

Kaya Saplamlarının İçinde ve Civarında Çehme Deneyleri Sırasında Oluşan Gerilme , Birim Deformasyon ve Yer Değiştirmelerle ilgili Yeni Bir Analitik Çözüm

A Nev Analitic Solution For Stresses, Strains and Displacements in/along Rockbolts

Ömer AYDAN*
Toshikazu KAWAMOTO**
Yasuaki ICHIKAWA***
Alpaslan ERSEN****

ÖZET

Bu yazıda kaya saplamlarının içinde ve civarında çekme deneyleri sırasında oluşan eksenel ve kesme gerilmeleri ile birim deformasyon ve yer değiştirme miktarlarıyla ilgili olarak kayanın deforme olabilme özelliği ve saplama-harç ya da harç-kaya ara yüzeylerinin elastik-gevrek-plastik davranışını göz önüne alan yeni bir analitik çözüm önerilmiştir.

ABSTRACT

In this paper a new analytical solution has been proposed for stresses, strains and displacements in/along rockbolts by taking into consideration the deformability of rock and clastic-brittle-plastic behaviour of the bolt-grout or grout-rock interfaces.

- * Doktora öğrencisi, Maden Yük. Müh., Nagoya Üniversitesi, JAPONYA
** Profesör, ditto, Dept. of Geotechnical Eng., Nagoya Üniversitesi, JAPONYA
*** Research Associate, ditto, Nagoya Üniversitesi, JAPONYA
**** Maden Yük. Müh., TKİ Genel Müdürlüğü, Etüd Dairesi, ANKARA.

1. GİRİŞ

Pasif kaya saplamaları (untensioned grouted rockbolts) günümüzde madencilik ve inşaat mühendisliği alanlarında yaygınca kullanılmaktadır. Buna karşılık halen teorik açıdan kaya saplamalarının tahkim edici etkisi açıklanabilmiş değildir. Bu kaya ile kaya saplamalarının arasındaki interaksiyonun oldukça karmaşık olmasından kaynaklanmaktadır.

Laboratuvarlarda ve arazide çekme deneyleri en azından kaya saplamalarının yük taşıma kapasitelerini belirlemek üzere yapılmaktadır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre kaya saplamalarının içinde ve çevresinde oluşan gerilmeler uniform olmayıp eksponensiyel bir dağılım göstermektedir, özellikle yükün uygulandığı uçta gerilme yoğunlaşması olmakta ve yükün uygulanmadığı uca doğru eksponensiyel bir biçimde azalmaktadır (1). Eğer uygulanan yük saplamanın bulunduğu sistemin içerisindeki malzemelerin herhangi birinin elastik limitlerinin aşılmasına neden olduğunda gerilme dağılımının karakteri de değişmektedir. Kaya saplamalarının çekme deneyleri sırasında 4 tip yenilme (failure) gözlenmektedir:

- Kaya kütesinin yenilmesi
- Kaya saplamasının yenilmesi
- Kaya-harç arayüzünün yenilmesi
- Saplama-harç arayüzünün yenilmesi

1975 yılında Farmer, kayanın rijid olması esasa ve kaya saplamasının ve de harçın elastik olarak davrandığı varsayımları üzerine dayanan bir analitik çözüm öne sürdü (2). Kitatsumi ve Nishimura ise saplama-harç yüzeyinin elastoplastik olarak davrandığını varsayarak ve Farmer'in kayanın rijid olması koşulunu kullanarak başka bir çözüm geliştirdiler (3). Yazarlar bu yazılarında kayanın belirli bir kısma kadar deforme ve yenilmenin herhangi bir ara yüzeyinde olabileceği varsayımları üzerine dayanan yeni bir analitik çözüm geliştirmişlerdir.

2. TEORİK ÇÖZÜM

Şekil 1'de gösterildiği gibi bir durumu düşünelim. Kaya saplamasının içinde oluşan çekme gerilmesi ara yüzeyler aracılığıyla harca ve kayaya kesme gerilmeleri olarak aktarılacaktır, z ile z + dz arasında küçük bir silindirik elemanı gözönüne al-

dığımızda ve bu eleman boyunca kesme gerilmesinin sabit olduğu varsayıldığında aşağıdaki gibi bir denge koşulu bu eleman için yazılabilir.

$$\pi r_b^2 \sigma_z = (\sigma_z + d\sigma_z) \pi r_b^2 + 2 \tau_b \pi r_b dz$$

Bu bağıntıda;

σ_z : Saplamaadaki aksenal gerilme

τ_b : Saplama-harç ara yüzeyindeki kesme gerilmesi

r_b : Saplamanın yarıçapıdır.

Yukarıdaki bağıntının terimleri yeniden düzenlenir ve yazılırsa;

$$\tau_b = - \frac{r_b}{2} \frac{d\sigma_z}{dz} \quad (2)$$

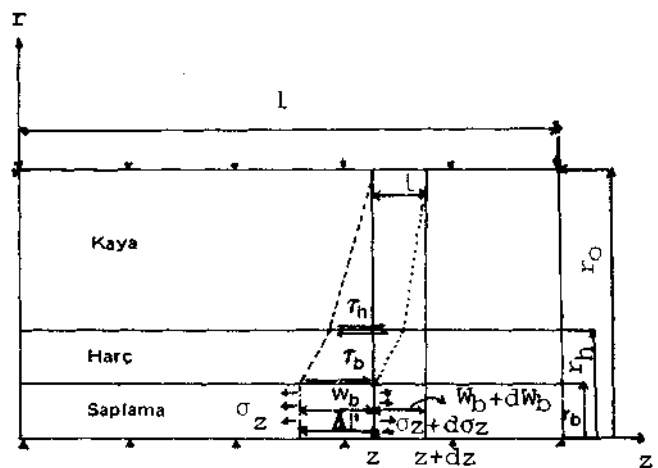
gibi bir bağıntı elde edilir.

