

(19) 花崗岩の圧裂試験の精度と強度分布

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

1. はじめに 岩石の力学的性質の評価や、岩盤物性評価の一手法として圧縮強度試験や引張強度試験は代表的な試験法であり、これらの試験を工学的に有用なものにするために、精度の良い試験結果が期待される。これまで一般に、岩石試験の結果には相当なばらつきが生ずるものと考えられていた。筆者らは、岩石の圧縮強度試験における強度分布を明らかにする目的から、北木島花崗岩を用いて一軸圧縮強度試験を行い、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ないことを明らかにした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、30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供試体の寸法は、粒形や先在クラックの大きさに対して若干の問題を有していたため、さらに細粒な花崗岩に対しては、より良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試験では1%以下の変動係数が得られる(未発表)。岩石の圧縮強度試験における岩石固有のばらつきがかなり小さいという事実は、花崗岩のみならず多くの岩石に該当するものであると考えられる。

圧縮強度分布におけるこうした傾向を認めた後も、引張強度の分布に対してはなおかつかなりのばらつきが生じるという考えは根強い。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いるようである。本研究では、代表的な岩石の引張強度試験法として圧裂試験を取り上げ、大島花崗岩について可能な限り入念な方法で実験を行い、これといくつかのパラメータを変動させて実験を行ったものとの実験精度について比較検討した。

2. 圧裂試験におけるいくつかの問題点 圧裂試験は試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、材料の性質に一定の仮定が必要となることである。圧裂試験の慣用式は等方弾性体を仮定しているが、ほとんどの岩石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。Amadei²⁾は横異方性(transversely isotropic)材料について、圧裂試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。

2番目の問題点は、載荷によって生じる応力分布が圧縮試験のように一様分布とはならず、接触角の関数となることである。圧裂試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分布荷重となる。分布荷重を受ける等方弾性体の円盤の圧裂についてはHondros³⁾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⁴⁾。それによれば、分布荷重による接触角が増すほど圧裂予定面の応力分布の慣用式からのズレは大きくなる。また佐藤⁴⁾は接触角と破壊荷重との関連について検討し、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。

第3に、圧裂強度の慣用式を用いるためには破断面が供試体中央部から形成される必要があることである。これに対してHooper⁵⁾がガラスについて行った圧裂試験、およびHudson et al.⁶⁾が花崗岩と大理石で行った圧裂試験では、初期亀裂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 Hawks⁷⁾は曲面形の載荷装置を用いることにより載荷幅を増加させることを提案し、これはISRMの指針⁸⁾に採用されている。Yanagidani et al.⁹⁾は、平板載荷の圧裂試験においてひずみゲージとトランジェントレコーダーを用いてクラックの観察を行い、圧裂試験における初期クラックが、圧裂の慣用式を適用できる領域から発生していることを明らかにしている。事実Mellor and Hawkes⁷⁾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。このように圧裂強度は一軸引張強度の指標として十分に有用なものであると考えられる。また岩石の異方性軸を評価したり¹⁰⁾異方性材料の弾性率

を決定することができる¹¹⁾ので、圧裂試験において異方性を考慮することは若干煩わしさが加わるが可能である。しかしながら、簡便さが最大の長所である圧裂試験に対してこうした複雑さを持ち込むことについては現在のところ多くの問題が残されている。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力として解釈したほうが圧裂試験の目的にかなっていると考えられる。当然のことではあるが、このことは、圧裂試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行こうとする努力と矛盾するものではない。

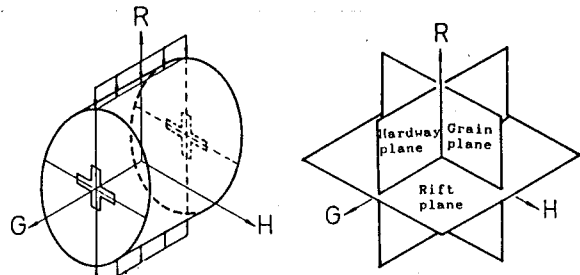


図-1 実験の模式図

3. 試料 実験に用いた試料は、愛媛県伊予大島産の比較的細粒な花崗岩である。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ずる¹²⁾¹³⁾が、異方性の程度は岩石ごとに異なる。この岩石と同じ採石場から採取された岩石の圧裂強度の異方性についてはすでに報告している¹³⁾。そこでは、それぞれの角度に対する供試体数はたかだか2個であったが、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た。本研究ではこの試験結果を参考にクラックの影響を比較的受けないと考えられるhardway面を圧裂することとした(図-1参照)。供試体の直径、厚さはそれぞれ43mm, 22mmである。

