

Kaolin kilinin dinamik mukavemet özellikleri

Çiğdem TİPİ¹, Zülküf KAYA², Hacı Bekir KARA³

¹ T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Kayseri, TÜRKİYE

^{2,3} Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE

ÖZET

Yapıların uygun olmayan zemin tabakaları üzerinde inşa edilmesi, son zamanlarda meydana gelen depremler ve önümüzdeki yıllarda yaşanması beklenen büyük depremler, zeminlerin tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet davranışının bilinmesi, kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişimlerin bulunması, elde edilen değerlerin yapıların projelendirilmesinde ve uzun süreli stabilite hesaplarında kullanılması gibi mühendislik problemlerini beraberinde getirmiştir. Depremler, dalga yükleri, makine temel titreşimleri gibi tekrarlı yükler etkisinde zemin tabakalarının göstereceği davranışın önceden bilinmesi ve doğru ölçülmesi ile elde edilen sonuçlara göre hareket edilmesi zemin dinamiğinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada yüksek su muhtevasında hazırlanarak konsolide edilen Uşak Kaolini'nin tekrarlı yüklemelere tabii tutulduğu dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney verileri kullanılarak zeminin kayma modülü ve sönüm oranı gibi dinamik mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Yükleme frekansı ve genliğinin dinamik özelliklere etkisinin ön planda tutulduğu deneysel çalışmalarla birim kaymanın kayma modülü ve sönüm oranı ile değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, dinamik gerilme oranı ve frekans arttıkça kayma modülünün arttığı ve artan deformasyonla beraber kayma modülünün azaldığı, sönüm oranının arttığı belirlenmiştir.

Anahtar

Kelimeler:

Dinamik basit kesme deneyi, dinamik üç eksenli deney, kayma deformasyonu, eksenel birim boy değişimi, kayma modülü, sönüm oranı.

Dynamic strength properties of kaolin clay

ABSTRACT

Construction of structures on unsuitable soil layers, the recent earthquakes and expected earthquakes hazard in the coming years have exposed engineering problems such as estimating the stress-strain and dynamic strength effects of soil layers under cycling loading, determining changes that may occur in shear strength and to implement these effects in the design and construction of structures. Soil dynamic has an important place to predict and evaluate behavior indicated by soil layers before under cyclic loading as earthquakes, wave loads, the basic vibrations of the machine. The purpose of this research is to study the behaviour of Uşak Kaolin subjected to cyclic loads based on dynamic shear and dynamic triaxial tests. In experimental methods, the effects of dynamic cyclic loading frequency and amplitude on dynamic properties of cohesive soils were prioritized and with obtaining experimental data were examined shear modulus, damping ratio, shear strain and axial length difference. Shear strain induced by cyclic loading has been dependent on the cyclic stress ratio and frequency. Shear modulus has increased by increasing cyclic stress ratio and frequency. Shear modulus decreased and damping ratios has increased with increased shear straining.

Key Words:

Dynamic simple shear test, dynamic triaxial test, shear strain, axial strain, shear modulus, damping ratio.

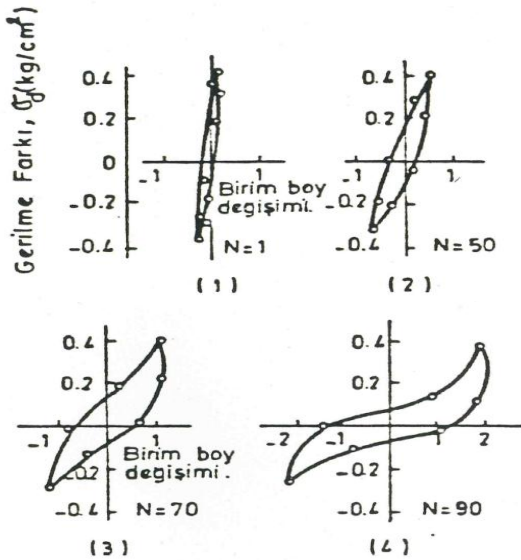
*Sorumlu Yazar (Corresponding author) e-posta: zkaya@erciyes.edu.tr Bu çalışma Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA'nın danışmanlığında yapılan "Zeminlerin Dinamik Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi" yüksek lisans tezinden yararlanılarak hazırlanmıştır. Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: "FBT 3033" (This work was supported by Research Fund of the Erciyes University. Project Number: "FBT 3033").

