

(1) 岩石の一軸圧縮試験精度と強度分布

山口大学工学部 正会員 佐野 修 徳山高専 正会員 工藤 洋三
山口大学工学部 正会員 古川 浩平 山口大学工学部 正会員 ○中川 浩二

1. 諸論

岩石の一軸圧縮強度は一般に大きなばらつきを有するものと考えられているようであり、実験結果の分布に関する統計的な取り扱いも多く見られる。一方いくつかの研究では、岩石物性が非常に少ない実験供試体数のもとに論じられており、時には一つの実験条件下での供試体数が1個という例もみられる。岩石の一軸圧縮試験結果のばらつきを生じる原因を大きく分けると(1)岩石材料固有のばらつき(2)岩石供試体作製上のばらつき(3)試験条件のばらつきの3つに分けることができよう。そして試験結果のばらつきは統計的にこれらのばらつきが何らかの形で乗じられたものとして生じると考えられる。これらの3つのばらつきが独立でそれぞれ正規分布に近いものであるとすると、それぞれのばらつきを小さくすれば試験結果のばらつきは小さくなるであろう。逆に試験結果のばらつきを小さくするためにはそれぞれの原因のばらつきを小さくすることによってのみ可能である。

本研究はこの考え方をもとに念入りに実験を行い、ばらつきの非常に小さい岩石一軸圧縮試験結果を得ることにより、実験におけるそれぞれの原因のばらつきが非常に小さくできることを示し、さらに(1)および(2)の岩石材料と供試体作製法とを同一の条件にした上で(3)の試験条件がばらつくような実験を行い、試験条件のばらつきが岩石の一軸圧縮試験結果のばらつきに与える影響について論じたものである。

2. 岩石一軸圧縮試験結果にばらつきを与える要因

岩石一軸圧縮試験結果にばらつきを与える個々の要因には次のようなものがある。

- (1) 岩石材料固有のばらつき
- (2) 供試体採取方法：(イ)採取位置、(ロ)採取方向など
- (3) 供試体形状・寸法 特に岩石の最大結晶寸法に対する供試体寸法
- (4) 整形方法 特に供試体端面の整形の精度
- (5) 試験環境：温度、湿度、含水状態などのばらつき
- (6) ひずみ速度のばらつき
- (7) 加圧盤の硬度、直径、表面の平滑度
- (8) 球座の良否

3. 実験

前項で述べた要因に対して以下のような配慮を行った。

(1) 岩石材料の選択： 実験に用いた岩石は岡山県笠岡市産の北木島花崗岩である。この岩石は中生代白亜紀の造山運動に伴い晶出したいわゆる広島花崗岩類に属し、中粒で堅硬緻密な岩石である。岩石力学での研究対象に用いられることの多い花崗岩としては稲田、万成、大島、北木島などのものがあるが、北木島花崗岩にはマイクロクラックが多くかつ長さも最大10mmに達するものも認められる。したがって北木島花崗岩はこれらの岩石の内では強度も比較的低く、ばらつきも大きいことが推測される。

(2) 供試体採取方法： 風化層の影響を避けるため新鮮な面が露出している採石場にて一辺約1000mmのブロックを入手し、その表面を約50mm取除いた後、150×500×500 mmの直方体ブロックを計3枚切り出しコアリングした。花崗岩の物理的性質に異方性が認められ、互いにほぼ直交する三つの面が存在することはよく知られているが、さまざまな方向にコアリングすることにより生じる物性値の変動を避けるためすべて同一方向、すなわち grain plane(二番目に割れ易い面)に垂直な方向にコアリングすることにした。

(3) 供試体形状・寸法： 供試体の形状、寸法もまた強度の測定結果に影響を及ぼす。円柱形供試体の高さ/直径(L/D)の比が小さいと見掛け上強度が増加することが知られている。また、 L/D が2.5以上

