

KAYALAR ÜZERİNDE YAPILAN KIRILMA DENEYLERİ HAKKINDA

Erdoğan YÜZER

İ.T.Ü. Tatbiki Jeoloji Kürsüsü, İstanbul

GİRİŞ

Arz üzerinde geniş alanlar kaplayan tektonik olayların izlerini, çeşitli kırık, çatlak ve fayları birbirine bağlı olarak arazide gözlemek ve bunları meydana getiren kuvvetlerin mekanizmasını çözmek çoğu zaman mümkün değildir. Yapılan saha araştırmaları genellikle küçük bölgeler içinde sınırlı kalmakta, dolayısıyla olayların mekaniğini, tesir eden çeşitli gerilme (birim alana düşen kuvvet) sistemlerini çözememektedir. Bu güçlüğü açıklanmasına ışık tutacak, onların anlaşılmasında bazı ipuçları verebilecek tektonik deneylerin yapılması 1.5 asır öncesine kadar iner. Başlangıçta sadece killer üzerinde yapılan model çalışmalarına, 1911 de Von Karman'ın kayalar üzerindeki deneyleriyle önemli bir katkıda bulunulmuştur. İlk deneyler sadece kayaların elastiklik ve plastiklik sınırını izafi olarak izlemeyi gaye edinmiş, bunlarla kırılma ve fayların açıklanması araştırılmıştır. Bu konudaki esas güçlük, kayaların kırılma esasları üzerinde düğümlenmektedir. Taşların, çeşitli gerilmeler altındaki çok küçük deformasyonları (genellikle % 1 civarında) deneyler esnasında bunları ölçebilen ayrı bir tekniği gerektirir. 15 sene evveline kadar bu gibi tekniklerin yokluğu sebebiyle kayalar üzerindeki çalışmalarda önemli adımlar atılamamıştır. 1950 den bu yana deformasyon ölçme tekniğinin gelişmesine paralel olarak, kendine kayaların çeşitli gerilmeler altındaki deformasyonunu incelemeyi konu edinen «Kaya Mekaniği» adıyla bir ilim kolu doğmuştur. Özellikle 1960 tan sonra kendine has disiplinleriyle gelişen kaya mekaniğinde çalışan çeşitli orijinden gelme araştırmacılar, özel sahalarındaki güçlükler üzerine eğilmişlerdir. Bu arada jeolojiyle uğraşanların başlıca çalışma konusu, kayaların kırılmalarını araştırmak olmuştur. Kayalarla ilgili çeşitli mühendislik dallarında çalışanlar da, büyük yeraltı ve yerüstü tesislerinin yapılmasında karşılaşacakları gerilme dağılımlarını önce öğrenmeye, ölçmeye, sonra güçlükleri yenmeye uğraşmaktadır. Külteler içinde mevcut gerilmelerin kültelerin gravitelerinin yanısıra, geçirdikleri tektonik hareketlerden kalan «residual gerilme-

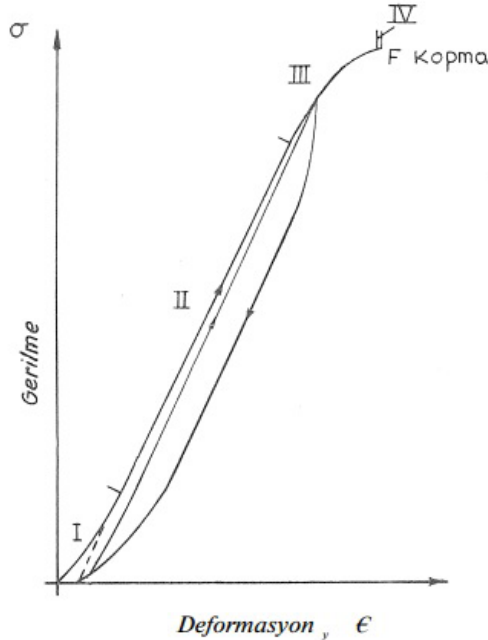
ler» sonucu oluşu, jeolojiyi kaya mekaniğinin ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir. Bu sebeple arazide yapılan kaya mekaniği deneyleri sonuçları, ancak bölgenin tektonik yapısının ışığı altında değerlendirilebilmektedir.

