

Kil Zeminin Dinamik Davranışının Rezonant Kolon Deneyi İle İncelenmesi

¹Burak Görgün and ²Nazile Ural

^{*1}Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Bilecik Seyh Edebali University, Turkey

²Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Bilecik Seyh Edebali University, Turkey

Özet

Zeminin ve inşa edilecek yapının genel olarak statik durumdaki halleri üzerine çalışmalar bulunmasının yanında zemini ve yapıyı en çok etkileyen unsurlardan birisi dinamik etkilerdir. Depremlerin neden olduğu tekrarlı gerilmeler zeminde farklı oranlarda şekil değiştirmelere sebep olur. Bir zeminin gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin ve davranışının çeşitli faktörlere bağlı olduğu ve statik yükleme durumuyla karşılaştırıldığında dinamik yükleme koşulları altında bu davranışın birçok yönden farklı olabileceği iyi bilinmektedir. Tekrarlı yüklemeler esnasında zemin tabakalarının göstereceği davranışın önceden bilinmesi, gerekli önlemlerin alınmasını ve bu tabakalar üzerindeki yapılarda oluşabilecek hasarların azaltılabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada 100 kPa'lık gerilme altında hazırlanan numuneler 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa'lık basınçlar altında konsolide edilmiştir ve her konsolidasyon aşamasında numune rezonans kolon deneyine tabi tutularak kil zeminin dinamik davranışındaki değişim incelenmiştir.

Key words: Rezonant kolon deneyi, Zemin dinamiği, Kil, Deprem

Investigation of Dynamic Behavior of Clay with Resonant Column Test

Abstract

In general, besides being static case of studies at soils and construction, dynamic effects are the one of the most influential elements which effect soils and constructions. The cyclic stresses caused by the earthquakes cause different strains at soil. It is well known that the stress-strain properties of soil and its behavior depend on various factors and under dynamic loading conditions this behavior may be different from many other directions as compared to the static loading case. Preliminary knowledge of the behavior of the soil during cyclic loading, ensures that the necessary precautions are taken and the damage to structures on this soil can be reduced. In this study, the samples, prepared under the 100 kPa of compaction energy, were consolidated under the pressures of 100 kPa, 150 kPa and 200 kPa and the changes of the dynamic behavior of the clay soil was investigated by subjecting to the sample resonant column test at each consolidation stage.

Key words: Resonant column test, Soil dynamic, Clay, Earthquake

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: caglar@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955752

1. Giriş

Yapılacak yapının güvenliği için üzerine oturduğu zeminin özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Zeminin özelliklerinin elde edilmesi uzun yıllardır geoteknik alanının ilgi konusu olmuştur ve bu parametreleri elde etmek için kullanılan teknolojiyi geliştirmek için sürekli adımlar atılmıştır. Zeminlerin belirli durumlarda nasıl davranacağını analizi için o zeminin maruz kalacağı etkenlerin iyi tespit edilmesi gerekmektedir. Zeminler statik yükler dışında trafik, rüzgar, dalga ve deprem gibi çeşitli şekillerde dinamik yükler ile yüklenir. Türkiye dünyanın en büyük deprem bölgelerinden birinde yer almakta ve yıllardır yıkıcı depremlere maruz kalmaktadır. Depremlerin neden olduğu tekrarlı gerilmeler zeminde farklı oranlarda şekil değiştirmelere sebep olur. Bir zeminin gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin ve davranışının çeşitli faktörlere bağlı olduğu ve statik yükleme durumuyla karşılaştırıldığında dinamik yükleme koşulları altında bu davranışın birçok yönden farklı olabileceği iyi bilinmektedir. Bu nedenle zeminlerin statik davranışlarının yanı sıra dinamik davranışlarının da iyi bilinmesi son 50 yılda depremler sebebiyle ülkemizde ve dünyada karşılaşılan can ve mal kayıplarının önlenmesi için hayati öneme sahiptir.

