

NORMAL KONSOLİDE KİLLERİN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDE DRENAJSIZ KAYMA MUKAVEMETİ

Hayreddin ERŞAN

Dr.

DSİ Genel Müdürlüğü

Ankara, Türkiye

Hüseyin YILDIRIM

Doç.Dr.

İTÜ İnşaat Fakültesi

İstanbul, Türkiye

ÖZET

Kohezyonlu zeminlerde kısa süreli drenajsız tekrarlı yükleme, efektif gerilmede azalmaya neden olur. Bu durum zeminin drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliğinde bozulma meydana getirir. Tekrarlı yüklemeler arasında drenajın oluştuğu okyanus dalgaları gibi uzun süreli durumlarda ise zeminin mukavemetinde daha sonraki tekrarlı yüklere karşı iyileşme olur.

Bu çalışmada normal konsolide killerin gerilme-deformasyon ve tekrarlı yükleme sonrası mukavemeti değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak konsolidasyonlu, drenajsız tekrarlı ve statik yüklemeli deneyler yapılmıştır. Çamur konsolidasyon aletinde hazırlanan numuneler, beş kez tekrarlı yükleme ve her bir tekrarlı yüklemeden sonra 60 dakika drenaja maruz bırakılmıştır. Tekrarlı yüklemeli deneyler, farklı gerilme genliği ve çevrim sayılarında yapılmıştır. Numuneler beşinci drenajdan sonra drenajsız olarak statik koşullarda kesilmiştir. Çalışma sonunda, tekrarlı yük ve drenaja maruz kalan yumuşak killerin daha sonra etkiyecek drenajsız tekrarlı yüke daha fazla direnç gösterdiği görülmüştür. Tekrarlı yükleme sonrası meydana gelen oturmalar, boşluk basınçları ve kayma deformasyonları her kademe tekrarlı yüklemeden sonra biraz daha azalırken drenajsız kayma mukavemetleri gerilme genliği ve çevrim sayısına bağlı olarak artmaktadır.

GİRİŞ

İstisnai durumlar dışında, yapının ağırlığı tek başına temelin taşıma gücü açısından probleme neden olmaz. Olası bir durum, temel zeminlerinin yapı ağırlığına ilave tekrarlı yüke maruz kalması halinde oluşur. Temel, bu tekrarlı yükler altında deforme olabilir ve yapı, düşey oturmalarındaki kademeli artışla birlikte yatay yer değiştirmelere maruz kalabilir. Tekrarlı yükler altındaki temelin davranışı, kısa süreli ve uzun süreli durum olarak ikiye ayrılabilir. Tekrarlı yükleme, zeminde boşluk suyu basınç artışları oluşturur. Kısa süreli durumda drenaj oluşması için yeterli zaman olmadığından zeminin drenajsız olduğu varsayılır. Uzun süreli durumda ise drenaj oluşacaktır (1). Kısa süreli durumda tekrarlı yükleme esnasında zamanla zeminin rijitliği ve drenajsız kayma mukavemeti azalır (2). Bunun nedeni tekrarlı yüklemeden oluşan boşluk suyu basınç artışlarının efektif gerilmelerde azalmaya yol açmasıdır. Rijitlik ve mukavemetin azalması sonucunda tekrarlı yer değiştirmeler ve düşey oturmalar kademeli olarak artar, taşıma gücü güvenliği kısa dönemde zamanla azalır.

Drenajın takip ettiği tekrarlı yüklemeler, zeminin rijitliğini ve daha sonraki tekrarlı yüklemelere karşı göstereceği direnci de etkiler. Kumlar, önceden tekrarlı yükleme ve drenaja maruz kaldıklarında çok sıkı bir durumda bile olsa drenajsız tekrarlı yüklemede oluşan boşluk basıncı oldukça küçüktür (3). Normal konsolide killerde de ön yüklemeden dolayı boşluk basınçları benzer şekilde küçük olur. Fakat aşırı konsolide killerde büyük miktar boşluk basınçları oluşur (1). Tekrarlı yüklere karşı killerin kumlardan daha büyük direnç gösterdiği bilinmektedir. Örneğin killer tekrarlı yükler altında kolaylıkla göçmezken suya doygun gevşek kumların sismik yükler altında sıvılaşması söz konusudur. Kil için bu durum, depremde olduğu gibi kısa süreli tekrarlı yükleme durumunda doğrudur. Bununla beraber kil uzun süre tekrarlı yük ve drenaj çevrimlerine maruz kalırsa durum farklı olur, iki drenajsız tekrarlı yükleme arasında drenaj meydana gelir. Tekrarlı yük ve sonrasında drenaj uygulanarak yapılan çalışmalarda deformasyon sertleşmesinden dolayı normal konsolide killerin daha sonraki drenajsız tekrarlı yüklere karşı göstereceği direnç artarken bu durumun aşırı konsolide killerde her zaman gerçekleşmeyeceği görülmüştür (4). Brown ve diğerleri (5) yapmış oldukları deneylerde, numuneye uygulanan tekrarlı yük ve drenaj çevrimlerinin normal konsolide killerin drenajsız kayma mukavemetinde %49'a ulaşan

