



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	封圧下における岩石の力学的挙動に関する実験的研究（そのII）：変形ならびに破壊特性
Author(s)	木下, 重教; Kinoshita, Shigenori; 山下, 秀 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 76, 11-17
Issue Date	1975-08-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41289
Type	departmental bulletin paper
File Information	76_11-18.pdf



封圧下における岩石の力学的 挙動に関する実験的研究 (そのII)

— 変形ならびに破壊特性 —

木下重教* 山下 秀** 石島洋二*
中村 章* 西原彰夫*

(昭和49年12月25日受理)

An Experimental Study of the Mechanical Behavior of Rocks under Confining Pressure (Part II)

— Deformation and Fracture Characteristics —

Shigenori KINOSHITA Shigeru YAMASHITA Yōji ISHIJIMA
Akira NAKAMURA Akio NISHIHARA

(Received December 25, 1974)

Abstract

The effect of combined stresses on the strength and deformation characteristics of rock samples at various confining pressures are discussed in the present paper.

As a conclusion, it was found that the failure mode of rocks changed from brittle to ductile flow accompanied with strain hardening as the confining pressure was increased and that as the fracture criterion of brittle fracture, Coulomb-Mohr criterion could be applied to a good approximation. The informations as to the ductile behavior of the rock could not be attained satisfactorily because of insufficient data.

1. 緒 言

著者らは前報¹⁰⁾で、主として北海道の二、三の炭鉱から得た夾炭層岩石の封圧下における応力—歪関係およびこれらの供試岩石の各封圧における強度、変形特性、残留強度、限界歪、破壊角などの実験結果を述べた。本報ではこれらの実験結果をもとに、岩石が脆性破壊をする場合の破壊条件および脆性から延性へ遷移する場合の変形挙動に関して検討した結果について述べることにする。

なお、本報における諸術語および諸記号は前報で定義されたものと全く同じである。

2. B 挙動における破壊条件の検討

2.1 主応力表示による破壊条件

B 挙動における破壊強度 $\sigma'_M (= \sigma_1 - \sigma_3)$ より、軸応力 σ_1 を縦軸に、封圧 σ_3 を横軸にとって破壊

* 北海道大学工学部資源開発工学科岩石力学教室

** 秋田大学鉱山学部採鉱科

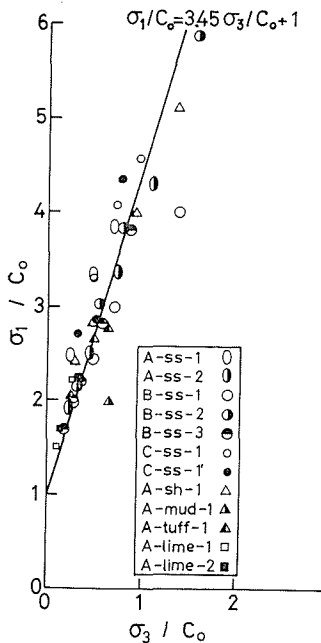
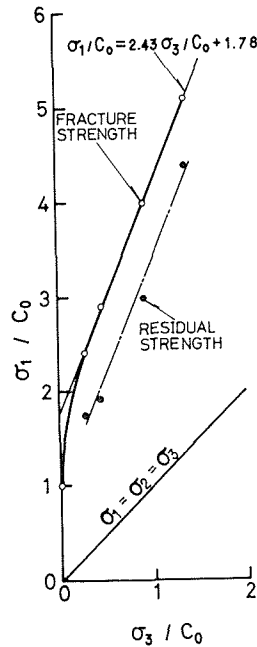
Fig. 2-1. 全実験データによる σ_1 - σ_3 線図

Fig. 2-2. 破壊条件の主応力表示 (夕張頁岩)

点をプロットすると Fig. 2-1 の結果がえられる。但しこの図では、 σ_1 , σ_3 を一軸圧縮強度で割った無次元化座標を採用している。

バラツキはあるが全試料を1つの母集団としてみると、各点は近似的に、 $\sigma_1 / C_0 = 1$ の点を通る1つの直線にそって配列し、B挙動における破壊条件は、よく知られている Coulomb の破壊条件に従う傾向があることがわかる。

