

46370

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNCE DANELİ ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş.Müh. Tufan SANCAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Haziran 1995

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Haziran 1995

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hüseyin YILDIRIM

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Atilla M. ANSAL

Prof. Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU

HAZİRAN 1995

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında yönlendirmelerinden ve yardımlarından ötürü tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Hüseyin YILDIRIM'a ve katkılarından dolayı Sayın Doç.Dr. Ayfer ERKEN'e teşekkür ederim.

HAZİRAN 1995

İnş. Müh.
Tufan SANCAR



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. ELE ALINAN KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Giriş	3
2.2. İnce Daneli Zeminlerin Dinamik Davranışı	3
2.3. Sıvılaşma ve Sıvılaşma Üzerinde İnce Dane Oranının Etkisi	15
2.4. Düşük Plastisiteli Siltlerin Sıvılaşması	18
2.5. Dinamik Mukavemeti Etkileyen Faktörler	19
2.5.1. Birim Kayma Genliği	20
2.5.2. Ortalama Efektif Çevre Gerilmesi	20
2.5.3. Boşluk Oranı	22
2.5.4. Çevrim Sayısı	22
2.5.5. Doygunluk Derecesi	22
2.5.6. Aşırı Konsolidasyon Oranı	23
2.5.7. Frekans	24
2.5.8. Yükleme Şekli	24
2.6. Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi	25
2.7. Dinamik Basit Kesme Deney Tekniği	31
2.8. Sonuç	35
BÖLÜM 3. KULLANILAN MALZEME VE DENEY ALETİ	36
3.1. Giriş	36
3.2. Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi	36
3.3. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Numunelerin Özellikleri	48
3.4. Numunelerin Hazırlanması	49
3.5. Deneylerin Yapılışı	50
3.6. Verilerin Değerlendirilmesi	53
3.7. Sonuç	54

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	55
4.1. Giriş	55
4.2. Numunelerin Dinamik Davranış Biçimi	55
4.3. Gerilme Seviyesinin Etkisi	60
4.4. Çevrim Sayısının Etkisi	65
4.5. Plastisitenin Etkisi	66
4.6. Sonuç	71
BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR	72
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	76



SEMBOL LİSTESİ

A	: Numune kesit alanı
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
B	: Doygunluk oranı
e	: Boşluk oranı
E01,....., E38	: Dinamik deney numaraları
f	: Frekans
G	: Dinamik kayma modülü
G ₀	: Başlangıç dinamik kayma modülü
H ₀	: Deney başı numune yüksekliği
I _p	: Plastisite indisi
K ₂	: Dinamik kayma modülü katsayısı
K ₀	: Sukunetteki toprak basıncı katsayısı
MH	: Yüksek plastisiteli siltli zemin
ML	: Düşük plastisiteli siltli zemin
N	: Çevrim sayısı
NP	: Plastik olmayan (Non-plastik)
S _r	: Doygunluk derecesi
S _u	: Drenajsız kayma mukavemeti
T	: Uygulanan tekrarlı kuvvet
u	: Boşluk suyu basıncı
w	: Tabii su muhtevası
w _L	: Likit limit

w_p	: Plastik limit
γ	: Birim kayma
γ_d	: Doygun birim hacim ağırlık
γ_n	: Tabii birim hacim ağırlık
ε	: Eksenel birim boy kısalması
ε_d	: Dinamik deformasyon
σ_c	: Konsolidasyon basıncı
σ_{cd}	: Tekrarlı deviatör gerilme
σ_{hc}	: Yatay dinamik normal gerilme
σ'_0	: Ortalama efektif çevre gerilmesi
σ_{vc}	: Düşey dinamik normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
τ_d	: Başlangıç tekrarlı kayma gerilmesi
τ_f	: Kırılma anındaki kayma gerilmesi
τ_{hc}	: Yatay dinamik kayma gerilmesi
Δl	: Yatay şekil değiştirme
Δu	: Boşluk suyu basıncı değişimi

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Tek ve çift yönlü yükleme biçimlerinin farkı	4
Şekil 2.2 Dinamik kayma modülü değerinin boşluk oranı ve ortalama efektif çevre basıncı ile değişimi	5
Şekil 2.3 Aşırı Konsolidasyon oranı ile dinamik mukavemet arasındaki ilişki	6
Şekil 2.4 Tekrarlı yük ile ϵ dinamik ilişkisi	7
Şekil 2.5 Aşırı Konsolidasyon oranının tekrarlı yük altında B.S.B. artımına etkisi	8
Şekil 2.6 τ/τ_f seviyesinin boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisi	10
Şekil 2.7 τ/τ_f seviyesinin birim kayma üzerindeki etkisi	10
Şekil 2.8 Tekrarlı kayma gerilmesi-birim kayma-boşluk suyu basıncının çevrim sayısına göre değişimi	11
Şekil 2.9 SB.1 sondajından farklı frekanslarda yapılan dinamik basit kesme deneyleri	13
Şekil 2.10 SB.4 sondajından farklı frekanslarda yapılan dinamik basit kesme deneyleri	13
Şekil 2.11 Deviatör gerilmenin çevrim sayısı ile değişimi	14
Şekil 2.12 Boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile değişimi	14
Şekil 2.13 Gevşek kumlarda sıvılaşma	15
Şekil 2.14 Düşük plastisiteli ince dane içeren kumların sıvılaşma üzerindeki etkisi	17
Şekil 2.15 Silt oranının sıvılaşmaya etkisi	17
Şekil 2.16 Plastik ince danelerin etkisi	18
Şekil 2.17 Düşük plastisiteli siltler için tekrarlı gerilme oranı ve çevrim sayısı arasındaki ilişki	18

Şekil 2.18	Gerilmelerle boşluk suyu basınçları arasındaki ilişki	21
Şekil 2.19	Tekrarlı yüklemede oluşan elastik ve plastik davranış	21
Şekil 2.20	Gerilme genliğinin etkisi	23
Şekil 2.21	Yükleme şeklinin dinamik davranışa etkisi	25
Şekil 2.22	Zemin kesitinde kayma gerilmeleri ve deneylerde kullanılan üniform kayma gerilmeleri	26
Şekil 2.23a	Gerilme kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi	27
Şekil 2.23b	Deformasyon kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi	27
Şekil 2.24	Tekrarlı kayma gerilmesi altında oluşan histerisis ilmikleri	28
Şekil 2.25	Suya doymun killerde kayma modülü ile kayma birim deformasyon bağıntısı	29
Şekil 2.26	Sönüm oranının tanımlanması	30
Şekil 2.27	Suya doymun killerde sönüm oranı ile kayma birim deformasyon bağıntısı	30
Şekil 2.28	Basit kesme deney sistemleri	32
Şekil 2.29	Dinamik yükleme öncesindeki statik gerilmeler	32
Şekil 2.30	Basit kesme deneylerinde gerilme durumu	33
Şekil 2.31	Tekrarlı yükler altında zeminlerde oluşan farklı gerilme durumları	34
Şekil 3.1	Dinamik basit kesme deney sisteminin önden çekilmiş bir fotoğrafı	37
Şekil 3.2	Deney hücresinin bir fotoğrafı	38
Şekil 3.3	Dinamik basit kesme deney sisteminin hücre bölümü	40
Şekil 3.4	Konsolidasyon sırasında numune üzerindeki gerilme durumu	41
Şekil 3.5	Basınç tablosu fotoğrafı	43
Şekil 3.6	İlave edilen basınç tablosu fotoğrafı	44
Şekil 3.7	Dinamik basit kesme deney sisteminde numune hazırlama aletleri	51
Şekil 4.1	Dinamik basit kesme deney sisteminde E18 nolu deney kaydı	57
Şekil 4.2	Dinamik basit kesme deney sisteminde E31 nolu deney kaydı	58

Şekil 4.3	Dinamik basit kesme deney sisteminde E38 nolu deney kaydı	59
Şekil 4.4	Dinamik gerilme seviyesinin etkisi	62
Şekil 4.5	Dinamik gerilme seviyesinin etkisi	63
Şekil 4.6	Dinamik gerilme seviyesinin etkisi	64
Şekil 4.7	Tekrarlı yüklemelerde çevrim sayısının etkisi	67
Şekil 4.8	Tekrarlı yüklemelerde çevrim sayısının etkisi	67
Şekil 4.9	Tekrarlı yüklemelerde çevrim sayısının etkisi	68
Şekil 4.10	Plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisi	68
Şekil 4.11	Plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisi	70
Şekil 4.12	Plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisi	70



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan numunelerin özellikleri	49
Tablo 4.1 Dinamik deneyler ve kayma gerilmesi oranları	55



ÖZET

Bu araştırmada suya doygun, ince daneli zeminlerin dinamik davranış biçimleri ve bu davranış biçimi üzerinde dinamik gerilme seviyesinin, çevrim sayısının ve plastisitesinin etkisi incelenmiştir.

Erzincan Ekşisu bölgesinde yapılan sondajlarda tüp ve pistonlu numune alıcılarla alınmış örselenmemiş plastik ve plastik olmayan siltli zemin numuneleri üzerinde, gerilme kontrolü olan dinamik basit kesme deney sisteminde, bir seri deney yapılmıştır. Zeminlerin dinamik mukavemetini etkileyen faktörlerden olan; uygulanan dinamik gerilme seviyesi, çevrim sayısı ve plastisitenin etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre; uygulanan dinamik gerilme seviyesinin artması durumunda boşluk suyu basıncının ve birim kaymanın arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, çevrim sayısının artması zemin numunelerindeki birim kayma değerlerini arttırmaktadır. Diğer bir sonuç ise, plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisidir. Belli bir çevrim sayısı dikkate alındığında, plastik siltlerin dinamik mukavemetinin, plastik olmayan siltlere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.

SUMMARY

CYCLIC BEHAVIOUR OF FINE GRADED SOILS

It is inevitably necessary to determine the behaviour of cohesive soils while investigating the response of soil layers to the earthquake loads. In such soils there is no total loss of strength as in sands; therefore investigations should be directed toward stress-strain and porewater pressure behaviour. The problems encountered in cohesive soil layers during an earthquake can arise as instability at slopes where the soil surface is inclined. Also the cyclic properties of cohesive soils should be obtained in order to conduct earthquake analyses at soil structures such as an earthfill dam.

Determination of the behaviour of soils under cyclic stresses, in other words the cyclic properties, can be divided into two sections:

- 1- Stress-strain properties
- 2- Strength properties

The term stress-strain properties implies the determination of the cyclic shear modulus and the damping ratio values and their variation with unit strain. The shear stress amplitude that produces collapse or large deformations are used as strength parameters.

Cyclic tests were conducted on properly prepared undisturbed soil samples and the factors affecting the cyclic behaviour were investigated. These factors have been thoroughly investigated by many researchers by tests done in the laboratory as well as in the field. Factors affecting the cyclic strength can be classified into two main groups according to their importance:

Factors of primary importance:

- 1- Unit shear strain amplitude, γ
- 2- Average effective confining pressure, σ'_0
- 3- Void ratio, e
- 4- Number of cyclics, N
- 5- Saturation ratio, S_r
- 6- Overconsolidation ratio, OCR
- 7- Frequency, f

Factors of secondary effect:

- 1- Testing methods

2- Loading type and direction

Soils under the effect of cyclic loads are effected by cyclic shear stress at various amplitudes and frequencies. The laboratory tests developed nowadays to determine the strength properties of soils at such loading conditions are as follows:

- 1- Cyclic simple shear test
- 2- Cyclic triaxial test
- 3- Cyclic torsional simple shear
- 4- Shaking table
- 5- Resonant column test

The cyclic simple shear testing system used in this study was a modified version of the Norwegian simple shear apparatus, developed by Prof. Ishihara and Prof. Silver. The cyclic shear stresses were controlled by a pneumatic system, applied at frequencies between 0,0001 Hz and 5 Hz.

The horizontal shear stresses were applied as stress controlled at the top cap connected to a horizontally moveable shaft going through the cell. The test sample had a 70 mm diameter and a 30 mm height and it could be consolidated under isotropic and anisotropic stresses.

The shear stresses were measured by a load cell located in the chamber. The porewater pressure transducer was connected to the bottom platen, axial and horizontal deformations were measured by sensitive displacement transducers located outside of the chamber.

In this study a series of cyclic tests were conducted on plastic and non-plastic undisturbed silty soil samples obtained by Shelby tube and piston sampler from borings at the Erzincan Ekşisu region.

Special care was given not to disturb the test samples and therefore sampler tubes of height 700-800 mm were divided into small pieces. The water content of carefully taken out samples was determined. Also other index properties (namely the liquid limit, plastic limit, natural unit weight, amount of coarse and fine graded particles) were determined.

The soil sample was placed carefully on the cell base after it was brought to cylinders of height 30 and 70 mm. Afterwards a membrane of 0,3 mm thickness was fit onto the sample and the O-rings were attached. The cell was filled with castor oil after all the connections of the device were completed.

This filling up with castor oil was followed by the application of pressure. At this stage the initial height reading was taken on the deformation gauge. Then a 100 kPa confining pressure was applied to the sample. The connections were opened between the back pressure, axial pressure and confining pressure.

The axial pressure increased equivalent to the confining pressure because the interconnections were free. The back pressure was slowly step-by-step increased to 400 kPa keeping the effective pressure at 100 kPa. Both of the pressures rose

equally to the back pressure to 500 kPa because the back pressure regulator controlled both the confining and the axial pressures.

The soil sample was then left to consolidate for 24 hours at these pressure stages. The B-check was done after 24 hours. B value was obtained as 0,95 or greater after 24 hours. The sample was consolidated to the desired effective confining stress and it was cyclically loaded as the stress was controlled at a frequency of 1 Hz.

Some of the silty soil samples used in the cyclic tests were non-plastic; some were plastic soils. The water content of non-plastic silty soil samples varied between 38% and 51% and those of plastic silty soil samples, from 36% to 50%. The liquid limit values of plastic silty samples varied between 36% and 60% and plastic limit had a span of 26% to 32%.

The liquid limit of the non-plastic silty soils had range of 31% to 51%. Also the coarse portion of the non- plastic samples was between 2% to 17% and that among the plastic soil samples between 24% and 38%.

The pore water pressures, applied cyclic loads, horizontal and vertical deformation readings were taken by computer during these tests. The applied cyclic load was recorded as T ; therefore the force acting on the sample was $\pm T/2$. Consequently, the applied stress to the sample was calculated as $\pm T/2A$ assuming that no longitudinal deformations developed and the sample area stayed constant during the testing.

The deformation calculations were done in a similar manner and the unit shear strain values, γ ; obtained by dividing the deformation recordings Δl from the computer by the sample height H_0 .

Pore water pressures were directly read from the data during the test. After the completion of the test these data were recorded with the help of floppy disk and processed for the calculations. It was crucial to carefully enter the necessary commands to the computer before starting the tests.

In this study, a series of cyclic tests were conducted using the simple shear testing system. In all the tests the wave shapes were taken as sinusoidal and the effective confining pressure as 100 kPa. The cyclic loads were applied to the specimen until the porewater pressures were equal to the confining pressure or until the porewater were equal to the confining pressure or until the porewater pressure reached steady-state.

The shear stress ratios were determined after each cyclic test. Besides, the porewater pressure ratio-time, shear strain-time and shear stress ratio-time relationships were shown after each cyclic tests.

Whether the porewater pressure reached the 100 kPa value (whether there was liquefaction or not) was checked. The shear strain ratio was taken as $\gamma=\pm 2,5\%$ as the accepted failure criteria under cyclic loads after applying the unit shear stress and the cyclic numbers, N and the porewater pressure ratio, $\Delta u/\sigma'_c$ were determined corresponding to this level.

Finally, according to the results obtained from the tests, the following factors that affect cyclic strength were investigated in the study:

- 1- Effect of the cyclic stress ratio
- 2- Effect of the number of cyclics
- 3- Effect of plasticity

1. The effect of the cyclic stress ratio

Cyclic loads at different stress ratios were applied to saturated high and low plasticity silty soil samples to determine the effect of cyclic stress ratio on cyclic behaviour. The deformation level, which was accepted as the failure criteria $\gamma=\pm 2,5\%$ was monitored for three different sets of tests and the cyclic number, and the porewater pressure ratio, $\Delta u/\sigma'_c$ corresponding to this was determined.

At soils not reaching the shear strain values at a certain stress level $\gamma=\pm 2,5\%$ was observed. For every soil at stresses exceeding the stress level the shear strain was monitored exceeding the $\gamma=\pm 2,5\%$ value.

As the stress ratio increased the differences in the number of cycles, N also increased. It was found that the porewater pressures and the shear strain increased in proportion to the cyclic stress ratio.

2-The effect of number of cyclics

Cyclic loads at different stress ratios were applied as well to saturated high and low plasticity silty soil samples to determine the effect of number of cycles on the cyclic behaviour.

At different cyclics (N=1, N=10, N=20 and N=100) evaluations were made at the same frequency and at a certain shear stress ratio and at the same shear stress ratio, the shear strain value at N=100 cycle obtained was higher than the shear strain value at N=1 cycle. Three different sets of tests were conducted as well to determine the effect of the cyclic number on the cyclic strength.

The increase in the number of the cycles resulted in an increase in the shear strain values in samples. This caused yield in soils. Certain repeated shear stress or shear strain amplitude had to be reached to obtain such a yield. The ties between the soil particles were then weakened and the strength was decreased due to the relative displacement of the particles.

3- The effect of plasticity

Lastly, cyclic tests on two different soil groups of plastic and non-plastic (NP) behaviour at different shear stresses were conducted and the obtained results were compared to determine the effect of plasticity on the cyclic strength of fine graded soils.

The results were evaluated at $\gamma=\pm 1\%$ deformation level as well as at $\gamma=\pm 2,5\%$ deformation level. There was a significant difference in their behaviour due to the effect of plasticity although both soils were classified as silt.

The cyclic strength of plastic silt was observed to be higher than that of non-plastic (NP) silty soils taking a certain cyclic number into consideration.

In this study, aim was to investigate the effects of cyclic shear stress level, the effect of the number of cycles and the effect of plasticity in fine graded soil samples. For every soil at stresses exceeding the stress level the shear strain was monitored exceeding the $\gamma=\pm 2,5\%$ value.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Zeminlerin statik yükler altındaki davranış ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi inşaat mühendisliğinde önemli bir inceleme aşamasıdır. Bununla birlikte özellikle deprem olasılığı yüksek olan bölgelerde yer alacak olan yapıların yeterli derecede güvenli yapılabilmesi için, bunların tasarım ve boyutlandırılmasında bu ilk inceleme aşamasında elde olunmuş bulgular yeterli olmamaktadır. Böyle bölgelerde zemin tabakalarının ve bu tabakaları oluşturan zeminlerin dinamik yükler altındaki mühendislik özelliklerinin laboratuvar ve arazide çeşitli deney sistem ve yöntemleri ile incelenmesi gerekir.

Deprem ve benzeri dinamik etkiler sırasında zemin tabakaları farklı frekans ve genliklere sahip tekrarlı yüklerin etkisinde kalarak titreşime uğrarlar. Zemin tabakalarının bu türden titreşimlere maruz kalmasından dolayı, tabakalarda bir takım hacim ve şekil değiştirmeler meydana gelir. Boşluk suyu basınçlarındaki artışlar da, zemin tabakalarında oturma ve göçmelere sebep olabilir. Deprem de zemin tabakalarını büyük titreşimlere bıraktıklarından dolayı, biz inşaat mühendislerinin zemin-yapı sistemindeki karşılıklı etkileşiminden dolayı meydana gelecek olan problemleri uygun bir şekilde çözmemiz gerekiyor.

Özellikle ülkemizin aktif bir deprem kuşağı üzerinde bulunduğunu hatırlanacak olursa, böyle bir durumda tekrarlı gerilmelerin etkisi altında zeminlerin nasıl bir davranış göstereceğinin incelenmesinin kaçınılmaz olduğu bir gerçektir.

Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altındaki davranışlarını, diğer bir deyişle dinamik özelliklerini tanımlarken, bunları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri diye iki gruba ayırabiliriz. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin ve bunların birim şekil

değiştirmeye göre değişimlerinin bulunması anlaşılır. Mukavemet özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere yol açan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır. Bu iki grup özelliklerin bulunması için çoğunlukla aynı tür laboratuvar deneylerinden yararlanılır, yalnız bazı durumlarda deney yöntemlerinde farklılıklar olabilir.

Laboratuvarda uygun şekilde hazırlanmış zemin numuneleri üzerinde dinamik deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlara dayanılarak arazideki zemin tabakalarının davranış biçiminin belirlenmesine çalışılmıştır. Ancak, gerek numune alınması aşamasında gerekse numune hazırlanmasında zemin numunelerinde meydana gelen örselenmeleri de gözönüne almamız gerekir. Bu araştırma çerçevesinde dinamik basit kesme deney sisteminde yapılmış olan deneylerde kullanılan numuneler, örselenme etkisi minimuma indirilerek hazırlanmıştır.

İnce daneli zeminlerin dinamik mukavemet davranışı, birçok araştırmacı tarafından laboratuvar ve arazi deneyleri ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda dinamik mukavemeti etkileyen faktörler; birim kayma genliği, ortalama efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı, çevrim sayısı, doygunluk derecesi, aşırı konsolidasyon oranı, frekans, deneysel yöntemler ve yükleme biçimi ve doğrultusudur. Bu faktörlerin etki dereceleri, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranış özellikleri ve dinamik basit kesme deney tekniği ikinci bölümde verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yapılan deneysel çalışmaların aşamaları özetlenmiştir. Dinamik basit kesme deney sistemi, numunelerin fiziksel özellikleri, numune hazırlanması ve deneylerin yapılış aşamaları bu bölüm kapsamında ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde, yapılan deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilerek, suya doygun siltli zemin numunelerin deprem yükleri altındaki davranış biçimleri ve bu davranış biçimi üzerinde dinamik gerilme seviyesi, çevrim sayısı ve plastisitenin etkisi incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

BÖLÜM 2

ELE ALINAN KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Günümüzde yapılmakta olan mühendislik yapılarının boyutlarının büyümesi ve fonksiyonlarının çok fazla önem kazanması nedeni ile deprem ve diğer olası tekrarlı yüklere karşı dayanıklı olarak tasarlanmaları hem ekonomik hem de işlevsel açıdan gereklidir. Zeminlere etkiyen deprem, dalga gibi dinamik yüklerin laboratuvar şartlarında, olabildiğince arazideki duruma uygun bir biçimde model edilebilmesi amacı ile bir takım deney yöntemleri ve deney sistemleri geliştirilmiştir. Bugün, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranış ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi amacı ile, dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, burulmalı kesme, rezonans frekansı titreşim ve sarsma tablası gibi deney sistemleri kullanılmaktadır.

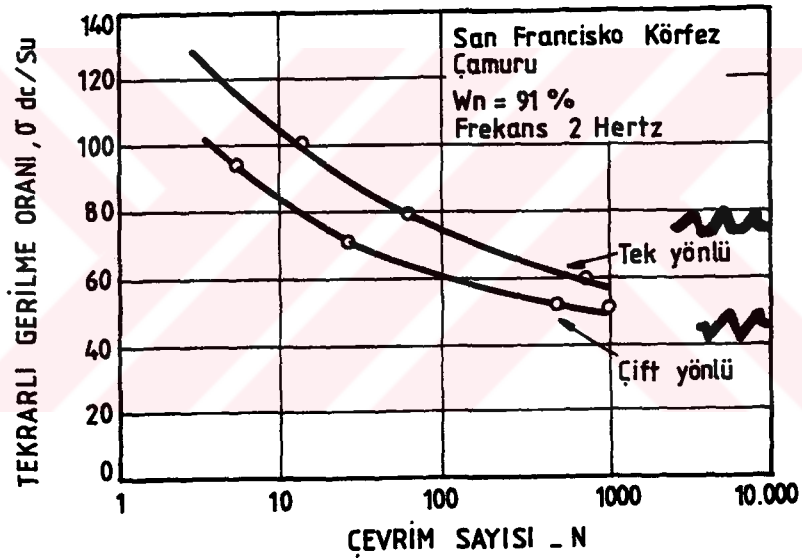
Bu bölümde, zeminlerin davranışlarının belirlenebilmesi amacıyla şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalar mümkün olduğu kadar gelişme süreci izlenerek anlatılacaktır.

2.2. İnce Daneli Zeminlerin Dinamik Davranışı

Killi zeminlerin deprem yükleri altında davranışlarının deneysel olarak incelenmesi için ilk çalışmalar 1966 yılında başlamıştır.

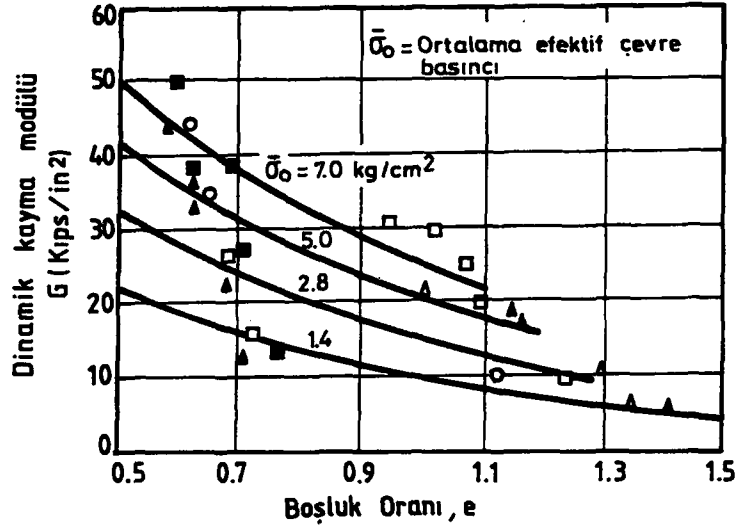
Seed ve Chan (1966), killerin, tek yönlü darbeleri ve çift yönlü tekrarlı yükler altındaki davranışlarının incelenmesi ve karşılaştırılması amacıyla, San Francisco körfezi çamurundan aldıkları numuneler üzerinde aynı izotropik basınçlar altında tek yönlü darbeleri yüklemeler uygulayarak yaptıkları üç eksenli basınç deneylerinde, örselenmemiş hassas killerin tek yönlü darbeleri yüklemeler altındaki

mukavemetlerinin, sıkıştırılmış killerininkine oranla daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Ancak, tekrarlı yükleme durumunun bu özelliği tam tersine çevirdiğini ve hassas yumuşak killerin çok daha ufak gerilme seviyelerinde göçtüğünü belirlemişlerdir. Ayrıca yaptıkları üç eksenli basınç deneyleri sonucunda; tek yönlü dinamik yüklemeler sonucu elde edilen mukavemetin çift yönlü tekrarlı darbeli yükleme koşullarına oranla 1.2-1.3 kat daha büyük olduğunu göstermişlerdir. (Şekil 2.1)



Şekil 2.1 Tek ve Çift Yönlü Yükleme Biçimlerinin Farkı

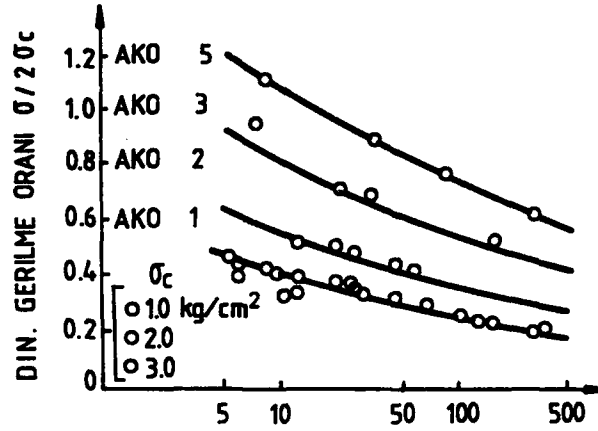
Hardin ve Black (1968), Kaolin ve Boston mavi kili üzerinde yaptıkları ilk deneylerde, aynı boşluk oranında artan ortalama efektif çevre gerilmeleri uygulandığında Şekil 2.2'de gösterildiği gibi kayma modülü değerinin arttığını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.2 Dinamik Kayma Modülü Değerinin Boşluk Oranı ve Ortalama Efektif Çevre Basıncı ile Değişimi

Sangrey ve diğerleri (1969), killerin düşük genlikli tekrarlı yüklemeler altındaki davranışlarını incelemişler ve göçmeye yol açmayacak şiddetteki tekrarlı yüklerin uygulanması halinde zeminin, bu tekrarlı yükler altında dengeye gelip elastik davranış gösterdiğini, oluşan maksimum boşluk suyu basıncının ise uygulanan tekrarlı yükün şiddeti ile doğrusal orantılı olduğunu ifade etmişlerdir.

