

14355.

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NORMAL KONSOLİDE KİLLERİN
TEKRARLI YÜKLER ETKİSİ ALTINDA DAVRANIŞI

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Hacı Bekir KARA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Eylül 1990

Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Şubat 1991

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Remzi ÖLKER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Ergün TOĞROL

Prof.Dr. Atilla M.ANSAL

Y. G.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

SUBAT 1991

ÖNSÖZ

Doktora çalışmama olanak sağlayan, değerli fikir ve görüşleri ile yol gösteren Sayın Prof.Dr. Remzi ÜLKER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her kademesinde sürekli ilgisini ve desteğini gördüğüm, fikir ve görüşlerinden her zaman yararlandığım Sayın Prof.Dr. Atilla M. ANSAL'a ve Doç.Dr. Hüseyin YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi büyük titizlikle daktilo eden Sayın Leyla AYKOL'a ve şekilleri özenle çizen Sayın Nurcan DİZİCİ ve Sayın Semih VİÇ'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

NOTASYON LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. ELE ALINAN KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Giriş	4
2.2. Dinamik Kayma Modülü	4
2.3. Sönüm Oranı	13
2.4. Dinamik Mukavemeti Etkileyen Faktörler	15
2.5. Dinamik Yükleme Sonrası Mukavemet Kaybı	30
2.6. Dinamik Deney Teknikleri	32
2.7. Sonuç	37
BÖLÜM 3. YÖNTEM	40
3.1. Giriş	40
3.2. Alet	40
3.3. Deney Malzemesi	53
3.4. Numune Hazırlanması	56
3.5. Deneylerin Yapılışı	57
3.6. Verilerin Değerlendirilmesi	61
3.7. Sonuç	63
BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR	64
4.1. Giriş	64
4.2. Dinamik Basit Kesme Deneyleri	64
4.3. Dinamik Üç Eksenli Deneyler	101
4.4. Dinamik Basit Kesme ve Dinamik Üç Eksenli Deneylerin Karşılaştırılması	126
4.5. Deney Sonuçları ile İlgili Bağlantılar	140
4.6. Sonuç	149
BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR	151
KAYNAKLAR	156
ÖZGEÇMİŞ	160

NOTASYON LİSTESİ

A_c	: Kil aktivitesi
A_o	: Başlangıç numune yatay kesit alanı (cm^2)
A	: Numune yatay kesit alanı (cm^2)
a	: Katsayı
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
B	: Boşluk suyu basıncı parametresi
c'	: Efektif gerilmeye göre kohezyon (kPa)
C_v	: Konsolidasyon katsayısı (cm^2/sn)
D	: Sönüm oranı
$D_{\max}$	: Maksimum sönüm oranı
e	: Boşluk oranı
f	: Frekans (Hz)
g	: Yerçekimi ivmesi (cm^2/sn)
G	: Dinamik kayma modülü (kPa)
G_o	: Başlangıç dinamik kayma modülü (kPa)
$G_{\max}$	: Maksimum dinamik kayma modülü (kPa)
H_o	: Deney başı numune yüksekliği (cm)
H	: Numune yüksekliği (cm)
I_p	: Plastisite indisi
K	: Zemin plastisite indisine bağlı bir katsayı
k	: Düşey permeabilite katsayısı (cm/sn)
K_o	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
m_v	: Hacimsal sıkışma katsayısı (m^2/kN)
N	: Çevrim Sayısı
P_c	: Ön konsolidasyon basıncı (kPa)
P_o	: Jeolojik yük (kPa)
S_r	: Doygunluk derecesi
S_u	: Drenajsız kayma mukavemeti (kPa)
T	: Kesme kuvveti
u	: Boşluk suyu basıncı (kN/m^2)
v_s	: Kayma dalgası hızı (cm/sn)

w_L	: Likit limit
w_p	: Plastik limit
w	: Su muhtevası
γ	: Birim kayma
γ_r	: Referans birim kayma
γ_n	: Tabii birim hacim ağırlığı (kN/m^3)
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı (kN/m^3)
ϵ	: Eksenel birim boy kısalması
ϵ_{fs}	: Kırılma anındaki eksenel birim boy kısalması
$\epsilon_{din}, \epsilon_p$	: Tekrarlı yüklemede oluşan plastik şekil değiştirme
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler (kPa)
σ'_o	: Ortalama efektif çevre basıncı (kPa)
σ_c	: Konsolidasyon basıncı (kPa)
σ_{dc}	: Eksenel tekrarlı gerilme (kPa)
σ_d	: Dinamik gerilme oranı
σ'_v	: Efektif düşey normal gerilme (kPa)
τ	: Kayma gerilmesi (kPa)
τ_f	: Kırılma anındaki kayma gerilmesi (kPa)
τ_{max}	: Maksimum kayma gerilmesi (kPa)
ΔH	: Düşey şekil değiştirme (mm)
ΔL	: Yatay şekil değiştirme (mm)
ΔU_f	: Kırılma anındaki boşluk suyu basıncı (kPa)
$\Delta \sigma$	: Deviator gerilme (kPa)
ϕ'	: Efektif gerilmeye göre kayma direnci açısı ($^\circ$)
ϕ_{cm}	: Konsolidasyonlu drenajsız kayma direnci açısı ($^\circ$)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1.	Gerilme Kontrollü Deneylerde Histerisis İlmığının Değişimi	5
Şekil 2.2	Deformasyon Kontrollü Deneylerde Histerisis İlmığının Değişimi	5
Şekil 2.3.	Tekrarlı Kayma Gerilmesi Altında Oluşan Histerisis İlmikleri	6
Şekil 2.4	Suya Doygun Killerde Kayma Modülü ile Kayma Birim Deformasyon Bağıntısı (2)	8
Şekil 2.5	Kayma Modülü ile SPT Darbe Sayısı Arasındaki Bağıntı (7)	10
Şekil 2.6	G_o ile Su Arasındaki İlişki (8)	11
Şekil 2.7	Suya Doygun Killerde Sönüm Oranı ile Kayma Birim Deformasyon Bağıntısı (2)	14
Şekil 2.8	ϵ_{fs} ve Birim Şekil Değiştirme Özelliğinin Dinamik Mukavemete Etkisi (18)	17
Şekil 2.9	Gerilmelerle Boşluk Suyu Basıncıları Arasındaki İlişki (20)	18
Şekil 2.10	Tekrarlı Yüklemede Oluşan Elastik ve Plastik Davranış (20)	19
Şekil 2.11	Tekrarlı Yük İle ϵ dinamik İlişkisi (22)	20
Şekil 2.12	Tekrarlı Kayma Gerilmesi-Birim Kayma-Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi (25) ...	21
Şekil 2.13	Dinamik Kayma Modülü Değerinin Boşluk Oranı ve Ortalama Efektif Çevre Basıncı ile Değişimi (1) .	22
Şekil 2.14	Aşırı Konsolide Killerde Normalize Boşluk Suyu Basıncı ile Deformasyon Arasında İlişki (21)	23
Şekil 2.15	Dinamik Kayma Modülüne Birim Kayma ve Aşırı Konsolidasyon Oranının Etkisi (28)	24
Şekil 2.16	Tekrarlı Yükleme Frekansının Boşluk Suyu Basıncına ve Eksenel Birim Deformasyona Etkisi (24)	25
Şekil 2.17	Frekansın ve Yükleme Şeklinin Dinamik Davranışa Etkisi (32)	27
Şekil 2.18	Tek ve Çift Yönlü Yükleme Biçimlerinin Farkı (35).	28
Şekil 2.19	Zemin Deneylerinde Kullanılan Yükleme Modelleri (36)	29
Şekil 2.20	Tekrarlı Yük Sonrası Statik Mukavemetin Değişimi (37)	31
Şekil 2.21	Basit Kesme Deney Sistemleri	33

Şekil 2.22	Arazideki Zemin Elemanı ile Laboratuvar Basit Kesme Deney Numunesi Üzerine Etkiyen Gerilmelerin Benzeşimi	34
Şekil 2.23	Arazideki Zemin Elemanı ile Laboratuvar Üç Eksenli Dinamik Deney Numunesi Üzerine Etkiyen Gerilmelerin Benzeşimi	36
Şekil 2.24	Kohezyonlu Zeminlerde Dinamik Kayma Modülü ve Sönüm Oranının Birim Kayma ile Değişimi (8)	39
Şekil 3.1	Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminin Şematik Çizimi	41
Şekil 3.2	Dinamik Basit Kesme Deney Hücresi	43
Şekil 3.3	Dinamik Deney Sistemleri Basınç Tablosu	45
Şekil 3.4	Dinamik Deney Sistemleri Kayıt Birimleri	48
Şekil 3.5	Dinamik Üç Eksenli Deney Hücresi	50
Şekil 3.6	Dinamik Üç Eksenli Yükleme Ünitesi	52
Şekil 3.7	Çamur Konsolidasyon Aleti	54
Şekil 3.8	Numune Hazırlama Aletleri	58
Şekil 4.1	Çevrim Sayısı ile Histerisis İlmikleri ve Boşluk Suyu Basınçlarının Değişimi	66
Şekil 4.2	Zamana Bağlı Çizdirilen Tipik Bir Deney Kaydı	67
-	Düzlemsel İzotropik Nümunelerle İlgili Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçları	
Şekil 4.3	Boşluk Suyu Basıncı İle Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	71
Şekil 4.4	Boşluk Suyu Basıncı İle Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	72
Şekil 4.5	Boşluk Suyu Basıncı ile Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	73
Şekil 4.6	Boşluk Suyu Basıncı ile Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	74
Şekil 4.7	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	76
Şekil 4.8	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	77
Şekil 4.9	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	78
Şekil 4.10	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	79
Şekil 4.11	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ...	80

Şekil 4.12	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ...	81
Şekil 4.13	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ...	82
Şekil 4.14	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ...	83
Şekil 4.15	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ...	84
Şekil 4.16	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ...	85
-	İzotropik Numunelerle İlgili Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçları	
Şekil 4.17	Boşluk Suyu Basıncı ile Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	87
Şekil 4.18	Boşluk Suyu Basıncı ile Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	88
Şekil 4.19	Boşluk Suyu Basıncı ile Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	89
Şekil 4.20	Boşluk Suyu Basıncı ile Birim Kaymanın Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	90
Şekil 4.21	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	92
Şekil 4.22	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	93
Şekil 4.23	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	94
Şekil 4.24	Belirli Tekrarlı Kayma Gerilmesinde Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	95
Şekil 4.25	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ..	97
Şekil 4.26	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ...	98
Şekil 4.27	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ..	99
Şekil 4.28	Gerilme Oranı ile Boşluk Suyu Basıncı ve Birim Kayma Arasındaki İlişkinin Frekansla Değişimi ..	100
-	Düzlemsel İzotropik Numunelerle İlgili Dinamik Üç Eksenli Deney Sonuçları	
Şekil 4.29	Boşluk Suyu Basıncı ile Eksenel Birim Boy Değişiminin Gerilme Oranına Göre Değişimi	105

Şekil 4.30	Boşluk Suyu Basıncı İle Eksenel Birim Boy Değişiminin Gerilme Oranına Göre Değişimi	106
Şekil 4.31	Boşluk Suyu Basıncı İle Eksenel Birim Boy Değişiminin Gerilme Oranına Göre Değişimi	107
Şekil 4.32	Belirli Tekrarlı Gerilmelerde Eksenel Birim Boy Değişimi ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	109
Şekil 4.33	Belirli Tekrarlı Gerilmelerde Eksenel Birim Boy Değişimi ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	110
Şekil 4.34	Belirli Tekrarlı Gerilmelerde Eksenel Birim Boy Değişimi ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	111
Şekil 4.35	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı-Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	113
Şekil 4.36	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı-Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	114
Şekil 4.37	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı-Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	115
Şekil 4.38	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı - Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	116
-	İzotropik Numunelerle İlgili Dinamik Üç Eksenli Deney Sonuçları	
Şekil 4.39	Boşluk Suyu Basıncı ile Eksenel Birim Boy Değişiminin Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	119
Şekil 4.40	Boşluk Suyu Basıncı ile Eksenel Birim Boy Değişiminin Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	120
Şekil 4.41	Boşluk Suyu Basıncı ile Eksenel Birim Boy Değişiminin Gerilme Oranına Bağlı Değişimi	121
Şekil 4.42	Belirli Tekrarlı Gerilmelerde Eksenel Birim Boy Değişimi ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	123
Şekil 4.43	Belirli Tekrarlı Gerilmelerde Eksenel Birim Boy Değişimi ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	124
Şekil 4.44	Belirli Tekrarlı Gerilmelerde Eksenel Birim Boy Değişimi ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi	125
Şekil 4.45	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı-Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	127
Şekil 4.46	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı-Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	128
Şekil 4.47	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı-Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	129
Şekil 4.48	Gerilme Oranı-Boşluk Suyu Basıncı-Eksenel Birim Boy Değişimi-Frekans Arasındaki İlişki	130

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1.	Kaolin Mineral Özellikleri	53
Tablo 3.2.	Kaolinin Endeks Özellikleri	55
Tablo 3.3.	Kaolin Numunelerin Geoteknik Özellikleri	55
Tablo 3.4.	Kaolin Numunelerin Mukavemet Parametreleri	56
Tablo 4.1.	Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçlarının Frekansa Göre Toplu Değerlendirilmesi	68
Tablo 4.2.	Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçlarının Kayma Gerilmesi Oranına Göre Toplu Değerlendirilmesi	69
Tablo 4.3.	Dinamik Üç Eksenli Deneylerin Frekansa Göre Toplu Değerlendirilmesi	102
Tablo 4.4.	Dinamik Üç Eksenli Deneylerin Dinamik Gerilme Oranına Göre Toplu Değerlendirilmesi	103
Tablo 4.5.	Düzlemsel İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Frekansa Göre Karşılaştırılması	132
Tablo 4.6.	Düzlemsel İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Kayma Gerilmesi ve Gerilme Oranına Göre Karşılaştırılması	135
Tablo 4.7.	İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Frekansa Göre Karşılaştırılması	136
Tablo 4.8.	İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Kayma Gerilmesi ve Gerilme Oranına Göre Karşılaştırılması	139
Tablo 4.9.	Boşluk Suyu Basıncı Regrasyon Hesap Sonuçları (Dinamik Basit Kesme Deneyleri)	142
Tablo 4.10.	Birim Kayma Regrasyon Hesap Sonuçları (Dinamik Basit Kesme Deneyleri)	144
Tablo 4.11.	Boşluk Suyu Basıncı b, m, r katsayıları (Dinamik Üç Eksenli Deneyler)	146
Tablo 4.12.	Eksenel Birim Boy Değişimi b, m, r katsayıları (Dinamik Üç Eksenli Deneyler)	148

ÖZET

Günümüz dünyasının enerji gereksiniminin hızlı artışı, açık denizlerde petrol ve doğal gaz işletilmesini, büyük boru hatları ve depolama tesisleri ile nükleer santrallerin yapımını, büyük barajlar inşaatını zorunlu ve ekonomik hale getirmiştir. Tüm bu gelişmelerin beraberinde getirdiği en önemli mühendislik problemlerinden biri de, yapıların temelini oluşturan zeminlerin tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışının belirlenmesi, kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişimlerin bulunması, elde edilen değerlerin mühendislik yapılarının projelendirilmesinde ve uzun süreli stabilite hesaplarında kullanılmasıdır. Ülkemizin, aktif bir deprem kuşağında bulunması, bu konuların önemini daha da arttırmaktadır.

Bu araştırmada; yüksek su muhtevasında hazırlanarak konsolide edilen kaolin numunelerin dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney aletlerinde sinusoidal tekrarlı yüklemelere tabi tutulmuş, bu yükler etkisi altında gerilme-şekil değiştirme ve dinamik mukavemet özellikleri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Çalışmalarda, dinamik yükleme frekansı ve genliğinin, kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerine etkisi ön planda tutulmuş, deney sonu kriteri olarak, düşük frekans ve genlikteki deneyler için boşluk suyu basınçlarının sabitleşmesi, diğer deneylerde ise, birim kayma veya eksenel birim boy değişiminin $\pm$ %10 değerine ulaşması seçilmiştir.

Her iki numune grubu ve deney sisteminde yapılan deneyler; çevrim sayısı ve gerilme oranlarındaki artımlarla frekans değerlerindeki azalmaların boşluk suyu basınçlarını ve deformasyonları artırdığını, dolayısıyla dinamik mukavemeti azalttığını göstermiştir. Düzlemsel izotropik numunelerde, izotropik numunelerden daha fazla deformasyon oluşurken, boşluk suyu basınçlarının daha düşük değerlerde kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, deney sonuçları yapılan regrasyon analizleri yardımıyla matematiksel olarak ifade edilmiştir.

SUMMARY

THE BEHAVIOUR OF NORMALLY CONSOLIDATED CLAYS UNDER CYCLIC LOADING

Because of the continuously increasing energy demands in the world, it became necessary to construct big dams, nuclear power plants and off shore petroleum platforms in oceans. The soil layers under such buildings dams, power plants, off shore platforms are subjected to cyclic and transient loadings due to earthquakes, wind, wave action. It is very crucial to know the effects of cyclic loadings on soil layers and to implement these effects in the design and construction of these structures.

Our country is on an active earthquake zone, therefore it is necessary to predict the behaviour of structures under earthquake loads. The behaviour of soil layers under cyclic loading is important for the structures that are built on these layers. The decrease in the bearing capacity of these soil layers and the probable settlements under cyclic loading must be predicted before. For this purpose dynamic laboratory, in-situ experimental methods have been developed and the stress-strain and dynamic strength properties of the soil layers have been predicted with these methods.

The main purpose in this thesis is to study the behaviour of cohesive soils subjected to cyclic loads based on dynamic shear and dynamic triaxial tests. The dynamic simple shear system is designed by M. Silver and K. Ishihara and it is possible to carry out stress controlled cyclic shear tests. The dynamic triaxial system is composed of a modified cell that strain and stress can be measured in side the cell and a loading unit capable of applying stress and strain controlled cyclic loading.

Kaolinite clay used in the experiments is Uşak Kaolin and it is taken from İstanbul Yıldız Porcelain factory. Liquidity limits and plasticity limits of the kaolin are 65 % and 25 % respectively. Kaolin samples are prepared in mud consolidometers starting initially with apporoximately 250 % moisture content where samples were consolidated under $p = 10.0 \text{ kN/m}^2$ axial pressure. Under these conditions the duration of consolidation takes about one month and soil samples obtained would have 45 % misture content.

In program two kinds of samples are used: undisturbed (transversely isotropic) and remolded (isotropic). Soil samples were placed in the cell and were subjected to 400 kN/m^2 confining pressure and 300 kN/m^2 back pressure. Then samples were left for consolidation under 100 kN/m^2 effective stress. After the completion of consolidation saturation of the sample is controlled and $B \geq 0.95$ condition is obtained in all of the tests.

Uniform sinusoidal cyclic loading were used in all experiments with frequencies 1.00 Hz., 0.50. Hz., 0.10 Hz., 0.01 Hz. and dynamic stress ratios 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80.

Total number of experiments done were 66; 40 of them were performed with dynamic simple shear system on remolded and undisturbed soil samples, 26 of them were dynamic triaxial tests.

In low cyclic stress levels, experiments were stopped when pore water pressure has reached a constant value. In other cases, experiments were continued until strains has reached 20 %.

The results obtained from the dynamic simple shear and dynamic triaxial tests can be summarized as given below:

In these two series of tests conducted on two types of soil samples at the same frequency it was observed that increase in the stress ratio caused an increase in pore water pressure and deformations and led to a reduction in the dynamic strength. The same effect could be enhanced by decreasing the loading frequency and increasing number of cycles.

$\tau/\tau_F \approx 0.50$ ratio can be defined as the critical stress ratio based on dynamic simple shear tests. In experiments conducted at cyclic stress larger than the critical stress ratio, important increase in pore water pressure and limited deformations were observed.

The increase in the cyclic strain amplitude in terms of number of cycles with respect to the dynamic stress ratio was observed to be hyperbolic for tests performed at the same frequency.

The curves for different number of cycles were focused at $\tau / \tau_f \approx 0.30$ and $\sigma_d / \sigma_c \approx 0.20$ values for transversely isotropic samples. On isotropic samples, the curves were focused $\tau / \tau_f \approx 0.40$ and $\sigma_d / \sigma_c \approx 0.10$ values. Deformations are constant or limited at these ratios.

Shear strains obtained from the tests on transversely isotropic and isotropic samples are compared. It was observed that shear strains of transversely isotropic samples are 25 % more than shear strains of isotropic samples.

Axial strains for transversely isotropic samples are 17 % - 20 % more during initial cycles and 77 % - 84 % more for large number of cycles than axial strains of isotropic samples.

Pore water pressures obtained from two types of soil samples prepared differently in dynamic simple shear tests can be shown by the following formula:

$$u_{tr, is} \approx (0.75 - 0.90) u_{is}$$

In dynamic triaxial tests the expression was as;

$$u_{tr, is} \approx 0.95 u_{is}$$

In dynamic triaxial tests, pore-water pressures obtained from transversely isotropic soil samples are 15 % - 20 % more than those obtained in dynamic simple shear tests. For isotropic soil samples no significant difference was observed in pore-water pressure. In transversely isotropic soil samples pore water pressure reaches maximum value around 100 cycles and for isotropic samples this value is 1000 cycles.

Reduction in frequency increases pore-water pressure build up and strain amplitude at the same stress ratio. The effect of frequency on transversely isotropic soil samples was more important. The effect of frequency was more pronounced for stress ratios $\tau / \tau_f < 0.50$. But this effect loses its importance at $\tau / \tau_f \geq 0.50$ ratio for transversely isotropic samples and at stress ratios $\tau / \tau_f \geq 0.70$ for isotropic samples.

In two systems of tests with samples prepared differently the effect of frequency on the pore water pressure can be observed if the increase in number of cycles linear. If increase in number of cycle is slow and reaches to a maximum value, than differences are not important.

Important differences are also observed on stress-strain properties in the tests at the frequency of 0.50 Hz. For this reason, it is very appropriate to select the tests frequency value as 0.10 Hz. at these laboratory tests.

The results of the tests have been used to model the behaviour of normally consolidated clays under cyclic loading with mathematical expressions. The formulas that have been derived for a certain frequency value have expressed suitably the pore water pressures, shear strain and axial strains at different stress ratios and number of cycles.

At the below expressions the data for the experiment that has the frequency of 0.10 Hz. have been used. At both of test systems, with the correlation of the test results, that have been done on the differently prepared samples the equations given below have been found for pore water pressures:

At dynamic simple shear tests;

$$u_{tr,is} = -3.66 + 19.93 (\tau/\tau_f) + |-1.11 + 20.85(\tau/\tau_f)| \ln N$$

$$u_{is} = -24.67 + 65.85(\tau/\tau_f) + |2.12 + 14.04(\tau/\tau_f)| \ln N$$

At dynamic three axial tests;

$$u_{tr,is} = -23.47 + 60.59 (\sigma_d/\sigma_c) + |9.62 + 4.15(\sigma_d/\sigma_c)| \ln N$$

$$u_{is} = -21.74 + 43.92 (\sigma_d/\sigma_c) + |7.64 + 10.59(\sigma_d/\sigma_c)| \ln N$$

The expressions for the shear strain and axial strains are given below:

At the dynamic simple shear tests;

$$\gamma_{tr,is} = 8.69 (\tau/\tau_f)^{2.33} \cdot N^{0.72(\tau/\tau_f)^{2.88}}$$

$$\gamma_{is} = 13.74 (\tau/\tau_f)^{3.10} \cdot N^{0.42(\tau/\tau_f)^{1.76}}$$

At the dynamic three axial tests;

$$\epsilon_{tr,is} = 3.31 (\sigma_d/\sigma_c)^{1.93} \cdot N^{0.63(\sigma_d/\sigma_c)^{1.15}}$$

$$\epsilon_{iz} = 4.01 (\sigma_d/\sigma_c)^{2.33} \cdot N^{0.33(\sigma_d/\sigma_c)^{0.42}}$$

The pore water pressures, shear strains and axial strains for certain test conditions and required number of cycles can be expressed with the help of these expressions.

BÖLÜM I

GİRİŞ

Günümüz dünyasında teknolojinin hızlı gelişmesi, enerji gereksiniminin artmasına yol açmış olup bu durum, konu ile ilgili büyük ve önemli mühendislik yapılarının yapılmasını gerektirmiştir. Bu yapıların temelini oluşturan zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi, zemin-yapı sistemindeki karşılıklı etkileşiminden dolayı çözümlenmesi gereken bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkar. Bu nedenle, dinamik kayma gerilmeleri altında, özellikle depremler sırasında bu tip gerilmelerin etkisi altında kalan zemin yapısı ve zemin tabakalarının, yükleme sırasında ve yükleme sonrası mukavemet özelliklerinin, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin ortaya çıkarılması ve kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişimlerin bulunması gereklidir.

Depremler sırasında oluşan gelişigüzel titreşimler sonucu zemin tabakalarında meydana gelen hacim ve şekil değiştirmeler, kayma dalgaları şeklinde ana kayadan yukarı doğru hareketle zemin tabakaları boyunca yayılarak temel zeminine ulaşmaktadırlar. Değişik genlik ve frekans özelliklerine sahip titreşimlerin etkisinde kalan zemin tabakalarında kayma dalgaları, tekrarlı fakat düzensiz genliklerde kayma gerilmelerinin oluşmasına dolayısıyla çok geniş sınırlar içerisinde oluşan şekil değiştirmelere, boşluk suyu basınçlarında artışlarla bu tabakalarda oturma ve göçmelere neden olabilirler. Bundan dolayı üst yapıda meydana gelebilecek hasarın azaltılabilmesi ve ortadan kaldırılabilmesi için zeminlerin tekrarlı yükler altında davranış özelliklerinin arazi ve laboratuvar deneyleri ile önceden belirlenmesi gereklidir.

Farklı zeminler üzerine yapılmış aynı tip mühendislik yapıları bir deprem sırasında farklı hasarlara uğrayacakları, projelendirme aşamasında zemin dinamik özelliklerinin gözönüne alınmasını gerektirmektedir. Bir çok parametreye bağlı olan zemin özellikleri, varolan koşullara uygun değerlendirilmelidir. Zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi çok yönlü bir problem olup, özellikle pratiğe dönük çalışmalarda karışık bir görünüm göstermektedir.

Zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde, arazideki gerilme ve şekil değiştirme koşulları yaklaşık olarak sağlanabilmesine rağmen araziden numune alınması ve deneye hazırlanması sırasında meydana gelen örselenmeler zemin numunelerinin davranış özelliklerini etkilemektedir. Arazi deneylerinde zemin tabakalarının malzeme ve dinamik özellikleri gerçeğe daha yakın bulunmasına karşılık belirlenen özellikler sınırlıdır. Bundan dolayı laboratuvar ve arazi deneylerinin birlikte kullanılması daha gerçekçi veriler elde edilmesi yönünden yararlıdır.

Dinamik laboratuvar deneylerinde yüklemenin yapılış şekli, belirlenen özellikler ve elde edilen sonuçların yorumlanması açısından önemlidir. Zemin numunelerine bir deprem kaydına ait düzensiz kayma gerilmelerinin uygulanması, farklı deprem kayıtlarının incelenmesi halinde çok sayıda deney yapılmasının zorunluluğu, pahalı ve karmaşık deney sistemlerini gerektirdiği için pratik olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenle, seçilmiş deprem kayıtlarından bulunmuş düzensiz kayma gerilmesi değişimlerini, sabit genlikli üniform bir eşdeğer kayma gerilmesi titreşimlerine dönüştürerek deney numunesine uygulanması tercih edilir. Bu yaklaşımla, laboratuvarda elde edilen bir deney setinin sonucu her deprem kaydı için kullanılabilir. Bu yöntemde amaç, düzensiz kayma gerilmesi titreşimlerinden oluşan deprem titreşimlerine eşdeğer bir etkisi olacak sabit kayma gerilmesi genliğini ve çevrim sayısını belirlemektir. Dinamik deneylerde yükleme şekli ve yönünün seçimi de önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. İncelenecek olaya uygun bir yükleme serisinin seçilmesi ve numuneye uygulanması, güvenilir sonuçlar elde edilmesi ve bunların projelendirme aşamasında kullanılması bakımından önemlidir.

Deneysel çalışmalarla zeminlerin dinamik özellikleri, gerilme-şekil değiştirme özellikleri, dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile mukavemet özellikleri göçmeye veya büyük deformasyonlara yol açan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısı belirlenebilir. Elde edilen verilere bağlı olarak geliştirilmiş ampirik bağıntılar veya nümerik modeller ile zeminlerin arazideki davranış biçimleri, tabaka ve sınır şartlarına göre yaklaşık olarak bulunabilir. Böylece, mühendislik yapılarının tasarımında ve uzun süreli stabilite hesaplarında, tekrarlı yüklere ve depremlere karşı gereken koruyucu önlemler alınabilir.

Son yıllarda, büyük ve önemli mühendislik yapılarının uygun olmayan zemin tabakaları üzerinde, özellikle yumuşak killi zeminlerde inşa edilmeye başlanması, killi zeminlerin dinamik mukavemet ve gerilme-deformasyon özelliklerinin araştırılmasını ve belirlenmesini gündeme getirmiştir. Tekrarlı yüklerin etkisi altında kalan kohezyonlu zeminlerde, tekrarlı yükleme sırasında ve yükleme sonrasında meydana gelebilecek mukavemet kayıplarının ve oluşabilecek büyük deformasyon birikimlerinin belirlenmesi, deprem bölgelerinde inşa edilecek yapıların ve makina temellerinin projelendirilmesinde, önemli bir kriter olarak hesaplara yansıtılması gereği unutulmamalıdır.

BÖLÜM 2

ELE ALINAN KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

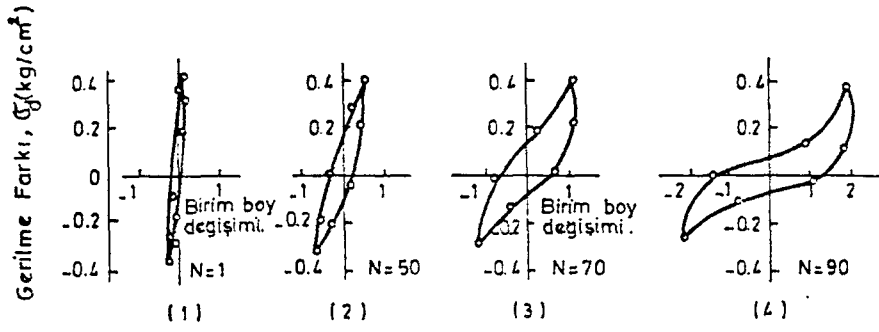
2.1. GİRİŞ

Zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışı, gelişen dünya ve teknoloji koşullarında bir çok araştırmacının ilgisini çekerek incelenmesine neden olmuştur. Bu konu ile ilgili çalışmalarda, arazideki gerilmeleri laboratuvarında en uygun model edebilen, dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, burulmalı kesme, rezonans frekansta titreşim ve sarsma tablası gibi deney sistemleri geliştirilerek kullanılmıştır. Bu bölümde, kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarını karakterize eden dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile dinamik mukavemete etki eden faktörler üzerinde şimdiye kadar yapılmış çalışmalar değerlendirilecektir.

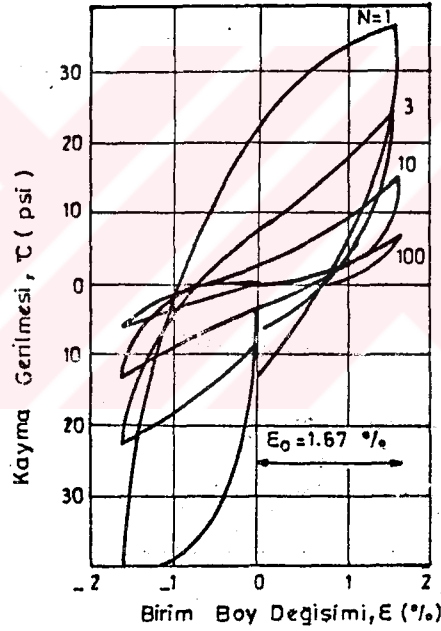
2.2. DİNAMİK KAYMA MODÜLÜ

Zeminlere etkiyen deprem, dalga gibi tekrarlı yükler, elastik ve plastik şekil değiştirmeler oluştururlar. Laboratuvarında yapılan dinamik deneylerde, bir yükleme çevriminde, zemin numunelerinde oluşan gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 de görüldüğü gibi histerisis ilmikleri şeklinde olmaktadır.

Gerilme kontrollü deneylerde, artan çevrim sayıları ile histerisis ilmikleri büyümekte ve yatıklaşmaktadır. Deformasyon kontrollü deneylerde ise belirli bir şekil değiştirme seviyesinin üzerinde, artan çevrim sayıları yine aynı etkiyi yapmaktadır.



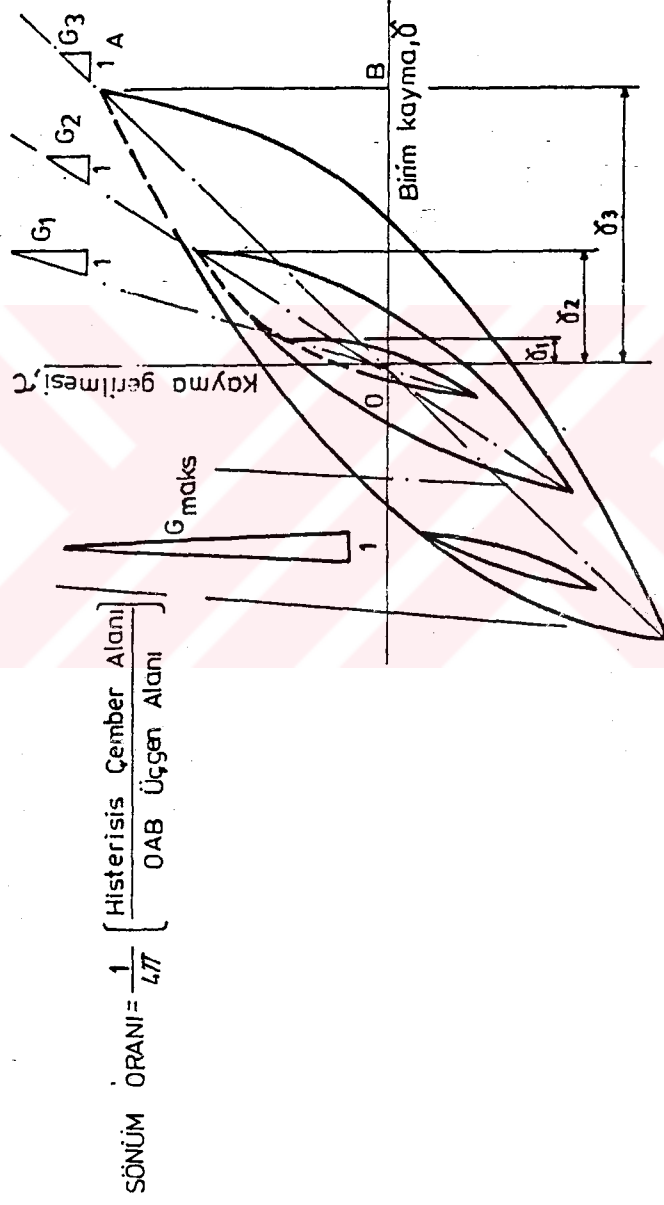
ŞEKİL:2.1. GERİLME KONTROLLU DENEYLERDE HİSTERİSİS İLMİĞİNİN DEĞİŞİMİ.



ŞEKİL:2.2. DEFORMASYON KONTROLLU DENEYLERDE HİSTERİSİS İLMİĞİNİN DEĞİŞİMİ.

Şekil 2.3 de görüldüğü gibi histerisis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi dinamik kayma modülü olarak tanımlanır ve bu modül artan çevrim sayılarına bağlı olarak azalır.

Bu konuda, Hardin ve Black [1], kaolin ve Boston mavi kili üzerinde, rezonans frekansta titreşim deney tekniği ile farklı, boşluk oranlarında ve farklı ortalama çevre gerilmelerinde deneyler yapmışlardır. Sonuçta dinamik kayma modülü için (2.1) bağıntısını



SEKİL: 2.3 TEKRARLI KAYMA GERİLMESİ ALTINDA OLUŞAN HİSTERİSİS İLMİKLERİ.

vermişler ve aynı boşluk oranında, e , artan efektif çevre gerilmesi, σ_o , ile bu modülün arttığını göstermişlerdir.

$$G_o = 320 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \bar{\sigma}_o^{-0.5} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (2.1)$$

Seed ve Idriss [2], Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin dinamik kayma modülleri ve sönüm oranları üzerinde geniş çaplı araştırmalar yapmışlar ve çeşitli araştırmacıların yapmış oldukları çalışmaları toplamışlardır. (Şekil 2.4). Ayrıca dinamik kayma modülüyle statik drenajsız kayma mukavemeti arasındaki aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir-

$$G_o = 2300 S_u \quad (2.2)$$

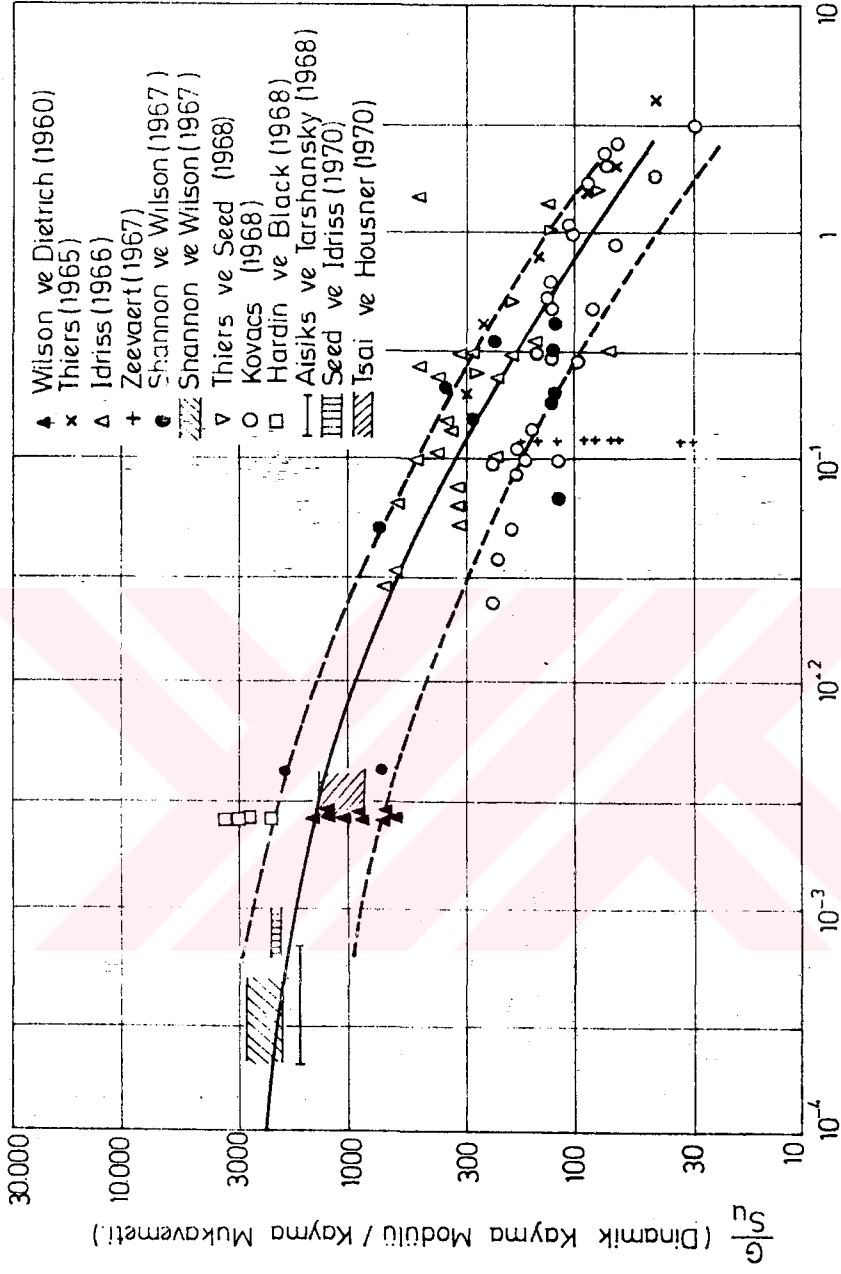
Zeminlerin dinamik özellikleri ve bağıntılı olduğu parametreler üzerinde Hardin ve Drnevich [3], [4], ayrıntılı araştırmalar yapmışlar ve dinamik kayma modülüne etkileyen unsurları önem sırasına göre; birim kayma genliği, efektif ortalama çevre gerilmesi, boşluk oranı, doygunluk derecesi ve aşırı konsolidasyon oranı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çok küçük birim deformasyon mertebelerine (10^{-6}) karşı gelen maksimum kayma modülünü,

$$G_{maks} = 320 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} (AKO)^K \bar{\sigma}_o^{-1/2} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (2.3)$$

formülü ile hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir. (e = Boşluk oranı, AKO = Aşırı Konsolidasyon Oranı, $\bar{\sigma}_o$ = efektif ortalama asal gerilme, K = Zemin plastisite indisine bağlı bir katsayı). Dinamik kayma modülünün, birim deformasyon, γ , ile değişimi için aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$\frac{G}{G_{maks}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2.4)$$

formüldeki γ_r , referans birim kayma değerini göstermekte olup,



SEKİL:2.4. SUYA DOYGUN KILLERDE KAYMA MODÜLÜ İLE KAYMA BİRİM DEFORMASYON BAĞINTISI. [2]

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\text{maks}}}{G_{\text{maks}}} \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanabilir. Uygulanan en büyük kayma gerilmesi ise,

$$\tau_{\text{maks}} = \left[(0.5(1+K_0)\sigma'_v \sin\phi' + c' \cos\phi')^2 - (0.5(1+K_0)\sigma'_v)^2 \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

eşitliğiyle tanımlanmıştır. (K_0 : sukunetteki yatay gerilme katsayısı, σ'_v : efektif-düşey gerilme, c' ve ϕ' : efektif kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon ve kayma mukavemeti açısı).

Başlangıç dinamik kayma modülünün, G_0 , statik drenajsız kayma mukavemetine bağlı ifadesi olarak,

$$G_0 \approx (550 - 1150) S_u \quad (2.7)$$

bağıntısını önermişlerdir.

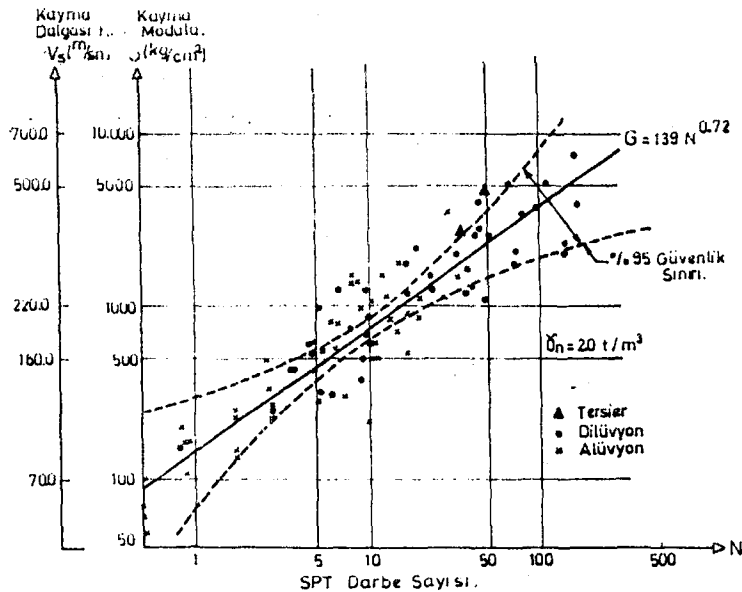
Kohezyonlu zeminlerin, tekrarlı yükler etkisi altında dinamik elastisite ve kayma modüllerinin laboratuvarda belirlenmesi ve arazide sismik ölçümlerle belirlenen değerlerle karşılaştırılmaları, arazideki birim şekil değiştirme mertebelerinin çok küçük değerlerde kalması, ($\gamma < 10^{-4}$), numunedeki örselenmeden dolayı karmaşık bir konu olmaktadır. Stoke ve Richart [5], yaptıkları bir çalışmada arazi ve laboratuvar deneyleri ile kayma modüllerinin saptanması konusunu araştırmışlardır. Laboratuvar, rezonans frekansta titreşim deney tekniği, arazide ise karşıt kuyu yöntemi kullanılarak kayma dalgası hızlarını, v_s , belirlemişler, sonuçta killi silt ve aşırı konsolide kumlu silt için elde edilen laboratuvar kayma dalgası hızları, arazi ölçümlerinin %70'i mertebesinde olduğunu göstermişlerdir. Dinamik kayma modülünü,

$$G = \frac{\gamma_n}{g} v_s^2 \quad (2.8)$$

formülü ile hesaplamışlardır. (V_s : kayma dalgası hızı, γ_n : zemin tabii birim hacim ağırlığı, g : yerçekimi ivmesi). Laboratuvarında elde edilen dinamik kayma modülü değerlerinin, arazide bulunan kayma modüllerinin yarısı kadar olduğunu göstermişlerdir. Örselenme ve diğer nedenlerle oluşan bu fark bazı araştırmacılar tarafından da belirlenmiş ve kabul edilmiştir.

Kumbasar ve Erguvanlı [6], kohezyonlu zeminlerde plastisite indisinin, kayma dalgası hızına etkisini araştırmak amacı ile yoğunlaşmış, suya doymun sekiz değişik kil numunesi üzerinde, rezonans frekansta titreşim deney tekniğini kullanarak deneyler yapmışlardır. Deneyler çok ufak birim kayma mertebelerinde ve çevre basıncı uygulanmadan yürütülmüş ve sonuçta, aynı kıvamdaki kil zeminlerde, kayma dalgası hızının, V_s , artan plastisite indisi, I_p , ile azaldığını göstermişlerdir.

Ohta ve diğerleri [7], Japonya'da, çeşitli jeolojik zamanlara ait suya doymun killerin, dinamik kayma modüllerinin, arazide yapılan SPT darbe sayıları ile bağlantısını araştırmışlar, (Şekil 2.5), artan SPT darbe sayılarının daha yüksek kayma dalgası hızına ve daha büyük dinamik kayma modülü değerine karşı geldiğini belirtmişlerdir.



ŞEKİL 2.5 KAYMA MODÜLÜ İLE SPT DARBE SAYISI ARASINDAKİ BAĞINTI.[7]

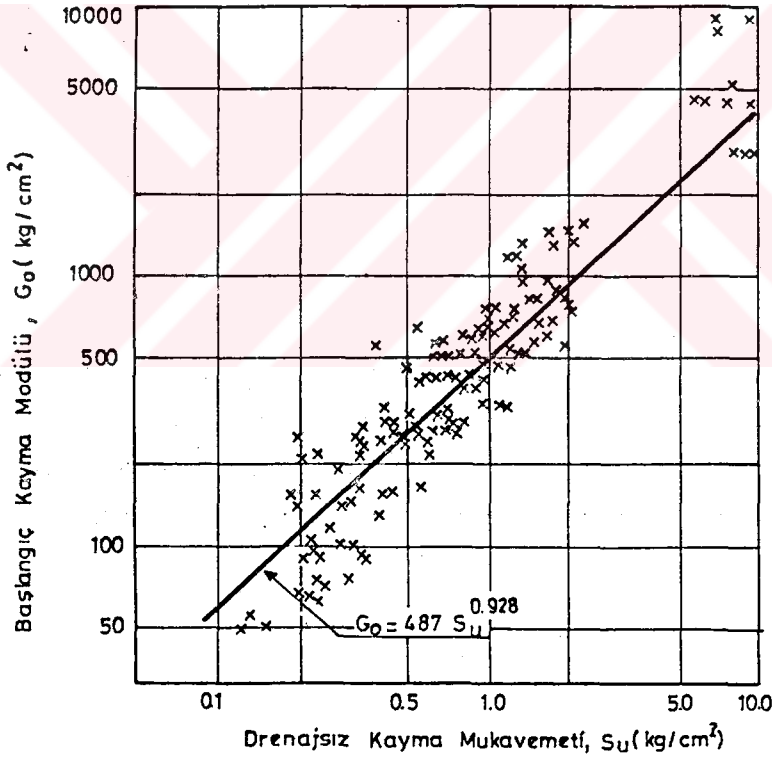
Hara ve diğerleri [8], yapmış oldukları bir çok arazi deneylerinin sonuçlarının korelasyonu ile drenajsız kayma mukavemeti ve SPT darbe sayıları yardımıyla, başlangıç dinamik kayma modülünü, G_o , hesaplamak istemişlerdir.

$$G_o = 158 \cdot N^{0.668} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2.9)$$

$$S_u = 0.297 \cdot N^{0.720} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2.10)$$

eşitliklerinden sonuç olarak, Şekil 2.6 da görülen başlangıç dinamik kayma modülü ile drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişkiyi elde etmişlerdir.

$$G_o = 487 S_u^{0.928} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2.11)$$



SEKİL: 2.6. G_o İLE S_u ARASINDAKİ İLİŞKİ. [8]

Marcuson ve Wahls [9], bentonit kili üzerinde yaptıkları çalışmada, boşluk oranı ve ortalama efektif çevre gerilmesinin, başlangıç dinamik kayma modülüne etkisini araştırmışlar ve aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$G_o = 445 \frac{(4.40-e)^2}{1+e} (\sigma'_e)^{0.5} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2.12)$$

Kokusho ve diğerleri [10], dinamik üç eksenli deney aleti ile, örselenmemiş yumuşak alüvyon kil zemin üzerinde çalışmalar yaparak, başlangıç dinamik kayma modülünü veren basit bir bağıntı önermişlerdir. (10^{-5}) mertebesinde küçük deformasyonlar için geçerli olan bağıntı aşağıdadır.

$$G_o = 90 \frac{(7.32-e)^2}{1+e} (\sigma'_c)^{0.6} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2.13)$$

Kim ve Novak [11], rezonans frekansta titreşim deney tekniği ile örselenmemiş yedi ayrı kil numunesi üzerinde, büyük ve küçük deformasyon genlikli olmak üzere iki seri deney yaparak, dinamik kayma modülünü ve sönüm oranını belirlemeyi, bunlara etki eden hücre basıncı, boşluk oranı ve deformasyon genliğinin etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak; dinamik kayma modülü ve sönüm oranının, deformasyon genliği, gerilme durumu ve çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğini, dolayısı ile dinamik analizlerde bu değerlerin sabit birer sayı olarak alınamıyacağını belirtmişlerdir. Ayrıca küçük deformasyon genlikli deneylerde, kayma dalgası hızının ve dinamik kayma modülünün, hücre basıncının artmasıyla artacağını, boşluk oranının artmasıyla azalacağını ifade ederek, deformasyon genliğinin (10^{-4}) den küçük olması durumunda, dinamik kayma modülünün, deformasyon genliğinden bağımsız olacağını, bu değer aşılması halinde ise hızla azalacağını belirtmişlerdir.

Taylor ve Nacci [12], kohezyonlu zeminler üzerinde yaptıkları araştırmada, dinamik elâstisite modülünün, boşluk oranı, ortalama efektif çevre basıncı ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri ile bağıntılı olduğunu saptamışlardır. Taylor ve diğerleri [13], yaptıkları bir çalışmada, laboratuvar deneyleri ile bulunan dinamik elâstisite modülünün artan çevrim sayısı ve artan birim deformasyon ile azaldığını göstermişlerdir.

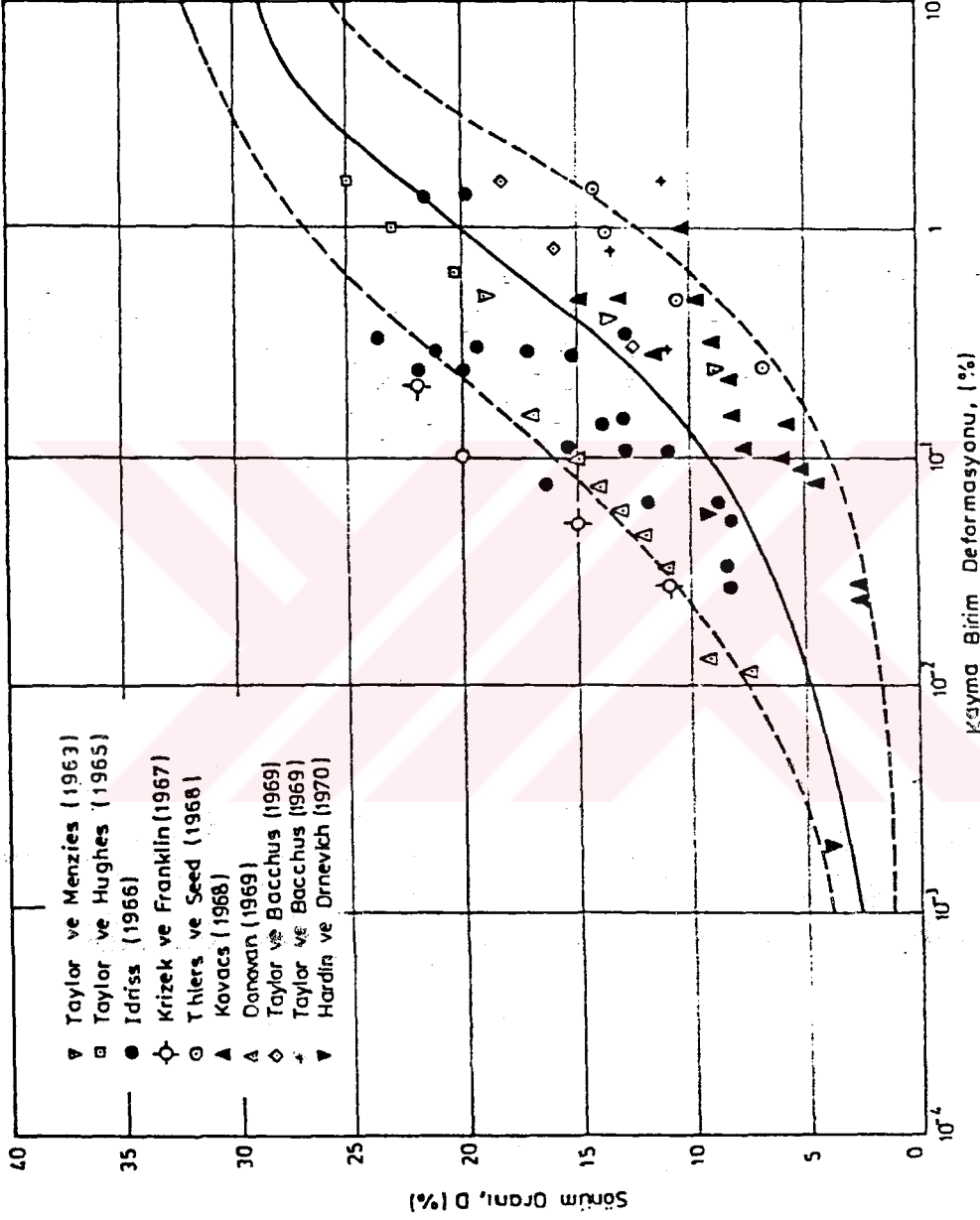
Erguvanlı [14], kohezyonlu zeminlerin dinamik özellikleri ile ilgili çalışmasında, sekiz değişik kil nümunesi üzerinde, rezonans frekansta titreşim deney tekniği kullanarak yurdumuzda bu konu ile ilgili ilk araştırmalardan birini gerçekleştirmiştir. Yoğrularak hazırlanmış numunelerde yapılan deneylerde, dinamik gerilme-şekil değiştirme özellikleri ile bunlara etki eden su muhtevası, boşluk oranı, doygunluk derecesi, birim deformasyon mertebesi ve plâstisite indisinin etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, zeminlerin dinamik özelliklerinin ve elâstisite modüllerinin sabit birer sayı kabul edilemeyeceğini, bu değerlere çeşitli parametrelerin etki ettiğini belirterek, projelendirme aşamasında kullanılacak değerler için yapılacak laboratuvar deneylerinin, arazi-yapı karşılıklı etkileşim koşullarını yansıtmaması gerektiğini ifade etmiştir.

Ansal ve Yıldırım [15] da, Kemerköy-Muğla ve Yeşilköy-İstanbul'dan aldıkları örselenmemiş kil ve numuneleri üzerinde dinamik basit kesme deney aletinde anizotropik gerilmeler altında konsolide ederek deneyler yapmışlar ve killerde dinamik kayma mukavemetinin, tekrarlı kayma genliğine bağlı olduğunu dinamik kayma modülünün birim kayma genliği arttıkça doğrusal olmayan bir azalma eğiliminde olduğunu göstermişlerdir.

2.3. SÖNÜM ORANI

Sönüm, zeminin elastik olmayan davranışlarının bir ifadesi olup, şekil değiştirmelerin meydana gelişinde zemin elemanları içinde çok çeşitli şekillerde oluşabilen ve fiziksel anlamda sebep sonuç bağıntıları kesinlikle belirlenemeyen enerji kayıplarını, uygun matematik formülasyona göre ifade etmek amacı ile kullanılan geniş kapsamlı bir dinamik kavramdır. [16] Şekil 2.3. de gösterildiği gibi histerisis ilmiği alanının, histerisis ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun altında kalan üçgenin alana oranı olarak tanımlanır.

Bu konu ile ilgili bir çok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmış ve yapılan bu çalışmalar Seed ve Idriss [2] tarafından derlenmiş ve killi zeminler için sönüm oranının birim şekil değiştirme-ye bağlı değişimi Şekil 2.7. de gösterilmiştir.



ŞEKİL:2.7 SUYA DOYGUN KİLLERDE SÖNÜM ORANI İLE KAYMA BİRİM DEFORMASYONU BAĞINTISI.[2]

Hardin ve Drnevich [3], [4], suya doymun kohezyonlu zeminlerde, sönüm oranına etkiyen en önemli faktörlerin birim deformasyon genliği, ortalama efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı ve çevrim sayısı olduğunu belirtmişler ve maksimum sönüm oranı için:

$$D_{\text{maks}} = 31 - (3 + 0.03 f) \bar{\sigma}_o^{-1/2} + 1.5 f^{1/2} - 1.4 \log N \quad (2.14)$$

bağıntısını önermişlerdir. (f = titreşim frekansı, N = çevrim sayısı, $\bar{\sigma}_o$ = ortalama efektif çevre gerilmesi) Sönüm oranının, birim deformasyon ile değişimi için, γ_r , referans birim kaymaya ve dinamik kayma modülüne bağlı aşağıdaki formül önerilmiştir.

$$D = D_{\text{maks}} \left(\frac{\gamma/\gamma_r}{1 + \gamma/\gamma_1} \right) = D_{\text{maks}} \left(1 - \frac{G}{G_{\text{maks}}} \right) \quad (2.15)$$

Su muhtevasının, suya doymun kohezyonlu zeminlerde sönüm oranına ve değişimine etkisi Chiang ve Chae, [17], tarafından incelenmiş, araştırma sonucunda; su muhtevasının sönüm oranına etkisi olduğu, zemin su muhtevasının, optimum su muhtevasından büyük değerleri için sönüm oranının da arttığını belirtmişlerdir.

