

Süreksizlik ya da Süreksizlik Takımını İçeren Topukların Kaya Saplamaları ile Tahkimi

**The Reinforcement of Pillars with a Discontinuity or Discontinuity
set by Rockbolts**

Ömer AYDAN (*)
Toshikazu KAVAMOTO (**)
Yasuaki ICHIKAWA (***)
Alpaslan ERSEN (****)

ÖZET

Bu çalışmada, önce süreksizliklerin kaya sapmaları ile tahkimi sunulmaktadır. Daha sonra, süreksizlik ya da süreksizlik takımını içeren topukların kaya saplamaları ile tahkimi üzerine geliştirilmiş bir teori ve uygulamaları verilmektedir.

ABSTRACT

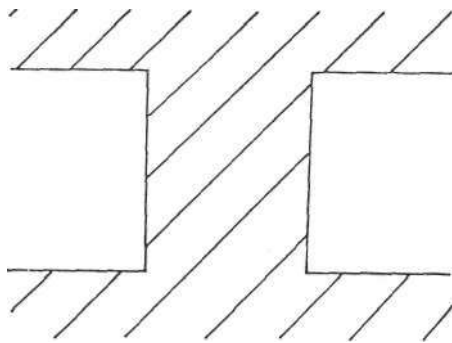
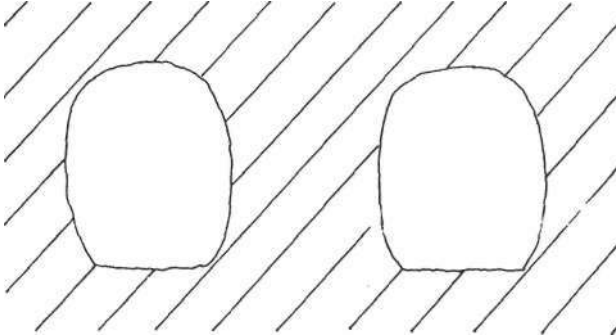
In this study, the reinforcement of discontinuities by rockbolts is firstly described. Then, a theory for the reinforcement of pillars with a discontinuity or discontinuity set by rockbolts and its application is given.

(*) Maden Y.Müh., Doktorant, Dept. of Geotech. Eng., Nagoya University,
(**) Prof.Dr., Dept. of Geotech. Eng., Nagoya University, JAPAN
(***) Dr., Research Associate, Dept. of Geotech. Eng., Nagoya University,
(****) Maden Y.Müh., TKİ Genel Müdürlüğü, Etüd Dairesi, ANKARA

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi, oda-topuk yöntemi madencilikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Topuklar genellikle kare, dikdörtgen yada dairesel bir plan görünüşüne sahiptirler. Bunların yanısıra iki galeri (tünel) arasında kalan kaya kütleleri de uzun dikdörtgen topukların oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 1). Doğada kayaların büyük bir kısmının süreksizlikler içermesi nedeniyle, topukların stabilitesi çoğunlukla süreksizliklerin uzaysal konumlarına, fiziksel özelliklerine bağlı hale gelmektedir. Bu durumda en etkin tahkimat şekli söz konusu süreksizliklerin kesme dayanımını arttırmakla elde edilebilir ki bu da ancak kaya saplamaları ile sağlanabilir.

