



İNCE DANELİ ZEMİNLERDE TEKRARLI YÜKLER ALTINDA BOŞLUK SUYU BASINCI OLUŞUMLARI VE MALZEME DAVRANIŞI

Volkan OKUR *

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 26480, Eskişehir

ÖZET

Bu çalışmada, ince daneli zeminlerde tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan boşluk suyu basınçlarının, zemin göçme davranışına etkisi incelenmiştir. Araziye yapılan sondajlardan farklı derinliklerden ve yer altı su tablasının altından alınan, bozulmamış orta-yüksek plastisiteye sahip kil zeminler üzerinde bir grup dinamik üç eksenli deney gerçekleştirilmiştir. İzotropik gerilme koşulları altında gerçekleştirilen deneylerde artan ve değişen gerilme genlikleri olmak üzere iki farklı yükleme tipi uygulanmıştır. Numuneler için göçme kriteri $\pm\%$ 2.5-3 birim kayma deformasyon seviyesi kabul edilmiştir. Yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışları ve göçme anındaki boşluk suyu basıncı değerleri farklı zemin parametrelerine göre karşılaştırılmıştır. Tekrarlı kayma gerilme değerine bağlı olarak boşluk suyu basıncının zemin numunesinin mineralojisiyle önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Pratik amaçlar için boşluk suyu basıncı modeli önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dinamik üç eksenli, Boşluk suyu basıncı, Kil zemin, Tekrarlı yükleme

GENERATION OF PORE PRESSURE AND MATERIAL RESPONSE OF FINE GRAINED SOILS UNDER CYCLIC LOADS

ABSTRACT

In this paper the effect of pore-water pressure of fine-grained soils on failure behavior was investigated. For this purpose a series of dynamic triaxial tests were performed on natural medium-high plasticity clay specimens taken from the in-situ boreholes under groundwater levels. Two different dynamic loading sequences were used under isotropic stress conditions. In terms of cyclic strain amplitude the failure criteria is assumed as $\pm 2.5\%$. Excess pore water pressure accumulation was recorded at the time of failure and were analyzed considering different soil parameters. It has been concluded that, besides the shear stress value, the pore water pressure behaviour has changed significantly by mineralogy of the soil sample. For practical purposes, a pore water pressure model is proposed.

Keywords: Dynamic triaxial test, Pore water pressure, Clay soil, Cyclic loading

1. GİRİŞ

Tekrarlı kayma gerilmeleri altında suya doymun ince daneli zeminlerde, drenaj koşullarına bağlı olarak farklı büyüklüklerde aşırı boşluk suyu basınçları oluşur. Boşluk suyu basıncındaki artışların zeminin rijitlik ve mukavemetine etkisi, dinamik parametrelerinin tespitinde kullanılmaktadır. Zemin permeabilitesine bağlı farklılıklar gösteren boşluk suyu basınçları, ince daneli zeminlerde kum zeminlere göre daha düşük oranlarda meydana gelir. İnce daneli zeminlerde boşluk suyu basıncı oluşumları sismik yükler altında yumuşama davranışı açısından, özellikle suya doymun kil, kum, silt karışımından oluşan zemin tabakalarında önemlidir [1], [2]. Uygulanan gerilme genliğine bağlı olarak boşluk suyu basınçları her çevrimde değişim gösterir. Birim kayma genliği değerine bağlı olarak belirli bir eşik değer aşılmaya kadar boşluk suyu basıncı oluşumu çevrim sayısından bağımsızdır. Bu sınır değere kadar herhangi bir artış gözlenmez. Ancak eşik birim kayma değeri aşıldıktan sonra boşluk suyu basınçları oluşmaya başlar ve permeabiliteye bağlı olarak belirli bir süre sönümlemeden kalır. Normal

*Sorumlu Yazar: vokur@ogu.edu.tr

Geliş Tarihi: 26.04.2018 Kabul:01.06.2018

konsolide killerde boşluk suyu basınçları her zaman pozitif olup, aşırı konsolide killerde ise aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak negatif değerler alabilmektedir [3], [4], [5], [6].

Gerilme ve/veya deformasyon kontrollü gerçekleştirilen tekrarlı deneylerde, ince daneli zeminlerde oluşan boşluk suyu basınçlarının, çevrim sayısı ve birim kayma genliğinin yanı sıra tekrarlı birim kayma gerilmesi ve gerilme geçmişine bağlı olduğu görülmüştür [7], [8], [9], [10].

Bu çalışmada araziden yeraltı su seviyesinin altından alınmış, yüksek plastisiteli kil zeminler üzerinde dinamik üç eksenli deneyler yapılmış ve boşluk suyu basıncı ve mukavemet davranışı incelenmiştir.

2. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Deneylerde kullanılan örselenmemiş numuneler, arazi sondajlarından yeraltı su seviyesi altından alınmıştır. Numunelerin fiziksel özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur. Sondaj derinlikleri 10.00-22.00 m. arasında olup numunelerin başlangıç boşluk oranları $e_o=0.70-1.40$, doğal su muhtevaları $w_o=\%22-51$, likit limit değerleri $LL= \%35-72$, plasitiste indisleri $PI=\%9-40$, 200 no’lu eleğin altı (ince dane oranı) $=\%98-99$ arasında değişmektedir. Numuneler Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (ASTM D2487) göre “yüksek plastisiteli kil”, CH zemin olarak tanımlanmıştır.

