

Büyük ölçekli bir yerinde makaslama deneyinde ilerleyici yenilme

Progressive failure in a large-scale field shear test

BARRY VOIGHT *Department of Geosciences, The Pennsylvania State University, U.S.A.*

K. ERÇİN KASAPOĞLU *Yerbilimleri Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara*

ÖZ: Parana nehri üzerindeki "Brazilian power-navigation" projesi ile ilgili olarak yapılan bir 'yerinde' makaslama deneyi, 'yerinde' makaslama deneylerinde makaslama bloğunun değişik noktalarına uygulanan yüklerin bir fonksiyonu olarak ölçülen yatay ve düşey yerdeğişimlerin sonlu-elemanlar yöntemi ile simulasyonu için uygun görülmüş ve bu amaçla incelenmiştir. Ruiz ve Camargo (1966) tarafından ayrıntılı olarak tanımlanan sözkonusu yerinde makaslama deneyinde, blok tabanını oluşturan kumtaşı ile üzerindeki bazaltik akıntı arasındaki makaslama direnci saptanmıştır. Bu deneyde, Ruiz ve Camargo tarafından gözlenen "düşey yer değişimlerin tersine dönümü" olayı, sonlu-elemanlar yöntemi ile elde edilen kuramsal sonuçlarda da aynen görülmüştür. Ancak kuramsal sonuçlar, bu olayın deney bloğunun elâstik deformasyonu sonucu oluşabileceğine işaret etmektedirler. 'Tersine dönüm' (inversion) etkisi, blok tabanındaki ilerleyici kayma sırasında, elâstik yerdeğişim alanının yeniden yönlenmesi sonucu oluşabilir.

ABSTRACT: A large-scale 'in-situ' shear test, employed in the construction of a Brazilian power-navigation project on the Parana River, was analyzed by a "discontinuum" finite element approach. This was considered particularly appropriate for simulation inasmuch as horizontal and vertical displacements were recorded as a function of applied load at a number of points on the test block. In the field test, described in detail by Ruiz and Camargo (1966), resistance between sandstone and an overlying basaltic flow was determined. Inversion of vertical displacements observed by Ruiz and Camargo in their field test, are also seen in the theoretical results obtained by the finite element approach. However, the theoretical results suggest that inversion of vertical displacements can also occur as a consequence of elastic deformation. The inversion effect can be produced as a consequence of the reorientation of the elastic displacement field during the progressive slip along the base of the shear block.