Cao ve Law (1992) Ottawa Nehri vadisinden elde edilen örselenmemiş normal konsolide ve aşırı konsolide Champlain Sea killeri kullanarak, başlangıç kayma modülünü ölçmek amacıyla küçük gerilme genliklerinde drenajsız koşullarda dinamik üç eksenli ve rezonans kolon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Dinamik üç eksenli deneyi 1 Hz freansta gerçekleştirilmiş ve şekil değiştirmeler %10'a ulaştığında zeminin yenildiği kabul edilmiştir. Dinamik yüklemeden kaynaklanan deformasyon sırasında enerji, histerik sönümleme ve zeminin deformasyonu ile sönümlenmektedir. Plastik deformasyonla enerji sönümlenmesi yükleme işleme sırasında kalıcı deformasyon oluştuğunda meydana gelmektedir. Araştırmacılar bu enerji konseptine dayanarak, çevrimsel yük altında kil zeminin davranışını analiz etmek için yeni bir enerji kavramı ortaya koymuşlardır. Sonuçları sönümlenme enerjisi ile dinamik yük altında zeminin davranışı arasında aşırı boşluk suyu basıncı, kalıcı deformasyon, kayma modülü ve dinamik mukavemetle ifade edilen bir ilişki bulunduğunu göstermiştir. Dinamik yükleme altında oluşan boşluk suyu basıncını, artık değer ve artık değer etrafında titreşen boşluk suyu basıncının genliği olarak iki bileşenle ifade etmişlerdir. Artık değer tam bir çevrim için ortalama aşırı boşluk suyu basıncıdır [1].

Ishibashi ve Zhang (1993) kil ve kumların dinamik kayma modülü ve sönüm oranlarının belirlenmesinde her iki zemin tipi içinde kullanılabilecek bir eşitlik önermiştir. Bu amaçla literatürdeki kum ve killeri için verilen deney sonuçları kullanılarak analizler yapılmıştır. Literatürde kumların kayma modülü ölçülmesi için genellikle boşluk oranı ve efektif gerilmeye bağlı olarak verilen eşitlikler ile killerin kayma modülünün belirlenmesi için plastisite indeksine bağlı olarak verilen eşitlikler incelenmiş, deney dataları aynı grafikler üzerinde işaretlenerek bir bağıntı oluşturulmuştur. Analizler sonucunda kayma modülü ölçümü için rezonant kolon deneyi ile elde edilen verilerin arazi deneyleri ile elde edilen veriler ile daha fazla benzerlik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada önerilen bağıntı çakıllı ve aşırı konsolide zeminler göz ardı edilerek oluşturulmuştur. Ayrıca kumlar ve normal konsolide zeminler için pratik amaçlarla kullanılabileceği yazarlar tarafından söylenmiştir [2].

Kallioglou ve diğ. (2008) tarafından rezonant kolon deney cihazı kullanılarak örselenmiş ve örselenmemiş kohezyonlu zeminlerin dinamik karakteristikleri ortaya konulmuştur. Çalışmada

çevre basıncı, aşırı konsolidasyon oranı, boşluk oranı ve plastisite indisinin kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kıbrıs ve Yunanistan’da çeşitli bölgelerden örselenmemiş olarak alınan ve laboratuvarında kaolin katılarak kompaksiyon ile hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Doyurma sırasında ters basınç ile hücre basıncı arasında 30kPa’lık bir fark olacak şekilde işlem yapılmıştır. Çalışma sonucunda plastisite, boşluk oranı, gerilme geçmişi, efektif gerilme ve zemin yapısının kayma modülü üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sönüm oranında ise en önemli parametrenin zemin yapısı olduğu belirtilmiş ve burada boşluk oranı için kritik eşik değerin 0.5 olduğu ifade edilmiştir. Boşluk oranı bu değerden küçük olduğunda çok yüksek sönüm oranı değerleri elde edildiği belirtilmiştir. Özellikle kohezyonlu zeminler için plastisite indeksinin kayma modülü ve sönüm oranında meydana gelen değişikliklerde en etkin parametre olduğu ve çalışmada verilen eşitliklerin pratik amaçlar için kullanılabileceği ifade edilmiştir [3].