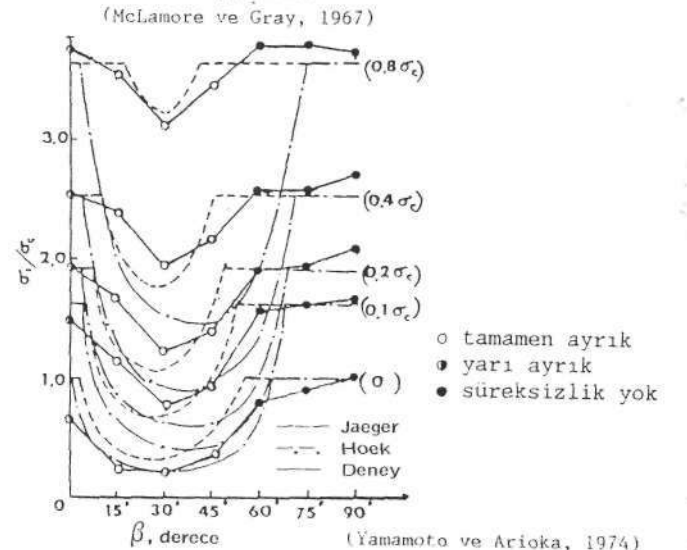
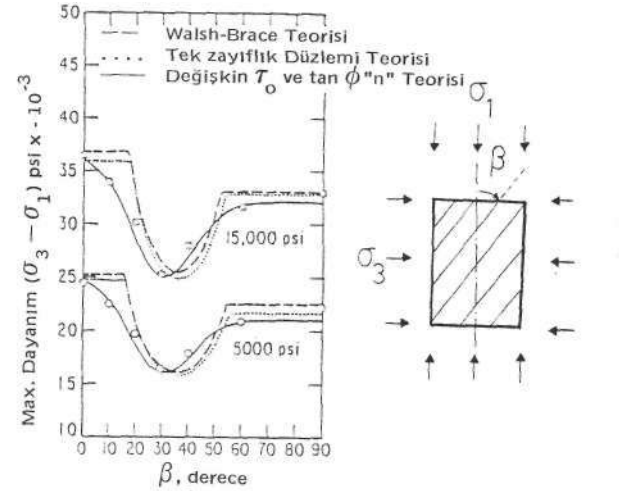
Bu çalışmada, öncelikle süreksizliklerin kaya sapmaları ile tahkimi konusu deneysel ve teorik bilgilerin ışığı altında tartışmalı bir şekilde sunulmuş, daha sonra ise süreksizlik yada süreksizlik takımını içeren kaya topuklarının kaya sapmaları ile tahkimi üzerine geliştirilen teori ve onun uygulaması verilmiştir.



Şekil 1. Kaya topukları a) İki galeri arasında b) Oda topuk yöntemi ile çalışılan ocaklarda.

2. SÜREKSİZLİK YA DA SÜREKSİZLİK TAKIMI VE TOPUKLARIN DAYANIMA ETKİSİ

Doğada kayaların büyük bir kısmı değişik büyüklükte bir çok süreksizlik takımını içerir. Bunların oluşumu kayadan kayaya değişmesine karşın, genellikle tortul kayalarda tortullaşma esnasında tabakalaşma yüzeyleri ve kuruma çatlakları olarak belirirken mağmatik kökenli kayalarda ise akma ve soğuma çatlakları olarak ortaya çıkarlar. Eğer kaya kütleleri tektonik kuvvetlere maruz kalırlarsa kuvvetin etkiye şekline bağlı olarak, akma, bükülme ve/veya kırılma gibi olgular oluşur. Bunlara ek olarak kayalar yüksek basınç ve sıcaklık altında değişime uğrayarak şistiyet olarak adlandırılan başka bir çatlak sistemi meydana gelir. Bu durumda kaya içinde oluşan süreksizlik yüzeyleri kayanın mekanik davranışının hayli yönsel olmasına ve de dayanımının bu yüzeylerin en büyük asal gerilmeye yaptığı açılara bağlı olarak çok küçük değerlere kadar düşmesine neden olmaktadır (Şekil 2)(1,2).



Şekil 2. Kaya numunelerinin dayanımına süreksizlik takımının etkisi.

Şekil 2'den de anlaşılacağı üzere kayanın dayanımı belirli açılar arasında oldukça azalmaktadır. Bu ve buna benzer deneylerde iki ana yenilme şekli söz konusudur. İlk yenilme şekli süreksizlik yüzeyi boyunca kayma halinde olurken, diğer yenilme şekli ise sağlam kayanın yenilmesi şeklinde olur. Belirli açılar civarında, başka bir deyişle geçiş zonlarında ise bu iki ana yenilme birlikte görülmektedir.