Laboratuvar çalışmalarında da gerek tane ve kristaller arasındaki ilginin, gerekse tabakalaşma, foliasyon, şistiyet v.b. gibi süresizlik ortamlarının araştırılması yine jeolojinin çeşitli konulan içinde yer alır. Kısaca, jeoloji hızla gelişmekte olan kaya mekaniğinin en büyük yardımcısı olmaktadır.

KAYA ÜZERİNDE KIRILMA DENEYLERİ

Kayalar üzerinde yapılan çeşitli deneyleri sınıflandırmadan önce, gerilme altında tutulan kayalara ait tipik bir gerilme deformasyon, $\sigma=f(\epsilon)$, eğrisini görelim (Şek. 1). Bu eğri üzerinde işaret edildiği gibi basınç arttıkça, deformasyon artmakta ve bu artış I. ve II bölgelerde birbiriyle orantılı olmaktadır. Başka bir deyimle, I. ve II. Bölgelerde kayaların davranışı tamamen elastiktir, gerilme kaldırılınca deformasyon da ortadan kalkar. I. bölgedeki eğrilik, taşın porozitesinin ve küçük fisürlerin miktarına göre değişir. Yoğun kayalarda bu doğruya yakındır. III. Bölgeye geçilince durum değişir, gerilmeler kaldırılınca

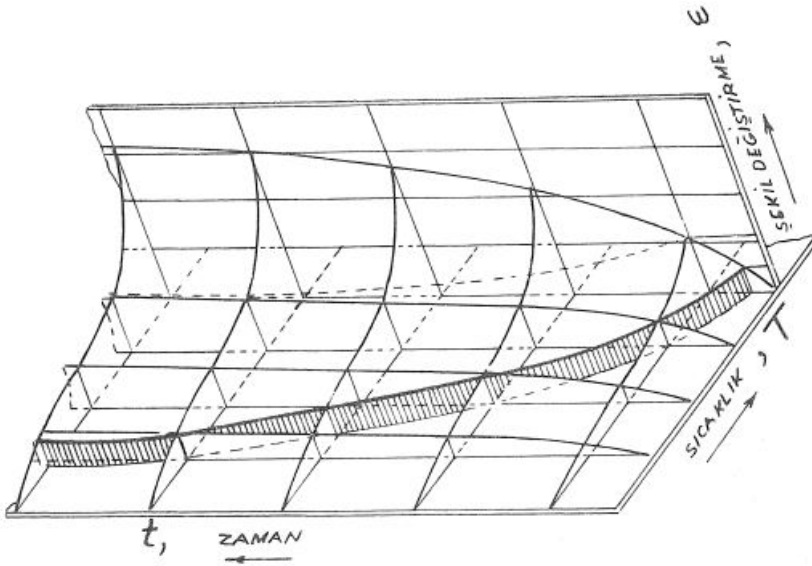
devamlı (kalıcı) deformasyondan dolayı bir histerezis elde edilir. Kısa süreli IV. bölgede önemli değişiklikler olur, önce taneler arasında daha sonra da, görülen fisür ve çatlaklar oluşur. Gerilme arttırıldıkça ileride açıklanacak şartlara bağlı olarak tansiyon çatlağı veya kesme (shear) şeklinde bir kırılmayla deney son bulur. III. bölge, yanıl basınçlar (σ_3), sıcaklık ve deney



Şek. 1 - Gevrek (brittle) kayaların basınç altında tutulmasıyla elde edilen tipik gerilme-deformasyon, $\sigma = f(\epsilon)$ eğrisi

