

(13) 一般応力下における岩石のひずみ制御試験と破壊曲面について

九州大学生産科学研究所 西田 正
 ○正員 江崎 哲郎
 青木 一男
 九州大学工学部 正員 木村 強
 安達 健一

1. まえがき

岩石の変形、破壊特性を得るために、周圧下あるいは一般応力下での三軸圧縮試験が行なわれる。前者は、装置が簡便であるが、再現できる応力場は限られている。後者は、中間主応力の影響を考慮できるため、三次元応力空間内における破壊規準、構成式を求めるには適している。ところが、従来これらの試験では、3主応力のうち2つあるいは3つ総てが応力速度を制御する載荷方法であるため、応力状態は予め定められた経路上でしか変化できない。また、応力制御ではひずみ軟化現象をはじめ破壊後の挙動を求める場合には、正しい特性を得ることはできない。この問題に対処するため、筆者らは、先に砂岩を用いて一般応力下でのひずみ制御試験を行ない、平均主ひずみ一定の条件などでの応力軌跡を求めた¹⁾。本研究では破壊曲面及び構成式を確立するための基礎的データを得る目的で、とくに、ひずみ制御試験での応力軌跡の方向が何に依存するのかを明らかにするために、大理石を用いて平均主応力一定試験および平均主ひずみ一定試験を行ない、両者の結果を比較検討した。また、平均主応力一定試験において、主として体積成分に起因する破壊曲面、すなわち End Cap の存在を示すような破壊曲面が得られたことから、新たに、ひずみ制御による静水圧試験を行なった結果について述べる。

2. 実験方法

2・1 供試岩石

実験に用いた岩石は、山口県産秋吉大理石である。この岩石は力学的には均質で空隙率が小さく、強度に関する変動係数は、3.3%である。物理的性質をTable-1に示す。供試体の形状は一稜の長さが4cmの立方体で、各面の平行度が5/100mm以内になるように端面仕上げを行なった。その後、炉(80℃)で10日間乾燥し、実験まではデシケータの中に保存した。

2・2 実験装置および計測

三軸載荷装置は3方向ともにサーボ機構を有しており、マイコンにより応力制御、ひずみ制御のいずれも可能である。本実験装置²⁾は3方向とも圧盤による載荷方式で、垂直方向でおよそ1,500MPa、水平2方向で750MPaの圧縮応力が得られる。また、載荷ロッドの保持方法を改良して、偏心載荷の影響を軽減し、より求心的に載荷できるようにしている。真の三軸試験において固体圧で載荷する場合、一般には摩擦の影響を小さくするためにテフロンシート、シリコングリースなどの減摩材が用いられている。本実験のひずみ制御試験では、圧盤間の変位をフィードバック信号とするので、原則として減摩材は用いなかった。なお、ひずみは計測した変位を供試体の一稜の長さ4cmで除し、応力はロードセルにより検出した荷重を圧盤の載荷面積3.6×3.6 cm²で除することにより算出した。

2・3 載荷方法

載荷は、まず、静水圧軸に沿って所定の平均主応力 σ_m まで載荷し(この状態を初期静水圧 σ_{m0} と呼ぶことにする)、次に、(1) σ_m が一定(ただし、 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 、 σ_1 、

Table 1 Properties of Akiyoshi marble.

Unit Weight (g/cm ³)	2.70
Porosity (%)	0.94
Young's Modulus (GPa)	80.0
Poisson's Ratio	0.25
Uniaxial Strength (MPa)	71.4

Table 2 Strain rates used in tests.

μ'	$\dot{\epsilon}_1$	$\dot{\epsilon}_2$	$\dot{\epsilon}_3$
-1	1600	-800	-800
-1/3	2750	-550	-2200
1/3	2200	550	-2750
1	800	800	-1600

(unit; $\times 10^{-6}/\text{min}$)

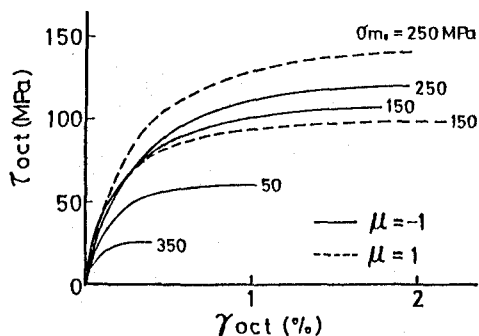


Fig.1 The relationship between τ_{oct} and γ_{oct} under $\sigma_m = \text{const.}$

