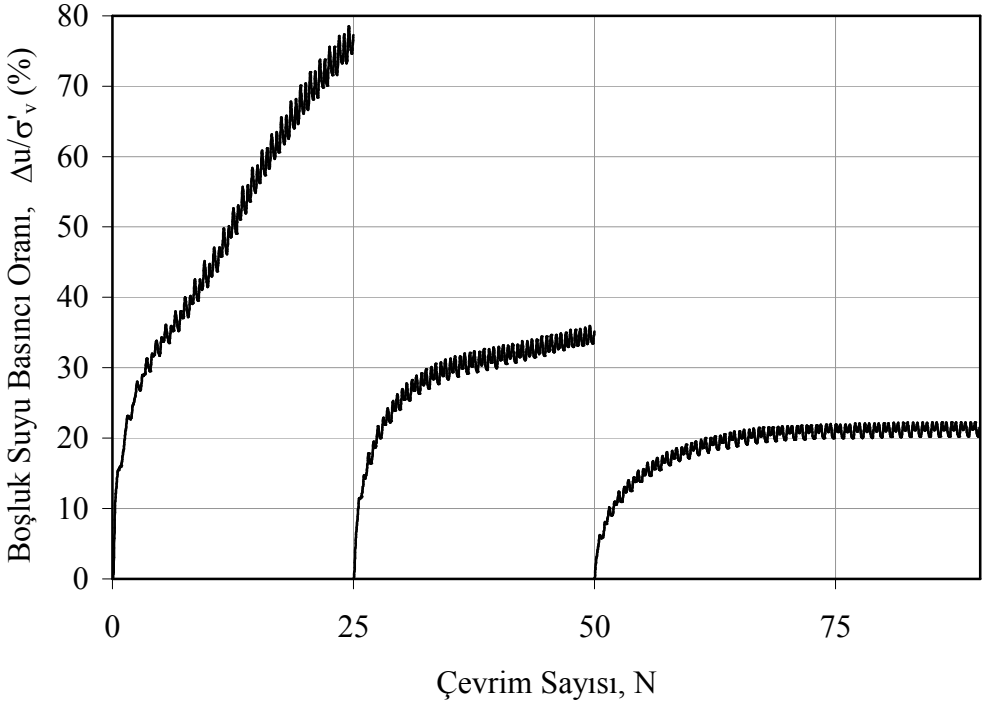


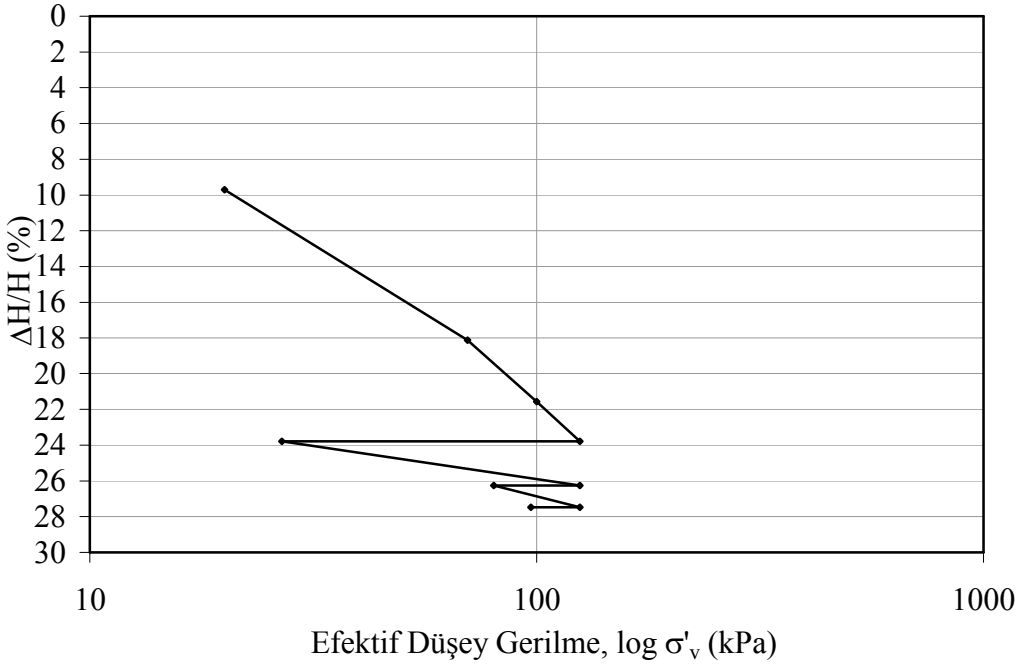


Şekil A.14: 1B-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

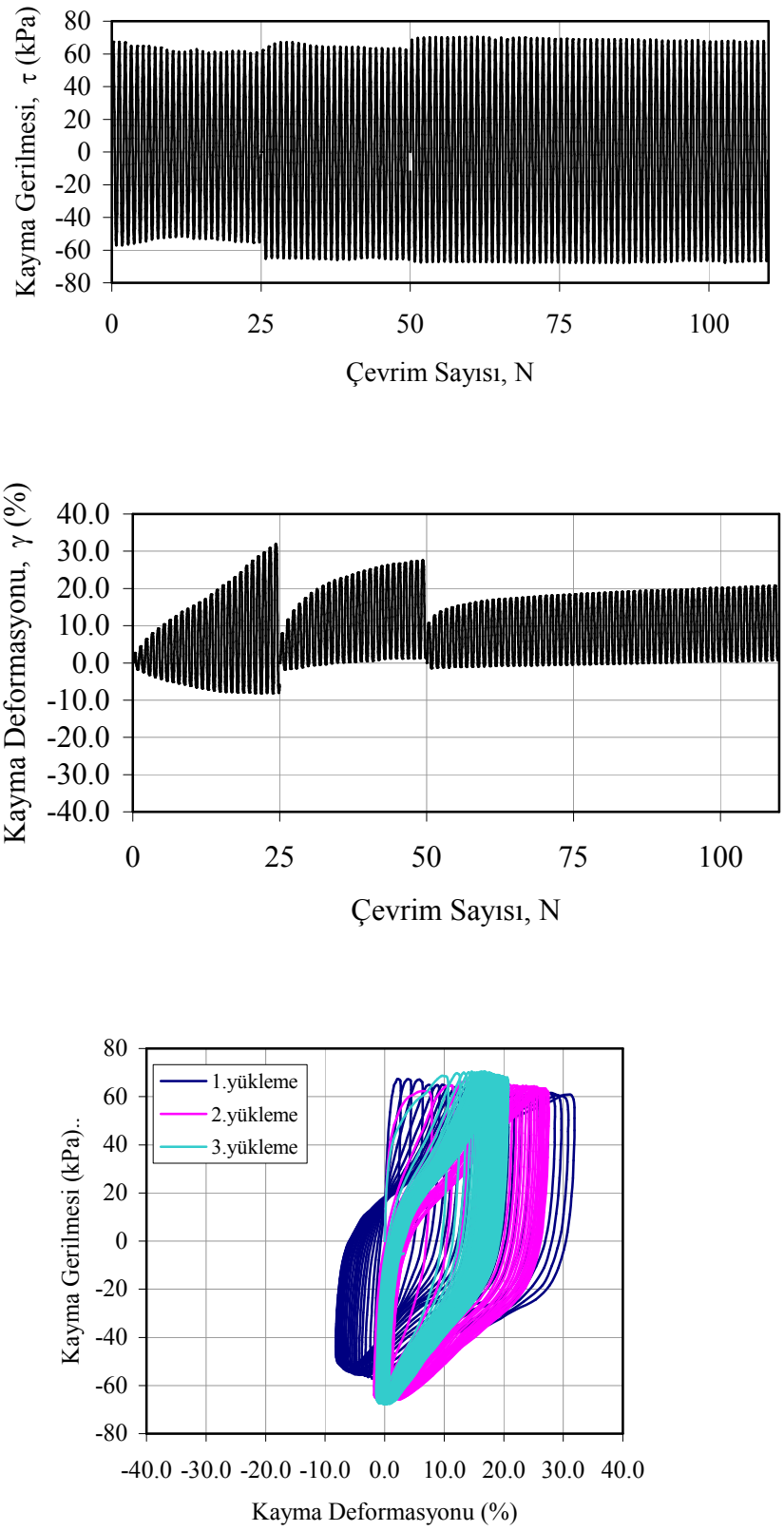


