

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ SİLTİ KİLLERİN DİNAMİK
DAVRANISININ ARASTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Murat ÖZMEN

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ SİLTİLİ KİLLERİN DİNAMİK
DAVRANISININ ARASTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Murat ÖZMEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ayfer ERKEN (İ.T.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Atilla ANSAL (B.Ü.)

Doç.Dr. Hüseyin YILDIRIM (İ.T.Ü)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmada çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana kendisiyle çalışma olanağını tanıyan; sevgili hocam Prof. Dr. Ayfer ERKEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Verdikleri destek için sayın hocalarım Prof. Dr. Atilla ANSAL'a ve Doç. Dr. Hüseyin YILDIRIM'a ayrıca teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan babam Güngör ÖZMEN'e, annem Memnune ÖZMEN'e, ablam Eda ÖZMEN'e , abim Polat ÖZMEN'e ve eşim Özlem ÖZMEN'e herşey ve herşeyim için teşekkür ederim.

Beni yüksek lisans için cesaretlendiren ve bu üç senelik süre zarfında beni yalnız bırakmayan, eniştem Hikmet ERGUN ve teyzem Münevver ERGUN'a, babam İsmet UZUN'a, annem Birgül UZUN'a, kardeşim Özkan UZUN'a, Ahmet ŞENER'e, Semih TÜRKDOĞAN'a, Şuayip ÇAVUŞLAR'a, Joseph KUBİN'e, hocam Prof. Dr. Recai BİLGİN'e, Suat BAYAR'a, Onur KIZILYEL'e, Dr. Zülküf KAYA'ya, Ali İbrahim ÖZDEN'e, Hüseyin EKŞİOĞLU'na, Mehmet HACIKULAOĞLU'na, Emre KAYA'ya ve tüm İTÜ Zemin laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmamı rahmetli babaannem Makbule ÖZMEN'e ve 17 Ağustos'da kaybettiğimiz teyzem Kadriye BUĞDAYLI ve eniştem İzzet BUĞDAYLI'ya ithaf ediyorum.

Temmuz 2008

Murat ÖZMEN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
2.ELE ALINAN KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Giriş	3
2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Dinamik Davranış Özellikleri	3
2.2.1 Silt, Siltli Kil ve Killi Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	5
2.2.2 Diğer Zemin Türlerinin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	15
2.2.2.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	16
2.2.2.2 Siltli Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	18
2.2.2.3 Siltli Kum Zeminlerin ve Silt Tabakalı Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları	19
2.3 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Mukavemet Özellikleri	35
2.4 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar	38
2.5 Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi	40
2.6 Numune Hazırlama Yönteminin ve Ekipmanın Dinamik Davranışına Etkisi	41
2.7 Zemin Yapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Koşullarında Değişimi	43
2.8 Sonuç	44
3. DENEY YÖNTEMİ VE KULLANILAN MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ	45
3.1. Giriş	45
3.2 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Sistemi	45
3.2.1 Üç Eksenli Yükleme Hücresi	46
3.2.2 Düşey Yük ve Burulma Momenti Yükleme Sistemi	49
3.2.3 Hava-Su Kontrol Uygulama Birimi	49
3.2.4 Ölçüm ve Kayıt Sistemi	51
3.2.5 Numune Hazırlama Esnasında Kullanılan İç ve Dış Kalıplar	55
3.3 Numune Hazırlama Yöntemi ve Numunelerin Özellikleri	55

3.3.1 Numune Hazırlama Yöntemi	55
3.3.2 Deney Sisteminin Kalibrasyonu	67
3.3.3 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Endeks Özellikleri	69
3.4 Zeminde Oluşan Gerilme ve Şekil Değiş-tirmelerin Hesabı	74
3.5 Deney Kaydının Yorumlanması	77
3.6 Sonuç	80
4. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	81
4.1. Giriş	81
4.2 Laboratuvarda Hazırlanan Numunelerde Yapılan Dinamik Deneyler	81
4.3 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Siltli Kil Zeminin Dinamik Davranışı	83
4.3.1 Kuru Birim Hacim Ağırlığının Dinamik Davranışa Etkisi	91
4.4 Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinde Siltli Kil Dinamik Davranışı	93
4.5 Plastisite İndisinin Tekrarlı Gerilme Oranı Üzerindeki Etkisi	97
4.6 Sonuç	98
5. SONUÇLAR	100
KAYNAKLAR	103
EKLER	111
EK A Yapılan deneylerin grafikleri	112
EK B Deney Numunelerinin Fotoğrafları	135
ÖZGEÇMİŞ	145

KISALTMALAR

DKGO	: Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı
DKÜE	: Deformasyon Kontrollü Üç Eksenli
DKKK	: Deformasyon Kontrollü Kesme Kutusu
GKDD	: Gerilme Kontrollü Düzlem Deformasyon
DKDD	: Deformasyon Kontrollü Düzlem Deformasyon
ÜEB	: Üç Eksenli Basınç
GÜEB	: Gerçek Üç Eksenli Basınç
SB	: Serbest Basınç
İDO	: İnce Dane Oranı
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Deney sonuçlarına etkiyen parametreler	5
Tablo 3.1 Burulmalı Kesme Deneylerinde İzotropik Gerilme Durumunda Çevre Basıncı ve Düşey Denge Basıncı Değişim Oranları.....	67
Tablo 3.2 Deneylerde Kullanılan Örselenmiş Numunenin Endeks Deney Sonuçları.....	69
Tablo 3.3a Deneyde kullanılan plastisite indisi % 26 olan siltli kil numuneye ait elek analizi sonuçları.....	70
Tablo 3.3b Deneyde kullanılan plastisite indisi %26 olan siltli kil numuneye ait hidrometre analizi sonuçları.....	71
Tablo 3.4 Deneyde kullanılan plastisite indisi %26 olan siltli kil numunesi kullanılarak yapılan dinamik burulmalı kesme deneyleri ve dinamik üçeksenli deney özellikleri.....	73
Tablo 3.5 Deney kaydının ilk hali.....	78
Tablo 4.1 Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi numunesinde yapılan dinamik burulmalı deney özellikleri (PI=%26).....	82
Tablo 4.2 Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi numunesinde yapılan dinamik üç eksenli deney özellikleri (PI=%26).....	93
Tablo 4.3 PI=%26 olan numunelerin $\pm$ % 2.5 birim kayma deformasyonundaki kayma gerilme oranları ve çevrim sayıları..	97

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Laborauarda hazırlanan silt numunelerin dinamik davranışlarının plastisite indisine etkisi (Puri, 1984).....	7
Şekil 2.2. Laborauarda hazırlanan silt numunelerin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984).....	7
Şekil 2.3. Siltli ve kumlu zeminlerde dinamik mukavemetin plastisite indisile değişimi (El Hosri, 1984).....	8
Şekil 2.4. Örselenmemiş numunelerde ve laboratuarda hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988).....	8
Şekil 2.5. Tekrarlı şekil değiştirme genliği- çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	9
Şekil 2.6. Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi .(Wagg, 1990).....	10
Şekil 2.7. Tekrarlı şekil değiştirme genliği –çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990).....	10
Şekil 2.8. Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu 1992).....	11
Şekil 2.9. Çalışmada elde edilen sonuçların diğer araştırmacıların sonuçları ile karşılaştırılması	13
Şekil 2.10. Tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi değişimi.....	14
Şekil 2.11. Yapay karışımlar için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)-Plastisite İndisi grafiği.....	15
Şekil 2.12 Doğal zeminler için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)-Plastisite İndisi grafiği.....	15
Şekil 2.13 İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara, Yasuda ve Yokota, 1981).....	20
Şekil 2.14. Plastisite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	21
Şekil 2.15. Plastisite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	22
Şekil 2.16. Plastisite indisi % 4 olan iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990).....	22
Şekil 2.17 Düşük plastisteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981).....	24
Şekil 2.18. Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987).....	25

Şekil 2.19	İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992).....	26
Şekil 2.20	Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi ($F = \text{Silt yüzdesi}$) (Troncoso, 1990).....	26
Şekil 2.21	Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1984).....	27
Şekil 2.22	Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995).....	28
Şekil 2.23	TAE-18 sondajındaki zemin kesiti ve kayma dalgası hızı (Erken, 2004).....	30
Şekil 2.24	Düzeltilmiş SPT darbe sayısı-Dinamik kayma gerilmesi ilişkisi ile güvenlik faktörünün derinlikle değişimi	31
Şekil 2.25	Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Tek, İki, Üç Silt Tabakalı ve Tabakasız (Kum Zemin)) (Tunçok, 2005).....	32
Şekil 3.1	Üç eksenli deney sisteminin genel görünümü.....	46
Şekil 3.2	Hücre alt tablasına bağlı vanaların gösterimi.....	47
Şekil 3.3	Hücre üst başlığı.....	48
Şekil 3.4	Düşey yük sistemi ve burulma momentinin genel görünümü.....	49
Şekil 3.5	Hava-Su kontrol ünitesi.....	50
Şekil 3.6	Veri Edinim Ünitesi.....	51
Şekil 3.7	Deney sistemi genel görünümü.....	52
Şekil 3.8	Deney numunesine ait düşey kesitin görünümü.....	53
Şekil 3.9	Numune hazırlama aşamasında kullanılan iç kalıplar.....	56
Şekil 3.10	Numune hazırlama aşamasında kullanılan alt ve üst başlıklar....	57
Şekil 3.11	Numune hazırlama aşamasında kullanılan dış kalıplar.....	58
Şekil 3.12	Membran ve iç kalıpların son hali.....	60
Şekil 3.13	Kuru yağmurlama öncesi membran, iç ve dış kalıplar.....	61
Şekil 3.14	Tabakalı numunenin son hali.....	63
Şekil 3.15	Üç eksenli tripodun numunenin üst başlığına takılması durumu.	64
Şekil 3.16	Dijital ölçüm panosu.....	68
Şekil 3.17	Plastisite kartı (Likit limit-Plastisite indisi).....	69
Şekil 3.18	Siltli Kil numuneye ait dane dağılımı eğrisi.....	72
Şekil 3.19	Burulmalı kesme deney aletine ait tipik deney sonuçları.....	79
Şekil 4.1	D2 deneyine ait gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu davranışları.....	84
Şekil 4.2	Siltli kil zeminde meydana gelen histeresis ilmikleri, $\tau_d/\sigma_c=0.20, PI = \%26$	85

Şekil 4.3	Siltli kilde birim kayma deformasyonu-efektif gerilme ilişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \%26$	85
Şekil 4.4	Siltli kilde gerilme izleri, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$	86
Şekil 4.5	D1 deneyine ait gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu davranışları	87
Şekil 4.6	D9 deneyinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncı Oranının Çevrim Sayısı ile ilişkisi.....	88
Şekil 4.7	D7 deneyinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncı Oranının Çevrim Sayısı ile ilişkisi.....	89
Şekil 4.8	İlk Deney Setindeki Deneylerin Boşluk Basıncı Oranlarının ve Birim.Kayma Deformasyonlarının Çevrim Sayılarıyla İlişkileri.	90
Şekil 4.9	Kayma Gerilmesi Oranı – Çevrim Sayısı İlişkisi, $\gamma_k = 1.4 \text{ t/m}^3$, $PI = \%26$	91
Şekil 4.10	D8 ve D10 Deneylerinin Boşluk Basıncı Oranlarının ve Birim Kayma Deformasyonlarının Çevrim Sayılarıyla İlişkileri.....	92
Şekil 4.11	UD3 deneyine ait gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu davranışları.....	94
Şekil 4.12	İlk Deney Setindeki Deneylerin Boşluk Basıncı Oranlarının ve Birim Kayma Deformasyonlarının Çevrim Sayılarıyla İlişkileri	95
Şekil 4.13	Dinamik Üç Eksenli ve Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletlerinin Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı - Çevrim Sayısı İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	96
Şekil 4.14	Tekrarlı Gerilme Oranı - Plastisite İndisi Değişimi ($\gamma_{z0} = \pm \% 2.5$, $\gamma_k = 1.29-1.43 \text{ t/m}^3$).....	98
Şekil A.1	D1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	112
Şekil A.2	D1 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	113
Şekil A.3	D2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	114
Şekil A.4	D2 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	115
Şekil A.5	D3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	116
Şekil A.6	D3 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	117
Şekil A.7	D4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	118
Şekil A.8	D4 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	119
Şekil A.9	D5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	120

Şekil A.10	D5 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	121
Şekil A.11	D6 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	122
Şekil A.12	D6 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	123
Şekil A.13	D7 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	124
Şekil A.14	D7 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	125
Şekil A.15	D8 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	126
Şekil A.16	D8 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	127
Şekil A.17	D9 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	128
Şekil A.18	D9 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi....	129
Şekil A.19	D10 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi.....	130
Şekil A.20	D10 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi.....	131
Şekil A.21	UD1 nolu deneyde kayma gerilmesi, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	132
Şekil A.22	UD2 nolu deneyde kayma gerilmesi, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	133
Şekil A.23	UD3 nolu deneyde kayma gerilmesi, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi.....	134
Şekil B.1	D2 numunesinin fotoğrafı.....	135
Şekil B.2	D3 numunesinin fotoğrafı.....	136
Şekil B.3	D4 numunesinin fotoğrafı.....	137
Şekil B.4	D5 numunesinin fotoğrafı.....	138
Şekil B.5	D6 numunesinin fotoğrafı.....	139
Şekil B.6	D7 numunesinin fotoğrafı.....	140
Şekil B.7	D8 numunesinin fotoğrafı.....	141
Şekil B.8	D8 numunesinin fotoğrafı.....	142
Şekil B.9	UDE1 numunesinin fotoğrafı.....	143

Şekil B.10	UDE2 numunesinin fotoğrafı.....	143
Şekil B.11	UDE3 numunesinin fotoğrafı.....	144

SEMBOL LİSTESİ

τ_d, τ_{cyc}	: Dinamik kayma gerilmesi
σ_d	: Dinamik düşey gerilme
σ_c, σ_v'	: Efektif çevre gerilmesi
σ_p'	: Ön konsolidasyon basıncı
σ_{z0}	: Ortalama kayma gerilmesi
σ_r	: Radyal gerilme
σ_z	: Üniform düşey eksenel gerilme
σ_θ	: Çevre gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
$\Delta\sigma_r$	: Radyal gerilme artımı
$\Delta\sigma_z$	: Üniform düşey eksenel gerilme artımı
$\Delta\sigma_\theta$	: Çevre gerilmesi artımı
F_z	: Düşey eksenel kuvvet
T	: Burulma momenti
P_i	: İç hücre basıncı
P_0	: Dış hücre basıncı
ΔH	: Düşey eksenel yer değiştirme
$\Delta\theta$	: Burulma açısı
ΔV_i	: İç hücre hacim değişimi
ΔV_s	: Numune hacim değişimi
B	: Skempton doygunluk parametresi
γ_{z0}	: Ortalama birim kayma deformasyonu
ε_{z0}	: Kayma şekil değiştirme artımı
ε	: Hacimsel deformasyon
ε_z	: Eksenel şekil değiştirme artımı
ε_θ	: Çevresel şekil değiştirme artımı
ε_r	: Radyal şekil değiştirme artımı
A_s	: Numune kesit alanı
Z	: Numune üst yüzeyinden olan düşey mesafe
u	: Boşluk suyu basıncı bileşeni
H_i	: Numune başlangıç yüksekliği
H_s	: Numune deney sonu yüksekliği
r_i	: Numune başlangıç iç yarıçapı
r_d	: Numune başlangıç dış yarıçapı

V	: Başlangıç hacmi
N	: Çevrim sayısı
ΔU	: Boşluk suyu basıncı artımı
K_c	: Yatay toprak basıncı katsayısı
AKO	: Aşır konsolidasyon oranı
W_n	: Doğal su muhtevası
w	: Doygun durumda su muhtevası
W_L	: Likit limit
W_P	: Plastik limit
I_p, PI	: Plastisite indisi
FC	: İnce dane miktarı
e_{max}	: En büyük boşluk oranı
e_{min}	: En küçük boşluk oranı
e_0	: Başlangıç boşluk oranı
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
γ_k	: Konsolidasyon öncesi başlangıç kuru birim hacim ağırlık
γ_{kc}	: Konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlık
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
γ'	: Efektif birim hacim ağırlığı
ML	: Düşük plastisiteli killi silt zemin
CL	: Düşük plastisiteli siltli kil zemin
SC	: Killi kum zemin
NP	: Plastik olmayan zemin

DÜŞÜK PLASTİSİTELİ SİLTİLİ KİLLERİN DİNAMİK DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Ülkemizin büyük bir bölümünün deprem kuşağı içinde olması ve 1999 yılında yaşanan depremler, zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliğini önem kazanan bilim dalları haline getirmiştir. Sanayi bölgelerinde yer alan endüstri yapılarına gelecek deprem yüklerinin hesaplanması ve bu yapıların temel sistemlerinin zeminle olan etkileşimi, zeminlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesini gerekli kılar

Zemin mekaniği ve geoteknik deprem mühendisliğinin temel amacı, zeminlerin tekrarlı yükler altında uğrayacakları deformasyonları belirlemek ve yapılacak farklı mühendislik yapıları için zeminden kaynaklanan dinamik etkinin derecesini saptamaktır.

Kocaeli- Sakarya bölgesi 17 Ağustos 1999'da büyüklüğü $M_w=7.4$ olan bir depremle ağır yapısal hasara ve büyük can kaybına uğramıştır. Adapazarı, Gölcük kıyıları ve Sapanca'da meydana gelen sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları sonucu binalarda dönme, ötelenme, oturma, taşıyıcı sistemde kalıcı hasarlar oluşmuştur. Bu depremler sırasında düşük plastisiteli siltler ile kumlu zeminler yaygın olarak sıvılaşmış ve killer ise taşıma gücü kaybına uğramıştır.

Bu çalışma çerçevesinde siltli killerin deprem yükleri altında nasıl bir davranış göstereceği üzerinde durulmuştur. Laboratuvar ortamında kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan örselenmiş siltli kil numuneleriye yapılan dinamik ve statik deneylerle taşıma gücü kaybına neden olan hususlar araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan siltli kil numunesi Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi'den alınmıştır.

Deneyler dinamik burulmalı kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemleri ile yapılmıştır. Dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yapılan deneylerde doyunluğun, plastisitenin ve kuru birim hacim ağırlığının dinamik davranışa etkileri araştırılmıştır. Dinamik üç eksenli deney sistemiyle yapılan deney seti ise dinamik burulmalı deney sisteminden çıkan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

THE STUDY OF DYNAMIC BEHAVIOURS OF LOW PLASTICITY SILTY CLAYS

SUMMARY

Turkey is located along earthquake zone and has experienced very severe earthquake in 1999. During this earthquake the observed ground deformations have emphasized the importance of soil dynamics and geotechnical earthquake engineering for all type structures. Calculation of the earthquake loads to industrial buildings located in industrial areas and the relationship between foundation systems of buildings and soils require the behaviors of soils under dynamic effects to be determined.

Main purpose of soil dynamics and geotechnical earthquake engineering is to determine deformations of soils which occur under dynamic cyclic loads and the degree of dynamic affects caused by soil for other engineering building types.

Kocaeli-Sakarya region confronted with heavy structural damage and several casualties by an earthquake with a magnitude is $M_w=7.4$ on 17th of August in 1999. Liquefaction and the bearing capacity failure developed in the city of Adapazarı. Some structures have been tilted and slide, some of them were settled. During those earthquakes low plasticity silts and sandy soils liquefied and clays lost their bearing capacity.

The framework of this study focuses on how silty clays behave under earthquake loads. The reasons which cause loss of bearing capacity by the dynamical and static tests experienced with disturbed silty clay specimens has been investigated in laboratory. Silty clay specimens used in the study has been collected from Cumhuriyet district, Adapazarı.

The tests has been performed with dynamical torsional shear and dynamical triaxial test systems. The effects of saturation, plasticity, dry density of soil to dynamical behavior have been investigated in the test made by dynamical torsional shear system. Test set formed with dynamical triaxial test system has been compared to the results of test set made with dynamical torsional shear systems.

1.GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Son yıllarda yaşanan depremler, zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliğini önem kazanan bilim dalları haline getirmiştir. Sanayi bölgelerinde yer alan endüstri yapılarına gelecek deprem yüklerinin hesaplanması ve bu yapıların temel sistemlerinin zeminle olan etkileşimi, zeminlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesini gerekli kılar.

Depremler sırasında düşük plastisiteli siltler ile kumlu zeminler yaygın olarak sivilaşmış ve killer ise taşıma gücü kaybına uğramıştır. 1999 yılında Adapazarı çevresindeki siltli kil ve killi zeminler deprem yükleri altında taşıma gücü kaybına yol açıp çok sayıda can ve mal kaybı oluşmasına yol açmıştır.

Bu çalışmada, düşük plastisiteli siltli kil zeminlerin tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışlarını ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan zemin numunesi Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi'deki muayene çukurlarından getirilen düşük plastisiteli siltli kil numunesidir. Bu kapsamda dinamik burulmalı kesme deney aleti ve dinamik üç eksenli deney aleti ile laboratuvar ortamında hazırlanan siltli kil zemin numuneleri üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın amacı, laboratuvar ortamında hazırlanan örselenmiş ve plastisite indisi % 26 olan siltli kil zeminlerin farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik davranışlarının incelenmesidir.

Bu kapsamda, literatür bölümünde araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalardan örnekler verilmiştir. Farklı koşullar altında başta siltli kil numuneleri ve diğer zemin türleri ile gerek dinamik üç eksenli gerekse burulmalı kesme deney aletinde yapılan dinamik deneylerin sonuçları incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan zemin numunesinin özellikleri gösterilmiş. Dinamik burulmalı kesme deney sistemi, numune hazırlama yöntemi hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, yapılan deneylerin sonuçları ve bu sonuçların değerlendirilmesi sunulmaktadır. Kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan düşük plastisiteli siltli kil zeminlerinin farklı tekrarlı kayma gerilme oranlarında dinamik davranış özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda doygunluğun, su muhtevasının, kuru birim hacim ağırlığının ve plastisite indisinin dinamik davranışa etkilerinin araştırılması ve dinamik üç eksenli deney sisteminden çıkan sonuçların dinamik burulmalı kesme deney sisteminden çıkan sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Son bölümde ise deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar birleştirilerek, genel bir sonuç ortaya çıkarılmış. Bu alanda yapılan çalışmalar hakkında öneriler getirilmiştir.

2. ELE ALINAN KONUYLA İLGİLİ ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ

2.1 Giriş

Literatür bölümünde çalışma konusuyla ilgili geçmiş çalışmalardan ve çalışmalardan çıkan sonuçlardan bahsedilecektir. Çalışmaya ışık tutması amacıyla öncelikle taşıma gücü kayıpları hakkındaki literatürden ve zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanan yöntemlerden ve son yıllarda yapılmış çalışmalardan bahsedilecektir. Bu çalışmada düşük plastisiteli killerde taşıma gücü kayıpları inceleneceği için literatür kısmında sitli kil ve killerin tekrarlı yükler altındaki davranışına daha geniş yer ayrılacaktır. Bu bölümde çalışma konusu dışında kalan diğer zemin türleriyle ilgili çalışmalara da göz atılacaktır. Buna müteakip bölümlerde siltli killi ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, dinamik burulmalı kesme deney aletinde yapılan çalışmalar temel başlıkları altında geçmiş çalışmalar genel mantık bir çerçevesinde sıralanıp literatür kapsamı içersinde ele alınacaktır.

2.2 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Dinamik Davranış Özellikleri

Deprem faktörü günümüzde mühendislik yapılarında dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir. Bu yüzden yapıdaki deprem büyüklüklerini belirlemek için önce temel altı zeminlerinin dinamik davranış özelliklerini belirlenmesi gerekir. Zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik mukavemet özelliklerini belirlemenin en pratik yolu deneylerdir. Deneyler farklı konsolidasyon ve gerilme koşulları altında yapılarak bir zemin tabakasında oldukça fazla envanter elde edilebilir. Bu deneyler ancak mevcut zemin koşullarının birebir olarak laboratuarda modellenmesi ile doğru sonuçlar vermektedir. Pratikte böyle bir şeyin çok zor olduğu bilinir, çünkü numunenin sahadan alımı, laboratuvar ortamına getirilmesi ve deney numunesinin hazırlanması sırasında bir takım örselenmeler oluşması doğaldır. Bu yüzden deney sonuçlarının tek başına yorumlanması beraberinde bir takım olumsuzluklar getirebilir. Meydana gelen bu

olumsuzlukların en aza indirilmesi için arazide ve laboratuarda yapılan deneyler birlikte değerlendirilmelidir.. (Ansal ve Erken, 1986).

Yapılan bu deneylerde belirlenmeye çalışan zemin özelliklerini gruplara ayırabiliriz.

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi; dinamik kayma modülü (elastik kayma deformasyonlarında, G_0 , kayma modülü-birim kayma ilişkisi), elastisite modülü, sönüm oranı hesaplanması bunlardan ilkidir. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak sönüm oranı ve dinamik kayma modülünün birim şekil değiştirmeye bağlı olarak tanımlanması gerekir. Bu özelliklerin belirlenmesi esnasında laboratuarda zeminin elastik davranış gösterdiği 10^{-6} dan küçük deformasyon seviyelerinde deneyler yapılırken, arazide de zeminin doğal yapısı bozulmadan yerinde özelliklerinin belirlenmesine çalışılır.

İkinci olarak Dinamik kayma mukavemeti özellikleri; dinamik kayma gerilmesi oranı, çevrim sayısı hesaplanabilir. Mukavemet özelliklerinin belirlenebilmesi içinde göçme seviyesi olarak belirlenen birim kayma seviyesine ulaşmak için gerekli dinamik kayma gerilmesi oranının ve çevrim sayısının bilinmesi gereklidir.

Konsolidasyon ve tekrarlı yüklemeyle birlikte hacimsel deformasyon değişiminin belirlenmesi ve boşluk suyu basıncı gelişimi de deneylerden edinebileceğimiz zemin özellikleridir.

Tekrarlı yüklemelerde altında zeminleri davranışlarında görülen kesin bir ayrıma göre iki gruba ayırabiliriz; İnce daneli,kohezyonlu ve kaba daneli, kohezyonsuz zeminler. Bu bakımdan değişik gerilme şartlarında yapılacak dinamik deneylerle kumların siltlerin ve belli oranda silt içeren ince daneli zeminlerin mühendislik özellikleri belirlenmelidir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda kohezyonlu, ince daneli ve kohezyonsuz kaba daneli zeminlerin, tekrarlı yükler altında büyük deformasyonlara uğrayarak mukavemetlerinde önemli oranda kayba uğradığını göstermektedir. Meydana gelen bu mukavemet kayıpları sonucu oluşan yumuşama ve sıvılaşma nedeniyle, zeminde kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. İçerisinde belli oranda kil olan siltlerde boşluk suyu basıncı artışının artan deformasyonlarının yanında sınırlı kalması sonucu taşıma gücünde önemli miktarda azalma meydana geldiği görülürken, kumlu zeminlerin de drenaj imkanı bulamaması ve artan boşluk suyu basınçları altında zeminin direncini kaybederek sıvı gibi davrandığı görülür. Bu açıklamadan anlaşıldığı üzere boşluk

suyu basıncının sönümlenmesinde etkili olan zemin parametreleri, geçirgenlik ve drenaj koşulları, zemin taneleri arasındaki sürtünmeyi etkileyen kohezyon gibi özellikler sıvılaşmaya karşı zeminin direncini etkilemektedir. (Elibol, 2005)

Deney sonuçlarına etkileyen parametreleri başlıca iki gruba ayırırsak. (Tablo 2.1)

Tablo 2.1 : Deney sonuçlarına etkileyen parametreler

Kohezyonlu zeminlerde yumuşamaya bağlı taşıma gücü kaybına etkileyen parametreler.	Kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmayı doğrudan etkileyen parametreler
Plastisite indisi	Boşluk oranı (rölatif sıkılık)
Doygunluk derecesi	Dane şekli
Su muhtevası	Dane boyutları ve dağılımı
Aşırı konsolidasyon oranı	Orta asal gerilme
Çevre basıncı	Çevre basıncı
Çevrim sayısı	Çevrim sayısı
Birim kayma genliği	Birim kayma genliği
Yatay toprak basıncı katsayısı	Yatay toprak basıncı katsayısı
Konsolidasyon basıncı	Efektif konsolidasyon basıncı

Bu parametreler dışında numune hazırlama yönteminin ve deney sisteminin, sınır koşulları ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi bakımından sonuçlara etkisi gözlemlenmiştir.

2.2.1 Silt, Siltli Kil ve Killi Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

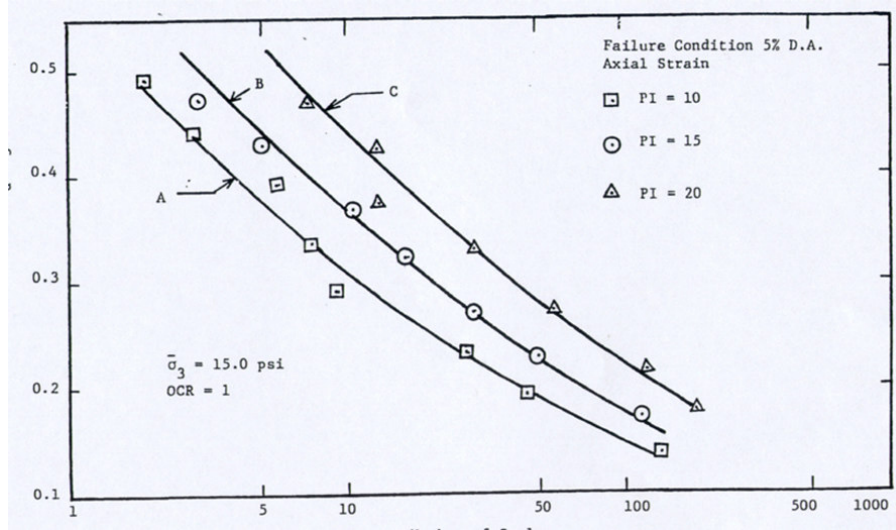
Silt zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışı bazı araştırmalarda belli miktarda silt içeren kumlarınkinden farklı elde edilirken, bazı çalışmalarda da benzer özellikler göstermiştir. Silt zeminler temiz kumlar gibi sıvılaşabilirler ancak bu sıvılaşma

davranışı kumlarınkinden farklı olarak belirli miktar sıkışma ve drenajlı durumda artık boşluk suyu basıncı sönümlenmesi nedeniyle konsolidasyonu da beraberinde getirmektedir. Siltlerde tekrarlı yüklemeler altında oluşan boşluk suyu basıncı artışları davranışa etkiyen; kil ve/veya kum miktarı, ince danelerin plastisitesi, boşluk oranı ve efektif konsolidasyon basıncı gibi parametrelere doğrudan bağlıdır. Bu da zeminin dinamik kayma mukavemetini etkilemektedir.

Plastik olmayan siltlerde ve içerisinde belli miktarda plastik silt olan kohezyonsuz zeminlerde yapılan çalışmalarda, bu tür zeminlerin tekrarlı yüklemeler sonucu hızla artan boşluk suyu basınçları nedeniyle sıvılaştığı ve efektif gerilmelerin sıfıra düştüğü belirlenmiştir. (Seed, 1976, Sandoval, 1989). İnce daneli zeminlerde yapılan çalışmalarda, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Buna göre her ikisi de arttığında dinamik mukavemette artış meydana gelmektedir.

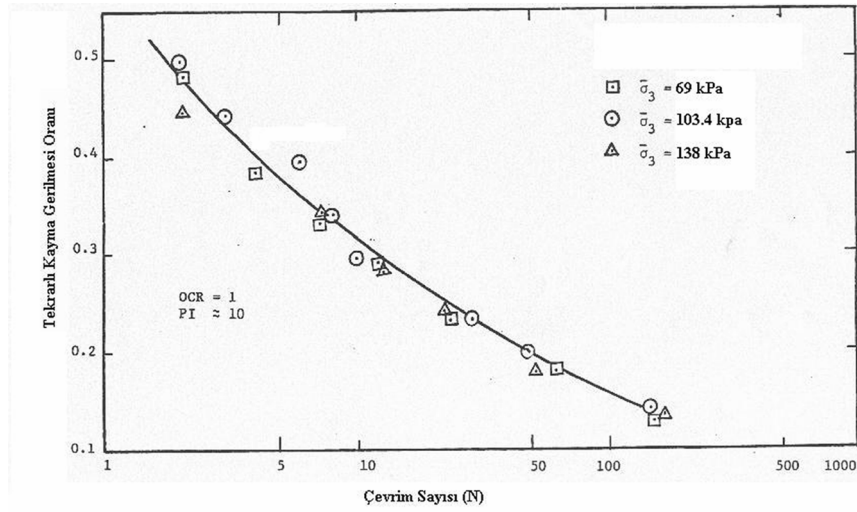
Puri (1984), yaptığı çalışmada plastisitenin etkisini belirlemek üzere göçme kriterini, % 5 çift genlikli deformasyon seviyesi olarak alıp, Şekil 2.1 de görülen dinamik mukavemet eğrileri ile ifade etmiştir. Buna göre, laboratuarda hazırlanan silt numunelerde % 10-20 aralığında plastisite indisi arttıkça zeminin dinamik mukavemeti de artmaktadır.

Yine Puri (1984) tarafından laboratuvar numunelerinde yapılan dinamik üç eksenli deney sonuçları görülmektedir(Şekil 2.2).Çift genlikli % 5 birim kayma deformasyonu seviyesi zeminde göçme kriteri olarak alınmıştır. Plastisite indisi % 10 olan siltli numunelerde farklı çevre basınçlarında yapılan deneylerde numunelerde 0.1-0.5 arasında değişen oranlarda tekrarlı gerilme uygulanmış ve sonuçlarda fazla bir farklılık görülmemiştir.



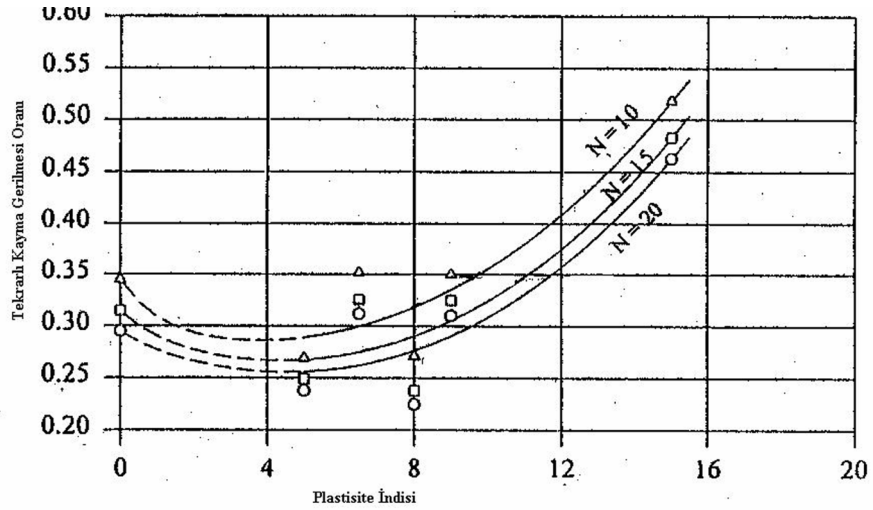
Çevrim Sayısı

Şekil 2.1 Laboratuarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışlarının plastisite indisine etkisi (Puri, 1984)



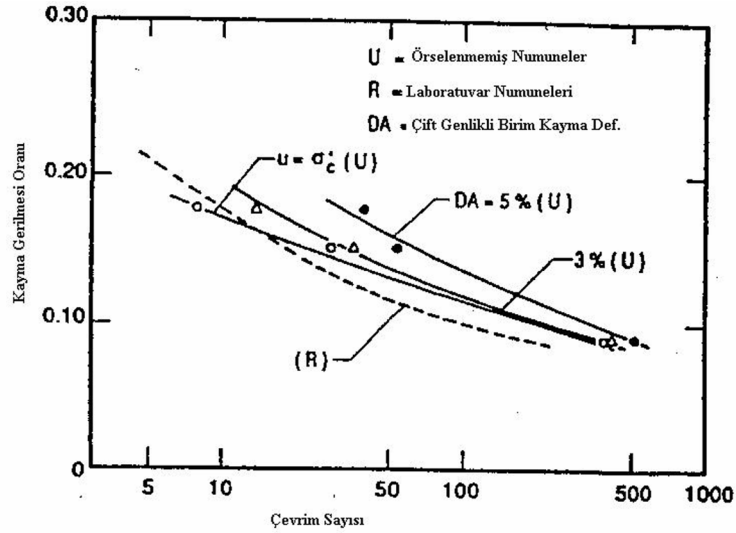
Şekil 2.2 Laboratuarda hazırlanan silt numunelerinin dinamik davranışına çevre basıncının etkisi (Puri, 1984)

El Hosri (1984), sadece plastisite etkisini araştırmak amacıyla boşluk oranına göre normalize edilen gerilme oranı ile plastisite indisi ilişkisi çizilmiş, % 5 plstisiteye kadar gerilme oranında azalma görülürken, sonraki değerlerde plastisite indisi ile gerilme oranı artmaktadır. (Şekil 2.3)



Şekil 2.3 Siltli ve kumlu zeminlerde dinamik mukavemetin plastisite indisiyle değişimi (El Hosri, 1984)

Zhu ve Law (1988) ise örselenmemiş ve laboratuarda hazırlanan plastik olmayan siltli numunelerde yaptıkları deneylerde sabit boşluk oranında siltlerin dinamik mukavemetlerinin kumlarınkine benzediğini kaydetmişlerdir. Ayrıca, örselenmemiş numunelerde artık boşluk suyu basıncının efektif konsolidasyon basıncının % 80'i olduğu anda kayma deformasyonlarının hızla arttığını, laboratuvar numunelerinde ise bu seviyenin % 85'e karşılık geldiğini söylemişlerdir. (Şekil 2.4)

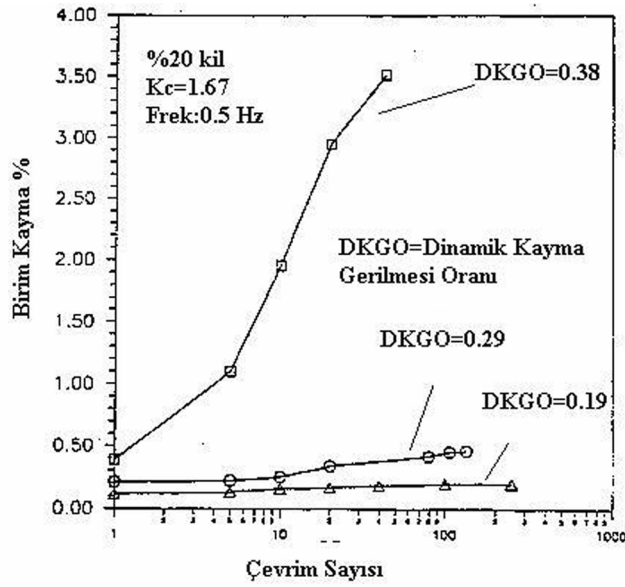


Şekil 2.4 Örselenmemiş numunelerde ve laboratuarda hazırlanan numunelerde sıvılaşma dayanımı arasındaki farklılık (Zhu ve Law, 1988)

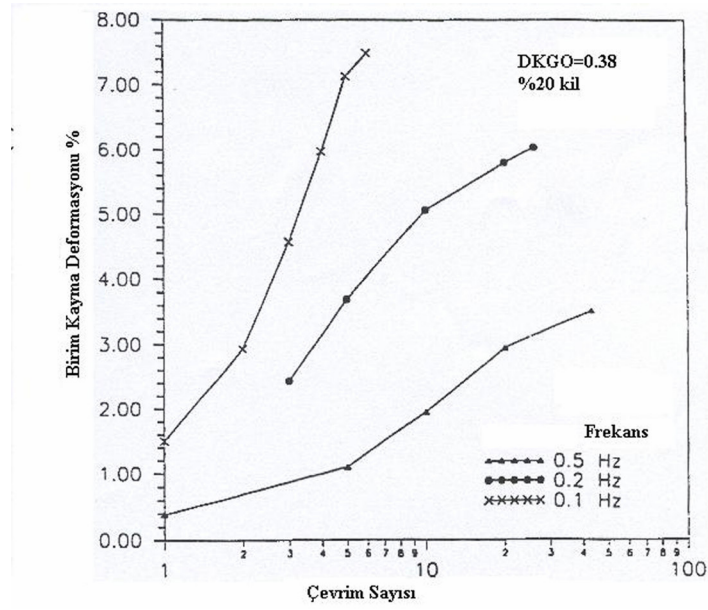
Konrad ve Wagg (1991) anizotropik olarak konsolide edilen killi siltler üzerinde yaptıkları drenajsız dinamik deneylerde, saf siltten % 40 kil içeren killi-silt karışımlarına kadar olan zeminlerde deformasyon seviyesinin üniform olmayan boşluk suyu basıncı dağılımında etkili olduğunu belirtmiştir.

Kil miktarı % 20 olan silt-kil karışımına ait birim kaymanın çevrim sayısı ile değişimini gösteren eğriler Şekil 2.5, 2.6, 2.7 'dedir. Şekil 2.5 ve 2.7 de farklı tekrarlı gerilme genliklerinde, aynı yükleme frekansında yapılan dinamik deneylerde birim kaymanın çevrim sayısı ile olan değişimi gösterilirken,

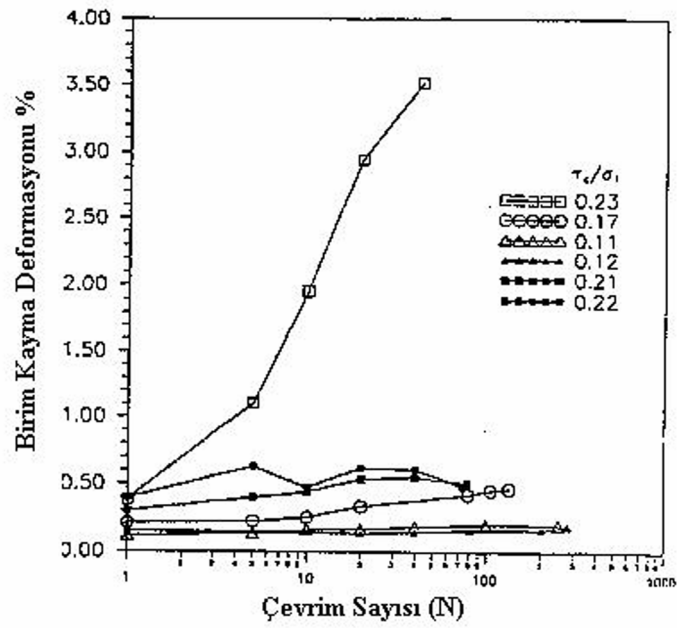
Şekil 2.6 'da birim kayma oluşumuna yükleme frekansının etkisi gösterilmiştir. Buna göre frekans attıkça aynı çevrim sayısında numunede oluşan birim kaymalar azalmaktadır. Dolayısıyla tekrarlı yüklemenin frekansı, ince daneli zeminde dinamik mukavemeti arttırmaktadır.



Şekil 2.5 Tekrarlı şekil değiştirme genliği- çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

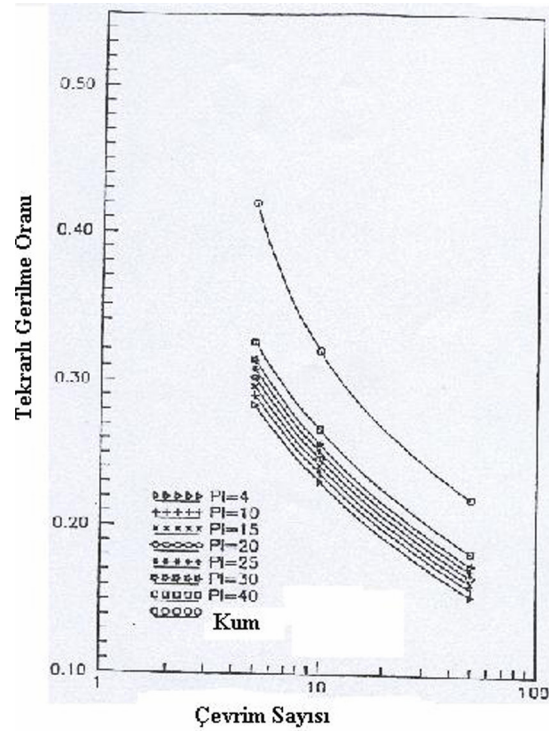


Şekil 2.6 Tekrarlı şekil değiştirme genliği-çevrim sayısı ilişkisi .(Wagg, 1990)



Şekil 2.7 Tekrarlı şekil değiştirme genliği –çevrim sayısı ilişkisi (Wagg, 1990)

Liu (1992) regresyon analiziyle elde ettiği dinamik mukavemet eğrilerinde, 10 çevrimde plastisite indisinin ince daneli, kohezyonlu zeminlerde dinamik mukavemet üzerindeki etkisini araştırmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Dinamik üç eksenli mukavemet eğrilerine plastisite indisinin etkisi (Liu 1992)

Sandoval (1989), Prakash ve Sandoval (1992), siltlerin sıvılaşma potansiyeline plastisite indisinin etkisini araştırmıştır. Düşük plastisiteli siltte ($I_p = \% 1.7-3.4$), $\% 5-10$ oranında kaolin kili ekleyerek hazırladıkları numuneleri, boşluk suyu basıncı efektif çevre basıncına eşit olana kadar veya $\% 5-10-20$ birim kayma genliklerine ulaşılana kadar tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Sonuçlardan, düşük plastisitelere, plastisite indisi arttıkça siltlerin dinamik mukavemeti azalmaktadır.

Benzer şekilde, siltli zeminde kil yüzdesi arttıkça, göçmenin oluşması için aynı çevrim sayısında aksenal deformasyon miktarı artmakta buna karşın dinamik gerilme oranı azalmaktadır. .

Das ve diğ. (1999) tarafından yapılan dinamik üç eksenli deneylerde $\% 9-14$ plastisite indisi değerlerine sahip killi silt numunelerde sıvılaşma meydana gelmiş, $\% 15$ ve üzeri plastisiteye sahip numunelerde ise boşluk suyu basıncı artışları sınırlı kalarak dinamik mukavemetteki azalma, yumuşama ile kendini göstermiştir.

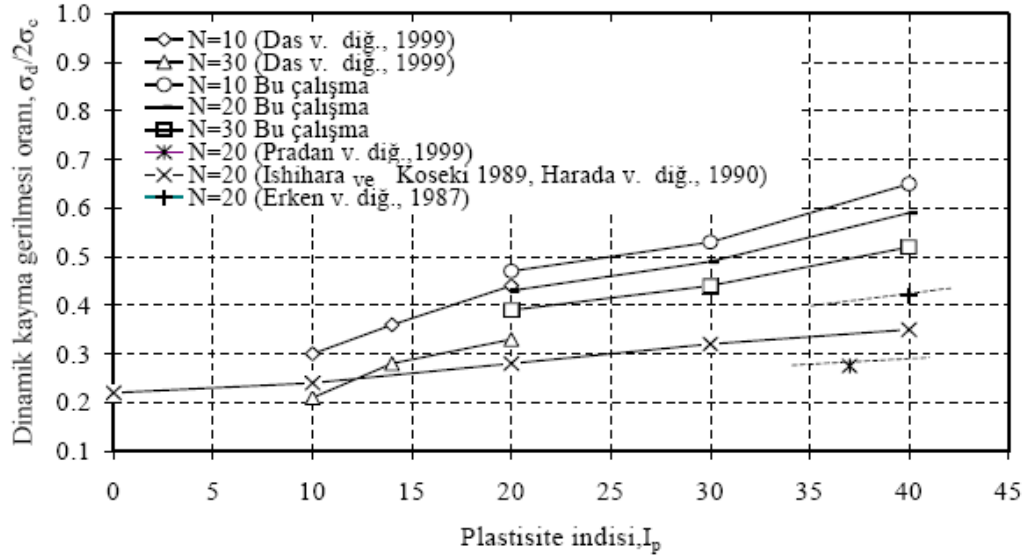
Prakash ve Guo (1999) ise silt ve kil karışımlarının tekrarlı yükler altındaki davranışlarını belirlemişlerdir. Plastik olmayan siltlerde tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı oluşumunun kumlardakine benzediğini söylemişlerdir. Ancak düşük miktarda da olsa yüksek plastisiteli kil eklendiğinde zeminde oluşan kohezyon etkisiyle sıvılaşma dayanımı artmaktadır.

Yoda ve diğ. (2001) tarımsal alanda plastisite indisi % 6 olan kil numuneleri için yapılan tekrarlı burulmalı kesme yüklemesi sonucunda, burulma kesme gerilmesinin ilk çevrimde ondan sonra gelecek değerlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çevrim sayısı arttıkça önce genliği azalır ve sonra sabit kalır.