Lee ve Focht (1975), Kuzey denizinden almış oldukları numuneler üzerinde tekrarlı yüklemelerin, yüklemeden önceki drenajsız kayma mukavemetine etkisini belirleyebilmek için dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Statik kırılma birim şekil değişimlerinin, %70'i kadar dinamik şekil değiştirme yapmış numunelerin, statik mukavemetlerinde %20 azalma olduğunu söylemişlerdir. Aynı deneysel çalışmada aşırı konsolide killerin normal konsolide killere oranla daha yüksek bir mukavemet gösterdiklerini saptamışlardır (Şekil 2.3); ayrıca dinamik mukavemetin, statik drenajsız mukavemete oranı şeklinde ifade edildiğinde (τ_d/S_u), killerde aşırı konsolidasyonun etkilerinin normalize olduğunu göstermişlerdir.

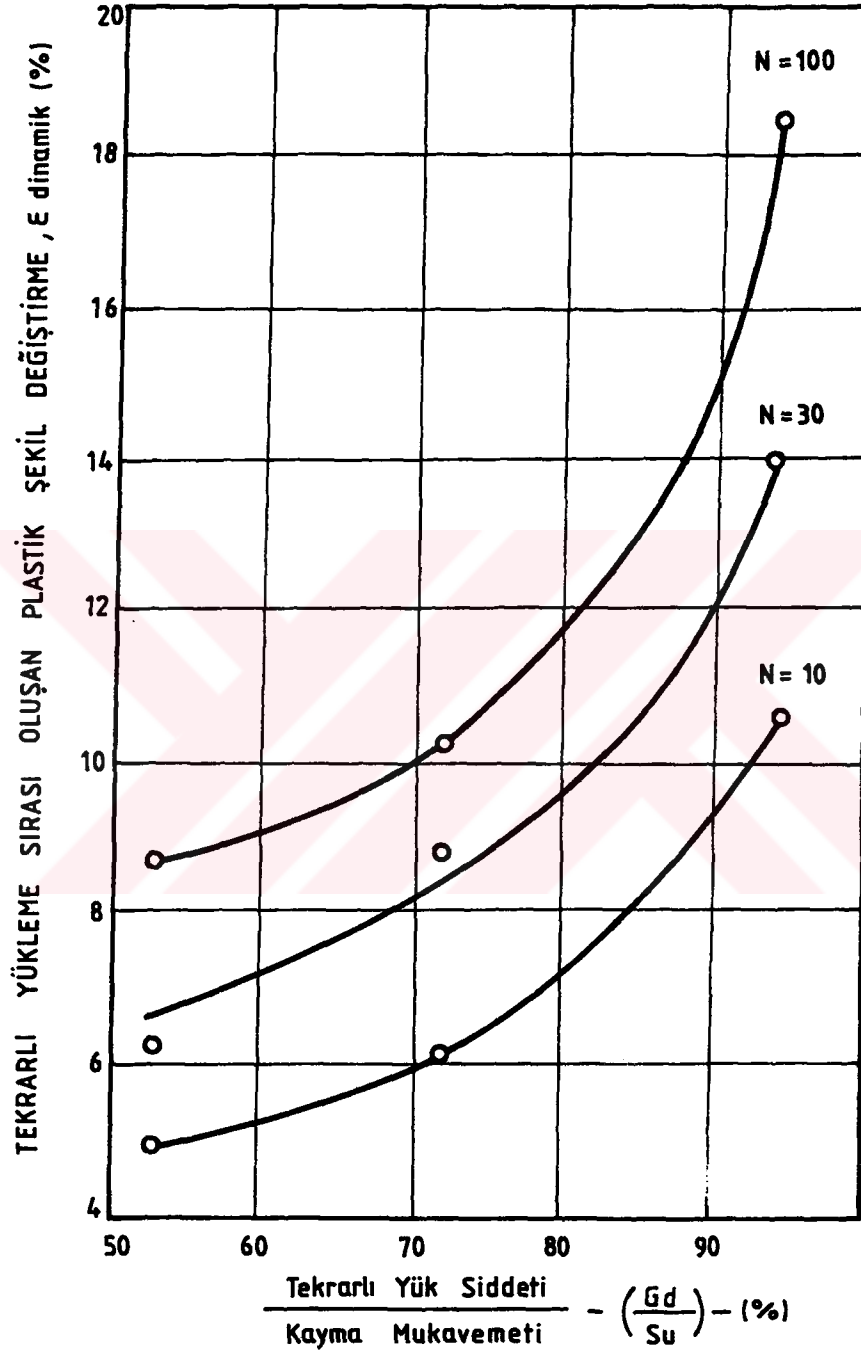


Şekil 2.3 Aşırı Konsolidasyon Oranı ile Dinamik Mukavemet Arasındaki İlişki

Castro ve Christian (1976), tekrarlı yüklemelerin, killerin davranış ve mukavemet özelliklerine etkisini incelemişler ve tekrarlı yüklemeler sırasında boşluk suyu basınçlarının arttığını, dolayısıyla efektif gerilmelerin, küçüleceğini ve kayma mukavemetinin azalıyormuş gibi gözükebileceğini; ancak tekrarlı yüklemeyi takip eden statik kesme sırasında negatif boşluk suyu basıncı oluşme eğiliminin zeminin kayma mukavemetinin değişmesini önlediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, killi ve siltli zeminlerin drenajsız kayma mukavemetine etkiyen esas parametrelerin boşluk oranı ve yapısal özellikler olduğunu söylemişlerdir.

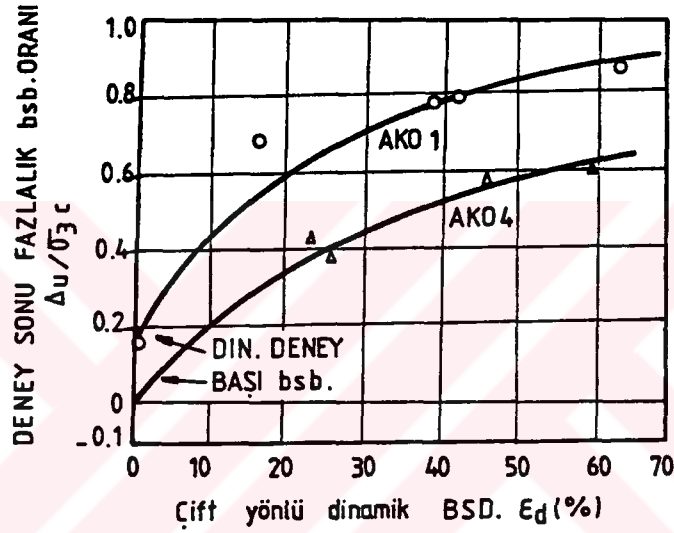
Anderson (1976), tarafından yapılmış diğer bir çalışmada, dinamik yükleme sırasında meydana gelen dinamik deformasyon sonucu numunelerde bir miktar mukavemet kaybı meydana gelebileceğini; ancak bu mukavemet kaybının yükleme öncesi mukavemetin %25'ini geçmeyeceğini belirtmiştir.

Toğrol ve diğerleri (1977), uygulanan tekrarlı yükün şiddetinin ve tekrar sayısının, dinamik yükleme sırasında oluşan şekil değiştirmelere etkin olduğunu ve tekrarlı yükleme sırasında meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin, tekrarlı yükün şiddeti ve tekrar sayısı ile arttığını ifade etmişlerdir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4 Tekrarlı Yük ile ϵ Dinamik İlişkisi

Kautsoftas (1978), normal ve aşırı konsolide killerin dinamik davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve tekrarlı yüklemeler sırasında normal konsolide killerin, aşırı konsolide killere oranla daha fazla deformasyona uğradıklarını ve dolayısıyla boşluk suyu basınçlarının Şekil 2.5’de görüldüğü gibi aşırı konsolide killere oranla daha hızlı ve fazla olduğunu belirtmiştir.



Şekil 2.5 Aşırı Konsolidasyon Oranının Tekrarlı Yük Altında B.S.B. Artımına Etkisi

Özüdoğru (1979), aşırı konsolide killeri üzerinde yaptığı deneysel çalışmada laboratuvar ortamında kompaksiyonla hazırlanmış ve suya doymun hale getirilmiş siltli kil numuneleri ile alınmış olan örselenmemiş aşırı konsolide plastik kil numuneleri üzerinde, bir ve iki yönlü dinamik yükleme yapabilen dinamik üç eksenli deney aletinde, numunelerin statik kayma mukavemetlerinin belirli yüzdelisinde ve çeşitli tekrar sayılarında drenajsız dinamik üç eksenli deneyler yapmıştır, sonuçta; tekrarlı yüklemenin, önceden yüklenmiş killerin yüklenmeden önceki statik mukavemetlerinde önemli oranda bir değişiklik yapmadığını, zeminin efektif kayma

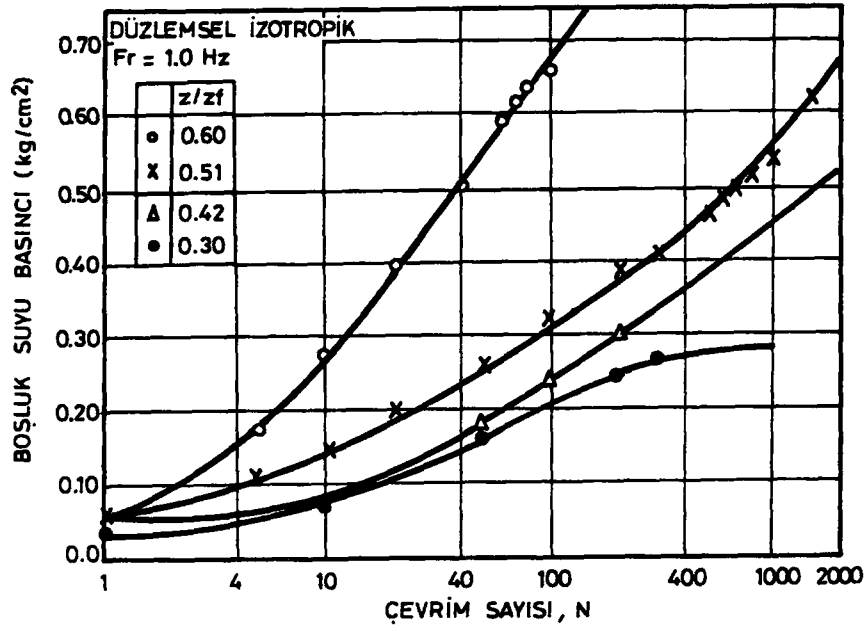
mukavemeti parametrelerinin, hemen hemen değişmediğini, tekrarlı yükleme sonucunda aşırı konsolide killerde kırılmanın, zeminin belirli bir kesiminde negatif boşluk suyu basınçlarının ortaya çıkması sonucunda su hücumu ile meydana geldiğini göstermiştir.

Erken (1982), dinamik yüklemeler sırasında oluşan boşluk suyu basıncı ve birim kayma değerleri üzerinde tekrarlı kayma gerilmesinin ve frekansın etkilerini araştırmıştır. Gerilme kontrollü dinamik basit kesme deney sisteminde, iki farklı şekilde (izotropik ve düzlemsel izotropik) hazırlanmış olan normal konsolide Kaolin numuneler üzerinde deneyler yapmıştır. Şekil 2.6 ve 2.7’de gösterildiği gibi belirli bir frekansta tekrarlı kayma gerilmeleri arttıkça boşluk suyu basıncının ve birim kayma değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

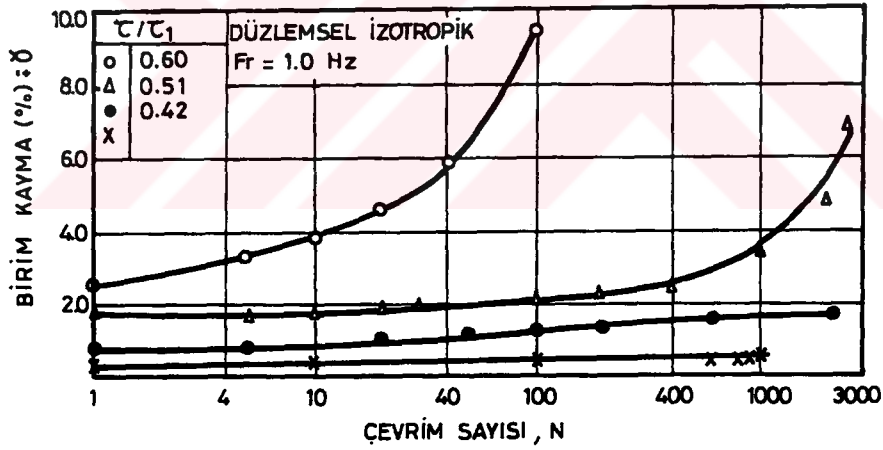
Tekrarlı kayma gerilmesi sabit tutularak değişik frekanslarda yapılan deneylerde ise, frekans arttıkça boşluk suyu basınçları ve birim kayma değerlerinin azaldığı ifade edilmiştir. Aynı frekans ve tekrarlı kayma gerilmelerinde izotropik ve düzlemsel izotropik numunelerin dinamik davranışları karşılaştırılmış ve dane yapıları nedeni ile düzlemsel izotropik numunelerdeki boşluk suyu basınçlarının izotropik numunelere göre daha az fakat birim kayma değerlerinin ise daha fazla olduğu ve bu nedenle kayma modülü değerlerinin izotropik numunelere oranla daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Ansal ve Yıldırım (1985), dinamik basit kesme deney sisteminde, anizotropik gerilmeler altında konsolide edilen, örselenmemiş doğal kil numunelerin mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme davranışları konusunda araştırma yapmışlar ve killerde dinamik kayma modülünün, birim kayma genliğine bağlı olarak doğrusal olmayan bir azalma gösterdiğini, dinamik kayma mukavemetinin uygulanan tekrarlı gerilmenin genliğine bağlı olduğunu ve tekrarlı kayma gerilmesinin etkisinin uzun dönemde statik mukavemeti artırıcı olabileceğini belirtmesidir.

Ansal ve Erken (1985), laboratuvarında iki farklı şekilde hazırlanmış Kaolin numuneler üzerinde dinamik basit kesme deneyleri yapmışlardır. Statik kayma mukavemetin %50 civarını “kritik kayma gerilmesi genliği” olarak tanımlayan

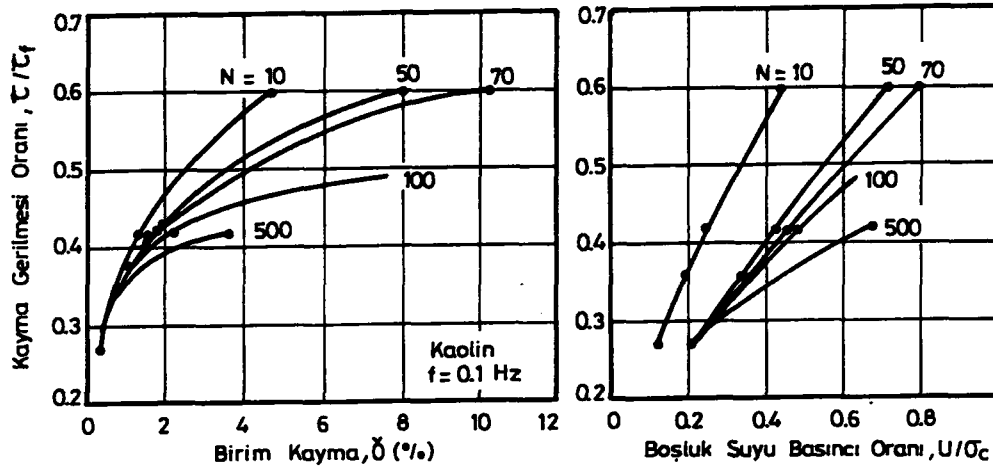


Şekil 2.6 τ/τ_r Seviyesinin Boşluk Suyu Basıncı Üzerindeki Etkisi



Şekil 2.7 τ/τ_r Seviyesinin Birim Kayma Üzerindeki Etkisi

araştırmacılar, bu genliğin aşılması durumunda birim kaymanın, γ , ve boşluk suyu basıncını, u , hızla arttığını belirtmişlerdir. Bu kritik değerden küçük yakın değerlerde yapılmış deneylerde, birim kaymaların sınırlı kaldığı 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 2.8)



Şekil 2.8 Tekrarlı Kayma Gerilmesi-Birim Kayma-Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi

Yıldırım (1987), İstanbul'da Haliç'ten sondajlarla alınmış olan örselenmemiş, doğal kil numunelerin üzerinde, tabiattaki yükleme biçimlerine uygun olacak şekilde laboratuvarında seçilen yükleme modelleri altında mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme davranışlarını deneysel olarak belirlemiştir. Deneylerde başlıca dört tip yükleme uygulanmıştır. Bunlardan ilki monotonik olarak artan yükleme biçimidir. Bu yükleme biçiminden yararlanarak numunelerin drenajsız kayma mukavemetleri (S_u) belirlenmiş ve

$$S_u = 65.00 - 100.00 \text{ (kPa)} \quad (2.1)$$

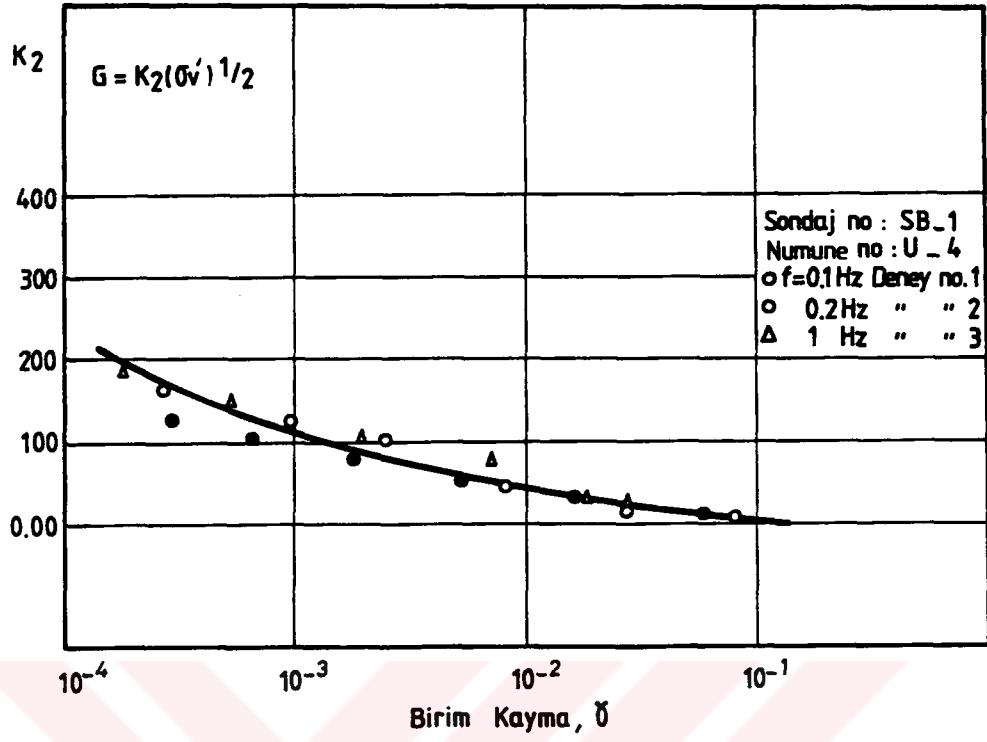
arasında değiştiğini belirtmiştir. Bu deneylerde numune anizotropik gerilme şartlarında konsolide edilmiştir. Kohezyonlu zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme davranışlarının tanımlanmasında kullanılan dinamik kayma modüllerinin deneysel olarak belirlenebilmesi amacı ile 10 adet örselenmemiş tabii numuneler üzerinde deneyler yapmıştır. Bu deneylerde her defasında beş çevrim ($N=5$) ve gittikçe arttırılan tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Çizdirilen histeresis ilmiklerinden yararlanılarak dinamik kayma modülleri hesaplanmıştır. Efektif düşey gerilmelere göre;

$$G = K_2 \cdot (\sigma'_v)^{1/2} \quad (2.2)$$

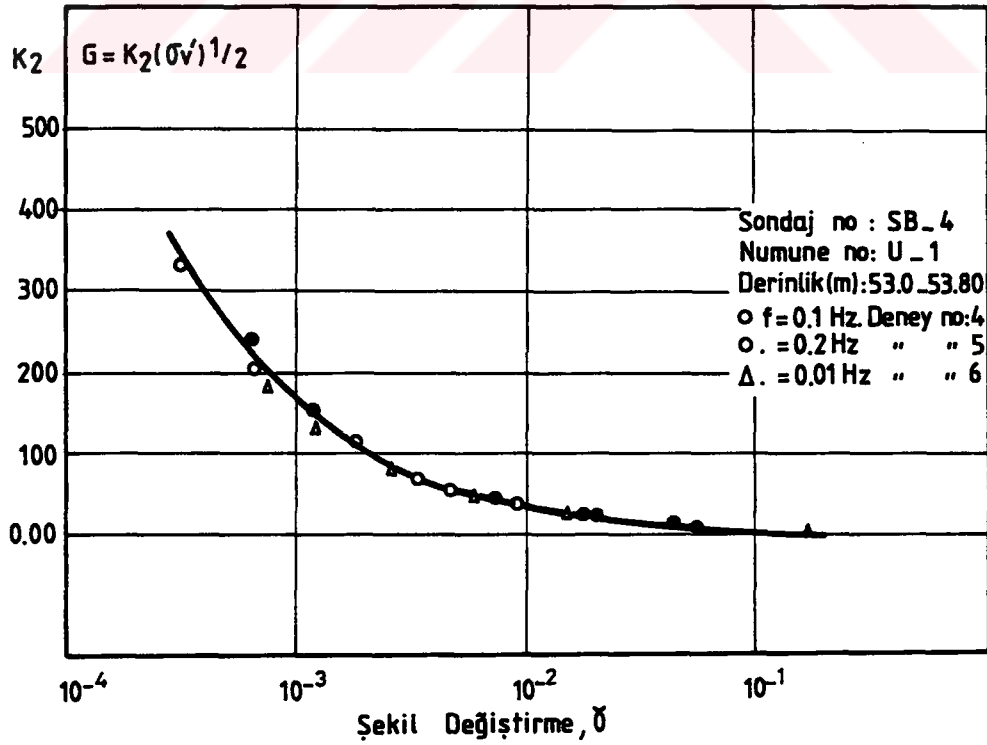
Bağlantı yardımıyla normalize edilmiş, böylece elde edilen K_2 katsayıları ile birim kaymalar arasındaki bağıntı her deney için grafik olarak belirlenmiştir. (Şekil 2.9-Şekil 2.10)

İkinci yükleme biçimi, monotonik-tekrarlı yükleme tipidir. Bu deneylerden elde edilen dinamik kayma modülleri ile başlangıç kayma gerilmesi uygulanmaksızın yapılan deneylerden elde edilen kayma gerilmesi uygulanması durumunda, kayma modüllerinde belirgin bir azalma meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, deformasyonların artması ve $\gamma=10^{-2}$ mertebelerinde kayma gerilmesinin etkisinin kaybolduğunu belirtmiştir. Üçüncü yükleme biçimi olan tekrarlı-monotonik yükleme biçiminde de deneyler yapmış ve statik kesmeden önce farklı genlik ve çevrim sayılarında yapılan tekrarlı yüklemelerin numunelerin mukavemetlerini değiştirmedeğini göstermiştir. Son yükleme biçiminde de tekrarlı ve statik kayma gerilmelerinin birilikte etkimesi durumu incelenmiş ve bu durumda zeminin mukavemeti önemli sayılabilecek oranda (%25) azaldığını göstermiştir.

