ÇATLAK KAYALAR İÇtNDE AÇILAN GALERİLERİN STABILITES!

İrfan ERGÜN (*)

özet :

Günümüzde kaya içinde açılan galeri ve benzeri açıklıkların stabilitesi incelenirken kaya kütleleri elâstik, bomogen ve yeknesak-katı olan bir yapı malzemesi gibi düşünülmektedir.

Bu yazıda kaya içinde mevcut çatlakların gerilme dağılımı üzerine yaptığı tesirler üzerinde durularak birbirine dikey iki logaritmik sipiral çatlak .sistemini ihtiva eden bir kaya kütlesi içinde açılan daire kesitli bir galerinin stabilitesi incelenmiştir.

Önsöz :

Kaya içinde açılan galeri, tünel ve diğer açıklıkların stabilitelerini incelerken lüzumlu olan hesaplamalara girişebilmek için kaya kütlelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri hakkında bazı temel kabuller yapmak zorunluğu doğmaktadır. Yapılan hesaplardan mühendislikte faydalanabilmek ancak bu temel kabullerin gerçeğe uyması nisbetinde olabilir.

Jeolojik incelemeler genellikle kaya kütllerinin birçok çatlaklar ve faylarla bölündüğünü ve çeşitli kaya tabakalarından müteşekkil olduğunu ortaya koymuştur. Çoğu hallerde mevcut çatlaklar rasgele değil belli yönlerde teşekkül etmiştir. Kaya çatlakları tamamen kapalı olabildiği gibi içlerinde birçok boşluklar ihtiva edebilirler. Bazı hallerde bu boşluklar su, kil veya ufalanmış kaya parçalarıyla dolu olabilir. Bunun yanında bir kaya kütlesi içinde mevcut çeitli tabakaların basma ve çekme mukavemetleri, elâstik modülleri ve diğer mekanik ve fiziksel özellikleri birbirinden çok farklı olabilir.

Günümüzde gerilme-dağılımı hesapları yapılırken genellikle kaya kütlelerinin özellikleri elâstik, homogen ve yeknesak-katı olarak kabul edilir. Bu kabullenmeler adı geçen hesapların elâstik teori çerçevesinde yapılabilmesini mümkün kılmaktadır. [Duvall (1967)]. Bunun en büyük faydası üzerinde çok çalışmış olan elâstik teorinin genel prensip ve çözümlerinden kolayca istifade imkânnmın olmasından ileri gelmektedir, en zayıf tarafı ise kaya kütlelerini yeknesak-katı olarak kabul etmesidir. Bu son bahsedilen kabul ise mühendislikte karşılaşılan problemlerle bağdaşmamaktadır. [Bray (1967), Morgenstern (1965), Londe (1965)]. Çünkü kaya kütleleri ya jeolojik zamanlarda veya kazı esnasında meydana gelmiş çeşitli çatlaklıklarla doludur. Çok nadir hallerde mevcut çatlakların yönü ve fiziksel ve mekanik özellikleri açıklığın kesitine ve arazide mevcut gerilme yönlerine uygun olursa, açıklığın etrafındaki gerilme dağılımı üzerine fazla tesir etmediği düşünülebilirse de ge-

(*) PH.D. D.I.C, B. SO. A.B.S.M.

netlikle kaya içindeki çatlakların gerilim dağılımı üzernde büyük tesirleri vardır. Bu nedenle gerilme dağılımı hesaplan yapılırken çatlakların mutlaka nazarı itibare alınması lâzımdır.

Coulomb-Novier Mukavemet Teorisi :

Kayaların mukavemetinin kaya içinde mevcut çatlakların sürtünme açısı *(<f>)* ve cohezyonu (c) bilindiği takdirde hesaplanabileceğini ve doğrudan doğruya çatlaklar üzerine gelen normal gerilme (ov,) ve kayma gerilmesine < ! „) bağlı olduğu ilk kez Coulomb tarafından ortaya atılmış olup Novier tarafından deneylerle ispatlanmıştır. Çatlağın limit-denge durumu Coulomb teorisine göre :

$$|\tau_{mn}| = (\sigma_n - u)\ \mathrm{Tan}\ \phi + C \qquad 1.1.$$

Bu denklemde u çatlak içindeki su basıncı olup mevzumuz dışında kaldığından u=o kabul edilir ve H=C Cot ϕ şeklinde yazılırsa denklem basitleştirilerek

$$|\tau_{mn}| = (\sigma_n + H)\ \mathrm{Tan}\ \phi \qquad 1.2.$$

şeklinde yazlabilir. îzahı kolaylaştırmak için C = H = 0 kabul edilirse denklem daha da basitleştirilerek

$$|\tau_{mn}| = \sigma_n \cdot \mathrm{Tan}\ \phi \qquad 1.3.$$

(i) Eğer çatlak üzerindeki normal gerilme çekme gerilmesi ise $(\sigma_n < 0)$ çatlak açılır ve herhangi bir gerilme taşıyamaz.

