

THE BEHAVIOR OF SOILS IN DYNAMIC TRIAXIAL AND TORSIONAL SHEAR TEST SYSTEMS

Ahmet ŞENER

Res. Asst.
Technical
University of
Istanbul
İstanbul, Turkey

Murat ÖZMEN

Civil Engineer
Technical
University of
Istanbul
İstanbul, Turkey

Zülküf KAYA

Res. Asst.
Technical
University of
Istanbul
İstanbul, Turkey

Ayfer ERKEN

Assoc. Prof. Dr.
Technical
University of
Istanbul
İstanbul, Turkey

SUMMARY

After the 1999 Kocaeli earthquake, the disturbed soil samples have been obtained from the city to determine the cyclic strength properties of Adapazari soils. The liquid limit and the plasticity index are 45 % and 26 respectively. To compare the cyclic behavior of soils the cyclic triaxial and the cyclic torsional test systems have been used in this research. The samples have been prepared by the dry pluviation method. The undrained cyclic triaxial tests with the $f=0.1$ Hz frequency and varying cyclic shear stress ratio have been carried out on the clay samples in both the dynamic triaxial compression system and dynamic torsional shear system. Stress-strain and pore water pressures behavior of soils were studied. Dynamic strength of soils has been obtained from the relationship between cyclic shear stress ratio and the number of cycles. It was observed the dynamic strength of soils were determined to be greater in triaxial test compared to that in torsional test due to the differences in stress conditions.

ZEMİNLERİN DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ VE BURULMALI DENEY SİSTEMLERİNDEKİ DAVRANIŞI

Ahmet ŞENER	Murat ÖZMEN	Zülküf KAYA	Ayfer ERKEN
Arş. Gör İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, Türkiye	İnşaat Müh. İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, Türkiye	Arş. Gör İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, Türkiye	Doç. Dr. İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, Türkiye

ÖZET

Adapazarı zeminlerinin dinamik mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla, 17 Ağustos 1999 depreminden sonra Adapazarı kent merkezinde geoteknik araştırmalar kapsamında açılmış muayene kuyularından alınmış likit limit değeri $\omega_l=45$, plastisite indisi $PI=26$ olan zemin numunesi üzerinde dinamik deneyler yapılmıştır. Numuneler kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmış ve 100 kPa ye konsolide edilmiştir. Deneyler drenajsız koşullarda ve $f = 0.1$ Hz frekansında dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde ve dinamik burulmalı kesme deney sisteminde değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarında yapılmıştır. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı davranışları incelenmiştir. Dinamik kayma gerilmesi oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren dinamik mukavemet eğrileri elde edilmiştir.

1. GİRİŞ

Günümüzde zeminlerin ve zemin yapılarının statik yükleme durumlarına göre stabilite hesaplarının yanı sıra tekrarlı yükleme durumundaki davranışlarının araştırılması da geoteknik mühendisliğinin önemli problemlerinden birisidir. Bu nedenle, depremler, patlama, dalga yükleri, makine temel titreşimleri, trafik yükleri gibi tekrarlı yükler altında olan zeminlerin dinamik mukavemet özelliklerinin belirlenebilmesi için zeminde oluşan deformasyonların ve boşluk suyu basıncındaki oluşturduğu değişimlerin bilinmesi gerekmektedir.

Zeminlerin dinamik davranışının incelenmesinde önemli olan konulardan biri de mukavemet özellikleri ve etki eden faktörlerdir. Bu amaçla drenajsız olarak tekrarlı yükler altında mukavemette meydana gelen azalmaların incelenmesi gerekir. Zeminlerin dinamik mukavemeti tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan boşluk suyu basıncına bağlı olarak değişim gösterir.

Adapazarı ve çevresinin büyük bir kısmını Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin getirdiği siltli çakıllı kumlu zeminler ile killi içeren Kuvaterner alüvyon birikintileri oluşturur. Genellikle çakıl-kum-silt serileri devamlı bir şekilde görülür. Bu birikintiler merceksi veya bant şeklinde düşük plastisiteli kil ve silt serileri içermektedir. Kil, kum, çakıl ve silt bazen tek başlarına belli seviyelerde bazen de bunların değişik kombinasyonları şeklinde aralanmalı olarak görülmektedir (Önalp ve diğ., 2000).

