



Kaya Mekaniği Bülteni
Bulletin of Rock Mechanics
Ağustos / August 1998

14





Kaya Mekaniği Bülteni

Bulletin of Rock Mechanics

Ağustos / August 1998

14

TÜRK ULUSAL KAYA MEKANİĞİ DERNEĞİ
Turkish National Society for Rock Mechanics

İçindekiler
Contents

Sayfa
Page

Yönetim Kurulu / Executive Committee

Prof.Dr. Seyfi Kulaksız
Prof.Dr. Abdurrahim Özgenoğlu
Doç.Dr. Aydın Bilgin
Hasan Şişman
Sedat Esen

Yayın Kurulu / Editorial Board

Prof.Dr. Hasan Gerçek
Doç.Dr. Reşat Ulusay
Doç.Dr. Bahtiyar Ünver
Yrd.Doç.Dr. Mehmet Ali Hindistan
Mehmet Altıntaş

Yazışma Adresleri / Addresses

Prof.Dr. Abdurrahim Özgenoğlu
Genel Sekreter / Secretary General
Maden Mühendisliği Bölümü, ODTÜ
06531 ANKARA
Tel : (312) 210 58 16
Fax : (312) 210 12 65
E-mail : aozgen@rorqual.cc.metu.edu.tr

Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği
P.K. 774
06423 Kızılay - ANKARA

Baskı : Kozan Ofset, Ankara, 1998

Beton/Zar/Kaya Tuzu Ara Yüzeyinin Gaz Geçirgenliğinin Ölçümü: Boyuna Akış Deneyleri 1
Measurements of gas permeability along a grout/membrane/halite interface: longitudinal-flow tests
Hasan ÜÇPIRTİ, Ömer AYDAN, J.J.K. DAEMEN

Küresel Bir Yeraltı Açıklığı İçin Arazi Reaksiyon Eğrisi 15
Ground response curve for a spherical underground opening
Gürel ŞENYUR

Kaya Şevlerindeki Kama Tipi Kaymaların Dinamik Duraylılığının Model Deneyler İle İncelenmesi 29
Assessment of dynamic stability of rock wedge failure using model tests
Halil KUMSAR, Ömer AYDAN

Plastik Davranış Gösteren Kayaçlarda Püskürtme Beton Tahkimatın Uygunluğu 41
The suitability of shotcrete support system for plastic rock behaviour
H.Tarık ÖZKAHRAMAN

YAZIM VE YAYINA KABUL İLKELERİ

Kaya Mekaniği Bülteninde yayımlanması istemiyle gönderilecek olan yazılar; kaya mekaniğine yeni bir katkısı olan araştırmaları, bilimsel ve teknik yöntemlerle yapılmış özgün sonuçları olan çalışmaları, kaya mekaniğinin herhangi bir konusunda daha önce yapılmış çalışmaları eleştirel bir yaklaşımla derleyip o konuda yeni bir görüş ortaya koyan eleştiri-derleme yazılarını ve tanıtma amaçlı çalışmaları veya ülkemizde kaya mekaniği camiasına yararlı olabilecek yabancı yayınların çevirilerini kapsayabilir.

Bültende yayımlanabilmesi için yazıların daha önce Türkçe olarak yayımlanmamış olması gerekir. Daha önce yabancı dilde yayımlanmış olan yazılar deniz bir araştırmacı ve uyuşlamacı kitlesini ilgilendirdiği takdirde Türkçe olarak Bülten'de yayımlanabilir.

Yazıların hazırlanması ve düzeni :

- a) Metin A4 ebadında kağıt üzerine 12 punto, 1.5 satır aralıklı ve bilgisayarla yazılmış olmalı, ayrıca sayfanın kenarlarında 3'er cm.lik boşluk bırakılmalıdır. Baskıda ofset tekniği kullanılacağından bilgisayar çıktılarının silik olmaması gerekmektedir.
- b) Başlık kısa, konuyu en iyi şekilde belirtebilir ve 10 sözcüğü geçmeyecek şekilde seçilmeli ve Türkçe başlığın (tamamı büyük harfle ve koyu yazılmış) yanısıra, İngilizcesi (küçük harflerle ve koyu) de yazılmalıdır.
- c) Yazının başlangıcında 200 kelimeli geçmeyecek şekilde hazırlanmış Türkçe ve İngilizce özet (abstract) bulunmalıdır. Özet içinde; yararlanılan kaynaklara, şekil, çizelge ve eşitlik numaralarına değinilmemelidir. Ayrıca, özet ve abstract bölümlerinin altına, bir satır ara verilerek *anahtar kelimeler* ve *key words* (en az 2 en çok 6) verilmelidir.
- d) Yazının genel olarak aşağıda belirtilen düzene göre sunulmasına özen gösterilmelidir:
 1. Başlık (Türkçe ve İngilizce)
 2. Yazar ad(lar)ı ve adres(ler)i
 3. Özet (anahtar kelimeler eklenerek)
 4. Abstract (key words eklenerek)
 5. Giriş (2. sayfanın başından başlayacak)
 6. Metin bölümü (yöntemler, teknikler, çalışılan malzeme, saha tanımlamaları, vb.)
 7. Sonuçlar
 8. Tartışmalar
 9. Katkı belirtme (gerekliyse)
 10. Kaynaklar
 11. Ek açıklamalar
- e) Metin içinde kaynaklara atıf yapılırken aşağıdaki örnekler dikkate alınmalıdır.
(Hoek(1990) veya (Aydan ve Paşamehmetoğlu, 1994; Hoek vd., 1994; gibi).
- f) Yararlanılan kaynaklar, yazar soyadları esas alınarak alfabetik sırayla verilmeli ve metin içinde değinilen tüm kaynaklar, kaynaklar dizininde eksiksiz olarak belirtilmelidir. Kaynakların yazılmasında aşağıdaki örneklerde belirtilen düzen dikkate alınmalıdır.
-Sürekli yayınlar ve bildiriler için:

Hoek, E., 1990. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from Hoek-Brown failure criterion. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 27, No.3, 227-229.

-Kitaplar için:

Goodman, R.E., 1989. Introduction to Rock Mechanics. John Wiley and Sons, New York, 562 pp.

g. Metin içerisinde verilen eşitliklerin karşısına sırayla ve parantez içinde numara verilmelidir.

Çizimler ve Çizelgeler:

- a. Çizimler teknik çizim normlarına uygun olarak çini mürekkep ile aydınlar kağıda çizilmeli, harf, rakam ve simgeler kolaylıkla okunabilmelidir. Bilgisayar çıktısı olarak alınan çizimlerin de yeterli koyulukta olması gereklidir. Çizimler metin içindeki yerlerine aydınlar olarak veya temiz bir fotokopisi çekilerek yerine yapıştırılmalıdır.
- b. Fotoğraflar aydınlık olmalı ve parlak kağıda siyah-beyaz olarak basılmalıdır ve fotoğraflar da şekil olarak değerlendirilmelidir.
- c. Yazarlar, Bültenin boyutlarını dikkate alarak, çizelgeleri sınırlamalı ve gerekiyorsa küçük karakterlerle hazırlamalıdır. Çizelgelerin altında gerekli durumlarda açıklayıcı dipnotlarına yer verilmelidir. Çizelge başlıkları kısa ve öz olarak seçilerek, çizelgelerin üzerine ilk harfleri büyük olmak kaydıyla yazılmalıdır.
- d. Bülten ofset tekniği ile basılacağı için şekil, fotoğraf ve çizimler metin içinde anıldıkları ilk paragraftan sonraki uygun bir başlığa, gerekiyorsa küçültülerek, monte edilip gönderilmeli ve bunlar metindeki sıralarına göre numaralandırılmalıdır. Şekil altı açıklamaları küçük harflerle yazılmalıdır.

Yazıların gönderilmesi:

Yazılar, biri orijinal diğer ikisi fotokopi olmak üzere 3 nüsha halinde gönderilmelidir. Yazıyla birlikte yazının kaydedildiği disket (tercihan 3.5", double density (DD) veya high density (HD)) de kullanılan yazılım programı ve versiyonu belirtilerek gönderilmelidir.

Yazıların yayına kabul edilmesi ve ayrı basımlar:

Yayın Kuruluna ulaşan yazılar Yayın Kurulu tarafından en kısa sürede değerlendirilerek incelemecilerden gelecek görüşler doğrultusunda yazının doğrudan veya bazı düzeltmeler yapılarak basılmasına veya basılmamasına Yayın Kurulunca karar verilir ve sonuç bir yazı ile yazara bildirilir.

Gönderilen yazılar Bülten'de yayımlansın yada yayımlanmasın geri iade edilmez. Bülte de yayımlanması kabul edilen yazıların ayrı basımından on adet yazarına (birden fazla yazarlı yazılarda başvuru yapan yazara) gönderilir.

Okurlarımıza,

Uzun bir aradan sonra Bülten'imizin ondördüncü sayısını çıkarmış olmanın mutluluğu ile sizlerle bir kez daha buluşuyoruz.

Bülten'imizde yer alan yazılardan ilki sayın Hasan ÜÇPİRTİ, Ömer AYDAN ve J.J.K. DAEMEN tarafından kaleme alınan "**Beton/zar/kaya tuzu ara yüzeyinin gaz geçirgenliğinin ölçümü: boyuna akış deneyleri**" başlığını taşımaktadır. Bu yazıda, zararlı nükleer atıkların depolanmasına yönelik olarak beton, zar ve kaya tuzundan oluşan numuneler üzerinde geçirgenlik deneyleri yapılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Sayın Gürel ŞENYUR'a ait "**Küresel bir yeraltı açıklığı için arazi reaksiyon eğrisi**" başlıklı ikinci yazıda, küresel biçimli bir boşluğu çevreleyen kaya kütlesinin arazi reaksiyon eğrisi ve yenilme bölgesine ilişkin hesaplama yöntemi verilmektedir. Yazıda verilen çözümleme bir örnek ile de uygulanmıştır.

Sayın Halil KUMSAR ve Ömer AYDAN tarafından kaleme alınan "**Kaya şevlerindeki kama tipi kaymaların dinamik duraylılığının model deneyler ile incelenmesi**" başlıklı yazıda, kama tipi kaymalar laboratuvarında hazırlanan model bloklar üzerinde çalışılmıştır. Deneylerden elde edilen değerlerin denge sınırı yöntemi kullanılarak hesaplanan değerler ile bir karşılaştırılması da verilmiştir.

Bu sayımızda yer alan son yazı sayın H.Tarık ÖZKAHRAMAN tarafından hazırlanan "**Plastik davranış gösteren kayalarda püskürtme beton tahkimatın uygunluğu**" başlığını taşımaktadır. Bu yazıda, varsayımlara göre tanımlanan dairesel bir tünel kesiti için plastik bölgenin özellikleri hesaplanmış ve püskürtme betonun getireceği avantajlar tartışılmıştır.

Gelecek sayılarda buluşmak dileğiyle tüm üyelerimize ve okurlarımıza saygılarımızı sunarız.

Yayın Kurulu

BETON/ZAR/KAYA TUZU ARA YÜZEYİNİN GAZ GEÇİRGENLİĞİNİN ÖLÇÜMÜ: BOYUNA AKIŞ DENEYLERİ

Measurements of gas permeability along a grout/membrane/halite
interface: longitudinal-flow tests

Hasan Üçpırtı

Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esentepe-Kampüsü, Sakarya

Ömer Aydan

Department of Marine Civil Engineering, Tokai University, Orido 3-20-1
Shimizu, 424 Japan

J.J.K. Daemen

Department of Mining Engineering, University of Nevada, Reno
Reno, Nevada 89557-0139

Özet

Son yıllardaki hızlı endüstrileşmeden dolayı askeri ve sivil nitelikteki zararlı atıklarda önemli oranda artış gözlenmektedir. Kaya tuzu geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle zararlı nükleer atıkların depolanabileceği bir ortam olarak düşünülmektedir. Bu çalışmanın ilk kısmında, beton, düşük yoğunluktaki polietilen zar ve kaya tuzundan oluşan numunelerin ara yüzey geçirgenliğinin saptanması için yapılan bir dizi laboratuvar deneyi tanıtılmıştır. İkinci kısımda deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile birlikte elde edilen boyuna-ara yüzey gaz geçirgenlik değerleri şekillerle gösterilip sonuçlar tartışılmıştır.

Abstract

Due to fast industrialization during the recent years, there is a considerable increment in military or civilian hazardous waste productions. Rock salt is considered to be a suitable medium for waste disposals as its permeability is very low. In the first part of this study, a series of laboratory gas-flow tests performed on interfaces in samples consisting of concrete, very low-density polyethylene membrane, and halite are described. In the second part, the data reduction of flow tests and analyses and some of the permeability test results for longitudinal flow tests on interface are illustrated and discussed.

1. Giriş

Amerika Birleşik Devletleri'nde (U.S.A.), Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından zararlı atık maddelerin güvenilir bir şekilde belirli bir süre depolanabileceği bir yerin bulunmasına ilişkin bir program(Waste Isolation Pilot Plant, WIPP) yürütülmektedir. Bu amaçla Amerika Birleşik Devletlerinin New Mexico eyaletinin güney-doğusunda pilot bir bölge seçilmiştir. Seçilen bu bölge yüzeyden 655 m derinlikte olup kaya tuzu tabakası içindedir.

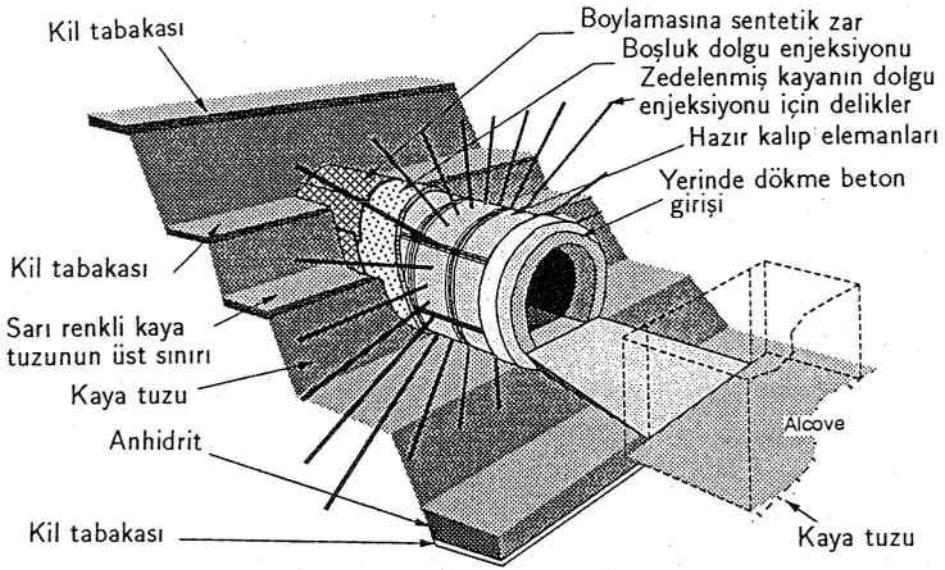
Deneyisel çalışmaların büyük bir kısmı planlandığı şekilde arazide (in-situ) yapılmaktadır. Alcove Deneyi bu planlı deneylerden birisidir (Molecke, 1990). Bu deneyin amacı, 12 yıllık bir süre içinde kaya tuzu yatakları içine depolanan zararlı atıklardan çıkabilecek ve canlılar için son derece tehlikeli olan gazın Alcove Gaz Tutucusu (Alcove Gas Barrier, AGB) içinde tutulmasına ilişkindir. Konuyla ilgili olarak Lin ve Van Sambeek (1992) tarafından yapılan benzer bazı çalışmalarda bulunmaktadır.

Zararlı atık maddelerin saklanabileceği yerin bölgesel stratigrafisi ve burada yapılması planlanan Alcove Gaz Tutucusunun üç boyutlu görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Böyle bir sistemin yapımı aşağıda verilen aşamaları içermektedir (Molecke, 1990):

- 1-) giriş kuyusunun ve Alcove Gaz Tutucusunun kazılması,
- 2-) kaya tuzu yüzeyinin poli-etilen bir zar ile kaplanması,
- 3-) çelik elemanlı beton kaplamanın inşaatı,
- 4-) zar ile çelik elemanlı beton kaplamanın arasına basınçlı çimentonun enjeksiyonu,
- 5-) benzer uygulamaların Alcove Gaz Tutucusunun iç kısmında da yapılarak tutuculuk özelliğinin kazandırılması.

Eğer Alcove Gaz Tutucusu müade edilebilir sızma miktarını (0.9 l/dak) sağlayamazsa, zedelenmiş kaya bölgesine basınçlı çimento enjeksiyonu yapılacaktır.

Beton/zar/kaya tuzu ara yüzeyi planlanan Alcove Gaz Tutucuda en kritik bölgeyi oluşturmaktadır. Çünkü Alcove'den sızacak gazın bu ara yüzeyi izleyerek kaçması olasıdır. Beton/kaya tuzu ara yüzeyinde kullanılan zarın Alcove Gaz Tutucusundan sızan gazın kaçmasını azaltıcı rol oynayacağı düşünülmektedir. Basınçlı çimento ile kaya tuzunun akma (creep) özelliğinden dolayı Alcove Gaz Tutucusu etrafında gazla sıkıştırılmış bir ara yüzeyin oluşmasına neden olacağı düşünülmektedir.



Şekil 1. Alcove Gaz Tutucusunun üç boyuttaki görünümü (Lin ve Van Sambeek, 1992)

Yeraltı yapılarının inşasında sıkça kullanılan sentetik zarların düşük geçirgenliğe sahip olmaları yeraltısuyunun açıklığa olan akışını azaltmaktadır. Buradaki uygulamada ise sentetik zarın gaz sızmasını önleyici bir unsur olarak kullanımı oldukça önem taşımaktadır. Dolayısıyla bu uygulama yaygın uygulamalardan farklı bir özelliğe sahiptir.

Bu çalışmada, Alcove Gaz Tutucusunda olası farklı yükleme koşulları altında beton/zar/kaya tuzu ara yüzeyinin gaz geçirgenliğini saptamak amacıyla bir dizi laboratuvar deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2 Ön bilgiler

Sentetik zar/kaya ara yüzeyindeki gaz geçirgenliğinin laboratuvarında ölçümü pek sıkça rastlanan bir çalışma olmamasına karşın, gerek tek gerekse birden fazla gerçek ve/veya yapay kaya süreksizliklerindeki sıvı akışı laboratuvar deneyleri ile yaygın olarak saptanmaktadır. Sadece birkaç deneysel çalışmada sıvının yerine gaz kullanılarak benzer deneyler gerçekleştirilmiştir (Schrauf ve Evans 1986; Elsworth ve Goodman 1986). Süreksizlik yüzeyine dik olarak etkiyen gerilme (normal gerilme) süreksizlik açıklığını azaltmaktadır. Eğer akışın yeraltısuyu mühendisliğinde *Üçüncü kuvvet yasası* (cubic law) olarak bilinen tanıma uyduğu düşünülürse, çatlak açıklığındaki küçük bir azalma sıvı akışında önemli değişikliklere neden olmaktadır. Yeraltısuyu mühendisliğinde *Üçüncü kuvvet yasası* aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Polubarinova-Kochina 1962):

$$q = -\left(\frac{h^3}{12\eta}\right)\left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (1)$$

- q : etkin zamandaki toplam akış miktarı ($ML^{-2}T^{-1}$)
 h : süreksizlik açıklığı (L)
 η : akışkanın viskozitesi ($ML^{-1}T^{-1}$)
 dp/dx : basınç eğimi (pressure gradient) ($ML^{-2}T^{-2}$).