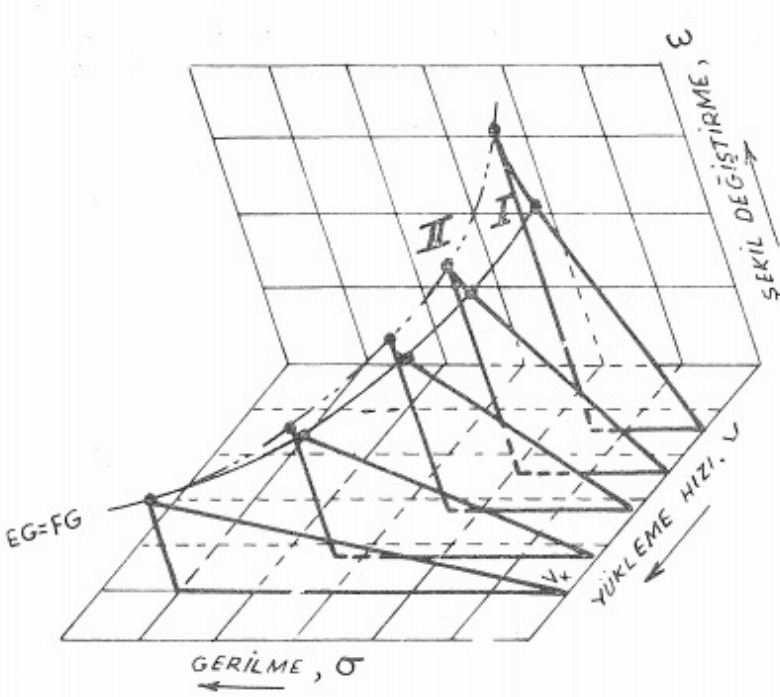
süresi, deformasyon hızı gibi şartlara bağlı olarak genişleyebilir. Bu durumda taş elastik veya gevrek (brittle) halden uzaklaşıp, sünümlü (ductile) hale geçer. Bu arada gevrekliğin herhangi bir taş cinsinin değişmez özeliği olmayıp, içinde bulunduğu ortam ve şartların bir fonksiyonu olduğunu hatırlamak gerekir. Başka bir deyimle, her taş şartlara göre gevrek veya sünümlü olarak davranabilir (Şek. 2, 3).

Kayalar üzerinde yapılan deneyleri elastik sınırı aşmadan ve aştıktan sonra yapılanlar olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Yazımıza konu olan birinci gruptaki deneyler, kayaların kırılma şartlarını ve şekillerini inceler, ikinci gruptakiler ise, kıvrımlarına mekanizmasının açıklanmasına uğraşır. Zamanımızda kayaların kırılmasını açıklamayı gaye edinen deneyler iki yönde yapılmaktadır. Birincisinde, mikroskopik yapıdaki kırıklardan ziyade görülen makro kırıklarla ilgilenilmekte, ikincisinde önce mikroskopik kırıklar üzerinde durulmakta sonra bunlarla makroskopik kırıkların ilgisi araştırılmaktadır. Minnesota Üniversitesi Teknoloji Enstitüsünde bulunduğumuz sırada her iki grup deney üzerinde bir müddet çalışma imkânı bulduk. Aşağıda bu konuda yapılan diğer ilgili çalışmaların sonuçlarını birleştirerek bunları özetlemeye çalışacağız.



Şek. 2 - Kayaların, deformasyonun zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişimini gösteren $\sigma = f(t, T)$ eğrileri.

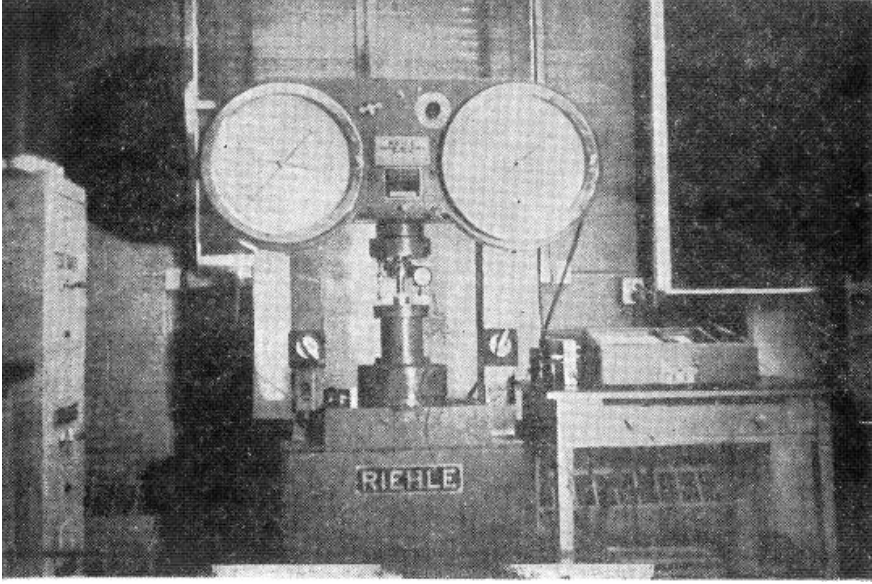
Tarama ile gösterilen bölge çeşitli zaman sıcaklık kombinasyonlarında elde edilen eşit büyüklükteki deformasyonları göstermektedir.



