

KAYA DOLGU MALZEMELERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BÜYÜK ÖLÇEKLİ DİREKT KESME DENEYLERİYLE BELİRLENMESİ

ASSESSMENT OF ENGINEERING PROPERTIES OF ROCK FILLS USING LARGE SCALE DIRECT SHEAR TESTING

A. Anıl YUNATCI¹, H. Tolga BİLGE², Yalın U. DOĞAN³
K. Önder ÇETİN⁴

ÖZET

Yüksek düşey efektif gerilme mertebelerine maruz kalan mühendislik dolgularının mukavemet ve rijitlik özelliklerinin yayılan kütleleri boyunca gerilme mertebesiyle doğrusal olmayan bir ilişki içerisinde değişkenlik gösterdiği bilinmektedir. Limit denge veya sonlu elemanlar analizleri dahil olmak üzere söz konusu yüksek dolguların mühendislik değerlendirmelerinde kullanılan sayısal modelleme araçlarında bulunan bünye modelleri ve bunlar için gerekli parametre seçimlerinde bu davranışın dikkate alınmaması durumunda kütlenin gerilme- deformasyon davranışı ve genel stabilite değerlendirmesinde, değişken şekilde ve sistematik olmayan mertebelerde saha davranışının tahmininden uzaklaşmaktadır. Dolgu imalatında kullanılan malzeme dane boyutuyla da orantılı olarak, söz konusu davranışın zeminler için kullanılan laboratuvar ekipmanları yerine büyük ölçekli ve yerinde deney düzenekleriyle tayini ihtiyacı doğmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ortalama dane boyutu 70 mm olan ve maksimum dane boyutu ise 120 mm mertebesine ulaşan bazalt kökenli kaya dolgu malzemesi, arazi koşullarında projeye özgü standart dolgu sıkıştırma kriterlerine uyacak şekilde teşkil edilerek, 200 kPa'ya varan düşey örtü yükleri altında 1300 mm x 1300 mm iç çerçeve boyutlarına sahip büyük ölçekli direkt kesme düzeneği kullanılarak makaslama tabi tutulmuştur. Beş farklı düşey yük mertebesi altında gerçekleştirilen saha deneylerinde makaslama sürecindeki yük – deformasyon karakteristikleri üzerinden makaslama mukavemeti parametrelerinin tayini yapılmış, bununla birlikte hiperbolik makaslama gerilmesi – birim deformasyon ilişkisi geliştirilerek model parametreleri geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: yerinde direkt kesme deneyi, kaya dolgu, bünye modelleri

¹Dr., Geodestek Ltd. Şti., ayunatci@geodestek.com (Sorumlu yazar)

²Dr., Geodestek Ltd. Şti., htbilge@geodestek.com

³Yüksek Jeoloji Mühendisi, Geodestek Ltd. Şti., ydogan@geodestek.com

⁴Prof. Dr., ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, onder@ce.metu.edu.tr

ABSTRACT

It is known that the strength and stiffness properties of engineering fills exposed to high vertical effective stress levels vary in a non-linear relationship with the stress level. Unless this characteristic is taken into account in the selection of the constitutive model and related engineering parameters, the numerical model; built with methods including limit equilibrium approach and finite elements, diverges unsystematically from the actual field performance. In proportion to the particle size gradation of the material used in the fill, there is a need to determine the stress – strain behaviour using in-situ test setups at larger scale compared to standard laboratory testing equipment used for soils. Within the scope of this study, basaltic rock fill material with an average particle size of 70 mm and a maximum grain size of 120 mm was constituted in a 1300 mm x 1300 mm size shear box in accordance with the project-specific standard fill compaction criteria applied in-situ, reaching vertical effective stresses of up to 200 kPa. In the field tests carried out under five different vertical load magnitudes, the shear strength parameters were determined, and effective stress dependent constitutive model parameters were obtained through constructing a hyperbolic shear stress-strain relationship.

Keywords: *large scale direct shear testing, rockfill, constitutive models*

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, Kars İli Sarıkamış İlçesi'nin batısında Aras Nehri üzerinde inşa edilen bir asfalt çekirdekli kaya dolgu baraj projesi kapsamında kullanılan kaya dolgu malzemesinin makaslama mukavemetinin ve yük – deformasyon davranışının belirlenmesi için büyük ölçekli direkt kesme kutusu deneylerinin gerçekleştirilmesi, elde edilen veriler kullanılarak makaslama gerilmesi – makaslama birim deformasyonu ilişkilerinin geliştirilmesi ve efektif gerilmeye bağlı makaslama rijitliği parametrelerinin belirlenmesidir.

