

İNCE DANELİ ZEMİNLERİN SİSMİK KOŞULLARDA DAVRANIŞI

Akın Önalp¹ , Sakarya Üniversitesi(e.)

ÖZET

Sıvılaşma terimi kumların deprem koşullarında yükselen boşluk suyu basıncının efektif gerilmeleri sıfıra düşürmesi durumu için kullanılmıştır. Geçirimsizliği kumlardan çok düşük olan silt ve killi ortamlar da tekrarlı yüklerden etkilenmekle birlikte bunlarda ana tarifi ile sıvılaşmanın gerçekleşmesi konusu tartışmalı olmuş, etkilenmenin daha ziyade aşırı deformasyon biçiminde belirlediği bulgusu tereddüd yaratmıştır. 1964 Niigata ve Alaska depremlerinde kumlar ve siltlerin sıvılaştığı rapor edilirken, sonraki dönemdeki Haicheng-ve Tangshan(1975 -76) olayları sonucunda Çin Kriteri olarak sergilenen ölçütlerin düşük plastisiteli killer için geliştirilmiş olması da ilginç bir gelişme olarak kayıtlara geçmiştir. 1999 depreminde Yalova-Kocaeli-Düzce ekseninde gözlemlenen sıvılaşma vak'aları konuyu Türkiye'de gündeme getirmişti. Olayda tahminen %25'inde dinamik yenilme gözlemlenen Adapazarı zeminleri depremden bu yana sıvılaşma açısından değerlendirilebilmektedir. Arazi gözlemleri-Laboratuvar sonuçları karşılaştırması ile Sakarya Üniversitesinde geliştirilen Adapazarı Kriteri'nin geçerliliği daha sonra gerçekleştirilen araştırma programları ile denetlenmektedir. Bölgede kaydedilmiş en yüksek çevrimsel gerilme oranı ile siltlerin önce farklı mineralojiye sahip killerle karışımlarının dinamik davranışı değerlendirilmiş ve yenilmenin hangi koşullarda gerçekleştiği tesbit edilerek bu sonuçlar kalibrasyon olarak kullanılmıştır. Daha sonra, yerleşim bölgelerinden alınmış örselenmemiş numuneler çevrimsel basit kesme ve dinamik üç eksenli hücre kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Bu bildiri de araştırma programlarında varılan sonuçlar özetlenmekte, Adapazarı Kriterinin Türkiye genelinde uygulanabilirliği önerilmektedir. Sonuçlar deprem koşullarında kumlar yanında siltli kumlar, siltler hatta killerin de yenilme olasılığı bulunduğunu göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER : sıvılaşma, yenilme, siltler, basit kesme, üç eksenli kesme, Adapazarı Kriteri

ABSTRACT

Liquefaction is basically a phenomenon encountered in sands subjected to dynamic loads, where excess pore water pressures cause the drop of effective stress to zero. As such the liquefaction of fine grained soils which have permeabilities of up to three orders of magnitude lower than sands have often been questioned. While irrefutable occurrence of liquefaction have been reported in Niigata sands and Alaskan silts in the 1964 quakes, the Chinese Criteria proposed subsequently based on Haicheng-1975 and Tangshan-1976 quakes for silts were actually developed also using results from low plasticity clays. The issue of liquefaction appeared on the Turkish geotechnical agenda following the events of 1999 Marmara earthquakes. Soils of Adapazarı where an estimated 25% of the area showed signs of seismic failure during this event have been extensively evaluated, resulting in the "Adapazarı Criteria" that diagnoses dynamic failure of fine grained soils. Subsequent research at Sakarya University has been ongoing to improve the criteria to this day. This paper gives an account of a study where dynamic behaviour of silt mixtures with different percentages of clays of different origin

were used as reference to judge the behaviour of undisturbed samples tested in simple(DSS) and triaxial shear (CTX) conditions. The data have been used to improve the Adapazari Criteria for universal use. The results show that clays as well as silts can exhibit signs of liquefaction, although failure by excessive deformation is a more likely mode of failure in clays.