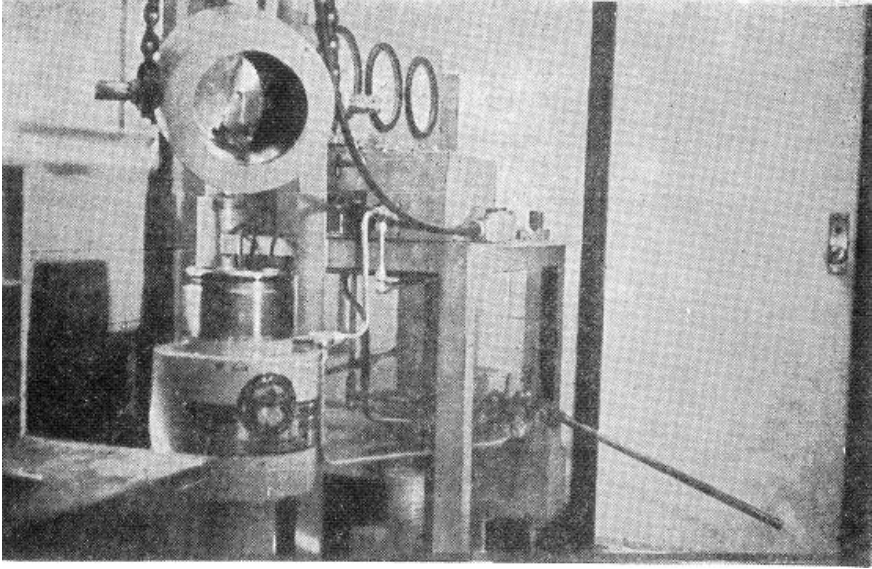
Şek. 3 - Deformasyonun gerilme ve yükleme veya deformasyon hızına bağlı olarak değişimini gösteren $\sigma = f(t, v)$ eğrileri.

1 - Eğrisi elastik deformasyonu; II - Eğrisi elastik deformasyondan uzaklaşarak, plastik deformasyona geçişi işaret etmektedir.

Şekil 4 ve 5 üzerinde kaya mekaniğinde, kırılma mekanizmasının açıklanması için kullanılan bazı deney aletleri görülmektedir. Tek eksenli basınç aletlerinde düşey basınç (σ_1), aşağıya veya yukarıya doğru hidrolik olarak hareket eden bir pistonun ucundaki yükleme tablasıyla sabit tabla arasında numuneyi sıkıştırmakla elde edilir. Üç eksenli alette yanal basınç (σ_3) ise, numune etrafında hidrolik olarak sıkıştırılmış çeşitli sıvımlarla meydana getirilir. Deney esnasında, her ana tekabül eden gerilme ve deformasyonlar elektriksel ekstansometreler (strain gauge) vasıtasıyla dolaylı olarak ölçülür, özel aletlerle (X-Y recorder) otomatik olarak $\sigma = f(\epsilon)$ eğrisi çizilir. Bu suretle deneyin herhangi bir safhasında numunenin tesiri altında bulunduğu gerilmeleri ve deformasyonu derhal bulmak imkân dahiline girer.



Şek. 4- Kayaların kırılma deneylerinin yapıldığı tek eksenli kırılma aleti.



Şek. 5- Hidrolik olarak sağlanan yüksek çevre basıncı altında kırılma deneylerin yapıldığı üç eksenli kırılma aleti.

