



Kum-Bentonit Karışımlarının Hacimsel Deformasyon ve Yüksek Sıcaklık Altındaki Kayma Dayanımı Davranışının Perlit Katkısı Varlığında İncelenmesi

Investigation of Volumetric Deformation and Shear Strength Behavior of Sand-Bentonite Mixtures under High Temperature in the Presence of Perlite Additive

Esra Güneri ^{1*}, Yeliz Yükselen Aksoy ²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE (*)

² Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: esra.guneri@ogr.deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 20.09.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 14.02.2022

DOI:10.21205/deufmd.2022247203

Atıf şekli/How to cite: GÜNERİ, E., YÜKSELEN-AKSOY, Y.(2022). Kum-Bentonit Karışımlarının Hacimsel Deformasyon ve Yüksek Sıcaklık Altındaki Kayma Dayanımı Davranışının Perlit Katkısı Varlığında İncelenmesi. DEÜ FMD 24(72), 717-723.

Öz

Enerji yapıları etrafında ortaya çıkan yüksek sıcaklığın zeminlerin mühendislik özelliklerini negatif yönde etkilemesi istenilmeyen bir durum olduğundan, bu alanlarda kullanılmak üzere yüksek sıcaklığa karşı bariyer görevi görecek yeni malzemelere ya da karışımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinim doğrultusunda, inşaat sektöründe ısı yalıtımında kullanılan "perlit", halihazırda tampon malzeme olarak kullanılan kum-bentonit karışımına eklenerek yüksek sıcaklığa dayanıklı yeni bir karışım elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada perlit katkılı kum-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı altında kompaksiyon, konsolidasyon deneyleri ve aynı zamanda hem oda (22~25°C) hem de yüksek sıcaklık altında (80°C) kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre perlit katkısı kum-bentonit karışımlarının birim hacim ağırlık değerini azaltırken, optimum su içeriğini arttırmıştır. Karışımda perlit içeriği arttıkça toplam düşey deformasyonun arttığı ve kayma dayanımının hem oda hem de 80°C' sıcaklık altında perlit katkısı ile birlikte azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayma Dayanımı, Konsolidasyon, Kum-bentonit, Perlit, Yüksek Sıcaklık

Abstract

High temperature that occurs around energy structures and facilities affects the engineering behavior of soils. For that reason new materials or mixtures that will act as a barrier which resist to high temperatures are needed. In line with this requirement, "perlite", which is frequently used in thermal insulation in the construction industry, was added to the sand-bentonite mixture, which is currently used as a buffer material, to obtain a new mixture that is durable under high temperatures. In this study, compaction and consolidation tests of perlite-added sand-bentonite mixtures at room temperature, as well as direct shear tests at both room and high temperature (80°C) were conducted. As a result of the compaction test results, it was observed that the perlite additive decreased the dry unit weight of the sand-bentonite mixtures, while the optimum water content increased. It was

determined that as the perlitite content in the mixture increased, the total vertical deformation increased and the shear strength decreased with the addition of perlitite both at room and at 80°C.

Keywords: Shear Strength, Consolidation, Sand-bentonite, Perlite, High Temperature

1. Giriş

Dünya nüfusunun hızlı artışı ve enerji kaynaklarının her geçen gün tükeniyor olması, fosil yakıtlar yerine sürdürülebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesine neden olmaktadır. Enerji yapı ve tesisleri (gömülü güç kabloları, ısı kazıkları, jeotermal enerji tesisleri, kentsel katı atık ve nükleer atık depolama tesisleri vs.) doğrudan zeminle temas halindedir ve bu zeminler ısısal değişikliklere maruz kalmaktadır. Oluşan ısısal değişiklikler zeminlerin mühendislik özelliklerini etkileyerek değişimlere neden olmaktadır.