Pekcan (2001), İzmit Depremi sonrası Adapazarı'ndan aldığı siltli kil ve killi siltli zemin numunelerine dinamik yükleri deprem sırasında Adapazarı'nda meydana gelen yüklere benzer şekilde (Tekrarlı Gerilme Oranı 0.3 ile 0.55 arası) seçerek ve 1 Hz. Frekans ile uygulamıştır. Dinamik üç eksenli deney aletiyle yapılan deneyler sonucu ortaya çıkan en önemli sonuç; bazı silt ve kil karışımlarının tekrarlı yükler altında % 100 boşluk suyu basıncı oluşması veya % 5 iki eksenel deformasyon kriterlerine göre sıvılaşabildiklerini göstermiş olmasıdır. Ayrıca siltli killer ve killi siltlerde boşluk suyu basıncı oluşumu kumlarda ve plastik olmayan siltlerdeki göre daha yavaş olduğunu ve kil, silt karışımlarının dinamik dayanımları boşluk oranındaki azalma ve plastisite değerindeki artışla beraber artmakta olduğunu söylemiştir.

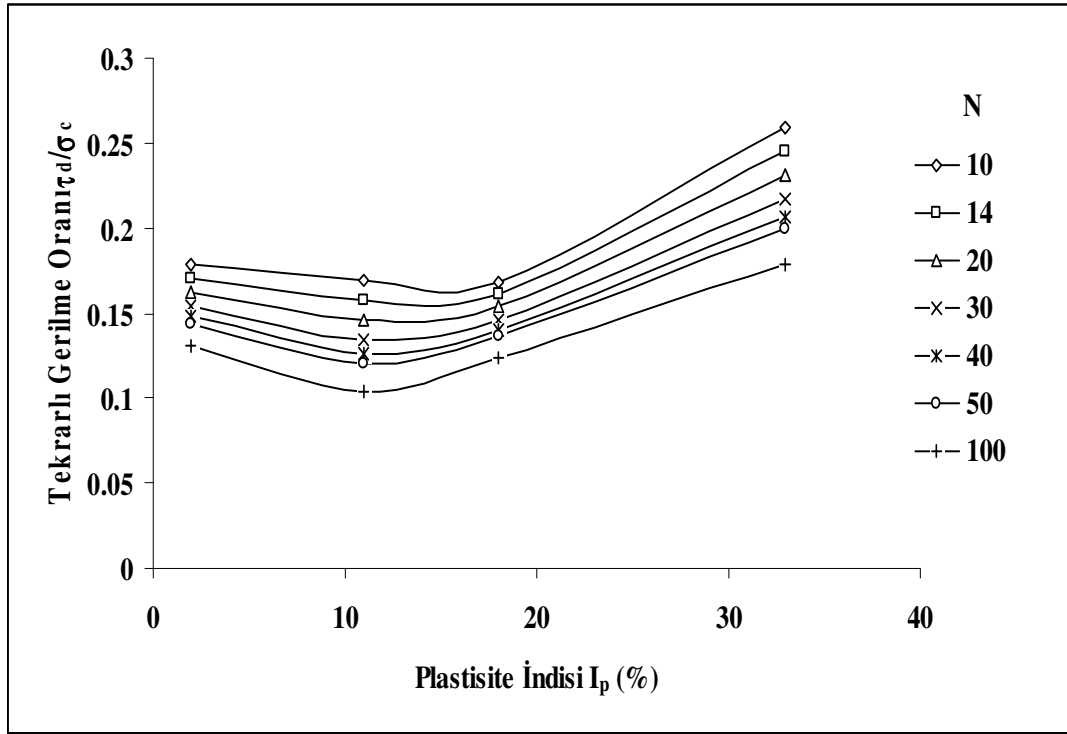
Thevanayagam ve Martin (2002), arazi incelemeleri ve deney sonuçlarından, siltli zeminlerin hacimsel sıkışma potansiyeli ve sıvılaşma sonrası sıkışma özelliklerinin dane temas noktalarındaki gerilmelere ve rölatif sıkılığa bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Erken ve Özay (2003) killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesine oranına etkisini incelerdikleri çalışmada örselenmemiş normal konsolide killi zemin numuneleri üzerinde üç eksenli dinamik deneyleri 0.50 Hz frekansında yapmışlardır. Deney sonuçlarından plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Dinamik kayma gerilmesi oranı $\sigma_d/2\sigma_c$ çevrim sayısı N , ilişkileri üzerinde birim boy değişimi seviyesi $\epsilon_d=\%5$ değeri için plastisite arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı artmaktadır. Ayrıca $\sigma_d/2\sigma_c$ üzerinde kıvamın da önemli etkisi olmaktadır. Aynı çevrim sayısı dikkate alındığında yumuşak kıvamlı numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranı düşük olmaktadır. Plastisitenin artışının $N=10$ ve $N=30$ çevrim sayılarındaki dinamik kayma gerilmesi oranına göre değişimi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



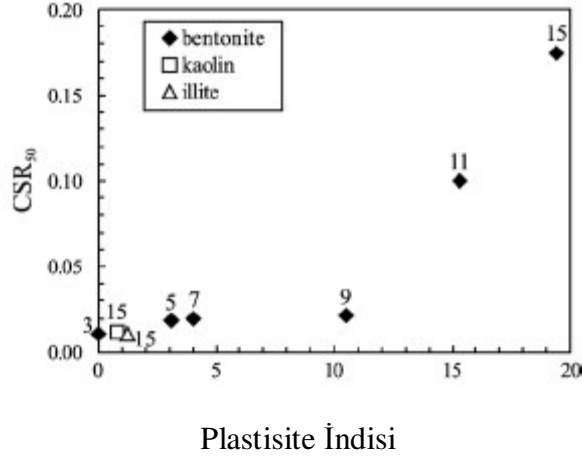
Şekil 2.9 Çalışmada elde edilen sonuçların diğer araştırmacıların sonuçları ile karşılaştırılması

Ülker (2004) Adapazarı'ndan getirilen siltli ve siltli killer zeminler üzerinde deneylerini yapmıştır. Bu deneylerden hayli geniş bir yelpazede sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin deney sonuçları plastisitenin siltlerin dinamik mukavemetine etkisini ortaya koymaktadır. İzotropik olarak 100 kPa basınçta konsolide edilen üç farklı plastisiteye sahip siltli numunelere diğer tüm deneylerde olduğu gibi 0.1 Hz frekansında farklı tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri uygulanmıştır. Sonuçlara göre plastisite arttıkça dinamik mukavemet artmaktadır. Ancak bu artış bu çalışmada yaklaşık % 10 plastisite indisi değerinden sonra gerçekleşmiştir. Plastisite indisi % 2 olan siltli numunenin dinamik mukavemeti, % 11 plastisiteli siltli numuneden az bir miktarla da olsa daha fazlayken, % 18 plastisiteli siltli kil zemine yakın elde edilmiştir. Bu durumun, kum miktarı da yüksek olan düşük plastisiteli silt zeminin danelerarası sürtünme mukavemetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca daha yüksek plastisiteli siltlere göre konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı da fazladır. Bununla birlikte siltlerde plastisite indisi % 11'e kadar arttıkça zeminin dinamik mukavemeti azalırken, bu değerden sonra plastisite arttıkça aynı çevrim sayısında numunenin göçmeye ulaşması için daha büyük gerilme seviyeleri gerekmektedir. (Şekil 2.10) (Ülker, 2004)

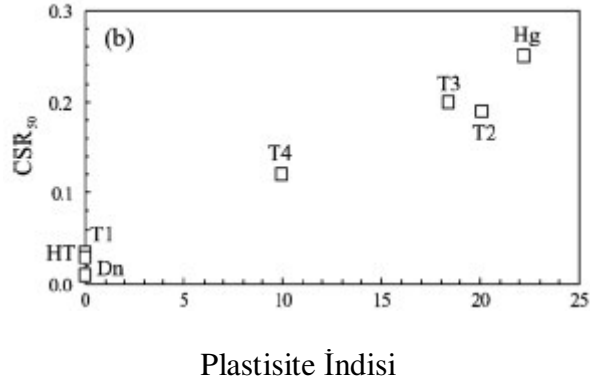


Şekil 2.10 Tekrarlı gerilme oranı-plastisite indisi değişimi ($\gamma_{z\theta}=\pm\%$ 2.5, $\gamma_{kc}=12.9$ - 14.3 kN/m³)

Sokolov, Osipov, Sassa ve Gratchev (2006) killi zeminlerin sıvılaşmasıyla ilgili çalışmalarında, killerin sıvılaşmasının killerin içeriğiyle ve minerolojisiyle alakalı olabileceği sonucunu çıkarmışlardır. Çalışmaya göre plastisite indisi ve kayma gerilmesi oranı arasındaki ilişki yapay karışımlar (Şekil 2.11) ve doğal zeminler (Şekil 2.12) için çok benzerdir bu da plastisite indisinin killerin sıvılaşma potansiyelini belirlemede bir kriter olabileceğini gösterir.



Şekil 2.11 Yapay karışımlar için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)-Plastisite İndisi grafiği



Şekil 2.12 Doğal zeminler için tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR)-Plastisite İndisi grafiği

2.2.2 Diğer Zemin Türlerinin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

Çalışma kapsamı dışında olduğu için kumlu, kumlu siltli ve siltli zemin türlerinin tekrarlı yükler altında davranışlarını zemin türlerine göre yapılan deneyleri ve alınan sonuçları bu konu başlığı altına kısaca incelenmiştir. Tekrarlı yükler altında farklı türde zeminler üzerinde yapılan çalışmalarda yükleme koşullarına bağlı olarak da zeminlerde farklı davranış özellikleri gözlemlendiği bilinmektedir. Davranış özelliklerini etkileyen faktörlerin sadece zemin türü ve yükleme koşulları olduğunu söylemek yanlış bir tespit olur. Tekrarlı yükler altında yapılan deneylerde zaman içinde çok farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Buna karşın alınacak sonuçları etkilemede yükleme koşulları ve zemin türünün ne kadar önemli olduğu yapılan çalışmalarda ortaya çıkan ilginç sonuçlarla görülmektedir. Bugüne kadar yapılan deneylerde farklı

indeks özellikleri içeren zeminlerle, iki zemin türünün karışımı ve tabakalı zeminlerle ilgili yapılan çalışmalara rastlıyoruz. Bu bölümde çeşitli zemin türlerinin tekrarlı yükler altında davranışlarını zemin türlerine göre yapılan deneyleri ve alınan sonuçları irdedeceğiz.

2.2.2.1 Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı

Kum zeminlerde, suya doymuş zeminlerin tekrarlı yükler altındaki daneler özellikleri, sahip oldukları boşluk oranı, başlangıç konsolidasyon şartları ve uygulanan gerilmenin genlik değerinin yeterli koşulları sağlaması halinde belirli bir çevrim sayısı sonunda büyük şekil değiştirmeler meydana getirdiği bilinmektedir. Bu mukavemet kaybının başlıca nedeninin zemin içerisindeki boşluk suyu basıncının drenajsız koşullarda uygulanan tekrarlı kayma gerilmelerine bağlı olarak hızlı bir şekilde artması ve buna bağlı olarak ortalama efektif gerilme değerinin sıfıra yaklaşmasının olduğudur. Genel olarak suya doymuş, üniform, gevşek, ince kum veya siltli kum zeminlerde görülebilen bu olaya ve ortaya çıkan sonuçlarına göre genel olarak “sıvılaşma” adı verilir. Bu nedenler sıvılaşma üzerinde yapılan çoğu çalışmalar kumlu zeminler üzerinde yapılmıştır.

Hem laboratuvarda hem de arazide yürütülen deneysel çalışmalar ışığında sıvılaşma olayının aydınlatılması amacıyla birçok inceleme ve araştırılma yapılmıştır. Sıvılaşma olayının gelişimi ve mekanizmasının aydınlatılması ilk olarak Seed ve Lee (1996) tarafından üç eksenli dinamik deney aletinde yürütülen deneylerle ortaya konulmuştur. Yürütülen deneysel çalışmalarda belirli bir çevre basıncında konsolide edilmiş suya doymuş gevşek temiz kum numuneleri üniform bir tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan çeşitli dinamik deney aletleri ile sürdürülen çalışmalarda sıvılaşmaya karşı en hassas zemin türünün suya doymuş gevşek ince kum zeminlerin olduğu görülmüştür. Peacock ve Seed (1968), Ladd (1974) ve Seed (1979)’in laboratuvarda sonradan oluşturulmuş kum zeminler üzerinde yürüttükleri dinamik deneyde zeminde sahip olduğu rölatif sıkılığın, başlangıçtaki konsolidasyon basıncının, uygulanan tekrarlı gerilmenin ve bu gerilmenin uygulama tekrar sayısının kumların dinamik davranışları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Suya doymuş kum zeminlerin tekrarlı yükler altında ve büyük deformasyon seviyelerinde ortaya koydukları dayanım özellikleri ve bunların yükleme sayısına bağlı olarak değişimi, sıvılaşma, çevrimsel oynaklık ve diğer benzeri olayların

meydana gelmesinde belirleyici olmaktadır.Yeterli koşullar oluşturulduğunda tekrarlı yükler altındaki kumlar ,içerisindeki boşluk suyu basıncının artmasıyla beraber mukavemetni kaybederken , değişik faktörlere bağlı olarak farklı davranış türeri ortaya koyabilmektedir.Özellikle yükleme sayısının miktarı , çevre basıncının değeri zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı ve anizotropik koşullar bu davranış türlerinin oluşmasında etken faktör olmaktadır. Buna göre çevre gerilmesindeki ve boşluk oranındaki farklılıkların kum zeminlerin dinamik özelliklerini ortaya koyan kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin deformasyona bağlı değişim eğrileri üzerinde değişiklikler oluşturduğu belirlenmiştir. Bu etken faktörlerin kum zeminlerin dinamik dayanımları üzerinde oldukça belirleyici etkileri olduğu tespit edilmiştir.Bu etkilerin belirlenmesi , zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma potansiyellerinin saptanmasında önemli olmaktadır. (Altun,2004)

Farklı bir çalışmada ise sıvılaşma özelliklerinde aşırı derecede küçük efektif gerilmeler altındaki kesme dayanımına ve gerilme seviyesine bağlı olarak değişimler görüldüğü (Koseki, Yoshida, Sao , 2005) tespit edilmiştir.

Kum zeminlerde ortaya çıkan sıvılaşma ve deformasyon yumuşaması olaylarının belirlenmesi konusunda birçok deneysel ve teorik araştırmalar yürütülmüştür. (Drnevich, 1972; Ishihara ve Li, 1972; Castro, 1975; Castro ve Poulos, 1977, Nemat-Nasser ve Takahashi, 1984)

Özellikle dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deney aletleri kullanılarak kumlu zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin saptanması ve bu özelliklere etki eden faktörlerin belirlenmesi amacıyla bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir.(Bei-Lin Chu, 2006; Koseki, Yoshida, Sao , 2005 ; Tunçkok , 2005 ; Ansal – Altun , 2003 ; Dehghani ve diğ. , 1999; Hyodo ve diğ. , 1998; Lanzo vd., 1997; Lo Presti vd., 1993, 1997 ; Linvd., 1996; Vucetic, 1994; Tatsuoka vd., 1991; Alarkon-Guzman ve diğ. , 1988; Yoshimine ve Ishihara, 1988).

Bu çalışmalar doğrultusunda kumların sıvılaşmaya ulaşması için gereken koşullar üzerinde tartışmalar sürmüştür. Uygulanan tekrarlı gerilmeyle beraber suya doygun kumlarda ilave boşluk suyu basıncının hızlı bir şekilde çevre basıncına yaklaşması sonucunda zeminde oluşan birim şekil değiştirmelerin belirli bir değere ulaşması zeminin sıvılaştığı yargısına ulaşmaktadır.

2.2.2.2 Siltli Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı

Siltli zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışında en dikkat çekici şey farklı endeks özelliklerine sahipken sıvılaşma bakımından tamamen farklı sonuçlar çıkarmasıdır. Kum içerisinde bulunan silt ve kil zeminlerin kumun dinamik davranışını etkilediği 1960'lı yıllardan beri bilinmektedir. Fakat siltlerin ve killerin içeriğinin ve plastisitenin kumların sıvılaşmaya karşı direncini ne şekilde etkilediği konusunda tam bir fikir birliği sağlanmış değildir.

Yapılan bazı çalışmalarda (Finn ve diğ., 1994; Ishihara ve diğ., 1978; Okusa ve diğ., 1980; Dobry ve diğ., 1985; Garga ve McKay, 1984) silt içeriğindeki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini arttırdığı sonucuna varılırken, diğer bazı çalışmalarda (Shen ve diğ., 1977; Ishihara ve diğ., 1980; Tronsco ve Verdugo, 1985; Erken ve Ansal, 1994; Vaid 1994; Yasuda ve diğ., 1994) silt içeriği oranındaki artışın kumların sıvılaşmaya karşı direncini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Sıvılaşmaya yönelik bu etki incelenirken elbette ince danenin kendi mühendislik özelliklerinin bu zıtlıklara sebep olabileceği düşünülmelidir. İnce malzemenin sahip olduğu plastisite, adezyon ve kohezyon değerleri bazen bu malzemeleri sıvılaşmaya karşı kumlardan daha dirençsiz bir hale getirmektedir. Bu yüzden siltlerin veya siltli kumların dinamik özellikleri incelenirken ince danelerin kendi fiziksel ve endeks özelliklerinin öne çıkabileceğinin dikkate alınması gerekmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda yaygın olan düşünce; plastik olmayan silt içeriğinin kumların sıvılaşma direncini azalttığı (Erken ve Ansal, 1994), örneğin plastik olmayan siltler üzerine yapılan başka bir çalışmada plastik olmayan siltlerin dinamik davranışının kumlara çok benzediği, kumların ve siltlerin arasındaki boşluk suyu basıncı karakterlerinin çok yakın olmasından dolayı çok önemli bir benzerlik olduğu ve bu benzerliğin gevşek kum ve gevşek siltlerin sıvılaşma potansiyelinin çok benzer olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.(Hussein ,1995), plastik silt içeriğindeki artışın ise kumların sıvılaşma direncini arttırdığı şeklindedir. (Ishihara, 1996). Yapılan bazı çalışmalarda da silt içerisindeki belirli oranların sıvılaşmaya karşı kritik değerler ifade ettiği belirlenmiştir. (Koester, 1994).Örneğin silt içerisindeki kil oranının etkilere farklı yönden incelenmiştir.(Andrews, 1997)

2.2.2.3 Siltli Kum Zeminlerin ve Silt Tabakalı Kumlu Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışları

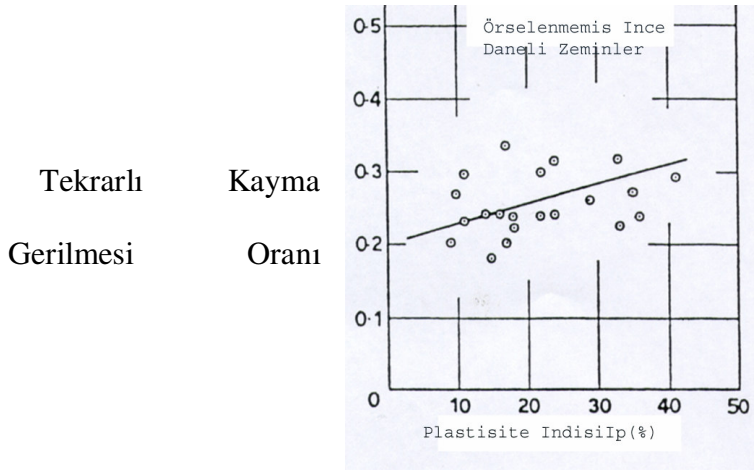
Bir önceki konu başlığı altında bahsedildiği üzere kumlu zemin içindeki belirli miktardaki ince daneli zeminlerin sıvılaşma bakımından etkisi özellikle son yıllarda iyice araştırılmaya başlanmıştır. İçerisinde belli miktarda ince dane olan kumlu zeminlerle, plastik olmayan ve düşük plastisiteli siltlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları da, büyük depremlerde gözlenen sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları nedeniyle önem kazanmaktadır.

Siltli kum zeminlerin sıvılaşması günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir; Ishihara, (1978), Ishihara ve diğ. (1980), Ishihara ve diğ., (1981), Kaufman, (1981), Sherifd, Tien ve Pan, (1983), Troncoso ve Verdugo (1985), Kondoh, Sasaki ve Matsumoto, (1987), Koester ve Tauchida, (1988), Chang (1988, 1990), Troncoso, (1990), Koester, (1992), Erken ve Ansal, (1994), Erten ve Maher, (1995), Yamamuro ve Lade (1997b, 1998), Lade ve Yamamuro (1997), Amini ve Qi, (2000), Salgado, Bandini ve Karim, (2000), Yasamuro ve Covert, (2001).

Ishihara ve diğ. (1978) tarafından yapılan dinamik deneylerde, kum zeminin sıvılaşmasına ince dane miktarının etkisi belirlenmiştir. İnce dane miktarı arttıkça, kumlu zeminin dinamik mukavemeti de gevşek durumda belli bir seviyeye kadar artmaktadır. Buna karşın, sıkı olduğu durumda artış daha da fazla olmaktadır. Buradan ince danelerde bulunan kohezyon mukavemetinin, tekrarlı yükleme sırasında danelerin birbirinden ayrılmasını zorlaştırdığı, dolayısıyla da boşluk suyu basıncı artışlarının azalttığı ve geciktirdiği bu sebeple de sıvılaşma dayanımının arttığı sonucuna varılabilmektedir.

Ishihara ve diğ. (1980), tarafından kum zeminde yapılan çalışmada, belli bir yüzdeye kadar ince dane oranı arttıkça, sıvılaşma dayanımının da arttığı sonucuna varılmaktadır. Bunun yanında, plastik olmayan siltlerin % 15-20 arası plastisiteye sahip kohezyonlu zeminlere göre çok daha düşük dinamik mukavemete sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber, ortalama olarak % 30 ince dane içeren kum zeminde ise, plastisitenin dinamik mukavemete etkisi araştırılmıştır. Lineer dağılıma ait $I_p/35$ oranının % 30 dan fazla ince dane içeren zeminlerde ise sabit olduğu ileri sürülmüştür (Ishihara ve diğ., 1981). Bununla birlikte plastisite indisi arttıkça aynı

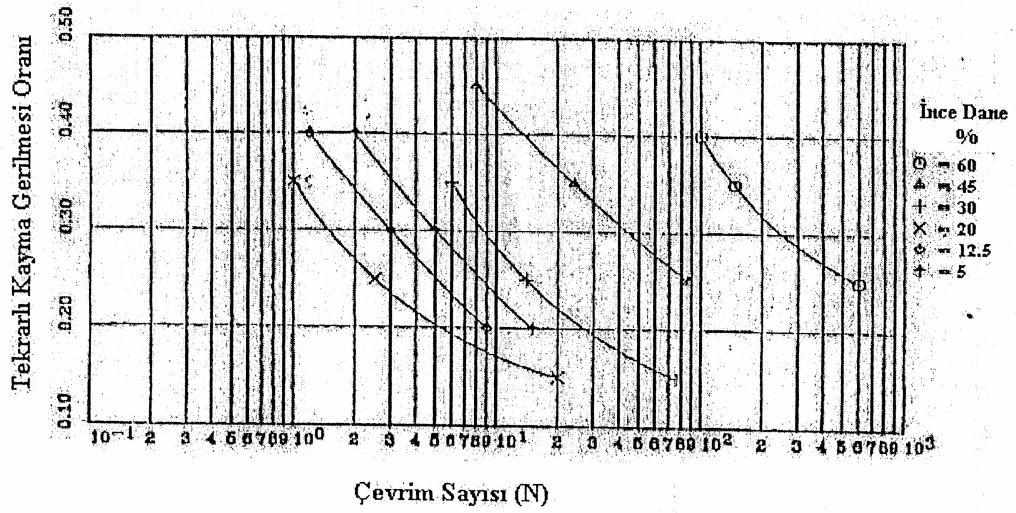
çevrim sayısında çift genlikli % 5 deformasyon seviyesine erişmek için gerekli tekrarlı gerilme oranı artmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 İnce dane miktarı % 30 için plastisite indisi ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki (Ishihara, Yasuda ve Yokota, 1981)

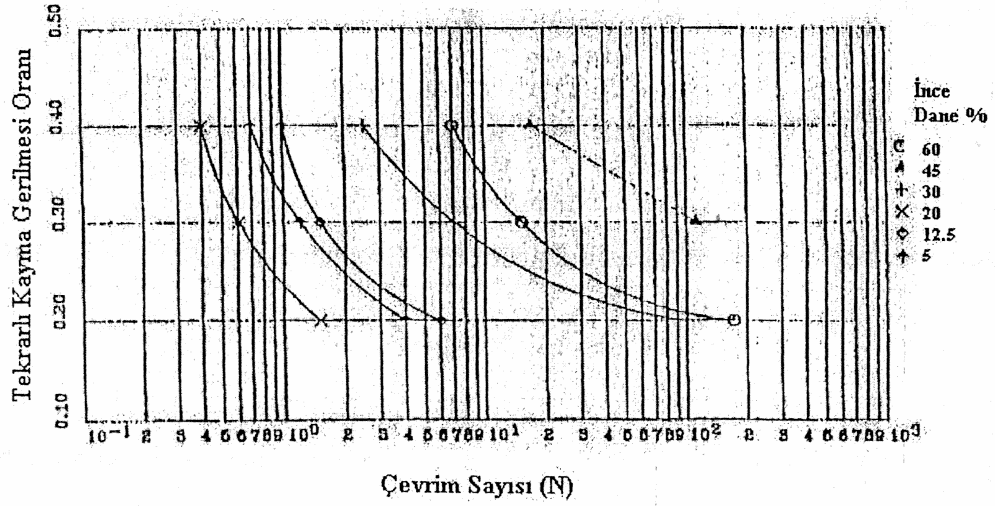
Chang (1988), Kaufman (1981), kumlarda % 10-60 arası arasında değişen oranlarda silt miktarı arttıkça, sıvılaşma potansiyelinin de arttığını söylemişlerdir. Chang, (1990), ise silt-kum karışımlarında yaptığı dinamik deneylerde, silt yüzdesinin dinamik mukavemet üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtirken, % 20 ‘ye kadar silt eklenen kumlu numunelerde mukavemetin silt miktarıyla azaldığını ancak bu durumda da ince danelerin boşluk suyu basıncı oluşumunu geciktirerek sıvılaşma dayanımını belli ölçüde arttırdığını söylemiştir. Bununla birlikte, suya doymun, temiz, orta sıkı ve iyi derecelenmiş üç farklı kum numunesinde yaptığı deneylerde ince dane oranı ve plastisite indisinin dinamik mukavemete etkisini araştırmıştır (Şekil 2.14, 2.15, 2.16). Plastisite indisi % 4 olan numunelerdeki silt miktarının dinamik mukavemete etkisi görülmektedir. En büyük mukavemet içerisinde hiç silt bulunmayan temiz kumda oluşurken silt yüzdesi % 20 olana kadar mukavemet ince dane miktarıyla azalmaktadır. Temiz ve iyi derecelenmiş kumda yapılan deneylerde ise plastisite indisinden bağımsız olarak % 5 ince dane eklendiği takdirde dinamik mukavemetin arttığı görülmektedir. Buna ek olarak, iyi derecelendirilmiş kumlar, diğer kum numunelere göre ince dane miktarından daha az oranda etkilenmektedir. Bütün kum numunelerde en düşük mukavemet ince dane yüzdesi % 4 olan kumda

görülürken, temiz ve iyi derecelenmiş kumlarda % 2 ince dane oranı, genel olarak sıvılaşma dayanımını attırmaktadır.



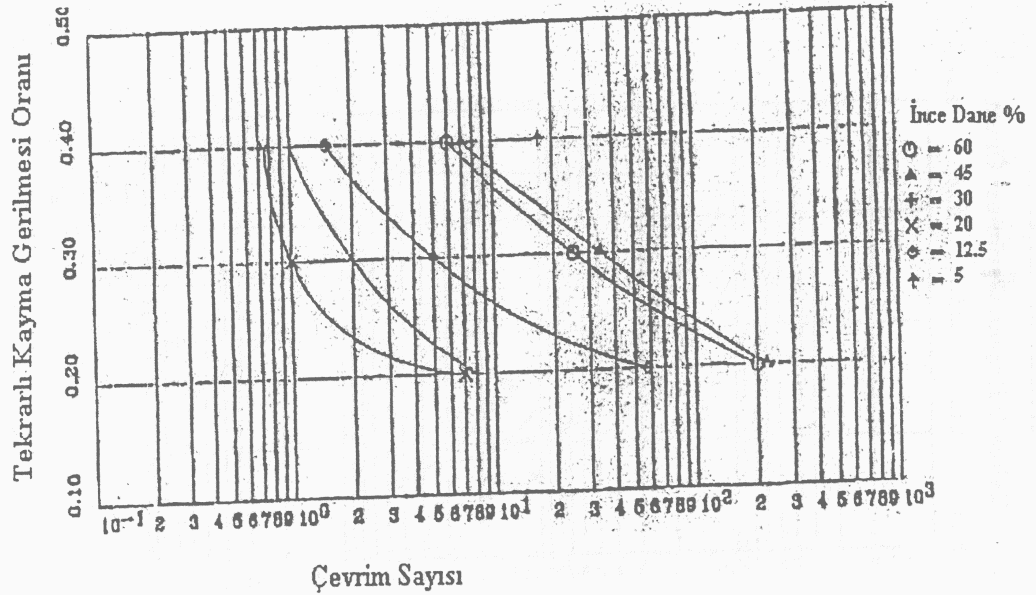
Şekil 2.14 Plastikite indisi % 4 olan orta sıkı kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Kaufman (1981) ve Sherif ve diğ. (1983), benzer granulometri eğrilerine ve endeks özelliklerine sahip farklı plastisitedeki silt miktarının kum-silt karışımının dinamik mukavemetini belirlemek üzere inamik 3 eksenli ve dinamik burulmalı kesme dene aletiyle % 5 çift genlikli deformasyon seviyesine kadar deneyler yapmışlardır. Şekil 2.5' den de görüleceği gibi ince dane yüzdesi arttıkça kumlu zeminlerde dinamik mukavemet artmaktadır. Saf silt içeren numunelerde dinamik mukavemet, % 30 veya daha az ince dane içeren numunelere göre dinamik üç eksenli deneylerde % 45 (Kaufman, 1981), Sherif ve diğ. (1983) tarafından yapılan dinamik burulmalı kesme deneylerinde ise yaklaşık olarak % 65 daha fazla mukavemet elde edilmiştir.



Şekil 2.15 Plastikite indisi % 4 olan temiz kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Koester ve Tsuchida, (1988), A.B.D., Çin ve Japonya'dan elde ettikleri ince daneli kum zeminler üzerindeki çalışmalarında, ince dane oranının sıvılaşma eğilimi olan kumlu zeminleri, olmayanlardan ayırmada yeterli bir parametre olmadığını söylemişlerdir.

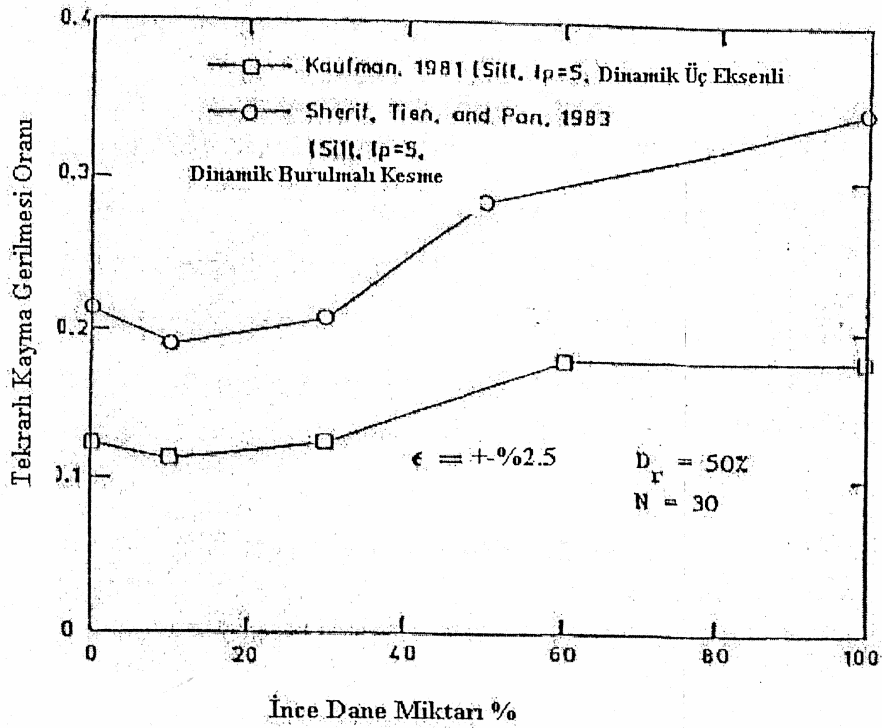


Şekil 2.16 Plastikite indisi % 4 olan iyi derecelenmiş kumlarda ince dane miktarının sıvılaşmaya etkisi (Chang, 1990)

Koester (1992) kum zeminlere değişik oranlarda düşük plastisiteli silt ve plastik kil katarak, sıvılaşma dayanımını, yaptığı dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme deneyleriyle belirlemişlerdir. Deney sonuçlarında belirli bir boşluk oranına sahip kum zeminde % 20 oranla ilave edilen düşük plastisiteli ince dane miktarına kadar sıvılaşma dayanımı artmaktadır (Şekil 2.22). Temiz kumda ise dinamik burulmalı kesme mukavemeti diğer ince daneli kumlara göre daha büyüktür. Bununla birlikte laboratuarda Casagrande aletiyle yaptığı likit limit deneylerini, koni penetrasyon aleti ile yaptığı deney sonuçlarıyla karşılaştırdıktan sonra, bulgularını arazideki sıvılaşma ve yumuşama potansiyeli yüksek olan ve önemli taşıma gücü kayıplarının gözleendiği bölgelerdeki endeks deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Casagrande aletinde yaptığı likit limit deney sonuçlarının koni penetrasyonla bulunduğu değerlere göre % 4 daha düşük su muhtevasında olduğu belirlemiştir. Buradan kohezyonlu zeminlerde tekrarlı yükler altında dinamik mukavemet kayıplarının belirlenmesinde bu farkın dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Koester (1992), dinamik üç eksenli deney aletinde ıslak sıkıştırma yöntemiyle hazırladığı farklı türdeki numuneleri izotropik olarak konsolide ettikten sonra yaptığı deneylerle ince dane türü ve oranının kum-silt-kil karışım zeminlerinin dinamik mukavemeti üzerine olan etkisi araştırmıştır. Dinamik burulmalı kesme deney aletinde ise dört tür numune kullanarak izotropik ve anizotropik koşullarda dinamik deneyler yapmıştır. Kullandığı numuneler; temiz ince kum; plastisite indisi $PI = \% 10$ olan % 20 ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $PI = \% 25$ olan % 20 ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum; plastisite indisi $PI = \% 15$ olan % 45 ince dane eklenerek hazırlanan temiz, ince kum numuneleridir. Bununla birlikte bu iki tür deney sisteminin sonuçları arasında ilişki olduğunu belirtmiş, bu durumun zemin granulometrisine, tekrarlı yüklemenin genlik ve frekansına ve numune hazırlama yöntemine bağlı olduğunu belirtmiştir. Deney sonuçlarından, % 20 'den fazla ince dane içeren kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımının, temiz ince kumlu zeminlerin sıvılaşma dayanımına kıyasla daha az efektif çevre basıncına bağlı olduğu görölmüştür.

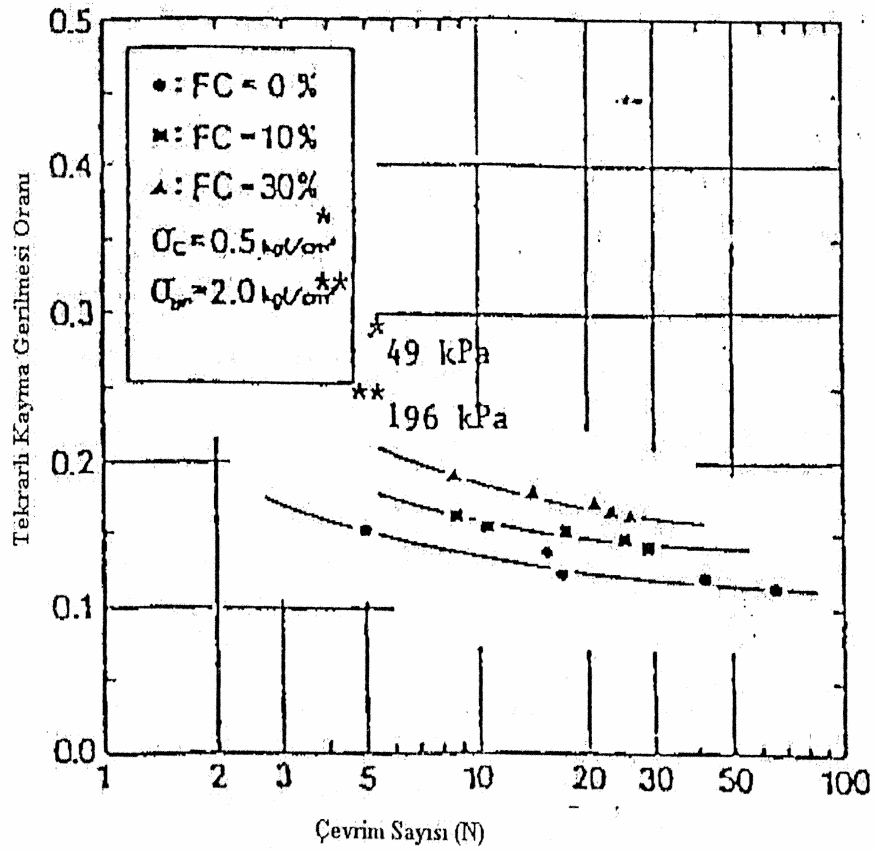


Şekil 2.17 Düşük plastisteli silt içeriğinin dinamik üç eksenli ve dinamik burulmalı kesme mukavemetlerine etkisi (Kaufman, 1981 ve Sherif ve diğ. 1983)

Ayrıca kumlar üzerinde yaptığı gerek dinamik üç eksenli gerekse dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yaptığı sıvılaşma deneylerinin, ince dane türü ve miktardan direkt olarak etkilendiğini ve belirli bir düzeye kadar eklenen ince dane miktarının sıvılaşma dayanımını arttırmadığını; ancak bu sınır değerini üzerine çıkıldığında, plastisite indisinden bağımsız olarak, sıvılaşma dayanımının, ince dane yüzdesiyle arttığını belirtmiştir. Troncoso (1990), 0.85 sabit boşluk oranında, % 0-30 arasında değişen oranlarda silt içeren kumların dinamik mukavemetini araştırmıştır. Artan silt miktarıyla, değişen dinamik mukavemetler Şekil 2.23 de gösterilmiştir. Aynı boşluk oranında silt yüzdesi % 30'a kadar arttıkça, kum zeminin mukavemeti azalmaktadır. Troncoso (1990), sabit boşluk oranında gerçekleştirdiği deneylerden elde ettiği sonuçların diğer yapılan araştırmalardan farklı olduğunu öne sürmüştür.

Erken ve Ansal, (1994) tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde yapılan deneylerde ise plastik ince dane oranı arttıkça sıvılaşma dayanımının da arttığı görülmüştür (Şekil 2.9). Erten ve Mahler, (1995) ise kumlarda boşluk suyu basıncı

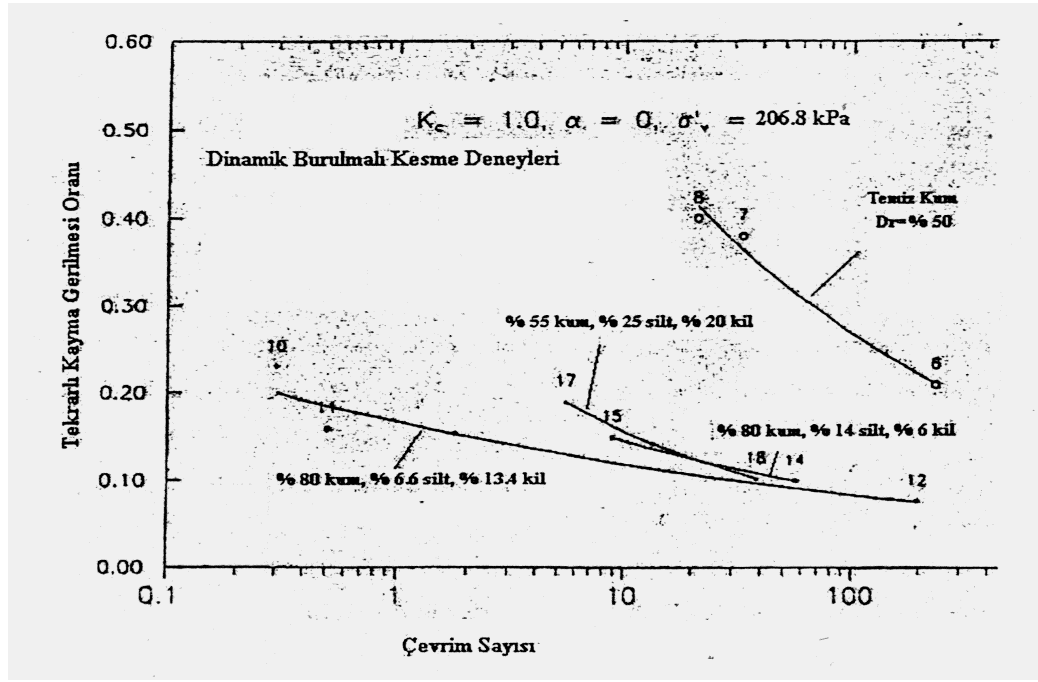
oluşumuna ince dane miktarının etkisini incelemek amacıyla dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır.



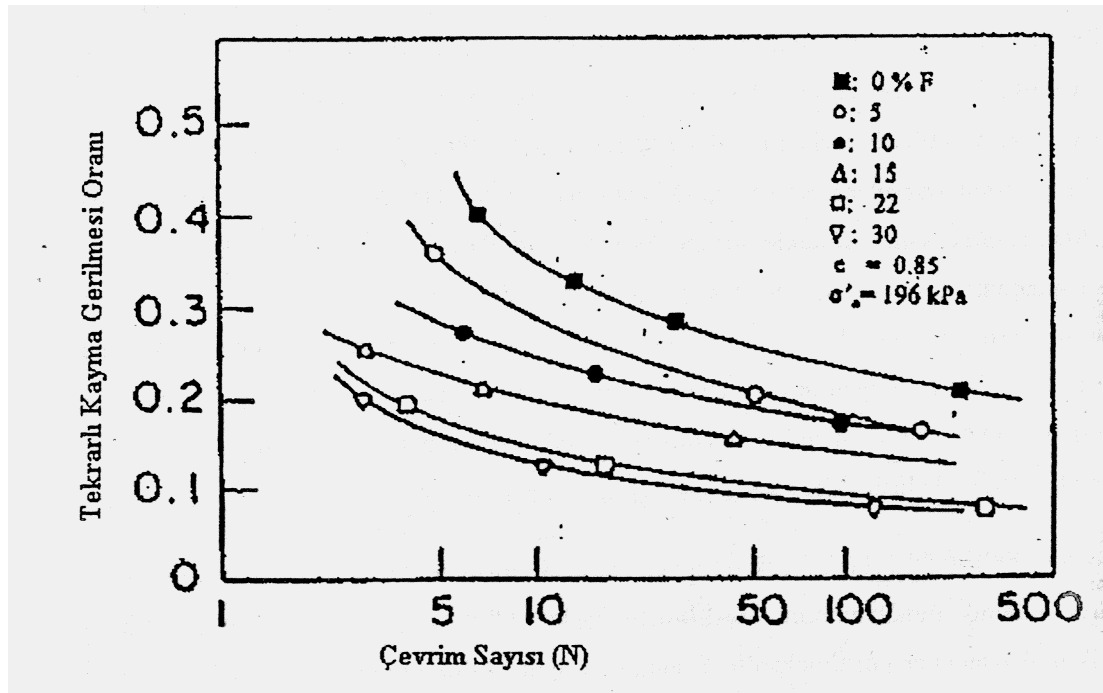
Şekil 2.18 Kaolin kilinin Sengenyama kumu sıvılaşma dayanımına etkisi (Kondoh ve diğ. 1987)

Silt miktarı, plastisite ve boşluk oranı, deney sonuçlarına etkiyen en önemli parametreler olarak belirlemiştir.

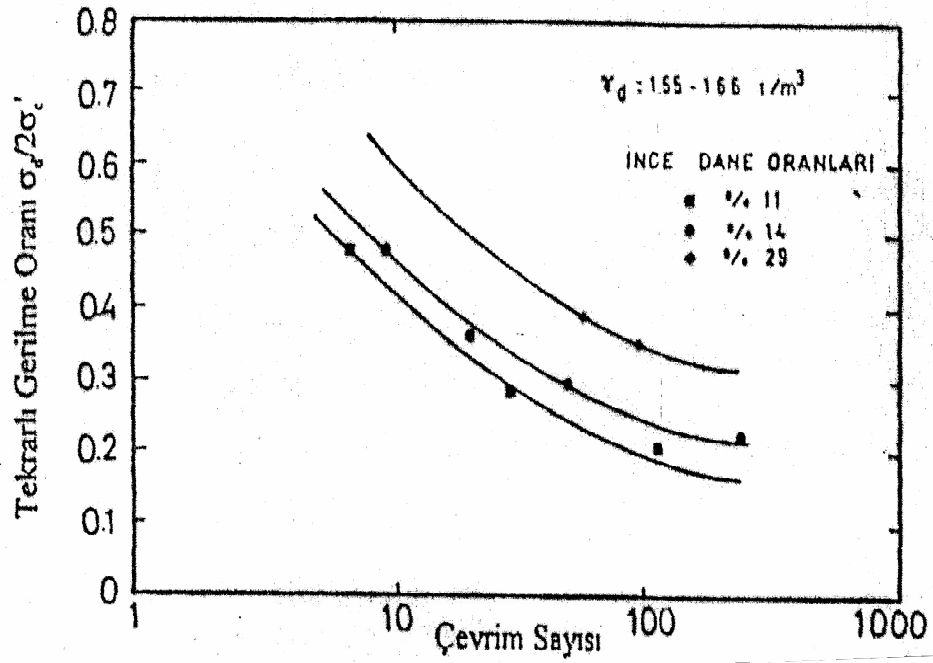
Elde edilen sonuçlardan, silt miktarının ve plastisitesinin, boşluk suyu basıncı oluşumunda $\% 10^{-2}$ birim kayma deformasyonundan küçük değerlerde etkinin olmadığı, siltli kumlarda ise akma deformasyonu eşik değerinin temiz kumlardakiyle aynı olduğu görülmüştür. (Şekil 2.25)



Şekil 2.19 İzotropik olarak konsolide edilen içi boş, silindirik ince daneli kum numunelerde yapılan dinamik burulmalı kesme deney sonuçları (Koester, 1992)



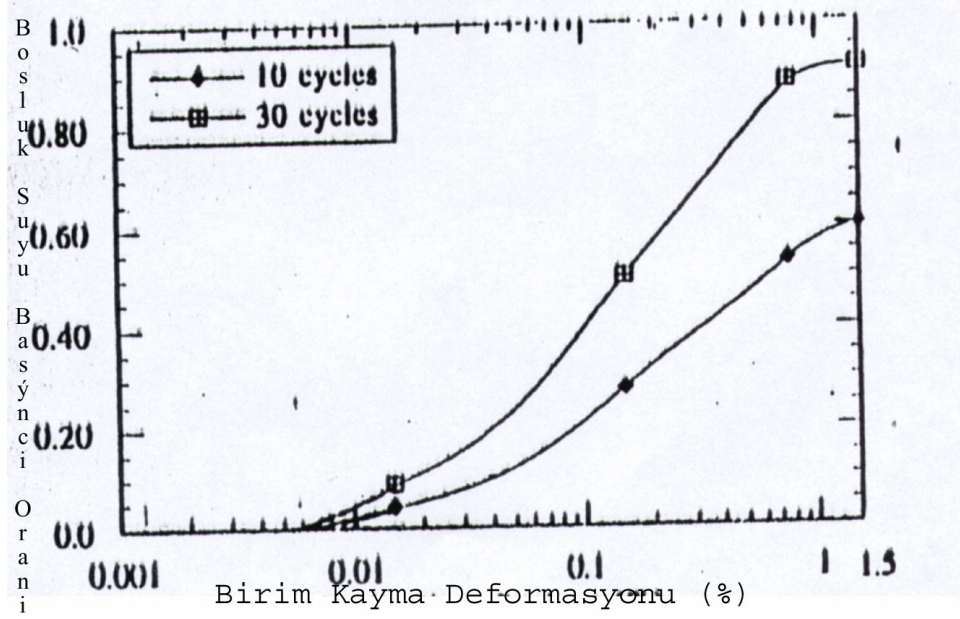
Şekil 2.20 Silt miktarının kumların dinamik mukavemetine etkisi (F= Silt yüzdesi) (Troncoso, 1990)



Şekil 2.21 Plastik ince danelerin kumların davranışına etkisi (Erken ve Ansal, 1984)

Buna göre, % 0.015 ve % 0.15 birim kayma seviyesine kadar yapılan deneylerden elde edilen boşluk suyu basınçları saf kumlarla % 10 plastik olmayan silt içeren kumlarda yaklaşık aynı seviyelerdeyken, % 0.75 ve % 1.5 birim kayma seviyesinde boşluk suyu basınçları temiz kumlarda daha düşük değerlerde kalmaktadır.

