

花崗岩の圧裂強度実験結果のばらつきに関する研究

TENSILE STRENGTH DISTRIBUTION OF GRANITIC ROCKS
IN DIAMETRAL COMPRESSION TEST

工藤洋三*・佐野 修**・古川浩平***・中川浩二****

By Yozo KUDO, Osam SANNO, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

Several kinds of diametral compression tests were performed to check what the major parameters that scatter tensile strength are. One of them was as carefully an arranged experiment as we could possibly do. Another one was a roughly arranged experiment, which is probably usually performed. Between these two extremes, three kinds of experiments varying in some parameters, like testing machine, cylindrical surface grinding, spherical seats and orientation of splitting plane, were carried out. Oshima granite was chosen for these tests. The tensile strength for the carefully arranged experiment showed minute scattering. Experimental results indicate that in order to get meaningful data, it is necessary to fix the split plane with respect to the axes of anisotropy, at least for granitic rocks and that the design of the spherical seats and the readjustment of the spherical seats after a slight loading are also important.

Keywords: diametral compression test, tensile strength, granite, anisotropy

1. はじめに

岩石や岩盤の力学的性質の評価の一手法として圧縮強度実験や引張強度実験は代表的な実験である。そしてこれらの実験が有用なものであるためには実験精度がよいことが必要なのはいうまでもない。これまで一般に、岩石実験の結果には大きなばらつきが生じるものと考えられてきており、この大きなばらつきは岩石のもつ不均質性に起因していると考えられてきた。これに対して著者らは、北木島花崗岩を用いて一軸圧縮強度実験を行い、岩石固有の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いことを明らかにし、同時に、わずかに実験手法が異なるだけで容易に大きなばらつきが生じることを示した¹⁾。そこでは供試体作製や試験の方法に細心の注意が払われており、16個の花崗岩供試体に対し1%台の変動係数が得られている。この実験で用いられた北木島花崗岩の最大結晶粒径は4mm程度であり、先

在クラックの中には供試体直径の1/10以上の長さのものも存在した。したがって、さらに細粒な花崗岩では、よりよい精度の実験結果が期待できる。事実、細粒の大島花崗岩を用いた圧縮強度実験では1%以下の変動係数が得られている²⁾。

圧縮強度のばらつきが従来考えられていたより小さいことが明らかになった後でも、引張強度についてはかなりのばらつきが生じるという考えが可能である。これは圧縮強度が、岩石内の微小欠陥などに対して比較的鈍感である、いわば構造鈍感であるのに対して、引張強度は構造敏感であるという考えに依拠しており、この点に関する検討も必要と考えられる。

本研究では、圧縮強度実験を扱った既報¹⁾に引続き、岩石の引張強度実験法として代表的な圧裂強度実験を取り上げ、まずいくつかの点で細心の注意を払った方法で実験を行う。そして、この実験結果のばらつきと実験技術上のパラメーターをいくつか変動させて実験を行った実験結果のばらつきとを比較検討する。本研究の主目的は、圧裂強度のばらつきに対する各パラメーターの寄与度を明らかにすることにある。なお既報との整合性を保つうえで、本研究でも便宜上、試料の採取から供試体の整形、載荷にわたる全過程を実験とよび、供試体を載荷する過程を試験とよぶ。

* 正会員 工修 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒745 徳山市久米 3538)

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

*** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科 (同上)

2. 圧裂強度実験におけるいくつかの問題点

圧裂強度実験は実験方法が簡便であるという大きな利点とともにいくつかの固有の問題点がある。まず、この試験が間接試験であるため、材料の性質にある種の仮定が必要となる。圧裂強度実験の慣用式は材料を等方線形弾性体と仮定しているが、ほとんどの岩石は組織上あるいは構造上の異方性を有するため厳密にはこの仮定は成立しない。またクラックや空隙の存在は材料の力学的挙動に非線形性をもたらす³⁾。これも線形弾性体という仮定に反することになる。Amedei⁴⁾は横等方性 (transversely isotropic) 材料について、圧裂強度実験の解を解析的に求め、慣用式によって得られる値を修正している。

異方性については、岩石の異方性軸や弾性率を決定することは可能なので⁵⁾、圧裂強度実験において異方性を考慮することは煩わしさが加わるが可能である。たとえば、供試体端面を hardway 面 (花崗岩の最も割れやすい面である rift 面と 2 番目に割れやすい面である grain 面に直交する面) とし、大島花崗岩についてすでに得られている弾性率⁵⁾を用いて Amedei らの方法⁴⁾で評価すると、等方性仮定の解を用いた場合に生じる誤差は 3% 程度である。

