

Tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonu

Hayreddin ERŞAN*, Hüseyin YILDIRIM

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Çalışmada, normal konsolide killerin drenajsız tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncı, kayma deformasyonu, konsolidasyon oturmaları, kayma mukavemetleri ile bu davranışları etkileyen faktörler dinamik basit kesme deney sistemi kullanarak deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmıştır. Deneyler numunelere farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarında beş kez sabit genlikli sinüzoidal drenajsız tekrarlı yükleme ve her tekrarlı yük sonrası drenaj uygulayarak yapılmıştır. Beşinci kademe drenajdan sonra numuneler statik olarak kesilmiştir. Çalışma sonunda tekrarlı yükleme ve drenaj uygulanmış killerin daha sonraki tekrarlı yüklere karşı direncinin arttığı, oturma, boşluk suyu basıncı ve kayma deformasyonu her bir tekrarlı yüklemeden sonra azaldığı görülmüştür. Bununla beraber tekrarlı yükleme ve drenaja maruz kalan killerin kayma mukavemeti artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kohezyonlu zemin, tekrarlı yükleme, boşluk suyu basıncı, konsolidasyon, kayma mukavemeti.

Consolidation of soils under cyclic loading effect

Abstract

Cyclic loading may have a relatively short duration for dissipating of pore pressure. The conditions will be undrained during cyclic loading and excess pore pressures will be generated. The generated pore pressures will dissipate after applying cyclic stresses, and the effective stresses will increase to a value of start of cyclic loading again. The volume reduction will occur resulting additional settlements. In this study, pore water pressure, shear strain, consolidation settlements and post-cyclic undrained strength of clays and affecting factors were investigated. For this purpose, a group of samples prepared in the laboratory were tested using cyclic simple shear testing device. The samples were subjected to 5 series of cyclic loading. Drainage were applied between five cyclic loading stages. At the end of fifth drainage stage, the samples were subjected to undrained static loading. Cyclic tests were performed with stress controlled two way sinusoidal wave loading with different stress levels and number of cycles. Frequency of cyclic loading was constant as 0.1 Hz. As a result of study, it can be concluded that soft clays subjected to undrained cyclic loading and drainage cycles are more resistant to undrained cyclic loadings that can be applied afterwards. The consolidation settlements, pore pressures and shear strains decreases after each stage of cyclic loading. However undrained shear strength increases with increasing pore water pressure induced by cyclic loading.

Keywords: Cohesive soil, cyclic loading, pore water pressure, consolidation, shear strength.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hayreddin ERŞAN. hayrettin@dsi.gov.tr; Tel: (312) 417 83 00 dahili: 2687.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Tekrarlı yüklemeler etkisi altında zeminlerin konsolidasyonu" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.12.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 20.02.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Statik yüklerden dolayı meydana gelen oturmalara ek olarak tekrarlı yükler de oturmalara neden olabilir. Tekrarlı yüklerden kaynaklanan ilave oturmaların karşılaştığı durumlar; deprem yüklerine maruz kalan bina ve diğer yapılar, dalga yüklerinin etkili olduğu açık deniz platformları, makine titreşimi altındaki temeller, trafik yüklerine maruz yol dolgularıdır (Andersen ve Hoeg, 1992; Hyodo vd., 1987; Yasuhara, 1995).

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

Kohezyonlu zeminlerde tekrarlı yüklerden kaynaklanan konsolidasyon davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Çalışmalarda çoğunlukla gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü olarak çalışan dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney sistemi olmak üzere farklı deney sistemleri, farklı aşırı konsolidasyon oranı, plastisite özelliği, numune hazırlama tekniğine sahip numuneler üzerinde tek yönlü veya çift yönlü tekrarlı yükler altında değişik yükleme modelleri kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Efektif gerilmeler açısından kilin tekrarlı yükler altındaki davranışı ile ilgili Sangrey ve diğerleri (1969) tarafından yapılan çalışma bu konuda yol gösterici olmuştur. Andersen ve diğerleri (1976, 1980), tekrarlı yükler altında Drammen kilinin davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Yasuhara ve diğerleri (1982) anizotrop olarak konsolide edilmiş yüksek plastisiteli Ariake kilinin tekrarlı yükler altındaki davranışını ince-

lemiştir. Bu çalışmalar, kilin tekrarlı yükler altındaki davranışının belirlenmesi için zamana bağlı boşluk basıncı modeli kurulması gerektiğini ortaya koymuştur. Yasuhara ve Andersen (1989, 1991) normal konsolide killerin tekrarlı yükler altında konsolidasyon özelliklerini belirlemek amacıyla gerilme kontrollü basit kesme deney sistemi kullanarak beş kademe drenajsız tekrarlı yük ve her tekrarlı yükleme sonunda drenaj uygulayarak bir grup deney yapmış, bu yükleme şartları altında normal konsolide zeminin daha sonra etkiyen yüklere karşı daha yüksek direnç gösterdiği görülmüştür. Ayrıca Andersen (1976, 1988), Andersen ve diğerleri (1978), Yasuhara ve diğerleri (1991, 1992), Fujiwara ve diğerleri (1985, 1987), Hyodo ve diğerleri (1988), Ansal ve Tuncan (1989), Ansal ve diğerleri (2001), Matsui ve diğerleri (1980) ve O' Reilly ve diğerleri gibi birçok araştırmacı killerin tekrarlı yükler altında oturma davranışını detaylı bir şekilde incelemiştir. Çalışmalarda numuneler genellikle drenajsız koşullarda deneye tabi tutulmakla beraber bazı çalışmalarda tekrarlı yükleme esnasında drenaja izin verilmiştir. Tekrarlı yüklemeler, belli çevrim, gerilme genliklerinde ve tekrarlı yüklemeler arasında drenaja izin verilerek 1-10 kez uygulanmış, drenajın daha sonraki tekrarlı yükleme esnasında oluşacak boşluk suyu basıncı ve oturmalara etkisi incelenmiştir. Bazı çalışmalarda son tekrarlı yüklemeyi takiben ya drenaja izin verilmeden hemen, ya da drenaja izin verilerek konsolidasyon oturmalarının oluşmasından sonra drenajsız koşullarda statik olarak kesilmiştir. Burada amaç tekrarlı yükleme ve drenaj çevrimlerinin zeminin drenajsız kayma mukavemetine etkisini incelemektir.