Çalışmada dinamik üç eksenli deney sistemi kullanılmıştır. Deney sisteminde tekrarlı yükleme, basınçlı hava ve servo-hidrolik bir sistemle sağlanmaktadır. Deney sırasında tekrarlı yük, şekil değiştirme ve tekrarlı yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçları ve deney sonrası hacim değişimleri ölçülebilmektedir. Dinamik üç eksenli deneyde sınır koşulları gereği, yükleme ve boşaltma sırasında numune üzerinde oluşan en büyük ve en küçük asal gerilmeler, her çevrimde 90° ’lik yön değiştirmektedir. Orta asal gerilmenin değeri, yükleme çevriminin basınçta kalan kısmında, en küçük asal gerilme değerine ve çekme anında ise en büyük asal gerilmenin değerine eşittir. Uygulanan tekrarlı yükleme sırasında numunenin üst ve alt kısımlarında, başlıklarla numune temas noktalarında da gerilme yığılmaları meydana gelmekte, ancak uygulanan gerilmeler uniform kabul edilmektedir. Numunenin çevresine monte edilebilen ve $\% 10^{-4}$ seviyelerinde ölçüm yapabilen iki adet deformasyon ölçer numunenin bulunmaktadır. Deney sonuçlarından numunelerin elastik modül değerlerinin birim şekil değiştirmeye göre değişimi hesaplanmıştır.

Çalışmada toplam 45 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde numuneler üniform sinüsoidal olarak iki farklı tekrarlı yükleme düzeninde yüklenmiştir. Birinci yükleme düzeni artan gerilme genliğinde (Şekil 1), ikincisi ise değişen gerilme genliklerinde tekrarlı yüklemedir (Şekil 2).

Deneylerde kullanılan numuneler 50 mm çap ve 105 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Her bir numune üzerinde konsolidasyon deneyi gerçekleştirilerek, numunelerin önkonsolidasyon basınçları tespit edilmiştir. Alındıkları derinlikler de göz önünde bulundurularak numuneler önkonsolidasyon basınç değerlerinin yaklaşık $\%50$ fazlası bir basınç değerinde, 24 saat konsolide edilmiştir. Bu yöntemle numune hazırlama sırasında meydana gelen örselenme miktarını azaltmak ve numuneleri normal konsolide koşullar altında deneye tabi tutmak amaçlanmıştır. Konsolidasyon aşaması tamamlandıktan sonra doygunluk kontrolleri yapılmış ve boşluk suyu basıncı parametresi “B” değeri $\%92$ ve üzeri olan numuneler deneylerde kullanılmıştır. Birinci grup yükleme sırasında tekrarlı gerilme genlikleri her beş çevrimde $\%0.2$ değerinde arttırılmış ve bu artış önceden belirlenmiş birim kayma deformasyon seviyesine (çift genlik $\%5$) ulaşmaya kadar devam etmiştir. Şekil 3’te örnek bir deney için gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi gösterilmiştir. Deney sonucu elde edilen şekil değiştirme davranışı Şekil 4’te verilmektedir.

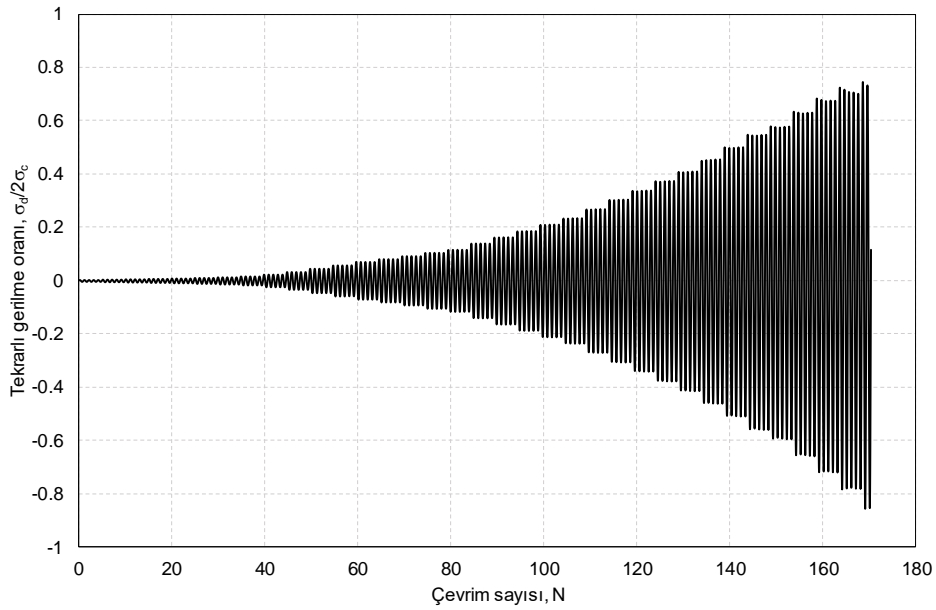
İkinci yükleme tipinde numuneler değişen birim kayma genliklerinde yüklenmişlerdir. Gerilme genliği arttırılırken su basınçları oluşmaya başladığı an genlik değeri başlangıç değerine düşürülmüş ve gerilme genliği tekrar arttırılmıştır. Bu şekil de artan-azalan-artan olarak tekrarlı gerilme uygulanmıştır. Göçme

önceden belirlenmiş birim kayma deformasyon seviyesine (çift genlik %5) ulaşıncaya kadar devam etmiştir.