artışa neden olduğu görülmüştür. Kohezyonlu zeminlerde kısa süreli drenajsız tekrarlı yükleme, zeminin dane yapısında kırılma ve efektif gerilmede de azalmaya neden olur. Bu durum zeminin drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliğinde bozulma meydana getirir. Tekrarlı yüklemeler arasında drenajın olduğu okyanus dalgaları gibi uzun süreli durumlarda normal konsolide zeminlerin mukavemetinde daha sonraki tekrarlı yüklemelere karşı iyileşme olur (6).

Geçmişte kil zeminlerde depremler, fırtına dalgalarına maruz açık deniz yapıları ve trafik yükleri altındaki yol kaplamaları ve demiryolu dolguları gibi tekrarlı yüklemelerden kaynaklanan birçok oturma ve stabilite problemleriyle karşılaşmış olmasına rağmen bu konuda az sayıda sistemli çalışma yapılmıştır (4).

AMAÇ

Zeminler, deprem, açık deniz dalgaları, yüksek binalara etkiyen rüzgar yükleri, makine temellerinde oluşan sürekli titreşimler, karayolu ve demiryolunun maruz kaldığı yükler gibi çok farklı tekrarlı yüklerle periyodik aralıklarla maruz kalabilir. Bu tür yükler altında zeminin ve bu zeminin üzerindeki yapıların davranışı, kesme kuvvetleri altında zeminin gösterdiği gerilme-deformasyon özelliklerine büyük oranda bağlıdır. İnşaat mühendisliği yapıları ve onların temellerinin güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için temel zeminine ait gerilme-deformasyon özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu da amaçla tekrarlı yüklerin farklı gerilme ve yükleme durumlarının laboratuvarında detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirir.

Bu çalışmada, periyodik aralıklarla zemine ve üzerindeki yapıya etkiyen tekrarlı yüklerin model edildiği yükleme ve gerilme durumlarını da içeren deney programı uygulanmıştır. Zeminin tekrarlı yükler altında davranışı, tekrarlı yüklemeler sonunda uygulanan drenajın daha sonraki tekrarlı yükler altındaki davranışa etkileri, uygulanan drenaj nedeniyle oluşan konsolidasyon oturmaları ve tekrarlı yükleme sonunda drenajsız kayma mukavemetindeki değişimler incelenmiştir. Bütün deneylerde tekrarlı yükleme sırasında düşey deformasyon, yatay deformasyon, yatay yük ve boşluk suyu basıncı, yükleme sonrasındaki drenaj sırasında ise oluşan konsolidasyon oturması gibi değişkenler

ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmış ve değişkenlerin birbirine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir.

LABORATUVAR ÇALIŞMASI

Çalışmada likit limiti %73, plastik limiti %25, plastisite indisi 48 ve özgül ağırlığı 26.4 kN/m³ olan yüksek plastisiteli kil kullanılmıştır. Numuneler arazideki gerilme durumunu model edebilmek için K_0 şartlarında çamur konsolidasyon aletinde konsolide edilerek hazırlanmıştır. Kuru, toz haline getirilmiş zemin likit limitin 2 katı su muhtevasında homojen bir çamur elde etmek için karıştırılmıştır. Düşey yük 25 kPa'dan başlayarak her defasında önceki düşey yükün iki katı olacak şekilde artırarak 100 kPa gerilme altında konsolide edilmiştir. Bunun nedeni zeminin heterojenlik, gerilme geçmişi, su muhtevası değişimi ve başlangıç yapı gibi faktörleri minimize etmektir. Bu yöntem, homojen ve aynı özellikte çok sayıda numune hazırlanmasına imkân vermektedir (7).

