

DOLGU-SAPLAMA ARAYÜZEYİ KESME DİRENCİNİN DOLGUNUN BASINÇ DAYANIMI İLE TAHMİNİ

Ahmet TEYMEN (ORCID: 0000-0001-7952-1025)*

Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 25.12.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 31.03.2017

Kabul / Accepted: 31.03.2017

ÖZ

Bu makale, kaya sapsmaları için geliştirilen dolgu malzemelerinin deneysel sonuçlarını içermektedir. Deneysel çalışmalar, mineral katkıların kaya sapsması ve dolgu arasındaki aderans dayanımına etkilerini kapsamaktadır. Literatürde mineral katkıların beton dayanımına etkileri ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak, bu katkıların sapsmaların mekanik özelliklerine etkilerine dair çalışma sayısı oldukça azdır. Sapslama çekme kapasitesini geliştirmek amacıyla 10 farklı dolgu malzemesi ve 4 farklı kür süresi için toplam 120 adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. Kontrol dolgusu dışındaki dolgu karışımları, çimento ağırlığının ağırlıkça %15'i yerine mineral katkı kullanılarak hazırlanmıştır. Metakaolin ve silis dumanlı dolguların her yaşta daha yüksek dayanımlara sahip oldukları belirlenmiştir. Uçuş kül kullanılan dolgunun 28 günlük kür süresine kadar tüm dayanımları düşük değerler gösterirken sonrasında dikkate değer şekilde artmıştır. Çimentonun atık mineral katkı ile birlikte kullanılmasıyla yüksek dayanımlı dolgular elde edilebilir ve bu dolgular tünelleme uygulamalarında kullanılabilir. Böylece düşük maliyetli ve yüksek dayanımlı çimento üretilebilecektir ve atık kullanımı ile çevresel problemlerin çözümüne katkıda bulunulabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kaya sapsması, dolgu, mineral katkı, metakaolin, silis dumanı

ESTIMATION OF THE SHEAR STRESS OF GROUT-BOLT INTERFACE BY COMPRESSIVE STRENGTH OF GROUT

ABSTRACT

This paper represents the experimental results of the grout materials developed for rockbolts. Experimental studies cover the effects of mineral admixtures on the bond characteristics between grout and rockbolts. There are many studies in the literature about the effects of mineral admixtures on concrete strength. However, the number of studies on the effects of these admixtures on the mechanical properties of rockbolts are quite limited. Totally 120 rockbolt pull-out tests were carried out using ten different grout types in order to improve the load bearing capacity for four different curing times. Grout mixtures outside the reference grout were prepared using mineral admixtures instead of 15% by weight of the cement weight. Metakaolin and silica fume additive grouts were found to have higher strengths at all ages. The all strength test of fly ash grouts exhibited low values till 28 days of curing time, but a sharp increase was observed after this period. It is concluded that cement, in combination with waste mineral admixtures, can be utilized in making high strength grout and such grout can be used as grouting material at tunnelling applications. Thus, grout having low cost and high-strength can be produced with waste materials and waste utilization will be contributing to the solution of environmental problems.

Keywords: Rockbolt, grout, mineral admixture, metakaolin, silica fume

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel. : +90 0505 570 1441; e-mail / e-posta: ateymen@ohu.edu.tr

A. TEYMEN

1. GİRİŞ

Kaya saplamları ile tahkimat, çok uzun zamandır kaya kütleleri içindeki yeraltı açıklıklarının stabilizesinde sıkça kullanılmaktadır [12]. Kaya saplama sistemi, çatlak hareketlerini önleyerek ve örselenmiş kaya kütlelerinin yeterliliğini geliştirebilir ve kaya kütlelerinin kendi kendisini taşımasını sağlar [9]. Özellikle tam dolgulu ve öngerdirmesiz kaya saplamları tahkimat ve güçlendirme aracı olarak madencilik ve inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu tip saplamlar, tüm uzunluğu boyunca yapışma sağladığı için sistematik düzende kullanılarak kaya kütlelerine yarı homojen bir tahkimat sağlarlar. Çelik kablo ya da betonarme çeliği gibi tam dolgulu kaya saplama uygulamaları en popüler tahkimat elemanlarıdır ve Portland çimentolu dolgu, saplamların etrafındaki kaya kütlesi ile aderansını sağlayan en yaygın kullanılan malzemedir [15]. Kaya saplamlarının tahkimat ve güçlendirme etkileri birçok bilim adamı tarafından araştırılmaktadır [7-9, 17, 19].

Saplama yerleştirme tekniğinin ve ekipmanlarının gelişimi, tahkimat etkisine güçlendirme etkisinin de eklenmesi, tünel ve şev stabilite uygulamalarında kaya saplamlarını rakipsiz yapmaktadır. Kaya saplamlarının yaygın kullanımı farklı tip kaya saplamlarının geliştirilmesini sağlamıştır. Kaya saplamları ankraj sistemlerine göre üç ana gruba ayrılırlar [1, 3, 4, 6, 11]. Bu gruplardan ilki mekanik ankrajlı, ikincisi sürtünme ankrajlı kaya saplamlarıdır. Üçüncüsü ise reçine ve çimento dolgulu olmak üzere ikiye ayrılan tam dolgu ankrajlı saplamlardır. Çimento dolgulu kaya saplama, mekanik ankraj özelliği olmayan tam dolgulu kaya saplama ve genellikle delik içine yerleştirilen ve tüm uzunluğu boyunca yapışma sağlayan nervürlü bir çelikten ibarettir. Çimento dolgulu kaya saplamlarının yük taşıma kapasiteleri saplama şekli, çapı, uzunluğu, kaya ve dolgu dayanımlarına bağlıdır. Dolgulu saplamanın yapışma direncinde sürtünme mekanizması etkindir ve saplama-dolgu ya da dolgu-kaya arasındaki makaslama direncine bağlıdır.