Bu deneysel bulguların ışığı altında, tabakalaşma yüzeylerinin yada iyi gelişmiş bir süreksizlik tahkiminin, yeraltı işletmelerindeki ve/veya iki galeri (tünel) arasındaki topukların ve yan duvarların duraylılığını büyük ölçüde etkileyeceği söylenebilir. Bu tür duraysızlık problemlerinin karşılaşıldığı yerde çelik bağlarla yapılacak tahkimatin etkili olması beklenemez. Bu durumda kaya saplamalarının kullanılması en doğru yol olacaktır.

3. KAYA SAPLAMALARININ TAHKİM EDİCİ ETKİLERİ VE SAPLAMA İÇİNDE GERİLME OLUŞUMU

Kaya saplamalarının süreksizlikleri tahkim edici etkisi genelde üç tür olduğu söylenebilir. Bunlar:

- Sürtünme kuvveti
- Kesme kuvveti bileşeni
- Saplamaların kesme direnci (dowel effect) olarak sıralanabilir.

3.1. Sürtünme ve Kesme Kuvveti Bileşeni Etkisi

Sürtünme ve kesme kuvveti bileşenlerinin süreksizliklerin dayanımına olan etkisi saplamaların yerleştirilme açısına ve saplamalar içindeki gerilmenin karakterine bağlı olarak olumlu yada olumsuz olabilir. Saplamaların bu etkileri pürüzsüz bir yüzey için matematiksel olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$T = \text{Sgn } m \cdot Ofo (\cos 77 \tan \psi + \sin 77) \quad \text{IH}$$

Burada;

Sgn : Çekme için (+) yada basma için (-) işareti

: Süreksizlik yüzeyinin kesme direnci (dayanımı)