4. 実験方法 本研究では、圧裂試験において実験結果に影響を与えるパラメータとして異方性軸の考慮、側面整形、試験機の良否、球座の良否を取り上げ、それぞれの影響について検討することとした。実験の内容についてまとめたものが表-1である。

表-1 実験条件

Case	A	B	C	D	E
異方性軸	○	○	○	○	×
試験機	○	○	×	×	×
側面整形	○	×	×	×	×
球座	○	○	×	△	○
供試体数	30	30	30	30	72

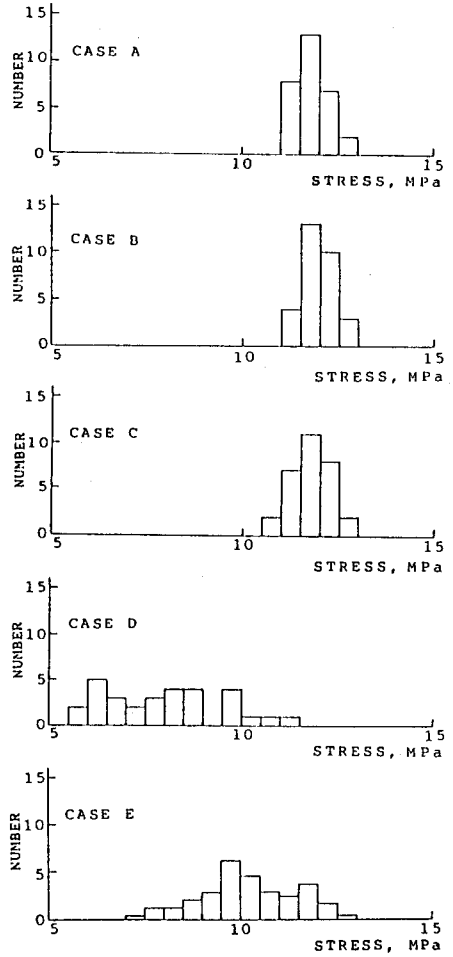


図-2 実験結果

異方性軸については全て考慮することとしたが、異方性軸を考慮しない場合については、筆者らがすでに報告した資料から方向角に無関係に全データをとり出し、これをランダムにコアリングされた供試体の資料として比較した。試験機については、サーボ制御が可能な試験機(○)とアムスラー型の試験機(×)で比較した。球座については、圧裂試験用に筆者らが試作した球座(○)¹³⁾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。さらにCase AおよびCase Bについては、低荷重でいったん載荷し、縦ひずみと横ひずみを読み取って偏心の有無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ている。

5. 実験結果 実験結果をまとめて、図-2に示す。また表-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、考えられる限り丁寧に材料を準備し実験を行ったものであるが、変動係数が2.98%である。Mellor

表-2 実験結果

Case	A	B	C	D	E
平均値 (MPa)	11.9	12.0	11.7	7.86	10.2
標準偏差 (MPa)	0.35	0.44	0.51	1.56	1.22
変動係数 (%)	2.98	3.65	4.38	19.8	12.0

and Hawkesが曲面載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変動係数で3.65%である。側面整形をしたものとの精度の差はわずかである。Case AおよびCase Bの結果は圧縮試験同様、圧裂試験においても材料固有の強度のばらつきは従来考えられていた程大きくないことを示している。

Case Cはアムスラー型の試験機を使用して、側面整形を行わず異方性軸のみを考慮して、球座なしで載荷した場合であり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%に収められている。このことは異方性軸を考慮するだけで実験結果に相当の精度が期待できることを示している。