このことは測定データを岩種別に個々に検討してみるとさらにはっきりと認められると同時に直線の勾配など供試岩石によって差異があることもわかる。Fig. 2-2 は岩種別データの代表として、夕張頁岩の例をあげたものである。図において太い実線が破壊限界線で、極めてよく直線上に配列している単軸圧縮強度を除いた上部4つの点を結んで画いたものである。

他の供試岩石についても同様であって、破壊限界直線はえられるが、この直線は単軸圧強度点をはずれることが多い。

したがって単軸圧縮強度点もカバーする破壊限界線を探めようとするれば、封圧の低い部分で曲線をなし、高い部分ではほぼ直線をなすような曲線で近似しなければならない。あるいは、封圧の低い部分と高い部分で勾配の異なる2つの直線であらわさねばならない。著者ら以外の研究でも、低封圧部と高封圧部で限界曲線の特性が異なることを指摘した例¹¹⁾もある。

筆者としては、この特性の違いは、低封圧部は open crack system による破壊であり、封圧が高くなると closed crack system による破壊に変るために生ずるものと考えている。

本実験では、封圧の低い範囲での測定は細かく行っていないし、実験数も充分とは云われないので、低封圧部の特性について細い論議はできない。したがって前述のごとく、単軸圧縮強度点を除いた測定点の直線性から破壊限界線の方程式 $\sigma_1 = A'\sigma_3 + B'$ を求めることにした。

表 2-1 はこのようにして求めた各供試岩石の破壊条件式 $\sigma_1 = A'\sigma_3 + B'$ の定数 A' , B' の値を示したものである。表から知られるように B' の値は各試料の単軸圧縮強度 C_0 より 1~1.78 倍大きな値になっている。

表 2.1 供試岩石の破壊条件式および内部摩擦係数

供 試 岩 石	破壊条件式 $\sigma_1 = A'\sigma_3 + B'$		破壊限界直線の勾配より算定した値		
	A'	B'	μ	ϕ	θ
A-SS-1	2.99	800	0.58	30°	30°
A-SS-2	2.74	900	0.53	28°	31°
B-SS-1	2.43	1420	0.46	25°	33°
B-SS-2	3.52	1040	0.67	34°	28°
B-SS-3	3.04	990	0.59	30°	30°
C-SS-1	4.08	1120	0.77	38°	26°
C-SS-1'	4.08	1050	0.77	38°	26°
A-sh-1	2.43	1960	0.46	25°	33°
A-mud-1	1.42	640	0.18	10°	40°
A-tuff-1	2.36	900	0.44	24°	33°
A-lime-1	5.08	580	0.91	42°	24°
A-lime-2	3.09	1120	0.59	31°	30°

注 μ は小数点以下 3 桁目四捨五入, ϕ, θ は小数点以下 1 桁目を四捨五入

2.2 破壊のパラメータとしての内部摩擦係数の算定

Coulomb の破壊条件式は次式であらわされる。

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{1+\mu^2} + \mu}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \sigma_3 + C_0 \quad (2.1)$$

ここに μ = 内部摩擦係数, C_0 = 単軸圧縮強度

本実験では $C_0 = B'$, $(\sqrt{1+\mu^2} + \mu)/(\sqrt{1+\mu^2} - \mu) = A'$ としている。したがって A' がわかれば次式によって μ を求めることができる。

$$\mu = \frac{A' - 1}{2\sqrt{A'}} \quad (2.2)$$

表 2.1 の μ は (2.2) 式によって求めた値である。また ϕ は μ より定めた内部摩擦角 ($\phi = \tan^{-1}\mu$) である。 θ は Coulomb の破壊論によってきまってくる理論破断角 ($\theta = \pi/4 - \phi/2$) をあらわす。

この θ の値を実際に測定した破断角 (前報表 4.1 参照) と比較すると必ずしも一致せず、大部分数度前後の差がある。これは試験片の端面の拘束条件、岩石材料の不均質性 (亀裂など弱点の存在を含めて) および試験装置の剛性などの影響で、最終的に生ずる破断面は、破壊時におけるオリジナルな破断面からずれて形成されるためと思われる。

2.3 τ - σ 破壊条件

主応力破壊条件式 $\sigma_1 = A'\sigma_3 + B'$ は次式によって τ - σ 破壊条件式に変換することができる。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{(A'-1)}{2\sqrt{A'}} \sigma + \frac{B'}{2\sqrt{A'}} \\ \tau &= \mu\sigma + S_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