(ii) Çatlak üzerindeki normal gerilme basma gerilmesi ise $(\sigma_n > 0)$ çatlak palı kalır ve gerilme iletebilir. Bu takdirde :

(a) $|\tau_{mn}| \geq \sigma_n$ Tan ϕ ise çatlak üzerinde izafi kayma meydana gelir yani kaya mukavemeti aşılmış olur.

(b) $|\tau_{mn}| < \sigma_n$ Tan ϕ ise çatlak üzerinde herhangi bir kayma meydana gelmiyeceğinden çatlaklar ihtiva etmesine rağmen kaya yeknesak kaya mukavemeti yenilinceye kadar basma gerilmesi taşıyabilir.

Ayrıca birim kaya kütlesi üzerine gelen (Şekil 1) maximum ve minumum normal gerilme (ov (72) belli ve çatlağın maximum gerilme yönüyle yaptığı açı biliniyorsa

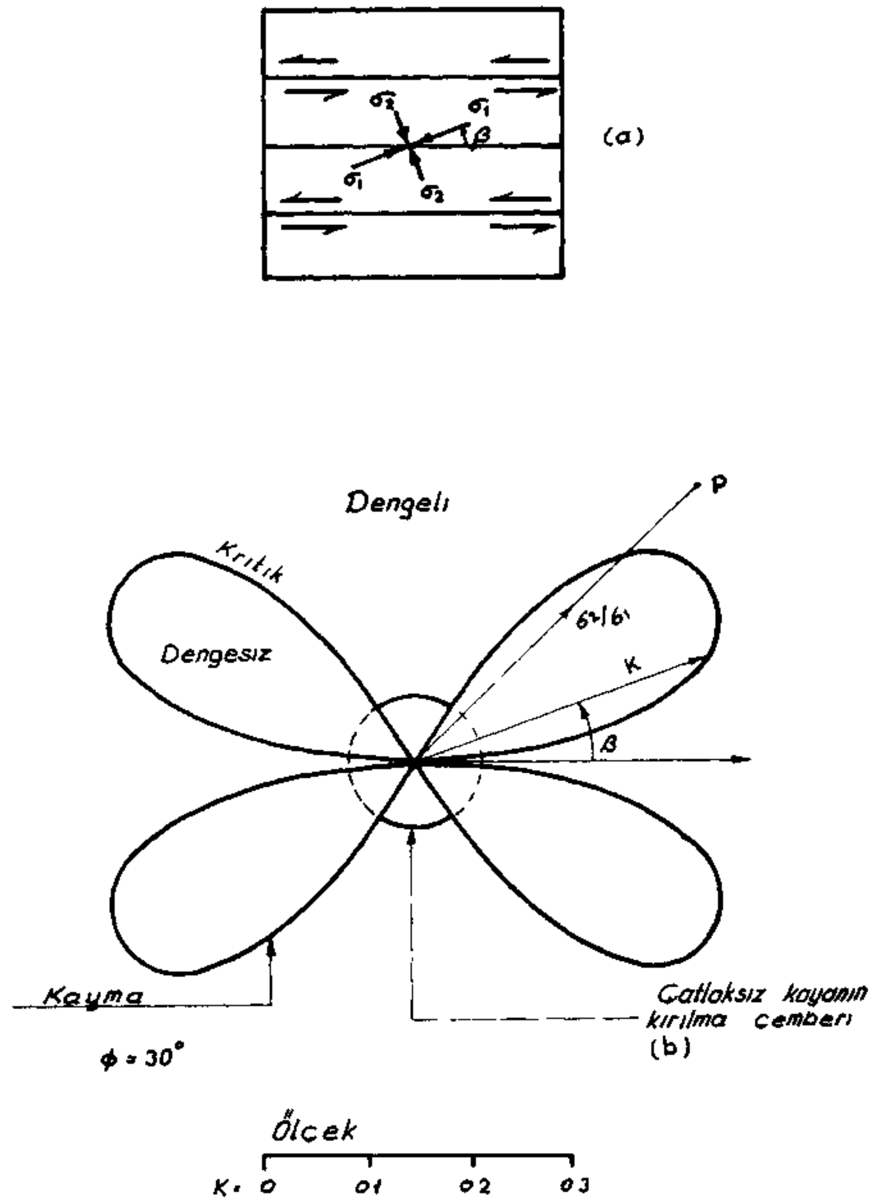
$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\beta \quad \dots\dots\dots \quad 1.4.$$

$$\tau_{mn} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\beta \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad 1.5.$$

olacağından bu değerler 1.3 No. lu formüle konularak ve basitleştirilerek

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = K = \mathrm{Cot}(|\beta| + \phi)\ \mathrm{Tan}(|\beta|) \quad \dots\dots\dots\dots\dots \quad 1.6.$$

şeklinde formüle edilerek kaya mukavemeti ov 0*2 ve β ya göre hesaplanabilir.



