İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKRARLI YÜKLEMELER ETKİSİ ALTINDA ZEMİNLERİN KONSOLİDASYONU

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Hayreddin ERŞAN

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

ARALIK 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKRARLI YÜKLEMELER ETKİSİ ALTINDA ZEMİNLERİN KONSOLİDASYONU

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Hayreddin ERŞAN
(501972011)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Ekim 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Aralık 2005

Tez Danışmanı :	**Doç.Dr. Hüseyin YILDIRIM**
Diğer Jüri Üyeleri	**Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü.)**
	Prof.Dr. Atilla ANSAL (B.Ü.)
	Prof.Dr. Erol GÜLER (B.Ü.)
	Doç.Dr. Ayfer ERKEN (İ.T.Ü.)

ARALIK 2005

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum çalışmanın her aşamasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hüseyin YILDIRIM, katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Ayfer ERKEN, Dr. Atila SEZEN, Dr. Süha AKSOY, Yük. Müh. Zülküf KAYA, Yük. Müh. Gökhan ÇEVİKBİLEN ve Yük. Müh. Bahadır BOZ ile Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Laboratuvarının tüm çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca öğrenim hayatımın her döneminde maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen çok değerli aileme ve fedakarlıklarından dolayı eşime ve kızıma sonsuz teşekkür ederim.

ARALIK, 2005 Hayreddin ERŞAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v

TABLO LİSTESİ vi

ŞEKİL LİSTESİ vii

SEMBOL LİSTESİ xvii

ÖZET xix

SUMMARY xxiii

1. GİRİŞ 1

2. TEKRARLI YÜKLER ALTINDA SIKIŞMA VE KONSOLİDASYON 3
2.1. Giriş 3
2.2. Oturma Problemlerinin Sınıflandırılması 6
2.3. Efektif Gerilme Değişiminden Kaynaklanan Bir Boyutlu Oturma 9
2.3.1. Trafik yüklerinden kaynaklanan oturmalar 9
2.3.2. Yeraltı su seviyesindeki mevsimsel değişimden kaynaklanan oturmalar 11
2.3.3. Yüksek frekanstaki hareketli yük değişiminden kaynaklanan oturmalar 12
2.4. Kısa Süreli Tekrarlı Yük Altındaki İki veya Üç Boyutlu Oturmalar 12
2.4.1. Depremden kaynaklanan tekrarlı yük etkisindeki oturmalar 12
2.5. Uzun Süreli Tekrarlı Yükten Oluşan İki veya Üç Boyutlu Oturma 15
2.5.1. Trafik kaynaklı tekrarlı yük etkisindeki iki veya üç boyutlu oturmalar 15
2.5.1.1. Trafikten kaynaklanan tekrarlı yük etkisinde dolgulardaki oturmalar 15
2.5.1.2. Trafik kaynaklı tekrarlı yük etkisinde yumuşak zeminlerin oturması 16
2.5.2. Okyanus dalgalarından oluşan tekrarlı yükten kaynaklanan oturmalar 16
2.6. Tekrarlı Yükler Altında Yapı Temelinin Davranışı 20
2.7. Tekrarlı Yükler Altındaki Zeminin Temel Davranışı 21
2.8. Kayma Deformasyonu ve Boşluk Suyu Basınçlarının Oluşumunu Etkileyen Faktörler 23
2.8.1. Çevrim sayısının etkisi 25
2.8.2. Gerilme durumlarının etkisi 27
2.8.3. Tekrarlı kayma gerilmesi seviyesinin etkisi 31
2.8.4. Aşırı konsolidasyon oranının etkisi 32

2.9. Uzun Süreli Drenajsız Tekrarlı Yükler Altında Zeminin Oturması 32
2.10. Normal Konsolide Killerde Tekrarlı Yükleme Sonrası Konsolidasyon Oturması 34
2.11. Aşırı Konsolide Killerde Tekrarlı Yükleme Sonrası Konsolidasyon Oturması 40
2.12. Tekrarlı Yükleme ve Drenaj Çevrimlerinin Kayma Mukavemetine Etkisi 44
2.13. Sonuç 50

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN ZEMİN VE DENEY SİSTEMLERİ 52
3.1. Giriş 52
3.2. Basit Kesme Deney Tekniği 52
3.2.1. Basit kesme deney sisteminde gerilmeler 52
3.2.2. Basit kesme deneyi ile arazi koşullarının modellenmesi 55
3.2.3. Basit kesme deneyinin avantajları 56
3.3. Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi 59
3.3.1. Deney hücresi 61
3.3.2. Basınç tablosu 64
3.3.3. Tekrarlı yatay kuvvet uygulama ünitesi 66
3.3.4. Ölçüm, veri toplama ve kayıt ünitesi 67
3.4. Deneylerin Yapılışı 67
3.5. Laboratuvar Deney Programı Seçiminde Dikkat Edilen Hususlar 71
3.6. Zeminin Özellikleri ve Numunelerin Hazırlanması 72
3.6.1. Deneylerde kullanılan zeminin özellikleri 72
3.6.2. Deney numunelerinin hazırlanması 72
3.7. Sonuç 75

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ 76
4.1. Giriş 76
4.2. Tekrarlı Yükleme ve Drenaj Çevrimlerinin Zemin Davranışına Etkisi 76
4.2.1. Boşluk suyu basıncı davranışı 80
4.2.2. Kayma deformasyonu davranışı 91
4.2.3. Konsolidasyon oturmaları 99
4.2.4. Tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti davranışı 114
4.3. Sonuç 123

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 125

KAYNAKLAR 131

EKLER 139
EK A A grubu deney grafikleri 140
EK B B grubu deney grafikleri 186

ÖZGEÇMİŞ 248

KISALTMALAR

AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
DSS	: Direkt Basit Kesme
LVDT	: Deformasyon Ölçer
LC	: Yük Ölçer
NGI	: Norveç Geoteknik Enstitüsü
PSC	: Düzlem Deformasyon Sıkışma
PSE	: Düzlem Deformasyon Genleşme
SGI	: İsveç Geoteknik Enstitiüsü
YASS	: Yeraltı Su Seviyesi

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	Düşey oturma bileşenleri…..…….	7
Tablo 2.2.	Üç eksenli deneyde tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmasının drenajsız kayma mukavemetine etkisi……..……..…..	47
Tablo 2.3.	Basit kesme deneyinde tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmasının drenajsız kayma mukavemetine etkisi ……..…..	47
Tablo 4.1.	Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneyler (A grubu deneyler)…..…….	77
Tablo 4.2.	Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmamış deneyler (B grubu deneyler)…….……..…	78
Tablo 4.3.	Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi sayısının farklı olduğu deneyler……..……	78
Tablo 4.4.	Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneylerde drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi (A grubu deneyler)……...……..	117
Tablo 4.5.	Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmamış deneylerde drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi (B grubu deneyler)……..	119
Tablo 4.6.	Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi sayısının farklı olduğu deneylerde kayma mukavemetlerinin değişimi.……..……..	120

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Zeminin tekrarlı yüklemeye maruz kaldığı durumlar (O'Reilly ve Brown, 1991)..... 5

Şekil 2.2 **:** Zeminlerin maruz kaldığı tekrarlı yüklerin sınıflandırılması (Yasuhara, 1995)……. 8

Şekil 2.3. : Boşluk suyu basıncı ve oturmaların zamanla değişimi (Yasuhara, 1995)……. 8

Şekil 2.4 : Tekrarlı yükleme esnasında gerilme ve drenaj izleri (Yasuhara ve diğerleri, 1988)……. 10

Şekil 2.5 : Tekrarlı yükleme esnasında düşey deformasyonun yaklaşık tahmini (Yasuhara, 1995)..... 11

Şekil 2.6 : Muikamachi, Niigata' da yeraltı su seviyesinin mevsimsel değişiminden kaynaklanan oturma (Tohno ve diğerleri, 1989)... 12

Şekil 2.7 : Tanktaki yük değişiminden dolayı oturma ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimi (Cooling ve Gibson, 1955)…… 13

Şekil 2.8 : Depremden sonraki oturma-zaman kayıtları (Yasuhara, 1995). 14

Şekil 2.9 : Drenajlı ve kısmi drenajlı tekrarlı yükleme deneylerinde durum izleri (Yasuhara ve diğerleri, 1988)……. 15

Şekil 2.10 : Yolun trafiğe açılmasından sonra dolgudaki oturmalar (Yasuhara, 1995)……. 16

Şekil 2.11 : Ariake kilinde yapılan dolguda trafiğe açıldıktan sonra gözlenen oturma-zaman değişimi (Yamanouchi ve Yasuhara, 1975)…… 17

Şekil 2.12 : Kuzey Denizinde inşa edilen tankta oturma-zaman kayıtları (Andersen ve diğerleri, 1978)…….. 17

Şekil 2.13 : Okyanus dalgalarından dolayı oluşan sıvılaşmanın iki türü (Yasuhara, 1995)……. 18

Şekil 2.14 : Açık deniz platformu altında potansiyel bir kayma yüzeyi boyunca oluşan gerilme durumları (Andersen, 1988)……. 19

Şekil 2.15 : Tekrarlı yüklemede muhtemel e-log σ'_v eğrileri (Yasuhara, 1995)…… 19

Şekil 2.16 : Kum ve killerde tekrarlı yükler altında göçme oluşması (Hyodo ve diğerleri, 1999)…….. 22

Şekil 2.17 : Üç eksenli deneyde tek yönlü tekrarlı ve statik yüklemelerde gerilme izleri (Andersen, 1976)……... 23

Şekil 2.18 : Sabit hacimli basit kesme deneyinde efektif gerilme izleri ve boşluk suyu basınçları (Yasuhara ve Andersen, 1991)……... 24

Şekil 2.19 : Farklı tekrarlı yüklemeler altında Drammen kilinde gerilme deformasyon davranışı (AKO=4) a) simetrik basit kesme yüklemesi, b) simetrik olmayan üç eksenli yüklemesi, c) simetrik üç eksenli yüklemesi (Andersen ve diğerleri, 1988). 26

Şekil 2.20 : Drenajsız çift yönlü basit kesme deneyinde efektif gerilme değişimi (Andersen ve diğerleri, 1978)……... 27
Şekil 2.21 : Çift yönlü tekrarlı yüklemeli basit kesme deneyinde deformasyonların ve boşluk suyu basınçlarının oluşumu (Andersen ve diğerleri, 1977)……..28
Şekil 2.22 : Tek yönlü tekrarlı yüklemeli üç eksenli deneyde deformasyonların ve boşluk suyu basınçlarının oluşumu (Andersen, 1976)……. 29
Şekil 2.23 : Farklı tekrarlı yüklemeli üç eksenli deneylerin karşılaştırılması (Andersen, 1988)…….. 30
Şekil 2.24 : Farklı deneylerde efektif kayma gerilmesi oranı ile tekrarlı kayma deformasyonu arasındaki ilişki (Andersen, 1976)……... 30
Şekil 2.25 : Sabit tekrarlı kayma gerilmeleri altında basit kesme deneyinde kayma deformasyonlarının oluşumu (Andersen, 1976)…….. 31
Şekil 2.26 : Sabit tekrarlı kayma gerilmeleri altında basit kesme deneyinde boşluk suyu basıncının oluşumu (Andersen, 1976)…….31
Şekil 2.27 : Basit kesme deneyinden elde edilmiş farklı aşırı konsolidasyon oranlarında göçmeye neden olan çevrim sayıları (Andersen, 1976)……... 32
Şekil 2.28 : Tekrarlı yükten zeminde oluşan oturmanın şematik gösterimi (Hyodo ve diğerleri, 1988)…..…… 33
Şekil 2.29 : Tekrarlı yükler altında oturmaların incelendiği deneyler (Hyodo ve diğerleri, 1988b)…… 34
Şekil 2.30 : Drenajsız tekrarlı yükleme ve daha sonra uygulanan drenaj esnasında düşey efektif gerilme ile hacimsel deformasyonların değişimi(Andersen, 1991)……... 34
Şekil 2.31 : Ödometre ve tekrarlı yük sonrasında drenaj uygulanan basit kesme deneyinde e- log σ'_v nin şematik gösterimi (Andersen, 1988)……35
Şekil 2.32 : Normal konsolide kilde 5 kez drenajsız tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmış deneyde e-log σ'_v değişimi (Andersen, 1988)……37
Şekil 2.33 : Drenajsız tekrarlı yüke maruz normal konsolide kildeki boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonlarına drenajın etkisi (Andersen ve diğerleri 1976)……..…...…… 38
Şekil 2.34 : Oturmaların tekrarlı gerilme genliğiyle değişimi (Ansal ve Tuncan,1989)……...38
Şekil 2.35 : Oturmaların çevrim sayısıyla değişimi (Ansal ve Tuncan, 1989)……39
Şekil 2.36 : Drenajsız tekrarlı yüklemede hacimsel deformasyonların boşluk suyu basıncıyla değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1989).40
Şekil 2.37 : Aşırı konsolide kilde tek kademe tekrarlı yük altında oluşan e-log σ'_v eğrisi (Yasuhara ve Andersen, 1989)……41
Şekil 2.38 : Tekrarlı yükleme sonrasında drenaj uygulanmış deneyde sıkışma indisi (Yasuhara ve Andersen, 1989)……. 41
Şekil 2.39 : Aşırı Konsolide kilde (AKO=4) 5 kez drenajsız tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmış deneyde e-log σ'_v değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1989)…… 42
Şekil 2.40 : Aşırı konsolide kilde 5 kez yükleme-boşaltmalı ödometre deneyinde e-log σ'_v değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1989)..... 43

Şekil 2.41 : Basit kesme deneyinde drenajsız tekrarlı yüke maruz aşırı konsolide kildeki (AKO= 4) boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonlarına drenajın etkisi (Andersen ve diğerleri, 1976)……43
Şekil 2.42 : Boşluk oranı, konsolidasyon basıncı ve drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Yasuhara, 1994)……44
Şekil 2.43 : Tekrarlı yükleme sonrası drenaja izin verilerek belirlenen drenajsız kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması (Yasuhara ve diğerleri, 1992)……..…….... 45
Şekil 2.44 : Tekrarlı yükleme sonrası drenaja izin verilerek belirlenen drenajsız kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması (Yasuhara ve diğerleri, 1992)……..…… 46
Şekil 2.45 : Basit keme deneyinde tekrarlı yükleme ve drenajdan dolayı tekrarlı göçme (γ=±%3) (Brown ve diğerleri, 1977)……...48
Şekil 2.46 Drenajsız tekrarlı yükten kaynaklanan drenajsız kayma mukavemeti azalması (Andersen ve diğerleri, 1976)……..48
Şekil 2.47 Boşluk oranı ve efektif gerilme arasındaki ilişki (Matsui ve diğerleri, 1980)…… 49
Şekil 2.48 Tekrarlı yüklemeden sonra drenajsız elastisite modülündeki azalma (Koutsoftas, 1978)……...50
Şekil 3.1 : Deformasyon durumları (a) genel deformasyon durumu, (b)basit kesme deformasyon durumu (Biscontin, 2001)……. 53
Şekil 3.2 : (a) Cambridge ve (b) NGI tipi basit kesme deneyleri (Franke ve diğerleri, 1979)……..... 54
Şekil 3.3 : Üniform olmayan gerilme dağılımlarının şematik gösterimi (a) numunenin uçlarında tamamlayıcı kayma gerilmelerinin olmamasından kaynaklanan, (b) basit kesme deneyinde numunenin alt ve üst yüzlerindeki normal gerilmeden kaynaklanan üniform olmayan dağılımlar (Airey ve diğerleri, 1985)……54
Şekil 3.4 : Numunenin üst ve alt yüzlerindeki gerilmeler (Prevost ve Höeg, 1976)……55
Şekil 3.5 : Deprem esnasında yüzey seviyesindeki zemin elemanındaki idealize edilmiş gerilme-deformasyon koşulları (Hsu, 2002)…. 57
Şekil 3.6 : Gerilme durumlarının karşılaştırılması (a) üç eksenli deney, (b) basit kesme deneyi (Biscontin, 2001)……58
Şekil 3.7 : Dolgu ve yüzeysel temellerin kayma yüzeyi boyunca bazı kesitlerde kayma mukavemetinin belirlenmesi için bazı deney örnekleri (Lacasse ve diğerleri, 1988)…….……59
Şekil 3.8 : Geoteknik problemlerde basit kesmeye ait diğer durumlar (Biscontin, 2001)……60
Şekil 3.9 : Dinamik basit kesme deney sisteminin görünüşü (Yıldırım, 1987)…….. 61
Şekil 3.10 : Deney hücresi (Yıldırım, 1987)…… 62
Şekil 3.11 : Dinamik basit kesme deney sisteminin şematik görünüşü…… 63
Şekil 3.12 : Dinamik basit kesme deney sisteminde konsolidasyon sırasında numune üzerindeki gerilme durumu…… 64
Şekil 3.13 : Basınç tablosu……65
Şekil 3.14 : Deney numunelerine uygulanan yükleme modelleri…….……70

Şekil 3.15 : Zeminin dane dağılım eğrisi……..…73
Şekil 3.16 : Çamur konsolidasyon aleti…… 74
Şekil 4.1 : Basit kesme deneyinde kayma gerilmesi ve kayma deformasyonunun çevrim sayısıyla değişimi……..…… 79
Şekil 4.2 : Basit kesme deneyinde oluşan gerilme-deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranlarının değişimi…… 80
Şekil 4.3 : A1 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi…… 81
Şekil 4.4 : A23 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi…… 81
Şekil 4.5 : Çevrim sayısının boşluk suyu basınçlarına etkisi (A grubu deneyler)…….. 82
Şekil 4.6 : Gerilme oranının boşluk suyu basınçlarına etkisi (A grubu deneyler)..…… 83
Şekil 4.7 : Çevrim sayısının boşluk suyu basınçlarına etkisi (B grubu deneyler). ……83
Şekil 4.8 : Gerilme oranının boşluk suyu basınçlarına etkisi (B grubu deneyler)..……83
Şekil 4.9 : Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının değişimi (A grubu deneyler)..……..……85
Şekil 4.10 : Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının değişimi (B grubu deneyler)..……..……86
Şekil 4.11 : Tekrarlı yüklemenin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının gerilme oranıyla değişimi (A grubu deneyler)…...87
Şekil 4.12 : Tekrarlı yüklemenin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının gerilme oranıyla değişimi (B grubu deneyler)…...88
Şeki 4.13 : Hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması (A ve B grubu deneyler)……... 89
Şekil 4.14 : Hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısıyla değişimi (A grubu deneyler)..……..…… 90
Şekil 4.15 : Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..……... 90
Şekil 4.16 : Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademe sayısıyla değişimi..……. 91
Şekil 4.17 : A11 deneyinde kayma deformasyonlarının beş kademe tekrarlı yüklemede değişimi……...…..… 92
Şekil 4.18 : B8 deneyinde tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinde kayma deformasyonlarının değişimi..…….…… 93
Şekil 4.19 : Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zeminde kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi (A grubu deneyler)..……..……94
Şekil 4.20 : Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zeminde kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi (B grubu deneyler)..……..……95
Şekil 4.21 : Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi (A grubu deneyler).…….……95

Şekil 4.22 : Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi (B grubu deneyler)....…….…… 96
Şekil 4.23 : Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde kayma deformasyonlarının değişimi (A grubu deneyler)....……..……..…97
Şekil 4.24 : Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde kayma deformasyonlarının değişimi (B grubu deneyler)....……..…….. 98
Şekil 4.25 : Hesaplanan ve gözlenen kayma deformasyonlarının karşılaştırılması (A ve B grubu deneyler)....……..…..…… 99
Şekil 4.26 : Hesaplanan ve gözlenen kayma deformasyonlarının çevrim sayısıyla değişimi (A grubu deneyler)....……..……...……100
Şekil 4.27 : Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi (A grubu deneyler)....……..…… 101
Şekil 4.28 : Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi (B grubu deneyler)…….. 102
Şekil 4.29 : Hacimsel deformasyonların gerilme oranıyla değişimi (A grubu deneyler)..…… 102
Şekil 4.30 : Hacimsel deformasyonların gerilme oranıyla değişimi (B grubu deneyler).……..103
Şekil 4.31 : A20 deneyinde beş kademe tekrarlı yüklemede meydana gelen oturmaların efektif gerilme ile değişimi…… 104
Şekil 4.32 : A20 deneyinde hacimsel deformasyonların boşluk suyu basıncı ile değişimi……... 104
Şekil 4.33 : Gerilme genliği τ/τ_f=0.65 ve farklı çevrim sayılarındaki A grubu deneylerde oturmaların çevrim sayısı ile değişimi……105
Şekil 4.34 : N=80 olan A grubu deneylerde oturmaların gerilme genliği ile değişimi…….. 106
Şekil 4.35 : Hacimsel deformasyonların farklı çevrim sayılarında beş kademe boyunca değişimi (A grubu deneyler)……107
Şekil 4.36 : Hacimsel deformasyonların farklı çevrim sayılarında dört kademe boyunca değişimi (B grubu deneyler)…… 108
Şekil 4.37 : Hacimsel deformasyonların gerilme oranına ve tekrarlı yükleme kademesine bağlı olarak değişimi (A grubu deneyler). 109
Şekil 4.38 : Hacimsel deformasyonların gerilme oranına ve tekrarlı yükleme kademesine bağlı olarak değişimi (B grubu deneyler). 110
Şekil 4.39 : Beş kademedeki hacimsel deformasyonların gerilme oranıyla değişimi……... 111
Şekil 4.40 : Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi…….112
Şekil 4.41 : İlk kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların karşılaştırılması (A ve B grubu deneyler)…… 112
Şekil 4.42 : İlk kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların çevrim sayısıyla değişimi…….113
Şekil 4.43 : Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların karşılaştırılması…… 114
Şekil 4.44 : Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların çevrim sayısıyla değişimi…….115
Şekil 4.45 : Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerilme deformasyon eğrileri..…… 116

Şekil 4.46 : Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneylerde drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısıyla değişimi…… 118
Şekil 4.47 : Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneylerde drenajsız kayma mukavemetinin gerilme oranıyla değişimi..…….…….. 118
Şekil 4.48 : Tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi sayılarının kayma mukavemeti üzerindeki etkisi..……..……..… 120
Şekil 4.49 : Deneylerden elde edilen ve hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının karşılaştırılması…… 121
Şekil 4.50 : Çevrim sayısına göre deney ve hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının değişimi…… 122
Şekil 4.51 : Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayısının değişmesi durumunda deney ve hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının karşılaştırılması...……..…… 122
Şekil A.1 : A1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.55)……140
Şekil A.2 : A1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları…… 141
Şekil A.3 : A2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.60)……142
Şekil A.4 : A2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..……..…… 143
Şekil A.5 : A3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.65)……144
Şekil A.6 : A3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..……..…… 145
Şekil A.7 : A4 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.70)……146
Şekil A.8 : A4 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları…… 147
Şekil A.9 : A5 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.55)……148
Şekil A.10 : A5 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..……..…… 149
Şekil A.11 : A6 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.65)……150
Şekil A.12 : A6 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..……..…… 151
Şekil A.13 : A7 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.65)……152
Şekil A.14 : A7 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..……..…… 153
Şekil A.15 : A8 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.70)……154
Şekil A.16 : A8 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..……..…… 155
Şekil A.17 : A9 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.55)……156

Şekil A.18 : A9 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 157
Şekil A.19 : A10 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.60)……158
Şekil A.20 : A10 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 159
Şekil A.21 : A11 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.65)……160
Şekil A.22 : A11 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 161
Şekil A.23 : A12 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.70)……162
Şekil A.24 : A12 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 163
Şekil A.25 : A13 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.55)……164
Şekil A.26 : A13 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 165
Şekil A.27 : A14 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.60)……166
Şekil A.28 : A14 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 167
Şekil A.29 : A15 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.65)...……168
Şekil A.30 : A15 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 169
Şekil A.31 : A16 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.70) ……..…… 170
Şekil A.32 : A16 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 171
Şekil A.33 : A17 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.55)..……172
Şekil A.34 : A17 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 173
Şekil A.35 : A18 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.60)..……174
Şekil A.36 : A18 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 175
Şekil A.37 : A19 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.65)..……176
Şekil A.38 : A19 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 177
Şekil A.39 : A20 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.70)..……178
Şekil A.40 : A20 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 179
Şekil A.41 : A21 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.55)..……180

Şekil A.42 : A21 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 181
Şekil A.43 : A22 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.60)..……182
Şekil A.44 : A22 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 183
Şekil A.45 : A23 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.65)..……184
Şekil A.46 : A23 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 185
Şekil B.1 : B1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.55). ..……186
Şekil B.2 : B1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 187
Şekil B.3 : B2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.60). ..……188
Şekil B.4 : B2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 189
Şekil B.5 : B3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.65). ..……190
Şekil B.6 : B3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 191
Şekil B.7 : B4 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.70). ..……192
Şekil B.8 : B4 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 193
Şekil B.9 : B5 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.55). ..……194
Şekil B.10 : B5 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 195
Şekil B.11 : B6 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.60). ..……196
Şekil B.12 : B6 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 197
Şekil B.13 : B7 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.625)..……198
Şekil B.14 : B7 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 199
Şekil B.15 : B8 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.65). ..……200
Şekil B.16 : B8 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 201
Şekil B.17 : B9 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.675)..……202
Şekil B.18 : B9 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 203
Şekil B.19 : B10 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.70). ..……204

Şekil B.20 : B10 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 205
Şekil B.21 : B11 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.55). ..……206
Şekil B.22 : B11 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 207
Şekil B.23 : B12 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.60). ..……208
Şekil B.24 : B12 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 209
Şekil B.25 : B13 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.625)..……210
Şekil B.26 : B13 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 211
Şekil B.27 : B14 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.65). ..……212
Şekil B.28 : B14 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 213
Şekil B.29 : B15 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.675)..……214
Şekil B.30 : B15 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 215
Şekil B.31 : B16 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.70). ..……216
Şekil B.32 : B16 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 217
Şekil B.33 : B17 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.55). ..……218
Şekil B.34 : B17 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 219
Şekil B.35 : B18 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.60). ..……220
Şekil B.36 : B18 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 221
Şekil B.37 : B19 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.65). ..……222
Şekil B.38 : B19 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 223
Şekil B.39 : B20 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.70). ..……224
Şekil B.40 : B20 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 225
Şekil B.41 : B21 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.55)..……226
Şekil B.42 : B21 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 227
Şekil B.43 : B22 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.60)..……228

Şekil B.44 : B22 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 229
Şekil B.45 : B23 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.625)……230
Şekil B.46 : B23 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 231
Şekil B.47 : B24 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.65)..……232
Şekil B.48 : B24 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 233
Şekil B.49 : B25 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.675)……234
Şekil B.50 : B25 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 235
Şekil B.51 : B26 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.70)..……236
Şekil B.52 : B26 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 237
Şekil B.53 : B27 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.55)..……238
Şekil B.54 : B27 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 239
Şekil B.55 : B28 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.60)..……240
Şekil B.56 : B28 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 241
Şekil B.57 : B29 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.625.…… 242
Şekil B.58 : B29 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 243
Şekil B.59 : B30 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.65)..……244
Şekil B.60 : B30 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 245
Şekil B.61 : B31 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.675)……246
Şekil B.62 : B31 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları..…….…… 247

SEMBOL LİSTESİ

B : Suya doygunluk derecesi
c' : Kohezyon
C'$_c$: Sıkışma indisi
Cc : Doğal sıkışma indisi
(Cu)cy/(Cu)nc: Drenajsız kayma mukavemeti oranı
D : Derinlik
Δe_r : Boşluk oranı değişimi
$\Delta\varepsilon e_t$: Toplam deformasyon
$\Delta\varepsilon^r$: Elastik deformasyon
$\Delta\varepsilon^{ir}$: Plastik deformasyon
Δh : Düşey oturma değişimi
Δvol : Hacim değişimi
$\Delta\tau_a$: Yapıdan kaynaklanan statik kayma gerilmesi artışı
Δu : Boşluk suyu basıncı değişimi
Δup : Boşluk suyu basıncı değişimi
$\Delta u/\sigma'_c$: Boşluk suyu basıncı oranı
e : Boşluk oranı
ε_v : Hacimsel deformasyon
ε_{vc} : Tekrarlı kayma deformasyonu
ε'_{vol} : Hacimsel sıkışma
ε_{yy} : Düşey deformasyon
ϕ : Çap
ϕ' : Kırılma açısı
γ : Kayma deformasyonu
γ_c : Tekrarlı kayma deformasyonu
H : Yükseklik
I_p : Plastisite indisi
K_0 : Yatay toprak basıncı katsayısı
n : Tekrarlı yükleme kademe sayısı
N : Çevrim sayısı
N_f : Göçme anındaki çevrim sayısı
M : Moment
P'c : Düşey efektif gerilme
S_u : Statik deneyde drenajsız kayma mukavemeti
σ'_e/σ'_m) : Eşdeğer aşırı konsolidasyon oranı
σ'_v : Düşey efektif gerilme
$\sigma'vc$: Başlangıç düşey efektif gerilme
σ_{1f} : Göçme anında asal gerilme yönü
t : Zaman
τ : Kayma gerilmesi

τ_0 : Arazi kayma gerilmesi
τ_{cy} : Tekrarlı kayma gerilmesi
τ_{hc} : Tekrarlı kayma gerilmesi
τ_f : Statik deneyde göçme anındaki yatay kayma gerilmesi
τ_{su} : Tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti
τ_{vh} : Yatay yük
τ/τ_f : Tekrarlı gerilme oranı
u_c : Tekrarlı yükten oluşan boşluk suyu basıncı
u_p : Artık boşluk suyu basıncı
W : Yapının ağırlığı
ω_L : Likit limit
ω_P : Plastik limit

TEKRARLI YÜKLEMELER ETKİSİ ALTINDA ZEMİNLERİN KONSOLİDASYONU

ÖZET

İnşaat mühendisliği yapıları altındaki zemin tabakaları, depremler, kazık çakma, trafik, patlatmalar, makine temelleri, okyanus dalgaları vb gibi tekrarlı yüklere maruz kalabilir.

Statik yükler altında oluşan oturmalara ilave olarak tekrarlı yüklemelerde oturmalara neden olur. Tekrarlı yüklemeler, yapının altındaki zeminde bir hacim azalması meydana getirir. Eğer artık boşluk suyu basıncı hacim azalması meydana getirmek için yeterince hızlı sönümlenmez ise bir boşluk suyu basıncı oluşur. Kil üzerindeki yapıların tekrarlı yüke maruz kalması durumunda boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için yeterli bir süre bulunmaz. Bu durumda drenajsız koşullar geçerli olup efektif gerilmelerde azalmaya neden olacak şekilde artık boşluk suyu basıncı oluşur. Oluşan boşluk suyu basınçları tekrarlı yükleme uygulamasından sonra sönümlenecek ve efektif gerilmeler tekrarlı yükleme başlangıcındaki değere tekrar artacaktır. Bu durumda hacim azalması ve ilave oturmalar meydana gelecektir.

Tekrarlı yükler altında zemin tabakaları ve üzerindeki yapıların davranışı, kesme esnasında zeminin geniş bir aralıkta değişen gerilme-şekil değiştirme özelliklerine bağlıdır. Sonuçta başarılı ve güvenli bir inşaat mühendisliği yapısı ve temeli dizaynı için temel zemininin gerilme-deformasyon özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Bu çalışmada 1-5 kez tekrarlı kayma gerilmeleri ve drenaj uygulanmış normal konsolide kilin konsolidasyon ve tekrarlı yükleme sonunda mukavemet davranışı incelenmiştir. Dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak konsolidasyonlu, drenajsız tekrarlı ve statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Deney programı İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında yürütülmüştür. Bütün tekrarlı yüklemeli deneyler farklı tekrarlı gerilme genliği ve çevrim sayılarında gerilme kontrollü, çift yönlü sinüzoidal dalga yükü kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada tekrarlı yükleme frekansı bütün deneylerde 0.1 Hz olarak sabit tutulmuştur.

Bu çalışma aşağıdaki durumların incelenmesini amaçlamıştır:

1. Drenajsız tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmasının daha sonraki zamanlarda uygulanan drenajsız tekrarlı yükleme esnasında boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonu davranışına etkisi,
2. Tekrarlı yükten oluşan boşluk suyu basıncının dağılmasıyla meydana gelen hacimsel sıkışmadan kaynaklanan oturmalar,
3. Beş kez uygulanan tekrarlı yükleme ve drenaj çevriminin, tekrarlı yükleme sonundaki drenajsız statik kayma mukavemetine etkisi,

4. Yumuşak kilin tekrarlı yük altındaki davranışına tekrarlı gerilme genliği ve çevrim sayısının etkisi,
5. Tekrarlı yükleme drenaj çevrimi sayısının tekrarlı yükleme sonundaki drenajsız statik kayma mukavemetine etkisi.

Günümüzde arazi gerilme-deformasyon durumlarını model edebilen ve mühendise dinamik zemin parametrelerinin teminini sağlayan birkaç çeşit geoteknik laboratuvar deney sistemi bulunmaktadır. Üç eksenli deney, burulmalı kesme deneyi (tam dolu veya içi boş silindir) ve rezonant kolon deneyi gibi çok sık kullanılan laboratuvar deney sistemleri ile karşılaştırıldığında basit kesme deneyi, diğer deneylerden daha çok sayıda geoteknik problemi model etmektedir. Ayrıca basit kesme deneyi numune düzlem gerilme durumunda iken kesme esnasında asal gerilmelerin dönmesine imkan tanıyan bir avantaj sunar Bu durum, birçok geoteknik problem için daha gerçekçi bir yükleme durumu sağlar. Bu geoteknik problemler:

1. Dolgu temelindeki zeminin davranışı,
2. Kazık şaftına yakın zemin elemanındaki kesme,
3. Taşıt yüklerinden kaynaklanan dinamik yükler,
4. Kumların sıvılaşma davranışı,
5. Rüzgar ve dalga yüklerine maruz açık deniz yapılarının (kazık, ağırlık tipi platform) temellerine etkiyen tekrarlı yükler,
6. Katı atıkların mekanik olarak sıkıştırılması sırasındaki davranış.

Çalışmada Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) ve İsveç Geoteknik Enstitüsü (SGI) basit kesme deney sisteminin K. Ishihara ve M. Silver tarafından geliştirilmiş ve Japon Seiken Incorporation tarafından üretilmiş dinamik basit kesme deney sistemi kullanılmıştır. Hava basıncı ile çalışan sistem başlıca dört bölümden oluşmaktadır. İşlevlerine göre bu bölümler;

1. Deney hücresi,
2. Basınç tablosu,
3. Tekrarlı yük uygulama birimi,
4. Ölçüm, veri toplama ve kayıt ünitesi olarak adlandırılır.

Zeytinburnu bölgesinden alınmış ve kil oranı %48.5 olan yüksek plastisiteli kil zemin çalışmada kullanılmıştır. Bütün numuneler iri daneli ve organik maddelerden arındırmak için 200 nolu elekten elenerek laboratuvarda hazırlanmıştır. Numunelere arazide zemin elemanının çökelmesini model eden K_0 koşulları uygulanmıştır. Bu numuneler, büyük çamur konsolidometre kullanılarak laboratuvarda hazırlanmıştır. Kuru, toz haline getirilmiş zemin likit limitin 2 katı (kuru zemin ağırlığının yaklaşık %150'si) su muhtevasında homojen bir çamur elde etmek için karıştırılmıştır. Bunun nedeni zeminin heterojenlik, gerilme geçmişi, su muhtevası değişimi ve başlangıç yapı gibi faktörleri minimize etmektir. Bu numune hazırlama tekniği, homojen ve aynı özellikte çok sayıda numune hazırlanmasına imkan vermektedir. Numunelerin hazırlanmasında aşağıdaki yöntem kullanılmıştır:

- Gerekli miktar kurutulmuş, toz haline getirilmiş kil alınır,
- Daha önce likit limit deneyinde belirlenen gerekli miktar damıtılmış su eklenir,
- Homojen çamur elde edilinceye kadar karıştırılır,
- Çamur konsolidometreye doldurulur,
- 25 kPa'dan başlayarak her defasında öncekinin 2 katı olacak şekilde düşey yük düşey oturmalar tamamlanıncaya kadar uygulanır ve çamur 100 kPa değerindeki düşey yük altında konsolide edilir,

- Konsolidasyondan sonra yaklaşık 9 cm yüksekliğinde 20 cm çapındaki blok numune çıkarılarak 6 parçaya bölünür,
- Hemen plastik film ve alüminyum folyo ile etrafı sarılarak hava geçirmez plastik torbalara konur,
- Nem odasındaki desikatörlerde saklanır.

Tekrarlı yükleme altında konsolidasyon ve kayma mukavemeti özelliklerinin incelendiği deney numuneleri 7 cm çapında ve 3 cm yüksekliğindedir. Sabit hacimli deney yapmak için statik ve tekrarlı yükleme esnasında numuneler teflon K_0 ringleri içine yerleştirilmiştir. Bu ringler, kesme esnasında numunelerin yüksekliğini sabit tutarken radyal deformasyonları önler. Bu tür sabit hacimli deney yöntemi drenajsız koşulları model etmektedir.

Numuneler basit kesme hücresine yerleştirilmiş ve çamur konsolidasyon aletinde uygulanan ön konsolidasyon basıncından biraz daha yüksek efektif düşey gerilme altında kademeli bir şekilde K_0 şartlarında konsolide edilmiştir. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra numuneler, daha önce belirlenen çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme seviyesinde drenajsız koşullarda tekrarlı yükler uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeyi takiben drenaj vanaları açılarak drenaja izin verilmiş ve numunelerdeki oturmalar gözlenerek tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçları sönümlenmiştir.

Çalışmada en son kademe tekrarlı yüklemeden sonra uygulanan drenaja bağlı olarak iki tip yükleme modeli kullanılmıştır. Birinci grup deneylerde (A grubu deneyler) numunelere beş kez tekrarlı yük ve her tekrarlı yüklemeden oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenebilmesi amacıyla sonra drenaja izin verilmiştir. Çalışma boyunca drenaj süresi 1 saat olarak uygulanmıştır. Beşinci drenaj aşamasından sonra numunelere drenajsız statik yük uygulanmıştır. İkinci grup deneylerde (B grubu deneyler) beşinci tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmeden statik olarak kesilmiştir. Drenajsız statik deneyler, saatte %6.5 deformasyon hızında deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Her bir tekrarlı ve statik basit kesme deneyinde yatay yük, yatay deformasyon, düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncı gibi dört değişken gözlenmiş ve kaydedilmiştir. Deneylerde numunelere N=50, 60, 80, 90, 100 ve 120 olan çevrim sayısı ve τ/τ_f=0.55, 0.60, 0.625, 0.65, 0.675 ve 0.70 gibi farklı gerilme oranlarında yatay kayma gerilmeleri uygulanmıştır. Bu deneylerden başka tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayılarının drenajsız kayma mukavemeti üzerindeki etkisi bir grup deneyle incelenmiştir. Bu amaçla tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinin uygulanma sayısı 1, 2, 3, 4 ve 5 olarak seçilerek son tekrarlı yüklemeden sonra oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenebilmesi için drenaja izin verilmiştir. Daha sonra numuneler statik olarak kesilmiş ve drenajsız kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Deneylerde sadece tek çevrim sayısı (N=100) ve gerilme oranı (τ/τ_f=0.65) kullanılmıştır.

Deneysel çalışma sonunda drenajsız tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimine maruz kalmış normal konsolide killerde ilk kademede, çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak yüksek boşluk suyu basınçları meydana gelmiştir. Bu basınçlar kayma deformasyonlarının da yüksek olmasına neden olmuştur. Daha sonraki yükleme-drenaj çevrimlerinde boşluk suyu basınçları ve kayma deformasyonları kademeli bir şekilde azalmış, son kademelerde birbirine çok yakın olmuştur. Boşluk suyu basınçlarında gözlenen bu yüksek değerler konsolidasyon oturmalarının da yüksek olmasına sebep olmuştur. Daha sonraki yükleme kademelerinde oturmalarda da boşluk basınçları ve kayma deformasyonlarında olduğu gibi azalmalar meydana

gelmiştir. Dolayısı ile zeminin, maruz kaldığı tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimlerinden dolayı sonraki drenajsız tekrarlı yüklere karşı daha yüksek direnç gösterdiği görülmüştür. Numunelerin sıkışma indisi, boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonu her bir tekrarlı yükleme aşamasından sonra azalmaktadır. Bununla beraber tekrarlı yüklemeden kaynaklanan boşluk suyu basıncının artmasıyla oluşan oturmalar etkisinde stabilize olan zeminin tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetinde artış gözlenmiştir. Drenajsız kayma mukavemetindeki artış, son kademe tekrarlı yüklemede oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesine izin verilen deneylerde (A grubu deneyler) daha yüksek olmaktadır. Ayrıca bu tip deneylerde mukavemet artışı ile gerilme oranı ve çevrim sayısına bağlı olarak ilişki bulunmaktadır. Bununla birlikte beşinci tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmeden statik olarak kesilen numunelerde (B grubu deneyler) mukavemet değişimi A grubu deneylerde olduğu gibi düzenli artan veya azalan bir davranış göstermemektedir. B grubu deney sonuçlarından çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı bir ilişki görülememiş, drenajsız kayma mukavemeti değişimi küçük azalma veya artış şeklinde olmuştur. Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi sayısının drenajsız kayma mukavemetine etkisinin incelendiği deneylerde A grubu deneylerde olduğu gibi çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak düzenli ve yüksek oranda artışlar meydana gelmiştir.

Yapılan bütün deney sonuçlarından Statistica adlı bilgisayar programı kullanılarak deneylerde uygulanan değişkenlerin tek kademe ve çoklu kademe tekrarlı yüklemeler etkisinde zeminin, boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, hacimsel deformasyon ve tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetine etkisini belirlemek amacıyla regresyon analizi yapılmış ve her davranışlara ait bağıntılar elde edilmiştir. Analiz sonunda elde edilen korelasyon katsayıları da oldukça yüksek olmuştur.

CONSOLIDATION OF SOILS UNDER CYCLIC LOADING EFFECT

SUMMARY

Soil deposits supporting civil engineering structures can be subjected to cyclic loads caused by earthquakes, pile driving, traffic, explosions, machine foundations, ocean wave storms etc.

Cyclic loading may cause settlements in addition to the settlements occuring under static loads. Cyclic loadings tend to cause volume reduction in the soil beneath a structure. If the excess pore water pressure is not dissipated fast enough for the volume reduction to occur, pore pressure is generated. In case the structures on clay are subjected to cyclic loading, there is not enough time for dissipation of the pore water pressure. In such cases the undrained conditions will be valid and excess pore pressure is generated causing a reduction in effective stresses. The generated pore pressures will dissipate after the application of cyclic stresses, and the effective stresses will increase to the starting value of the cyclic loading again. The volume reduction will then take place and additional settlements result.

The response of soil deposits and overlying structures to such loads depends to a large extent on the cyclic stress-strain characteristic of soil in shear. Consequently, for a successful and safe design of the civil engineering structures and their foundations, it is essential to know stress-strain properties of the foundation soil.

In this study consolidation and post-cyclic strength behaviour of a normally consolidated clay subjected to 1-5 consecutive series of cyclic shear stresses and drainage has been investigated. Consolidated, undrained cyclic and static tests were performed using cyclic simple shear testing device. The testing programme was conducted in Soil Dynamics Laboratory of Civil Engineering Faculty at Istanbul Technical University. All cyclic tests were performed with stress controlled two way sinusoidal wave loading with different shear stress amplitudes and number of cycles. Frequency of cyclic loading during the study was constant as 0.1 Hz.

This study concentrates on the following aspects:

1. The effect of undrained cyclic loading and drainage on behaviour of pore pressure and shear strain during undrained cyclic loading applied afterwards,
2. Settlements due to volumetric compression when the cyclically generated pore water pressure dissipates,
3. The effect of five series of cyclic loading and drainage on post-cyclic static shear strength,
4. The effect of cyclic stress ratio and number of cycles on cylic behaviour of soft clay.
5. The effect of number of cyclic loading and drainage cycle on post-cyclic static shear strength,

Nowadays, there are several types of geotechnical laboratory tests that are typically used in practice to simulate field stress-strain conditions and provide designers with cyclic soil parameters. When compared to the widely used laboratory testing systems such as triaxial test, torsional shear test (solid or hollow cylinder) and resonant column test, the simple shear test is used to simulate field conditions in a relatively large number of geotechnical problems. Furthermore simple shear test presents the advantage of allowing the principal stresses to rotate during shearing while the specimen is kept in a plane strain condition. This provides a more realistic loading condition applicable to many geotechnical problems. Examples of this include:

1. Behaviour of soil within the foundation of an embankment,
2. Shearing of a soil element adjacent to a pile shaft,
3. Dynamic traffic loads on pavement,
4. Liquefaction behaviour of sands,
5. Cyclic loads acting on foundations (piles or gravity) of offshore structures subjected to wind and wave loads,
6. Mechanical behaviour of municipal solid waste during compaction.

Dynamic simple shear testing device manufactured by Seiken, Inc., Japon according to the design of K. Ishihara and M. Silver which was essentially a modification of Norwegian Geotechnical Institute (NGI) and Swedish Geotechnical Institute (SGI) direct simple shear testing systems was used in the study. The testing system which is pneumatic, is composed of the following four units as;

1. The test cell,
2. Pressure panel,
3. Cyclic loading unit,
4. Measuring, data acquisition and recording unit.

A highly plastic clay having clay ratio of 48.5% from Zeytinburnu region was used in the study. All the samples were reconsituted from the part of the specimen passing from No:200 sieve to remove larger particles and organic matter. Specimens were subjected to K_0 consolidation modelling the deposition history of a soil element in situ. These specimens were prepared in the laboratory by using a big slurry consolidometer. Dried and powdered soil was mixed to form a homogeneous slurry having a water content of 2 times liquid limit (about 150 % of dry soil weight). This is done to minimize the effects of factors such as heterogenity, stress history, moisture content variation, initial structure of the samples. This sample preparation technique provides the production of reasonably homogeneous and reproducible samples. The following procedure was used for preparing all the samples:

- Take the required amount of dried, powdered clay,
- Add the required amount of distilled water (established from prior testing of liquid limit),
- Mix until a homogeneous slurry is achieved,
- Transfer the slurry into the consolidometer.
- Apply vertical stress incrementally starting from 25 kPa, always doubling each previous stress and maintaining it until the vertical deformation is finished and consolidate slurry to a vertical stress of 100 kPa,
- After consolidation, take the block sample of about 9 cm in height and 20 cm in diameter and divide into six equal parts,

- Immediately wrap around by plastic film, then aluminium sheet and placed in a practically airtight plastic bag,
- Keep them in the desiccators in a moisture controlled for ambient temperature.

The test specimens used for investigating consolidation and shear strength properties under cylic loading were cylinders of 7 cm diameter and 3 cm height. To maintain constant-volume, the specimens were confined during static and cyclic straining in teflon coated K_0 rings, which restrict or almost completely prevent radial strains, while the height of the specimens was maintained constant during shear. Such a constant-volume test procedure simulates undrained conditions.

The samples were placed in simple shear cell and were consolidated in increments under K_0 conditions to a vertical effective stress slightly larger than preconsolidation stress applied at slurry consolidometer. After consolidation is completed, the samples were subjected to cyclic shear stresses under undrained conditions for a selected number of cycles and cyclic stress level. Following the cyclic loading, drainage was allowed by opening the valves and pore pressures generated by cyclic loading were dissipated while monitoring the settlements in the samples.

Depending on the drainage after the last cyclic loading, two kinds of loading patterns were used in the study. At the first group of tests (group A tests) the samples were subjected to five consecutive series of cyclic loading. Drainage were applied between each cyclic loading stage in order to dissipate the pore water pressure. The duration of drainage period was 1 hour throughout the study At the end of fifth drainage stage, the samples were immediately subjected to undrained static loading. At the second group of tests (group B tests), the samples were statically sheared without allowing drainage at the end of 5 th cyclic loading. The undrained static tests were run strain controlled with approximately 6.5% shear strain per hour. Four parameters such as horizontal load, horizontal deformation, vertical deformation and pore water pressure were monitored and recorded during each cyclic and static simple shear test. The samples were subjected to horizontal shear stresses at different number of cycles such as N=50, 60, 80, 90, 100 and 120 and cyclic stress levels such as τ/τ_f=0.55, 0.60, 0.625, 0.65, 0.675 and 0.70. Effect of number of cyclic loading and drainage cycles on post-cyclic undrained strength is investigated by a group of tests. In these tests number of cyclic loading and drainage cycles applied was selected as 1, 2, 3, 4 and 5 and drainage at the end of last cyclic loading was allowed for dissipating of pore water pressures. Then the samples were subjected to undrained static loading and undrained strength was determined. A single number of cycle (N=100) and stress level (τ/τ_f=0.65) were used in this group of tests.

As a result of experimental study, high pore water pressures were observed for normally consolidated clays subjected to undrained cyclic loading and drainage depending on the number of cycles and stress levels at the first loading stage. These levels of pressure resulted shear strain to be high. Pore pressures and shear strains were gradually decreased at the consequent cyclic loading and drainage cycles and they became close to each other at the last stages. These high pore pressures observed caused consolidation settlements to be high also. At the consequent loading stages settlements were decreased like pore pressures and shear strains. Therefore it can be concluded that normally consolidated clays subjected to undrained cyclic loading and drainage cycles are more resistant to undrained cyclic loadings that can be applied afterwards. The compression index, pore water pressure and shear strains

of the specimens decrease after each stage of cyclic loading. However an increase was observed at the post-cyclic undrained shear strength when the soil was stabilized with the consolidation settlements by increasing pore water pressure induced by cyclic loading. Increase in the undrained shear strength was higher at the tests which drainage was allowed for dissipating of pore water pressures at the end of last cyclic loading (group A tests). Furthermore it was observed that the undrained shear strength increase can be formulated as a function of the number of cycles and the stress levels. Besides, for the samples which were sheared without allowing of dissipation of cyclically induced pore pressures at the end of fifth cyclic loading (group B tests) and no regular change in undrained strength increase or decrease was observed like group A tests. No relationship can be seen between shear strength and the test variables such as number of cycles and stress level. Change in undrained shear strength became a small increase or decrease. A high increase depending on the number of cycles and stress levels were observed at the tests which were used to investigate the effect of number of cyclic loading and drainage cycles on post-cyclic undrained strength like group A tests.

Regression analyses to determine the effects of applied variables on pore water pressure, shear strain, volumetric strain and post-cyclic undrained strength for the single and multiple cyclic loading stages were performed by using computer programme Statistica and relations were obtained. Coefficients of correlation resulted from the regression analyses were relatively high values.

1. GİRİŞ

Kil zemin üzerinde inşa edilen yapılarda, deprem vb. etkilerden dolayı temel zemininde hızla artan boşluk suyu basınçları etkisiyle büyük deformasyonların meydana gelmesi sonucunda göçme oluşur.

Bir temele tekrarlı yük uygulandığında temel zemininde meydana gelen deformasyon statik yükler altında meydana gelen deformasyondan büyük olur. Bu sebepten dolayı tekrarlı yükler altında oluşan zemin deformasyonlarının belirlenmesinde geleneksel olmayan yöntemlere ihtiyaç vardır. Deprem yükleri, açık deniz dalgaları, yüksek binalara etkiyen rüzgar yükleri, karayolu taşıt yükleri ve yakıt depolama tank yükleri tekrarlı yüklere verilebilecek bazı örneklerdir.

Arazide suya doygun killer sık sık deprem, rüzgar, trafik, kazık çakma gibi etkilerden dolayı tekrarlı yüklere maruz kalır. Tekrarlı gerilme-deformasyon geçmişine sahip suya doygun killi zeminlerde, tekrarlı yüklemelerden dolayı artık boşluk basıncı sönümleninceye kadar kayma direnci belirli ölçüde azalır.

Depremler esnasında oluşan artık boşluk basınçları sönümlendiğinde, boşluk hacminin azalmasından dolayı zeminlerde oturmalar meydana gelir. Zeminin kil olması durumunda tekrarlı yüklemeden sonra tekrar sıkışma oturmaları uzun süre devam eder ve bu oturmaların miktarı kumlarda olduğundan daha belirgindir. Zeminde göçme meydana gelmemiş ve boşluk basıncı efektif çevre basıncına eşit olmasa da artık boşluk basıncının sönümlenmesi zararlı oturmalara neden olabilir.

Suya doygun killi zeminlerin tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı, bu davranışa etki eden faktörler, tekrarlı yükler altında zeminlerin konsolidasyon oturması, normal ve aşırı konsolide killerin uzun süreli tekrarlı yükler altında oturma ve kayma mukavemetindeki davranış özelliklerini içeren ayrıntılı literatür çalışması ikinci bölümde verilmiştir.

Üçüncü bölümde çalışmada tekrarlı ve statik yüklemeli deneylerin yapılmasında kullanılan dinamik basit kesme deney sistemi ile adı geçen sistemin kullanılma gerekçeleri detaylıca incelenmiş, deney numunelerinin özellikleri, hazırlanması, uygulanan yükleme modelleri ve deneylerin yapılışı ele alınmıştır.

Yapılan deneysel çalışmaya ait sonuçlar dördüncü bölümde değerlendirilmiştir. Bu bölümde, normal konsolide kil zeminin tekrarlı yük altındaki davranışını etkileyen, çevrim sayısı, tekrarlı gerilme genliği ve yükleme modeli gibi parametrelere bağlı olarak zeminin boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, konsolidasyon oturmaları ve tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti gibi özelliklerindeki değişimler detaylıca incelenmiştir. Deney sonuçları kullanılarak yapılan regresyon analizi ile deneylerdeki değişkenler olan çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranının, boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, konsolidasyon oturmaları ve drenajsız kayma mukavemetine etkileri araştırılmıştır.

Çalışmadan elde edilen genel sonuçlar, bu sonuçların pratikte hangi amaçlar için kullanılabileceği ile ilgili değerlendirmeler ise beşinci bölümde özetlenmiştir.

2. TEKRARLI YÜKLER ALTINDA SIKIŞMA VE KONSOLİDASYON

2.1 Giriş

Kohezyonlu zeminlerde tekrarlı yüklerden kaynaklanan konsolidasyon davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çalışmalarda çoğunlukla gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü olarak çalışan dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney sistemi olmak üzere farklı deney sistemleri, farklı aşırı konsolidasyon oranı, plastisite özelliği, numune hazırlama tekniğine sahip numuneler üzerinde tek yönlü veya çift yönlü tekrarlı yükler altında değişik yükleme modelleri kullanılarak drenajlı, kısmi drenajlı veya drenajsız deneyler yapılmıştır. Çalışmalarda çoğunlukla deprem yükleri, açık denizde meydana gelen dalga yükleri, trafik yükleri, pistonlu makinelerden kaynaklanan titreşimler gibi yüklerden kaynaklanan konsolidasyon oturmaları detaylı olarak incelenmiştir.

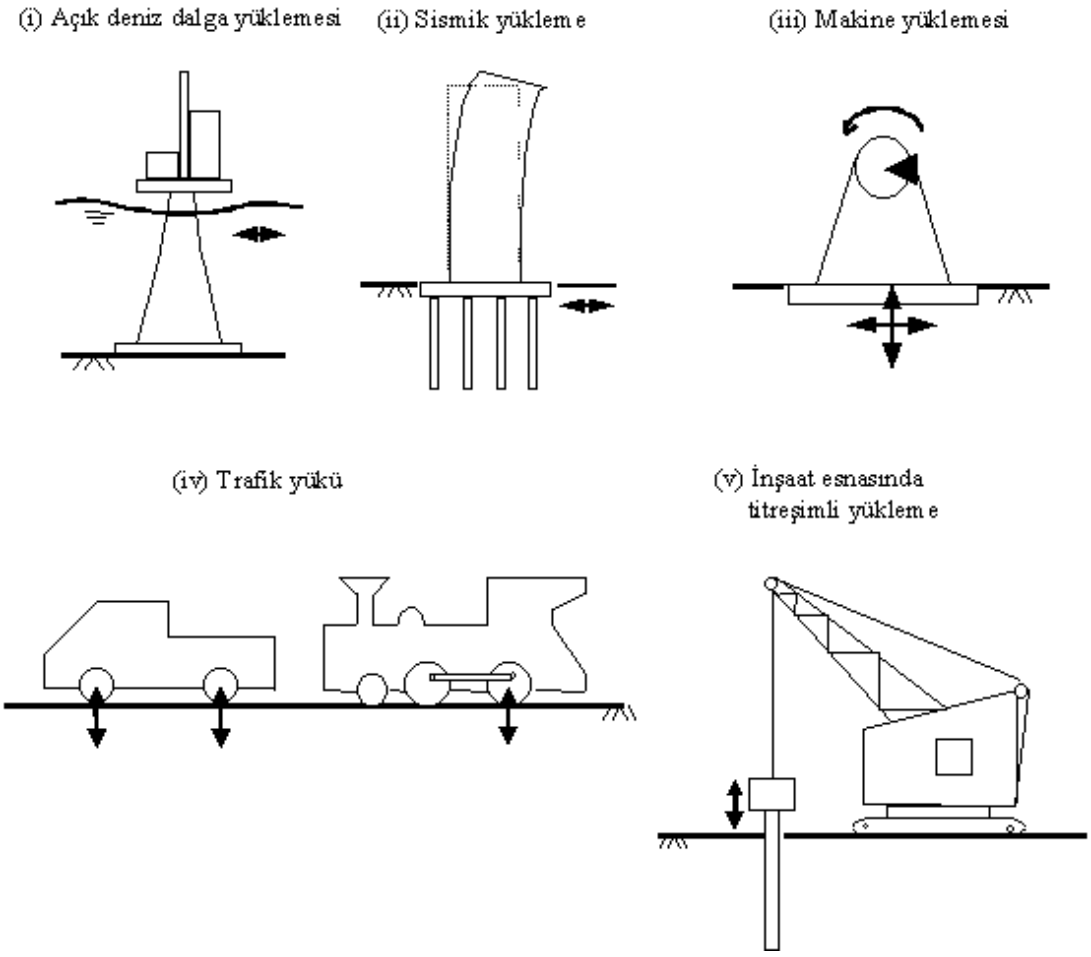
Efektif gerilmeler açısından kilin tekrarlı yükler altındaki davranışı ile ilgili Sangrey ve diğerleri (1969) tarafından yapılan çalışma bu konuda yol gösterici olmuştur. Andersen ve diğerleri (1976, 1980), Fugro, the University of Nottingham, Dutch Soil Testing Laboratory ve Norwegian Geotechnical Instıtute (NGI) gibi geoteknik danışman kuruluşlar tarafından yapılan uluslararası bir proje sayesinde tekrarlı yükler altında Drammen kilinin davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Yasuhara ve diğerleri (1982) anizotrop olarak konsolide edilmiş yüksek plastisiteli Ariake kilinin tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemişlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca drenajsız tekrarlı yükleme sonunda drenajlı ve drenajsız durumlarda, drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesi için başka metotlar önermiştir. Bu çalışmalar, kilin tekrarlı yükler altındaki davranışının belirlenmesi için zamana bağlı boşluk basıncı modeli kurulması gerektiğini ortaya koymuştur. Yasuhara ve Andersen (1989, 1991) normal konsolide killerin tekrarlı yükler altında konsolidasyon özelliklerini belirlemek amacıyla gerilme kontrollü basit kesme deney sistemi kullanarak beş kademe drenajsız tekrarlı yük ve her tekrarlı yükleme sonunda drenaj uygulayarak bir grup deney yapmış, bu yükleme şartları altında normal konsolide zeminin daha sonra uygulanacak yüklere karşı daha yüksek direnç gösterdiği görülmüştür. Ayrıca Andersen (1976, 1988, 1991, 1992), Andersen ve diğerleri (1978, 1988), Yasuhara ve diğerleri (1980, 1988, 1991, 1992), Fujiwara ve diğerleri

(1985, 1987), Hyodo ve Yasuhara (1988), Hyodo, Yasuhara, Murata, ve Hirao, (1988), Hyodo, Yasuhara, ve Murata, (1988), Ansal ve Tuncan (1989), Ansal ve diğerleri (2001), Matsui ve diğerleri (1980), Marr ve Christian (1981), O' Reilly ve diğerleri (1991), Diaz-Rodriguez ve Leyte-Guerrero (1989) ve Yasuhara (1995) gibi birçok araştırmacı killerin tekrarlı yükler altında oturma davranışını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmalarda numuneler genellikle drenajsız koşullarda deneye tabi tutulmakla beraber bazı çalışmalarda tekrarlı yükleme esnasında drenaja izin verilmiştir. Tekrarlı yüklemeler, belli çevrim, gerilme genliklerinde ve tekrarlı yüklemeler arasında drenaja izin verilerek 1-10 kez uygulanmış, drenajın daha sonraki tekrarlı yükleme esnasında oluşacak boşluk suyu basıncı ve oturmalara etkisi incelenmiştir. Bazı çalışmalarda son tekrarlı yüklemeyi takiben ya drenaja izin verilmeden hemen, ya da drenaja izin verilerek konsolidasyon oturmalarının oluşmasında sonra drenajsız koşullarda statik olarak kesilmiştir. Burada amaç tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimlerinin zeminin drenajsız kayma mukavemetine etkisini incelemektir. Farklı AKO değerlerinde yapılan deneylerde normal konsolide numunelerle aşırı konsolide numunelerin boşluk suyu basıncı, kayma deformasyon davranışı, oturma özellikleri ve drenajsız kayma mukavemeti davranışlarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür.

Statik yüklerden dolayı meydana gelen oturmalara ek olarak tekrarlı yükler de oturmalara neden olabilir. Tekrarlı yüklerden kaynaklanan ilave oturmaların karşılaşıldığı durumlar (Şekil 2.1);

1. Deprem yüklerine maruz kalan bina ve diğer yapılar,
2. Dalga yüklerinin etkili olduğu açık deniz platformları,
3. Makine titreşimi altındaki temeller,
4. Trafik yüklerine maruz yol dolguları.

Tekrarlı yükler, yapı altındaki zeminde bir hacim azalması meydana getirir. Eğer artık boşluk suyu basıncı hacim azalması meydana getirmek için yeterince hızlı sönümlenmez ise bir boşluk suyu basıncı oluşur. Kil üzerindeki yapılar tekrarlı yüke maruz kalması durumunda boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için yeterli bir süre bulunmaz. Bu durumda drenajsız koşullar geçerli olup efektif gerilmelerde azalmaya neden olacak şekilde artık boşluk suyu basıncı oluşur. Tekrarlı yükten dolayı statik gerilmelerin bölgesel olarak yeniden dağılımı ile birlikte efektif gerilmelerdeki azalma, kayma deformasyonlarının ve drenajsız yükleme esnasında yapıdaki oturmaların artmasına neden olur (Yasuhara ve Andersen, 1991).



Şekil 2.1 Zeminin tekrarlı yüklemeye maruz kaldığı durumlar (O' Reilly ve Brown, 1991).

Tekrarlı yükün kalkmasından sonra oluşan boşluk suyu basıncı azalır ve efektif gerilmeler yeniden artar. Daha sonra ise hacim azalmasına bağlı olarak ilave oturmalar meydana gelir.

Zeminin tekrarlı gerilmelerle yüklenmesi, efektif gerilmelerin azalması ve artması kilin yapısını da değiştirir ve daha sonraki tekrarlı yüklemeler altındaki davranışını etkiler (Yasuhara ve Andersen, 1991).

Tekrarlı yüklere karşı killerin kumlardan daha büyük direnç gösterdiği bilinmektedir. Örneğin killer tekrarlı yükler altında kolaylıkla göçmezken suya doygun gevşek kumların sismik yükler altında sıvılaşması söz konusudur. Kil için bu durum, depremde olduğu gibi kısa süreli tekrarlı yükleme durumunda tamamen doğrudur. Bununla beraber uzun süre kil tekrarlı yük ve drenaj çevrimlerine maruz kalırsa durum farklı olur. Bu durumda iki drenajsız tekrarlı yükleme arasında drenaj meydana gelecektir. Üç eksenli ve basit kesme deney sistemleri kullanılarak tekrarlı yük ve sonrasında drenaj uygulanarak yapılan çalışmalarda deformasyon

sertleşmesinden dolayı normal konsolide killerin daha sonraki drenajsız tekrarlı yüklere karşı göstereceği dirençte artışa neden olurken bu durumun aşırı konsolide killerde her zaman gerçekleşmeyeceğini göstermiştir. Uzun süreli drenajsız tekrarlı yükler, hem normal konsolide killerde hem de aşırı konsolide killerde artık boşluk basıncı ve kayma deformasyonu oluşumundan dolayı tekrarlı göçme meydana gelebilir (Yasuhara ve diğerleri, 1992).

Tekrarlı yükler altında killerin davranışı kumların davranışından çok daha karmaşıktır. Bunun nedeni, kumun tekrarlı yükler altındaki davranışının belirlenmesinde önemsenmeyen zamana bağlı sünme ve ön konsolidasyon periyodu gibi faktörlerin killerin davranışının incelenmesinde göz önüne alınmasıdır. Geçmişte kil zeminlerde depremler, fırtına dalgalarına maruz açık deniz yapıları ve trafik yükleri altındaki yol kaplamaları ve demiryolu dolguları gibi tekrarlı yüklemeden kaynaklanan birçok oturma ve stabilite problemleriyle karşılaşılmış olmasına rağmen bu konuda az sayıda sistemli çalışma yapılmıştır (Yasuhara ve diğerleri, 1992).

2.2 Oturma Problemlerinin Sınıflandırılması

Yapının inşa edilmesinde sonra, yapı ağırlığı ve diğer dış yükler yapı altındaki zeminde kalıcı deformasyonlara neden olacaktır. Bu durum yapıda aşağıdaki kalıcı deplasmanlara sebep olur (Andersen ve Eide, 1984):

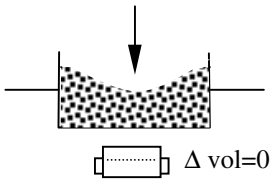
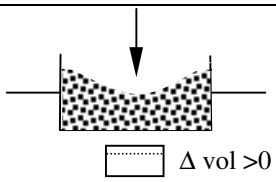
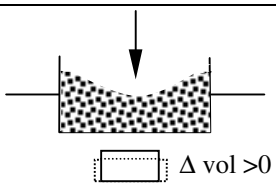
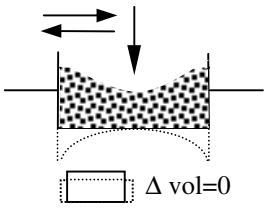
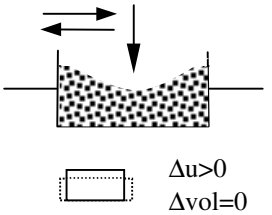
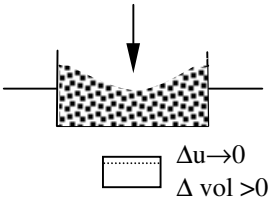
- Düşey oturma,
- Faklı oturma,
- Yatay deplasmanlar

Yapının düşey oturması farklı bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler birbirinden bağımsız olmayıp birkaç bileşen aynı anda oluşabilir ve bir diğerini etkileyebilir. Tablo 2.1'de yapı temel zemininde statik ve tekrarlı yüklerden dolayı meydana gelebilecek oturma bileşenleri gösterilmiştir.

Bu bileşenlerden ilk üçü kara ve açık deniz yapılarında gözlenirken 4. ve 5. bileşen tekrarlı yüklerden kaynaklanır ve daha çok açık deniz yapılarında görülmekle beraber karadaki yapılarda da görülebilir. Tekrarlı yükler oturmalarda artışa neden olur (Andersen ve Eide, 1984).

Farklı oturma, yapı altındaki zemin özelliklerindeki yatay değişimlerden, simetrik olmayan yüklerden oluşur. Kalıcı yatay deplasmanlar ise simetrik olmayan yatay yüklerden kaynaklanır.

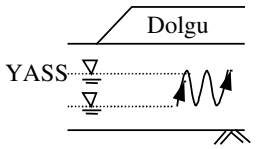
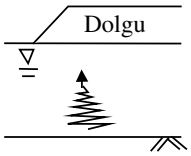
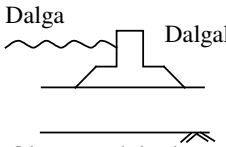
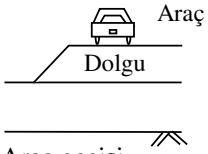
Tablo 2.1 Düşey oturma bileşenleri (Andersen ve Eide, 1984; Andersen ve Hoeg, 1992).

Yük	Oturma Bileşeni	Oturma Şekli
Statik Yük	(1a)Ani oturma (statik yükün uygulanmasıyla oluşan drenajsız koşullardaki kayma deformasyonu)	
	(1b)Drenajsız sünme (yapının ağırlığından kaynaklanan drenajsız koşullardaki kayma deformasyonu) (1a'nın devamı)	
	(2)Konsolidasyon oturması (yapının ağırlığından kaynaklanan boşluk basıncının sönümlenmesiyle oluşan hacimsel deformasyon)	
	(3)İkincil konsolidasyon (drenajlı koşullarda ve sabit efektif gerilme altında oluşan hacimsel ve kayma deformasyonları)	
Tekrarlı Yük	(4a)Bölgesel plastik deformasyonlar ve tekrarlı yük esnasında gerilmelerin yeniden dağılımı (drenajsız koşullarda kayma deformasyonları)	
	(4b)Tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk suyu basınçlarının neden olduğu efektif gerilme ve zemin ririjtliğindeki azalmanın neden olduğu kayma deformasyonları (drenajsız)	
	(5)Tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk suyu basıncının sönümlenmesiyle oluşan hacimsel deformasyonlar	

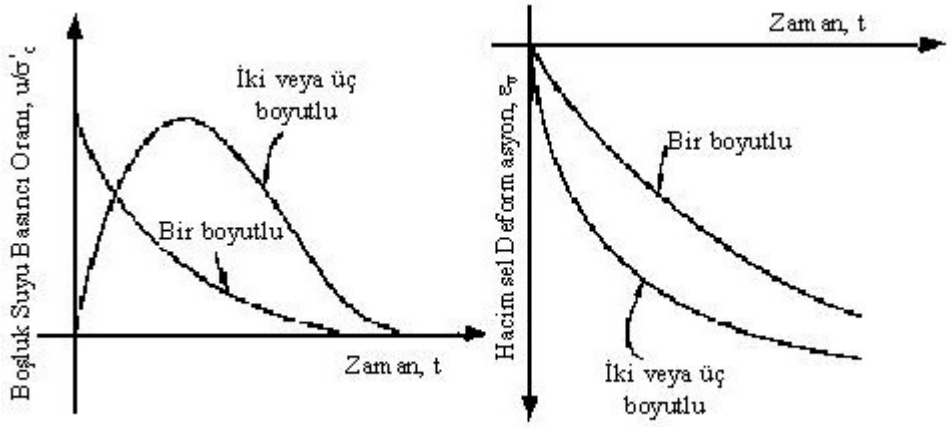
Kalıcı yatay deplasmanlar, rüzgar, akıntı ve deniz dalgasından kaynaklanan simetrik olmayan yatay yüklerden meydana gelir (Andersen ve Eide, 1984).

Zeminlerin konsolidasyon ve oturması Şekil 2.2'de görüldüğü gibi iki kategoriye ayrılır. Bunlardan birincisi göçmeye neden olurken ikincisinde göçme meydana gelmez. Tekrarlı yükler altında her iki durumdaki oturma ve artık boşluk basıncı değişimleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Bu değişimler statik ve monotonik yükleme için hemen hemen aynıdır. Birinci grup, depremlerden, okyanus dalgalarından ve trafik

yüklerinden kaynaklanırken ikinci grup yeraltı su seviyesinin mevsimsel değişimlerinden ve yakıt tanklarındaki yakıt seviyesindeki değişimlerinden oluşan durumları içerir (Yasuhara, 1995).

Deformasyonun Boyutu	Tekrarlı Yük	Muhtemel Problemler
Bir boyutlu	 Yeraltı su seviyesinin değişimi	Göçme oluşmaz, sıkışabilirlik önemli problemdir.
İki veya üç boyutlu	 (a) Depremler	Göçme ve oturma önemli problemdir.
	 (b) Okyanus dalgaları	Göçme ve oturma önemli problemdir.
	 (c) Araç geçişi	Sıkışma ve oturma önemli problemdir.

Şekil 2.2 Zeminlerin maruz kaldığı tekrarlı yüklerin sınıflandırılması (Yasuhara, 1995).



Şekil 2.3 Boşluk suyu basıncı ve oturmaların zamanla değişimi (Yasuhara, 1995).

Japonya'da tekrarlı yükler altında kohezyonlu zeminlerde oluşan oturma problemlerinin incelenmesine, 1960'ların sonlarında yumuşak zemin üzerine inşa edilmiş düşük yükseklikteki kara ve demiryolu dolgularının analizleriyle başlanmıştır (Yamanouchi ve Yasuhara, 1975). Daha sonraki yıllarda bu tür oturmaların mekanizmaları, birçok kohezyonlu zemin üzerinde özellikle tekrarlı ödometre ve tekrarlı üç eksenli deney sistemleri kullanılarak incelenmiştir (Yasuhara ve diğerleri, 1988). Kutara ve diğerleri (1980), karayolu dolguları üzerinde arazi ölçümlerine dayanarak bu tür oturmaların belirlenmesinde kullanılabilecek pratik bir metot geliştirmiştir. Demiryollarında da görülmüş olan bu tür oturmalar, demiryolu inşaatlarında önemli problemlerdir (Yasuhara, 1995).

Yasuhara (1995) yolun trafiğe açılmasında sonra kilden oluşan alt tabakalardaki oturmanın incelendiği çalışmasında zemin parametrelerini ve davranış mekanizmasını açıklamak amacıyla, tekrarlı ödometre deneyleri yapmıştır. Bununla beraber çok az da olsa trafik yükleri altında göçen zemin göz önüne alındığında ödometre deneyi yerine tekrarlı üç eksenli, direkt basit kesme ve burulmalı kesme deneyini kullanmak daha uygun olacağını belirtmiştir. Burulmalı kesme deneyi, göçmeye neden olan büyük kayma deformasyonlarına ulaşabilir. Zeminin göçme ihtimalinin bulunduğu bu gruba ait üç durum (depremler, okyanus dalgaları ve trafik) arasındaki benzerlik ve farklılıkları, Şekil 2.4'te görülen gerilme ve drenaj izleri arasındaki farklılıklar açısından incelemek gerekmektedir (Yasuhara ve diğerleri, 1988).

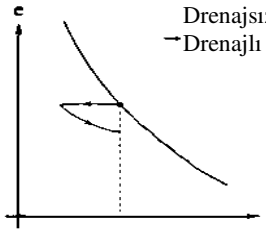
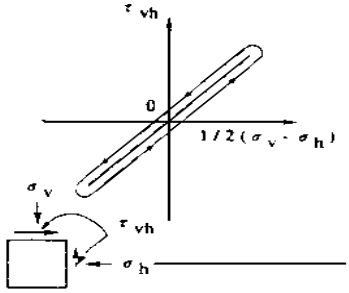
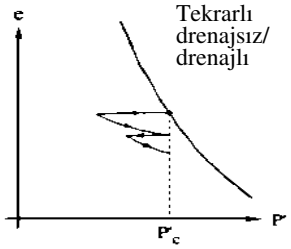
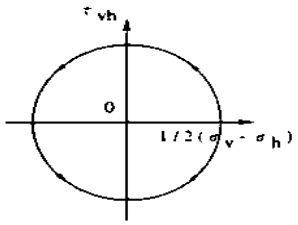
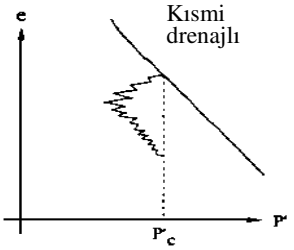
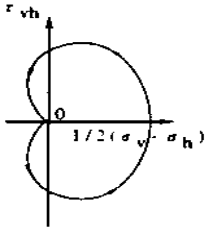
Yeraltı su seviyesinde mevsimsel değişimlerden dolayı yumuşak zeminde oluşan oturmalar genellikle bir boyutludur. Dolayısı ile bu tür oturmaların belirlenmesinde bir boyutlu konsolidasyon teorisiyle açıklanan ödometre deneylerini kullanmak uygun olacaktır (Yasuhara, 1995). Tohno ve diğerleri (1989) bu alandaki ilk çalışmayı yapmışlardır. Yeraltı su seviyesinin değişimiyle yumuşak zeminde hiçbir zaman göçme oluşmayacağı için bu tip oturmalar trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlı yüklerden oluşan oturmalardan ayrı olarak düşünülmüştür.

2.3 Efektif Gerilme Değişiminden Kaynaklanan Bir Boyutlu Oturma

2.3.1 Trafik yüklerinden kaynaklanan oturmalar

Trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlı yükler altında killerde meydana gelen oturmalara kara ve demiryollarının trafiğe açılmasından sonra karşılaşılır. Japonya'da bu tip oturmaların belirlenmesinde tekrarlı yük uygulayabilen ödometre deney sonuçları 1960'ların sonları ve 1970'lerin başlarında kullanılmaya

başlanmıştır. Bununla beraber bu tür bir yaklaşım böyle karmaşık bir problemi çözmek için bugün yeterli değildir (Yasuhara, 1995).

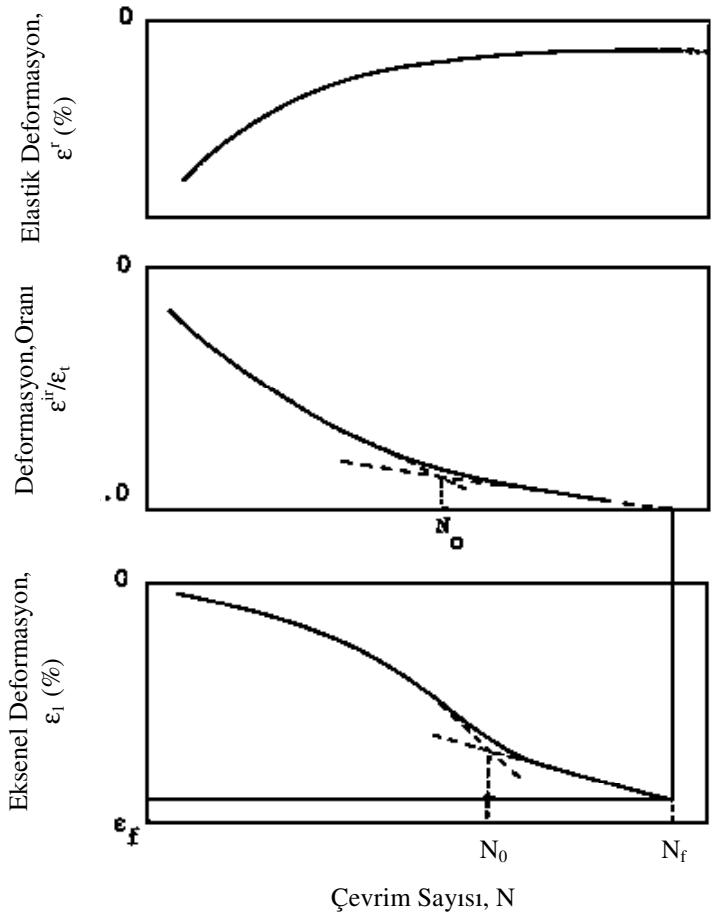
Yük Çeşidi	Durum İzi (Yasuhara ve diğerleri, 1988)	Gerilme İzi (Ishihara, 1983)
(a) Depremler		
(b) Okyanus Dalgaları		
(c) Araç Geçişi		

Şekil 2.4 Tekrarlı yükleme esnasında gerilme ve drenaj izleri (Yasuhara ve diğerleri, 1988).

Yasuhara (1995) yapmış olduğu çalışmada eksenel deformasyonla çevrim sayısının değişimi incelemiştir. Genellikle zemin deformasyonu geriye dönebilen (elastik) ($\Delta\varepsilon^r$) ve geriye dönmeyen (plastik) ($\Delta\varepsilon^{ir}$) olarak ikiye ayrılır. Yani,

$$\Delta\varepsilon_t=\Delta\varepsilon^r+\Delta\varepsilon^{ir} \qquad (2.1)$$

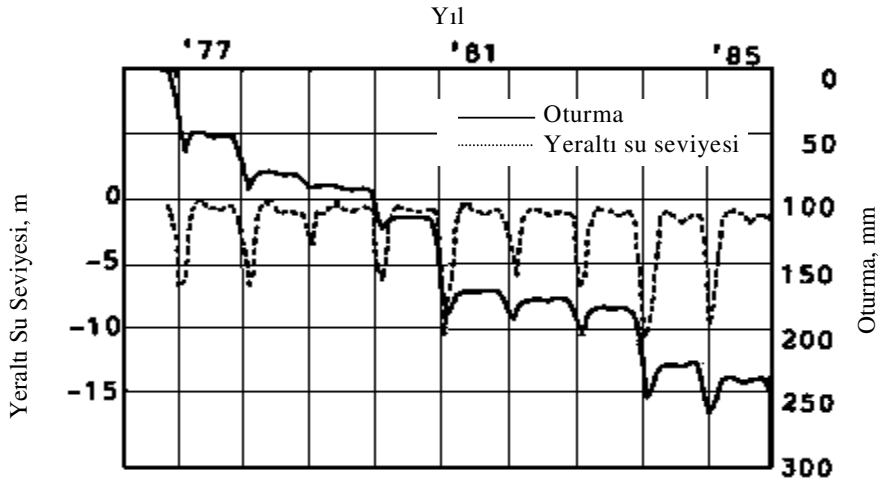
olur. Burada $\Delta\varepsilon_t$, her çevrim esnasındaki toplam deformasyon artışıdır. Örselenmemiş kil (ω_L=%54, I_P=32) üzerinde yapılan tekrarlı ödometre deney sonucunu gösteren Şekil 2.5'ten, geriye dönebilen deformasyonun gittikçe azaldığı ve en sonunda çevrim sayısıyla hemen hemen sabit kaldığı görülür. Bu tekrarlı yükler altında ilerleyen deformasyonun kilin geriye dönmeyen karakteristiklerinden kaynaklandığını gösterir.



Şekil 2.5 Tekrarlı yükleme esnasında düşey deformasyonun yaklaşık tahmini (Yasuhara, 1995).

2.3.2 Yeraltı su seviyesindeki mevsimsel değişimden kaynaklanan oturmalar

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi şehir içi yollardaki karı eritmek için kışın yeraltı suyunun çekildiği Niigata (Japonya) gibi bölgelerde yeraltı su seviyesi kışın düşer yazın yükselir. Bu durum yılda 1 çevrim frekansa sahip tekrarlı yük olarak düşünülmüştür. Yeraltı su seviyesinde bu tür mevsimsel değişimi takip eden uzun bir zaman boyunca yeraltı su seviyesinin yıllar boyunca yaklaşık olarak sabit tutulmasına rağmen, kil ve kum içeren zemin tabakaları konsolidasyon ve uzun süreli ikincil sıkışmadan dolayı düşey olarak oturmaktadır. Yeraltı su seviyesi değişimi esnasında meydana gelen bu oturma bir boyutlu konsolidasyon olarak göz önüne alınır (Tohno ve diğerleri, 1989). Muikaichi, Niigata'da yapılan bir çalışma bu bölgedeki yüzey oturmasının yeraltı su seviyesindeki düşüşle orantılı olduğunu ve çok fazla karın yağdığı 1984 yılında 92 mm'ye ulaştığını göstermiştir. Araştırmacılar bunu yumuşak zeminin oturması ile ilgili yeni bir problem olarak ortaya koymuş ve oturma-zaman ilişkisini belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir.



Şekil 2.6 Muikamachi, Niigata'da yeraltı su seviyesinin mevsimsel değişiminden kaynaklanan oturma (Tohno ve diğerleri, 1989).

Yüzey oturmaları, mevsimsel olarak kar erimesi ile meydana gelen yer altı su seviyesindeki yükselmeyle birlikte aynı zamanda tarımsal amaçlı yeraltı suyu kullanımı nedeniyle oluşan yeraltı su seviyesindeki düşüşten de meydana gelir. Saga ovasında yeraltı su seviyesinin değişim frekansı da Niigata'daki gibi genellikle yılda bir kezdir. Saga ovasından alınan Ariake kilinin oturma-zaman eğrileri yeraltı su seviyesinin orijinal seviyesine ulaşmasına rağmen kabarma yerine oturmaların zamanla arttığını göstermiştir (Yasuhara, 1995).

2.3.3 Yüksek frekanstaki hareketli yük değişiminden kaynaklanan oturmalar

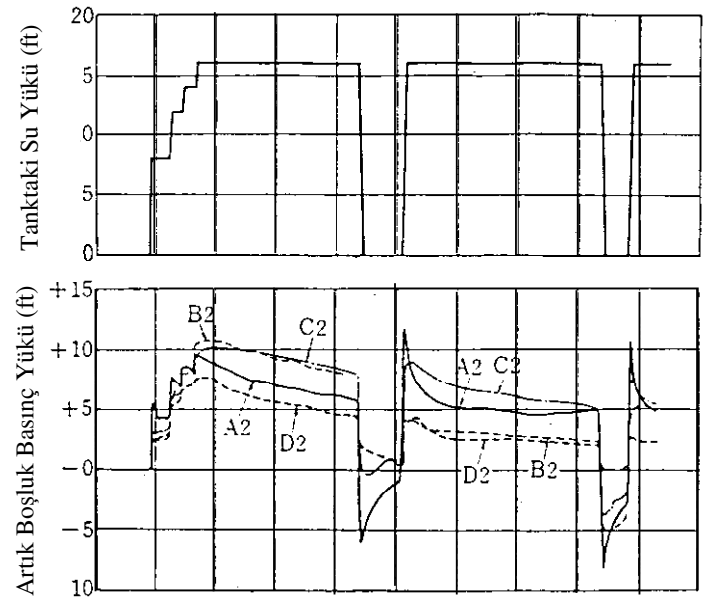
Tanklardaki yakıt veya silolardaki tahıl yüksekliğinden kaynaklanan yüklerin değişimi, yeraltı su seviyesinden kaynaklanan yüklerin değişiminden biraz daha hızlıdır. Bu durum tekrarlı yükten kaynaklanan oturma olarak değerlendirilebilir. Şekil 2.7'de bir yakıt tankı altında bulunan kumlu silt tabakasında yakıt miktarının değişimiyle ortaya çıkan yavaş tekrarlı yük etkisinde artık boşluk basıncı ile oturmanın zamana bağlı değişimini göstermektedir (Cooling ve Gibson, 1955). D/B oranının (D:kil tabakasının derinliği, B:yüklenen yapının genişliği) 1'den az olması durumunda oturmanın bir boyutlu olduğu düşünülebilir (Yasuhara, 1995).

2.4 Kısa Süreli Tekrarlı Yük Altındaki İki veya Üç Boyutlu Oturmalar

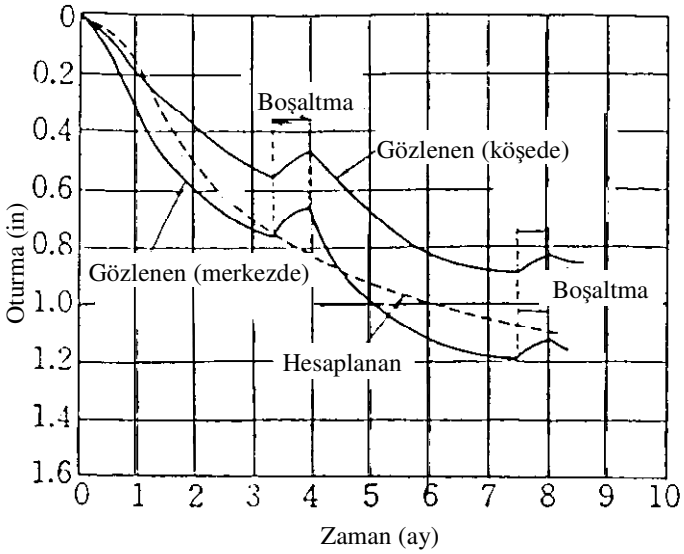
2.4.1 Depremden kaynaklanan tekrarlı yük etkisindeki oturmalar

Depremler gibi tekrarlı yükler, yüksek frekansa sahip kısa süreli tekrarlı yük uygulaması olarak tanımlanır. Dolayısı ile kohezyonlu zeminlerin drenajsız şartlara

sahip olduğu düşünülür. Bu yüzden depremler esnasında büyük kayma deformasyonları oluşursa yumuşak kil göçebilir. Bu durum yeraltı su seviyesinin değişiminden farklı olup deformasyonlar iki veya üç boyutlu olarak meydana gelir. Ayrıca göz önüne alınan yumuşak zemin üzerinde bir yapının bulunup bulunmamasına bağlı olarak oturma ve deformasyon şekli de farklıdır. Teorik olarak zemin üzerinde yapı bulunması durumunda zeminin rijitliği azalır ve bu bozulmadan dolayı yapıya hasar verecek şekilde elastik veya ani oturmalar meydana gelir. Diğer taraftan zemin üzerinde yapı bulunmaz ise elastik oturma meydana gelmez (Yasuhara, 1995).



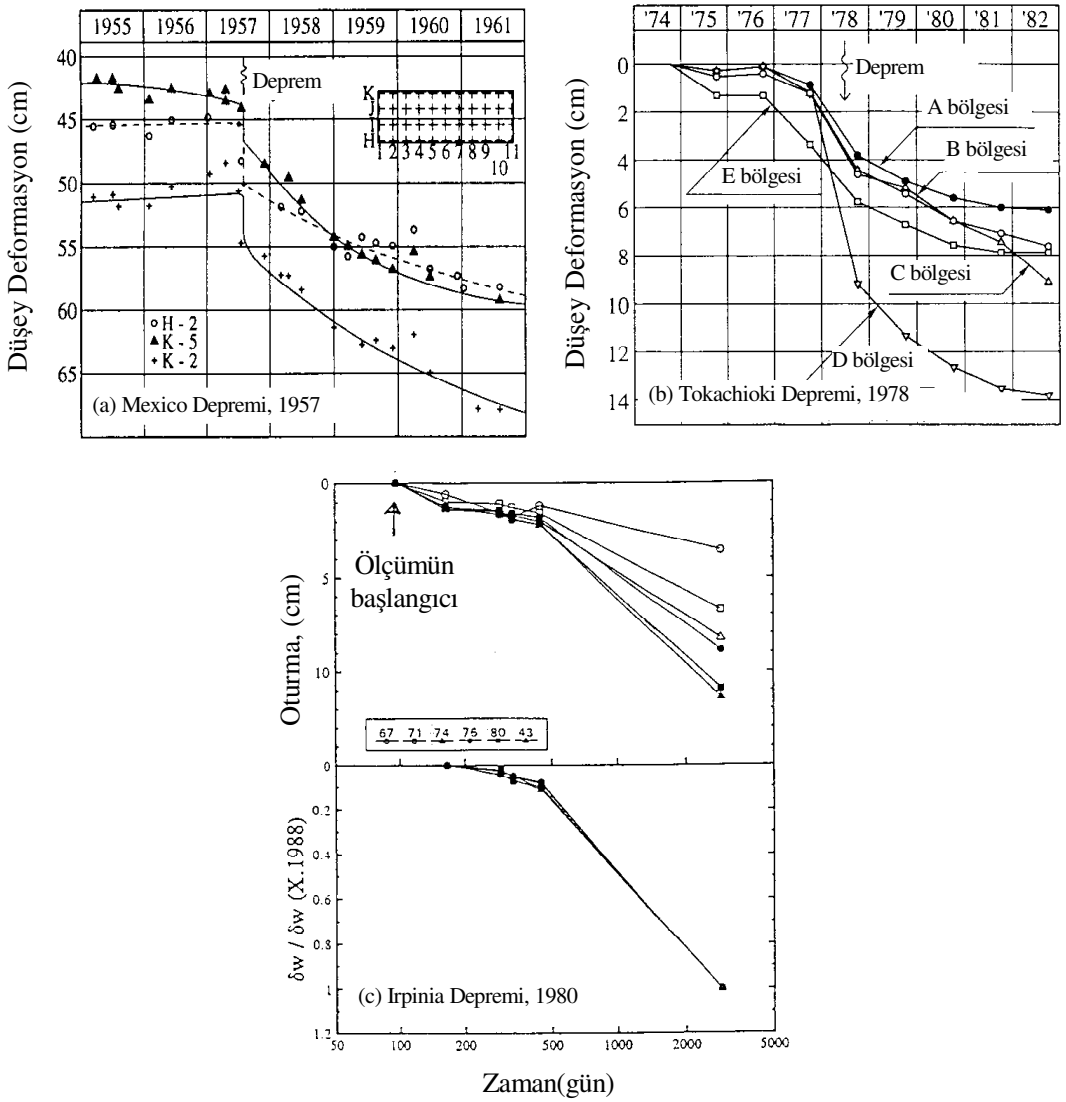
(a) Yük ve artık boşluk suyu basıncı değişimi



(b) Oturma-zaman değişimi

Şekil 2.7 Tanktaki yük değişiminden dolayı oturma ve boşluk suyu basıncının zamanla değişimi (Cooling ve Gibson, 1955).

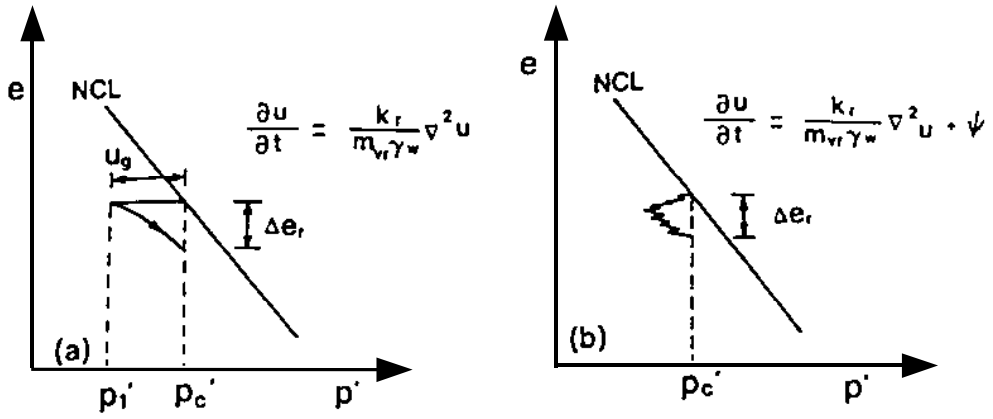
Depremden sonra tekrarlı yükten oluşan artık boşluk basıncının dağılmasıyla yumuşak zemin kademeli olarak oturur. Bu durumun görüldüğü tipik örnekler, 1957'de Meksika (yüksek plastisiteli kil), 1978'de Miyogioki, Japonya (turba) ve 1980'de Irpinia, İtalya (killi şist) depremleridir (Şekil 2.8). %15~20 arasında su muhtevasına sahip aşırı konsolide kil olan zeminde Irpinia depreminden sonra 10 yıl boyunca deprem sonrası oturmaya maruz kalmıştır. Miyagioki depreminde ise zemin turbadan oluşmaktadır. Bu turba zeminin deprem sonrası oturma özelliklerini belirlemek amacıyla, örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde direkt basit kesme deney sistemini kullanarak tekrarlı yükten sonra artık boşluk suyu basıncının dağılmasıyla meydana gelen hacim değişikliklerini incelenmiştir. Deney sonuçlarından deprem sonrası zeminde meydana gelen oturmanın yaklaşık 5 cm olduğu görülmüştür (Yasuhara, 1995).



Şekil 2.8 Depremden sonraki oturma-zaman kayıtları (Yasuhara, 1995).

2.5 Uzun Süreli Tekrarlı Yükten Oluşan İki veya Üç Boyutlu Oturma

Karayolu ve demiryollarına etkiyen trafik yükleri ve okyanus dalgalarının hareketi gibi tekrarlı yükler, uzun süreli olup bu yükler esnasında veya sonrasında drenaj meydana gelebilir. Bu durum depremler gibi kısa süreli tekrarlı yüklemeden farklıdır. Dolayısı ile Şekil 2.9'da görüldüğü gibi her iki yükleme durumuna ait konsolidasyon denklemleri de farklı olur. Tekrarlı yükleme esnasında drenaj olmasına kısmi drenaj (Şekil 2.9b) adı verilir. Bu durum tekrarlı yükleme sonrası drenajdan farklıdır (Şekil 2.9a) (Yasuhara ve diğerleri, 1988).



Şekil 2.9 Drenajlı ve kısmi drenajlı tekrarlı yükleme deneylerinde durum izleri (Yasuhara ve diğerleri, 1988).

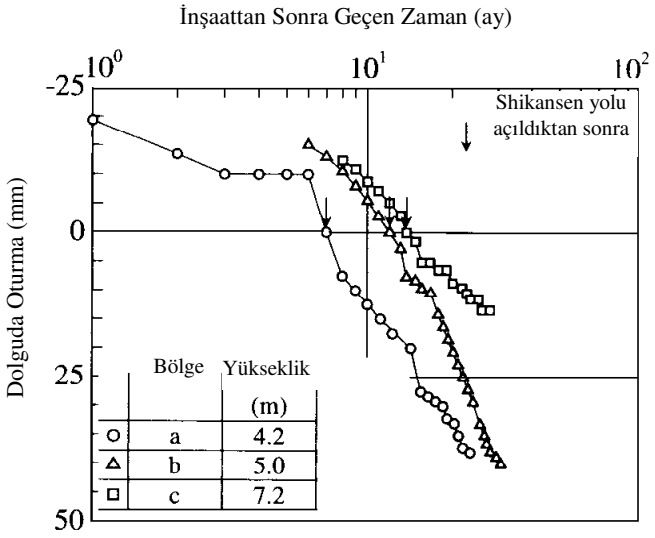
2.5.1 Trafik kaynaklı tekrarlı yük etkisindeki iki veya üç boyutlu oturmalar

2.5.1.1 Trafikten kaynaklanan tekrarlı yük etkisinde dolgulardaki oturmalar

Yumuşak zemin üzerinde küçük yükseklikte bir dolgu yapıldığında trafik yükleri zeminin oturma ve stabilitesini etkiler. Bununla beraber yüksek bir dolgu yapıldığında trafik yükleri dolgudan daha çok dolgu altındaki zemini etkiler. Şekil 2.10'da Shinkansen demiryolunda sert bir zemin üzerine inşa edilmiş yüksek bir dolguda demiryolunun trafiğe açılmasından sonra meydana gelen oturmalar görülmektedir. Bütün dolgular, oturma değeri ihmal edilebilir seviyede olan sıkı zemin üzerinde inşa edildiği için oturmaların tamamen trafik yüklerinden kaynaklandığı anlaşılır (Yasuhara, 1995).

Bu konuyla ilgili ilk çalışmalar, oturmalarla birlikte dolgunun stabilitesini de incelemek amacıyla 1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başında Seed ve diğerleri tarafından başlatılmıştır. Japonya'da, tekrarlı yükler altında düşük taşıma

kapasitesine sahip yumuşak zeminlerin mühendislik problemleri üzerindeki araştırmalar II. Dünya Savaşından sonra kara ve demiryolu gibi üst yapıların onarım çalışmaları esnasında başlamıştır. Bu alanda çalışma yapan ilk Japon bilim adamları 1964 yılında Yamanouchi ve Luo ile 1965 yılında Kawakami ve Ogawa'dır. Araştırmacılar suya doygun olmayan diğer bir deyişle dolgu zeminlerin oturma ve deformasyon özelliklerini üç boyutlu problemlerde tekrarlı üç eksenli, bir boyutlu problemlerde ise tekrarlı ödometre deney sistemini kullanarak incelemiştir (Yasuhara, 1995).



Şekil 2.10 Yolun trafiğe açılmasından sonra dolgudaki oturmalar (Yasuhara, 1995).

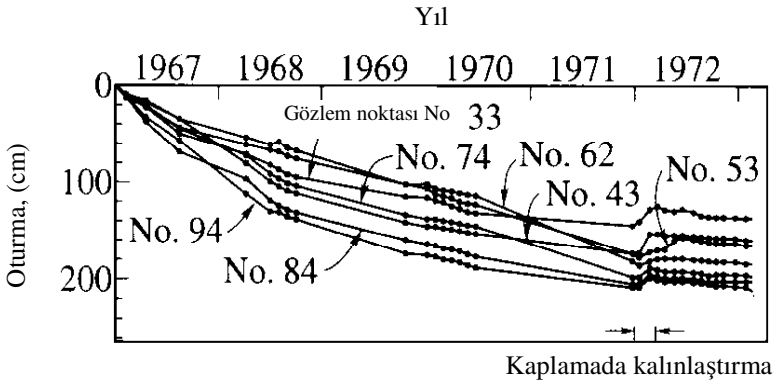
2.5.1.2 Trafik kaynaklı tekrarlı yük etkisinde yumuşak zeminlerin oturması

Malzeme kullanımını ve maliyetleri azaltmak amacıyla düşük yükseklikteki dolguların kullanılmaya başlandığı 1970'li yıllarda, tekrarlı yükler altında yumuşak zeminin davranışını belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda bir artış olmuştur. 12,6 m kalınlıktaki Ariake kili üzerinde inşa edilmiş düşük yükseklikteki bir dolgu üzerinde inşa edilen yolun trafiğe açılmasından sonra Şekil 2.11'de görüldüğü gibi önemli derecede oturma meydana gelmiştir (Yamanouchi ve Yasuhara, 1975). Gözlenen bu oturmalar kısmen killi zemin altındaki akiferden suyun çekilmesinden kaynaklanmış olsa da belirlenmiş oturma değerinin büyük olmasından dolayı trafik yüklerinden meydana gelen oturma ihmal edilemez.

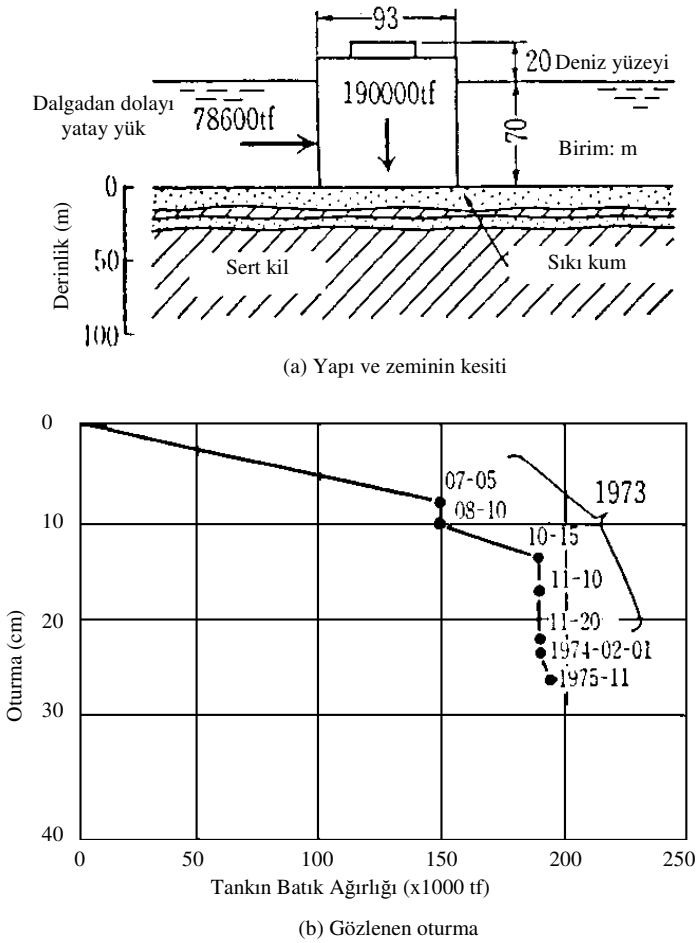
2.5.2 Okyanus dalgalarından oluşan tekrarlı yükten kaynaklanan oturmalar

Sert kil üzerinde inşa edilmiş olan açık deniz yapılarında dalga etkisiyle oturma oluşmuş en önemli durumlardan birisi ile Kuzey Denizi'nde karşılaşılmıştır. Şekil

2.12, yapıların inşaatının tamamlanmış olmasına rağmen oturmaların devam ettiğini göstermektedir. İlave oturmalar açık deniz platformuna etkiyen okyanus dalgalarından kaynaklanmıştır (Yasuhara, 1995).

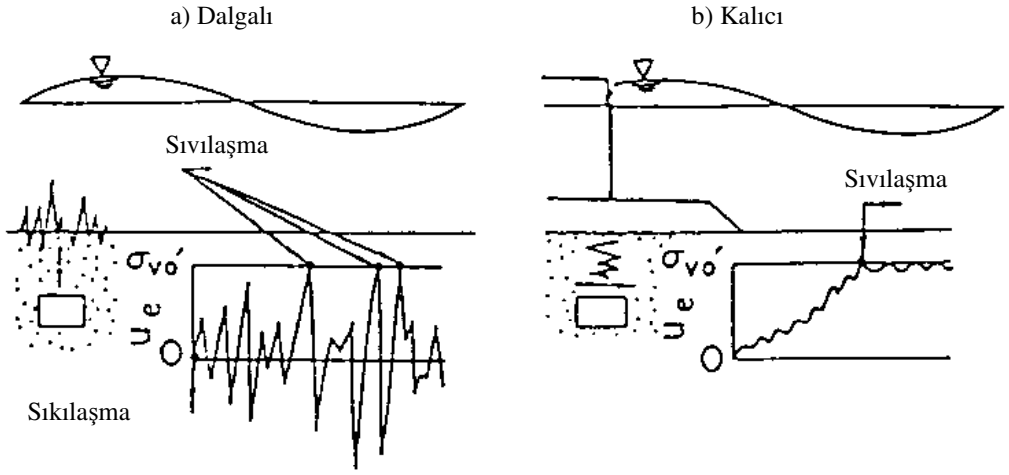


Şekil 2.11 Ariake kilinde yapılan dolguda trafiğe açıldıktan sonra gözlenen oturma-zaman değişimi (Yamanouchi ve Yasuhara, 1975).



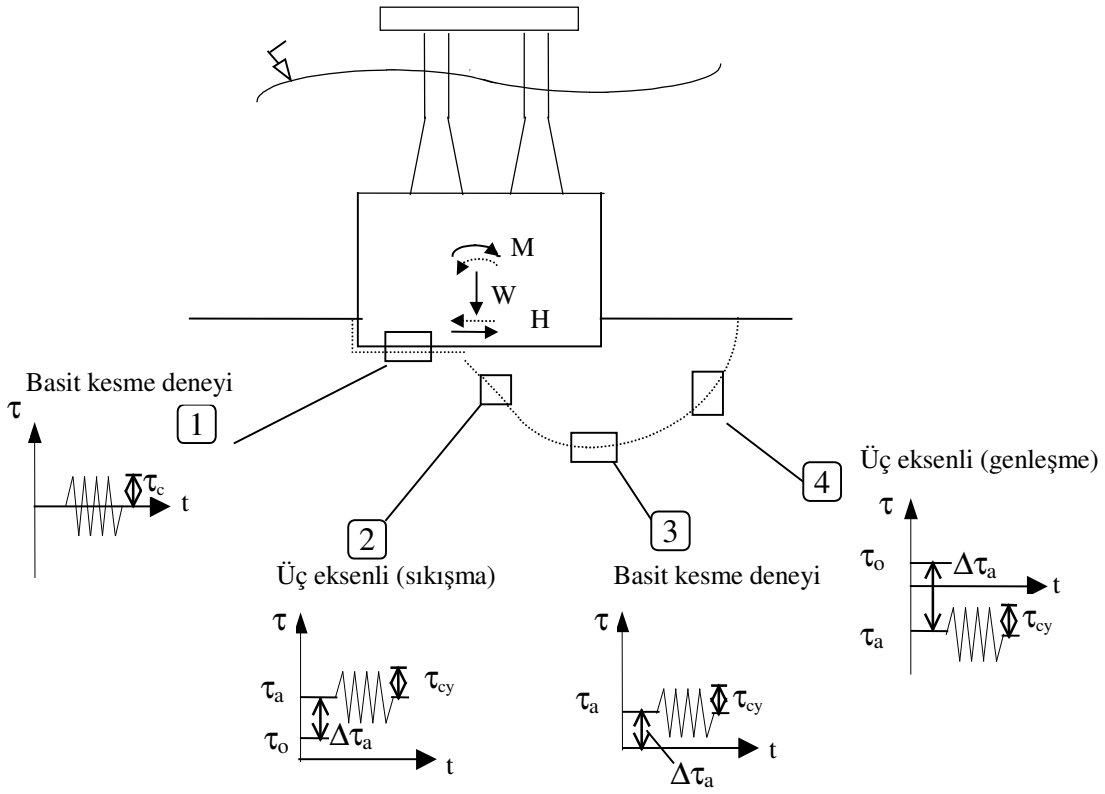
Şekil 2.12 Kuzey Denizinde inşa edilen tankta oturma-zaman kayıtları (Andersen ve diğerleri, 1978).

Okyanus dalgalarına maruz deniz tabanında, gerilme ve drenaj durumu, Şekil 2.13'te görüldüğü gibi bu seviyede bir yapı inşa edilip edilmemesine bağlı olarak iki gruba ayrılır. Okyanus dalgalarının oluşturduğu yükleme, uzun süre etkimesinden dolayı trafik yüklerine çok benzer. Geoteknik açıdan ise yükleme durumu, fırtınalı havalarda drenajsız koşullar ve iki fırtına arasında geçen durgun sürede drenajlı koşullar olmak üzere iki grupta incelenir. Drenajsız tekrarlı yüklemeden sonra boşluk suyu basıncının dağılmasıyla oluşan bu davranış deprem sırasında ve deprem sonrasında da görülür. Hem trafikten hem de dalgadan meydana gelen tekrarlı yükleme uzun süreli etkir. Bu iki durum arasındaki başlıca fark Şekil 2.3'te gösterilmiş olan gerilme izi ve Şekil 2.4'te gösterilen boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisidir (Yasuhara, 1995).

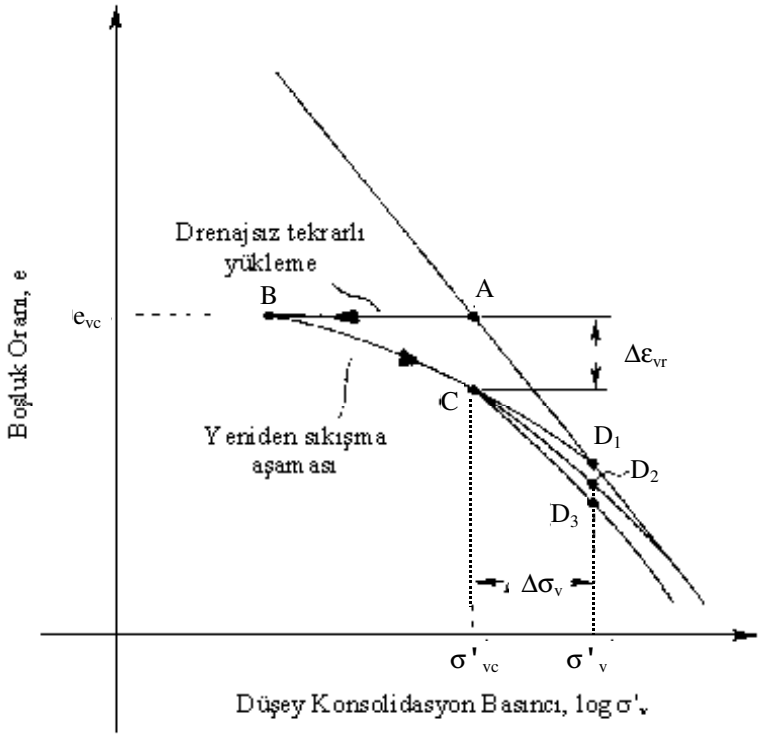


Şekil 2.13 Okyanus dalgalarından dolayı oluşan sıvılaşmanın iki türü (Yasuhara, 1995).

Deniz tabanında bulunan kil üzerine inşa edilmiş bir ağırlık platformunda (Şekil 2.14) kendi ağırlığı altında konsolidasyondan dolayı oturma meydana gelir. Bu durumda bir zemin elemanı önce Şekil 2.15'te gösterilen A noktasından D1 noktasına hareket eder. Bununla beraber, yapı, inşaatın tamamlanmasından sonra dalga hareketlerine maruz kaldığından A noktasındaki zemin elemanı, drenajsız koşullar altında B noktasına gelir. Yapının kendi ağırlığı altında konsolidasyonun oluştuğu drenajlı davranış ile aynı zamanda dalga hareketlerinden dolayı drenajsız davranışı içerdiği için bu davranış şekli çok karmaşık olmaktadır. Kolaylık sağlamak için zemin elemanının Şekil 15'te görülen $ABCD_2$ (veya $ABCD_3$) izini takip ettiği varsayılır. $ABCD_1$ yerine $ABCD_2$ veya $ABCD_3$ izini kullanmanın sebebi, daha önce Şekil 5'te gösterilen drenajsız tekrarlı yüklemeden dolayı zemin elemanının yeniden şekillenmesidir. Bunun anlamı; D_1D_2'de boşluk oranındaki azalma, tekrarlı yüklemeden kaynaklanan örselenmeden meydana gelmektedir (Yasuhara, 1995).



Şekil 2.14 Açık deniz platformu altında potansiyel bir kayma yüzeyi boyunca oluşan gerilme durumları (Andersen, 1988).



Şekil 2.15 Tekrarlı yüklemede muhtemel e-log σ'_v eğrileri (Yasuhara, 1995).

2.6 Tekrarlı Yükler Altında Yapı Temelinin Davranışı

Bir yapının ağırlığı tek başına temelin taşıma gücü açısından probleme neden olmaz. Kritik durum, ağırlığına ilave olarak büyük tekrarlı dalga kuvvetlerine maruz kaldığı zaman meydana gelir. Temel, bu tekrarlı dalga kuvvetleri altında deforme olur ve yapı, düşey oturmalardaki kademeli artışla birlikte tekrarlı yatay yer değiştirmelere maruz kalacaktır (Andersen, 1976).

Tekrarlı yüklemeler altındaki temelin davranışı, kısa süreli ve uzun süreli durum olarak ikiye ayrılabilir. Tekrarlı yükleme zeminde boşluk basınçları oluşturur. Kısa süreli durumda önemli derecede drenaj oluşması için yeterli zaman bulunmaz ve temelin drenajsız olduğu düşünülür. Uzun süreli durumda drenaj oluşacaktır. Kil zeminlerde kısa süreli durum birbirini takip eden çok sayıda tekrarlı yüke maruz kalabilir. Bununla beraber kumlarda bir çevrimlik tekrarlı yükleme esnasında önemli miktar drenaj oluşur (Andersen, 1976).

Kısa süreli durumda bir fırtına esnasında zamanla zeminin rijitliği ve drenajsız kayma mukavemeti azalır (Seed, 1968). Bunun nedeni tekrarlı yüklemeden oluşan boşluk basınçlarının efektif gerilmelerde azalmaya yol açmasıdır. Rijitlik ve mukavemetin azalması sonucunda tekrarlı yer değiştirmeler ve düşey oturmalar kademeli olarak artar, taşıma gücü güvenliği zamanla azalır.

Uzun süreli durumda tekrarlı yüklerden kaynaklanan boşluk basınçları sönümlenir. Boşluk basınçlarının sönümlenmesi, kilde hacimsel sıkışmalara ve yapının oturmasına yol açar. Yapı zaman içerisinde birçok tekrarlı yük ve daha sonra drenaja maruz kalacak ve bu durum uzun süreli oturmalarda artışa neden olacaktır (Andersen, 1976).

Drenajın takip ettiği tekrarlı yüklemeler, zeminin rijitliğini ve daha sonraki tekrarlı yüklemelere karşı göstereceği direnci de etkiler. Kumlar, önceden tekrarlı yükleme ve drenaja (ön yükleme) maruz kaldıklarında çok sıkı bir durumda olsa bile drenajsız tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk basıncı oldukça küçüktür (Bjerrum, 1973). Normal konsolide killerde de ön kesmeden dolayı boşluk basınçları benzer şekilde küçük olur. Fakat aşırı konsolide killerde büyük miktar boşluk basınçları oluşur (Andersen, 1976).

Bu etkilerden elde edilen önemli sonuçlar;

- Uzun süreli durumda kum veya normal konsolide kil üzerindeki platformun tekrarlı yer değiştirmeleri azalır, platformun stabilitesi artar.

- Aşırı konsolide kil üzerindeki platformun tekrarlı yer değiştirmeleri artar ve stabilitesi azalır.

Depremler ve dalga yüklerinden dolayı kil tabakalarındaki göçme, genellikle başlangıç drenajlı kayma gerilmelerinin etkidiği mühendislik yapısının altındaki temel bölgesinde meydana gelir. Bu tip göçme, kumlardaki sıvılaşma tipi tekrarlı yüklerden kaynaklanan göçmeden farklı tutulabilir ve tekrarlı kayma göçmesi olarak adlandırılır. Yapılan çalışmalarda killerin tekrarlı mukavemetinin artan başlangıç drenajlı kayma gerilmeleriyle azaldığını göstermiştir. Çünkü kildeki başlangıç drenajlı kayma gerilmesi, gerilme izini, stabiliteyi bozacak şekilde kritik duruma yaklaştırır. Fakat kumların drenajsız tekrarlı yükler altında sıkılığı artmaktadır (Hyodo ve diğerleri, 1999).

