

Sıvılaşma Enerjisinin Laboratuvarında Belirlenmesinde Numune Boyutunun Etkisi Var mıdır?

*¹Turgay Beyaz ve ²Şeyda Özçelik

^{*1}Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye
²Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye

Özet

Kumların sıvılaşma potansiyelinin laboratuvarında belirlenmesinde; dinamik üç eksenli, içi boş silindirik burulmalı makaslama, rezonans kolonu, bender elemanları ve tekrarlı basit makaslama deneyleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisinin tekrarlı basit makaslama deney düzeneğinde belirlenmesinde numune boyutunun etkisinin olup-olmadığı araştırılmıştır.

Çalışmada, üniform, temiz deniz kumu kullanılmıştır. Test edilecek örneklerin içerisine yerleştirildiği hücre çapı 50 mm'dir. Boy/çap (H/D) oranı 1, 0.5 ve 0.25 olan üç farklı boyda ve dört ayrı rölatif sıklıkta (Dr: %40, %50, %60 ve %70) numune hazırlanmıştır. Numunelere 100 kPa düşey gerilme ve 50 kPa boşluk suyu basıncı altında, 0.1 Hz frekansta tek yönlü dinamik yükleme uygulanmıştır. Her bir deney 3 kez tekrarlanmış, eşdeğer veya birbirine yakın sonuçlar anlamlı olarak kabul edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, farklı boylardaki numunelerin birim hacim için sıvılaşma enerjisi değerleri (J/m³) birbirinden farklıdır.

Anahtar kelimeler: Devirsel basit kesme deneyi, Düşey gerilme, Jeoteknik, Kum, Numune boyutu, Rölatif sıklık, Sıvılaşma enerjisi

Is There any Effect of Sample Sizes on Laboratory Liquefaction Tests?

Abstract

Determination of liquefaction potential of sands in laboratory; dynamic three axial, hollow cylindrical torsional shear, resonance column, bender elements and cyclic simple shear tests are used. In this study, the effect of sample size on the determination of liquefaction energy of sandy soils in cyclic simple shear test apparatus was investigated.

Uniform clean sea sand was used in the study. The cell inner diameter in which the samples to be tested is placed is 50 mm. Samples were prepared three different sizes with a length/diameter (H/D) ratio of 1, 0.5 and 0.25 and four varied relative densities (Dr: 40%, 50%, 60% and 70%). The samples were subjected to 1D cyclic loading at a frequency of 0.1 Hz under 100 kPa vertical stress and 50 kPa pore pressure. Each experiment was repeated 3 times, with equivalent or closer results considered significant. According to the test results, the liquefaction energy values per volume (J/m³) of the samples of different sizes are different from each other.

Key words: Cyclic simple shear tests, Vertical stress, Geotechnics, Sand, Sample size, Relative density, Liquefaction energy

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Geology Engineering Pamukkale University, 20070, Denizli TURKEY. E-mail address: tbeyaz@pau.edu.tr, Phone: +902582963371 Fax: +902582963460

Kısaltmalar

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
D_r	Rölatif sıkılık (%)	σ'_v	Efektif (etkin) düşey gerilme (kPa)
f	frekans (Hz)	H	Boy (mm)
u	Boşluk suyu basıncı (kPa)	D	Çap (mm)
γ	Kesme birim deformasyon oranı (%)	W	Birim hacim başına sıvılaşma enerjisi (kJ/m ³)
r_u	Boşluk suyu basıncı oranı	mm	milimetre
σ_v	Düşey gerilme (kPa)	m	metre