σ_2
σ_1
β
σ_1
σ_2
(a)
Dengeli
Kritik
Dengesiz
P
σ_2/σ_1
K
β
Kayma
Catlaksız kayanın
kırılma cemberı
(b)
$\phi = 30°$
Ölçek
K = 0
01
02
03

Şekil 1

Çatlak Kayalar içindeki Gerilme Dağılımı :

Bu kısımda belli bir kuvvet sistemi altında bulunan çatlak kayalar içindeki gerilme dağılımının yeknesak katlar içinde meydana gelecek gerilme dağılımı ile mukayesesi yapılmakta olup izahı kolaylaştırmak için çatlakların kohezyonun olmadığı kabul edilmiştir. (C=0).

Bir kaya çatlağının üzerine gelen normal gerilme çekme gerilmesi ise bu çatlak açılacağından adı geçen çatlak üzerinden herhangi bir gerilme iletimi olmıyacaktır. Bu takdirde çatlağın hemen çevresindeki gerilme tek yönlü bir çekme gerilmesinden ibaret kalacaktır.

Eğer çatlaklar üzerindeki normal gerilme basma gerilmesi ise çatlaklar kapalı kalacaklar ve bu gerilimi iletebileceklerdir. Bu takdirde çatlağın mukavemeti 0« 1*'an ⊕ olacaktır. Aynı çatlak üzerine gelen kayma gerilmesi bu mukavemetten az veya eşit ise kaya küüesi içindeki gerilme dağılımı bir elâstik yeknesak-katı içindeki gerilme dağılımının aynısı olacaktır. Çatlak üzerindeki kayma gerilmesi çatlak mukavemetine eşitse meydana gelen gerilme dağılımı hem elâstik teorinin ve hem de limit denge teorisinin denge denklemlerini aynı zamanda sağlamış olacaklardır. Yani gerilim dağılımı iki teoriye görede hesaplanabilecektir. Buna mukabil eğer kayma gerilmesi çatlağın mukavemetinden fazla ise bu fazlalık çatlak üzerinde izafi bir kaymaya sebep olacaktır. Bu kaymanm sonunda tekrar çatlak üzerindeki kayma gerilmesi ile çatlağın mukavemeti eşit olabilir ve yeniden limit denge durumu sağlanabilirsede meydana gelecek gerime dağılımı elâstik yeknesak katılar için bulunan gerilme dağılımından tamamen farklı olacaktır. Bundan dolayı elâstik denge durumunun yeniden meydana gelmesine imkân yoktur.

Yukarıdaki izahtan da anlaşılacağı üzere çatlak kayalar içinde kazılan bir açıklığın etrafında üç tip gerilme bölgesi bulunabilir.

(i) Çatlakların açıldığı bölge. Bu çatlaklar arasındaki her tabaka veya blok **ayrı** birer yapı elemanı gibi kalmıştır. Bu yapı elemanları eksenlerine göre bükülme ve kıvrılma imkânlarına sahiptir.

(ii) Bütün çatlakların kapalı kaldığı ve çatlaklar üzerinde bir kayma meydana gelmeyen bölgeler. Bu bölgelerde gerilme dağılımı yeknesak katı içindeki elâstik gerilme dağılımının aynıdır.

(iii) Çatlaklar üzerinde limit denge prensiplerine uygun kaymanın meydana geldiği kısımlar.

Kaya içinde açılan yapıların etrafındaki gerilme dağılımının hesaplarının ana zorluğu yukarıda bahsedilen bölgelerin sınırlarının tayininin zorluğundan ileri gelmektedir. Eğer yapı üzerindeki yükü başlangıçta sıfır imiş gibi düşünür ve yüklerin yavaş yavaş aynı oranda artırıldığını kabul edersek meydana gelecek gerilme bölgelerinin sınırları sabit kalacaktır. Yükün son durumuna göre her bölge içindeki gerilme dağılımı belli değerlerini almış olacaktır. Eğer yükleme bunun dışında bir metodla yapılırsa açıklık üzerine gelecek yükler değiştikçe hem gerilme bölgelerinin sınılan ve hem de gerilim dağılımı değişecektir. Bundan dolayı kaya içinde meydana gelecek gerilme dağılımı yüklemeye bağlı olduğu gibi yüklerin tatbik ediliş şekline de bağlıdır.

