



REZONANT KOLON DENEYİ İLE KİL ZEMİNİN DİNAMİK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Burak GÖRGÜN^{1,*}, Nazile URAL²

¹ Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye

² Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye

ÖZET

Aktif bir deprem kuşağında bulunan ülkemizde yıllardır yıkıcı depremler ile karşılaşmaktadır. Tekrarlı yüklemeler esnasında zeminler, statik yüklemelere kıyasla farklı davranışlar sergilemektedirler. Bu davranışın önceden tespiti, olası can ve mal kayıplarının önüne geçilmesine yardımcı olacaktır. Geçmişte depremlerin hasar verici etkisinin yalnızca yapı elemanlarından ve yapı malzemesinden kaynaklı olduğu düşünülmüştür. 1960'lı yıllardan sonraki depremlerle deprem hasarına zeminlerin katkısının çok etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, temelde etkili olan düşük gerilme düzeyindeki dinamik etkinin incelenmesi için rezonant kolon testi seçilmiştir. Böylelikle, düşük gerilmeler altında dinamik parametrelerin incelenmesi için kil zeminde, farklı çevre basınçlarında aynı zeminde rezonant kolon deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarından çevre basıncının artmasıyla sönüm oranının azaldığı, maksimum kayma modülünün ise arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Rezonant kolon deneyi, Sönüm oranı, Kayma gerilmesi, Kil zemin

DETERMINATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF CLAY WITH RESONANT COLUMN TEST

ABSTRACT

During cyclic loading, soils indicate different behaviors than static loads. In the past it was thought that the damaging effect of earthquakes was only due to the inadequate selection building elements and building materials. After 1960's it is found that soils are very effective for the earthquake's damage and magnitude. In this study, the resonant column test is chosen to investigate the dynamic effect at low stress level, which is effective for structures such as foundation and soil works. Thus, for the analysis of dynamic parameters under low stresses, resonant column test was carried out in clay soil, at different cell pressures. As a result of the tests, with increasing cell pressure, the maximum shear modulus of the clay soil was increased while the damping ratio decreased.

Keywords: Resonant column test, Damping ratio, Shear stress, Clay soil

1. GİRİŞ

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği, kurucusu Karl Terzaghi'nin İstanbul Teknik Üniversitesi ve Robert Kolej'de 1920'li yıllarda yaptığı çalışmalarla bilimsel bir disiplin olarak ortaya çıkmıştır. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği yirminci yüzyılda hızla gelişmiş ve bu bilim dalı hakkında çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Zemin mekaniği ve Geoteknik Mühendisliğinin ne kadar önemli olduğu, üzerine veya içine inşa edilecek herhangi bir yapının güvenliğini ne derecede etkilediği ortaya konulmuştur. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği, zeminin ve inşa edilecek yapının genel olarak statik durumdaki halleri üzerine çalışma yapan bir bilim dalıdır. Ancak bilindiği üzere zemini ve yapıyı en çok etkileyen unsur dinamik etkilerdir. Bu yüzden yirminci yüzyılın sonlarına doğru Zemin Dinamiği ve Geoteknik Deprem Mühendisliği bilimleri ortaya çıkmıştır. Bu bilim dalları zeminin dinamik durumdaki parametrelerini incelemektedir. Her ne kadar bu bilim dallarında da oldukça fazla araştırma ve çalışma yapılsa da henüz çok sayıda bilinmeyen olduğu

*Sorumlu Yazar: burak.gorgun@bilecik.edu.tr

Geliş: 20.04.2018 Kabul:02.06.2018

bir gerçektir. Dinamik etkilerin zeminlerde meydana getirebileceği deformasyon vb. problemlere karşı önlem alınabilmesi için hem dinamik etkiler çok iyi bilinmeli hem de zeminin özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Tekrarlı yüklemeler esnasında zemin tabakalarının göstereceği davranışı önceden bilmek, gerekli önlemlerin alınmasını ve bu tabakalar üzerindeki yapılarda oluşabilecek hasarların azaltılabilmesini sağlar. Ülkemizin aktif bir deprem kuşağında bulunması bu konuda yapılacak çalışmaların önemini daha da arttırmaktadır.