1. Giriş

Yapıların makine temelleri, nükleer, atomik ya da kimyasal patlamaların neden olduğu geçici titreşimler ve su dalgalarının meydana getirdiği titreşimlerin yanı sıra çok kısa süre ve nadiren de olsa ömrü boyunca karşılaşılabilecek ilave yüklerin en önemlisi depremlerden kaynaklanan tekrarlı yüklerdir. Bu yükler karşısında yapının davranışının yanında, yapıya ait temel zemininin davranışı da bilinmelidir.

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışları; gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri olarak göz önüne alınır. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ile bunların birim şekil deformasyonlarına göre değişimlerini; mukavemet özellikleri ise büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısını kapsamaktadır. Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışını belirlemek için laboratuvar deneylerinden (dinamik basit kesme, dinamik burulmalı kesme, dinamik üç eksenli gibi) yararlanır. Deneylerden elde edilen ampirik bağıntılar ve nümerik modeller ile zeminlerin arazideki davranış biçimleri yaklaşık olarak bulunabilir.

Laboratuvarında yapılan dinamik deneylerde, bir yükleme çevriminde zemin numunelerinde oluşan gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 1 ve Şekil 2' de gösterilen histerisis ilmiği şeklindedir. Bu eğrinin karakteristik özellikleri ilmiğin eğimi ve alanıdır [1].



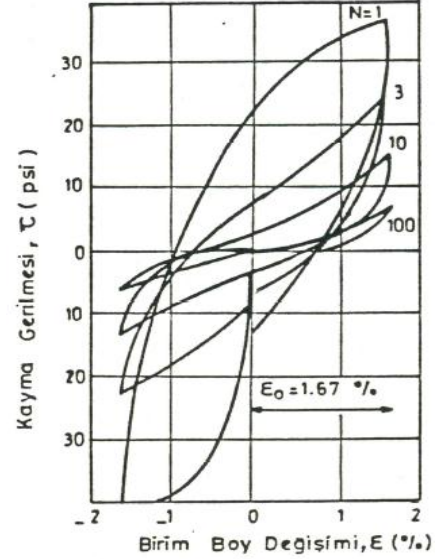
Şekil 1. Gerilme kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi [1]

Gerilme kontrollü deneylerde histerisis ilmiği çevrim sayısının artmasıyla büyümekte ve yatıklaşarak eğimi azalmaktadır. Deformasyon kontrollü gerçekleştirilen deneylerde ise eğim artan çevrim sayılarına karşılık belirli bir şekil değiştirme seviyesinin üzerinde aynı kalmaktadır [1].

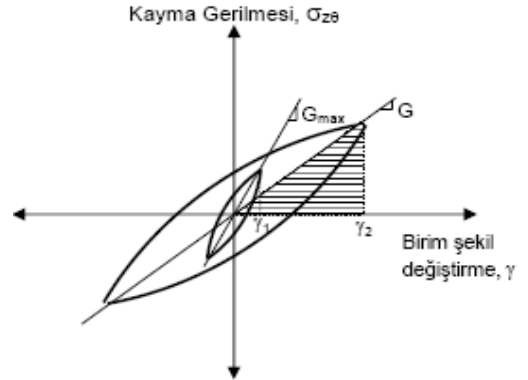
Şekil 3' deki histerisis ilmiğinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi dinamik kayma modülü, G , olarak

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1)$$

ifade edilir. Burada τ tekrarlı kayma gerilmesi, γ tekrarlı kayma deformasyonudur.

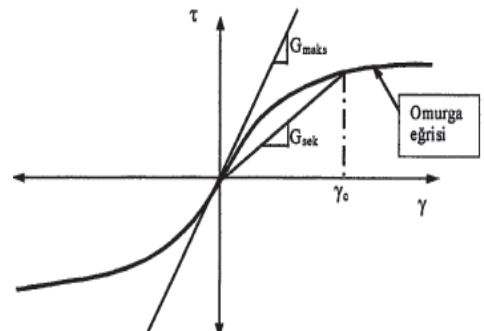


Şekil 2. Deformasyon kontrollü deneylerde histerisis ilmiğinin değişimi [1]



Şekil 3. Farklı şekil değiştirme genliklerindeki histeristik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [2]

Histerisis eğrisinin uç noktalarından geçen ve kayma gerilmesi ile birim kayma genliğinin fonksiyonu olan eğri omurga eğrisi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4). Omurga eğrisine orijinden teğet geçen doğrunun eğimi de dinamik kayma modülü G_{maks} ' dir [3].