Kılıç ve ark. [11], dolgulu kaya saplamlarının yenilme mekanizmasını açıklarken, dolgu makaslama sisteminin aksel çekme boyunca yük taşıma kapasitesinin kontrolünde anahtar parametre olduğunu belirtmişlerdir. Böylece bu arayüzeyin makaslama dayanımındaki bir takım değişiklikler, saplama ankraj direncini ve yük taşıma kapasitesini etkileyecektir. Çimento dolgulu saplamların yük taşıma kapasiteleri ve dolgu kohezyonu, çevre kayacı ile saplama çeliğinin bir fonksiyonudur [1].

Yük taşıma kapasitesi, saplamanın dayanımı ya da çapının artması ile artabilir. Dolgu-kaya arasındaki makaslama direncinin artışı delik çapının büyüülmesi ile sağlanabilir. Bu durum, dolgu malzemesinin yüzey alanının artmasına sebep olur [10]. Dolgu malzemesinin makaslama direncinin artması, yüksek dayanımlı çimento kullanımı, düşük su/çimento oranı, süperakışkanlaştırıcı ve bazı mineral katkıların kullanımı ile mümkün olabilmektedir. Mevcut yayınlardaki deneysel çalışmalar dolgu malzemesinin makaslama dayanımını arttırmaya ve bu makaslama dayanımının saplama çekme direncine etkilerini araştırmaya yöneliktir. Düşük su/çimento oranına sahip karışımlarda dolgunun makaslama kuvveti artar, ancak işlenebilirlik ve akışkanlık azalır. İşlenebilirlik ve akışkanlık, bir miktar süperakışkanlaştırıcı ilavesi ile artırılabilir. Çimento katkılarının kullanımı son yıllarda oldukça artmıştır. Bu durumun temel gerekçeleri ise ekonomik, teknik ve çevresel düşüncelerdir. Mineral katkılar yüksek dayanımlı beton üretiminde değerlendirilmektedir. Dolguların fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla, çimento dolguların bileşimini modifiye ederek çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Mineral katkıların optimum oranları ve betona etkileri ile ilişkili bir dizi çalışma [2, 5, 13, 14, 18, 21, 22] yürütülmüştür.

Vipulanandan ve Sunder [23] yaptıkları çalışmada metakaolinin saplama çekme kuvveti, basınç dayanımı ve akışkanlık gibi dolgu özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre çimento dolguların saplama çekme kuvveti ve basınç dayanımı metakaolin ilavesi ile dikkat çekici değişimler göstermiştir. Lam ve ark. [13] farklı su/çimento oranlarında uçucu kül ve silis dumanının dayanım etkilerini çalışmışlardır. %15 silis dumanı ve %25 uçucu kül katkısının 28 gün sonunda basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

Shannag [18], %15 puzolan ve %15 silis dumanı ile 28 gün sonunda %26 dayanım artışı elde etmiştir. Su/çimento oranı 0,35 olan karışımlar için silis dumanlı betonun basınç dayanımı silis dumanı olmayan betonun basınç dayanımından daha yüksektir. Mazloom ve ark. [14] farklı miktarlarda silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonun uzun ve kısa dönem mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Silis dumanı oranı arttıkça betonun işlenebilirliği azalmaktadır. Sonuçlar 28 günlük basınç dayanımı ve sekant modülü gibi kısa dönem mekanik özelliklerin silis dumanı katkısı ile iyileştiğini göstermektedir.

Farklı oranlarda uçucu kül-silis dumanının kullanıldığı ve su/çimento oranları 0,29-0,44 arasında değişen karışımlardan yapılan yüksek dayanımlı beton özelliklerini belirlemek için Nassif ve ark. [16] tarafından bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül oranı %10-30, silis dumanı oranı %5-15 arasında değişmektedir. Bu çalışmanın sonuçları silis dumanı katkısının erken dönemlerde dayanım artışı ile sonuçlandığını göstermektedir. Bu sonuçlara ilave olarak, farklı oranlarda silis dumanı ile birlikte %20 uçucu kül ilavesi, 90 günlük kür süresinden sonraki tüm kür sürelerinde, elastisite modülü ve dayanımın her ikisinde de

DOLGU-SAPLAMA ARAYÜZEYİ KESME DİRENCİNİN DOLGUNUN BASINÇ DAYANIMI İLE TAHMİNİ

olumsuz sonuçlara sahiptir. Ayrıca %5 silis dumanı ve %10 uçucu kül katkısına sahip optimum bileşim en yüksek dayanım değeri göstermiştir.