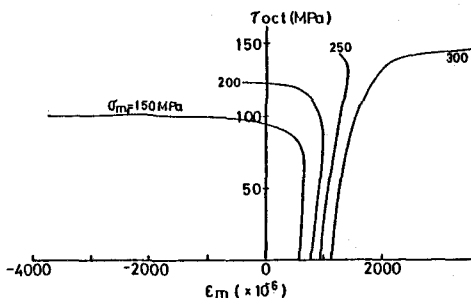


Fig.2 The relationship between τ_{oct} and ϵ_m for $\mu = 1$ under $\sigma_m = \text{const.}$

σ_2 および σ_3 は、各々最大主応力、中間主応力、最小主応力、圧縮を正とする)、および、(2) 平均主ひずみ ϵ_m が一定 (ただし、 $\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/3$ 、 ϵ_1 、 ϵ_2 および ϵ_3 はそれぞれ最大主ひずみ、中間主ひずみ、最小主ひずみ)、の条件が得られるように、それぞれマイコンで制御しながら以下に述べる試験を行なった。このような条件下での試験をそれぞれ平均主応力一定試験および平均主ひずみ一定試験と呼ぶことにする。

(1) の平均主応力一定試験では、Lode のパラメータ

$$\mu = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

が、 $\mu = -1$ ($\sigma_2 = \sigma_3$ の三軸圧縮試験) および $\mu = 1$ ($\sigma_1 = \sigma_2$ の三軸伸張試験) になるように、八面体せん断応力 τ_{oct} を増加させ破壊に至らしめた。

この試験では、載荷面での摩擦の影響を調べるために、テフロンシートを挿入した場合も併せて行なった。応力速度はひずみ制御試験を考慮して、 $\mu = -1$ のとき最大主応力速度 $\dot{\sigma}_1 = 20 \text{ MPa/min}$ 程度になるようにした。

(2) の平均主ひずみ一定試験では、 γ_{oct} を $\mu' = -1, -1/3, 1/3$ 、および 1 について増大させ応力状態の変化を調べた。ここで、 μ' は μ に相応して

$$\mu' = (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3)$$

であり、等方等質の弾性体では $\mu = \mu'$ となる。この試験は体積ひずみ一定の試験ということもできる。ひずみ制御試験でのひずみ速度を Table 2 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 平均主応力 σ_m 一定試験

σ_m 一定試験で得られた τ_{oct} と γ_{oct} の関係を Fig. 1 に示す。一定速度に制御された τ_{oct} に対し、 γ_{oct} の速度は徐々に増加し、応力-ひずみ曲線の勾配は小さくなる。最終的には、曲線の勾配はほとんど 0 になり、このときを破壊が生じたと考えることにする。 γ_{oct} が小さいときのせん断抵抗は、 σ_m よりも破壊時の応力に関係しており、この応力が大きい程せん断抵抗も大きくなっている。従来より、破壊時の応力は σ_m に伴って増加し、また、 $\mu = 1$ (伸張状態) よりも $\mu = -1$ (圧縮状態) の方が大きいとされてきた。本実験では、 $\mu = -1$ の $\sigma_m = 350 \text{ MPa}$ 場合、破壊時の応力が極端に小さくなっている。これは、ある静水圧下で破壊が生じること、すなわち End Cap が存在する可能性を示している。

τ_{oct} と ϵ_m の関係を $\mu = 1$ について示すと Fig. 2 のようである。 ϵ_m の増加は体積の収縮、減少は体積の膨張を表わしている。 $\sigma_m = 150 \text{ MPa}$ の場合には、およそ $\tau_{oct} = 80 \text{ MPa}$ までほぼ弾性的な挙動をするが、その後、体積の膨張が生じる。また、 $\sigma_m = 300 \text{ MPa}$ の場合には体積は収縮のみ生じる。この境界にあたる $\sigma_m = 220 \text{ MPa}$ 付近がこの岩石の最大応力と残留応力が、同一となる点である。