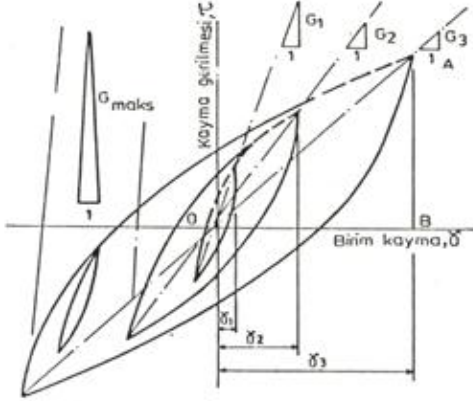


Şekil 4. G_{sek} 'in kayma birim deformasyonu ile tipik değişimini

Tekrarlı yükler altında meydana gelen şekil değiştirmeler ile zemin elemanlarındaki enerji kaybı sönüm oranı olarak tarif edilmektedir. Bir malzemenin veya zeminin sönümünün küçük ya da büyük olması dinamik yükler etkisi altında yutulmuş enerjiyle ilgilidir [1]. Şekil 5’ de gösterildiği gibi histeris ilmiklerinden yararlanılarak elde edilen sönüm oranı;

$$D = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\text{Histeris Çember Alanı}}{\text{Eğrinin Altında Kalan Üçgenin Alanı}} \right) \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Eğrinin altında kalan üçgenin alanı olarak histeris ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun yatayla yapmış olduğu OAB üçgeninin alanı ifade edilmiştir [5].



Şekil 5. Tekrarlı kayma gerilmesi altında oluşan histeris ilmikleri [1]

Zeminlerdeki dinamik mukavemet özelliklerinin değişimlerini açıklayabilmek, zemin davranışlarını etkileyen birçok nedenden dolayı karmaşık olmaktadır. Bir zemin elemanının sadece bir mukavemet değeri olmayacağı gibi tek bir dinamik kayma modülü veya sönüm oranı değeri de yoktur. Hardin ve Richart (1963); küçük gerilmelerde daneli zeminlerin kayma dalgası hızlarını ölçerek örselenmiş zeminlerin kayma gerilmeleri üzerinde çalışmışlardır.

Araştırmalarda; boşluk suyu oranı, su muhtevası ile dane özelliklerinin kayma dalgası hızı ve kayma modülü üzerinde etkileri görülmüştür.

Hardin ve Drnevich (1972) zeminlerin kayma modülü ve sönüm oranını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre parametreleri, çok önemli, önemli ve kısmen önemsiz olarak üç gruba ayırmışlardır. Gerilme genliği, efektif gerilme, boşluk oranı, çevrim sayısı ve doygunluk derecesi en önemli beş faktördür [6].

Dobry ve Vucetic (1987), birçok çalışmalarında kohezyonlu zeminlerde maksimum dinamik kayma modülü, G_{maks} , normalize edilmiş kayma modülü, G/G_{maks} ve sönüm oranında değişik faktörlerin etkisini araştırmışlardır. Dokuz faktörün etkileri Tablo 1’ de özetlenmiştir [6].

Tekrarlı yüklemelerin zeminde yol açtığı deformasyonların ve boşluk suyu basınçlarının oluşturduğu değişimler dinamik mukavemet özelliklerinin incelenmesinde gereklidir. Sabit periyodik yük altında çevrim sayısı arttıkça şekil değiştirmeler ve boşluk suyu basınçlarında artışlar meydana gelmektedir.

Titreşim devir sayısı yeterince tekrarlandığında boşluk suyu basıncı çevre basıncına ulaşarak zeminin taşıma gücü kaybolmakta, sıvılaşma meydana gelmekte veya şekil değiştirmeler izin verilebilir seviyelerin üzerine çıkarak göçme oluşmaktadır [7].

2. Bu Çalışmada Kullanılan Deney Numunesi ve Deney Yöntemleri

Bu çalışma kapsamında “Normal Konsolide Killerin Tekrarlı Yükler Etkisi Altındaki Davranışı” adlı doktora tezinden (Kara, 1990) yararlanılmıştır. Bu çalışmada laboratuvar ortamında çamur konsolidasyon aletinde hazırlanan numunelerden alınan düzlemsel izotropik ve yoğrularak elde edilen izotropik numuneler üzerinde dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney aletinde yürütülen deney sonuçları kullanılarak kayma modülü ve sönüm oranı hesaplanmıştır. Deney sistemlerinin ve kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri ayrıntılı olarak Kara (1990)’ da verilmiştir.

2.1. Deney Malzemesi ve Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde İstanbul Yıldız Porselen fabrikasından temin edilen Uşak kaolini kullanılmıştır. Uşak Kaolini üzerinde M.T.A. Enstitüsü ve Yıldız Porselen Fabrikası Laboratuvarları’nda yapılan mineralojik çalışmalar sonucunda esas mineralin Kaolinit olduğu ve fazlaca kuvars içerdiği belirlenmiştir.