あるいは

(2.3) 式の関係はまた、各封圧におけるモールの破壊応力円を求め、これらの円の包絡線からも得られる。Fig. 2.3 はこの一例を示したもので、単軸圧縮破壊応力円を除いた B 挙動破壊応力円の包絡線は直線となっている。

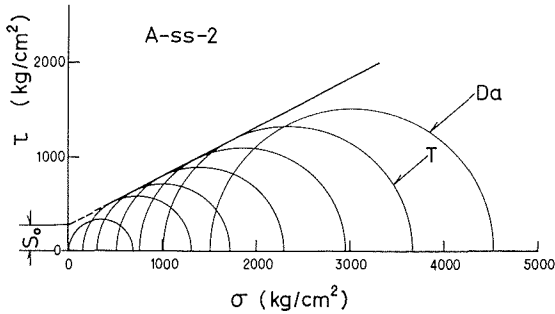


Fig. 2.3. モールの破壊包絡線の一例 (幌内砂岩)

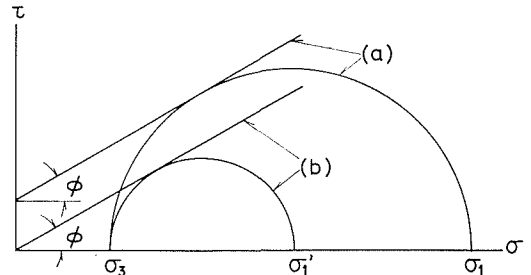


Fig. 2.4. 残留強度説明図

直線包絡線が τ 軸を切る点の座標 S_0 は見掛けの凝集抵抗 (剪断強度) をあらわし, (2.3) 式から A' , B' がわかれば算出することができる。

2.4 残留強度 (残留差応力) について

Fig. 2.4 の a は, ある封圧 σ_3 におけるモールの破壊応力円を示す。 σ_1 の軸応力でずり破壊を生じたとすると, 破断面の凝集抵抗 S_0 が失われるので, 破断面上の応力の釣合は, 破断面上の直応力を σ , 剪断応力を τ , 内部摩擦係数を μ とすれば, $\tau = \mu\sigma$ だけによって維持されることになる。図の (b) はこの関係を図解したもので, $\tau = \mu\sigma$ の釣合条件を満足する軸応力は σ'_1 で与えられる。すなわちずり破壊によって, 軸応力は σ_1 から σ'_1 に低下し, $(\sigma'_1 - \sigma_3)$ がこの場合の残留差応力 (残留強度) をあらわすのである。

σ'_1 と σ_3 の関係は, 図における幾何学的関係から

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma_3) \sin \phi = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma_3)$$

$$\therefore \sigma'_1 = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3$$

あるいは

$$\sigma'_1 = \frac{\sqrt{1 + \mu^2} + \mu}{\sqrt{1 + \mu^2} - \mu} \sigma_3 = A' \sigma_3 \quad (2.4)$$

となる。ただし $\phi = \tan^{-1} \mu$ で, 破壊前後の内部摩擦係数 μ は等しいものと仮定している。

以上の考えが正しいとすると, 若し実験データから, 各供試岩石について, 残留軸応力 (σ'_1) と封圧 σ_3 の関係をプロットすれば, それぞれ原点を通り, 破壊限界線に平行な直線が得られる筈である。

Fig. 2.2 の鎖線は, 夕張頁岩についての $\sigma'_1 - \sigma_3$ 線図であって, 破壊限界線 (太い実線) に平行な直線となっていることがよくわかる。ただし, 他の供試岩石についても同様であるが, 原点は通らない。

このように, $\sigma'_1 - \sigma_3$ 関係に適用される直線は, 破壊限界線にはほぼ平行であるが原点より上部で縦軸を切る例が多い。これは, 破断面に不規則な凹凸が存在するためと思われる。

3. B 挙動から延性挙動への遷移条件

T 挙動の封圧は, 岩石がずり破壊挙動から延性流動挙動に移る場合の遷移点をあらわしているが, 若しこの値が供試岩石について一定であるとすれば, このときの降伏差応力も一定となるから, 遷移条件として次式が得られる。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K \quad (\text{一定}) \quad (3.1)$$

本実験では、T 挙動を示した場合が数例あったので、これらのデータから供試岩石の遷移封圧、遷移条件を求めてみると表 3.1 のごとくである。この表にない岩石、砂岩 B-SS-1・B-SS-2・C-SS-1 および頁岩 A-sh-1 等は本実験における最大設定封圧 1500 kg/cm² に達してもなお延性挙動に移行しなかった岩石である。