Badogiannis ve ark. [2] zayıf Yunanistan killlerinden üretilen 5 farklı metakaolin içeren çimentonun basınç dayanımı ile ilgili çalışmalar yürütmüşlerdir. Test sonuçları göstermiştir ki; metakaolin 2 gün sonra, özellikle de 28 ve 180 gün sonunda beton dayanımına oldukça pozitif etkilere sahiptir. Metakaolinli betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak, %10 metakaolin katkısı, %20 metakaolin katkısından daha avantajlı ve faydalıdır. Türkmen ve ark. [22], beton içinde gömülü demirin korozyona karşı direncini artırmak ve betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada çimento yerine farklı oranlarda silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Sonuçlar göstermektedir ki; çimento yerine %20 oranında yüksek fırın cürufu ve %10 oranında silis dumanı kullanmak, betonun mukavemetini 28 gün sonunda %8, 250 gün sonunda %16 oranında artırmaktadır. Su/çimento oranındaki artış (0,35'den 0,45'e) basınç dayanımını 28 günde yaklaşık %22 azaltmaktadır.

Kaya saplama performansının genel manada iyi anlaşılmış durumdadır, ancak farklı dolgu koşullarında kaya saplama performansının nasıl davrandığı çok açık değildir. Bu çalışmanın temel amacı, farklı dolgu tiplerinin tam dolgulu kaya saplama performansının taşıma kapasitelerine etkisini araştırmaktır. Uygulamada kullanılabilir dolgu karışımları geliştirmek için ekonomik, teknik ve çevresel gerekçeler de göz önünde bulundurularak bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Bu hedeflerin yanı sıra dolgu-saplama ara yüzeyi kesme direncini tahmin etmek için dolgunun basınç dayanımlarını kullanarak bazı ampirik formüller açıklanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, mineral katkıların tam dolgulu nervürlü kaya saplama performansının saplama çekme kapasiteleri ve dolgu malzemelerinin dayanımları üzerindeki etkilerini araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 14 mm çapa sahip S420 çelik sınıfında nervürlü kaya saplama kullanılmıştır. Saplama yerleştirildikleri deliklerin çapı 24,8 mm'dir. Nervürlü kaya saplama dayanımları 97 kN ve nihai çekme dayanımları 113 kN'dur. Deneysel çalışmalara karar vermeden önce yapılan deneme çalışmalarında, 7 günlük kür süresi sonunda 20 cm'den daha uzun saplama dolgu-saplama ara yüzeyinde sıyrılma oluşmadan önce saplama sapından koştugu görülmüştür. Bu nedenle çalışmada 20 cm uzunluğunda nervürlü kaya saplama kullanılmıştır.

Saplama çekme testleri, Osmaniye ilinde kurulu bulunan bir doğal taş fabrikasında kesilip düzeltilerek hazırlanan 6 adet bazalt blok içerisine farklı dolgular kullanılarak yerleştirilen nervürlü kaya saplama üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bazalt bloklar her birine 10 adet nervürlü kaya saplama yerleştirilecek şekilde 15x20x60 cm ebatlarında hazırlanmıştır. Blokların ebatları belirlenirken, saplama ankraj uzunluğu ve saplama çekme aletinin ebatları dikkate alınmıştır. Dolgularda çimento yerine ikame edilen mineral katkıları Türkiye'de farklı fabrika ve üretim tesislerinden toparlanmıştır. Mineral katkıların tam dolgulu kaya saplama performansının saplama çekme kapasiteleri üzerindeki etkilerini araştırmak için on farklı dolgu karışımı hazırlanmıştır. Dolgulardan bir tanesi, içinde mineral katkı kullanılmayan referans dolgusu olarak belirlenmiştir. Dolguların bileşimi, birim hacim ağırlıkları ve kullanılan mineral katkıların isimleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. 1 m³ dolgu için yaklaşık karışım oranları ve dolguların taze birim hacim ağırlıkları

Karışım Kodu	Mineral Katkı Tipleri	Çimento (kg/m ³)	M.Katkı (kg/m ³)	Silis Kumu (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	S.Akışk. (kg/m ³)	Taze B.H.Ağırlık (kg/m ³)
K1	Silis dumanı (SD)	1077	190	127	456	10,8	1861
K2	Y. fırın cürufu (YFC)	1139	201	134	482	11,4	1968
K3	Uçucu kül (UK)	1118	197	132	474	11,2	1932
K4	Kolemanit (KLM)	1104	195	130	468	11,0	1908
K5	Simektit (SMT)	1123	198	132	476	11,2	1940
K6	Genleş. perlit (PRL)	1087	192	128	460	10,9	1878
K7	Bazalt tozu (BT)	1137	201	134	482	11,4	1965
K8	Kömür tozu (KT)	1045	184	123	443	10,5	1806
K9	Metakaolin (MK)	1114	197	131	472	11,1	1924
K10	Referans dolgu (RD)	1322	-	132	476	11,2	1941

A. TEYMEN

Farklı mineral katkıların dayanıma etkilerini belirleyebilmek amacıyla tüm karışım tipleri aynı koşullarda hazırlanmıştır. Silis kumu/bağlayıcı (çimento+mineral katkı) oranı 0,10, su/bağlayıcı oranı 0,36 ve süperakışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı 0,0085'tir. Tam dolgulu kaya saplama çalışmalarının yük taşıma kapasitelerini geliştirmek ve araştırmak amacıyla 10 farklı dolgu tipi ve 4 farklı kür (1, 3, 7, 28 gün) süresinde, toplam 120 adet saplama çekme testi gerçekleştirilmiştir. Saplama çekme testleri, ISRM-1985'te [20] açıklanan deney prosedürlerine göre yürütülmüştür.