Temel Denklemler :

Herhangi bir dengenin temin edilebilmesi için gerilme dağılımı aşağıdaki iki diferansiyel denklemleri sağlamak zorundadır.

$$\frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.1.$$

$$\frac{\delta \tau_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta \sigma_y}{\delta y} = \gamma \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.2.$$

Burada x,y kartezyen koordinat sisteminin absis ve ordinat exsenleri olup y düşey yönde yukarıdan aşağı doğıu ölçülmüştür, y ise kayanın özgül ağırlığıdır.

Kayma halinde olan bir çatlak üzerindeki gerilme aşağıdaki eşitlikleri sağlaması gereklidir.

$$\tau_{mn} = \sigma_n \ \mathrm{Tan}\,\phi \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.3.$$

veya

$$\sigma_2 = K \sigma_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.4.$$

İki çatlak arasındaki kaya kütlesi elâstik ve yeknesak-katı olarak alırsak Hooke kanununa göre kaya içindeki birim uzama ve kısalma

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \delta\sigma_y - \delta\sigma_z) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.5.$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G}(\tau_{xy}) \ etc \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.6.$$

Burada $_{fx}$ y_n normal ve kayma birim uzama ve kısalması, E, G ve y İse kayanın elâstik modülü, kayma modülü ve Polssan katsayısıdır.

Bu denklemler bir açıklığın sınır şartlarıyla birlikte bir problemi tamamen tanımlamış olur. Çatlakların mevcut olması halinde gerilme kesitlikleri meydana getirmesi bakımından bir problem doğmaktadır. Bunu oradan kaldırmak için çatlaklar arasındaki mesafeyi sonsuz-küçük bir mesafe olarak kabullenmek yetmektedir. Bu kabulün iki avantajı vardır. Bunlardan biri gerilmenin Hooke kanununa bağlı olmadan hesaplanabilmesidir. Bunun nedeni kayma dolayısiyle meydana gelecek kaya hareketlerinin nisbeten kat be kat fazla olmasıdır. İkincisi ise gerilme kesikliklerini ortadan kaldırmasıdır. Bu nedenle bir problemin çözümü için yalnızca limit denge denklemlerini ve sınır şartlarını yerine getirmek kâfi gelmektedir.

Hakikatte çatlaklar arasında belirli bir mesafe vardır. Buna rağmen bu kabule dayanan bazı çözümler model çalışmalarından elde edilen neticelerle karşılaştırılmış olup neticeler arasında iyi bir uygunluğun bulunduğu ispatlanmıştır. [Moore (1966]

Logaritmik Spiral Çatlaklarla Dolu Kaya Kütleleri içinde açılan Dairesel Kesitli Galerilerin Stabilité Hesapları :

Hesaplama için yapılan kabuller

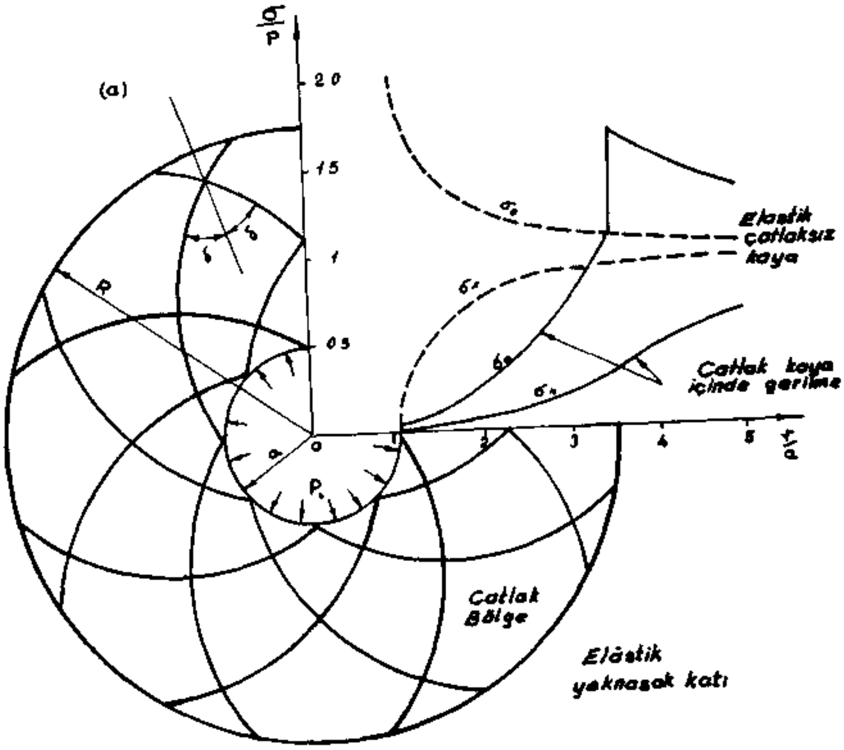
(i) Kaya kütlesi içindeki asal basma gerilmesi hidrostatiktir. Yani yatay basma gerilmesi düşey basma gerilmesine eşittir. (Px=Pv=P)