Erten ve Maher tarafından yapılan diğer çalışmalarda ise, % 60 silt miktarına kadar eklenen plastik olmayan siltin, kum numunedeki boşluk suyu basıncı oluşumuna bir etkisi olmadığı, % 60'ın üzerindeki silt miktarıyla boşluk suyu basıncının düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 2.22 Temiz kumda boşluk suyu basıncı oranı-birim kayma ilişkisi (Erten ve Maher, 1995)

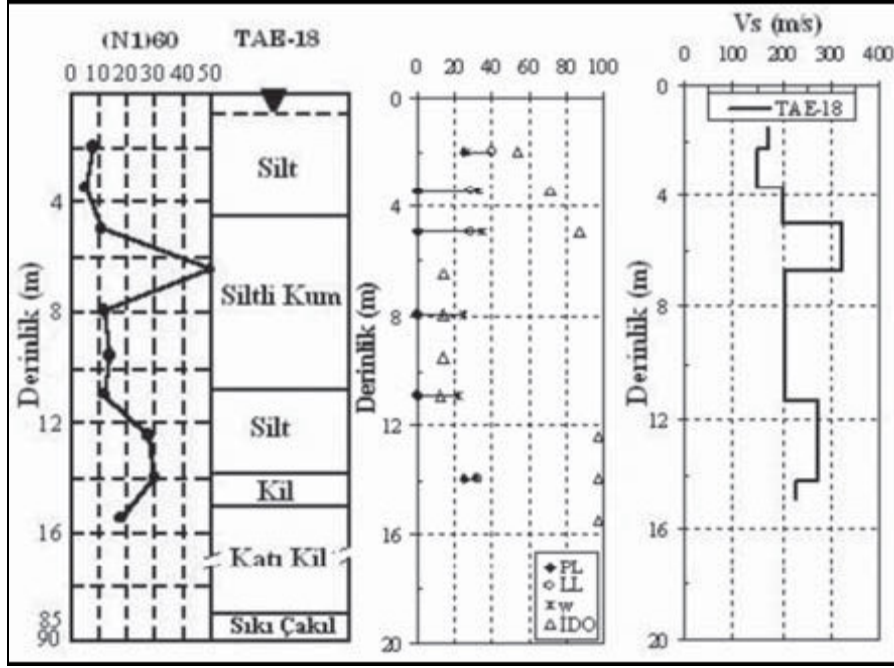
Amini ve Qi, (2000), tarafından homojen olarak hazırlanan ve 250 kPa çevre basıncı uygulanan silt-kum karışımı numunelerde inamik üç eksenli deney aletinde yapılan bir seri deneyde % 10'dan % 50'ye kadar artan silt miktarının, N=10 çevrim sayısına karşılık gelen dinamik gerilme oranında % 60'a kadar bir artışla sebep olduğu görülmüştür. Çevre basıncının 50, 100, 250 kPa değerlerinde ve sabit boşluk oranında yapılan deneylerde, üniform ve tabakalı zeminlerin davranışları birbirine yakın elde edilmiştir. Buna göre çevre basıncı arttıkça, sıvılaşma dayanımı azalmaktadır. Homojen olarak hazırlanan ve % 30 silt içeren numunelerde çevre basıncının 50 kPa'dan 250 kPa ' a kadar artmasıyla, N= 10 çevrime karşı gelen dinamik gerilme oranında % 38 bir azalma meydana gelmektedir. Tabakalı olarak hazırlanan numunelerde ise bu azalma % 20 seviyesindedir (Amini ve Qi, 2000).

Polito ve Martin (2001) ise kumların sıvılaşma dayanımına plastik olmayan ince danelerin etkisini araştırmışlardır. Plastik olmayan siltlerde aynı zeminde bulunan kumların dinamik davranışına hangi zeminin daha etkin olduğunu belirlemek için, kum zemin iskeletinin sahip olduğu boşlukların hangi oranda siltle dolu olduğunu bilmek gerektiğini söylemişlerdir. Araştırmalardan, kum zeminin yapısını örselemeden daneler arası boşlukların alabileceği en büyük silt miktarına sınır değer silt yüzdesi adı verilmiştir ve yaklaşık olarak % 25-45 arasında bulunduğunu

gözlemiştir. Eğer kum zeminin boşlularının bir kısmı siltle doluyorsa, zeminin dinamik davranışına kum zeminin sahip olduğu rölatif sıkılık etkili olmaktadır. İskeletin boşluk oranı azaldıkça mukavemet artmaktadır. Bu karışım zeminin içeriği silt miltarı sınır değerini üzerindeyse, bu durumda davranışa silt etkili olurken, tüm zeminin rölatif sıkılığı dinamik mukavemete etkilemektedir. Buna karşın rölatif sıkılık, bir önceki duruma göre daha az oranda mukavemeti değiştirmektedir. (Polito ve Martin, 2001).

Depremler sırasında zemin sıvılaşması ile ilgili başka bir çalışmada (Erken, 2004) ise suya doygun kumlu, düşük plastisiteli ve plastik olmayan siltli zeminlerde deprem yükleri altında boşluk suyu basınçlarının artması ile efektif basınçlar azalarak tamamen sıfır veya sıfıra yakın değerlere düşerler. Efektif gerilmenin sıfıra yakın değere düşmesi sonucu zeminin taşıma gücü tamamen ortadan kalkar. Sıvılaşan zeminde drenaj koşulları ve zeminin geçirgenliğine bağlı olarak su kumlu zemini kısa sürede terk ederken düşük plastisiteli siltte zamana bağlı olarak terk edecektir. Hem kumlu hem de düşük plastisiteli siltlerde sıvılaşma sonucu zemin yüzeyinde farklı oturmalar oluşmaktadır. Bu nedenle de eğer yapının temel sistemi yeterli güvenlikle inşa edilmedi ise zemindeki düzensiz oturmalar önce temel sistemini ve daha sonra üst yapıyı etkilemeye başlar. Bu nedenle zeminlerin sıvılaşabilirliğinin yapı tasarım aşamasında bilinmesi ve ona göre gereken önlemlerin alınması gerekir.(Erken, 2004), (Şekil 2.23)

Yine aynı çalışmada zemin tabakalarının sıvılaşabilirliği üzerine bir araştırma yapılmıştır. Genel olarak gevşek yerleşimli olan kum tabakasının altında katı silt ve killer bulunan sondaj mahalinde kayma dalgası hızları şekilde görüldüğü gibi zemin tabakalarının Ohta ve Goto (1978) tarafından verilen formülle ($V_s=85.3*N^{0.348}$) hesaplanmıştır. Burada N, düzeltilmemiş standart penetrasyon sayısıdır.

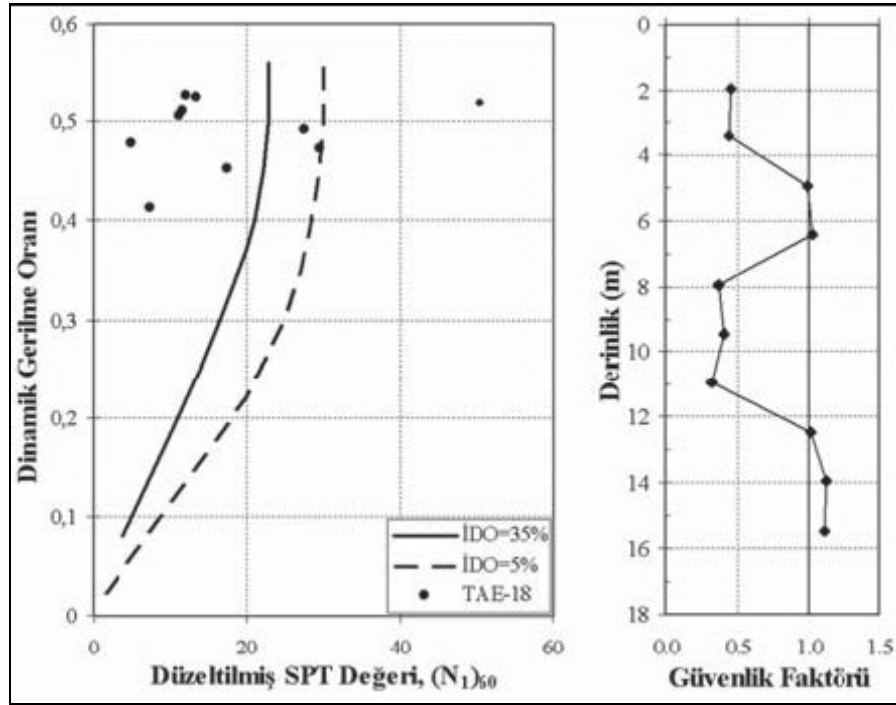


Şekil 2.23 TAE-18 sondajındaki zemin kesiti ve kayma dalgası hızı

Sıvılaşma direncini değerlendirmek için Seed ve diğ. (1985) tarafından verilen grafik kullanılarak zeminlerin içerdiği ince dane oranı ve (N1)60 değerlerine göre dinamik kayma direnç oranı (DKDO) elde edilir. Bu değer ile depremde oluşan dinamik kayma gerilme oranı (DKGO) karşılaştırılması ile sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü (GF) elde edilir.

$$GF = DKD \setminus DKGO \quad (2.1)$$

Güvenlik faktörünün $GF \leq 1$ olması durumunda silt ve kum tabakaları için sıvılaşmadan söz edilebilir. Bu sondaj loglarına ait düzeltilmiş SPT-(N1)60 ile dinamik gerilme oranı arasındaki ilişki ve güvenlik faktörünün derinlikle değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi depremde oluşmuş dinamik kayma gerilmesi oranı 0.41-0.53 arasında değişmekte olup ince dane oranı %5 eğrisinin solunda sıvılaşma aralığı içerisinde yer almaktadır. Güvenlik faktörünün derinlikle değişimine bakıldığında yaklaşık 13.0 m derinliğe kadar devam eden silt ve kum tabakalarda $GF \leq 1$ olması nedeni ile büyüklüğü 7.5 olan bir depremde sıvılaşma riskinin bulunduğu görülmektedir. Bu yöntemle göre 13.0 m derinliğin altında kalan zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı dirençleri yüksektir (Erken, 2004), (Şekil 2.24)

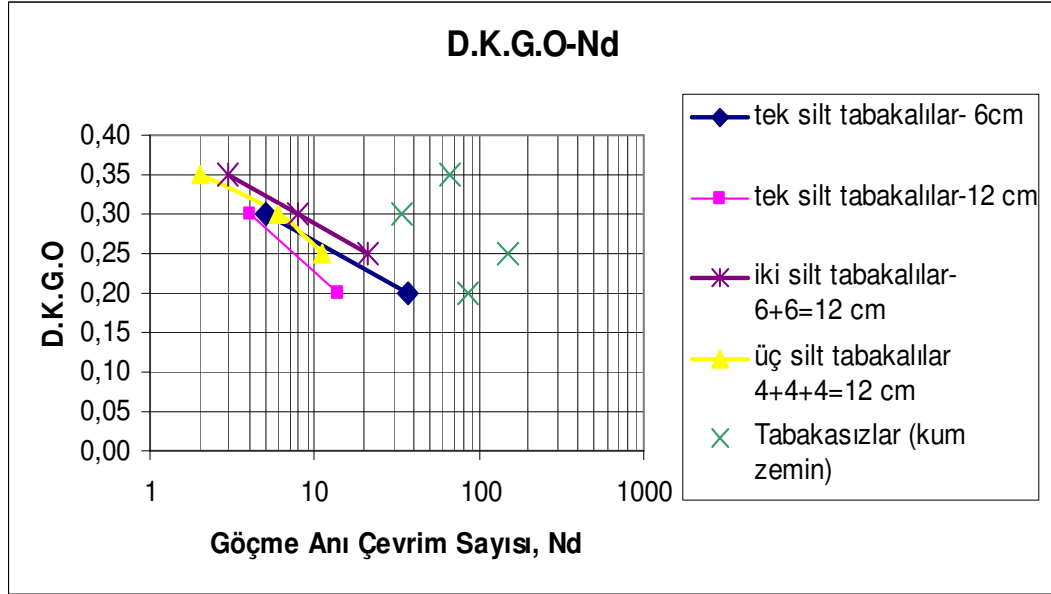


Şekil 2.24 Düzeltilmiş SPT darbe sayısı-Dinamik kayma gerilmesi ilişkisi ile güvenlik faktörünün derinlikle değişimi

Tunçkok (2005) çalışmasında ise farklı endeks özelliklerine sahip tabakalı silt-kum zeminlerin tekrarlı yükler altındaki dinamik davranışlarını ve mukavemet özellikleri belirlenmesi için dinamik burulmalı kesme deney aleti ile laboratuvar ortamında hazırlanan tabakalı silt-kum zemin numuneleri üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır. Çalışmanın amacı tabakalı zemin olarak hazırlanan plastisite indisi % 18 olan silt numune ve rölatif sıkılıkları $Dr = \% 51-53$ arasında değişen silt ve kum numunelerle hazırlanan tabakalı silt-kum zeminlerin farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik davranışlarının incelenmesidir. Bununla birlikte, farklı tekrarlı gerilme oranlarında yapılan deneylerde tabaka kalınlığı ve tabaka sayısına bağlı olarak numunede meydana gelebilecek deformasyonun hangi çevrim sayısında oluşacağı ve tabaka sayısının ve kalınlığının numunenin dinamik davranışına ne tür bir etki edeceği incelenmeye çalışılmıştır.

Tabaka kalınlığı ve sayısının göçme anındaki çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı ile değişimi incelenmiştir. Silt tabaka sayısındaki artışa ve buna bağlı olarak her bir tabaka kalınlığındaki azalma neticesinde artan tekrarlı kayma gerilmesi oranları dikkate alındığında genel olarak silt tabaka sayısındaki artış neticesinde silt-kum zemin daha erken çevrim sayılarında deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir.

Bununla birlikte iki ve üç silt tabakalı silt kum zeminde; üç silt tabakalı silt-kum zemin artan tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında iki silt tabakalı silt-kum zemine göre daha erken çevrim sayısında şekil değiştirmelere maruz kaldığı gözlenmiştir. Bu durum nedeni; artan tabaka sayısına bağlı olarak kum-silt ve silt kum geçiş noktalarındaki zayıf bölgelerin numunenin artan kayma gerilmesi oranlarından daha çabuk etkilenmesine neden olmuş buda numuneyi daha erken çevrim sayısında sıvılaşmaya ve deformasyona maruz bırakmıştır (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı- Göçme Anındaki Çevrim Sayısı İlişkisi (Tek, İki, Üç Silt Tabakalı ve Tabakasız (Kum Zemin))

Smith (2006), sitli kum ve killi kum zeminlerin rijitlik ve dinamik davranışlarını incelemiştir.

Siltli ve kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarına etki eden faktörlerin de incelenmesi gerekir. Tekrarlı yükler altında zeminlerin davranış özelliklerinin incelenmesinde hem arazi deneyleri, hem laboratuvar deneyleri, hem de teorik modellerden faydalanılmaktadır. Bu amaçla geliştirilen laboratuvar deney aletlerinde geliştirilen daha gerçekçi modeller sayesinde, hazırlanan numuneler mümkün olduğunca doğadaki koşullara uygun gerilmelere maruz bırakılarak, mümkün olduğunca doğadaki koşullara uygun gerilmelerinde olabildiğince yine doğada gerçekleşen gerilmeleri temsil edebilme olanağına yaklaşılmıştır. Zeminin çok fazlı karmaşık yapısı nedeniyle zeminlerin gerilmeler altındaki dayanım ve deformasyon özellikleri konusundaki araştırmalar yapılan tüm bu gelişmelere rağmen halen en doğruya daha yakın olmaktan öteye gidememektedir.

Laboratuvar deneylerinin yürütülmesinde sonuca etkiyen birçok faktörden bahsedilebilir. Kullanılan deney aletinin sınır koşulları, seçilen numune hazırlama yöntemi, uygulanan yüklemenin türü ve numunede oluşturduğu gerilme koşulları, ölçüleme ve veri edinim sistemlerindeki farklılıklar yürütülen deneylerden elde edilecek sonuçlar üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Örneğin aynı zemin özellikleri ve deney koşullarında üç eksenli deney aleti ve burulmalı kesme deney aletinde yürütüldüğü belirlenen deney sonuçları birbirlerinden oldukça farklıdır. (Tatsuoka ve diğ., 1986b). Bu farklılığın deney aletlerinin sınır koşulları ve numunede yaratılan gerilme koşullarındaki değişikliklerden kaynaklandığını söylenebilir. Numune hazırlama yöntemlerindeki farklılıklar da deney sonuçlarını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Bu nedenle yapılacak çalışmanın amacı doğrultusunda sonuçlar etkileyecek bu faktörlerin iyi bilinmesi gerekir.

Bu faktörlerin etkisi incelenirken sonucu etkileyebilecek diğer faktörlerin sabit kalmasına dikkat edilmelidir. *Örneğin kumlu ve siltli numunelerin dinamik özellikleri karşılaştırılırken aynı numune hazırlama yöntemi ile benzer röletif sıklıktaki numuneler elde edilebilecek şekilde deney hazırlanmalıdır.*

Çevrim Sayısının Etkisi: Zeminlerin etkisi altına bulundukları yüklere göre ortaya koydukları davranışlar birbirinden farklı olmaktadır. Dinamik yükleri statik yüklerden ayıran en temel özellik dinamik yüklemenin çevrimsel olarak uygulanmasıdır. Bu nedenle de tekrarlı yüklemelerde en önemli parametrelerden biri uygulanan yükün çevrim sayısıdır. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerindeki değişikliklere neden olan tekrarlı yüklerin genlik değeri ve zeminin fiziksel özellikleri kadar yükün uygulanma süresinin ve çevrim sayısının da önem taşıdığı bilinmektedir. Özellikle suya doymuş gevşek kumlarda tekrarlı yükler dolayısıyla ortaya çıkan mukavemet kaybı ve sıvılaşma olayı uygulanan gerilmenin çevrim sayısı miktarı ile çok yakından ilgilidir. Zeminler üzerinde dinamik etkiler oluşturan doğal olaylarından depremlerin de belirli etkisi olduğu düşünülürse özellikle depremlerin sebep olduğu mukavemet kaybı incelenirken uygulanan yükün çevrim sayısının etkisinin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Deprem sırasında ana şokun 10-20 arasında çevrim sayısında değişik genlikli ve nispeten yüksek frekanslı tekrarlı yüklemeleri oluşturduğu bilinmektedir. Buna karşın deniz dalgaları etkisi altındaki zeminler çok daha büyük çevrim sayılarında ve daha düşük frekanslı tekrarlı yüklemeler etkisi altındadır. Dolayısıyla zeminlerin dinamik özellikleri

araştırılırken yapılacak olan çalışmalar incelenen problemin amacı doğrultusunda yapılmalıdır.

Rölatif Sıklığın Etkisi: Tekrarlı yükler altında suya doymun kum zeminlerde oluşan birim şekil değıştirme genliklerindeki artan bir değışim göstermektedir. Belirli bir genlikteki üniform kayma gerilmelerine maruz bir zemin içerisinde artan boşluk suyu basınçları ile birlikte efektif gerilme değeriinde meydana gelen azalmaların zeminin mukavemet özelliklerindeki etkisi birim şekil değıştirmelerin ani bir şekilde artışı ile kendisini göstermektedir.

Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını statik yükleme durumunda olduğu gibi belirleyen en temel etkenlerden birisi zeminin sıklık oranıdır. Genel olarak kohezyonsuz zeminlerin yapısal davranışlarının rölatif sıklığa bağlı olarak açıklamak alışlagelmiş bir uygulamadır. Kum zeminin başlangıçta sahip olduğu boşluk oranı tekrarlı yükler altında zeminde oluşacak mukavemet kaybının süreci ve şeklini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Fsrklı rölatif sıklık değeriine sahip ve izotropik koşullarda konsolide edilmiş suya doymun kumların drenajsız koşullarda belirli bir üniform burulmalı gerilme değeriinde kesilmeye çalışıldığında sıvılaşmaya ulaşması için gereken çevrim sayıları Şekil..de gösterilmiştir. Burada rölatif sıklığın kum zeminlerden sıvılaşabilirlikleri üzerinde etkisini görebilmek mümkündür. Buna göre de rölatif sıklığın azalması ile kum zeminin sıvılaşmaya ulaşmasının daha az bir çevrim sayısı ile ulaşılabilceğidir.

Çevre Basıncının Etkisi: Zeminlerin sıvılaşma davranışlarına etki eden deneysel parametrelerden birisinin de farklı çevre basıncı değeriinde olduğu düşünölmektedir. Zeminlerin doğada aynı çevre gerilmesi altında olmadığı farz edilirse bu farklılığın tekrarlı yükler altındaki mukavemet kaybı olayını ne şekilde etkilediğinin incelenmesi gerektiği açıktır. Yine bununla ilgili geçmişte değışik zemin türlerinde farklı deney aletleri kullanılarak laboratuvar koşullarında bir çok deneysel çalışma yürütölmüştür (Yoshimi ve diğ., 1984; Tatsuoka ve diğ., 1981; Vaid ve Chen, 1985; Bhatia ve diğ., 1985; Hyodo ve diğ., 1988).

Aynı deney yöntemi kullanılarak izotropik koşullarda farklı çevre gerilmelerinde konsolide edilmiş kum numuneleri belirli bir genlikteki üniform burulmalı tekrarlı gerilmeler uygulanarak sıvılaşması için gereken çevrim sayıları belirlenmiştir.Yine izotropik koşullarda fakat artan gerilme genlikleri uygulanarak yürütölen deneylerde de farklı çevre basınçlarının sıvılaşma özelliğine etkisi incelenmiştir. Bu deneylerde

artan gerilme genliklerinin artım oranları yaklaşık olarak eşit tutulmuştur. Bu tip gerilme koşullarında çevre gerilmesinin sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu ilişkinin de yükleme deneylerinden elde edilen ilişkiye benzerlik gösterdiği düşünülmektedir.

Silt İçeriğinin Etkisi: İnce dane veya başka deyişle kohezyonlu zeminlerin varlığının granüler zeminlerin gerek statik ve gerekse dinamik özelliklerinin etkilediği bilinmektedir. Bu etkinin büyüklüğü ince malzemenin kendi özelliklerine de (plastisite, kohezyon ve adezyon kuvvet katsayısı vb.) oldukça bağlıdır. Dolayısıyla bu etki araştırılırken öncelikle ince daneli zeminlerin kendine ait fiziksel ve endeks özelliklerinin ortaya konması gerekmektedir.

Silt içeriğinin kumların dinamik davranışına etkisi üzerinde günümüze kadar yapılan çalışmalarda net bir sonuca ulaşılamamıştır. Ancak yürütülen deneysel çalışmalardaki genel görüş, plastik olmayan ince malzeme içeriğinin kumların sıvılaşma direncini azalttığı, plastik ince malzemelerin ise tam tersine kumların sıvılaşma direncini arttırdığı yönündedir. Fakat silt ve kumların fiziksel ve endeks özellikleri ile mineralojik kökenlerindeki farklılıklar bu etkinin yönünü ve büyüklüğünü etkilemektedir.

2.3 Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Mukavemet Özellikleri

Tekrarlı yüklemelerin neden olduğu şekil değiştirme miktarı zeminlerin dinamik davranış özelliklerine direkt olarak etki eden önemli bir etmendir. Elastik ve elasto-plastik davranış koşullarına bağlı olarak düşük deformasyon seviyelerinde zeminlerin gerilme şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Daha düşük deformasyonlarda ise yük altında zeminde oluşan mukavemet kayıplarında plastik davranış özellikleri önem kazanmaktadır.

Zeminlerin belirli gerilme koşulları altında şekil değiştirme seviyesinin artışıyla beraber çok farklı dinamik davranış özellikleri ortaya koyduğu bilinmektedir. Tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yanı sıra artan şekil değiştirme seviyesi ile beraber zeminin mukavemet özelliklerindeki değişiminde belirlenmesi gerekir.

Deprem gibi önemli tekrar yüklere maruz kalan zemin tabakaları geniş sınırlar içerisinde değişen genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında

kalırlar. Bunun sonucunda, zemin boşluklarındaki suyun yer değştirebilmesi için yeterli süre olmadığından zemin tabakalarında boşluk suyu artması ve şekil değıştirmeler meydana gelir. Tekrarlı yükler altında zemin tabakalarında meydana gelen bu gerilme durumunu ve davranış biçimini laboratuarda inceleyebilmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir (Ansal ve Erken, 1985).

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

Bununla birlikte farklı tekrarlı gerilme oranında yapılan dinamik deneylerden sonra statik gerilme-şekil değıştirme ilişkileri arasında çevrim sayısına bağı olan bir davranış da sözkonusudur. Numunelerde göçme seviyesine ulaşıldığından sonuçlar arasında pek bir farklılık olmasa da, tekrarlı gerilme oranı arttıkça, dinamik deney sonrası statik mukavemetler de az bir miktarla da olsa yüksek çıkmaktadır (Ülker, 2004).

Deprem gibi tekrarlı yüklemeler veya hızlı statik yüklemeler altında kum içerisindeki suyun pratik olarak dışarı çıkması mümkün olmayacağından, zeminde drenajsız kayma mukavemetleri gözlenebilir.

Tekrarlı gerilmeler etkisinde kalmış zeminlerin gerilme-şekil değıştirme ve mukavemet özelliklerinin incelenmesine 1960'lı yıllarda başlanmış ve günümüze kadar pek çok araştırma yapılmıştır. Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zemin davranışı ile ilgili ilk çalışmalar Seed ve Chan (1966) Thiers ve Seed (1969) tarafından yapılmıştır. Daha sonra Andersen ve diğ. (1980), Ansal (1981), Ansal ve Erken (1982, 1986, 1989), Ansal ve Yıldırım (1985) tekrarlı yükler altında davranışı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Matsui ve Bahr (1992), Özay Erken (2002), Özay (2002) örselenmemiş killi zeminler üzerinde üç eksenli dinamik deney aletinde önce tekrarlı yük uygulayıp daha sonra statik deformasyon kontrollu deneyler yapmışlardır

Tekrarlı yüklemeler altında suya doygun kumların dinamik davranış özellikleri ile ilgili çalışmalar Seed ve Lee (1996) tarafından dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile kumlu zeminlerde gerçekleşen sıvılaşma olayı incelenmeye çalışılmıştır.

Aradan geçen süre içerisinde bu konu ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır.(Lee ve Seed, 1967a,1967b; Dehghami ve diğ. 1999, Hyodo ve diğ., 1994; Castro ve Christian, 1976; Hanzawa, 1980; Seed ve Idriss, 1971; Nemat-Nasser ve Takahashi, 1984; Peacock ve Seed, 1968; Poulos ve diğ, 1985; Pradhan ve diğ. 1988a, Seed, 1979; Talaganov, 1996).

Araştırmacıların birçoğu tekrarlı yükle altında kumlarda meydana gelen bu büyük şekil değiştirmelerin sebebini dinamik yüklemenin belli koşul ve aşamalarında zemindeki efektif gerilmenin geçici olarak sıfıra düşmesine bağlayarak bu olayı sıvılaşma olarak tanımlamışlardır. Bununla birlikte zeminlerin dinamik davranış özelliklerini tam olarak kavrayabilmek için statik yükler altındaki davranışları ile beraber ele almak ve incelemek doğru bir yaklaşım olmaktadır.Bu amaçla suya doymuş kum zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışlarının kumun fiziksel özelliklerine ve yüklemenin türüne göre farklılık gösterdiği, bir çok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. (Bouckovalas ve Hoeg, 1987; Castro ve Poulos, 1977; Frost ve Drnevich, 1994; Ishihara ve Okada, 1978; Ishihara ve Takatsu, 1979; Lade ve Duncan, 1976; Lam ve Tatsuoka, 1988; Miura ve Toki, 1982; Pradhan ve Tatsuoka, 1979; Tatsuoka ve diğ.; 1983; Wong ve Artur, 1986; Yamashita ve Toki, 1993). Laboratuvar koşullarında sonradan oluşturulan zeminler üzerinde yapılan deneylerde numune hazırlama yöntemlerindeki farklılıklarının dinamik davranış üzerindeki etkileri Ladd (1974) ve Mulilis ve diğ. (1974) tarafından yürütülen çalışmalarla incelenmeye çalışılmıştır.

Buna ek olarak geçmiş yıllarda meydana gelen sıvılaşma olayının teorik olarak modellenmesi çalışmaları da Bolton ve Wilson (1989), Ishihara ve Kabilamany (1990), Jouanna ve Mokhtar (2000), Li ve Ming (2000), Nishi ve Kantani (1990) ve Ramsamooj ve Alwash (1990) tarafından yürütülmüştür.

Buna göre Verdugo ve Ishihara (1996) tarafından gerçekleştirilen çalışmada drenajsız koşullarda üç eksenli deney sistemiyle belli bir çevre gerilmesi altında izotropik olarak konsolide edilmiş, suya doymuş kumlarda gerçekleştirilen statik yüklemeli deneylerden saptanan zeminin davranış özellikleri gerilme izleri ile beraber Şekil 2.2 de gösterilmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerindeki davranış farklılıkları bu deneylerde kullanılan zeminlerin değişik relatif sıkılıklara sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Benzer davranış

özellikleri anizotropik gerilme koşullarında yapılan deneylerde gözlenmiştir. (Vaid ve Chern, 1985).

Birinci davranış türünde tekrarlı yüklemenin belli safhalarında zeminde görülen büyük şekil değiştirmeler zemin direncinin kaybolmasıyla oluşan deformasyon yumuşaması sonucu meydana gelmektedir. Bu durumda zemin, yukarıda bahsedilen statik durumdaki 1 ve 2. No'lu eğrilerle temsil edilen zemin davranışına benzer bir şekilde direncinin büyük bir kısmını kaybederek sabit bir gerilmeyle sürekli olarak şekil değiştirmeye devam eder. Bu davranış şekli yine sabit gerilme durumu olarak nitelendirilir ve bu hadiseye sıvılaşma adı verilir. (Ishihara ve Yasuda, 1975).

İkinci davranış türünde ise kumda meydana gelen şekil değiştirmelerin tekrarlı yüklemeler nedeniyle artan boşluk suyu basıncından dolayı efektif gerilmenin sıfıra yaklaşmasıyla beraber kumun rijitliğinin gittikçe azalması sonucunda gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu gerilme-şekil değiştirme davranış durumunun hiçbir safhasında deformasyon yumuşaması türü davranış görülmez. Zeminde oluşan belirgin şekil değiştirmeler sadece yükleme-boşaltma döngülerinde görülür.

Sıvılaşma, sınırlı sıvılaşma ve çevrimsel oynaklık olayları tekrarlı yükler altında özellikle suya doymun kum zeminlerde görülebilen en tipik deformasyon davranışlarıdır. Bu davranış türlerini ve özelliklerini belirlemek için laboratuarda gerçekleştirilen dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme vb. deneyleriyle farklı zemin özellikleri değişik yükleme koşullarında incelenir. Örneğin çevre gerilmesi, boşluk oranı gibi değişkenlerin zeminin dinamik davranışı üzerindeki etkisi birçok deneysel çalışmanın konusu olmuştur (Vaid ve Chern, 1985; Verdugo ve Ishihara, 1996). Yinede drenajsız koşullarda uygulanan tekrarlı yüklemeler altında meydana gelen şekil değiştirmelerin mekanizması tam olarak kesinlik kazanmamıştır.

2.4 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Yapılan Çalışmalar

Tatsuoka ve diğ. (1982), dinamik burulmalı kesme deney aletinde Toyoura ve Sengenyama kumu kullanarak sıvılaşma deneyleri yapmışlardır. Rölatif sıkılığın sıvılaşma dayanımını arttırdığını belirten araştırmacılar, sıkı kumlarda sınırlı ön sıvılaşma ve çevrimsel oynaklık davranışını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte ince

dane içermeyen Toyoura kumunun dinamik mukavemetinin, % 1.6 ince dane içeren Sengenyama kumuna göre daha fazla olduğunu söylemişlerdir.

Tatsuoka ve diğ. (1982) sıkı kumların drenajsız tekrarlı yükler altında yapılan burulmalı kesme deneyleriyle, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini araştırmışlardır. Sonuçlardan, rölatif sıkılığın belli bir değerinden sonra, % 7.5 ve % 15 birim kayma elde etmek için gerekli gerilme seviyesinin statik deneylerden elde edilen gerilme değerine yakın olduğu bulunmuştur.

Sayao ve Vaid (1991), gerilme anizotropisini ve asal eksenlerin döngüsünü araştırmışlardır.

Tatsuoka ve diğ. (1996), kumlarda mukavemet ve deformasyon özelliklerini yaptıkları burulmalı kesme deneyleriyle araştırmışlardır. Sonuçların doğruluğu açısından düşey eksenel yük ve burulma momentinin doğrulukla ölçülmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak numunede oluşan gerilmelerin membran penetrasyonu açısından düzeltilmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Yoshimine ve diğ. (1999), İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında yapmış oldukları burulmalı kesme deneylerinde drenajsız düzlem deformasyon durumunda kayma mukavemetini ve drenajsız kayma mukavemetini karşılaştırmışlardır.

Yoda ve diğ. (2001), değişik bir çalışmaya imza atarak tarım arazisindeki araçların hareketlerinin yükleme karakteristiklerini tekrarlı burulmalı kesme gerilmesi ile modelleyerek Bangkok'taki tarım arazisindeki killi silt zemin numunesinin dinamic davranışını öğrenmeye çalışmışlardır. Tarım arazi zeminleri genelde doymuş olmaması bu deney tipinin seçilmesi için en önemli etken olarak gösterilmiştir.

Shahnazari ve Towhata (2002), kumlarda gerilme-hacim değişimi ilişkisini araştırmak amacıyla dinamik burulmalı kesme deneyleri yapmışlardır. Araştırmalarında Toyoura kumu kullanarak, drenajlı deneyler altında başlangıç anizotropik gerilme durumu ile efektif çevre gerilmesinin ve birim hacim ağırlığının deney sonuçlarına ve gerilme-hacim değiştirme ilişkisine etkisini araştırmışlardır.

Ülker (2004), çalışmasının amacı olarak farklı endeks özelliklerine sahip yumuşak ve suya doymuş kumlu ve killi siltlerin ve siltli killerin tekrarlı yükler altındaki dinamik mukavemet özelliklerini belirlemeyi göstermiştir. Daha da detaylı olarak söylemek gerekirse yumuşak siltli kil zeminin dinamik mukavemetinin belirlenmesi ve tekrarlı

yükleme sonrası önceden belirlenen statik mukavemetinde meydana gelen azalmanın derecesini saptanması, farklı plastisite indislerindeki silt zeminlerin dinamik mukavemetlerinin belirlenmesi, farklı konsolidasyon ve yükleme koşullarında zemin dane yapısında meydana gelen değişimlerin belirlenmesi dinamik burulmalı kesme deney aletinde yapılan bu çalışmanın amaçları olarak sıralanabilirler.

Koseki ve diğ. (2005), dinamik burulmalı kesme deney aletini kullanarak düşük gerilmeler altında Toyoura kumunun sıvılaşma özelliklerini incelemişlerdir ve sıvılaşma özelliklerinde aşırı derecede küçük efektif gerilmeler altındaki kesme dayanımına ve gerilme seviyesine bağlı olarak değişimler görmüşlerdir.

Koseki ve HongNam (2005), dinamik üç eksenli deney aleti ve dinamik burulmalı kesme aletiyle Toyoura kumunun Quasi-Elastic deformasyon özelliklerini incelemişlerdir.

Tunçkok (2005), çalışmasında dinamik burulmalı kesme deney aleti yardımıyla tabakalı zemin olarak hazırlanan plastisite indisi % 18 olan silt numune ve rölatif sıkılıkları $D_r = \% 51-53$ arasında değişen silt ve kum numunelerle hazırlanan tabakalı silt-kum zeminlerin farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik davranışlarının belirlemiş, farklı tekrarlı gerilme oranlarında yapılan deneylerde tabaka kalınlığı ve tabaka sayısına bağlı olarak numunede meydana gelebilecek deformasyonun hangi çevrim sayısında oluşacağı ve tabaka sayısının ve kalınlığının numunenin dinamik davranışına ne tür bir etki edeceği incelemiştir.

2.5 Deney Sistemi ve Yükleme Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi

Yapılan çalışmalarda, deney sistemine de bağlı olarak sinüzoidal, üçgen, dikdörtgen ve trapez yükleme şekilleri kullanılmıştır. Dikdörtgen yükleme biçiminin kullanılması durumunda en büyük gerilme değerinin numune üzerinde diğer yükleme şekillerine göre daha uzun süre etkimesinden dolayı daha büyük şekil değiştirmeler ve dolayısıyla daha büyük artık boşluk suyu basınçları elde edilmiştir. Laboratuvar çalışmalarının temel amacı doğadaki durumu modellemek olduğu için, deneylerde kullanılan yükleme biçimi, deprem yüklemesine eşit bir etki yaratacak tipte olmalıdır. Literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan sinüzoidal yükleme şekli, gerçekte deprem tarafından zemin tabakalarına uygulanan yükleme şekli değildir. Ancak deney sonuçları her iki tür yükleme arasında fazla bir fark olmadığını

göstermektedir. Bu farkın az olması laboratuarda yüklemenin eşdeğer tekrarlı gerilme genliği şeklinde olmasındandır. Böylece çift yönlü yüklemeyle birlikte uygulanan tekrarlı gerilme genliğinin hem çekme hem de basınç bölgesinde kalması sağlanmaktadır. Sonuç olarak şekil değiştirmeler daha büyük olmakta; daha küçük mukavemet değerleri elde edilmektedir.

Yapılan çalışma kapsamında kullanılan dinamik burulmalı kesme deney sisteminin diğer dinamik deney aletlerine göre bazı avantajları vardır. Deneylerde kullanılan içi boş silindirik numuneler, numune yüksekliği boyunca üniform gerilme dağılımının oluşması, düşey eksenel kuvvet, burulma momenti ve iç ve dış hücre basınçlarının bağımsız bir şekilde uygulanabilmesi orta asal gerilme etkisinin incelenebilmesi, asal eksen yönlerinin istenilen koşullara göre döngüsünün sağlanması, bu avantajlardan en önemlileridir. Ayrıca anizotropik konsolidasyonun sağlanabilmesi, zeminin arazide maruz kaldığı gerilme koşullarını laboratuarda aynen modelleme açısından yarar sağlar.

2.6 Numune Hazırlama Yönteminin ve Ekipmanın Dinamik Davranışa Etkisi

Deney sonuçlarına etkiyen bir diğer parametre ise numune hazırlama yöntemidir. Laboratuar çalışmalarında yapılan dinamik deneylerde farklı yöntemler kullanılarak farklı sıklıkta örselenmiş numuneler oluşturulabilmektedir. Bunlar arasında, ıslak sıkıştırma, suda çökeltme, kuru yağmurlama, şişleme, düşük frekanslı titreşim, vibrasyonlu yüksek frekanslı titreşim genelde kullanılan yöntemlerdir.

Tatsuoka ve diğ. (1984), numune hazırlama yönteminin dinamik burulmalı kesme deney sonuçlarına etkisini araştırmışlardır. Bunun için ince dane içermeyen Toyoura kumu ile % 2.4 ince dane içeren Sengenyama kumu kullanmışlardır. Buna karşın en büyük ve en küçük boşluk oranının belirlenmesinde kullanılan yöntem ile dinamik deneylerde kullanılan numune hazırlama yöntemi farklı olduğundan, rölatif sıklığın kumlarda dinamik mukavemete olan etkisini tek başına yeterli bir parametre olarak almanın yanlış olacağını belirtmişlerdir. Dinamik deney sonuçları, numune hazırlama yöntemine doğrudan bağlıdır. Tatsuoka ve diğ. (1984), ıslak sıkıştırma, kuru yağmurlama, ıslak vibrasyon ve vibrasyonla suda yağmurlama yöntemleri kullanarak dinamik üç eksenli deney aletinde yaptıkları deneylerde, 20 çevrim sayısında % 10 birim kayma elde etmek için gerekli gerilme oranı ıslak sıkıştırma yönteminde elde edilmiştir. Bu sonuç, Mulilis ve diğ. (1975), tarafından bulunan sonuçla

uyuşmaktadır. Bunun yanında ıslak sıkıştırma yöntemi ile elde edilen mukavemetlerle, ıslak vibrasyon yöntemiyle hazırlanan numunelerle yapılan dinamik burulmalı kesme aletinden elde edilen mukavemetler (20 çevrimde % 15 birim kaymaya ulaşmak için gerekli gerilme oranı), daha büyüktür.

Vaid ve diğ. (1999), kumların drenajsız mukavemetlerine laboratuarda yeniden hazırlama yöntemlerinin etkisini araştırmışlar, kuru yağmurlama, ıslak sıkıştırma ve suda depolama yöntemleriyle elde edilen numunelerin dinamik ve statik davranışlarını incelemişlerdir. Sabit boşluk oranında ve aynı çevre gerilmesi altında, ıslak sıkıştırmayla hazırlanan numunelerin sıvılaşma potansiyeli olduğu ve hacim azlığı gösterdikleri belirlenirken, suda yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numunelerin hacim artışı gösterdikleri bulunmuştur. Buna ek olarak ıslak sıkıştırmayla hazırlanan numunelerin suda çökelmeyle elde edilen numunelere göre daha üniform olmayan bir davranış gösterdikleri belirlenmiştir.

Suya doymuş kumlar dikkate alındığında, numune hazırlama yönteminin, kumun sıvılaşma davranışı üzerinde etkili olduğu görülür. Bunun nedeni ise, laboratuarda farklı numune hazırlama yöntemleriyle, farklı dane yapısı ve yerleştirme sahip farklı sıklıktaki kumların oluşturulmasındandır.

Mulilis ve diğ. (1975), farklı numune hazırlama yöntemleriyle, aynı çevre basıncı altında aynı rölatif sıklıkta sarsma tablası deneyleri yapmışlardır. Belirli bir tekrar sayısı da ön sıvılaşma meydana getirecek tekrarlı gerilme oranları arasında % 200'e çıkan farklar olmaktadır. Bu farklılığın ayrıca kumun cinsinin rölatif sıklığına ve efektif çevre gerilmesine bağlı olduğu da belirtilmiştir.

Deney sisteminin ve hazırlama yönteminin dinamik davranışa etkisi gibi deney sırasında kullanılacak ekipmanlarında alınan sonuçlara direk olarak etkisi vardır.

Örneğin Koseki, Yoshida ve Sato (2005) düşük gerilmeler altında yapılan drenajsız dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yaptıkları deneyler sonucu kesme gerilmesi hesaplarındaki düzeltmelerde membranın etkisinin hesaba katılmasının bir zorunluluk olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca sıvılaşma direncinin gerilme azaldıkça arttığı sonucu yanında membran penetrasyon düzeltmesinin bu eğilime önemli bir etki yapamayacağı sonucunda ulaşmışlardır.

2.7 Zemin Yapısının Farklı Konsolidasyon ve Yükleme Koşullarında Değişimi

Zemin Mekaniği'nde deneysel çalışmalar sırasında kullanılan ince daneli, kohezyonlu ve kaba daneli kohezyonsuz zeminlerin sahip oldukları yapı, üç fazlı ve danesel malzeme olan zeminlerin statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışına doğrudan etkimektedir. Bu açıdan günümüzde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerine yapılarının etkisini belirlemek üzere çeşitli araştırmalar yapılmaktadır.

Youd (1977), tekrarlı yüklemenin granüler zeminler üzerindeki etkisine değirmiştir. Buna göre kumlarda yüklemeyle birlikte dilatans nedeniyle oluşan hacimsel deformasyona bağlı olarak yeniden bir yerleşim olmaktadır. Bu yeni dane düzeni ise boşluklu yapıyı etkilemektedir. Düşük deformasyon seviyelerinde kum daneleri arasında oluşan küçük çaplı boşluklar, deformasyonlar arttıkça yükleme döngüsüyle birlikte azalmaktadır. Buda tekrarlı yüklenen kum zeminlerin mikromekanizmasına etki etmektedir.

Cotecchia ve Chandler (1997), doğal kil zeminin statik kayma gerilmeleri altındaki göçme öncesindeki davranışına numune yapısının etkisini araştırmıştır. Araziden örselenmemiş olarak doğal kil zemin ile laboratuvarı ödometre deney aletinde konsolide edildikten sonra yoğrularak üç eksenli deneyde kullanılan kil numuneleri arasında yapısal farklılık olduğunu belirten araştırmacılar elektron mikroskobu görüntüleriyle örselenmemiş numunelerin oluşumları sırasında paralel tabletler halinde sıralandıklarını söylemişlerdir.

Ülker (2004), ise çalışmaları sonucunda izotropik konsolidasyonla birlikte hem laboratuvarı hazırlanan örselenmiş ince kumlu ve killi silt numunelerde, hem de örselenmemiş killi silt numunelerde, kaba danelerarası büyük ve ince danelerarası küçük boşluklarda belirgin bir azalma söz konusu olduğunu ve bu azalmanın, örselenmemiş zeminde daha fazla olduğunu saptamıştır ve diğeri bir saptamaya göre laboratuvarı hazırlanan örselenmiş siltli numunede ise konsolidasyon öncesi porozite örselenmemiş numuneye göre daha büyüktür. Bir başka sonuç ise tekrarlı yükleme sonrası plastisitesi % 11 olan siltli zeminden elde edilmiştir. Buna göre yükleme öncesinde her üç doğrultudan alınan görüntülerin analizinden, büyük çaptaki boşlukların heterojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Tekrarlı yükleme de yeniden bir dane dağılımı ve yapısına sahip olan numunede, boşluk

aplarının da yeni yerleşime bağlı olarak değiştii ve her üç düzlemde yapılan ölçümlerde bu çap değerlerinin birbirine yaklaştığı belirlenmiştir.

Yıldırım ve Erşan (2006), tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonunu araştırdıkları çalışmada tekrarlı yükler altında zeminde meydana gelen oturmalar, zeminin daha sonra maruz kalacağı yüklere karşı konsolidasyon davranışını değiştirmekte, sıkışma indisi tekrarlı gerilme genliğine bağlı olarak azalmakta olduğunu belirlemişlerdir..

2.8 Sonuç

Literatür bölümünde çalışma konusuyla ilgili geçmiş çalışmalardan ve çalışmalardan çıkan sonuçlardan bahsedilmiştir.

Birinci bölümde öncelikle taşıma gücü kayıpları hakkındaki literatürden ve zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanan yöntemlerden ve son yıllarda yapılmış çalışmalara değinilmiştir. Bu çalışmada düşük plastisiteli killerde taşıma gücü kayıpları inceleneceği için literatür kısmında siltli kil ve killerin tekrarlı yükler altındaki davranışına daha geniş yer ayrılmıştır.

İkinci bölümde çalışma konusu dışında kalan diğer zemin türleriyle ilgili çalışmalara da göz atılmıştır

Son bölümlerde siltli killi ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları, dinamik burulmalı kesme deney aletinde yapılan çalışmalar temel başlıkları altında geçmiş çalışmalar genel mantık bir çerçevesinde sıralanıp literatür kapsamı içersinde ele alınmıştır.

3. DENEY YÖNTEMİ VE KULLANILAN MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ

3.1 Giriş

Laboratuvar çalışmalarının temel amacı doğadaki durumu modellemek olduğu için, deneyde kullanılacak numune doğal ortamındaki şartlar altında olmalı ve deneylerde kullanılan yükleme biçimi, deprem yüklemesine eşit bir etki yaratacak tipte olmalıdır. Bu yüzden deney aleti, deney yöntemi ve kullanılacak malzemenin hazırlanması çok önem taşımaktadır. Üçüncü bölümde deney aleti hakkında bilgiler ve numune hazırlama yöntemiyle deneylerde kullanılan örselenmiş numunelerin özellikleri ve bu numunelerde oluşan gerilme-şekil değiştirme yöntemleriyle ilgili hesap yöntemleri açıklanmaktadır.

3.2 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Sistemi

Çalışma kapsamındaki dinamik deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'na getirilen içi boş silindirik burulmalı kesme deney aletiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi, düşey eksenel F_z , burulma momenti T , iç hücre basıncı P_1 , ve dış hücre basıncı P_0 ve dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilmesinin yanı sıra; düşey eksenel yer değiştirme ΔH , burulma açısı $\Delta \theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_i ve numune hacim değişimi ΔV_s ' nin belirlenmesine olanak tanır. Burulma momenti istenilen değer ve hızda tekrarlı olarak veya bir doğrultuda uygulanır. Düşey yük ve ters basınç ise hem dışarıdan elle hem de otomatik olarak kontrol edilebilmektedir.