DeneySEL çalışmaların planlanması aşamasında farklı dolgu tipleri elde etmek için değişik oranlarda dolgu karışımları denenmiştir. Bu amaçla mineral katkı tipleri %5 - 25 arasında değişen oranlarda çimento yerine ikame edilmiştir. Uygulamada, dolgu karışımlarının çekme gerilmelerine karşı dayanımlı olması ve saplama deliklerine kolay pompalanabilir kıvamda olması beklenir. Bu parametreler dikkate alındığında yapılan deneme çalışmalarından ortaya çıkan en uygun ikame oranı %15 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple çalışmada kullanılan dolgu karışımları, çimentonun ağırlıkça %15'i yerine mineral katkıları kullanılarak hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda ince agrega olarak 0,5 mm elek altı homojen tane dağılımına sahip silis kumu kullanılmıştır. Her bir dolgu karışımı için 100x100x100 mm ebatlara sahip küp numuneler dökülmüştür ve tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) testleri bu numuneler kullanılarak TS EN 12390-3 [27] standardına uygun olarak yapılmıştır. Dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkartılan numuneler, 23±2°C sıcaklıktaki su içerisinde (ıslak kür) laboratuvar ortamında deney gününe kadar kür edilmişlerdir.

Çimento olarak TS EN 197-1 [24] standardına uygun, erken dayanımı yüksek CEM II/B- P32.5 tip Portland çimentosu kullanılmıştır. Dolgu karışımlarında işlenebilirliği sağlamak amacıyla TS EN 934-2+A1 [25] standardına uygun, polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, erken ve ileriki yaşlarda yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan harç ve betonlar için geliştirilmiş, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. TEBD numuneleri ve deliklere mineral katkıları dolgular kullanılarak yerleştirilmiş kaya saplama Şekil 1'de gösterilmektedir. Öncelikle, akışkan özelliğe sahip dolgu karışımı boşluk kalmayacak şekilde deliklere enjekte edilmektedir ve saplama bu deliklerin merkezine gelecek şekilde yavaş ve dikkatli bir şekilde kendiliğinden yerleştirilmektedir.



Şekil 1. Deliklere yerleştirilmiş kaya saplama ve TEBD numuneleri (10x10x10 cm)

Tek eksenli basınç dayanımını belirlemek için gerekli olan küp numuneler saplama yerleştirme çalışmaları ile eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Saplama çekme aleti (boltmetre) ve farklı dolgular elde etmek için kullanılan mineral katkıları Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Saplama çekme aleti (boltmetre) ve karışımlarda kullanılan mineral katkıları

DOLGU-SAPLAMA ARAYÜZEYİ KESME DİRENCİNİN DOLGUNUN BASINÇ DAYANIMI İLE TAHMİNİ

Kaya saplamları 1, 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda boltmetre yardımı ile aksel olarak yüklenmiştir. Uygulanan yük dolgu-saplama ara yüzeyinde sıyrılma oluşana kadar kademeli olarak artırılmıştır. Boltmetrenin iki çenesi arasına yerleştirilen kaya saplamları 150 kN kapasiteli, manüel bir pompanın bağlı olduğu hidrolik çekme aleti vasıtasıyla çekilmiştir. Uygulanan yüklerin kaydedilmesi için sekiz kanallı bilgisayar kontrollü bir veri toplama sistemi kullanılmıştır ve deformasyonlar kaydedilmemiştir. Saplama çekme testleri her dolgu tipi ve kür süresi için üçer kez tekrarlanmıştır. Herhangi bir kaya saplama testinin yenilme yükü bu üç deneyin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Tüm basınç dayanım testleri için 0,15 MPa/s yükleme hızına sahip ASTM C39 [26] tarafından önerilen beton presi kullanılmıştır. Yük, tüm örnekler için kırılma oluşuncaya kadar, şok etkisi olmaksızın sürekli olarak uygulanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tek aksel basıncı dayanımı test numuneleri 1, 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda deneye tabi tutulmuştur. TEBD deneyinde her kür süresi ve her dolgu tipi için üçer adet numune kullanılmıştır. Ortalama test sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Aynı kür sürelerinde saplama çekme deneyleri de gerçekleştirilmiş ve nihai saplama çekme kuvveti (P_s) ile dolgu-saplama ara yüzeyi kesme direnci (τ_s) çekme testlerinin sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Bir kaya saplama testinin maksimum saplama çekme kuvveti, bu saplama çeliğinin nihai dayanımına bağlıdır. Tüm saplama çekme testlerinde, kaya saplama-dolgu arası makaslama tipi yenilme gözlenmiştir. Kür süresinin daha uzun olması durumunda dolgu karışımlarının birçoğunda saplama yenilmesi görülme ihtimali artmaktadır. Hesaplanan ortalama değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kaya saplamları ve dolgulara ait mekanik test sonuçları

