

Killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi

Recep ÖZAY*, Ayfer ERKEN

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

Özet

Bu çalışmada killi zeminlerin plastisitesinin dinamik mukavemet üzerinde etkisinin gösterilmesi amacı ile araziden piston numune alıcılarla örselenmeden alınmış numuneler üzerinde dinamik üç eksenli basınç deney aletinde deneyler yapılmıştır. Dinamik deneyler farklı genliklerde gerilme kontrollü olarak 0.50 Hz. frekansında yapılmıştır. Düşey birim boy değişimi genliği $\varepsilon_{da}=\%5$ değeri için dinamik kayma gerilmesi oranı ($DKGO=\sigma_a/2\sigma_c$), çevrim sayısı, N değişimleri oluşturulmuştur. Deney sonuçlarına göre aynı kıvamda olan ve aynı basınçta konsolide edilen killerin plastisitesi yüksek olanlarının dinamik kayma gerilmesi oranlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. $N=20$ çevrime karşılık gelen dinamik kayma gerilmesi oranı yüksek plastisiteli killerde daha yüksek iken düşük plastisiteli killerde daha az olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Dinamik kayma gerilmesi oranı, plastisite, çevrim sayısı.

Effect of soil plasticity on cyclic shear stress ratio

Abstract

The aim of this study is to investigate the effect of soil plasticity on cyclic shear stress ratio. Different cyclic axial stress levels were applied to undisturbed clay samples in a cyclic triaxial test system. The samples were obtained from Dinar town where a $M=5.9$ magnitude earthquake occurred in 1995. The plasticity and consistency indices of the normal consolidated clays were $I_p=25-40\%$ and $I_c=0.62-1.04$, respectively. Saturated samples were consolidated under isotropic stress conditions to the overburden pressure and were loaded with a cyclic frequency of 0.5 Hz.. The behaviour of axial strain and pore pressure ratio have been studied and the relationship between cyclic shear stress ratio and number of cycles has been obtained. The results indicate that induced pore pressure developed and axial strain were limited in high plasticity clays compared to low plasticity clays under same stress conditions. It was observed that the cyclic shear stress ratio ($\sigma_a/2\sigma_c$) increased with plasticity for $\varepsilon_{da}=\%5$ and decreased with the increase of number of cycles (N). Another factor investigated was consistency index. A decrease in consistency causes a decrease in cyclic shear stress ratio at a given number of cycles for clays having the same index properties and under same stress conditions.

Keywords: Cyclic shear stress ratio, plasticity, number of cycles.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Recep ÖZAY. ozayre@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 39 16.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Örselenmemiş killi zeminlerin statik mukavemetine deprem yüklerinin etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 17.04.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 25.12.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Killi zeminlerin tekrarlı yükler etkisinde davranışın incelenmesine ilk kez 1960'lı yıllarda başlanmıştır.

Çeşitli araştırmacılar tarafından killerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet davranışı üzerinde dinamik yükün büyüklüğü, süresi, yükleme şekli, zeminin plastisitesi, kıvamı, başlangıç boşluk oranı, doyumluk derecesi, sismik geçmişi, jeolojik yük, aşırı konsolidasyon oranı, kaba dane oranı, deney sistemi ve yükleme şekli ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Houston ve Herrmann (1979), Özüdoğru (1979), Ansal (1981), Yasuhara ve diğerleri (1982), Ansal ve Yıldırım (1985), Ansal ve Erken (1986, 1989), Yıldırım (1987), Erken ve diğerleri (1987), Ishihara ve Koseki (1989), Harada ve diğerleri (1990), Hyodo (1997), Hyodo ve diğerleri (1999), Das ve diğerleri (1999), Pradhan ve diğerleri (1999), Guo ve Prakash (1999), Özay ve diğerleri (2000), yaptıkları deneysel çalışmalarda killerin tekrarlı yükler etkisinde gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin incelemiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda plastisitesi yüksek olan zeminlerin dinamik gerilmeler altındaki davranışlarının düşük plastisiteli zeminlerden farklı olduğu görülmüştür.

Düşük plastisiteli zeminlerde boşluk suyu basınçları daha hızlı artmakta ve tekrarlı yük etkisinde oluşan birim boy değişimleri daha büyük olmaktadır. Bu çalışmalarda araziden örselenmeden alınmış killi numuneler kullanılmıştır. Orta ve katı killerde plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranı üzerinde etkisini göstermek için dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde deneyler yapılmıştır.