2.4. DİNAMİK MUKAVEMETİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Zeminlerin dinamik davranışlarına etki eden faktörler üzerinde günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların genel değerlendirmesinden çıkarılan sonuçlara göre etkiyen faktörler önem sırasına göre iki grupta toplanabilir.

Birinci derecede önemli faktörler :

- Birim kayma genliği, γ
- Ortalama efektif çevre gerilmesi, σ'_o
- Boşluk oranı, e
- Çevrim sayısı, N
- Doygunluk derecesi, S_r

- Aşırı konsolidasyon oranı, AKO
- Frekans, f

İkinci derecede önemli faktörler :

- Deneysel yöntemler
- Yükleme biçimi ve doğrultusu

olarak sıralanabilir.

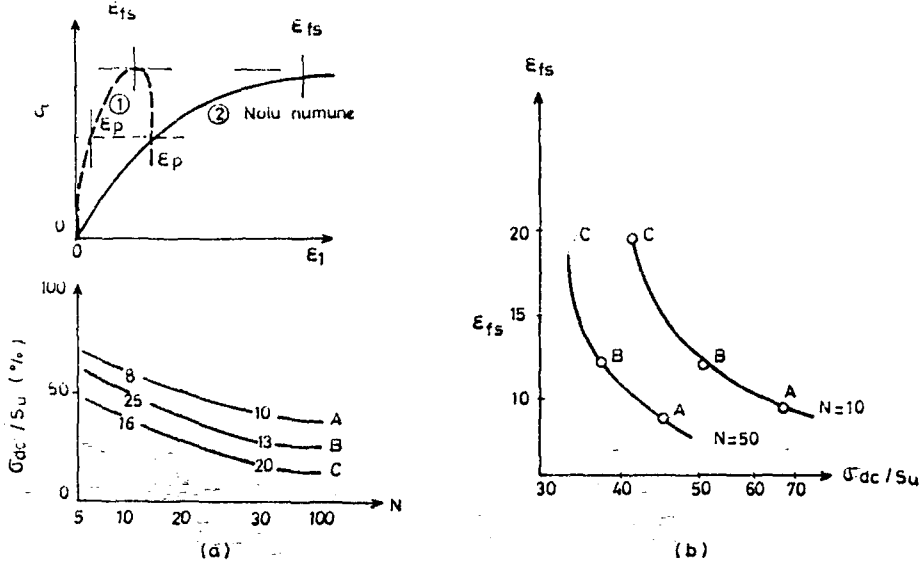
Bu kısımda, yukarıda özetlenen faktörler üzerinde çeşitli araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar ve elde ettikleri sonuçları kısaca anlatılacaktır.

2.4.1. Birim Kayma Genliği ve Çevrim Sayısı

Zeminlerin, tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarında oluşan birim şekil değiştirmeler, artan çevrim sayısına bağlı olarak artarak birikir. Bu olay, denge durumunda olan boşluk suyu basınçlarını artırırken, efektif gerilme değerlerini azaltır. Sonuçta, zemin elemanının dinamik mukavemetinde azalma gözlenir.

Thiers ve Seed [18], suya doymuş kil numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deneyler yaparak bu etkiyi araştırmışlar ve dinamik mukavemette, statik yükleme durumundaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin özellikleri ile statik yüklemde göçme kabul edilen birim boy kısalmasının " ϵ_{fs} " etkili olduğunu göstermişlerdir. (Şekil 2.8).

Statik mukavemetleri aynı, birim şekil değiştirme ve " ϵ_{fs} " özellikleri farklı olan iki ayrı kil numunesi üzerindeki deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar, 2 No.lu kil numunesinin her çevrim sayısında daha fazla şekil değiştireceğini ve artan çevrim sayıları ile 1.No.lu kil numunesine oranla daha fazla biriken birim şekil değiştirmelerin yol açacağı boşluk suyu basınçlarından mukavemet kaybının hızlanacağını belirtmişlerdir. Üç ayrı hassasiyet ve " ϵ_{fs} " değerine sahip kiler üzerindeki deneylerde, en küçük " ϵ_{fs} " değerine sahip olan A kili en yüksek dinamik mukavemeti göstermiştir.



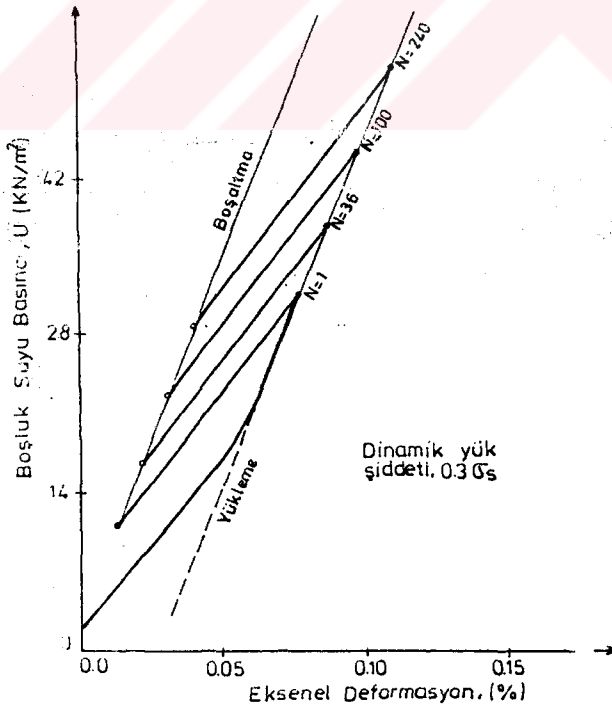
ŞEKİL: 2.8. E_{fs} VE BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖZELLİĞİNİN DİNAMİK MUKAVEMETE ETKİSİ. [18]

Zeminlere uygulanan tekrarlı gerilmenin genliğinin artması, birim şekil değiştirmeleri arttırırken kırılma için gerekli çevrim sayılarını azaltmaktadır. Bu konu ile ilgili Sangrey, Henkel ve Esring [19] üç eksenli deney aleti ile yaptıkları çalışmalarda, suya doymun killi zeminlerin göçmeye yol açmayacak düşük genlikli tekrarlı yükler altındaki davranışlarını araştırmışlardır. Zeminlerin bu tür yükler altında elastik davranış gösterdiğini ve meydana gelen boşluk suyu basınçlarının uygulanan tekrarlı yük genliği ile doğru orantılı olduğunu belirterek, "kritik tekrarlı yük genliği" tanımlayarak bu değer elâstik ve plastik şekil değiştirmelerinin sınırı oluşturduğunu göstermişlerdir.

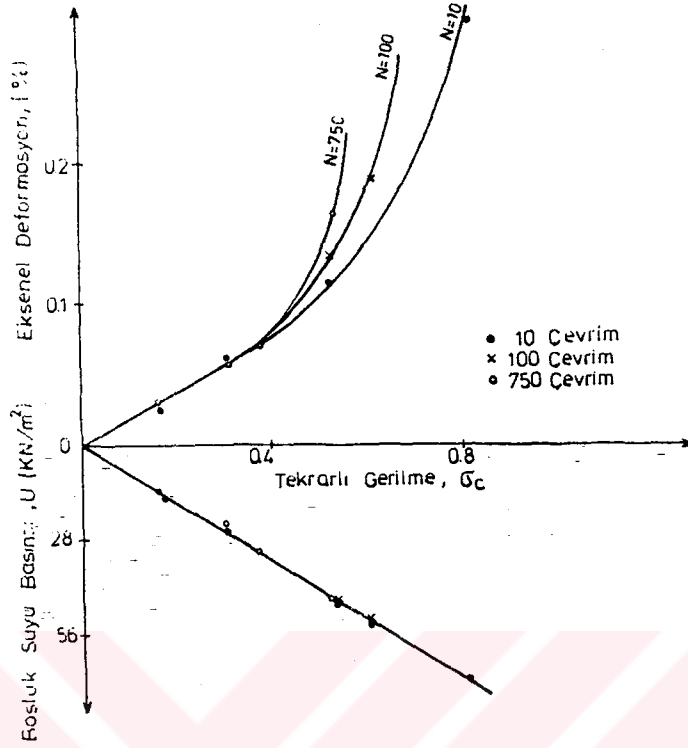
Tekrarlı yükleme sayısı veya çevrim sayısının artmasının, zeminde oluşan boşluk suyu basınçlarını ve birim şekil değiştirmeleri arttırdığı ve zemin mukavemetini düşürdüğü birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Yine bu araştırmacılar, zeminde yumuşama olup mukavemetin azalması için kayma genliğinde belirli bir kritik değeri aşması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Wilson ve Greenwood [20], tekrarlı yük uyguladıkları üç eksenli hücrede, örselenmemiş normal konsolide Hamilton kili üzerinde yaptıkları deneylerde boşluk suyu basıncı ile eksenel deformasyon arasındaki bağlantıyı araştırmışlardır. Sonuçta, çevrim sayısının, boşluk suyu basıncı ve eksenel deformasyona bağlı olan eğrilerin eğimleri, çevrim sayısının ve gerilme genliğinin artması ile arttığını göstermişlerdir. (Şekil 2.9 , 2.10).

Brown, Lashine ve Hyde [21] ise, dinamik üç eksenli deney altında, aşırı konsolidasyon oranı 2-20 arasında değişen killer üzerinde, frekansın 10 Hz olduğu deneyler yapmışlar, artan çevrim sayısının boşluk suyu basınçlarını arttıracaklarını ve bu değerin statik kesme deneylerinde oluşan boşluk suyu basınçlarından fazla olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca 10^6 çevrim sayısında oluşan plastik şekil değiştirmenin, statik kesme deneylerindeki kırılma deformasyonunu aştığını gözlemişlerdir.



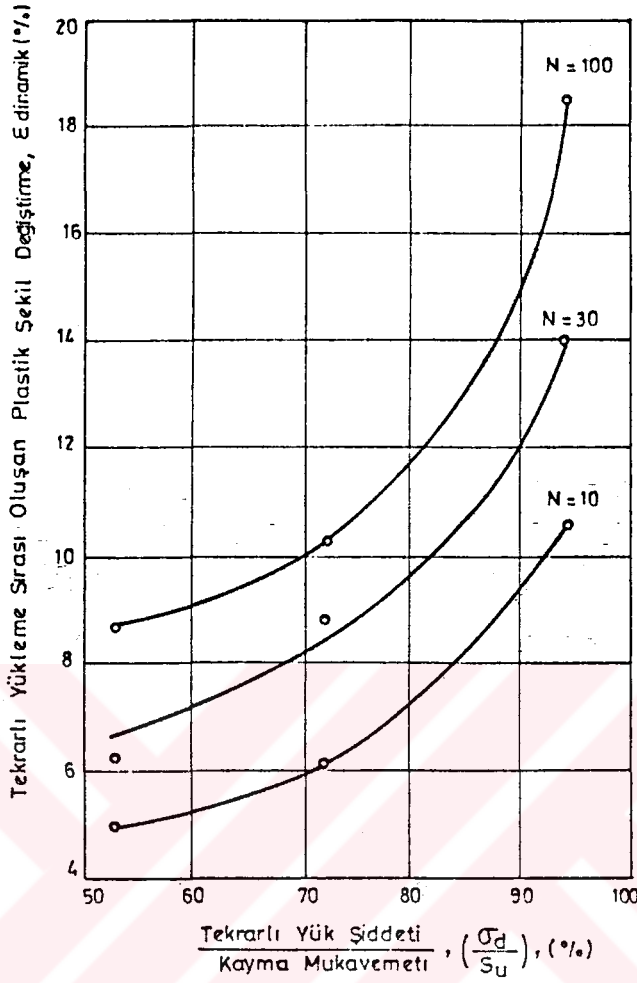
ŞEKİL:2.9 GERİLMELERLE BOŞLUK SUYU BASINÇLARI ARASINDAKİ İLİŞKİ.[20]



ŞEKİL: 2.10 TEKRARLI YÜKLEMEDE OLUŞAN ELASTİK VE PLASTİK DAVRANIŞ. [20]

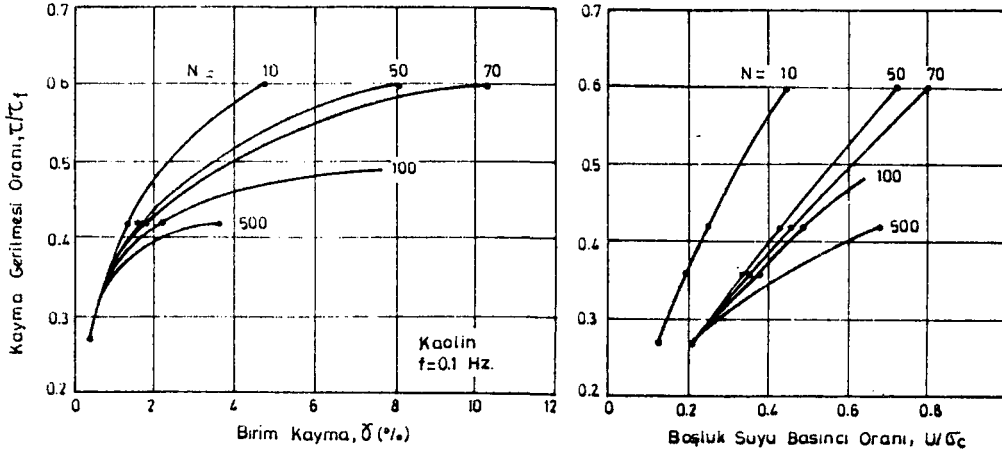
Tekrarlı yüklemelerde oluşan, birim şekil değiştirme, boşluk suyu basıncı ve çevrim sayısı arasındaki ilişki Toğrol, Özudoğru ve Güler [22] tarafından da incelenmiştir. Dinamik üç eksenli deney aletinde, suya doymun killere üzerinde yapılan araştırmada, uygulanan tekrarlı yükün şiddetinin ve çevrim sayısının artmasıyla plâstik şekil değiştirmelerin arttığını göstermişlerdir. (Şekil 2.11).

Kritik seviyenin altında uygulanan tekrarlı gerilmelerde şekil değiştirmelerin sınırlı kalacağını, artan çevrim sayıları ile "şekil değiştirme-çevrim sayısı" eğrisinin yataya yaklaşacağını Lashine [23] ve Matsui, Ohara, Ito [24] yaptıkları çalışmalarda da göstermişlerdir.



ŞEKİL: 2.11. TEKRARLI YÜK İLE $E_{dinamik}$ İLİSKİSİ [22]

Ansal ve Erken [25], Laboratuvarında iki farklı şekilde hazırlanmış Kaolin numuneler üzerinde dinamik basit kesme deneyleri yapmışlardır. Statik kayma mukavemetin %50 civarını "kritik kayma gerilmesi genliği" olarak tanımlayan araştırmacılar, bu genliğin aşılması durumunda, birim kaymanın, γ , ve boşluk suyu basıncının, u , hızla arttığını belirtmişlerdir. Bu kritik değerden küçük yakın değerlerde yapılmış deneylerde, birim kaymaların sınırlı kaldığını ama oluşan boşluk suyu basınçlarının statik kayma mukavemetini etkileyecek ölçüde olduğunu, kayma gerilmesi genliğinin küçük olması halinde, birim kayma ve artık boşluk suyu basınçlarının sınırlı kaldığını ifade etmişlerdir. (Şekil 2.12).



ŞEKİL: 2.12 TEKRARLI KAYMA GERİLMESİ - BİRİM KAYMA - BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ, [25]

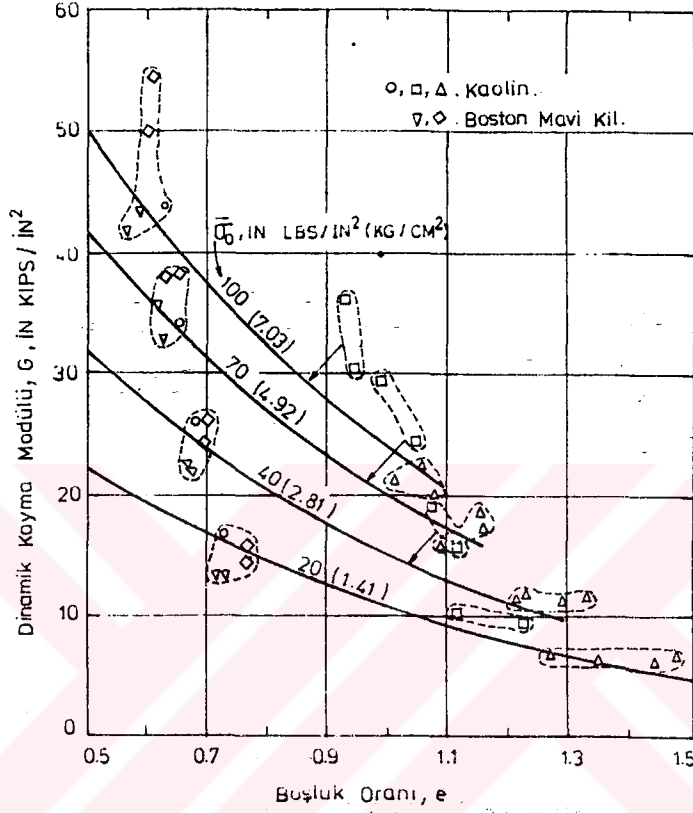
2.4.2. Ortalama Efektif Çevre Gerilmesi ve Boşluk Oranı

Zeminlerin statik ve tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışına etkiyen faktörler arasında ortalama efektif çevre gerilmesi ve boşluk oranı başta gelir. Efektif çevre gerilmesindeki artışlar, zemin daneleri arasındaki teması arttıracak kayma modülü değerlerini arttırmaktadır. Boşluk oranındaki artma ve azalmalarda, daneler arası teması azaltır veya arttırır. Hardin ve Black [1], bu konu ile ilgili çalışmalarında yukarıdaki görüşleri doğrulamışlardır. Şekil 13 de bu etkileşim görülmektedir.

2.4.3. Doygunluk Derecesi

Tekrarlı yüklemeler sırasında zemin boşluklarındaki suyun drene olması için gerekli süre olmadığı için drenajsız koşullarda deneyler yapılır. Oluşabilecek boşluk suyu basınçları da doyumluk derecesinin bir fonksiyonu olup %100 doyum olmayan zeminlerde, boşluklarda bulunan havanın sıkışması daha kolay olacağı için, boşluk suyu basınçlarının daha az meydana geldiği gözlenir. Bu nedenlerle, tekrarlı

gerilmeler altında davranışlar incelenirken doygun derecesinin bilinmesi gereklidir.



ŞEKİL: 2.13 DİNAMİK KAYMA MODÜLÜ DEĞERİNİN BOŞLUK ORANI VE ORTALAMA EFEKTİF ÇEVRE BASINCI İLE DEĞİŞİMİ. [1]

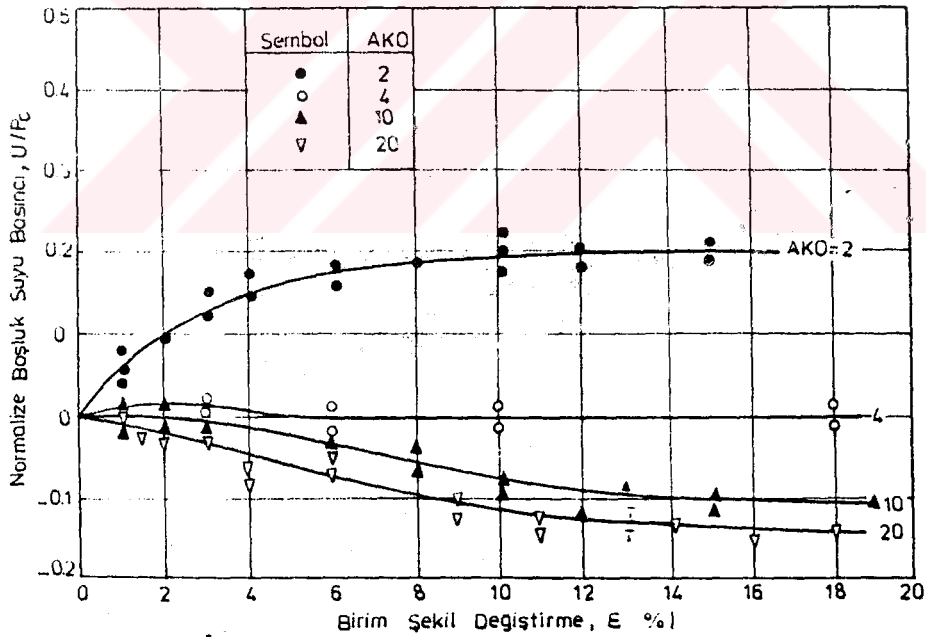
2.4.4. Aşırı Konsolidasyon Oranı

Araştırmacıların dikkatini ve ilgisini çeken diğer bir konuda, kohezyonlu zeminlerin aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak tekrarlı yükler etkisi altında farklı davranışlar göstermeleridir.

Lee ve Focht [26], Kuzey denizinden alınmış örselenmemiş tabii kil numuneleri üzerinde, dinamik üç eksenli deney aletinde yaptıkları

çalışmalarla, aşırı konsolide olmuş killerin, normal konsolide olmuş killere oranla daha yüksek bir mukavemet gösterdikleri, dinamik mukavemeti, statik drenajsız mukavemete oranlayarak, (Z_d/S_u) , killerdeki aşırı konsolidasyon etkisinin normalize edilebileceğini belirtmişlerdir.

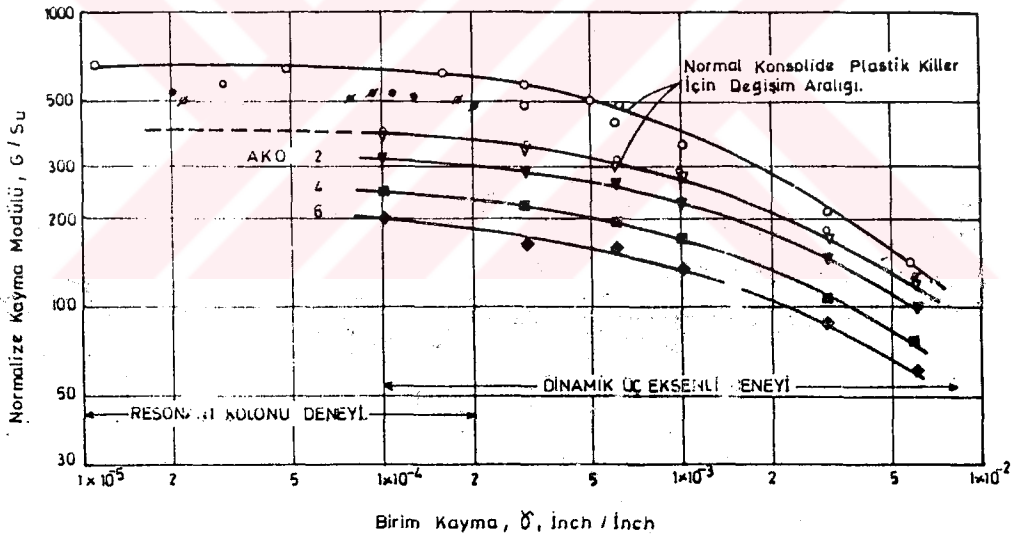
Brown, Lashine, Hyde [21], aşırı konsolidasyon oranı 2-20 arasında değişen zemin numuneleri üzerinde yaptıkları dinamik üç eksenli deneylerde, boşluk suyu basınçlarının değişimini incelemişler, aşırı konsolidasyon oranı büyük numunelerde negatif boşluk suyu basıncı oluştuğunu, aşırı konsolidasyon oranı küçüldükçe bu değer yükseldiğini hatta pozitif olduğunu gözlemişlerdir. (Şekil 2.14).



ŞEKİL: 2.14. AŞIRI KONSOLİDE KILLERDE NORMALİZE BOŞLUK SUYU BASINCI İLE DEFORMASYON ARASINDAKİ İLİŞKİ. [21]

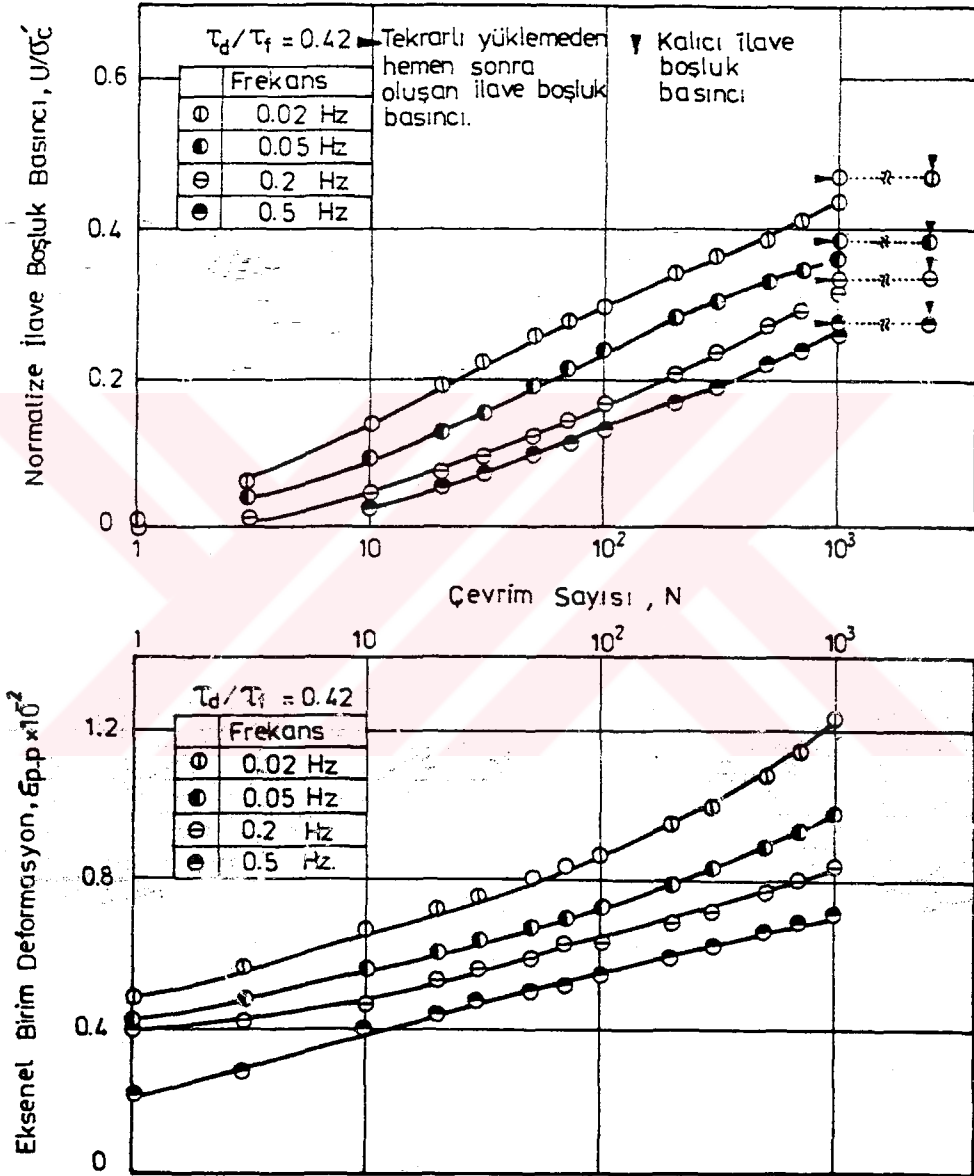
Ogawa ve diğerleri [27] tarafından yapılan bir araştırmada, aynı " $\sigma_d/2\sigma_{3c}'$ " değerinde göçme olabilmesi için, aşırı konsolidasyon oranı yüksek olan killerde daha fazla çevrim sayısına gerek olduğunu ve aşırı konsolidasyon oranının artması ile dinamik mukavemetide arttırdığını göstermişlerdir.

Koutsoftas ve Fischer [28], iki değişik plastik inorganik deniz kili üzerinde yaptıkları deformasyon kontrollü dinamik üç eksenli ve rezonans frekansta titreşim deney tekniği ile aşırı konsolidasyonun dinamik kayma modülüne etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, dinamik kayma modülünün gerilme tarihçesinden fazlaca etkilendiğini, aynı kayma deformasyonu ve konsolidasyon basıncında aşırı konsolide killerin daha yüksek dinamik kayma modülüne sahip olduklarını göstermişlerdir. (Şekil 2.15).



ŞEKİL 2.15 DİNAMİK KAYMA MODÜLÜNE BİRİM KAYMA VE AŞIRI KONSOLİDASYON ORANININ ETKİSİ.(28)

Özüdoğru [29], arazide alınmış aşırı konsolide kil numuneler ve laboratuvarında kompaksiyon ile hazırlanmış suya doymuş siltli kil numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deney aletinde çalışmalar yapmıştır. Deneylerin sonuçlarında, tekrarlı yüklemenin, aşırı konsolide killerin statik mukavemetini önemli ölçüde değiştirmedikçe,



ŞEKİL:2.16.TEKRARLI YÜKLEME FREKANSININ BOŞLUK SUYU BASINCINA VE EKSENEL BİRİM DEFORMASYONA ETKİSİ. [24]

efektif kayma mukavemeti parametrelerinin hemen hemen aynı kaldığını, tekrarlı yükleme ile oluşan plastik deformasyonların dinamik yük genliği ve tekrar sayısı ile arttığını, aşırı konsolide killere de oluşan negatif boşluk suyu basınçlarının kırılmada etkili olduğunu belirtmiştir.

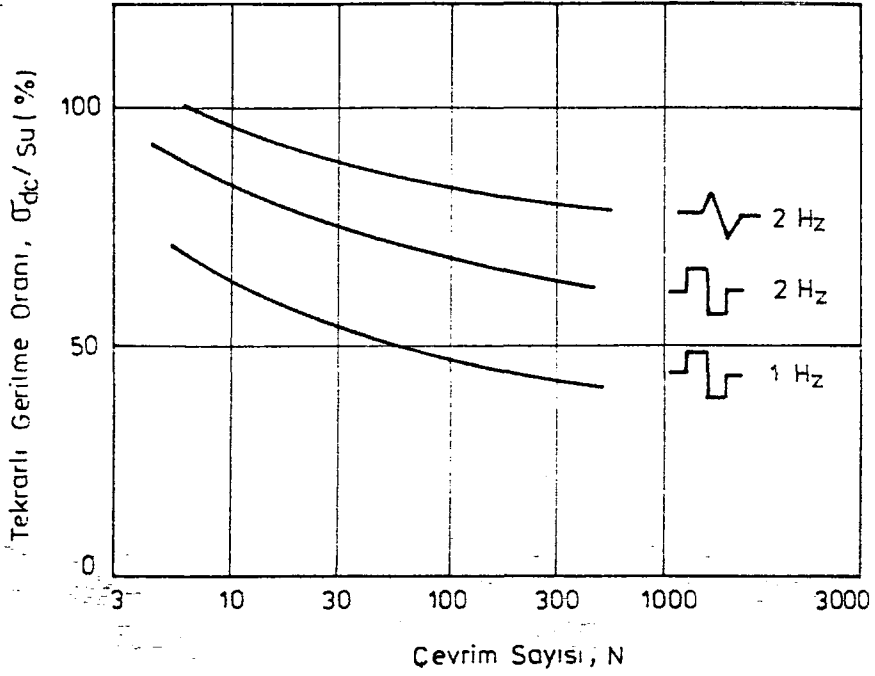
Andersen ve diğerleri [30], aşırı konsolidasyon oranı 1-10 arasında değişen Drammen kili üzerinde dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemi ile araştırmalar yapmışlardır. Brown, Lashine, Hyde [21] ve Özüdoğru [29] ile benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

2.4.5. Frekans

Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki davranışlarında, tekrarlı yüklemelerin uygulama süreleri bir başka deyişle tekrarlı yükleme frekansı önem kazanmaktadır. Özellikle oluşan boşluk suyu basınçlarının ölçümü yüksek frekanslarda tam olarak gerçekleştirilmemektedir. Aynı bir çevrim sayısı için frekansın küçük olması, birim şekil değiştirmeleri ve boşluk suyu basınçlarının artmasına neden olmaktadır. Matsui, Ohara ve Ito [24], normal konsolide Senri kili üzerinde yaptıkları dinamik üç eksenli deneylerde bu özelliği gözlemişlerdir. (Şekil 2.16). Ansal ve Erken [31], laboratuvarında hazırladıkları kaolin numuneler üzerinde yaptıkları dinamik basit kesme deneylerinde aynı sonuçları elde etmişlerdir.

Brown, Lashine ve Hyde [21], frekansın 0.1-10 Hz arasındaki değerlerinde, belirli bir gerilme seviyesi için önemli bir etki olmayacağını, özellikle aşırı konsolide zemin özelliklerini değiştirmeyeceğini belirtmişlerdir.

Thiers [32], uygulanan tekrarlı gerilme frekansının 1 Hz.'den, 2 Hz.'e çıkmasıyla kırılma için gerekli tekrar sayısının önemli ölçüde artacağını göstermiştir. (Şekil 2.17).



ŞEKİL 2.17 FREKANSIN VE YÜKLEME ŞEKLİNİN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ. [32]

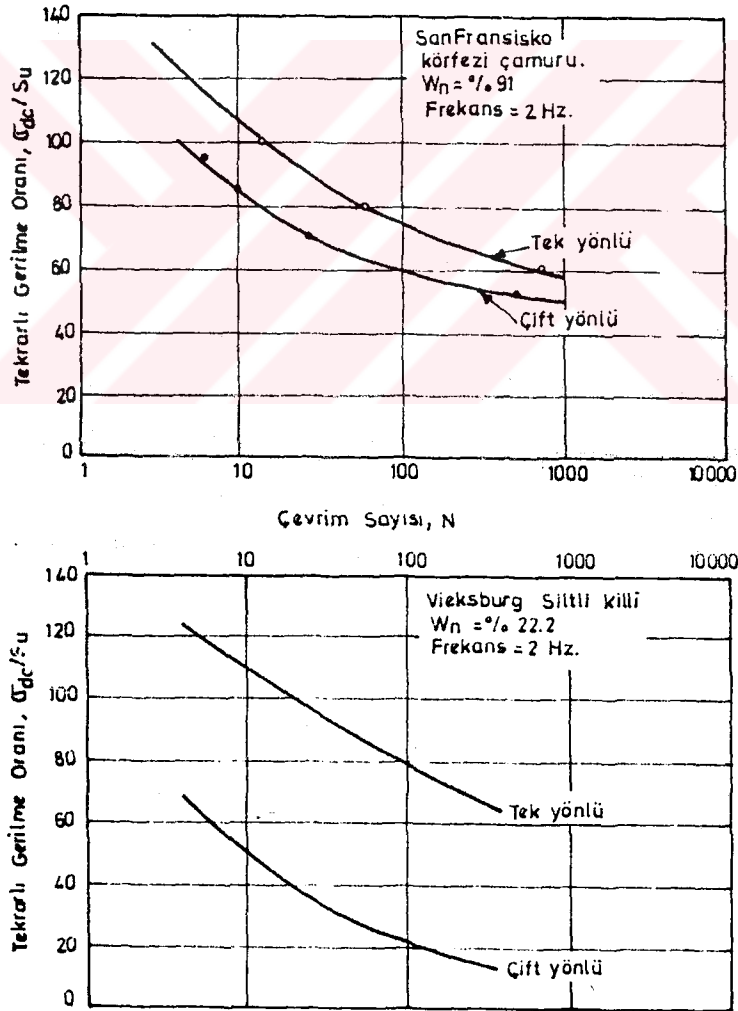
Silver [33] ise yaptığı çalışmada tekrarlı yükleme frekansının önemli bir parametre olmadığını ve standart frekans deneyi olarak 1 Hz.'in seçilmesinin uygun olacağını belirtmiştir.

2.4.6. Yükleme Şekli ve Yönü

Zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarına yükleme şeklinin ve yükleme yönünde etkisi olduğu bilinmektedir. Dinamik deney sisteminin özelliklerine bağlı olarak uygulanan yükleme şekilleri, sinusoidal, üçgen, dikdörtgen ve trapezdir. Bu yükleme şekilleri numune üzerine tek veya çift yönlü olarak etki ettirilir. Dikdörtgen yükleme şeklinin, diğer yükleme şekillerine göre numune üzerinde daha etkili olacağı, büyük birim şekil değiştirmelere ve artık boşluk suyu basınçlarına yol açacağı rahatlıkla belirtilebilir. Çünkü bu yükleme durumunda, gerilmenin numuneye etkime süresi artmış olmaktadır. Thiers [32], yaptığı deneysel çalışmada benzer sonuçlar elde etmiştir. (Şekil 2.17).

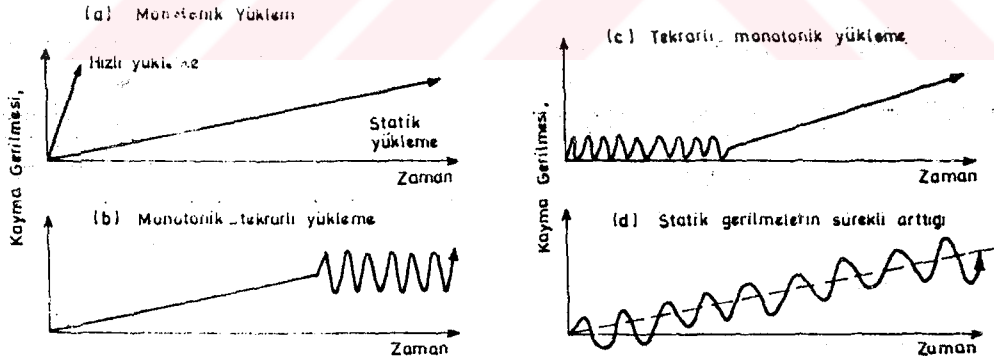
Annaki ve Lee [34], dinamik üç eksenli deney aletinde gelişmiş güzel yapılan yükleme ile üniform sinusoidal yüklemeyi karşılaştırarak, üniform veya simetrik olmayan sinusoidal yükleme durumunda zeminin dinamik özelliklerinde önemli bir farklılaşma olmayacağını ve dinamik deneylerde çift yönlü üniform sinusoidal yük uygulamanın yeterli olacağını belirtmişlerdir.

Tek yönlü veya çift yönlü dinamik yüklemeler uygulanarak, Seed ve Chan [35] tarafından yapılan deneylerden Şekil 2.18 de gösterildiği gibi çift yönlü tekrarlı gerilme uygulamanın daha büyük şekil değiştirmelere ve daha küçük mukavemet değerlerine neden olduğu söylenebilir. Depremler sırasında zeminler, çift yönlü gelişmiş güzel yüklemeler etkisi altında kaldığına göre, laboratuvarında çift yönlü yükleme yapılması uygundur.



ŞEKİL:2.18 TEK VE ÇİFT YÖNLÜ YÜKLEME BİÇİMLERİNİN FARKI.[35]

Zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranış ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak deneylerde; doğadaki statik ve tekrarlı gerilme koşullarının laboratuvarında oluşturulması gereklidir. Ishara [36] Şekil 2.19 da görülen, dört değişik yükleme modelini zemin deneylerinde kullanılmak üzere önermektedir. İlk yükleme biçimi, araştırılan olayın yükleme hızında, sürekli artan bir statik yüklemedir. Diğer üç yükleme biçimi zeminlerin tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının incelenmesinde kullanılır. "Monotonik-tekrarlı yükleme" biçimi depremler sırasında yamaç ve şevlerde yer alan zemin tabakalarında meydana gelebilir. Tekrarlı yüklemeye maruz kalmış zeminlerdeki, mukavemet kayıplarının ve davranış özelliklerinin değişiminin araştırılması için, "Tekrarlı-monotonik yükleme", titreşimli makina temelleri ve kazık çakma işlemleri sırasında zemin davranışını belirlemek için "Statik gerilmelerin sürekli arttığı yükleme" biçimlerinden yararlanılır.



ŞEKİL: 2.19 ZEMİN DENEYLERİNDE KULLANILAN YÜKLEME MODELLERİ. [36]

2.5. DİNAMİK YÜKLEME SONRASI MUKAVEMET KAYBI

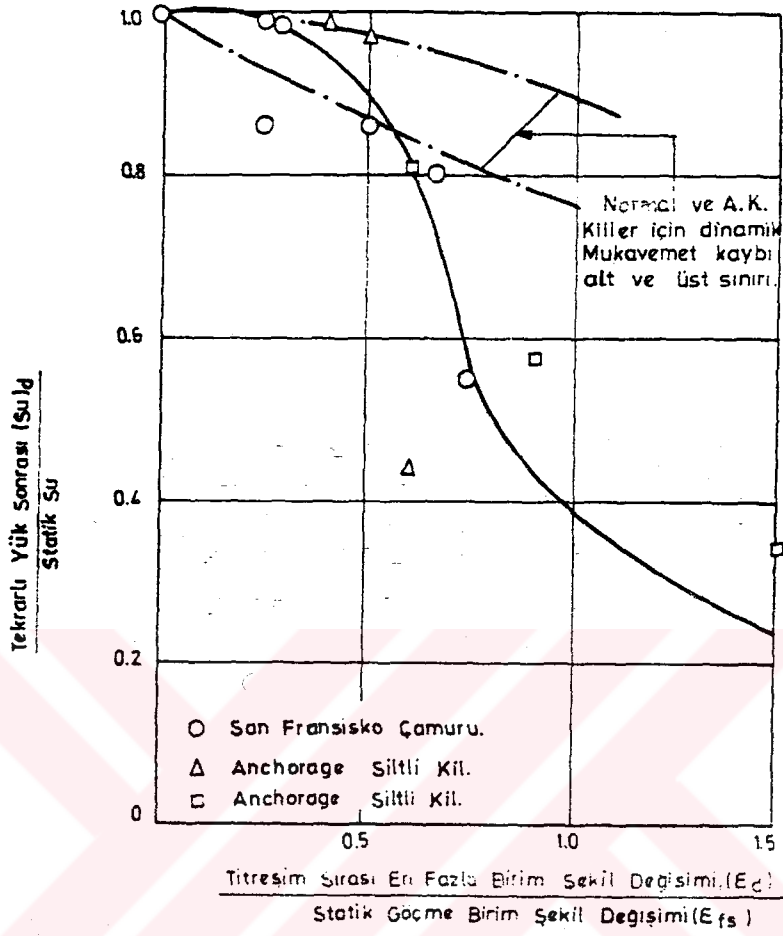
Uygulanan tekrarlı yüklemeler zeminlerin statik mukavemetini azaltmaktadır. Deprem titreşimlerinde uygulanan her bir yükleme zeminde tek başına akma veya toptan göçme oluşturmazken, bunların yarattıkları kalıcı deformasyonların artarak birikmesi ve boşluk suyu basınçlarının artışı sonuçta mukavemet kaybına ve bu kayıp sonucu oluşan yumaşama ve deformasyonlar göçmelere yol açabilir. Dinamit patlaması sonrası veya depremden birkaç saat sonra gözlenen heyelanlar bu mukavemet kaybına güzel örneklerdir. Bu yüzden killi zeminlerin tekrarlı yükler altında ve sonrası mukavemetleri ile gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesi gerekir.

Thiers [32], yaptığı deformasyon kontrollü deneylerde, belirli bir çevrim sayısından sonra oluşan mukavemet kaybının, birim kayma genliği arttıkça büyümekte olduğunu göstermiştir.

Seed ve Chan [35], çalışmalarında kohezyonlu zeminlerde, tekrarlı yüklemelerin sonunda zamana bağlı sünme ve kayma olaylarının gözlemlendiğini belirterek, tekrarlı yük değerinin " S_u " değerine ulaşmasının büyük kalıcı deformasyonlar oluşturacağını ifade etmişlerdir.

Thiers ve Seed [37], üç değişik kil üzerinde çalışarak, tekrarlı yük öncesi ve sonrası mukavemetlerini araştırmışlar ve tekrarlı yükleme sonrası mukavemetin, tekrarlı yükleme sırasında oluşan birim şekil değiştirmelerin bir fonksiyonnu olduğunu belirtmişlerdir. (Şekil 2.20).

Castro ve Christian[38], yaptıkları çalışmalarda, tekrarlı yüklemeler sırasında oluşan boşluk suyu basınçları, σ' , efektif gerilme değerini düşüreceğinden, bunda mukavemeti azaltacağını sanıldığını, fakat, tekrarlı yükleme sonrası statik kesmede oluşan negatif boşluk suyu basınçlarının bunu engellediğini belirtmiştir. Koutsoftas [39], tekrarlı yükleme sonrası mukavemet kaybının Theirs ve Seed [37], tarafından belirtildiği kadar yüksek olmadığını, bu kaybın çok büyük plastik deformasyonlar mertebesinde bile %10-%20 mertebesinde kaldığını, çevrim sayısının artması ile zemin



ŞEKİL: 2.20. TEKRARLI YÜK SONRASI STATİK MUKAVEMETİN DEĞİŞİMİ. [37]

Özelliklerine bağlı bir ilişkinin de gözönüne alınmasını gerektiğini belirtmiştir. Andersen [40] ise, tekrarlı yük sonrası kayma mukavemetindeki azalmanın %25'si geçmeyeceğini yaptığı çalışmada belirtmiştir. Koutsoftas'ın [39] normal ve aşırı konsolide killeri üzerinde yaptığı tekrarlı yükleme sonrası mukavemet kaybı alt ve üst sınırları Şekil 2.20 üzerinde gösterilmiştir.

Güler [41], Arnavutköy Kaolini üzerinde dinamik üç eksenli deneyler yapmış, sonra bu numuneleri statik olarak kesmiştir. Sonuç olarak; dinamik deneyler sırasında biriken boşluk suyu basıncının, uygulanan statik ve dinamik yükler cinsinden, oluşan plastik deformasyonların ise biriken boşluk suyu basınçlarına göre bulunabileceğini

belirtmiş ve dinamik yüklemekten sonra statik olarak kesilen numunelerin aşırı konsolide kil gibi davranacağı ifade etmiştir. Ayrıca verdiği aşağıdaki bağıntı ile :

$$\Delta u_f = 0.34 P_c \log \varepsilon_f - 9.7 \quad (2.16)$$

(Δu_f : kırılma sırasındaki boşluk suyu basıncı, P_c : ön konsolidasyon basıncı, ε_f : kırılma anındaki eksenel birim deformasyon) deney sırasında biriken boşluk suyu basınçlarının hesaplanabileceğini göstermiştir.

Özüdoğru [29], Andersen ve diğerleri [30], Brown ve diğerleri [42], aynı sonuçları elde etmişler ve tekrarlı yükleme sonrası statik olarak kesilen zemin numunelerinde oluşan boşluk suyu basınçlarına bağlı olarak aşırı konsolide kil davranışına benzer bir davranış gözleneceğini belirtmişlerdir.

2.6. DİNAMİK DENEY TEKNİKLERİ

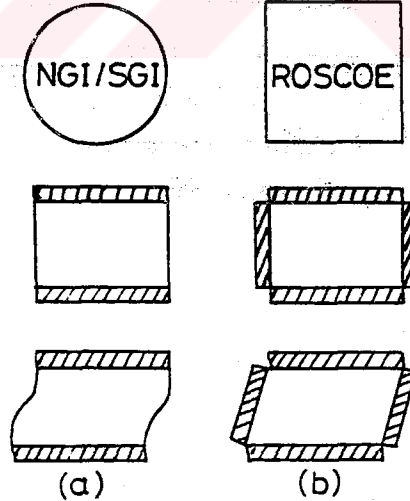
Tekrarlı yükler etkisi altındaki zeminler, değişik genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında kalırlar. Bu yükleme koşullarında, zeminlerin mukavemet özelliklerinin belirlenebilmesi için günümüzde geliştirilmiş laboratuvar deneylerinden; dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme, sarsma tablası ve rezonans frekansta titreşim deneyleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Seçilecek deney türü ve sınır koşulları, arazideki mevcut gerilme durumunu, zemin elemanının gerilme tarihçesini konsolidasyon durumunu gerçekçi olarak yansıtmaları, tekrarlı yük genliği ve frekansını uygun laboratuvar benzeşimi ile sağlaması gerekmektedir. Bu bölümde en çok kullanılan dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney teknikleri anlatılacaktır.

2.6.1. Dinamik Basit Kesme Deney Tekniği

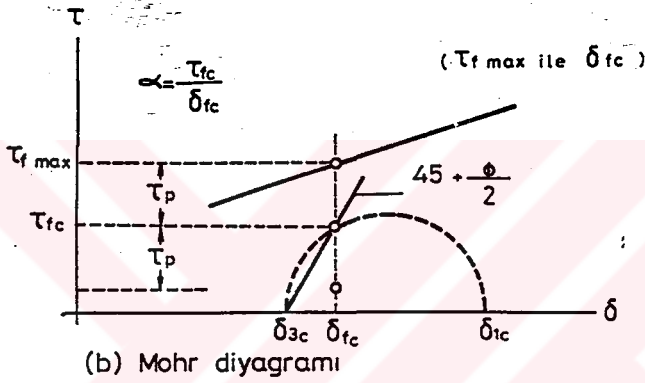
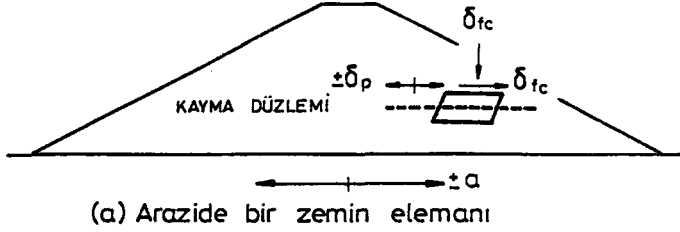
Dinamik basit kesme deney tekniği kullanılarak yapılan ilk deneyler, Seed ve Peacock tarafından 1968 yılında, Roscoe tipi kare kesitli numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kare kesitli numunelerin kullanılışı üniform numune hazırlamayı ve gerilme-şekil değiştirmelerin de üniform oluşunu engellemektedir. Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) tarafından geliştirilen, daire kesitli silindirik numunelerle yapılan deneylerde bu olumsuz etkilenme ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. (Şekil 2.21) NGI tipi basit kesme deney sisteminde, numunenin içinde bulunduğu mebranın esnek oluşu düzlem şekil değiştirmeyi tam olarak sağlayamazken, Roscoe tipi aletlerde kenarların rijit oluşu bu koşulunun oluşmasına neden olmaktadır.

Dinamik basit kesme deney sisteminde, arazideki gerilme koşullarının aynen laboratuvarda model edilmesi mümkündür. Şekil 2.22'de arazi elemanı ve laboratuvar zemin numuneleri üzerindeki gerilme durumları Mohr dairesi üzerinde gösterilmiştir.



ŞEKİL 2.21_ BASİT KESME DENEY SİSTEMLERİ

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



ŞEKİL 2.22. ARAZİDEKİ ZEMİN ELEMANI İLE LABORATUAR BASİT KESME DENEY NUMUNESİ ÜZERİNDE ETKİYEN GERİLMELERİN BENZEŞİMİ

a. Zemin numunesine uygulanan yatay kuvvet alt ve üst yüzeylerde kayma gerilmeleri oluşturmaktadır. Fakat düşey yüzlere kayma gerilmesi uygulama olanağı yoktur. Bu durum köşelere yakın olan yerlerde üniformluğun bozulmasına neden olmaktadır.

b. Numune kesidinde kayma gerilmesi yayılımının üniformluğu, alt ve üst başlık özelliklerine bağlı olmakta, ve kesin olarak sağlanamamaktadır.

c. Numune boyunca, birim kayma değişimlerinin üniform olmaması, şekil değiştirmelerin en zayıf olan kesitte toplanmasına neden olmaktadır.

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

2.5.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Tekniği

Dinamik üç eksenli deney sistemi ile zeminlerin dinamik özelliklerinin araştırılması 1960'lı yıllarda başlamıştır. Normal üç eksenli deney hücrelerinin kullanılabilmesi ve yöntemin basit oluşu yaygınlaşmasına yol açmıştır.

Şekil 2.23'de laboratuvarında dinamik üç eksenli deney numunesi ile arazi elemanı arasındaki ilişki görülmektedir. Deneyler genellikle suya doygun zeminlerde, drenajsız ve sabit çevre basıncı altında, numuneye eksenel tekrarlı yüklemeler uygulanarak yapılır ve eksenel boy değişimleri ve boşluk suyu basıncı değişimleri bulunur.

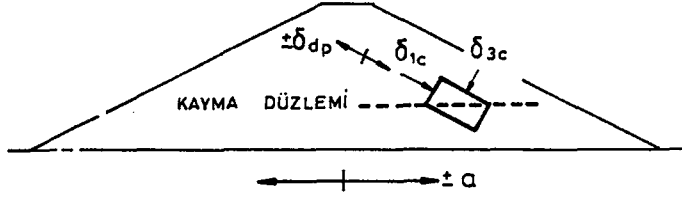
Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde aşağıdaki özelliklerin gözönünde tutulması gereklidir.

a. Arazide, başlangıçta düşey olan büyük asal gerilme, tekrarlı kayma gerilmesi altında her iki yönde 40° lık açı yapar. Dinamik üç eksenli deneylerde ise her yükleme çevriminde en büyük asal gerilme 90° lık açı değişimi yapar.

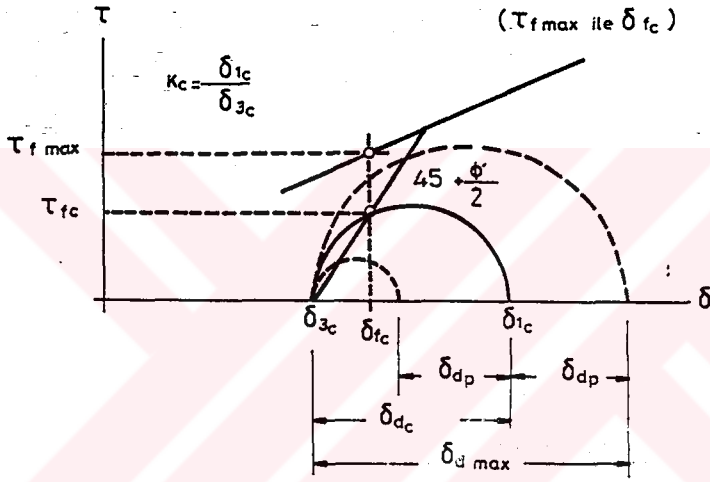
b. Laboratuvarında zemin numunesi, her üç asal gerilme doğrultusunda şekil değiştirmeye uğrarken, deprem yükleri altında basit kaymaya veya tek yönlü deformasyona maruz kalır.

c. Numune ile alt ve üst başlık arasındaki sürtünme, uniform olmayan gerilme-şekil değiştirmeler meydana getirmektedir. Zemin numunesi, yükleme çevriminin eksenel basınç ve çekme bölümlerinde simetrik olmayan davranış göstermekte, eksenel gerilmenin azaldığı

kısımlarda numune kesidinde incelmeye olmaktadır. Bu durumlar mukavemet kaybını çabuklaştırmaktadır. Konsolidasyon aşamasında asal gerilmelerin bir birine eşit olması ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) mukavemet değerini arttırmaktadır.



(a) Arazide bir zemin elemanı



(b) Mohr diyagramı

ŞEKİL 2.23 - ARAZİ ZEMİN ELEMANI İLE LABORATUAR ÜÇ EKSENLİ DİNAMİK DENey NUMUNESİ ÜZERİNE ETKİYEN GERİLMELERİN BENZEŞİMİ

Belirtilen bu etkenlere rağmen, dinamik üç eksenli deneyler, numune hazırlanmasının ve deney yapımının kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir.

2.7. SONUÇLAR

Günümüz dünyasında, ihtiyaçların süratle artması, inşa edilen mühendislik yapılarının büyük boyutlara ulaşması, açık deniz platformları, toprak dolgu barajlar, büyük boru hatları, depolama tankları ve nükleer santrallerin yumuşak kil zeminlere yapımının zorunlu olması, bu yapılara etki edecek dalga, deprem ve benzeri tekrarlı yüklerin etkisi altında zemin davranışının belirlenmesini gerektirmektedir. Konunun önemi araştırmaların bu yönde yoğunlaşmasına yol açmıştır.

Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışın incelenmesinde, dinamik gerilme-şekil değiştirme parametreleri olan, dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile bunlara etki eden faktörler ve dinamik yükleme sonrası zeminlerde görülen mukavemet kaybı araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarını belirleyen dinamik kayma modülünün tek bir sabit sayı olmadığı, en azından birim kayma genliğinin bir fonksiyonu olduğu araştırmacıların birleştiği bir konudur. G_o/S_u oranı, referans birim kayma gerilme karşılığı Hara ve diğerleri [6], Hardin ve Dranevich [3], Seed ve Idriss [2] tarafında çeşitli bağıntılar önerilmiştir. Genel bağıntı :

$$G_o = a S_u \quad (2.17)$$

şeklinde olup, a katsayısı (500-2300) arasında değişmektedir. Bu konudaki diğer araştırmalar dinamik kayma modülü ile statik drenajsız kayma mukavemeti arasında makül bir korelasyonun olduğunu açıkça göstermektedir. G_o ile S_u arasındaki ilişkinin dağılım aralığı her iki değerlerin değişik gerilme tarihçesi ve zemin yapısına sahip numuneler üzerinde değişik birim kayma değerleri ile hesaplanarak azaltılabilir.

Sönüm oranı, (D) , kili zeminlerde birim kayma deformasyonunun bir fonksiyonu olup, D_{max} değeri birim kaymanın en büyük değerlerinde 0,25 dolaylarında bir değer olmaktadır. Seed ve Idriss [2],

birim kaymanın 10^{-3} ile 10^{-2} arasındaki değerlerinde sönüm oranı için 0.10 ile 0.20 arasında değiştiğini verdikleri eğri ile göstermişlerdir. (Şekil 2.6) Kokusho ve diğerleri [8] dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ile ilgili birçok araştırmacının yaptığı çalışmaları makalelerinde toplamışlardır (Şekil 2.24).

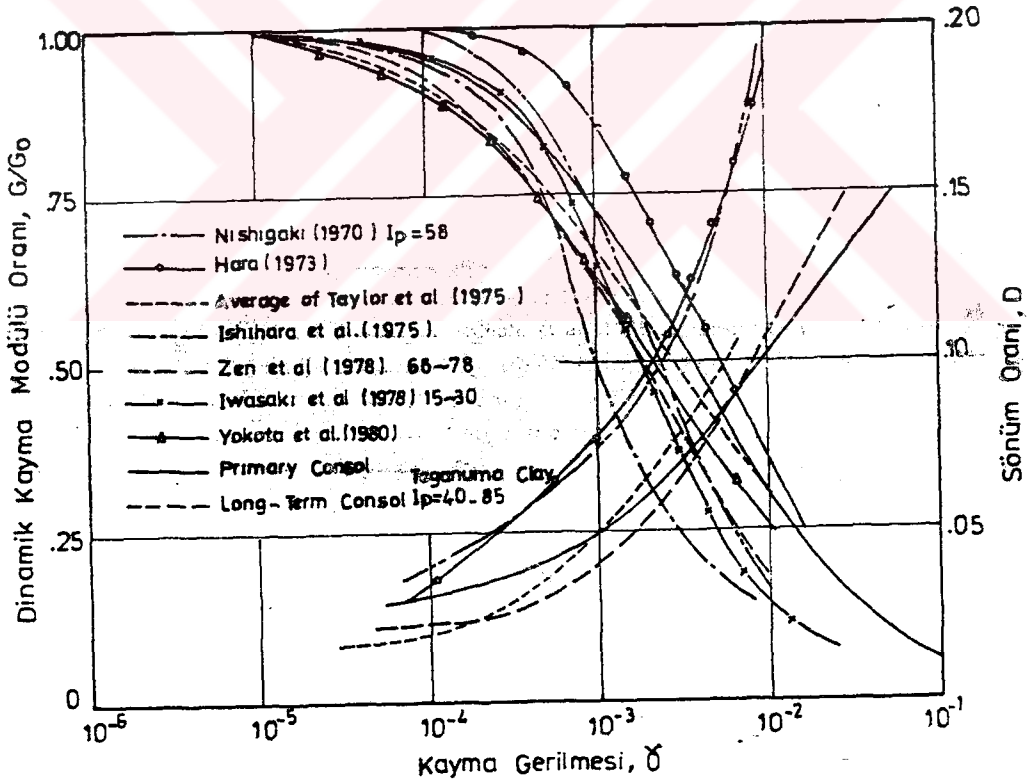
Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarına etki eden faktörler konusunda yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz.