第 2 に、圧裂強度の慣用式を適用するためには破断面が載荷点近傍の圧縮応力集中域から形成されてはならない。これに対して Hooper⁶⁾ がガラスについて行った平板載荷圧裂強度実験、および Hudson et al.⁷⁾ が St. Cloud 花崗閃緑岩 (Charcoal 花崗岩) と Tennessee 大理石で行った平板載荷圧裂強度実験では、初期クラックは載荷点付近から発生すると報告されている。載荷点近傍からの初期クラックの発生を防止するため Mellor and Hawkes⁸⁾ は曲面載荷盤を用いて載荷幅を増加させることにより初期クラックを供試体中央部より発生させることを提案し、これは ISRM の指針⁹⁾に採用されている。一方、平面載荷板を用いても初期クラックが圧裂予定面に沿う供試体中央部から発生するという指摘がいくつかある^{10), 11)}。さらに、Yanagidani et al.¹²⁾ は、村田安山岩と北木島花崗岩を用いた平板載荷の圧裂強度実験において、ひずみゲージとトランジェントレコーダーによるクラックの観察を行い、圧裂の慣用式を適用できる領域から初期クラックが発生していることを明らかにしている。これらの観察結果は、たとえば花崗岩という同種の岩石に対しても異なった結論が得られる可能性を示しており、第 2 の問題点に関しては未解決である。

3 番目の問題点は、載荷によって生じる供試体内の応力分布が一様とはならず、またその分布状態は圧盤と供試体との接触角の関数となることである。圧裂強度実験

において供試体に作用する外力は、慣用式の理論的基礎となっている線荷重ではなく載荷幅を有する分布荷重となる。分布荷重を受ける圧裂試験については Hondros¹³⁾ が応力分布の解析解を得ており、他にもいくつかの分布形状に対する解が得られている¹⁴⁾。それらによれば、分布荷重幅に対応する接触角が増すほど慣用式で考えられている応力分布との差が大きくなる傾向にある。この点に関して Fairhurst¹⁵⁾ は、Hondros の応力解に、材料の破壊条件として修正 Griffith 理論¹⁶⁾を適用して接触角と破壊荷重との関連について検討した。そこでは接触角が小さい場合破壊は供試体の中心よりむしろ載荷点に近い位置で生じることが示されている。同様の考え方から佐藤¹⁷⁾は、圧裂強度を接触角の関数として修正する必要があることを指摘している。しかしこの修正も材料が Griffith の破壊条件に基づくことを前提としており、実際の岩石への適用可能性については問題が残されている。

異方性や接触角の考慮など、簡便さが最大の長所である圧裂強度実験に対してこのような複雑さを導入することについては多くの問題がある。そこで実用上は、圧裂強度が一軸引張強度を反映するという前提のもとに、圧裂強度の慣用式を一定の面積を圧裂するために必要な見掛けの応力として解釈した方が圧裂強度実験の目的にかなっていると考えられる。事実 Mellor and Hawkes⁸⁾は一軸引張強度と圧裂強度がおおまかに一致することを明らかにしている。当然のことではあるが、このことは、圧裂強度実験をより厳密に扱うために異方性の影響や一軸引張強度との関連を追求していこうとする努力をなおざりにしようとするものではない。

以上のように、圧裂実験法が正確な引張強度を求める実験法であるかどうかについてはいくつかの問題点がある。しかしその実験法は比較的簡単であり、実験結果はおよその引張強度を与えるとしてよいようである。このことは実用上から岩石圧裂実験結果のばらつきを論じ、実験精度を検討することが重要であることを意味する。

3. 岩石の圧裂強度実験結果にばらつきを与える要因

既報¹⁾では、圧縮強度実験結果にばらつきを与える要因として、1) 岩石材料固有のばらつき、2) 供試体採取方法、3) 供試体形状、寸法、4) 整形精度、5) 加圧盤と供試体の接触状況、6) 試験環境、7) ひずみ速度、8) 試験機および球座、9) 試験技術、を考え、それぞれのばらつきの要因を極力小さくして念入りの実験を行うことによりばらつきの小さい圧縮実験結果を得た。圧裂強度実験結果にばらつきを与える要因についても圧縮試験と同様の要因が考えられる。しかしながら圧縮強度実験

と圧裂強度実験では、支配的な応力場が圧縮と引張で異なるなど重要な相違点があり、圧裂強度実験に固有の問題点もある。そこで既往の研究などから圧裂強度実験結果にばらつきを与えると考えられる要因を検討すれば、以下に述べるようなものとなる。

1) 岩石材料固有のばらつき

岩石はその内部にクラックをはじめとする多くの微小欠陥を含みまた粒子組成も不均一である。この微小欠陥のばらつきや粒子不均一性が圧裂強度にばらつきをもたらすと考えられる。

2) 供試体採取方向と載荷方向

多くの岩石は多かれ少なかれその組織・構造に異方性を有している。これらの異方性はクラックなどの選択配向や鉱物粒子の平行配列などによるものであるため供試体がこれらの配向面に対してどのように準備されるかによって強度が異なる。このため圧裂予定面を固定せずに圧裂強度実験を行った場合、この強度の異方性が見掛け上強度のばらつきとなって現われる。

3) 整形精度

圧縮試験においては供試体端面の整形は強度に大きな影響を与える。圧裂強度実験においても整形の良否は強度のばらつきに影響を与えることが考えられる。

4) 試験機および球座

試験機の荷重速度あるいはひずみ速度を一定に保つことが望ましい。また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と考えられる。