Malzeme ve deneyler

Bu çalışmada kullanılan numuneler araziden sondajlar sırasında piston numune alıcılarla alınmıştır. Yapılan standart laboratuvar deneyleri sonucunda doğal su muhtevaları ω_n =%21-35 arasında; likit limit su muhtevaları ω_l =%38-71, plastik limit su muhtevaları ω_p =%18-31, plastisite indisleri I_p =15-40

arasında; kıvam indisleri ise I_c =0.62-1.04 arasında değişmektedir. Dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde konsolidasyon sonu doyum birim hacim ağırlıkları $1.82-2.04 \text{ gr/cm}^3$, kuru birim hacim ağırlıklar ise $0.98-1.70 \text{ gr/cm}^3$ olarak elde edilmiştir. Elek analizi ve hidrometre analizi sonuçlarına göre kaba dane oranı 0-%29 arasında, kil oranı %16-39 arasında, silt oranı ise %38-70 arasında bulunduğu tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tüplerden yarılarak çıkarılan numuneler 50 mm çapında ve 100 mm boyunda traşlandıktan sonra birim hacim ağırlığı bulunmuş daha sonra üç eksenli hücreye yerleştirilmiş ve 24 saat süre konsolide edilmiştir. Konsolidasyon sırasında düşey yer değiştirmeler ve hacim değiştirmeleri ölçülmüştür.

Kullanılan numuneler normal konsolide düşük veya yüksek plastisiteli killerdir. Numunenin konsolidasyonu sonunda B kontrolü yapılarak dinamik yüklemeye geçilmiştir. Üç eksenli dinamik deney aleti hücresinde zemin numuneleri σ_c =70-150 kPa arasında arazide etkisinde kaldıkları jeolojik gerilme altında konsolide edilmişlerdir. Bu çalışmada numunelerde B değerinin %98'in üstünde olması sağlanmıştır. Düşey sinüzoidal yük drenajsız koşullarda $f=0.50 \text{ Hz}$ frekansında numuneye uygulanarak elektikli amplifikatörden ve bu sisteme bağlı bilgisayar yardımı ile düşey deviatorik gerilme, düşey boy değişimi ve boşluk suyu basıncı değerleri kaydedilmiştir. Veri aktarılmasında Virtuel-Bench Logger programı kullanılmıştır. Bilgisayardan alınan bu ham veriler yardımı ile numuneye uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranı, $\sigma_d/2\sigma_c$ değeri ve düşey eksenel birim boy değiştirme genliği ϵ_{da} =%5 değerlerine karşılık gelen çevrim sayıları hesaplanmıştır.

Zeminlerin tekrarlı yükler etkisinde davranışı

Tekrarlı yükler etkisinde drenajsız koşullarda uygulanan kayma gerilmesi genliğine bağlı olarak çevrim sayısı arttıkça birim boy değişimleri artmakta ve zeminlerde yumuşamaya bağlı olarak rijitlik azalmaktadır.

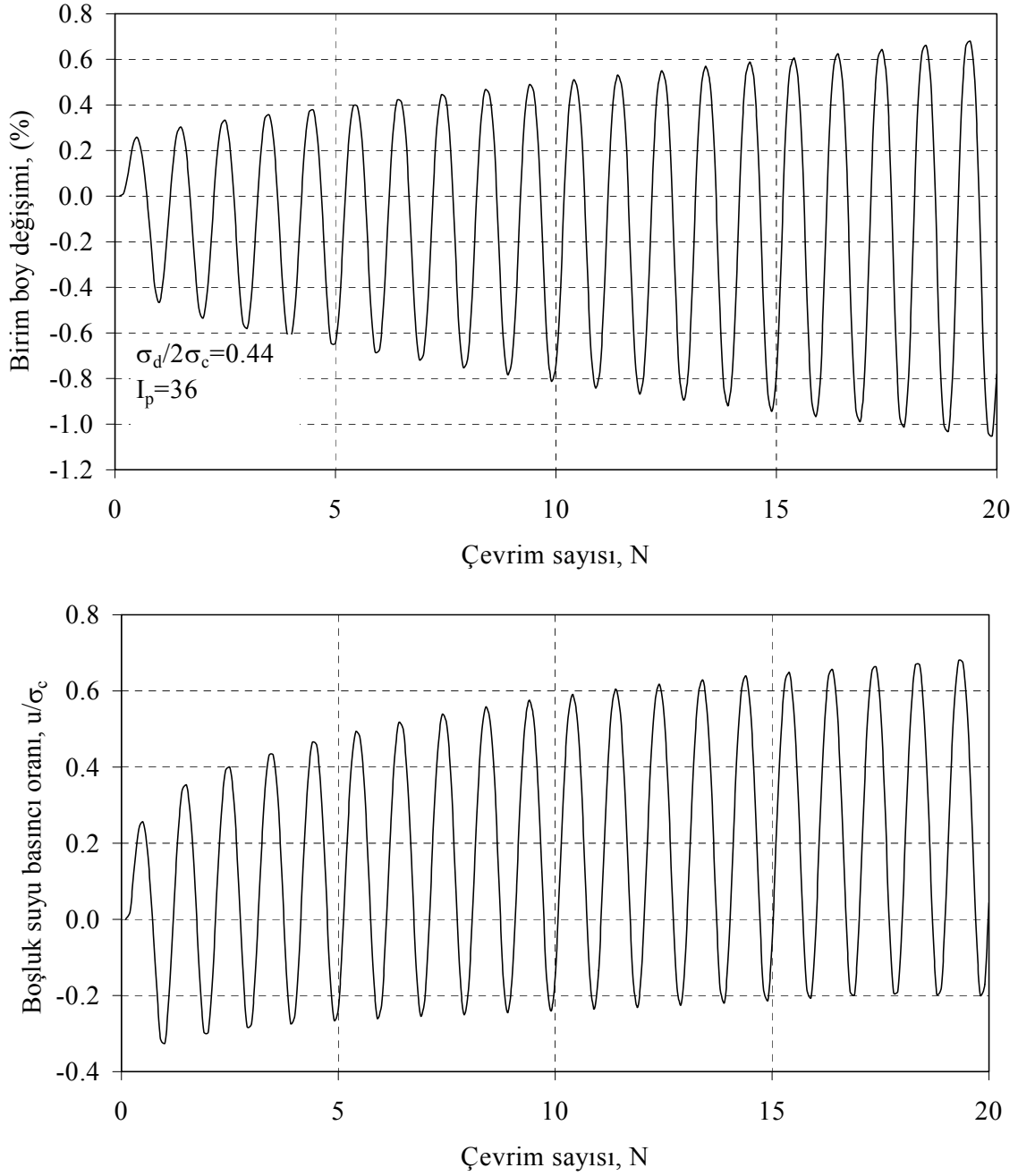
Tablo 1. Deneylerde kullanılan numuneler