1. Giriş

Depremler sırasında gelişen tekrarlı kuvvetler, zemin tanelerini sıkışmaya zorlarken boşluk suyu basıncında artışa neden olur. Özellikle, kohezyonsuz suya doymun zeminlerdeki boşluk suyu basıncı artışı esnasında deprem süresi kısa olduğundan yeraltı suyunun drenajı için yeterli olmaz -efektif gerilme azalır (ve eğer sıfır olursa), zeminin taşıma gücü kaybolur. Suyu doymun kohezyonsuz zeminlerde meydana gelen bu davranış türüne sıvılaşma denmektedir. Bunun sonucu olarak zeminlerde beklenenin dışında bir oturma meydana gelir [1 ve 2]. Bu durum zemine inşa edilmiş yapılarda ciddi hasarlara neden olabilir. Bu hasarlar, yapıların ve istinat/sanat yapılarının zemine gömülmesi veya kayması şeklinde ortaya çıkmaktadır [3]. Sıvılaşma emarelerinin 1964-Niigata, 1989-Loma Prieta, 1996-Ceyhan, 1999-Chi-Chi, 1999-Gölcük ve 1999-Bolu-Düzce depremlerinde de gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Araştırmacılar, sıvılaşma mekanizmasını daha iyi anlamak ve zeminlerin sıvılaşma potansiyelini tahmin etmek için arazide [4, 5] ve laboratuvarında [6, 7] çeşitli yöntemler önermişlerdir. Bunlar genel olarak: i) gerilme temelli yöntemler [8-10], ii) birim deformasyon temelli yöntemler [11, 12] ve iii) enerji temelli yöntemler [13, 14] olarak üç ana grupta toplanabilir [9, 15]. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin laboratuvarında belirlenmesinde dinamik üç eksenli kesme deneyi, tek yönlü tekrarlı basit kesme deneyi, tekrarlı burulmalı kesme (halka) deneyi, rezonans kolonu deneyi ve bender elemanı deneyleri vb. yöntemler kullanılmaktadır.

Enerji temelli yöntemde temel parametreler: zeminin rölatif sıkılığı ve efektif gerilmedir. Sıvılaşma potansiyelinin laboratuvarında sadece bu parametrelerle bulunabiliyor olması çok sayıda belirsizlik içeren ve gerilme yöntemine dayanan arazi teknikleri için önemli bir alternatiftir.

Enerji yaklaşımıyla laboratuvarında yapılan deneysel çalışmaları; uygulanan yükün frekansı, suya doymunluk oranı, kesme birim deformasyonu, tane boyu dağılımı, zemin tanelerinin şekli vb. birçok parametre etkilemektedir. Bunlardan bir tanesi de deney için hazırlanan örneklerin boyutu; yani çap ve boy ölçüleridir. Deney düzeneklerinin bir bölümünde örnek hazırlama aparatının boyutları birbirinden farklıdır. Araştırmalardan elde edilen verilerin sağlıklı şekilde kıyaslanabilmesi için deney örneklerinin standart boyutta olması gerekir.

Kumların sıvılaşma enerjisinin laboratuvarında belirlenebilmesi için; üç yönlü dinamik (tekrarlı) basit kesme deney düzeniği kullanılmıştır.

Zemin numunesinin boyutunun (boy ve çap ölçülerinin) kumların sıvılaşma enerjisinin laboratuvarında belirlenmesindeki etkisi araştırılmıştır. Aynı boyutlarda hazırlanan numunelerle, aynı şartlar altında deneylerin tekrarlanması halinde; eşdeğer sonuçların alınabildiği numune boyutunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler: boşluk suyu basıncı artışı, kesme gerilmesi değeri, sıvılaşmanın meydana geldiği çevrim sayısı gibi bazı parametreler göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, her deney üçer kez tekrarlanmış, birbirine yakın sonuçların elde edildiği numune ölçüleri; standart deney numune boyutu olarak kabul edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada;