Fig. 1 で述べた End Cap の存在を明らかにするために、 σ_m 一定試験とは異なり、静水圧軸上を σ_m 。

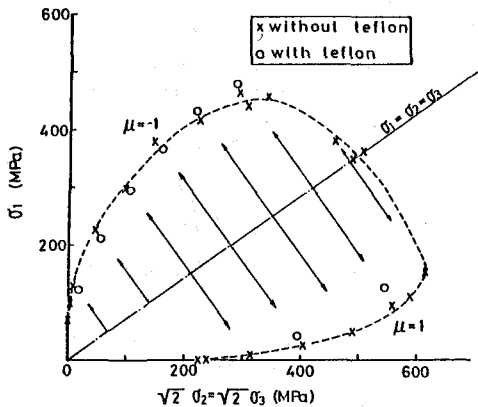


Fig. 4 The failure points obtained by constant mean principal stress tests.

=300MPaまで載荷後、 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ —一定になるようにひずみ速度を制御し静水圧載荷を行なった。この試験により得られた σ_m と ϵ_m の関係をFig.3に示す。図には、応力制御($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)による静水圧試験の結果も示している。応力制御による試験では、破壊の近くなるとひずみ速度が急激に増加し、制御は不安定となるが、ひずみ制御による試験では、破壊時も安定である。この場合、各方向の応力が不均一になると急激に偏差成分が増大しやすい傾向にあるが、できる限り同一になるように制御した。ひずみ制御による曲線をみると、ひずみ硬化の部分が少なく、 $\sigma_m = 380\text{MPa}$ でピークが現われている。ピークに達したあと、むしろ、やや応力を低下させながら、ひずみのみが増大する。これより、破壊曲線に関するEnd Capは静水圧軸上ではおよそ380MPaに存在するということがいえる。

σ_m —一定試験により求めた破壊点をFig.4に示す。破壊点は、応力—ひずみ曲線の勾配がほとんど0になったときの応力値で表わし、これらの破壊点を通る線(面)を破壊曲線(面)とした。Fig.4にはシリコングリースを塗った2枚のテフロンシートを載荷面に挿入した場合の破壊点も併せて示しているが、テフロンシートの挿入による有意な差はないようである。破壊曲線はEnd Capにより静水圧軸を横切り完全に閉じた曲線となっている。End Capは降伏曲線に関しては、Millerら³⁾によって、比較的脆弱な石灰石や大理石でその存在が実験的に示されているが、圧縮強度71.4MPaの中程度の岩においても確認された。また一般に降伏曲面は、ひずみ硬化によって次々に拡大していくが、本実験では、ひずみ硬化からひずみ軟化へと変遷する。この原因については、今のところ不明である。降伏曲線は破壊曲線の内側にあって、ひずみ硬化とともに拡大し、最終的には本実験で求めた破壊曲線に収束するとも考えられるが、今後の実験によって確かめねばならない。

3. 2 平均主ひずみ ϵ_m —一定試験

ϵ_m —一定試験で得られた $\mu = -1$ および1の応力軌跡をRendulic応力面に示すとFig.5のようである。図には σ_m —一定試験で得られた破壊曲線を併せて示している。応力軌跡は γ_{oct} の増大とともに静水圧線より離れて破壊曲線に向かう。そして最終的には破壊曲面に漸近するように変化する。 $\sigma_m = 150 \sim 300\text{MPa}$ の範囲では応力軌跡の包絡線は破壊曲線と一致している。ところで、本実験では、変位の計測には、圧盤の弾性変形や圧盤と供試体間の接触に起因する変形が含まれ、その除去が完全でないので厳密には ϵ_m —一定の条件の条件が満足されていない。 σ_m —一定試験の応力軌跡には、静水圧軸に直角な

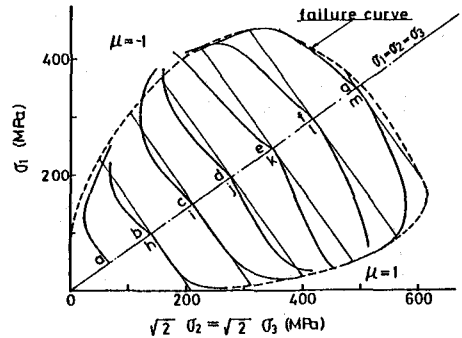


Fig.5 The stress loci in the Rendulic stress plane obtained by constant mean principal stress tests.