Şekil A.15: 3D-1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

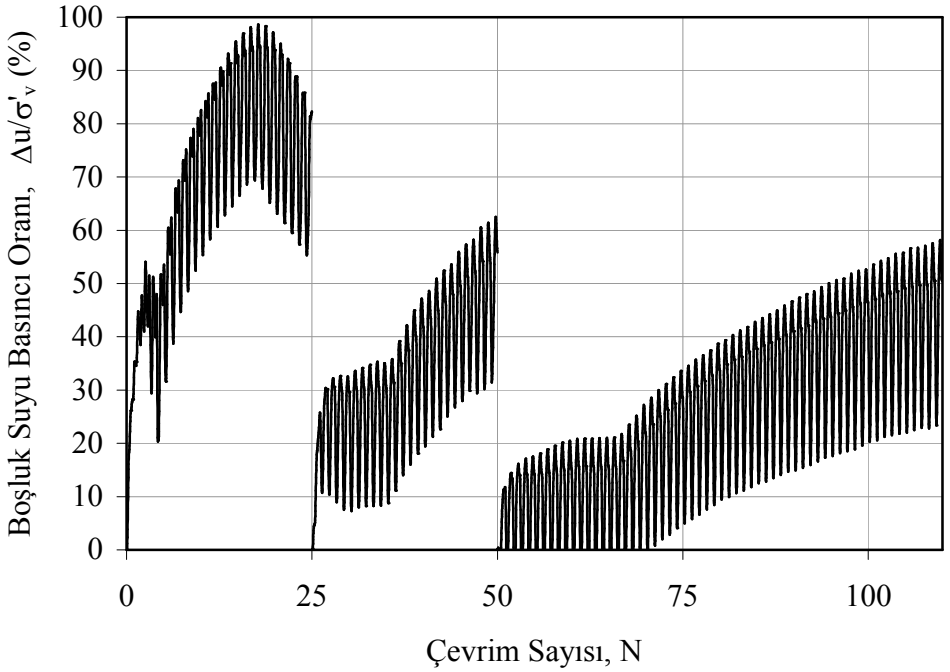


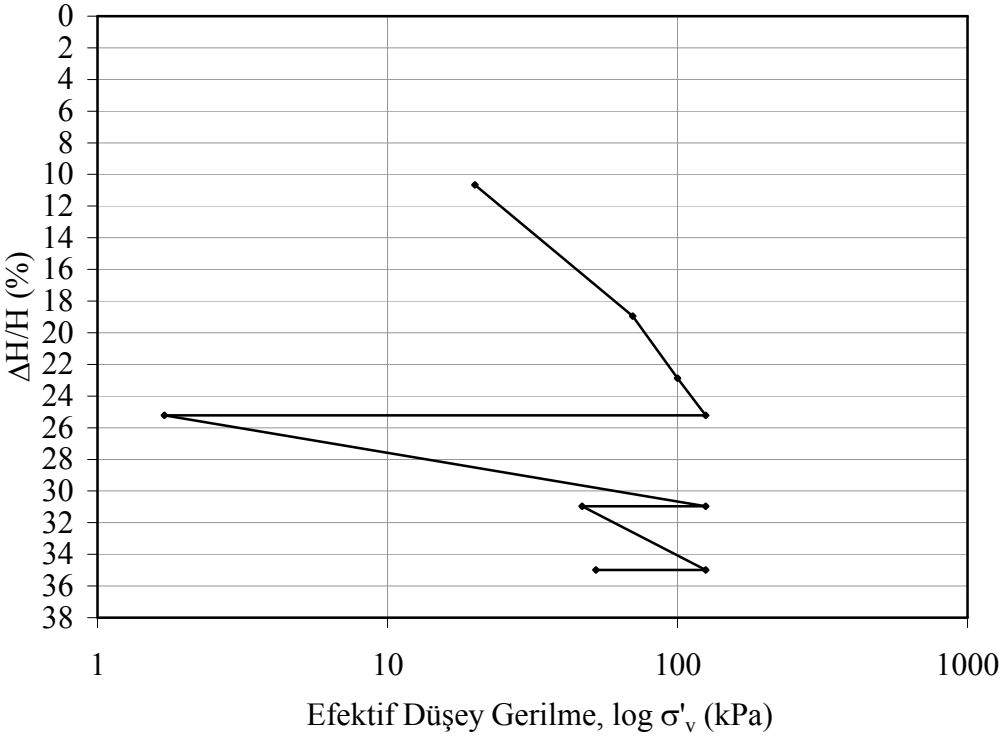


Şekil A.16: 3D-1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