Tekrarlı yük genliğinin artırılması veya aynı genlikte çevrim sayısının artırılması, birim kaymaları ve boşluk suyu basınçlarını artırırken, dinamik mukavemetin azalmasına neden olacağı birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Artan efektif çevre gerilmesi ile azalan boşluk oranları dinamik kayma modülünü dolayısı ile dinamik mukavemeti arttırmaktadır. Suyu doygunluğun düşük olması ise dinamik mukavemeti düşürmektedir. Uygulanan titreşim frekansının artması, boşluk suyu basınçlarını ve birim kaymaları azaltmakta ve dinamik mukavemeti arttırmakta olup aynı çevrim sayısında frekansın düşmesi ise boşluk suyu basınçları ve birim kaymaları arttırırken dinamik mukavemeti azaltmaktadır. Aşırı konsolidasyon oranındaki artımlar, boşluk suyu basınçlarını negatif değere indirirken, dinamik mukavemeti arttırıcı yönde rol oynamaktadır. Tek yönlü dökdörtgen yüklemeler, birim kayma ve boşluk suyu basınçlarını arttıran en etkili yükleme biçimidir. Fakat araştırmacılar, frekansın 0.1 Hz. olduğu üniform çift yönlü sinosoidal yüklemelerin gerçek yüklemelere daha uygun olacağı fikrinde birleşmişlerdir.

Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yüklemeler sonrası mukavemet kaybı üzerine yapılan ilk çalışmalarda bu etkinin oldukça fazla olduğu yolunda bulgular elde edilmişse de, sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda belirlenen mukavemet kaybının fazla olmadığı, bu tür yüklemeler sonucunda zeminlerin aşırı konsolide kil gibi davranış gösterdiği birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Tekrarlı yük genliğine, çevrim sayısına ve zemin özelliklerine bağlı olarak oluşan plastik şekil değiştirmelerin mertebelerinin büyümesi halinde meydana gelecek mukavemet kayıplarının dikkate alınması gereklidir. Deprem bölgelerinde yapılacak önemli yapıların projelendirilmesinde,

bu konunun daha titiz ve dikkatli araştırılmasının ve tekrarlı yük-
leme sonrası belirlenecek mukavemetin hesap kriterine yansıtılması-
nın yararı olacaktır.

Zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarının
incelenmesinde kullanılan deney teknikleride, elde edilen verilerin
sağlıklı olarak değerlendirilmesi, arazi-laboratuvar koşullarının
uyuşması açısından önemli bir konudur. En yaygın olarak kullanılan
deney sistemleri olan dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme de-
ney sistemleri ile $\% 10^{-1} - 10^{-2}$ arasında kayma deformasyonu oluş-
turan tekrarlı yüklemelerin araştırılması önerilmektedir.



ŞEKİL:2.24 KOHEZYONLU ZEMİNLERDE DİNAMİK KAYMA MODÜLÜ VE SÖNÜM ORANININ BİRİM KAYMA İLE DEĞİŞİMİ.[8]

BÖLÜM 3

YÖNTEM

3.1. GİRİŞ

Bu araştırmada, laboratuvarı yüksek su muhtevasında hazırlanan kaolin numuneler konsolide edilerek, dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemlerinde, belirli frekans ve genlikte üniform sinosoidal dinamik yüklemeler tabi tutularak, bu yükler etkisi altındaki gerilme-şekil değıştirme ve mukavemet özellikleri incelenmiştir

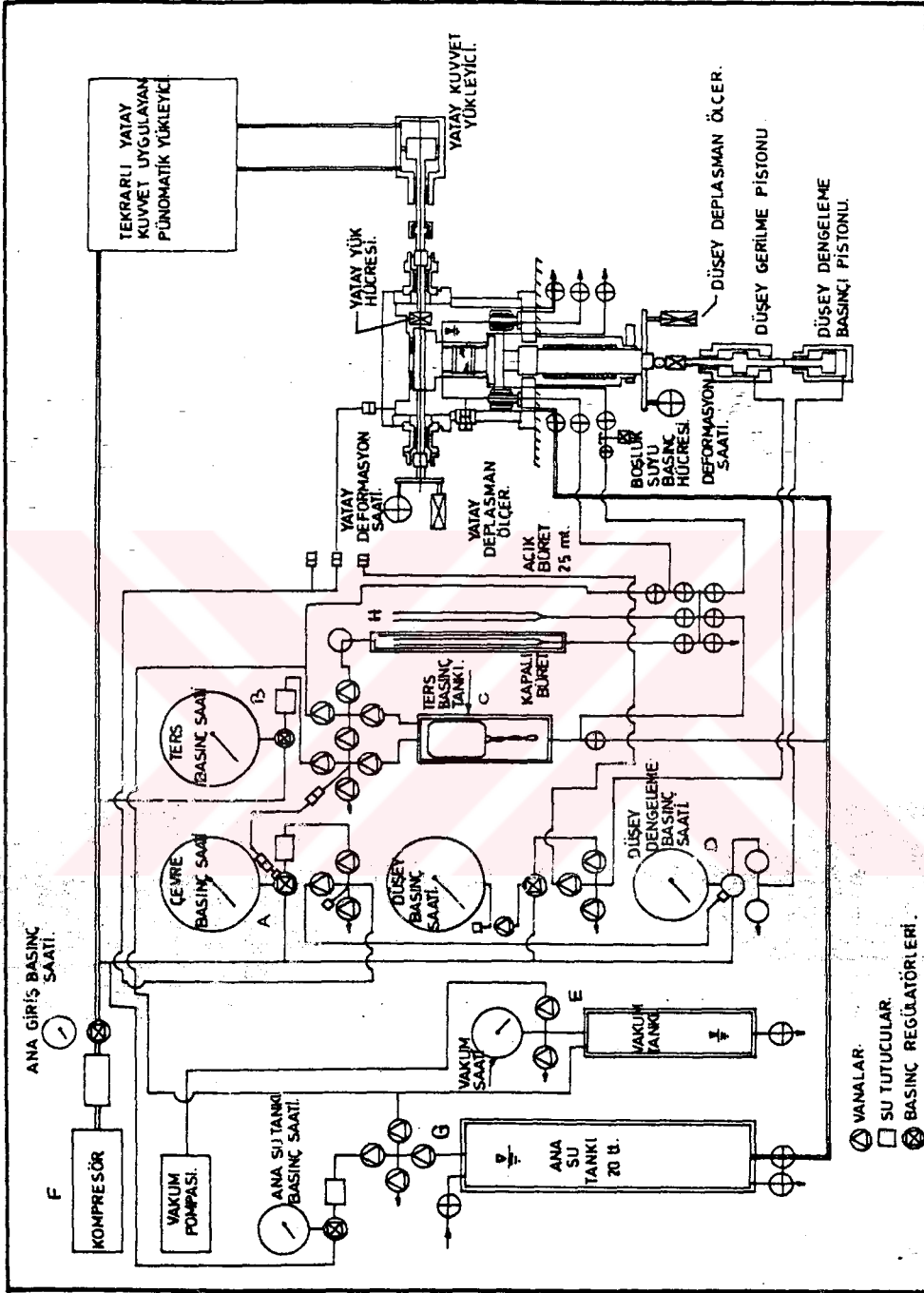
Bu bölümde, araştırmada kullanılan deney aletleri ve deney malzemesi tanıtılarak, numune hazırlanması, deneylerin yapılışı anlatılacak ve verilerin değeriendirilmesi konu edilecektir.

3.2. ALET

3.2.1. Dinamik Basit Kesme Deney Aleti

Bu araştırma çerçevesinde yapılan dinamik basit kesme deneyleri, Japon Seiken Inc. firmasının geliştirmiş olduğı dinamik basit kesme deney sisteminde yapılmıştır. Şekil 3.1.'de şematik olarak görülen deney sistemi başlıca dört ana üniteden oluşur.

1. Deney hücresi
2. Basınç tablosu
3. Yükleme ünitesi
4. Ölçüm ve kayıt birimleri



ŞEKİL 31 DİNAMİK BASIT KESME DENEY SİSTEMİ ŞEMATİK ÇİZİMİ.

3.2.1.1. Deney Hücresi

Deney hücresi, $\phi 250$ mm ϕ apında, 160 mm. yüksekliğinde, 20 mm et kalınlığında şeffaf pleksiglastan yapılmış bir silindir olup, sızdırmaklık sağlayan lâstik halka ile çelik alt başlığa oturur. Yine çelikten yapılmış, düşey yönde hareketi hidrolik sistem ile sağlanan üst ana başlık ile kapatılır. (Şekil 3.2)

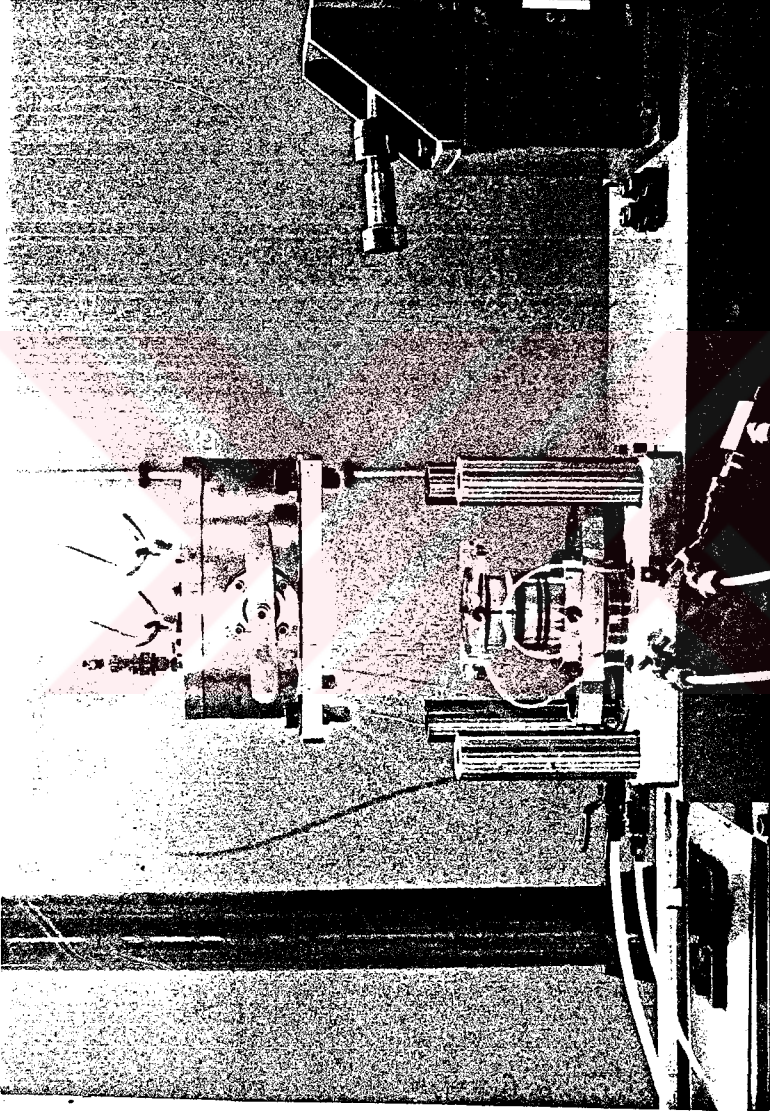
Sistemde, 70 mm ϕ apında, 25 - 30 mm yüksekliğinde zemin numuneleri üzerinde deney yapılabilmekte ve numuneler istenilen tipte membranlar içerisine yerleştirilebilmektedir. Bu çalışmada yapılan deneylerde, 30 mm yüksekliğinde, 70 mm ϕ apında hazırlanan numuneler, normal esnek membran içine yerleştirilmiştir.

Numune alt başlığı yatay yönde sabit olup, düşey hareket edebilen bir şaft üzerine yerleştirilmiştir. Üst başlık, kayma kuvveti alabilmesi için yatay bir şafta bağlanmıştır. Numune alt başlığı metal, üst başlığı ise pleksiglastan yapılmıştır. Her iki başlıkta poröz taşlar, başlık içindeki yuvalara yerleştirilmiştir. Her iki başlıktan ters basınç uygulamak ve drenaj için ikişer adet ince tüp çıkışı vardır. Bu çıkışlar, hücre dışına yerleştirilmiş dört adet vana ile kontrol edilir. Alt başlığa bağlı bir çıkışta boşluk suyu basıncını ölçmek için elektronik basınç ölçer bulunmaktadır.

3.2.1.2. Basınç Tablosu

Bu bölüm, dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemleri için, zemin numunesi veya deney hücresi içine düzenli olarak su ve hava basıncı uygulamak ve istenilen durumlarda numunede oluşacak hacim değişimlerini ölçmek amacı ile kullanılmakta olup, Şekil 3.1. üzerinde harflerle gösterilmiş sekiz ana ünitelerden oluşur.

- A. Çevre basınç ünitesi
- B. Ters basınç ünitesi
- C. Düşey basınç ünitesi
- D. Dengeleme ve düşey basınç ünitesi
- E. Vakum ünitesi



Şekil 3.2. Dinamik Basit Kesme Deney Hücresi

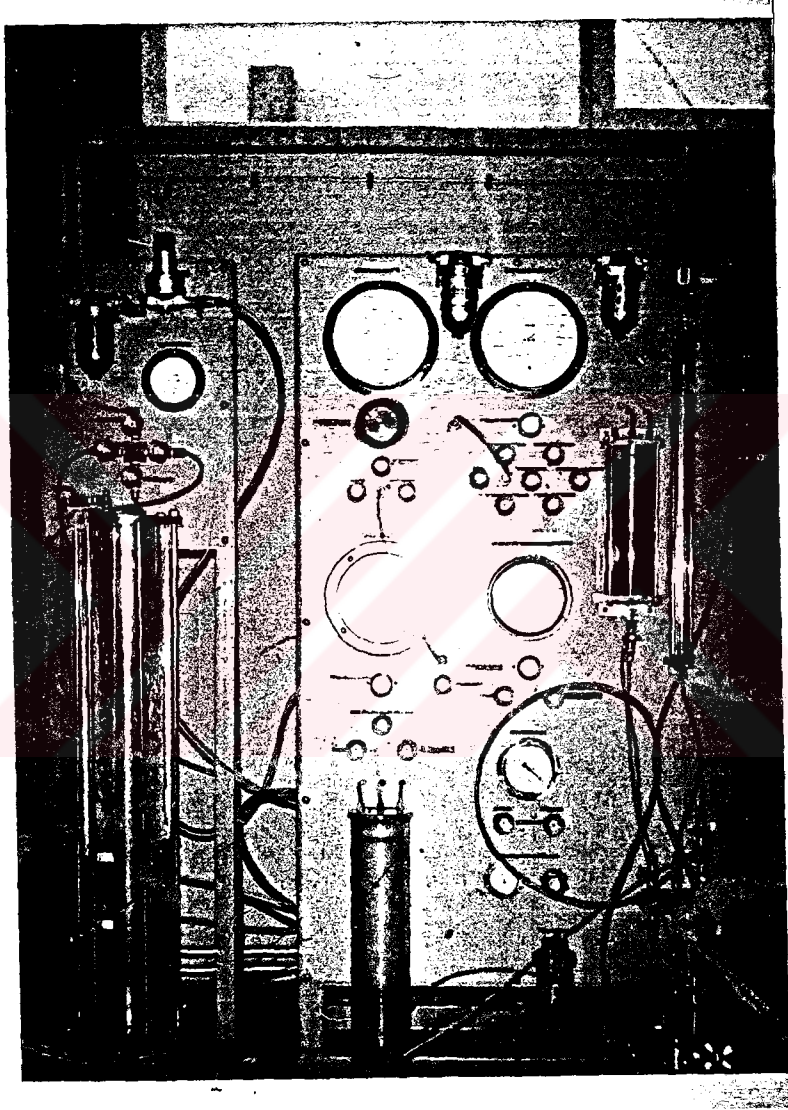
- F. Sistem hava basıncı üretim ünitesi
- G. Sistem suyu sağlama ünitesi
- H. Numune hacim değişimi ölçüm ünitesi

Şekil 3.3. , basınç tablosunun genel görünüşünü göstermektedir. Yukarıdaki ünitelerde, sistem hava basıncı ana girişi, çevre, ters, düşey dengeleme ve sistem ana su tankı için altı adet basınç regülatörü ve altı adet basınç saati vardır. Basınç regülatörleri, yüksek hava basıncını kontrol ederek istenilen basıncın sabit olarak uygulanmasını sağlarlar. Bunlardan ikisi (çevre ve dengeleme basınç regülatörleri), diğer basınç regülatörleri ile bağlanarak eşit basınç artışları için ortak beslenebilirler. Basınç saatleri, bourdon tüpü tipinde olup, basınç regülatörlerinin kontrol ettiği hava basıncını gösterirler.

Vakum uygulayabilmek için birer adet vakum pompası, vakum saati ve küçük bir su tankı kullanılır. Vakum pompası AEG firması üretimi olup 70 cm. Hg. gücünde ADEA 71 N 4 tipindedir. Vakum saati ise 76 cm. Hg ölçüm kapasitelidir. Küçük su tanklarından biri vakum tankı olup, numuneden gelen suyu tutarak vakum pompasına girmesini engeller. Sistemdeki diğer tank ise ters basınç tankı olup, hava basınç regülatörü tarafından kontrol edilen hava basıncı, bu tankı içerisindeki lastik bir balon ile su basıncına dönüştürülür. Yine ters basınç uygulamak ve numunedeki hacim değişimini su çıkışı ile gözlemek için 0.1 ml. taksimatlı 25 ml. kapasiteli birer adet açık ve kapalı büretten faydalanılır.

Sistemin hava gereksinimi, Lupamat tipi $800-1000 \text{ kN/m}^2$ basınç sağlayacak kapasitede, İzmir Makina üretimi bir kopresör ile sağlanmıştır. Sistem suyu ise 20 lt. lik bir tanktan karşılanmaktadır.

Ayrıca sistem verimliliğini arttırmak için çok sayıda iğne vanalar ve su tutucu filitreler yerleştirilmiştir. İğne vanaların görevi, hava devresini açmak ya da kapatmaktadır. Bu vanalar bağlı bulunduğu bölümlerde hava regülatörü devresinde, diğer bölümlerle olan devrelerde ve sistemi atmosfere açmada yukarıdaki işlevi yaparlar. Su tutucu filitreler ise hava basınç borusundan gelebilecek kondense suları tutarak regülatörlere ve sisteme girmesini önlerler.



Şekil 3.3. Dinamik Deney Sistemleri Basınç Tablosu

3.2.1.3. Yükleme Ünitesi

Deney hücresindeki numuneye uygulanan statik ve dinamik yatay gerilmeler ile statik düşey gerilmeleri numuneye aktaran ünite iki ana birimden oluşur.

Yatay yükleme birimi

Düşey yükleme birimi

YATAY YÜKLEME BİRİMİ, hava basınç ileticisi, statik yükleme pistonu ve dinamik yükleme pistonundan oluşur. Hava basınç ileticisi, yatay yükleme biriminden gelen hava basıncını, hücre içindeki bir yük ölçer ve bir şaft ile şaftın bağlı olduğu kayıcı rulmanlı üst başlıktan numune üst yüzeyine kayma gerilmesi uygular. Statik yükleme ve dinamik yükleme pistonları içindeki havanın basıncının artması numuneye kuvvet uygulanmasını sağlar.

Deney sırasında, numune üst yüzeyine uygulanan statik ve dinamik kayma gerilmeleri "Havalı Yükleme Birimi" tarafından kontrol edilir. Sistemde, sinusoidal, kare ve iki tip üçgen kesitli olmak üzere dört tip yükleme yapılabilir. Tekrarlı yükleme frekans aralığı (0.0001 - 9999 çevrim/sn) ayarlanabilir. Fakat, sistemin hava basıncı ile çalışması nedeni ile 2 çevrim (sn) den hızlı deneyler yapılamamaktadır. Yük genliği, ayrı bir kumanda düğmesi ile düzenlenir ve dinamik basınç ölçerin gösterdiği değerden büyük olamaz. Yükleme birimi gerilme kontrollüdür. Belirli frekans ve genlikte tekrarlı deneyler yapılabildiği gibi belirli kayma gerilmeleri altında akma ve değişik hızlarda gerilme kontrollü statik deneyler de yapılabilir.

DÜŞEY YÜKLEME BİRİMİ, iki pistonlu bir silindirden oluşur. Pistonlardan birinin görevi, üzerinde zemin numunesi bulunan şaftın kendi ağırlığını dengelemek ve numune üst başlığını, hücre üst başlığına bağlamak için numuneyi kaldırmaktır. Ayrıca hücre basıncı ile bağlantısı açıldığında numuneye izotropik çevre gerilmesi uygulamasını ikinci pistonun görevi ise numuneye farklı düşey ve yanal

basınçlar uygulanması istendiğinde öngörülen düşey gerilmeyi numune uygulamaktır. Bu düşey şafta yerleştirilmiş deplasman ölçer ile numunedeki boy değişimleri ölçülebilir. Ayrıca gerekli hallerde düşey hareketi engelleyecek mekanik bir kilit vardır.

3.2.1.4. Ölçüm ve Kayıt Birimleri

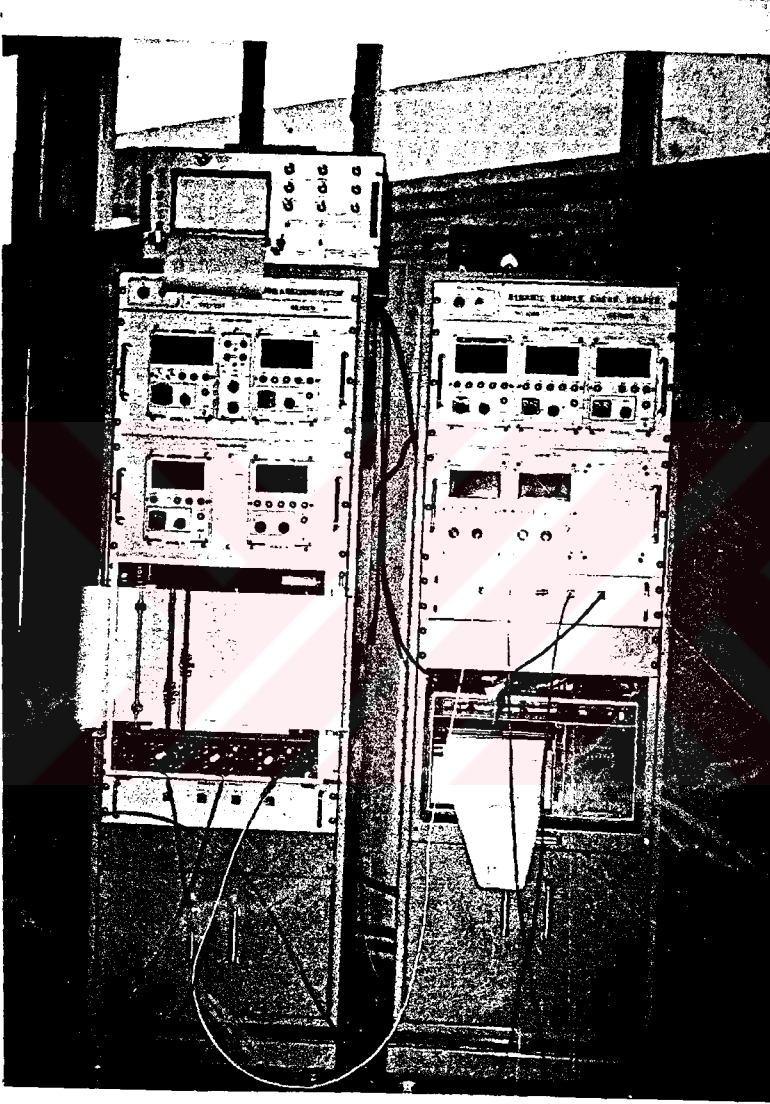
Dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneyleri sırasında numunelere uygulanan gerilmeleri, gerilmeler sonucu oluşan yatay ve düşey deplasmanları, oluşan boşluk suyu basınçları, sistemdeki basınç ölçer ve deplasman ölçerden gelen elektrik sinyallerinin ayarlanması ve istenilen ölçekte büyütülmesi ile bağlı oldukları amplifikatör göstergelerinden okunabilmektedir.

Ayrıca üç kanallı x-y çizici ile yatay eksen deplasmanlar düşey eksen de uygulanan kuvvet ve boşluk suyu basıncı çizdirilebilmektedir. Japon Riken Denshi firması yapımı model D.72 BP çizici ile belirli çevrim sayılarında histeresis ilmikleri ve boşluk suyu basınçları deney sırasında çizdirilmiştir.

Japon San-ei Instrument firmasının SL30 model olarak ürettiği altı kanallı mor ötesi oscillograph çizici ile özel kağıda deney süresince sürekli olarak zamana bağlı boşluk suyu basıncı, yatay deplasman, düşey deplasman ve uygulanan yük değerleri çizdirilebilmektedir. (Şekil 3.4)

3.2.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Aleti

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



Şekil 3.4. Dinamik Deney Sistemleri Kayıt Birimleri

3.2.2.1. Deney Hücresi

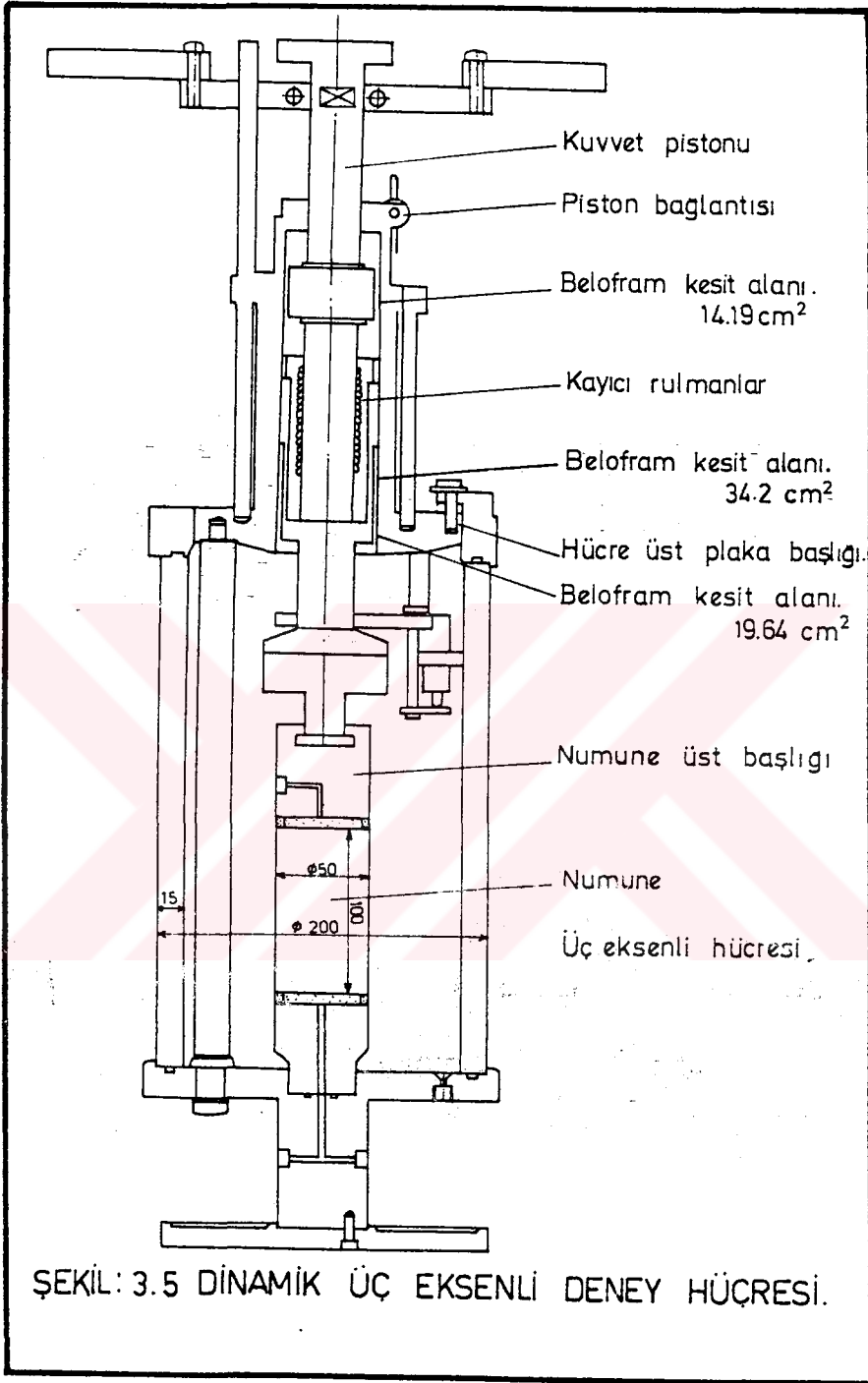
Üç eksenli deney hücresi 695 mm. yüksekliğinde olup ϕ 200 mm lik çelik bir tabana oturmaktadır. Bu ana tabanın 70 mm üzerinde yine çelikten yapılmış hücre taban platformu yer alır. Bu kısım yekpare tek parça olup, üst kısım üçlü saç ayak ile alt tabana oturtulup vidalanır. (Şekil 3.5).

Hücre silindiri 15 mm et kalınlığında ϕ 200 mm. çapında saydam pleksiglastan imal edilmiş olup, alt taban üzerindeki lastik ring üzerine oturur. Üst bağlantısı, çelikten yapılmış kapama ringinin yerleştirilip, üst gövdeye vidalanması ile sağlanır. 140 mm. yüksekliğinde, ϕ 70 mm. çapında ve 100 mm yüksekliğinde ve ϕ 50 mm çapında numuneler üzerinde deney yapılabilir. Hazırlanan numuneler metalden yapılmış alt ve üst başlık arasına konulur. Poröz taşlar, başlık içindeki yuvalara yerleştirilmiştir.

Üst başlık üstünde 2000 kN düşey yük ölçme kapasiteli bir yük ölçer ile numunede deney sırasında oluşabilecek küçük deplasmanları ölçmek için 2,5 mm kapasiteli LVDT tipi deplasman ölçer vardır. Hücre üst plâka başlığından sonra sürtünmeleri minimuma indiren kayırıcı rulmanlar içine kuvvet uygulama pistonu yerleştirilmiştir. Bu piston istenildiğinde mekanik bir kilit ile sabitleştirilir. Kayıcı rulmanların etrafında aşağıdan yukarı doğru 19.64 cm^2 , 34.20 cm^2 , 14.19 cm^2 kesit alanlı üç adet belofram yer alır.

Hücre üstünde, çevre basıncı ve düşey basınç uygulamak için iki giriş vardır. Bu kısımlar basınç tablosundan gelen hava hattı ile beslenir. Ayrıca hücreye su doldurulması sırasında hücre içinde sıkışan havayı dışarı atmak için bir vidadan yararlanılır.

Alt başlıkta dört adet su giriş/çıkış vanası vardır. Bunlar, hücreye su almak, numuneye ters basınç uygulamak ve drenaj için kullanılır. Çıkış devrelerinin birine boşluk suyu basıncını ölçmek için basınç ölçer yerleştirilmiştir.



3.2.2.2. Hidrolik Yükleme Ünitesi

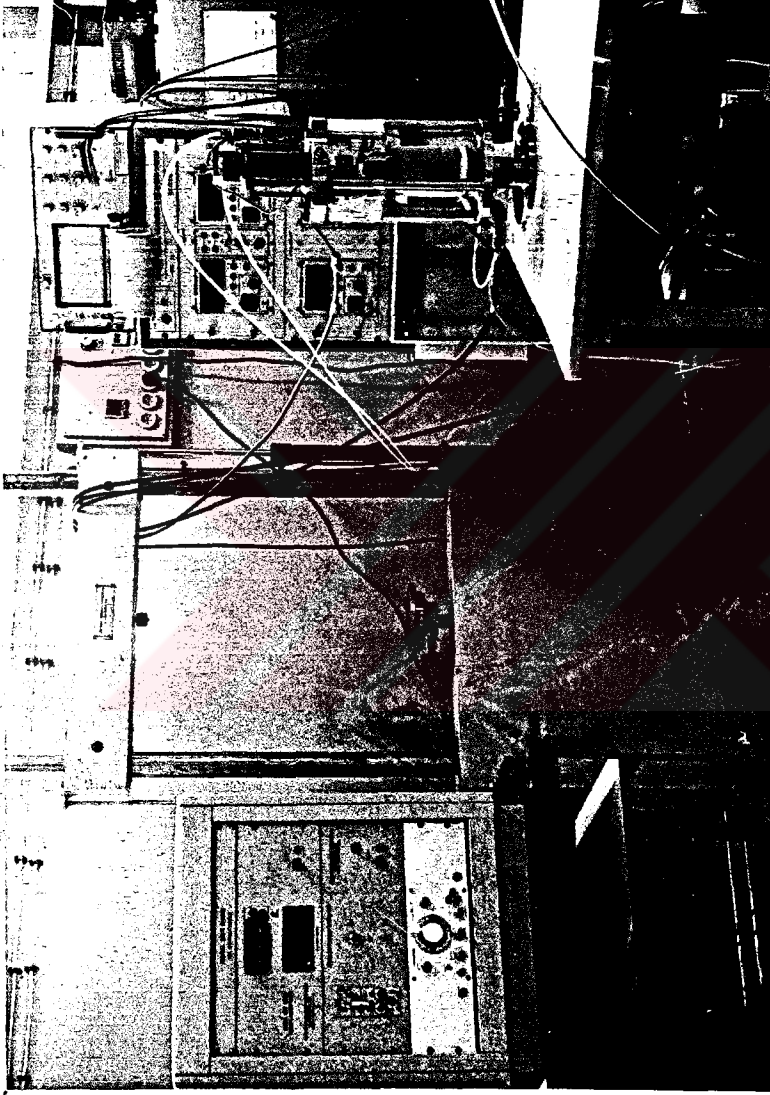
Dinamik yükleme ile ilgili büyüklüklerin ayarlanıp numuneye aktaran ünite, elektronik kontrol bölümü, hidrolik güç bölümü ve yükleme çerçevesinden oluşur.

Elektronik kontrol bölümü, sayısal okuyucular, servo kontrol birimi ve fonksiyon üreticisinden meydana gelir. Sayısal okuyucuda iki adet digital gösterge vardır. Göstergelerden biri uygulanan kuvveti, diğeri ise çevrim sayısını gözlemlemizi sağlar. Servo kontrol ünitesi, fonksiyon üreticisinden gelen işareti, isteğimize uygun değişikliklere uğratar. Ünitedeki SPAN anahtarı sistem dinamik yükünün genliğini ayarlar. STAT anahtarı ise işaretin statik seviyesini kontrol eder ve deney süresince sabit kalır. Bu üniteye ayrıca sistemin ayarlanabilmesi için gerekli potansiyometreler yer alır. Servo kontrol ünitesinde sinüsoidal, üçgen ve kare şeklinde yükleme işareti, fonksiyon üreticisi tarafından sağlanır. Uygulama frekansları 0.0001 Hz. ile 200 kHz arasında ayarlanabilir. (Şekil 3.6

Hidrolik güç ünitesi Amerikan The Lincoln Elektrik C.O. imali olup üç birimden oluşur. (Elektrik motoru-sabit basınç değişken hacimli pompa-servo vana).

Yükleme çerçevesi, kolon-kiriş çerçeve birimi, 1,5 cm hareket kapasiteli yükleme pistonu ve geri besleme iticisinden meydana gelir.

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



Şekil 3.6, Dinamik Üç Eksenli Yükleme Ünitesi

3.2.3. Çamur Konsolidasyon Aleti

Deneylerde kullanılacak numuneler çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmıştır. Aletin hücre kısmı 800 mm yüksekliğinde $\phi 180$ mm çapında olup PVC'den yapılmıştır. Bu hücre metal bir muhafaza içerisine alınmış olup dört ayakla yerden 20 cm. yükseltilmiştir. Üst kapama başlığı içinden düşü y kuvvet uygulama pistonu kılavuzlanarak geçer. Piston içine poroz taş yerleştirilmiş olup su çıkışı için drenaj musluğu konulmuştur. Hücre alt poroz taşının altında da bir drenaj musluğu vardır. Düşey yük, kuvvet pistonu üzerine geçirilen askıya ağırlık konularak uygulanır. (Şekil 3.7).

3.2.4. Diğer Aletler

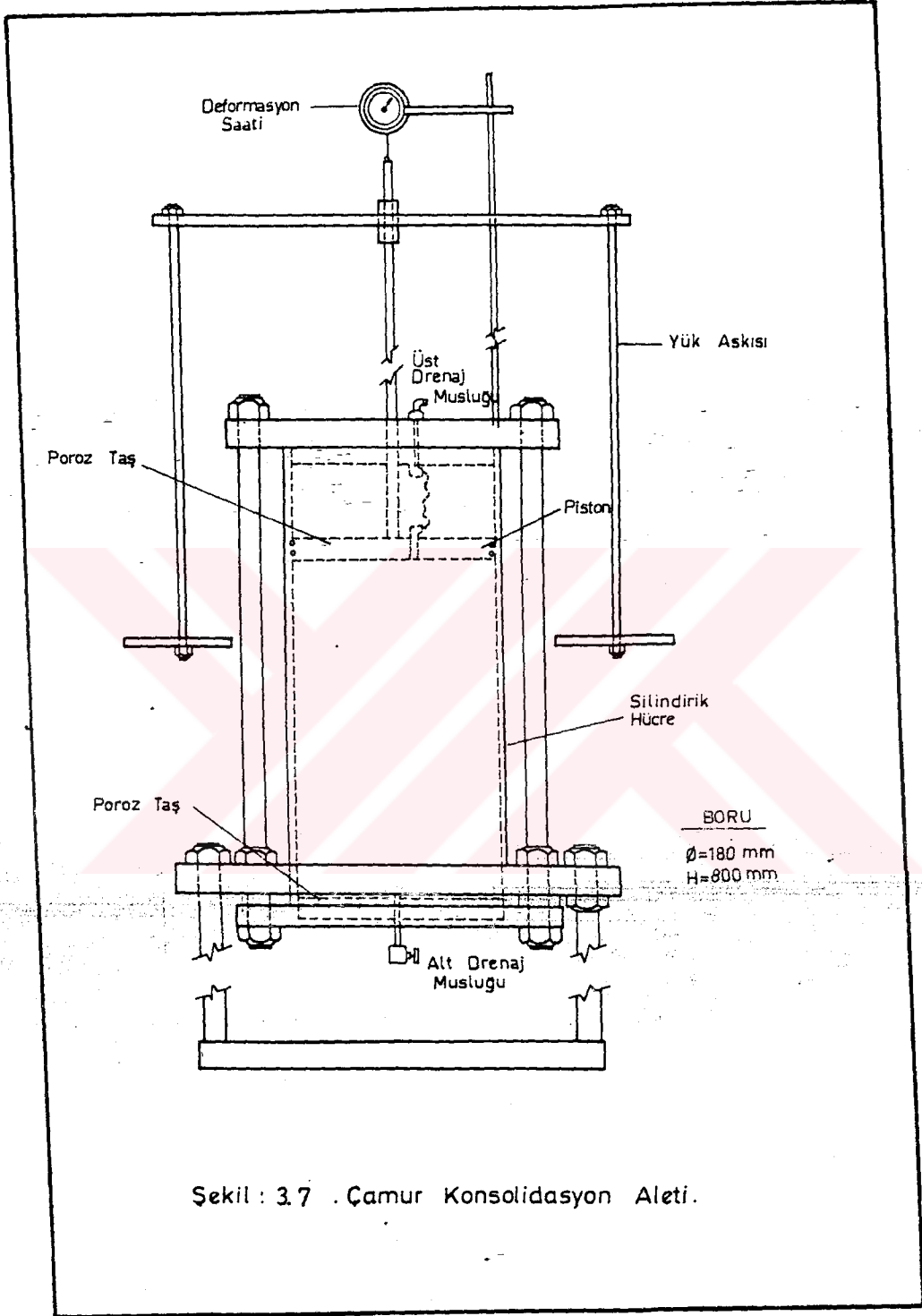
Deney malzemesinin endeks özelliklerini belirlemek için zemin mekaniği standart deney aletlerinden yararlanılmıştır. Konsolidasyon deneyleri Wykehan Farrance Eng. Ltd. firması imali odometrelerde, üç eksenli deneyler ise Norveç Geonor firması üretimi deney aletinde yapılmıştır.

3.3. DENEY MALZEMESİ

Deneylerde kullanılan malzeme UŞAK KAOLİN'i olup İstanbul Yıldız Porselen fabrikasından temin edilmiştir. Uşak kaolini üzerinde M.T.A. Enstitüsü tarafından yapılan analizler sonucu bulunan mineraller aşağıdaki Tablo 3.1.'de özetlenmiştir.

Tablo 3.1- Kaolin Mineral Özellikleri

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



Malzeme endeks özelliklerini belirlemek amacıyla çok sayıda standart laboratuvar deneyi yapılmış olup sonuçlar Tablo 3.2'de toplanmıştır.

Tablo 3.2. Kaolinin Endeks Özellikleri

Likit Limit %	Plastik Limit %	Plastisite indisi %	Dane Birim Hacim Ağ. kN/m^3	Dane çapı $<2\mu$ %	Aktivite	Zemin Cinsi
65.0	25.0	40.0	27.0	49.0	0.82	CH

Erguvanlı [10] tarafından yapılan çalışmada x-ışını difraksiyon analiz sonucu esas mineralin KAOLİNİT olduğu ve oldukça fazla kuvars içerdiği anlaşılmıştır.

Örselenmemiş (düzlemsel izotropik) ve yoğrularak (izotropik) hazırlanan zemin örnekleri üzerinde 800 kN/m^2 'ye kadar yükleme ve boşaltılan konsolidasyon deneyi yapılmış olup 100 kN/m^2 basınç değerinde elde edilen geoteknik büyüklükler Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Kaolin Numunelerin Geoteknik Özellikleri

Konsolidasyon Basıncı $\sigma_c = 100 \text{ kN/m}^2$	Düzlemsel İzotropik Numune	İzotropik Numune
Hacimsal sıkışma katsayısı (m^3/kN)	0.051	0.070
Permeabilite katsayısı (cm/sn)	0.78×10^{-8}	1.48×10^{-8}
Konsolidasyon katsayısı (cm^2/sn)	1.53×10^{-4}	2.13×10^{-4}
Boşluk oranı	1.07	1.18
Su muhtevası (%)	45.0	46.0

Kırılma hipotezinde kullanılmak üzere numuneler üzerinde statik basit kesme ve statik üç eksenli deneyler yapılmıştır. 100 kN/m^2 düşey basınç altında yapılan drenajsız basit kesme ve 100 kN/m^2 hücre basıncında yapılan drenajsız üç eksenli basınç deneylerinde %20 deformasyon mertebesine kadar devam edilmiş ve aşağıda Tablo 3.4 de gösterilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 3.4. Kaolin Numunelerin Mukavemet Parametreleri

DENEY / NUMUNE		Düzlemsel İzotropik Numuneler	İzotropik Numuneler
Basit Kesme Deneyi	$\phi_{cm} \text{ (}^\circ\text{)}$	16°	19°
	$\tau_{maks} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	28.	33.
Üç Eksenli Basınç Deneyi	$\phi_{cm} \text{ (}^\circ\text{)}$	14°	18°
	$\Delta\sigma_{maks} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	70.	87.

3.4. NUMUNE HAZIRLANMASI

Numune hazırlamak için, çamur konsolidasyon aletinden yararlanılır. Kurutulan kaolin ahşap tokmak ile dövülür ve No.40 (ASTM) eleğinde elenerek elde edilen kuru malzeme, saf su ile karıştırılır. Başlangıç su muhtevası $w = \%250$ olan homojen bir çamur elde etmek için karıştırma işlemi sık sık tekrarlanır. Üç günlük bekleme sonunda, çamur konsolidasyon aletinin 12 cm. çapında, 80 cm. yüksekliğinde olan hücresine yerleştirilir. Hücre altında ve üstündeki poröz taşların üzerine filtre kağıtları konulur. Hücre içine giren pistonun kollarına, asılan ağırlıklarla kademeli olarak basınç verilmesi uygulanır. Alt ve üst drenaj musluklarından çıkan ve oturma ölçümleri ile konsolidasyon denetlenir. Numuneler, konsolidasyon basıncı, $P = 10.0 \text{ kN/m}^2$ 'ye ulaştığında, oturmalar ve su çıkışları durduğu zaman aletten çıkarılır. Konsolidasyonun tamamlanma süresi yaklaşık bir aydır. Bu süre sonunda yaklaşık 20 cm. yüksekliğinde,

w = % 45 su muhtevasında zemin numunesi elde edilir. Su muhtevası değişimini önlemek amacı ile ıslak bezlere sarılarak desikatörlerle konur.

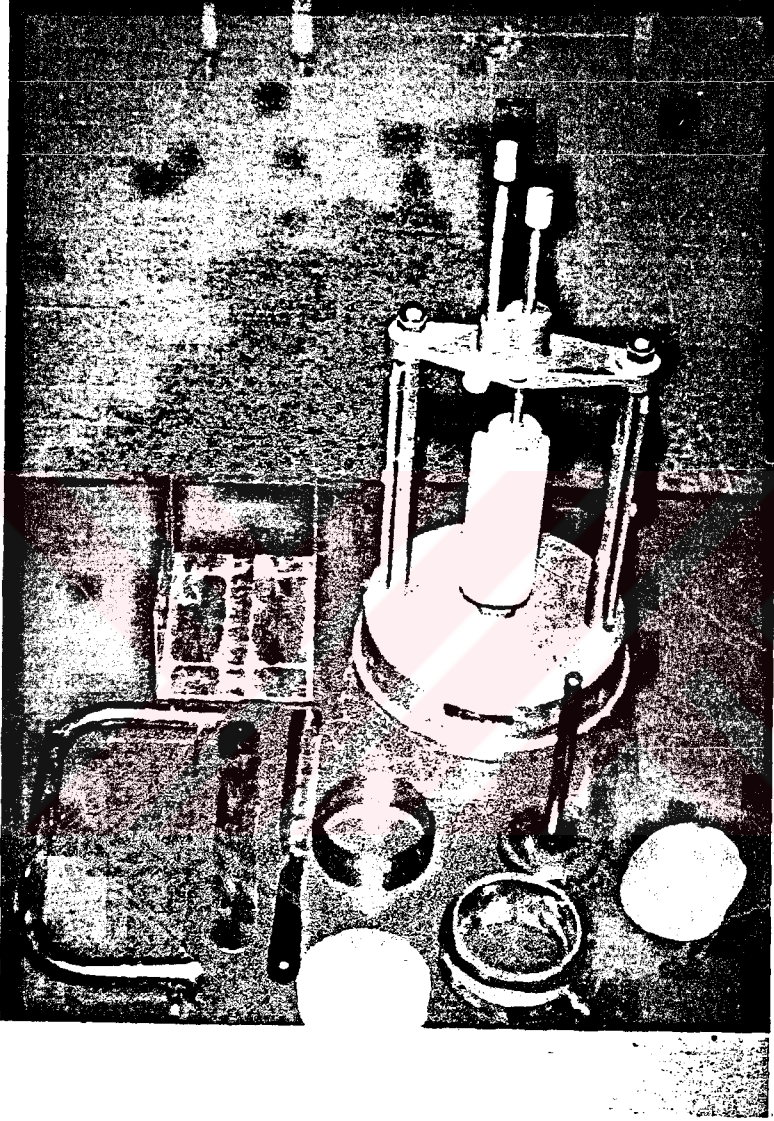
Deneylerde, düzlemsel izotropik (örselenmemiş) ve izotropik (örselenmiş) numuneler kullanılmıştır. Dinamik basit kesme deneyi için numune hazırlamada 70 mm. çapında, 30 mm. yüksekliğinde çelik ring kullanılır. Vazelinlenen çelik ring, çamur konsolidasyon aletinden çıkan zemine dik olarak bastırılarak numune alınır. İzotropik numuneler ise artık malzemenin homojen yoğrulması ve çelik ringe doldurulması ile elde edilir. Kullanma anında piston ile çıkarılan numune tartılır ve boyu ölçülür.

Dinamik üç eksenli deney numuneleri için ana numune 10 cm. yüksekliğinde kesilir. Üst tabana 5 cm. çapında üç adet şablon yerleştirilir ve 120° lik açılar ile spaküla yardımıyla üç dilime ayrılır. Elde edilen dilimler, numune oluşturma aletinde kıl testere ile 5 cm. çapında, 10 cm. yüksekliğinde silindirlere dönüştürülür. Deney öncesi numuneler tartılarak deneye hazır hale getirilir. İzotropik numuneler ise, artık numune yoğrularak homojen silindir haline getirilip, numune oluşturma aletinde kesimi ile hazırlanılır. Şekil 3.8, tüm numune hazırlama aletlerini toplu halde göstermektedir.

3.5. DENEYLERİN YAPILIŞI

3.5.1. Dinamik Basit Kesme Deneyi

Deneyle ilgili ön hazırlıklara sistem basınçlı havasını sağlayacak kompresörün çalıştırılmasıyla başlanır. 70 mm. çapında, 30 mm yüksekliğinde hazırlanmış ve tartımı yapılan deney numunesi alınarak deney hücresi alt kaidesine konur ve çelik silindir yardımı ile esnek membran geçirilir. Çelik silindir çıkarılarak özenle üst başlık yerleştirilir. Başlıklarla membran arasında suyun sızmasını önlemek için ikişer adet O- ring takılır. Bu işlemler sırasında numune içinde hava kalmamasına özel itina gösterilmiştir. Gerekli durumlarda, numune içerisinden su geçirilerek veya vakum uygulanarak



Şekil 3.8. Numune Hazırlama Aletleri

varsa havanın dışarı atılması sağlanır. Deney hücresi yerine yerleştirilerek, hücre başlığı kapatılır ve dört adet bağlantı civatası ile sabitleştirilir.

Ön hazırlıkların tamamlanıp, numunenin yerleştirilmesinden sonra düşey dengeleme basıncı 60 kN/m^2 'ye yükseltilerek numune kaldırılır ve üst başlığın yatay şaftıyla bağlantı vidaları sıkıştırılır. Yükseklik boy okuması yapılarak kayıt edilir ve hücreye, numune üst başlık hizasına kadar su alınır. Üst kapama vidaları takılarak sisteme basınç verilebilir duruma getirilir.

Ters basınç vanaları açılır, çevre basıncı 50 kN/m^2 değerine yükseltilir. Sistemde ters basınç, çevre basıncı ve düşey dengeleme basınçları birbirine bağlı olup, ters basınç regülatöründen kumanda edilmektedir. Bu regülatör yavaş yavaş çevrilerek numuneye izotropik gerilme uygulanır. 300 kN/m^2 basınç değerine ulaşıldığı zaman, çevre basıncı bağımsız olarak arttırılır ve 400 kN/m^2 'ye çıkartılır. Böylece numune $\sigma_c = 100 \text{ kN/m}^2$ efektif basınç altında konsolidasyona bırakılır. Bu durumda çevre basıncı 400 kN/m^2 , ters basınç 300 kN/m^2 düşey dengeleme basıncı ise 460 kN/m^2 değerini göstermektedir.

Deney numunesi yaklaşık 24 saat 100 kN/m^2 değerindeki efektif basınç altında tutulur. Konsolidasyonun tamamlanması, drenajlar kapatıldığında boşluk suyu basıncının değişmemesi veya kapalı büret su seviyesinin sabitleşmesi ile kontrol edilir.

Konsolidasyonun tamamlanıp, basınçların denge durumuna gelmesiyle numunenin suya doygunluğunun kontrolü yapılır. Bunun için ters basınç vanaları kapatılır, çevre basıncı $\Delta\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ arttırılır. Çevre basıncındaki bu artış boşluk suyu basınçlarına yansır. $B = \Delta U / \Delta\sigma > \%95$ ise numuneler suya doygun kabul edilerek dinamik deneylere geçilmek için ters basınç vanaları açılır ve oluşan b.s.b. dengelenmesi beklenir.

Amplifikatörlerin sıfırlama ve ölçek kontrolü yapılır, çizicilerin ölçekleri ayarlanır ve tekrarlı yatay yük uygulama birimi çalıştırılır. Deney sırasında uygulanacak frekans, genlik ve yükleme

şekli ile ilgili komutlar bu birime verilir. Statik yatay yük 250 kN/m^2 ye yükseltilerek dinamik yük uygulama ünitesi ile numune üst başlığının bağlı olduğu yatay şaft birbirine bağlanır. Numune üzerinde ilâve yük var ise alınır. Üst başlık tesbit civatası gevşetilir. Son konsolidasyon okuması kayıt edilir.

Deney için tüm hazırlıklar tamamlanmıştır. Drenajlar kapatılır, çizici ve kayıt edici çalıştırılır, yükleme ünitesi serbest bırakılarak deney başlatılır. Deney sırasında belirli çevrimlerde histerisis ilmkleri çizdirilmiş ve ayrıca amplifikatörlerden alınan okumalar kayıt edilmiştir.

Deneyler, düşük gerilme seviyelerinde b.s.b. sabitleştiğinde, yüksek gerilme seviyelerinde ise deformasyonlar %20 mertebesine ulaştığında sona erdirilmiştir. Deney sonunda dinamik yükleme kapatılır. Yatay şaft bağlantısı açılarak statik yük düşürülür. Üst başlık tesbit civatası sıkıştırılır ve hücre içindeki su boşaltılır. Son olarak numune çıkartılır ve tartılır. Su muhtevasının belirlenmesi için etüve konur.

3.5.2. Dinamik Üç Eksenli Deney

Deney için hazırlanmış 100 mm yüksekliğinde 50 mm çapındaki numunelere, drenaj boyunu kısaltmak amacı ile delikli filtre kağıdı sarılır. Özel çelik silindir yardımı ile esnek membran numune etrafına geçirilir. Alt ve üst başlıklar ile drenaj hatlarında hava kalmaması için su geçirilir. Numune hücre içerisine yerleştirilir. Başlıklarla membran arasından suyun sızmasını önlemek için ikişer adet lastik halka takılır. Yük uygulama pistonu kilitlenir.

Şeffaf plastik hücre silindiri geçirilir ve üst boşluk çerçevesi takılarak civata bağlantıları yapılır. Hücre içerisine üst başlık üstüne kadar su alınır. Bu sırada hava sıkışmasını önlemek için hava alma vidası açıktır. Bundan sonraki aşamada numuneye basınç uygulanır. Dinamik basit kesme deneyinde olduğu gibi numune 100 kN/m^2 efektif basınç altında konsolidasyona bırakılır. Konsolidasyon sonrası suya doygunluk kontrolü yapılır. Numune suya

doygunsa deneye başlanır. Dinamik yükleme uygulanacak zemin numunesinin içine yerleştirildiği dinamik üç eksenli deney hücresi, kolon-kiriş çerçeve ünitesine konur. Alttan sıkıştırma ile bağlanan hücre üstten vida bağlantısı ile yük pistonundan çerçeveye tesbit edilir.

Elektronik kontrol ünitesi çalıştırılarak 20 dakika kadar ısıtılır. Bu bölümde yükleme şekli, genliği ve frekansı ayarlanır. Diğer taraftan amplifikatör, çizici ve osilografta gerekli kontrol ve düzenlemeler yapılır. Deney ile ilgili tüm hazırlıklar tamamlandığında çizici ve kayıt alıcılar çalıştırılır, drenajlar kapatılır ve dinamik yük uygulamasına geçilir. Deney sırasında gerekli kayıt ve çizdirme işlemleri yapılır.

Deneylerin sona erdirmeye kriteri, dinamik basit kesme deneyinde olduğu gibi alınmıştır. Deney sonunda dinamik yük uygulamasına son verilir. Numune hücreden çıkartılarak gereken tartım ve boy ölçümü yapılır. Su muhtevasını belirlemek için etüve konulur.

3.6. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu araştırmada kullanılan Uşak Kaolin'i üzerinde standart tanıma ve sınıflandırma, ödometre, statik mukavemet tayini ve bir takım dinamik deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneyler aşağıda anlatılan şekilde değerlendirilmiştir.

3.6.1. Standart Tanıma ve Sınıflandırma Deneyleri

Deney malzemesi endeks özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan kıvam limitleri deneylerinde No.40 elek altı malzeme kullanılmış olup, çok sayıda standart deney yapılarak bunların ortalamaları alınmıştır. Kıvam limitleri değerlerine göre, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi ile sınıflama yapılmıştır. Dane birim hacim ağırlığı piknometre deneyi ile belirlenmiştir. Antikoagülan madde olarak sodyum silikat ilavesiyle yapılan hidrometre deneyi ile kil yüzdesi belirlenmiş olup kil aktivitesi,

$$A_c = I_p / \text{kil (\%)}'si \quad (3.1)$$

olarak hesaplanmıştır.

3.6.2. Ödometre ve Statik Mukavemet Deneyleri

Ödometre deneyleri yüklemeli-boşaltmalı olarak yapılmış olup, her yük kademesinde konsolidasyon tamamlanana kadar ve en az 24 saat beklenilmiştir. Oturma zaman ölçümleri hassas olarak alınmış, sonuçlar boşluk oranı-basınç, $(e - \log p)$, ve boy kısalması-basınç, $(\Delta H - \log P)$, diyagramlarının değerlendirilmesinden hacimsel sıkışma katsayıları hesaplanmıştır. $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$ basınç kademesinde boy kısalması-zaman, $(\Delta H - \log t)$, diyagramları çizilerek, Casagrande grafik yöntemi ile konsolidasyon katsayısı belirlenmiştir.

Statik olarak yapılan basit kesme deneylerinde, birim kaymalar,

$$\gamma = \Delta L / H_0 \quad (3.2)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Yatay şekil değiştirmeler, ΔL , kayıt ölçerler ile sürekli kayıt edilmiş, konsolidasyon sonrası numune boyu, H_0 , başlangıç boyu olarak alınmıştır. Deney sırasında numune üzerine uygulanan kesme kuvveti, T , numune alanı, A , belli olduğundan kayma gerilmeleri,

$$\tau = T/A \quad (\text{kN/m}^2) \quad (3.3)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Bu değerler yardımı ile numunedeki gerilme-şekil değiştirme, $(\tau - \gamma)$, davranışı belirlenmiştir.

