

## Tekrarlı yükler altında kumların gerilme–şekil değiştirme özellikleri

Selim ALTUN\*, Atilla ANSAL

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

### Özet

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerine bağlı olarak zeminlerde oldukça farklı boyutlarda deformasyonlara yol açtığı ve bundan dolayı zeminin kayma mukavemetinin azaldığı; gerilme–deformasyon özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Özellikle suya doygun gevşek kumların tekrarlı yükler altında ortaya koydukları deformasyon yumuşaması ile beraber mukavemetlerini hızla kaybetme özellikleri bu tür zeminleri diğerlerinden oldukça farklı kılmaktadır. Bu çalışmada burulmalı kesme deney aleti ile suya doygun kumların değişik fiziksel özellikler ve deneysel koşullar altında gerilme–şekil değiştirme özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Drenajsız koşullarda ve gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilen deneylerde kumların tekrarlı yükler altında dinamik gerilme–şekil değiştirme özelliklerine bazı faktörlerin etkisi araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Burulmalı kesme, laboratuvar deneyi, kum zemin, gerilme–şekil değiştirme özellikleri.

### The cyclic undrained stress–strain behaviour of saturated sand

#### Abstract

It is known that cyclic shear stresses induced by earthquake, cause a range of shear strain due to granular and index properties of soil and thus losing shear strength of soil and changing stress–strain behavior. In particular, saturated loose sands differ from the other type of soils because of losing quickly their shear strength due to strain softening under cyclic loading. In this study, changing in stress–strain properties of saturated sand having different physical characteristics under different test conditions was investigated with a series of hollow cylindrical torsional shear test in laboratory. In the tests, which are performed on sand using torsional shear apparatus, the changes of the shear stress amplitude, the excess pore water pressure and the shear strain due to the number of cycles shall be determined. The effect of some factors on stress–strain relationships in sand was evaluated with stress–controlled, consolidated–undrained tests. The changes of the shear modulus and the damping ratios depends on the shear strain amplitude were tried to determine in different confining stresses, relative densities and initial consolidation conditions with performed tests. In results of the tests, it was seen that the stress–strain behavior of sand was significantly influenced by these factors.

**Keywords:** Torsional shear, laboratory test, sandy soil, stress–strain behavior.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Selim ALTUN. saltun@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 65 81.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Burulmalı kesme deney aleti ile kum zeminlerin dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 04.04.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 01.05.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerine bağlı olarak zeminlerde oldukça farklı boyutlarda deformasyonlara yol açtığı ve bundan dolayı zeminin kayma mukavemetinin azaldığı, gerilme–deformasyon özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Bu mukavemet kaybı, zemin türü ve özellikleri ile ele alındığında zeminlerin tekrarlı yükler altında oldukça farklı davranış ve gerilme–şekil değiştirme özellikleri gösterdikleri görülmektedir. Bu yüzden değişik türdeki yüklere maruz olan zeminlerin davranış özellikleri de her bir zemin türünde oldukça farklı tepkilerle ortaya çıkmaktadır

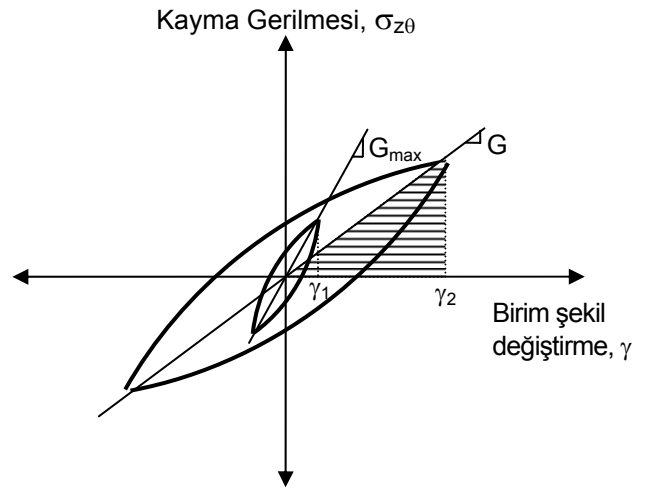
Özellikle suya doymun gevşek kumların gerek hızlı monotonik gerekse tekrarlı yükler altında ortaya koydukları deformasyon yumuşaması ile beraber mukavemetlerini hızla kaybetme özellikleri bu tür zeminleri diğerlerinden oldukça farklı kılmaktadır. Oysa sıkı kumlarda bu özellik gözlenmemektedir. Asal gerilme eksenlerinin döngüsü, gerilme seviyesi ve gerilme geçmişi gibi zemin ve yükleme özelliklerin etkisi altında olan gevşek kumlarda ortaya çıkan deformasyon yumuşaması ve beraberindeki sıvılaşma olayı geoteknik mühendisliğinin ve zemin dinamiğinin en dikkat çekici konularından birisi olmuştur.

## Suya doymun kumların gerilme–şekil değiştirme özellikleri

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını, bir başka ifadeyle dinamik özelliklerini tanımlarken, bunları gerilme–şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri diye iki gruba ayırabiliriz. Gerilme–şekil değiştirme özellikleri olarak genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin ve bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması anlaşılır. Mukavemet özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır. Bu iki grup özelliklerin bulunması için çoğunlukla aynı tür deney sistemlerinden faydalanılır.

Şekil değiştirmelerin küçük seviyelerde kalması bekleniyorsa kumların gerilme–şekil değiştirme

özelliklerinin belirlenmesinde “*lineer elastik teori*”ye uygun modellerin kullanımı daha doğru olmaktadır. Bu şekil değiştirme seviyesinde zemin davranışının modellenmesinde “*kayma modülü*” en önemli parametre olmaktadır. Şekil değiştirmelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını ifade edebilmek için şekil değiştirmelerin teorik olarak yaklaşık  $10^{-5}$  den küçük olması gerektiği ve zeminlerin bu seviyenin altında elastik davranış özellikleri gösterdiği kabul edilir. Yine bu şekil değiştirme seviyesinde kayma modülü maksimum değerinde ( $G_{maks}$ ) olup elastik sınırlar içerisinde bu sabit değerini sürdürür (Şekil 1).