Bu çalışmada yapılan laboratuvar deneylerinin en önemli amaçlarından biri, farklı normal gerilmeler altında ara yüzeyin geçirgenliğini ölçerek değerlendirmek ve böylece ara yüzeyde kullanılan zarın deney sonuçları üzerindeki etkilerini araştırmak olmuştur.

Stormont (1990(a), (b)) tarafından yapılan laboratuvar ve yerinde arazi deney sonuçları, WIPP bölgesindeki kaya tuzlarındaki gaz geçirgenliğinin 10^{-12} ile $10^{-22}m^2$ arasında değiştiğini göstermiştir. Geçirgenlik en yüksek değerlerini açıklık yüzeyine yakın kısımda almakta ve açıklıktan uzaklaştıkça düzenli bir şekilde azalmaktadır. Belirli bir uzaklıktan sonra ana kayanın geçirgenlik değerine yaklaştığı görülmektedir. Kaya tuzu üzerinde yapılan tüm deneyler basıncın artması ile zedelenmiş kayanın zedelenme derecesinin azalmasına ve kesme gerilmesinin artması ise zedelenmenin artmasına neden olduğunu göstermiştir. Alcove Gaz Tutucusunun gerek yapımı sırasında kullanılan kazı metodu gerekse tutucunun yeryüzünden olan derinliği nedeniyle, tutucunun merkezi çevresinde plastik bir bölgenin oluşması beklenmekte ve bu bölgenin kaya tuzunun tekrar kristalleşmesi ile ortadan kalkacağı düşünülmektedir. WIPP bölgesinde yapılan çalışmalarda yavaş akmanın çatlaklara neden olduğu (creep-induced fracturing) saptanmıştır (Borns ve Stormont, 1989). Bu nedenle, yapımı planlanan Alcove Gaz Tutucusunun rijit olması halinde tuzun yavaş akması büyük bir oranda durdurulacaktır. Alcove Gaz Tutucusunun etrafında oluşan plastik bölge nedeniyle, gerilme farkı azalacak ve kazı çalışmalarının tuzda oluşturduğu çatlakların kapanmasına neden olacaktır.

3 Kullanılan malzemeler ve laboratuvar deneyleri

3.1 Kullanılan malzemeler

Laboratuvar deneyleri sırasında kullanılan malzemeler şunlardır:

- 1-) WIPP bölgesinden alınan kaya tuzu numunesi,
- 2-) düşük yoğunluktaki polietilen (VLDPE, Gundline VL 40mil/mm) zar,
- 3-) belirli özelliklerde hazırlanan beton numuneler,
- 4-) endüstriyel nitelikteki plastik (plastic dip, industrial grade) ve/veya sert epoksi (2216 B/A, structural) yapıştırıcısı.

WIPP bölgesinden laboratuvara getirilen kaya tuzu numunesi 91.4 cm çapında ve 1 m boyundadır. Laboratuvar deneylerinde, bu büyük numuneden karotiyer ile alınan 10.2 cm çapındaki küçük numuneler kullanılmıştır. Beton numuneler, silindirik olarak ve elle karılarak (ASTM C192-90a) hazırlanmıştır. Numuneler oda sıcaklığında 7 veya 28 gün olmak üzere muhafaza silindirleri üzerinde su içinde sertleşmesi sağlanmıştır. Bu numunelerin karışım maddeleri ve oranları Çizelge 1'de verilmiştir.

Beton numunelerin elastik dalga hızı (sonic velocity) ve tek eksenli basınç (uniaxial compressive strength) değerleri saptanmıştır (Çizelge 2). Deneylerde kullanılan ilk 10 beton numunenin tek eksenli basınç dayanım değerleri çok küçük çıkmıştır. Bunun başlıca nedeni, numunelerin hazırlanımı sırasındaki karıştırma zorluğudur. Özellikle su miktarı az olan bir karışımda iyi bir hidrasyonun elde edilmesi son derece zordur. Karşılaşılan bu zorluklar, su/çimento+silika+kum oranını 0.30 dan 0.35 oranına arttırarak ortadan kaldırılmıştır (Çizelge 1). Sonuç olarak, son 6 beton numunenin tek eksenli basınç dayanımı ilk 10 numunenin tek eksenli basınç dayanımından daha büyük çıkmıştır.

Boyuna akış deneyinde kullanılan tuz ve beton numuneler silindirik eksenleri boyunca kesilerek hazırlanmıştır. Daha sonra kaya tuzu ve beton numuneler, dikdörtgen şeklinde kesilmiş olan ve ara yüzeyde kullanılan zar ile biraraya getirilmiştir.

Şekil 2'de verilen deney sistemi kullanılarak boyuna akış deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerle ilgili geniş bilgi bir sonraki bölümde verilecektir. Yapılan tüm deneylerde azot gazı kullanılmıştır. Ara yüzeyde kullanılan zarın özellikleri üretici firma tarafından verildiği şekilde Çizelge 3'de sunulmuştur.

3.2 Boyuna ara yüzey akış deneyleri

Silindirik eksenleri boyunca kesilerek hazırlanan kaya tuzu ve beton numuneler ve bunların ara yüzeyi boyutunda kesilerek hazırlanan zar birleştirilerek boyuna akış deneyi için kullanılan 10.2 cm çapındaki numune hazırlanmıştır. Bu üç farklı malzemeden oluşan numune Şekil 2'de gösterildiği gibi basınç hücresi (Hoek cell) içine yerleştirilmiştir. Tipik bir boyuna-ara yüzey akış deneyi aşağıda verilen basamakları içermektedir:

- a-) numunenin doymun (permenant saturation) hale getirilmesi,
- b-) kaya tuzu numunelerinin belirli bir süre hidrostatik basınç altında tutulması,
- c-) farklı gerilme ve gaz-basınç ortamlarında akış deneylerinin yapılması.

Deney numuneleri, üst hazneden yaklaşık 0.01 MPa'lık ek bir basınç verilerek doymun hale getirilir (Stormont, 1990(b)). İdeal koşullar altında, üst haznedeki basıncın düşmesi anında alt haznedeki basıncın artması söz konusu ise numune doymun hale geldiği düşünülmektedir. Numunelerin doymun hale getirilmesi esnasında, numuneler 0.7 ile 1.7 MPa arasında değişen değerlerde çevre basıncı altında tutulmaktadır. Fakat buna rağmen, deney numunesinin tamamen doymun hale getirildiğini söylemek hayli zordur.

Çizelge 1. Beton numunelerin karışım maddeleri ve bileşen oranları (Üçpırtı vd., 1995)

Karışım Maddeleri	Ağırlık (gr)	Ağırlık (%)
<i>Su:</i>		
1) su/(çimento+silika tozu) = 0.30	230	5.9
2) [su/(çimento+silika tozu) = 0.35]	[279]	[7.1]
<i>Çimento:</i>		
(basaltik tip I-II)	760	19.5 [19.3]
<i>Silika tozu:</i>		
(EMSAC F100)	38	1.0 [1.0]
<i>Çakıl: (düzensiz yüzeyli)</i>		
(doğgun, kuru yüzeyli)	1720	44.2
(3/8 in. şeker (candy))		[43.6]
(3/8 in. * 1/2 tuz ve biber (salt and pepper))		
<i>Kum:</i>		
(doğgun, kuru yüzeyli)	1135	29.2 [28.8]
<i>Geçiktirici Katkı Suyu:</i>		
(PSI 400R)	9.0	0.2

Çizelge 2. Beton numunelerin dalga hızı ve basınç dayanımı (Üçpırtı vd., 1995)

Numune No	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Dalga Hızı	
		V_p (m/san)	V_s (m/san)
C-10	15.6	3365	1588
C-11	12.5	3455	1542
C-12	16.8	3168	1639
C-13	20.2	3213	1660
C-14	16.5	3116	1583
C-15	17.9	3224	1513
C-16	14.4	3180	1564
C-17	16.8	3104	1504
C-18	-	3154	1573
C-19	9.6	-	-
C-20	7.7	-	-
C-21 ⁽¹⁾	35.4	-	-
C-22 ⁽¹⁾	35.0	-	-
C-23 ^(1,2)	17.6	-	-
C-24 ⁽¹⁾	33.6	3470	1705
C-25 ⁽¹⁾	32.8	3461	1746
C-26 ^(1,2)	23.3	3372	1686
C-27 ^(1,2)	25.9	3371	1686
C-28 ^(1,2)	21.3	3384	1653

(1) : Numunelerde 279 gr çeşme suyu kullanılmıştır.

(2) : Numunelerin sertleşme süresi 7 gündür. Diğer numunelerin sertleşme süresi 28 gündür.

Çizelge 3. Beton/kaya tuzu ara yüzeyinde kullanılan zarın malzeme özellikleri
(Gundle VLDPE)

Boyuna akış deneyinde kullanılan numuneler deney öncesi 100 saate yakın bir süre 1.4 ile 6.9 MPa arasında değişen çevre basıncı altında tutulmuştur. Bunun amacı, WIPP bölgesindeki tuzun içinde bulunduğu gerilme koşullarını laboratuvar koşullarında oluşturmaktır (Stormont 1990(b)).

Yapılan ilk laboratuvar deneylerinde, üst hazneden deney başında verilen gaz basıncının çok kısa bir süre içinde alt hazneye ulaştığı gözlenmiştir. Gaz basıncının üst hazneden alt hazneye ulaşma sürecinin çok kısa olması kaya tuzu, beton ve zar yüzeylerinin birbirine temas ettiği bölgelerde akış kanallarının (preferential flowpaths) oluşabileceği kuşkusunu oluşturmıştır. Bu olası olgu Şekil 3'de gösterilmiştir. Bunun başlıca nedeni olarak ara yüzeye dik olarak etkiyen gerilmenin tüm yüzeyde aynı değere sahip olmaması ve numune yüzeylerinin istenilen oranda düzgün olmaması gösterilebilir. Bu durumu ortadan kaldırmak amacıyla deney numunesi basınç hücresinin içine konmadan önce numunenin kaya tuzu/zar/beton ara yüzey kenarlarına tüm numune boyunca plastik ve/veya sert epoksi yapıştırıcısı sürülmüştür. Toplam 23 adet düşey akış deneyi yapılmıştır. Bu deneyler, Stormont (1990(b)) tarafından önerilen deney yöntemi ve düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4 Boyuna ara yüzey akış deneylerinin değerlendirilmesi

Kararsız basınç değişim deney (transient pulse-test) yöntemi bu çalışmada kullanılmış olup deney yöntemi ile ilgili geniş bilgiler Brace ve diğerlerinin (1968) yaptığı çalışmadan elde edilebilir. Bu deney sistemi ile ilgili bazı ek çalışmalar bulunmaktadır (Hsieh vd. 1968; Walls, 1983; Trimmer, 1982). Eğer kaya numunesinin gözeneklerindeki sıvı ve gazın hacimsel birim deformasyon hızı ihmal edilirse numune içindeki basınç eğimi ($\partial p / \partial x \approx -(P_1 - P_2) / L$) sabit kalacaktır. Dolayısıyla numuneyi sınırlandıran haznelerdeki basınç değişimi aşağıdaki gibi elde edilecektir (Brace vd. 1968):

$$P_1 - P_2 = \Delta P e^{-\alpha t} \quad (2)$$

Burada

$$\alpha = \frac{k}{C_f \eta L} \frac{A (V_1 + V_2)}{(V_1 V_2)} \quad (3)$$

k : geçirgenlik (L^2)

α : $\ln((P_1 - P_2) / \Delta P) - t$ ilişkisinin eğimi (T^{-1})

C_f : akışkanın sıkışabilirlik katsayısı ($M^{-1} LT$)

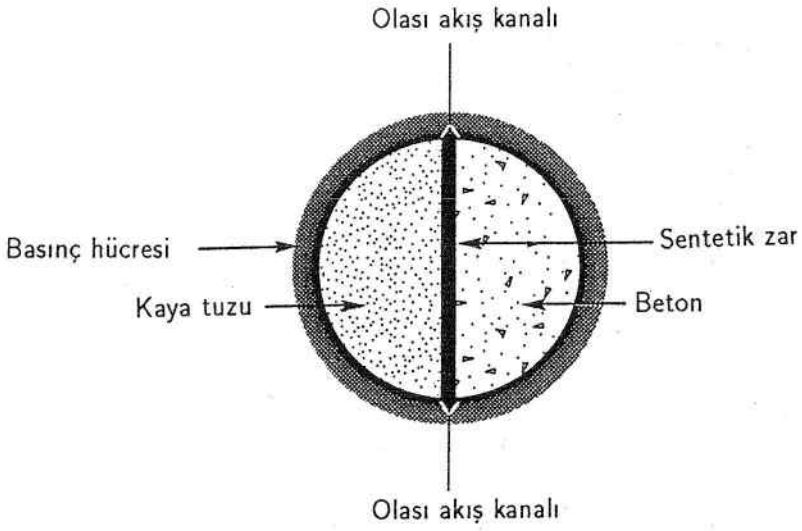
L : numunenin boyu (L)

A : numunenin en kesit alanı (L^2)

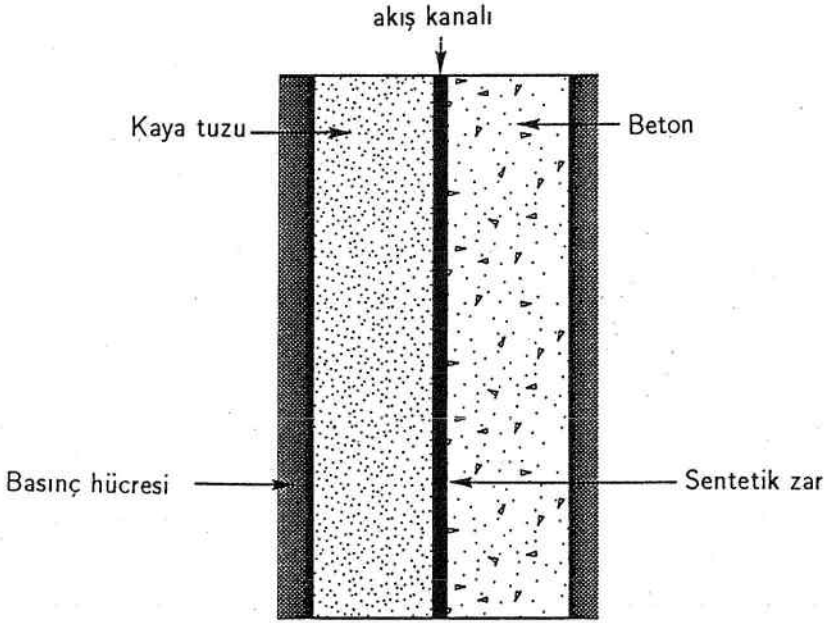
V_1 : üst haznenin hacmi (L^3)

V_2 : alt haznenin hacmi (L^3)

2 nolu denklemin logaritması alınır ve elde edilen şekilden oranlanmış basınç farkının zamana göre eğimi (α) ölçülür ve bu değer 3 nolu denklem kullanılarak geçirgenlik elde edilir:



a) Üst görünüm



b) Yan görünüm

Şekil 3. Boylam akış deneyinde olası akış kanallarının görünümü (Üçpırtı vd. 1995)

$$k = \alpha(C_f \eta) \left(\frac{L}{A} \right) \frac{(V_1 V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad (4)$$

5 Boyuna ara yüzey akış deney sonuçları

Toplam olarak 23 adet boyuna akış deneyi yapılmıştır. Bu deneyler, 3 farklı numune üzerinde ve farklı gaz ve çevre basınç değerleri altında gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanan gaz basınç değerleri 0.7 ile 0.8 MPa arasında değişmektedir.

Hidrostatik gerilme 5.2 ile 17.2 MPa arasında değiştirilerek yapılan boyuna akış deneylerinde ölçülen geçirgenlik değerinin 10^{-14} ile $10^{-20} m^2$ arasında değiştiği saptanmıştır. Geçirgenlik değerleri 4 nolu eşitlikten hesaplanmıştır ve akışın ara yüzey boyunca olduğu varsayılmıştır. Halbuki gerçekte, gaz akışının 5 şekilde oluşabileceğini söylemek mümkündür: (1) kaya tuzunda, (2) betonda, (3) kaya tuzu/zar ara yüzeyinde, (4) beton/zar ara yüzeyinde ve (5) numune ile basınç hücre zarı ara yüzeyinde. Dolayısıyla, gerek kaya tuzunun geçirgenliğini gereksede betonun geçirgenliğini ve ara yüzey açıklığını dikkate alarak daha gerçekçi bir analiz yapmak mümkündür. Ancak, burada böyle bir analiz yapılmamıştır.

Farklı üç numunede yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 4, 5 ve 6'da verilmiştir. Her numune için ölçülen gaz geçirgenlik değeri ile hidrostatik gerilme arasındaki ilişki Şekil 4, 5 ve 6'da gösterilmiştir. Genel olarak hidrostatik gerilme değeri arttıkça gaz geçirgenlik değeri azalmaktadır. Özellikle bu durum Şekil 6'da daha açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca yapılan tüm deneyler esnasında gerek üst gereksede alt haznedeki sıcaklık değişimi kayıt edilmekte birlikte, sıcaklık değişiminin küçük olması nedeniyle geçirgenlik hesaplarında gözönüne alınmamıştır.

6 Tartışmalar ve tavsiyeler

Beton/kaya tuzu ara yüzeyinde kullanılan zarın ara yüzeydeki gaz geçirgenliğini azaltıcı rol oynadığı yapılan bu çalışma sonucu saptanmakla birlikte elde edilen bu sonuçların ilksel sonuçlar olarak dikkate alınmasında fayda vardır. Bu çalışmadaki deney sistemi yeni olup deney esnasındaki sınır koşullarını tümüyle kontrol etmek son derece güç olduğu gözlenmiştir (Üçpırtı vd., 1995).

Bu çalışmanın yapılması sırasında, gerek deney sistemlerinin kurulması ve gerekse de deney numunelerinin hazırlanmasında, bir takım zorluklarla karşılaşmıştır. Bu zorlukların deney sonuçları üzerindeki olası olumsuz etkisini kaldırmak büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, aşağıda verilen hususların mutlak surette gözönüne alınması gerekmektedir (Üçpırtı vd., 1995):

- 1-) laboratuvar numunelerinin gerek sondajı (coring) gerekse kesimi sırasında en az oranda zedelenmesi,

Çizelge 4. Hidrostatik gerilme altındaki beton/zar/kaya tuzun'da (numune no: H-1, M-1, C-1) yapılan boyuna akış ara yüzey deney sonuçları

Deney Tarihi	Geçirgenlik Deney Nosu	Hidrostatik Gerilme (MPa)	Deney Süresi (saat)	Geçirgenlik (m^2)
9/10/92	1	6.9	0.004	$5.9*10^{-15}$
9/15/92	2*	10.3	72.0	$2.0*10^{-20}$
9/21/92	3**	6.9	0.001	$8.7*10^{-15}$
9/21/92	4**	8.6	0.003	$6.0*10^{-16}$
9/21/92	5**	10.3	0.009	$2.4*10^{-15}$
9/21/92	6**	12.1	(?)***	$4.6*10^{-17}$

* : Numune, basınç hücresi içinde sadece 1.8 MPa'lık bir çevre basıncı altında 104.7 saat tutulduktan sonra deney yapılmıştır.