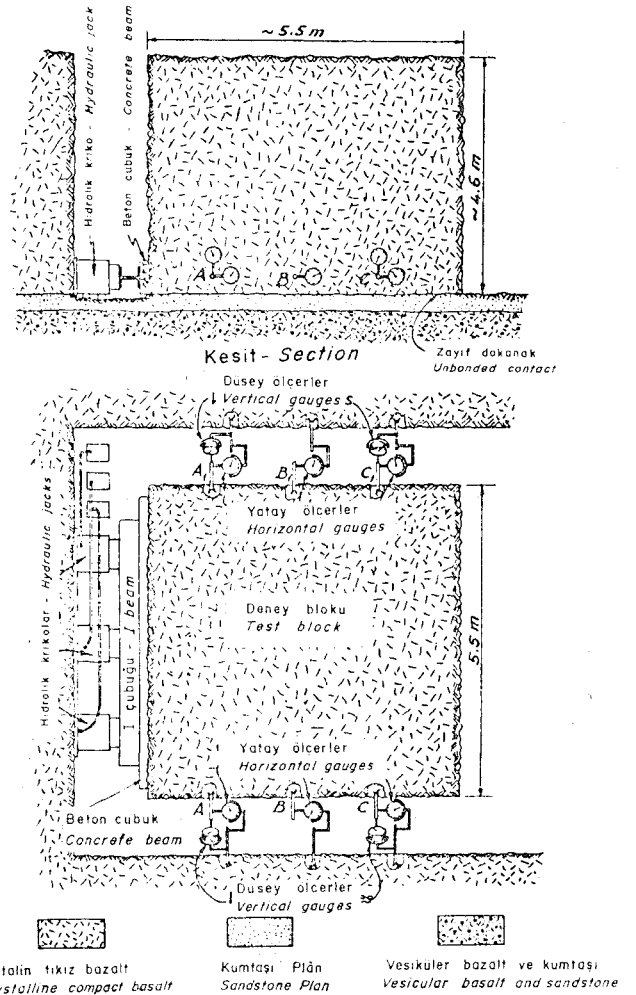
GİRİŞ

Kayaç kütlelerinin 'yerinde' makaslama dayanımları, gerek inşaat mühendisliği yapılarında temel koşullarının saptanmasında, gerek eğim duraylılığı çözümlenmelerinde, ölçülen en önemli mekanik özelliklerden biridir. Bu nedenle, büyük ölçekli 'yerinde' makaslama deneyleri, mühendislikte git-tikçe yaygınlaşan bir ölçüde uygulanmaktadır. Ancak, bu deneylerin uygulanış şekilleri, elde edilen sonuçların yorumu ve kullanılan yenilme ölçütleri için saptanmış belirli standartların bulunmayışı nedeniyle, 'yerinde' saha deneylerinden bugüne dek elde edilen sonuçlar, kayaç kütlelerinin makaslama dayanımı mekanizmasının açık bir şekilde ortaya konmasına ve bunun tutarlı bir şekilde anlaşılmasına olanak sağlayamamıştır; bu konuda bazı kuşku vardır. Örneğin, bazı araştırmacılar (Ruiz ve Camargo, 1966), 'yerinde' makaslama deneylerinde gözlenen "düşey yerdeğişimlerin tersine dönümü" (inversion of vertical displacements) olayını, bir yenilme ölçütü olarak benimserlerken; yine bazı araştırmacılar (Ruiz ve diğerleri, 1968), bu durumun (düşey yerdeğişimlerin tersine dönümünün) 'yerinde' makaslama deneylerinde her zaman gözlenmediğini ileri sürmektedirler. Bu çalışmanın temel amacı, bu konudaki kuşkuyla, teorik bir yaklaşım ile, belirli bir ölçüde ışık tutmak olmuştur.

YERİNDE DENEYİN TANIMI

Deneyin uygulandığı kayaç blokunun hazırlanmasında, salt elle kullanılan aletlerden yararlanılmış, patlayıcı madde kullanılmamasına özen gösterilmiştir. Boyutları 5,5X5,5X4,6 m olan blokun toplam hacmi 139,1 m³ tür; özgül ağırlığı ise 2,79 gr/cm³ olarak saptanmıştır. Kayaç blokunun 388,1 ton olarak hesaplanan toplam ağırlığı, blok tabanındaki makaslama düzlemi üzerinde ortalama 1,28 kg/cm² lik bir dikey gerilim oluşturur. Deney bloku ve deneyde kullanılan kriko ve ölçerler şekil 1'de gösterilmiştir. Toplam kapasiteleri 900 tonu bulan üç hidrolik kriko, yatay eksenleri olabildiği kadar blok tabanına yakın bir şekilde yerleştirilmiştir. Blok tabanındaki yük dağılımını sağlamak için çelik ve beton çubuklar kullanılmıştır. Yerdeğişim kontrolü için, kayaç blokunun her iki yanında, üç ayrı noktaya (A, B ve C) on adet deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. A ve C noktalarında, hem düşey hem de yatay yöndeki yerdeğişimler saptanmıştır.

Blok tabanına etkiyen düşey gerilim, salt bloku oluşturan kayacın ağırlığının sonucudur. Deneyde, yatay kuvvet, kayaç blokuna yükleme ve boşaltma çevirimleri şeklinde uygulanmıştır. Her artan yük düzeyinde, yatay yük, ölçerler-



Şekil 1: 'Yerinde' büyük ölçekli makaslama deneyi düzeninin plan ve kesiti (Ruiz ve Camargo, 1966 dan). I

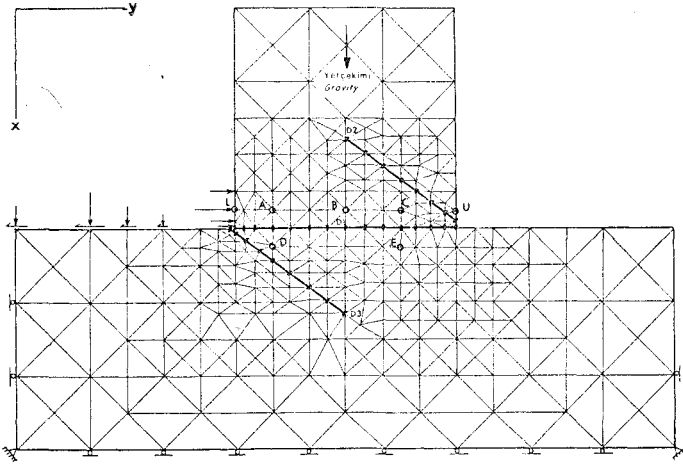
Figure 1: Plan and section of arrangement for 'in-situ' large scale shear test (After Ruiz and Camargo, 1966).

de gözlenen yerdeğişimlerde daha fazla bir artış olmayıncaya dek değişmez tutulmuştur.