1. Giriş

Son yıllarda gelişen çok sayıda deprem zeminlerin sismik etkiler altında performansını gündeme getirmiştir. Batık durumda ve standart penetrasyon direnci ≤ 10 'larda seyreden kum profillerinde gerçekleşen sıvılaşma olayının silt, hatta killi ortamlarda da gerçekleştiğini öne süren çok sayıda zemin araştırma raporu ile karşılaşmaktadır. Bu tanımlamalar özellikle Marmara Bölgesi için yapıldığından bu tür yargının gerekli kıldığı zemin iyileştirme işlemlerinin temel inşaat maliyetlerini yükselttiği gözönüne alındığında konunun daha gerçekçi irdelenmesi gerektiği düşünülmüştür. 1999 depremlerinde Adapazari kent merkezinde kaydedilmiş yaygın yıkımın zeminden kaynaklandığı gerekçesi ile kentin kuzeye taşınması kararı dahi alınmıştı. Zeminde gözlemlenen yenilmelerin sıvılaşmadan kaynaklandığı varsayılarak yapılan incelemelerde olayın kesin gerçekleştiği görülen parsellerde zemin profilinde egemen türün ağırlıklı olarak siltli kumlar ve kumlu siltler olduğu da görülmüştür. Kısmen siltler, killi siltler ve siltli killerde beliren yenilmenin mekanizmasını anlamak maksadı ile laboratuvar ve arazide uzun süreli araştırma yapılmış, yapılmaktadır. Araştırmalar sonucunda Adapazari Kriterleri olarak adlandırılan limitler geliştirilmiştir. Bu bildiri depreme duyarlı ince daneli zeminlerin tanımlanmasına yönelik olarak arazi ve laboratuvarda yürütülmüş iki çalışmanın sonuçlarını özetlemektedir.

2. SİTLERİN DİNAMİK ETKİLER ALTINDA DAVRANIŞI

Siltler ($0.002\text{mm} < D < 0.076\text{mm}$) zemin türleri arasında çelişkili davranışları nedeniyle öne çıkarlar. Kayma gerilmeleri aldıklarında boşluk suyu basınçları pozitif veya negatif yönde gelişebilir(Wang ve Luna,2012) . Deprem koşullarında beliren fazla boşluk suyu basınçlarının aşırı konsolidasyon oranı OCR'ye bağlı olmaması bu özelliğin bir yansıması olarak yorumlanmıştır.