Şekil 1. Histeritik gerilme–şekil değiştirme ilişkisi

Şekil değiştirme seviyesinin yaklaşık olarak  $10^{-3}$  den küçük olması durumunda zeminin davranış özellikleri “*elasto-plastik teori*”ye daha uygun olacaktır. Bu şekil değiştirme aralığına orta deformasyon seviyesi adı verilir. Artık bu deformasyon seviyesinden itibaren kayma modülü azalmaya, şekil değiştirmeler artmaya başlar. Yine bu seviyeden itibaren tekrarlı yüklemelerle beraber enerji kayıpları oluşur ve zeminin bu soğurma özelliğini temsil etmek için “*sönüm oranı*” ifadesi kullanılır. Bu deformasyon seviyesine kadar şekil değiştirmelerin halen yeterince küçük olduğu ve zemin özelliklerinde kalıcı değişikliklerin oluşmadığı kabul edilir. Kayma modülünün ve sönüm oranının da tekrarlı yüklemeler sonucu değişmediği bu sabit seviyeli zemin davranışı “*azalmayan histerisis türü*” olarak isimlendirilir. Bu tür zemin

davranışlarını bünyesel olarak modelleyebilmek için en uygun seçim “*lineer viskoelastik teori*” (Kelvin, Maxwell vb.) olmaktadır. Lineer olmayan, çevrimden bağımsız model çalışmalarında ise yine enerji kayıplarıyla beraber lineer olmayan deformasyonların dikkate alınabildiği modellerle (Hyperbolic, Ramber-Osgood, vb.) gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve dolayısıyla zeminin kayma modülü  $G$  ve sönüm oranı  $D$  elde edilebilmektedir. Orta deformasyon seviyesindeki zemin davranışını temsil eden en önemli parametreler kayma modülü ve sönüm oranıdır.

Kalıcı şekil değiştirmelerin oluşmadığı zemin ortamlarında simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalan zeminlerin davranışları genellikle kayma modülü ve sönüm oranı özellikleri ile belirlenir. Bu durumda kayma modülü ve sönüm oranı faktörlerinin kullanıldığı incelemeler zeminde oluşacak şekil değiştirmeler ile daha uyumlu olmaktadır. Birim kayma deformasyonunun  $10^{-2}$  den büyük olması durumunda artık tekrarlı yüklemeler altındaki zeminde oluşan şekil değiştirmelerin kalıcı olduğu söylenebilmektedir. Bu seviyeden sonra kayma modülü ve sönüm oranı tekrarlı yüklemelerle beraber değişimlerini sürdürürler. Bu durumda zemin davranışı “azalan histerisis türü” olarak isimlendirilir. Bu deformasyon seviyesi için de şekil değiştirmelerin “*plastik teori*”ye uygun olduğu kabul edilerek model çalışmaları yapılabilmektedir.

Yukarıda verilen model çalışmaları ile beraber zeminlerin küçük deformasyon seviyelerindeki gerilme-şekil değiştirme özellikleri bozulmamış veya yeniden oluşturulmuş numunelerle yapılan deneysel çalışmalarla da elde edilmektedir. Yapılan dinamik deneylerin birçoğunda farklı zeminlerin çok küçük deformasyon seviyelerindeki ( $<10^{-4}$ ) kayma modülleri saptanmaya çalışılmıştır.

Gerilme veya deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde çevrim sayısındaki artışla beraber boşluk suyu basıncının artması numunede yumuşamayı artırıcı yönde etki etmektedir. Böylece zeminlerin tekrarlı yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme özelliklerini temsil eden en önemli parametreler olan dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ve bu

değerlerin zamana (veya birim şekil değiştirmedeki artışa) bağlı olarak değişimi her çevrimde elde edilen histerisis ilmiklerinden yararlanılarak belirlenir.

Seed ve Idriss (1970), Hardin ve Drnevich (1972a, 1972b) tarafından kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerle yapılan laboratuvar deneylerinde kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi kayma deformasyonuna bağlı olarak araştırılmıştır. Bu çalışmalarda kum zeminlerde kayma modülüne etki eden en önemli faktörlerin çevre gerilmesi, birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranı olduğu; buna karşın sönüm oranının ise daha çok kum zeminin maruz kaldığı şekil değiştirme seviyesi ve efektif çevre gerilmesinden etkilendiği belirtilmektedir.

Tekrarlı yükler altındaki kohezyonsuz zeminlerin kayma modülünün belirlenmesi ile ilgili ilk deneysel çalışmalardan birisi Hardin ve Richard (1963) tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada farklı çevre gerilmelerinde ve boşluk oranlarında yapılan deneylerle zeminin kayma modülünde meydana gelen değişim araştırılmıştır. Sonraki yıllarda Sherif ve Ishibashi (1976), ve Iwasaki ve diğerleri (1978) kumlarla yaptıkları tekrarlı üç eksenli deneylerde çevre gerilmesinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Daha sonraki yıllarda yine laboratuvar koşullarında dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme ve rezonant kolon deney aletleriyle kumların gerilme-şekil değiştirme özelliklerini belirlemek ve bu özellikleri etkileyen zemin ve yükleme koşullarını ortaya koymak amacıyla bazı deneysel çalışmalar yürütülmüştür (Seed vd., 1986; Alarkon-Guzman vd., 1986; Chen vd., 1988; Ishibashi vd., 1988; Tatsuoka vd., 1991; Lo Presti vd., 1993, 1997; Vucetic, 1994; Lin vd., 1996; Lanzo vd., 1997; Zavoral vd., 1994).