Deprem zeminlerde oluşturacağı hasar incelenirken yapılan çalışmalar genellikle kum zeminlerde sıvılaşma problemine odaklanmıştır. Deprem sırasında kil, kum ile karşılaştırıldığında depremde oluşan titreşimlere karşı dayanıklı olarak kabul edilmiştir [1]. Buna rağmen yapılan incelemelerde kalın kil tabakalarında ciddi yapı hasarları meydana geldiği görülmüştür [2,3]. Deprem sırasında sismik hareket büyümesi nedeniyle oluşan büyük deformasyonların kil zeminin bir özelliği olduğu fark edilmiştir. Deprem dalgalarının genliğinde yüzeye yakın yumuşak zemin tabakalarından geçerken meydana gelen artış, yapısal hasar üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir. Ayrıca 1964 yılında Niigata depremi ve 1978 yılında Miyagiken-oki depremi sırasında, Japonya’da birçok bölgede zeminde çökme meydana geldiği görülmüştür [4]. Bu tarz durumlar killerin gerçekten de kumlardan depremde oluşan titreşimlere karşı daha dayanıklı olup olmadığı sorusunu akıllara getirmektedir. Her ne kadar deprem gibi kısa yükleme döneminde bu durum kısmen doğru olsa da uzun dönemde çevrimsel bir yükleme maruz kalan kilde durum farklı hale gelmektedir [5]. Ayrıca yatay katmanlı kil zeminlerde deprem sırasında oluşacak çevrimsel kesme dayanımı ciddi bir stabilite sorununa yol açmazken bu durum boşluk suyu basıncının yükselmesini tetikleyerek oturmalara sebep olabilir. Bu oturma genellikle konsolidasyon oturması olarak gerçekleşir ve deprem sırasında tekrarlı yükler altında oluşan boşluk suyu basıncının sönümlendiği durumda ortaya çıkmaktadır [6]. Çevrimsel yüklemeden sonra killerin durumu çok miktarda araştırılmıştır. Bu çalışmaların birçoğu çevrimsel yükler altında gerilme-şekil değiştirme ve kesme dayanımının belirlenmesi üzerinedir [6]. Çevrimsel yükleme tipi deprem gibi yüksek genlik ve kısa süreli ya da dalga, trafik yükü yada makine temel titreşimi gibi kısa genlik ve uzun süreli olabilir. Çevrimsel yükler altında kil zeminlerin davranışı karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Çevrimsel yük etkisi altında zemin taşıma kapasitesi ya da deformasyonların hesaplanmasına yönelik temel bir yöntem geliştirilebilmiş değildir [7]. Bunun nedeni ise zamana bağlı oluşan sönümlenme, ön konsolidasyon dönemi, tekrarlı yük özellikleri, zemine ait parametreler, yer altı suyu gibi birçok faktörün dinamik davranışa etki ediyor olmasıdır.

Humphries ve Wahls (1968) yeniden oluşturulan kaolin ve bentonit kiline 10PSI’den 100PSI’ya kadar izotropik konsolidasyon yükü vererek, aynı zamanda aşırı konsolidasyon oranını 1’den 10’a kadar oluşturarak numunelere kalıcı durum burulma titreşimi uygulamışlardır. Burulmalı kesme büyüklüğü 0.00015, 0.0003 ve 0.0006 radyandır ve numunelerin üst kısmına uygulanmıştır. Numunelere ait dinamik kayma modülünü rezonant kolon deneyi ile tespit etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda uygulanan genlik arttırıldığında kayma modülünün %5’ten daha az bir azalmaya uğradığı belirtilmiştir. Her iki kilde de efektif gerilmenin daha etkili bir parametre olduğu belirtilere boşluk oranının azalması ve efektif gerilmenin yükselmesiyle kayma modülünün yükseldiği tespit edilmiştir. Yazarlar normal konsolide killerde hem kaolin hem de bentonit kilinde bu artışın efektif gerilme artışının 1/2 ile 2/3 katı arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Aşırı konsolide killerde ise boşluk oranı ve efektif gerilme arasındaki bir regrasyona bağlı olarak kayma modülünün etkilendiğini belirtmişlerdir [8].