D.No	γ_n (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_l □□□□□	ω_p (%)	I_p (%)	σ_c (kPa)	$\sigma_c/2 \sigma_d$ (-)	N ($\epsilon_{da}=\%5$)
D05	1.89	30	43	20	23	70	0.417	115
D06	1.87	33	43	20	23	70	0.560	13
D13	1.82	35	71	31	40	100	0.752	22
D14	1.98	23	38	20	18	100	0.710	4
D15	2.04	23	37	22	15	100	0.745	2
D16	1.80	32	71	31	40	100	0.723	120
D25	1.90	28	39	18	21	100	0.331	156
D26	1.91	29	39	18	21	100	0.521	7
D32	1.91	31	53	27	26	100	0.435	190
D41	2.02	24	43	21	22	125	0.390	18
D42	2.01	22	43	21	22	125	0.400	15
DS48	1.98	22	39	18	21	100	0.650	20
DSY1	2.01	21	39	21	18	200	0.550	0.75
DSY5	1.81	35	62	26	36	150	0.440	-
DSY7	1.94	28	41	20	21	150	0.420	15
DSY8	1.91	27	41	20	21	150	0.480	14
DSY9	1.93	28	41	20	21	150	0.330	-

Bu çalışmada kullanılan değişik plastisitedeki killerin deney sonuçlarından; düşey birim boy değişimi, çevrim sayısı ve boşluk suyu basıncı oranı, çevrim sayısı ilişkileri Şekil 1 ve Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 1'de dinamik kayma gerilmesi oranı, $\sigma_d/2\sigma_c=0.44$; plastisite indisi, $I_p=36$ ve uygulanan konsolidasyon basıncı, $\sigma_c=150$ kPa olan yüksek plastisiteli kil numunenin deney sonuçları görülmektedir. Dinamik gerilme etkisinde numunede ilk çevrimden itibaren boşluk suyu basıncında artışlar oluşmuş ve 20. çevrime gelindiğinde boşluk suyu basıncı oranı, $u/\sigma_c=0.75$ değerine ulaşmıştır. Bu durumda numunede düşey birim boy değişimi genliği, $\epsilon_{da}\%$ 1.80 civarındadır. Şekil 2'de ise $\sigma_d/2\sigma_c=0.42$ olan $\sigma_c=150$ kPa basınç altında konsolide edilmiş plastisite indisi $I_p=21$ olan numunenin birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı N'e göre değişimi görülmektedir.

Bu durumda numunede düşey birim boy değişimi genliği, $\epsilon_{da}\%$ 1.80 civarındadır. Şekil 2'de ise $\sigma_d/2\sigma_c=0.42$ olan $\sigma_c=150$ kPa basınç

altında konsolide edilmiş, plastisite indisi $I_p=21$ olan numunenin birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranı, u/σ_c 'nin çevrim sayısı N'e göre değişimi görülmektedir. Çevrim sayısı arttıkça birim boy değişimlerinde artma oluşmuş N=15 olduğu zaman $\epsilon_{da} = \%5$ değerine ulaşmıştır. Bu sırada numunede oluşan boşluk suyu basıncı oranı %90 civarındadır. Düşük plastisiteli numunede ilk çevrimden itibaren boşluk suyu basıncı artışları yüksek değerlere ulaşmış ve numunenin büyük deformasyon yapmasına neden olmuştur. Böylece aynı tekrarlı yüklerin etkisi altında olan zeminlerde plastisitesi yüksek numunelerin dinamik gerilmelere karşı direncinin yüksek olacağı anlaşılmıştır. Killi zeminlerde özellikle düşük plastisiteli olanlarda dinamik gerilme etkisinde artan boşluk suyu basınçlarının yüksek değerlere yumuşamasına ve efektif gerilmenin azalmasına yol açmasından dolayı mukavemet kaybı oluşmakta ve buna bağlı olarak taşıma gücü ve stabilite kayıpları meydana gelmektedir.