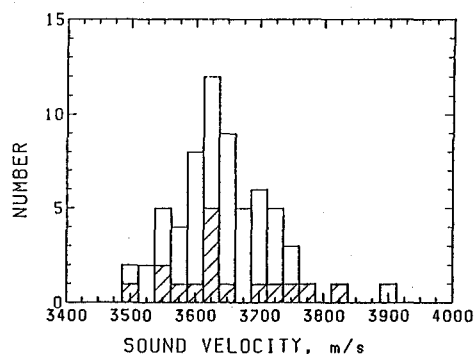


Fig. 1. grain plane に垂直に伝播する弾性波速度 (P-波) のヒストグラム。速度の最小区分は 25 m/s である。斜線を施したものは試験条件 1 で使用したもの。その他は条件 2 で使用した。

となつてはじめて本来の強度に収束することが見出されており、I SRMの suggested method には L/D を 2.5 とするよう述べられている。本研究では長さが異なることによる結果の変動を避けるため、 L/D が 2.60 に等しい円柱形供試体を採用した。

(4)整形方法： 円柱形供試体の端面は十分平滑であること、軸に垂直であること、さらに両端面が互に平行であることが要求される。球座を使用すれば平行度に対する要求は若干緩和されることが期待できるが、I SRMの suggested method では厳しく規定されている。本研究ではレンズ加工業者(日本地科学社)に整形を外注しており、例えば端面の平行度は5/1000 mm以内におさまられている。

(5)試験環境： 含水状態を一定にするため供試体整形終了後、室内にて約一年間保存乾燥させた。試験時間中湿度は制御していないが、降雨時の湿度上昇を避けるため雨量の少ない夏に試験を行った。実験室内の温度はほぼ $20\sim 24^{\circ}\text{C}$ の範囲内に制御されている。

(6)ひずみ速度： MTS試験機を用いてサーボ制御した試験においてはひずみ速度は $10^{-6}/\text{s}$ の一定値に保つ。アムスラー型試験機を用いて手動で制御した場合もひずみ速度がほぼ一定となるように制御しており、その値は $2 \times 10^{-6}/\text{s}$ である。

(7)加圧盤： サーボ制御試験機に用いられたエンドピースはクロムモリブデン鋼で作られており、直径および長さは 48mm である。供試体の直径が約45mm、エンドピースはほぼ同一寸法であるが、僅かに大きい。アムスラー型の場合にはエンドピースを使用しなかったため試験機とロードセルの加圧板(直径120mm)を用いた。

(8)球座： 本研究で用いた球座はサーボ制御試験機の場合と手動制御のアムスラー型試験機の場合とで異なっている。いずれも JIS, I SRMの規格を満足している。

両試験装置を用いた測定方法に大きな差はない。加圧板間の変位を2台のLVDT(Schaeffert社HCD 125)で計測し、サーボコントローラー(アムスラー型のもは人間)に入力する。コントローラーは比較信号と比べながらジャッキの上げ下げを操作することにより載荷する。荷重はサーボ制御試験機を用いたものはMTS製ロードセルを、アムスラー型を用いたものは東京測器製ロードセルを用いて計測した。供試体の軸方向およびこれに垂直な方向のひずみは花崗岩の異方性の主軸が供試体側面と交わる位置、すなわち計4ヵ所で計測した。用いたひずみゲージは長さ20mmのクロス型のものである(東京測器PC-20)。荷重、ひずみおよび変形はすべて東京測器社製データロガー(TDS301)で計測し、HP-IBバスラインを介してHP85Fあるいは9801Fに転送した。

4. 実験結果と考察

実験に用いた全供試体の材料的なばらつきの検討の一つとして供試体中を伝わる超音波伝播速度(V_p)の分布をFig.1に示す。図中斜線を施したものが後に述べる試験条件1で用いた供試体である。この計測は筆者らの経験によるとかなり再現性のよいものであり、平均値 3643 m/sec、標準偏差74m/secのほぼ正規分布を示している。これによりここで用いた花崗岩供試体には材料的なばらつきが認められる。

Fig.2に試験条件1(サーボ制御を行い試験開始前にひずみゲージの情報にもとづき球座の調整をした)で載荷した場合の応力～歪曲線を、Figs.3, 4に試験条件2(手動で制御し、試験開始前に目視による球座の調整を行った)で載荷して比較的高強度および低強度を示した場合の応力～歪曲線を示す。これらの試験で得られた強度の分布をヒストグラムに示したものがFigs. 5, 6である。Fig.5には試験条件1で行った全16個の供試体についてまたFig. 6には試験条件2で行った全48個の供試