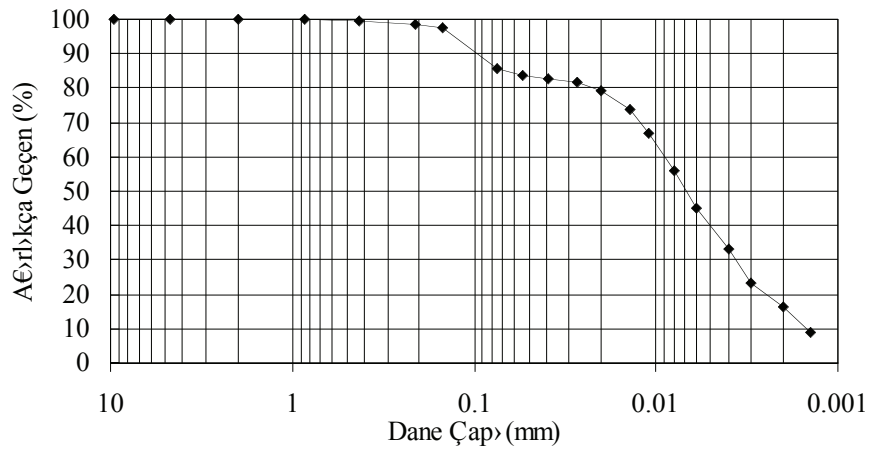
Adapazarı, Türkiye kuzeyinde doğudan batıya uzanan Kuzey Anadolu Fayı'ndan dolayı tektonik açıdan aktif bir konumdadır. Şehir, aynı zamanda kalın bir alüvyon dolgu üzerinde yer alması nedeniyle çeşitli tarihlerde meydana gelmiş olan büyük magnitüdlü depremlerde hasar görmüştür. Yerel zemin şartlarından dolayı, depremler sırasında sıvılaşma ve taşıma gücü kaybı ile ilgili zemin hasarları karşılaşılmıştır (Erken, 2001). Bu nedenle zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi önem kazanmaktadır. Kil ve siltlerin deprem sırasındaki gerilme-şekil değiştirme davranışları laboratuvarında dinamik üç eksenli basınç, dinamik basit kesme ve dinamik burulmalı deney sistemleri kullanılarak araştırılabilir.

Bu çalışmada, Adapazarı'nda açılan muayene kuyularından alınmış olan örselenmiş zemin numunesi üzerinde drenajsız koşullarda ve $f=0.1$ Hz. frekansında değişik kayma gerilmesi oranlarında dinamik üç eksenli basınç deney sistemi ile dinamik burulmalı kesme deney sisteminde deneyler yapılmıştır. Zemin numunelerinin gerilme-şekil değiştirme-boşluk suyu basıncındaki değişim incelenmiştir. Ayrıca dinamik mukavemet eğrileri elde edilmiştir.

2. KULLANILAN MALZEME VE DENEY SİSTEMİ

Deneyler, Adapazarı şehir merkezinden alınmış örselenmiş zemin numunesi üzerinde yapılmıştır. Laboratuarda yapılan kıvam limitleri, elek ve hidrometre deneyleri ile dinamik deneylerde kullanılan zemin numunesinin endeks özellikleri belirlenmiştir. Zemin numunesinin likit limit değeri $\omega_l=45$, plastisite indisi $I_p=26$ dır.

Zeminin dane dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan zemin numunesiyle ilgili diğer endeks özellikler Tablo 1'de verilmektedir.

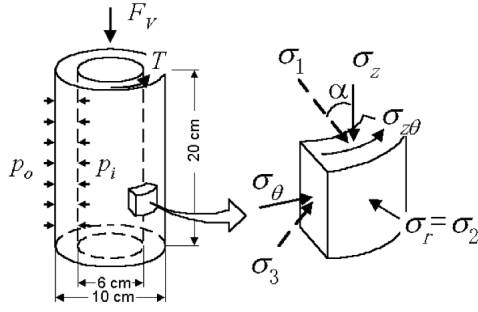


Tablo 1. Kullanılan Zemine Ait Endeks Özellikler

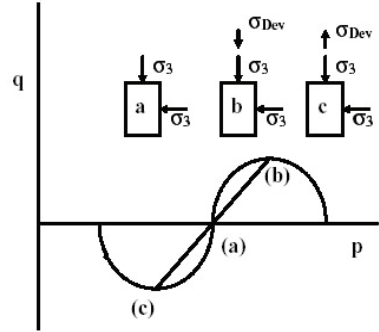
İnce Dane Oranı	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
İDO (%)	w _L (%)	w _P (%)	Ip(%)
86	45	19	26