Statik üç eksenli deneylerde, birim boy değiştirmeler,

$$\epsilon = \Delta H / H_0 \quad (3.4)$$

H_0 , konsolidasyon sonu numune boyudur. Gerilme hesaplarında ise,

$$A = A_0 / (1 - \epsilon) \quad (3.5)$$

alan düzeltmesi kullanılmış olup, uygulanan kuvvet bu düzeltilmiş alana bölünerek gerilmeler hesaplanmıştır. Gerilme-birim boyu değişimi, $(\sigma-\epsilon)$ diyagramları ile gerilme şekil değiştirme davranışları incelenmiştir.

3.6.3. Dinamik Deneyler

Dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneylerin değerlendirilmesi, statik deneyler üzerinde yapılan değerlendirmenin aynıdır. Deney sonuçlarının toplu değerlendirmeleri ise, çevrim sayısı ile kayma gerilmesi, normal gerilme ve boşluk suyu arasında çizilen, $(\tau-N)$, $(\sigma-N)$, $(\tau-N)$, diyagramları, gerilme oranları ile boşluk suyu basıncı, birim kayma ve birim deformasyon arasında çizilen, $(u-\tau/\tau_f)$, $(u-\sigma/\sigma_f)$, $(\gamma-\tau/\tau_f)$, $(\epsilon-\sigma/\sigma_f)$ diyagramları ile yapılmıştır.

3.7. SONUÇ

Zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesinde, genellikle laboratuvarlarda dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemleri kullanılmaktadır. Bu araştırmada bu iki deney sistemi ile deneyler gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deney malzemesi olarak Uşak kaolin'i kullanılmıştır. Standart laboratuvar deneyleri ile endeks özellikleri, geoteknik ve mukavemet parametreleri belirlenen kaolinden dinamik deneyler için kullanılacak numuneler çamur konsolidasyon aleti ile hazırlanmıştır. Başlangıç su muhtevası %250 olan kaolin çamuru 10.0 kN/m^2 basınç altında konsolide edilerek %45 su muhtevasında deneye hazır hale getirilmiştir. Değişik frekans ve genliklerde, dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deneyler ile düzlemsel izotropik (örselenmemiş) ve izotropik (örselenmiş) numuneler üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çevrim sayısı, kayma gerilmesi, boşluk suyu basıncı arasında gerilme oranı ve frekansa bağlı diyagramlar çizilerek değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. GİRİŞ

Normal konsolide killerin tekrarlı yükler etkisi altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışları ile dinamik mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla, tekrarlı sinusoidal yükleme biçimi kullanılarak farklı gerilme genliklerinde ve frekanslarda dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney aletinde seri deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kaolin numuneler iki farklı şekilde hazırlanmıştır. Birinci grup deneyler, çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmış düzlemsel izotropik (örselenmemiş) numuneler üzerinde yürütülmüştür. İkinci grup deneyler de ise, yine çamur konsolidasyon aletinden çıkan numunelerden yoğrularak hazırlanmış izotropik (örselenmiş) numuneler üzerinde yapılmıştır.

Deneylerin sonuçları, dinamik basit kesme deneyleri düzlemsel izotropik ve izotropik, dinamik üç eksenli deneyler de düzlemsel izotropik ve izotropik olmak üzere dört ayrı grupta değerlendirilecek ve bu değerlendirmelerin sonunda grupların birbirleri ile karşılaştırılması yapılarak deney aletlerinin ve numune hazırlama yöntemlerinin etkisi açıklanacaktır.

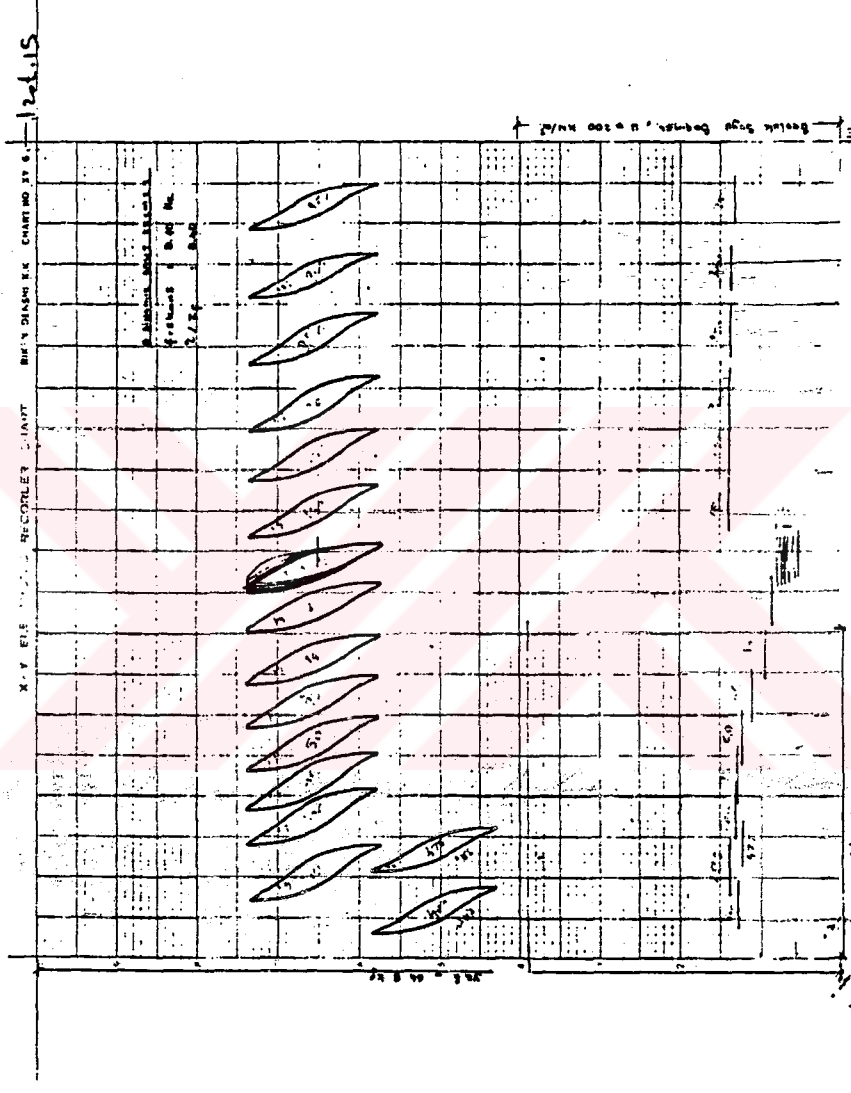
4.2. DİNAMİK BASİT KESME DENEYLERİ

Dinamik basit kesme deney aletinde, düzlemsel izotropik ve izotropik olarak hazırlanmış deney numuneleri, $\sigma_c = 100 \text{ kN/m}^2$, hücre basıncında konsolide edildikten sonra 1.00, 0.5, 0.50, 0.10,

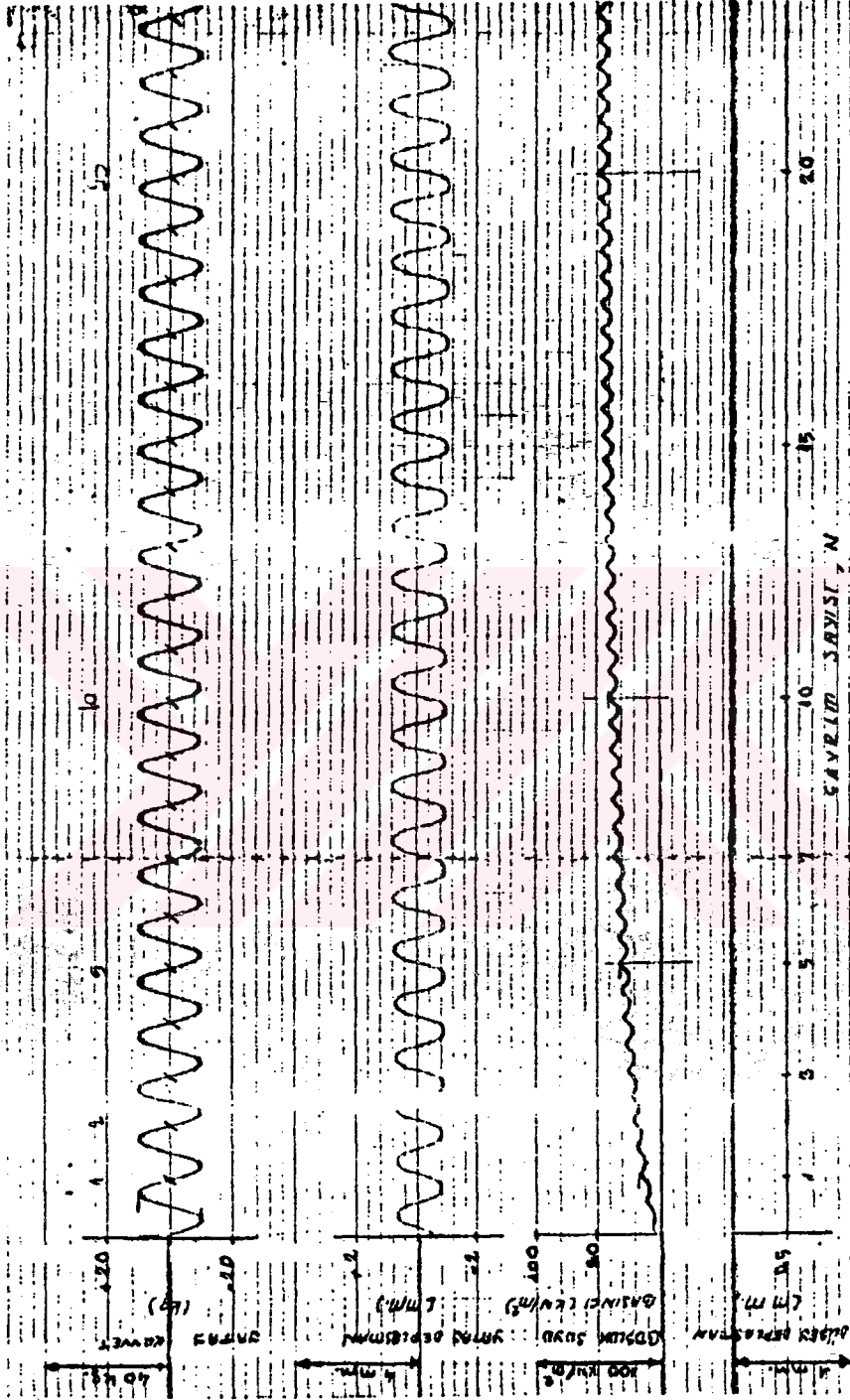
0.01 Hz frekanslarında ve farklı kayma gerilmesi genliklerinde deneye tabii tutulmuşlardır. Deney sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla aynı frekans ve aynı kayma gerilmesi genliğinin de hem düzlemsel izotropik hem de izotropik numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Yapılmış olan toplam 40 adet deneyin karşılaştırılmalı değerlendirilmesi frekansa göre Tablo 4.1'de, kayma gerilmesi oranına göre Tablo 4.2'de özet olarak verilmiştir. Tablolara deney frekansı, kayma gerilmesi oranı ve çevrim sayısı ile, deneyler sırasında meydana gelen boşluk suyu basıncı ve birim kaymanın başlangıç ve en son değerleri işlenmiştir.

Dinamik basit kesme deneylerinde, üç kanallı x-y çizicisiyle boşluk suyu basıncı-kayma gerilmesi-birim kayma değişimleri izlenmiştir. Tipik bir deney kaydı olan Şekil 4.1'de, çevrim sayısına göre histeresis ilmiklerinin değişimi görülmektedir. Ayrıca altı kanallı mor ötesi oscillograph çizici ile zamana bağlı boşluk suyu basıncı, yatay ve düşey deplasman, uygulanan yük değerleri çizdirilmiştir (Şekil 4.2).

Bu bölümde, dinamik basit kesme deney aletinde, düzlemsel izotropik ve izotropik numuneler üzerinde yapılan deneyler ayrı ayrı değerlendirilecek ve elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılacaktır.



Şekil 4.1. Çevrim Sayısı İle Histeresis İlmikleri ve Boşluk Suyu Basıncının Değişimi



Şekil 4.2. Zamana Bağlı Çizdirilen Tipik Bir Deney Kaydı

Tablo 4.1. Dinamik Basit Kırma Deney Sonuçlarının Frekansa Göre Toplu Değerlendirilmesi

Düzlemsel İzotropik				İzotropik			
Gerilme Oranı z/z_f	Çevrim Sayısı N	b.s.b. kN/m^2	γ %	Gerilme Oranı z/z_f	Çevrim Sayısı N	b.s.b. kN/m^2	γ %
FREKANS = 0.01 Hz.							
0.40	40	4-30	1.7-1.9	0.40	100	8-40	0.9-1.1
0.50	100	6-60	2.0-3.2	0.50	125	12-65	1.9-2.5
0.60	100	12-68	4.5-8.0	0.60	50	20-75	3.5-6.5
0.70	100	17-75	5.0-12.0	0.70	55	25-80	5.2-10.0
0.80	30	25-85	5.5-28.0	0.80	40	27-88	6.0-26.0
FREKANS = 0.10 Hz.							
0.30	200	4-25	0.6-0.7	0.30	500	2-40	0.3 sbt
0.40	400	6-45	0.9-1.1	0.40	500	3.50	0.7-1.2
0.50	250	8-50	1.6-2.3	0.50	300	5.60	1.7-2.6
0.60	500	10-70	3.8-13.0	0.60	300	10-75	3.2-7.2
0.70	300	12-80	5.0-20.0	0.70	150	12-80	5.4-15.0
FREKANS = 0.50 Hz.							
0.30	1000	3-35	0.35 sbt	0.30	1000	2-45	0.25 sbt
0.40	1000	4-40	0.5-0.9	0.40	1000	2-52	0.4-0.7
0.50	500	5-50	1.0-1.4	0.50	2500	3-75	0.8-2.4
0.60	1000	6-70	2.4-15.0	0.60	1000	6-80	1.6-6.0
0.70	500	9-80	4.0-30.0	0.70	150	12-80	3.5-15.0
0.80	65	10-80	6.0-26.0	0.80	100	16-80	4.4-24.0
FREKANS = 1.00 Hz.							
0.40	1000	2-30	0.3-0.4	0.40	2000	5-52	0.2-0.4
0.50	2500	3-50	0.7-1.2	0.50	2500	2-70	0.5-1.0
0.60	2500	4-60	1.7-8.0	0.60	1000	5-82	1.1-1.8
0.70	100	6-70	2.5-10.0	0.70	150	10-80	2.0-8.0

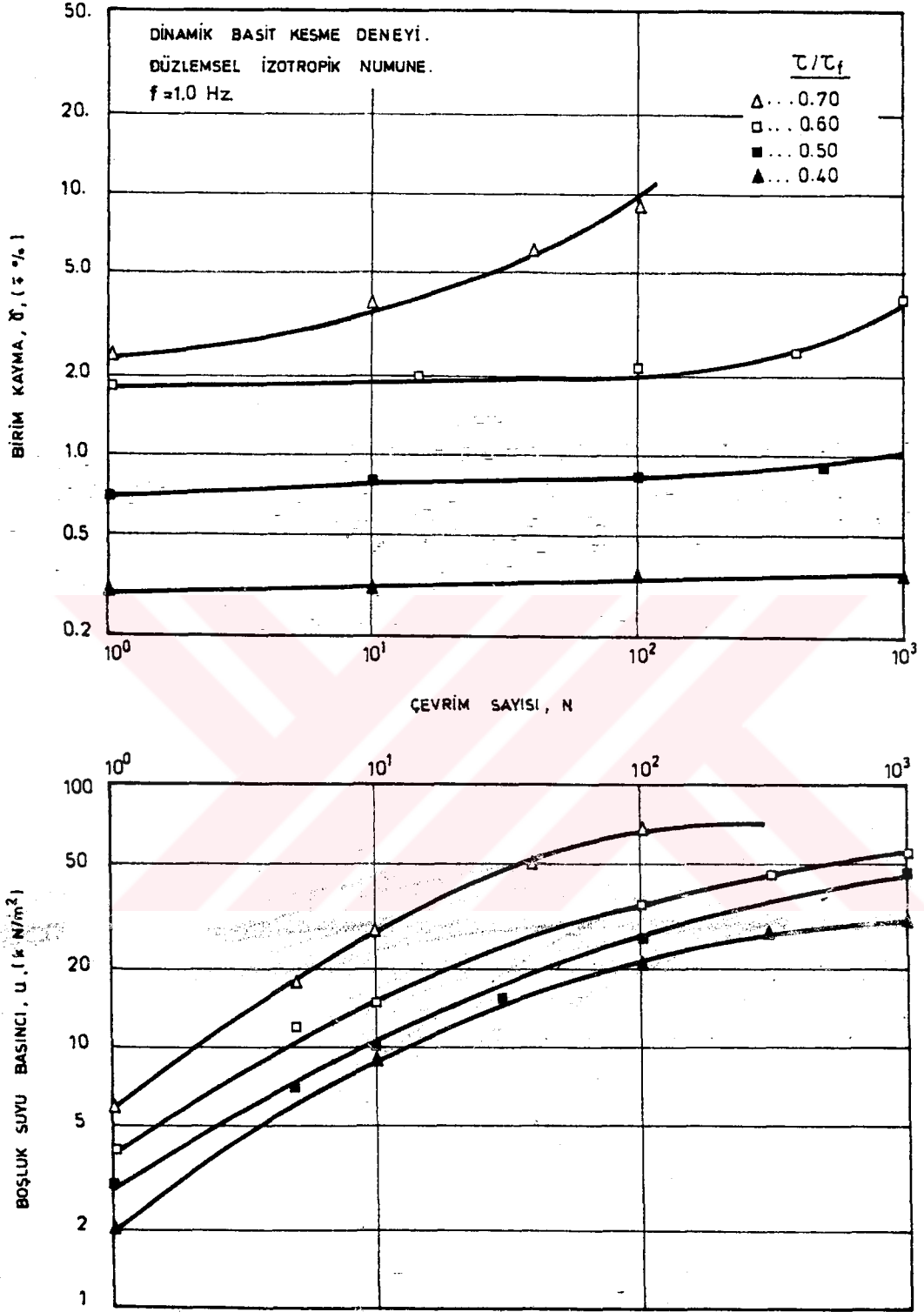
Tablo 4.2. Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçlarının Kayma Gerilmesi Oranına Göre Toplu Değerlendirilmesi

Düzlemsel İzotropik				İzotropik			
Frekans f Hz.	Çevrim Sayısı N	b.s.b. kN/m ²	γ %	Frekans f Hz.	Çevrim Sayısı N	b.s.b. kN/m ²	γ %
KAYMA GERİLMESİ ORANI, $z/z_f = 0.30$							
0.10	200	4-25	0.6-0.7	0.10	500	2-40	0.30 sbt
0.50	1000	3-35	0.35 sbt	0.50	1000	2-45	0.25 sbt
KAYMA GERİLMESİ ORANI, $z/z_f = 0.40$							
0.01	40	4-30	1.7-1.9	0.01	100	8-40	0.9-1.1
0.10	400	6-45	0.9-1.1	0.10	500	3-50	0.7-1.2
0.50	1000	4-40	0.5-0.9	0.50	1000	2-52	0.4-0.7
1.00	1000	2-30	0.3-0.4	1.00	1000	5-42	0.2-0.4
KAYMA GERİLMESİ ORANI, $z/z_f = 0.50$							
0.01	100	6-60	2.0-3.2	0.01	125	12-65	1.9-2.5
0.10	250	8-50	1.6-2.3	0.10	300	5-60	1.7-2.6
0.50	500	5-50	1.0-1.4	0.50	2500	3-75	0.8-2.4
1.00	2500	3-50	0.7-1.2	1.00	2500	2-70	0.5-1.2
KAYMA GERİLMESİ ORANI, $z/z_f = 0.60$							
0.01	100	12-68	4.5-8.0	0.01	50	20-75	3.5-6.5
0.10	500	10-70	3.8-13.0	0.10	300	10-75	3.2-7.2
0.50	1000	6-70	2.4-15.0	0.50	1000	6-80	1.6-6.0
1.00	2500	4-60	1.7-8.0	1.00	2000	5-82	1.1-1.8
KAYMA GERİLMESİ ORANI, $z/z_f = 0.70$							
0.01	100	17-75	5.0-12.0	0.01	55	25-80	5.2-10.0
0.10	300	12-80	5.0-20.0	0.10	55	12-80	5.4-18.0
0.50	500	9-80	4.0-30.0	0.50	150	12-80	3.5-15.0
1.00	100	6-70	2.5-10.0	1.00	150	10-80	2.0-8.0
KAYMA GERİLMESİ ORANI, $z/z_f = 0.80$							
0.01	30	25-85	5.5-28.0	0.01	40	27-88	6.0-26.0
0.50	65	10-80	6.0-26.0	0.50	100	16-80	4.4-24.0

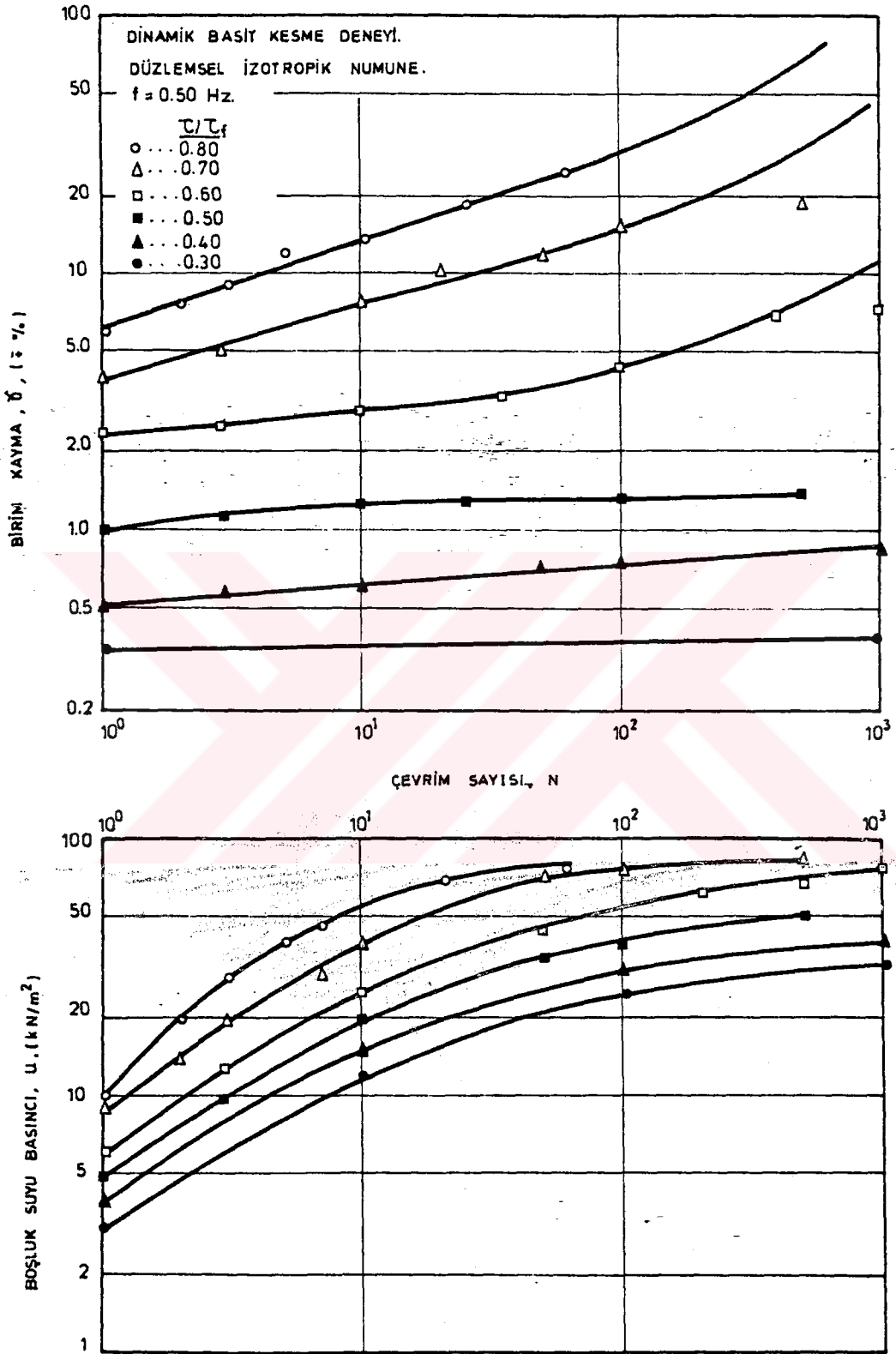
4.2.1. Dinamik Basit Kesme Düzlemsel İzotropik Numunelerle İlgili Deney Sonuçları

Dinamik basit kesme deney alatinde, düzlemsel izotropik numuneler üzerinde dört değişik frekansta, (1.00, 0.50, 0.10, 0.01 Hz), altı değişik gerilme oranında, (0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80), toplam 20 adet deney yapılmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, meydana gelen boşluk suyu basınçları ile birim kaymalara; gerilme oranı, çevrim sayısı ve frekansın etkisi ayrı ayrı gözönüne alınmıştır.

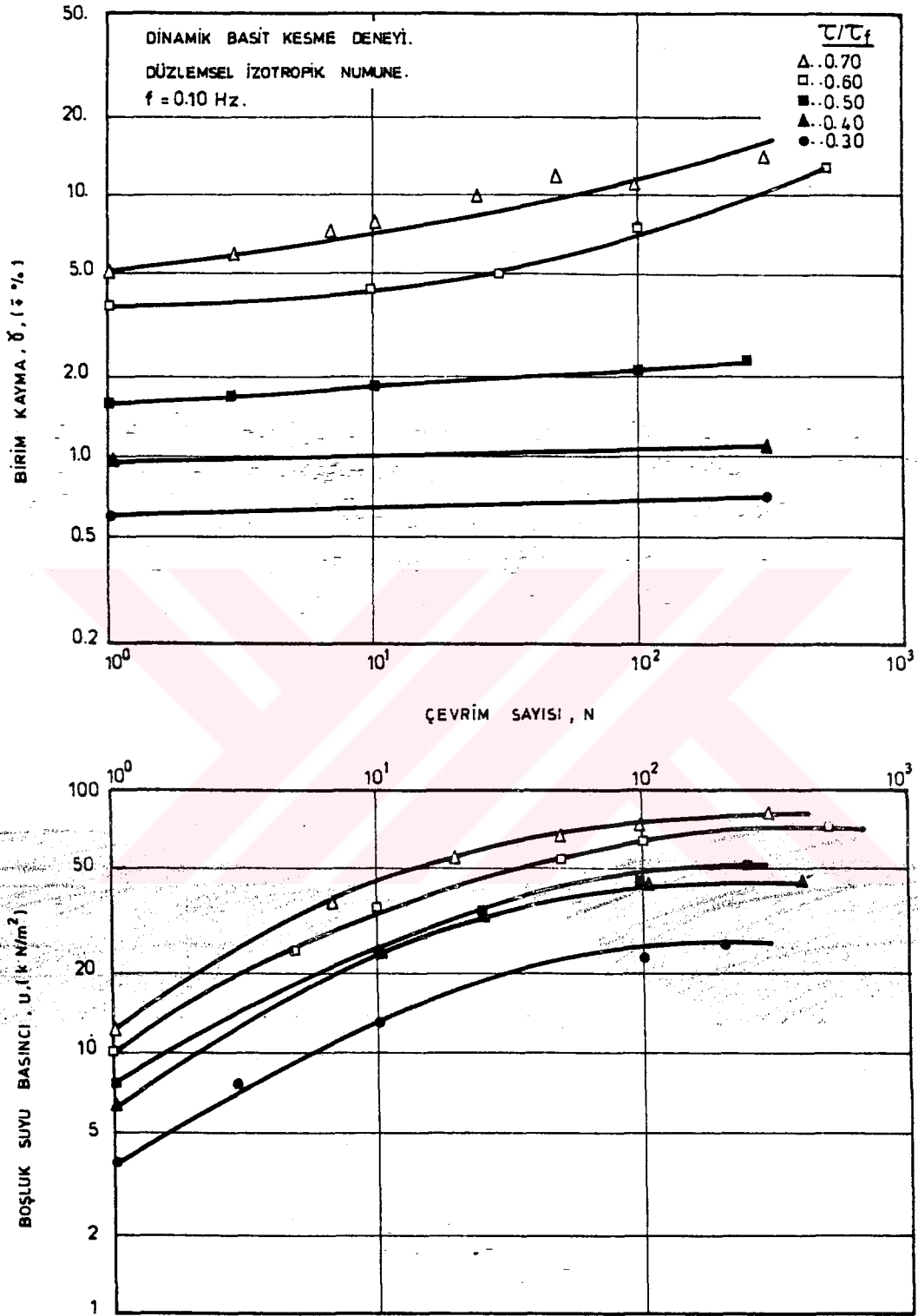
Kayma genliğinin etkisini araştırmak için, deney sonuçları, aynı frekansta farklı gerilme oranlarında değerlendirilmiştir. Şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6.'da birim kayma γ , ve boşluk suyu basıncının, u , çevrim sayısına, N , bağlı değişimleri görülmektedir. Burada numunelere uygulanan tekrarlı kayma gerilmesi genliği, τ , nümune özelliklerinden bağımsız hale getirmek için, statik kayma mukavemetine, τ_f , oranı olarak tanımlanmıştır. Eğrilerin incelenmesinde ilk göze çarpan özellik, aynı frekansta, gerilme oranındaki artımlar, oluşan boşluk suyu basınçlarını ve birim kaymaları arttırmasıdır. Dört ayrı frekans değerinde de aynı davranış biçimi görülmektedir. Gözlenebilen diğer bir ortak özellikte, dinamik kayma mukavemeti olarak tanımlanabilecek bir kritik kayma gerilmesi genliğinin olmasıdır. Bu kritik genlik seviyesi yaklaşık olarak gerilme oranının, τ/τ_f , % 50'si civarındadır. Bu değerden küçük genliklerde yapılan deneylerde, ($\tau/\tau_f = 0.40 - 0.50$), birim kaymalardaki artımlar sınırlı kalmaktadır. $\tau/\tau_f < 0.30$ değerlerinde ise birim kaymalarda sabitleşme gözlenmekte, büyüme meydana gelmemektedir. Kritik kayma genliğinin altındaki gerilme oranlarında yapılan deneylerde boşluk suyu basınçlarında önemli artışlar oluşmamaktadır. $\tau/\tau_f \geq 0.60$ değerlerinde ise birim kaymaların ve boşluk suyu basınçlarının hızla arttığı gözlenmiştir. Boşluk suyu basınçları her gerilme seviyesinde, ilk 20-30 çevrimde hızla artmakta, bundan sonra artışlar yavaşlamakta ve yaklaşık 100 çevrimde sabitleşme eğiliminde olduğu görülmüştür. Dikkati çeken diğer bir özellikte, kritik kayma genliğine yakın değerlerde kayma gerilmesi uygulanması halinde meydana gelen birim kaymalar sınırlı kalırken, oluşan boşluk suyu basınçları yüksek değerlere çıkabilmektedir.



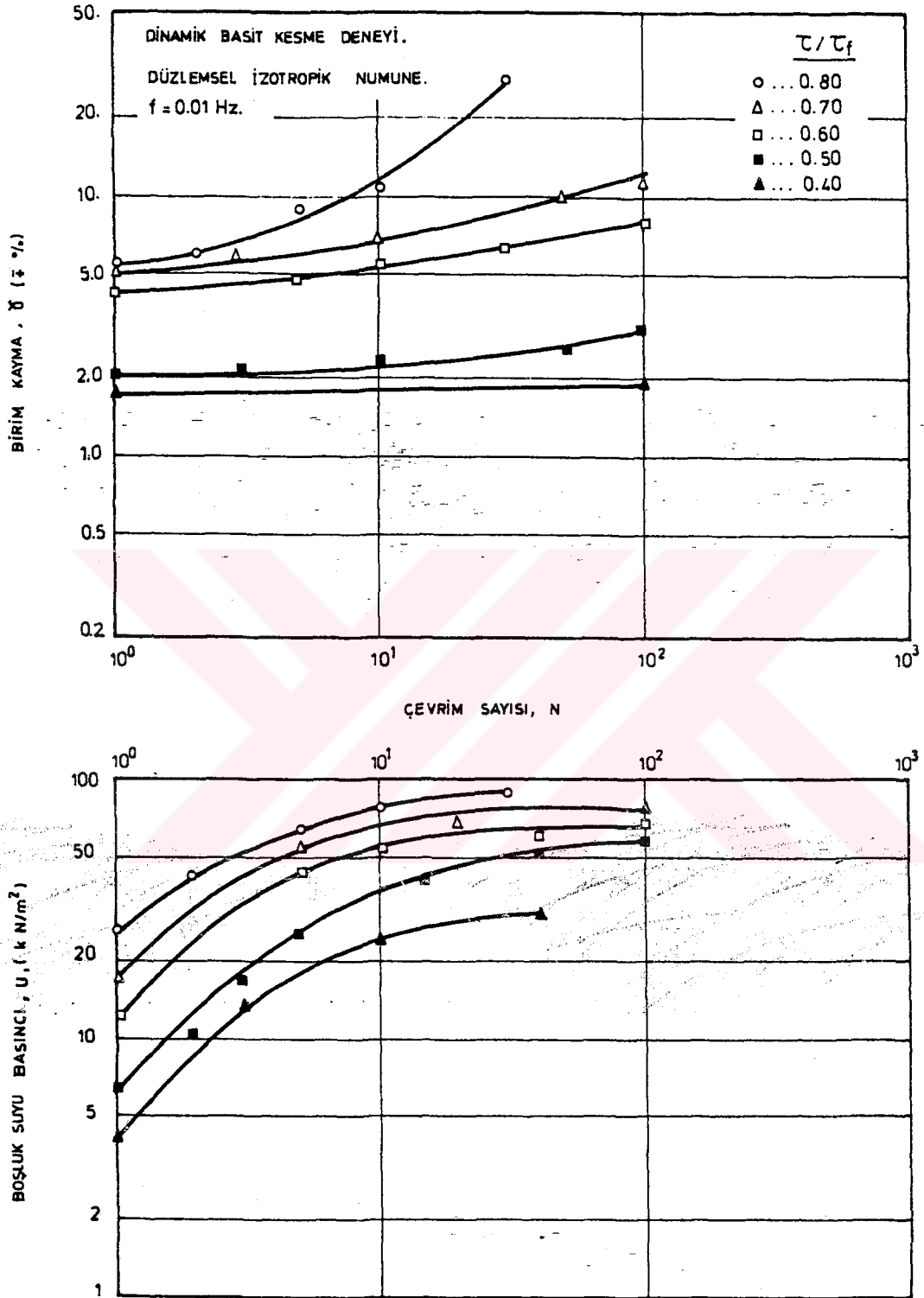
ŞEKİL:4.3 - BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN FREKANS BAĞLI DEĞİŞİMİ.



ŞEKİL: 4.4 - BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN FREKANS BAĞLI DEĞİŞİMİ.



ŞEKİL: 4.5. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN FREKANS BAĞLI DEĞİŞİMİ.



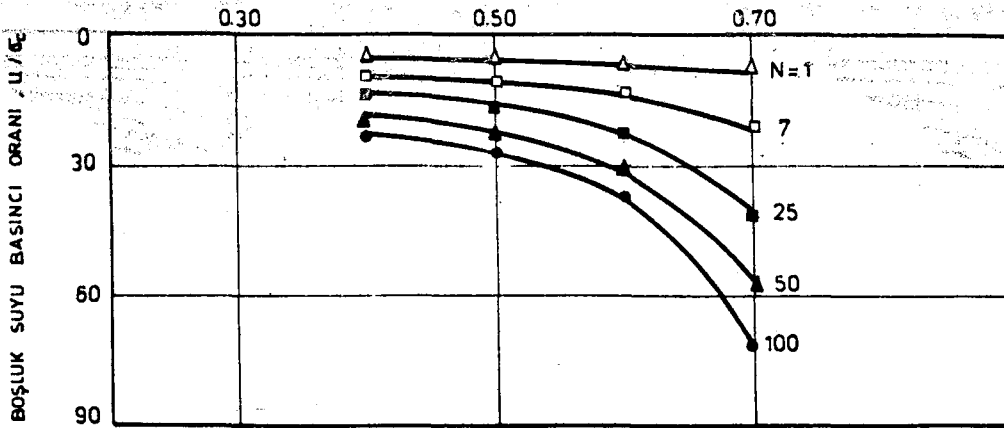
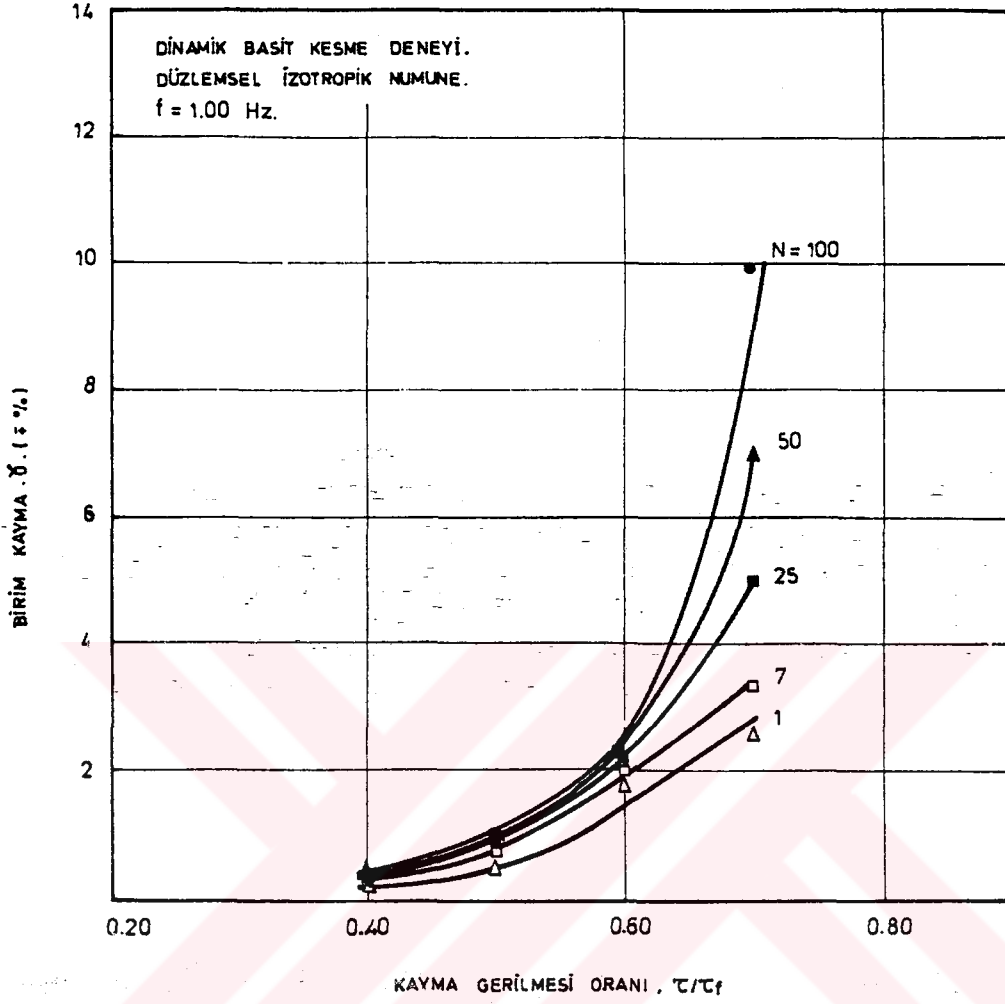
ŞEKİL: 4.6.. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN FREKANS BAĞLI DEĞİŞİMİ.

Bu durum tekrarlı yüklemenin bitiminden sonra statik mukavemetin olumsuz yönde etkilenmesine neden olur. Bunun nedeni, boşluk suyu basınçlarının kohezyonlu zeminlerde sönümlenmesinin zamana bağlı oluşudur.

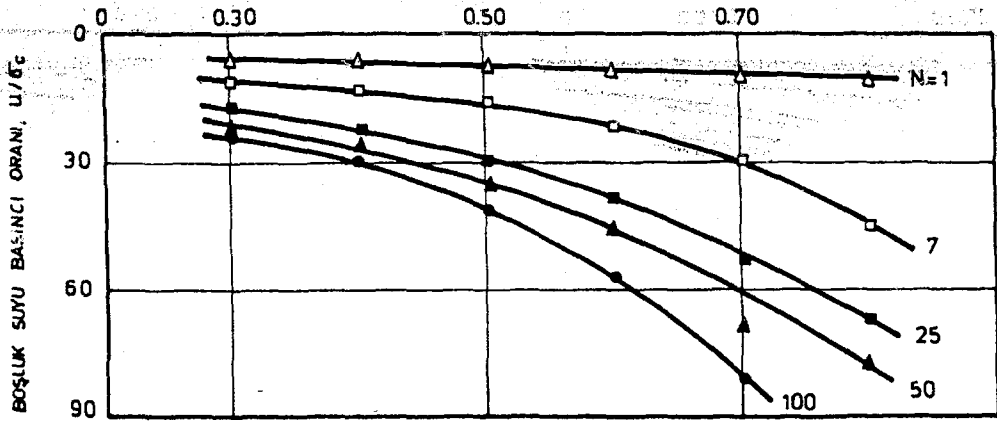
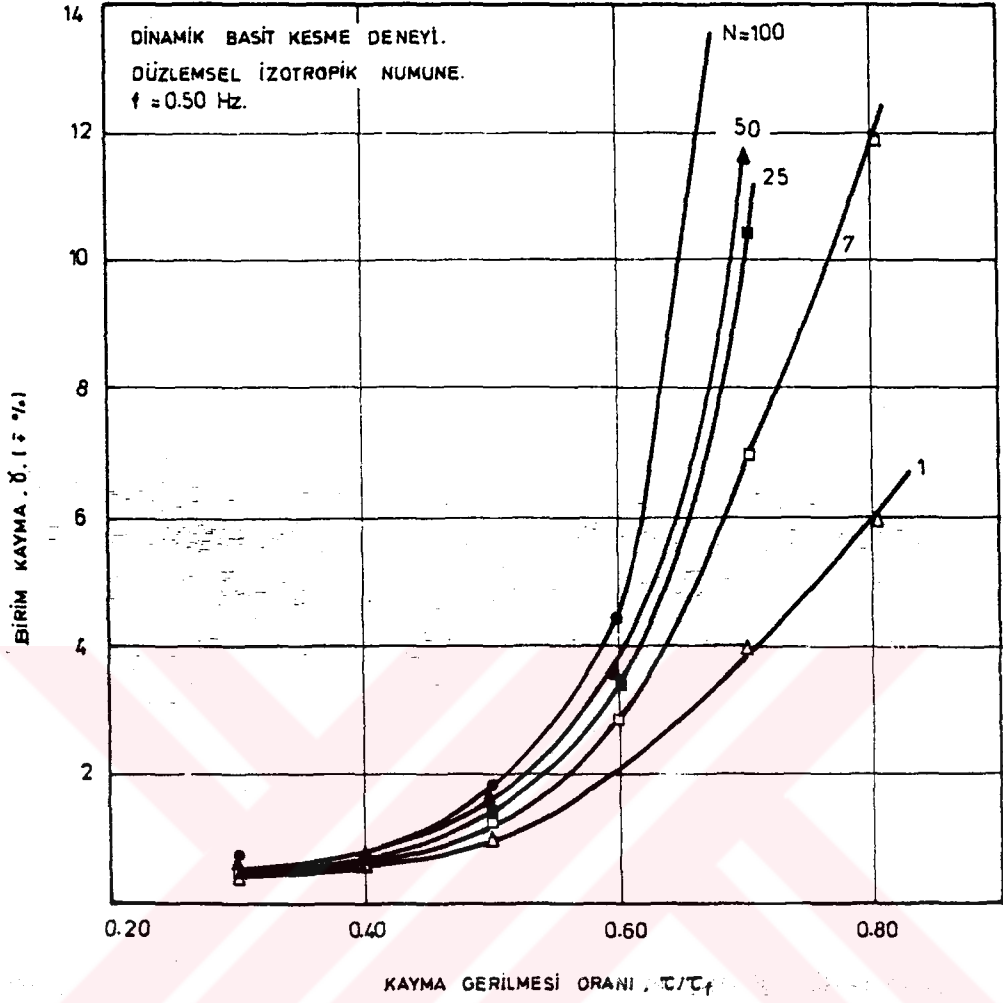
Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yüklemeler altındaki davranışına çevrim sayısının etkisini araştırmak için deney sonuçları, aynı frekansta belirli kayma gerilmesi oranında, birim kayma ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısı ile değişimine göre değerlendirilmiştir (Şekil 4.7, 4.8, 4.9, 4.10). Diyagramların çiziminde kullanılan çevrim sayıları $N = 1-7-25-50-100$ olarak alınmıştır. Belirli bir frekans ve belirli bir çevrim sayısında, birim kaymanın, kayma gerilme oranına bağlı değişimi hiperbolik bir eğridir. Bir yelpazeyi andıran eğriler, kayma gerilmesi oranı, $\tau/\tau_f = 0.30$ değerinde odaklaşmaktadır. Bu noktanın yerini belirleyen birim kayma değeri, frekansın bir fonksiyonudur ve artan frekans değerleri ile birim kaymalar azalmaktadır. $f = 1.00$ Hz için ± 0.2 civarından olan başlangıç birim kayma değeri, $f = 0.01$ Hz için ± 1.5 değerine kadar çıkmaktadır. Kayma gerilme oranı, $\tau/\tau_f = 0.50$ değerine kadar belirli bir eğimle gelen hiperbolik eğriler bu değerden sonra birbirlerinden hızla ayrılmaktadırlar. Artan çevrim sayıları numunelerdeki birim kayma değerlerini arttırmaktadırlar. Frekans değerlerinin azalması bu değerleri daha da arttırmaktadır.

Aynı diyagramlarda boşluk suyu basınçlarının değişiminide gözleme olanağı vardır. Frekansın 0.01 Hz ve 0.10 Hz olduğu deneylerde belirli bir çevrim için, boşluk suyu basınçlarındaki değişim lineer bir doğrudur. Frekans arttıkça lineer olan değişim hiperbolik eğri şeklini almaktadır (Şekil 4.7, 4.8). İlk çevrim için lineer doğru davranışı tüm frekanslar için geçerlidir.

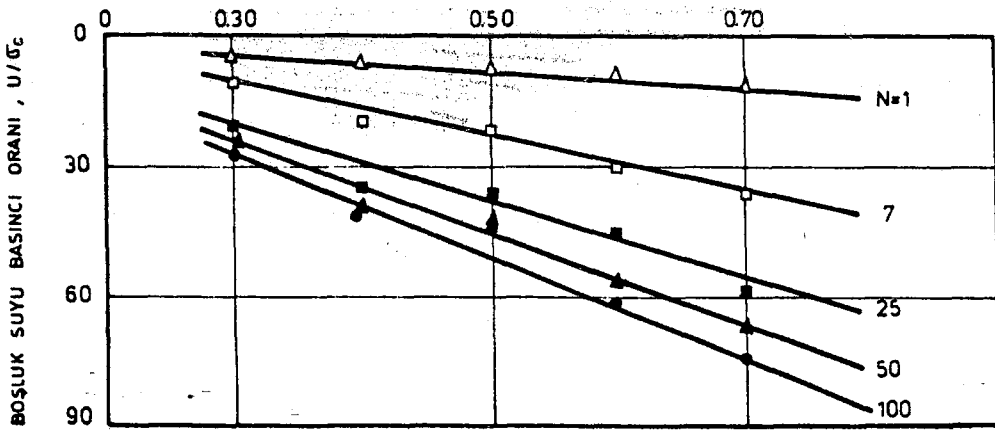
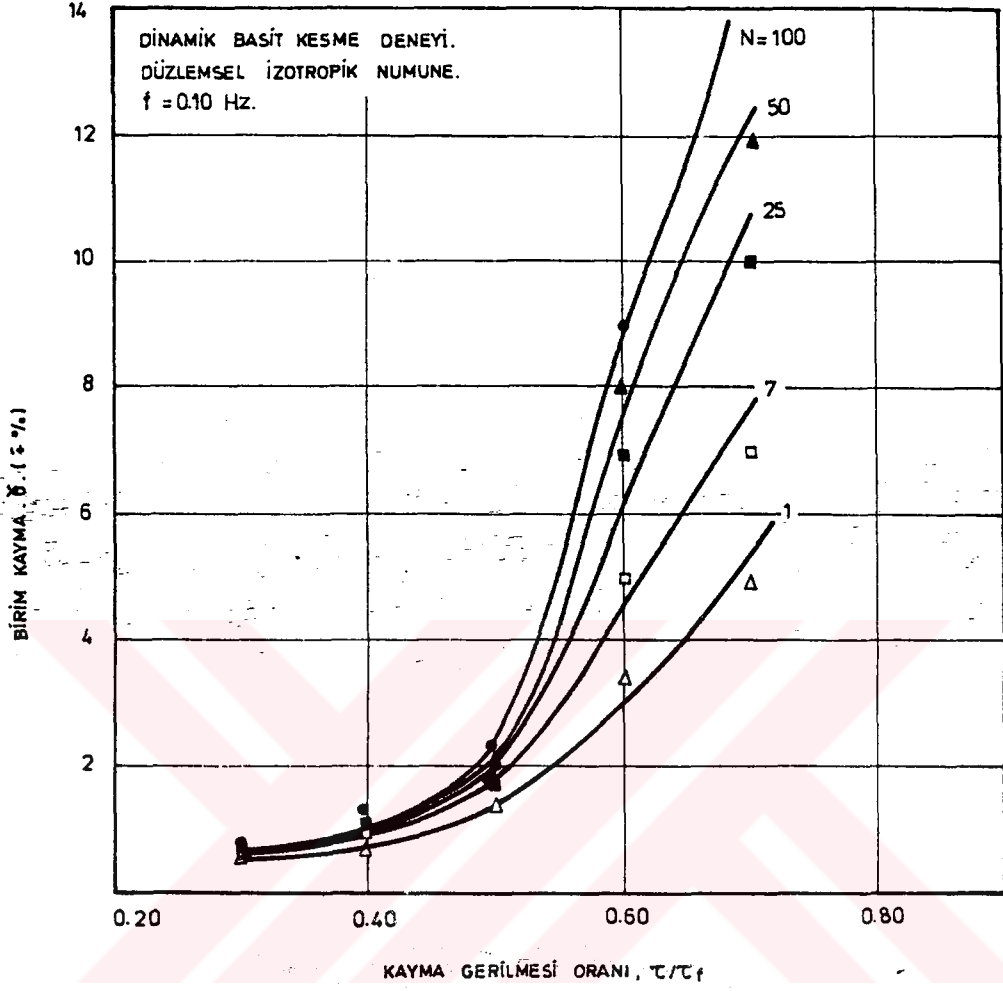
Gerilme oranı ile boşluk suyu basıncı ve birim kayma arasındaki ilişkinin frekansla değişimi gözlemek amacıyla Şekil 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 eğrileri çizilmiştir. Belirli bir gerilme oranında, frekansın artması, birim kayma ve boşluk suyu basıncı değerini azaltmaktadır. Düşük gerilme seviyelerinde ($\tau/\tau_f = 0.30, 0.40, 0.50$) birim kaymaların, çevrim sayısı ile ilişkisi lineer olup frekans etkisi belirgin bir şekilde



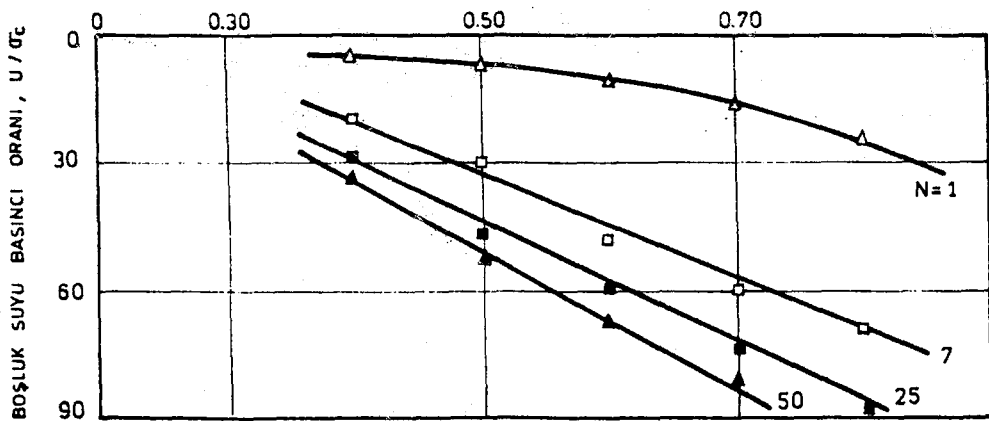
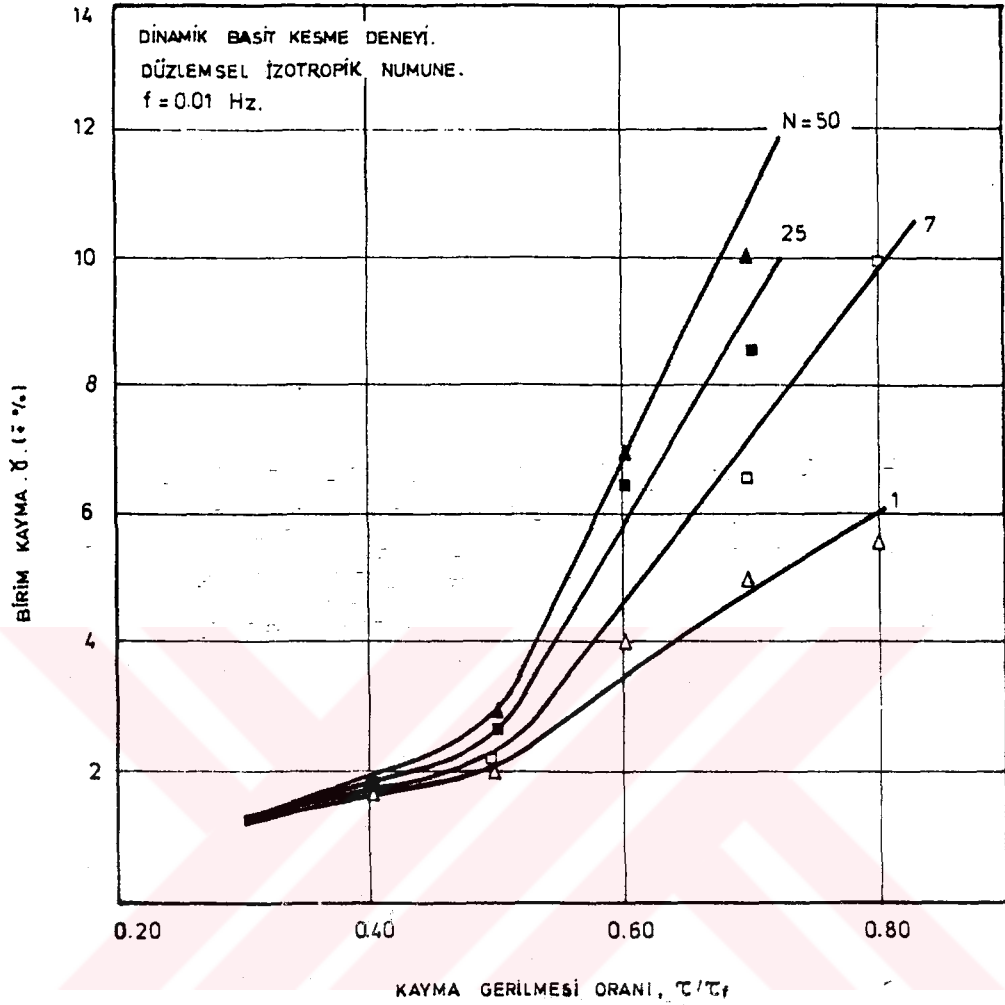
ŞEKİL: 4.7. BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.



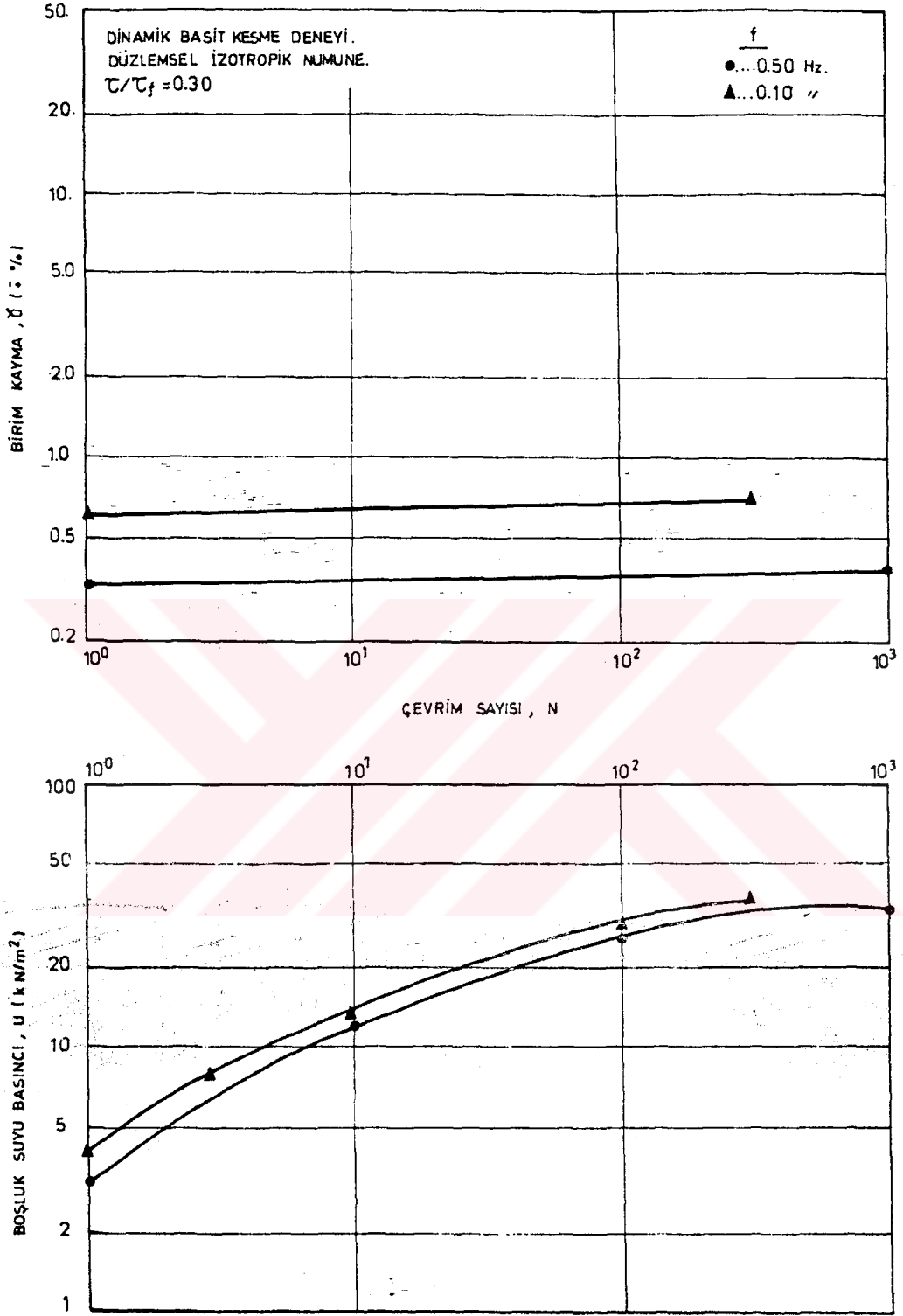
ŞEKİL: 4.8 - BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.