SİMULASYON ŞEKLİ

Simulasyonda kullanılan sonlu-elemanlar modeli (şekil 2), laboratuvar makaslama deneylerinin simülasyonu için daha

(1) Simulasyon: bir olayın, oluştuğu doğal koşullara benzer koşullar altında yeniden oluşturulması.



Sekil 2: 'Yerinde' büyük ölçekli makaslama, deneyi modelinin sonlu elemanlara bölünümü.

Figure 2: Finite element model of 'in-situ' large scale shear test.

önce Kasapoğlu (1973) tarafından geliştirilen bir model üzerinde geometri ve sınır koşulları için gerekli değişiklikler yapılarak oluşturulmuştur. Burada kullanılan sonlu-elemanlar kavramı, daha önce Wang ve Voight (1969) tarafından tanımlanan yöntemi ve modeldeki süreksizlik düzlemleri üzerinde çift köşe noktalarının kullanılmasını içerir.

Süreksizlikler boyunca, kayma ve ayrılma şeklindeki deformasyon, bu yaklaşım ile elde edilmiş ve Coulomb-Navier'in 'çekici kesimli' yenilme teorisi uygulanmıştır. Model için kullanılan malzeme özellikleri çizelge 1'de özetlenmiştir.

D2 süreksizliği için öngörülen dayanım değerleri, aynı yerde, 0,7X0,7X0,3 m boyutlarındaki makaslama blokları üzerinde yapılan 'yerinde' dayanım deneylerinin yayımlanmış verileri (Ruiz, 1966) ile benzerdir. Aynı yayından alınan elastik özellikler de, yine küçük laboratuvar örneklerine dayanmaktadır. Bu şekilde elde edilen elastik modül değerleri, üst sınır olarak kabul edilirler. D1 süreksizliği (katmanlaşma dokanağı) boyunca, çekilme dayanımı ve kohezyon direnci (makaslama kesimi) değerlerinin sıfıra eşit oldukları varsayılmıştır. Kayaç kütlesi içindeki içsel kilitlenmeden dolayı, D3 süreksizliği boyunca, sonlu fakat düşük kohezyon değerleri öngörülmüştür.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Makaslama blokuna uygulanan 35, 175 ve 350 tonluk üç ayrı yatay kuvvetin blok içinde oluşturdukları asal gerilmelerin dağılımı şekil 3'te gösterilmiştir. Blok tabanındaki D1 süreksizliğinin sol ucunda 'ayrılma' şeklinde başlayan yenilme, blok tabanının sağ alt köşesine doğru 'kayma' şeklinde ilerlemiştir (şekil 4). Uygulanan kuvvetin artmasıyla, 'kayma' şeklindeki yerel yenilme, blok tabanı boyunca ilerleme göstermiştir. 75 tonluk yük düzeyinde; kayma, D1 üzerindeki toplam 15 nokta çiftinin ilk üçüne kadar ilerlemiş; 150 tonluk yük düzeyinde ise, 12 nci nokta çiftine kadar ulaşmıştır.

Çizelge 1: 'Yerinde' makaslama bloku modelleri için kullanılan malzeme özelliklerinin özeti

Table 1: Summary of material properties used for the 'in-situ' shear block models