Karışım Kodu	Test sonuçları											
	1 (gün)			3 (gün)			7 (gün)			28 (gün)		
	P_s (kN)	τ_s (MPa)	TEBD (MPa)	P_s (kN)	τ_s (MPa)	TEBD (MPa)	P_s (kN)	τ_s (MPa)	TEBD (MPa)	P_s (kN)	τ_s (MPa)	TEBD (MPa)
K1 (SD)	69,9	7,94	6,7	84,6	9,61	19,2	99,3	11,28	26,3	110,9	12,60	51,9
K2 (YFC)	58,2	6,62	3,4	75,5	8,58	14,7	88,3	10,04	21,8	91,6	10,41	41,5
K3 (UK)	69,2	7,87	4,3	81,5	9,27	16,3	91,5	10,40	23,8	104,5	11,87	42,5
K4 (KLM)	29,5	3,36	2,2	47,7	5,42	8,6	62,0	7,05	14,6	71,8	8,17	27,9
K5 (SMT)	58,6	6,66	3,8	75,5	8,58	15,9	85,4	9,71	21,9	90,0	10,24	35,7
K6 (PRL)	55,3	6,29	3,7	82,6	9,39	17,4	90,3	10,27	22,7	96,6	10,98	41,6
K7 (BT)	38,3	4,35	3,1	70,5	8,02	15,5	80,1	9,10	22,8	88,2	10,03	34,5
K8 (KT)	39,9	4,53	3,5	58,2	6,62	14,3	69,4	7,89	19,8	85,3	9,69	31,4
K9 (MK)	73,7	8,37	7,4	86,5	9,84	26,8	107,4	12,21	35,3	112,6	12,80	53,3
K10 (RD)	62,2	7,08	4,7	83,8	9,52	20,5	92,3	10,50	25,0	100,7	11,45	41,8

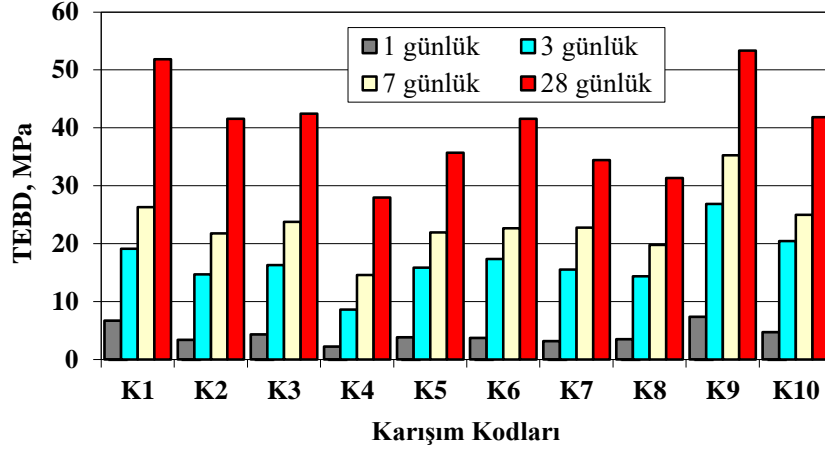
Şekil 3, dolgu malzemelerinin farklı kür süreleri için tek aksel basıncı dayanımı değerlerindeki değişimi göstermektedir. Farklı dolgu tipleri ve kür sürelerine göre dolgu-saplama arayüzeyi kesme direncindeki değişim Şekil 4’te verilmektedir.

Silis dumanı kullanılarak hazırlanan K1 karışımı 28 günlük kür süresi sonunda 51,86 MPa TEBD değeri verirken, metakaolin kullanılarak hazırlanan K9 karışımı 53,32 MPa TEBD değeri vermektedir. 28 günlük kür süresinin sonunda, bu iki katkı tipinden sonra en yüksek mekanik özellikleri uçucu küllü dolgu (K3) göstermiştir. Bu katkı tipi 42,46 MPa değerine sahiptir. 41,82 MPa TEBD değerine sahip referans dolgusu (K10) ile kıyaslandığında metakaolin, silis dumanı ve uçucu kül kullanımının TEBD ve τ_s değerlerini artırdığı görülmüştür.

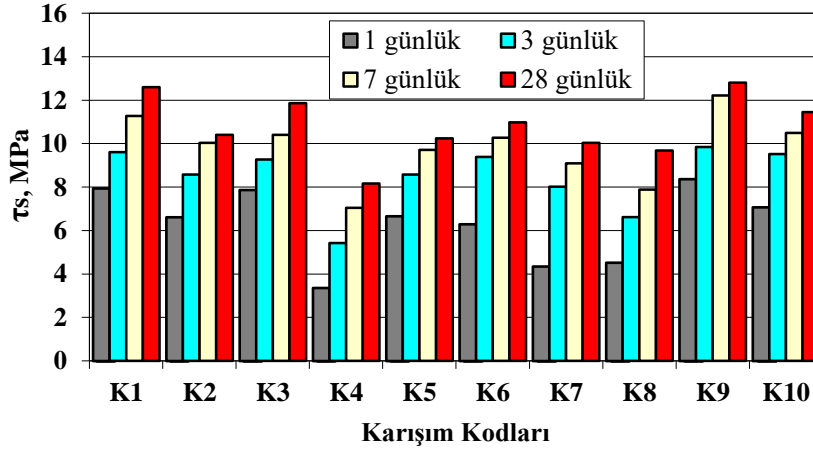
Şekil 3 ve 4’ten de görülebileceği gibi sözü edilen bu üç katkı, tüm kür sürelerinde oldukça yüksek dayanım göstermiştir. Eğer dolguların erken dayanımı önemli ise bu durum kaya saplama uygulamaları için faydalı olacaktır. Tüm deney sonuçları en yüksek puzolanik davranışın metakaolin katkı tipine ait olduğunu göstermiştir. Bu üç katkı tipi arasından en dikkat çeken durum uçucu küle aittir. Uçucu kül (UK) ilavesi kısa dönemde basınç dayanımını ve saplama çekme kapasitesini artırmamıştır ancak uzun dönemdeki gelişme dikkat çekicidir. Bu dolgunun tüm dayanım tiplerinde, 7 günlük kür süresine kadar oldukça yavaş bir dayanım artışı

A. TEYMEN

görülmüştür. Ancak 28 günlük kür süresinde tüm dayanım tiplerinde artış hızlanmış ve referans dolgunun dayanım değerlerini aşmıştır.