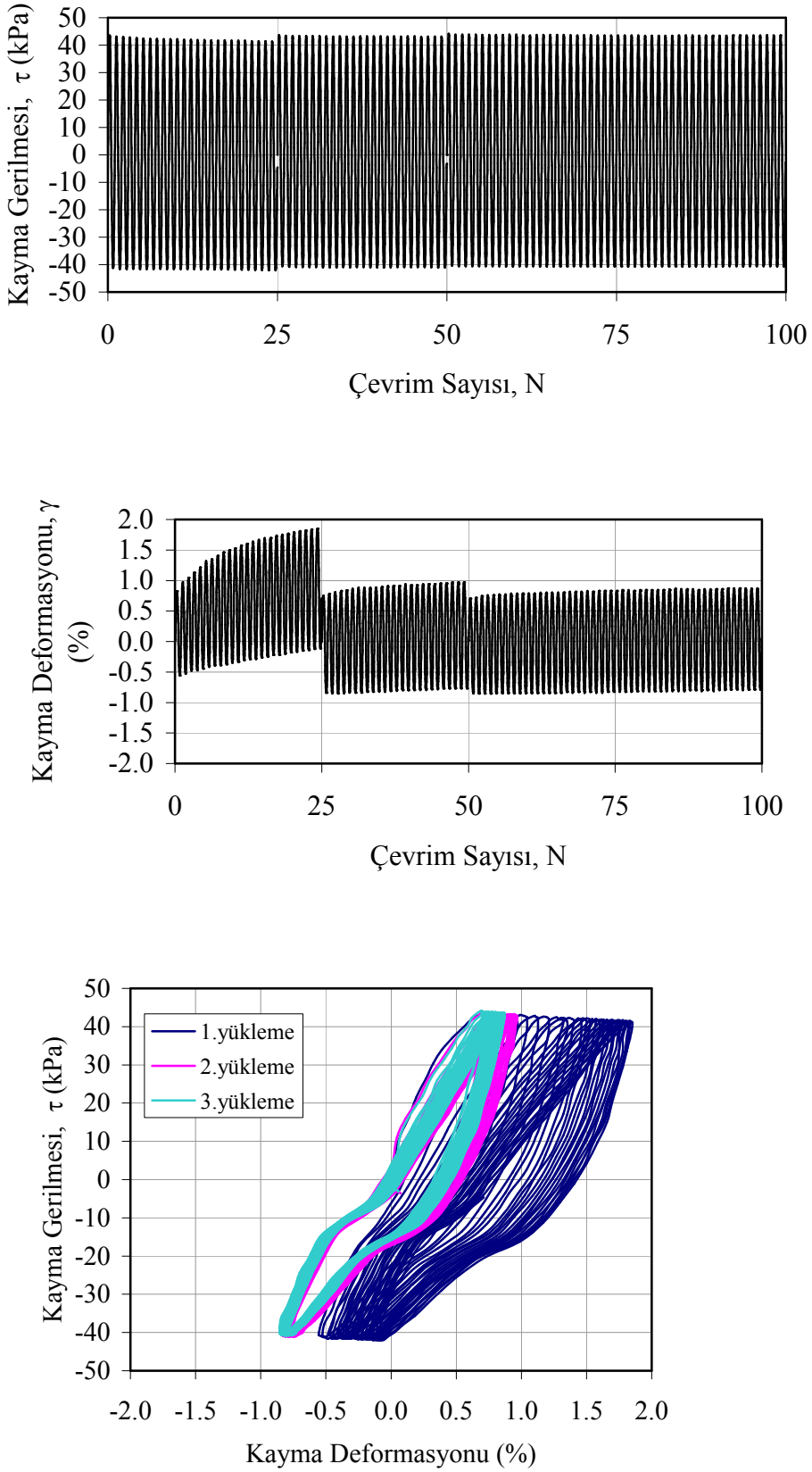


Şekil A.17: 3D-2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

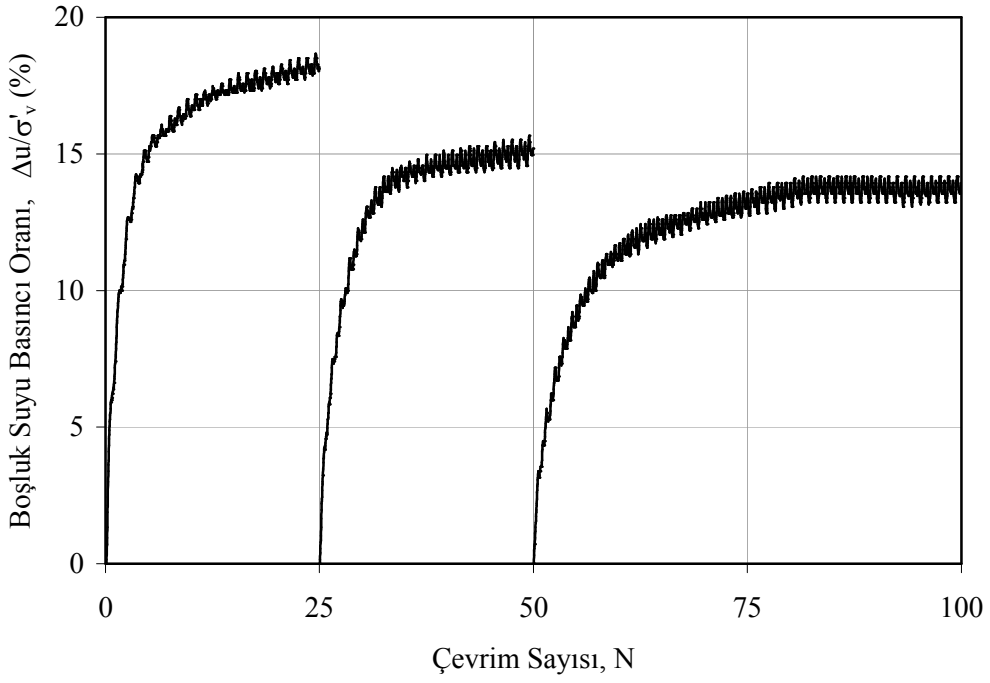


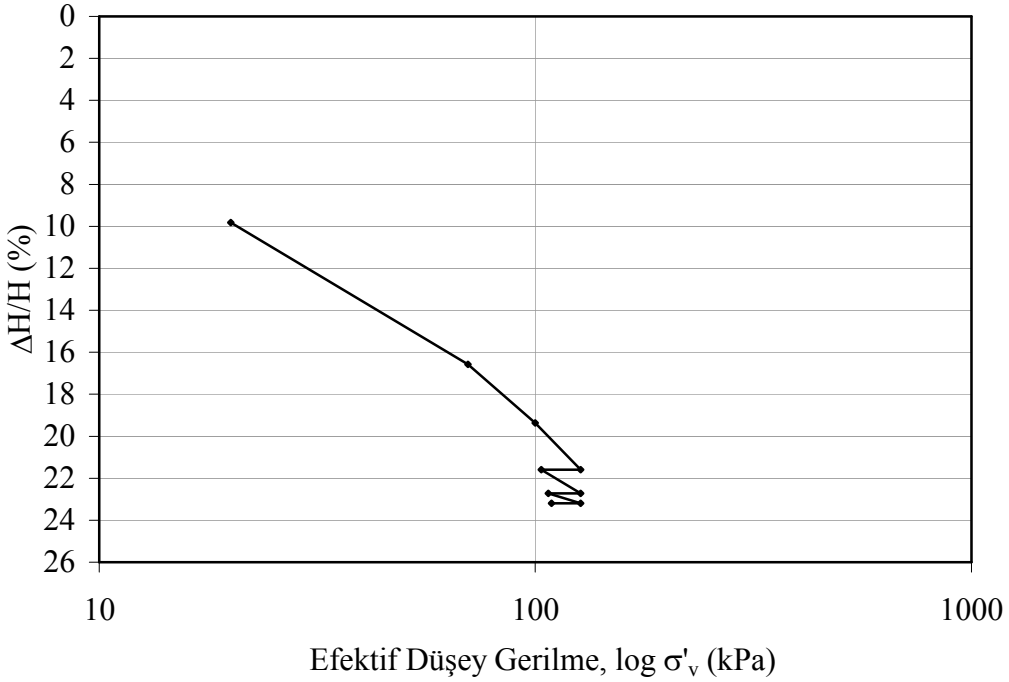


