

〔特別講演〕 高压下の岩石破壊

東京大学地震研究所 茂 木 清 夫

1. まえがき

多くの金属では、ある程度の圧力で著しい延性を示して、脆い破壊が起こりにくくなり、その降伏応力もほとんど静水圧に無関係であることが知られているが、岩石では、高压下でもなお脆性破壊が起こり、その強度に及ぼす圧力の効果が非常に著しい。例えば、常圧下で2 K bの強度をもつ花崗岩は1 K bの封圧下では10～15 K bの強度に達する。従って、岩石の強度を論ずる上に、封圧の効果、もっと一般的に3軸応力場の効果を明らかにすることは極めて重要なことである。また一方で、地球内部の力学的問題、とくに地震の発生などを研究する上に、高压下の岩石の破壊特性を知ることが強く要請されてきた。このような事情から、すでに今世紀初頭から、広い圧力範囲にわたって、岩石の破壊強度に及ぼす圧力の効果、圧力増加にともなう脆性から延性への遷移過程などが研究されてきた。

最近までの高压下の岩石破壊実験では、円柱試料を封圧下で主軸方向に加圧するというKarmanの方法がもっぱら用いられ、それによって封圧の効果の詳細が明らかにされてきた。この場合には、3つの主応力のうち2つが等しい。Coulomb, Mohr, Griffithなどのこれまでのおもな破壊説は、中間主応力の効果は無視できるという立場をとるものである。しかし、最近の吾々の実験によると、中間主応力の効果は重要なものであり、それを無視しては、定量的には勿論、定性的にも、圧力効果の本質を理解することができないことがわかってきた。今回は最近の高压下の岩石破壊実験の現状を紹介し、その成果、とくに強度に対する封圧及び一般的組合わせ応力場の影響について述べる。

なお、本論に入るまえに、応力の定義について述べておきたい。高压の分野では、主として圧縮応力場を問題とするので圧縮応力を正にとり、

$$\sigma_1 (\text{最大主応力}) > \sigma_2 (\text{中間主応力}) > \sigma_3 (\text{最小主応力})$$

と定義する。

2. 封圧の効果

これまで広く3軸試験とよばれてきたKarmanの方法は次のようなものである。円柱形の試料を高压容器の中に収め、流体で所定の封圧($\sigma_2 = \sigma_3$)を加えた後、軸方向に加圧し、破壊応力(σ_1)を求める。この場合、流体が試料に浸入するのを防ぐために、試料はゴムなどで複覆してある。

変形特性をあらわす最も基本的なものは、応力—ひずみ曲線である。第1図には、封圧下の岩石の応力—ひずみ曲線の代表的な3つの場合を示してあるが、それぞれ、脆性、中間的、延性の場合である。第2図は破壊特性をあらわす ①破壊応力、②降伏応力、③応

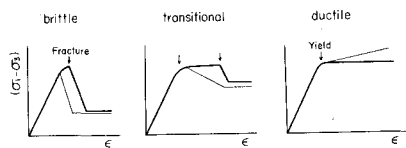


Fig. 1. Representative stress-strain curves for rocks.

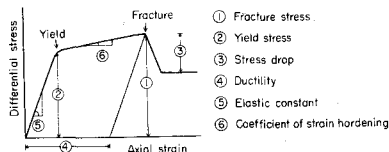


Fig. 2. Definitions of some important deformational properties of rock.

力低下, ④延性度(破壊直前の永久ひずみ量であらわす), などの定義を示してある。第3図は, 山口大理石の各封圧下の応力-ひずみ曲線を示したものであるが, 同一岩石では, 封圧の増加と共に, 脆性から次第に延性状態に移行する。

2.1 破壊強度

第4図に各種岩石の圧縮強度と封圧との関係を示した。黒丸は脆性, 白丸は延性状態を示している。ここで, 同一の岩石では, 封圧とともに強度が増大し, 脆性から延性状態に移行することが認められる。しかし, 強度の圧力増加は脆性領域で極めて著しい。表1にこれまで提出されてきた主要な破壊論をまとめて示した。これらの破壊論は脆性破壊強度の圧力効果についての予測を与えている。これも表1に示してある。Griffith理論から予測される圧力効果は実測結果と比較して著しく小さく, 適当でないことがわかる。Coulombと修正Griffith理論は摩擦係数 μ をもっともらしい値(0.5~1.0)にとって実験結果をかなりよく説明できるようである。但し, Griffith理論及びその修正理論は, 微小クラックが生長を開始する限界応力についての理論であるが, 岩石のような不均一な構造をもつものでは, 微小クラックの生長開始は破壊応力より遙かに低い応力でおこることが明らかにされて居り, このような材料の強度理論としては不適當であると言ふべきである。