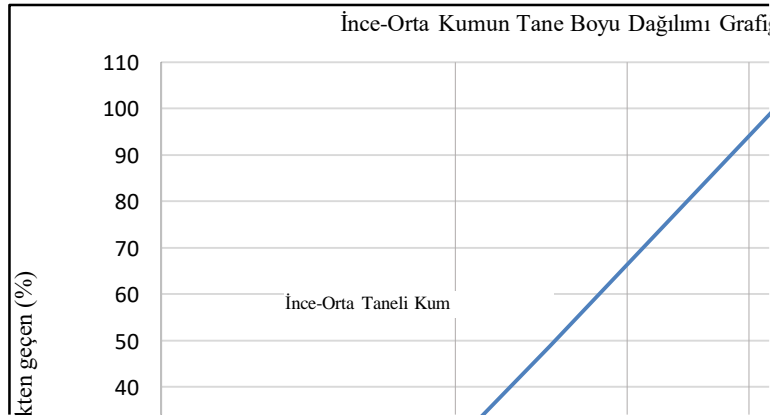
- i) Temiz, üniform, ince-orta daneli, denizel kökenli kum kullanılmıştır. Kumun tane boyu dağılım analizi (elek analizi) (ASTM-D 422) [16] yapılmış ve grafiği çizilmiştir (Tablo 1, Şekil 1). Tane boyu dağılım grafiğinden D_{10} , D_{30} , D_{60} ve D_{50} değerleri belirlenmiş; C_u ve C_c değerleri (ASTM-D 2487) [17] hesaplanmıştır (Tablo 1). Özgül ağırlık (ASTM-D 854) [18], minimum boşluk oranı (ASTM-D 4253) [19], maksimum boşluk oranı (ASTM-D 4254) [20] değerleri deney standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Deneyler için rölatif sıklık (ASTM-C 127) [21] değerlerine uygun olarak kullanılacak numune ağırlığı hesaplanmıştır. Kum numuneler kuru yağmurlama sistemiyle hücre içerisine yerleştirilmiştir. Numuneler, deney düzeneğine yerleştirilirken rölatif sıklık değerinin kontrolü için numune yüksekliği kontrol edilmiş (ve bu değer yardımıyla), deney başlangıcındaki rölatif sıklığı hesaplanmıştır. Deney düzeneğine yerleştirilen bütün numuneler, önce CO_2 gazıyla doyurulmuş, daha sonra havası alınmış suyla doyurma işlemi yapılmıştır.
- ii) Deneyler laboratuvarında, devirsel basit kesme deney düzeneğinde yapılmıştır. Deneyler için 50 mm çapında (D) silindirik numuneler hazırlanmıştır. Numune yüksekliği (H), çapı (D) ile orantılıdır. H/D oranı: 0,25; 0,5 ve 1,0'dir. Numuneler deneye başlamadan önce; 100 kPa düşey gerilme, 50 kPa boşluk suyu basıncı (hücre içi basınç) etkisinde bırakılmıştır.
- iii) Deney yöntemi olarak; "Birim Deformasyon Kontrollü Devirsel Kesme (Strain Controlled Cyclic Shearing)" yöntemiyle numunelere yük/gerilme uygulanmıştır. Bu deney yöntemi altında: Tek yönlü (1-D), Sinusoidal dalga etkisinde, drenajsız, deney süresince boyu değişebilen (boy değişimi, deney süresince serbest bırakılan) deney şartları tercih edilmiştir. 0.1 Hz frekansta devirsel (tekrarlı) yükleme uygulanmıştır. %5 kesme birim deformasyona (yanal hareket/öteleme miktarı) izin verilmiştir. Her devirsel hareket için 20 kayıt alınmıştır. Bu kayıtlar yardımıyla, her bir deney için "Çevrim Sayısı-Boşluk Suyu Basıncı (kPa)" ve "Kesme Gerilmesi (kPa)-Kesme Birim deformasyonu (%)" grafikleri hazırlanmıştır.