Ölçek ve / veya sınır şartları uyumluluğu yakalamadaki zorluklar dikkate alındığın zaman, çakıllar ve daha büyük dane çapına sahip malzemelerin mühendislik özellikleri ve yük – deformasyon karakteristiklerinin belirlenmesinde, konvansiyonel üç eksenli, basit kesme veya direkt kesme düzenekleri kullanılarak yapılan sınırlı sayıda çalışma bulunduğu görülmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmalara örnek olmak üzere Liu (2009) 122.5 cm x 122.5 cm boyutlarındaki deney çerçeveleri üzerinde farklı yoğunluklarda sıkıştırılmış ve maksimum blok boyutu 200 mm ile 300 mm arasında değişen kaya dolgu malzemesi üzerinde 260 kPa'ya varan efektif normal gerilmeler altında büyük ölçekli direkt kesme deneyleri (Matsuoka vd., 2001; Liu vd., 2004); kumtaşı kökenli kaya dolgu malzemesi üzerinde 80 cm x 80 cm'lik çerçeve kullanılarak elde edilen deney sonuçları (Wang vd., 2016) ile maksimum 250 kPa gerilme altında 50 cm x 50 cm'lik kesme çerçevesinde test edilen zemin – kaya karışımları üzerinde yapılmış çalışmalar (Li vd., 2014) gösterilebilir. Bununla birlikte boyutları 200 mm ile 600 mm arasında değişken, nehir yataklarından ve patlatma yoluyla elde edilen numunelerin paralel gradasyon teknikleriyle indirgenmiş bir dane boyutu dağılımına dönüştürülerek konvansiyonel laboratuvar üç eksenli ekipmanı vasıtasıyla deneye tabi tutulması yoluyla getirilen alternatif yaklaşımlar bulunmaktadır (Vasistha vd., 2012). Gerekli teçhizatın bulunduğu veya üretilebildiği durumlarda da çakıl ve kaya dolgu malzemelerin büyük ölçekli

laboratuvar üç eksenli koşulları altında genleşme ve dane ezilme etkileri incelenerek mühendislik özelliklerini belirlemek mümkün olmuştur (Xiao vd., 2016). Ölçeklemeyle birlikte makaslama sürecindeki dane ezilme etkileri Frossard vd. (2012) ve Asadzadeh ve Soroush (2009) tarafından tartışılmıştır.

Örselenmemiş veya laboratuvarda belirli sıklıkta yeniden oluşturulmuş numuneler üzerinde, zemin birimlerinin belirli bir yatay düzlem boyunca yenilmeye zorlanarak yük – deformasyon davranışlarını ve makaslama dayanımlarını belirlemek için kullanılan temel laboratuvar deneyi “ASTM D3080 / D3080M – 11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions” (ASTM, 2011) veya benzeri uluslararası, ulusal (TS 1900) standartlarca tariflenmiştir. Bu standarda göre, geometrisi 6 cm x 6 cm kare veya dairesel şekilli bir kesme çerçevesi üzerinde belirlenmiş düzlem boyunca malzemenin yük deformasyon ve mukavemet parametrelerini belirlemek mümkündür. İlgili standartta Madde 6.2.1; kesme kutusu plan boyutlarının test edilecek malzemenin maksimum dane boyutunun 10 katından daha az olmamasını (veya 50 mm’den küçük olmaması; hangi değer büyükse o dikkate alınmak üzere) zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmaya konu olan kaya dolgu malzemesi için yapılan değerlendirmelerde öncelikle 250 mm üstü blokların ayrılması kararlaştırılmış, ardından üç farklı numune üzerinde dane boyutu dağılımı incelenmiştir. Farklı kuru eleme sonuçları arasında belirgin bir tutarlılık olduğu belgelenmiştir. Buna göre temsili ortalama dane (D_{50}) boyutu değeri 70 mm, 1 mm’den küçük danelerin kütlece miktarı %4 mertebesinde dir. Proje sahasında kurulu olan laboratuvarda yapılan deney sonucunda özgül ağırlık değeri $G_s = 2.623$ olarak raporlanmıştır.

2. DENEY DÜZENEGİ VE YERİNDE NUMUNE TEŞKİLİ

Tarafımızca yapılan gözlem ve ölçümlerde, proje sahibi tarafından imalatı üstlenilen 1300 mm x 1300 mm plan ebatlarına sahip bir kesme kutusu konfigürasyonunun numunenin teşkil edildiği dolu halinde 80 cm net derinliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Deney çerçevesinin kesit özelliklerinin, beklenen yük mertebeleri altında deforme olmayacak şekilde seçildiği deney sürecinde teyit edilmiştir. Deney düzeneği, tek hareketli çerçeveden oluşmaktadır ve makaslama yüzeyi, bir önceki sıkıştırılan tabakanın üst yüzeyi olarak modellenmektedir. Çerçeve elemanları, yanal yükler altındaki deformasyon, olası kopma ve kaynak atması gibi istenmeyen olayları önlemek üzere, takviye flanş parçalarıyla desteklenmiş ve elemanların yükleme eksenleri boyunca kesit ataletleri arttırılmıştır. Çerçevenin kusursuz olarak yatay dengede yerleştirilmesi, makaslama aşamasındaysa merkez eksenli boyunca hareketinin herhangi bir dönmeye maruz kalmayacak şekilde ilerlemesi sağlanmıştır. Bununla birlikte çekme / itme düzeneği elemanlarına ait yük transfer bileşenlerinin kendi deformasyonlarının kısıtlı ve ihmal edilebilir düzeyde tutulması sağlanmıştır. Yük transferi sırasında reaksiyon alınan desteğin harekete maruz kalmadığı da ayrıca teyit edilmiştir.