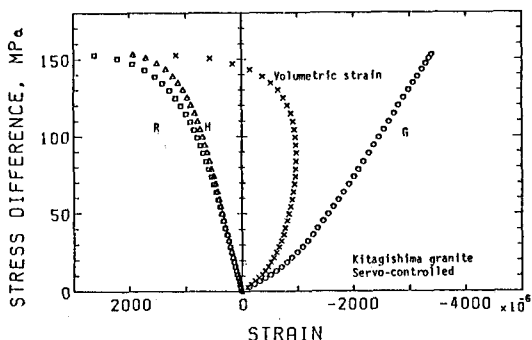


Fig. 2. 試験条件1で作られた応力～ひずみ曲線の例。図中に示す R, G および H はそれぞれ rift plane, grain plane および hardway plane に垂直な方向である。R 軸方向の横ひずみが H 軸方向より大きいことはグイランシーの異方性を示しており、Fig. 9に示された fault の方向の分布と調和的である。

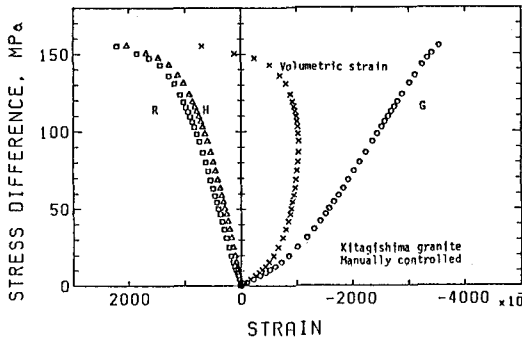


Fig. 3. 試験条件2で比較的強度が高い場合に得られた応力-ひずみ線図の例。R, G および H は Fig. 2と同様。

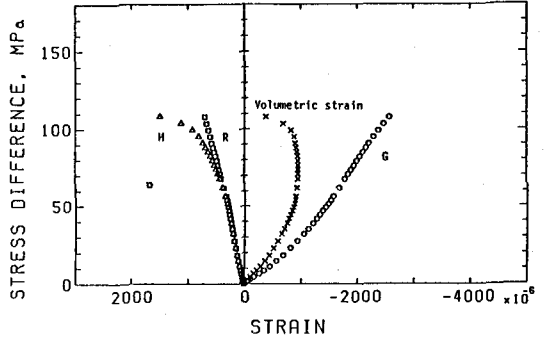


Fig. 4. 試験条件2で比較的強度が低い場合に得られた応力-ひずみ線図の例。R, G および H は Fig. 2と同様。

体についての強度の分布を示している。これらの図によると強度のばらつきの程度は異なるがいずれも対数正規分布に近い分布を示しており、最大の強度は両者で同程度となっている。ここで試験条件2の載荷速度が試験条件1のその2倍であることを考慮すると最大値はほぼ一致としてよいであろう。

いま Fig. 5の強度の分布が平均値 154.7 MPa 標準偏差 2.9 MPaで標準偏差が非常に小さいことを考えると先に述べた(1)岩石強度固有のばらつき、(2)岩石供試体作製上のばらつき、(3)試験材料のばらつきの3種類のばらつきはそれぞれ十分に小さいものと考えることができる。このことからFig. 6に示された強度分布のばらつきはほぼ試験条件のばらつきにより支配されていると考えられる。