Tekrarlı yükler altında zeminlerin dinamik davranışlarını belirlemek için bir grup deney dinamik üç eksenli deney sisteminde yapılmıştır. Deney sisteminin düşey statik yük kapasitesi 5000 N ve hücre basınç dayanımı 1000 kN/m² dir. Deneylerde 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılabilir. Dinamik sinüzoidal düşey yük kapasitesi ± 2000 N dur. Dinamik deneyler gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir. Dinamik deneylerin frekansı 0.1 Hz ile 2 Hz arasında ayarlanabilir. Dinamik üç eksenli deney sisteminde düşey yük, düşey deplasman, boşluk suyu basıncı ve hacim değişimleri ölçülebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan diğer deney sistemi Ishihara ve Towhata (1983) tarafından kullanılan ve İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan içi boş silindirik burulmalı kesme deney aletinin geliştirilmiş bir modeliyle gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi düşey eksenel kuvvet, F_v , burulma momenti, T , iç hücre basıncı, p_i ve dış hücre basıncı, p_o dış kuvvetlerinin otomatik olarak ölçülüp kaydedilebilmesinin yanı sıra düşey eksenel yer değiştirme, ΔH , burulma açısı, $\Delta \theta$, iç hücre hacim değişimi, ΔV_i ve numune hacim değişimi, ΔV_s 'nin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu deney sistemi ile içi boş numuneye drenajsız şartlarda, izotropik veya anizotropik üç eksenli gerilme koşullarında 0.1 Hz ile 2 Hz. frekans aralığında tekrarlı burulma yüklemesi uygulanabilmektedir. Burulmalı kesme deneyleri gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilmektedir. Deneyde kullanılan numunelerin iç yarıçapı $r_i=3$ cm, dış yarıçapı $r_o=5$ cm ve yüksekliği $H=20$ cm'dir. Numune içerden ve dışardan 0.3 mm kalınlığındaki boyutları numune boyutlarına uygun membranlarla çevrelenmektedir. Şekil 2'de deney sistemlerinde numunelere uygulanan gerilme koşulları gösterilmiştir.



a. Dinamik Burulmalı Kesme



b. Dinamik Üç Eksenli Basınç

Şekil 2 Deney Sistemlerinde Uygulanan Gerilme Koşulları

3. NUMUNE HAZIRLANMASI VE DENEYLERİN YAPILMASI

3.1. Numune Hazırlama

Her iki deney sisteminde de numuneler kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_k=1.40 \text{ t/m}^3$ değerinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Dinamik üç eksenli deney aletinde hazırlanan numunelerin çapı 50 mm. ve yüksekliği 100 mm'dir. İçi boş silindirik burulmalı dinamik kesme deney aletindeki numunelerin ise iç çapı 60 mm, dış çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm'dir.

3.2. Deneylerin Yapılması

Deneyler için İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuarında mevcut olan dinamik üç eksenli basınç deney aleti ve içi boş silindirik burulmalı dinamik kesme deney aleti kullanılmıştır. Kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanan numuneler 30 kN/m^2 'lik basınca eşit vakum üst drenaj kanalından uygulanmıştır. Ardından bu vakum değeri izotropik basınç olarak aktarılmıştır ve vakum sıfıra indirilmiştir. Bu sayede kuru numune bozulmadan durmaktadır. Bu halde iken alt drenaj kanalından çok düşük hidrolik eğim altında üst drenaj kanalından çıkacak şekilde su geçirilmiştir. Su geçirme işlemi tamamlandıktan sonra numunenin doygunluğunu sağlamak için ters basınç 200 kN/m^2 'ye,