2.1. Üniform Temiz Denizel Kum

Çalışmada kullanılacak malzeme kumdur. Çalışmada, tek tür ince-orta tane boyuna sahip temiz denizel kökenli kum kullanılmıştır. Bu kum, Antalya ili, Alanya ilçesindeki sahillerden alınmıştır. Bu kum sarımsı renkli, ince-orta boyda tanelerden oluşmaktadır. Kumun tane boyu dağılım analizi (elek analizi) yapılmıştır (Tablo 1, Şekil 1) [22].

Tablo 1. Çalışmada kullanılan denizel kökenli kumunun tane boyu dağılımı ve özellikleri [22]

Elek No	Elek Açıklığı	Elekten Geçen (%)
	(mm)	
40	0.425	100
60	0.25	48.7
100	0.15	0.8
120	0.125	0.1
230	0.063	0.0
Tane boyu dağılımına bağlı özellikler		
D ₁₀ : 0,16	D ₅₀ : 0,254	G _s (=ρ _s): 2,65
D ₃₀ : 0,205	C _c : 0,97	e _{min} : 0,551
D ₆₀ : 0,27	C _u : 1,69	e _{maks} : 0,782

**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan denizel kökenli kumunun tane boyu dağılımı grafiği [22]

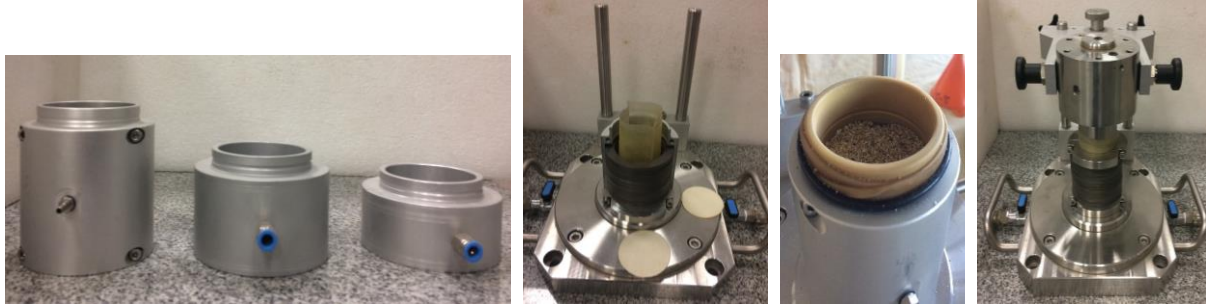
2.2. Devirsel Basit Kesme Deney Düzenegi

Çalışmada, üç yönlü dinamik (tekrarlı) basit kesme deney düzenegi kullanılmıştır. Araştırmada kullanılacak düzeneğe, üç ortogonal yönde gerçek deprem verisi girilerek deney yapılabilmesi düzenegin en ayrıcalıklı özelliğidir. Bu düzenek ile sıvılaşma enerjisinin belirlenmesinin, diğer yöntemlere kıyasla daha güvenilir olacağı düşünülmektedir.

Numune boyut etkisinin sıvılaşma enerjisine etkisinin araştırılması amaçla; 50 mm çapında (D) ve üç (3) ayrı boyda (H=50 mm, 25 mm ve 12,5 mm yüksekliğinde) silindirik numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2). Her bir numune dört (4) ayrı rölatif sıkılık değerinde (Dr= %40, %50, %60 ve %70) test edilmiştir.