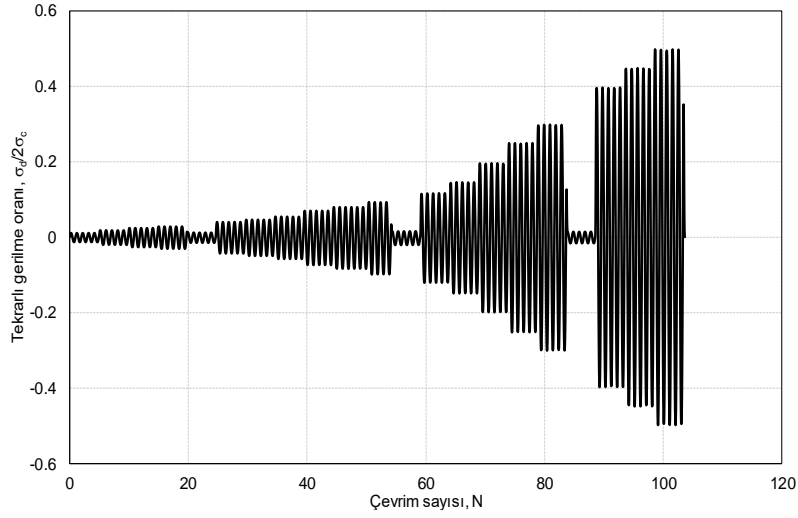
Tablo 1. Numunelerin fiziksel özellikleri

Numune	Derinlik (m)	w _o (%)	e _o	LL (%)	PI (%)	KDO (%)	ZS	σ _c ' (kPa)
S-1	5.95	40	1.08	51	30	3	CH	100
S-2	4.95	30	0.81	68	33	2	CH	90
S-3	17.50	30	0.81	55	38	5	CH	300
S-4	13.00	41	1.09	60	22	2	CH	200
S-5	13.00	41	1.09	55	22	1	CH	200
S-6	16.50	25	0.68	57	25	2	CH	300
S-7	17.00	35	0.95	70	40	5	CH	350
S-8	2.50	30	0.81	51	23	2	CH	70
S-9	16.00	52	1.40	55	23	7	CH	200
S-10	16.00	52	1.40	55	23	7	CH	200
S-11	16.50	51	1.38	52	23	3	CH	200
S-12	16.50	51	1.38	52	21	3	CH	300
S-13	16.50	51	1.38	52	23	3	CH	400
S-14	8.00	41	1.11	65	22	5	CH	150
S-15	8.00	42	1.12	60	22	3	CH	150
S-16	16.00	51	1.40	55	23	5	CH	200
S-17	22.50	37	1.01	56	33	5	CH	200
S-18	22.50	40	1.10	54	33	5	CH	200
S-19	16.50	35	0.95	56	32	3	CH	180
S-20	15.00	46	1.24	54	25	4	CH	160
S-24	15.00	46	1.24	51	25	3	CH	160

w_o: Başlangıç su muhtevası KDO: Kaba dane oranı (#200 üstü) PI:Plastisite indisi
e_o: Dene başı boşluk oranı ZS:Zemin sınıfı σ_c':Konsolidasyon basıncı σ_v:Ters basınç



Şekil 1. Birinci grup deney yükleme düzeni



Şekil 2. İkinci grup deney yükleme düzeni

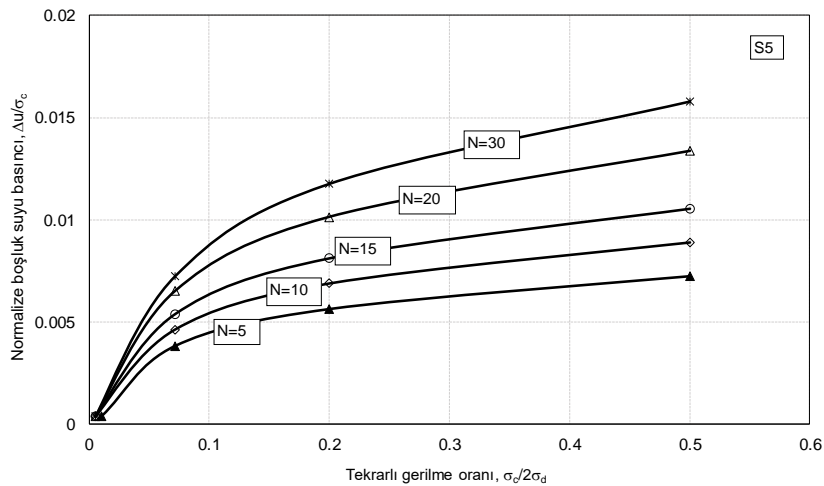
3. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yükleme türlerine göre elde edilen deney sonuçları kendi aralarında değerlendirilmiştir. Deney sırasında ölçülen büyüklükler, numunelerin fiziksel özellikleri de göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır. Tekrarlı yükleme sırasında numunelerdeki aşırı boşluk suyu basınçları için bir model oluşturulmuştur. Şekil 3'te S5 numunesinde 5, 10, 15, 20 ve 30. çevrimlerde, tekrarlı gerilme oranına bağlı boşluk suyu basınçlarındaki artışlar görülmektedir. Boşluk suyu basıncı şekilde belirtilen elastik eşik değerini geçtikten sonra artmaktadır.