m : A_b/A_s

A_u : Saplamaların kesit alanı

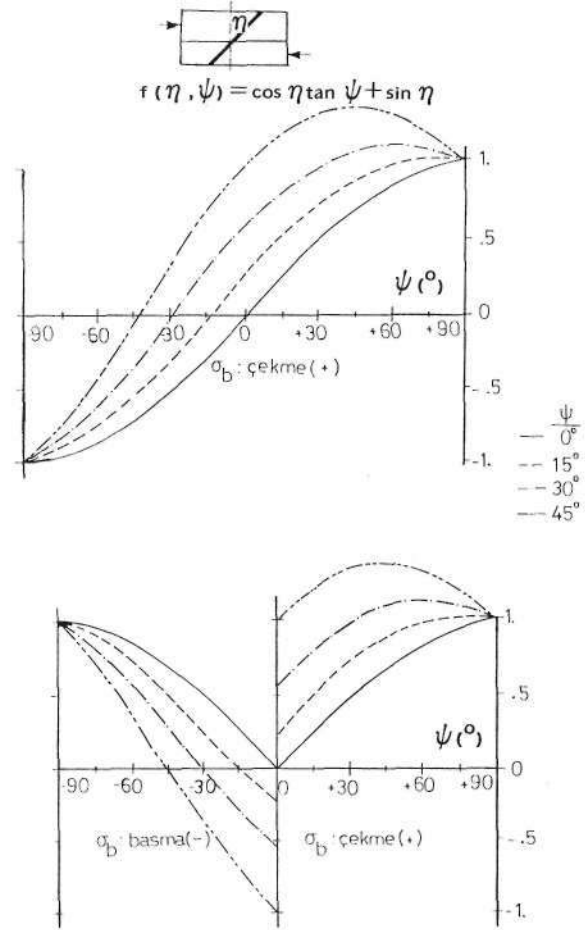
A : Süreksizliğin alanı

O_u : Saplama içindeki gerilme

77 : Saplamaların süreksizlik yüzeyinin normali ile yaptığı açı

4> • Süreksizlik yüzeyinin sürtünme açısı

Bu etkiler saplamaların içindeki gerilmeye ve yerleştirilme açısına (77) bağlı olarak değişecektir (Şekil 3). Örneğin, saplama içindeki gerilme çekme gerilmesi ise -90° ile 0° , arasında sürtünme etkisi süreksizlik yüzeyinin kesme direncine olumlu yönde fakat kesme bileşeni olumsuz yönde etki edecektir. Diğer yandan, bu gerilme basma tipi bir gerilme ise, yüzeyin dayanımına sürtünme kuvveti olumsuz yönde etki ederken kesme bileşeni olumlu yönde katkıda bulunacaktır.



Şekil 3. Kaya sapmalarının yerleştirilme açısının (77) saplamaların tahkim edici etkisine olan etkisi.

Gerilme çekme tipinde ise, 0° ile 90° arasında sürtünme ve kesme bileşeni olumlu yönde etkili olacağı için saplamaların yerleştirilme açısı 0° ile 90° arasında olmalıdır. Şekil 3'te en uygun açının yaklaşık $90^\circ - \psi$ olması gerektiği görülmektedir.

3.2.Saplamanın Kesme Direnci (Dowel Effect)

Bjurstrom (3) ve Hibino ile Motojima (4) yaptıkları deneylerden elde ettikleri sonuçlara dayanarak saplamanın kesme direncinin süreksizlik yüzeyinin direncine olan katkısının, yerleştirilme açısına bağlı olarak değiştiğini ileri sürmektedirler.

Bu araştırmacılar ayrıca saplamanın direncinin süreksizlik boyunca oluşan göreceli yerdeğiştirme miktarına ve kayanın mekanik özelliklerine bağlı olduğunu vurgulamaktadırlar. Bjurstrom yaptığı deneysel çalışmada saplamanın kesme direncini aşağıdaki eşitlik ile ifade etmiştir:

$$T_{\zeta} = 0,67 \cdot d^2 \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_c} \quad [2]$$

Burada;

- T_V : Saplamanın kesme direnci
- d : Saplamanın çapı
- σ_s : Saplamanın akma dayanımı
- σ_c : Kayanın tek eksenli basınç dayanımı

Bu eşitlik, çekme kuvvetinin saplama içinde çok az etkilediği yada hiç etkilediği durumda ve saplama süreksizlik yüzeyine dik olduğu durumda geçerlidir.

Süreksizlik yakınında saplamanın bükülmeye maruz kalması nedeniyle Paulay ve arkadaşları (5) ise aşağıdaki eşitliği önermektedirler:

$$T_{\zeta} = \frac{\pi d^2}{4} \sigma_s \cos \theta \quad [3]$$

Burada θ süreksizlik yakınında saplamanın süreksizlikle yaptığı açığı göstermektedir.

Son yıllarda Egger (6) yaptığı deneysel çalışmanın ışığı altında bu açının 180° ile 30° arasında değiştiğini ve saplamanın ilk yerleştirilme açısından bağımsız olduğunu ileri sürmektedir, θ 'nın ortalama değeri 25.2° dolaylarındadır. Bu deneysel bulguların ışığı altında, θ ile kayanın içsel sürtünme açısı (ϕ) arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı ileri sürülebilir.

$$\theta = 45 - \frac{\phi}{2} \quad [4]$$

Burada θ kayanın içsel sürtünme açısıdır.

