



Yüksek plastisiteli killerin kalıcı kayma mukavemetine plastisitenin etkisi

Mustafa Hatipoğlu*, Recep İyisan

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Yüksek plastisiteli killerde kalıcı kayma mukavemetinin önemi
- Kalıcı kayma mukavemetinin laboratuvarında belirlenmesi
- Kıvam limitleri ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi

Makale Bilgileri

Geliş: 10.02.2016
Kabul: 09.06.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.322152

Anahtar Kelimeler:

Kalıcı kayma mukavemeti,
tekrarlı kesme kutusu deneyi,
halka kesme deneyi,
kıvam limitleri,
plastisite

ÖZET

Zeminlerde bir düşey gerilme altında deformasyonun artışıyla büyük şekil değiştirmeler sonrasında sabit kalan en düşük kayma gerilmesi değerine kalıcı kayma gerilmesi adı verilmektedir. Bu gerilme değerlerine göre hesaplanan mukavemet ise kalıcı kayma mukavemeti (KKM) olarak tanımlanmaktadır. Özellikle aşırı konsolide, sert ve fisürlü killerin gösterdiği gevrek davranış nedeniyle kayma mukavemetinde artan deformasyonla birlikte önemli derecede azalmalar görülmektedir. Kalıcı şartlara büyük yer değiştirmeler sonucunda erişildiğinden geoteknik mühendisliğinde önceden kaymış ve tekrar aktif hale geçen şevlerin analizinde önemli olmaktadır. Bu nedenle bu tür stabilite problemlerinin incelenmesinde veya tasarımı kalıcı kayma mukavemeti parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. KKM parametrelerini laboratuvarında belirlemede yaygın olarak kullanılan deney yöntemleri Halka Kesme ve Tekrarlı Kesme Kutusudur. KKM parametrelerine mineraloji, efektif düşey gerilme, kesme hızı ve kil yüzdesi gibi birçok faktör etkili olmaktadır. Burada etkiyen esas faktör zeminin mineralojik özellikleri olup, dolaylı olarak zeminin plastisitesi ile KKM arasında ilişkinin varlığına işaret etmektedir. Bu çalışmada 31 farklı plastisite özelliklerine sahip numune üzerinde Tekrarlı Kesme Kutusu ve Halka Kesme deneyleri yapılarak, KKM parametreleri belirlenmiştir. Konsolidometreler kullanılarak hazırlanan numunelerin tamamı yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olup deneyler 0,02 – 0,03 mm/min kesme hızlarında ve en az üç farklı düşey gerilme altında gerçekleştirilmiştir. KKM'nin kıvam limitleri ile değişimi incelenmiş, pratik amaçlar için korelasyonlar geliştirilmiş, elde edilen bulgular önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

The effect of plasticity on residual shear strength for high plasticity clays

H I G H L I G H T S

- The significance of residual shear strength for high plasticity clays
- The determination of residual shear strength in laboratory conditions
- The relationship between residual shear strength with consistency limits

Article Info

Received: 10.02.2016
Accepted: 09.06.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.322152

Keywords:

Residual shear strength,
reversal direct shear test,
ring shear test,
consistency limits,
plasticity

ABSTRACT

The minimum and constant value of shear stress attained at large displacements is defined as residual shear strength (RSS) of soils. For especially over-consolidated fissured clays, as the shear deformation increases the shear stress firstly reaches to a peak value, and then gradually decreases to a constant value. RSS is useful for analyzing the pre-failed slopes in fissured clays and the progressive failures. Reversal Direct Shear and Ring Shear Tests are well-known methods to obtain the RSS parameters in the laboratory. Previous investigations reveal that RSS is affected by mineralogy, effective normal stress and shear rate. As the main affecting parameter is mineralogy, a relationship between consistency limits and RSS could be established indirectly. In this study, Reversal Direct Shear and Ring Shear tests were carried out on 31 clay samples having different plasticity characteristics to determine the RSS parameters. Tests were conducted at least at three different vertical stress levels at shear rates of 0.02 – 0.03 mm/min on the high plasticity clays (CH) samples prepared with slurry consolidometers. The variations of RSS parameters versus consistency limits were studied. Some correlations were established for practical purposes and the findings were compared with the previous studies.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: / hatipoglu1@itu.edu.tr / Tel: +90 212 285 37 02

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zeminlerde büyük deformasyonlar sonrasında değişmeden sabit kalan en düşük kayma gerilmesi değerine kalıcı kayma gerilmesi adı verilmektedir. Aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda kayma gerilmesinin deformasyonla artarak bir doruk yaptığı daha sonra artan deformasyonla azalarak belli bir değerde sabit kaldığı görülmektedir. Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini, büyük yer değiştirmeler sonucunda kayma düzlemine paralel olarak yönelmiş daneler arasındaki sürtünme direnci oluşturmaktadır [1]. Mohr Coulomb göçme kriterine göre kayma mukavemeti parametreleri olarak tanımlanan kohezyon ve sürtünme bileşenleri göz önüne alındığında, büyük deformasyonlar sonucunda daneler arası bağlar tamamen ortadan kalktığı için kalıcı duruma ulaşıldığında yüksek plastisiteli killerde dahi genelde kohezyon etkisi görülmemekte veya çok düşük değerler almaktadır. Dolayısıyla kalıcı kayma mukavemetinin sadece daneler arası sürtünmeden kaynaklandığı birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir. Diğer bir deyişle bu şartlarda zeminlerin kayma mukavemeti kalıcı kayma mukavemeti açısı ϕ_r ile tanımlanabilmektedir [2, 3]. Aşırı konsolide killerin drenajlı şartlarda pik mukavemet sonrası kayma gerilmesindeki değişim kil yüzdesine bağlı olarak artan yer değiştirme ile birlikte iki kademedeyen meydana gelmektedir. Kil yüzdesine bağlı olarak önce göreceli olarak düşük deformasyon seviyelerinde erişilen tamamen yumuşamış veya kritik durum olarak tanımlanan anda dilatasyon nedeni ile kayma yüzeyinde su muhtevasında artış meydana gelmektedir. Daha sonra artan deformasyonlar sonucunda gerilme kalıcı bir değere düşerek sabit hale gelmektedir. Bu aşamada artan yer değiştirme ile birlikte özellikle yapraklı kil minerallerine sahip yüksek plastisiteli zeminlerde, plaka şeklindeki danecikler kayma düzlemine paralel hale gelmektedir. Bu olaya dane yönelimi adı verilmektedir. Dolayısı ile oluşan kayma gerilmesi sadece paralelleşen kil daneciklerinin birbirine sürtünmesinden kaynaklanmaktadır [4]. Normal konsolide killerde ise pik mukavemet sonrası düşüş sadece dane yönelimi nedeni ile meydana gelmektedir. Bu nedenle mukavemet davranışında önemli miktarda bir düşüş söz konusu olmamaktadır. Bu nedenle, inşaat mühendisliğinde kalıcı kayma mukavemetinin genellikle ilk defa harekete geçecek şevlerde, göçmemiş kil tabakalarında ve kil dolgularda kullanılması uygun olmamaktadır. Aksine daha önce harekete geçmiş ve tekrar hareketlenen şev kaymalarında, kayma yüzeylerinde veya kayma yüzeyine yakın bölgelerde, yapraklanma düzlemleri üzerindeki hareketlerde ve göçmenin meydana geldiği dolgularda stabilite tahkiklerinde kullanılmaktadır.