Dinamik basit kesme hücresine yerleştirilen numuneler ön konsolidasyon basıncından biraz daha yüksek efektif düşey gerilme altında kademeli bir şekilde konsolide edilmiştir. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra numunelere daha önce belirlenen çevrim sayısı ve gerilme seviyesinde drenajsız koşullarda tekrarlı yük uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeyi takiben drenaja izin verilmiş ve tekrarlı yükleme esnasında oluşan boşluk suyu basınçları sönümlenmiştir. Numunelere beş kez tekrarlı yük uygulanmış, yükleme esnasında meydana gelen boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için her yükleme arasında genellikle 60 dakika drenaj uygulanmıştır. Daha sonra drenaj vanaları kapatılarak konsolidasyon esnasında sönümlenen boşluk suyu basınçlarında herhangi bir değişim olup olmadığı gözlenmiştir. Tekrarlı yükleme esnasında efektif gerilmeye göre yüksek boşluk suyu basınçlarının oluştuğu birkaç deneyde drenaj süresi sonunda drenaj vanaları kapatıldığında boşluk suyu basıncında hala küçük miktar artış görülmüştür. Bu deneylerde boşluk suyu basınçları sönümlenmesi amacıyla drenaj süresi daha uzun tutulmuştur. Çalışmada uygulanan deneysel prosedür Şekil 1'de şematik olarak verilmiştir (8). Her tekrarlı yükleme esnasında yatay yük, yatay deformasyon, düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncı kaydedilmiştir. Deneylerde numunelere N=50, 60, 80, 90, 100 ve 120 olan çevrim sayısı ve $\tau/\tau_f=0.55, 0.60, 0.65$ ve 0.70 gibi farklı gerilme oranlarında yatay kayma

gerilmeleri uygulanmış, tekrarlı yükleme periyodu 10 sn olarak sabit tutulmuştur. Yapılan 23 deneye ait yükleme koşulları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo1. Çalışmada uygulanan deney koşulları.

Deney no	Çevrim sayısı, N	Tekrarlı gerilme oranı, τ/τ_f	Düşey efektif gerilme, σ'_v (kPa)
A1	5x50	0.55	120
A2		0.60	120
A3		0.65	120
A4		0.70	120
A5	5x60	0.55	120
A6		0.60	120
A7		0.65	120
A8		0.70	120
A9	5x80	0.55	120
A10		0.60	120
A11		0.65	120
A12		0.70	120
A13	5x90	0.55	120
A14		0.60	120
A15		0.65	120
A16		0.70	120
A17	5x100	0.55	120
A18		0.60	120
A19		0.65	120
A20		0.70	120
A21	5x120	0.55	120
A22		0.60	120
A23		0.65	120

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Aşağıda suya doymun bir kilin çok kez tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimine maruz kalması durumunda, boşluk basıncı, kayma deformasyonu, konsolidasyon oturmaları ve tekrarlı yükleme sonundaki drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme genliğiyle değişimi incelenmiştir.

Boşluk suyu basıncı davranışı: Şekil 2’de farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarında boşluk basınçlarının değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi artan çevrim sayısı ile boşluk suyu basınçlarında da artışlar meydana gelmiştir. Şekil 3 ise yine farklı çevrim sayısı ve farklı tekrarlı kayma gerilme seviyelerinde yapılan deneylerden elde edilmiş olup gerilme seviyesine bağlı olarak boşluk suyu basıncının değişimini göstermektedir. Çevrim sayısının etkisi gerilme oranında da görülmekte olup artan gerilme seviyesiyle boşluk suyu

basınçlarında da artışlar meydana gelmektedir. Boşluk suyu basınçları numune alt başlığı üzerinde bulunan bir boşluk suyu basınç ölçerle ölçülmüştür.