Saplamanın elastik olduğu kabul edilerek;

$$\epsilon_z = E_b e_z \quad (3)$$

gibi bir bağıntı yazılabilir. Birim deformasyon Şekil 1'den de görüleceği üzere aşağıdaki gibi bir bağıntı ile tanımlanabilir.

$$\epsilon_z = - \frac{dw_b}{dz} \quad (4)$$



Şekil 1. Pasif bir kaya saplamasındaki gerilme ve deformasyon durumu.

Bu bağıntıda;

E_b : Saplamanın elastisite modülü,

ξ_2 : Saplamanın eksene! birim deformasyonu,

W_b : Saplama-harç ara yüzeyi ile saplamanın z yönünde yerdeğiştirme miktarı (displacement).

Bu (3) bağıntısında yerine konulduğunda, ek-senel gerilmenin matematiksel ifadesi aşağıdaki durumu alır.

$$\sigma_z = -E_b \frac{dW_b}{dz} \quad (5)$$

(5) bağıntısının sürekli ve türevi alınabilir olduğu varsayımı yapılarak türevi alınır ve (2) bağıntısında yerine konulursa,

$$\tau_b = \frac{E_b r_b}{2} \frac{d^2 W_b}{dz^2} \quad (6)$$

gibi bir bağıntı elde edilir.

Harç ve kaya içinde denge koşulu silindirik koordinatlar cinsinden

$$\frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (7)$$

olarak yazılabilir.

Kesme birim deformasyonu ve gerilmesi ise

$$\gamma_{rz} = \frac{dW_{rz}}{dr} \quad (8)$$

$$\tau_{rz} = G_g \frac{dW_{rz}}{dr} \quad (9)$$

olarak tanımlanabili

Bu ifade (7) bağıntısında yerine konur ve oluşan diferansiyel denklem çözümlerse harç içindeki deformasyon (teğetsel yerdeğiştirme miktarı)

$$W_{rz} = A \ln r + B \quad (10)$$

$$W_{rz} = A \ln r + B$$

olarak elde edilir.

Sınır koşullarını

$$r = r_b \text{ 'de } W_{rz} = -W_b \quad (11)$$

ve

$$r = r_h \text{ 'de } W_{rz} = -W_h$$

olarak kullandığımızda (10) bağıntısındaki integ-rasyon sabitleri A ve B

$$A = \frac{W_b - W_h}{\ln \frac{r_h}{r_b}} \quad (12)$$

$$B = \frac{W_h \ln r_b - W_b \ln r_h}{\ln \frac{r_h}{r_b}} \quad (13)$$

olarak elde edilir.

(10) bağıntısında A ve B yerine konulduğunda deformasyon

$$W_{rz} = \frac{W_b - W_h}{\ln \frac{r_h}{r_b}} \ln r + \frac{W_h \ln r_h - W_b \ln r_b}{\ln \frac{r_h}{r_b}} \quad (14)$$

olarak bulunur. Bu ifadenin z'ye göre türevi alınır ve (9) bağıntısında yerine konulursa harç içindeki kesme gerilmesi aşağıdaki gibi bir bağıntı ile tanımlanabilir duruma gelir.

$$\tau_{rz}^h = G_g \frac{W_b - W_h}{r \ln \frac{r_h}{r_b}} \quad (16)$$

özel bir hal olarak yukarıdaki bağıntıdan sap-lama-harç ara yüzeyindeki kesme gerilmesi $r = r_b$ için aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\tau_b = G_g \frac{W_b - W_h}{r_b \ln \frac{r_h}{r_b}} \quad (16)$$

Kaya içinde de denge koşulu aynen geçerli olduğu için benzer bir şekilde kaya içinde ve harç-kaya ara yüzeyindeki kesme gerilmesi ve deformasyonlar aşağıda verilen sınır koşulları kullanılarak

$$\begin{aligned} r = r_h \text{ 'de} & \quad W_{rz} = -W_h \\ \text{ve} & \\ r = r_b \text{ 'de} & \quad W_{rz} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\tau_{rz}^k = G_r \frac{W_h}{r \ln \frac{r_o}{r_h}} \quad (18)$$

$$W_{rz} = \frac{W_h}{\ln \frac{r_o}{r_h}} \ln r - \frac{W_h}{\ln \frac{r_o}{r_h}} \ln r_o \quad (19)$$

$$\tau_h = G_r \frac{W_h}{r_h \ln \frac{r_o}{r_h}} \quad (20)$$

olarak elde edilirler, $r = r_h$ 'de, $T_{rz} = T_{rz}$ gerektiği koşulundan r_b ile T_h ve W_b ile W_h arasında aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$W_b = K W_h \quad (21)$$

$$\tau_b = K \frac{k_g}{k_r} \tau_h \quad (22)$$

Bu bağıntılarda;

$$k_g = \frac{G_g}{r_b \ln \frac{r_h}{r_b}} \frac{k-1}{k}, \quad k_r = \frac{G_r}{r_h \ln \frac{r_o}{r_h}} \quad (23)$$

$$K = \frac{G_r}{G_g} \frac{\ln \frac{r_h}{r_b}}{\ln \frac{r_o}{r_h}} + 1 \quad (24)$$