** : Numune, basınç hücresi içinde sadece 1.8 MPa'lık bir çevre basıncı altında 104.7 saat tutulduktan sonra deney yapılmıştır.

*** : Deney devam ederken kaza ile sona ermiştir.

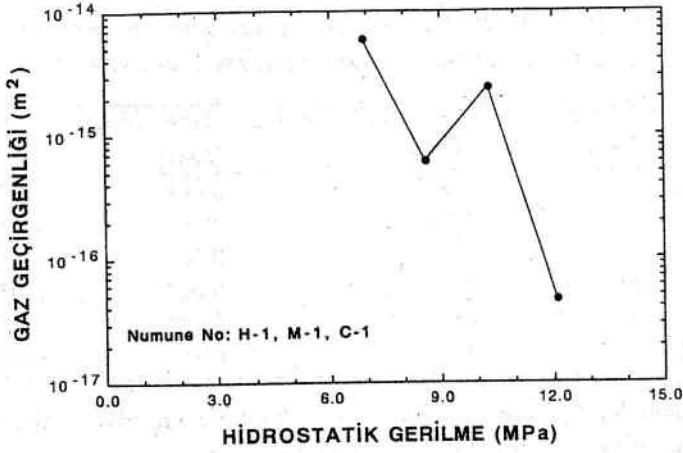
Çizelge 5. Hidrostatik gerilme altındaki beton/zar/kaya tuzun'da (numune no: H-2, M-2, C-1) yapılan boyuna akış ara yüzey deney sonuçları

Deney Tarihi	Geçirgenlik Deney Nosu	Hidrostatik Gerilme (MPa)	Deney Süresi (saat)	Geçirgenlik (m^2)
10/16/92	1	8.6	0.00016	$7.4*10^{-15}$
10/16/92	2	10.3	0.0038	$6.4*10^{-15}$
10/16/92	3	12.1	0.0156	$1.7*10^{-15}$
10/16/92	4	13.8	77.0	$1.5*10^{-16}$

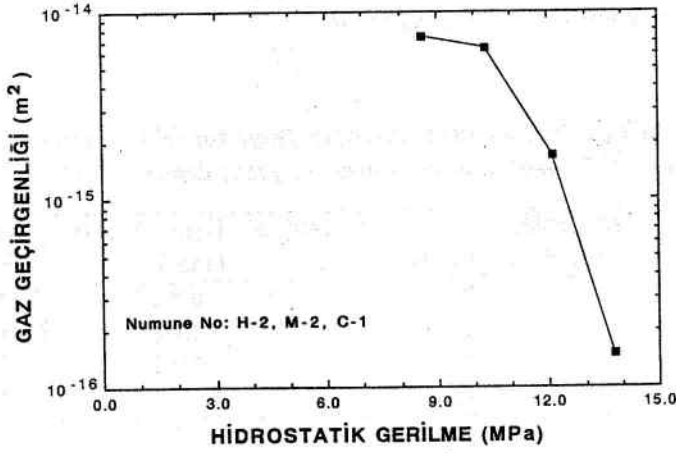
Çizelge 6. Hidrostatik gerilme altındaki beton/zar/kaya tuzun'da (numune no: H-3, M-2, C-2) yapılan boyuna akış ara yüzey deney sonuçları

Deney Tarihi	Geçirgenlik Deney Nosu	Hidrostatik Gerilme (MPa)	Deney Süresi (saat)	Geçirgenlik (m^2)
11/17/92	1*	5.9	0.002	$2.3*10^{-14}$
11/17/92	2*	6.9	0.002	$1.1*10^{-14}$
11/17/92	3*	8.6	0.002	$1.1*10^{-14}$
11/17/92	4*	10.3	0.003	$1.6*10^{-14}$
11/17/92	5*	12.1	0.003	$1.3*10^{-14}$
11/17/92	6*	13.8	0.003	$1.0*10^{-14}$
11/17/92	7*	15.5	0.003	$1.0*10^{-14}$
11/17/92	8*	17.2	0.004	$9.5*10^{-15}$

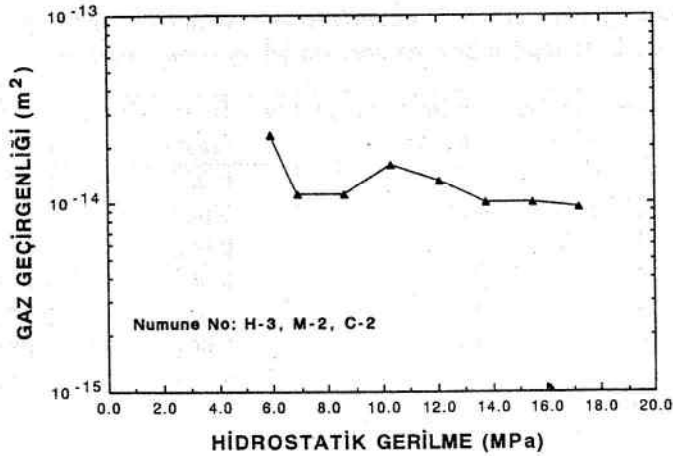
* : Numune, basınç hücresi içinde sadece 1.4 MPa'lık bir çevre basıncı altında 89.8 saat tutulduktan sonra deney yapılmıştır.



Şekil 4. Hidrostatik gerilme ile gaz geçirgenliği arasındaki ilişki (No: H-1, M-1, C-1)



Şekil 5. Hidrostatik gerilme ile gaz geçirgenliği arasındaki ilişki (No: H-2, M-2, C-1)



Şekil 6. Hidrostatik gerilme ile gaz geçirgenliği arasındaki ilişki (No: H-3, M-2, C-2)

- 2-) numunelerin ara yüzey düzlemlerinin ve kenarlarının mümkün olan oranda pürüzsüz ve düzgün olması,
- 3-) ara yüzeyde kullanılacak malzemenin özürsüz (yırtık, delik vb.) olması,
- 4-) gaz akışının büyük bir olasılıkla ara yüzey boyunca olduğu düşünülürse numuneleri gerilme hücresine koymadan önce yüzeylerinin birbirlerine iyi bir şekilde karşılık gelmesine özen gösterilmesi,
- 5-) deney sırasında numunelerin mekanik davranışının gözlenmesi.

Katkı belirtme

Bu çalışma, Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DEO) için (kontrak no: DE-AC04-94AL85000) yapılmış olup mali giderleri Sandia Ulusal Laboratuvarı (Sandia National Laboratories) tarafından karşılanmıştır. Bu çalışma, Ray Finley ve Tim George'un (Sandia National Laboratories) gözetimi altında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, çalışmada emeği geçen (gerek deney sisteminin kurulmasında gereksede deneylerin yapılmasında) Dr. Xiaoping Sun, Hülya Çetintaş, Vinson Palathingal ve Hanbin Du'ya teşekkür ederler.

Kaynaklar

- Börn, D. J. ve J. C. Stormont. 1989. An interim report on excavation effect studies at the waste isolation pilot plant: the delineation of the disturbed rock zone. *Proceedings of an NEA Workshop on Excavation Response in Geological Repositories for Radioactive Waste*, Winnipeg, Canada, April 26-28. SAND87-1375C.
- Brace, W. F., J. B. Walsh ve W. T. Frangos. 1968. Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical Research*, 73, No. 6, 2225-2236.
- Elsworth, D. ve R. E. Goodman. 1986. Characterization of rock fissure hydraulic conductivity using idealized wall roughness profiles. *Int. J. of Rock Mechanics and Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 23, No. 3, 233-243.
- Hsieh, P. A., J. V. Tracy, C. E. Neuzil, J. D. Bredehoeft ve S. E. Siliman. 1981. A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of "tight" rock-I. Theory. *Int. J. of Rock Mechanics and Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 18, No. 3, 245-252.
- Lin, M. S. ve L. L. Van Sambeek. 1992. Waste isolation pilot plant: alcove gas barrier trade-off study. SAND91-7099. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.

- Molecke, M. A. 1990. Test plan: WIPP in situ alcove CH TRU waste tests. Albuquerque, NM: *Sandia National Laboratories*.
- Polubarinova-Kochina, P. YA. 1962. Theory of groundwater movement. *Princeton University Press*.
- Schrauf, T. W. ve D. D. Evans. 1986. Laboratory studies of gas flow through a single natural fracture. *Water Resources Research*, 22, No. 7, 1038-1050.
- Stormont, J. C. 1990(a). Summary of 1988 WIPP facility horizon gas flow Measurements. *SAND89-2497*. Albuquerque, NM: *Sandia National Laboratories*.
- Stormont, J. C. 1990(b). Gas permeability changes in rock salt during deformation. *Ph.D dissertation*. Tucson, Arizona: *University of Arizona*.
- Trimmer, D. 1982. Laboratory measurement of ultralow permeability of geological materials. *Review of Scientific Instruments*. 53, No. 8, 1246-1254.
- Üçpirtli, H., J.J.K. Daemen, R. E. Finley ve J. T. George. 1995. Laboratory measurement of gas flow along a pressurized grout/membrane/halite interface for waste isolation pilot plan. *SAND92-2121*. Albuquerque, NM: *Sandia National Laboratories*.
- Walls, J. D. 1983. Effect of pore pressure, confining pressure and partial saturation on permeability of sandstones. *Ph. D. Dissertation*. Pola Alto, CA: *Stanford University*.

KÜRESEL BİR YERALTI AÇIKLIĞI İÇİN ARAZİ REAKSİYON EĞRİSİ

Ground Response Curve for a Spherical Underground Opening

Gürel ŞENYUR

Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

Özet

Bu çalışmada, küresel şekildeki bir boşluğu çevreleyen kaya kütesinin arazi reaksiyonu eğrisini ve yenilme bölgesine ilişkin hesaplama yöntemi verilmektedir. Küresel boşluğun içinde açıldığı ortam hidrostatik arazi basıncı altındadır. Verilen çözüm, Hoek ve Brown tarafından geliştirilmiş görgül eşitlikle tanımlanan doğrusal olmayan en yüksek ve kalıcı kaya kütle dayanımı ölçütlerini kullanmaktadır. Kapalı çözüm, büyük asal birim deformasyonla beraber kırılma sonrası sabit bir hızla hacim artışı olan elastik-gevrek-plastik malzeme davranış modeli için geliştirilmiştir. Çözüm bir örnekle uygulanmıştır. Çözümün, yer etkisi eğrisi ve yenilme bölgesi analizi için bir yöntem sağladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, çözüm, iki boyutlu durum için bilinen karmaşık çözümlerin üç boyutlu problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilmesini gündeme getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arazi reaksiyonu/tepkimesi eğrisi, elasto-plastik çözümler, kapalı çözüm, yeraltı açıklıkları, yenilme bölgesi,

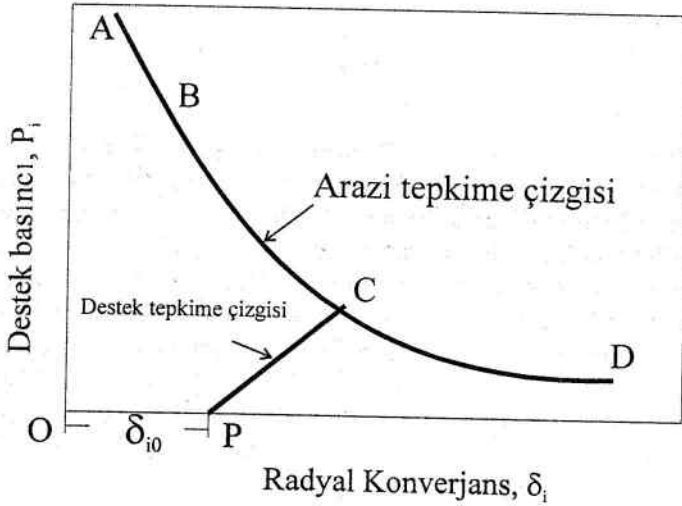
Abstract

This study presents a method of calculation of yield zone and ground response curve for a rock mass surrounding an opening with a spherical shape. The spherical opening is opened in a medium initially subjected to hydrostatic far field pressures. The solution presented uses nonlinear peak and residual rock mass strength criteria proposed by Hoek and Brown empirical relationship. A closed-form solution is presented for an elastic-brittle-plastic material behavior model in which post-peak dilatancy occurs at a constant rate with major principal strain. The solution is applied in an illustrative example. It is concluded that the suggested solution provides a way of analysis both for the ground response curve and yield zone. It is also concluded that the presented solution recommends the development of the complex solutions of two dimensional case to three dimensional problems.

Key words: Closed form solution, elasto-plastic analyses, ground response curve, underground openings, yield zone

1. Giriş

Bir yeraltı boşluğunu çevreleyen kayaç ortamında ve destek elemanında meydana gelen yer değiştirmeler, kaya kütlesi özelliklerine ve tahkimat elemanının davranışına bağlıdır. Bu faktörlerin karşılıklı bağımlılığı genellikle arazi-destek iç etkileşim diyagramında, arazi karakteristik ve destek tepkime eğrileri ile gösterilmektedir (Nguyen-Minh ve Corbetta, 1992). Şekil 1'de arazi tepkime eğrisi, lokal radyal konverjans (δ_i) ve bunu önlemek için gerekli radyal destek basıncı (P_i) ilişkisi verilmektedir. Bu durumda, destek, bir başlangıç (δ_{i0}) duvar deformasyonu geliştikten sonra kurulmuştur. Destek reaksiyonu EC hattını izleyerek oluşur ve C noktasında dengeye ulaşır.

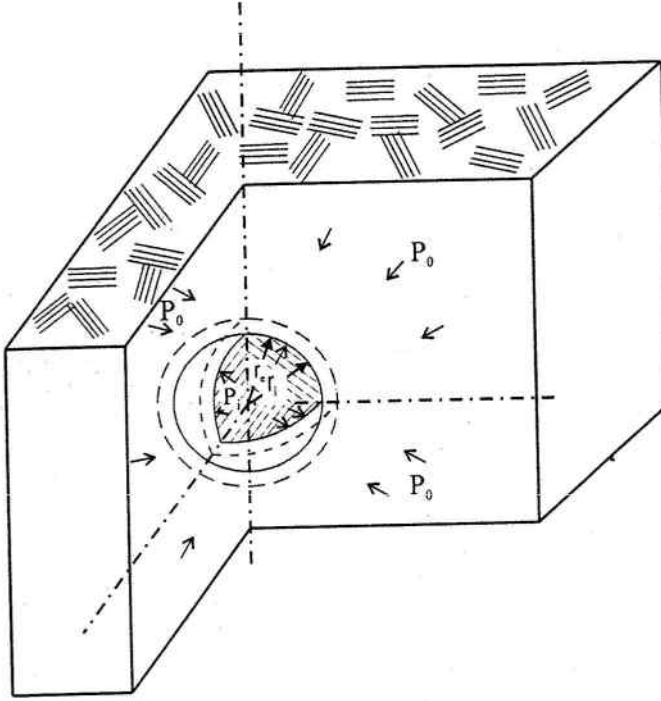


Şekil 1. Basitleştirilmiş kayaç-destek iç etkileşim diyagramı

Arazi-destek iç etkileşim diyagramları, boşluk desteklenmesi mekaniğinin anlaşılmasında yardımcı olurlar (Lombardi, 1980). Dolayısıyla, arazi tepkime eğrisinin özellikle kaya kütlesi, gerilme rejimi ve açıklık geometrisi için, önceden belirlenmesi gereklidir. Arazî tepkime eğrileri ile ilgili yaklaşımların çoğu, hidrostatik arazi basıncı koşulu ve basit açıklık geometrilerini içeren iki boyutlu kapalı form çözümleridir. Halbuki, bazı nümerik yöntemler karmaşık geometri çözümlerinde kullanılmaktadır. Genel olarak, geçmişte kullanılan malzeme davranış modeli basit ve az gerçekçidir. Çünkü, bu modelde kaya kütlesi homojen ve elastik malzeme olarak alınmaktadır. Gerçekte, kaya kütleleri içlerinde süreksizlikler içeren farklı yapıya sahip malzemelerdir. Yakın zamanlarda kayaların bu özelliklerini tanımlayan görgül modeller geliştirilmiştir (Hoek vd., 1995). Bundan başka, iki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan yaklaşımların üç boyutlu problemlerin çözümü için de geliştirilmesinde yarar vardır. Bu makale, bir küresel yeraltı açıklığı için doğrusal olmayan en yüksek ve kalıcı kaya kütle dayanım ölçütlerini kullanarak arazi tepkime eğrisinin elde edilmesini sunmaktadır.

2. Problemin Tanımı

Yarıçapı r_i olan bir küresel açıklık, P_0 hidrostatik arazi basıncı altında, homojen, izotrop ve başlangıçta elastik bir kaya kütesinde açılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Küresel açıklık probleminin blok diyagramda gösterimi

Destek sisteminin, düzgün yayılı bir radyal tahkimat basıncı P_i sağladığı düşünülmektedir. Açıklık kazısından sonra oluşan gerilmeler kayanın akma dayanımını aşabilir ve küresel açıklık etrafında r_e yarıçaplı bir plastik bölge oluşabilir. Burada, r_e yarıçaplı sınır dışındaki kayanın elastik olarak kaldığı düşünülmektedir. Problemdeki küresel simetriden dolayı teğetsel (σ_θ) ve radyal (σ_r) gerilmeler asal gerilmeler olmaktadır. Problemin simetrik basitliğini bozmamak için, plastik bölgede oluşan kaya kütesinin ağırlığının açıklığın çeperlerinin deformasyonu ve destek basıncı üzerindeki etkisi dikkate alınmamıştır.

3. Denge Koşulu

Aynı merkezli iki tane r ve $r+dr$ yarıçaplı küresel yüzey ve dört meridyen ile sınırlandırılmış bir küçük hacimsel elemana etkiyen kuvvetler Şekil 3'de verilmiştir.

Gerilme sisteminin denge denklemi (Lin, 1968),

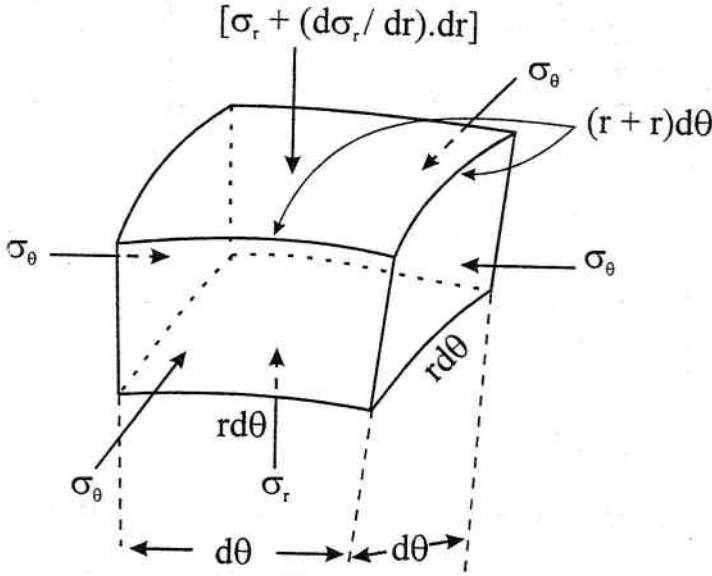
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

olup, küresel açıklığın merkezinden bir r radyal mesafedeki elastik gerilmeler (σ_θ ve σ_r) aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir (Lin, 1968),

$$\sigma_r = P_0 - (P_0 - P_i) \frac{r_i^3}{r^3} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = P_0 + \frac{1}{2}(P_0 - P_i) \frac{r_i^3}{r^3} \quad (3)$$

Yukarıda, P_0 arazi basıncını, P_i iç basıncı ve r_i ise küresel açıklığın yarıçapını göstermektedir.