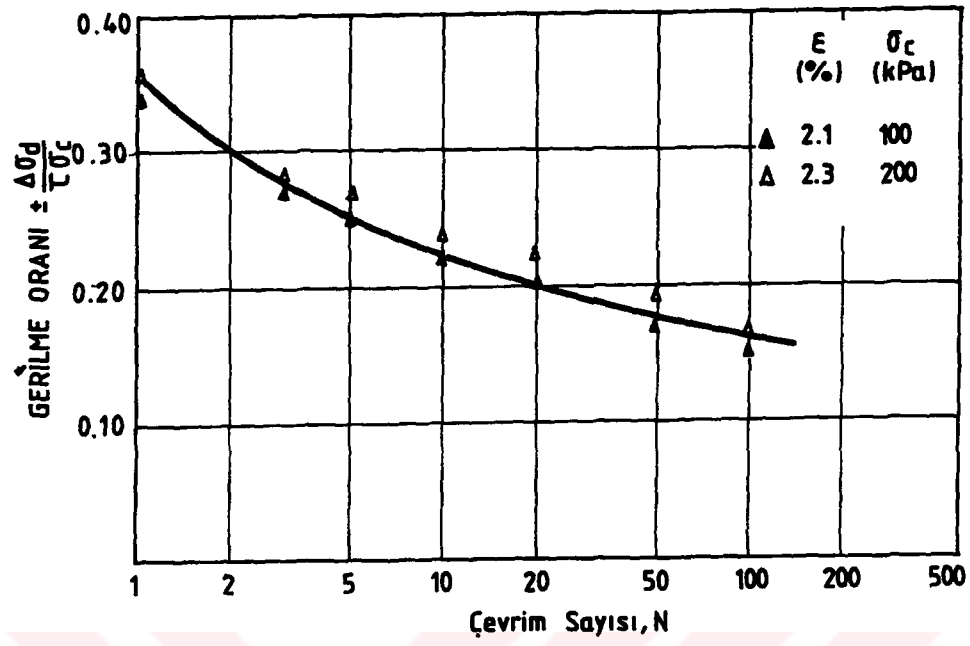
Ansal ve diğerleri (1987), araziden örselenmeden alınmış yüksek plastisiteli normal konsolide killeri üzerinde gerilme ve deformasyon kontrollü üç eksenli deneyler yapmışlardır. Araştırmacılar dinamik yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı davranışlarını incelemişlerdir. Aynı frekansta farklı konsolidasyon basıncı ve birim boy değiştirme genliklerinde yapılan deneylerden örneklerin yaklaşık aynı çevrim sayısında kırıldığını gözlemişlerdir. Bu kritik çevrim sayısına bağlı olarak elde edilen dinamik mukavemetin %50'si civarında olduğu gözlenmiş, ayrıca, belirli bir birim boy değişimi genliğinde fakat farklı konsolidasyon basınçlarında yapılan deneylerde meydana gelen gerilme ve boşluk suyu basınçları konsolidasyon basıncına göre normalize edildiğinde gerilmelerin ve boşluk suyu basınçlarının tek bir eğri üzerine düştüğünü belirtmişlerdir. (Şekil 2.11-Şekil 2.12)



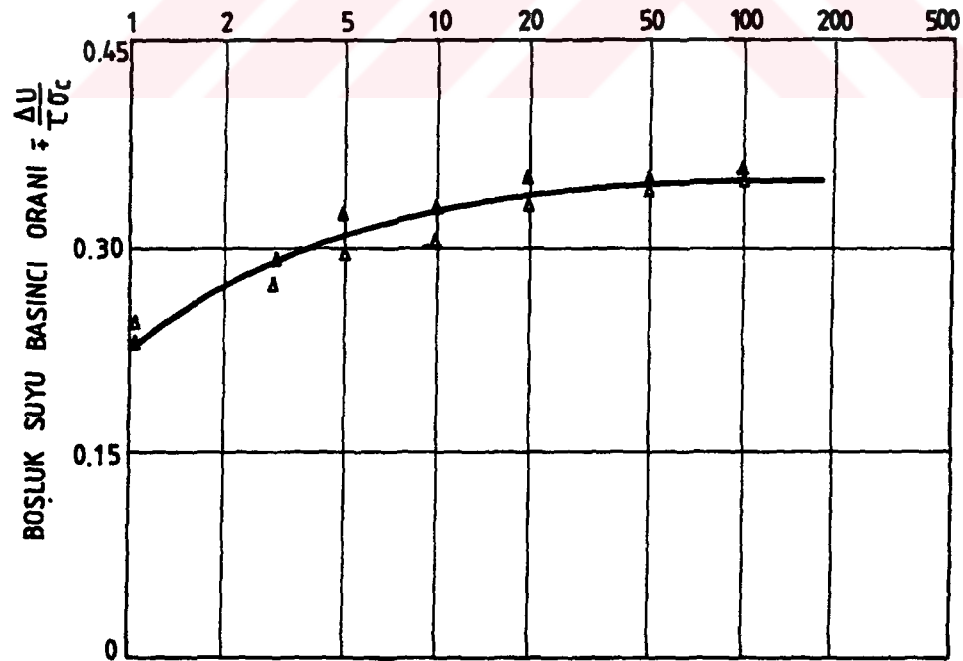
Şekil 2.9 SB.1 Sondajından Farklı Frekanslarda Yapılan Dinamik Basit Kesme Deneyleri



Şekil 2.10 SB.4 Sondajından Farklı Frekanslarda Yapılan Dinamik Basit Kesme Deneyleri



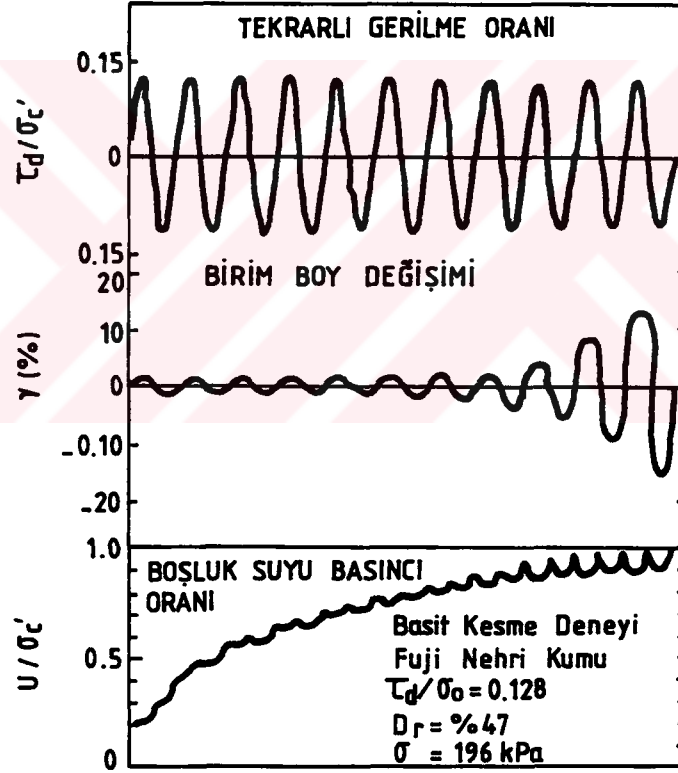
Şekil 2.11 Deviator Gerilmenin Çevrim Sayısı ile Değişimi



Şekil 2.12 Boşluk Suyu Basıncı Oranının Çevrim Sayısı ile Değişimi

2.3. Sıvılaşıma ve Sıvılaşıma Üzerinde İnce Dane Oranının Etkisi

Suya doymun kohezyonsuz zeminlerde özellikle kumlarda, drenajsız koşullarda yapılan deneylerde, tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncında Şekil 2.13'deki gibi ani artışlar olduğu gözlenmiştir. Bu artışın nedeni bu tip zeminlerin kayma gerilmeleri altında bir hacim daralması yapmak istemeleri, buna da daneler arasını dolduran boşluk suyunun karşı koymasındır. Boşluk suyu basıncının artması, zemin daneleri arasındaki efektif gerilmenin azalmasına hatta "sıfır" olmasına yol açar. Bunun sonucu olarak, zemin kayma mukavemetini kaybeder ve bir sıvı gibi davranarak büyük şekil değiştirmelere uğrar.



Şekil 2.13 Gevşek Kumlarda Sıvılaşıma

Sıvılaşıma ile ilgili şu tanımlar yapılabilir:

1. **Ön Sıvılaşıma:** Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının bir yükleme çevrimi sonunda toplam çevre gerilmesine eşit olmasına ön sıvılaşıma denir. Ancak

ön sıvılaşmanın meydana gelmesi, zemin elemanında oluşabilecek şekil değiştirmelerin boyutları ile ilgili bir bilgi vermez.

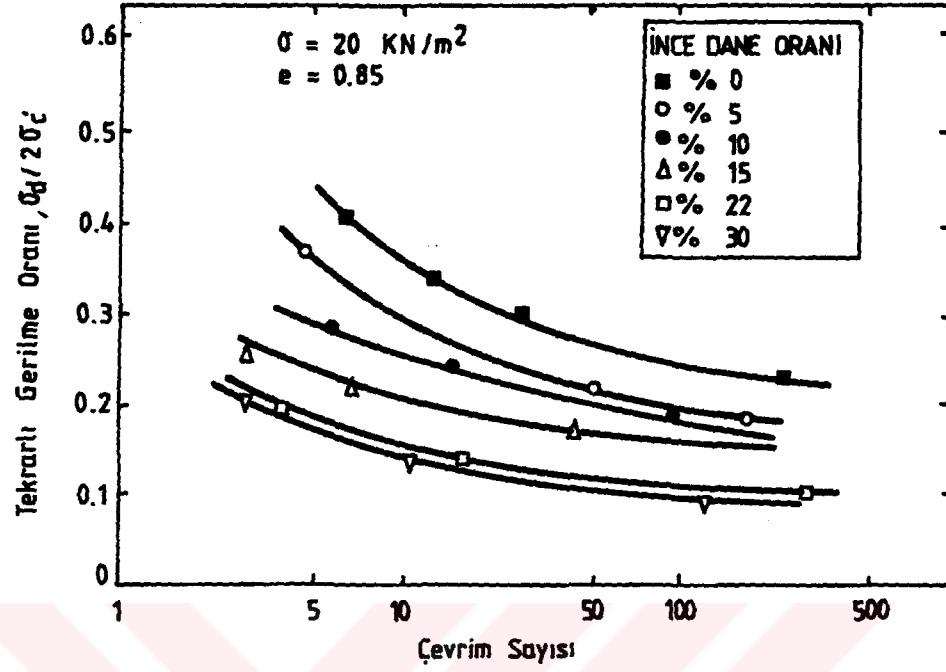
2. Sıvılaşma: Boşluk suyu basıncının tekrarlı veya statik yükler altında sürekli olarak artması ve bir noktadan sonra sabitleşmesi, efektif çevre gerilmesinin sıfır veya çok küçük bir değere düşmesine neden olur. Bunun sonucunda zemin elemanında sürekli olarak artan şekil değiştirmeler oluşur ve zemin bir sıvı gibi davranır. Bu olaya gerçek sıvılaşma denir.

3. Sınırlı Ön Sıvılaşma: Tekrarlı yükler altında bir yükleme çevrimi sonucunda bir ön sıvılaşmanın oluşması ve bunu izleyen yükleme çevrimlerinde zemin elemanında bir artık dayanım bulunmasından veya hacim kabarmasından ötürü tekrar bir kayma direnci oluşur. Bunun sonucunda şekil değiştirmeler sınırlı kalır ve zemin elemanı tekrarlı yükler altında duraylı bir konuma gelir. Bu olaya sınırlı ön sıvılaşma denir.

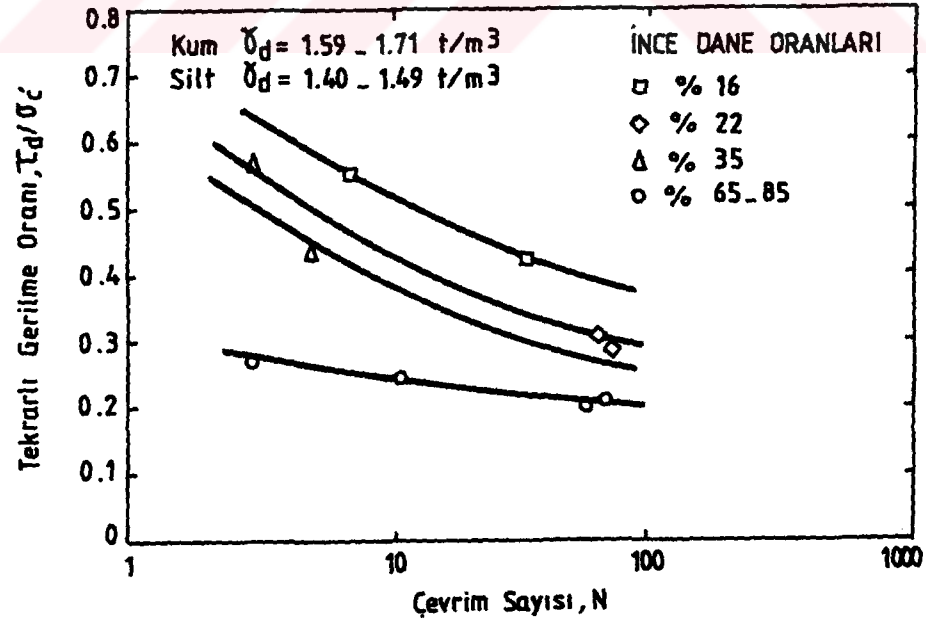
Sıvılaşma üzerinde ince dane oranının etkisinin belirlenmesi amacıyla birçok araştırması tarafından laboratuvar ve arazide kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Troncoso ve Verdugo (1985), tarafından dinamik üç eksenli basınç deney aletinde düşük plastisiteli ince daneler üzerinde yapılan deneylerdir. Deney sonuçları Şekil 2.14'te gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere plastik olmayan ince dane oranı arttıkça mukavemette azalma meydana gelmektedir.

Erken ve Ansal (1994) tarafından aynı amaçla, dinamik üç eksenli deney sisteminde, örselenmemiş düşük plastisiteli siltli kum numunelerin davranış biçimlerini incelemişlerdir. Kumlu zeminin içerdiği silt oranının dinamik mukavemeti olumsuz olarak etkilediği, silt oranı arttıkça dinamik mukavemette azalmanın olduğu Şekil 2.15'den de anlaşılmaktadır.

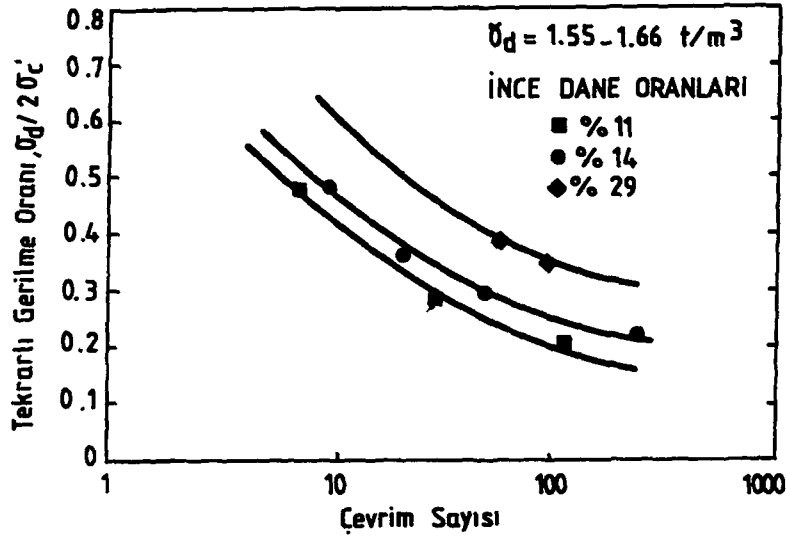
Erken ve Ansal (1994), tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde değişik oranlarda plastik ince dane içeren zeminlerin sıvılaşma deney sonuçları Şekil 2.16'da verilmektedir. Plastik ince dane oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin arttığı şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 2.14 Düşük Plastisiteli İnce Dane İçeren Kumların Sıvılaşma Üzerindeki Etkisi



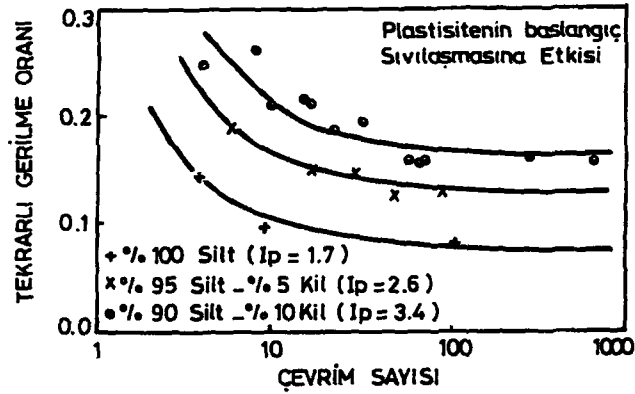
Şekil 2.15 Silt Oranının Sıvılaşmaya Etkisi



Şekil 2.16 Plastik İnce Daneleşimin Etkisi

2.4. Düşük Plastisiteli Siltlerin Sıvılaşması

İnce daneli zeminler olan siltleri, killerden ayıran en önemli özellik; düşük plastisiteli veya non-plastik siltli zeminlerde görülen sıvılaşma olayıdır. Prakash ve Sandoval (1992), düşük plastisiteli siltli zeminlerin sıvılaşmasında plastisiteli indisinin etkisini ayrıntılarıyla incelemişlerdir. Şekil 2.17'de düşük plastisiteli siltlerin çevrim sayısı ile tekrarlı gerilme oranı arasındaki ilişki verilmektedir.



Şekil 2.17 Düşük Plastisiteli Siltler İçin Tekrarlı Gerilme Oranı ve Çevrim Sayısı Arasındaki İlişki

Şekil 2.17’de de görüldüğü gibi düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma direnci artan plastisite ile azalır. ($I_p=1.7$ ile 3.4)

Ayrıca Prakash ve Sandoval çalışmalarında şu sonuçları elde etmişlerdir:

1. Kil partikül yüzdesinin artması, tekrarlı gerilme oranını düşürmektedir. Kil yüzdesi ne kadar fazlaysa, %10’a kadar, tekrarlı gerilme oranı o kadar düşüktür.
2. Düşük palstisiteli siltlerin eksenel deformasyonu, kil yüzdesinin artmasıyla artar. %5 kil için, ilk sıvılaşma durumuna %5 göçme sınırından sonra erişilir.

2.5. Dinamik Mukavemet Etkileyen Faktörler

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını incelemek ve farklı tekrarlı yükler altındaki davranışları model edebilmek için önerilmiş dinamik kayma modülü ve sönüm oranları zeminlerin dinamik özellikleri olarak düşünülebilir. Birçok araştırmacı tarafından yapılmış çalışmaların ışığı altında bu dinamik özelliklere dolayısıyla da zeminlerin dinamik davranışlarına etki eden faktörler etki derecelerine göre iki grupta ele alınabilir. İlk grupta birinci dereceden önemli faktörler olarak:

- Birim kayma genliği, γ
- Ortalama efektif çevre gerilmesi, σ'_m
- Boşluk oranı, e
- Çevrim sayısı, N
- Doygunluk derecesi, S
- Aşırı konsolidasyon oranı, A.K.O.
- Frekans, f

sayılabilir. İkinci grup faktörler arasında ise;

- DeneySEL yöntemler
- Yükleme biçimi ve doğrultusu

zeminlerin dinamik davranışına etki eden faktörler olarak düşünülmelidir.

2.5.1. Birim Kayma Genliği

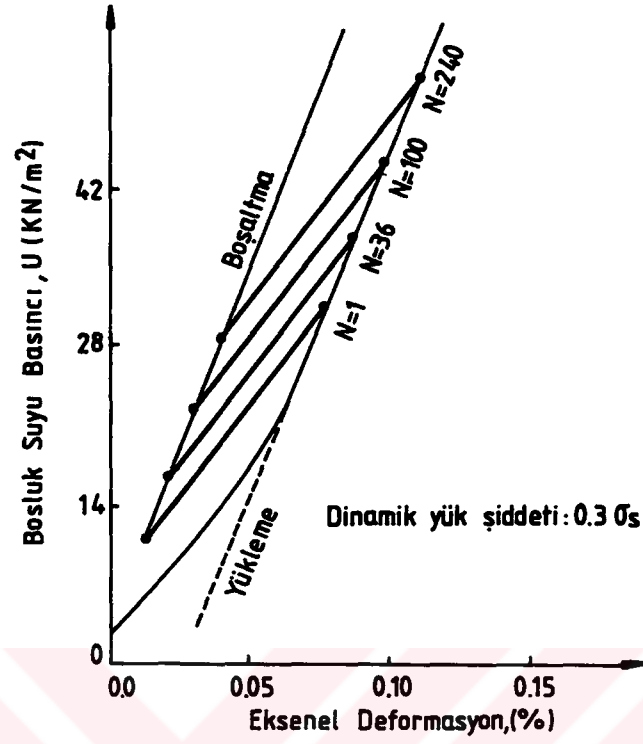
Zeminlerin, tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışlarında oluşan birim şekil değiştirmeler, artan çevrim sayısına bağlı olarak artarak birikir. Bu olay, denge durumunda olan boşluk suyu basınçlarını arttırırken, efektif gerilme değerlerini azaltır. Sonuçta, zemin elemanının dinamik mukavemetinde azalma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

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.

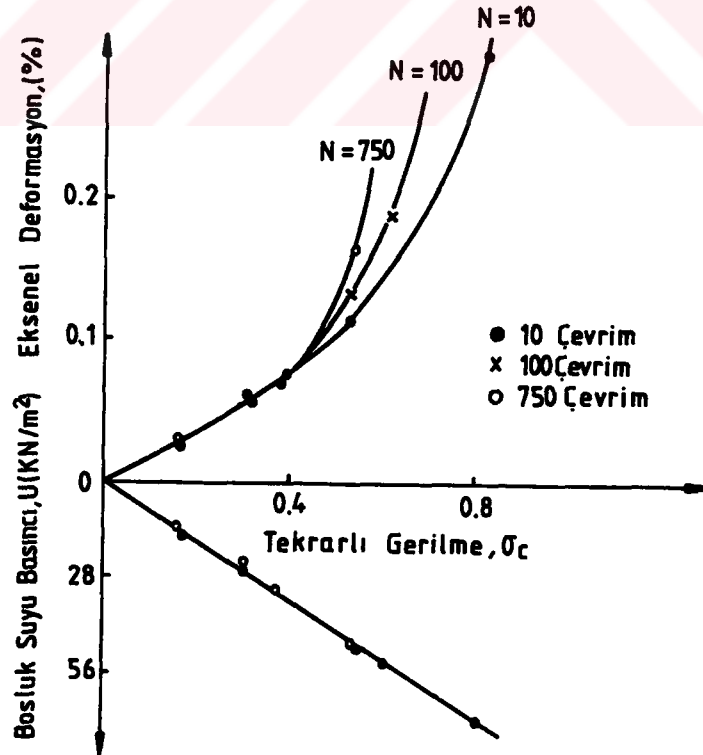
Wilson ve Greenwood (1974), tekrarlı yük uyguladıkları üç eksenli hücrede, örselenmemiş normal konsolide Hamilton kili üzerinde yaptıkları deneylerde boşluk suyu basıncı ile eksenel deformasyon arasındaki bağıntıyı araştırmışlardır. Sonuçta çevrim sayısının, boşluk suyu basıncı ve eksenel deformasyona bağlı olan eğrilerin eğimleri, çevrim sayısının ve gerilme genliğinin artması ile arttığını göstermişlerdir. (Şekil 2.18,2.19)

2.5.2. Ortalama Efektif Çevre Gerilmesi

Zemin numuneleri üzerinde yapılan statik deneylerde elde olunan sonuçlara benzer olarak tekrarlı yükler altında yapılan deneylerde de numuneye uygulanan efektif çevre gerilmesinin mertebesinin meydana gelen şekil değiştirmelerin değerini doğrudan etkilemektedir. Efektif çevre gerilmesindeki artışlar zemin daneleri arasındaki değme noktalarındaki basınçları ve temas alanlarını arttırdığı için zemin numunesinin kayma modülü değerinin büyümesine yol açmaktadır. Bu da aynı tekrarlı gerilmeler altında daha küçük şekil değiştirmeler oluşmasına yol açmaktadır.



Şekil 2.18 Gerilmelerle Boşluk Suyu Basıncıları Arasındaki İlişki



Şekil 2.19 Tekrarlı Yüklemede Oluşan Elastik ve Plastik Davranış

2.5.3. Boşluk Oranı

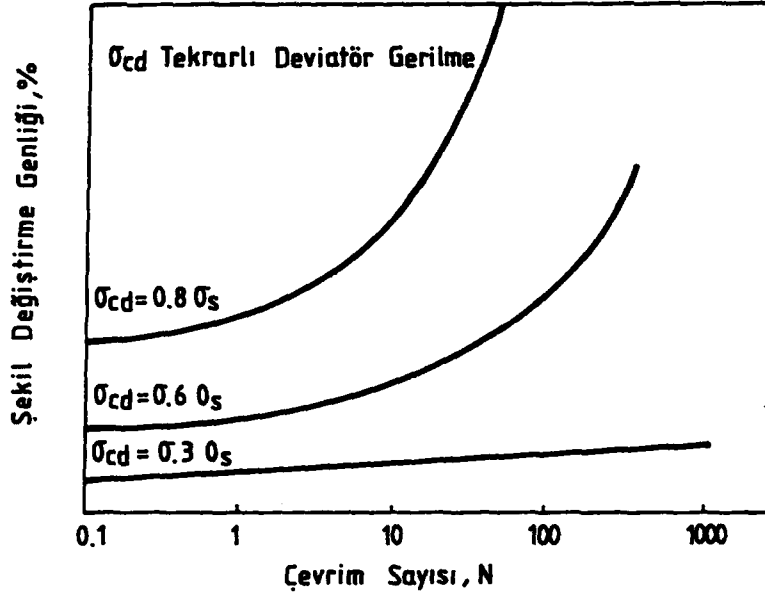
Zeminlerin hem statik hem de tekrarlı yükler altında davranışlarını etkileyen en önemli faktörlerden biri boşluk oranı olmaktadır. Danesel bir yapıya sahip olan zeminlerin mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme özellikleri daneler arasındaki ve birbirleri ile temas ettikleri noktalarındaki sürtünme ve kohezyona bağlı olmaktadır. Boşluk oranının artması veya azalması danelerin birbirleri ile temas noktalarının ve ara açıklıklarını arttıracak veya eksilteceği için davranışları doğrudan etkilemektedir. Boşluk oranlarında artma, zeminlerde bir yumuşamaya ve mukavemetin azalmasına yol açmaktadır.

2.5.4. Çevrim Sayısı

Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışlarını incelerken önem kazanan bir faktörde çevrim sayısıdır. Şekil 2.20'den de görüldüğü gibi çevrim sayısının artması zeminlerde bir yumuşamaya yol açmaktadır. Yalnız böyle bir yumuşamanın olabilmesi için belirli bir tekrarlı kayma gerilmesi veya birim kayma genliği aşılması gerekir. Bu durumda danelerin birbirlerine göre hareket etmeleri arasındaki bağları zayıflatmakta ve mukavemeti azaltmaktadır.

2.5.5. Doygunluk Derecesi

Tekrarlı gerilmeler altında zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları incelenirken bu süre içinde zemin boşluklarındaki suyun drene olabilmesi için gerekli zamanın olmayacağı açıktır. Bu nedenden ötürü tekrarlı gerilmeler altında drenajsız şartlarda deneyler yapılması alışılmalıdır. Diğer yandan zemin tabakalarının tekrarlı gerilmeler altında davranışları incelenirken de bu varsayım kullanılır. Bu durumda zemin daneleri arasındaki boşluklarda meydana gelebilecek boşluk suyu basınçları efektif gerilmeleri diğer bir deyişle daneler arasındaki gerilmeleri etkileyeceği için çok önemlidir. Yalnız oluşabilecek boşluk suyu basınçları doygunluk derecesinin bir fonksiyonu olacaktır. Eğer zemin elemanı %100 suya doygun değilse boşluklarda bulunan havanın kolay sıkışabilir olmasından



Şekil 2.20 Gerilme Genliğinin Etkisi

ötürü boşluk suyu basınçları meydana gelmeyeceği açıktır. Bu nedenle tekrarlı gerilmeler altında davranışlar incelenirken doygunluk derecesinin bilinmesi gerekir.

2.5.6. Aşırı Konsolidasyon Oranı

Tekrarlı yükler altında kohezyonlu zeminler aşırı konsolidasyon oranına (AKO) bağlı olarak farklı davranış biçimleri göstermektedir. Bu farklılaşmaya yol açan en önemli etken çevrim sayısına göre meydana gelen farklı boşluk suyu basıncı değişimleri olmaktadır.

Brown ve diğerleri, (1979) yaptıkları araştırmada aşırı konsolidasyon oranı 2 ila 20 arasında değişen zemin numuneleri üzerinde yaptıkları tek yönlü dinamik üç eksenli deneylerde boşluk suyu basıncı değişimlerini incelemişlerdir. Aşırı konsolidasyon oranı büyük olan numunelerde negatif boşluk suyu basıncı oluştuğunu buna karşı aşırı konsolidasyon oranı azaldıkça meydana gelen negatif boşluk suyu basıncı değerlerinin küçüldüğünü ve AKO'nun küçük değerlerinde pozitif olduğunu gözlemişlerdir.