Andersen ve diğ. (1980) Kuzey Denizi’nde oluşturulacak bir petrol platformu için Shell ve Norveç Geoteknik Enstitüsü’yle birlikte plastik limiti yüksek Drammen kilinin çevrimsel davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar örselenmemiş numuneler üzerinde statik üç eksenli, dinamik üç eksenli, direkt kesme ve dinamik basit kesme deneyleri yapmışlardır. Kullandıkları kilin su muhtevası (w) %52, özgül ağırlığı (G_s) 2.76, likit limiti (LL) %55 ve plastik limiti (PL) %28’dir. Numuneler 400kPa önkonsolidasyon basıncı altında konsolide edildikten sonra istenilen aşırı konsolidasyon oranlarına ulaşabilmesi için çeşitli gerilmeler altında şişmeye bırakılmıştır. Böylelikle aşırı konsolidasyon oranı 1, 4, 10, 25, 50 olan numuneler elde etmişlerdir. Numunelere önce çevrimsel gerilmeler uygulanmış daha

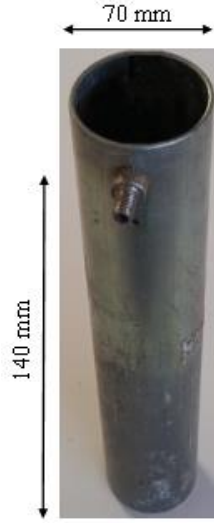
sonra ise numuneler statik deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre çevrimsel gerilmeler esnasında yenilen zeminlerde, aşırı konsolide kil zeminler normal konsolide kil zeminlere göre daha az çevrimsel yüklemeye yenilmişlerdir. Çevrim sayısı arttıkça numunelerde kayma modülü azalmıştır. Ayrıca çevrimsel yüklemeye esnasında efektif gerilmenin azalmasıyla normal konsolide killerde belirgin bir aşırı konsolidasyon durumu oluşmuştur. Çevrimsel gerilmelere maruz kalan numunelerde drejansız kayma modülü öncesine kıyasla belirgin şekilde azalmıştır [9].

Pestana ve diğ. (2000) yazdıkları makalede sismik performans değerlendirmesinin ve batık yamaçlardaki kalıcı oturmaların doğru tahmininin yapılabilmesi için zeminin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin çok iyi bilinmesi gerektiğini söylemişlerdir. Genellikle batık yamaçlardaki jeolojik profilinin kil olduğunu belirten yazarlar bu killerin aşırı konsolideden normal konsolideye geçtiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında kil zemine ait döngüsel yüklemelerin formülasyonları ve modelleri gösterilmiştir [10].

Altun ve Ansal (2010) çalışmalarında depremin neden olduğu döngüsel kayma gerilmelerinin zeminin fiziksel ve mühendislik özelliklerine bağlı olarak zeminlerde oldukça farklı boyutlarda deformasyonlara yol açtığını belirtmişlerdir. Bu sebeple zemine ait kayma mukavemetinin azaldığını söylemişlerdir. Özellikle suya doygun gevşek kumların döngüsel yükler altında meydana gelen mukavemetlerini hızla kaybetme özelliklerinin farklı olduğunu belirterek çalışmalarında burulmalı kesme deney aleti ile suya doygun kumların değişik fiziksel özellikler ve deneysel koşullar altında gerilme-şekil değiştirme özelliklerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Drenajsız koşullarda ve gerilme kontrollü olarak gerçekleştirilen deneylerde kumların tekrarlı yükler altında dinamik gerilme-şekil değiştirme özelliklerine bazı faktörlerin etkisi araştırılmıştır. Araştırmaları sonucunda çevre gerilmesindeki ve boşluk oranındaki farklılıkların kum zeminlerin dinamik özelliklerini ortaya koyan kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin deformasyona bağlı değişim eğrileri üzerinde değişiklikler oluşturduğu belirlemişlerdir [11].