Coulombの破壊論では強度が圧力とともに直線的に増大

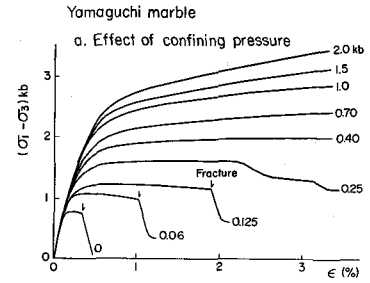


Fig. 3. Stress-strain curves Yamaguchi marble under various confining pressures.

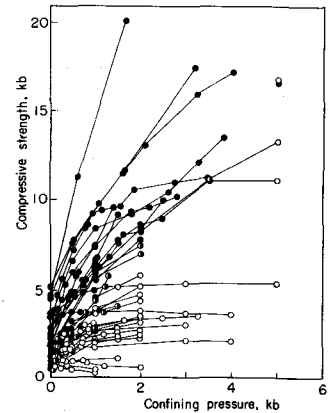


Fig. 4. Relation between compressive strength and confining pressure. Closed circle: brittle; open circle: ductile.

TABLE I

Current fracture criteria

(1)	Coulomb	$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n$
(2)	Mohr	$\tau = f(\sigma_n)$
(3)	Griffith	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8T_0(\sigma_1 + \sigma_3)$, if $\sigma_1 - 3\sigma_3 > 0$
(4)	Modified Griffith	$(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu)^{\frac{1}{2}} + \mu(\sigma_1 + \sigma_3) = 4T_0$ (McClintock and Walsh, 1962)
(5)	Von Mises	$\tau_{oct}^* = \text{constant}$ $\tau_{oct} = C_1 \sigma_{oct}^{**} + C_2$ (Bresler and Pister, 1957) $\tau_{oct} = 8T_0 \sigma_{oct}$ (Murrell, 1963)

$$* \tau_{oct} = \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$** \sigma_{oct} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

するが、実際の強度—圧力曲線も直線的で Coulomb の説がよく適用できる場合が多い。しかし、一方では明らかに強度—圧力曲線が彎曲して、到底、Coulomb の予測する直線をあてはめることができない場合もある。多くの場合ごく低圧部分と脆性から延性に遷移する部分で直線からはずれる。後者は、部分的な降伏が進行している遷移過程で、脆性破壊理論が完全に適用しがたい領域であり、前者は先在クラックの存在が影響しているとの議論もあり、今後の問題である。

これまでは、軸方向の圧力が封圧よりも大きい圧縮試験 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) について述べたが、軸方向の圧力が封圧よりも小さい伸張試験 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) も行なわれている。両者のちがいは中間主応力 (σ_2) のちがいであり、両試験を比較することによって σ_2 効果の有無を検討することが行なわれた。初期には、相反する結果が報告され、混乱もあったが、最近の精密な伸張試験によって両者の強度及び破壊角に明瞭なちがいが存在することが確認され、 σ_2 効果の存在が立証された。第 5 図に圧縮試験と伸張試験の破壊角のちがいが示してある。

ここで Mohr の破壊説にふれておきたい。Mohr は破壊のときのズリ応力 (τ) がすべり面の垂直応力 (σ_n) だけの函数であるという仮定にたって、 τ — σ_n 曲線の傾斜から破壊角を求めることができることを示した。第 5 図の点線は Mohr の理論によって強度—圧力曲線から求められた破壊角 (θ) を示したものである。ここに見られるように、圧縮試験の場合には Mohr の予測値は実験値とよく一致しているが、伸張試験では両者の不一致は決定的である。このことは、Mohr の理論は一面の真実をつくものであるが重大な欠点をもつものであることを示して居り、それは Mohr 説の前提である仮定に問題があるためである。

2.2 降伏応力

岩石の降伏点は不明瞭な場合が少なくないが、降伏応力に対する封圧の効果は、延性金属と同じように十分小さいものから、かなり顕著な場合まで広範囲にある。したがって、Tresca や von Mises の降伏条件を全面的に適用する問題がある。降伏応力が封圧と共に増加する例は、第 3 図の山口大理石の場合にみることができよう。最近、金属の場合にも、明らかに圧力効果を示すものがあることが知られてきたので事情は同じであるかもしれない。