2.5.7. Frekans

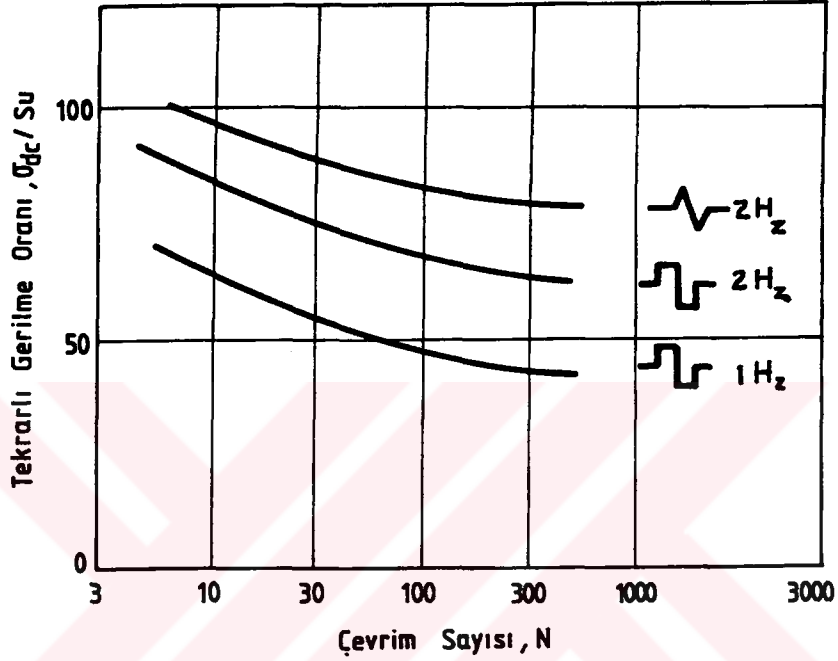
Kohezyonlu zemin numunelerinin tekrarlı gerilmeler altında davranışlarına etki eden faktörlerden biri de bu tekrarlı yüklemenin frekansıdır. Matsui ve diğerleri (1980) tarafından normal konsolide killer üzerinde yapılan dinamik deneylerde frekansın etkisi incelenmiştir. Elde olunmuş sonuçlar aynı bir çevrim sayısında frekans değerlerinin küçülmesinin meydana gelen artık boşluk suyu basıncı ve birim şekil değiştirme genliklerinin büyümesine yol açtığı görülmüştür. Diğer yandan tekrarlı gerilmeler altında kohezyonlu zeminler üzerinde yapılan deneylerde artık boşluk suyu basıncı değerlerinin güvenilir bir biçimde ölçülebilmesi için uygulanan frekans değerlerinin 0.1 Hz civarında olması birçok araştırmacı tarafında öngörülmektedir. Bunun başlıca nedeni daha yüksek frekanslarda oluşabilecek boşluk suyu basınçlarını ölçülebilmesi için gereken zamanın olmamasıdır. Genellikle alt veya üst başlığa yerleştirilmiş bir basınçölçer (transducer) ile yapılan boşluk suyu basıncını ölçümlerinin bütün numunede meydana gelen boşluk suyu basıncını gösterebilmesi için bir dengeleme süresi gerekmektedir. Bu sürenin çok kısa olması durumunda oluşan basınçların ancak belirli bir kısmı ölçülebilmektedir. Sürenin çok fazla olması durumunda ise meydana gelen boşluk suyu basınçları zemin dane yapısında zamana bağlı akma olayından etkilenmektedir.

2.5.8. Yükleme Şekli

Dinamik deneylerde tekrarlı gerilmelerin uygulama biçim ve şekilleri de davranışa etki eden faktörler arasında ele alınmalıdır. Bugüne kadar yapılmış çalışmalarda bir ölçüde deney sisteminin özelliklerine de bağlı olarak sinusoidal, üçgen, dikdörtgen ve trapez yükleme şekilleri kullanılmıştır. Dikdörtgen yükleme şeklinin uygulaması durumunda en büyük gerilme değerinin numune üzerinde diğer yükleme şekillerine göre daha uzun bir süre etkili olması nedeniyle daha büyük şekil değiştirmelere ve de dolayısıyla daha büyük artık boşluk suyu basınçlarına yol açtığı görülmüştür.

Thiers ve Seed (1968), yükleme şeklinin etkisinin incelemiş ve yapılmış olan bir çalışmadan elde olunmuş sonuçlardan bir örnek Şekil 2.21’de verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi dikdörtgen yükleme şekli daha büyük şekil değiştirmelere

dolayısıyla da daha küçük değerlerde bir mukavemet eğrisine yol açmaktadır. Bu sonuçlardan ortaya çıkan diğer bir özellik de frekansın etkisidir. Uygulanan tekrarlı frekansın 2 Hz'den 1 Hz'e düşmesinin etkisi çok bariz bir biçimde görülebilmektedir.

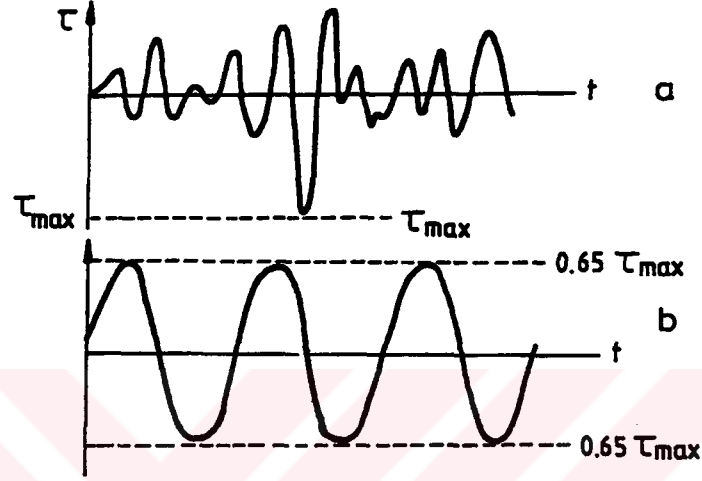


Şekil 2.21 Yükleme Şeklinin Dinamik Davranışa Etkisi

2.6. Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi

Zemin numunelerinin laboratuvarında deprem yükleri gibi tekrarlı yükler altında davranışları incelenirken seçilmiş bir depreme ait Şekil 2.22a'daki gibi düzensiz kayma gerilmelerinin uygulanması karmaşık ve pahalı sistemleri gerektirmektedir. Ayrıca böyle bir deney sonucunda tek bir deney kaydına bağlı davranışlar elde edildiğinden bu bulgular başka deprem kayıtları altındaki davranışları incelemek için kullanılmaktadır. Bu nedenle seçilmiş deprem kayıtlarından bulunmuş düzensiz kayma gerilmeleri sabit genlikli üniform eşdeğer kayma gerilmesine (Şekil 2.22b) dönüştürülerek zemin numunesine uygulanması tercih edilir. Temsil ettiği zemin tabakasının çok ufak bir parçası olan zemin numunesinin bu şekilde laboratuvar

deneyleri ile bulunan malzeme ve dinamik özelliklerinden, geliştirilmiş amprik bağıntılar veya nümerik modeller ile zeminlerin arazideki davranış biçimi, tabaka ve sınır şartlarına göre yaklaşık olarak bulunabilir.



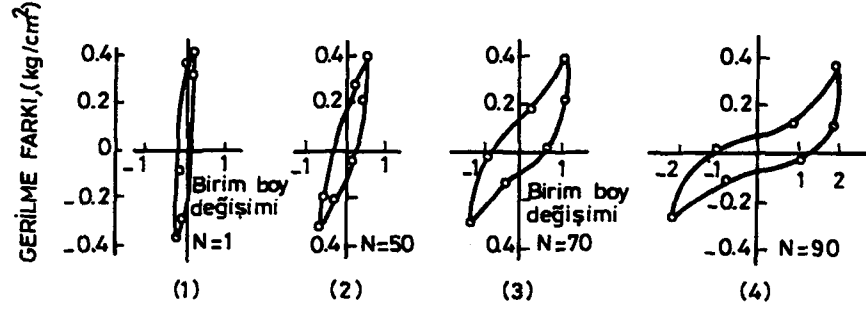
Şekil 2.22 Zemin Kesitinde Kayma Gerilmeleri ve Deneylerde Kullanılan Üniform Kayma gerilmeleri

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını diğer bir deyişle dinamik özelliklerini tanımlarken, bunları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri diye iki gruba ayırabiliriz. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin ve bunların birim şekil değiştirmeye göre değişimlerinin bulunması anlaşılır. Mukavemet özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere yol açan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır.

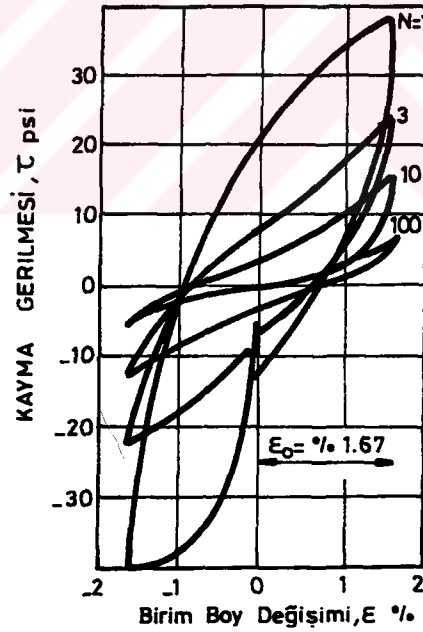
Gerilme Şekil Değiştirme Özellikleri

Deprem , titreşimli makine ve patlayıcı maddelerin kullanılması durumunda oluşan tekrarlı yüklemeler sırasında zeminlerde elastik ve plastik (kalıcı) şekil değiştirmeler meydana gelir. Burada kayma gerilmesi genliklerinin büyümesi zemin danelerinin temas yüzeylerinde oluşan kaymaları arttıracak için plastik şekil değiştirmelerde de bir artmaya yol açar.

Tekrarlı yüklemelerde bir yükleme çevrimi sırasında zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2.23a ve Şekil 2.23b'de gösterildiği gibi histerisis ilmiklerinin büyümesine ve yatıklaşmasına yol açmaktadır.



Şekil 2.23a Gerilme Kontrollü Deneylerde Histerisis İlmığının Değişimi



Şekil 2.23b Deformasyon Kontrollü Deneylerde Histerisis İlmığının Değişimi

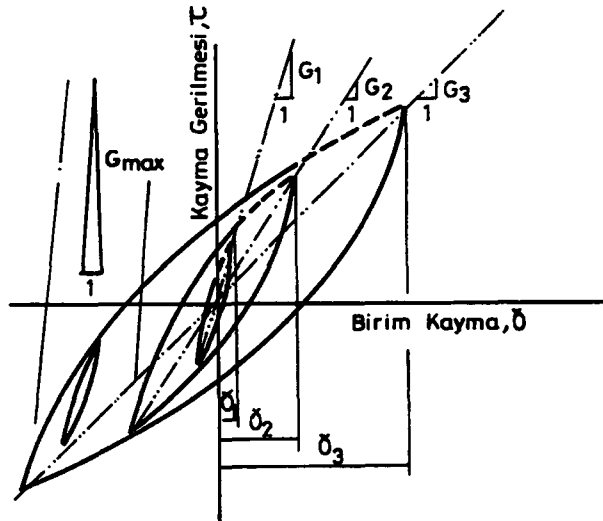
Aynı durum deformasyon kontrollü deneylerde belirli bir şekil ödeğiştirme seviyesinin üzerine çıkıldığında her çevrimde gerilme genliklerinin azalması ve de histerisis ilmiklerinin yatıklaşması biçiminde Şekil 2.23b'de gösterildiği gibi ortaya

çıkılmaktadır. Her iki tür deneylerde de her çevrimde boşluk suyu basıncı değerlerinin artması numunede yumuşamayı artırıcı yönde etki etmekte ve histerisis ilmiklerinin büyümesini ve yatıklaşmasını hızlandırmaktadır.

Zeminlerin tekrarlı yükler altında gerilme-şekil değiştirme özelliklerini incelemenin bir yolu da histerisis ilmiklerinden yararlanarak kayma modülü ve sönüm oranları değerlerini her çevrim için bulmaktır. Böylece çevrim sayısına bağlı olarak elde olunan kayma modülü ve sönüm oranlarının değişimi zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını modelleyebilmek için kullanılır.

1. Dinamik Kayma Modülü

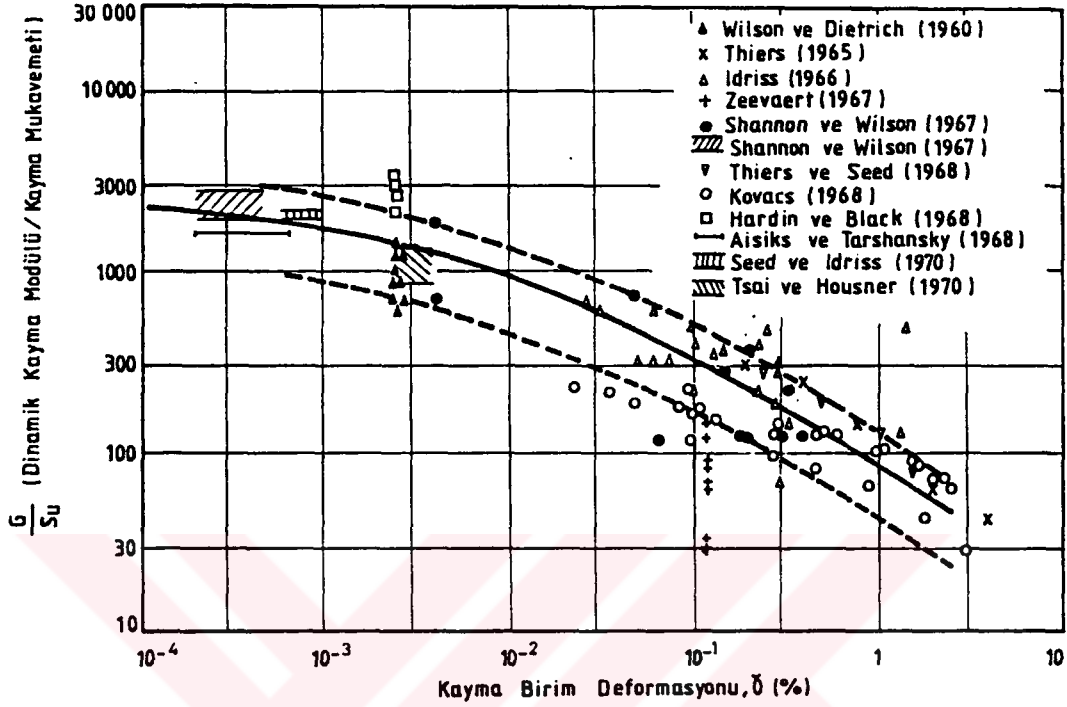
Zeminlerin tekrarlı yükler altında gerilme-şekil değiştirme davranışlarını incelerken kullanılan parametrelerden birisi dinamik kayma modülü olmaktadır. Simetrik tekrarlı gerilmeler sırasında Şekil 2.24'de gösterildiği gibi, elde olunan histerisis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi kayma modülü olarak tanımlanır. Gene aynı şekilde de gösterildiği gibi böylece bulunan kayma modülü şekil değiştirme mertebesine bağlı olarak değişen değerler alır.



Şekil 2.24 Tekrarlı Kayma Gerilmesi Altında Oluşan Histerisis İlmikleri

Killerde, birçok araştırmacı tarafından incelenmiş kayma modülü ve birim şekil değişime davranışları Şekil 2.25'de gösterildiği gibi doğrusal olmayan bir davranış

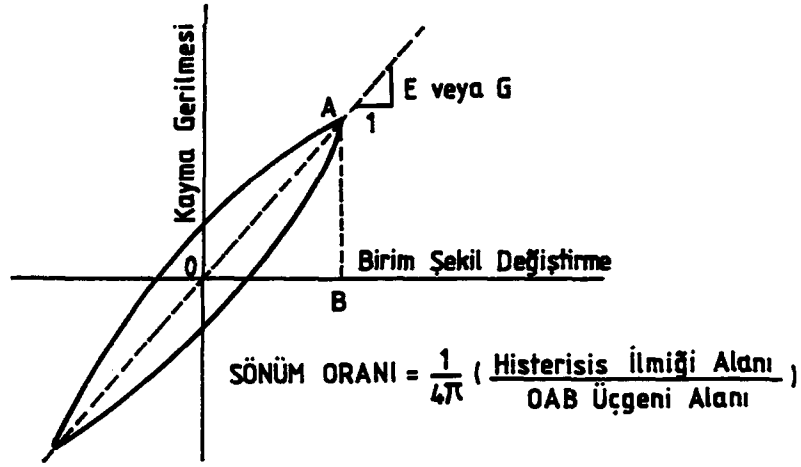
gösterir. Buradan da anlaşılacağı üzere birim şekil değiştirmenin artmasıyla kayma modülü değerinde bir azalma meydana gelmektedir.



Şekil 2.25 Suyu Doygun Killerde Kayma Modülü ile Kayma Birim Deformasyon Bağıntısı

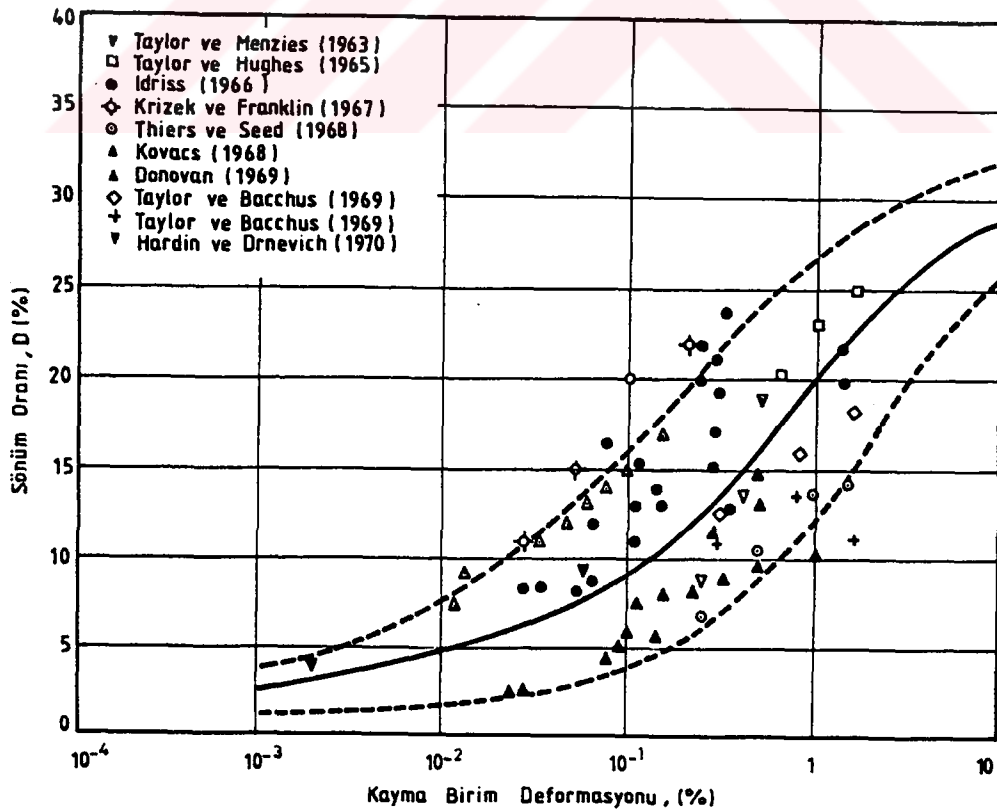
2. Sönüm Oranı

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 kavramıdır. Sönüm oranı, Şekil 2.26'da gösterildiği gibi histerisis ilmiğinin alanının, histerisis ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun altında kalan üçgenin alanına oranı olarak tanımlanır.



Şekil 2.26 Sönüm Oranının Tanımlanması

Killerde birçok araştırmacı tarafından yapılmış çalışmada sonuçlar sönüm oranının birim şekil değiştirme mertebesine bağlı olarak Şekil 2.27’de verildiği gibi değiştiğini göstermiştir. Sönüm oranı da dinamik kayma modülü gibi tekrarlı gerilmeler altında oluşan şekil değiştirme genliklerine bağlı olarak doğrusal olmayan bir davranış gösterir.



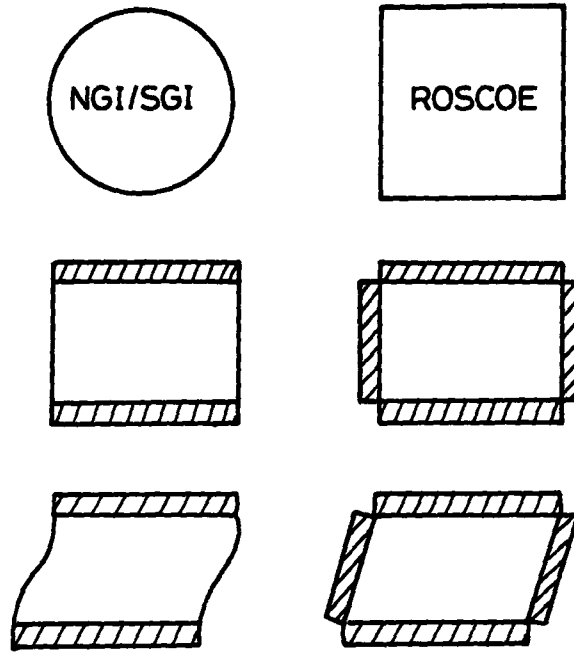
Şekil 2.27 Suyu Doygun Killerde Sönüm Oranı ile Kayma Birim Deformasyonu Bağlantısı

2.7. Dinamik Basit Kesme Deney Tekniği

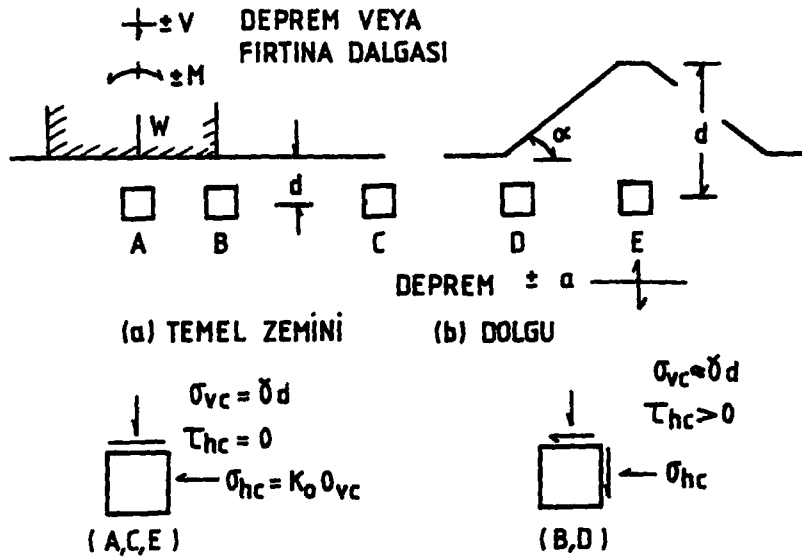
Uygulamada sıkça kullanılan sıvılaştırma deney yöntemlerinden biri dinamik basit kesme deneyidir. İlk dinamik basit kesme deneyleri 1960'lı yıllarda Kaliforniya Üniversitesi'nde Peacock ve Seed tarafından Roscoe tipi kare kesitli basit kesme deney aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde numunenin kare kesitli olarak hazırlanması sırasında karşılaşılan zorluklar üniform bir numune hazırlanması sırasında karşılaşılan zorluklar üniform bir numune hazırlanmasını engelleyebiliyordu. Aynı zamanda gerilme ve şekil değiştirme yayılımı bakımından da üniform olamayan bir dağılım bulunmaktaydı. Seed ve Peacock (1971), Finn ve diğerleri (1971) tarafından yapılan araştırmalar sonucunda karşılaşılan bu sakıncalar sonucunda bu sakıncaların kısmen giderilebileceği görülmüştür. Bu sırada Norveç Geoteknik Enstitüsü (N.G.I.), tarafından geliştirilen basit kesme deney aletinde daire kesitli silindirik numuneler üzerinde deneyler yapılmaya başlanmıştır. Şekil 2.28'de gösterildiği gibi Roscoe tipi deney aletinde numunenin yan yüzleri rijit olan bir kutu içerisine yerleştirilmiş olmasına karşın N.G.I. tipi deney aletinde numune yatay yönde genişlemeye imkan vermeyen donatılı bir membran içinde bulunmaktadır. İsveç Geoteknik Enstitüsü (S.G.I) tarafından geliştirilmiş olan diğer bir yöntemde ise silindirik numune üst üste konan ortalarında numune kesitine eşit dairesel delikler bulunan ince kaygan plaklar arasında yer almaktadır.

Seçilecek deney türü ve koşullarının, arazide mevcut gerilme durumu, gerilme tarihçe, konsolidasyon şartları, deprem yük ve frekans içeriği ile mümkün olduğunca benzeşiminin sağlanmasına çalışılmalıdır. Genel olarak arazideki bir zemin elemanının tekrarlı yükleme öncesinde, etkisinde bulunduğu gerilme durumu Şekil 2.29'da gösterilmiştir. A, C, E elemanlarında yan yüzeylerde kayma gerilmeleri oluşmadığı halde ($\tau=0$), B ve D elemanlarında $\tau>0$ olmaktadır.

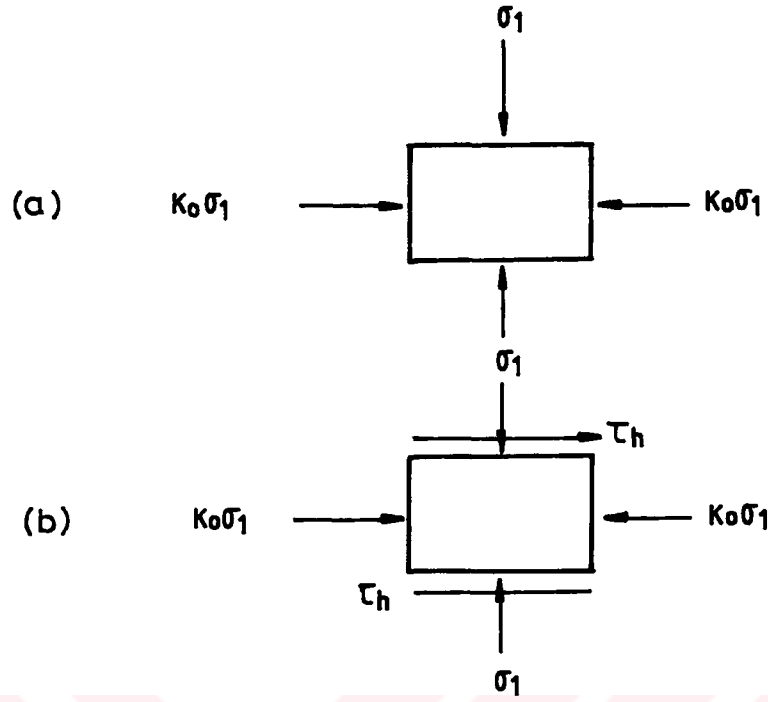
Basit kesme deneylerinde deney numunesine önceden seçilmiş bir σ_1 düşey gerilmesi uygulanarak numunenin bu gerilme altında konsolidasyonu gerçekleştirilir. Bu durumda numunenin yatay doğrultuda şekil değiştirmesine izin verilmemiş olması yatay düzlem içinde orta ve en küçük asal gerilmelerin birbirine eşit olmasına yol açar. (Şekil 2.30)



Şekil 2.28 Basit Kesme Deney Sistemleri



Şekil 2.29 Dinamik Yükleme Öncesindeki Statik Gerilmeler



Şekil 2.30 Basit Kesme Deneylerinde Gerilme Durumu

$$\sigma_2 = \sigma_3 = K_0 \sigma_1 \quad (2.3)$$

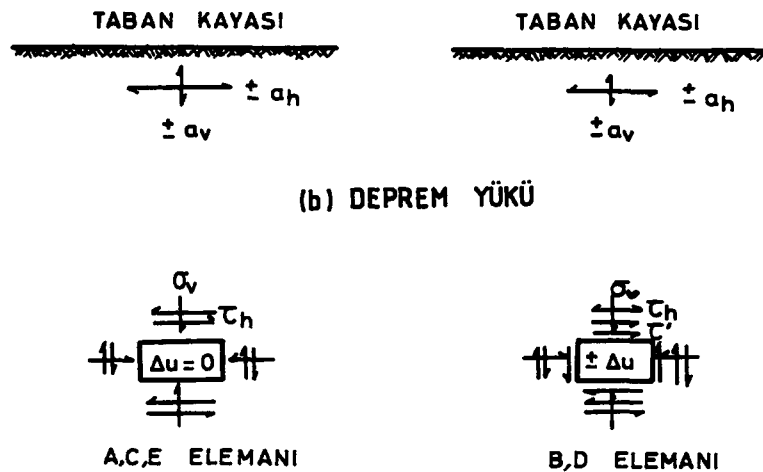
Burada K_0 Sukunetteki yatay toprak basıncı katsayısıdır. Normal konsolide zeminlerde numunenin alınmış olduğu derinlik göz önüne alınarak numuneye uygulanacak düşey gerilme arazide etkisinde kaldığı efektif düşey gerilmeye eşit olacak şekilde seçilir. Aşırı konsolide zeminlerde ise, önce ödometre deneylerinden bulunmuş ön konsolidasyon basıncına eşit bir düşey gerilme altında konsolidasyona bırakılır. Daha sonra doğada numunenin alınmış olduğu derinlikte etkisinde kaldığı düşey basınç hesaplanarak numune üzerindeki düşey gerilme bu değere düşürülür. Burada amaç tekrarlı kayma gerilmelerinin uygulanmasından önce numuneyi arazide etkisinde bulunduğu gerilme durumuna eşit bir duruma getirmek ve arazi-laboratuvar benzeşimini sağlamaktır.