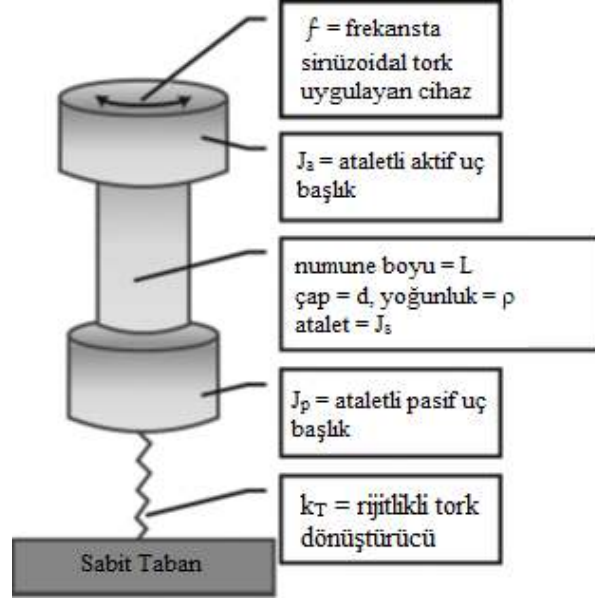
Papadopoulou ve diğ. (2010) tarafından kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerini ve siltli kumların sıvılaşma dirençlerini belirlemek amacıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. 1999 yılında $M_w = 7.4$ ve $M_w = 7.2$ büyüklüğünde iki büyük depremden etkilenen Düzce ili sınırları içinde 6 farklı bölgeden zemin numuneleri alınmıştır. SM sınıfında bulunan siltli kum zeminler ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanıp drenajsız koşullarda deformasyon kontrollü dinamik üç eksenli deneyine tabi tutulmuştur. Örselenmeden kullanılan killi numunelere ise rezonant kolon deneyi uygulanmıştır. Resonant kolon deneyinde kil zeminler, önce tam olarak doymuş hale getirilmiş daha sonra izotropik olarak 24 saat konsolide edildikten sonra çevrimsel gerilmeye maruz bırakılmıştır. Çalışmalarında kullandıkları 7 farklı killi zeminin likit limiti %37 ile %50 arasında, plastisite indisi ise %15 ile %30 arasında değişmektedir. Kil zeminlerin 5 tanesi CL sınıfında 2 tanesi ise CH sınıfında yer almaktadır. Deneyler sonucunda ise siltli kum numunelerde sıvılaşma direnci için laboratuvar ortamında belirlenen parametreler ile zeminin doğal ortamındaki parametreler arasında bazı farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Deneyde kullanılan kil numunesinin kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin diğer kohezyonlu zeminlerle benzer sonuçlar gösterdiği ve plastisitenin sonuçları etkilediği tespit edilmiştir [4].

Bu çalışmada 100 kPa’lık gerilme altında hazırlanan numuneler 100 kPa, 150 kPa ve 200 kPa’lık basınçlar altında konsolide edilmiştir ve her konsolidasyon aşamasında numune rezonans kolon deneyine tabi tutularak kil zeminin dinamik davranışındaki değişim incelenmiştir.

2. Materyel ve Metod

Resonant kolon deneyi düşük deformasyon genliklerinde zeminin kayma parametrelerinin belirlenmesi için 1930’ların sonlarından beri kullanılmaktadır [5,6]. Günümüzde resonant kolon deneyi ile 10^{-5} ile %1 arasındaki deformasyon genliklerinde kayma modülü ve sönüm oranı hesaplanabilmektedir. Hardin ve Drnevich (1972a) konsolidasyonun olmadığı durumlarda resonant kolon deneyinin zemindeki çevrimsel kayma davranışının belirlenmesi için çok uygun bir deney yöntemi olduğunu belirtmişlerdir [7]. Resonant kolon deneyi deprem etkileri, trafik titreşimleri, makine temelleri ve konsolidasyonun gerçekleşmediği statik yüklenme durumlarıyla ilgili analiz ve tasarımlarda kullanılabilmektedir [8]. Resonant kolon deneyi ilk kez 1981 yılında Drnevich ve diğ. (1978) büyük ölçüde çalışmalarına dayanarak ASTM tarafından standartlaştırılmıştır [8]. 1980’li yıllardan itibaren birçok araştırmacı resonant kolon deneyinin

geliştirilmesinde katkı sağlamıştır [9,10]. Werden ve diğ. (2013) tarafından rezonant kolon deneyine yeni bir yaklaşım sunulmuştur [11]. Bu yaklaşımda yarı-sabit taban ve serbest başlığa sahip yeni bir burulmalı kayma ve rezonant kolon cihazı tanıtılmıştır. Bu cihazda nispeten rijit olan bir tork gücü aktarıcı başlık alt taban ile sabit hazne tabanı arasına yerleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Resonant kolon cihazı

Drnevich ve diğ. (2015) çalışmalarında Werden ve diğ. (2013) tanıtılan cihazın getirdiğin güncellemelere genel bir bakış sunmuşlardır [12]. Yeni yaklaşıma sahip rezonant kolon deneyi ile elde edilen verilerinden kayma modülünü, sönümlemeyi ve kayma deformasyonunu belirlemek için yeni çözümler ve bu çözümlerin cihaz kalibrasyonuna nasıl yardımcı olabileceğini anlatmışlardır. Ayrıca Sabit Tabanlı Rezonant Kolon Cihazı ile Zeminin Modül ve Sönümünde Standart Test Yöntemleri'nde (ASTM D4015, 2015) yer alan bu yeni tip cihazın özellikleri incelenmiştir [13]. Bu çalışmada kil zeminlerin dinamik davranışının incelenmesinde Werden ve diğ. (2013) tanıtılan rezonant kolon deneyi kullanılmıştır.