Göçmenin olmadığı kil tabakalarında kalıcı kayma mukavemetinin kullanılması ile her ne kadar güvenli tarafta kalınsa da ekonomik açıdan çok doğru olmayacaktır. Ülkemizde özellikle karayolları şevlerinde belli bir süreden sonra önemli stabilite problemlerinin oluşması kalıcı kayma mukavemetinin önemini göstermektedir [5].

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini etkileyen faktörler günümüze kadar çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yapılan araştırmaların sonuçlarında, kalıcı kayma mukavemetinin en çok zeminin mineralojik yapısı [6], jeolojik yük [2] ve kesme hızından [7, 8] etkilendiği ortaya konulmuştur. Bunun dışında mineralojik yapıyı dolaylı olarak temsil edebilen kıvam limitleri [9, 10] ve plastisite [11, 12], özgül yüzey alanı [6], aşırı konsolidasyon oranı [13], kil yüzdesi [14], kesme modu [14], boşluk suyu kimyası [15, 16] ve sıcaklık [17] kalıcı kayma mukavemetine etki eden diğer faktörler olarak sayılabilir. Lupini vd. [14]'de zeminin kil yüzdesi, dane şekli ve kesme hızına bağlı olarak kayma yüzeyinde meydana gelecek farklı mekanizmalar kesme modu olarak tanımlanmıştır. Killerde dane boyutunun küçülmesi ile özgül yüzey artmakta dolayısı ile kalıcı mukavemetin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kaolinit, illit ve montmorillonit gibi genel kil mineralleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında bir ilişki kurulabilmektedir [6, 10]. Ayrıca zeminlerin içerdikleri kil mineralleri tipi, zeminin su tutma özelliklerini etkilediğinden, su ile temas ettiklerinde daha geniş bir su muhtevası aralığında plastik özellik göstermesini sağlamaktadır. Dolayısıyla bu özellikler kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit [14, 18], plastisite indisi [19] veya kil yüzdesi [14] arasında ilişkilerin aranmasına yol açmaktadır. Geoteknik mühendisliği literatüründe ince daneli zeminler üzerine yapılan birçok çalışmada mineralojik yapıyı temsilen kıvam limitleri deney sonuçları yaygınca kullanılmaktadır [20]. Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde yaygın olarak halka kesme ve kesme kutusu deneyleri kullanılmaktadır [21, 22].

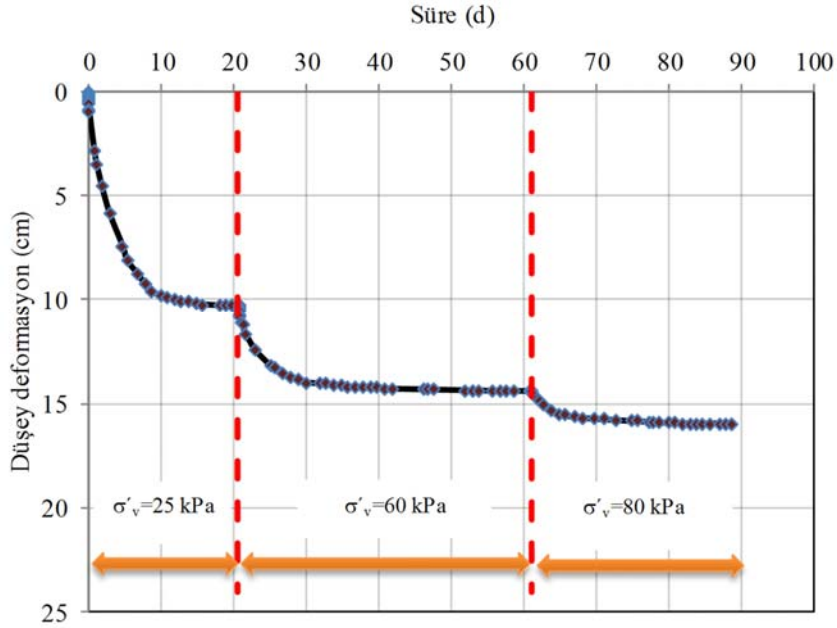
Bu çalışmada yüksek plastisiteli killerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla, farklı likit limit ve kil içeriğine sahip zemin numuneleri üzerinde drenajlı tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapılmıştır. Deneyler literatürde ve standartlarda verilen kesme hızları göz önüne alınarak en az üç farklı yüzey gerilme altında 0,02 mm/min – 0,03 mm/min kesme hızında yapılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri sırasında uygulanan her düşey gerilme altında numune kesildikten sonra kesilme yüzeyi doğrultusunda geri çekilmiş ve tekrar kesilmiştir. En az üç tekrar sonunda elde edilen sabit kayma gerilmesi değeri, kalıcı kayma gerilmesi olarak kabul edilmiş, bu değerlere göre Mohr-Coulomb göçme kriterine göre kırılma zarfının doğrusal olduğu kabulü ile kalıcı kayma mukavemeti açısı belirlenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları ışığında kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve plastisite indisi ile değişimi incelenmiş, pratik amaçlar için korelasyonlar geliştirilmiş ve elde edilen bulgular önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

Homojen ve aynı özelliklere sahip numuneler elde edilmesi için deneylerde konsolidometrelerde (Şekil 1a) 80 kN/m² düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanmış olan numuneler (Şekil 1b) kullanılmıştır.