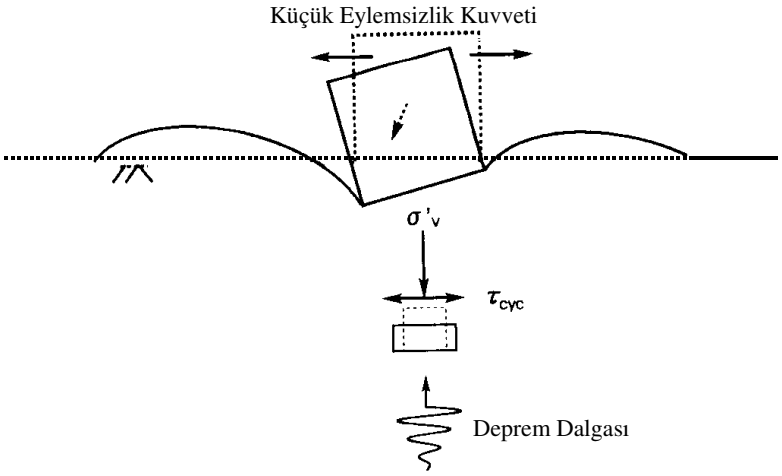
Kumlar herhangi bir başlangıç kayma gerilmesi olmadan tekrarlı yatay kayma gerilmelerinden dolayı sıvılaşabilir. Bununla birlikte killer, başlangıç kayma gerilmelerine maruz bir yapı altındaki dairesel kayma yüzeyi boyunca göçerler. Kumların ve killerin tekrarlı yükler altında göçmesi arasındaki fark Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Sıvılaşabilir bir kumda yatay kayma dalgaları sönümlenebilir ve bu nedenle yapıya etkiyen atalet kuvvetleri azalır. Bununla beraber zeminin sıvılaşmış olmasından dolayı stabilite bozulur ve göçme oluşur. Kil tabakalarda yapıdan kaynaklanan atalet kuvvetleri 1985 Mexico depreminde görüldüğü gibi çok büyüktür. Bu kuvvetler, yapının altındaki bir kayma yüzeyi boyunca tekrarlı kayma gerilmesi olarak etkir ve stabilitenin bozulmasına neden olur (Hyodo ve diğerleri, 1999).

2.7 Tekrarlı Yükler Altındaki Zeminin Temel Davranışı

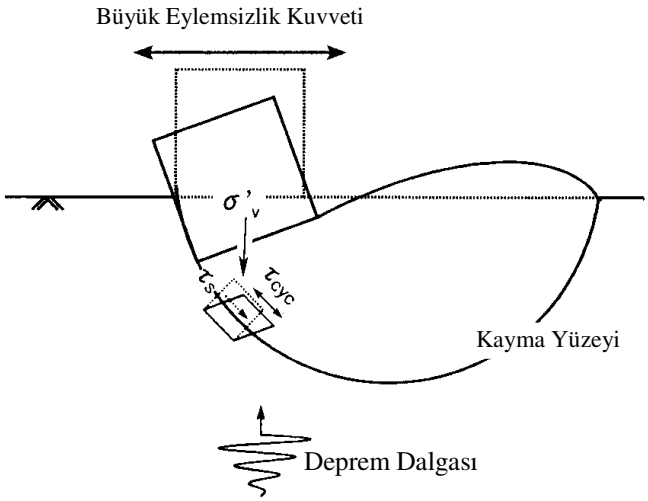
Şekil 2.17'deki Mohr-Coulomb diyagramı, tekrarlı ve/veya statik yük uygulanmış bir kil elemanındaki efektif gerilmelerin değişimini göstermektedir. Küçük tekrarlı kayma gerilmesine sahip bir eleman ilk çevrim yüklemesi esnasında a noktasından b noktasına, boşaltma esnasında ise b noktasından c noktasına hareket eder. Kilin tam elastik olmaması ve yükleme çevriminden sonra küçük kalıcı boşluk basıncı (Δu_p) oluştuğu için a ve c noktaları üst üste gelmez. Bir grup yükleme çevrimi esnasında her bir çevrimden dolayı oluşan boşluk basınçları birikecek, efektif gerilemeler azalacak ve gerilme izi (a'-b') ye hareket edecektir. Bu şekilde gerilme izi kırılma doğrusuna yaklaşır. Fakat tekrarlı yükleme altında göçme oluşması için kırılma doğrusundan hala çok uzaktır (Andersen, 1976).

Daha yüksek tekrarlı kayma gerilmelerine maruz bir zemin elemanı ilk yüklemede a noktasından d noktasına hareket eder. Bir çevrimde büyük miktar kalıcı boşluk

basıncı oluşur. Gerilme izi hızlı bir şekilde sola doğru sola doğru hareket eder ve belli bir çevrim sayısından sonra kırılma doğrusu üzerindeki e noktasına ulaşır. Bu durumda zemin elemanında büyük tekrarlı deformasyonlar oluşur ve tekrarlı yükler altında göçer (Andersen, 1976).



a) Kumun Sıvılaşması

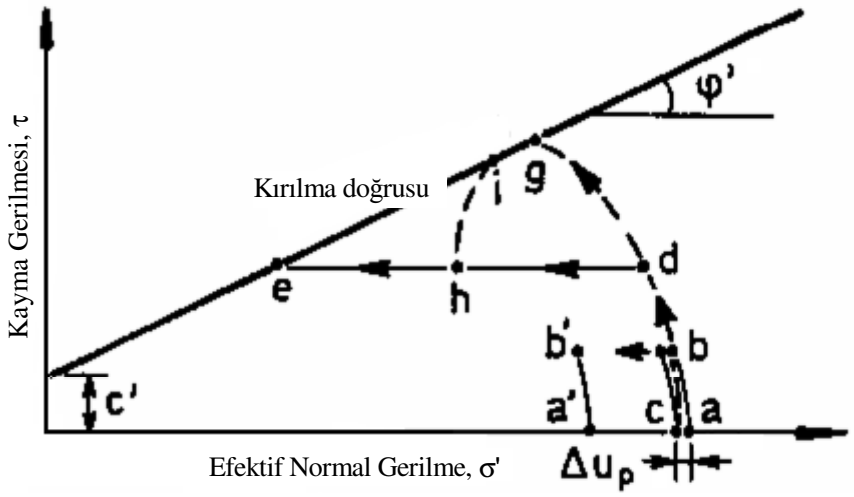


b) Kilin Tekrarlı Yük Altında Göçmesi

Şekil 2.16 Kum ve killerde tekrarlı yükler altında göçme oluşması (Hyodo ve diğerleri, 1999).

Tekrarlı yüklerin daha sonraki drenajsız tekrarlı yüklemeler altında kilin mukavemetine etkisi de Şekil 2.17 üzerinde gösterilmiştir. Drenajsız statik deneydeki gerilme izi a noktasında başlar ve g noktasında kırılma doğrusuna ulaşır. Daha önce tekrarlı yüklemeye maruz kalmış bir zemin elemanının drenajsız statik yükleme durumundaki gerilme izi h-i gerilme izi ile gösterilir. i noktası g noktasından daha

aşağıdadır. Bunun nedeni göçme kayma gerilmesinin önceki drenajsız tekrarlı yüklemeden dolayı azalmasıdır (Andersen, 1976).



Şekil 2.17 Üç eksenli deneyde tek yönlü tekrarlı ve statik yüklemelerde gerilme izleri (Andersen, 1976).

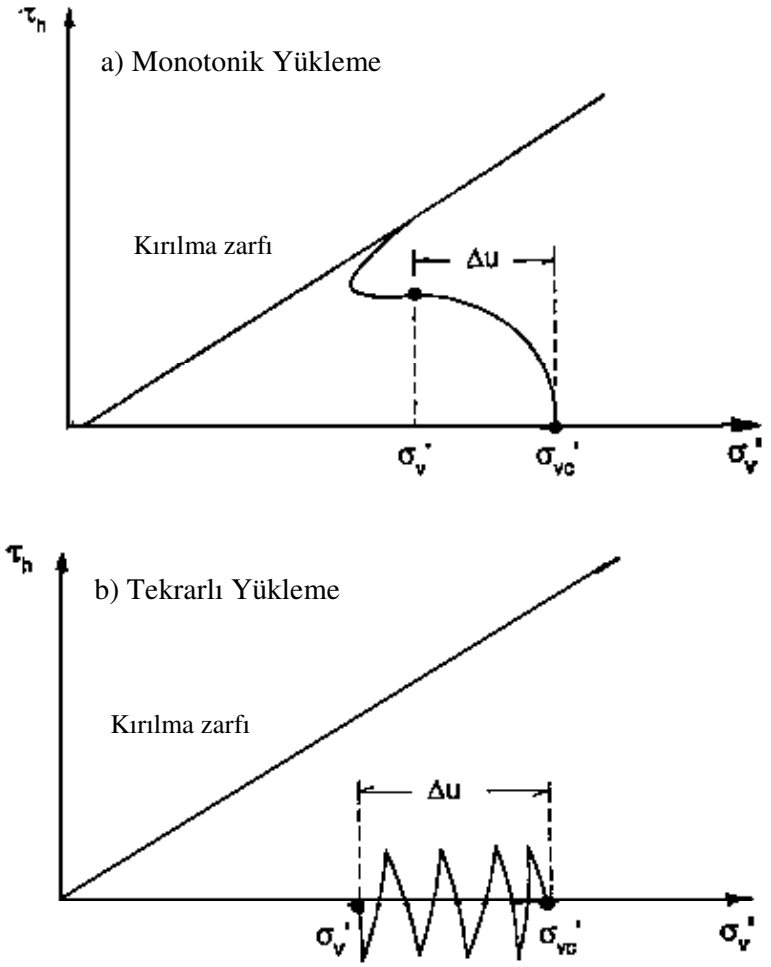
Yasuhara ve Andersen'in (1991) sabit hacimli basit kesme deney sistemi kullanarak yaptığı çalışmada monotonik ve tekrarlı yüklemeler altında sabit hacimli şartlardaki zeminin efektif gerilme ve boşluk suyu basıncı davranışı Şekil 2.18'de görüldüğü gibidir. Çalışmada, numune alanının değişmediği kabul edilerek sabit hacim, numune yüksekliğini sabit tutmak için numuneye etkiyen düşey efektif gerilmeyi (σ'_v) otomatik olarak ayarlayarak sağlanmıştır. Düşey efektif gerilme ölçülmüş, statik ve dinamik yüklemeden oluşan boşluk suyu basıncı,

$$\Delta u = \sigma'_{vc} - \sigma'_v \qquad (2.2)$$

formülünden hesaplanmıştır. Burada, σ'_{vc} başlangıç düşey efektif gerilme, σ'_v mevcut düşey efektif gerilmedir.

2.8 Kayma Deformasyonu ve Boşluk Suyu Basınçlarının Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Drenajsız tekrarlı yükler altında zeminlerde meydana gelen kayma deformasyonu ve boşluk suyu basıncını etkileyen faktörler birçok araştırmacı tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Bu faktörlerden başlıcaları; uygulanan tekrarlı yükün çevrim sayısı, gerilme oranı, yükün tek yönlü veya çift yönlü olarak uygulanma şekli, aşırı konsolidasyon oranıdır.



Şekil 2.18 Sabit hacimli basit kesme deneyinde efektif gerilme izleri ve boşluk suyu basınçları (Yasuhara ve Andersen, 1991).

Bazı araştırmacılar ise yapmış oldukları çalışmadan elde edilen verileri kullanarak regresyon analizi ile bu iki değişken için genel bir bağıntı elde etmişlerdir. Hirao ve diğerleri (1988) üç eksenli deney sistemi ile yapmış oldukları bir grup deney sonuçlarından, boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonlarının belirlenebilmesi için aşağıda verilen bağıntıları vermiştir. Bu bağıntılar kullanılarak elde edilen boşluk suyu basınçları ile kayma deformasyonu değerlerinin deneylerden elde edilen değerlerle birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

$$\frac{u_g}{\sigma_c} = 0.171 \times (\log 10N)^{1.535} \times \left(\frac{\Delta\tau_{max}}{\sigma_c}\right)^{1.418} \qquad (2.3)$$

$$\gamma_{max} = 0.241 \times (\log 10N)^{1.763} \times \left(\frac{\Delta\tau_{max}}{\sigma_c}\right)^{1.745} \qquad (2.4)$$

Burada; u_g boşluk suyu basıncı, σ_c çevre basıncı, N çevrim sayısı, $\Delta\sigma_a$ tekrarlı düşey gerilme, γ_{max} maksimum kayma deformasyonu, $\Delta\tau_{max}$ maksimum kayma gerilmesidir.

2.8.1 Çevrim sayısının etkisi

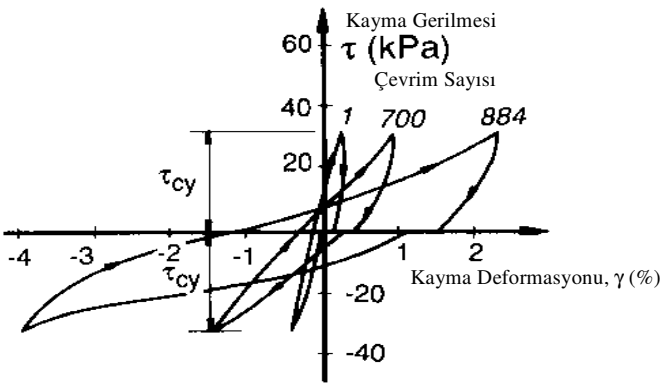
Şekil 2.19'da farklı tekrarlı yükleme durumları altında gerilme-deformasyon davranışı gösterilmiştir. Şekil 2.19a'da basit kesme deneyinde simetrik yük uygulanmış çift yönlü tekrarlı yüklemeye maruz bir kil elemanında simetrik kayma gerilmelerinin simetrik kayma deformasyonu oluşturduğu görülmektedir. Kayma deformasyonu genliği artan çevrim sayısıyla artarken kayma modülü azalmaktadır. Bunun nedeni tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk suyu basınçlarıdır. Tekrarlı kayma gerilmesi, drenajsız statik yüklemede göçmeye yol açan yatay kayma gerilmesinin %45'ine karşılık gelen değer olan ±32 kPa'da sabit tutulmuştur. Tekrarlı kayma deformasyonu ilk çevrimde ±%0.35 olup 884 çevrim sonra ±%3.1'e ulaşır. Bu durumda sekant modülü 9000 kPa'dan 1000 kPa'a düşer. Ayrıca gerilme-deformasyon eğrileri bir yük çevrimi esnasında zeminde meydana gelen sönüm anlamında olan histerisis ilmiklerini de tanımlar (Andersen ve diğerleri, 1988).

Şekil 2.19b üç eksenli deneyde simetrik olmayan gerilmeler altında çevrim sayısıyla kalıcı deformasyonlarda artış, kayma deformasyon genliğinde ise küçük bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 2.19c'de ise üç eksenli deneyde yüklemelerin simetrik olması durumunda bile kalıcı kayma deformasyon oluşmaktadır. Bu davranış simetrik yük uygulanan basit kesme deneyinde elde edilenden farklıdır. Üç eksenli deneyde kalıcı deformasyon oluşumunun nedeni, drenajsız çekme deneylerinden elde edilen kayma mukavemetinin drenajsız basınç deneylerinden elde edilen kayma mukavemetinden düşük olmasıdır. Şekil 2.19'daki üç örnek, laboratuvarda zeminlerin gerilme-deformasyon davranışı ve kayma modülünün doğru bir şekilde belirlenmesinde yükleme tipinin önemli olduğunu göstermektedir (Andersen, 1988).

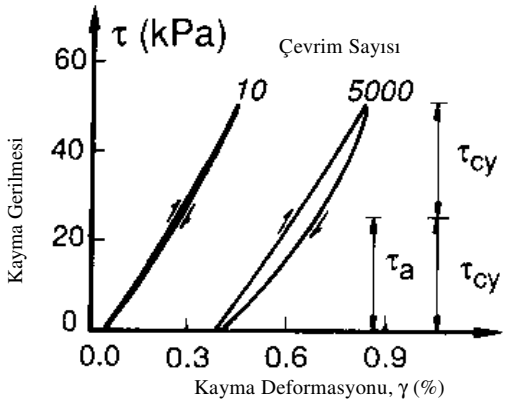
Boşluk basıncındaki değişim, Şekil 2.20'de görüldüğü gibi kildeki efektif gerilmede değişikliğe neden olur. Bu şekil üzerinde, AKO=4 olan kilde, deney esnasında uygulanan tek bir çevrim için düşey efektif gerilmedeki değişim gösterilmiştir (Andersen ve diğerleri, 1978).

Çevrim sayısı 884 iken tekrarlı kayma deformasyonları ±%3.1 olmuş numunedeki gerilme durumu statik deneylerden elde edilen kırılma doğrusuna ulaşarak göçme meydana gelmiştir. Bu durum tekrarlı yükler altında kilin göçmesinin efektif gerilmelerle açıklanabileceğini göstermektedir (Andersen ve diğerleri, 1978).

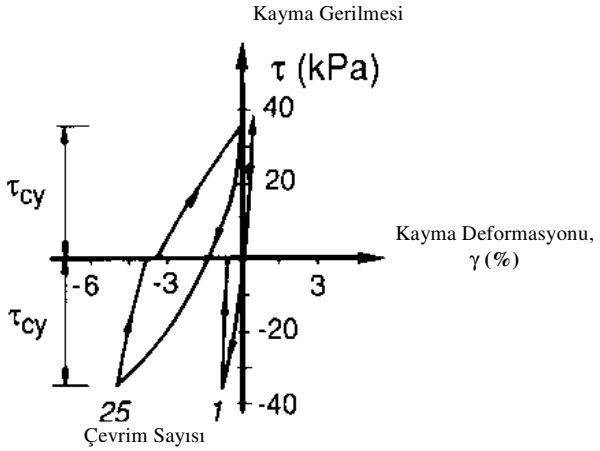
a)



b)



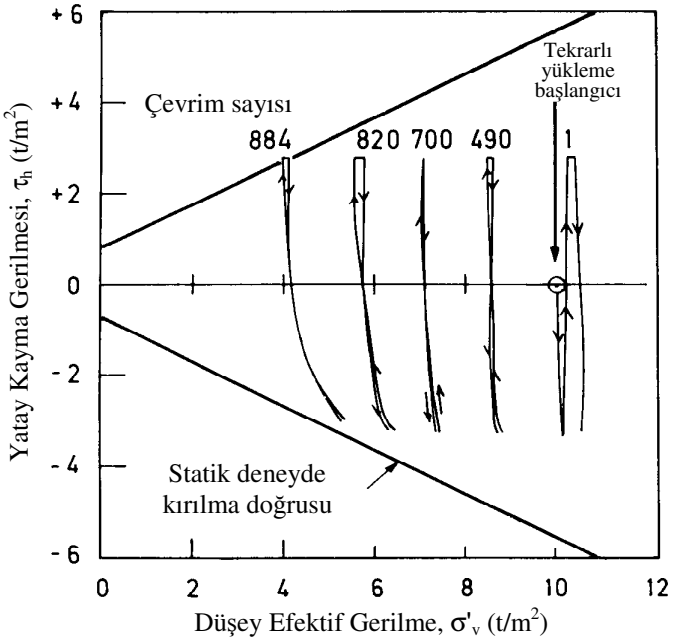
c)



Şekil 2.19 Farklı tekrarlı yüklemeler altında Drammen kilinde gerilme deformasyon davranışı (AKO=4) a) simetrik basit kesme yüklemesi, b) simetrik olmayan üç eksenli yüklemesi, c) simetrik üç eksenli yüklemesi (Andersen ve diğerleri, 1988).

Şekil 2.21, basit kesme deneyinden elde edilen deformasyonların ve boşluk basınçlarının çevrim sayısıyla değişimini gösterir. Numunedeki boşluk basıncı artan çevrim sayısıyla artmaktadır. Bu boşluk basıncı, her bir çevrimde küçük miktarda değişen kalıcı boşluk basıncıdır. Artan boşluk basıncı numuneyi Şekil 2.17'de görüldüğü gibi kırılma doğrusuna yaklaştırır. Şekilden de görüldüğü gibi artan çevrim sayısı tekrarlı kayma deformasyonların artmasına neden olur. Tekrarlı

deformasyonlar yaklaşık simetriktir ve ortalama veya kalıcı kayma deformasyonu sıfıra yakındır. Tekrarlı kayma deformasyonundaki artış başlangıçta az olup yaklaşık 700 çevrim sonunda hız kazanmaya başlar ve 800 çevrim sonuna tekrarlı kayma deformasyonu ±%3 olur. İlave birkaç çevrim büyük tekrarlı kayma deformasyonlarına neden olur ve tekrarlı kayma gerilmesi statik yüklemede göçmeye neden olan yatay kayma gerilmesinin sadece %45'i bile olsa tekrarlı yükleme altında numunede göçme oluşur (Andersen ve diğerleri, 1977).



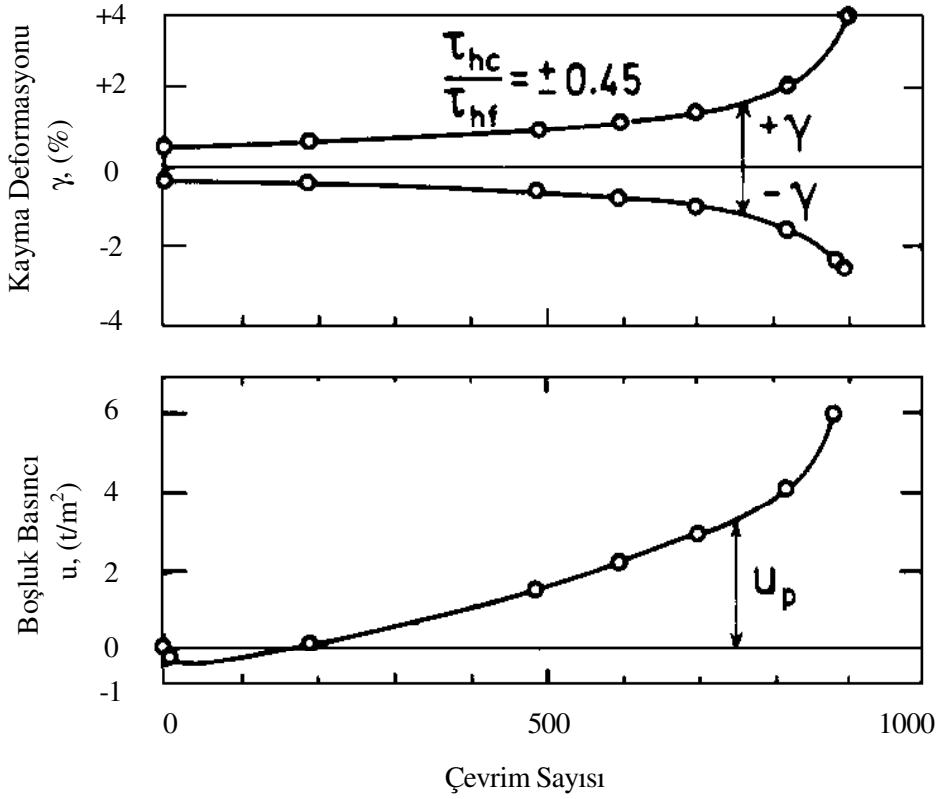
Şekil 2.20 Drenajsız çift yönlü basit kesme deneyinde efektif gerilme değişimi (Andersen ve diğerleri, 1978).

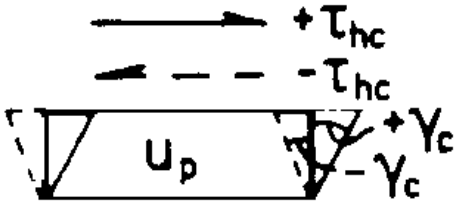
Şekil 2.22, tek yönlü üç eksenli yüklemeye maruz bir kil elemanında deformasyonların ve boşluk basınçlarının değişimini gösterir. Tekrarlı yükleme simetrik olmadığı için numunede tekrarlı deformasyona ilave olarak kalıcı deformasyonlar oluşur. Hem kalıcı hem de tekrarlı deformasyonlar artan çevrim sayısıyla artmaktadır. Üç eksenli numunede kademeli bir şekilde artan kalıcı boşluk basıncına ilave olarak tekrarlı boşluk basıncı da oluşmaktadır. Tekrarlı boşluk basıncı değişimi, bir çevrim esnasında numune üzerindeki toplam gerilmelerdeki değişimden kaynaklanır (Andersen, 1976).

2.8.2 Gerilme durumlarının etkisi

Bir platform altında bulunan temeldeki gerilme durumları oldukça karmaşıktır ve tekrarlı yüklemelere maruz kilin davranışı büyük oranda gerilme durumlarına

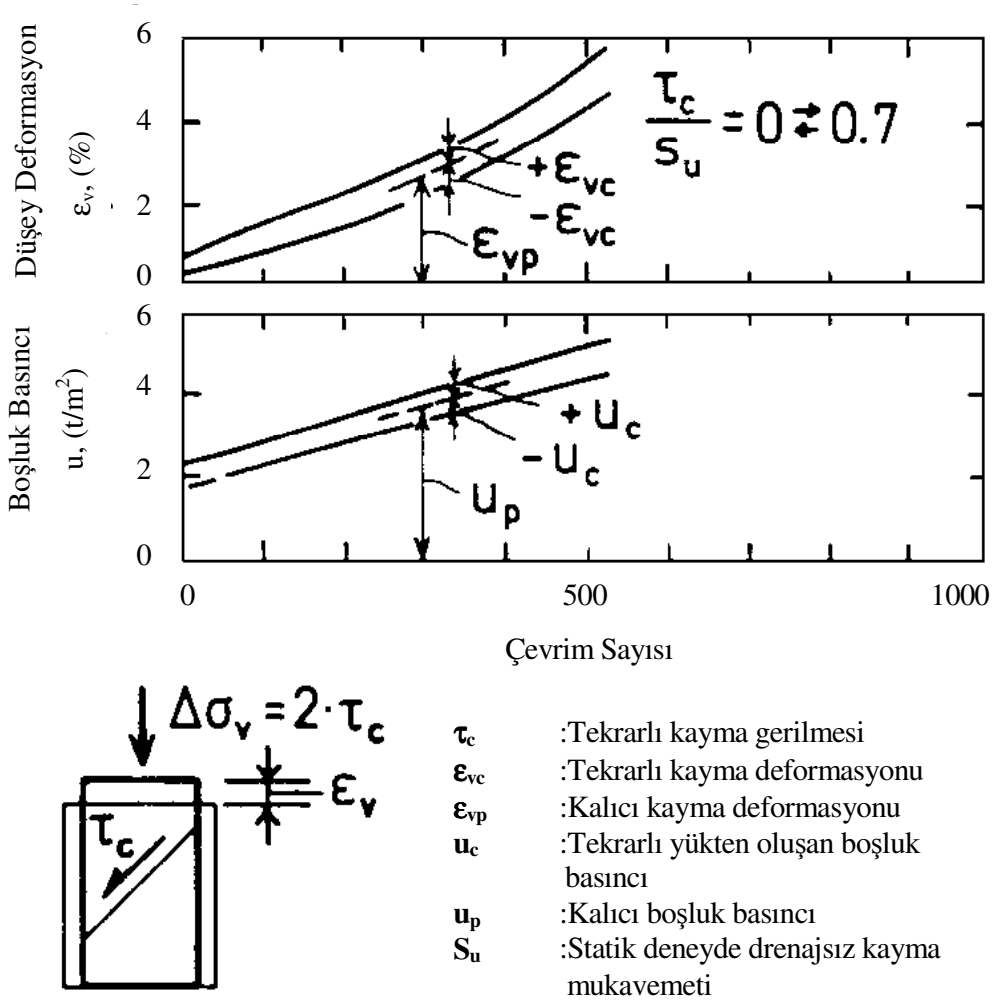
bağlıdır. Bu durum tekrarlı yüklemeli üç adet deney sonucunun verildiği Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Bütün numuneler tekrarlı yükleme esnasında 50 kPa büyüklüğündeki aynı maksimum kayma gerilmesine kadar yüklenmiştir. Fakat kayma gerilmesi genlikleri farklıdır. Şekilde verilmiş olan sonuçlar bu üç numunenin davranışlarının oldukça farklı olduğunu gösterir. Bunun anlamı, maksimum kayma gerilmesinin tekrarlı yüklemenin etkisini belirlemede tek bir parametre olarak kullanılamayacağıdır (Andersen, 1988). Kayma gerilmesi seviyesi mukavemet mobilizasyon derecesi olarak tanımlanır.





τ_{hc} :Tekrarlı kayma gerilmesi
γ_c :Tekrarlı kayma deformasyonu
u_p :Tekrarlı yükten oluşan kalıcı boşluk basıncı
τ_{hf} :Statik deneyde göçme anındaki yatay kayma gerilmesi

Şekil 2.21 Çift yönlü tekrarlı yüklemeli basit kesme deneyinde deformasyonların ve boşluk suyu basınçlarının oluşumu (Andersen ve diğerleri, 1977).

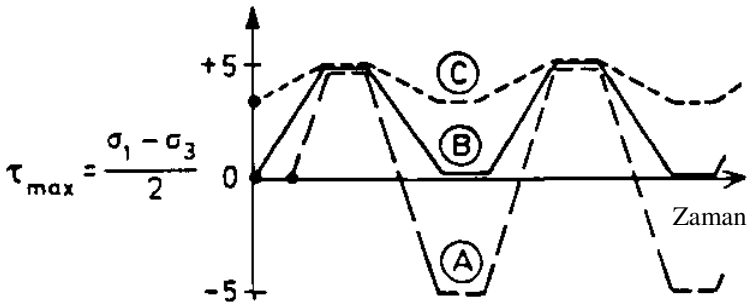


Şekil 2.22 Tek yönlü tekrarlı yüklemeli üç eksenli deneyde deformasyonların ve boşluk suyu basınçlarının oluşumu (Andersen, 1976).

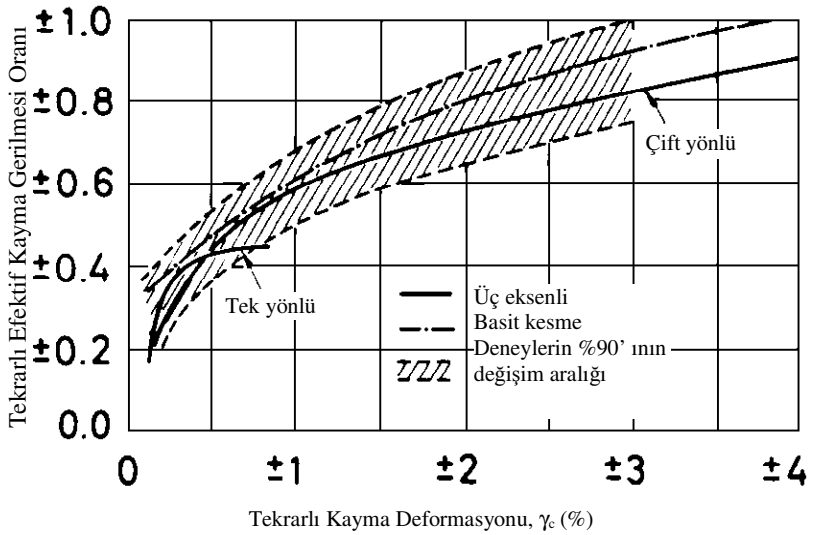
Şekil 2.24'te farklı deney tipleri için tekrarlı kayma deformasyonları ile tekrarlı efektif gerilme seviyeleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 2.24'teki diyagram kil numuneler üzerinde yapılan tek yönlü üç eksenli ve çift yönlü basit kesme deney sonuçlarını gösterir. Bu numunelerin aşırı konsolidasyon oranı 1, 4 ve 10'dur. Bu şekildeki deneyler için ortalama veya kalıcı kayma gerilme seviyesi 0.5'ten azdır.

Daha yüksek kalıcı kayma gerilmesi seviyesine sahip numunelerde, tekrarlı kayma deformasyonunun, hem tekrarlı hem de kalıcı kayma gerilmesi seviyesinin bir fonksiyonu olduğu düşünülmüştür. Şekil 2.24'te gösterilen tekrarlı kayma gerilmesi seviyesi ile tekrarlı kayma deformasyonları arasındaki ilişki çevrim sayısından bağımsızdır ve tekrarlı yüklemeye maruz kilin davranışı efektif gerilmelere bağlıdır (Andersen, 1976).

Deney no	Yükleme tipi	τ_{maks} Konsolidasyon	τ_{maks} Yükleme	Sonuçlar
A	Çift yönlü	0.0	-5↔+5	10 çevrimden sonra göçme
B	Tek yönlü	0.0	0↔+5	2500 çevrimden sonra $\gamma c=\pm\%0.3$ $\gamma p=\%0.8$
C	Tek yönlü	3.5	+3.5↔+5	2500 çevrimden sonra $\gamma c=\pm\%0.02$ $\gamma p=\%0.03$



Şekil 2.23 Farklı tekrarlı yüklemeli üç eksenli deneylerin karşılaştırılması (Andersen, 1988).

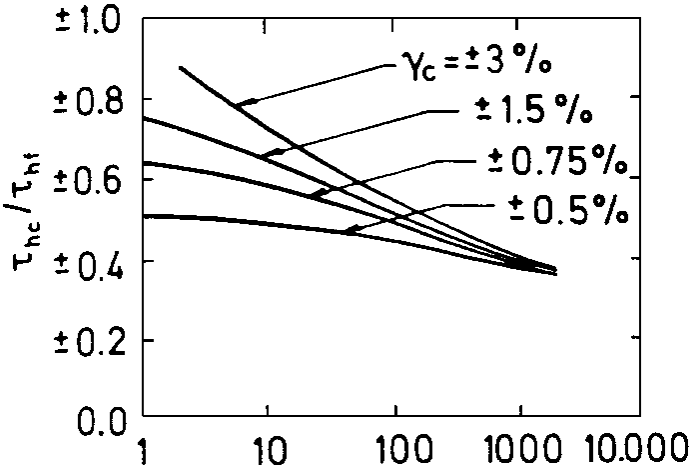


Şekil 2.24 Farklı deneylerde efektif kayma gerilmesi oranı ile tekrarlı kayma deformasyonu arasındaki ilişki (Andersen, 1976).

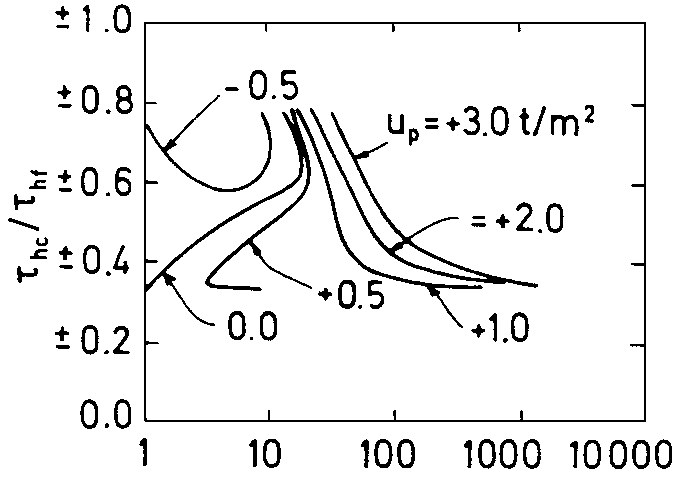
Ağırlık tipi platformların temel dizaynında efektif gerilme prensibi kullanılırsa, platforma temelindeki farklı gerilme durumları için güvenilir efektif gerilme belirlemesi yapılır. Eğer bu şekil bir belirleme zor olursa toplam gerilme prensibine göre deney sonuçları kullanılabilir. Bu durumda dizayn temeldeki farklı bölgeleri temsil eden deney tipinin kullanılmasını içeren gerilme izi metoduna bağlı olarak yapılır. Zeminin davranışı üzerine gerilme durumunun bağlı olması, tekrarlı yükleme açısından problem değildir. Statik yüklemeler için de benzer problemler vardır ve toplam gerilme prensibine göre gerilme izi metodu statik yükleme için daha önce başarı ile kullanılmıştır (Andersen, 1976).

2.8.3 Tekrarlı kayma gerilmesi seviyesinin etkisi

Çift yönlü tekrarlı yüklemeli deneylerden elde edilen tekrarlı kayma deformasyonları ve kalıcı boşluk basınçlarının oluşumuna ait örnekler Şekil 2.25 ve 2.26'da gösterilmiştir. Göçmeye (±%3 tekrarlı kayma deformasyonu olarak tanımlanan) neden olan çevrim sayısı, azalan tekrarlı kayma gerilmesiyle hızlı bir şekilde artar. Şekil 2.25 ve 2.26'dan tekrarlı toplam kayma gerilmesinin ±%0.33'ten az olması durumunda tekrarlı yüklemenin, kilin davranışı üzerindeki etkisi önemsiz derecede olmaktadır. Bu limit değer; kil tipi, aşırı konsolidasyon oranı ve tekrarlı yüklemenin türü gibi faktörlere bağlıdır (Andersen, 1976).



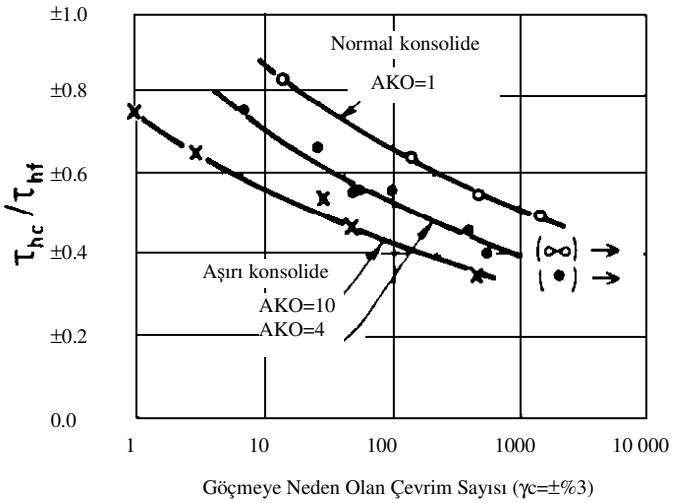
Şekil 2.25 Sabit tekrarlı kayma gerilmeleri altında basit kesme deneyinde kayma deformasyonlarının oluşumu (Andersen, 1976).



Şekil 2.26 Sabit tekrarlı kayma gerilmeleri altında basit kesme deneyinde boşluk suyu basıncının oluşumu (Andersen, 1976).

2.8.4 Aşırı konsolidasyon oranının etkisi

Drammen kili üzerinde yapılan basit kesme deneylerinden elde edilen Şekil 2.27'de göçmeye yol açan çevrim sayısının aşırı konsolidasyon oranına bağlı olduğu görülür. Aşırı konsolidasyon oranının benzer etkileri, tek yönlü ve çift yönlü yükleme uygulanan üç eksenli deneylerde de görülmüştür. Bunun pratikteki anlamı, toplam gerilme prensibine göre normal konsolide kil üzerindeki temel, aşırı konsolide kil üzerindeki temelden daha düşük bir güvenlik sayısıyla dizayn edilebilir (Andersen, 1976).



Şekil 2.27 Basit kesme deneyinden elde edilmiş farklı aşırı konsolidasyon oranlarında göçmeye neden olan çevrim sayıları (Andersen, 1976).

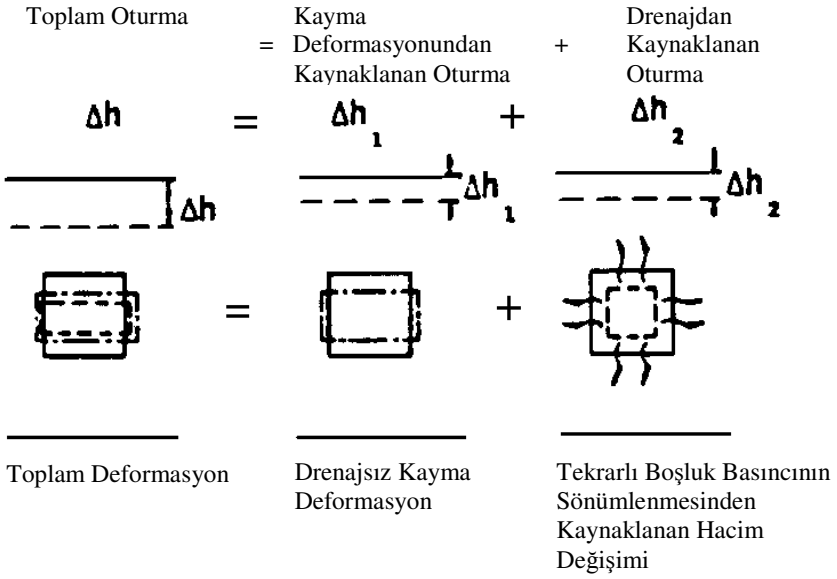
2.9 Uzun Süreli Drenajsız Tekrarlı Yükler Altında Zeminin Oturması

Tekrarlı yükleme ve daha sonra drenaj uygulanan kilin deformasyonu aşağıdaki iki bileşenden oluşur:

1. Drenajsız tekrarlı yükleme altında kayma deformasyonu,
2. Tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk basıncının sönümlenmesiyle oluşan hacim değişimi (Hyodo ve diğerleri, 1988).

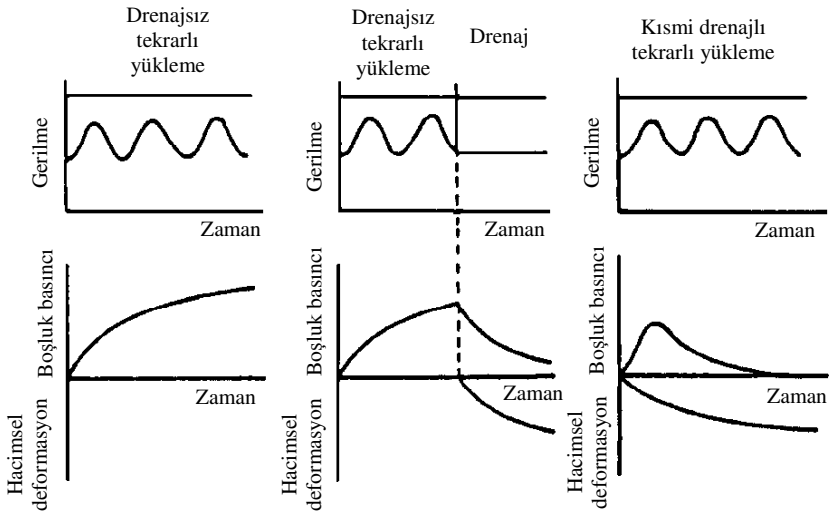
Bu davranışı açıklayan şematik gösterim Şekil 2.28'de verilmiştir. Toplam deformasyon bu iki faktörün kombinasyonundan elde edilir. Depremin yatay sarsıntısından kaynaklanan bir boyutlu oturmalar değerlendirilirken ikinci bileşen daha etkilidir. Bununla beraber tekrarlı yükleme problemlerinde her iki faktöründe göz önüne alınması gerekir. Bu faktörleri ayrı ayrı incelemek için Şekil 2.29'da gösterilen aşağıdaki deneyler yapılmaktadır (Hyodo ve diğerleri, 1988):

1. Drenajsız tekrarlı deneyler: Bu tip deneylerden elde edilen sonuçlar boşluk basıncı ve rezidüel kayma deformasyonunun belirlenmesinde kullanılmaktadır.
2. Drenajın takip ettiği drenajsız tekrarlı deneyler: Bu tip deneyde numuneye belli sayıda tekrarlı yük uygulandıktan sonra drenaja izin verilir, tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk basıncından dolayı numunedeki hacim değişimi ölçümünden hacimsel sıkışabilirlik ve permeabilite katsayıları belirlenmektedir.
3. Drenajlı tekrarlı deneyler: Sistemin drenajları açılarak numuneye drenajlı koşullarda tekrarlı yük uygulanır. Deneydeki amaç uzun süreli tekrarlı yükleme koşullarındaki kilin deformasyonunu incelemektir. Drenajlı yükleme esnasında kilin düşük permeabilitesinden dolayı numune boyunca boşluk basıncı dağılımı üniform değildir. Bu nedenle bu tip bir deney kısmi drenajlı deney olarak adlandırılabilir.

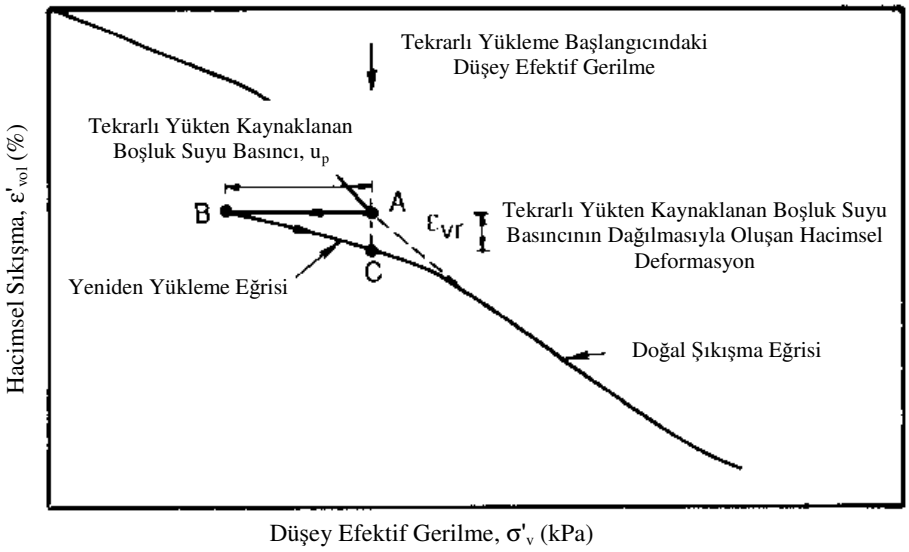


Şekil 2.28 Tekrarlı yükten zeminde oluşan oturmanın şematik gösterimi (Hyodo ve diğerleri, 1988).

Drenajsız tekrarlı yükleme sonucu oluşan kalıcı boşluk basıncı zemindeki efektif gerilmelerde azalmaya neden olur. Drenajsız koşullar söz konusu olduğundan hacimsel deformasyonlar sıfır olacaktır. Bu durum Şekil 2.30'da A noktasının yatay olarak B'ye gelmesini ifade eder. Zamanla drenaj oluşur, artık boşluk basıncı sönümlenir, efektif gerilmeler artar ve zemin, B noktasından C noktasına tekrar yükleme eğrisi boyunca bir davranış gösterir. Eğer efektif gerilmeler, tekrarlı yükleme başlangıcındaki efektif gerilmeleri aşacak kadar arttırılırsa zemin, tekrarlı yükleme eğrisinin devamı boyunca hareket edecek ve yaklaşarak doğal yükleme eğrisiyle birleşecektir (Andersen, 1991).



Şekil 2.29 Tekrarlı yükler altında oturmaların incelendiği deneyler (Hyodo ve diğerleri, 1988).

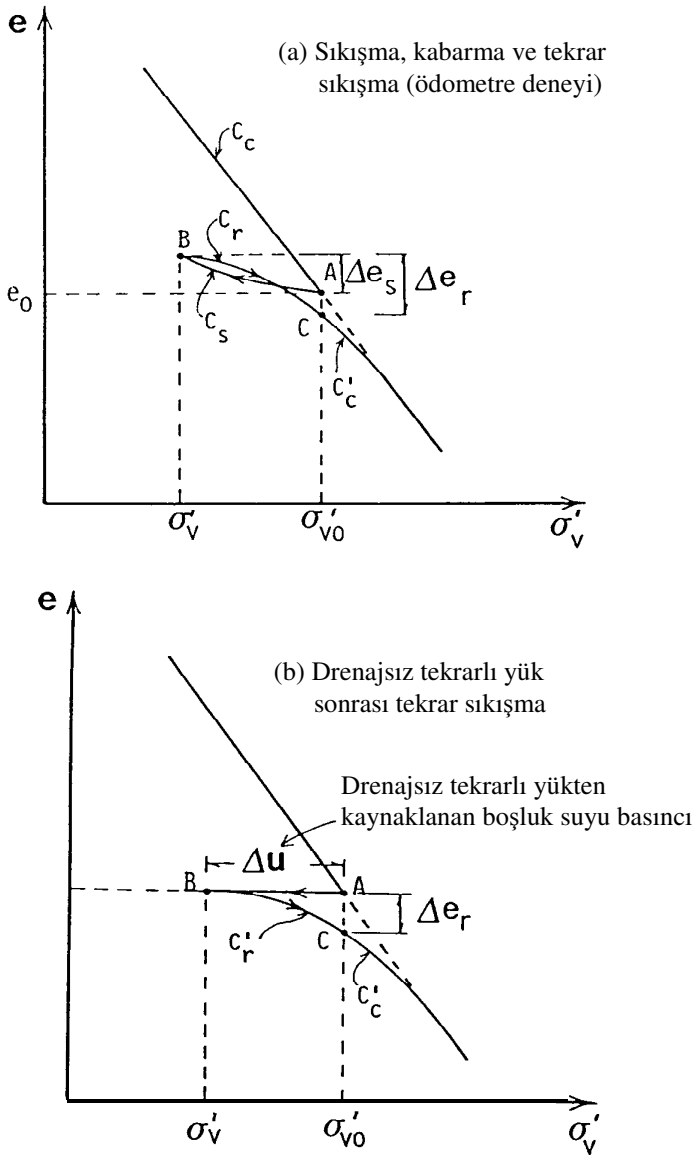


Şekil 2.30 Drenajsız tekrarlı yükleme ve daha sonra uygulanan drenaj esnasında düşey efektif gerilme ile hacimsel deformasyonların değişimi (Andersen, 1991).

2.10 Normal Konsolide Killerde Tekrarlı Yükleme Sonrası Konsolidasyon Oturması

Drenajsız tekrarlı yüklemeden dolayı oluşan boşluk basıncı kilde efektif gerilmelerin azalmasına neden olur. Tek kademe tekrarlı yük ve hemen sonra drenaj uygulanan

numune ile klasik konsolidasyon deneyinden elde edilen numunenin davranışı Şekil 2.31'de görülmektedir. Tekrarlı yük uygulanan deney sonuçları Şekil 2.31b'de görülmekte olup tekrarlı yükten sonra efektif gerilmedeki azalma, A noktasının B noktasına gelmesi ile gösterilmiştir. Zamanla drenaj oluşur ve artık boşluk suyu basıncı dağılır. Efektif gerilmeler tekrar artar ve kil, B noktasından C noktasına tekrar yükleme eğrisi boyunca davranış gösterecektir. C noktasında ise tekrarlı yük uygulamadan önce sahip olduğu efektif gerilme değerine ulaşır. BC eğrisi, numunelerin sıkışma, kabarma ve tekrar sıkışmaya tabi tutulduğu ödometre deneyinden elde edilen tekrar sıkışma bölümüyle benzerlik gösterir (Andersen, 1988).



Şekil 2.31 Ödometre ve tekrarlı yük sonrasında drenaj uygulanan basit kesme deneyinde e- log σ'_v nin şematik gösterimi (Andersen, 1988).

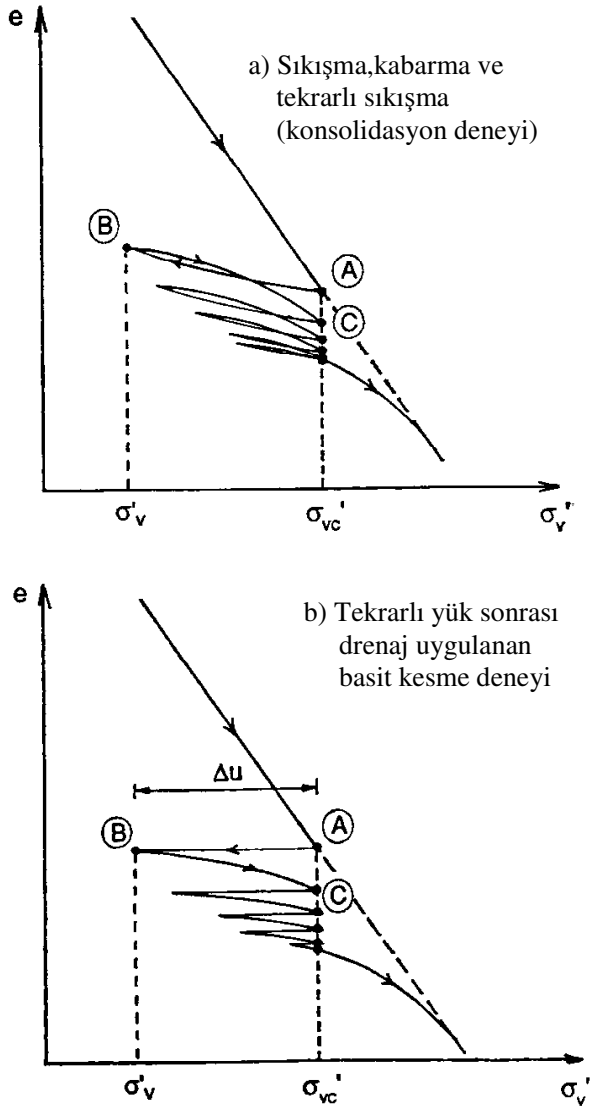
Şekil 2.32'de (Yasuhara ve Andersen, 1991) 5 kez tekrar yükleme-boşaltma uygulanan konsolidasyon ve tekrarlı basit kesme deneylerinden elde edilen boşluk oranı-efektif gerilme değişimleri görülmektedir. İki deneyin karşılaştırılmasından, tekrar yükleme modüllerinin yaklaşık eşit olduğu görülür. Tekrarlı deneyde ilk çevrimden sonra boşluk suyu basıncının dağılması sonucu eğrinin B'den C'ye gelmesi ile Δe yaklaşık 0.6 olmaktadır. Konsolidasyon deneyinde de birinci tekrar yüklemede eğrinin B'den 1'e gelmesi sonucu da yaklaşık aynı Δe elde edilmiştir. Bununla beraber iki deney arasında önemli bir fark bulunmaktadır. Konsolidasyon deneyinde boşaltma esnasında önemli bir kabarma meydana gelmektedir. Tekrarlı yüklemede ise boşaltma drenajsız koşullarda oluşur ve hiç kabarma oluşmaz. 5 kademe tekrarlı yükleme-drenaj çevriminden elde edilen toplam oturma miktarı aynı sayıda yükleme boşaltma uygulanan konsolidasyon deneyinden elde edilmiş oturma miktarından oldukça yüksek olmaktadır (Andersen, 1988).

Yükleme-boşaltma-yeniden yükleme deneyleri sonunda, tekrarlı deneyde D noktası, statik konsolidasyon deneyinde ise 5' noktasına ulaşılmış olur. D noktası 5' noktasına göre doğal sıkışma eğrisinden oldukça uzaktır. Yani tekrarlı yükleme deneyleri gözle görülür bir konsolidasyon etkisi yaratır. Eğer zemin boşaltma-yeniden yükleme serilerinin başlangıcındaki efektif gerilmeyi aşan bir değere kadar yüklenirse, tekrarlı yükleme altındaki numune, konsolidasyon testinden daha büyük efektif tekrarlı gerilme aralığı üzerinde oldukça düz bir tekrar yükleme eğrisi izleyecektir ve konsolidasyon deneyinden daha küçük ilave oturmalar meydana gelecektir. Eğer tekrarlı yüklemeli deneyde efektif gerilmeler doğal sıkışma eğrisine ulaşacak kadar yükseltilirse toplam oturmalar her iki deneyde de aynı olacaktır (Andersen, 1988).

Temel zemininin konsolidasyonu veya kabarmasını takip eden drenaj, deprem, rüzgar, okyanus dalgaları gibi tekrarlı yükleme esnasında veya bu etkilerin kalkmasından sonra meydana gelir. Daha sonraki tekrarlı yükler esnasında zeminin davranışına böyle bir drenajın etkisi, temelin uzun süreli davranışının belirlenmesi açısından önemlidir (Andersen ve diğerleri, 1976).

Andersen ve diğerleri (1976) tarafından normal konsolide killerde tekrarlı yüklemeler arasında drenaj uygulanarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.33'te verilmiştir. Bu şekildeki sonuçlar, çevrim sayısı 100 olan ve 10 kez drenajsız tekrarlı yükleme uygulanarak yapılan basit kesme deneylerinden elde edilmiştir. Her drenajsız tekrarlı yüklemeden sonra drenaj uygulanmıştır. Şekil tekrarlı yatay kayma gerilmesinin $\tau_{hc}=\pm 50$ kPa olduğu normal konsolide numuneden elde edilmiş sonuçları gösterir. Bu yatay kayma gerilmesi, drenajsız statik yüklemede göçmeye yol açan yatay kayma gerilmesinin %57'sine eşittir. İlk 100 çevrim

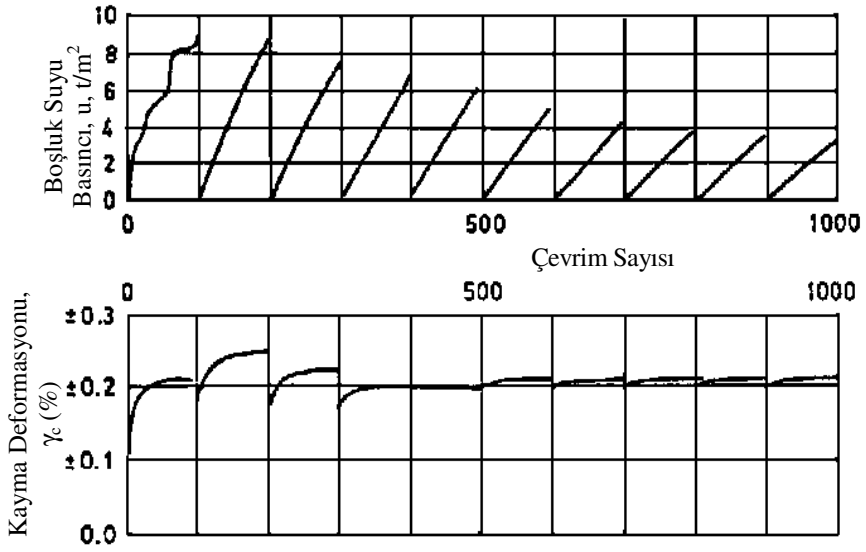
esnasında ortalama 80-90 kPa değerinde boşluk basıncı oluşmuştur. Daha sonraki yükleme aşamalarında boşluk basıncı oluşumu azalmış ve 10. yükleme esnasında sadece 35 kPa olmuştur. Bunun anlamı, 9 kez tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanarak yapılan ön yükleme, normal konsolide kili stabilize etmiş ve daha sonraki drenajsız tekrarlı yüklemeye karşı daha dirençli yapmıştır. Tekrarlı kayma deformasyonları üzerindeki etkide Şekil 2.33'te görülmektedir. Fakat bu etki boşluk basıncında olduğu kadar belirgin değildir.



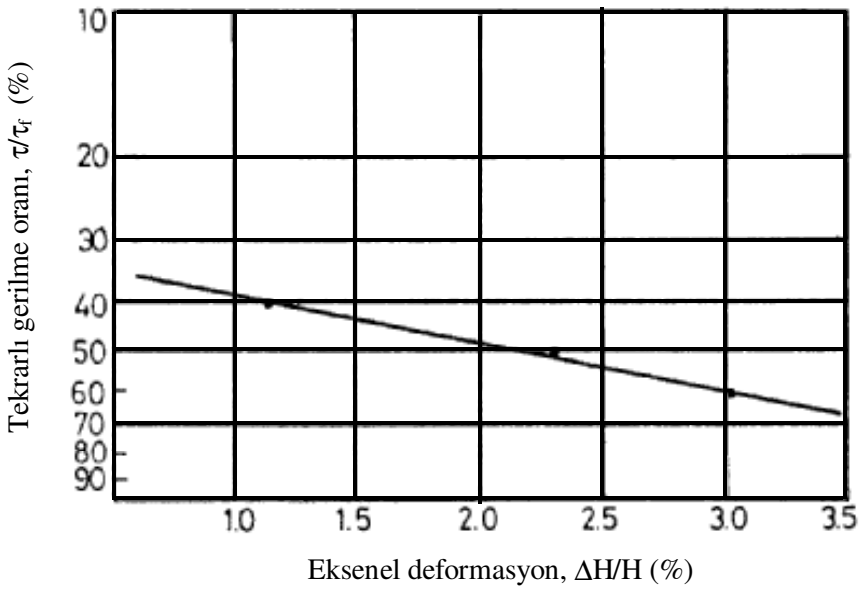
Şekil 2.32 Normal konsolide kilde 5 kez drenajsız tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmış deneyde e-log σ'_v değişimi (Andersen, 1988).

Ansal ve Tuncan'ın (1989) dinamik basit kesme deney sistemi kullanarak tekrarlı gerilmelerden kaynaklanan konsolidasyon oturmalarına, çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme genliğinin etkilerini inceledikleri çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 2.34

ve 2.35'te verilmiştir. Her iki şekilden, tekrarlı yüklemeden kaynaklanan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesiyle meydana gelen düşey oturmaların yarı logaritmik eksende çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme genliği ile doğrusal bir değişim gösterdiği görülmektedir. Çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme genliğinin artmasıyla oturmalarda da artış olmaktadır. Bunun nedeni çevrim sayısı gerilme genliklerindeki artışın boşluk suyu basıncında artışa neden olmasıdır.

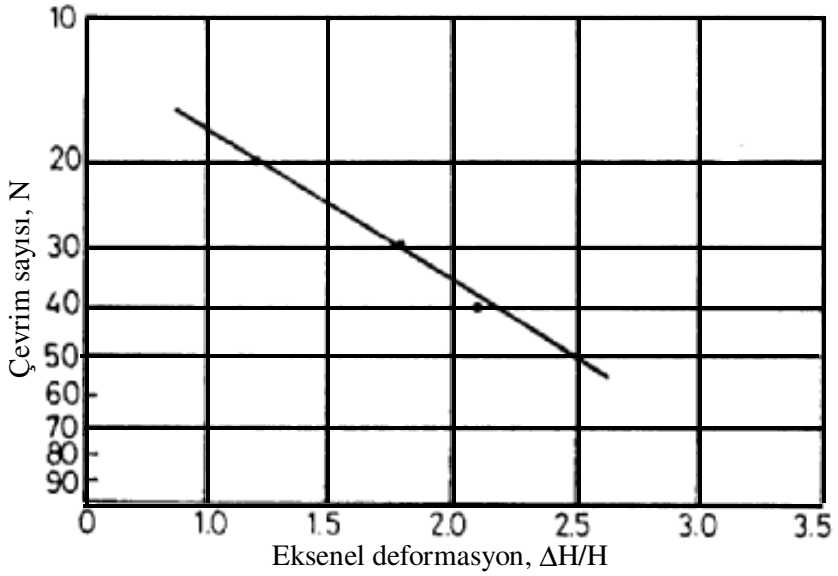


Şekil 2.33 Drenajsız tekrarlı yüke maruz normal konsolide kildeki boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonlarına drenajın etkisi (Andersen ve diğerleri 1976).



Şekil 2.34 Oturmaların tekrarlı gerilme genliğiyle değişimi (Ansal ve Tuncan,1989).

Yasuhara ve Andersen'in (1989) normal konsolide kaolin üzerinde yapmış oldukları çalışmadan elde edilen hacimsel deformasyonların boşluk suyu basınçlarına bağlı değişimi Şekil 2.36'da verilmiştir. Ayrıca çalışmadan elde edilen sonuçlarla tekrarlı yükler altında oluşan oturmaların pratik hesabı için aşağıdaki formülün kullanılabileceği ifade edilmiştir.



Şekil 2.35 Oturmaların çevrim sayısıyla değişimi (Ansal ve Tuncan,1989).

$$\varepsilon_{vr} = \frac{C_r}{1+e_c} \times \log\left(\frac{1}{1-\Delta u / \sigma'_{vc}}\right) \quad (2.5)$$

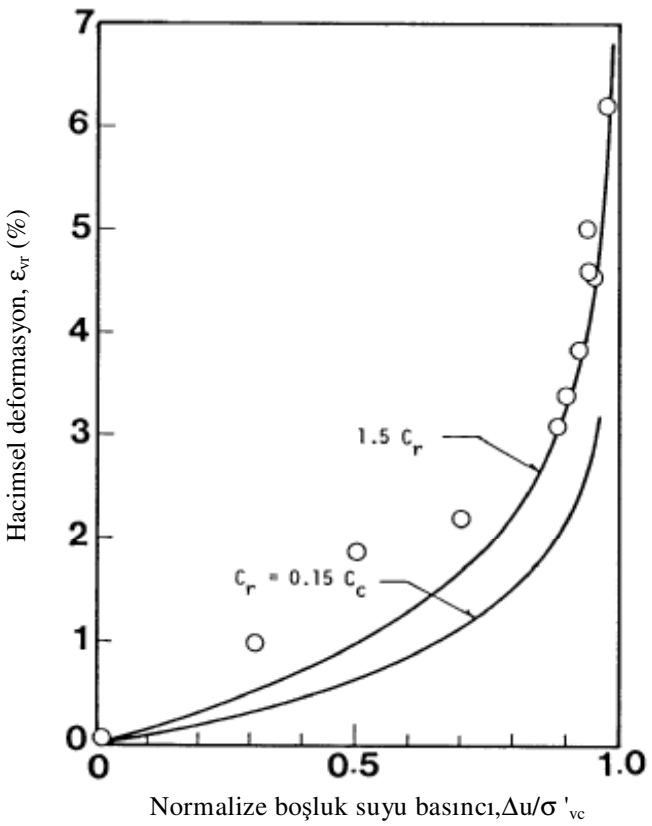
Burada; e_c tekrarlı yükleme başlangıcındaki boşluk oranı, $\Delta u/\sigma'_{vc}$ boşluk suyu basıncı oranı ve C_r ödometre deneyinden elde edilen yeniden sıkışma indisidir. Bu formül Yasuhara ve diğerleri (1991) tarafından daha da sadeleştirilerek aşağıdaki şekli almıştır.

$$\varepsilon_{vr} = \frac{u / \sigma_c}{0.412 - 0.291(u / \sigma_c)} \quad (2.6)$$

Normal konsolide killerin drenajsız tekrarlı yükler altında konsolidasyon davranışına ait benzer sonuçlar Yasuhara ve diğerleri (1992), Yasuhara ve Andersen (1991), Andersen ve Hoeg (1992), Hyodo ve diğerleri (1988) ve Andersen (1991) tarafından yapılan çalışmalarda da görülmüştür.

2.11 Aşırı Konsolide Killerde Tekrarlı Yükleme Sonrası Konsolidasyon Oturması

Şekil 2.37, aşırı konsolide bir kil (AKO=4) üzerinde yapılan tek kademeli tekrarlı yükleme uygulanarak yapılan deneylerden elde edilen e-log σ'_v eğrisi görülmektedir. Şekilden, tekrarlı kayma deformasyonu ne kadar büyükse normal konsolidasyon eğrisine dönmesinin de o kadar yavaş olduğu görülür. Bununla beraber e-log σ'_v eğrisindeki normal konsolide kil kısmıyla asla paralel olarak ilerlemeyecektir.

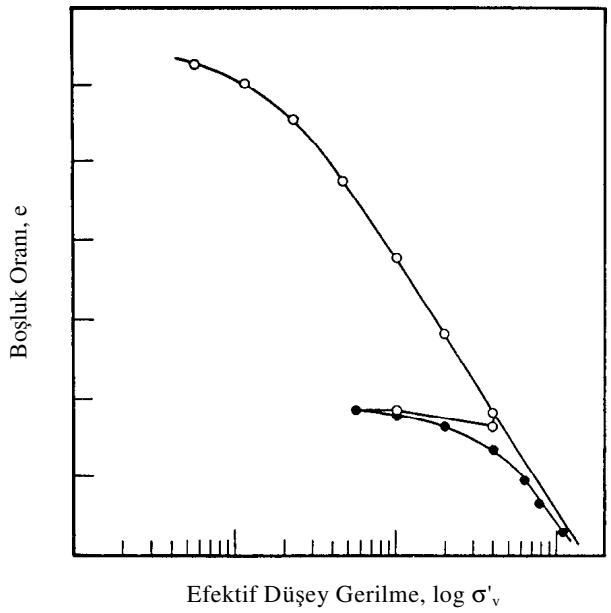


Şekil 2.36 Drenajsız tekrarlı yüklemede hacimsel deformasyonların boşluk suyu basıncıyla değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1989).

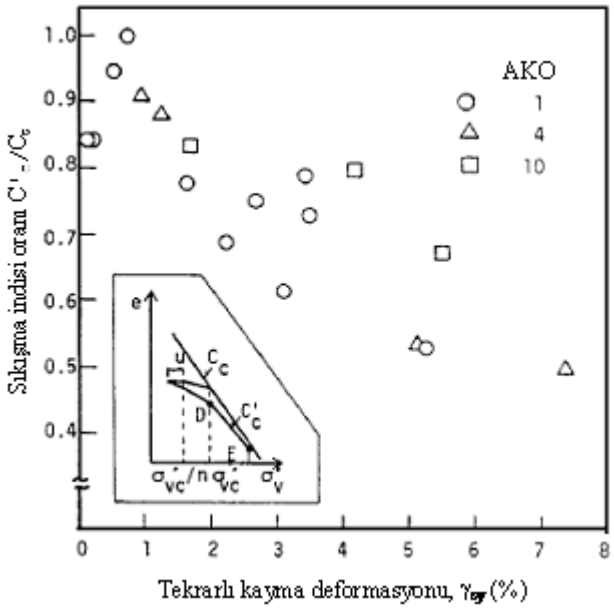
Tekrarlı yüklemeden sonraki sıkışma indisi (C'_c) ve doğal sıkışma indisi (C_c) arasındaki oran e-log σ'v eğrisinden belirlenir. C'_c, Şekil 2.38'de bulunan σ'_{vc}'deki D noktasını $3\sigma'_{vc}$'deki E noktasına birleştiren doğrunun eğiminden bulunur. Şekil 2.38'de C'_c/C_c oranı ve tekrarlı yükleme sonundaki tekrarlı kayma deformasyonu arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bu şekil üzerinde ayrıca normal konsolide numunelerden elde edilen sonuçlar da verilmiştir (Yasuhara ve Andersen, 1989).

Şekil 2.39'da basit kesme deney sisteminde, aşırı konsolide kilde 5 kez drenajsız tekrarlı yükleme ve her tekrarlı yüklemeden sonra drenaj uygulanmış deneylerden

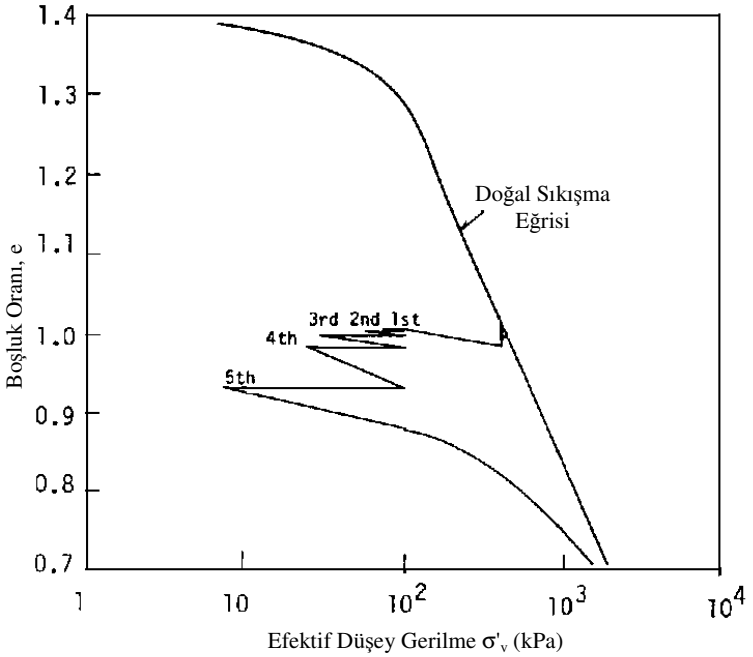
elde edilen e-log σ'_v değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi aşırı konsolide zeminlerde her drenajsız tekrarlı yüklemede meydana gelen boşluk suyu basınçları ve drenaj esnasındaki konsolidasyon oturmaları her yükleme-drenaj aşamasında normal konsolide killerin aksine daha da artmaktadır (Yasuhara ve Andersen, 1989).



Şekil 2.37 Aşırı konsolide kilde tek kademe tekrarlı yük altında oluşan e-log σ'_v eğrisi (Yasuhara ve Andersen, 1989).



Şekil 2.38 Tekrarlı yükleme sonrasında drenaj uygulanmış deneyde sıkışma indisi (Yasuhara ve Andersen, 1989).

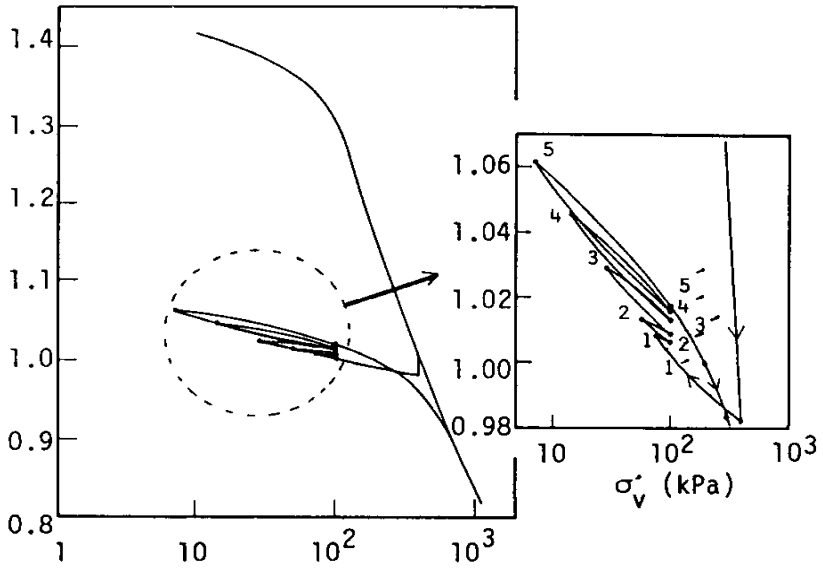


Şekil 2.39 Aşırı Konsolide kilde (AKO=4) 5 kez drenajsız tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmış deneyde e-log σ'_v değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1989).

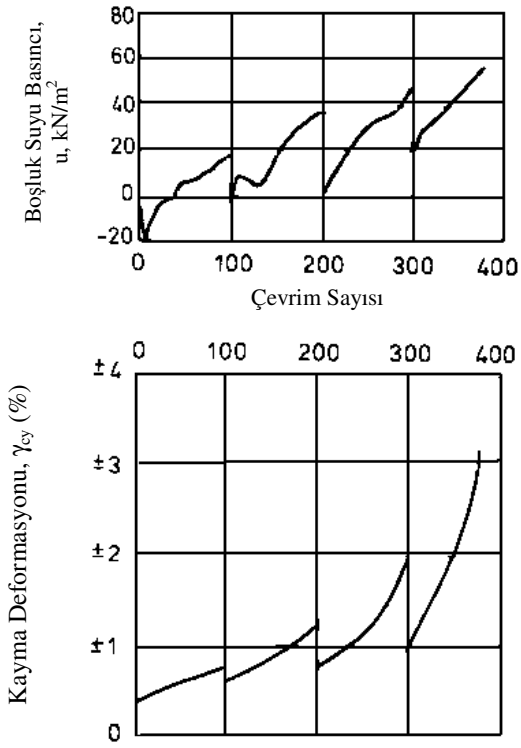
Bununla beraber iki deney arasındaki karşılaştırma önemli bir farkı ortaya koyar. Ödometre tipi deneyde (Şekil 2.40) boşaltma esnasında önemli bir kabarma meydana gelir. Tekrarlı yük uygulayarak yapılan deneyde efektif gerilmedeki azalma drenajız şartlarda oluşur ve bundan dolayı kabarma meydana gelmez. Dolayısıyla birkaç kez tekrarlı yükten meydana gelen birikmiş oturma miktarı, ödometre deney sistemi kullanılarak yapılan aynı sayıda statik yükleme-boşaltma uygulanmış numunelerde meydana gelen oturma miktarından çok büyük olabilir (Yasuhara ve Andersen, 1989).

Şekil 2.41, aşırı konsolidasyon oranı AKO= 4 olan numune üzerinde aynı yükleme altındaki numuneden elde edilmiş, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı-kayma deformasyonlarının değişimini gösterir. Tekrarlı kayma gerilmesi, drenajsız statik kesmede göçmeye yol açan yatay kayma gerilmesinin %50'si kadar olup $\tau_{hc}=\pm 35$ kPa dır. Normal konsolide numunenin aksine aşırı konsolide numunede daha sonraki tekrarlı yükleme aşamalarında boşluk basıncı oluşumu artar. Bu numunede tekrarlı kayma deformasyonları ön yüklemeden önemli derecede etkilenmektedir. 4. aşama yüklemede tekrarlı kayma deformasyonları büyük miktarda artmış ve yaklaşık 78 çevrim sonunda göçmeye yaklaşılmıştır. Ön kesme uygulanmayan tekrarlı bir deneyde büyük kayma deformasyonları oluşmadan 160 çevrime kadar direnç göstermektedir. Bunun anlamı; drenajın takip ettiği ön yükleme, aşırı konsolide kilde bir bozulma etkisi meydana getirmekte ve daha

sonraki drenajsız tekrarlı yüklemelere karşı göstereceği direnci azaltır (Andersen ve diğerleri, 1976).



Şekil 2.40 Aşırı konsolide kilde 5 kez yükleme-boşaltmalı ödometre deneyinde e-log σ'_v değişimi (Yasuhara ve Andersen, 1989).

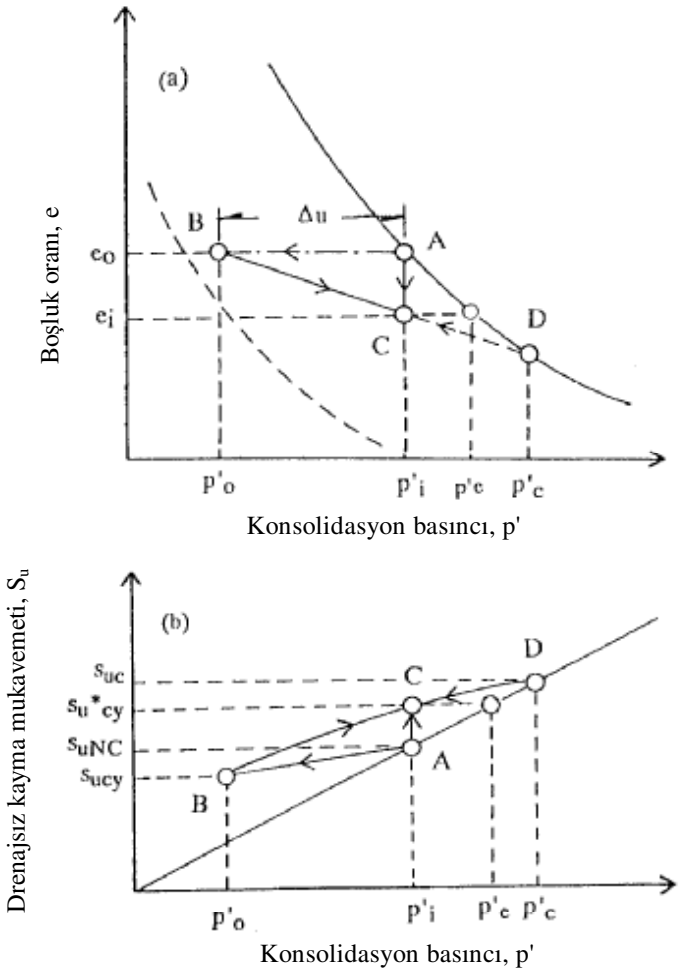


Şekil 2.41 Basit kesme deneyinde drenajsız tekrarlı yüke maruz aşırı konsolide kildeki (AKO= 4) boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonlarına drenajın etkisi (Andersen ve diğerleri, 1976).

2.12 Tekrarlı Yükleme ve Drenaj Çevrimlerinin Kayma Mukavemetine Etkisi

Kohezyonlu zeminlerde kısa süreli drenajsız tekrarlı yükleme, zeminin dane yapısında kırılma ile beraber efektif gerilmede de azalmaya neden olur. Bu durum zeminin drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliğinde bozulma meydana getirir. Tekrarlı yüklemeler arasında drenajın oluştuğu okyanus dalgaları gibi uzun süreli durumlarda zeminin mukavemetinde daha sonraki tekrarlı yüklemelere karşı iyileşme olur. Özellikle normal konsolide zeminlerin özellikleri iyileşir (Yasuhara,1994).

Şekil 2.42, tekrarlı yüklemeden önce ve sonra suya doygun normal ve aşırı konsolide kohezyonlu zeminlerde boşluk oranı (e), efektif düşey gerilme (p') ve drenajsız kayma mukavemetleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Normal konsolide zeminin drenajsız kayma mukavemeti tekrarlı yüklemeden önce A noktasındadır. Gerilme boşalmasından dolayı efektif gerilme D noktasından B'ye azalırsa drenajsız kayma mukavemeti de azalır.

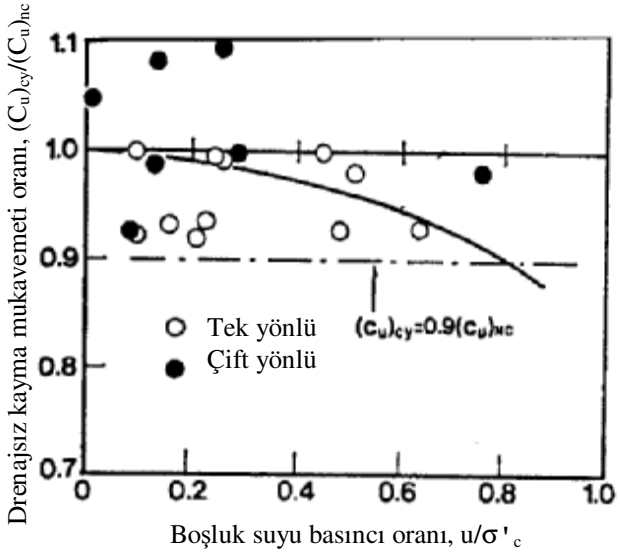


Şekil 2.42 Boşluk oranı, konsolidasyon basıncı ve drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişkinin şematik gösterimi (Yasuhara, 1994).

Zemine etkiyen tekrarlı yük belli bir çevrim sayısından sonra durdurulursa, tekrarlı yüklemeden dolayı oluşan ve zemin içinde kalan pozitif artık boşluk suyu basıncından dolayı zemin elemanı kararsız bir durumda olacaktır. Daha sonra bu boşluk suyu basınçları sönümlenecek ve zeminin kararlı duruma gelmesine neden olacak konsolidasyon oturmaları oluşacaktır. Bu durum zeminin Şekil 2.42'de B'den C'ye gelmesiyle aynı durumu ifade eder.

Suya doygun kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yüklemeden sonraki drenajsız kayma mukavemeti, zeminin başlangıçta normal konsolide veya aşırı konsolide olmasına, tekrarlı yükleme esnasında veya tekrarlı yükleme sonrasında drenaja izin verilip verilmediğine bağlı olarak artar veya azalır (Yasuhara, 1994).

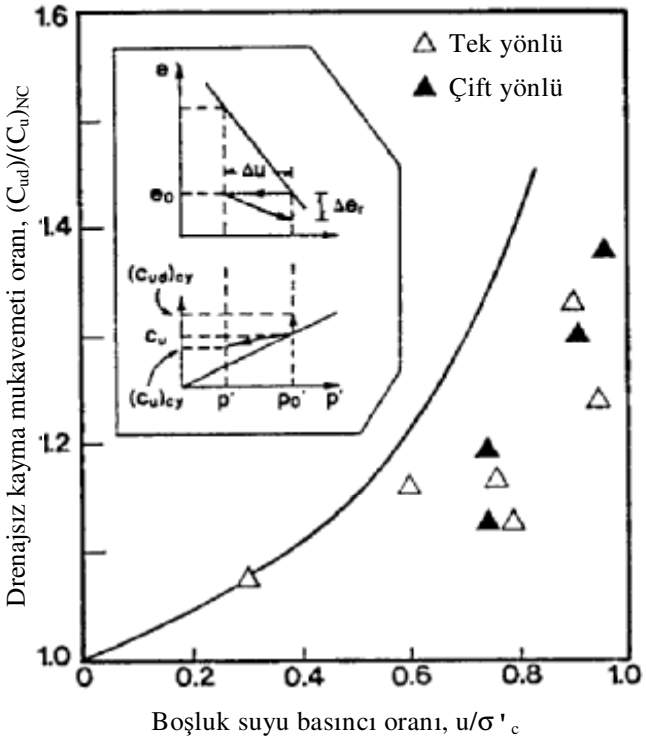
Yasuhara ve diğerlerinin (1992) tekrarlı yükleme sonrası kohezyonlu zeminlerin mukavemetindeki değişimi belirlemek amacıyla yapmış oldukları çalışmadan, mukavemetteki azalmanın tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk suyu basıncı artışıyla arttığı ancak boşluk suyu basıncı oranının %75'ten küçük olması durumunda %10'dan daha az olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.43). Bununla beraber şekilden de görüldüğü gibi deneylerden elde edilen verilerde bir dağınıklık söz konusudur. Uygulanan gerilme durumu mukavemetteki değişimi etkilemiş, tek yönlü yüklemelerde mukavemetteki azalma artarken çift yönlü yüklemelerde artışlar da meydana gelmiş veya belirgin bir değişiklik görülmemiştir.



Şekil 2.43 Tekrarlı yükleme sonrası drenaja izin verilmeden belirlenen drenajsız kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması (Yasuhara ve diğerleri, 1992).

Aynı çalışmada tekrarlı yükleme sonunda drenaja izin verilmiş tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçları sönümlendikten sonra numuneler drenajsız

koşullarda statik olarak kesilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.44'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi drenajsız kayma mukavemetlerinde %40'lara ulaşan artışlar meydana gelmiştir.



Şekil 2.44 Tekrarlı yükleme sonrası drenaja izin verilerek belirlenen drenajsız kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması (Yasuhara ve diğerleri, 1992).

Brown ve diğerleri (1977) yapmış oldukları dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneyinden elde ettikleri drenajsız kayma mukavemetindeki değişim sonuçlarını Tablo 2.2'de vermişlerdir. Tablodan da görüldüğü gibi numuneye uygulanan tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimleri normal konsolide killerin drenajsız kayma mukavemetinde %49'a ulaşan önemli bir artışa neden olmakta, artan aşırı konsolidasyon oranıyla birlikte tekrarlı yükleme ve drenaj sonrasında drenajsız kayma mukavemetlerindeki artış azalmakta ve AKO=10 iken mukavemette %9 oranında azalma meydana gelmektedir. Ayrıca tekrarlı gerilme genliğinin seviyesi ile drenajsız kayma mukavemeti değerleri arasında bir ilişki bulunmadığını, gerilme genliğinin artışıyla drenajsız kayma mukavemetinin artmamakta olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlardan bir diğeri ise normal konsolide killerden farklı olarak aşırı konsolide killerde deneylerinde kullandıkları gerilme seviyelerinde tekrarlı yükleme ve drenaj çevriminin, drenajsız kayma mukavemeti üzerinde ya hiç ya da önemsiz bir etki meydana getirdiğidir. Mukavemetteki değişmelerin nedeni olarak ise aşırı konsolide killerde yumuşama,

normal konsolide killerde pekleşme esnasında meydana gelen negatif ve pozitif boşluk suyu basınçlarından kaynaklanan numunenin su muhtevasındaki değişim yani tekrarlı yükleme sonrası konsolidasyon süreci olduğunu ifade etmişlerdir. Tablo 2.3'ten basit kesme deney sisteminde tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimlerine maruz kalan numunelerde de üç eksenli deneyde olduğu gibi drenajsız kayma mukavemetlerinin değişiminde benzer davranışlar meydana geldiği görülmektedir.

Tablo 2.2 Üç eksenli deneyde tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmasının drenajsız kayma mukavemetine etkisi (Brown ve diğerleri, 1977).

AKO	Tekrarlı yük uygulanmamış numunenin drenajsız kayma mukavemeti, S_u (kPa)	4x1000 çevrim sonunda drenajsız kayma mukavemeti, S_u (kPa)			Ortalama kayma mukavemeti, S_u (kPa)	Drenajsız kayma mukavemetindeki ortalama artış (%)
		q_r/q_f=0.35	q_r/q_f=0.5	q_r/q_f=0.65		
1	92	131	142	138	137	49
4	89	86	99	92	92	3
10	75	75	80	75	77	3
25	66	-	60	-	60	-9
50	56	-	58	-	58	4

AKO	Tekrarlı yük uygulanmamış numunenin drenajsız kayma mukavemeti, S_u (kPa)	q_r/q_f=0.35 te 4x1000 çevrim ve q_r/q_f=0.65 te 4x2500 çevrim sonunda drenajsız kayma mukavemeti, S_u (kPa)	
1	92	125	Bu değerler tekrarlı yükleme ile statik deney arasında drenaja izin verilmeyen deneylerden elde edilmiştir.
4	89	96	
10	75	76	

Tablo 2.3 Basit kesme deneyinde tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmasının drenajsız kayma mukavemetine etkisi (Brown ve diğerleri, 1977).

a) Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanması durumu

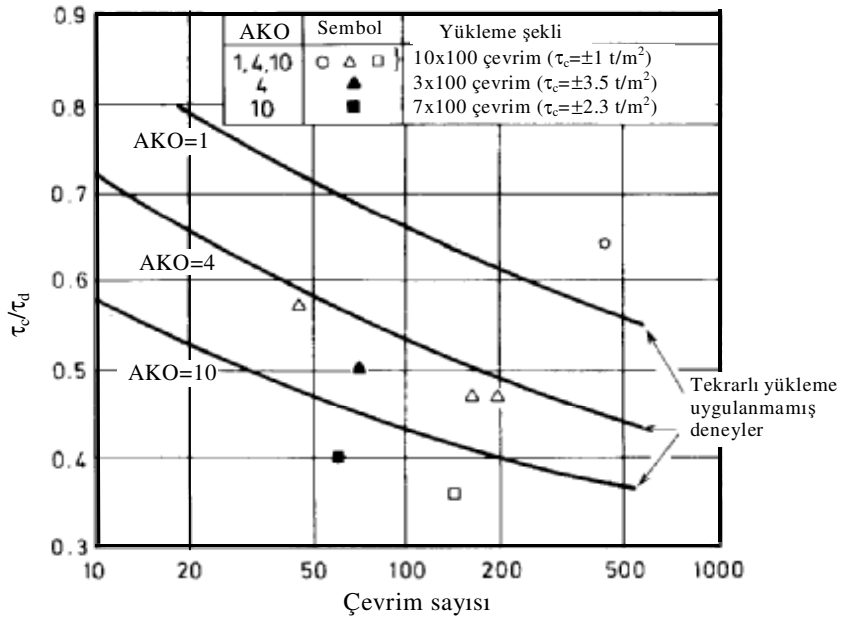
AKO	Drenajsız kayma mukavemetleri, S_u (kPa)		Drenajsız kayma mukavemetindeki artış (%)
	Tekrarlı yük uygulanmamış numunenin drenajsız kayma mukavemeti, S_u (kPa)	Tekrarlı yük uygulanmış numunenin drenajsız kayma mukavemeti, S_u (kPa)	
1	86	101	17
4	70	73	3
10	57	54	-5

b) Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmaması durumu

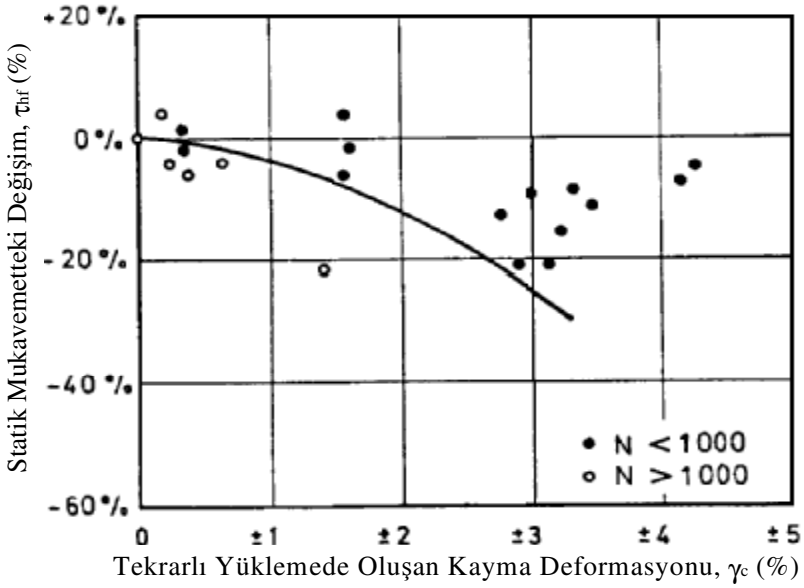
AKO	Drenajsız kayma mukavemetindeki artış (%)	
	Tekrarlı yükleme esnasında göçme meydana gelmiş numuneler	Diğer numuneler
1	-7	25
4	-12	0
10	-9	-
25	1	-
50	10	-

Şekil 2.45 ise tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimine maruz kalan normal ve aşırı konsolide zeminlerin mukavemetindeki değişimleri göstermektedir. Görüldüğü gibi AKO=1 olan numunelerin mukavemetlerinde tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimleri artışa neden olurken AKO=4 ve 10 olan aşırı konsolide numunelerin

mukavemetlerinde bir azalmaya neden olmaktadır (Brown ve diğerleri, 1977). Aşırı konsolide zeminlerin drenajsız kayma mukavemetlerindeki azalma kayma deformasyonu %3'ü aşmadığı sürece Şekil 2.46'da görüldüğü gibi %25'ten az olmaktadır. Bununla birlikte bazı Kuzey Denizi killerinde mukavemetteki azalma %40'lara ulaştığı görülmüştür (Andersen ve diğerleri, 1976).

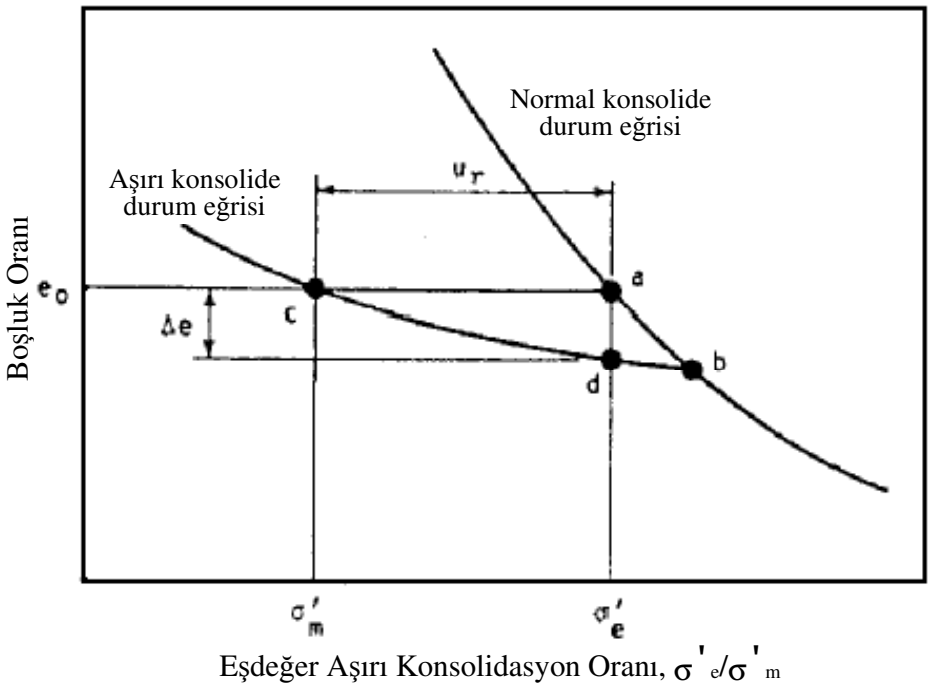


Şekil 2.45 Basit kesme deneyinde tekrarlı yükleme ve drenajdan dolayı tekrarlı göçme (γ=±%3) (Brown ve diğerleri, 1977).



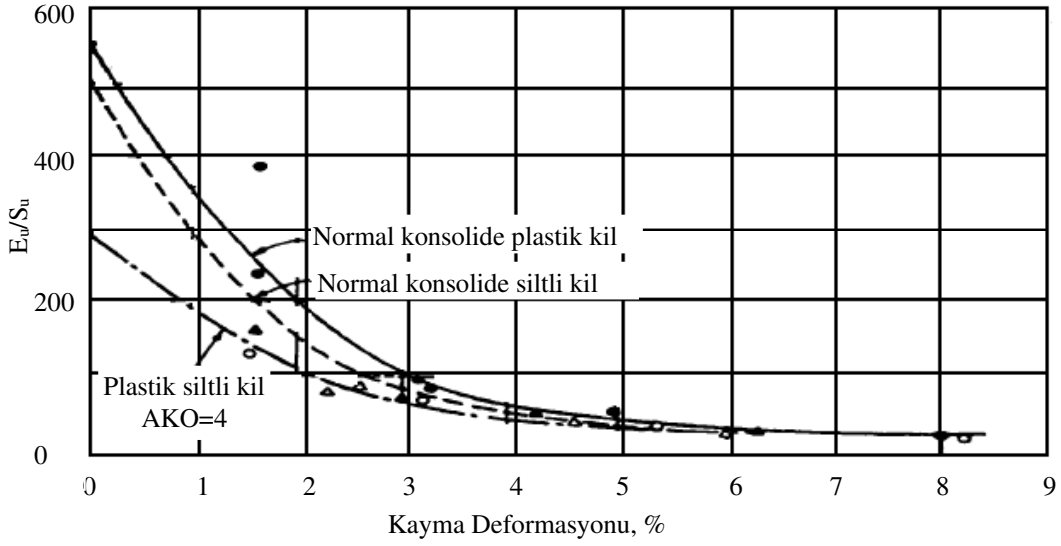
Şekil 2.46 Drenajsız tekrarlı yükten kaynaklanan drenajsız kayma mukavemeti azalması (Andersen ve diğerleri, 1976).

Matsui ve diğerleri (1980) dinamik üç eksenli deney sistemini kullanarak tekrarlı yükler altında kilin gerilme deformasyon ve kayma mukavemeti davranışını incelemiştir. Elde edilen verilerle, eşdeğer aşırı konsolidasyon kavramını kullanarak tekrarlı yüklerden dolayı drenajsız kayma mukavemetindeki değişim belirlenmiştir. Bu kavram, tekrarlı yükleme esnasında ve tekrarlı yükleme sonrasında uygulanan drenajdan dolayı zeminin takip ettiği efektif gerilme-boşluk oranı eğrisinden elde edilmektedir. Şekil 2.47'de görüldüğü gibi ab eğrisi normal konsolidasyonu, bdc eğrisi ise aşırı konsolidasyonu gösterir. Drenajsız tekrarlı yük uygulanan normal konsolide bir kil a noktasında iken x eksenine paralel bir şekilde c noktasına gelir. Bu noktada numune bir artık boşluk suyu basıncı içermektedir. Drenaja izin verildiğinde bu boşluk suyu basıncının sönümlenmesiyle c noktası d ye hareket eder. Böylece tekrarlı gerilme-deformasyon geçmişi acd izi ile temsil edilir. ac izi boyunca, boşluk suyu basıncı oluşmasıyla yumuşama, cd izinde ise oluşan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve boşluk oranının azalmasıyla sertleşme meydana gelir. Bu sebeple c ve d noktasında numune, farklı gerilme-deformasyon geçmişine sahip olmaktadır. Bu noktalardaki farklılıktan yararlanarak eşdeğer konsolidasyon kavramı kullanılmış ve artan eşdeğer konsolidasyon oranıyla tekrarlı yükler altında zeminin drenajsız kayma mukavemetinde de bir artış olduğu gösterilmiştir. Eşdeğer konsolidasyon oranı (σ'_e/σ'_m), tekrarlı yükleme esnasındaki efektif gerilmenin (σ'_e) meydana gelen boşluk suyu basıncıyla azalan efektif gerilme (σ'_m) değerine oranı olarak tarif edilir.



Şekil 2.47 Boşluk oranı ve efektif gerilme arasındaki ilişki (Matsui ve diğerleri, 1980).

Koutsoftas (1978), tekrarlı yükleme sırasında ve tekrarlı yükleme sonrasında iki kilin kayma mukavemetine tekrarlı yüklemenin etkisini incelemiştir. Zeminin biri plastik kil (IP=40) diğeri ise siltli kildir (IP=18). Deneylerden plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının kayma mukavemeti üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. Her iki kilde de tekrarlı yüklemeden sonra drenajsız kayma mukavemetinde az bir miktar azalma olmuştur. Statik drenajsız kayma mukavemetinde azalma %10'dan daha azdır. Mukavemetteki bu azalmanın nedeni, tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basıncıdır. Plastik kilde, aşırı konsolide durumdaki mukavemet kaybı normal konsolide durumdan daha azdır. Çünkü aynı deney koşulları altında aşırı konsolide numunelerde daha az boşluk suyu basıncı oluşur. Her iki zeminde drenajsız koşullarda elastik modüldeki azalma mukavemetteki azalmadan çok daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 2.48). Tekrarlı yükleme numunelerin yumuşamasına sebep olmuştur.



Şekil 2.48. Tekrarlı yüklemeden sonra drenajsız elastisite modülündeki azalma (Koutsoftas, 1978).

2.13 Sonuç

Kohezyonlu zeminlerde statik yüklerden başka tekrarlı yüklemelerinde konsolidasyon oturmasına neden olduğu daha önce birçok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur. Bu konudaki ilk çalışmalar 1950'li yıllarda özellikle depremden kaynaklanan tekrarlı yüklerin neden olduğu oturmalar üzerine olmakla beraber sonraki yıllarda önemli mühendislik yapılarının yumuşak ince daneli zeminlerin üzerine yapılması ile diğer tekrarlı yüklerin (rüzgar, okyanus dalgaları, pistonlu makinelerin titreşimi vb.) etkileri de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bununla birlikte

tekrarlı yükler altında zeminlerin davranışı konusunda daha çok kohezyonsuz ince daneli kum zeminlerin davranışı üzerinde yoğunlaşılmıştır. Yapılan literatür araştırmasından, suya doygun kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki konsolidasyon davranışının tam olarak belirlenebilmesi için daha kapsamlı ve sistematik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Killerin tekrarlı yükler altında oturmalarının belirlenmesi konusunda yapılan araştırmalar oturma miktarının birçok faktöre bağlı olduğunu göstermiştir. Bu faktörler, zemin özellikleriyle birlikte kullanılan deney sistemi ve yükleme durumlarını içermektedir.

Yumuşak ince daneli zeminlerin konsolidasyon özellikleriyle birlikte tekrarlı yükler altında zeminin mukavemetindeki değişimlerde yukarıda bahsedilen deneylerin devamında incelenmiştir. Belli çevrim ve tekrarlı gerilme genliğinde deneye tabi tutulan numuneler tekrarlı yükleme sonunda drenaja izin verilerek veya izin verilmeden hemen drenajsız koşullarda statik olarak kesilerek tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi incelenmiştir. Bu konuda araştırmacıların ortaya koyduğu sonuçlarda farklılıklar gözlenmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda zeminin plastisite özelliği, AKO oranı önemli zemin değişkenleridir. Ayrıca çalışmalarda çoğunlukla dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemleri kullanılarak numunelere farklı çevrim sayıları ve tekrarlı gerilme oranlarında tekrarlı yükler uygulanmıştır. Deneyler sadece bir kez belli çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranlarında yapıldığı gibi aynı çevrim sayısında ve gerilme genliğinde her yükleme arasında drenaja izin verilerek tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi sağlanmış ve bu yükleme-drenaj çevrimleri bazı çalışmalarda 10'a kadar çıkmıştır.

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN ZEMİN VE DENEY SİSTEMLERİ

3.1 Giriş

İnşaat mühendisliği yapılarını taşıyan zemin tabakaları, deprem, kazık çakma, trafik, kazı amaçlı patlatmalar ve makine temelleri, okyanus fırtına dalgaları gibi çok değişik tipte tekrarlı yüklere maruz kalır. Bu tür yükler etkisi altındaki zemin tabakalarının ve üzerlerindeki yapıların davranışı, kesme kuvvetleri esnasında zeminin gerilme-deformasyon özelliklerine büyük oranda bağlıdır. Bu nedenle inşaat mühendisliği yapıları ve onların temellerinin güvenli bir şekilde dizayn edilmesi için temel zemine ait gerilme-deformasyon özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Günümüzde arazi gerilme-deformasyon durumlarını model edebilen ve mühendise dinamik zemin parametrelerinin teminini sağlayan; üç eksenli, basit kesme, burulmalı kesme (tam dolu veya içi boş silindir) ve rezonant kolon deney sistemi gibi birtakım geoteknik laboratuvar deney sistemleri bulunmaktadır. Bu deneyler arasında basit kesme deneyinde, diğer deneylerden daha çok sayıda problemin model edilebilmesi mümkündür.

3.2 Basit Kesme Deney Tekniği

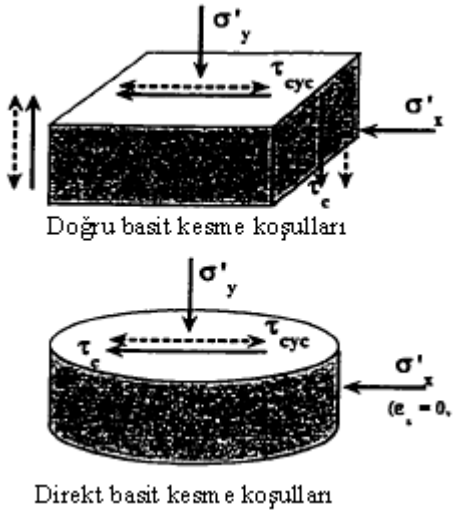
3.2.1 Basit kesme deney sisteminde gerilmeler

Basit kesme terimi, $\varepsilon_{zz}=\gamma_{yz}=\gamma_{zx}=\varepsilon_{xx}=0$ olan düzlem deformasyon durumuna işaret eder (Şekil 3.1). Sadece kayma deformasyonu, γ_{yx} ve hacimsel deformasyona eşit olan düşey deformasyon, ε_{yy} sıfır değildir. Sabit hacimli deneylerde düşey deformasyon oluşmaz ve $\varepsilon_{yy}=0$ olur (Biscontin, 2001).

Düzlem gerilmenin tanımının basit olmasına rağmen bu ideal durumların elde edilmesi zordur. Birçok basit kesme deney aleti geliştirilmiş olsa da genellikle Cambridge tipi veya NGI (Norveç Geoteknik Enstitüsü) tipi model daha çok kullanılmaktadır. Cambridge tipi sistemlerde dikdörtgen numune kullanılır ve yanal deformasyonlar, üst veya alt başlığa menteşelenmiş plakalarla önlenir (Şekil 3.2). NGI tipi sistemde (Bjerrum ve Landva, 1966) dairesel numune kullanılır ve ön

gerilmeli membran kullanılarak sabit kesit korunur. Her iki sistemin eksiklikleri aşağıdaki gibidir;

1. Gerçek sınır koşulları, basit kesme deformasyon varsayımıyla uyuşmaz. Finn ve diğerlerinin (1971) plastisen kullanarak yaptığı deneyden numunenin kenarlarında uzama meydana geldiği görülmüştür,
2. Sistem, numunenin yatay yüzlerine tamamlayıcı kayma gerilmelerini uygulayamaz. Sonuçta numune kenarlarının alt ve üst yüzlerinde kayma gerilmeleri sıfır olmalıdır. Bu gerilmelerden kaynaklanan moment, normal gerilmelerin üniform olmayan dağılımı tarafından dengelenir (Şekil 3.3) (Biscontin, 2001).



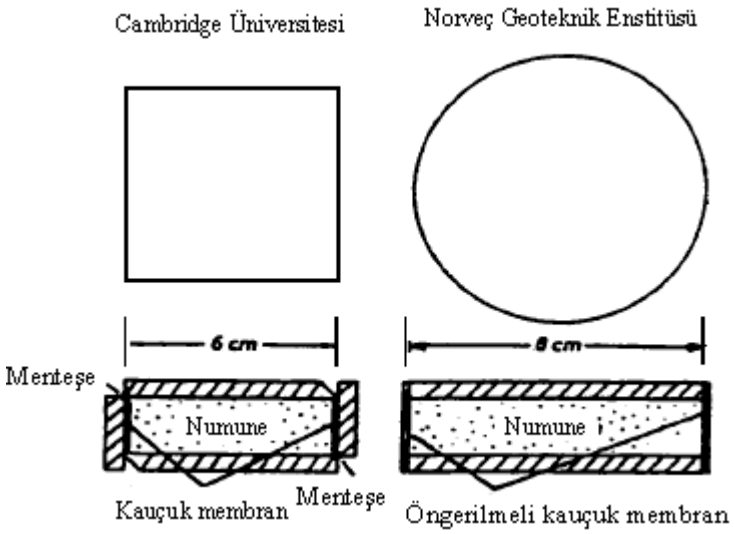
Şekil 3.1 Deformasyon durumları (a) genel deformasyon durumu, (b) basit kesme deformasyon durumu (Biscontin, 2001).

Basit kesme deney sisteminde, zemindeki gerilme durumlarını incelemek için birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar gerilme düzensizliğinin var olmadığını kanıtlamak için yeterli olmamakla beraber onların etkisini ve nasıl azaltılacağını belirler. Sayısal ve analitik çalışmalarda numunenin lineer elastik ve izotropik olduğu kabul edilir (Biscontin, 2001).

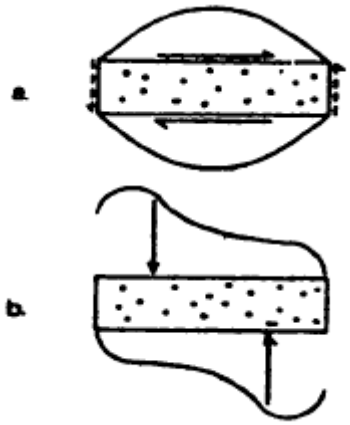
Roscoe (1953) yaptığı analitik çalışmalarda, basit kesme deney sistemindeki numune üzerinde üniform olmayan gerilme dağılımının varlığını ilk kez göstermiştir. Zeminin elastik olduğu düşünülmüş ve zemine düşey yük uygulanmamıştır.

Lucks ve diğerleri (1972), lineer elastik, izotropik malzeme özelliklerinde ve deformasyonları çok küçük kabul ederek üç boyutlu sonlu eleman analizi yapmıştır. Yapılan çalışma, kenarlarda gerilme konsantrasyonu olmasına rağmen numunenin

%70'i, uygulanan yatay kayma gerilmesinin %2'si içinde, üniform gerilme şartlarına maruz kaldığını göstermiştir. Bununla beraber Saada ve Townsend (1981), Bjerrum ve Landva'nın (1966) aksine dairesel numunelerde düzlem gerilme durumunun sağlanamayacağına işaret etmiştir. Çünkü ön gerilmeli membran, sınır koşullarını sağlamak için gerekli basınç ve çekme gerilmelerinin uygulanmasını önler.



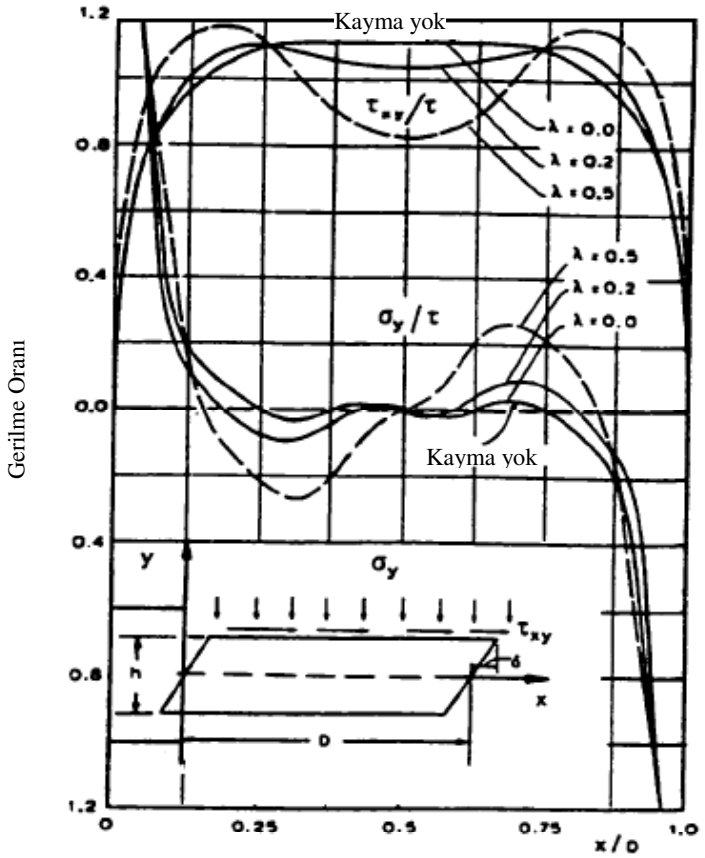
Şekil 3.2 (a) Cambridge ve (b) NGI tipi basit kesme deneyleri (Franke ve diğerleri, 1979).



Şekil 3.3 Üniform olmayan gerilme dağılımlarının şematik gösterimi (a) numunenin uçlarında tamamlayıcı kayma gerilmelerinin olmamasından kaynaklanan, (b) basit kesme deneyinde numunenin alt ve üst yüzlerindeki normal gerilmeden kaynaklanan üniform olmayan dağılımlar (Airey ve diğerleri, 1985).

Prevost ve Höeg (1976) deney esnasında numune ile başlıkları arasında kayma olabileceğini göstermiştir. Çalışmada yine numunenin elastik ve izotropik olduğu

göz önüne alınmıştır. Şekil 3.4'teki sonuçlar, hem kayma hem de düşey gerilmelerdeki dağılımın büyük bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Uygulamada zeminler, kesmeden önce konsolide edilir ve numune ile başlıklar arasındaki kaymayı azaltmak için düşey gerilme uygulanır. Ayrıca pürüzlü alt ve üst başlık yüzeyi kullanmakta başlık ve zemin arasındaki hareketi azaltıcı etki yapar.



τ: Numuneye uygulanan ortalama yatay kayma gerilmesi

Şekil 3.4 Numunenin üst ve alt yüzlerindeki gerilmeler (Prevost ve Höeg, 1976).

Basit kesme deney sisteminin numune yatay yüzeylerine tamamlayıcı kayma gerilmeleri uygulayamaması, basit kesme deformasyon durumunu sağlarken ideal basit kesme gerilme durumunun sağlanmasını önleyecek şekilde üniform olmayan gerilme dağılımlarına neden olur. Deney sonuçlarının doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için bu üniform olmayan gerilme dağılımlarının önemi çok sayıda analitik, sayısal ve deneysel çalışmada incelenmiştir (Biscontin, 2001).

3.2.2 Basit kesme deneyi ile arazi koşullarının modellenmesi

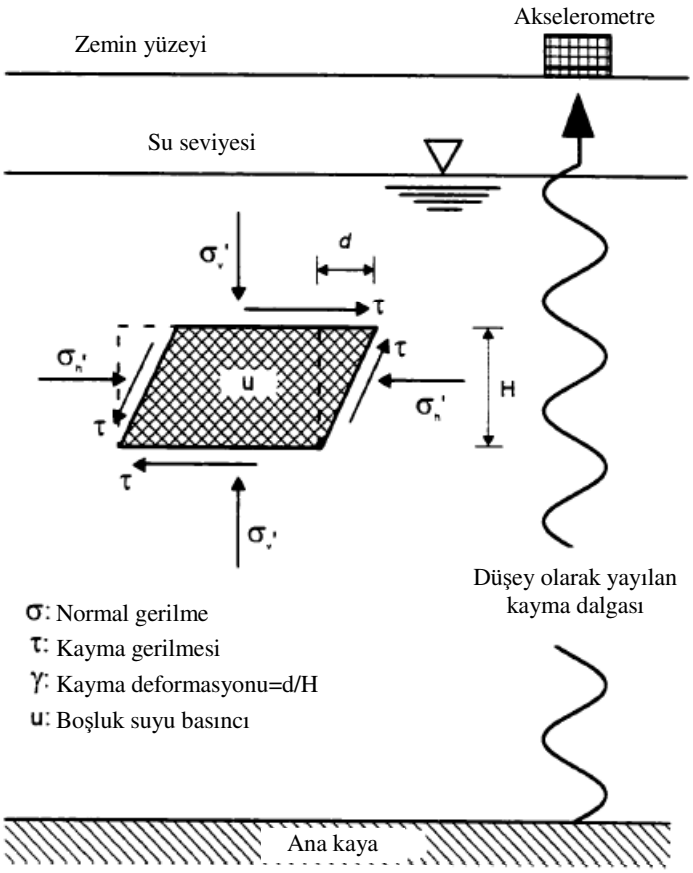
Basit kesme deneyi, hem geoteknik problemlerde gerilme-deformasyon anizotropisinin öneminin artması hem de üç eksenli deneye göre göreceli olarak

basitliğinden dolayı kullanımı gittikçe artmaktadır. Basit kesme deney sisteminin ilk prototipleri, silindirik SGI (İsveç Geoteknik Enstitüsü) tipi (Kjellman, 1955), dikdörtgen Cambridge tipi (Roscoe, 1953) ve silindirik NGI (Norveç Geoteknik Enstitüsü) tipidir. Deney aleti tam kayma gerilme koşullarını iyi model eden basit kesme deformasyon koşulları altındaki zemin numunelerinin deneyi için geliştirilmiştir. Bu koşullar, diğer standart laboratuvar deney metotlarıyla sağlanamaz. Bu deney sistemleri daha çok şev ve temel taşıma gücü kayma yüzeyi ile düşey olarak yüklenmiş kazık çevresindeki zeminin davranışı gibi genel arazi durumları için uygundur. Zemin dinamiğinde basit kesme deney sistemi büyük öneme sahiptir. Dinamik basit kesme deney sistemindeki gerilme-deformasyon koşulları, zemin tabakalarında kayma dalgalarının yayılımı esnasındaki koşullara oldukça benzerdir (Hsu, 2002).