Kayma deformasyonu davranışı: Kayma deformasyonu ile boşluk suyu basıncında görülen davranış benzerlik göstermektedir. İlk kademe tekrarlı yükleme esnasında en büyük kayma deformasyonu görülmektedir. Tekrarlı yüklemeden sonra uygulanan drenaj nedeniyle boşluk basınçlarının sönümlenmesi ve oluşan konsolidasyon oturmaları zeminin daha sonraki tekrarlı yüklere karşı daha dirençli olmasına ve meydana gelen kayma deformasyonlarının her kademede biraz daha azalmasına yol açmakta, kayma modülünde artışlar meydana gelmektedir. Farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarında yapılan deneylerden elde edilen deformasyonların çevrim sayısı ve gerilme oranıyla değişimi Şekil 4’de verilmiştir. Zeminlerin maruz kaldığı tekrarlı yükün genliği ve çevrim sayısı diğer davranışlarda olduğu gibi kayma deformasyonlarında da etkisini göstermektedir. Her iki değişkenin etkisi, kayma deformasyonlarında artış şeklinde olmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi gerilme genliğinin ve çevrim sayısının artmasıyla kayma deformasyonlarında önemli artışlar meydana gelmektedir. Tekrarlı gerilme oranına göre kayma deformasyonlarının değişimi Şekil 5’te verilmiştir. Şekil üzerinde çevrim sayılarının etkisi de gösterilmiştir. Şekilden, gerilme oranı arttıkça kayma deformasyonlarının da arttığı görülmektedir.

Konsolidasyon oturmaları: Tekrarlı yüklerin uygulandığı kısa süre içinde, killerin düşük permeabilitesi nedeniyle drenajsız koşullar hakim olmaktadır. Tekrarlı yüklemelerden sonraki uzun dönemde ise, zamanla artık boşluk suyu basıncı sönümlenir ve kil zeminin boşluk oranı azalır, zeminde dikkate değer oturmalar meydana gelir. Tekrarlı yüklerin uygulanması ile oluşan boşluk suyu basınçları nedeniyle efektif gerilmelerde azalma meydana gelmektedir. Drenajlar açılarak efektif gerilmelerin artarak başlangıç değerine ulaşması esnasında zeminde oturmalar oluşmaktadır. Farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarındaki ilk kademe tekrarlı yüklemeler sonunda meydana gelen oturmaların değişimi Şekil 6’da verilmiştir. Görüldüğü gibi hacimsel deformasyonların büyüklüğüne etki eden iki önemli değişken çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranı olmaktadır. Çevrim sayısının artmasıyla oturmalar da önemli artışlar meydana gelmektedir. Görüldüğü gibi deney özelliklerindeki her değişiklik tekrarlı yükten kaynaklanan oturmalar da önemli değişikliklere neden olmaktadır. Şekil 7’de ise tekrarlı kayma gerilmelerinden dolayı

zeminde oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesiyle oluşan konsolidasyon oturmalarının gerilme genliğine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi deneylerde kullanılan gerilme oranlarının altındaki gerilme oranlarında oturmalar çok düşük olmaktadır. Gerilme oranının artmasıyla birlikte oturmalarda da önemli artışlar meydana gelmektedir. Numuneye uygulanan çevrim sayılarının artmasıyla ise oturma değişim eğrisinin eğimi sürekli artmaktadır. Bu iki şekilde deneylerin ilk kademe tekrarlı yüklemekten sonra oluşan oturma değerleri kullanılarak elde edilmiştir.

Drenajsız kayma mukavemeti davranışı: Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış kil numuneler üzerinde yapılan drenajsız statik deneylerden elde edilen bir grup gerilme-deformasyon eğrisi Şekil 8’de verilmiştir. En yüksek drenajsız kayma mukavemeti artışı, A20 deneyinde %46.4, en düşük drenajsız kayma mukavemeti artışı ise A1 deneyinde %12.1 olarak elde edilmiştir. Şekil 9’da drenajsız kayma mukavemetlerinin çevrim sayısına bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tekrarlı yükleme sonrasında drenaj uygulanmış deneylerde çevrim sayısının artmasıyla numunelerde oluşan boşluk suyu basınçlarının ve dolayısıyla toplam oturmalarında artması drenajsız kayma mukavemetlerinde de önemli artışlar meydana getirmiştir. 5x50 çevrim uygulanan numunelerin drenajsız kayma mukavemetindeki maksimum artış %23.4 iken çevrim sayısının 5x90 olduğu numunelerdeki maksimum artış %40.2 ve 5x120 çevrim sayısındaki artış %43.7 olmuştur. Drenajsız kayma mukavemetindeki en büyük artış çevrim sayısının N=100 ve tekrarlı gerilme oranının $\tau/\tau_f=0.70$ olduğu numunede %46.4 olarak görülmüştür. Şekil 10’da tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişimin tekrarlı gerilme oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi çevrim sayısının artmasıyla ortaya çıkan etki gerilme oranlarının artmasıyla da görülmüştür.