Laboratuvar çalışması

Çalışmada kullanılan tekrarlı basit kesme deney sistemi, 0.0001-5 Hz arasında frekansa sahip tekrarlı yük uygulayabilen gerilme kontrollü bir sistemdir. Sabit hacimli deney yapılabilmesi için numune, öngerilmeli membran veya numune çapına eşit delikleri olan sürtünmesiz metal halkaların içine yerleştirilmektedir. Düşey basınç, yatay yönde hareketi önlenmiş alt başlık vasıtasıyla uygulanır (Yıldırım, 1987). Numune, çevre ve ters basınç uygulanabilen bir hücre içi-

ne yerleştirilmektedir. Uygulanan bu basınçlar, deney esnasında daha güvenilir boşluk basınçları ölçümü için numunenin suya doygunluğunu sağlamaktadır (Ansal ve Erken, 1989).

Deneylerde kullanılan zemin, dane birim hacim ağırlığı 26.4 kN/m^3 , likit limiti $\omega_L = \%73$, plastik limiti $\omega_P = \%25$ ve plastisite indisi $I_P = 48$ olan yüksek plastisiteli (CH) yeşil kildir.

Zeytinburnu bölgesinden alınmış plastik kil üzerinde deneyler yapılmıştır. Bütün numuneler iri daneli ve organik maddelerden arındırmak için 200 nolu elekten elenmiştir. Homojen ve tekrar hazırlanabilme özelliğine sahip çamur konsolidasyon tekniği kullanılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu tür bir numune hazırlama metodu kullanarak kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerinin zeminin endeks özelliklerinden bağımsız olarak incelenmesi mümkün olmaktadır (Özaydın ve Erguvanlı, 1980).

Numunelere arazide zemin elemanının çökmesini model eden K_0 koşulları uygulanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında, laboratuvarında hazne çapı $\phi = 20 \text{ cm}$ ve yüksekliği $H = 80 \text{ cm}$ olan sert plastikten yapılmış çamur konsolidasyon aleti kullanılmıştır. Çamurun hazırlanmasında, $104 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de etüvde kurutulup toz haline getirilmiş temiz kil ve damıtılmış su kullanılmıştır. Zemin, likit limitinin iki katı bir başka deyişle $\%150$ su muhtevasında hazırlanan süspansiyon, mikserle homojen bir özelliğe sahip oluncaya kadar karıştırılmıştır. Karışım çamur konsolidasyon aletine dökülerek gerekli bağlantılar yapılmış ve konsolidasyon basınçlarının uygulanması için hazır hale gelmiştir. Düşey efektif gerilme 25 kPa 'dan başlayarak 50 ve 100 kPa olarak uygulanmış ve her yük kademesinde numune iki hafta süre ile konsolide edilmiştir. Elde edilen numuneler nem odasında desikatörler içinde saklanmıştır. Bu numune hazırlama tekniği, homojen ve aynı özellikte çok sayıda numune hazırlanmasına imkan vermektedir.

Tekrarlı yükleme altında konsolidasyon ve kayma mukavemeti özelliklerinin incelendiği deney numuneleri 7 cm çapında ve 3 cm yüksekliğindedir. Sabit hacimli deney yapmak için statik ve tekrarlı yükleme esnasında numuneler

teflon K_0 ringleri içine yerleştirilmiştir. Bu ringler, kesme esnasında numunelerin yüksekliğini sabit tutarken radyal deformasyonları önler. Bu tür sabit hacimli deney yöntemi drenajsız koşulları model etmektedir.