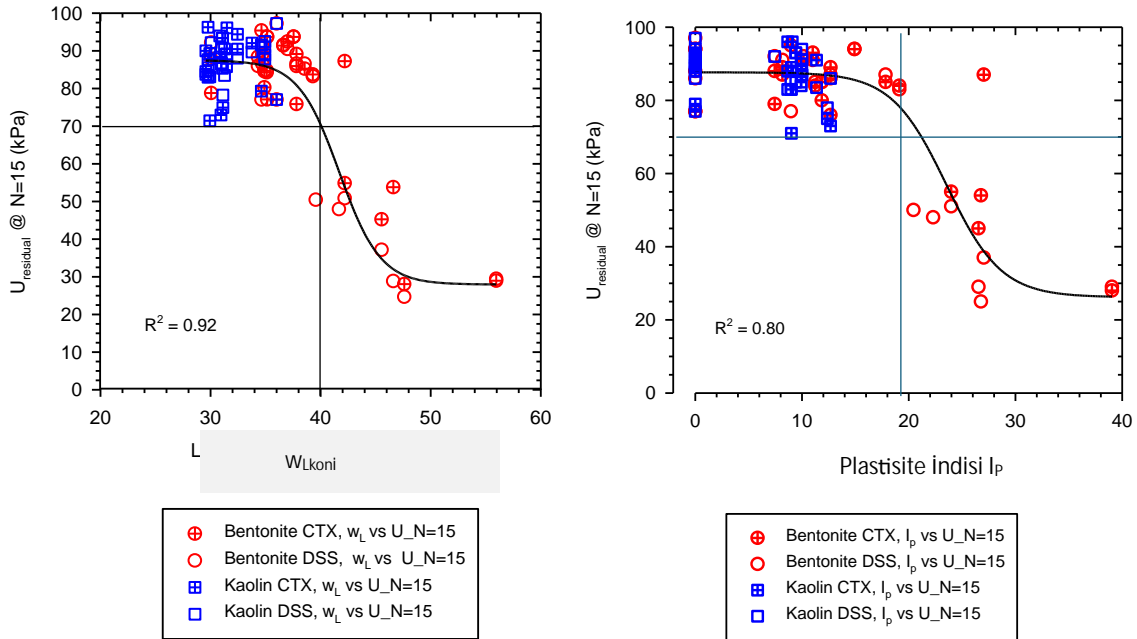
2.1 . Adapazari Siltinin Özellikleri

Adapazari silti NP'den montmorillonit kökenli kil içeriği karakteristik olarak %5-10 olan, *SiM,SiL* gurubuna giren taşkın ovası ürünüdür(Arel ve Önalp,2012). Bu özelliği arazide ortamın kumsu($I_p < 7$) ya da kilsli karakter (Idriss ve Boulanger,2006) göstermesi modelini gerçekçi bir tanımlama olarak teyid etmektedir. Kilsli numunelerin drenajsız kayma direnci(UU) yatay bir zarfla temsil edilirken kumsu numunelerin 30° ye kadar kayma direnci açısı gösterdiği yapılan son araştırmalarla anlaşılmıştır. Son depremlerde siltli kil ve killi profillerde de çevrimsel hareketlilik belirtilerinin gözlemlenmesi bu alanda yoğun çalışmaları gerektirmiştir.

3. KİL MİNERALI İÇERİĞİNİN SİLTİN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

Doğal kil içeriğinden yüzdürme yöntemi ile arındırılan Adapazari silti önce kaolin ve bentonit ile belirli yüzdelerde karıştırılarak yapay numuneler hazırlanmıştır. Özel hücrede bulamaçtan

$\sigma_c=100\text{kPa}$ 'a konsolide edilerek oluşturulan numuneler $M_w=7.5$ deprem karşılığı $CSR=0.35$ ile çevrimsel dinamik üç eksenli(CTX) ve basit kesme(DSS) dinamik deneylerine tabi tutulmuştur ($\sigma_3=100\text{kPa}$: $OCR=1$). Normal gerilme/çevre basıncının 100kPa 'da tutulması Adapazarında karakteristik sıvılaşma derinliğinin üst 10m 'de olmasından kaynaklanmaktadır. Bu seri deneylerin yapılma amacı örselenmemiş numunelerin analizine altlık hazırlamak ve bir anlamda kalibrasyon yapmaktır. Deneyde ölçülen fazla boşluk suyu basıncı örneklerin temel özelliği olan likit limit ve plastisite indisi ile karşılaştırılmıştır. Koni düşürme yöntemi ile ölçülen likit limit kalıntı boşluk suyu basıncına karşı noktalanmıştır. Kalıntı fazla boşluk suyu basıncı(u_{wres}) deney sırasında çevrimsel deviator gerilmenin sıfırdan geçtiği aşamada ölçülen değer olup, maksimum değerden (u_{wmax}) daha gerçekçi bilgi sağladığı için tercih edilmiştir. Likit limitin koni düşürme yöntemi ile ölçülmesinin nedeni ise bu deneyde w_{Lkoni} ile her örnekte sonuç elde edilebilmesi, çarpmalı yöntemde olduğu gibi kimi deneyin NP nitelendirmesi ile sonlandırılmamasıdır. Şekil 1. 15 çevrimde ölçülen fazla boşluk suyu basıncının likit limitle bağıntısını göstermektedir. R^2 değeri plastisite indisinden bulunandan daha yüksektir. Buradan yenilmenin $u_{wres}=70\text{kPa}$ 'da gerçekleştiği görülmektedir. Bağıntı sigmoidal bir fonksiyonla temsil edildiğinde grafikten $w_{Lkoni}=40$ sınırı okunmaktadır. Bunun çarpmalı deneyde (Casagrande) karşılığı ise 35 ± 2 'dir. Deneylerde dikkat çeken husus kaolin karışımı siltlerin tüm numunelerde yenilme gösterdiği gözlemi olmuştur. Kaolin katkılı numunelerde artan kil yüzdesi ile plastisitenin yükselmemesi de ayrıca dikkat çekmişti. Buradan kil minerali içeriğinin dinamik davranışı etkilediği izlenimi edinilmektedir.