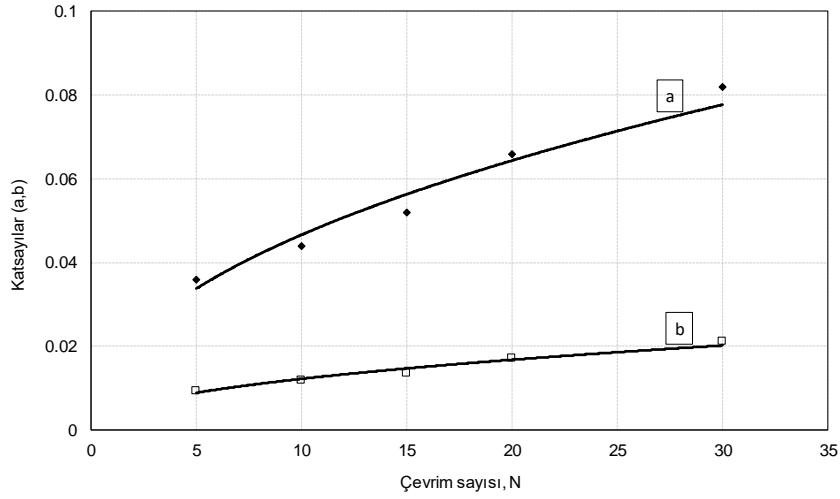
Kil zeminlerin mikro yapısının karmaşık ve yeterince açıklığa kavuşmamış olması nedeniyle boşluk suyu basıncı oluşumu, elde edilen deney noktalarından en uygun eğriyi geçirmek suretiyle elde edilmiştir. Şekil 3'deki eğrilerin denklemi

$$u_N = a + b \ln(\sigma_{TGO}) \quad (1)$$

biçiminde ifade edilebilir. Denklemden u_N normalize boşluk suyu basıncı, a ve b çevrim sayısına bağlı sabitler, σ_{TGO} ise tekrarlı gerilme oranı olarak ifade edilmektedir. a ve b katsayılarının çevrim sayısına göre değişimi ise Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. Tekrarlı gerilme oranı normalize boşluk suyu basıncı ilişkisi



Şekil 4. Katsayıların çevrim sayısına göre değişimi

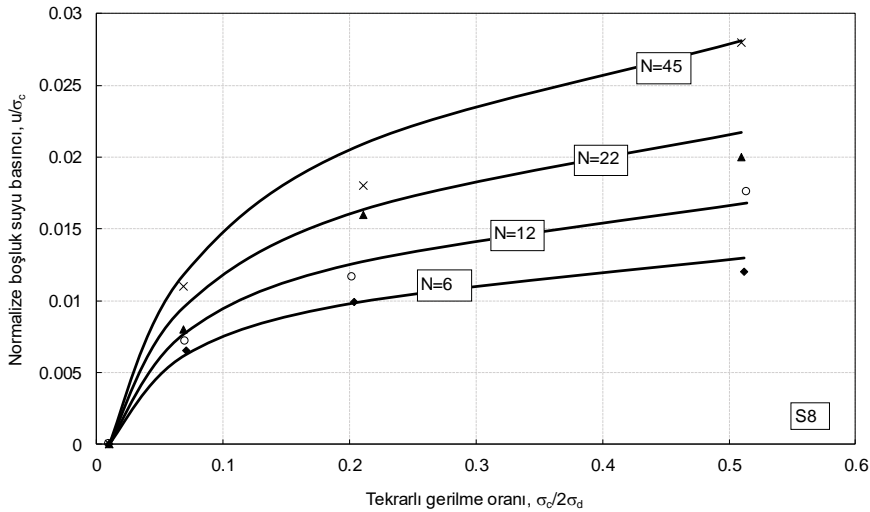
Şekil 4'deki a ve b katsayıları çevrim sayısına bağlı olarak,

$$a_{f(N)} = 0.009N^{0.38} \quad (2)$$

$$b_{f(N)} = 0.0019N^{0.42} \quad (3)$$

elde edilir. Farklı çevrim sayıları için elde edilen deney verileri ve (1) bağıntısı kullanılarak elde edilen eğriler Şekil 5'de görülmektedir. Oluşturulan boşluk suyu modeli 6, 12 ve 22. çevrimler için deney noktalarından geçmekte, 45. çevrim de sapma meydana gelmektedir. (1) bağıntısında önerilen matematiksel model malzemenin özellikle elastik davrandığı aralıkta deney verileri ile tam olarak örtüşmektedir. Malzeme davranışının elasto-plastik ve plastik aralığında da diğer deneyler için kabul edilebilir düzeydedir.