Şekil A.18: 3D-2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

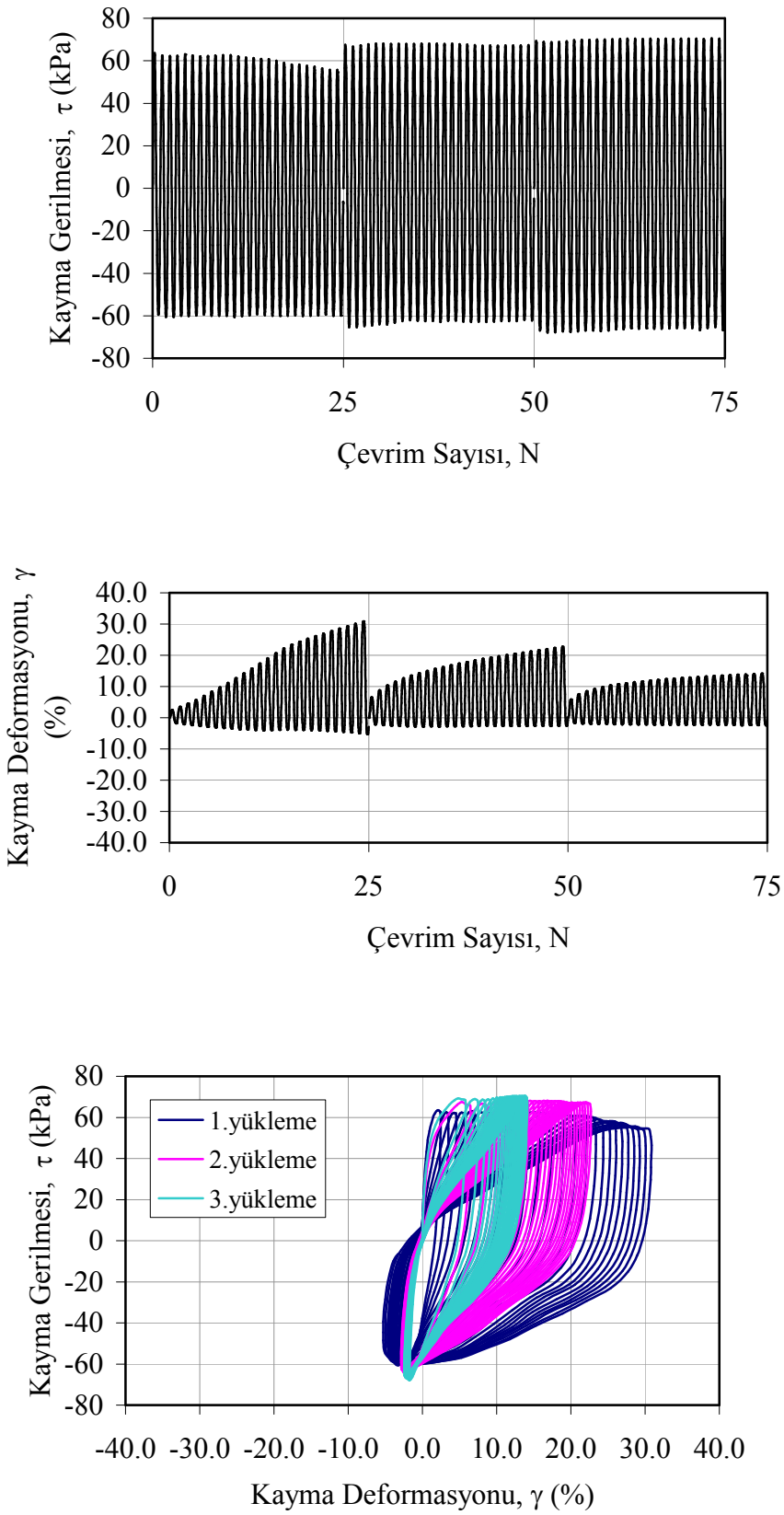


Şekil A.19: 3D-3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.