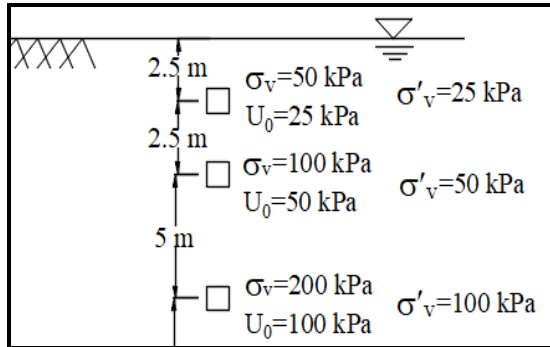
Deney düzeneginin özelliği olarak deneyler sırasında kum numunelere hücre içi basınç (dolayısıyla boşluk suyu basıncı) uygulanmaktadır. Basınçta kayıp yaşanmaması için numunelerin membran içerisine yerleştirilmesi gerekmektedir. Deney düzeneginde, 1 mm kalınlığındaki teflon kaplı yassı bileziklerin serbest hareketiyle yatay yönde kesme oluşturulmaktadır. Numune hazırlanırken yassı bileziklerin hareket etmemesi için (deneyden önce kesme meydana gelmemesi için) yassı bilezikler ve numuneler bir sabitleme hücresi

içerisine yerleştirilerek hazırlanmaktadır (Şekil. 2). Numune hazırlamada, kumun havadan serbest düşmesi ile sağlanan "havada kuru yağmurlama tekniği" kullanılmıştır.

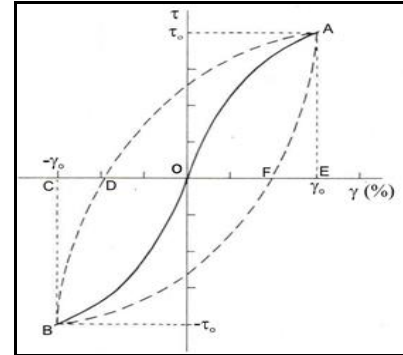


Şekil 2. 50 mm kum numunesi hazırlama aparatı ve deneye numune hazırlama aşamalarına örnek

Belirlenen rölatif sıkılıkta hazırlanan numune, dinamik kesme düzeneğine yerleştirilerek, arazideki şartlarına benzer olarak; 100 kPa düşey gerilme ve 50 kPa boşluk suyu basıncı uygulanmıştır (Şekil 3). Membran içinde ve teflon kaplı bileziklerle kuşatılan zemine 0,1 Hz harmonik yükleme yapılmıştır. Bu yükleme sırasında, kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüleri oluşur (Şekil 4). Numune tekrarlı yükleme altında makaslandıkça, boşluk suyu basıncının başlangıçtaki değeri giderek artacaktır. Dinamik yükleme etkisi ile gelişen boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeye ulaşana kadar artmaya devam eder ve sonuçta belli sayıda kesme gerilmesi-kesme birim deformasyonu döngüsü oluşur. Her bir döngü sırasında numuneye uygulanan enerjinin bir bölümü döngü (histerez) içinde soğurulur. Soğurulan bu enerji zeminde boşluk suyu basıncı artışına sebep olan "iş"e (δW) karşılık gelmektedir (Denklem 1).



Şekil 3. Kumların sıvılaşma deneylerinde öngörülen; arazide derinlik, düşey gerilme ve boşluk suyu basıncı ilişkisi



Şekil 4. Numunenin yatay yönde makaslanması sırasında oluşan gerilme döngüsüne tipik bir örnek [23, 24]

$$\delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (\tau_i + \tau_{i+1}) (\gamma_i + \gamma_{i+1})$$