Deney sonuçları çeşitli usul ve grafiklerle ifade edilir, Bunlardan en yaygın ve faydalı olanı «MOHR» grafik gösterme usulüdür. Bu usulde kırılma anındaki gerilmeler, kırılma açıları kolayca görülür. (Şek. 6). (T) kayma (kesme) gerilmesini (shearing stress), (σ) normal gerilmeyi (normal stress) göstermek üzere, T-a koordinat sisteminde, merkezleri apsis ekseninde olan ve kırılma anındaki çeşitli σ_1, σ_3 gerilme çiftine tekabül eden, orijinden itibaren

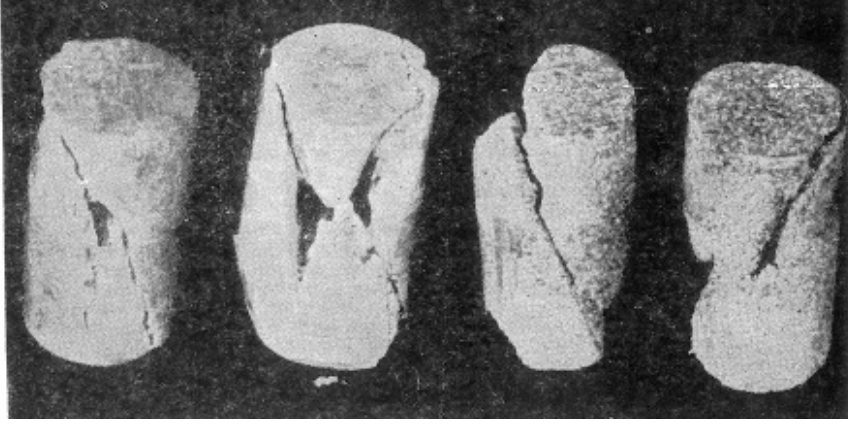
$\sigma_1 + \sigma_2/2$ merkezli ve $\sigma_1 - \sigma_2/2$ yarıçaplı «MOHR» gerilme daireleri

çizilir. Bu dairelerin ortak zarfı, deneyin yapıldığı numunede hangi σ_1, σ_3 çiftinin kırılmayı sonuçlayabileceğini açıklar, zarfa teğet olan veya kesen σ_1, σ_3 daireleri kırılmayı kesmeyenler de halen kırılmanın mevcut olmadığını gösterir.

Zarf nispeten küçük σ_3 gerilmeleri altında doğru, büyük σ_3 gerilmeleri için bir parabol şeklindedir.

Gerilme daireleri ve kırılma zarfı çizildikten sonra, bunlar yardımıyla, kırılma düzlemleri arasında meydana gelen açığı, kırılma veya kesme yüzünde kırılma anındaki normal ve kayma gerilmelerini, iç sürtünme açısını bulmak mümkündür (Şek. 6).

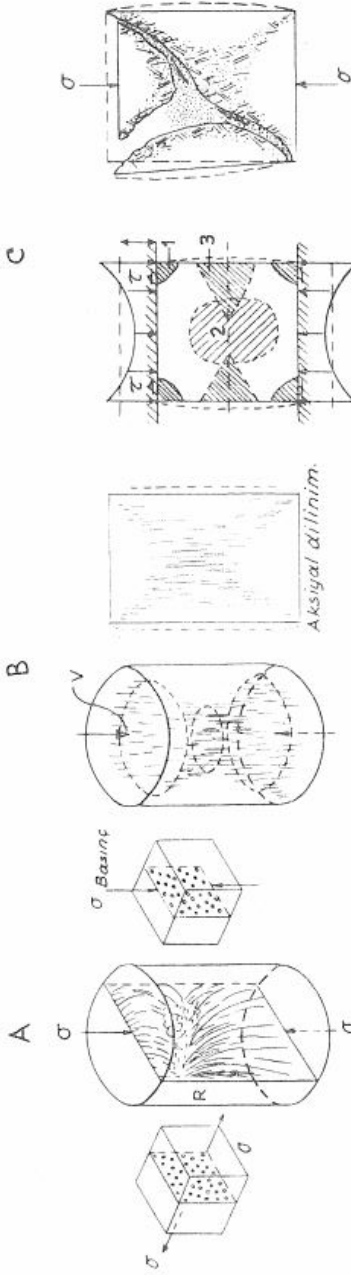
Çalışmalarımız sırasında deney için küçük kristalli Tennessee mermerinden alınan katotlardan 1 inch çapında ve 2 inch yüksekliğinde silindirik ve uçları 0.001 inch mertebesinde paralelleştirilmiş numuneler hazırlanmıştır. Bunlar, tansiyon gerilmesi, bir eksenli basınç gerilmesi ve üç eksenli basınç gerilmeleri altında tutulmuş ve meydana gelen kırıkların mekanizması incelenmiştir. Tansiyon gerilmeleri altında tutulan numunelerde gerilme eksenine dik, temiz yüzeyli tek bir tansiyon kırığı meydana gelmiştir (tension joint). Bir eksenli gerilme halinde ise, birbirini kesen iki yüzey boyunca kayma meydana gelmiştir (shear joints) (Şek. 7). Üç eksenli basınç deneylerinde düşük yanal gerilme (σ_3) değerleri için iki kayma (kesme) yüzeyi, (σ_3) değerleri büyüdükçe bir kayma yüzeyi elde edilmiştir. Aynı zamanda, yanal gerilmelerin artmasıyla kayma düzlemleri arasındaki açı da büyümektedir. Yanal basınçların artması hali tabiiatta yeryüzünden itibaren derinlik artmasına tekabül ettiğine göre, deney sırasında soldan sağa doğru meydana gelen değişimleri, tabiiatta düşey doğrultuda beklemek gerekir. Nitekim, Muehlberger, Appalaşlar üzerinde yaptığı arazi gözlemlerinde, çeşitli kırık ve kayma yüzleri arasında bu ilgileri izlemiştir.