SONUÇ

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Normal konsolide killerde drenajla birlikte uygulanan tekrarlı yükler altında giderek daha az boşluk suyu basınçları oluşmakta ve oluşan boşluk suyu basınçları sönümlenirken meydana gelen oturmalarda her kademedede biraz daha azalmaktadır.
2. Tekrarlı gerilme genliğinin artmasıyla daha fazla boşluk basınçları oluşmakta ve bu basınçlar sönümlenirken oturmalarında daha fazla olduğu görülmektedir.

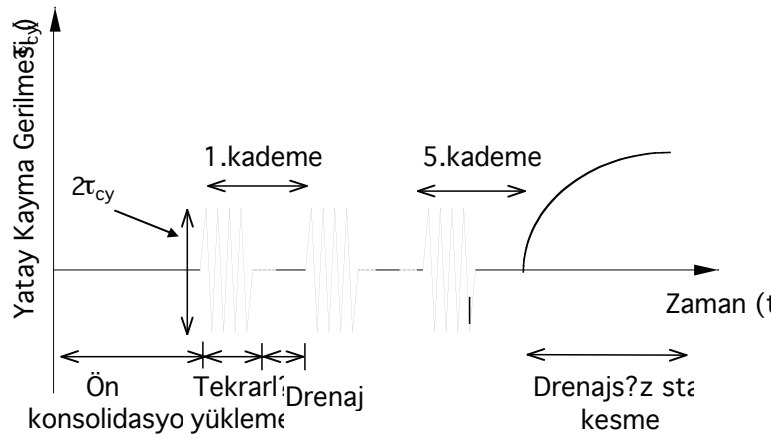
3. Çevrim sayısı da zeminin davranışını etkileyen önemli değişkenlerdendir. Tekrarlı gerilme genliğinde olduğu gibi çevrim sayısının artmasıyla meydana gelen boşluk basınçlarında ve tekrarlı yük sonrası drenaj süreçlerinde konsolidasyon oturumlarında artış meydana gelmektedir.
4. Tekrarlı yükler altında zeminde meydana gelen oturmalar, zeminin daha sonra maruz kalacağı yüklere karşı konsolidasyon davranışını değiştirmekte, sıkışma indisi tekrarlı gerilme genliğine bağlı olarak azalmaktadır.
5. Killerde tekrarlı kayma gerilmeleri etkisinde oluşan kayma deformasyonları aynı boşluk basınçlarında olduğu gibi her kademede bir önceki yüklemede oluşan kayma deformasyonlarına göre azalma meydana gelmekte, gerilme-deformasyon eğrisinin eğimi artmaktadır. Tekrarlı gerilme genliği ve çevrim sayısı kayma deformasyonlarının büyüklüğünü belirleyen önemli değişkenlerdir.
6. Tekrarlı yatay kayma gerilmelerinden sonra uygulanan drenaj esnasında zemindeki oturmalar, normal konsolide zeminin drenajsız kayma mukavemetinde çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak %12.1-%46.4 arasında değişen oranlarda artışa neden olmuştur.