5) 試験技術

以上述べてきた供試体作製や試験装置に対する配慮に加えて、荷重軸が供試体の重心を通るようにして偏心を除去するなど、ばらつきの小さい実験結果を得るうえで、試験技術は重要な要因となる。

圧縮強度実験同様、これらの要因に対する配慮の欠如は、ほとんどの場合は強度低下をもたらすと考えられる。しかし強度に異方性がある場合には、予定した圧裂面に対して載荷軸がずれた場合に強度が増加する可能性もある。

4. 実験結果のばらつきを小さくするための配慮

前章に述べた要因によってもたらされるばらつきをできるだけ小さくするため、各要因ごとに以下に述べるような配慮をした。

(1) 試料の選択

実験に用いた試料は、愛媛県伊予大島産の花崗岩である。試料選択の主な理由は、大島花崗岩の平均結晶粒径が約1~2mmの細粒で、内部のクラックが結晶粒径程度の寸法であり安定な実験結果が期待されることにあ

る。またこの岩石は岩石試験に用いられることが多く、組織・構造に関する情報が豊富に得られている^{18),19)}。

(2) 供試体採取方法

よく知られているように、花崗岩は、内部の微小欠陥が優先方位を有するため力学的性質に異方性を生じる^{20)~23)}。今回の実験に使用した岩石と同じ採石場から採取された花崗岩の圧裂強度の異方性について先に報告したものの²³⁾を Fig.1 に示す。図より明らかなように、それぞれの角度に対する供試体数はたかだか2個であるが、これら2個のばらつきの範囲をはるかに越えて圧裂強度に明瞭な異方性が認められる。このことから、供試体の採取にあたっては同一方向からコアリングすることとし、grain面に垂直にコアリングした。

(3) 載荷方向

前述したように、再現性のよい結果を得るためには圧裂面を異方性軸に関して厳密に固定することが必要である。しかしながら Fig.1(b)からも明らかなように、たとえば rift面を圧裂予定面として選択した場合、載荷軸がずれば圧裂強度は増加する。本研究では実験精度の低下が強度増加をもたらす可能性をできるだけ小さくすることとし、Fig.1(b)を参考に配向面のうちで相対的に強度の高い hardway面を圧裂することにした (Fig.2 参照)。

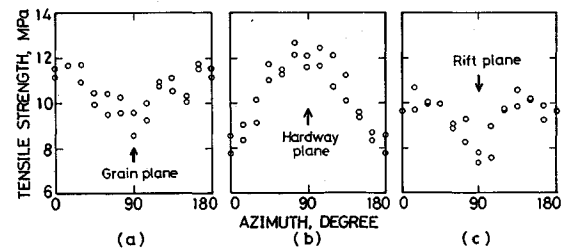


Fig.1 Tensile strength anisotropy of Oshima granite after Kudo et al. (1986). (a) Disks with flat surfaces parallel to rift plane. (b) Disks with surfaces parallel to grain plane. (c) Disks with surfaces parallel to hardway plane.

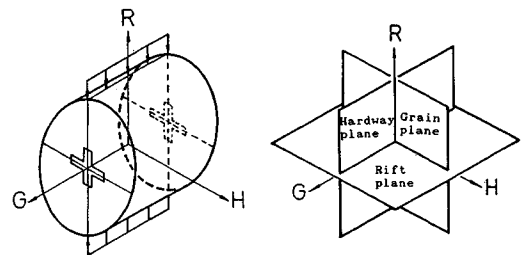


Fig.2 Directional symbols and the orientation of the split plane. R, G and H indicate the orientations normal to the rift plane, grain plane and hardway plane, respectively.

(4) 供試体形状と寸法

圧裂強度の慣用式は平面ひずみ、平面応力のいずれの応力状態に対しても有効であるため、供試体長が長くなることによって生じる側面の平行度の劣化や荷重の偏心を防ぐという目的からすれば円盤の厚みは小さいほどよいと考えられる。しかし一方で、供試体の寸法は結晶粒の大きさによる制約を受ける。用いた花崗岩の最大結晶粒径が約2 mmであるため供試体軸方向の厚みをその約10倍の21 mmとした。これは供試体直径(約42 mm)の約1/2にあたる。これらは ISRM の指針に準拠している。

(5) 整形方法

岩石ブロックから抜き取られたコアの側面は、かなり慎重にコアリングを行っても直径に0.05 mm程度の変動が認められた。このため側面の整形はレンズ加工業者に外注した。この結果側面整形を行った供試体の直径の変動は0.01 mm以内に収められている。端面はターンテーブル上で研磨して、両端面の平行度が0.1 mm以内に収まるようにした。

(6) 試験機および球座

試験機としては油圧サーボ制御が可能な試験機を使用した。荷重は加圧盤の変位速度が一定となるように行った。球座には直径30 mmの鋼球をもつものを採用し、荷重が載荷面に均一に分布するように球の下端から載荷面までの距離を載荷長の約1.5倍とした。