Şekil 3. Küçük elemana etki eden gerilmeler

4. Yenilme Ölçütü ve Gerilme-Birim Deformasyon İlişkisi

Yakın zamanlarda kaya kütleleri için kullanılan en yaygın yenilme ölçütü Hoek ve Brown (Hoek vd., 1995) tarafından verilen görgül ölçüttür. Bu yenilme ölçütü aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (4)$$

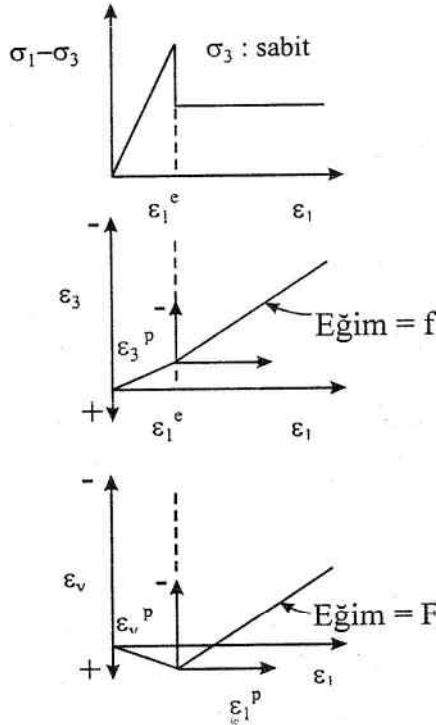
Yukarıda, σ_1 ve σ_3 sırasıyla en büyük ve en küçük asal gerilmeler σ_c sağlam kayaç tek eksenli sıkışma dayanımı ve m ve s sabitleri kayanın tipine bağlı orjinal kaya kütle parametreleridir. m ve s parametrelerinin kaya tipine bağlı değişimi Bieniawski (1989) tarafından geliştirilen Kaya Kütle Sınıflaması (RMR) sistemine göre yapılmaktadır.

4 numaralı eşitlik çözümlerde sağlam kayaç kütle dayanımı için kullanılmaktadır. Yenilmiş veya plastik bölgede m ve s parametreleri aşağıda verilen kaya kütle kalıcı dayanımı denkleminin m_r ve s_r parametreleri olmaktadır (Hoek vd.,1995).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \sigma_3 + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \quad (5)$$

4 ve 5 numaralı eşitlikler ile verilen dayanım ölçütleri açıklığın kazısı sırasında sistematik olarak toplanabilen ve değerlendirilebilen kaya kütle kalitesi verileri ve tek eksenli sıkışma dayanımına (σ_c) bağlı olmaları nedeniyle diğer yaklaşımlara oranla üstünlük sağlamaktadır.

Şekil 4, bundan sonraki bölümde sunulan kapalı form çözümünde kullanılmak üzere ideal gerilme-birim deformasyon ilişkisini vermektedir. Bu durumda kayaç, Young modülü (E), ve Poisson oranı (ν) olan doğrusal davranışlı elastik bir malzeme olarak düşünülmektedir. Bu davranış bir σ_3 değeri altında kayacın ilk dayanım değerine ulaşıncaya kadar sürer. Daha sonra, şekildeki basit modelde görüldüğü üzere, dayanım aniden kalıcı değerine düşer (Brown vd.,1983).



Şekil 4. Kapalı form çözümünde kullanılan malzeme davranış modeli (Brown vd., 1983).

En yüksek değerden itibaren dayanım azalması ve kalıcı dayanımda devamlı deformasyon plastik hacim artışı ile birlikte görülür. En yüksek değer sonrası davranışı açıklamada, en küçük asal birim deformasyon ϵ_3 - en büyük asal birim deformasyon ϵ_1

ve hacim $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ eğrilerinin eğimleri önemlidir. Burada, ε_1^P , ε_3^P ve ε_v^P birim deformasyonları, plastik birim deformasyon artışından daha çok en yüksek değer ötesi toplam birim deformasyonları göstermektedir. f ve F parametreleri σ_3 ve ε_1 ile değişebilir, diğer bir değişle $\varepsilon_3^P - \varepsilon_1^P$ ve $e_v^P - \varepsilon_1^P$ ilişkileri doğrusal olmayabilirler. f ve F parametrelerini saptamak için deneysel veri gerekmektedir. Bu şekilde bir veri sağlam kayaç için bulunabilir (Crouch, 1970; Ladanyi ve Nguyen, 1971), ancak deneysel zorluklar nedeniyle çatlaklı kayaçlar için zordur. Deneysel veri tabanına dayalı parametre tayinine alternatif yöntem, plastisite teorisinde verilen birleşik akış kuralı ile f in belirlenmesidir (Kachanov, 1971). Ladanyi (1974) ve Hoek ve Brown (1980) önerdikleri çözümlerde bu yaklaşımı kullanmışlardır. Birleşik akış kuralı kullanıldığı zaman, akma (yield) ölçütü ve plastik potansiyel fonksiyonu aynı fonksiyonlar olmaktadır.

5. Malzeme Davranış Modeli Kullanılarak Çözüm

Şekil 1'de verilen diyagramda kayaçtaki gerilmeler ve yerdeğiştirmeler için kapalı form çözümleri, Şekil 4' de verilen gerilme-birim deformasyon ilişkileri ve 4 ve 5 numaralı eşitlikler ile verilen dayanım ölçütleri kullanılarak elde edilebilir. Birim deformasyonlar çok küçük olarak düşünülmektedir. Açıklık sınırlarındaki birim deformasyonların hesaplanmasında ani ve başlangıç değerleri arasında bir fark gözlemlenmemektedir.

6. Gerilmeler

Bu küresel simetrik problemde diferansiyel denge denklemi Eşitlik 1'de verilmektedir. Sınır koşulları $r = r_e$ iken $\sigma_r = \sigma_{re}$ ve $r = \infty$ iken $\sigma_r = P_0$ kullanılırsa 2 ve 3 numaralı eşitlikler aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$\sigma_\theta = P_0 + \frac{1}{2}(P_0 - \sigma_{re})\left(\frac{r_e}{r}\right)^3 \quad (6)$$

$$\sigma_r = P_0 - (P_0 - \sigma_{re})\left(\frac{r_e}{r}\right)^3 \quad (7)$$

Kırılmış kayaç bölgesinde, gerilmeler Eşitlik 5 ile verilen kaya kütlesi kalıcı dayanımı ile sınırlıdır. 5 numaralı eşitlik, $\sigma_\theta = \sigma_1$ ve $\sigma_r = \sigma_3$ yer değiştirmeleri ile aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\sigma_\theta - \sigma_r = (m_r \sigma_c \sigma_r + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \quad (8)$$

Eşitlik 8'de verilen ifade Eşitlik 1'e yerleştirilir ve $r = r_i$ (açıklık yarıçapı) iken $\sigma_r = P_i$ (destek basıncı) sınır koşulu kullanarak integral alınırsa kırılmış bölgede radyal gerilme,

$$\sigma_r = m_r \sigma_c \left[\ln(r / r_i) \right]^2 + 2 \ln(r / r_i) (m_r \sigma_c P_i + s_r \sigma_c^2)^{1/2} + P_i \quad (9)$$

olarak bulunur. Burada r_e ve σ_{re} gerilmeleri ile tanımlanan kırılmış bölgenin büyüklüğünü bulmak için başlangıç yenilme ölçütü olan Eşitlik 4'ün $r = r_e$ sınırında sağlanması gerektiği kabul edilmelidir. 6 ve 7 numaralı eşitliklerde asal gerilme farkı,

$$\sigma_{\theta e} - \sigma_{re} = \frac{3}{2}(P_0 - \sigma_{re}) \quad (10)$$

olup, bu durumda yenilme ölçütü (Eşitlik 4) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma_{\theta e} - \sigma_{re} = \sigma_c \left(m \frac{\sigma_{re}}{\sigma_c} + s \right)^{1/2} \quad (11)$$

Eşitlik 10 ve 11'in sağ tarafları eşitlenerek,

$$\sigma_{re} = P_0 - M\sigma_c \quad (12)$$

yukarıda,

$$M = \frac{2}{9} \left[m^2 + 9m \frac{P_0}{\sigma_c} + 9s \right]^{1/2} - \frac{2}{9} m \quad (13)$$

Eşitlik 9 ve 12 ile verilen σ_{re} değerleri eşitlenerek,

$$r_e = r_i \exp \left\{ \frac{1}{m_r \sigma_c} \left[N - (m_r \sigma_c P_i + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \right] \right\} \quad (14)$$

elde edilir ve burada verilen N aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$N = \left[s_r \sigma_c^2 + m_r \sigma_c (P_0 - M\sigma_c) \right]^{1/2} \quad (15)$$

7. Birim Deformasyonlar ve Yer Değiştirmeler

Gerilimler ve birim deformasyonlar pozitif olarak alınmaktadır. σ_r' nin başlangıç değerinin P_0' dan σ_{re}' ye azalması ile elastik sınırda meydana gelen radyal deformasyon (Ladanyi, 1967),

$$u_e = \frac{1+\nu}{2E} (P_0 - \sigma_{re}) r_e \quad (16)$$

veya 12 numaralı eşitlik kullanarak, $r=r_e$ elastik sınırında teğetsel birim deformasyon,

$$\epsilon_{\theta}^e = \frac{u_e}{r_e} = \frac{M\sigma_c}{4G} \quad (17)$$

olarak yazılabilir. Burada,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (18)$$

olmaktadır. Çok küçük değerlerde hacımsal birim deformasyon(ϵ_v^e) üç asal birim deformasyonun toplamıdır ve elastik hacim artışı yoktur (Ladanyi,1967).Bu nedenle, aşağıda verilen eşitlik yazılabilir.

$$\epsilon_v^e = \epsilon_r^e + 2\epsilon_\theta^e = 0 \quad (19)$$

Yukarıda verilen 17 ve 19 eşitliklerinden radyal birim deformasyon,

$$\epsilon_r^e = -\frac{M\sigma_e}{2G} \quad (20)$$

olarak bulunur.

Yenilmiş veya plastik bölgede birim deformasyonlar elastik (ϵ^e) ve plastik (ϵ^p) kısımlarının toplamına eşittir,

$$\epsilon_\theta = \epsilon_\theta^e + \epsilon_\theta^p \quad (21)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_r^e + \epsilon_r^p \quad (22)$$

Yukarıda verilen radyal (ϵ_r) ve teğetsel (ϵ_θ) birim deformasyonlar hidrostatik gerilme ortamında asal birim deformasyonlar (ϵ_3, ϵ_1) olmaktadırlar. ϵ_r^p ve ϵ_θ^p , Şekil 4' de verilen doruk ötesi birim deformasyon artışlarıdır ve Şekil 4' den,

$$\epsilon_r^p = -f \epsilon_\theta^p \quad (23)$$

Herhangi bir r radyal uzaklığında teğetsel (ϵ_θ) ve radyal (ϵ_r) birim deformasyonlar,

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (24)$$

ve

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (25)$$

21 - 25 numaralı eşitliklerden

$$\frac{du}{dr} = \epsilon_r^e - f \left(\frac{u}{r} - \epsilon_\theta^e \right) \quad (26)$$

veya, 17 ve 20 eşitlikleri kullanılarak,

$$\frac{du}{dr} = \frac{M\sigma_e}{2G} \left(\frac{f}{2} - 1 \right) - f \frac{u}{r} \quad (27)$$

elde edilir. Bu diferansiyel denklemin çözümlenmesi ile

$$u = \frac{M\sigma_c}{2G} \left(\frac{f/2-1}{f+1} \right) r + Cr^{-f} \quad (28)$$

veya

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} = \frac{M\sigma_c}{2G} \left(\frac{f/2-1}{f+1} \right) + Cr^{-(f+1)} \quad (29)$$

elde edilir. Burada, C integral sabiti olup, Eşitlik 17'den $r = r_e$ iken ε_θ nın değeri kullanılarak bulunur ve,

$$\frac{u}{r} = \frac{M\sigma_c}{2G(f+1)} \left[f/2-1 + \frac{3}{2} (r_e/r)^{f+1} \right] \quad (30)$$

elde edilir.

8. Arazi Tepkime Eğrisi

Bu eğri, iç destek basıncı (P_i) ve açıklık etrafında gelişen radyal deformasyonun (u_i) arasındaki ilişkiyi ifade eder. Eğer yenilmiş bölge mevcut değilse, yani kırılmış kayacın tepkimesi elastik ise, tepkime eğrisi,

$$\frac{u_i}{r_i} = \frac{(P_o - P_i)}{4G} \quad (31)$$

ilişkisi ile belirlenir.

Yenilmiş bölge mevcut olduğu zaman, Eşitlik 30'dan istenilen ilişki,

$$\frac{u_i}{r_i} = \frac{M\sigma_c}{2G(f+1)} \left[f/2-1 + \frac{3}{2} (r_e/r_i)^{f+1} \right] \quad (32)$$

olarak elde edilir. Burada, r_e Eşitlik 14' den bulunan değer, G, f ve σ_c kayaç özellikleri, M ise kayaç özellikleri ile arazi basıncı P_o 'ın fonksiyonudur.

9. Örnek Çözüm

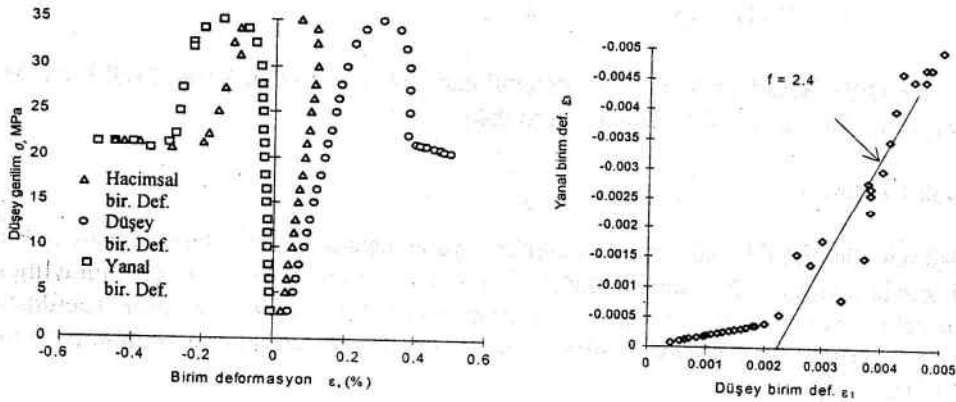
Bu bölümde önerilen kapalı form çözümün uygulamasına örnek olarak granodiyorit masifi içinde açılacak güç santrali amaçlı 6 m çapında küresel bir açıklığın duraylılığı incelenecektir. Granodiyorit, Yozgat ili sınırları içinde bir kömür madeninin işletildiği sedimanter serilerin temel kayacı olup, kömür damarı alt seviyelerde bulunmaktadır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Örnek problem verileri

Derinlik	400 m
Arazi basıncı	$P_0 = 10 \text{ MPa}$
Sağlam kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı	$\sigma_c = 92 \text{ MPa}$
Yenilmemiş kayacın malzeme özelliği	$m = 2.5$ ve $s = 0.004$
Yenilmemiş kayacın Young modülü	$E = 10 \text{ GPa}$
Yenilmiş kaya kütleli malzeme özelliği	$m_r = 0.13$ ve $s_r = 0.00005$

Çatlaklı kayalarda en yüksek değer ötesi davranış verileri çok az ve elde edilmesi deneysel olarak zordur. ISRM (1989) tarafından önerilen büyük ölçekli örnekler ile yapılan üç eksenli laboratuvar deneyleri en gerçekçi yaklaşımı vermektedir. Ancak süreksizlikleri de içeren büyük ölçekli örnek alınması ve deneyi için gerekli sistem mevcut değildi. Bu çalışmada Hobbs (1965) tarafından geliştirilen deneysel yöntemden yararlanılmıştır. Hobbs, yapay olarak çatlak oluşturulmuş silindirik örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapmış ve dayanım parametreleri ile ilgili olumlu sonuçlar elde etmiştir. Benzer olarak bu çalışmada 5 adet BX çaplı deney örneği 5-10 MPa yanıl basınç altında yüklenmiş ve örneklerde ön çatlak oluşturulmuştur. Bu ön çatlaklı örnekler daha sonra bir bilgisayar kontrollü yükleme presinde tekrar yüklenmiş ve en yüksek değer öncesi ve ötesi düşey, yanıl ve hacımsal deformasyonlar kaydedilmiştir. Şekil 5'de bir örnekte yapılan deneyden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Kapalı çözümün f değeri olarak Şekil 5'de verilen değer alınmıştır. Çizelge 2'de kapalı form çözümünün sonuçları verilmiştir. Bu örnek problem iki sonucun karşılaştırılması amacıyla, aynı metodoloji ve veri kullanarak uzun silindirik açıklık (tünel) için de çözülmüştür (Brown vd., 1983), (Şekil 6).

Konunun tam anlaşılması için, sıfır iç basınç ($P_0=0$) koşulunda kırılmış kayaç (plastik bölge) ve yenilmemiş kayaç (elastik bölge) içindeki gerilmelerin değişimi verilmiştir (Şekil 7). Gerilme hesapları 2,3,8 ve 9 numaralı eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 7'de ayrıca aynı koşullar için uzun silindirik açıklık etrafında plastik ve elastik bölgedeki gerilmelerin dağılımı da görülmektedir.