Daha önceki araştırmacılar, zemin özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğunu ve bu bağımlılığı etkileyen parametrelerin zeminin türü, kimyasal bileşimi, yükleme oranı, mineralojik yapısı, yoğunluğu ve su içeriği gibi etkenler olduğunu rapor etmiştir [1, 2]. Bunlara ek olarak, birçok farklı zemin türünde, ısınmanın etkisiyle mühendislik özelliklerinde iyileşme görülmüş ve bu sebeple zemin iyileştirme yöntemi olarak da kullanılmıştır [2-4]. Sıcaklığın kayma dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılan yüksek sıcaklıkta (90°C) gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinde daha yüksek kayma dayanımına ulaşıldığı belirlenmiştir [5]. Hueckel ve Baldi'nin (1990) çalışmasında ise yüksek sıcaklık altında kayma mukavemetinde azalma gözlenmiş ve bu davranış aşırı konsolidasyon oranındaki azalmaya veya aşırı konsolide zeminin ısınması sırasındaki boşluk oranındaki artışa bağlanmıştır [6].

Zeminlerin, yüksek sıcaklık altında yukarıda bahsedilen değişimlere maruz kalmaması ve özelliklerini muhafaza edebilmesi için tampon görevi görececek karışım ya da katkı malzemelerine ihtiyaç bulunmaktadır. Günümüzde uygulamalarda, kum-bentonit veya sadece bentonit tampon malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kum-bentonit karışımlarına, inşaat sektöründe ısı ve ses yalıtımında yaygın olarak kullanılan "perlit" katkı malzemesi ilave edilerek tampon görevinde kullanılacak yeni bir karışım malzemesi elde edilmesi amaçlanmıştır. Perlit,

volkanik kökenli amorf bir alüminosilikattır. Oldukça gözenekli bir yapıya, düşük yoğunluğa ve iyi termal stabiliteye sahiptir [7]. Kimyasal yapısı SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, MgO bileşiklerini içerir [8].

Bu çalışmada perlit katkılı kum-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı altında kompaksiyon ve konsolidasyon deneyleri ve aynı zamanda hem oda hem de yüksek sıcaklık altında (80°C) kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karışımlarda kum-bentonit (10B-90S) katkısız karışımı oluştururken, %10 ve %20 perlit ilavesi ile katkılı karışımlar elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

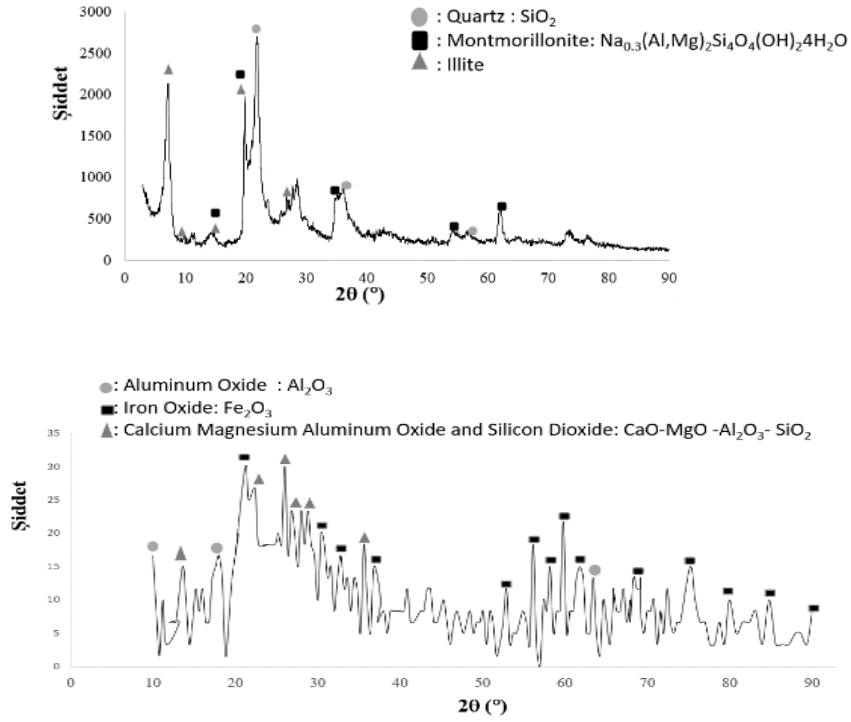
2.1. Materyal

Perlit numunesi, yerel bir üreticiden temin edilmiştir. Deneylerde Na-bentonit kullanılmıştır. X-Işını kırınım (XRD) analizleri, Thermo Scientific ARL X'TRA cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bentonit ve perlit numunelerinin XRD analiz sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Sonuçlara göre perlit numunesinin içeriğinde demir oksit, kalsiyum, magnezyum, alüminyum oksit ve silikon dioksit gözlenmiştir. Bentonit numunesi montmorillonit, kuvars ve illit mineralleri içermektedir.