(7) 試験技術

圧裂予定面に沿って正確に破断させるため、供試体の設置と球座の調整には細心の注意を払った。供試体の設置については調整用の治具を作製して慎重に行った。また荷重の偏心をできるだけ小さくするため、供試体端面の中央部に貼られた長さ5 mmのクロスゲージの出力をモニターし球座を再調整することによって荷重の偏心を除去するように努めた。具体的には縦ひずみが 40×10^{-6} 程度になるまで載荷し、縦ひずみと横ひずみを読み取って偏心の程度を確認し、偏心が大きい場合は除荷して球座の調整を行った後に再載荷した。

前述のように、ISRMでは加圧盤として曲面載荷盤を使用する方法を採用している。ISRMの指針の根拠になっている Mellor and Hawkes⁸⁾の実験では変動係数で4%程度の値が得られている。またすでに述べたように論拠となっている載荷点付近からの亀裂の発生についても議論が分かれている。このため本研究では著者らが試作した平面載荷盤を用いてできるだけ丁寧な実験を行うこととした。

5. 実験方法

本研究では、前述の要因に対する配慮が実験結果にどの程度の影響を及ぼすかを検討するため、Table 1に示す条件の下でのいくつかの実験を行った。

側面整形については、直径の変動を0.01 mm以内に側面整形を施した供試体とコアリング後側面整形をしない供試体とで比較した。試験機については、サーボ制御油圧試験機と通常のRayleigh式油圧試験機とで比較した。球座については、圧裂強度実験用に著者らが試作した球座と、コンクリートの圧縮試験用の備え付けの球座と、球座を用いずに載荷した場合について検討した。供試体の方向性については、今回行った載荷試験(Case A~D)ではすべて圧裂面を固定して載荷することとした。圧裂面を固定しない場合については、まずFig. 1(b)に示された資料から方向角にランダムに測定値を取り出し、これを同一方向からコアリングされた供試体の圧裂面を固定しない場合のデータ(Case E)とした。さらにFig. 1の全データを、ランダムにコアリングされた供試体の資料(Case F)として比較した。なお、球座の調整についてはCase AおよびCase Bのみについて行っている。

載荷に際して、荷重の偏心を測定する目的で供試体の端面中央部に長さ5 mmのクロスゲージを貼りつけた。

6. 実験条件と実験結果

Fig. 3に、弾性波速度の測定結果を示す。測定に用いたトランジェントレコーダーのサンプリング速度が50

Table 1 Experimental conditions.

Case	Number of specimens	Consideration of anisotropy	Testing machine	Waviness of surface	Spherical seats	Remarks
A	30	Yes	Servo-controlled	<0.01mm	Custom-made	Block A
B	30	Yes	Servo-controlled	<0.05mm	Custom-made	Block A
C	30	Yes	Conventional	<0.05mm	None	Block A
D	30	Yes	Conventional	<0.05mm	Equipped	Block A
E	24	No	Conventional	<0.05mm	Custom-made	Block B
F	72	No	Conventional	<0.05mm	Custom-made	Block B

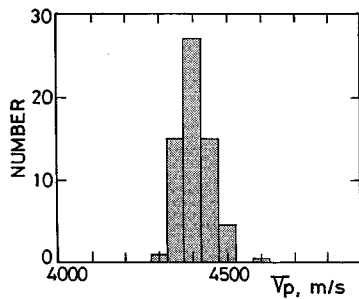


Fig. 3 A spatial distribution of the sound velocity propagating normal to the hardway plane. Because of small error in measurement, ± 10 m/s, this figure suggests that the variation of the sound velocity is due to its own property.

nsなので、測定結果には約 10 m/s の誤差が含まれる。図の弾性波速度の分布はこの誤差をはるかに超えて広がっている。したがって図の弾性波速度の分布は材料固有のばらつきを示しているものと考えられる。変動係数は 1.29 % である。

それぞれの実験条件で载荷した場合の圧裂強度の分布状況を Fig. 4 に示す。また Table 2 に各ケースの平均圧裂強度、標準偏差、変動係数を示す。Case A は、できるかぎり慎重に材料を準備し実験を行ったものであり、変動係数が 2.98 % である。Mellor and Hawkes⁹⁾ が曲面载荷盤を用いた実験精度の向上の証左として掲げている変動係数 4 % 台を考慮すれば、この値は十分に小さいといえる。Case B は、Case A と比較して側面整形をしない場合であるがこの場合も 3.65 % の変動係数で、側面整形をしたものとの差はわずかであり実験結果のばらつきは小さい。実験結果のばらつきは、(材料固有の強度のばらつき) と (供試体整形技術のばらつき) および (試験条件のばらつき) の相乗的な効果によって生じると考えられるが、Case A および Case B の結果は大島花崗岩固有のばらつきが小さいことを示している。この結果は同じ花崗岩という岩種についてこれまで報告されているもの²⁴⁾と比較してもかなり小さい。なお Case A と Case B では载荷時の球座の調整を行っている。

Case C は Rayleigh 式試験機を使用して、側面整形は特に行わずコアリング状態のままで圧裂面の固定のみを行って球座なしで载荷した場合である。測定値の分布にも若干の広がりが見られるが、変動係数は 4.38 % に収まっている。