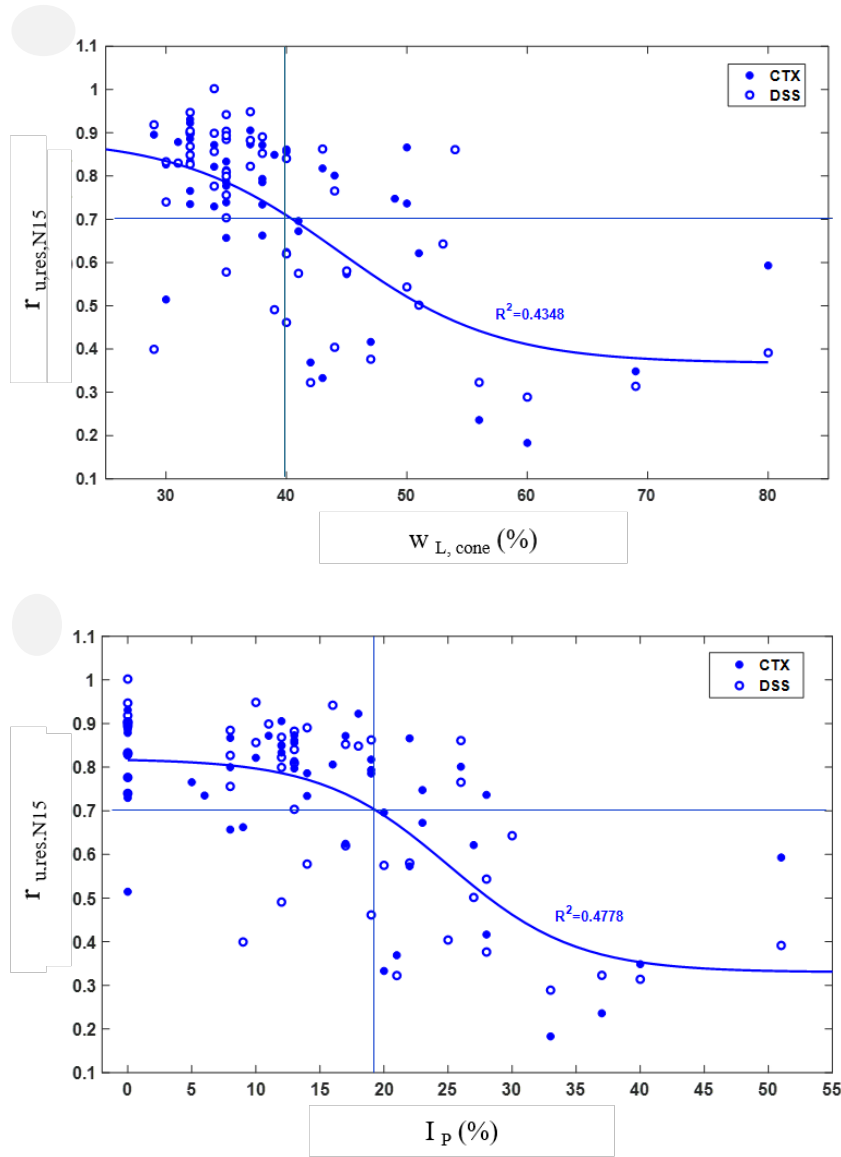


Şekil 1. Yapay Silt Numunelerinin Dinamik Davranışı

Yapay numunelerde geçerliliği yüksek korelasyonla gösterilen $r_{u,res}=0.7$ 'deki sıvılaşma değerinin ikinci aşamada denenecek doğal(UD) numunelerin davranışının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılması yenilme kriterinin geliştirilmesine temel oluşturmuştur.

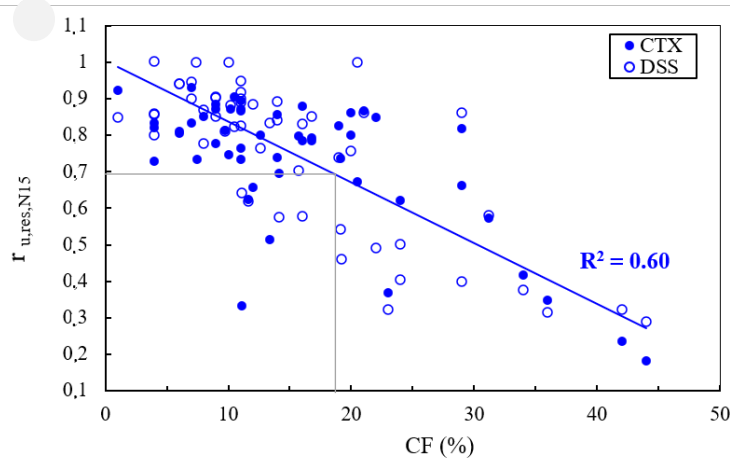
4. DOĞAL NUMUNELERİN DİNAMİK DENEYLERDE DAVRANIŞI

Kent merkezinden seçilen 40 tipik sitede sondaj ve de kuyu yanında CPTu ölçümü yapılarak sondajdan alınan örselenmemiş numuneler yapay örneklerle aynı koşullarda dinamik üç eksenli(CTX) ve basit kesme(DSS) deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneylerde çevrimsel yükleme ile yükselen boşluk suyu basınçlarının arazide gelişen basınçlarla eşdeğer olduğu görüşü geçerli sayılmıştır. Sonuçlar Şekil 2.de gösterilmektedir. Doğal numunelerin kum-silt-kil içerikleri değişken olduğundan bağıntı yine sigmoidal fonksiyona uyum gösterse de R^2 değerlerinin beklendiği gibi kalite kontrollü yapay numunelerden düşük çıktığı görülmektedir(0.435). Ancak, $r_{uwres}=0.7$ değerine karşılık olan likit limitin eğriden yine 40 dolayında okunması(*inflection*) anlamlıdır. Plastisite indisi sonuçlarına bakıldığında R^2 'nin 0.5'e yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 2. Doğal Numunelerde Dinamik Davranış (a)Likit Limit (b) Plastisite indisinin Etkisi

Kil içeriği(CF) çevrimsel yükleme sırasında boşluk suyu basınçlarının yükselmesini etkilediğinden birçok araştırmacı bunun yenilmeye olan katkısını göstermişti . Bu çalışmada da elde edilen veriler bu bulguyu doğrular nitelikte bulunmuş, $r_{u,res} = 0.7$ sınırına CF=18'de erişildiğini göstermiştir(Şekil 3.).