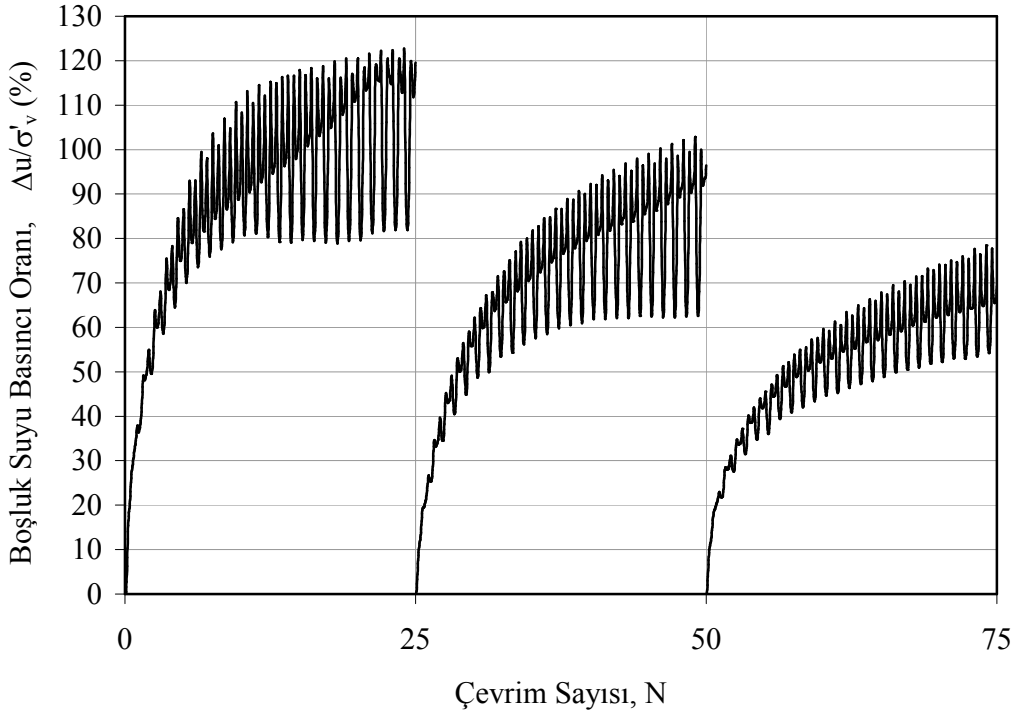


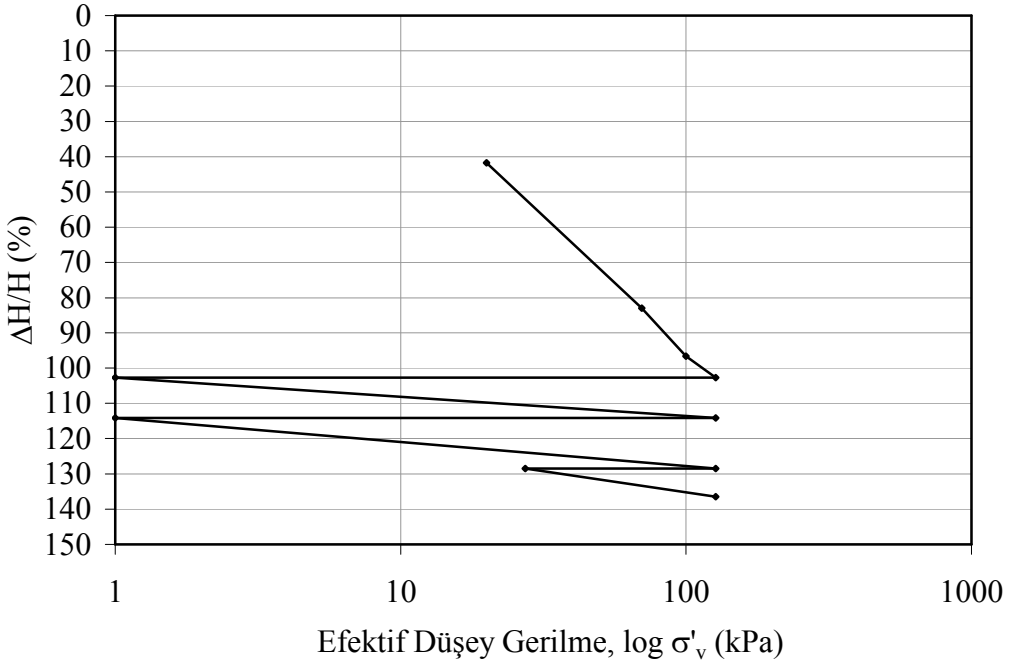


Şekil A.20: 3D-3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.



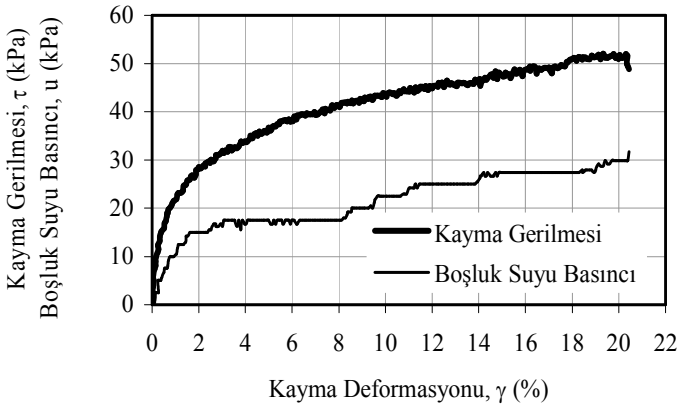
Şekil A.21: 3D-4 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi, kayma deformasyonu ve gerilme deformasyon değişimleri.