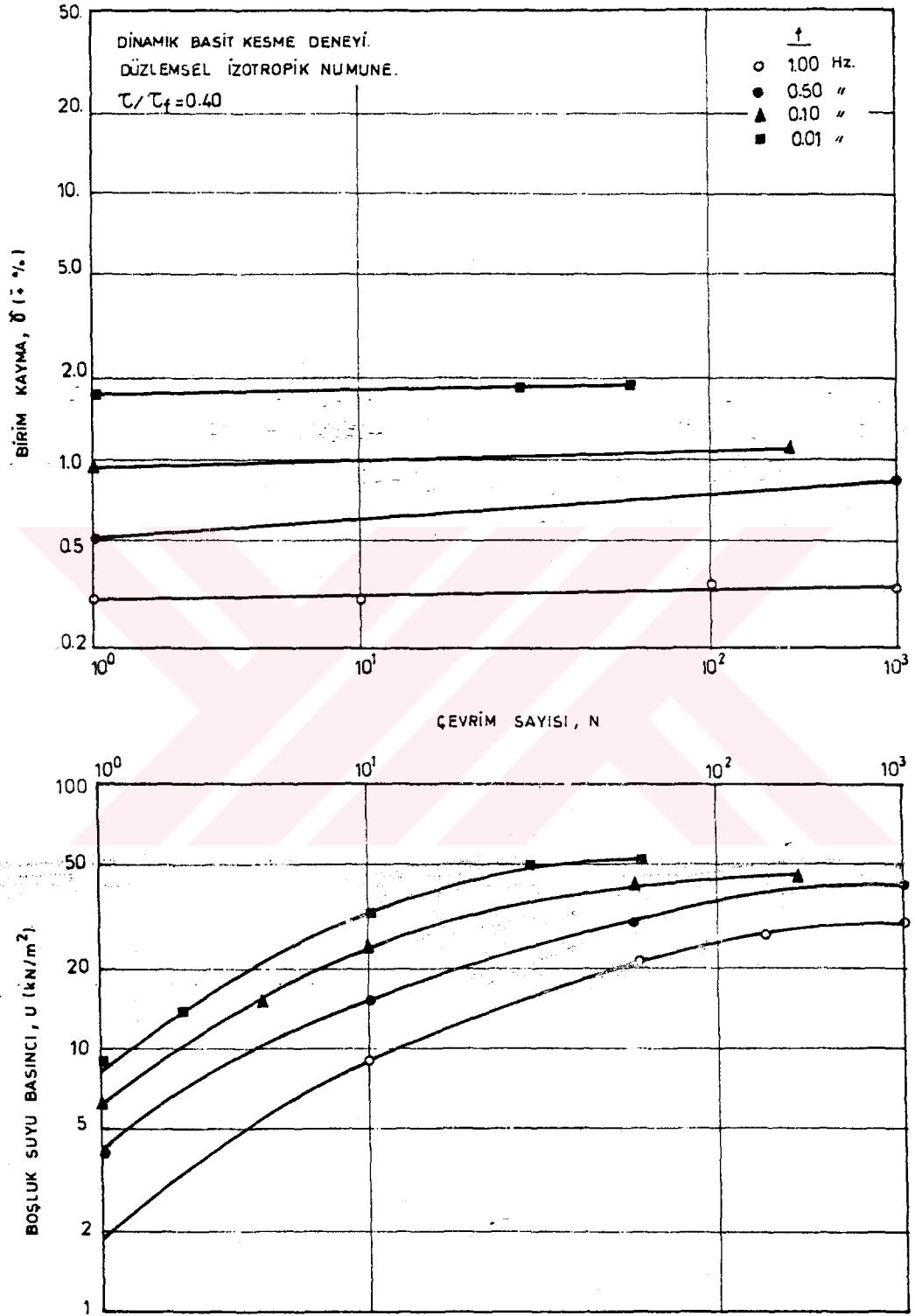
ŞEKİL: 4.9. BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.



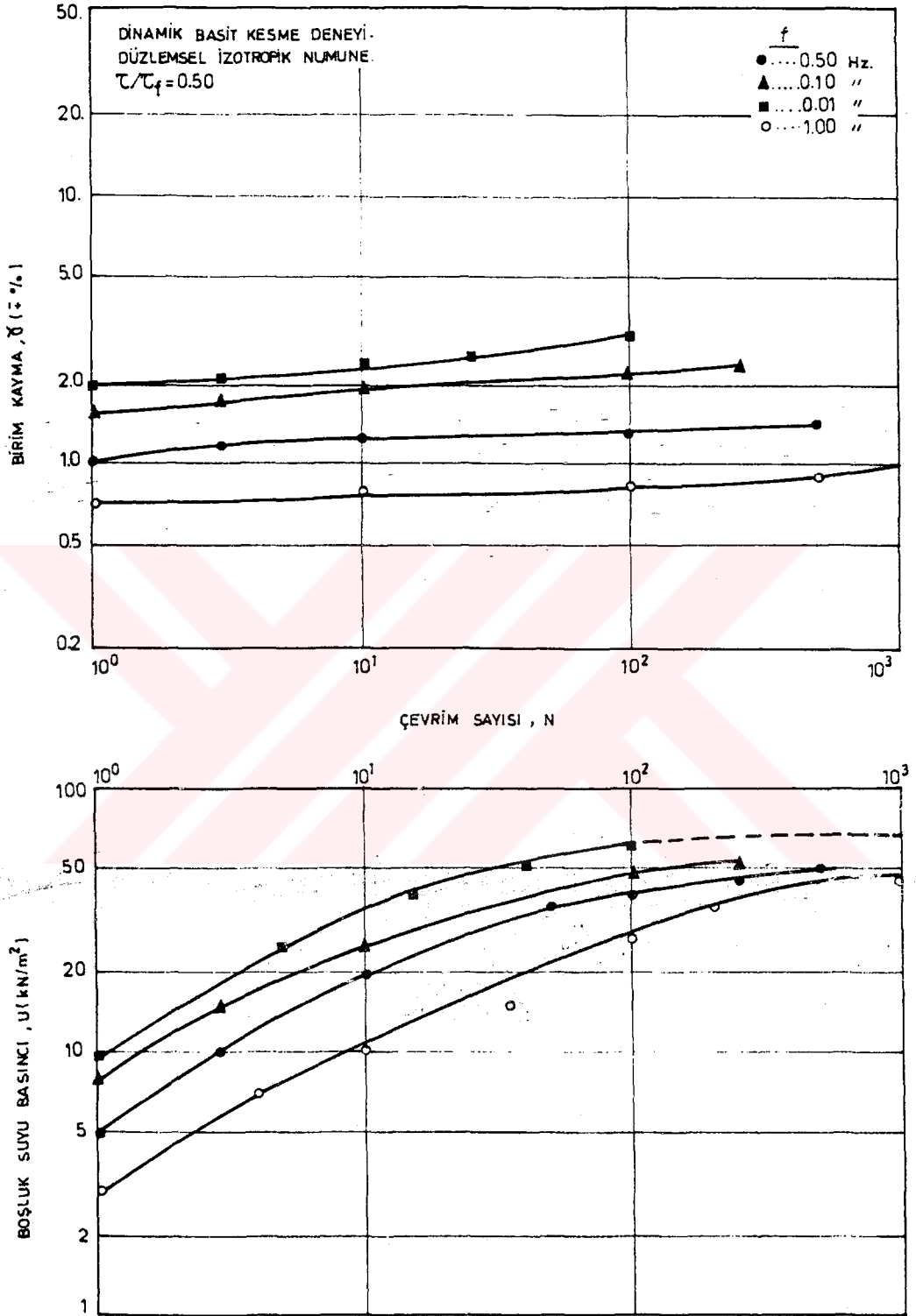
ŞEKİL: 4.10..BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.



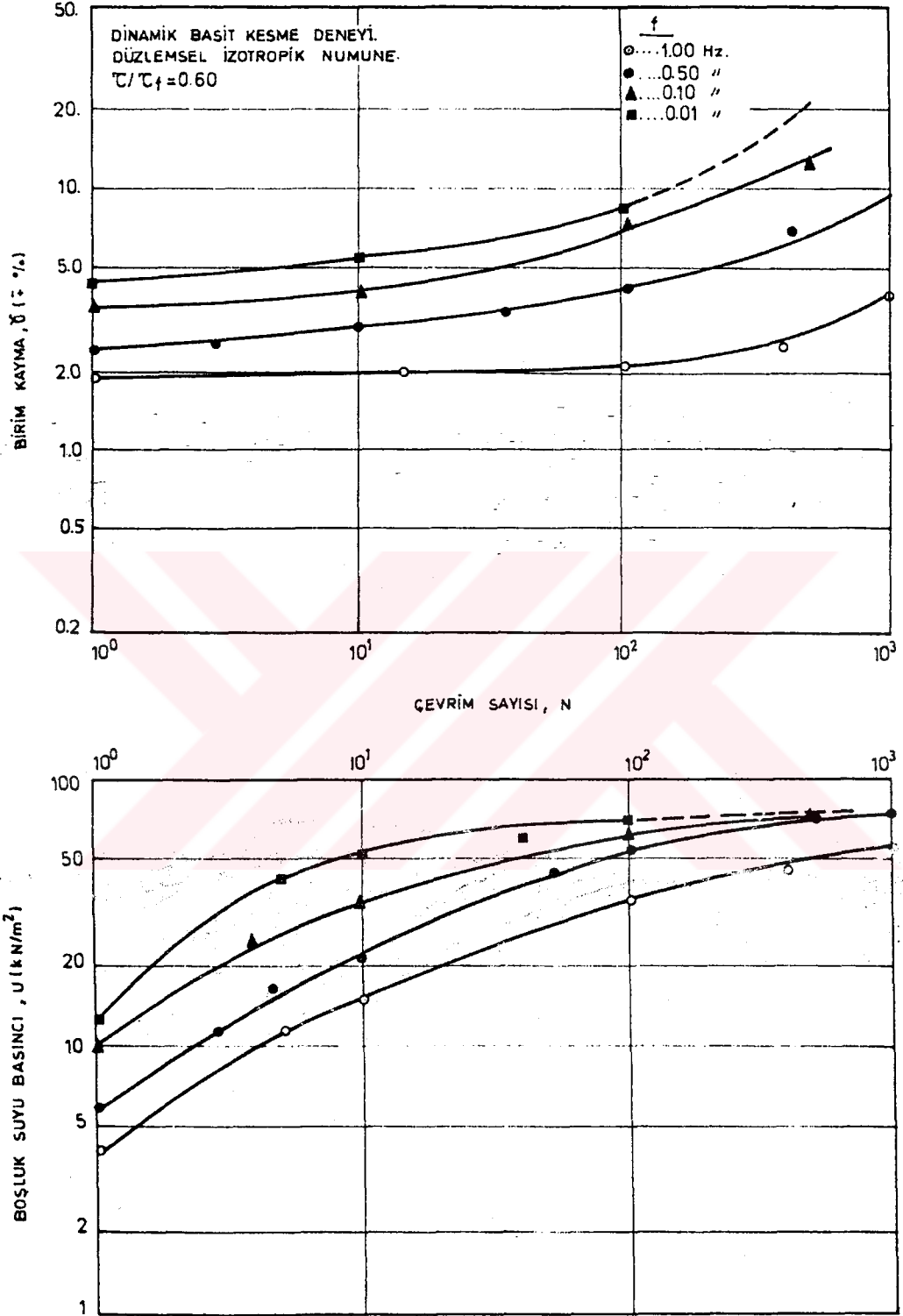
ŞEKİL: 4.11 - GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



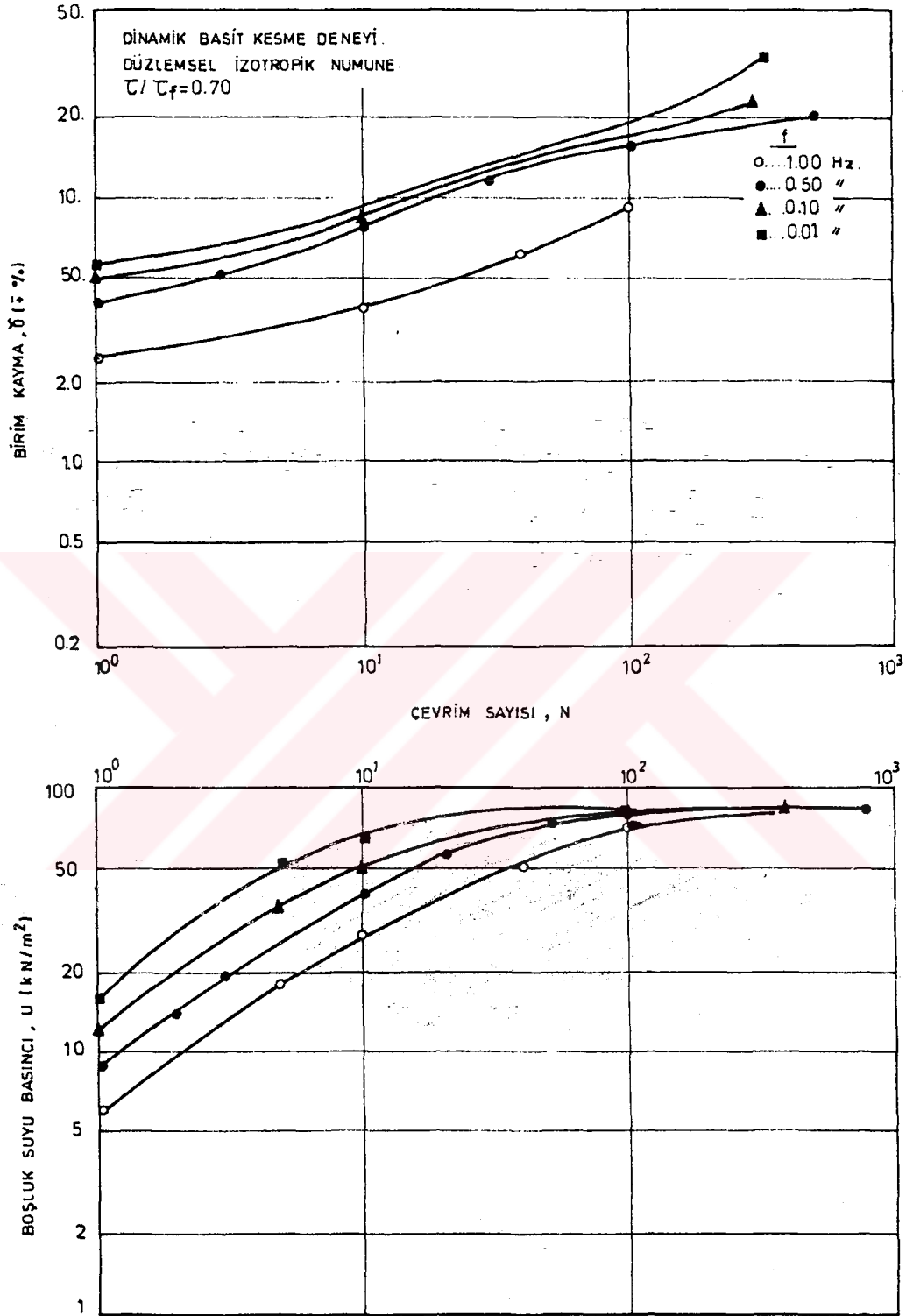
ŞEKİL: 4.12. GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



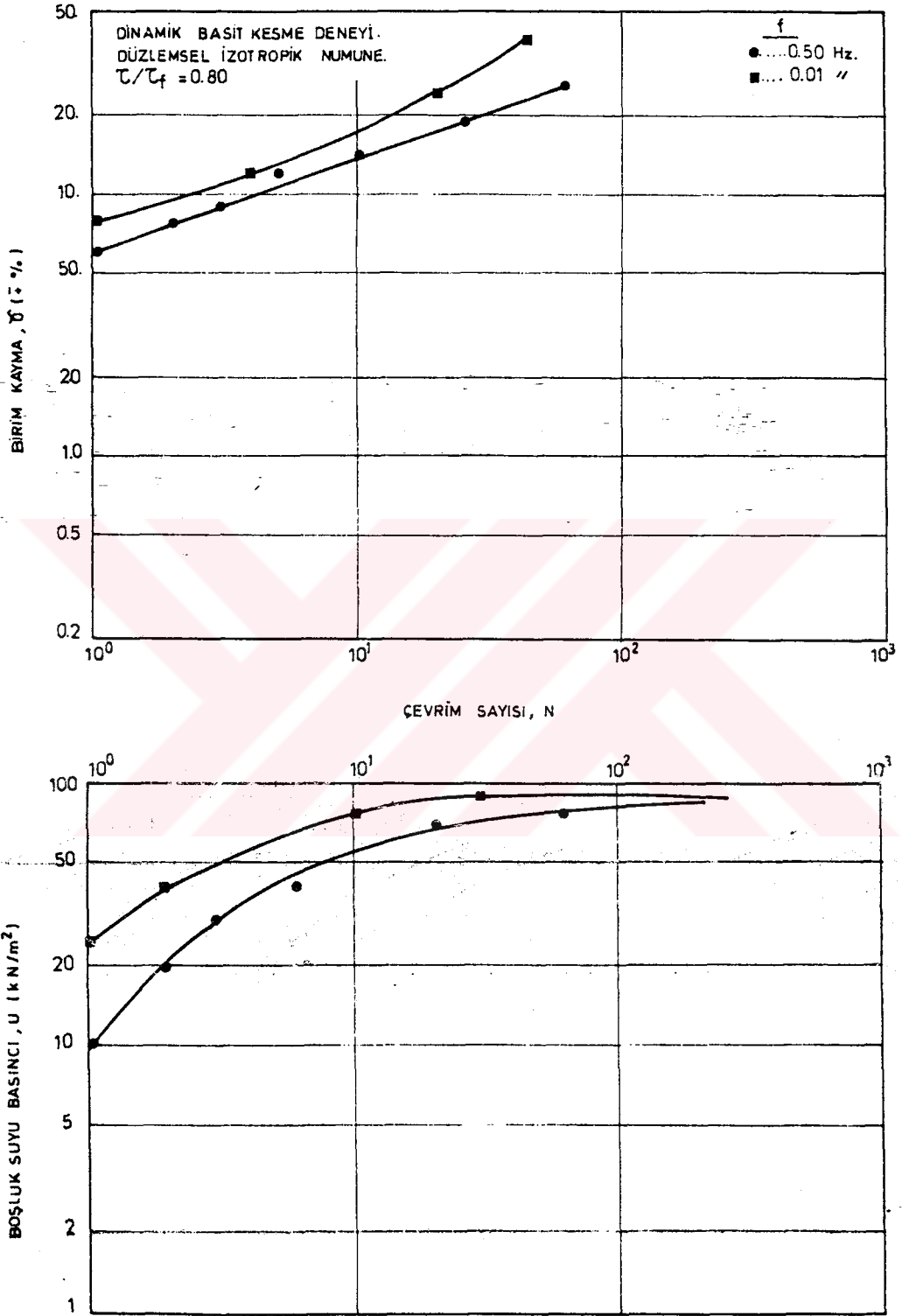
ŞEKİL: 4.13 _ GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



SEKİL: 4.14 - GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.15 - GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDA İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.16 - GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ

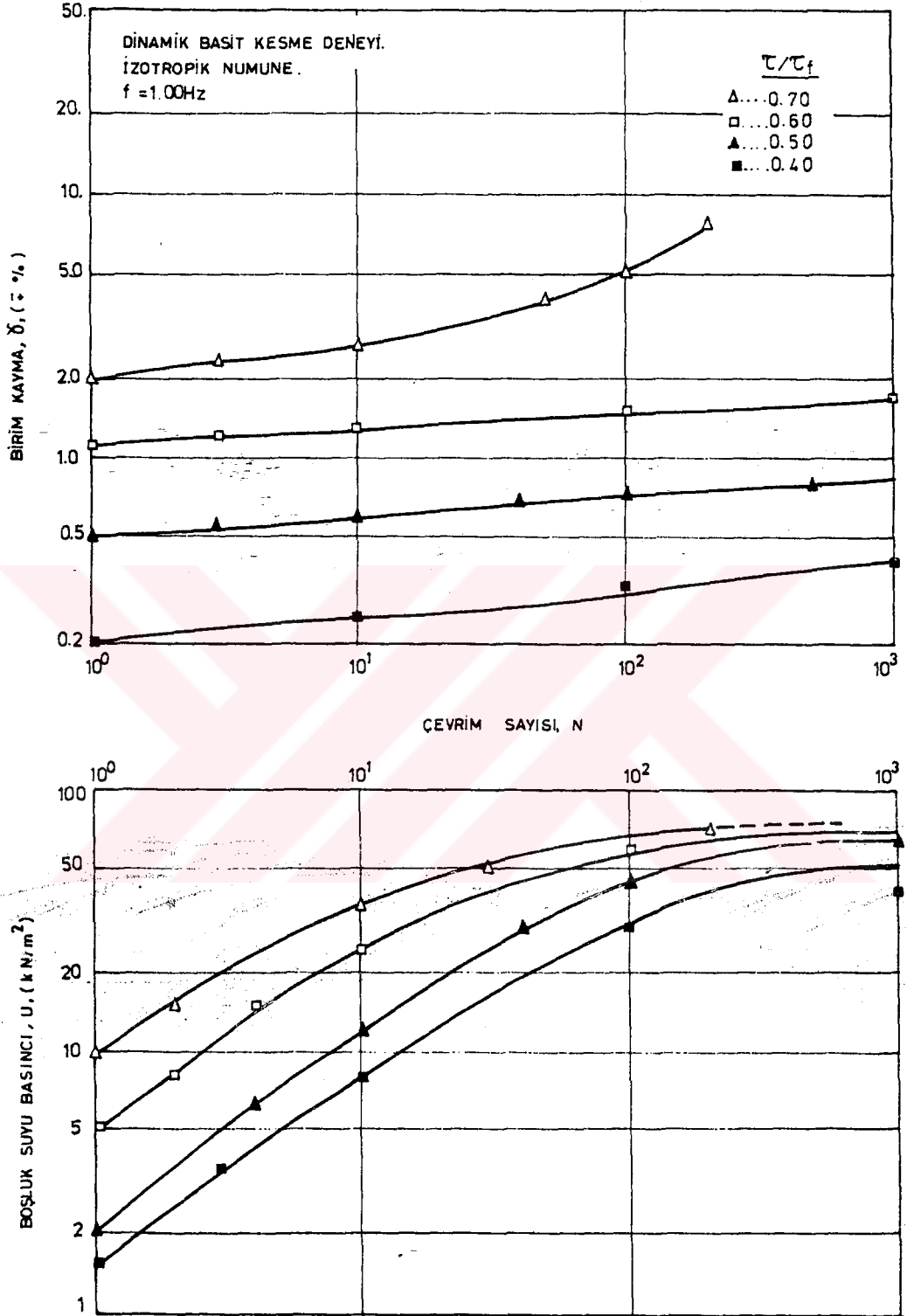
görülmektedir. Gerilme oranının, kritik gerilme seviyesinin üzerine çıktığı değerlerde ($\tau/\tau_f = 0.60, 0.70, 0.80$) bu lineer davranış ilk 10 çevrimden sonra bozulmakta olup birim kaymalar hızla artmakta ve frekans etkisi bir miktar azalmaktadır.

Belirli bir gerilme oranında frekans değerindeki artımlar, oluşan boşluk suyu basınçlarını azaltmaktadır. Gerilme seviyesine bağlı olarak oluşan boşluk suyu basınçlarında 100 çevrimden sonra maksimum değere asimtot olma eğilimi gözlenmektedir.

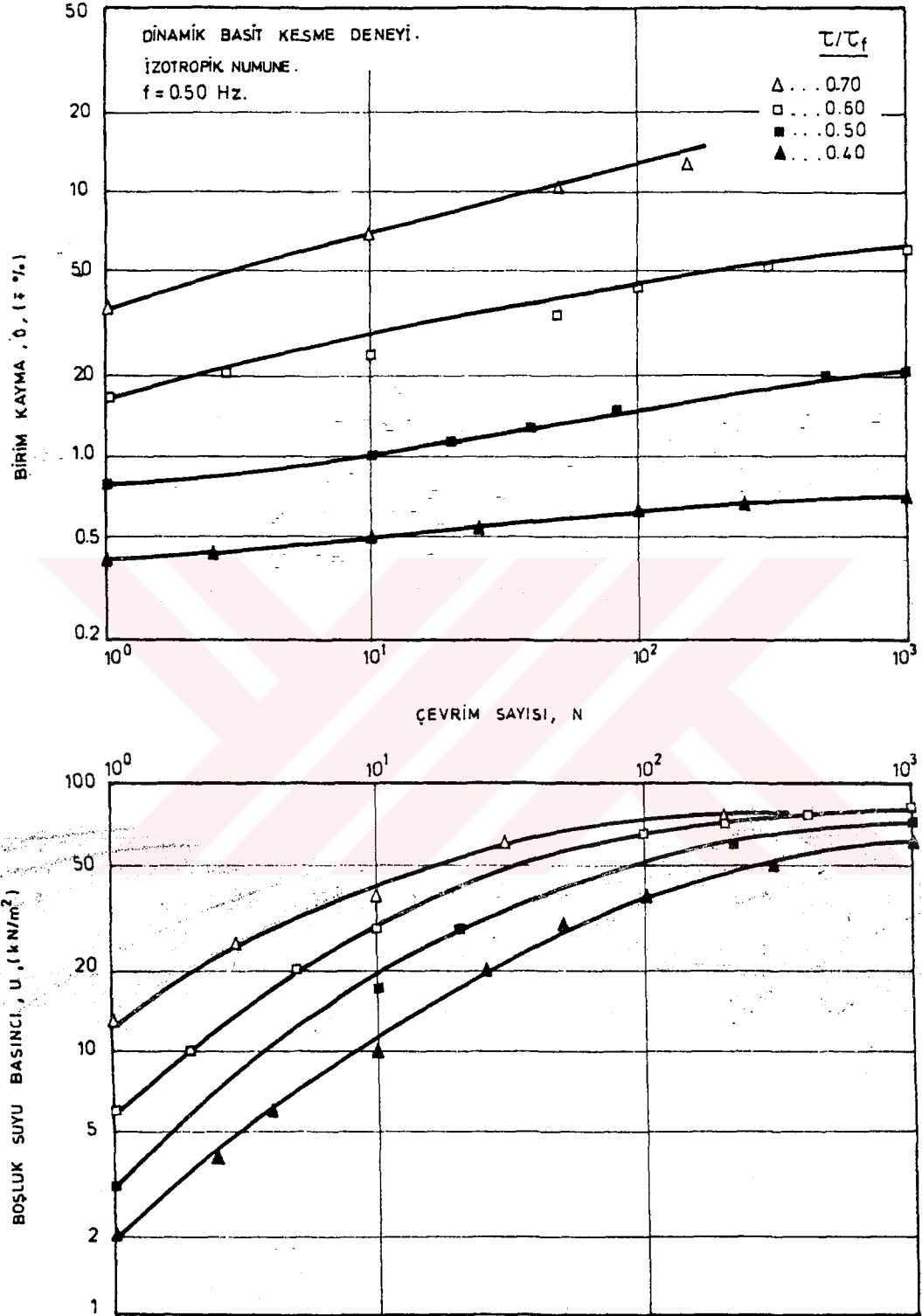
4.2.2. Dinamik Basit Kesme İzotropik Numunelerle İlgili Deney Sonuçları

Dinamik basit kesme deney aletinde, ikinci grup deneyler, izotropik (örselenmiş) numuneler üzerinde yapılmıştır. Düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylere benzer olarak dört değişik frekans ve altı değişik gerilme oranında 20 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde elde edilen deney sonuçları değerlendirilecek ve düzlemsel izotropik deney sonuçları ile karşılaştırmalar yapılacaktır.

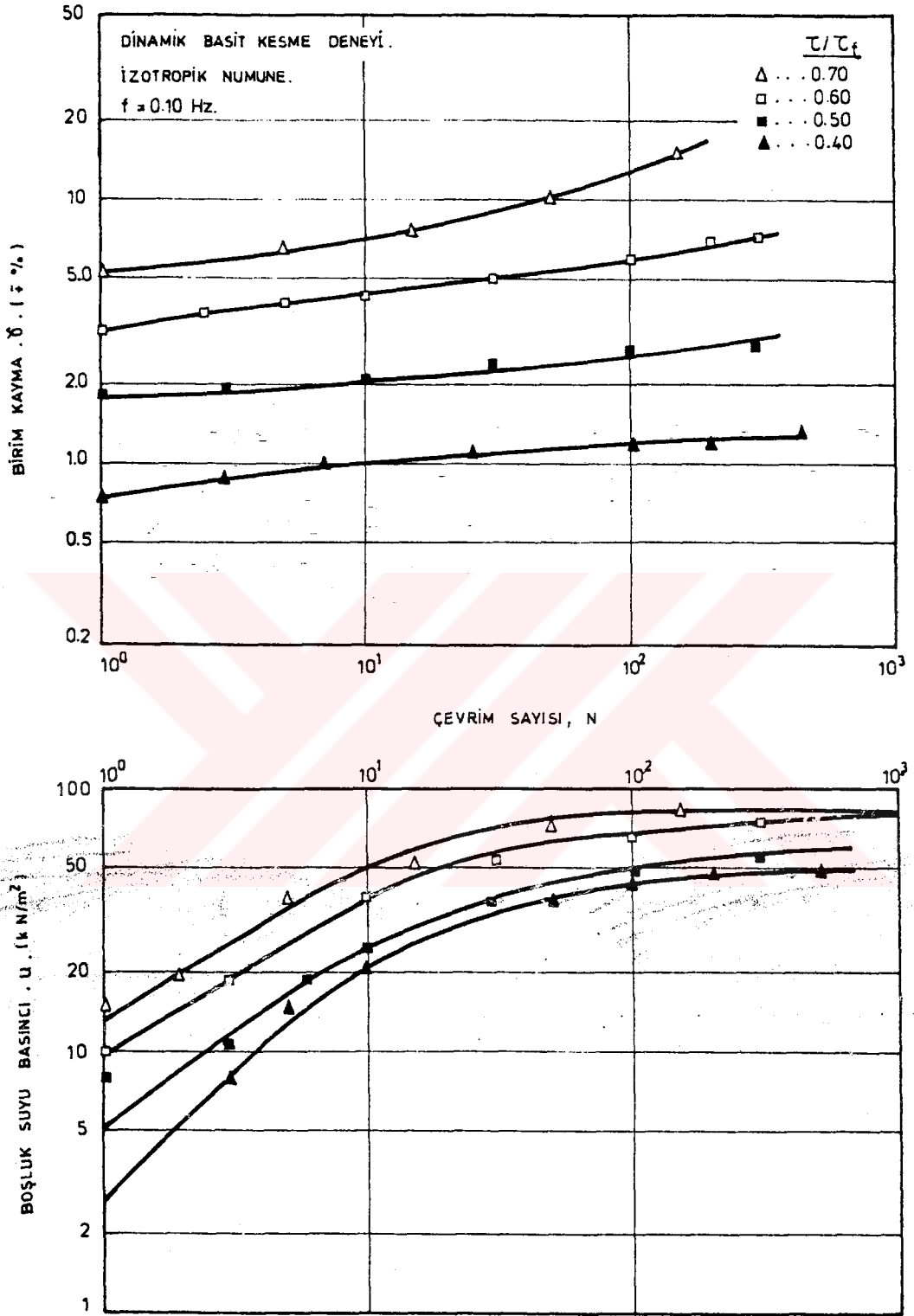
Deney sonuçlarının ilk değerlendirilmesi, aynı frekansta, farklı gerilme oranlarında yapılmış olup, kayma genliğinin etkisini araştırmayı amaçlamaktadır (Şekil 4.17, 4.18, 4.19, 4.20). Bu deneylerde gözlenen, zemin davranışı, düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde görülen davranış biçimiyle uyum göstermektedir. Aynı frekansta, gerilme oranındaki artımlar, birim kaymaları, γ , ve boşluk suyu basınçlarını, u , arttırmaktadır. Doğal olan bu sonuç, iki ayrı yöntemle hazırlanmış numunelerde karşılaştırılırsa (Tablo 4.1) düzlemsel izotropik numunelerde meydana gelen birim kaymalarda bir artış, dolayısıyla dinamik kayma mukavemetinde bir azalma gözlenirken, oluşan boşluk suyu basınçlarında daha küçük mertebelerde kalmaktadır. Bu davranış biçiminin ana nedeni numunelerin dane yapılarındaki farklılıktır. Düzlemsel izotropik numunelerde zemin danelerinin, oluşum itibarıyla yatay düzlem boyunca bir dizilim göstermeleri, kayma gerilmesi altındaki davranışlarında, düşük mukavemet değerlerinin elde



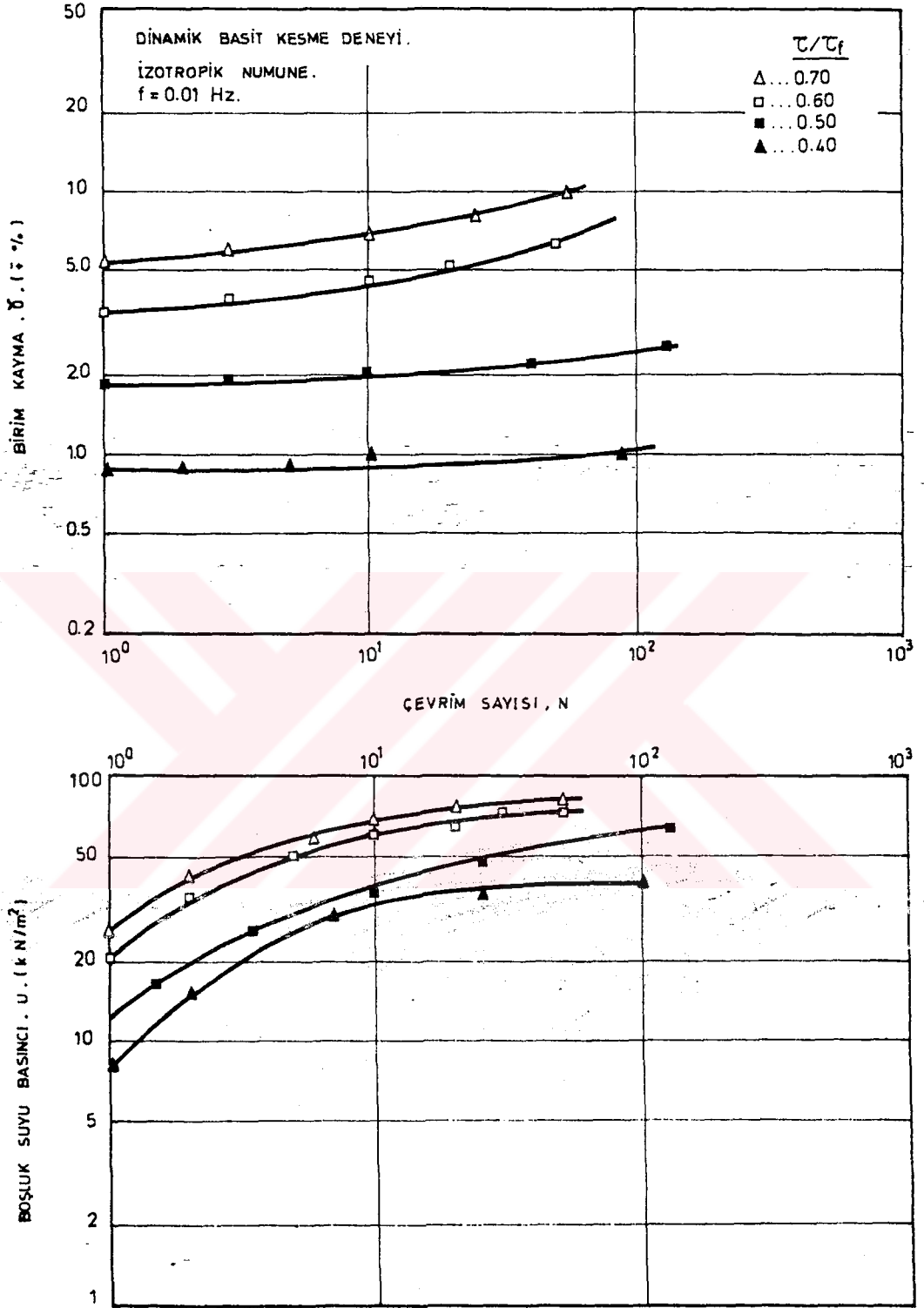
ŞEKİL: 4.17. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ



SEKİL: 4.18. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ



ŞEKİL 4.19. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.20...BOŞLUK SUYU BASINCI İLE BİRİM KAYMANIN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ

edilmesine yol açmaktadır. Yoğrularak hazırlanan izotropik numunelerde, bu yatay düzlem boyunca oluşan dizilim bozulmakta, zemin dane yapısı, şekil değiştirmelere karşı daha mukavim hale gelmektedir. Yine aynı nedenle, izotropik numunelerde zemin boşluklarını dolduran suyun sıkışması ile, oluşan boşluk suyu basınçlarının daha büyük değerlere ulaşması beklenen bir davranış biçimidir. Deneylerden elde edilen verilerin karşılaştırılmasında, düzlemsel izotropik numunelerde oluşan boşluk suyu basıncı değerlerini, aynı çevrimde izotropik numunelerde oluşan boşluk suyu basınçlarına oranlamasında şu sonucu görmekteyiz. Bu oran, düşük gerilme seviyelerinde % 75 iken gerilme seviyesi $\tau/\tau_f = 0.50$ olması halinde % 90 ulaşmaktadır.

$$u_{düz, iz} = (0.75 - 0.90)u_{iz} \quad (4.1)$$

Aynı karşılaştırmayı birim kaymalar için yaptığımızda, elde edilen değer için ortalama,

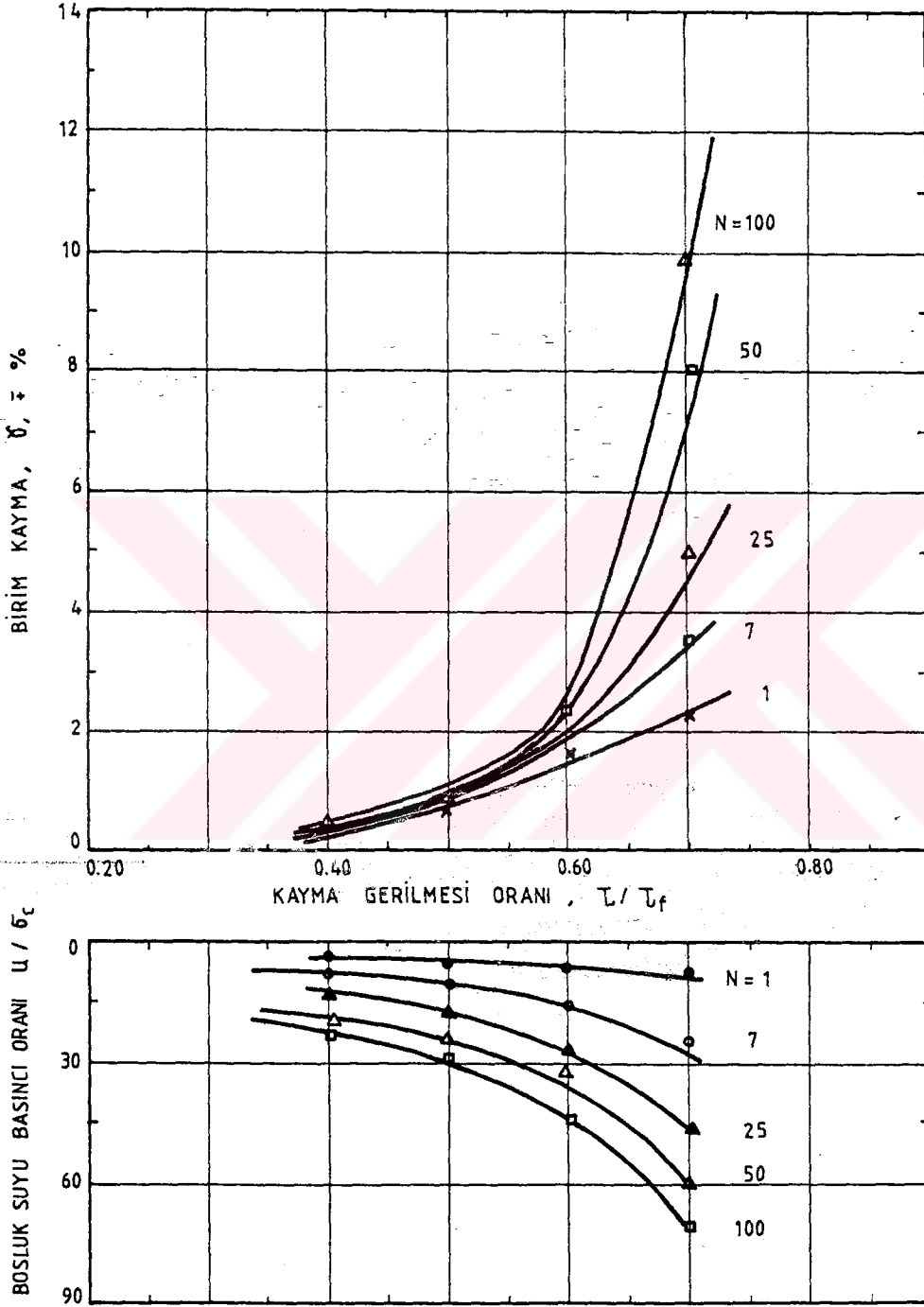
$$\gamma_{düz, iz} = 1.25 \cdot \gamma_{iz} \quad (4.2)$$

eşitliği verilebilir. Dikkati çeken önemli bir hususta bu değerler üzerinde frekansın etkisinin önemsenmeyecek ölçüde olmasıdır.

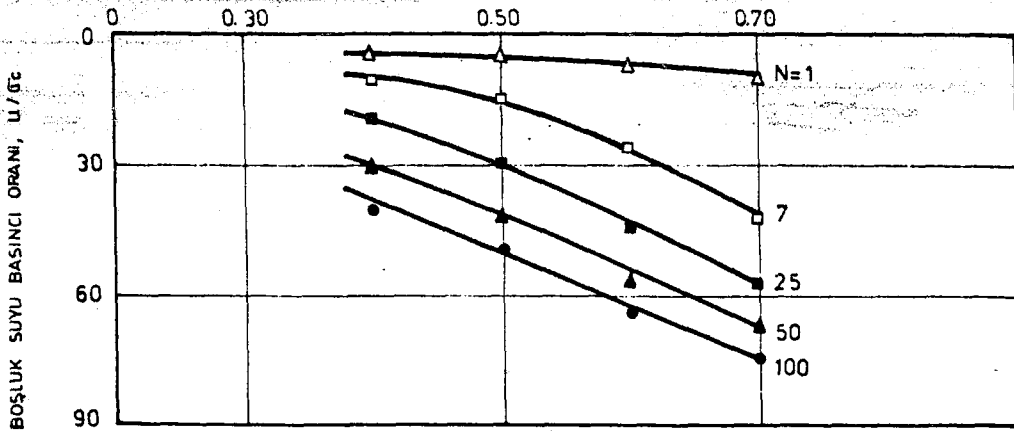
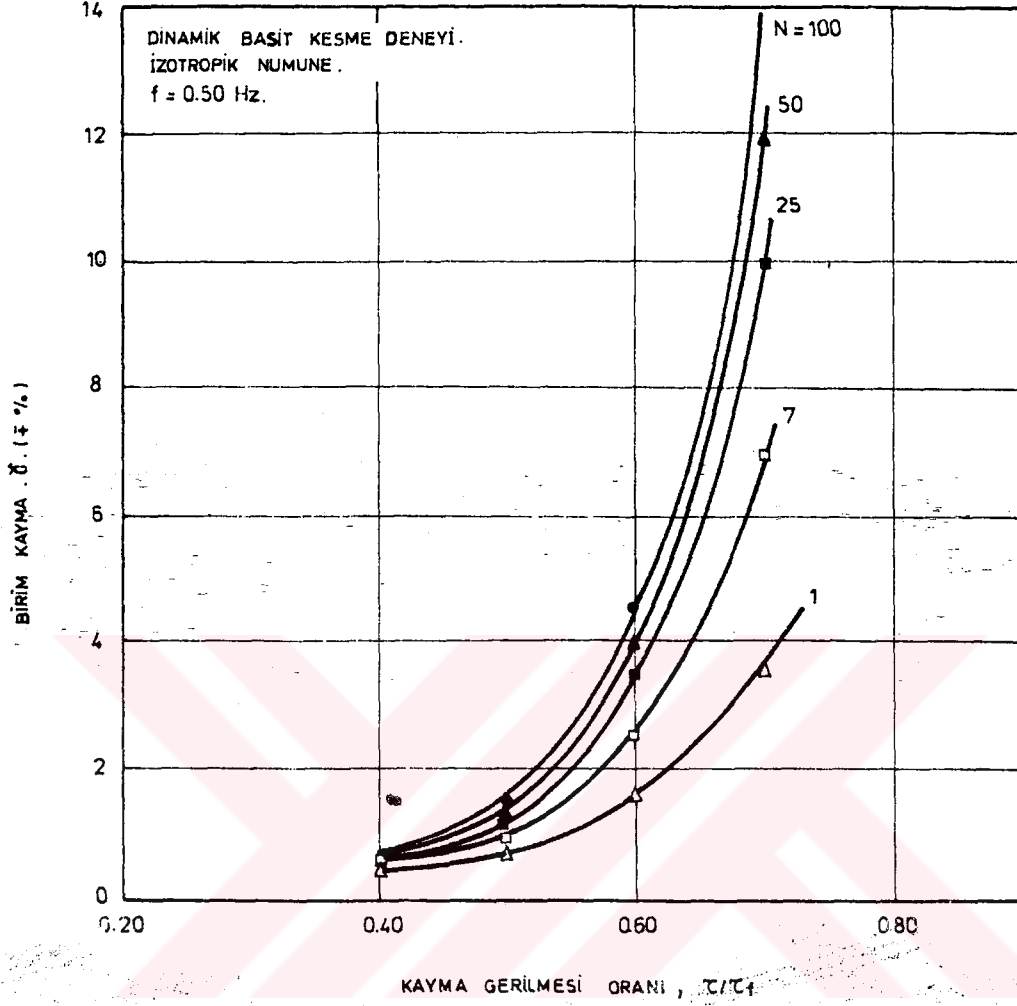
İzotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde, çevrim sayısının etkisini araştırmak amacıyla, deney sonuçları, aynı frekansta, belirli kayma gerilmesi oranında değerlendirilmiştir. (Şekil 4.21, 4.22, 4.23, 4.24). Deneyler sonucu çizilen eğriler, düzlemsel izotropik deney eğrileri ile uyum içindedir. Belirli frekans ve belirli bir çevrim sayısında, birim kaymanın, kayma gerilmesi oranına bağlı değişimi hiperbolik bir eğridir. Çevrim sayısı, $N = 1-7-25-50-100$ değerlerinde çizilen eğriler yelpaze şeklindedir. Yelpazenin odak noktası, $\tau/\tau_f = 0.40$ değerindedir. Düzlemsel izotropik numunelerde ise odaklaşma $\tau/\tau_f = 0.30$ değerindedir. İzotropik numunelerde bu noktanın yerini frekans değeri fazla etkilememekte ve $\gamma = \%0.5 \sim 1.0$ civarındadır. Kayma gerilme oranındaki artımlar, eğrileri düzlemsel izotropik numunelerde olduğu gibi birbirlerinden hızla ayırmamaktadır.

DİNAMİK BASİT KESME DENEYİ
İZOTROPİK NUMUNE

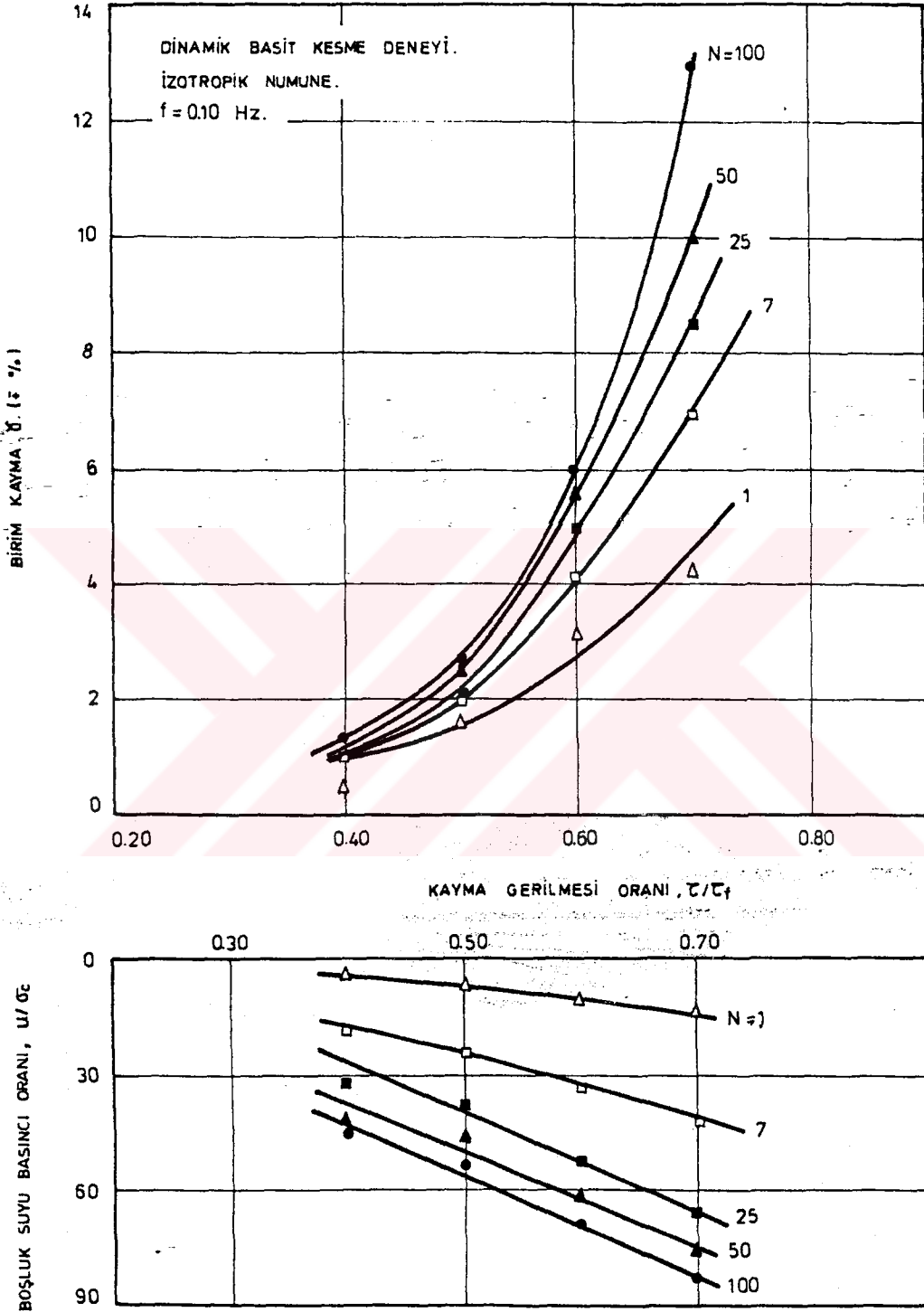
$f = 1.0 \text{ Hz.}$



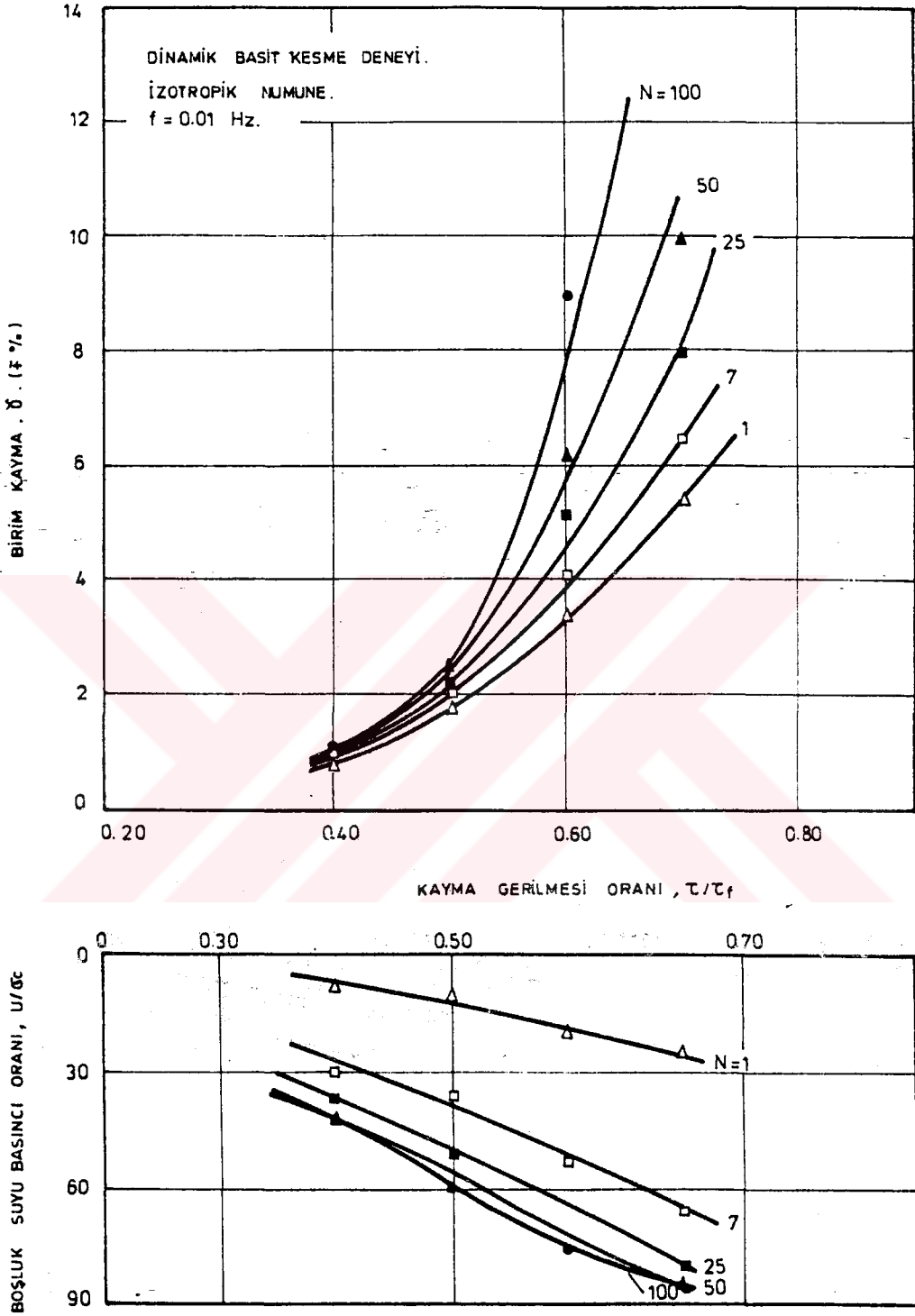
ŞEKİL. 4.21 - BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.22. BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.



ŞEKİL: 4.23_ BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.

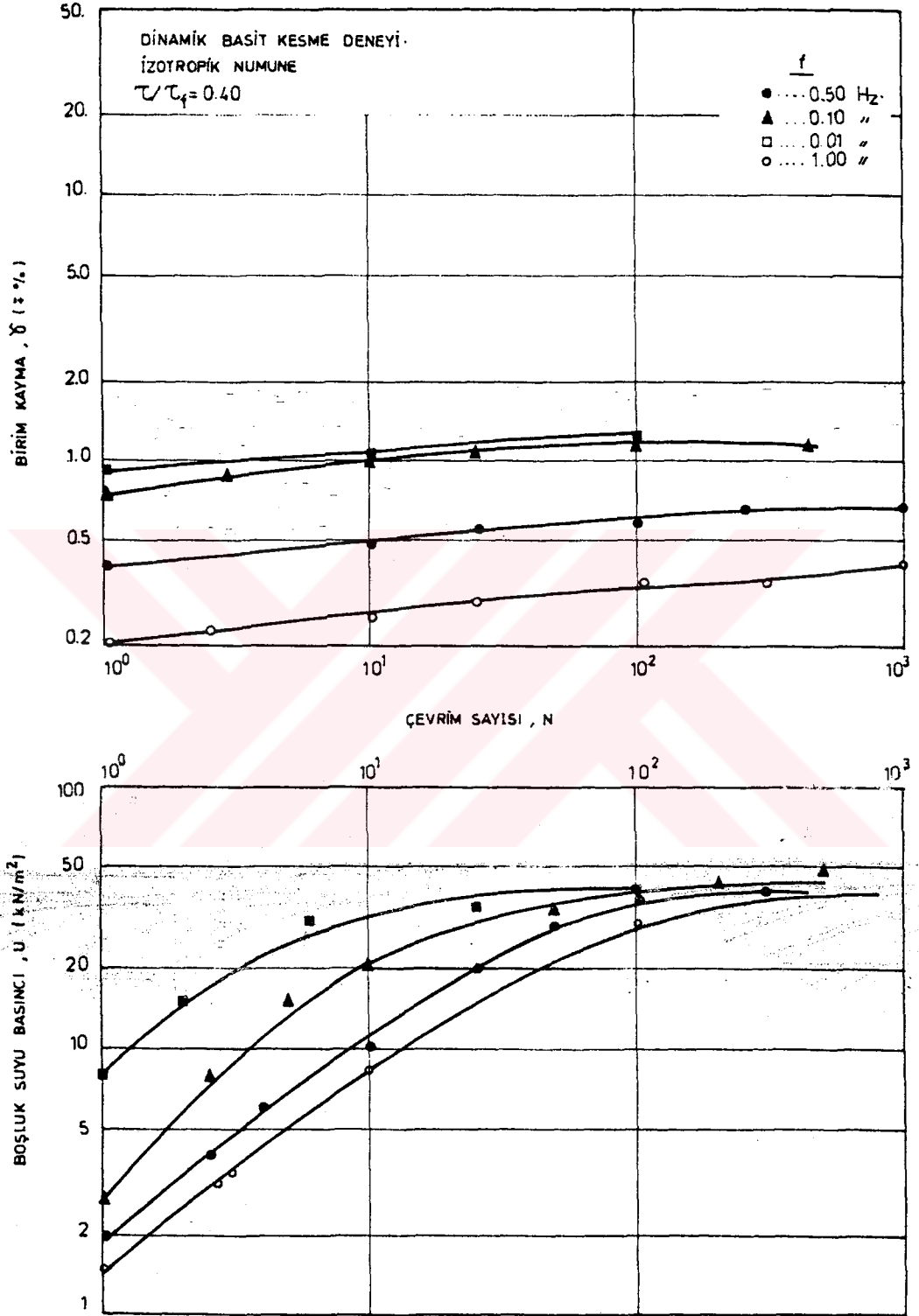


ŞEKİL: 4.24 - BELİRLİ TEKRARLI KAYMA GERİLMESİNDE BİRİM KAYMA VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.