Basit kesme deney sistemi kullanılarak model edilen bir geoteknik problemine ait örnek Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekil, düşey olarak yayılan kayma gerilmelerinin idealize edilmiş durumunu göstermektedir. Sismik arazi davranışının analizinde, düşey olarak yayılan kayma dalgaları çok önemlidir. Çünkü düşey kayma dalgalarından dolayı zeminin yatay olarak sarsılması inşaat mühendisliği yapılarında meydana gelen hasarların en büyük sebebidir. Şekildeki zemin elemanının geometrisi ve gerilme-deformasyon koşulları basit kesme deneyindeki koşullara benzemektedir (Hsu, 2002).

3.2.3 Basit kesme deneyinin avantajları

Zeminlerin drenajsız kayma mukavemetinin belli bir değere sahip malzeme özelliği olduğu düşünülür. Fakat drenajsız kayma mukavemeti, kullanılan deney metodu yani belli bir deneyde uygulanan gerilme durumu, deformasyon hızı yani göçmeye kadar geçen süre gibi birçok faktöre bağlı olarak değişir. Birçok zemin doğal koşullarda anizotropiktir. Gerilmeler ve gerilmedeki değişim de zeminde anizotropiye neden olur. Ladd'e (1991) göre anizotropinin başlangıç ve yapıdaki değişimden kaynaklanan olmak üzere iki bileşeni vardır. Başlangıç anizotropisi, çökelme sırasında danelerin yapısı ve doğal diziliminden kaynaklanır. Zeminin K_0 yani izotropik koşullar altında konsolide olduğu gerilme durumu da başlangıç anizotropisini etkiler. Bu durum, üç eksenli deneylerde izotropik ve anizotropik olarak konsolide edilen numunelerin davranışları arasındaki farktan görülür. Konsolidasyondan sonraki kesme ve deformasyondan kaynaklanan anizotropi değişimi ise ikinci bileşen olan değişim anizotropisine işaret eder (Biscontin, 2001).

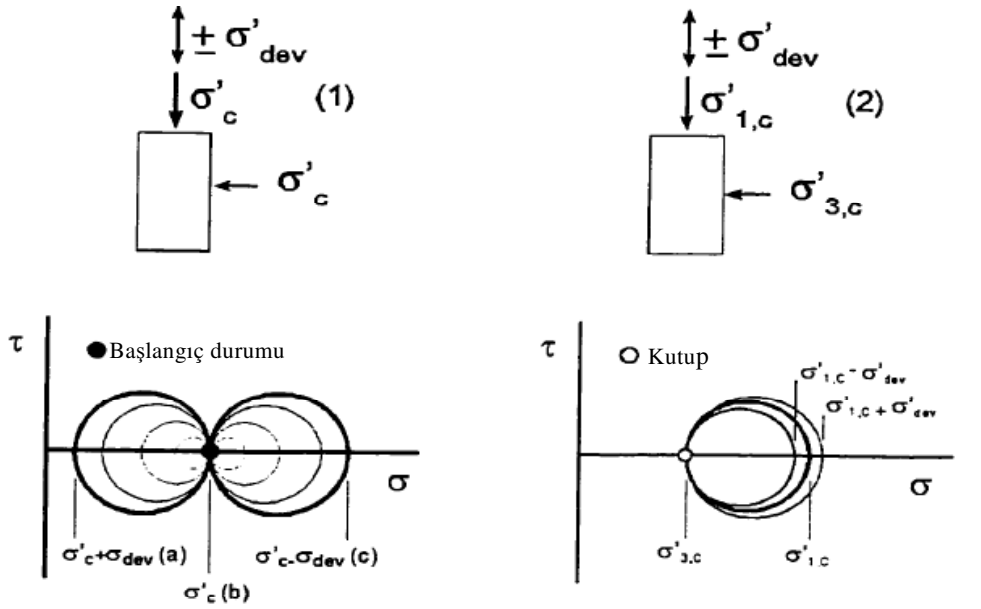


Şekil 3.5 Deprem esnasında yüzey seviyesindeki zemin elemanındaki idealize edilmiş gerilme-deformasyon koşulları (Hsu, 2002).

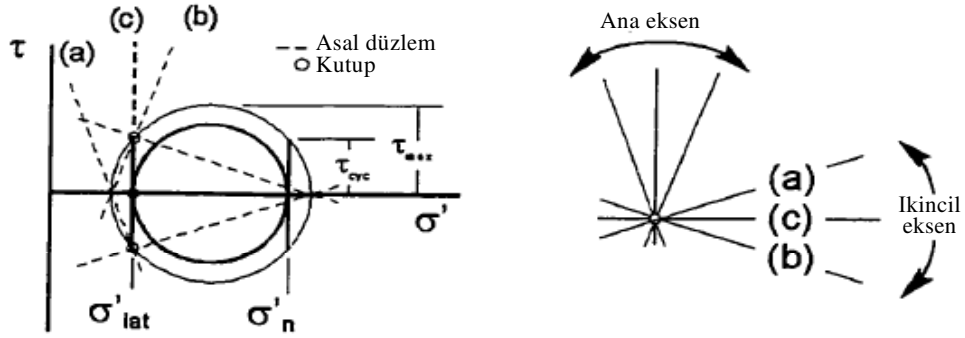
Üç eksenli deneyle karşılaştırıldığında, basit kesme deney, kesme esnasında, numunenin düzlem deformasyon altında sabit tutulduğu için asal gerilmelerin dönmesine olanak tanımasından dolayı birçok avantaja sahiptir (Şekil 3.6). Bu durum, birçok geoteknik problem için daha gerçekçi bir yükleme durumu sağlar (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8). Bu geoteknik problemler:

7. Dolgu temelindeki zeminin davranışı,
8. Kazık şaftına yakın zemin elemanındaki kesme,
9. Taşıt yüklerinden kaynaklanan dinamik yükler,
10. Kumların sıvılaşma davranışı,
11. Rüzgar ve dalga yüklerine maruz açık deniz yapılarının (kazık, ağırlık tipi platform) temellerine etkiyen tekrarlı yükler,
12. Katı atıkların mekanik olarak sıkıştırılması sırasındaki davranışı.

(a) Üç eksenli deney



(b) Basit kesme deneyi

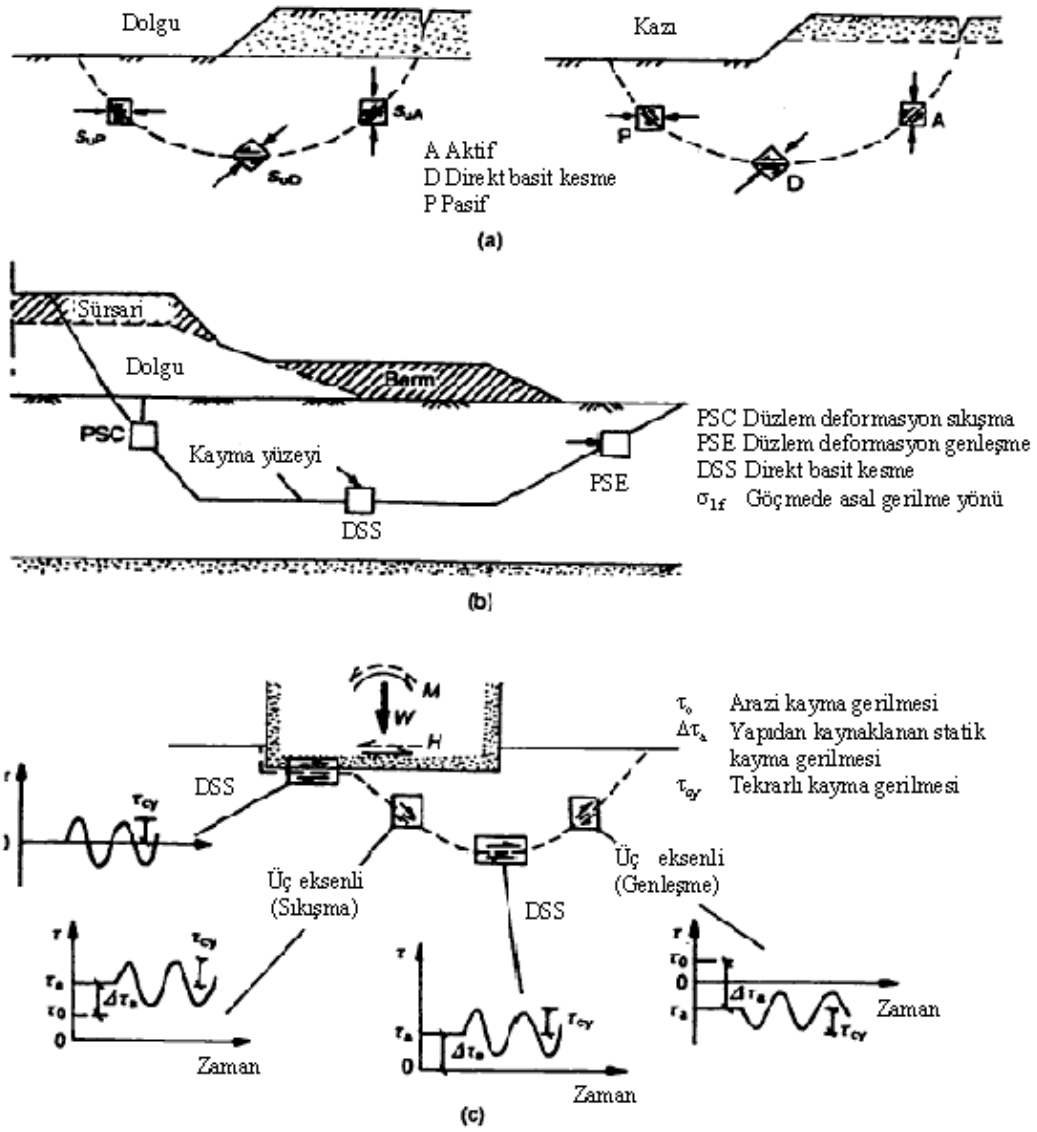


Şekil 3.6 Gerilme durumlarının karşılaştırılması (a) üç eksenli deney, (b) basit kesme deneyi (Biscontin, 2001).

Arazideki gerçek gerilme durumları çok daha karmaşıktır ve tek bir deney sistemiyle model edilemez. Aynı zemin elemanında herhangi bir gerilme durumu için bir deney sistemi uygun iken gerilme durumunun değişmesiyle başka bir sistem kullanılabilir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi belli bir problemin belli gerilme durumlarını model eden birden fazla deney vardır (Biscontin, 2001).

Deprem yükü veya okyanus dalgaları gibi doğal tekrarlı yüklemeler düzensiz olup tekrarlı gerilmeler bir çevrimden diğerine değişir. Bu yüzden doğadaki bütün tekrarlı gerilme durumlarını laboratuvarda model etmek mümkün değildir ve pratik olamamaktadır. Laboratuvar deneyleri, başlangıç ve sabit tekrarlı kesme gerilmelerinin farklı kombinasyonları ile yapılır. Dolayısıyla düzensiz tekrarlı

gerilmeler altındaki zeminin davranışı, sabit tekrarlı kayma gerilmesi uygulayan bu deneylerle belirlenir (Biscontin, 2001).



Şekil 3.7 Dolgu ve yüzeysel temellerin kayma yüzeyi boyunca bazı kesitlerde kayma mukavemetinin belirlenmesi için bazı deney örnekleri (Lacasse ve diğerleri, 1988).

3.3 Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi

Bu çalışmada Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) ve İsveç Geoteknik Enstitüsü (SGI) basit kesme deney sisteminin K. Ishihara ve M. Silver tarafından geliştirilmiş ve Japon Seiken Incorporation tarafından üretilmiş ve Şekil 3.9'da gösterilen dinamik basit kesme deney sistemi kullanılmıştır (Yıldırım, 1987). Hava basıncı ile çalışan sistem başlıca dört bölümden oluşmaktadır. Fonksiyonlarına göre bu bölümler aşağıdaki gibidir.

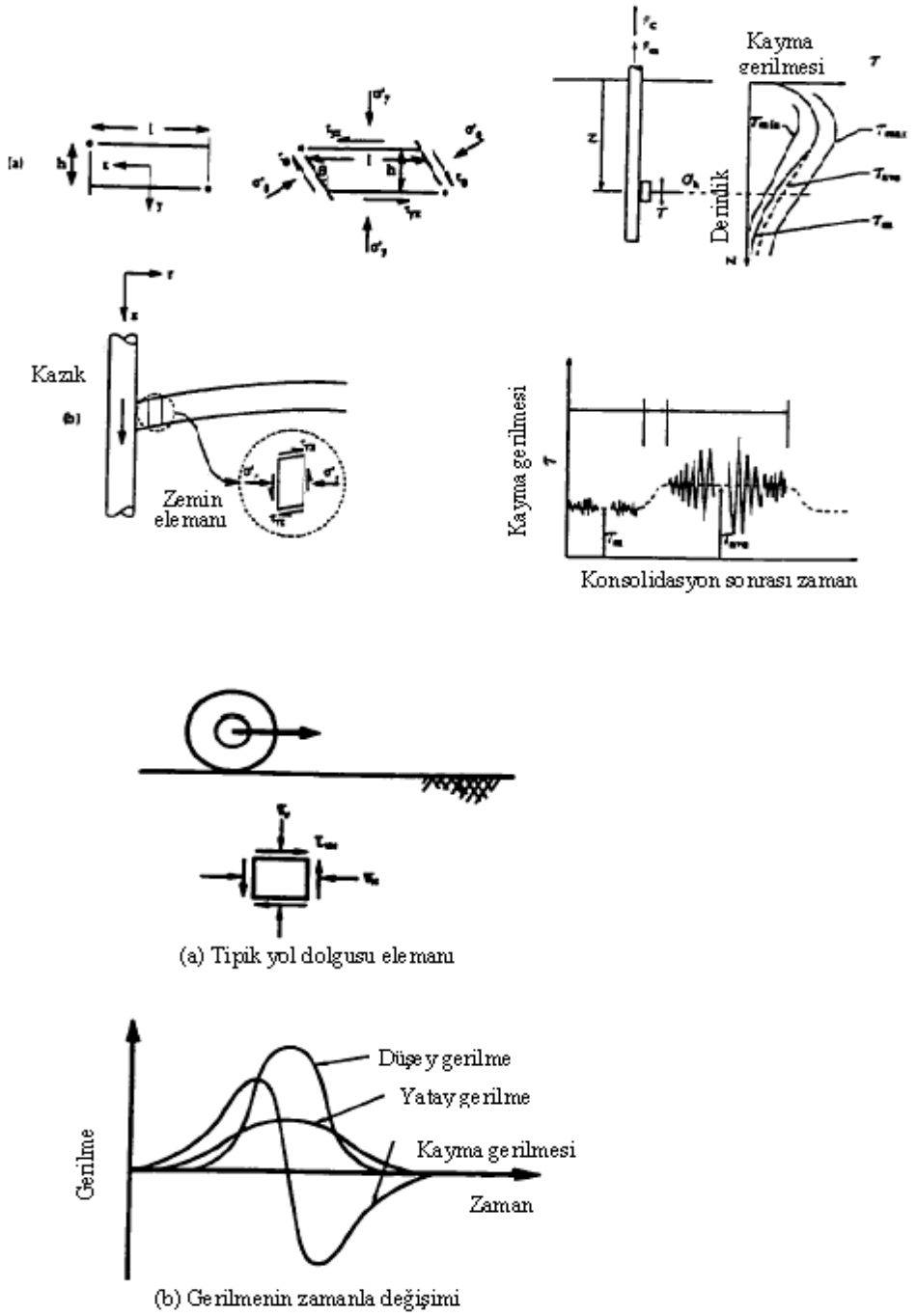
5. Deney hücresi,

6. Basınç tablosu,

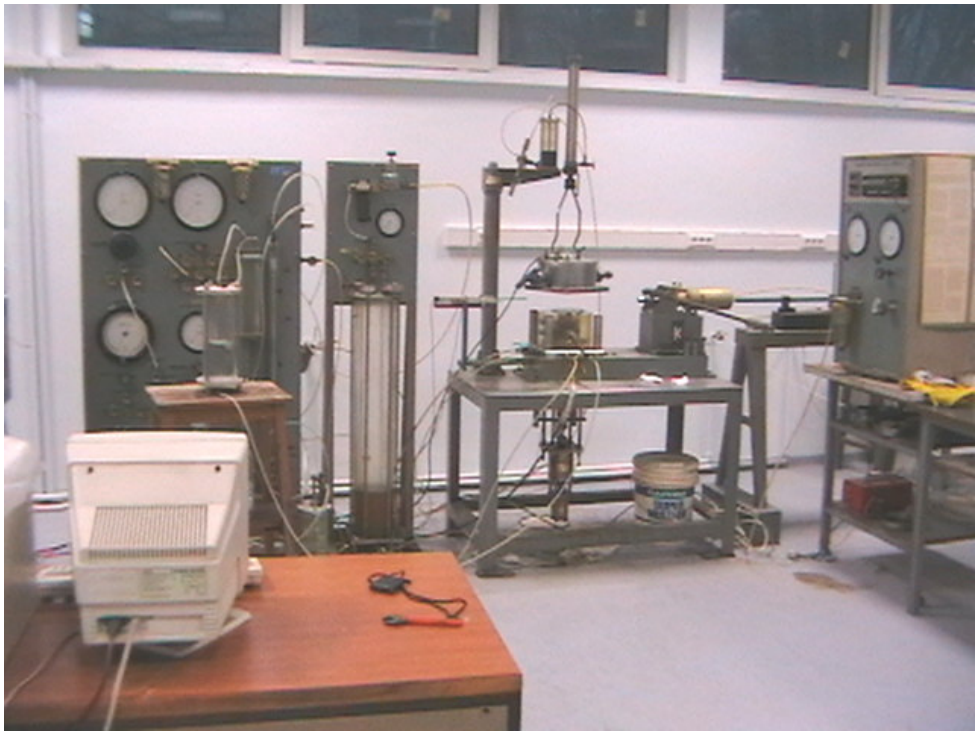
7. Tekrarlı yük uygulama birimi,

8. Ölçüm, veri toplama ve kayıt birimi olarak adlandırılır.

Aşağıda bu bölümler sırasıyla anlatılmıştır.



Şekil 3.8 Geoteknik problemlerde basit kesmeye ait diğer durumlar (Biscontin, 2001).



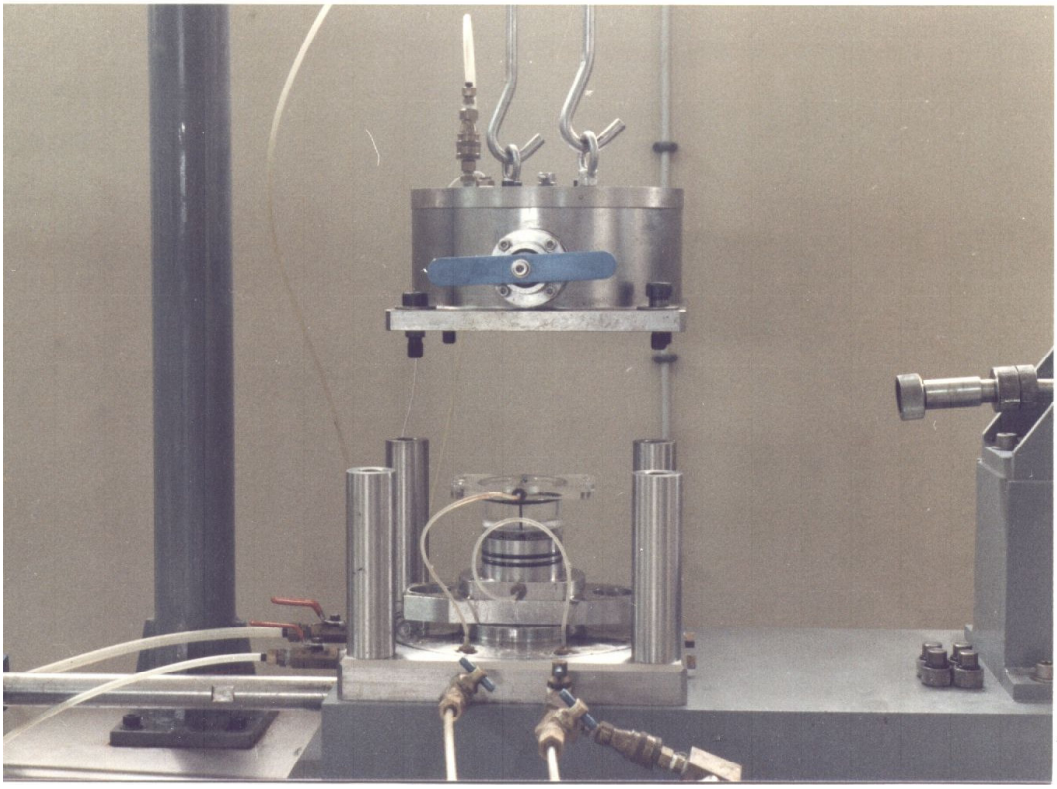
Şekil 3.9 Dinamik basit kesme deney sisteminin görünüşü.

3.3.1 Deney hücresi

Numunenin içine yerleştirildiği deney hücresi, 250 mm çapında, 160 mm yüksekliğinde olup uygulanacak yüksek çevre basıncına karşı 20 mm et kalınlığına sahip sert pleksiglas bir silindirle çevrelenmiştir. Hücre içerisinde 25-35 mm çapında ve 70 mm numune, alt ve üst başlıklar, yatay yük pistonu, yatay yük ölçer, alt ve üst başlık bağlantı mekanizması bulunmaktadır.

Deney numunesi, K_0 şartlarında deney yapmayı mümkün kılacak şekilde yatay düzlemde genişlemeyi önleyen donatılı membran içine veya İsveç Geoteknik Enstitüsü basit kesme deney sisteminde kullanılan ve ortalarında numune çapına eşit delikler bulunan, numune yüksekliğince üst üste numunenin etrafına geçirilen ince sürtünmesiz plaklar içine veya sadece membran içine konulabilmektedir. Numunenin alt başlığı konsolidasyon oturmalarının oluşabilmesi için düşey yönde, üst bağlığı ise statik ve tekrarlı kayma gerilmelerinin uygulanabilmesi amacıyla yatay yönde hareket imkanına sahiptir. Her iki başlıkta sadece tek yönde hareket edebilmektedir. Numune alt bağlığının altında bulunan şaft üzerinde iki adet düşey yük uygulama pistonu bulunmaktadır. Bu pistonlardan birinin görevi, numune, numune alt başlığı, bağlantı mekanizmaları ve tüm şaftın ağırlığını dengelemek ve numuneyi yükselterek üst başlığın yatay yük uygulama şaftına bağlanmasını sağlamaktır. İkinci pistonun görevi ise numuneye farklı düşey ve yanal basınçlar uygulanması istendiğinde,

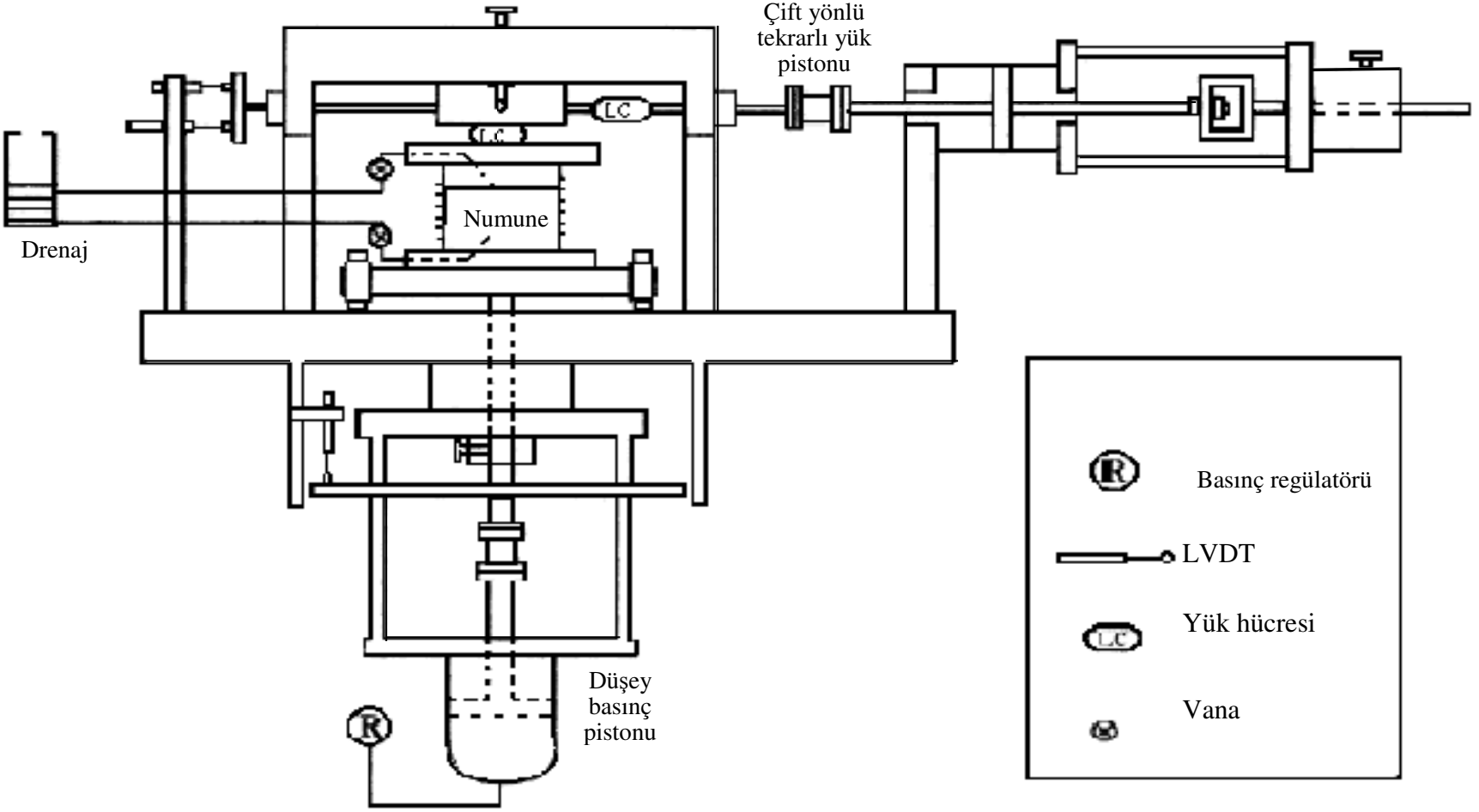
öngörülen bu düşey gerilmenin numuneye uygulanabilmesini sağlamaktır. Şekil 3.11'de konsolidasyon aşamasında numuneye uygulanan gerilmeler ve konsolidasyon sırasındaki gerilme durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Deney hücresi.

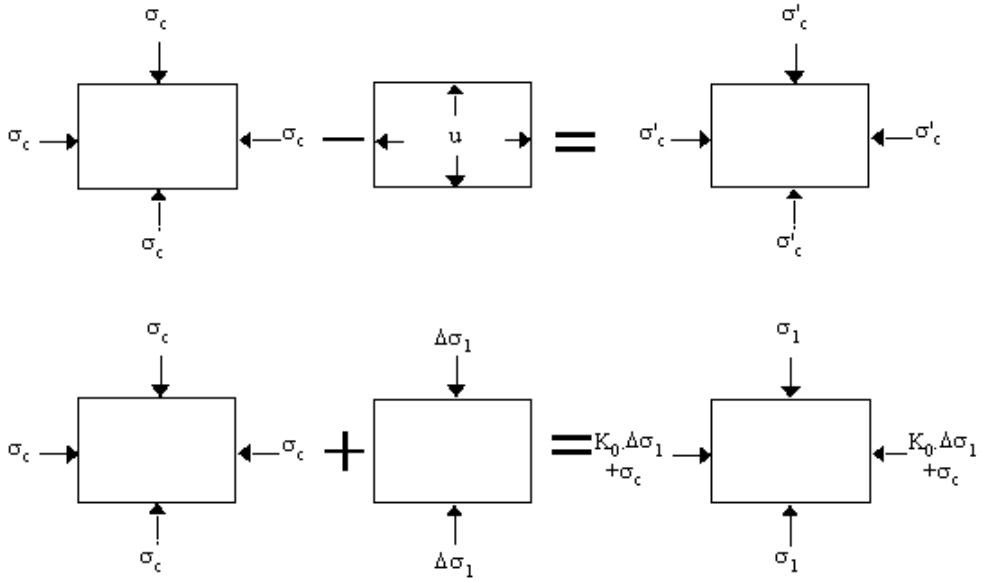
Şekil 3.12'de hücre bölümünün ortadan alınmış düşey bir kesiti verilmiştir. Kesit üzerinde hücre, numune, yatay ve düşey yükleme şaftları, deformasyon ve yük ölçerler, yatay yük uygulama ünitesi ile düşey yük ve dengeleme basıncı uygulama pistonları şematik olarak gösterilmiştir. Bunun dışında istenilen durumlarda numuneye izotropik çevre gerilmesi uygulanabilmesi amacı ile hücre basıncı ile olan bir ara bağlantının açılmasıyla bu silindir, numuneyi taşıyan düşey şafta, ağırlık dengeleme basıncına ek olarak numunenin alt ve üst yüzeylerine hücre basıncına eşit bir basınç verecek kuvveti de aktarmaktadır (Yıldırım, 1987).

Zeminin suya doygunluğunun sağlanması için ters basınç uygulanması amacıyla alt ve üst başlıklardan ikişer adet ince tüp çıkışı bulunmaktadır. Alt başlıktan çıkan tüp üzerinde hücrenin hemen dışında iki adet vana ve boşluk suyu basınçlarının ölçülmesi amacıyla bir adet basınç ölçer, üst başlıktan çıkan tüp üzerinde de sadece bir adet vana bulunmaktadır. Her iki başlık üzerindeki vanaların görevi numunenin suya doygunluğunun kontrolü esnasında vanaların kapatılarak numune içindeki basıncın ana hava basınç sistemiyle ilişkisini kesmektir.



Şekil 3.11 Dinamik basit kesme deney sisteminin şematik görünüşü.

Numuneye uygulanan statik ve tekrarlı yatay kayma gerilmeleri, uzantısı hücre dışında bulunan ve numune üst başlığına sabitlenen bir şaft vasıtasıyla uygulanmaktadır. Yükleme (statik veya tekrarlı) biriminin pistonu numuneye ilave yük getirmeyecek şekilde yatay yük şaftına bağlanır. Uygulanan yatay yük ise hücre içerisinde ve şaft üzerinde bulunan yük hücresi vasıtasıyla yapılır. Yük hücresinin konumundan dolayı şaftın hücreye giriş ve çıkışındaki yataklarda oluşacak sürtünme kuvvetleri kayma kuvvet okumaları içine dahil edilmemiş olmaktadır.



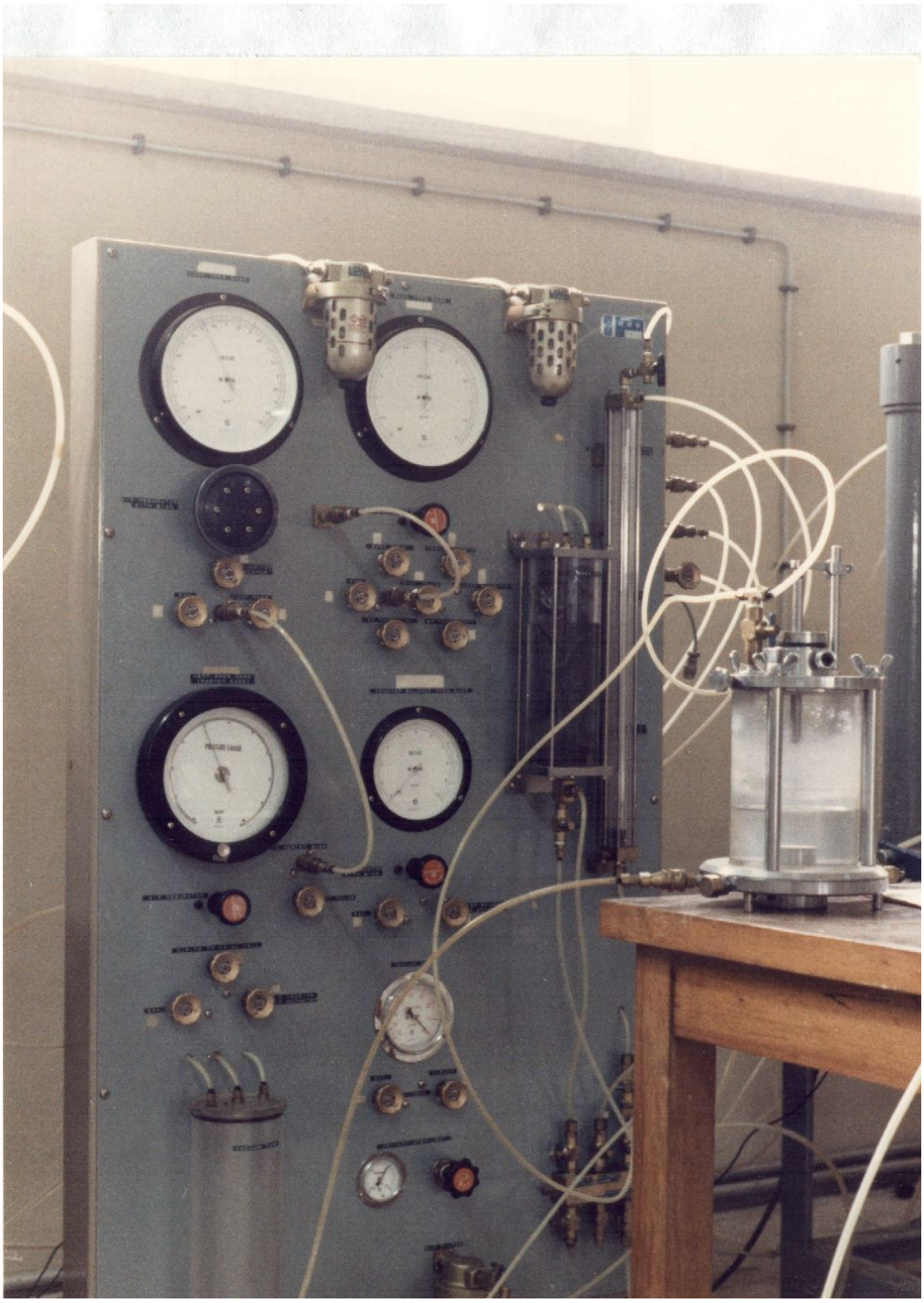
Şekil 3.12 Dinamik basit kesme deney sisteminde konsolidasyon sırasında numune üzerindeki gerilme durumu (Yıldırım, 1987).

Sistemde yükleme esnasında yatay ve düşey deformasyonlarda gözlenmektedir. Yatay deformasyon, hücre dışında yatay yük uygulama şaftının çıkışına bağlanmış bir deformasyon ölçerle yapılır. Şaft, numune üst başlığına sabitlendiğinden ölçülen deformasyonlar numunenin deformasyonlarıyla aynı olmaktadır. Düşey deformasyonlar ise numune alt başlığının uzantısında ve hücre dışındaki düşey şaft üzerinde bulunan deformasyon ölçerle yapılır. Numunenin konsolidasyonu aşamasındaki oturmaların belirlenebilmesi amacıyla yine düşey şaft üzerinde 0.01 mm hassasiyette okuma yapabilen mekanik bir deformasyon saati bulunmaktadır.

3.3.2 Basınç tablosu

Bu birim, düşey ve yatay yük uygulama birimleri, deney hücresi ve numuneye regüle edilmiş hava ve su sağlamaktadır. Basınç tablosu (Şekil 3.13) üzerindeki alt birimler; deney hücresine hava sağlama birimi (çevre basıncı), numuneye su sağlama birimi (ters basınç), düşey yük uygulama birimine basınç sağlama birimi (düşey basınç),

düşey yükleme pistonunun ağırlığını dengelemek için basınç temini birimi (dengeleme basıncı), bütün deney sisteminin basıncını kontrol eden ana basınç birimi, numuneye vakum sağlayan vakum birimi, deney sisteminin su ihtiyacını karşılayan 20 litrelik su tankı ve numuneden drene olan su miktarını ölçme birimidir. Ayrıca bu alt birimler içinde çok sayıda vana, su filtresi, basınç regülatörü ve bağlantı tüpleri bulunmaktadır.



Şekil 3.13 Basınç tablosu.

Basınç tablosunda regülatörler arasında yapılmış olan bağlantılar yardımıyla deney numunesine uygulanacak basınçlar kademeli ve her defasında tek bir regülatörden ayarlanabilecek şekildedir. Basınç regülatörleri yüksek hava basıncını kontrol ederek, istenilen basıncın numuneye uygulanabilmesine olanak sağlar. Bunun yanında istenilen regülatörlerin birbirlerine bağlanması suretiyle eşit basınçlar için ortak beslenmeleri sağlanabilir. Bu sistemde, ters basınç regülatörü, çevre basıncı regülatörüne, çevre basıncı regülatörü ise düşey dengeleme basıncı regülatörüne bağlanmış durumdadır. Bu sayede numuneye ters basınç ile aynı zamanda çevre basıncı ve düşey dengeleme basıncı da uygulanmakta ve numunenin basınçların uygulanması sırasında meydana gelebilecek farklardan etkilenmesi önlenmiş olmaktadır. Ortak çalışmaları halinde, çevre ve düşey dengeleme basıncı regülatörlerinden uygulanan basınçlar sırasında, üst başlık bağlantısının yapılabilmesi için önceden, numuneyi yükseltmek amacı ile düşey dengeleme basıncı regülatöründen uygulanması gereken basınç kadar (60 kPa) bir fark vardır. Düşey basınç regülatörü ise çevre ve ters basınç regülatörlerinden bağımsız olarak kumanda edilebilir ve bu sayede numuneyi istenilen durumlarda farklı düşey ve yanal basınçlar uygulanması mümkün olur. Sistem için gerekli olan hava basıncı 700-1500 kPa'lık basınç aralığında çalışan bir kompresörden sağlanmaktadır. Numuneye çevre basıncı uygulayabilmek için hücreye 20 litrelik büyük tanktan hint yağı doldurulmaktadır. Hint yağı kullanılmasının nedeni membran ve beloframların bozulmasını ve yataklarda oluşacak paslanmayı önlemektir. Hücrede su kullanılması durumunda, uzun süreli deneylerde ve yüksek çevre basınçları uygulanması durumunda, membranların suyu geçirebilecekleri de dikkate alınırsa, hint yağı kullanılmasının daha uygun olacağı açıktır (Yıldırım, 1987).

Sistem için gerekli olan hava basıncı 700-1500 kPa'lık basınç aralığında çalışan bir kompresörden sağlanmaktadır. Numuneye çevre basıncı uygulayabilmek için hücreye 20 litrelik büyük tanktan hint yağı doldurulmaktadır. Hint yağı kullanılmasının nedeni membran ve beloframların bozulmasını ve yataklarda oluşacak paslanmayı önlemektir. Hücrede su kullanılması durumunda, uzun süreli deneylerde ve yüksek çevre basınçları uygulanması durumunda, membranların suyu geçirebilecekleri de dikkate alınırsa, hint yağı kullanılmasının daha uygun olacağı açıktır (Yıldırım, 1987).

3.3.3 Tekrarlı yatay kuvvet uygulama ünitesi

Şekil 3.11'de verilmiş olan şemada deney hücresinin sağında görülen sistemdir. Hava basıncı ile çalışır ve deney numunesine tekrarlı yatay kayma kuvvetleri uygulayan birimdir. Bu yükleme birimi yardımı ile sünizoidal, kare ve iki tip üçgen

kesitli olmak üzere dört tip yüklemeye olanak sağlar. Titreşim frekans aralığı, 0.0001-9999 çevrim/saniye arasında ayarlanabilmektedir. Yük genliği bir kumanda düğmesi ile ayarlanır ve dinamik basınç ölçerlerin gösterdiği değerden büyük olmaz. Yükleme biçimi gerilme kontrollüdür. Belirli bir frekans ve genlikte deney yapılabildiği gibi, belirli kayma gerilmeleri altında akma ve değişik hızlarda gerilme kontrollü monotonik kesme deneyleri de yapılabilir.

3.3.4 Ölçüm, veri toplama ve kayıt ünitesi

Gerek dinamik gerekse statik deneylerde, zaman, yatay yük, yatay deformasyon, boşluk suyu basıncı ve düşey deformasyonlarda oluşan değişimler 64 kanallı veri toplama sisteminin 5 kanalı kullanılarak sisteme bağlı program yazılımının yüklü olduğu bir bilgisayar vasıtasıyla toplanarak kayıt edilmişlerdir. Bu programda veri toplama sıklığı deney türüne göre değiştirilebilmektedir. Maksimum 10 000 satır veri toplanabilmekte olduğundan dinamik deneylerde saniyede 5 veri, statik yüklemeli deneylerde ise 90 saniyede 1 veri alınmıştır. Programda yapılan kalibrasyonla değişkenlerin birimlerinde ayarlar yapılabilmektedir. Çalışmada zaman saniye, yatay yük kN, yatay ve düşey deformasyonlar milimetre, boşluk suyu basıncı ise kPa olarak kaydedilmiştir.

3.4 Deneylerin Yapılışı

70 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde ringe alınmış numune, içine vakum uygulanabilen bir numuneden daha yüksek çelik silindir vasıtası ile esnek bir membran içine yerleştirilir. Numunenin alt ve üstüne suya doyurulmuş poroz kağıt konur. Çelik silindir, membran ve numune birlikte deney hücresindeki numune alt başlığının üzerine yerleştirilir. Çelik silindirin alt kısmındaki membran aşağıya doğru çekilerek numune alt başlığına membran geçirilir, üst kısımdaki membran parçası serbest bırakılarak çelik silindir numune ve membranın etrafından çıkarılır. Numunenin alt kısmından membranın sızdırmasını önlemek amacıyla yarım silindir şeklinde yarı esnek bir parça numune üstünden yukarıdan aşağıya doğru geçirilerek alt kaide üzerine oturtulur. Bunun etrafına da numunenin etrafına geçirilen ince kaygan plakların üzerine oturtulduğu ortasında ise sızdırmazlığı sağlayan kauçuk parçanın çapına eşit bir delik bulunan ve belirli bir et kalınlığına sahip, hafif ve paslanmaz bir metalden yapılmış olan ikinci bir parça geçirilir ve bu parça üzerinde bulunan dört uzun vida yardımı ile numunenin alt kaidesinin oturduğu parçaya bağlanır. Vidalar sıkıştırıldıkça kauçuk parçada sıkışarak sızmayı önleyecek şekilde membranı çepeçevre kuşatır. Bu işlemlerden sonra numunenin etrafına ortalarında numune çapına eşit delikler bulunan ince, rijit ve kaygan plakalar geçirilir. Bu

plakaların görevi yüklemeler sırasında numunede oluşabilecek yanal şekil değiştirmeleri önlemek ve böylece arazideki K_0 şartlarını sağlamaktır. Numunenin üst başlığı, etrafına lastik O-ring geçirilmiş olduğu halde numunenin üzerine yerleştirilir. Membran, başlık üzerine iyice çekilir ve üzerine O-ring geçirilir. O-ring takıldıktan sonra membran yukarıya doğru iyice çekilerek gerdirilmesine ve içerisinde hava kalmamasına dikkat edilmelidir. Böylece numunenin hücre içerisindeki yerine yerleştirilmesi işlemi tamamlanmış olmaktadır. Bundan sonra hücre üst başlığı yerine yerleştirilir ve köşelerinde bulunan dört adet bağlantı civatası ile alt tablaya bağlanır (Yıldırım, 1987).

Numune hücrede yerine yerleştirilip hücre alt tablaya bağlantısı yapıldıktan sonra dengeleme basıncı 60 kPa'a çıkarılarak numune üst başlığı yatay yük uygulama şaftına bağlanır. Hücre yağ giriş vanaları açılır, yağ tankına 300-400 kPa değerinde basınç verilerek numune üstüne kadar hücre hint yağı ile doldurulur ve vanalar tekrar kapatılır. Hücrenin üst başlık bağlama civatalarının sıkıştırılabilmesi için açık tutulan dört adet delik kapatılır ve numuneye basınç uygulanmadan önce düşey deformasyon saatinden ilk boy okuması yapılır.

Numunenin suya doygun hale getirilmesi için küçük değerde çevre basıncı uygulanır. Bu değer bütün deneylerde 20 kPa olarak sabit tutulmuştur. Uygulanan ilk çevre basıncının küçük seçilmesi ters basınca yakın olması ve dolayısı ile numunenin suya doygunluğunun daha kolay sağlanmasıdır. Çevre basıncından sonra ters basınç regülatörü vasıtası ile ters basınç (u) 300 kPa değerine yükseltilir. Ters basınç regülatörü düşey basınç hariç diğer basınçları kontrol ettiğinden çevre basıncı (σ_c) 320 kPa'a dengeleme basıncı da 380 kPa'a yükseltilmiş olur. Bu durumda efektif konsolidasyon basıncı, $\sigma'_c=\sigma_c-u=20$ kPa değerindedir. Daha sonra düşey basınç regülatörü ile önceden belirlenen düşey konsolidasyon basınçları uygulanır.

Numunelere uygulanacak basınçlarının seçiminde, numunelerin hazırlandığı çamur konsolidasyon aletinde uygulanan ön konsolidasyon basınç (p_c) değeri esas alınmıştır. Belirlenen bu basınca aynı çamur konsolidasyon aletinde olduğu gibi kademeli olarak ulaşılmıştır.

Son basınç kademesinde, numunenin konsolidasyonunu tamamlayıp tamamlamadığını anlayabilmek için drenajlar kapatılarak boşluk suyu basıncındaki değişimler gözlenmiştir. Drenajlar kapatıldığında boşluk suyu basıncının sabitleşmemesi konsolidasyonun hala devam ettiğini gösterir.

Konsolidasyonun tamamlanıp basınçların denge durumuna gelmesinden sonra, deneye başlamadan önce numunenin suya doygun olup olmadığının araştırılması

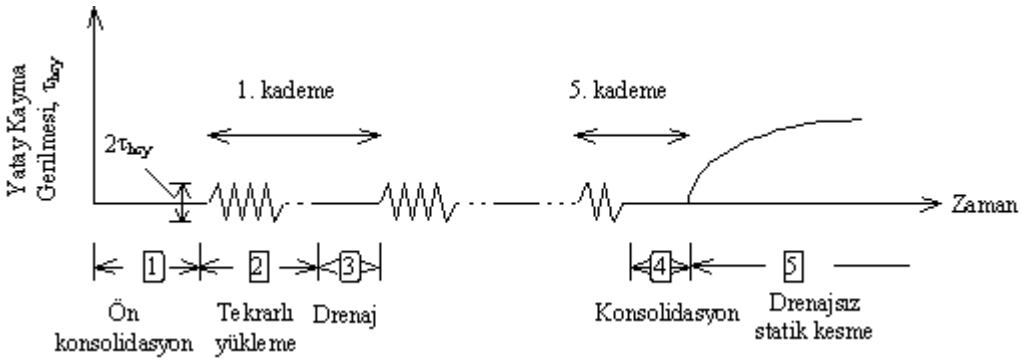
gerekir. Bu amaçla ters basınç vanaları kapalı iken çevre basıncı bir miktar (örneğin $\Delta\sigma_c$=50 kPa) artırılır. Çevre basıncındaki bu artış boşluk suyu basınçlarına yansır. Şayet numune tamamen suya doygunsa bir süre sonra boşluk suyu basıncında bu artımın aynen okunması gerekir. $B=\Delta u/\Delta\sigma$ >%95 ise numunelerin suya doygun olduğu kabul edilir, dinamik deneylere geçebilmek için ters basınç artırılır ve vanaları açılır ve doygunluk kontrolünün yapıldığı sırada oluşmuş olan boşluk suyu basınçlarının eşitlenmesine kadar beklenir. Numuneler laboratuvarda çamur konsolidasyon aletinde %150 su muhtevasında homojen bir karışımdan hazırlandığı için yapılan bütün deneylerde B>%95 değerine kolaylıkla ulaşılmıştır (Yıldırım, 1987).

Doygun kil numunelerine tekrarlı kayma kuvveti uygulayabilmek için tekrarlı yatay kuvvet uygulama biriminin kompresör bağlantı vanası açılır ve bu birim çalıştırılır. Deney sırasında uygulanacak çevrim sayısı, frekans, genlik ve yükleme şekli ile ilgili ayarlar yapılır. Statik ve dinamik yükler ayarlanarak bu ünite ile numunenin üst başlığının bağlı olduğu yatay şaft bağlantısı yapılır. Bu işlem sırasında numunenin yatay yük alıp bozulmasına engel olmak için üst başlığın bağlı olduğu yatay yükleme şaftı hücre üst başlığına sabitleştirilmiş durumdadır. Şayet numune üzerinde ilave yük varsa bu yük sıfırlandıktan sonra üst başlık tespit vidası açılarak yatay yükleme şaftı serbest bırakılır. Bu sırada son konsolidasyon okuması alınarak kaydedilir. Amplifikatörlerin sıfırlama ve ölçek kontrolleri yapılır, veri toplama sistemi açılır ve bilgisayar programı deneye hazır hale getirilir.

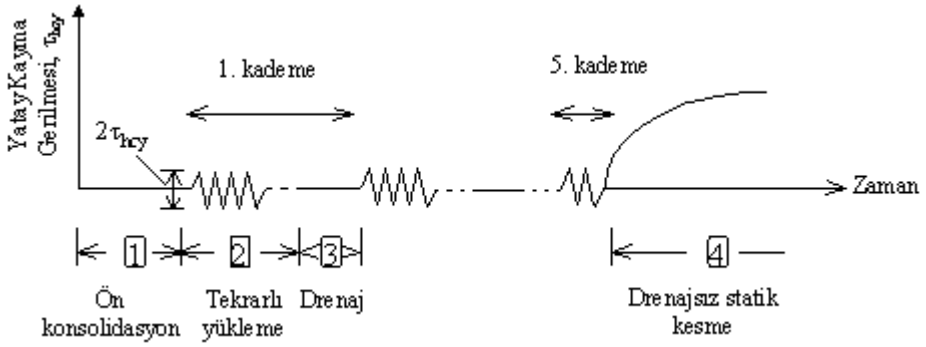
Yukarıda anlatılan işlemlerle deney için tüm hazırlıklar tamamlanmış olur. Drenajlar kapatılır, veri toplamak için bilgisayardaki program ayarlanarak çalıştırılır ve dinamik yük uygulama biriminde bulunan yükleme düğmesine basılarak deney başlatılır (Yıldırım, 1987).

Dinamik yatay yük uygulaması, birimin sahip olduğu özellikten dolayı otomatik olarak önceden belirlenen çevrim sayısı sonunda kendiliğinden kesilir. Çalışmada numuneye, Şekil 3.14a, b ve c'de gösterilen yükleme modelleri uygulanmıştır. İlk iki grup deneylerde her bir numuneye 5 kez ilk dinamik deneyde uygulanan çevrim sayısı, frekans ve gerilme genliği uygulandığı için yatay yük uygulama birimi ile yatay şaft bağlantısı beşinci deney sonuna kadar bağlı tutulmaktadır. İlk dinamik yükleme tamamlandıktan sonra hemen sonra veri toplama bilgisayar programı durdurulur ve elde edilen veriler kaydedilir. Deney sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesine izin vermek için drenajlar açılır. Tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ve konsolidasyon oturmalarının tamamlanması için 1 saat süreyle beklenir. Belirtilen süre,

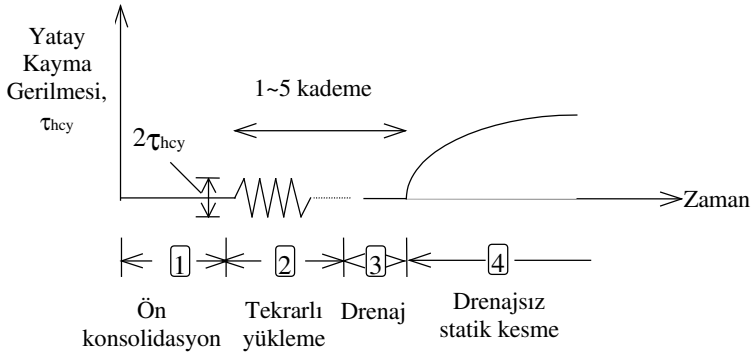
konsolidasyonun önemli bir kısmının tamamlanması için yeterli olmaktadır. Birinci kademe dinamik yükleme sonunda meydana gelen konsolidasyon oturması miktarı kaydedildikten sonra drenajlar kapatılarak ikinci kademe dinamik yükleme yapılır. Bu şekilde yükleme ve drenaj süreçleri 5 kez tekrarlanmıştır.



a) Yükleme I: 5 kez drenajsız tekrarlı yükleme+her tekrarlı yükleme sonunda drenaj+5. tekrarlı yükten sonra drenaj+drenajsız statik kesme



b) Yükleme II: 5 kez drenajsız tekrarlı yükleme+her tekrarlı yükleme sonunda drenaj + 5. tekrarlı yükten hemen sonra drenajsız statik kesme



c) Yükleme III: 1~5 kez drenajsız tekrarlı yükleme+her tekrarlı yükleme sonunda drenaj+Son. tekrarlı yükten sonra drenaj+drenajsız statik kesme

Şekil 3.14 Deney numunelerine uygulanan yükleme modelleri.

Dinamik yükleme aşaması tamamlandıktan sonra yatay şaft bağlantısı açılır ve statik yük düşürülür. Numune son olarak drenajsız koşullarda statik olarak kesilir. Bunun için statik deney aleti yatay yük uygulama şaftına bağlanır ve deney hızı, %20 deformasyonu yaklaşık 3 saatte meydana getirecek şekilde ayarlanarak deformasyon kontrollü statik deney yapılır. Statik kesme, bazı deneylerde 5. kademe dinamik yükten hemen sonra boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesine izin vermeden, bazı deneylerde ise son kademede oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesine de izin vererek drenajsız olarak yapılmıştır. Bu deney sırasında oluşan boşluk suyu basıncı, yatay deformasyon ve yatay yük verileri de veri toplama sistemine bağlı bilgisayar programıyla kaydedilmiştir.

Deney bittikten sonra statik yük uygulama kolu, yatay şafttan ayrılır. Hücre çıkış vanaları açılarak hint yağı büyük tanka boşaltılır. Bu sırada numunenin su almaması için ters basınç vanalarının açılmaması gereklidir. Bu durumda numune çıkartılır, hemen tartılarak su muhtevasının tayini için kurutulmak üzere 104 ^{0}C derecedeki etüve konur.

3.5 Laboratuvar Deney Programı Seçiminde Dikkat Edilen Hususlar

Temel dizayn analizinde gerekli olan zemin özelliklerini belirlemek için farklı zemin elemanlarına etkiyen gerilme durumlarının mümkün olduğu kadar yakın model edildiği laboratuvar deneyleri yapmak gereklidir. Mevcut laboratuvar deney sistemleri ile bütün arazi gerilme durumlarının oluşturulması mümkün değildir. Bununla beraber üç eksenli ve direkt basit kesme deneyleri bazı önemli gerilme durumlarını model etmektedir. Tekrarlı kayma gerilmelerinin farklı kombinasyonlarıyla yapılan bu deneylerden elde edilen sonuçlar, statik ve tekrarlı yüklere birlikte maruz kalan kil temellerinin davranışının analizi için gerekli olan zemin parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılabilir (Andersen, 1988).

Gerçekçi zemin parametrelerini bulmak için laboratuvar deneyleri aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Andersen, 1988):

- Deney numuneleri yüksek kaliteli olmalıdır.
- Numuneler, arazide etkisi altında kaldığı gerilmeler altında konsolide edilmelidir. Özellikle K_0'ın yaklaşık 0.5 olduğu yumuşak killerde anizotropik konsolidasyon gerilmelerinin uygulanması önemlidir.
- Değişik arazi gerilme izleri, hem zemin yapısal hem de gerilmelerden kaynaklanan anizotropinin etkisini yansıtacak derecede yakın oluşturulabilmelidir.

- Yükleme tipi arazideki yükleme tipini model etmelidir. Statik deneyler arazideki yükleme tipine bağlı olarak sabit deformasyon artış hızında deformasyon kontrollü veya sabit gerilme artış hızında gerilme kontrollü yapılmalıdır. Tekrarlı deneyler, numuneye ya tekrarlı kayma gerilmeleri ya da tekrarlı deformasyon uygulayarak gerilme ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilir.
- Yükleme hızı arazideki ile aynı olmalıdır. Statik deneyler arazide göçme oluşması için gerekli zaman göz önüne alınarak aynı yükleme periyoduna sahip olarak yapılmalıdır.

3.6 Zeminin Özellikleri ve Numunelerin Hazırlanması

Heterojenlik, gerilme geçmişi, su muhtevası, başlangıç yapı ve boşluk sıvısı özellikleri gibi faktörlerin etkisini en aza indirmek amacıyla tekrarlı yük uygulayarak deneye tabi tutulan zemin numuneleri laboratuvarda hazırlanarak elde edilmiştir. Kil zeminlerin dinamik davranışı üzerine bu faktörlerin büyük bir etkisi vardır. Örneğin frekansın etkisini incelemek için ya bütün faktörlerin sabit tutulduğu ya da bu faktörlerin bağımsız bir şekilde ölçüldüğü numuneler kullanılmalıdır. Bu tür ölçümler yapılsa bile bu kadar çok değişkene sahip deney sonuçlarının analizi çok zordur ve çok sayıda deney yapılmasını gerektirir. Bununla beraber diğer faktörler sabit tutulduğunda göz önüne alınan faktörün etkisi daha açık bir şekilde daha az sayıda deney yaparak incelenebilir (Özaydın ve Erguvanlı, 1980).

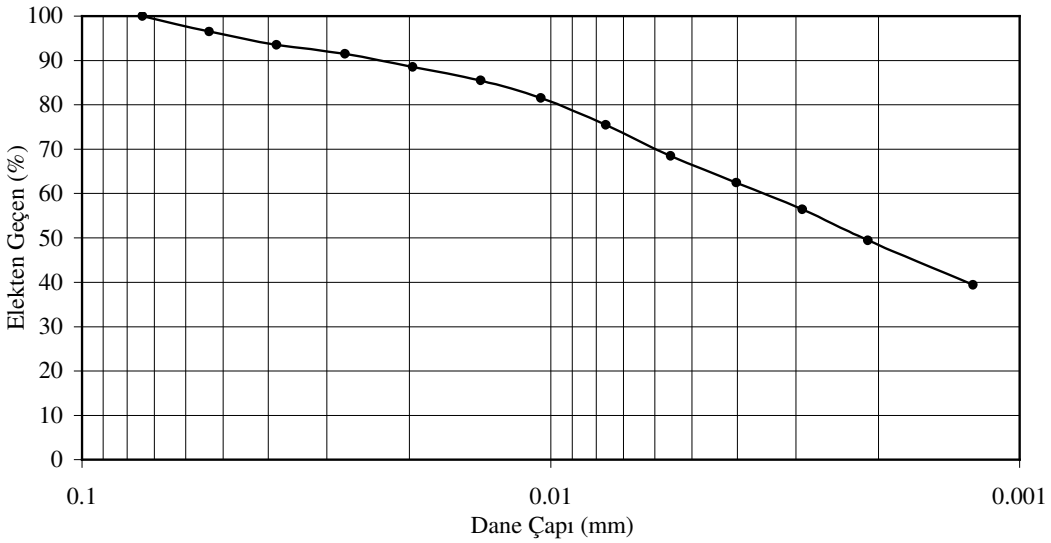
3.6.1 Deneylerde kullanılan zeminin özellikleri

Çalışmada kullanılacak zemin numunesi temin edilmiş ve endeks özellikleri belirlenmiştir. Tez çalışmasında kullanılacak zemin, 200 nolu elekten (0.0042 mm) elenerek elde edilen dane birim hacim ağırlığı 26.4 kN/m^3, likit limiti ω_L=%73, plastik limiti ω_P=%25 ve plastisite indisi I_P=48 olan yüksek plastisiteli kildir (CH). Danelerin tamamı 200 nolu elekten geçtiği için numuneye ait dane dağılım eğrisi hidrometre analiziyle belirlenmiştir (Şekil 3.15). Şekilden de görüldüğü gibi malzemenin % 48.5'i kil boyutundadır.

3.6.2 Deney numunelerinin hazırlanması

Her deneyi aynı tip özelliklere sahip zemin numuneleri üzerinde yapabilmek için numuneler, laboratuvarda Şekil 3.16'da görülen hazne çapı ϕ=20 cm ve yüksekliği 80 cm olan sert plastikten yapılmış çamur konsolidasyon aleti kullanılarak hazırlanmıştır. Çamurun hazırlanmasında, 104 ^{0}C'de etüvde kurutulup toz haline

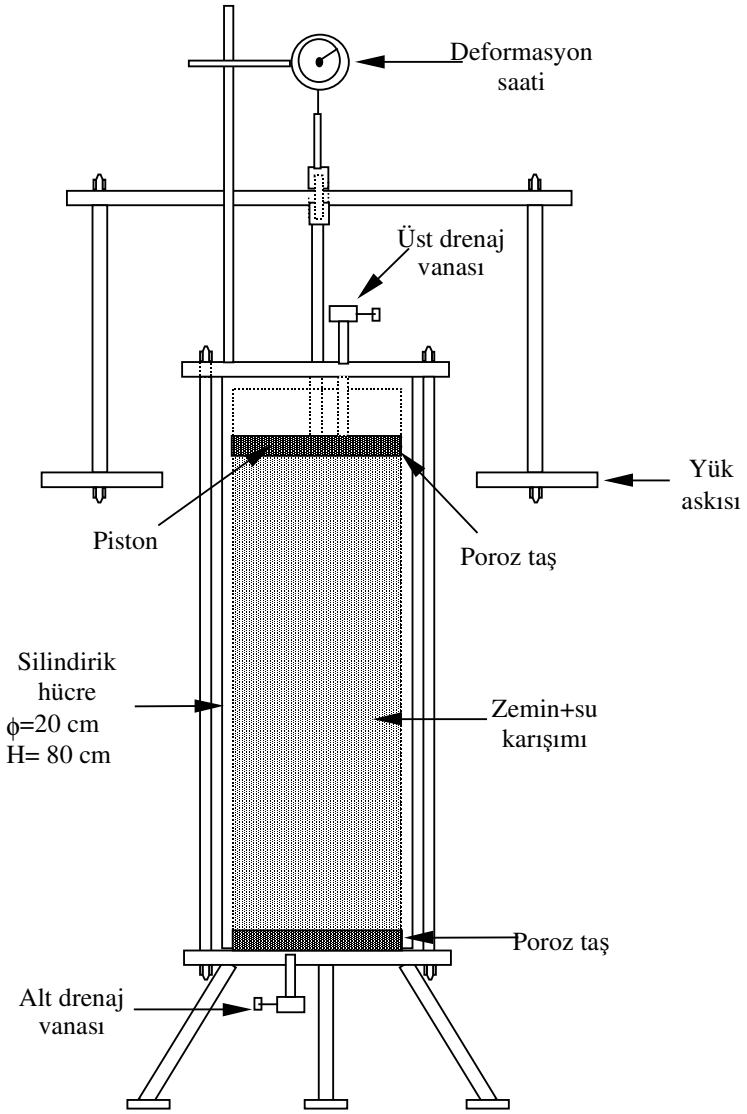
getirilmiş temiz kil ve damıtılmış su kullanılmıştır. Bu tür bir yöntemle, homojen numuneler hazırlanabilmekte ve daha sonra aynı özelliklere sahip numune hazırlanması mümkün olmaktadır.



Şekil 3.15 Zeminin dane dağılım eğrisi.

Zemin, likit limitinin iki katı bir başka deyişle %150 su muhtevasında hazırlanan süspansiyon, mikserle homojen bir özelliğe sahip oluncaya kadar karıştırılmıştır. Çamur konsolidasyon aletinin altında bulunan başlık üzerine suya doygun hale getirilmiş poroz taş ve poroz kağıt ve başlık üzerindeki yuvaya lastik conta konularak dört vida yardımı ile sıkıca sabitlenmiştir. Bu arada alt başlık üzerindeki tahliye vanası kapalı durumdadır. Böylece numune içindeki suyun alt başlık drenaj borusu dışında kenarlardan drene olması önlenmiştir. Hazırlanan homojen karışım çamur konsolidasyon aletine dökülmüştür. Karışımın dökülmesi esnasında numune içinde kalması muhtemel havanın, çamur konsolidasyon aletine titreşim uygulayarak dışarı çıkarılması sağlanmıştır. Daha sonra üst başlığın üzerinde bulunduğu piston, itilerek numune ile sadece teması sağlanmış, numuneye ek yük gelmemesine özen gösterilmiştir. Pistonun yatay yönde hareketini engelleyen ve ortasında piston kolu çapına eşit delik ile üst başlıktan suyun drenajını sağlayan hortum bağlantısı bulunan plaka, dört vida yardımıyla çamur konsolidasyon aletine sabitlenmiştir. Son olarak numuneyi konsolide etmek için simetrik yük uygulanmasına imkan veren yük askısı üst başlık pistonunun üst ucuna sabitlenir. Böylece sistem konsolidasyon basınçlarının uygulanması için hazır hale gelmiştir. Çamur konsolidasyon aletinde düşey efektif gerilme 25 kPa'dan başlayarak 50 ve 100 kPa olarak kademeli bir

şekilde uygulanmış ve her yük kademesinde numune iki hafta süre ile konsolide edilmiştir.



Şekil 3.16 Çamur konsolidasyon aleti.

Konsolidasyon sonunda uygulanan yükler dikkatlice yük askısından indirilmiş, numuneye ilave yükler gelmemesine özen gösterilmiştir. Alt başlığı çıkarılan aletin üst başlık pistonu numunenin örselenmesini önlemek amacı ile çok yavaş itilerek numune bir bütün olarak çıkarılmıştır. Tam ortadan tel testereyle iki parçaya bölünen numunenin her parçası da üçe bölünerek toplam altı deney numunesi elde edilmiştir.

Çamur konsolidasyon aletinden elde edilen altı adet numune önce çok ince plastiklerle daha sonra alüminyum folyoya sarılmış ve en sonunda hava geçirmez plastik poşetler içerisine konulmuştur. Hava ile irtibatı kesilen bu numuneler en son olarak nem odasında bulunan desikatörler içerisinde saklanmıştır.

3.7 Sonuç

Çalışmada deneyler, arazi gerilme-deformasyon durumlarını diğer deney sistemlerine (üç eksenli deney, tam dolu veya içi boş silindir numuneli burulmalı kesme deneyi, rezonant kolon deneyi vb.) göre daha iyi model edebilen ve daha çok sayıda problemin model edilmesinde kullanılan İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuvarındaki dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada, su muhtevası, gerilme geçmişi, dane dağılımı gibi zemin özelliklerini sabit tutarak tekrarlı yükleme çevrim sayısı, gerilme genliği gibi faktörleri değiştirerek zeminin tekrarlı yükler altındaki konsolidasyon, gerilme-deformasyon ve tekrarlı yükleme sonrası mukavemet özelliklerindeki değişiklikler incelenmiştir.

Numuneler, aynı su muhtevası, gerilme geçmişi gibi özelliklere sahip çok sayıda numune elde edebilmek amacıyla No.40 eleğin altından geçen kilden laboratuvarda büyük çaplı çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmıştır.

Deneylerin çoğunda iki tip yükleme modeli uygulanmış, her iki model için yukarıda belirtilen zemin özelliklerindeki değişimin belirlenebilmesi için 54 adet deney içerisinde 270 dinamik yüklemeli, 45 adet drenajsız statik yüklemeli deney yapılmıştır. Birinci grup deneylerde (A grubu) numunelere belli çevrim ve tekrarlı gerilme genliklerinde tekrarlı yük uygulanmış daha sonra 1 saat süreyle oluşan boşluk suyu basınçlarının dağılması amacıyla drenaja izin verilmiştir. Bu tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi 5 kez tekrarlanmış beşinci drenajdan sonra statik olarak drenajsız koşullarda kesilmiştir. İkinci grup deneylerde de (B grubu) aynı yol takip edilmiş fakat bu kez son tekrarlı yüklemeden sonra drenaj uygulanmamış, son tekrarlı yükleme esnasındaki boşluk suyu basınçlarının da sönümlenmesine izin verilmemiş ve drenajsız koşullarda statik olarak kesilmiştir. Her iki grup deneyde de tekrarlı yükleme sonunda drenaj uygulanması esnasında oluşan konsolidasyon oturmaları kaydedilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMESİ

4.1 Giriş

Çalışmada tekrarlı yükleme frekansı sabit tutularak farklı gerilme genlikleri ve çevrim sayılarında üç grup deney yapılmıştır. Birinci grup deneylerde (A grubu), aynı çevrim sayısı ve gerilme genliğinde beş kez tekrarlı yükleme ve her tekrarlı yükleme arasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi amacıyla 1 saat süreyle drenaj uygulanmıştır. Beşinci kademe drenajdan sonra statik olarak kesilmiştir. İkinci grup deneylerde (B grubu) ise ilk dört tekrarlı yükleme kademesinden sonra drenaja izin verilmiş, son kademede boşluk suyu basınçları sönümlenmeden statik olarak drenajsız koşullarda kesilmiştir. Her deneyde, zaman, yatay yük, yatay deformasyon, düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncı değişimleri kaydedilmiştir. Elde edilen verilerle, normal konsolide zeminlerde tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, gerilme-deformasyon davranışı, gerilme oranı ve çevrim sayısının boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisi, tek bir numune üzerinde 5 kez tekrarlı yükleme ve her tekrarlı yük sonrasında uygulanan drenajdan kaynaklanan konsolidasyon oturmaları için eksenel deformasyon-efektif düşey gerilme değişimleri ile drenajsız tekrarlı yükleme sonrasında zeminin kayma mukavemetinin değişimleri tekrarlı yükleme sonunda drenaj uygulanıp uygulanmaması açısından incelenmiştir. Son olarak tekrarlı yükleme drenaj çevrimi sayılarının drenajsız kayma mukavemetine etkisini incelemek amacıyla bir grup deney yapılmıştır. Daha önce beş kez tekrarlanan tekrarlı yükleme drenaj çevrimi bu deneylerde 1~5 arasında değişmiştir.

4.2 Tekrarlı Yükleme ve Drenaj Çevrimlerinin Zemin Davranışına Etkisi

Zeminler, doğada birden çok sayıda deprem, açık deniz dalgaları, yüksek binalara etkiyen rüzgar yükleri, makine temellerinde oluşan sürekli titreşimler, karayolu ve demiryolunun maruz kaldığı yükler gibi çok farklı tekrarlı yüklere periyodik aralıklarla maruz kalabilir. Bu tür yükler altında zeminin ve bu zeminin üzerindeki yapıların davranışı, kesme kuvvetleri esnasında zeminin gerilme-deformasyon özelliklerine büyük oranda bağlıdır. İnşaat mühendisliği yapıları ve onların temellerinin güvenli bir şekilde dizayn edilmesi için temel zeminine ait gerilme-

deformasyon özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu amaçla tekrarlı yüklerin farklı gerilme ve yükleme durumlarının laboratuvarda detaylı bir şekilde incelenmesi gereklidir.

Bu çalışmada, periyodik aralıklarla zemine ve üzerindeki yapıya etkiyen bu tür yüklerin model edildiği yükleme ve gerilme durumlarını da içeren deney programı uygulanmıştır. Zeminin tekrarlı yükler altında davranışı, tekrarlı yüklemeler sonunda uygulanan drenajın daha sonraki tekrarlı yükler altındaki davranışa etkileri, uygulanan drenaj nedeniyle oluşan konsolidasyon oturmaları ve tekrarlı yükleme sonunda drenajsız kayma mukavemetindeki değişimler incelenmiştir. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de iki tip yükleme modeli kullanılarak yapılan A ve B grubu olarak adlandırılan deneyler ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1 Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneyler (A grubu deneyler).

Deney no	Çevrim sayısı, N	Tekrarlı gerilme oranı, τ/τ_f	Tekrarlı yükleme sonunda drenajsız statik kesme
A1	5x50	55.0	Var
A2		60.0	Var
A3		65.0	Var
A4		70.0	Var
A5	5x60	55.0	Var
A6		60.0	Var
A7		65.0	Var
A8		70.0	Var
A9	5x80	55.0	Var
A10		60.0	Var
A11		65.0	Var
A12		70.0	Var
A13	5x90	55.0	Var
A14		60.0	Var
A15		65.0	Var
A16		70.0	Var
A17	5x100	55.0	Var
A18		60.0	Var
A19		65.0	Var
A20		70.0	Var
A21	5x120	55.0	Var
A22		60.0	Var
A23		65.0	Var

A grubu deneylerde beşinci tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilerek numune statik olarak kesilmiş, B grubu deneylerde son tekrarlı yüklemeden hemen sonra drenaja izin verilmeden statik yük uygulanmıştır. B grubu deneylerde A grubuna göre daha fazla tekrarlı gerilme oranında deney yapılmıştır. Deneylerin 5 kademe tekrarlı yüklemeli olmasından dolayı toplam A ve B deney grubunda olmak üzere 54 grup altında, çevrim sayısı, tekrarlı gerilme oranı ve deney türüne bağlı olarak toplam 270 dinamik yüklemeli ve 45 drenajsız statik kesme deneyi yapılmıştır.

Ayrıca farklı tekrarlı yükleme drenaj çevrimi sayısının, drenajsız kayma mukavemetine etkisini incelemek amacıyla çevrim sayısı N=100, gerilme oranı τ/τ_f=0.65 ve tekrarlı yükleme drenaj çevrimi sayısı 1, 2, 3, 4 ve 5 olan beş adet deney yapılmıştır (Tablo 4.3).

Tablo 4.2 Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmamış deneyler (B grubu deneyler).

Deney no	Çevrim sayısı, N	Tekrarlı gerilme oranı, τ/τ_f	Tekrarlı yükleme sonunda drenajsız statik kesme
B1	5x50	55.0	-
B2		60.0	-
B3		65.0	-
B4		70.0	-
B5	5x60	55.0	-
B6		60.0	-
B7		62.5	-
B8		65.0	-
B9		67.5	-
B10		70.0	-
B11	5x80	55.0	Var
B12		60.0	Var
B13		62.5	Var
B14		65.0	Var
B15		67.5	Var
B16		70.0	Var
B17	5x90	55.0	-
B18		60.0	-
B19		65.0	-
B20		70.0	-
B21	5x100	55.0	Var
B22		60.0	Var
B23		62.5	Var
B24		65.0	Var
B25		67.5	Var
B26		70.0	Var
B27	5x120	55.0	Var
B28		60.0	Var
B29		62.5	Var
B30		65.0	Var
B31		67.5	Var

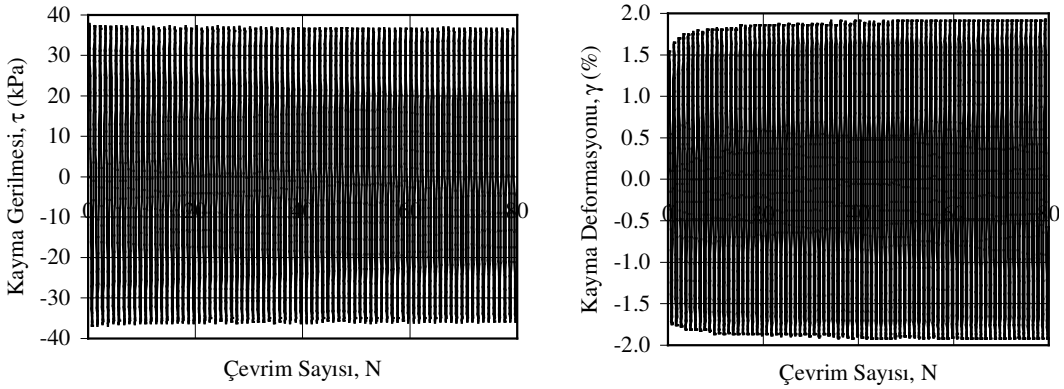
Tablo 4.3 Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi sayısının farklı olduğu deneyler.

Çevrim Sayısı, N	Gerilme Oranı, τ/τ_f (%)	Tekrarlı yükleme sonunda drenajsız statik kesme
1x100	65.0	Var
2x100	65.0	Var
3x100	65.0	Var
4x100	65.0	Var
5x100	65.0	Var

Bütün deneylerde tekrarlı yükleme sırasında düşey deformasyon, yatay deformasyon, yatay yük ve boşluk suyu basıncı, yükleme sonrasındaki drenaj sırasında ise oluşan

konsolidayon oturması gibi değişkenler ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmış ve değişkenlerin birbirine bağlı olarak değişimleri çizilmiştir. Deneylerden elde edilen grafikler, tekrarlı ve statik yükler altında gerilme-deformasyon değişimi, boşluk suyu basıncı oranı değişimi, hacimsel deformasyonun efektif düşey gerilmeye bağlı değişimlerdir.

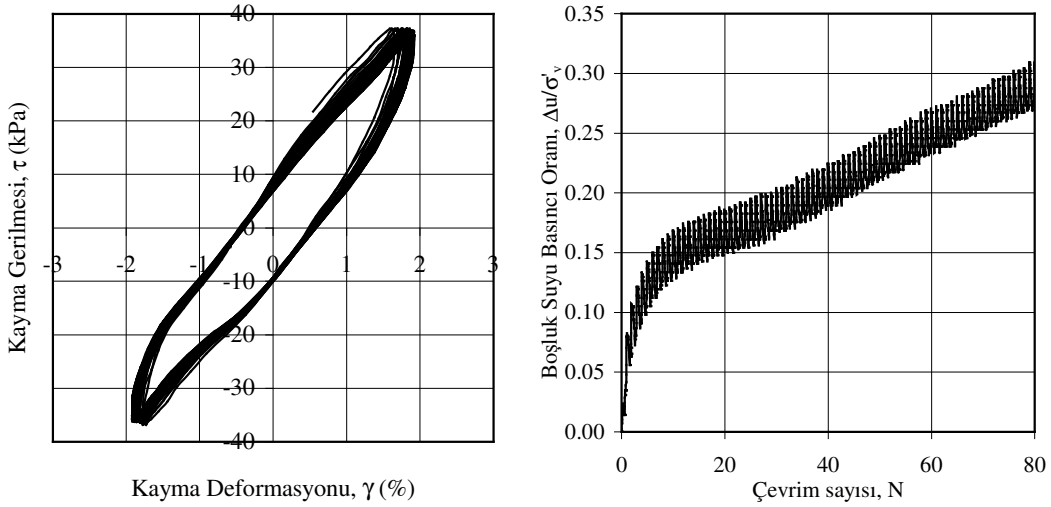
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak beş kademe tekrarlı yük ve her tekrarlı yükleme sonunda drenaj uygulayarak yapılan bir deneyin bir kademesinden elde edilen kayma deformasyonu, uygulanan kayma gerilmesi, meydana gelen boşluk suyu basıncı ve gerilme-deformasyon değişimleri görülmektedir. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi deneyler esnasında uygulanan kayma gerilmeleri simetrik sabit genliklidir. Oluşan kayma deformasyonları ise deney başından itibaren gittikçe artan, deneyin sonlarına doğru artışı yavaşlayan yine simetrik bir davranıştır.



Şekil 4.1 Basit kesme deneyinde kayma gerilmesi ve kayma deformasyonunun çevrim sayısıyla değişimi.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi tekrarlı yükler altında zeminlerin gerilme-deformasyon davranışı histerisis ilmikleri şeklinde olmaktadır. Gerilme kontrollü deneylerde çevrim sayısının artmasıyla birlikte meydana gelen şekil değiştirmeler de artmakta, histerisis ilmiklerinin yatıklaşmasına neden olmaktadır. Boşluk suyu basınçları ise artan çevrim sayısıyla artmakta deneyin sonuna doğru artışlar yavaşlamaktadır.

Aşağıda suya doygun bir zemin elemanının çok kademeli tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimine maruz kalması durumunda numunede meydana gelen, boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, konsolidasyon oturmaları ve tekrarlı yükleme sonundaki drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme genliğiyle değişimi detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.2 Basit kesme deneyinde oluşan gerilme-deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranlarının değişimi.

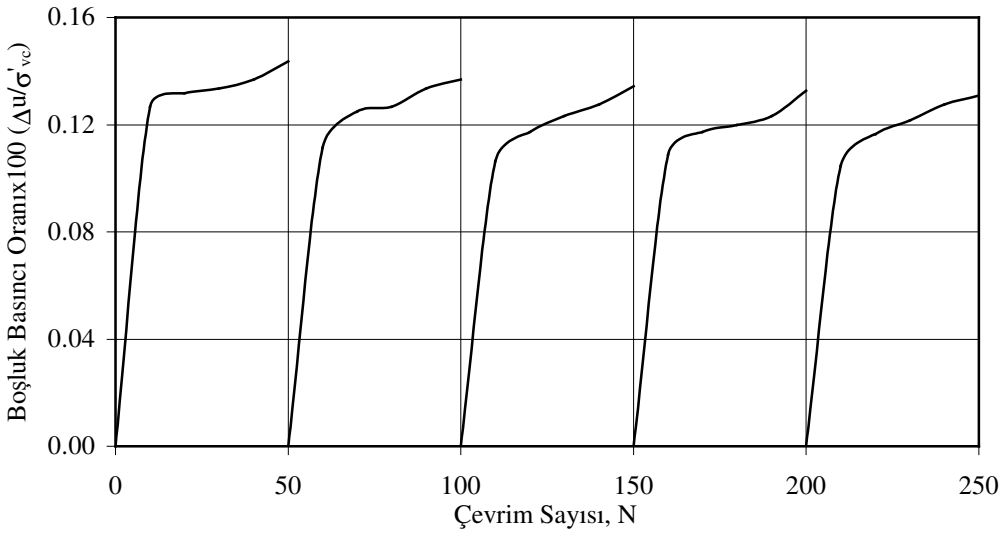
4.2.1 Boşluk suyu basıncı davranışı

Deneyler, tek bir numune aynı çevrim sayısı ve gerilme oranında beş kez drenajsız tekrarlı yükleme uygulanarak farklı çevrim sayısı ve gerilme oranları kullanılarak yapılmıştır. A grubu deneylerde her tekrarlı yüklemeden sonra, B grubu deneylerde ise ilk 4 kademeden sonra oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenebilmesi için 1 saat süreyle drenaja izin verilmiştir.

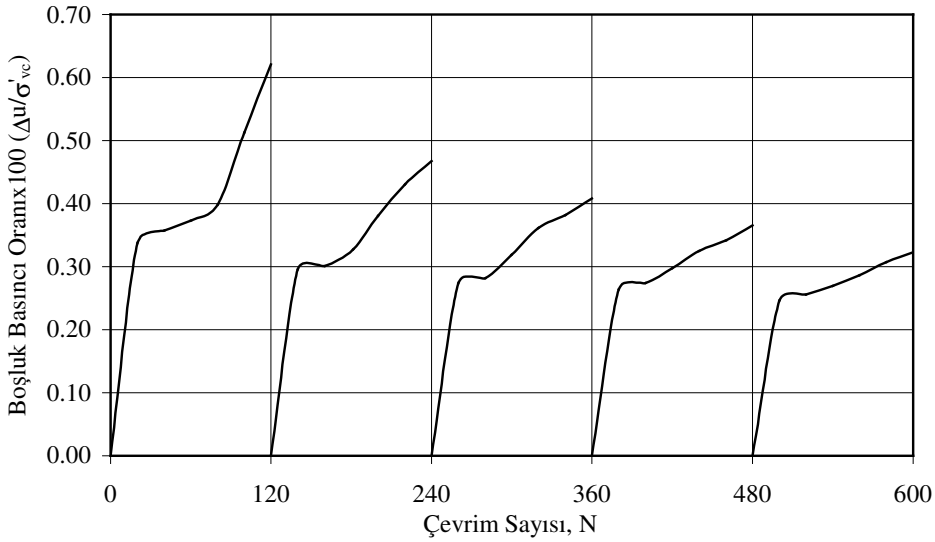
Şekil 4.3'te A1 deneyinde oluşan boşluk suyu basınçlarının her kademe tekrarlı yüklemedeki değişimi görülmektedir. Bu deney A grubu içinde en düşük çevrim sayısı (N=50) ve gerilme oranına (τ/τ_f=0.55) sahiptir. Tekrarlı yüklemeden sonra uygulanan drenaj sayesinde zeminde oluşan konsolidasyon oturmaları zeminin stabilitesinde artışa neden olmakta ve daha sonraki her kademede sürekli olarak azalmaktadır. N=50 olan ilk tekrarlı yüklemede boşluk suyu basıncı oranı %14.4 iken son kademede %13.1'e düşmektedir. Tekrarlı yüklemenin son kademelerinde boşluk suyu basınç artışı birbirine yakın olmaktadır. Hatta bazı deneylerde son iki kademede oluşan boşluk suyu basınçları birbirine eşit olmuştur.

Şekil 4.4'te ise A grubu deneylerden çevrim sayısı (N=120) ve gerilme oranı (τ/τ_f=0.70) en yüksek olan A23 deneyinde oluşan boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi artan çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranı boşluk suyu basınçlarında önemli bir artışa neden olmaktadır. İlk kademede boşluk basıncı oranı 0.621 iken son kademede 0.323'e kadar düşmektedir. İki deneyde oluşan boşluk suyu basınçları arasındaki önemli farklardan diğeri ise A23 deneyinde kademeler arasında boşluk suyu basıncı farkı

daha belirgin olmaktadır. Yani çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranı arttıkça boşluk suyu basınçları ile birlikte kademeler arasındaki boşluk suyu basınçları arasındaki farklar da artmakta, kademeler arası boşluk suyu basıncındaki değişim daha belirgin hale gelmektedir. Düşük çevrim sayısı ve gerilme oranlarında bu değişimler küçük olmakta son kademelerde meydana gelen boşluk suyu basınçları birbirine çok yakın olmaktadır.

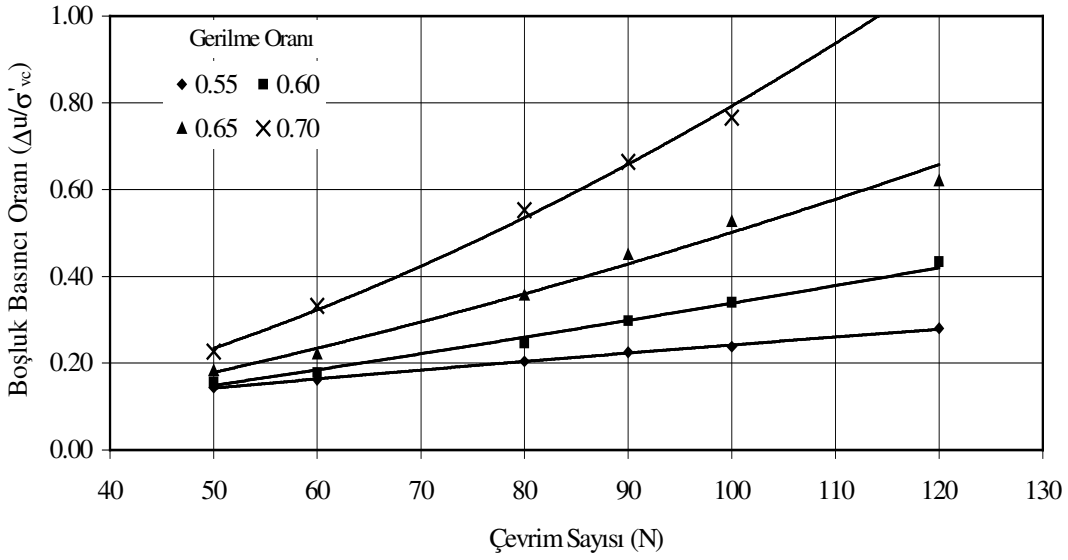


Şekil 4.3 A1 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi.



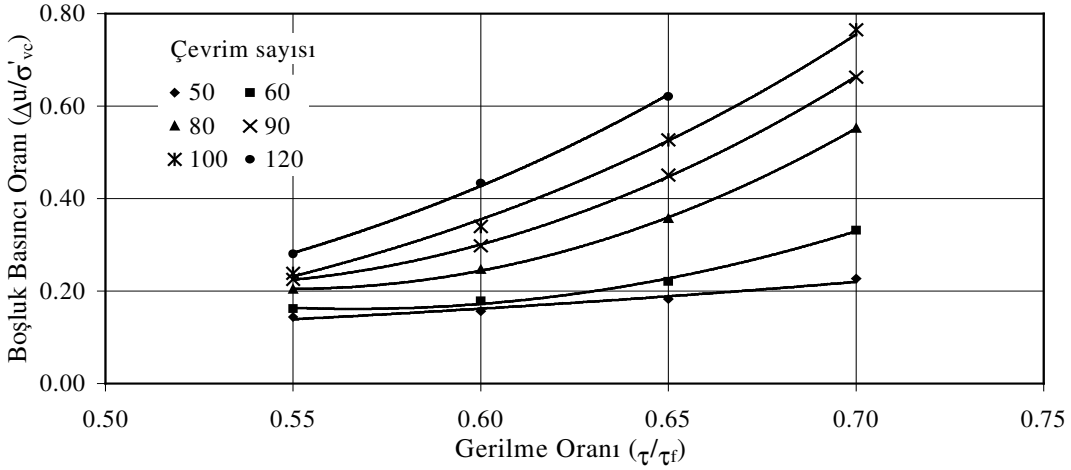
Şekil 4.4 A23 deneyinde boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademelerine göre değişimi.

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi oluşan boşluk suyu basınçlarının mertebesine etki eden önemli iki değişken çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranı olmaktadır. Şekil 4.5'te farklı gerilme oranı ve çevrim sayıları uygulanan numunelerde oluşan boşluk suyu basınçlarının değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi artan çevrim sayısıyla boşluk suyu basınçlarında da artışlar meydana gelmiştir. Örneğin τ/τ_f=0.65 olan deneyde N=50 iken boşluk basıncı oranı sadece 0.183 olmakta, artan çevrim sayısıyla sürekli artarak N=120 olan numunede bu değer 0.621'e yükselmiştir. Şekil 4.6 ise yine farklı çevrim sayısı ve farklı tekrarlı kayma gerilme seviyelerinde yapılan deneylerden elde edilmiş olup gerilme seviyesine bağlı olarak boşluk suyu basıncının değişimini göstermektedir. Çevrim sayısının etkisi gerilme oranında da görülmekte olup artan gerilme seviyesiyle boşluk suyu basınçlarında da artışlar meydana gelmektedir. N=100 olan numunede gerilme seviyesi τ/τ_f=0.55'de boşluk basıncı oranı $\Delta u/\sigma'_{vc}$=0.238 iken τ/τ_f=0.70'de bu değer 0.765 gibi yüksek bir değere ulaşmaktadır. Her iki şekilde görülen önemli özelliklerden bir diğeri gerilme seviyesi ve çevrim sayısının düşük olduğu numunelerde artışlar düşük olmuş ve değişim eğrisi daha düşük eğimlidir. Gerilme genliği ve çevrim sayılarının artmasıyla eğimde de önemli artışlar meydana gelmiştir.

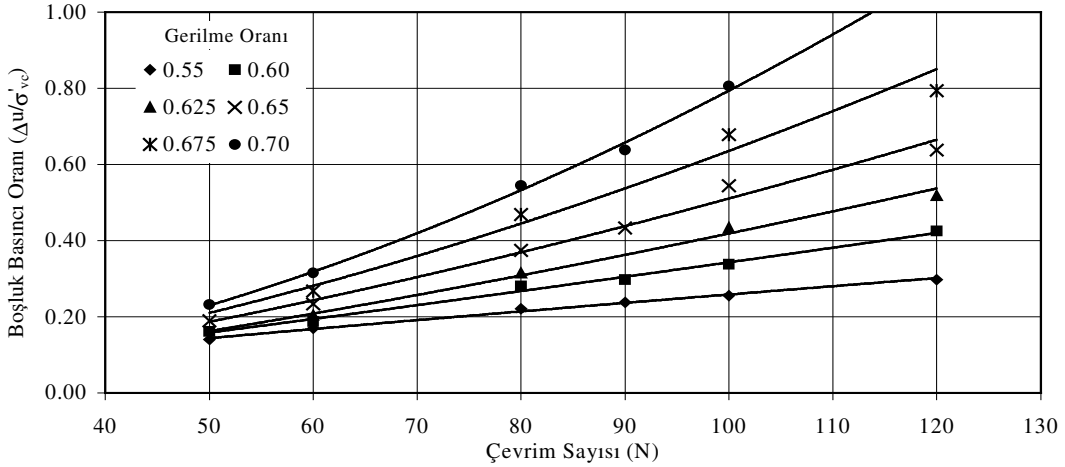


Şekil 4.5 Çevrim sayısının boşluk suyu basınçlarına etkisi (A grubu deneyler).

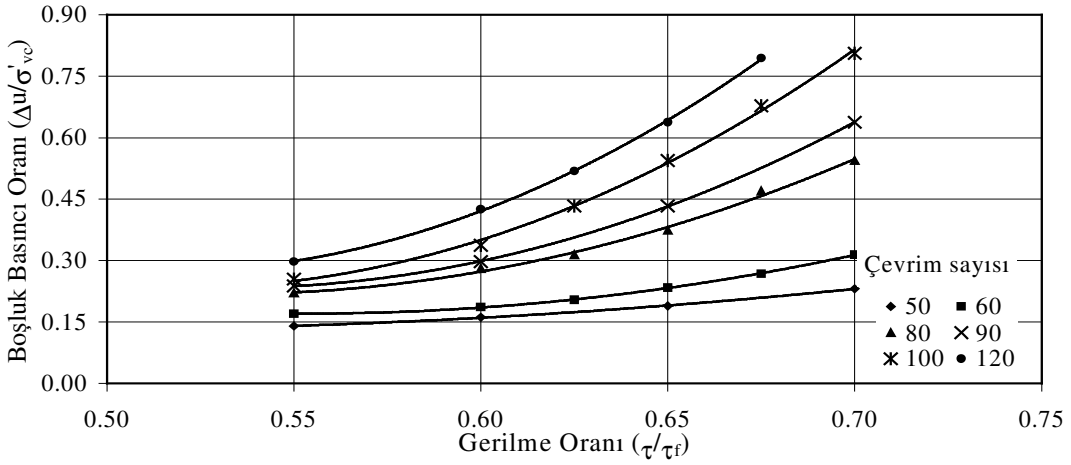
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da A grubu deneylerin ilk kademe tekrarlı yükleme sonunda elde edilen veriler kullanılmıştır. B grubu deneylerde de benzer davranış özelliği ve aynı çevrim sayısı ve gerilme genliğinde A grubu ile çok yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8).



Şekil 4.6 Gerilme oranının boşluk suyu basınçlarına etkisi (A grubu deneyler).



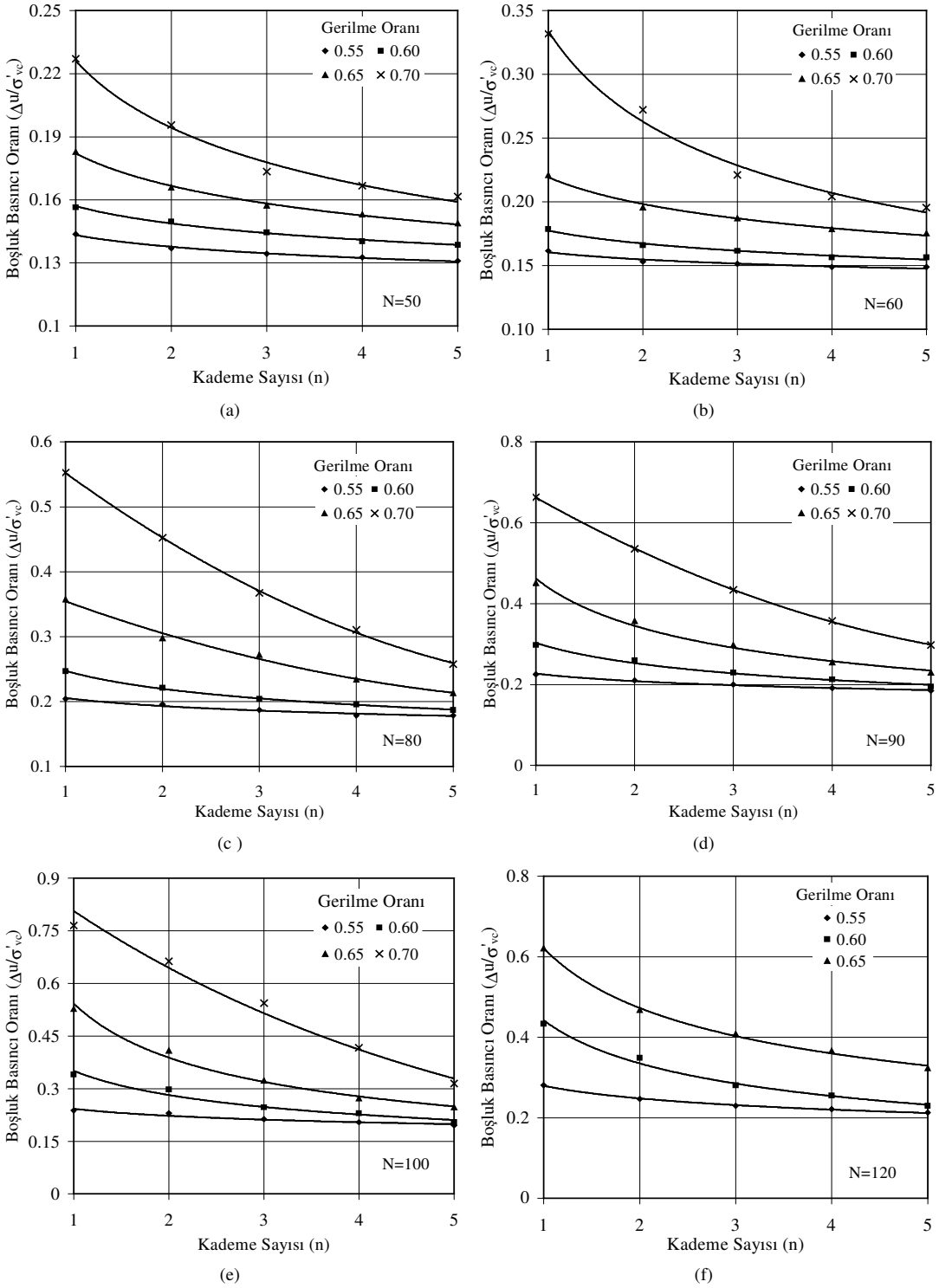
Şekil 4.7 Çevrim sayısının boşluk suyu basınçlarına etkisi (B grubu deneyler).



Şekil 4.8 Gerilme oranının boşluk suyu basınçlarına etkisi (B grubu deneyler).

Deneylerin beş kademesinde boşluk suyu basıncı davranışı, ilk kademedeki artışların giderek azalması ve son kademelerde birbirine yakın şeklinde olmuştur. Çevrim sayısı ve gerilme genliğinin yüksek olduğu deneylerde artışlar ve kademeler arasındaki azalmalar daha yüksek olmaktadır. Çevrim sayısı ve gerilme genliği düştükçe kademeler arası boşluk suyu basınçlarındaki azalmalar daha düşük olup son kademelerde hemen hemen eşit değerler almıştır. Şekil 4.9'da farklı çevrim sayısı ve gerilme genliğinde yapılan A grubu deneylerde boşluk suyu basınçlarının beş kademe boyunca değişimi verilmiştir. Her bir deneyde beş kademe boyunca çevrim sayısı sabit tutulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi belli bir çevrim sayısında yapılan deneylerde boşluk suyu basınçları ilk kademeden itibaren sürekli düşüş göstermektedir. Bu düşüş örneğin Şekil 4.9a'da görüldüğü gibi gerilme oranı 0.55 iken daha yavaş olmakta, ilk kademede boşluk basıncı oranı 0.144 iken son kademede sadece 0.131'e düşmektedir. Bununla beraber gerilme oranı 0.70 iken boşluk suyu basıncındaki azalma daha belirgin olmuş ilk kademede boşluk basıncı oranı 0.227'den son kademede 0.162'ye düşmüştür. Çevrim sayısının yüksek uygulandığı (N=100) ve Şekil 4.9e'de değişimi verilen deneylerde de davranış benzer özellikler göstermektedir. Fakat değerler arasında büyük farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin gerilme oranı 0.55'te boşluk basıncı oranı 0.238'den 0.196'ya düşerken gerilme oranı 0.70'de ilk kademede boşluk basıncı oranı 0.765 gibi yüksek bir değer ulaşmış, beşinci tekrarlı yükleme sonunda ise 0.315'e kadar düşmüştür. Şekil 4.10'da ise farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan ve beş kademe tekrarlı yükleme ile ilk dört kademeden sonra drenaj uygulanmış olan B grubu deney numunelerindeki boşluk suyu basınçlarının kademe sayısına bağlı değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aynı gerilme oranı ve çevrim sayılarında yapılan A ve B grubu deneylerde boşluk suyu basınçları birbirine yakın olmuştur.

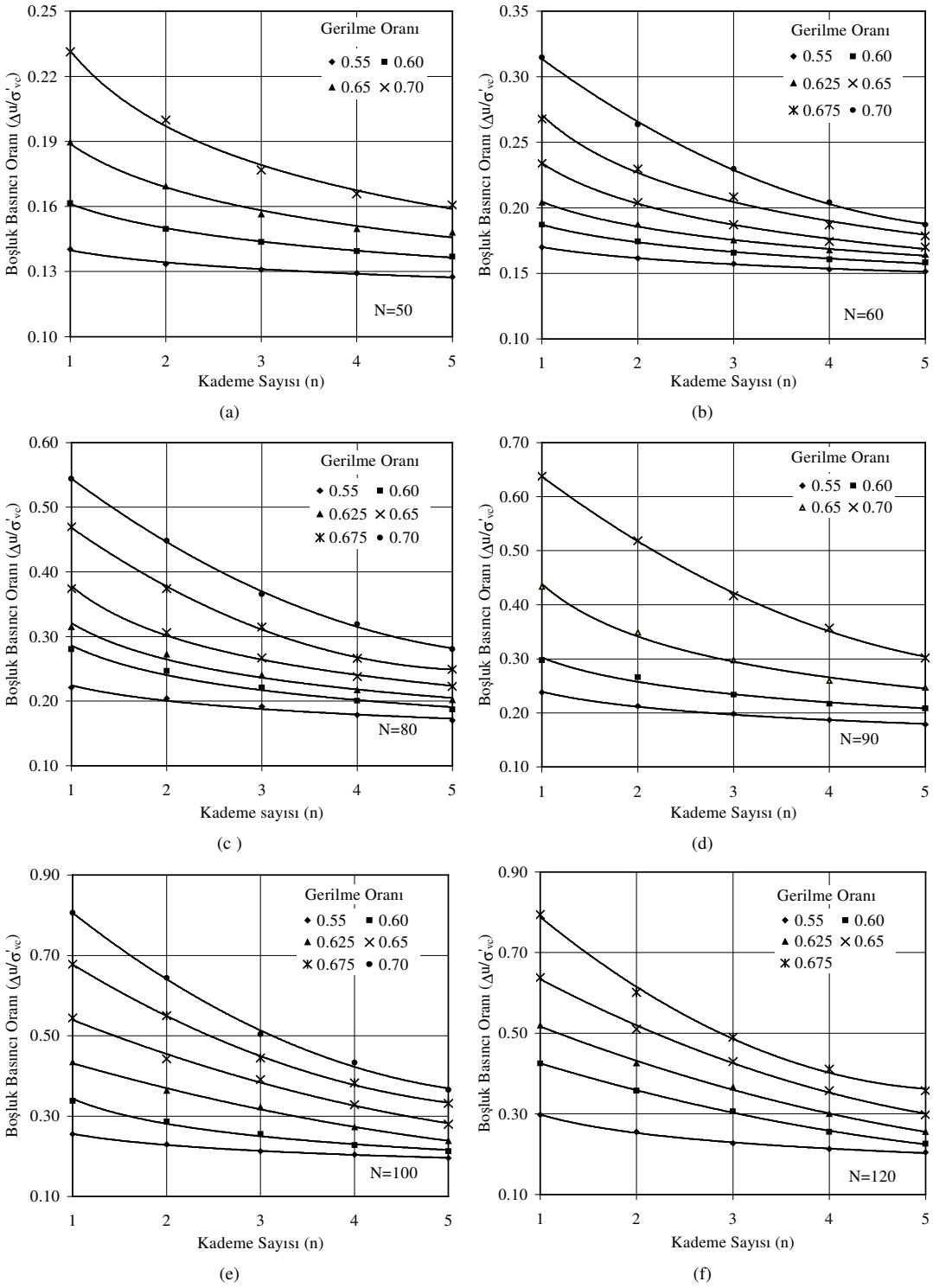
Şekil 4.11'de A grubu deneylerde boşluk suyu basınçlarının beş kademe tekrarlı yüklemede gerilme oranı ve çevrim sayısıyla değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi tekrarlı yatay kayma gerilmelerine maruz kalan zeminde tekrarlı yük ve drenaj çevrimleri zeminin daha sonraki tekrarlı yüklere karşı davranışında önemli değişikliklere neden olmaktadır. Şekil 4a çevrim sayısı N=50 olan deneylerden elde edilen değişimi göstermektedir. İlk tekrarlı yükleme kademesinde boşluk suyu basınçları her zaman bir sonraki kademede oluşan boşluk suyu basınçlarından daha yüksek olmaktadır. Örneğin gerilme oranı 0.70'te birinci kademede oluşan boşluk basıncı oranı 0.227 iken ikinci kademede 0.196 ve son kademede ise 0.162'ye düşmektedir. Çevrim sayısının N=100 olduğu deneylerde bu değişimler daha büyük olmuştur. Gerilme oranı yine 0.70'te ilk kademede boşluk basıncı oranı 0.765 iken ikinci kademede 0.663 ve son kademede 0.315'e kadar azalmaktadır.



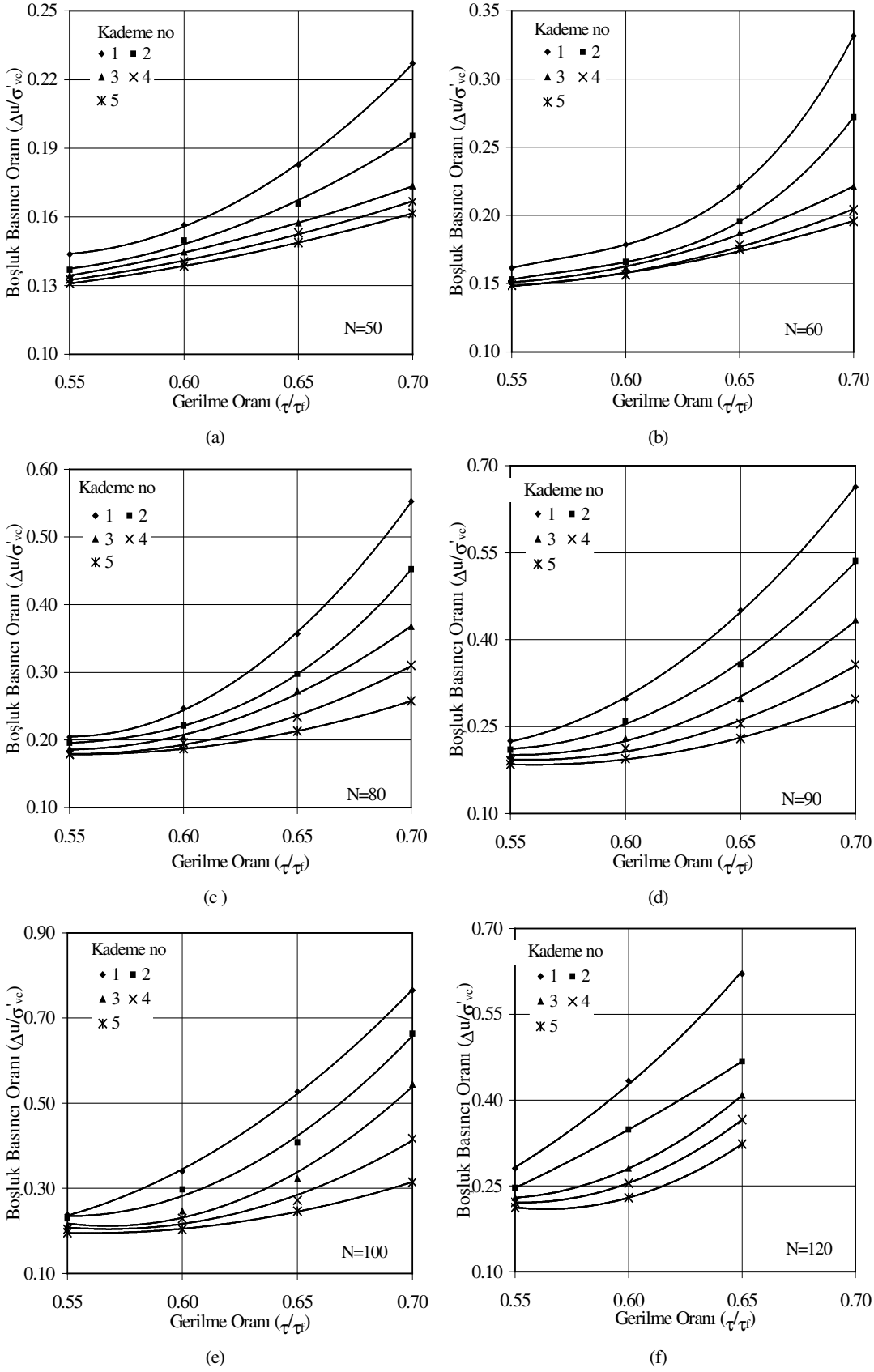
Şekil 4.9 Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının değişimi (A grubu deneyler).

Beş kademe tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimlerinin B grubu deneylerde de benzer bir davranışa neden olmuştur (Şekil 4.12). Aynı özellikte numune kullanılması, çevrim sayısı ve gerilme oranlarının da benzer olması nedeniyle A grubu deneylerle hemen hemen yakın sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin çevrim sayısı N=50 ve gerilme

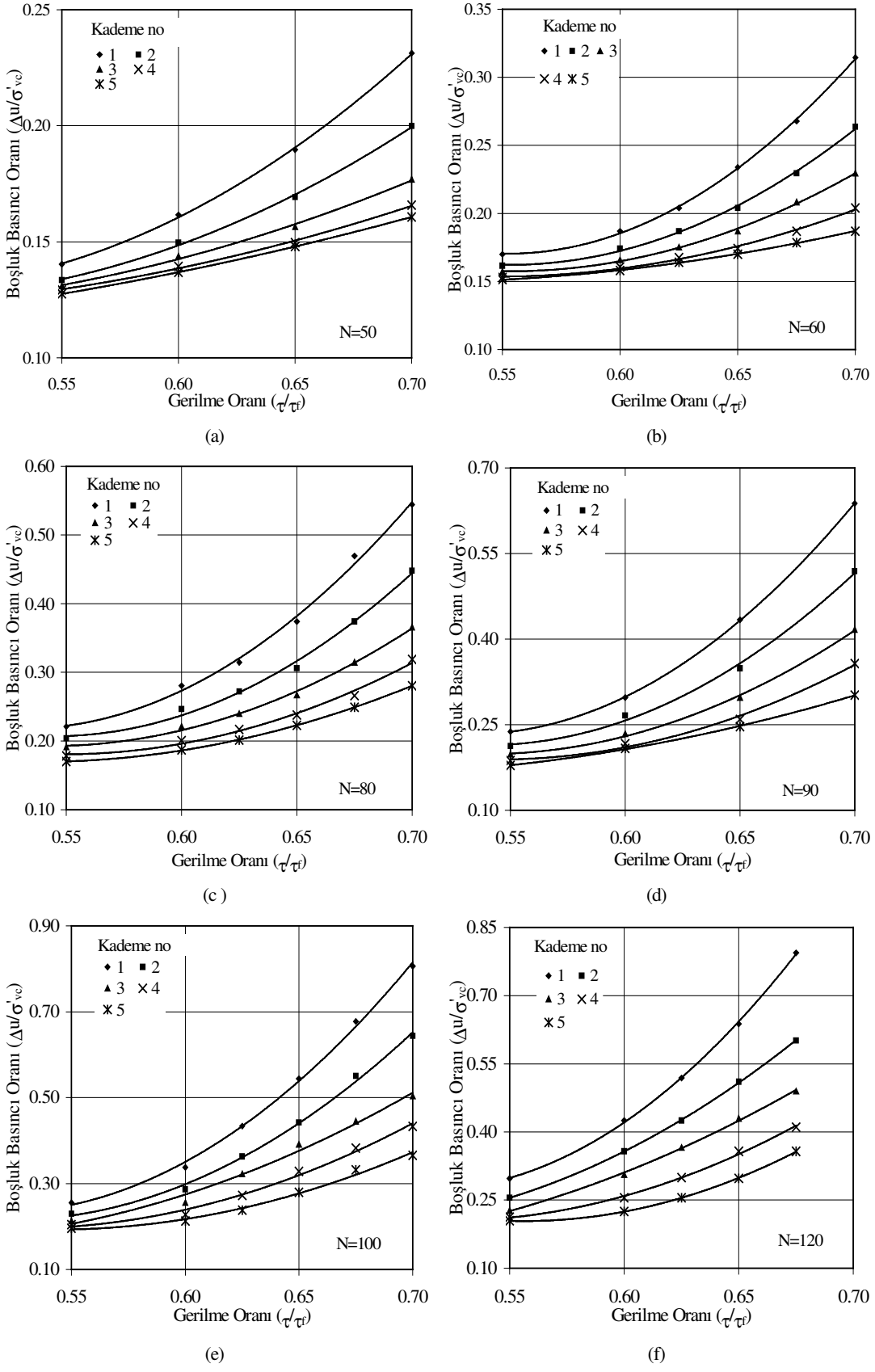
oranı τ/τ_f=0.70 iken birinci kademede boşluk basıncı oranı 0.231, ikinci kademede 0.200 ve son kademede 0.161'dir. Yine çevrim sayısının N=100, τ/τ_f=0.70 olan deneylerde ilk kademede boşluk basıncı oranı 0.806, ikinci kademede 0.644 ve son kademede ise 0.366 olmaktadır.



Şekil 4.10 Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının değişimi (B grubu deneyler).



Şekil 4.11 Tekrarlı yüklemenin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının gerilme oranıyla değişimi (A grubu deneyler).

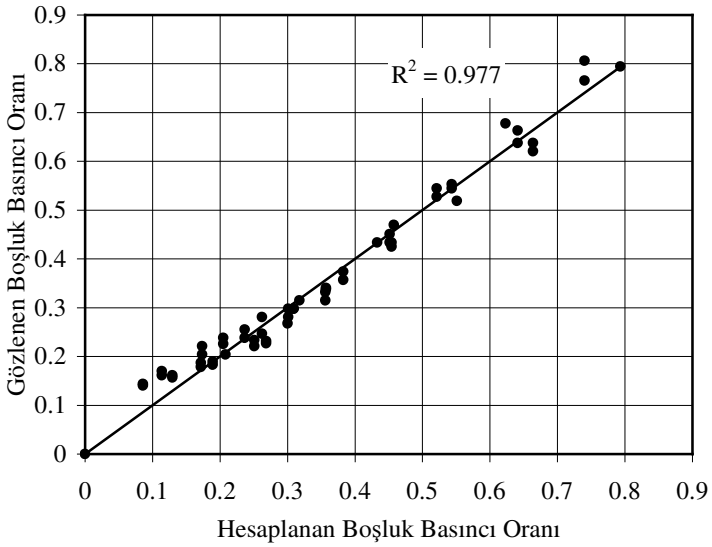


Şekil 4.12 Tekrarlı yüklemenin beş kademesinde boşluk suyu basınçlarının gerilme oranıyla değişimi (B grubu deneyler).

Statistica adlı bilgisayar programı ile A grubu deneylerinde ilk kademe boşluk suyu basıncı değerleri kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Boşluk suyu basınçlarının, deney esnasında numuneye uygulanan çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak formüle edilebileceği deney sonuçları ile görülmüştür. Yapılan analizden boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak değişimi aşağıdaki bağıntıya uygun olmaktadır. Analizinden elde edilen korelasyon katsayısı oldukça yüksek olup 0.9877'dir.

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} = 0.054 \times (\log 10N)^{6.220} \times (\frac{\tau}{\tau_f})^{4.733} \qquad (4.1)$$

Burada; Δu tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk suyu basıncı, σ'_{vc} düşey efektif gerilme, N numuneye uygulanan çevrim sayısı ve τ/τ_f tekrarlı gerilme oranıdır. Şekil 4.13'te deney sonuçları ile formül kullanılarak elde edilen boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.14'te ise deney ile formülden elde edilen aynı çevrim sayısı ve gerilme oranındaki boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi gösterilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi deneyden elde edilen ve hesaplanan kayma deformasyonları arasında büyük benzerlik bulunmaktadır.

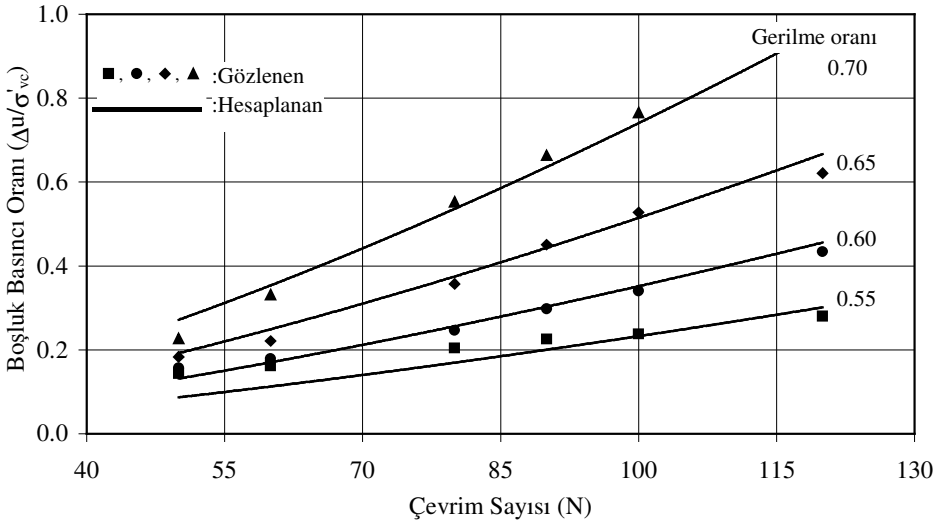


Şekil 4.13 Hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması (A ve B grubu deneyler).

