

# 岩石の一軸圧縮強度実験結果のばらつきに関する研究

## STRENGTH DISTRIBUTION OF ROCK SPECIMENS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES

佐野 修\*・工藤洋三\*\*・古川浩平\*\*\*・中川浩二\*\*\*\*

By Osamu SANO, Yozo KUDO, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

The concept that the compressive strength of rocks usually falls within the range of two or three times the strength of its minimum value seems to be accepted in engineering fields in Japan. The authors suggest that such a wide distribution of the strength was from the experimental conditions. Carefully arranged experiments (experiments : No. 1) and normal experiments (No. 2) were carried out. Although the same granite specimens were used, the scattering of the data in No. 1 was very small but the data in No. 2 was scattered widely. The applied bending moment was calculated from the strain deviation of four axial strains at the periphery of each cylindrical specimen. The observed strength decreased with increasing bending moment. The strike of the fault was nearly parallel to the rift plane for the carefully arranged experiments. However, in experiments No. 2, the strike varied widely, showing that the intrinsic nature of the rock can not be easily discovered because of the disturbances of the experimental techniques.

*Keywords* : compressive strength, strength distribution, granite, anisotropy

### 1. 緒 論

岩石の一軸圧縮強度は岩石の代表的な物理量として、岩石物性の研究の対象のみならず岩盤構造物の設計・施工のための資料として用いられてきている。そのため数えきれないほど多くの研究が岩石の一軸圧縮実験についてなされてきており、その内容は多方面にわたっている。これらの研究の中には岩石供試体の一軸圧縮強度のばらつきを論じた論文も多くみられる(山口<sup>1)</sup>、西松<sup>2)</sup>、松尾他<sup>3)</sup>)。また山口、西松<sup>4)</sup>や三木<sup>5)</sup>によると、岩石供試体の一軸圧縮強度は、読取り誤差や計測器のドリフトなどによる計測誤差と比較してはるか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る。

それらの研究の多くでは、岩石は本来その組織・構造上クラック等の内部欠陥を多数含むため材料固有の強度にばらつきが生じるものと考えられており、Griffithの破壊理論との関連で強度のばらつきが説明されている。

さらにそこでは強度の分布特性をもとに、一軸圧縮強度の信頼できる実験結果を得るためにどの程度の供試体数が必要かが論じられている。岩石の強度の大きなばらつきは基本的には最弱リンクの概念により説明されているが<sup>4)</sup>、近年の岩石力学では大きな欠陥のない岩石の破壊は多数の微小破壊の集積によるものと考えられており<sup>6)</sup>、最弱リンク説から得られる概念は再検討する必要があると思われる。

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(たとえば Mogi<sup>7),8)</sup>や Brace et al.<sup>9)</sup>)、時には1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(Sano et al.<sup>10),11)</sup>)。これらの研究では岩石の強度のばらつきは山口、西松<sup>4)</sup>および三木<sup>5)</sup>に述べられているほど大きくはないと考えられているようである。

岩石供試体の一軸圧縮実験結果に大きなばらつきを生じる原因は、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つに大きく分けることができよう。そして実験結果のばらつきはこれら3つの原因によるばらつきの複合的な効果として生じると考えられる。いまこれらの3つのばらつきはそれぞれ何らかの分布をもっているとしても、それぞれのばらつきが小さくなれば実験結果のばらつきは小さくな

\* 正会員 工博 山口大学助手 工学部資源工学科  
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

\*\* 正会員 工修 徳山工業高等専門学校助教授 土木工学科  
(〒745 山口県徳山市大学久米字高城 3538)

\*\*\* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科  
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

\*\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科(同上)

るであろう。すなわち上記の②, ③の2つのばらつきを極力小さくした実験を行うことによるのみ岩石材料固有のばらつきを明らかにすることができる。

本研究では大きな欠陥のない岩石を用い、上述の考え方をもとに岩石供試体作製上のばらつきと試験条件のばらつきを極力小さくした念入りの実験を行い、岩石固有のばらつきがどの程度であるかを明らかにすることを意図したものである。さらに①および②の岩石材料と供試体作製法とを先の実験と同一の条件にしたうえで、通常行われていると考えられる手法で実験を行い、③の試験条件のばらつきが岩石の一軸圧縮実験結果のばらつきに与える影響を検討した。ただし本研究では実験と試験という語を便宜上次のように使い分けることにする。すなわち実験とは試料の採取から供試体の整形、载荷にわたる全過程を指し、試験とは供試体を载荷する過程を指す。

## 2. 岩石の一軸圧縮実験結果にばらつきを与える要因

岩石の一軸圧縮実験結果にばらつきを与える要因としては以下に述べるようなものが考えられる。ただしここでは同一の圧縮試験機を用いて一連の実験を行う場合について考える。

### (1) 岩石材料固有のばらつき

岩石材料はその内部にクラックをはじめとする多くの欠陥や粒子組成の非均一性を含む。そのため一軸圧縮強度にばらつきが生じると考えられる。

### (2) 供試体採取方法

a) 採取位置：同一の岩塊から供試体を作製しても位置により若干のばらつきが存在する。この点については地質統計学 (geostatistics, たとえば Hudson<sup>12)</sup>) の研究対象としても取り扱われ得る。

b) 採取方向：たとえば花崗岩類では岩石内欠陥の異方性のため供試体採取方向すなわちコアボーリングの方向により強度が異なる (たとえば Dale<sup>13)</sup>)。

### (3) 供試体形状, 寸法

試験結果のばらつきを小さくするためには岩石の最大結晶寸法の10倍以上の供試体直径があること<sup>14)</sup>、またばらつきとは直接関係がないが、さまざまな粒径を有する岩石を用いて Mogi<sup>3)</sup> が行った研究によると、正しい実験結果を得るためには長さ/直径 ( $L/D$ ) が2.5以上でなければならないことが示されており、ISRMの指針に採用されている<sup>14)</sup>。