Şekil 3. Kil içeriğinin Fazla Boşluk Suyu Basıncına Etkisi

Yine ilginç bir bulgu, önceki araştırma sonuçlarının aksine doğal numunelerde su muhtevası/sıvılık indisi ve ortalama dane çapının(D_{50}) boşluk suyu basıncının yükselmesinde anlamlı etki yapmadığı yolunda olmuştur. Bu koşullarda, dinamik yükleme sırasında belirecek boşluk suyu basıncının $R^2=0.52$ gibi korelasyonla

$$u_{wres,N15} = -1.06CF - 0.65I_p + 0.46w + 82 \quad (1)$$

ifadesi ile gösterilebileceği görüşüne varılmıştır. Daha önce yapılmış araştırmalar da likit limit ve kil içeriğini "anahtar" parametreler olarak tanımlamıştı (Andrews ve Martin,2000). Bu çalışma sonuçları da anılan anahtar özelliklerin egemenliğini teyid etmiştir.

5. ADAPAZARI KRİTERİ

1999 depremlerini izleyerek bölgede ince daneli zeminler için sıvılaşma değerlendirmeleri Çin kriteri(Wang,1979) olarak bilinen yaklaşımla yapılmıştı. Yerel koşulların gözönüne alınması için bu zeminlerde boşluk suyu basıncının artışında etkin olan özellikler yeniden değerlendirildiğinde Adapazarı Kriteri olarak tanımlanan(Bol,E. vd.,2012) ve Denklem (1) ile ifade edilmiş özellikler öne çıkmıştır. Amaca uygunluğu nedeniyle siltli zeminlerde likit limitin koni düşürme deneyinde ölçülmesi uygun olacaktır.

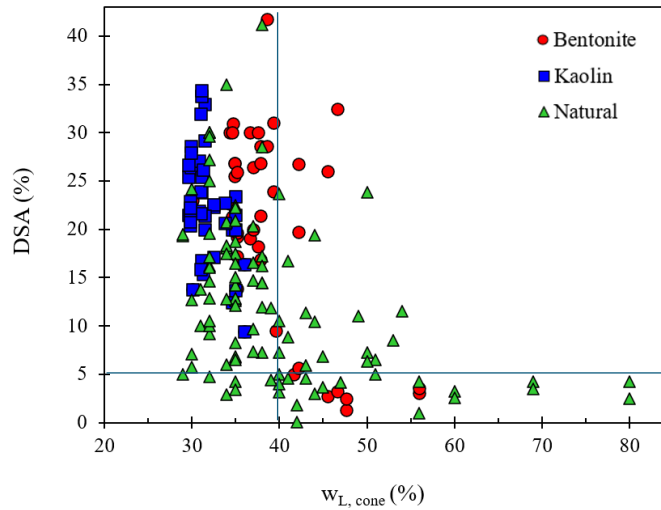
Bu son aşamada çarpmalı alet sonucu gözönüne alınarak bir ince daneli zeminin likit limitinin $w_L > 40$, plastisite indisinin $I_p > 19$, kil içeriğinin ise $CF > 18$ olması durumunda siltler, killi siltler ve killerin sismik koşullarda($M_w \geq 7.5$) yenilme olasılığının çok düşük olacağı söylenebilmektedir. Burada sıvılaşma yerine "yenilme" sözcüğü kullanılmasının nedenine aşağıda değinilmektedir.

6. DİNAMİK DENEYLERDE DEFORMASYON

1999 depreminde evi hasar görmemiş bazı kent sakini mühendisler ertesi gün evlerine döndükleri, ancak bundan 2-3 gün sonra binalarının aniden oturduğu/eğildiği yönünde bilgi vermişlerdi. Orta-yüksek plastisiteli killer üzerinde oturan bu binaların çevresinde sıvılaşma belirtisi görülmediği halde bu hareketin nedeni tam açıklanamamıştı.