Şekil 1. (a) Konsolidometre düzeneği (b) hazırlanmış bir numune [13]
(a) Slurry consolidometers setup (b) a prepared sample [13]



Şekil 2. Bir numunenin hazırlığı sırasında konsolidometre düzeneğinde düşey doğrultuda meydana gelen oturmanın zamana göre değişimi
(The variation of vertical deformation with the time during the preparation of a sample)

Likit limit değerinin 1,5~2 katı bir su muhtevasında hazırlanan numuneler konsolidometreler yardımıyla konsolidasyona tabi tutulmuştur. Numunelerin hazırlık aşamasında 80 kN/m^2 değerinin seçilmesinin nedeni yapılan deneyler sırasında bütün numunelerin normal konsolide (AKO=1) olmalarını sağlamak üzere en düşük düşey gerilme olan 100 kN/m^2 'den daha düşük değer olmasıdır. Bir numunenin hazırlığı sırasında konsolidometre düzeneğinde düşey doğrultuda meydana gelen oturmanın zamana göre değişimi Şekil 2'de verilmiştir.

2.1. Numunelerin Geoteknik Özellikleri (Geotechnical Properties of the Samples)

DeneySEL çalışmada kullanılan 31 farklı numunenin geoteknik özelliklerini belirlemek için laboratuvarında gerekli sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Yapılan dane çapı dağılımı analizlerinden numunelerin ince dane oranlarının %70 - %100 değerleri arasında olduğu belirlenmiştir. Kıvam limitleri deney sonuçlarından numunelerin likit limitlerinin %50 ile %340,

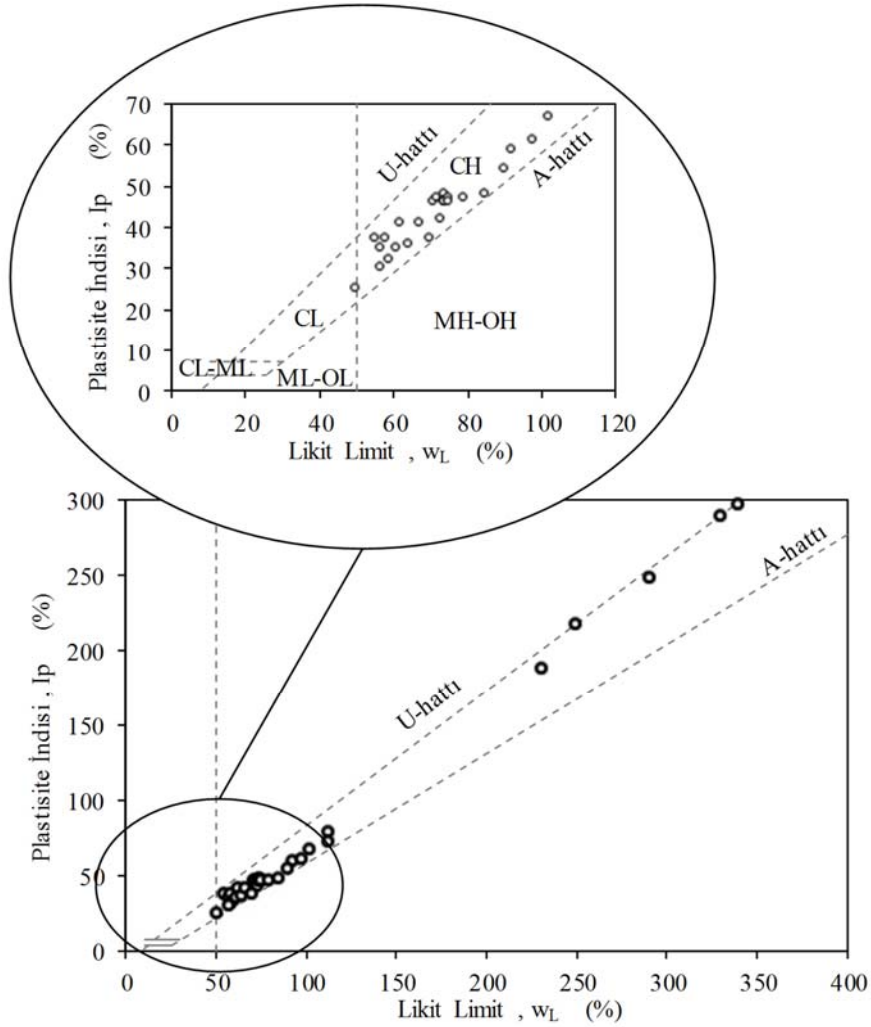
plastik limitlerinin %18 ile %43 ve plastisite indislerinin ise %25 ile %297 aralığında değiştiği anlaşılmaktadır. Numunelerin aktiviteyi 1 ile 5 değerleri arasındadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan 31 adet numunenin Casagrande Plastisite Kartındaki yerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği üzere deneysel çalışmada kullanılan numunelerin tamamı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında yer almaktadır.

2.2. Deneysel Yöntem (Test Methods)

Bu çalışmada, kalıcı kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kesme kutusu ve halka kesme deneyleri olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Halka kesme deney düzeneği numune üzerinde sınırsız deformasyon yapmaya izin verecek şekilde Bishop tarafından geliştirilmiştir [23]. Ayrıca bu deney yönteminde, kohezyonlu zeminlerde görülen rotasyonel kaymanın modellenmesi, numune kesit alanının deney süresince sabit olması ve numuneye üniform düşey gerilme

uygulanabilmesi sayesinde kalıcı kayma mukavemeti güvenli bir şekilde belirlenebilmektedir [13].