Direkt kesme çerçevesine proje kriterleri ve tasarlanan normal gerilmelerle uyumlu olarak, beklenen yenilme yük mertebeleriyle uyumlu şekilde kademeli olarak yanal yük aktarılmasını sağlayan hidrolik bir düzenek bulunmaktadır. Bu düzenek temel olarak

uygun kapasiteli tek yönlü bir piston, farklı hassasiyet derecelerine sahip ve ayarlanabilir, 80 ton yükleme ve 100 mm deformasyon kapasiteli, el krikosu ile yönetilen bir hidrolik yükleme ünitesinden oluşmaktadır. Yanal yükleme düzeneği arkasında rijit bir çelik çerçeve oluşturulmuş ve deney sahasında, tasarlanan yüklere dayanıklı olacak şekilde yatay reaksiyon verebilecek ağırlıktaki iş makineleri ile tam teması sağlanmıştır. Hidrolik yükleme sisteminin oluşturduğu yanal itkinin mertebesi elektronik yük hücresi vasıtasıyla anlık olarak takip edilip kaydedilmiştir. Hedef düşey (normal) gerilmeleri sağlamak için yaklaşık 2.4 m x 1.8 m x 0.86 m boyutlarındaki betonarme bloklar kullanılmıştır. Bu amaçla toplamda 5 adet blok imal edilmiştir. Bloklara ait net ağırlıkların saptanması için 50 kg hassasiyetli elektronik kantar tercih edilmiştir.

Deneyleri gerçekleştirebilmek amacıyla ilk adım olarak baraj imalat prosedürüyle uyumlu olarak teşkil edilen alt tabaka malzemesinin serilip sıkıştırılmasının ardından tüm çerçeve elemanlarının dengeye alınıp sabitlenmesi ve tamamen eksenel olarak yük aktarımına izin verecek şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Alt tabakalar, sulama ile 6 pas olarak tek tamburlu silindir ile sağlanan titreşim etkisiyle sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma tabaka kalınlığı 80 cm'dir. Çerçeve yerleşiminden önce kesme kutusunun konumlanacağı yüzeyin görsel kontrolü yapılmış ve çerçevenin tam terazide yerleştirilmesi sağlanmıştır. Çerçeve alt yüzeyinin, kesme düzlemiyle olan sürtünme etkileşimini asgariye indirmek üzere, çerçeve et kalınlığını kapsayacak şekilde geotekstil kullanılmıştır. Alt tabaka serimi ve sıkıştırması sırasında genelde düzlemsel yüzeye sahip kaya dolgu malzemesinin uzun kenarlarının yer eksenine paralel olacak şekilde yerleşmeye ve sıkışmaya meyilli oldukları gözlenmiştir. Bununla birlikte, uygulanan sıkıştırma enerjisiyle birlikte seyrek de olsa dolgu malzemesinin kırılarak parçalandığı kayıt altına alınmıştır.

Çerçeve elemanlarının sabitlenmesinin ardından gelen adım, baraj sahasındaki sıkıştırma koşullarını temsil eden hedef yoğunluktaki deney numunelerinin tüm kesme kutusu hacmi boyunca homojen bir yoğunlukta serilmesini içermektedir. Bu amaçla ilk olarak, boyut kontrolü yapılan bir kısım numune çerçeve içine ve dışına -sıkıştırma sonrası 80 cm kalınlık teşkil edilecek şekilde- serilmiştir. Serim sonrası, sıkıştırma silindiri mobilizasyonunu mümkün kılmak amacıyla aynı dolgu malzemesiyle bir platform inşa edilmiş ve sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).

Uygulanan sıkıştırma prosedürünün ardından bir önceki tabakaya göre 80 cm yukarıda seviyelendirilen çerçevenin çevresi, dört kenarından dikkatlice boşaltılmış ve serbest hareket şartları oluşturulmuştur. Bununla birlikte makaslama esnasında çerçevenin hareket doğrultusu üzerindeki sıkıştırılmış alt tabakanın da terazide olduğu ve makaslama esnasında değişmeyen bir temas düzlemi içerisinde yük aktarımına olanak tanınması sağlanmıştır. Çerçevenin üstü için terazi dengesi tekrar kontrol edilerek, gerek görüldüğü durumlarda ince kum ile ince bir tabaka halinde tesviye edilmiştir. Deney programı, "her biri ayrı çerçevede, yeni numune teşkili" koşulları altında, 5 farklı normal gerilme seviyesine maruz kalmış kesme kutularının makaslanması şeklinde belirlenmiştir (Şekil 2). Büyük ölçekli kesme kutusu düzeneği, 1 adet 100 ton kapasiteli elektronik yük hücresi ve kesme kutusunun hareketlerini anlık olarak kaydetmek üzere karşılıklı simetrik olarak konumlandırılmış 2 adet 150 mm kapasiteli yatay potansiyometre ve 2 adet 25 mm ölçüm kapasiteli düşey yönde yerleştirilen potansiyometre içermektedir (Şekil 3). Deneyler sırasında 5 Hz'lik örnekleme aralığı kullanılmıştır.