Numuneler çamur konsolidasyon aletinde hazırlanmıştır. Kurutulan kaolin ahşap tokmakla dövülüp No: 40 (ASTM) eleğinden elenip başlangıç su muhtevası $w = \%250$ olacak şekilde çamur elde edilene kadar saf su ile karıştırılmış ve numune aletinde 12 cm çapında, 80 cm yüksekliğinde yerleştirilip hücre altındaki ve üstündeki poroz taşlarına filtre kağıtları konulmuştur. Kademeli şekilde basınç gerilmesi uygulanmış ve alt ve üst drenaj musluklarından çıkan su miktarları ve oturma ölçümleri ile konsolidasyon kontrol edilmiştir. Konsolidasyon basıncı $P = 100 \text{ kN/m}^2$ ye ulaştığında zaman numune aletten çıkartılmıştır. Yaklaşık 20 cm yüksekliğinde $w = \%45$ su muhtevasında zemin numunesi elde edilmiştir [1].

Deneylerde hem düzlemsel izotropik (örselenmemiş) hem de izotropik (örselenmiş) numuneler kullanılmıştır. Dinamik basit kesme deneyinde numune hazırlamada 70 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde çelik ring kullanılmıştır. Düzlemsel izotropik numuneler çelik ring çamur konsolidasyon aletinden çıkan hazırlanmış zemine dik olarak bastırılarak alınmıştır. İzotropik numuneler ise artan malzemenin yoğrulup çelik ringe doldurulmasıyla elde edilmiştir. Dinamik üç eksenli deneylerde ise düzlemsel izotropik deney numuneleri ana numunedan 100 mm yüksekliğinde kesilmiştir. Üst tabana 50 mm çapında üç adet şablon yerleştirilip 120° lik açılar ile üç dilime ayrılmış ve bu elde edilen dilimlerden de 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde numuneler elde edilmiştir. İzotropik numunelerde yine artan malzemenin yoğrulup ringe yerleştirilmesi ile hazırlanmıştır.

Tablo 1. Normal konsolide ve aşırı konsolide kilerde G_{maks} , G/G_{maks} ve D 'nin farklı faktörlerle değişimi [6]

Etkileyen Faktörler	G_{maks}	G/G_{maks}	D
Çevre Basıncı, σ_o	Artar	Sabit kalır yada artar	Sabit kalır yada azalır
Boşluk Oranı, e	Azalır	Artar	Azalır
Jeolojik Geçmiş, t	Artar	Artabilir	Azalır
Çimentolanma, c	Artar	Artabilir	Azalabilir
Aşırı Konsolidasyon Oranı, AKO	Artar	Etkilemez	Etkilemez
Plastisite İndisi, I_p	AKO > 1 Artar AKO = 1 Sabit kalır	Artar	Azalır
Tekrarlı Birim Deformasyon, γ_c	-	G artar, G ve G_{maks} etkilenmez ise G/G_{maks} sabit kalır	Artar
Birim Boy Deformasyonu, γ	Artar	Azalır	Sabit kalır yada artabilir
Çevrim Sayısı, N	Büyük γ_c ' lerin N kez tekrarından sonra azalır. Fakat daha sonra zamanla toplar.	Azalır	Orta derecede γ_c ve N değerlerinde önemli değildir.

2.2. Deneysel Sistemleri

Veriler; dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemlerinin kullanıldığı, değişik frekans ve genliklerde düzlemsel izotropik ve izotropik numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilmiştir. Deneylerde tekrarlı gerilme yükleme şekli sinüzoidal olarak seçilmiş ve deneyler drenajsız koşullarda yapılmıştır.

Deneyler sırasında boşluk suyu basıncı, yatay kayma gerilmesi, birim kayma genliği, yatay ve düşey deformasyonlar grafik çizicilerle sürekli olarak kaydedilmiş ve belirli çevrimler için histerisis ilmikleri çizdirilmiştir. Deneylere, düşük gerilme seviyelerinde boşluk suyu sabitleştiğinde, yüksek gerilme genliklerinde ise deformasyonlar \pm %10 değerine ulaştığında son verilmiştir [8].