### (4) 整形精度

供試体端面の整形は特に重要である。ISRM指針に従えば供試体端面は0.02 mmの平滑さを、供試体中心からの偏りは0.001 ラジアンあるいは50 mm長に対して0.05 mmを越えてはならないとされている。

(5) 圧縮試験機の加圧盤と供試体加圧面の接触状況  
端面拘束による側圧効果を減じるために加圧盤と供試体端面の間にテフロンシートなどの減摩剤が用いられることがある。これらの減摩剤は供試体端面に局部的な引張応力集中を生じさせることが Peng and Johnson<sup>15)</sup> により示されており、ISRMの指針でも使用は禁止されている<sup>14)</sup>。減摩材を使用する場合、この種の応力集中の効果にばらつきが生じるために強度にもばらつきが生じる。

### (6) 試験環境

温度、湿度、含水状態などのばらつきが考えられる。特に含水状態のばらつきの影響は大きいと考えられる。

### (7) ひずみ速度

ひずみ速度が大きくなるほど強度は大きくなる。ばらつきを小さくするためにはひずみ速度を一定に保つことが必要である。

### (8) 試験機および球座

試験機は十分な容量をもっている必要があり、また荷重速度あるいはひずみ速度を一定に制御できることが望ましい。試験機に付属している球座の良否は安定した実験結果を得るために特に重要である。この点についても ISRM の指針に述べられているが<sup>14)</sup>、その精度および潤滑性が劣ると効果的に作用しないので、球座の設計および使用状態は重要な項目となる。

### (9) 試験技術

荷重軸と供試体軸の一致、加圧盤面と供試体端面の一致など試験技術は特に熟練と慎重さを必要とする。

ここで前に述べた3種のばらつきをばらつきの要因の立場から考えると(1)および(2)のa)は岩石材料固有のばらつきを与えるとしてよいであろう。また(2)のb)、(3)、(4)は供試体作製上のばらつきを、(5)~(9)は試験条件のばらつきを与える。また(1)および(2)に起因するばらつきは供試体の作製技術や試験方法によって小さくできる性質のものではない。(3)の供試体直径と最大結晶寸法との比が小さくなると、強度が大きくなるか小さくなるかは必ずしも明らかではない。これに比べて(5)の端面拘束および(6)の供試体の乾燥は一般に強度上昇をもたらす。逆に(4)の整形精度の低下、(5)の減摩材による供試体端面の局部的応力集中、(8)の球座の不良、そして(9)の試験技術の不十分さは強度低下をもたらす。

## 3. 実験結果のばらつきを小さくするための配慮

前章に述べた要因が実験結果に与えるばらつきをできるだけ小さくするために各要因ごとに以下に述べるよう

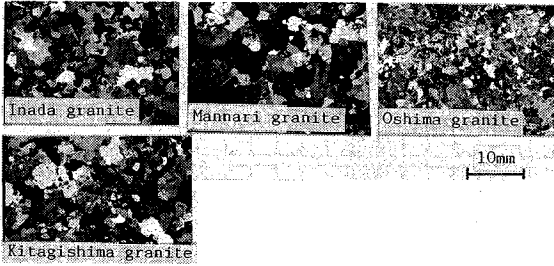


Fig. 1 A photograph showing the structure of several granites in Japan. A bar in the figure corresponds to 10 mm in length.

な配慮を行った。ただし(1)の岩石材料の選択はばらつきを小さくするための配慮というよりも用いた材料の特性を示すものであるが、前章との対応上ここに示す。

(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。岩石力学の研究対象に用いられることの多い花崗岩である稲田、万成、大島、北木島各花崗岩の偏光顕微鏡写真を示すと Fig. 1 のとおりである。いずれも平均結晶粒径が 3 mm 以下であり、特に大島花崗岩では小さい。北木島花崗岩の平均結晶粒径は 2 mm 程度であり、その最大寸法は 4 mm 程度である。またこの写真からは明らかではないが、北木島花崗岩には石英および長石粒子中にマイクロクラックが特に多く、時に長さが 4 mm を越えるものも認められた。したがって北木島花崗岩は Fig. 1 に示された岩石の内では比較的強度も低く、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 1 m のブロックを入手し、その表面を約 5 cm 取り除いた後、15×50×50 cm の直方体ブロックを計 3 個切り出しコアリングした。花崗岩には選択的に割れやすい面が存在することがよく知られており、この面が花崗岩の異方性をもたらす<sup>13), 15), 16)</sup>。これは内部に存在する先在クラックの配向性によるものであり<sup>15)~17)</sup>、最も割れやすい面を採石場の用語で rift 面、これにほぼ垂直で 2 番目に割れやすい面を grain 面とよび、これらに垂直な面は hardway 面とよばれる<sup>13), 18)</sup>。本研究では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 2 番目に割れやすい面として知られている grain 面に垂直な方向にコアリングすることにした。

(3) 供試体形状と寸法

円柱形供試体の  $L/D$  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 Mogi<sup>9)</sup> によると、 $L/D$

が 2.5 以上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、ISRM 指針には  $L/D$  を 2.5~3.0 とするよう述べられている<sup>14)</sup>。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、 $L/D$  が約 2.6 に等しい円柱形供試体を採用した。また前述した岩石中の最大結晶粒径 4 mm を参考に供試体直径を 44.5 mm、供試体長を 115 mm とした。

(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、さらに両端面が互いに平行であることが要求される。平行度の不足は球座を使用すれば若干改善されることが期待できるが、ISRM 指針ではそれらの精度が厳しく規定されている<sup>14)</sup>。本研究では供試体の整形をレンズ加工業者に外注しており、たとえば端面の平行度は  $\pm 5/1000$  mm 以内におさめられている。