Şekil 1. DSY05 nolu deney sonuçları

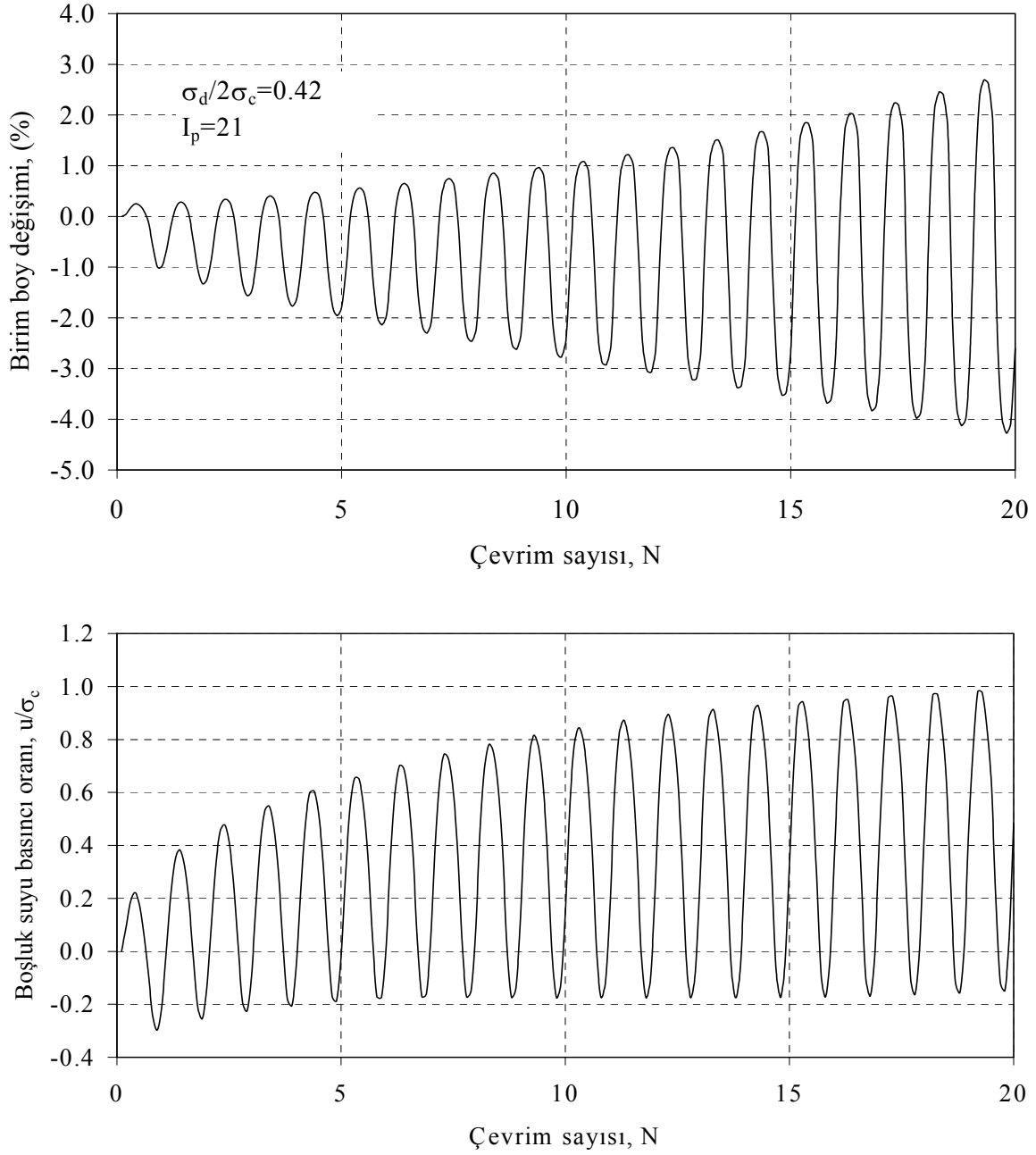
Dinamik kayma gerilmesi oranı çevrim sayısı ilişkileri

Dinamik kayma gerilmesi oranları değerleri her deney için hesaplanarak $\varepsilon=\pm\%2.5$ (veya $\varepsilon_{da}=\%5$) değerindeki çevrim sayıları N'in değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir Şekilde de görüldüğü gibi 100 kPa konsolidasyon basıncı altında konsolide edilen numunelerden plastisitesi $I_p=40$ olanların $I_p=15-22$ olanlardan

daha yüksek dinamik kayma gerilmesi oranına sahip oldukları anlaşılmaktadır. Buradan plastik numunelerin tekrarlı yüklere karşı daha direçli oldukları görülmektedir.

Dinamik kayma gerilmesi oranı çevrim sayısı ilişkilerinde N=20 çevrim, 40 saniye süre ve M=7.5 büyüklüğündeki bir depreme eşdeğer olmaktadır (Seed v. diğ., 1976).