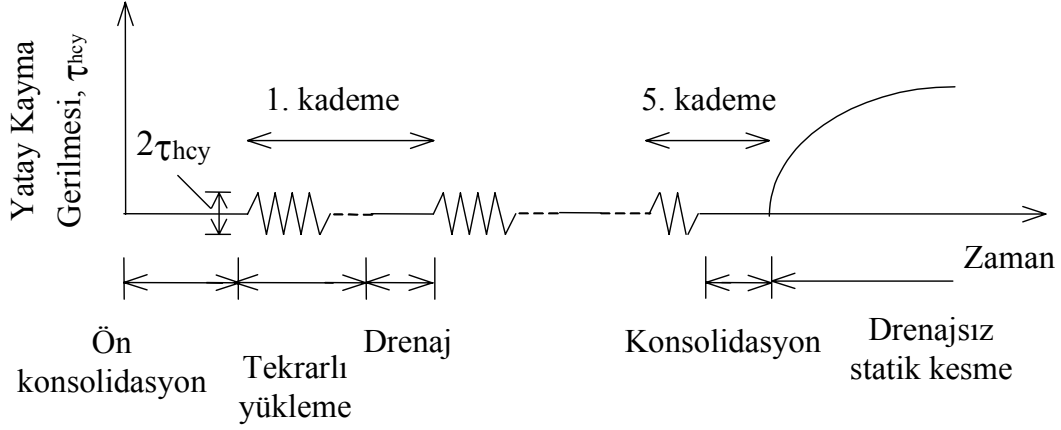
Çalışmada Şekil 1'de gösterilen yükleme modeli kullanılmıştır. Farklı gerilme oranı ve çevrim sayılarında deneyler yapılmıştır. Deneylerde numunelere beş kez tekrarlı yük ve her tekrarlı yük sonrasında drenaj uygulanmıştır. Beşinci drenaj uygulamasından hemen sonra numuneler drenajsız koşullarda statik olarak kesilmiştir. Tekrarlı yükleme, numunenin üst başlığına uygulanan 10 sn periyotlu sabit genlikli sinüzoidal tekrarlı kayma gerilmesidir (Şekil 2). Bütün deneylerde tekrarlı yük frekansı sabit olup 0.1 Hz 'dir. Her bir tekrarlı ve statik basit kesme deneyinde yatay yük, yatay deformasyon, düşey deformasyon ve boşluk suyu basıncı gibi dört değişken gözlenmiş ve kaydedilmiştir.

Deney sonuçları

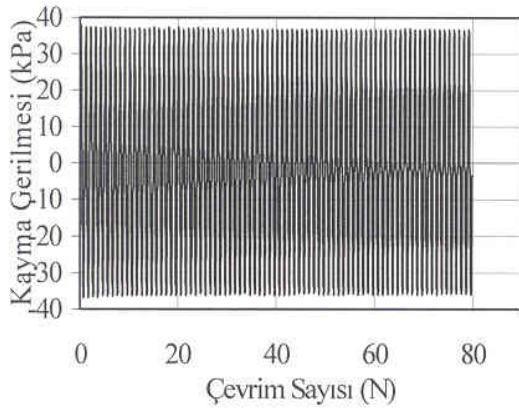
Çalışmada tekrarlı yükleme frekansı sabit tutularak farklı gerilme genlikleri ve çevrim sayılarında deneyler yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak tekrarlı yükleme esnasında zemin numunesinde meydana gelen gerilme-deformasyon, çevrim sayısı-boşluk suyu basıncı, tek bir numune üzerinde 5 kez tekrarlı yükleme ve her tekrarlı yük sonrasında uygulanan drenajdan kaynaklanan konsolidasyon oturmaları için hacimsel deformasyon-efektif düşey gerilme ($\Delta H/H - \log \sigma'_{vc}$) ile drenajsız kayma mukavemetlerindeki değişimler incelenmiştir.

Boşluk suyu basıncı davranışı

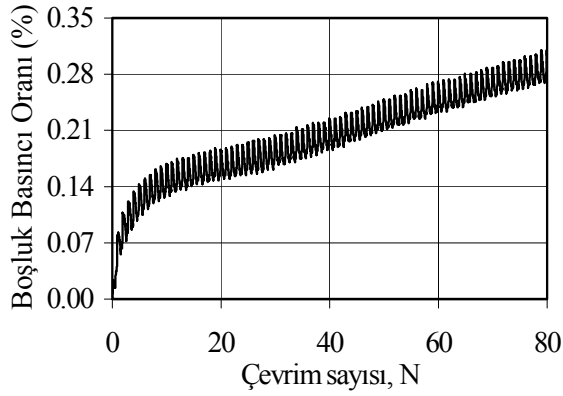
Deneyler tek bir numune üzerinde beş kez drenajsız tekrarlı yükleme uygulanarak yapılmıştır. Her tekrarlı yüklemeden sonra oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenebilmesi için 1 saat süreyle drenaj uygulanmıştır. Şekil 3'te boşluk suyu basınçlarının tek bir kademede, Şekil 4'de ise beş kademe tekrarlı yüklemede oluşumu görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ilk yüklemede boşluk suyu basınçları 0.434 olarak yüksek bir değere ulaşmakta daha sonraki her kademede sürekli olarak azalmaktadır. Son kademelerde boşluk suyu basınç artışı birbirine yakın olmaktadır.



Şekil .1 Çalışmada deney numunelerine uygulanan yüklem modeli



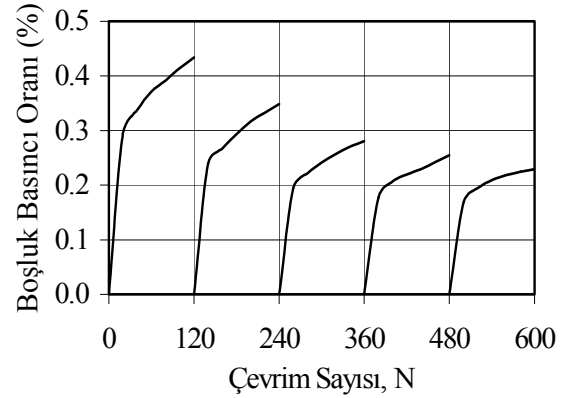
Şekil 2. Numunelere uygulanan kayma gerilmeleri