Malzeme özelliklerinin boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla artan gerilme genliklerinde yapılan deneylerde elde edilen boşluk suyu basınçları ve azalım eğrilerinin değişimi incelenmiştir. Plastisite indisleri eşit veya birbirine yakın olan numunelere ait boşluk suyu basınç değerleri, çevre basıncına bölünmek suretiyle normalize edilmiş ve kayma modülü oranına göre değişimleri Şekil 6'da verilmiştir.



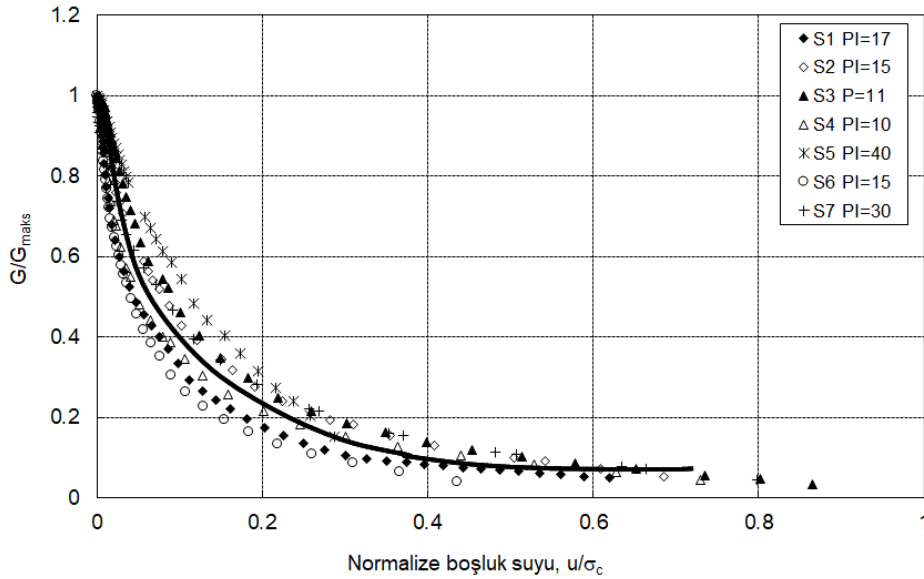
Şekil 5. Tekrarlı gerilme oranı normalize boşluk suyu basıncı ilişkisi

Şekilde plastisite indisi 10-17 olan S1, S2, S3, S4, S6 ve 30-40 S5, S7 numunelerinden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Plastisite indislerinin birbirine çok yakın olmasına karşılık S3, S4 eğrileri S1 ve S2 numunelerine göre aynı boşluk suyu basıncı oranı için daha düşük kayma modül oranına sahip olduğu görülmektedir. Buna karşılık plastisite indisi 40 olan S7 numunesinin kayma modül oranı değişimi, S6 ve S4 numuneleri ile benzerdir. Aynı durum plastisite indisi 10 olan S4 eğrisi ile S1 ve S7 eğrileri için de söz konusudur. Eğriler aynı aralıkta değişmektedir. Plastisite indisinin boşluk suyu basıncı değişimine etkisinin fazla olmadığı anlaşılmaktadır. Deney sonuçları genel olarak değerlendirilerek regresyon analizi yapılmış ve boşluk suyu basıncı ile dinamik kayma modülü oranı arasında,

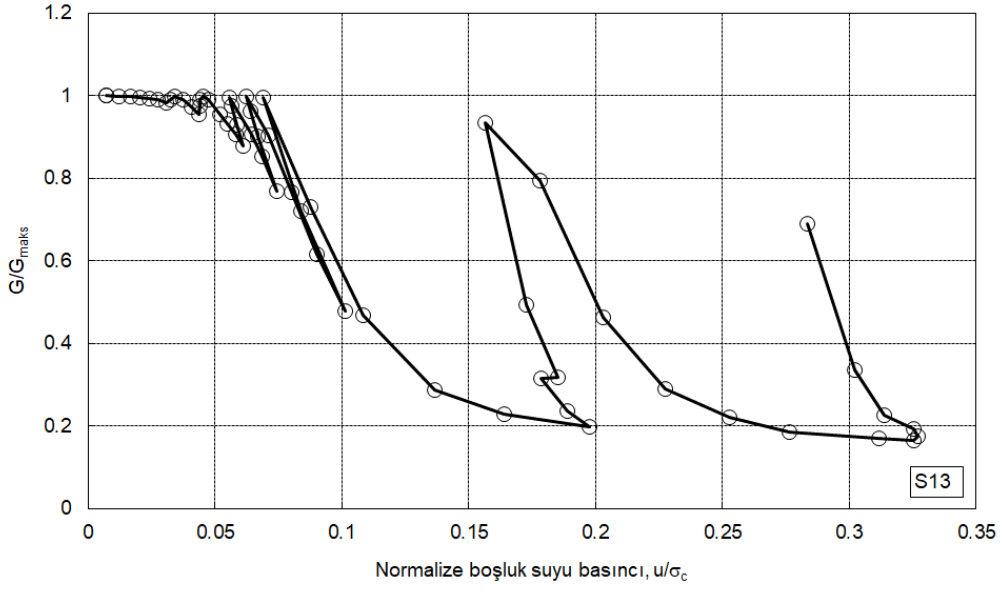
$$\frac{G}{G_{maks}} = \left[0.98 + 1.05 \left(\frac{u}{\sigma_c} \right) \right]^{-1.31} \quad (5)$$

şeklinde bir bağıntı tanımlanmıştır. Bağıntıda u boşluk suyu basıncı, σ_c efektif çevre basıncı olup her iki değer kPa cinsindedir.