これに対して Case D は、Case C においてコンクリート圧縮試験用の備え付けの球座を用いて球座の調整なしに载荷したものであり、Case A~C に比べて強度の平均値がきわめて小さく変動係数も 19.8 % と著しく大き

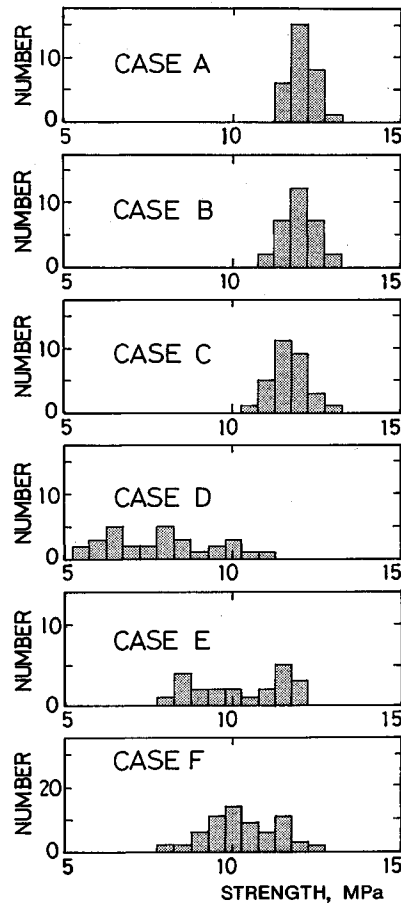


Fig. 4 Tensile strength distribution in each case. "Strength" is calculated from the conventional equation for diametral compression test, $2P/\pi dl$, where P is the applied load, d is the disc diameter and l is the disc thickness.

Table 2 Experimental results.

Case	Average Strength (MPa)	Standard Deviation (MPa)	Coefficient of Variation (%)
A	11.9	0.35	2.98
B	12.0	0.44	3.65
C	11.7	0.51	4.38
D	7.86	1.56	19.8
E	10.5	1.51	14.5
F	10.2	1.22	12.0

い。Case D が Case C と異なるのは備え付けの球座の使用の有無のみであり、圧裂強度実験結果のばらつきに球座の設計と载荷時の調整が非常に重要であることが示されている。しかし満足のいく球座の設計は必ずしも容易でなく、また载荷時の調整ははなはだ経費と時間を要する。したがって実際上それが困難な場合は、異方性軸を考慮し圧裂面を固定して球座なしで载荷した方がはるかに良好な結果が得られることが認められる。

圧裂面を固定しない場合は、Case E にみられるように、同じ方向からコアリングされた供試体に対してもかなりのばらつきが認められる。またコアリングの方向を考慮せず、ランダムにコアリングした場合にも、Case F にみられるように大きなばらつきを生じるものと考えられる。通常、花崗岩では異方性が認められている^{19)~23)}ので、花崗岩を用いた圧裂強度実験において異方性を考慮することが重要である。

以上の実験結果より、圧裂強度実験結果に大きな影響を及ぼす要因として圧裂面の固定と球座の設計が挙げられる。これに対して側面整形は、慎重にコアリングされた供試体の側面であれば、厳密な側面整形を行ったものと比較しても実験結果にさほど影響を及ぼさない。またサーボ制御機能を有しない試験機であっても良好な結果を得ることが可能である。

7. 考 察

圧裂下での岩石の強度特性についてさらに詳しく調べるために、Case A および Case D の供試体について、代表的な応力-ひずみ曲線をそれぞれ Fig. 5 (a) および Fig. 5 (b) に示す。応力は等方性を仮定した慣用式に従っ

て算出したものである。ひずみは、供試体両端面中央に貼られた長さ 5 mm のクロスゲージの出力で、縦ひずみと横ひずみそれぞれ 2 枚ずつについて示したものである。なお本研究で縦ひずみとよぶのは载荷軸と平行に貼られたひずみゲージの出力であり、横ひずみとよぶのは载荷軸に垂直に貼られたひずみゲージの出力によるものである。それぞれのひずみの相対的な位置関係が明らかになるように、同じ側面から得られたひずみについては同じマークが使用してある。縦ひずみはいずれの場合も载荷の初期から比較的線形に近い挙動を示している。また一軸圧縮試験同様破断点の近傍でも縦ひずみの顕著な変化は認められない。Fig. 5 (a) は、比較的強度が高い場合で、縦ひずみ、横ひずみともに、供試体の両端面で、最大荷重付近までよく一致している。Fig. 5 (b) は、縦、横いずれのひずみも低荷重域から不一致を示している場合で、縦ひずみの大きくなっている側面が横ひずみも大きく、荷重載荷面内における荷重の偏心を示唆している。

そこでその偏心を偏心荷重を受ける短柱の構造力学的取り扱いに従い、それぞれのひずみを軸荷重によるひずみと偏心による曲げ成分の寄与分と考えられるひずみに分離して考える。具体的には縦ひずみ、横ひずみの各荷