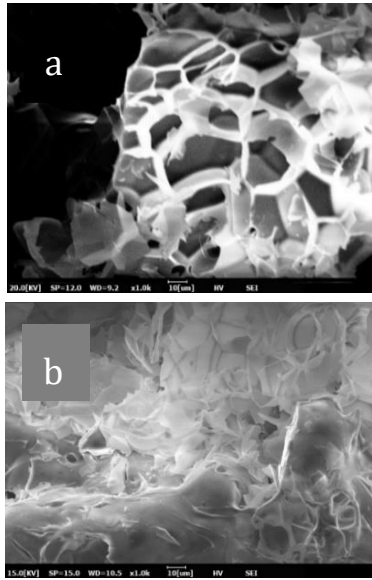
Tablo 1. Numunelere ait fiziko-kimyasal özellikler

| Özellik | Numune | | |
|-------------------|----------|------|--------|
| | Bentonit | Kum | Perlit |
| Özgül ağırlık | 2.70 | 2.63 | 1.50 |
| Likit limit (%) | 476.0 | - | 375.0 |
| Plastik limit (%) | 70.1 | - | N.P. |
| pH | 9.50 | - | 8.96 |

Kumun elek analizi ASTM D6913'e [9] göre yapılmış ve %20.7'si No.200 elekten geçmiştir. Tablo 1'de bu çalışmada kullanılan malzemelerin fiziko-kimyasal özellikleri verilmiştir [10, 11, 12]. Karışımlarda homojenliği sağlamak için kum, No.6 elekten elenerek kullanılmıştır. Kum ve bentonit numuneleri deneylerde kullanılmadan önce 105°C'de 24 saat etüvde kurutulmuştur. Perlit kurutulmadan kullanılmıştır ve doğal su içeriği yüzdesi ihmal edilebilecek düzeydedir (%1-2).



Şekil 1. Numunelerin X-Ray kırınım analizi (XRD) sonuçları a) bentonit, b) perlit



Şekil 2. Perlitin SEM fotoğrafları
a) oda sıcaklığı, b) 80°C

2.2. Metot

Deneylerde kullanılan karışımlar, %10 bentonit-%90 kum (10B-90S) karışımına %10 ve %20 perlit ilave edilerek hazırlanmıştır. Toplam kuru ağırlığın %10 ve %20'si perlit ve geriye kalan kuru ağırlık kum-bentonit karışımı olarak belirlenmiştir. Karışımlar isimlendirilirken; bentonit "B", kum "S" ve perlit "PE" olarak gösterilmiştir. Kompaksiyon deneyi gerçekleştirilmeden önce numuneler kuru halde homojen olarak karıştırılmış ve ardından su püskürtme yoluyla eklenmiştir. Numuneler hazırlandıktan sonra kapalı bir kaptaki 24 saat bekletilmiştir. Standart Proctor Testi ASTM D698-12'ye [13] göre gerçekleştirilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünü elde etmek için perlit numunesi büzülmeyi önlemek için en az 24 saat dondurularak kurutulmuştur. Yüksek sıcaklıkta incelenmesi istenen numune ise 24 saat 80°C'de ısıtılmıştır. COXEM EM-30 Plus cihazı ile perlit numunesinin SEM fotoğrafları elde edilmiştir (Şekil 2).