3. PLASTİK VE ELASTİK GERİLMELER BİRİM DEFORMASYONLAR VE YER DEĞİŞTİRME MİKTARLARININ HESABI

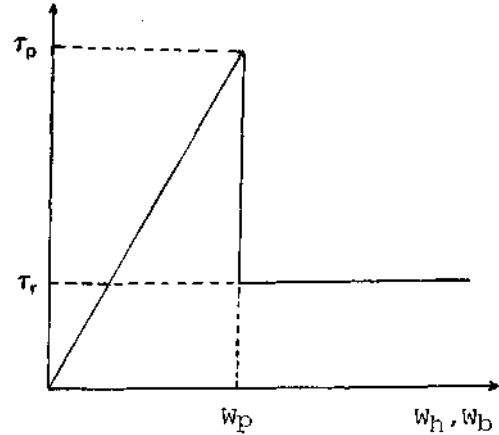
Burada ara yüzeylerin mekanik davranışı Şekil 2'de gösterildiği gibi elastik-gevrek-plastik olarak kabul edilecektir. Bu tür bir davranış için yenilme noktası aşılar aşılmaz ara yüzeyin dayanımı kalıcı değere düşer ve sabit bir değere eşit olur. Bu varsayımına göre kalıcı dayanımla, en büyük dayanım arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$= \eta \tau_p \quad (25)$$

Bu,(2) bağıntısında yerine konulursa,

$$\frac{2 \eta \tau_p}{E b r_b} = \frac{d^2 W_b}{dz^2} \quad (26)$$

gibi bir bağıntı elde edilir.



Şekil 2. Saplama-harç ya da harç-kaya ara yüzeyinin davranışı.

Aşağıda yenilmenin saplama-harç ve harç-kaya ara yüzeylerinde olduğu varsayılarak gerilme, birim deformasyon ve yer değiştirme miktarları ile ilgili çözümler verilecektir.

3.1. Saplama - Harç Ara Yüzeyinde Yenilme

— Plastik bölgede

Yukarıda verilen ilişkide τ_p τ olarak simgeler ve sınır koşulları

$$\begin{aligned} z = 0'da \quad W_b &= W_0 \\ \text{ve} \\ z = 0'da \quad \sigma_z &= \sigma_0 \end{aligned} \quad (27)$$

olarak kullanılırsa; yer değiştirme miktarı (W_b), kesme gerilmesi (T_b), aksenal gerilme (CT_z) ve aksenal birim deformasyon (ϵ_z) değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$W_b = \frac{\eta \tau_p^{ch}}{E_b r_b} z^2 - \frac{\sigma_0}{E_b} z + W_0 \quad (28)$$

$$\tau_b = \tau_r = \eta \tau_p^{ch} \quad (29)$$

$$\sigma_z = \sigma_0 - \frac{2 \eta \tau_p^{ch}}{r_b} z \quad (30)$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_0}{E_b} - \frac{2 \eta \tau_p^{ch}}{E_b r_b} z \quad (31)$$

II— Elastik bölgede:

(16) bağıntısında verilen kesme gerilmesi (6) bağıntısında yerine konur ve oluşan diferansiyel denklemi,

$$\begin{aligned} z = t'de \quad b &= r \\ \text{ve} \\ z = 1'de \quad a_z &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

sınır koşullarında çözdüğümüzde W_b , r_b , CT_z ve ϵ_z değerleri aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$W_b = \frac{\tau_p^{ch}}{k_g} \frac{e^{\alpha(z-t)} + e^{\alpha(2l-t-z)}}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} \quad (33)$$

$$\tau_b = \tau_p^{ch} \frac{e^{\alpha(z-t)} + e^{\alpha(2l-t-z)}}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} \quad (34)$$

$$\sigma_z = \frac{\tau_p^{ch} \alpha E_b}{k_g} \frac{e^{\alpha(2l-t-z)} - e^{\alpha(z-t)}}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} \quad (35)$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_b} \quad (36)$$

Bu bağıntılarda;

$$\alpha^2 = \frac{2k_g}{E_b r_b} \quad (37)$$

III—Saplama ucu gerilme (σ_0) ve yer değiştirme miktarı (W_0):

Kaya saplmasının yükün uygulandığı ucundaki gerilme (σ_0) ve deformasyon, yani yer değiştirme miktarı (W_0), 28, 33 ve 30, 35 bağıntılarından elastik - plastik geçiş noktasında gerilme, birim deformasyon ve yer değiştirmelerin süreklilik koşulundan yararlanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$W_0 = \frac{\sigma_0}{E_b} t + \frac{\tau_p^{ch}}{k_g} \left(1 - \frac{\eta k_g}{E_b r_b} t^2 \right) \quad (38)$$

$$\sigma_0 = \tau_p^{ch} \left(\frac{\alpha E_b}{k_g} - \frac{e^{2\alpha(l-t)} - 1}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} + \frac{2\eta}{r_b} t \right) \quad (39)$$

3.2. Harç - Kaya Ara Yüzeyinde Yenilme

I- Plastik bölgede:

Bu bölümde verilen bağıntıların çıkarılmasında izlenen yöntem bir önceki bölümde izlenen yöntemle aynıdır. Farklılık (6) bağıntısındaki T_b ile W_b 'nin yerine harç - kaya ara yüzeyindeki kesme gerilmesi ve yer değiştirme ifadeleri olan (21) ve (22) bağıntılarının konulmasıdır. Bu ara yüzeyindeki plastik durumda kalıcı dayanım $77T^{hk}$ 'e düşüğü varsayılarak (6), (21) ve (22) bağıntılardan elde edilen eşitliğe konulduğunda oluşan diferansiyel denklemi aşağıdaki sınır koşulları için

$$\begin{aligned} z = 0'da \quad W_h &= W_0/K \\ \text{ve} \\ z = 0'da \quad CT_h &= CT_0 \end{aligned} \quad (40)$$

çözdüğümüzde yer değiştirme miktarları (W_h ve W_0), kesme gerilmeleri (r_h ve r_b) aksenal gerilme (CT_h) ve aksenal birim deformasyon (ϵ_z) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$W_h = \frac{\eta \tau_p^{hk}}{E_b r_b} Z^2 - \frac{1}{K} \left(\frac{\sigma_o}{E_b} Z - W_o \right) \quad (41)$$

$$W_b = K W_h \quad (42)$$

$$\tau_h = \eta \tau_p^{hk} \quad \text{ve} \quad \tau_b = K \frac{k_b}{k_r} \tau_h \quad (43 \text{ ve } 44)$$

$$\sigma_z = \sigma_o - K \frac{k_g}{k_r} \frac{2 \eta \tau_p^{hk}}{r_b} Z \quad (45)$$

$$\epsilon_z = \sigma_z / E_b \quad (46)$$

II - Elastik bölgede:

(21) ve (22) bağıntılarda verilen ilişkileri (6) bağıntısında kullanır ve meydana gelen diferansiyel denklemi sınır koşulları

$$z = t \text{ 'de } \tau_h = \tau_p^{hk} \quad \text{ve} \quad z = 1 \text{ 'de } \sigma_z = 0 \quad (47)$$

için çözersek W_h , W_b , τ_h , τ_b , τ_z ve ϵ_z 'ye ait bağıntılar aşağıdaki gibi bulunur.

$$W_h = \frac{\tau_p^{hk}}{k_r} \frac{e^{\alpha(z-t)} + e^{\alpha(2l-t-z)}}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} \quad (48)$$

$$W_b = K W_h \quad (49)$$

$$\tau_h = \tau_p^{hk} \frac{e^{\alpha(z-t)} + e^{\alpha(2l-t-z)}}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} \quad (50)$$

$$\tau_b = K \frac{k_g}{k_r} \tau_h \quad (51)$$

$$\sigma_z = \frac{\tau_p^{hk} \alpha E_b}{k_r} \frac{e^{\alpha(2l-t-z)} - e^{\alpha(z-t)}}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} \quad (52)$$

$$\epsilon_z = \sigma_z / E_b \quad (53)$$

Burada,

$$\alpha = \left(\frac{2 k_g}{E_b r_b} \right)^{1/2} \quad (54)$$

III— Kaya saplama ucunda gerilme (yük) ve yer değiştirme miktarı:

Saplama ucundaki gerilme ya da yük ve yer değiştirme bir önceki bölümdeki yöntem takip edilerek aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$W_o = \frac{\sigma_o}{E_b} t + K \frac{\tau_p^{hk}}{k_r} \left(1 - \frac{\eta k_g}{E_b r_b} \right) \quad (55)$$

$$\sigma_o = K \frac{\tau_p^{hk}}{k_r} \left(E_b \alpha \frac{e^{\alpha(2l-t)} - e^{\alpha(l-t)}}{e^{2\alpha(l-t)} + 1} + \frac{2 \eta t}{r_b} k_g \right) \quad (56)$$

3.3. Özel Durum

I— Elastik Davranış

Bu kısımda saplama, harç ve kaya ara yüzeylerinin elastik olarak davrandığı ve de ara yüzeylerinde sürekliliğin olduğu varsayılarak (6), (16) ve (21) bağıntılarından elde edilen diferansiyel denklem sınır koşulları

$$z = 0 \text{ 'da } \sigma_z = \sigma_o \quad \text{ve} \quad z = 1 \text{ 'de } \sigma_z = 0 \quad (57)$$

için çözdüğümüzde W_b , σ_b ve σ_z değerleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$W_b = \frac{\sigma_o}{E_b \alpha} \frac{e^{\alpha(l-z)} + e^{-\alpha(l-z)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \quad (58)$$

$$\tau_b = \frac{\sigma_o \sigma_b \alpha}{2} \frac{e^{\alpha(l-z)} + e^{-\alpha(l-z)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \quad (59)$$

$$\sigma_z = \sigma_o \frac{e^{\alpha(l-z)} - e^{-\alpha(l-z)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \quad (60)$$

Burada;

$$\alpha = \left(\frac{2 k_g}{E_b r_b} \right)^{1/2} \quad (61)$$

II - Plastik Davranış:

Kaya saplaması ara yüzeylerinden herhangi birinin tamamen plastik duruma geçtiği kabul edilir ve kalıcı deformasyonun değerinin saplama boyunca sabit bir değere eşit olduğu varsayılırsa ve ayrıca bu değer (6) bağıntısında kullanılarak elde edilen diferansiyel denklem sınır koşulları,

$$z = 0 \text{ 'da } a_z = a_0 \text{ ve } z = 1 \text{ 'de } W_b = t_f W_p^h \quad (62)$$

için çözümlerse W_b , r_b , a_z ve E_z değerleri aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$W_b = \frac{\sigma_0}{E_b} (1-z) + \frac{\tau_p^{ch}}{k_g} \left[\gamma - \frac{\eta k_g}{E_b r_b} (1^2 - z^2) \right] \quad (63)$$

$$\tau_b = \eta \tau_p^{ch} \quad (64)$$

$$\sigma_z = \sigma_0 - \frac{2 \eta \tau_p^{ch}}{r_b} z \quad (65)$$

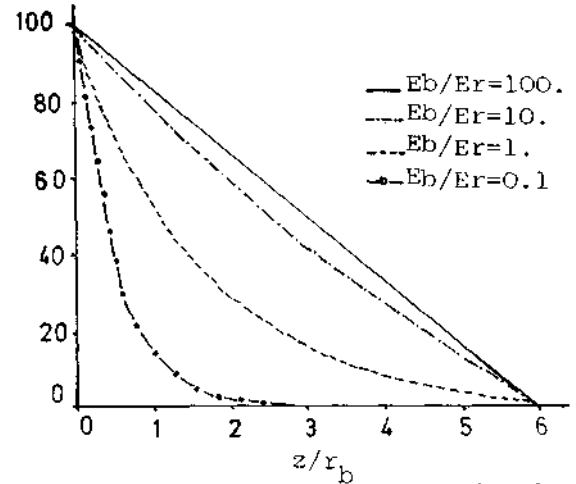
$$\epsilon_z = \sigma_z / E_b \quad (66)$$

4. NÜMERİK UYGULAMALAR VE YORUMLAR

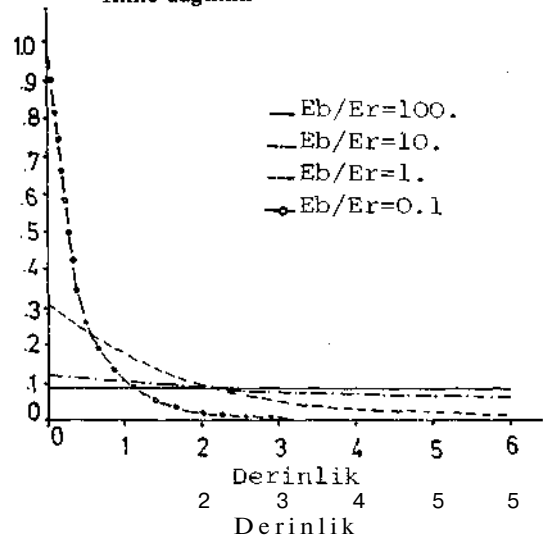
Bu bölümde elastik ve elasto-plastik davranışlar üzerine dayandırılarak elde edilmiş bağıntıların nümerik uygulamaları verilecek ve sonuçlar Coates ve Yu ile Hollingshead'in kaya saplamaları ile ilgili olarak Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak yaptıkları analizlerin sonuçları ile karşılaştırılacaktır (1 ve 4).

İlk örnekte elastik davranış üzerine dayandırılarak çıkarılmış bağıntılar kullanılacaktır. Kaya ile saplama arasında harcın olmadığını ve iki malzeme arasında eksiksiz bir bağlantı (bond) olduğu kabul edilmiştir. Saplama içinde ve saplama-kaya ara yüzeyindeki gerilmelerin derinliğe bağlı olarak dağılımı değişik saplama-kaya Elastisite

Modülleri (E_b ve E_r) K'nın Şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir. Bu dağılımlar Coates ı/tYu ile Hollingshead'in elde ettiği sonuçları ile büyük bir benzerlik içindedir. Coate ve Yu yazılarında basmaya maruz bir kapa saplaması için bir şekil sunmalarına karşın, çekmeye maruz saplamalarda da aynı tür dağılımların elde edilebileceğine işaret etmişlerdir (1). Yalnız, kaya saplaması ile kayanın delik dibinde bağlı olduğu sınır koşulunu kullanmaları nedeniyle delik dibine doğru, özellikle kesme gerilmesinde biraz artma olmaktadır. Gerçekte saplama ile delik dibini oluşturan malzeme arasında bir bağlantı yoktur. Şekillerden de görüleceği üzere saplama içinde ve boyunca var olan gerilmeler kaya ve saplamanın elastisite modüllerine bağlı olarak lineer bir doğru halinden eksponansiyel bir eğri haline dönüşmektedir. Özellikle gerilme yoğunlaşması yükün olduğu uçta olmaktadır.



Şekil 3. Derinlikle kaya saplamasında aksel gerilme dağılımı.