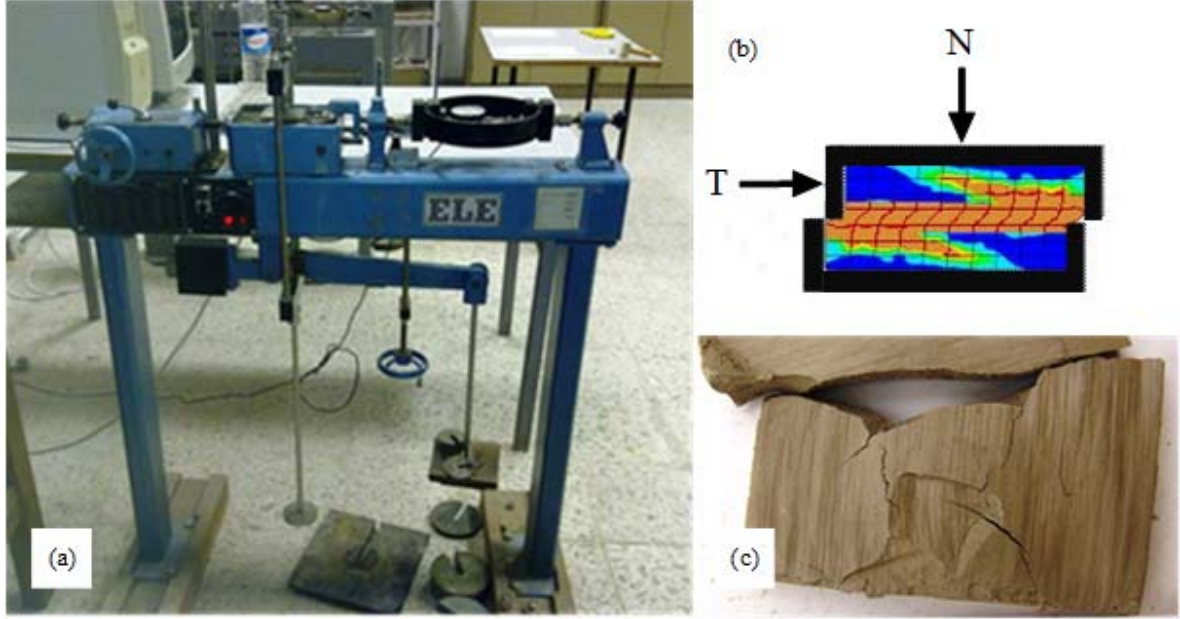
Tekrarlı kesme kutusu deneyinde numuneye yeterli ve kesintisiz yerdeğiştirme yapılamaması deneyin en önemli sınırlayıcı yanlarından biridir. Aynı şekilde sabit olmayan kesit alanı ve dolayısı ile üniform sabit düşey yük uygulanamaması, numunede meydana gelen gerilme yığılmaları bu deney yöntemi için diğer zayıf yönlerdir. Tekrarlı kesme kutusu deneyinin üstün yanları ise yaygın deney düzeneği ve kullanım kolaylığıdır. Çalışma da en kesiti 6 cm x 6 cm ve numune yüksekliği 2,0 cm olan kesme kutusu deney düzeneği kullanılarak tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır [24]. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri 100, 200 ve 300 kPa değerinde üç değişik normal gerilme altında yapılmış ve kesme hızı Skempton tarafından 1985 yılında yapılan çalışmada arazi şartlarında kalıcı durum için verilen kesme hızı değerleri göz önünde bulundurularak 0,03 mm/min olarak seçilmiştir [13]. Kesme kutusu deney sistemi yaklaşık 12 mm



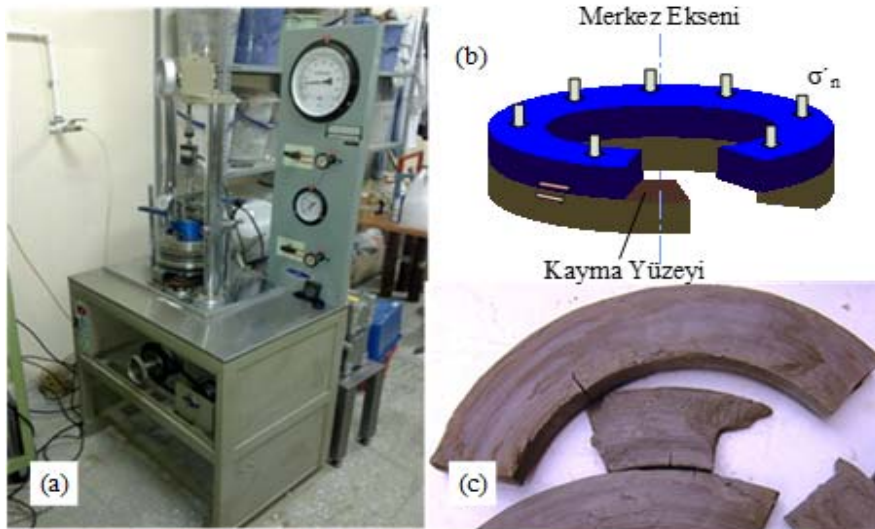
Şekil 3. Numunelerin kıvam limitlerinin plastisite kartındaki gösterimi
(Plasticity chart showing the results of consistency limits of the samples)

kesintisiz yatay yer değiştirmeye izin vermektedir. Kalıcı duruma ulaşmak için, bu yer değiştirmeye ulaşıldığında kesme kutusu geri çekilerek aynı yönde numune yeniden kesilmiştir. Bu çalışmada tekrarlı yapılan kesme kutusu deneylerinde en az üç çevrim sonucunda elde edilen kayma gerilmelerinin kalıcı kayma gerilmesi olduğu kabul edilmiştir. Her çevrim sonunda, numune etkisi altındaki düşey gerilme değerinde bir gün süre ile konsolidasyona terk edilmiştir. Kullanılan kesme kutusu deney aleti ve kesme sırasında numuneye etkiyen kuvvetler Şekil 4'te görülmektedir. Deney süresince yatay yer değiştirme,

uygulanan yatay kuvvet ve düşey yer değiştirme mekanik veya belirli aralıklarla dijital olarak sürekli okunmuş ve veri toplama ünitesi yardımı ile bilgisayara aktarılmıştır. Halka kesme deneyi, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan en uygun laboratuvar deney yöntemidir [13]. Bu çalışma kapsamında yapılan halka kesme deneyleri İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan Seiken, Inc. DTA-138 model halka kesme aletinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Deney aleti, numune üzerinde sınırsız deformasyon yapmaya