Egger'in deneylerinde kullandığı betonun içsel sürtünme açısının yaklaşık 40° olduğu gözönüne alınır ve yukarıdaki bağıntıda yerine konursa θ değerinin 25° olduğu görülür. Bulunan bu değer deneylerde ölçülen ortalama θ değeri ile hemen hemen aynı olması yukarıda öne sürülen ilişkinin geçerliliğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu bağıntının doğruluğunu pekiştirmede bir takım deneysel çalışmalar gereklidir. Bu nedenle, saplamanın kesme direnci için aşağıdaki gibi bir ilişki öne sürülecektir.

$$T_{\zeta} = \xi \cdot A_b \cdot \sigma_s \quad [5]$$

Burada ξ θ açısına bağlı bir parametredir. Verilerin yokluğunda aşağıdaki ilişki kullanılabilir.

$$\xi = \cos \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad [6]$$

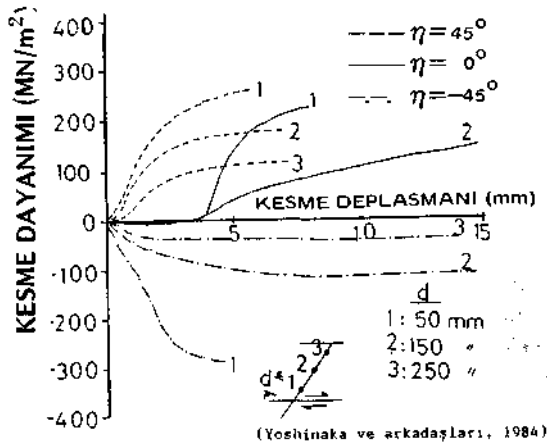
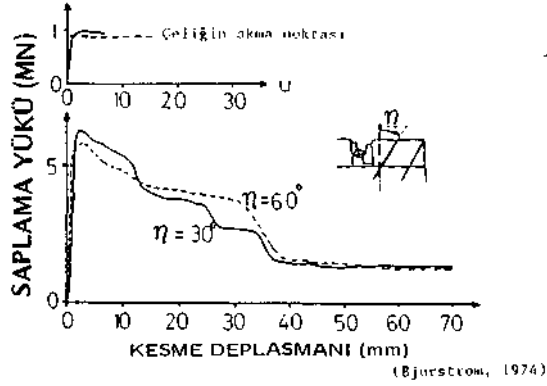
Saplamanın kesme direncinin tamamının etkin hale gelmesi için süreksizlik boyunca relatif yerdeğiştirme miktarının saplama çapının 1 ile 2 katına ulaşması gerektiği dikkate alınmalıdır.

3.3. Saplama İçinde Gerilme Oluşumu

Eşitlik [1] 'den de anlaşılacağı üzere saplamanın tahkim edici etkisi saplama içindeki gerilme miktarına ve de saplamanın yerleştirilme açısına bağlıdır. Bunun yanısıra saplamanın ön gerilmeli mekanik ankrajlı yada pasif harç ankrajlı olup olmamasına da bağlıdır.

Değişik araştırmacıların elde ettikleri deneysel sonuçlar(3,4,6,7) ile yaptıkları kuramsal çalışmalar(7,8) yerleştirilme açısının -90° ile 0° arasında olması halinde öngeriilmeli mekanik ankrajlı saplamlarda öngeriilmemin giderek azaldığını ve belirli bir miktar yerdeğiştirmeden sonra hiç yük taşımadığını, diğer yandan pasif harç ankrajlı saplamlarda ise yerdeğiştirmeye bağlı olarak basma tipi bir gerilmenin oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca her iki tür saplamanın $0^\circ-90^\circ$ arasında yerleştirilmesi durumunda saplama içinde çekme tipi bir yükün oluştuğu ve yerleştirme açısının 90° 'ye yakın olması halinde ise saplama içindeki gerilmenin yüksek değerlere ulaşması için çok az bir relatif yerdeğiştirmenin gerektiği anlaşılmıştır.

Şekil 4, yerinde ve laboratuvarında yapılan deney sonuçlarını göstermektedir. Deney sonuçları saplamanın yerleştirme açısının küçük miktarda relatif kesme yerdeğiştirme miktarlarında etkili olduğunu



Şekil 4. Kaya saplamaları içinde kesme deneyleri esnasında aksenal gerilme oluşumu.

ve belirli bir miktar relatif yerdeğişmeden sonra hemen hemen aynı seviyeye ulaştığını da göstermektedir. Bu sonuçlar saplama içinde oluşacak gerilme değerinin saplamanın akma dayanımına eşit olarak alınabileceğini işaret etmektedir.