本表にはこのほかに、遷移封圧に対応する B 挙動破壊限界線上の点から求めた遷移条件 2K の値も示した。両者を比較すると、典型的な脆性破壊挙動を示す岩石 (A-SS-1・A-SS-2) では、ほぼ一致し、より延性度の高い B_c 挙動または B_c に近い挙動を示す岩石 (A-mud-1・A-tuff-1・A-lime-1・A-lime-2 等) は、破壊限界線から求めた 2K の方が大きい値を示す。これは B_c 挙動において求めた最大差応力(これを破壊強度としている)は厳密には破壊強度ではなくて、若干のひずみ硬化を伴った延性降伏点をあらわしているのかも知れない。この意味では B_c 挙動は B_a、B_b 挙動と区別して考えるべきなのかも知れないが、これについては今後の研究課題としたい。

表 3.1 にはさらに参考までに T 挙動から求めた遷移条件式の定数 K と単軸圧縮強度 C₀ との比を示しておいたが、砂岩等では K は C₀ の約 2 倍、泥岩、凝灰岩、大理石では K は C₀ とほぼ等しい。

表 3.1 脆性—延性遷移条件

Rock samples	Confining pressure at T-behavior (kg/cm ²)	Yield differential stress $\sigma'_M (=2K)$ at T-behavior 2K (kg/cm ²)	Yield differential stress obtained from Coulomb failure line 2K (kg/cm ²)	K/C ₀ ($\sigma'_M=2K$)
A-SS-1	500	1800	1800	2.05
A-SS-2	1000	2650	2640	1.95
B-SS-3	1500	3230	4060	1.87
A-mud-1	500	830	850	0.88
A-tuff-1	500	1290	1580	1.01
A-lime-1	300	1260	1800	1.09
A-lime-2	750	2430	2700	1.32

4. 遷移封圧以後の特性

遷移封圧以後の特性に関してある程度データが得られたのは、僅かに A-tuff-1・A-lime-1 および A-lime-2 の 3 試料だけであり、他の大部分の試料については、封圧が不足のため殆んどデータが得られなかった。

したがってここでは、比較的まとまったデータが得られた A-tuff-1 の実験結果を報告し、これを参考にして岩石の延性挙動に関し若干の私見を述べるにとどめたいと思う。

Fig. 4.1 および Fig. 4.2 は A-tuff-1 の実験結果を示したものである。このうち Fig. 4.1 は前報 4.3 節で述べた降伏点の定め方のうち (7) の方法を用いた場合であり、Fig. 4.2 は (4) の軸ひずみを指定する方法を採用した場合である。何れにしても、これらの図は降伏限界曲線が変ることを示している。

Fig. 4.1 では降伏曲線は封圧に無関係にはほぼ一定の水平に近い線になっているし、Fig. 4.2 では、各指定ひずみに対してそれぞれ勾配の異なる上昇曲線となっている。Fig. 4.2 は岩石がひずみの増加および封圧の増大に伴ってひずみ硬化あるいは加工硬化することをあらわしている。Fig. 4.1 において水平に近い曲線が得られたのは、この場合は降伏点として差応力—軸ひずみ曲

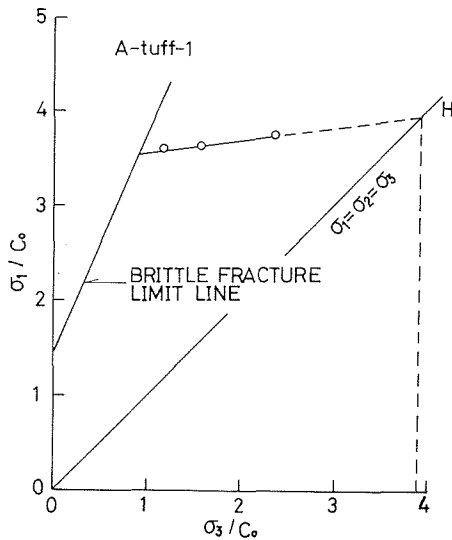


Fig. 4-1. 延性降伏条件の一例
(荻野凝灰岩)