Konsolidasyon deney numuneleri, Standart Proctor testlerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığa karşılık gelen optimum su içeriğinin %2 ıslak tarafında hazırlanmıştır. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında kalan numunelere, daha az enerji uygulanarak daha fazla sıkışma elde edilmektedir. Numuneler numune halkasında sıkıştırılmış ve hazırlandıktan sonra 6.86 kPa oturma basıncı altında 24 saat bekletilmiştir. Konsolidasyon deneyleri ASTM D2435'e [14] göre yapılmıştır. Yük artış oranı (LIR) 1.0 ve uygulanan yük kademeleri sırasıyla 24.5, 49, 98, 196, 392 ve 784 kPa'dır. Deformasyonlar tamamlandığında, bir sonraki yükleme aşamasına geçilmiştir. Deneyin yükleme aşamasının tamamlanmasının ardından boşaltma aşamasına geçilmiştir ve 784 kPa'dan 196 kPa'a, 196 kPa'dan 49 kPa'a boşaltma gerçekleştirilmiştir. Boşaltma sonucunda oluşan deformasyon miktarları da incelenmiştir.

Kesme kutusu deneyleri ASTM D3080'e [15] göre yapılmıştır. Kuru haldeki numuneler homojen hale gelene kadar bir kaptaki karıştırılmıştır. Su içeriği, her karışımın optimum su içeriğinin (w_{opt}) %2 ıslak tarafı olacak şekilde ayarlanmıştır. Numuneler 6x6 cm'lik kalıplarda maksimum kuru birim ağırlıkta ve üç tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra 24 saat suya batık halde tutulmuş ve şişmeyi önlemek için numuneler yaklaşık 14 kPa gerilme altında bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda kalıp içerisindeki numune, suyla doldurulmuş kesme kutusuna yerleştirilmiştir. Üç farklı normal gerilme değeri altında (49, 98 ve 196 kPa) numuneler konsolide edilmiş ve ardından kesme safhasına geçilmiştir. Kesme kutusu deneyleri oda sıcaklığı (20~25°C) ve yüksek sıcaklık (80°C) altında olmak üzere iki farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklığı (80°C) sağlamak amacı ile kesme kutusunda özel olarak tasarlanmış ısı çubuğu kullanılmıştır (Şekil 3). U şeklindeki bu ısı çubuğu, hücrenin içerisine deney başlamadan önce yerleştirilmiş olup deney sırasında çıkartılmadan kullanılmıştır. Böylece, deneylerin yüksek sıcaklık altında gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Hücre içindeki suyun sıcaklığı termostat kullanılarak 80°C'de sabit tutulmuştur. İki ayrı K tipi termokupl ve bir dijital termometre, su ve zemin numunesinin sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır.



Şekil 3. Kesme kutusu deney ekipmanı

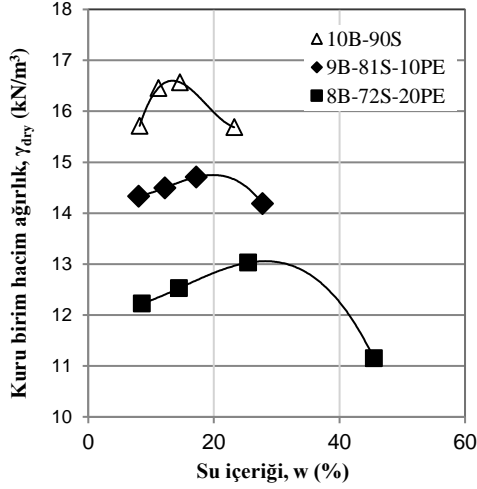
Perlit katkılu kum-bentonit karışımlarının termal iletkenlik değerleri "hot wire" metodunu kullanan yöntem ile belirlenmiştir. Karışımlar, birim hacim ağırlık ve doygunluk dereceleri aynı olacak şekilde hazırlanmıştır.

3. Bulgular

Bu çalışmada perlit katkılu kum-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı altında kompaksiyon, konsolidasyon deneyleri ve aynı zamanda hem oda hem de yüksek sıcaklık altında (80°C) kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Perlit numunesinin oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında, SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Sıcaklık artışı ile birlikte perlitin yapısındaki boşlukların azaldığı görülmüştür.