## **Deney aleti, kullanılan malzeme ve deney yöntemi**

Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler 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,  $F_z$ , 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,  $\Delta H$ , burulma açısı,  $\Delta\theta$ , iç hücre hacim değişimi,  $\Delta V_i$  ve numune hacim değişimi,  $\Delta V_s$ 'nin belirlenmesine olanak tanımaktadır.

### İçi boş silindirik numunede gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin hesabı

Numune duvarı boyunca gerilme bileşenlerinin en son numune boyutları ve uygulanan yükler cinsinden ortalamalarının hesaplanması ve ifadeleri aşağıda verilmiştir. Bu gerilme bileşenlerinin ortalama değerler olduğu ve bu çalışmadaki bütün gerilmelerin efektif gerilmeleri temsil ettiği her zaman hatırlanmalıdır (Hight vd., 1983). Buna göre ortalama düşey eksenel gerilme,

$$\sigma_z = \frac{P}{A_s} + z\gamma' + \Delta\sigma_z \quad (1)$$

olarak hesaplanır. Yukarıdaki formülde  $P$  numunenin üst yüzeyine gelen toplam eksenel yük,  $A_s$  numunenin ortalama kesit alanı,  $z$  numunenin üst kısmından aşağıya doğru olan mesafe,  $\gamma'$  numunenin efektif birim hacim ağırlığı ve  $\Delta\sigma_z$  membran düzeltme kuvvetidir.

Numunenin deney süresince içi boş silindirik yapısını sürdürdüğü kabul edilerek numunenin yükseklikçe orta kısmındaki ortalama eksenel gerilme bileşeni aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\sigma_z = \left( F_z + \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2) \right) \frac{1}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{1}{2} \gamma' \cdot H + \Delta\sigma_z \quad (2)$$

Burada  $F_z$  yük hücresi kullanarak ölçülen (Şekil 2) ve numunenin üst yüzeyindeki gerilme koşullarının üniform olduğu kabul edilerek belirlenen deviatorik eksenel yüküdür. Burada  $r_i$  ve  $r_o$  ise, hacim değişim değerleri, numunenin düşey deformasyonu ve numunenin iç silindir kısmının hacim değişiminin ölçülmesiyle elde edilen numunenin en son iç ve dış yarıçaplarıdır.  $H$  ise numunenin yüksekliğidir.

Ortalama efektif radyal ve çevre gerilmeleri ise aşağıdaki ifadeler yardımıyla elde edilir:

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} + \Delta\sigma_r \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} + \Delta\sigma_\theta \quad (4)$$

Bu ifadeler Hight ve diğerleri, (1983) tarafından lineer elastisite kabulleri ve herhangi bir  $r$  yarıçapında,  $\sigma_\theta$  ve  $\sigma_z$  arasındaki ilişki kullanılarak türetilmiştir. Yine  $\Delta\sigma_r$  ve  $\Delta\sigma_\theta$  elastik ince kabuklar teorisine dayanarak hesaplanan, membranlar için düzeltme kuvvetleridir.

Herhangi bir gerilme dağılımı için çevre gerilmesi, aşağıdaki eşitliğin koşullarını sağlamaktadır:

$$T = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} [\sigma_{z\theta}(r) \cdot r] \cdot r dr \cdot d\theta \quad (5)$$

Bu koşullara dayanarak lineer elastik ve ideal plastik dağılıma uyan ve numune duvarı boyunca sabit olduğu kabul edilen ortalama kayma gerilmesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \right\} + \Delta\sigma_{z\theta} \quad (6)$$

Bu ifadede  $T$  burulma momenti,  $\Delta\sigma_{z\theta}$  ise membran düzeltme kuvvetleridir.

Ortalama şekil değiştirme bileşenleri, numunenin düzgün silindirik yapısını sürdürdüğü kabulüyle, düşey eksenel yer değiştirme,  $\Delta H$ , numunenin açısal sapması,  $\Delta\theta$ , iç hücre hacim değişimi,  $\Delta V_i$  ve numune hacim değişimi,  $\Delta V_s$ 'den hesaplanan numunenin iç ve dış yarıçaplarının değişimi,  $\Delta r_o$  ve  $\Delta r_i$  ve numunenin ilk boyutları,  $r_o$  ve  $r_i$  cinsinden hesaplanır. Böylece ortalama birim şekil değiştirme artımı,  $\gamma_{z\theta}$ :

$$\gamma_{z\theta} = 2 \cdot \varepsilon_{z\theta} = \frac{2 \cdot \Delta\theta \cdot (r_o^3 - r_i^3)}{3h \cdot (r_o^2 - r_i^2)} \quad (7)$$

şeklinde elde edilir. Sonuç olarak burulmalı kayma deneyi süresince içi boş silindirik numunede ölçülebilen dokuz bileşen belirlenebilmektedir. Bunların dört tanesi gerilme bileşeni, dört tanesi şekil değiştirme bileşenleri ve sonuncusu oluşan boşluk suyu basıncı,  $u$  dur (Pradel vd., 1990).

### Deneyde kullanılan malzemenin özellikleri

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen bütün deneylerde Japonya standart kumu olan “*Toyoura kumu*” kullanılmıştır. Kuartz özellikli ve çoğunlukla yarı yuvarlak-yarı köşeli tane yapısına sahip Toyoura kumu üniform ince kum sınıfına girmektedir. Kumun fiziksel özellikleri Tablo 1’de gösterilmektedir.