3. 一般的な組合わせ圧縮応力の効果

上に述べた Karman の方法は、応力分布が均一で高精度の測定に適した 3 軸試験法ではあるが、2 つの主応力が等しい場合しか実現できないという欠点がある。一般的な組合わせ応力場の破壊特性を知るためには、3 つの主応力の異なる場合の実験が必要である。そのための方法は大別して次の 2 つに分けられる。

第 1 は応力分布が不均一な場合である。この方法は実験方法として比較的容易であり、しばしば行なわれてきたが、応力値推定上の誤差や広力勾配の影響などの困難な問題を含んで居り、破壊条件を

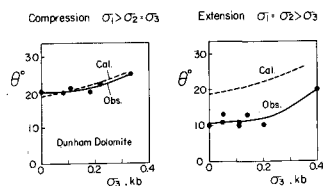


Fig. 5. Fracture angle (θ) as function of confining pressure (σ_3). Solid curve: observed; broken curve: Calculated by Mohr theory from strengths.

求めるための基礎実験としては適当でない。

第2は均一応力分布の場合で、そのための多くの試みが行なわれてきた。第6図に示した(b),(c)はその一例である。(b)は立方体試料を直交する3方向から3組のピストンで加圧する方法であるが、固体ピストンによる直接の加圧方式では、端部の摩擦や応力分布、とくに極めて著しい効果を及ぼす最小主応力(σ_2)方向の応力分布の不均一さによる誤差が問題であろう。

(c)はHandin らによって試みられた方法で、金属の場合同様の薄肉円筒試料を用いて圧縮、よちりを組合わせるものであるが、彼らの結果はあまりにもバラツキが大きく、定量的な結論を導びくことは困難であった。それは岩石のような脆い多結晶材料では金属と同じような無キズの薄肉円筒を作成することはむずかしいためであると思われる。このように、これまでは実験上の困難のため信頼すべき結果がほとんど得られていなかったが、最近吾々によってかなり満足すべき方法が開発され、3軸応力下の岩石の破壊特性が明らかにされつつある。

その原理は、第6図(d)に示してある。角型試料を用い、最小主圧力(σ_3)は流体による封圧によって加え、中間主圧力(σ_2)は最大主圧力(σ_1)と共に固体ピストンで加える。破壊強度に対する σ_3 の影響は非常に大きいので、これは流体圧によって加える必要がある。一方、 σ_2 効果はそれよりも一段小さいので固体加圧でも差支えない。実際に作成した装置の高圧容器部分を第7図に示した。これによって、 σ_3 が最高8000気圧、 σ_2 と σ_1 は15000気圧の広い圧力範囲で、任意の組合せ応力下の破壊実験が可能である。

この方法によって求められた σ_3 及び σ_2 の応力-ひずみ曲線に対する影響を第8図に示した。山口大理石の場合である。 σ_3 の効果と σ_2 の効果は明らかにちがうものであり、またさきに述べた封圧の効果ともちがうものである。

次にこれらの効果を定量的に検討しよう。

3.1 破壊強度

第9図は、一般的3軸応力場での破壊応力を σ_2 の函数としてプロットしたもので、曲線の数字は σ_3 の値をKbで示したも

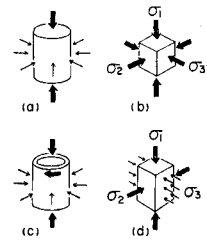


Fig. 6. Various methods for triaxial compression. Thick arrow indicates compression or torsion through solid end pieces; thin arrows indicate compression or tension by fluid pressure. (a) Axial compression or tension under fluid-confining pressure (conventional triaxial test); (b) triaxial compression by three solid pistons; (c) compression and torsion of a hollow cylinder under fluid-confining pressure; (d) triaxial compression by biaxial solid pistons and fluid-confining pressure made in the present experiment.