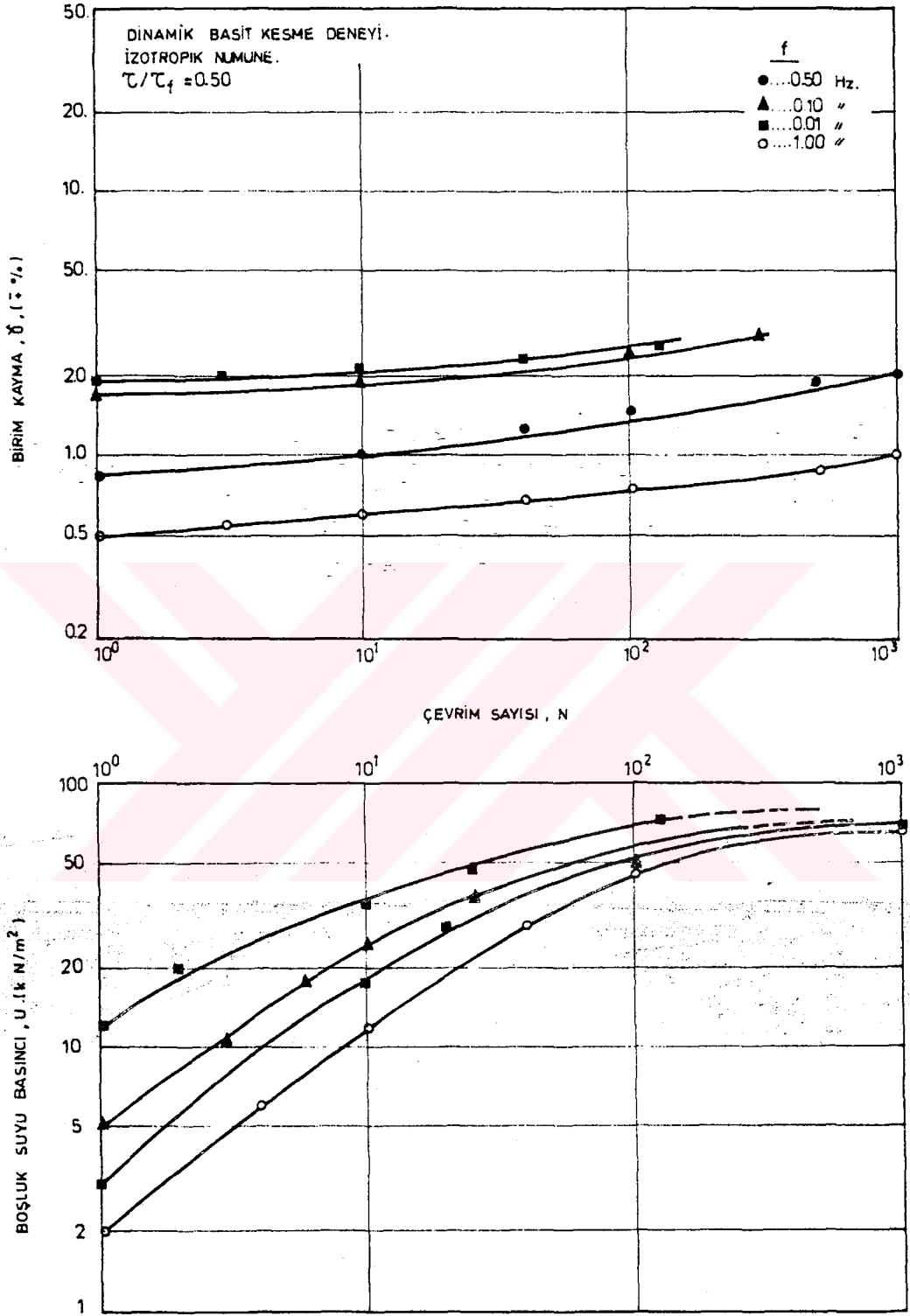
Çevrim sayısının boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisi için aynı diyagramlardan faydalanabilmiz. Frekansın 0.01 Hz, 0.10 Hz ve 0.50 Hz. olduğu deneylerde, belirli bir çevrim sayısı için boşluk suyu basınçlarının değişiminin lineer olduğu görülmektedir. Frekans değeri 1.0 Hz için, lineer olan bu değişim hiperbolik bir eğri şeklini almaktadır (Şekil 4.21). Düzlemsel izotropik numuneler üzerindeki deneylerde hiperbolik davranış biçimi 0.50 Hz. frekans değerinden sonra kendini göstermektedir. İlk çevrim için lineer doğru davranış biçimi, düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde olduğu, izotropik numuneler ile yapılan deneylerde de bütün frekans değerleri için de gözlenmiştir.

Yapılan deneylerin değerlendirilmesinde, frekansın; gerilme oranı, boşluk suyu basıncı ve birim kayma üzerindeki etkisini Şekil 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 eğrileri ile değerlendirilebilir. Belirli bir gerilme oranında, frekans üzerindeki azalmalar, birim kayma ve boşluk suyu basıncı değerlerini arttırmaktadır. Bu davranış biçimi, tekrarlı yükün zemin numunesi üzerindeki uygulama süresinin fazlalığı ile açıklanabilir. Düzlemsel izotropik ve izotropik numunelerde genelde aynı davranış özelliği gözlenmektedir. Düzlemsel izotropik numunelerde, kritik gerilme seviyesi olarak tanımlanan, $\tau/\tau_f = 0.50$ oranından sonra görülen frekans etkisinin azalma eğilimi, izotropik numunelerde ise, $\tau/\tau_f = 0.70$ gerilme oranında kendini göstermektedir.

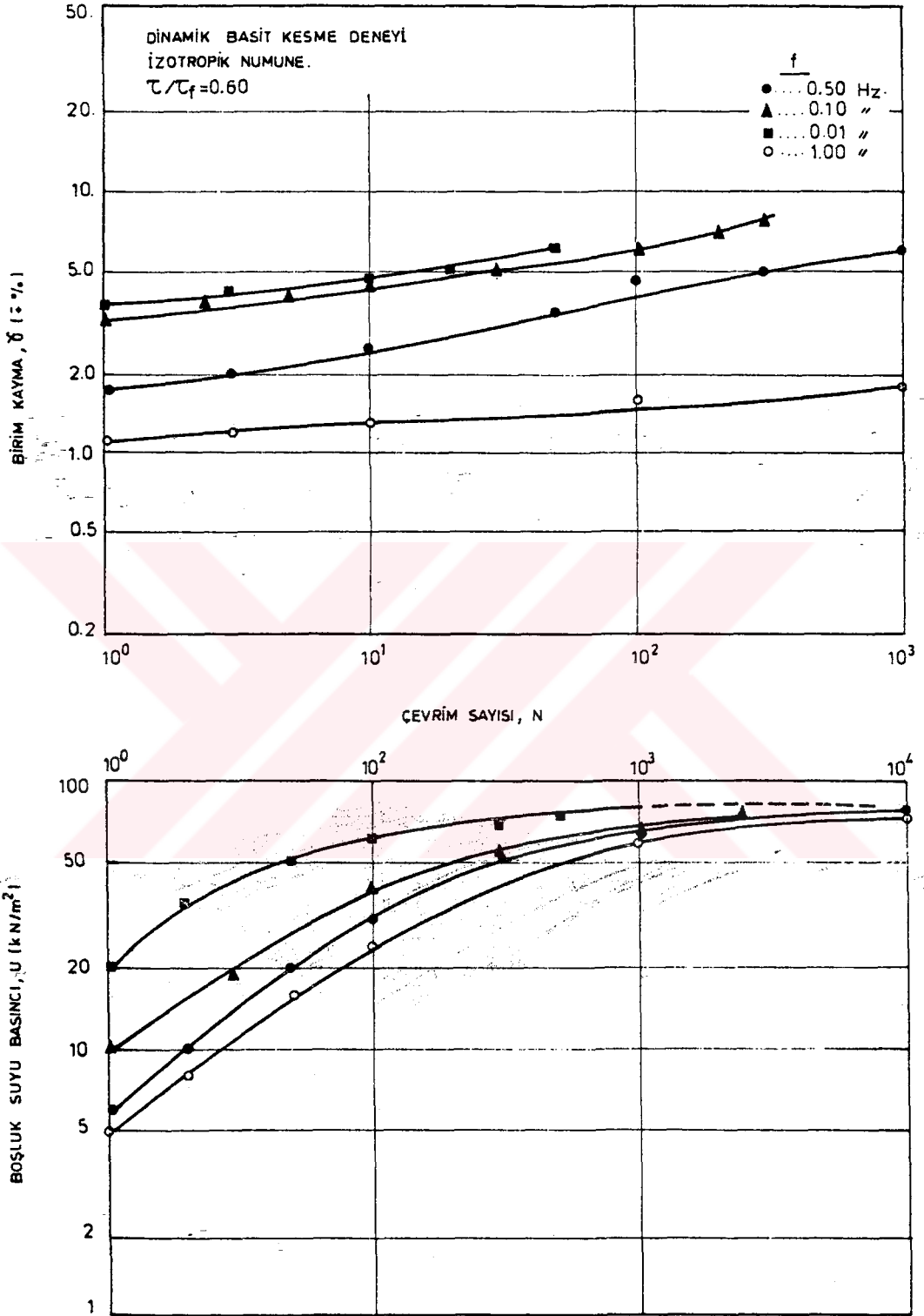
Frekans üzerindeki azalmaların, oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırdığı, çizilen diyagramlardan görülmektedir. Uygulanan tekrarlı gerilme seviyesine bağlı olarak ilk 50 çevrime kadar lineer artan boşluk suyu basınçları 100 çevrim civarında toplanmakta ve 1000 çevrim dolaylarında, tüm gerilme seviyeleri için maksimum değerde odaklanmaktadır. Düzlemsel izotropik numunelerde bu özellik yüksek gerilme oranlarında, ($\tau/\tau_f > 0.50$), görülmektedir.



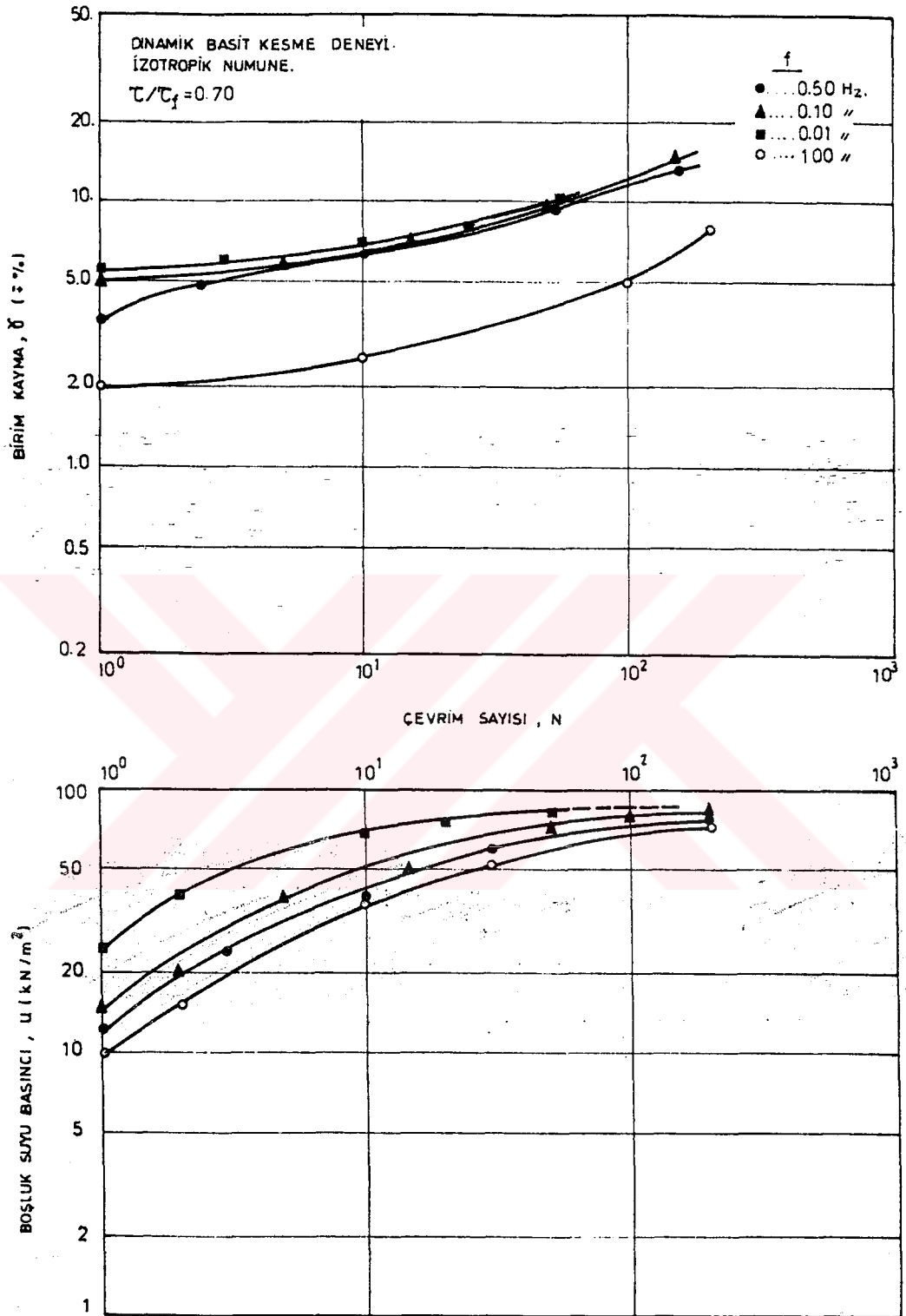
ŞEKİL: 4.25 - GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.26 - GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.27-GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.28 - GERİLME ORANI İLE BOŞLUK SUYU BASINCI VE BİRİM KAYMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ

4.3. DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYLER

Kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerine deney sisteminin etkisini araştırmak için, dinamik basit kesme deney aletinde yapılan deneyler, dinamik üç eksenli deney aletinde tekrarlanmıştır. Düzlemsel izotropik ve izotropik olarak hazırlanmış olan deney numuneleri, $\sigma_c = 100 \text{ kN/m}^2$ hücre basıncında konsolide edilmişlerdir. 0.50, 0.10 ve 0.01 Hz frekanslarında ve farklı dinamik gerilme oranlarında sinuzoidal yükleme biçimi uygulanarak seri deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, dinamik basit kesme deneylerinde izlenen yoldan faydalanılmıştır. Aynı frekans ve aynı dinamik gerilme oranında düzlemsel izotropik ve izotropik olarak yapılan deneylerle ilgili toplu sonuçlar Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'de toplanmıştır. Tablolarda, deney frekansı, uygulanan dinamik gerilme oranı, oluşan boşluk suyu basıncının ve birim boy değişimlerinin ilk ve son değerleri, ulaşılan çevrim sayısı ve deney sırasında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler yer almaktadır. Tablo 4.3'de belirli bir frekansta, değişik dinamik gerilme oranındaki deney sonuçları özetlenirken, Tablo 4.4 de ise, belirli bir dinamik gerilme oranında, farklı frekansta toplu değerlendirme yer olmaktadır.

Bu bölümde dinamik üç eksenli deney aletinde düzlemsel izotropik ve izotropik numuneler üzerinde yapılan deneyler ayrı ayrı incelenecek ve iki ayrı şekilde hazırlanmış numuneler ile yapılan deneyler karşılaştırılacaktır.

Tablo 4.3. Dinamik Uç Eksenli Deneylerin Frekansa Göre Toplu Değerlendirilmesi

Düzlemsel İzotropik					İzotropik				
Gerilme Oranı σ_d/σ_c	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	ϵ ±%	ϵ_p mm	Gerilme Oranı σ_d/σ_c	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	ϵ ±%	ϵ_p mm
FREKANS = 0.01 Hz.									
0.40	100	4-67	0.9-2.6	9	0.40	100	7-70	0.7-1.5	5
0.50	100	6-72	1.1-3.7	11	0.50	65	10-80	0.8-2.0	10
0.60	60	12-82	2.2-7.5	12.5	0.60	90	15-82	1.8-5.0	15
0.70	6	13-50	3.2-6.5	19	0.70	50	20-80	3.2-12.0	14
FREKANS = 0.10 Hz.									
0.40	160	3-56	0.7-2.0	7	0.40	100	4-60	0.6-1.5	4
0.50	45	4-60	0.9-3.0	23	0.50	100	4-65	0.7-2.0	17
0.60	200	6-72	1.6-6.0	25	0.60	95	5-75	1.5-4.0	19
0.70	50	9-70	2.8-11.0	25	0.70	45	10-75	2.4-10.0	18
FREKANS = 0.50 Hz.									
0.30	200	1-30	0.12-0.20	-	0.30	200	1-35	0.9-0.15	-
0.40	300	2-42	0.5-0.9	-	0.40	300	2-45	0.35-0.50	-
0.50	300	4-65	0.6-2.5	11	0.50	2000	3-70	0.60-1.10	2
0.60	100	6-62	0.7-2.5	15	0.60	500	5-75	0.70-1.50	12
0.70	200	8-75	1.2-8.2	25	0.70	500	6-80	0.85-3.0	18

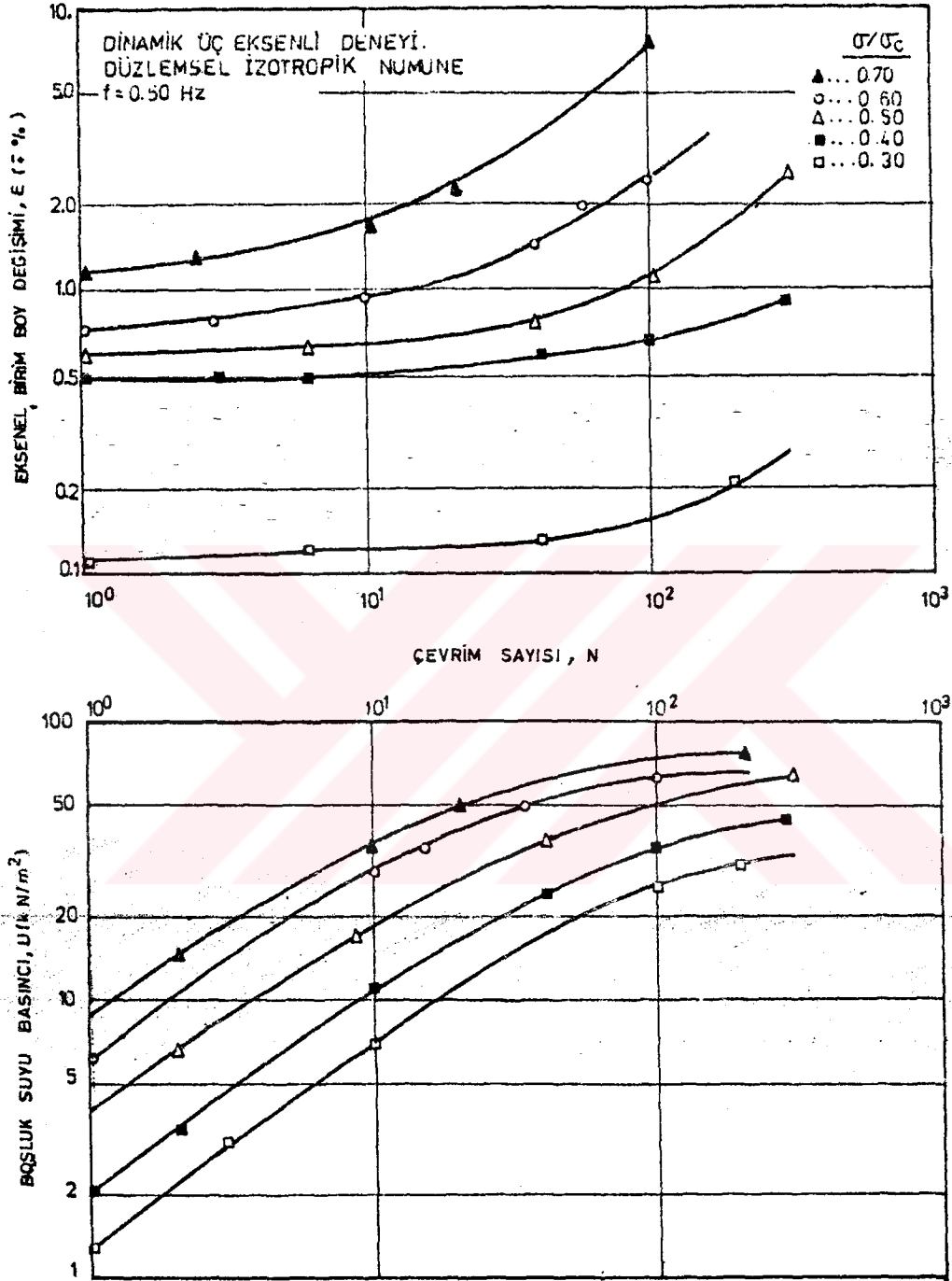
Tablo 4.4. Dinamik Üç Eksenli Deneylerinin Dinamik Gerilme Oranına Göre Toplu Değerlendirilmesi

Düzlemsel İzotropik					İzotropik				
Frekans f Hz	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	ϵ ±%	ϵ_p mm	Frekans f Hz	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	ϵ ±%	ϵ_p mm
DİNAMİK GERİLME ORANI $\sigma_d/\sigma_c = 0.30$									
0.50	200	1.30	0.12-0.20	-	0.50	200	1.35	0.09-0.15	-
DİNAMİK GERİLME ORANI $\sigma_d/\sigma_c = 0.40$									
0.01	100	4-67	0.9-2.6	9	0.01	100	5-70	0.7-1.5	5
0.10	160	3-56	0.7-2.0	7	0.10	100	4-60	0.6-1.5	4
0.50	300	2-42	0.5-0.9	-	0.50	300	2-45	0.6-0.50	-
DİNAMİK GERİLME ORANI, $\sigma_d/\sigma_c = 0.50$									
0.01	100	6-72	1.1-3.7	11	0.01	65	10-80	0.8-2.0	10
0.10	45	4-60	0.9-3.0	23	0.10	100	4-65	0.7-2.0	17
0.50	300	4-65	0.6-2.5	11	0.50	2000	3-70	0.6-1.13	2
DİNAMİK GERİLME ORANI, $\sigma_d/\sigma_c = 0.60$									
0.01	60	12-82	2.2-7.5	12.5	0.01	90	15-82	1.8-5.0	15
0.10	200	8-72	1.6-6.0	25.0	0.10	95	5-75	1.4-3.5	19
0.50	100	6.62	0.7-2.5	15.0	0.50	500	5-75	0.7-1.52	18
DİNAMİK GERİLME ORANI, $\sigma_d/\sigma_c = 0.70$									
0.01	6	13-50	3.2-6.5	19	0.01	50	17-80	3.2-12.0	14
0.10	50	9-70	2.8-16.6	25	0.10	45	10-75	2.4-10.0	18
0.50	200	6-75	1.2-7.2	25	0.50	500	6-80	0.80-3.0	18

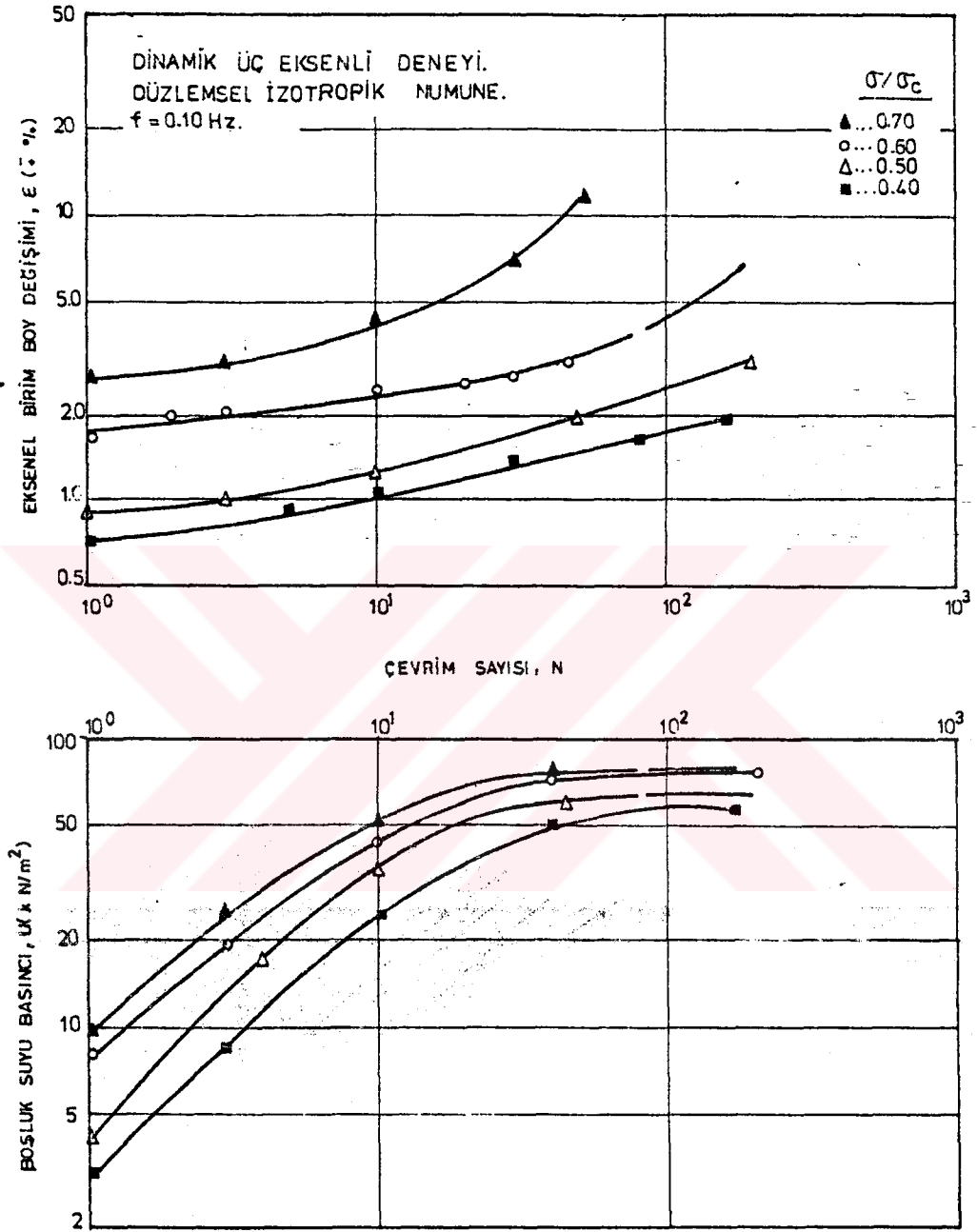
4.3.1. Dinamik Üç Eksenli Düzlemsel İzotropik Numunelerle İlgili Deney Sonuçları

Dinamik üç eksenli deney aletinde, düzlemsel izotropik olarak hazırlanmış deney numuneleri üzerinde toplam 13 adet deney yapılmıştır. Deneyler, üç değişik frekansta (0.01 - 0.10 - 0.50 Hz) ve beş değişik dinamik gerilme oranında (0.30 - 0.40 - 0.50 - 0.60 - 0.70) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, boşluk suyu basıncına ve eksenel birim boy değişimine etkiyen faktörler göz önüne alınarak çizilen eğrilerden yararlanılmıştır. Dinamik gerilme oranı, çevrim sayısı ve frekansın bu parametreler üzerindeki etkisi aşağıda anlatılmıştır.

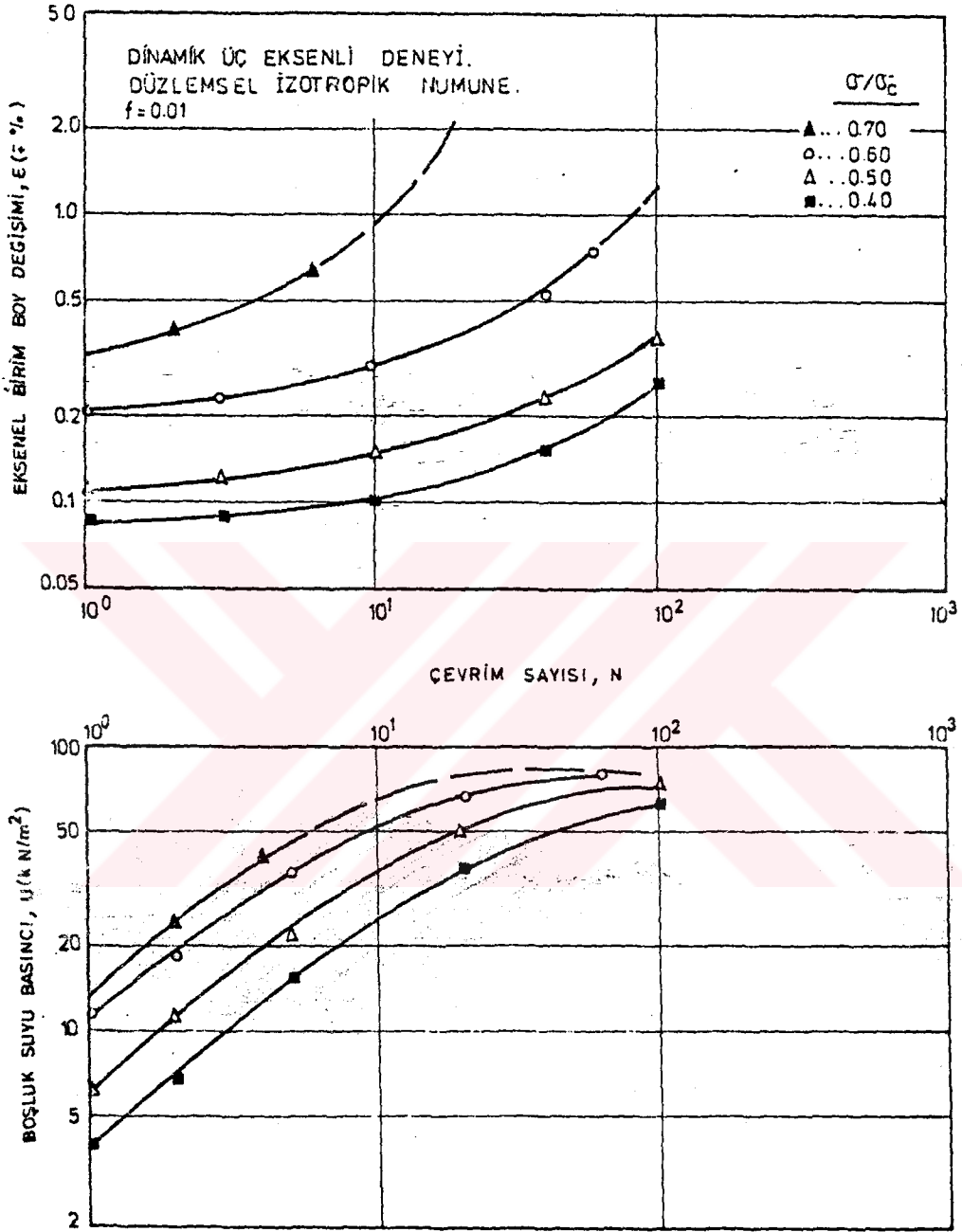
Dinamik gerilme oranının etkisini gözlemek için deney sonuçları, aynı frekansta farklı gerilme oranlarında değerlendirilmiştir (Şekil 4.29, 4.30, 4.31). Eğrilerde, ϵ , eksenel birim boy değişimini, u , boşluk suyu basınçlarını, σ_d , dinamik gerilme oranını, σ_c , numune üzerindeki çevre basıncını, f , frekansı göstermektedir. Numune özelliklerini ilgili parametrelerden bağımsız hale getirmek için uygulanan dinamik gerilme, statik maksimum gerilmeye bölünmüştür. σ_d , bu bulunan değeri ifade etmektedir. Eğrilerin incelenmesinden çıkaracağımız ilk sonuç, aynı frekansta dinamik gerilme oranındaki artımlar, oluşan boşluk suyu basınçlarını ve eksenel birim boy değişimlerini arttırmaktadır. Her üç eğride de bu durum rahatlıkla gözlenmektedir. $\sigma_d/\sigma_c = 0.30$ olan bir tek deney yapılmıştır ($f=0.50$ Hz). Bu deneyde oluşan eksenel birim boy değişimleri, diğer deneylerdeki değerlerden çok küçüktür. $\epsilon = \pm 0.12-0.20$ arasındaki değişimi bir üst dinamik gerilme seviyesinde ($\sigma_d/\sigma_c=0.40$) $\epsilon = \pm 0.5 - 0.9$ arasındadır. Dinamik gerilme oranındaki artımlar, eksenel birim boy değişimlerini arttırmaktadır. Deneylerde gözlenen diğer bir konuda oluşan plastik şekil değişimleridir. Deney sonuçlarından hesaplanan eksenel birim boy değişimlerinde, numune boyu alınırken plastik şekil değiştirmeler gözönüne alınmıştır. Aynı frekansta, dinamik gerilme oranındaki artımlar oluşan plastik şekil değişimlerini arttırmakta, max. 25 mm değerine kadar ulaşmaktadır. Dinamik gerilme oranının sabit bir değerine karşı, frekans-taki azalmalar, plastik şekil değiştirmeleri arttırmaktadır.



ŞEKİL: 4.29. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİNİN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ



ŞEKİL 4.30. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİNİN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ



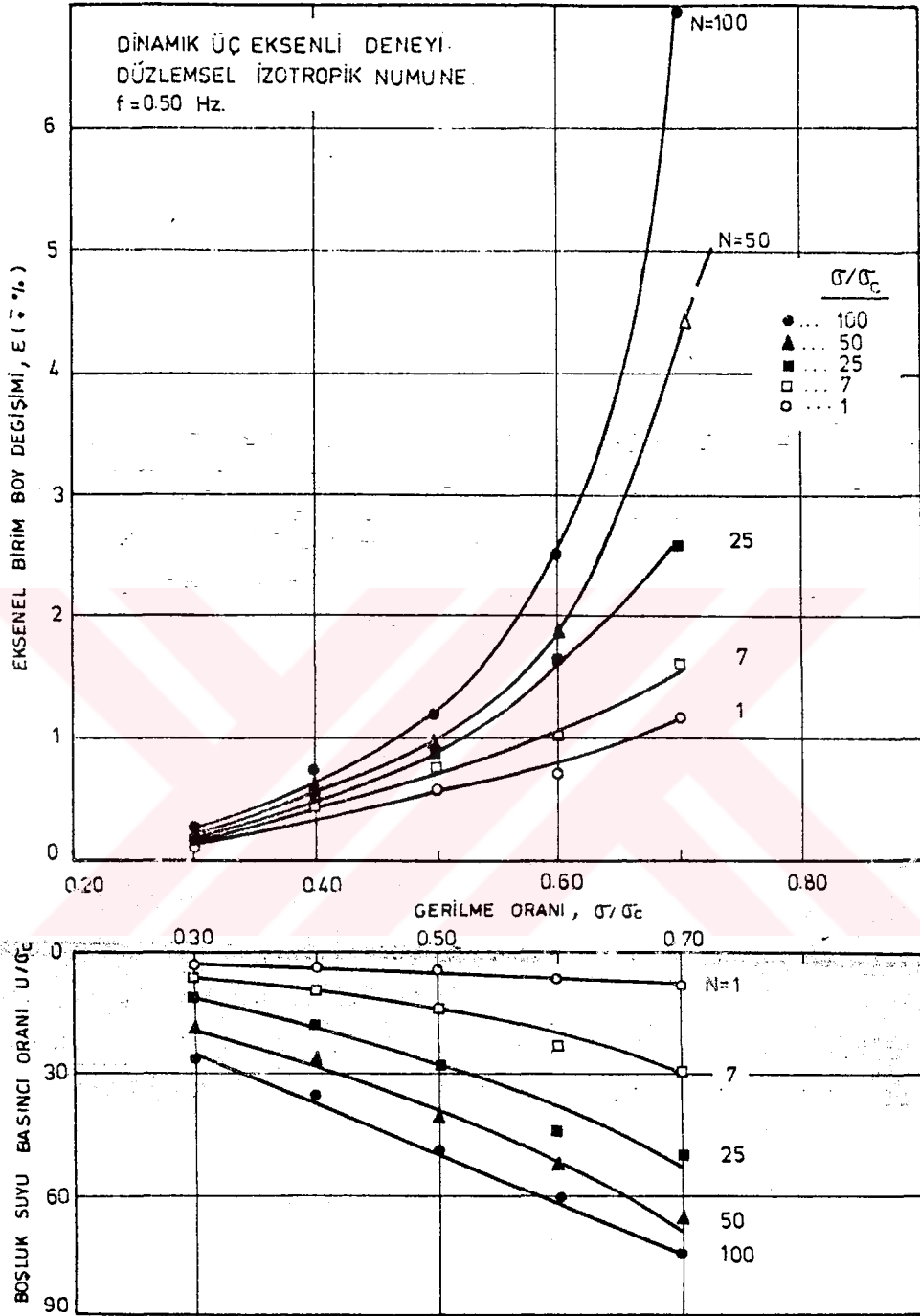
ŞEKİL:4.31- BOŞLUK SUYU BASINCI İLE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİNİN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ

Bunun nedeni, yükün numune üzerindeki uygulama süresinin artmasıyla kalıcıdeformasyonların oluşmasıdır. Frekansın düşük olduğu (0.01 Hz - 0.10 Hz) deneylerde çevrim sayısının artması, eksenel birim boy değişimini hiperbolik bir eğri boyunca arttırmaktadır. Frekanstaki artımlarda, ilk 10 çevrim için doğrusal ve sabit olan eksenel birim boy değişimlerini bu çevrimden sonra hızla artmaktadır.

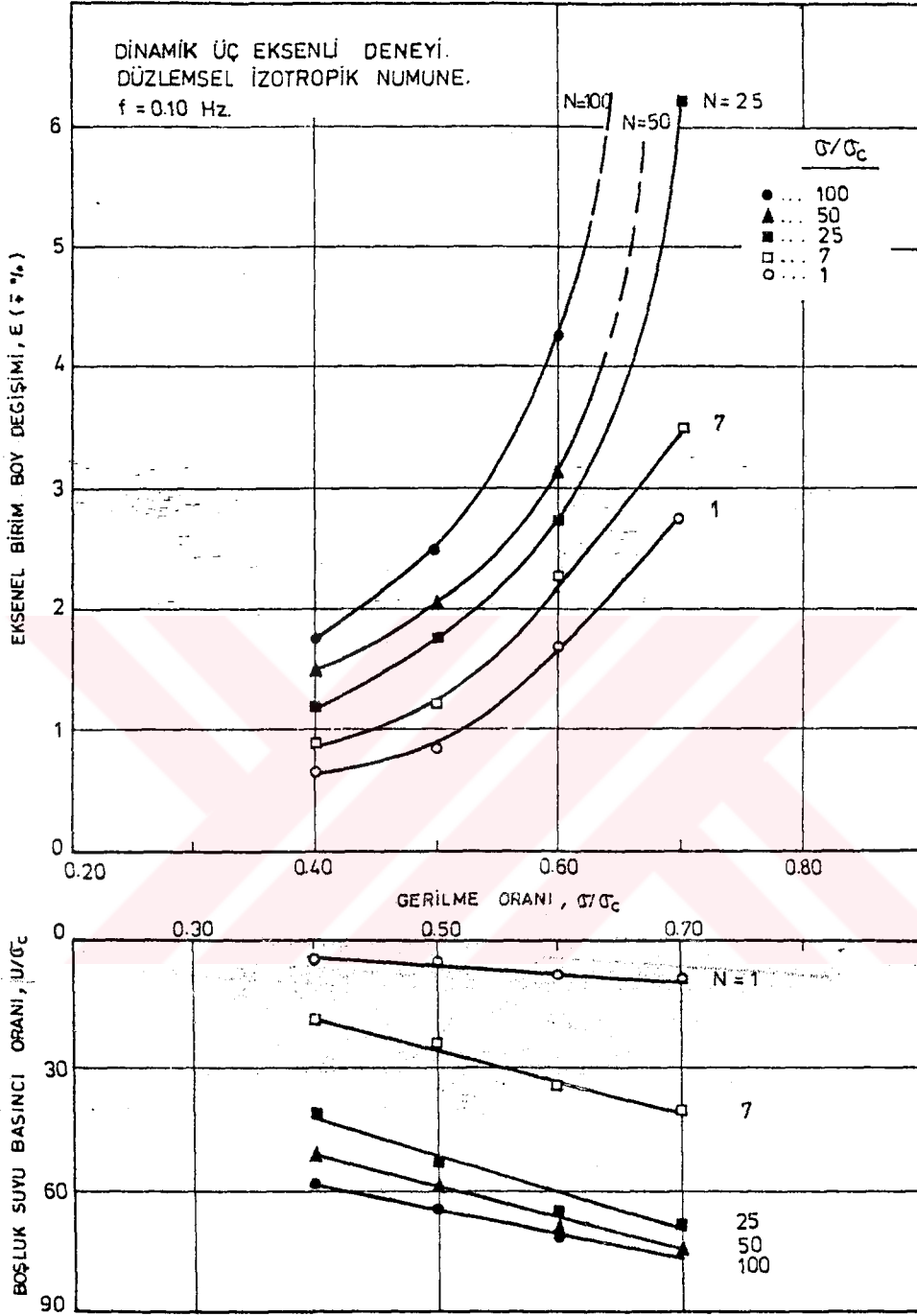
Aynı eğrilerden boşluk suyu basıncını değişimi gözlenirse, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir. Dinamik gerilme oranındaki artımlar, oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırmaktadır. Frekansın 0.10 Hz ve 0.01 Hz olduğu deneylerde, ilk 10 çevrimde boşluk suyu basınçları hızla artmakta ve 100 çevrimden sonra sabitleşme eğilimi görülmektedir. Oluşan maksimum boşluk suyu basıncına %60 'şısı ilk 10 çevrim sonunda meydana gelmektedir. Frekanstaki artım (0.50 Hz) oluşan boşluk suyu basınçlarını azaltmakta, lineer artım 100 çevrime kadar devam etmek olup, bu çevrimden sonra sabitleşme eğilimi görülmektedir. Fakat bu çevrimde eksenel birim boy değişimleri yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Kohezyonlu zeminler tekrarlı yüklemelere maruz bırakıldığında, yükün tekrar sayısı, oluşan boşluk suyu basınçlarına ve eksenel birim boy değişimlerine etki etmektedir. Bu etkinin araştırılması için deney sonuçları, aynı frekansta, belirli dinamik gerilme oranında ve çevrim sayısının değişen değerleri ile (N=1-7-25-50-100) eksenel birim boy değişimi ve boşluk suyu basınçları arasında çizilen eğrilerle (Şekil 4.32, 4.33, 4.34) değerlendirilmiştir.

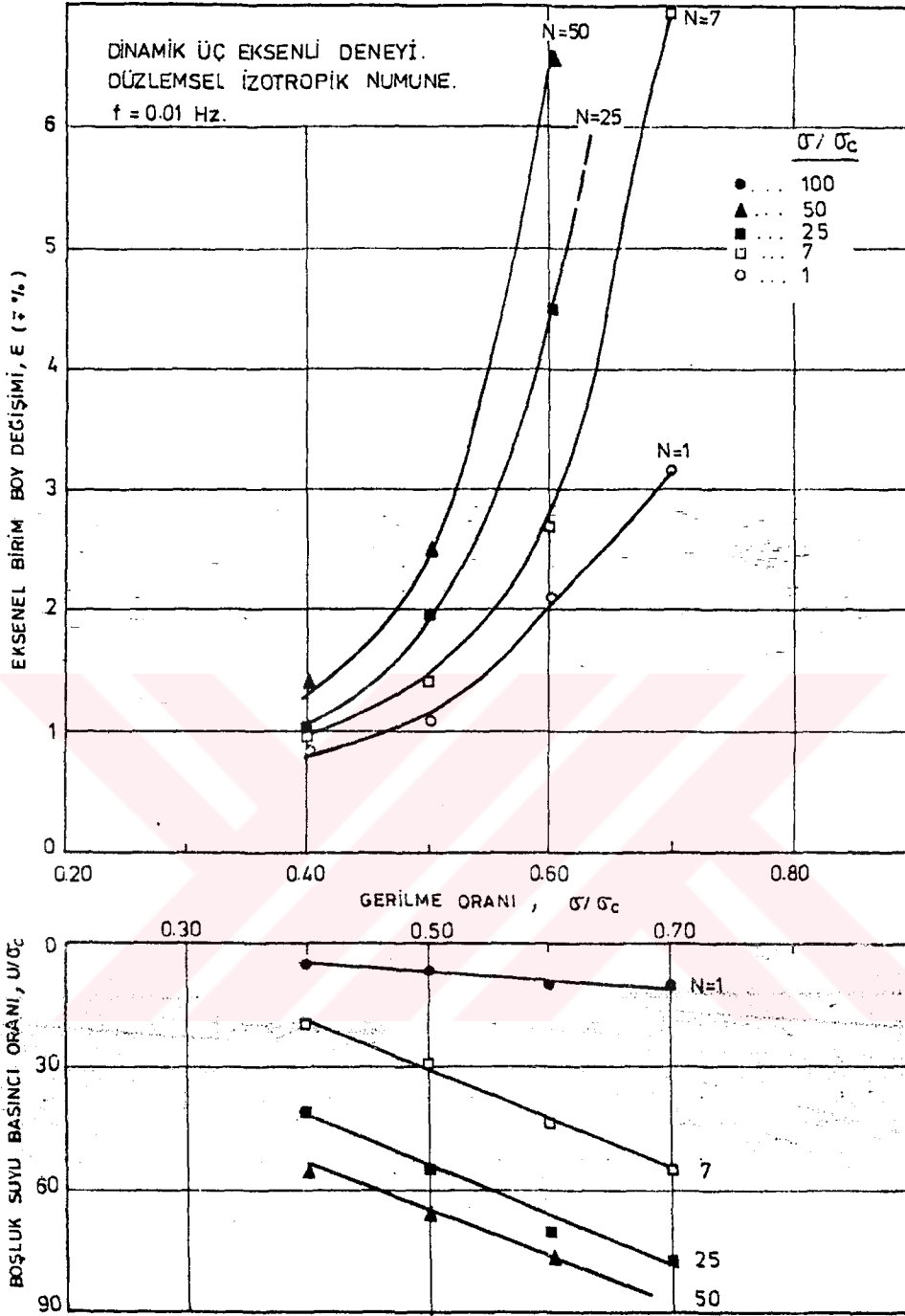
Belirli frekansta, belirli bir çevrim sayısında eksenel boy değişiminin, dinamik gerilme oranına bağlı değişimi hiperbolik bir eğridir. Çizilen diyagramlara bakıldığında görünüm bir yelpazeyi andırmakta olup eğriler uzatıldığında $\sigma_d/\sigma_c = 0.20$ değerinde toplanmaktadır. Bu noktanın yeri frekansın bir fonksiyonu olup, frekans değeri azaldıkça, eksenel birim boy değişimi artmaktadır. Frekans 0.50 Hz iken $\epsilon = \pm 0.05$ değerinde meydana gelen odaklaşma, frekans 0.01 Hz iken $\epsilon = \pm 0.5$ değerine yükselmektedir. Frekansın 0.50 Hz ve 0.10 Hz olduğu diyagramlar incelenirse, bu



ŞEKİL:4.32_BELİRLİ TEKRARLI GERİLMELERDE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ



ŞEKİL: 4.33- BELİRLİ TEKRARLI GERİLMELERDE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.



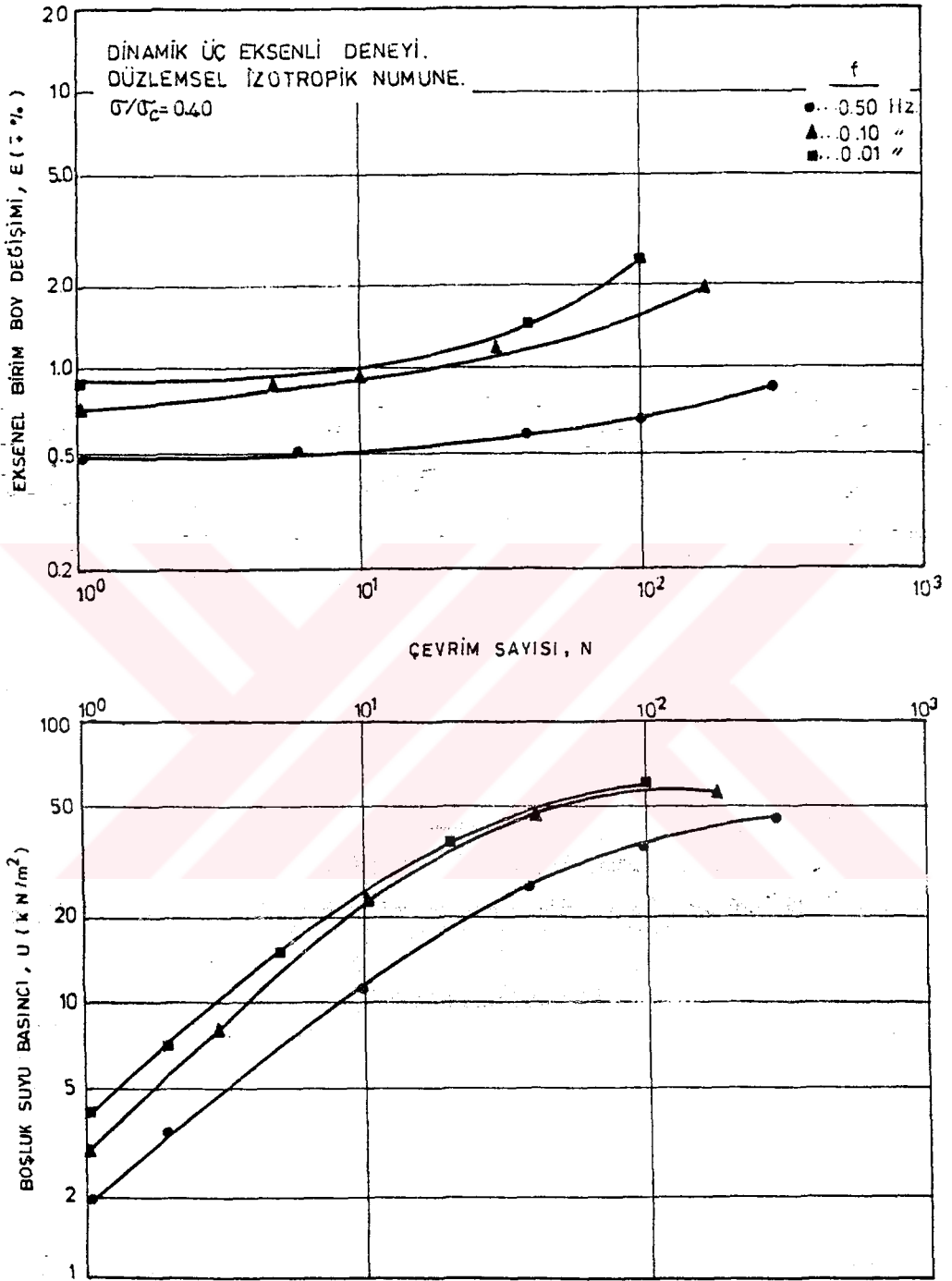
ŞEKİL: 4.34- BELİRLİ TEKRARLI GERİLMELERDE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ.

iki değerin kritik bir sınır oluşturduğu söylenebilir. Frekans 0.50 Hz olduğu deneylerde dinamik gerilme oranının artması, deformasyonları hızla arttırmakta ve eğriler hızla birbirlerinden uzaklaşmaktadır. Frekansın 0.10 Hz ve 0.01 Hz olduğu deneylerde, dinamik gerilmelerdeki artışlar deformasyonları arttırmakta fakat eğriler birbirlerine paralel gitmektedir. Eğrilerin taşlanması düşük gerilme seviyelerinde olmaktadır. Frekansın 0.50 Hz, gerilme oranının 0.40 olduğu deneylerde, $N = 1-100$ çevrim arasında $\epsilon = \pm 0.4 - 0.7$ arasında değişirken, frekansın 0.10 Hz ve 0.01 Hz olması halinde aynı deney koşullarında deformasyon aralığı, $\epsilon = \pm 0.7 - 1.8$ ve $\epsilon = 0.8 - 1.4$ arasında değişmektedir.

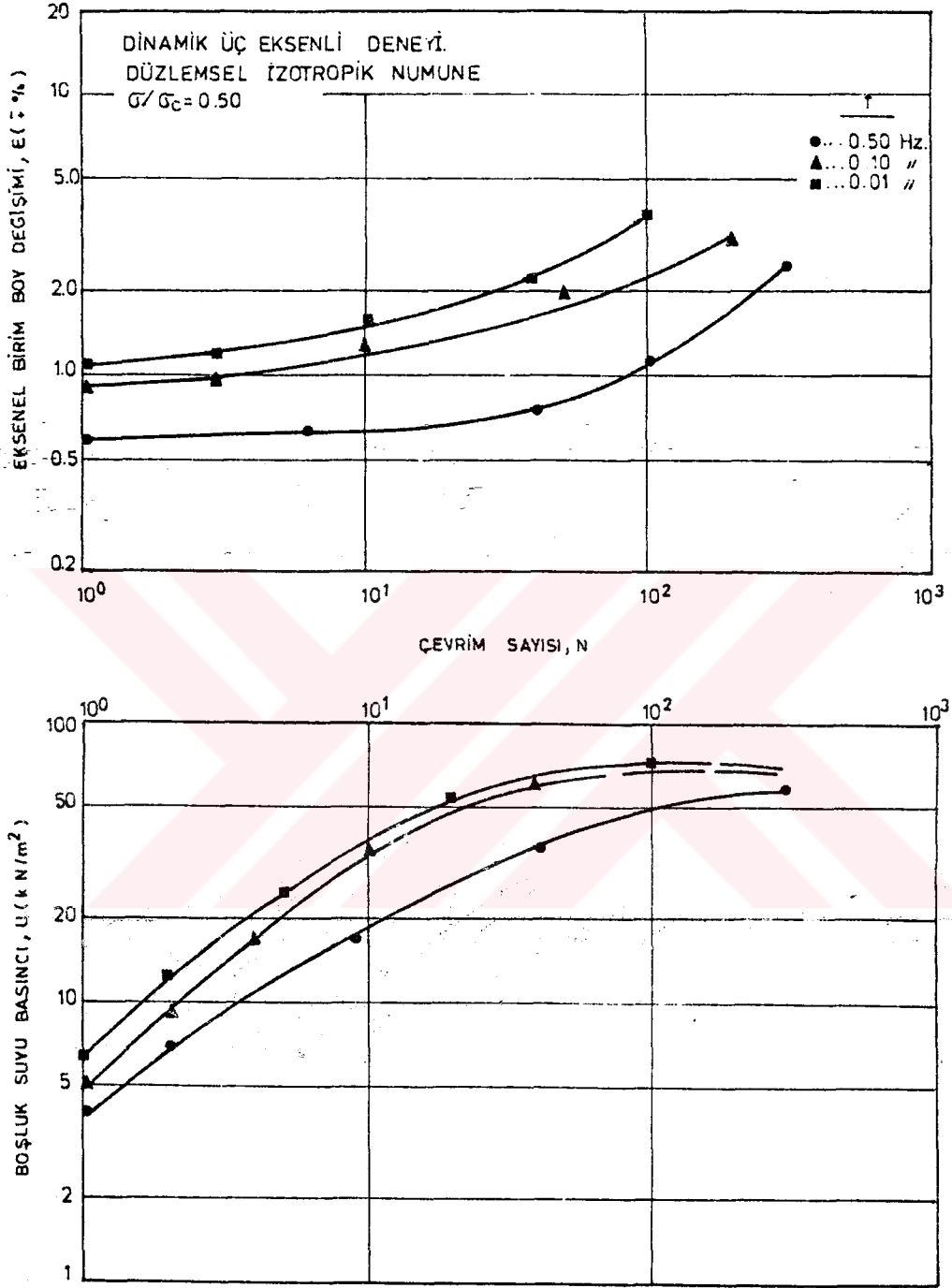
Boşluk suyu basınçlarının değişimini aynı eğrilerden incelersek, bu değişimin lineer olduğunu söyleyebiliriz. Çevrim sayısının artışı, doğruların eğimlerini de arttırmaktadır. Frekans değerlerindeki artımlar (0.50 Hz) bu lineer davranışı eğrisel şekle çevirdiği Şekil 4.32 de görülmektedir.

Dinamik üç eksenli deney aletinde düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde, frekansın etkisini gözlemek amacıyla, belirli gerilme oranlarında, frekans ile eksenel boy değişimi-boşluk suyu basınçlarının değişimini çevrim sayısına bağlı olarak gösteren diyagramlar çizilmiştir (Şekil 4.35, 4.36, 4.37, 4.38).