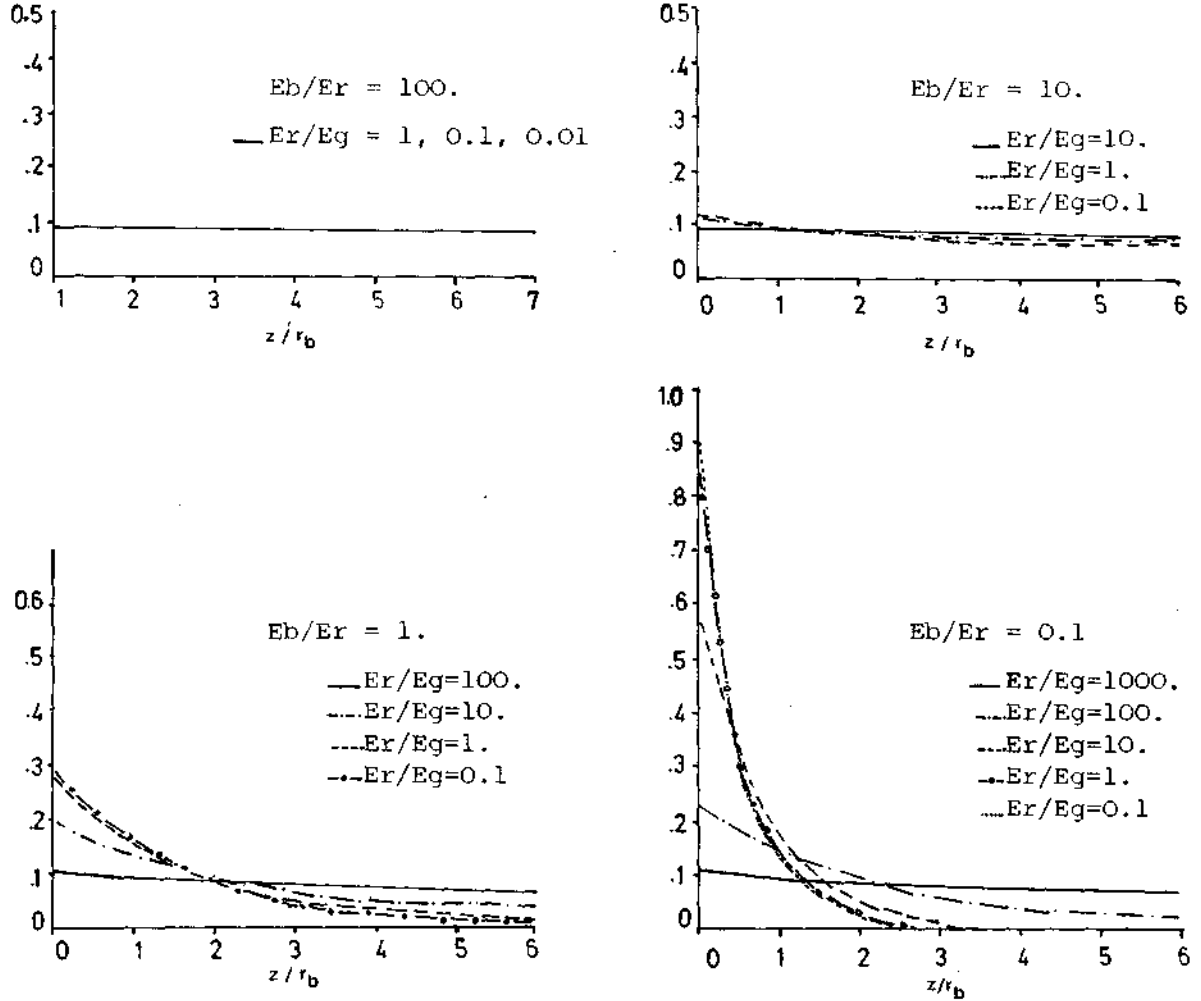


Şekil 4. Kaya saplaması boyunca kesme gerilmesinin dağılımı.

İkinci örneğimi/de harcın varlığını kabul edilip dolayısıyla sistemin de 3 farklı malzemeden oluştuğu gözönünde bulundurulacaktır. Böylece elastik bağıntıların uygulanmasıyla kaya saplama içinde ve boyunca oluşan gerilmelerin dağılımı değişik saplama-kaya ve kaya-harç elastisite modülleri için Şekil 5'te gösterildiği gibi elde edilir. Şekilde E_g harcın elastisite modülünü göstermektedir.

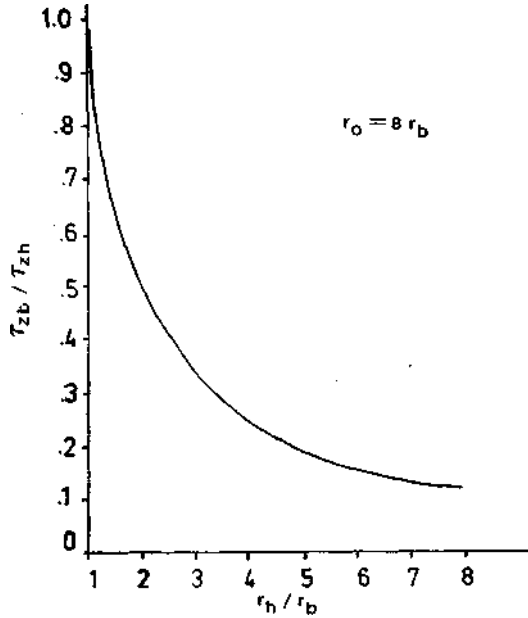
Şekil 5'den de görüleceği üzere gerilmelerin dağılımları bu oranlara sıkı sıkıya bağlıdır. En önemli parametre saplama ile kayanın elastisite modüllerinin oranıdır (E_b/E_r). Kaya ve harca ait elastisite modüllerinin etkisi ikincildir (E_r/E_g). Kaya ve harcın elastisite modüllerine ait oranın etkisi harcın elastisite modülü kayadan küçük ol-