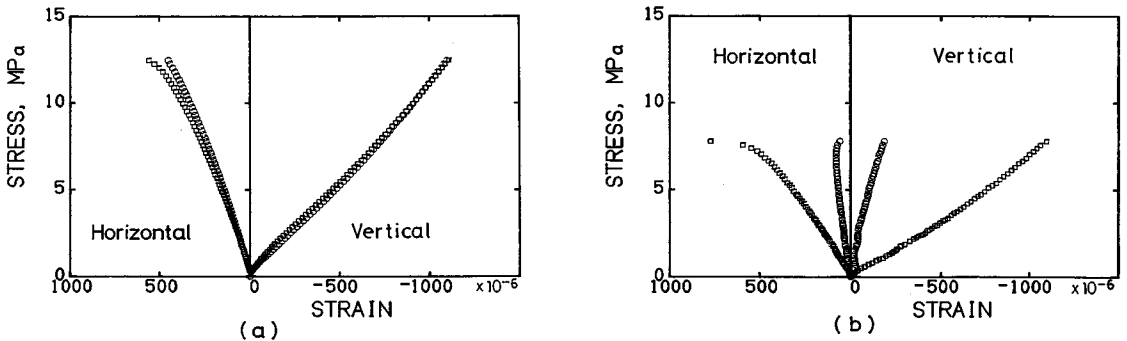


Fig. 5 Vertical and horizontal strains measured in the middle of the end surfaces (see Fig. 2). Fig. 5 (a) was obtained from one of the experiments for Case A and Fig. 5 (b) was from Case D.

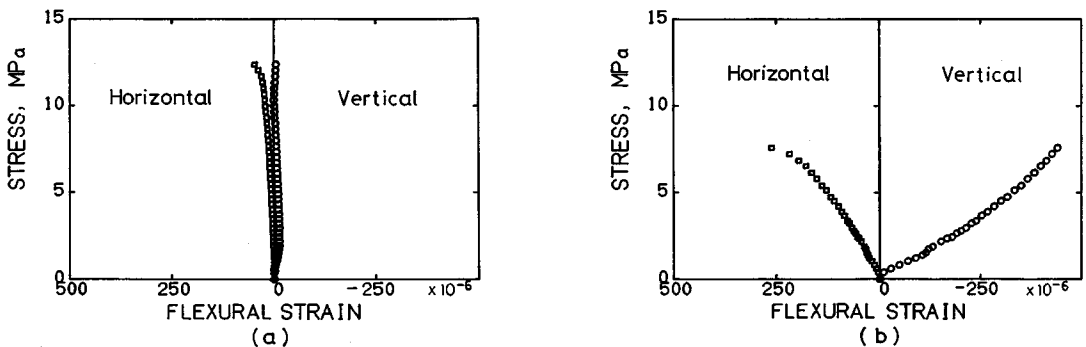


Fig. 6 Flexural strains calculated by subtracting the measured strains from the mean value of the strains on both sides. Figs. 6 (a) and 6 (b) correspond to Figs. 5 (a) and 5 (b), respectively.

重段階における平均値からの偏差成分を求め、これを曲げ成分による寄与と考える。縦ひずみの偏差成分を負、横ひずみの偏差成分を正として図に示す。以後このひずみを偏差ひずみとよぶ。Fig. 6 はこうして得られた偏差ひずみを Fig. 5 に対応させて示したものである。縦ひずみの偏差成分は前述のように曲げ成分の程度を示しているものと考えられる。

偏差ひずみと応力の関係を各ケースについてまとめた

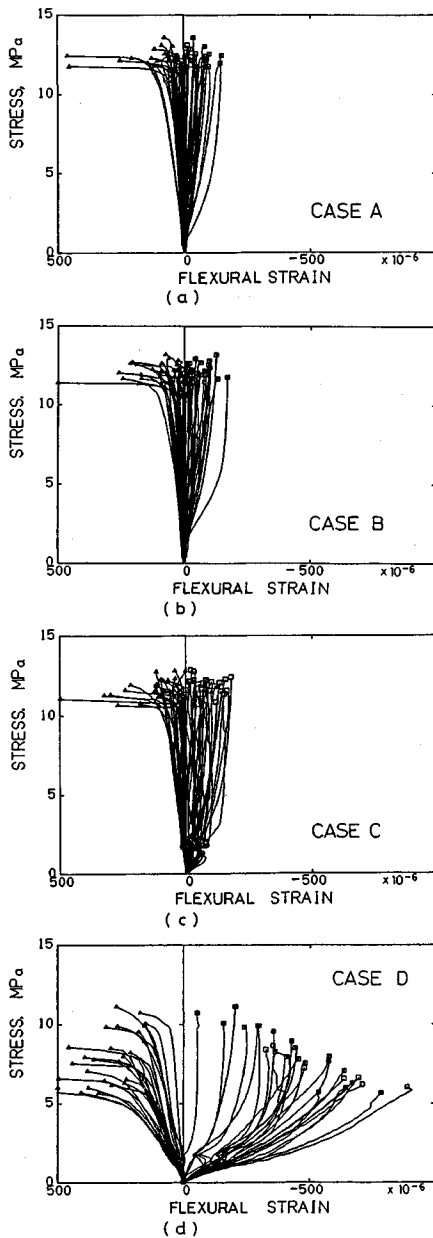


Fig. 7 Flexural strains in each case. High strength corresponds to minute scattering.