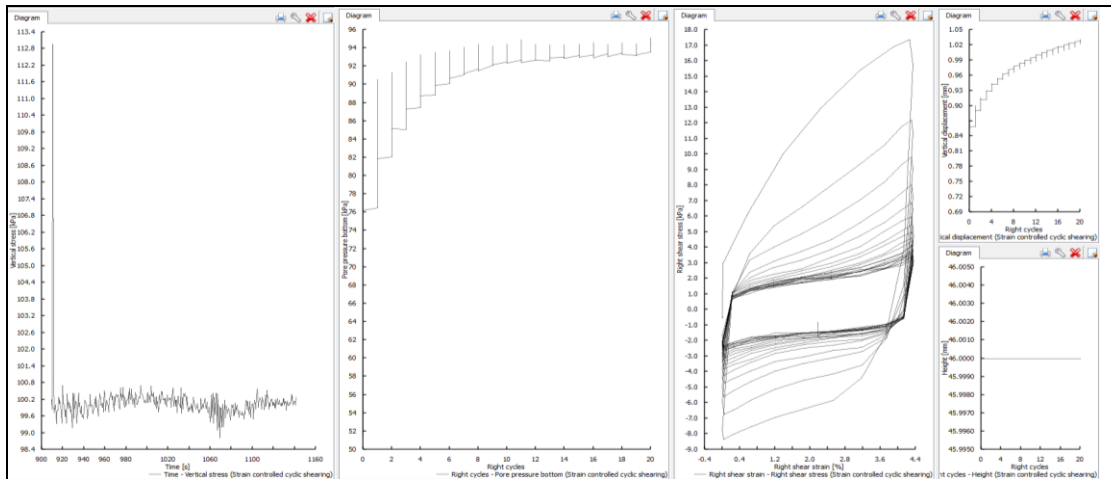
(Denklem - 1)

Soğurulan enerji, Denklem-1 yardımıyla metreküp başına Joule (J/m^3) cinsinden hesaplanmış olur.

3. Bulgular

Bütün kum numuneleri tek yönlü (1-D) hareketle; 0,1 Hz frekansta (f) harmonik salınıma tabi tutulmuştur. % 40, % 50, % 60 ve % 70 rölatif sıkılıklarda (D_r) hazırlanan kum numunelerin hepsi için % 5 kesme birim deformasyon oranında ötelenme uygulanmıştır. Her bir farklı boy ve rölatif sıkılık değerinde; toplam düşey gerilme (σ_v) 100 kPa, boşluk suyu basıncı (u) 50 kPa olacak şekilde gerilme etkisinde bırakılmıştır. Bu şartlar altında, 50 mm çapındaki ($=D$) bir zemin numunesi için 4 farklı rölatif sıkılıkta (D_r) ve [Boy/Çap (H/D) oranı= 1; 0,5 ve 0,25 olacak şekilde] 3 ayrı boyda numuneler üzerinde toplam 12 deney gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sırasında efektif gerilmenin sifıra ulaştığı anda, sıvılaşmanın gerçekleştiği kabul edilerek, deneye son verilmiştir (Şekil 5). Deneylerden elde edilen veriler (Tablo 2) kullanılarak; rölatif sıkılık, ortalama tane çapı, efektif gerilme, kesme gerilmesi, kesme birim deformasyon oranı vb. faktörlerin etkisindeki kumun 12 ayrı sıvılaşma enerjisi (iş-W), Denklem-1’de verilen bağıntı yardımıyla metre küp başına Joule (J/m^3) cinsinden, hesaplanmıştır (Tablo 3).



Şekil 5. Kumun 50 mm çap ve 50 mm boy numune kalıbı ile %40 rölatif sıkılık değerinde yapılan sıvılaşma deneyine ait ekran görüntüsü [a) Zaman(s)-Düşey gerilme(kPa); b) Devir sayısı-Boşluk suyu basıncı(kPa); c) Kesme birim deformasyonu(%) -Kesme gerilmesi(kPa); d) Devir sayısı-Düşey yer değiştirme (mm) grafikleridir]

Her bir deney üçer (3) kez tekrarlanmıştır. Deneylerde birbirine eşdeğer veya yakın sonuç veren numune ölçüleri, standart numunesi boyutu olarak kabul edilmiş ve deneylerde kullanılması önerilmiştir.