Zemin numunesinin üst başlığına yatay bir kuvvet uygulanması durumunda Şekil 2.31’de gösterildiği gibi bir değişiklik meydana getirmektedir. Bu sırada durumu, Şekil 2.30’da gösterilen ve arazi elemanı üzerinde deprem sırasında oluşan

gerilmelerle karşılaştırılacak olur ise, dinamik basit kesme deney tekniğinde numune üzerinde gerçek gerilme durumunun tam olarak sağlanamadığı, numunenin alt ve üst yüzeylerinde kayma gerilmeleri oluşmasına rağmen yan yüzeyleri üzerinde tamamlayıcı kayma gerilmelerinin oluşturulamadığı görülür. Numuneye uygulanan yükler rijit üst başlık yardımı ile aktarılmaktadır. Bu durumda numunede oluşan düşey gerilmeler (σ_v) ve şekil değiştirme dağılımları üniform olmamaktadır. Numune boyunca birim kayma değişimlerinin üniform olmaması büyük birim kayma değerlerinde, şekil değiştirmelerin en zayıf olan kesitte yoğunlaşmasına neden olacaktır. Diğer yandan numune kesitinde kayma gerilmesi dağılımının üniform olması gerilmenin numuneye aktarılmasında kullanılan alt ve üst başlıkların özelliklerine bağlı olmakta ve kesin olarak sağlanamamaktadır.

Görülüyorki, deprem yüklerinin basitleştirilerek, düzlem deformasyon şartlarında sinüsoidal ve üniform olarak alınıp numuneye uygulanması durumunda bile her üç gerilme bileşeninin (σ_v , σ_n ve τ_h) arazi koşullarına benzer biçimde oluşturulması mümkün olamamaktadır.

Deney sırasında efektif düşey gerilmeler (σ'_{vc}) ölçülebilmesine rağmen numunede oluşan yatay gerilmelerin ölçülmesi çok zordur. Bu nedenle gerek toplam gerekse efektif gerilmeler belirlenememesinden ötürü Mohr dairesini doğru olarak çizmek mümkün değildir. Dolayısıyla maksimum dinamik kayma gerilmesi de bulunamaz. Bilinen gerilme bileşenleri sadece yatay düzlemdeki σ_v ve τ_h 'dir.



Şekil 2.31 Tekrarlı Yükler Altında Zeminlerde Oluşan Farklı Gerilme Durumları

Dinamik basit kesme deney sisteminde zemin kesitindeki bir elemanda depremler sırasında meydana gelen gerilme durumu çok yaklaşık olarak modellenebilmesine rağmen yukarıda özetlenen nedenlerden ötürü gerilme ve şekil değiştirme yayılışlarının üniform olmaması zemin numunesinde mukavemet kaybının daha çabuk olmasına yol açmaktadır.

2.8. Sonuç

Bu bölümde ince daneli zeminlerin dinamik davranışı, mukavemet özellikleri incelenmiştir. Bugüne kadar bu konuda yapılmış çalışmalar, birçok araştırmadan elde edilmiş sonuçlara dayanarak, malzeme özelliklerine göre dinamik davranıştaki farklılıklar tanımları ile verilmiştir. Bu tanımlardan sonra sıvılaşma ve sıvılaşma üzerinde ince dane oranı etkisi ele alınarak etki dereceleri açıklanmıştır. Daha sonrada düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşması üzerinde durulmuştur. Dinamik mukavemeti etkileyen faktörlerin açıklanmasından sonrada zeminlerin dinamik özellikleri incelenmiştir.

Son olarakta, dinamik basit kesme deney tekniği açıklanmıştır.

BÖLÜM 3

KULLANILAN MALZEME VE DENEY ALETİ

3.1. Giriş

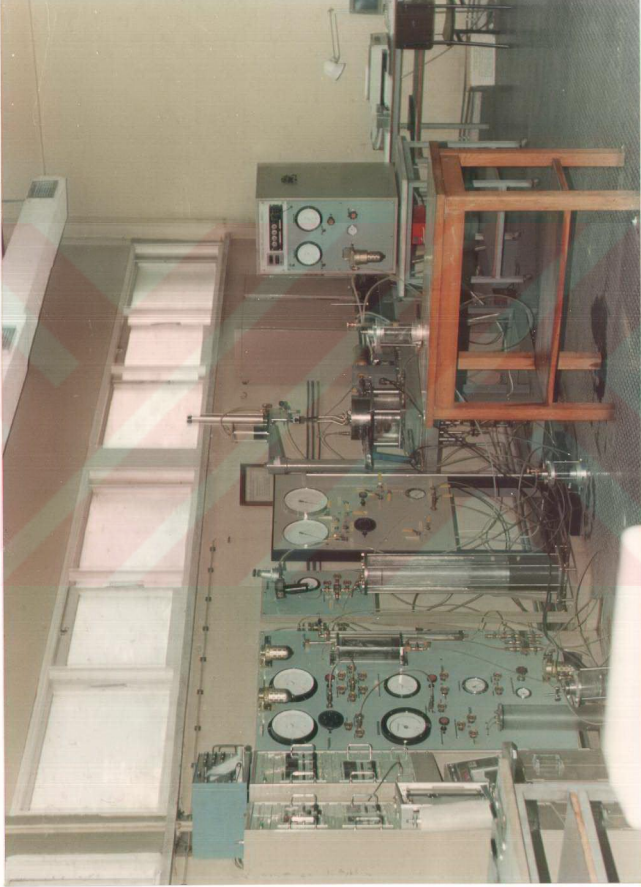
Laboratuvarda zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerini bulmak, kumlarda sıvılaşmanın incelenmesi ve etki eden faktörlerin araştırılması amacı ile en çok kullanılmış deney yöntemlerinden biri de dinamik basit kesme deneyidir. Bu araştırmada yapılan dinamik deneyler dinamik basit kesme deney sisteminde gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda uygun şekilde hazırlanan ince daneli zemin numuneleri üzerinde deneyler yapılmış ve dinamik davranışa etki eden faktörler incelenmiştir. Ayrıca deneylerin yapılışı da bu bölümde anlatılmıştır.

3.2. Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi

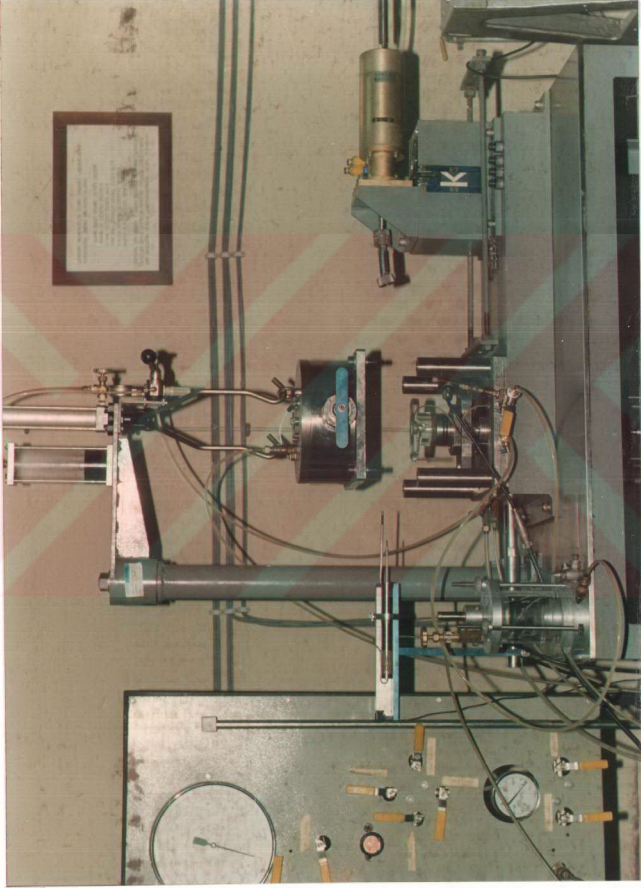
Bu araştırmada kullanılan dinamik basit kesme deney sistemi, Japon Seiken Inc. tarafından yapılmış olup Norveç Geoteknik (NGI) basit kesme deney aletinin K. Ishihara ve M.Silver tarafından geliştirilmiş bir tipidir. Şekil 3.1’de önden çekilmiş bir fotoğrafı verilmiş olan deney sistemi hava basıncı ile çalışan ve başlıca dört bölümden oluşan bir sistemdir. Bu bölümler işlevlerine göre ayrılmış olup;

1. Deney Hücresi,
2. Basınç Tablosu,
3. Tekrarlı Yük Uygulama Birimi
4. Ölçüm ve Kayıt Birimleri

olarak adlandırılabilir. Bu bölümler aşağıda sırasıyla anlatılacaktır.



Şekil 3.1 Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminin Önden Çekilmiş Bir Fotoğrafı



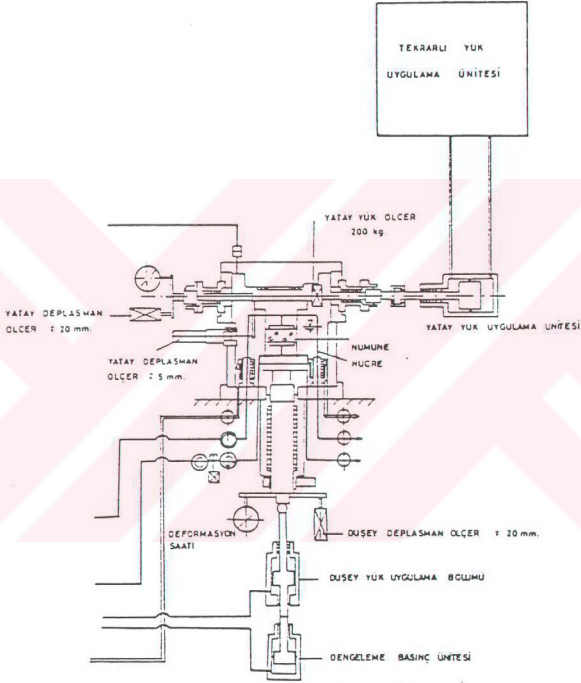
Şekil 3.2 Deney Hücresinin Bir Fotoğrafı

Şekil 3.2’de yakından çekilmiş bir fotoğrafı ve Şekil 3.3’te şematik çizimi verilmiş olan deney hücresinde, çapı 70 mm ve yüksekliği 25-35 mm olan silindirik zemin numuneleri üzerinde deney yapılabilmektedir. Hücre $\phi 250$ mm çapında 160 mm yüksekliğinde, 20 mm et kalınlığı olan şeffaf pleksiglastan yapılmış bir silindiridir. Bu silindir, sızdırmazlığı sağlayan bir lastik halka ile alt kaidenin üzerine oturtulur. İçerisinde yatay yükleme ve numune üst başlığının bağlantı mekanizmasını taşıyan üst başlık ile kapatılır. Üst başlık hidrolik bir sistemle düşey yönde hareket imkanına sahiptir.

Numune, yatay düzlemde genişlemeyi engelleyen donatılı bir membran içine veya İsviçre Geoteknik Enstitüsü Basit Kesme Deney Sisteminde kullanılan ortalarında numune çapına eşit delikler bulunan ve numune boyunca numunenin etrafına geçirilen ince sürtünmesiz plaklar veya sadece normal esnek bir membran içine konabilmektedir.

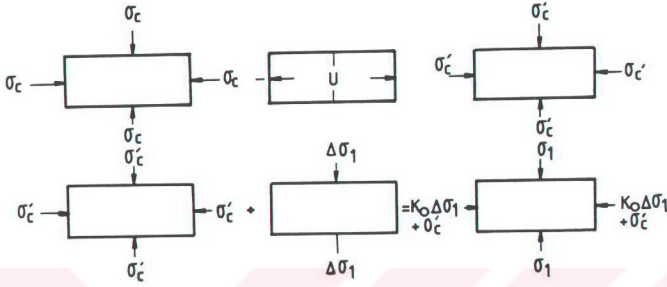
Numune alt başlığı, düşey yönde hareket edebilen bir şaft üzerine oturtulmuş olup yatay hareketi önlenmiştir. Alt başlığın bağlı olduğu düşey şafta, hemen altında bulunan iki piston yardımıyla düşey kuvvet uygulanması mümkündür. Bu pistonlardan birinin görevi, üzerinde zemin numunesi bulunan şaftın kendi ağırlığını dengelemek için numuneyi yükseltmektir. Şekil 3.3’te hücre bölümünün ortadan alınmış bir düşey kesit verilmiştir. Bu şema üzerinde hücre, numune, yatay ve düşey yükleme şaftları, deplasman ve yük ölçerler, yatay yük uygulama ünitesi ile düşey yük ve dengeleme basıncı uygulama pistonları gösterilmiştir. Bunun dışında istenilen durumlarda numuneye izotropik çevre gerilmesi uygulanabilmesi amacıyla hücre üst basıncı ile olan ara bağlantısının açılmasıyla bu silindir, numuneyi taşıyan düşey şafta, ağırlık dengeleme kuvvetine ek olarak numune üst ve alt yüzeylerine hücre basıncına eşit bir basınç verecek kuvveti de aktarmaktadır.

İkinci pistonun görevi ise numuneye farklı düşey ve yanal basınçlar uygulanması istendiğinde, öngörülen bu düşey gerilmenin numuneye uygulanabilmesini sağlamaktır.



Şekil 3.3 Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminin Hücre Bölümü

Şekil 3.4’de konsolidasyon aşamasında numuneye uygulanan gerilmeler ve konsolidasyon sırasındaki gerilme durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Konsolidasyon Sırasında Numune Üzerindeki Gerilme Durumu

Numune ait başlığı metal, üst başlık ise hafif bir malzeme olan pleksiglastan yapılmış olup her iki başlıkta da poröz taşlar başlıklar içerisindeki yuvalara yerleştirilmiştir. Deney sırasında başlıklar üzerinde numunenin kaymasını önlemek için poröz taşlar üzerine hareket yönüne dik 1~2 mm yüksekliğinde dörder adet metal plaklar yerleştirilmiştir.

Numuneye ters basınç uygulayabilmek ve drenaja olanak sağlayabilmek amacıyla, başlıklardan ikişer adet ince tüp çıkışı vardır. Bu çıkışlar hücre dışında bulunan üç adet vana ile kontrol edilmektedir. Alt başlığa bağlı olan çıkış üzerine boşluk suyu basınçlarını ölçebilmek için bir basınç ölçer (Pressure transducer) bulunmaktadır.

Numuneye yatay doğrultudaki kayma kuvvetleri Şekil 3.3’te gösterildiği gibi hücre üst başlığına bağlanmış olan yatay bir şaft yardımıyla uygulanmaktadır. Bu yatay şaft hücre üst başlığına sabit bir şekilde bağlanmış olan silindirik rulman sistemi içerisinde hareket eder. Numune üst başlığı, hücre dışından kumanda edilebilen dört adet cıvata yardımı ile hareketli yatay şafta bağlanmaktadır. Deneye başlamadan önce ve yüklem ünitelerinin yatay şaft bağlantısının yapıldığı sırada numuneye ilave

yatay yük uygulanmasının önlenmesi amacı ile başlığın bağlı olduğu bu yatay şaftın hücre üst başlığına bağlı bir cıvata yardımı ile sabitleştirilmesi oldukça önemlidir. Numuneye uygulanan kayma kuvvetleri, hücre içerisinde, numune üst başlığını, hareketli yatay şafta bağlayan bir yük hücresi (Load cell) yardımı ile ölçülmektedir. Böylece, şaftın hücreye giriş ve çıkışındaki yataklarda oluşacak olan sürtünme kuvvetleri kayma kuvveti okumaları içine girmemektedir.

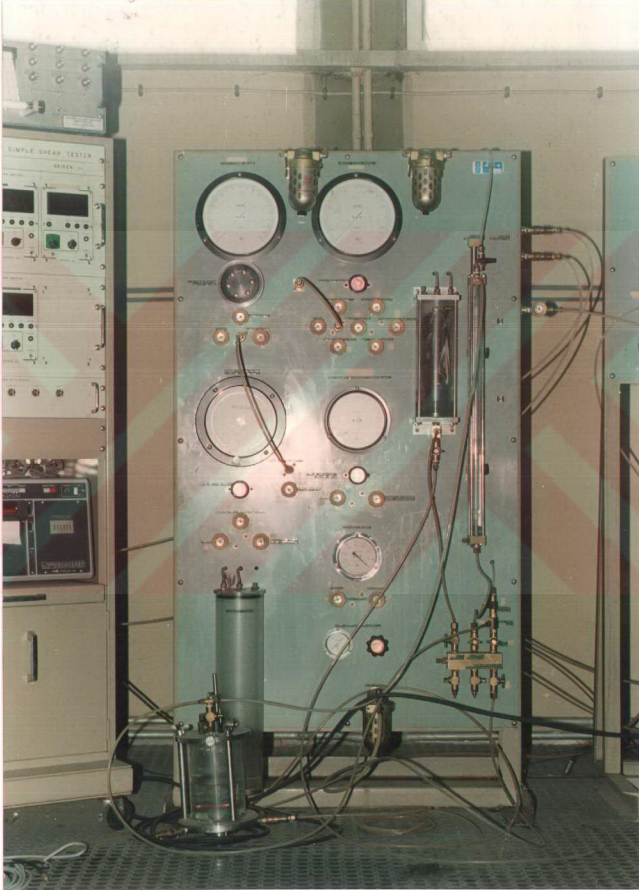
Yükleme sırasında numunede oluşan yatay deplasmanlar, hücre dışında, yatay şaftın hücre dışına bağlanabilen bir elektronik deplasman ölçer yardımı ile okunur. Deney numunesi yatay şafta bağlı olduğu için deney sırasında yatay şaftta oluşan yer değiştirmeler numunede oluşan yer değiştirmelerle aynıdır.

Deney sırasında numunede düşey yönde meydana gelen yer değiştirmeler de düşey şafta bağlı olan aynı tipte bir deplasman ölçer yardımıyla ölçülür. Deneyden önce, numunelerin konsolidasyonu sırasında oluşan boy değiştirmeler ise yine düşey şafta bağlı olan 0.01 mm hassasiyette okuma yapabilen bir deformasyon saati yardımıyla okunabilmektedir.

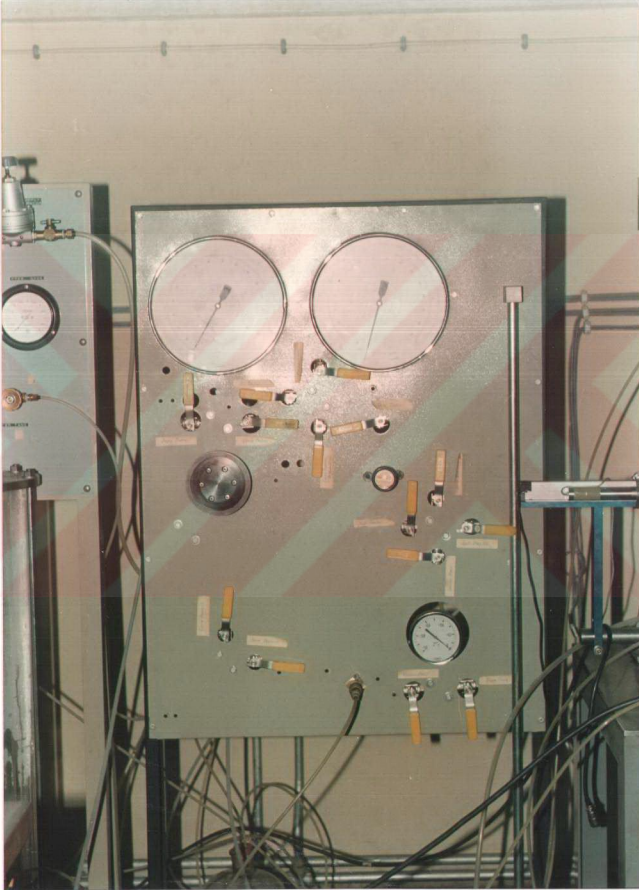
Basınç Tablosu:

Şekil 3.5’de fotoğrafı verilmiş olan basınç tablosu, numuneye uygulanan, çevre, ters ve düşey basınçların düzenlenmesini ve istenilen durumlarda numunede meydana gelebilecek hacim değişikliklerinin ölçülebilmesi için gerekli olan düzene sahiptir. Bu tablo üzerinde, altı adet basınç regülatörü ve basınç saati (ana giriş, çevre, düşey dengeleme, düşey ve ters basınçlar ve ana su tankı için), bir adet vakum regülatörü ve vakum saati, iki adet küçük su tankı (ters basınç ve vakum uygulamaları için), numuneye ters basınç uygulanabilmesi için bir adet kapalı büret ve çok sayıda kontrol vanaları, bağlantı tüpleri ve su filtreleri bulunur.

Bu tabloda regülatörler arasında yapılmış olan bağlantılar yardımıyla deney numunesine uygulanacak basınçlar aşamalı ve her seferinde bir tek regülatörden ayarlanabilecek şekildedir. Basınç regülatörleri hava basıncını kontrol ederek, istenilen basıncın numuneye uygulanabilmesine olanak sağlar. Bunun yanında



Şekil 3.5 Basınç Tablosu Fotoğrafi



Şekil 3.6 İlave Edilen Basınç Tablosunun Fotoğrafi

istenilen regülatörlerin birbirine bağlanması suretiyle eşit basınçlar için ortak beslenmeleri sağlanabilir. Bu sistemde, ters basınç regülatörü, çevre basıncı regülatörüne, çevre basıncı regülatörü ise düşey dengeleme basıncı regülatörüne bağlanmış durumdadır.

Bu sayede numuneye çevre basıncı ile aynı anda düşey dengeleme basıncı ve ters basınçta uygulamakta ve numunenin basınçların uygulanması sırasında oluşabilecek farklardan etkilenmesi önlenmiş olmaktadır. Ortak çalışmaları halinde, çevre ve düşey dengeleme basıncı regülatörlerinden uygulanan basınçlar arasında, üst başlık bağlantısının yapılabilmesi için önceden, numuneyi yükseltmek amacı ile, düşey dengeleme basıncı regülatörlerinden uygulanması gereken basınç kadar (60 kPa) bir fark vardır.

Düşey dengeleme basıncı regülatörü ise çevre basıncı ve ters basınç regülatörlerinden bağımsız olarak kumanda edilebilir ve bu sayede numuneye istenilen durumlarda farklı düşey ve yanal basınçlar uygulanması mümkün olur.

Basınç uygulanması işlemleri sırasında öncelikle numuneye düşük bir çevre basıncı uygulanır. Bu sırada çevre basıncı ile düşey dengeleme basıncı arasındaki bağlantı vanası kapalı durumdadır ve numunenin bozulmasını önlemek için, düşey yönde hareketini sağlayan düşey şaft bağlı durumdadır. Daha sonra ters basınç regülatörü istenilen değere ayarlanır. Bu sırada ters basınca bağlı olarak çevre basıncıda yükseltilmiştir. Çevre basıncının istenilen değere ayarlanması işlemi de kendi regülatörü yardımıyla yapıldıktan sonra, düşey dengeleme basıncı ile arasındaki irtibat vanası açılır, düşey şaft serbest bırakılır, böylece numuneye çevre basıncı ile birlikte ona eş bir düşey dengeleme basıncı da uygulanmış olur.

Bu sistemde numuneye ters basınç, sistem hava basıncı ile çalıştığı için, havası alınmış damıtık su ile doldurulmuş olan ters basınç tankının içine yerleştirilmiş bir lastik balona hava basıncı vererek uygulanır. Bu sayede su yüzeyi üzerine doğrudan hava basıncının uygulanması ve boşluk suyuna havanın karışması engellenmiş olur.

Vakum uygulayabilmek için bir adet vakum pompası, vakum saati ve küçük bir su tankı kullanılır. Vakum pompası 76 cm Hg gücünde ADEA 71 N 4 tipindedir. Küçük su tankının görevi vakumlama sırasında numuneden gelen suyu tutmak ve vakum pompasına girmesine önlemektir.

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuvarı'nda bulunan dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemleri tek bir basınç tablosundan kumanda edildiği için her iki sistemin aynı anda kullanılması, farklı basınçlarda çalışılmasından dolayı mümkün olamıyordu. Bu durum her iki deney sisteminin aynı anda birbirinden bağımsız olarak çalışmasının sağlanabilmesi amacı ile laboratuvar imkanları kullanılarak dinamik basit kesme deney sistemi için, işlev olarak orjinal basınç tablosunun benzeri olan ve Şekil 3.6'da fotoğrafı verilen ikinci bir basınç tablosu yapılmıştır. Bu tabloda çevre basıncı, ters basınç ve düşey basınç için birer regülatör, ters basınç ve çevre basıncı için birer okuma saati, ters basınç için iki küçük eksenli deney hücresi, bir adet vakum şişesi ve vakum saati, gerekli vanalar ve bağlantı tüpleri kullanılmıştır.

Sistemin orjinal durumunda deney numunesinin alt başlıktan üst başlığa doğru hava geçirmek ancak çok küçük ters basınç değerlerinde mümkün olmaktadır. Bu durumda kumlarda suya doygun numuneler elde etmekte güçlüklerle karşılaşmıştır. İlave edilen basınç tablosunda bu problem ters basınç için iki üç eksenli hücresi ile giderilmiştir. Ara bağlantının açılması ile her iki ters basınç hücresine eşit basınçlar uygulanabilmektedir. Böylece hem yüksek ters basınç değerlerinde numune içinden su geçirilebilmekte hem de ikinci tank birinciye göre alt bir seviyeye yerleştirilerek daha yüksek hidrolik eğim elde edilebilmektedir.

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

Tekrarlı Yatay Kuvvet Uygulama Birimi:

Şekil 3.3'te verilmiş olan şemada deney hücresinin sağında görülen, hava basıncı ile çalışan ve deney numunesine tekrarlı kayma kuvvetleri uygulayan birimdir. Bu yükleme birimi yardımı ile sinüsoidal, kare ve iki tip üçgen kesitli olmak üzere dört tip yükleme uygulanabilir. Titreşim frekans aralığı, (0.0001-9999 çevrim/saniye) arasında ayarlanabilir. Hava basıncı ile çalışan bir sistem olması nedeniyle pratik olarak 5 çevrim/sn sağlıklı bir şekilde yapılabilen üst hız olmaktadır. Yük genliği bir kumanda düğmesi ile ayarlanır ve dinamik basınç ölçerinin gösterdiği değerden büyük olamaz. Yükleme birimi gerilme kontrollüdür. Belirli frekans ve genliklerde deneyler yapılabildiği gibi, belirli kayma gerilmeleri altında akma ve değişik hızlarda gerilme kontrollü monotonik kesme deneyleri de yapılabilir.