(5) 加圧盤との接触状況

減摩剤は使用しない。なお直径 48 mm のエンドピースを使用したこと、および(3)で述べたように  $L/D$  を 2.6 とすることにより端面拘束の影響を避けることができる(佐野他<sup>19)</sup>)。

(6) 試験環境

含水飽和状態の花崗岩を空气中に放置した場合、最初の数時間でかなりの包含水が蒸発し、80 時間後には乾燥状態に近接することを、弾性波速度(縦波)の測定により Nur and Simmons<sup>20)</sup> は見出した。また岩本<sup>21)</sup>も同様の実験により、含水飽和に近い状態ではほぼ等方性(縦波の速度に関して)となる花崗岩が最初の数十分で異方性が顕著となり、2 週間後には弾性波速度がほぼ室内乾燥状態の値となることを報告した。本研究では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 1 年間保存、乾燥させた。ISRM 指針<sup>14)</sup>に従い求めた含水比の平均値は 0.0453 % であり、標準偏差は 0.0005 % である。なお大気圧下での昇温は数十度のオーダーでも花崗岩内部のクラックを増加させるという報告があるので<sup>22)</sup>、含水比測定に用いた供試体を弾性波速度および圧縮強度試験に用いることは避けた。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試験期間を雨量の少ない夏に選んだ。実験室内の温度はほぼ 23~28°C の範囲内にある。

(7) ひずみ速度

圧縮載荷試験には MTS 社製サーボ制御材料試験機を用いて変位速度を制御しており、ひずみ速度は  $10^{-6}$ /s の一定値に保った。

(8) 球座

用いた球座の構造は JIS, ISRM の規格を満足しており、球座は供試体端面の平行度の不足を補い得る方向に回転する。しかしエンドピースをつけたため、球座の中

心が供試体表面とは異なること、および球座半径は 60 mm と大きくその補正は必ずしも敏感ではない点に若干の問題がある。

### (9) 試験技術

荷重試験には細心の注意を払った。特に試験機への供試体の設置と球座の調整が試験結果に大きな影響を与えることが予想される。そのため、まず供試体軸方向ひずみがおおよそ  $100 \times 10^{-6}$  程度となるまで荷重し、供試体側面中央の互いに直交する位置にはられた 4 枚のひずみゲージの読みがほぼ一致することを確認した。この一致がみられない場合には除荷し、球座の調整を行った後、サーボ制御による荷重を開始した。

## 4. 圧縮試験

前章で述べた配慮をした念入りの圧縮荷重試験を行った。ここで行った条件を試験条件 1 とする。

それに対して試験条件のみが異なる圧縮荷重試験を行うため、2. に示したばらつきの要因 (1)~(6) に対する配慮は全く同一とし、(7)~(9) の条件を変化させた実験を行った。すなわち試験機としてはアムスラー型の圧縮試験機を用い、ひずみ速度は試験者が互いに  $180^\circ$  の位置にある 2 台の差動トランス (LVDT) で計測される変位をモニターしながら、ひずみ速度  $5 \times 10^{-6}/s$  となるように手で制御した。アムスラー型試験機の球座もまた JIS, ISRM の規格を満足しているが、これも球座半径が 150 mm と大きく、さらに潤滑状態がよくないため半固定座とも考えられる。試験機への供試体の設置と球座の調整はひずみゲージによるひずみ値をみることなく目視のみ頼ることとし、供試体端面と荷重圧盤面とが目視により平行と認められるまで球座の調整を行った。このようにして行った圧縮荷重試験の条件を試験条件 2 とする。

ここで試験条件 1 ではできるだけ安定な試験結果を得、かつ試験過程に種々のデータを得るためひずみ速度を  $1 \times 10^{-6}/s$  としており、供試体の破壊に至るまでに約 1 時間を要した。これに対し試験条件 2 でも当初この荷重速度で試験することを試みたが、手動制御では 1 時間にわたる制御は精神的にも肉体的にも容易ではないため、やむを得ず荷重速度をこの 5 倍とし、破壊までに要する時間を 10 分強とした。荷重速度が 5 倍になることによって強度が 5% 増加することが Sano et al.<sup>10)</sup> により報告されている。

試験条件 1 と試験条件 2 とでデータの測定方法には大きな差はない。すなわち 2 台の LVDT で加圧板間の変位を計測し、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荷重

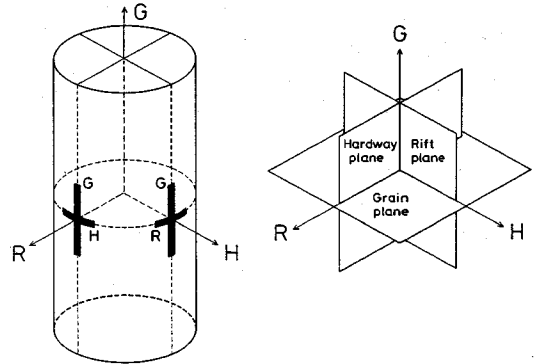


Fig. 2 Specimens of the right circular cylinder were cored normal to the grain plane. An arrangement of electrical resistance gages is also shown. R, G and H indicate the direction normal to the rift, grain and hardway planes, respectively.