試験条件のばらつきを生じる大きな原因として載荷の偏心や球座の回転などによって生じる曲げモーメントの影響がある。そこで供試体側面の軸方向ひずみゲージから最大の曲げモーメントの作用方向を算定し、荷重の増加によるその大きさの変化を示したものがFig. 7である。ここで軸力-曲げモーメント曲線における最終の値は最大荷重の1測点前(10秒前)で表しており、表示値はひずみを応力に換算して得たものである。偏心圧縮柱の理論によると σ_c 、 σ_t をそれぞれ圧縮、引張強度として(圧縮を正とする)

$$\sigma_t < P/A \pm M/W < \sigma_c$$

が安全性の吟味の対象とされる。この実験において σ_t におよその値を用いて図中に記入している。これによると断面中に引張応力が生じて破壊に至ることは非常にまれであることが認められる(全供試体中2例認められる)。また縁応力が σ_c に達して破壊が生じるとすれば実験結果は図中の破線(直線)で与えられることになるがこれに比べて実験結果ははるかに曲げモーメントに対して鈍感であることが認められる。しかし、一般的には縁応力が σ_c に近い状態となってその部分の材料が破壊し(非線形を示し)、順次破壊が供試体内部へ進行して強度破壊に至ると考えられる。また曲げモーメントが大きいものほど最大、最小の縁応力の差は大きい。このことは曲げモーメントが大きいほど供試体内での破壊の進行過程に差があることを意味する。これを示すために最大荷重の2測点前における体積ひずみを応力に対して示したものがFig. 8である。図において曲線は典型的な応力-体積ひずみ曲線を与えている。これからダイラタンシー量の少ない供試体ほど強度が低いこと、すなわち局部的

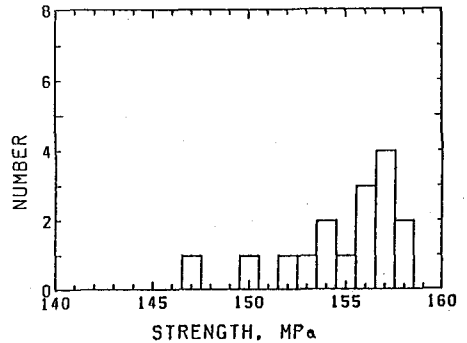


Fig. 5. 試験条件1で得られた強度のヒストグラム。強度の最小区分は1 MPaである。

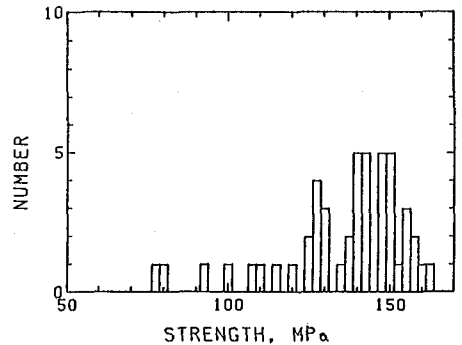


Fig. 6. 試験条件2で得られた強度のヒストグラム。強度の最小区分は2.5 MPaである。

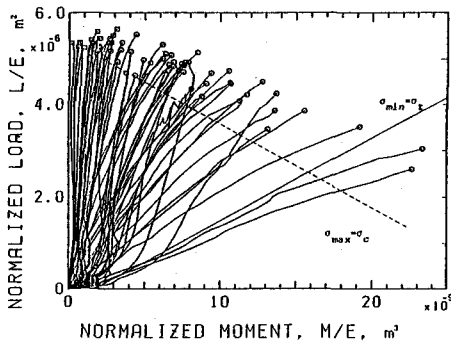


Fig. 7. 供試体側面4箇所計測された軸方向のひずみより得られた偏差ひずみと平均ひずみから求めた軸力成分と曲げモーメント成分の関係。最大荷重に達する10秒前の値を最終値として○(試験条件2)と□(条件1)で示す。图中直線は最小応力が引張強度 σ_t に等しく、また破線は最大応力が圧縮強度 σ_c に等しくなる条件をそれぞれ示している。

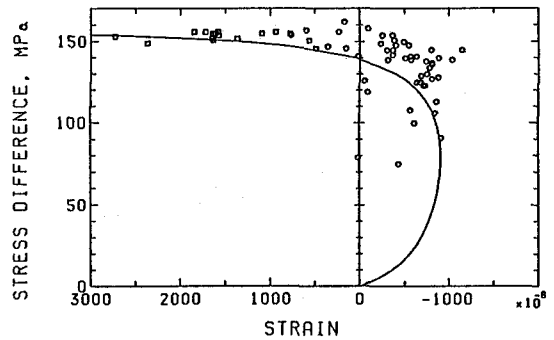


Fig. 8. 最大荷重の20秒前の体積ひずみと応力との関係。○は試験条件2を、□は試験1を示す。典型的な応力-体積ひずみ曲線を図中に示す。巨視的なダイラタンシー量が低下するほど強度が低下する。