これに対してCase Dは、Case Cと比較してコンクリート圧縮試験用の備え付けの球座を用いたものであるが、Case A~Cに比べて強度の平均値が極めて小さく変動係数も19.8%と大きい。このことは、球座の設計がかなり重要であることを示唆している。すなわち、球座の設計に当たっては供試体と試験機との接触幅を考慮して正確に設計しなければならないが、実際上それが不可能な場合は、異方性軸のみを考慮して球座なしで載荷した方が、中途半端な球座を使用するよりも良好な結果が得られることを示している。異方性軸を考慮することの重要性は、Case Eの結果からも明らかである。

6. 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Fig. 2に代表的な応力-ひずみ曲線を示す。ひずみは、供試体中央に貼られた長さ5mm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枚ずつの出力で、圧縮ひずみを正にしている。それぞれのひずみの相対的な位置関係が明かになるように、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。応力は等方性を仮定した圧裂強度の慣用式から算出したものである。縦ひずみはいずれの場合も載荷の初期から比較的線形の挙動を示し、圧縮強度試験で認められるような非線形領域はほとんどない。これは供試体中央部のひずみのみを計測しているためで、内蔵の変位計より得られた変位にはクラックの閉塞によると考えられる明瞭な非線形領域が認められる。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

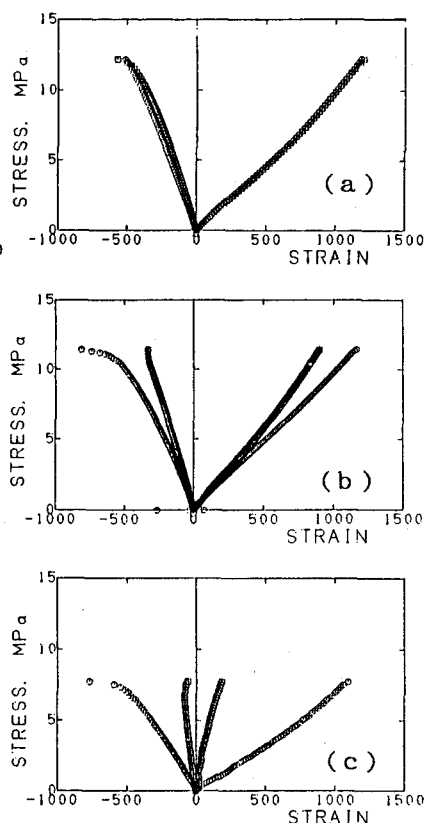


図-3 応力-ひずみ図

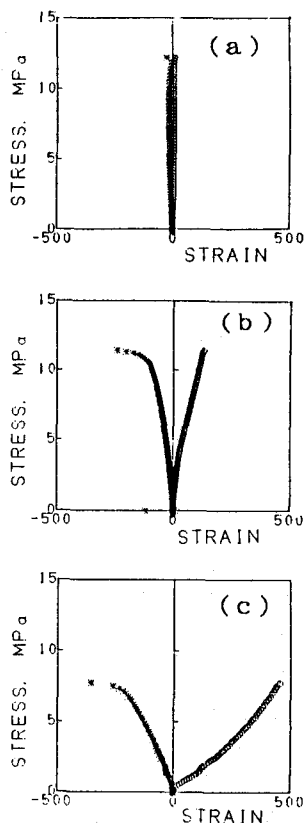


図-4 応力-曲げひずみ図

認められない。図-2(a)は、比較的強度が高い場合で、縦ひずみ、横ひずみともによく一致している。図-2(b)は図-2(a)よりすこし強度の低い場合で、いずれのひずみも低荷重下からかなりの不一致を示しており、縦ひずみの大きくなっている側面が横ひずみも大きく、荷重の偏心を示唆している。図-2(c)はさらに強度が低い場合で、図-2で認められた傾向がさらに拡大されている。