Şekil 4. (a) Kesme kutusu deney düzeneği (b) deney sırasında numuneye etkiyen kuvvetler (URL1) (c) meydana gelen cilalanmış kesme yüzeyi
 ((a) Shear box test equipment (b) the forces acting on the sample during the test (URL1) (c) a slicken-sided shear failure plane of a sample)

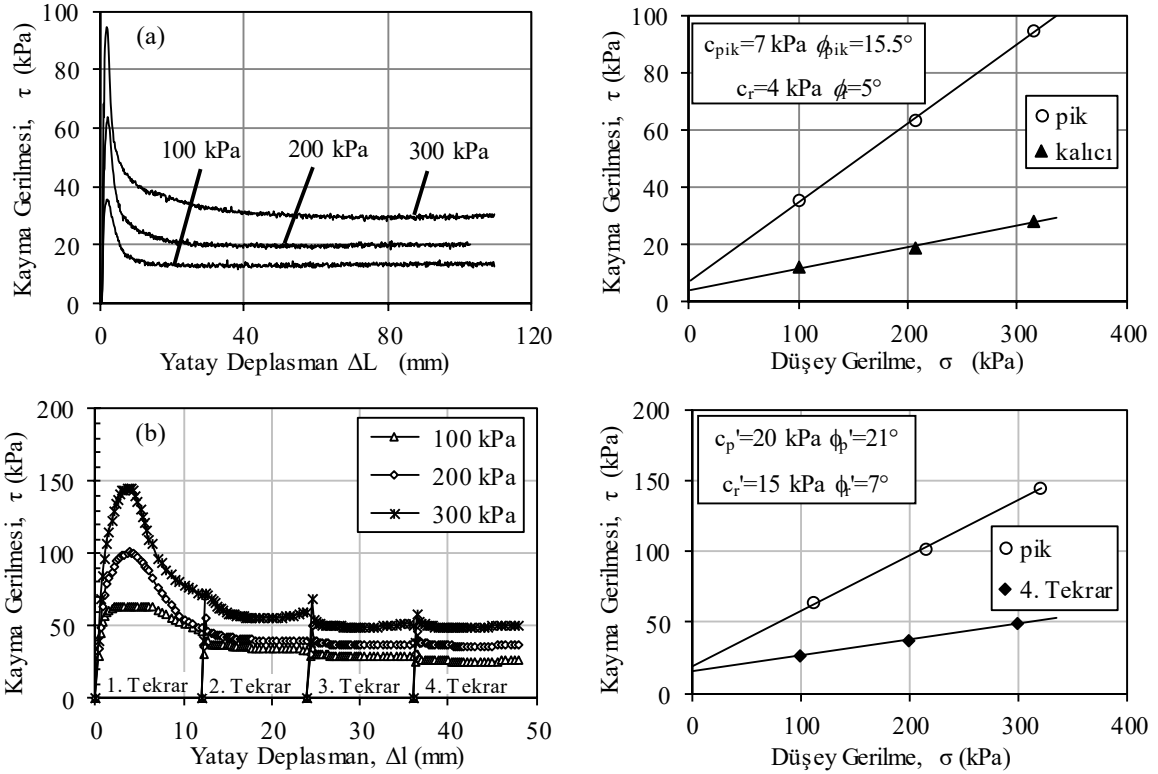


Şekil 5. (a) Halka kesme deney düzeneği (b) deney esnasında numuneye etkiyen kuvvetler (c) meydana gelen cilalanmış kesme yüzeyi
 ((a) Ring shear test equipment (b) the forces acting on the sample during the test (c) a slicken-sided shear failure plane of a sample)

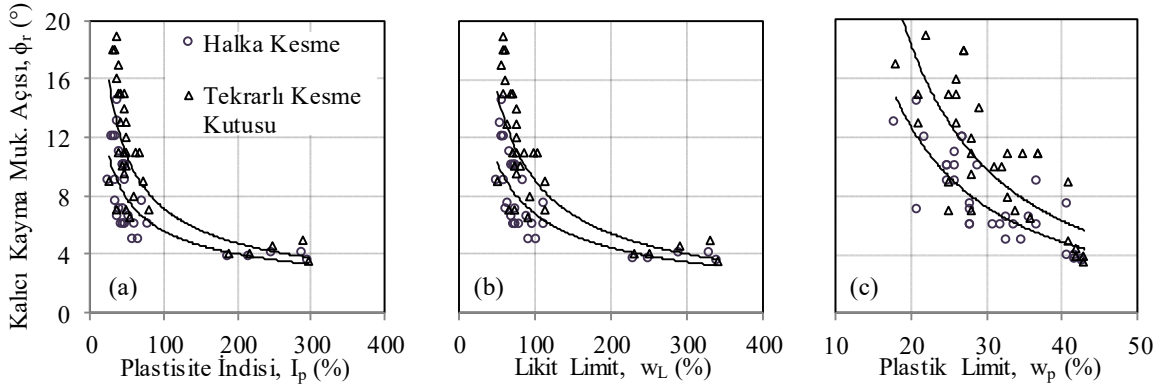
uygundur. Halka kesme aleti 0,018 mm/min ile 2,0 mm/min kesme hızları aralığında çalışabilmektedir. Halka kesme deneylerinde iç çapı 100 mm, dış çapı 150 mm olan ve 20 mm kalınlığa sahip halka şeklinde numuneler kullanılmıştır. Halka kesme deneyi sırasında kesme hızı olarak deney düzeneğinde istikrarlı olarak erişilebilen en düşük hız olan 0,02 mm/min olarak belirlenmiştir. Deneyler sırasında boşluk suyu ölçme imkânı bulunmamaktadır. Deney düzeneği numune üzerine 40 Nm değerinde burulma momenti ve 500 kPa değerinde düşey gerilme uygulanabilme kapasitesine sahiptir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI (RESULTS OF THE EXPERIMENTAL STUDY)

Yukarıda geoteknik özellikleri verilen numuneler üzerinde en az üç farklı normal gerilme altında yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda pik ve kalıcı kayma gerilmelerine göre elde edilen Mohr-Coulomb kırılma zarflarının ilgili düşey gerilme aralığında doğrusal olduğu gözlenmiştir. Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde her düşey gerilme altında birinci çevrim sonunda ulaşılan en büyük kayma gerilmeleri dikkate alınarak elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinde genelde kohezyon terimi bulunmamaktadır.