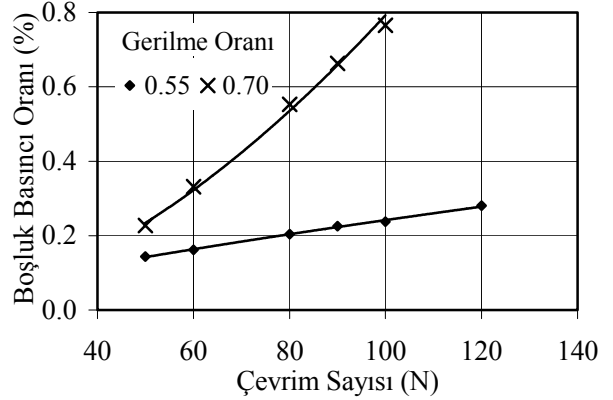
Şekil 3. Tekrarlı yüklemelerde boşluk suyu basıncının oluşumu

Çevrim sayısı boşluk suyu basınçlarına etki eden önemli faktörlerden biridir. İki farklı tekrarlı gerilme genliğinde yapılan deneylerden elde edilen boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı değişimleri aşağıda Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi çevrim sayılarının artmasıyla

boşluk suyu basınçları da artmaktadır. Bu artış, gerilme oranının 0.55 olduğu deneyde çevrim sayısı ile daha yavaş gelişirken gerilme oranının 0.70 olduğu deneyde daha hızlı bir şekilde oluşmaktadır.



Şekil 4. Çevrim sayısı $N=120$ ve gerilme genliği $\tau/\tau_f=0.60$ olan deneyde boşluk suyu basınçları

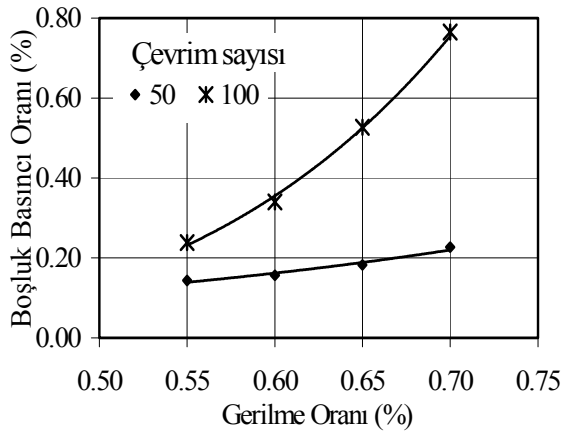


Şekil 5. İlk kademe boşluk suyu basınçlarının çevrim sayısı ile değişimi

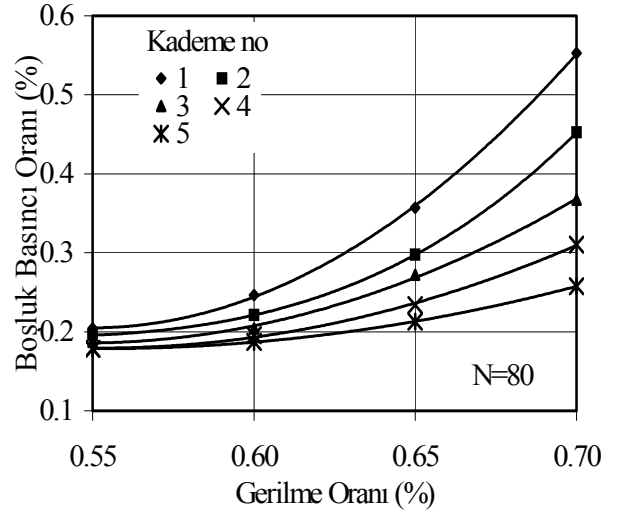
Tekrarlı yükler altında zeminlerin davranışını etkileyen bir diğer önemli parametre numuneye uygulanan tekrarlı kayma gerilmelerinin seviyesidir. Uygulanan farklı gerilmeler altında oluşan boşluk suyu basınç davranışında da önemli farklılıklar görülmüştür. Şekil 6’da dört farklı gerilme genliğinde yapılan deney sonuçları verilmiştir. Çevrim sayısının etkisi de şekilde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi gerilme genliğinin artmasıyla boşluk suyu basınçlarında da artışlar meydana gelmektedir. Çevrim sayısı N=100 olan deneylerde gerilme genliği 0.55’te boşluk basıncı oranı 0.238, gerilme genliği 0.70’te ise 0.765’e kadar yükselmektedir. Çevrim sayısının N=50 olduğu deneylerde ise artış daha yavaş olmaktadır. Beş kez tekrarlı yükleme drenaj çevrimi uygulanan numunelerde boşluk suyu basınçlarının değişimi çevrim sayısı N=80 için gerilme genliğine bağlı olarak Şekil 7’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ilk kademe tekrarlı yüklemelerde boşluk suyu basınçları gerilme genliğine bağlı olarak hızlı bir şekilde artarken son kademelerde artış daha yavaş olmaktadır.

Kayma deformasyonları

Drenajsız tekrarlı yükler altında normal konsolide killerde gözlenen kayma deformasyonu davranışı boşluk suyu basıncında görülen davranışla benzerlikler göstermektedir. İlk kademe drenajsız tekrarlı yükleme esnasında en büyük kayma deformasyonu görülmektedir. Oluşan kayma deformasyonları ise deney başından itibaren gittikçe artan, deneyin sonlarına doğru artışı yavaşlayan yine simetrik bir davranıştır (Şekil 8).