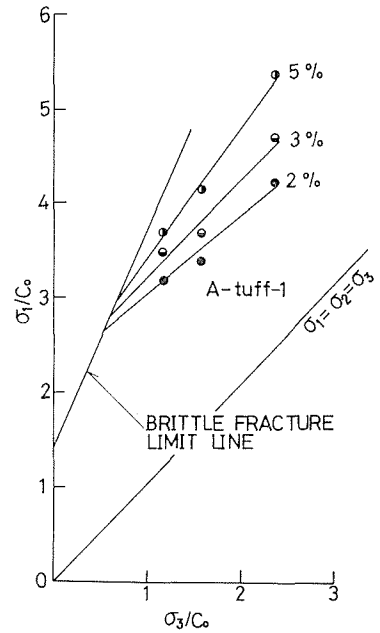


Fig. 4-2. 指定ひずみ値に対する
 $\sigma_1 - \sigma_3$ 線図 (荻野凝灰岩)

線上のひずみ硬化現象があらわれはじめる直前の点を指定したためと思われる。

一般に岩石の延性降伏挙動を定式化することは、延性降伏点をはっきりきめられないことおよび岩石のひずみ硬化に関する法則がまだ明らかになっていないことなどのためにむづかしい問題である。最近では体積ひずみ、塑性変形仕事などの面から岩石のひずみ硬化則の研究¹²⁾が行なわれているが、筆者らとしても今後これらの面の実験データを積み上げ、この分野の研究に貢献したいと考えている次第である。

5. 結 論

本文は封圧下における岩石の強度、変形挙動を明らかにすることを目的として行なった一連の三軸圧縮試験の結果を述べたものである。

本研究によって得られた事項を結論として要約するとつぎのごとくである。

(1) 岩石は封圧が増すにつれて、応力低下を伴わずに割れ破壊挙動からひずみ硬化を伴う延性流動挙動に移行する。

(2) 割れ破壊挙動から延性流動挙動に移行するときの封圧は供試岩石によって異なるが、大体封圧の大きさが一軸圧縮強度の1~2倍に達したとき延性流動挙動に移行する。

(3) 延性流動挙動に移行するときの応力条件すなわち差応力は、砂岩等の脆い岩石では圧縮強度の約2倍、より延性度の高い凝灰岩、大理石等ではほぼ圧縮強度に等しい。

(4) 割れ破壊挙動を示す場合の岩石の破壊の条件は Coulomb-Mohr の条件式で非常によくあらわされることがわかった。

(5) 延性流動挙動については試験機の封圧容量に限度があったため十分なデータが得られなかったが、若干のデータから今後の研究に対する有益な指針をうることができた。

(6) 本研究では以上のほかに、割れ破壊挙動における応力低下の意味、破壊のパラメータと

しての内部摩擦係数などについても検討を加えた。

参 考 文 献

- 1) Robertson, E. C.: Bull. Geolo. Soc. Am., **66** (1955), p. 1290.
- 2) Miller, T. W. and Cheatham, J.B.Jr.: Int. J. Rock. Min. Sci., **9** (1972), p. 459.
- 3) Handin, J. and Hager, R. V. Jr.: Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., **41** (1957), 1, p. 4; Mogi, K.: Bull. Earthq. Res. Inst., **44** (1966), pp. 220-221.
- 4) Handin, J. and Hager, R. V. Jr.: Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., **42** (1958), 12, p. 2895; Mogi, K.: Bull. Earthq. Res. Inst., **42** (1942), p. 496; Hoshino, K. *et al.*: Rept. Geol. Surv. Japan, **224** (1972), p. 10.
- 5) Mogi, K.: Bull. Earthq. Res. Inst., **43** (1965), pp. 364-371.
- 6) Mogi, K.: 前掲 3).
- 7) Mogi, K.: 前掲 5).
- 8) Serata, S. *et al.*: Basic and applied rock mechanics, K. F. Gray ed. (1972), p. 451, Society of Mining Engineers of AIME, New York.
- 9) 堀部富男, 他: 日本鉱業会昭和 47 年度春季講演要旨集, pp. 137-138; 堀部富男, 他: 日本鉱業会昭和 48 年度春季講演要旨集, pp. 209-210.
- 10) 木下重教, 他: 北海道大学工学部研究報告, **76** (1975), pp. 1-10.
- 11) Mogi, K.: 前掲 3), pp. 229-231.
- 12) Miller, T. W. and Cheatham, J. B. Jr.: 前掲 2), pp. 453-474.