Şekil 1. Çerçeve içerisi ve çevresinde numune serimi ve standart sıkıştırma işlemi



Şekil 2. Farklı efektif gerilmeler altında deney hazır düzeneklerden görüntüler

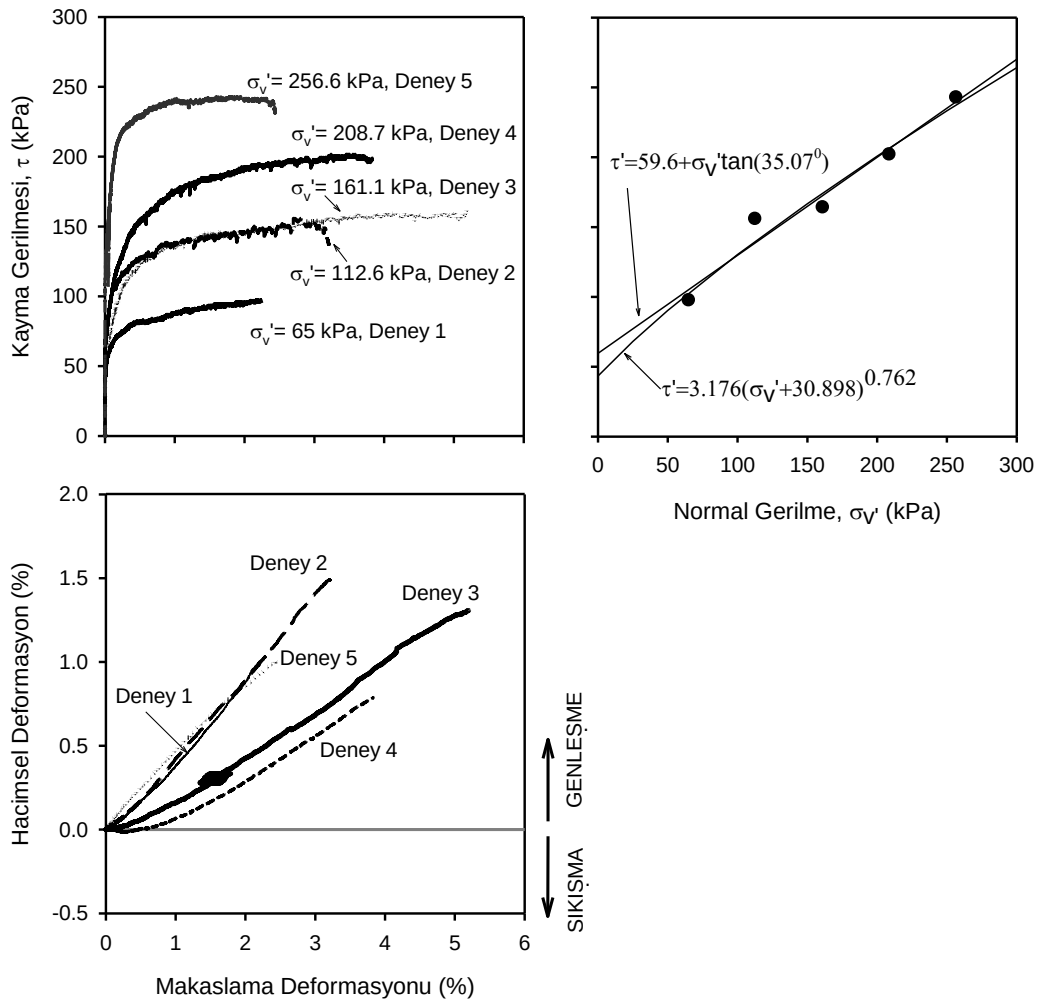


Şekil 3. Kesme kutusu deformasyonunu takip etmek için kullanılan yatay ve düşey potansiyometrik cetvellerden görünüm

3. DENEY SONUÇLARI

Takip edilen deney programı, her seferinde aynı sıkıştırma prosedürüne sadık kalınarak baştan oluşturulan numunelere 5 farklı efektif gerilme seviyesi altında makaslama birim deformasyon uygulanmasını içermektedir. Deney 4'ün ilk evresi haricinde (yaklaşık %0.14'lük makaslama birim deformasyon) tüm numunelerin artan makaslama birim deformasyonla birlikte hacim genişlemesine maruz kaldıkları tespit edilmiştir. Makaslama

işlemi sonrası deforme kesitler içinde kalan malzemenin kontrollü olarak kazılması ve tartılmasıyla hesaplanan doğal birim hacim ağırlık değerleri 16.52 kN/m^3 ile 23.22 kN/m^3 arasında değişmekte ve bunların ortalaması 19.79 kN/m^3 değerine sahiptir. Gerçekleştirilen deneylerde, yanal itkilerin yükleme çerçevesine makaslama sırasında hedeflenen ekseninde, herhangi bir eksantrisite yaratmadan aktarılması esastır. Buna göre gözlemsel veya gerçek zamanlı olarak takip edilen deformasyon verilerine göre çerçevede herhangi bir eksen etrafında dönme tespit edilen, yükleme esnasında reaksiyon mesnetinde herhangi bir rahatlama veya deformasyon gözlenen durumlara ait deney teşebbüsleri iptal edilmiş ve numuneler tekrar teşkil edilerek, deney tekrarlanmıştır. Buna göre takip edilen deney programında makaslama birim deformasyonu – makaslama gerilmesi, yatay (makaslama) ve düşey (hacimsel değişim) ilişkisi ile maksimum makaslama mukavemeti – normal gerilme çiftleri Şekil 4'te sunulmuştur. Deney verisi uyarınca makaslama (yanal) deplasman ve hacimsel (düşey) deplasmanların oranları kullanılarak genleşme ve plastisite teorileriyle uyumlu olarak maksimum genleşme açıları hesaplanmıştır (Bolton, 1986; Vermeer ve de Borst, 1984) (Tablo 1). Genleşme açısının hesaplanmasında kesme kutusunun yatay düzleminin sıfır uzanım hattını temsil ettiği kabul edilmiştir (Roscoe, 1970). Çalışma kapsamında yapılacak değerlendirmelere bahsi geçen bu deney verisi esas teşkil edecektir.