Plastisitenin kayma gerilmesi oranına etkisi



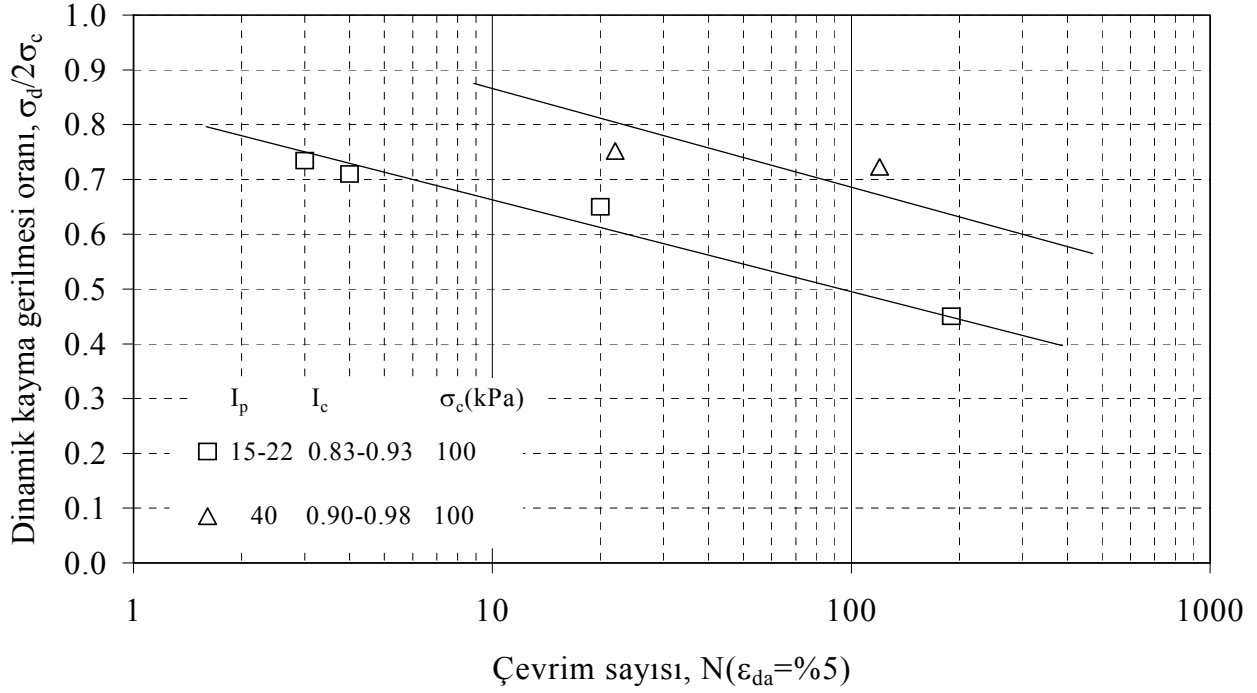
Şekil 2. DSY07 nolu deney sonuçları

N=20. çevrim sayısında $I_p=40$ olan numunelerde Dinamik kayma gerilmesi oranı 0.75 civarında iken $I_p=15-22$ olanlarda 0.60 civarındadır. Düşük plastisiteli killerde $\sigma_d/2\sigma_c$ -N ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Burada farklı kıvam ve konsolidasyona sahip numunelerin davranışı görülmektedir. Çevrim sayısı arttıkça $\sigma_d/2\sigma_c$ değerleri azalmaktadır.

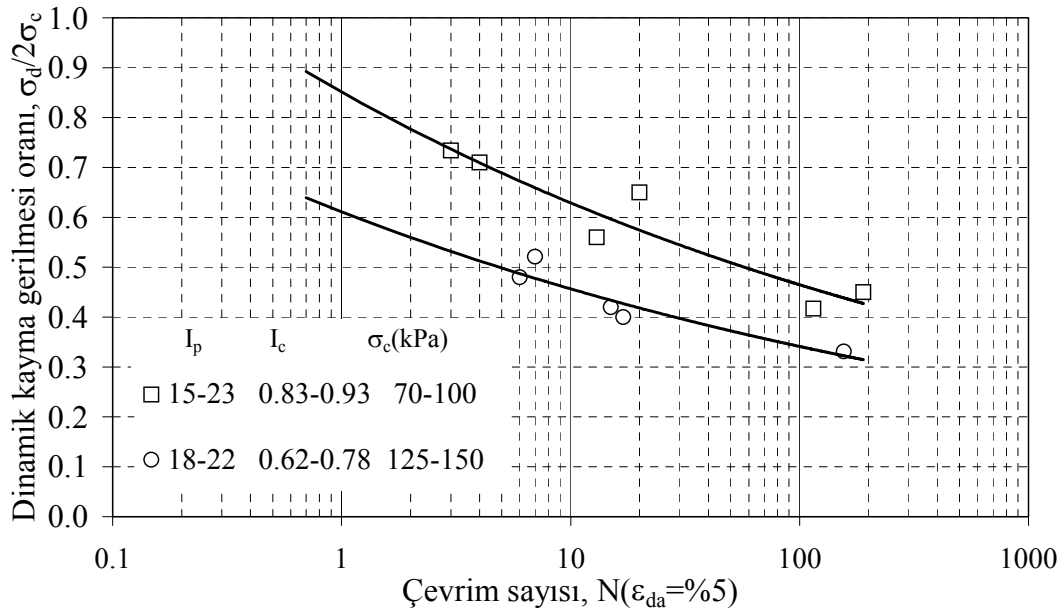
Aynı $\sigma_d/2\sigma_c$ değerinde katı numunelerin çevrim sayıları daha fazla olmaktadır. Bu numunelerin

tekrarlı yükler etkisinde daha yüksek mukavemet gösterdikleri söylenebilir.