Bu deney aleti içi boş, silindirik numune drenajlı veya drenajsız koşullar altında, izotropik üç eksenli gerilme koşullarında, 0,01-10,00 Hz yükleme frekansı aralığında yük uygulanarak, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ile kayma mukavemeti özellikleri belirlenebilmektedir. Şekil 3.7 de dinamik burulmalı kesme deney aletinin genel görünüşü görülmektedir. Şekil 3.8 de ise içi boş silindirik deney numunesine ait düşey kesit görülmektedir.

İstanbul Teknik Üniversitesi zemin dinamiği laboratuvarına, ortak yürütülen bir proje kapsamında Japonya Uluslararası İşbirliği Kuruluşu (JICA) tarafından getirilmiş olan DTC-311 modelidir.

Sistem esas olarak

- i) Üç eksenli yükleme hücresi
- ii) Düşey Yük ve Burulma momenti yükleme sistemi
- iii) Hava-su kontrol uygulama birimi
- iv) Ölçüm ve kayıt sistemi bölümlerinden oluşmaktadır.

3.2.1 Üç Eksenli Yükleme Hücresi

Dinamik burulmalı kesme deney aletinde üç eksenli yükleme hücresi sabit bir platform üzerindedir (Şekil 3.1). Bu platform üzerinde deney numunesinin kurulması aşamasında numunenin hazırlandığı alt başlık platform üzerindedir. Bu sistem hava sürükleyici bir sistemle ilişkilendirilerek sistemin rahat hareket etmesi sağlanır.



Şekil 3.1 Üç eksenli deney sisteminin genel görünümü

Üç eksenli sistemde numuneye su ve ters basınç verilmesini sağlayan ve bunları kontrol eden kanallar mevcuttur. Bununla birlikte hava su kontrol ünitesi ile de ilişkilendirilen bu kanallar aracılığıyla numunede meydana gelecek basınç değişimlerini ölçmek üzere bu kanalları izleyen bağlantı noktalarında ölçüm cihazları yerleştirilmiştir.

Alt piston başlığı poroz taşının yerleştirildiği yuva, içinden geçen kanaldan oluşmakta ve alt tabladan ayrılabilir. Numune poroz taş üzerine yerleştirildiğinde bu kanaldan su girişi ve çıkışı tabla kenarına monte edilmiş vanalar yardımıyla sağlanır (Şekil 3.2).

Su alma kanallarının bir ucu yukarıda anlatıldığı gibi pistonun diğer ucu ise yükleme düzeneğinin yanında bulunan depolara ve ters basınç vermeye yarayan bürete bağlıdır. Ayrıca bu büret ve bir alıcı yardımıyla deney sırasında meydana gelen hacim değişimi de ölçülebilmektedir. Depodan su kanallara cazibe ile akmakta, büretten ise ters basınç uygulanarak numune içine girmektedir. Drenaj vanalarının açık olduğu durumda da numune içinden çıkan su da hava su kontrol ünitesinde bulunan ikinci bürette toplanmaktadır. Boşluk suyu basıncı ölçümü için kullanılan kanalın diğer ucu ise su basıncındaki değişimi belli oranlarda dirence çeviren ve elektrik akımı cinsinden okumaya olanak sağlayan basınçölçere bağlıdır. Basınçölçer elastik bir diyaframla, bu diyaframda hareketi ölçen deformasyon ölçerden oluşmaktadır. Oluşan su basıncı diyaframı şişirmekte, bu davranış deformasyon ölçer tarafından algılanmakta ve sonuç olarak da bu değer akım cinsinden panoda görülebilmekte ve kayıt edilebilmektedir. Hücreye su almaya yarayan kanalın diğer ucu da hava su kontrol ünitesinin arkasında bulunan büyük su deposuna bağlıdır ve su alma işlemi bu depoya uygulanan basınç yardımıyla yapılmaktadır.



Şekil 3.2 Hücre alt tablasına bağlı vanaların gösterimi

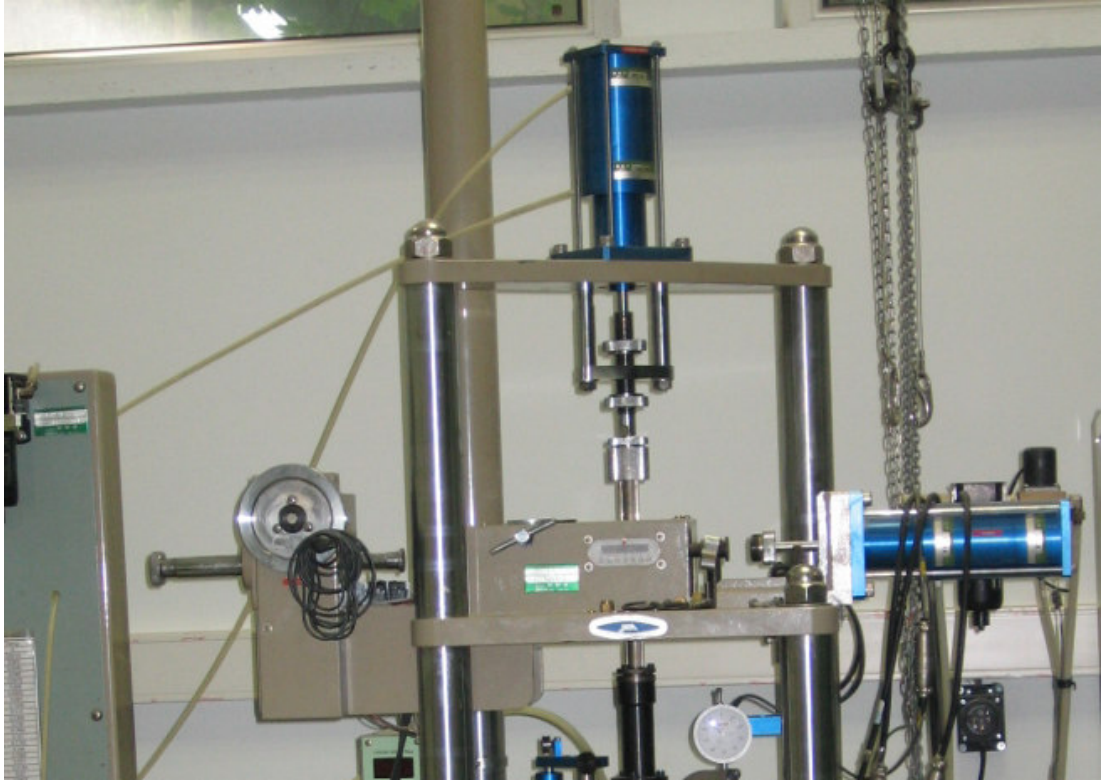
Üç eksenli deney sisteminde platform üzerinde sabit olan alt tablaya numune yerleştirilip üst piston monte edilerek sistemin düşey yönde yük alması sağlanmaktadır. Üst piston bölümünde düşey deformasyonun ölçümüne olanak sağlayan hassas algılayıcılar bulunmaktadır.. Algılayıcılardaki veri üst başlıkta bulunan kanallardan geçen kablolar aracılığı ile veri edinim düzeneğine ulaştırılır. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3 Hücre üst başlığı

3.2.2 Düşey Yük ve Burulma Momenti Yükleme Sistemi

Burulmalı kesme deney aletinde incelenen diğer bir bölümde numuneye statik yükleme esnasında verilen düşey yük ve dinamik burulma yükünün aktarıldığı düzenektir (Şekil 3.4). Bu sistemde, verilen düşey yük, hava-su kontrol ünitesinden gelen iki kanal sayesinde sağlanmaktadır. Bu kanallardan ilki düşey dengeleme basıncını ayarlayan kanaldır. Diğer kanal ise sisteme çevre basıncı verilmesi esnasında çevre basıncıyla orantılı olarak arttırılan düşey yükün sisteme verilmesini sağlayan kanaldır. Burulma momentinin sisteme aktaran ünite ise veri edinim ünitesiyle ilişkilendirilmiştir. Numuneye uygulanacak burulma momenti yükü veri edinim ünitesi aracılığıyla sağlanır.



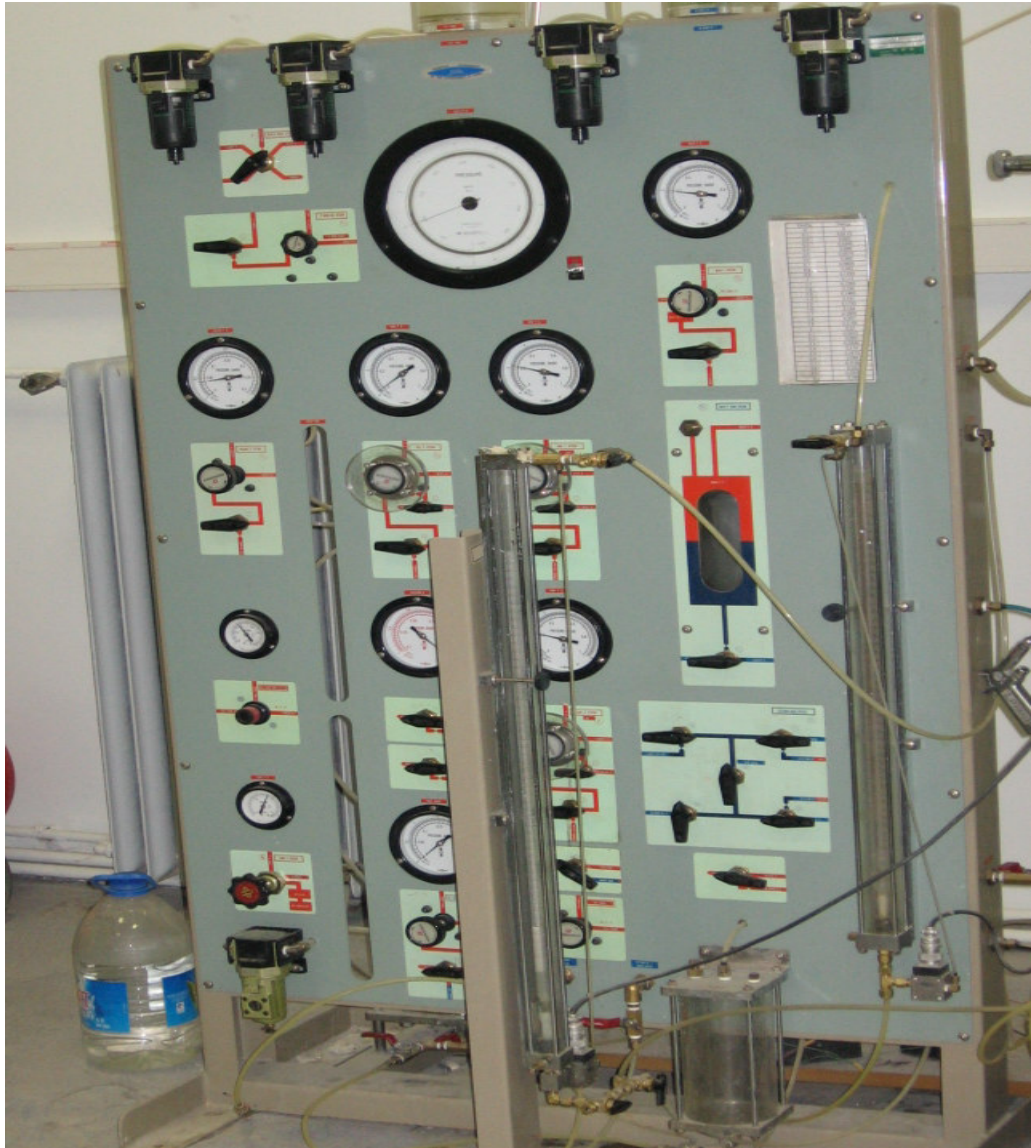
Şekil 3.4 Düşey yük sistemi ve burulma momentinin genel görünümü

3.2.3 Hava-Su Kontrol Uygulama Birimi

Sisteme uygulanan basınçlar kompresörden gelen basınçlı havanın düzenlenmesiyle elde edilir. Kompresörden gelen basınç G regülatöründe düzenlenmekte, değeri alete zarar vermeyecek kullanılabilecek maksimum değere indirgenerek sisteme borular aracılığıyla girişi sağlanır.. Bu basınç deney sisteminin panosu içindeki regülatörler

yardımıyla deney sırasında uygulanacak basınçlar ayarlanmak suretiyle çevre basıncı, düşey basınç, ters basınç ve dinamik yük uygulanır (Şekil 3.5).

Çevre basıncının uygulanması kompresörden gelen basınçlı havanın G regülatöründen geçtikten sonra sırasıyla sisteme girişi, ikinci regülatöre gelişi, burada istenen düzeye basıncın indirgenmesi ve ardında da hücre alt başlığındaki kanallardan girmesi ile tamamlanır. Kompresörden gelen basınçlı havanın diğer bir kullanım amacı da numuneye ters basınç uygulamasıdır. Burada da sistemden gelen basınçlı hava panodaki regülatörde düzenlendikten sonra önce 100 ml kapasiteli büret içindeki suya, su ile beraber hücre alt tablasındaki kanallara, oradan da numune altından iki kanalla ve üstten de bir kanalla giriş yapar.



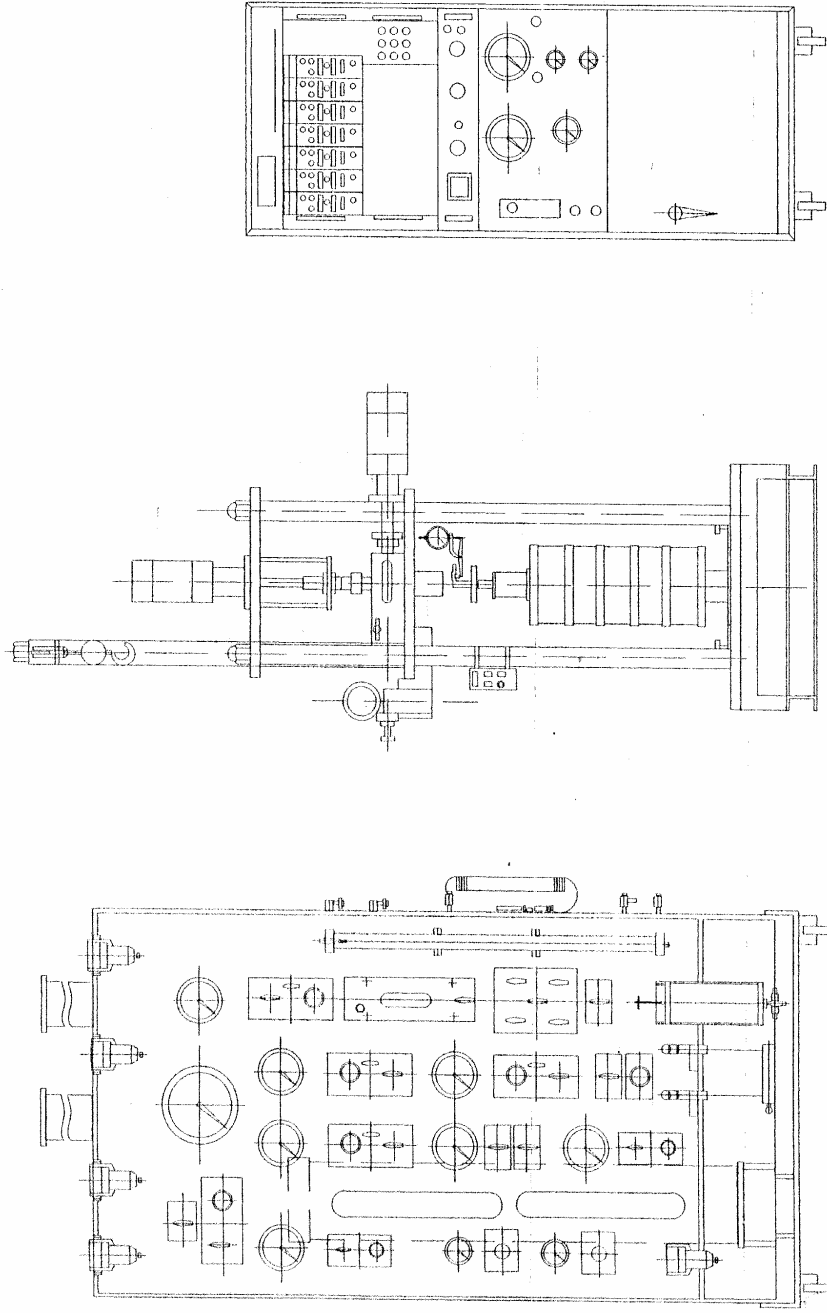
Şekil 3.5 Hava-Su kontrol ünitesi

3.2.4 Ölçüm ve Kayıt Sistemi

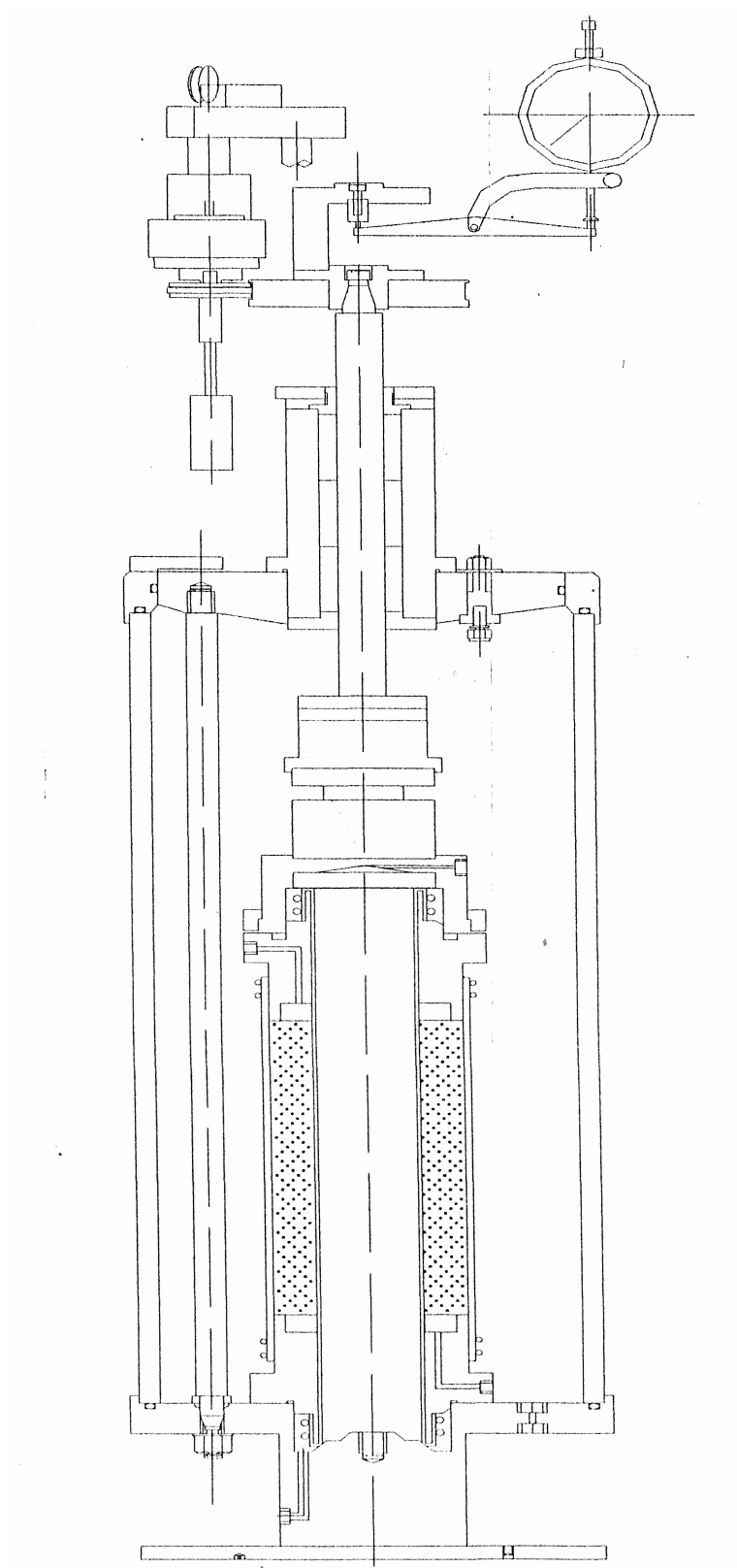
Ölçüm sistemi olarak Seiken firması tarafından üretilmiş olan dijital voltmetreli, ayarlı deformasyon amplifikatörüdür (Şekil 3.6). Sistem giriş olarak aldığı sinyali büyütme ve çıkışı volt olarak vermektedir. Sistemin giriş olarak aldığı veri deformasyon yada başka bir fiziksel özellikteki değişimin sistemde voltaj değişimine sebep olmasıdır. Temel olarak ölçüm sistemi deneyler sırasında numunelerde meydana gelen deformasyonların, oluşan basınçların ve kuvvetlerin ölçülmesidir. Kayıt sistemi de bu verilerin sonradan değerlendirilmeye alınması için fiziksel verilerin sayısal değerler olarak saklanmasıdır. Kayıt sistemi de temel olarak ölçüm sisteminden alınan verilerin bir program aracılığı ile sayısal değere çevrilmesinden ibarettir. Deney düzeneği ölçüm panosundan çıkan veriler bilgisayara giriş yapar ve burada Labtec adlı program aracılığı volt değerleri sayısal olarak metin formatında kayıt edilir



Şekil 3.6 Veri Edinim Ünitesi



Şekil 3.7 Deney sistemi genel görünümü



Şekil 3.8 Deney numunesine ait düşey kesitin görünümü

Numunenin içinde bulunduğu üç eksenli deney hücresinin yapıldığı madde akriliktir. Numunenin etrafını saran ve damıtık suya 1 Mpa ‘ a kadar varan basınçlar

uygulanmasına olanak tanır. Hücre alt ve üst düzlemlerine lastik conta ve vidalarla sıkıca sabitlenerek hava ve su sızıntısı engellenir.

Numuneye düşey eksenel yük en fazla 200 kg, burulma momenti de en fazla 200 kg-cm olacak şekilde iki ayrı yükleme pistonu aracılığıyla uygulanır. Bu yüklemeler altında zemin numunesinde oluşan gerilmeler ise bir yük hücresi yardımıyla belirlenir. Burulma momenti, numuneye yatay piston aracılığıyla bir doğrultuda statik veya iki doğrultuda tersinir sinüzoidal şekilde, dinamik olarak iletilir.

Numunenin dış yüzeyine uygulanacak basınç (p_0), hücreye verilen hava basıncının, dış kısma doldurulan damıtık su ile homojen bir şekilde numuneye aktarılması ile gerçekleştirilir. İç silindirik kısımda oluşturulmak istenen gerilme (p_i) ise suyla dolu olan iç kısma bağlı bir büret aracılığıyla elde edilir. Bu büretten iç hücre hacim değişimi (ΔV_i) ve büretin altına yerleştirilen bir basınç ölçerle de iç hücre basıncı (P_i) ölçülebilmektedir.

Numuneye alt kısmından iki, üst kısmından bir olmak üzere üç drenaj hattı bağlanmıştır. Alt başlığa bağlı olan iki hat, özellikle kum numunelerde uygulanan CO_2 geçişinde, tüm numunelerde doygunluğun sağlanmasında uygulanan su geçişinde ve numuneye ters basıncın uygulanmasında kullanılır.

Konsolidasyon ve yükleme sırasında numunede meydana gelen hacim değişimi (ΔV_s) ise drenaj hatlarının bağlı olduğu 100 ml' lik diğer bir büretle ölçülebilmektedir. Alt başlığa bağlı drenaj hatlarından birinin üzerine yerleştirilen basınçölçerle de boşluk suyu basıncı (u), deney sırasında her aşamada ölçülebilmektedir. Üst başlığa bağlı olan hat ise, su geçirme ve konsolidasyon sırasında drenaj hattı olarak kullanılmaktadır. Deney süresince, düşey yük ve burulma momenti numuneye aynı anda iletildiği için meydana gelen sürtünme etkisini en aza indirmek için hava taşıyıcı sistemler kullanılmıştır. Düşey ve açısallık yer değiştirmeler, hücre dışına yerleştirilen ölçüm saatleri aracılığıyla ölçülür. Bu saatlerin hassasiyeti % 0,02 mertebesindedir. Dinamik yüklemeler istenen deney şartlarına göre gerilme-deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Ayrıca kontrol panelindeki düzenekler yardımıyla, numuneye uygulanacak dinamik yükün dalga özellikleri ve frekansı ayarlanabilmektedir.

3.2.5 Numune Hazırlama Esnasında Kullanılan İç ve Dış Kalıplar

Bu esas ünitelerin yanında farklı tür ve boyutta numune hazırlanmasında kullanılan yardımcı aletler bulunmaktadır. Bunlar alt ve üst başlıklardır. Hazırlanacak numunelerin özelliğine göre iki farklı tip başlık kullanılabilir. Numuneler örselenmiş olarak hazırlanacaksa dış çapı 10.00 cm, iç çapı 6.00 cm olan başlıklar, numuneler örselenmemiş ise dış çapı 7.00 cm iç çapı 3.00 cm olan başlıklar kullanılır. Başlıkların içerisinde, yaklaşık 1.00 cm kalınlığında poroz taşlar bulunmaktadır (Şekil 3.10). Bu taşların üzerinde ise 6 adet 0.50 mm kalınlığında metal bıçaklar ara mesafeleri aynı olacak şekilde düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.9). Bu bıçaklar numune kesilinceye kadar, numune üst yüzeyi ile başlık arasındaki kaymayı önleyerek, burulma momentinin numuneye aktarılmasını sağlarlar. Poroz taşlara; konsolidasyon sırasında drenaj yolunu belirlemek ve drenajın hem alt hem de üst başlıklara doğru olmasını sağlamak amacıyla kullanılırlar. Ayrıca burulma momentinin numuneye daha etkin bir şekilde iletilmesi için pürüzlü olarak yapılmışlardır. Deneyde kullanılan diğer yardımcı araç ise; numunenin hazırlanması sırasında numune iç ve dış kısım yan yüzeylerinin düzgün bir yapıya sahip olmasını sağlamak amacıyla kullanılan iç ve dış kalıplardır (Şekil 3.11).

Bu kalıplarla sabitlenmiş iç ve dış lastik membranların arasında oluşan boş bölmeye doldurulan kum ve silt numunelerinin, numune hazırlama işlemi bitinceye kadar düzgünlüğün sağlanması için dış kalıba yaklaşık 50 kPa civarında vakum uygulanmaktadır.

3.3 Numune Hazırlama Yöntemi ve Numunelerin Özellikleri

3.3.1 Numune Hazırlama Yöntemi

Çalışmadaki deneylerde kullanılan numuneler Adapazarı Cumhuriyet Mahallesinden getirilen örselenmiş numunelerdir. Bunlar laboratuvarında deneye hazır hale getirilmiştir. Zemin numuneleri örselenmiş olarak araziden alındıktan sonra laboratuvarında dane dağılımı belirlenmiş ve en büyük dane çapının No:40 eleğin altında kaldığı (numunenin %99.8'nin) görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan zemin numuneleri plastisite indisi % 26 olan siltli kil numunelerdir. Dinamik burulmalı kesme deney aletinde aletin standartı olarak iç yarıçapı 3.00 cm dış yarıçapı 5.00 cm ve yüksekliği yaklaşık 20.00 cm boyutlarında hazırlanmış zemin numuneleri

üzerinde deneyler yapılmıştır. Numune içeriden ve dışarıdan boyutlarına uygun 0.3 mm kalınlığında lastik membranlarla çevrilmektedir. Membranların üst ve alt kısımları geçirimsizlik için lastik contalarla sarılmaktadır.



Şekil 3.9 Numune hazırlama aşamasında kullanılan iç kalıplar



Şekil 3.10 Numune hazırlama aşamasında kullanılan alt ve üst başlıklar

Örselenmiş zemin numunelerinin kalıplarla çevrili membranlara yerleştirilme işleminde kuru yağmurlama yöntemi kullanılır. Laboratuvar ortamında hazırlanan numuneler; 3.00cm iç yarıçapında, 5.00 cm dış yarıçapında ve 20.00 cm yüksekliğinde hazırlanır.

Bu yöntemde iç ve dış membranlarla çevrili 50 kPa basıncında vakum uygulanarak tutulan kalıpların arasına kuru yağmurlama yöntemiyle örselenmiş siltli kil numunesinin doğal ortamdaki γ_k değerine ulaşması amacıyla istenen γ_k değerine 3-4 tabaka şeklinde sıkıştırılıp yerleştirilmiştir. Numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarının kontrol edebilmek için özel olarak polistren malzemedan numune boyutlarında yapılan içi boş silindirik kalıp üzerine yapıştırılan ölçekli kağıt sayesinde hazırlanan her tabakanın sabit bir değerde kalması sağlanmıştır.

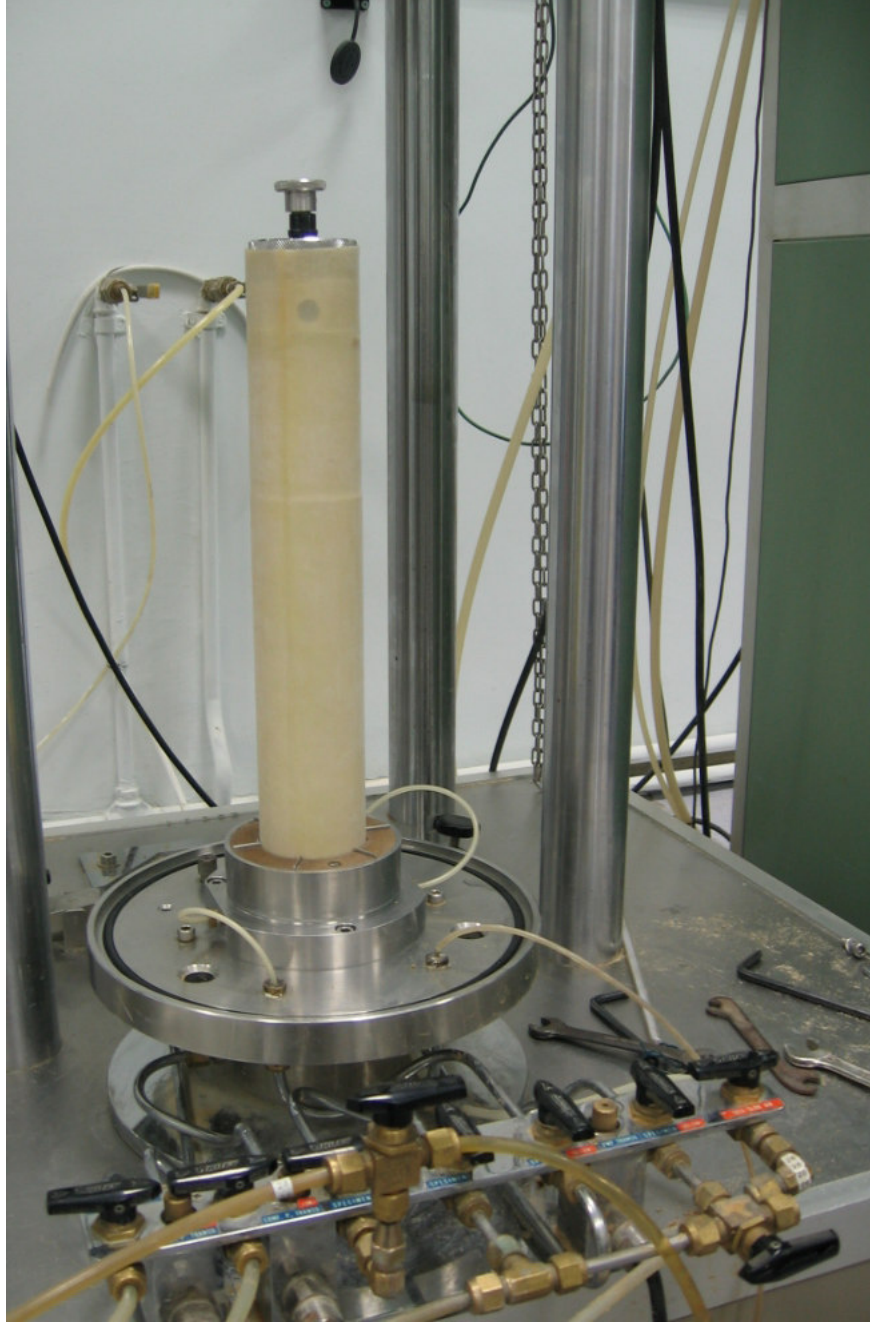


Şekil 3.11 Numune hazırlama aşamasında kullanılan dış kalıplar

Laboratuvar ortamına numune hazırlama sırasında farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Bu yöntemler; kuru yağmurlama, kuru depolama, ıslak sıkıştırma, suda çökeltme, şişleme, düşük frekanslı titreşim ve vibrasyonlu titreşimdir. Bu yöntemlerin seçiminde, numunenin tür ve özellikleri, deney aletinin sınır koşulları ve deneyin yapılış amacı önemlidir. Bu çalışmada kuru yağmurlama yöntemi kullanılmış, numunelerin yerleşim sıklıkları, dış kalıba karşılıklı dört yönden eşit şiddet ve sayıda vuruş yapılarak oluşturulan düşük frekanslı titreşim ile sağlanmıştır (Şekil 3.11).

Uygulanan numune hazırlama yöntemi, Japonya Geoteknik Enstitüsü (JGS) tarafından yayınlanan standartlara (JGS 0543 2000) uygun olarak yürütülmüştür. Deney sırasında izlenen yol aşağıda anlatılmıştır.

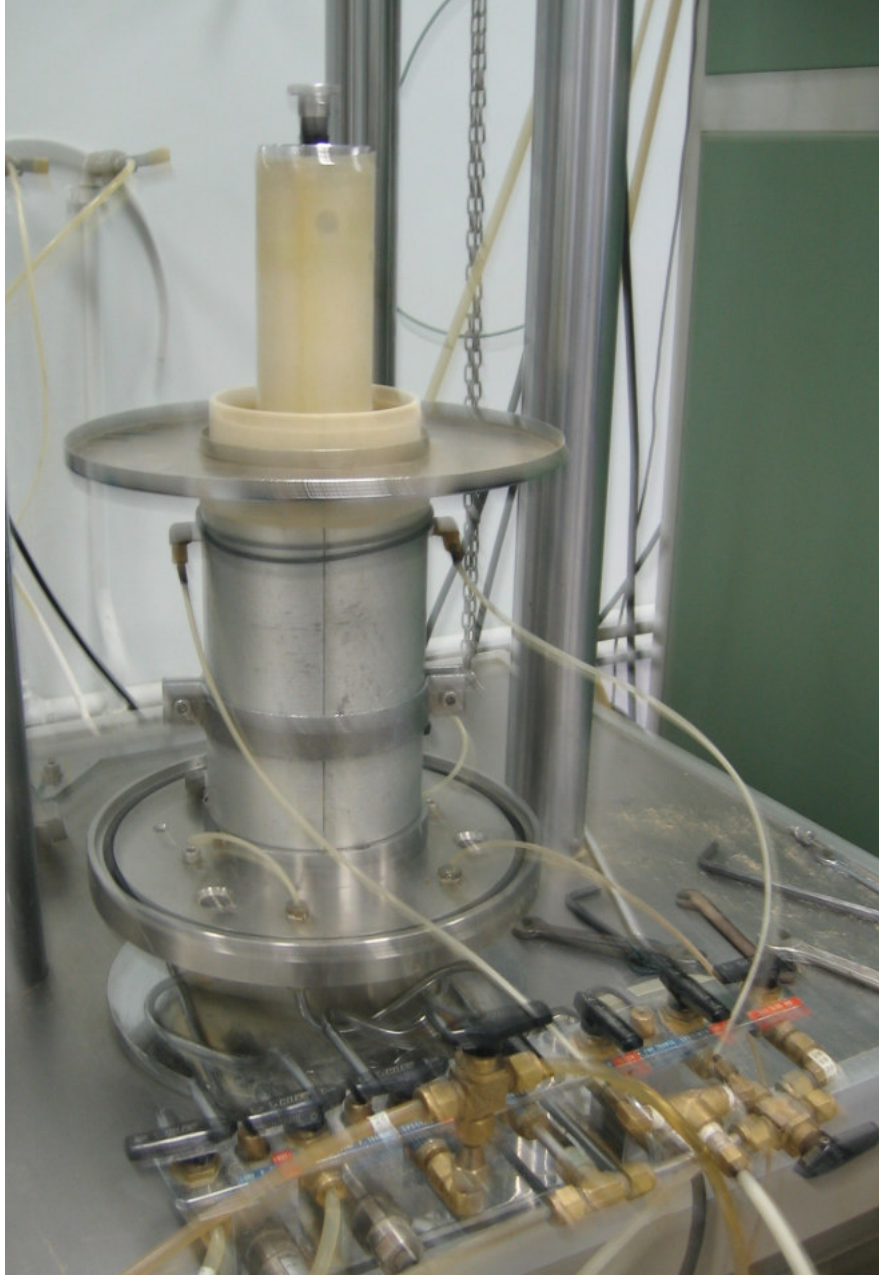
1. Öncelikle deney aletinin ve deney sırasında kullanılacak malzemelerin temizliği çok önemlidir. Daha önceki deneylerden dolayı deney aleti parçalarının üzerinde kalan zemin parçacıkları parçaların düzgün bir şekilde monte olmasını engeller. Sistemdeki su tankı ve damıtılmış su tankı gerekli miktarda su ile doldurulur. Bir önceki deneyde kullanılan sular kullanılacaksa tankların içinin temizliğide kontrol edilmelidir. Su alma işlemi ilgili vanaların vakum konumuna getirilmesi suretiyle, daha önceden damıtılmış olan suyun hava su kontrol ünitesine alınması işlemi tamamlanmış olur. Su tankına deneyden en az bir gün önce su alınıp vakum altında tutulması ve içeriye alınan sudaki kabarcıkların tanka verilecek ufak titreşimler sayesinde yüzeye çıkarılması , sudaki havanın alınması açısından kullanılacak iki yöntemdir.
2. İç membran alt başlığa geçirilip çevresine 2 adet lastik conta geçirilir. Alt başlığın altındaki dairesel bir boşluğa da lastik conta takılması sızdırmazlık açısından çok önemlidir. İç membranı alt başlığa yerleştirdikten sonra alt drenaj boruları alt başlığın sağına ve soluna vidaları yardımıyla monte edilir. Bu işlemi yaparken sızdırmazlık açısından vida çevresine teflon sarılır veya vidaya sızdırmazlık sıvısı sürülür. Hazırlanan deney düzeneğinde bir hava kaçağı olmaması için alt başlığa bu borular monte edilmeden önce ters basınçla kontrol edilerek boruların üstlerinde bir delik olup olmadığını kontrol edilir. Bu evrede üst drenaj borusu da kontrol edilmelidir. Alt başlık uygun vidalar yardımıyla hava sürükleyici sisteme monte edilir. İç membrana dört parçadan oluşan iç kalıplar yerleştirilir silindirik metal çubukla sisteme sabitlenir. Bu çalışmadaki deneylerde dört parçadan oluşan kalıbın arasına büzülmeyi engelleyecek şekilde silindirik mukavva konulmuştur. İç kalıp üst başlığı da konularak iç kısım son halini alır. (Şekil 3.12)



Şekil 3.12 Membran ve iç kalıpların son hali.

3. Dış membran, 2 lastik conta yardımıyla alt başlığa takılır. Dış kalıplar kelepçe yardımıyla ile kenetlenmek suretiyle dış membranın etrafına yerleştirilir. Kelepçe, anahtarla iyice sıkıştırıldıktan sonra dış membran üst tarafından dış kalıba bağlanır. Daha sonra vakum girişinin olduğu anahtarlı boruya harici vakum borusu takılarak vakum klepesinin açılmasıyla dış membrana 50 kPa basınçta vakum uygulanır. Vakumun dış kalıplara uygulanmasında temel etken numune hazırlama sırasında membranların

deforme olmasını engellemek ve numunenin üniform bir şekilde hazırlanmasını sağlamaktır. Vakum verildikten sonra dış membran iç taraftan dış kalıba doğru sarılır ve 2 adet lastik conta dış kalıbın dışına sarılır. (Şekil 3.13)

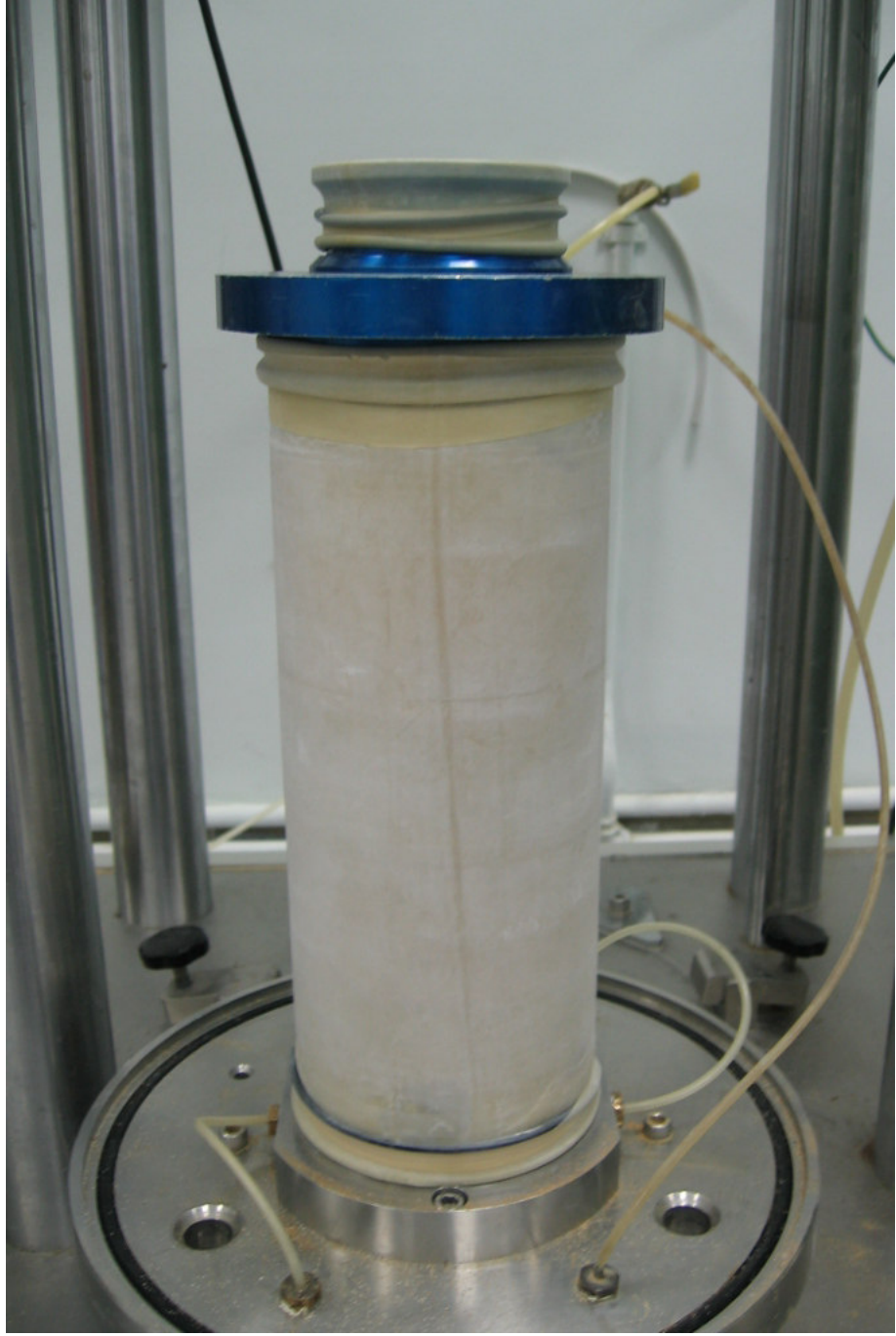


Şekil 3.13 Kuru yağmurlama öncesi membran, iç ve dış kalıplar

4. Oluşturulan içi boş silindirik yapıya numune kuru yağmurlama yöntemiyle daha önceden belirlenmiş kuru birim hacim ağırlık değeri sabit kalmak suretiyle belirli bir yükseklikten ve çapı sabit ince bir borudan dökülerek doldurulur. Homojen bir dağılımının sağlanması amacıyla doldurma işlemi

hem saat yönünde hem de saatin tersi yönünde yapılır. Numune kaybı oluşmaması için dış kalıba silindirik metal tabak yerleştirilir. Bu çalışmada numunenin yerleştirilmesi belirlenen kuru birim hacim ağırlığı değerine göre numunenin tabaka tabaka sıkıştırılması suretiyle yapılmıştır. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra numune üst yüzeyi pürüzsüz yatay bir metal veya benzeri cisimle düzeltilir. Üst başlık, numunenin üzerine yerleştirilerek üst drenaj borusu üst başlığa takılır. (Şekil 3.14)

5. Membranların iç kısmına numune yerleştirildikten sonra numune kendi başına ayakta kalmasını sağlamak için iki yöntem vardır. İlk yöntemde vakum borusu, alt drenaj hattına monte edilen ve numunenin dik durmasını sağlayacak vakum borusu ile yer değiştirilir. Diğer yöntem ise numunenin kendi başına ayakta durması için üst başlıktan vakum uygulanmasıdır. Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılmıştır. Dış kalıplara takılann 50 kPa değerinde vakum sağlayan harici vakum borusu çıkartılarak, yerine diğer vakum borusunun takılması suretiyle hazırlanan numuneye verilir.
6. Dış kalıplar çıkartıldıktan sonra numune boyu ve dış çapı yükseklik boyunca 3 farklı yerden ölçülür ve kaydedilir. Harici tripot dikkatli bir şekilde hava sürükleyici sisteme tripodun ayaklarının deliklere tam oturması sağlanacak biçimde ve drenaj borularının hasar görmesini engelleyecek biçimde yerleştirilir. Harici tripotta bulunan düşey yükleme başlığı üst başlıktaki vida yerlerine gelecek şekilde numunede ekstra burulma momenti ve ilave düşey yük oluşturmeyecek şekilde vidayla sıkıştırılır. Yerleştirilen tripodun üç ayağı hava sürükleyici sisteme pul ve vidalarla dengeli bir biçimde sabitlenir. (Şekil 3.15)



Şekil 3.14 Tabakalı numunenin son hali



Şekil 3.15 Üç eksenli tripodun numunenin üst başlığına takılması durumu

7. Üç eksenli akrilik hücre yerleştirilmek suretiyle üst başlık kalın vidalarla akrilik hücreye monte edilir. Hava sürükleyici sistem yavaşça kaydırılarak düşey yük ve burulma momentinin uygulanacağı üniteye düzgün bir şekilde yerleştirilerek hava sürükleyici sistemin alt kısmı tablaya metal vidalarla sıkıştırılır.
8. Düşey ve açısız deformasyon ölçüm saatleri yerlerine yerleştirilir ve yükleme şaftına tam olarak değecek şekilde sıfırlanır. Elektrikli amplifikatördeki 7

kanal sırasıyla sıfırlanır. Kalibrasyon sırasında okunan volt değerleri istenen katsayıyla çarpılmak suretiyle ayarlanır. Bu çalışmada katsayılar 5.00 volt değerinde sabitlenmiştir.

9. Kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra, düşey basınç bir miktar artırılarak düşey yük yükleme barı, yükleme başlığına yaklaştırılıp vidalar yardımıyla yerine yerleştirilir. Bu işlem sırasında da numuneye ilave düşey yük ve burulma momenti uygulanmamasına dikkat edilir. Düşey yük sıfırlanmak suretiyle numunenin iç ve dış kısmına su alma işlemine başlanır. İç kısma ve dış kısma su alma işlemlerinin senkronize bir şekilde yapılması en ideal yöntemdir. Numunenin dış kısmına alınacak su, hava su kontrol ünitesinde yer alan üç eksenli basınç ayarlama vanasında basıncın yaklaşık 50 kPa değerine getirilmesi ile yapılır. Numunenin iç boşluğuna su alma işlemide hava sürükleyici sistemin üzerinde bulunan hücre içi anahtarının açılmasıyla yukardaki havası alınmış su tankından gelen suyun cazibeyle içeriye dolmasıyla olur. Numunenin dış kısmına ve iç kısmına su alma işlemi kalibrasyon işlemi yapılmış olan veri edinim ünitesinden de takip edilebilir. Numunenin iç kısmına su alma işleminin tamamlandığı üst başlıkta bulunan vanaya takılan borudan su çıkışının görülmesi ile anlaşılırken, numunenin dış kısmına su alma işlemi su seviyesinin üst başlığa kadar gelmesiyle sona erdirilir. İç ve dış kısma su alma işlemi tamamlandıktan sonra, düşey yük sıfırlanır. Basınç dengeleme borusu hücre üst başlığına monte edilir. Bu aşamadan sonra hücrenin iç ve dış kısmına verilecek olan 50 kPa'lık çevre basıncı hava su kontrol ünitesinde bulunan iç ve dış çevre basınçlarının ayarlandığı vanalar kullanılarak yapılır. Bu evreden sonra numune vakumla değil basınçla ayakta tutulması gerekir. Bu yüzden numunenin iç ve dış kısmına 50 kPa değerindeki çevre basıncı verilirken, ortamda bulunan 50 kPa değerindeki vakum iç ve dış çevre basınç artışları ile aynı oranda azaltılarak sıfırlanır.