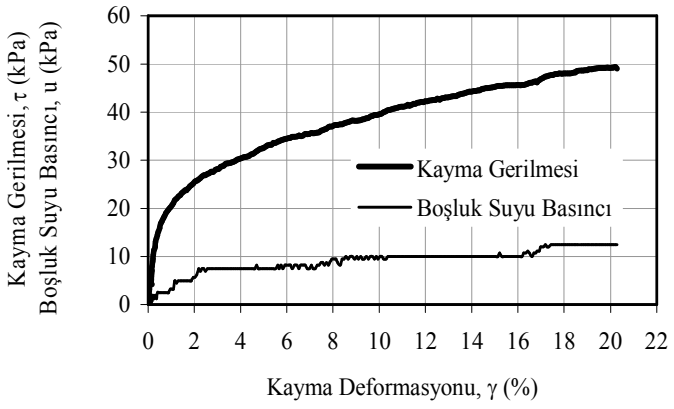


Şekil A.22: 3D-4 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

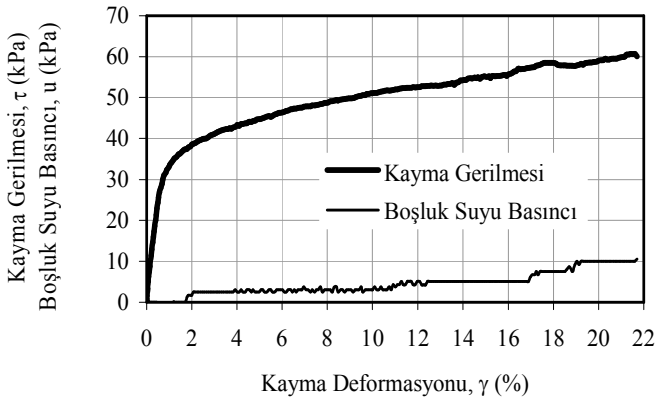
EK B STATİK YÜKLEMELİ DENEY GRAFİKLERİ



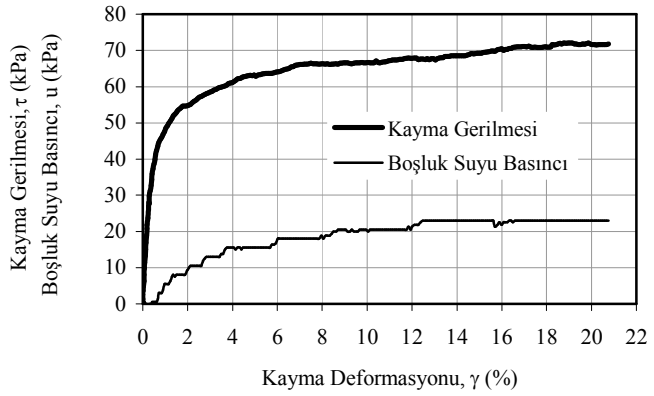
Şekil B.1: 1C tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