Tekrarlı gerilme genliklerinin artırılıp azaltılmasıyla yapılan ikinci grup deneylerde oluşan boşluk suyu basınç değişimleri de incelenmiştir. Şekil 7’de, S13 deneyine ait boşluk suyu basıncı kayma modülü oranı değişimi verilmiştir. Şekilden gözlemleneceği üzere boşluk suyu basıncı değişimi, gerilmenin her artırılış ve azaltılışında gerilme genliklerinden bağımsız olarak bir önceki tekrarlı yükleme şeklinde elde edilene benzer bir davranış göstermektedir.

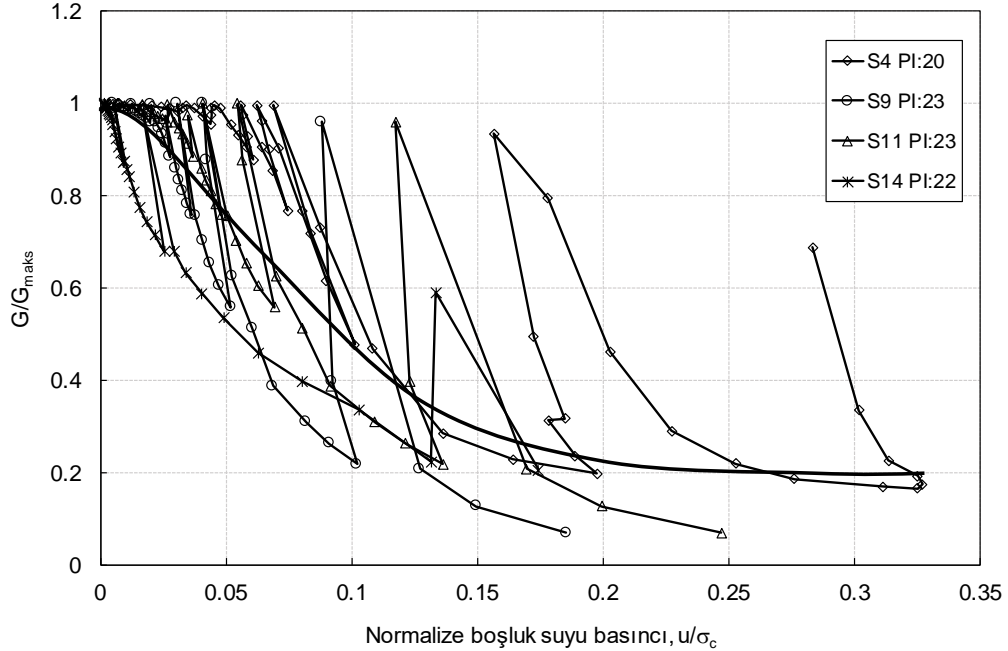


Şekil 6. Normalize boşluk suyu basıncı kayma modülü oranı değişimi



Şekil 7. Düzensiz yükleme sonucu oluşan normalize boşluk suyu basıncı kayma modülü oranı değişimi

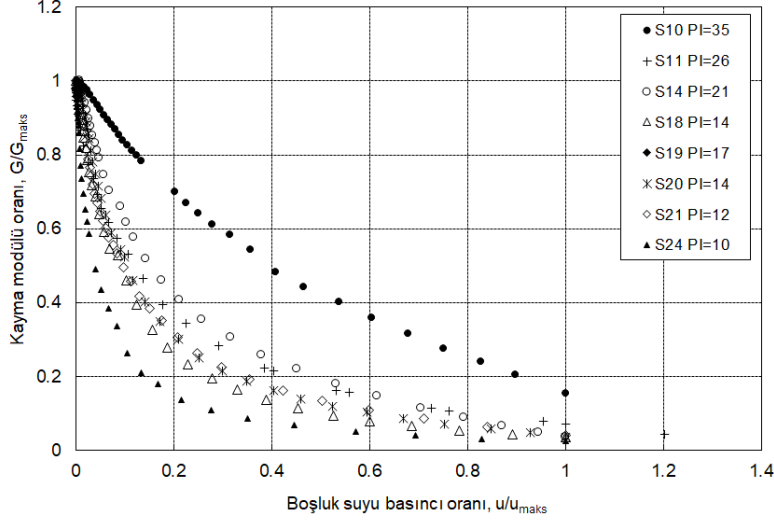
İkinci grup yükleme düzeninde de gerçekleştirilen deneyler için de benzer bir boşluk suyu basıncı modeli oluşturmak amacıyla plastisitesi indisleri birbirine yakın numunelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 8’de artan ve azalan gerilme genliklerinde yapılan deneyler için de normalize boşluk suyu basıncı ile kayma modülü oranı arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 8. Normalize boşluk suyu basıncı kayma modülü oranlarının karşılaştırması