Konsolidasyon basıncı $\sigma_c=150$ kPa olan numunelerin $\sigma_d/2\sigma_c$ ları daha düşüktür bunun nedeni bu numuneler diğerlerinden daha büyük dinamik düşey gerilmelerin etkisi altında kalmış olup ayrıca diğerlerinden daha yumuşak kıvamda olmalarıdır.



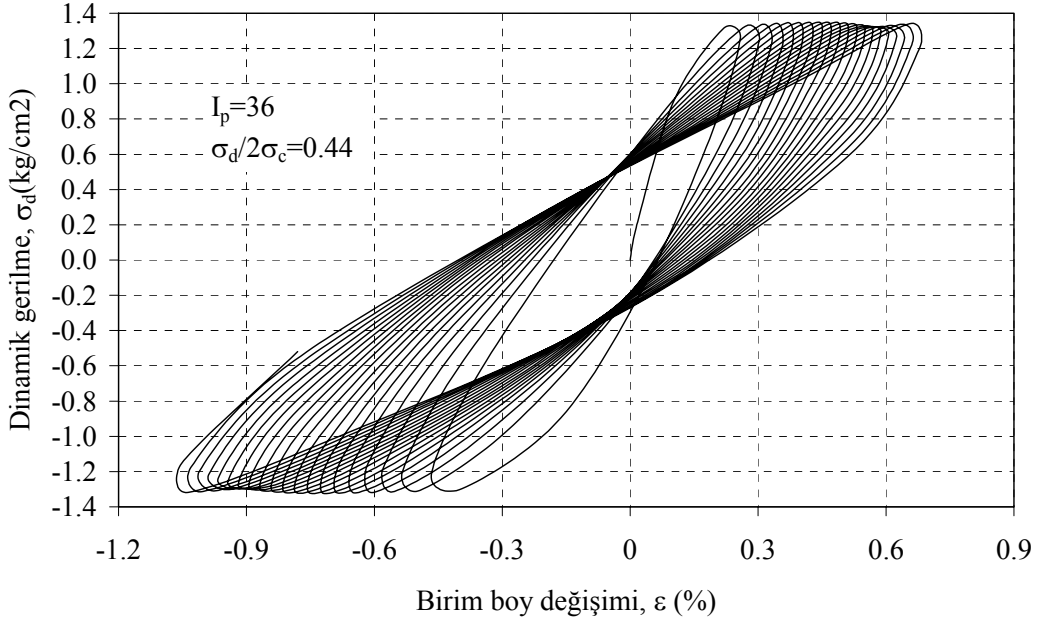
Şekil 3. Plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi

Şekil 4. Düşük plastisiteli numunelerde ($\sigma_d/2\sigma_c$)- N değişimi

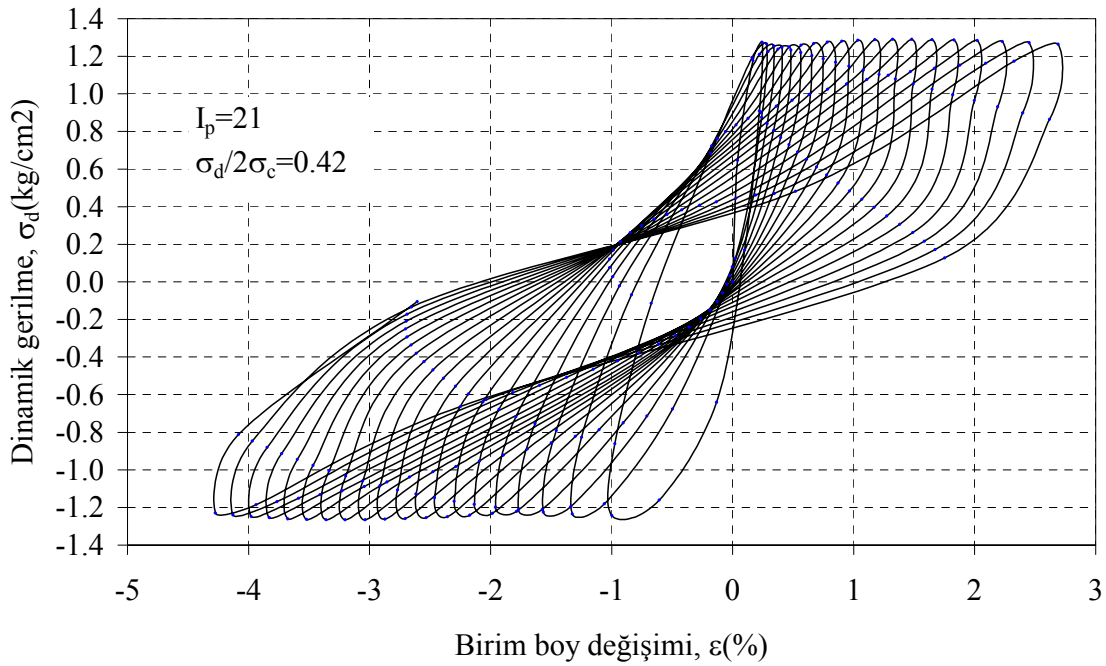
Dinamik gerilme-birim boy değişimi ilişkileri