Şekil 6. (a) Bir numune üzerinde yapılan halka kesme deney sonucu (b) Bir numune üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonucu ((a) A ring shear test result of a sample (b) Reversal direct shear test result of a sample)



Şekil 7. Kalıcı kayma mukavemeti açısının kıvam limitleri ile değişimi (a) ϕ_r - I_p (b) ϕ_r - w_L (c) ϕ_r - w_p
(The variation of residual shear strength with the consistency limits (a) ϕ_r -PI (b) ϕ_r -LL (c) ϕ_r -PL)

Buna karşılık çoğunlukla üçüncü çevrimden sonra ulaşılan kalıcı kayma gerilmelerinden hesaplanan parametrelerde kohezyonun etkisi görülmemiştir. Bu sonuç, kesme kutusu deneylerinde kalıcı duruma ulaşmada üçüncü çevrimin genelde yeterli olduğuna işaret etmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan 31 adet yüksek plastisiteli kil numunesi üzerinde yapılan halka kesme deneylerinde kalıcı kayma mukavemeti açıları (ϕ) 3.5° ile 14° arasında ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinde ise kalıcı kayma mukavemeti açıları sırasıyla (ϕ) 4° ile 19° arasında elde edilmiştir. Şekil 6'da numuneler üzerinde yapılan halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri ile bu eğrilere göre elde edilen pik ve kalıcı mukavemet zarflarına örnekler görülmektedir.

4. KALICI MUKAVEMETİN KIVAM LİMİTLERİ İLE DEĞİŞİMİ (THE VARIATION OF THE RESIDUAL SHEAR STRENGTH WITH THE CONSISTENCY LIMITS)

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti, büyük yer değiştirmeler sonucunda kayma düzlemine paralel olarak yönelen daneler arasındaki sürtünme kuvvetlerinden oluşmaktadır. Kalıcı kayma mukavemetine etkileyen ana unsurun zeminin mineralojik özelliği olduğu bilinmektedir. İnce daneli zeminlerde dane boyutu azaldıkça diğer bir değişle kil boyutundaki dane miktarı arttıkça yassılık artmakta, dolayısı ile özgül yüzey ile birlikte su tutma kapasitesi de artmaktadır. Bu durumda likit limit ve plastisite değerlerinin de artması beklenmektedir [9]. Sonuç olarak plastisitenin doğrudan olmasa da dolaylı olarak zeminlerin mineralojisi ile ilişkili olduğu ve onun bir göstergesi olduğu düşünülebilir.

Bu çalışmada farklı likit limit değerlerine sahip 31 adet numune üzerinde halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmış ve kalıcı kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açılarının (ϕ) likit limit (w_L), plastisite indisi (I_p) ve plastik limit (w_p) ile değişimleri sırasıyla Şekil 7'de verilmiştir. Verilen şekillerden de izlenebileceği üzere, kalıcı kayma mukavemeti açısı, likit limitin, plastik limitin ve plastisite indisinin artışı ile azalmaktadır. Likit limitleri %50 ile %340 arasında değişen numuneler üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ϕ_r ile likit limit w_L arasında, regresyon analizi sonucunda korelasyon katsayıları yüksek sayılabilecek ($R_{HK}=0,85$ ve $R_{TKK}=0,83$) aşağıdaki bağıntılar (Eş. 1, Eş. 2) elde edilmiştir. Bağıntılarda likit limit değerleri yüzde cinsinden hesaba katılmaktadır.

$$\phi_{r-HK} = 111 w_L^{-0.61} \quad (1)$$

$$\phi_{r-TKK} = 273 w_L^{-0.74} \quad (2)$$

Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı belirlenen yüksek plastisiteli kil numunelerin plastik limitleri %18 ile %43 arasında değişmektedir. Yapılan deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastik limit değerleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda korelasyon

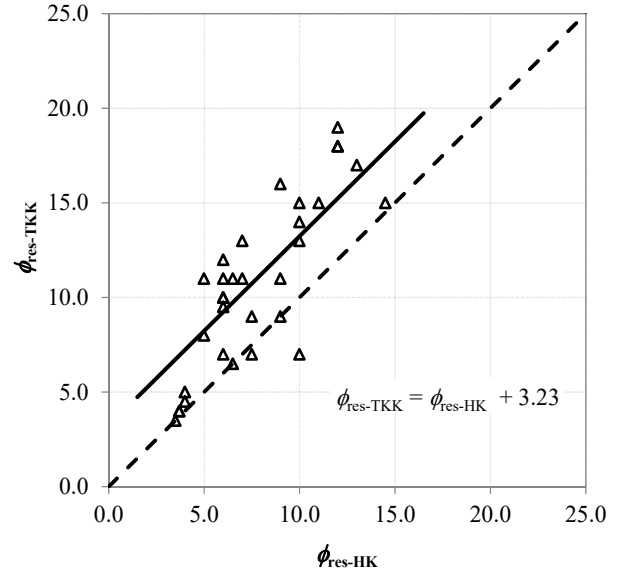
katsayıları halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri için sırasıyla %81 ve %76 olan aşağıdaki denklemlere (Eş. 3, Eş. 4) ulaşılmıştır. Bağıntılarda plastik limit yüzde cinsindedir.

$$\phi_{r-HK} = 825 w_p^{-1.39} \quad (3)$$

$$\phi_{r-TKK} = 1896 w_p^{-1.55} \quad (4)$$

Çalışmada kullanılan yüksek plastisiteli kil numunelerin plastisite indisleri %25 ile %297 arasında değişmektedir. Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastisite indisleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda korelasyon katsayıları sırasıyla %84 ve %81 olan aşağıdaki eşitliklere (Eş. 5, Eş. 6) ulaşılmıştır. Bağıntılarda plastisite indisi yüzde cinsindedir.