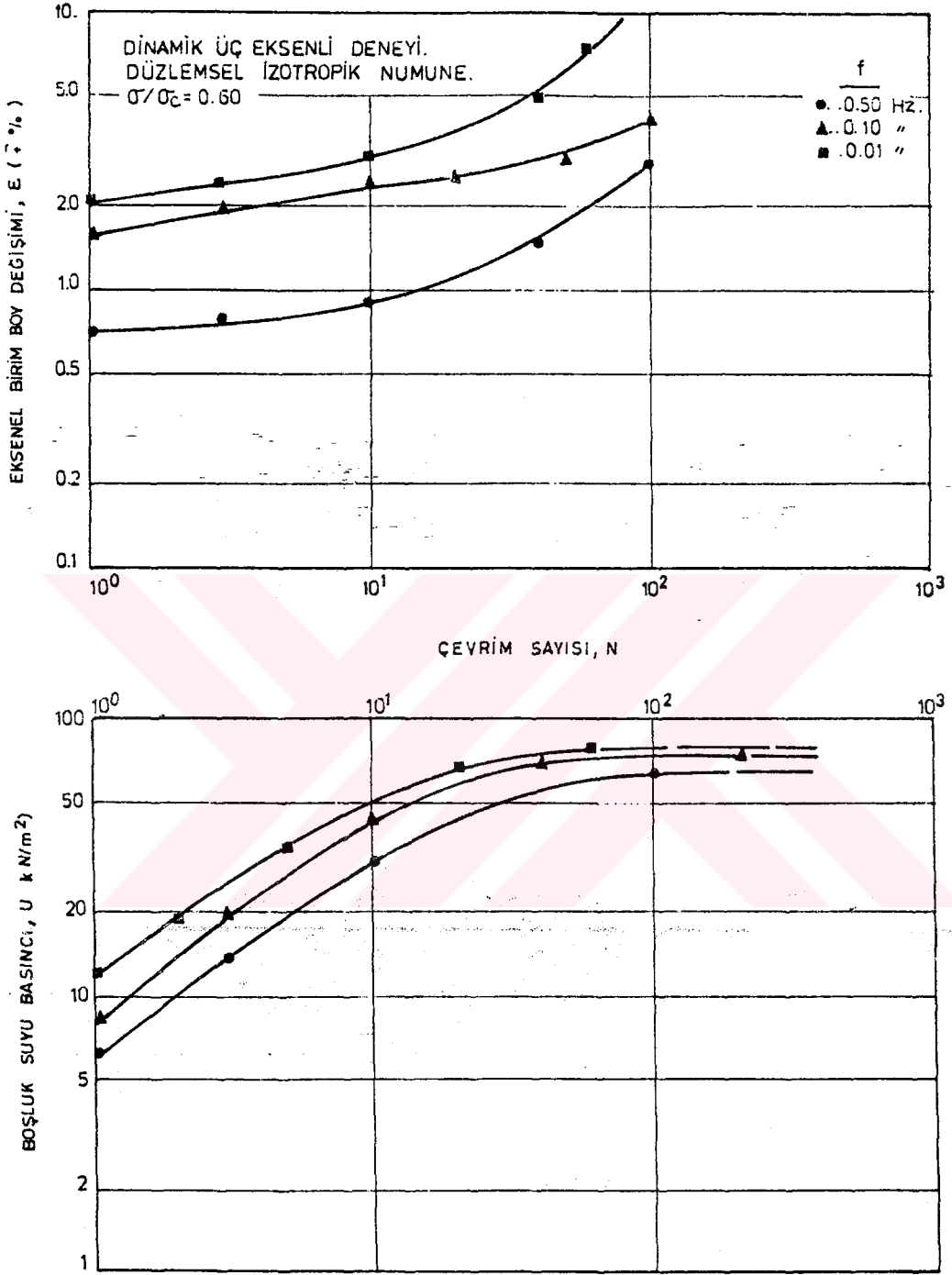
Eğrilerin incelenmesinden ilk çıkarılan gözlem, aynı gerilme oranında, frekans değerindeki azalmalar meydana gelen eksenel birim boy değişimlerini arttırdığıdır. Frekansın 0.01 Hz ve 0.10 Hz olduğu deneylerde, düşük gerilme seviyesinde oluşan eksenel birim boy değişimleri arasında anlamlı bir fark söz konusu değildir. Gerilme oranındaki artımlarda bu fark açılmakta frekans etkisi kendini göstermektedir. Frekansın 0.50 Hz olduğu deneylerde ise oluşan eksenel boy değişimleri diğer frekanslardan farklı ve daha azdır. Deneyler sırasında oluşan plastik şekil değiştirmeler içinde frekans aynı etkiyi yapmakta, düşük frekanslarda daha fazla plastik şekil değişimi meydana gelmektedir. Fakat gerilme oranının $\sigma_d/\sigma_c > 0.50$ olması durumunda plastik şekil değişimlerine frekansın etkisi azalmakta ve değerler birbirlerine yaklaşmaktadır (Tablo 4.3).



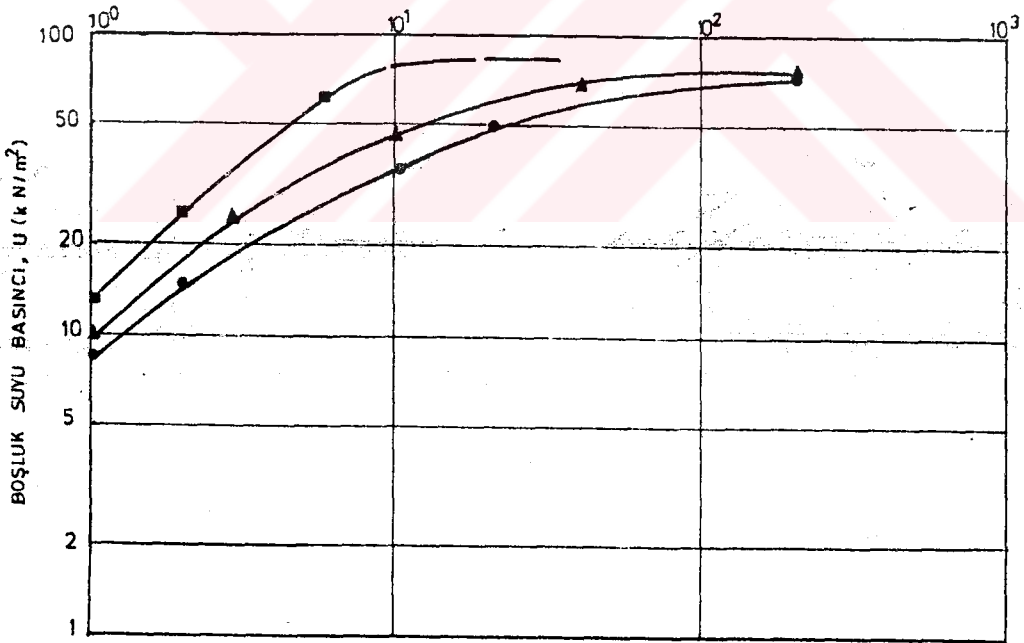
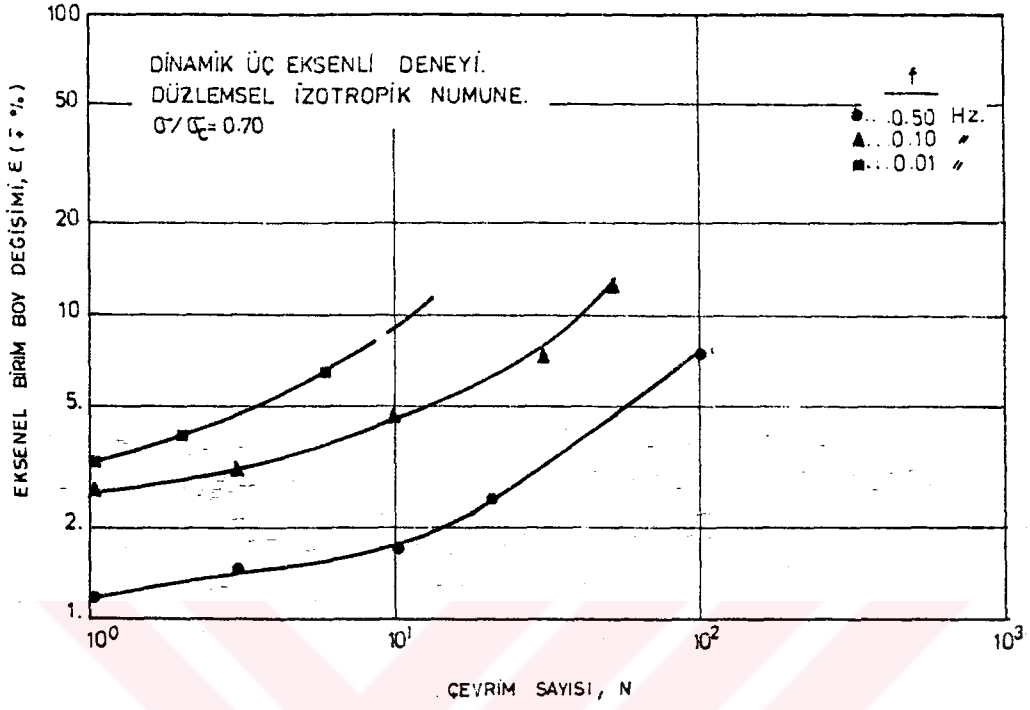
ŞEKİL: 4.35- GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ



ŞEKİL: 4.36. GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ



ŞEKİL: 4.37 - GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ



ŞEKİL: 4.38 - GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ

Aynı eğri gruplarında, çevrim sayısı ile eksenel birim boy değişimi arasındaki ilişkinin hiperbolik olduğu görülmektedir. Gerilme oranı 0.60 kadar olan deneylerde ilk 50 çevrime kadar lineer artan eksenel birim boy değişimleri bu değerden sonra eğrisel olarak hızla artmaktadır. Bu hızlı artımda numunede oluşan plastik şekil değişimlerinde rolü vardır. Gerilme oranının 0.60 değerinden büyük olması halinde ise eksenel birim boy değişimleri ilk çevrimden itibaren artmaktadır. Bunun nedeni ise diğer etkenlerin yanı sıra numune statik mukavemetine yaklaşılmaması ve numune iç yapısında oluşan bozulmalardır.

Deneyler sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarına frekansın etkisi, eksenel birim boy değişimine benzemekte artan frekans değeri oluşan boşluk suyu basınçlarını azaltmaktadır. Fakat bu etki anlamlı bir fark meydana getirmemektedir. Artan çevrim sayıları oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırmakta ve 100 çevrimden sonra maksimum değere (yaklaşık 70 kN/m^2) asimtot olmaktadır. Boşluk suyu basıncı artışları, düşük gerilme seviyelerinde ($\sigma_d/\sigma_c = 0.40$) 100 çevrime, kritik gerilme seviyesinde ($\sigma_d/\sigma_c = 0.50 - 0.60$) 50 çevrime, yüksek gerilme seviyelerinde ($\sigma_d/\sigma_c > 0.60$) 10 çevrime kadar lineer olmaktadır.

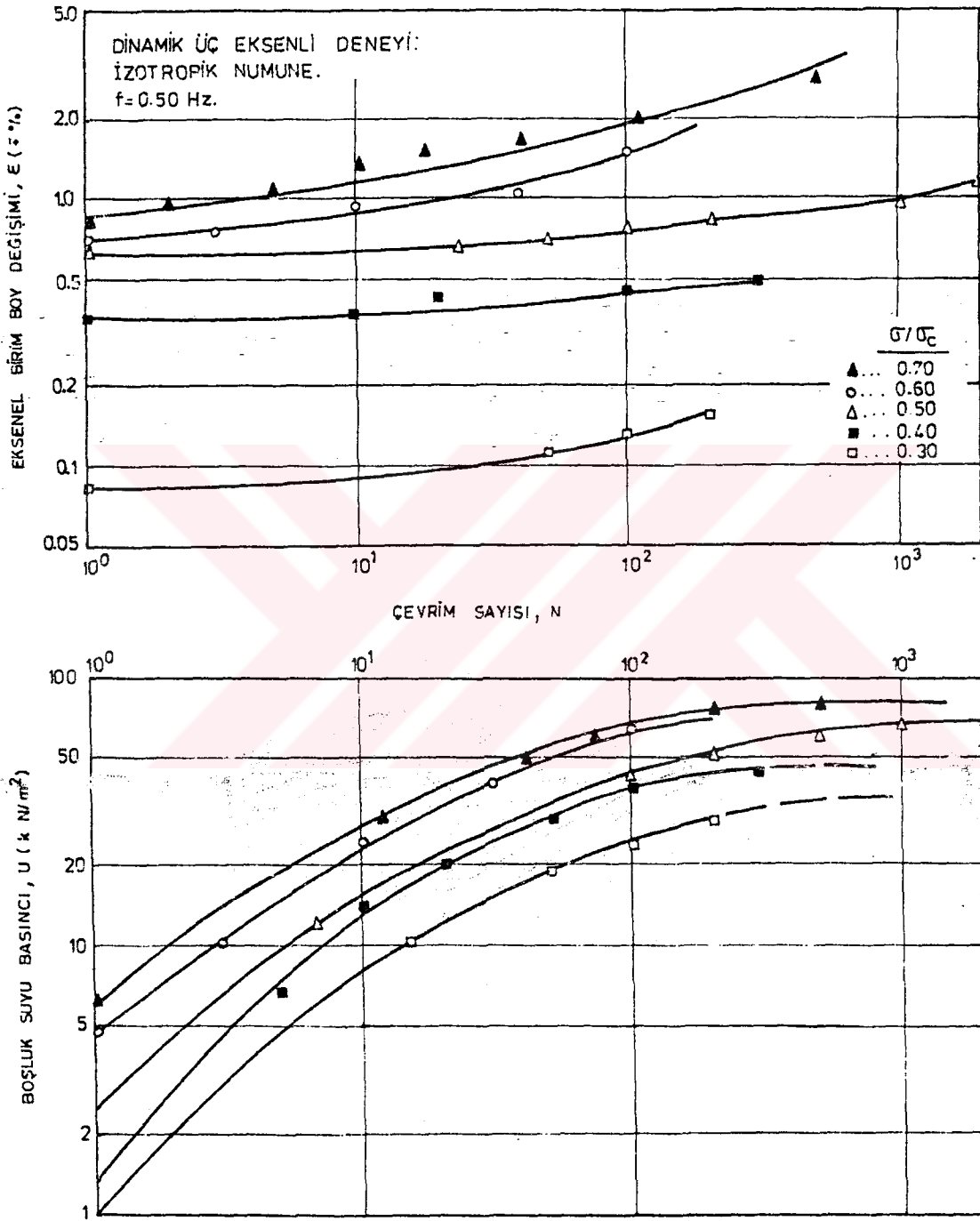
4.3.2. Dinamik Üç Eksenli İzotropik Numunelerle İlgili

Deney Sonuçları

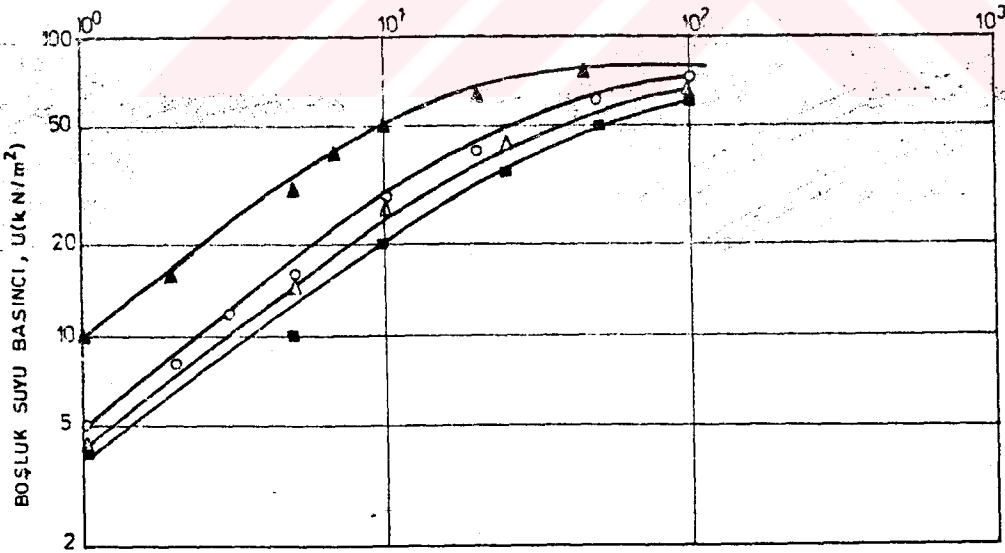
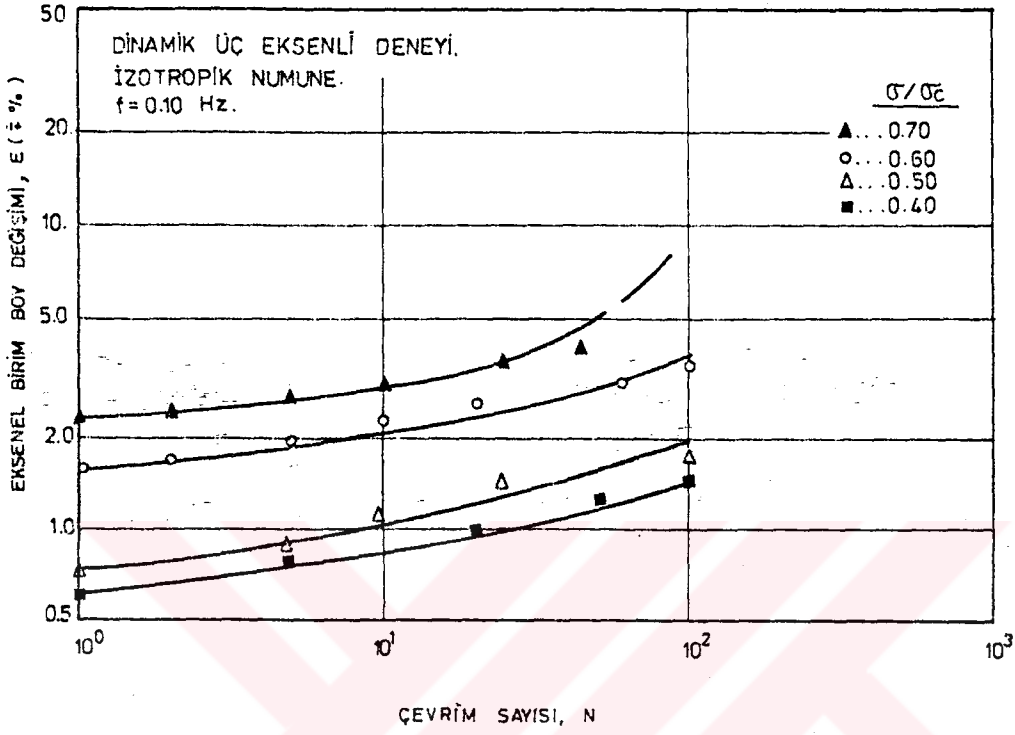
Numunelerin iç yapısının bozulmasının (yuğrulmanın) deney sonuçlarına etkisi araştırmak üzere dinamik üç eksenli deney aletinde izotropik (örselenmiş) olarak hazırlanmış numuneler üzerinde üç değişik frekansta ve beş değişik gerilme oranında toplam 13 adet deney yapılmıştır. Bu deney setleri dinamik üç eksenli düzlemsel izotropik deneylere karşı gelecek şekilde seçilmiştir. Böylelikle her iki grubun karşılaştırılması sağlanmıştır. Bu bölümde dinamik üç eksenli izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları değerlendirilmiş ve bu sonuçlar dinamik üç eksenli düzlemsel numunelerle yapılan deneylerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesini, aynı frekans, farklı gerilme oranlarına göre yapılmış ve bununla ilgili çizilen eğriler Şekil 4.39, 4.40, 4.41'de görülmektedir. Doğal olarak gözlenen ilk sonuç, aynı frekansta, gerilme oranındaki artımlar oluşan boşluk suyu basınçlarını ve eksenel birim boy değişimlerini arttırdığıdır. Bu sonuç düzlemsel izotropik numunelerle yapılan deneylere uyum göstermektedir. Her iki deney grubu birbiri ile karşılaştırılırsa, izotropik hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan deneylerde oluşan boşluk suyu basınçları biraz daha yüksek değerlere ulaşırken, eksenel birim boy değişimleri daha küçük değerlerde kalmaktadır. Bu durum Tablo 4.3'de rahatlıkla görülmektedir. Düzlemsel izotropik numunelerde, zemin danelerinin yatay düzlem boyunca sıralanmaları mukavemeti düşürmekte dolayısı ile oluşan eksenel birim boy değişimlerini arttırmaktadır. Aynı nedenle boşluklardaki suyun ortamda hareketinin rahat oluşu, daha düşük boşluk suyu basınçlarının doğmasına neden olmaktadır. Fakat her iki şekilde hazırlanan numuneler üzerinde aynı koşullarla yapılan deneylerin boşluk suyu basıncı yönünden karşılaştırılmasında aşırı bir farkın olmadığı görülmüştür. İlk çevrimlerde oluşan boşluk suyu basınçları hemen hemen aynı iken, aynı deney sonu çevrimlerinde düzlemsel izotropik numunelerdeki boşluk suyu basınçlarının, izotropik numunelerdeki boşluk suyu basınçlarına oranı yaklaşık %93 mertebesinde-dir. Eksenel birim boy değişimlerinin karşılaştırılmasında, düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde elde edilen değerler, izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlardan, ilk çevrimlerde %17-20 fazla iken, artan çevrim sayıları ile bu yüzdenin daha da arttığı, aynı deney sonu çevrim sayılarında %77-84 değerine ulaştığı görülmüştür. Her iki deney grubunun karşılaştırılmasında elde edilen sonuçlar üzerinde frekansın önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

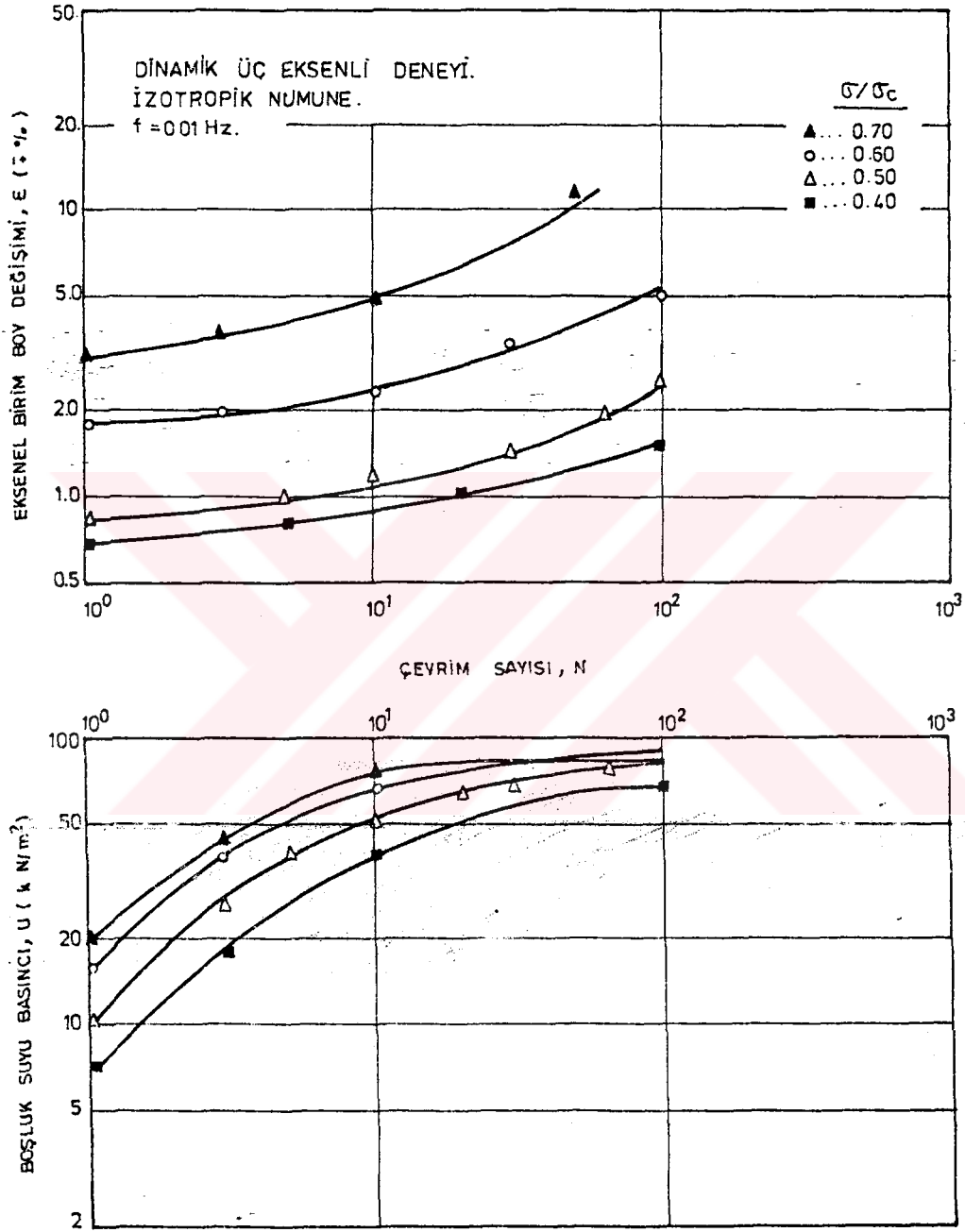
Deney eğrilerinin incelenmesinde ise frekansın 0.01 Hz ve 0.10 Hz olduğu deneylerden elde edilen sonuçların birbirlerine yakın olduğu, oluşan boşluk suyu basınçlarının 100 çevrim civarında aynı maksimum değere asimtot olduğu ve eksenel birim boy değişimlerinin artan dinamik gerilme oranı ve çevrim sayısı ile arttığı görülmektedir. Frekansın 0.50 Hz seçildiği deneylerde daha



ŞEKİL:4.39. BOŞLUK SUYU BASINCI İLE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİNİN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ



ŞEKİL 4.40..BOŞLUK SUYU BASINCI İLE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİNİN GERİLME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ



ŞEKİL 4.41 - BOŞLUK SUYU BASINCI İLE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİNİN GERİME ORANINA BAĞLI DEĞİŞİMİ

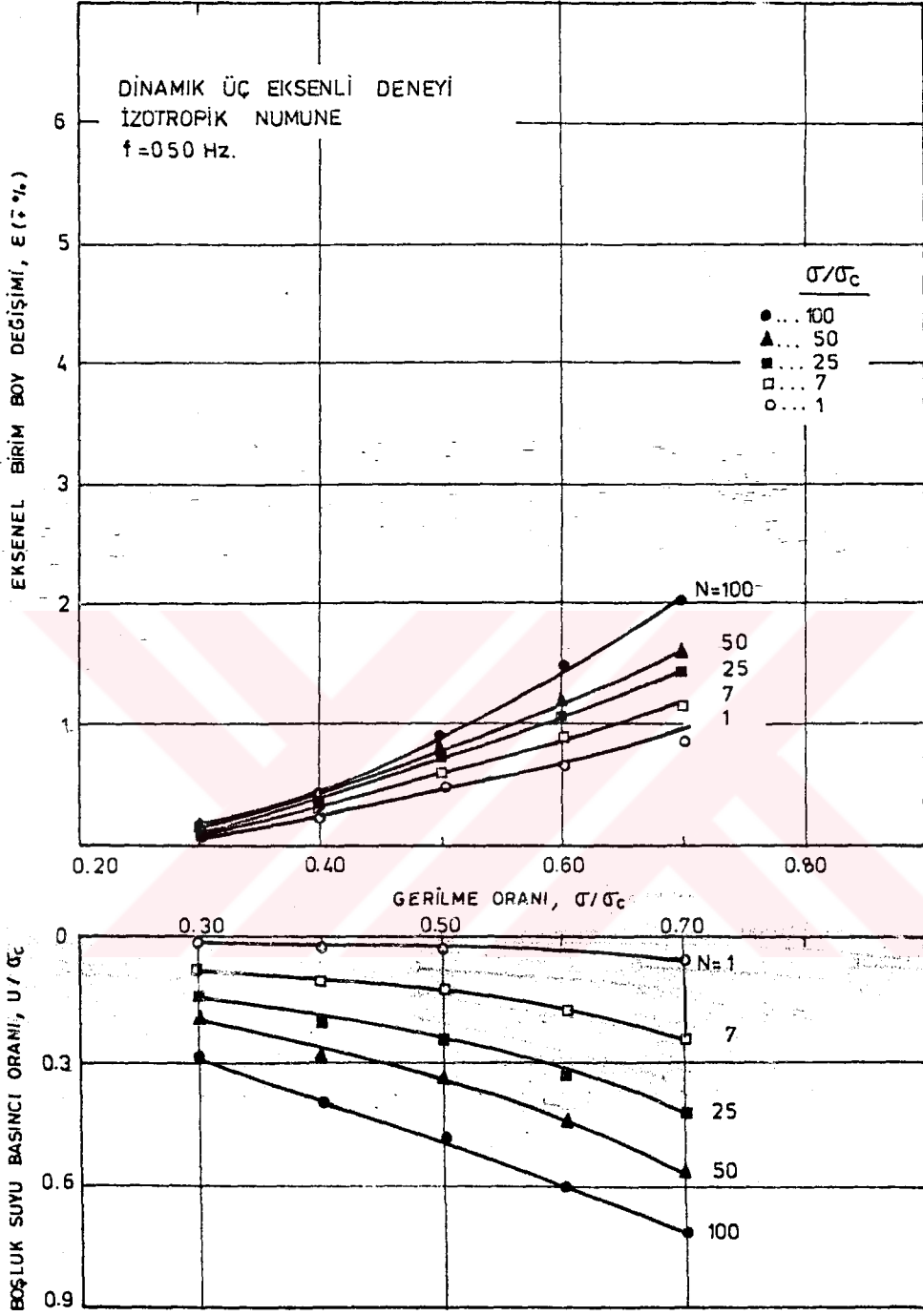
az boşluk suyu basıncı olduğu ve yaklaşık 1000 çevrimde farklı değerlere asimtot olduğu, eksenel birim boy değişimlerinin ise çok küçük mertebelerde kaldığı söylenebilir.

Deneyler sırasında meydana gelen kalıcı şekil değiştirmeler, düzlemsel izotropik numunelerde, izotropik numunelere göre ortalama %70 daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni, numune iç yapısındaki farklılaşma ile açıklanabilir.

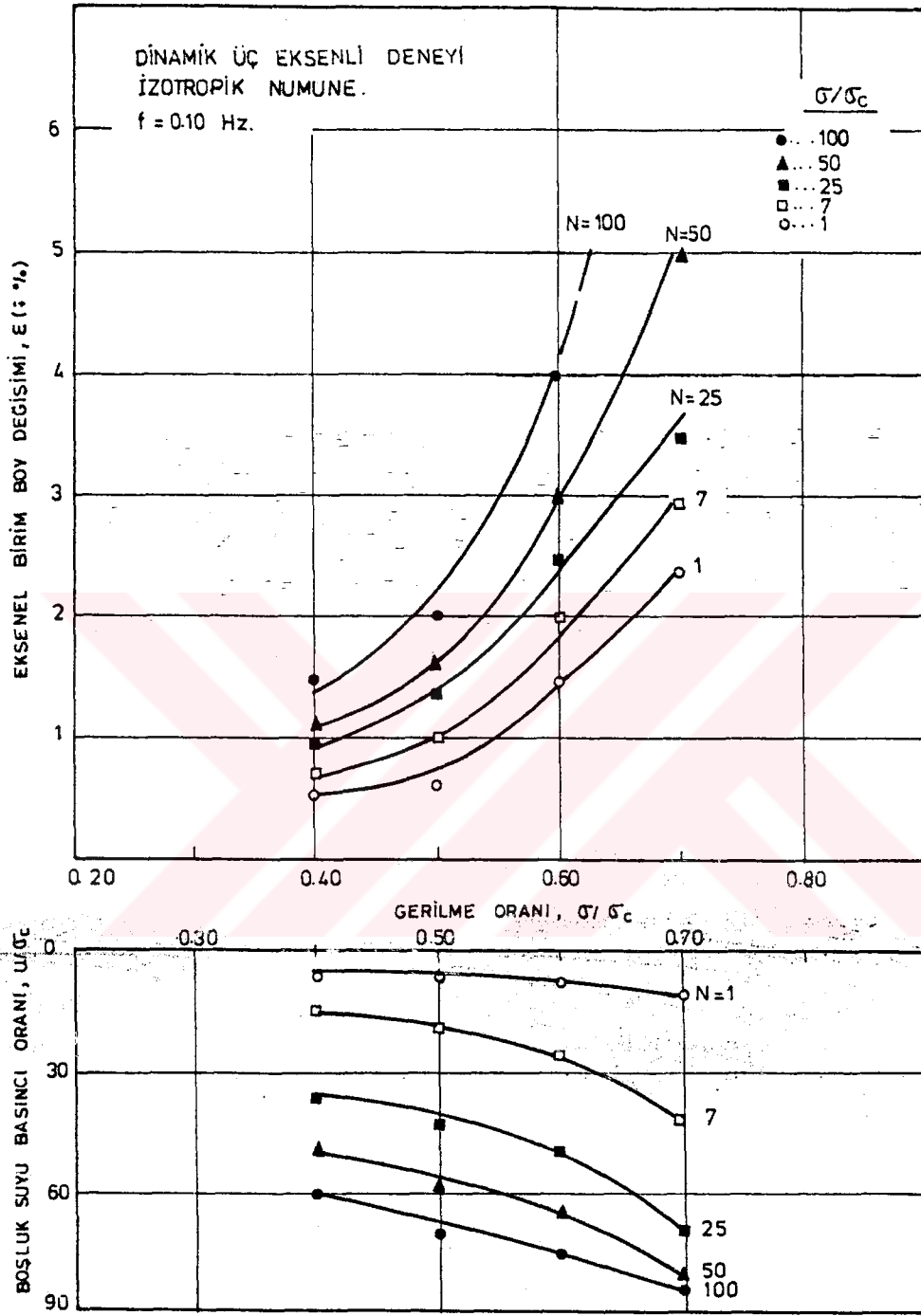
Dinamik deneylerde, dinamik yükün tekrar sayısı, başka bir deyişle çevrim sayısı oluşan boşluk suyu basınçlarına ve eksenel birim boy değişimlerine etki eden bir parametredir. Bu etkinin araştırılması için çizilen Şekil 4.42, 4.43, 4.44'deki diyagramlardan yararlanılmıştır. Eğrilerden gözlenen davranış biçimi düzlemsel izotropik deney sonuçları ile uyuşmakta, yelpazeyi andıran ve artan çevrim sayıları değerlerinde birbirlerinden ayrılan eğriler ile doğru şeklindeki boşluk suyu basıncı değişimleri birbirlerine benzerdir.

İzotropik numunelerde zemin yapısındaki bozulma nedeni ile eğrilerin odaklanma yeri $\sigma_d/\sigma_c = 0.20$ değerinden, $\sigma_d/\sigma_c = 0.10$ değerine ötelenmiştir. Frekansın 0.50 Hz olduğu değerlerde ise eğri toplanmakta, diğer frekans eğrilerinden farklılık göstermektedir. Dinamik gerilme oranı 0.70 olduğu deneyde ilk çevrimde %1 olan eksenel birim boy değişimi, 100 çevrimde %2 civarına çıkmaktadır. Diğer frekanslarda yapılan deneylerde ise aynı durumda büyük farklılaşma meydana gelmektedir.

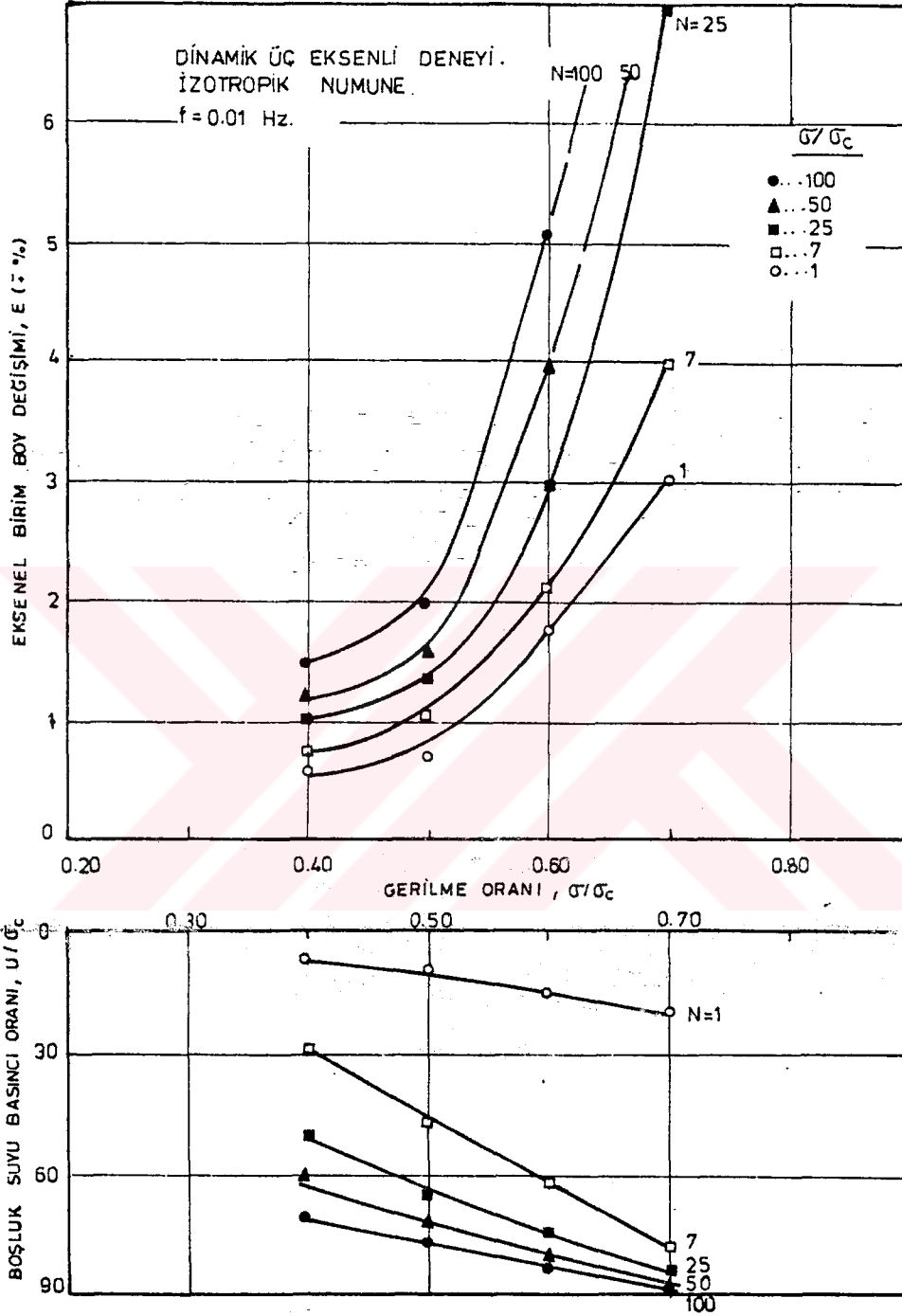
Aynı eğrilerden boşluk suyu basıncı değişimlerinin lineer olduğu söylenebilir. Frekansın 0.10 Hz , çevrim sayısının $N = 7$ ve $N = 25$ olduğu değerlendirmede doğrularda eğrileşme gözlenmektedir. Çevrim sayılarındaki artışlar doğru eğimlerini arttırmaktadır. Düzlemsel izotropik ve izotropik numunelerin karşılaştırılmasında, frekansın 0.50 Hz ve 0.10 Hz olduğu deneylerde farklılık gözlenmez iken, frekansın 0.01 Hz olduğu izotropik numunelere ait deneylerde $\sigma_d/\sigma_c \geq 0.50$ değerinden sonra boşluk suyu basıncı değerlerinin birbirlerine yaklaştığı ve hızla maksimum değere ulaştığı görülmektedir.



ŞEKİL: 4.42. BELİRLİ TEKRARLI GERİLMELERDE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ



ŞEKİL:4.43- BELİRLİ TEKRARLI GERİLMELERDE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ
VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ



ŞEKİL : 4.44 - BELİRLİ TEKRARLI GERİLMELERDE EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ
VE BOŞLUK SUYU BASINCININ ÇEVİRİM SAYISINA GÖRE DEĞİŞİMİ

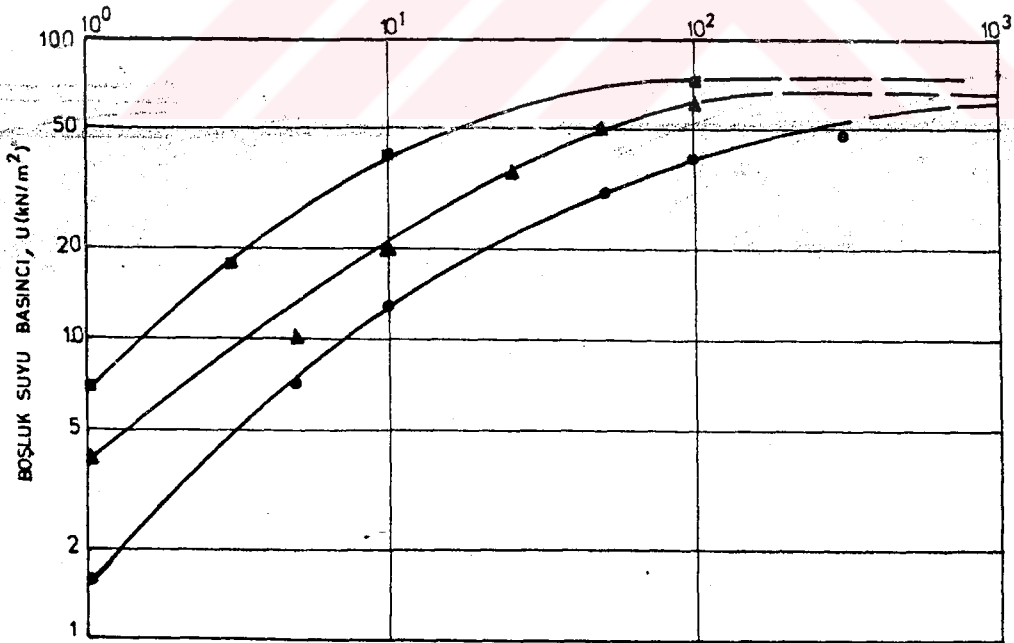
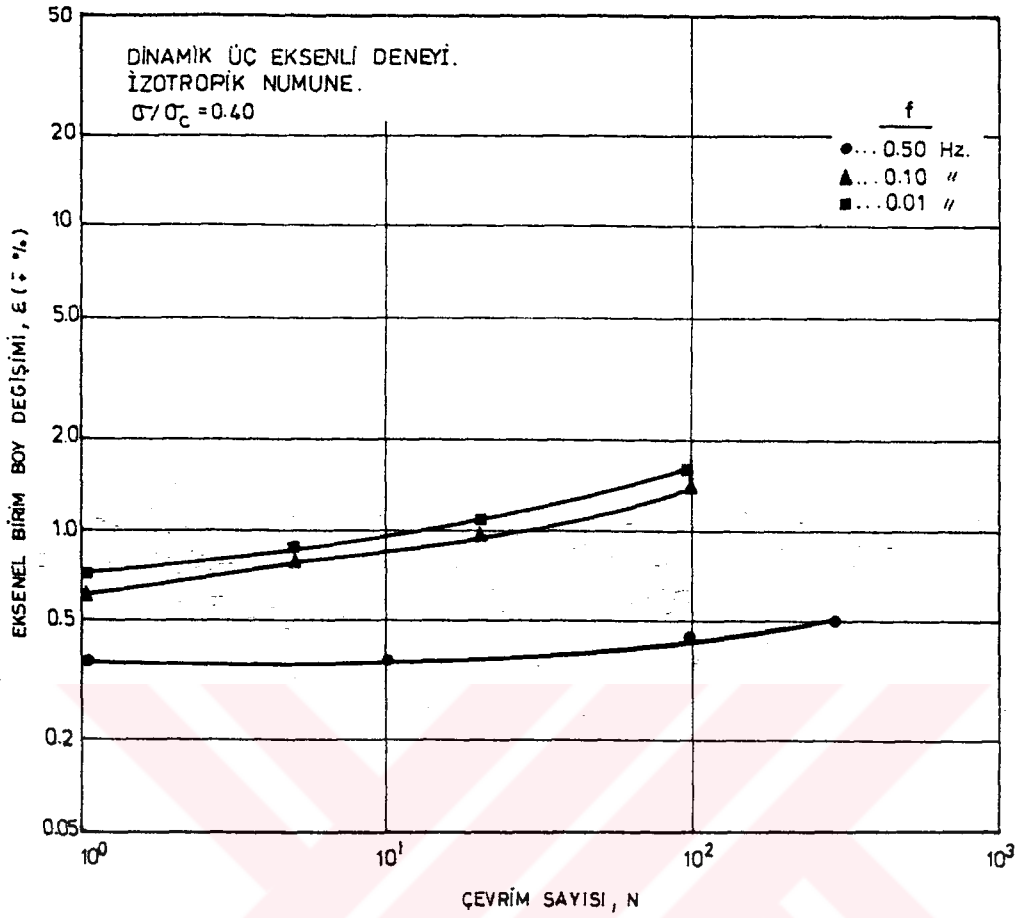
Elde edilen sonuçların son değerlendirmesinde frekansın, boşluk suyu basıncı ve eksenel birim boy değişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 4.45 - 4.46 - 4.47 - 4.48)

Aynı gerilme oranında, frekans değerindeki artırımların, eksenel birim boy değişimlerini azalttığı eğrilerden görülmektedir. Düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde olduğu gibi izotropik numunelerle yapılan deneylerde de 0.01 Hz ve 0.10 Hz frekanslı deneyler birbirlerine yakın sonuçlar verirken 0.50 Hz frekanslı deneyler daha küçük ve farklı eksenel birim boy değişimleri ile farklılık göstermektedir. Deneyler sırasında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler için frekans yine yukarıda sözü edilen etkiyi yapmakta hatta 0.50 Hz frekansta, $\sigma_d/\sigma_c = 0.50$ değerine kadar plastik şekil değişimi oluşmamaktadır. Her iki deney grubunun karşılaştırılmasında ise izotropik numunelerde daha az plastik şekil değişimi görülmektedir.

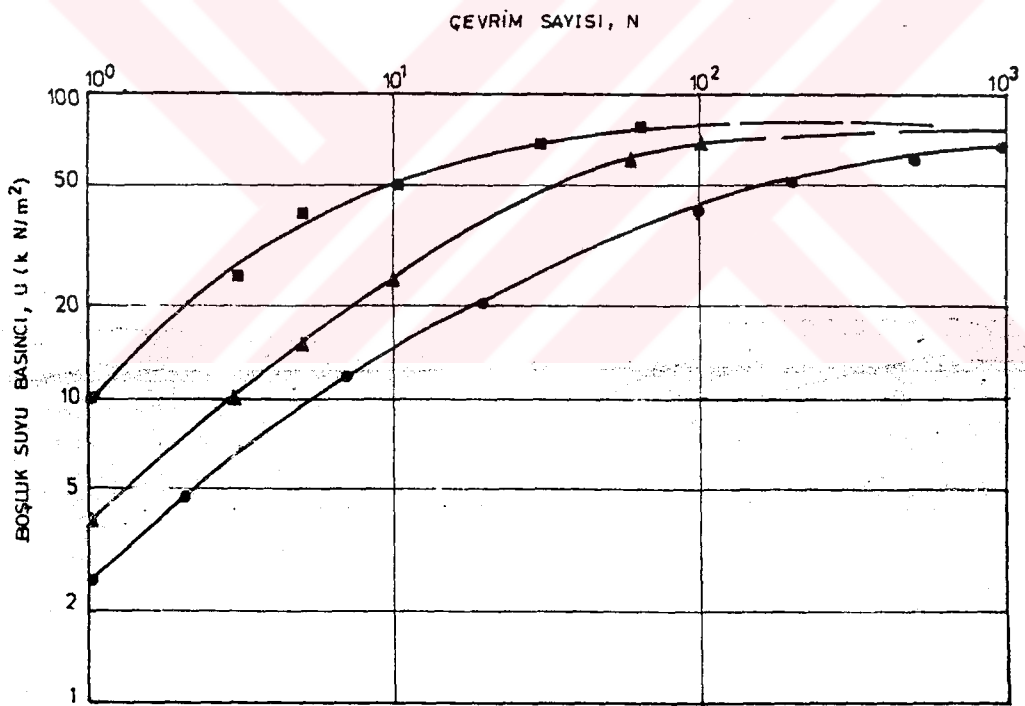
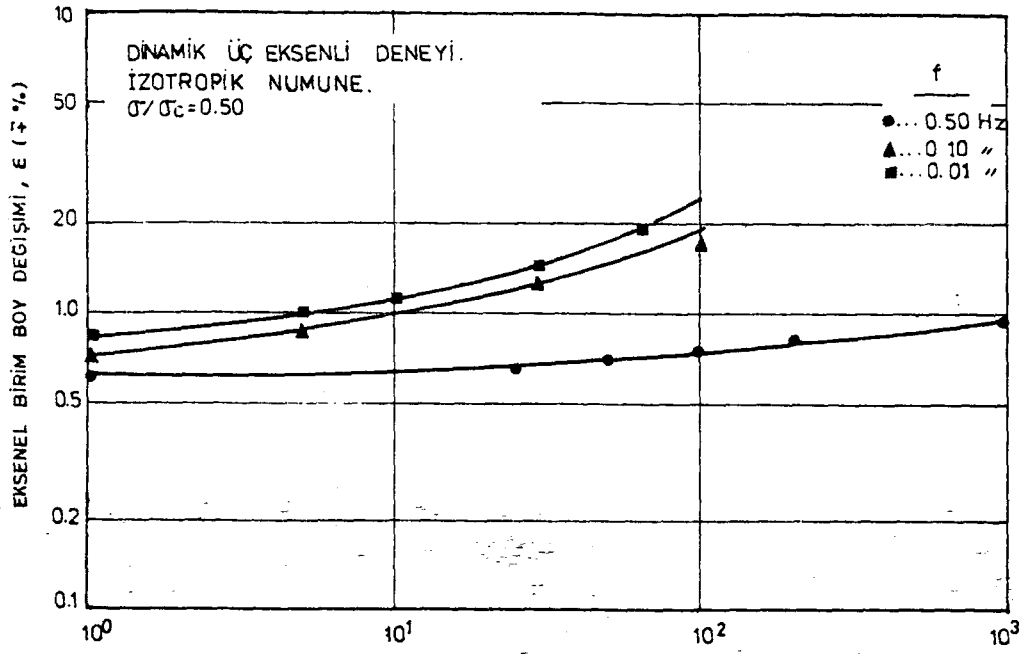
Deneyler sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarına tüm gerilme seviyelerinde, her üç frekans değerinde farklı etkisi görülmekte ve azalan frekans değeri boşluk suyu basınçlarının da azaltmaktadır. Yaklaşık 100 çevrim civarında toplanan eğriler bu çevrimden sonra maksimum değere asimtot alma eğilimine girmektedir.

4.4. DİNAMİK BASİT KESME VE DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

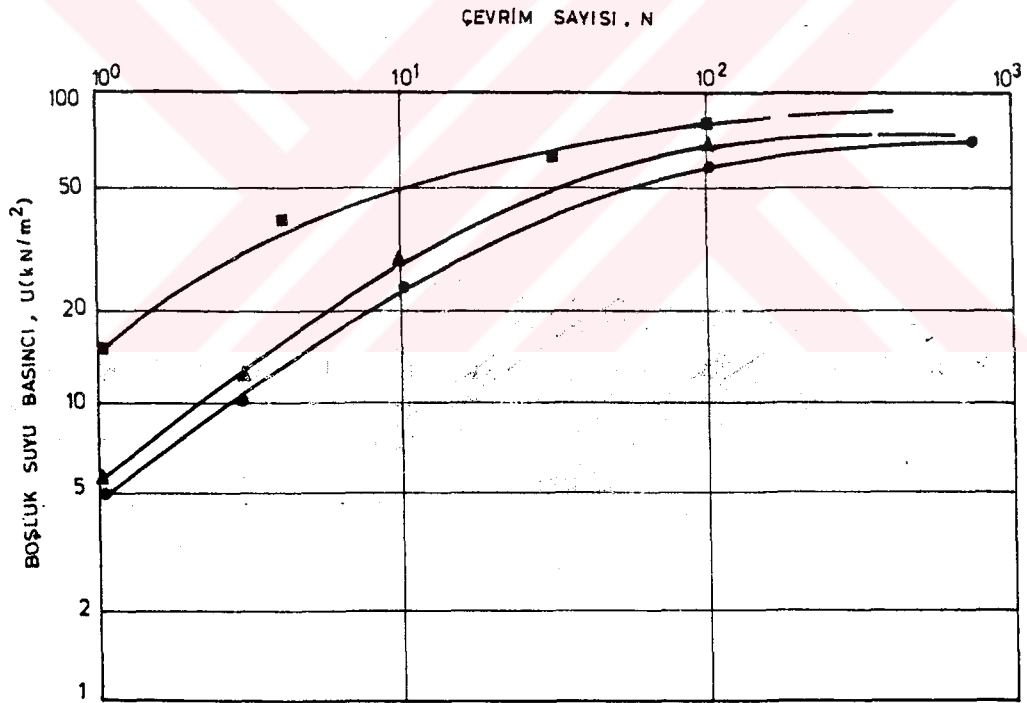
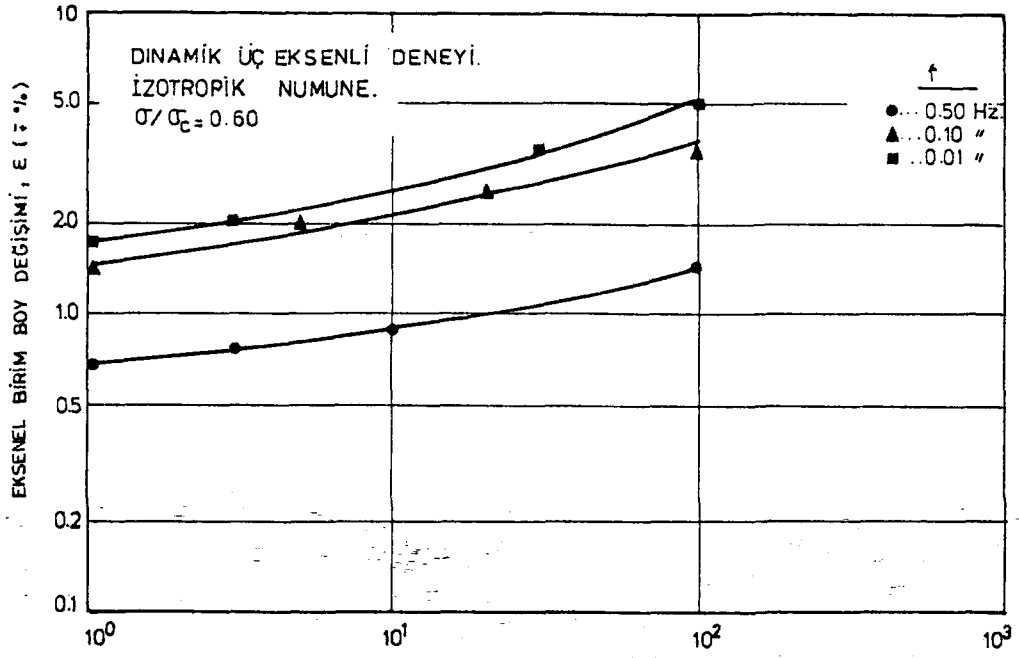
Normal konsolide killerin dinamik özelliklerine deney sisteminin etkisinin araştırılması amacıyla bu tez çerçevesinde yapılan seri, grup deneylerinin karşılaştırılması bu bölümde yapılmıştır. Önce her iki deney sistemiyle düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde, dinamik gerilme oranının, kayma gerilmesinin, frekansın ve çevrim sayısının, oluşan boşluk suyu basınçlarına eksenel birim boy değişimlerine ve birim kaymalara etkisi karşılaştırmalı olarak açıklanacaktır. Aynı etkileşim izotropik numuneler üzerinde araştırılacaktır.



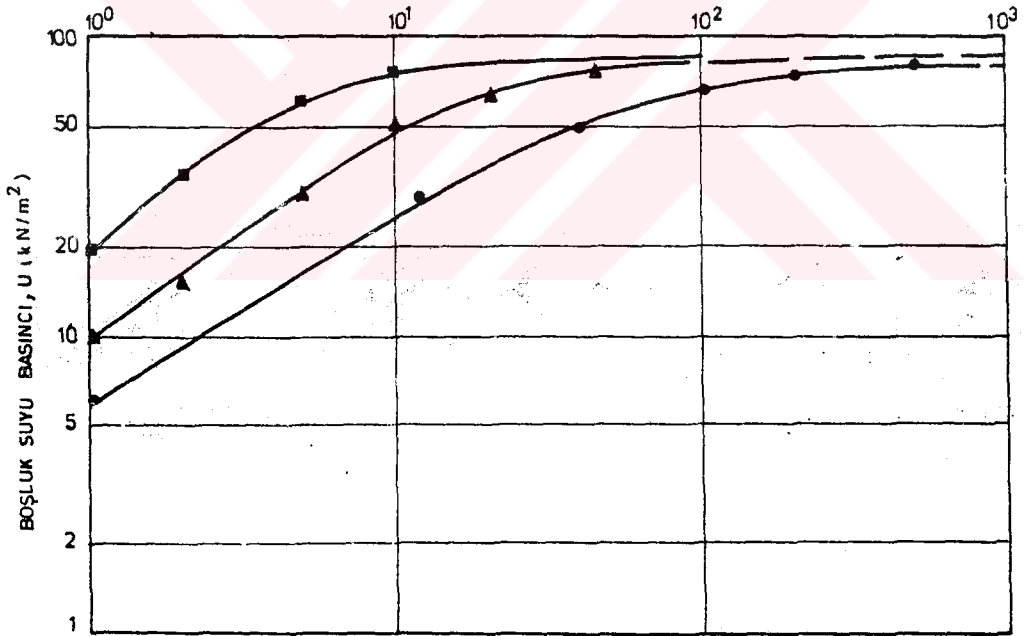
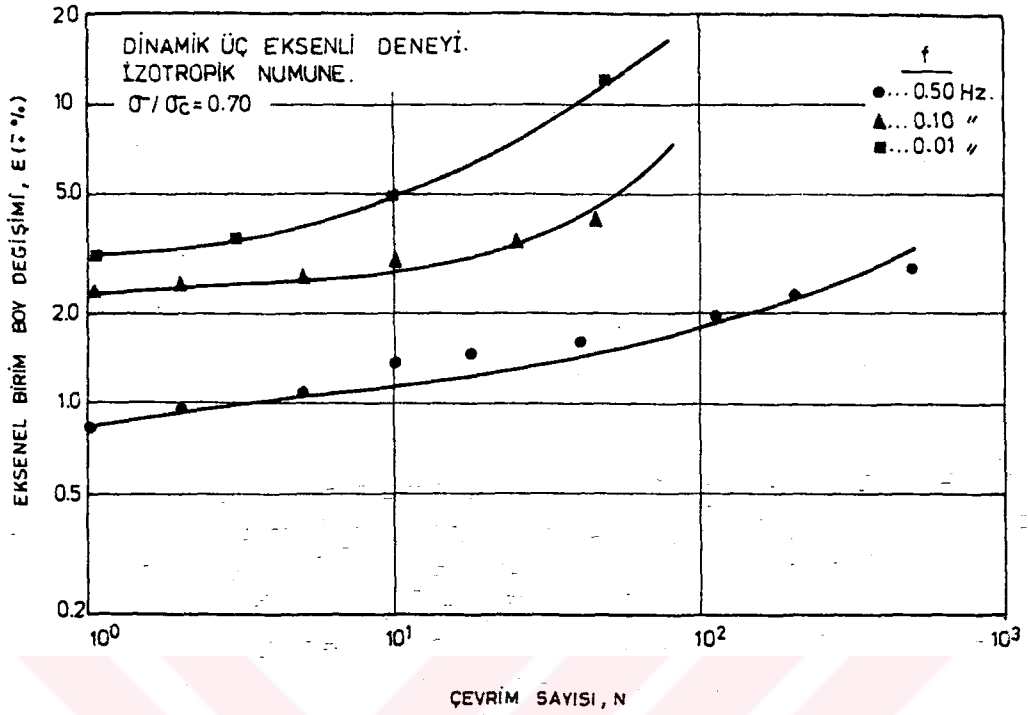
ŞEKİL:4.45- GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ



ŞEKİL:4.46- GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ



ŞEKİL 4.47 GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ



ŞEKİL:4.48..GERİLME ORANI - BOŞLUK SUYU BASINCI - EKSENEL BİRİM BOY DEĞİŞİMİ - FREKANS ARASINDAKİ İLİŞKİ

4.4.1. Düzlemsel İzotropik Numuneler Üzerinde Her İki Deney Sisteminde Yapılan Deneylerin Karşılaştırılması

Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarına deney sistemi ve numune hazırlamanın etkisinin araştırılması için dinamik basit kesme deney aletinde düzlemsel izotropik numuneler üzerinde dört değişik frekans ve altı değişik kayma gerilmesi oranında yapılan 20 adet deney ile, dinamik üç eksenli deney aletinde aynı tür numuneler üzerinde üç değişik frekansta ve beş değişik gerilme oranında yapılan 13 adet deneyin karşılaştırılması yapılmıştır.