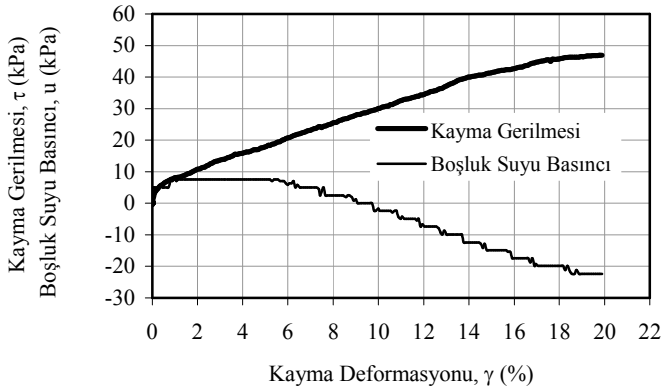
Şekil B.2: 1C-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



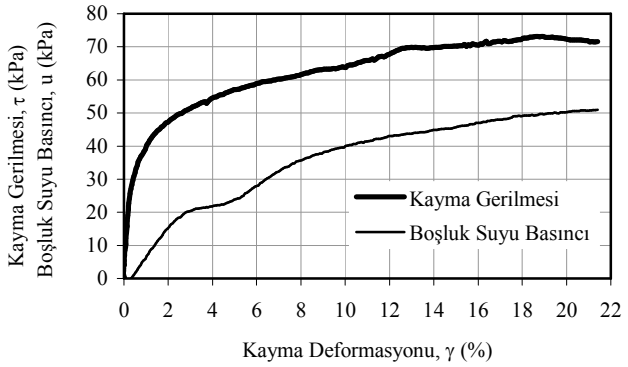
Şekil B.3: 1C-2 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



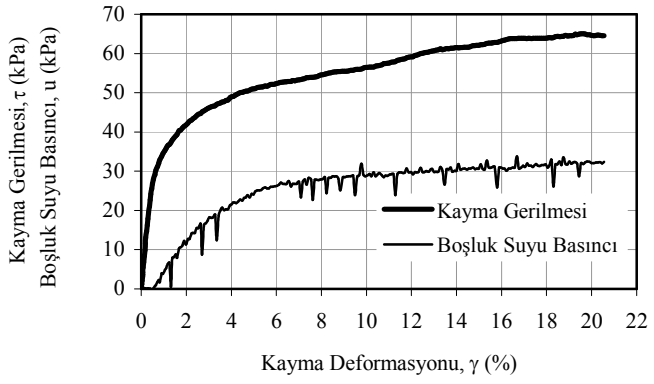
Şekil B.4: 1D tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



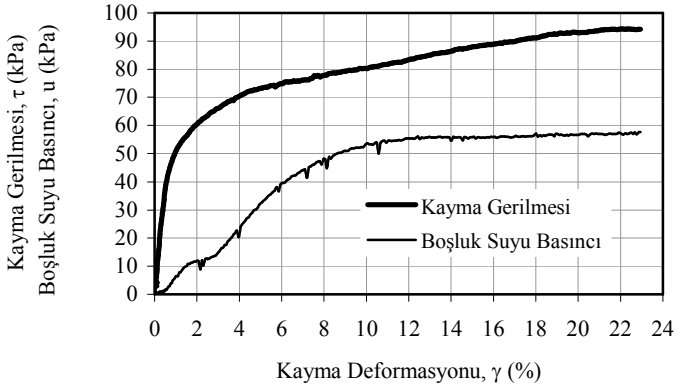
Şekil B.5: 1D-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



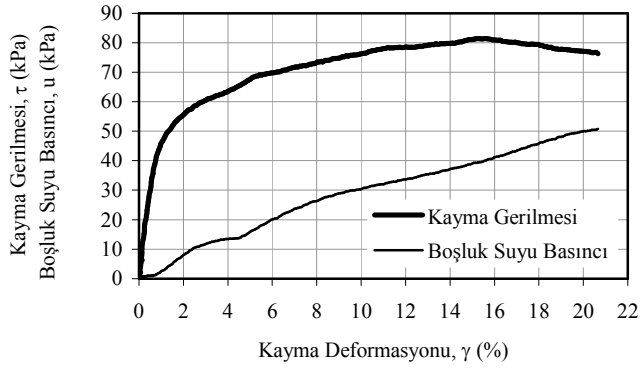
Şekil B.6: 2C tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



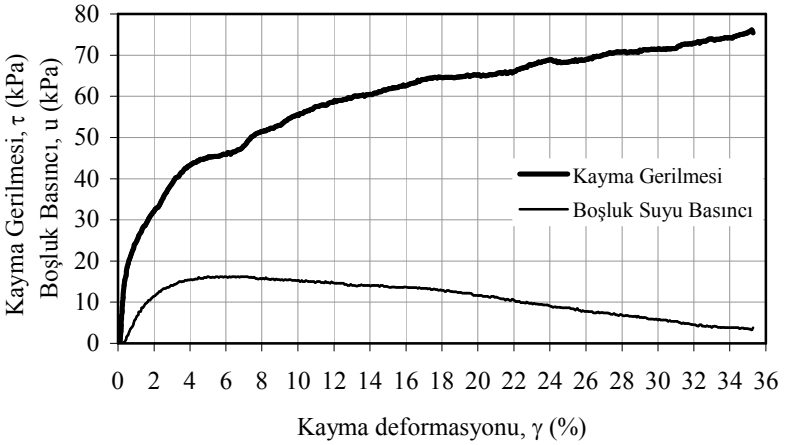
Şekil B.7: 2C-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



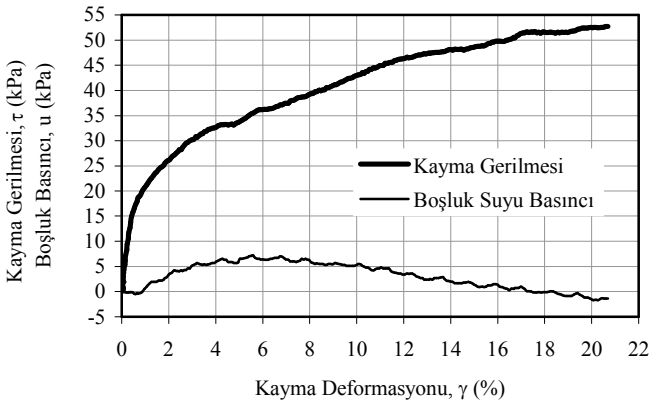
Şekil B.8: 2C-2 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