2. YÖNTEM

Bu çalışmada numune hazırlama yöntemi olarak ıslak tokmaklama yöntemi kullanılmıştır. Islak tokmaklama kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında çok yaygın kullanılan bir numune hazırlama yöntemidir. Bu yöntemde, ıslak zemin numunesi tabakalar halinde sıkıştırılır [12]. Suda çöktürme ve bulamaç çökeliyle yapılan numune hazırlama sistemlerinde kum taneleri kil tanelerinden daha hızlı çökecek ve bu yüzden bu yöntemler yerine daha düzgün bir yapı oluşturmak için ıslak tokmaklama yöntemini kullanmak daha uygun olacaktır [13]. Daha önceki yapılan araştırmalardan ve dinamik deneylerin yapılması için oluşturulan standartların kullanılacak olmasından dolayı bu çalışmada numune hazırlama için ıslak tokmaklama yöntemi seçilmiştir. Çalışmada numunenin sıkıştırılmasında ASTM D D4015 – 15^e 1 standardı kullanılmıştır. Bu standartta numunelerin çapının minimum 33mm olması ve boy/çap oranının ise en az 2 olması gerektiği belirtilmektedir. Hazırlanan numuneler 70 mm çapta ve 140 mm boyunda olacak şekilde ıslak tokmaklama yöntemiyle hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Numunelerin hazırlandığı kalıp

Bu çalışmada zemin 100kPa'lık gerilme altında ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanmıştır. Numune hazırlanırken kompaksiyon enerjisi kullanılmıştır (Şekil 2). Sıkıştırma enerjisi (E_c), katman sayısı (N_L), her bir tabakadaki kompaksiyon sayısı (N_B) ve çelik tokmağın düşen yüksekliği (H) ile Formül 1.e göre hesaplanabilmektedir [14,15].

$$E_{c(kJ/m^3)} = \frac{W_R \times H \times N_L \times N_B}{V} \quad (1)$$

Hazırlanan numune 100kPa, 150kPa ve 200kPa'lık basınçlar altında konsolidasyon olacak ve her konsolidasyon aşamasında numunede rezonant kolon deneyi gerçekleştirilerek zeminin dinamik davranışındaki değişim incelenmiştir.