Şekil 5. a) Düşey gerilim karşılığı düşey, yanıl, hacımsal birim deformasyonlar
b) Düşey birim deformasyon karşılığı yanıl birim deformasyon

Çizelge 2. Arazi tepkime eğrisi hesaplama aşamaları (örnek çözüm)

σ_c (MPa)	m	s	E (MPa)	ν	m_r	s_r	f	P_0 (MPa)	r_i (m)	P_i (MPa)	M	σ_{re} (MPa)	G (MPa)	N	r_e/r_i	u_i/r_i
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0	0.10	0.7	4167	2.9061	1.26	0.0011
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0.1	0.10	0.7	4167	2.9061	1.20	0.00088
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0.2	0.10	0.7	4167	2.9061	1.16	0.00078
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0.3	0.10	0.7	4167	2.9061	1.13	0.00072
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0.4	0.10	0.7	4167	2.9061	1.10	0.00067
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0.5	0.10	0.7	4167	2.9061	1.06	0.00062
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0.6	0.10	0.7	4167	2.9061	1.03	0.0006
92	2.5	0.004	10000	0.2	0.13	1E-05	2.4	10	3	0.7	0.10	0.7	4167	2.9003	1.00	0.00056

P_i : Destek basıncı

σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı

m, s : Yenilmemiş kayacın malzeme özelliği

E : Yenilmemiş kayacın Young modülü

m_r, s_r : Yenilmemiş kayacın malzeme özelliği

f : Şekil 5'deki değer

P_0 : Arazi basıncı

r_i : Küresel açıklığın iç yarıçapı

M : Eşitlik 13

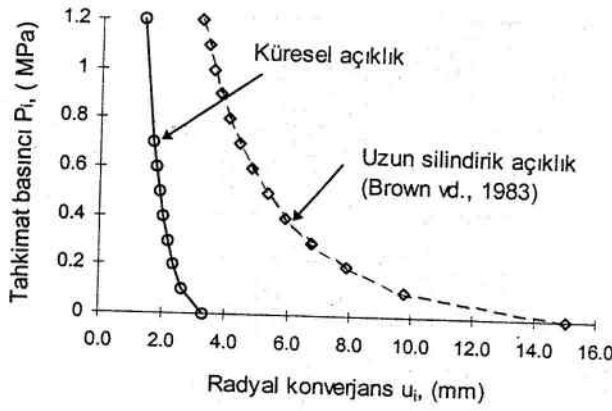
σ_{re} : Eşitlik 12

G : Lame sabiti

N : Eşitlik 15

r_e/r_i : Eşitlik 14

u_i/r_i : Eşitlik 32

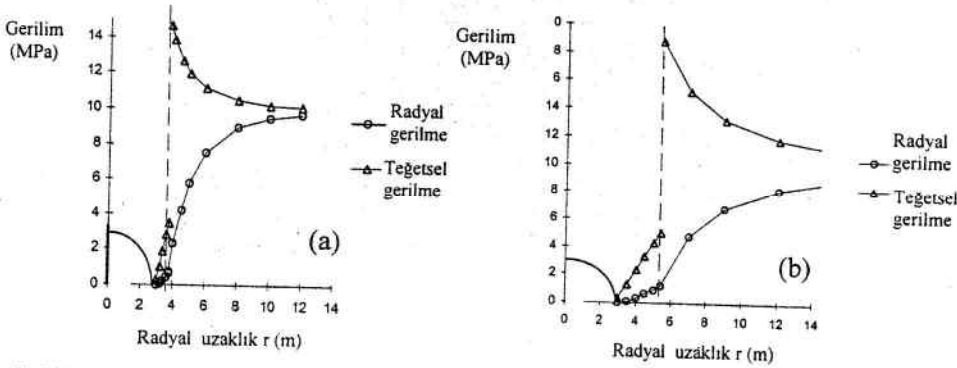


Şekil 6. Arazi tepkime eğrisi (örnek çözüm)

9. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada yeraltındaki küresel bir açıklık için akma (yield) bölgesi ve arazi tepkime eğrisi için önerilen analiz yöntemi verilmiştir. Bu tür çalışmalar genellikle iki boyutlu problemler (tüneller) için yapılmaktadır. İki boyutlu problemlerin çözümünde bilinen yöntem karmaşık sayılar teorisi ve konform dönüşüm çizimi kullanarak çözüm geliştirmektedir. Günümüze değin üç boyutlu problemlerin çözümü için bir yöntem geliştirilmemiştir. İleride üç boyutlu geometrik açıklıkların etrafındaki gerilmeleri birim küreye dönüşüm formülleri ile hesaplama yöntemleri geliştirilebilir ve dolayısıyla bu çalışma, analitik çözümler için bir başlangıç olarak düşünülebilir.

Şekil 6 ve 7'de verilen çözümler küresel açıklığın yararını göstermektedir. Aynı koşullar altında, küresel bir boşluk etrafındaki kırılmış bölge kalınlığı uzun silindirik açıklığa (tüneller) göre çok daha incedir. Küresel açıklık etrafında elastik bölgede teğetsel (σ_θ) ve radyal (σ_r) gerilmelerin değişimi birbirine göre simetrik değildir. Küresel açıklık etrafında gerilme değerleri uzun silindirik açıklık etrafındakilere oranla düşüktür.



Şekil 7. (a) Küresel ve (b) uzun silindirik açıklıklar etrafında gerilme dağılımları

Bu fark, büyük asal gerilme olan teğetsel gerilme değerlerinde görülmektedir. Sonuç olarak, küresel açıklık duraylılık yönünden en ideali olmaktadır.

Bu çalışmada plastisite teorisinin birleşik akış kuralı (associated flow rule) kullanılarak en yüksek değer ötesi (post-peak) birim deformasyon tahmin edilebilir. Ancak birleşik akış kuralının çok çatlaklı ve gevşek kayaç kütleleri için kullanımını destekliyen olgu yoktur. Bu durumlarda akış kuralı birleşik değildir (Brown, 1978). Plastik hacim değişimi birleşik akış kuralını kullanarak elde edilen değerden düşüktür. Ladanyi'nin (1974) önerdiği yöntemde birleşik akış kuralı kullanılmakla beraber küçük birim deformasyonlar için hacimsal birim deformasyon makaslama birim deformasyonu ile orantılı düşünülmektedir. Geçerli f değerlerinin elde edilmesi için uygun çözüm açıklığının desteklenmesinden önce arazi ölçümlerinin yapılmasıdır (Kaiser, 1980). Kaya kütlelerinin yerinde davranışı, çevre basıncı, su içeriği, süreksizliklerin sıklığı ve yönelimi gibi faktörlere bağlı karmaşık bir olaydır (Mahmutoğlu ve Vardar, 1996). Dolayısıyla en yüksek değer ötesi davranış ve f değerinin bulunmasında arazi koşullarına benzeşim sağlayabilen Mahmutoğlu ve Vardar (1996)'ın geliştirdiğine benzer bir laboratuvar düzeneği ile deney yapılması bir alternatif olarak önerilebilir.

Çözelti madenciliği ve yeraltı maden çalışmaları için oluşturulan yeraltı açıklıkları, atık depoları ve güç tesis odaları olarak kullanılabilirler. Bu açıklıklar yaklaşık küre biçiminde ve uzun süreli duraylı veya destekleme gereksiniminde olabilirler. Bu çalışma bu tip yaklaşık küre biçiminde açıklıkların duraylılık analizi için çözüm yöntemi sağlamaktadır.

Kaynaklar

- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, New York, 237 p.
- Brown, E.T., 1978, Volume changes in models of jointed rock. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102, GT3, 273-276.
- Brown, E.T., Bray, J.W., ve Ladanyi, B., 1983. Ground response curves for rock tunnels, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 109, (1), 15-39.
- Hobbs, D.W., 1965, A study of the behaviour of a broken rock under triaxial compression and its application to mine roadways, International. Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 3, 11-43.
- Hoek E. ve Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 527p.
- Hoek, E.T., Kaiser, P. K. ve Bawden, W. F., 1995, Support of Underground Excavations in Hard Rock, A. A. Balkema, Rotterdam, 215p.
- ISRM, 1981, Suggested method for large scale sampling and triaxial testing of jointed rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 26, (5), 429-434
- Kachanov, L.M., 1971, Foundations of the Theory of Plasticity, North-Holland Publ. Company, Rotterdam, 482 p.
- Kaiser, P.K., 1980. Effect of stress history on the determination behavior of underground openings. Underground Rock Engineering, Proceedings of the Thirteenth Canadian Rock Mechanics Symposium, Canadian Institution of Mining and Metallurgy, Montreal, Canada, 264-271.

- Ladanyi, B., 1967, Expansion of cavities in brittle media, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 4, 301-328.
- Ladanyi, B., 1974, Use of the long-term strength conception the determination of ground pressure on tunnel linings, *Advances in Rock Mechanics. Proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics*, 2, Part B, National Academy of Science, Washington D.C., 1150-1156.
- Lin, T.H., 1968, *Theory of inelastic structures*, John Wiley&Sons, NewYork, 454 p.
- Lombardi, G., 1980, Some comments on the convergence-confinement method. *Underground Space Thecnology*, 4, (4), Jan.-Feb., 249-258.
- Mahmutoglu, Y., ve Vardar, M., 1996, Çatlaklı kayanın gevşeme modülünün araştırılması, 3. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Türk Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, 225-240.
- Nguyen-Minh, D., ve Corbetta, F., 1992, New methods for rock support analysis of tunnels in elastoplastic media. *Proceedings of First Symposium of Rock Support*, Ontorio, Balkema, Rotterdam, 83-90.

KAYA ŞEVLERİNDEKİ KAMA TİPİ KAYMALARIN DİNAMİK DURAYLILIĞININ MODEL DENEYLER İLE İNCELENMESİ

ASSESSMENT OF DYNAMIC STABILITY OF ROCK WEDGE FAILURES USING MODEL TESTS

Halil KUMSAR¹ ve Ömer AYDAN²

¹ Pamukkale Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampüsü, Denizli

² Tokai University, Dept. of Marine Civil Engineering, Shimizu, JAPONYA

ÖZET

Süreksizlikler içeren kaya şevlerinin duraylılığı yer çekimi, dinamik yükler, gözenek suyu basıncı, yüzey yükleri gibi değişik kuvvetler tarafından kontrol edilmektedir. Kaya şevlerinde meydana gelen kama türü şev kaymalarının duraylılık analizleri farklı kabullere dayanan değişik denge sınırı yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin geçerliliği deneysel olarak henüz doğrulanmamıştır. Bu makalede şevlerin dinamik yüklerin etkisi altındaki duraylılığının incelenmesi için yapılan deneysel çalışmalar verilmiştir. Farklı boyutlarda 6 çeşit temel ve kama bloğu modelleri hazırlanmıştır. Her bir kama bloğu geometrisi için 3 ayrı modelleme yapılmış ve toplam model sayısı 18 olmuştur. Kama bloğu modellerinin duraylılığı yatay düzlemde bir yönde hareket eden tek yönlü sarsma masası kullanılarak denenmiştir. Kama bloklarının yenilme anındaki duraylılıkları, bir denge sınırı yöntemi kullanılarak da belirlenmiştir. Bu makalede önerilen denge sınırı yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar ile model deneylerinden elde edilen sonuçlar iyi bir uyum içerisinde.

Anahtar Kelimeler: Dinamik, kama, model, şev.

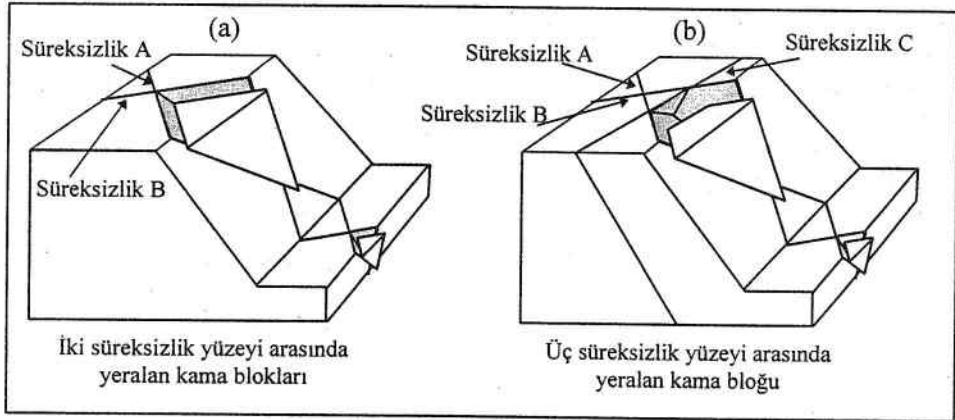
ABSTRACT

The stability of rock slopes having discontinuities is governed by various forces namely gravity, dynamic loading, pore pressure and surface loading. The stability assessment of rock slopes against wedge type failure is generally carried out by means of limiting equilibrium methods (LEM) which have different assumptions. However, the applicability of these methods has not been validated yet by experimental studies. In this paper, experimental studies that were carried out for the stability assessment of model slopes against wedge failure subjected to dynamic loading, are given. 6 types of wedge models with different geometry have been made. 3 models have been prepared for each geometry reaching 18 models in total. The stability of wedge models have been tested on a one dimensional shaking table which moves in one horizontal direction only. The dynamic stability of the wedge blocks against failure was also assessed by a limiting equilibrium method. The experimental results are in a good agreement with the estimations from the method proposed in this paper.

Key Words: Dynamic, model slopes, wedge.

1. GİRİŞ

Yer kabuğunda meydana gelen tektonik olayların yolaçtığı faylanmalar ve kıvrımlanmalar, yer kabuğunu oluşturan kayalar içerisinde değişik doğrultu ve eğimlerde, farklı boyutlarda süreksizlik takımlarının oluşmasına sebep olur. Bu süreksizlik yüzeylerinin jeomekanik özellikleri (içsel sürtünme açısı, kohezyon), açıklık, sıklık, doğrultu ve eğimleri, dolgu malzemesi içerip içermedikleri ve dolgu malzemesinin jeomekanik özellikleri doğal ve yapay şevlerin duraylılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Kama tipi kaymalar, genelde eğim yönleri birbirine doğru olan, topoğrafik yüzeydeki izleri 2 noktada kesişen 2 süreksizlik yüzeyi ve topoğrafya yüzeyi ile sınırlanan bir kütlenin bu iki süreksizlik yüzeyinin kesiştiği arakesit doğrultusu boyunca değişik yüklerin (yer çekimi, dinamik, su basıncı, yüzey yükü gibi) etkisi altında hareket etmesi sonucu meydana gelirler (Şekil 1a).



Şekil 1. Kama tipi duraysızlıklarda kayan blokları geometrik oluşumu.

Şev gerisinde yeralan ve her iki süreksizlik yüzeyinin üçüncü bir süreksizlik yüzeyi tarafından kesilmesi sonucunda da kama tipi kayma meydana gelebilmektedir (Şeki 1b). Bu tür kaya kütlelerinde açılan şevlerin duraylılığı, şevler üzerinde veya yakınında yer alan mühendislik yapıları için büyük bir önem taşımaktadır.

Kaya şevlerinin duraylılığının araştırılmasında ve uygulamalarda pratik çözümler elde edilmesi için farklı araştırmacılar tarafından matematiksel yöntemler geliştirilmiştir (Wittke 1967; Kovari ve Fritz 1975; Hoek ve Bray 1977; Aydan vd. 1989; Kawamoto

ve Aydan 1997; Aydan vd. 1997). Bu matematiksel yöntemlerin içinde denge sınırı yaklaşımları pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin geçerliliği hala tartışmaya açıktır.

Bu çalışmada farklı boyutlardaki 6 kama bloğunun duraylılıkları dinamik yükler altında model deneyleri yapılarak incelenmiş ve sonuçlar denge sınırı yönteminden elde edilen çözüm ile karşılaştırılmıştır..

2. KAMA BLOK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI

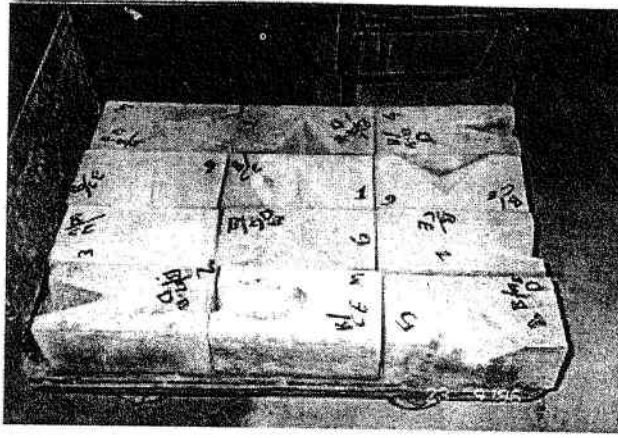
Kayma yüzeyinin ve kama bloğunun oluşturulması için plastik model kalıpları kullanılmış ve bu kalıplardan beton modeller elde edilmiştir. Çizelge 1'de verilen boyutlarda plastik kama bloğu modelleri hazırlanmıştır. Taban kayacını temsil eden kütle için boyutları 28cm, 14cm ve 12cm olan ahşap kalıp kutuları hazırlanmıştır (Şekil 2). Plastik kama tipi kayma kütleleri bu kutuların içerisinde yan yüzeye tutturularak kutunun içerisi, karışımı Çizelge 2'de verilen harç ile doldurulmuştur. 8 saatlik bir süre sonunda plastik kalıplar çıkartılarak her blok için kama tipi süreksizlik yüzeyleri oluşturulmuştur. 24 saatlik süre sonunda plastik kayma kütlesi modelleri çıkarılmış ve taban bloğunda oluşan bu kayma kütlelerinin kaplamış olduğu boşluk hacmine, karışımı taban blokları ile aynı olan harç dökülerek kama bloklarının beton modelleri elde edilmiştir (Şekil 3). Daha sonra bu modeller ve taban blokları, betonun hızlı kuruması sonucu oluşabilecek mukavemet kaybının önlenmesi için bir hafta süre ile su içerisinde bekletilmiştir.

Çizelge 1. Kama kütlesi modellerinin geometrik özellikleri (Şekil 8)

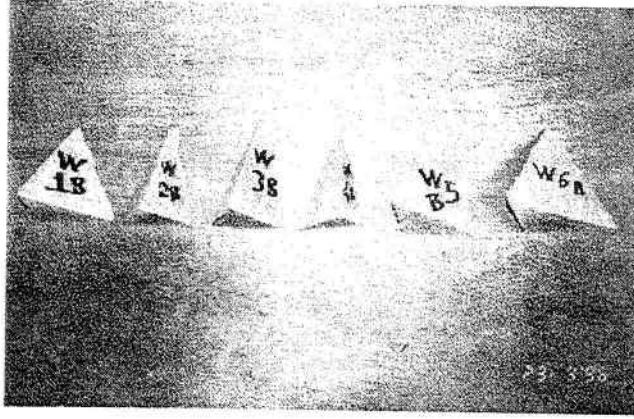
Kama No	Arakesit doğrusunun dalımı i_a (°)	Yarım kama açısı - W_a (°)
1	30.96	45.00
2	30.26	29.73
3	26.56	35.54
4	30.26	23.18
5	28.61	51.33
6	28.61	56.30

Çizelge 2. Model kalıplarının oluşturulmasında kullanılan malzeme karışımı

Malzeme cinsi	Su miktarı (kN) (%)	Çimento (kN/m ³)	İnce kum (kN/m ³)
Miktar	50	3.5	17.5



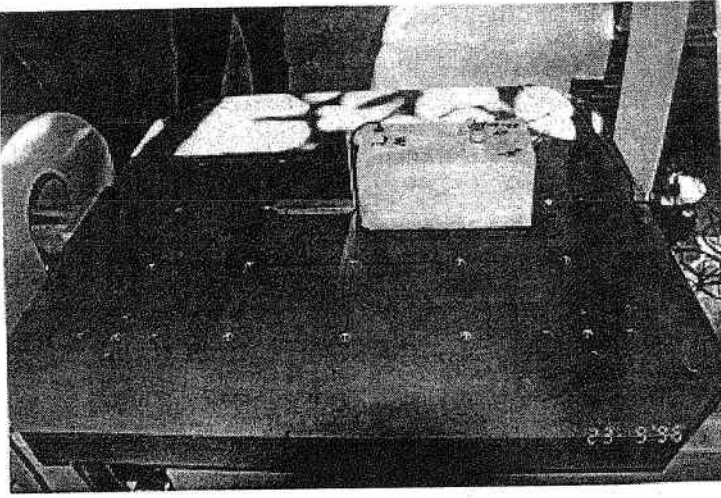
Şekil 2. Temel ve kama bloğu beton modellerinin görünümü.