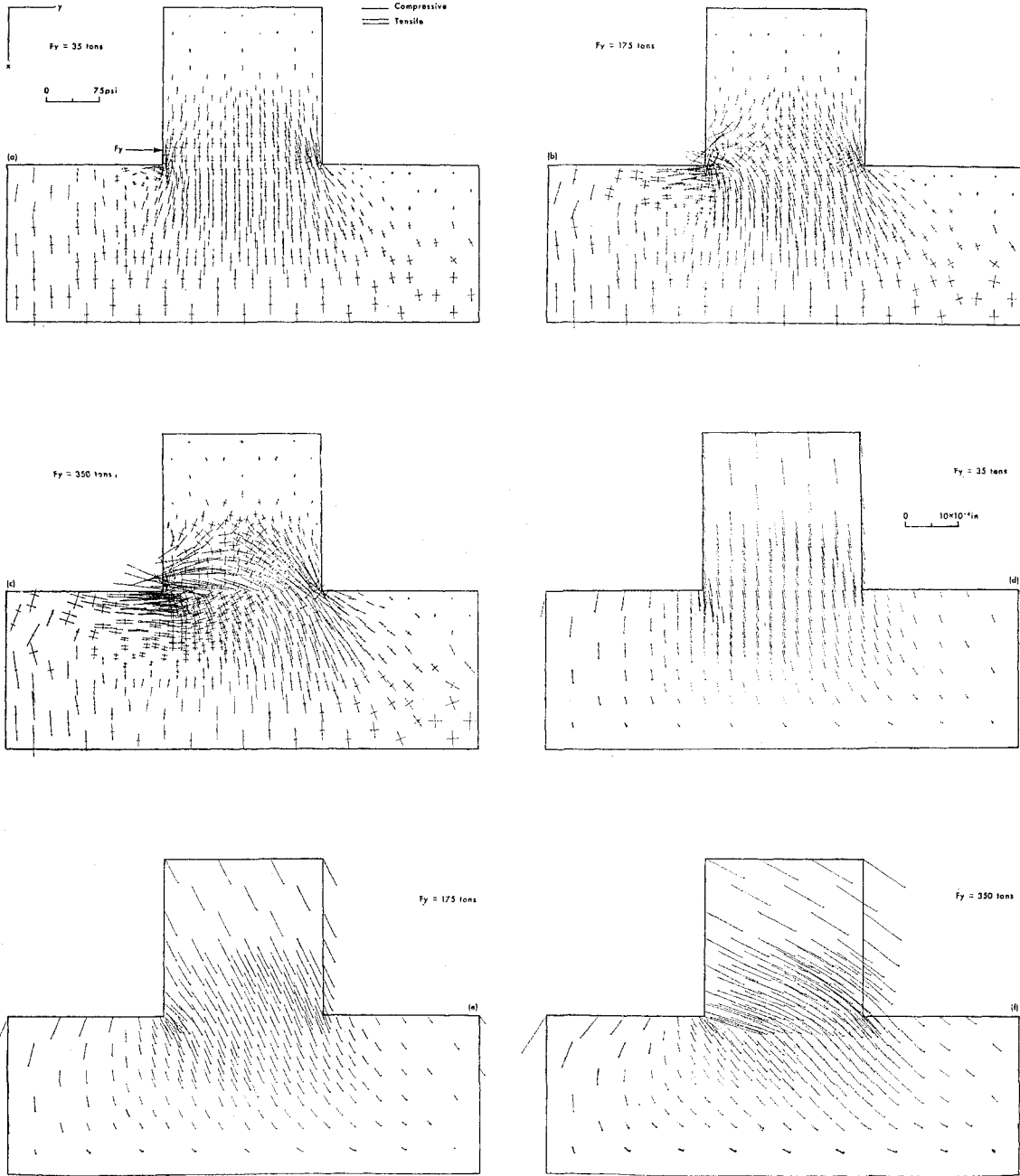
Süreksizlikler için varsayılan dayanım özellikleri	D ₁ süreksizliği	D ₂ süreksizliği
Sürtünme katsayısı	1,0	1,5
Makaslama kesimi	0,0 kg/cm ²	2,7 kg/cm ²
Çekilme dayanımı	0,0 kg/cm ²	1,4 kg/cm ²
İlk modelin elastik özellikleri		
Young modülü	7,2 × 10 ⁵ kg/cm ²	
Poisson oranı	0,21	
Değiştirilmiş modelin elastik özellikleri		
Young modülü	1 × 10 ⁴ kg/cm ²	
Poisson oranı	0,20	

Bu yük düzeyinde, blok tabanındaki yenilmenin henüz tamamlanmamış olduğuna işaret eden bu sonuç, saha deneyinde gözlenen durum ve şekil 6'da gösterilen 'yerinde' kuvvet-, yerdeğişim eğrisi ile uyum halindedir.