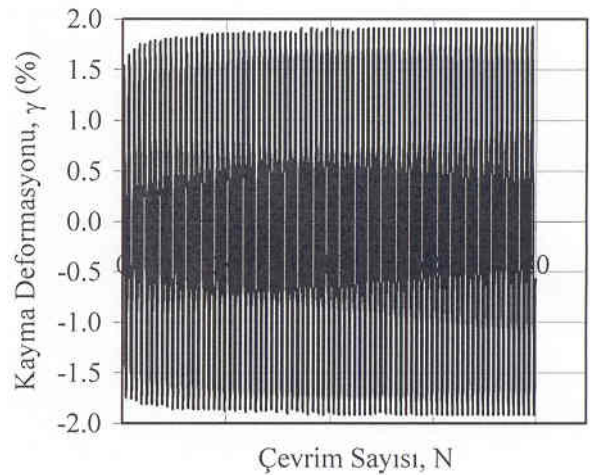


Şekil 6. İlk kademe boşluk suyu basınçlarının gerilme genliğiyle değişimi



Şekil 7. Boşluk suyu basınçlarının beş kademe boyunca gerilme genliğiyle değişimi

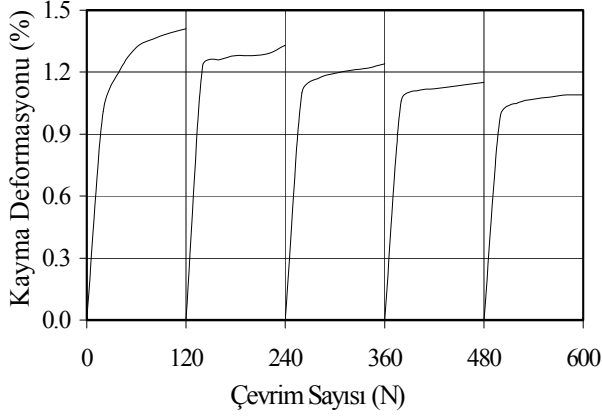
Tekrarlı yüklemelerden sonra uygulanan drenaj, boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ve oluşan konsolidasyon oturmalarından dolayı zemin daha sonraki drenajsız tekrarlı yüklerle karşı daha yüksek direnç göstermekte ve meydana gelen kayma deformasyonları her kademede biraz daha azalmakta, son kademelerde birbirine yakın olmaktadır. İlk kademede artış kademeli bir şekilde olurken daha sonraki kademelerde ani yükseliş olup sonra yavaşlamaktadır (Şekil 9).



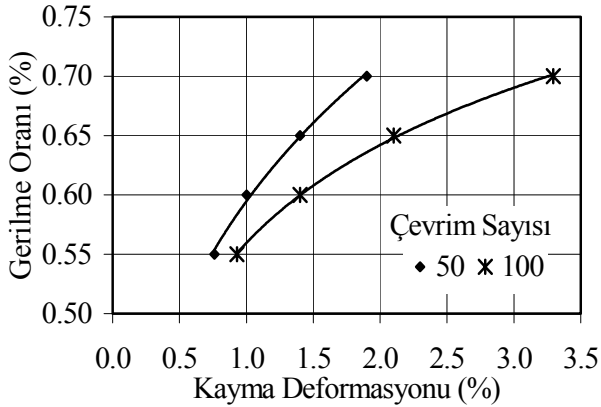
Şekil 8. Tekrarlı yüklemelerde kayma deformasyonlarının oluşumu

Çevrim sayısı ve tekrarlı gerilme oranı boşluk suyu basıncında olduğu gibi kayma deformasyonu davranışında önemli değişkendir. Şekil

10'da deformasyonların gerilme oranı ve çevrim sayısı ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi her iki değişimdeki artış kayma deformasyonlarında da artışa neden olmaktadır. Yüksek çevrim sayısı ve gerilme oranlarındaki artış oranları da yüksek olmaktadır.



Şekil 9. $N=120$, $\tau/\tau_f=0.60$ olan deneyde kayma deformasyonlarının değişimi

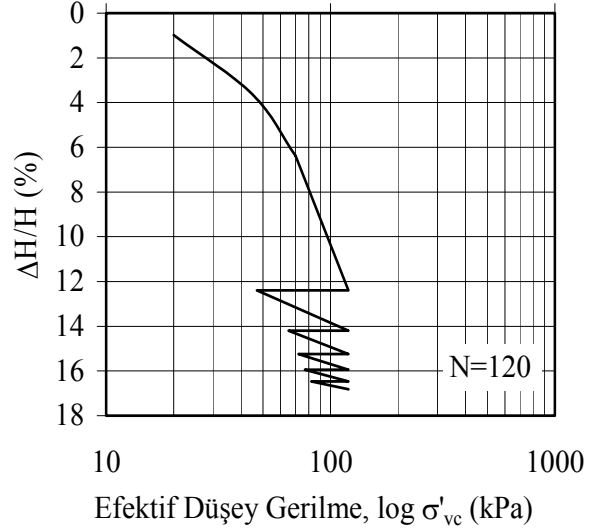


Şekil 10. Kayma deformasyonlarının gerilme oranı ve çevrim sayısı ile değişimi

Konsolidasyon oturmaları

Suya doymun killerin tekrarlı yüklere maruz kaldığında artık boşluk suyu basıncı oluştuğu daha önce açıklanmıştır. Tekrarlı yüklerin uygulandığı kısa süre içinde, killerin düşük permeabilitesi nedeniyle drenajsız koşullar hakim olmaktadır. Tekrarlı yüklemelerden sonraki uzun dönemde ise, zamanla birikmiş 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. Drenajların açılmasıyla efektif gerilmelerin artarak eski değerine ulaşması esnasında zemin oturmakta ve bu oturmalar Şekil 11'de görülmektedir. Bu şekilde tekrarlı yüklemelerden sonra konsolidasyon eğrisinin eğiminin azaldığı ve tekrarlı kayma gerilmesinin artması ile bu azalmanın daha önemli değerlere ulaştığı görülmektedir.