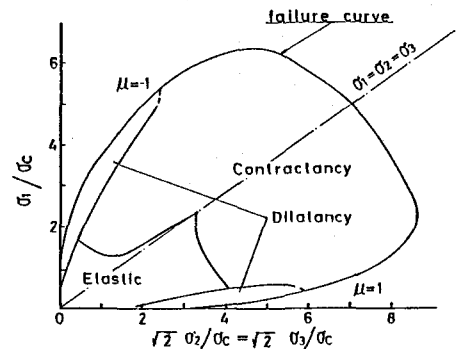


Fig.6 The regions of dilatant, contractant and elastic behavior in the Rendulic stress plane.

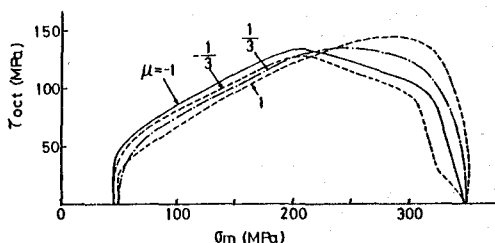


Fig.7 The envelopes of stress loci in the mean principal stress σ_m - octahedral shear stress τ_{oct} space.

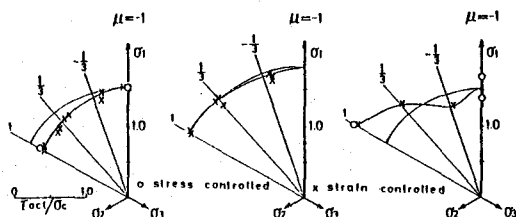


Fig.8 The shapes of failure curve on the constant mean principal stress plane (a) $\sigma_m=150$ (b) $\sigma_m=220$ and (c) $\sigma_m=300$ MPa.

線(以下、 σ_m 一定の線と呼ぶ)より原点側に逸脱した軌跡の応力状態では ϵ_m の増加、すなわち体積の収縮が生じ、その反対側では体積の膨張が生じていることになる。また、 σ_m 一定の線上では完全弾性体として供試体は挙動している。このように、応力軌跡が σ_m 一定の線から逸脱する方向に注目することによりFig.5に示した軌跡は3つの領域に分けることができ、それぞれ体積の膨張、収縮する過程が異なっている。各々対応する ϵ_m 一定試験と σ_m 一定試験の応力軌跡を比較すると、例えば σ_m が小さい場合には両者の軌跡はほぼ同じとなり、弾性的な挙動を示した後、体積は膨張する。このような体積の膨張、収縮あるいは弾性的な挙動は応力状態に依存しており、それぞれの領域はFig.6のように表わすことができる。およその傾向はSchockら⁴⁾と同じであるが、本実験のように $\mu=-1$, $\mu=1$ を区別して考えた場合、後者のほうが弾性的な挙動を示す領域は広いといえる。

Fig.7は、 σ_m と τ_{oct} に関する応力軌跡の包絡線を $\mu'=-1, -1/3, 1/3$ および1について示したものである。Fig.5で示したように $\sigma_m=150\sim 300$ MPaの範囲では、これらの包絡線はそれぞれの μ' に対する破壊曲線とみなすことができる。 μ' によって曲線が異なるのは σ_2 の影響である。 τ_{oct} の大きさの違いによって、これらの曲線は $\sigma_m=220$ MPaを境界として2つに分けることができる。すなわち、同じ σ_m の値に対して τ_{oct} が最も大きいのは $\sigma_m=220$ MPa以下では $\mu'=-1$ であり、これは従来の実験結果と一致する。しかし、 $\sigma_m=220$ MPa以上では $\mu'=1$ の場合が最大となる。破壊曲面を $\sigma_m=150, 220$ および300MPa一定の静水圧軸に垂直な平面で切った形状を、それぞれFig.8の(a)、(b)、(c)に示す。 τ_{oct} の大きさは σ_c で除することにより無次元化して表わしている。図中の×印は、 σ_m の異なった応力軌跡が、 σ_m 一定の平面を通過するときの点である。この点が $\mu=1, 1/3$ などの線上にプロットされていないのは、 γ_{oct} の増大とともに μ が変化し、必ずしも $\mu=\mu'$ とならないからである。また、○印は σ_m 一定試験で得られた破壊点である。 $\sigma_m=220$ MPa一定の面上での形状は円に近く Von Mises の破壊規準ではほぼ近似できるが、 $\sigma_m=150$ MPaの場合は Von Mises と Mohr-Coulomb の中間的な性質である。また、 $\sigma_m=300$ MPa一定の面上での形状は、静水圧軸から外側に凹となっており、従来の物理的意味をもった破壊規準のどれも適用することはできない。