10. Vakumun sıfırlamasından sonra alt drenaj borusuna takılı olan vakum borusu çıkartılarak numuneye su alma işleminin gerçekleşmesini sağlayacak drenaj borusu takılır. Alt başlığa bağlanan drenaj borusundan gelen su bütün numuneyi dolaşarak üst başlıktan geçip dışarıya çıkar. Numunenin içinden su geçişinin olup olmadığı tanktaki su seviyesindeki azalmayla kontrol edilir. Su

geçirme evresinden önce karbon gazı geçişi de numunedeki havayı sürüklemek için kullanılabilecek bir yöntemdir. Su geçirme işlemi de numune doygunluğunun sağlanması içindir. Bu işleme suyun zeminin numunesinden tamamen geçtiğinden emin oluncaya kadar devam edilir. Bu süre siltli killere için 3 günü bulmaktadır. Burada su geçişi hızının numuneye zarar vermeyecek hızda seçilmesi önemlidir.

11. Bu evre sonunda sıra numuneye ters basınç vermeye gelir. Ters basınç vanasının kullanılması suretiyle kademeli olarak 300 kPa değerine kadar numuneye ters basınç uygulanır. Ters basıncın 300 kPa değerine ulaştırılmasıyla birlikte iç ve dış çevre basınçları da otomatik olarak 350 kPa değerine gelir. Bununla birlikte numune türüne göre değişebilen değerlerde ters basınç uygulanabilir. Deney süresince sistem basınçları sabit tutulmaya çalışılmıştır. Doygunluk kontrolü içinse; drenaj vanaları kapatılarak ters basınç değeri 100 kPa artırılmak suretiyle iç ve dış basınçların 450 Kpa değerine getirilmesi sağlanır. Elektronik göstergeden boşluk suyu basıncı değerindeki artış miktarı gözlenir.
12. Bu evreden sonra doygunluğu belirlemede kullanılan B kontrolü yapılır. Skempton B parametresinin artış miktarı 0.96 ve üzeri olduğu anda zemin numunesi doygunluğa ulaşmış kabul edilir. Düzgün bir B kontrolü için 30 dk beklemek gereklidir. Doygunluğun sağlanması işleminden sonra izotropik veya anizotropik olarak uygulanan konsolidasyon aşamasına geçilir. İzotropik konsolidasyon için iç ve dış basınçların istenen efektif konsolidasyon basıncı değerine (100 kPa) getirilmesine çalışılır. Uygulanan efektif düşey gerilme seviyesine bağlı olarak düşey yükünde aynı seviyede artması için Tablo 3.1’de belirtilen oranlara dikkat edilir. Anizotropik konsolidasyon içinse düşey yük ve çevre basınçları istenen anizotropik ve efektif gerilme değeri dikkate alınarak arttırılır. Bu çalışmada tüm deneyler izotropik koşullar altında yapılmıştır. Konsolidasyon işlemi hacim değişiminin ölçüldüğü büretlerden ve düşey deformasyon saatlerinden takip edilerek istenen bir süre boyunca devam ettirilir. Bu çalışmada konsolidasyon süresi 1 gün olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1 Burulmalı Kesme Deneylerinde İzotropik Gerilme Durumunda Çevre Basıncı ve Düşey Denge Basınç Değişim Oranları

Çevre Basıncı (kPa)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Düşey Dengeleme Basıncı (kPa)	1.15	2.3	3.45	4.6	5.75	6.9	8.05	9.2	10.35	11.5

Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından numunelerin dinamik deneylere farklı gerilme oranlarında burulma momenti uygulanmıştır. Bunun için veri edinim ünitesindeki amplifikatörün ve 7 ayrı kanalın bulunduğu panelden dinamik yük vanası açılır ve göstergeler kontrol edilir. Daha sonra istenen frekans ve gerilme genliği seçilir. Dinamik burulma momentinin uygulanacağı yatay yük hücresi düşey yük hücresine yaklaştırılır ve yuvarlak vidayla bağlanır. Kişisel bilgisayarda gerekli komutlar girildikten sonra “Labtec” programı çalıştırılır ve deneye başlanır. Deney serilerinden ileride ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

3.3.2 Deney Sisteminin Kalibrasyonu

Deneysel çalışmalar yapıldığında ölçülen verilerin doğruluk derecesinin belirlenmesi için sistemlerin düzgün çalışmasının yanında alınan verilerin kontrol edilerek çalışmalarda kullanılması, çalışmanın sağlıklı şekilde yürümesi ve geçerlilik kazanması için gerekli bir işlemdir. Bu kontroller çeşitli veri alma tekniklerinin birbiri ile karşılaştırılmasıyla ve ölçüm cihazlarının çeşitli yollardan kontrolü ile sağlanabilir.

Dinamik üç eksenli deney aletinde kalibrasyonlar dijital panodaki deformasyon verilerinin karşılaştırılması ve panodaki değerlerin kontrolleri ile sağlanmaktadır. Ölçüm panosunda dijital değerler ve ayar düğmeleri Şekil 3.16 da görülmektedir.



Şekil 3.16 Dijital ölçüm panosu

Panonun kalibrasyonu başlangıç olarak sistem çalıştırıldığında kazanç düğmesi, ATT5 düğmesi ve CAL.µε düğmelerinin ışıklarının yandığının kontrolü ile başlar. ATT düğmesi ölçümlerin hassaslığını kontrol eden bu düğmelerden 5'e basıldığında sistem 5 kez hassalaşır. Hassaslık düzeyi ATT 2 ve 1 içinde aynı şekilde ayarlanabilir. CAL.µε anahtarı ise giriş kalibrasyon anahtarı olarak adlandırılır ve CALL.ON anahtarına basıldığında kalibrasyon başlar. AUTO anahtarına basılarak voltmetredeki "0.00" okuması sağlanır ve CALL. ON düğmesine basılır GAIN kontrol düğmesi kullanılarak dijital voltmetre değeri "5.00" değerine ayarlanır. Ölçüm değişim anahtarı olan ZERO-C-BAL anahtarı ZERO pozisyonundayken köprü denge direnci ZERO CONTROLLER ayarı kullanılarak voltmetre göstergesi "0.00" değerine getirilir. ZERO-C-BAL anahtarı C-BAL pozisyonundayken sabit tutulur ve voltmetre göstergesi C-BAL kontrolü kullanılarak "0.00" değerine ayarlanmalıdır. Sistemde ZERO-C-BAL anahtarı her iki durumda da "0.00" değerini gösterene kadar yukarıda anlatılan adımlar tekrar edilmelidir.

Dijital değerlerin kalibrasyonu yapıldıktan sonra ölçüm panosundaki dijital deformasyon okumalarının kalibrasyonu sistemin üzerine yerleştirilen mekanik deformasyon saatlerinden aynı anda alınan okumaların arasındaki bağıntının belirlenmesiyle yapılmaktadır.

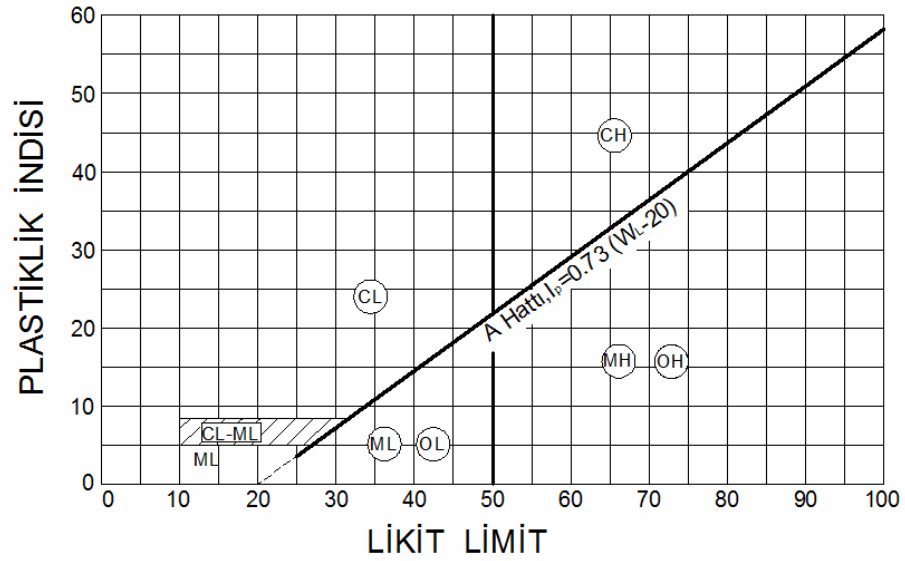
Mekanik saat okumaları sık okuma aralıkları belirlenir ve bu deformasyon miktarlarında düşey deformasyon ve açısal deformasyon okumaları dijital sayaçlardan kayıt edilir

3.3.3 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Endeks Özellikleri

Bu çalışmada laboratuvar ortamında hazırlanan örselenmiş zemin numuneleriyle deneyler yapılmıştır. Örselenmiş numuneler Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi civarında bulunan bir arazide açılan 3 muayene kuyularından alınmıştır. Adapazarı’ndan getirilen numunelere ait elek analizi, hidrometre analizi ve kıvam limit deney sonuçları tablo(Tablo 3.2, Tablo3.3a, Tablo 3.3b, Tablo 3.4) ve grafik (Şekil 3.17 ve Şekil 3.18) halinde gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Deneylerde Kullanılan Örselenmiş Numunenin Endeks Deney Sonuçları

Grup	Wn (%)	WL (%)	Wp(%)	Ip (%)	İnce Dane (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)
CL	22	45	19	26	86	14	70	16



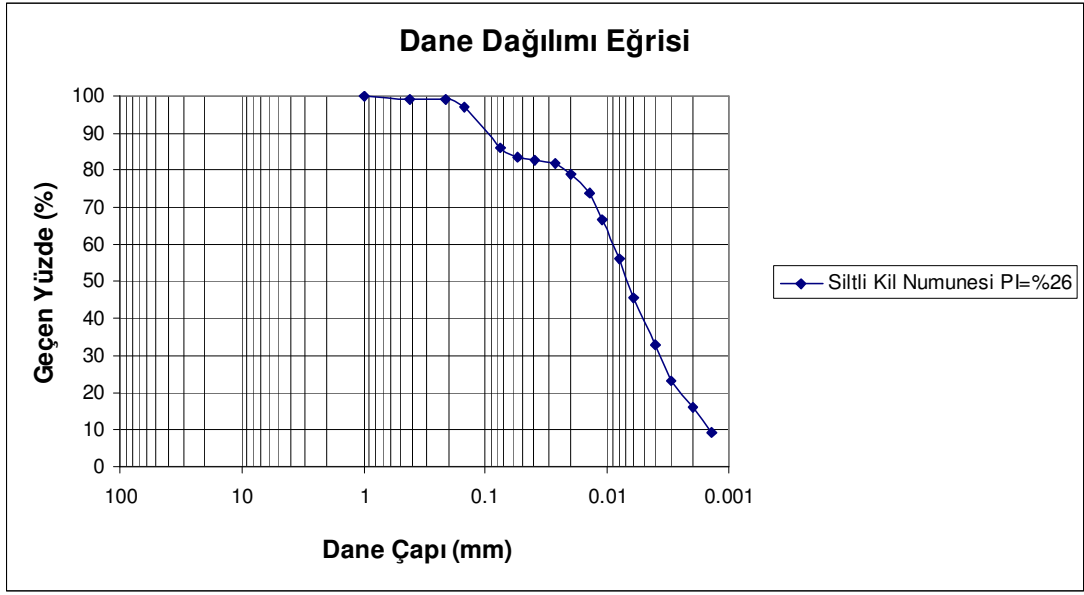
Şekil 3.17 Plastisite kartı (Likit limit-Plastisite indisi)

Tablo 3.3.a Deneyde kullanılan plastisite indisi % 26 olan siltli kil numuneye ait elek analizi sonuçları:

ELEK ANALİZİ	CL				
Kuru Numune (gr):	300				
Yıkama sonrası (gr):	43,6				
İnce Dane Ağ.:	256,4				
İnde Dane Oranı (%):	86				
	Elek No	Elek Çapı	Elek Üstü	Geçen	Geçen
	-	(mm)	(gr)	(gr)	(%)
	18#	1,000	0,1	299,6	100
	40#	0,420	0,4	299,2	99
	70#	0,210	3,2	296	99
	100#	0,149	4	292	97
	200#	0,075	35.6	256,4	86

Tablo 3.3.b Deneyde kullanılan plastisite indisi %26 olan siltli kil numuneye ait hidrometre analizi sonuçları

HİDROMETRE		CL				
			200# altı (%)	86		
				2,5		
t					D	Ana N.
(dak)	Rh1	Rh	Rh'	He	(mm)	(%)
0,25	50	51	48,5	8,0125	0,076	86
0,5	48,5	49,5	47,15	8,2563	0,054	83,5
1	48	49	46,65	8,34	0,039	82,6
2	47,5	48,50	46,15	8,42	0,027	81,7
4	46	47	44,65	8,66	0,020	79
8	43	44	41,65	9,15	0,014	73,7
15	39	40	37,65	9,8	0,011	66,67
30	33	34	31,65	10,775	0,008	56,04
60	27	28	25,65	11,75	0,006	45,4
120	20	21	18,65	12,888	0,004	33,02
240	14,5	15,5	13,15	13,781	0,003	23,28
480	10,5	11,5	9,15	14,43	0,002	16,21
1440	6,5	7,5	5,15	15,08	0,0014	9,11



Şekil 3.18 Siltli Kil numuneye ait dane dağılımı eğrisi

Tablo 3.4 Deneyde kullanılan plastisite indisi %26 olan siltli kil numunesi kullanılarak yapılan dinamik burulmalı kesme deneyleri ve dinamik üç eksenli deney özellikleri (*Dinamik üç eksenli deney aletiyle yapılan deneyler için $\sigma_d/2\sigma_c$ değerleri kullanılmıştır.)

Deney No	σ_3 kPa	σ kPa	σ_c kPa	B %	Başlangıç γ_k (t/m ³)	Konsolidasyon Sonrası γ_{kc} (t/m ³)	ω (%)	τ_d/σ_c'	Çevrim Sayısı,N ($\gamma=\pm 2.5\%$)
D1	400	300	100	96	1,35	1,37	15	0,27	1
D2	400	300	100	96	1,28	1,31	28	0,20	11
D3	400	300	100	95	1,28	1,31	28	0,225	6
D4	400	300	100	94	1,26	1,29	31	0,18	9,5
D5	400	300	100	98	1,35	1,36	17	0,24	9
D6	400	300	100	96	1,30	1,33	28	0,182	15,5
D7	400	300	100	92	1,24	1,27	34	0,17	83
D8	400	300	100	96	1,32	1,35	22	0,17	45
D9	400	300	100	99	1,30	1,33	22	0,149	51
D10	400	300	100	99	1,28	1,31	25	0,17	-
UDN1	400	300	100	97	1,4	1,43	32	0,21*	-
UDN2	400	300	100	98	1,4	1,43	33	0,25*	27
UDN3	400	300	100	97	1,4	1,43	32	0,3*	11

3.4 Zemin Numunesinde Oluşan Gerilme ve Şekil Değiştirmenin Hesabı

Burulmalı kesme deney aletinde kullanılan numunelerde, deney sisteminin ve içi boş, silindirik numune özelliğinden dolayı uygulanan yüklemeler altında zemin numunesinde oluşan toplam ve efektif gerilmeler belli kabuller altında hesaplanmaktadır. Bunun için öncelikle, tüm numuneyi tam bir dairesel silindir ve deformasyona uğrayan tek bir eleman olarak düşünülmesi gerekir. Bununla birlikte gerilme ve şekil değiştirmeler farklı yükleme koşulları altında numune yüksekliği boyunca değişebileceğinden ortalama olarak hesaplanması gerekir.

Polar koordinatlarla hesaplanan σ_r , σ_θ , σ_z ve $\sigma_{z\theta}$ 'nın belirlenmesi için yapılması gerekli kabuller şu şekilde sıralanabilir:

1. Düşey eksenel gerilme σ_z üniform
2. Çevre gerilmesi σ_θ ve radyal gerilme σ_r , lineer elastik,
3. Ortalama kayma gerilmesi $\sigma_{z\theta}$ ise elastik ve ideal plastik bir dağılım gösterir.

Ortalama düşey eksenel gerilme,

$$\sigma_z = \frac{P}{A_s} + z\gamma' + \Delta\sigma_z \quad (3.1)$$

şeklinde hesaplanır. P, numuneye gelen toplam eksenel yüke, A_s , numunenin ortalama kesit alanına, z numunenin üst yüzeyinden itibaren yüksekliği boyunca olan düşey mesafeye, γ' , numunenin efektif birim hacim ağırlığına, $\Delta\sigma_z$ ise membran düzeltme gerilmesine karşılık gelmektedir. Bu çalışmada membran penetrasyon etkisi göz ardı edilmiştir.

Düşey eksenel yükün belirlenmesinde kullanılan yük hücresi, üç eksenli hücre içerisinde olduğu için, hesaplamada yükleme şaftının alanı dikkate alınmaz. Ortalama efektif radyal ve çevre gerilmeleri ise sırasıyla;

$$\sigma_r = \frac{p_0 r_0 + p_i r_i}{r_0 + r_i} + \Delta \sigma_r \quad (3.2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_0 r_0 - p_i r_i}{r_0 - r_i} + \Delta \sigma_\theta \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanır. Bu bağıntılar Hight ve diğ., (1983) tarafından üretilmiştir. $\Delta \sigma_r$ ve $\Delta \sigma_\theta$ elastik ince kabuklar teorisine dayanan membran düzeltme gerilmeleridir. Lineer elastik ve ideal plastik dağılıma uyan ve numune yüksekliği boyunca sabit olduğu kabul edilen ortalama kayma gerilmesi;

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_0^2 + r_i^2)} \right\} + \Delta \sigma_{z\theta} \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanır. Yukarıdaki ifadelerde r_i ve r_0 numunenin son iç ve dış yarıçaplarının T ise burulma momentini göstermektedir. (3.5) bağıntısındaki ilk kısım ideal plastik dağılımı, ikinci kısım ise lineer elastik ve izotropik bir malzemeyi temsil etmektedir. Küçük kayma gerilmesi ve deformasyon seviyelerinde lineer elastik dağılım en kabul edilebilir. Sonucu verdiğiinden ifadenin ilk kısımda kullanılması uygun olmaktadır. Bunun yanında göçme seviyesi civarında ideal plastik dağılım söz konusu olduğundan, ifadenin ikinci kısmının kullanılması uygun hale gelmektedir.

Ortalama şekil değiştirme bileşenleri, numunenin deney başındaki düzgün silindirik yapısının korunduğu kabulüyle, düşey eksenel yer değiştirme, ΔH , numunenin açısal sapması $\Delta \theta$, iç hücre hacim değişimi ΔV_s ' den hesaplanan iç ve dış yarıçap değişimleri Δr_0 , Δr_i ve numunenin ilk yarıçapları r_0 ve r_i cinsinden hesaplanır. Ortalama şekil değiştirmeler aşağıdaki kabullere uygun biçimde hesaplanmaktadır.

1. ΔH üniform eksenel yer değiştirmedir.
2. Numunenin yüksekliği boyunca lineer olarak değişen radyal yer değiştirme, u_r
3. $\Delta \theta$, üniform açısal sapmaya karşılık gelir.

Bu kabuller altında ortalama şekil değıştirme bileşenleri; aksel şekil değıştirme, ϵ_z , radyal şekil değıştirme artımı ϵ_r , çevresel şekil değıştirme artımı, ϵ_θ ve kayma şekil değıştirme artımı, $\epsilon_{z\theta}$ sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\epsilon_z = -\Delta H/H_0 \quad (3.4)$$

$$\epsilon_r = -\frac{\left[\frac{r_0}{r_i} \int \frac{\partial U_r}{\partial r} r dr \right]}{\left[\frac{r_0}{r_i} \int r dr \right]} = -\frac{\Delta r_0 - \Delta r_i}{r_0 - r_i} \quad (3.5)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{\left[\frac{r_0}{r_i} \int \frac{U_r}{r} r dr \right]}{\left[\frac{r_0}{r_i} \int r dr \right]} = -\frac{\Delta r_0 + \Delta r_i}{r_0 + r_i} \quad (3.6)$$

$$\epsilon_{z\theta} = \frac{1}{\pi(r_0^2 - r_i^2)} \int_{r_i}^{r_0} \int_0^{2\pi} \epsilon_{z\theta}(r) r dr \quad (3.7a)$$

$$\epsilon_{z\theta} = \frac{\Delta \theta (r_0^3 - r_i^3)}{3h(r_0^2 - r_i^2)} \quad (3.7b)$$

Buradan (3.7b) ifadesi kullanılarak ortalama birim kayma şekil değıştirme artımı, $\gamma_{z\theta}$,

$$\gamma_{z\theta} = 2\varepsilon_{z\theta} = \frac{2\Delta\theta(r_0^3 - r_i^3)}{3h(r_0^2 - r_i^2)} \quad (3.8)$$

Sonuç olarak burulmalı kesme deneyleri boyunca içi boş silindirik numunede oluşan dokuz bileşen belirlenebilmektedir. Bunlardan dört tanesi gerilme bileşeni, dört tanesi şekil değiştirme ve sonuncusu da boşluk suyu basıncı, u dur.

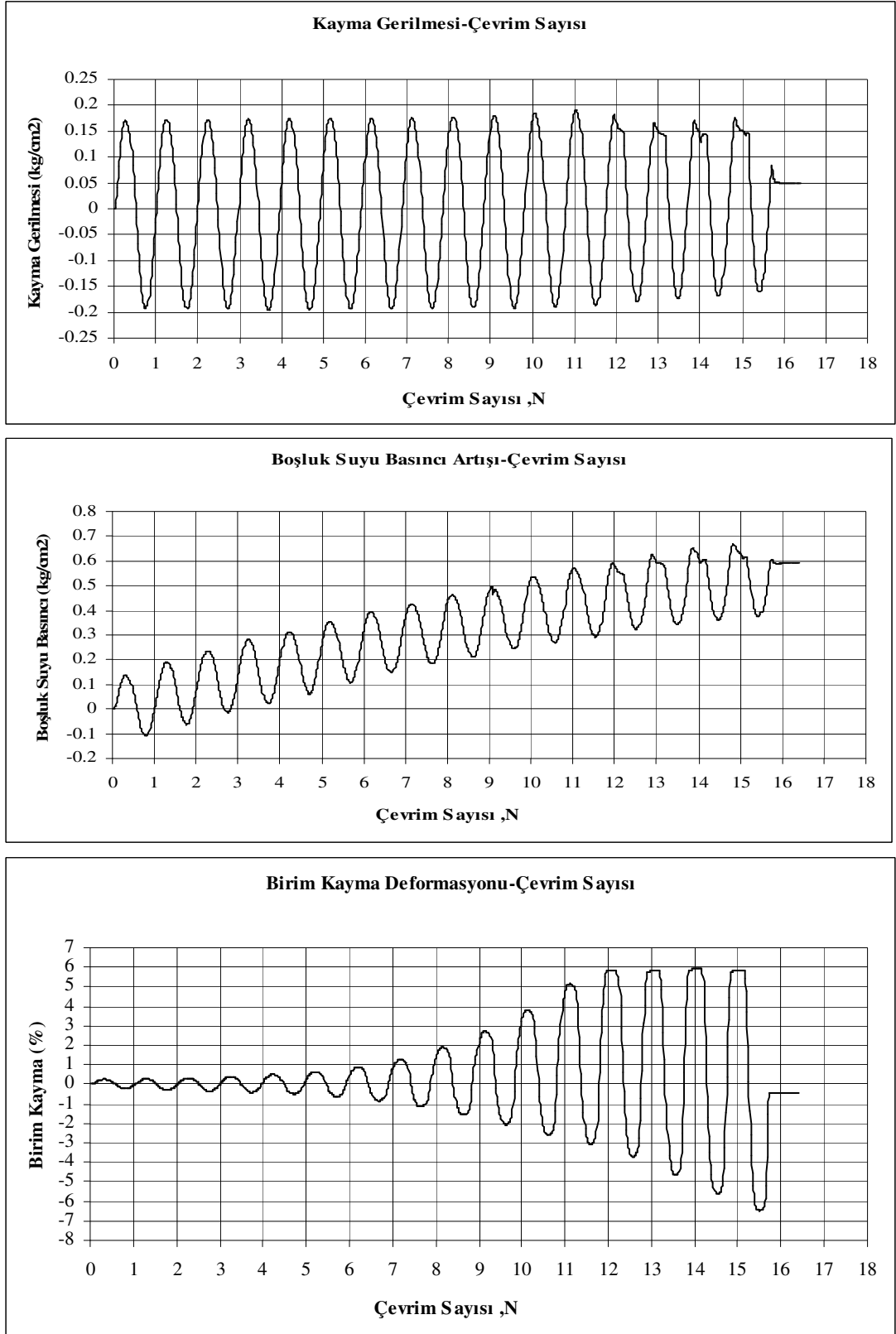
3.5 Deney Kaydının Yorumlanması

Deney verileri bilgisayara metin dosyası olarak kayıt edilmektedirler. Metin dosyası Microsoft Office Excel programı yardımıyla açılır ve sonuç olarak veriler Tablo 3.5 da olduğu gibi görüntülenir. Tabloda “CH0” olarak adlandırılan veriler uygulanan kuvvetin voltaj olarak karşılıklarıdır. Voltaj değerleri bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi belli katsayılarla çarpılarak “kg” birimine çevrilir. “CH1” verileri ise oluşan düşey şekil değiştirmeleri 10^{-3} mertebesinde büyük değerdeki ölçümleri almak için kullanılır ve voltaj cinsinden kayıt eder. Bu değerlerde yapılan kalibrasyonlar sonucunda oluşan katsayıyla çarpılarak “mm” cinsine çevrilir. Kalibrasyon işlemi sistemde kalibrasyon için kullanılan sert plastik malzemeden imal edilmiş olan silindirin yüklenmesi sırasında alınan mekanik saatle elektronik verinin karşılaştırılması ve aralarındaki bağıntının bulunmasıyla yapılmaktadır. Aynı işlem “CH4” kanalından alınan verilerin kalibrasyon katsayılarının belirlenmesinde de kullanılmaktadır. “CH4” kanalıda bilindiği gibi düşey deformasyonların 10^{-3} - 10^{-5} mertebelerini okumak için kullanılmaktadır.

Tablo 3.5 Deney kaydının ilk hali

LABTECH NOTEBOOK			
Data file			
Time is 13:28:32.44.			
Date is 02-14-2008.			
Torque	pore pre	Angular	Vertical
Volt	volt	Volt	Volt
2,324	7,243	0,212	0,169
1,112	4,624	0,256	0,042
0,959	2,008	0,315	0,042
0,59	1,689	0,316	0,042
0,52	1,301	0,309	0,037
0,441	0,944	0,288	0,036
0,286	0,655	0,206	0,039
0,212	0,444	0,188	0,042
0,109	0,389	0,181	0,036

Tabloda da görüldüğü üzere bilgisayara bağlı veri edinim kanallarından 4 tanesi açık tutularak kayıt alınmıştır. Bu kanallardan ilki numunede oluşacak burulma momentini ölçen “Torque Load” adı verilen CH1 kanalıdır. İkinci Kanal ise numunede oluşacak boşluk suyu basıncı değişimini gösteren “Pore Pressure” adı verilen CH2 kanalıdır. Üçüncü kanal olan CH3 kanalı ise numunede meydana gelecek açısal deformasyonları ölçmeye yarar ve “Angular Displacement” olarak adlandırılır. Son kanal ise numunede oluşan düşey yükü ölçmeye yarayan “Vertical Load” olarak adlandırılan CH4 kanalıdır. Şekil 3.19’da bir deney kaydı verilmektedir.



Şekil 3.19 Burulmalı kesme deney aletine ait tipik deney sonuçları

3.7 Sonuç

Üçüncü bölüm dahilinde çalışmada kullanılan dinamik burulmalı kesme deney aleti, numune hazırlama yöntemi ve numune özellikleri ile ilgili olarak bilgi verilmiştir. Burulmalı kesme deney aletinde laboratuarda hazırlanan ve örselenmiş içi boş olarak yapılan silindirik numunelerde istenilen genlik ve hızda, dinamik deneyler gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir.

Bu çalışmada laboratuarda hazırlanan zemin numuneleri kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Deneyler tek tip zemin numunesi yani plastisite indisi % 26 olan siltli kil numunesi kullanılarak yapılmıştır. Yapılan deneylere ait tipik sonuçları ise grafik halinde aşağıda verilmiştir.

4. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Giriş

Bu çalışmada kullanılan dinamik burulmalı kesme deney sisteminde, drenajlı ve drenajsız olmak üzere değişik yükleme koşullarında gerilme ve deformasyon kontrollü deneyler yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan numune türü siltli kil zemin numunesidir ve yapılan dinamik deneyler gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde konsolidasyon basıncı izotropik olarak 100 kPa uygulanmıştır. Konsolidasyonun tamamlanmasının ardından 0.10 Hz frekansında sinüzoidal burulma momenti yüklemeyle numuneler kesilmiştir. Numunelerde oluşan kalıcı deformasyonlar ve boşluk suyu basıncının değişimi deney boyunca izlenmiştir.

Bu çalışma kapsamındaki deney programında laboratuvarında kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanan örselenmiş siltli kil numuneleri kullanılmıştır. Deney programı üç farklı deney serisinden oluşmuştur.

4.2 Laboratuvarında Hazırlanan Numuneler Üzerinde Yapılan Dinamik Deneyler

İlk deney serisinde Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi'nde açılan muayene çukurlarından alınan ve $PI=26$ plastisite indisine sahip siltli kil numunesi kullanılmıştır. Bu deney serisinde kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanan zemin numuneleri üzerinde öncelikle göçme seviyesi olarak belirlenen ± 2.5 birim kayma deformasyonu seviyesine kadar ve bu seviye geçildikten sonra yapılan tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Deneylerde izotropik konsolidasyonun tamamlanmasının ardından farklı gerilme oranlarında sinüzoidal yüklemeyle, zemin numunelerinde göçme oluşması için gerekli çevrim sayıları belirlenmiştir.

Tüm deneyler kuru yağmurlama yöntemiyle drenajlı koşullarda 0.1 Hz frekansta ve 100 kPa konsolidasyon basıncı altında sinüzoidal tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır(Tablo 4.1).

İkinci deney serisinde dinamik üç eksenli deney aleti kullanılmıştır. γ_k değeri 1.4 t/m³ olan siltli kil numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deney aleti ile farklı gerilme oranları verilerek deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde uygulanan dinamik yük, eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına bağlı olarak değişimi gösterilmiş ve sonuçlar aynı zemin numunesi üzerinde yapılan burumalı kesme deney aletinde yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.1 Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi numunesinde yapılan dinamik burumalı deney özellikleri (PI=%26)

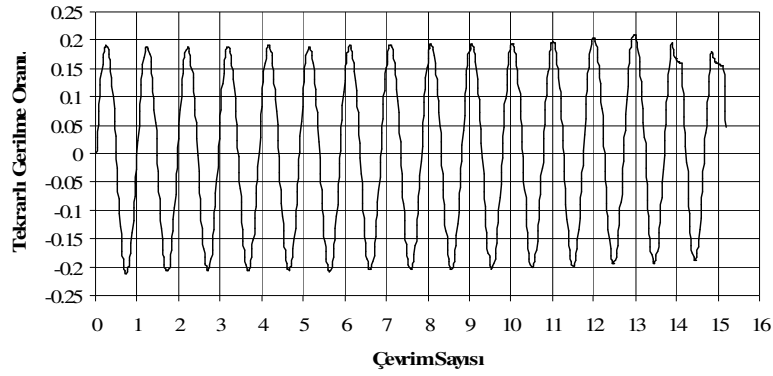
Deney No	σ_3 kPa	σ_b kPa	σ_c kPa	B %	Başlangıç γ_k (t/m ³)	Konsolidasyon Sonrası γ_{kc} (t/m ³)	ω (%)	τ_d/σ_c'	Çevrim Sayısı,N ($\gamma=\pm 2.5\%$)
D1	400	300	100	96	1,35	1,37	15	0,27	1
D2	400	300	100	96	1,28	1,31	28	0,20	11
D3	400	300	100	95	1,28	1,31	28	0,225	6
D4	400	300	100	94	1,26	1,29	31	0,18	9,5
D5	400	300	100	98	1,35	1,36	17	0,24	9
D6	400	300	100	96	1,30	1,33	28	0,182	15,5
D7	400	300	100	92	1,24	1,27	34	0,17	83
D8	400	300	100	96	1,32	1,35	22	0,17	45
D9	400	300	100	99	1,30	1,33	22	0,149	51
D10	400	300	100	99	1,28	1,31	25	0,17	-

4.3 Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletinde Siltli Kil Zeminin Dinamik Davranışı

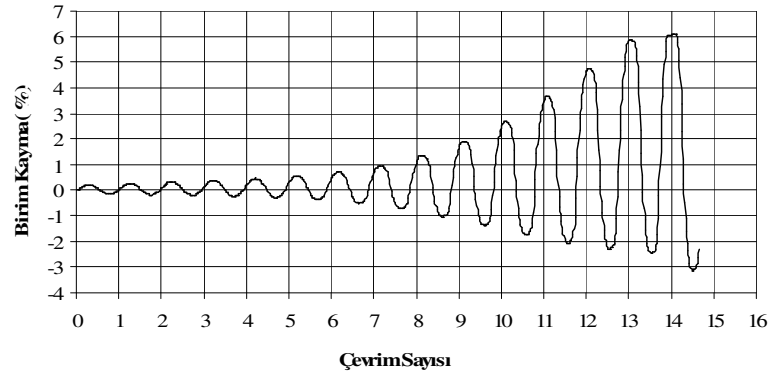
Bu çalışma sabit tekrarlı kayma gerilmesi oranında göçmeye ulaşınca kadar yapılan dinamik deneyleri kapsamaktadır.

Bu çalışmada yapılan ilk seri deney, farklı tekrarlı gerilme oranlarında göçmeye ulaşınca kadar yapılan dinamik deneyleri kapsamaktadır. Burulmalı kesme deney aletinde üniform gerilme genliği altında sinüzoidal olarak uygulanan dinamik yüklemeye ait tipik deney kayıtları Şekil 4.1’de görülmektedir. Buna göre deney kayıtlarında tekrarlı kayma gerilmesi oranı $\tau_d/\sigma_c = 0.20$ uygulanan deneye ait tekrarlı gerilme oranının çevrim sayısı ile olan değişimi görülmektedir (Şekil 4.1a).

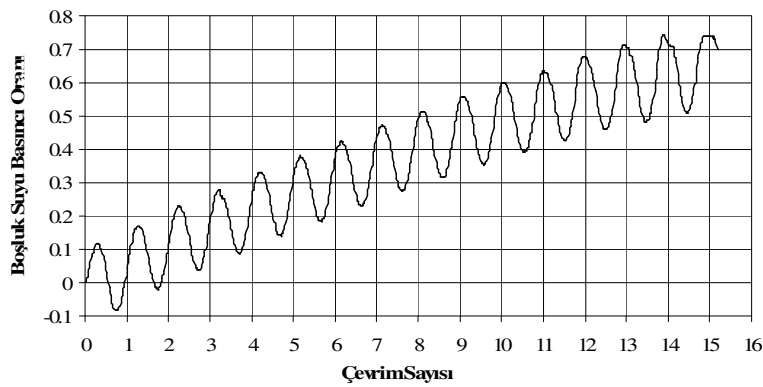
Birim kayma deformasyonunun ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile olan değişimi ise sırasıyla Şekil 4.1b ve Şekil 4.1c’de görülmektedir. $N=11$ çevrimde birim kayma $\gamma = \pm 2.5\%$ seviyesine ulaşan numunede aynı seviyeye karşı gelen boşluk suyu basıncı 63 kPa’dır. Numunede hızla artan birim kaymaların yanında boşluk suyu basınçları sınırlı kalmıştır. 14.çevrimde birim kaymalar ± 5.0 ulaşmıştır. Bu arada numune göçtüğü için üzerine uygulanan gerilmede azalma olmuştur ve boşluk suyu basıncı %74’e ulaşmıştır. Şekil 4.2’de ise bu deneye ait histeresis ilmikleri görülmektedir. Ortalama kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu ilişkisi şeklinde elde edilen ilmiklerde, çevrim sayıları ile birlikte büyüme ve yatıklaşma meydana gelmektedir. Artan birim kayma genliklerine bağlı olarak zeminde oluşan kalıcı deformasyonlar nedeniyle ince daneli zeminde yumuşama olmaktadır. Bundan dolayı zemin devam eden yükleme çevrimlerinde önemli mukavemet kayıplarına uğramaktadır. Tekrarlı yüklemeye birlikte zeminde oluşan birim kaymalarla, efektif gerilmelerin değişimi Şekil 4.3’te görülmektedir. Buna göre artan kayma deformasyonları, numunede oluşan boşluk suyu basınçları nedeniyle meydana gelen efektif gerilme azalmasıyla ilişkilidir. Belirli bir kayma deformasyonu seviyesinden sonra numunede akma meydana gelirken, efektif gerilmelerde de önemli ölçüde düşme görülmektedir. Bu kayma deformasyonu seviyesi *kritik akma deformasyonu* olarak tanımlanmıştır.



a) Kayma Gerilmesi - Çevrim Sayısı İlişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$

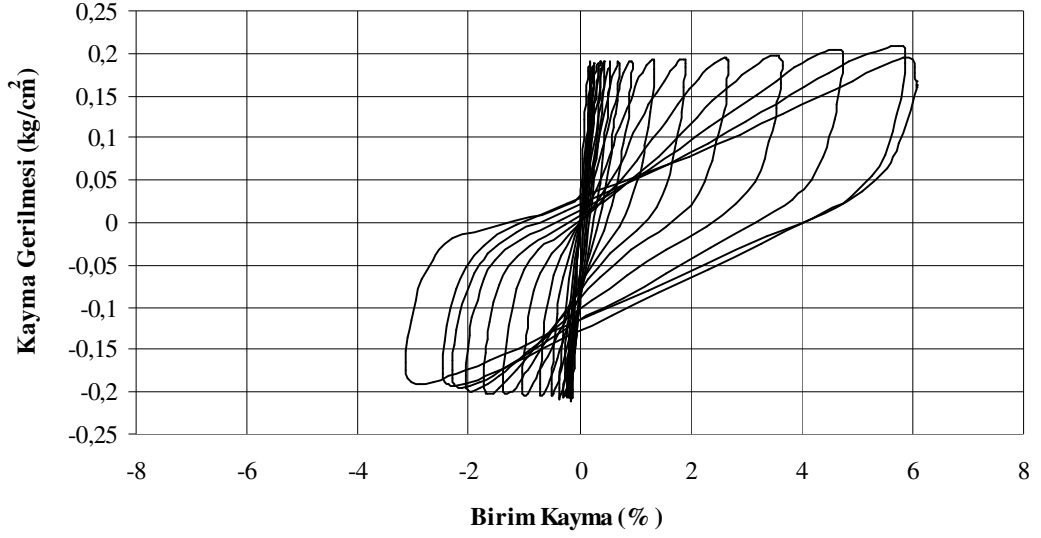


b) Birim Kayma Deformasyonu - Çevrim Sayısı İlişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$

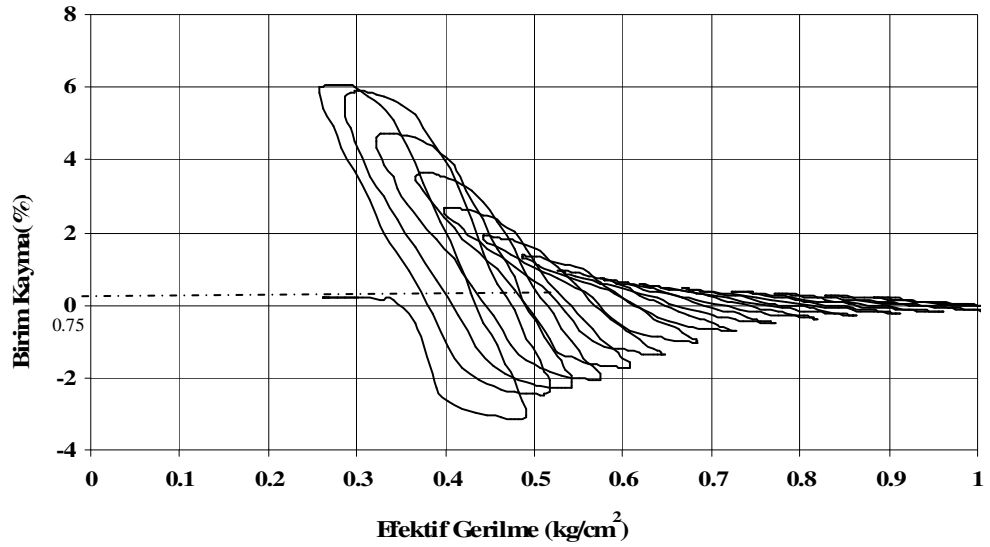


c) Boşluk Suyu Basıncı Oranı - Çevrim Sayısı İlişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$

Şekil 4.1 D2 deneyine ait gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu davranışları

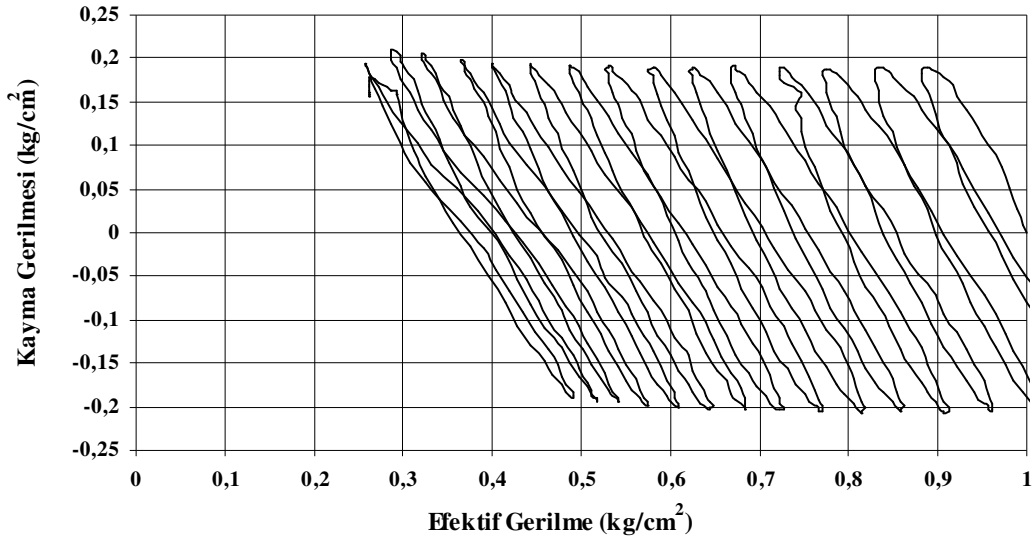


Şekil 4.2 Siltli kil zeminde meydana gelen histeresis ilmkileri, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$



Şekil 4.3 Siltli kilde birim kayma deformasyonu-efektif gerilme ilişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$

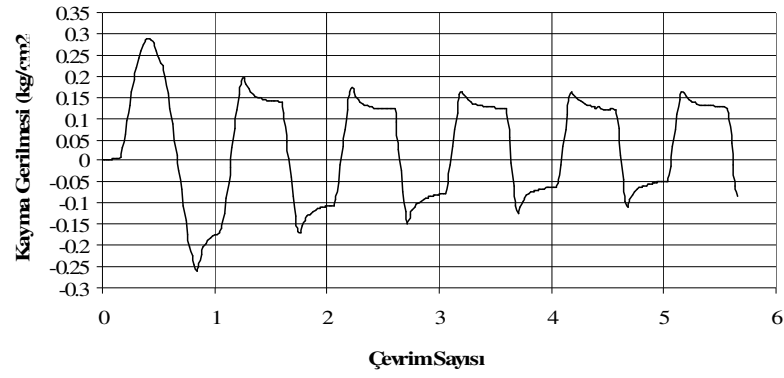
Bu çalışmada kullanılan $\% 26$ plastisite indisli siltli kil numunesinde yapılan drenajsız dinamik deneylerde bu deformasyon seviyesi yaklaşık $\pm \% 0.75$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.4'te aynı deneye ait gerilme izleri görülmektedir.



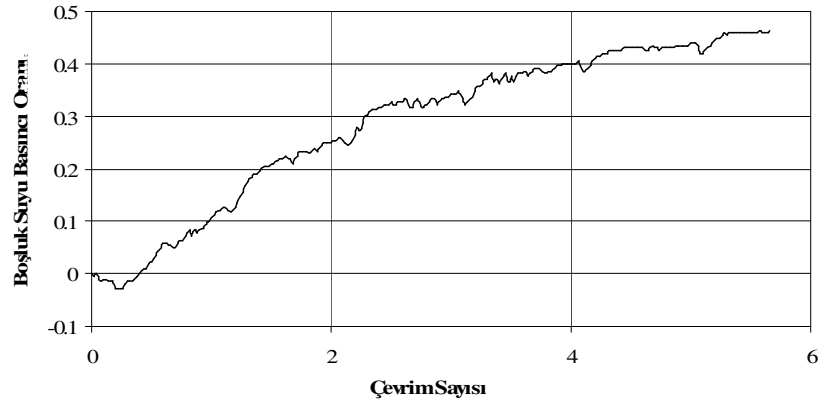
Şekil 4.4 Siltli kilde gerilme izleri, $\tau_d/\sigma_c=0.20$, $PI = \% 26$

D1 deneyinde dinamik kayma gerilmesi oranı $\tau_d/\sigma_c=0.27$ uygulanmıştır. Bu deney sonucu numune birinci çevrim sona ermeden aşırı birim kayma seviyesine ulaşp göçmeye uğramıştır(Şekil 4.5a). $N=1$ de eksenel birim deformasyon $\gamma = \pm \%6.0$ seviyesine ulaştığı için zemin numunesi gerilmeyi taşıyamayıp göçmüştür ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u=\%10$ dur(Şekil 4.5b).