duğu durumlarda oldukça etkilidir. Harcın elastisite modülünün kayaninkine yaklaşımı sırasında saplama içinde ve boyunca gerilmelerin dağılımları oldukça değişmektedir. Bu değişme, harcın elastisite modülü saplamaninkini geçtiğinde, hemen hemen yok denilecek bir şekilde azalmaktadır. Aynı tür sonuçlar Hata ve arkadaşlarının yaptığı sonlu elemanlar yöntemi çalışmalarında da görülmüştür (5). Saplama-harç ile harç-kaya ara yüzelerindeki kesme gerilmelerinin değerleri sistemi oluşturan malzemelerin elastisite modüllerine ve delik ile saplama çaplarının oranına bağlıdır. Bu ara yüzelerdeki kesme gerilmelerinin oranı ise yalnız saplama-delik çap oranına bağlıdır (Şekil 6). Bu husus, özellikle kaya saplama zayıf kayalarda kullanıldığında oldukça önemlidir. Zayıf kayalarda kaya saplama harç-kaya ara



Şekil 5. Derinliğe bağlı saplama boyunca normalize edilmiş kesme gerilmesinin dağılımı.

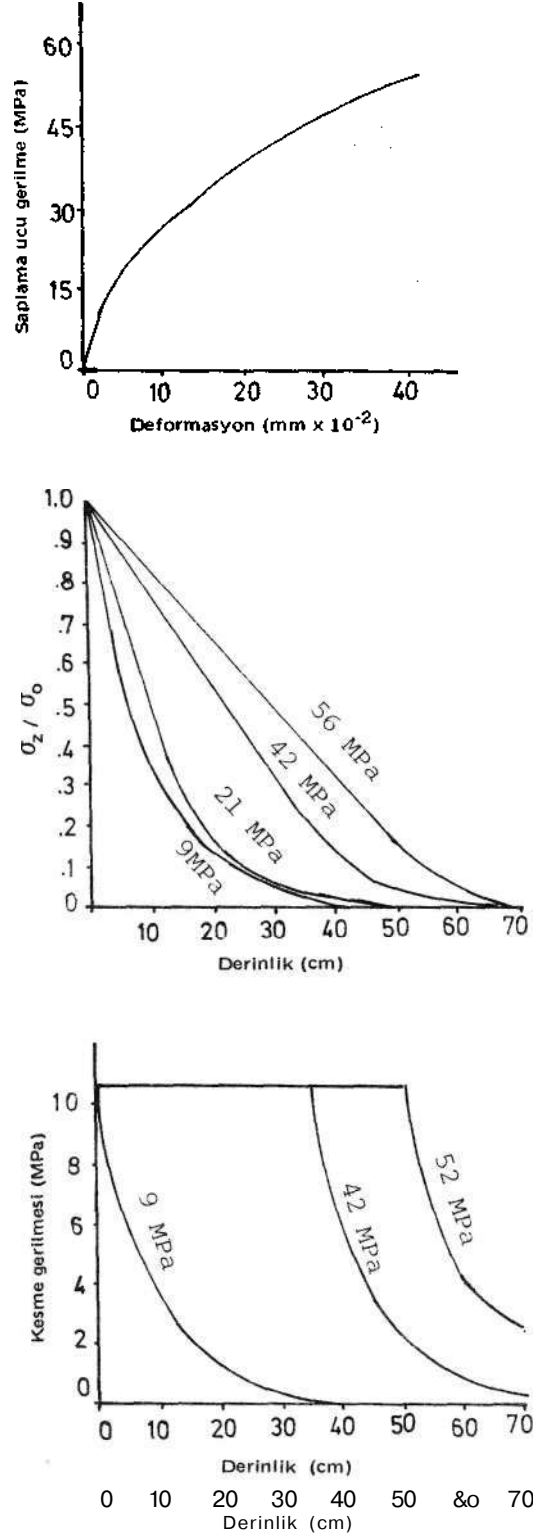
yüzeyinde yenilmesi olasıdır. Bu nedenle, bu ara yüzeyde oluşabilecek kesme gerilmesinin azaltılması gerekir. Delik çapının saplamaya göre artırılmasıyla harç-kaya ara yüzeyinin yenilmesi (failüre) olasılığı azaltılabilir. Snyder ve arkadaşlarının yaptığı laboratuvar çalışmalarında zayıf kayalarda, bu ara yüzeyin yenilmesini engellemek için delik çapının saplamaya göre artırılması gerektiğini işaret etmektedirler (6).



Şekil 6. Delik civarı gerilme iletimine saplama-delik etkisi.

Üçüncü örnek elasto-plastik davranış üzerine çıkarılmış bağıntıların uygulaması ile ilgili olacaktır, örnekte, Hollingshead'in yaptığı sonlu elemanlar yöntemi analizinde kullandığı veriler karşılaştırma yapabilmek amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu yazıda verilen bağıntılardan elde edilen sonuçlar ile Hollingshead'in sonuçları hem sayısal hem de biçimsel açıdan büyük bir uyum içerisindedir (4). Yalnız Hollingshead'in elde ettiği saplama-harç ara yüzeyindeki kesme gerilmesinin dağılımı kullanılan sınır koşulları ile yapılan iterasyon sayısının yetersizliğinden etkilenmiştir. Bu husus Hollingshead tarafından da dile getirilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere kaya-saplama arasında belirli limitler arasında kısmi yenilmesine müsaade etmekte sakınca yoktur. Saplama ucuna doğru yoğunlaşmanın olması nedeniyle kaya saplamasının taşıma kapasitesinin tümü bir anda kullanıla-

mamaktadır. Kısmi yenilme ile kaya saplamasının pasif durumdaki kısmi faaliyete geçirilmektedir.