3. Kayma Modülü ve Sönüm Oranının Belirlenmesi

Dinamik basit kesme deneyinde, düzlemsel izotropik ve izotropik olarak hazırlanmış deney numuneleri $\sigma_c=100$ kN/m² hücre basıncında konsolide edildikten sonra dinamik basit kesme deneyinde 0.01, 0.10, 0.50 Hz frekanslarına ve farklı kayma gerilmesi genliklerinde deneye tabii tutulmuştur. Dinamik üç eksenli deney numuneleri ise $\sigma_c=100$ kN/m² hücre basıncında konsolide edilerek 0.02, 0.01, 0.10, 0.50, 1.00 Hz frekanslarında ve farklı dinamik gerilme oranlarında deneye tabii tutulmuştur. Hem basit kesme hem de üç eksenli deneylerinde, histerisis ilmikleri üç kanallı x-y çiziciyle kaydedilmiştir. Çizdirilen histerisis ilmiklerinde yatay ölçek birim boy değişimlerine, ΔL (mm), düşey ölçek ise uygulanan yüke, P (kg), karşılık gelmektedir.

Dinamik basit kesme deneylerinde çizdirilmiş her histerisis ilmiklerinde okunan boy değişimi, ΔL , numune yüksekliğine; P yükü numune kesit alanına oranlanarak her eğri için birim deformasyon, γ , ve kayma gerilmesi, τ , değerleri (3) ve (4) bağıntıları kullanılarak elde edilmiştir. Dinamik basit kesme deneyinde numuneye kayma gerilmeleri uygulandığı için dinamik kayma modülü herhangi bir ara işleme ihtiyaç duyulmadan deney sonuçlarına göre çizilen kayma gerilmesi deformasyon grafiğinden direkt olarak belirlenmektedir.

$$\gamma = \frac{\Delta L}{H} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Dinamik üç eksenli deneylerinde ise çizdirilmiş histerisis ilmiklerinin okunan düşey boy değişimi ΔH (mm), numune yüksekliğine; P yükü numune kesit alanına oranlanarak düşey deformasyon, ε , dinamik tekrarlı gerilme, σ , değerleri (5), (6) ve (7) bağıntılar yardımıyla elde edilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \quad (5)$$

$$\gamma = (1 + \mu) \varepsilon \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (7)$$

Her eğri için deformasyon ve gerilme değerleri elde edildikten sonra Fortran dilinde yazılan program yardımıyla eğrilerin alanı, eğrinin iki ucunu birleştiren doğrunun altında kalan üçgenin alanı ve doğrunun eğimi hesaplanmıştır. Bu şekilde her biri bir çevrimi temsil eden farklı gerilme oranlarında ve frekanslardaki histerisis ilmiklerinden kayma modülü ve sönüm oranı (1) ve (2) nolu denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

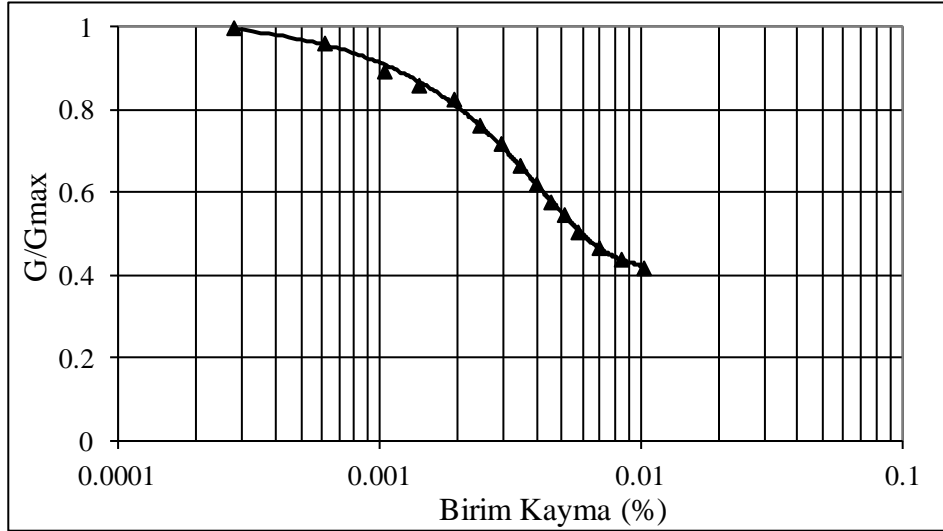
Dinamik üç eksenli basınç deneyinde, gerilme-düşey deformasyon ilişkisini gösteren histerisis ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun eğimi elastisite modülü (E) 8 nu.lı denklem ile belirlenir. Bununla beraber kayma modülü (9) nu.lı bağıntı kullanılarak elde edilebilir.

$$E = \frac{\text{Tekrarlı Gerilme Oranı, } \sigma_d / 2\sigma_c}{\text{Düşey Deformasyon, } \varepsilon} \quad (8)$$