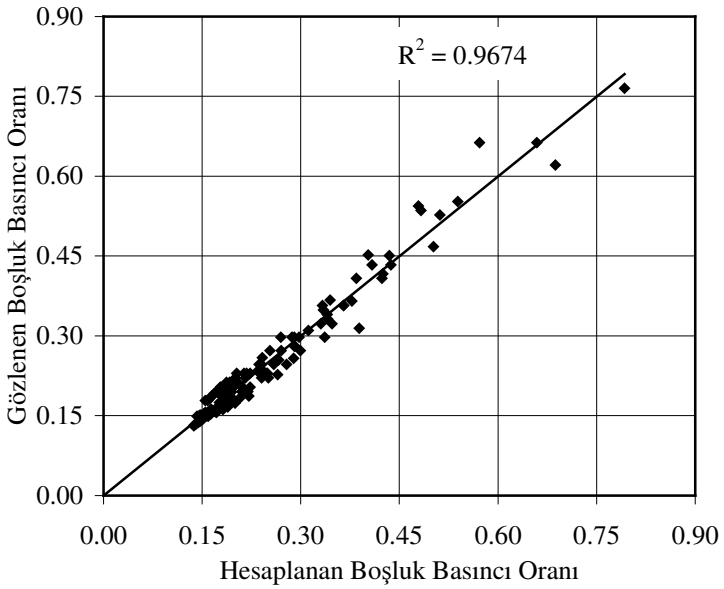
Beş kademe tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi içeren deneylerde numuneye uygulanan çevrim sayısı (N), tekrarlı gerilme oranına (τ/τ_f) ve tekrarlı yükleme

kademe sayısına (n) bağlı olarak yapılan regresyon analizinden ise aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir. Regresyon katsayısı ise 0.9674 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.15'te bağıntı ve deneylerden elde edilen boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması görülmektedir.

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} = 0.128 + 0.0113 \times (n)^{-0.581} \times (\log 10N)^{9.695} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{7.409} \qquad (4.2)$$

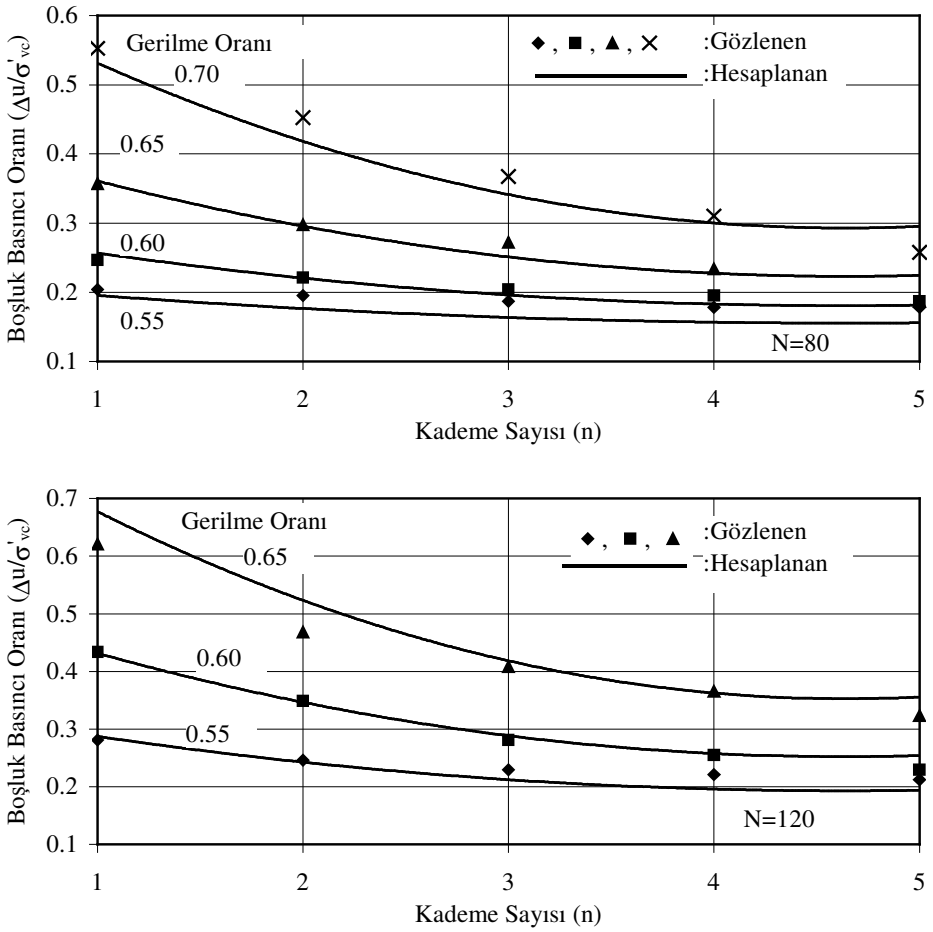


Şekil 4.14 Hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısıyla değişimi (A grubu deneyler).



Şekil 4.15 Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.16'da ise boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademe sayısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bu şekilde üzerinde, farklı tekrarlı gerilme oranı ve çevrim sayısı N=80 ve 120 olan deney sonuçları ile bağıntının kullanılmasıyla hesaplanan değerlerin karşılaştırılması görülmektedir. Görüldüğü gibi hesaplanan değerler ile deneylerden elde edilen boşluk suyu basıncı değerleri arasında korelasyon katsayısından da anlaşılacağı üzere her gerilme oranı ve çevrim sayılarında büyük benzerlikler bulunmaktadır.



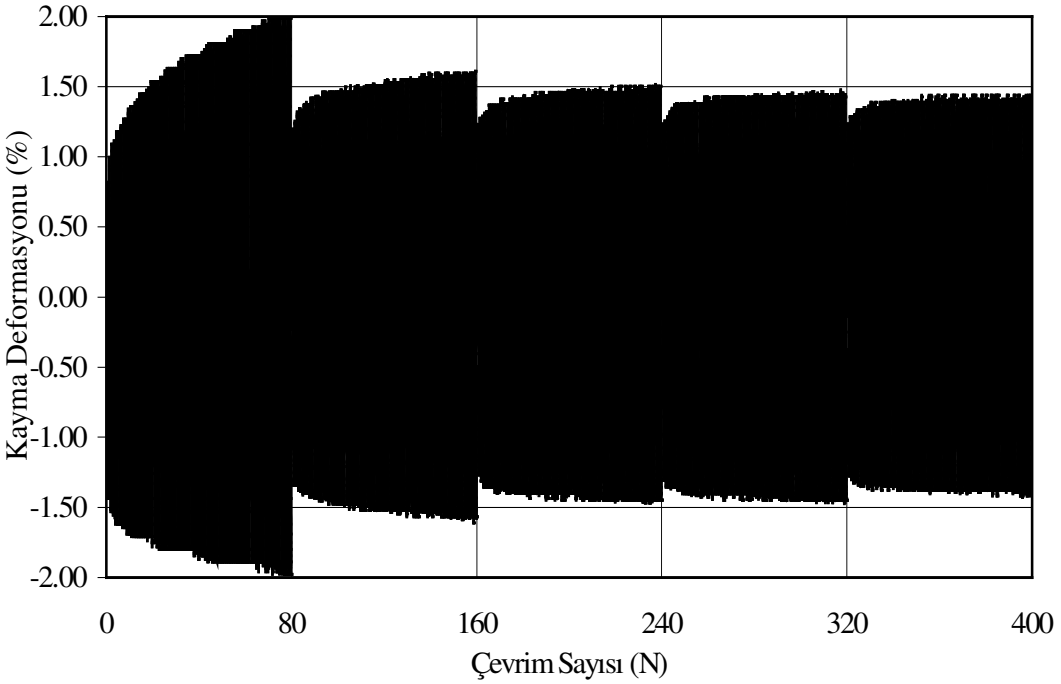
Şekil 4.16 Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen boşluk suyu basınçlarının tekrarlı yükleme kademe sayısıyla değişimi.

4.2.2 Kayma deformasyonu davranışı

Drenajsız tekrarlı yükler altında normal konsolide killerde gözlenen kayma deformasyonu davranışı boşluk suyu basıncında görülen davranışla benzerlikler göstermektedir. İlk kademe drenajsız tekrarlı yükleme esnasında en büyük kayma deformasyonu görülmektedir. Tekrarlı yüklemeden sonra uygulanan drenajdan dolayı boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ve oluşan konsolidasyon

oturmalarından dolayı zemin daha sonraki drenajsız tekrarlı yüklere karşı daha yüksek direnç göstermekte ve meydana gelen kayma deformasyonları her kademede biraz daha azalmakta, gerilme-deformasyon grafiklerinde eğim gittikçe artmaktadır. Bir başka deyişle histerisis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi olan kayma modülünde artışlar meydana gelmektedir.

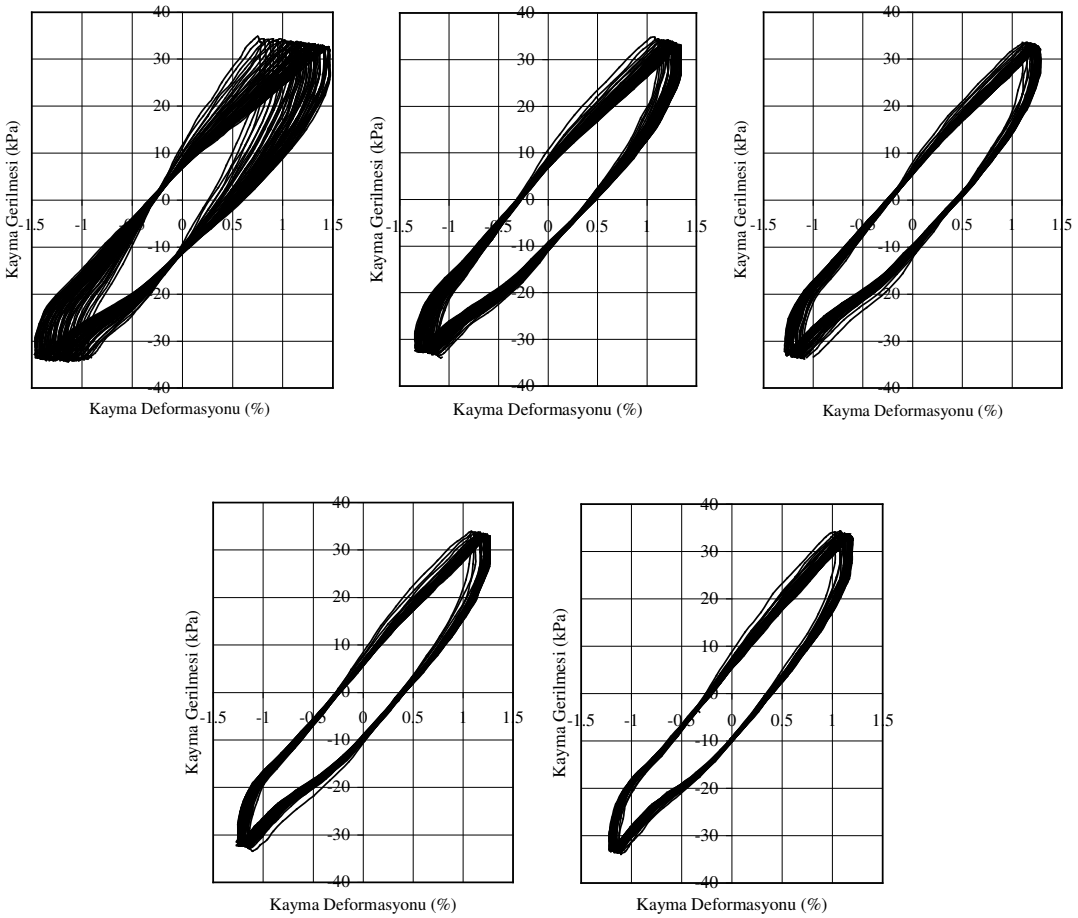
Şekil 4.17'de A11 deneyinde N=5x80 çevrimlik beş kademe tekrarlı yüklemede meydana gelen kayma deformasyonlarının değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi ilk yüklemede kayma deformasyonları yavaş yavaş oluşmakta, düzenli artan bir davranış göstermektedir. İkinci tekrarlı yükleme kademesinden itibaren zemindeki konsolidasyon oturmasından dolayı kazanılan stabilite, kayma deformasyonlarında ani bir artışa neden olmakta, daha sonraki çevrim sayılarında artış azalarak artmaktadır. İlk kademede kayma deformasyonları en yüksek değere ulaşmakta ikinci kademeden itibaren sürekli azalarak son kademelerde birbirine çok yakın olmaktadır.



Şekil 4.17 A11 deneyinde kayma deformasyonlarının beş kademe tekrarlı yüklemede değişimi.

Şekil 4.18'de B8 deneyinde oluşan kayma deformasyonlarının kayma gerilmesiyle değişimi, her tekrarlı yükleme kademesi için verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kayma deformasyonları her tekrarlı yükleme kademesinde azalmakta dolayısıyla

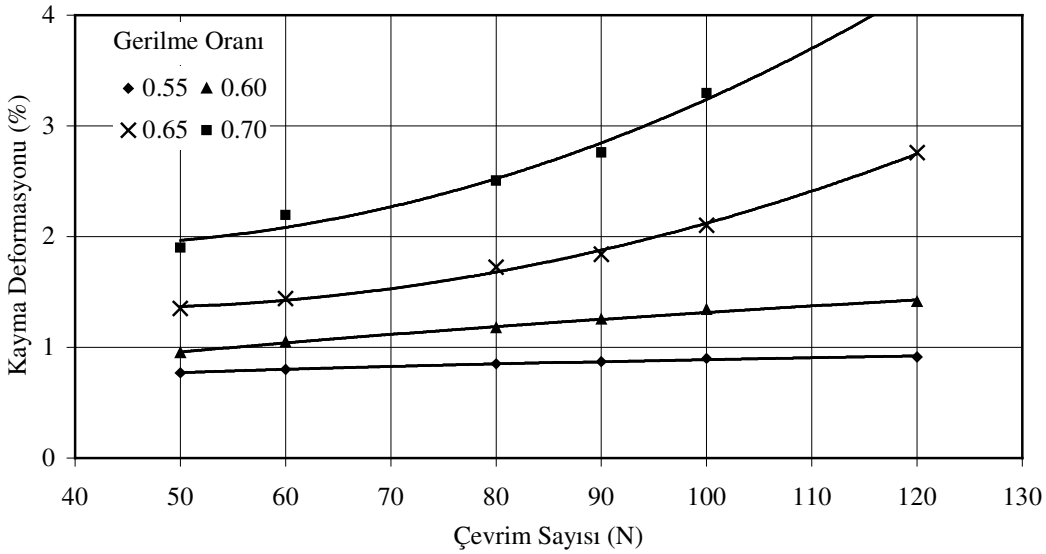
zeminin kayma modülünde gerilme–deformasyon grafiğindeki değişime göre artışlar meydana gelmektedir.



Şekil 4.18 B8 deneyinde tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinde kayma deformasyonlarının değişimi.

Beş kademe tekrarlı yük ve her tekrarlı yükleme arasında drenaj uygulanarak yapılan deneylerde oluşan kayma deformasyonu davranışı önceki iki şekilde verilmişti. Farklı gerilme oranı ve tekrarlı yük çevrim sayıları uygulanarak yapılan A grubu deneylerden elde edilen ve deformasyonların çevrim sayısı ve gerilme oranıyla değişimi Şekil 4.19'da verilmiştir. Zeminlerin maruz kaldığı tekrarlı yükün genliği ve çevrim sayısı diğer davranışlarda olduğu gibi kayma deformasyonlarında da etkisini göstermektedir. Her iki değişkenin etkisi, kayma deformasyonlarında artış şeklinde olmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi tekrarlı gerilme genliğinin ve çevrim sayısının artmasıyla kayma deformasyonlarında önemli artışlar meydana gelmektedir. Örneğin gerilme oranı τ/τ_f=0.55 olan deneylerde çevrim sayısı N=50 iken oluşan kayma deformasyonu %0.77, aynı gerilme oranında çevrim sayısı N=120'de %0.91 olmaktadır. Gerilme oranı τ/τ_f=0.65'te aynı çevrim sayılarında meydana gelen kayma deformasyonları ise sırasıyla %1.35 ve %2.76 olmaktadır.

Çevrim sayısının etkisi ise N=100 olan deneylerle karşılaştırılırsa aynı şekilde artışlar görülmektedir. Gerilme oranı τ/τ_f=0.55'te kayma deformasyonu %0.90 ve gittikçe artarak τ/τ_f=0.70'te %3.30 gibi yüksek bir değere ulaşmaktadır. Şekilde dikkat çeken önemli bir diğer davranış ise gerilme genliğinin düşük olduğu numunelerdeki kayma deformasyonu artışının daha düşük eğimli olması, gerilme oranının artmasıyla deformasyonlardaki artış oranının da artmasıdır.

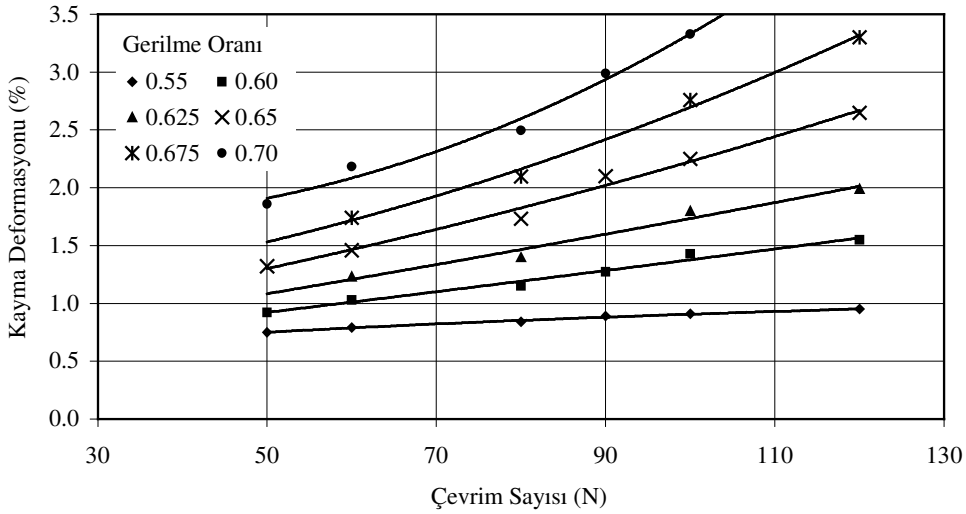


Şekil 4.19 Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zeminde kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi (A grubu deneyler).

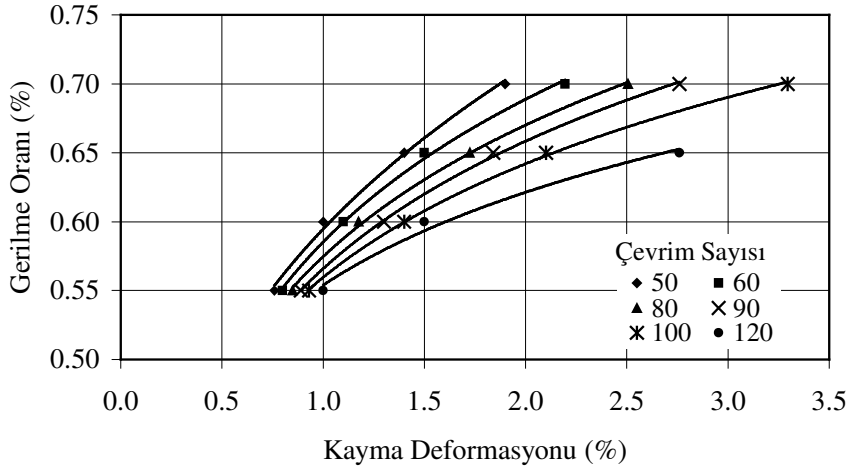
Şekil 4.20'de ise B grubu deneylerden elde edilen ve kayma deformasyonlarına çevrim sayısı ile gerilme genliğinin etkisini gösteren sonuçlar verilmiştir. Bu grup deneylerde daha çok sayıda gerilme oranı kullanılmıştır. B grubu deneylerde de A grubu deneylerden elde edilen sonuçlarla benzer deformasyon davranışı görülmüştür. Düşük gerilme oranlarında çevrim sayısıyla birlikte kayma deformasyonlarındaki artış düşük bir eğimle olurken yüksek gerilme oranlarında deformasyon artış hızında da artışlar meydana gelmiştir. Bu durum gerilme oranının τ/τ_f=0.70 olduğu deneylerde oldukça belirgindir. Ayrıca aynı gerilme genliği ve çevrim sayılarındaki deneylerde birbirine çok yakın deformasyonlar oluşmuştur. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de beş kademe tekrarlı yük uygulanarak yapılan deneylerin sadece ilk kademelerinde oluşan kayma deformasyonları kullanılmıştır.

Tekrarlı gerilme oranına göre kayma deformasyonlarının değişimi A grubu deneyler için Şekil 4.21, B grubu deneyler için ise Şekil 4.22'de verilmiştir. Şekiller üzerinde çevrim sayılarının etkisi de gösterilmiştir. Şekillerden, gerilme oranı arttıkça kayma deformasyonlarının da arttığı görülmektedir. Gerilme oranı τ/τ_f=0.55'te bütün çevrim

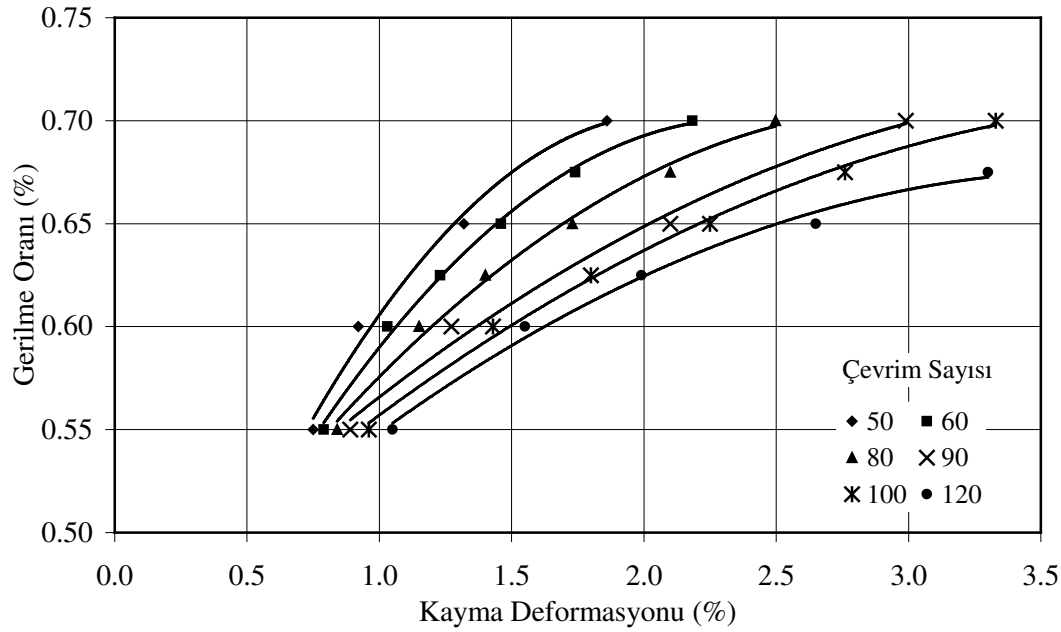
sayılarındaki deformasyonlar birbirine çok yakınken artan gerilme oranlarında farklar artmakta deformasyon değerleri birbirinden uzaklaşmaktadır. Gerilme oranının daha fazla artması ile ise davranış x-ekseni boyunca yataya dönmektedir. Bir başka ifadeyle belli bir gerilme oranından sonra gerilme oranı artmadan numunede kayma deformasyonları hızlı bir şekilde artmaya başlar. İlave çevrimlerde büyük deformasyonlar meydana gelerek numunede tekrarlı yükler altında göçme oluşur. B grubu deneylerin bazı çevrim sayılarında daha çok gerilme oranında deney yapılmıştır. Dolayısıyla ilgili şekil daha çok değer kullanılarak çizildiğinden davranıştaki yataya dönüş daha da belirgindir. Her iki şekilde deneylerin ilk kademe tekrarlı yüklemede oluşan deformasyon değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.20 Tekrarlı gerilmeler etkisindeki zeminde kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi (B grubu deneyler).



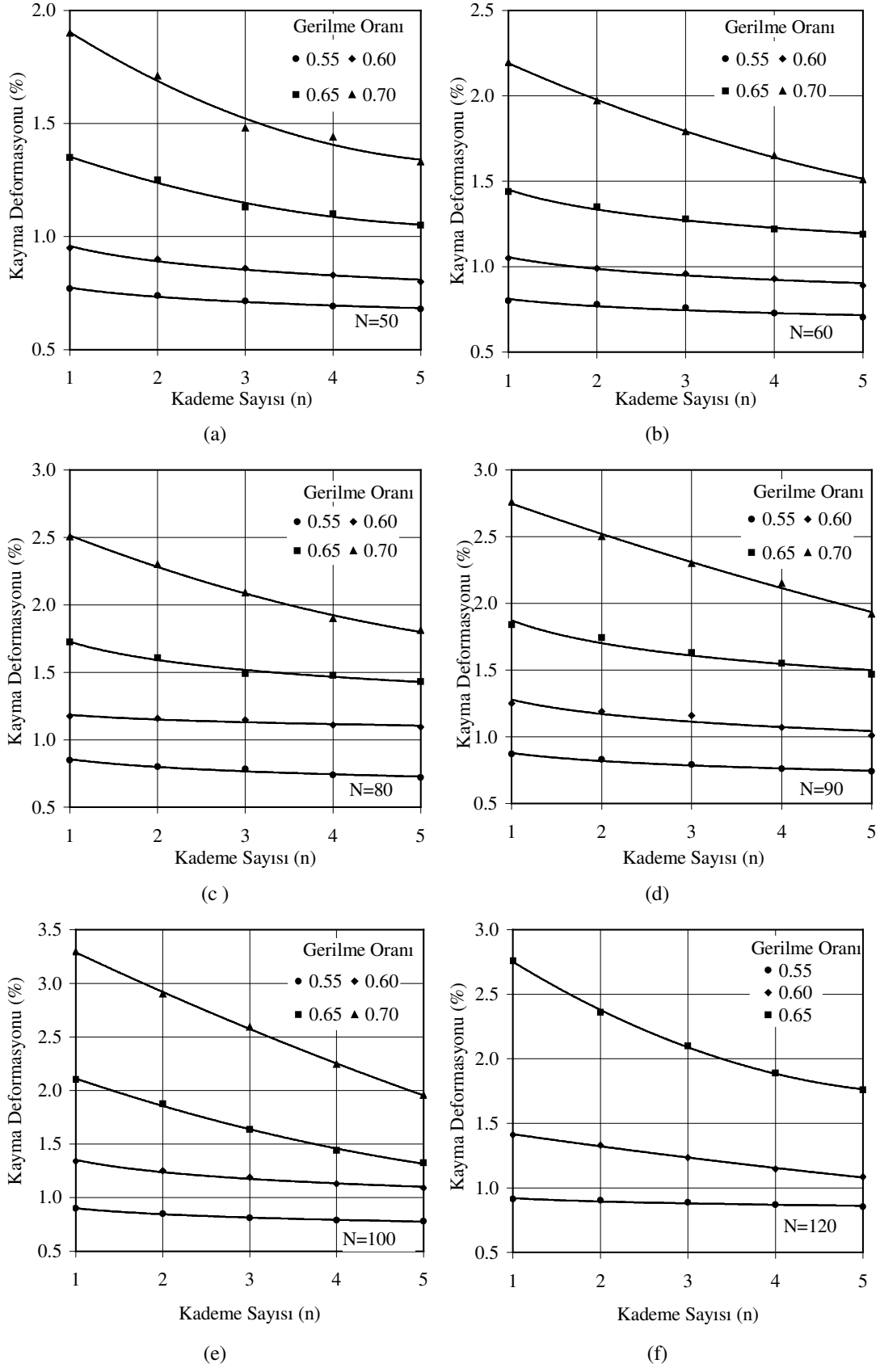
Şekil 4.21 Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi (A grubu deneyler).



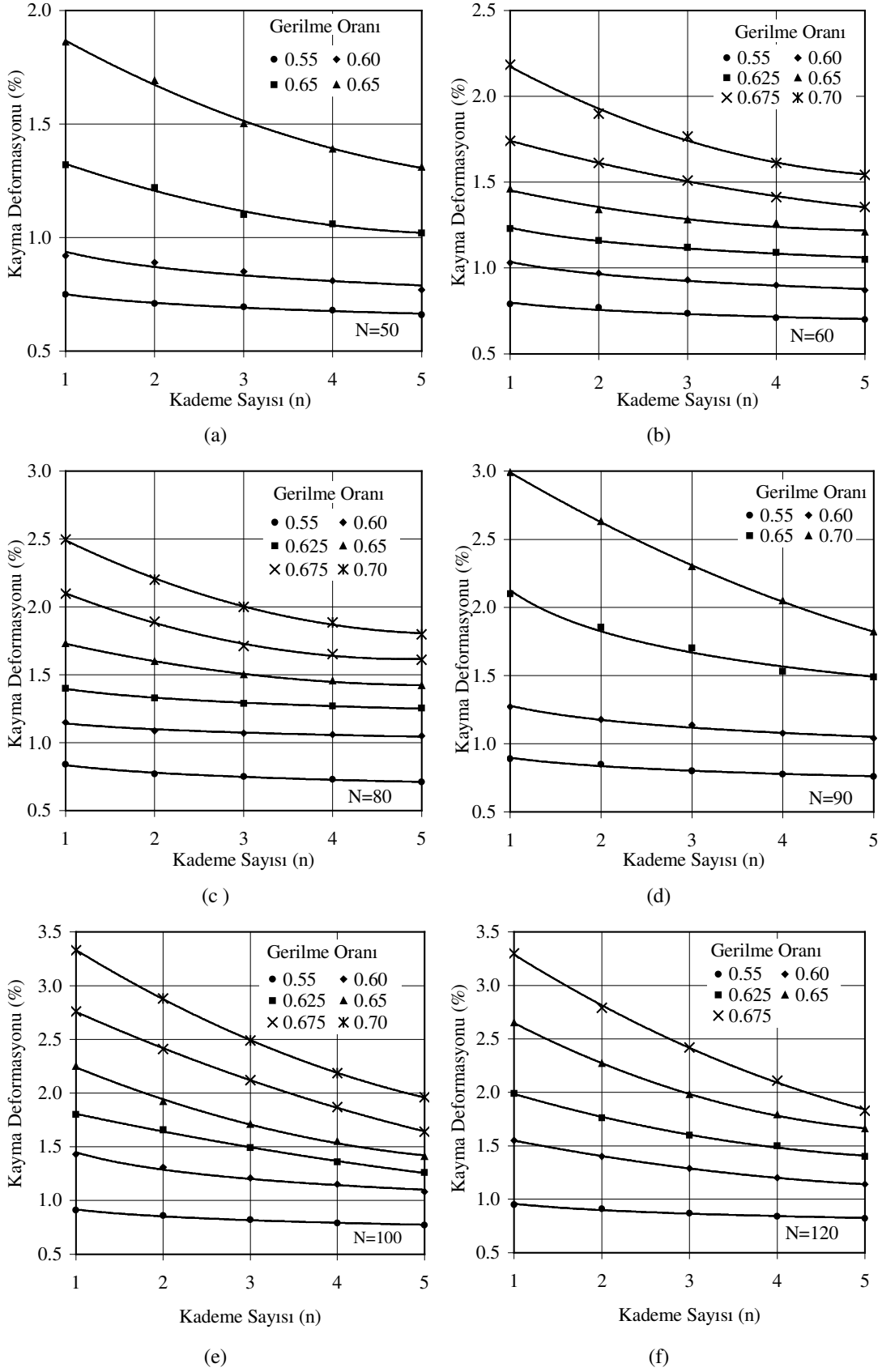
Şekil 4.22 Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi (B grubu deneyler).

Tekrarlı yüklemenin beş kademesinde deformasyonların değişimi A grubu deneyler için Şekil 4.23'te verilmiştir. Bu gruptaki deneylerden elde edilen bütün kayma deformasyon değerlerini içeren bu şekil, deformasyonların çevrim sayısı ve gerilme oranına bağımlılığını göstermektedir. Artan çevrim sayısı ve gerilme oranıyla birlikte kayma deformasyonları da artmaktadır. Bu artış yüksek çevrim sayısı ve gerilme oranlarında daha yüksek olmaktadır.

Beş kademe boyunca kayma deformasyonları, çevrim sayısı ve gerilme oranından bağımsız olarak sürekli azalmaktadır. Bu azalmanın mertebesi ilk kademede oluşan kayma deformasyonuna bağlı olmaktadır. İlk kademede yüksek deformasyon oluşmuş ise ikinci kademede hızlı bir düşüş takip eden kademelerde ise daha az düşüşler meydana gelmiştir. Örneğin çevrim sayısı N=50 ve gerilme genliği τ/τ_f=0.55 olan deneyin ilk kademesindeki deformasyon %0.77, ikinci kademede %0.74 olup sonraki kademelerde de azalarak son kademede %0.68'e kadar düşmektedir. Bununla beraber çevrim sayısı N=100 ve gerilme genliği τ/τ_f=0.70 olan deneyin ilk kademesindeki deformasyon %3.30 gibi yüksek değere ulaşmakta, ikinci kademede %2.9'a son kademede ise %1.95'e kadar düşmektedir. Şekil 4.24'te ise B grubu deneylerde kayma deformasyonlarının uygulanan beş kademe tekrarlı yüklemede çevrim sayısına ve gerilme oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Burada da A grubu ile aynı davranış ve çok yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.23 Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde kayma deformasyonlarının değişimi (A grubu deneyler).

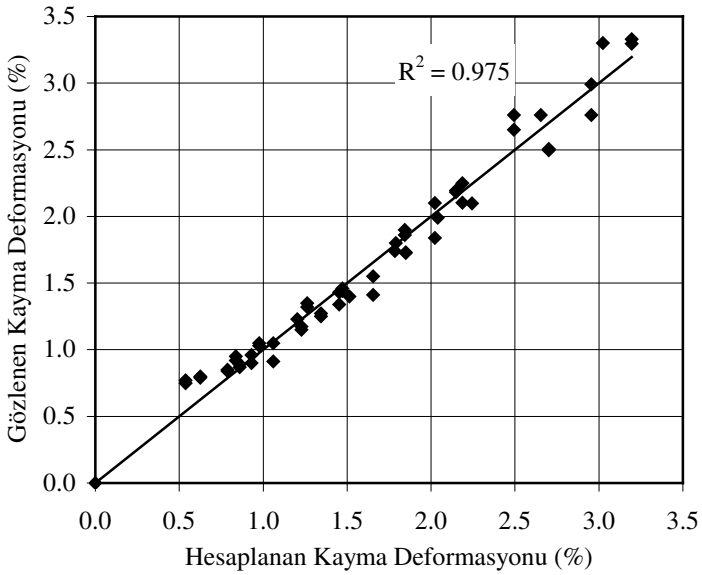


Şekil 4.24 Farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında yapılan deneylerin beş kademesinde kayma deformasyonlarının değişimi (B grubu deneyler).

A ve B grubu deney verileri kullanılarak yapılan regresyon analizden boşluk suyu basınçlarında olduğu gibi kayma deformasyonlarında da çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak değişim aşağıdaki bağıntıya uygun olmaktadır. Analizden elde edilen korelasyon katsayısı ise 0.9861'dir.

$$\gamma_{max} = 1.911 \times (\log 10N)^{3.374} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{5.115} \qquad (4.3)$$

Burada; γ_{max} tekrarlı yükleme esnasında oluşan maksimum kayma deformasyonu, N deneyde uygulanan çevrim sayısı ve τ/τ_f tekrarlı gerilme oranıdır. Şekil 4.25'te deney sonuçları ile formül kullanılarak elde edilen kayma deformasyonlarının karşılaştırılması, Şekil 4.26'da ise deney sonuçları ile formülden elde edilen kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi gösterilmiştir.

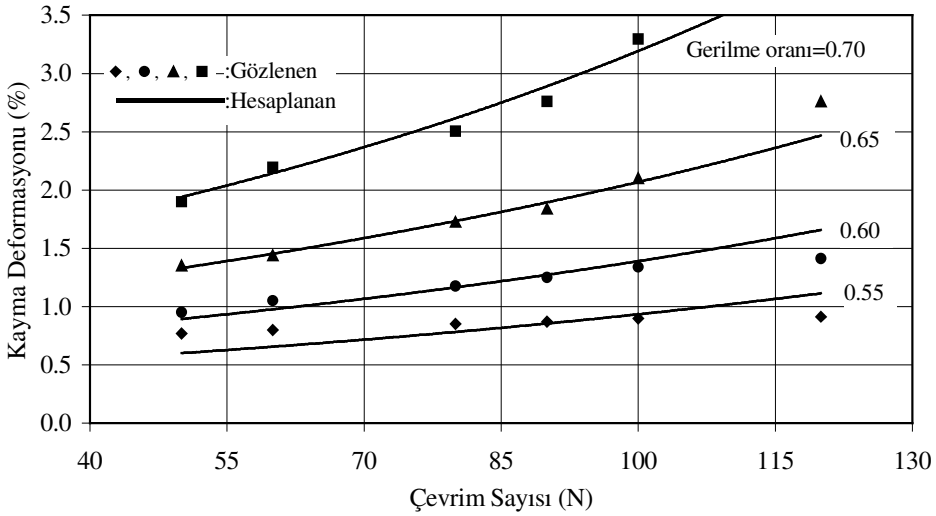


Şekil 4.25 Hesaplanan ve gözlenen kayma deformasyonlarının karşılaştırılması (A ve B grubu deneyler).

4.2.3 Konsolidasyon oturmaları

Suya doygun killerin tekrarlı yüklere maruz kalması durumunda artık boşluk suyu basıncı oluştuğu daha önce açıklanmıştı. Tekrarlı yüklerin uygulandığı kısa süre içinde, killerin düşük permeabilitesi nedeniyle drenajsız koşullar hakim olmaktadır. Tekrarlı yüklemelerden sonraki uzun dönemde ise, zamanla artık boşluk suyu basıncı sönümlenir ve kil zeminin boşluk oranı azalır, zeminde dikkate değer oturmalar

meydana gelir. Tekrarlı yüklerin uygulanması ile oluşan boşluk suyu basınçları nedeniyle efektif gerilmelerde azalma meydana gelmektedir. Drenajlar açılarak efektif gerilmelerin artarak başlangıç değerine ulaşması esnasında zeminde oturmalar oluşmaktadır.



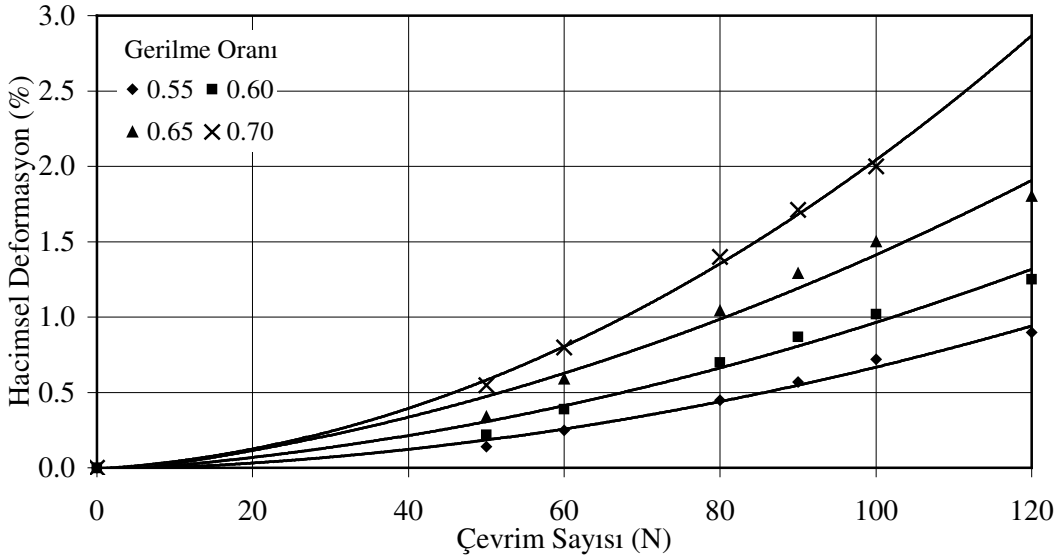
Şekil 4.26 Hesaplanan ve gözlenen kayma deformasyonlarının çevrim sayısıyla değişimi (A grubu deneyler).

Çalışmada yürütülen deneylerden ilk grupta, beş kademe aynı çevrim sayısı ve gerilme genliğinde tekrarlı yük, her tekrarlı yükleme kademeleri arasında 1 saat süreyle drenaj uygulanmıştır. Drenaj sonunda ise tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesinden kaynaklanan konsolidasyon oturmaları belirlenmiştir. İkinci grup deneylerde ise ilk dört kademe tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilerek boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi sağlanmıştır. Son kademe tekrarlı yüklemeden hemen sonra drenaja izin vermeden numuneler statik yükler altında drenajsız olarak kesilmiştir.

Tekrarlı yükler altında zeminde meydana gelen konsolidasyon oturmalarının büyüklükleri, deneylerde kullanılan çevrim sayısı ve gerilme oranı gibi değişkenlere bağlı olarak farklılıklar göstermiştir. Çünkü bu değişkenlerin farklı değerlerinde oluşan boşluk suyu basınçlarında da büyük farklılıklar meydana gelmiştir. Dolayısıyla oturma miktarını kontrol eden önemli husus deney esnasında tekrarlı yüklerden kaynaklanan boşluk suyu basınçlarının büyüklükleri olmaktadır.

A grubu deneylerin farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarındaki ilk kademe tekrarlı yüklemeler sonunda meydana gelen oturmaların değişimi Şekil 4.27'de verilmiştir. Görüldüğü gibi hacimsel deformasyonların büyüklüğüne etki eden iki önemli

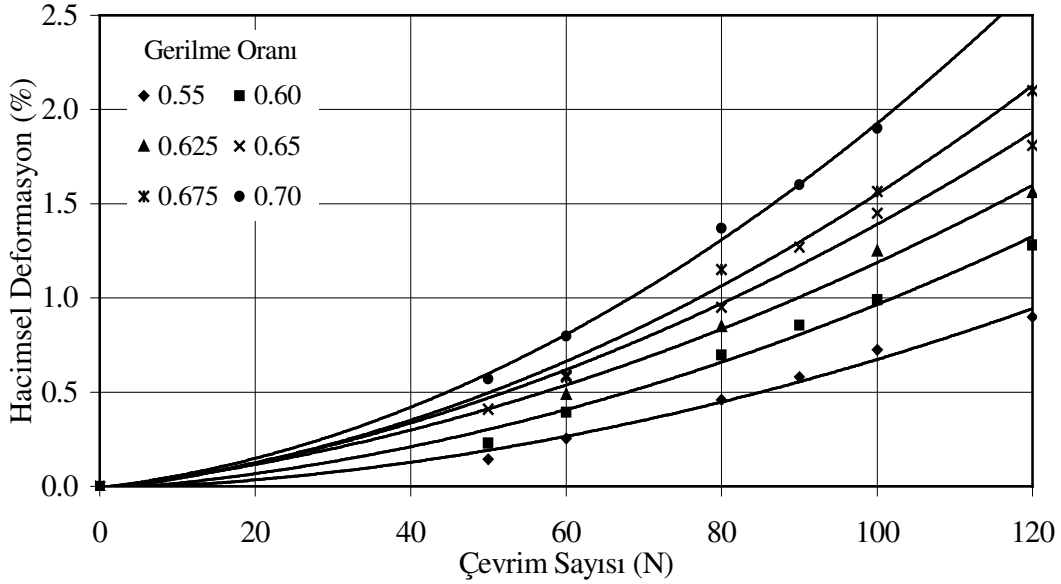
değişken çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranı olmaktadır. Çevrim sayısının artmasıyla oturmalarda da önemli artışlar meydana gelmektedir. Gerilme oranı τ/τ_f=0.65 iken N=50 çevrim yük uygulandığında oluşan hacimsel deformasyon %0.34, N=80 çevrimde %1.04 ve N=120 çevrimde %1.80 olmakta ve değişimin büyüklüğü görülmektedir. Çevrim sayısı N=100'de gerilme oranı τ/τ_f=0.55 iken oluşan hacimsel deformasyon %0.72, τ/τ_f=0.60'ta %1.02 ve τ/τ_f=0.70'te ise %2.00'ye kadar yükselmektedir. Görüldüğü gibi deney özelliklerindeki her değişiklik tekrarlı yükten kaynaklanan oturmalarda da önemli değişikliklere neden olmaktadır.



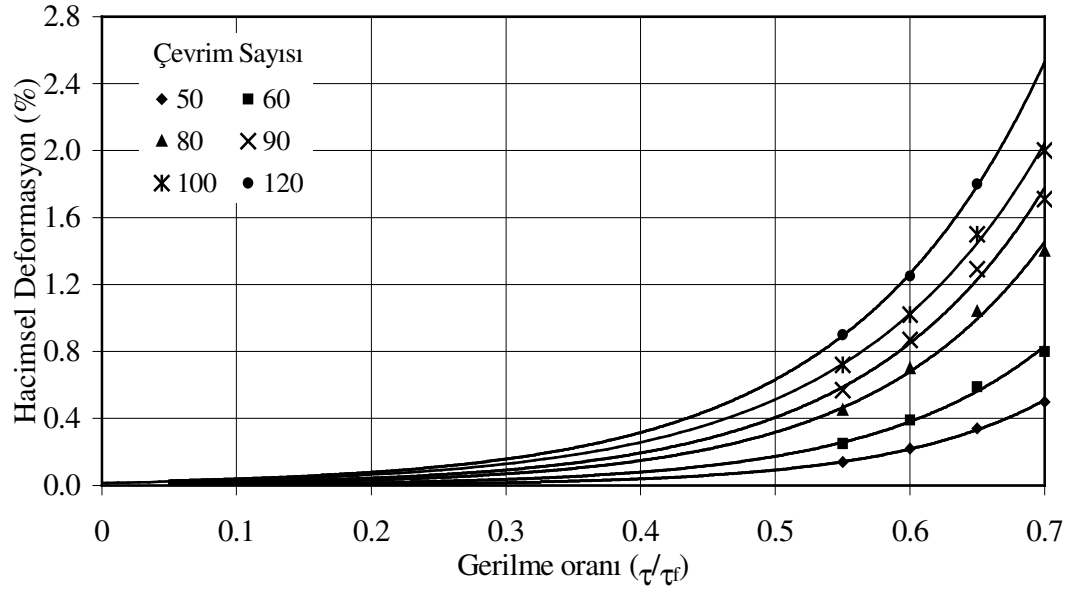
Şekil 4.27 Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi (A grubu deneyler).

Daha çok sayıda tekrarlı gerilme oranı kullanılarak yapılan B grubu deneylerde de benzer davranış görülmüş ve oturmalarda A grubu ile birbirine yakın olmuştur (Şekil 4.28).

Şekil 4.29 ve 4.30'da ise sırasıyla A ve B grubu deneyler için tekrarlı kayma gerilmelerinden dolayı zeminde oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesiyle oluşan konsolidasyon oturmalarının gerilme genliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi deneylerde kullanılan gerilme oranlarının altındaki gerilme oranlarında oturmalar çok düşük olmaktadır. Gerilme oranının artmasıyla birlikte oturmalarda da önemli artışlar meydana gelmektedir. Numuneye uygulanan çevrim sayılarının artmasıyla ise oturma değişim eğrisinin eğimi sürekli artmaktadır. Bu iki şekilde deneylerin ilk kademe tekrarlı yüklemeden sonra oluşan oturma değerleri kullanılarak elde edilmiştir.



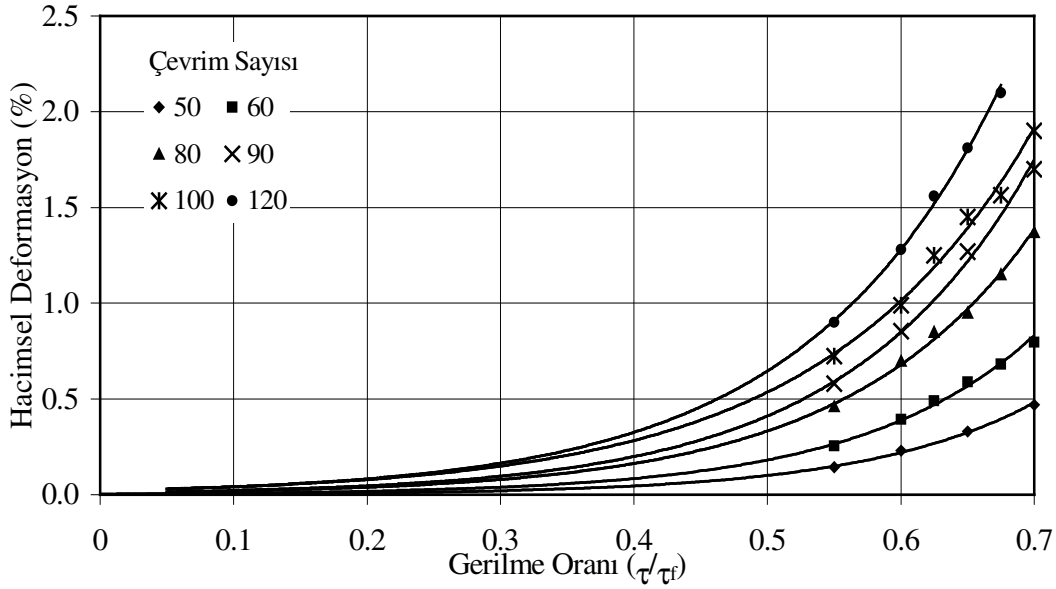
Şekil 4.28 Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi (B grubu deneyler).



Şekil 4.29 Hacimsel deformasyonların gerilme oranıyla değişimi (A grubu deneyler).

Tekrarlı yatay kayma gerilmelerine maruz bir zeminde oluşan boşluk suyu basınçlarının daha sonraki dönemlerde sönümlenmesi sonucu meydana gelen hacimsel deformasyonlara, çevrim sayısı ve gerilme oranının etkisi yukarıda anlatılmıştır. Uygulanan tekrarlı yüklerin belli aralıklarla devam etmesi durumunda zeminin bu yükler ve yükleme sonundaki drenaj çevrimleri etkisinde nasıl davranacağı önem kazanmaktadır. Zeminin etkisinde kaldığı tekrarlı yükleme ve

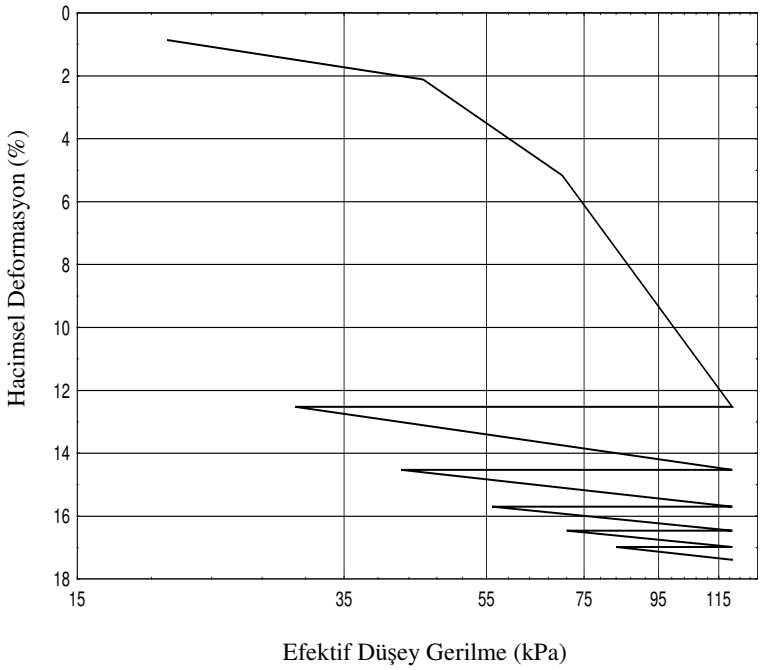
drenaj çevrimleri oluşan boşluk suyu basıncında her defasında azalmaya neden olmaktadır. Oturmaların büyüklüğü tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarına da bağlı olduğundan zemindeki oturmalar da her kademe de biraz daha azalmaktadır. Bir başka deyişle tekrarlı yük-drenaj çevrimleri zeminin stabilitesinde artışa neden olmaktadır.



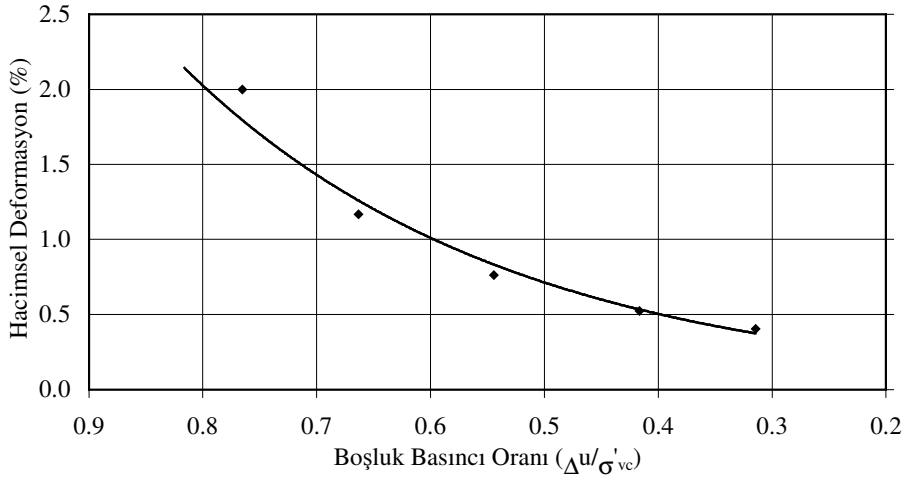
Şekil 4.30 Hacimsel deformasyonların gerilme oranıyla değişimi (B grubu deneyler).

Şekil 4.31'de A20 deneyinde beş kademede oluşan oturmaların efektif düşey gerilmeye göre değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi statik yükler altında konsolide olan bir zemine uygulanan tekrarlı yükler zeminin efektif gerilme değerinde, meydana gelen boşluk suyu basıncına eşit azalmaya neden olur. Tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmesiyle boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesiyle efektif gerilmeler tekrar artarak başlangıç değerine ulaşır. Bu arada zeminde önemli miktarda oturma meydana gelmiştir. Daha sonraki tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinde de bu davranış görülür. Bununla beraber boşluk suyu basınçlarının her defasında azalmasıyla efektif gerilmelerdeki azalma ve dolayısıyla konsolidasyon oturmaları her kademede biraz daha azalmaktadır.

Şekil 4.32'de ise aynı deney grubunda oturmaların boşluk suyu basıncıyla değişimi verilmiştir. İlk tekrarlı yüklemede en büyük boşluk suyu basıncı ve oturmalar meydana gelirken daha sonraki kademelerde hem oturma hem de boşluk suyu basıncında sürekli azalmalar meydana gelmektedir. Son kademelerde boşluk suyu basıncı artışına rağmen oturma davranışı yataya dönmektedir.



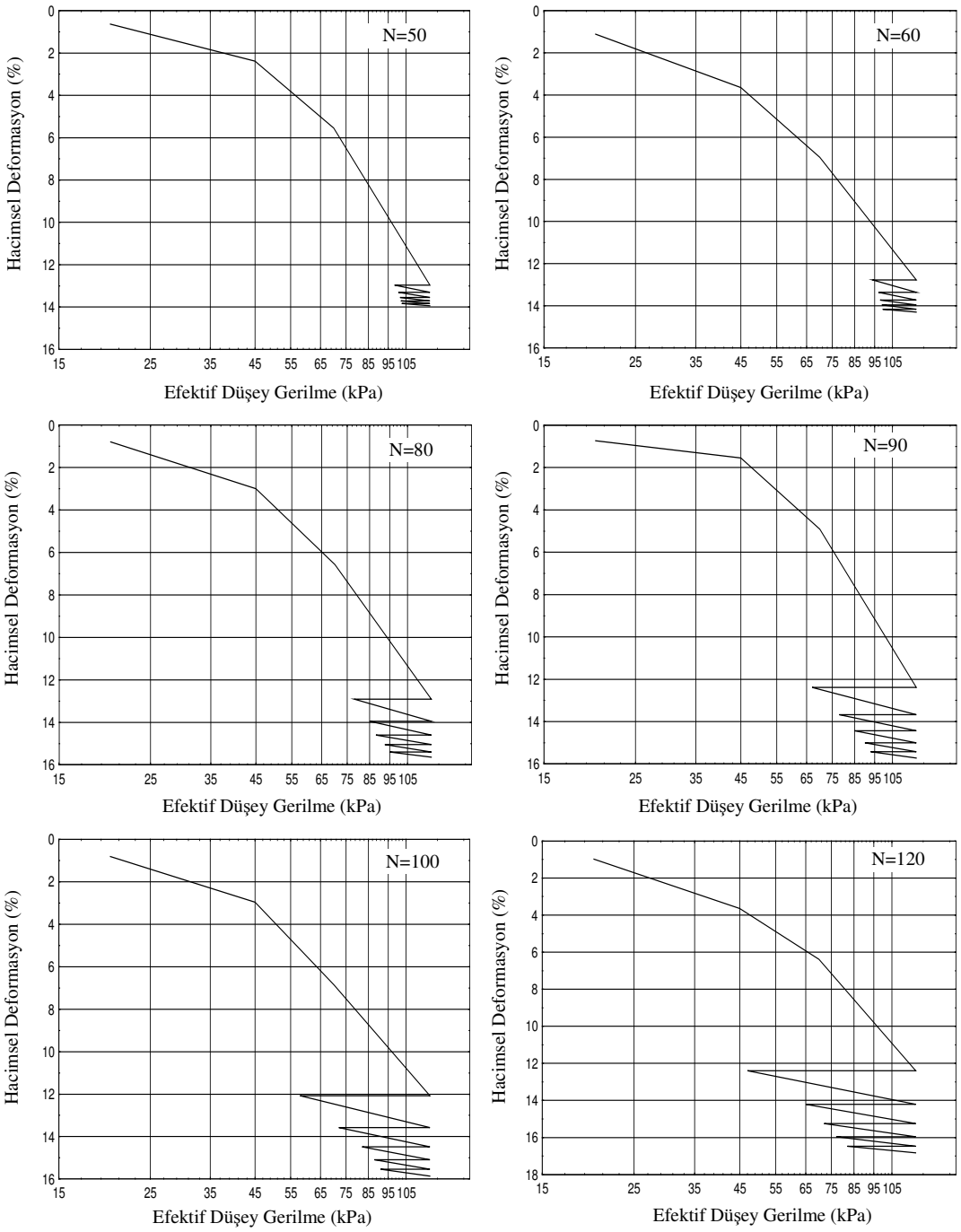
Şekil 4.31 A20 deneyinde beş kademe tekrarlı yüklemede meydana gelen oturmaların efektif gerilme ile değişimi.



Şekil 4.32 A20 deneyinde hacimsel deformasyonların boşluk suyu basıncı ile değişimi.

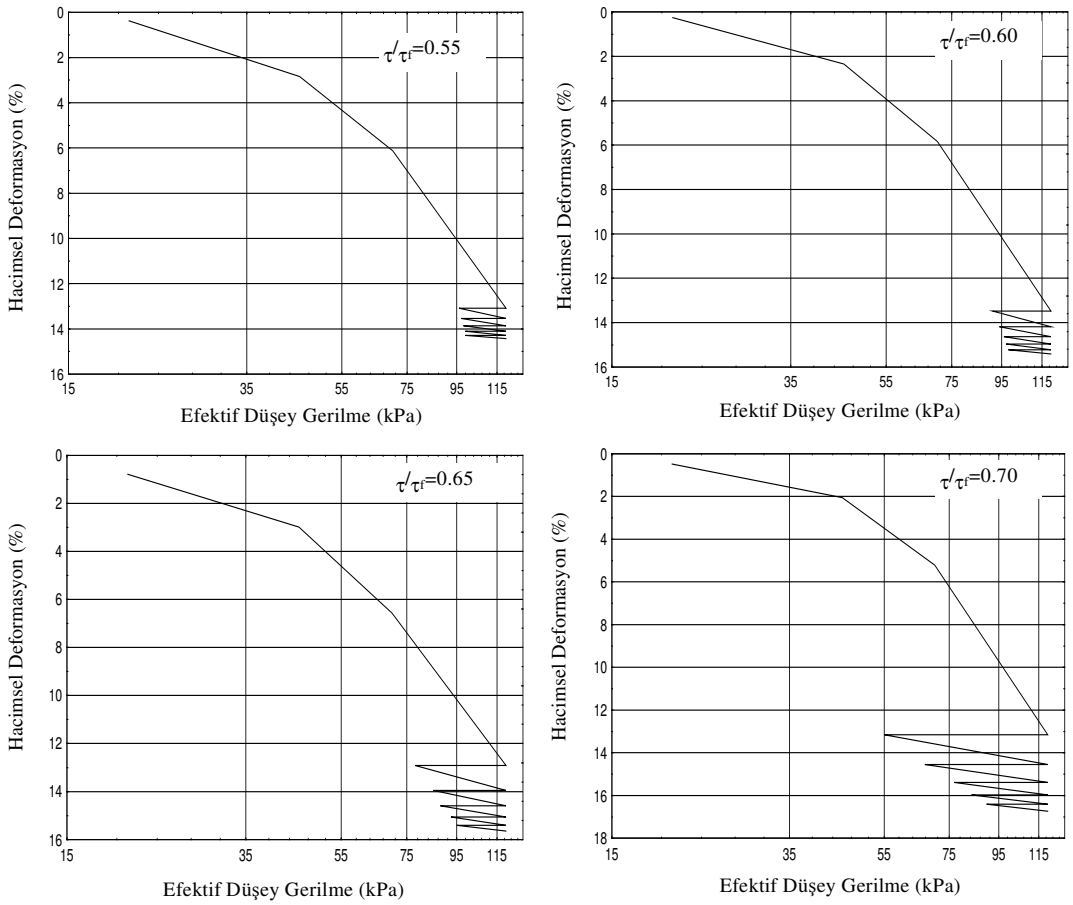
Şekil 4.33'te gerilme genliği τ/τ_f=0.65 olan A grubu deneylerde oturmaların değişimi, 6 farklı çevrim sayısı için hacimsel deformasyon ($\Delta H/H$) ile düşey efektif gerilme ($\log \sigma'_{vc}$) eksenlerinde verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aynı gerilme oranında çevrim sayısının atmasıyla oturmalarda da önemli artışlar meydana gelmektedir. Bu artışlar herhangi bir kademede olduğu gibi toplam oturmalar açısından da belirgin bir şekilde gerçekleşmektedir. Örneğin çevrim sayısının N=50

olduğu deneyin ilk kademesinde meydana gelen oturma %0.34, N=60' da %0.59, N=80'de %1.04, N=90'da %1.29, N=100'de %1.50 iken çevrim sayısı N=120'de %1.80 olmaktadır. Beş kademe tekrarlı yükleme drenaj çevrimlerinden kaynaklanan toplam oturmalar ise çevrim sayısı N=50'de %0.97, N=60'da %1.54, N=80'de %2.73, N=90'da %3.34, N=100'de %3.79 ve çevrim sayısı N=120'de %4.42 gibi yüksek bir değere ulaşmaktadır.



Şekil 4.33 Gerilme genliği τ/τ_f=0.65 ve farklı çevrim sayılarındaki A grubu deneylerde oturmaların çevrim sayısı ile değişimi.

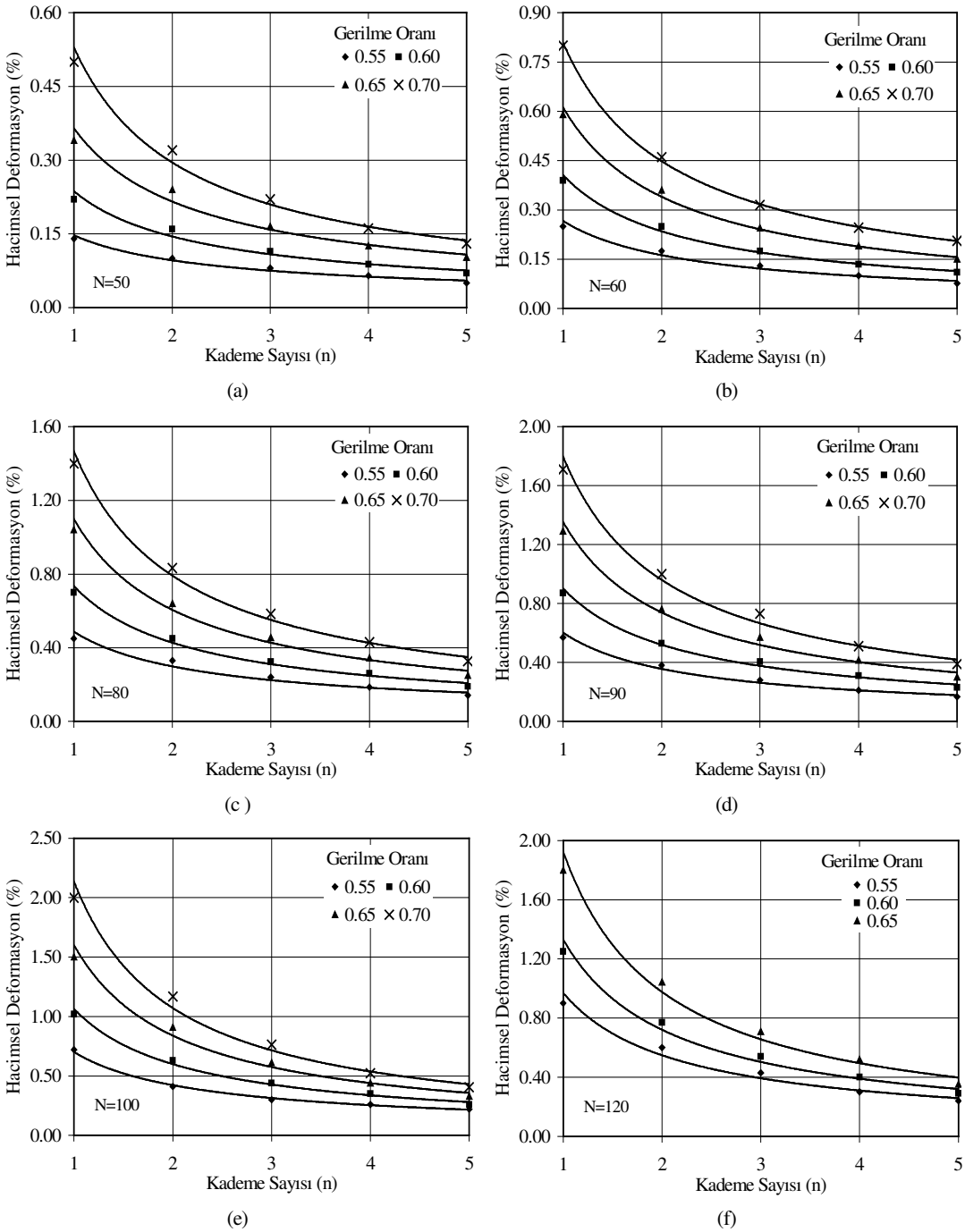
Şekil 4.34'de ise N=80 olan A grubu deneylerde oturmaların gerilme genliği ile değişimi hacimsel deformasyon (ΔH/H) ile düşey efektif gerilme (log σ'_{vc}) eksenlerinde verilmiştir. Burada da gerilme genliğinin oturmalara etkisinin artırıcı yönde olduğu görülmektedir. Gerilme oranının 0.55 olduğu deneyde ilk kademedeki oturma %0.45, 0.60'ta %0.70, 0.65'te %1.04 ve gerilme oranının 0.70 olduğu deneyde ise %1.40 olmuştur. Beş kademede oluşan toplam oturmalar ise gerilme oranı 0.55'te %1.35, gerilme oranı 0.60'ta %1.93, gerilme oranı 0.65'te %2.73 ve gerilme oranı 0.70'te ise %3.58 olmuştur.



Şekil 4.34 N=80 olan A grubu deneylerde oturmaların gerilme genliği ile değişimi.

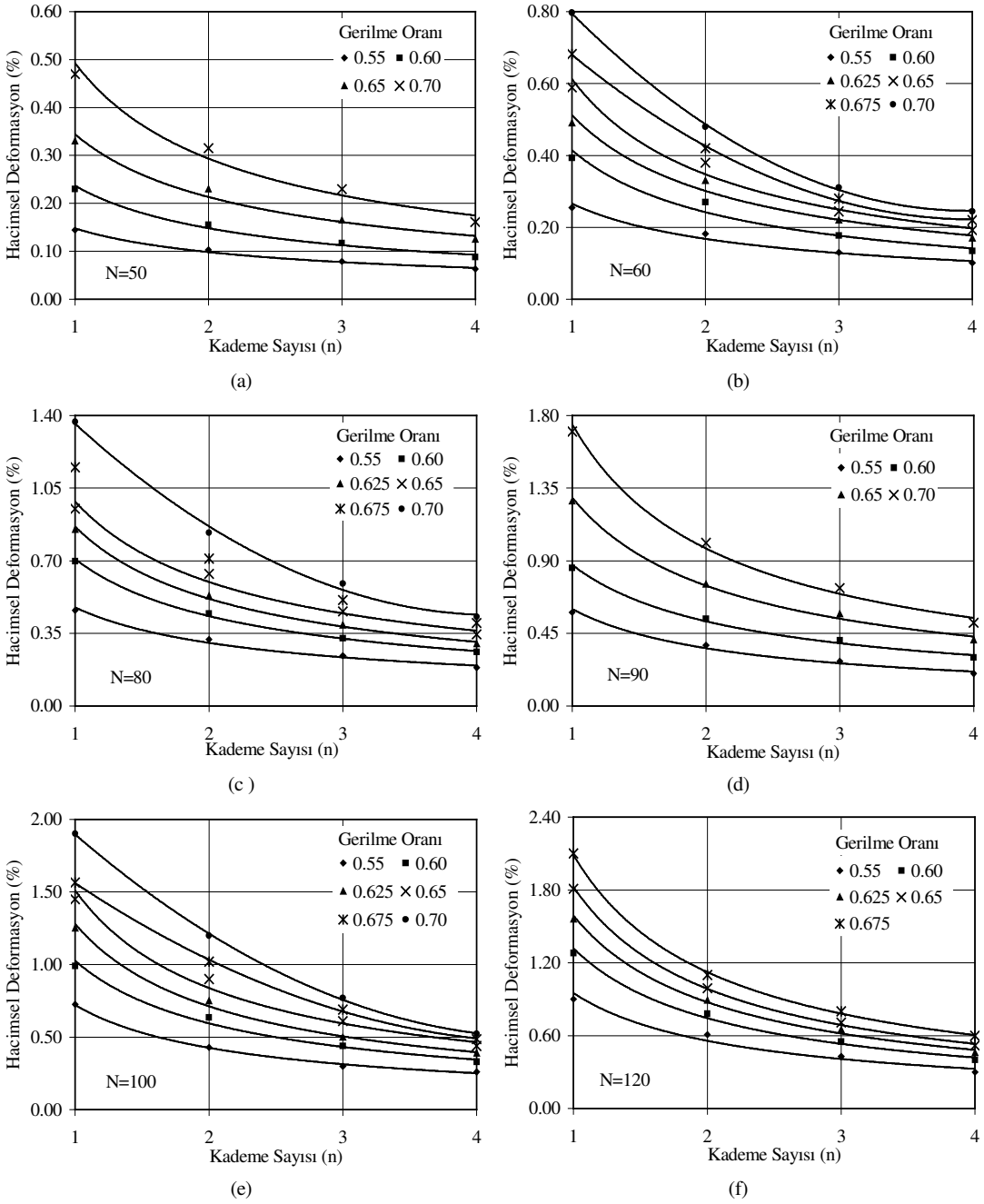
Şekil 4.35'de beş kademe tekrarlı yük ve her tekrarlı yüklemeden sonra drenaj uygulanmış A grubu deneylerden elde edilen hacimsel deformasyonların kademe sayısıyla değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi her gerilme oranında ilk tekrarlı yükleme sonunda en büyük konsolidasyon oturması meydana gelmektedir. Daha sonraki yükleme-drenaj çevrimlerinde oturmalar azalmakta, son kademelerde yataya dönmektedir. Örneğin Şekil 4.35a'da çevrim sayısının N=50, gerilme oranının τ/τ_f=0.70 olduğu deneyde ilk kademede hacimsel deformasyon %0.50 iken ikinci kademede %0.32 ve azalarak son kademede sadece %0.13 olmaktadır. Çevrim

sayısının artmasıyla oturmalarda da önemli artışlar meydana gelmektedir. Çevrim sayısının 100 ve gerilme oranının yine τ/τ_f=0.70 olduğu deneyde (Şekil 4.35e) hacimsel deformasyonlar ilk kademede %2.00, ikinci kademede %1.17 ve son kademede ise %0.41 olmaktadır. Oturmaların değişiminde dikkat çeken diğer bir husus ikinci kademe oturmalarda birinci kademe oturmalara göre daha hızlı bir azalma olmasıdır. Daha sonraki kademelerdeki oturma azalması nispeten daha azdır.



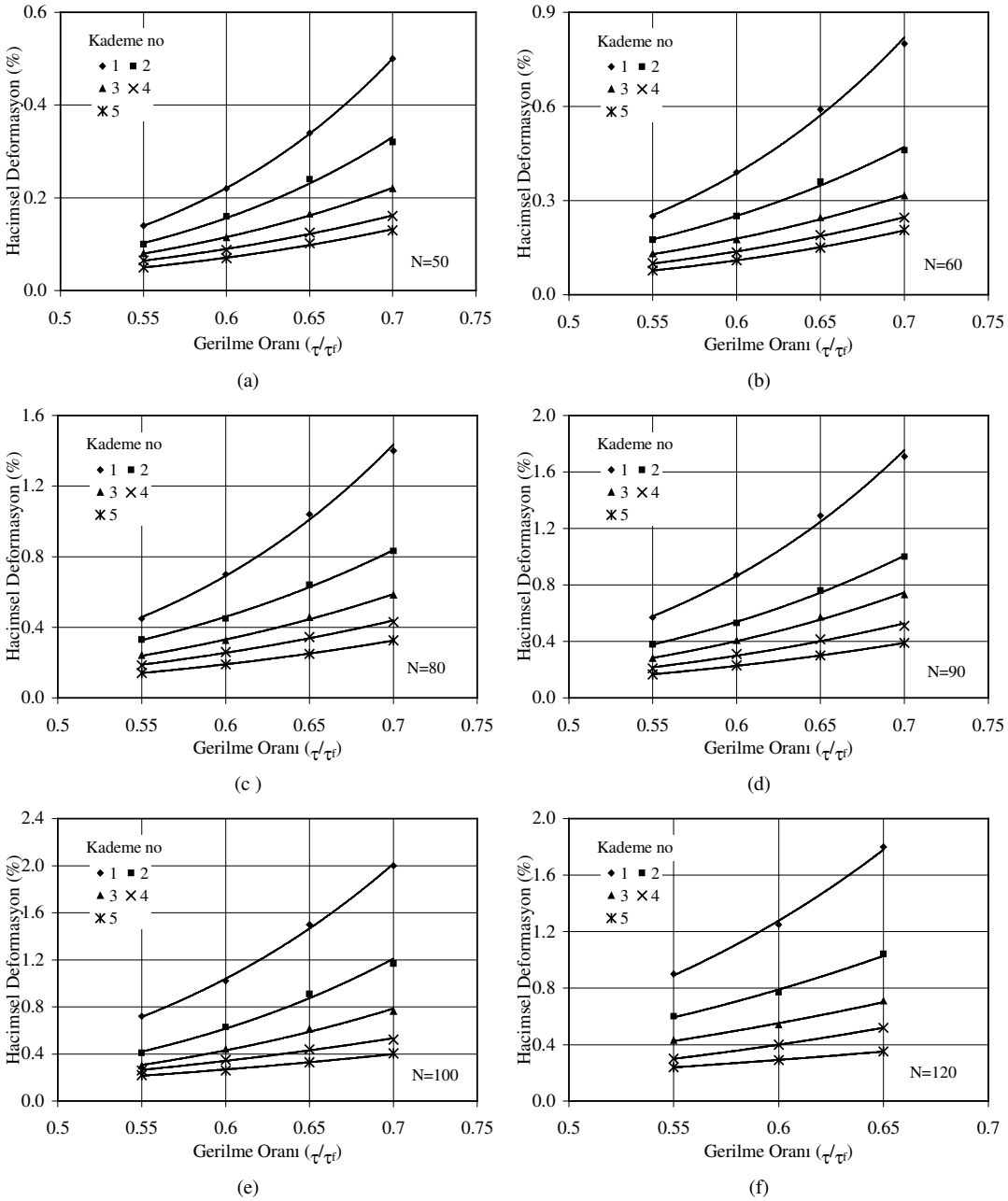
Şekil 4.35 Hacimsel deformasyonların farklı çevrim sayılarında beş kademe boyunca değişimi (A grubu deneyler).

Şekil 4.36'da ise sadece ilk dört kademe tekrarlı yüklemeden sonra boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için drenaja izin verilmiş B grubu deneylerden elde edilmiş oturmaların çevrim sayısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Son kademede drenaj uygulanmadığı için beşinci kademe konsolidasyon oturması da oluşmamıştır. Burada da A grubu deneylerle benzer davranış görülmektedir. Aynı zamanda konsolidasyon oturması değerlerinin de her iki grup deneyde birbirine yakın olduğu görülmektedir.

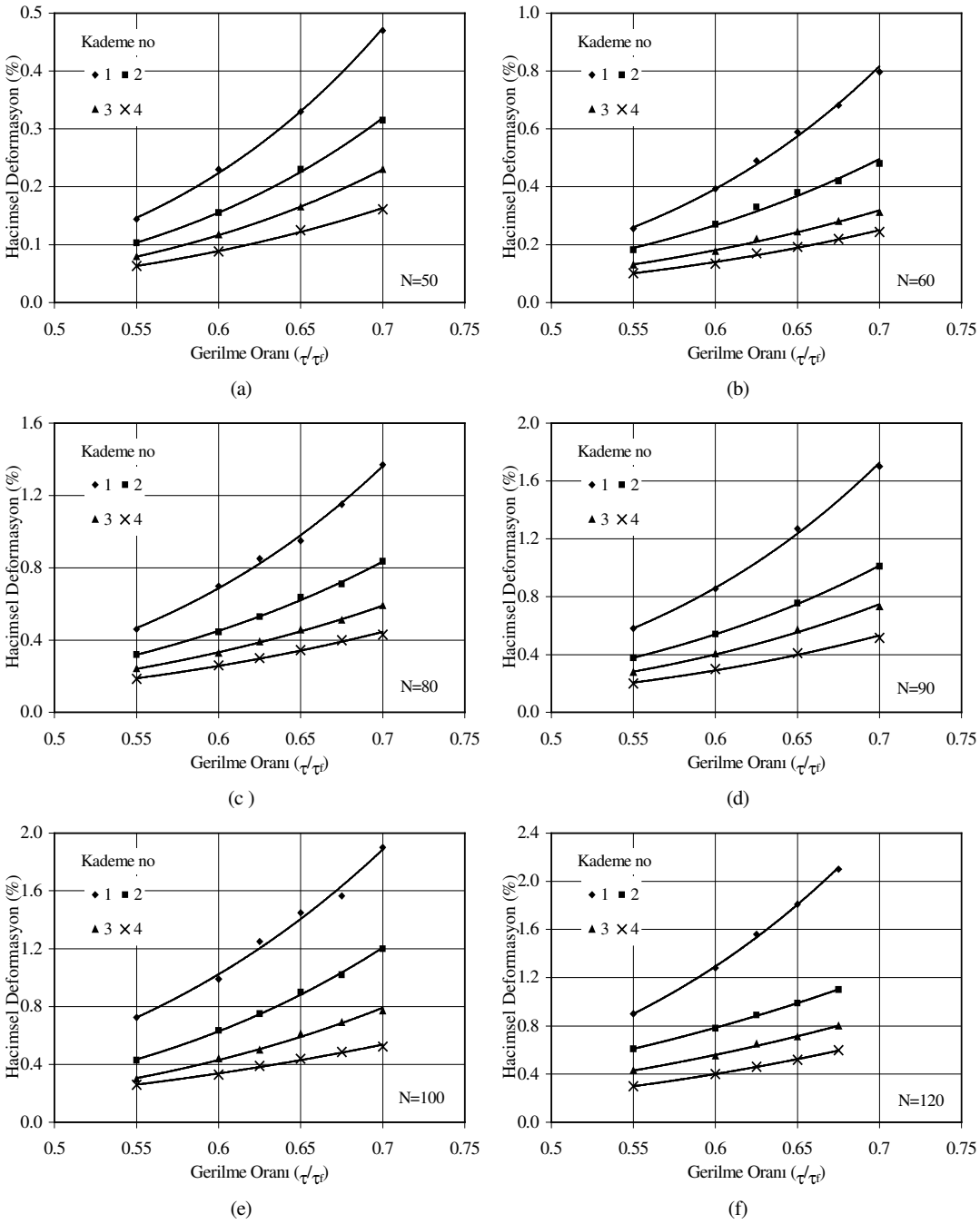


Şekil 4.36 Hacimsel deformasyonların farklı çevrim sayılarında dört kademe boyunca değişimi (B grubu deneyler).

Şekil 4.37 ve 4.38'de ise hacimsel deformasyonların gerilme oranına bağlı olarak değişimi sırasıyla A ve B grubu deneyler için verilmiştir. Şekiller üzerinde ayrıca her kademe tekrarlı yükleme için değişimler de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi son kademelerde hacimsel deformasyonlarda gerilme oranına bağlı olarak daha az eğimli bir artış olmaktadır. Bununla beraber özellikle ilk kademelerde yüksek eğimli ve artmaya eğilimli bir hacimsel deformasyon artış davranışı görülmektedir. Bu davranışın nedeni daha önce açıklanmış olan ilk kademe tekrarlı yüklemelerde yüksek, daha sonraki kademelerde azalan oranlarda boşluk suyu basıncı oluşmasıdır.



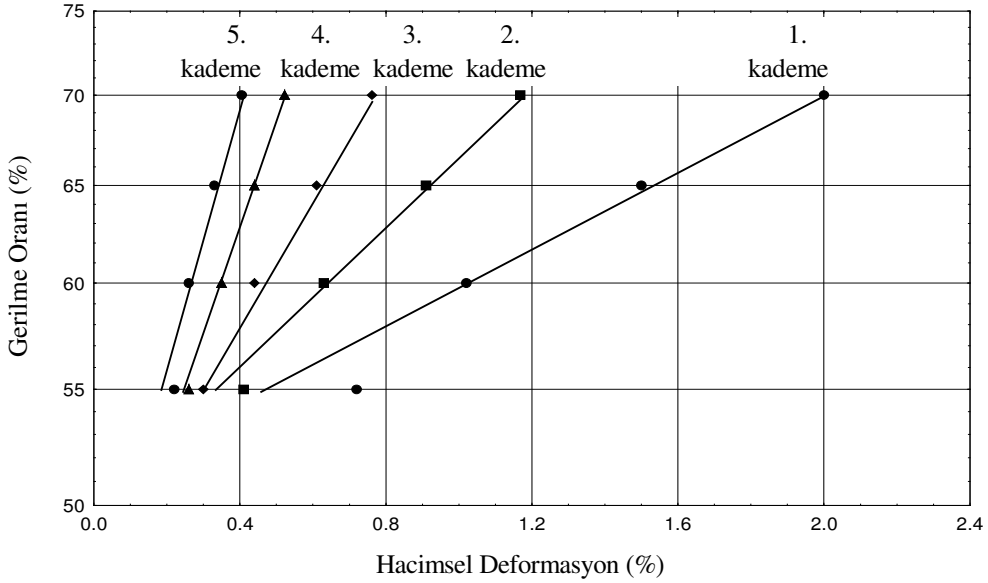
Şekil 4.37 Hacimsel deformasyonların gerilme oranına ve tekrarlı yükleme kademesine bağlı olarak değişimi (A grubu deneyler).



Şekil 4.38 Hacimsel deformasyonların gerilme oranına ve tekrarlı yükleme kademesine bağlı olarak değişimi (B grubu deneyler).

Şekil 4.39'da A grubu deneylerden çevrim sayısı N=100 olan deneylerde hacimsel deformasyonların tekrarlı gerilme oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bu değişimin yarı logaritmik eksen takımında bir doğru ile temsil edilebileceği görülmektedir. Ayrıca dört gerilme oranından elde edilen ilk kademe tekrarlı yüklemeler doğrusunun eğimi düşükken son kademeler doğrusunun eğimi artmaktadır. Bir başka deyişle ilk kademe tekrarlı yüklemede gerilme genliği

değişimiyle oturmalardaki artışlar yüksek olmaktadır. Son kademelerde farklı gerilme genliği uygulanan numunelerde oluşan oturmalar birbirine yakın olmaktadır. Hacimsel deformasyonlar daima tekrarlı yüklemenin ilk uygulanmaya başlanan numune yüksekliği ve bu yükseklikten itibaren düşey deformasyonlar göz önüne alınarak hesaplanmıştır.



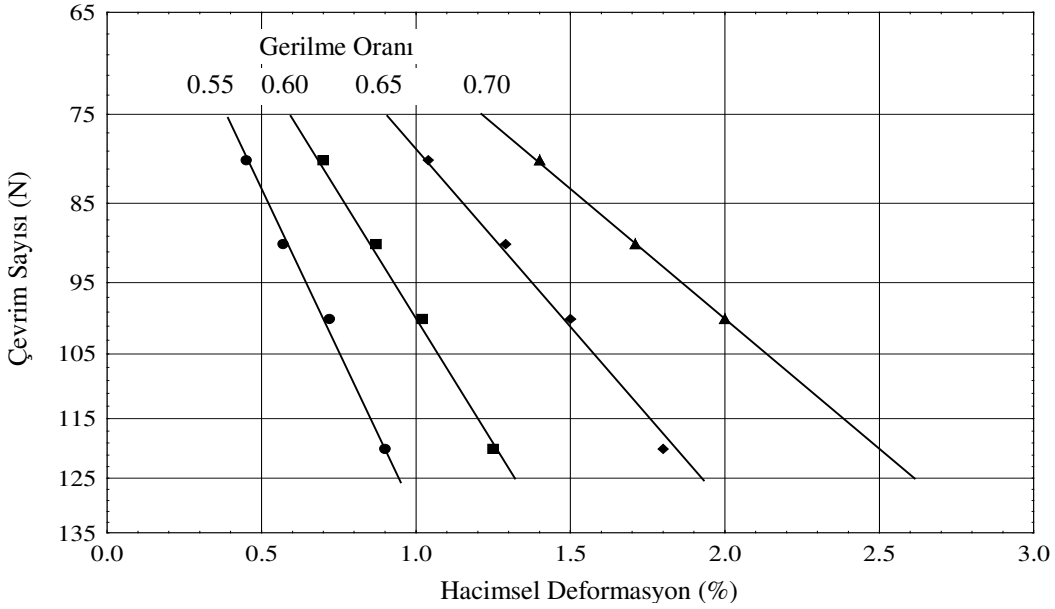
Şekil 4.39 Beş kademedeki hacimsel deformasyonların gerilme oranıyla değişimi.

Şekil 4.40'ta ise hacimsel deformasyonların numuneye uygulanan tekrarlı gerilmenin çevrim sayısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bu değişimde de yarı logaritmik eksen takımında bir doğru ile temsil edilebileceği görülmektedir. Gerilme oranının yükselmesiyle değişim eğrisi eğimi azalmakta, dolayısıyla yatay eksende gösterilen hacimsel deformasyon değerlerinde artış meydana gelmektedir. gerilme oranının azalmasıyla doğrunun eğimi atmakta, artışlar nispeten daha düşük olmaktadır. Şekildeki değerler sadece ilk kademe tekrarlı yüklemeden kaynaklanan hacimsel deformasyon değerleridir.

İlk kademe tekrarlı yüklemeden kaynaklanan oturmaların hesabı için çevrim sayısı ve gerilme oranının değişken olduğu kabul edilerek yapılan regresyon analizinden aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Boşluk suyu basıncının içinde bulunmadığı bu analizde korelasyon katsayısı R=0.9974 olarak belirlenmiştir.

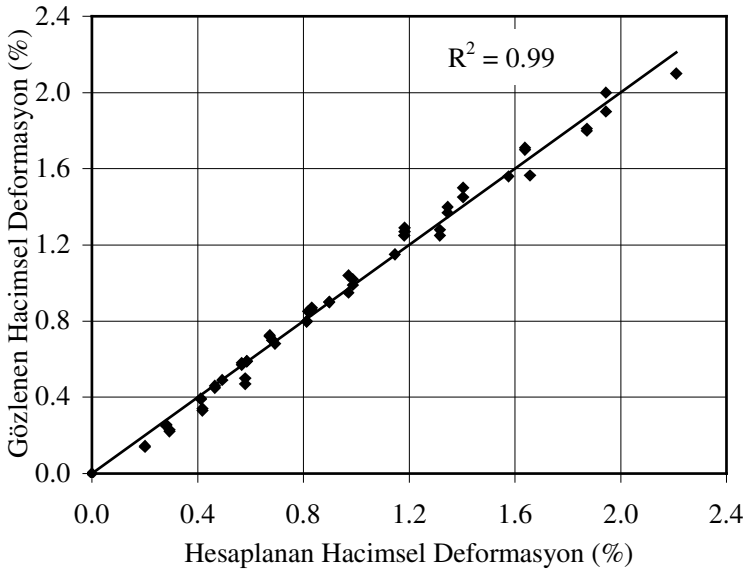
$$\varepsilon_{vr} = 0.054 \times (\log 10N)^{7.421} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{4.397} \quad (4.4)$$

Burada; ε_{vr} hacimsel deformasyon, N çevrim sayısı, τ numuneye uygulanan tekrarlı kayma gerilmesi, τ_f ise drenajsız statik kesmedeki maksimum kayma gerilmesidir.

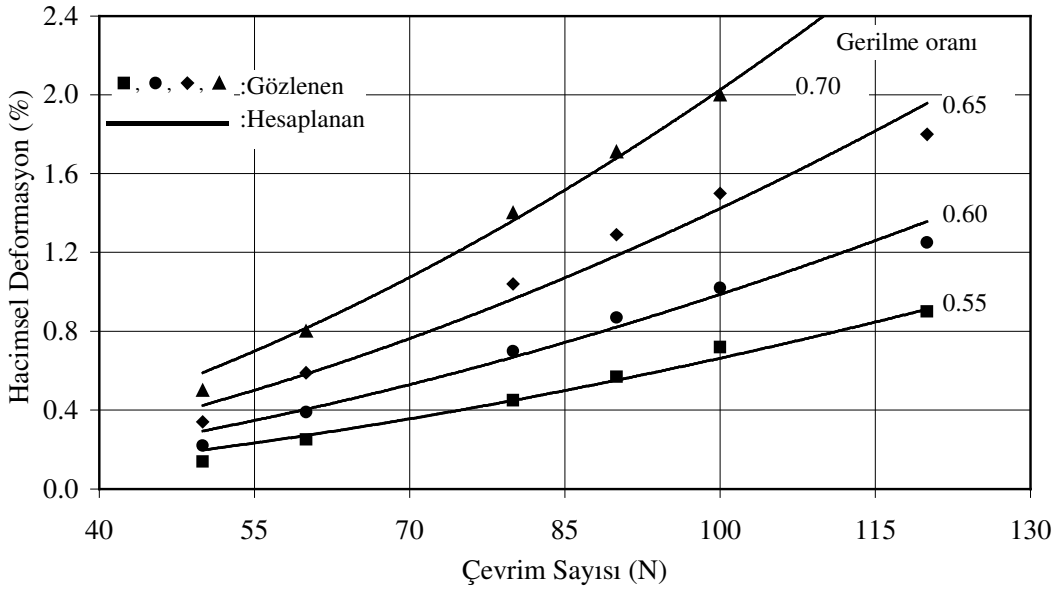


Şekil 4.40 Hacimsel deformasyonların çevrim sayısıyla değişimi.

Şekil 4.41'de deneyden ve bağıntıdan elde edilen hacimsel deformasyonların karşılaştırılması, Şekil 4.42'de ise A grubu deneyler için çevrim sayısına bağlı olarak yine deneyden ve bağıntı kullanılarak hesaplanan oturmalar gösterilmiştir.



Şekil 4.41 İlk kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların karşılaştırılması (A ve B grubu deneyler).

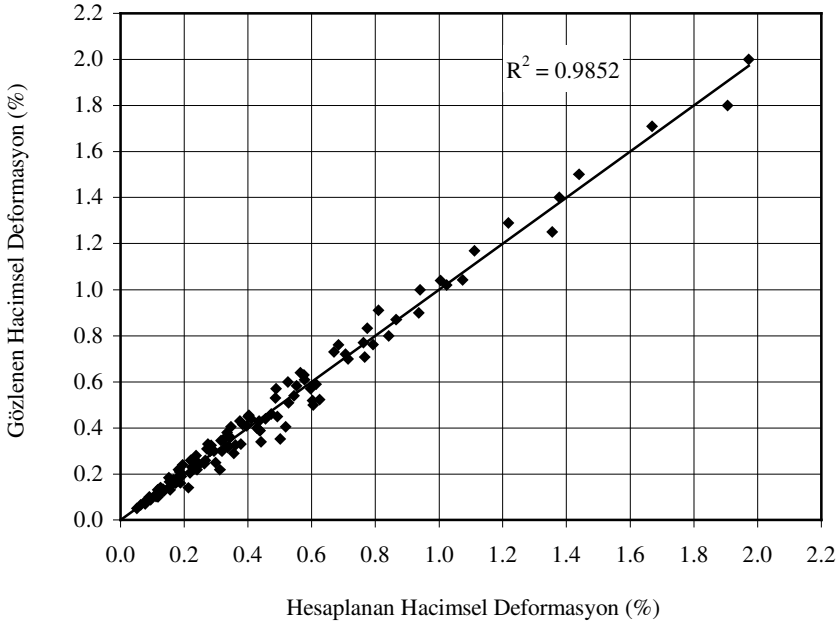


Şekil 4.42 İlk kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların çevrim sayısıyla değişimi.

Çok sayıda tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi etkisinde kalan temel zeminlerinin oturma problemi sürekli titreşime maruz kalan makine temelleri, açık deniz yapıları ve rüzgar yüküne maruz kalan yüksek yapılarda önemli olmaktadır. Bu amaçla farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında beş kademe tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi uygulanarak elde edilen deney verileri kullanılarak yapılan regresyon analizinden aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Burada; N deney numunesine uygulanan tekrarlı yükleme çevrim sayısı, τ/τ_f tekrarlı kayma gerilmesi oranı ve n tekrarlı yükleme kademe sayısını göstermektedir. Denklemden de görüldüğü gibi tekrarlı kademe sayısıyla oturmalar azalırken çevrim sayısı ve gerilme oranı oturmalarda artışa neden olmaktadır. Regresyon katsayısı ise 0.9852 olarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_{vr} = -0.0067 + 0.061 \times (n)^{-0.824} \times (\log 10N)^{7.197} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{4.234} \qquad (4.5)$$

Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların karşılaştırılması Şekil 4.43'te verilmiştir. Şekil 4.44'te ise deneylerden elde edilen ve denklemle hesaplanan oturmaların değişimi çevrim sayısı N=80 ve 120 için verilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi hesaplanan oturma değerleri deneylerden elde edilmiş değerlere yakın olmakla birlikte davranış şekli de uyumlu olmuştur.

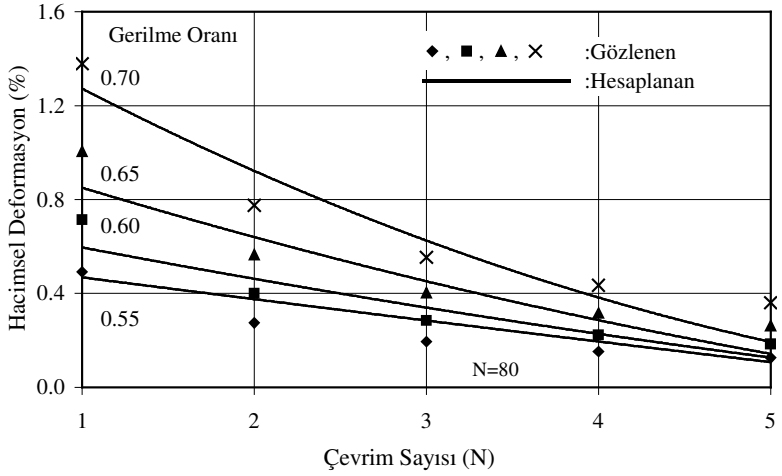


Şekil 4.43 Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların karşılaştırılması.

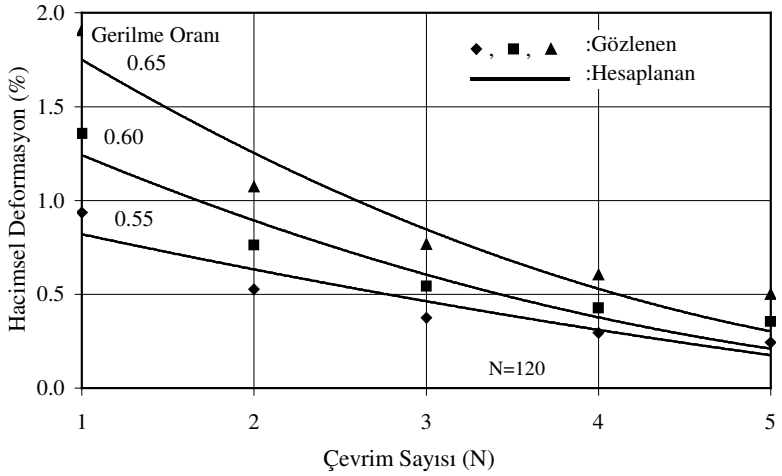
4.2.4 Tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti davranışı

Deprem gibi kısa süreli drenajsız tekrarlı yükleme esnasında belirli bir kayma gerilmesi seviyesi veya belirli bir yük çevriminden sonra zemin tekrarlı göçmeye uğrar. Numunenin suya doygun kum olması durumunda bu tür göçmeye sıvılaşma denir. Kil numune tekrarlı göçmeye uğramayabilir. Bununla beraber iki drenajsız tekrarlı yükleme arasındaki geçen zaman içinde drenaja ya da şişmeye izin verilip verilmemesine bağlı olarak tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti azalır veya artar. Tekrarlı yükten dolayı oluşan artık boşluk basıncı sönümlendiğinde ise numunede konsolidasyon oturmalarından dolayı tekrarlı yükleme sonrası hacimsel değişim oluşur. Aşırı konsolide killerde negatif boşluk basıncının sönümlenmesi kabarmaya neden olacak ve dolayısı ile tekrarlı yükleme sonrası drenajsız statik kayma mukavemetinde bir azalma meydana gelecektir (Yasuhara ve diğerleri, 1992).

Zeminlere etkiyen kısa süreli drenajsız tekrarlı yükleme efektif gerilmelerde azalmaya neden olur. Bu durum zeminin drenajsız kayma mukavemetinde de değişiklik meydana getirir. Tekrarlı yüklemeler arasında drenajın oluştuğu okyanus dalgaları gibi uzun süreli durumlarda zeminin mukavemetinde daha sonraki tekrarlı yüklemelere karşı iyileşmeler olur. Özellikle aşırı konsolide zeminlere oranla normal konsolide zeminlerin özellikleri iyileşir.



(a)

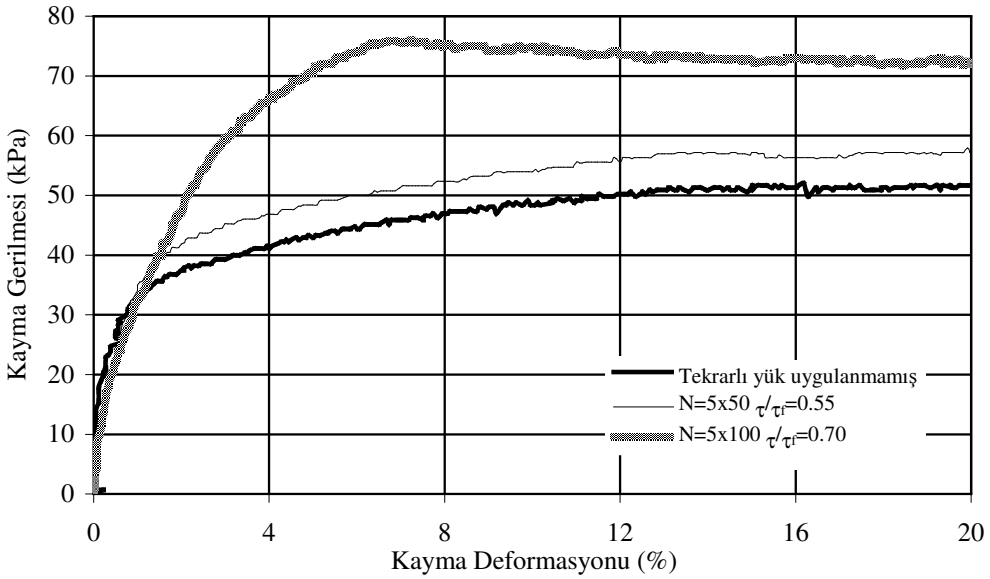


(b)

Şekil 4.44 Beş kademe tekrarlı yükleme için hesaplanan ve gözlenen oturmaların çevrim sayısıyla değişimi.

Yapılan deneylerden tekrarlı yükleme sonrası uygulanan drenajın, suya doygun normal konsolide bir kil üzerindeki yapının uzun süreli davranışı üzerinde olumlu etki yarattığı, tekrarlı yer değiştirmelerin azaldığı ve stabilitenin zamanla iyileşmesine neden olduğu görülmüştür.

Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış kil numuneler üzerinde yapılan drenajsız statik deneylerden elde edilen bir grup gerilme-deformasyon eğrisi Şekil 4.45'te verilmiştir. Tekrarlı yük uygulanmış deneyler, çalışmada drenajsız kayma mukavemeti artışının en düşük ve en yüksek olduğu deneylerdir. Tekrarlı yükleme sonrası en yüksek drenajsız kayma mukavemeti artışı, çevrim sayısının N=100 ve gerilme oranının τ/τ_f=0.70 olduğu deneyde (A20 deneyi) %46.4, en düşük drenajsız kayma mukavemeti artışı ise çevrim sayısının N=50 ve gerilme oranının τ/τ_f=0.55 olduğu deneyde (A1 deneyi) %12.1 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.45 Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerilme deformasyon eğrileri.

Tablo 4.4'te tekrarlı yükleme ve drenajsız statik kesme arasında drenaj uygulanmış deneylerden (A grubu deneyler) elde edilen drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişimler verilmiştir. Drenajsız statik deneyler, saatte %6.5 deformasyon hızında defomasyon kontrollü olarak yapılmıştır.

Şekil 4.46'da drenajsız kayma mukavemetlerinin çevrim sayısına bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tekrarlı yükleme sonrasında drenaj uygulanmış deneylerde çevrim sayısının artmasıyla numunelerde oluşan boşluk suyu basınçlarının ve dolayısıyla toplam oturmalarında artması drenajsız kayma mukavemetlerinde de önemli artışlar meydana getirmiştir. 5x50 çevrim uygulanan numunelerin drenajsız kayma mukavemetindeki maksimum artış %23.4 iken çevrim sayısının 5x90 olduğu numunelerdeki maksimum artış %40.2 ve 5x120 çevrim sayısındaki artış %43.7 olmuştur. Drenajsız kayma mukavemetindeki en büyük artış çevrim sayısının N=100 ve tekrarlı gerilme oranının τ/τ_f=0.70 olduğu numunede %46.4 olarak görülmüştür. Şekil 4.47'de tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişimin tekrarlı gerilme oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi çevrim sayısının artmasıyla ortaya çıkan etki gerilme oranlarının artmasıyla da görülmüştür.

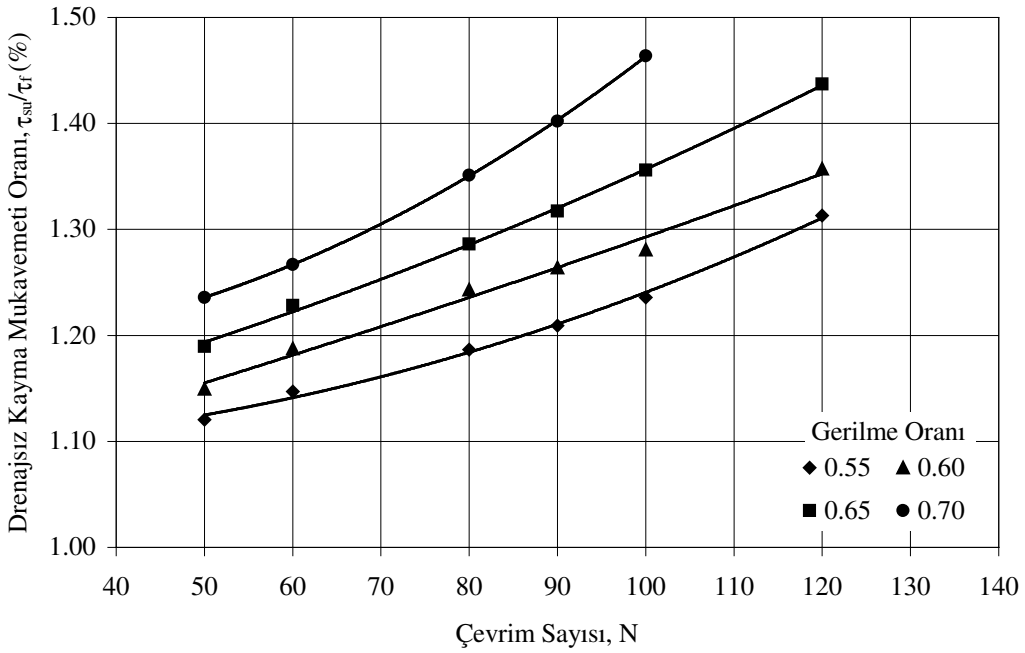
B grubu deneylerde, belli bir çevrim sayısı ve gerilme genliğinde beş kez tekrarlı yük uygulanmış ilk dört tekrarlı yükleme sonunda drenaja izin verilmiş, beşinci tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmeden numuneler drenajsız statik yüklemeye tabi

tutulmuştur. Bu grup deneylerden 17 tanesinde son tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmeden numuneler statik olarak kesilmiştir.

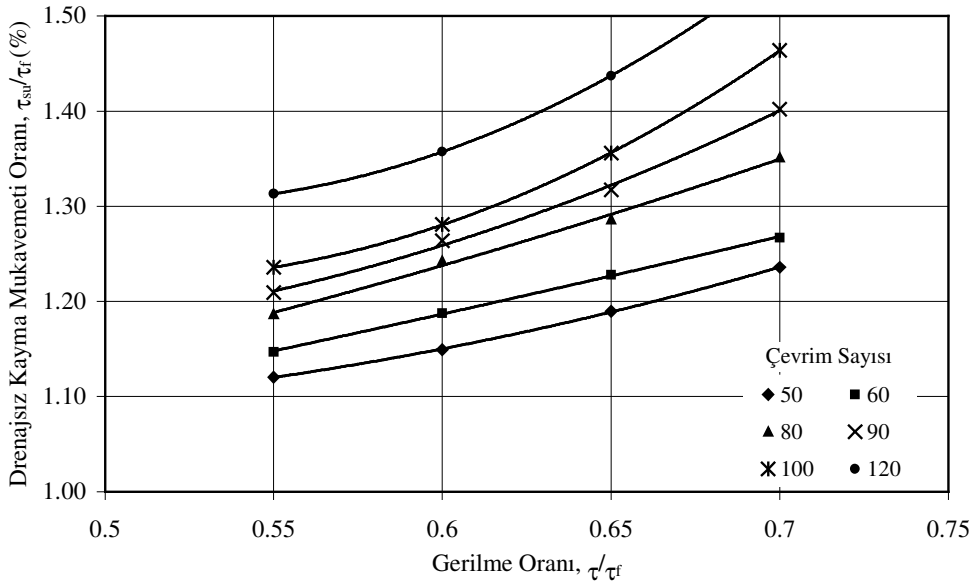
Tablo 4.4 Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneylerde drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi (A grubu deneyler).

Çevrim Sayısı, N	Gerilme Oranı, τ/τ_f (%)	Drenajsız Kayma Mukavemeti Artışı, (%)
5x50	55	12.1
	60	14.9
	65	19.0
	70	23.6
5x60	55	14.7
	60	18.8
	65	22.8
	70	26.7
5x80	55	18.7
	60	24.3
	65	28.6
	70	35.1
5x90	55	20.9
	60	26.4
	65	31.7
	70	40.2
5x100	55	23.6
	60	28.1
	65	35.6
	70	46.4
5x120	55	31.3
	60	35.7
	65	43.7

B grubu deney numunelerinden elde edilen sonuçlar A grubu deneylerinden elde edilen sonuçlardan oldukça farklı olmuştur. Drenajsız kayma mukavemetlerinde çevrim sayısı ve gerilme genliğine bağlı düzenli bir değişim görülmemiştir. Numunelerin drenajsız kayma mukavemeti oranları ($\tau su/\tau_f$) -%7.1 ile +%13.0 arasında değişim göstermiştir. Kayma mukavemetlerinde düşüş görülen numune sayısı az olup sadece iki numunede %5'ten fazla düşüş olmuş diğerlerinde ya artış görülmüş ya da herhangi bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 4.46 Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneylerde drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısıyla değişimi.



Şekil 4.47 Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmış deneylerde drenajsız kayma mukavemetinin gerilme oranıyla değişimi.

İlk dört kademe tekrarlı yükleme drenaj çevrimleri esnasında meydana gelen konsolidasyon oturmaları sayesinde zemin mukavemetinde önemli artışlar görülmemiş olsa dahi tekrarlı yükler altında orijinal direncini korumuş olmaktadır. Literatürde sıkça karşılaşılan, tekrarlı yükleme ve statik kesme arasında drenaja izin

verilmeyen numunelerin drenajsız kayma mukavemetinde görülen azalmalar, çalışmadaki birden çok sayıda tekrarlı yükleme drenaj çevrimleri nedeniyle görülmemiştir. Numunelerin drenajsız kayma mukavemeti numuneye uygulanan çevrim sayısı ve gerilme genliğinden bağımsız olarak statik kesmeden elde edilen drenajsız kayma mukavemeti civarında oluşmuştur. Elde edilen drenajsız mukavemeti oranları Tablo 4.5'te verilmiştir.

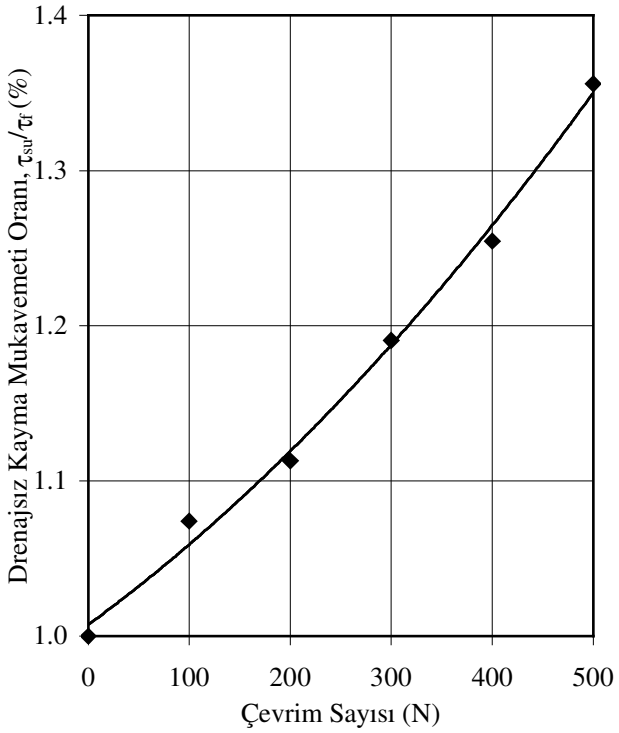
Tablo 4.5 Tekrarlı yükleme ve statik deney arasında drenaj uygulanmamış deneylerde drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi (B grubu deneyler).

Çevrim Sayısı, N	Gerilme Oranı, τ/τ_f (%)	Drenajsız Kayma Mukavemeti Artışı (%)
5x80	55	1.3
	60	5.6
	62.5	-7.1
	65	13.0
	67.5	10.2
	70	3.2
5x100	55	3.2
	60	9.8
	62.5	4.2
	65	-2.9
	67.5	2.7
	70	-2.9
5x120	55	2.9
	60	-1.0
	62.5	-5.3
	65	4.9
	67.5	8.1

Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayılarının drenajsız kayma mukavemeti üzerindeki etkisi bir grup deneyle incelenmiştir. Bu amaçla tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinin uygulanma sayısı 1, 2, 3, 4 ve 5 olarak seçilerek son tekrarlı yüklemeden sonra oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenebilmesi için drenaja izin verilmiştir. Daha sonra numuneler statik olarak kesilmiş ve drenajsız kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Deneylerde sadece tek çevrim sayısı (N=100) ve gerilme oranı (τ/τ_f=0.65) kullanılmıştır. Bu grup deneylerde de numunelerin kayma mukavemetlerinde belirgin artışlar görülmüştür. Bir kez tekrarlı yükleme ve drenaja tabi tutulan numunede kayma mukavemeti artışı %7.4, iki kez tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanan numunede %11.3 iken beş kez tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi uygulanmış numunenin kayma mukavemetindeki artış %35.6 gibi yüksek bir değere ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.6 ve Şekil 4.48'de gösterilmiştir.

Tablo 4.6 Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi sayısının farklı olduğu deneylerde drenajsız kayma mukavemetlerinin değişimi.

Çevrim Sayısı, N	Gerilme Oranı, τ/τ_f (%)	Drenajsız Kayma Mukavemetindeki Artış (%)
1x100	65	7.42
2x100	65	11.30
3x100	65	19.06
4x100	65	25.46
5x100	65	35.59



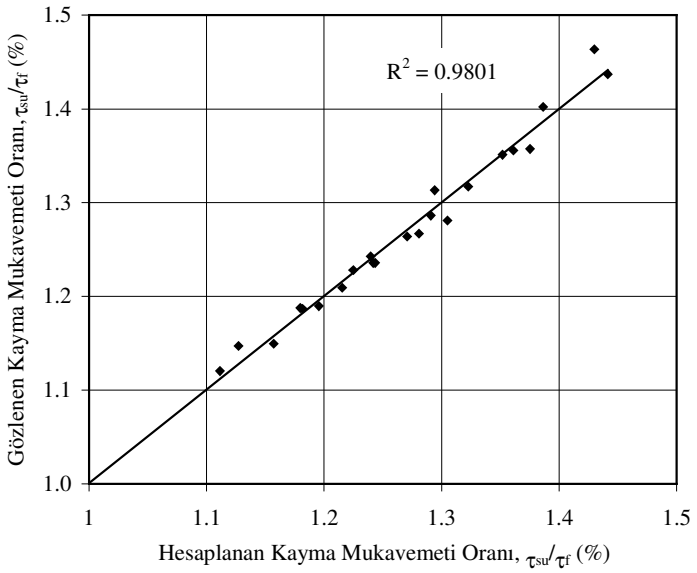
Şekil 4.48 Tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi sayılarının kayma mukavemeti üzerindeki etkisi.

Çevrim sayısı, tekrarlı gerilme oranı ve beş kademe tekrarlı yükleme drenaj çevrimleri esnasında meydana gelen toplam hacimsel deformasyonlara bağlı olarak yapılan regresyon analizinden drenajsız kayma mukavemeti oranı için aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Korelasyon katsayısı ise R=0.99 olmuştur.

Denklemde; τ_{su} beş kademe tekrarlı yükleme sonunda ölçülen drenajsız kayma mukavemeti,τ_f tekrarlı yük uygulanmamış numunenin drenajsız kayma mukavemeti, N tekrarlı yük çevrim sayısı, τ numuneye uygulanan tekrarlı yük, ε_T ise beş kademe tekrarlı yük uygulanmış numunede meydana gelen toplam hacimsel deformasyondur.

$$\frac{\tau_{su}}{\tau_f} = 0.653 \times \frac{(\log 10N)^{2.102} \times (\frac{\tau}{\tau_f})^{1.191}}{(\varepsilon_T)^{0.157}} \qquad (4.6)$$

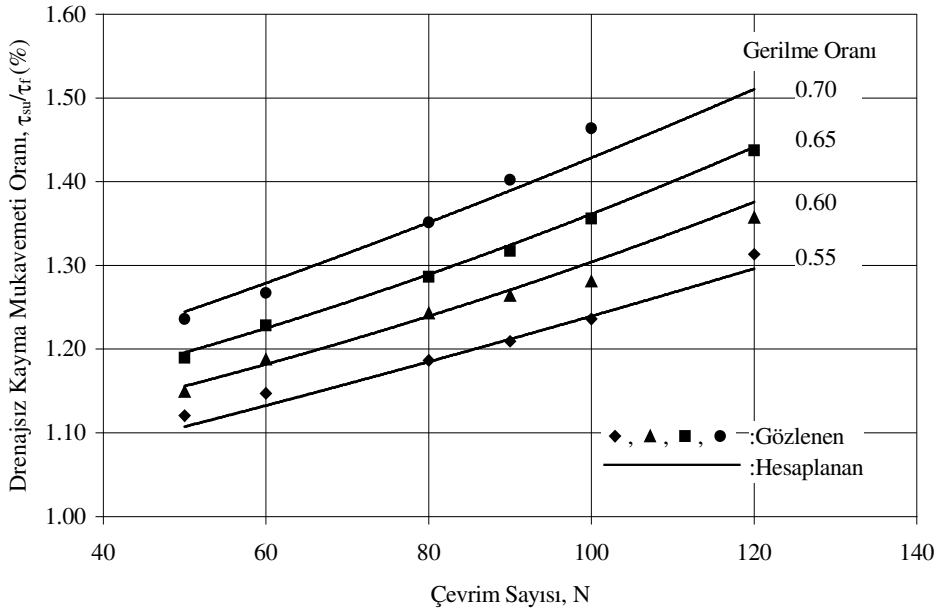
Şekil 4.49'da deney sonuçları ile bağıntı ile hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 4.50'de ise çevrim sayısına göre denelerden elde edilen ve denklemle belirlenen drenajsız kayma mukavemeti oranları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.49 Deneylerden elde edilen ve hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının karşılaştırılması.