KAYNAKLAR

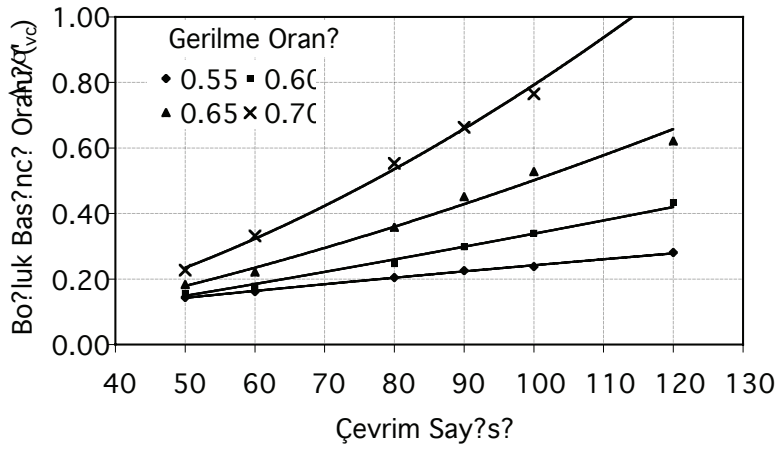
1. Andersen, K.H., "Behaviour of Clay Subjected to Undrained Cyclic Loading", Proc. Conf. On Behaviour of Off-Shore Structures, Trondheim, August 1976, Vol.1, pp 392-403.
2. Seed, H.B., "Landslides During Earthquakes due to Liquefaction", Proc. American Society of Civil Engineers, Vol. 94, No.SM5, 1968, pp 1053-1122.
3. Bjerrum, L., "Geotechnical Problems Involved in Foundations of Structures in North Sea", Geotechnique, Vol. 23, No.3, 1973, pp 319-358.
4. Yasuhara, K., Hirao, K.ve Hyde, A.F.L., "Effects of Cyclic Loading on Undrained Strength and Compressibility of Clay", Soils and Foundations, Vol.32, No1, 1992, pp 100-116.
5. Brown, S.F., Andersen, K.H. ve McElvaney, J., "The Effects of Drainage on Cyclic Loading of Clay", Proc. 9th Int. Con. on Soil Mechanics and Foundation Eng., Tokyo 1977, Vol. 2, pp 195-200.
6. Yasuhara, K., "Postcyclic Undrained Strength for Cohesive Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.120, No.11, 1994, pp 1961-1979.

7. Özeydin, K. ve Erguvanlı, A., “The Generation of Pore Pressures in Clayey Soils During Earthquakes”, Proc.of the 7th World Conf. on Earth Eng.,Vol 3, İstanbul 1980, pp 326-330.

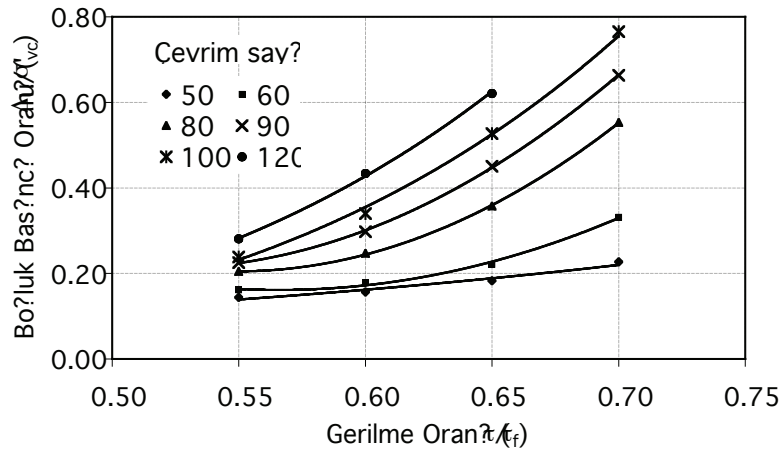
8. Yasuhara, K. and Andersen, K.H., “Post-cyclic Recompression Settlement of Clay”, Proc. 4th Int. Conf. Soil Dynamics and Earthquake Eng.,Vol.1, October 1989, pp 159-167.



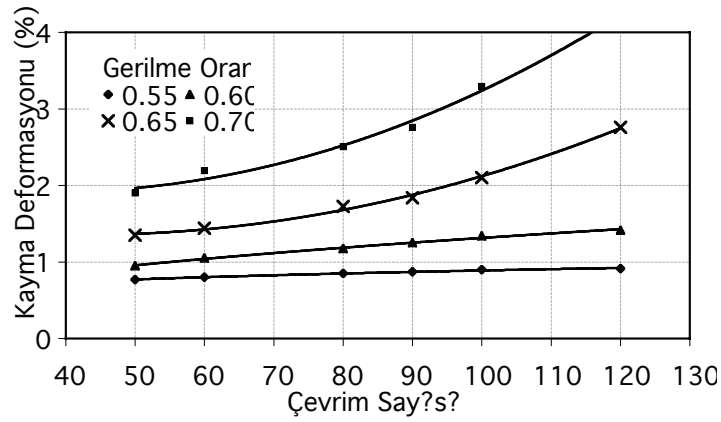
Şekil 1. Deney numunelerine uygulanan yükleme modeli.