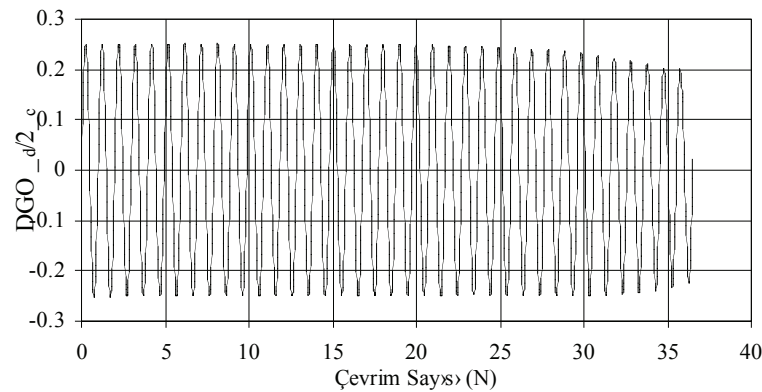
çevre basıncı ise 230 kN/m²'ye getirilmiştir. Numune bu gerilme şartları altında uzun süre bekletilerek doygunluğu kontrol edilip % 95 üzerinde doygunluk sağlandıktan sonra ters basınç 200 kN/m², çevre basıncı 300 kN/m² yapılarak 100 kN/m²'lik efektif izotropik çevre gerilmesi altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyon sonunda ölçülen kuru birim hacim ağırlıkların $\gamma_k=1.40 \text{ t/m}^3$ ile 1.45 t/m^3 arasında değiştiği görülmüştür.

Konsolidasyonunu tamamlayan numunelere tekrarlı yükler uygulanmış ve bu süreçte çevre basıncı sabit tutulmuştur. Deneyler drenajlar kapalı olarak $f=0.1 \text{ Hz}$ frekansında yapılmıştır. Dinamik yükleme yapılırken dinamik yük, düşey deplasman, birim kayma ve boşluk suyu basıncı ölçülmüştür.

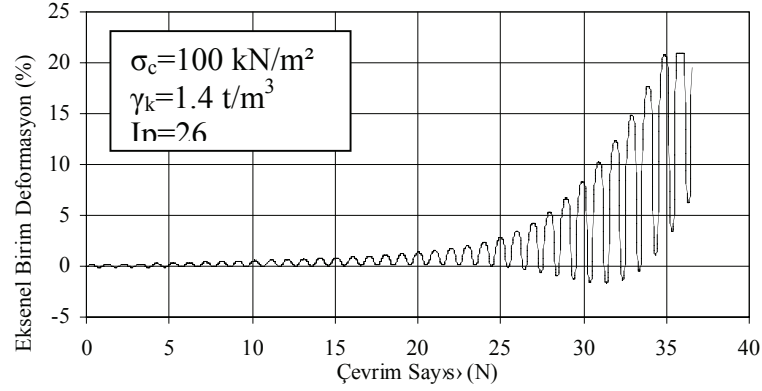
4. DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEY SONUÇLARI

Bir grup deney dinamik üç eksenli deney sisteminde yapılmıştır. UDN 6 deneyinde uygulanan dinamik yük, eksenel deformasyon ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 3. de gösterilmiştir. UDN6 deneyinde uygulanan

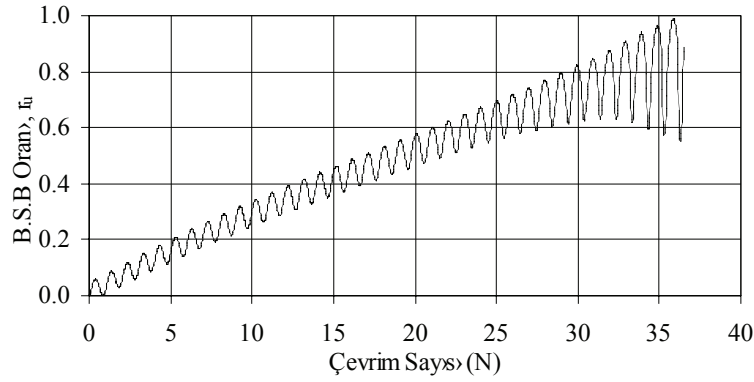
dinamik kayma gerilmesi oranı $\frac{\sigma_d}{2\sigma_c} = \pm 0.25$ 'dir.