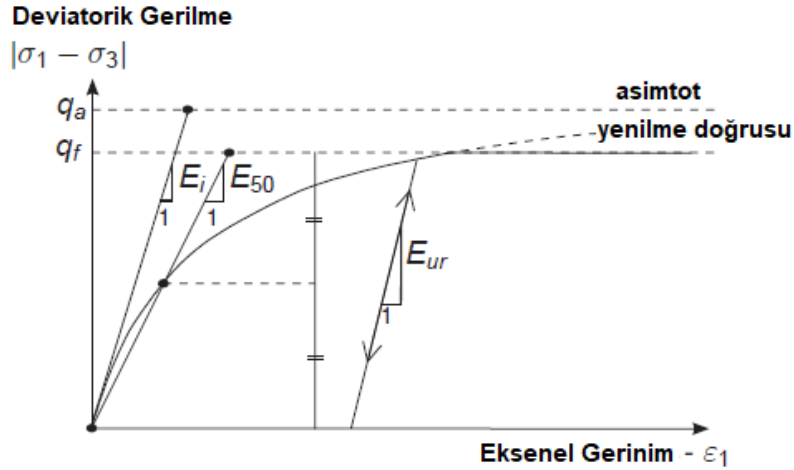
Şekil 4. Büyük ölçekli direkt kesme deneyi sonuçlarına ait özet veriler

Tablo 1. Büyük ölçekli direkt kesme deneyleri sonucu elde edilen anahtar parametrelerin özeti

Deney No	Yenilme Anındaki Yanal (Makaslama) Deformasyon (%)	Yenilme Anındaki Düşey (Hacimsel) Deformasyon (%)	Maksimum Sekant İçsel Sürtünme Açısı (ϕ_s^0)	Maksimum Genleşme Açısı $\psi_{\max}^0$
Deney 1	2.24	1.02	56.4	22.1
Deney 2	3.21	1.49	54.1	20.8
Deney 3	5.20	1.31	45.5	10.9
Deney 4	3.83	0.79	44.1	9.45
Deney 5	2.44	0.99	43.4	13.6

4. HİPERBOLİK BÜNYE MODELİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Duncan ve Chang (1970) tarafından, farklı nitelikteki zemin birimleri için drenajlı üç eksenli yükleme deney sonuçları uyarınca geliştirilen bu model ile zeminlerin doğrusal olmayan mekanik davranışlarının ve gerilme koşullarına bağlı olarak değişen rijitliklerinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Söz konusu model en basit şekliyle asal gerilmeler arasındaki farkın (deviatorik gerilme) ve makaslama birim deformasyonu arasındaki ilişkinin, hiperbolik bir fonksiyon ile açıklanmasını içermektedir. Hiperbolik model, Mohr – Coulomb yenilme kriterini temel almakta ve gerilmeye bağlı olarak doğrusal olmayan şekilde değişen yükleme ve yük boşaltma / geri yükleme elastik modüllerini üstel bir fonksiyon ile açıklamaktadır. Bu yaklaşımın bileşenleri Şekil 5'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Hiperbolik birim deformasyon – gerilme davranışının şematik gösterimi

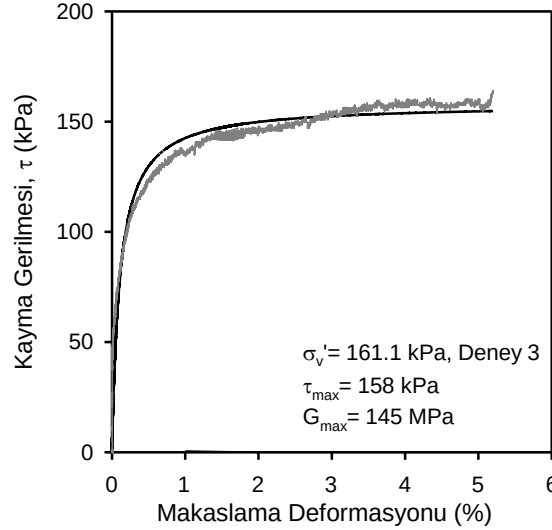
Şekil 5'te üç eksenli yükleme deneylerinde ölçülen (ve bunlara istinaden hesaplanan) değerler cinsinden verilen ifadeler, proje kapsamında gerçekleştirilen büyük ölçekli direkt kesme deneylerinde ölçülen (ve bunlara istinaden hesaplanan) değerler için Eşitlik 1 ve 2'de verilen şekilde ifade edilmiştir. Burada temel olarak deviatorik gerilme, eksenel birim deformasyon ve elastisite modülü yerine makaslama gerilmesi, makaslama birim deformasyonu ve kayma modülü ifadeleri kullanılmaktadır.