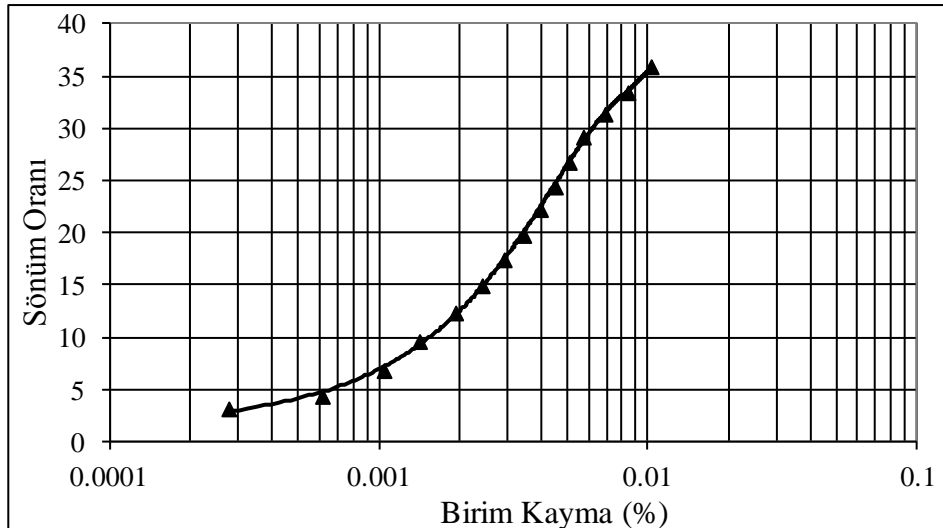
$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (9)$$

Her deney grubu için birim kayma ile kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi frekans değerlerine ve gerilme oranlarına göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Dinamik basit kesme deneylerin büyük bir kısmında birim kayma genlikleri % 0.001 değerinin üstünde kalırken, üç eksenli deneylerde ise birim kayma genlikleri % 0.001 alt değerinden başlamıştır. G_{maks} ile normalize edilmiş grafiklerde son çevrimlerdeki oturmaların azalması nedeniyle birim kaymada meydana gelen değişimlerim azalmasıyla eğriler yatıklaşmış ve noktalar eğrilerin son kısımlarına doğru sıklaşmıştır. Her frekans değerinde ve her gerilme oranında artan birim kaymaya karşılık kayma modülünde azalış, sönüm oranında ise artışlar meydana gelmiştir.

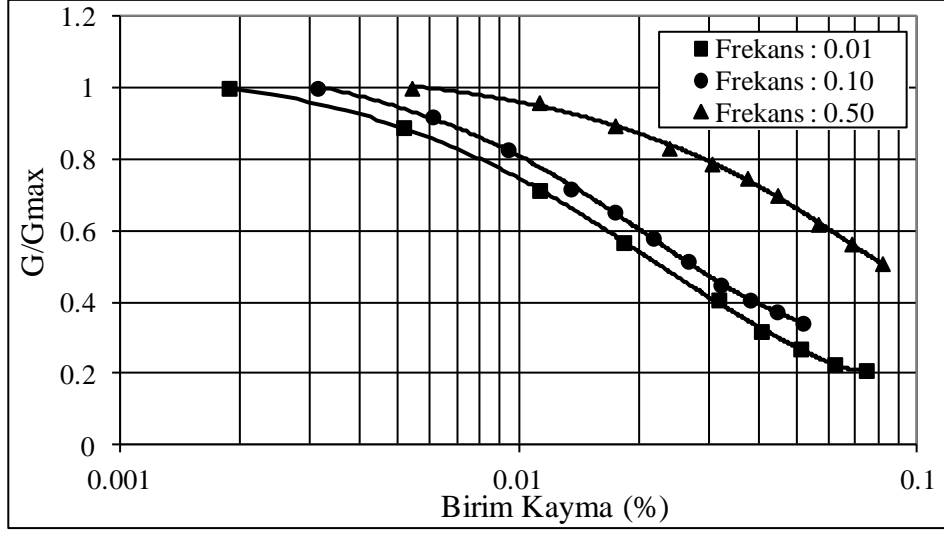
Elde edilen kayma modülü oranı ve sönüm oranının birim kayma ile ilişkisini gösteren eğrilerden en iyi sonuç frekansın 1.00 Hz olduğu deneyden elde edilmiştir. Kayma modülü; % 0.0001 - % 0.001 aralığında artan deformasyon ile birlikte azalış göstermiştir. Yine aynı deformasyon aralığında sönüm oranı artan deformasyonla birlikte artış gösterip %35 seviyelerine çıkmıştır (Şekil 6-Şekil 7).