荷重の偏心の影響を調べるために、計測された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分と考えて、縦ひずみの偏差成分を正、横ひずみの偏差成分を負として図上に展開する。図-4はこうして得られた偏差ひずみを図-3に対応させて示したものである。縦ひずみの偏差成分は主に曲げ成分を示しているものと考えられる。これに対して横ひずみは破断予定面に関して直角方向に貼られているため、引張応力によって生じるクラックに敏感であると考えられる。したがって横ひずみの偏差成分の増加はクラック生成が一方の側に偏っていることを示す。この偏差ひずみと応力の関係をCase Dについてまとめたものが図-5である。図より明らかなように、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、材料に固有の強度が与えられない。このことは精度の良い試験をする上でこうした荷重の偏心を小さくすることが重要であることを示している。

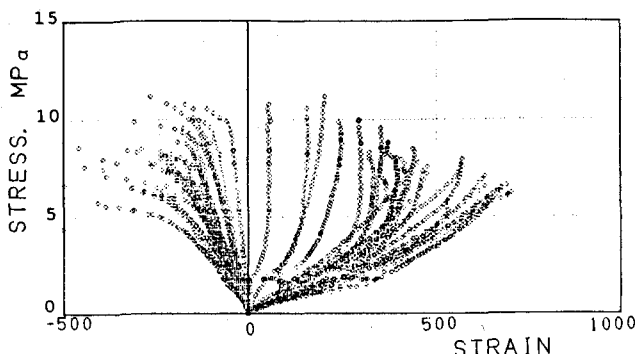


図-5 Case D の応力-曲げひずみ図

7. おわりに 本研究では、大島花崗岩を用いて圧裂試験における強度分布について検討を行ってきた。これまで圧裂試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され定説化されてきたが、異方性を考慮するとともに丁寧な実験を行うことにより、高い精度の実験結果を得ることができることが明らかになった。これは実験データのばらつきは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ずることを示すものである。

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君（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 修他, 土木学会論文集, 第388号, III-8, 1987.
- 2) Amedei, B. et al., Proc. Int. Congress in Rock Mech., 189-196, 1983.
- 3) Hondros, G., Aust. J. Appl. Sci., 10, 243-268, 1959.
- 4) 佐藤嘉晃, 材料, 第36巻, 第410号, pp.1219-1224, 1987.
- 5) Hooper, J. A., J. Appl. Phys. Solids, 19, 17-200, 1971.
- 6) Hudson, J. A. et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., , pp.241-248, 1972.
- 7) Mellor, M. and I. Hawkes, Eng. Geol., 5, 173-225, 1971.
- 8) 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. & Geomech. Abstr., 15, 99-103, 1978.
- 9) Yanagidani, T. et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15, 225-235, 1978.
- 10) 工藤洋三他, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.43-48, 1987.
- 11) 佐野修他, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.49-54, 1987.
- 12) S. Peng and A. M. Johnson, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, 37-86, 1972.
- 13) 工藤洋三他, 土木学会論文集, 第370号, III-6, PP.189-198, 1986.

(19) Tensile strength distribution in diametral compression test

Yozo KUDO*
Osam SANO**
Kohei FURUKAWA**
Koji, NAKAGAWA**

ABSTRACT

From the practical point of view, the diametral compression test plays a major role as an alternative to the uniaxial tensile test. Up to now, the concept that the tensile strength of rocks exhibits a wide variation, even though experiments are performed carefully, has been dominant. In the previous report, the authors showed that compressive strength resulting from carefully arranged experiments covered a limited range. But some people have suggested that this result should not be extrapolated into the tensile stress field because of its sensitivity to defect structures.

To check what the major parameter that scatters tensile strength is, several kinds of diametral compression tests were performed using Oshima granite. One of them was as carefully an arranged experiment as we could possibly do. Another one was a roughly arranged experiment, which is probably normally used. Between these two extremes, there were three kinds of experiments varying in some parameters. Tensile strength for carefully arranged experiment showed minute scattering, but it is very important to fix the split plane with respect to the axes of anisotropy, at least for granitic rocks and that the design of the spherical seat is also important. An attempt was made to establish optimum test procedure.

* Tokuyama College of Technology, Tokuyama
** Yamaguchi University, Ube