$$\tau = \frac{\gamma}{a+b\cdot\gamma} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de $a = 1/G_{max}$ ve $b = 1/\tau_{max}$ olarak ifade edilmiş (burada G_{max} : küçük deformasyonlara karşılık gelen makaslama modülü (Şekil 5’te verilen ifadelerle göre E_i), τ_{max} : Maksimum makaslama dayanımına (Şekil 5’te verilen ifadelerle göre q_a) karşılık gelmektedir) ve buna göre bu ifade Eşitlik 2’deki haline dönüştürülmüştür:

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{max}} + \frac{\gamma}{\tau_{max}}} \quad (2)$$

Çalışmanın bir sonraki aşaması, mevcut verinin değerlendirilmesi ile bu bölümün girişinde tanıtılan hiperbolik model katsayılarının test edilen malzeme bazlı olarak geliştirilmesini içermektedir. Bölümün girişinde değinildiği üzere makaslama gerilmesi, makaslama birim deformasyonu (γ), maksimum (düşük birim deformasyon) kayma modülü (G_{max}) ve maksimum makaslama dayanımının (τ_{max}) bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Çalışma kapsamında her gerilme mertebesindeki direkt kesme deney verileri kullanılarak tespit edilen davranışla uyumlu olan hiperbolik model parametreleri optimize edilerek seçilmiştir. Örnek teşkil etmesi amacıyla Deney 3 verisi üzerinde yapılan çalışma Şekil 6’da sunulmuştur.

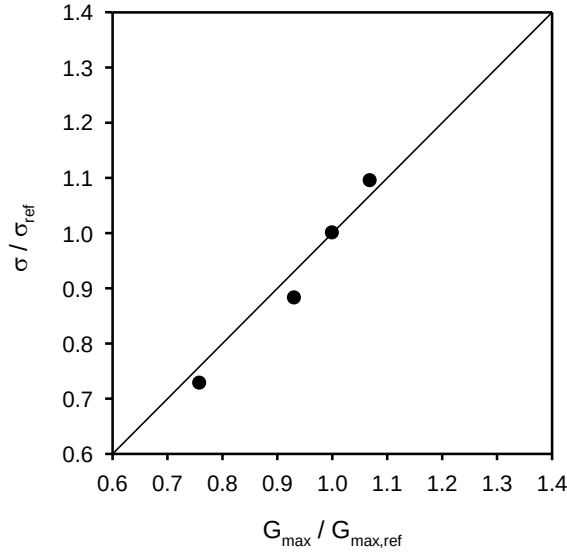


Şekil 6. Deney 3 için deney verisi – hiperbolik gerilme – birim deformasyon modeli karşılaştırması

Hiperbolik model kullanımındaki genel yaklaşım, model parametrelerinin seçilen bir referans gerilme seviyesi cinsinden ifade edilmesi ve farklı gerilme koşullarına karşılık gelen değerlerin ise referans değer temel alınarak hesaplanmasını içermektedir (Eşitlik 3).

$$\frac{G_{max}}{G_{max,ref}} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ref}} \right)^m \quad (3)$$

Bu ifadede, “m” değeri farklı düşey efektif gerilme seviyeleri altındaki makaslama modüllerinin ilişkilendirilmesi için kullanılan bir malzeme parametresini temsil etmektedir. Eşitlik 3 uyarınca, referans durumu temsil etmek üzere Deney 3’e ait verinin kullanılmasına karar verilmiş (referans değer sabit tutulmak üzere herhangi bir deney verisinin kullanılmasının mümkün olduğu unutulmamalıdır) ve neticede üretilen hiperbolik model katsayıları uyarınca geçerli tüm deney verisini optimize etmek üzere kapsayan “m” değeri 0.35 olarak belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. $m=0.35$ kabulü için gerilme – modül ilişkisi tahmin performansı

Tablo 2, hiperbolik model ile hesaplanan $G_{\max}$ değerlerini sunmaktadır. Modelin bir diğer parametresi olan G_{50} (Şekil 5'te verilen ifadelerle göre E_{50}) ise $\tau_{\max}/2$ değerine karşılık gelen sekant modülünü ifade etmektedir. Bunun için ilgili gerilme seviyesine karşılık gelen makaslama birim deformasyonu (γ_{50}), gerçekleştirilen büyük ölçekli direkt kesme deney sonuçları uyarınca belirlenmiş ve G_{50} değeri ise bu değerler oranlanması ile hesaplanmıştır.

Tablo 2. Hiperbolik model katsayılarının geliştirilmesinde kullanılan parametreler

Deney No	$G_{\max}$ (MPa)	$\tau_{\max}$ (MPa)	$\tau_{\max}/2$ (MPa)	σ_v' (kPa)	γ_{50} (%) Deney	G_{50} (MPa)	σ / σ_{ref}	$G_{\max} / G_{\max,ref}$
Deney 1	110	97.5	48.8	65	0.0719	67.8	0.403	0.759
Deney 2	135	155	77.5	112.6	0.1157	66.9	0.699	0.931
Deney 3	145	158	79	161.1	0.1121	70.5	1.000	1.000
Deney 4	155	200	100	208.7	0.1303	76.8	1.295	1.069