4. TEORİ

Üç eksenli bir gerilme ortamında bir ya da birbirine paralel süreksizlik takımı içeren silindirik, kübik ya da prizmatik bir topuğun dayanımı Jeager'in (9) geliştirdiği teori ile hesaplanabilir. Jeager kritik açılar arasında yenilmenin süreksizlik yüzeyinde ya da süreksizlik takımının birinde kayma şeklinde olacağını varsaymaktadır.

Kayma yüzeyinin kesme dayanımı Mohr-Coulomb'un kriteri cinsinden aşağıdaki gibi verilebilir.

$$r_i = c_i + a_n \tan \varphi_p,$$

M

Burada;

Tt : Süreksizliğin kesme dayanımı

Cr : Süreksizliğin kohezyonu

φ_{pr} : Süreksizlik yüzeyinin sürtünme açısı

O_n : Süreksizlik yüzeyine etki eden normal gerilme

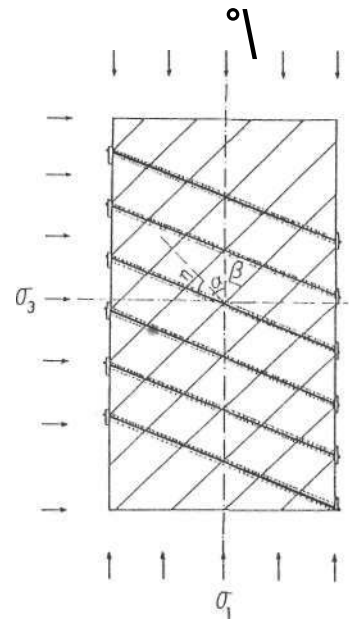
Eğer, asal gerilmeler topuğun düşey ve yatay eksenleri ile çıkışıyorsa, en büyük asal gerilme ile β açısı yapan bir süreksizlik yüzeyindeki kesme gerilmesi ve normal gerilme sırasıyla:

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad [8a]$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta \quad [8b]$$

olarak yazılabilir. Burada a_1 ve a_3 sırasıyla en büyük ve en küçük asal gerilmelerdir.

Bu topuğun n sayıda saplama ile tahkim edildiğini ve saplamaların en büyük asal gerilmenin yönü ile a ve süreksizlik yüzeyinin normali ile r açısını yaptığını düşünelim (Şekil 5).



Şekil 5. Bir süreksizlik takımı içeren kaya topuğu ve notasyon.

Saplama içindeki gerilmelerin değerinin aynı olduğu ve süreksizlik yüzeyine düzgün olarak etkidiği kabul edilirse, süreksizlik yüzeyinin kesme dayanımı, aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\tau_r = c_f + o_n \tan \rho f + n \cdot m \cdot a, \quad [9]$$

Böylece yeni kesme ve normal gerilmeler aşağıdaki hale dönüşür.

$$\tau'_n = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin 2\beta - n \cdot m \cdot \sigma_b \sin \eta \quad [10a]$$

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos 2\beta + n \cdot m \cdot \sigma_b \cos \eta \quad [10b]$$

10 no'lu eşitlikleri 9'da yerine koyarsak, yeni en büyük gerilme için aşağıdaki gibi bir ilişki elde edilir.

11 no'lu eşitlikte σ'_3 saplamaları çelik plaka ile donatılıp donatılmamasına bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanacaktır.

Plaka varsa

$$\sigma'_3 = \sigma_3 + \frac{n\sigma_b}{A_\zeta} \quad [12]$$

Burada A saplamaların etkidiği yüzeylerin toplam alanı

Plaka yoksa

$$a_3 = o_3 \quad [13]$$

olacaktır.