する。荷重は MTS を用いたものは 500 kN ロードセル (保証精度  $\pm 0.5\%$  FS) を、アムスラー型を用いたものは 1 MN ロードセル (保証精度  $\pm 0.3\%$  FS) 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、Fig. 2 に示すように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 か所で計測した。用いたひずみゲージは長さ 20 mm のクロス型のものである。荷重、ひずみおよび変形はすべてデータロガーで計測し、HP-IB バスラインを介してパーソナル・コンピュータに転送した。

微小破壊のモニタリングなどのためにアコースティック・エミッション (AE) や弾性波速度を計測する場合には、PZT-7 圧電振動子をシアノアクリレート系の接着剤を用いて供試体に接着し、受信子 (あるいは発信子) とした。弾性波速度の計測はパルス透過法にて行い、パルスの周波数を 1 MHz とした。受信波を増幅 (10 kHz ~ 2 MHz, 50 dB) した後、AE については最大振幅が 90 mV を越える現象のみ周波数カウンタで計数し、パーソナル・コンピュータに転送した。弾性波の波形の記録に用いたトランジェント・レコーダの分解能は 10 ビットでサンプリング・レイトは 50 ns である。したがって求められる弾性波速度には 6 m/s 程度の誤差が存在する。

## 5. 実験結果と考察

全供試体の材料的なばらつきを検討するため、Fig. 3 に実験に用いた供試体中を伝わる超音波伝播速度 (縦波速度  $V_p$ ) の分布を示す。この計測は著者らの経験によるとかなり再現性のよいものであるが、計測結果は平均値 3 643 m/s, 標準偏差 74 m/s のほぼ左右対称の分布を示している。図より明らかなように、測定精度をはるか

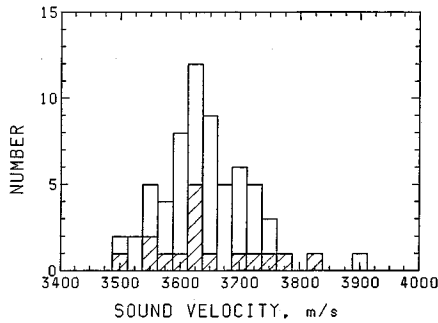


Fig. 3 A spatial variation of the sound velocity in the same direction, showing that the elastic property varies due to its own nature. The mean velocity and the standard deviation are 3643 m/s and 74 m/s, respectively.

に超えてばらついていることが認められる。したがって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。ここで図中斜線をほどこしたものは試験条件1の載荷試験用に、全供試体中から無作為に抽出した供試体の速度分布である。

Fig. 4 に試験条件1で得られた計16の応力-ひずみ曲線図の内から任意抽出した3例を示す。ここで載荷軸方向のひずみは供試体の側面にはられた4枚の軸方向ひずみゲージのひずみ値の平均値から、横方向ひずみは向かい合う位置にはられた2枚の円周方向のそれぞれの平均値から算出している。ただし Fig. 2 に示したように供試体側面のゲージ配置は供試体軸が、grain面に垂直となっていることから、riftおよびhardway面に垂直となっている。

図中それぞれの応力-ひずみ曲線に付したGおよびH(白抜き記号)、およびR(黒ぬり記号)はそれぞれgrain, hardway, rift面に垂直な方向のひずみを表わしており、Vは体積ひずみを表わしている。応力-ひずみ曲線の再現性はきわめて良好である。載荷軸方向の応力-ひずみ曲線(G)は立ち上がり部分で大きな非線形性を示し、この面内におけるクラックの閉塞が生じていることを示している。Fig. 4によると横ひずみにも異方性が現われる。すなわちriftおよびhardway面に垂直な方向の横ひずみの値が異なっており、rift面に垂直な方向のひずみがhardway面に垂直なものよりも若干大きくなっている。この傾向はrift面方向とhardway面方向がほぼ等しかった2例を除き、試験条件1で得られたすべての供試体に共通している。このひずみの違いはrift面およびhardway面に垂直な方向のポアソン比が異なること、およびダイラタンシーに異方性<sup>23)</sup>があることを示しており、先在クラックの選択的配向性によって生じるものと考えられる。

いまこの条件下で計測されたAE頻度の測定結果の

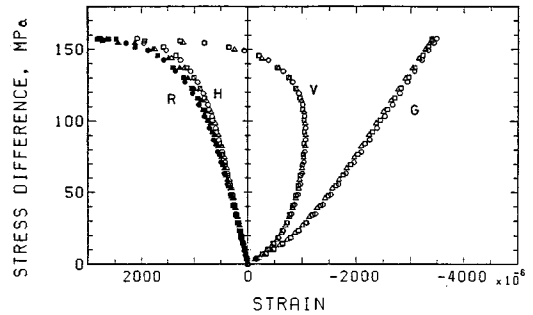


Fig. 4 Three linear strains and volumetric strain observed on three specimens for the carefully arranged experiments (experiments No. 1). The reproducibility is excellent.

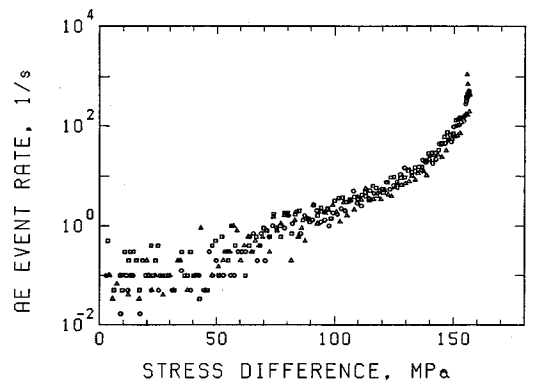


Fig. 5 Event rate of acoustic emissions observed on three specimens for the experiments No. 1. The reproducibility is excellent.