ものが Fig. 7 である。強度のばらつきの小さい Case A は偏差成分も相対的に小さく、逆にばらつきの大きい Case D は偏差ひずみもかなり大きい。さらに Case D についてみると、特に縦ひずみの最大偏差ひずみと圧裂強度との間に負の相関があることが認められる。すなわち偏心が大きい場合には圧裂強度は曲げ成分の影響を受け、試験結果から得られる強度が著しく低下する。以上のように大島花崗岩においては、载荷における偏心を小さくしかつ圧裂面を固定すれば、ばらつきの小さい圧裂実験結果が得られた。

ここで圧裂試験における破壊機構を検討するため、「体積ひずみ」の概念を導入して検討する。ただし供試体軸方向のひずみは、縦ひずみと横ひずみを計測している供試体中央部では計測できないためこれを 0 と仮定して体積ひずみを計算した。この計算は平面ひずみ状態を仮定することと等しい。実際の応力状態は平面ひずみ状態と平面応力状態の中間の値をとるものと考えられるが、この状態を厳密に評価する際に材料の性質に関する新たな仮定が必要となる。このため直接計算が可能な応力状態を仮定した。

計算結果の一例を Fig. 8 に示す。体積ひずみは一軸圧縮実験の場合と似た挙動を示している。すなわち体積ひずみは最大荷重点に至る前に、変化率が収縮から膨張へ転じるようになり、線形弾性からの逸脱と考えられる挙動を示すようになる。圧縮強度実験の場合はこの逸脱成分が载荷に伴う微小クラックの生成と集積から説明されている。Fig. 9 は圧裂実験の場合もこれと同様な機構から説明されることを示唆している。また Fig. 8 で明らかのようにこの逸脱が主に横ひずみによってもたらされていることも、载荷軸方向の微小クラックの生成と集積に対応しているものと考えられる。すなわち圧裂による破

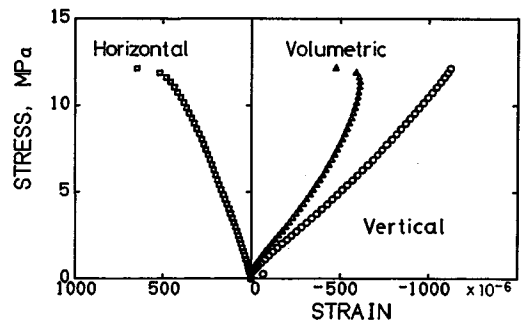


Fig. 8 Typical vertical, horizontal and volumetric strains for Case A under diametral compression. Volumetric strain is defined as the sum of vertical strain and horizontal strain. The deviation of volumetric strain from linearity near the final stage suggests the generation of stress-induced microcracks.

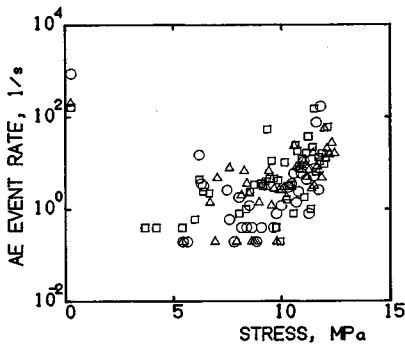


Fig. 9 Event rate of acoustic emissions observed on three specimens for Case A experiments.

壊が1個あるいは数個の欠陥によって決定されるのではなく、かなりの数の微小クラックの集積によってもたらされることを示しているものと考えられる。このことはAEの測定によっても裏付けられる。Fig. 9はCase Aの3例についてAEの測定結果を示したものであるが、強度の1/2程度の応力下からAEの発生が認められる。AEの震源位置決定はなされていないが、これは直接引張荷重下でも微小クラックの生成と集積によるクラックの安定成長域の存在を認めた Bieniawski²⁵⁾ や Peng²⁶⁾ の指摘とよく一致している。このように、最終的な破断面の形成に先立つ微小クラックの生成と集積を考慮することにより圧裂強度のばらつきが小さいという事実を説明することができる。

圧裂による最終破断面の形成が、かなり短時間のうちに行われることが指摘されている¹⁵⁾が、横ひずみやAEの観測から推定されるように、破断面の形成に先だって多数の微小クラックが発生するものと考えられる。実験では、Fig. 5(b)に認められるように、供試体の一方の側に貼られた横ひずみの方に非線形的増加が認められることが多く、これはクラックの生成が一方の側に偏っていることを示しているが、その詳細な検討は別の機会に譲る。

8. おわりに

本研究では、圧裂強度実験における強度のばらつきについて大島花崗岩を用いて検討を行った。これまで圧裂強度実験法による引張強度は、かなり大きく変動するという報告がなされてきた。しかし大島花崗岩を用いて行った本研究で明らかにしたように、試料の準備から試験の実施に至るまでの過程で慎重な実験を行えば、ばらつきの小さな実験結果を得られることが明らかになった。これは圧縮強度実験¹⁾と同様に実験データの大きなばらつきの主要因が材料固有のばらつきによるものでなく、実験条件や実験方法によって生じることを示すもの