Ölçüm ve Kayıt Birimi:

Şekil 3.1'de verilen deney sisteminin genel fotoğrafında en solda yer alan ölçüm ve kayıt birimleri, yatay kuvvetin ölçüldüğü yük hücresinden, yatay ve düşey yer değiştirmelerin ölçüldüğü deplasman ölçerlerden ve boşluk suyu basıncının ölçüldüğü basınç ölçerlerden gelen elektrik sinyallerinin ayarlanmasını, istenilen ölçeklerde büyütülmesini ve göstergelerden okunabilmesini sağlar. Ayrıca ölçülen bu değerler yine istenilen ölçeklerde elektronik iki çizici yardımı ile sürekli bir şekilde kayıt edilebilir.

Bu çalışmanın ilk aşamasında grafik çiziciler ile ölçümlerin yapılmasının zorluğu nedeniyle ölçümlerin doğrudan veri toplama sistemi ile alınabilmesi için gerekli bağlantılar yapılmıştır. Deney sırasında alınan ölçümlerin bağlı olduğu veri toplama sistemi ile bilgisayara kaydedilmiştir.

Veri toplama sisteminde toplam 64 kanal bulunmaktadır. Bu çalışmada boşluk suyu basıncı, yatay yük, düşey ve yatay deformasyonlar ölçerlerin bağlantısı ve kalibrasyonu yapılarak, bu kanallardan sadece dört tanesi kullanılmıştır.

Veri toplama programı ise aynı anda birbirinden bağımsız birçok deneyin datalarını okuma ve belleğinde tutma kapasitesine sahiptir. Bunun için her deneye bir referans numarası verilmek zorundadır. Bir deney tanımlandığı zaman, sistem bu deneyle ilgili veriler için belleğinde bir alan ayırır. Bu bölge deney ayrıntılarını kapsadığı gibi, kanallara bağlı ölçerlerden gelen okumaları da içermektedir. Her kolon bir kanalı satırlar ise deney anındaki okumaları oluşturmaktadır. Aynı zamanda her deney bir kontrol kanalına sahiptir. Bu kanal ölçer (transducer) grubundan da seçilebileceği gibi genellikle zamandır ve diğer kanallarla aynı anda tanımlanmak zorundadır.

Kullanıcı tarafından kontrol kanalı zaman olarak seçildiğinde istenilen aralıklarda ve sıklıkta okuma alınabileceği gibi, 72 saatlik süre boyunca logaritmik ve köklü zaman aralıkları (log-time, root-time) içinde otomatik olarak okuma alınabilmektedir.

Deney ile ilgili veriler bilgisayara aktarılırken, öncelikle deneyin yapılacağı tarih, deney numarası, ölçerlerin bağlı olduğu kanallar ve bu kanallardan alınacak okumaların başlangıç değerleri tanımlanır. Bu işlemlerden sonra sistem bu haliyle istenildiği kadar bekletilebilir ve monitörden okumalardaki değişimler izlenebilir.

Deneyin yapılabilmesi için istenilen koşullar sağlandıktan sonra okuma aralıkları her bir kolon için alınacak okuma sayılarının başlangıç ve bitiş değerleri kaydedilerek deney başlatılır. Deney devam ederken, deneyin hangi aşamada olduğu ekrandan sürekli bir şekilde izlenebileceği gibi kaydedilen okumalarda gözlenebilir. Veri toplama programı aynı zamanda alınan okumaların şekillere dönüştürülebilmesi işleminde yapabilmektedir.

3.3. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Numunelerin Özellikleri

Bu araştırmada Erzincan Ekşisu bölgesinde yapılan sondajlarda tüp ve pistonlu numune alıcılar ile alınmış örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. İlk aşamada dinamik gerilme seviyesi, çevrim sayısı ve plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisini incelemek için laboratuvarında zemin numuneleri üzerinde bir seri deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan siltli

zeminlerin likit limit değerleri $w_L = \%31 - \%60$ arasında değişmektedir. Zeminlerin bir kısmı plastik olmayan, bir kısmı ise plastik zeminlerdir. Plastik olan zeminlerin plastisite indisi $I_P = \%10$ ile $I_P = \%28$ arasında değişmektedir. Deneylerde kullanılan zeminlerin tabii su muhtevası ise $w = \%36$ ile $w = \%51$ arasında değişmektedir. Numunelerin zemin özelliklerini gösteren Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Deneylerde Kullanılan Numunelerin Özellikleri

Deney No	w (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	Kaba Dane Oranı (%)	İnce Dane Oranı (%)	γ_n (kN/m ³)	Sınıflandırma
E07	51	51	NP	-	2	98	16.87	ML
E08	51	51	NP	-	2	98	16.97	ML
E10	51	51	NP	-	2	98	17.46	ML
E15	50	38	27	11	28	72	19.42	ML
E18	36	36	26	10	38	62	17.46	ML
E20	36	36	26	10	38	62	17.95	ML
E29	45	60	32	28	24	76	16.97	MH
E30	45	60	32	28	24	76	17.07	MH
E31	45	60	32	28	24	76	16.68	MH
E37	38	31	NP	-	17	83	17.95	ML
E38	38	31	NP	-	17	83	18.25	ML

3.4. Numunelerin Hazırlanması

Yapılan deneysel çalışmada Erzincan Ekşisu bölgesinde yapılan sondajlarda tüp ve pistonlu numune alıcılar ile alınmış örselenmemiş zemin numuneleri kullanılmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere seçilen tüplerin çapı 70 mm ile 80 mm arasında değişmektedir. Laboratuvara getirilmiş olan bu numuneler, laboratuvarında nem odasında muhafaza edilmiştir.

Deney yapılacağı zaman, seçilen tüp içerisindeki zemin numunesi, hidrolik bir sistemle çalışan numune çıkarıcı yardımı ile çıkarılıp, tel testere yardımı ile uygun boylarda iki ya da üç parçaya ayrılarak, tabii su muhtevasının değişmemesi için açık havada fazla bekletilmeden desikatörlerin içerisine yerleştirilmişlerdir. Bütün bu işlemler sırasında numunenin örselenmemesi için çok dikkatli davranılmıştır.

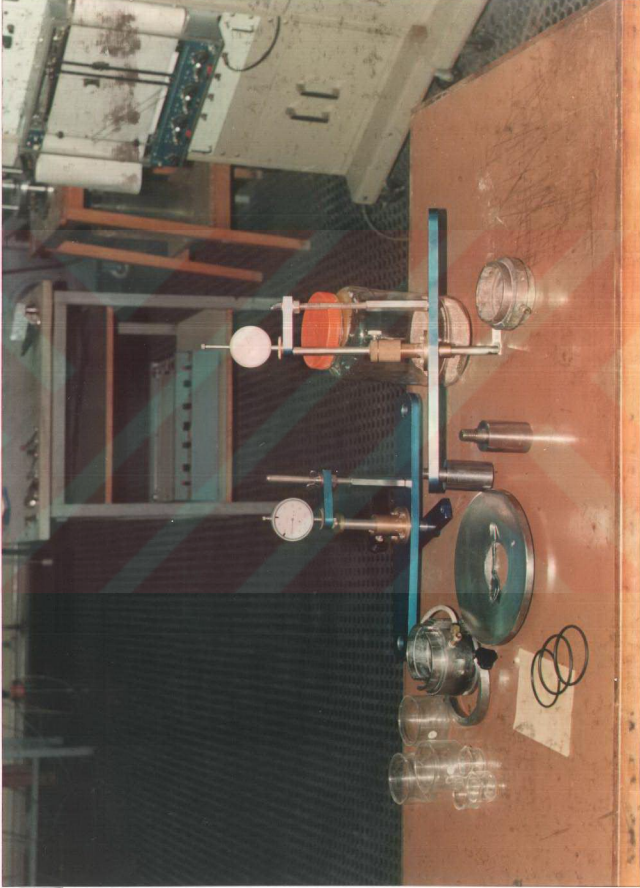
Dinamik basit kesme deney sisteminde deney sisteminde deney numunesinin çapı 70 mm ve yüksekliği 30 mm'dir. Bu boyutları sağlamak için dinamik basit kesme deney aletinin aynı ebatlarda sahip olan kendi özel numune hazırlama ringi kullanılarak Şekil 3.7'de görüldüğü gibi numune ringe yerleştirilmeden önce, kesme kalıbı kullanılarak numunenin alt kısmı tel testere yardımı ile düzgün bir şekilde kesilmiş ve düzeltilmiştir. Daha sonra numune düzgün bir yüzey üzerine, kesilerek düzeltilmiş olan kısmı alta gelecek şekilde konmuş, bu sırada numunenin yüksekliğinde deney numunesinin yüksekliği olan 30 mm'den biraz fazla olmak üzere kesilmiştir. Daha sonra içerisi hafifçe yağlanmış olan ring, çok yavaş bir şekilde numuneye doğru itilirken numune traşlanmış ve örselenmeden ringin içine girmesi sağlanmıştır. Numune tam olarak ringe girdikten sonra tel testere ile ringin dışına çıkan fazlalık kısım kesilmek suretiyle hem numunenin boyu 30 mm'ye indirilmiş hem de numunenin üst yüzeyi düzeltilmiştir.

Böylece hazırlanmış olan numune, aynı çapta özel piston yardımıyla itirilerek ringin içerisinden çıkartılmış, su muhtevasının ve birim ağırlığının tayini için tartılmış ve boyu ölçülmüştür. Bundan sonra deneyde kullanılmak üzere deney aletindeki yerine yerleştirilmiştir.

3.5. Deneylerin Yapılışı

Deneye başlamadan önce, sistemden su geçirerek içerdeki hava dışarı çıkartılır. Daha sonra dişli poroz taşların dişlerinin arasındaki kırıntılar temizlendikten sonra poroz taşlar doymun hale getirilir. Zemin numunesi dikkatli bir şekilde alt başlığa yerleştirildikten sonra, zemin numunesinin etrafına membran geçirilir ve o-ringler yerleştirilir. Bu işlemten sonra üst başlık dikkatlice bir şekilde numunenin üst kısmına yerleştirilir. Daha sonra $\phi 250$ mm çapında 160 mm yüksekliğinde, 20 mm et kalınlığı olan şeffaf pleksiglastan yapılmış silindir hücre oturtulur ve numune üst başlığı, hücre üst başlığına bağlanır.

Düşey dengeleme basınç uygulama regülatöründen 60 kPa'lık bir dengeleme basıncı uygulanır. Bağlantılar tamamlandıktan sonra hücre giriş vanaları açılır, yağ tankına



Şekil 3.7 Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminde Numune Hazırlama Aletleri

basınç verilerek (400-500 kPa) numunenin üstü tam olarak kapanıncaya kadar hint yağı ile doldurulur ve giriş vanaları kapatılır.

Numuneye basınç uygulamadan önce, hücrenin üst başlığında bulunan üst başlık bağlama cıvataları sıkıştırılır ve düşey deformasyon saatinden ilk boy okuması yapılır. Ters basınç, düşey basınç ve çevre basıncı arasındaki bağlantılar açılır. Sonra çevre basıncı 100 kPa'a çıkartılır ve ara bağlantıların açık olması nedeni ile düşey basınçta çevre basıncına eşdeğerde artar. Efektif basınç 100 kPa olacak şekilde ters basınç yavaş ve kademeli olarak yükseltilerek 400 kPa'a çıkartılır. Ters basınç regülatörü diğer basınçları (çevre ve düşey basınçlar) kontrol edilebildiği için her iki basınçları ters basınca eşit değerde artarak 500 kPa olur. Bu basınçlar altında zemin numunesi konsolidasyona bırakılır. (Yaklaşık 24 saat)

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

Konsolidasyonun tamamlanıp basınçların denge durumuna gelmesinden sonra, deneye başlamadan önce numunenin suya doymun olup olmadığının araştırılması gerekir. Bu amaçla ters basınç vanaları kapalı iken çevre basıncı bir miktar (örneğin $\Delta\sigma_c=50$ kPa) artırılır. Çevre basıncındaki bu artış boşluk suyu basınçlarına yansır. Şayet numune suya doymun ise bir süre sonra boşluk suyu basınçlarındaki bu artımın aynen okunması gerekir. Dinamik deneylere geçebilmek için ters basınç vanaları açılır ve doymunluk kontrollerinin yapıldığı sırada oluşmuş olan boşluk suyu basınçlarının dengeleninceye kadar beklenir. Yine de numunelerin büyük bir bölümünde $B>0.95$ koşulu sağlandıktan sonra deneyler yapılmıştır.

Numunelere tekrarlı kayma kuvveti uygulayabilmek için tekrarlı yatay kuvvet uygulama biriminin kompresör bağlantı vanası açılır ve bu birim çalıştırılır. Deney sırasında uygulanacak frekans, genlik ve yükleme şekli ile ilgili ayarlar yapılır. Statik ve dinamik yükler ayarlanarak bu ünite ile numunenin üst başlığının bağlı olduğu yatay şaft bağlantısı yapılır. Bu işlem sırasında numunenin yatay yük alıp

bozulmasına engel olmak için üst başlığın bağlı olduğu yatay yükleme şaftı hücre üst başlığına sabitleştirilmiş durumdadır. Şayet numune üzerinde ilave yük varsa bu yük sıfırlandıktan sonra üst başlık tespit vidası açılarak yatay yükleme şaftı serbest bırakılır. Bu sırada son konsolidasyon okuması alınarak kaydedilir. Amplifikatörlerin sıfırlama ve ölçek kontrolleri yapılır ve bilgisayara deney anında okumaların alınabilmesi için gerekli komutlar girilir. Drenajlar kapatılır ve yükleme düğmesi açılarak deneye başlanır. Deney süresince, bir veri toplama sistemi ile düşey deformasyon, boşluk suyu basıncı, yatay yük ve yatay deformasyon değerleri elde edilir.

Deney bittikten sonra dinamik yükleme kapatılır, yatay şaft bağlantısı açılarak statik yük düşürülür. Üst başlık, tespit civatası yardımı ile sabitleştirilir ve hücre çıkış vanaları açılarak hint yağı büyük bir tanka boşaltılır. Daha sonrada bir disket yardımıyla veri toplama sistemindeki datalar alınır ve gerekli düzeltmeler yapılarak, sonuçlar değerlendirilir.

3.6. Verilerin Değerlendirilmesi

Bu deneylerde deney süresi boyunca boşluk suyu basınçları, uygulanan tekrarlı kuvvet, yatay ve düşey deformasyon okumaları bilgisayardan alınmıştır. Uygulanan tekrarlı kuvvet, alınan kayıtlarda T değerinde olduğu için numuneye uygulanan kuvvet $\pm T/2$ 'dir.

Dolayısıyla numunede yanal deformasyonların oluşmayacağı kabul edilerek numune alanı deney süresince sabit kalacağından numuneye uygulanan gerilme $\pm T/2A$ olarak hesaplanır. Deformasyonların hesabı da; bilgisayardan alınan deformasyon kayıtlarından okunan değerlerden alınarak $\pm \Delta L/H_0$ bağıntısı yardımıyla birim kayma değerleri, (γ) hesaplanır. Boşluk suyu basınçları ise deney sırasında alınan datalardan doğrudan elde edilir.

3.7. Sonuç

İnce daneli zeminlerin tekrarlı kayma gerilmeleri altında dinamik davranışlarının ve mukavemet özelliklerinin incelenmesinde dinamik basit kesme deney sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Dinamik basit kesme deney sisteminde, numuneye uygulanabilen gerilmeler, arazi koşullarına oldukça yakındır. Bu çalışmada yapılan bütün dinamik deneyler dinamik basit kesme deney sisteminde yapılmıştır. Bölüm 2’de dinamik basit kesme deney tekniği hakkında, bu bölümde ise deney sistemi ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Bu çalışmada Erzincan Ekşisu bölgesinde yapılan sondajlarda tüp ve pistonlu numuneler alıcılar ile alınmış örselenmemiş siltli zemin numuneleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerin yapılış aşamaları da ayrıca bu bölüm kapsamında ele alınmıştır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Giriş

Bu araştırmada, dinamik basit kesme deney sisteminde, siltli zeminlerin dinamik yükler altındaki davranış üzerinde gerilme seviyesinin, çevrim sayısı ve plastisitenin etkisi incelenmiştir. Gerilme kontrollü olan dinamik basit kesme sisteminde, farklı plastisitede ve plastik olmayan siltli zemin numuneleri üzerinde farklı gerilme seviyelerinde dinamik seviyelerinde dinamik deneyler yapılmıştır. Bütün deneylerde titreşim frekansı $f=1.0$ Hz, dalga biçimi sinüsoidal, ortalama efektif çevre basıncı 100 kPa olarak alınmıştır. Numunelerde, tekrarlı gerilmeler, boşluk suyu basıncının ortalama efektif çevre basıncına eşit veya boşluk suyu basınçlarının sabitleştiği duruma erişilinceye kadar uygulanmıştır.

4.2. Numunelerin Dinamik Davranış Biçimi

Bu araştırmada yapılmış deneyler ve herbir deneyin kayma gerilmesi oranı Tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Dinamik Deneyler ve Kayma Gerilmesi Oranları

Deney No	E07	E08	E10	E15	E18	E20	E29	E30	E31	E37	E38
Kayma (τ/σ'_c) gerilmesi oranı	0.092	0.100	0.153	0.370	0.353	0.249	0.249	0.478	0.578	0.500	0.585

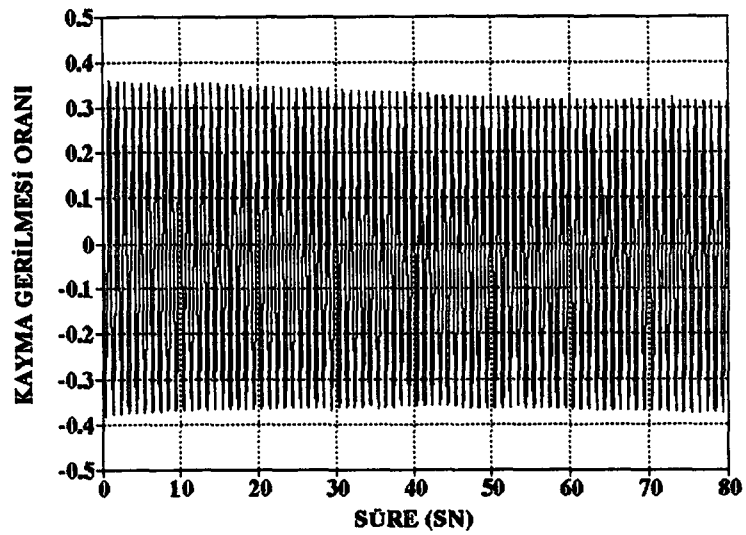
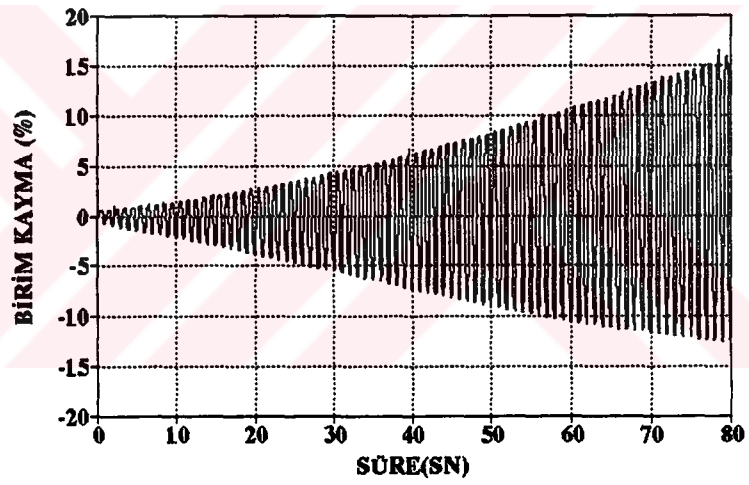
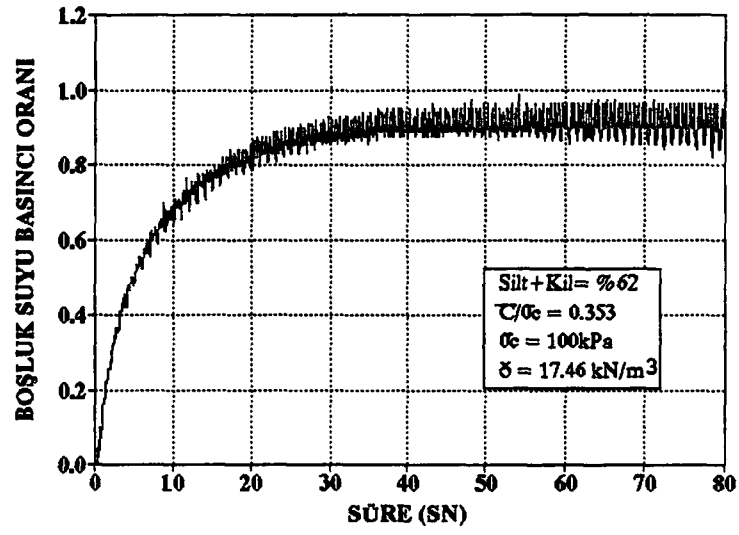
Erzincan Ekşisu bölgesinde yapılan sondajlarda tüp ve pistonlu numune alıcılar ile alınmış örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerde efektif çevre basıncı yaklaşık $\sigma'_c=100$ kPa olacak şekilde, yanal ve düşey basınçlar 590 kPa ve ters basınç ise 490 kPa olarak uygulanmıştır. Bu çalışmada siltli zemin numuneleri

üzerinde, farklı tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanarak yapılan deneylerde oluşmuş birim kayma ve boşluk suyu basınçlarının zamana göre değişimleri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Ayrıca bu şekillerin en alt kısmında da kayma gerilmesi oranı ile süre arasındaki davranış gösterilmektedir.

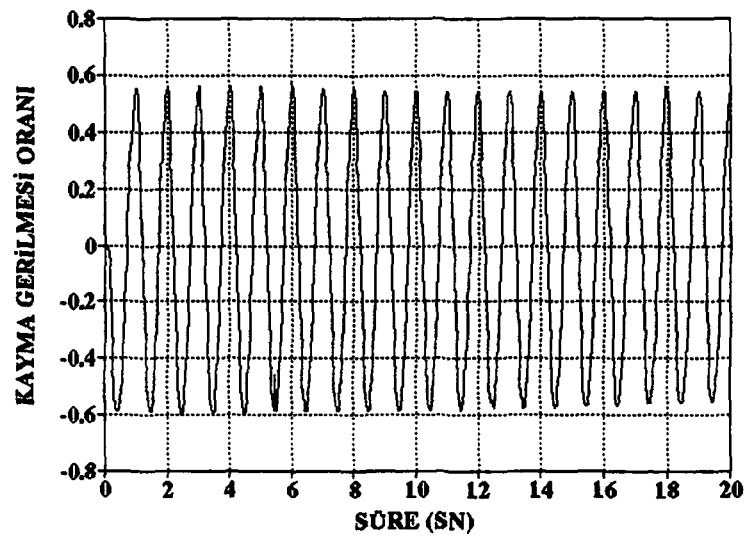
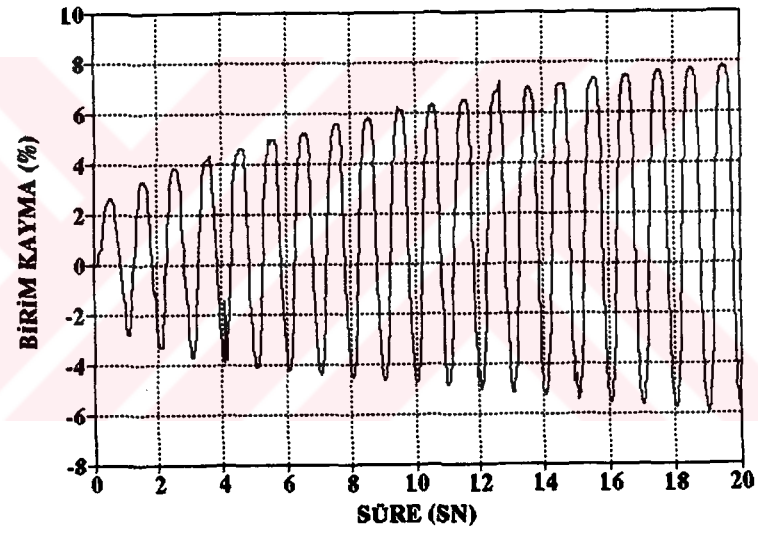
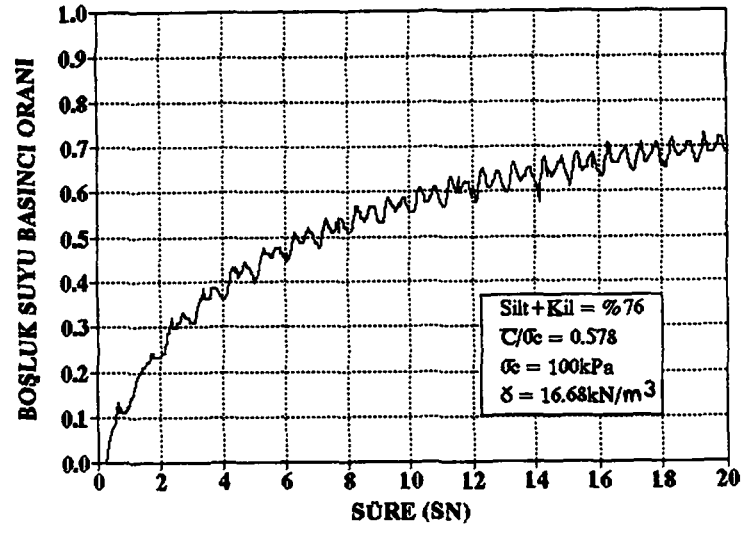
Şekil 4.1’de $w_L = 36\%$, 10% plastisiteli (ML), 38% kaba dane içeren E18 nolu deney kaydına ait boşluk suyu basıncı oranı-süre, birim kayma-süre ve kayma gerilmesi oranı-süre arasındaki davranış biçimleri gösterilmiştir. Gerilme oranı $\tau/\sigma_c = 0.353$ olan suya doymun düşük plastisiteli siltli zeminde boşluk suyu basıncı oluşumu ilk çevrim içinde başlamış ve zamanla artmıştır. Boşluk suyu basıncı değeri, 40. sn’den sonra sabit bir değerde devam etmiş, fakat 100 kPa değerine erişememiştir. Diğer yandan birim kayma deformasyonları zamanla hızla artmakta ve göçme kriteri olarak kabul edilen $\gamma = \pm 2.50\%$ deformasyon mertebesine $N=15$. çevrimde ulaşmış ve bu andaki boşluk suyu basıncı oranı ise $\Delta u/\sigma_c = 0.78$ olarak bulunmuştur. Birim kaymalar, boşluk suyu basıncı sabitleştiği halde artmaya devam etmiştir.