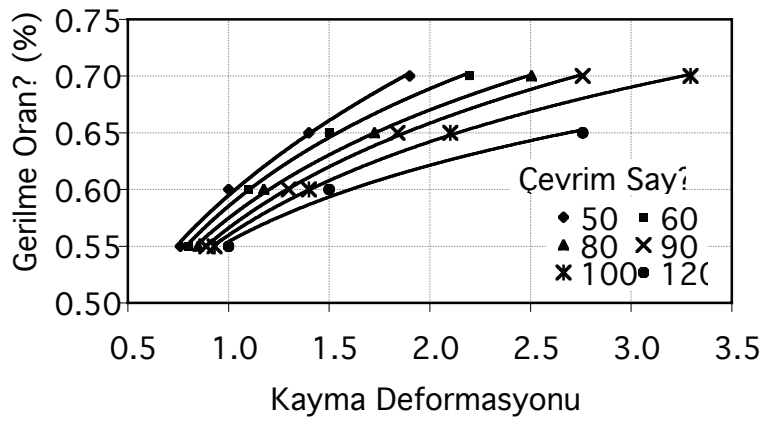
Şekil 2. Çevrim sayısının boşluk suyu basınçlarına etkisi.



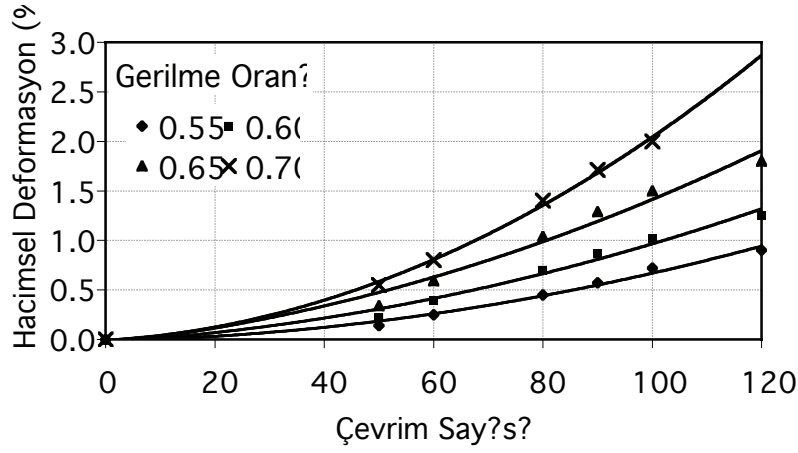
Şekil 3. Gerilme oranının boşluk suyu basınçlarına etkisi.



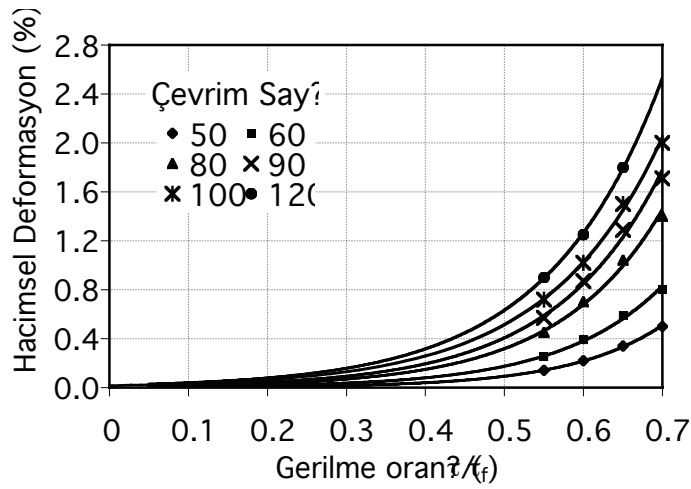
Şekil 4. Kayma deformasyonlarının çevrim sayısı ve gerilme genliğiyle değişimi.