Şekil 3. TEBD'nin kür süresi ve dolgu tipine göre değişimi



Şekil 4. Dolgu-saplama arayüzeyi kesme direncinin kür süresi ve dolgu tipine göre değişimi

Bu bulgulara göre uçucu kül, özellikle erken dayanımın talep edilmediği durumlarda yüksek dayanımlı dolgu üretiminde çimento katkı maddesi olarak kullanılabilir. Yukarıda bahsi geçen katkı tipleri belli koşullarda çimento yerine ikame edilebilir. Böylece düşük maliyetli ve yüksek dayanımlı dolgu üretimi başarılabilecektir. Buna ilave olarak, bu tür proses atıklarının depolanma problemleri ortadan kalkacaktır. Perlit kullanılan K6 karışımı ve yüksek fırın cürufu ile hazırlanan K2 karışımları özellikle 28 günlük kür süresine kadar referans dolgusu ile benzer dayanım özellikleri göstermektedir. Referans dolgusu (K10) 41,82 MPa TEBD değerine sahipken, K6 karışımı 41,57 MPa TEBD, K2 karışımı 41,54 MPa TEBD değerine sahiptir. K2 ve K6 karışımları referans dolgusu ile benzer dayanım özellikler göstermesine rağmen bu karışımların dayanımları geri kalan kür sürelerinde yavaşlamaktadır. Bahsi geçen katkı tiplerinin, farklı oranlarda çimento yerine kullanılması durumunda dolgu dayanımını yükseltebileceği öngörülmektedir.

Saplama çekme testleri ile ilgili kayda değer bulgular elde edilmiştir. 7 günlük kür süresi sonunda K2 karışımı 88,3 kN P_s, 10,04 MPa τ_s, K6 karışımı 90,3 kN P_s, 10,27 MPa τ_s değerine sahiptir. Buna paralel olarak referans dolgusunun nihai saplama çekme kuvveti 92,3 kN ve dolgu-saplama arayüzeyi kesme direnci 10,5 MPa'dır. Bu durumda YFC ve PRL katkıların erken dayanım istenen bazı mühendislik ve tünel çalışmalarında kullanılabilirliği söylenebilir. Bu çalışmanın en çarpıcı bulgusu kolemanit katkısının dolgu dayanımını oldukça düşürmesidir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre kolemanitin çimento yerine ikame edilmesi önerilmemektedir. Şekil 3 ve 4'ten de görülebileceği gibi, KT, BT ve SMT katkıları dolgu dayanımına olumsuz etkilere sahiptir. Bu katkıları mühendislik uygulamaları dışında sadece çimento maliyetini azaltmak amacıyla kullanılabilir.

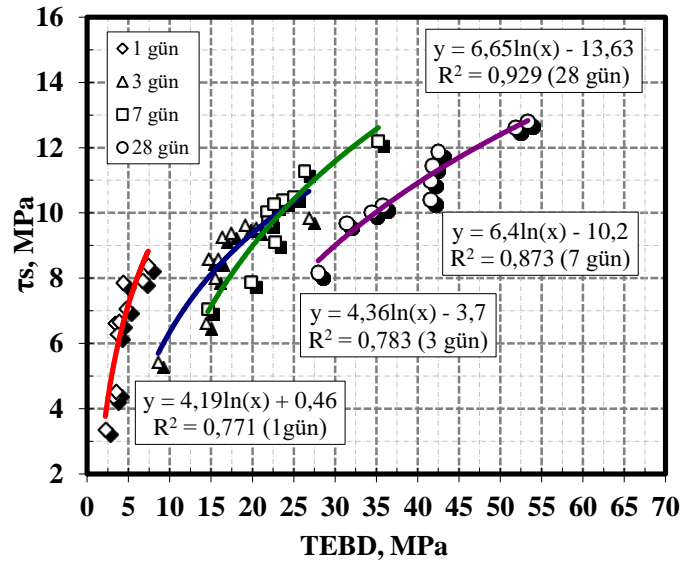
DOLGU-SAPLAMA ARAYÜZEYİ KESME DİRENCİNİN DOLGUNUN BASINÇ DAYANIMI İLE TAHMİNİ

3.1. Regresyon Analizi

Regresyon analizleri dolguların dayanımları ile saplama çekme test sonuçlarının tüm kür sürelerine göre değişimini belirlemek için yapılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri istatistiksel olarak anlamlı korelasyonlar gösteren bir veri seti için bir doğru ya da eğrinin belirlendiği oldukça yaygın kullanım alanı bulan metotlardır. En uygun regresyon modeline göre, bağımlı değişkenlerin değerleri herhangi bir bağımsız değişken değeri kullanılarak tahmin edilebilir. Bu çalışmada dolgu dayanım verilerinden, saplamanın dayanım özelliklerini tahmin edebilen istatistiksel bağıntılar elde etmek amacıyla doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri vasıtasıyla regresyon eşitlikleri belirlenmiştir.