a. Dinamik Yük



b. Birim Deformasyon Değişimi



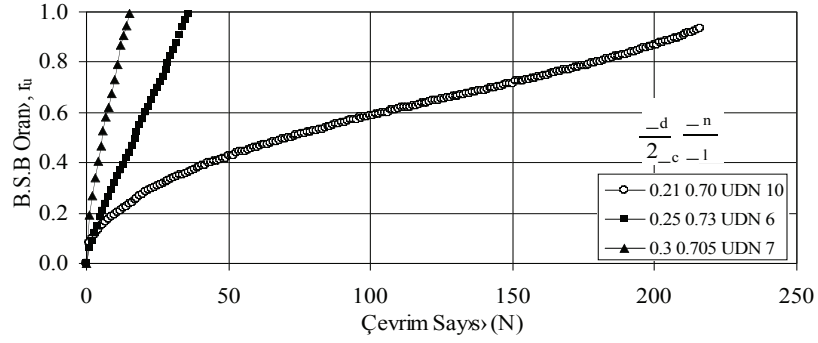
c. Boşluk Suyu Basıncı Oranı Değişimi

Şekil 3. UDN 6 Nolu Deneye Ait Deney Sonuçları

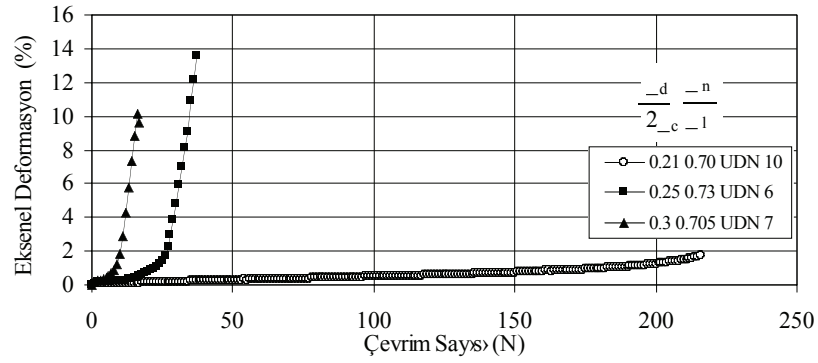
Eksenel boy değişimine göre zemin $N=27$ çevrimde $\varepsilon=\pm\%2.5$ seviyesine ulaşırken eksenel deformasyonlar (ε) Dobry (1991) 'de önerildiği gibi $\gamma = 1.5 \times \varepsilon$ denklemi ile birim kayma deformasyonlara (γ) dönüştürüldüğünde çevrim sayısı $N=25$ de göçme kriteri olan $\gamma=\pm\%2.5$ birim kayma deformasyon değerine ulaşmıştır.

Şekil 4 de dinamik üç eksenli deney sisteminde değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarında yapılmış deneylere ait birim kayma ile boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi görülmektedir. Gerilme seviyesi arttıkça zemin küçük çevrim sayılarında göçme sınırı olan $\varepsilon=\pm\%2.5$ eksenel birim deformasyon seviyesine ulaşmaktadır. UDN 7 deneyinde dinamik kayma gerilmesi oranı 0.30 olup çevrim sayısı $N=10$ 'da eksenel birim deformasyon $\varepsilon = \pm\%2.5$ seviyesinde ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u=\%78$ dir. UDN 10

deneyinde dinamik kayma gerilmesi oranı 0.21 olup çevrim sayısı $N=215$ de eksenel birim deformasyon $\varepsilon=\pm\%2.5$ seviyesinde ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u=\%90$ dır.



a. Boşluk Suyu Basıncı Oranı – Çevrim Sayısı İlişkisi



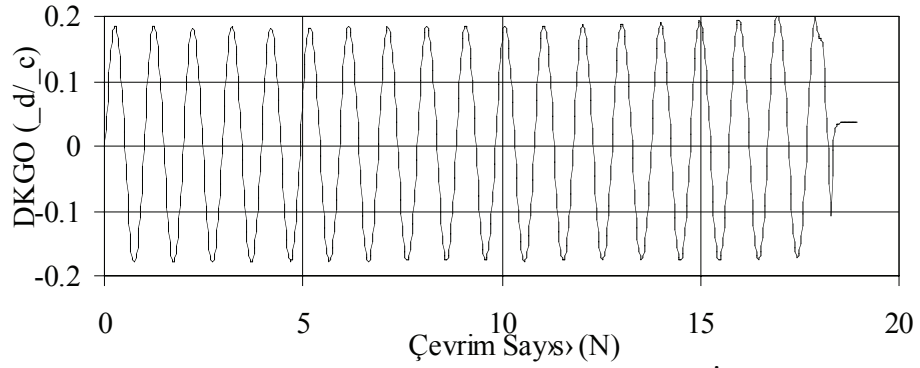
b. Eksenel Deformasyon – Çevrim Sayısı İlişkisi