Şekil 2. Tokmaktama aleti

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

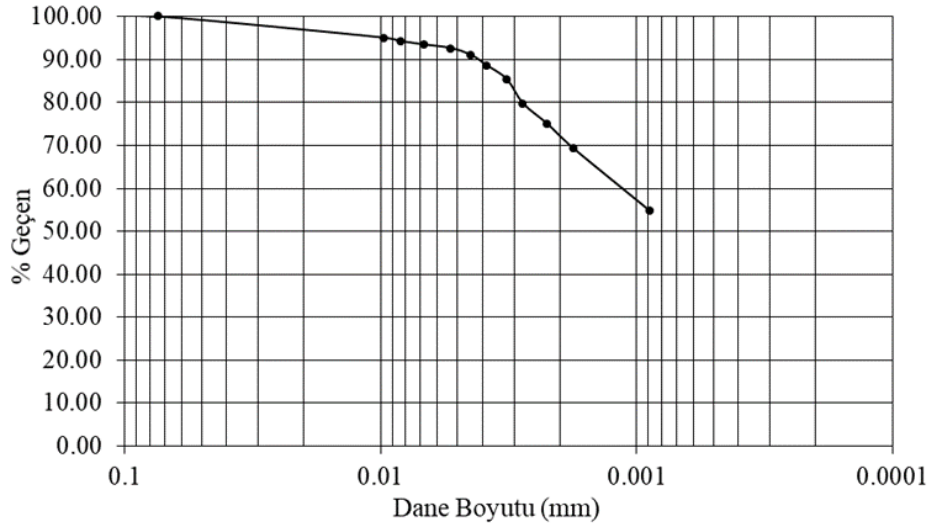
3.1. Fiziksel Deneyler

Bu çalışmada 100 kPa'lık gerilme altında sıkıştırılan kil zemin 100kPa, 150kPa ve 200kPa'lık basınçlar altında konsolide edilerek, her konsolidasyon aşamasında numunede rezonant kolon deneyi

gerçekleştirilerek zeminin dinamik davranışındaki değişim incelenecektir. Deneysel olarak kullanılan kilin geoteknik özellikleri Tablo’da verilmiştir. Kilin özgül ağırlığı piknometre deneyi ile kıvam limitleri ise Casagrande deneyi ile belirlenmiştir. Kil zeminin sınıfının belirlenmesi amacıyla ASTM D7928-17 standardına uygun olarak hidrometre deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Sınıflandırma sonucu kil sınıfı CH olarak tespit edilmiştir.