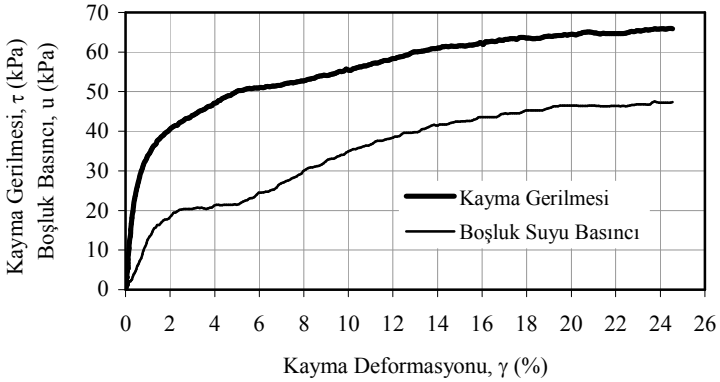
Şekil B.9: 2C-3 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



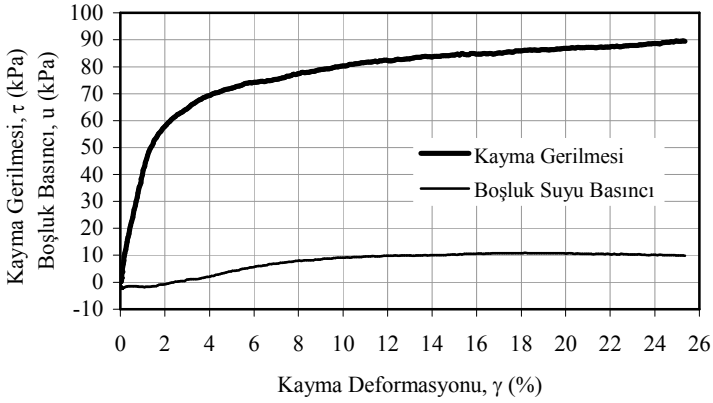
Şekil B.10: 1B tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



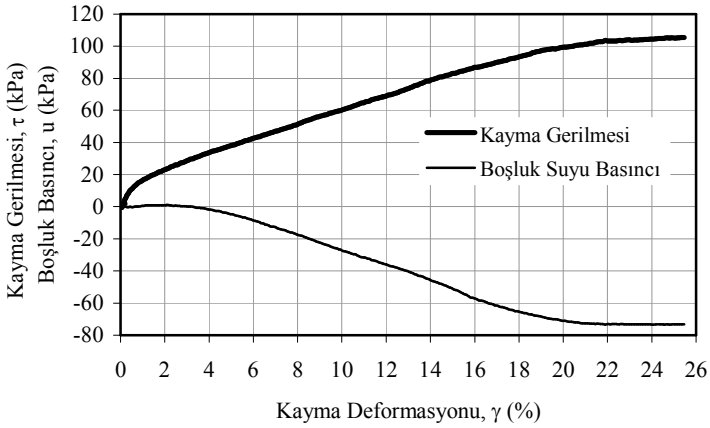
Şekil B.11: 1B-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



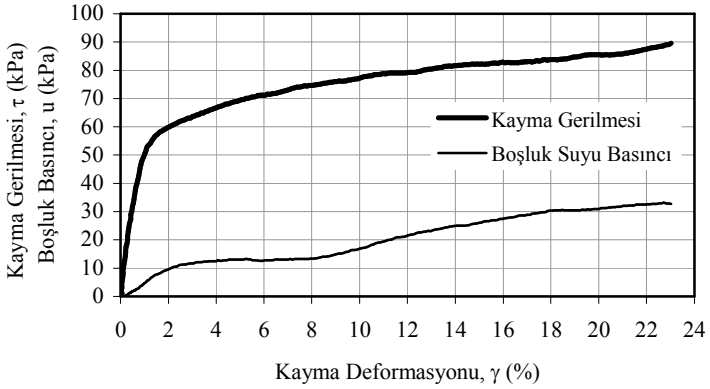
Şekil B.12: 3D tüpü için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



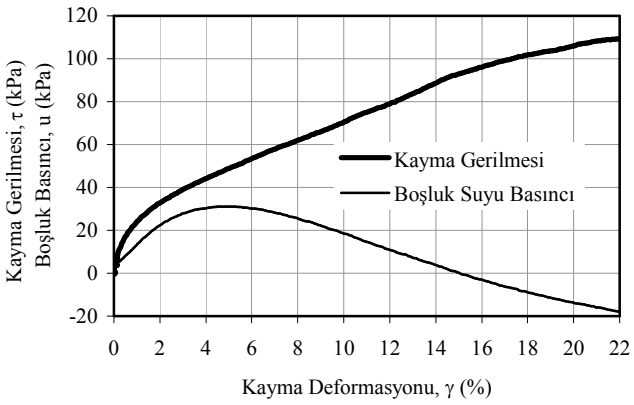
Şekil B.13: 3D-1 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



Şekil B.14: 3D-2 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



Şekil B.15: 3D-3 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi.



Şekil B.16: 3D-4 deneyi için kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncının kayma deformasyonuyla değişimi

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini İstanbul'da tamamladıktan sonra 1999 yılında İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek öğrenime başladı. 2004 yılında lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programında yüksek lisansa başladı. Halen Geoteknik Etüd, Müşavirlik ve Mühendislik A.Ş. Proje Departmanında çalışmaktadır.