な破壊のみで強度破壊に至った供試体ほど強度が低いことが示される。

供試体の破断面の方向を読み取り図示したものが、Fig.9である。前述のとおり花崗岩には方向性がありこの石目の方向(最も割れやすい面, rift plane)からの破壊面の傾きをヒストグラムで示している。图中斜線を施したものが前と同様に試験条件1に対応する試験結果であり、施さないものが試験条件2に対応するものである。全データについてのヒストグラムでは破壊面はほぼ各方向に等しく分布しているようであるが試験条件1のみについてみれば $\pm 20^\circ$ の間に多く分布しており、破壊面方向に石目の影響があることが示される。またこのことは精度良く実験すれば実験結果に現れること、またこのような実験結果も実験精度が低下すれば認められなくなることを示している。

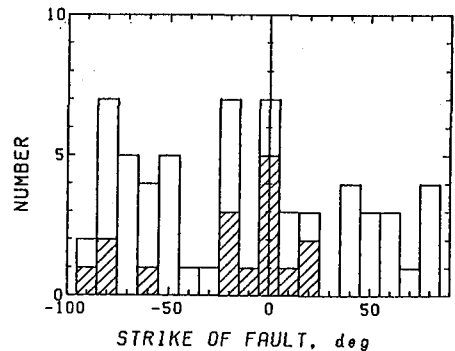


Fig. 9. 最終破断面の走向を rift plane を基準に計測した結果のヒストグラム。斜線を施したものは試験条件1を示す。条件1のものは $\pm 20^\circ$ に集中しているが条件2のものは広範囲に分布する。

結 論

本研究では岩石供試体一軸圧縮試験において試験条件のばらつきが圧縮強度のばらつきに及ぼす影響について検討した。その結果、通常岩石試験に用いられるような花崗岩では注意深く整形、試験することにより十分精度良い実験結果を得ることができることが示された。このことから本研究の試験条件1においては供試体材料性質のばらつき、整形のばらつき、試験条件のばらつきはそれぞれ小さいものと考えうる。またこの場合の強度の分布は狭い範囲にあるが、対数正規分布に類似した形を示す。前の条件のうち試験条件のみ精度を変えて行った実験結果の強度分布は分布範囲が大きく広がるが前と同様に対数正規分布に類似した形を示す。さらに得られる圧縮強度は供試体に作用する曲げモーメントの影響を大きくうけ、作用する曲げモーメントが大きいくほど強度は低くなり、かつその場合には破壊時のダイラタンシー量が小さくなることが認められる。

謝 辞

本研究に用いた花崗岩ブロックの入手に際し、馬越石材社の馬越道世氏に大変お世話になった。ここに記して謝意を表する。

(1) Strength distribution of rock specimens and experimental techniques

Osam Sano*
Yozo Kudo**
Kohei Furukawa*
Koji Nakagawa*

ABSTRACT

A concept that the uniaxial compressive strength of rocks scatters violently seems to be widely accepted in engineering fields, while in some researches an excellent reproducibility in the strength has been shown. The authors introduce an idea that the distribution of the strength is brought from not only its own nature of the rock but the experimental techniques. Then the carefully arranged experiments and the usual ones were carried out on the specimens cored normal to the grain plane for Kitagishima granite. The scattering in the former experiments was very small than that in the latter ones. The bending moment and the axial force were calculated from the mean strain and from the deviatoric strain by using four axial strains of different position at the periphery of the cylinder. The observed strength decreased with increasing bending moment applied. Dilatant strain near the maximum stress also decreased with decreasing strength. This fact may show a local fracture of the specimen should occur when the bending moment was high. The strike of the fault at final fracture was nearly parallel to the rift plane for carefully arranged experiments. However, in the latter experiments, the strike varied widely, showing that the nature of the rock can be masked by the disturbance responsible to the experimental techniques.

* Yamaguchi University, Ube

**Tokuyama Technical College, Tokuyama