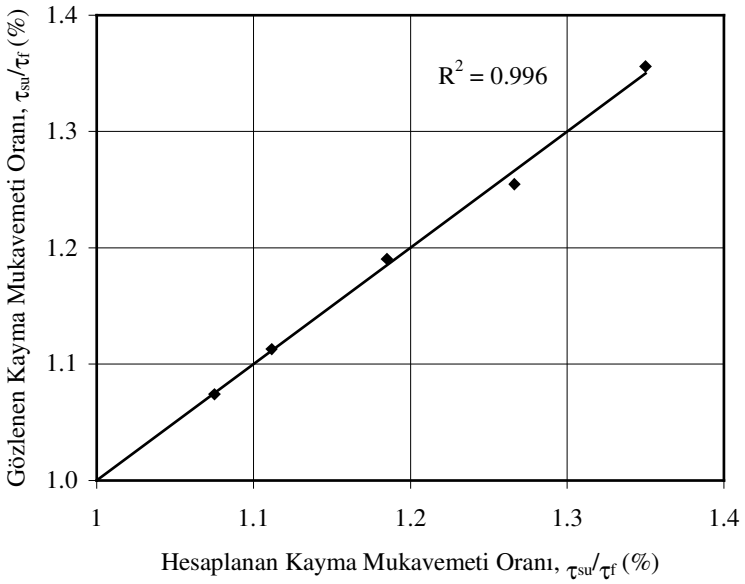
Farklı sayıda tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi uygulanan deneylerden elde edilen değerlerle yapılan regresyon analizinden ise aşağıdaki denklem elde edilmiştir. 1~5 kez uygulanan tekrarlı yükleme drenaj çevrimi, deneylerde tek çevrim sayısı (N=100) ve gerilme oranı (τ/τ_f=0.65) kullanılması nedeniyle veri sayısı azdır. Dolayısıyla korelasyon katsayısının 0.99 olmasına rağmen denklemin güvenilir olduğunu göstermemektedir. Bu denklemde ε_T her bir deneyde drenajsız statik kesmeden önceki tekrarlı yükleme drenaj çevrimlerinde meydana gelen toplam hacimsel deformasyon, n ise tekrarlı yükleme drenaj çevriminin sayısını göstermektedir. Çalışmada n=1, 2, 3, 4 ve 5 olarak belirlenerek deney yapılmıştır.

$$\frac{\tau_{su}}{\tau_f} = 1.527 \times \frac{n^{0.640}}{(\varepsilon_T)^{0.865}} \qquad (4.7)$$



Şekil 4.50 Çevrim sayısına göre deney ve hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının değişimi.

Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayısının değişmesi durumunda deney ve hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının karşılaştırılması Şekil 4.51'de gösterilmiştir.



Şekil 4.51 Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayısının değişmesi durumunda deney ve hesaplanan drenajsız kayma mukavemeti oranlarının karşılaştırılması.

4.3 Sonuç

Bu çalışmada, çoğu deneyde beş kez olmak üzere farklı sayıda tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimine maruz kalan suya doygun kohezyonlu zeminlerin gerilme-şekil değiştirme, konsolidasyon oturması ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak numunelere farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında tekrarlı yükler uygulanmıştır. Beşinci tekrarlı yüklemeden sonra drenaj uygulanıp uygulanmamasına göre iki grup deney yapılmıştır. A grubu deneylerde son kademeden sonra drenaja izin verilmiş ve numuneler drenajsız koşullarda statik olarak kesilmiştir. B grubu deneylerde son tekrarlı yüklemeden hemen sonra numuneler statik yükler altında kesilmiştir. Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayısının tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetine etkisini incelemek amacıyla beş deneyden oluşan üçüncü grup deney yapılmıştır. Bu deneylerde tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi sayısı 1-5 arasında uygulanmış son kademe tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilip numuneler statik olarak kesilmiştir.

Tekrarlı yüke maruz zeminlerde boşluk suyu basınçları oluşmakta ve çevrim sayısı ve gerilme genliğine bağlı olarak artış göstermektedir. Çok kademe tekrarlı yüklemelerde ise ilk kademede yüksek boşluk suyu basınçları oluşurken daha sonraki kademelerde ilk kademeye göre azalmaya başlamaktadır. Son kademelerde birbirine yakın olmaktadır. Kayma deformasyonlarındaki davranış boşluk suyu basıncındaki davranışa benzemektedir. Deneylerde çevrim sayısı ve gerilme oranının artmasıyla birlikte meydana gelen şekil değiştirmeler de artmaktadır. Çok kademeli deneylerde ise ikinci kademeden itibaren kayma deformasyonlarında azalmalar görülmüş yani zeminin kayma modülünde artışlar meydana gelmiştir. Tekrarlı yükleme-drenaj çevrimleri sayesinde zeminin stabilitesindeki iyileşmeler daha sonraki tekrarlı yükler esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarının ve kayma deformasyonlarının da azalmasına, son kademelerde birbirine yakın olmasına neden olmaktadır.

Tekrarlı yüklemelerden sonraki drenaj aşamasında artık boşluk suyu basıncı sönümlenir ve kil zeminin boşluk oranı azalır, zeminde dikkate değer oturmalar meydana gelir. İlk kademe tekrarlı yüklemeyi takip eden kademelerde oluşan boşluk suyu basınçları gittikçe azaldığı için oturmalar da azalma meydana gelmektedir. Çevrim sayısı ve gerilme oranının artmasıyla oturmalarda da artışlar görülmüştür.

Tekrarlı yükleme sonrası uygulanan drenaj sayesinde gözlenen konsolidasyon oturmaları zeminin daha sonra etkisinde, kalacağı tekrarlı yüklere karşı direncini artırmıştır. Özellikle A grubu deneylerde tekrarlı yükleme-drenaj çevrimleri sonunda çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak zeminin drenajsız kayma

mukavemetinde %12.1~%46.4 arasında artışlar meydana gelmiştir. B grubu deneylerde ise drenajsız kayma mukavemetleri davranışında düzenli bir artış veya azalıştan söz etmek mümkün olmamaktadır. Numunelerin drenajsız kayma mukavemeti oranları ($\tau su/\tau_f$) -%7.1 ile +%13.0 arasında değişmiştir. Düşüş görülen numune sayısı az olup sadece iki numunede %5'ten fazla düşüş olmuş diğerlerinde ya artışlar ya da herhangi bir değişiklik olmamıştır.

Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayılarının drenajsız kayma mukavemeti üzerindeki etkisinin incelendiği deneylerde tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinin uygulanma sayısı 1, 2, 3, 4 ve 5 olarak seçilerek son tekrarlı yüklemeden sonra oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenebilmesi için drenaja izin verilmiştir. Daha sonra numuneler statik olarak kesilmiş ve drenajsız kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Deneylerde sadece tek çevrim sayısı (N=100) ve gerilme oranı (τ/τ_f=0.65) kullanılmıştır. Bu grup deneylerde de A grubu deneylerde olduğu gibi numunelerin kayma mukavemetlerinde belirgin artışlar görülmüştür. Bir kez tekrarlı yükleme ve drenaja tabi tutulan numunede kayma mukavemeti artışı %7.4, iki kez tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanan numunede %11.3 iken beş kez tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi uygulanmış numunenin kayma mukavemetindeki artış %35.6 gibi yüksek bir değere ulaşmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tekrarlı yükler altında kohezyonlu zeminlerin davranışını inceleyen araştırmacıların birçoğu geçmişte kohezyonlu zeminlerden ziyade kohezyonsuz zeminlerin davranışına önem verildiğini ve araştırmaların suya doygun, gevşek kumlardaki sıvılaşmaya yöneldiğini belirtmişlerdir. Fakat 1985 Mexico City ve 1989 Loma Prieta depremlerinde, depremin odağından uzak noktalarda bile kil zeminlerde hasarlar meydana geldiği görülmüştür. 1964 Alaska depreminde meydana gelen deprem hasarları incelendiğinde yapısında kil bulunan çok sayıda şevde kayma meydana geldiği, daha önce sadece sıvılaşmadan kaynaklandığı sanılan şev kaymalarında, kildeki mukavemet kaybının da etken olduğu, 1994 Northridge depreminde düşük eğimli arazide yumuşak kilde tekrarlı yük kaynaklı göçme meydana geldiği görülmüştür.

Bir yapı altındaki zemin, yapının ağırlığından dolayı düşey statik yüke, deprem, rüzgar, açık deniz dalgası, trafik gibi dış etkilerden dolayı tekrarlı yüklere maruz kalır. Bu tür yükler hem tekrarlı yatay, düşey hem de moment yüküne neden olur. Tekrarlı yükler yapıların uzun süreli davranışlarında ilave oturmalar olarak etkisini göstermektedir. Bu ilave oturmalar yapılarda ilave gerilmelere neden olur. Yapıların temel dizayn analizinde esas, yeterli taşıma gücü güvenliğinin sağlanması ve yer değiştirmelerin kabul edilebilir mertebelerde olmasıdır. Güvenli ve ekonomik bir dizayn için zeminin statik ve tekrarlı yükler altındaki davranışının bilinmesi gereklidir.

Temel dizayn analizinde gerekli olan zemin özelliklerini belirlemek için farklı zemin elemanlarına etkiyen gerilme durumlarının mümkün olduğu kadar yakın model edildiği laboratuvar deneyleri yapmak gereklidir. Mevcut laboratuvar deney sistemleri ile bütün arazi gerilme durumlarının oluşturulması mümkün değildir. Bununla beraber çalışmada da kullanılan dinamik basit kesme deney sistemi bazı önemli gerilme durumlarını model etmektedir. Tekrarlı kayma gerilmelerinin farklı kombinasyonlarıyla yapılan bu deneylerden elde edilen sonuçlar, statik ve tekrarlı yüklere birlikte maruz kalan kil temellerinin davranışının analizi için gerekli olan zemin parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılabilir.

Suya doygun normal konsolide bir kil tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kaldığında, artık boşluk suyu basıncı meydana gelir. Meydana gelen boşluk suyu basınçları zemindeki efektif gerilmelerde aynı miktarda azalmaya neden olur. Numune üzerindeki tekrarlı yükün kalkmasından sonra meydana gelen boşluk suyu basınçları sönümlenir ve efektif gerilme başlangıç değerine tekrar ulaşır. Bu esnada boşluk suyu basınçlarının dağılmasıyla zeminin boşluk oranında da azalmalar meydana gelir. Yani zeminde, tekrarlı yüklemeden dolayı oluşan boşluk suyu basıncının sönümlenmesiyle birlikte konsolidasyon oturmaları oluşur.

Çalışmada üç grupta farklı çevrim sayısı ve gerilme genliği uygulanmış toplam 270 dinamik yüklemeli, 45 adet drenajsız statik yüklemeli deney yapılmıştır. Birinci grup deneylerde (A grubu deneyler) numuneye beş kez tekrarlı yük, 1 saat süreyle her tekrarlı yükten sonra drenaj, son drenaj aşamasından sonra ise drenajsız koşullarda statik yük uygulanmıştır. İkinci grup deneylerde (B grubu deneyler) beş kademe tekrarlı yükleme, ilk dört tekrarlı yüklemeden sonra drenaj ve son tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin vermeden drenajsız koşullarda statik yük uygulanmıştır. Son grup deneylerde tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayısı 1-5 arasında değişmiş, her tekrarlı yüklemeden sonra drenaja izin verilmiştir. Drenajdan sonra numunelere drenajsız statik yük uygulanmıştır. Deneyler N=50, 60, 80, 90, 100 ve 120 olmak üzere altı farklı çevrim sayısı ve τ/τ_f=0.55, 0.60, 0.625, 0.65, 0.675 ve 0.70 olmak üzere yine altı farklı gerilme genliğinde yapılmıştır. Deney verilerinden, zeminin hem bir kez hem de beş kez tekrarlı yüklemeye maruz kalması durumları için çevrim sayısı ve gerilme genliğine bağlı olarak boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, hacimsel deformasyonların değişimi incelenmiştir. Son olarak ise beş kez tekrarlı yükleme uygulanan numunelerde tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetinin deney değişkenlerine bağlı değişimleri incelenmiştir.

Yapılan deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir:

1. Normal konsolide killerde drenaj süreçleri ile birlikte uygulanan tekrarlı yükler altında giderek daha az boşluk suyu basınçları oluşmakta ve oluşan boşluk suyu basınçları sönümlenirken meydana gelen oturmalarda her kademede biraz daha azalmaktadır. Diğer bir deyişle numune stabilize olmaktadır.
2. Tekrarlı gerilme genliğinin artmasıyla daha fazla boşluk suyu basınçları oluşmakta ve bu basınçlar sönümlenirken oturmalarında daha fazla olduğu görülmektedir.
3. Çevrim sayısı da tekrarlı yükler altındaki zeminin davranışını etkileyen önemli değişkenlerdendir. Tekrarlı gerilme genliğinde olduğu gibi çevrim sayısının artmasıyla meydana gelen boşluk suyu basınçlarında ve dolayısıyla tekrarlı yük

sonrası drenaj süreçlerinde konsolidasyon oturmalarında artış meydana gelmektedir.

4. Tekrarlı yükler altında zeminde meydana gelen oturmalar, zeminin daha sonra maruz kalacağı yüklere karşı konsolidasyon davranışını değiştirmekte, sıkışma indisi tekrarlı gerilme genliğine bağlı olarak azalmaktadır.

5. Killerde tekrarlı kayma gerilmeleri etkisinde oluşan kayma deformasyonları aynı boşluk suyu basınçlarında olduğu gibi her kademede bir önceki yüklemede oluşan kayma deformasyonlarına göre azalma meydana gelmekte, gerilme-deformasyon eğrisinin eğimi artmaktadır. Tekrarlı gerilme genliği ve çevrim sayısı kayma deformasyonlarının büyüklüğünü belirleyen önemli değişkenlerdir.

6. Tekrarlı yatay kayma gerilmelerinden sonra uygulanan drenaj esnasında zemindeki oturmalar, normal konsolide zeminin drenajsız kayma mukavemetinde çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak A grubu deneylerde %12.1-%46.4 arasında değişen oranlarda artışa neden olmuştur. B grubu deneylerde ise düzenli bir davranış görülememiş bazı numunelerde drenajsız kayma mukavemetinde artış bazılarında küçük düşüşler gözlenmiştir. Bu grup deneylerde drenajsız kayma mukavemetindeki değişim aralığı -%7.1 ile +%13.0'tür.

7. Tekrarlı yükleme ve drenaj çevrim sayısının drenajsız kayma mukavemetine etkisinin incelendiği deneylerde de bu çevrimin uygulanma sayısına bağlı olarak düzenli bir artış görülmüştür. Drenajsız kayma mukavemetinin değişimi %7.4-%35.6 aralığında gerçekleşmiştir.

Elde edilen verilerle her davranış için Statistica adlı bilgisayar programı kullanılarak regresyon analizi yapılmış, değişen parametrelere bağlı basit bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntılar aşağıda verilmiştir:

1. Boşluk suyu basıncının sırasıyla bir kez ve beş kez tekrarlı yükleme altındaki davranışı, gerilme genliği, çevrim sayısı ve tekrarlı yükleme çevrim sayısına bağlı olarak aşağıdaki bağıntılara uygun olmaktadır. Korelasyon katsayıları ise tek kademe yüklemede 0.9877, beş kademe yüklemede ise 0.9836 gibi çok yüksek olmuştur. Burada; Δu tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk suyu basıncı, σ'_{vc} düşey efektif gerilme, N numuneye uygulanan çevrim sayısı, τ/τ_f tekrarlı gerilme oranı ve n tekrarlı yükleme kademe sayısıdır.

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} = 0.054 \times (\log 10N)^{6.220} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{4.733} \qquad (5.1)$$

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} = 0.128 + 0.0113 \times (n)^{-0.581} \times (\log 10N)^{9.695} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{7.409} \qquad (5.2)$$

2. Kayma deformasyonları için yapılan regresyon analizinde yine çevrim sayısı ve gerilme genliğine bağlı değişim aşağıdaki gibi olmaktadır. Korelasyon katsayısı ise 0.9861'dir. Burada; γ_{max} tekrarlı yükleme esnasında oluşan maksimum kayma deformasyonudur.

$$\gamma_{max} = 1.911 \times (\log 10N)^{3.374} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{5.115} \qquad (5.3)$$

3. İlk kademe tekrarlı yüklemeden kaynaklanan oturmaların hesabı için çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak yapılan regresyon analizinden aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Korelasyon katsayısı R=0.9974 olarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_{vr} = 0.054 \times (\log 10N)^{7.421} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{4.397} \quad (5.4)$$

4. Çok sayıda tekrarlı yükleme drenaj çevriminin etkisinde kalan temel zeminlerinin oturma problemi sürekli tekrarlı yüke maruz yapılar için önemlidir. Bu amaçla farklı çevrim sayısı ve gerilme oranlarında beş kademe tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi uygulanarak elde edilen deney verileri kullanılarak daha genel bir bağıntı elde etmek amacıyla diğer bir regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan analizden aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Regresyon katsayısı ise 0.9852 olmuştur. Burada ε_{vr} herhangi bir kademe tekrarlı yüklemeden dolayı oluşan hacimsel deformasyonu, n ise tekrarlı yüklemenin kademe sayısını göstermektedir.

$$\varepsilon_{vr} = -0.0067 + 0.061 \times (n)^{-0.824} \times (\log 10N)^{7.197} \times \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{4.234} \qquad (5.5)$$

5. Çevrim sayısı, tekrarlı gerilme oranı ve beş kademe tekrarlı yükleme drenaj çevrimleri esnasında meydana gelen toplam hacimsel deformasyonlara bağlı olarak yapılan regresyon analizinden drenajsız kayma mukavemeti oranı için aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Korelasyon katsayısı ise R=0.99 olmuştur. Bu denklemde $\varepsilon_{T,}$ beş kademede meydana gelen toplam hacimsel deformasyondur

$$\frac{\tau_{su}}{\tau_f} = 0.653 \times \frac{(\log 10N)^{2.102} \times (\frac{\tau}{\tau_f})^{1.191}}{(\varepsilon_T)^{0.157}} \qquad (5.6)$$

6. Farklı sayıda tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimi uygulanan deneylerden elde edilen değerlerle yapılan regresyon analizinden ise aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Deneylerde 1~5 kez arasında uygulanan tekrarlı yükleme-drenaj çevrimi ile tek çevrim sayısı (N=100) ve gerilme oranı (τ/τ_f=0.65) kullanılması nedeniyle veri sayısı azdır. Korelasyon katsayısı 0.99 olarak belirlenmiştir. Bu denklemde ε_T deneylerde drenajsız statik kesmeden önce tekrarlı yükleme drenaj çevrimlerinde meydana gelen toplam hacimsel deformasyon, n ise tekrarlı yükleme drenaj çevriminin sayısını göstermektedir.

$$\frac{\tau_{su}}{\tau_f} = 1.527 \times \frac{n^{0.640}}{(\varepsilon_T)^{0.865}} \qquad (5.7)$$

Çalışmadan elde edilen veriler tekrarlı yüklemeye maruz temellerin dizaynında kullanılabilir. Bunlar;

- Açık deniz platformları dışındaki açık deniz yapıları (dalgakıranlar, rıhtımlar, dalga tutucu bariyerler vs),
- Açık deniz ve karada deprem yüklerine maruz yapılar (binalar, platformlar, boru hatları, kazılar, şev stabilitesi vs.),
- Rüzgar yüküne maruz kuleler, bacalar ve diğer yüksek yapıları,
- Makine temelleri,
- Taşıt yüklerine maruz karayolu ve demiryolları.

Çalışmanın birincil amacı, literatürde daha az karşılaşılan kohezyonlu zeminlerin çok kademeli tekrarlı yükleme ve drenaj uygulaması altında özellikle hacimsel deformasyon ve tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemeti davranışının belirlenmesi olmuştur. Ayrıca bu davranışlara deney değişkenlerinin etkisi ve tekrarlı yüklemeden kaynaklanan boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonu davranışları da çalışmada incelenmiştir.

Deneylerden elde edilen davranış biçimleri literatürde görülen davranışlara uygun olmuştur. Bununla beraber regresyon analizinden elde edilen bağıntıların, çok yüksek korelasyon katsayıları ile elde edilmesine rağmen fazla güvenilir olduğu söylenemez. Çünkü denklemlerin elde edildiği veri sayısı oldukça azdır. Ayrıca deneylerde

kullanılan değişkenlerin azlığı, zeminin kil yüzdesinin ve plastisite özelliklerinin sabit olması, tek zemin üzerinde, tek efektif düşey gerilme, frekans ve aşırı konsolidasyon oranında deney yapılması, çevrim sayılarının ve gerilme oranlarının dar aralıkta olması, değişik deney sistemleri kullanılmaması, yükün sadece çift yönlü uygulanması, sinüzoidal dalga dışında yükleme yapılmaması gibi faktörler bağıntıların güvenilirlik derecesini düşürmektedir.

Yukarıda bahsedilen ve bağıntıların güvenilirlik derecesini düşüren nedenlerden dolayı daha kapsamlı, disiplinli bir çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı tekrarlı yükler için o yüklerin frekans, dalga tipi gibi davranış özellikleri dikkate alınarak deneyler yapılmalıdır. Örneğin depremler 5 Hz frekansa sahip büyük gerilmeler meydana getirirken açık deniz yapıları altındaki zeminler daha büyük periyoda sahip tekrarlı yüklere maruz kalır ve bir çevrim genellikle birkaç saniye sürer. Birçok kez tekrarlı yükleme ve drenaja maruz kalan zeminlerin davranışı, statik yüklemeden önce drenaja izin verilmeyen durum için özellikle incelenmelidir.

Çalışma sonunda elde edilen deney sonuçları ve bağıntılar kısıtlı olmasına rağmen, belli bir çevrim sayısı ve gerilme seviyesinde zeminlerde oluşması muhtemel boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, hacimsel deformasyonlar ile tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetlerinin yaklaşık olarak tahmin edilebilmesine yardımcı olabilecektir.

KAYNAKLAR

Airey, D., Budhu, M. and Wood, D., 1985. Some aspects of the behaviour of soils in simple shear, *Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering Stress Strain Modeling of Soils*, Eds. Banerjee, P.K. and Butterfield, R., **6**, 185-213, Elsevier, London.

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

Andersen, K.H., 1988. Properties of soft clay under static and cyclic loading, Invited lecture, *Proc. Int. Conf. Engrg. Problems of Reg. Soils*, Beijing, China, 7-26, Edited by Chinese Instution of Soil Mech. And Found. Engrg.

Andersen, K.H., 1991. Displacements of structures subjected to combined static and cyclic loads, *Proc. Int. Conf. On Geotechnical Engineering for Coastal Development, GEO-Coast' 91*, Yokohoma, Japan, **1**, Edited by Port and Harbour Research Institute, Japan, September 3-6, 537-542.

Andersen, K.H., 1992. Foundation design of offshore gravity structures*, NGI Publication*, **185**, 1-52.

Andersen, K.H., Brown, S.F., Foss, J., Pool, J.H. and Rosenbrand, W.F., 1976. Effect of cyclic loading on clay behaviour, *Proc. Conf. Design and Construction of Offshore Structure*, Institution of Civil Engineers, London, October 27-28, **1**, 75-79.

Andersen, K.H., Hansteen, O.E., Höeg, K. and Prevost, J.H., 1978. Soil deformations due to cyclic loads on offshore structures, *Numerical Methods in Offshore Engineering*, Ed. By O.C. Zienkewicz, R.W. Lewis and K.G. Stagg, 413-452, Wiley and Sons, Chichester, England.

Andersen, K.H. and Höeg, K., 1992. Deformations of soils and displacements of structures subjected to combined static and cyclic loads, *NGI Publication*, **185**, 1-12.

Andersen, K.H., Dyvik, R., Lauritzsen, R., Heinen, D., Harvik, L. and Amundsen, T., 1989. Model tests of gravity platforms. II: interpretation, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **115** (11),1550-1568.

Andersen, K.H., Kleven, A. and Heinen, D., 1988. cyclic soil data for design of gravity structures, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **114** (5), 517-539.

Andersen, K.H. and Lauritzsen, R., 1988. Bearing capacity for foundations with cyclic loads, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **114** (5), 540-555.

Andersen, K.H., Pool, J.H, Brown, S.F. and Rosenbrend, W.F., 1980. Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **106** (GT5), 499-529.

Ansal, M.A. ve Erken, A., 1989. Undrained behaviour of clay under cyclic shear stresses, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **115** (7), 968-983.

Ansal, A.M., İyisan, R. ve Yıldırım, H., 2001. The cyclic behaviour of soils and effects of geotechnical factors in microzonation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **21**, 445-452.

Ansal, A.M. ve Tuncan, M., 1989. Consolidation in clays due to cyclic stresses, *Proc. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Jenerio, **1**, Balkema, Rotterdam, August 13-18, 3-6.

Akai, K., Kamon, M., Sano, I. and Soga, K., 1991. Long-term consolidation characteristic of diluvial clay in osaka bay, *Soils and Foundations*, **31**(4), 61-74.

Biscontin, G., 2001. Modeling the dynamic behaviour of lightly overconsolidated soil deposits on submerged slopes, *PhD Thesis*, Universtiy of California, Berkeley.

Brown, S.F., Andersen, K.H. and McElvaney, J., 1977. The effects of drainage on cyclic loading of clay, *Proceedings of the 9 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, July 1977, **2**, 195-200.

Bjerrum, L., 1973. Geotechnical problems involved in foundations of structures in north sea, *Geotechnique*, **23** (3), 319-358.

Bjerrum, L. and Landva, A., 1966. Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, **16** (1), 1-20.

Koutsoftas, D.C., 1978. Effects of cyclic loads on undrained strength of two marine clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **104** (GT5), 609-620.

Diaz-Rodriguez, J.A. and Leyte-Guerrero, F., 1989. Consolidation of Mexico City clay under repeated loading, *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Jenerio, **1**, Balkema, Rotterdam, August 13-18, 33-37.

Cooling, L.F. and Gibson, R.E., 1955. Settlement studies on structures in England, *Proc. Conf. Correlation between Calculated and Observed Stresses and Displacements, ICE*, September 1955, 1-297.

Dyvik, R., Andersen, K.H., Madshus, C. and Amundsen, T., 1989. Model tests of gravity platforms. I: description, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **115** (11), 1532-1549.

Eide, O. and Andersen, K.H., 1984. Foundation engineering for gravity structures in the northern north sea, *NGI Publication*, **154**, 1-48.

Finn, L., Pickering, D. and Bransby, P., 1971. Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions*, **97** (SM4), 639-659.

France, J.W. and Sangrey, D.A., 1977. Effects of drainage in repeated loading, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **103** (GT7), 769-785.

Franke, E., Kiekbusch, M. and Schuppener, B., 1979. A new direct simple shear device, *Geotechnical Testing Journal*, **2**(4), 190-199.

Fujiwara, H., Ue, S. and Yasuhara, K., 1987. Secondary compression of clay under repeated loading, *Soils and Foundations*, **27** (2), 21-30.

Fujiwara, H., Yamanouchi, T., Yasuhara, K. and Ue, S., 1985. Consolidation of alluvial clay under repeated loading, *Soils and Foundations*, **25** (3), 19-30.

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

Hirao, K. and Yasuhara, K., 1991. Cyclic strength of underconsolidated clay, *Soils and Foundations*, **31** (4), 180-186.

Hyde, A.F.L., Yasuhara, K. and Hirao, K., 1993. Stability criteria for marine clay under one-way cyclic loading, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE,* **119**, 1771-1789.

Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Yamamoto, Y. and Fuji, T., 1999. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, **39**(2), 45-58.

Hyodo, M., Yasuhara, K. and Hirao, K., 1992. Prediction of clay behaviour in undrained and partially drained cyclic triaxial tests, *Soils and Foundations*, **32** (4), 117-127.

Hyodo, M., Yamamoto, Y. and Sugiyama, M., 1993. Undrained cyclic shear behaviour of clay with initial static shear stress, *Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Bath, UK, September 30, 299-313,.

Hyodo, M., Yasuhara, K. and Murata, H., 1987. Traffic-induced pore pressure and deformation of soft clay deposit beneath embankment, *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Mexico City, Mexico, August 13-14, 231-237.

Hyodo, M., Yasuhara, K., Murata, H. and Hirao, K., 1988. Behaviour of soft clay deposit subjected to long-term cyclic shear stresses, Technology reports of the Yamaguchi University, **4** (2), 171-181.

Hyodo, M., Yasuhara, K. and Murata, H., 1988. Earthquake induced settlements in clays, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering,* Tokyo-Kyoto, Japan, August 2-9, **3**, 89-94.

Hyodo, M. and Yasuhara, K., 1988. Analytical procedure for evaluating pore-water pressure and deformation of saturated clay groung subjected to traffic loads, *Proceedings of the ixth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Innsbruck, April 11-15, 653-658.

Kjellman, W., 1955. Testing the shear strength of clay in Sweden, *Geotechnique*, **2**(3), 225-235.

Kokusho, T., Yoshida, Y. and Esashi, Y., 1982. Dynamic properties of soft clay for wide strain range, *Soils and Foundations*, **22** (4), 1-18.

Koutsoftas, D.C., 1978. Effect of cyclic loads on undrained strength of two marine clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **104** (GT5), 609-620.

Koutsoftas, D.C and Fischer J.A., 1980. Dynamic properties of two marine clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **106** (GT6), 645-657.

Kutara, K., Miki, H. and Manoshita, S., 1980. Settlement of low bank highway on soft ground and its countermeasures, *Civil Eng. Journal, PWRI*, **22** (3), 13-17.

Lacasse, S., Dyvik, R. and Höeg, K., 1988. Discussion on the behaviour of normally consolidated clay as observed in undrained direct shear tests by wroth (1987), *Geotechnique*, **38** (1), 144-146.

Ladd, C., 1991. Stability evaluation during staged construction, *Journal of Geotechnical Engineering*, **117** (4), 540-615.

Lee, K. L. and Focht, J.A., 1976. Strength of clay subjected to cyclic loading, *Marine Geotechnology*, **1** (3), 165-185.

Lefebre, G. and LeBoeuf, D., 1987. Rate effects and cyclic loading of sensitive clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE,* **113** (5), 476-489.

Lucks, A., Christian, J., Brandow, G. and Höeg, K., 1972. Stress conditions in NGI simple shear test*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, **98** (SM1), 155-160.

Marr, W.A. and Christian, J.T., 1981. Permanent displacements due to cyclic wave loading, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **107** (GT8), 1129-1149.

Matasovic, N. and Vucetic, M., 1995. Generalized cyclic-degradation-pore pressure generation model for clays*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **121** (1), 33-42.

Matsui, T., Bahr, M.A. and Abe, N., 1992. Estimation of shear characteristics degradation and stress-strain relationship of saturated clays after cyclic loading, *Soils and Foundations*, **32** (1), 161-172.

Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T., 1980. Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **106**(GT10), 1101-1120.

O' Reilly, M.P. and Brown, S.F., 1991. Cyclic Loading in Geotechnical Engineering, Cyclic Loading of Soils: From Theory to Design, Eds. O' Reilly, M.P. and Brown, S.F., Blackie and Son Ltd., Bishopbriggs, Glasgow.

O' Reilly, M.P., Brown, S.F. and Overy, R.F., 1991. Cyclic loading of silty clay with drainage periods, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **117**(1), 354-362.

Özaydın, K. and Erguvanlı, A., 1980. The generation of pore pressures in clayey soils during earthquakes, *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, **3**, İstanbul, September 8-13, 326-330.

Poulos, H.G., De Ambrosis, L.P. and Davis, E.H., 1976. Method of calculating long-term creep settlements, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **102** (GT7), 787-804.

Prevost, J. and Höeg, K., 1976. Reanalysis of simple shear soil testing, *Canadian Geotechnical Journal*, **13** (4), 418-429

Proctor, D.C. and Khaffaf, J.H., 1984. Cyclic triaxial tests on remoulded clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **110** (10), 1432-1445.

Roscoe, K. H., 1953. An apparatus for the application of simple shear to soil samples, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Switzerland, August 1953, **1**, 186-191.

Roscoe, K. H. and Burland, J., 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay, *Engineering Plasticity*, 535-609, Eds. Hayman, J. and Leckie, F.A, Cambridge University Press.

Saada, A. and Townsend, F., 1981. State of the art: Laboratory strength testing of soils, *Laboratory Shear Strength of Soil*, Eds. Yong, R.N. and Townsend, F.C., 7-77, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, Pa.

Sangrey, D.A., Henkel, D.J. and Esring, M.I., 1969. The effective stress response of a saturated clay to repeated loading, *Canadian Geotechnical Journal*, **6** (3), 241-252.

Seed, H.B., 1968. Landslides during earthquakes due to liquefaction*, Proc. American Society of Civil Engineers,* **94** (SM5), 1053-1122.

Thiers, G.R. and Seed, H.B., 1969. Strength and stress-strain characteristics of clays subjected to seismic loading conditions, *American Society for Testing and Materials, ASTM,* STP 450, 3-56.

Tohno, I.S., Iwata, S. and Shamoto, Y., 1989. Land subsidence caused by repeated loading in one dimensional consolidation, *Proc. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Jenerio, August 13-18, **3**, 1819-1822.

Tamotsu, M., Bahr, M.A. and Abe, N., 1992. Estimation of shear characteristisc degradation and stress-strain relationsihp of saturated clays after cyclic loading, *Soils and Foundations*, **32** (1), 161-172.

Tamotsu, M., Ohara, H. and Ito, T., 1980. Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **106**(GT10), 1101-1120.

Vucetic, M. and Dobry, R., 1988. Degradation of marine clays under cyclic loading, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **114** (2), 133-149.

Yamanouchi, T. and Yasuhara, K.,1975. Settlement of clay subgrades after opening to traffic, *Proceedings of the 2nd Australia & New Zeland Conference on Geomechanics*, **1**, Brisbane, Australia, July 21-25, 115-120.

Yasuhara, K., 1994. Postcyclic undrained strength for cohesive soils, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120** (11), 1961-1979.

Yasuhara, K., 1995. Consolidation and settlement under cyclic loading, *Proceedings of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Hiroshima, Japan, May 10-12, 979-1001.

Yasuhara, K. and Andersen, K.H., 1989. Post-cyclic recompression settlement of clay, *Proc. 4th Int. Conf. Soil Dynamics and Earthquake Eng*., **1**, Mexico City, Mexico, October 1989, 159-167.

Yasuhara, K. and Andersen, K.H., 1991. Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading, *Soils and Foundations*, **31** (1), 83-94.

Yasuhara, K. and Andersen, K.H., 1989. Effect of cyclic loading on recompression of overconsolidated clay*, Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* **4**, Rio de Jenerio, August 13-18, 485-488, Balkema, Rotterdam.

Yasuhara, K., Hirao, K. and Aoto, H., 1980. A simplified strain-time relation for soils subjected to repeated loads, *Proceedings of the International Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, January 7-11, 791-800.

Yasuhara, K., Hirao, K. and Hyde, A.F.L., 1992. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay, *Soils and Foundations*, **32** (1), 100-116.

Yasuhara, K., Hirao, K. and Hyodo, M., 1988. Partial-drained behaviour of clay under cyclic loading, *Proceedings of 6th Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics*, Innsbruck, April 11-15, 659-664.

Yasuhara, K. and HydeE, A.F.L., 1997. Method for estimating postcyclic undrained secant modulus of clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **123** (3), 204-211.

Yasuhara, K., Hyodo, M., Konami, T., Hyde, A.F.L. and Hirao, K., 1991. Cyclic induced settlement in soft clays, *Proceedings of the Tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Florence, May 26-30, 887-890.

Yasuhara, K.H., Konami, T., Hyodo, M. and Hirao, K., 1991. Earthquake-induced settlement in soft grounds, *Proceedings of The Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, March 11-15, 365-370.

Yasuhara, K., Murakami, S., Song, B.W., Yokokawa, S and Hyde A.F.L., 1993. Postcyclic degradation of strength and stiffness for low plasticity silt, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **129**(8), 756-769.

Yasuhara, K., Yamanouchi, T. and Hirao, K., 1982. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay, *Soils and Foundations,* **22**(3), 77-91.

Yasuhara, K., Yamanouchi, T., Fujiwara, H., Aoto, H. and Hirao, K., 1983. Approximate prediction of soil deformation under drained-repeated loading*, Soils and Foundations*, **23** (2), 13-25.

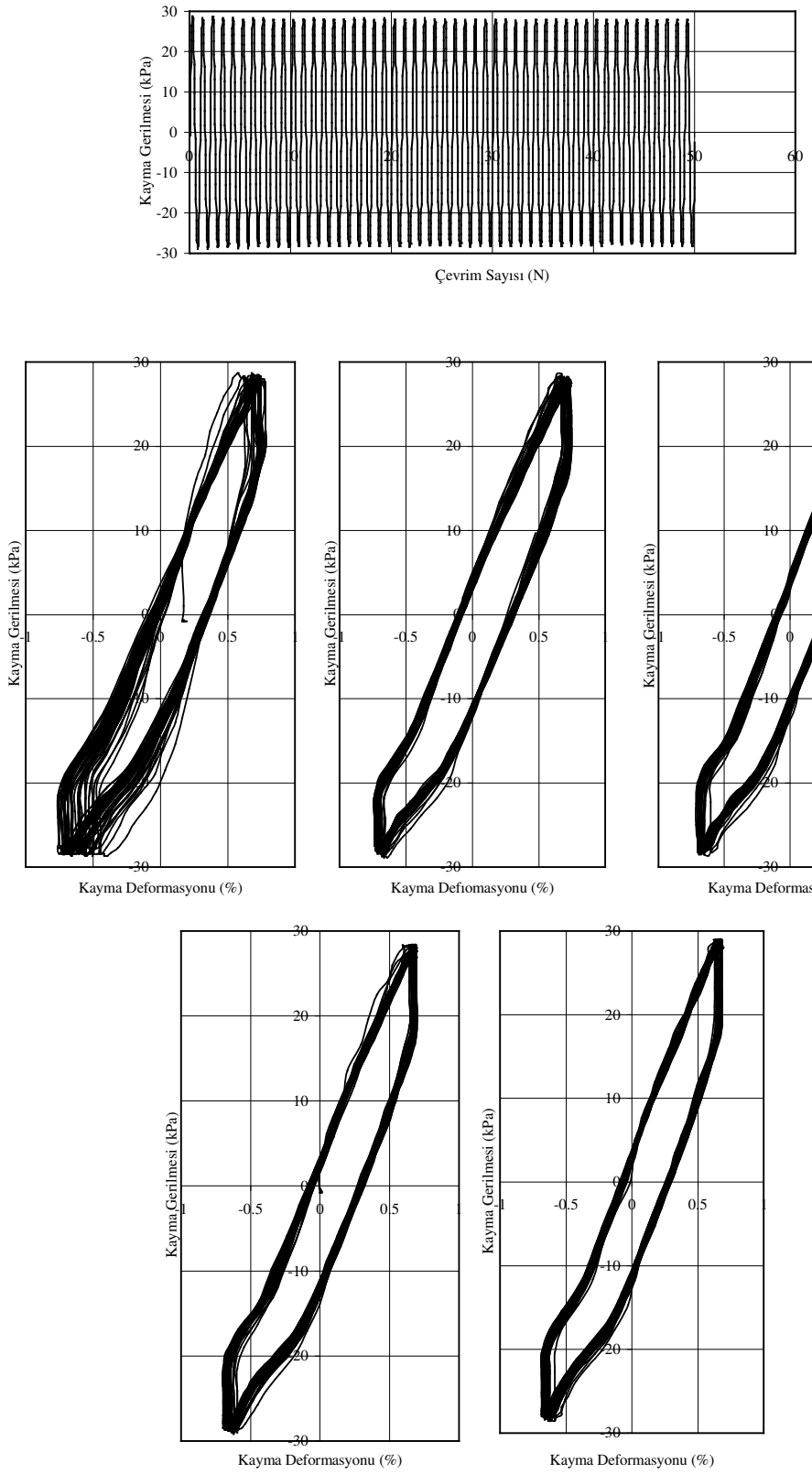
Yıldırım, H., 1987. Farklı tekrarlı yükleme biçimleri altında killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

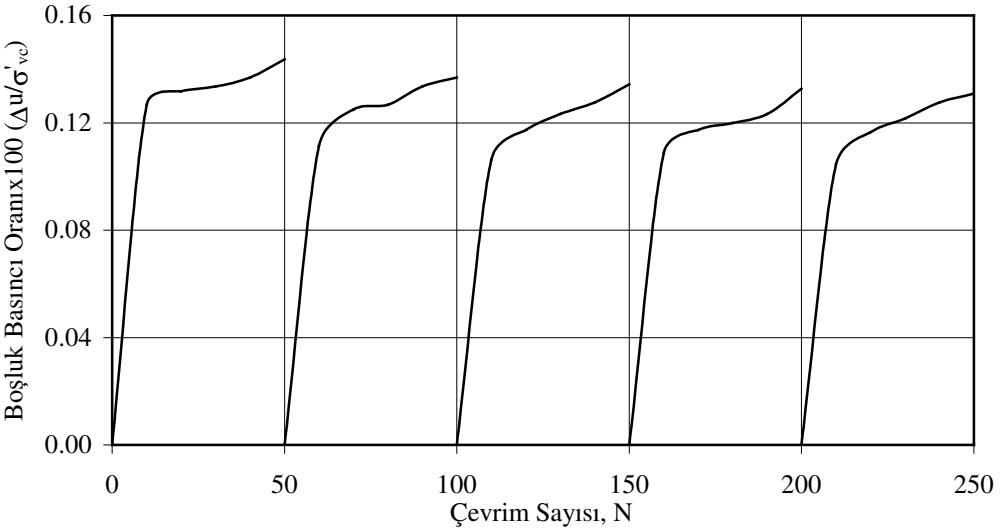
EK A. A GRUBU DENEY GRAFİKLERİ

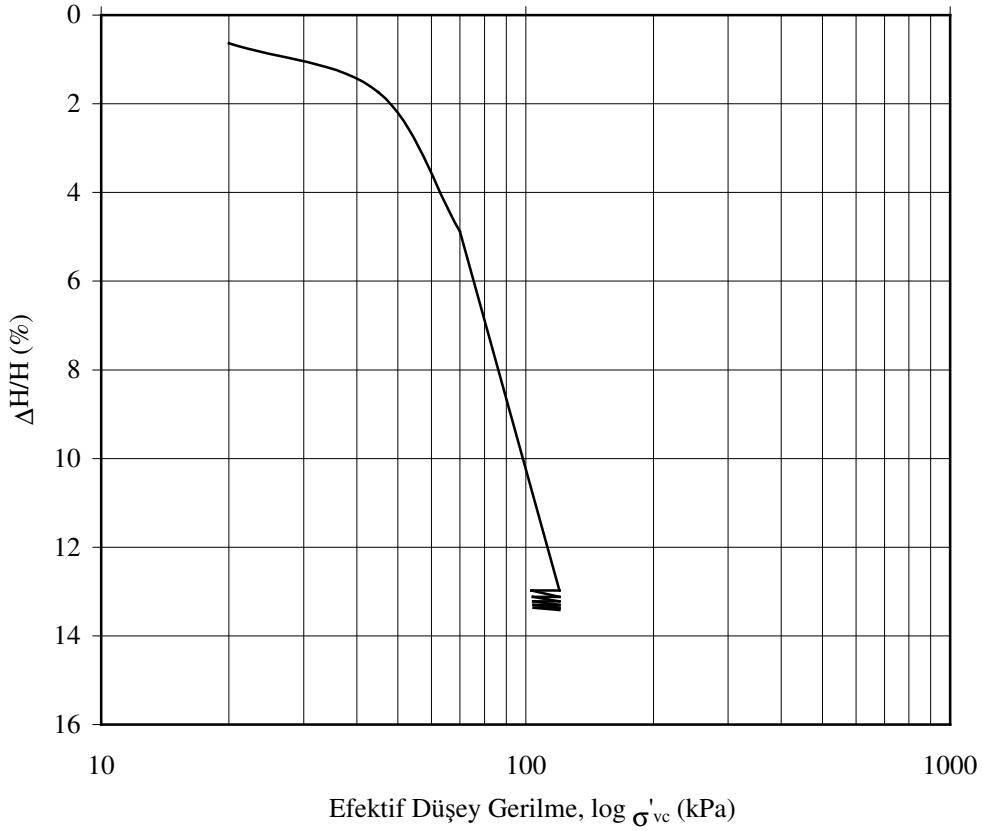
EK B. B BRUBU DENEY GRAFİKLERİ

EK A. A GRUBU DENEY GRAFİKLERİ

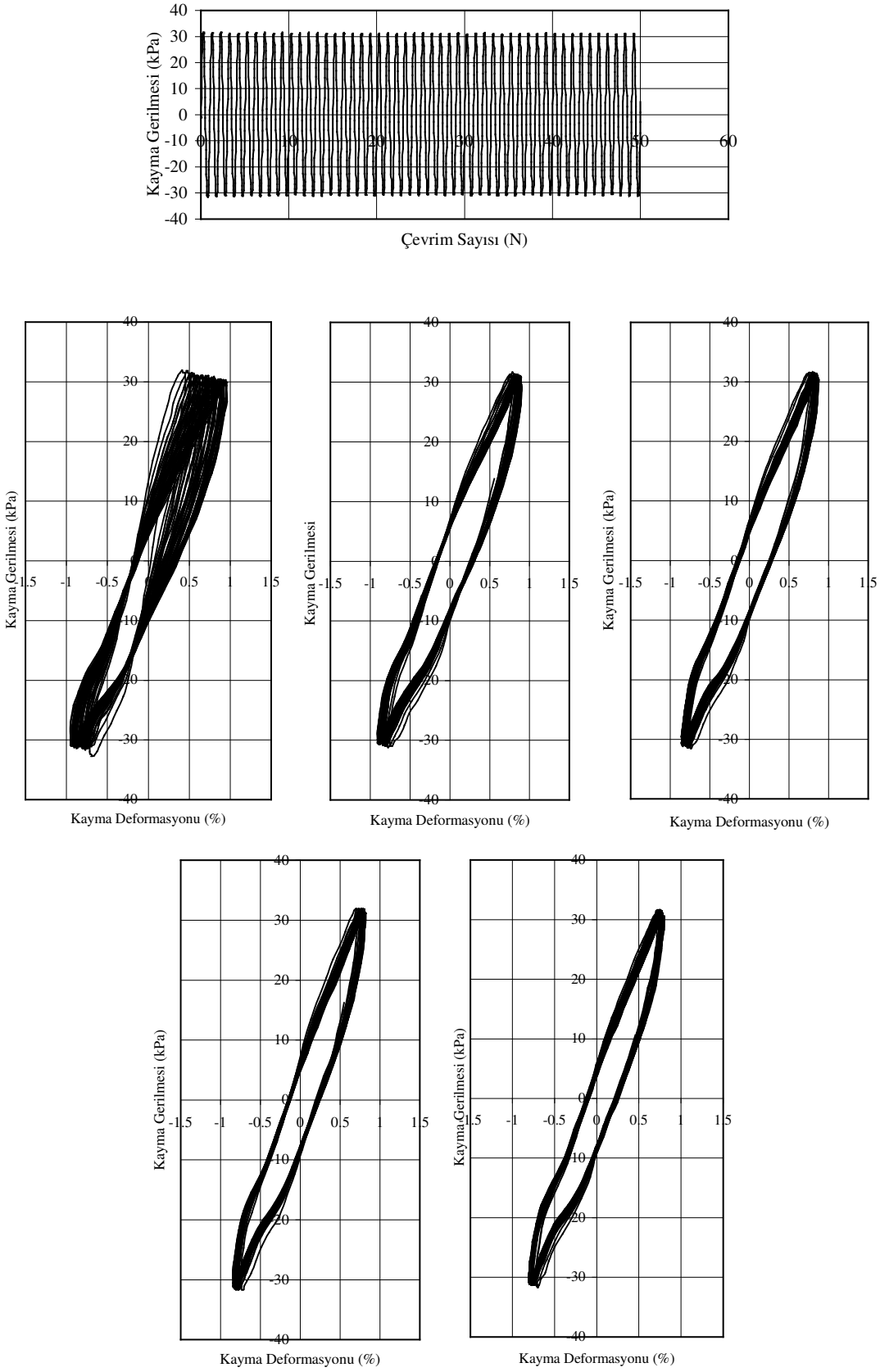


Şekil A1. A1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.55).

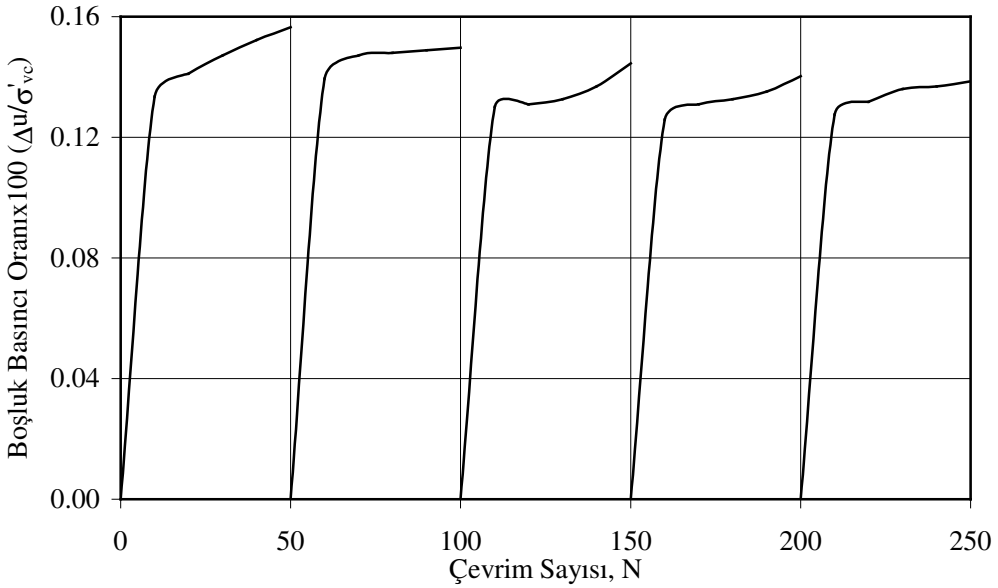


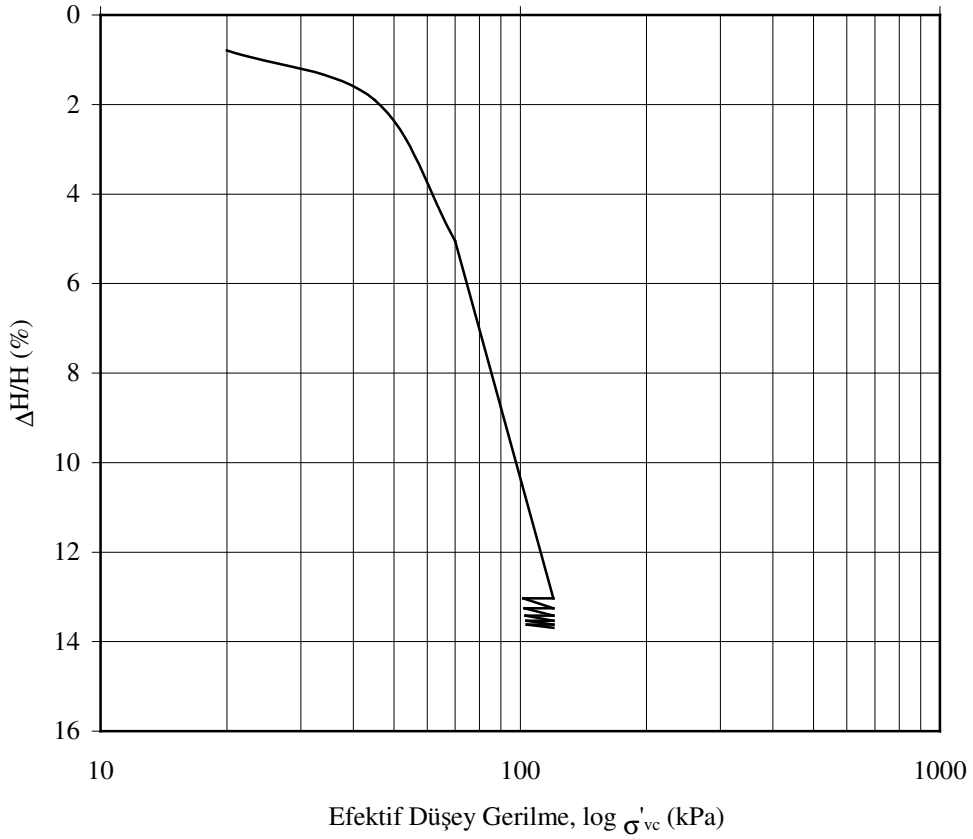


Şekil A2. A1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

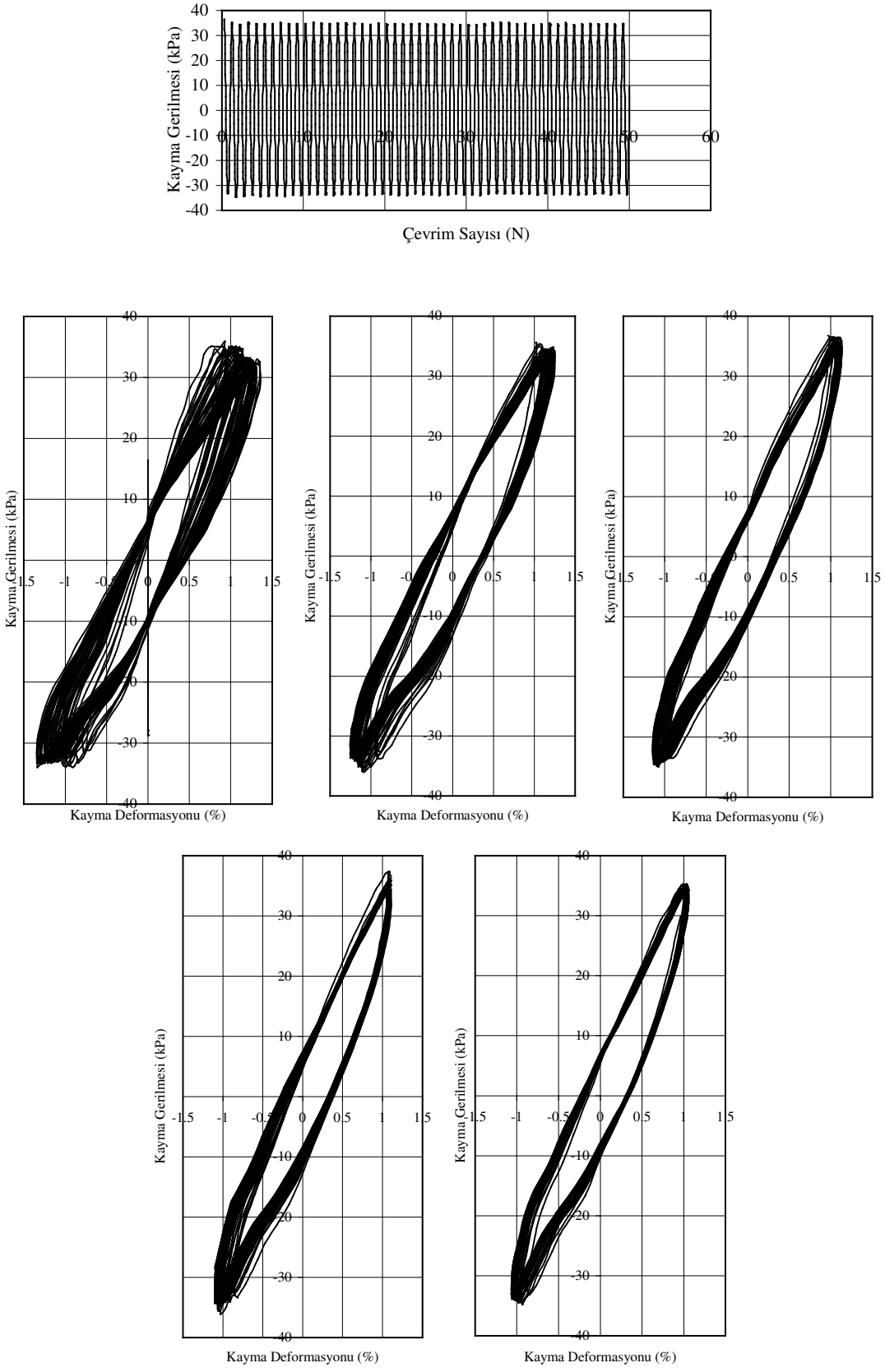


Şekil A3. A2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.60).

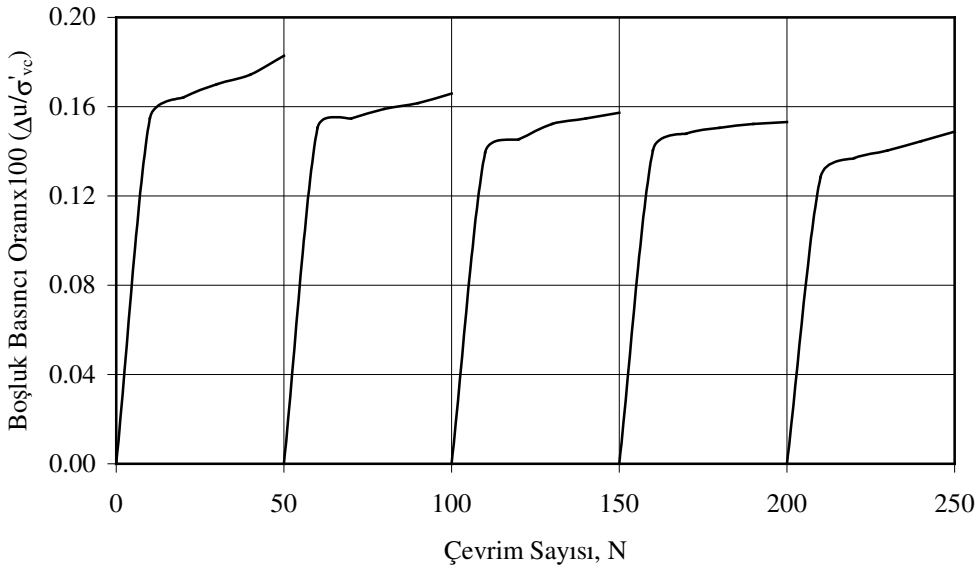


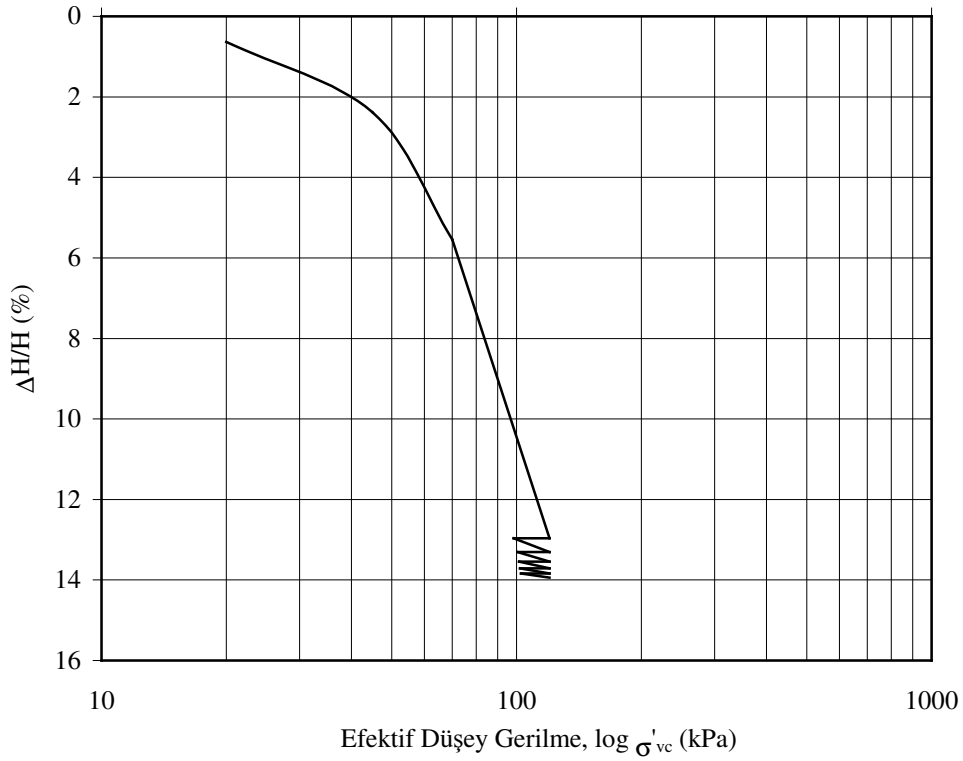


Şekil A4. A2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

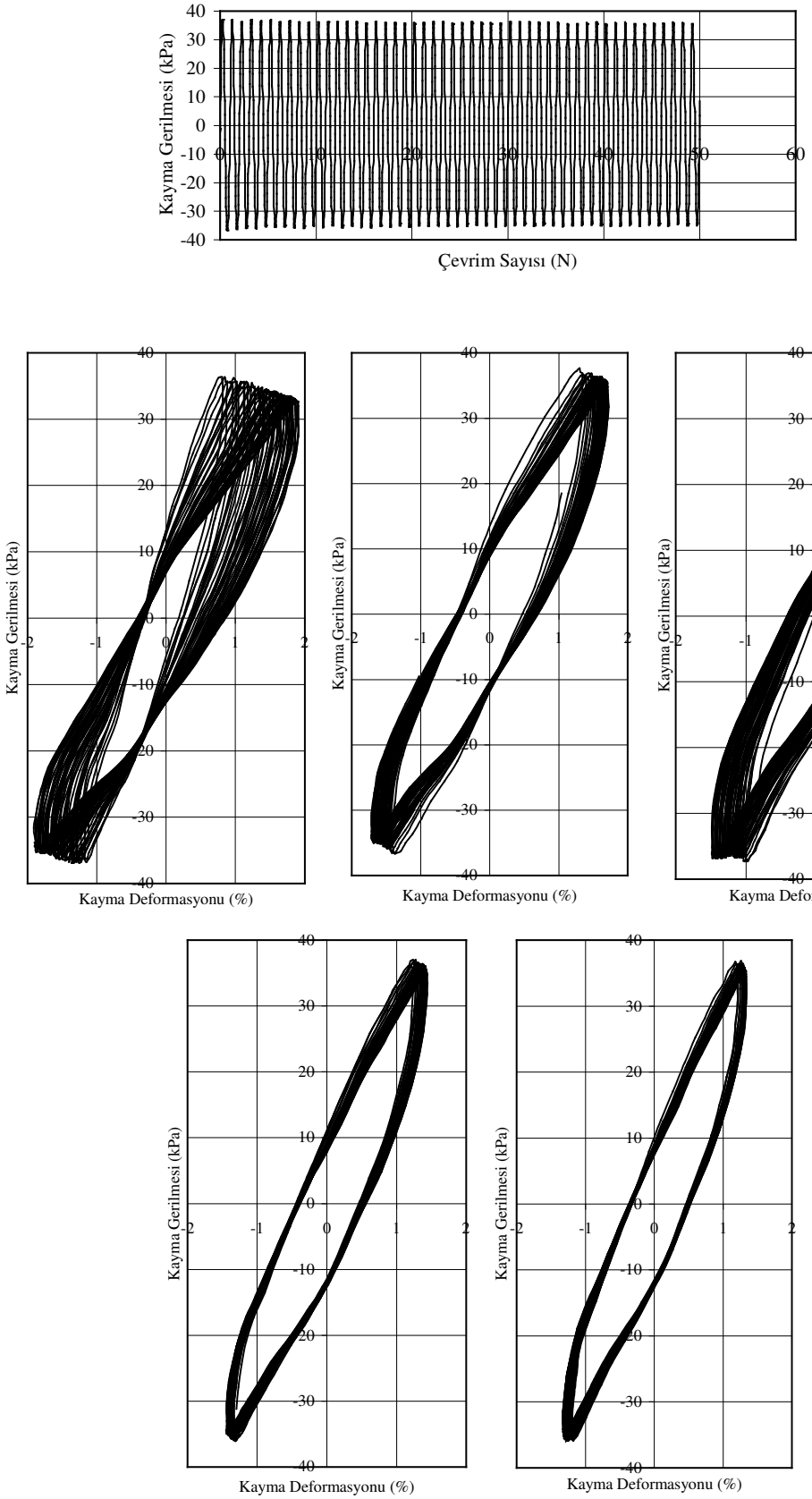


Şekil A5. A3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.65).

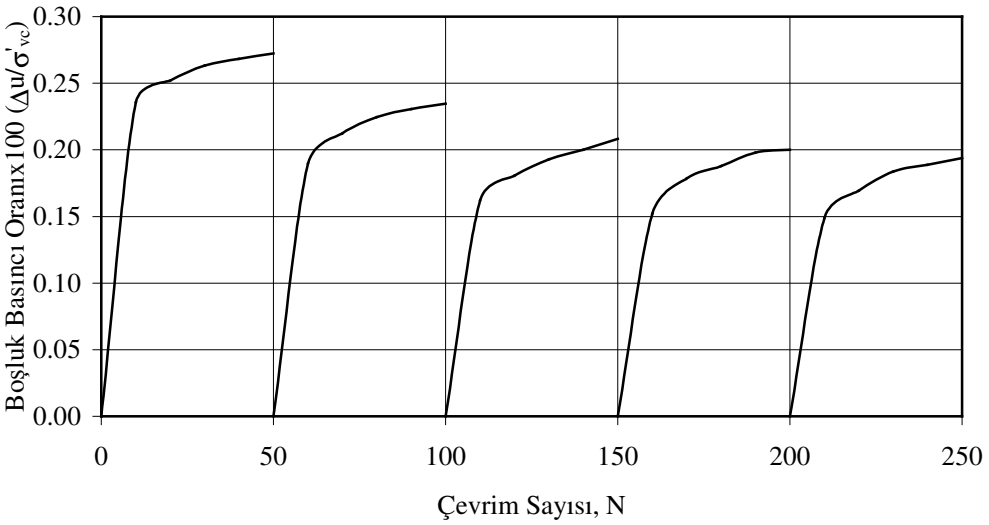


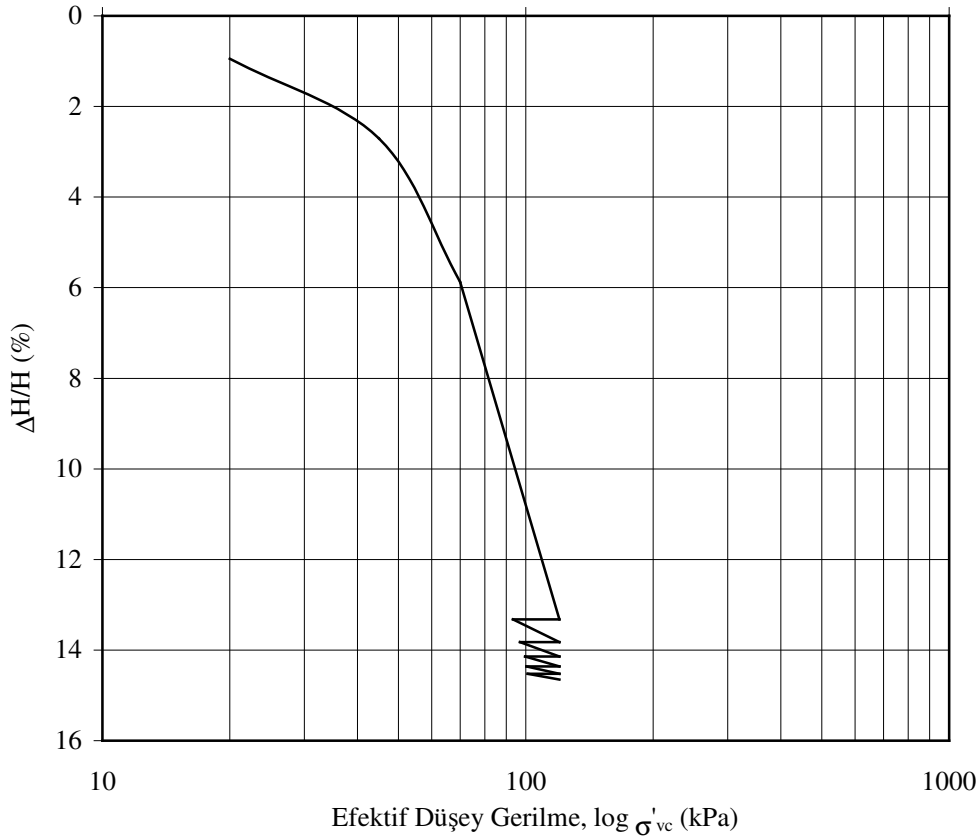


Şekil A6. A3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

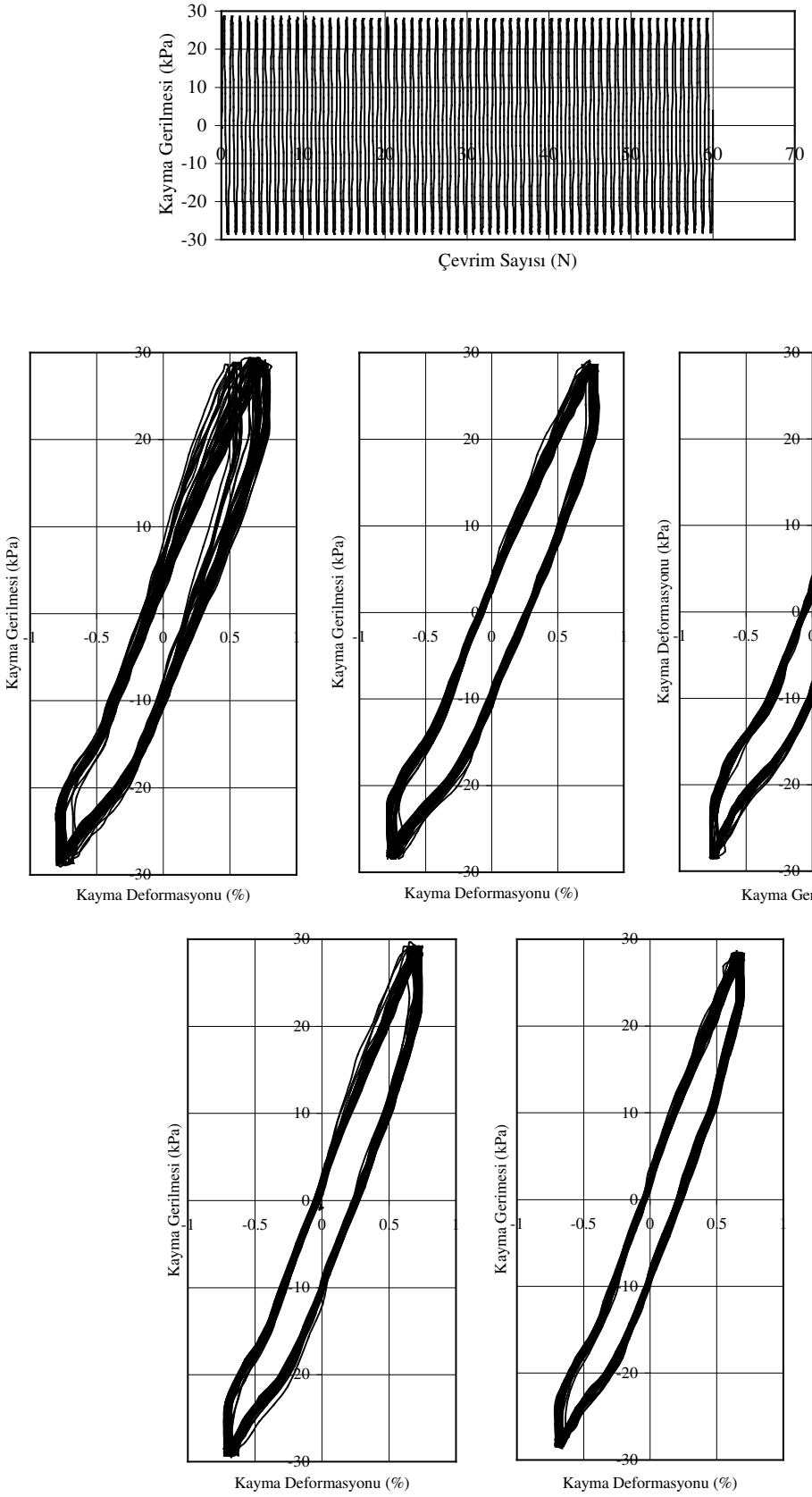


Şekil A7. A4 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.70).

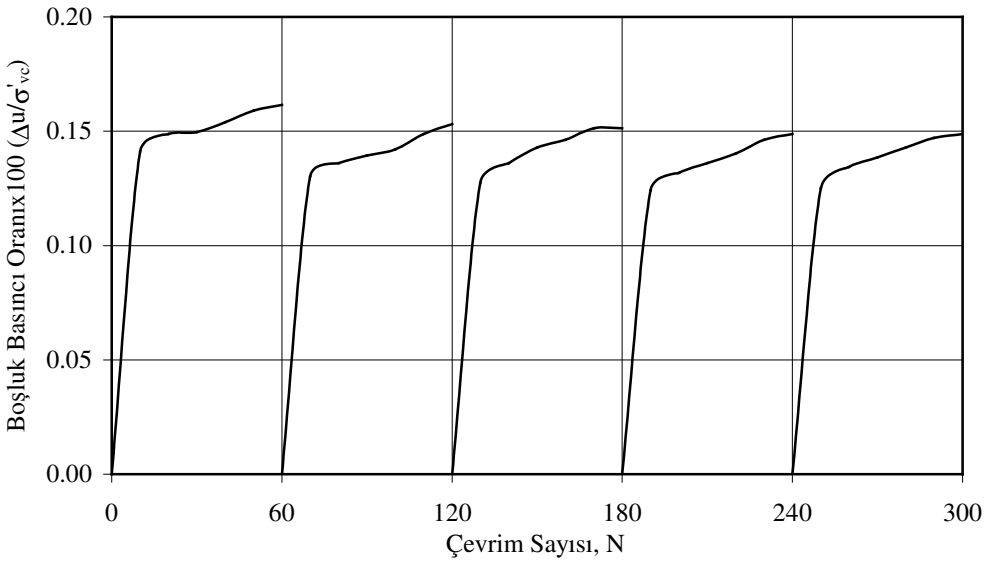


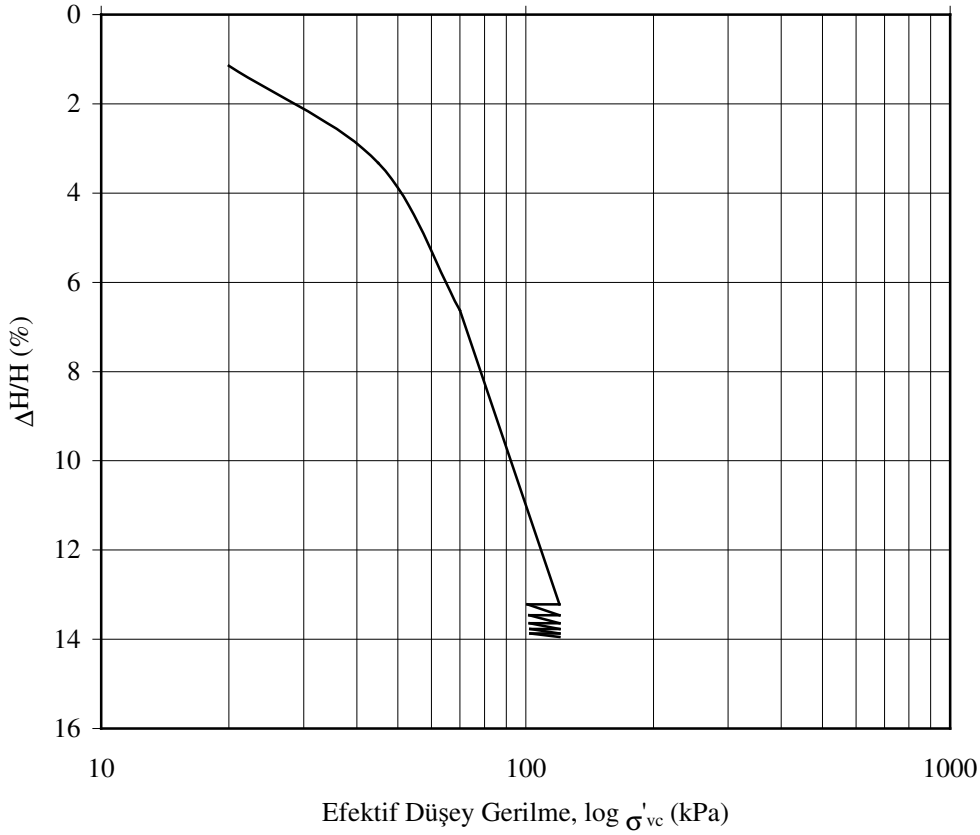


Şekil A8. A4 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

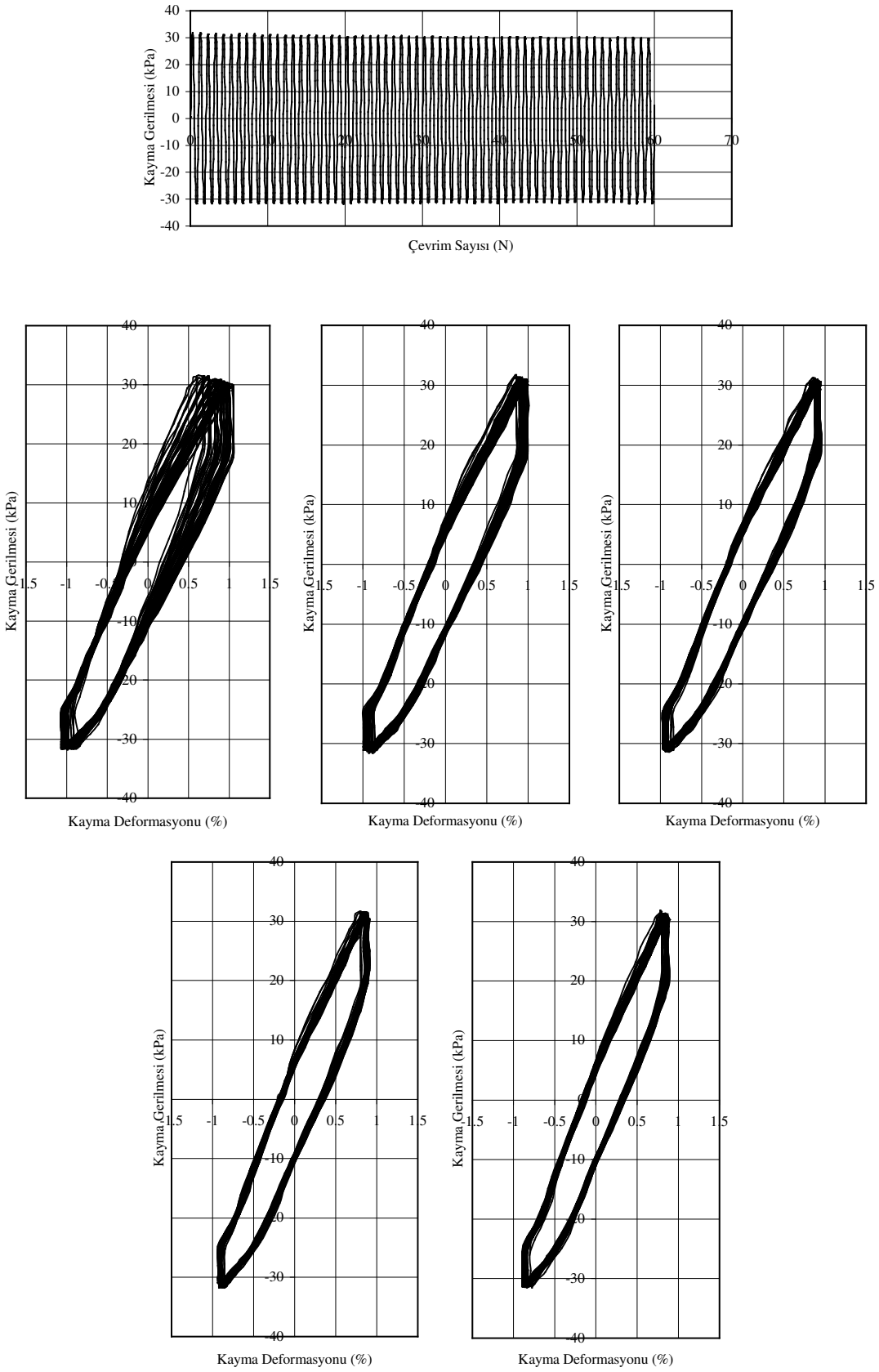


Şekil A9. A5 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.55).

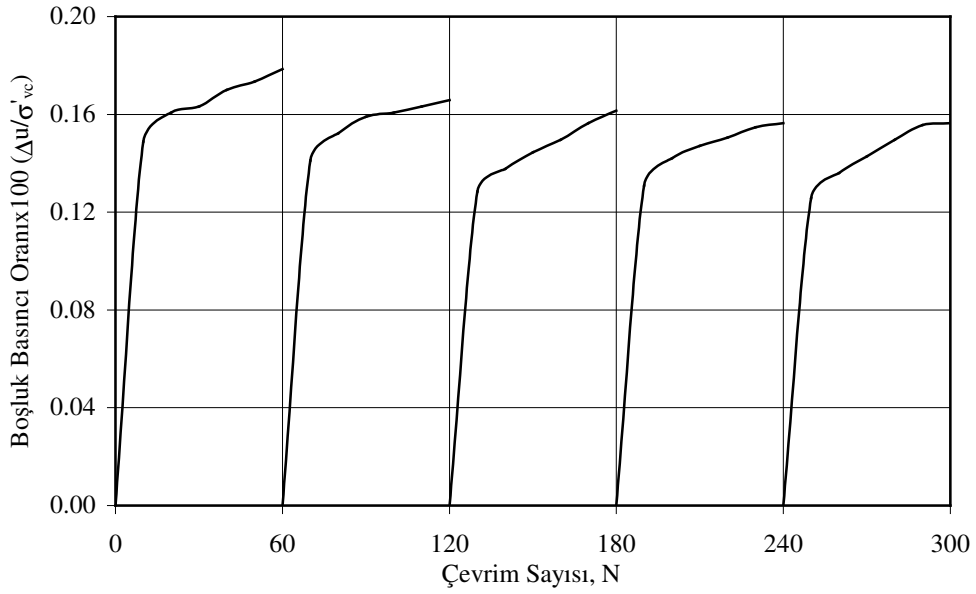


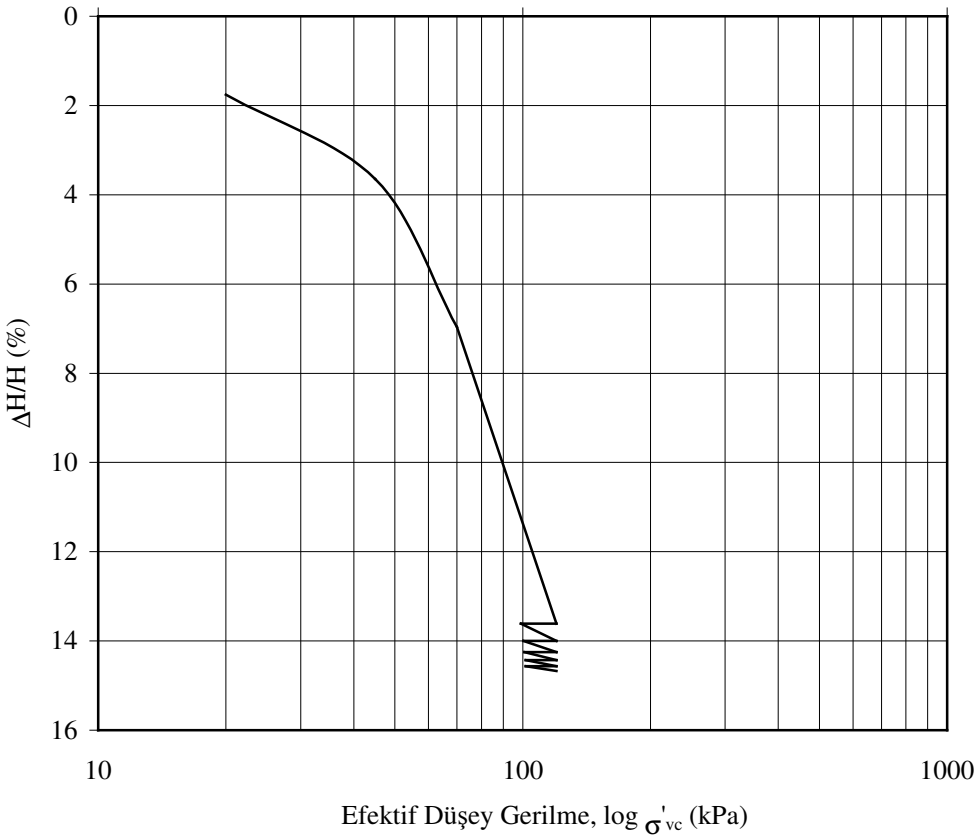


Şekil A10. A5 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

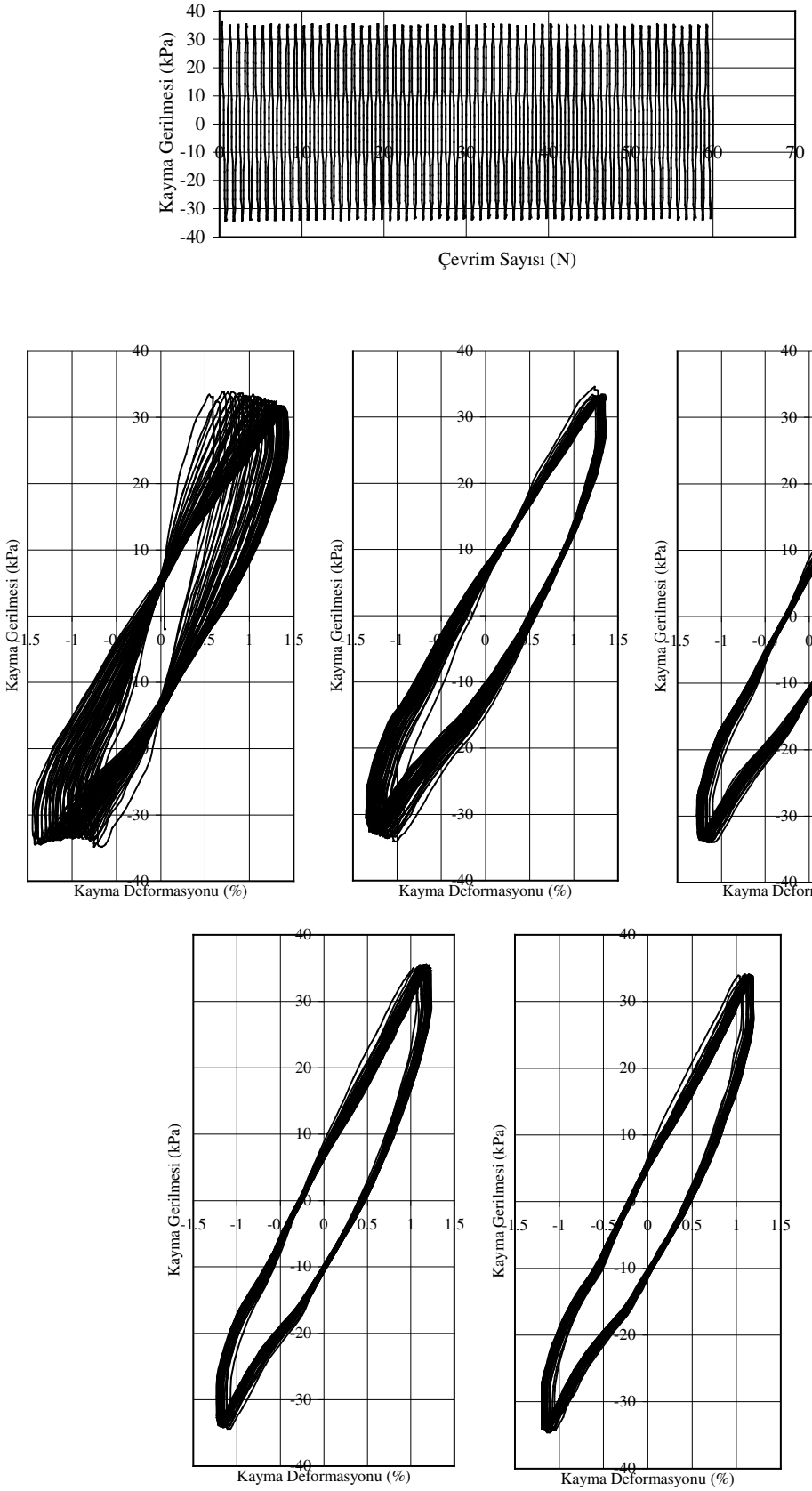


Şekil A11. A6 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.60).

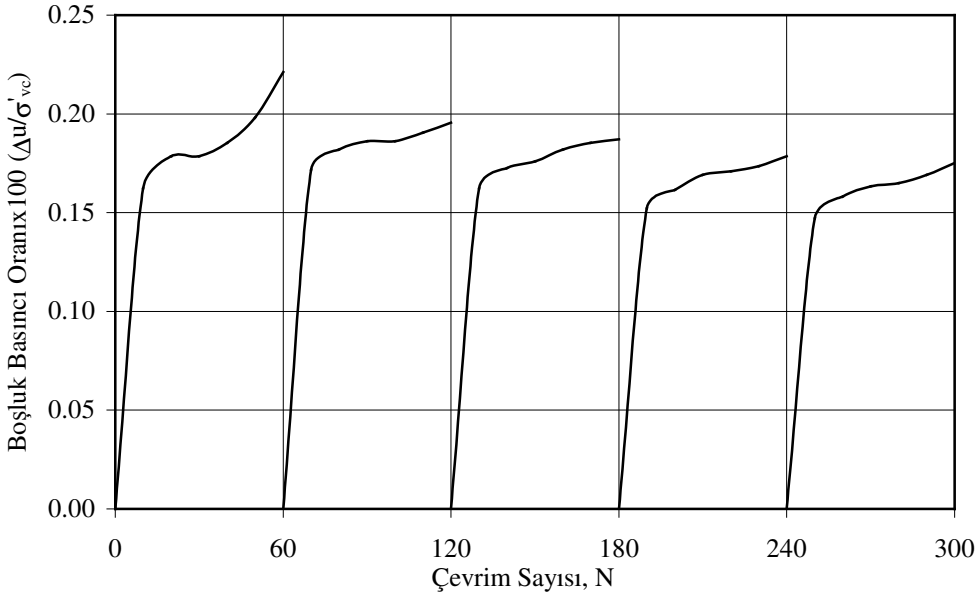


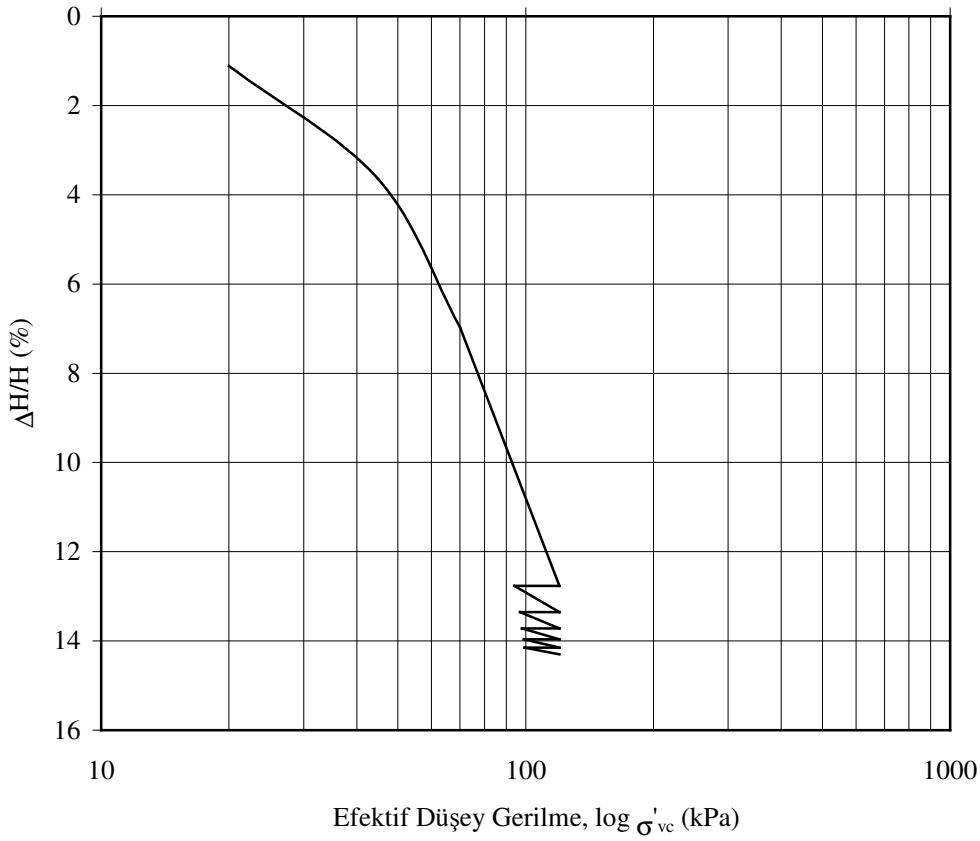


Şekil A12. A6 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

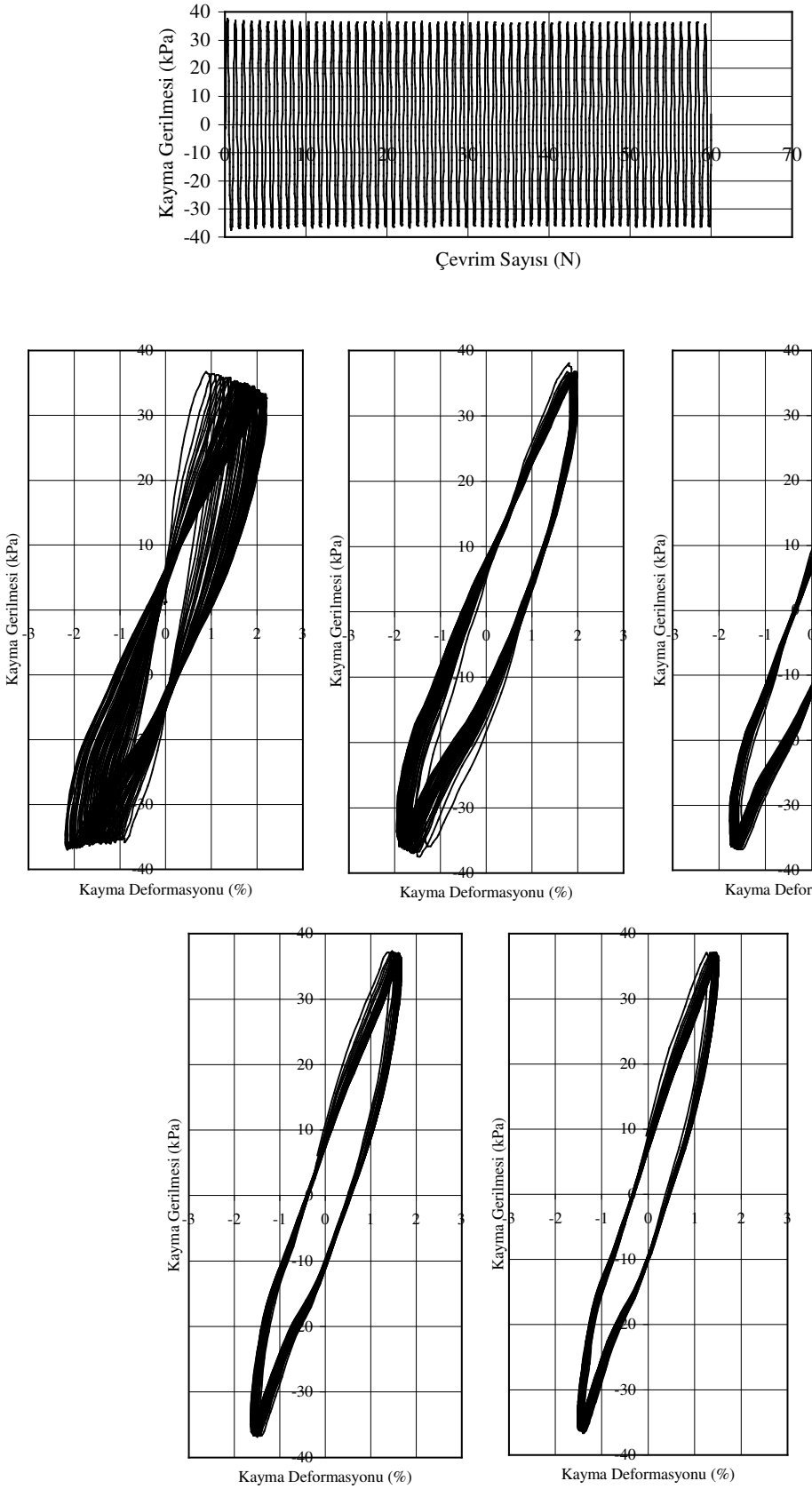


Şekil A13. A7 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.65).

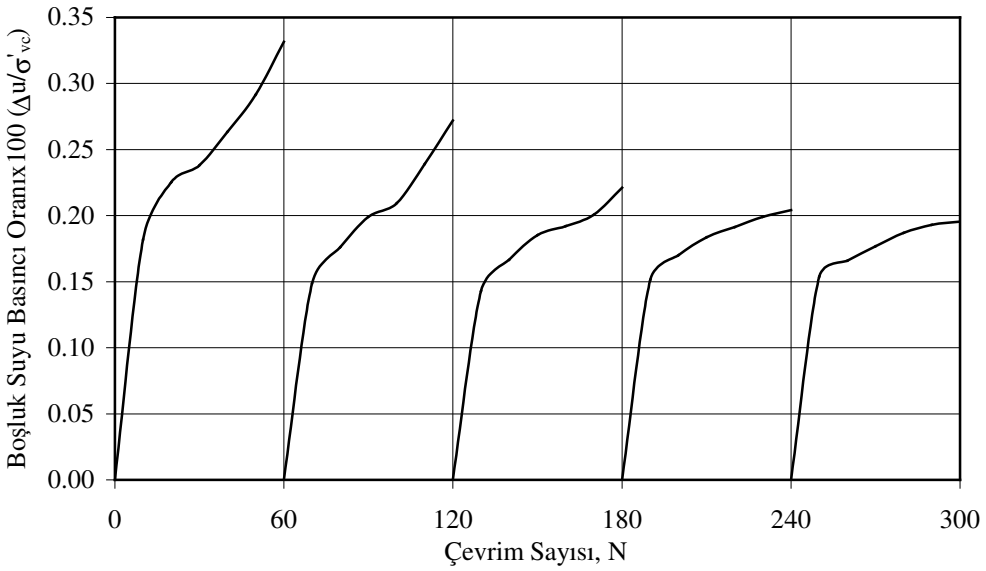


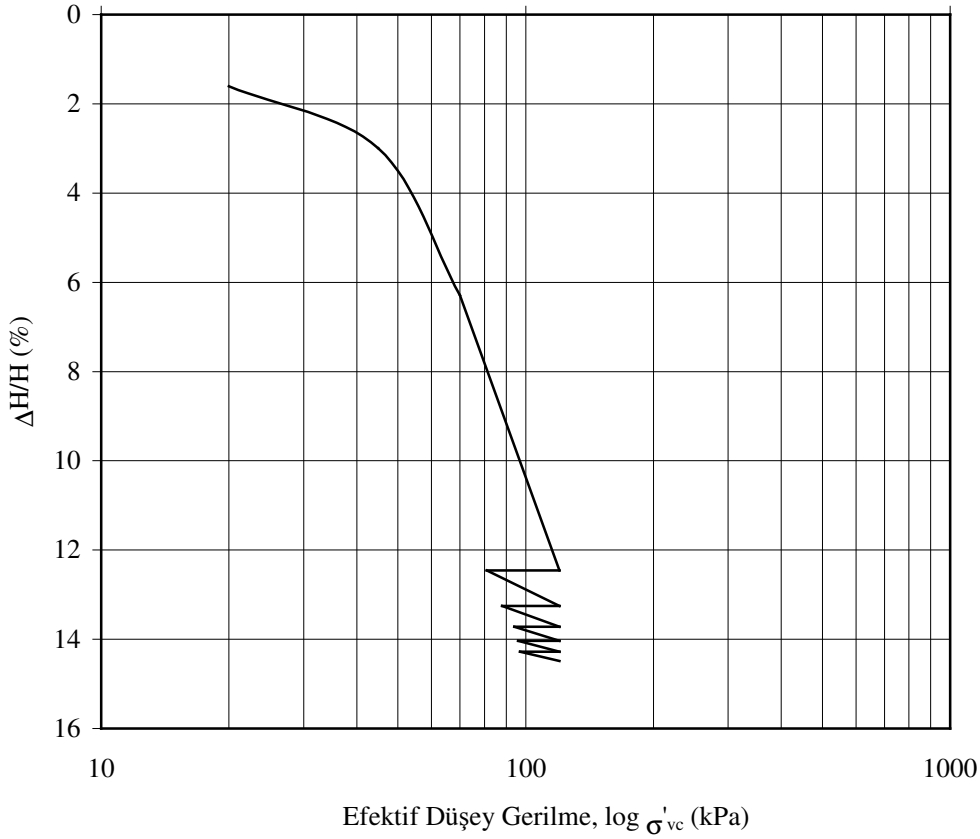


Şekil A14. A7 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

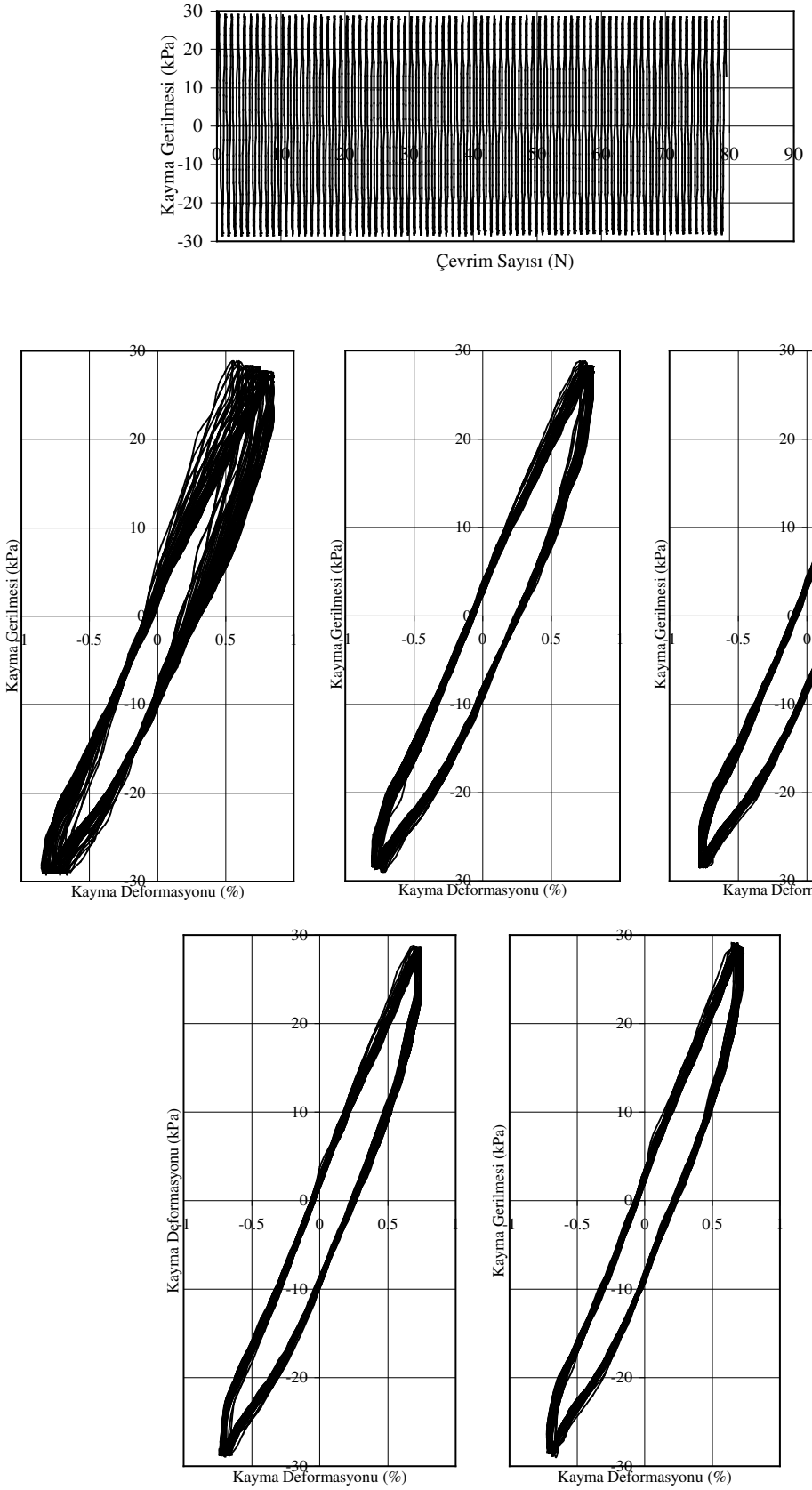


Şekil A15. A8 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.70).

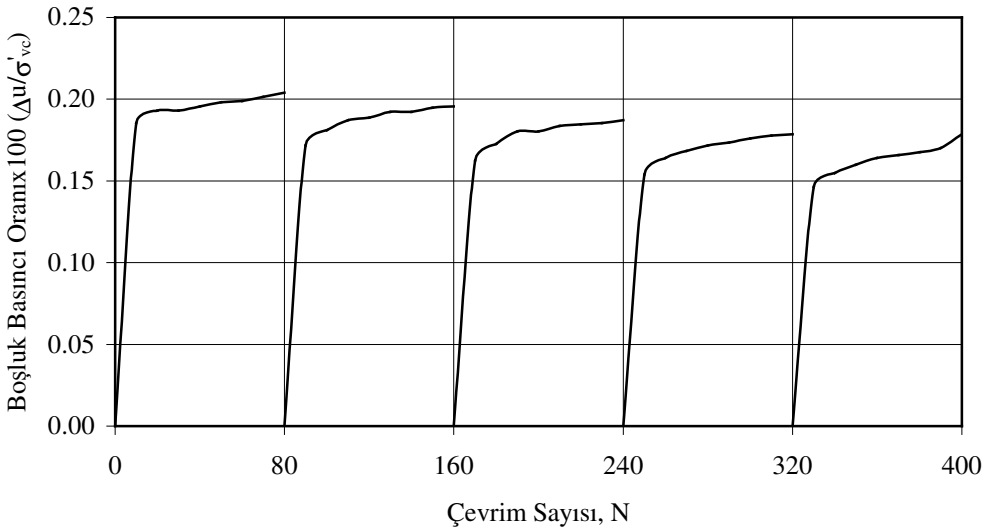


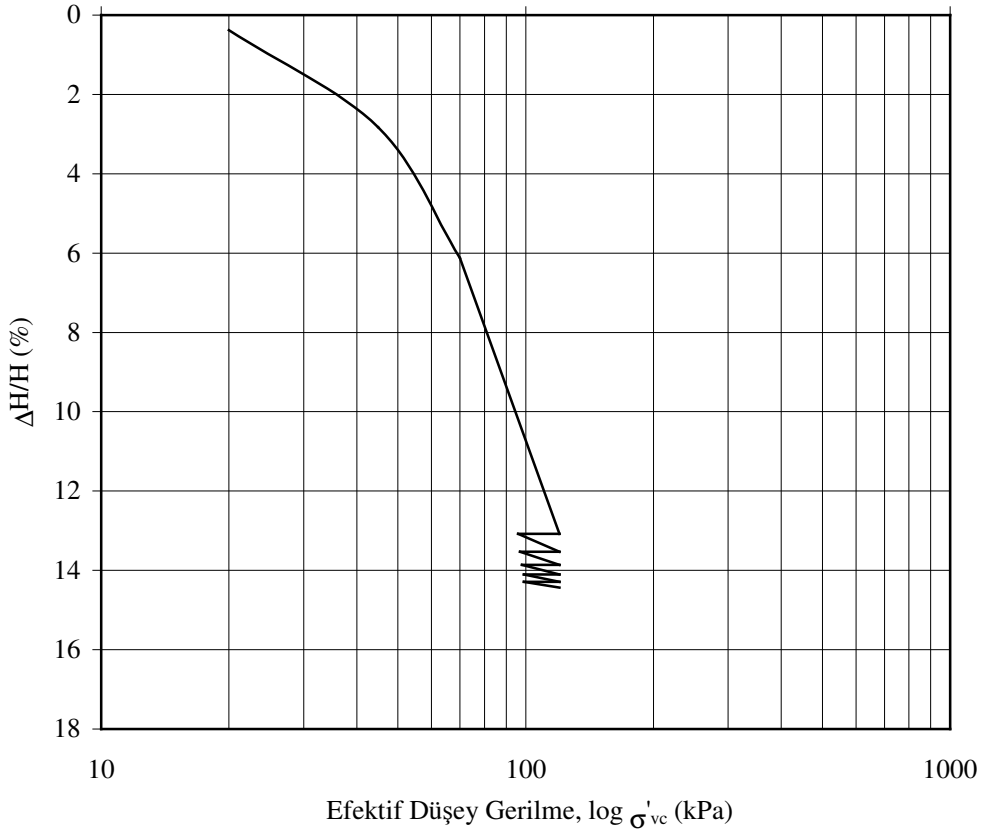


Şekil A16. A8 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

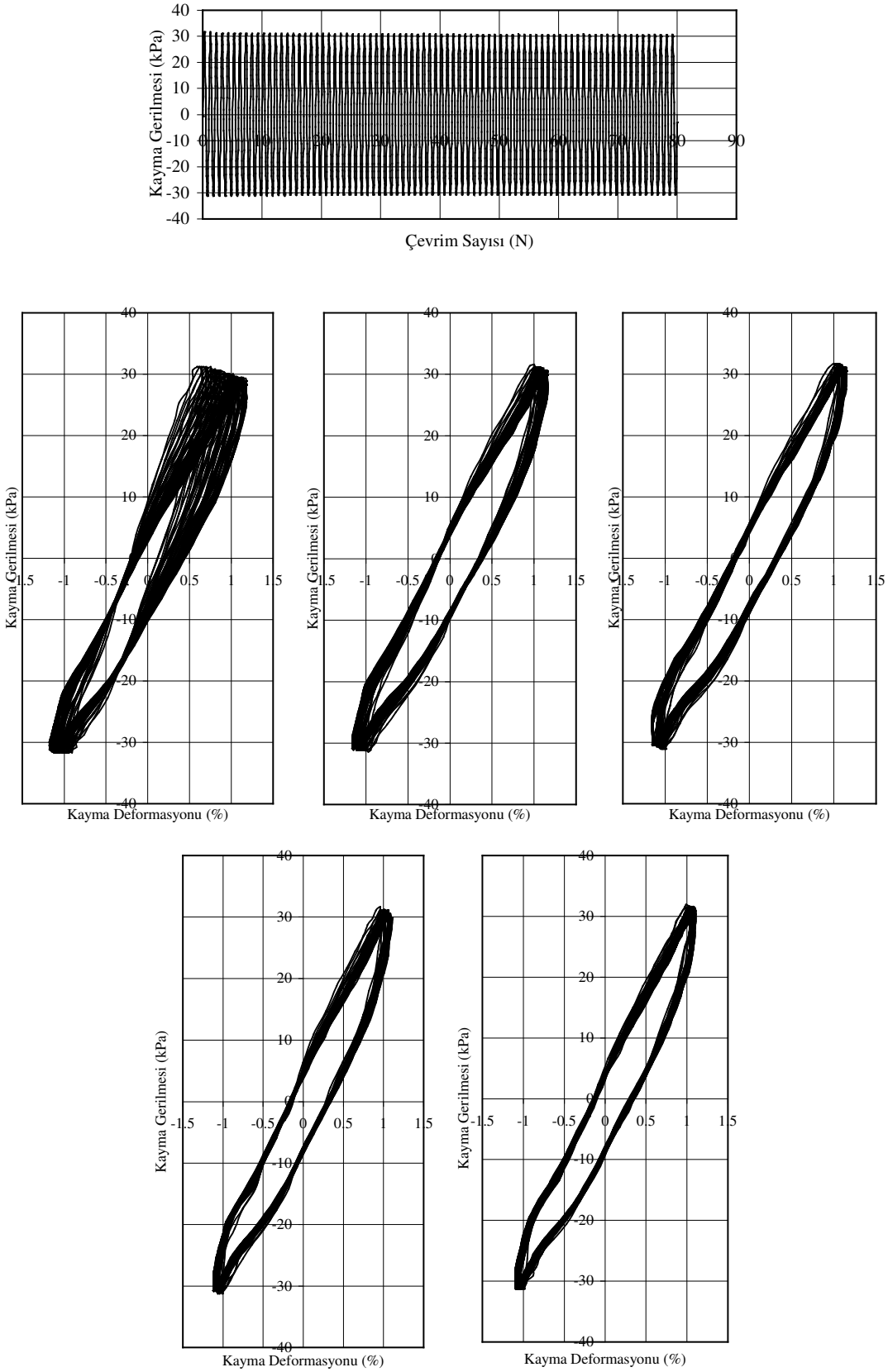


Şekil A17. A9 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.55).