Şekil 4. Gerilme Oranının Eksenel Deformasyon ve Boşluk Suyu Basıncına Oranı

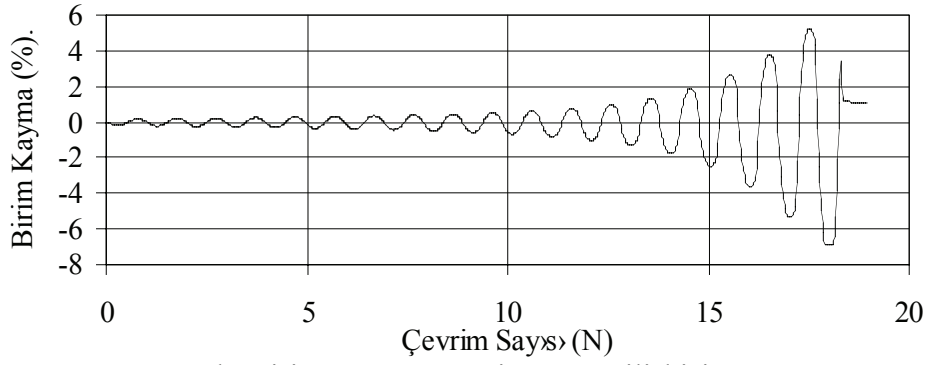
5. DİNAMİK BURULMALI KESME DENEY SONUÇLARI

İkinci aşamada aynı γ_k değerinde hazırlanmış zemin numuneleri üzerinde dinamik burulmalı kesme deneyleri yapılmıştır. Şekil 5’de TDN 7 deneyinin dinamik kayma gerilmesi, birim kayma ve boşluk suyu basıncında oluşan değişimlerin sonuçları verilmiştir. TDN 7 deneyinde uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranı $\frac{\tau_d}{\sigma_c} = \pm 0.18$ dir.

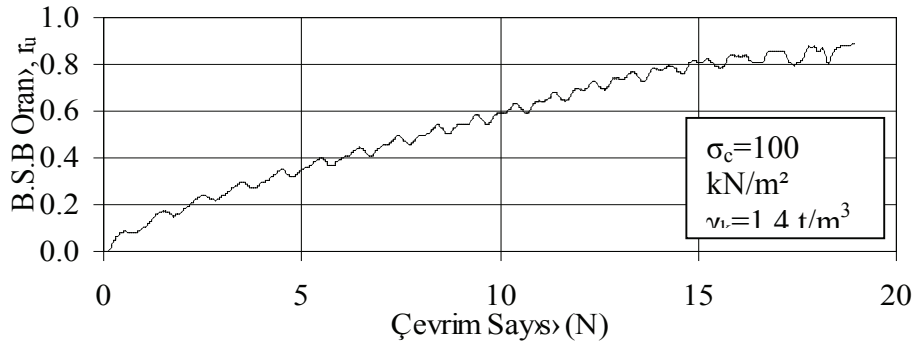
Çevrim sayısı $N=17$ ’de göçme kriteri $\gamma=\pm\%2.50$ birim kayma değerine ulaşılmakta ve bu çevrim sayısında boşluk suyu basıncı oranı $r_u=\%85$ olmaktadır.