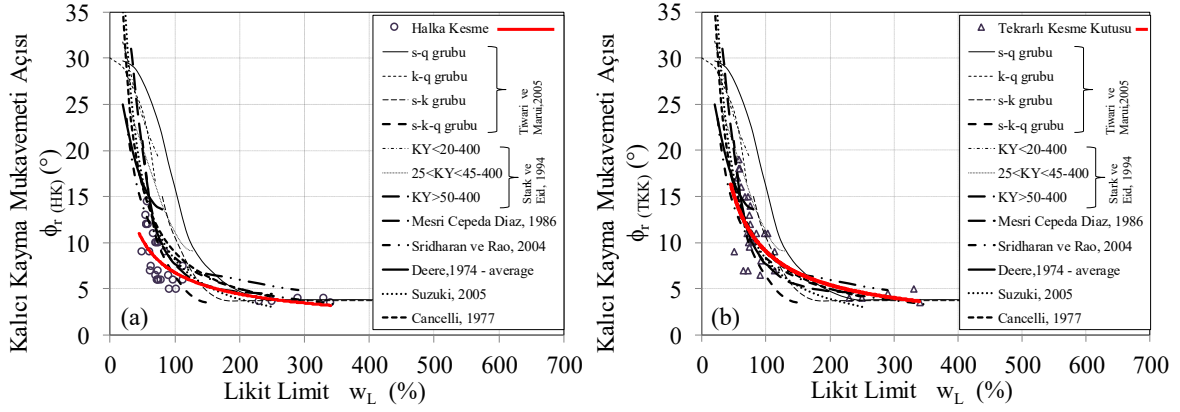
$$\phi_{r-HK} = 50 I_p^{-0.48} \quad (5)$$



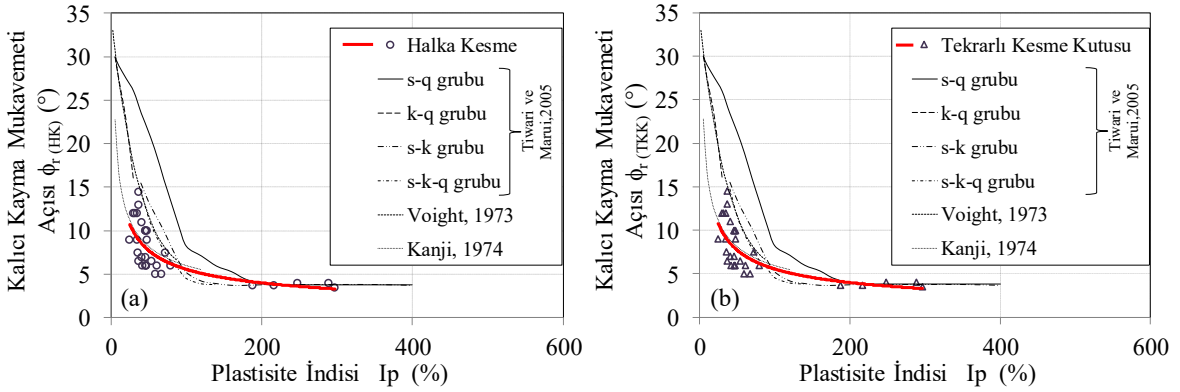
Şekil 8. Deney yöntemlerine göre kalıcı kayma mukavemeti açısının değişimi
(The variation of residual shear strength with test method)

$$\phi_{r-TKK} = 104 I_p^{-0.58} \quad (6)$$

Deney yönteminin etkisini belirlemek üzere iki farklı deney düzeneğinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırması Şekil 8'de verilmiştir. Görüldüğü üzere halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı mukavemet parametreleri daha düşük değerler vermektedir. Önerilen korelasyonların likit limite bağlı olarak literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmaları sırasıyla Şekil 9'da verilmiştir. Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında literatürde verilen korelasyonlar bu karşılaştırmada kullanılmıştır. Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları kullanılarak plastisite indisine bağlı önerilen korelasyonların literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmaları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limite göre değişiminin literatür ile karşılaştırılması
(The comparison of residual shear strength angles with the literature in terms of liquid limit)



Şekil 10. Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisine göre değişiminin literatür ile karşılaştırılması
(The comparison of residual shear strength angles with the literature in terms of plasticity index)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma yüksek plastisiteli kil sınıfında yer alan otuz bir adet hazırlanmış numune üzerinde halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılarak kalıcı kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açılarının, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ile değişimi incelenmiş, aralarında bir ilişki geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan numunelerin likit limitleri %50~340 ve plastisite indisleri %25~297 aralığında değişmektedir.

Yapılan deneysel çalışma sonucu ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Genel olarak bakıldığında kalıcı kayma mukavemeti açısının artan likit limit ve plastisite indisi ile azaldığı görülmektedir. Farklı numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde likit limitin %100'den büyük olduğu durumda sonuçlar bir eğilim üzerinde uyumlu olup saçılım gözlenmemektedir. Bu şartlarda çok yüksek likit limit değerleri ($w_L > \%250$) için 4° gibi bir kayma mukavemeti açısına kadar düşülebilmektedir. Likit limitin %100'den daha küçük olduğu durumlarda ise her ne kadar likit limitin artışıyla azalma yönünde bir eğilim gözlenirse de verilerde belirgin bir saçılım olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeninin

kalıcı kayma mukavemetini kontrol eden temel faktörün zemin danelerinin mineralojik yapısının olması söylenebilir. Her ne kadar bütün numuneler yüksek plastisiteli kil olarak sınıflandırılrsa da içerdikleri kil minerali tipleri değişkenlik gösterdiğinden dolayı aynı likit limite de sahip olsalar farklı kalıcı kayma mukavemeti açılarına sahip olabilmektedirler. Tiwari, B. ve Marui, H. [10] tarafından mineralojik yapının etkisi üzerine yapılan çalışma sonuçları da bu yargıyı desteklemektedir. Bu çalışmada kaolin, kum ve bentonit karışımları üzerinde yapılan deneylerde aynı likit limite sahip numuneler birbirinden çok farklı mukavemet değerleri verebilmektedir. Kil minerali tipinin bu farklılığa neden olması ise dane şekillerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Dane şekilleri yassılaştıkça kalıcı şartlara erişildiğinde danelerin birbirine paralel hale gelmesiyle en düşük mukavemet değeri elde edilmektedir. Bu nedenle kalıcı kayma mukavemeti açısından kil minerallerinin şekil özellikleri büyük önem kazanmaktadır. Plastisite indisi değerleri için söz konusu saçılım daha belirgin hale gelmektedir. Tiwari, B. ve Marui, H. [10] tarafından plastisite indisine bağlı tanımlanan eğilim çizgileri de bu yönde sonuçlar sunmaktadır. Bu noktada kil yüzdesinin kalıcı mukavemet için kilit bir rol oynadığı açıktır. Şöyle ki kalıcı mukavemetin önem arz etmesi için zeminin kil olması temel şarttır, ancak kalıcı mukavemet