(ii) Galeri cidarlarına verilen tahkimat cidarlara eşit olarak dağılmış bir basma gerilmesi (Pi) tatbik etmektedir ve bu gerilmenin miktarı galeri çerçevesinde kaya kütlesinin dengesini temin etmeye yeterlidir.

(iii) Galeri çerçevesindeki çatlaklar her noktada radyal yönle sabit bir g açısı yapan logaritmik spiıal çatlaklardır.

(iv) Mevcut çatlaklar birbirine sonsuz-küçük uzaklıktadır.

(v) Galeri çerçevesindeki kaya kütlesi ağırlığı olmayan bir madde gibi düşünülmüştür.



Şekil: 2

(a) Problemin Gerilme Dağılımı Açısından Çözümü :

Şekil 2 de gösterilen ve yarı çapı a olan daire kesitli bir galerinin cidarlarına verilen tahkimat (Pi) yalnızca galeri çerçevesindeki kaya kütlesinin stabilitesini sağlayacak kadar olduğunu kabul ettiğimize göre, galeri çevresindeki maximum asal gerilme çap yönünde olacaktır. Çatlak bölge içinde (**r** <^ R)

$$\beta = 90 - \delta \qquad 3.1.$$

1.6 ve 3.1 No. lu denklemlerden

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = h = Tan\,(\,|\delta| - \phi)\;Cot\,|\delta| \qquad \ldots\ldots\ldots \quad 3.2.$$

Problem galeri çapına göre simetrik olduğundan galeri çevresindeki basınç dağılımı Θ açısına bağlı değildir ve denge eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir. (Burada probleme daha uygun olması nedeniyle polar koordinat sistemi seçilmiştir)

$$\frac{\delta \sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = q \frac{\sigma_r}{r} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ 3.3.$$

EntegraJ olarak ve galeri cidarlarındaki sınır şartlarından

$$(r = a \text{ ve } \sigma_r = P_i)$$

$$\sigma_r = P_i \left(\frac{r}{a}\right)^q \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ 3.4.$$

$$\text{ve} \quad \sigma_\theta = \frac{1}{K} \cdot \sigma_r = \frac{P_i}{K} \left(\frac{r}{a}\right)^q \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ 3.5.$$

Galeri çevresindeki çatlak bölgedeki basınç dağılımını gösteren bu denklemler kayma mukavemetinin tamamen sürtünme açısından geldiği kabul edilerek bulunmuştur. Kohezyonu da hesaba katmak icabederse normal gerilmelere H kohezyon faktörünü ilâve ederek

$$\sigma_r + H = (P_i + H) \left(\frac{r}{a}\right)^q \qquad \ldots\ldots\ldots\ 3.6.$$

$$\sigma_\theta + H = \frac{P_i + H}{K} \left(\frac{r}{a}\right)^q \qquad \ldots\ldots\ldots\ 3.7.$$

bulunur.

Galeri çevresindeki çatlak bölgenin dışında kalan (f^>R) kaya kütleleri elastik yeknesak-katı gibi hasma gerilmesini taşıdığı için bu bölgedeki gerilme dağılımı :

$$\sigma_r = p - \frac{b}{r^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ 3.8.$$

$$\sigma_\theta = p + \frac{b}{r^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ 3.9.$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots\ 3.10.$$

formüllerinden hesaplanabilir. Burada b ve R elastik-katının mukavemeti bilindiği takdirde hesaplanabilen sabit değerlerdir Eğer kaya mukavemeti Coulomb-Novier mukavemet teorisine göre hesaplanırsa

$$\sigma_\theta = h\sigma_r + J \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ 3.11.$$