Şekil 6. Dinamik üç eksenli deneyinde izotropik zemin numunesi kayma modülü oranı birim kayma ilişkisi (Frekans = 1.0 Hz, GO = 0.40)



Şekil 7. Dinamik üç eksenli deneyinde izotropik zemin numunesi sönüm oranı birim kayma ilişkisi (Frekans = 1.0 Hz, GO = 0.40)

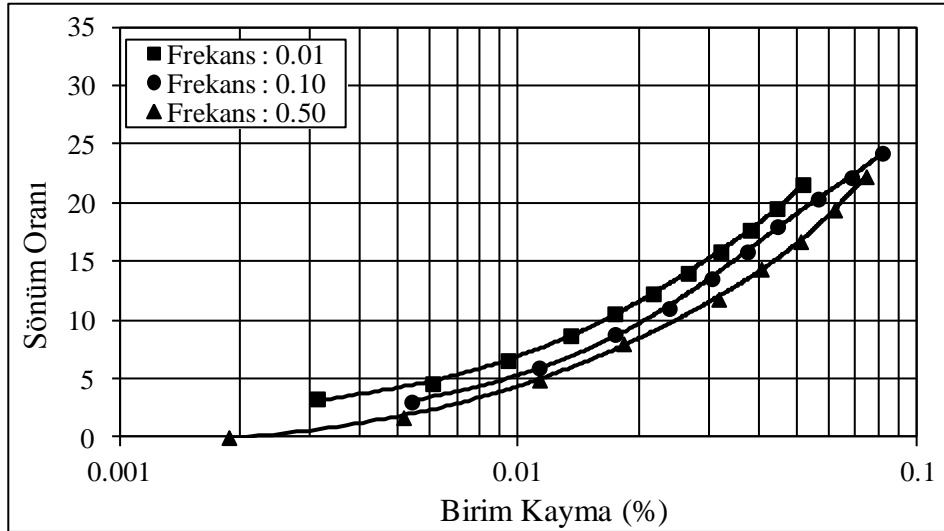


Şekil 8. Dinamik basit kesme deneyinde kayma modülü oranının frekansa göre değişimi (GO = 0.70)

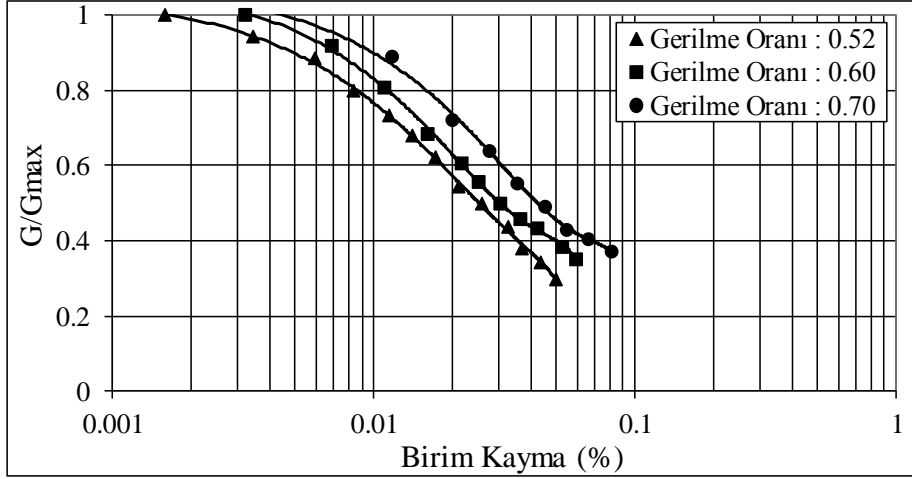
Artan frekans değerlerine göre kayma modülü oranı ve sönüm oranı değişimine bakılırsa dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sonuçları paralellik göstermekte ve artan frekans değerlerinin katkısı çok açık olmamakla beraber hem kayma modülünde hem de sönüm oranında artış meydana gelmektedir (Şekil 8, Şekil 9).

Deney sonuçları ayrıca aynı frekans değerinde farklı gerilme oranları içinde değerlendirilmiştir.