Dinamik basit kesme deney aleti ve dinamik üç eksenli deney aletinde düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerin uygulanan deney frekansına göre karşılaştırılması topluca Tablo 4.5 de görülmektedir. Tablo ve konu ile ilgili eğriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçları çıkarmamız mümkündür.

Her iki deney sisteminde sabit bir frekans değerinde, gerilme oranındaki artımlar oluşan boşluk suyu basınçlarını ve genel anlamda deplasman değerlerini arttırmaktadır. Aynı gerilme oranında frekans değerindeki azalmalarda da benzer davranış biçimi gözlenmektedir. Yine aynı frekans ve aynı gerilme oranında çevrim sayısındaki artımlar da, doğal olarak oluşan boşluk suyu basınçlarını ve deformasyonları arttırmaktadır.

Aynı deney sonu çevrim sayıları alınarak oluşan boşluk suyu basınçları karşılaştırılırsa dinamik üç eksenli deneylerde % 20 daha fazla boşluk suyu basıncı oluştuğunu söyleyebiliriz. Frekansın 0.01 Hz ve 0.10 Hz olduğu deneylerde bu ortalama artış sağlanırken, frekansa 0.50 Hz olması durumunda %15 mertebesine düşmektedir. Her iki deney sisteminde ilk çevrimde oluşan boşluk suyu basınç değerleri birbirlerine yakın olup, belirgin bir fark yoktur.

Deneyler sırasında meydana gelen birim kaymalar ve eksenel birim boy değişimleri karşılaştırıldığında ilk çevrimdeki eksenel

Tablo 4.5. Düzlemsel İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Frekansa Göre Karşılaştırılması

DİNAMİK BASİT KESME				DİNAMİK UÇ EKSENLİ				
Gerilme oranı τ/τ_f	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	γ + %	Gerilme oranı σ_d/σ_c	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	ϵ + %	ϵ_p min
FREKANS = 0.01 Hz								
0.40	40	4-30	1.7-1.9	0.40	100	4-67	0.9-2.6	9
0.50	100	6-60	2.0-3.2	0.50	100	6-72	1.1-3.7	11
0.60	100	12-68	4.5-8.0	0.60	60	12-82	2.2-7.5	12.5
0.70	100	17-75	5.0-12.0	0.70	6	13-50	3.2-6.5	19
0.80	30	25-65	5.5-28.0	-	-	-	-	-
FREKANS = 0.10 Hz								
0.30	200	4-25	0.6-0.7	-	-	-	-	-
0.40	400	6-45	0.9-1.1	0.40	160	3-56	0.7-2.0	7
0.50	250	8-50	1.6-2.3	0.50	45	4-60	0.9-3.0	23
0.60	500	10-70	3.8-13.0	0.60	200	8-72	1.6-6.0	25
0.70	300	12-80	5.0-20.0	0.70	50	9-90	2.8-11.6	25
FREKANS = 0.50 Hz								
0.30	1000	3-35	0.35 sbt	0.30	200	1-30	0.12-0.20	-
0.40	1000	4-40	0.50-0.85	0.40	300	2-42	0.5-0.9	-
0.50	500	5-50	1.0 -1.4	0.50	300	4-65	0.6-2.5	11
0.60	1000	6-70	2.4-15.0	0.60	100	6-62	0.7-2.5	15
0.70	500	9-80	4.0-30.0	0.70	200	8-75	1.2-8.2	25
0.80	65	10-80	6.0-26.0	-	-	-	-	-

birim boy değişimleri, birim kaymaların % 55'şii mertebesinde kalmaktadır. Artan çevrim sayıları ve oluşan plastik şekil değişimleri aksenel birim boy değişimlerini daha hızlı arttırmakta, frekansın 0.01 Hz ve 0.10 Hz olduğu deneylerde $N = 60$ çevrim dolaylarında, frekansın 0.50 Hz olduğu deneylerde ise $N = 150$ çevrim dolaylarında birim kayma değerine eşit olmaktadır. Aynı deney sonu çevrim sayısında ise oluşan aksenel birim boy değişimleri, birim kaymalardan % 25 daha fazla değere ulaşmaktadır. Frekansın 0.50 Hz. olduğu deneylerde ise farklılık söz konusu olup belirli bir ilişki gözlenemmiştir. Dinamik basit kesme deneylerinde, kayma gerilmesi oranı kritik değerin ($\tau/\tau_f > 0.50$) üstünde ise birim kayma değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Belirli bir frekans ve belirli bir çevrim sayısında dinamik deformasyonların, dinamik gerilme oranına bağlı değişimleri her iki deney sisteminde de hiperbolik bir eğridir. Yelpazeyi andıran bu eğriler dinamik basit kesme deneylerinde $\tau/\tau_f = 0.30$ değerinde odaklaşmakta ve kritik gerilme oranına kadar ($\tau/\tau_f \cong 0.50$) belirli bir eğimle ulaşmakta, bu değerden sonra ise hızla birbirlerinden ayrılmaktadır. Dinamik üç aksenli deneylerde ise $\sigma_d/\sigma_c = 0.20$ değerinde toplanan eğriler belirli eğimlerle birbirlerinden ayrılmaktadır. Deney frekansının 0.50 Hz olması halinde davranış biçimi dinamik basit kesmeye benzemektedir.

Belirli çevrim sayılarında, dinamik gerilme oranının boşluk suyu basıncına etkisi lineer bir doğru şeklindedir (Şekil 4.7 - 4.10 ve Şekil 4.32 - 4.34). Frekansın 0.50 Hz olması lineer olan bu davranış her iki deney sisteminde de eğrisel şekle çevirmektedir.

Deney frekansının, sonuçlara etkisini belirlemek amacı ile deney sonuçları Tablo 4.6'da karşılaştırılmalı olarak özetlenmiştir. Tabloya bakıldığında, aynı dinamik gerilme oranında, frekans değerindeki azalmalar oluşan boşluk suyu basınçlarını, birim kayma ve aksenel birim boy değişimlerini arttırdığı görülmektedir. Dinamik basit kesme deneylerinde, kayma gerilmesi kritik değerin ($\tau/\tau_f \cong 0.50$) altında ise çevrim sayısı ile birim kayma ilişkisi

lineer olup frekans etkisi belirgindir. Gerilme oranı arttıkça frekans etkisi kaybolmaktadır. Dinamik üç eksenli deneylerde ise 0.01 Hz ve 0.10 Hz frekansları arasında anlamlı bir fark söz konusu değilken, 0.50 Hz frekansı deney sonuçları değiştirmektedir. Artan çevrim sayısı ile artan boşluk suyu basınçları her iki deney sisteminde de 100 çevrimden sonra maksimum değere asimtot olma eğilimi görülmektedir.

4.4.2. İzotropik Numuneler Üzerinde Her İki Deney Sisteminde Yapılan Deneylerin Karşılaştırılması

Bu bölümde dinamik basit kesme deney aleti ile dinamik üç eksenli deney aletinde, izotropik (örselenmiş) olarak hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan deneyler birbirleri ile karşılaştırılacaktır. Ayrıca yine her iki deney sistemiyle düzlemsel izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları birlikte değerlendirilerek numune iç yapısının bozulmasının ve deney sisteminin dinamik özelliklere etkisi araştırılacaktır.

Dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemlerinde izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerin frekansa göre değerlendirilmesi Tablo 4.7 de toplu halde gösterilmiştir. Üç değişik frekansta (0.50 Hz - 0.10 Hz - 0.01 Hz) , altı değişik dinamik gerilme oranında (0.30 - 0.40 - 0.50 - 0.60 - 0.70 - 0.80) toplam 28 deney sonucu tabloda özetlenmiştir.

Aynı frekansta, dinamik gerilme oranındaki artımlar, oluşan boşluk suyu basınçlarını, eksenel birim boy değişimleri ile birim kaymaları düzlemsel izotropik numunelerde olduğu gibi arttırmaktadır. Aynı gerilme oranında, frekans değerindeki azalmalarda da aynı etkileşim söz konusudur. Deney sonuçlarının karşılaştırılmasında aynı deney sonu çevrim sayısı esas alınması durumunda aşağıdaki sonuçların çıkarılması mümkündür:

Numune hazırlanmasındaki özellik dolayısıyla, malzeme iç yapısı tamamen bozulmuş, oluşum itibariyle yatay düzlem boyunca

Tablo 4.6. Düzlemsel İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Kayma Gerilmesi ve Gerilme Oranına Göre Karşılaştırılması

DİNAMİK BASİT KESME				DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ				
Frekans f Hz	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m^2	γ %	Frekans f Hz	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m^2	ϵ %	ϵ_p min
$\tau/\tau_f = 0.30$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.30$				
0.01	-	-	-	0.01	-	-	-	-
0.10	200	4-25	0.6-0.7	0.10	-	-	-	-
0.50	1000	3-35	0.35 sbt	0.50	200	1-30	0.12-0.20	-
$\tau/\tau_f = 0.40$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.40$				
0.01	40	4-30	1.7-1.9	0.01	100	4-67	0.9-2.6	9
0.10	400	6-45	0.9-1.1	0.10	160	3-56	0.7-2.0	7
0.50	1000	4-40	0.5-0.85	0.50	300	2-42	0.5-0.9	-
$\tau/\tau_f = 0.50$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.50$				
0.01	100	6-60	2.0-3.2	0.01	100	6-72	1.1-3.7	11
0.10	250	8-50	1.6-2.3	0.10	45	4-60	0.9-3.0	23
0.50	500	5-50	1.0-1.4	0.50	300	4-65	0.6-2.5	11
$\tau/\tau_f = 0.60$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.60$				
0.01	100	12-68	4.5-8.0	0.01	60	12-82	2.2-7.5	12.5
0.10	500	10-70	3.8-13.0	0.10	200	8-72	1.6-6.0	25
0.50	1000	6-70	2.4-15.0	0.50	100	6-62	0.7-2.5	15
$\tau/\tau_f = 0.70$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.70$				
0.01	100	17-75	5.0-12.0	0.01	6	13-50	3.2-6.5	19
0.10	300	12-80	5.0-20.0	0.10	50	9-90	2.8-11.6	25
0.50	500	9-80	4.0-30.0	0.50	200	8-75	1.2-8.2	25

Tablo 4.7. İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Frekansa Göre Karşılaştırılması

DİNAMİK BASİT KESME				DİNAMİK UÇ EKSENLİ				
Cerilme oranı τ/τ_f	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	γ ± %	Cerilme oranı σ_d/σ_c	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	ϵ ± %	ϵ_p min
FREKANS = 0.01 Hz								
0.40	100	8-40	0.9-1.1	0.40	100	7-70	0.7-1.5	5
0.50	125	12-65	1.9-2.5	0.50	65	10-80	0.8-2.0	10
0.60	50	20-75	3.5-6.5	0.60	90	15-82	1.8-50	15
0.70	55	25-80	5.2-10.0	0.70	50	20-80	3.2-12.0	14
FREKANS = 0.10 Hz								
0.30	500	2-40	0.3 sbt.	-	-	-	-	-
0.40	500	3-50	0.7-1.2	0.40	100	4-60	0.6-1.5	4
0.50	300	5-60	1.7-2.6	0.50	100	4.65	0.7-2.0	17
0.60	300	10-75	3.2-7.2	0.60	95	5-75	1.5-4.0	19
0.70	150	12-80	5.4-15.0	0.70	45	10-75	2.4-10.0	18
FREKANS = 0.50 Hz								
0.30	1000	2-45	0.25 sbt.	0.30	200	1-35	0.09-0.15	-
0.40	1000	2-52	0.4-0.7	0.40	300	2-45	0.35-0.50	-
0.50	2500	3-75	0.8-2.4	0.50	2000	3-70	0.60-1.10	2
0.60	1000	6-80	1.6-6.0	0.60	500	5-75	0.70-1.58	12
0.70	150	12-80	3.5-15.0	0.70	500	6-80	0.85-3.00	18
0.80	100	16-80	4.4-24.0	-	-	-	-	-

sıralanan zemin danelerinde bu dizilim kaybolmuş, zemin iskeleti rastgele bir yapı hakim olmuştur. Bu durum izotropik numuneleri, düzlemsel izotropik numunelere göre, şekil değiştirmeler yönünde daha dayanıklı hale getirirken, zemin boşluklarındaki suyun sıkışması sonucu daha fazla boşluk suyu oluşumuna yol açmaktadır.

Bu ana yaklaşım çerçevesinde her iki deney sisteminde izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerde oluşan boşluk suyu basınçları arasında belirgin bir farkın olmadığı söylenebilir. Düşük frekans değerlerin de (0.10 Hz - 0.01 Hz), düşük dinamik gerilme oranlarında (0.30 - 0.40 - 0.50) dinamik üç eksenli deneylerde %30 daha fazla b.s.b. oluşurken, kritik gerilme seviyesinin üstündeki gerilme seviyelerinde oluşan b.s.b. arasında fark yoktur. Frekansın 0.50 Hz olduğu deneylerde ise dinamik basit kesme deneylerinde %10 daha fazla b.s.b. oluştuğu görülmüştür. Düzlemsel izotropik numunelerde dinamik üç eksenlerde %15 - %20 oranında gözlenen fazla b.s.b., izotropik numunelerde yapılan deneylerde görülmemiştir.

Deneyler sırasında oluşan eksenel birim boy değişimleri ve birim kaymalar karşılaştırıldığında, ilk çevrimde görülen durum düzlemsel izotropik numunelere benzemektedir. $N = 1$ için meydana gelen eksenel birim boy değişimler, birim kaymaların ortalama olarak % 55 mertebesinde kalmaktadır. Bu oran frekansın 0.50 Hz., dinamik gerilme oranının 0.70 olduğu deneyde %24 mertebesine düşerken, frekansın 0.10 Hz., dinamik gerilme oranının 0.40 olduğu deneyde % 86 değerine ulaşmaktadır. Çevrim sayılarının düşük frekanslarda artması ile bu fark kapanmaktadır. Aynı deney sonu çevrim sayısında ($N = 100$ çevrim) eşitlenmektedir. 0.50 Hz. frekans değerindeki deneylerde ise oluşan eksenel birim boy değişimlerinin, birim kaymalara oranı ortalama %47 değerine düşmektedir. Bunun nedeni, bu frekansta meydana gelen plastik deformasyon değerlerinin daha az olmasıdır.

Kohezyonlu zeminlerde dinamik özelliklere etki eden diğer bir parametre olan çevrim sayısının etkisinin belirlenmesi ve numune hazırlama ile deney sisteminin etkisinin araştırılması için

Şekil 4.21 - 4.24 ve Şekil 4.42 - 4.44 eğrilerinden yararlanılmıştır. Aynı frekansta ve aynı çevrim sayısında, dinamik gerilme oranına bağlı, dinamik deformasyonların çizildiği eğriler hiperbolik olup, değişik çevrim sayılarına göre değerlendirildiğinde yelpaze görünümü almaktadır. Dinamik basit kesme deney sisteminde düzlemsel izotropik numunelerde $\tau/\tau_f = 0.30$ değerindeki odaklaşma, izotropik numunelerde 0.40 değerine oluşmuştur. Düzlemsel izotropik numunelerde $\tau/\tau_f \approx 0.50$ değerinden sonra eğrilerin birbirinden hızla ayrılması, izotropik numunelerde gözlenmemektedir. Bu davranış biçimi dinamik üç eksenli deneylerde her iki grup numunedeki davranışa benzemektedir. Bu deney sistemindeki düzlemsel izotropik numunelerde odaklaşma $\sigma_d/\sigma_c = 0.20$ değerinde iken, izotropik numunelerde 0.10 değerine düşmektedir. Deney frekansının 0.50 Hz olması, davranış genel özelliğini bozmakta olup, oluşan plastik deformasyon değerlerinin azlığı, eğrileri lineer doğru şekline çevirdiği görülmektedir.

Aynı eğri gruplarının incelenmesinden, belirli frekansta ve belirli çevrim sayısında, dinamik gerilme oranına bağlı olarak oluşan boşluk suyu basınçlarının lineer olduğu her iki deney sistemi ile izotropik numuneler üzerinde yapılan deneyler için söylenebilir. Düzlemsel izotropik numunelerde ise lineer olan bu davranış şekli, frekans 0.50 Hz değerinde eğrisel şekle dönüşmektedir.

Deneysel sonuçlara frekansın etkisinin belirlenmesi için düzenlenen Tablo 4.8 'de toplu sonuçlar görülmektedir. Aynı dinamik gerilme oranında, frekans değerindeki azalmalar, düzlemsel izotropik numunelerde olduğu gibi oluşan boşluk suyu basınçları ile dinamik deformasyon değerlerini arttırmaktadır. Her iki deney sisteminde 0.01 Hz ve 0.10 Hz frekans değerlerinde oluşan birim kaymalar ve eksenel birim boy değişimleri arasında belirgin bir fark gözlenmezken frekansın 0.50 Hz. değerindeki deneylerde, frekans etkisi kendini göstermektedir. Dinamik basit kesme deneylerinde kritik gerilme oranının üzerindeki deneylerde bu etki kaybolurken, dinamik üç eksenli deneylerde devam etmektedir. Düzlemsel izotropik numunelerde ise her üç frekans değerinde de, izotropik numunelerden daha belirgin bir etki göze çarpmaktadır.

Tablo 4.8. İzotropik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Kayma Gerilmesi ve Gerilme Oranına Göre Karşılaştırılması

DİNAMİK BASİT KESME				DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ				
Frekans f Hz.	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	γ %	Frekans f Hz.	Çevrim sayısı N	b.s.b. u kN/m ²	ε %	ε _p mm
$\tau/\tau_f = 0.30$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.30$				
0.01	-	-	-	0.01	-	-	-	-
0.10	500	2-40	0.3 sbt	0.10	-	-	-	-
0.50	1000	2-45	0.25 sbt	0.50	200	1-35	0.09-0.15	-
$\tau/\tau_f = 0.40$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.40$				
0.01	100	8-40	0.9-1.1	0.01	100	7-70	0.7-1.5	5
0.10	500	3-50	0.7-1.2	0.10	100	4-60	0.6-1.5	4
0.50	1000	2-52	0.4-0.7	0.50	300	2-45	0.35-0.50	-
$\tau/\tau_f = 0.50$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.50$				
0.01	125	12-65	1.9-2.5	0.01	65	10-80	0.8-2.0	10
0.10	300	5-60	1.7-2.6	0.10	100	4-65	0.7-2.0	17
0.50	2500	3-75	0.8-2.4	0.50	2000	3-70	0.6-1.1	2
$\tau/\tau_f = 0.60$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.60$				
0.01	50	20-75	3.5-6.5	0.01	90	15-82	1.8-5.0	15
0.10	300	10-75	3.2-7.2	0.10	95	5-75	1.5-4.0	19
0.50	1000	6-80	1.6-6.0	0.50	500	5-75	0.7-1.5	12
$\tau/\tau_f = 0.70$				$\sigma_d/\sigma_c = 0.70$				
0.01	55	25-80	5.2-10.0	0.01	50	20-80	3.2-12.0	14
0.10	150	12-80	5.4-15.0	0.10	45	10-75	2.4-10.0	18
0.50	150	12-80	3.5-15.0	0.50	500	6.80	0.85-3.0	18

Frekans değeriindeki azalmaların, oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırdığı çizilen diyagramlardan açıkça görülmektedir. Tüm gerilme seviyelerin ilk 50 çevrime kadar lineer olan davranışta frekans etkisi belirgin iken, 100 çevrim dolaylarında toplanan eğriler, 1000 çevrim değeriinde aynı maksimum değere asimtot olmaktadır. Bu değer düşük gerilme oranlarında 50 kN/m^2 , yüksek gerilme oranlarında ise 75 kN/m^2 değeridir. Aynı maksimum değere asimptot olma eğilimi izotropik numunelerde tüm gerilme oranlarında gözlenirken, düzlemsel izotropik numunelerde sadece yüksek gerilme oranlarında görülmektedir.

4.5. DENEY SONUÇLARI İLE İLGİLİ BAĞINTILAR

Normal konsolide killerin dinamik yükler etkisi altındaki davranışlarını incelemek için dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan seri deneyler sonucu çizilen eğrilerden, boşluk suyu basınçları, u , birim kaymalar, γ , eksenel birim boy değişimleri, ϵ , formüle edilmiştir. Formüller belirli bir frekans değeri, f , için çıkartılırken, gerilme oranları, τ/τ_f ve σ/σ_d ile çevrim sayıları, N , formül içinde değişken olarak yer almışlardır.

Bu bölümde, farklı deney sistemleriyle, farklı hazırlanan numuneler üzerinde çıkartılan bağıntılar ayrı ayrı anlatılacaktır.

4.5.1. Dinamik Basit Kesme Deney Sonuçları İle İlgili Bağıntılar

Dinamik basit kesme deney aletinde düzlemsel izotropik ve izotropik numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucu oluşan boşluk suyu basınçlarının ve birim kaymaların model edilerek en uygun nümerik korelasyonu bulunmaya çalışılmıştır. Bunun için, belirli frekansta, farklı gerilme oranında çizilen eğrilerden faydalanılmıştır.

Dinamik basit kesme deney aletinde, düzlemsel izotropik numunelerin deney sonuçlarının formüle edilmesinde Şekil 4.3, 4.4,

4.5, 4.6 da görülen eğrilerden, izotropik numunelerin deney sonuçlarının formüle edilmesinde ise Şekil 4.17, 4.18, 4.19, 4.20'de görülen eğrilerden yararlanılmıştır.

Belirli frekans değerlerinde, değişik gerilme oranlarında, oluşan boşluk suyu basınçları ile çevrim sayıları arasındaki nümerik korelasyon için en uygun modelin,

$$y = b + m \ell_n x$$

$$u = b + m \ell_n N \quad (4.3)$$

fonksiyonu ile sağlandığı gözlenmiştir. Bütün deney verileri kullanılarak yapılan regresyon hesaplarında bulunan b, m ve r regresyon katsayıları Tablo (4.9) özetlenmiştir.

b ve m katsayılarının, aynı frekans, farklı gerilme oranlarında değişimi ikinci aşama olarak incelenmiştir. Yine birinci aşamadaki fonksiyonun en iyi nümerik korelasyonu verdiği görülmüştür.

Frekans değerlerine göre bulunan boşluk suyu basıncı formülleri aşağıda toplu halde yazılmıştır. Düzlemsel izotropik ve izotropik numuneler için çıkarılan ifadeler karşılaştırma açısından alt alta yazılmıştır.

$$f = 0.01 \text{ Hz.}$$

$$U_{\text{düz,iz}} = -30.57 + 83.11(\tau/\tau_f) + |-0.19 + 17.82(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.4)$$

$$U_{\text{iz}} = -26.74 + 99.66(\tau/\tau_f) + |-0.88 + 15.81(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.5)$$

$$f = 0.10 \text{ Hz.}$$

$$U_{\text{düz,iz}} = -3.66 + 19.93(\tau/\tau_f) + |-1.11 + 20.85(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.6)$$

$$U_{\text{iz}} = -24.67 + 65.84(\tau/\tau_f) + |2.12 + 14.04(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.7)$$

Tablo 4.9. Boşluk Suyu Basıncı Regresyon Hesap Sonuçları
(Dinamik Basit kesme Deneyleri)

Düzlemsel İzotropik				İzotropik			
Gerilme oranı τ/τ_f	b	m	r	Gerilme oranı τ/τ_f	b	m	r
FREKANS = 0.01 Hz.							
0.40	6.291	6.215	.97	0.40	16.123	4.602	.89
0.50	5.626	12.656	.99	0.50	17.384	8.719	.97
0.60	19.815	12.029	.96	0.60	35.487	7.763	.90
0.70	28.221	12.115	.95	0.70	43.308	7.649	.88
0.80	36.548	13.426	.95	0.80			
FREKANS = 0.10 Hz.							
0.30	2.469	4.857	.98	0.30			
0.40	4.924	7.956	.99	0.40	3.788	7.859	.97
0.50	5.273	8.733	.99	0.50	5.702	8.905	.98
0.60	7.941	11.591	.99	0.60	13.594	10.667	.99
0.70	10.925	13.465	.99	0.70	23.104	10.512	.92
FREKANS = 0.50 Hz.							
0.30	1.470	4.693	.99	0.30			
0.40	2.695	5.600	.99	0.40	-6.296	9.505	.98
0.50	3.180	7.528	.99	0.50	-2.399	11.140	.99
0.60	4.353	9.492	.98	0.60	4.814	12.002	.99
0.70	10.313	11.939	.97	0.70	17.637	10.749	.97
0.80	22.100	17.797	.92	0.80			
FREKANS = 1.00 Hz.							
0.40	-0.190	4.467	.99	0.40	-7.219	8.413	.97
0.50	-1.953	6.471	.99	0.50	-7.622	10.916	.97
0.60	-1.084	7.832	.99	0.60	2.825	10.919	.99
0.70	3.673	11.189	.97	0.70	13.435	10.395	.97

$f = 0.50 \text{ Hz.}$

$$U_{\text{düz,iz}} = -10.74 + 33.19(\tau/\tau_f) + |-4.09 + 24.72(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.8)$$

$$U_{\text{iz}} = -40.02 + 79.01(\tau/\tau_f) + |4.64 + 12.49(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.9)$$

$f = 1.00 \text{ Hz.}$

$$U_{\text{düz,iz}} = -7.52 + 15.06(\tau/\tau_f) + |1.95 + 10.53(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.10)$$

$$U_{\text{iz}} = -39.47 + 72.41(\tau/\tau_f) + |3.82 + 12.53(\tau/\tau_f)| \ell_n N \quad (4.11)$$

Dinamik basit kesme deneyleri sırasında meydana gelen birim kaymaların formülasyonu için yapılan çalışmalarda model olarak,

$$y = b \cdot X^m$$

$$\gamma = b \cdot N^m \quad (4.12)$$

fonksiyonu kullanılmıştır. Aynı frekans, farklı gerilme oranlarındaki deney verilerinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen b , m , r katsayıları Tablo (4.10) toplanmıştır.

Tabloda görülen b ve m değerleri arasında gerilme oranına bağlı korelasyon aranmış ve sonuçta aynı fonksiyon ile aşağıda toplu halde görülen bağıntılar bulunmuştur.

$f = 0.01 \text{ Hz.}$

$$\gamma_{\text{düz,iz}} = 7.97(\tau/\tau_f)^{1.66} \cdot N^{1.34(\tau/\tau_f)^{4.34}} \quad (4.13)$$

$$\gamma_{\text{iz}} = 14.24(\tau/\tau_f)^{3.11} \cdot N^{0.53(\tau/\tau_f)^{2.29}} \quad (4.14)$$

$f = 0.10 \text{ Hz.}$

$$\gamma_{\text{düz,iz}} = 8.69(\tau/\tau_f)^{2.33} \cdot N^{0.72(\tau/\tau_f)^{2.88}} \quad (4.15)$$

$$\gamma_{\text{iz}} = 13.74(\tau/\tau_f)^{3.10} \cdot N^{0.42(\tau/\tau_f)^{1.76}} \quad (4.16)$$

Tablo 4.10 Birim Kayma Regrasyon Hesap Sonuçları (Dinamik Basit Kesme Deneyleri)

Düzlemsel İzotropik				İzotropik			
Gerilme oranı τ/τ_f	b	m	r	Gerilme oranı τ/τ_f	b	m	r
FREKANS = 0.01 Hz.							
0.40	1.691	0.0240	.99	0.40	0.808	0.0677	.88
0.50	1.663	0.1515	.93	0.50	1.700	0.0904	.96
0.60	3.765	0.1732	.99	0.60	2.900	0.2178	.94
0.70	4.102	0.2516	.98	0.70	4.643	0.2077	.95
FREKANS = 0.10 Hz.							
0.40	0.934	0.0319	.98	0.40	0.773	0.0945	.99
0.50	1.492	0.0848	.97	0.50	1.660	0.1002	.98
0.60	2.799	0.2310	.94	0.60	2.986	0.1628	.98
0.70	4.107	0.2520	.99	0.70	4.301	0.2475	.96
FREKANS = 0.50 Hz.							
0.40	0.507	0.0771	.99	0.40	0.406	0.0830	.98
0.50	1.058	0.0962	.97	0.50	0.739	0.1528	.99
0.60	2.003	0.1860	.96	0.60	1.792	0.1922	.99
0.70	3.684	0.3134	.99	0.70	3.659	0.2791	.99
FREKANS = 1.00 Hz.							
0.40	0.301	0.0289	.99	0.40	0.197	0.0995	.99
0.50	0.696	0.0481	.98	0.50	0.494	0.0808	.99
0.60	1.190	0.1454	.84	0.60	1.125	0.0605	.99
0.70	1.759	0.3598	.95	0.70	1.528	0.2918	.93

$f = 0.50 \text{ Hz.}$

$$\gamma_{\text{düz,iz}} = 10.27(\tau/\tau_f)^{3.04} \cdot N^{0.79(\tau/\tau_f)^{3.06}} \quad (4.17)$$

$$\gamma_{\text{iz}} = 13.91(\tau/\tau_f)^{3.98} \cdot N^{0.56(\tau/\tau_f)^{1.99}} \quad (4.18)$$

$f = 1.00 \text{ Hz.}$

$$\gamma_{\text{düz,iz}} = 5.75(\tau/\tau_f)^{3.16} \cdot N^{1.58(\tau/\tau_f)^{4.59}} \quad (4.19)$$

$$\gamma_{\text{iz}} = 6.64(\tau/\tau_f)^{3.78} \cdot N^{0.58(\tau/\tau_f)^{1.92}} \quad (4.20)$$

4.5.2. Dinamik Üç Eksenli Deney Sonuçları İle İlgili Bağlıntılar

Dinamik üç eksenli deney aletinde yapılan deney sonuçlarının nümerik model edilmesinde dinamik basit kesme deney sonuçlarının formülasyonunda izlenen yoldan faydalanılmıştır. Deneyler sonucu oluşan boşluk suyu basınçları ve eksenel birim boy değişimleri nümerik korelasyon ile model edilmiştir. Bu çalışmalarda Şekil 4.29, 4.30, 4.31 görülen düzlemsel izotropik numunelere ait eğrilerden ve Şekil 4.39, 4.40, 4.41 görülen izotropik numunelere ait eğrilerden yararlanılmıştır.

Belirli bir frekans değerinde, değişik gerilme oranlarında oluşan boşluk suyu basınçlarının model edilmesinde,

$$y = b + m \ell_n X$$

$$u = b + m \ell_n N \quad (4.21)$$

fonksiyonu kullanılmıştır. Nümerik korelasyon hesaplarında bulunan b , m , r değerleri her iki numune grubu için toplu halde, Tablo 4.11 de gösterilmiştir.

Tablo 4.11 Boşluk Suyu Basıncı b, m, r Katsayıları
(Dinamik Uç Eksenli Deneyler)

Düzlemsel İzotropik				İzotropik			
Dinamik Gerilme Oranı σ_d/σ_c	b	m	r	Dinamik Gerilme Oranı σ_d/σ_c	b	m	r
FREKANS = 0.01 Hz							
0.40	1.388	11.422	.97	0.40	9.983	11.671	.97
0.50	6.902	12.985	.96	0.50	20.805	11.143	.94
0.60	19.430	12.378	.93	0.60	32.473	10.027	.90
0.70	28.347	11.741	.90	0.70	36.202	11.643	.90
FREKANS = 0.10 Hz							
0.40	0.725	11.262	.96	0.40	-2.275	11.966	.97
0.50	6.536	11.819	.94	0.50	-0.855	12.847	.97
0.60	13.605	11.885	.93	0.60	1.052	13.881	.97
0.70	18.566	12.628	.94	0.70	11.729	15.150	.97
FREKANS = 0.50 Hz							
0.40	-3.540	7.583	.98	0.40	-5.514	8.742	.98
0.50	-2.774	10.823	.99	0.50	-3.510	9.530	.98
0.60	5.342	11.318	.98	0.60	-2.411	11.173	.91
0.70	8.429	12.671	.97	0.70	0.433	13.215	.99

b ve m katsayıları ile dinamik gerilme oranları arasındaki nümerik korelasyonda yukarıdaki fonksiyon uyum sağlamıştır. Elde edilen formüller, frekanslara göre aşağıda verilmiştir.

$$f = 0.01 \text{ Hz.}$$

$$U_{\text{düz,iz}} = -37.36 + 93.41(\sigma_d/\sigma_c) + |9.51 + 4.78(\sigma_d/\sigma_c)| \ell_n N \quad (4.22)$$

$$U_{\text{iz}} = -24.81 + 90.32(\sigma_d/\sigma_c) + |8.28 + 4.97(\sigma_d/\sigma_c)| \ell_n N \quad (4.23)$$

$$f = 0.10 \text{ Hz.}$$

$$U_{\text{düz,iz}} = -23.47 + 60.59(\sigma_d/\sigma_c) + |9.62 + 4.15(\sigma_d/\sigma_c)| \ell_n N \quad (4.24)$$

$$U_{\text{iz}} = -21.74 + 43.92(\sigma_d/\sigma_c) + |7.64 + 10.59(\sigma_d/\sigma_c)| \ell_n N \quad (4.25)$$

$$f = 0.50 \text{ Hz.}$$

$$U_{\text{düz,iz}} = -22.35 + 44.02(\sigma_d/\sigma_c) + |1.94 + 15.74(\sigma_d/\sigma_c)| \ell_n N \quad (4.26)$$

$$U_{\text{iz}} = -13.17 + 18.94(\sigma_d/\sigma_c) + |2.38 + 15.06(\sigma_d/\sigma_c)| \ell_n N \quad (4.27)$$

Eksenel birim boy değişimlerinin model edilmesinde de dinamik basit kesme deneylerinde oluşan birim kaymaların model edilmesinde kullanılan aşağıdaki fonksiyon kullanılmıştır.

$$y = b \cdot X^m$$

$$\epsilon = b \cdot N^m \quad (4.28)$$

Tüm deney verilerinin değerlendirilmesi sonucu bulunan b, m, r katsayıları Tablo 4.12 de toplanmıştır.

Dinamik gerilme oranları ile b ve m katsayıları arasında yapılan regrasyon hesaplarında, frekansa bağlı ifadeler farklı numune tiplerine göre aşağıda özetlenmiştir.

Tablo 4.12 Eksenel Birim Boy Değişimi b, m, r Katsayıları
(Dinamik Uç Eksenli Deneyler)

Düzlemsel İzotropik				İzotropik			
Dinamik Gerilme Oranı σ_d/σ_c	b	m	r	Dinamik Gerilme Oranı σ_d/σ_c	b	m	r
FREKANS = 0.01 Hz.							
0.40	0.0535	0.3195	.95	0.40	0.5925	0.2088	.98
0.50	0.0804	0.3264	.93	0.50	0.6882	0.2446	.95
0.60	0.1333	0.4477	.93	0.60	1.3285	0.3015	.95
0.70	0.2118	0.7639	.97	0.70	2.3585	0.3740	.97
FREKANS = 0.10 Hz.							
0.40	0.6336	0.2272	.99	0.40	0.5379	0.2171	.98
0.50	0.7100	0.2842	.97	0.50	0.6346	0.2538	.96
0.60	1.2428	0.3017	.91	0.60	1.2987	0.2387	.95
0.70	1.7891	0.4609	.94	0.70	1.8376	0.2774	.89
FREKANS = 0.50 Hz.							
0.40	0.4043	0.1290	.89	0.40	0.3234	0.0692	.96
0.50	0.3953	0.2627	.86	0.50	0.5755	0.0897	.95
0.60	0.5328	0.3153	.94	0.60	0.5935	0.1883	.97
0.70	0.7174	0.4859	.96	0.70	0.7538	0.2057	.98

$f = 0.01 \text{ Hz.}$

$$\epsilon_{\text{düz,iz}} = 0.48 \cdot (\sigma_d/\sigma_c)^{2.47} \cdot N^{1.11(\sigma_d/\sigma_c)^{1.51}} \quad (4.29)$$

$$\epsilon_{\text{iz}} = 5.06 \cdot (\sigma_d/\sigma_c)^{2.52} \cdot N^{0.52(\sigma_d/\sigma_c)^{1.04}} \quad (4.30)$$

$f = 0.10 \text{ Hz.}$

$$\epsilon_{\text{düz,iz}} = 3.31 \cdot (\sigma_d/\sigma_c)^{1.93} \cdot N^{0.63(\sigma_d/\sigma_c)^{1.15}} \quad (4.31)$$

$$\epsilon_{\text{iz}} = 4.01 \cdot (\sigma_d/\sigma_c)^{2.33} \cdot N^{0.33(\sigma_d/\sigma_c)^{0.42}} \quad (4.32)$$

$f = 0.50 \text{ Hz.}$

$$\epsilon_{\text{düz,iz}} = 1.34 \cdot (\sigma_d/\sigma_c)^{1.77} \cdot N^{1.08(\sigma_d/\sigma_c)^{2.25}} \quad (4.33)$$

$$\epsilon_{\text{iz}} = 1.28 \cdot (\sigma_d/\sigma_c)^{1.41} \cdot N^{0.47(\sigma_d/\sigma_c)^{2.15}} \quad (4.34)$$

4.6. SONUÇ

Günümüz dünyasının artan ihtiyaçları ve gelişen teknoloji koşullarında araştırmacıların ilgisini 1960'lı yıllardan başlayarak çeken konulardan biri de zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarıdır. Bu çalışmada kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışı, yaygın olarak kullanılan dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemleri ile incelenmiştir. Laboratuvarında hazırlanan normal konsolide kaolin zemin örnekleri üzerinde, belirli genlik ve frekanslarda üniform sinoidal dinamik yüklemeyle, gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Dinamik özelliklere, deney sisteminin etkisi kullanılan iki farklı sistem ile araştırılırken diğer yandan düzlemsel izotropik (örselenmemiş) ve izotropik (örselenmiş) zemin örnekleri kullanılarak zemin yapısındaki bozulmanın etkisi incelenmiştir.

Dinamik basit kesme deney aletinde yapılan deneyler sonucu, her iki tip numune grubunda aynı frekansta gerilme oranlarındaki artımların, oluşan birim kaymaları ve boşluk suyu basınçlarını arttırdığı gözlenmiştir. Aynı gerilme oranında frekans değerindeki azalmalar da aynı etkiyi yaptığı görülmüştür.

Her iki deney aletinde ve her iki farklı şekilde hazırlanan zemin örnekleri üzerinde, aynı frekansta, farklı dinamik gerilme oranlarında yapılan deney setleriyle gerilme oranının etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Dinamik deneylerde, dinamik yükün tekrar sayısı, oluşan boşluk suyu basınçlarına, birim kaymalara ve eksenel birim boy değişimlerine etki eden bir parametredir. Çevrim sayısının bu etkisini belirlemek amacı ile aynı frekansta, belirli gerilme oranlarında, çizilen eğrilerden yararlanılmıştır.

Bu araştırma çerçevesinde incelenen diğer bir konuda frekansın etkisidir. Bunun için deney sonuçları aynı gerilme oranında farklı frekanslarda değerlendirilmiştir.

Eldeki deneysel veriler için, son olarak matematiksel model geliştirilmeye çalışılmıştır. Belirli frekansta, değişik gerilme oranlarında oluşan boşluk suyu basınçları, birim kaymalar ve eksenel birim boy değişimleri ile çevrim sayısı arasında nümerik korelasyonlarla uygun modeller belirlenmiştir.

BÖLÜM 5

GENEL SONUÇLAR

Kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemeyi amaçlayan bu çalışmada malzeme olarak Uşak kaolini kullanılmıştır. Laboratuvarında konsolide edilerek hazırlanmış, düzlemsel izotropik (örse-lenmemiş) ve izotropik (örse-lenmiş) zemin örnekleri üzerinde farklı frekans ve farklı dinamik gerilmeler altında, üniform sinosoidal yüklemeye dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney aletinde seri deneyler yaparak gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir.

Dinamik basit kesme deney aletinde iki farklı şekilde hazırlanan numuneler üzerinde, dört değişik frekansta, altı farklı gerilme oranında toplam 40 deney yapılmıştır.

Deney sonuçları gözlenen ilk özellik aynı frekansta, gerilme oranındaki artımlar, oluşan birim kaymaları ve boşluk suyu basınçlarını arttırmaktadır. Dolayısı ile dinamik mukavemeti azaltmaktadır. Zemin dane yapısındaki dizilimden dolayı düzlemsel izotropik numuneler, izotropik numunelerden daha fazla deformasyon yapmakta ve daha düşük boşluk suyu basınçlarının oluşumuna neden olmaktadır. Gerilme seviyesine bağlı olarak oluşan boşluk suyu basınçları:

$$u_{\text{düz,iz}} = 0.75 \sim 0.90 \cdot u_{\text{iz}} \quad (4.1)$$

Birim kayma değerleri ise:

$$\gamma_{\text{düz,iz}} = 1.25 \cdot \gamma_{\text{iz}} \quad (4.2)$$

ifadeleri ile belirlenebilmektedir. Bu değerler üzerinde frekansın

belirli bir etkisi görülmemektedir.

Artan çevrim sayıları, oluşan boşluk suyu basınçlarını ve birim kaymaları arttırmaktadır. Düzlemsel izotropik numunelerde τ/τ_f $\tau/\tau_f = 0.30$, izotropik numunelerde ise $\tau/\tau_f = 0.40$ değerinde sabit kalan birim kaymalar bu değerlerden sonra hızla artmaktadır. Bu odak noktanın yeri, düzlemsel izotropik numunelerde frekansın bir fonksiyonu iken ($\gamma = \pm \%0.2 - 1.50$), izotropik numunelerde frekans-tan fazla etkilenmemektedir ($\gamma = \pm \%0.5 - 1.0$).

Diğer önemli bir konuda kritik gerilme seviyesi olarak $\tau/\tau_f \approx 0.50$ değerinin belirlenmesidir. Bu genliğin altında yapılan deneylerde birim kaymalar sınırlı kalırken, boşluk suyu basınçlarının da önemli ölçüde artmadığı görülmüştür. Kritik genlikte ise, birim kaymalarda fazla bir artım görülmezken boşluk suyu basınçları yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu durumun statik mukavemeti olumsuz yönde etkileyeceği açıktır.

Frekansın, gerilme-şekil değiştirme ve dinamik mukavemet özelliklerine etkisi de bu araştırma kapsamında incelenmiştir. Belirli bir gerilme oranında, frekans değerindeki azalmalar oluşan boşluk suyu basınçlarını ve birim kaymaları arttırdığı gözlenmiştir. Düşük gerilme seviyelerde belirgin olan bu frekans etkisi, düzlemsel izotropik numunelerde $\tau/\tau_f \approx 0.50$, izotropik numunelerde ise $\tau/\tau_f \approx 0.70$ değerlerinden sonra azalmaktadır.

Gerilme seviyesine bağlı olarak oluşan boşluk suyu basınçları ise, düzlemsel izotropik numunelerde 100 çevrimden sonra maksimum değere asimtot olma eğilimi gösterirken, izotropik numunelerde ilk 50 çevrimde lineer olarak artmakta, 100 çevrimde artım yavaşlamakta ve 1000 çevrim dolaylarında maksimum değere asimtot olmaktadır.

Dinamik üç eksenli deney aletinde de, farklı hazırlanmış iki numune grubu üzerinde, üç değişik frekansta ve beş farklı dinamik gerilme oranında toplam 26 deney yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, dinamik basit kesme deney sonuçları ile uyum göstermektedir.

Düzlemsel izotropik ve izotropik numuneler üzerinde, aynı frekansta, artan gerilme oranları oluşan boşluk suyu basınçlarını ve eksenel birim boy değişimlerini arttırmaktadır. İzotropik numunelerdeki boşluk suyu basınçları biraz daha yüksek iken eksenel birim boy değişimleri daha küçük değerlerde kalmaktadır. Sonuç olarak frekansın önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Artan çevrim sayıları da oluşan boşluk suyu basınçlarını ve eksenel birim boy değişimlerini arttırmaktadır. Her iki numune grubunda da oluşan boşluk suyu basınçlarının % 60 'sı ilk 10 çevrimde meydana gelmekte ve 100 çevrim civarında aynı maksimum değere asimtot olmaktadır. Fakat bu çevrim değerinde yüksek eksenel birim boy değişimleri görülmektedir. Düzlemsel izotropik numunelerde $\sigma_d/\sigma_c = 0.20$, izotropik numunelerde ise $\sigma_d/\sigma_c = 0.10$ değerlerinde eksenel birim boy değişimleri sabit kalmaktadır.

Frekans değerindeki azalmalar, aynı dinamik gerilme oranında oluşan boşluk suyu basınçlarını ve eksenel birim boy değişimlerini arttırmaktadır. Fakat frekansın 0.50 Hz olduğu deneylerde bu etki kendini daha etkin bir şekil göstermektedir.

Deneyler sonucu oluşan kalıcı şekil değişimleri, düzlemsel izotropik numunelerde % 70 daha fazladır. $\sigma_d/\sigma_c > 0.50$ dinamik gerilme arasında frekans etkisi kaybolmakta ve plastik şekil değişimleri birbirine yaklaşmaktadır.

Her iki deney sisteminde yapılan deneyleri karşılaştırdığımızda aşağıdaki sonuçları elde ederiz.

Düzlemsel izotropik numunelerde, aynı deney sonu çevrim sayısı alınması halinde, dinamik üç eksenli deneylerde % 20 daha fazla boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Her iki deney sisteminde de oluşan boşluk suyu basınçları 100 çevrimde maksimum değere asimtot olmaktadır ve ilk çevrimdeki boşluk suyu basınçları arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Fakat ilk çevrimdeki eksenel birim boy değişimleri, birim kaymaların % 55 'si mertebesinde-dir. 60 çevrim sayısında eşit olan deformasyonlar, aynı deney sonu

çevriminde ise eksenel birim boy değişimleri, birim kaymalardan % 25 daha fazla bir değere ulaşmaktadır. $\tau/\tau_f > 0.50$ olan deneylerde ise birim kaymalara daha büyük olduğu görülmüştür. Deformasyonların sabit olduğu gerilme seviyeleri, dinamik basit kesme deneylerinde $\tau/\tau_f = 0.30$, dinamik üç eksenli deneylerde ise $\sigma_d/\sigma_c = 0.20$ dir.

İzotropik numunelerde, her iki deney sistemi ile kritik gerilme seviyesinin üzerinde yapılan deneylerde belirgin bir farklılaşma gözlenmezken, frekans ve gerilme oranındaki azalmalar dinamik üç eksenli deneylerde daha fazla boşluk suyu basınçlarının doğmasına yol açmıştır. Tüm gerilme seviyelerinde ilk 50 çevrimde lineer olan boşluk suyu basınçları 100 çevrim dolaylarında artımları yavaşlamakta ve 1000 çevrim de aynı maksimum değere asimtot olmaktadır. Deneyler sırasında oluşan deformasyonlar frekans değerinden etkilenmekte olup, ilk çevrim değerleri düzlemsel izotropik numunelerde olduğu gibidir. 100 çevrim dolaylarında ise deformasyon değerleri eşitlenmektedir. Frekansın 0.50 Hz. olduğu deneylerde ise eksenel birim boy değişimleri tüm çevrim sayılarında birim kaymaların ortalama %47'sinde kalmaktadır. Dinamik basit kesme deney sisteminde $\tau/\tau_f = 0.40$ değerinde, dinamik üç eksenli deneylerde ise $\sigma_d/\sigma_c = 0.10$ değerinde deformasyonlar sabit kalmaktadır.

Frekansın 0.50 Hz. olduğu deneyler her iki deney sisteminde de mukavemet, gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin ayrıcalık gösterdiği frekans değeri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden laboratuvar çalışmalarında deney frekansı olarak 0.10 Hz seçilmiştir. Konu ile ilgili model çalışmalarında çıkarılan aşağıdaki formüllerde deney frekansı 0.10 Hz. olan veriler kullanılmıştır. Her iki deney sisteminde, farklı numune hazırlama ile yapılan deney sonuçlarının korelasyonu sonucu boşluk suyu basınçları için:

$f = 0.10$ Hz Dinamik basit kesme deneyleri,

$$u_{düz,iz} = -3.66 + 19.93(\tau/\tau_f) + |-1.11 + 20.85(\tau/\tau_f)| \ln N \quad (4.6)$$

$$u_{iz} = -24.67 + 65.84(\tau/\tau_f) + |2.12 + 14.04(\tau/\tau_f)| \ln N \quad (4.7)$$

Dinamik üç eksenli deneyler:

$$u_{düz,iz} = -23.47 + 60.59(\sigma_d/\sigma_c) + |9.62 + 4.15(\sigma_d/\sigma_c)| \ln N \quad (4.24)$$

$$u_{iz} = -21.74 + 43.92(\sigma_d/\sigma_c) + |7.64 + 10.59(\sigma_d/\sigma_c)| \ln N \quad (4.25)$$

bağıntıları elde edilmiştir. Birim kayma ve eksenel birim boy değişimleri için yine 0.10 Hz. frekans değerinde çıkarılan formüller ise,

$$\gamma_{düz,iz} = 8.69(\tau/\tau_f)^{2.33} \cdot N^{0.72(\tau/\tau_f)^{2.88}} \quad (4.15)$$

$$\gamma_{iz} = 13.74(\tau/\tau_f)^{3.10} \cdot N^{0.63(\tau/\tau_f)^{1.15}} \quad (4.16)$$

$$\epsilon_{düz,iz} = 3.31(\sigma_d/\sigma_c)^{1.93} \cdot N^{0.63(\sigma_d/\sigma_c)^{1.15}} \quad (4.31)$$

$$\epsilon_{iz} = 4.01(\sigma_d/\sigma_c)^{2.33} \cdot N^{0.33(\sigma_d/\sigma_c)^{0.42}} \quad (4.32)$$

eşitlikleridir.

KAYNAKLAR

- [1] HARDIN, B.O., BLACK, W.L., (1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", Journal of Soil Mechanic and Foundation Engineering Division, March, ASCE, S.353-369.
- [2] SEED, B., IDRİSS, I., (1970), "Soil Moduli and Damping Faktors for Dynamic Response Analysis", Report No.EERC 70-10 Earthquake Engineering Research Center Berkeley-December
- [3] HARDIN, B.O., DRNEVICH, V.P., (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils, Measurement and Parameter effects", Journal of the soil Mechanics and Foundations Division, June, ASCE.
- [4] HARDIN, B.O., DRNEVICH, V.P., (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils; Design Equations and Curves", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, July, ASCE.
- [5] STOKOE, K.H., RICHART, F.E., (1973), "Shear Moduli of Soil, In-Situ and from Laboratory Tests", 5.Dünya Deprem Mühendisliği Konferansı, Roma., No.41.
- [6] KUMBASAR, V., ERGUVANLI, A., (1978), "Plastisite İndisinin Kayma Dalgası Hızına Etkisi", Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, Yıl:6, Sayı 21, S. 28-34.
- [7] OHTA, T., HARA, A., UCHIYAMA, S., NIWA, M., (1973), "Dynamic Respanse of Buildings Supported of Piles Extending Thorough Soft Alluvial Subsoil Layer", 5.Dünya Deprem Mühendisliği Konferansı, Roma, V.2, S.2084-2088.
- [8] HARA, A., OHTA, T., NIVA, M., TANAKA, S., BANNO, T., (1974), "Shear Modulus and Shear Strength of Cohosive Soils", Soils and Foundations, Japannese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.14., No.13, S.1-11.
- [9] MARCUSON, W.F., WAHLS, H.E., (1972), "Time effects on dynamic Shear Modulus of Clays", Proc. of ASCE, Vol.98, SM 12, S.1359-1373.
- [10] KOKUSHO, T., YOSHIDA, Y., ESASHİ, Y., (1982), "Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range", Soils and Foundations, Japannese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.22, No.4, Dec. 1982.

- [11] KIM, T.C., NOVAK, M., (1981), "Dynamic Properties of Some Cohesive Soils of Ontario", Canadian Geotechnical Journal, Vol.18, s.371-389.
- [12] TAYLOR, R., NACCI, V., (1967), "Influence of Clay Structure on Elastic Wave Velocities", Bulletin of Dynamic of Earth Materials., S.491-502.
- [13] TAYLOR, P.W., STRUT, A.M.I., HUGNES, T.M.O., (1969), "Dynamic Properties of Foundation Subsoils as Determined from Laboratory Tests", 4. Dünya Deprem Mühendisliği Konferansı - Şili, I., S.196-211.
- [14] ERGUVANLI, A., (1975), "Kohezyonlu Zeminlerin Dinamik Özellikleri", Doktora tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi
- [15] ANSAL, A.M., YILDIRIM, H., (1985), "Killerin Tekrarlı Yükler Altında Kayma Mukavemeti Özellikleri," II.Ulusal Kil Sempozyumu, Hacettepe Üniversitesi, Beytepe- Ankara, s.329-341.
- [16] ÖZAYDIN, K., (1982), "Zemin Dinamiği", Deprem mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları No.1.
- [17] CHAE, Y.S., CHIANG, Y.C., (1973), "Dynamic Behaviour of Weak Soils Treated With Additives", 5. Dünya Deprem Mühendisliği Konferansı - Roma, No.201.
- [18] THIERS, G.R., SEED, H.B., (1969), "Strength and Stress-Strain Characteristics of Clays Subjected to Seismic Loading Conditions", American Society of Testing and Materials, Special Technical Materials 450.
- [19] SANGREY, D.A., HENKEL, J.D., ERSING, M.I., (1969), "The Effective Stress Response of a Sturated Clay Soil to Repeated Loading", Canadian Geotechnical Journal, V.G., S.241-252.
- [20] WILSON, N.E., GREENWOOD, J.R., (1974), "Pore Pressure and Strains After Repeated Loading of Sturated Clays.", Canadian Geotechnical Journal, 11, S.269-277.
- [21] BROWN, S.F., LASHINE, A.K.F., Hyde, A.F.L., (1975), "Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay.", Geotechniques, V.25, N.1, S.95-114.
- [22] TOĞROL, E., ÖZÜDOĞRU, G.K., GÜLER, E., (1977), "Tekrarlı Yüklerin Zemin Mukavemetine Etkisi", İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Teknik Rapor, N.29.
- [23] LASHINE, A.K.F., (1973), "Deformation Characteristics of a Silty Clay Under Repeated Loading.", Proc.8 th. Int. Conf. on SMFE, Moscow,

- [24] MATSUI, T., OHARA, H., ITO, T., (1980), "Cyclic Stress-Strain History and Shear Characteristics of Clay", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.106, No.GT10, S.1101-1120.
- [25] ANSAL, A.M., ERKEN, A., (1985), "Killerin Tekrarlı Gerilmeler Altında Davranışı", Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, Yıl:12, Sayı 48, S.5-82.
- [26] LEE, K.L., FOCHT, J.A., Jr., (1975), "Strength of Clay Subjected to Cycling Loading", Marine Geotechnology, V.1, No.3.
- [27] OGAWA, S., SHIBAYAMA, T., YAMAGUCHI, H., (1977), "Dynamic Strength of Saturated Cohesive Soils", 9.Uluslararası SMFE Konferansı-Tokyo, 4/26, S.317-320.
- [28] KOUTSOFTAS, G.D., FISCHER, J.A., (1980), "Dynamic Properties of two Marine Clays", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.106, No.GTG, S.645-657.
- [29] ÖZÜDOĞRU, G.K., (1979), "Önceden Yüklenmiş Killerin Dinamik Davranışı", Doktora Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.
- [30] ANDERSEN, K.H., POOL, J.H., BROWN, S.F., ROSENBRAND, W.F., (1980), "Cyclic and Static Laboratory Tests on Drammen Clay", ASCE, Vol.106, GT.5, S.499-529.
- [31] ANSAL, A.M., ERKEN, A., (1982), "Rate Dependent Dynamic Behavior of Normally Consolidated Clay", 7 th. European Conference of Earthquake Engineering, Athens-Greece, Vol.2, S.329-336.
- [32] THIERS, G.R., (1965), "The Behaviour of Saturated Clay Under Seismic Loading Conditions", P.H.D. Thesis, University of California-Berkeley.
- [33] SILVER, M.L., (1977), "Laboratory Triaxial Testing Procedures to Determine the Cyclic Strength of Soils", Department of Materials Engineering University of Illinois at Chicago Circle.
- [34] ANNAKİ, M., LEE, K., (1976), "Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics", Preprint 2752, ASCE, Annual Convention and Exposition, Philadelphia, P.A.
- [35] SEED, H.B., CHAN, C.K., (1966), "Clay Strength Under Earthquake Loading Conditions", Proc. ASCE 92, SMZ, S.53-78.
- [36] ISHIHARA, K., (1980), "Strength of Cohesive Soils Under Transient and Cyclic Loading Conditions", 7. Dünya Deprem Mühendisliği Konferansı- İstanbul, V.State-of-the-art, S.159-169.

- [37] THIERS, G.R., SEED, H.B., (1969), "Strength and Stress-Strain Characteristics of Clays Subjected to Seismic Loading Conditions", Soils of Foundation, S.3-56.
- [38] CASTRO, G., CRISTIAN, J.T., (1976), "Shear Strength of Soil and Cyclic Loading", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT9, S.887-894.
- [39] KOUFSOFTAS, C.D., (1978), "Effect of Cyclic Loads on Undrained Strength of Two Marine Clays". Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.104, GT5, S.609-619.
- [40] ANDERSEN, K.H., (1976), "Behaviour of Clay Subjected to Undrained Cyclic Loading". Norwegian Geotechnical Institute Publication, No.114, S.33-44.
- [41] GÜLER, F.E., (1981), "Kohezyonlu Zeminlerin Davranışına Boşluk Suyu Basıncının Etkisi", Doktora Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.
- [42] BROWN, S.F., ANDERSEN, K.H., ELVANEY, J., (1977), "The Effect of Drainage on Cyclic Loading of Clay", Norwegian Geotechnical Institute Publication, No.118, S.1-6.

OZGEÇMİS

1956 yılında Kayseri'de doğan Hacı Bekir Kara İlk öğrenimini Afyon Atatürk ilkokulunda, Orta öğrenimini Afyon Şemseddin Karahisari orta okulunda tamamlamış olup 1972-1973 ders yılında İstanbul Haydarpasha Erkek Lisesinden mezun olmuştur.

1973 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Bölümüne girdi ve 1978 yılında MML öğrenimini bitirerek mezun oldu. Kısa bir süre Ankara'da Karayolları Genel Müdürlüğü Köprü Etüt Proje dairesinde Avam proje mühendisi olarak çalıştı. MMLS öğrenimini, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Geoteknik Dalında, 1979-1980 yılları arasında tamamlamıştır.

İstanbul Su ve Kanalizasyon İşleri Müdürlüğündeki görevi sırasında, İ.T.Ü. Maçka İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalına doktora adayı olarak kabul edildi.

1980-1988 yılları arasında Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Bölümü Araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. 1981 yılı Temmuz ayında kısa devre olarak askerliğini İsparta 40. Piyade Alayında yapmıştır. 1989 yılından bu yana serbest çalışmakta olup evli ve iki çocuk sahibidir.