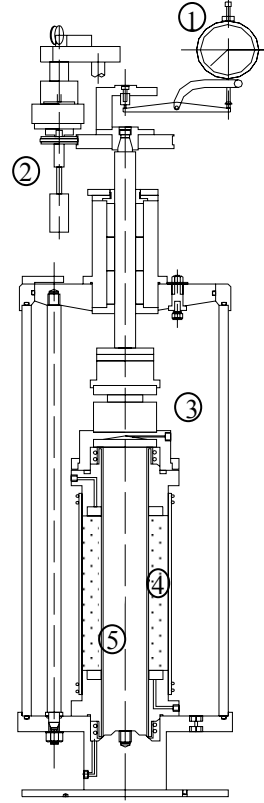
Tablo 1. *Toyoura kumunun fiziksel özellikleri*

Mineraloji	Kuartz
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembölü	SP
Özgül Ağırlık, $G_s$	2.65
Maksimum Boşluk Oranı; $e_{max}$	0.977
Minimum Boşluk Oranı, $e_{min}$	0.605
Ortalama Tane Çapı, $D_{50}$	0.17 mm
Efektif Çap, $D_{10}$	0.13 mm
Üniformluk Katsayısı, $U_c$	1.43

### Deney aleti

Bu çalışmada kullanılan içi boş silindirik dinamik burulmalı kesme deney aletinin genel görünüşü Şekil 2’de görülmektedir. Bu deney aleti ile içi boş numuneye drenajsız şartlarda, izotropik veya anizotropik üç eksenli gerilme koşullarında 0.1 Hz. frekansında tekrarlı burulma yüklemesi yapılarak zeminin dinamik gerilme ve şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri laboratuvar koşullarında belirlenmeye çalışılmıştır. Burulmalı kesme deneyleri gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilir.

Deneyde kullanılan numunelerin iç yarıçapı  $r_i=3.0$  cm, dış yarıçapı  $r_o=5.0$  cm ve yüksekliği  $H=20$  cm dir. Numune içerden ve dışardan 0.3 mm kalınlığındaki boyutları numune boyutlarına uygun membranlarla çevrelenmektedir.



1. Düşey yer değiştirme transdüresi
2. Açısal yer değiştirme transdüresi
3. Hücre içi dış kısım
4. Numune
5. Numune içi boş kısım

Şekil 2. Deney hücresi içerisine yerleştirilmiş numunenin görünüşü

### Numune hazırlama

Bu çalışma sürecinde yürütülen bütün deneylerde Japonya Geoteknik Birliği (JGS) tarafından yayınlanan standartlara (JGS 543-2000) uygun bir numune hazırlama metodu kullanılmıştır. Buna göre deneyler, kuru yağmurlama metoduyla  $D_r \approx \%30, \%50, \%60$  ve  $\%75$  rölatif sıklık değerlerini elde edebilmek için sırasıyla 10–15, 15–20, 20–25 ve 25–30 cm. yükseklikten sekiz tabaka halinde dökülerek oluşturulan gevşek ve orta sıklıktaki numuneler ile gerçekleştirilmiştir.  $CO_2$  geçirme tekniği kullanılarak ve  $20 \text{ kN/m}^2$  değerinde ters basınç uygulanarak numunenin, *Skempton B* değeri 0.96 ve üstü olacak şekilde doygunlaşması sağlanmıştır.

### Deney yöntemi

İçi boş burulmalı kesme deney sistemi diğer dinamik deney aletlerine kıyasla çok yönlü ve daha kompleks bir yapıya sahiptir. Bu nedenle deney yöntemlerinde de bazı farklılıklar oluşmaktadır. Bu çalışmada izotropik olarak konsolide edilmiş kum numuneler üzerinde

drenajsız koşullarda dinamik burulmalı kesme deneyleri yapılarak zeminin gerilme ve şekil değiştirme özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Zeminlerin dinamik özelliklerinin incelenmesinde burulmalı kesme deney aleti ile amaca bağlı olarak değişik yükleme koşullarında deneyler yapılabilmektedir. Deney aleti, araştırmacının incelenen konunun hedefi doğrultusunda, konsolide edilen zemin numunesine istenilen tür ve koşullarda yükleme yapabilmeye ve diğer birçok deneysel parametreyi değiştirebilmesine izin vermektedir.

Bu çalışmada, belirlenen amaç doğrultusunda yürütülen deneyler, yine Japonya Geoteknik Birliği (JGS) tarafından yayınlanan deney standartlarına ve yöntemlerine (JGS 550-2000 ve JGS 551-1998) uygun olarak gerçekleştirilmiş ve sonrasında yorumlanıp değerlendirilmiştir. Bu çalışmada yapılan bütün deneyler gerilme kontrollü olarak drenajsız koşullarda gerçekleştirilmiştir. Yine deneylerin tamamı 0.1 Hz sabit frekansında sinüzoidal dinamik yükleme koşullarında yapılmıştır.

### **Kumların dinamik gerilme–şekil değiştirme özelliklerini etkileyen faktörler**

Zeminlerde gerilme–şekil değiştirme ilişkisi incelenirken özellikle kalıcı şekil değiştirmelerin oluşmadığı zemin ortamlarında simetrik tekrarlı yükleme koşullarına maruz kalan zeminlerin davranışları genellikle kayma modülü ve sönüm oranı özellikleri ile belirlenir.

Bu tür zemin durumlarında kayma modülü ve sönüm oranı faktörlerinin kullanıldığı lineer analizler zeminde oluşacak şekil değiştirmeler ile daha uyumlu olmaktadır. Çünkü çoğu zemin türü belli bir şekil değiştirme seviyesinde Şekil 1’de görülen gerilme–şekil değiştirme ilişkisine sahiptir. Yani kayma modülü ve sönüm oranı faktörleri tanımları gereği birim şekil değiştirme genliğine bağlı olarak belirlenirler.

Hardin ve Drenevich (1972a) tarafından yapılan çalışmada kum zeminlerde kayma modülüne etki eden en önemli faktörlerin çevre gerilmesi,

birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranı olduğu; buna karşın sönüm oranının ise tane boyutu, doyguluk derecesi, boşluk oranı, içsel sürtünme açısı, yanal toprak basıncı katsayısı ve çevrim sayısı değerlerinden az miktarda etkilenmekle beraber daha çok zeminin maruz kaldığı şekil değiştirme seviyesi ve efektif çevre gerilmesinden etkilendiği belirtilmektedir.