Şek. 7 - Tennessee mermeri ve Wisconsin kumlu kalkeri üzerinde yapılan tek eksenli kırılma deneyi sonucunda elde edilen kırılma yüzleri.

da görüldüğü üzere, mermer, kuarsit, granit gibi numunelerde kırılma birbirini kesen kayma yüzeyleri boyunca oluşmuştur.

Son zamanlarda kayaların kırılma mekanizmalarının analizinde çalışanların üzerine eğildiği en önemli konulardan biri de aksiyal dilinimdir. Bir grup araştırmacı, kayaların bir eksenli, hatta küçük yanal gerilmeli üç eksenli basınç deneyleri sonucunda meydana gelen koni şeklindeki kırılma yüzeylerini «deney hatalarının» doğurduğu yanıltıcı yüzler olarak nitelemektedir. İleri sürülenlere göre, «Gerilme tatbiki esnasında gerek uygun şekilde numuneler kullanılmadığından numunelerde, gerekse basınç aletlerinde gerilme konsantrasyonunun meydana geldiği bazı kısımlar mevcuttur (Şek. 8). Kırılmanın tam başladığı anda buralarda anî enerji boşalması kırılma yüzeylerinin şeklini ve yapısını değiştirmektedir. Aslında, uygun numune şekli ve alet tipi seçilirse basınç gerilmeleri altında, maksimum basınç eksenine paralel kırılmalar (aksiyal dilinme) olur.» Bu görüşü doğrulayan birçok arazi ve laboratuvar gözlemleri mevcuttur. Gramberg litografya kalkerinin serbest basınç deneyi sonucunda gerilme eksenine paralel düşey dilinimlerin meydana geldiği ve bu yüzlerin tamamen tansiyon çatlakları özeliğini taşıdığını görmüştür. O halde bu kırılmaları meydana getiren gerilme, basınç gerilmelerinin endirekt olarak doğurduğu tansiyon gerilmeleridir. Bu noktadan hareket ederek birçok deney yapılmıştır. Basınç gerilmelerinin katı cisimlerin mikroskopik yapısında, tansiyon gerilmelerini doğurduğu konusu yemi değildir ve 1920 de Griffith tarafından ortaya atılmıştır. Griffith'e göre katı ve gevrek cisimlerle içinde küçük elips şekilli mikro çatlaklar mevcuttur. Basınç veya tansiyon gerilmesi altında