değerinin hangi mertebede olacağına dair bir ipucu vermeyecektir. Bu noktada ön değerlendirme açısından en ekonomik yaklaşım dolaylı da olsa kıvam limitlerine bağlı ampirik yaklaşımların kullanılmasıdır. Tabii olarak nihai projelendirme de söz konusu zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin laboratuvar şartlarında belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, kalıcı kayma mukavemeti açısı, pratik amaçlar için likit limit değerine bağlı olarak tahmin edebilmek amacıyla geliştirilmiş olan ilişkinin literatürde yer alan diğer çalışmalarla bir karşılaştırması da verilmiştir. Bu çalışmada ulaşılan sonuçlar ile önceki çalışma sonuçları genel olarak birbirleri ile uyum içindedir. Yüksek plastisiteli killerin kalıcı kayma mukavemetini pratik amaçlar doğrultusunda tahmin edebilmek için sınırlı sayıda numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına dayanan bulguların, daha farklı özelliklere sahip numuneler üzerinde yapılacak deney sonuçlarından elde edilecek verilerle değişmesi ve geliştirilmesi mümkün olacaktır.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

w_L	Likit limit
w_p	Plastik limit
I_p	Plastisite indisi
ϕ_r	Kalıcı kayma mukavemeti açısı
ϕ_{r-HK}	Halka kesme deneyi ile bulunan kalıcı kayma muk. açısı
ϕ_{r-TKK}	Tekrarlı kesme kutusu deneyi ile bulunan kalıcı kayma muk. açısı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Skempton A.W., Residual strength of clays in candslides, *Folded Strata and the Laboratory*, Geotechnique, 35 (1), 3-18, 1985.
- Stark T.D., Eid T.H., Drained residual strength of cohesive soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (5), 856-871, 1994.
- Mesri G., Shahien M., Residual shear strength mobilized in first time slope failures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (1), 12-31, 2003.
- Skempton A.W., Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, 14 (2), 75-101, 1964.
- Önalp A., Arel E., Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği, Birsen Yayınevi. İstanbul. 2004.
- Mitchell J.K., Soga K., *Fundamentals of Soil Behavior*, Third Edition, John Wiley & Sons, New York. 2005.
- Khosravi, M., Meehan, C., Cacciola, D., Khosravi,A., Effect of fast shearing on the residual shear strengths measured along pre-existing shear surfaces in kaolinite, *Geo-Congress-2013*, San Diego, California, 245–254, 3-7 Mart, 2013.
- Kimura S., Nakamura S., Vithana S.B., Sakai K., Shearing rate effect on residual strength of landslide soils in the slow rate range, *Landslides*, 11, 969-979, 2014.
- Wesley L.D., Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits, *Geotechnique*, 53 (7), 669-672, 2003.
- Tiwari B., Marui H., Objective oriented multistage ring shear test for shear strength of landslide soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (2), 217-222, 2004.
- Mesri G., Cepeda-Diaz A.F., Residual shear strength of clays and shales, *Geotechnique*, 36 (2), 269-274, 1986.
- Stark T.D., Hussain M., Empirical correlations: Drained shear strength for slope stability analyses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 139 (6), 853-862, 2013.
- Hatipoğlu M., Kalıcı kayma mukavemetinin halka kesme deneyi ile belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- Lupini J.F., Skinner A.E., Vaughan P.R., The drained residual strength of cohesive soils, *Geotechnique*, 31 (2), 181-213, 1981.
- Di Maio C., Scaringi G., Shear displacements induced by decrease in pore solution concentration on a pre-existing slip surface, *Engineering Geology*, 200, 1–9, 2016.
- He L., Wen B.P., Effect of porewater salinity on residual shear strength of clays and their mixtures, *Developments in Engineering Geology*, Geological Society, London. *Engineering Geology Special Publication*, 27, 239–248, 2016.
- Shibasaki T.; Matsuura S., Hasegawa Y., Temperature-dependent residual shear strength characteristics of smectite-bearing landslide soils, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 1449–1469, 2017.
- Stark T.D., Choi H., McCone S., Drained shear strength parameters for analysis of landslides, *Journal of - Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (5), 575-588, 2005.
- Suzuki M., Tsuzuki S., Yamamoto T., Physical and chemical index properties of residual strength of various soils, *Memoirs Fac. Engineering Yamaguchi University*, 56 (1), 1-11, 2005.
- Yurtcu S., Ozocak A., Prediction of compression index of fine grained soils using statistical and artificial intelligence methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 597-608, 2016.
- Vithana S.B., Nakamura S., Gibo S. Yoshinaga A., Kimura S., Correlation of large displacement drained shear strength of landslide soils measured by direct shear and ring shear devices, *Landslides*, 9, 305, 2012.
- Chen X.P., Liu D., Residual strength of slip zone soils, *Landslides*, 11, 305-314, 2014.
- Bishop A.W., Green G.E., Garga V.K., Andersen A., Brown J.D., A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength; *Geotechnique*, 21 (4), 273-328, 1971.
- ASTM - D3080, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions,

- American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2004.
25. Cancelli A., Residual shear strength and stability analysis of a landslide in fissured overconsolidated clays, *Bull. Int. Assoc. Engineering Geology*, 16, 193–197, 1977.
 26. Dewoolkar M.M., Huzjak J.R., Drained residual shear strength of some claystones from Front Range, Colorado, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (12), 1543-1551, 2005.
 27. Voight B., Correlation between atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils, *Geotechnique*, 23 (2), 265–267, 1973.
 28. Kanji M.A., The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils. *Geotechnique*, 24 (4), 671–674, 1974.
 29. URL1, Geosim, Progressive Mobilization of Soil Shear Strength, <http://geosim.engr.mun.ca/progmob.htm>, Eriřim Tarihi, Őubat 2016.