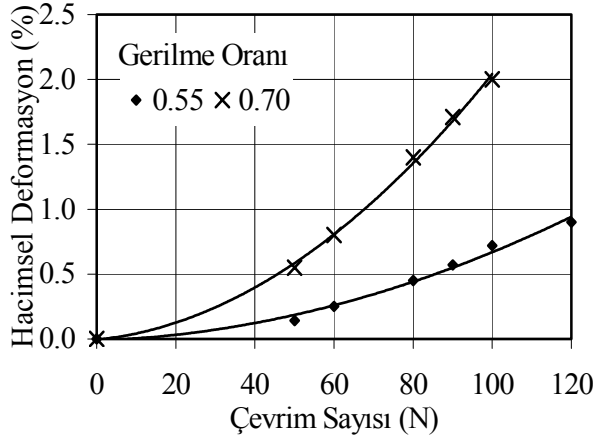


Şekil 11. Tekrarlı yüklemelerde konsolidasyon oturmalarının değişimi

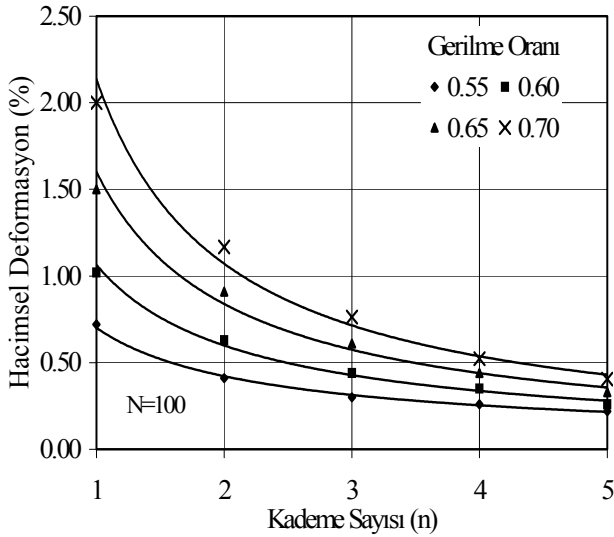
Şekil 12'de çevrim sayısına bağlı olarak ilk kademe hacimsel deformasyonların değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi hem çevrim sayısı hem de gerilme oranının artmasıyla oturmalar önemli derecede artmaktadır. Gerilme oranı $\tau/\tau_f=0.55$ ve $N=50$ 'de meydana gelen hacimsel deformasyon %0.14, çevrim sayısının $N=100$ olduğu numunede ise %0.72'ye yükselmektedir. Aynı şekilde gerilme oranı $\tau/\tau_f=0.70$ ve çevrim sayısı $N=50$ 'de hacimsel deformasyon %0.50 olmakta, çevrim sayısının $N=100$ olması durumunda ise %2.00'ye ulaşmaktadır.

Beş kademe tekrarlı yüklemeler altında oturmaların değişimi ise Şekil 13'te gösterilmiştir. Gerilme oranı ve çevrim sayısı ile birlikte artan boşluk suyu basınçları oturmaların da artmasına neden olmaktadır. Boşluk suyu basınçlarının her kademedede biraz daha azalması ile ise tek numu-

nede yapılan deneylerde her kademede oturmalara biraz daha azalmasına neden olmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi gerilme genliğinin her değerinde ilk kademe oturmalar yüksek olmakta azalan boşluk suyu basınçları ile birlikte daha sonraki kademelerde oturmalar da azalmaktadır. Son kademelerde oturmalardaki azalmalar yavaşlamakta davranış yataylaşmaktadır.



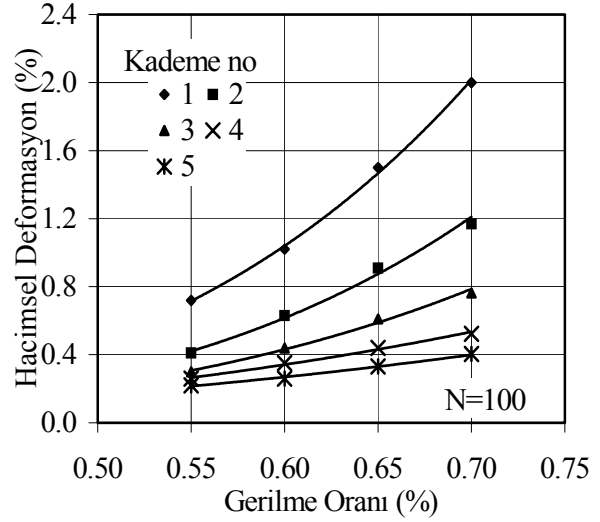
Şekil 12. İlk kademe hacimsel deformasyonların çevrim sayısı ile değişimi



Şekil 13. N=100 olan deneylerde beş kademede oturmaların değişimi

Çevrim sayısı N=100 olan numunelerde beş kademe boyunca oturmaların gerilme oranına bağlı değişimi Şekil 14'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ilk kademe tekrarlı yüklemelerde oturmalar

yüksek değerlerde olmakta, tekrarlı yükleme drenaj çevrimleriyle stabilize olan numunelerde daha sonraki kademelerde oturmalarda azalmalar meydana gelmektedir. Şekil üzerinde gerilme oranının etkisi de görülmektedir.