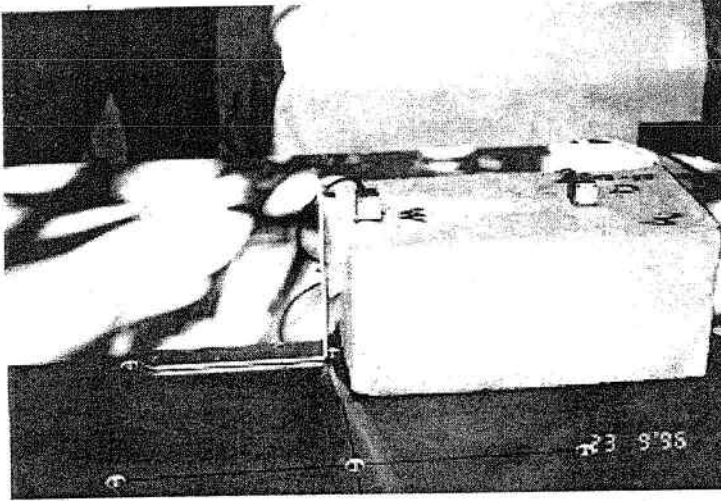
Şekil 3. Değişik boyutlardaki kama kütlesi modelleri.

3. MODEL DENEYLERİN YAPILMASI

Kama modellerinin dinamik yükler altında duraylılıklarının incelenmesi için yatay düzlemde hareket eden tek yönde hareket eden sarsma masası kullanılmıştır (Şekil 4 ve 5). Temel blok modeli sallama tablası üzerine sabitleştirilerek sarsma sırasında bu bloğun sarsma masası ile birlikte hareket etmesi sağlanmıştır. Deney sırasında sarsma masasına, temel ve kama bloklarına giren ivme dalgaları ivme ölçerlerle sayısal olarak ayrı ayrı kayıt edilmiş ve veri dosyalarına aktarılmıştır (Şekil 6).

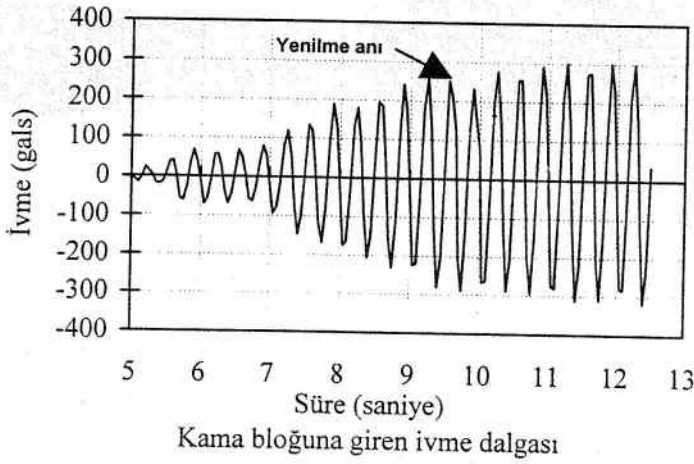
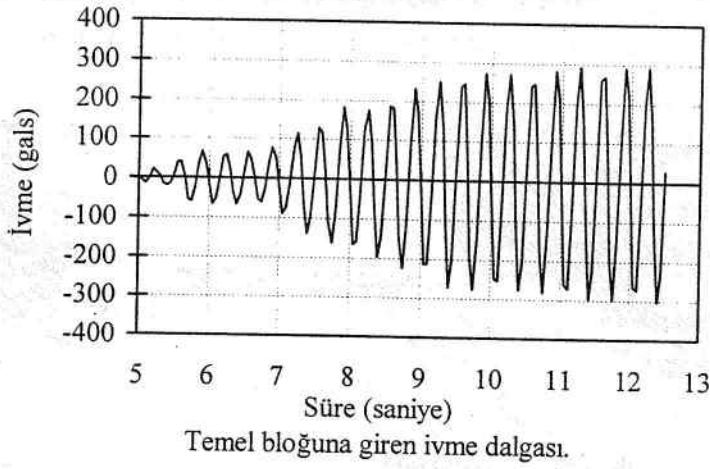
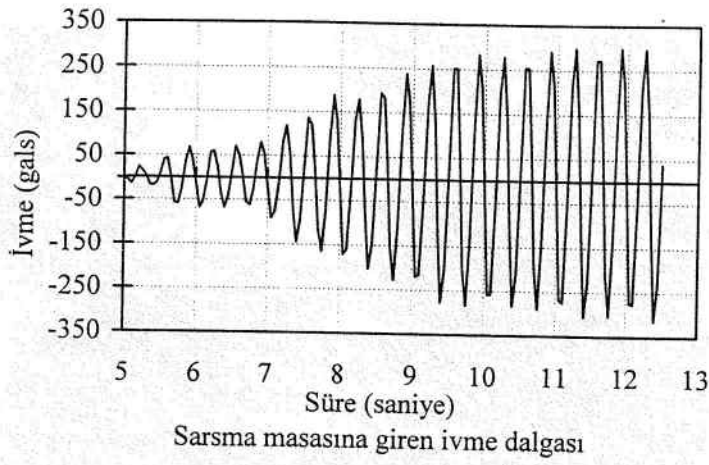


Şekil 4. Sarsma masası ve deney düzeneğinin görünümü.



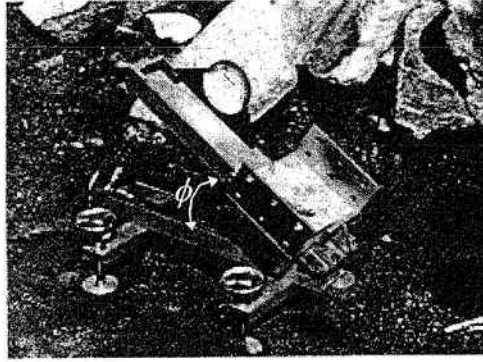
Şekil 5. Sarsma masası üzerinde yeralan taban bloğu ve kaymış kama kütlelerinin yakından görünümü.

Deney sırasında aynı anda 3 ivme dalga kaydının alınmasının amacı, kayma anında kama bloğundaki dalga ile sabit olan temel bloğu ve sarsma masasına ait dalga kayıtlarındaki dalgalar karşılaştırılarak kaymanın olduğu anda kama bloğuna giren dalganın büyüklüğünün belirlenmesidir (Şekil 6).



Şekil 6: Örnek ivme kaydı; Model Numarası TB1C olan kama kütleinin duraylılık deneyinde kayıt edilen ivme dalgaları

Altı değişik boyutlardaki kama bloklarının her birinden üçer adet olmak üzere toplam 18 adet kama kütlesi modeli hazırlanmıştır. Her kama bloğundan en az üç modelinin hazırlanmasının nedeni, kama bloğu modellerinin küçük boyutta olmasından dolayı deney sırasında bu beton kama modellerinin kırılabilme riskinin olması ve ayrıca beton kama modellerinin hazırlanmasından doğabilecek model hazırlama hatalarının deney sonuçları üzerindeki etkisini en aza indirmektir. Bu modellerin duraylılıkları sarsma masası üzerinde dinamik yüklemeler altında ve kuru ortamda incelenmiştir. Her bloğu kayma anında etkiyen dalganın büyüklüğü saptanmış ve denge sınırı çözümü ile karşılaştırılmıştır. Beton kama modelleri ile temel bloğu arasındaki süreksizlik yüzeyleri boyunca sürtünme açısının (ϕ) belirlenmesi için eğimlendirme aleti (tilting machine) kullanılmıştır (Şekil 7). Bu açının tesbiti için, aynı malzemeden düzgün yüzeyli bloklar hazırlanmış ve bu bloklar birbiri üzerine konularak eğimlendirme deney aleti kullanılarak kayma anındaki açı (ϕ) ortalama 35° olarak saptanmıştır.



Şekil 7. Eğimlendirme deney aleti.

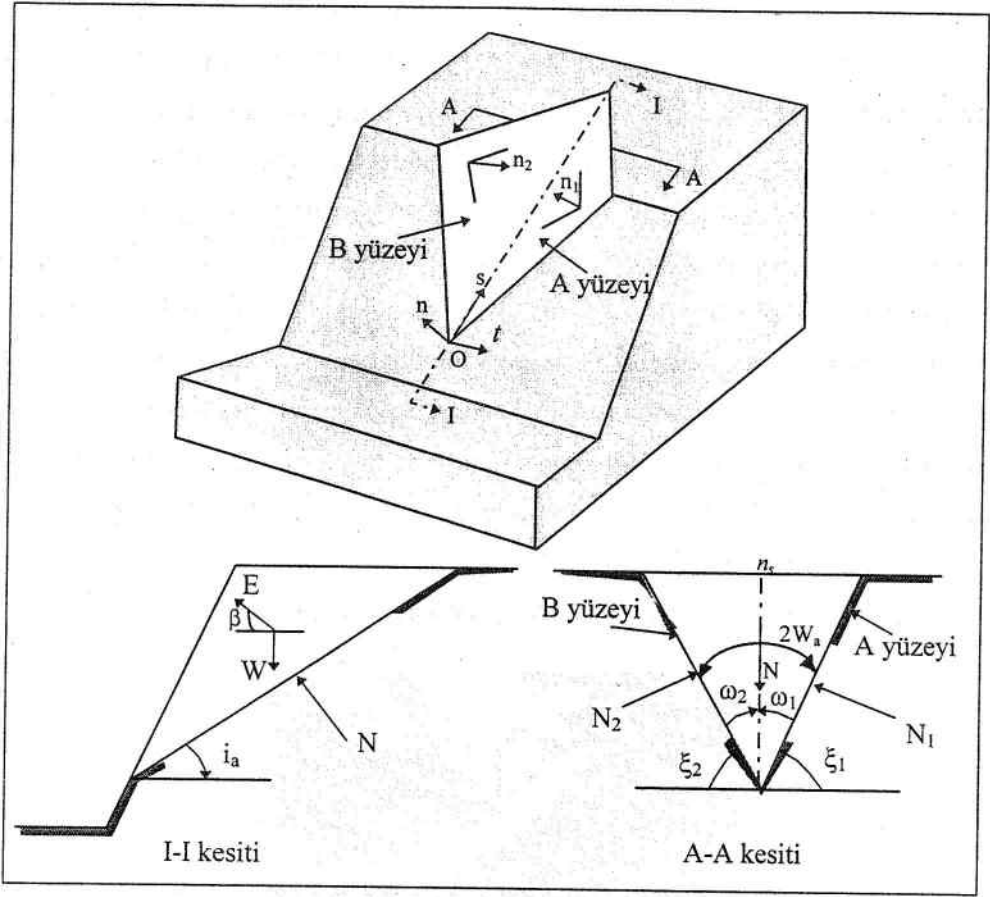
4. DENGİ SINIRI YÖNTEMİ

Kama bloklarının duraylılıklarının incelenmesi için Şekil 8'de verilen blok esas alınmıştır. Şekildeki s , n ve t yönleri için kuvvet denge denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sum F_s = W \sin i_a - E \cos(i_a + \beta) - S = 0 \quad 1$$

$$\sum F_n = W \cos i_a - E \sin(i_a + \beta) - N = 0 \quad 2$$

$$\sum F_t = N_2 \cos \omega_2 - N_1 \cos \omega_1 \quad 3$$



Şekil 8. Bir kama kütleline etkiyen kuvvetler.

Burada $N = N_1 \sin \omega_1 + N_2 \sin \omega_2$, i_a arakesit doğrusunun yatayla yapmış olduğu açıdır. $W = (1-n)W_{br} + nW_{bw}$ şeklinde yazılabilir. Burada n gözeneklilik, W_{br} bloğun katı ağırlığı ve W_{bw} bloğun içerdiği suyun ağırlığı, S makaslama kuvveti, N arakesit doğrusuna dik yönde kama bloğuna etkiyen normal kuvvet ve E ise dinamik yüküdür. β dinamik yükün, i_a arakesit doğrusunun, ξ_1 ve ξ_2 ise A ve B yüzeylerine etkiyen N_1 ve N_2 normal kuvvetlerin yatayla yaptığı açılardır. ω_1 ve ω_2 ise Şekil 8'de A-A kesitindeki A ve B yüzeylerinin düşeyle yapmış oldukları açılardır. 2 ve 3 numaralı eşitliklerde arakesit doğrultusuna dik yönde A ve B yüzeylerine etkiyen makaslama kuvvetinin bileşenleri ihmal edilmiştir. Bu tür bir varsayım kama bloğunun arakesit doğrultusuna dik yöndeki hareketinin ihmal edilebilir olmasından kaynaklanmaktadır.

Normal kuvvet ile makaslama kuvveti arasındaki ilişki Amonton'un sürtünme yasasına uyar (Hoek ve Bray, 1981).

$$T = N \tan \phi \quad 4$$

Dinamik yük E ve blok ağırlığı W , sismik katsayı η aşağıdaki gibi ilişkilendirilirse

$$E = \eta W \quad 5$$

ve güvenlik katsayısı (F)

$$F = \frac{T}{S} \quad 6$$

şeklinde yazılabilir.

1, 2, 3 ve 6 numaralı eşitliklerden güvenlik katsayısı aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$F = \lambda \frac{(\cos i_a - \eta \sin(i_a + \beta)) \tan \phi}{\sin i_a + \eta \cos(i_a + \beta)} \quad 7$$

burada λ kama faktörü olarak adlandırılmış ve aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$\lambda = \frac{\cos \omega_1 + \cos \omega_2}{\sin(\omega_1 + \omega_2)} \quad 8$$

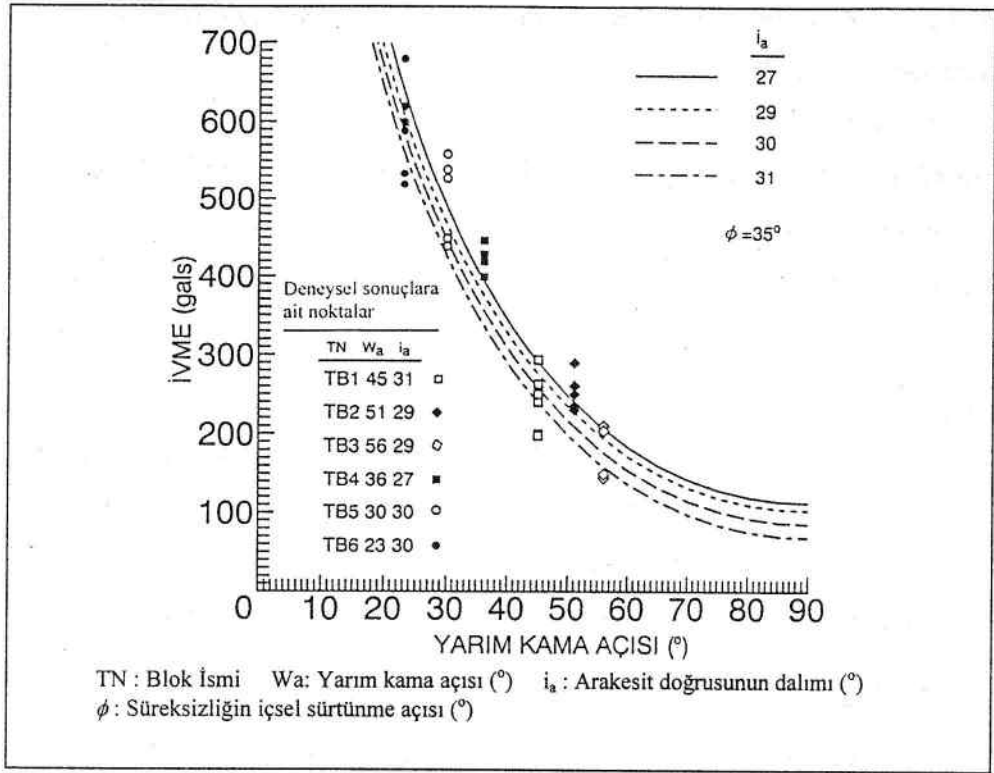
Eğer kayma anında $F = 1$ kabul edilirse, sismik katsayı η aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\eta = \frac{\lambda \cos i_a \tan \phi - \sin i_a}{\cos(i_a + \beta) + \lambda \sin(i_a + \beta) \tan \phi} \quad 9$$

5. MODEL DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Model kama blokları deney başlangıcında statik durumda tamamen duraylıdırlar. Deney başlangıcından itibaren sarsma masası yatay düzlemde tek yönde hareket ettirilerek kama bloklarının duraylılıkları incelenmiştir. Her kama bloğu geometrisi için toplam 9 adet deney yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. Kama model bloklarının duraylılıkları, ayrıca bir önceki bölümde verilen denge sınırı yöntemi ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile Şekil 9'da karşılaştırılmıştır.

Şekil 9'da görüldüğü gibi model deneylerinden elde edilen sonuçlar ile denge sınırı yöntemi ile elde edilen kuramsal sonuçlar birbirine yakın değerler vermektedir. Bu da denge sınırı yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçları açıklayabilmekte yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Deneyel sonuçların teorik tahminler ile karşılaştırılması.

Şekil 9'da görülen küçük miktardaki sapmaların ise genelde kama ve taban bloğundaki kayma yüzeylerinde yer alan küçük boyutlardaki çakıllar ve bazan hava boşluklarının neden olduğu ve yüzeyler arasındaki sürtünmeyi etkileyen pürüzlülüğünden kaynaklandığı düşünülmüştür. Model deneylerinde aynı yüzey özelliklerine sahip blokları elde etmek tam olarak mümkün olamamaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada kaya şevlerindeki süreksizlik yüzeylerinin kesişmesiyle oluşan kama türü duraysızlıkların dinamik yükler etkisi altındaki duraylılıkları deneyel ve denge sınırı yöntemi kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Kayma yüzeylerinde sadece sürtünmeye bağlı bir direncin varlığı düşünüldüğünde, denge sınırı yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile deneyel sonuçların çok iyi bir uyum

içinde olduğu görülmektedir. Doğal (deprem) ve yapay (patlatma, trafik, iş makinaları gibi) olarak oluşan dinamik yüklerin yamaçların duraylılığını etkilediği ve can ile mal kaybı gibi önemli hasarlara sebep olduğu dikkate alınırsa bu çalışmada elde edilen sonuçlar jeoteknik mühendisliği açısından oldukça önemlidir.

Dinamik yüklerin etkisinin yanısıra, bu tür deneylerin kuru koşullarda ve su altında da yapılması, çalışmanın bütünlüğü açısından gereklidir. Ayrıca gelecekte yapılabilecek deneysel çalışmalarda kama kütlesi model bloklarının daha büyük boyutlarda yapılması bu çalışmaya önemli katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Aydan, Ö., Shimizu, Y. and Ichikawa, Y. 1989. Effective failure modes of rock slopes with two discontinuity sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22(4), 163-188.
- Aydan, Ö., Kumsar, H. and Sakoda, S., 1997. Model wedge and re-assessment of limiting equilibrium methods for wedge sliding, *Proc. Of Int. Symp. on Rock Mec. And Environmental Geotechnology*, 261-266.
- Hoek, E. and Bray, J. W. 1977. *Rock Slope Engineering*, Inst. Min. and Metall., London.
- Kovari, K. and Fritz, P. 1975. Stability analysis of rock slopes for plane and wedge failure with the aid of a programmable pocket calculator. 16th US Rock Mech. Symp., 25-33.
- Wittke, W. 1967. Influence of the shear strength of joints on the design of prestressed anchors to stabilize a rock slope. *Geotechnical Conference, Oslo*, paper Np. 4.11, 311-318.