4. まとめ

得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 秋吉大理石は、静水圧軸上、 $\sigma_m=380$ MPaでEnd Capを持つ。
- (2) 破壊曲面を静水圧軸に垂直な $\sigma_m=150, 220$ および300MPaの平面で切断した際の形状は σ_m によって異なる。すなわち、 $\sigma_m=220$ MPaの場合、Von Misesの破壊規準に近く、 $\sigma_m=150$ MPaの場合、Mohr-Coulombと Von Misesとの破壊規準の中間的な性質を示す。しかしながら、 $\sigma_m=300$ MPaの場合は部分的には従来の破壊規準が適用できないような外側へ凹の形状を示す。
- (3) ϵ_m 一定試験で得られた応力軌跡は γ_{oct} の増加とともに静水圧軸から離れ、破壊曲線へ向かい、その後、破壊曲線に沿って漸近するような変化を示す。
- (4) σ_m が低い領域では弾性的な挙動を示すのに対し、破壊曲線付近の $\sigma_m=220$ MPa以下の比較的低い領域ではダイレタンシーを示し、それよりも高い領域ではコントラクタンシーを示す。

参考文献

- 1) 西田 正ほか:第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集,43~48(1984)
- 2) 西田 正ほか:九大生産科学研究所報告,72,5~14(1980)
- 3) Miller, T.W. & J.B. Cheatham: Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 9, 453~474(1972)
- 4) Schock, R.N. et al: J. Geophys. Res., 78, 5922~5941(1973)

(13) Strain Rate Controlled Tests of Rock and Failure Criteria
under Generalized Triaxial Stresses

by

Tadashi NISHIDA, Tetsuro ESAKI, Kazuo AOKI,
(Research Institute of Industrial Science, Kyushu Univ.)
Tsuyoshi KIMURA and Kenichi ADACHI
(Faculty of Engineering, Kyushu Univ.)

ABSTRACT

In order to obtain the failure criteria and stress-strain behavior such as strain-hardening phenomena of rock, octahedral shear strain γ_{oct} was increased at constant rate under the constant mean principal strain ϵ_m . Specimens used were 4cm cubes of Akiyoshi marble, uniaxial strength=71.4MPa and were tested under the conditions for $\mu' = -1, -1/3, 1/3$ and 1 , where $\mu' = (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3)$ and ϵ_1, ϵ_2 and ϵ_3 are maximum, intermediate and minimum principal strain respectively. In addition to these tests, constant mean stress tests ($\sigma_m = \text{const.}$) were performed.

A comparison was made between strain and stress controlled tests. The test results are as follows;

- (1) On the hydrostatic stress axis, Akiyoshi marble has the End Cap at a mean principal stress of $\sigma_m = 380\text{MPa}$.
- (2) The shapes of the failure curves which are cut by the plane perpendicular to hydrostatic axis change with the value of σ_m . At lower σ_m , they are non circular but triangular as in previous papers. But, when $\sigma_m = 300\text{MPa}$, the shape becomes to partially concave.
- (3) The stress loci obtained by the constant mean principal strain tests deviate from the hydrostatic stress axis and go toward the failure curve with increasing octahedral shear strain γ_{oct} . Finally, the loci converge asymptotically to the failure curve.
- (4) A comparison of the loci under $\epsilon_m = \text{const.}$ tests and $\sigma_m = \text{const.}$ ones which are perpendicular to the hydrostatic axis reveals that the loci of the former are divided into two regions at $\sigma_m = 220\text{MPa}$, which cause a volume contraction and expansion as indicated in Fig.5.