Yapılan çalışma kapsamında yürütülen deneyler ile kum zeminlerin gerilme–şekil değiştirme ilişkisini ortaya koyan özellikler ve bunları etkileyen faktörler incelenmeye çalışılmıştır. Bu kısımda kumlarda dinamik kayma modülü ve sönüm oranındaki değişim artan genlikli gerilme koşullarında ele alınarak bu özelliklerin çevrim sayısı, çevre gerilmesi ve boşluk oranı gibi faktörlerden ne ölçüde etkilendikleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

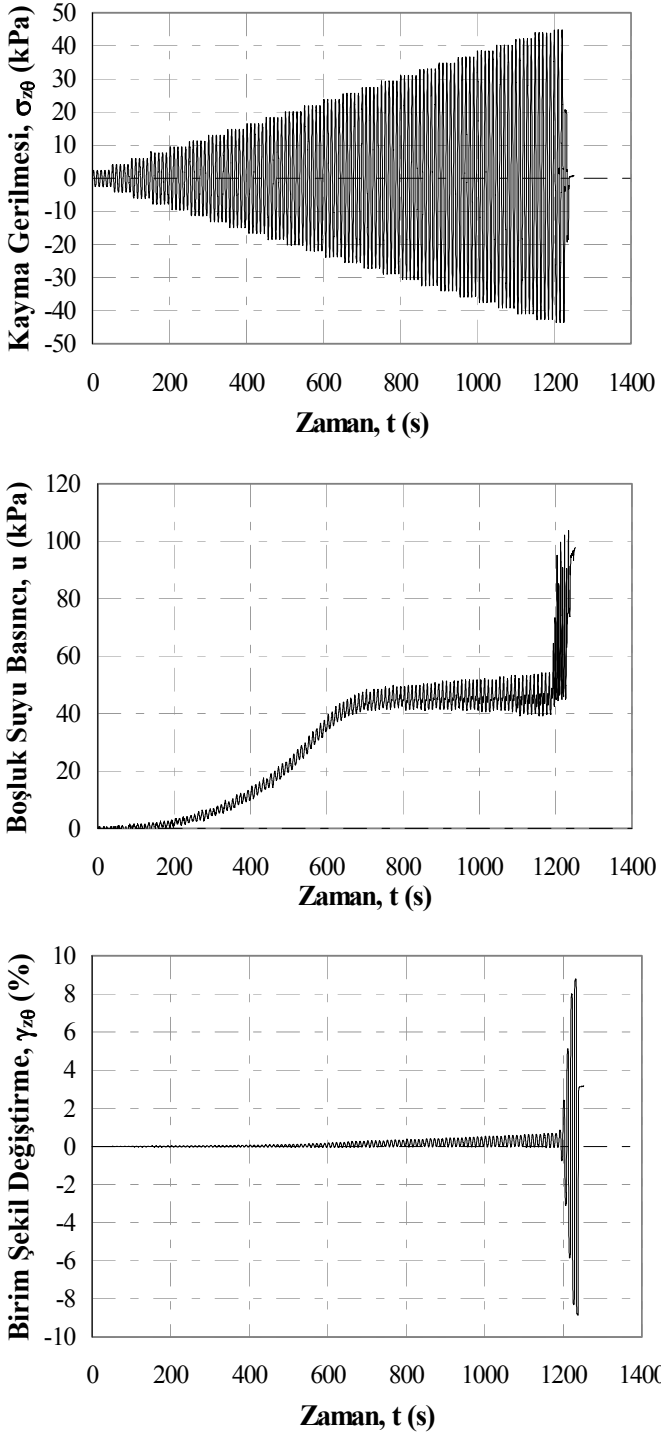
Kum zeminlerde iç boş silindirik burulmalı kesme deney aleti ile yürütülen artan gerilme genlikli deneylere ait tipik kayıtlar Şekil 3’te görülmektedir. Bu şekilde kayma gerilmesi genliğinin, ilave boşluk suyu basıncının ve birim şekil değiştirmenin çevrim sayısına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi tekrarlı yüklemeler altında boşluk suyu basıncı ve birim şekil değiştirme belirli bir seviyeden sonra hızla artmaktadır.

Şekil 4’te ise gerilme–şekil değiştirme ilişkisini niteleyen histerisis ilmiklerinin oluşumu ilişkisine bağlı olarak kum zemine ait kayma modülünün değişimi Şekil 5’te görülmektedir. Kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri elde edilirken uygulanan beşer çevrimlik gerilme değerlerinin beşinci çevrimindeki gerilme–şekil değiştirme değerleri dikkate alınmıştır.

Burada kayma modülü  $G$ :

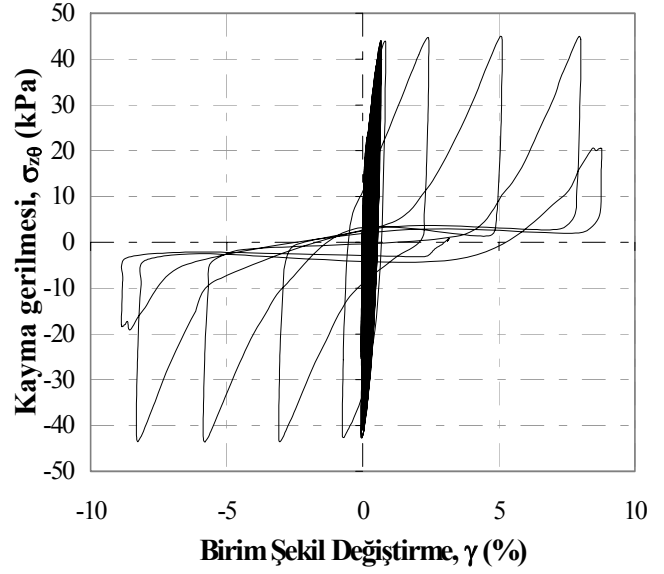
$$G = \frac{\sigma_{z\theta}}{\gamma_{z\theta}} \quad (8)$$

ifadesi ile elde edilmektedir. Bu ifadedeki  $\sigma_{z\theta}$  değeri (6) denkleminde elde edilen ortalama kayma gerilmesini,  $\gamma_{z\theta}$  ise (7) formülü ile hesaplanabilen birim kayma genliğini ifade etmektedir.