Yapılan dinamik deney sonuçları boşluk suyu basıncı yükselmesi değil de birim deformasyona göre değerlendirildiğinde oldukça farklı bilgiler gelmiştir (Şekil 4.). Öncelikle, hiç yaşlanmamış yani taze, yapay numunelerde çok yüksek deformasyonlar belirdiği gözlemlenmiştir. %40 likit limitin yapay numunelerde aşırı deformasyonları kısıtladığı bir diğer bulgudur. $DSA = \pm 5\%$ yenilme limiti olarak kabul edildiğinde likit limiti %40'tan düşük yapay numunelerin çoğunluğunun bu limitin üstünde noktalararak yenilme mod'una geçtiği görülmektedir. Buna karşın, gözardı edilmeyecek sayıda doğal numunenin $N=15$ çevrimde %25 birim deformasyona yükseldiği de gözden kaçmamaktadır. Doğal numunelerde artan plastisitenin deformasyonları sıfıra kadar düşürmesi de diğer bir bulgudur.

Dikkat çeken bir husus likit limiti 40'tan büyük olduğu halde yapayların aksine birçok doğal numunenin aşırı şekil değiştirdiği, yani yenilme limitlerine yaklaştığı gözlemi olmuştur.



Şekil 4. Dinamik Yüklemenin Deformasyonlara Etkisi

7. SONUÇ

Zeminlerin sismik koşullarda yenilmesi iri daneli ortamlara özgü kabul edilirken ince danelilerde de birincil sıvılaşma olmasa dahi şartlar uygun olduğunda, aşırı deformasyonla yenilmenin gerçekleşeceği bir kez daha görülmüştür. Yapılmış olan bu yaygın çalışma kapsamında siltler yanında düşük ve orta plastisiteli killerin de sıvılaşabileceği gözlemlenmiştir. Bu araştırmacıların son 20 yılda yaptığı çalışmalar Adapazarı Kriterlerinin gerçekçi ve geçerli olduğunu da göstermiştir. Buna göre Y.A.S.S. altında ve likit limiti 40, plastisite indisi 19, kil içeriği (<2µm) 18'den büyük olan siltler ve killerde sismik koşullarda yenilme olasılığı ihmal edilebilecek denli düşüktür. Ayrıca, sıvılaşmanın gerçekleşmesi için her üç kriterin de sağlanması gerekmektedir. Dinamik deneylere tabi tutulan yapay ve doğal numunelerde boşluk suyu basıncı artışları arazi bilgileri ile tutarlı görünürken deformasyonların aşırı değerlerde çıkması ölçek etkisinin göstergesi olarak yorumlanmış, ek araştırma gerekliliğini gündemde tutmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu makale içeriği SAÜ Geoteknik Çalışma Gurubu'nun uzun yıllar süren özverili gayretlerinin bir ürünüdür. Emeği geçen birçok kişi yanında A.Özocak, E.Bol, S.Sert ve özellikle E.Arel'in katkılarna teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Andrews,D.C.A. ve Martin,G.R.(2000) Criteria for liquefaction of silty soils Paper 0312, 12.WCEE,Auckland,NZ
- Arel,E. ve Önalp,A. (2012) Geotechnical properties of Adapazari Silt, Bulletin of Eng Geol & Environ. DOI 10.1007/s10064-012-0443
- Arel,E. A. Önalp, G.C. Olgun(2018) "The Effect of Clay Mineral content on the Dynamic Response of reconstituted fine grained soil", Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 16, Issue 10, pp 4515–4532. DOI: 10.1007/s10518-018-0360-6.
- Bol,E.,Önalp,A.,Arel,E.,Sert,S.,Özocak,A.(2010) Liquefaction of silts: the Adapazari Criteria Bulletin of Earthquake Eng DOI 10.1007/s10518-010-9174-x
- Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2006). "Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays." ASCE Journal of Geotechnical & Geoenviron. Eng., 132(11), 1413–1426
- Bray, J.D., Sancio, R.B. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. Journal Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 132, 1165-1177, 2006.
- Wang,S. ve Luna,R. (2012) "Monotonic Behavior of Mississippi River Valley Silt in Triaxial Compression" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 138, No. 4, ASCE, ISSN 1090-0241/2012/4-516–525
- Wang,W.S.(1979)Some findings in soil liquefaction Scientific Research Institute-Water Conservancy and Hydroelectric Power, Beijing