うちから任意抽出した3例を示すと Fig. 5 のとおりである。AE頻度の再現性は良好で各供試体内部で同じように微小破壊が生じ、同じように最終破壊に至っていることが認められる。AEは指数関数的に増加し、最終破壊に至る過程で急増する。この結果は岩石の圧縮応力下の破壊がきわめて多数の微小破壊の生成およびその集積の結果として生じることを示す直接的証拠である。

試験条件1で得られた強度の分布をヒストグラムに示したものが Fig. 6 である。Fig. 6 は全16個の供試体について示したものであり、強度の平均値は154.7 MPa、標準偏差2.9 MPaである。すなわち強度の変動係数は1.88%となっており、十分に小さいといえる。このことから本実験の試験条件1において先に述べた、①岩石固有の強度のばらつき、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種類のばらつきはそれぞれ十分に小さいことが認められる。すなわち大きな欠陥のない岩石の一軸圧縮強度のばらつきは従来考えられていたほど大きなものではなく、十分注意深い実験を行えばかなり再現性のよいデータが得られると考えられる。圧縮

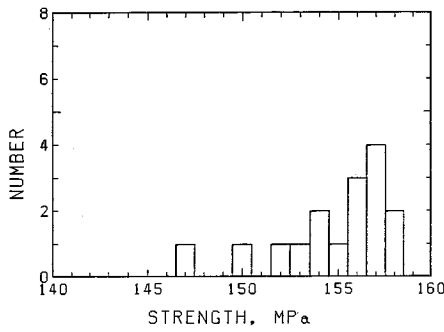


Fig. 6 The strength distribution for the experiments No. 1. The mean strength and the standard deviation are 154.7 MPa and 2.9 MPa, respectively.

応力下の岩石の破壊がきわめて多数の微小破壊の集積による<sup>6)</sup>ことを考慮すれば、最弱リンク説が成立しないことは当然とも思える。言い換えれば、比較的小数の微小破壊により最終破壊に至るような試験条件下では強度のばらつきは大きくなることが予測される。したがって再現性のよいデータを得るためには微小破壊の大きさと供試体寸法の間にある条件が成り立つ必要があると思われる。最大荷重に接近するまでに花崗岩に生じるクラックには結晶粒内破壊が多いと考えられているので<sup>6)</sup>、この条件は供試体の最小寸法が最大結晶粒径の10倍以上でなければならないと定めた ISRM の指針と間接的に結ばれている。

試験条件 2 において比較的高強度および低強度を示した供試体の応力～ひずみ曲線からそれぞれ 3 例を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。図中の記号は Fig. 4 のものと同様である。比較的高強度を示した供試体の応力～ひずみ曲線である Fig. 7 は試験条件 1 の Fig. 4 と類似したものとなっている。しかし比較的低強度を示した Fig. 8 は応力値が 100 MPa あたりが限界となっているだけでなく、

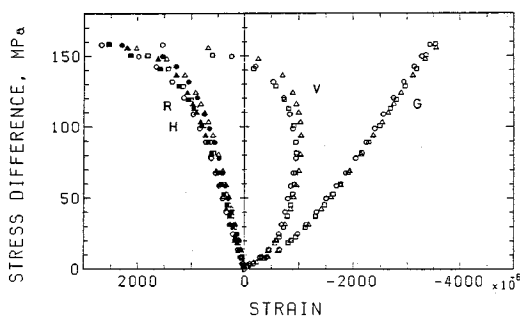


Fig. 7 Three linear strains and volumetric strain observed on three specimens of relatively high strength in experiments No. 2. The stress-strain relationship is similar to that in No. 1.

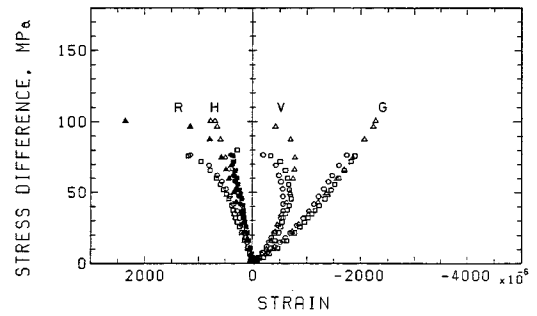


Fig. 8 Three linear strains and volumetric strain observed on three specimens of relatively low strength in the experiments No. 2.

いくつかの点で Fig. 4 と異なる特徴を示している。たとえば最後に計測された体積ひずみが圧縮の状態にあるものや、試験条件 1 の結果と逆に hardway 面に垂直な方向のひずみが rift 面に垂直な方向のひずみより大きくなっているものも認められる。

この条件下で計測された AE 頻度の測定結果のうちから 3 例を示すと Fig. 9 のとおりである。すなわち試験条件 1 と同様の結果が得られたもの、比較的低強度のもの、および载荷初期の AE 発生頻度が強度の低いものと同様であるが最終的には強度の高かったものが選ばれている。Fig. 5 と比較するとばらつきが大きく、同一応力レベルの AE 発生頻度には最大で 100 倍程度の差が認められる。また強度の低いものでは荷重の低い段階から AE 発生頻度が高くなっていることが認められ、より低荷重から微小破壊を発生させる応力状態が生じていることを示している。

試験条件 2 で得られた強度の分布をヒストグラムに示したものが Fig. 10 である。Fig. 10 には試験条件 2 で行った全 48 個の供試体について示している。この分布

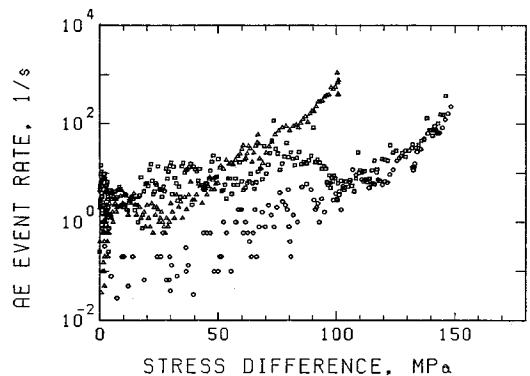


Fig. 9 Event rate of acoustic emissions observed on three specimens for the experiments No. 2. The reproducibility is poor.