Tablo. Kullanılan kilin indeks özellikleri

Malzeme	LL	PL	G _s	Sınıflandırma
Kil	57	28	2.64	CH

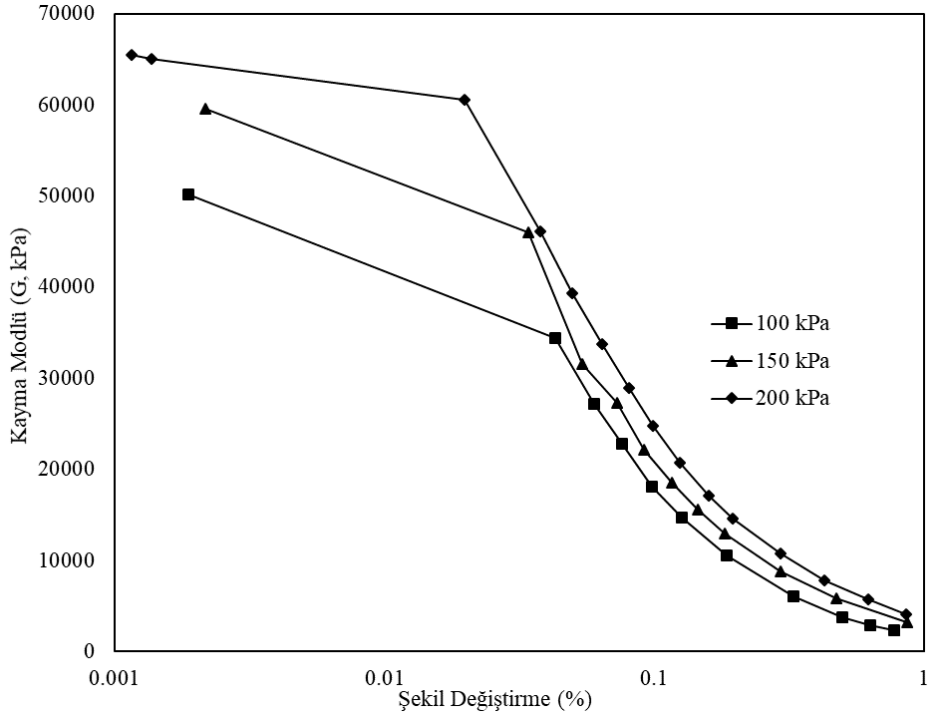


Şekil 3. Kil zemine ait hidrometre deneyi

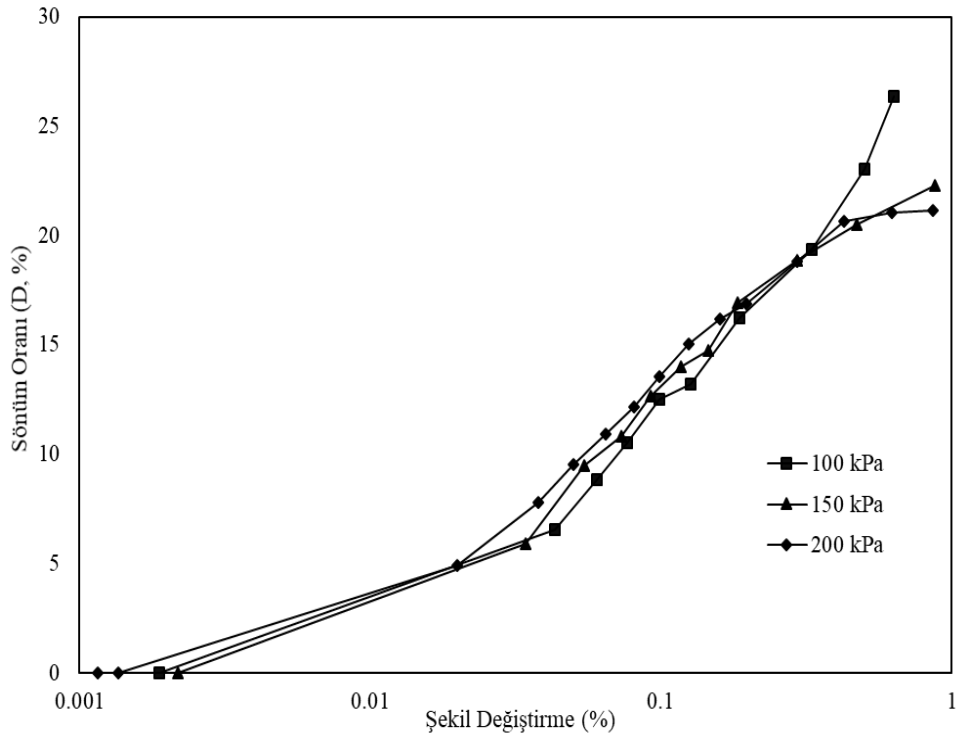
Bu çalışmada 100kPa’lık gerilmeye tekabül edecek şekilde sıkıştırılan zeminde konsolidasyon deneyi yapılarak ön konsolidasyon basıncı tespit edilmiştir. Bu sayede sıkıştırma enerjisinin kontrolü sağlanmıştır. Yapılan konsolidasyon deneyi sonucunda ön konsolidasyon basıncı 100kPa olarak bulunmuştur.

3.2. Dinamik Deneyler

Bu çalışmada kil zemin 100kPa gerilmeye sıkıştırılarak doyurma işlemine tabi tutulmuştur. Numunenin doygunluğu Bishop’un B parametresi ile kontrol edilmiş olup, $B > 0.95$ olduğu durumda numune doygun olarak kabul edilmiştir. Doymuş hale gelen kil zemin numunesi 100kPa altında konsolide edilmiş ve konsolidasyon işlemi tamamlandıktan sonra numunede rezonans kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. 100kPa altında konsolide olan ve rezonans deneyi gerçekleştirilen numune 150kPa basınç altında tekrar konsolide edilerek, rezonans deneyine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda aynı numune 200kPa altında bir kez daha konsolide edilerek rezonans deneyi yapılmıştır. Böylece bir kil numunesinin küçük genlikli gerilmelere maruz kaldıktan sonra üzerindeki yük artışıyla dinamik davranışındaki değişim incelenmiştir. Çalışmada rezonans kolon deneylerinde numunenin maksimum deformasyonu %1 tutulmuştur. Yapılan deneylerle farklı konsolidasyonlar sonucunda tekrarlı gerilmelere maruz kalan kil numunesinde sönüm oranındaki ve maksimum kayma modülündeki değişim bulunmuştur. Yapılan deneyler sonucunda daha yüksek basınç altında konsolide olan kil zeminin maksimum kayma modülü (G_{max}) artarken sönüm oranının (%D) azaldığı görülmüştür (Şekil 4 ve Şekil 5). Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan sonuçlarla uyumlu bulunmuştur [16,17].