3.1. Kompaksiyon Deney Sonuçları

Karışımların sıkıştırılabilirlik parametreleri Standart Proctor testleri [13] ile belirlenmiştir. Perlit katkılu kum-bentonit karışımlarının deney sonuçlarına göre, 10B-90S karışımının maksimum kuru birim ağırlığı 16.6 kN/m³ ve optimum su içeriği (w_{opt}) değeri %13 olarak belirlenmiştir. Perlitin kuru birim hacim ağırlığı 2.9 kN/m³ ve w_{opt} değeri %240 olarak belirlenmiştir. Perlit, yüksek su tutma kapasitesine ve düşük kuru birim hacim ağırlığa sahip bir malzemedir. Bu nedenle %10 perlit katkısı ile karışımın maksimum kuru birim hacim ağırlığı 14.8 kN/m³ değerine düşmüş ve w_{opt} değeri %20 oranına yükselmiştir. Karışımındaki perlit yüzdesi %10'dan %20'ye çıkartıldığında maksimum kuru birim hacim ağırlık 13.1 kN/m³ değerine düşmüş ve optimum su içeriği %30'a ulaşmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. 10B-90S karışımlarına ait kompaksiyon eğrileri

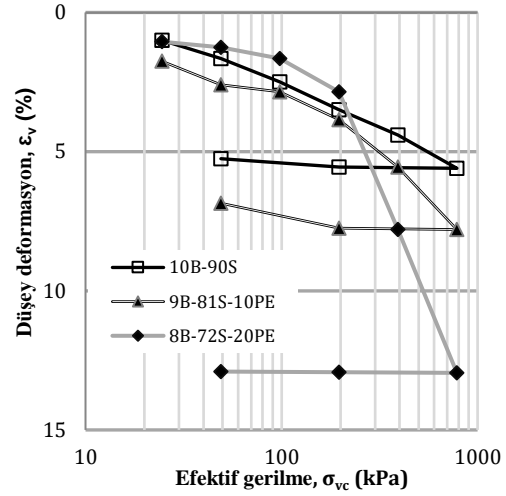
Deney sonuçları, perlit katkısının 10B-90S karışımlarının kuru birim hacim ağırlığını azalttığını ve optimum su içeriğini arttırdığını göstermiştir.

3.2. Konsolidasyon Deney Sonuçları

Bu çalışmada, 10B-90S karışımlarının %10 ve %20 perlit katkısı varlığında konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, 10B-90S karışımında perlit içeriği arttıkça toplam düşey deformasyon artmıştır. %10 perlit katkısı ile %7.5 olan düşey deformasyon, %20 perlit katkısı ile %11.9'a yükselmiştir. 10B-90S karışımında perlit ilavesi arttıkça düşey deformasyon ve şişme deformasyon değerlerinin arttığı görülmüştür.

Perlit içeriği arttıkça perlitin gözenekli yapısı nedeniyle yükleme ile sıkışma miktarı katkısız karışıma kıyasla artmıştır (Şekil 5). Karışımların boşaltma sırasındaki deformasyon davranışı incelendiğinde ise, %10 perlit katkısının katkısız karışımın deformasyon (şişme) miktarını arttırdığı ve bu davranışa perlitin su tutma kapasitesi yüksek bir malzeme olmasının neden olduğu belirlenmiştir. %20 perlit katkısının %10 perlit katkısına göre boşaltmada gözlenen deformasyon (şişme) miktarını azaltıcı etkide bulunması karışımdaki perlit etkisinin belli bir sınıra değere kadar doğrusal ilerleyip, daha sonra doğrusal olmayan davranış göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5 ve Tablo 2'de deney sonuçlarına ait sonuçlar verilmiştir.