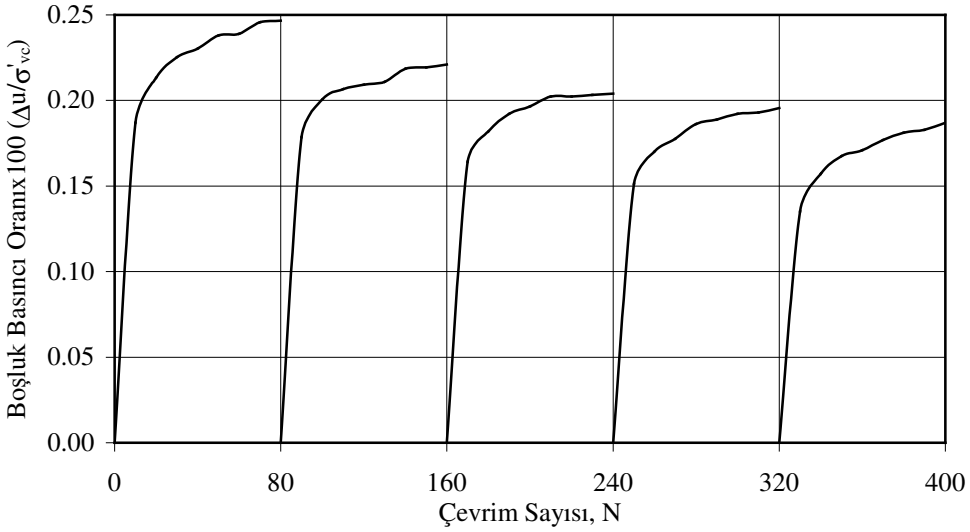


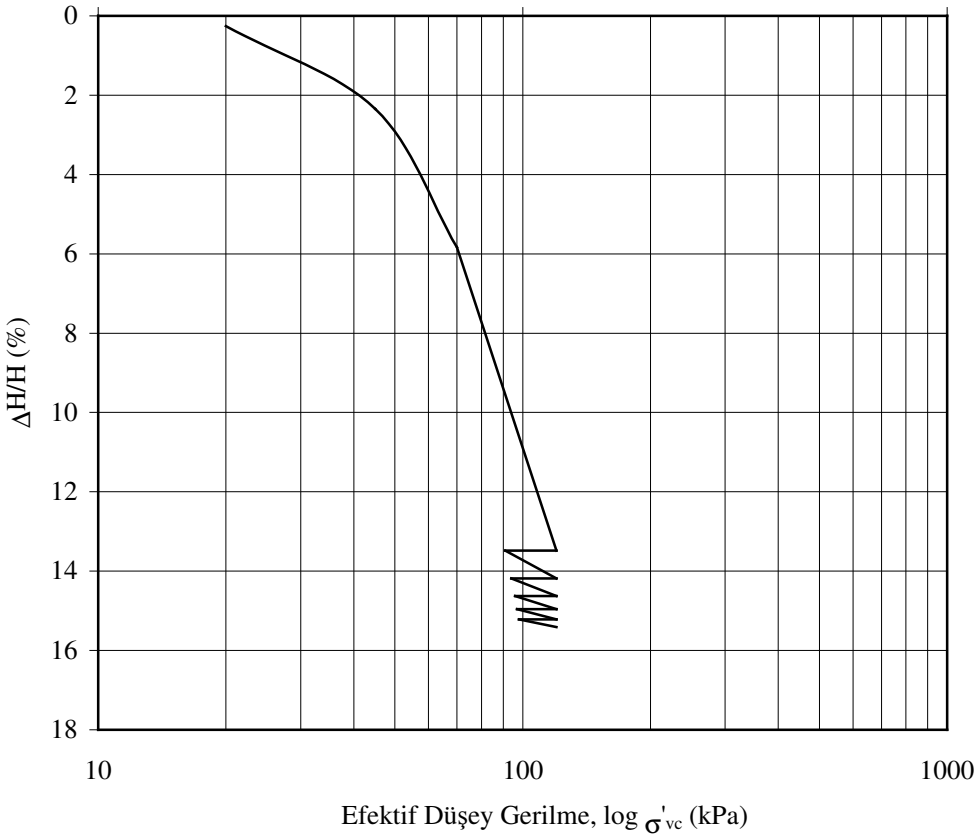


Şekil A18. A9 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

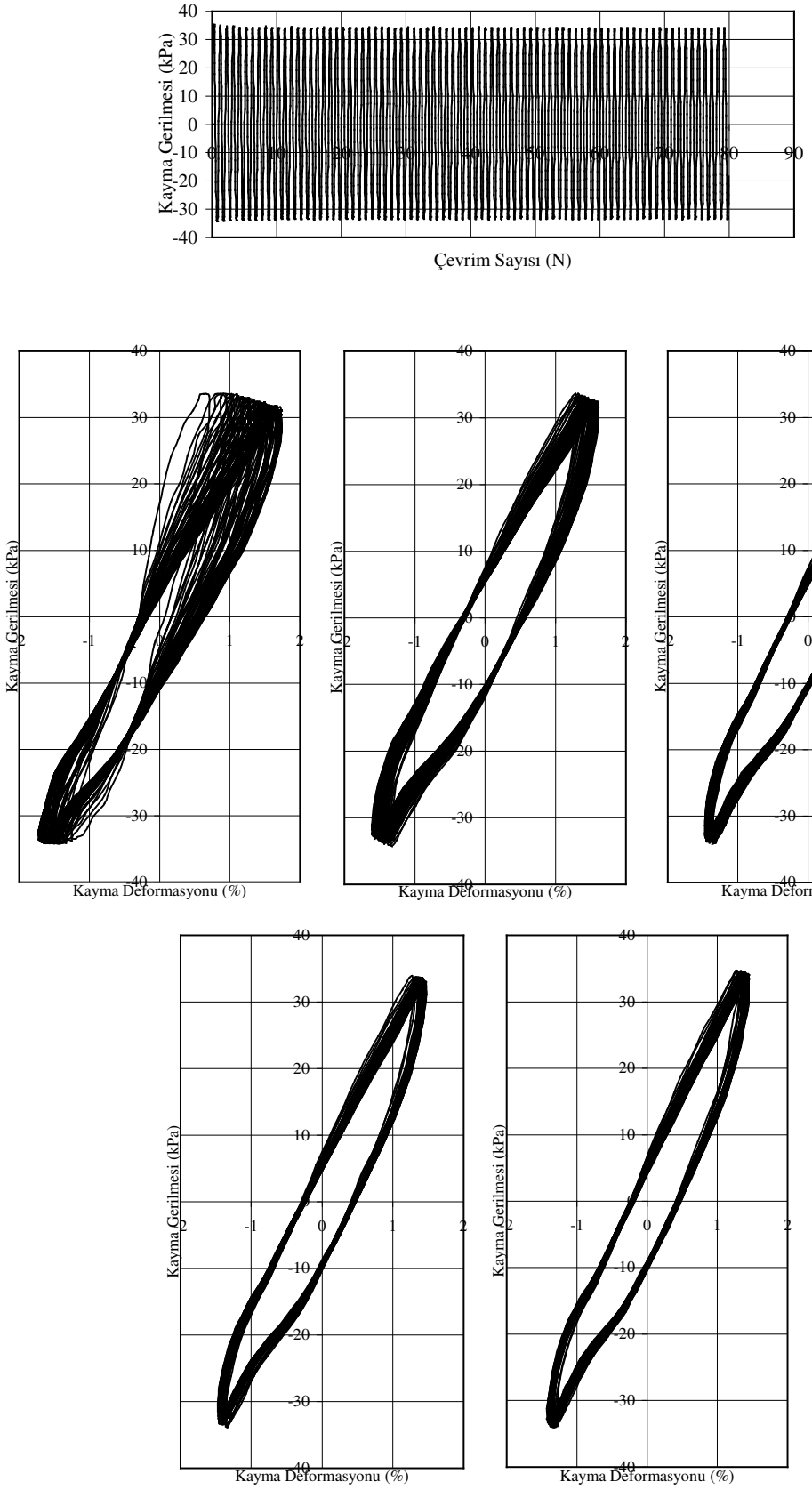


Şekil A19. A10 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.60).

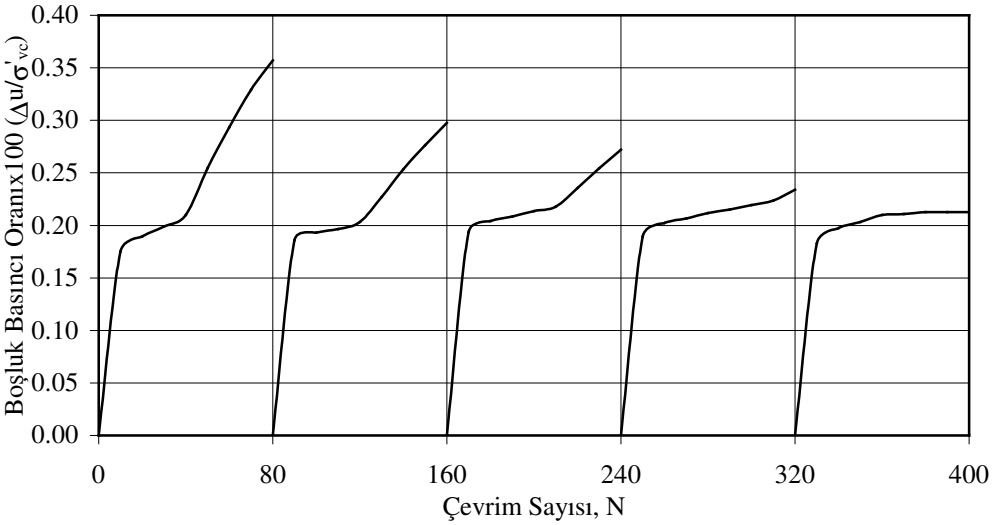


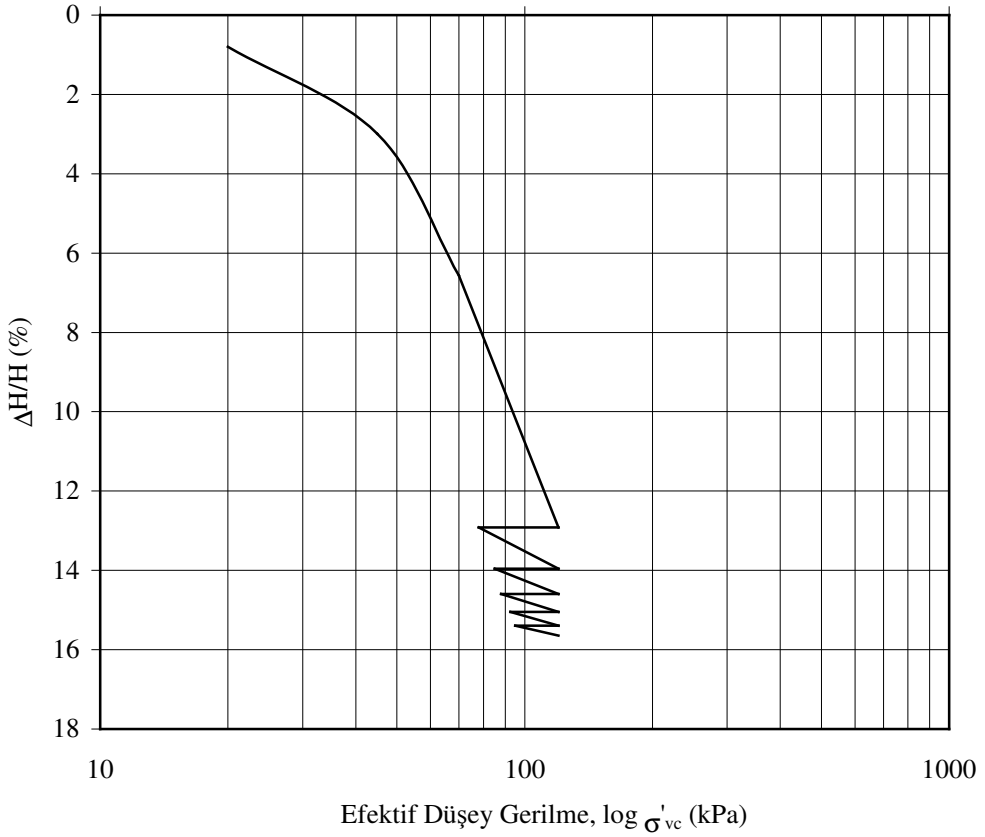


Şekil A20. A10 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

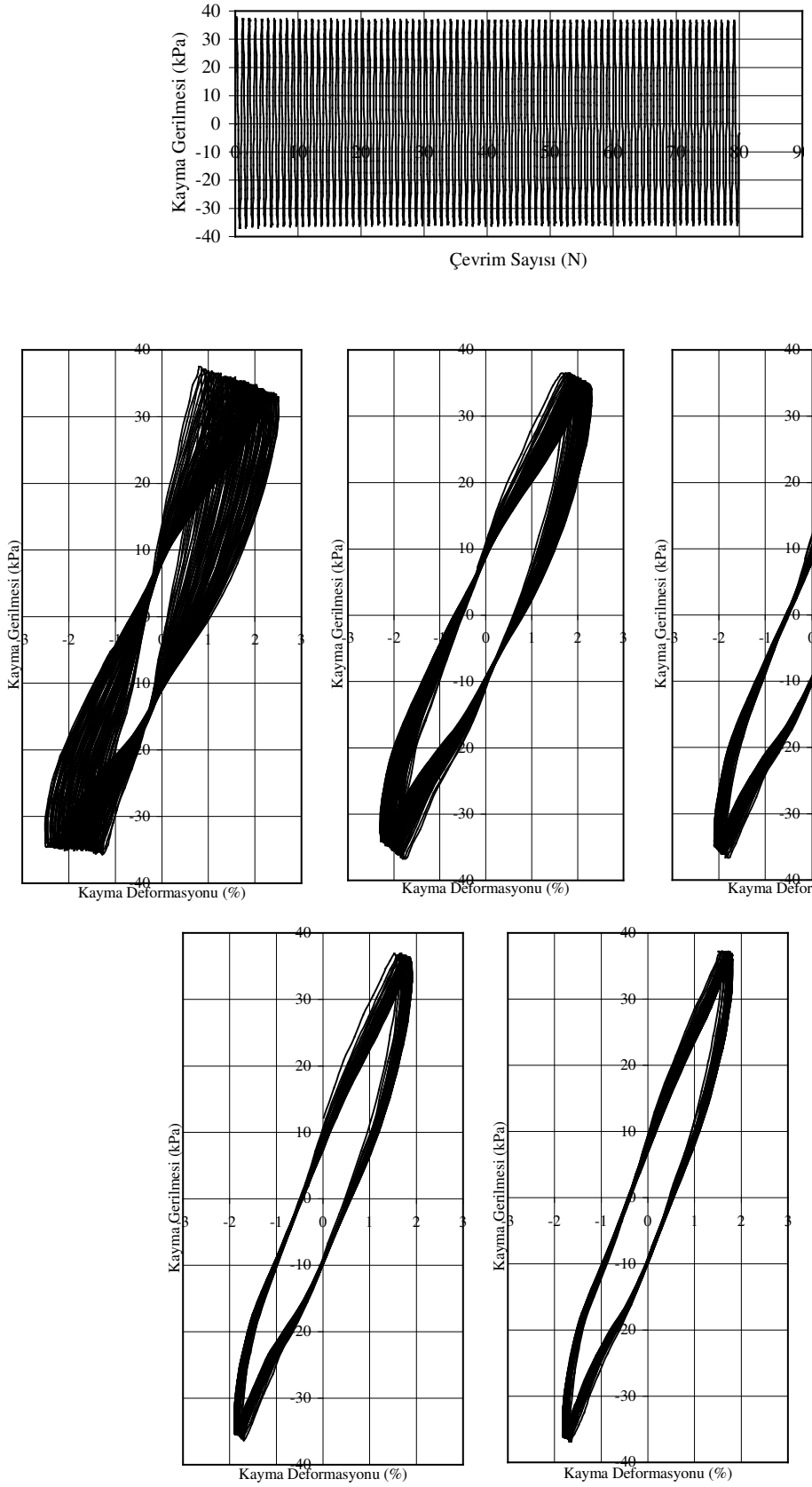


Şekil A21. A11 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.65).

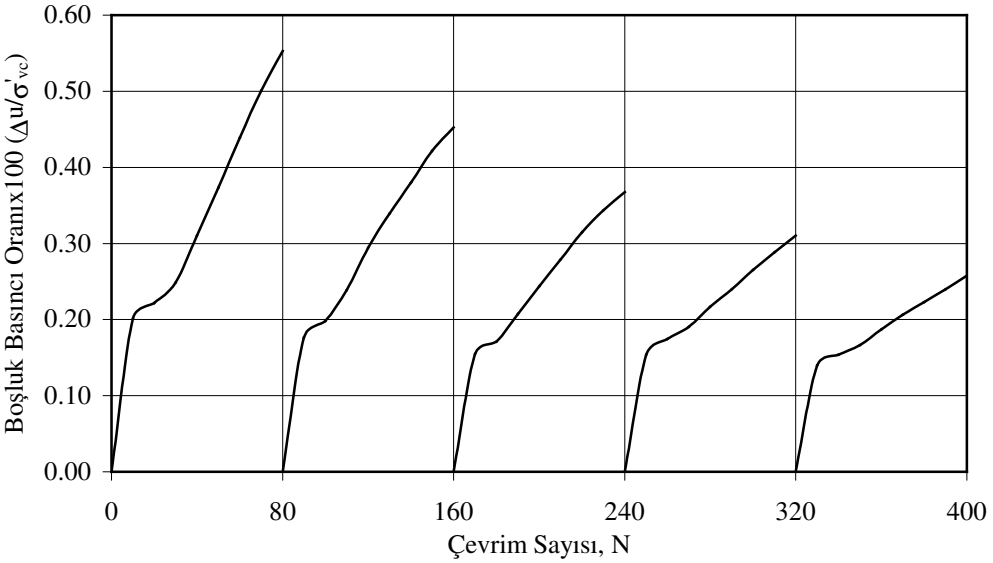


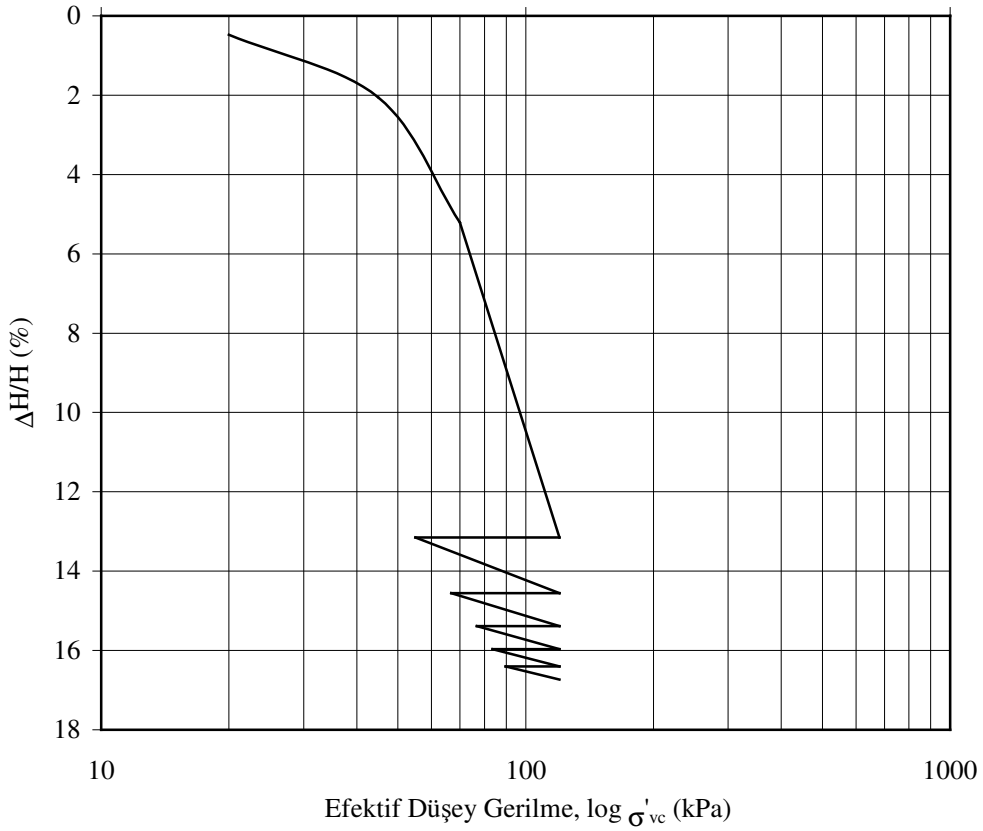


Şekil A22. A11 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

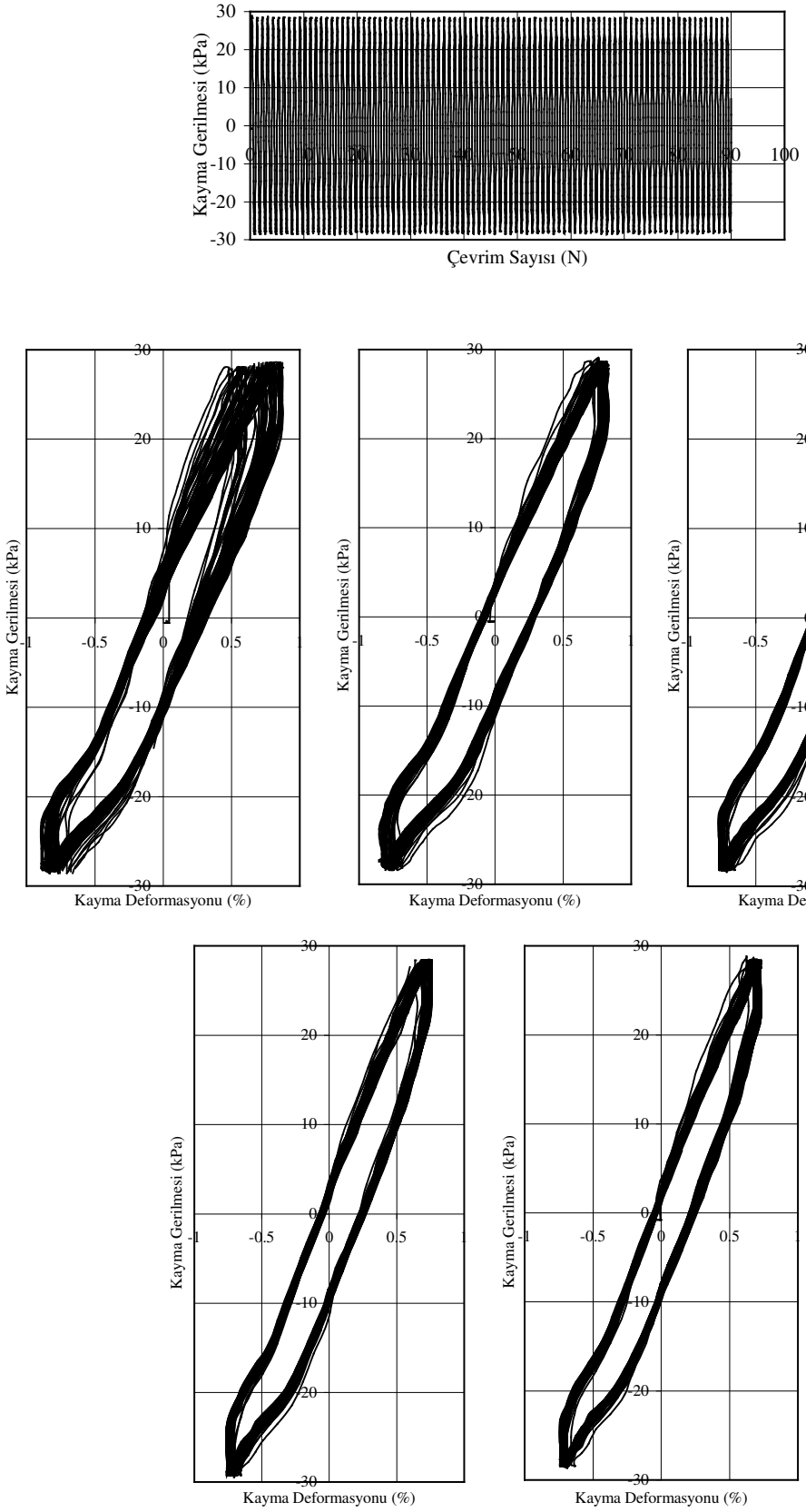


Şekil A23. A12 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.70).

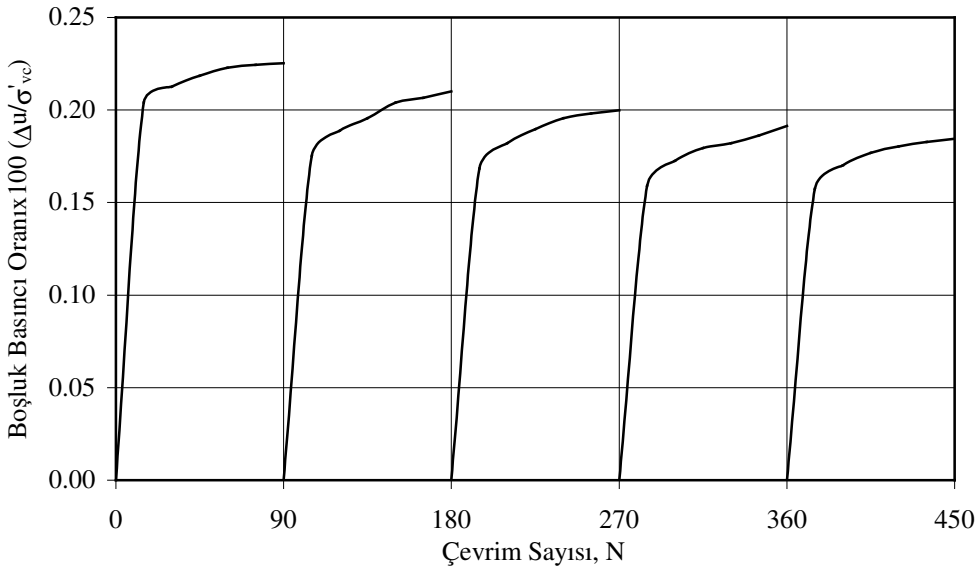


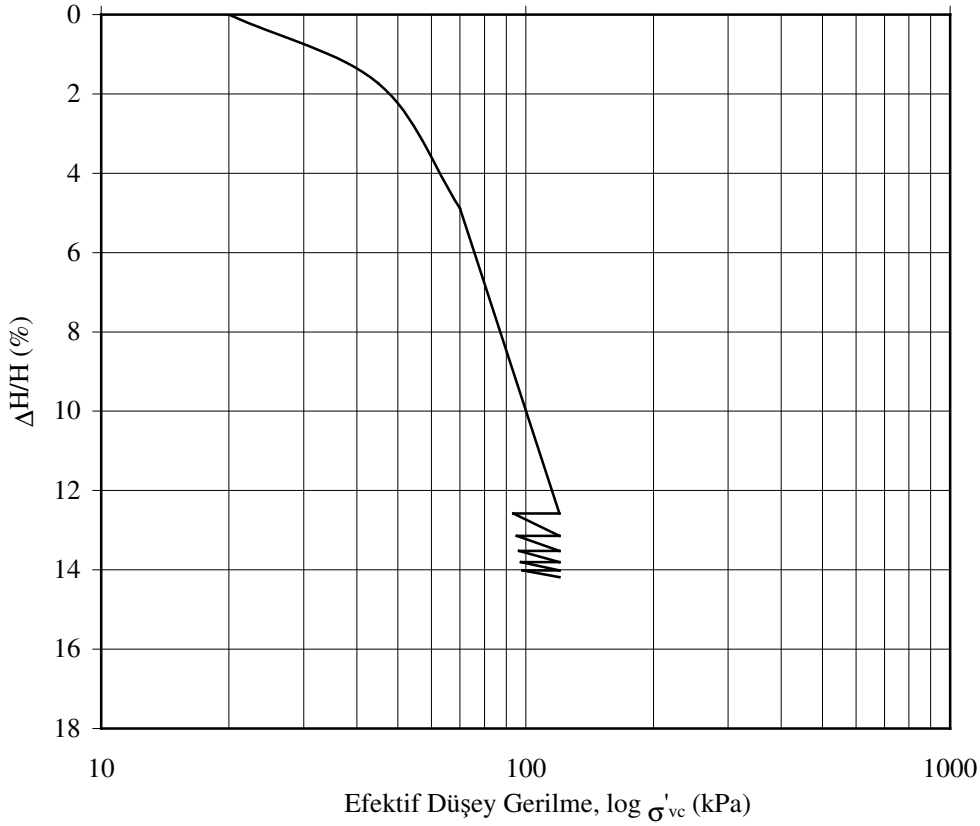


Şekil A24. A12 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

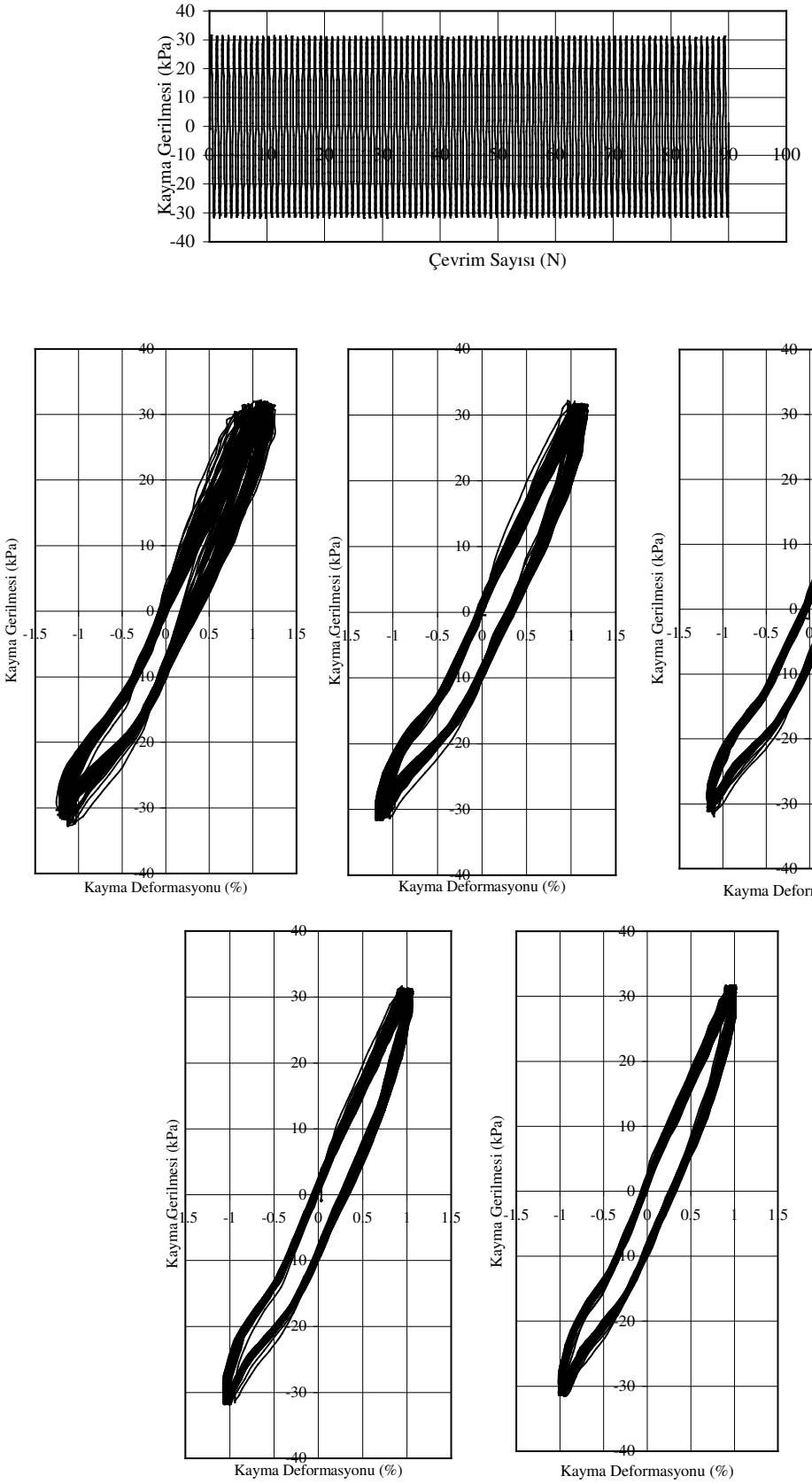


Şekil A25. A13 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.55).

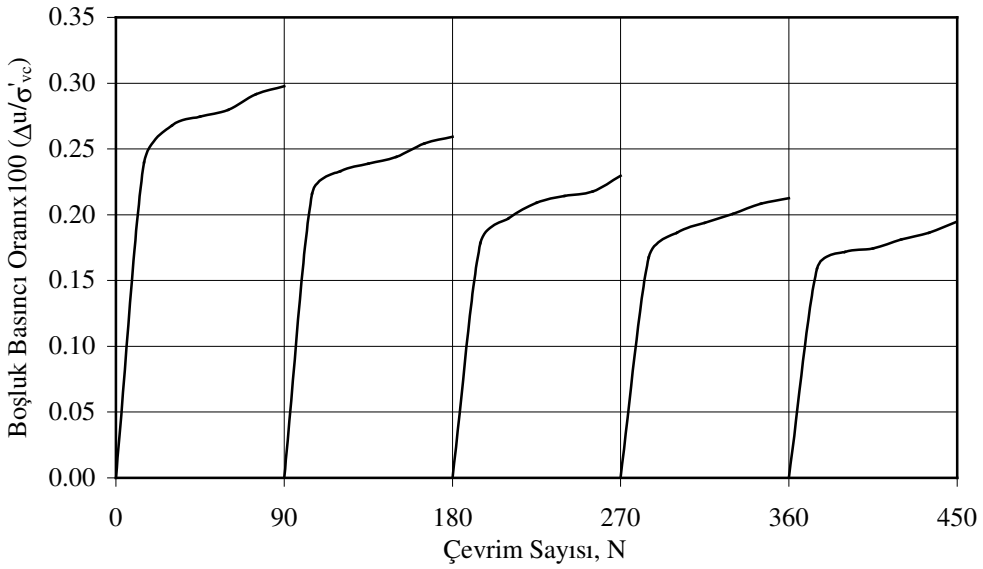


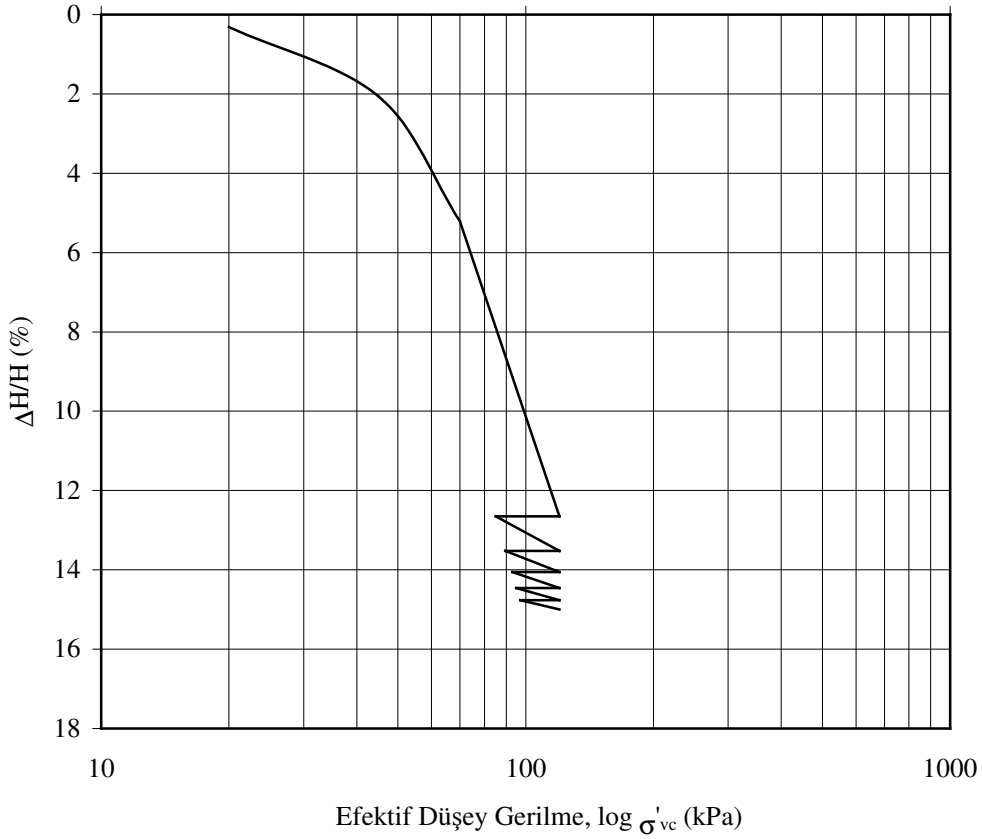


Şekil A26. A13 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

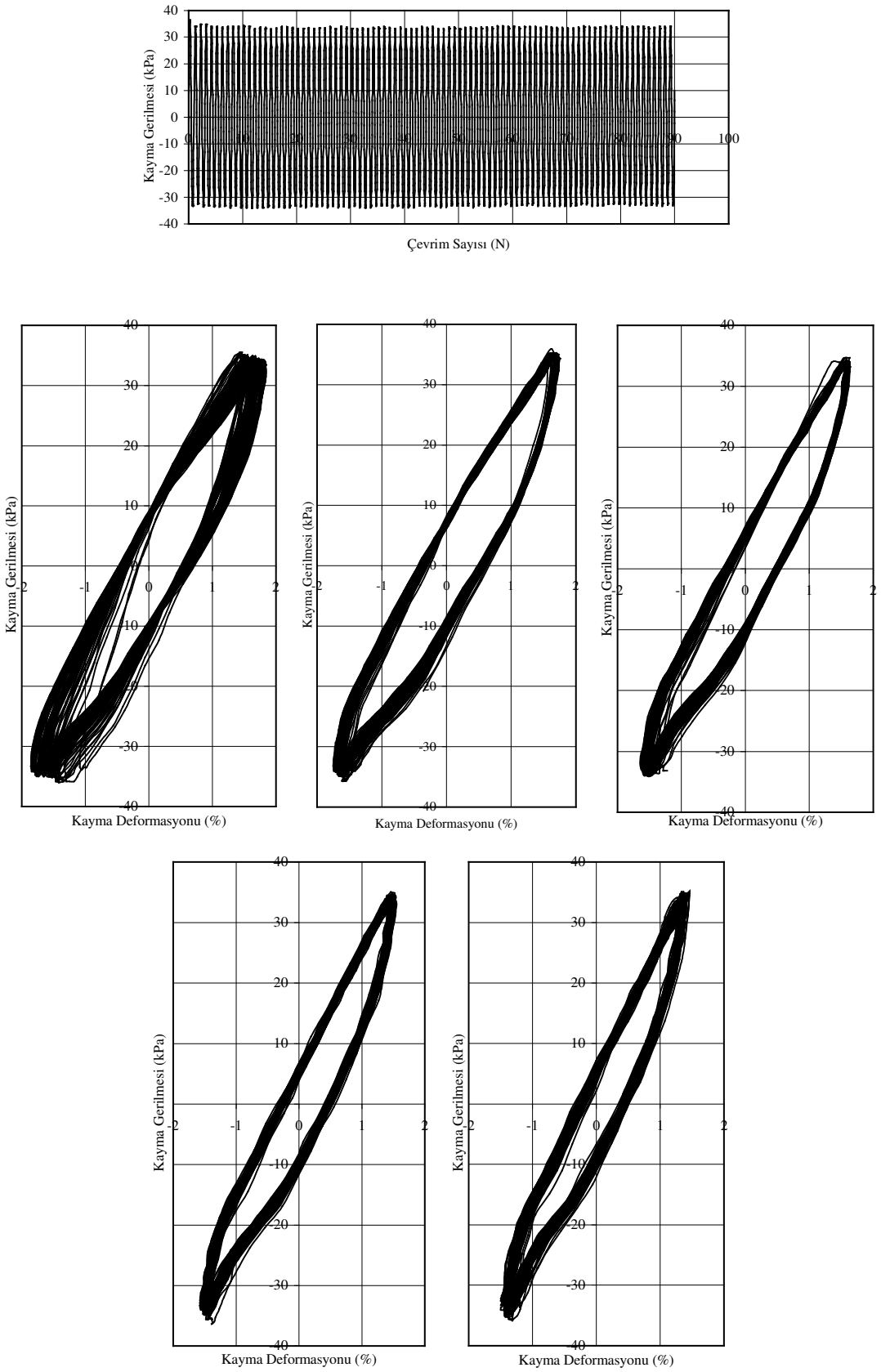


Şekil A27. A14 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.60).

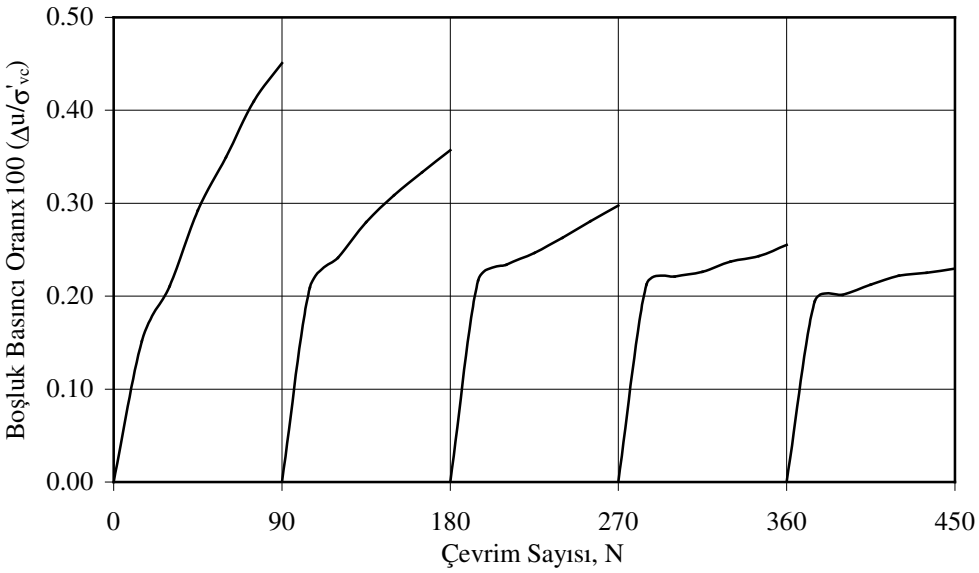


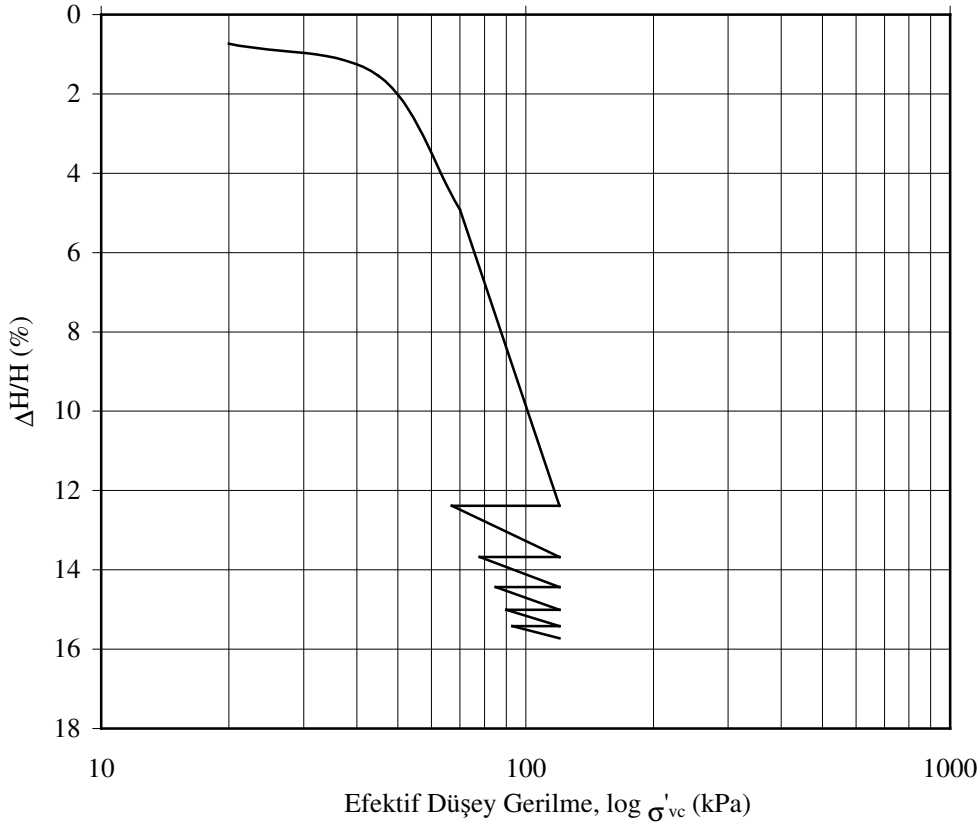


Şekil A28. A14 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

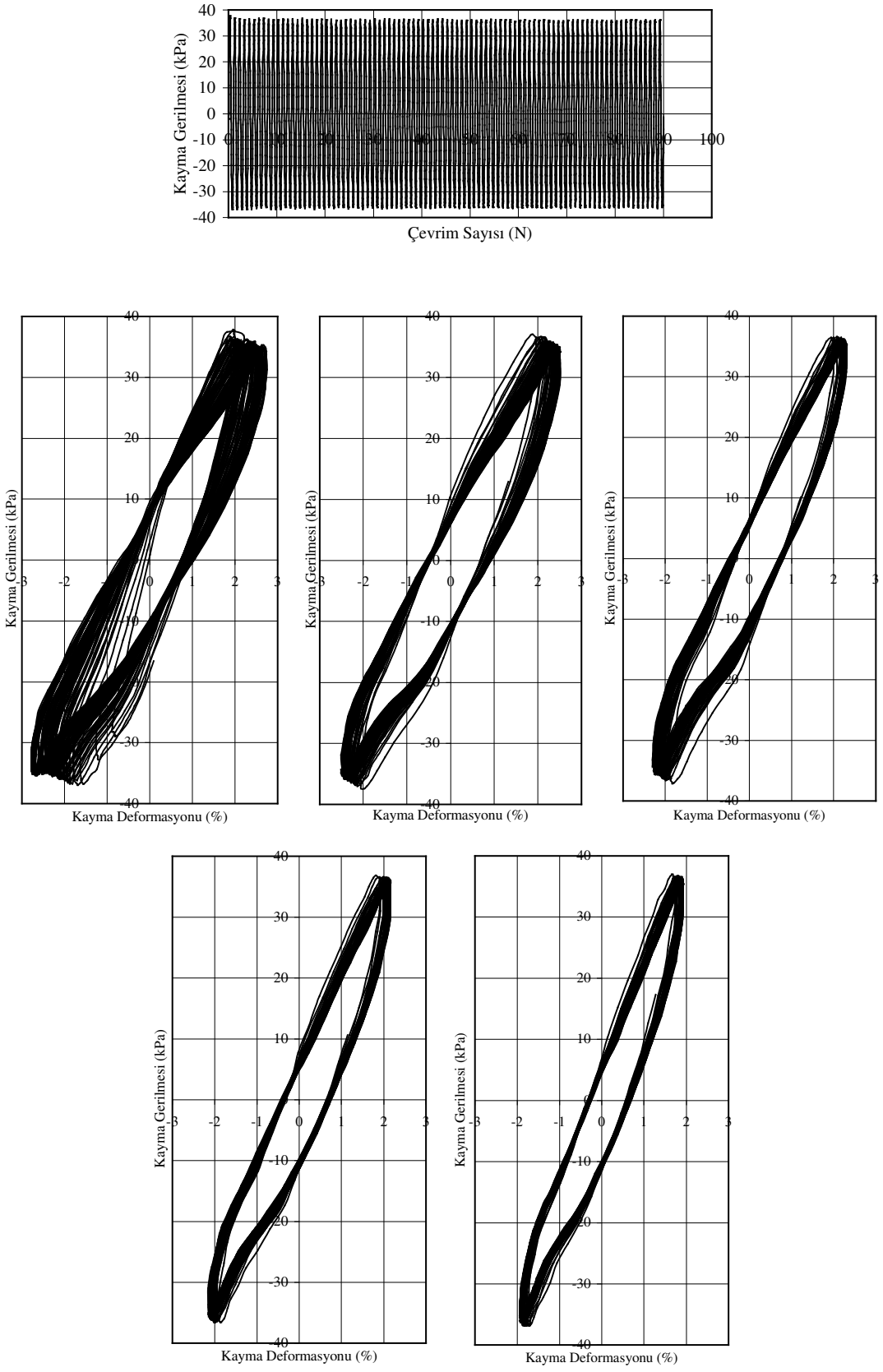


Şekil A29. A15 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.65).

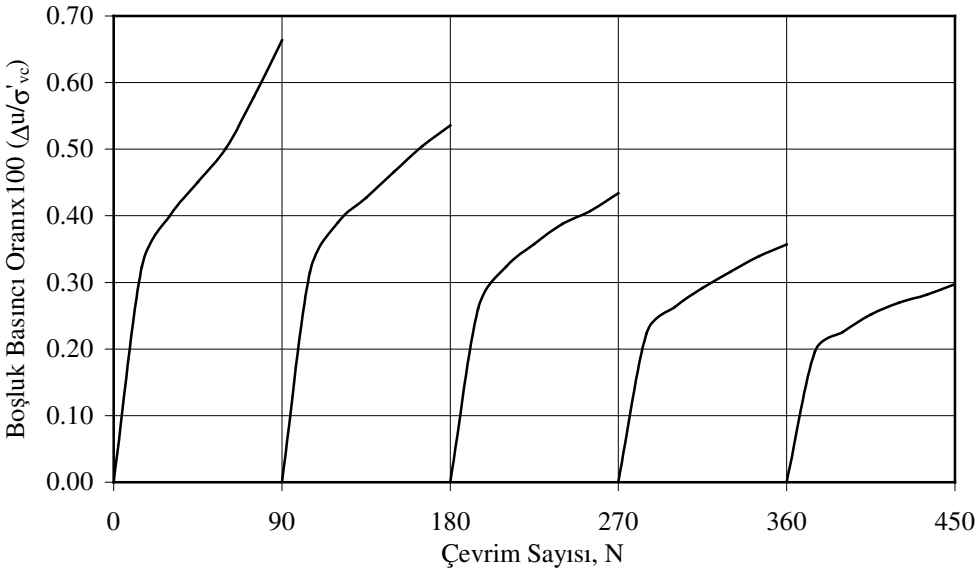


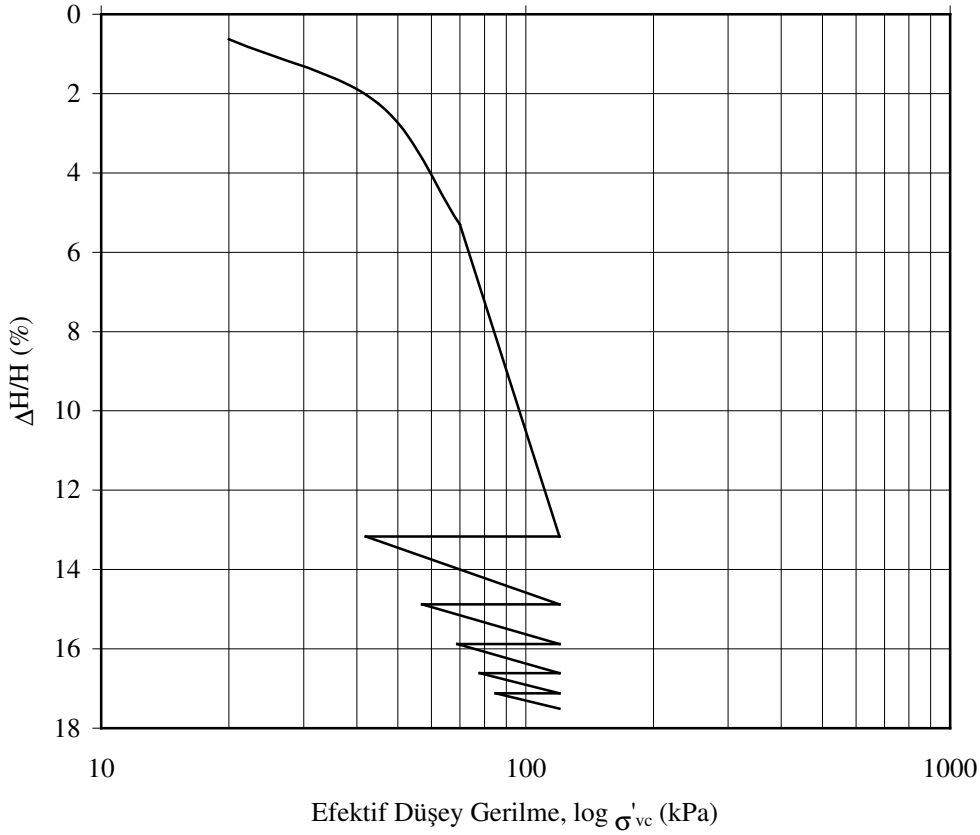


Şekil A30. A15 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

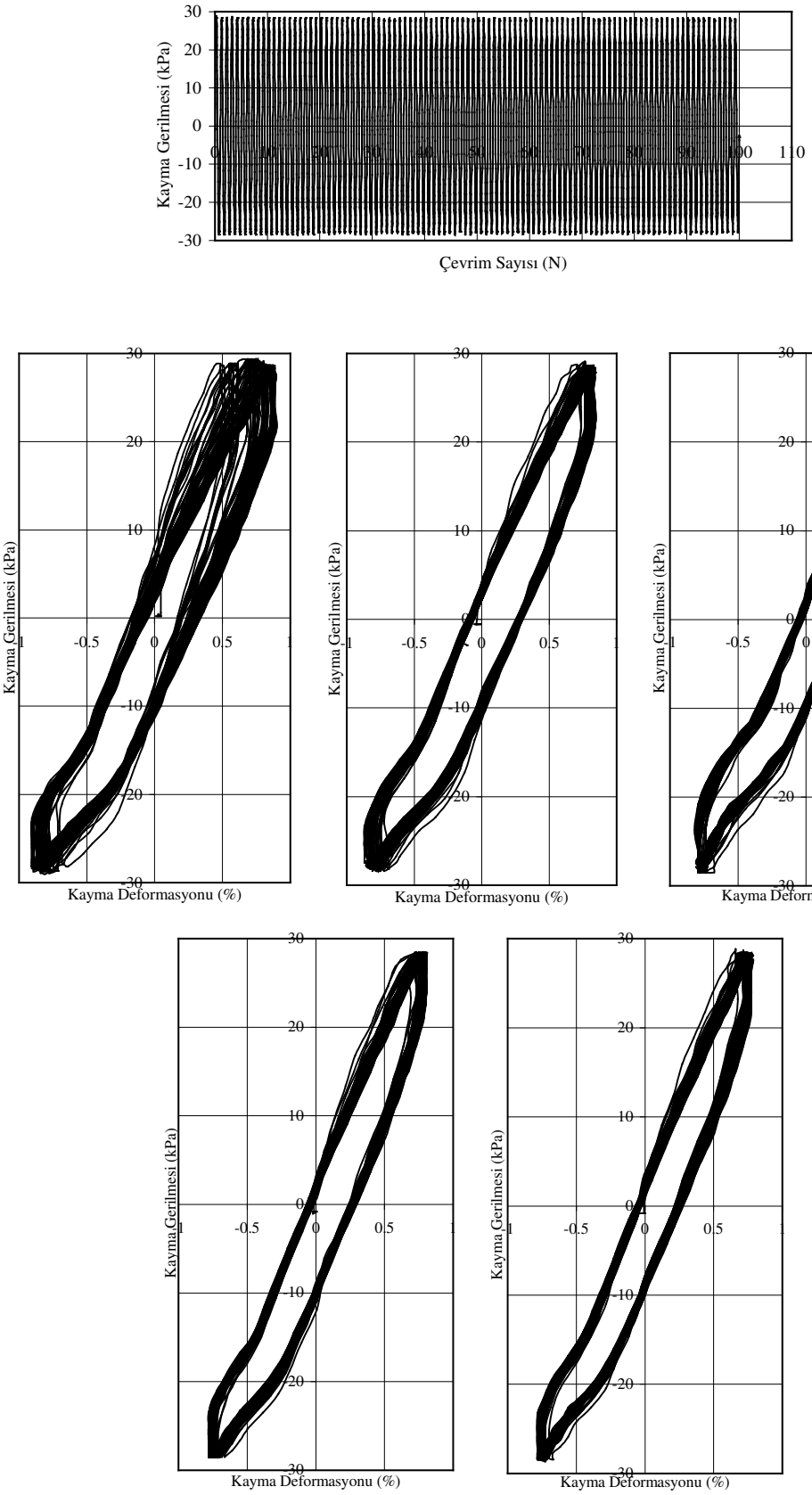


Şekil A31. A16 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.70).

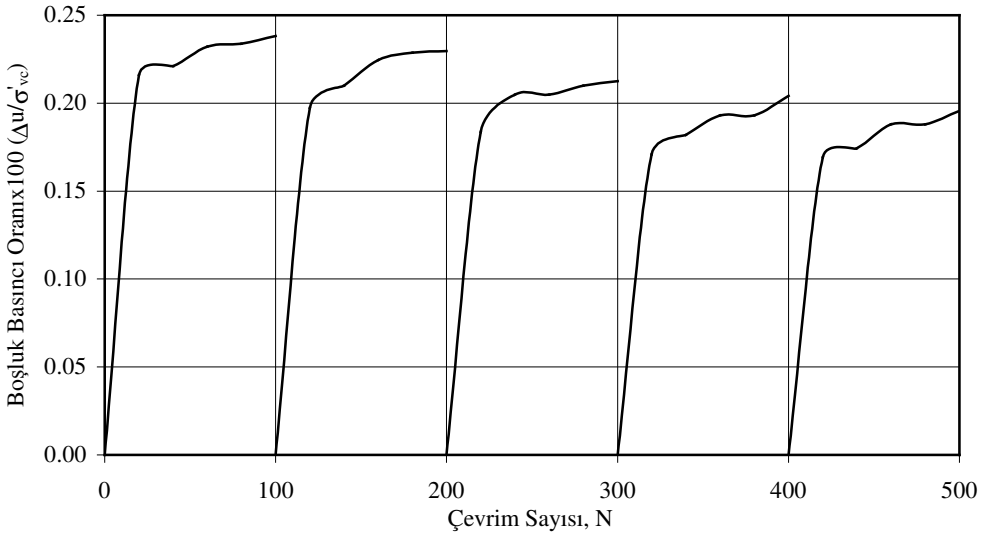


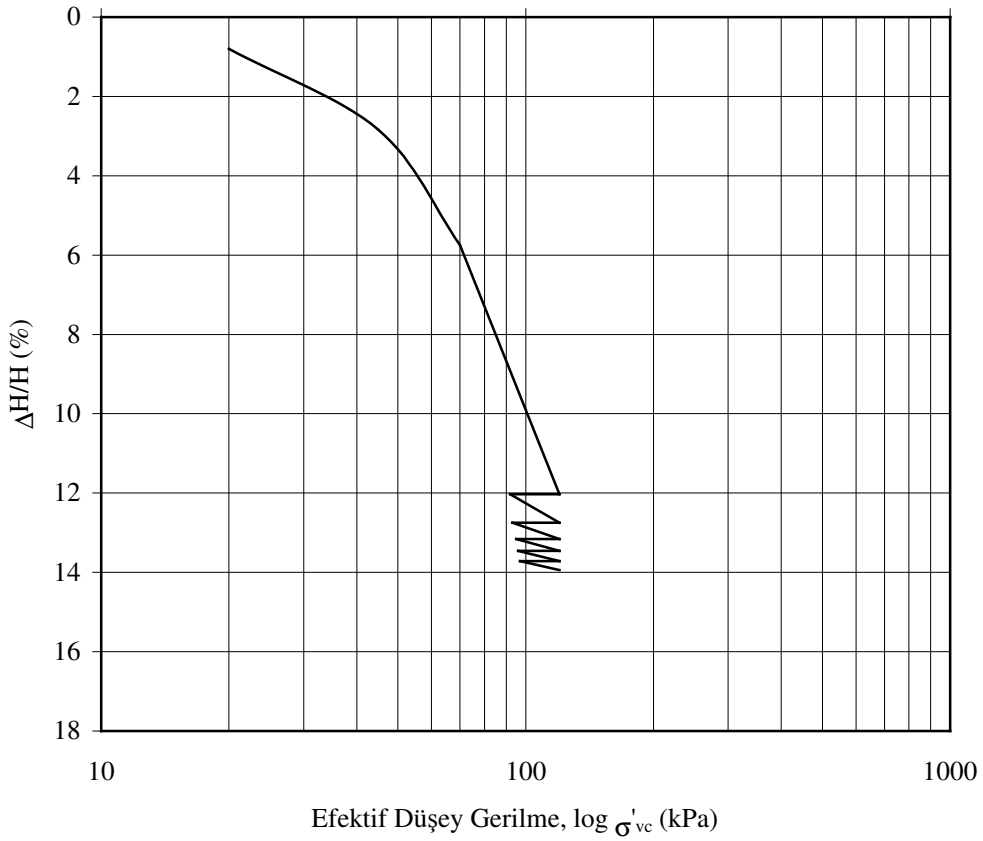


Şekil A32. A16 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

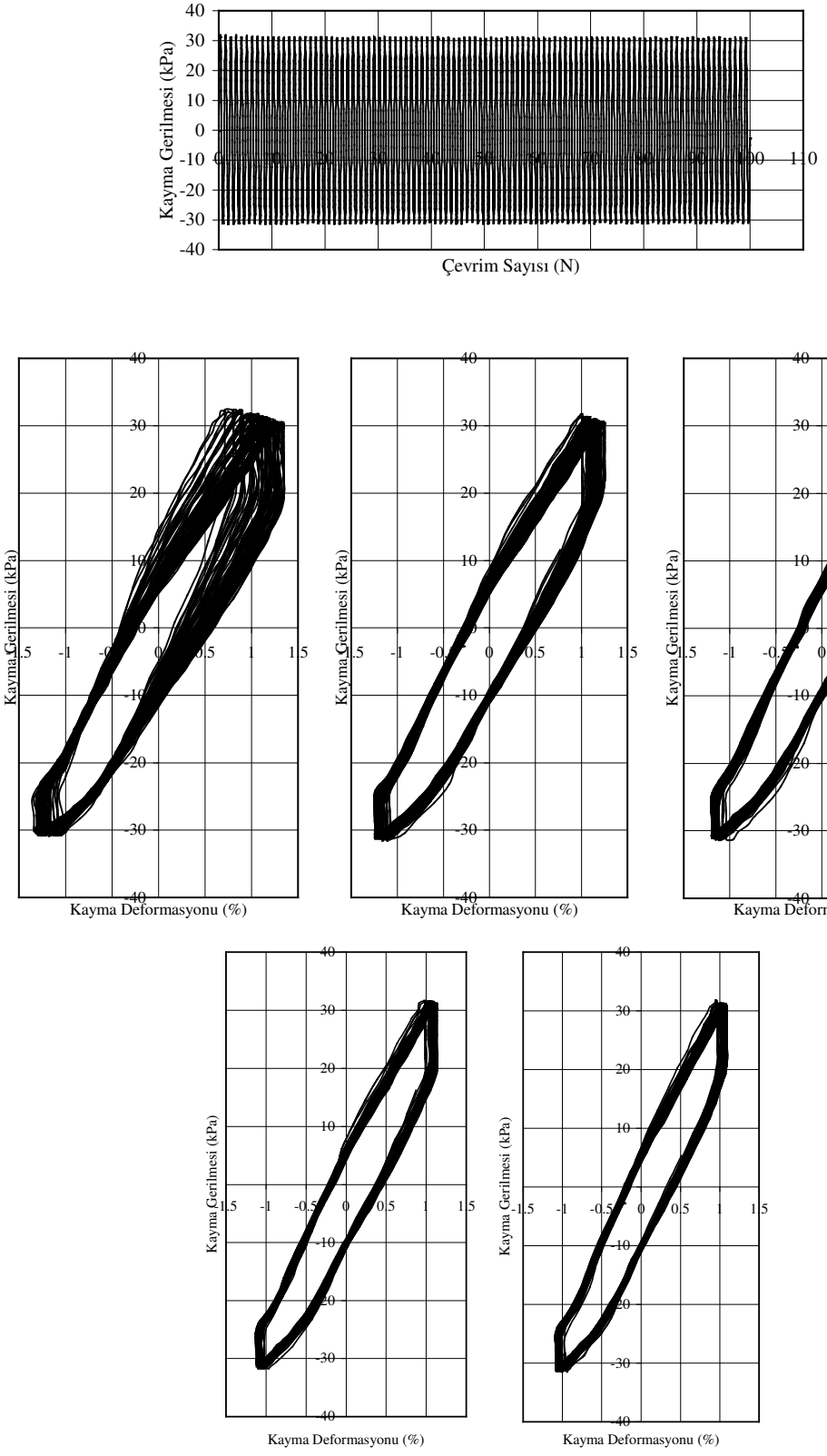


Şekil A33. A17 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.55).

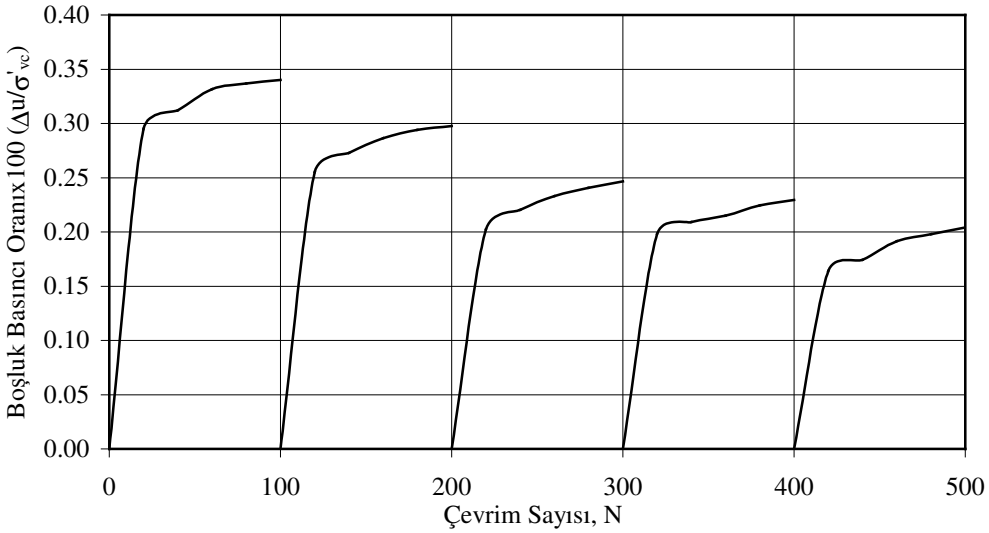


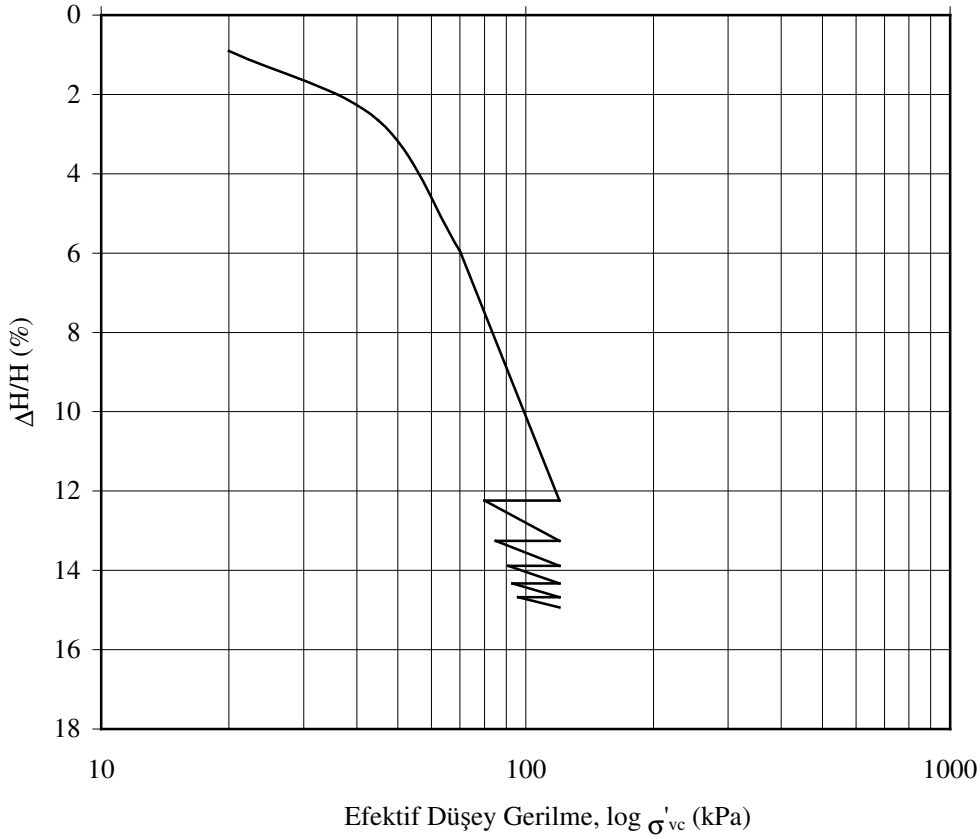


Şekil A34. A17 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

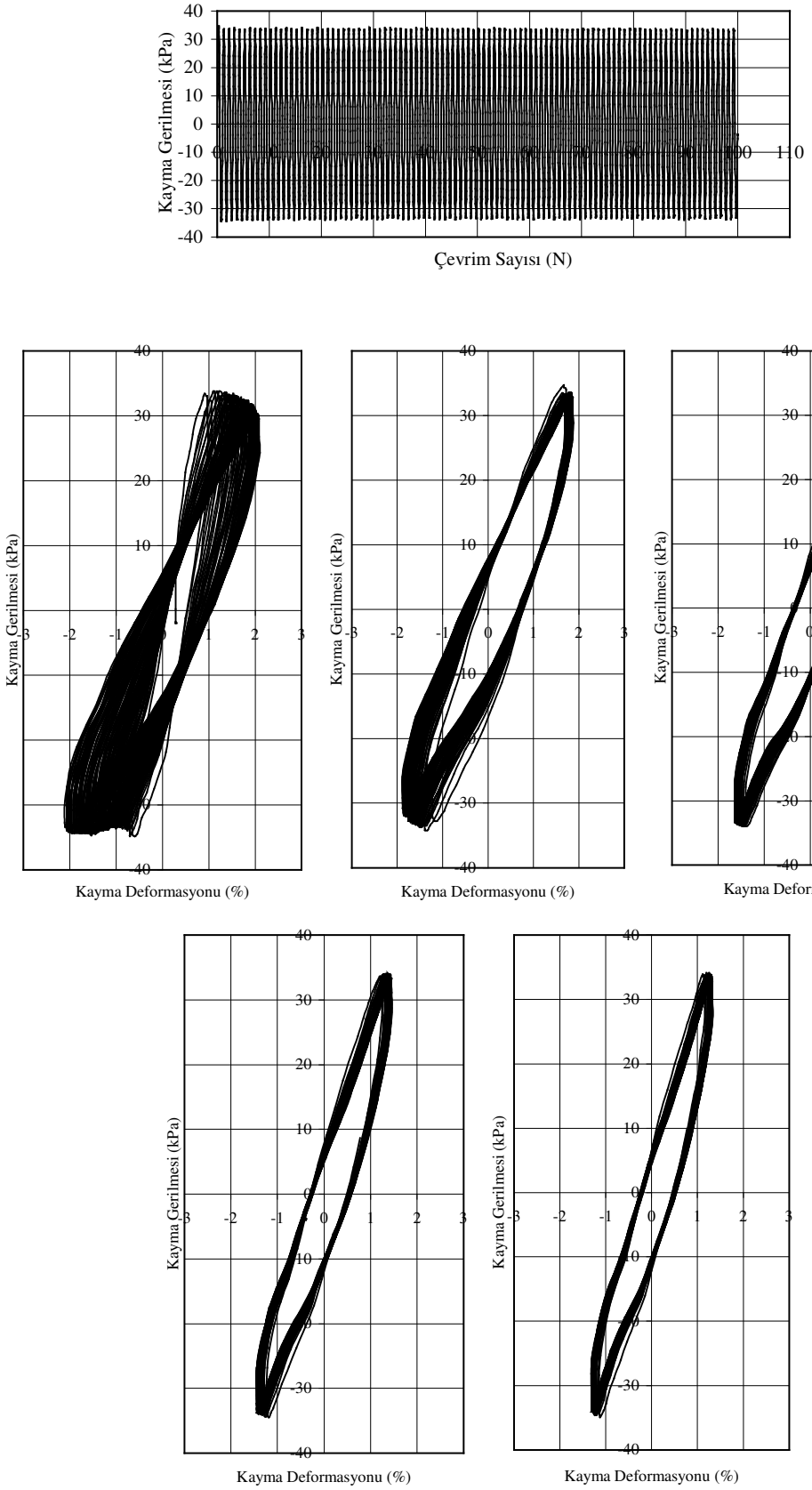


Şekil A35. A18 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.60).

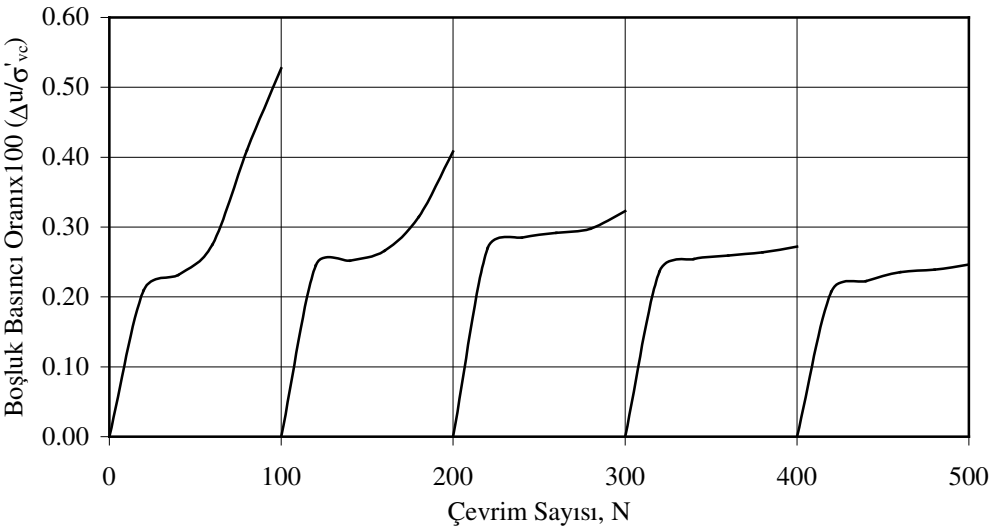


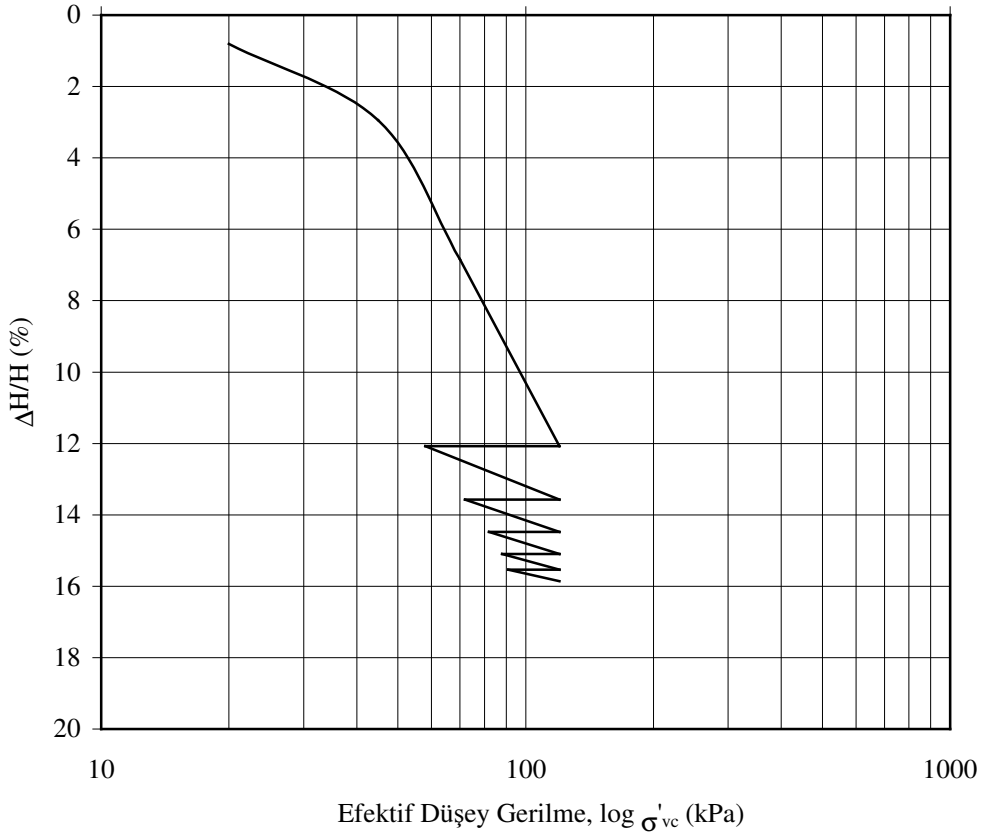


Şekil A36. A18 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

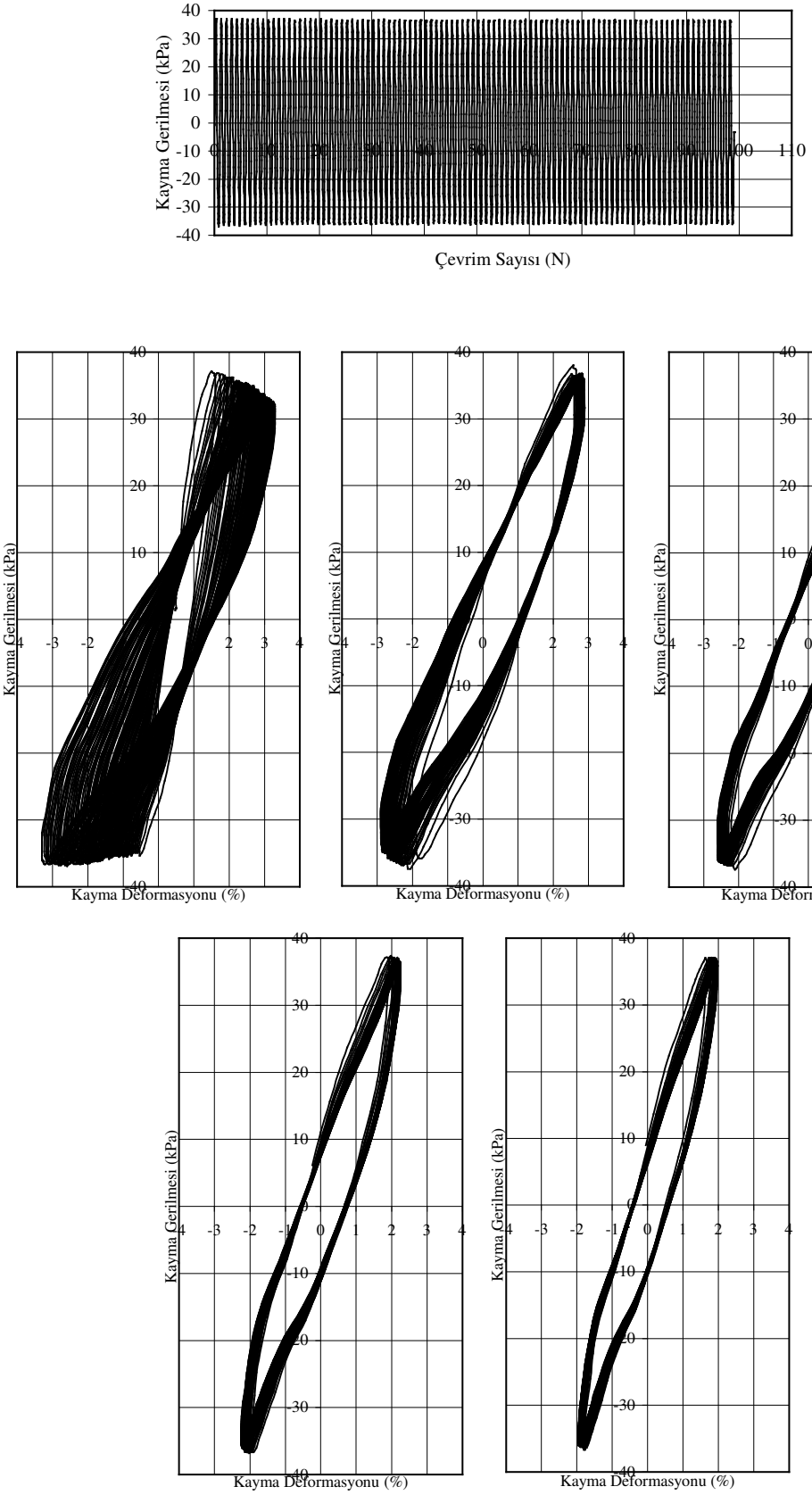


Şekil A37. A19 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.65).

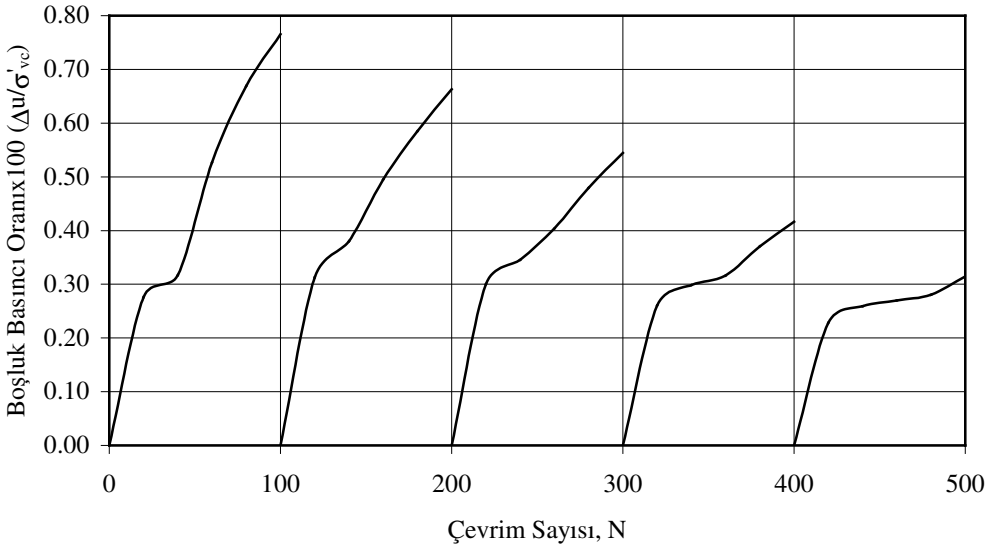


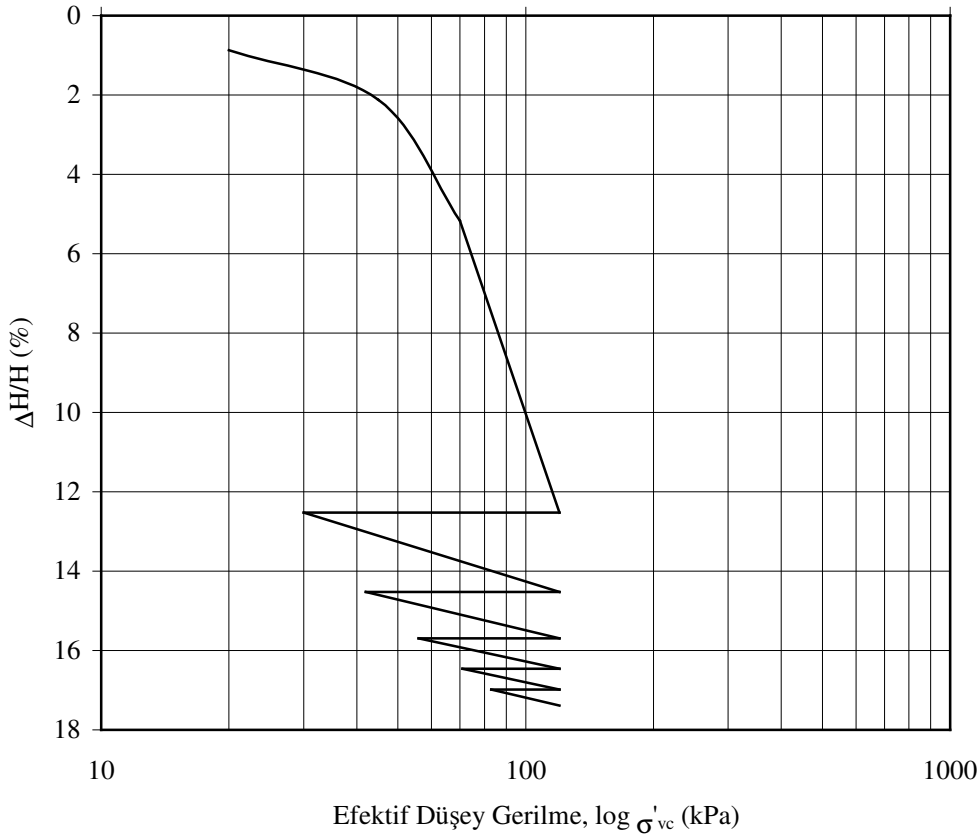


Şekil A38. A19 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

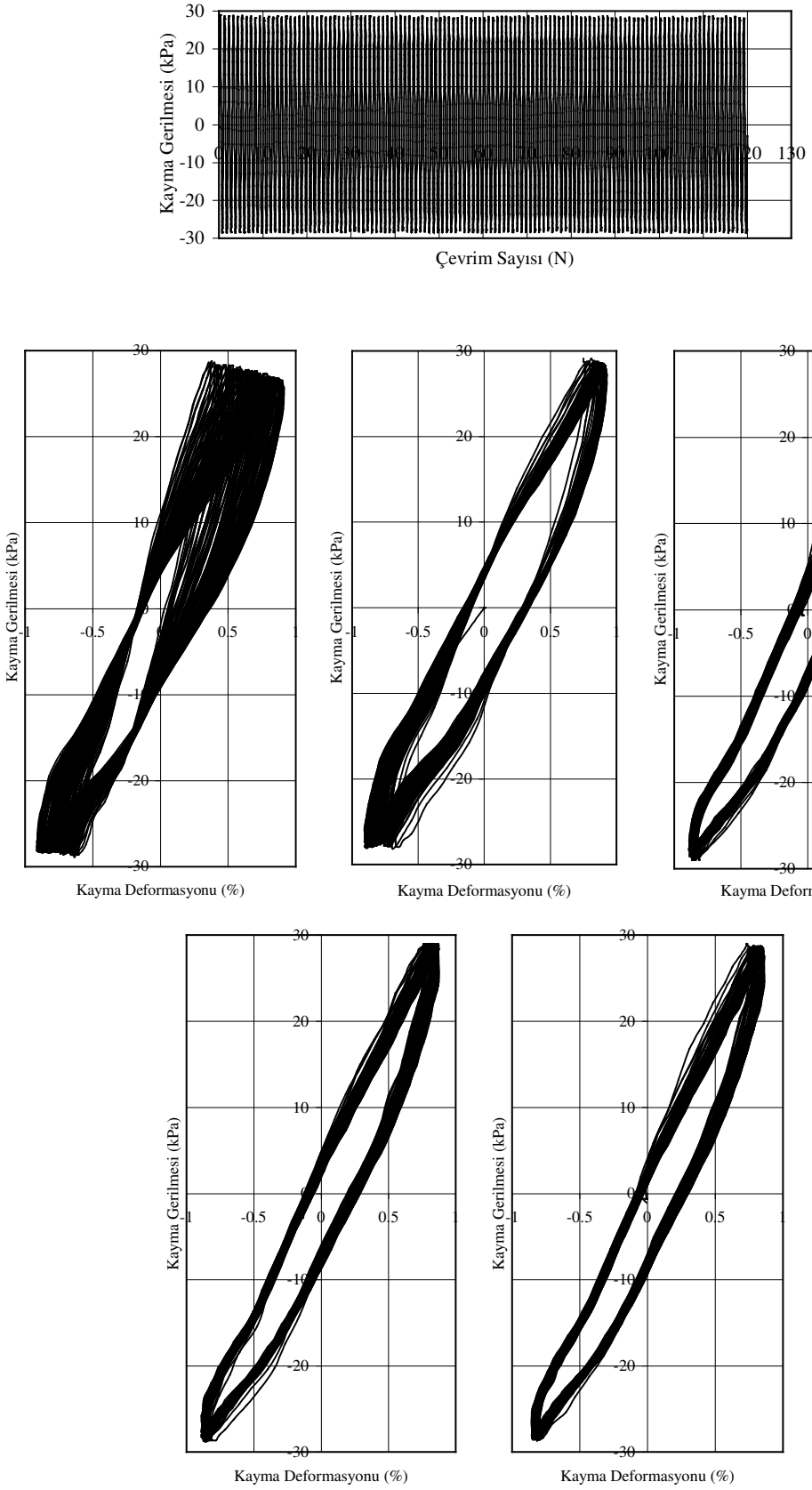


Şekil A39. A20 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.70).

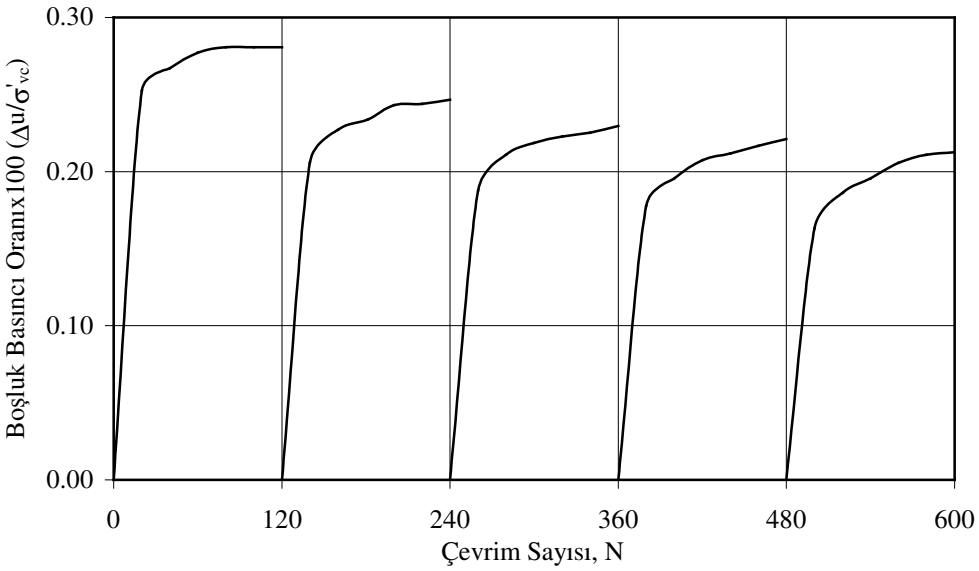


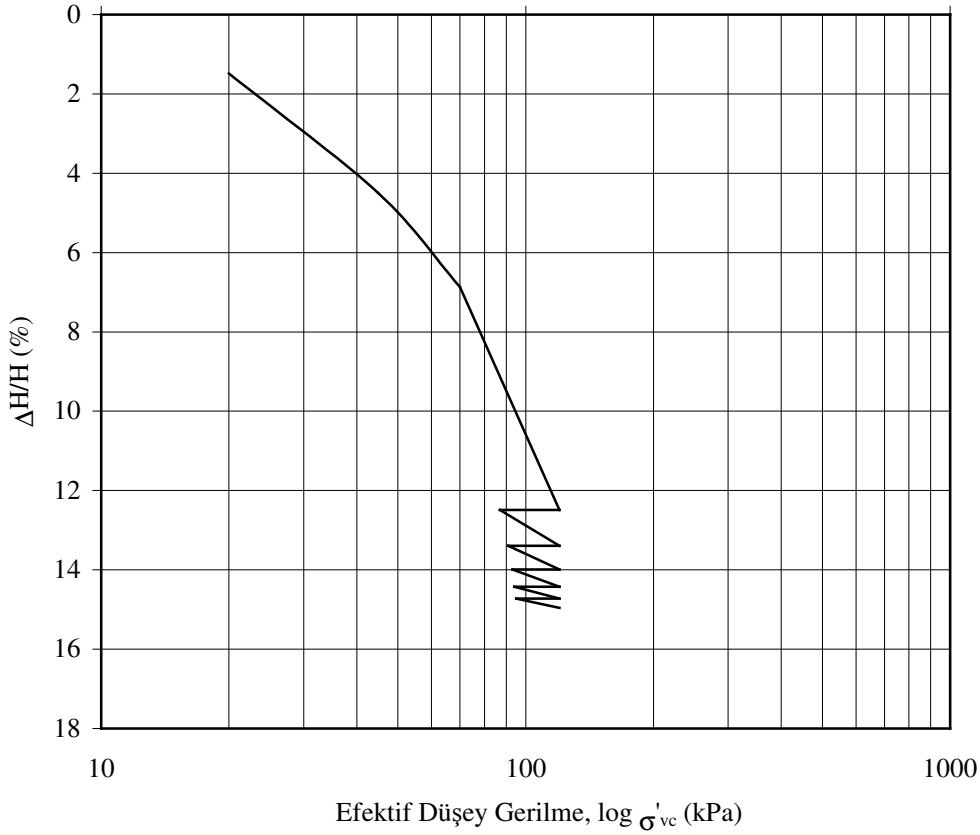


Şekil A40. A20 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

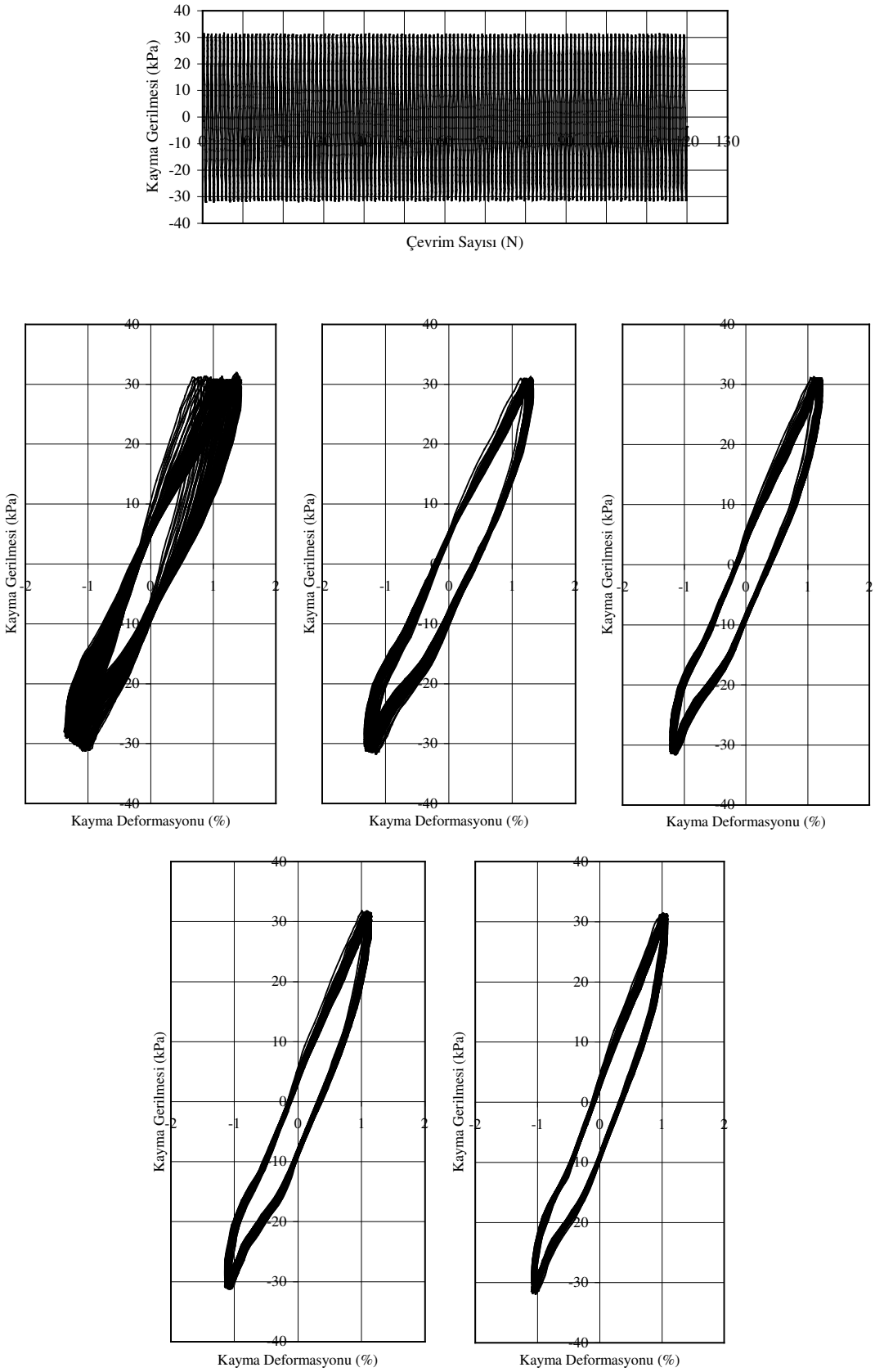


Şekil A41. A21 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.55).

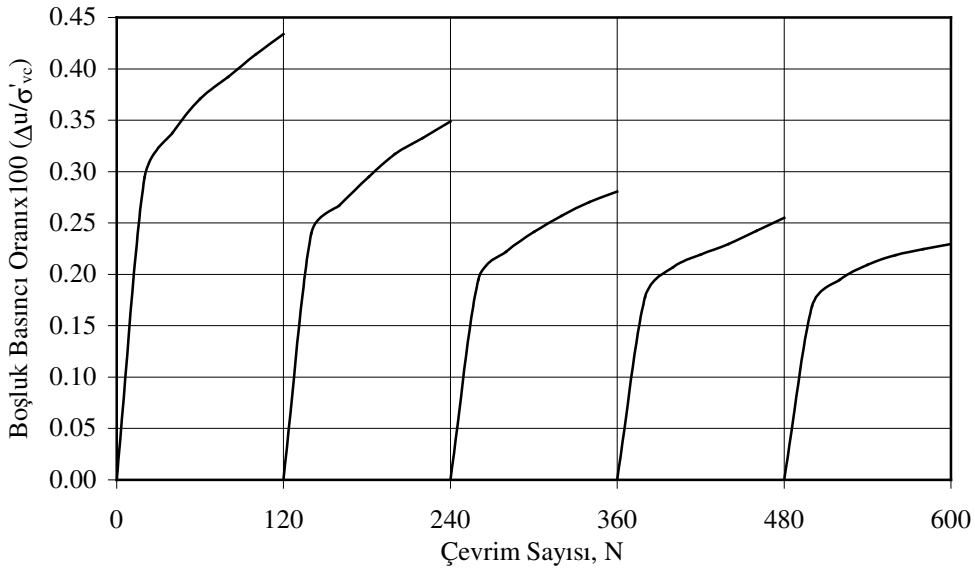


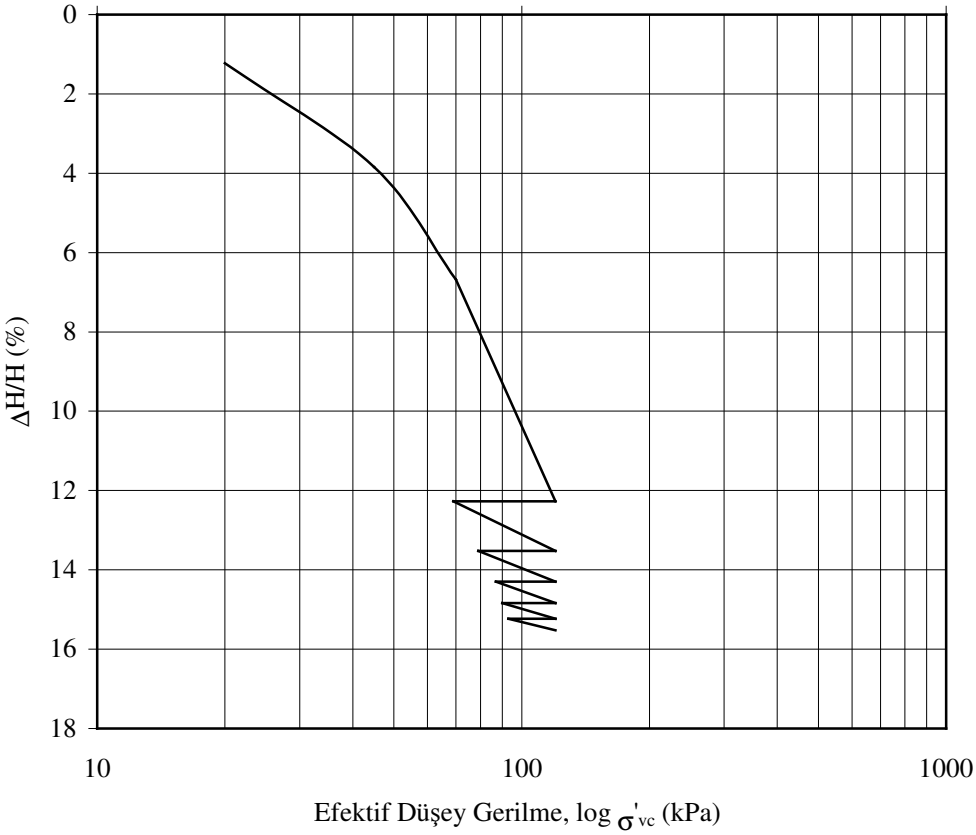


Şekil A42. A21 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

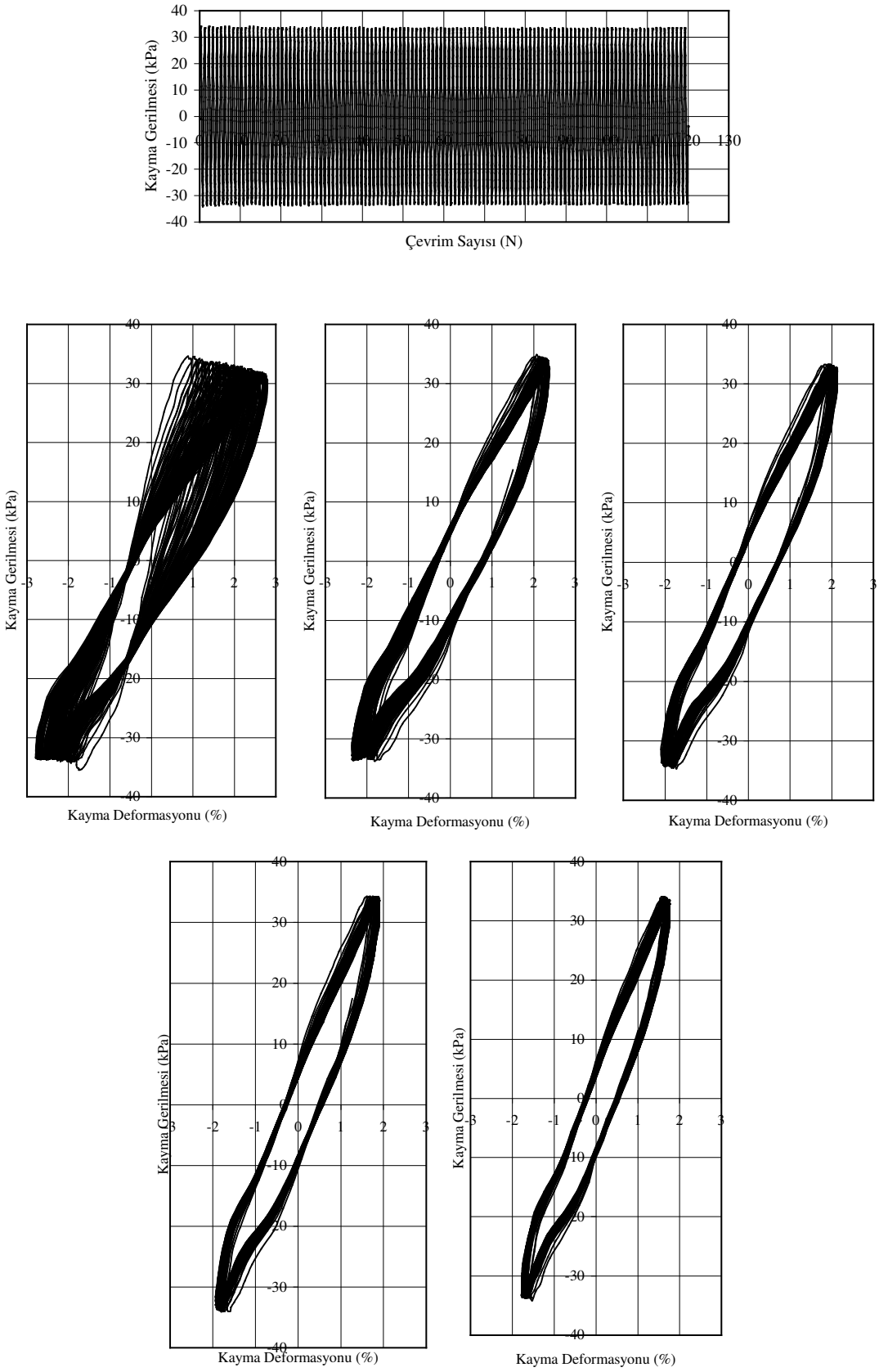


Şekil A43. A22 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.60).

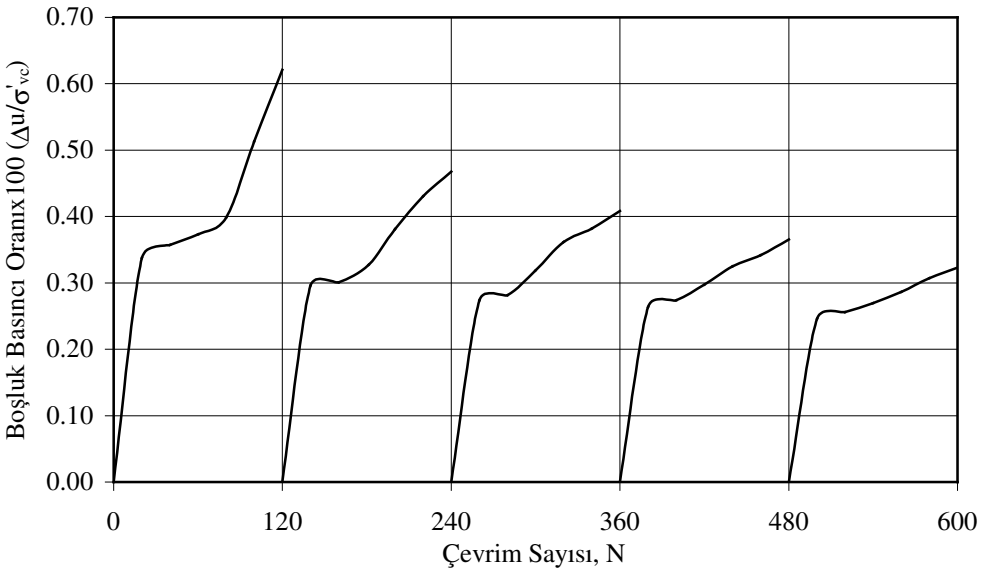


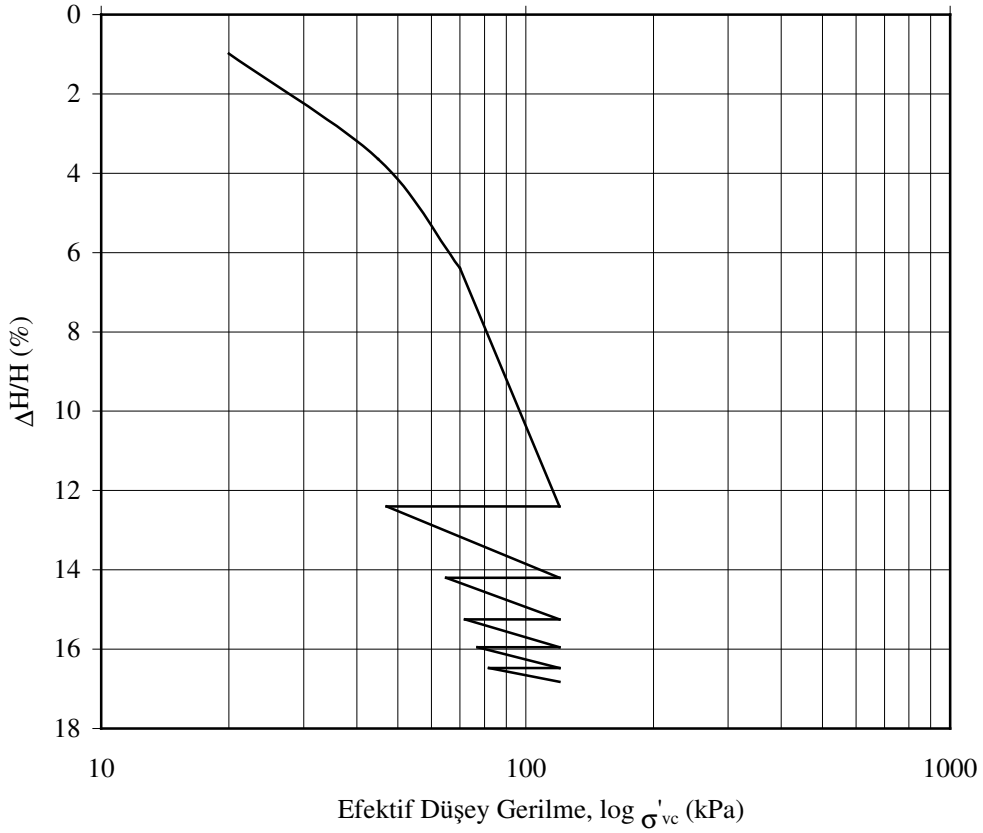


Şekil A44. A22 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.



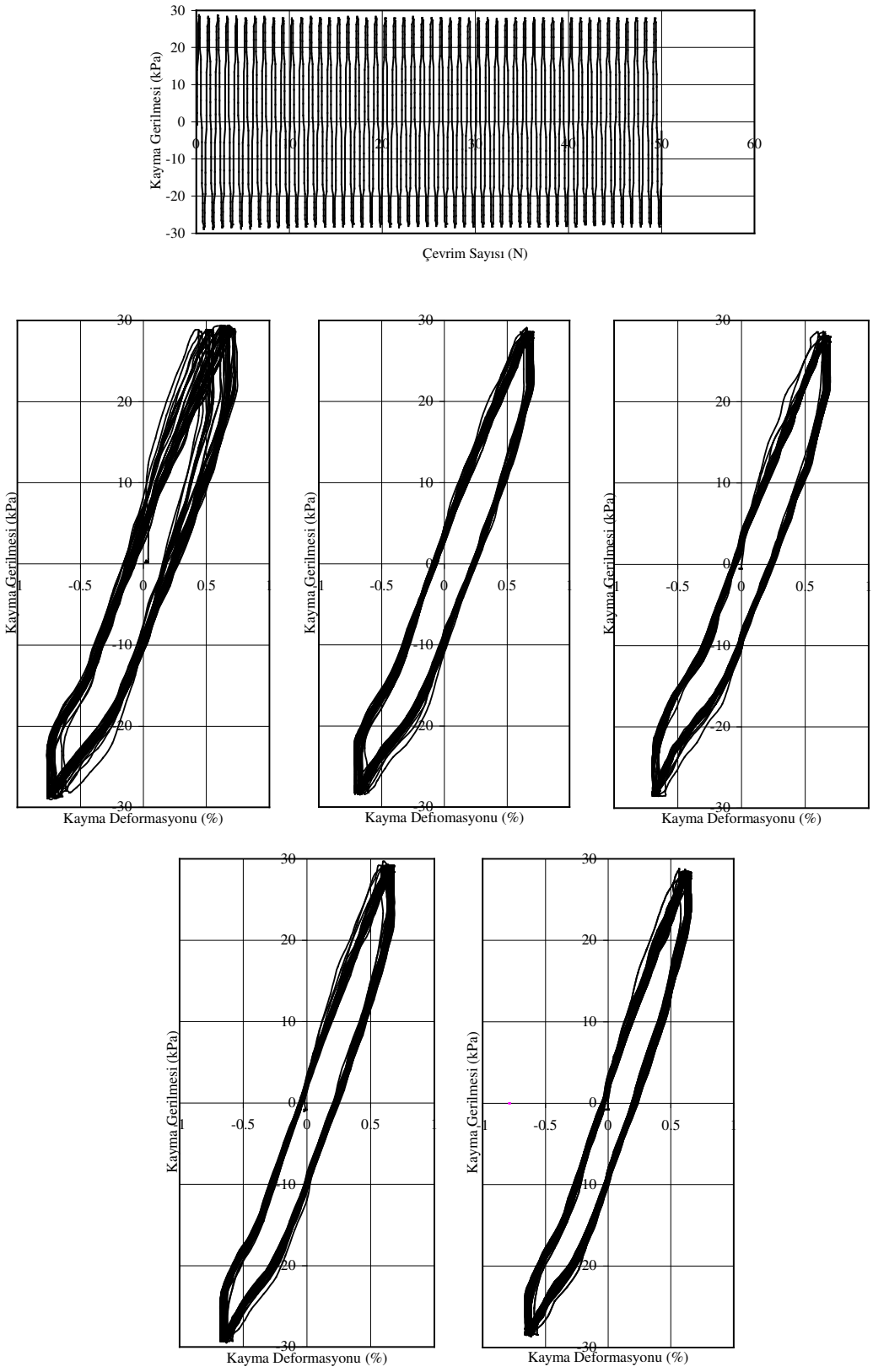
Şekil A45. A23 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.65).



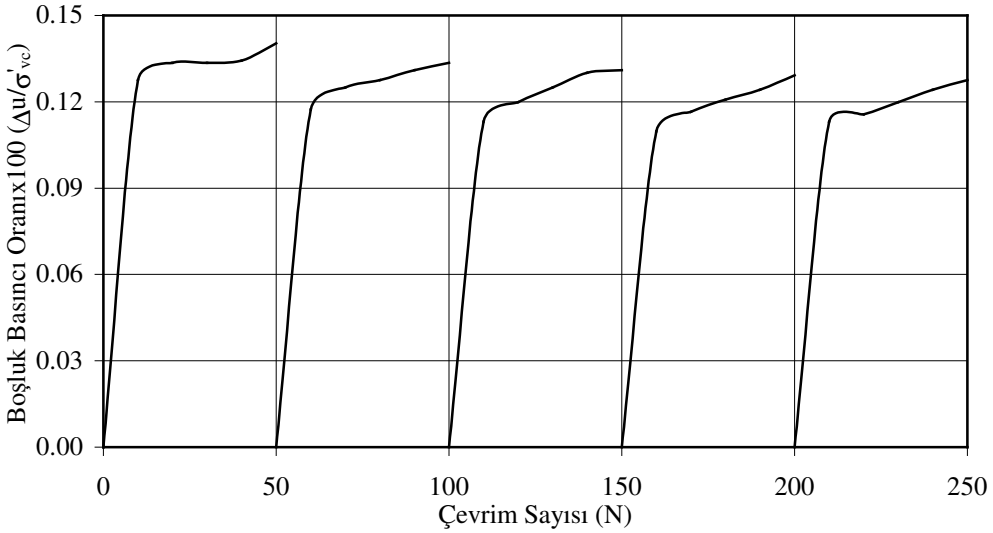


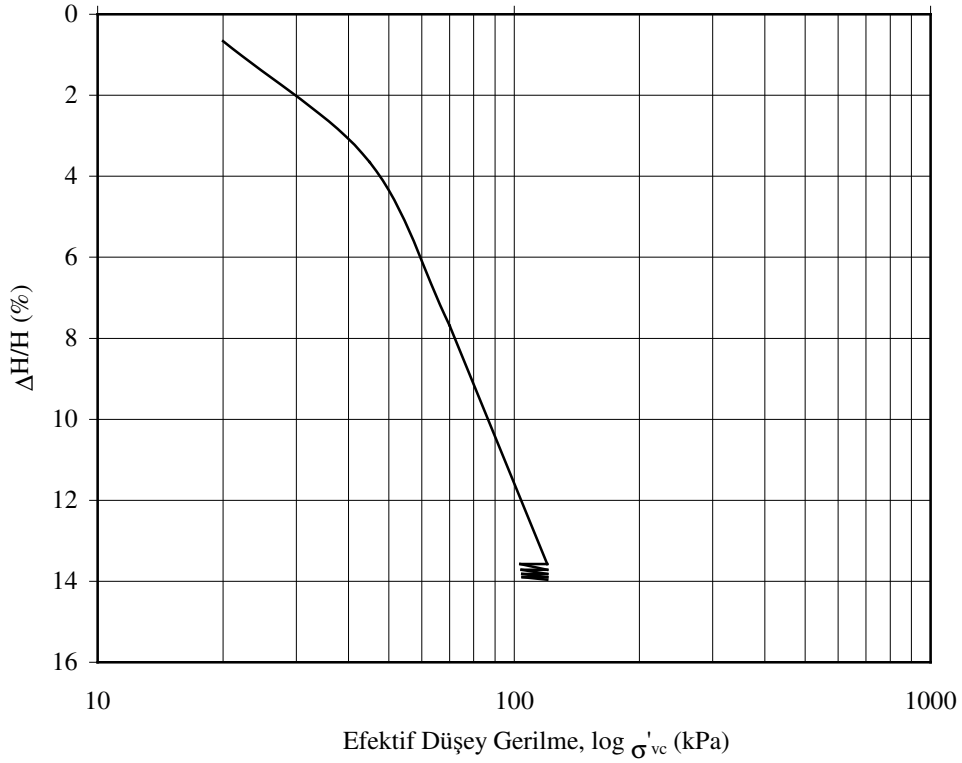
Şekil A46. A23 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

EK B. B GRUBU DENEY GRAFİKLERİ

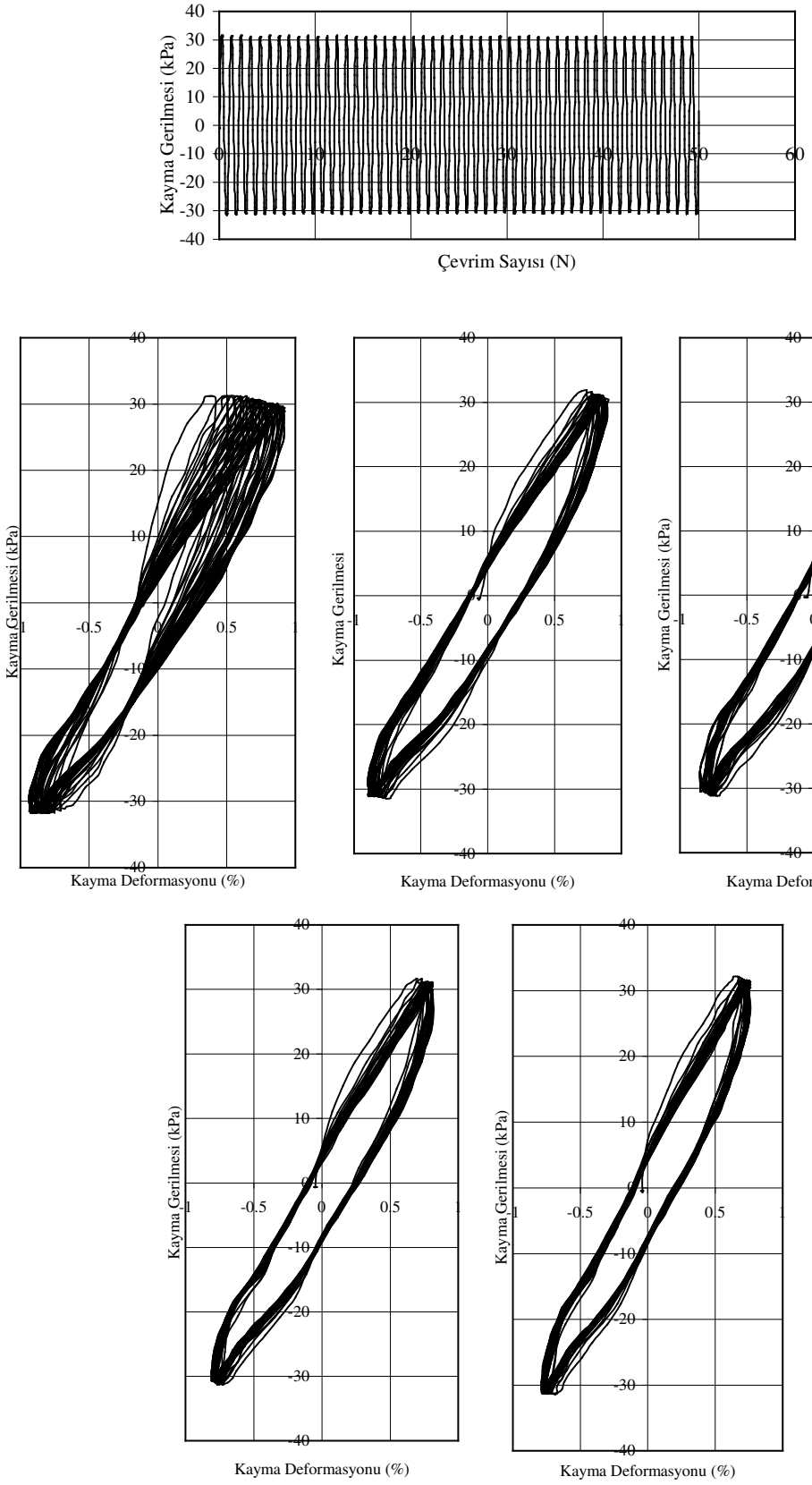


Şekil B1. B1 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.55).