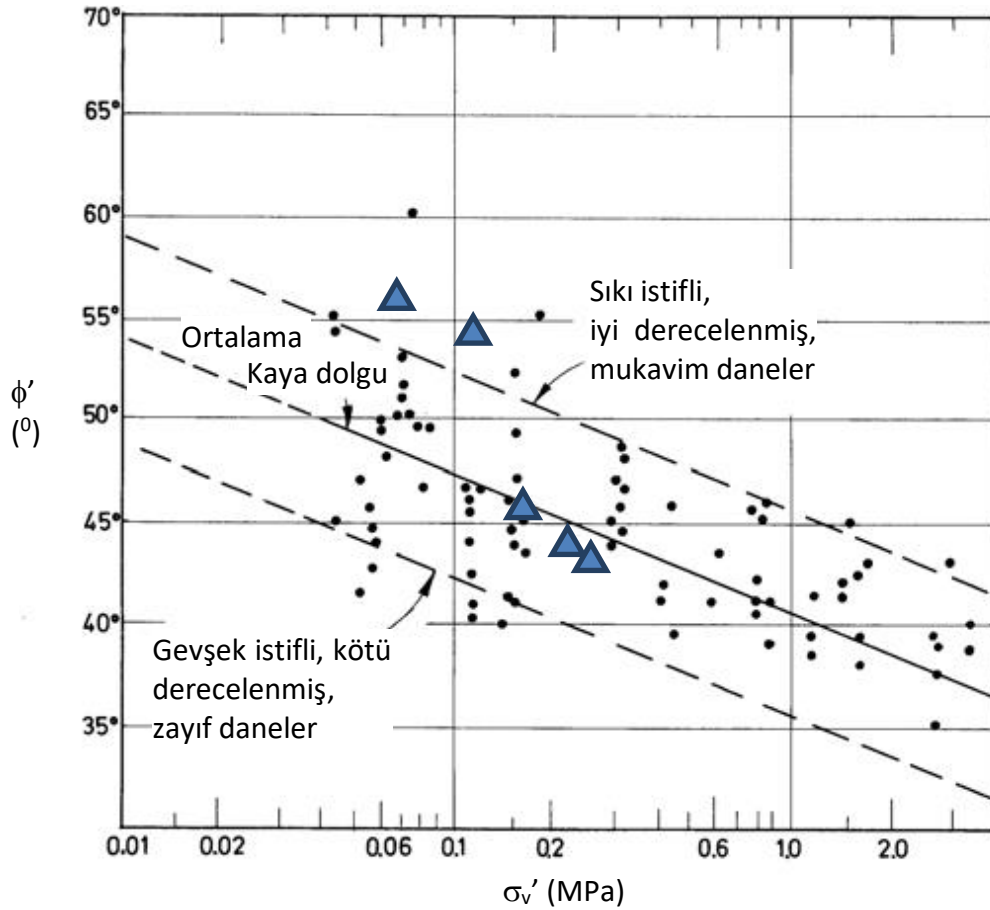
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışma kapsamında, Kars İli Sarıkamış İlçesi'nin batısında Aras Nehri üzerinde inşa edilen bir asfalt çekirdekli kaya dolgu baraj projesi kapsamında kullanılan kaya dolgu malzemesinin makaslama mukavemetinin ve yük – deformasyon davranışının belirlenmesi için yerinde gerçekleştirilen büyük ölçekli direkt kesme kutusu deney sistemi tanıtılmış, deney sonuçları sunulmuş ve farklı efektif gerilme seviyelerinin dolgu malzemesinin mühendislik davranışı üzerindeki etkilerinin belirlemek üzere yapılan değerlendirmelere yer verilmiştir.

Bazalt kökenli kayalardan teşkil edilen kaya dolgu malzeme üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre belirlenen tepe içsel sürtünme açıları (Tablo 1) Leps (1970) tarafından önerilen abak (Şekil 8) kullanılmak üzere değerlendirilmiştir. Buna göre, 100 kPa düşey efektif gerilme mertebelerine kadar belirlenen içsel sürtünme açısı değerlerinin sıkı şekilde istifli, iyi-derecelenmiş mukavim daneleri temsil eden üst sınır doğrusunun kabul edilebilir mertebelerde üzerinde kaldığı, 100 ile 260 kPa aralığında ise ortalama

eğriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür (mevcut deney verisi Şekil 8 üzerinde Leps (1970) tarafından önerilen eğriler ile sunulmuştur). Mevcut veriler uyarınca, test edilen örneklerle ait içsel sürtünme açılarının 43.4° ile 56.4° arasında değiştiği görülmektedir. Artan gerilmelerle birlikte genişleme davranışının genel olarak baskılanması beklentisi dahilinde hesaplanan sekant sürtünme açılarının azaldığı gözlenmiştir. Bu davranış, çok sıkı haldeki granüler malzemelerin makaslamayla birlikte, küçük birim deformasyonlardan itibaren sergilediği genişleme davranışını da dolaylı olarak desteklemektedir.

Şekil 4 kapsamında sunulduğu üzere, doğrusal fonksiyona sahip mukavemet zarfından elde edilen teğet içsel sürtünme açısı değeri 35° mertebesinde-dir. Burada yapılan regresyon analizinde, her ne kadar bazalt kökenli dolgu malzemesi için görece yüksek bir kohezyon değeri beklenmiyor olsa da, mukavemet zarfındaki değer sıfıra zorlanmayarak olduğu gibi bırakılmıştır. Yüksek örtü yüklerinin ortaya çıkması öngörülen baraj tipi yapılarda, mukavemet ve gerilme arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi temsil edebilecek mukavemet zarflarından biri yine Şekil 4 kapsamında sunulmuştur.