Şekil 4. Rezonans kolon deneyinde kayma modülleri



Şekil 5. Rezonans kolon deneyinde sönüm oranları

4. SONUÇ

Bu çalışmada 100kPa'lık gerilme altında ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan kil zemin numunesi 100kPa basınç altında konsolide edilerek rezonans kolon deneyine tabi tutulmuştur. Rezonans kolon deneyinden sonra aynı numune, 150kPa basınç konsolide edilerek, numuneye tekrar rezonans kolon deneyi uygulanmıştır. Aynı numune 200kPa'lık basınç altında da konsolidasyon deneyine tabi tutulduktan sonra bir kez daha rezonans kolon deneyi uygulanmıştır. Böylelikle aynı zeminde üzerinden farklı zamanlarda gerçekleşen depremler modellenmiş ve bu durumdaki kil zeminin dinamik davranışının değişimi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda daha yüksek basınç altında konsolide olan kil zeminin maksimum kayma modülü (G_{max}) artarken sönüm oranının (%D) azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara bakıldığında en fazla değişim hem sönüm oranında hem de kayma modülünde yüzde olarak 100kPa'lık basınçtan sonra görülmüştür. Bunun nedeni ise zeminin 100kPa'lık gerilme altında hazırlanmasıdır.

REFERENCES

- [1] Lee L, Fitton JA. Factors affecting the cyclic loading strength of soil. *Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations* 1969; 450: 71.
- [2] Seed HB. Design problems in soil liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987; 113(8): 827-845.
- [3] Mendoza MJ, Auvinet G. The Mexico earthquake of September 19, 1985-Behavior of building foundations in Mexico City. *Earthquake spectra* 1988; 4(4): 835-53.
- [4] Sasaki H, Suzuki K, Ichikawa T, Sawada M, Iwane Y, Ando K. Microbial degradation of a macrotetrolide miticide in soil. *Applied and environmental microbiology* 1980; 40(2): 264-268.
- [5] Yasuhara K, Hirao K, Hyde AF. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay. *Soils and Foundations* 1992; 32(1): 100-116.
- [6] Ansal AM, Tuncan M. Consolidation in clays due to cyclic stresses. In *Proceedings 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*; 13-18 August 1989; Rio De Janeiro, Brazil. pp. 3-6.
- [7] Okur V, Ansal, A. Non-linear elastic response of clay soils under cyclic loadings. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University* 2009; 22(1): 169-185.
- [8] Humphries WK, Wahls HE. Stress History Effects on Dynamic Modulus of Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 1968; 94(2): 371-390.
- [9] Andersen KH, Rosenbrand WF, Brown SF, Pool JH. Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 1980; 106(5): 499-529.
- [10] Pestana JM, Biscontin G, Nadim F, Andersen K. Modeling cyclic behavior of lightly overconsolidated clays in simple shear. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2000; 19(7): 501-519.
- [11] Altun S, Ansal, A. The cyclic undrained stress-strain behaviour of saturated sand. *İtüdergisi/d* 2003; 2(4): 25-34.

- [12] Kuerbis R, Vaid YP. Sand sample preparation-the slurry deposition method. *Soils and Foundations* 1988; 28(4): 107-118.
- [13] Naeini SA, Baziar MH. Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2004; 24(3): 181-187.
- [14] Adachi M, Yasuhara K, Shimabukuro A. Influences of sample preparation method on the behavior of non-plastic silts in undrained monotonic and cyclic triaxial tests. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* 2000; 48(11): 24-27.
- [15] Kim U, Kim D, Zhuang L. Influence of fines content on the undrained cyclic shear strength of sand–clay mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2016; 83: 124-134.
- [16] Seed HB, Idriss IM. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Report EERC 70-10, University of California, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA, 1970.
- [17] Kokusho T, Yoshida Y, Esashi Y. Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils and Foundations* 1982; 22(4): 1-18.