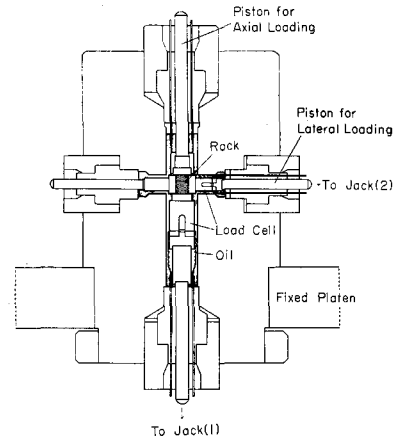


Fig. 7. New high-pressure vessel with axial and lateral pistons.

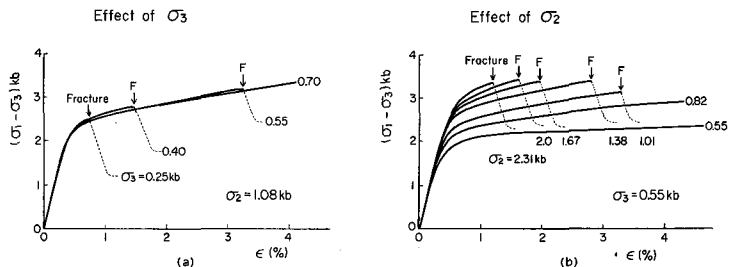


Fig. 8. Stress-strain curves of Yamaguchi marble under triaxial compression. (a) Curves at various values of the minimum principal stress σ_3 and the intermediate principal stress σ_2 of 1.08 kb. (b) Curves at various values of σ_2 and σ_3 of 0.55 kb.

のである。この図から、破壊応力 (σ_1) が σ_3 及び σ_2 の増加と共に著しく変化すること、 σ_3 効果は σ_2 効果よりも大きいこと、 σ_2 による強度増加は低圧部で著しいが、 σ_2 が増すとともに次第に減じて、逆に負になる傾向がある等が認められる。

さて、このような実験結果は既存の破壊条件式で表わされるであろうか？ すでに述べたように、Coulomb, Mohr, Griffith, などの破壊論は σ_2 効果を認めないものであって、これらの実験結果を説明することはできない。中間主応力 (σ_2) を考慮した条件式もいくつか提案されてきたが (表 1 参照), 満足すべきものはなく、結局、次の、von Mises の式を一般化した新らしい条件式がほぼ満足すべきものとして得られた。

$$\tau_{oct} = f_1(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (1)$$

第 9 図のドロマイトの結果を、 τ_{oct} 対 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ の形で示したものが第 10 図である。異なる丸印は異なる σ_3 を示しているが、これらの各種の丸印が一本の曲線上に集中して並んでいることは、公式(1)が破壊条件式として満足すべきものであることを示している。この曲線はむしろ直線に近いものであり、公式(1)の函数 f_1 は単調な増加函数である。なお、この曲線の傾きは岩石の種類によってちがひ、強度の圧力依存性の度合をあらわしている (第 12 図)。

3.2 降伏応力

降伏応力 (σ_1) についても、 σ_2 及び σ_3 の函数として、第 9 図に似た結果が得られている。これらについても、降伏条件式を検討した結果、やはり von Mises の式を一般化した次の式がよい適用性を示した。

$$\tau_{oct} = f_2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

第 11 図は降伏点における τ_{oct} を平均応力 $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ に対してプロットしたものである。異なる丸印は異なる σ_3 をあらわしている。この場合も一本の曲線上に集中して並んでいることから、公式(2)は降伏条件式として満足すべきものであることがわかる。第 12 図に示したように、曲線の傾きは岩石によって著しく異なる。ソレンホーヘン石灰岩の場合はこの傾きが 0 となり、多くの延性金属と同様に、von Mises の条件式が適用される。このように公式(2)は von Mises の式を特別の場合として含んでいる。

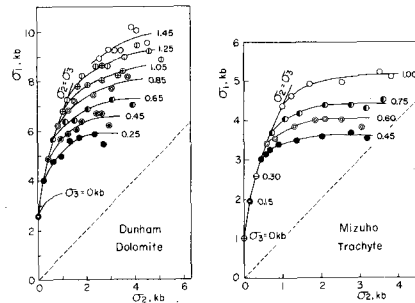


Fig. 9. Fracture stress (σ_1) as function of the intermediate principal stress (σ_2) for Dunham Dolomite and Mizuho Trachyte. Different symbols show the different values of the minimum principal stress (σ_3), which are indicated by numerals in kbar.