Şekil 4.2’de ise $w_L = 60\%$, 28% plastisiteli (MH), 24% kaba dane içeren E31 nolu deney kaydına ait boşluk suyu basıncı oranı-süre, birim kayma-süre ve kayma gerilmesi oranı-süre arasındaki davranış biçimleri gösterilmiştir. Gerilme oranı $\tau/\sigma_c = 0.578$ olan suya doymun yüksek plastisiteli siltli zeminde boşluk suyu basıncı yine ilk çevrimlerde oluşmuş ve zamanla artmıştır. Bu arada birim kayma deformasyonları zamanla hızla artmakta ve $\gamma = \pm 2.50\%$ deformasyon mertebesine $N=0.60$. çevrimde ulaşmış ve bu andaki boşluk suyu basıncı oranı ise $\Delta u/\sigma_c = 0.14$ olarak bulunmuştur.

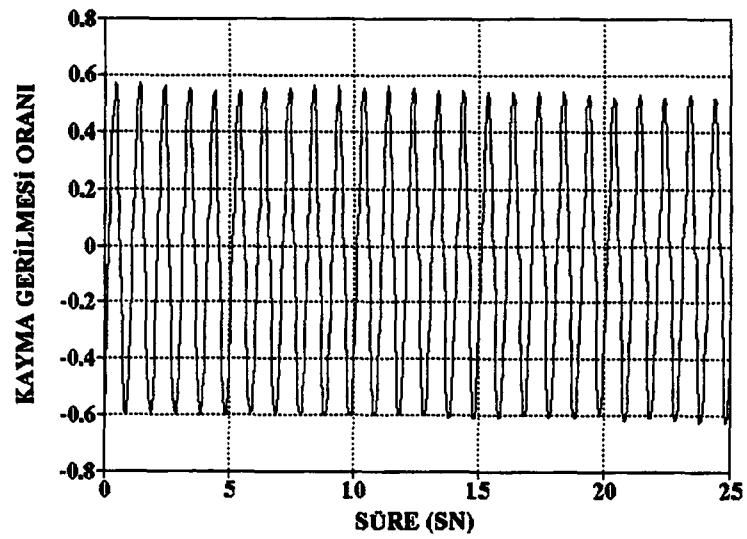
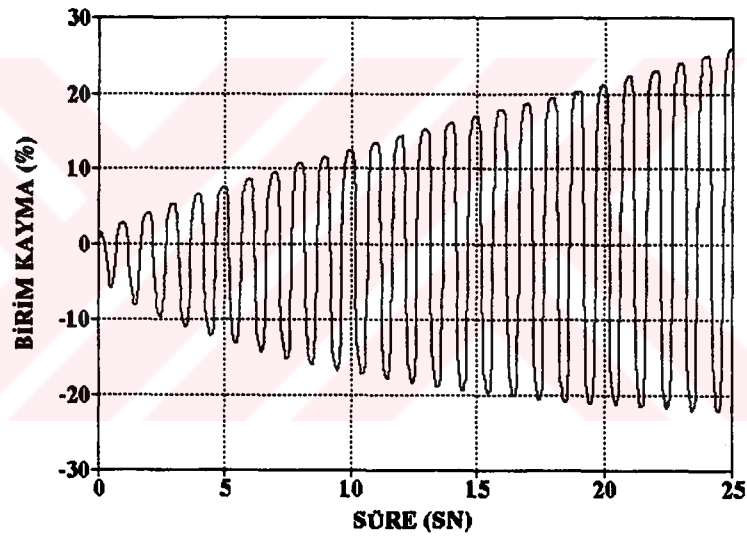
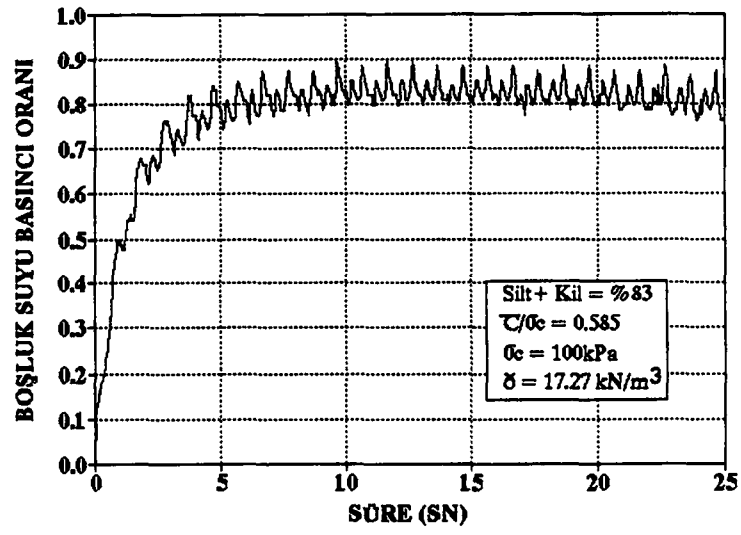
Şekil 4.3’de ise $w_L = 31\%$, plastik olmayan (NP), 17% kaba dane içeren E38 nolu deney kaydına ait boşluk suyu basıncı oranı-süre, birim kayma-süre ve kayma gerilmesi oranı-süre arasındaki davranış biçimleri gösterilmiştir. Gerilme oranı, $\tau/\sigma_c = 0.585$ olan suya doymun plastik olmayan siltli zeminde boşluk suyu basıncı yine ilk çevrimlerde oluşmuş fakat diğer deneylere nazaran ilk çevrimlerde daha yüksek bir değere erişmiştir. Diğer yandan birim kayma deformasyonları zamanla hızla artmakta ve $\gamma = \pm 2.50\%$ deformasyon mertebesine $N=0.09$. çevrimde ulaşmış ve bu andaki boşluk suyu basıncı oranı ise $\Delta u/\sigma_c = 0.11$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1 Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminde E18 nolu Deney Kaydı



Şekil 4.2 Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminde E31 nolu Deney Kaydı



Şekil 4.3 Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminde E38 nolu Deney Kaydı

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi değişik zemin özelliklerine sahip üç numunenin davranışlarında farklılıklar gözlenmektedir. Bu farklılık, uygulanan tektrarli kayma gerilmesi oranlarına, zeminin plastik olup olmadığına ve zemin içerdığı ince dane oranına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır.

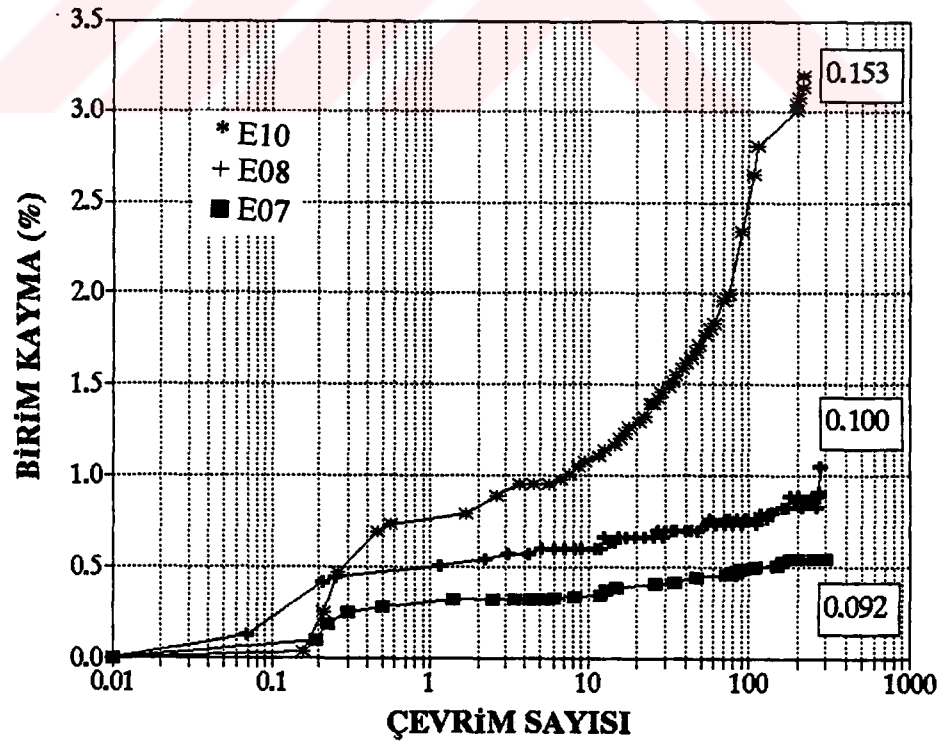
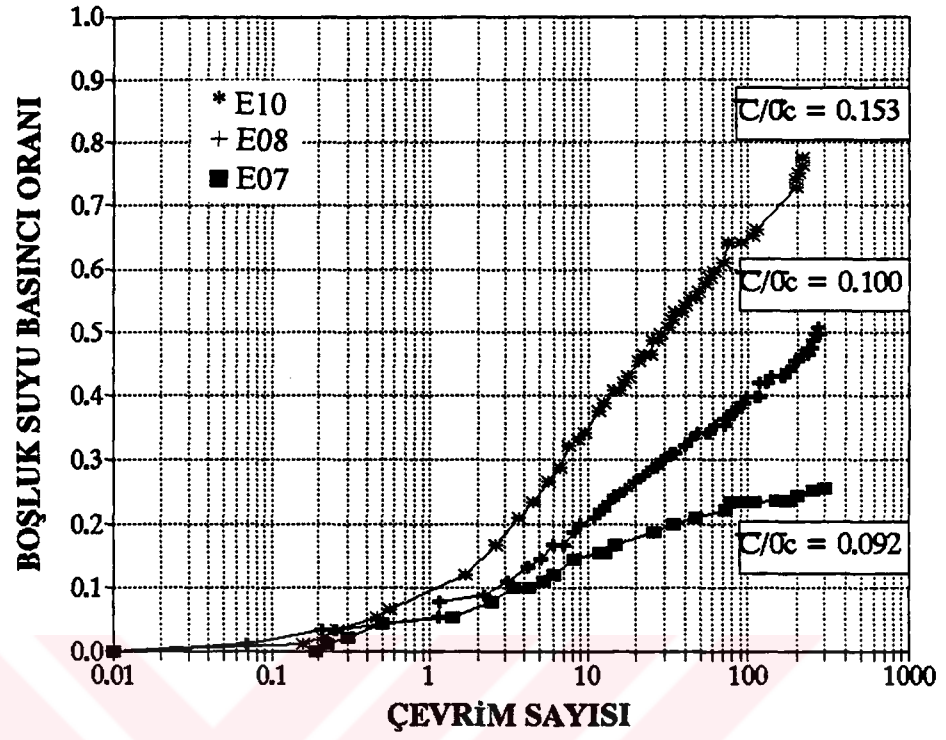
4.3. Gerilme Seviyesinin Etkisi

Gerilme seviyesinin dinamik davranış üzerindeki etkisini incelemek için suya doygun düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli siltli zemin numunelerine farklı gerilme seviyelerinde dinamik yükler uygulanmıştır. Şekil 4.4’de plastik olmayan siltlerde boşluk suyu basıncı oluşumu ve birim kayma üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu deney setinde kullanılan numunelerde tabii birim hacim ağırlıkları $\gamma_n=16 \text{ kN/m}^3$ civarındadır. Deneyler sırası ile $w_L=\%51$, plastik olmayan (NP), $\%2$ kaba dane içeren numuneler üzerinde $\tau/\sigma_c=0.092$, $\tau/\sigma_c=0.100$ ve $\tau/\sigma_c=0.153$ olmak üzere üç farklı gerilme seviyesinde yapılmıştır. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.092$ ve $\tau/\sigma_c=0.100$ olan deneyler $\gamma=\pm\%2.50$ deformasyon mertebesine ulaşamamıştır. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.153$ olan deneyde $\gamma=\pm\%2.50$ deformasyon mertebesine $N=100$. çevrimde ulaşmış ve $N=100$. çevrime karşılık gelen boşluk suyu basıncı oranı $\Delta u/\sigma_c=0.655$ değerinde bulunmuştur. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.153$ olan deneyde boşluk suyu basıncı oranı en yüksek mertebede, gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.092$ olan deneyde ise boşluk suyu basıncı oranı ise en düşük mertebede gözlenmiştir. Diğer yandan, $\tau/\sigma_c=0.092$ gerilme seviyesinde birim kayma deformasyonları en düşük mertebede, $\tau/\sigma_c=0.153$ gerilme seviyesinde ise birim kayma deformasyonları daha yüksek merterbededir. $N=20$. çevrimde; $\tau/\sigma_c=0.153$ gerilme seviyesinde $\gamma=\pm\%1.296$, $\tau/\sigma_c=0.100$ gerilme seviyesinde $\gamma=\pm\%0.667$, $\tau/\sigma_c=0.092$ gerilme seviyesinde $\gamma=\pm\%0.407$ olarak bulunmuştur.

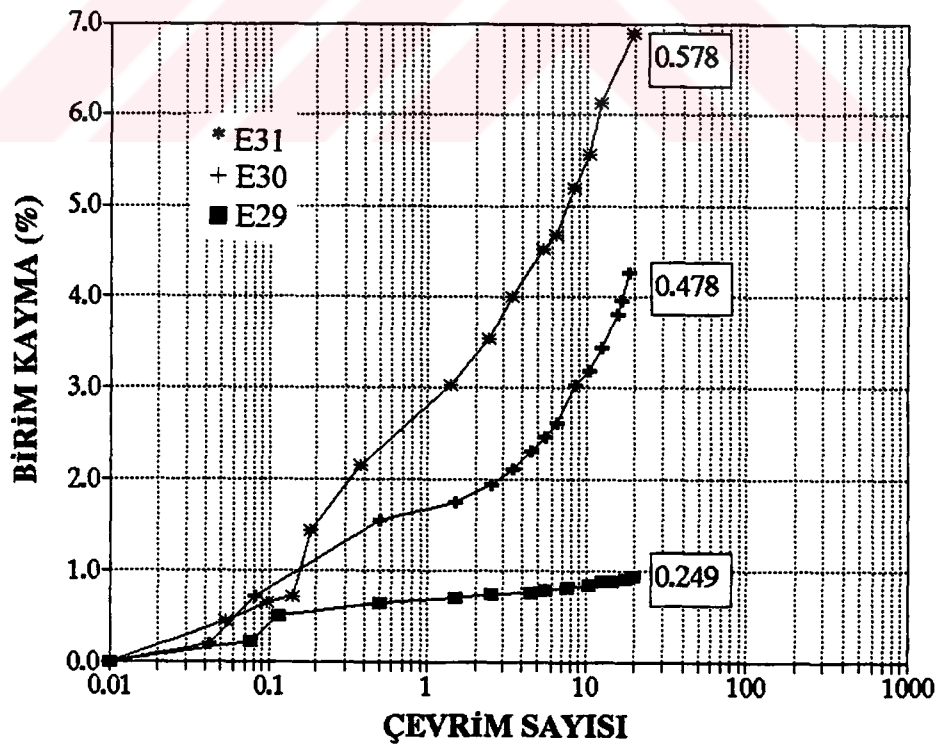
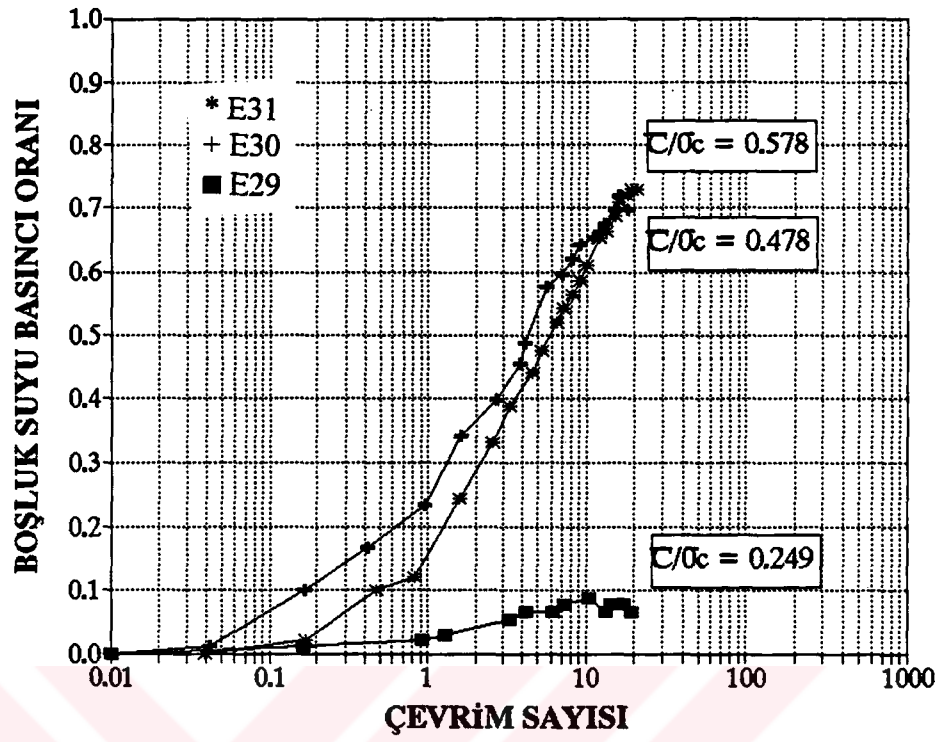
Şekil 4.5’de ise yüksek plastisiteli siltli zeminlerde boşluk suyu basıncı oluşumu ve birim kayma üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu deney setinde kullanılan numunelerde tabii birim hacim ağırlıkları $\gamma_n=16 \text{ kN/m}^3$ civarındadır. Deneyler sırası ile $w_L=\%60$, $\%28$ plastisiteli (MH), $\%24$ kaba dane içeren numuneler üzerinde $\tau/\sigma_c=0.249$, $\tau/\sigma_c=0.478$ ve $\tau/\sigma_c=0.578$ olmak üzere üç farklı gerilme seviyesinde yapılmıştır. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.249$ olan deney, $\gamma=\pm\%2.50$ deformasyon

mertebeğine ulaşamamıştır. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.478$ olan deneyde; $\gamma=\pm\%2.50$ deformasyon mertebesine $N=5.50$. çevrimde ulaşmış ve $N=5.50$. çevrime karşılık gelen boşluk suyu basıncı oranı $\Delta u/\sigma_c=0.575$ olarak bulunmuştur. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.578$ olan deneyde ise; $\gamma=\pm\%2.50$ deformasyon mertebesine $N=0.60$. çevrimde ulaşmış ve $N=0.60$. çevrime karşılık gelen boşluk suyu basıncı oranı $\Delta u/\sigma_c=0.14$ olarak bulunmuştur. $N=10$. çevrim sayısında; $\tau/\sigma_c=0.249$ gerilme seviyesinde $\gamma=\pm\%0.800$, $\tau/\sigma_c=0.478$ gerilme seviyesinde $\gamma=\pm\%3.13$, $\tau/\sigma_c=0.578$ gerilme seviyesinde $\gamma=\pm\%5.40$ olarak bulunmuştur. $\tau/\sigma_c=0.578$ gerilme seviyesinde; $N=15$. çevrime kadar boşluk suyu basıncı oranları, $\tau/\sigma_c=0.478$ gerilme seviyesindekinde daha düşük olmasına rağmen birim kaymalar normal şekilde oluşmaktadır. $\tau/\sigma_c=0.478$ gerilme seviyesindeki deneyde doygunluk $\%100$ 'dür. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.478$ doygunluğu $\%100$ olan deney; $\tau/\sigma_c=0.578$ gerilme seviyesindeki $\%95$ doygun deneye göre boşluk suyu basıncı oranı-süre grafiğinde en solda ve önünde kalmıştır. Burada da iki deney arasındaki doygunluk etkisi açıkça görülmektedir. Yine de nihai durumda $\tau/\sigma_c=0.578$ gerilme seviyesindeki boşluk suyu basıncı oranı daha yüksek değerdedir.

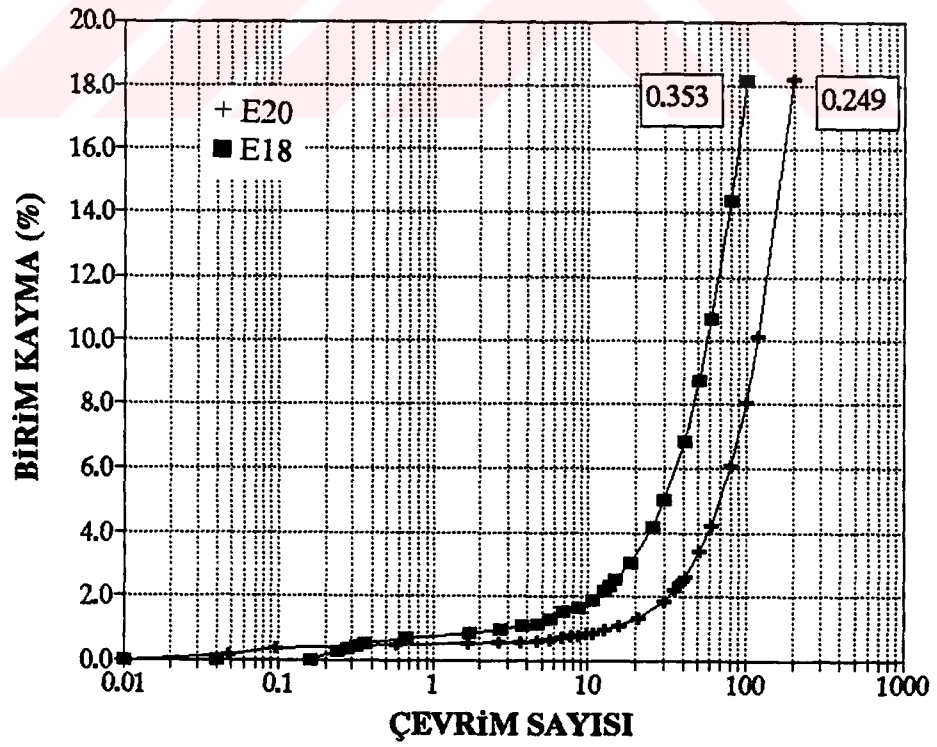
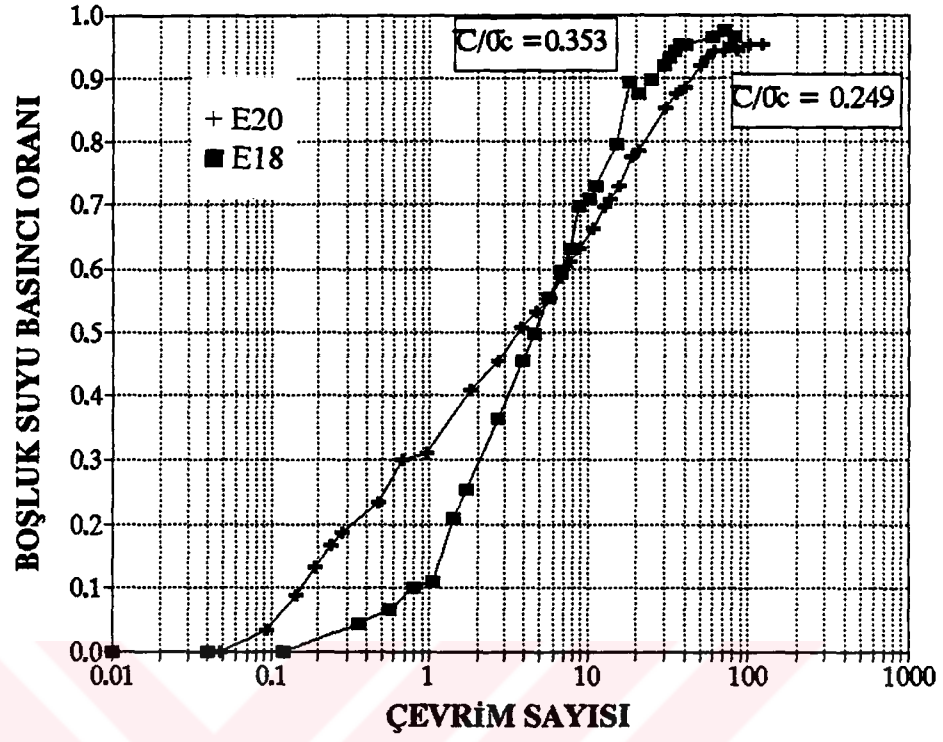
Şekil 4.6'da ise düşük plastisiteli siltli zeminlerde boşluk suyu basıncı oluşumu ve birim kayma üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu deney setinde kullanılan numunelerde tabii birim hacim ağırlıkları $\gamma_n=18 \text{ kN/m}^3$ civarındadır. Deneyler sırası ile $w_L=\%36$, $\%10$ plastisiteli (ML), $\%38$ kaba dane içeren numuneler üzerinde $\tau/\sigma_c=0.353$ ve $\tau/\sigma_c=0.249$ olmak üzere iki farklı gerilme seviyesinde yapılmıştır. Gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.353$ olan deneyde; $\gamma=\pm\%2.50$ deformasyon mertebesine $N=15$. çevrimde ulaşılmış ve $N=15$. çevrime karşılık gelen boşluk suyu basıncı oranı $\Delta u/\sigma_c=0.78$ değerinde iken, gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.249$ olduğunda $\gamma=\pm\%2.50$ deformasyon mertebesine $N=40$. çevrimde ulaşmış ve bu çevrime karşılık gelen boşluk suyu basıncı oranı $\Delta u/\sigma_c=0.884$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.4 Dinamik Gerilme Seviyesinin Etkisi



Şekil 4.5 Dinamik Gerilme Seviyesinin Etkisi



Şekil 4.6 Dinamik Gerilme Seviyesinin Etkisi

Deney sonuçlarında, göçme kriteri olarak kabul edilen $\gamma=\pm\%2.5$ birim kayma değerine bakılmış ve birim kaymaların bu değeri aşıp aşmadığı kontrol edilmiştir. Belirtildiği gibi, bu değere karşı gelen; N, çevrim sayısı ve $\Delta u/\sigma_c$ boşluk suyu basıncı oranları bulunmuştur. Belirli bir gerilme seviyesinde $\gamma=\pm\%2.5$ birim kayma değerine ulaşamamış zeminlerde, bu gerilme seviyesinin üzerindeki gerilmelerde ise birim kaymalar $\gamma=\pm\%2.5$ değerini aşacak, gerilme oranı arttıkça N, çevrim sayıları arasındaki fark da artacaktır. Gerilme seviyelerindeki küçük bir artış bile, daha ilk çevrimlerde birim kayma değerinde büyük artışlara neden olacaktır.

4.4. Çevrim Sayısının Etkisi

Çevrim sayısının dinamik davranış üzerindeki etkisini incelemek için suya doygun düşük ve yüksek plastisiteli siltli zemin numunelerine farklı gerilme seviyelerinde dinamik yükler uygulanmıştır. Şekil 4.7’de kayma gerilmesi oranı ile birim kayma arasındaki ilişki görülmektedir. Deneyler sırası ile $w_L=\%51$, plastik olmayan (NP), $\%2$ kaba dane içeren numuneler üzerinde $\tau/\sigma_c=0.092$, $\tau/\sigma_c=0.100$ ve $\tau/\sigma_c=0.153$ olmak üzere üç farklı gerilme seviyesinde yapılmıştır. Değişik çevrim sayılarında (N=1, N=10, N=20 ve N=100) aynı frekansta ve belirli bir kayma gerilmesi oranında değerlendirmeler yapılmıştır.

Aynı kayma gerilmesi oranında N=100. çevrimdeki birim kayma değeri, N=1. çevrimdeki birim kayma değerinden daha yüksek bir değerdir. Çevrim sayısı arttıkça, birim kayma değerinin arttığı gözlenmiştir.