Uygulanan yükün artmasıyla oluşan, makaslama bloku ve bitişik blok içindeki gerilim alanındaki değişimlerin önemi, şekil 3'te açık bir şekilde gösterilmiştir. Deney blokunun sol alt köşesi çevresinde oluşan 'çekici' gerilmelerin de önemli olduğu düşünülmüştür. Bu gerilmeler, iki kayaç bloku arasında uygulanan hidrolik krikonun etki ve tepkisinin oluşturduğu 'kamalama' etkisinin bir sonucu olarak gelişmekte; dirler. Bu çekici gerilmelerin yönü, yaklaşık olarak, blok tabanına (D1 süreksizliğine) paralel olup, 'çekici ayrılma' şeklindeki 'yerel' yenilmeyi oluştururlar. Burada varsayılan dayanım parametreleri için, bu yerel ayrılma, uygulanan kuvvetin orta düzeyinde, yenilmenin ikinci evresinde oluşmaktadır. D1 üzerindeki kayma sona erdikten sonra, yenilmenin üçüncü evresi, yine 'ayrılma' şeklinde, fakat bu defa blok tabanına vev olarak (D3 süreksizliği boyunca) ilerlemektedir. Bu vev çekici yenilmenin uzanımı, dayanım parametrelerinin seçimine bağlıdır. Büyük bir olasılıkla, çekici gerilmelere karşı direnci zayıf olan kayaç blokları, hidrolik krikonun yükleme zonu çevresinde, 'ayrılma' şeklinde bir tepki göstermektedirler. Bu koşullar altında, her iki makaslama bloku içinde ve bunların tabanları boyunca, uygulanan yatay kuvvetler, çok küçük artmalarla büyük yerdeğişimler oluşturabilmektedirler. Şekil 5, makaslama bloku içinde seçilen belirli noktadaki net yatay ve düşey yerdeğişimleri göstermektedir. Şekildeki L noktası, makaslama blokunun yüklenen kenarı üzerinde; U noktası ise, yüklenmemiş karşı kenar üzerinde bir noktadır. A, B ve C noktaları ise, saha deneyinde yerdeğişimlerin ölçüldüğü noktalara karşittirler; D ve E ise, blok tabanında ve kayma düzleminin hemen altında herhangi iki noktayı belirlemektedirler.

'Yerinde' makaslama bloku modeli üzerinde, bu kritik noktalarda (özellikle A, B ve C noktalarında) sonlu-eleman-

(1) 'Yerinde' makaslama blokunun soluna uygulanan düşey yük (şekil 2), yerinde deneydeki bitişik blokun (şekil 1) ağırlığına karşılıktır. Aynı yere uygulanan yatay kuvvetler ise, yine bitişik kayac kütlesinin tepkimesinin bir simülasyonudur. Alt ve üst bloklar arasındaki katmanlaşma dokanağı boyunca, sürtünme katsayısının eşit olduğu varsayılmıştır.