a. Dinamik Kayma Gerilmesi – Çevrim Sayısı İlişkisi



b. Birim Kayma-Çevrim Sayısı ilişkisi

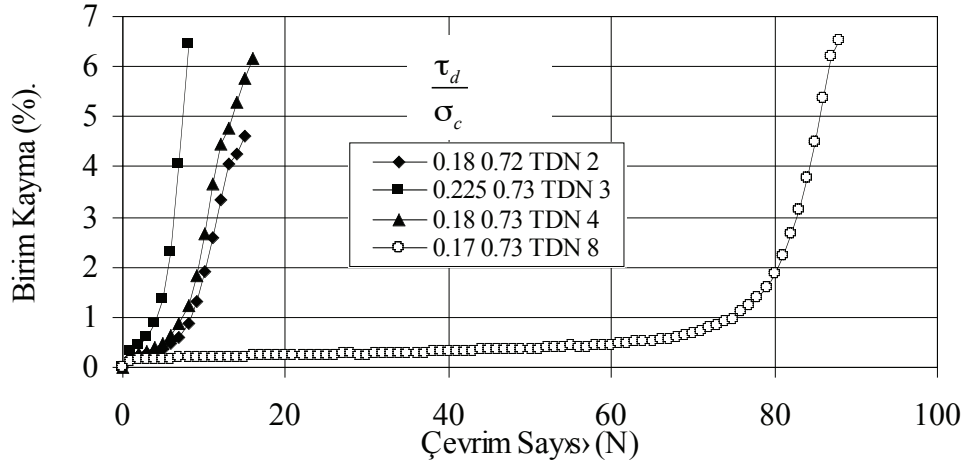


c. Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Çevrim Sayısı İlişkisi

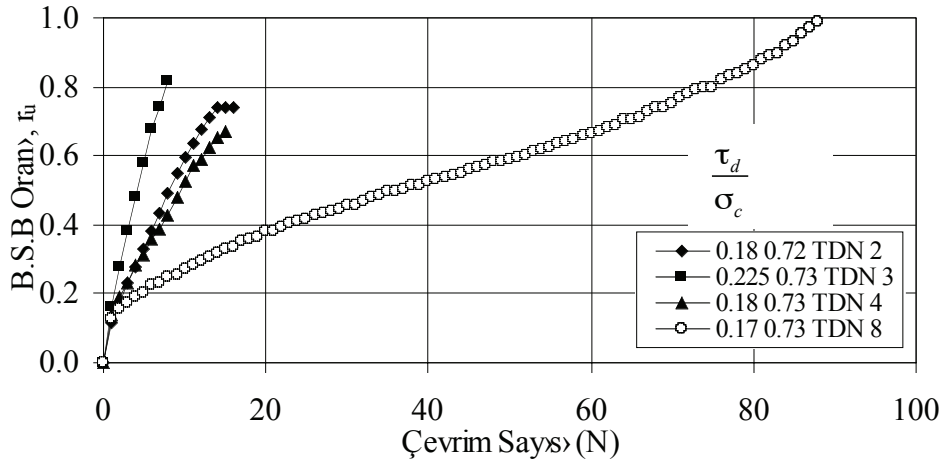
Şekil 5. TDN7 Nolu Deneye Ait Deney Sonuçları

Şekil 6’da dinamik burulmalı kesme deney sisteminde değişik dinamik kayma gerilmesi oranlarında yapılmış deneylere ait birim kayma ile boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı ile ilişkisi görülmektedir. Gerilme seviyesi arttıkça zemin küçük çevrim sayılarında göçme sınırı olan $\gamma = \pm 2.5\%$ deformasyon seviyesine ulaşmaktadır. TDN 2 ve TDN 4 deneylerinde dinamik kayma gerilmesi oranı 0.18 olup her iki deneyde de çevrim

sayısı $N=10$ 'da birim kayma $\gamma=\pm 2.5$ seviyesinde ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u=57\%$ 'dir. TDN 3 deneyinde dinamik kayma gerilmesi oranı 0.225 olup çevrim sayısı $N=6$ 'da birim kayma $\gamma=\pm 2.5$ seviyesinde ve boşluk suyu basıncı oranı $r_u=68\%$ 'dir.