Şekil 5 ve Şekil 6'da DY5 ve DY7 nolu deneylerin uygulanan düşey dinamik gerilme genliği altında birim boy değişimi ilişkileri görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi

yaklaşık aynı oranda $\sigma_d/2\sigma_c=0.4$ gerilme uygulanan bu numunelerden plastisitesi $I_p=36$ olan DY5 nolu numunede birim boy değişimleri sınırlı kalırken, DY7 nolu numunede $N=20$ çevrim sonunda birim boy değişimi genliği $\epsilon_{da}=\%7$ civarında olmaktadır.



Şekil 5. DSY05 nolu deney dinamik gerilme birim boy değişimi ilişkisi

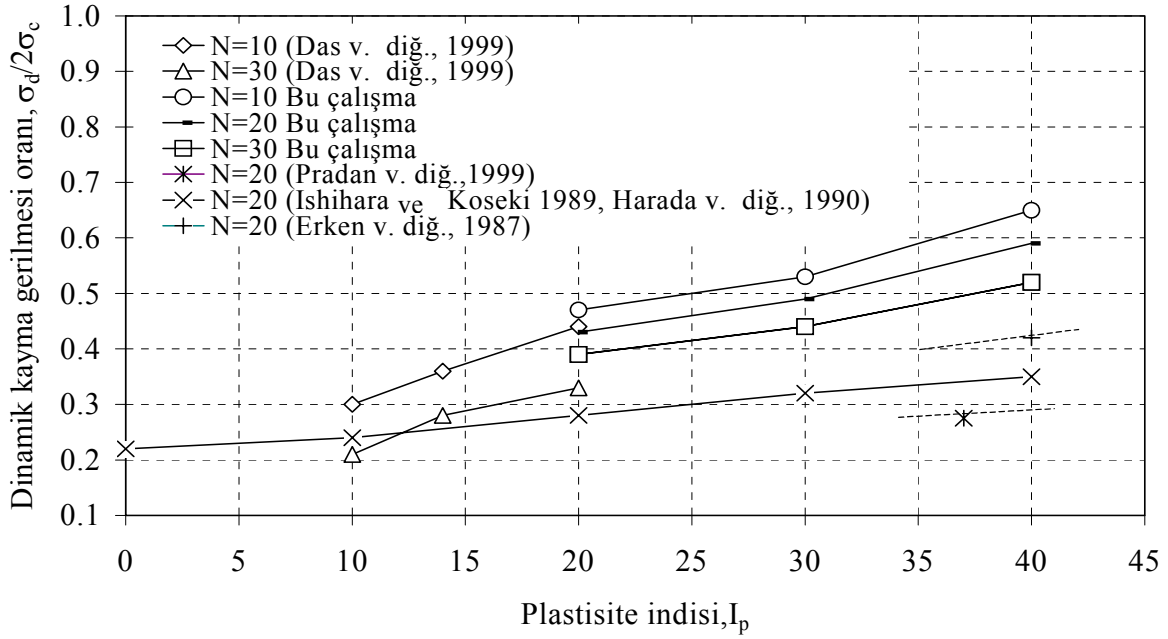


Şekil 6. DSY07 nolu deney dinamik gerilme birim boy değişimi ilişkisi

Gerilme birim değiştirme ilmikleri ise düşük plastisiteli numunenin davranışında çok büyük ve eğim fazla iken yüksek plastisiteli numunede ise daha küçük ve daha dik olmaktadır. Buradan yüksek plastisiteli numunelerin dinamik yük etkisinde rijitlik ve kayma modülü kayıplarının daha az olduğu söylenebilir.

Dinamik kayma gerilmesi oranına plastisitenin etkisi

Plastisitenin artışının N=10 ve N=30 çevrim sayılarındaki dinamik kayma gerilmesi oranına göre değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Bu çalışmada elde edilen sonuçların diğer araştırmacıların sonuçları ile karşılaştırılması