Saplamanın en uygun yerleştirilme açısını belirlemek üzere 11 no'lu bağıntının 77'e göre türevini alır, β ve ξ 'yi sabit tutulursa aşağıdaki gibi bir ilişki elde edilir.

$$\tan r_j = \frac{1}{\tan \rho_j} \quad \text{yada} \quad T = 90^\circ - \rho_j \quad [14]$$

$$o_f = - \frac{2cf + ai [\sin 2\beta + \tan \rho_j (1 + \cos 2\beta)] + 2n \cdot m [o_b (\cos T \tan \rho_j + s' m f_j + \xi o''_s)}{\sin 2\beta - \tan \rho_j (1 - \cos 2\beta)} \quad [11]$$

Bu ilişki, daha önceki bölümlerde de işaret edildiği gibi, saplamalar süreksizlik yüzeyinin normali ile $90^\circ - \rho_j$ 'lik bir açı yapacak şekilde yerleştirildiğinde tahkim edici etkilerinden en etkin bir biçimde yararlanılabileceğini göstermektedir.

Buraya kadar verilmiş olan bağıntılarda CT^ saplamaların akma noktasına (σ_3) eşdeğer kılınarak tasarımlarda kullanılabilir.

5. UYGULAMA VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, bir önceki bölümde sunulan teoremin Horino ve arkadaşları (7) ile Egger'in (6) yapmış olduğu deneylere olan uygulaması verilecek ve tartışılacaktır.

Horino ve arkadaşları (7) tabakalaşma yüzeyleri içeren 5 tane çelik plakalı, 1.6 mm çaplı ve 358 MPa çekme dayanımına sahip kaya saplamaları ile tahkim edilmiş silindirik değişik kayaç numuneleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Kayaçlar ile süreksizliklerin fiziksel özellikleri ve deney detayları sözü edilen kaynaktan elde edilebilir. 11, 12 ve 6 no'lu eşitlikleri kullanarak yani saplamaların tahkim edici etkileri; sürtünme ve kesme kuvvetleri bileşenleri ile yüzeyin kesme direncini artırması ve ayrıca topuk yüzeyine yanal bir gerilme uygulaması olarak gözönüne alındığında yapılan hesap sonuçları Çizelge Tde deneysel sonuçlar ile birlikte gösterilmiştir. Bu çizelgeden; deneysel ve teorik sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldıklarında iyi bir uyum içinde oldukları ve ayrıca süreksizlikler içeren bir topuğun saplamalar yardımıyla dayanımının oldukça artırılacağı görülmektedir. Özellikle zayıf kayalarda bu etki oldukça belirgindir.

İkinci uygulama Egger'in deneylerine yapılmış ve teorik ve ölçüm sonuçları Çizelge 2'de gösterilmiştir. Bu uygulamada da teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmektedir. Egger'in kullandığı numune kare prizması şeklinde ve bir tek süreksizlik yüzeyi ile plakasız bir saplamayı içermektedir.

6. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmayla bir süreksizlik yüzeyinin kaya saplamaları ile tahkimi hususu deneysel ve

Çizelge 1. Teorik Sonuçların Ölçümler ile Karşılaştırılması

Kaya Türü	Ölçülmüş(*)		Hesaplanmış	
	Saplaması* (MPa)	Saplamalı (MPa)	$\frac{a_1}{a_x}$ S"Plamal. Saplamasız	$\frac{a_1}{a_x}$ Saplamalı. Saplamasız
Longmont Kumtaşı	51.5	94.9	1.84	1.29
Carthage Mermeri	43.2	56.4	1.31	1.31
Indiana Kireçtaşı	20.9	31.8	1.52	1.42
Şeyi	114.6	126.3	1.103	1.115

$$n = 5$$

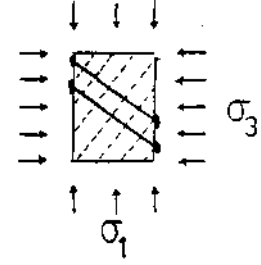
$$\sigma_b = 358 \text{ MPa}$$

$$\xi = \cos\left(45 - \frac{\psi}{2}\right)$$

$$\beta = 45^\circ$$

$$\eta = 0^\circ$$

Saplamalar çelik plaka ile donatılmıştır.