Burada h ve J deneyler neticesinde bulunan kayanın içsel sürtünme katsayısı ve kohezyonudur. Galeri çevresindeki çatlak bölgenin dış yarıçapı (R) yi hesaplamak için çatak bölgenin limitinde r=R olduğundan 3.6, 3.8, 3.9 ve 3.11 No. lu formüllerden

$$\sigma_\theta = h\sigma_< + J = p + \frac{b}{R^2}$$

$$\sigma_r = (P_i + H)\left(\frac{R}{a}\right)^q - H = p - \frac{b}{R^2}$$

yazdır ve bu iki denklem çözülerek

$$R = a \left[\frac{2p - J + (h+1)H}{(h+1)(P_i + H)} \right]^{1/q} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad 3.12.$$

$$b = \left[\frac{(h-1)\,P + J}{h+1} \right] R^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad 3.13.$$

bulunur. Bu kabullerin limiti içinde kaya kütlesinin belli fiziksel özelliği bilinirse herhangi bir galerinin stabilitesi yukarıdaki formüllerden hesaplanabilir.

Bu çözümlerin nasıl uygulanacağını nümerik bir misalle izah edebiliriz.

δ = 450°, $\varnothing$ = 30°, H = 0, h=4.58

J = 90 Kg/Cm2, P = 280 Kg/Cm2, Pi = 2.8 Kg/Cm*.

Bu değerleri yukarıdaki denklemlere koyarak K=0.268, q=2.72

R = 3.5a, b=2390 a2 ve çatlak bölgede

$$\sigma_r = 2.8 \left(\frac{r}{a}\right) 2.72$$

$$\sigma_\Theta = 10.5 \left(\frac{r}{a}\right) 2.72$$

Çatlak bölge dışında

$$\sigma_r = 280 - 2390 \left(\frac{a}{r}\right)^2$$

$$\sigma_\Theta = 280 + 2390 \left(\frac{a}{r}\right)^2$$

bulunur.

Bu çözümün neticesi σ_Θ, σ_r normalize edilerek yani arazi basıncı p **ile** bölünerek (Şekil 3) verilmiş olup içinde hiç çatlak bulunmayan elastik yeknesak-katı için açılacak daire kesitli bir galerinin çevresindeki gerilme dağılımı ile mukayese edilmiştir.

Burada pratikte faydalanabileceğimiz bazı faydalı prensipler hemen kendini göstermektedir. Bu prensipleri kısaca özetlersek :

(i) Çatlak kayalar içinde açılan bir galeriye verilen tahkimat basıncı arazide mevcut basma gerilmesine nisbeten çok küçük dahi olsa, galerinin stabilitesi için çok önemli bir faktördür. Tahkimat mukavemetindeki çok az bir ilâve galeri çevresindeki çatlak bölgenin sınırlarını hissedilir bir miktarda daraltmaktadır.

(ii) Çatlak kayalar içinde açılan bir galeri etrafındaki gerilme dağılımını kaya kütlelerini elâstik yeknesak-katı gibi kabul ederek hesaplamak hakikate hiç uymamakta ve bu tip hesapların mühendislik problemlerinde faydalı olabilmesi için çok titizlikle kullanılması gerekmektedir.

(iii) Kaya çatlaklarında mevcut olan kohezyon azda olsa stabilité için tahkimat kadar önemli bir faktördür.

(iv) Yukarıda alınan değerlere göre galeri çevresindeki çatlak bölgenin dış yan çap R = 5.47 a dır. Yani bir galerinin çatlak kayalar içindeki tesir sahası galeri yarı çapının en az 5.47 misli olmaktadır. Halbuki elâstik teoriye göre yeknesak katılar için yapılan hesaplardan bu problem için galerinin tesir sahası en çok R = 3 a bulunur.

Elde edilen neticeler tamamen hayali bir problem içindir ve pratikte tatbiki mümkün olmayan bir tahkimat sistemine göre yapılmıştır. Bu problemde tahkimatın kazı yapılır yapılmaz yerleştirilmesi gerekmektedir.

(b) Daire Kesitli Bir Galerinin Stabilitesinin Kaya Hareketleri Yönünden İncelenmesi :

Gerilme yönünden incelenen çatlak kayalar içinde açılan daire kesitli bir galerinin stabilitesini şimdide birim uzama, kısalma ve kaya hareketi yönünden inceleyelim, iki logaritmik spiral çatlak sisteminin çap yönüyle sabit S a?[181] **yaptığını** kabul etmiştik. Bu çatlak sisteminin biri üzerindeki izafi kayma

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2}\Gamma \sin 2\delta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\quad 4.1.$$

$$\varepsilon_r = -\frac{1}{2}\Gamma \sin 2\delta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\quad 4.2$$

$$\gamma_{r\theta} = \Gamma \cos 2\delta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\quad 4.3$$