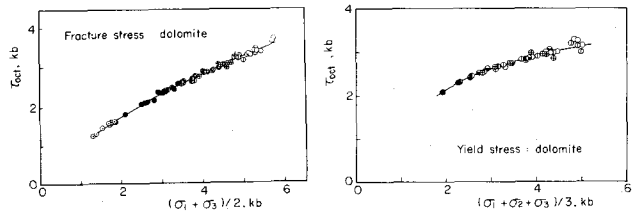


Fig. 10. Octahedral shear stress (τ_{oct}) at fracture versus $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ for Dunham Dolomite. Different symbols show different minimum principal stresses (σ_3).

Fig. 11. Octahedral shear stress (τ_{oct}) at yielding versus the mean stress $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ for Dunham Dolomite. Different symbols show different minimum principal stresses (σ_3).

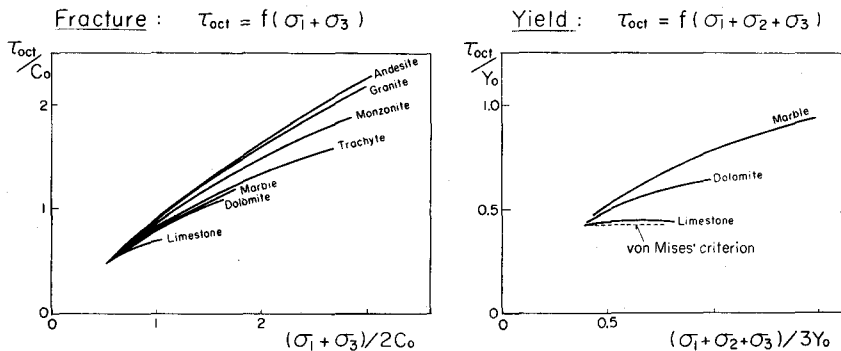


Fig. 12. Summary of stress states at fracture and yielding of tested rocks (expression by the generalized von Mises criteria). C_0 is uniaxial compressive strength; Y_0 is yield stress at the ductility of 1%, obtained by the conventional test.

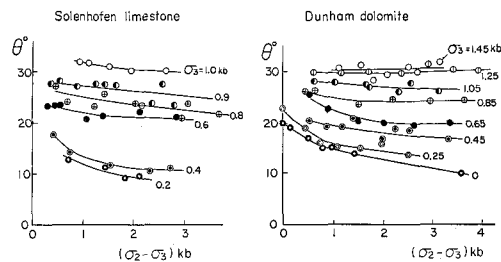


Fig. 13. Fracture angle θ as functions of the intermediate principal stress σ_2 in Solenhofen limestone and Dunham dolomite. Different symbols show different values of the minimum principal stress σ_3 which are indicated by numerals in kb.

3.3 破壊及び降伏条件式の解釈

これらの破壊及び降伏条件式は Von Mises の式を特殊な場合として含むもので、一般化された Von Mises の式と呼ぶのが適当であろう。これらの条件式の右辺のパラメータが破壊と降伏でちがうことを注意したい。これらの式には次のような物理的解釈を与えることができると思われる。Von Mises の条件は「形状ひずみエネルギーが一定値に達したときに降伏が起こる」と解釈されるが、一般化された Von Mises の条件は「形状ひずみエネルギーがある臨界値に達したときに破壊や降伏が起こるが、臨界値が必ずしも一定ではなくて、破壊では $(\sigma_1 + \sigma_3)$ とともに増加し、降伏では $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ とともに増加する」と解釈される。破壊ではスベリ面が常に σ_2 軸に平行であり、 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ はスベリ面への平均圧力とみることができる。一方、降伏ではこの様な限定されたスベリ面の方向がなく、平均圧力をとると考えればよい。結局、両者を統一して「臨界値はスベリ面への平均圧力とともに増加する」と解釈することができるであろう。

3.4 破壊角

高圧下の岩石の破壊はズリ型である。そのスベリ面は常に中間主応力に平行である。スベリ面と最大主応力 (σ_1) 方向とのなす角は破壊角とよばれ、 σ_2 及び σ_3 と共に変化する。第13 図は破壊角を σ_2 の函数として示したもので、図中の数字は σ_3 の値を Kb で示したものである。破壊角は σ_3 の増加と共に著しく増加するが、 σ_2 の増加と共に減少するのである。 σ_2 の効果は σ_3 が小さい場合に著しい。この様に、 σ_2 の効果が存在するのであるから、 σ_2 効果を見捨てる Mohr の説によれば、一般的応力場の破壊角