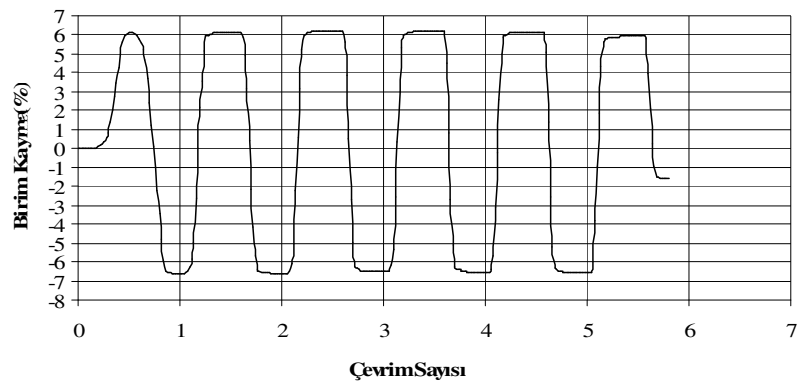
Doygunluğun birim kayma deformasyonu – çevrim sayısı ilişkisine etkisini D7 ve D9 deneyleri karşılaştırarak görülebilir. B değeri $\% 99$ ve kayma gerilmesi oranı $\tau_d/\sigma_c=0.149$ olan D9 nun 51 çevrim sonunda $\pm \%2.5$ birim kayma seviyesine ulaşp deformasyona uğramıştır. Bu çevrim sayısında boşluk suyu basıncı oranı $r_u=0.7$ dir (Şekil 4.6). Buna karşı kayma gerilmesi oranı daha yüksek olan ($\tau_d/\sigma_c=0.17$) D7 deneyinin B değeri $\%92$ olmasından dolayı $\pm \%2.5$ birim kayma seviyesine ulaşp deformasyona uğradığı değer 83 çevrimdir. Bu çevrimde $r_u=0.8$ olmuştur(Şekil 4.7). Doygun zeminler daha küçük çevrim sayılarında $\gamma = \pm \%2.5$ seviyesine ulaşırlar.



a) Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı-Çevrim Sayısı İlişkisi $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$

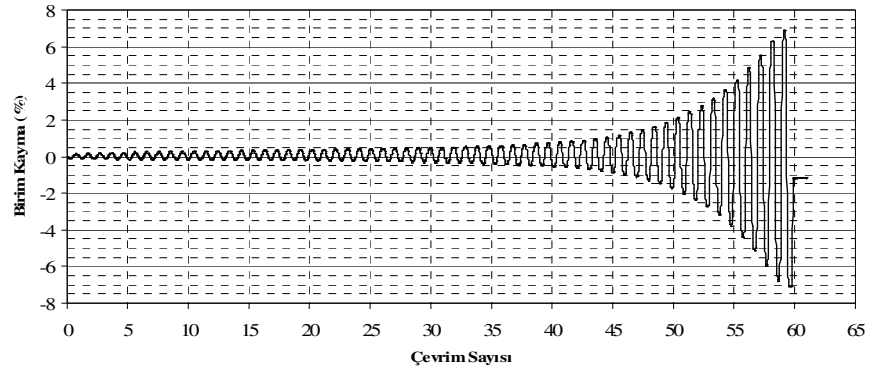


b) Boşluk Suyu Basıncı – Çevrim Sayısı İlişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$

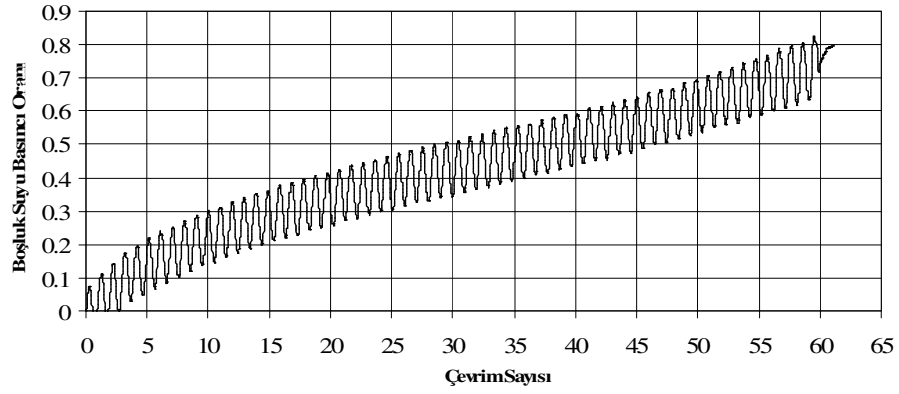


c) Birim Kayma Deformasyonu – Çevrim Sayısı İlişkisi, $\tau_d/\sigma_c = 0.20$, $PI = \% 26$

Şekil 4.5 D1 deneyine ait gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu davranışları

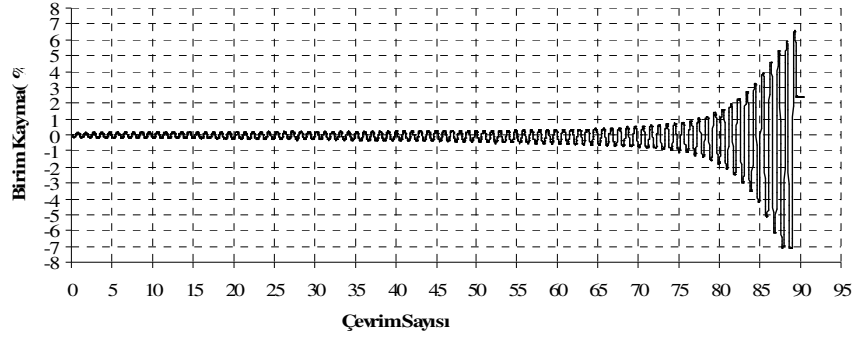


a) Birim Kayma Deformasyonu – Çevrim Sayısı İlişkisi

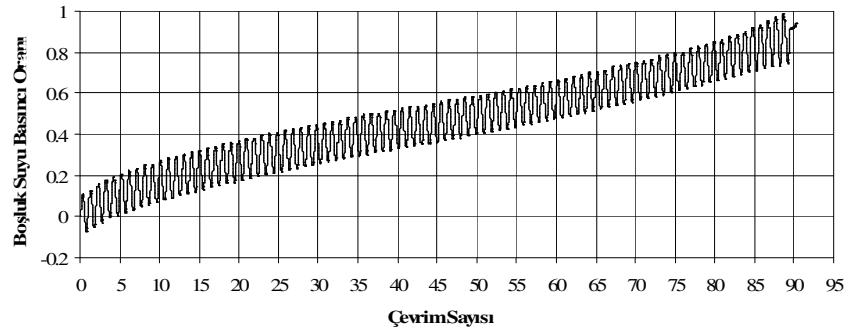


b) Boşluk Suyu Basıncı– Çevrim Sayısı İlişkisi

Şekil 4.6 D9 deneyinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncı Oranının Çevrim Sayısı ile ilişkisi



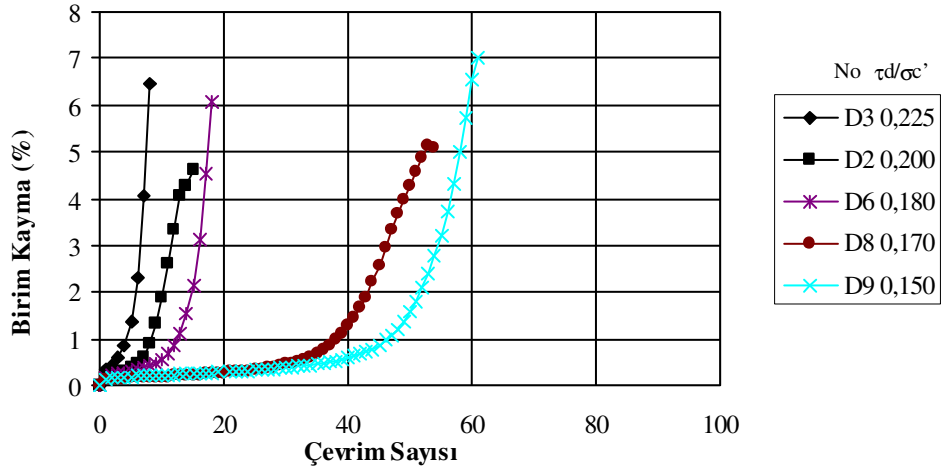
a) Birim Kayma Deformasyonu – Çevrim Sayısı İlişkisi



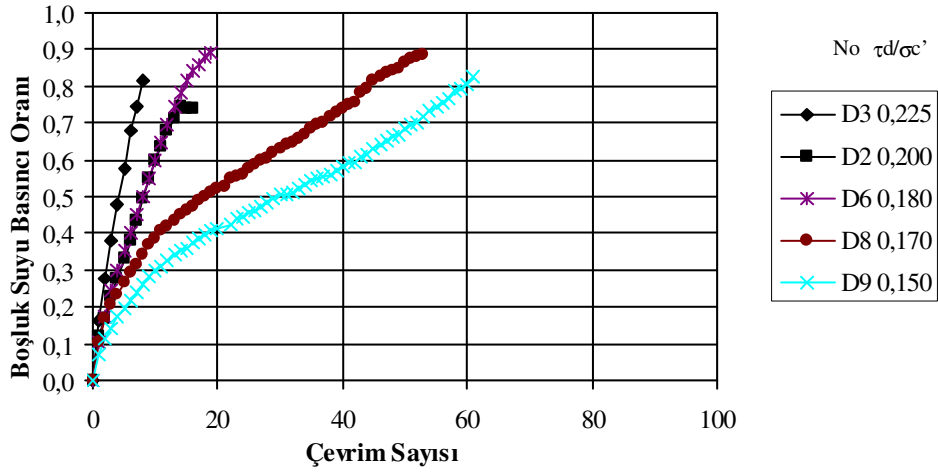
b) Boşluk Suyu Basıncı Oranı – Çevrim Sayısı İlişkisi

Şekil 4.7 D7 deneyinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncı Oranının Çevrim Sayısı ile ilişkisi

Şekil 4.8’de dinamik burulmalı kesme deney sisteminde değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarının birim kayma ile boşluk suyu basıncı oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. D3 deneyinde uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranı $\tau_d/\sigma_c=0.225$ sırasıyla D2, D6, D8, D9 deneylerinde ise bu oran sırasıyla 0.200, 0.180 , 0.170 ve 0.150’dir. Dinamik kayma gerilme seviyesi arttıkça zemin göçme sınırı olan $\gamma=\pm 2.5\%$ deformasyon seviyesine küçük çevrim sayılarında ulaşmaktadır(Şekil 4.8a). Belirli bir çevrim sayısı olarak $N=10$ dikkate alındığında boşluk suyu basıncı oranlarında gerilmeye doğru orantılı azaldığı görülür(Şekil 4.8b).



a) Birim Kayma Deformasyonu –Çevrim Sayısı İlişkisi

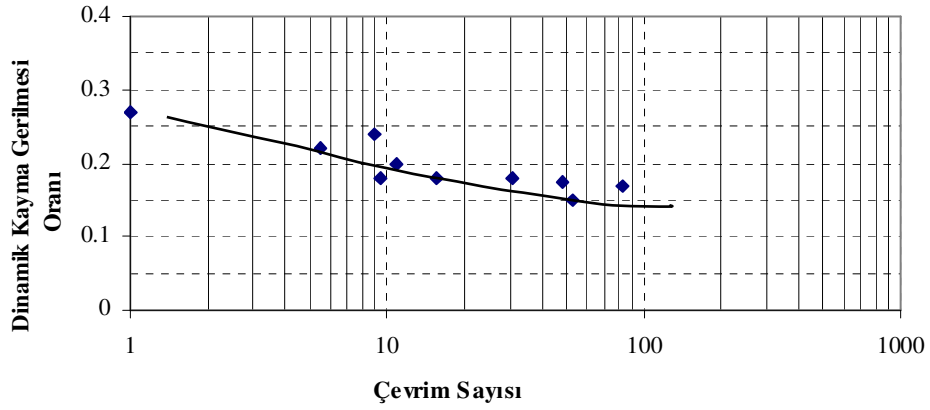


b) Boşluk Suyu Basıncı Oranı –Çevrim Sayısı İlişkisi

Şekil 4.8 İlk Deney Setindeki Deneylerin Boşluk Basıncı Oranlarının ve Birim Kayma Deformasyonlarının Çevrim Sayılarıyla İlişkileri

Yapılan deneylerde artan birim kaymalarla birlikte oluşan boşluk suyu basıncına da bağlı olarak, efektif gerilmede önemli ölçüde azalma meydana geldiği görülmüştür. Yukarıda anlatılan ilk seri dinamik deneyde belirlenen birim kayma-efektif gerilme ilişkisinde, yaklaşık $\pm$ % 0.75 birim kayma seviyesinden sonra numune deformasyonların hızla arttığı görülmüştür. Şekil 4.8’de D6 ve D8 grafikleri arasındaki geniş boşluklara da eşik seviyesinin geçilmesinden dolayı oluşan bu hızlı artışlar sebep olmuştur. Hızla artan kayma deformasyonlarının yanında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarına da bağlı olarak efektif gerilmelerde de önemli ölçüde azalma

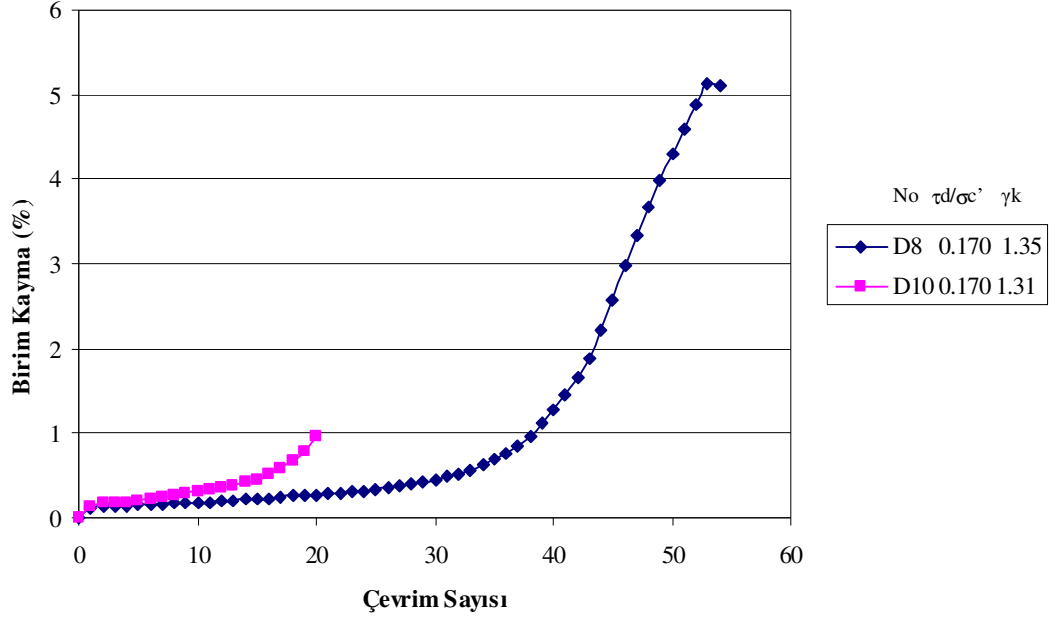
meydana geldiği görülmektedir. Dinamik yüklemelerde göçme birim kayma deformasyonu olarak adlandırılan $\gamma=\pm\%2.5$ seviyesine karşı gelen çevrim sayıları ile Şekil 4.9’da belirtilen eğri elde edilmiştir. Göçme eğrisinden ise deprem aletsel büyüklüğü $M_w=7.5$ ’a karşı gelen $N=20$ çevrim sayısındaki (Seed, 1975), gerilme oranı $\tau_d/\sigma_c = 0.175$ olarak belirlenmiştir.



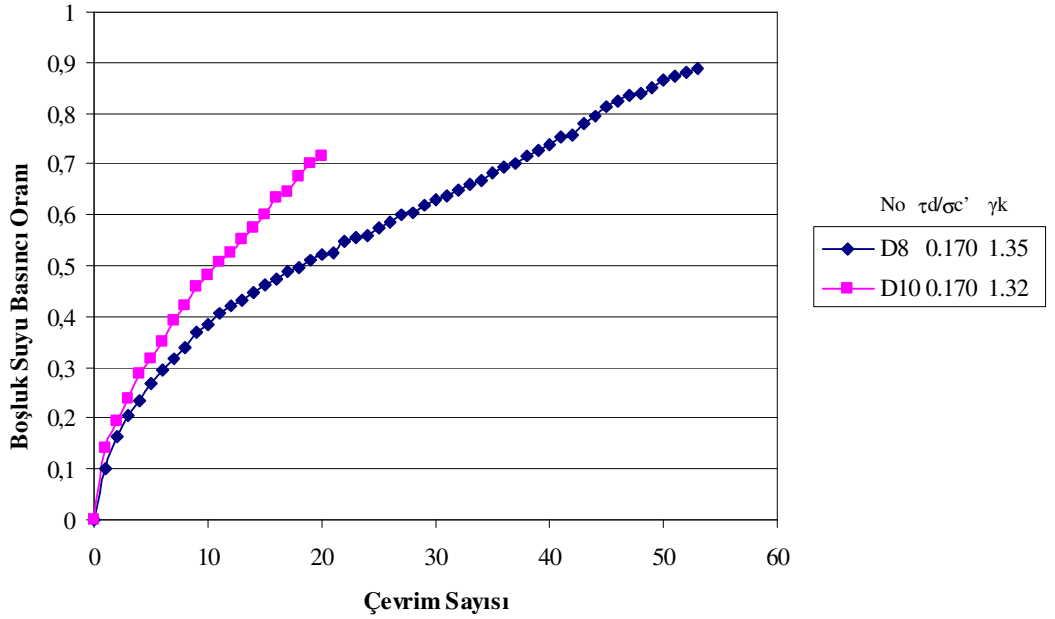
Şekil 4.9 Kayma Gerilmesi Oranı – Çevrim Sayısı İlişkisi, $\gamma_k=1.4 \text{ t/m}^3$, $PI=\%26$

4.3.1 Kuru Birim Hacim Ağırlığın Dinamik Davranışa Etkisi

Aynı zemin numunesi kullanılarak yapılan D8 ve D10 deneylerinde aynı dinamik kayma gerilme oranı ($\tau_d/\sigma_c=0.17$) uygulanmıştır. Deney sonrası su muhtevasıda iki deney içinde $\%22$ ’dir. İki farklı numuneninde B değerlerine göre (D8 için $B=\%96$, D10 için $B=\%99$) doymun olduğu görülmüştür. Konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla $\gamma_k=1.43 \text{ t/m}^3$ ve $\gamma_k=1.32 \text{ t/m}^3$ elde edilmiştir. Şekil 4.10’de γ_k değerindeki bu farklılığın boşluk basıncı oranlarının ve birim kayma deformasyonlarının çevrim sayılarıyla ilişkilerine etkisi görülmektedir.



a) Birim Kayma Deformasyonu – Çevrim Sayısı İlişkisi



b) Boşluk Suyu Basıncı Oranı – Çevrim Sayısı İlişkisi
Şekil 4.10 D8 ve D10 Deneylerinin Boşluk Basıncı Oranlarının ve Birim Kayma Deformasyonlarının Çevrim Sayılarıyla İlişkileri

Şekil 4.10a'da konsolidasyon sonrası kuru birim hacim ağırlığı daha düşük olan ($\gamma_k=1.31 \text{ t/m}^3$) D10'un $N=10$ çevrimde , D8 deneyine ($\gamma_k=1.35 \text{ t/m}^3$) göre daha büyük deformasyona uğradığı görülmektedir. Kuru birim hacim ağırlığı değeri

arttıkça zemin göçme sınırı olan $\gamma=\pm\%2.5$ deformasyon seviyesine küçük çevrim sayılarında yaklaşılmaktadır.

Şekil 4.10b’de ise N=10 çevrim sayısında kuru birim hacim ağırlığı azaldıkça boşluk suyu basınçlarının arttığı görülmektedir.

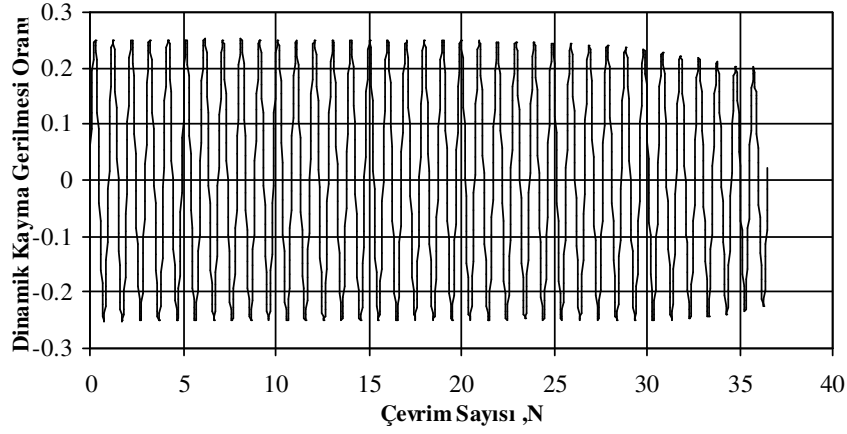
4.4 Dinamik Üç Eksenli Deney Aletinde Siltli Kil Numunesinin Dinamik Davranışı

Bir grup deney dinamik üç eksenli deney sisteminde yapılmıştır(Tablo 4.2). UD 3 deneyinde uygulanan dinamik yük, eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. UD3

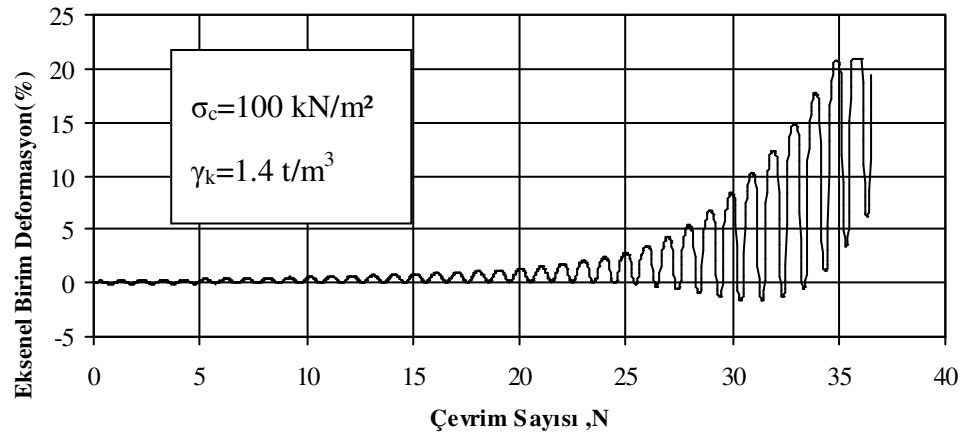
deneyinde uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranı $\frac{\sigma_d}{2\sigma_c} = \pm 0.25$ ’dir.

Tablo 4.2 Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi numunesinde yapılan dinamik üç eksenli deney özellikleri (PI= %26)

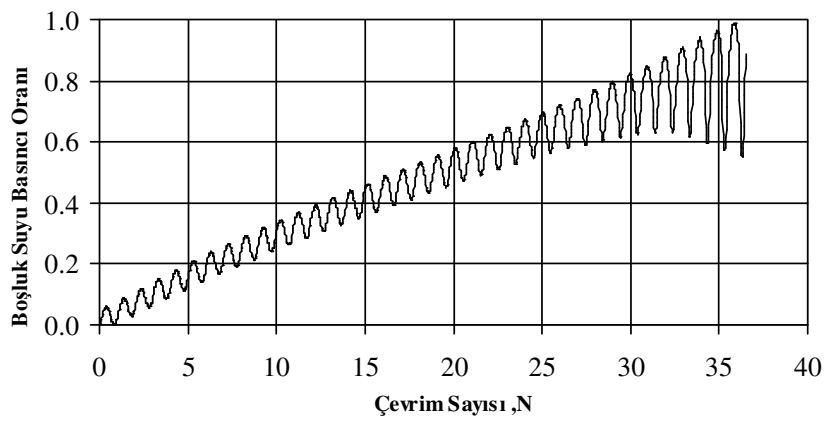
Deney No	σ_3 kPa	σ kPa	σ_c kPa	B %	Başlangıç γ_k (t/m ³)	Konsolidasyon Sonrası γ_{kc} (t/m ³)	ω (%)	$\sigma_d/2\sigma_c$	Çevrim Sayısı,N $\gamma=\pm 2.5\%$
UD1	400	300	100	97	1,4	1,43	32	0,21	-
UD2	400	300	100	98	1,4	1,43	33	0,25	27
UD3	400	300	100	97	1,4	1,43	32	0,3	11



a) Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı - Çevrim Sayısı İlişkisi



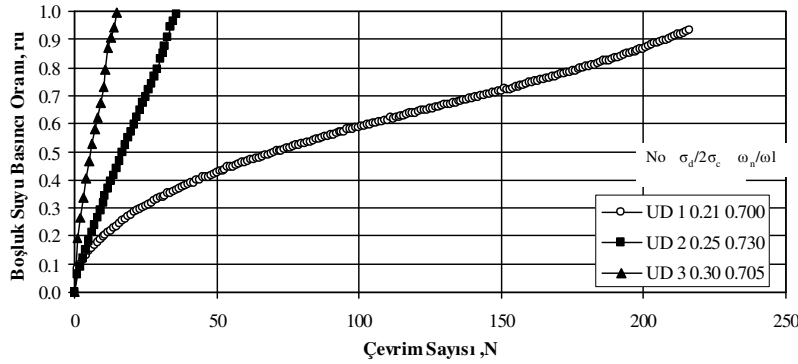
b) Eksenel Birim Deformasyonu – Çevrim Sayısı İlişkisi



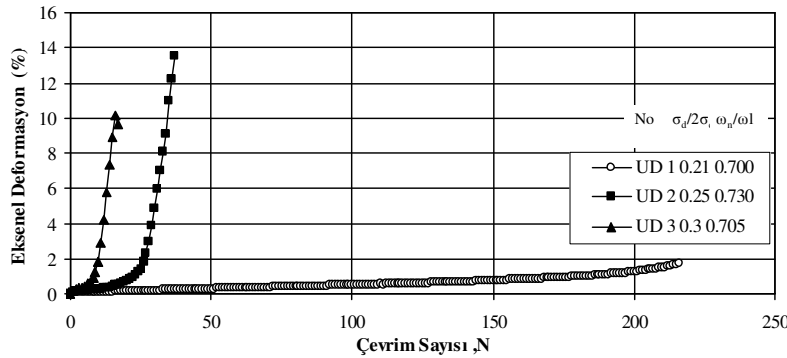
c) Boşluk Suyu Basıncı Oranı Değişimi – Çevrim Sayısı İlişkisi

Şekil 4.11 UD3 deneyine ait gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu davranışları

Eksenel boy değişimine göre zemin $N=27$ çevrimde $\gamma=\pm\%2.5$ seviyesine ulaşırken boşluk suyu basıncı oranı bu çevrim sayısında $r_u=\%75$. Şekil 4.12’de dinamik üç eksenli deney sisteminde değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarında yapılmış deneylere ait birim kayma ile boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi görülmektedir. Gerilme seviyesi arttıkça zemin küçük çevrim sayılarında göçme sınırı olan $\gamma=\pm\%2.5$ eksenel birim deformasyon seviyesine ulaşmaktadır. UD 3 deneyinde dinamik kayma gerilmesi oranı $\tau_d/\sigma_c=0.30$ olup çevrim sayısı $N=10$ ’da eksenel birim deformasyon $\gamma=\pm\%2.5$ seviyesinde ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u=\%78$ olmuştur. UD 1 deneyinde dinamik kayma gerilmesi oranı 0.21 olup çevrim sayısı $N=215$ de eksenel birim deformasyon $\gamma=\pm\%2.0$ seviyesinde ulaşmıştır ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u=\%90$ olmuştur.



a) Boşluk Suyu Basıncı Oranı –Çevrim Sayısı İlişkisi

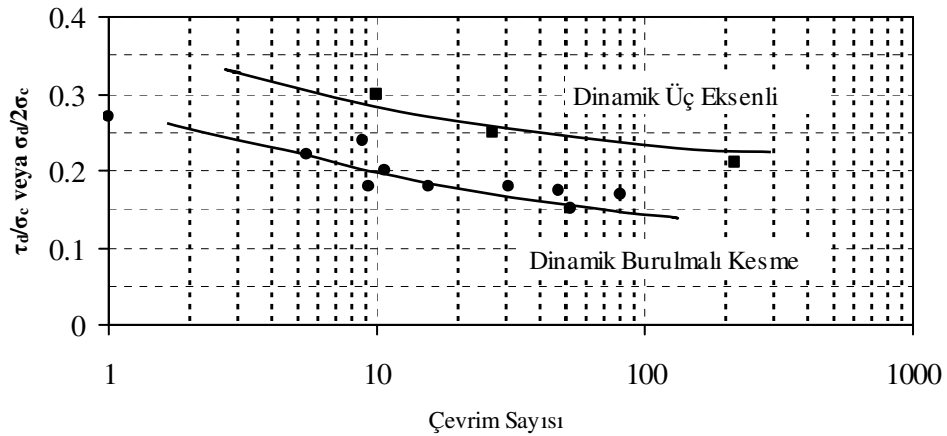


b) Gerilme Oranının Eksenel Deformasyon ve Boşluk Suyu Basıncına Oranı

Şekil 4.12 İlk Deney Setindeki Deneylerin Boşluk Basıncı Oranlarının ve Birim Kayma Deformasyonlarının Çevrim Sayılarıyla İlişkileri

Her iki deney sisteminde yapılan deneylerin dinamik kayma gerilmesi oranı – çevrim sayısı ilişkisi Şekil 4.13’de görülmektedir. Dinamik üç eksenli basınç deneyi sonuçlarını dinamik burulmalı kesme deney sonuçları ile karşılaştırabilmek için eksenel birim deformasyonlar (ϵ) Dobry(1991) de verilen denklem ile birim kayma deformasyonlara (γ) dönüştürülmüş olup birim kayma deformasyonun $\gamma=\pm 2.5$ olduğu çevrim sayıları dikkate alınmıştır.

Bu sonuçlara göre zemin numunesi dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde daha büyük dinamik kayma gerilmesi oranlarında göçme kriterlerine ulaşmıştır. $N=20$ çevrim sayısına eşit 7.5 büyüklüğündeki bir depremin dinamik üç eksenli basınç deneyleri sonuçlarına göre bu zeminde oluşturacağı dinamik kayma gerilmesi oranı $\tau_d/\sigma_c=0.26$ iken, dinamik burulmalı kesme deney sisteminde elde edilen sonuçlara göre bu değer $\tau_d/\sigma_c=0.18$ olmaktadır.



Şekil 4.13 Dinamik Üç Eksenli ve Dinamik Burulmalı Kesme Deney Aletlerinin Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı - Çevrim Sayısı İlişkilerinin Karşılaştırılması

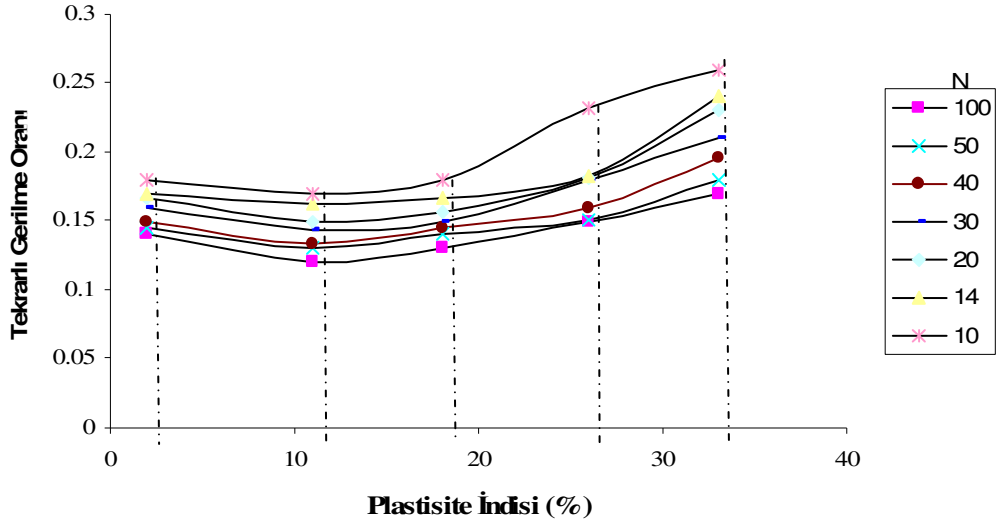
4.5 Plastisite İndisinin Tekrarlı Gerilme Oranı Üzerindeki Etkisi

Bu çalışmada plastisite indisi $PI=26$ olan siltli killerin üzerinde yapılan deney sonuçları, Ülker(2004) tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.3 $PI=26$ olan numunelerin ± 2.5 birim kayma deformasyonundaki kayma gerilme oranları ve çevrim sayıları

Deney No	D5	D6	D8	D9
τ_d/σ_c	0,24	0,182	0,17	0,149
N ($\gamma=\pm 2.5\%$)	9	15,5	45	51

Şekil 4.14’de tekrarlı gerilme oranı – plastisite indisi arasındaki davranış biçimi çevrim sayısına bağlı olarak görülmektedir. Uygulanan yükleme çevrim sayısı arttıkça aynı plastisitedeki numunenin göçme seviyesine erişmesi için daha düşük gerilme seviyesi yeterli olmaktadır. Bununla birlikte siltlerde plastisite indisi % 11’e kadar arttıkça zeminin dinamik mukavemeti azalırken, bu değerden sonra plastisite arttıkça aynı çevrim sayısında numunenin göçmeye ulaşması için daha büyük gerilme seviyeleri gerekmektedir. Ülker (2004) çalışmasında %2, %11, %18, %33 plastisiteli zeminleri kullanmıştır. Bu çalışma kapsamında $PI=26$ olan deney sonuçları (Tablo 4.3) grafiğin içerisine konulmuş ve sonuçların grafiğe uyduğu görülmüştür.



Şekil 4.14 Tekrarlı Gerilme Oranı - Plastisite İndisi Değişimi ($\gamma_{z0}=\pm\% 2.5$, $\gamma_{kc}=1.29-1.43 \text{ t/m}^3$)

4.6 Sonuç

Bu bölümde plastisite indisi % 26 olan siltli kil numuneleriyle dinamik burulmalı kesme ve dinamik üç eksenli deney aletleri yardımıyla farklı tekrarlı kayma gerilmesi oranlarında dinamik deneyler yapılmıştır. Hazırlanan bu deney setlerinden elde edilen sonuçların dinamik olarak analizi yapılmış, boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ve birim kayma (%) - çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir. Çalışma iki deney seti oluşturularak yapılmıştır. İlk deney setindeki deneyler aynı numune üzerinde farklı gerilmeler uygulanarak yapılmıştır.

İlk olarak doygunluğun, dinamik davranışına etkisi araştırılmıştır. Buna göre doygun zeminler daha küçük çevrim sayılarında $\gamma = \pm\%2.5$ seviyesine ulaşırlar.

Kuru birim hacim ağırlığı değeri arttıkça zemin göçme sınırı olan $\gamma = \pm\%2.5$ deformasyon seviyesine küçük çevrim sayılarında yaklaşılmaktadır ve $N=10$ çevrim sayısında kuru birim hacim ağırlığı azaldıkça boşluk suyu basınçlarının arttığı görülmektedir.

Plastisite indisinin dinamik davranışına etkisine bakıldığında ise uygulanan yükleme çevrim sayısı arttıkça aynı plastisitedeki numunenin göçme seviyesine erişmesi için daha düşük gerilme seviyesi yeterli olmakta olduğu görülmektedir.

İkinci deney setinde ise dinamik üç eksenli deney aletinde aynı siltli kil numunesi üzerinde yapılan deneyler dinamik burulmalı kesme deney aletiyle karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre zemin numunesi dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde dinamik burulmalı kesme deney sistemine göre daha büyük dinamik kayma gerilmesi oranlarında göçme kriterlerine ulaşmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Adapazarı Cumhuriyet Mahallesi'nden getirilen örselenmiş siltli kil zeminlerinin tekrarlı yükler altındaki davranışı, dinamik burulmalı kesme deney aletinde yapılan dinamik ve statik deneylerle araştırılmıştır. Bu çalışmanın yanı sıra dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak da dinamik deneyler yapılmıştır. Dinamik deneyler gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan zemin numuneleri kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanmış olup içinden damıtık su geçirilerek doymun hale getirilmiş ve 100 kPa basınca konsolide edilmiştir. Deneyler drenajsız koşullarda 0.1 Hz frekansta sinüzoidal tekrarlı yükleme altında kalmıştır. Bu deney setindeki deneyler aynı numune üzerinde farklı gerilmeler uygulanarak yapılmıştır.

Laboratuarda bu çalışma için 2 deney seti hazırlanmıştır. Hazırlanan bu deney setlerinden elde edilen sonuçların, boşluk suyu basıncı oranı - çevrim sayısı ve birim kayma (%) - çevrim sayısı ilişkisi incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıda görülmektedir.

Birinci deney setinde kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanan zemin numuneleri üzerinde öncelikle göçme seviyesi olarak belirlenen $\pm \% 2.5$ birim kayma deformasyonu seviyesini geçinceye kadar dinamik burulmalı kesme gerilmesi uygulanmıştır. Deneylerde her dinamik gerilme oranı altında, zemin numunelerinde göçme oluşması için gerekli çevrim sayıları belirlenmiştir.

Ayrıca doymunluğun, plastisitenin, su muhtevasının ve kuru birim hacim ağırlığının dinamik davranışa etkisi araştırılmıştır.

Doymunluğun, dinamik davranışına etkisi araştırıldığında doymun zeminlerin daha küçük çevrim sayılarında $\gamma = \pm \% 2.5$ seviyesine ulaştıkları görülmektedir. B değeri $\% 99$ ve kayma gerilmesi oranı $\tau_d/\sigma_c=0.149$ olan deney (D9) 51 çevrim sonunda $\pm \% 2.5$ birim kayma seviyesine ulaşp deformasyona uğramıştır. Bu çevrim sayısında boşluk suyu basıncı oranı $r_u=0.7$ dir. Buna karşı kayma gerilmesi oranı daha yüksek olan ($\tau_d/\sigma_c=0.17$) deney (D7) deneyinin B değeri $\% 92$ olmasından dolayı $\pm \% 2.5$ birim

kayma seviyesine ulaşıp deformasyona uğradığı değer 83 çevrimdir. Bu çevrimde $r_u=0.8$ olmuştur.

Dinamik burulmalı kesme deney sisteminde değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarının birim kayma ile boşluk suyu basıncı oranı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Dinamik kayma gerilme seviyesi arttıkça zemin göçme sınırı olan $\gamma=\pm\%2.5$ deformasyon seviyesine küçük çevrim sayılarında ulaşmaktadır. Belirli bir çevrim sayısı olarak $N=10$ dikkate alındığında boşluk suyu basıncı oranlarının da gerilmeyle doğru orantılı azaldığı görülür. Yapılan deneylerde artan birim kaymalarla birlikte oluşan boşluk suyu basıncına da bağlı olarak, efektif gerilmede önemli ölçüde azalma meydana geldiği görülmüştür.

Aynı dinamik kayma gerilmesi oranı uygulanan, doymuş olan farklı γ_k değerlerine ($\gamma_{kc}=1.43 \text{ t/m}^3, \gamma_{kc}=1.32 \text{ t}$) sahip iki numune üzerinde kuru birim hacim ağırlıklarının dinamik davranışa etkisi araştırılmıştır. Buna göre kuru birim hacim ağırlığı değeri arttıkça zemin göçme sınırı olan $\gamma=\pm\%2.5$ deformasyon seviyesine büyük çevrim sayılarında yaklaşılmaktadır ve $N=10$ çevrim sayısında kuru birim hacim ağırlığı azaldıkça boşluk suyu basınçlarının arttığı görülmektedir.

Bu deney seti kullanılarak yapılan son çalışmada ise sonuçlar Ülker(2004) tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan $PI=\%26$ olan siltli kil numunesinden çıkan sonuçlar Ülker(2004)'in tablosuna eklenerek plastisite indisinin dinamik davranışa etkisi incelenmiştir. Buna göre uygulanan yükleme çevrim sayısı arttıkça aynı plastisitedeki numunenin göçme seviyesine erişmesi için daha düşük gerilme seviyesi yeterli olmakta olduğu görülmektedir.

İkinci deney setinde ise dinamik üç eksenli deney aletinde aynı siltli kil numunesi üzerinde yapılan üç deney dinamik burulmalı kesme deney aletiyle yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Dinamik üç eksenli basınç deneyi sonuçlarını dinamik burulmalı kesme deney sonuçları ile karşılaştırmak için eksenel birim deformasyonlar (ϵ) Dobry(1991) de verilen denklem ile birim kayma deformasyonlara (γ) dönüştürülmüş olup birim kayma deformasyonun $\gamma=\pm 2.5$ olduğu çevrim sayıları dikkate alınmıştır.

Dinamik kayma gerilmesi oranı ile $\pm \%2.5$ kayma deformasyon seviyesine ulaşılan çevrim sayısı arasındaki ilişki incelendiğinde aynı çevrim sayısında dinamik üç

eksenli deneye ait dinamik gerilme oranının dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen değerden daha büyük olduğu görülmüştür

Düşük plastisiteli siltli kil zemini ülkemizde çok rastlanan karakteristik bir zemin olduğu için zemin yumuşaması ve taşıma gücü kayıplarıyla ilgili daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Mukavemet kayıplarıyla ilgili daha fazla bilgi edinmek için dinamik burulmalı kesme deney aleti kullanılarak farklı kuru birim hacim ağırlıklarında ve gerilmelerde daha fazla sayıda statik ve dinamik+statik deney yapılmalıdır. Aynı şartlarda statik ve dinamik+statik deney serileri dinamik üç eksenli deney aletinde de yapıp sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Alhas, E.**, 1994. Siltli ve killi kumlarda sıvılaşma, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul
- Altun, S.**, 2003. Burulmalı kesme deney aleti ile zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi, *Doktora tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Altun, S., Ansal, A.**, 2003, Tekrarlı yükler altında kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri, *İTÜ Dergisi*, Ağustos, Cilt:2, Sayı:4, 25-34
- Amini, F. and Qi, G.Z.**, 2000. Liquefaction testing of stratified silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**, 208-217
- Ansal, A.M.**, 1981. Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989 Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı, *Deprem Araştırma Bülteni*, **50**, 10-53
- Ansal, A.M. and Erken, A.**, 1989. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, 115, 968-983
- Castro, G.**, 1969 Liquefaction of sands, *PhD Thesis*, Harvard University, Cambridge, Massachusettes.
- Castro, G., Keller, T.O. and Boynton, S.S**, 1989, Re-evaluation of the lower San Fernando Dam-Report 1: Contract Report GL-89-2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.S.
- Castro, G., Poulos, S.J. France J.W. and Enos, J.L.**, 1982, Liquefaction induced by cyclic loading, Report By Geotechnical Engineers Inc. To the National Science Foundation, Washington D.C.
- Chang, N.Y.**, 1990. Influence of fines content and plasticity on earthquake induced soil liquefaction, Misc. Paper, GL-87-24, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Wicksburg, MS.
- Chaundlary, S.K., Kuwano J. Hashimoto S., Hayano Y. And Nakamura, Y.**, 2002 Effects of initial fabric and sheareing direction on cyclic

deformation characteristics of sand, *Soils And Foundations*, **42**, 147-157

Chen, Y.C., Ishibashi, I. And Jenkins, J.T., 1988. Dynamic shear modulus and fabric: part 1, depositional and induced anisotropy, *Geotechnique*, **38**, 25-32.

Chu Lin, D.B., 2006, Case studies of soil liquefaction of sands and cyclic softening of clays induced by the 1999 Taiwan Chi-Chi Earthquake, *PhD Thesis*, University of California, California

Cotecchia, F., and Chandler, R.J., 1997. The influence of structure on the pre-failure behavior of a natural clay, *Geotechnique*, **47**, 523-544

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

Das, M.B., Puri, V.K. and Prakash, S. 1999, Liquefaction of silty soils, Proceedings of Second Earthquake Geotechnical Eng. Int. Conf. Lisbon, Portugal, 619-623

Dyvik, R., 1981. Strain and pore pressure behavior of fine grained soils subjected to cyclic shear loading, *PhD Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute, UMI, Ann Arbor.

El Hosri, M.S, Biarez, and Hicher, P.Y., 1984, Liquefaction characteristics of silty clay, Proc. Eight World Conf. On Earthquake Eng., Prentice Hall, NJ, 277-284.

Elıbol, B., Ülker, B.C., Kaya, Z., Özay, R. ve Erken, 2004, Depremler sırasında zeminlerin sıvılaşması ve taşıma gücü kayıpları, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 431, 20-26.

Erdem, A., Okan, R., Erken, A., 2003, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi’de Adapazarı’nda yer alan zeminlerin davranışı, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs, AT-112

Erken, A., 1982 Killerin dinamik özellikleri üzerine frekansın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

- Erken, A. and Ansal, A.M.,** 1994 Liquefaction characteristics of undisturbed sands, Performance of Ground And Soil Structures, Thirteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Foundation Engineering, 165-170.
- Erken, A.,** 2001. The role of geotechnical factors on observed damage in Adapazarı, Proceedings of Fifteenth Int. Conf. On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering Sat. Conf. On Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes, İstanbul, Turkey, 29-32.
- Erşan, H., Yıldırım, H.,** 2006. Tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonu, İTÜ Dergisi, Cilt:5 Sayı:3,2, 187-195
- Erten, D. and Maher, M.H.,** 1995. Cyclic undrained behavior of silty sand, Soil Dynamics And Earthquake Engineering, **14**, 115-123.
- Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I., Sokolov, V.N.,** 2004. The liquefaction of clayey soils under cyclic loading, Engineering Geology, **86**, 70-84
- Guo, T. and Prakash, S.,** 1999. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures, Journal of Geotechnical Engineering And Geoenvironmental Engineering, **125**, 706-710.
- Hoeg, K. Dyvik R. AND Sandbaekken, G.,** 2000. Strentgh of undisturbed versus reconstitued silt and silty sand specimens, Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, **126**, 606-617.
- Hong, W.P. and Lade, P.V.,** 1989 Strain increment and stress directions in torsion shear tests, Journal of The Geotechnical Engineering Division, **115**, 1388-1401.
- Hussein, A.K.,** 1995 Undrained cyclic behavior of nonplastic silt, PhD Thesis, Cornell University, UMI, Ann Arbor.
- Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Yamamoto, Y., and Teruhisa, F.,** 1999. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, Soils And Foundations, **39**, 45-58.
- Ishihara, K and Yasuda, S.,** 1975. Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, Soils And Foundations., **15**, 45-59.