İkinci çatlak sistem üzerindeki kayma dolayısiyle meydana gelecek birim uzama ve kısalmanın miktarı bunların aynı olacak yalnız kayma birim uzamasının yönü buradakinin aksi yönde olacaktır. Bu iki çatlak sistemlerinden meydana gelen uzama ve kısalmalara elâstik uzama ve kısalmalar ilâve edilirse

$$\varepsilon_\theta = \Gamma \sin 2\delta + \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \delta\sigma_r) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\quad 4.4.$$

$$\varepsilon_r = \Gamma \sin 2\delta + \frac{1}{E}(\sigma_r - \delta\sigma_\theta) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\quad 4.5.$$

$$\delta_{r\theta} = \frac{1}{G}\tau_{r\theta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\quad 4.6.$$

Çatlakların kahezyonunu sıfır kabul edersek

$$\sigma_r = P_i \left(\frac{r}{a}\right)^q$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_r}{K}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} = \Gamma \sin 2\delta + \frac{P_i}{E}\left(\frac{r}{a}\right)^q (K-\nu) \quad \ldots\ldots \ 4.7.$$

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\Gamma \sin 2\delta + \frac{P_i}{E}\left(\frac{r}{a}\right)^q (1-\nu K) \quad \ldots\ldots \ 4.8.$$

4.7. No. lu eşitliğin iki tarafını r ile çarpan ve r ye göre türevi alınırsa

$$\frac{du_r}{dr} = \sin 2\delta \left(\Gamma + r\frac{d\Gamma}{dr}\right) + (q+1)\frac{P_i}{E}\left(\frac{r}{a}\right)^q (K-\nu)$$

Bu denklemi $_{gr}$ İle eşitler ve $q = \frac{1}{K} - 1$

olduğunu nazara itibara alırsak

$$\frac{d}{dr}\left(r^2 \Gamma \sin 2\delta\right) = \frac{\nu P_i}{E a^q}\left(\frac{1}{K} - K\right) r^{(q+1)}$$

Entegral olarak

$$\Gamma \sin 2\delta = \nu (1-K) \frac{P_i}{E}\left(\frac{r}{a}\right)^q + t r^{-2}$$

Burada t entegral sabitidir. Yukarıdaki 4.7 No. lu denklemden

$$U_r = (1-\nu) \frac{P_i}{E} \cdot \frac{r^{(q+1)}}{q^2} + t r^{-1} \quad \ldots\ldots\ldots \ 4.9.$$

Bu denkleme gore elde edilen toplam kaya hareketinden kaya basma gerilmesinden doğan elâstik kısalmayı çıkarırsak

$$U_r = \frac{(1-\nu)}{E}\left(P_i \frac{r^{(q+1)}}{a^q} - p r\right) + t r^{-} \quad \ldots\ldots\ldots \ 4.10.$$

bulunur. Çatlak bölgenin sınırında r = R olduğundan çatlak bölgenin sınırındaki elâstik gerilme

$$\sigma_r = p - \frac{b}{R^2}$$

$$\sigma_\theta = p + \frac{b}{R^2}$$

Burada çap yönündeki toplam kaya hareketi :

$$U_r = R\,\varepsilon_\theta = \frac{R}{E}\left[(\sigma_\theta - p) - \nu(\sigma_r - p)\right] = (1+\nu)\frac{b}{ER} \quad \ldots\ldots \ 4.11.$$

bulunur.

Buradan elde edilen Ur 4.10 No. lu denklemden r R iken elde edilecek Ur ile eşitlenirse

$$t = \left(\frac{1-\nu}{E}\right) R^2 \left[P - P_1 \left(\frac{R}{a}\right)^4 \right] + \left(\frac{1+\nu}{E}\right) b \qquad \ldots . \; 4.12.$$

bulunur. Buradan elde edilen t değeri 4.10 No. lu denklem yerine konulursa her yarıçapta doğacak toplam kaya hareketinin miktarını hesaplamak mümkün olmaktadır.

Bu çözümü de bir misalle izah edelim. Yukarıdaki misaldeki değerlere ilâveten kaya kütlesi İçin E = T X 10^s Kgl crr^, —0.2; a = 260 cm. alırsak verilen denklemlerden + = 406 cm2 Ur = 1.57 cm. bulunur. Bunu elâstik katı içinde açılan aynı çaptaki bir galeride meydana gelecek toplam uzama Ur = 0.115 cm. ile mukayese edersek çatlak kayalar içindeki kaya hareketinin kat be kat daha fazla olduğu ortaya çıkar.