Dolgu malzemesinin TEBD, kaya saplama davranışında önemli bir rol oynar. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre TEBD artışı ile dolgu-saplama arayüzeyi kesme direncinde de bir artış gözlenmiştir. TEBD ve saplama çekme testlerinin her ikisi de eksenel yükleme koşullarında gerçekleştirilmektedir. Eğer bu teknik gerçeklik açısından bakarsak, saplama yük taşıma kapasitelerini dolgunun tek eksenli basınç dayanımından tahmin etmek tasarım mühendisleri için faydalı bir yaklaşımdır. Şekil 5'te tüm kür süreleri için dolguların TEBD ile dolgu-saplama arayüzeyi kesme direnci arasındaki logaritmik (ters üstel) ilişkiler görülmektedir. Bu ilişki 28 günlük kür süresi için aşağıdaki gibi formüle edilebilir;

$$\tau_s = 6,65 \ln(\text{TEBD}) - 13,63 \quad (1)$$



Şekil 5. Tüm kür süreleri için τ_s ve TEBD arasındaki ilişki.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, mineral katkıları içeren farklı dolgular kullanılarak bazalt bloklar içerisine yerleştirilen tam dolgulu kaya saplama malzemesinin dolgu-saplama arayüzeyi kesme direnci ve yük taşıma kapasiteleri deneysel olarak araştırılmıştır ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Kaya saplama için dolgu malzemesi olarak kullanılan bütün dolgu karışımları aynı su/bağlayıcı oranında ve mineral katkıları bağlayıcı ağırlığının ağırlıkça %15'i olacak şekilde hazırlanmıştır. Dolgu örnekleri farklı kür sürelerinde test edilmiş ve referans dolgusu ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma bulgularına dayanılarak aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkarılmıştır;

- Hem basınç dayanımı hem de tam dolgulu saplama malzemesinin yük taşıma kapasiteleri bazı mineral katkı bileşimleri ile artmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki; mineral katkıları ile hazırlanan yüksek dayanımlı dolgular, geleneksel dolgudan daha çabuk dayanım gösterme eğilimindedir. MK ve SD mevcudiyeti dolgunun erken dayanımını artırmaktadır. Dayanımdaki bu artış ne de SMT, BT ile ne de KT, KLM gibi diğer katkıları ile sağlanamamıştır.
- Dolgu karışımlarında ikame materyali olarak metakaolin (K9), silis dumanı (K1) ve uçucu kül (K2) kullanımı, sırasıyla saplama çekme kapasitelerini %12, 10 ve 5 oranlarında artırmıştır.