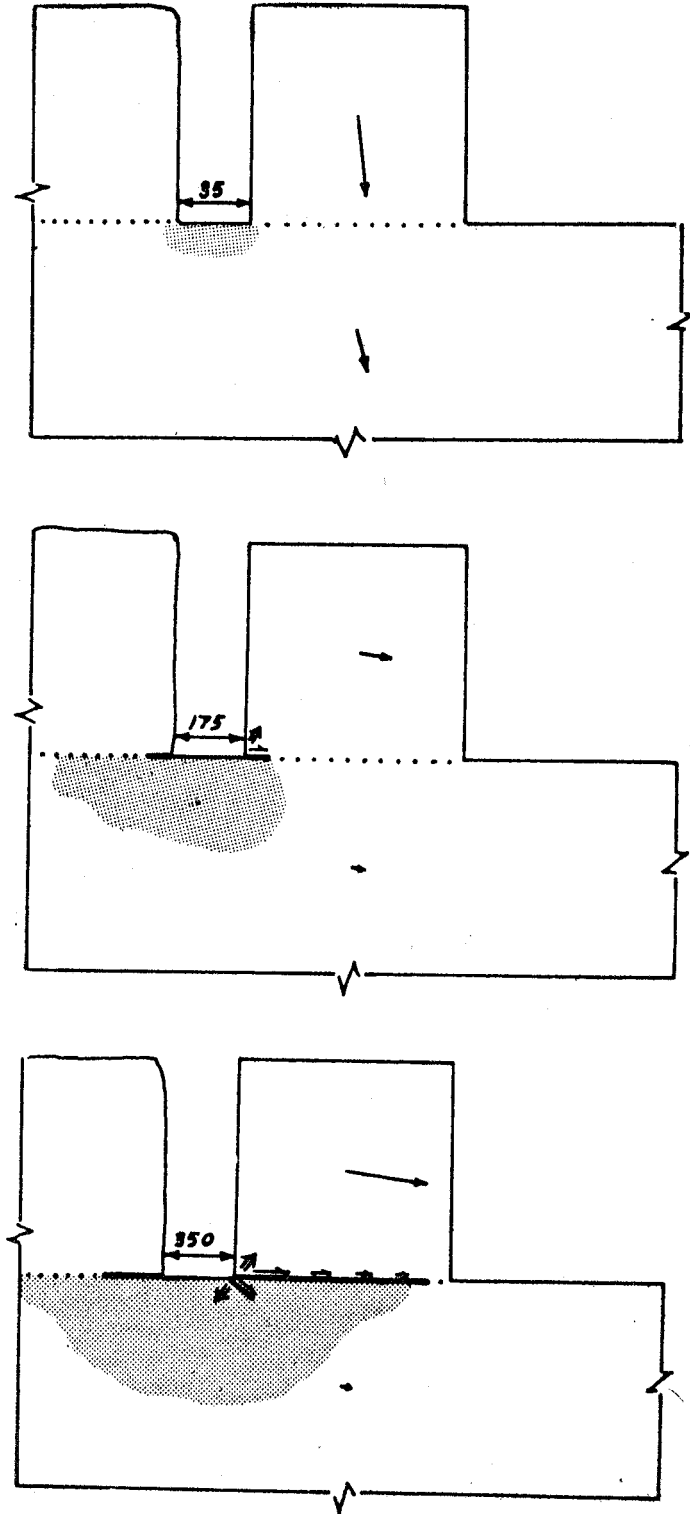


Şekil 3: 'Yerinde' makaslama bloku içindeki asal gerilim dağılımı ve yerdeğişim alanı.

Figure 3: Distribution of principal stresses and associated displacement field in 'in-situ' shear block model.

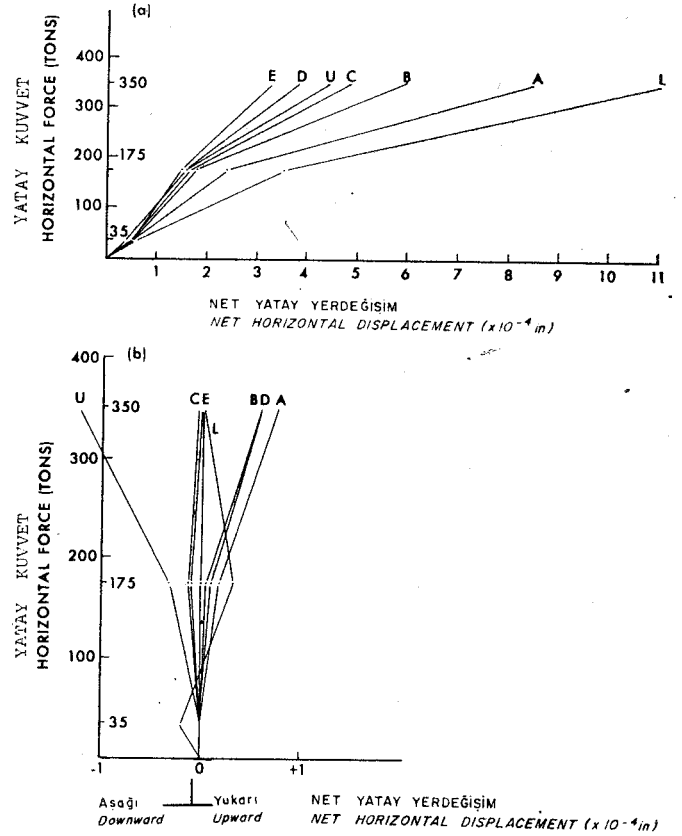
lar yöntemi ile saptanan yatay ve düşey gerilim değerleri, Ruiz ve Camargo (1966)'mn saha verileri (şekil 6) ile oldukça iyi bir uyum halindedirler. Ancak, sonlu-elemanlar çözümlerinden elde edilen yatay yerdeğişim değerleri, saha değerlerinden 102 faktörü kadar daha düşüktür (örneğin, A noktasında 70 faktörü kadar). Bu farkın, modelde Young modülün üst sınır değerlerinin kullanılmış olmasından ileri geldiği söylenebilir. Kayaç kütlelerinin Young modülü ise, en az 10 faktörü kadar daha az olabilir. Bu durumda, daha uyumlu yerdeğişim değerleri elde edebilmek için, model ve

kayaçın modül değerleri arasında bir ayarlama yapılması gerekir. Nitekim, modelin Young modül değeri belirli oranlarda azaltılarak uygulandığında; örneğin $E=10^4$ kg/cm² değerine kargın elde edilen yatay yerdeğişim değerleri, sahada ölçülen değerlere (şekil 6) çok daha yakın bulunmuştur (özellikle 350 tonluk yük düzeyinde). 175 tonluk yük düzeyi için elde edilen yatay yerdeğişim değerleri ise çok yüksektir ki bu da, etkin kayaç modülünün deney sırasında değişmiş olabileceği (azalabileceği) olasılığını ortaya koymaktadır. Eğer öyle ise, kuvvet-yerdeğişim ilişkilerini öngörmekte kullan-



Şekil 4: Deformasyon şekli ve tipik yerdeğişimlerin gelişimi (—^işareti 'kayma' yı ⇌ işareti 'ayrılma' yı; gölgelendirilmiş alan ise, 'çekilme' zonunu belirlemektedir.