- Ishihara, K.**, Sodekawa, M. ve Tanaka, Y., 1978. Effects of overconsolidation on liquefaction characteristics of sands containing fines, *Dynamic Geotechnical Testing*, **654**, 246-264.
- Ishihara, K.**, Troncoso, J., Kawase, Y., and Takahashi, Y., 1980. Cyclic strength characteristics of tailings materials, *Soils And Foundations*, **20**, 127-142.
- Ishihara, K.**, Yauda, S., Yokota, K., 1981. Cyclic strength of undisturbed mine tailings, *Proc. Int. Conf. On Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, 53-58.
- Ishihara, K.**, 1995. *Earthquake Geotechnical Engineering Proc. of IS-Tokyo' 95 The First Int. Conf. On Earth. Geo. Eng.*, Rotterdam Balkema.
- Ishihara, K.**, 1996. *Soil Behavior of Earthquake Geotechnics*. Claredon Press, Oxford.
- Kaufman, L.P.**, 1981. Percentage silt content in sands and its effects on liquefaction potential, M.S. Thesis, University of Colorado, Denver
- Koester, J.P. and Tsuchida, T.**, 1988. Earthquake induced liquefaction of fine grained soils: some considerations from Japanese research, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Koester, J.P.**, 1992 Cyclic strength and pore pressure generation characteristics of fine-grained soils, *PhD Thesis*, University of Colorado at Boulder, UMI, Ann Arbor.
- Konrad, J.M. and Wagg, B.T.**, 1993. Undrained cyclic loading of anisotropically consolidated clayey silts, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **119**, 929-947.
- Koseki, J., AnhDan, L.**, 2004, Effects of large number of cyclic loading on deformation characteristics of dense granular materials, *June*, **44.3**, 115-123
- Koseki, J., HongNam, N.**, 2005, Quasi-elastic deformation properties of Toyoura sand in cyclic triaxial and torsional loadings, *Soils and Foundations*, October, **45.5**, 19-38

- Lee, K.L. and Focht, J.A.**, 1975 Strength of clay subjected to cyclic loading, *Marine Geotechnology*, **1**, 165-185
- Lee, K and Dass, W.C.**, 1993. An experimental study of granular packing structure changes under load, *Powders and Grains*, **93**, 17-22.
- Liu, H.C.**, 1992. Liquefaction resistance of soils containing fines, *PhD Thesis*, University of Colorado.
- Matsui, T. Ohara, H. And Ito, T.**, 1980. Cyclic stress strain history and shear characteristics of clay, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, **106**, 1101-1120
- Moses, G.G., Rao, S.N., Rao, P.N.**, 2003, Undrained strength behaviour of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading, *Ocean Engineering*, **30**, 1765-1789.
- Özay, R. ve Erken, A.**, 2003 Killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi, *İTÜ Dergisi*, Şubat 2003, Cilt:2, Sayı:1, s. 55-63
- Özay, R. ve Erken, A.**, 2002 Killerde dinamik yüklerin hacim değişimine etkisi. IX. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, AÜ, Eskişehir, 21-22 Ekim, s. 342-348.
- Özay, R. ve Erken, A.**, 2003 Tekrarlı yük etkisinde kalmış düşük plastisiteli killi zeminlerin davranışı, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26 -30 Mayıs, AT-114
- Pekcan, O.**, 2001, Cyclic behaviour of Adapazarı clayey silts, Yüksek lisans tezi, ODTÜ, Ankara
- Poulos, S.J., Castro, G. And France, J.W.**, 1985. Liquefaction evaluation procedure, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **111**, 772-792
- Polito, C.P. and Martin, J.R.**, 2001. Effects of non-plastic fines on the liquefaction resistance of sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, **127**, 408-415
- Prakash, S. And Sandoval, J.AÇ**, 1992. Liquefaction of low of low plasticity silts. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering.*, **11**, 373-379

- Puri, V.K.**, 1984 Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (silty) soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla UNI, Ann Arbor.
- Sandoval, S.A.**, 1989 Liquefaction and settlement characteristics of silt soils, *PhD Thesis*, University of Missouri-Rolla, UMI, Ann Arbor.
- Sato, T., Yoshida, T. and Koseki, J.**, 2005, Liquefaction properties of Toyoura sand in cyclic torsional shear tests under low confining stress, *Soils and Foundations*, October, **45.5**, 103-113
- Sayao, A. and Vaid, Y.P.**, 1991. A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens, *Soils And Foundations*, **31**, 60-72
- Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer J.**, 1976. Pore water pressure changes during liquefaction, *Journal of Soil Mechanics And Foundation Eng. Div.*, ASCE, **102**, 323-347
- Shahnazari, H. And Towhata, I.**, 2002. Torsion shear tests on cyclic stress-dilatancy relationships of sand, *Soils and Foundations*, **42**, 105-119
- Sherif, M.A., Tien, Y.B. and Pan, Y.W.**, 1983. Liquefaction potential of silty sand, *Soil Engineering Research Report No. 26*, University of Washington College of Engineering, Seattle, Washington.
- Smith, N.**, 2006, Stiffness and cyclic response of clay fine sands, *Proceesings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, October, **159**, 251-268
- Tatsuoka, F., Muramatsu M. And Sasaki T.**, 1982. Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sabds by torsional simple shear test, *Soils and Foundations*, **22**, 55-70
- Tatsuoka, F., Ochi K. Fujii S., an Okamoto, M.**, 1986. Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, **26**, 23-41
- Tatsuoka, F., Sonoda S., ara, K., Fukushima, S. and Pradhan T.B.S.**, 1986. Failure and deformation of sand in torsional shear, *Soils and Foundations*, **26**, 79-97

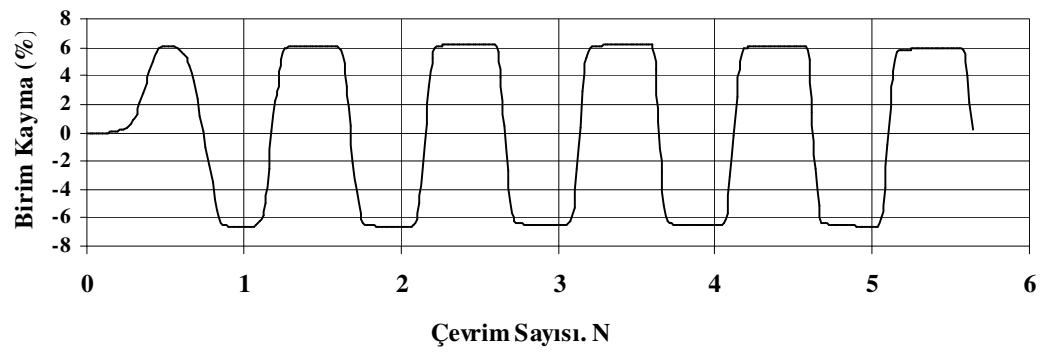
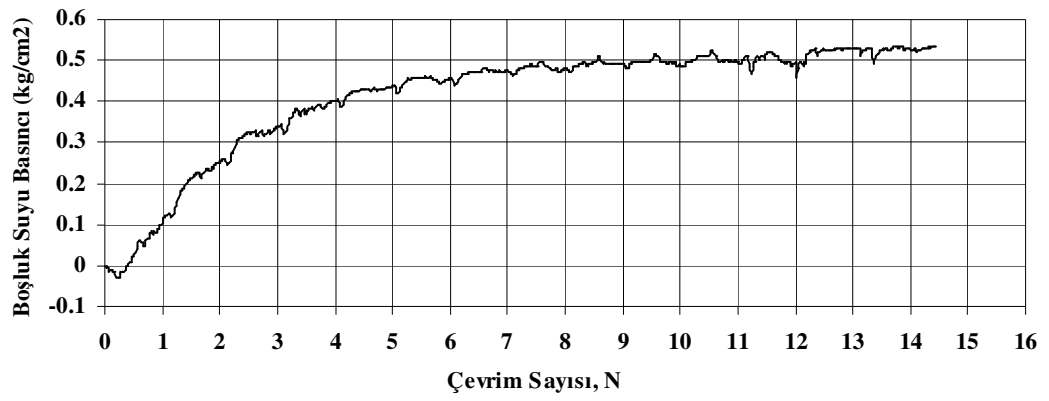
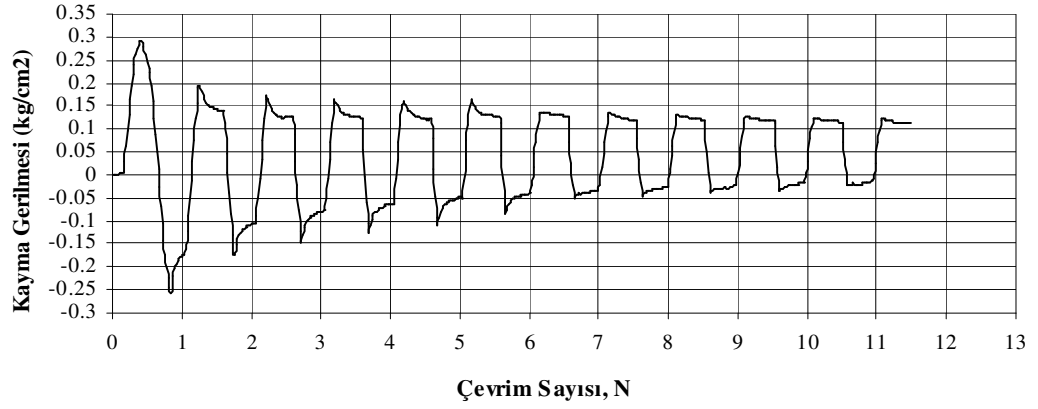
- Terauchi, T., Altun, S., Erken, A. ve Yasuda, S.,** 1998. Burulmalı dinamik deney sistemiyle sıvılaşma deneyleri, VII. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, YTÜ, İstanbul, 22-23 Ekim, s. 584-590.
- Terzaghi, K., Peck, R.B.,** 1948 Soil Mechanics in Engineering practice, John-Wiley and Sons.,
- Thevanayagam, S. and Martin, G.R.,** 2002. Liquefaction in silty soils-screening and remediation issues, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.*, **22**, 1035-1042
- Tunçok, H.,** 2005, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul
- Usaborisut, P., Koike, M., Bahalayodhin, B., Niyamapa, T. and Yoda, A.,** 2001 Cyclic torsional shear loading test for an unsaturated hollowed specimen using Bangkok clayey soil, *Journal of Terramechanics*, **38**, 71-87
- Ülker, B.C.,** 2004, Siltli ve killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul
- Wagg, B.T.,** 1990. Undrained behavior of clay-silt mixtures during cyclic loading, *PhD Thesis*, University of Waterloo, UMI, Ann Arbor.
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.,** 1998. Steady state concept and static liquefaction of silty sands, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **124**, 868-877
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.,** 1999. Experiments and modelling of silty sands susceptible to soil liquefaction, *Mech. Of Cohesive-Frictional Mat.*, **4**, 545-564
- Yamamuro, J.A. and Covert, K.M.,** 2001. Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **127**, 314-324
- Yılmaz, I., Üstünkaya, M.,** 2004 Uncosolidated clays from the inner shore of the Gemlik Gulf in the Marmara Sea (Bursa-Turkey), 12 Mart, *Bull Eng.Geol.Env.*, **63**, 133-139

- Yoshimine, M., Özay R., Sezen A. and Ansal, A.M.,** 1999 Undrained plane strain shear tests on saturated sand using a hollow cylinder torsional shear apparatus, *Soils and Foundations*, **39**, 131-136
- Youd, T.L.,** 1977, Packing changes and liquefaction susceptibility, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **103**, 918-922
- Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K.,** 2007, Explanation of cyclic mobility of soils: aproach by stress-induced anisotrophy, *Japanese Geotechnical Society*, August, **47.4**, 635-647
- Zhu, R, and Law, K.T.,** 1988, Liquefaction potential of silt, *Proceedings of Ninth Int. Conf. On Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, pp.237-242

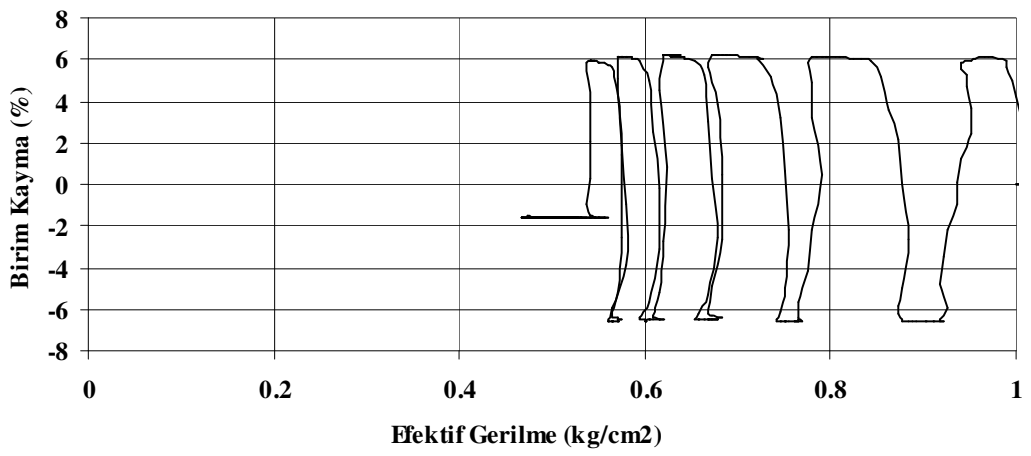
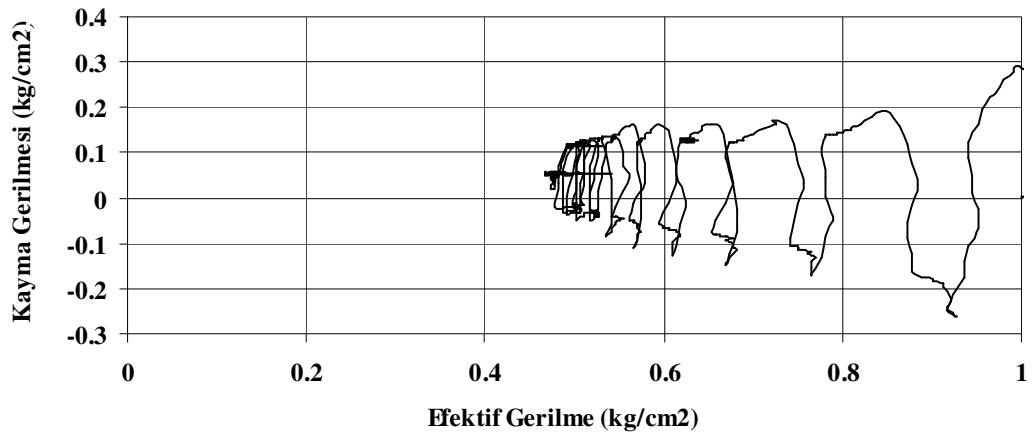
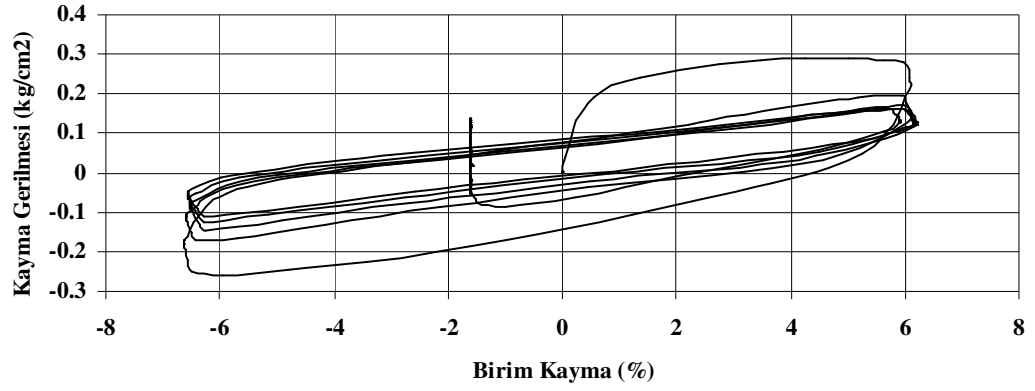
EKLER

EKLER A. YAPILAN DENEYLERİN GRAFİKLERİ

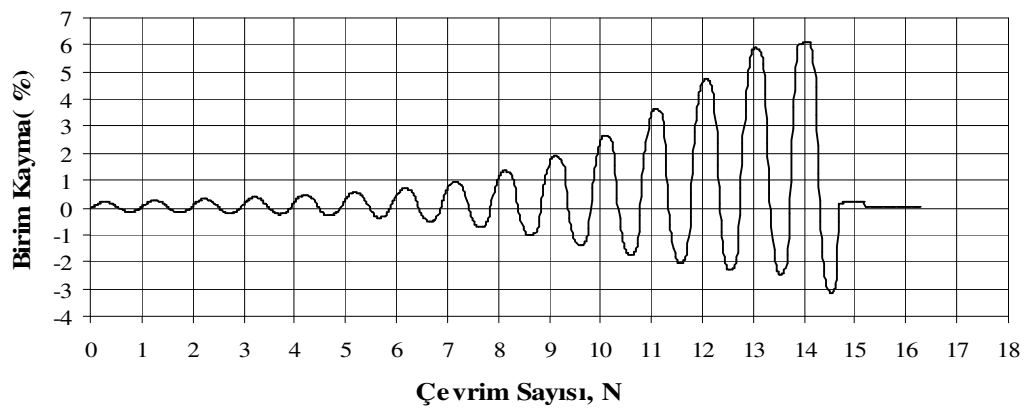
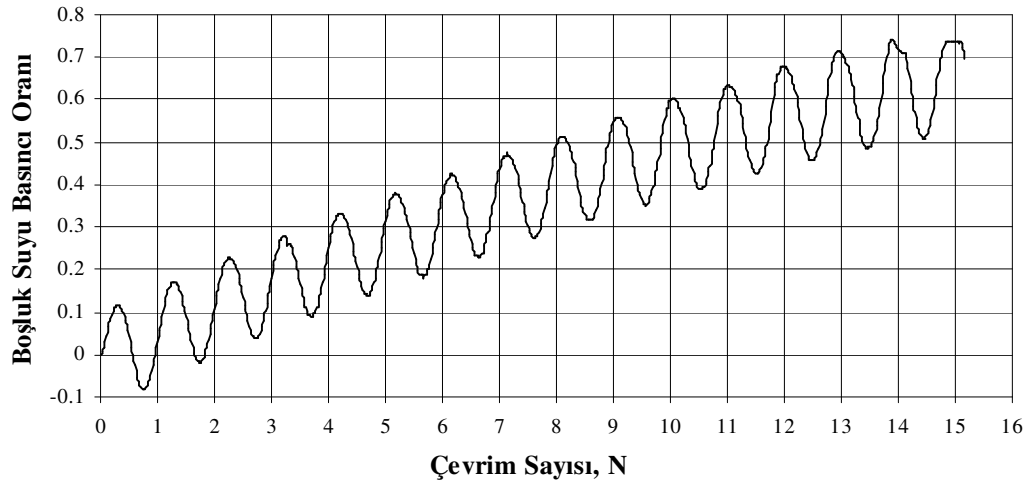
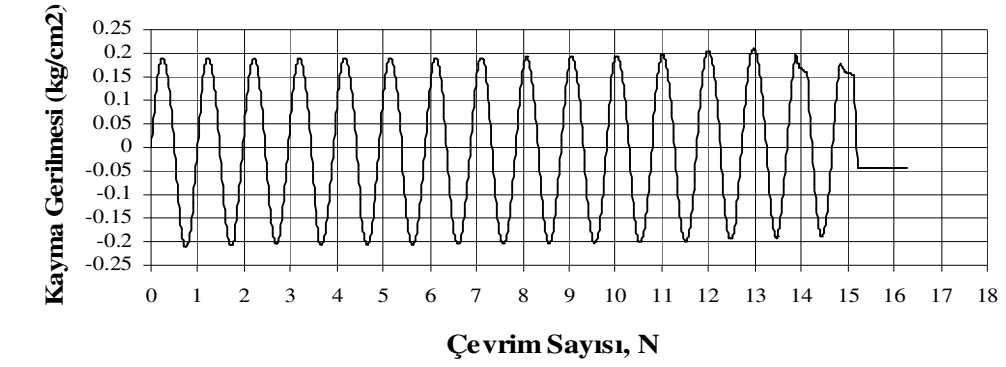
EK A. YAPILAN DENEYLERİN GRAFİKLERİ



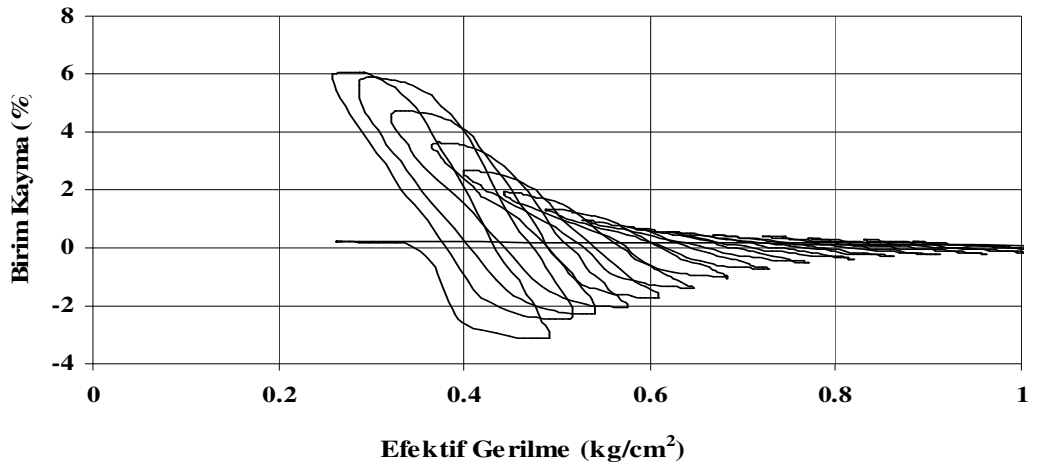
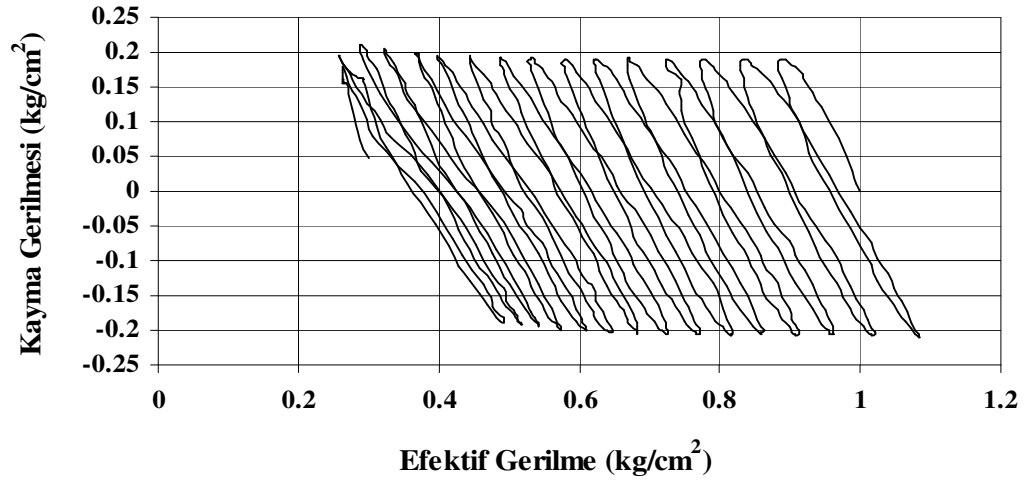
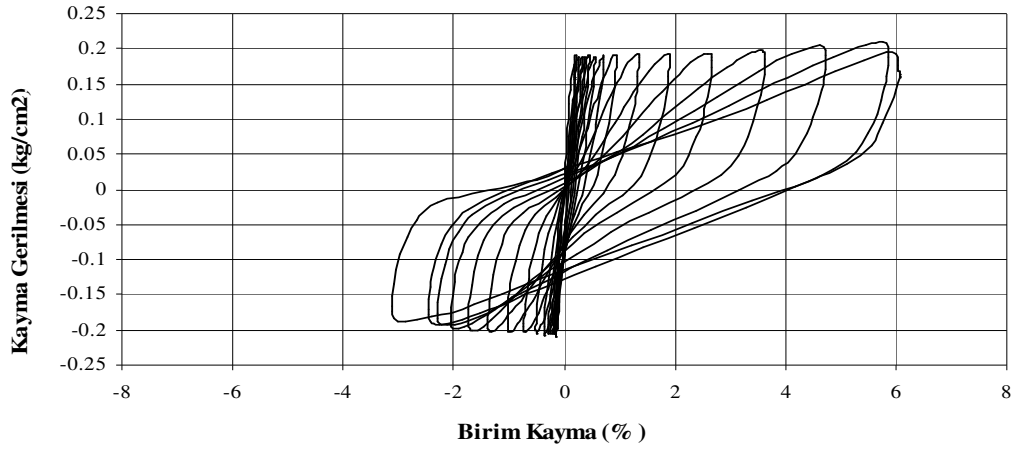
Şekil A.1 D1 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi



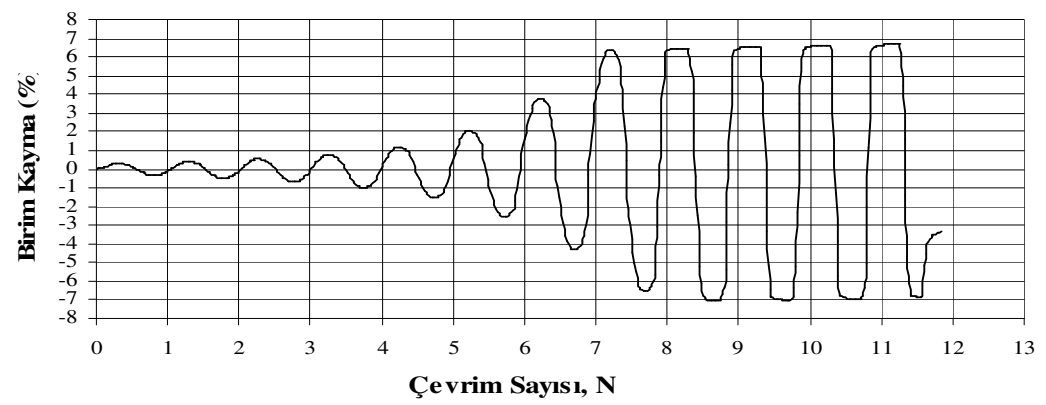
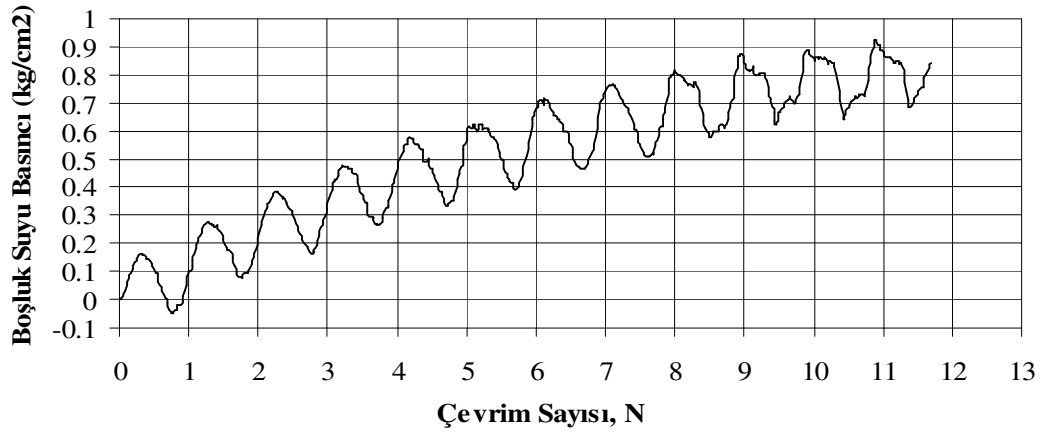
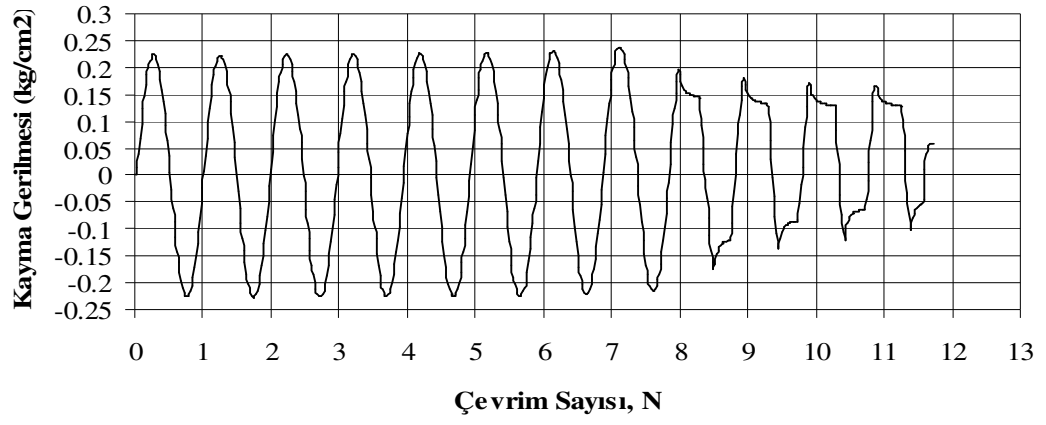
Şekil A.2 D1 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



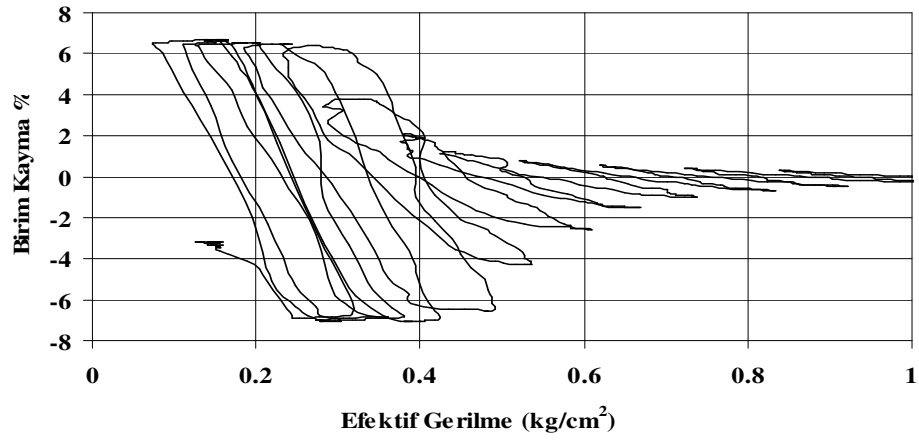
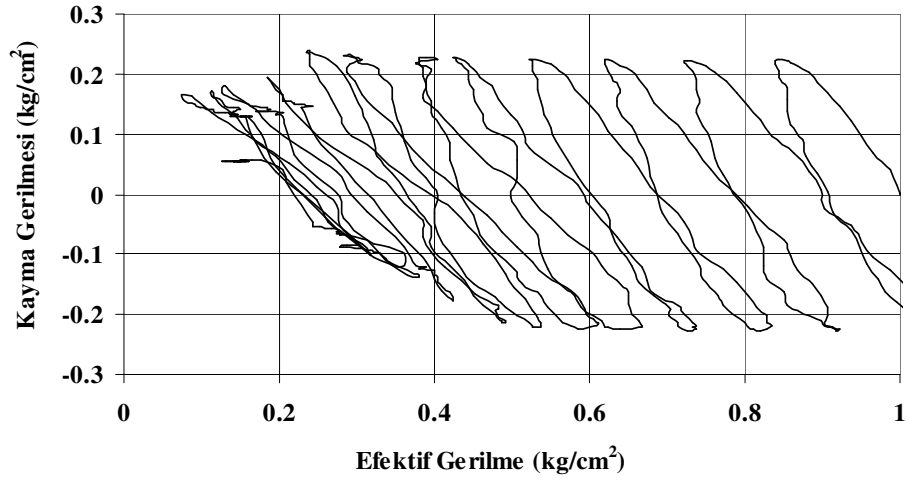
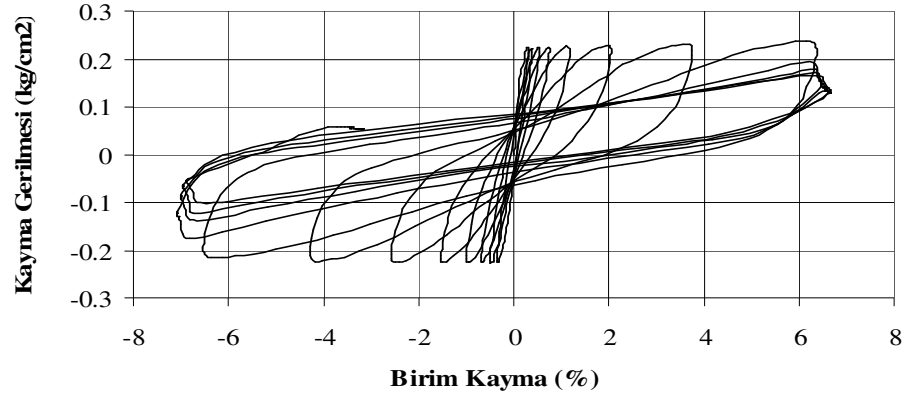
Şekil A.3 D2 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi



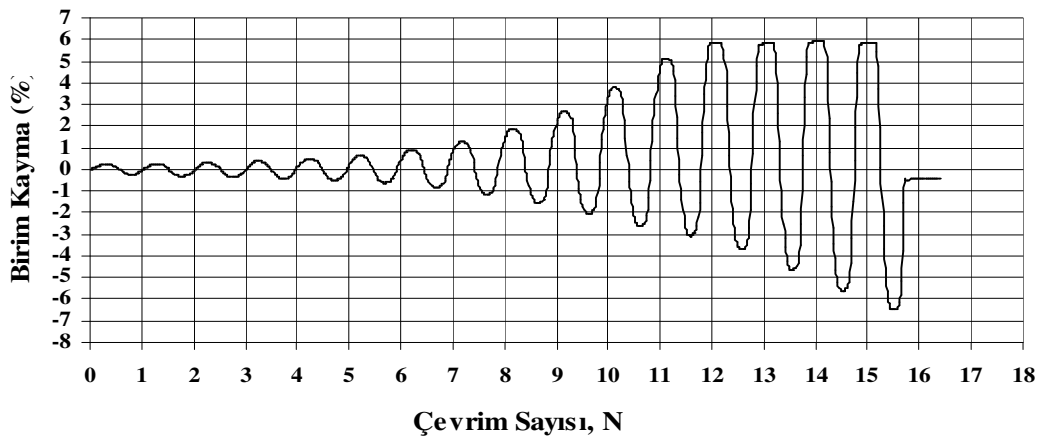
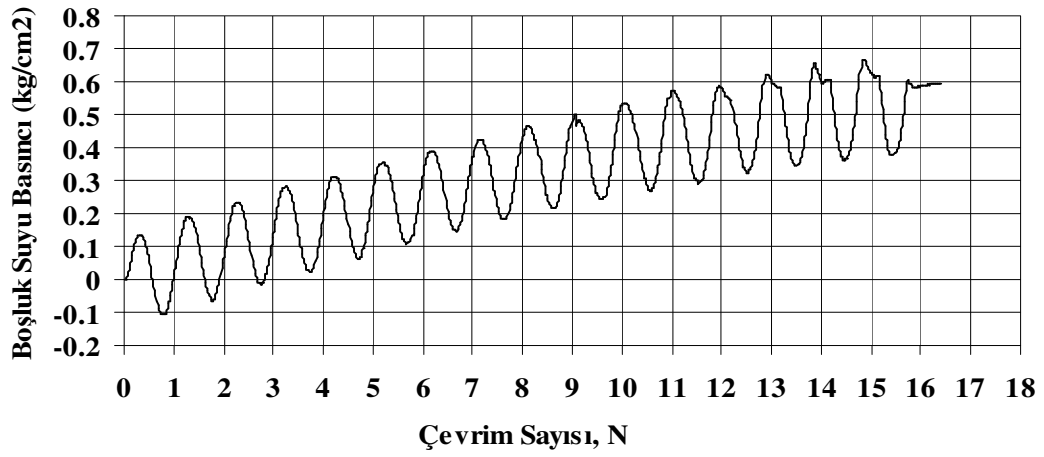
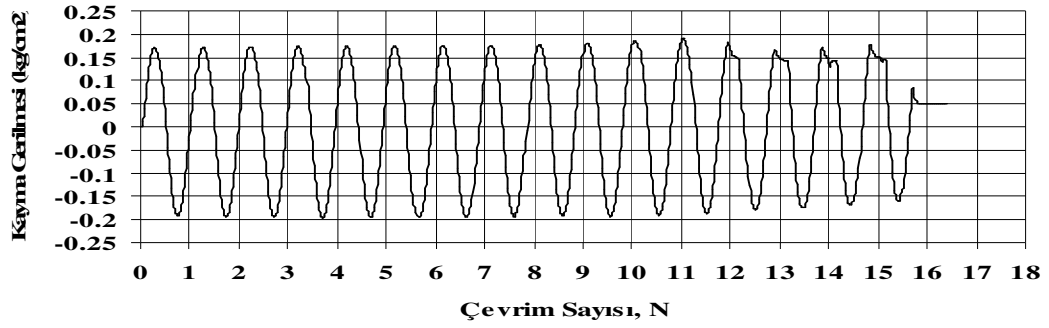
Şekil A.4 D2 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



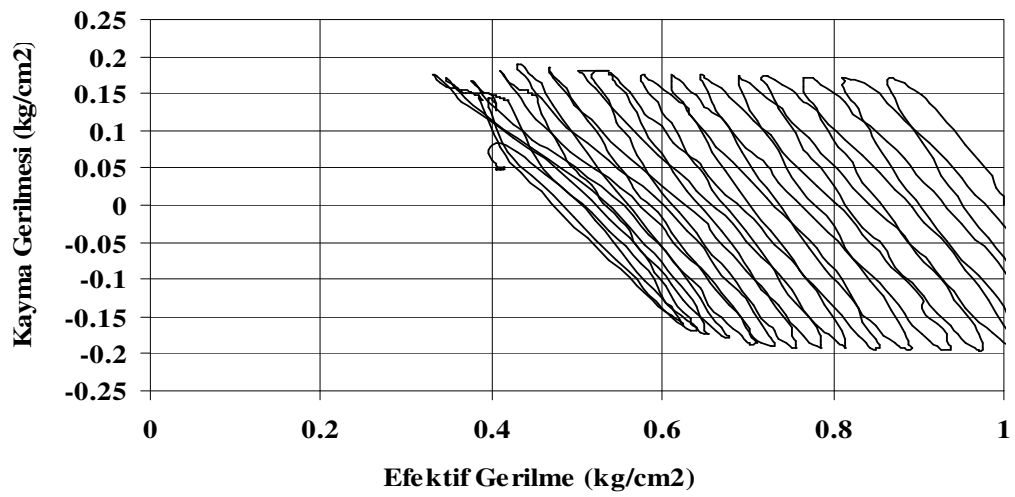
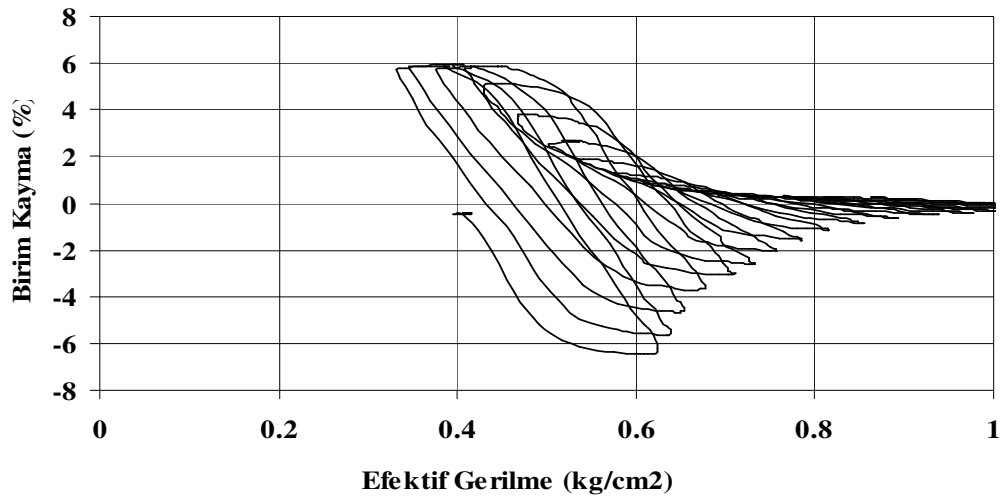
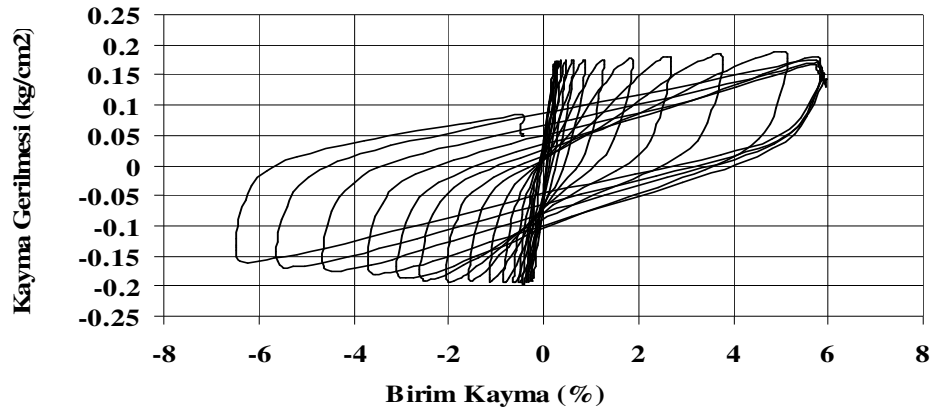
Şekil A.5 D3 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi



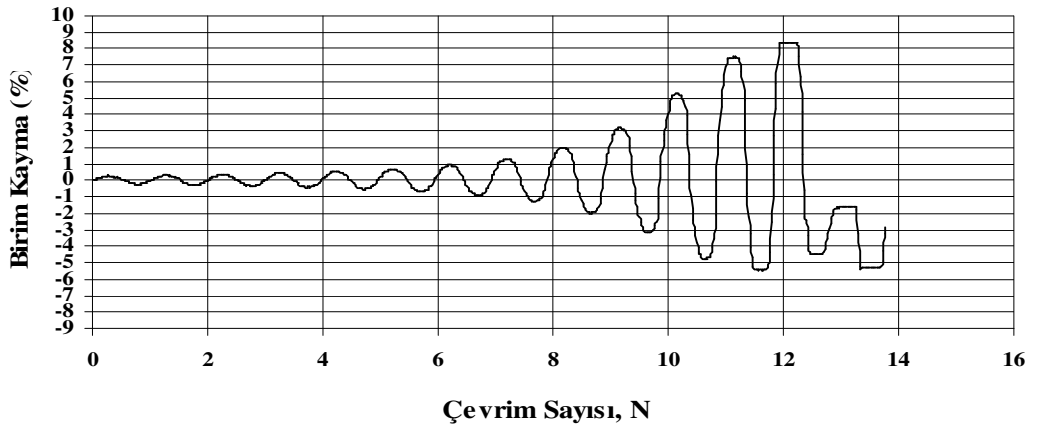
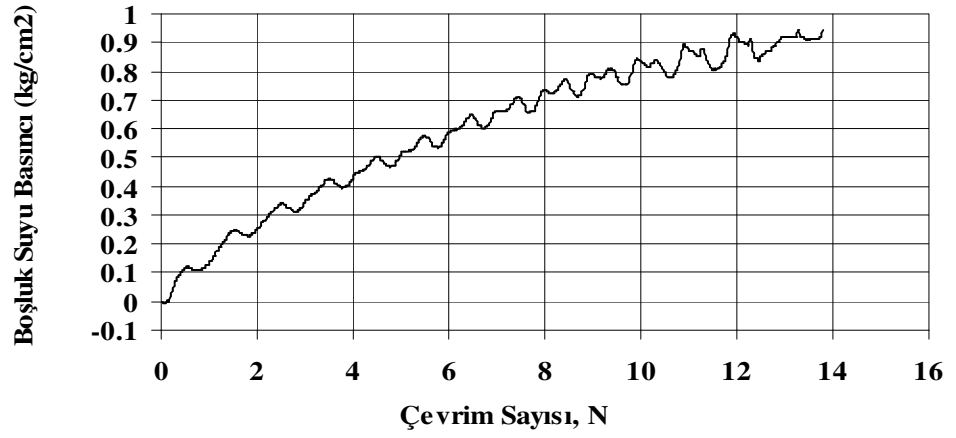
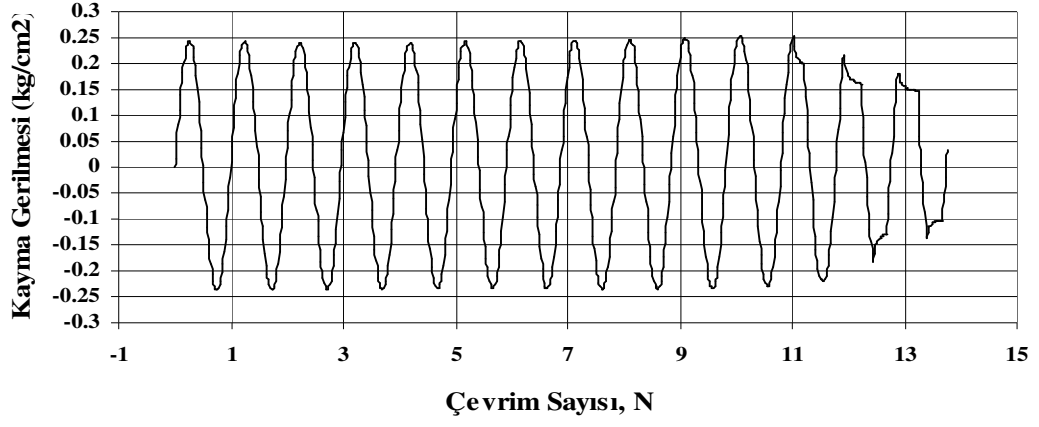
Şekil A.6 D3 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



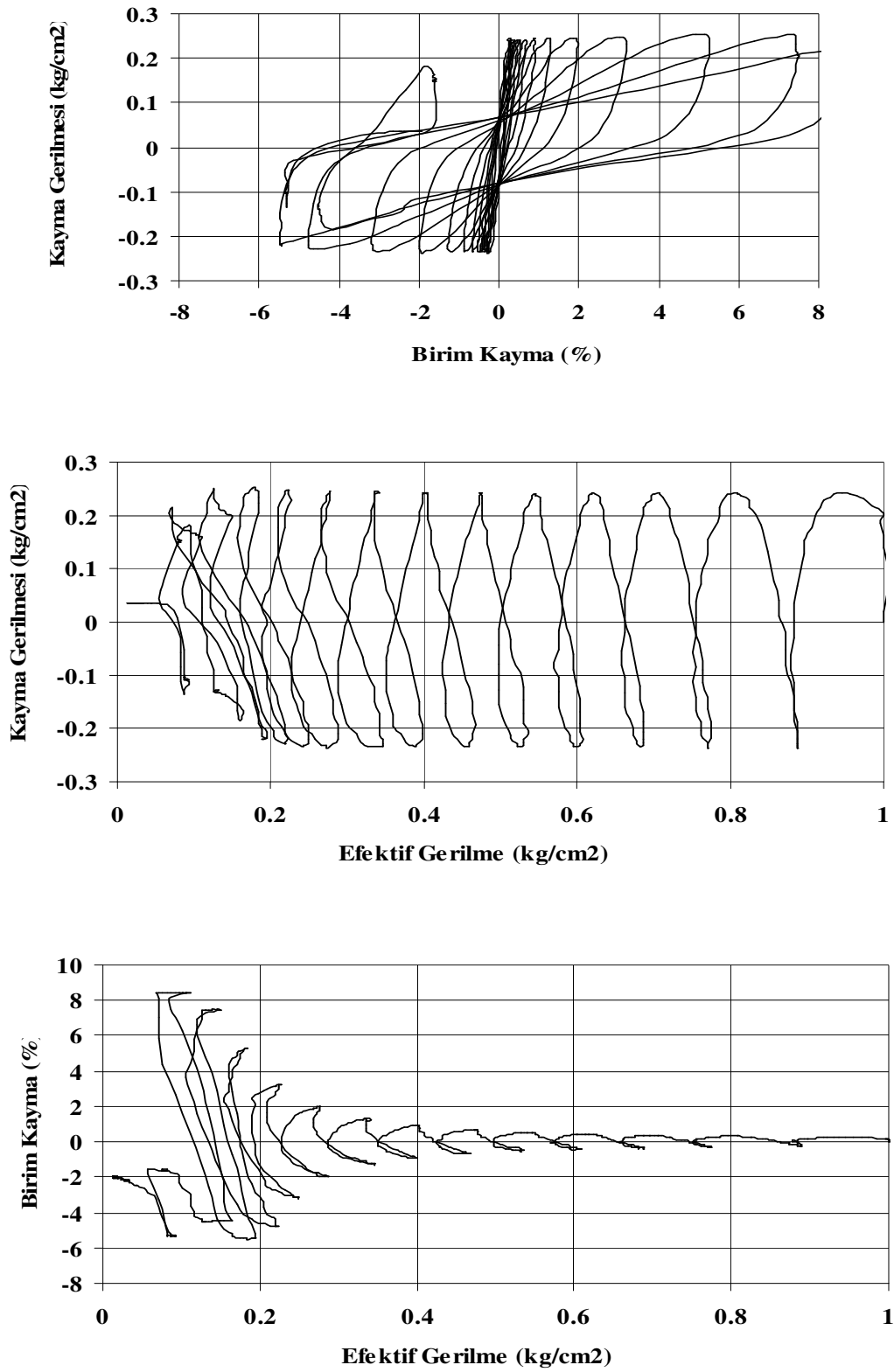
Şekil A.7 D4 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi



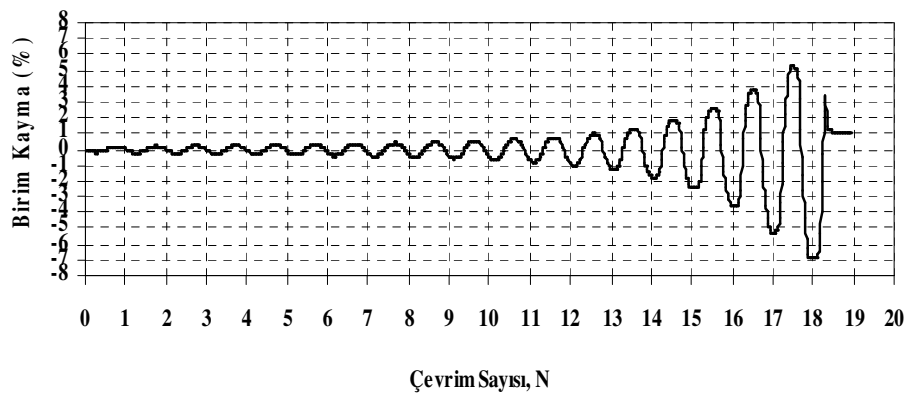
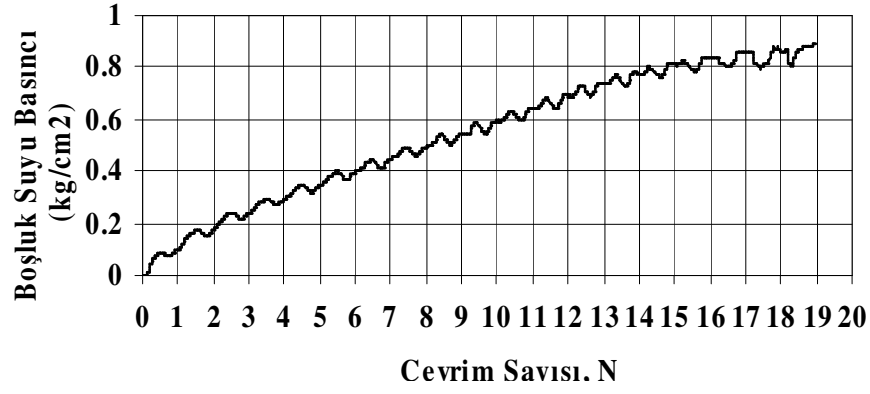
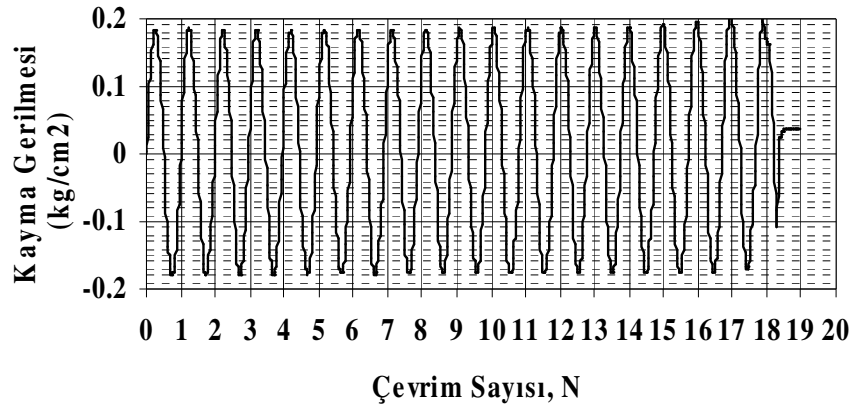
Şekil A.8 D4 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