Şekil 5. 10B-90S karışımlarına ait sıkışma eğrileri

3.3. Kesme Kutusu Deney Sonuçları

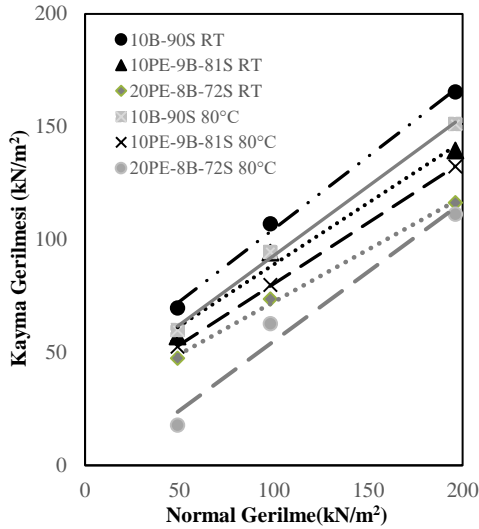
Kum-bentonit karışımlarının kesme kutusu deneyleri, oda sıcaklığında ve 80°C'de %10 ve %20 perlit katkısı varlığında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. %10 ve %20 perlit katkılı kum-bentonit karışımlarının içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri

| Karışım | Oda Sıcaklığı | | 80°C | |
|-------------|---------------|----------|--------|----------|
| | φ' (°) | c' (kPa) | φ' (°) | c' (kPa) |
| 10B-90S | 32.7 | 40.4 | 31.5 | 31.5 |
| 9B-81S-10PE | 28.9 | 34.4 | 28.6 | 26.3 |
| 8B-72S-20PE | 25.1 | 26.0 | 31.5 | 6.4 |

Katkısız 10B-90S karışımının sıcaklığı oda sıcaklığından 80°C'ye yükseltildiğinde kayma dayanımının azaldığı görülmüştür (Şekil 6). Bu azalışın nedeni olarak sıcaklık artışı ile birlikte zemin danelerinin genleşmesi olarak rapor edilmektedir [16]. Ayrıca içsel sürtünme açısının önemli ölçüde değişmediği ancak kohezyon değerinin 40.4 kPa değerinden 31.5 kPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Sıcaklığın zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, zeminin aşırı konsolidasyon oranına, plastisitesine, genleşebilirliğine ve su içeriğine bağlıdır [17, 18]. De Bruyn ve Thimus (1996) ve Kuntiwattanakul et al. (1995) drenajsız koşullarda gerçekleştirdikleri deneylerde ısıtmadan hemen sonra zeminin kayma dayanımının azaldığını bildirmişlerdir [19, 20]. 10B-90S karışımlarına perlit ilavesi hem oda

sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta kayma dayanımını azaltıcı yönde etki göstermiştir. Bu çalışmada, gerçekleştirilen kesme deneyleri (CD) sonucunda, perlit katkısının sıcaklık artışı ile birlikte yapısındaki boşlukların arttığı ve bunun sonucunda kayma dayanımını azaltıcı etkide bulunduğu belirlenmiştir. Oda sıcaklığındaki dayanım kaybı ise kumun, kendisine göre mühendislik özellikleri daha zayıf olan perlitte yer değiştirmesine, karışım içerisindeki kum yüzdesinin azalmasına bağlanmaktadır.



Şekil 6. Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta %10 ve %20 perlit katkılı 10B-90S karışımlarının kayma gerilmesi-normal gerilme (τ - σ) grafiği

Termal iletkenlik ölçümleri sonucunda; katkısız kum-bentonit karışımının termal iletkenlik değeri 1.779 w/m-k iken, %10 perlit eklendiğinde bu değer 0.945 w/m-k değerine ve %20 perlit eklendiğinde 0.403 w/m-k değerine düşmüştür. Perlit termal iletkenlik değerini azaltıcı etki göstermiştir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada perlit katkılı kum-bentonit karışımlarının oda sıcaklığı altında kompaksiyon ve konsolidasyon deneyleri ve hem oda hem de yüksek sıcaklık altında (80°C) kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre; katkısız kum-bentonit karışımına perlit ilave edildikçe karışımın kuru birim hacim ağırlığı azalmış, optimum su içeriği artmıştır. Perlitin düşük özgül ağırlığa sahip ve