Boşluk suyu basıncı oluşumları deney sırasında oluşan maksimum boşluk suyu basıncı ile normalize edildiğinde plastisite indisleri farklı zeminler ve kayma modülü oranı arasındaki ilişki daha açık gözlenmektedir. Şekil 9’da plastisite indisi 38 olan C3 numunesine ait noktalar üst sınırı oluştururken, plastisite indisi 9 olan S6 numunesi alt sınırı oluşturmaktadır. Diğer numunelerin plastisite indis değerleri birbirine yakın olduğundan davranış eğrileri birbirine yakındır.

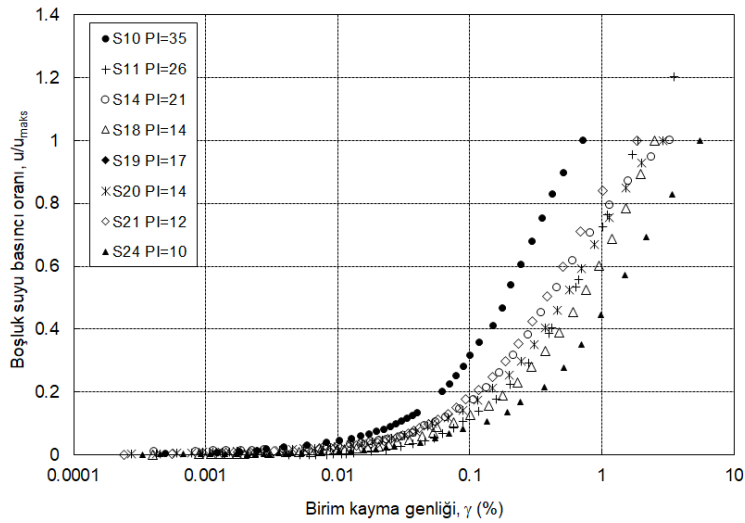
Boşluk suyu basıncı oranı tekrarlı birim kayma genliği ilişkisinde de plastisite indisinin etkisi açık bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 10). Plastisite indisi 9 olan S24 numunesinde boşluk suyu basıncı oluşumu, plastisite indisi 35 olan S10 numunesine göre daha yüksek birim kayama genliğinde başlamakta buna karşılık Şekil 10’ da görüldüğü gibi alt sınırdaki S10 numunesinde yumuşama diğerlerine göre daha düşük birim kayma genliği değerinde başlamaktadır.



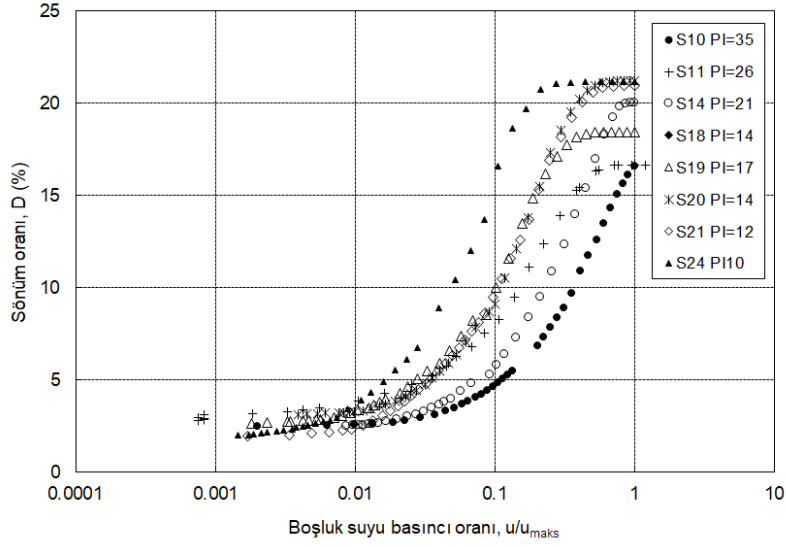
Şekil 9. Boşluk suyu basıncı oranı kayma modülü oranı ilişkisi

Birbiriyle çelişiyor gibi görünen bu durum sönüm oranı değişimleri incelendiğinde daha iyi anlaşılabilir. Şekil 11’de görüleceği gibi plastisite indisi arttıkça, aynı boşluk suyu basıncı oranı artışı için sönüm oranı değeri azalmaktadır. Dolayısıyla plastisite indisi arttıkça, boşluk suyu basıncı artsa da malzeme elastik davranmaya devam etmekte ve meydana gelen sönüm miktarı plastisitesi düşük olan zemine göre daha küçük değerde kalmaktadır.