Şekil 8. Kaya dolgu malzemeler için tepe içsel sürtünme açısı ile efektif gerilme ilişkisi (Leps, 1970'ten uyarlanmıştır)

Bu noktada özellikle her ne kadar laboratuvar ölçeğinden farklı olsa da yine de baraj gövdesinin maruz kaldığı maksimum gerilme mertebelerinin sınırlı bir kısmını temsil eden bu gerilme aralığında gerçekleştirilen büyük ölçekli direkt kesme deneyleriyle (çekirdek bölgesinde maksimum örtünün olduğu bölgede %5-10'u arasında) üretilen mukavemet

zarflarının düşük gerilmelerdeki doğrusal olmayan davranışı daha büyük başarıyla yakalayabildiği söylenebilir.

Dolgu malzemesinin mukavemet özelliklerinin yanı sıra, gerilme – birim deformasyon ilişkisinin değerlendirilmesine yönelik hiperbolik bünye modeli malzeme parametrelerinin belirlenmesi için de yerinde gerçekleştirilen büyük ölçekli direkt kesme deney verisinden faydalanılmıştır. Malzemenin farklı efektif gerilme seviyelerinde sahip olduğu rijitlik seviyesini temsil eden makaslama modülleri deney verisi uyarınca belirlenmiş ve efektif gerilme – modül ilişkisini tariflemek üzere kullanılan malzeme parametresi (m) 0.35 mertebesinde olarak seçilmiştir. Bu değer, benzer nitelikteki dolgular için literatürde verilen (Duncan ve Chang, 1970) değer aralıkları ile de uyumlu olduğu görülmüştür.

Kullanım amaçları doğrultusunda kritik olarak değerlendirilen kaya dolgu tipi barajların mühendislik değerlendirmeleri için dolgu malzemesine ait mühendislik özelliklerinin aslına en yakın şekilde belirlenmesi önem taşımaktadır; ancak kaya dolgunun boyutları nedeniyle malzemenin mühendislik özelliklerinin rutin zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu durumu dikkate almak üzere, dolgu dane boyutları dikkate alınarak geliştirilen bir büyük ölçekli direkt kesme deney düzeneği ile arazi hedef sıkışma şartlarını sağlayan dolgu malzemesi üzerinde deneyler yapılmış ve sayısal analizler kapsamında ihtiyaç duyulacak mühendislik parametreleri, malzeme özelinde belirlenmiştir. Literatürdeki genel değer aralıkları ile uyumlu olduğu görülen bu parametreler ile gerçekleştirilecek sayısal modelleme çalışmaları neticesinde daha hassas ve doğruya yakın sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Asadzadeh, M., Soroush, A., Direct Shear Testing on a Rockfill Material. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, No. 2B, 379-396, 2009.
- ASTM D3080 / D3080M – 11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions
- Bolton, M. D., The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, 65-78, 1986.
- Duncan, J. M., Chang, C. Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 96(SM5), 1629-1653, 1970.
- Frossard, E., Hu, W., Dano, C., Hicher, P. Y., Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects. *Géotechnique*, Thomas Telford, 62 (5), pp.415- 427, 2012.
- Leps, T.M. (1970) Review of the shearing strength of rockfill. *J. of Soil Mech. And Found. Div., ASCE*, Vol.96, No. SM4, Proc. Paper 7394, July 1970, 1159-1170.
- Li, X. Z, Li, J. L., Deng, H. F., In-Situ Direct Shear Test Research of Rock and Soil of Typical Bank Slope in Three Gorges Reservoir Area. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 19, Bundle K, 2523-2534, 2014.
- Liu, S. H., Application of in situ direct shear device to shear strength measurement of rockfill materials. *Water Science and Engineering*, 2 (3): 48-57, 2009.
- Liu, S. H., Xiao, G. Y., Yang, J. Z., and Wu, G. Y, New in-situ direct shear tests on rock fill materials at Yixing Pumped Storage Power Station Project. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 26(6), 772-776, 2004, (in Chinese).

- Matsuoka, H., Liu, S. H., Sun, D., and Nishikata, U., Development of a new in-situ direct shear test. *Geotechnical Testing Journal*, 24(1), 92-102, 2001. [doi:10.1520/GTJ11285J]
- Roscoe, K.H., The Influence of Strains in Soil Mechanics, Tenth Rankine Lecture, *Geotechnique*, Vol. 20, No. 2, pp. 129-170.
- Vasistha, Y., Gupta, A. K., Kanwar, V., Prediction of Shear Strength Parameters of Two Rockfill Materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 17, Bundle W, 3221 – 3232, 2012.
- Vermeer, P. A., de Borst, R., Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*, Delft University of Technology, Vol. 29, No.3, 1984.
- Wang, J. J., Yang, Y., Chai, H.J., Strength of a Roller Compacted Rockfill Sandstone from In-Situ Direct Shear Test. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 53, No.1, March 2016.
- Xiao, Y., Liu, H., Zhang, W., Liu, H., Yin, F., Wang, Y., Testing and modeling of rockfill materials: A review. *Journal of RockMechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 8., 415-422, 2016.