PLASTİK DAVRANIŞ GÖSTEREN KAYAÇLARDA PÜSKÜRTME BETON TAHKİMATIN UYGUNLUĞU

The Suitability of Shotcrete Support System for Plastic Rock Behaviour

ÖZKAHRAMAN, H. Tank; S. Demirel Üniv. Müh. Fak. Maden Müh. Böl. ISPARTA

ÖZET

Kil ve şeyl gibi dayanımı zayıf kayaçlar çok sığ derinliklerde dahi yenilerek, tüneller ve galeriler etrafında plastikleşen bir bölge oluşturmaktadır. Galeri üstünde yenilerek plastikleşen bu kaya yükü zamanla gittikçe artarak tahkimatı zorlamaktadır. Plastik olarak yenilen tünel kayacının mekaniği ve tahkimat taşıma yükü ile ilişkisi Bray'in teorik modellemesi ile daha belirgin bir şekilde açıklanabilmekte, plastik bölgenin genişliği ile plastik-elastik ortamdaki gerilme ve deformasyonlar hesaplanabilmektedir. Bu modellemede hidrostatik gerilme ortamında Mohr-Coulomb teorisine göre yenildiği varsayılan, dairesel bir tünel kesiti ele alınmıştır. Bu kabüllerden hareket edilerek plastik bölgenin genişliği, oluşturduğu arazi yükü ve deformasyon miktarları hesaplanmıştır. Bray'in plastik çözümü ile tahkimatın ilk kuruluş anındaki tavana uyguladığı basınç değerinin önemi çok belirgin bir şekilde ortaya konmuştur. Ortaya çıkan neticelerin ışığında plastik bir kaya ortamı içinde açılan galerilerde püskürtme betonun önemi vurgulanmıştır. Kömür madenciliğinde uzun süre hizmet vermesi beklenen ana hazırlık galerilerinin tahkimatında püskürtme beton ile galerilerin uzun ömürlü olması sağlanacak, ayrıca tamir ve bakım masrafları da azalacaktır.

Anahtar kelimeler: Plastik Davranış, Püskürtme Beton, Tünel Tahkimatı

ABSTRACT

Weak rocks like shale and clay reach the condition for rock cracking even at small depths, exhibiting plastic behavior around tunnels. Commonly, the supports experience a gradual build up in pressure by the weight of loosened rock.. A theoretical model for plastic behavior is proposed by Bray and its solution gives the extent of failure "plastic zone" and determines stresses and displacements. In this model rock behaviour assumed as Elasto- plastic and exhibiting failure according to Mohr-Coulomb theory Also a circular tunnel cross-section in a hydrostatic stress field is assumed. The extent of failed zone, ground pressure and the amount of plastic displacements can be determined as a result of the assumptions. The importance of the magnitude of support erection pressure, applied to hanging wall are proven by Bray's plastic solution. In this aspect shotcreting is suggested as the most favorite support under plastic behaviour for underground roadways in coal which service life expected to be long. Thus, shotcreting the main haulage roadways in coal mining can increase stability and reduce repair and maintenance costs.

Key words: Plastic behaviour; Shotcrete; Tunnel Support

1.GİRİŞ

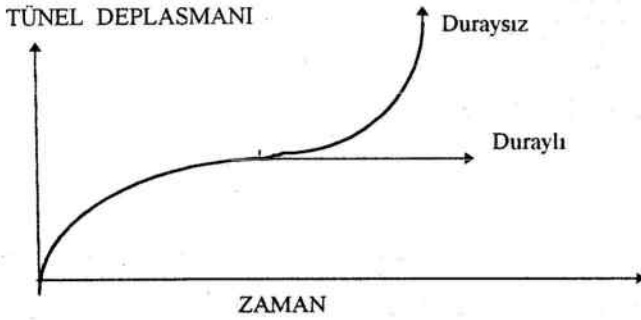
Tünel tahkimatının belirlenmesinde, kaya sağlamlığının tahmin edilmesi gerekmektedir. Şayet 20 m. veya daha geniş bir tavan açıklığı boyunca tahkimat gerekmiyorsa, bu tavan kayası kaya mekaniği uzmanlarınca sağlam olarak nitelendirilmektedir, (Goodman 1989). Elastik özellik gösteren sağlam kaya ortamında açılan tünel cidarındaki basınç yoğunlaşmaları (konsantrasyonlar) elastik teori yardımıyla Kirsch formülleri kullanılarak kolayca hesaplanmaktadır. Ancak kaya kütleleri büyük bir çoğunlukla tam elastik davranmamakta, bu nedenle kaya davranışının ve tahkimat gereksiniminin kestirimi elastik-plastik modelin kullanımını gerektirmektedir.

Kayaçlarda plastik davranışa, kayacın litolojisi ve yapısı nedeniyle çok küçük gerilme değerlerinde dahi ulaşıldığı bilinmektedir. Plastik özellik gösteren killerde bu yenilme hacim genişlemesi olarak kendini gösterir. Terzaghi, (1946) montmorilonit cinsi kil ihtiva eden kayaçların hacimce çok genişlediğini fakat mikroskopik ölçekte mika mineralleri ihtiva eden killi kayaçlarda ise kayda değer bir hacim artışı görülmediğini belirtmiştir. Örneğin, kömür madenciliğinde karşılaşılan şeyl ve kil tipi sedimenter kayaçlar çok düşük arazi basınçlarında dahi plastik davranış sergilemektedirler. Goodman (1989), çatlak oluşumunun galeri cidarında oluşan teğetsel gerilmelerin değeri, kayacın tek eksenli basma dayanımının yarı değerine ulaştığında başladığını söylemektedir. Bu durumda, örneğin basma dayanımı 3.4 Mpa olan bir şeyl tabakası içinde 15 m. gibi sığ derinlikte sürülen dairesel galeri ($K=2$ durumda) çevresindeki gerilmelerin değeri, tünel çevresinde çatlamların başlamasına yeterli olacak düzeye ulaşır. Ayrıca oluşan bu çatlaklara suyun ve havanın da girmesiyle kaya yapısındaki bozunma ve ayrışmanın arttığını kömür madenciliğindeki tecrübeler göstermiştir.

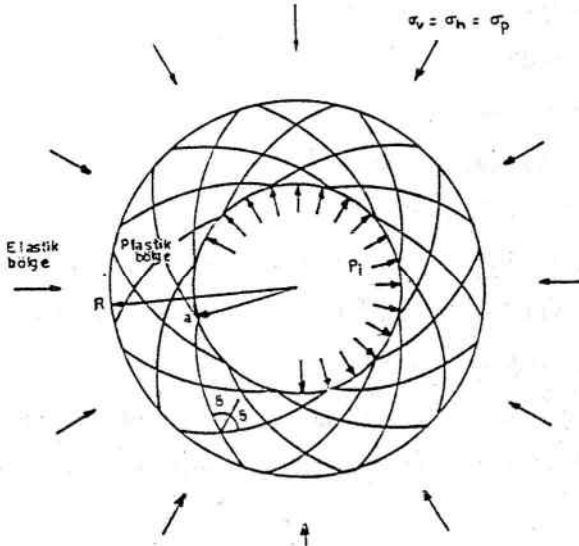
Kayanın yenilmesi tünel iç yüzeyinde meydana gelen aşırı konverjans ile kendini belli eder. Meydana gelen deformasyonlar kalıcı ise tünel içine doğru plastik bir akma söz konusudur. Şekil 1'de plastik akıcılık gösteren zeminde zamana bağlı olarak iki davranış şekli gözlenmektedir. Birincide kaya sağlam ve tahkimatın ilk kaldırma yükü de yeterliyse, tünel yan duvarlarının deplasmanı zamanla azalır ve gittikçe artan bozulma (yenilme) durur, bu durumda tünel duraylıdır. İkinci davranış şeklinde arazi yükü ve yan duvarların konverjansı gittikçe artmaktadır. Tünel duraysızdır. Bu durum eğer tahkimat çok geç kurulursa veya plastik bölgenin ölü ağırlığı tahkimatın dayanma yükünden daha

fazla ise ortaya çıkar. Oluşan deformasyonlar zamanla ivme kazanarak artar. Netice olarak tünel göçer. Böyle çürük tavan şartlarında galeri konverjansını ölçüm istasyonları kurarak periyodik olarak ölçmek ve izlemek gerekir. Böyle plastik bir yenilme söz konusu olduğunda, Bray (1967)'in teorik çözümü ile plastik bölgenin genişliği hesaplanmış ve gerçeğe yakın değerler elde edilmiştir, (Goodman, 1989).

Bray,(1965)'in teorik çözümünde Mohr-Coulomb kriterine göre kayanın yenildiği düşünülmüş ve tünel cidarındaki kaya yenilmesinin genişliği yarıçap (R) ile gösterilerek, hesap edilmiştir. Her ne kadar kırılma yüzeyleri birçok kayada dairesel halkalar şeklinde oluşmasına rağmen kil ve şeyl gibi yumuşak formasyonlarda log spiral şekilli eğriler görünümünde olduğu ve radyal yön ile (δ) açısı yaptığı kabul edilmiştir, (Şekil 2).



Şekil 1. Tünel yüzeyindeki deplasmanların zamanla değişimi, (Goodman, 1989)



Şekil 2. Elasto-plastik çözümün yenilme eğrileri, (Bray, 1967)

2. PLASTİK YENİLME BÖLGESİNİN GENİŞLİĞİ

Plastik yenilme bölgesinin genişliği Bray ,(1967) tarafından hesaplanmış ve örnek hesaplama şekli ve formüller Goodman (1989) tarafından verildiği için gerilme ve deformasyon formülleri burada tekrarlanmamıştır. Sadece yorum için gerekli görülen formüllere değinilmiştir.

Bray'in çözümünde plastik bölge içindeki kırılmış kaya yüzeylerinin makaslama dayanımı;

$$\tau_p = S_j + \sigma \tan \phi_j \quad (1)$$

formülü ile verilmektedir. Burada S_j = Kohezyon , σ = Normal gerilme ve ϕ_j = İçsel sürtünme açısıdır. Elastik -Plastik bölgenin merkezden uzaklığını veren (R) ise;

$$R = a \left(\frac{2p - q_u + \left[1 + \tan^2 (45 + \phi / 2) \right] S_j \cot \phi_j}{\left[1 + \tan^2 (45 + \phi / 2) \right] (p_i + S_j \cot \phi_j)} \right)^{1/Q} \quad (2)$$

formülünden hesaplanabilmektedir. Bu formülde;

$$Q = \frac{\tan \delta}{\tan (\delta - \phi_j)} - 1 \quad \text{ve} \quad \delta = 45 + \phi / 2 \text{ dir.}$$

Bray'in elastik-plastik çözümüyle dairesel bir galeri etrafında oluşan plastik bölgenin genişliği yanında, gerilme ve deformasyonlar da hesaplanabilmektedir. Aşağıdaki yaklaşık değerleri kullanarak;

$\phi_j = 30^\circ$ ile $S_j = 0$, Kırılma yüzeylerinin mukavemeti

$q_u = 9 \text{ MPa}$ (1300 psi), basma dayanımı

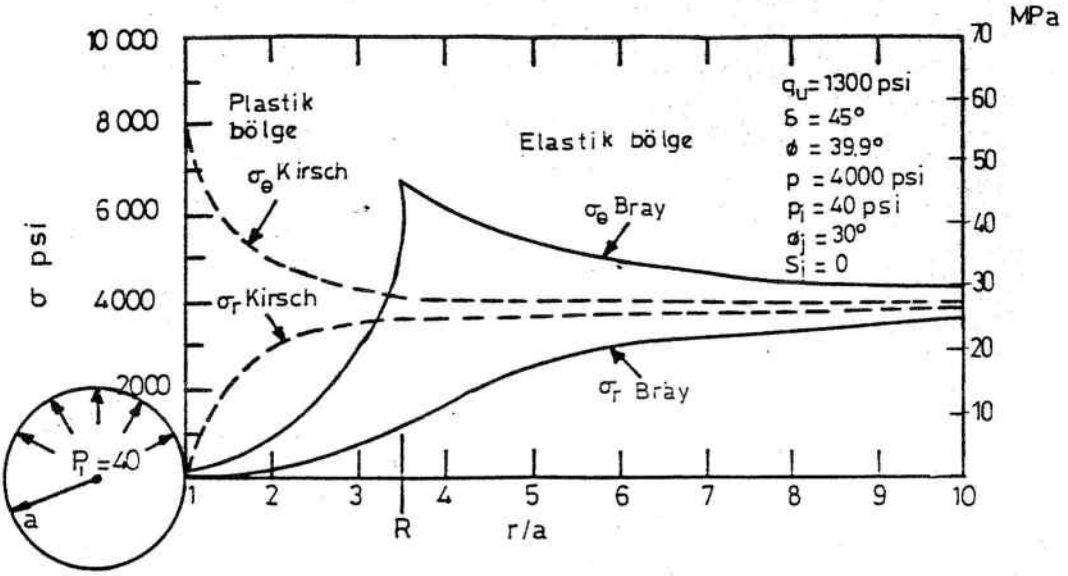
$\phi = 39.9^\circ$ (içsel sürtünme açısı); $\delta = 45^\circ$

$p = 27,6 \text{ MPa}$ (4000 psi), ortamdaki gerilmeler

$p_i = 0,28 \text{ MPa}$ (40 psi), tahkimat kurulma basıncı ise,

Bray'in formülleri ile plastik bölgenin sınırının merkezden uzaklığı $R=3.47a$ olarak hesaplanmıştır. "a"tünel yarıçapıdır. "R" Plastik-elastik bölgenin ara yüzeyinin merkezden uzaklığıdır. "p" ise hidrostatik gerilme ortamındaki yatay (σ_h) ve düşey (σ_v) gerilmeleri göstermektedir, ($\sigma_v = \sigma_h = p$). "q_u" ise sağlam kayanın tek eksenli basma dayanımıdır.

Bray'in çözümünde plastik bölgedeki radyal ve teğetsel gerilmeler (psi) cinsinden;



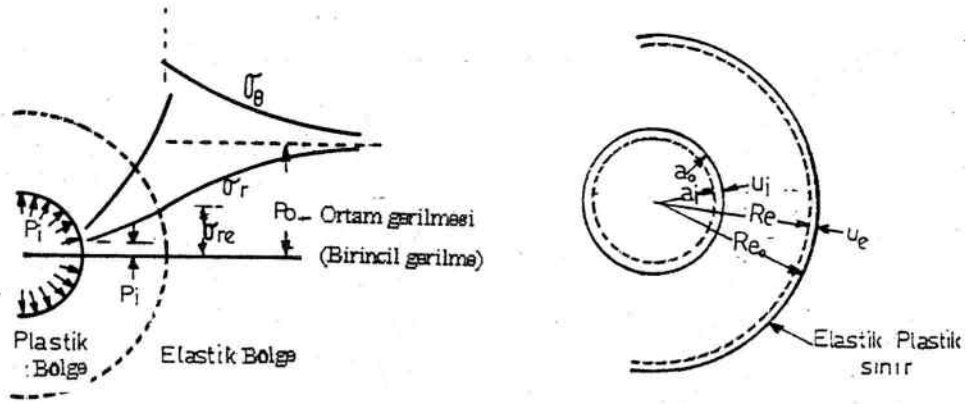
Şekil 3. Plastik deformasyona uğrayan tünel etrafındaki gerilmelerin, elastik gerilmelerle karşılaştırılması, (Goodman, 1989)

$$\sigma_r = 40 \left(\frac{r}{a} \right)^{2.73} \quad \text{ile} \quad \sigma_\theta = 40 \left(\frac{r}{a} \right)^{2.73} \quad (3)$$

elastik bölgedeki gerilmeler ise;

$$\sigma_r = 4000 - 33732 \frac{a^2}{r^2}; \quad \sigma_\theta = 4000 - 33732 \frac{a^2}{r^2} \quad (4)$$

formülleriyle verilmektedir. Şekil 3' de teğetsel ve radyal gerilmelerin tünel etrafında bu formüllerden hesaplanan değerlerinin eğrisi elastik-plastik davranış için (Bray çözümü) sürekli çizgiyle elastik ortam için Kirsch formülleriyle bulunan değerlerin eğriside karşılaştırma açısından kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 3'de görülen eğriler üzerindeki değerleri karşılaştırsak, plastik bölgede oluşan teğetsel gerilme (σ_θ)'nin galeri cidarındaki minimum 1,03 MPa (149 psi) olan değeri, kaya ortamının içlerine doğru gittikçe artarak elastik-plastik sınırdaki ($R=3.5a$), 47 MPa (6800psi) değerine ulaşmaktadır. Halbuki Kirsch formülleri ile hesaplanan teğetsel gerilme değeri galeri cidarındaki maksimum değerden gittikçe azalarak belli bir uzaklıkta ortamın birincil (primer) gerilmelerine eşitlenmektedir, (Şekil 3). Bray'ın çözümü ile varlığı saptanan, tünel iç yüzeyinin hemen arkasında yaklaşık ($3a < R < 3.5a$) mesafesinde oluşan, yüksek gerilmelere maruz kalmış böyle bir bölgenin varlığı, sismik kırılma ölçümleriyle de



Şekil 4. Dairesel tünel etrafındaki gerilmelerin gösterimi, Hoek ve Brown, (1980)

doğrulanmıştır, (Herget, 1988). Dairesel tünel etrafındaki gerek elastik gerekse plastik gerilmeler Şekil 4' de gösterilmiştir.

Kayacın tümüyle elastik davrandığı durumda, teğetsel gerilmeler tünel yarıçapının 3,5 katı uzağında ortamdaki ilk gerilme değerlerinin ancak % 10 fazlasına ulaştığı halde ,plastik davranışta (Bray çözümünden) ise, bu noktadaki ikincil teğetsel gerilmeler ortamın birincil gerilme değerinden % 70 daha büyüktür ve ancak 10a uzaklığında etkisi ortam gerilmesine göre %10'luk bir fazlalık göstermektedir. Dolayısıyla elastik kaya içinde birbirlerini etkilemeyen iki tünel plastik davranış gösteren kayalarda birbirini etkileyebilir.