Zeminlerde yapılan laboratuvar deneyleri hem araştırma hem de tasarım amaçları için geoteknik mühendisliğinin önemli bir parçasıdır. Numune hazırlama yöntemi yapılacak olan deneylerin doğru modellenmesi için kritik bir öneme sahiptir. Birçok çalışma zemin davranışının laboratuvar numunesi hazırlama tekniklerine oldukça bağımlı olduğunu göstermiştir [14,15]. Literatürde çeşitli numune hazırlama yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan yöntemler kuru yağmurlama, ıslak tokmaklama, suda çöktürme, bulamaç çökeli ve kuru çöktürmedir. Kohezyonlu zemin numunelerinin laboratuvarda hazırlanması için en çok kullanılan yöntemler ise bulamaç çamuru ve sıkıştırma ile numune hazırlanmasıdır [16]. Çalışmada numunenin sıkıştırılmasında ASTM D 4015 – 92 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 tokmakla yöntemiyle hazırlanmıştır [17,18].

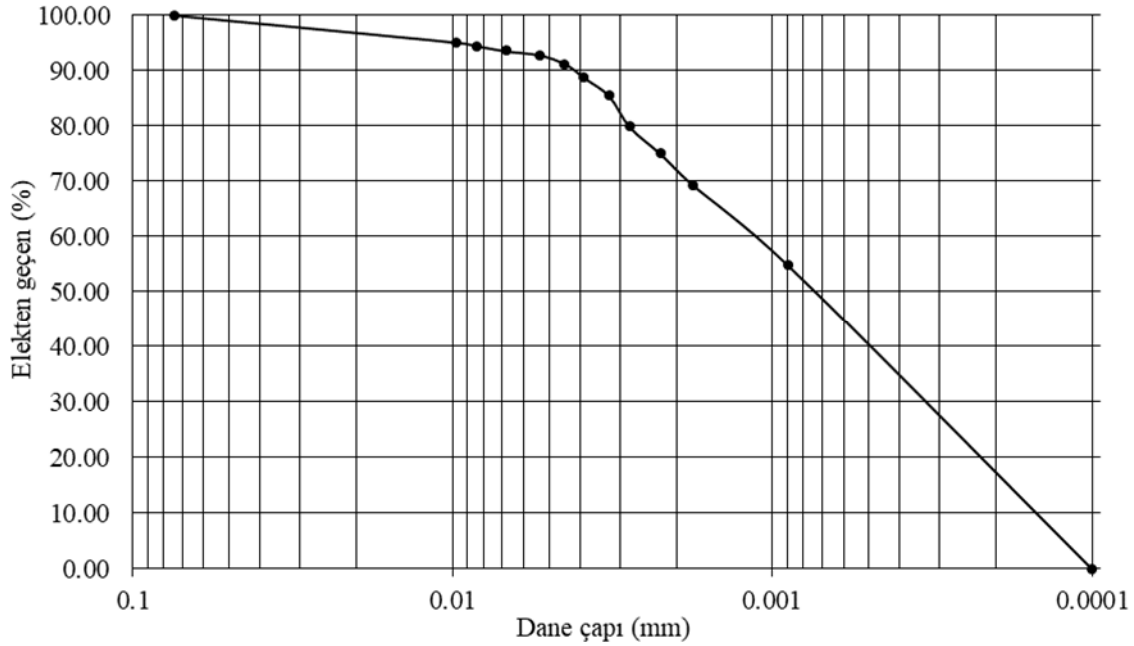
3. Sonuçlar

3.1. Fiziksel Deneyler

Hazırlanan numunelerde likit limit, plastik limit ve özgül ağırlık deneyleri gerçekleştirilerek karışımlara ait fiziksel özellikler belirlenmiştir (Tablo 1). Belirlenen fiziksel özelliklere göre karışımların zemin sınıfları bulunmuştur. Zeminlerin kıvam limitlerinin tespitinde ASTM D4318 – 17, piknometre deneyi ile özgül ağırlıklarının bulunmasında ASTM D854 – 14 ve zeminlerin sınıflandırmasında ASTM D2487 – 11 standartları kullanılmıştır [19,20,21].