Tablo 2. Sıvılaşma deneylerinde otomatik olarak kaydedilen dosya örneği (Wille-GeoTechnic, 2017)

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Actual phase	Time	Vertical load	Vertical displacement	Vertical extension	Vertical stress	Right load	Right displacement	Right extension	Right shear stress	Left Load	Left displacement	Left extension	Left shear stress	Height	Backpressure	Burette	Vertical stress	
	s	kN	mm	mm	kPa	kN	mm	mm	kPa	kN	mm	mm	kPa	mm	kPa	ml	kPa	
1	2	935.3	0.78519999	0.222	-0.00322	99.974769	0.13888	-0.047999999	-5.00E-04	17.682751	0.02126	0.001	-0.0013	2.7069073	20	0.72544092	0.1204	99.974769
2	2	935.8	0.78254999	0.222	-0.00278	99.637361	0.13806	-0.047999999	-0.00125	17.578345	0.02096	0.001	-9.00E-04	2.6687101	20	0.72556657	0.1208	99.637361
3	2	936.3	0.783	0.223	-0.00256	99.694656	0.17654	-0.042	-0.00125	22.477771	0.01836	0.001	-0.001	2.3376678	20	0.72561759	0.0865	99.694656
4	2	936.8	0.64429999	0.263	-0.00298	82.034824	0.43246	0.191	-0.0013	55.062517	-0.00684	0.001	-0.00155	-0.87089585	20	0.72534329	0.1062	82.034824
5	2	937.3	0.78939999	0.272	-0.00286	100.50953	0.5319	0.586	-0.001	67.723611	0.0017	0.001	-0.00115	0.21645072	20	0.7256012	0.103	100.50953

Sonuçlar, laboratuvarda yapılacak deneyler için önemli ve temel bir parametredir. Bundan sonra yapılacak deneylerdeki numune ebatlarına karar verilmesinde referans olarak kullanılabilecektir.

Tablo 3. Kumlarda, %50 rölatif sıklıkta yapılan deney sonuçlarına örnek

Örnek Çapı (mm)	Rölatif Sıklık (%)	Örnek Boyu (mm)	Boy/Çap Oranı	Sıvılaşma Devir Sayısı	Kesme Gerilmesi (kPa)	u_{maks} (kPa)	Sıvılaşma Enerjisi (kJ/m ³)
50	50	50	1.0	1	19.44	100.2	4.13
		25	0.5	9	40.9	99.87	33.89
		12.5	0.25	18	17.87	85.6	30.49

4. Sonuçlar

Bu araştırmada, 50 mm çapında, 3 ayrı yükseklikteki numuneler üzerinde deney yapılmıştır. Deneylerde, çapı 50 mm ve yüksekliği 50 mm olan numuneler birbirine eşdeğer (veya yakın) sonuçlar vermiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki değerlere yakındır. Kumların sıvılaşma enerjisinin laboratuvarda belirlenmesinde; 50 mm çap ve boy ölçüsünün standart numune boyutları olarak kabul edilmesi ve gelecekte yapılacak deneylerde kullanılması önerilmektedir. Ancak, burada elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından; çalışmanın farklı çaplardaki (100 mm, 150 mm vb. gibi) numuneler üzerinde denenmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışma, bir kum türü üzerinde denenmiştir, çok sayıda kum türü üzerinde denenmesi önerilmektedir. Bu çalışmanın farklı kum türleri üzerinde (farklı tane boyuna ve farklı tane şekline sahip numuneler üzerinde) araştırılmasından sonra, nihai numune boyutuna karar verilmesi daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Numune boyutları, laboratuvar teknikleriyle sıvılaşma enerjisinin belirlenmesinde oldukça önemli bir ölçüttür. Numune boyutunun değişmesi, sıvılaşma enerjisi değerini çok fazla etkilemektedir. Dolayısıyla, kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisini belirlemeden önce, deney düzeneğinde kullanılacak numune boyutlarının detaylı olarak araştırılması ve standart numune boyutuna karar verilmesi oldukça önemlidir.

Teşekkür

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (PAÜ-BAP) Koordinasyon Birimi tarafından 2018FEBE044 nolu proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Çalışmanın laboratuvar deneyleri, Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, laboratuvar ve altyapı imkânlarının kullanılmasını sağladıkları için Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği bölümünden Sayın Prof. Dr. Kamil Kayabalı'ya ve Sayın Prof. Dr. Yusuf Kağan Kadioğlu'ya teşekkür ederler.