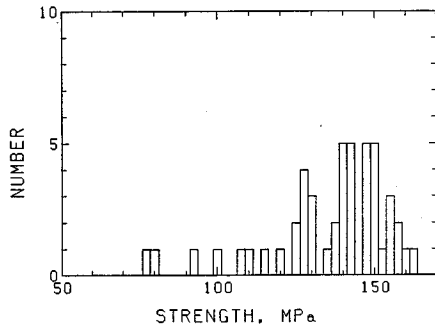


Fig. 10 Strength distribution for the experiments No. 2. The mean strength and the standard deviation are 135.8 MPa and 19.5 MPa, respectively.

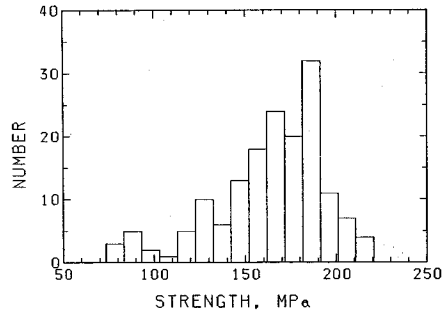


Fig. 11 Strength distribution of Inada granite after Yamaguchi (1967). This resembles to the distribution of experiments No. 2.

形は Fig. 3 に示されている弾性波速度の分布形とは異なり、上限値をもつような非対称分布のような形をしている。この試験で得られた強度の平均値は 135.8 MPa、標準偏差は 19.5 MPa であり、変動係数は 14.4 % となって試験条件 1 の場合と比べてはるかにばらつきの大きい結果となっている。しかし両者の分布形を比較すると強度の分布範囲、度数は異なるが両者とも非対称分布となっており、よく似た形となっている。また試験条件 1 の载荷速度は試験条件 2 の速度の 1/5 であることから、試験条件 1 で得られた最大の強度 157.7 MPa を Sano et al.<sup>10)</sup> に従い 5 % 割り増しすると 165.6 MPa となり、試験条件 2 で得られた最大強度 163.7 MPa よりいくらか大きめであるが近い値となる。

試験条件 1 の結果からみられたように、試験条件 2 においても岩石材料固有のばらつきと供試体整形にともなうばらつきはほとんどないはずである。このことから試験条件 2 で行った実験結果のばらつきはほとんど試験条件のばらつきによるものと考えられる。しかもここで関与する試験条件のばらつきは主として 2. の (8), (9) に対応しており、これらは強度を低下させる方向に作用する。すなわち実験の結果得られる強度は真の強度から試験条件のばらつき分だけ減じた値を与えている。そのため真の強度は得られた強度試験結果の最大値近傍、あるいはそれより若干高いあたりにあると考えられる。このことは载荷速度が 1/5 であるため 5 % 割増しされた試験条件 1 の結果が試験条件 2 の結果の最大値近傍、あるいはそれより若干高いあたりに分布することと一致している。Fig. 10 にみられるように試験条件 2 の場合の強度の分布形は上限値をもつ非対称分布のような形となる。またこの形は試験条件 1 の場合の分布形 (Fig. 6) ともよく似ており、試験条件 1 の実験においても試験条件のばらつきが関与している可能性がある。

岩石供試体の強度のばらつきを論じる際によく引用さ

れている<sup>4),5)</sup>、稲田花崗岩を用いて行われた実験結果<sup>1)</sup>を Fig. 11 に示す。この分布形も Fig. 3 に示されている弾性波速度の分布形とは異なり、上限値をもつような非対称分布のような形をしているところが興味深い。またこの分布形は本研究の試験条件 2 で得られた結果とよく似ている。したがってこの実験で得られた結果にみられるばらつきはそこで議論されたような岩石固有の性質ではなく、本研究の試験条件 2 と同様に試験条件によるばらつきの可能性がある。また本来の強度はそこで議論されたような平均値ではなく、はるかに高い可能性がある。ただしここでは岩石ブロックから互いに垂直な 3 方向にコアリングされた供試体の強度が計測されており、方向によるばらつきも関与しているものと考えられる。また前述の研究が行われた当時から現在までに試験機の機構のみならず測定系も大きく進歩しており、多点のひずみ計測がきわめて高速に行えるようになってはじめて試験条件 1 が可能になったともいえよう。

試験条件のばらつきを生じる大きな原因として载荷の偏心、あるいは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。そこで供試体側面に 90° の間隔で軸方向にはられた 4 本の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、荷重の増加による曲げモーメント変化の状況を示したものが Fig. 12 である。ただしこの算定には相対する位置で計測されたひずみの平均値が一致する必要がある。しかし hardway 面と rift 面が供試体側面とそれぞれ交差する位置で計測されたそれぞれ 2 つの軸方向ひずみの平均値が厳密には一致していないので、計算された曲げモーメントの値には若干の誤差が含まれる。また曲線の最終の値は記録された最大荷重の 2 測点前 (試験条件 1 で 100 秒前、2 で 20 秒前) で表わしてある。また軸力は平均ひずみより、曲げモーメントは偏差ひずみから求めたものでそれぞれ弾性係数で割った値が示されている。

図中□印で試験条件 1 の実験結果を、○印で試験条件

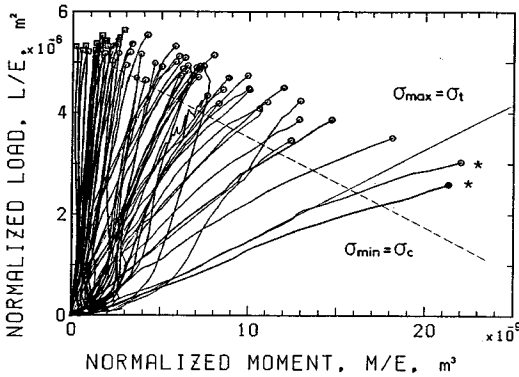


Fig. 12 Applied normal force and the bending moment were calculated from the four axial strains observed on each specimen. Squares and circles indicate the experiments No.1 and No.2, respectively.