Tablo 1. Kullanılan kilin indeks özellikleri

Malzeme	LL	PL	Gs	Sınıflandırma
Kil	49	23	2.56	CL



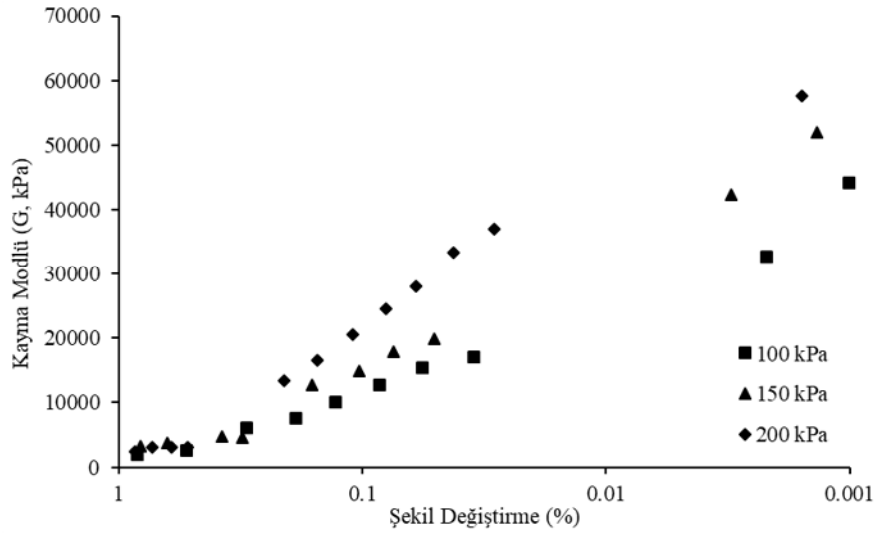
Şekil 3. Kullanılan zeminin dane çapı dağılımı

Bu çalışmada 100 kPa'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 100 kPa olarak bulunmuştur.

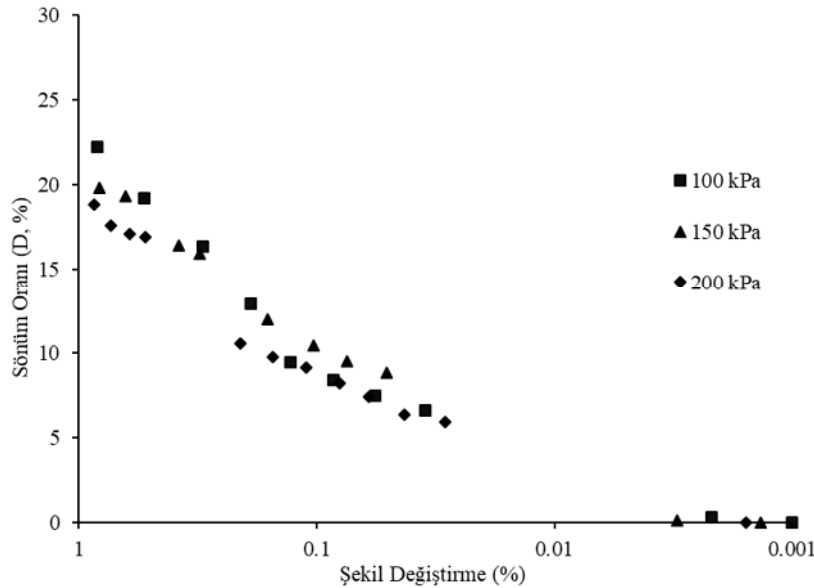
3.2. Dinamik Deneyler

Bu çalışmada kil zemin numunesi 100 kPa gerilmeye ıslak tokmaktama işlemi ile sıkıştırılarak doyurma işlemine tabi tutulmuştur. %100 doygun hale gelen numune 100 kPa altında konsolide edilmiş ve konsolidasyon işlemi tamamlandıktan sonra rezonans kolon deneyi uygulanmıştır.