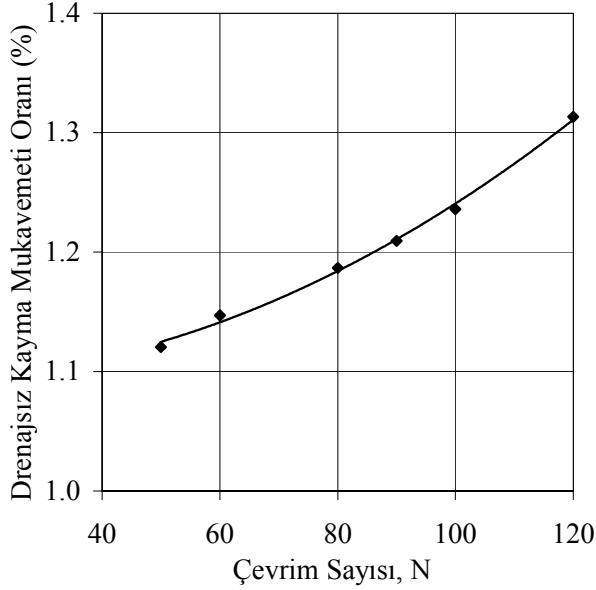


Şekil 14. Beş kademe boyunca oturmaların gerilme oranıyla değişimi

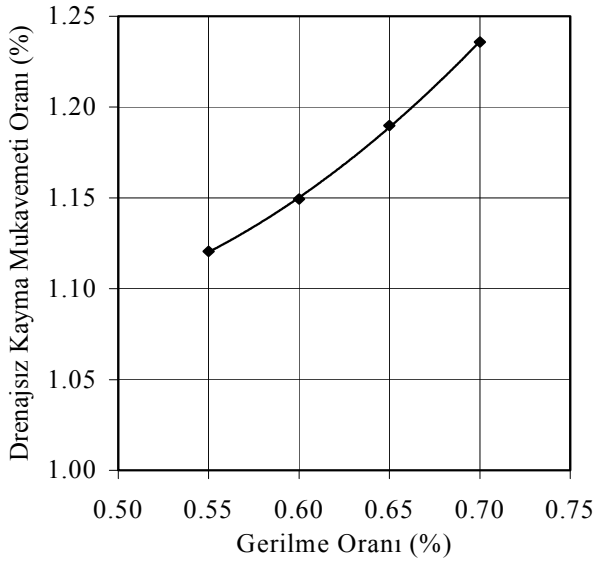
Kayma mukavemeti değişimi

Yapılan deneylerden tekrarlı yükleme sonrası uygulanan drenajın, normal konsolide bir kil üzerindeki yapının uzun süreli davranışı üzerinde faydalı olduğu, tekrarlı yerdeğiştirmelerin azaldığı ve stabilitenin zamanla iyileşmesine neden olduğu görülmüştür.

Tekrarlı yatay kayma gerilmelerinin etkilediği zemin tabakalarının tekrarlı yükleme-drenaj çevrimlerinden sonra drenajsız kayma mukavemetlerine etkileyen iki önemli değişken diğer davranışlarda olduğu gibi tekrarlı yükleme çevrim sayısı ve gerilme oranıdır. Şekil 15'te çevrim sayısına bağlı olarak tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetindeki değişim $\tau/\tau_f=0.55$ olan deneyler için verilmiştir. Görüldüğü gibi zeminin kayma mukavemetinde %31.0'e ulaşan artışlar meydana gelmiştir. Şekil 16'da ise çevrim sayısı N=50 olan deneylerden elde edilmiş ve kayma mukavemetlerinin gerilme oranına bağlı değişimi verilmiştir. Buradaki artış oranı ise %23.6 olmuştur.



Şekil 15. Drenajsız kayma mukavemetinin çevrim sayısıyla değişimi ($\tau/\tau_f=0.55$)



Şekil 16. Drenajsız kayma mukavemetinin gerilme oranıyla değişimi ($N=50$)

Sonuçlar

Suya doymun normal konsolide kil tabakaları tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kaldığında, artık boşluk suyu basıncı meydana gelir. Meydana gelen boşluk suyu basınçları zemindeki efektif gerilmelerde aynı miktarda azalmaya neden olur. Numune üzerindeki tekrarlı yükün kalkmasından sonra meydana gelen boşluk suyu basınçları sönmülendir ve efektif gerilmeler baş-