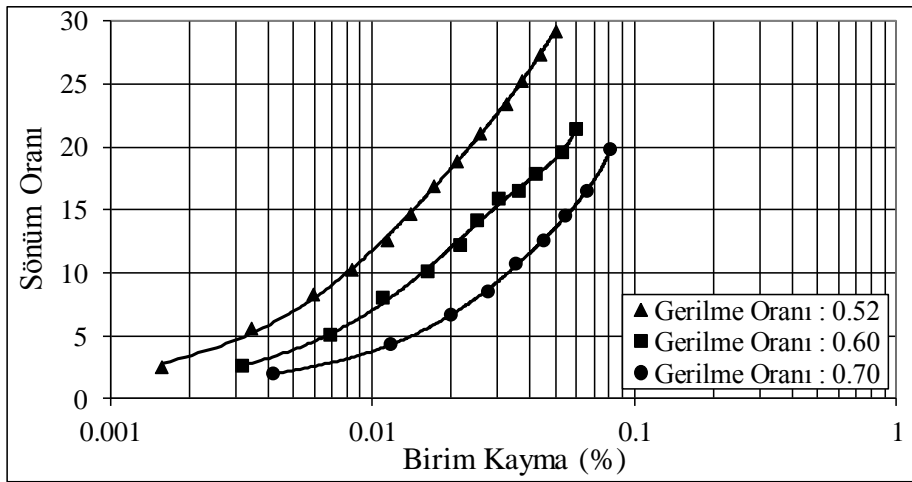
Gerilme oranının etkisini incelemek amacıyla dinamik kayma modülü oranı ve sönüm oranı eğrileri her değer için ayrı ayrı çizilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11' de dinamik basit kesme deneyi için gerilme oranlarının dinamik kayma modülü oranı ve sönüm oranı ile değişimi görülmektedir. Gerilme oranının etkisi frekansın etkisinden daha açık şekilde görülmekte ve artan gerilme oranıyla daha büyük deformasyonlar meydana gelmektedir. Bundan dolayı artan gerilme oranıyla kayma modülü oranı-birim kayma, $G/G_{maks}-\gamma$, ve sönüm oranı-birim kayma, $D-\gamma$, ilişkilerini gösteren eğriler sağa doğru kaymaktadır.



Şekil 9. Dinamik basit kesme deneyinde sönüm oranının frekansa göre değişimi (GO = 0.70)



Şekil 10. Dinamik basit kesme deneyinde kayma modülü oranının gerilme oranına göre değişimi (Frekans = 0.1 Hz)



Şekil 11. Dinamik basit kesme deneyinde sönüm oranının gerilme oranına göre değişimi (Frekans = 0.1 Hz)

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, Uşak Kaolini numuneleri üzerinde farklı başlangıç ve deneysel koşullarda yapılmış olan dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney verilerinden yararlanılmıştır. Yükleme frekansı ve gerilme oranının etkisi incelenmiş ve daha önce yapılan aynı tür çalışmalarla paralel sonuçlar elde edilmiştir. Boşluk suyu basınçlarının artmasının da etkisiyle aynı frekansta gerilme oranındaki artımlar, oluşan birim kaymaları arttırmaktadır. Artan çevrim sayıları, oluşan boşluk suyu basınçları ve birim kaymaları arttırmaktadır.

Zemin ana dizilimden dolayı düzlemsel izotropik numuneler, izotropik numunelerden daha fazla deformasyon yapmış ve kayma gerilmesi altındaki davranışlarında ise daha düşük mukavemet elde edilmiştir.

Frekansın ve gerilme oranının dinamik mukavemet özellikleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça tüm çevrimlerde oluşan deformasyonlar artmıştır. Birim kaymalar her kademede artmış fakat kademeler arasındaki boşluk suyu basıncı sönümlemesinden dolayı konsolidasyon oturmaları nedeniyle numune mukavemet kazanmış ve en küçük deformasyon artışları son çevrimlerde meydana gelmiştir. Bununla beraber birim kaymaların artmasıyla kayma modülünde azalma sönüm oranında ise artış gerçekleşmiştir. Frekansın etkisi ise düşük gerilme seviyelerinde görülmektedir fakat gerilme oranının artması ile frekansın önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Kaynaklar

1. Kara H. B., 1990. Normal konsolide killerin tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
2. Altun S., 2003. Burulmalı kesme deney aleti ile zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
3. Kramer, S. L., (Çeviren Kayabalı K.), 2003. Geoteknik deprem mühendisliği. Gazi Kitabevi, Ankara, 191-228.
4. Luh G., 1980. An experimental study of the dynamic behavior of soils, Ph. D. Thesis, The University of Wisconsin, Madison.
5. Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., and Daily III, W. D., 1998. Shear modulus and damping relationships for gravels. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(5), 396-405.
6. Hwang S. K., 1997. Dynamic properties of natural soils. Ph.D. Thesis, The University of Texas, Austin.
7. Zhang J., 2004. Characterizing the dynamic properties of south Carolina soils for ground motion evaluation. Ph. D. Thesis, The Graduate School of Clemson University, Clemson.
8. Kara H. B., Özer A.T., Kaya Z., 2001. Uşak kaolininin geoteknik ve dinamik özellikleri üzerine bir araştırma. 10. Ulusal Kil Sempozyumu, Konya.