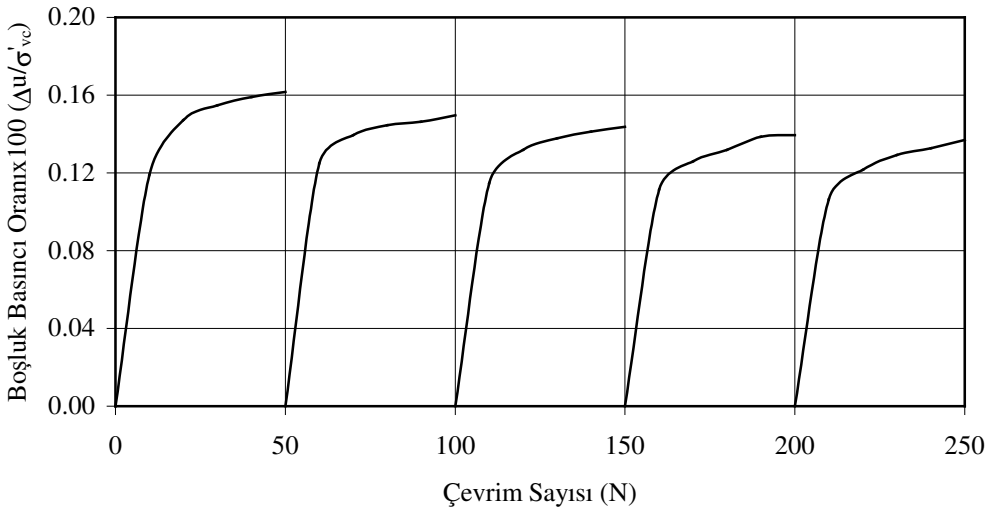


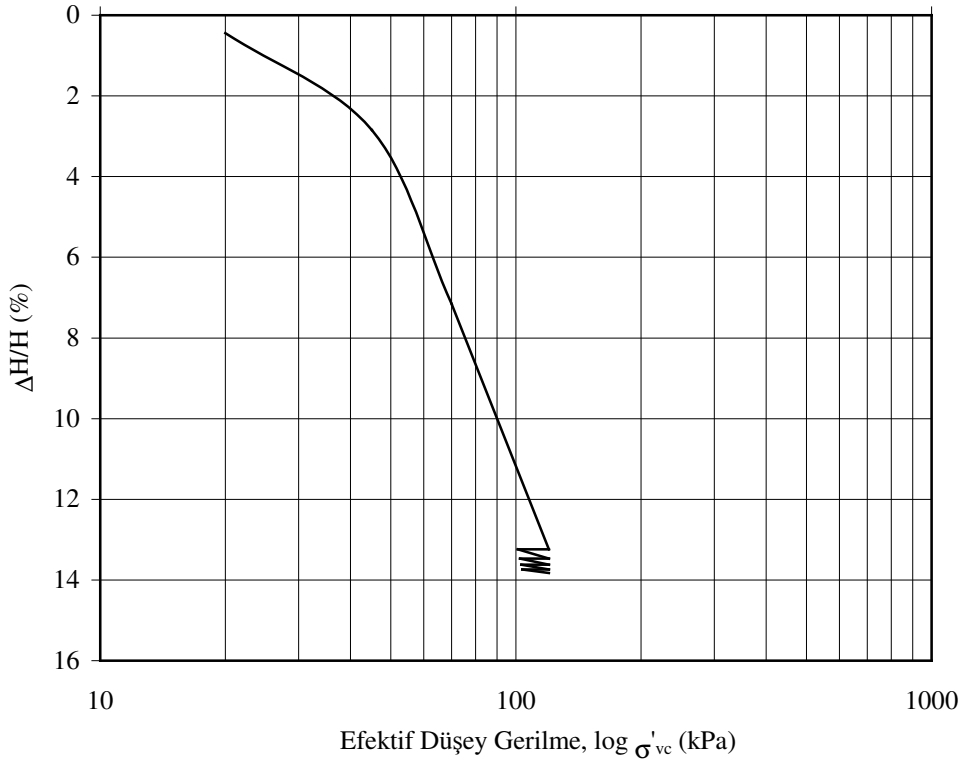


Şekil B2. B1 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

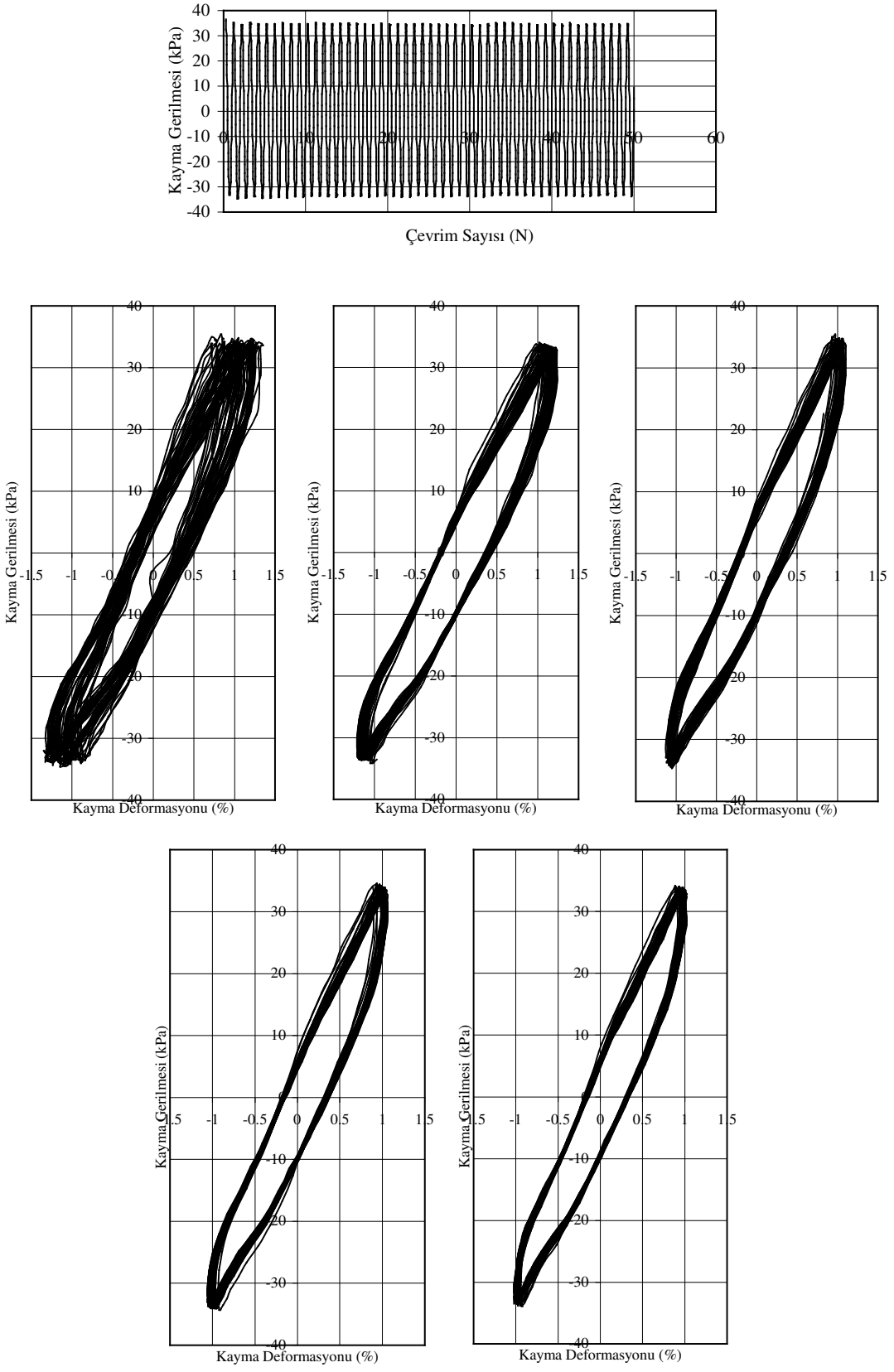


Şekil B3. B2 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.60).

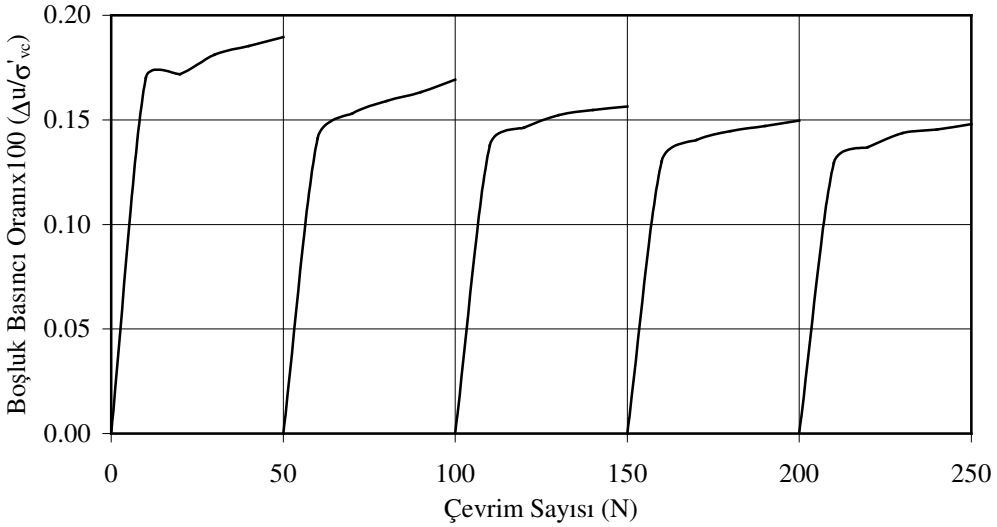


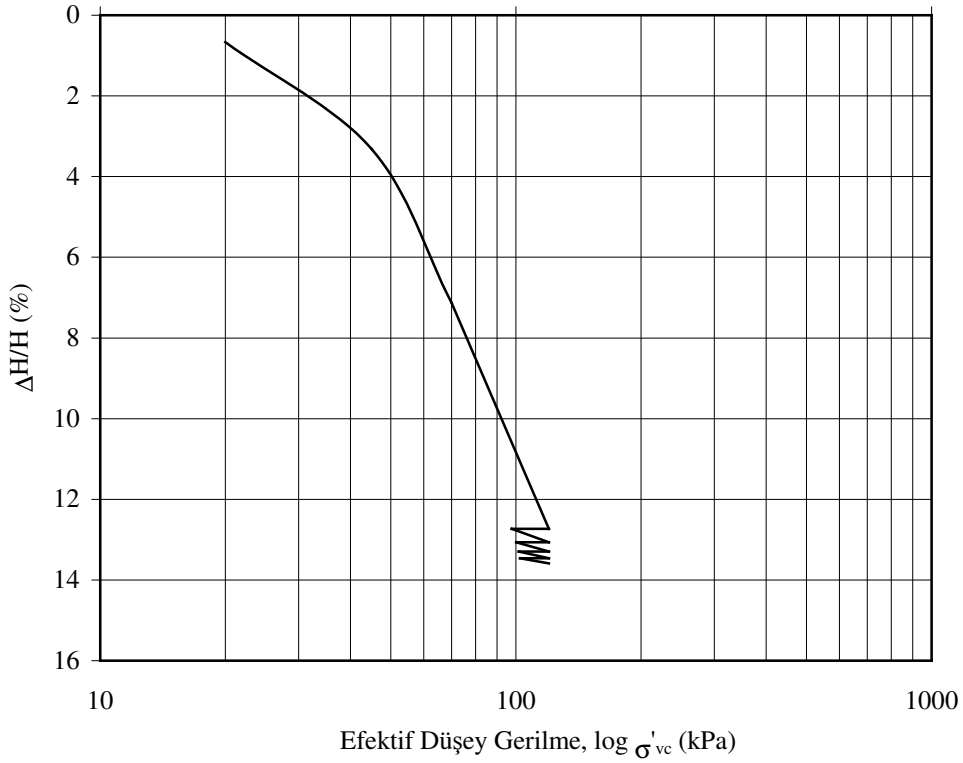


Şekil B4. B2 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

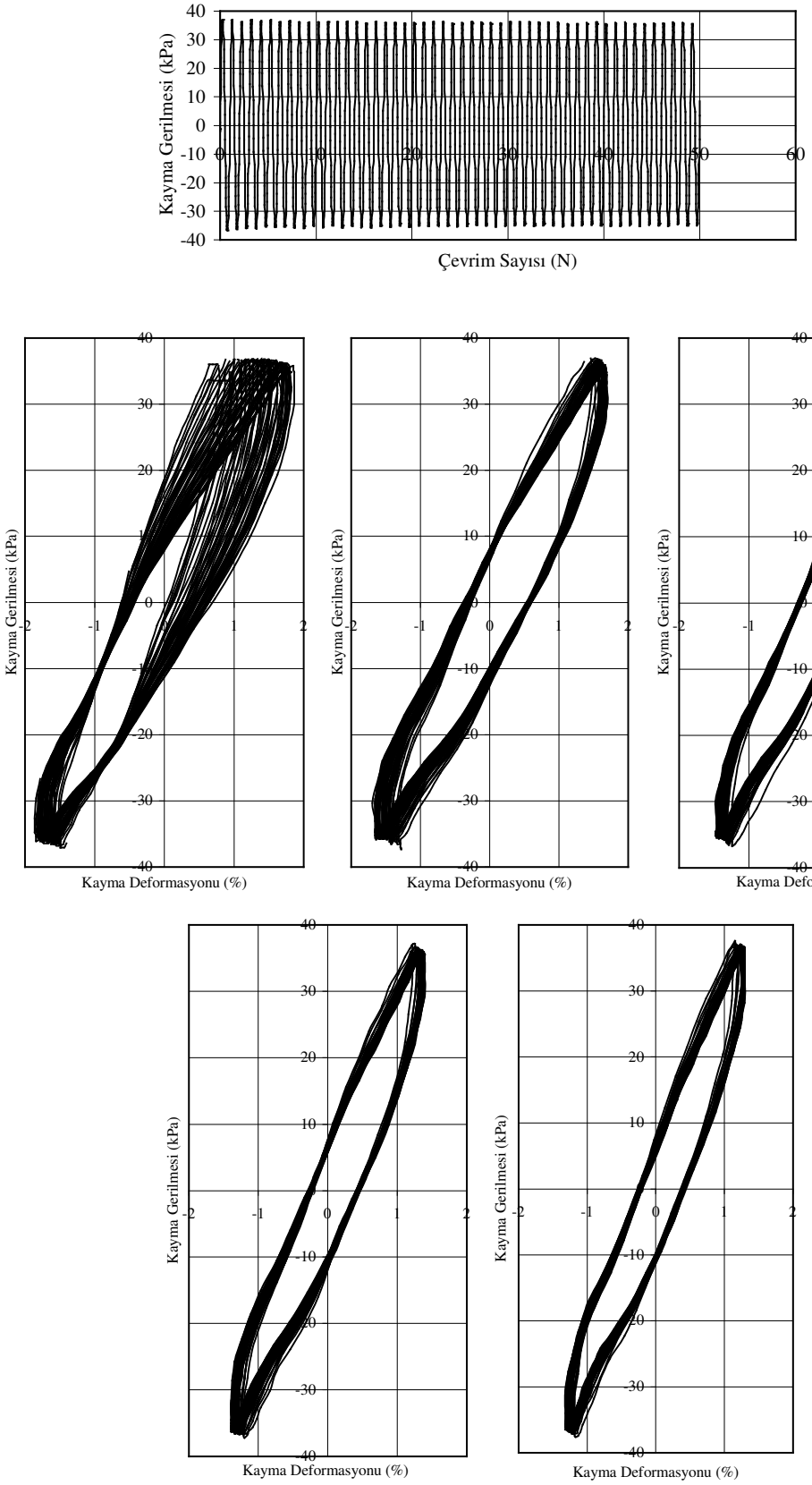


Şekil B5. B3 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.65).

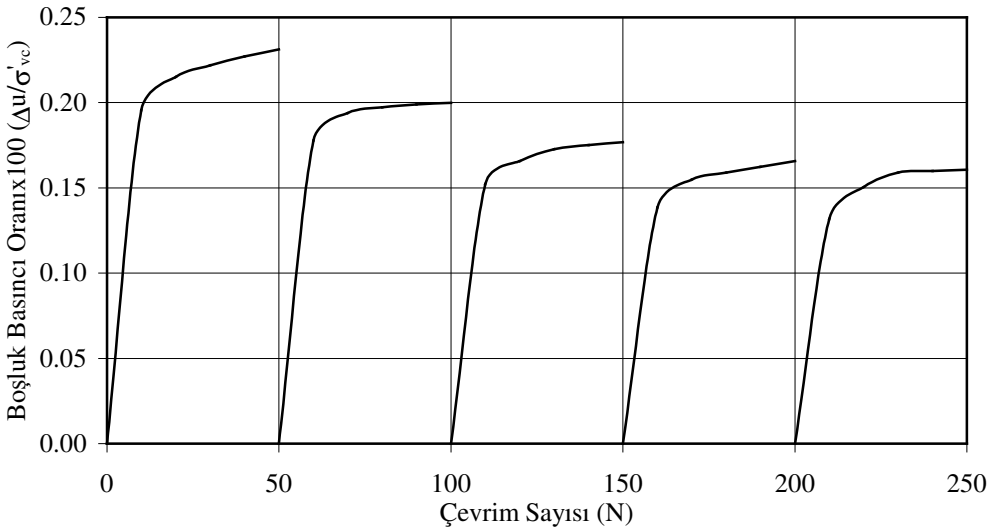


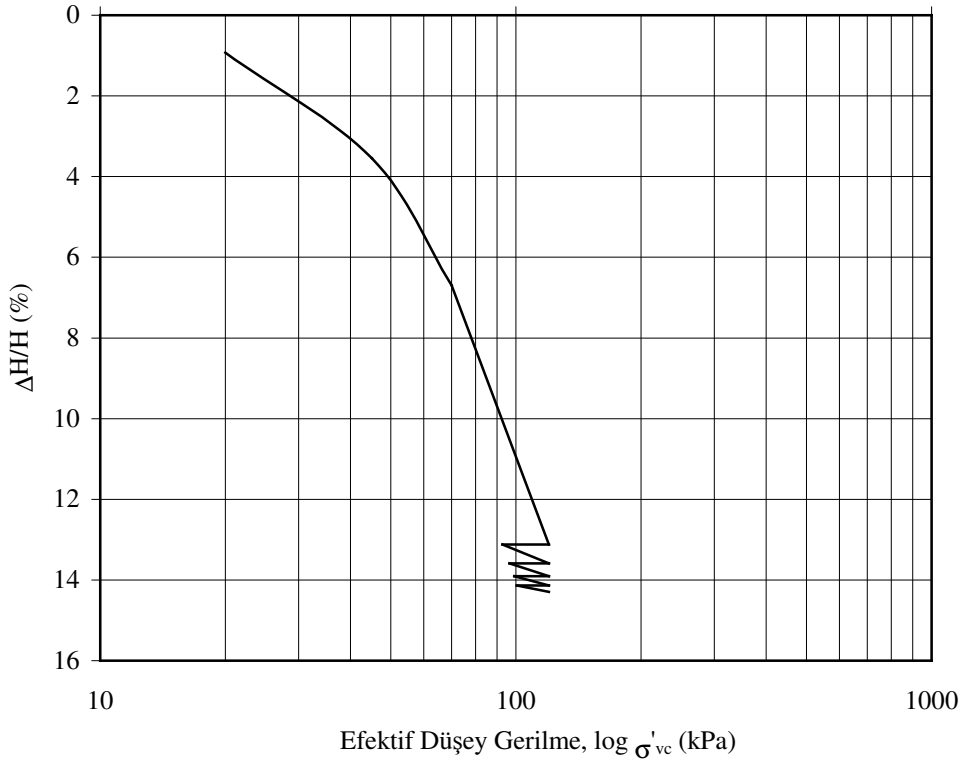


Şekil B6. B3 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

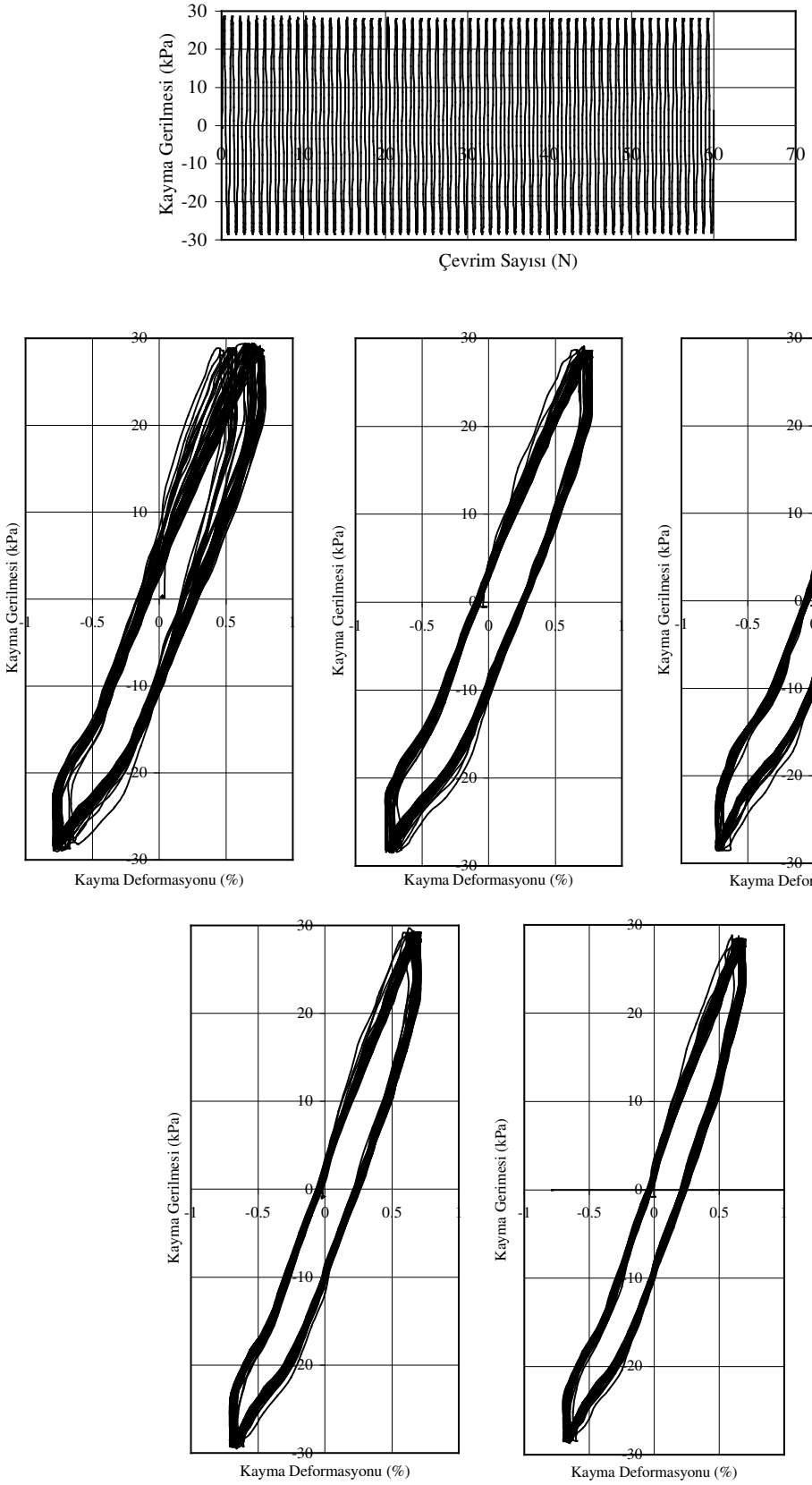


Şekil B7. B4 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=50, τ/τ_f=0.70).

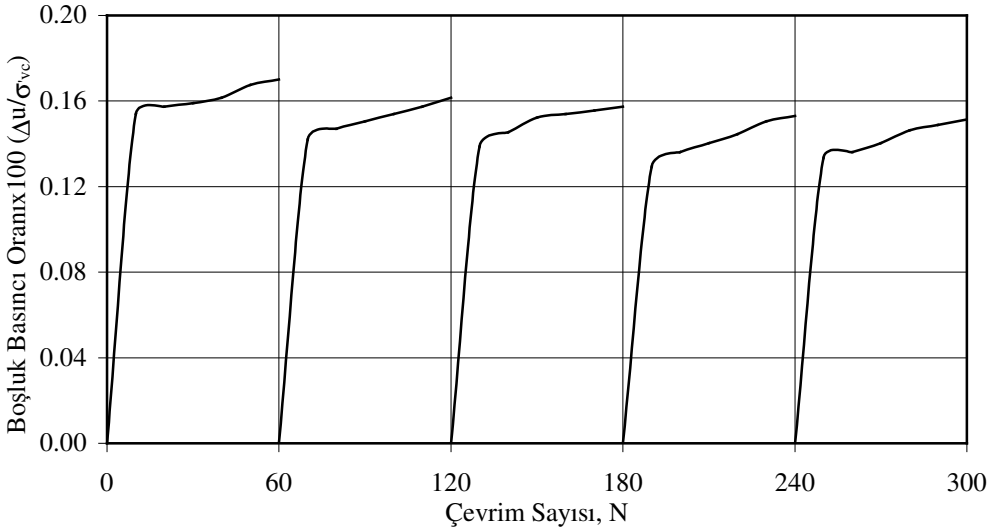


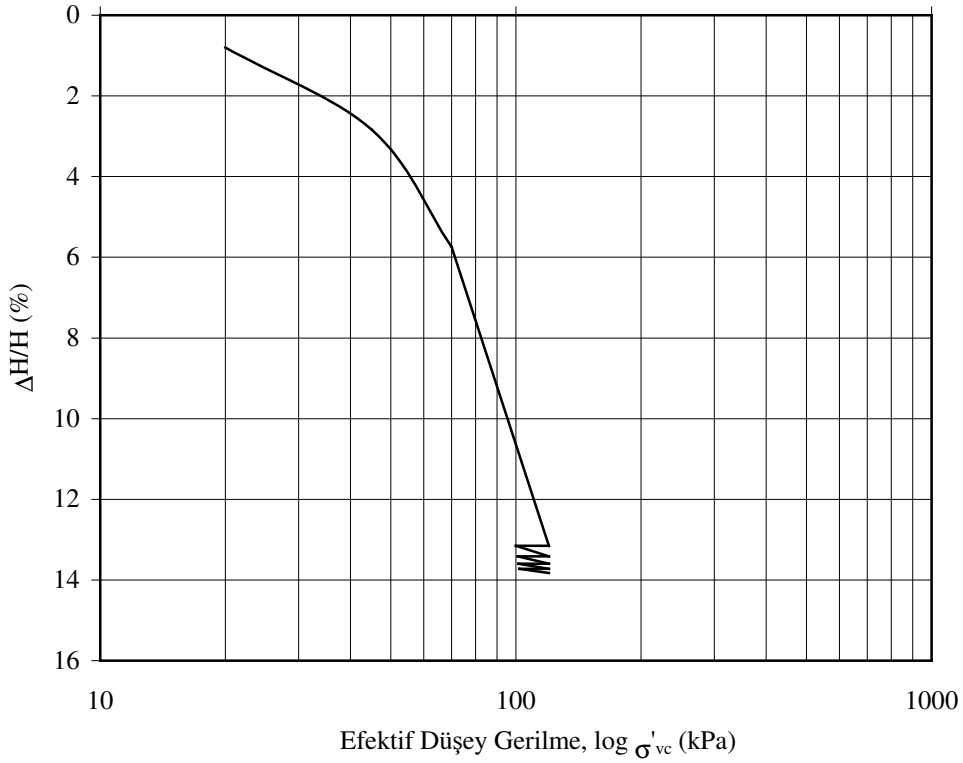


Şekil B8. B4 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

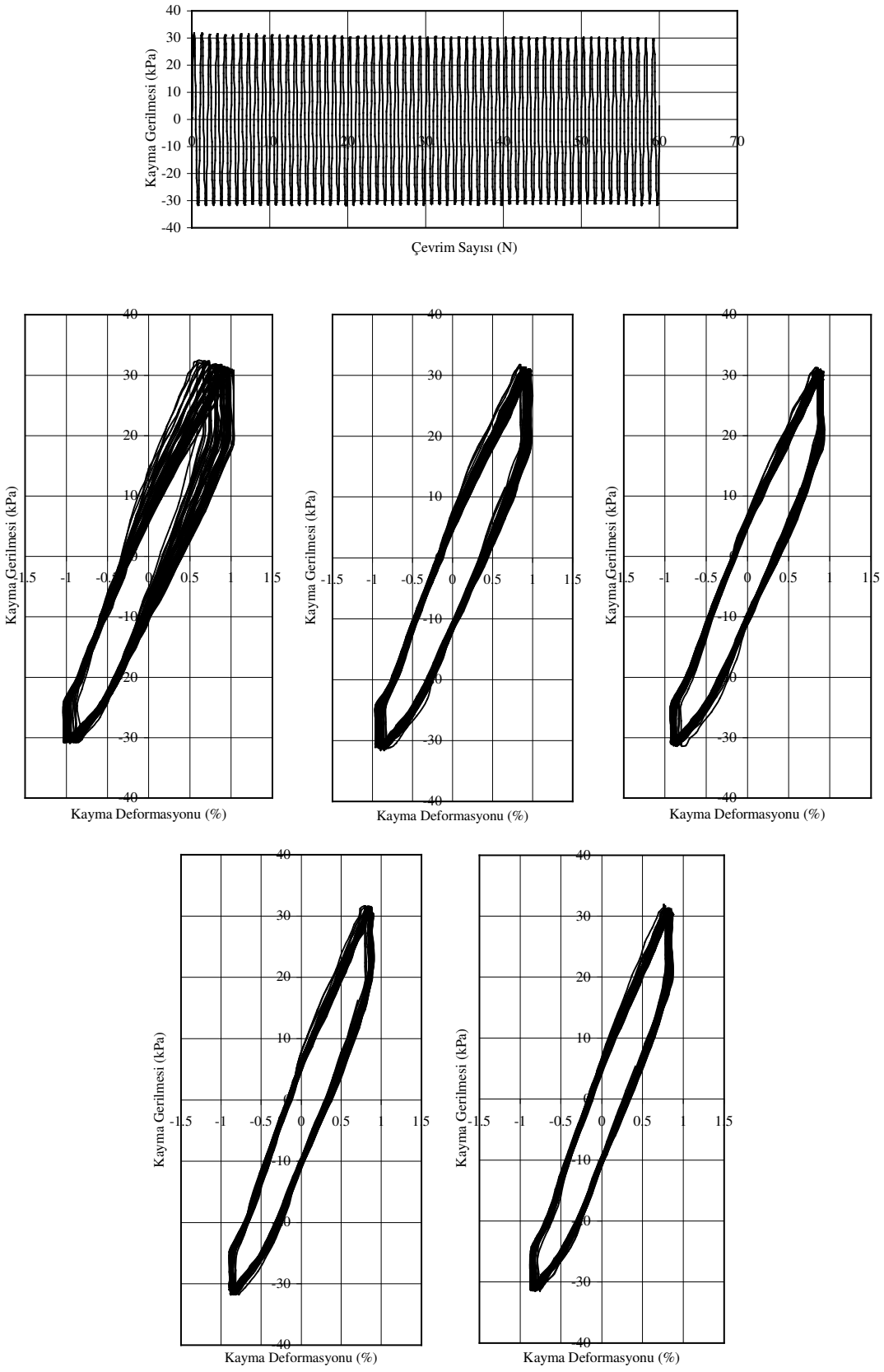


Şekil B9. B5 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.55).

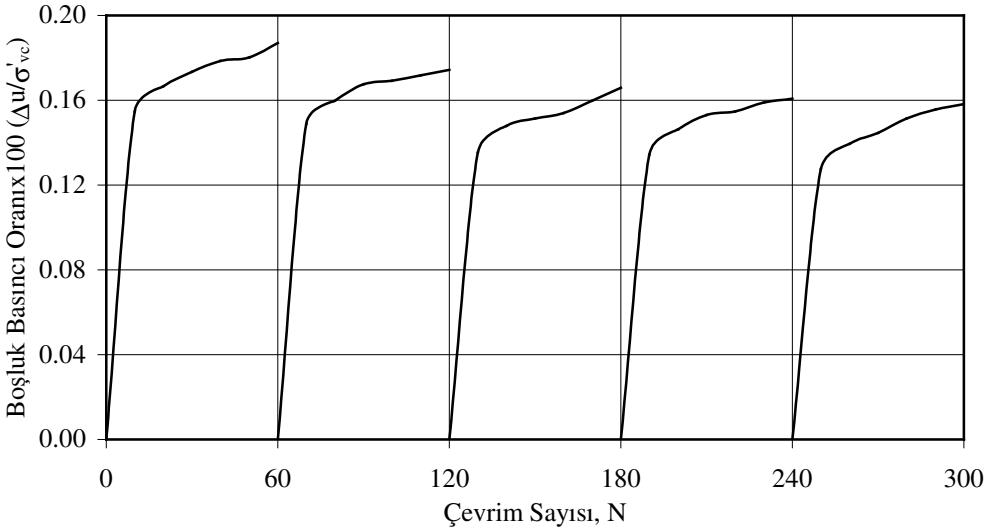


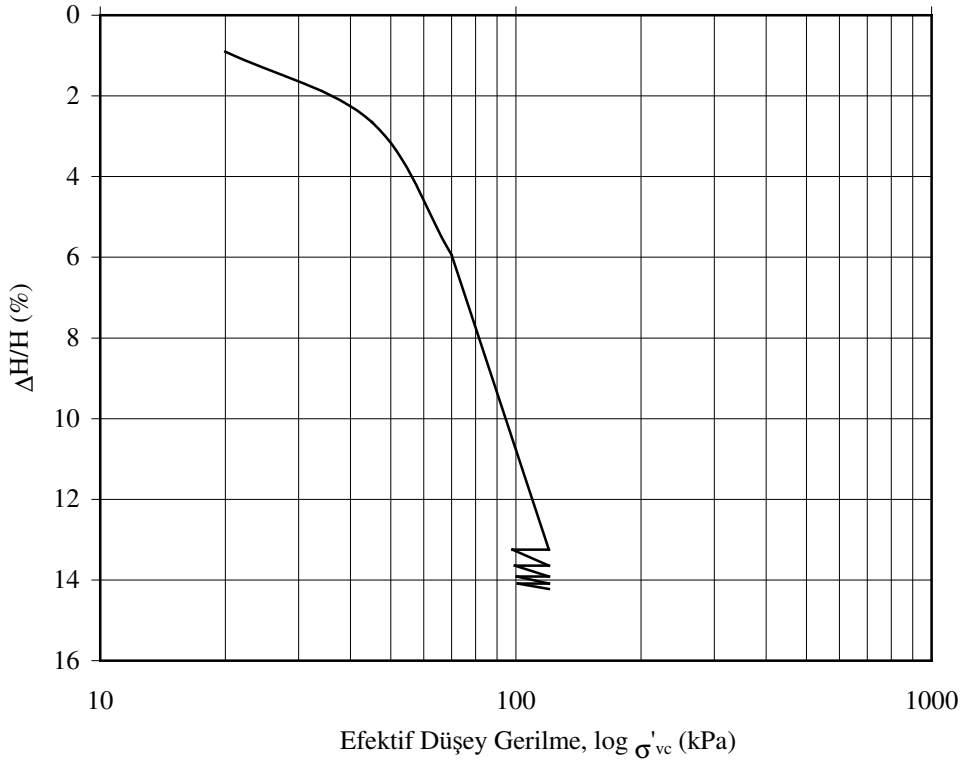


Şekil B10. B5 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

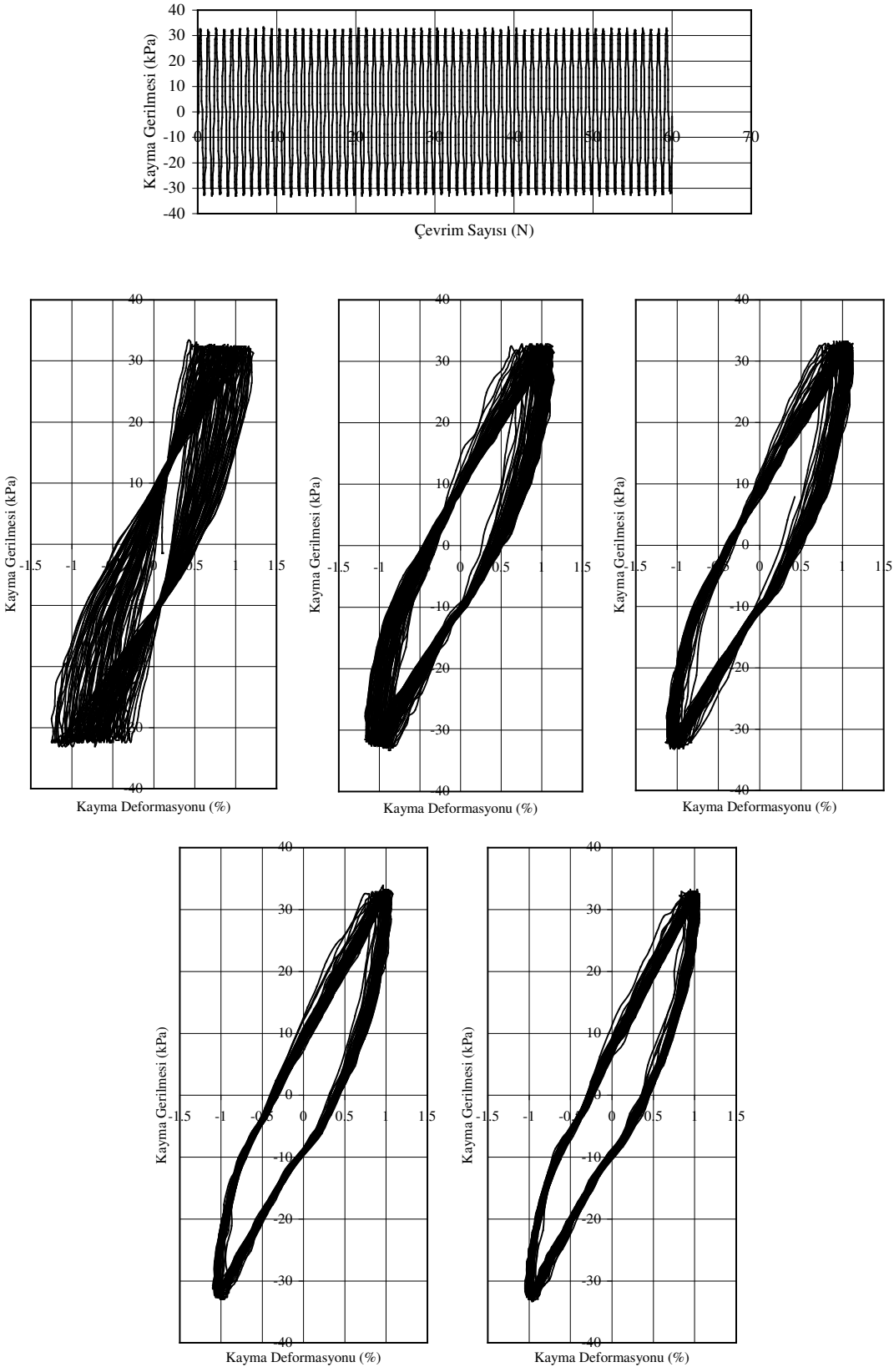


Şekil B11. B6 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.60).

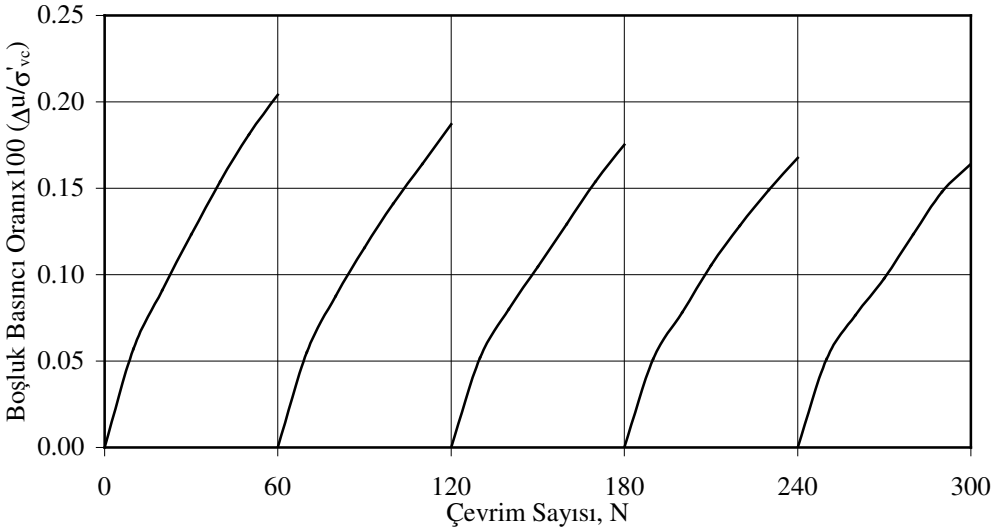


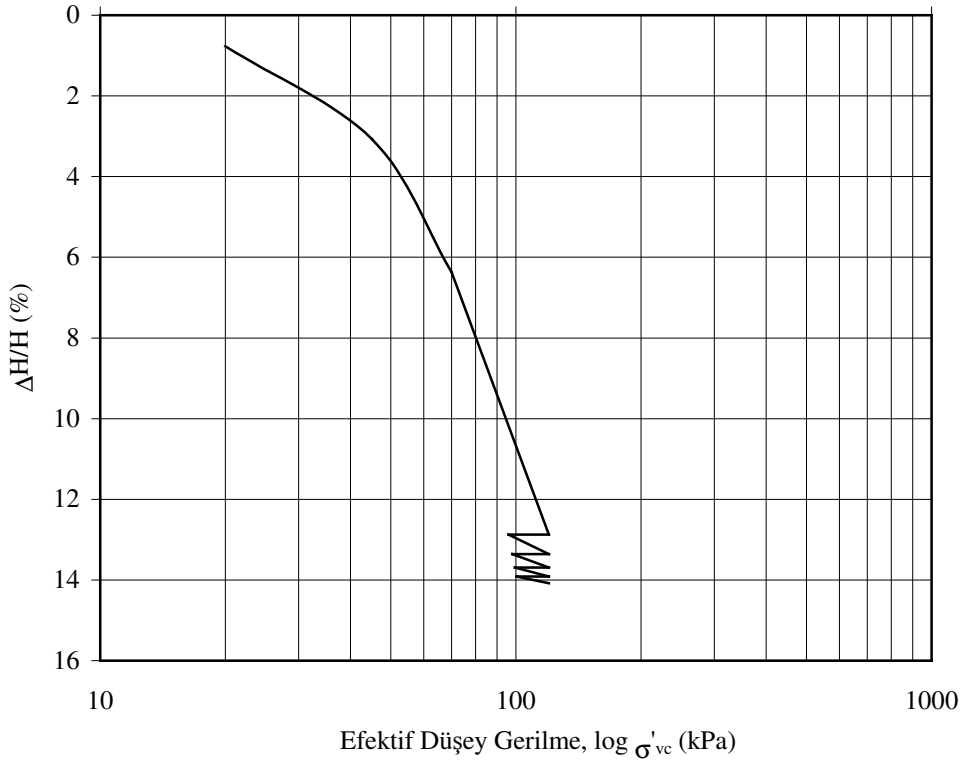


Şekil B12. B6 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

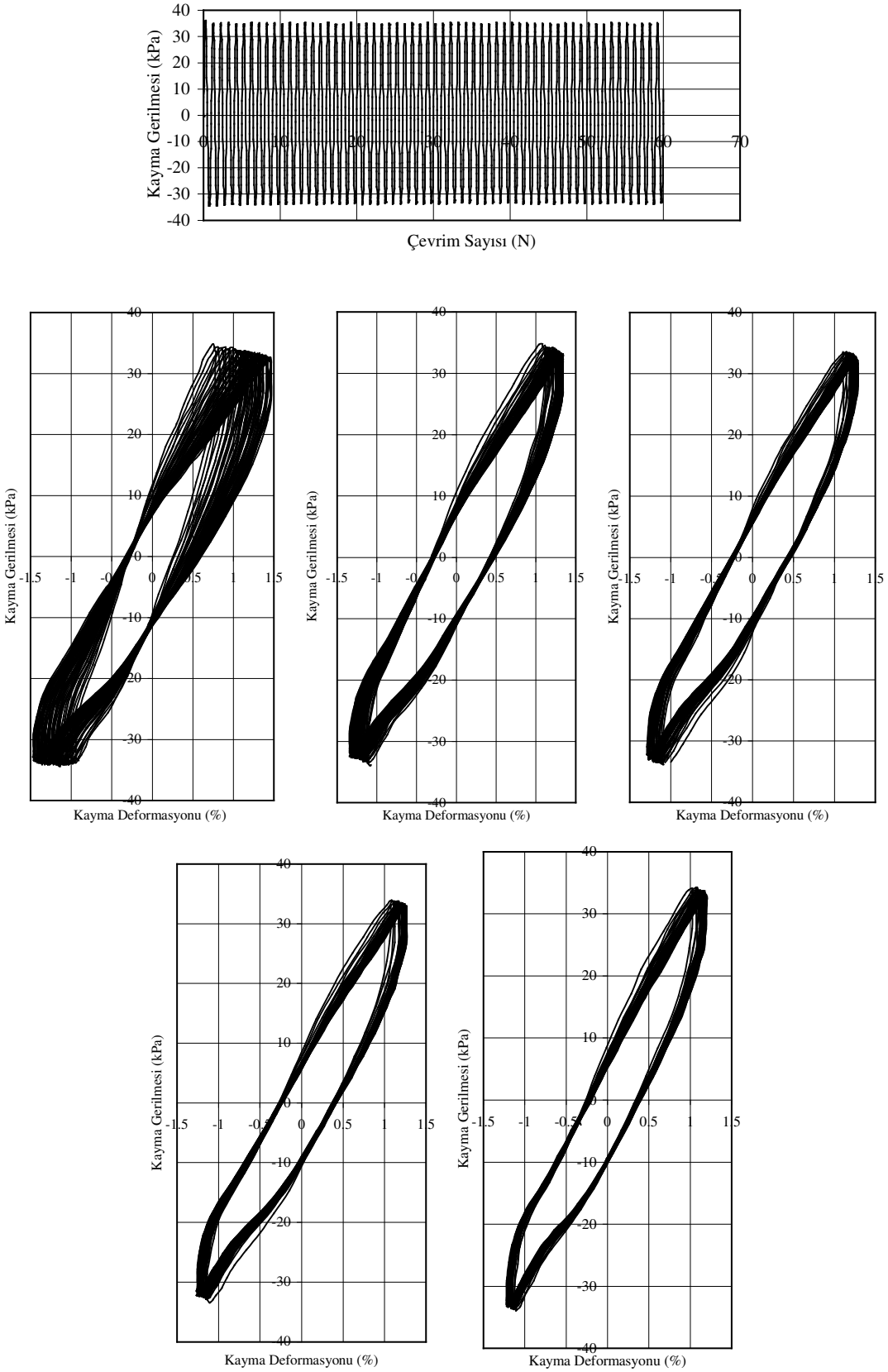


Şekil B13. B7 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.625).

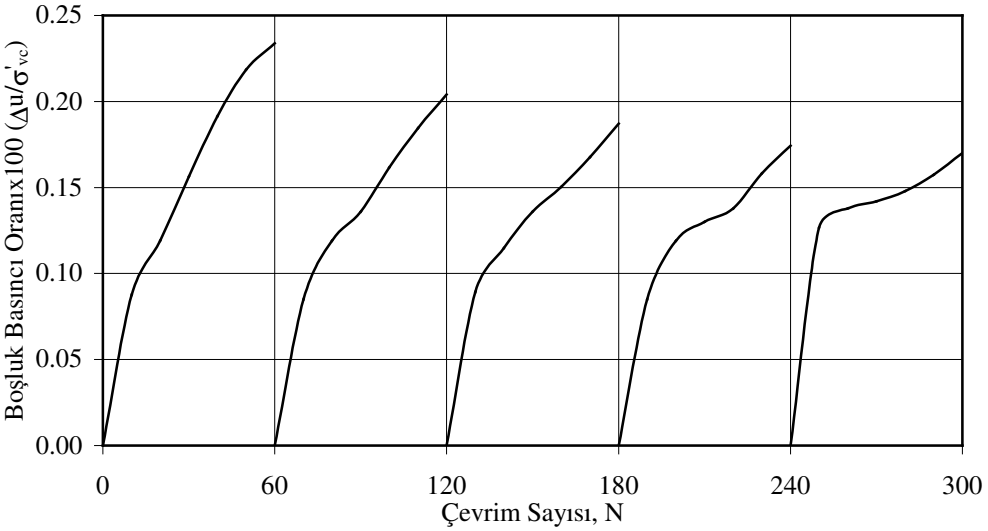


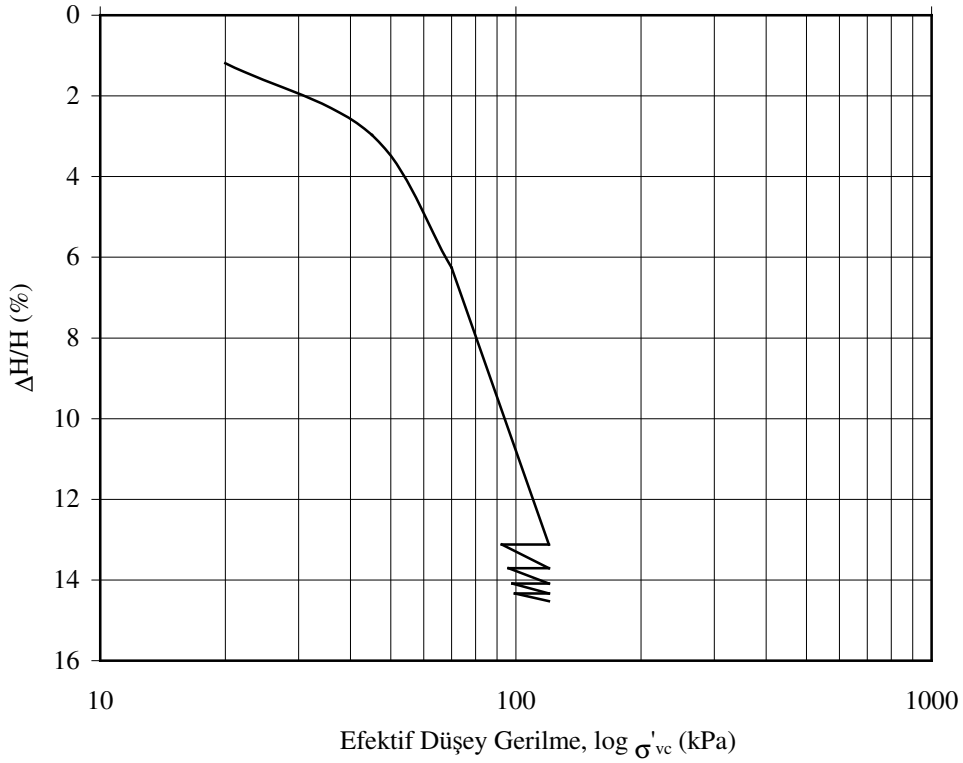


Şekil B14. B7 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

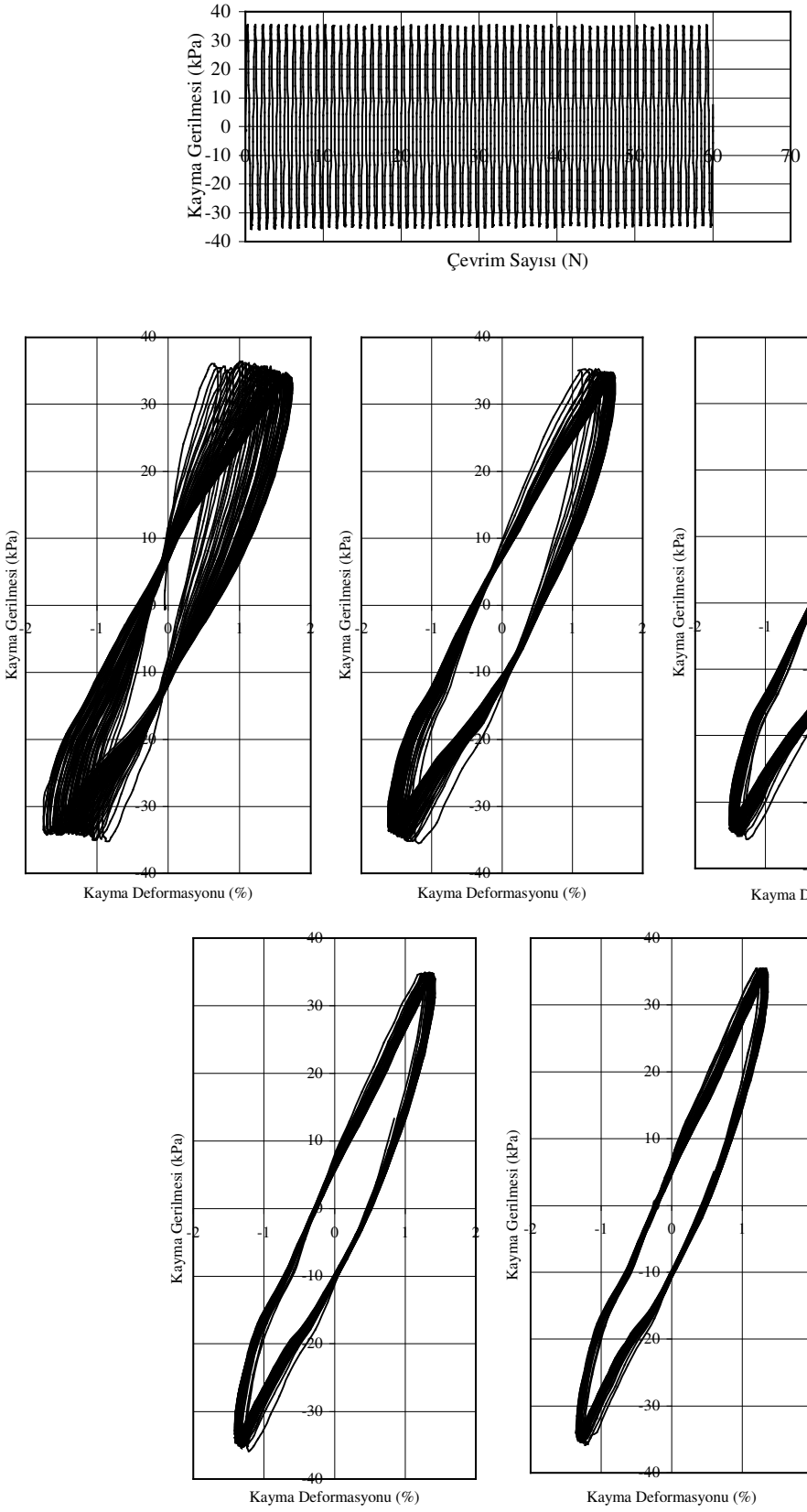


Şekil B15. B8 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.65).

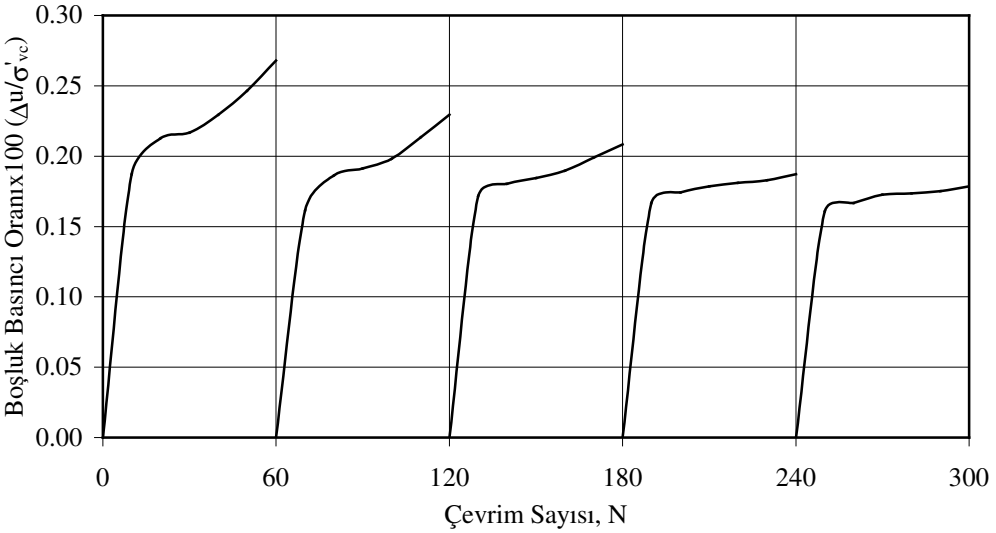


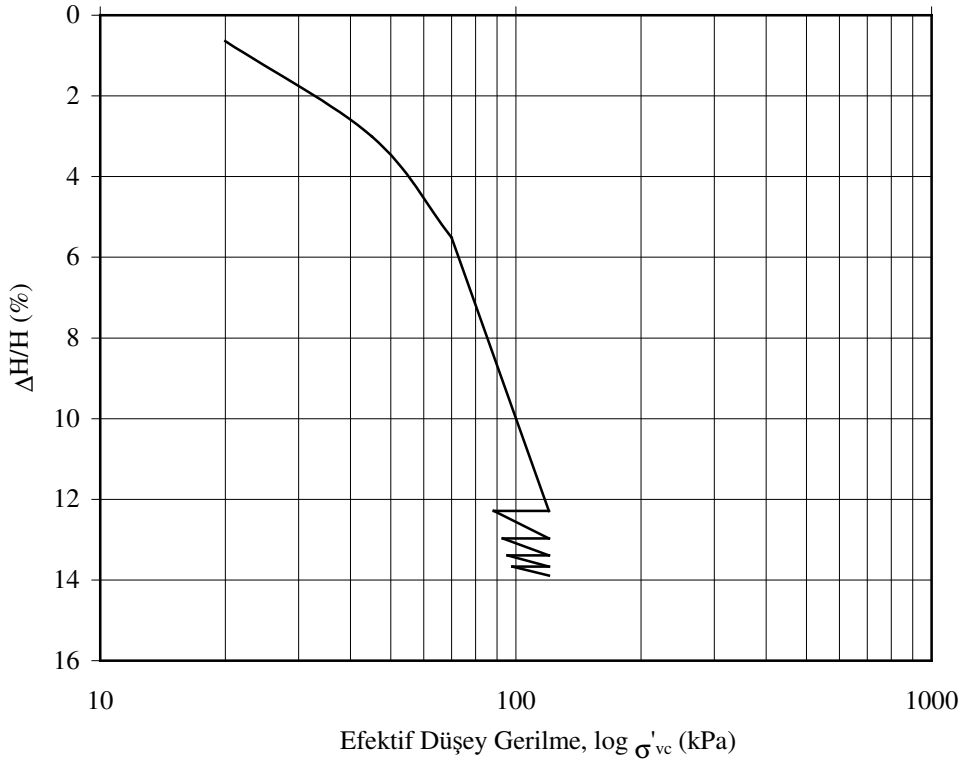


Şekil B16. B8 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

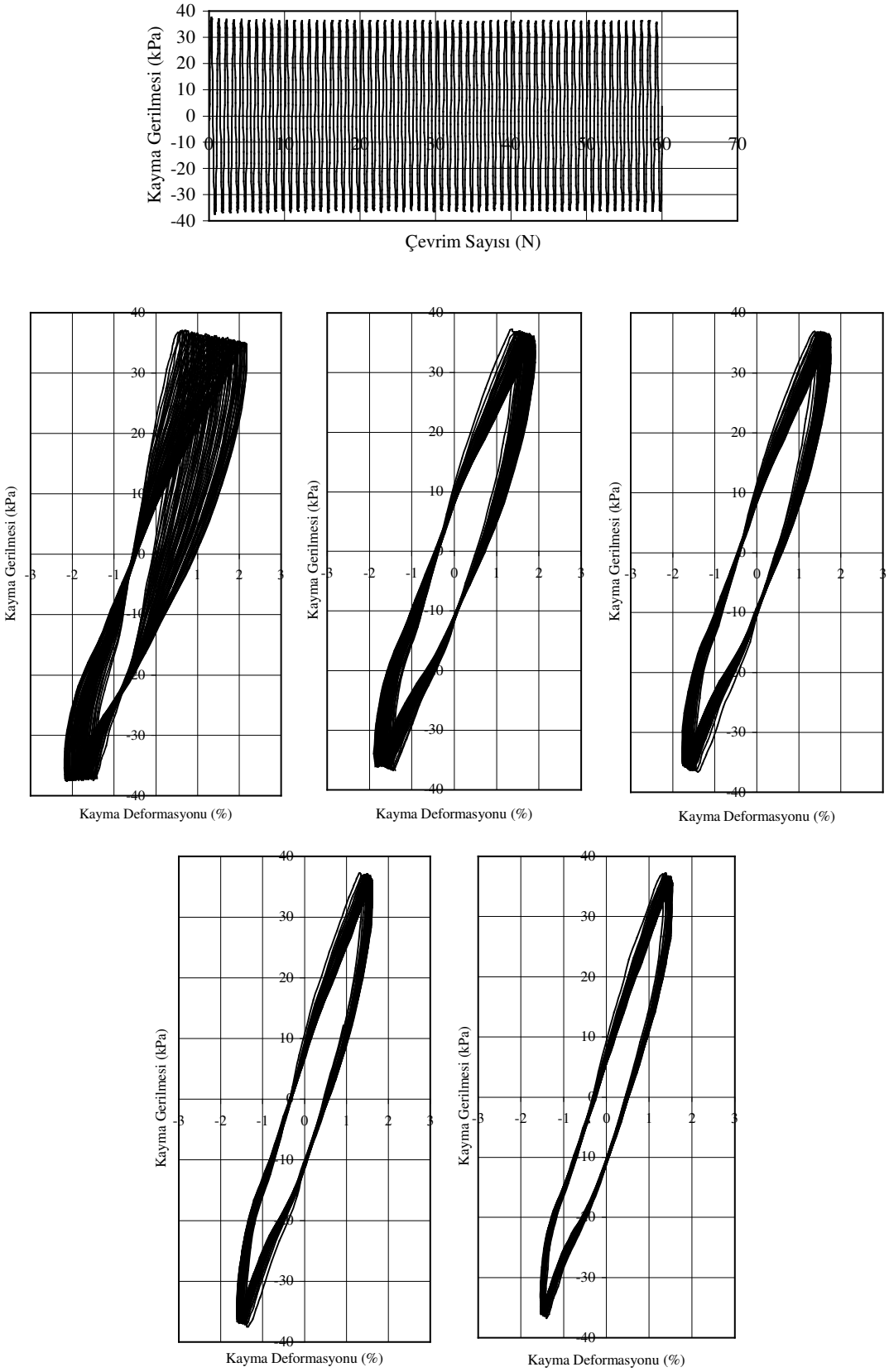


Şekil B17. B9 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.675).

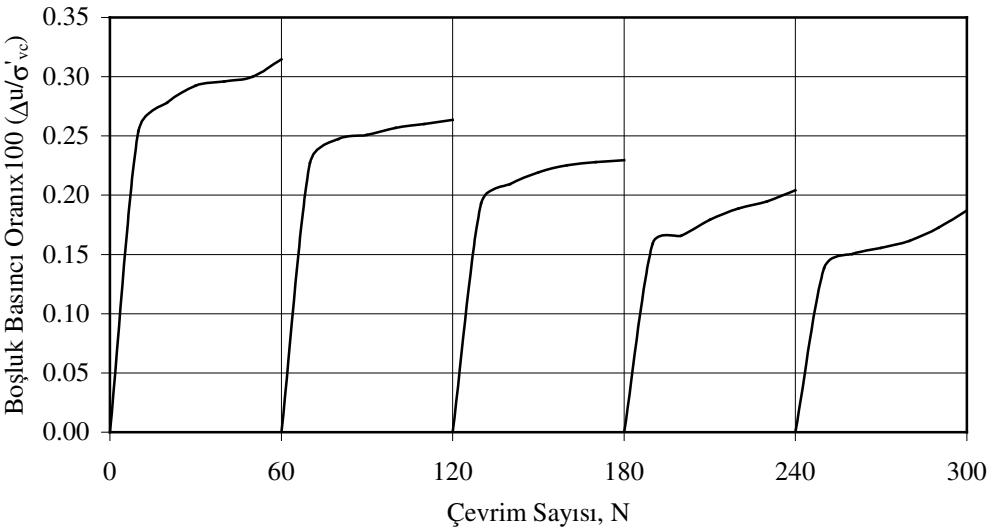


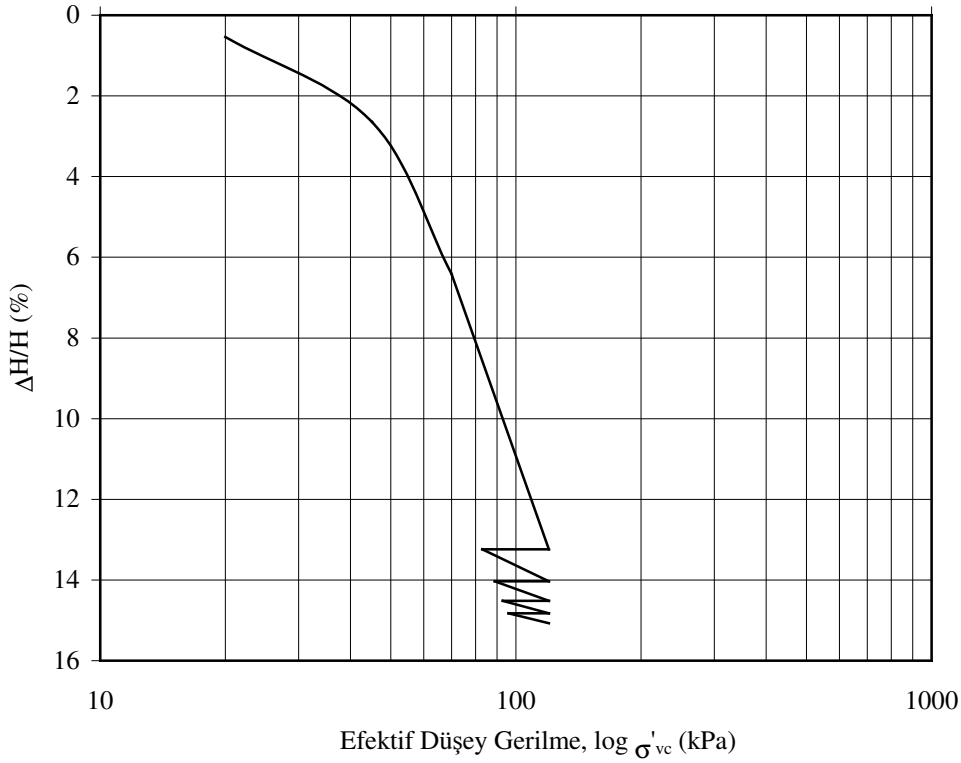


Şekil B18. B9 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

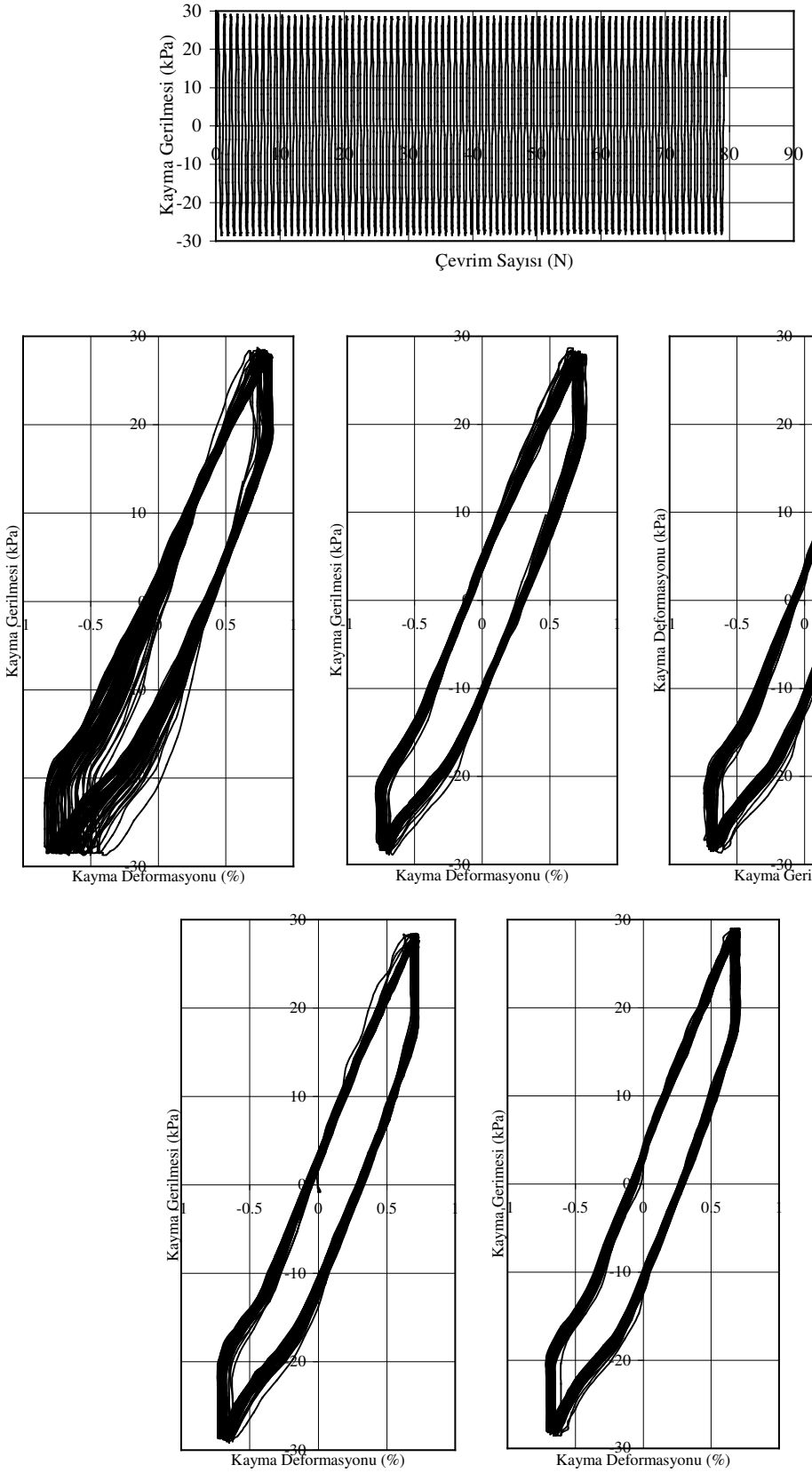


Şekil B19. B10 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=60, τ/τ_f=0.70).

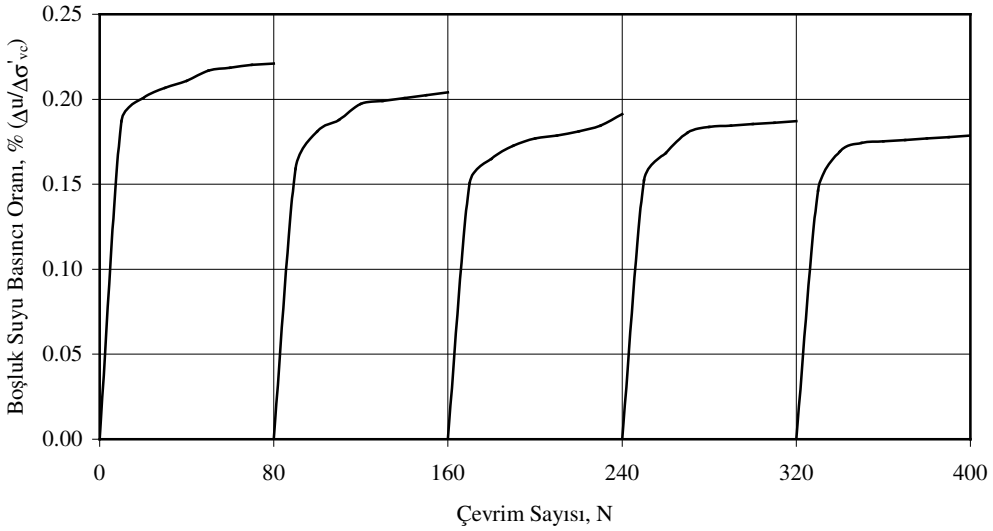


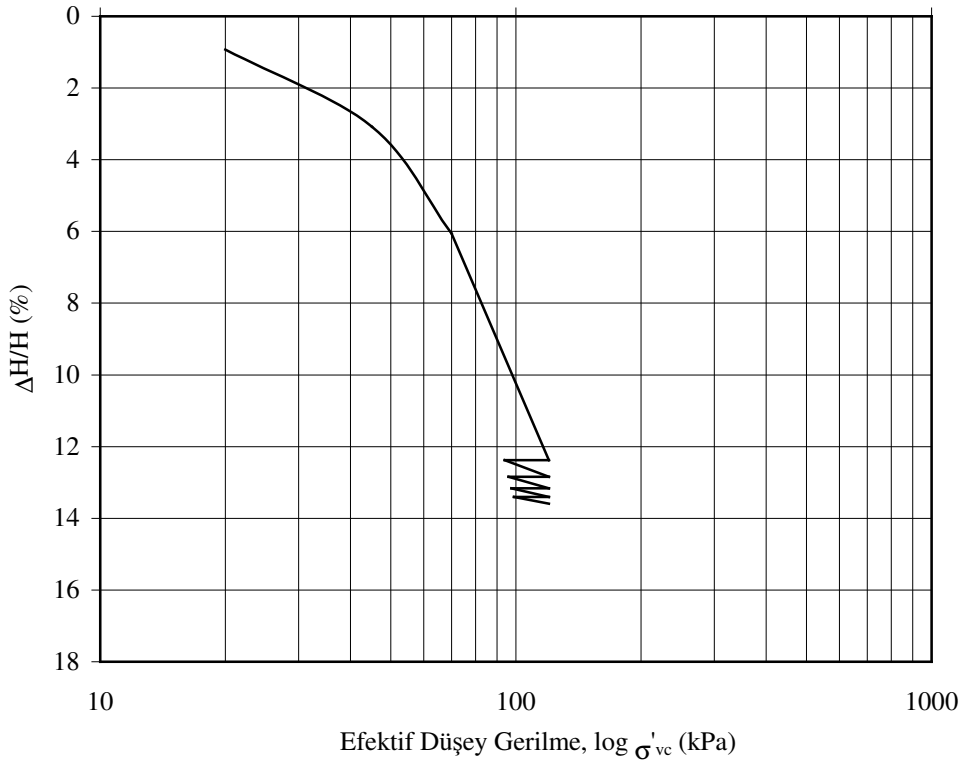


Şekil B20. B10 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

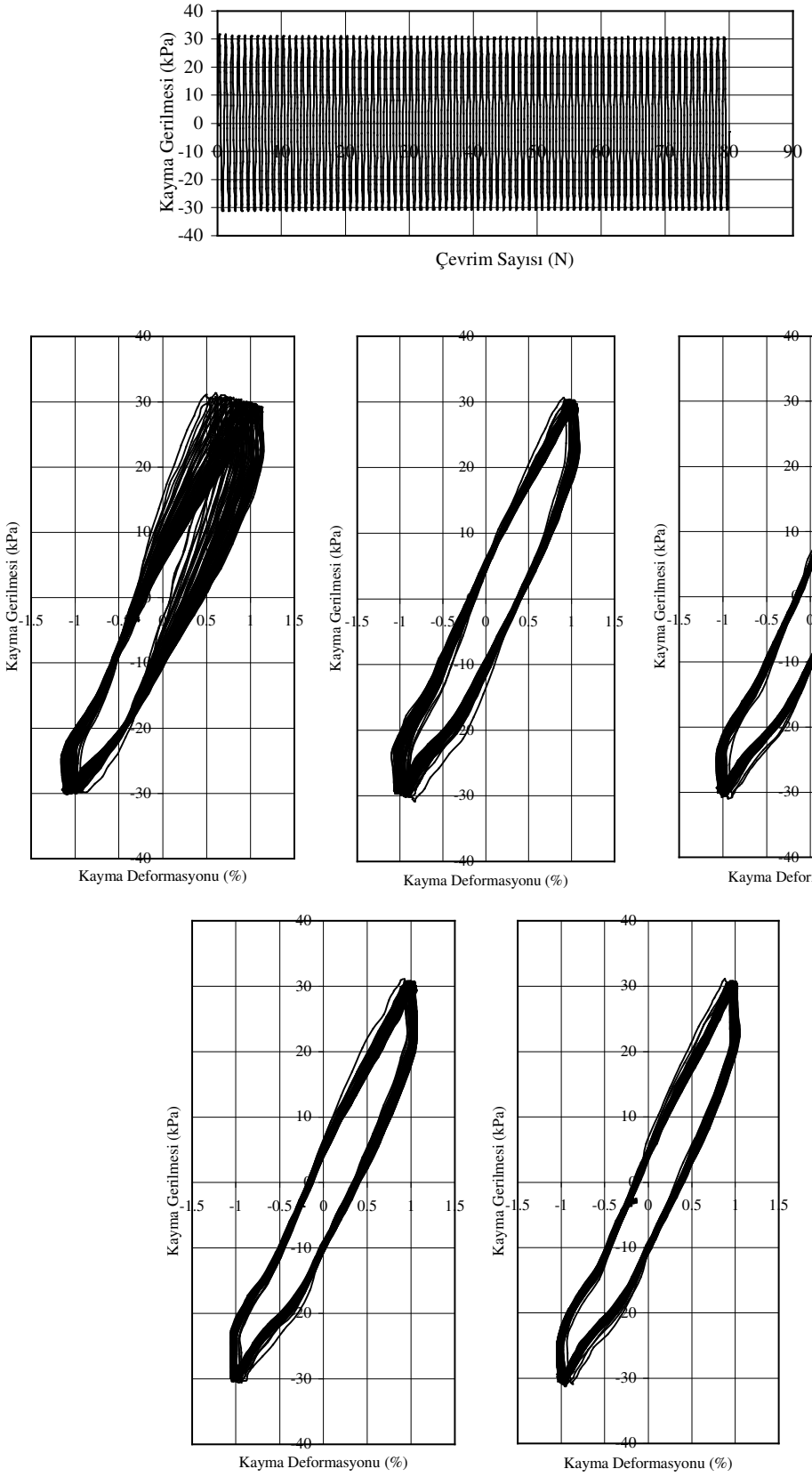


Şekil B21. B11 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.55).

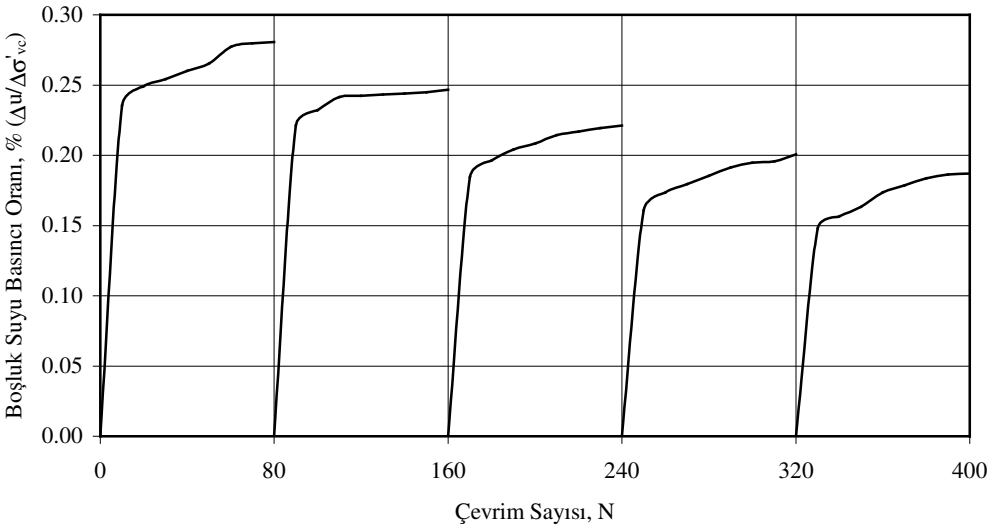


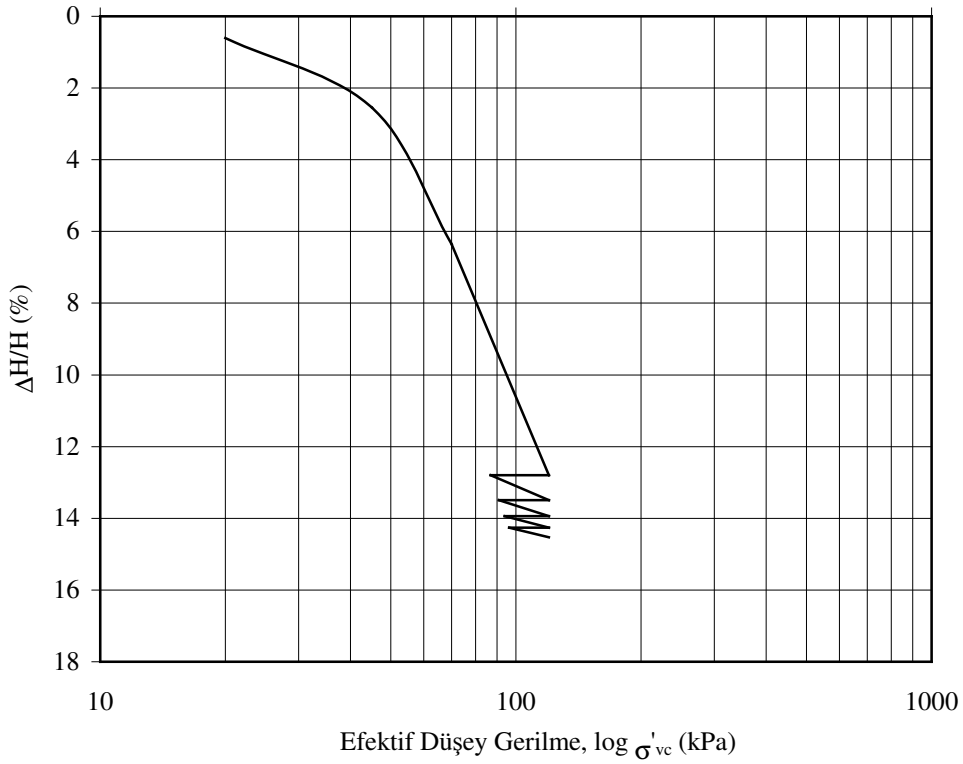


Şekil B22. B11 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

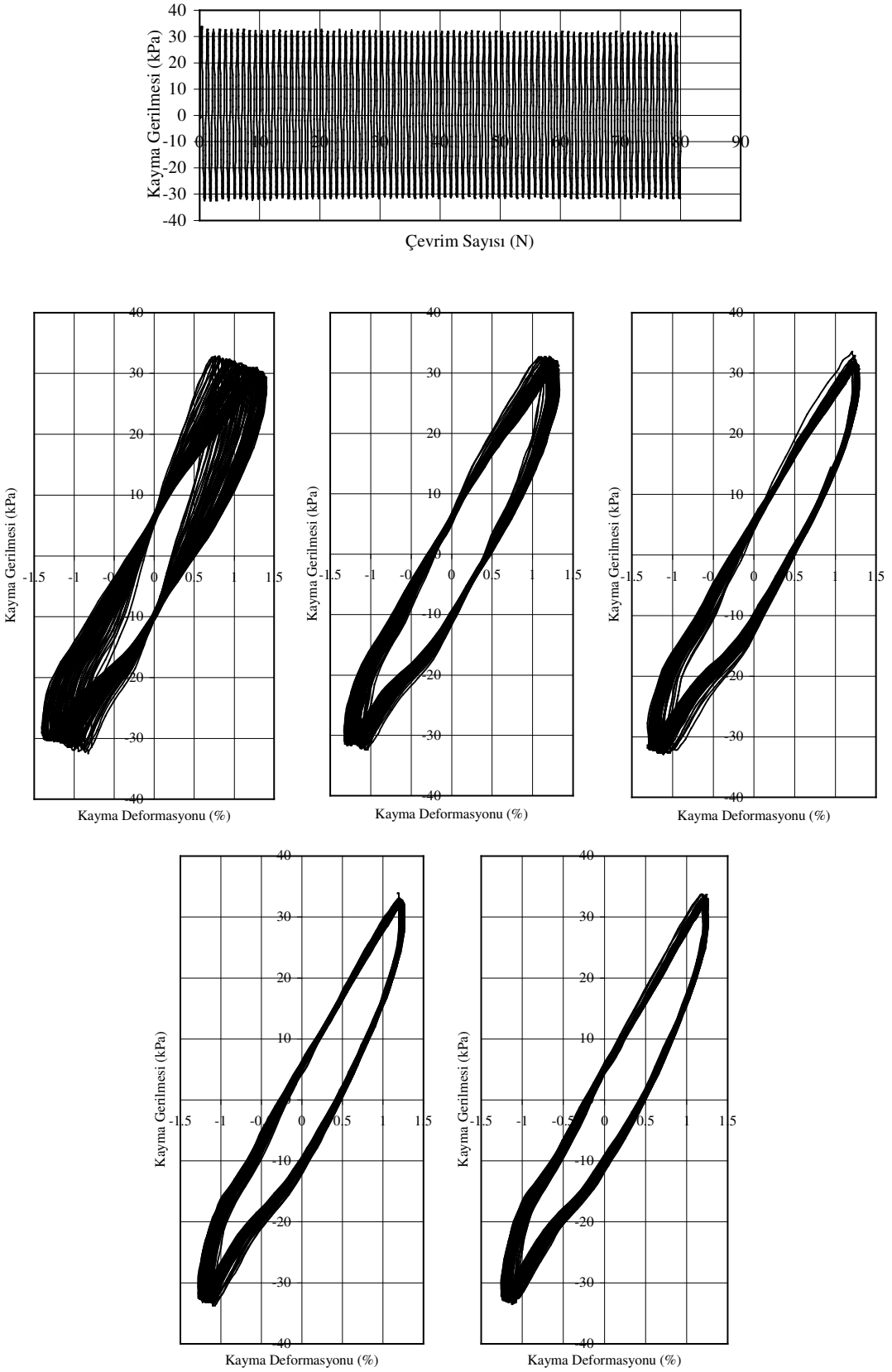


Şekil B23. B12 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.60).

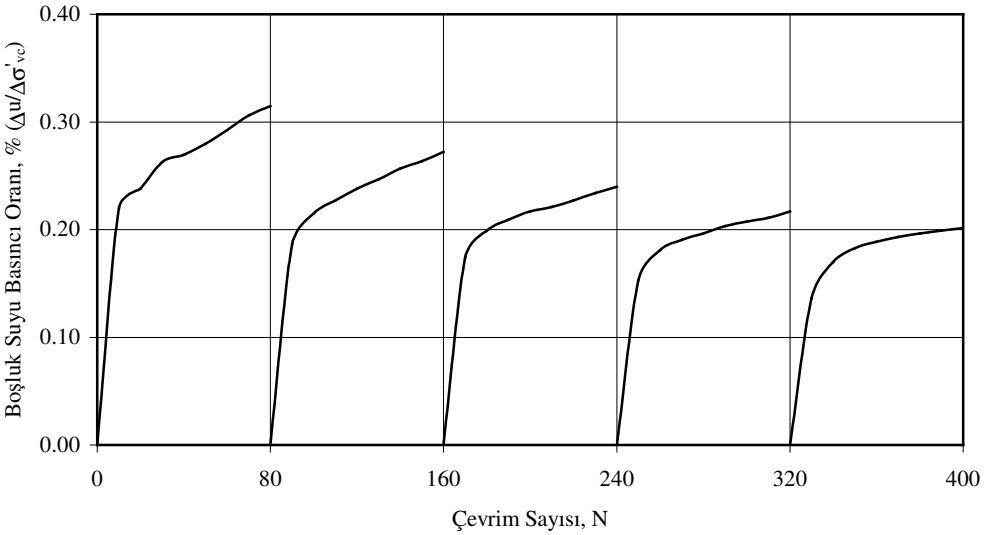


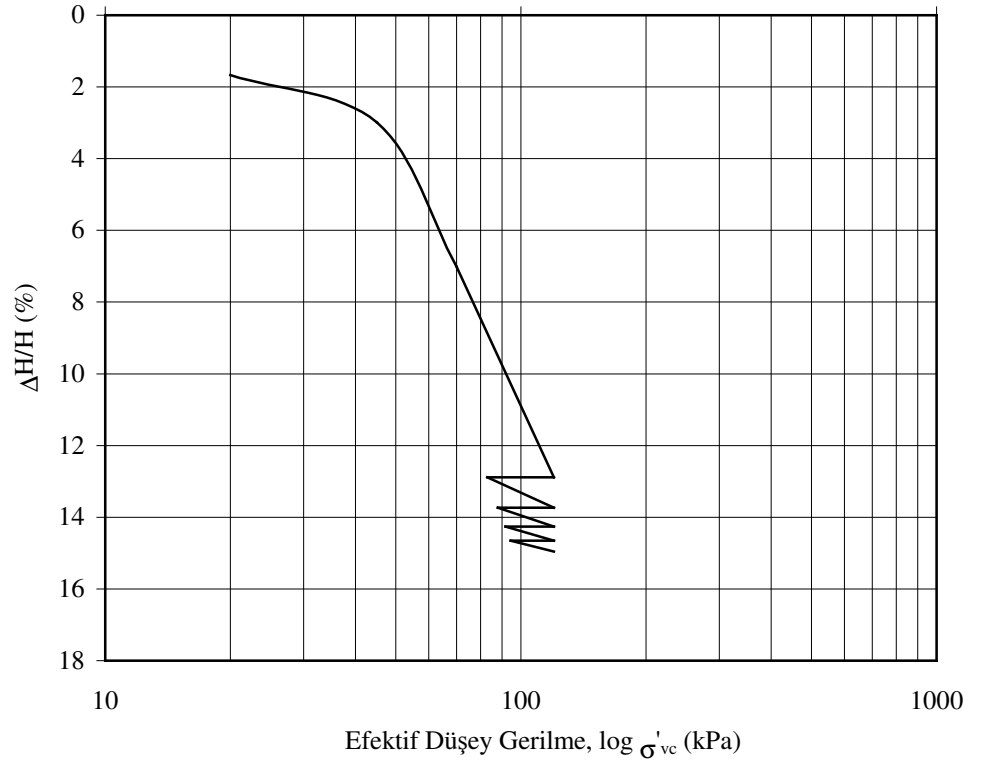


Şekil B24. B12 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

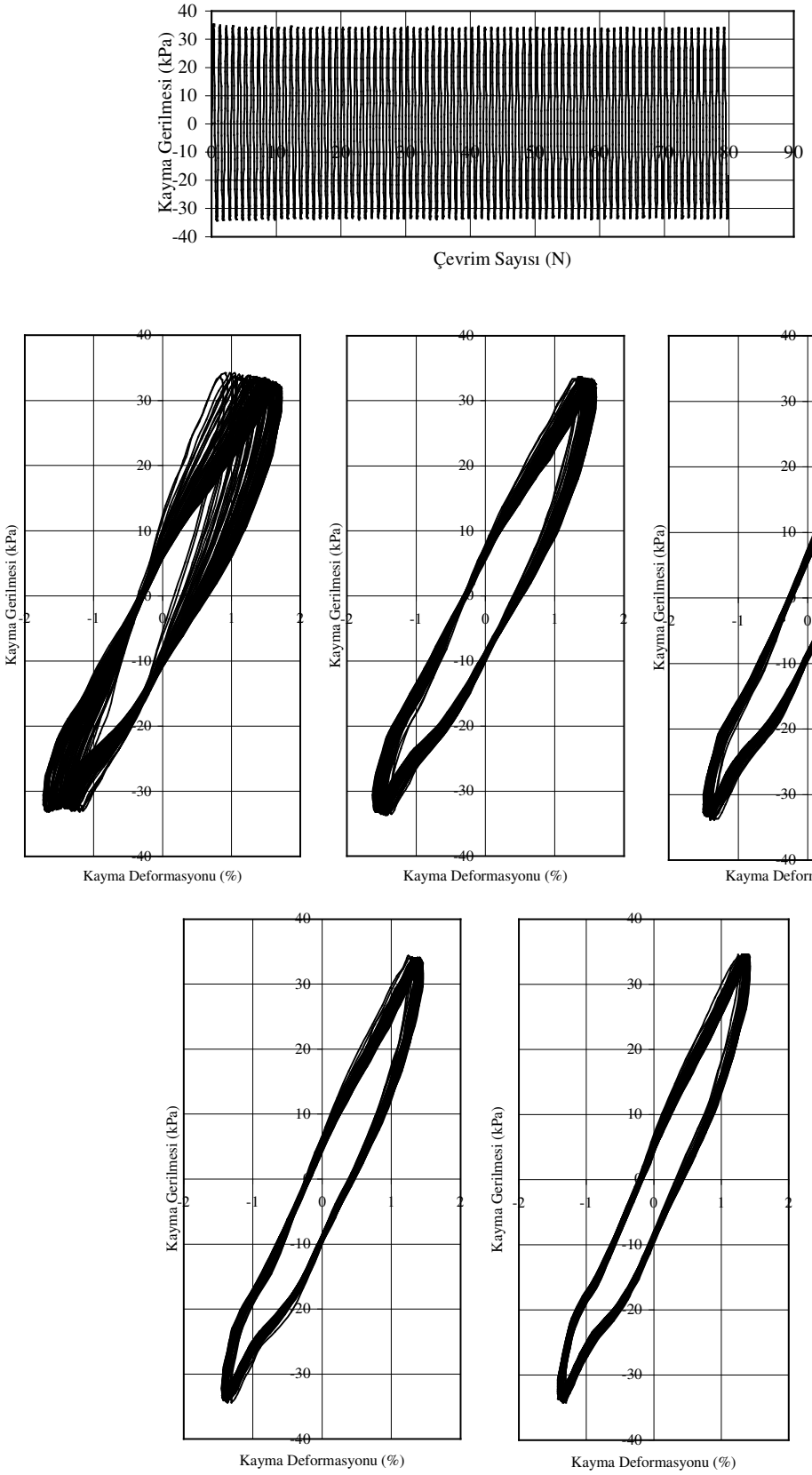


Şekil B25. B13 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.625).

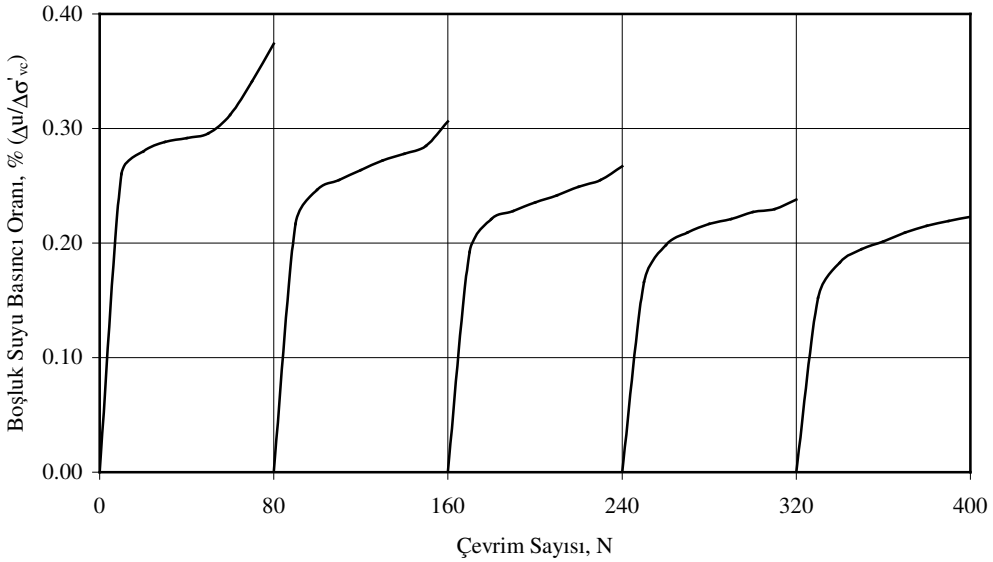


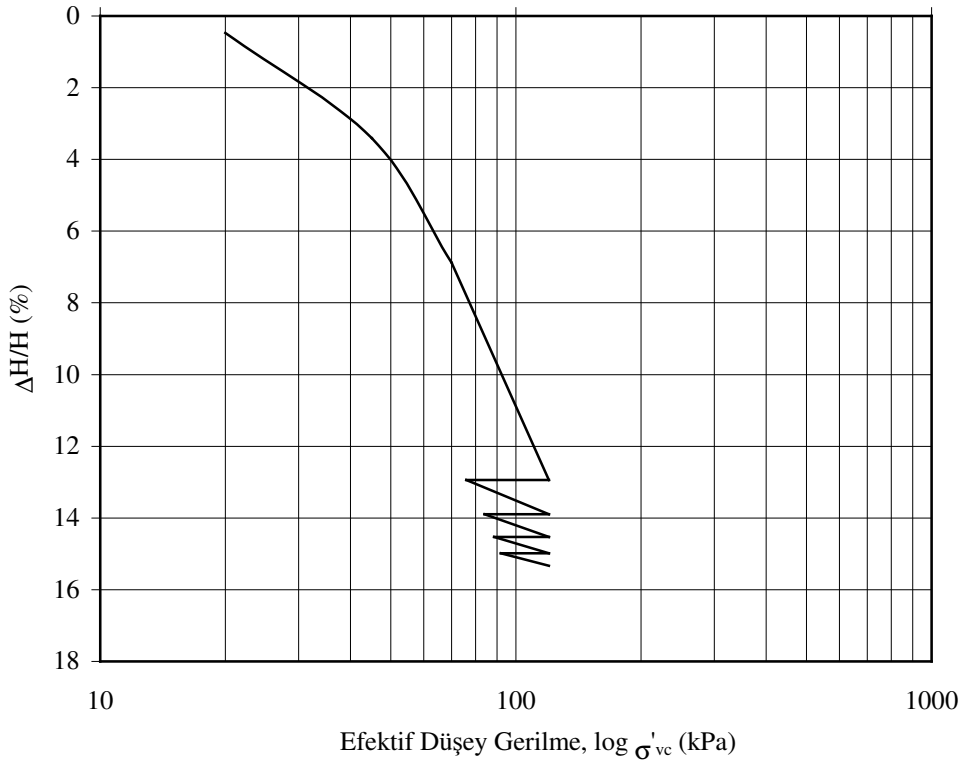


Şekil B26. B13 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

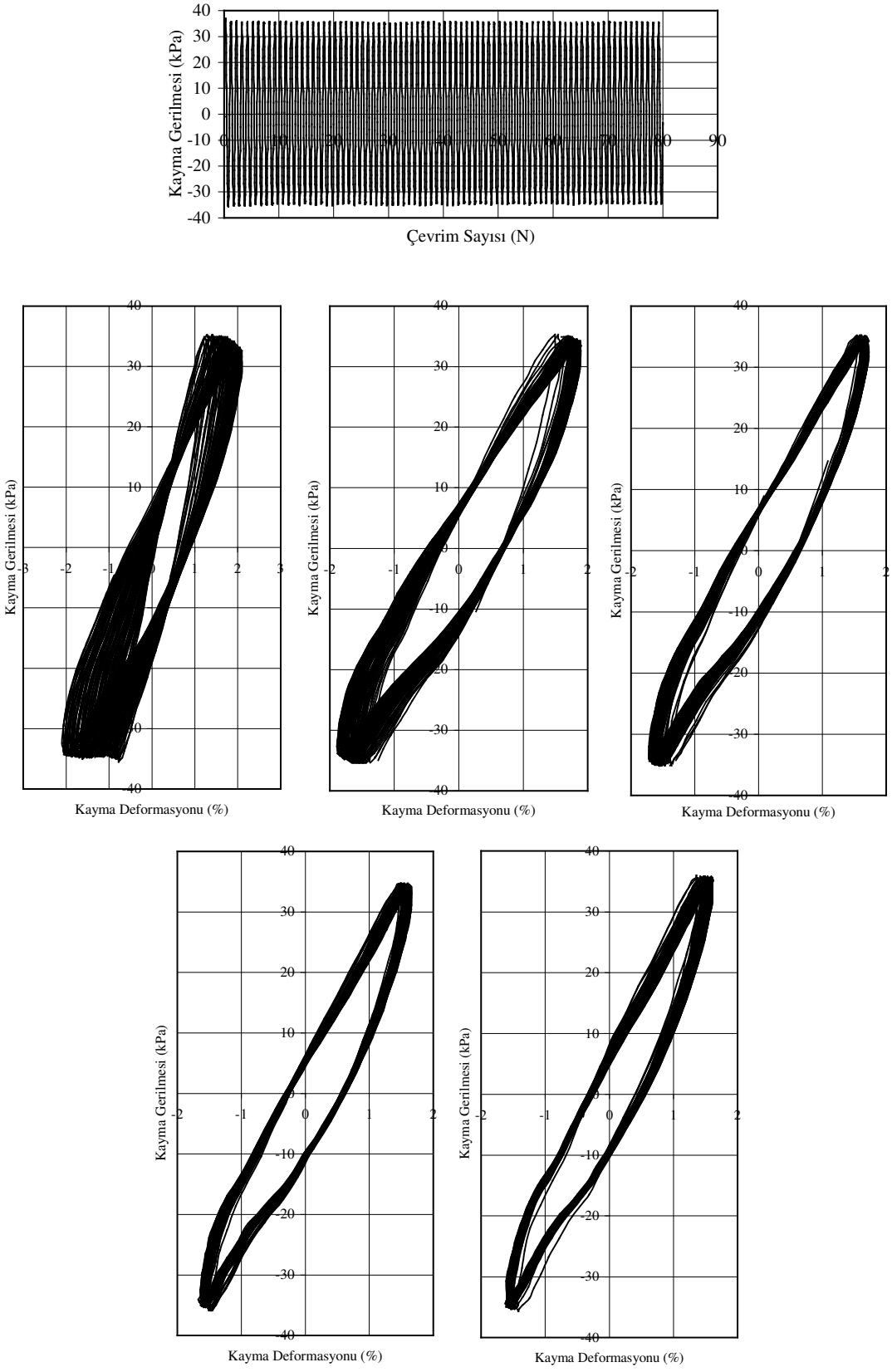


Şekil B27. B14 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80,τ/τ_f=0.65).

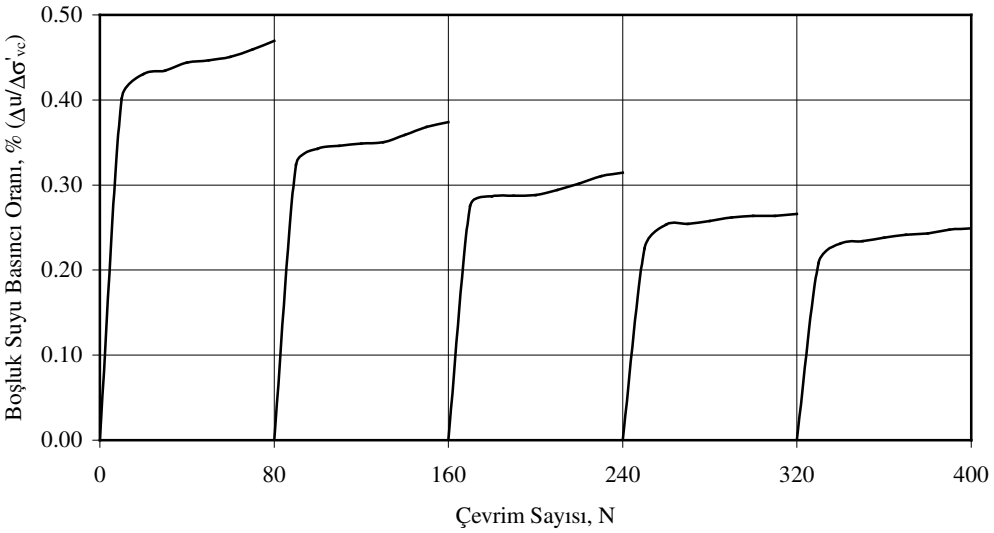


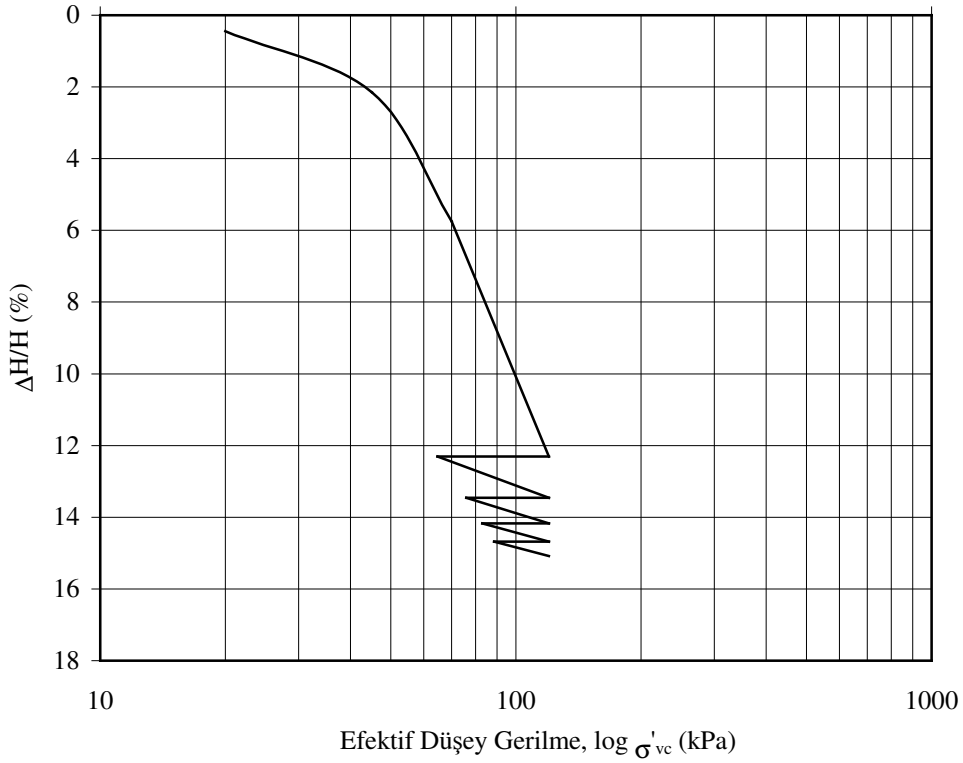


Şekil B28. B14 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

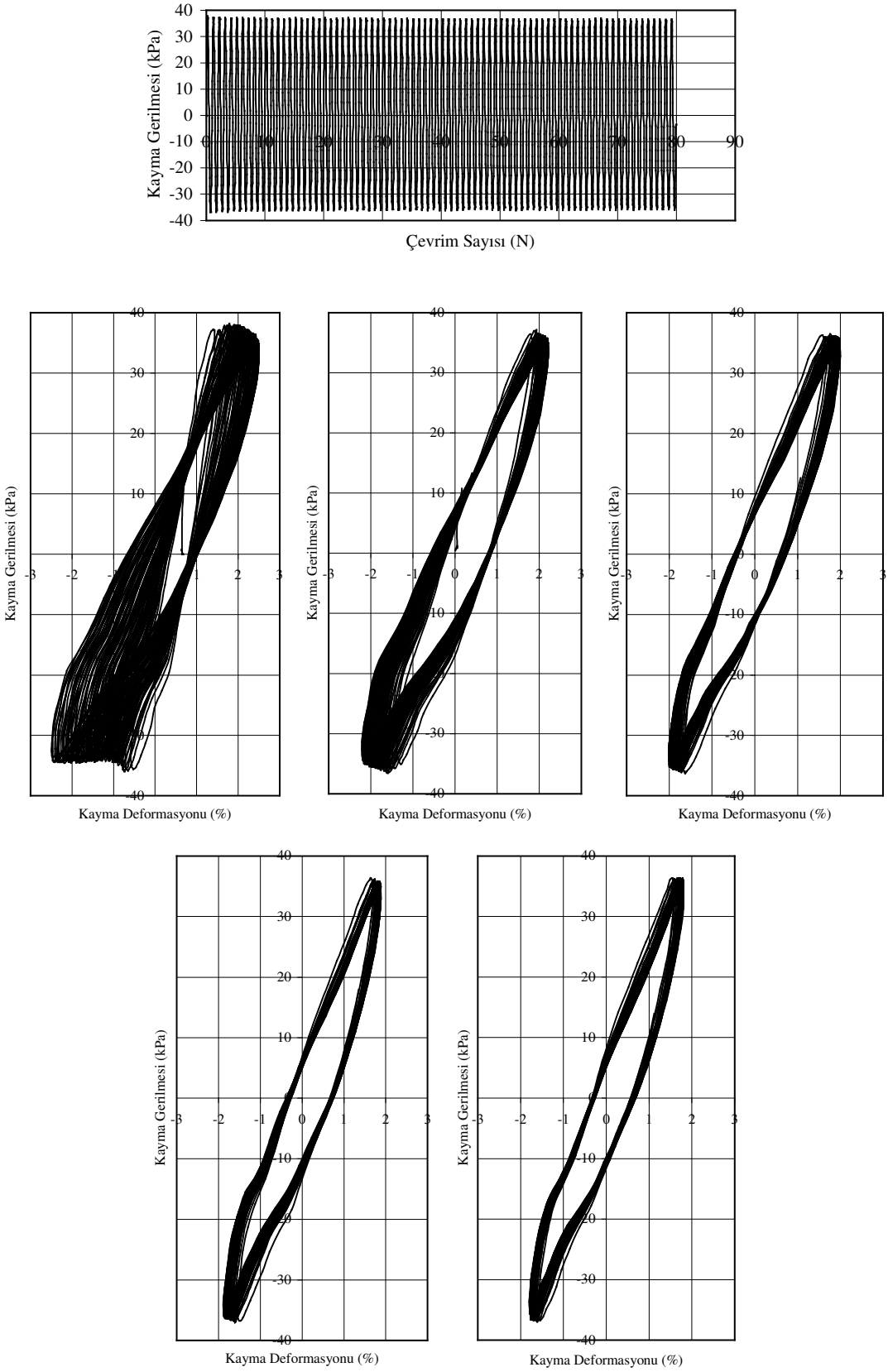


Şekil B29. B15 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80 τ/τ_f=0.675).

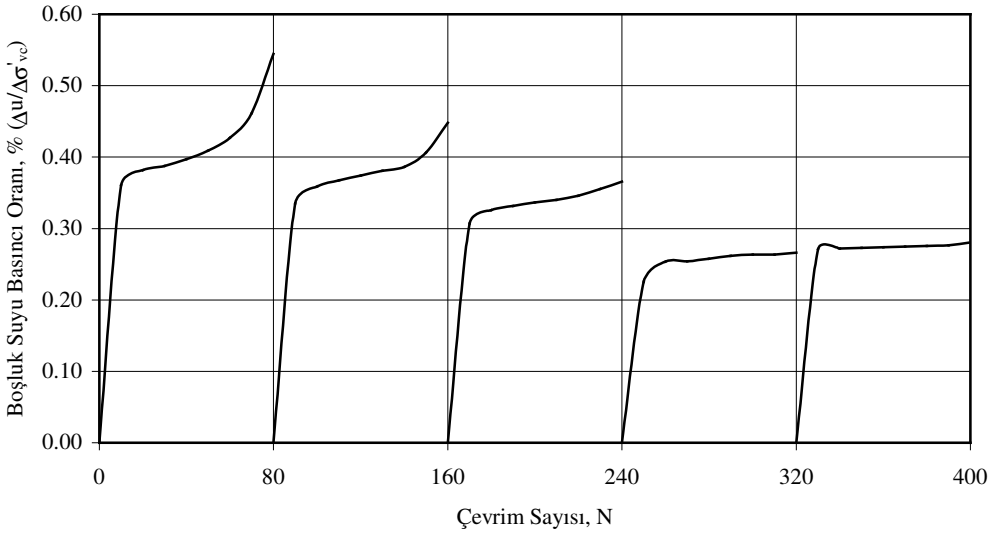


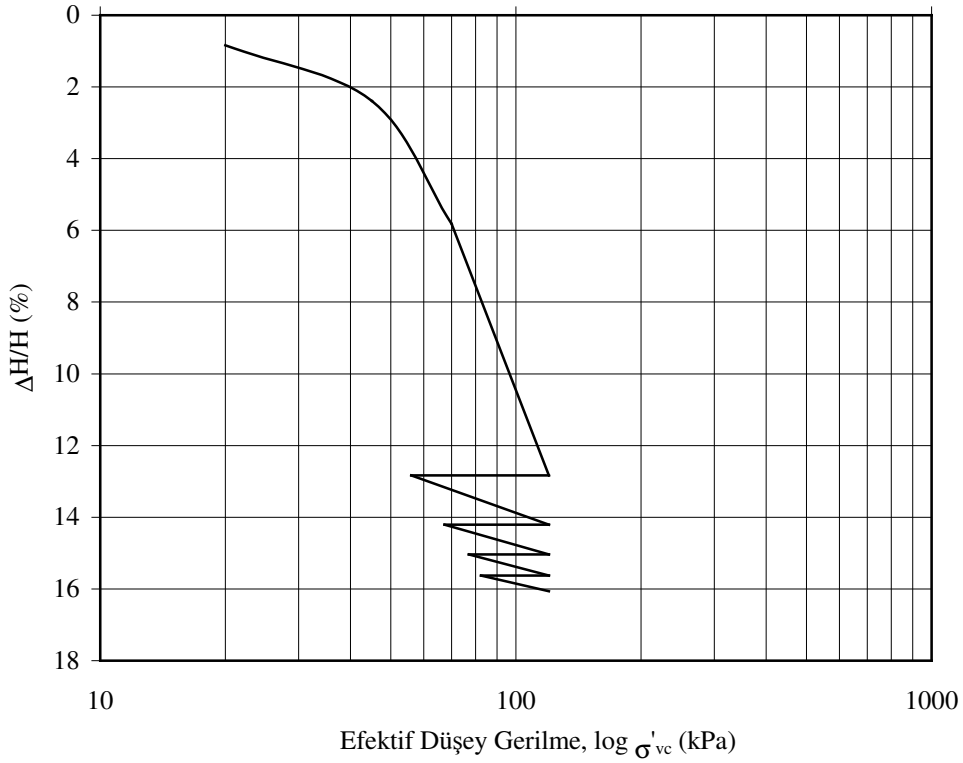


Şekil B30. B15 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

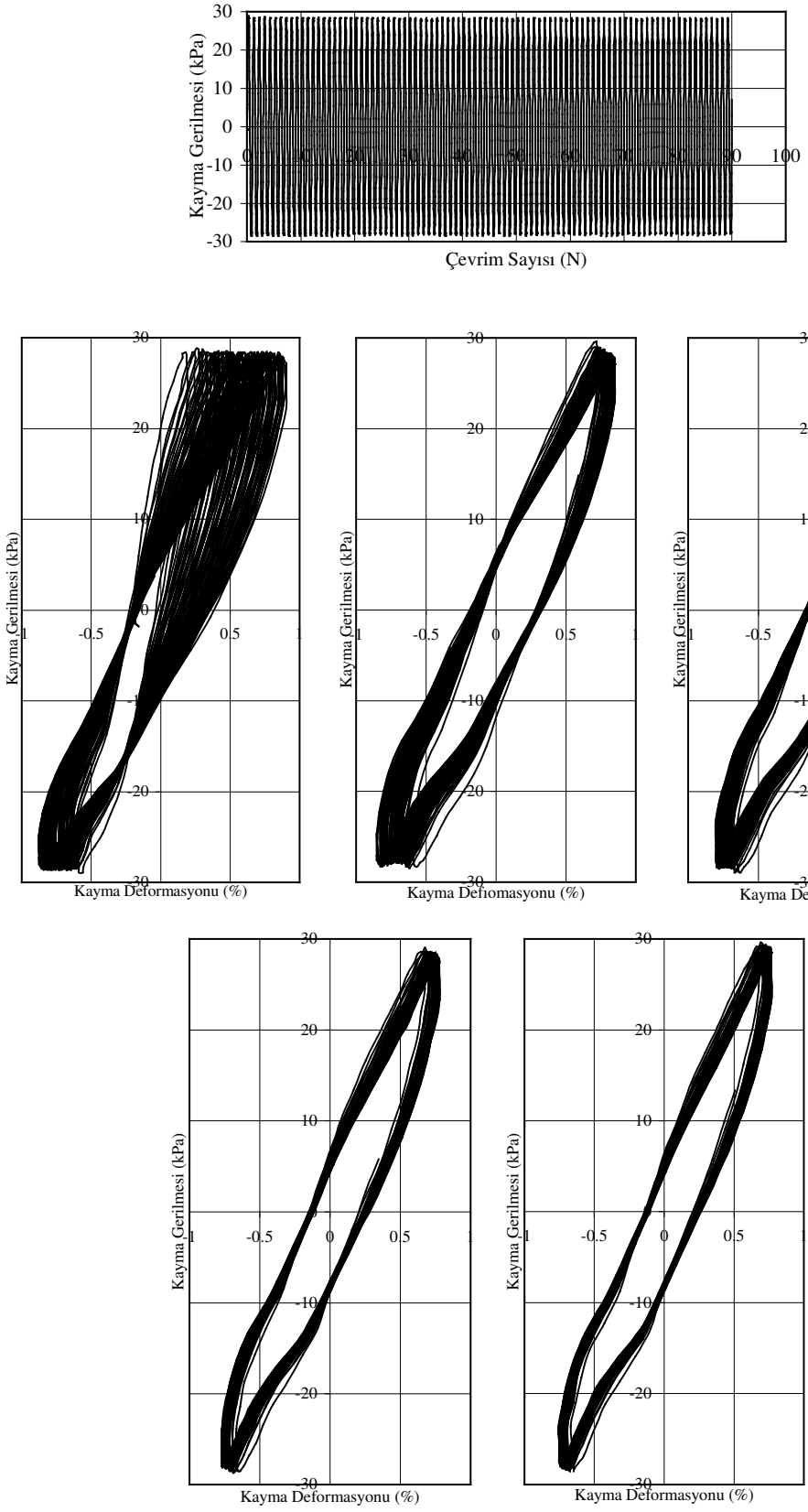


Şekil B31. B16 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=80, τ/τ_f=0.70).