langıç değerine tekrar ulaşır. Bu esnada boşluk suyu basınçlarının sönmülmesiyle zeminin boşluk oranında da azalmalar meydana gelir. Yani zeminde, tekrarlı yükten kaynaklanan boşluk suyu basıncının dağılmasından kaynaklanan konsolidasyon oturmaları oluşur. Bu amaçla yapılan deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Normal konsolide killerde drenaj süreçleri ile birlikte uygulanan tekrarlı yükler altında giderek daha az boşluk suyu basınçları oluşmakta ve oluşan boşluk suyu basınçları sönmülendirken meydana gelen oturmalarda her kademede biraz daha azalmaktadır.
- Tekrarlı gerilme genliğinin artmasıyla daha fazla boşluk suyu basınçları oluşmakta ve bu basınçlar sönmülendirken oturmaların da daha fazla olduğu görülmektedir.
- Tekrarlı gerilme genliğinde olduğu gibi çevrim sayısının artmasıyla meydana gelen boşluk suyu basınçlarında ve dolayısıyla tekrarlı yük sonrası drenaj süreçlerinde konsolidasyon oturmalarında artış meydana gelmektedir.
- Killerde tekrarlı kayma gerilmeleri etkisinde oluşan kayma deformasyonları aynı boşluk suyu basınçlarında olduğu gibi her kademede bir önceki yüklemeye oluşan kayma deformasyonlarına göre azalma meydana gelmekte, gerilme-deformasyon eğrisinin eğimi artmaktadır. Bir başka deyişle histerisis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi olan kayma modülünde artışlar meydana gelmektedir.
- 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.
- Tekrarlı yatay kayma gerilmelerinden sonra uygulanan drenaj esnasında zemindeki oturmalar, normal konsolide zeminin drenajsız kayma mukavemetinde çevrim sayısı ve gerilme oranına bağlı olarak değişen oranlarda artışa neden olmuştur.

Kaynaklar

Andersen, K.H., (1976). Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading, *Proceedings of Con-*

- ference on Behavior of Off-Shore Structures*, Trondheim, August 1976, **1**, 392-403.
- Andersen, K.H., (1988). Properties of soft clay under static and cyclic loading, Invited Lecture, *Proceedings International Conference Engineering Problems of Regional Soils*, Beijing, China, 7-26, Edited by Chinese Institution of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Andersen, K.H., Brown, S.F., Foss, J., Pool, J.H. ve Rosenbrand, W.F., (1976) Effect of cyclic loading on clay behaviour, *Proceedings Conference Design And Construction of Offshore Structure*, Institution of Civil Engineers, London, **1**, 1-6.
- Andersen, K.H., Hansteen, O.E., Höeg, K. ve Prevost, J.H., (1978). Soil deformations due to cyclic loads on offshore structures, *Numerical Methods in Offshore Engineering*, Edited by O.C. Zienkewicz, R.W. Lewis ve K.G. Stagg, 413-452, Wiley and Sons, Chichester, England.
- Andersen, K.H. ve Höeg, K., (1992). Deformations of soils and displacements of structures subjected to combined static and cyclic loads, NGI Publication, **185**, 1-12.
- Andersen, K.H., Pool, J.H, Brown, S.F. ve Rosenbrend, W.F., (1980). Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **106**, GT5, 499-529.
- Ansal, A.M. ve Erken, A, (1989). Undrained behaviour of clay under cyclic shear stresses, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **115**, 7, 968-983.
- Ansal, A.M., İyisan, R. ve Yıldırım, H., (2001). The cyclic behaviour of soils and effects of geotechnical factors in microzonation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **21**, 445-452.
- Ansal, A.M. ve Tuncan, M., (1989). Consolidation in clays due to cyclic stresses, *Proceedins 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Jenerio, **1**, 3-6, Balkema, Rotterdam.
- Fujiwara, H., Yamanouchi, T., Yasuhara, K. ve Ue, S., (1985). Consolidation of alluvial clay under repeated loading, *Soils and Foundations*, **25**, 3, 19-30.
- Fujiwara, H., Ue, S. ve Yasuhara, K., (1987). Secondary compression of clay under repeated loading, *Soils and Foundations*, **27**, 2, 21-30.
- Hyodo, M., Yasuhara, K. ve Murata, H., (1988). Earthquake induced settlements in clays, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, **III**, 89-94.
- Hyodo, M., Yasuhara, K. ve Murata, H., (1987). Traffic-induced pore pressure and deformation of soft clay deposit beneath embankment, *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Mexico City, 231-237.
- Matsui, T., Ohara, H. ve Ito, T., (1980). Cyclic Stress-strain history and shear characteristics of clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **106**, No.Gt10, 1101-1120.
- O'Reilly, M.P, Brown, S.F. ve Overy, R.F., (1991). Cyclic loading of silty clay with drainage periods, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **117**, 1, 354-362.
- Özaydın, K. ve Erguvanlı, A., (1980). The generation of pore pressures in clayey soils during earthquakes, *Proceedings of The Seventh World Conference on Earth Engineering*, İstanbul, **3**, 326-330.
- Sangrey, D.A., Henkel, D.J. ve Esrig, M.I., (1969). The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading, *Canadian Geotechnical Journal*, **6**, 3, 241-252.
- Yasuhara, K., (1995). Consolidation and settlement under cyclic loading, *Proceedings of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Hiroshima, 979-1001.
- Yasuhara, K. ve Andersen, K.H., (1989). Post-cyclic recompression settlement of clay, *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **1**, 159-167.
- Yasuhara, K. ve Andersen, K.H., (1991). Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading, *Soils and Foundations*, **31**, 1, 83-94.
- Yasuhara, K., Hirao, K. ve Hyde, A.F.L., (1992). Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay, *Soils and Foundations*, **32**, 1, 100-116.
- Yasuhara, K., Hyodo, M., Konami, T., Hyde, A.F.L. ve Hirao, K., (1991). Cyclic induced settlement in soft clays, *Proceedings of the Tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Florence, 887-890.
- Yasuhara, K., Yamanouchi, T. and Hirao, K., (1982). Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay, *Soils and Foundations*, **22**, 3, 77-91.
- Yıldırım, H., (1987). Farklı tekrarlı yükleme biçimleri altında killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.