の予測ができないのは明らかである。最近、筆者は Mohr 説の適用法を修正することによって、強度曲線から破壊角を予測できる可能性があることを論じた。

3.5 延性度

常圧下では極めて脆い岩石も、高封圧下では著しい延性を示すことはすでに述べたが、一般的な応力場ではやや複雑な変化を示す。延性度な破壊までの永久ひずみ量 (%) で定義されるが、それを σ_2 及び σ_3 の関数として示したのが第14図である。この図から知られるように、延性度は σ_3 とともに著しく増加するが、 σ_2 の増加によっては逆に減少する。この図で延性度 (ϵ_n) の等値線がほぼ直線的で互に平行していることから、

$$\epsilon_n = f_3(\sigma_3 - \alpha\sigma_2) \quad (3)$$

という実験式が得られる。 α は常数でドロマイトで 0.3 程度である。

4. あとがき

以上、岩石の破壊特性を示す諸量、破壊強度、降伏応力、破壊角、延性度が、封圧及びさらに一般的な 3 軸応力場の影響をどのように受けるものであるかを述べた。破壊の際の応力低下量やひずみ硬化度なども応力場の影響を著しく受ける。最小主圧力 (σ_3) の効果は多くの場合最も重要であるが、中間主圧力 σ_2 の効果もまた顕著なものであり、 σ_2 の大きい場合には σ_3 の効果よりも大きくなることもあり得る。しかも、この両者の効果は必ずしも同符合のものではなく、互に打消し合う場合もある。このような一般的組合せ応力場の効果は、単なる封圧のそれからは推測できない面をもっている。ここで述べた破壊及び降伏条件などは、岩石以外の他の不均質脆性材料にも適用されると考えられ、今後さらに検討したいと思っている。

参考文献

- Mogi, K., 1966. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow, Bull. Earthq. Res. Inst., vol. 44: 215-232.
- Mogi, K., 1967. Effect of the intermediate principal stress on rock failure, Jour. Geophys. Res., vol. 72: 5117-5131.
- Mogi, K., 1971. Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone, Tectonophysics, vol. 11: 111-127.
- Mogi, K., 1971. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, Jour. Geophys. Res. vol. 76: 1255-1269.
- Mogi, K., 1972. Fracture and flow of rocks, In: A. R. Ritsema (Editor), The Upper Mantle. Tectonophysics, vol. 13 (1-4): 541-568.

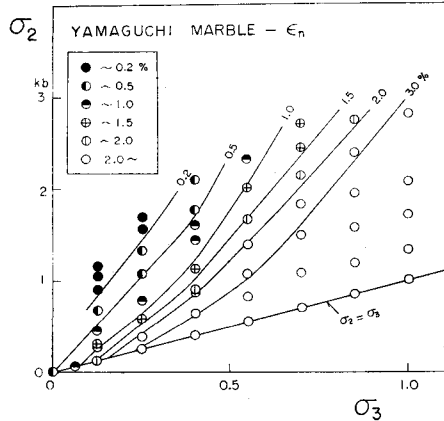


Fig. 14. Ductility ϵ_n (permanent strain just before fracture) as functions of σ_2 and σ_3 in Yamaguchi marble.

Mogi, K., 1972. Effect of the triaxial stress system on fracture and flow of rocks, Phys. Earth Planet. Interiors, vol. 5: 318-324.

ROCK FRACTURE UNDER HIGH PRESSURE

Kiyoo Mogi

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Recent laboratory studies of rock fracture under high pressure are presented. New developments in laboratory apparatus have made it possible to discuss quantitatively the stress-strain relation under pressure.

The effect of the confining pressure on the fracture strength of rocks follows closely the Coulomb criterion, except for the low pressure region. From results of a new triaxial compression test in which all three principal stresses are different, the intermediate principal stress σ_2 has an important influence, so that current fracture criteria, such as Coulomb, Mohr or Griffith, are not entirely applicable. The observed behavior under combined stress is adequately described by a new fracture criterion, which has the form of a generalized von Mises criterion. Not only fracture stress, but also the yield stress is affected by both the least compression σ_3 , and by the intermediate compression σ_2 . The other formula, obtained by generalization of the von Mises criterion, can also be applied to this case. The ductility of rocks strongly increases with the increasing σ_3 , but decreases with increasing σ_2 .