su emme kapasitesi yüksek bir malzeme olması, elde edilen bu sonuçların nedenlerini oluşturmaktadır. Diğer yandan konsolidasyon deney sonuçlarına göre, perlit ilavesi ile sıkışma miktarının arttığı bunun da perlitin oldukça boşluklu yapısının etkisiyle meydana geldiği gözlenmiştir. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altında yapılan kesme kutusu deney sonuçlarından, karışımındaki kum miktarının azalmasına (kuma göre dayanımı daha düşük olan perlitte yer değiştirmesine) bağlı olarak kayma dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Perlitin %10 bentonit-%90 kum karışımına ilave edilmesi ile oluşturulan karışımlar sıkışma ve kayma dayanımı açısından beklenen sonuçlara ulaşamamış olup, bentonit oranı karışım içerisinde arttığında perlit katkısı ile daha olumlu sonuçlar elde edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (Proje no: 217M553) tarafından desteklenmektedir. Yazarlar bu destek ve Esra Güneri'nin 100/2000 Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Doktora Bursu için minnettardır.

Kaynakça

- [1] Mitchell, J.K. 1969. Temperature Effects on the Engineering Properties and Behavior of Soils. Highway Research Board, Special Report 103, National Research Council, pp. 9-28.
- [2] Wang, M.C., Benway, J.M. and Arayssi, A.M. 1990. The Effect of Heating on Engineering Properties of Clays," Physico-Chemical Aspects of Soil and Related Materials, ASTM STP 1095, K. B. Hodinott and R. O. Lamb, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 139-158.
- [3] Day, D.E. 1965. Thermal Stabilization of Soils, Report 1, Technical Report No. 6-706, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, MI.
- [4] Jumikis, A.R. 1966. Thermal Soil Mechanics, Rutgers University Press, New Brunswick, NJ.
- [5] Cekerevac C, Laloui L. 2004. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. Int J Numer Anal Methods Geomech. <https://doi.org/10.1002/nag.332>
- [6] Hueckel, T., Baldi G. 1990. Thermoplasticity of saturated clays: Experimental constitutive study. J Geotech Eng. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:12\(1778\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:12(1778))
- [7] Karaman, S., Karaipekli, A., Sarı, A. and Bic, A. 2011. Polyethylene Glycol (PEG)/ Diatomite Composite as a Novel Form-Stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage. Solar Energy Materials & Solar Cells. 95: 1647-53.
- [8] Mekaddem, N., Ali S Ben, Fois, M., Hannachi A. 2019. Paraffin/expanded perlite/plaster as thermal energy storage composite. In: Energy Procedia.
- [9] ASTM D6913/D6913M. 2017. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of

- Soils Using Sieve Analysis. ASTM Int. <https://doi.org/10.1520/D06913-04>
- [10] ASTM:D854-14. 2014. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1-8.
- [11] ASTM:D4318-17e1. 2017. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1-20.
- [12] ASTM:D4972-18. 2018. Standard test methods for ph of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1-6.
- [13] ASTM:D698-12. 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM Int. <https://doi.org/10.1520/D0698-12.1.4>
- [14] ASTM International. 2011. ASTM D2435/D2435M-11: Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM Int. https://doi.org/10.1520/D2435_D2435M-11
- [15] ASTM International. 2011. D3080/D3080M-11. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM Int. <https://doi.org/10.1520/D3080>
- [16] Gu, K., Tang, C., Shi, B., Hong, J., Jin, F. 2014. A study of the effect of temperature on the structural strength of a clayey soil using a micropenetrrometer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 747-58.
- [17] Baldi, G., Hueckel T., Pellegrini R. 1988. Thermal volume changes of the mineral-water system in low-porosity clay soils. *Can Geotech J.* <https://doi.org/10.1139/t88-089>
- [18] Romero, E., Gens A., Lloret A. 2001. Temperature effects on the hydraulic behaviour of an unsaturated clay. *Geotech Geol Eng.* <https://doi.org/10.1023/A:1013133809333>
- [19] De Bruyn, D., Thimus, J.F. 1996. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: the results of an initial laboratory programme. *Engineering Geology* 41, Nos. 1 - 4, 117 - 126.
- [20] Kuntiwattanakul, P., Towhata, I., Ohishi, K. and Seko, I. 1995. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay, *Soils and Foundations*, 35(1), 147-162.