Çalışmada her rezonant kolon aşamasında numunenin maksimum kayma deformasyonu %1 tutulmuştur. 100 kPa altında konsolide olduktan sonra ve rezonans deneyinde %1 kayma deformasyonuna uğrayan numune 150 kPa basınç altında tekrar konsolide edilerek, rezonant deneyine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda aynı numune 200 kPa altında bir kez daha konsolide edilerek rezonant deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda farklı çevre basınçlarına maruz kalan aynı zeminde rezonant kolon deneyi ile kil zemin numunesinin kayma modülü ve sönüm oranındaki değişim tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda daha yüksek basınç altında konsolide olan kil zeminin maksimum kayma modülü (G_{max}) artarken sönüm oranının (%D) azaldığı görülmüştür. (Şekil 2 ve Şekil 3). Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan sonuçlarla uyumlu bulunmuştur [22,23].



Şekil 2. Rezonans kolon deneyinde kayma modülleri



Şekil 3. Rezonans kolon deneyinde sönüm oranları

Sonuç

Bu çalışmada 100 kPa'lık gerilme altında ıslak tokmaktama yöntemiyle hazırlanan kil zemin numunesi farklı evre basınçlarında konsolide edilerek her konsolidasyon aşamasından sonra rezonant deneyine tabi tutulmuştur. Böylelikle aynı zeminde 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 grlmştir.

Referanslar

- [1] Cao YL, Law KT. Energy dissipation and dynamic behaviour of clay under cyclic loading. Canadian Geotechnical Journal. 1992 Feb 1;29(1):103-11.
- [2] Ishibashi I, Zhang X. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. Soils and Foundations. 1993 Mar 15;33(1):182-91.
- [3] Kallioglou P, Tika TH, Pitilakis K. Shear modulus and damping ratio of cohesive soils. Journal of Earthquake Engineering. 2008 Aug 6;12(6):879-913.
- [4] Papadopoulou A, Kallioglou P, Tika T, Papadopoulos S, Batum E. Liquefaction Resistance of Silty Sands and Dynamic Properties of Cohesive Soils from Dzce, Turkey. Journal of Earthquake Engineering. 2010 Mar 8;14(3):351-62.
- [5] Iida K. The velocity of elastic waves in sand. Bull. Earthq. Res. Inst., University of Tokyo. 1938;16:131-44.
- [6] Iida K. On the elastic properties of soil, particularly in relation to its water content. Bull. Earthquake Res. Inst.. 1940;18:675-91.
- [7] Hardin BO, Drnevich VP. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div. 1972 Jun;98(sm6).
- [8] Hardin BO, Drnevich VP. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div. 1972 Jul;98(sm7).
- [9] Drnevich VP, Hardin BO, Shippy DJ. Modulus and damping of soils by the resonant-column method. In Dynamic geotechnical testing 1978 Jan. ASTM International.
- [10] Ashmawy AK, Drnevich VP. A general dynamic model for the resonant column/quasi-static torsional shear apparatus. Geotechnical Testing Journal. 1994 Sep 1;17(3):337-48.
- [11] Frost JD, Drnevich VP. Towards standardization of torsional shear testing. In Dynamic Geotechnical Testing II 1994 Jan. ASTM International.
- [12] Werden SK, Drnevich VP, Hall JR, Hankour C, Conlee CT, Marr WA. New Approach to Resonant Column Testing. Geotechnical Testing Journal. 2013 Jan 24;36(2):169-77.
- [13] Drnevich VP, Werden S, Ashlock JC, Hall JR. Applications of the new approach to resonant column testing. Geotechnical Testing Journal. 2014 Nov 26;38(1):23-39.
- [14] Standard AS. D4015-92. 2015. Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] Mulilis JP, Arulanandan K, Mitchell JK, Chan CK, Seed HB. Effects of sample preparation on sand liquefaction. Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1977 Feb 2;103(2):91-108.
- [16] Miura S, TOKI S. A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-

strength properties of sand. *Soils and Foundations*. 1982 Mar 15;22(1):61-77.

[17] Lade PV. *Triaxial testing of soils*. John Wiley & Sons; 2016 May 2.

[18] Kim U, Hyodo M, Koga C, Orense R. Effect of fines content on the monotonic shear behavior of sand-clay mixtures. *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*. 2006 Aug 17:133-8.,

[19] 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):24-7.

[20] Standard AS. D4318. 2017. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[21] Standard AS. D854. 2014. *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[22] Standard AS. D2487. 2011. *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[23] Seed HB. *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*. EERC. 1970.

[24] Kokusho T, Yoshida Y, Esashi Y. Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils and Foundations*. 1982 Dec 15;22(4):1-8.