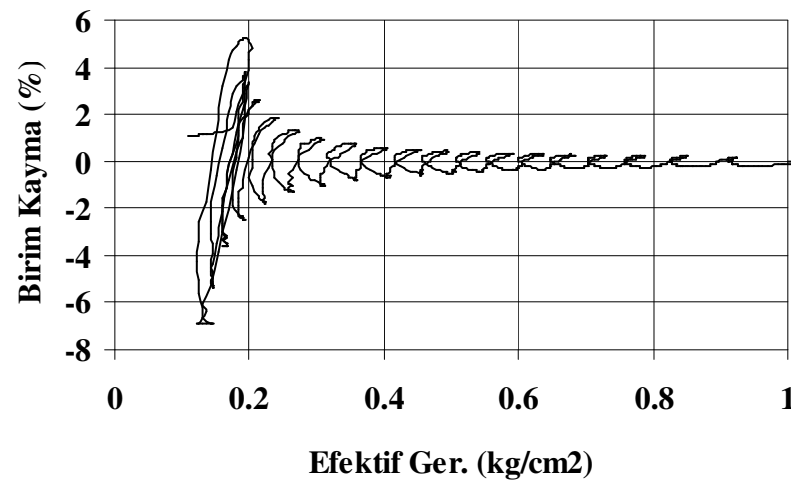
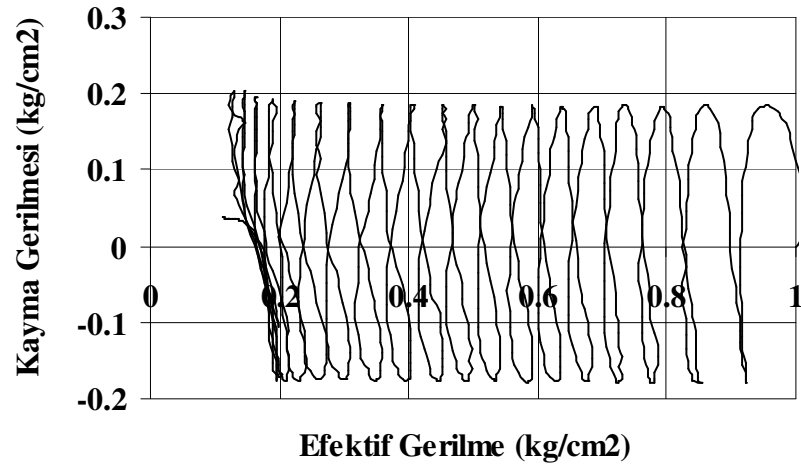
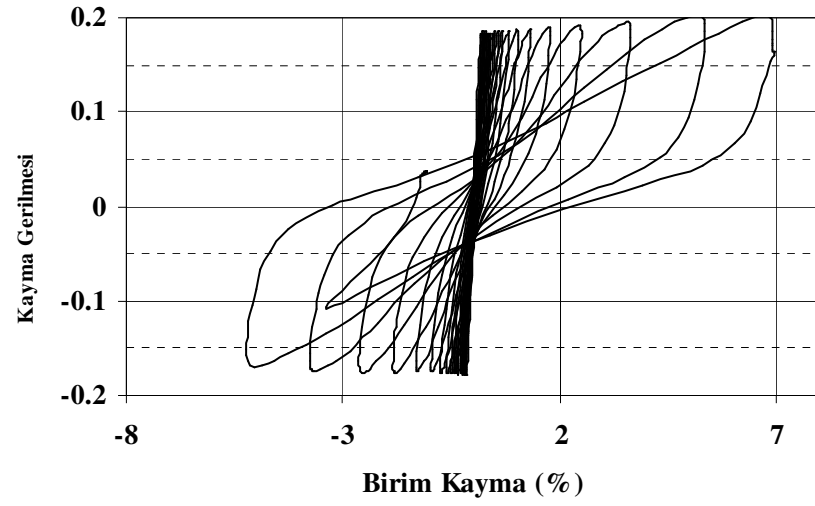
Şekil A.9 D5 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi



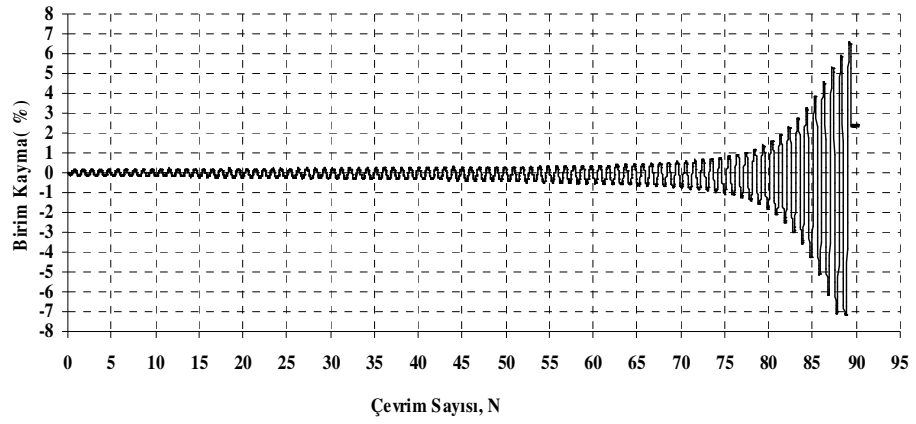
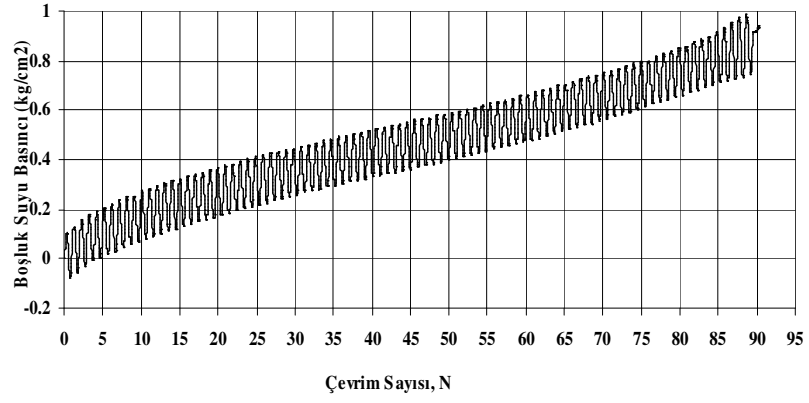
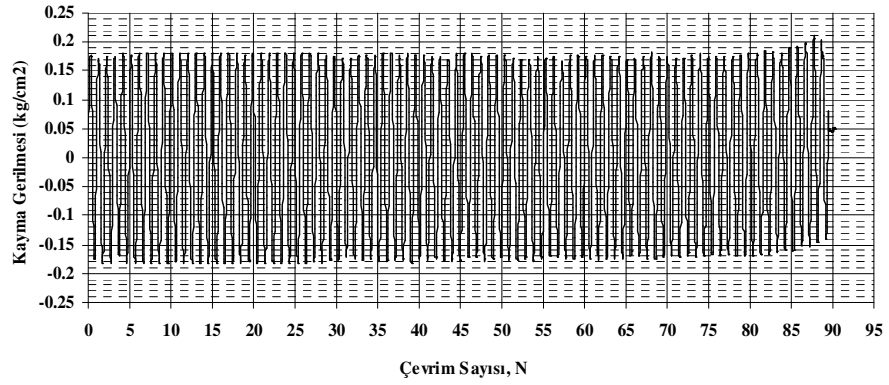
Şekil A.10 D5 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



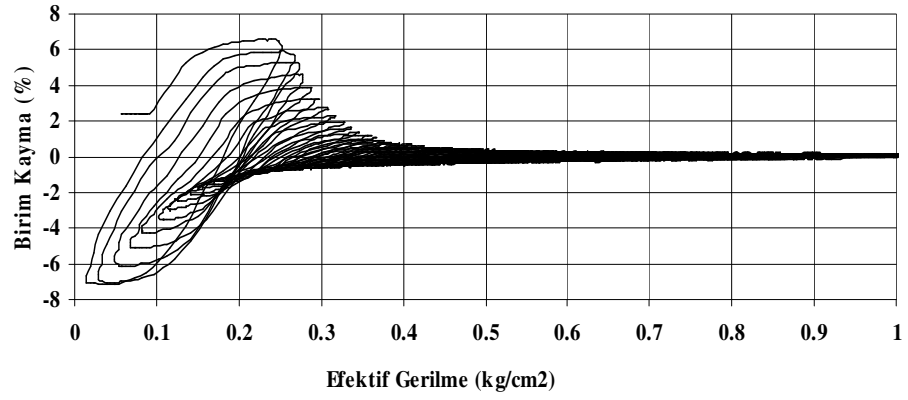
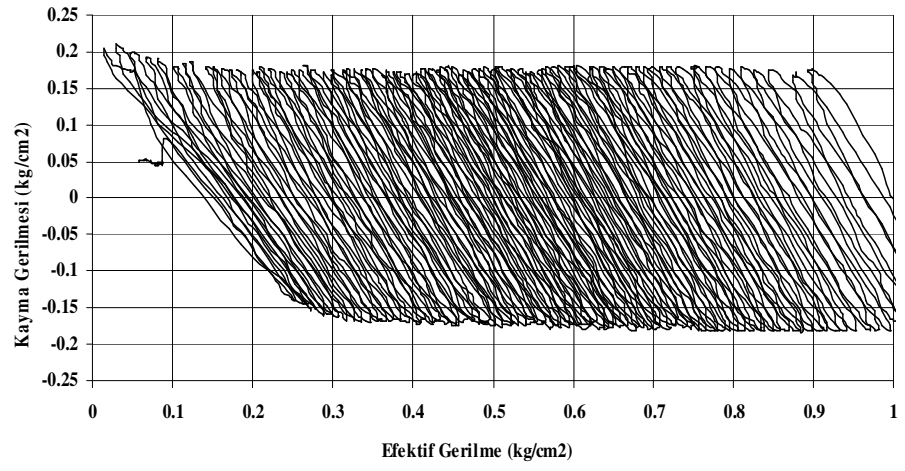
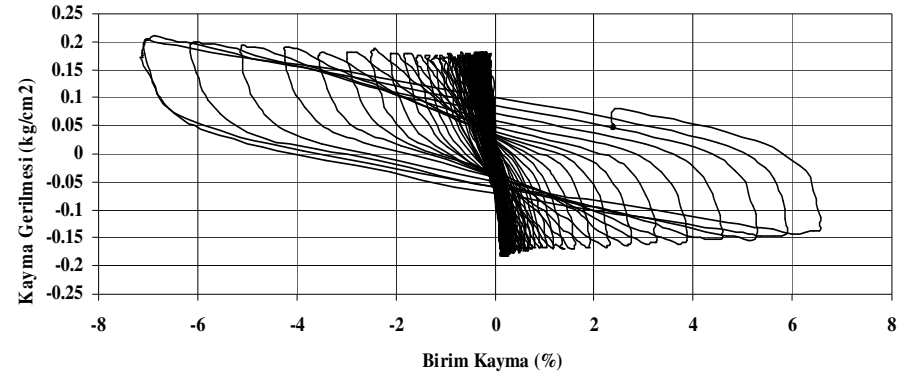
Şekil A.11 D6 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi



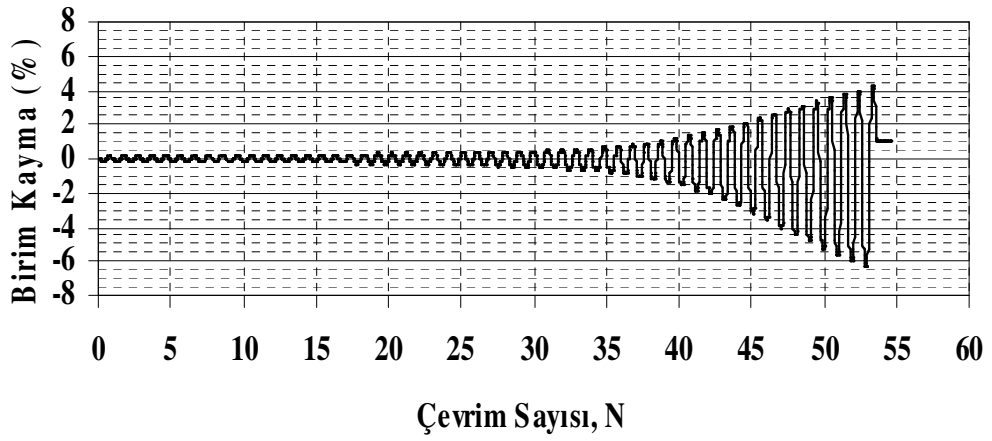
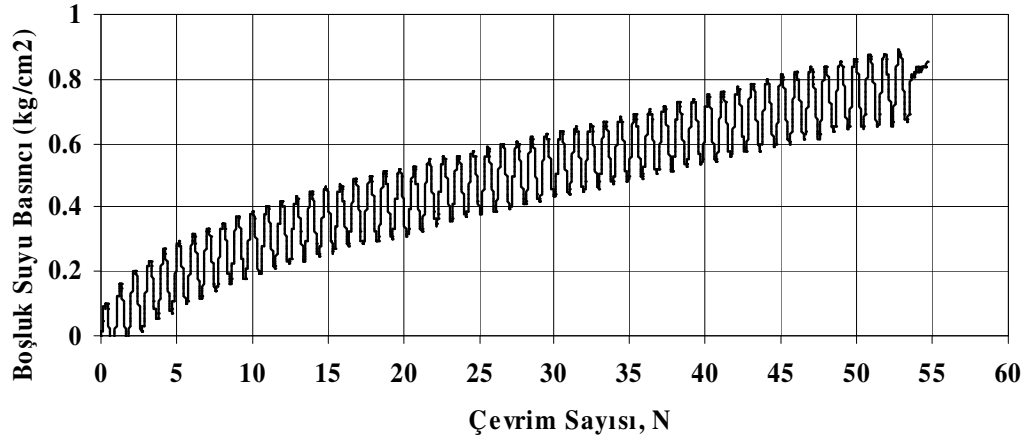
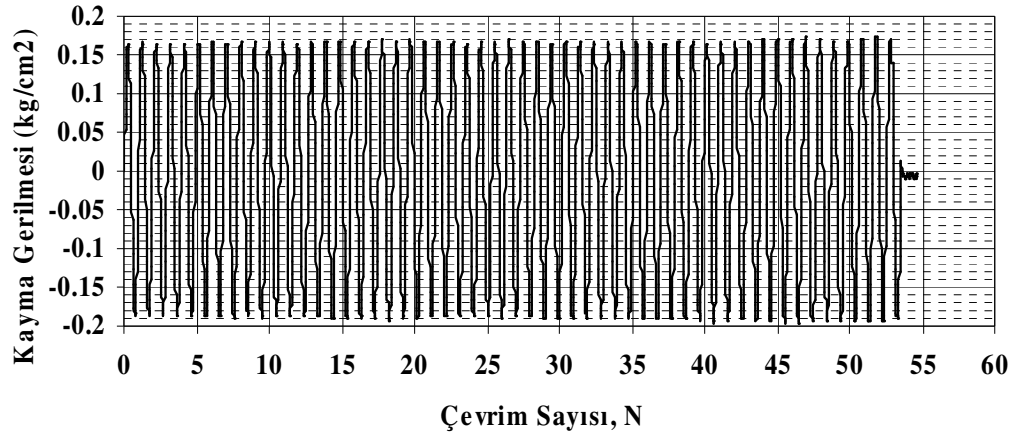
Şekil A.12 D6 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



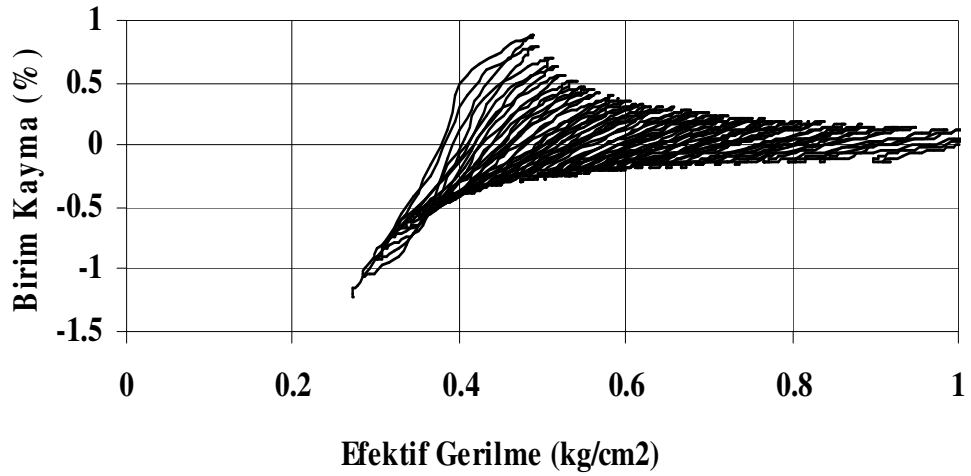
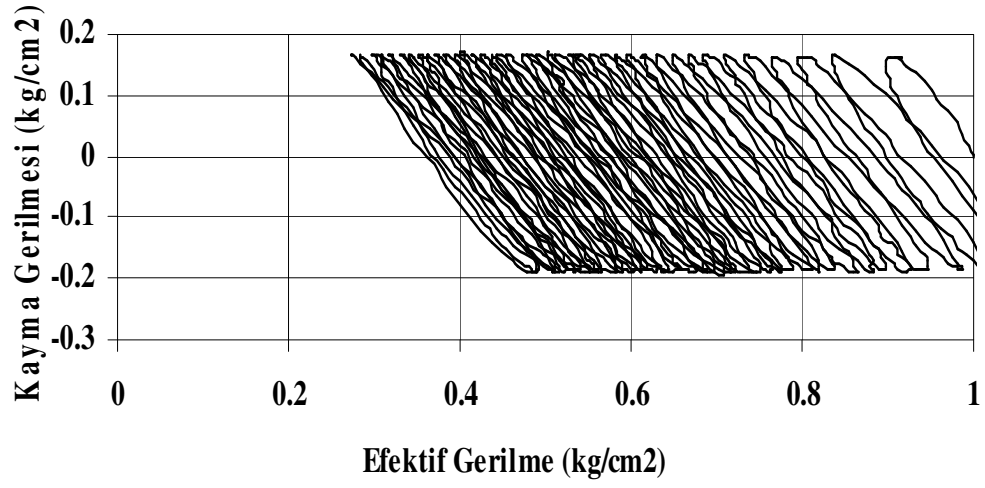
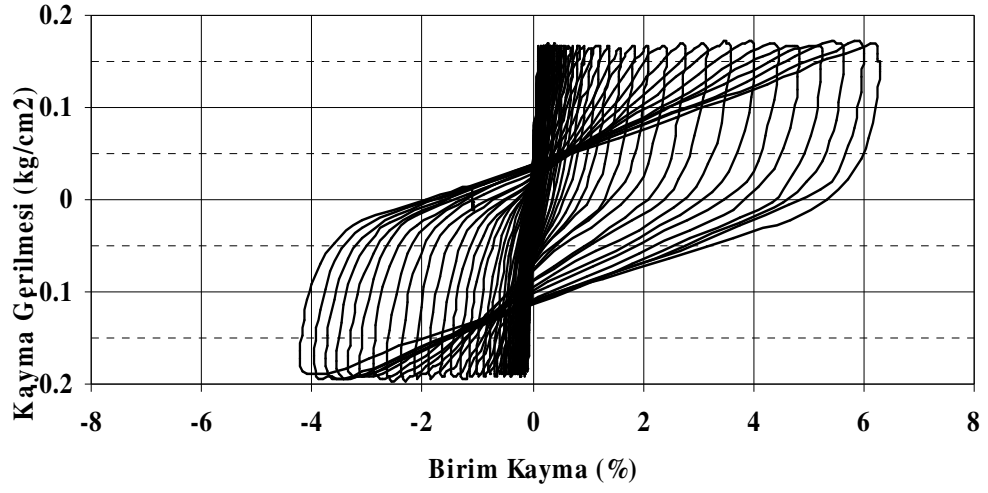
Şekil A.13 D7 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayılarıyla olan değişimi



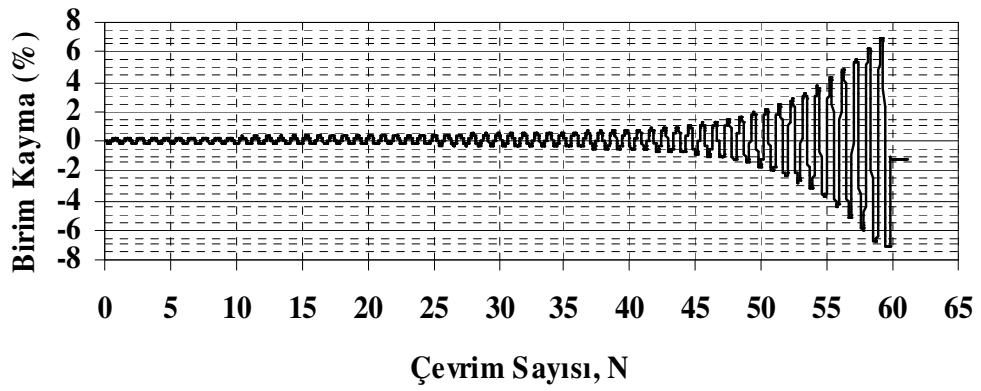
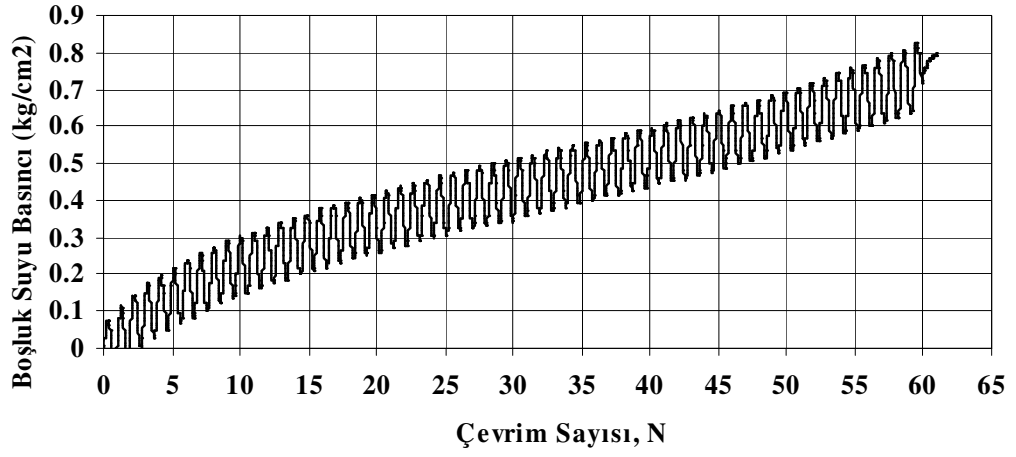
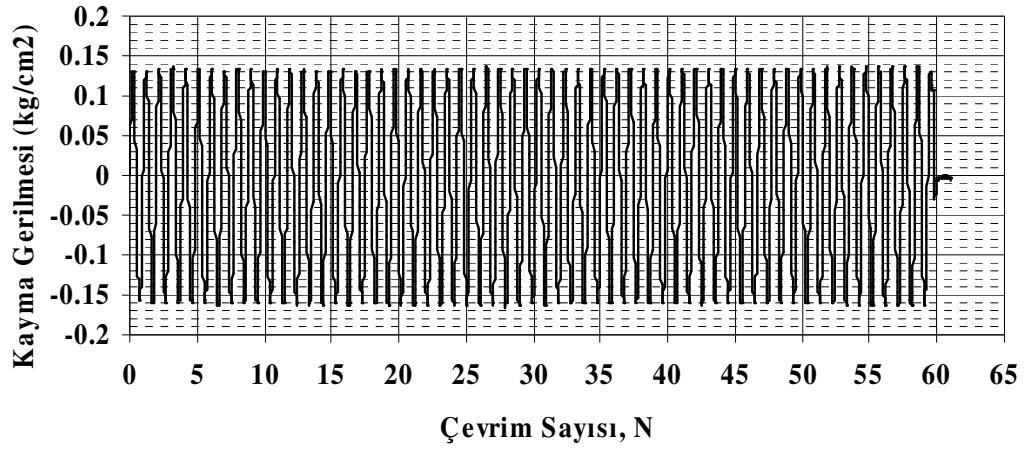
Şekil A.14 D7 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



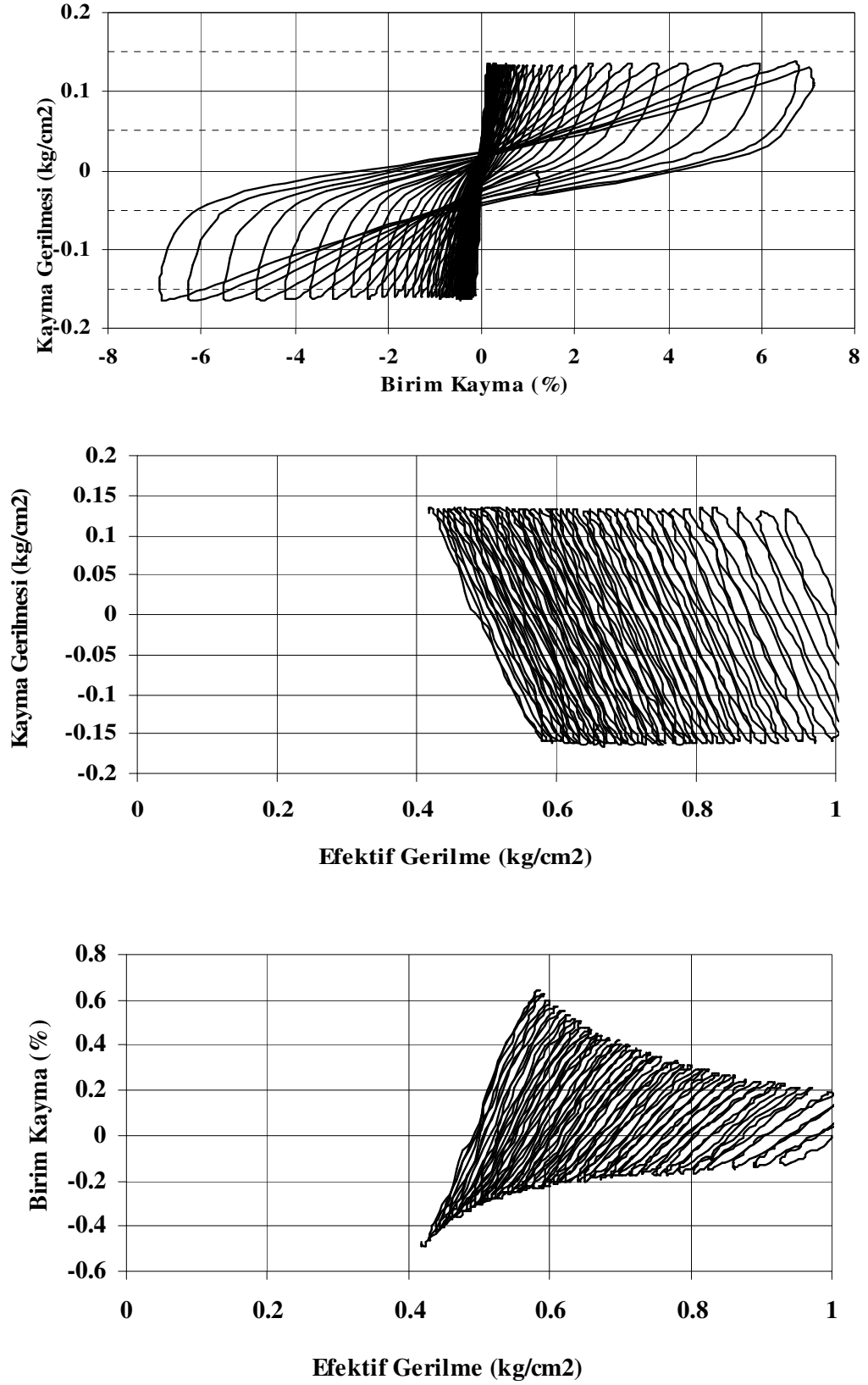
Şekil A.15 D8 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayıları ile olan değişimi



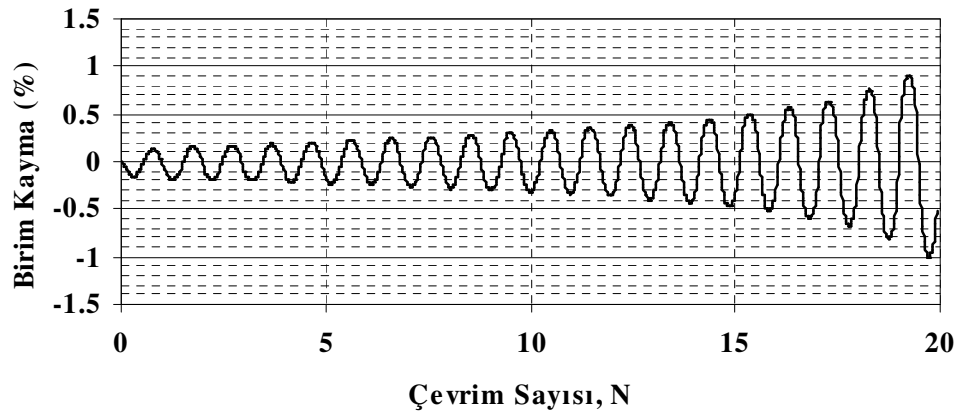
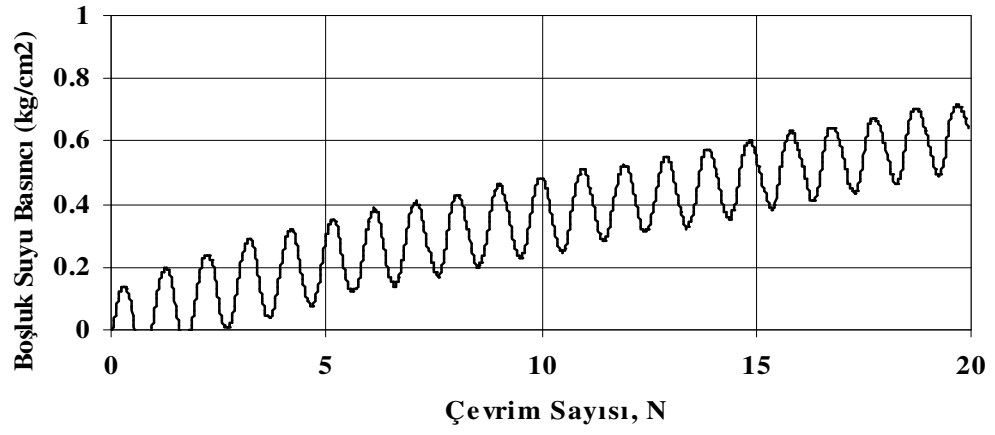
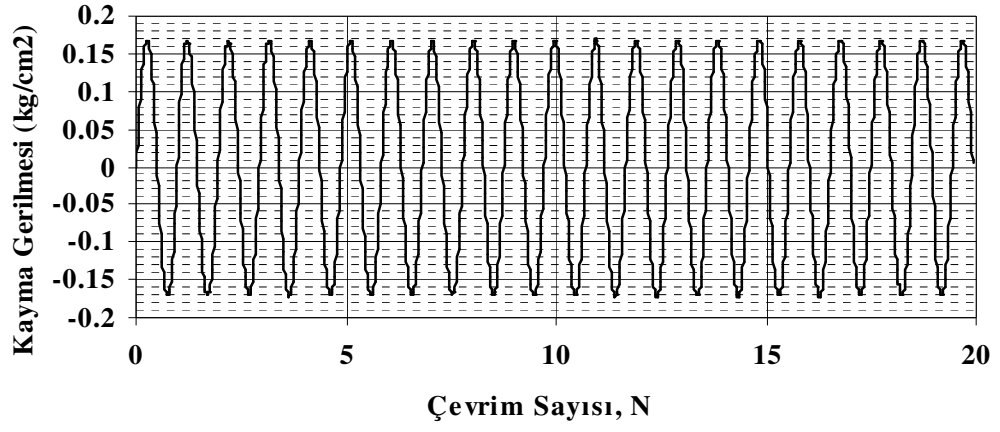
Şekil A.16 D8 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



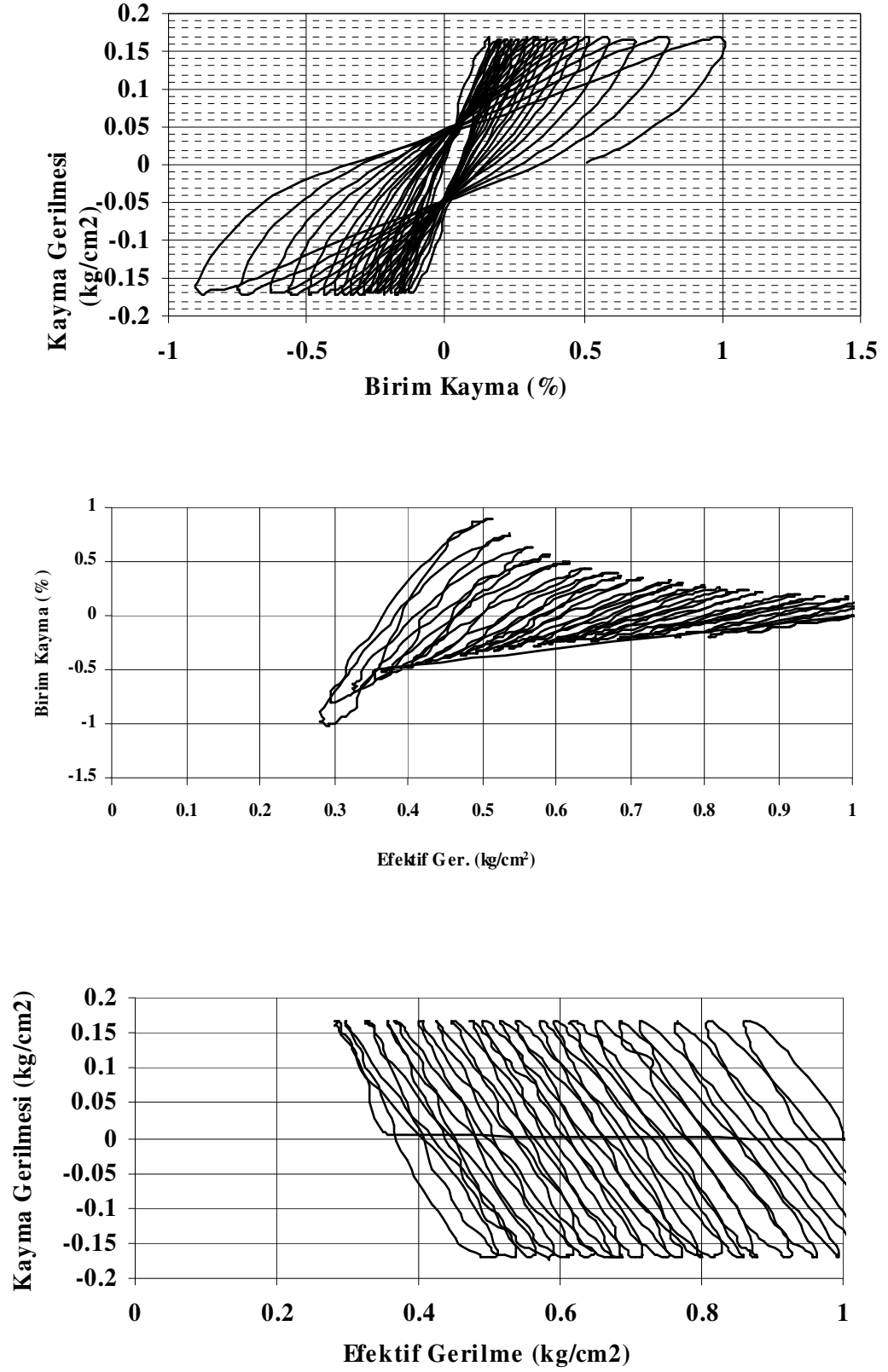
Şekil A.17 D9 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayıları ile olan değişimi



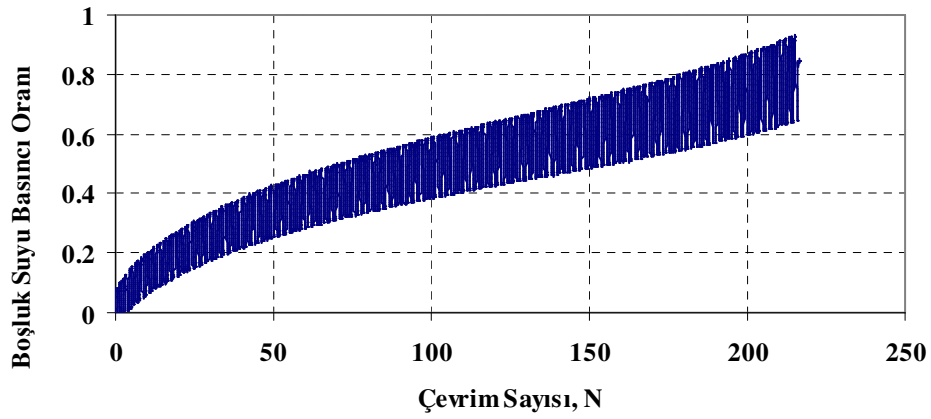
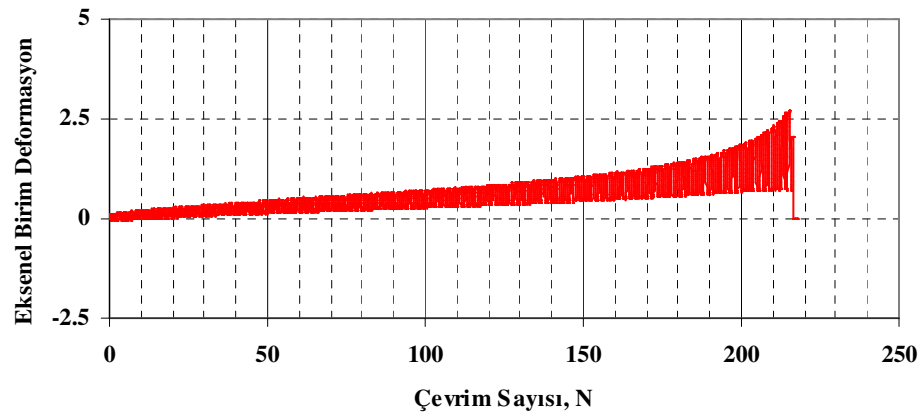
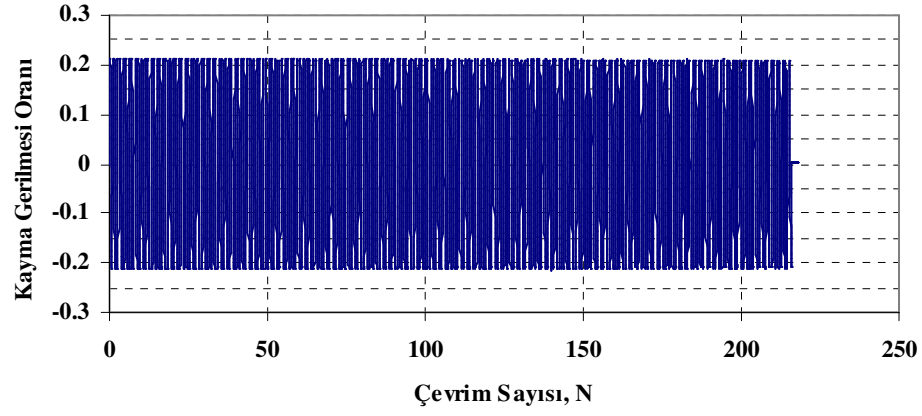
Şekil A.18 D9 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



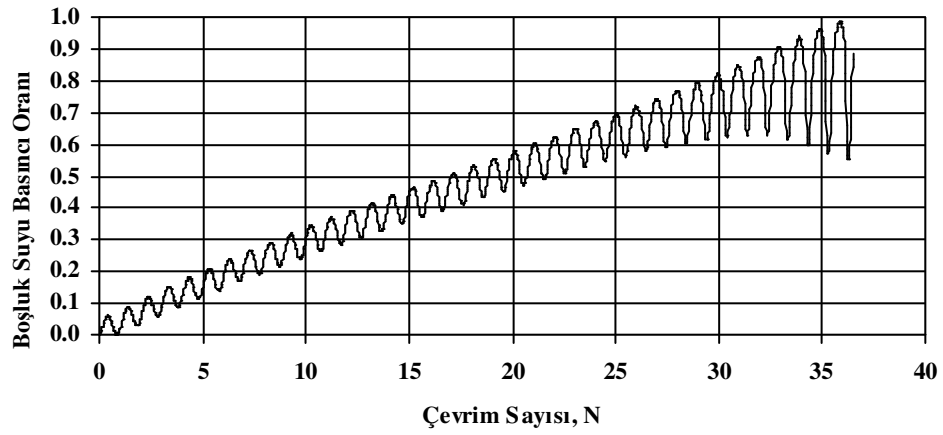
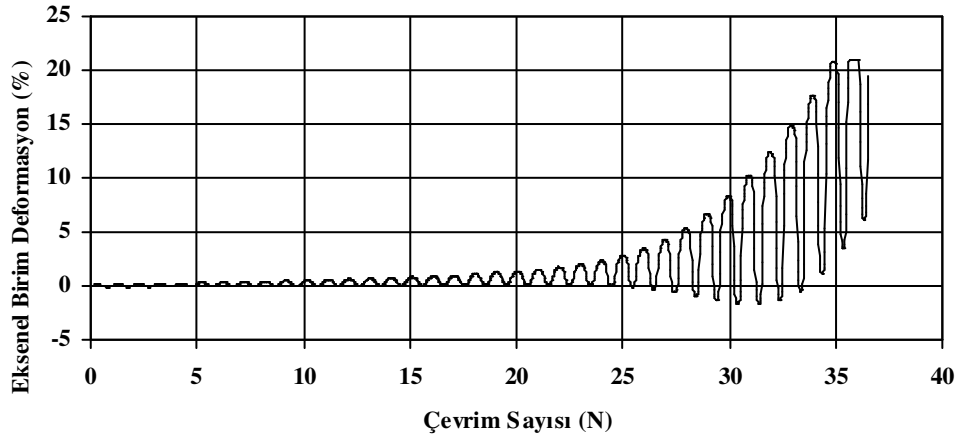
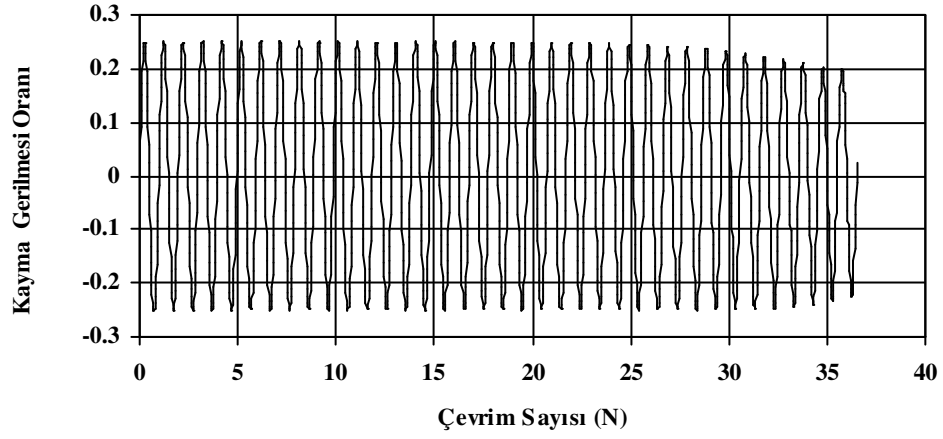
Şekil A.19 D10 nolu deneyde kayma gerilmesinin, birim kaymaların ve boşluk suyu basıncının çevrim sayıları ile olan değişimi



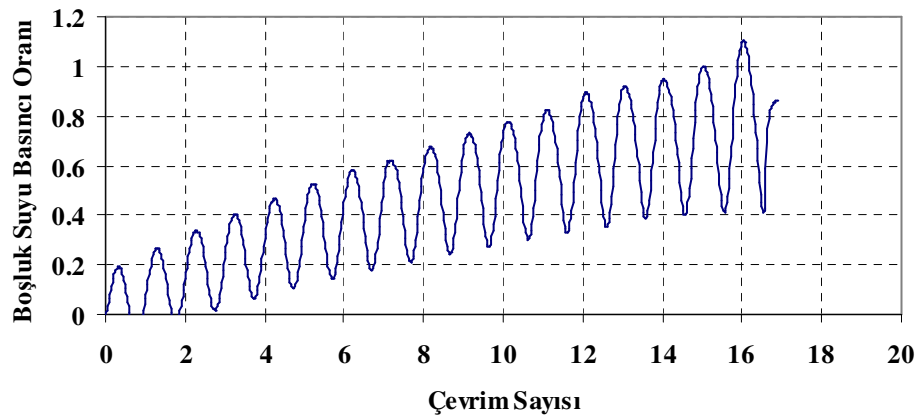
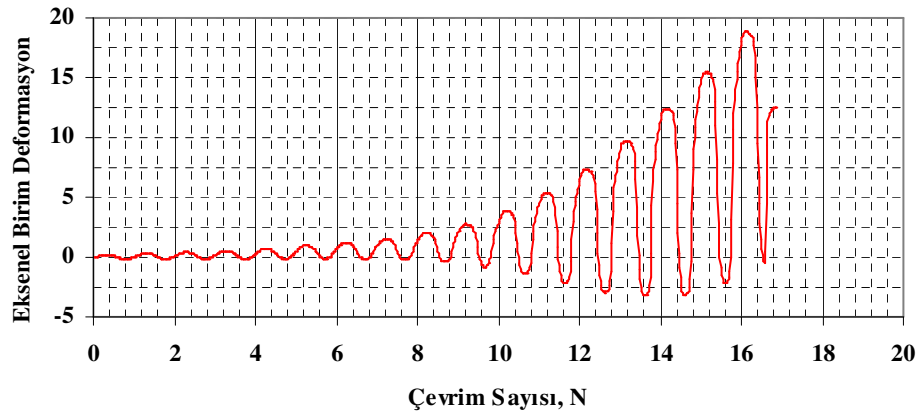
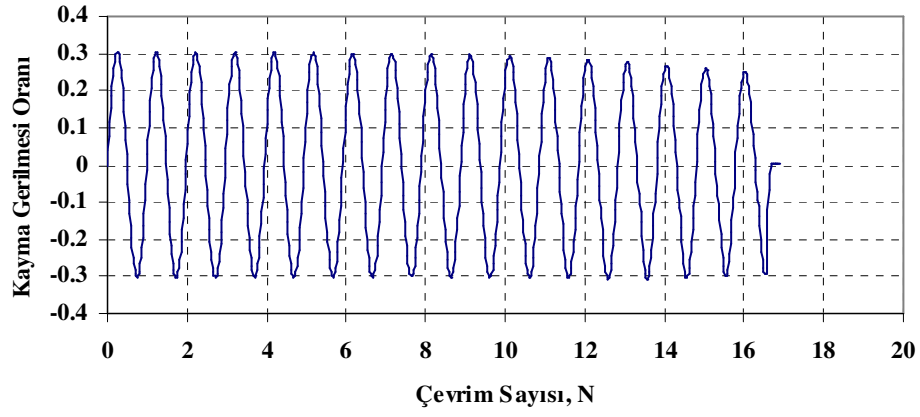
Şekil A.20 D10 nolu deneyde kayma gerilmesi-birim kayma ilişkisi ve birim kaymanın ve kayma gerilmesinin efektif gerilmeyle değişimi



Şekil A.21 UD1 nolu deneyde kayma gerilmesi, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi



Şekil A.22 UD2 nolu deneyde kayma gerilmesi, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi



Şekil A.23 UD3 nolu deneyde kayma gerilmesi, eksenel birim deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi

EK B. DENEY NUMUNELERİNİN FOTOĞRAFLARI



Şekil B.1 D2 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.2 D3 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.3 D4 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.4 D5 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.5 D6 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.6 D7 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.7 D8 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.8 D9 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.9 UDE1 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.10 UDE2 numunesinin fotoğrafı



Şekil B.11 UDE3 numunesinin fotoğrafı

ÖZGEÇMİŞ

Murat Özmen,

2 Şubat 1979 yılında Adapazarı'nda doğdu. 1996 yılında Mehmet Çelikel Lisesi'ni bitirdi. 1998 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2004 senesinde mezun oldu. 2004 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem Mühendisliği Programı'na kabul edilmesinin ardından 6 ay hazırlık eğitimi gördü. 2005 yılında Yüksek Lisans eğitimin başladı.