Figure 4: Sequence of mode of deformation, typical net displacements (⇌ implies 'slip'; ^ implies 'separation', shaded area refers to tension zone)

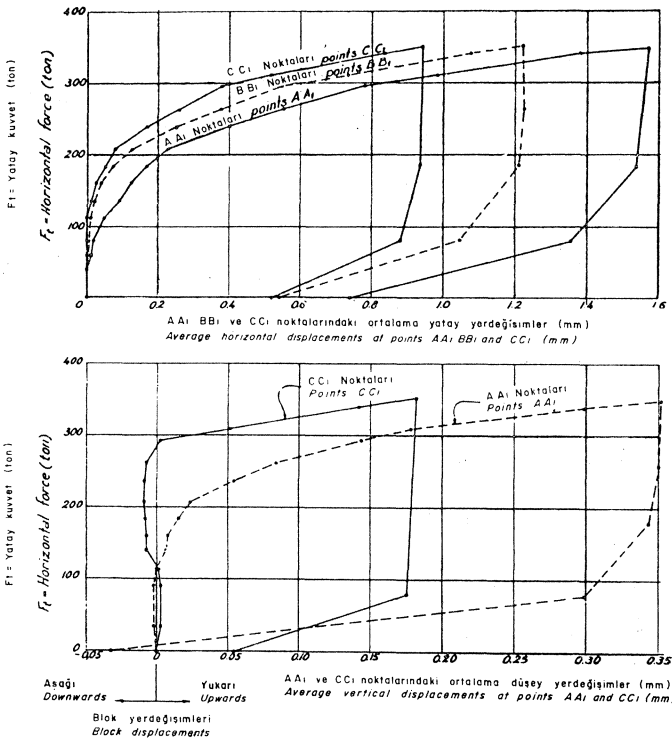


Şekil 5: 'Yerinde' makaslama bloku içindeki A, B, C, D, E, L ve U noktalarında, sonlu elemanlar çözümleri ile öngörülen yerdeğişimler, (a) yatay yerdeğişim ve (b) düşey yerdeğişim.

Figure 5: Displacements predicted from finite element solutions at points A, B, C, D, E, X, and U in the 'in-situ' shear block model, (a) horizontal displacement and (b) vertical displacement.

lan ve tüm yük düzeylerinde aynı tek modül değerini uygun simülasyon sonuçları, öngörülen yerdeğişim ve birim deformasyonlardaki varsayım hatalarını gidermekten uzaktırlar. Oysa, gerilim değerleri, burada uygulanan kuvvet sınır koşulları altında, değişmemektedirler. Buradan da, makaslama bloku içinde oluşan gerilim alanının (şekil 3) ve yük düzeyinin bir fonksiyonu olarak gelişen ilerleyici yenilmenin (şekil 4), kullanılan modül değerlerine bağımlı olmadıkları sonucuna varılabilir.

Şekil 3'te gösterilen ve yerçekim bileşenlerinin çıkartılmış olduğu toplam yerdeğişimler (net düşey yerdeğişimler), uygulanan makaslama yükünün bir fonksiyonu olarak, L noktasında sürekli bir yükselmeye işaret etmektedir (şekil 5 b). A, B, C, D, E iç noktalarındaki görece yerdeğişimler de, yine benzer bir yönelimi (makaslama bloğunun saat yönünde dönümünü) yansıtmaktadır. Dönü merkezi, bloğunun ağırlık merkezinin sağında olup, makaslama kuvvetindeki artış ve D1 boyunca oluşan kayma ile birlikte sağa doğru kaymaktadır. Düşük modül değerleri kullanıldığında yine benzer bir yönelim izlenmiştir; ancak, elde edilen yerdeğişim değerleri çok daha büyük olup, saha gözlemleri ile karşılaştırılabilirler (şekil 6 b).



Şekil 6: AA₁, BB₁ ve CC₁ noktalarındaki, yatay kuvvetlere ilişkin ortalama yatay ve düşey yerdeğişimler (Ruiz ve Camargo, 1966 dan).

Figure 6: Average horizontal and vertical displacements at points AA₁, BB₁ ve CC₁ in relation to horizontal forces (After Ruiz and Camargo, 1966).