Sonuç:

Kaya mekaniği çok genç bir ilim dalı olmasına rağmen mevcut çalışmalar mühendislikte karşılaşılan birçok problemlerin çözümlerinde yardımcı olabilecek duruma gelmiş bulunmaktadır. Bu ilim dalının geliştirilmesi ancak elde edilen çeşitli çözümlerin mühendislik problemlerine tatbiki ve alınan neticelerin teorik çözümlerin ışığı altında değerlendirilmesi ile mümkün olacağı kanısındayım.

lebliğ Hakkında :

Bu tebliğde verilen çözümler Londra Üniversitesine bağlı Imperial College of Science and Technology'de kaya mekaniği Öğretim Üyesi Sayın Dr. J. W. Bray'e aittir. Tebliğde ileri sürülen fikirler yazar aynı üniversitede doktora öğrenimi yaparken geliştirilmiş olup çözümlerde olan hatalar mevcutsa yazara aittir.

Bibliyografik Tanıtım :

BERNAIX, J., 1969. *New laboratory methods of studying the mechanical properties of rocks'. Int. J. Rock Mech. Min. Sei Vol. 6, pp. 43.90.

BIENIAWSKI, Z. T., 1968. The efect of specimen size on compressive strength of coal'. Int J. Rock Mech. Min. Sei. VoL 5, pp. 325-335.

BISHOP, A. W., 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes'. Geotechnique.

BISHOP, A. W. and HENKEL, D. J., 1957 The measurement of soil properties in the Triaxial Tesf. Arnold, London.

BISHOP, A. W., 1966. The strength of soils as engineering materials'. Sixth Rankine Lecture, Geotechnique VoL 16 pp. 91-180.

BRAY. J. W., 1966. 'Limiting equilibrium of fractured and jointed rock'. Proc. of the finst congress on nock mechanics, Lisbon.

BRAY, J. W., 1957. The teaching of rock mechanics to Mining engineers', Trans. Inst. Min. Engineers, No. 79.

BRAY, J. W., 1967. 'A study of jointed and fractured Rock'. Parts I and II. Rock Mech. and Eng. Geol. Yol. v/2 - 3, 1967 and Vol. v/4.

BYERLEE, J. D., 1967. 'Teory of friction based on brittle fracture'. Journal of Geophysical research,

BYERLEE, J. D., 1968. 'Brittle - Juotile transition in rocks' Journal of Geophysical Research.

DEERE, D. U., 1968. 'Geological considerations' Rock Mech. in Eng. Practice, Stag and Zienkievricz, John Wiley.

DENKHAUS, H. G„ 1958. The application of the mathematical theory of elasticity to problems of stress in hard rock. Ass. Min. Mngrs. S. Afr. Vol. 1958/9.

DUVALI, W. I. and Obert, L., 1967. 'Rock mechanics and the design of structures in rock', 1967.' N. Y. John Wiley.

EINSTEIN, R. H., et al. 1969. 'Model studies of jounted-rock behavior'. Eleventh symposium on rock mech. Berkeley, California.

FRANKLIN, J. A., 1970. 'Classification of rock according to its mechanical properties'. Ph. D. Thesis, London University.

FAMUGALLI, E., 1968. 'Model simulation of rock mechanics problems. Rock, Mech. Eng. Practice. Stagg and zienkiewicz.

HAST, N., 1958. The measurement of rock pressure in mines'. Arsb. Sver. Geol Unders, 52.3

HAYASHI, M., 1966. 'Strength and dilatancy of brittle jointed mass*. Proc. First. Cong. Rock Meah. Lisbon.

HENDRON, A. J., 1968. 'Mechanical properties of rock'. Rock Mech. in Eng. Practice, Edit: Stag and Zienkievricz John Wiley and Sons.

HOBBS, D. W., 1960. .Scale model studies of strata movement around mine roadways.' Int. J. Rock Mech. Min. Sei. Vol. 3, pp. 101 - 127.

MOORE, J. F. A., 1965. The Behaviour of Discontinuous Ground'. Ph. D thesis, London University.

MORGENSTREN, N. R., 1964. The limit equilibrium method of slope stability analysis'. Ph. D. thesis, University of London.

MORGENSTREN, N. R. and PRICE, V. E., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces'. Heotechnique, Vol. 15, pp. 79.93.

PATTON, FJ)., 1966. 'Multiple modes of shear failure'. Proc. of First congress on Rock Mechanics, Lisbon.

SAVIN, G. N., 1951. 'Stress concentration around holes'. Moscow.

ERGÜN, I. 197», Stability of Underground openings. PH. D. thesis, University of London.

ERGÜN, I. 1970, Stress distribution in jointed rock media. Proc. the and. Congress on rock mechanics, Belgrade.