Burada değişik dinamik kayma gerilme oranları altında kıvamları yaklaşık $I_c=0.70-0.90$ olan $\sigma_c=100$ kPa konsolidasyon basıncı altındaki katı numunelerin $N=10$ ve $N=30$ çevrim sayılarındaki değerleri esas alındığında plastisite arttıkça $\sigma_d/2\sigma_c$ nin arttığı görülmüştür. Aynı şekilde Das ve diğerleri (1999) tarafından aynı konsolidasyon basıncı ve aynı kıvamdaki hazırlanmış siltli numunelerin $\varepsilon_{da}=\%5$ birim boy değişimi seviyesindeki davranışının benzer olduğu görülmektedir. Siltli zeminlerde plastisitenin artması ile sıvılaşmaya karşı direncin arttığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan örselenmemiş suya doymun killi zeminlerin dinamik kayma gerilmesi oranının plastisite ile artışı, diğer araştırmacıların değişik plastisitede siltli numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deney aletinde yaptığı çalışmalar ile benzer davranış göstermiştir. Pradan ve diğerleri (1999) Fujinomori kili için plastisitenin $I_p=37$ ve $I_c=0.55$ deki değerinin bu çalışmadaki numunelerden daha az $\sigma_d/2\sigma_c$ göstermesi kıvamdan ve frekansın 0.1 Hz. olmasından kaynaklanmaktadır. $N=20$ çevrim sayısındaki $\sigma_d/2\sigma_c$ Erken ve diğerleri (1987) $N=20$ çevrim için bu çalışmada elde edilen $\sigma_d/2\sigma_c$ dan düşük $\sigma_d/2\sigma_c$ bulmuşlardır. Ishihara ve Koseki (1989) ve Harada ve diğerleri (1990) ince dane içeren

kumlar için ince dane oranı arttıkça $\sigma_d/2\sigma_c$ nin arttığını göstermişlerdir. Şekil 7'den de görüldüğü gibi kumlu olan bu numuneler daha düşük $\sigma_d/2\sigma_c$ değerine sahiptirler. Kumlu zeminlerde tekrarlı yüklerle etkisinde $\sigma_d/2\sigma_c$ daha az olmaktadır. Ariake kili daha yumuşak olduğundan $\sigma_d/2\sigma_c$ daha azdır. Böylece farklı çevrim sayılarında plastisite artarken dinamik kayma gerilmesi oranının arttığı görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Das ve diğerleri (1999) sonuçlarını tamamlayıcı niteliktedir.

Sonuç

Örselenmemiş normal konsolide killi zemin numuneleri üzerinde yapılan üç eksenli dinamik deneyler 0.50 Hz frekansında yapılmıştır. Deney sonuçlarından plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Dinamik kayma gerilmesi oranı $\sigma_d/2\sigma_c$ çevrim sayısı N , ilişkileri üzerinde birim boy değişimi seviyesi $\varepsilon_{da}=\%5$ değeri için plastisite arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı artmaktadır. Ayrıca $\sigma_d/2\sigma_c$ üzerinde kıvamın da önemli etkisi olmaktadır. Aynı çevrim sayısı dikkate alındığında yumuşak kıvamlı numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranı düşük olmaktadır.

Kaynaklar

- Ansal, A. M., (1981). Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ansal, A. M. ve Yıldırım, H., (1985). Killerin tekrarlı yükler altında kayma mukavemeti, *II.Ulusal Kil Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 24-27 Eylül, 329-341.
- Ansal, A. M., ve Erken, A., (1986). Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı, *Deprem Araştırma Bülteni*, **50**, 10-53.
- Ansal, A. M., ve Erken, A., (1989). Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, **115**, 968-983.
- Das, M. B., Puri, K. V. ve Prakash, S. (1999). Liquefaction of silty soils, *Proceedings of 2th Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, June 21-25, Portugal, 619-623.
- Erken, A., Ansal, A. M. ve Özarda, H., (1987). Killerde deformasyon kontrollü dinamik deneyler, *III. Ulusal Kil Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 21-27 Eylül, 343-355.
- Guo, T. ve Prakash, S., (1999). Liquefaction of silts and silt-sand mixtures, *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, **125** 706-710.
- Harada, M., Urasawa, Y. ve Sirai, S. (1990). Liquefaction strength characteristics of reclaimed coastal area by sands containing fines, *JSSMFE*, **38**, 21-26.
- Houston, N. W. ve Herrmann, H. G., (1979). Undrained cyclic strength of marine soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **106**, 691-711.
- Hyodo, M., (1997). Evaluation of in-situ cyclic shear strength of clay, *Proceeding. of The 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Hamburg, 6-12 September, Germany, 123-126.
- Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Yamamoto, Y. ve Fujii, T., (1999). Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, **39**, 45-58.
- Ishihara, K. ve Koseki, J. (1989). Cyclic shear strength of fine containing sands, *Proceedings of the 12th International Conference on SMFE Special Volume*, 101-106.
- Özudogru, K. G., (1979). Önceden yüklenmiş killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Özay, R., Okur, V. ve Erken, A., (2000). Örselenmemiş killi zeminlerde kıvamın dinamik kayma modülü ve sönüme etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, İ.T.Ü. İstanbul, 26-27 Ekim, Türkiye, 437-444
- Pradhan, B. S. Matsui, T., Yasuhara, K. (1999). Cyclic undrained triaxial strength of clay by a Round Robin Test, *Soils and Foundations*, **4**, 121-129.
- Seed, H. B., Martin, P. P. ve Lysmer, J. (1976). Pore-water pressure changes during liquefaction, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division*, ASCE, **102**, 323-347.
- Yasuhara, K., Yamanouchi, T. ve Hirao, K., (1982). Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay, *Soils and Foundations*, **22**, 77-91.
- Yıldırım, H., (1987). Farklı tekrarlı yükleme biçimleri altında killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.