Yukarıdaki örnekte deformasyonlar da, tünel yarıçapı ile ortamın elastik katsayılarına uygun değerler verilerek hesaplanmış, ve her iki çözüm için karşılaştırma yapılmıştır. Örneğin, $E= 69 \text{ GPa}$, $\nu=0.2$ ve $a=2.44\text{m}$ olduğunda, $P_i = 0,28 \text{ Mpa}$ (40 psi) için, Bray'in çözümünden tünel yüzeyindeki konverjans deplasmanı $u = 15,7 \text{ mm}$, (0.62 in.) elastik-plastik sınırdaki deplasman ise $2,79 \text{ mm}$ (0.11 in.) değerindedir. Buna karşı kayanın tamamının elastik davranış gösterdiği kabul edilirse, (Kirsch formülüyle bulunan değer), bu değer tünel cidarında sadece $1,17 \text{ mm}$ (0.046 in.)'dir. Dolayısıyla tünel iç yüzeyinde plastik bölgenin varlığından dolayı oluşan deformasyonlar elastik deformasyonlardan çok daha fazla olmaktadır. Ayrıca deformasyon değerleri tahkimat basıncı (P_i) ile de çok etkilenmektedir. Rakamlarla örnek verirse; eğer tahkimat $P_i=0,28 \text{ Mpa}$ (40 psi), yerine $0,035 \text{ Mpa}$ (5 psi)'lik bir destekleme basıncıyla kurulmuş olsaydı, plastik bölge

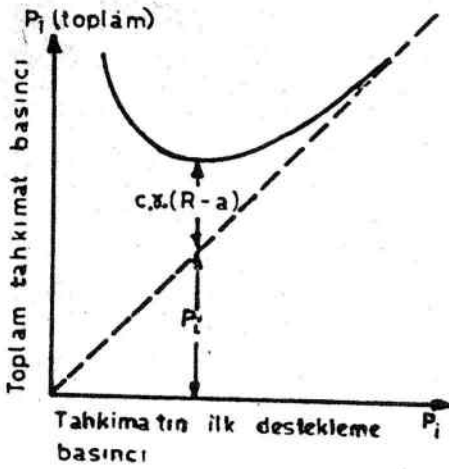
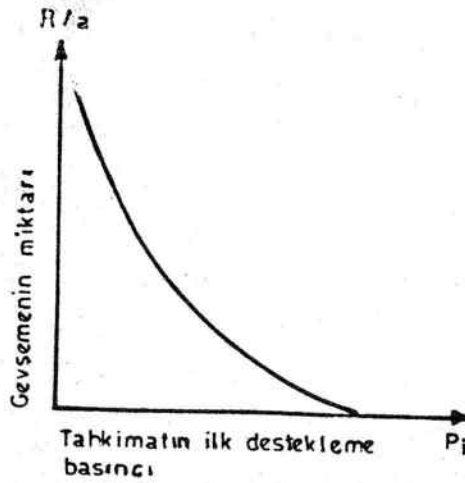
$R = 7.44a$ mesafesine kadar uzayacak ve $U_r = 39,4$ mm (1.55 in.) olacaktır. Aynı şekilde $P_i = 0,007$ MPa (1 psi) için $R = 13.4a$ olacak, bu da $U_r = 108,2$ mm. (4.26 in.)'lik bir deformasyon yaratacaktı, (Bakınız, Çizelge 1). Plastik bölge uzaklığı (R)'nın artması, tünel etrafında kırılarak gevşeyen kaya kütlelerinin genişlediğini gösterir. Gevşeyen, kemerleşmeyip kendi ağırlığını tahkimata yükleyen bu bölgenin yerçekiminin etkisi ile hareket etmeye başlaması ancak tahkimat kapasitesinin bu ilave kaya yükü kadar arttırılması ile önlenebilir. Plastik bölge içindeki bu kaya kütlelerinin oluşturduğu ek basınç, tünel üstündeki gevşeme bölgesindeki kaya yükünün bir c sabiti ile çarpımı şeklinde ifade edilmiştir, $[c \cdot \gamma \cdot (R-a)]$. Formülde " c " sabit bir faktör olup değeri en fazla 1' e eşittir. Çünkü tünel etrafındaki kemerleşmeden dolayı bu bölgenin ağırlığının tamamı tahkimat tarafından taşınmamaktadır. Kırılma ve gevşemenin derecesine göre bu değer 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu nedenle tahkimat tarafından karşılanacak olan toplam destekleme basıncı;

$$P_i (\text{toplam}) = P_i + c \cdot \gamma \cdot (R-a) \quad (5)$$

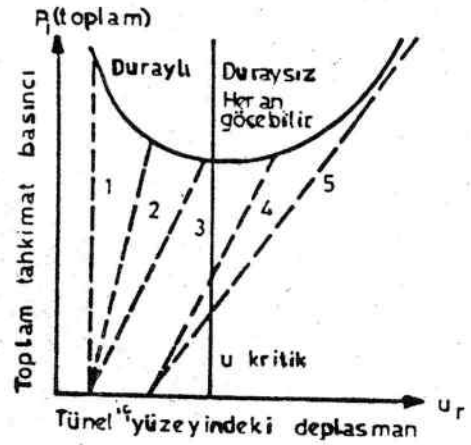
formülüyle ifade edilebilir.

Bu formülde γ kayacın yoğunluğudur. R değeri " P_i " ile ters orantılı olarak artacağından, kayanın gevşemesi ile oluşan yük artışı da, " P_i " ile ters orantılı olarak artar, (Şekil 5a). Sonuç olarak, toplam tahkimat basıncının, tahkimatın ilk kuruluş basıncına (P_i) bağlı olarak değişim eğrisi minimum bir değer vermektedir, (Şekil 5b). Aynı şekilde deformasyonun (U_r), tahkimat basıncı ile değişim eğriside, $U_r = U(\text{kritik})$ deformasyon değerinde bir minimum verir, (Şekil 5c). Şayet tahkimat, deformasyonların $U_r < U(\text{kritik})$ olduğu bir zamanda ve yeterli bir ilk destek basıncı ile kurulmuş ise tünel duraylı olacaktır. Tünel yüzeyinde bu konverjans değerine ilaveten fazladan bir deformasyon oluşması, gerekli tahkimat basıncını azaltacaktır. Tahkimatın kurulması geciktirse veya tahkimat çok esnekse, kaya yükü ile destekleme yükü arasındaki ilk dengelenme, radyal (ışınsal) deformasyonların $U(\text{kritik})$ değerinden daha büyük bir değerinde oluşacaktır. Bu da istenmeyen bir durumdur.

(a)



(b)



(c)

Şekil 5. Tahkimatın seçimi ve kurulma süresinin önemi; 1, 2 ve 3 no'lu tahkimatlar güvenlidir; 4 No'lu her an göçebilir; 5 No'lu güvensizdir, (Goodman, 1989).

Çizelge 1. Örnek hesaplama şeklinin sonuçlarının dökümü (Goodman, 1989).

P_i MPa (psi)	U_r mm (inç)	R/a	$c \cdot \gamma \cdot (R-a)/144$ MPa (psi)	Toplam, P_i MPa (psi)
0,28 (40)	15,7(0,62)	3,47	0,14(20,6)	0,45(64,6)
0,035(5)	39,4(1,55)	7,44	0,37(53,7)	0,41(58,7)
(0,007(1))	108(4,26)	13,42	0,71(103,5)	0,72(104,5)

$a = 2,44 \text{ m}$; $\gamma = 2.4 \text{ g/cm}^3$; $c = 1$

Çünkü deformasyonlardaki en ufak bir artış, ilave bir tahkimat destekleme yükü gerektirecektir. Şekil 5c'de görüldüğü gibi, "toplam tahkimat basıncı/Ur" eğrisinin eğimi tahkimatin yük/deformasyon eğrisinin eğiminden daha dikse tünelin yıkılması kaçınılmaz olacaktır. Çünkü tahkimat, aynı yük altında kayaya nazaran daha çok esnemektedir.

Bray'in çözümü Şekil 5c'de ki gibi bir dizayn eğrisinin çizilmesinde kullanılabilir. Kaya yükü sabiti $c = 1$ alınarak, 0,007, 0,035 ve 0,28 MPa değerlerinde üç ayrı tahkimat ilk kuruluş basınçlarında, 0,72; 0,41 ve 0,45 Mpa değerlerinde toplam tahkimat basınçları elde edilmiştir (Çizelge 1). Eğer tahkimatin ilk kuruluş basıncı 0,28 MPa'dan büyük olup ayrıca daha fazla yük taşıma kapasitesinede sahipse, bu tahkimat ile plastik bölgenin oluşturacağı ilave yükler karşılanabilir. Ayrıca formasyonların artan yüklerinin dengelenebilmesi için, tahkimatin esneme (stiffness) modülünün de yüksek olması gerekmektedir. Diğer taraftan tahkimat geç kuruldu ise ve çok esnekse tünel etrafındaki plastik zon geniş olarak tezahür edecek, zaman içinde her an göçebilir bir bölge oluşacaktır, (Şekil 5c).

3. PLASTİK DAVRANIŞ GÖSTEREN KAYAÇLARDA PÜSKÜRTME BETON TAHKİMATIN ÖNEMİ

Püskürtme beton tahkimat uygulamasında priz hızlandırıcıdan dolayı çabuk sertleşme olmakta, birkaç saat içinde 1-1.3 MPa gibi yüksek tahkimat ilk kurma basınçlarına ulaşılmaktadır (Hoek ve Brown, 1980).

Püskürtme beton nihai dayanımının 35 MPa değerine kadar ulaştığı literatürde verilmektedir (Özkahraman, 1990). Ayrıca püskürtme beton yüzeyi hava ve nem ile irtibatını keseceğinden kayanın dayanımının daha da zayıflamasını önlemektedir. Püskürtme betonun diğer bir avantajıda tünel iç yüzeyini bir bütün olarak desteklemesidir. Halbuki demir bağlarla ancak aralıklı tahkimat yapılmakta tünel yüzeyinin her noktası aynı ölçüde desteklenmemektedir. Çizelge 2'de tünel tahkimatları gösterilmiş ve ilk destek basınçları verilmiştir (Goodman, 1989).

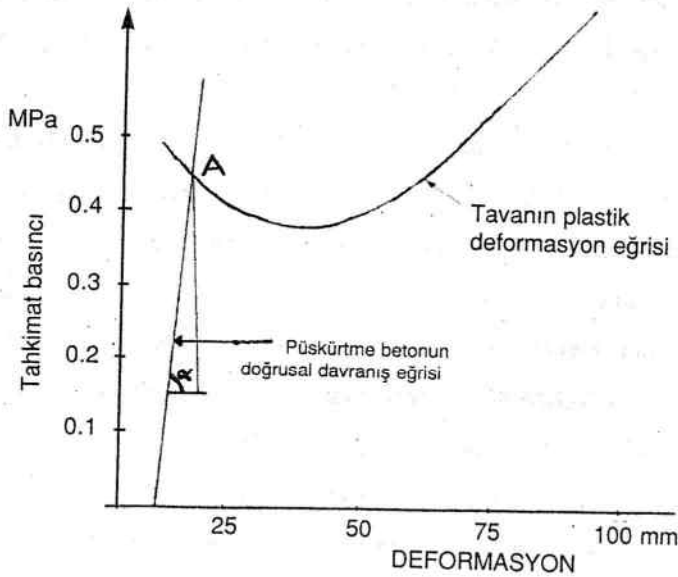
Püskürtme betonun, plastik davranış için uygunluğunu kanıtlayan, çizelge 1'deki verilere göre çizilen "Toplam Basıncı / Deformasyon, Ur" eğrisi ile püskürtme betonun

Çizelge 2. Tipik tahkimat basınçları (Goodman, 1989)

TAHKİMAT TÜRÜ	DESTEK BASINCI, MPa	TAHKİMAT ETKİSİNİN BAŞLAMA SÜRESİ
Kaya cıvatası	0-0,35 (0-50 psi)	Birkaç saat
Püskürtme beton	0,35-1,38 (50-200 psi)	Birkaç saat
Demir bağlar	0-2,76 (0-400 psi)	Birgün-birkaç hafta
Beton Tahkimat	0,69-5,5 (100-800 psi)	Birkaç hafta-ay
Çelik Tahkimat	3,5-5,5 (500-800 psi)	Birkaç ay

davranış eğrisi Şekil 6' da gösterilmiştir. Bu şekilde görülen dengelenme noktasında (A), püskürtme betonun yarattığı destekleme yeterli olmaktadır.

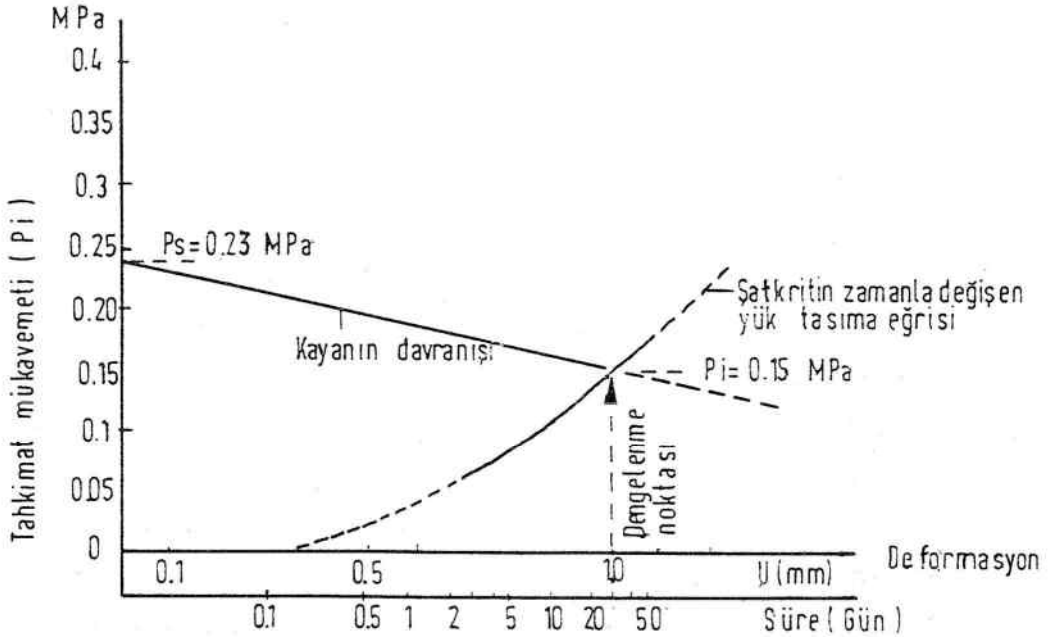
Tavan kayaçlarının deformasyon-arazi yükü ilişkisi ile püskürtme beton sıvasının sağladığı destekleme basıncı, bize plastik-elastik bölgenin sınırının ilk tahkimat basıncıyla ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Püskürtme beton tahkimatında ise ilk destekleme basıncı yüksek olduğundan plastik bölge küçülmekte, dolayısıyla gevşeyen kütle miktarı diğer tahkimat türlerine nazaran daha az olmaktadır. Bu da gerekli tahkimat destekleme basınçlarını



Şekil 6. Tüneldeki deformasyon ve püskürtme betonun davranışı (Hoek ve Brown, 1980).

azaltılmaktadır. Ayrıca püskürtme beton, çok kısa sürede sertleştiğinden kazı yüzeyinin deformasyonuna izin vermez. Oluşan deformasyon miktarları çok küçük olduğundan kritik deformasyon değerinin altında gerçekleşir.

Açıklanan yukarıdaki örnekte, hesaplamaları basitleştirmek için kırılmış bölgenin dayanımı ve deformasyon ilişkisi, hidrostatik basınç ortamında bulunan homojen bir kaya ortamı ve dairesel bir kesit için hesaplanmıştır. Fakat tüneller etrafındaki yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı çok değişmekte ve çok değişken arazi yükleri ile karşılaşmaktadır. Bu nedenle gerçek durum ve gerçek kaya davranışı ancak yerinde gerilme ve konverjans ölçümleriyle tayin edilebilir. Bu açıdan yapılan teorik çalışmaları destekler mahiyetteki Müller ve Packer'in püskürtme beton kalınlığının tayini amacıyla yaptıkları deney sonuçlarının örnek olarak sunulmasında yarar vardır. (Herget, 1988). Ölçümler için 20m derinde bulunan 1,5 m çapındaki bir araştırma tüneli kullanılmış alınan sonuçlar Şekil 7' de gösterilmiştir. Şekil üzerindeki ilk eğri kaya ortamının reaksiyon (tepki) eğrisi olup, kazı sonrası tünel iç yüzeyinde yapılan radyal plaka yükleme deneylerinden elde edilmiştir. Tatbik edilen maksimum gerilme 0,23 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 7. Tavan yükü ile püskürtme betonun yük taşımadaki davranışı (Herget, 1988).

Şekil 7' deki ikinci eğri ise püskürtme beton sıvasının yük taşıma kapasitesini göstermektedir. Laboratuvar örnekleri üzerinde, ayrıca arazide yerinde basınç ölçerler kullanılarak püskürtme beton sıvasının zamanla değişen bu yük taşıma eğrisi elde edilmiştir.

Tünel üstündeki 20 m 'lik arazi yükünün yarattığı teorik ortam gerilmesi (P_o);

$P_o = 0,026 \text{ MPa/m} \times (20 \text{ m}) = 0,52 \text{ MPa}$, olmasına karşılık kazıdan hemen sonra ölçülen, kaya yükünün yarattığı gerilme değeri $P_i = 0,23 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Bunun ortam gerilmesine oranı $0,23/0,52 = 0,44$ dür. Dengelenme noktasında ölçülen gerilme (P_i) = 0,15 MPa olup, bunda ortam gerilmesine oranı $0,15/0,52 = 0,3$ dür. Püskürtme beton sıvasının yarattığı destekleme gerilmesi, kaya yükünün oluşturduğu arazi basıncına eşit olduğunda radyal deformasyonlar durmuştur.

Netice olarak püskürtme beton tahkimatı tünelin uzun vadede duraylı olmasını ve sağlam kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca büyük arazi basınçlarını önlediğinden galerilerin tamir ve bakım masraflarını da azaltmaktadır. Halbuki demir bağ kullanıldığında, ilk tahkimat basıncı sıfır olduğundan plastik olarak yenilen kaya yükü gittikçe artmakta, artan arazi basınçlarını karşılayamayan bağlar eğilmektedir. Demir bağla tahkimat yapılan galerilerde tavan konverjansı çok olmakta, tamir ve bakım masrafları artmaktadır. Netice olarak uzun süre hizmet verecek galerilerde kaya zayıf dayanımlı ise püskürtme beton ile iyi neticeler alınabilir. Ayrıca püskürtme beton yüzeyin hava ve nem ile irtibatını keseceğinden kayanın dayanımının dahada zayıflamasını önler.

KAYNAKLAR

- BRAY, J. W., 1967. A study of Jointed and Fractured Rock. II. Theory of Limiting Equilibrium, Felsmechanik und Ingenieurgeologie 5, pp 197-216.
- GOODMAN, R. E., 1989. Introduction to Rock Mechanics. John Wiley and Sons, Newyork, 562 p.
- HOEK, E., ve BROWN, E. T., (1980) Underground Excavation in Rock, Institute of Mining and Metallurgy, London, 527p.
- HERGET, G., 1988. Stresses in Rock. A.A. Balkema Publishers Book Company, Rotterdam, Netherlands, 179p.

ÖZKAHRAMAN, H. Tarık., 1990. Yeraltı Galeri Tahkimatında Geliştirilmiş Yaş Sistem Şatkritleme Yönteminin Tanıtılması. 2. Ulusal Kaya Mekanîği Sempozyumu, Kasım 1990, Ankara, . 26-46.

**Beton/Zar/Kaya Tuzu Ara Yüzeyinin Gaz Geçirgenliğinin Ölçümü:
Boyuna Akış Deneyleri**

*Measurements of gas permeability along a grout/membrane/halite interface:
longitudinal-flow tests*

Hasan ÜÇPİRTİ
Ömer AYDAN
J.J.K. DAEMEN

Küresel Bir Yeraltı Açıklığı İçin Arazi Reaksiyon Eğrisi
Ground response curve for a spherical underground opening

Gürel ŞENYUR

**Kaya Şevlerindeki Kama Tipi Kaymaların Dinamik Duraylılığının
Model Deneyler İle İncelenmesi**
Assessment of dynamic stability of rock wedge failure using model tests

Halil KUMSAR
Ömer AYDAN

**Plastik Davranış Gösteren Kayaçlarda Püskürtme Beton
Tahkimatin Uygunluğu**
The suitability of shotcrete support system for plastic rock behaviour

H.Tarık
ÖZKAHRAMAN