Şekil 7. Kaya saplaması içinde ve civarında gerilme dağılımı yük-deformasyon eğrisi.

Şekil 7 den de görüleceği üzere saplamanın yaklaşık 40 cm'lik kısmı aktif durumdadır. Bu nokta oldukça önemli olupj saplama elastik durumda iken saplama boyunun artırılması, kaya saplmasının taşıma kapasitesinin artmasına neden olmamaktadır. Bununla birlikte, kaya saplmasının yenilmesine (ara yüzeyi yenilmesi) müsaade edildiğinde saplamanın uzunluğu önemli duruma gelmektedir.

Bu yazıda ara yüzeylerin yenilme sonrası davranışı, gevrek - plastik akma şeklinde olduğu kabul edilmiştir. Daha gerçekçi çözüm, zayıflama (softening) - plastik akma tipi bir davranışı içermek zorundadır. Bu tür bir davranış üzerine tesis edilmiş bir çözüm, kaya saplamalarının taşıma kapasitelerinin daha gerçekçi bir şekilde belirlenmesini olanaklı kılacaktır (7 ve 8). Ayrıca nervürlü çeliklerden yapılmış saplamalar çekme sırasında geometrik bir dilatasyon'a (genişleme) neden olarak harca doğru radyal basınç gerilmesini oluşturmakta ve böylece ara yüzlerinin kesme dayanımlarını artırmaktadır. Bu etki, çözümde kabul edilen davranışta en yüksek dayanım noktasının değerini artırmakla hesaplarda gözönüne alınabilir.

5. SONUÇLAR

Bu yazıda, kaya saplamalarının çekme deneyleri sırasında, içinde ve ara yüzlerde oluşan gerilme, birim deformasyon ve yerdeğiştirme miktarlarıyla ilgili elastik - gevrek - plastik davranış üzerine dayanan yeni bir çözüm sunulmuştur. Bu çözüm yenilme sonrası oluşan zayıflama (softening) tipi bir davranış içermemesine karşın daha gerçekçi bir şekilde kaya saplamalarına ait taşıma kapasitelerinin hesaplanabilmesini olanaklı kılmaktadır.

Bu çalışmanın ve nümerik uygulamaların ışığı altında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kaya saplamaları içinde ve civarındaki gerilmeler, saplama, harç ve kayanın özelliklerine sıkı sıkıya bağlıdır. En önemli etken kaya ile saplamanın elastisite modülüsleri arasındaki orandır. İkincil derecede ise harç ile kaya arasındaki elastisite modülüslerinin oranıdır, özellikle kaya-harç elastisite modülüslerinin oranı harcın

elastisite modülüsünün kayanınkinden küçük olduğunda önemli olmakta ve etkisi kayanınkinden büyük olduğunda kaybolmaktadır.

- Kaya saplamalarının taşıma kapasitelerinden yararlanmakta, kısmi ara yüzey yenilmesine izin vermekte bir sakınca yoktur, özellikle yenilmeye izin verilecekse bunun saplama-harç ara yüzeyinde olmasına dikkat edilmelidir. Yalnız yenilmenin, uzun dönemde kaya saplmasının taşıma kapasitesinin azalmasına neden olmayacak bir şekilde olmasına dikkat edilmelidir.
- Saplamaların daha gerçekçi analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi gibi bir nümerik yöntemle yapılabilir. Bu analizlerde sistemi oluşturan malzemelerin ve ara yüzeylerinin mekanik davranışlarının iyi bir şekilde tanımlanması gereklidir. Özellikle ara yüzeylerin mekanik davranışlarının bu nümerik yöntemlerde kullanılmalarında büyük güçlüklerin doğmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yeterli bir şekilde nümerik analizlerde özellikle tünel, baraj ve diğer madencilik ve inşaat mühendisliği problemlerinin analizinde kaya saplamalarının tahkim edici etkisi tam olarak canlandırılmamaktadır.

KAYNAKLAR

1. COATES, D.F. and YU. Y.S., "Three Dimensional Stress Distribution Around a Cylindrical Hole and Anchor" 2 nd Rock Mechanics Congress, Belgrad, 1970.
2. FARMER, I.W., "Stress Distribution Along Resin Grouted Rock Anchors" Int. J. Rock Mech. Min. Sei, Vol. 12, 1975.
3. KITATSU, T. and NISHIMURA, M., "Fundamental Research into Interaction Mechanism Between Rockmass and Rockbolts" (in Japanese), Omura Corp., Annual Report of technology, No. 8, 1982.
4. HOLLINGSHEAD, G.W., "Stress Distribution in Rock Anchors" Can. Geotechn. J., Vol. 8, 1971.
5. HATA, S. et-all, "Effects of Grouting Material on Rockbolting" (In Japanese), Procs. 15 th Symp. on Rock Mechs., Tokyo, 1983.
6. SNYDER, V. W. et all, "Factors Covering the Effectiveness of Roof Bolts", Procs. 20 th U.S. Symp. Ruck Mechs., June, 1979.
7. AYDAN, ö., ICHIKAWA, Y. and KAWAMOTO T., "Load Bearing Copacity and Stress Distributions in/along Rock Bolts with Elastic Behaviour of Interfaces" to be published in Procs., 5 th Int. Congr. Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, 1985.