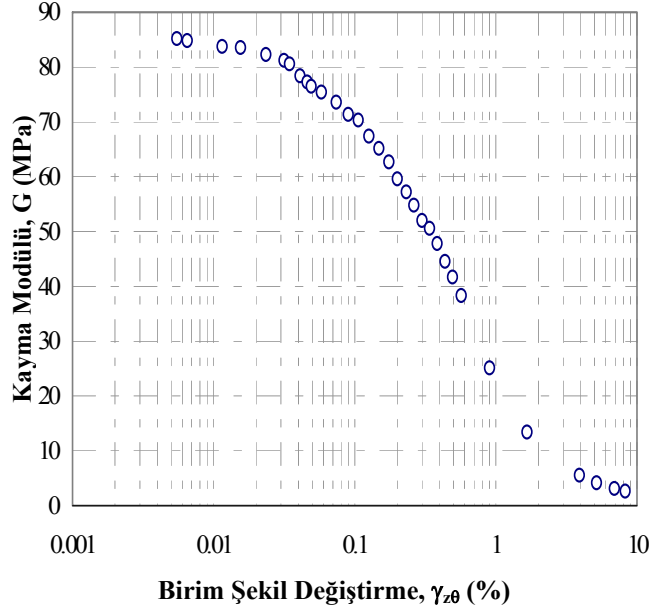


Şekil 3. Tipik deney kayıtları

Bir başka deyişle Şekil 1’de görülen tek çevrimlik histerisis ilmiğinin iki ucunu birleştiren doğrunun eğimi kayma modülünü vermektedir. Burada dikkate alınması gereken nokta kayma modülünün ortalama kayma gerilmesi ve şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olmasından dolayı her bir yüklemeye çevrimi için hesaplanması gerekliliğidir.



Şekil 4. Histerisis ilmikleri



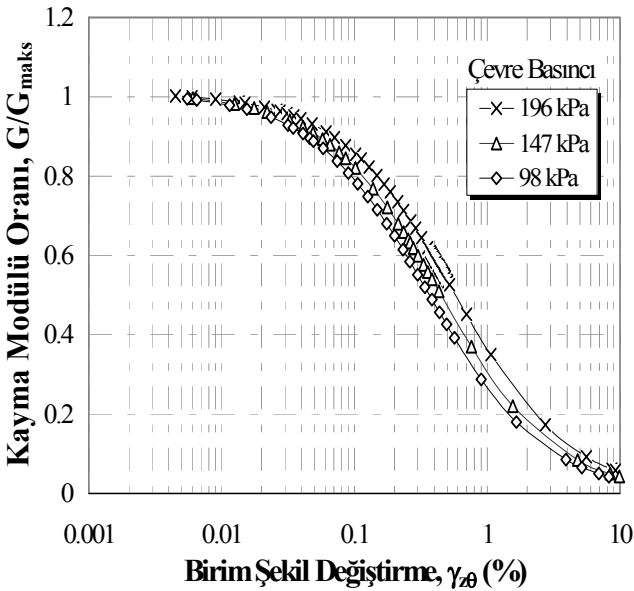
Şekil 5. Kuma ait kayma modülü azalım eğrisi

Sönüm oranının tespiti için kullanılan ifade:

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (9)$$

dir. Burada  $\Delta W$  Şekil 1’deki kapalı histerisis ilmiğinin alanı,  $W$  ise yine şekildeki taralı üçgenin alanıdır. Sönüm oranı da her bir çevrim için hesaplanması gereken bir dinamik zemin parametresidir.

Bu çalışma kapsamında izotropik koşullarda ve artan gerilme genlikleri uygulanarak yürütülen deneyler ile suya doymun kum zemine ait kayma modülü ve sönüm oranının birim şekil değiştirme genliğine bağlı olarak değişimi farklı çevre gerilmesi ve başlangıç konsolidasyon koşullarında elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 6'da  $G_{maks}$  ile normalize edilmiş eksen takımında da çevre gerilmesinin etkisi açık bir şekilde görülebilmektedir. Çevre basıncındaki artışla beraber dinamik kayma modülü azalım eğrisinin sağa doğru kaymakta olduğu bu şekilden görülebilmektedir. Bu değişim Hardin ve Drnevich (1972a) ve Iwasaki ve diğerlerinin (1978) kum numuneler üzerinde yaptığı benzeri çalışmalarla uyumluluk göstermektedir.