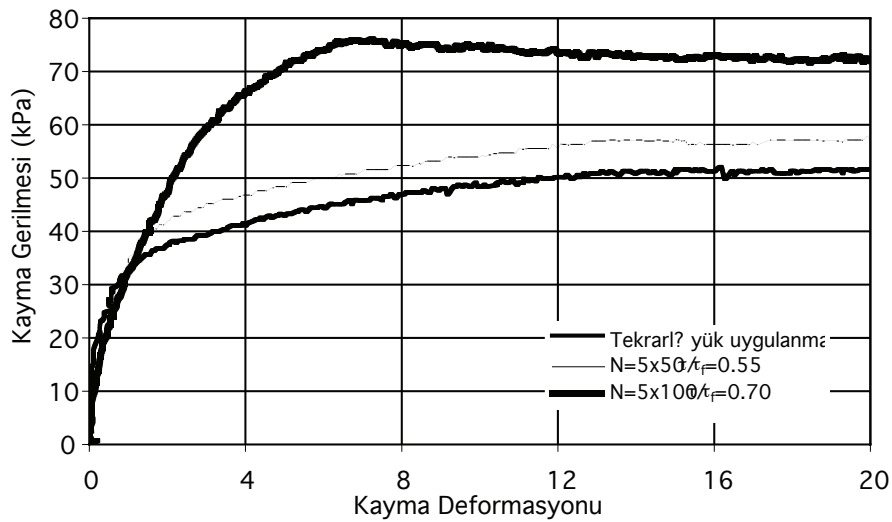
Şekil 5. Gerilme oranının kayma deformasyonlarına etkisi.



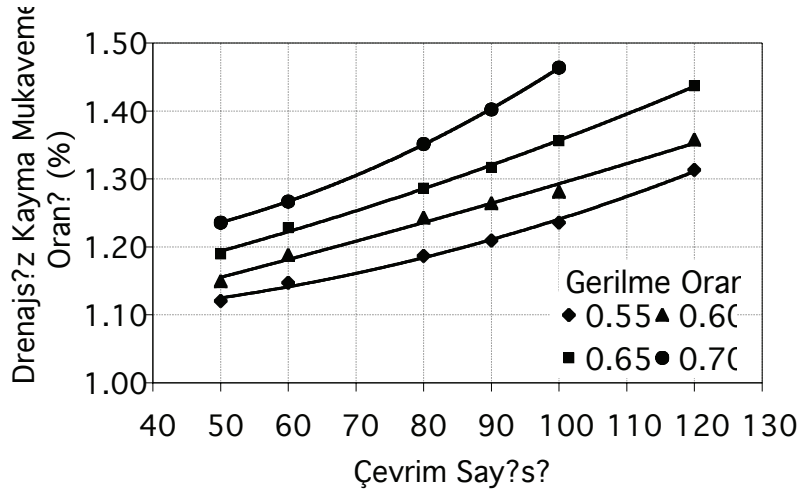
Şekil 6. Hacimsel deformasyonların çevrim sayısı ile değişimi.



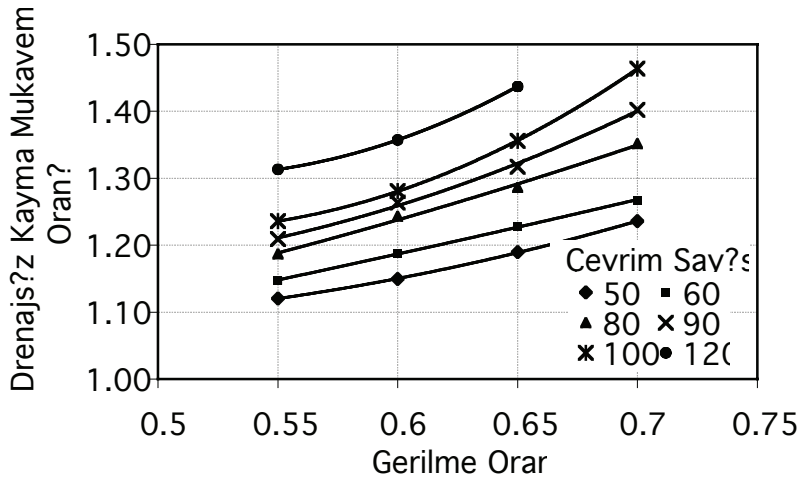
Şekil 7. Hacimsel deformasyonların gerilme oranı ile değişimi.



Şekil 8. Tekrarlı yük uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde gerilme deformasyon eğrileri.



Şekil 9. Drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısı ile değişimi.



Şekil 10. Drenajsız kayma mukavemetinin gerilme oranı ile değişimi.