Referanslar

- [1] Seed, R.B., and Lee, K.L. 1966. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. Proc. ASCE, 92 (SM6), 105-134.
- [2] Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N., Murata, H. 1994. Undrained cyclic and monotonic triaxial behavior of saturated loose sand. Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundations, 34(1), 19-32.
- [3] Towhata, I. 2008. Geotechnical earthquake engineering. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, p. 698.
- [4] Davis, R.O., Berrill, J.B. 2001. Pore pressure and dissipated energy in earthquakes-Field verification. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(3), 269-274.
- [5] Cetin, K.O., Seed, R.B., Der-Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, Jr. L.F., Kayen, R.E., Moss, R.E.S. 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130 (12).
- [6] DeAlba, P.S., Seed, H.B., Chan, C.K. 1976. Sand liquefaction in large-scale simple shear tests. Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, 102(GT9): 909-927.
- [7] Ladd, R.S., Dobry, R., Yokel, F.Y., Chung, R.M. 1989. Pore water pressure buildup in clean sands because of cyclic straining. ASTM Geotechnical Testing Journal, 12(1), 2208-2228.
- [8] Seed, R.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97, 1249-1274 (SM8).
- [9] Green, R.A., 2001. Energy-based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils. (PhD dissertation). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- [10] Baziar, M.H., and Jafarian, Y. 2007. Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model, capacity energy. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 1056-1072.
- [11] Dobry, R., Ladd, R., Yokel, F., Chung, R., Powell, D. 1982. Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method. National Bureau of Standards Building Science Series, US Dept of Commerce, 138.
- [12] Schneider, J.A., and Moss, R.E.S. 2011. Linking cyclic stress and cyclic strain based methods for assessment of cyclic liquefaction triggering in sands. Géotechnique Letters, 1, 31-36.
- [13] Figueroa, J., Saada, A., Liang, L., and Dahisaria, N. 1994. Evaluation of soil liquefaction by energy principles. Journal of Geotechnical Engineering, 120(9): 1554-1569.
- [14] Liang, L. 1995. Development of an energy method for evaluating the liquefaction potential of a soil deposit [Ph.D. dissertation]. Cleveland, Ohio: Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University.
- [15] Zhang, W. , Goh, A.T.C. , Zhang, Y. , Chen, Y. , Xiao, Y. 2015. Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines. Engineering Geology, 188, 29-37.
- [16] ASTM-D 422. 2002. Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM Standards.
- [17] ASTM-D 2487. 2000. Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Standards.
- [18] ASTM-D 854. 2006. Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM Standards.
- [19] ASTM-D 4253. 2006. Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils and Vibratory Tables. ASTM Standards.
- [20] ASTM-D 4254. 2006. Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. ASTM Standards.
- [21] ASTM-C 127. Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM Standards.
- [22] Özçelik, Ş., 2019. Kumlu zeminlerin sıvılaşma enerjisinin laboratuvarında belirlenmesinde numune boyutunun etkisinin araştırılması. PAÜ, Fen Bil. Enst., Yük. Lis Tezi. Denizli-TR (yayımlanmamış).
- [23] Hardin, B.O., Drenevich, V.P. 1972. Shear modulus and damping in soils – design and curves. ASCE J. of the Soil Mech. and Found. Div., 94 (SM3), 689-708.
- [24] Kayabalı, K., Yılmaz, P., Fener, M., Aktürk, Ö. ve Habibzadeh, F. 2018. Zemin sıvılaşmasının enerji yaklaşımıyla değerlendirilmesi. MTA Dergisi, 156: 195-206.
- [25] Wille-Geotechnik, 2017. <https://www.wille-geotechnik.com/> (Erişim Tarihi: 05 Eylül 2019).