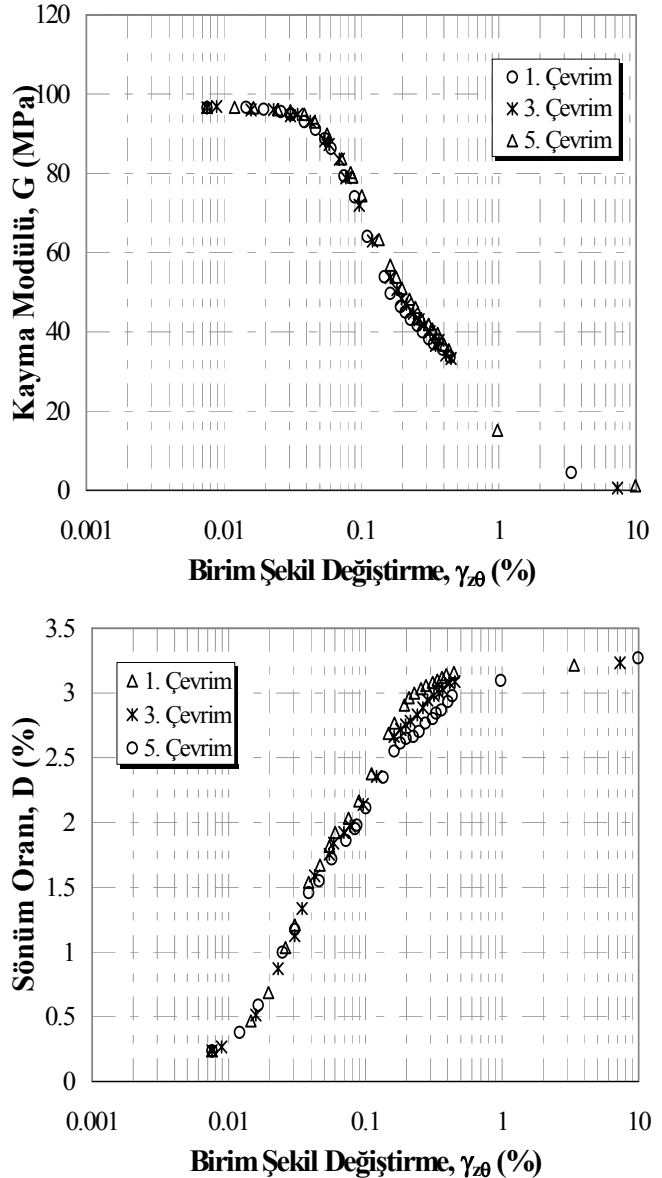
Şekil 6. Kayma modülü azalım eğrilerine çevrim sayısının etkisi

Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden birisi çevrim sayısıdır. Uygulanan tekrarlı yüklemeler altında çevrim sayısının ilerleyişi ile beraber zeminin ait dinamik parametrelerde değişiklikler meydana gelmektedir.

Beşer çevrimlik periyotların birinci, üçüncü ve beşinci çevrimlerine ait kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ayrı ayrı belirlenerek Şekil 7'deki eğrilerle gösterilmektedir.

Bu şekillerden birinci, üçüncü ve beşinci çevrim sayılarında kayma modülü ve sönüm oranlarının

değerlerinin nasıl bir değişim gösterdiği görülebilmektedir. Özellikle her iki parametrenin daha büyük değişim içinde olduğu süreçlerde çevrim sayısının etkisi daha belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

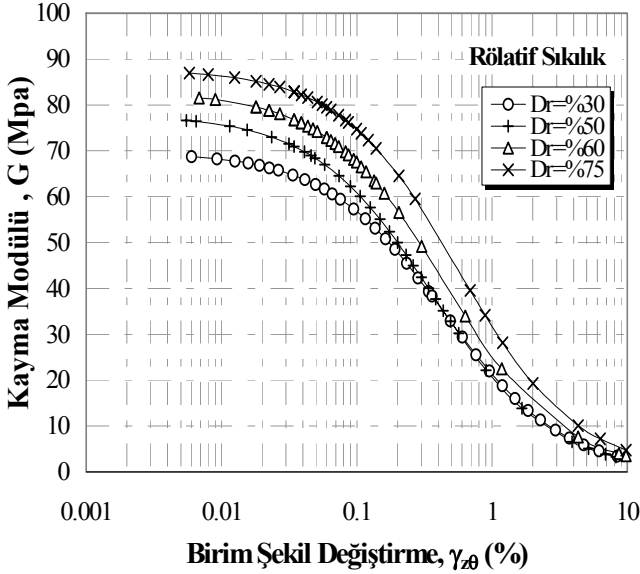


Şekil 7. Bir, üç ve beşinci çevrime ait kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri

Çevrim sayısındaki artış kayma modülü değerlerinde doğru orantılı bir değişim etkisi oluştururken sönüm oranı değerlerinde bir azalmaya yol açmaktadır. Bir başka deyişle aynı gerilme genliğinin uygulanması durumunda artan çevrim sayıları ile beraber kayma modülü ve sönüm oranına ait değişim eğrileri sağa doğru kaymaktadır.



Değişik rölatif sıklıktaki kum numuneleriyle gerçekleştirilen deneylerden elde edilen  $G \sim \gamma$  ilişkisine ait azalım eğrileri Şekil 8'de götserilmektedir. Bu şekilde farklı rölatif sıklık değeriierinin dinamik kayma modülü üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda kum zemine ait boşluk oranı değeriinin zeminin dinamik parametreleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı rölatif sıklık değeriierindeki kayma modülü azalım eğriieri

## Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında suya doygun kum zeminlerin drenajsız koşullardaki gerilme-şekil değeriştirme özelliklerini belirlemek amacıyla üniform ince kumdan oluşturulan içi boş silindirik numuneler üzerinde değerişik başlangıç ve deneysel koşullarda belirli bir sayıda dinamik burulmalı gerilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zemin ve deney özelliklerinde yapılan değerişikliklerin bu davranış özelliklerini ne şekilde etkilediği araştırılmaya çalışılmıştır. Buna göre yapılan deneysel çalışmaların sonucunda aşağıda maddeler halinde verilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. İçi boş silindirik burulmalı gerilme deney aleti ile diğer laboratuvar dinamik deney aletlerine göre, sahip olduğu birçok avantajlara bağlı olarak, küçük ve büyük deformasyon seviyelerinde,

belirli başlangıç ve sınır şartlarında ve birçok zemin türünde monotonik ve tekrarlı deneyler yapabilmek mümkündür. Bu deney sisteminde, oldukça üniform gerilme dağılımları ile zeminlerin gerilme-şekil değeriştirme ve mukavemet özellikleri farklı koşullar altında belirlenebilmektedir.