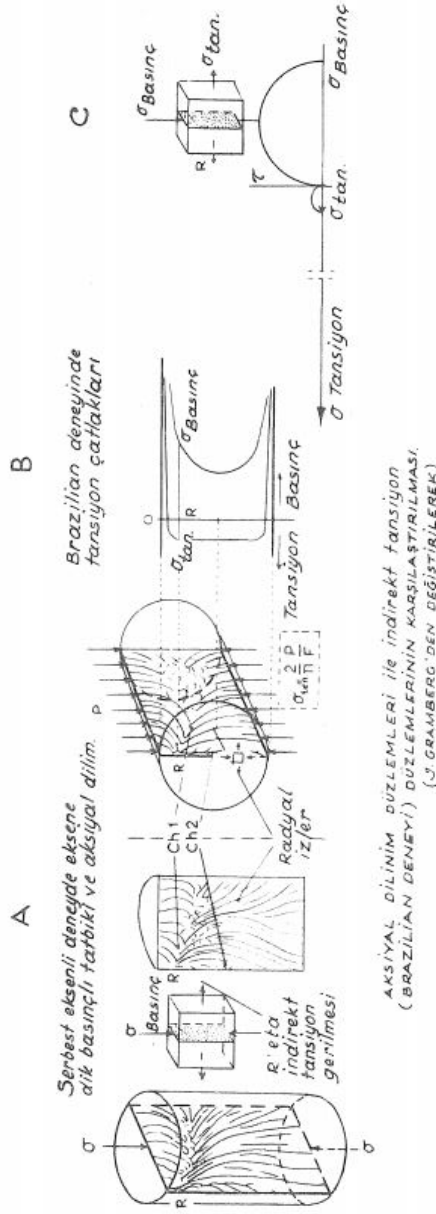
Şek. 8 - Tek eksenli basınç deneylerinde kırılma mekanizması (Gramberg'den değiştirilerek).

A - İnce dokulu yoğun taşlarda, gerilme eksenine paralel (aksiyal) bir çatlak meydana geliş; B - İri kristalli çatlaklarda, gerilme eksenine paralel gelişen mikro çatlaklar; C - Bu çatlakların heterogen gerilme dağılımı sebebiyle birleşerek kesme çatlakları doğurması.

*Yoğun taşlar
(Siliceous, Lithographic limestone)*

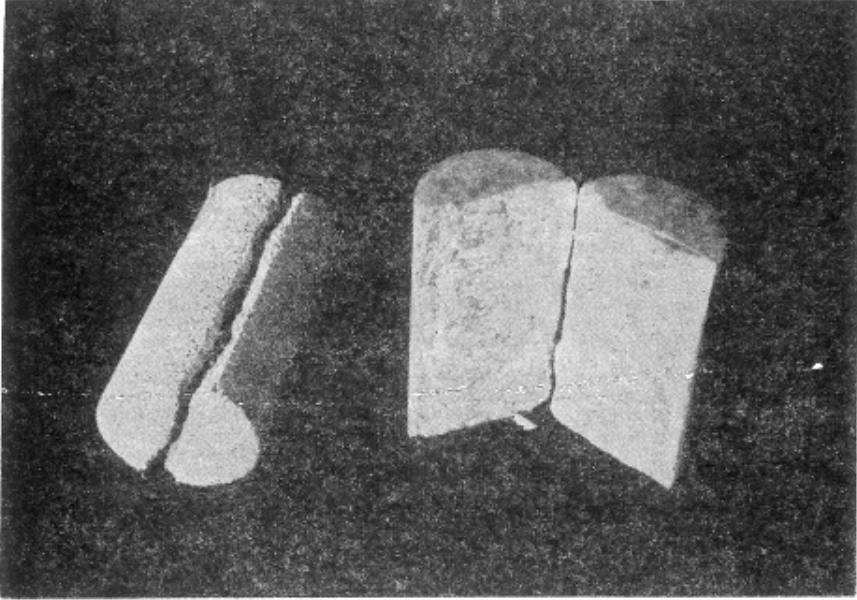
*İri kristalli taşlar
(Granite, Quartzite)*

Aksiyal dâlinim



Şek. 9 - Tek eksenli basınç deneyinde silindirik numunelerin uzun eksen boyunca (A), uzun eksene dik (B) yüklenmeleriyle gelişen çatlaklar ve bunlara ait gerilme dağılımları (C).

bırakılan bir kati cisimde, bu mikro çatlakların uç noktalarında tansiyon gerilmeleri doğmakta ve taşın kırılmasını bunlar sonuçlamaktadır. Griffith teorisi üzerinde bugün kaya mekaniği laboratuvarlarında çeşitli deneyler yapılmaktadır. Fakat halen münakaşa götürmez bir sonuç alınamamıştır. Bilinen bir nokta varsa, o da hakikaten basınç gerilmeleri sonucunda, tıpkı tansiyon gerilmeleriyle meydana gelen çatlaklar özeliğinde çatlakların oluştuğudur. Şekil 9 ve 10 da gösterildiği gibi, silindir şeklindeki taş numunelerine iki ucundan çekme veya uzun eksenini yönünde basınç gerilmesi tatbik edildiğinde, aynı özellikte çatlaklar meydana gelmektedir.