Saha deneyinde, Ruiz ve Camargo (1966) tarafından C noktasında gözlenen "düşey yerdeğişimlerin tersine dönümü" (başlangıçta yukarıya doğru olan hareketi izleyen aşağıya doğru hareket) olayı, teorik sonuçlarda da aynen görülmüştür. Diğer taraftan, Serafim (1963) tarafından da gözlenen bu olay, daha önce 'dilatasyon' kavramı ile ilgili olarak yorumlanmıştır. Bir noktadaki düşey yerdeğişimin tersine dönümü, o noktada 'yerel' bir yenilmenin işareti sayılmış; ve bu tersine dönümü oluşturan yatay yükün, o noktadaki 'yerel' yenilme için gerekli yük olduğu düşünülmüştür. Diğer bir deyişle, "tersine dönüm" (inversion) olayının, 'yerinde' makaslama deneylerinde geçerli bir yenilme ölçütü olabileceği ileri sürülmüş; hattâ, buna bazıları tarafından "dilatasyon ölçütü" olarak değinilmiştir (Ruiz ve Camargo, 1966, s. 258),

Şekil 5'te sunulan teorik sonuçlar ise, "düşey yerdeğişimin tersine dönümü" olayının, elastik deformasyon sonucu oluşabileceğini göstermektedir. Tersine dönüm etkisi, ilerleyici kayma sırasında, elastik yerdeğişim alanının yeniden yönlmesi sonucu oluşabilir. Burada verilen örnekte, 'kay-

ma' henüz C noktasına ulaşmadığı halde, C noktasında düşey yerdeğişimin tersine dönümü oluşmuştur. Bu veri ile, gerçek deformasyondaki 'dilatasyon' mekanizmasını yadsımak istemiyoruz; fakat bu olayda daha başka mekanizmaların da etken olabileceğine işaret etmek istiyoruz. Örneğin, düşey yerdeğişim değerlerinin büyüklüğü önemli olabilir. Ruiz ve Camargo'nun verileri (şekil 6), gerçekten bir 'dilatasyon' mekanizmasına işaret etmektedir. Fakat, bizim görüşümüze göre, dilatasyonda önemli olan etken "tersine dönüm" değil, düşey yerdeğişim değerlerinde gözlenen büyük değişimlerdir. Örneğin, artı veya eksi yönlü küçük (daha çok 'elastik') deformasyonlardan, yenilme zonunda dilatasyon sonucu oluşan, ani, büyük ve yukarı yönlü yerdeğişimlere olan değişimler gibi.

Bu çalışmamızdaki gözlemlerimize göre, büyük ve yukarı yönlü yerdeğişimler, "tersine dönüm" için gerekli yük düzeyinden daha büyük bir yük düzeyinde oluşmaktadır. Herhangi bir noktadaki düşey yerdeğişim miktarının sonlu bir sınırı olabilir; ancak, 'yerinde' makaslama deneyleri, çoğunlukla bu sınıra erişilmeden durdurulur. Burada işaret edilmesi gereken önemli bir başka nokta da, "tersine dönüm" kavramının, C gibi blok içindeki bir nokta için değil; daha çok, makaslama bloğunun yüklenmemiş olan karşı kenarındaki noktalar için geçerli olabileceğidir. Şekil 3 ve 5'te sunulan teorik verilere göre, makaslama bloğunun yüklenmemiş kenarı çevresindeki düşey yerdeğişimlerin eğimi oldukça büyüktür. Bu nedenle, özellikle iç noktalardan elde edilen verilerin çok dikkatli yorumlanmaları gerekir. Makaslama bloku çevresindeki yerdeğişimlerin nitelikleri, blok geometrisi, krikoların yerleştirilme şekilleri gibi, bugüne dek yeterince araştırılmamış bazı etkenlere bağlı olabilir. Nitekim, Ruiz ve diğerleri (1968), "tersine dönüm" olayının 'yerinde' makaslama deneylerinde her zaman gözlenmediğine işaret etmişlerdir.

Yayına verildiği tarih: Ocak, 1976

DEĞİNİLEN BELGELER

- Kasapoğlu, K.E., 1973, Progressive failure in discontinuous rock masses subjected to shear loading: Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University, 165 s.
- Ruiz, M.D., 1966, Some technological characteristics of twentysix Brazilian rock types: Proc. 1st Congress. Int. Soc. of Rock Mechanics, Lisbon, 115-121.
- Ruiz, M.D. ve Camargo, F.P., 1966, A large scale field shear test: Proc. 1st Congress. Int. Soc. of Rock Mechanics, Lisbon, 257-261.
- Ruiz, M.D., Camargo, F.P. ve Nieble, C.M., 1968, Some considerations regarding the shear strength of rock masses: International Symposium on Rock Mechanics, Madrid, 159-161.
- Serafim, J.L., 1963, Rock mechanics considerations in the design of concrete dams: Int. Conf. State of Stress in the Earth Crust, Santa Monica, 628-633.
- Wang, Y.J. ve Voight, B., 1969, A discrete element stress analysis model for discontinuous materials: Proc. Inter. Symp. on Large Permanent Underground Openings, Oslo, 111-115.