である。本研究で用いた大島花崗岩は、室内実験でよく使用される岩石であり、典型的な花崗岩の一種である。したがって本研究で得られた結果は、大きな欠陥のない花崗岩一般に成り立つものと考えられる。具体的には、ばらつきの小さい実験結果を得るためには、異方性軸を考慮することが必要である。さらに球座の設計の良否および載荷時の球座の調整は実験結果に大きな影響を及ぼす。このため圧裂試験用の適切な球座が使用できない場合あるいは載荷時の球座の調整が困難である場合は、球座を用いずに直接載荷の方がよりよい実験結果を得ることができる。

本研究を進めるにあたり大島石協同組合には花崗岩の入手に対して多大なご援助をいただいた。また徳山高専講師 橋本堅一氏、徳山高専技官 山本秀喜氏および市川秀之氏(現・佐賀大学)には実験の援助や試料整理をお願いした。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 佐野 修・工藤洋三・古川浩平・中川浩二：岩石の一軸圧縮強度実験結果のばらつきに関する研究，土木学会論文集，第388号/Ⅲ-8，pp.141~150，1987。
- 2) Unpublished data
- 3) たとえば，Hawkes, I., Mellor, M. and Garipey, S. : Deformation of rocks under uniaxial tension, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.10, pp.493~507, 1973.
- 4) Amedei, B. et al. : *Proc. 5th Int. Congr. on Rock Mech.*, Melbourne, pp.189~196, 1983.
- 5) 佐野 修：応力腐食による岩石内のクラック伸長現象の異方性に関する理論的考察，*材料*，37, 413, pp.159~165, 1988.
- 6) Hooper, J.A. : The failure of glass cylinders in diametral compression, *J. Appl. Phys. Solids*, Vol.19, pp.17~200, 1971.
- 7) Hudson, J.A., Brown, E.T. and Rummel, F. : The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.9, pp.241~248, 1972.
- 8) Mellor, M. and Hawkes, I. : Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli, *Eng. Geol.*, Vol.5, pp.173~225, 1971.
- 9) ISRM Commission on standardization of laboratory and field tests, Suggested Methods for determining tensile strength of rock materials, Part 1, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.15, pp.99~103, 1978.
- 10) Colback, P.S.B. : An analysis of brittle fracture initiation and propagation in the Brazilian test, *Proc. 1st Int. Congr. on Rock Mech.*, Lisbon, pp.385~391, 1966.
- 11) Brown, E.T. and Trollope, D.H. : The failure of linear brittle materials under effective tensile strength, *Rock Mech. Eng. Geol.*, Vol.5, pp.229~241, 1967.
- 12) Yanagidani, T., Sano, O., Terada, M. and Ito, I. : The observation of cracks propagating in diametrically-

- compressed rock discs, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 15, pp. 225~235, 1978.
- 13) Hondros, G. : The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete, *Aust. J. Appl. Sci.*, Vol. 10, pp. 243~268, 1959.
- 14) たとえば, 淡路英夫・佐藤千之助: ヘルツの接触圧を考慮した圧裂引張応力, *材料*, 第 27 巻, pp. 336~341, 1978.
- 15) Fairhurst, C. : On the validity of the Brazilian test for brittle materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 1, pp. 535~546, 1964.
- 16) McClintock, F. A. and Walsh, J. B. : Friction on Griffith cracks in rocks under pressure, *Proc. 4th U. S. Nat. Congr. Appl. Mech.*, pp. 1015~1021, 1962.
- 17) 佐藤嘉晃: 圧裂試験における破壊開始位置と破壊荷重についての Griffith 理論による検討, *材料*, 第 36 巻, 第 410 号, pp. 1219~1224, 1987.
- 18) 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.
- 19) 柳谷 俊・西山 哲・寺田 孚: 花崗岩のダイラタンシー異方性について, *土木学会論文集*, 第 382 号/Ⅲ-7, pp. 63~72, 1987.
- 20) Dale, T. N. : The commercial granite of New England, *Bull. U. S. Geol. Surv.*, No. 738, pp. 22~103, 1923.
- 21) Osborne, F. F. : Rift, grain and hardway in some Precambrian granites, Quebec, *Econ. Geol.*, Vol. 30, pp. 540~551, 1935.
- 22) 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.
- 23) 工藤洋三・橋本堅一・佐野 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.
- 24) Yamaguchi, U. : The number of test-pieces required to determine the strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 7, pp. 209~227, 1970.
- 25) Bieniawski, Z. T. : The phenomenon of terminal fracture velocity in rock, *Rock Mech. Engng. Geol.*, Vol. 6, pp. 113~125, 1968.
- 26) Peng, S. S. : A note on the fracture propagation and time-dependent behavior of rocks in uniaxial tension, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 12, pp. 125~127, 1975.

(1988. 5. 2・受付)