Şek. 10- Tennessee mermerinden hazırlanan silindirik numunelerin uzun eksenine dik olarak tek eksenli basınç aletinde yüklenmesiyle elde edilen temiz yüzlü tek çatlak (Brazilian deneyi).

Bu iki ayrı tip gerilme altında tutulan taşların her iki hal için tansiyon mukavemetleri birbirine çok yakın bulunmaktadır. Bu uygunluk, kırıkların tansiyon kuvvetleri sonucunda meydana geldiğini gösteren diğer bir delildir.

Burada kısaca bahsedilen deneyler de göstermektedir ki, kayaların kırılma mekanizmasının açıklanması pek basit değildir. Hele tabiattaki düzensizlikler dolayısıyla kayaların artan anizotropik özellikleri de düşünülürse, problemin karışıklığı daha açık ortaya çıkar. Bununla beraber, kırılma mekanizmalarını açıklamak için halen bulunan ipuçlarına,

teorik ve deneysel yönden girişilen yoğun çalışmalara dayanarak yakın bir gelecekte elle tutulur sonuçlar alınacağına ümitle bakılabilir. Taşları elastik sınırlar içinde alarak kırılmayı açıklamaya gayret eden bu deneylerin yanı sıra, yüksek basınç, düşük defermasyon hızı, ısı, tane ve çatlak aralarındaki sıvı basıncını, uzun deney zamanını da göz önüne alarak, plastik halde yapılan bazı deneylerle kırılmanın da açıklanmasına uğraşmaktadır. Bulunacak sonuçlarla, güçlük çektiğimiz birçok tektonik problemin çözülmesinin kolaylaşacağı muhakkaktır.

BİBLİYOGRAFYA

- 1—BAIDYUK, V. B. (1967): Mechanical properties of rocks at high temperatures and pressures. Consultants Bureau, New York.
- 2 — BRACE, W. F. (1964): Brittle fracture of rock. State of stress in the Earth's crust. Elsevier Publishing Co.
- 3 — CLAUSING, D. P. (1959): Comparison of Griffith's theory with Mohr's failure criteria. Quart. Colo. School of Mines, 5A, no. 3, s. 285-297.
- 4 — GRAMBERG, J. (1965): Axial cleavage fracturing, a significant process in mining and geology. Engineering Geology, vol. 1, no. 1, s. 31-71.
- 5 — GRIFFITH, A. A. (1924): The theory of rupture. Proc. Intern. Congr. Appl. Mechanics, s. 55-63.
- 6 — GRIGSS, D. T. (1951): Deformation of Yule marble. Bull. Geol. Soc. of Amer, no. 62, s. 1385-1406.
- 7 — HANDIN, J. & FAIRBAIRN, H. W. (1955): Experimental deformation of Hasmark dolomite, Bull. Geol. Soc. Am. vol. 66.
- 8 — HEARD, C. H. (1960): Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure and interstitial pressure. Rock Deformation. The Geol. Soc. of America, Memoir 79, s. 193-226.
- 9 — KVPIL, R. (1963): Tectonic experiments on natural rocks. Int. J. Rock Mech. Mining Sci., vol. I, s. 17-30.
- 10—MAZANTI, B. B. & SOWERS, G. F. (1966): Laboratory testing of rock strength, ASTM, STP. 402.
- 11— SCHWARTZ, A. E. (1964): Failure of rock In the trlaxial shear test.

Proceedings, 6th Symposium on Rock Mechanics, University of Missouri. Rolla. Mo.

- 12 —YÜZER, E. (1967): Kaya mekaniği ve jeolojisi, İ.T.Ü. Dergisi, cilt 25, no. 2.
-