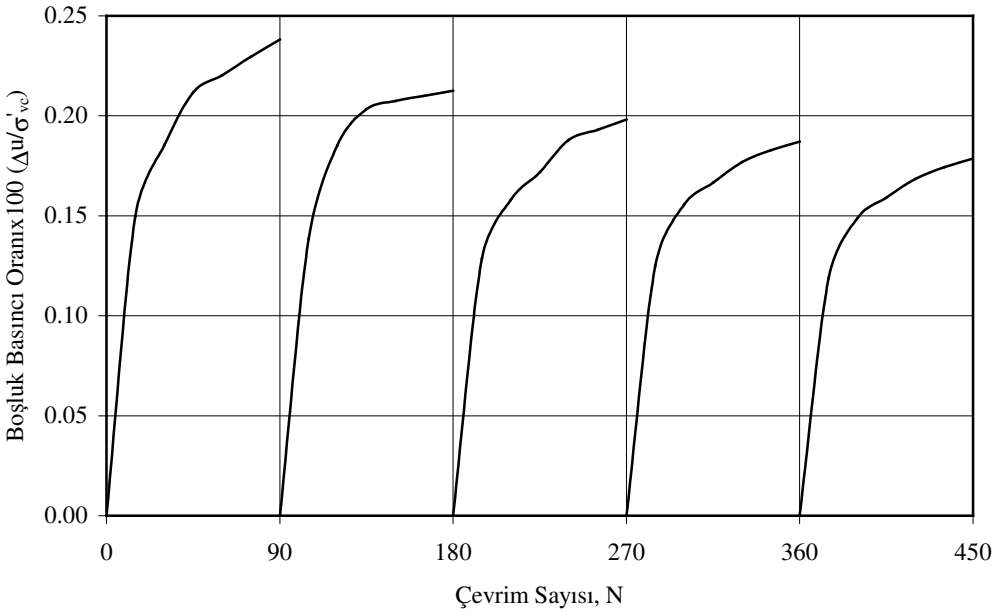


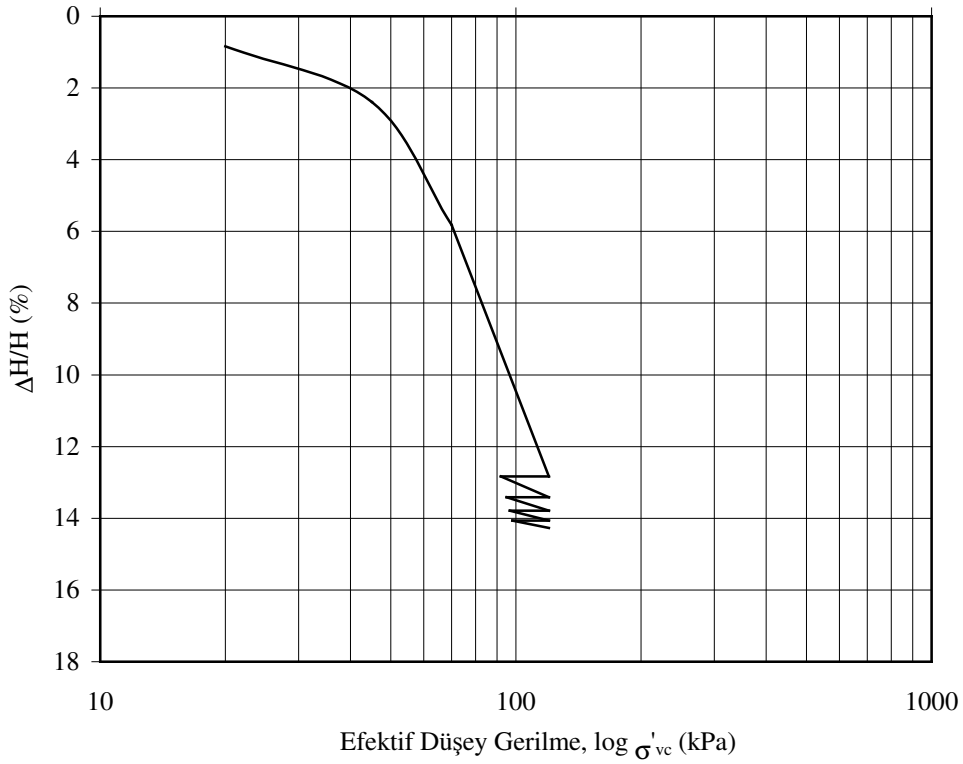


Şekil B32. B16 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

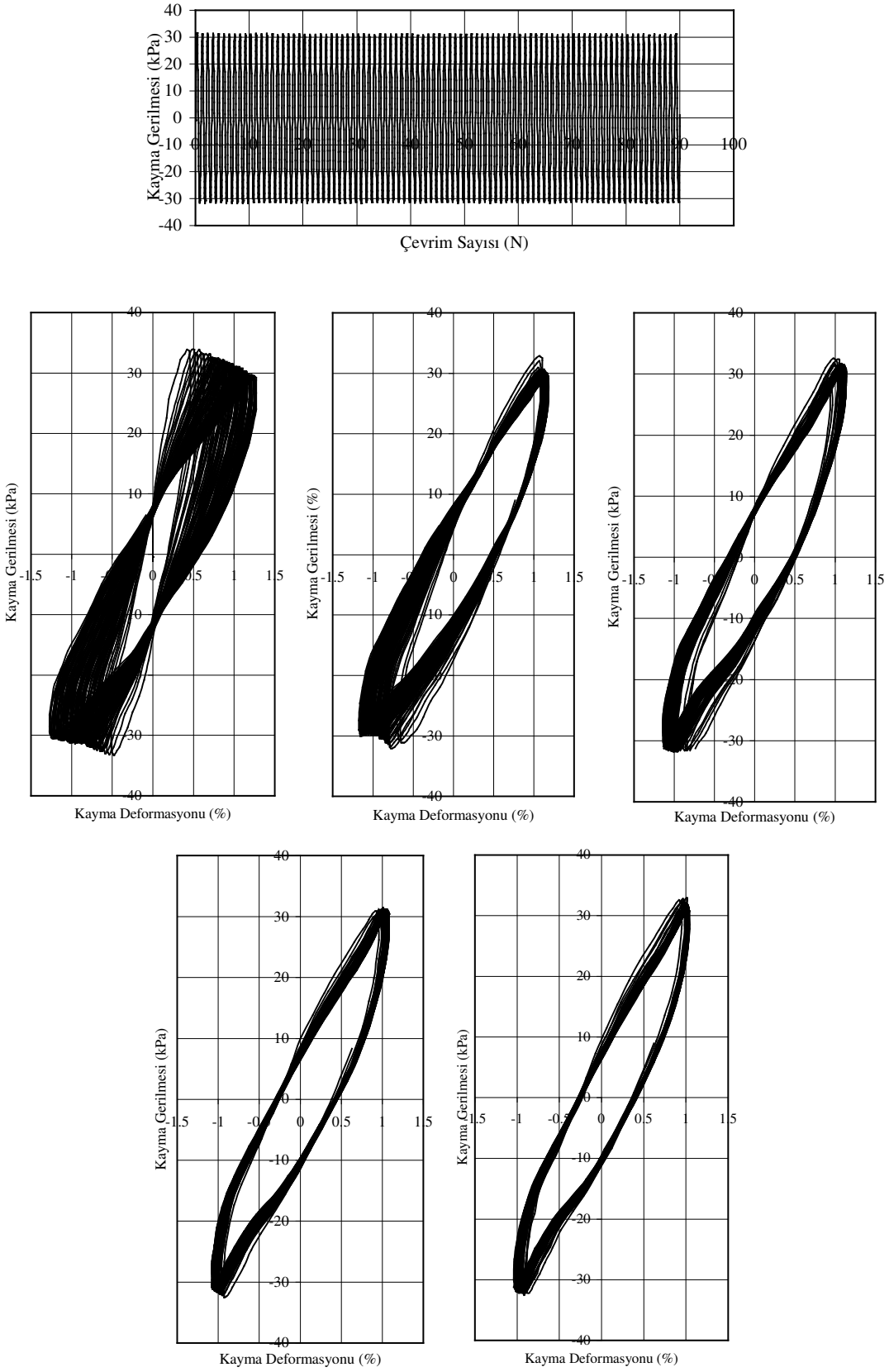


Şekil B33. B17 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.55).

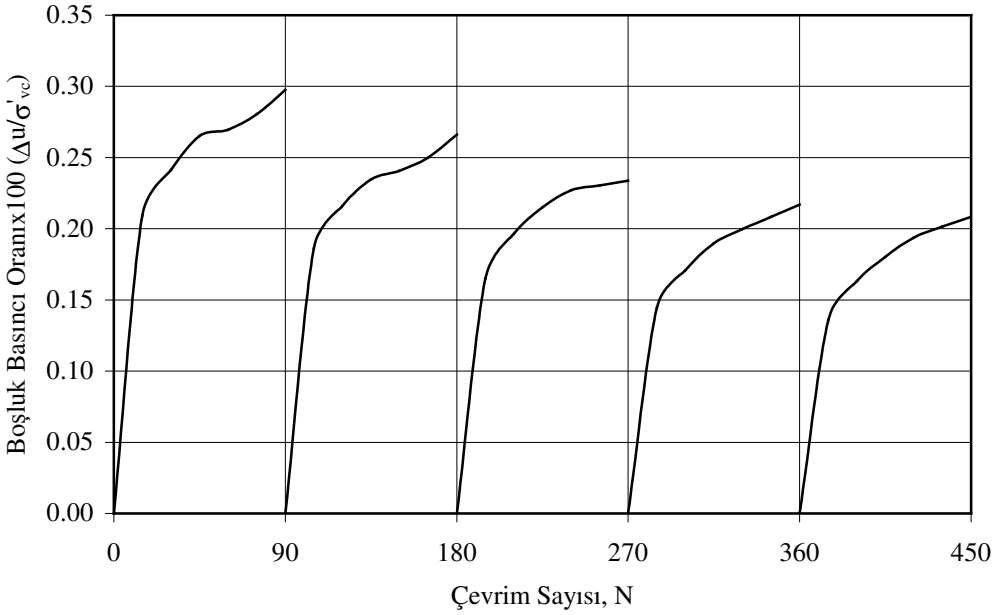


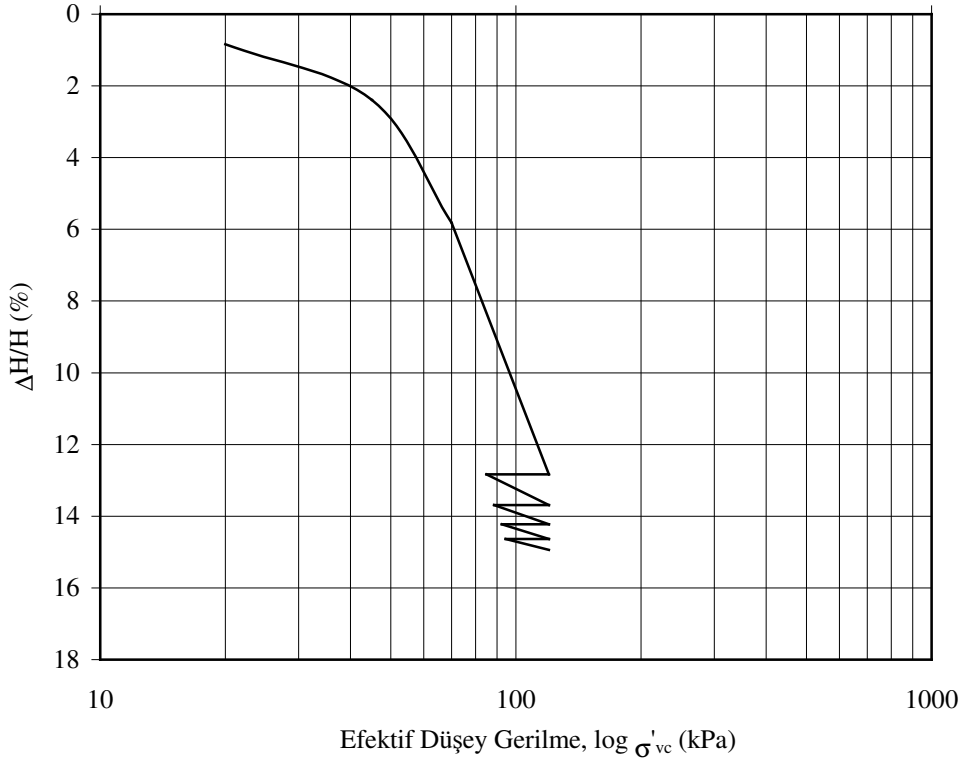


Şekil B34. B17 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

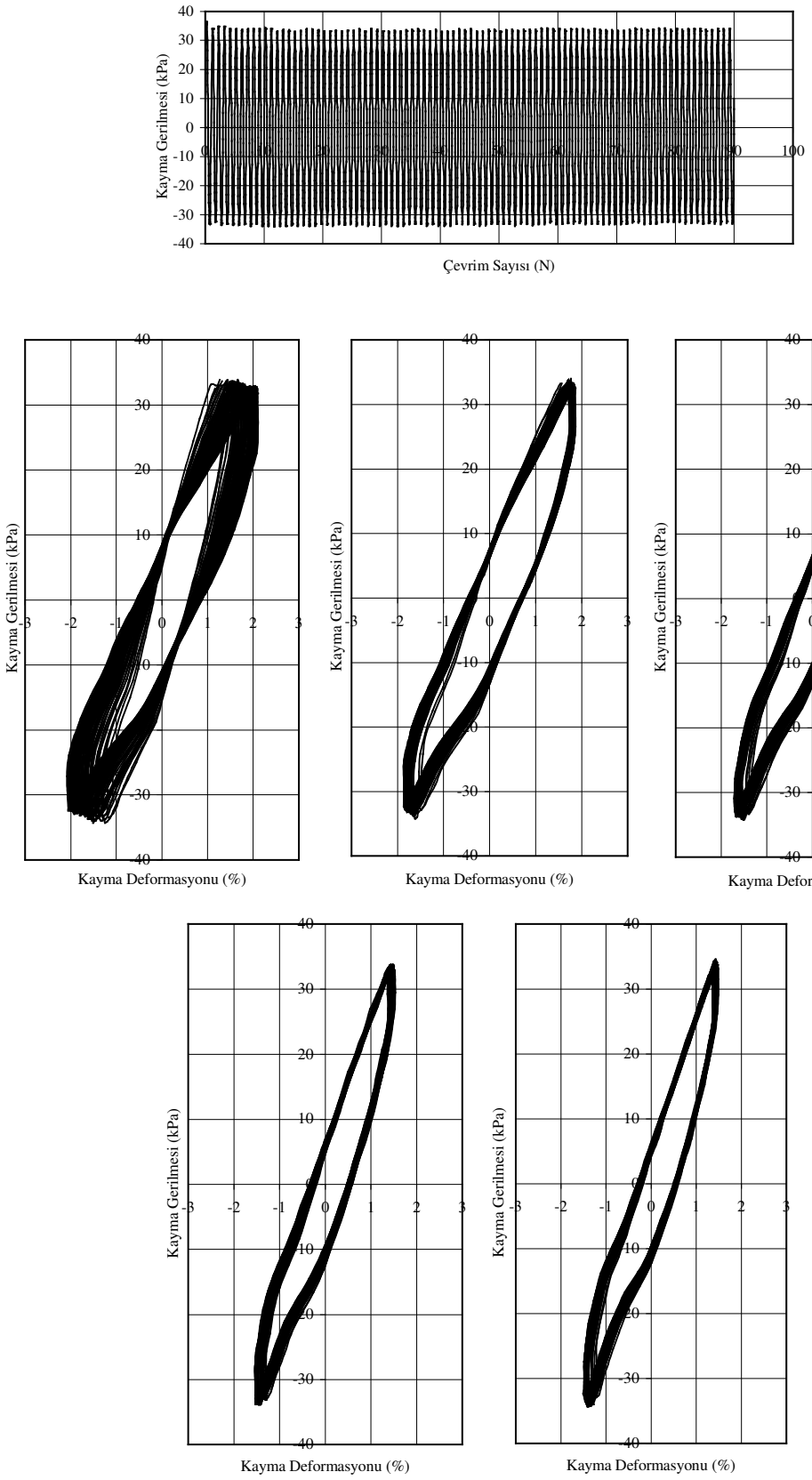


Şekil B35. B18 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.60).

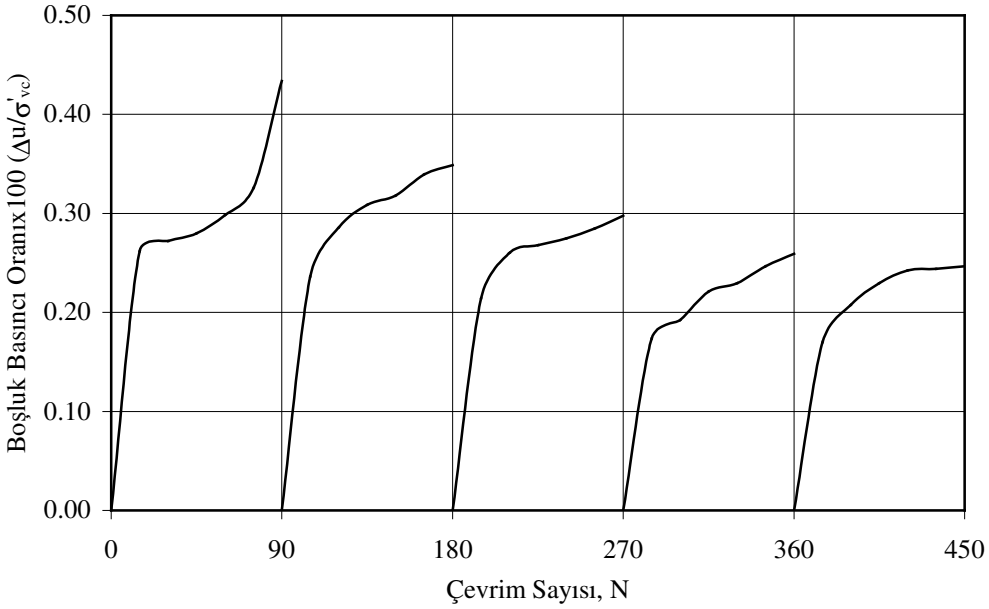


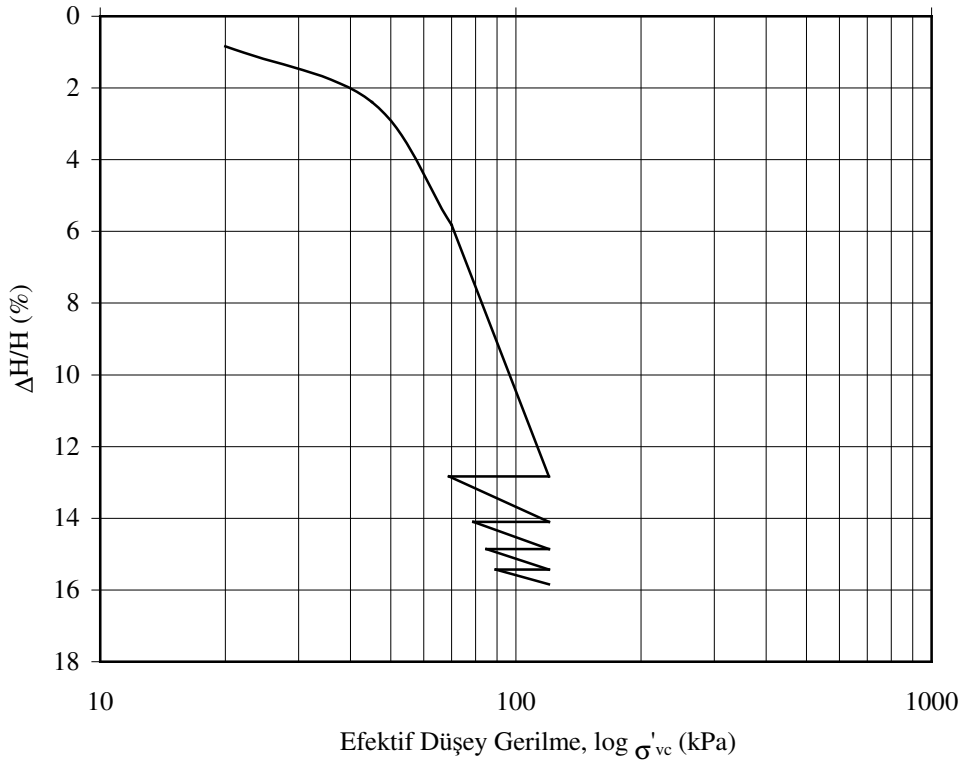


Şekil B36. B18 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

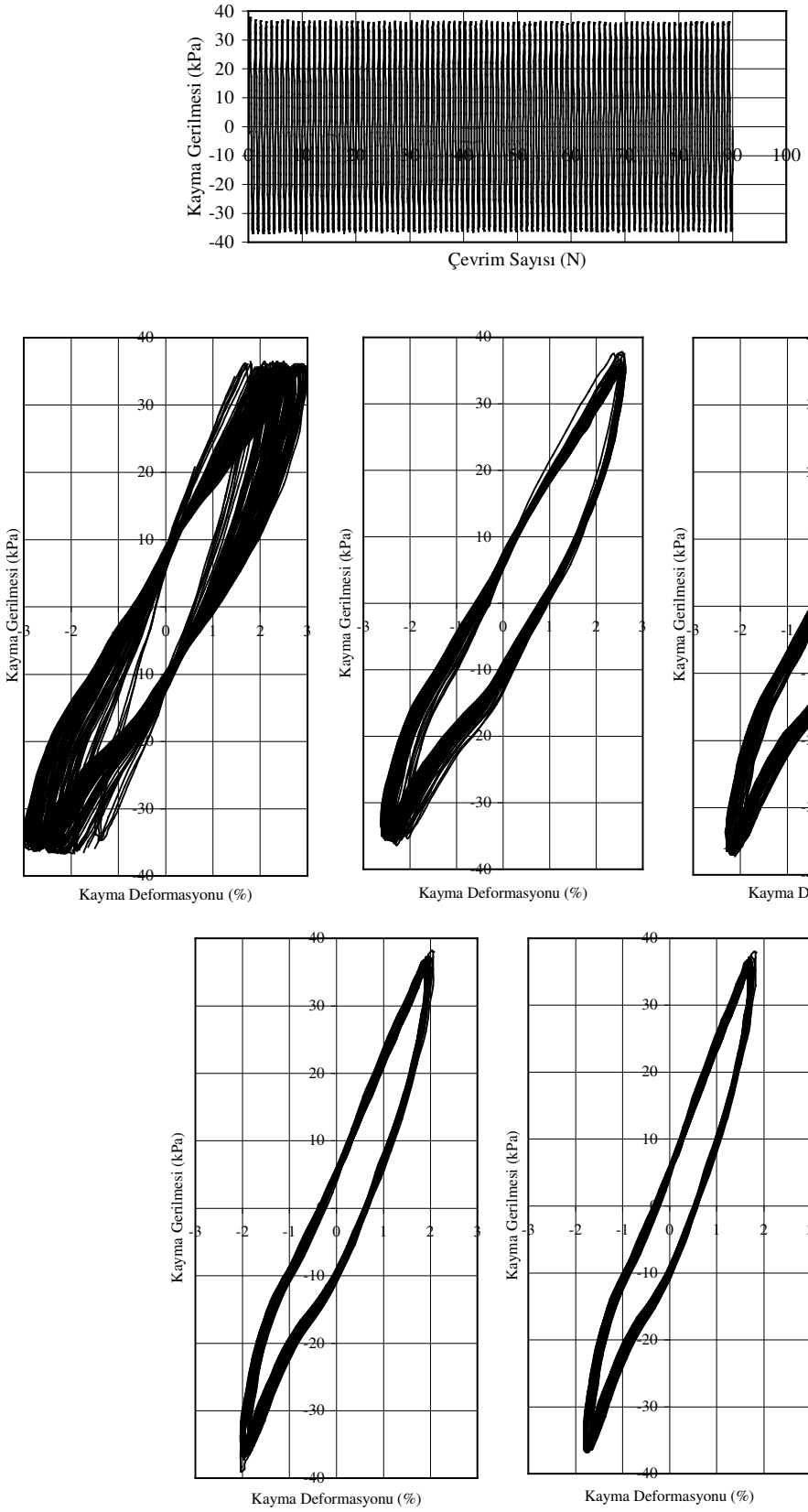


Şekil B37. B19 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.65).

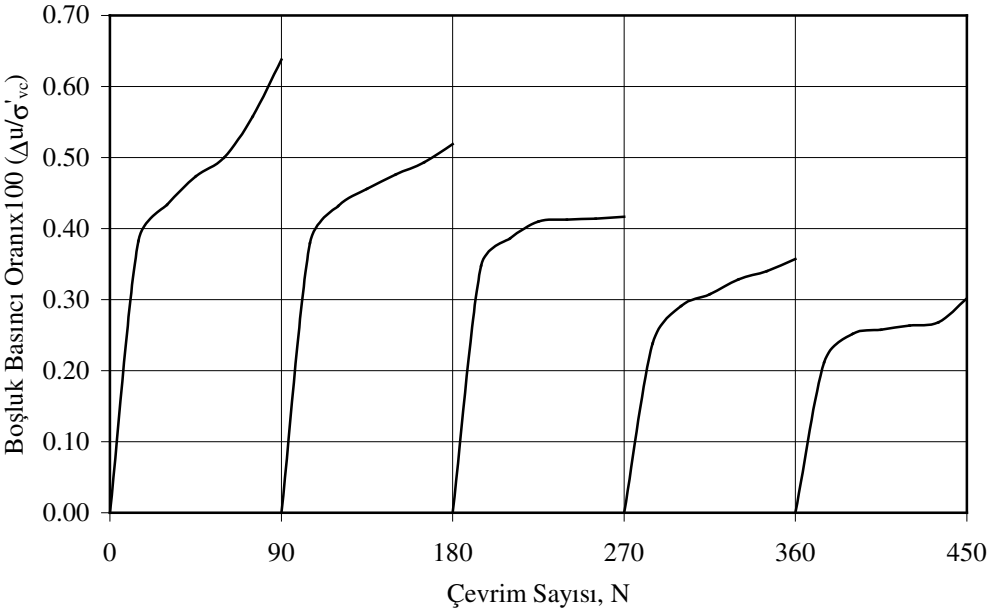


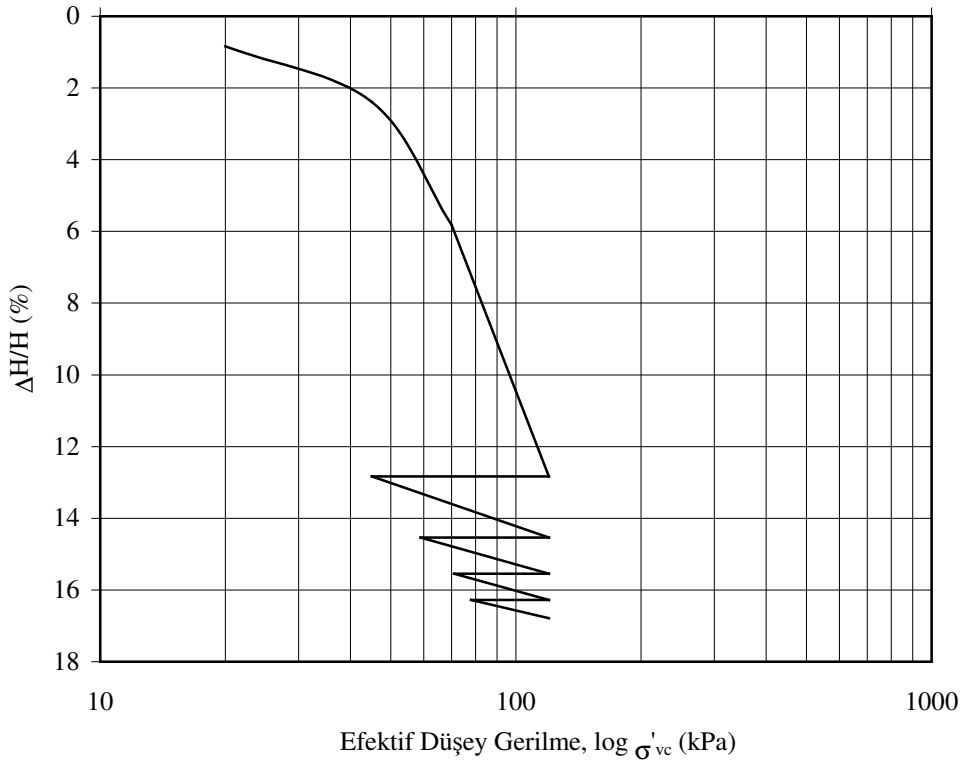


Şekil B38. B19 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

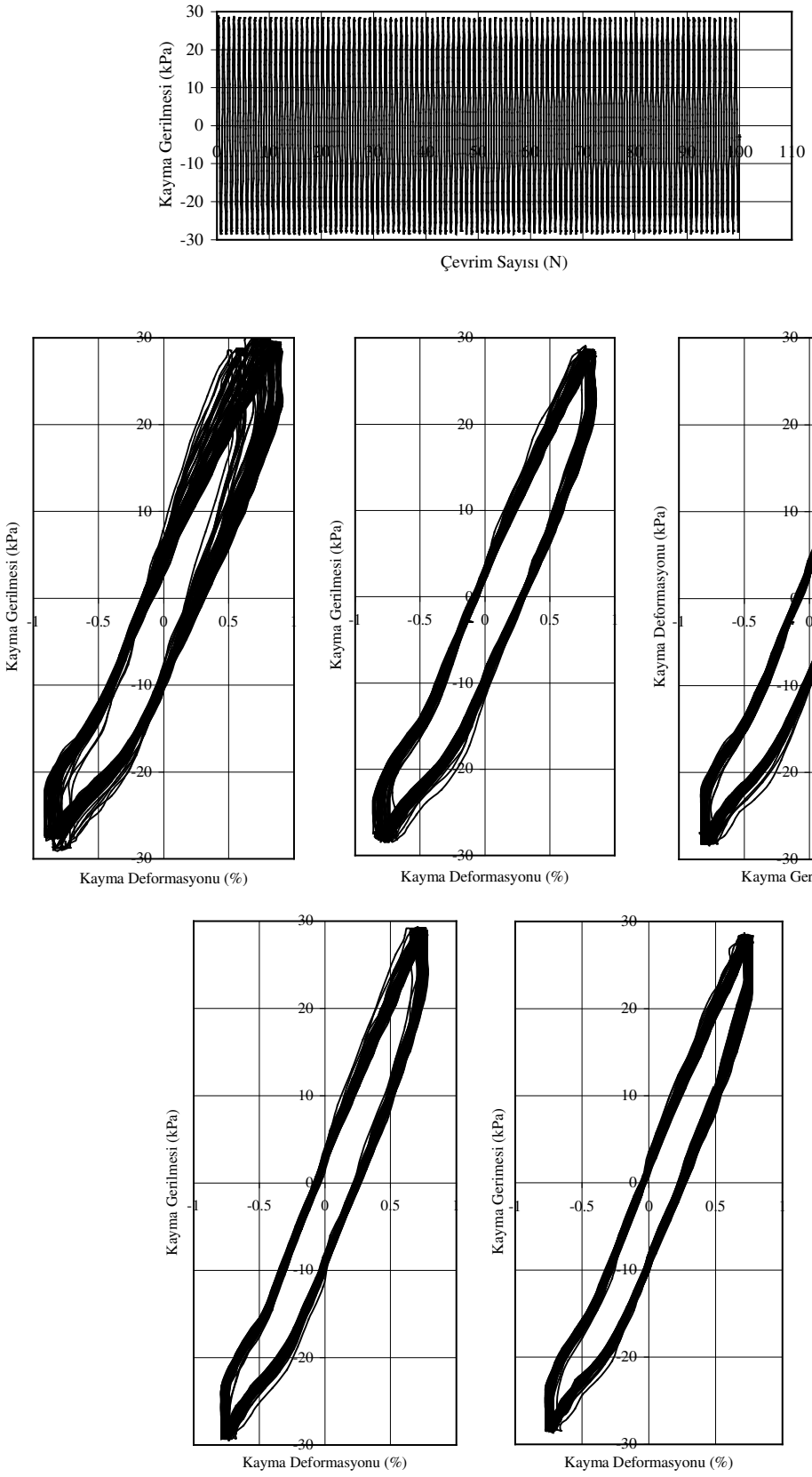


Şekil B39. B20 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=90, τ/τ_f=0.70).

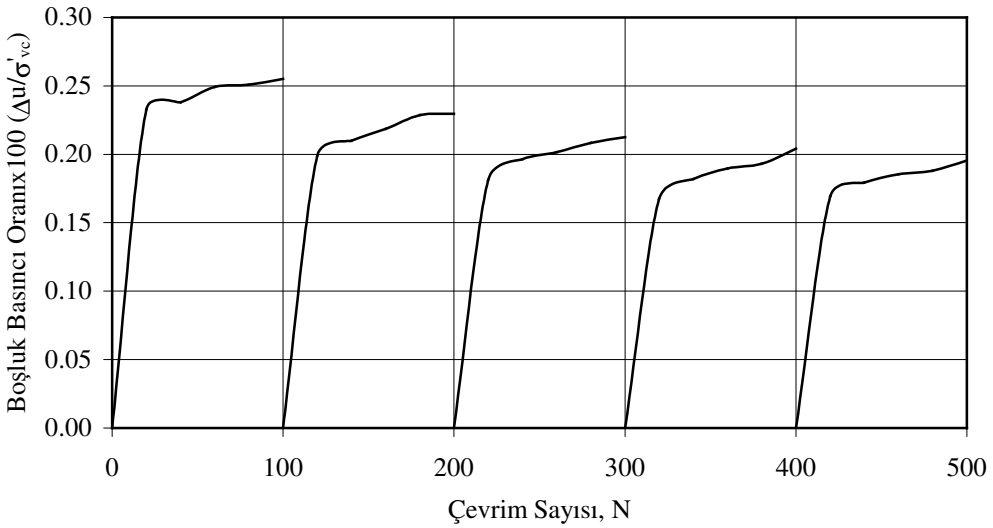


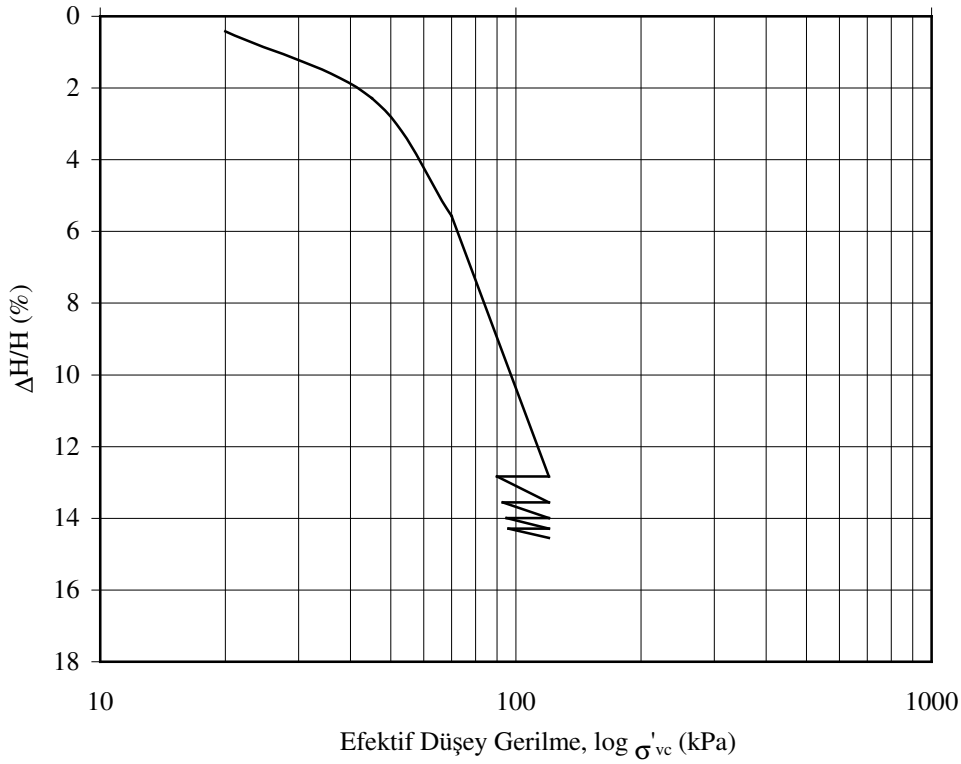


Şekil B40. B20 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

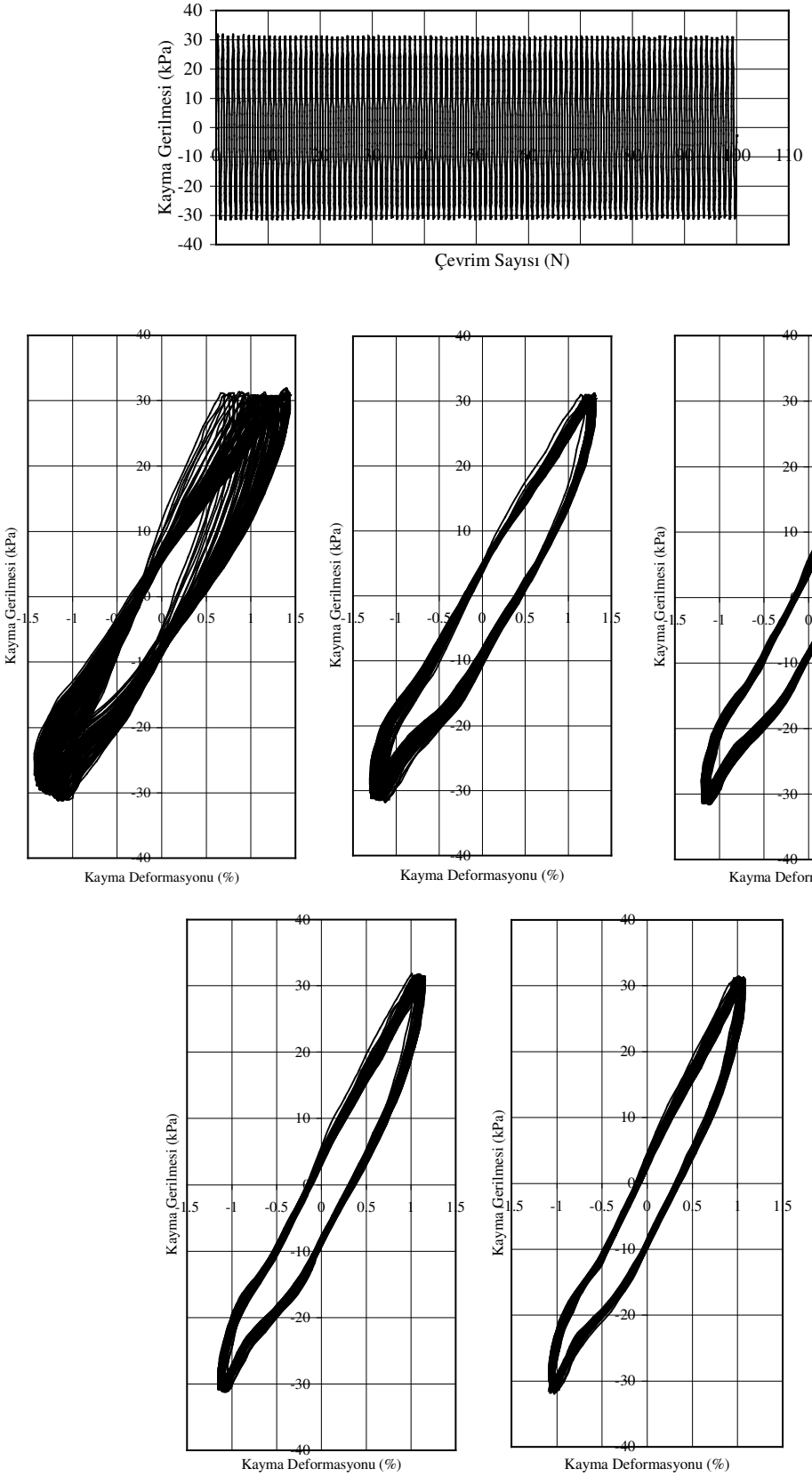


Şekil B41. B21 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.55).

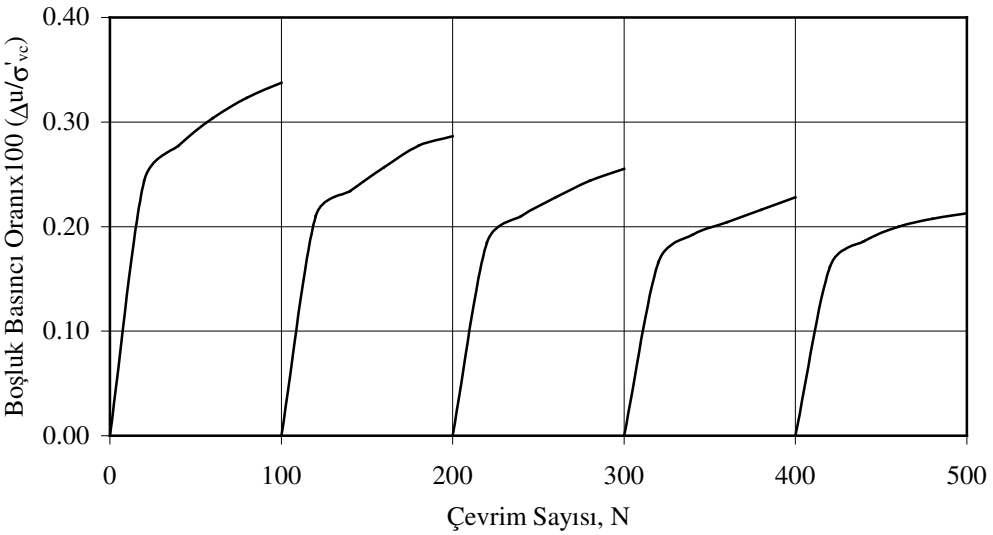


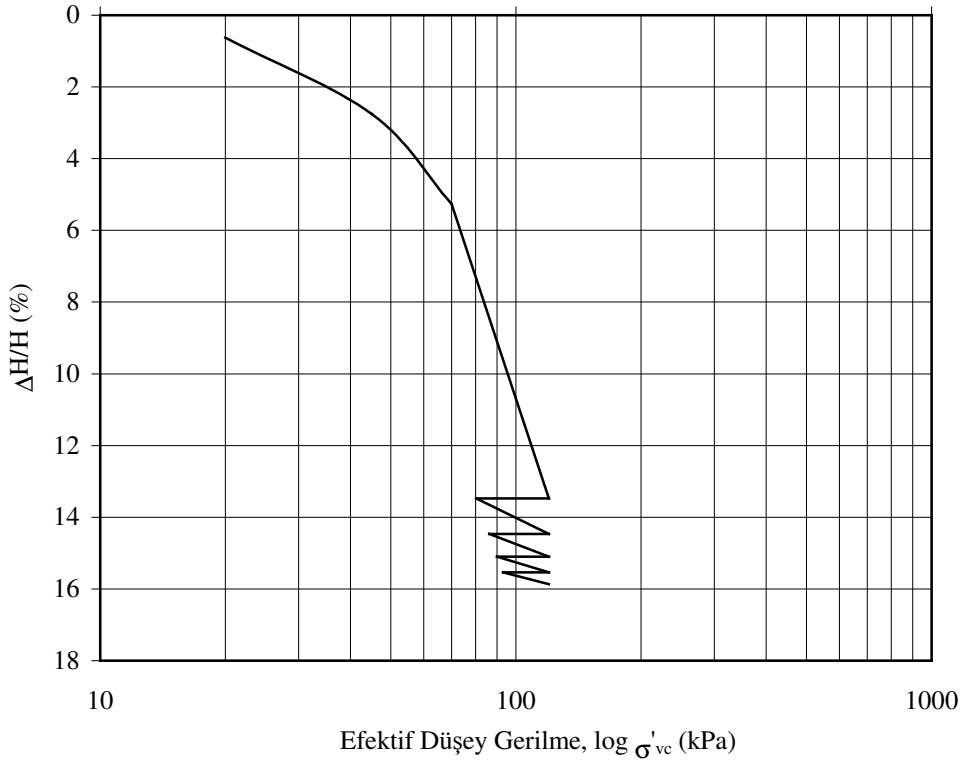


Şekil B42. B21 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

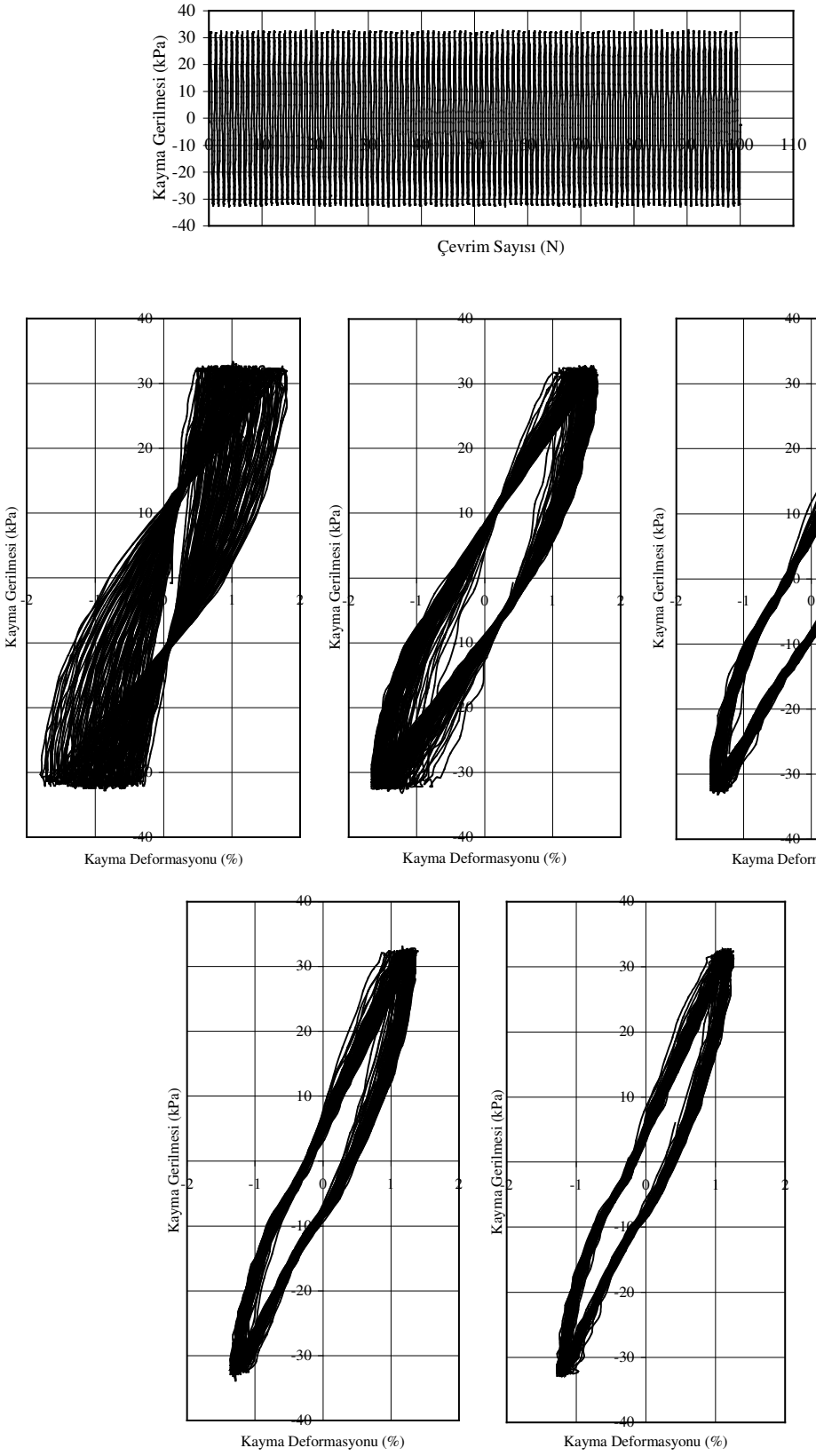


Şekil B43. B22 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.60).

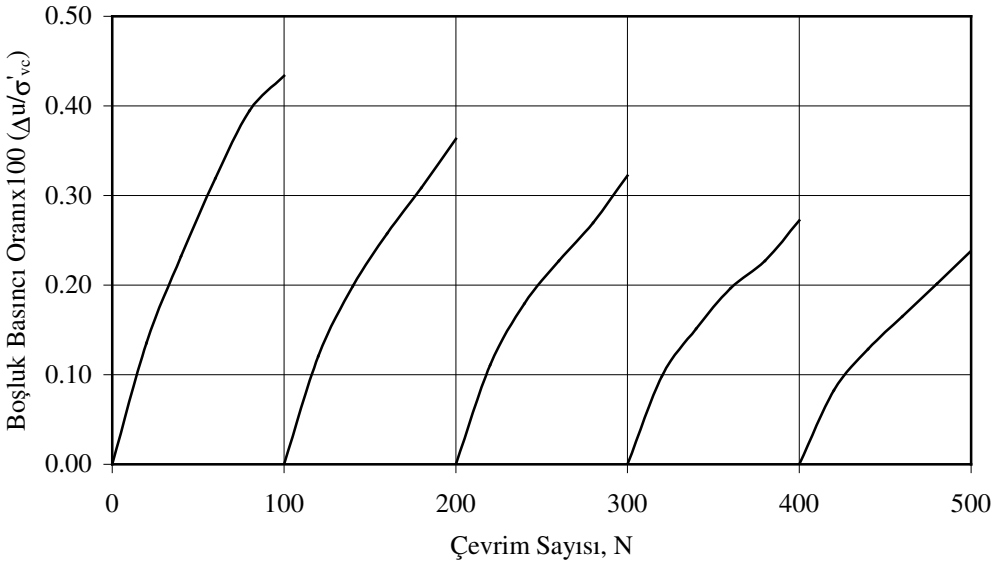


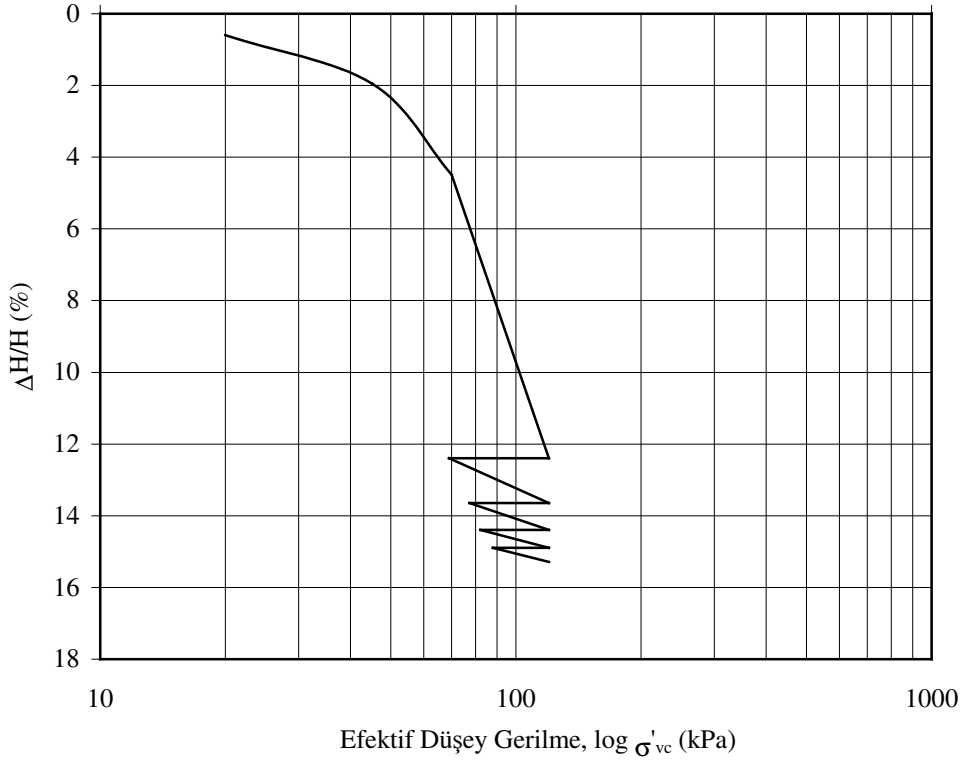


Şekil B44. B22 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

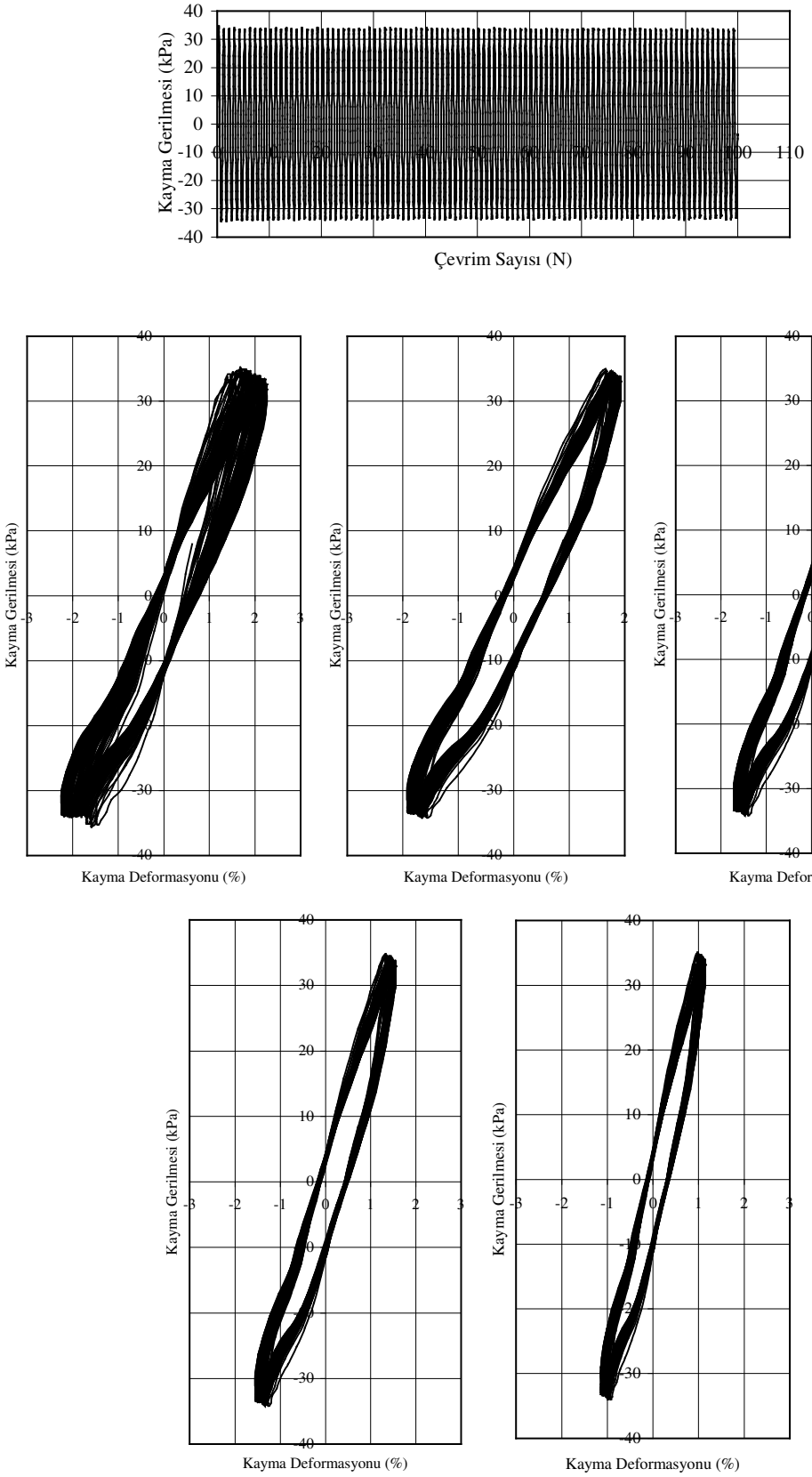


Şekil B45. B23 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.625).

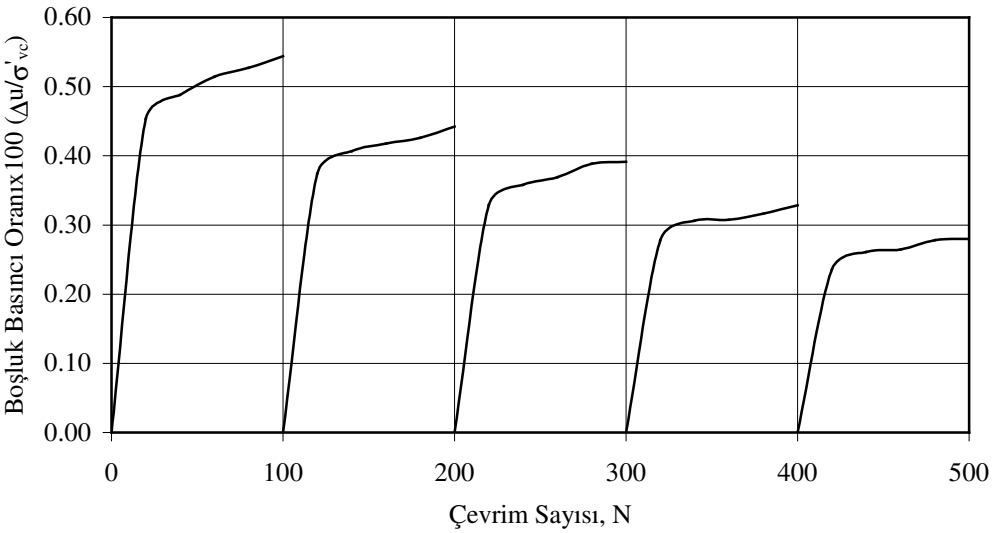


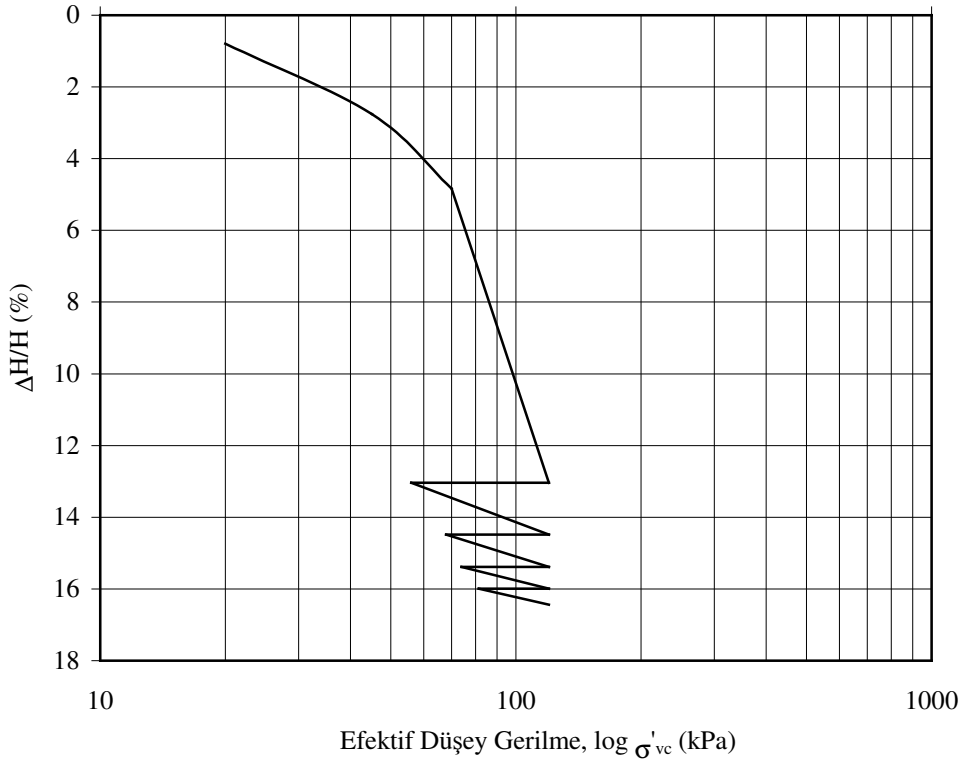


Şekil B46. B23 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

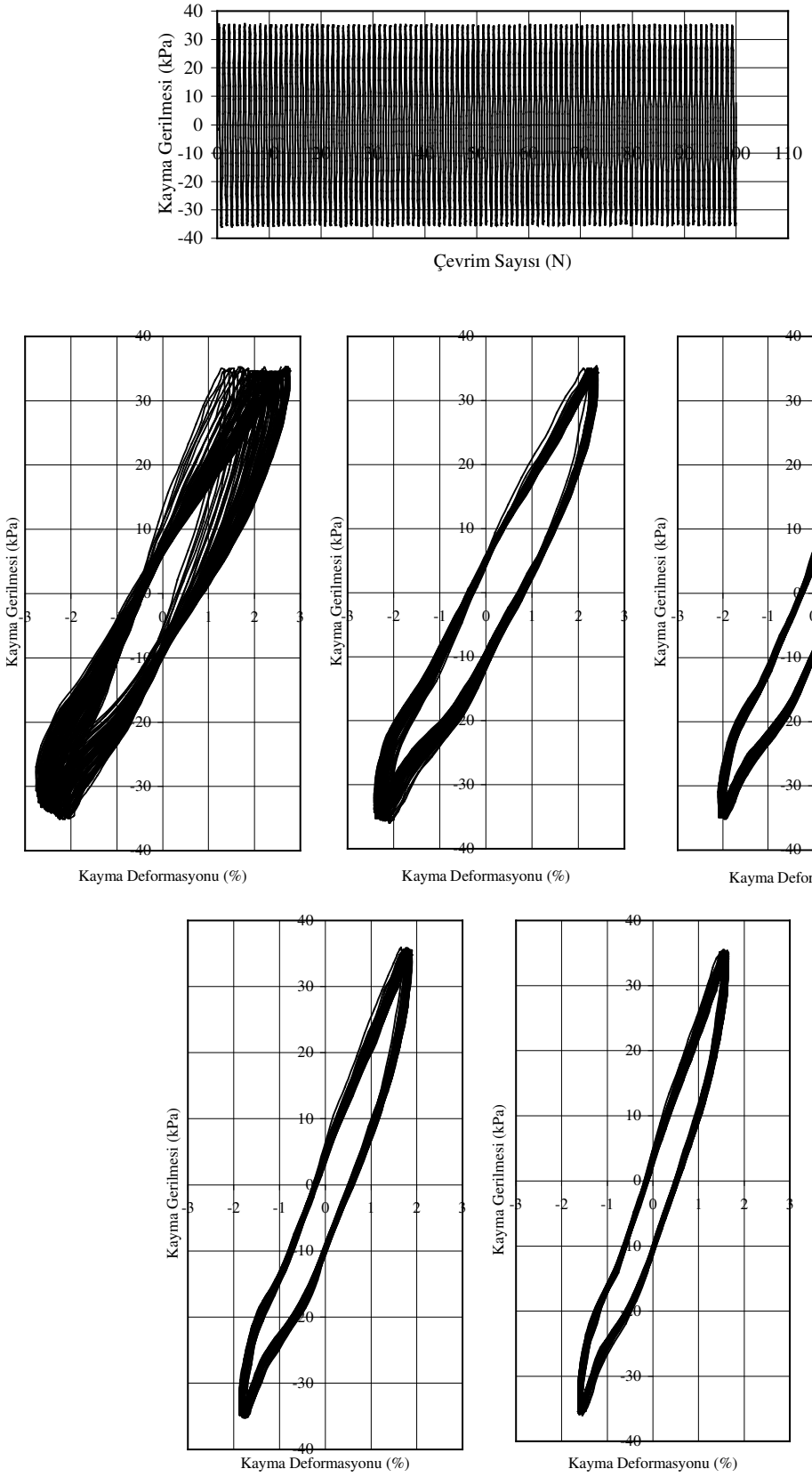


Şekil B47. B24 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.65).

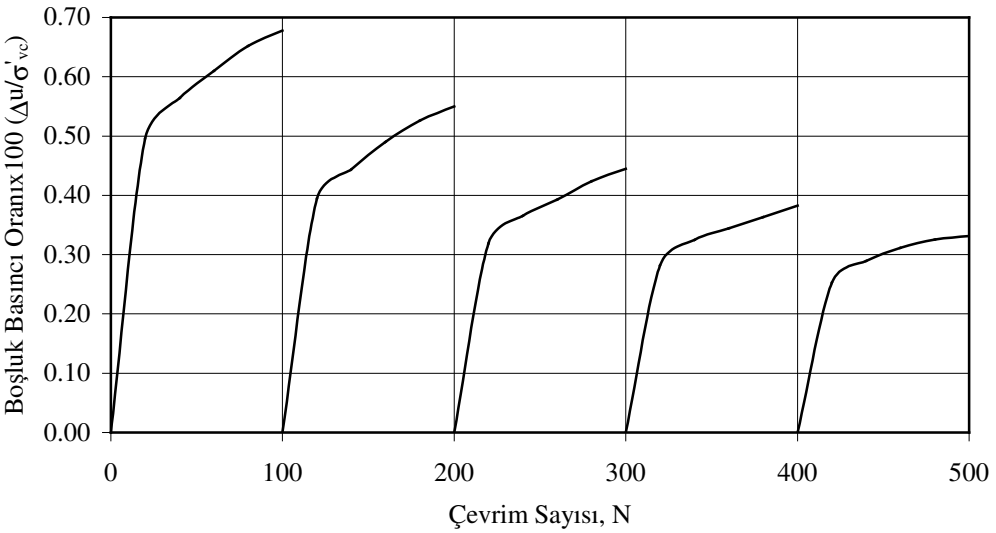


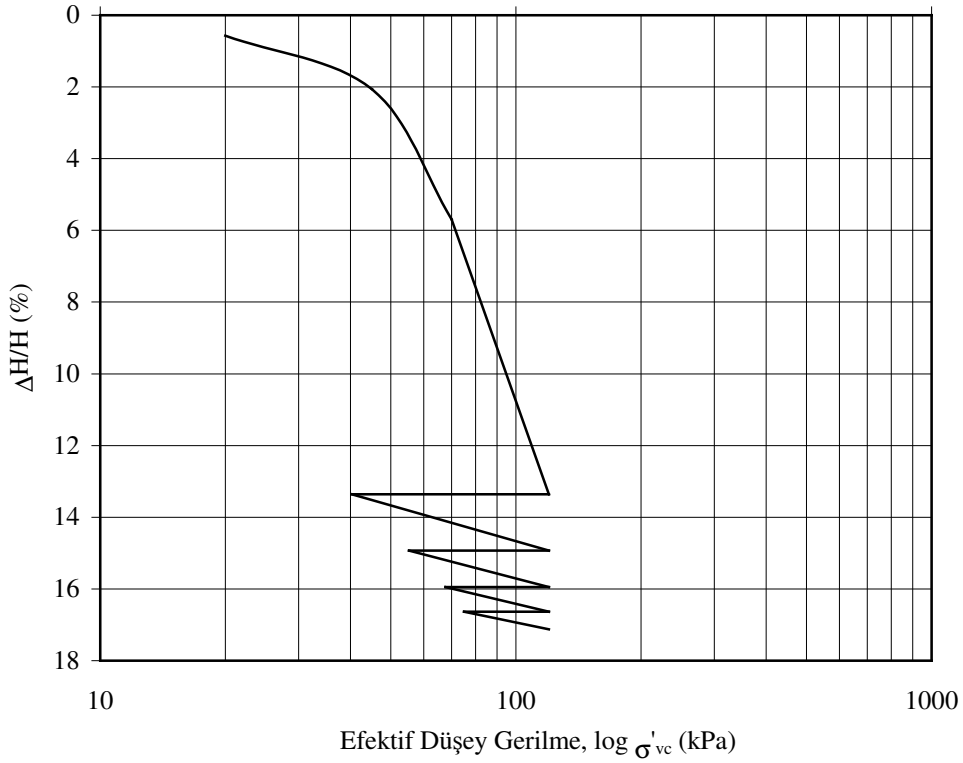


Şekil B48. B24 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

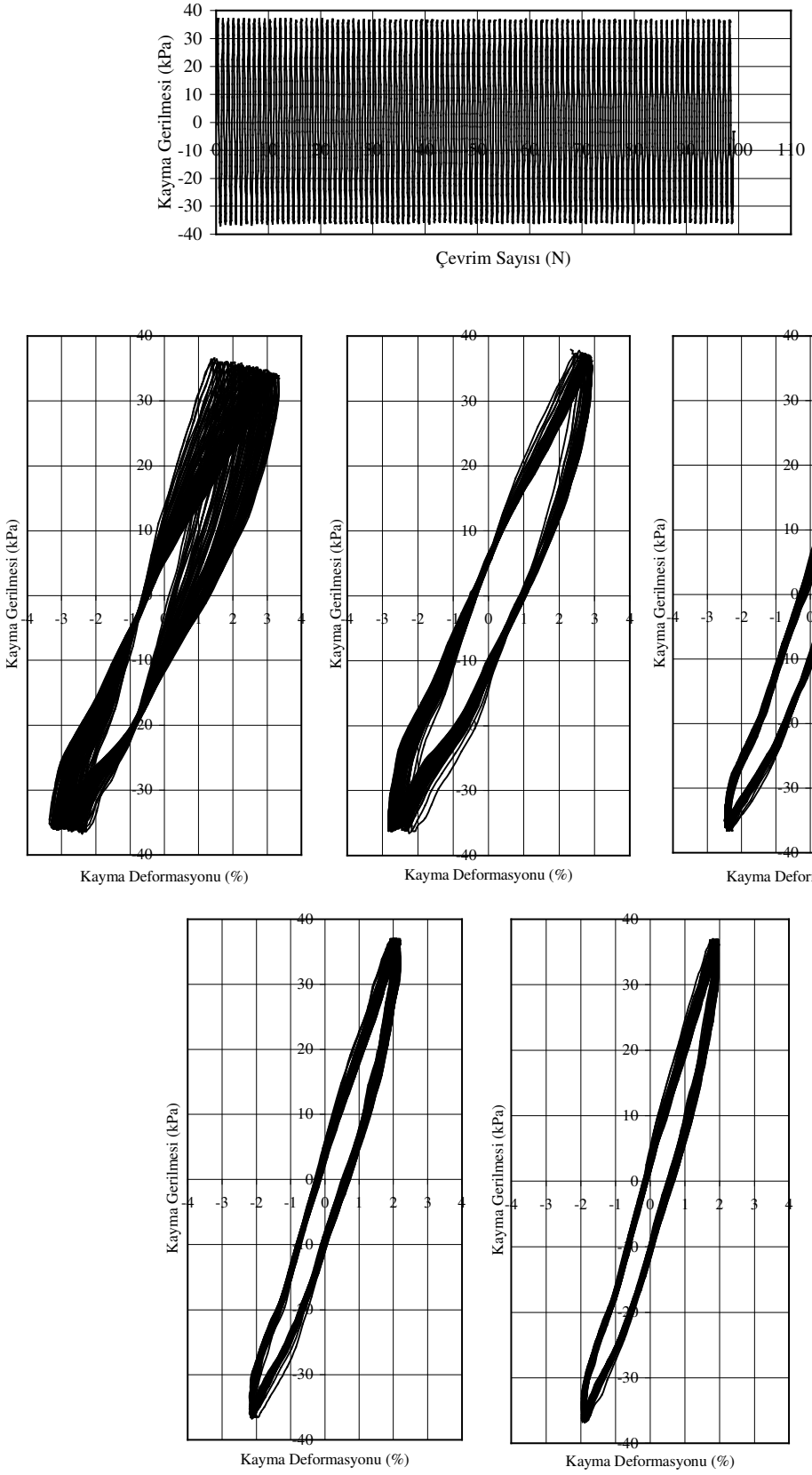


Şekil B49. B25 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.675).

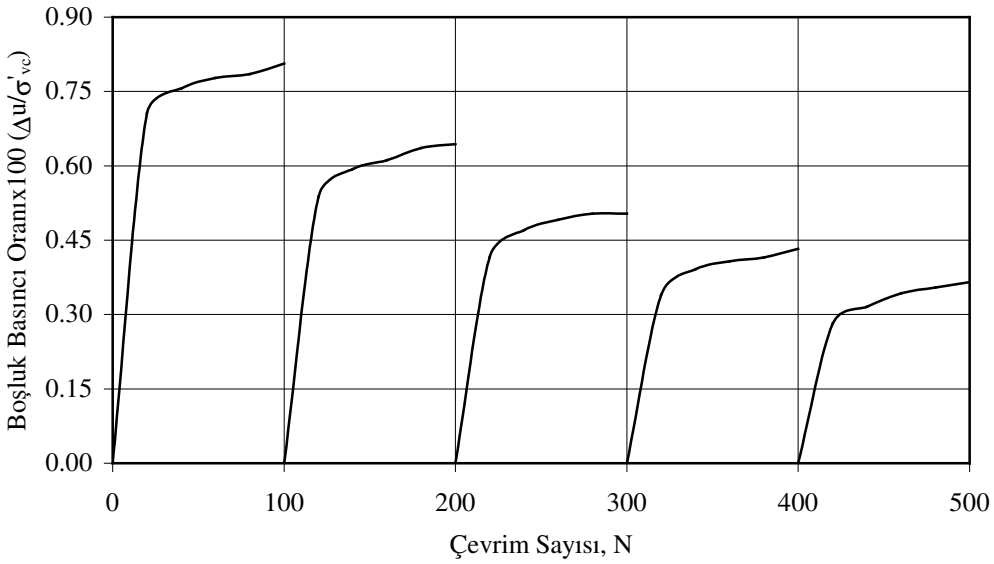


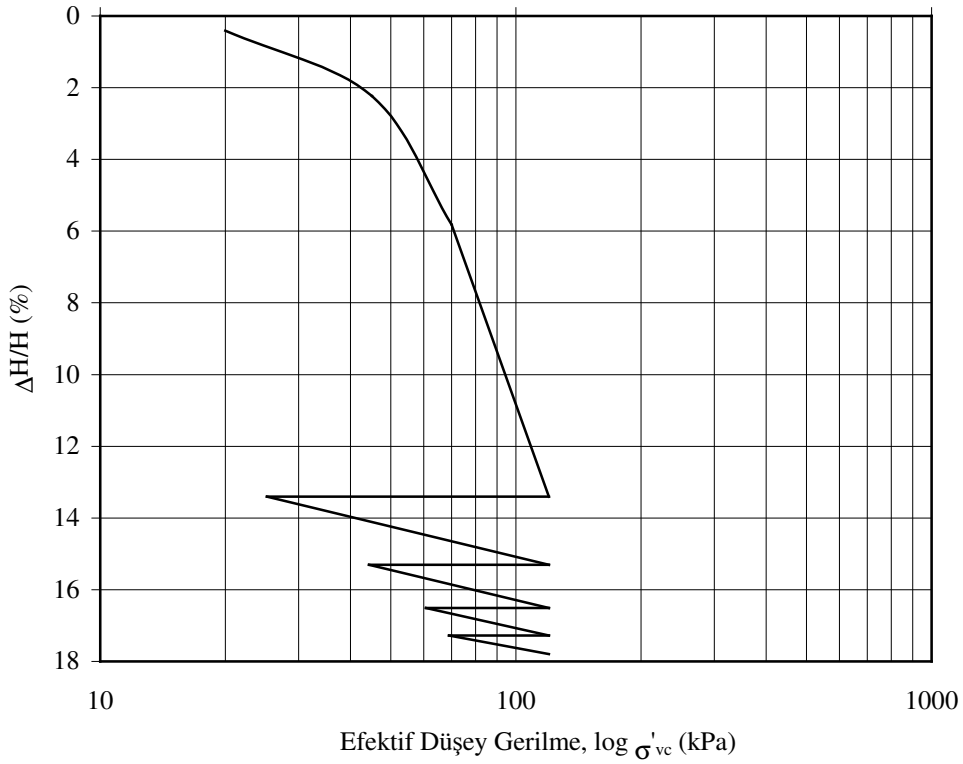


Şekil B50. B25 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

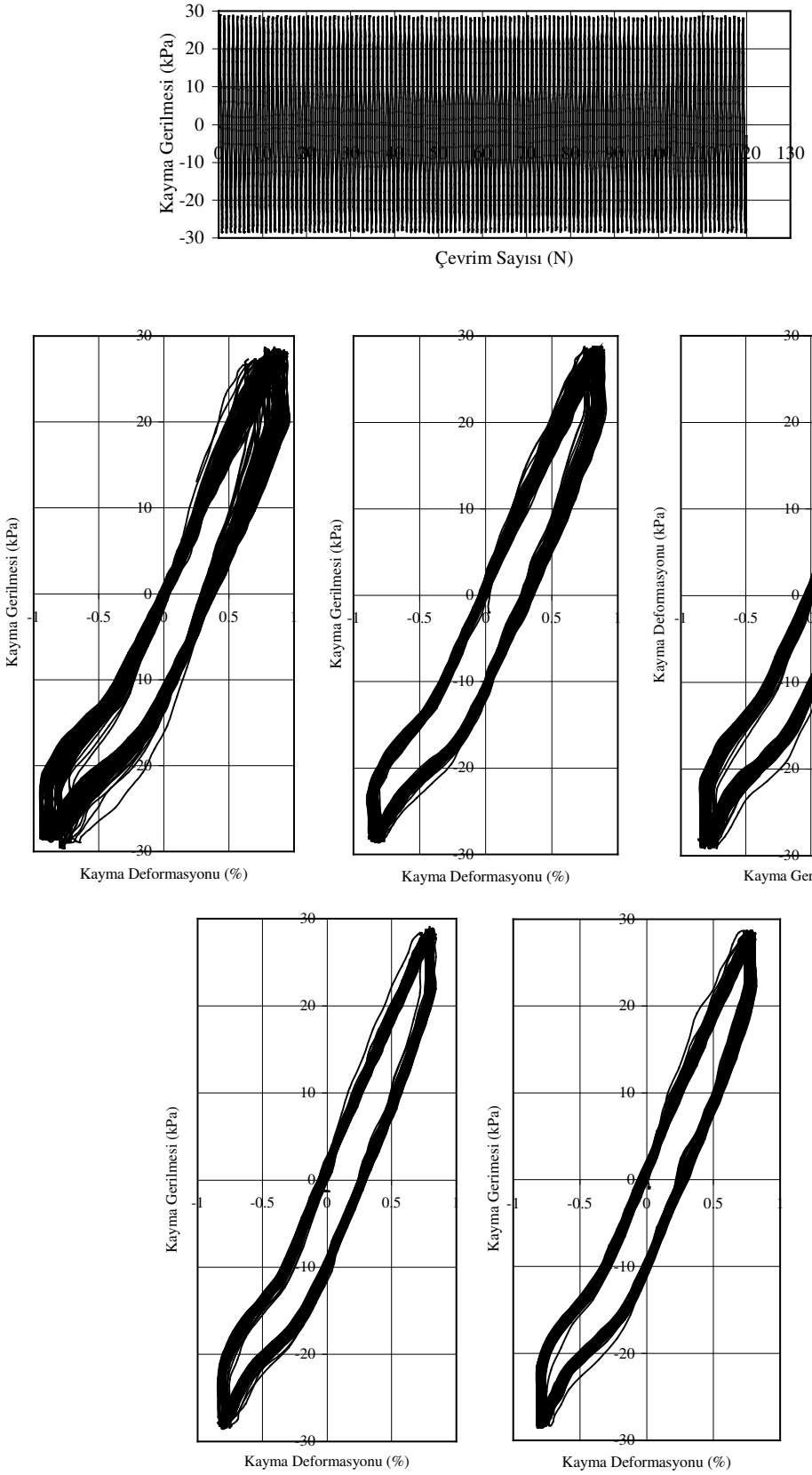


Şekil B51. B26 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=100, τ/τ_f=0.70).

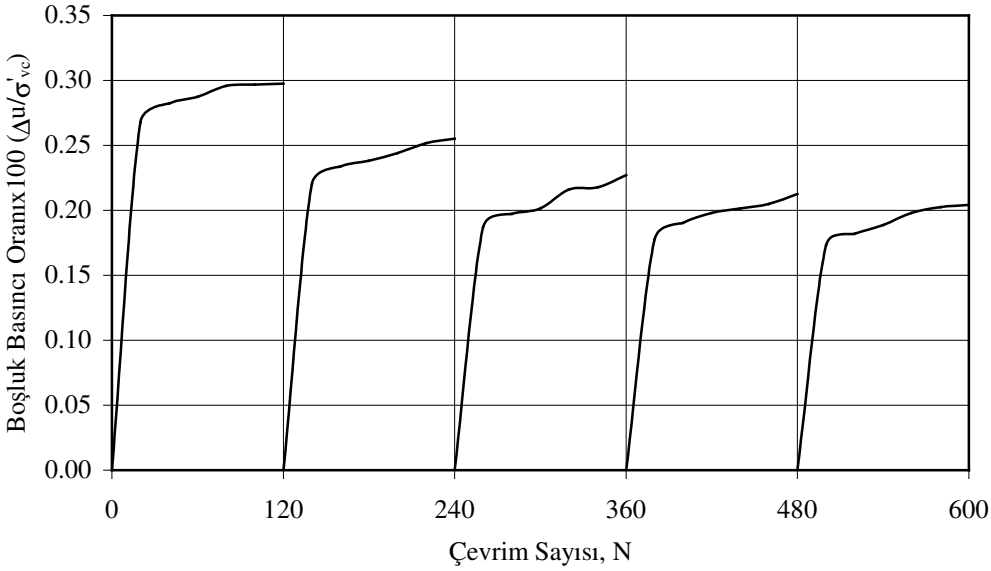


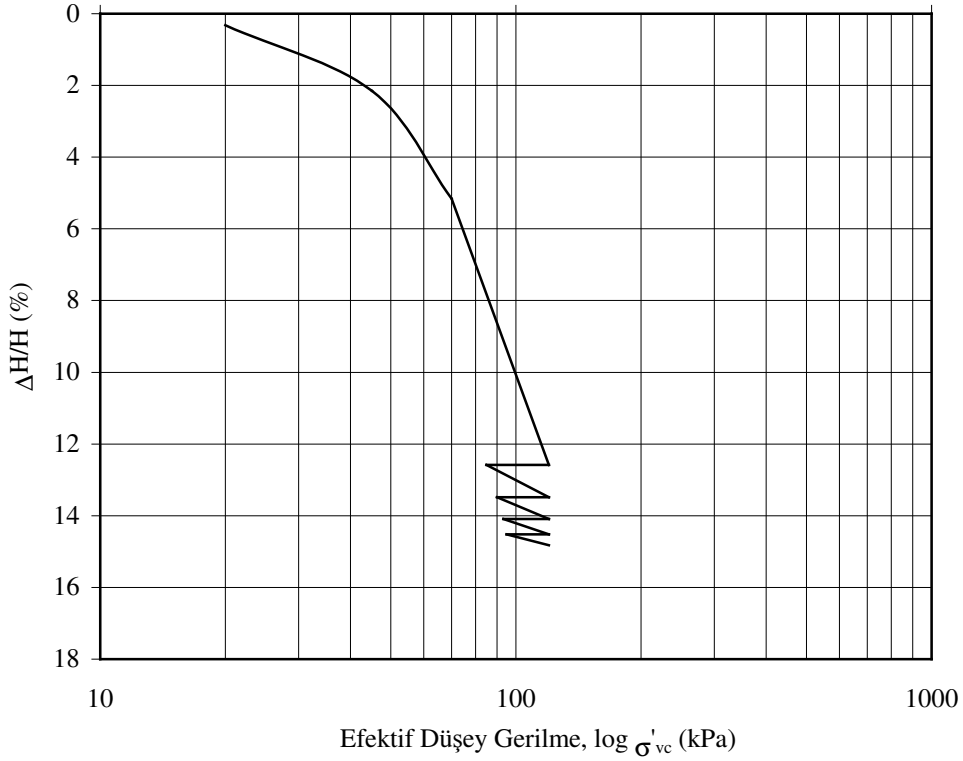


Şekil B52. B26 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

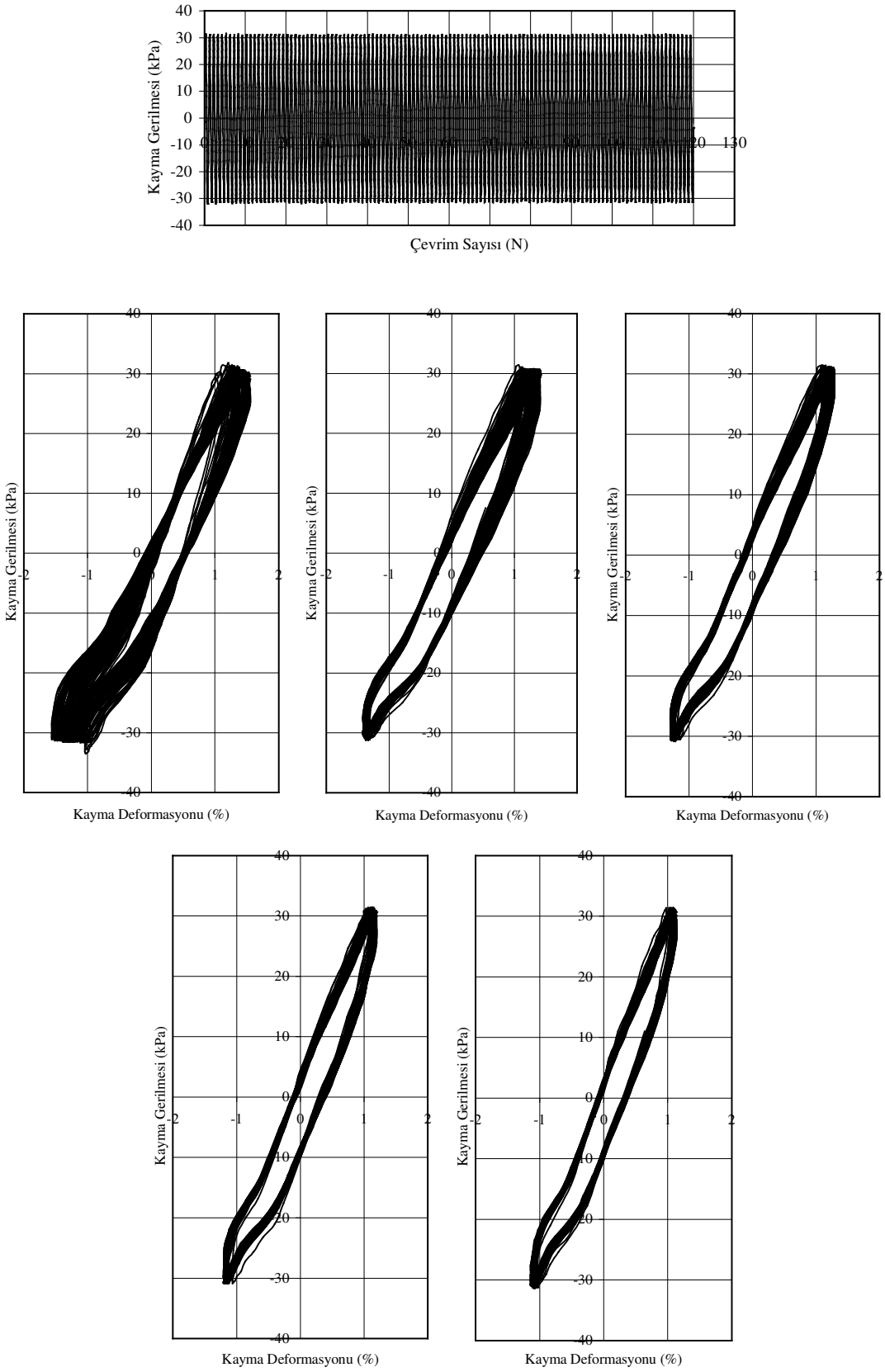


Şekil B53. B27 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.55).

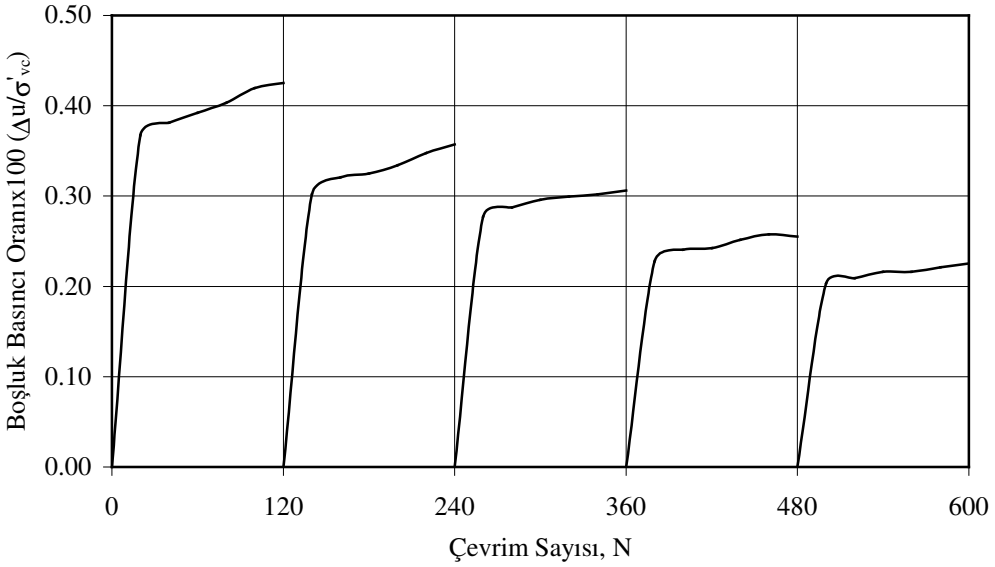


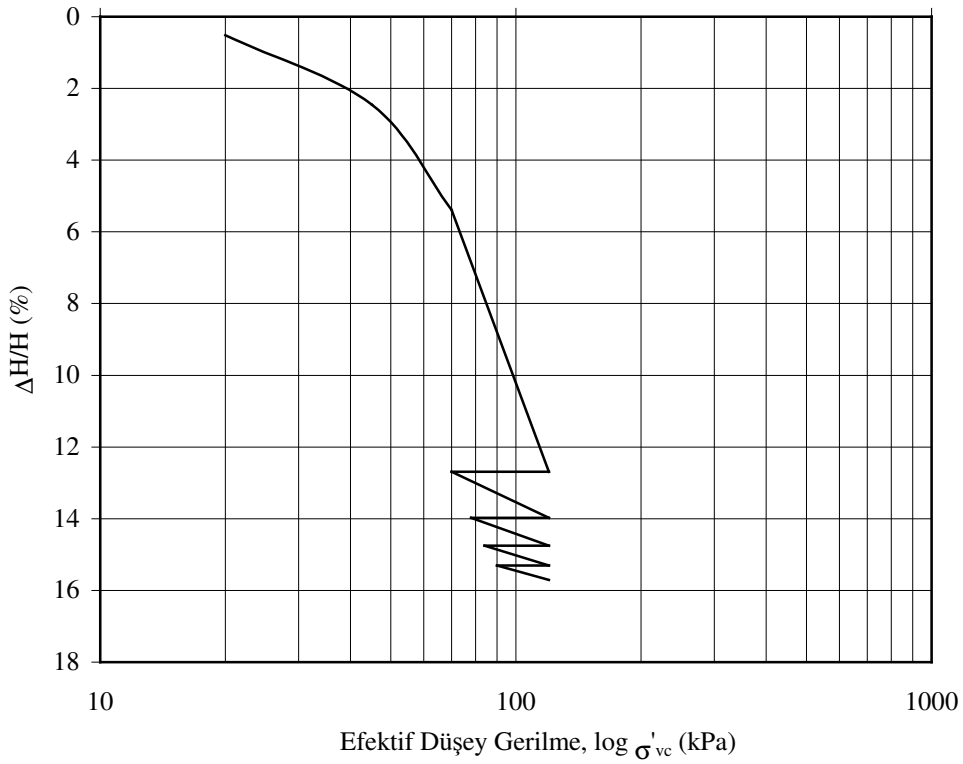


Şekil B54. B27 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

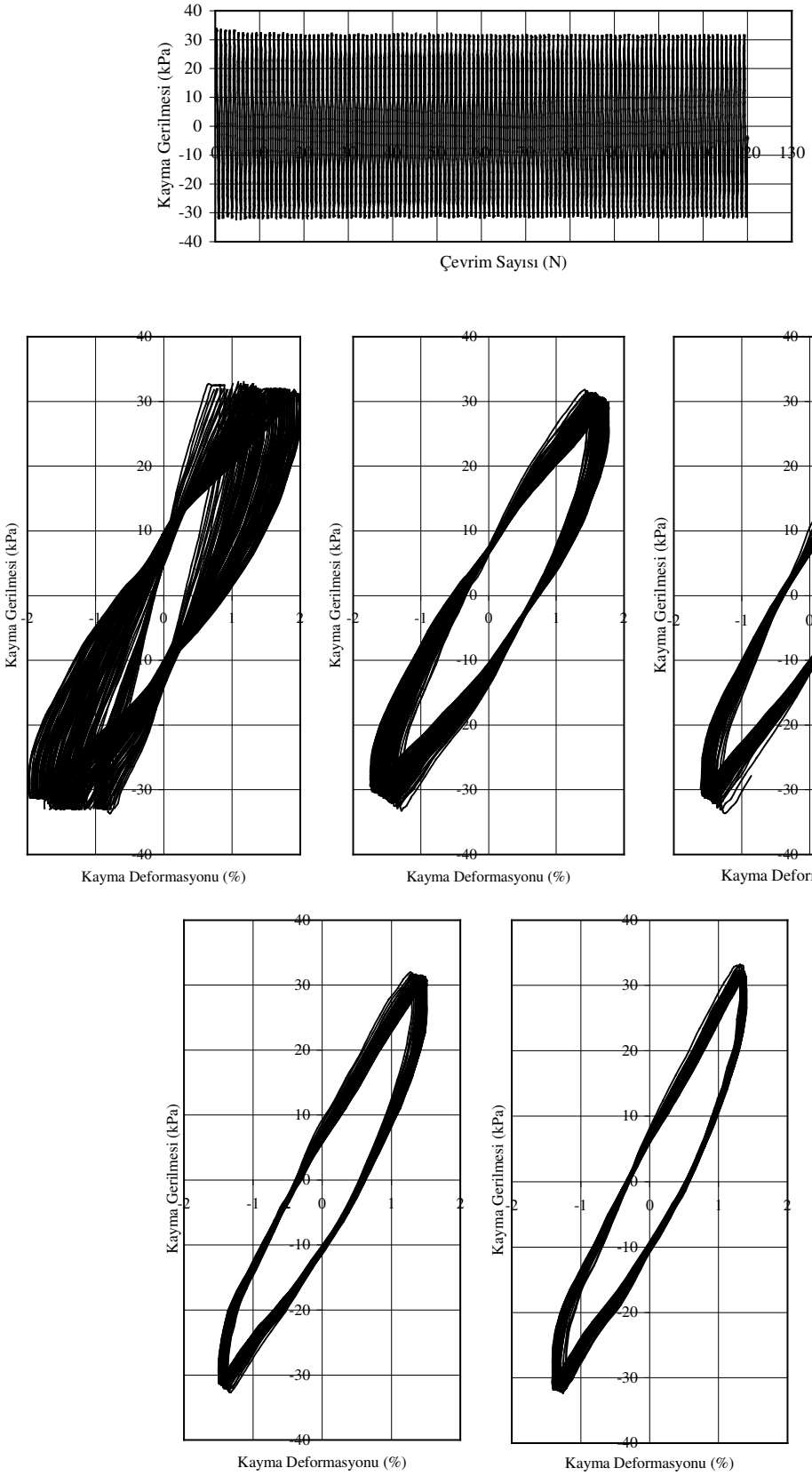


Şekil B55. B28 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.60).

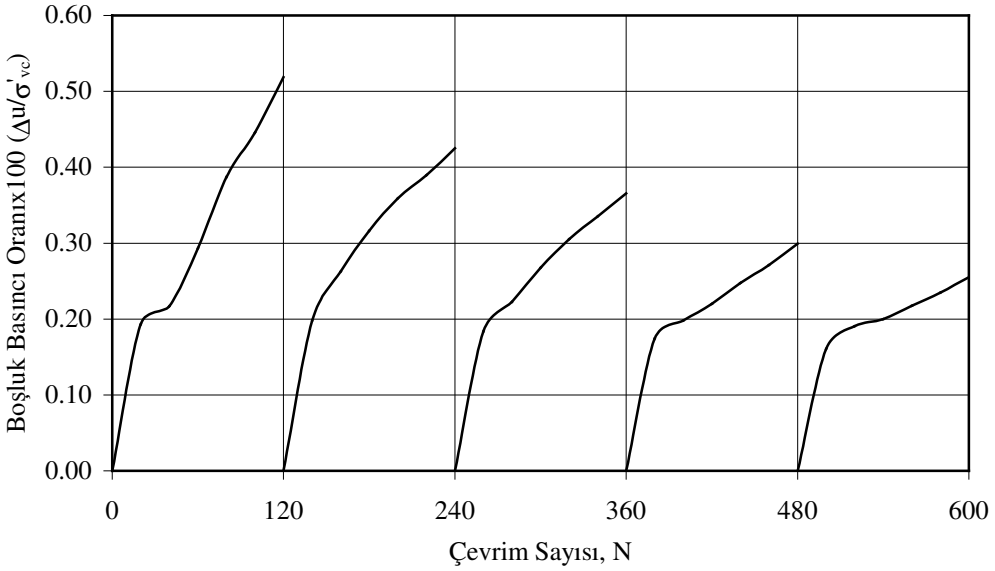


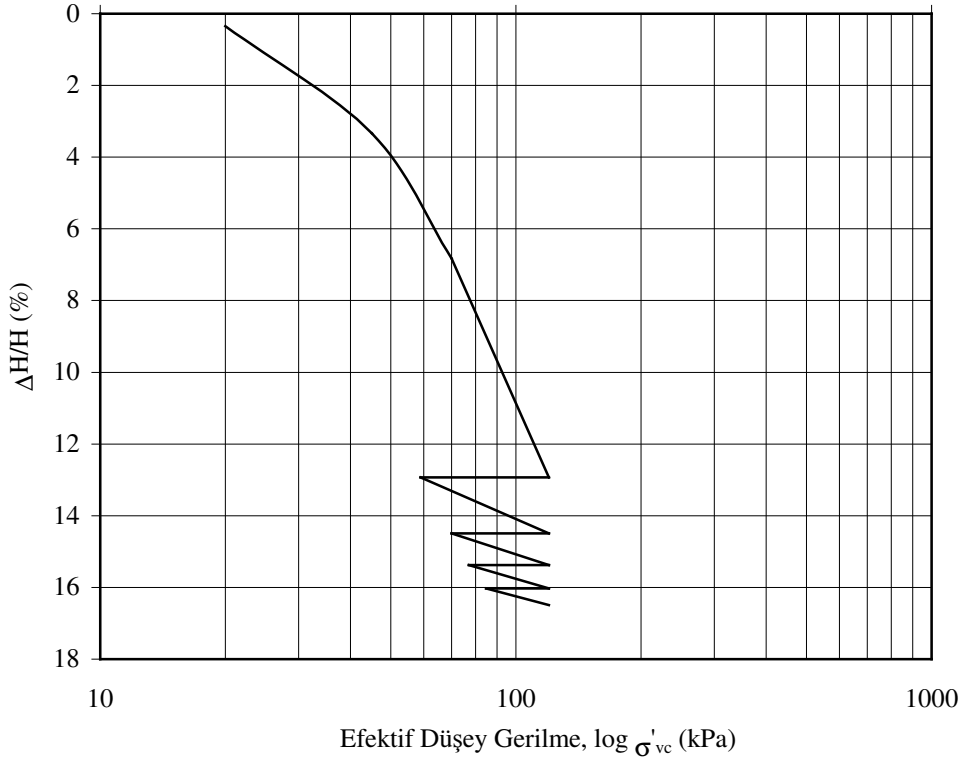


Şekil B56. B28 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

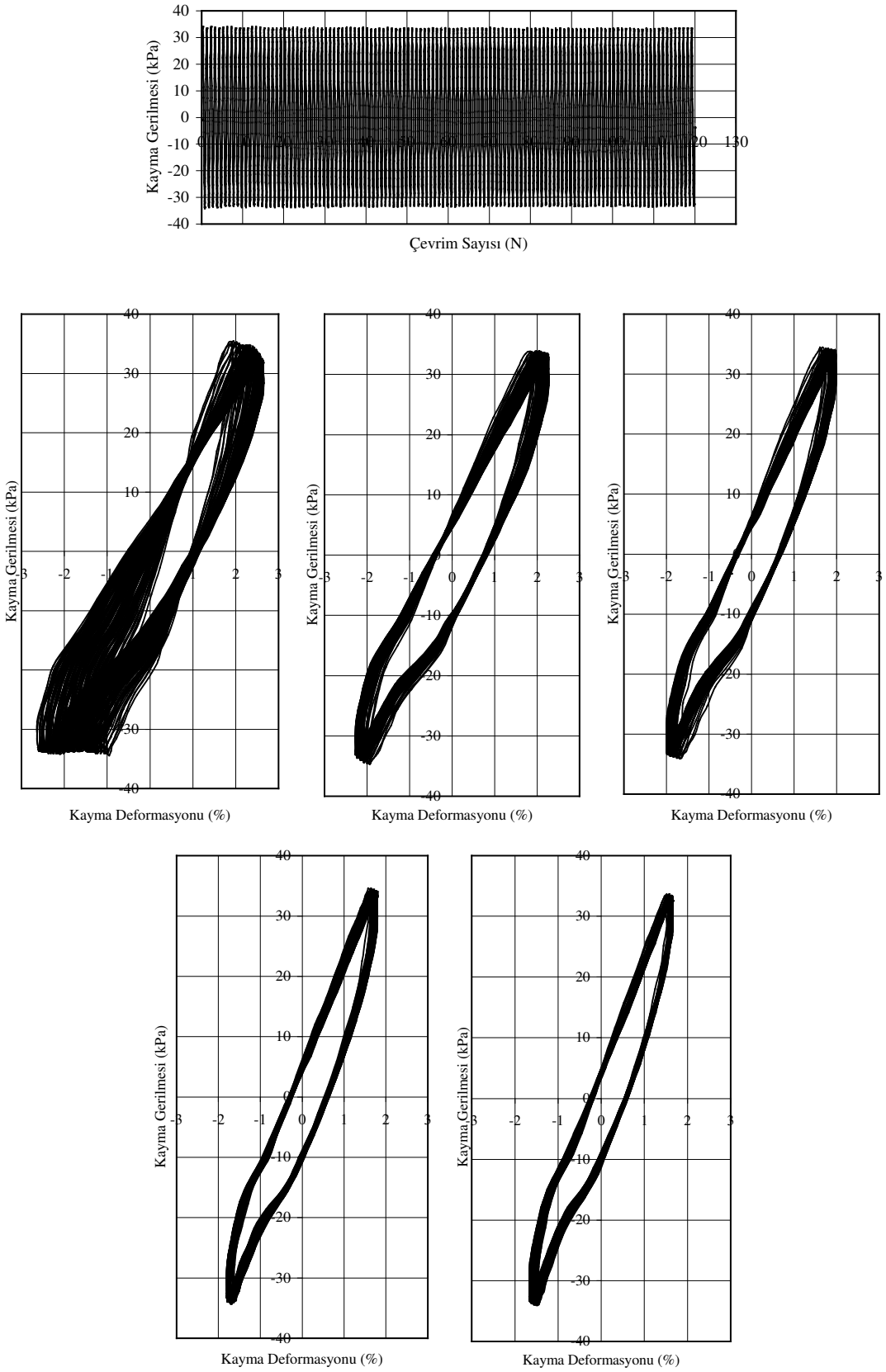


Şekil B57. B29 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.625).

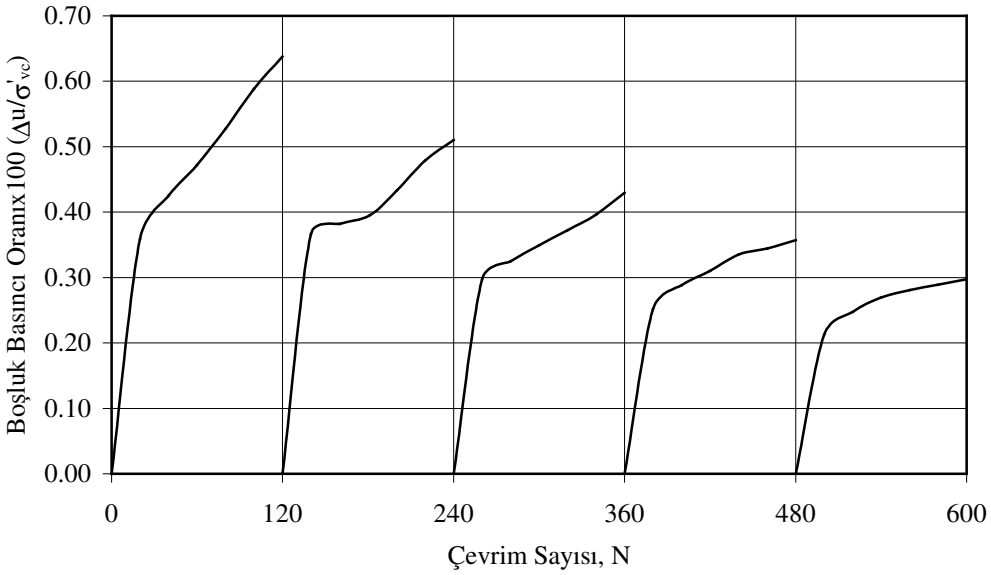


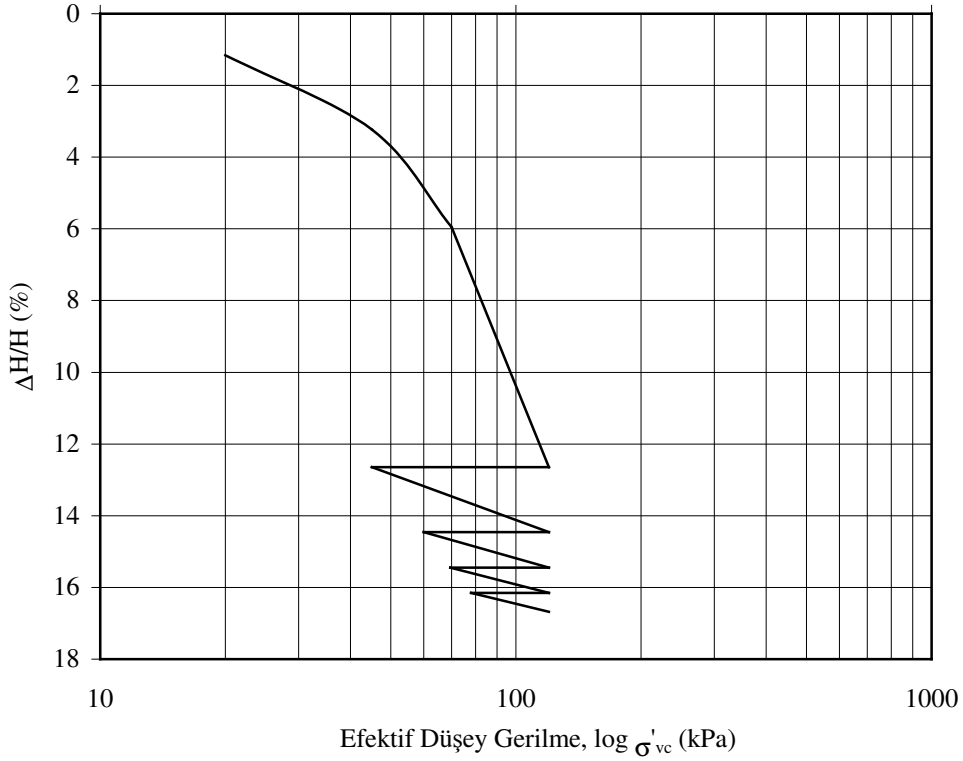


Şekil B58. B29 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

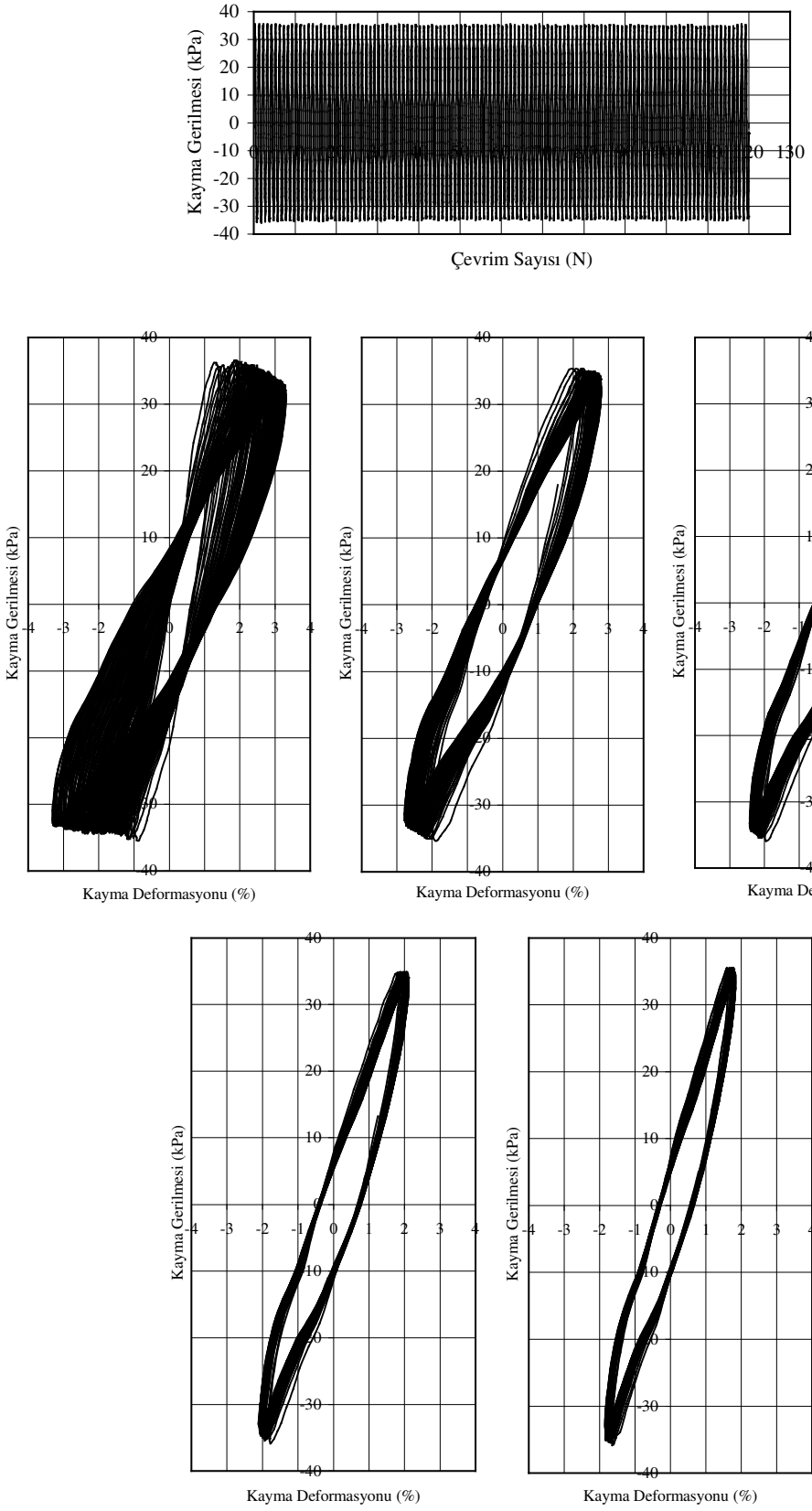


Şekil B59. B30 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.65).

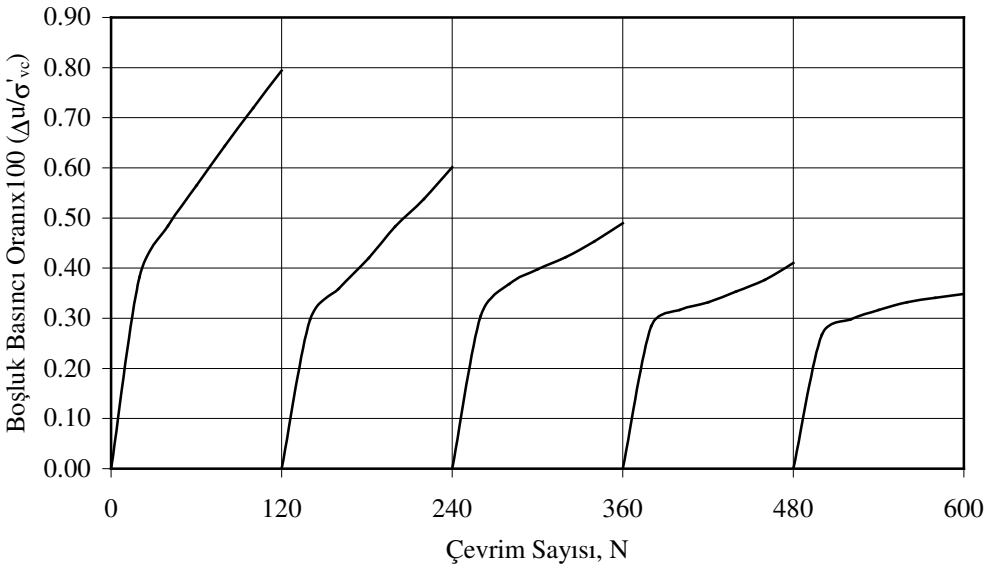


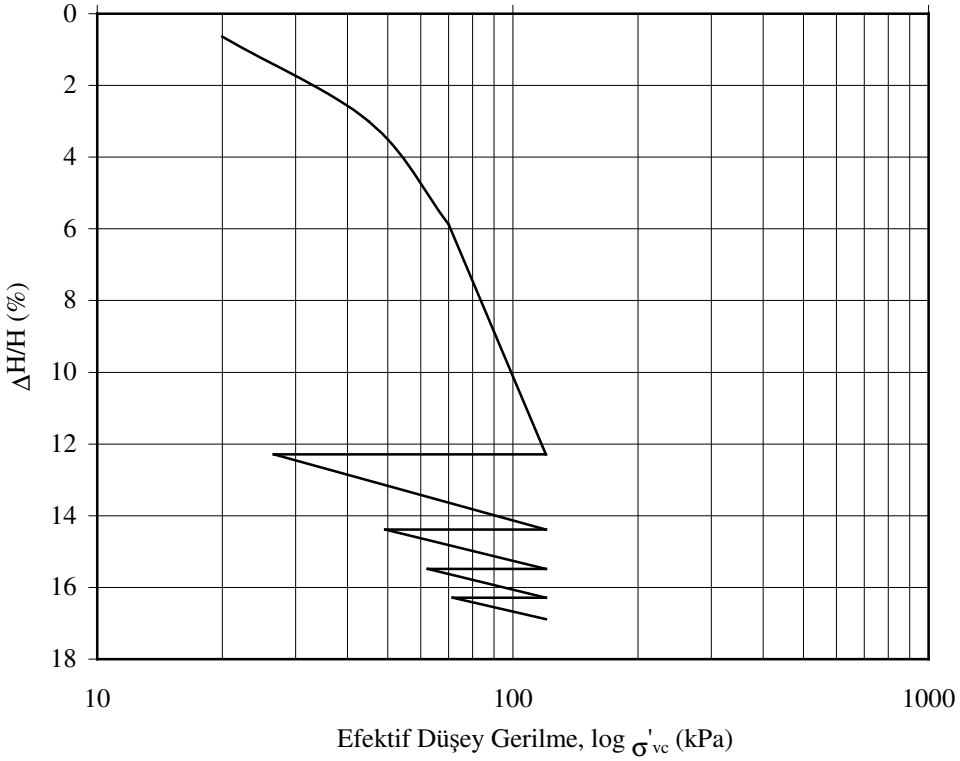


Şekil B60. B30 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.



Şekil B61. B31 deneyinde uygulanan kayma gerilmesi ve gerilme deformasyon değişimleri (N=120, τ/τ_f=0.675).





Şekil B62. B31 deneyinde meydana gelen boşluk suyu basınçları ve konsolidasyon oturmaları.

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Sivas'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sivas'ta tamamladıktan sonra 1989 yılında İTÜ İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek öğrenime başladı. 1993 yılında lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında yüksek lisansa başladı. 1996 yılında yüksek lisansı tamamladı. 1997 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında doktora yapmaya hak kazandı. 1997-2000 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yaptı. Halen Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Proje ve İnşaat Dairesi Başkanlığında proje mühendisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.