A. TEYMEN

- MK ve SD gibi mineral katkıları, özellikle erken dayanımın talep edildiği yer altı yapılarında daha yüksek dayanımlı dolgu elde etmek için tercihen kullanılabilir. SD ve MK dolguların kısa ve uzun dönem mekanik özelliklerinin her ikisine de katkıda bulunmaktayken, UK faydalı katkısını nispeten uzun dönemlerde göstermektedir.
- Kaya saplama dolgu-saplama arayüzeyi kesme direncini tahmin etmek için basit regresyon analizlerinden türetilerek geliştirilen kestirimci modeller, pratik durumlar için kullanılabilir.
- Referans dolgusu 28 günlük kür süresi için 41,82 MPa TEBD değerine sahipken, K6 karışımı 41,57 MPa TEBD, K2 karışımı 41,54 MPa TEBD değerine sahiptir. K2 ve K6 karışımları referans dolgusu ile benzer dayanım özellikler göstermesine rağmen bu karışımların dayanımları geri kalan kür sürelerinde yavaşlamaktadır. Bu bulgulardan da anlaşıldığı gibi, yüksek fırın cürufu (K2) ve perlit (K6) kritik dayanım değerleri göstermiştir. Özellikle yukarıda bahsi geçen katkı tipleri, dolgu dayanımına etkilerinin belirlenebilmesi için %15'den farklı oranlarda test edilebilir.
- Tam dolgulu kaya saplama uygulamalarında, saplamanın tahkimat kabiliyetini oldukça etkileyen yerleştirme zamanı problemi, dolgu karışımlarında süperakışkanlaştırıcı kullanılarak çözülebilir.
- Ana dolgu malzemeleri mineral katkıları ile kombinasyonlar halinde yüksek dayanımlı dolgu yapımında değerlendirilebilir ve bu tür dolgular tünelleme uygulamalarında etkili bir biçimde kullanılabilir.
- Çalışmada kullanılan mineral katkıların bir bölümü (MK, SD, UK vb.) puzolan özelliklerinden dolayı normal sıcaklıklarda ve sulu ortamda bağlayıcılık özelliği kazanarak dayanımı artırmaktadır. Ayrıca çimento içerisindeki zararlı maddelerle tepkimeye girerek bunların çimento içerisindeki oranlarını düşürmektedir.
- Bu çalışmanın bulgularından yola çıkılarak katkıların dayanım etkilerini belirlemek için, daha ince boyutlu ve daha farklı katkı tipleri ile başka araştırmalar yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ALDORF, J., EXNER, K., "Mine Openings: Stability and Support", Elsevier, Oxford, Amsterdam, Tokyo, 1986.
- [2] BADOGIANNIS, E., KAKALI, G., DIMOPOULOU, G., CHANIOTAKIS, E., TSIVILIS, S., "Metakaolin as a Main Cement Constituent: Exploitation of Poor Greek Kaolins", Cement and Concrete Composites, 27, 197-203, 2005.
- [3] CYBULSKI, J. A., MAZZONI, R. A., "Roof Support Systems Continue to Evolve", Proceedings of the 12th Annual Institute on Coal Mining Healthy, Safety and Research. 147-158. Blackburg, Virginia, 1989.
- [4] FRANKLIN, J. A., DUSSEAU, M. B., "Rock Engineering", McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1989.
- [5] GONEN, T., YAZICIOĞLU, S., "The Influence of Mineral Admixtures on the Short and Long-Term Performance of Concrete", Journal of Building and Environment, 42, 3080-3085, 2007.
- [6] HOEK, E., WOOD, D.F., "Rock Support", Min. Mag. 282-287, 1989.
- [7] HYETT, A. J., BAWDEN, W. F., REICHERT, R. D., "The Effect of Rock Mass Confinement on the Bond Strength of Fully Grouted Cable Bolts", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomechanics Abstracts, 29, 503-524, 1992.
- [8] ITO, F., NAKAHARA, F., KAWANO, R., KANG, S., OBARA, Y., "Visualisation of Failure in a Pull-Out Cable Bolts Using X-ray CT", Construction and Building Materials, 15, 263-270, 2001.
- [9] KAISER, P. K., YAZICI, S., NOSE, J., "Effect of Stress Change on the Bond Strength of Fully Grouted Cables", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomechanics Abstracts, 29, 293-305, 1992.
- [10] KILIÇ, A., "Rock Mass Classification and Reinforcement Application of Tarsus-Adana-Gaziantep (TAG) Motorway Tunnels in Bahçe Region", Ph.D. Thesis, Cukurova University, Department of Mining Engineering, 1997.
- [11] KILIÇ, A., YAŞAR, E., ATIŞ, C. D., "Effect of Grout Properties on the Pull-Out Load Capacity of Fully Grouted Rock Bolt", Tunneling and Underground Space Technology, 17, 355-362, 2002.
- [12] LABIOUSE, V., "Ground Response Curves for Rock Excavations Supported by UngROUTED Tensioned Rockbolts", Rock Mechanics and Rock Engineering, 29, 19-38, 1996.
- [13] LAM, L., WONG, Y. L., POON, C. S., "Effects of Fly Ash and Silica Fume on Compressive and Fracture Behavior of Concrete", Journal of Cement and Concrete Research, 28, 271-283, 1998.
- [14] MAZLOOM, M., RAMEZANIANPOUR, A. A., BROOKS, J. J., "Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete", Journal of Cement and Concrete Composites, 26, 347-357, 2003.

DOLGU-SAPLAMA ARAYÜZEYİ KESME DİRENCİNİN DOLGUNUN BASINÇ DAYANIMI İLE TAHMİNİ

- [15] MOOSAVI, M., BAWDEN, W.F., “Shear Strength of Portland Cement Grout”, *Cement and Concrete Composites*, 25, 729-735, 2003.
- [16] NASSIF, H. H., NAJM, H., SUKSAWANG, N., “Effect of Pozzolanic Materials and Curing Methods on the Elastic Modulus of HPC”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 27, 661-670, 2003.
- [17] REICHERT, R.D., BAWDEN, W.F., HYETT, A.J., “Evaluation of Design Bolt Bond Strength for Fully Grouted Bolt”, *Proceedings of the 93 Annual Meeting of rd CIM, Vancouver*, 1991.
- [18] SHANNAG, M. J., “High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 22, 399-406, 2000.
- [19] STILLBORG, B., “Experimental Investigation of Steel Cables for Rock Reinforcement in Hard Rock”, *Doctoral Thesis*, 33 D, Lulea University, Sweden, 1984.
- [20] LARDNER, W. E., LITTLEJOHN, G. S., “Suggested Method for Rock Anchorage Testing”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22, 71-83, 1985.
- [21] TOUTANJI, H. A., EL-KORCHI, T., “Tensile and Compressive Strength of Silica-Fume Cement Pastes and Mortars”, *Journal of Cement, Concrete and Aggregates*, 18, 78-84, 1996.
- [22] TÜRKMEN, İ., GAVGALI, M., GÜL, R., “Influence of Mineral Admixtures on the Mechanical Properties and Corrosion of Steel Embedded in High Strength Concrete”, *Materials Letters*, 57, 2037-2043, 2003.
- [23] VIPULANANDAN, C., SUNDER, S., “Effects of Meta-Kaolin Clay on the Working and Strength Properties of Cement Grouts”, *In Grouting and Deep Mixing*, 1739-1747, ASCE, 2012.
- [24] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [25] TS EN 934-2+A1, Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet için-Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları-Tarifler, Gereklere, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [26] ASTM, C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, 2001.
- [27] TS EN 12390-3, Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, Ankara: Turkish Standard Institution, 2010.