2の実験結果を示している。曲線が下向きに凸であることは載荷とともに球座が偏心を正す方向に作用することを意味し、上向きに凸であることはその逆を意味する。このことから試験条件1では一般にもともと偏心は小さく、また球座も良好に作用しているのに比べて、試験条件2では供試体によって球座が偏心を正す方向に作用する場合とその逆の場合があることを示している。

偏心圧縮柱の理論によると  $\sigma_c, \sigma_t$  をそれぞれ材料の圧縮、引張強度として (引張を正とする)

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

が柱の安全性の吟味の対象とされる。ここで  $P, M$  は荷重と曲げモーメント、 $A$  は供試体の断面積、 $W$  は断面係数である。この条件をおよその  $\sigma_c, \sigma_t$  の値を用いて計算し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 (図中の実直線) は非常にまれであり供試体の破壊状況から検討して全供試体中に2例 (図中\*印) 認められるのみである。さらにこの2例も Fig. 12 中ではかなり引張応力が大きくなってから最大応力に至っており、供試体中に引張破壊が生じてそれが直ちに最終破壊に至らないことを示している。また縁応力が  $\sigma_c$  に達して破壊が生じるとすれば実験結果は図中の破線と与えられることになる。実験結果によると、強度は必ずしも曲げモーメントに敏感であるとはいえないが、上述の傾向は認められるようである。著者らは岩石の破壊が必ずしもこのような単純な理論によって説明できるという立場には立っていないが、圧縮強度に関する曲げモーメントの影響を定性的に説明することはできるだろう。

一般的には縁応力が  $\sigma_c$  に近い状態となつてその部分の材料が破壊し (非線形性を示し)、順次破壊が供試体内部へ進行して最終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その時の荷重に対して示したものが Fig. 13 である。図中の曲線は典型的な応力-体積ひずみ曲線である。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、すなわち局部的な破壊のみで最終破壊に至った供試体ほど強度が低いことがわかる。

Fig. 14 に供試体の破壊の状況を示す。左より順に右に行くほど低い強度をあたえた供試体となっている。供試体の破壊の状況は球座の動きやすさなど、最終的なすべり面の形成状況の影響を受けるため必ずしも載荷条件に対応するものではない。しかし左端の供試体がほぼ対称的な壊れ方をしているのに比べて右へ行くほど対称性がなくなり、右端では曲げによる引張破壊が明瞭に認められる。

この状況から供試体の破断面の走行を読み取り試験条件1および2について図示したものが、Fig. 15 および Fig. 16 である。これらの図では破断面の走行が rift 面からの角度で表現されており、そのヒストグラムが示されている。Fig. 16 に示す試験条件2についてのヒスト

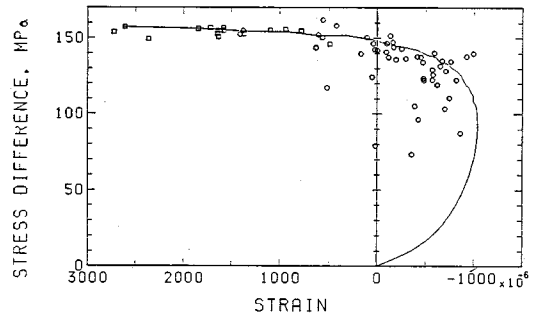


Fig. 13 Volumetric strain near the fracture point and the axial stress. Squares and circles are the same as in figure 12. A typical stress-volumetric strain curve is also shown.

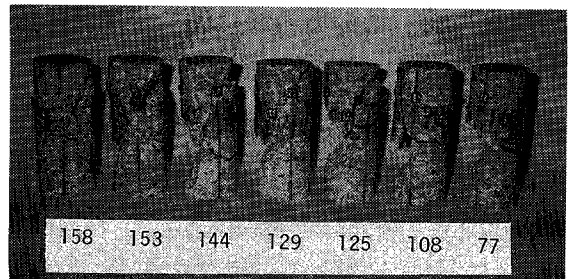


Fig. 14 A photograph showing the fractured specimens. The strength in megapascals for each specimen is also shown.



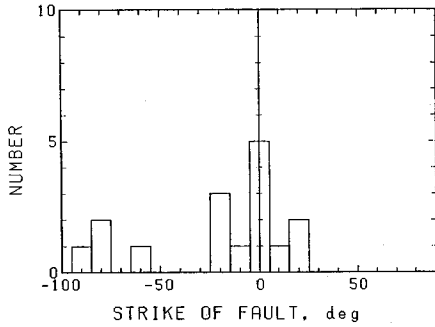


Fig. 15 A histogram of the strike of the fault for specimens No. 1. Almost all the specimens fractured parallel to the rift plane.

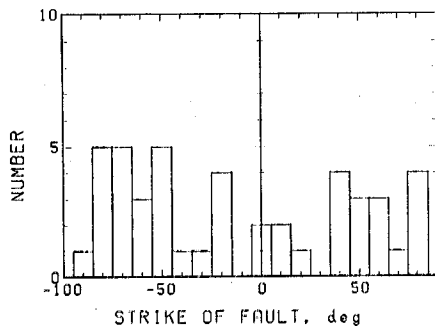


Fig. 16 A histogram of the strike of the fault for specimens No. 2. The strike varied widely.