2. Değerişik başlangıç ve sınır koşullarında, artan genlikli gerilmelerle yapılan burulmalı yüklemeye deneyleri ile kum zeminlerin dinamik yükler altındaki gerilme-şekil değeriştirme özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Beşer çevrimlik bu gerilme artımı yöntemi ile kum zemine ait dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değeriierleri, farklı çevre gerilmesi ve boşluk oranı değeriierlerinde belirlenerek, bu değerişiklerin dinamik parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buna göre çevre gerilmesindeki ve boşluk oranındaki farklılıkların kum zeminlerin dinamik özelliklerini ortaya koyan kayma modülü ve sönüm oranı değeriierlerinin deformasyona bağlı değerişik eğriieri üzerinde değerişiklikler oluşturduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu etkilerin, geçmişte değerişik araştırmacılar tarafından yürütölen benzeri çalışmalarla uyumluluk gösterdiği saptanmıştır.

3. Yapılan deneysel çalışmalarla Toyoura kumuna ait belirlenen bu özellik ve etkilerin, gelecekte benzeri konularda gerçekleştirilecek deneysel ve teorik model çalışmaların geliştirilmesi konusunda yararlı olabileceği düşünölmektedir.

## Semboller

$D$	: Sönüm oranı
$F_z$	: Düşey eksenel kuvvet
$G$	: Dinamik kayma modülü
$G_{maks}$	: Maksimum dinamik kayma modülü
$H$	: Numune yüksekliği
$H_0$	: Numunenin başlangıçtaki yüksekliği
$P$	: Toplam efektif düşey eksenel yük
$p_i, p_o$	: İçi ve dış hücre basınçları
$r_i, r_o$	: Numune iç ve dış yarıçapları
$u$	: Boşluk suyu basıncı
$\Delta H$	: Düşey eksenel yer değeriştirme
$\Delta V_i$	: İçi hücre hacim değerişimi
$\Delta V_s$	: Numune hacim değerişimi
$\Delta W$	: Kapalı histerisis ilmiği alanı
$\Delta \theta$	: Burulma açısı
$\epsilon_{z\theta}$	: Kayma şekil değeriştirme artımı
$\gamma$	: Birim Kayma Genliği

- $\gamma_{z\theta}$  : Ortalama birim şekil değiştirme artımı  
 $\sigma_r$  : Radyal gerilme  
 $\sigma_z$  : Üniform düşey eksenel gerilme  
 $\sigma_{z\theta}$  : Ortalama kayma gerilmesi

## Kaynaklar

- Alarkon-Guzman, Chameau, J. L. ve A., Leonards, G. A., (1986). A new apparatus for investigating the stress-strain characteristics of sand, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, **9**, 204-212.
- Chen, Y. C., Ishibashi, I. ve Jenkins, J. T., (1988). Dynamic shear modulus and fabric: part I, depositional and induced anisotropy, *Géotechnique*, **38**, 25-32.
- Hardin, B. O. ve Drnevich, V. P., (1972a). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, *ASCE Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, **98**, 667-692.
- Hardin, B. O. ve Drnevich, V. P., (1972b). Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects, *ASCE Journal of The Soil Mech. And Found. Eng. Div.* **98**, 603-624.
- Hardin, B. O., Richart, F. E., (1963). Elastic wave velocities in granular soils, *ASCE Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, **89**, SM1, 33-65.
- Hight, D. W.; Gens, A.; Symes, M. J. (1983). The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils, *Géotechnique*, **33**, 355-383.
- Ishihara, K.; Towhata, I. (1983). Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads, *Soils and Foundations*, **23**, 11-26.
- Ishibashi, I., Chen, Y. C. ve Jenkins, J.T., (1988). Dynamic shear modulus and fabric: part II, stress reversal, *Géotechnique*, **38**, 33-37
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F. ve Takagi, Y., (1978). Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, *Soils and Foundations*, **18**, 39-56.
- Lanzo, G., Vucetic, M. ve Doroudian, M., (1997). Reduction of shear modulus at small strains in simple shear, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, **123**, 1035-1042.
- Lin, M. L., Huang, T. H. ve You, J. C., (1996). The effects of frequency on damping properties of sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **15**, 269-278.
- Lo Presti, D. C. F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A. ve Pedroni, S., (1997). Shear modulus and damping of sand, *Géotechnique*, **47**, 603-617.
- Lo Presti, D. C. F., Pallara, O., Lancellotta, R., Armandi, M. ve Maniscalco, R., (1993). Monotonic and cyclic loading behavior of two sands at small strains, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, **16**, 409-424.
- Pradel, D., Ishihara, K. ve Gutierrez, M., (1990). Yielding and flow of sand under principal stress axes rotation, *Soils and Foundations*, **30**, 87-99.
- Seed, H. B. ve Idriss, I. M., (1970). Soil moduli and damping factors for dynamics response analysis, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering and Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. ve Tokimatsu, K., (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **112**, 1016-1032.
- Sherif, M. A., Ishibashi, I., (1976). Dynamic shear modulus for dry sands, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, **102**, 1171-1184.
- Tatsuoka, F., Shibuya, S. ve Teachavorasinskun, S., (1991). Discussion on "Shear modulus and cyclic undrained behavior of sands", *Soils and Foundations*, **31**, 202-209.
- Vucetic, M., (1994). Cyclic threshold shear strains in soils, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 2208-2228.
- Zavoral, D. Z. ve Campanella, R. G., (1994). Frequency effects on damping / modulus of cohesive soils, *Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM STP 1213*, 191-201.
- JGS 550-1998, (1999). Preparation of hollow cylindrical soil specimens for torsional shear tests, *Standards of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test*, The Japanese Geotechnical Society, Tokyo.
- JGS 551-1998, (1999). Method for torsional shear test on hollow cylindrical soil specimens, *Standards of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test*, The Japanese Geotechnical Society, Tokyo.
- JGS 543-2000, (1999). Method for cyclic torsional shear test on hollow cylindrical specimens to determine deformation properties of soils, *Standards of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test*, The Japanese Geotechnical Society, Tokyo.