a. Birim Kayma – Çevrim Sayısı İlişkisi

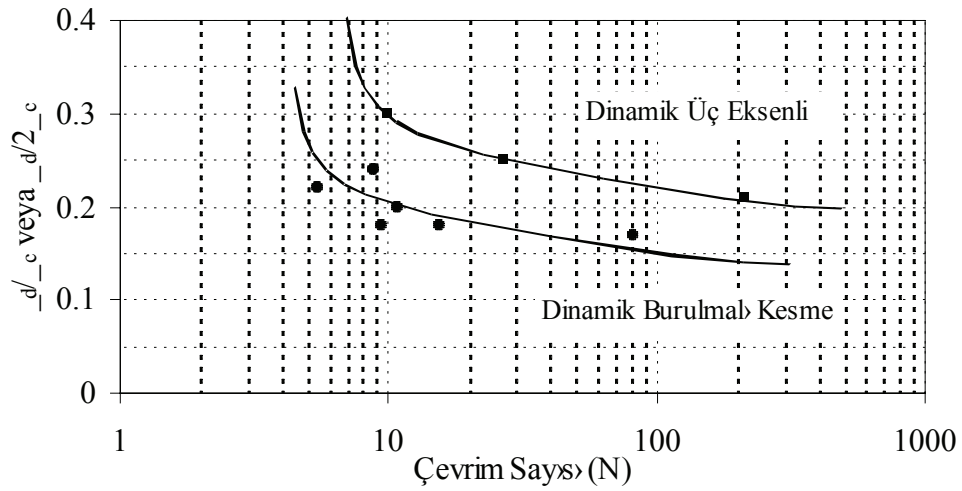


b. Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Çevrim Sayısı İlişkisi

Şekil 6. Dinamik Burulmalı Deney Sisteminde Kullanılan Numunelerin Birim Kayma ve Boşluk Suyu Basıncı Davranışı

6. DİNAMİK KAYMA GERİLMESİ ORANI – ÇEVİRİM SAYISI İLİŞKİSİ

Her iki deney sisteminde yapılan deneylerin dinamik kayma gerilmesi oranı – çevrim sayısı ilişkisi Şekil 7’de görülmektedir. Dinamik üç eksenli basınç deneyi sonuçlarını dinamik burulmalı kesme deney sonuçları ile karşılaştırabilmek için eksenel birim deformasyonlar (ϵ) Dobry(1991) de verilen denklem ile birim kayma deformasyonlara (γ) dönüştürülmüş olup birim kayma deformasyonun $\gamma=\pm 2.5$ olduğu çevrim sayıları dikkate alınmıştır. Bu sonuçlara göre zemin numunesi dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde daha büyük dinamik kayma gerilmesi oranlarında göçme kriterlerine ulaşmıştır. $N=20$ çevrim sayısına eşit 7.5 büyüklüğündeki bir depremin dinamik üç eksenli basınç deneyleri sonuçlarına göre bu zeminde oluşturacağı dinamik kayma gerilmesi oranı 0.26 iken, dinamik burulmalı kesme deney sisteminde elde edilen sonuçlara göre bu değer 0.18 olmaktadır.



Şekil 7. Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı - Çevrim Sayısı

7. SONUÇ

Adapazarı kent merkezinden alınan, likit limit değeri $\omega_l=45\%$, plastisite indisi $I_p=26$ olan örselenmiş zemin numunesi dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde ve dinamik

burulmalı kesme deney sisteminde $\gamma_k=1.40 \text{ t/m}^3$ olacak şekilde kuru yağmurlama yöntemiyle hazırlanarak her iki deney sisteminde farklı dinamik kayma gerilmesi oranlarında deneyler yapılmıştır. Bu deney numunelerine her iki deney sisteminde farklı dinamik gerilmeler uygulanmıştır. Gerilme oranları arttıkça zeminde oluşan boşluk suyu basıncı artarak toplam gerilmeye yaklaştırmıştır. Deformasyonlarda ise büyük artışlar meydana gelmiştir. Dinamik kayma gerilmesi oranı ile $\pm \%2.5$ kayma deformasyon seviyesine ulaşılan çevrim sayısı arasındaki ilişki incelendiğinde aynı çevrim sayısında dinamik üç eksenli deneye ait dinamik gerilme oranının dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen değerden daha büyük olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Erken, A. "The Role of Geotechnical Factors on Observed Damage in Adapazarı", Proceedings of the XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, İstanbul, Turkey, 2001, p.p.29-32.

Önalp, A., Sert, S., Bol, E. "Adapazarı Zeminlerinin Deprem Performansı", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, s.375-382, 26-27 Ekim 2000, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Vucetic, M., Dobry, R. "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1991, Vol. 117, No. 1, pp. 89-107.

Ishihara, K.; Towhata, I.. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads, 1983, Soils and Foundations, 23, 11-26.