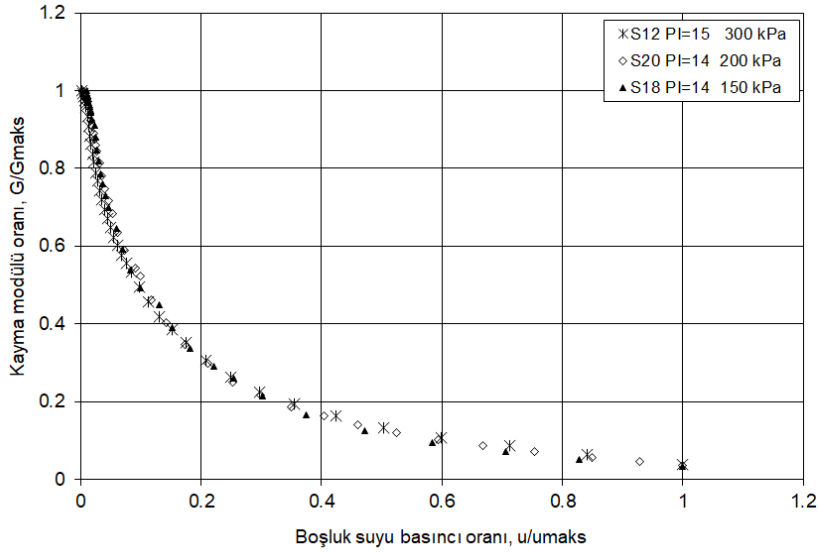
Kayma modülü oranı, boşluk suyu basıncı oranı ilişkisinin çevre basıncının etkisini incelemek amacıyla aynı plastisite indisine sahip ve çevre basıncı değerleri sırasıyla, 150, 200 ve 300 kPa olan S12, S18, S20 numuneleri karşılaştırılmıştır. Şekil 12’de sonuçlardan çevre basıncının, dinamik kayma modülü oranı boşluk suyu basıncı oranı ilişkisine etkisi olmadığı görülmektedir.



Şekil 10. Boşluk suyu basıncı oranı tekrarlı birim kayma genliği ilişkisi



Şekil 11. Sönüm oranı boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi



Şekil 12. Dinamik kayma modülü oranı boşluk suyu basıncı oranı ilişkisi

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışmada, ince daneli zeminlerin tekrarlı yükler altındaki mukavemet davranışlarının incelenmesi amacıyla dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Kullanılan numuneler, sahada yeraltı su seviyesi altından alınmış yüksek plastisiteli kil numunelerden oluşmaktadır. Deneyler izotropik gerilme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Plastisite indisi değerinin başlangıç kayma modülüne bir etkisi gözlenmemiştir. Tekrarlı gerilme oranı arttıkça kayma modülü değeri azalmaktadır.

Artan gerilme genliklerinde tekrarlı yüklemeye maruz numunelerde oluşan boşluk suyu basınçlarının artış oranları plastisite indisinden bağımsızdır. Yükleme paterni değiştirildiğinde de bir değişim gözlenmemiştir. Ancak her iki yükleme paterninde oluşan boşluk suyu basınçları göçme anındaki kaydedilen maksimum değere normalize edildiğinde plastisite indisinin etkisi ortaya çıkmaktadır. Düşük plastisiteli zeminlerin boşluk suyu basıncı oranı aynı birim kayma genliği için yüksek plastisiteli

zeminlere göre daha düşüktür. Ayrıca ise boşluk suyu basıncı oranının efektif çevre basıncından da bağımsız olduğu görülmüştür. Ancak deneylerin düşük plastisite ve farklı konsolidasyon oranlarındaki kil zeminler için de tekrarlanması oluşturulan boşluk suyu modelinin uygunluğunun açıklığı kavuşturulması açısından önemlidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje No: 200915006 ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Erken A and Ulker BMC. Effect of cyclic loading on monotonic shear strength of fine-grained soils. *Engineering Geology*, 2007; 89, 243–257.
- [2] Diaz-Rodriguez A and Lopez-Molina JA. Stress thresholds in soil dynamics. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008; 1-8.
- [3] Gratchev IB and Sassa K. Cyclic shear strength of soil with different pore fluids. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013; 139(10),1817–1821.
- [4] Mesri G. Discussion of “cyclic tests on high-quality undisturbed block samples of soft marine norwegian clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 2013; 50(11),1188–1190.
- [5] Vucetic M, Lanzo G and Dorouian M. Effect of the shape of cyclic loading on damping ratio at small strains, *Soils and Foundations*, 1998; 38, 111-120.
- [6] Vucetic M. Cyclic threshold shear strains in soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1994; ASCE, 120, 2208-2228.
- [7] Okur DV and Ansal AM. Dynamic characteristics of clays under irregular cyclic loadings, *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, TC4 Satellite Conference on Lessons Learned from Strong Earthquakes, Istanbul, 25-26 August, 2001; Turkey*, p. 267-270.
- [8] Ohara S and Matsuda H. Study on settlement of saturated clay layer induced by cyclic shear, *Soils and Foundations*, 1988; 28, 103-113.
- [9] Vucetic M and Dobry R.. Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1991; ASCE, 117, 89-107.
- [10] Hight DW and Georgiannou VN. Effects of sampling on the undrained behavior of clayey sands, *Geotechnique*, 1995; 45, 237-247.
- [11] Tang YQ, Zhou J and Liu S. Test on cyclic creep behavior of mucky clay in shangay under step cyclic loading. *Environmental Earth Sciences*, 2011; 63, 321–327.