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 Fig. 15 に示す試験条件 1 のみについてみれば  $-25^{\circ} \sim +25^{\circ}$  の間に多く分布しており、破壊面方向が主として先在クラックの選択的配向面 (rift 面) の影響により決定されることが示されている。このことは Fig. 4 において rift 面に垂直な方向のひずみが hardway 面に垂直な方向のひずみより大きく現われることと対応している。また精度よく実験すれば実験結果に現われる花崗岩の異方性の影響も、実験精度がわずかに低下するだけで認められなくなることを示している。

## 6. 結 論

物理量の測定には読取り誤差や計器のドリフトなどによる測定誤差がつきものである。しかし十分慎重な測定を行うことによりこの種の誤差を小さくすることは可能である。岩石の一軸圧縮強度は従来この種の誤差よりはるかに大きなばらつきを有するものと考えられてきた。本研究で示された結果によると、岩石の一軸圧縮強度のばらつきは従来考えられていたほど大きなものではなく、十分注意深い実験を行えばかなり再現性のよいデータが得られることが認められた。

同一装置を用い、同一試験方法と同一手順で行われた試験で得られた結果にもかかわらず、試験条件 2 で得られた圧縮強度には大きなばらつきが認められた。しかしこれらの供試体側面、計 4 か所で同時に計測された曲げモーメントの大きさは強度と明瞭な負の相関を示しており、試験条件 2 で認められた強度の大きなばらつきは試験条件、特に曲げモーメントの載荷によるものと考えられる。すなわち山口、西松<sup>4)</sup>や三木<sup>5)</sup>に引用されている岩石の強度の大きなばらつきは、そこで主張されているような岩石固有の性質ではなく、試験条件、特に曲げモーメント載荷に依存した結果の可能性があることをこの結果は示している。ただしそこで引用されている実験に用いられた岩石は稲田花崗岩であり、本研究で用いたものと同一ではなく、また強度の異方性が配慮されていないことも考慮する必要があると思われる。

ひずみや AE などのパラメーターや破壊面の形成方向など、丁寧な実験では十分再現性のよいデータが得られるが、実験精度がわずかでも低下すると岩石本来の性質が見失われてしまうことが見出された。

近年、原油や天然ガスの地下備蓄あるいは放射線廃棄物の地下保管計画などに伴い、正確な岩石の物性を知る必要のある機会が増えており、将来ますますその機会が増えるものと思われる。本研究で示された丁寧な実験は純粋な理学的興味に基づく研究だけではなく、このような場合に役立つものと考えられる。しかしすべての場合にここで述べられたような丁寧な実験を必要とするとは限らない。そのような場合、通常の実験から得られた結果をもとに本来の強度を推定する方法については今後の課題としたい。

本研究の岩石資料入手にあたり馬越道也氏に多大のお世話になった。ここに記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 山口梅太郎：花こう岩の強度試験における試験片の数について、材料, Vol. 16, pp. 52~58, 1967.
- 2) 西松裕一：岩石の強度と破壊に関する統計学的研究, 東京大学学位論文, 1968.
- 3) 松尾 稔・川村国夫・板橋一雄：岩石強度の統計的性質に関する推定法, 土と基礎, Vol. 31, pp. 11~16, 1983.
- 4) 山口梅太郎・西松裕一：岩石力学入門第 2 版, pp. 3~5, pp. 95~102, 東京大学出版局, 1977.
- 5) 三木幸蔵：岩盤力学入門, 鹿島出版会, pp. 186~210, 1986.
- 6) Paterson, M. S. (荻野正二ほか訳)：実験岩石力学, 古今書院, 1986.
- 7) Mogi, K. : Deformation and fracture of rocks under confining pressure, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., Vol. 42, pp. 491~514, 1964.
- 8) Mogi, K. : Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress,

- Felsmechanik und Ingenieurgeol., Vol. 4, pp. 41~55, 1966.
- 9) Brace, W. F., Paulding, Jr., B. W. and Scholz, C. H. : Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, J. Geophys. Res., Vol. 71, pp. 3939~3953, 1966.
  - 10) Sano, O., Ito, I. and Terada, M. : Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression, J. Geophys. Res., Vol. 86, pp. 9299~9311, 1981.
  - 11) Sano, O., Terada, M. and Ehara, S. : A study of the time-dependent microfracturing and strength of Oshima granite, Tectonophysics, Vol. 84, pp. 343~362, 1982.
  - 12) Hudson, J. A. : Geostatistics applied to rock mechanics, Proc. 7th West Japan Symp. Rock Engng., pp. 4~20, 1986.
  - 13) Dale, T. N. : The commercial granites of New England, Bull. U. S. Geol. Surv., Vol. 738, pp. 1~97, 1923.
  - 14) ISRM 指針 : 岩の力学連合会, 1982.
  - 15) Peng, S. S. and Johnson, A. M. : Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, pp. 37~86, 1972.
  - 16) 工藤洋三・橋本堅一・佐藤 修・中川浩二 : 花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布, 土木学会論文集, 第 370 号, III-6, pp. 189~198, 1986.
  - 17) Simmons, G., Todd, T. and Baldrige, W. S. : Toward a quantitative relationship between elastic properties and cracks in low porosity rocks, Amer. J. Sci., Vol. 275, pp. 318~345, 1975.
  - 18) Balk, R. : Structural behavior of igneous rocks, Mem. Geol. Soc. Amer., pp. 27~42, 1937.
  - 19) 佐野 修・西村豪人・寺田 孚・伊藤一郎 : 岩石の変形挙動および強度に及ぼす荷重速度の影響, 日本鉱業会誌, Vol. 96, pp. 141~147, 1980.
  - 20) Nur, A. and Simmons, G. : The effect of saturation on velocity in low porosity rocks, Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 7, pp. 183~193, 1969.
  - 21) 岩本 健 : ケイ酸塩質岩石のダイラタンシー現象の定量化に関する研究, 山口大学工学部修士論文, 174 p., 1983.
  - 22) Wong, T.-F. and Brace, W. F. : Thermal expansion of rocks, Tectonophysics, Vol. 57, pp. 95~117, 1979.
  - 23) Scholz, C. H. and Koczyński, T. A. : Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads, J. Geophys. Res., Vol. 84, pp. 5525~5534, 1979.

(1987. 3. 25・受付)