(*) ölçümler Horino ve arkadaşları (7) tarafından alınmıştır.

Çizelge 2. Teorik Sonuçların Ölçümler ile Karşılaştırılması.

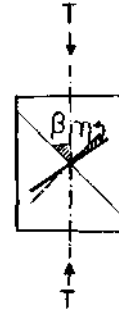
V	σ	$T_c U_m^w$ (kN)	hesap (kN)	$\frac{T_h - T_ö}{T_ö \times 0.01}$
0	28	92	86.30	- 6.20
5	28	100	91.32	- 8.68
22	21	103	108	+ 4.85
24	18	136	161	+18,38
26	28	136	107	-21.32
30	28	128	110	-14.06
42	25	140	116	-17.14
63	18	136	120.67	-11.27
64	10	116	122.45	+ 5.56

$$\beta = 45^\circ$$

$$\psi = 33^\circ$$

$$\sigma_b = 495 \text{ MPa}$$

$$\xi = \cos \theta$$



(*) ölçümler Egger (6) tarafından alınmıştır. 6)

teorik açıdan incelenmiştir. Bu bilgilerin ışığı altında, Jaeger'in teorisi üzerine dayanan ve sadece ön-gerilimli mekanik ankrajlı saplamalarla topuk tahikmi üzerine Horino ve arkadaşları tarafından ilk önce öne sürülen teori bu bildiride sunulan teori ile geliştirilmiştir.

Kaya saplamalarının süreksizlikler içeren kaya topuklarını tahkim edici etkisi, sadece süreksizlik yüzeylerinin direncini kesme ve sürtünme bileşenleri ve saplamanın kesme direnci aracılığıyla artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çelik plakalar aracılığıyla topuk yüzeyine bir yanıl gerilme olarak etki etmekte ve topuk yüzeyinde üç eksenli bir gerilme ortamı oluşturmaktadır.

Teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olmasına karşın, teörinin ileride yapılacak deneyler ve pratik uygulamalar ile sınanmasında yarar görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. MCLAMORE, R. and GRAY, K.E. The Mechanical Behaviour of Anisotropic Sedimentary Rocks, ASME Trans., Series B, s. 95-128, 1967.
2. YAMOMOTO, K. and ARIOTO, M., Failure Properties of Anisotropic Brittle Material with Weakness Plane, Rock Mechs. in Japan, Cilt II, ISCE, 1974.
3. BJURSTROM, S., Shear Strength of Hard Rocks Reinforced by Grouted Untensioned Bolts, Procs. 3 rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver, Vol 2, Part B., 1974.
4. HIBINO, S. and MOTOYIMA, M., Effects of Rockbolting in Jointy Rocks, Procs. Int. Symp. Weak Rock, Tokyos. 1057-1062, 1981.
5. PAULAY, T., PARK, R. and PHILLIPS, M.H., Horizontal Construction Joints in Cast-in-place Reinforced Concrete, ACI Special Publication, SP42, s. 599-616.
6. EGGER, P., Nouvelle Presse Triaxiale-etude de Modèles Discontinus Boulonnes, Procs. 5 th Int. Cong. Rock Mech., ISRM, Melbourne, A 171-175, 1984.
7. HORINO, F.C., DUVAL, W.F. and BRADY, B.T., The Use of Rockbolts or Wire Rope to Increase the Strength of Fractured Model Pillars, US. Dept. Interior, BM, IN23.U7 No. 7568, 622.06173., 1971.
8. YOSHINOKA ve Arkadaşları, Fundamental Study for Action and Effect of Rockbolt in a Rock Joint, Proc. 17 th Symp. Rock Mechs., Tokyo, J SCE, s. 281-285, 1984.