Şekil 4.8’de de kayma gerilmesi oranı ile birim kayma arasındaki ilişki görülmektedir. Deneylerde ki gerilme seviyeleri; $\tau/\sigma_c=0.249$, $\tau/\sigma_c=0.478$ ve $\tau/\sigma_c=0.578$ ’dir. Deneylerdeki numunelerin; $w_L=\%60$, plastisite indisi $\%28$ (MH), içerdiği kaba dane oranı ise $\%24$ ’dür. Değişik çevrim sayılarında (N=1, N=10, N=20) aynı frekansta ve belirli bir kayma gerilmesi oranında değerlendirmeler yapılmıştır. Aynı kayma gerilmesi oranında N=20. çevrimdeki birim kayma değeri, N=1. çevrimdeki birim kayma değerinden daha yüksek bir değerdir. Yine çevrim sayısı arttıkça, birim kayma değerinin arttığı gözlenmiştir.

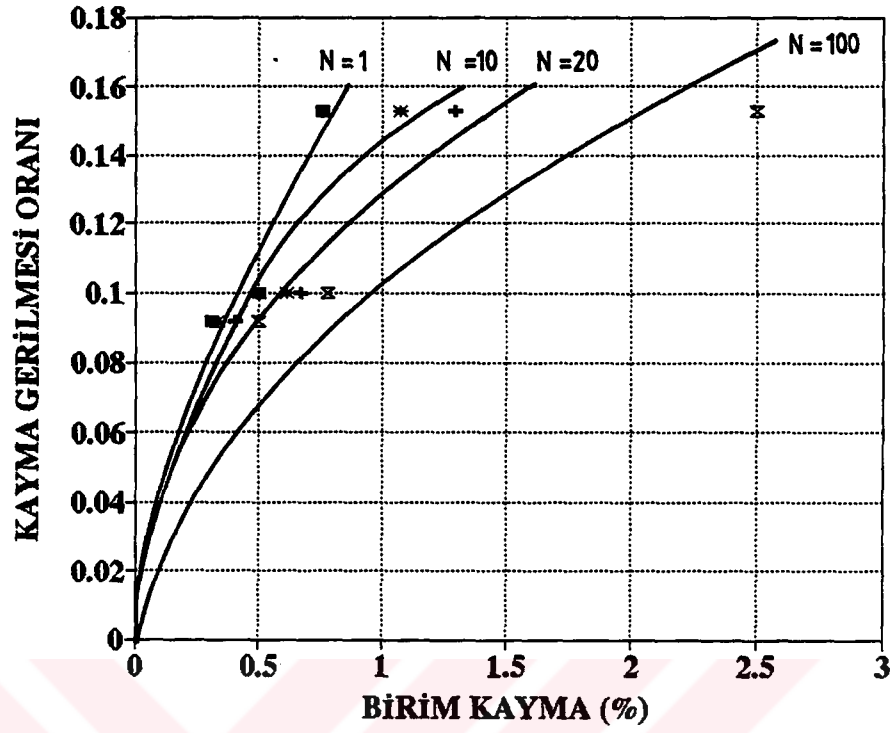
Şekil 4.9’da ise yine kayma gerilmesi oranı ile birim kayma arasındaki ilişki verilmiştir. Deneylerde ki gerilme seviyeleri; $\tau/\sigma_c=0.353$ ve $\tau/\sigma_c=0.249$ ’dur. Deneylerde kullanılan numunelerin $w_L=36\%$, plastisite indisi 10 (ML), içerdiği kaba dane oranı ise 38% ’dir. Değişik çevrim sayılarında ($N=1$, $N=10$, $N=20$ ve $N=100$), aynı frekansta ve belirli bir kayma gerilmesi oranında değerlendirmeler yapılmıştır. Yine yukarıdaki sonuçlara benzer şekilde $N=100$. çevrimdeki birim kayma değeri, $N=1$. çevrimdeki birim kayma değerinden daha yüksektir.

Sonuç olarak; zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışlarını incelerken önem kazanan bir faktör de çevrim sayısıdır. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da da görüldüğü gibi çevrim sayısının artması numunelerdeki birim kayma değerlerini arttırmaktadır. Bu durumda, zeminlerde bir yumuşamaya yol açmaktadır. Yalnız böyle bir yumuşamanın olabilmesi için belirli bir tekrarlı kayma gerilmesi veya birim kayma genliğinin aşılması gerekir. Bu durumda danelerin birbirlerine göre hareket etmeleri aralarındaki bağları zayıflatmakta ve mukavemeti azaltmaktadır.

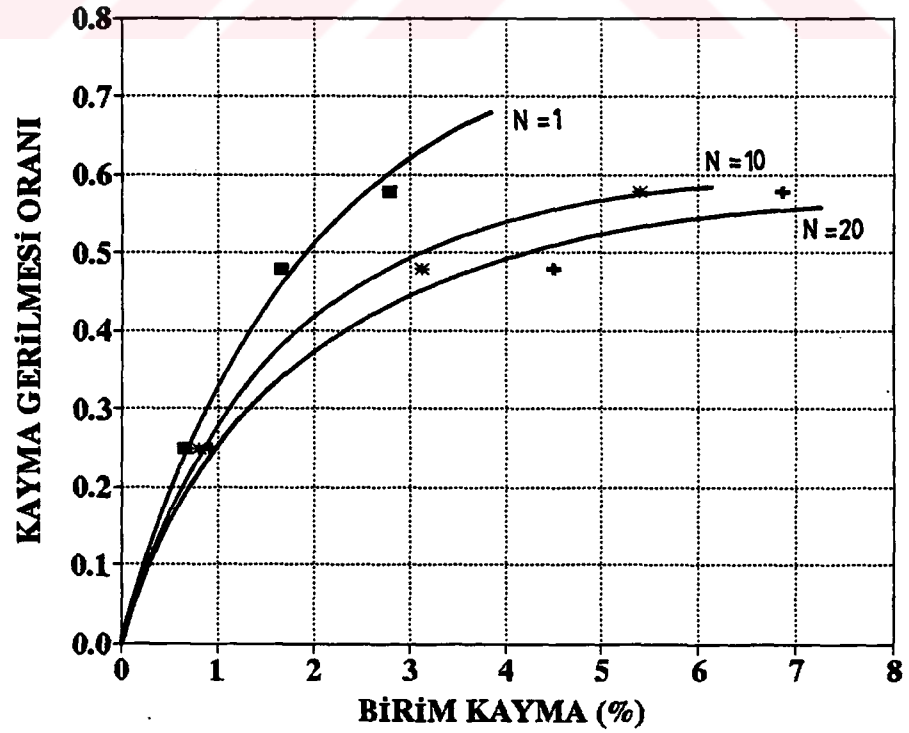
Son olarakta Şekil 4.10’da görüldüğü gibi $N=10$. çevrim sayısı mertebesinde, kayma gerilmesi oranı ve birim kayma oranı arasındaki ilişki gösterilmiş ve bu ilişkide plastisitenin etkisi incelenmiştir. Plastisite arttıkça, dinamik mukavemetin arttığı görülmüştür.

4.5. Plastisitenin Etkisi

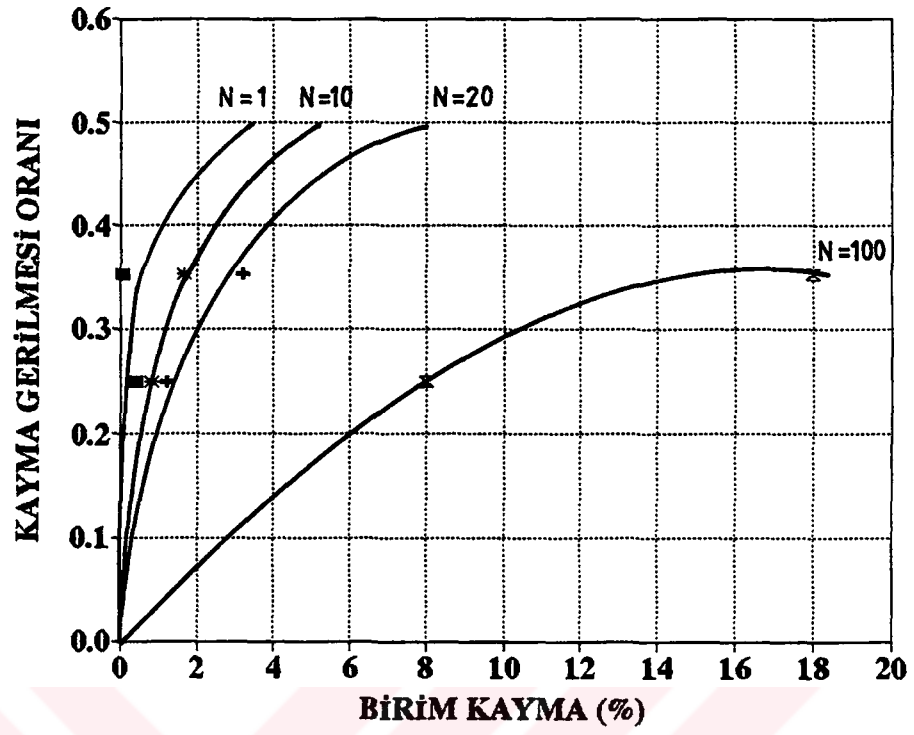
Siltli zeminlerin dinamik mukavemeti üzerinde plastisitenin etkisini incelemek için, plastik ve plastik olmayan grubuna giren üç farklı zemin grubu üzerinde değişik kayma gerilmelerinde dinamik deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bütün numuneler 100 kPa efektif çevre basıncına izotropik olarak konsolide edildikten sonra tekrarlı yük uygulanmıştır. Dinamik mukavemet üzerinde plastisitenin etkisini incelemek için $\gamma=\pm 1\%$ ve $\gamma=\pm 2.50\%$ deformasyon mertebesinde değerlendirmeler yapılmıştır.



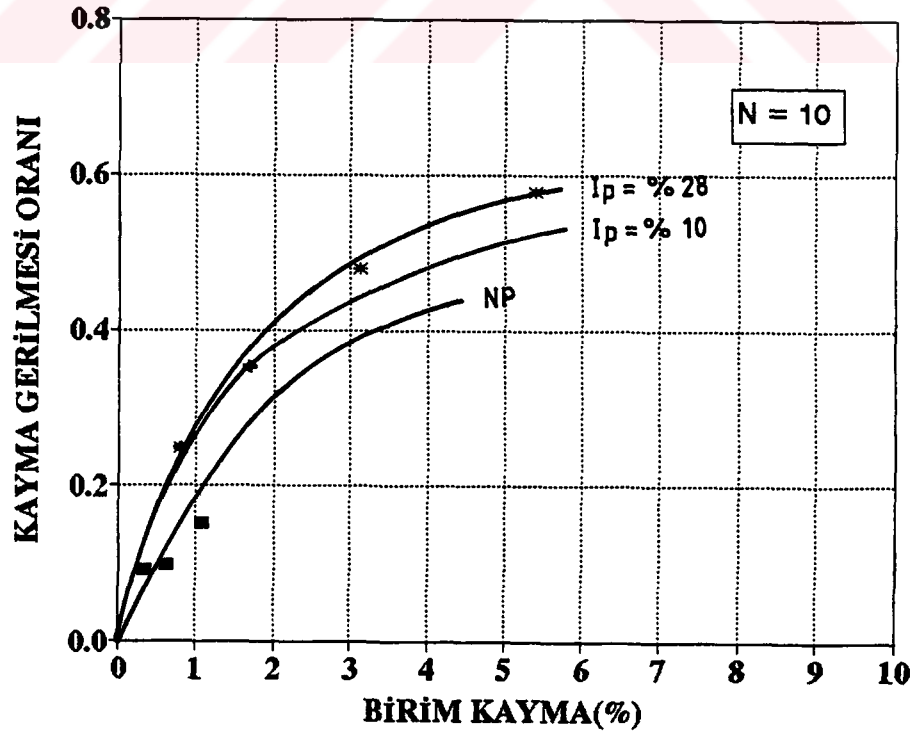
Şekil 4.7 Tekrarlı Yüklemelerde Çevrim Sayısının Etkisi



Şekil 4.8 Tekrarlı Yüklemelerde Çevrim Sayısının Etkisi



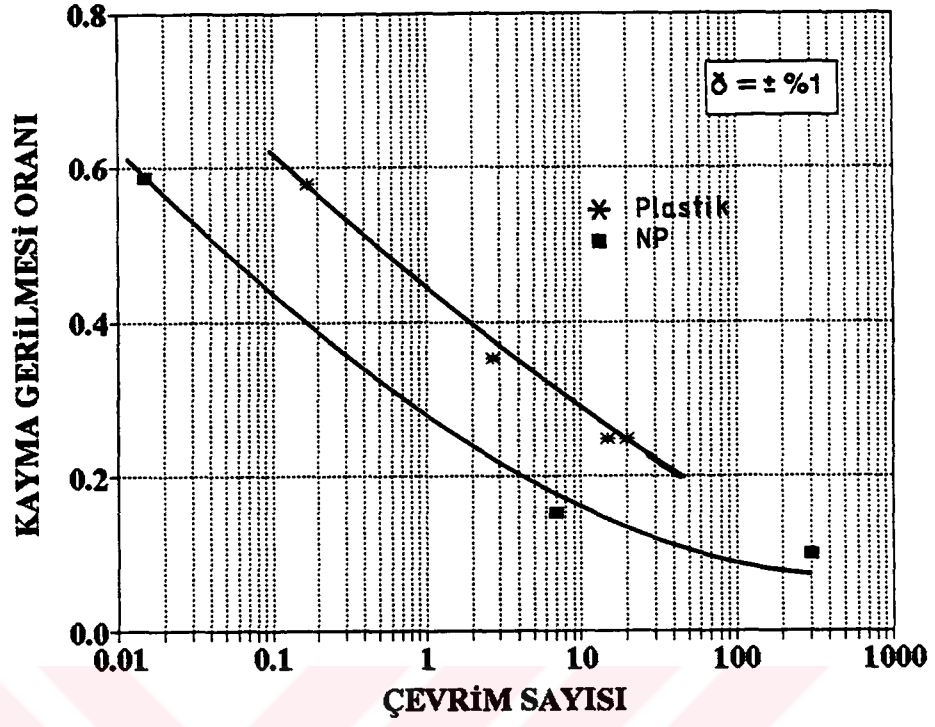
Şekil 4.9 Tekrarlı Yüklemelerde Çevrim Sayısının Etkisi



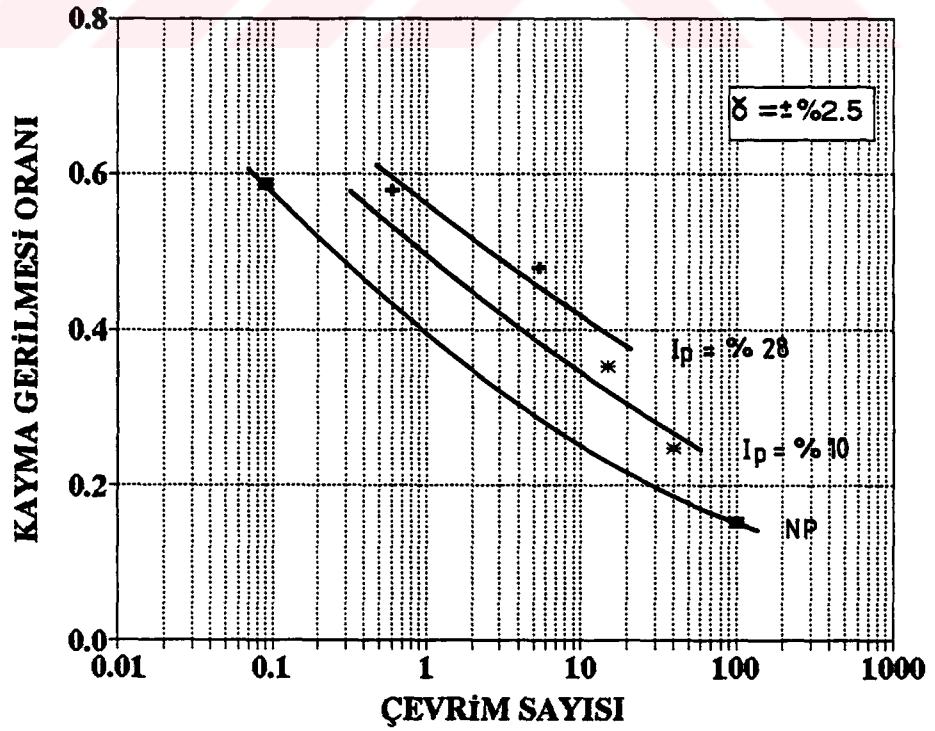
Şekil 4.10 Plastisitenin Dinamik Mukavemet Üzerindeki Etkisi

$\gamma=\pm\%1$ deformasyon mertebesinde değerlendirmeler yapılırken; gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.100$ ve çevrim sayısı, $N=300$ gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.153$ ve çevrim sayısı, $N=7$ ve son olarakta gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.585$ ve çevrim sayısı, $N=0.015$ olan plastik olmayan zemin numuneleri düşünölmüş ve Şekil 4.11’de göröldüğü gibi bir davranış gözlenmiştir. Yine $\gamma=\pm\%1$ deformasyon mertebesinde; gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.353$ ve çevrim sayısı, $N=2.70$, gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.249$ ve çevrim sayısı, $N=15$, gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.249$ ve çevrim sayısı, $N=20$, gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.578$ ve çevrim sayısı, $N=0.17$ olan plastik olan zemin numuneleri düşünölmüş ve Şekil 4.11’deki davranış gözlenmiştir. Elde edilen dinamik mukavemet eğrilerinden, $\gamma=\pm\%1$ deformasyon mertebesinde, her iki zeminin silt olmasına karşılık plastisitenin etkisi ile davranışları arasında büyük farklar meydana gelmektedir. Belli bir çevrim sayısı dikkate alındığında plastik siltlerin dinamik mukavemetinin plastik olmayan silte göre daha fazla olduğu görölmüşür.

Belli bir kayma gerilmesi uygulanması sonucu zeminde dinamik yükler altında göçme kriteri olarak kabul edilen $\gamma=\pm\%2.5$ birim kayma seviyesi göz önüne alınarak plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisi araştırılmışür. Bu araştırma yapılırken; gerilme seviyesi, $\tau/\sigma_c=0.153$ ve çevrim sayısı, $N=100$, gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.585$ ve çevrim sayısı, $N=0.09$ olan plastik olmayan zemin numuneleri düşünölmüş ve Şekil 4.12’de göröldüğü gibi mukavemet eğrisi elde edilmiştir. Yine $\gamma=\pm\%2.5$ deformasyon mertebesinde; gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.353$ ve çevrim sayısı, $N=15$, gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.249$ ve çevrim sayısı, $N=40$ ($I_p=\%10$) ve gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.578$ ve çevrim sayısı, $N=0.60$ ve gerilme seviyesi $\tau/\sigma_c=0.478$ ve çevrim sayısı, $N=5.50$ ($I_p=\%28$) olan plastik zemin numuneleri düşünölmüş ve Şekil 4.12’deki üstteki dinamik mukavemet eğrileri elde edilmiştir. Yine, elde edilen dinamik mukavemet eğrilerinden, $\gamma=\pm\%2.5$ deformasyon mertebesinde, her iki zemininin silt olmasına karşılık plastisitenin etkisi ile dinamik davranışlar arasında önemli farklar meydana gelmektedir. Yine, belli bir çevrim sayısı dikkate alındığında plastisitenin mukavemeti artırıcı yönde etki ettiği, plastik siltlerin dinamik mukavemetinin plastik olmayan silte göre daha fazla olduğu görölmüşür.



Şekil 4.11 Plastisitenin Dinamik Mukavemet Üzerindeki Etkisi



Şekil 4.12 Plastisitenin Dinamik Mukavemet Üzerindeki Etkisi

4.6. Sonuç

Bu araştırmada basit kesme deney sisteminde 100 kPa efektif basınçta konsolide edilmiş, Erzincan Ekşisu bölgesinden alınmış örselenmemiş plastik ve plastik olmayan siltli zemin numuneleri üzerinde gerilme kontrollü olarak değişik gerilme seviyelerinde dinamik deneyler yapılmıştır. İlk aşamada gerilme seviyesinin etkisi, ikinci aşamada çevrim sayısının etkisi, üçüncü aşamada ise plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, uygulanan dinamik gerilme seviyesinin artması durumunda boşluk suyu basıncının ve birim kayma deformasyonlarının arttığını göstermiştir. Diğer bir bulgu ise, çevrim sayısının dinamik mukavemet üzerindeki etkisinin belirtilmesidir. Çevrim sayısının artması numunelerdeki birim kayma değerlerini arttırmaktadır. Bunun sonucunda, zeminde yumuşamalar meydana gelmekte ve dinamik mukavemet azalmaktadır. Ayrıca plastisitenin dinamik mukavemet üzerine etkisi araştırılmış, belli bir çevrim sayısı dikkate alındığında plastik siltlerin dinamik mukavemetinin, plastik olmayan siltlere göre daha fazla olduğu görölmüştür.

BÖLÜM 5

GENEL SONUÇLAR

Ülkemizin, aktif bir deprem kuşağında bulunması beraberinde bir takım mühendislik problemlerini de yanında getirmektedir. Yapıların temelini oluşturan zeminlerin tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesi, kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişimlerin bulunması bu problemlerden bazılarıdır. Dolayısıyla, bu problemlerin çözülmesinde de biz inşaat mühendislerine birtakım görevler düşmektedir. Bu amaçla, bu araştırmada Erzincan Ekşisu bölgesinde yapılan sondajlardan alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde dinamik basit kesme sisteminde bir seri dinamik deneyler yapılmıştır.

Yapılan çalışmada, ilk önce numunelerin örselenmeden hazırlanmasına dikkat edilmiştir. Çünkü örselenmenin dinamik mukavemet davranışına etkisi, birçok araştırmacı tarafından gerek arazi, gerekse laboratuvar deneyleri ile açıklanmıştır. Daha sonra değişik gerilme seviyelerinde örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır. Çalışmada, ilk önce dinamik gerilme seviyesinin etkisi, daha sonra çevrim sayısının etkisi ve son olarakda plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Sonuçlar, uygulanan dinamik gerilme seviyesinin artması durumunda boşluk suyu basıncının ve birim kayma deformasyonlarının arttığını göstermiştir. Bunu göstermek için hem plastik hem de plastik olmayan siltli zemin numuneleri üzerinde değişik gerilme seviyelerinde dinamik deneyler yapılmıştır. Diğer bir sonuç ise, çevrim sayısının dinamik mukavemet üzerindeki etkisidir. Plastik ve plastik olmayan siltli zemin numunelerinde değişik çevrim sayılarında ($N=1$, $N=10$, $N=20$ ve $N=100$) deneyler yapılmış ve çevrim sayısının artmasıyla numunelerdeki birim kayma deformasyonlarının arttığı bulunmuştur. Elde edilen son bulgu ise, plastisitenin dinamik mukavemet üzerindeki etkisidir. Yapılan deneyler sonucunda, belli bir

evrim sayısı dikkate alındığında, plastik siltlerin dinamik mukavemetinin, plastik olmayan silte göre daha fazla olduğu grlmştr.



KAYNAKLAR

- ALHAS, E., (1994), Siltli ve Killi Kumlarda Sıvılaşma, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, 88 s.
- ANDERSEN, K.H., (1976), Behavior of Clay Subjected to Undrained Cyclic Loading, Norwegian Geotechnical Institute Publ., No.114, pp.33-44.
- ANSAL, A.M. ve ERKEN, A., (1985), Killerin Tekrarlı Gerilmeler Altında Davranışı, Deprem Araştırma Bülteni, Yıl 12, Sayı 48, sf.5-81.
- ANSAL, A.M. ve YILDIRIM, H., (1985), Killerin Tekrarlı Yükler Altında Kayma Mukavemeti, II.Ulusal Kil Sempozyumu Kitabı, Hacettepe Üniversitesi, Beytepe, Ankara, sf.329-341.
- ANSAL, A.M., ERKEN, A. ve ÖZARDA, H., (1987), Killerde Deformasyon Kontrollü Dinamik Deneyler, III.Ulusal Kil Sempozyumu, Bildiriler, sf.343-355.
- BROWN, S.F., LASHINE, A.K.F. and HYDE, A.F.L., (1975), Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay, Geotechnique, Vol.25, No.1, pp.95-114.
- CASTRO, G. and CHRISTIAN, J.T., (1976), Shear Strength of Soils and Cyclic Loading, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.102, No.GT9, pp.887-894.
- ERKEN, A. ve ANSAL, A.M., (1994), Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands, Performance of Ground and Soil Structure During Earthquakes, 13th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., pp.165-170.
- ERKEN, A., (1982), Killerin Dinamik Özellikleri Üzerinde Frekansın Etkisi, MMLS Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.
- FINN, W.D.L., PICKERING, D.J. and BRANSBY, P.L., (1971), Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests, Jour. of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol.97, No.SM4, pp.639-659.
- HARDIN, B.O. and BLACK, W.L., (1968), Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, ASCE, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.94, No.SM2, pp.353-369.
- ISHIHARA, K., KOKUSHO, T. and SILVER, M.L., (1985), Recent Developments in Evaluating Liquefaction Characteristics of Soils
- KOUTSOFTAS, C.D., (1978), Effect of Cyclic Loads on Undrained Strength of Two Marine Clays, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.104, No.GT5, pp.609-619.

LEE, K.L. and FOCHT, J.A., JR., (1975), Strength of Clay Subjected to Cyclic Loading, *Marine Geotechnology*, Vol.1, No.3, pp.165-185.

MATSUI, T., OHARA, H. and ITO, T., (1980), Cyclic Stress-Strain History and Shear Characteristics, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.106, No.GT10, pp.1101-1120.

ÖZÜDOĞRU, K.G., (1979), Önceden Yüklenmiş Killerin Dinamik Davranışı, *Doktora Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi*, 130 s.

ÖZÜDOĞRU, K.G., (1979), Depremlerle İlgili Zemin Parametrelerinin Elde Edilmesinde Kullanılan Laboratuvar Deneyleri, *Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni*, Yıl 6, Sayı 25.

PRAKASH, S. and SANDOVAL, J.A., (1992), Liquefaction of Low Plasticity Silts, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11, pp.373-379.

SANGREY, D.A., HENKEL, J.D. and ESRIG, M.I., (1969), The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.6, pp.241-452.

SEED, H.B. and CHAN, C.K., (1966), Clay Strength Under Earthquake Loading Conditions, *ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.92, No.SM2, pp.53-78.

SEED, H.B. and PEACOCK, W.H., (1971), Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristic, *ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.97, No.8, pp.1099-1199.

THIERS, G.R. and SEED, H.B., (1968), Strength and Stress-Strain Characteristics of Clays Subjected to Seismic Loading Conditions, *American Society of Testing and Materials, Special Technical Materials* 450.

TOĞROL, E., ÖZÜDOĞRU, K.G. ve GÜLER, E., (1977), Tekrarlı Yüklerin Zemin Mukavemetine Etkisi, *İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Teknik Rapor*, No.29, 61 s.

TRONCOSO, J.H., (1985), Critical State of Tailing Silty Sands for Earthquake Soil Dynamics and Earthquake Engineering, *Vol.5, No.3*, pp.248-252.

WILSON, N.E. and GREENWOOD, J.R., (1974), Pore Pressures and Strains After Repeated Loading of Saturated Clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 11, pp.269-277.

YILDIRIM, H., (1987), Farklı Tekrarlı Yükleme Biçimleri Altında Killerin Dinamik Davranışları, *Doktora Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi*, 143 s.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında İstanbul Üsküdar'da doğdu. İlk öğrenimini Üsküdar Bağlarbaşı İlkokulu, orta ve lise öğrenimini ise Haydarpaşa Lisesi'nde 1988 yılında tamamladı. Aynı yıl İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazandı. 1992 yılında mezun oldu ve aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Geoteknik Programına kaydoldu.

