

(60) 花崗岩の異方性が力学的性質に及ぼす影響

徳山高専

工藤洋三

徳山高専

橋本堅一

山口大学工学部

中川浩二

1. まえがき

一般的に等方性材料として扱われている花崗岩にも異方性が存在することは以前から知られており、その異方性は花崗岩造岩鉱物内の潜在クラックの方向性に依存するとされているようである。すなわち古くは Osborne (1935)¹⁾ により花崗岩の圧縮強度の異方性が指摘されており、この異方性は潜在クラックの配向性から説明している。さらに McWilliams (1966)²⁾ は Salisbury 花崗岩を用いて P 波の伝播速度と圧裂面の方位角を変化させた圧裂試験を行っており、P 波の伝播速度と圧裂引張強度の間に相関が存在すること、それらの値が極値をとる面に point load test による選択的な破壊面が形成されることを述べている。Douglass ら (1969)³⁾ と Peng (1972)⁴⁾ は潜在クラックが卓越して配向する面を正確に考慮して花崗岩の変形挙動を追跡しており、変形挙動に非線形性と異方性をもたらす原因と潜在クラックの選択的配向面の存在に求めている。なかでも Peng らは grain plane および hard way plane 内の圧裂強度の異方性と比較的細かい角度で測定している。この Chelmsford 花崗石での測定によれば、hard way plane 内で 23%, grain plane 内で 41% の異方性が存在することが示されている。また佐野⁵⁾ ら (1982) は一軸圧縮試験時の花崗岩の破壊挙動にもこの選択的に配向した潜在クラックが大きな役割を果たすことを明らかにしている。これらの研究により、花崗岩の力学的性質に異方性をもたらす主要原因が潜在クラックの選択的配向性によることは明らかである。しかしながら、たとえばこれまで報告されている花崗岩の圧裂試験結果は実験精度の記述に欠けるものや、潜在クラックの選択的配向面内とこれに直交する他の面内での系統的な測定を欠いているものが多い。また圧縮強度と引張強度などの異方性の長われ方も造岩鉱物の種類と組成、粒径と過去の応力場の影響とうけて変化するものと考えられる。したがって岩盤力学的な立場からこの花崗岩の異方性という問題を考える場合に重要なことは、潜在クラックの方向と密度と圧縮強度と引張強度などの力学的性質の間にどのような相関があるかを知ることであろう。筆者らは現在花崗岩の潜在クラックの異方性が一軸圧縮強度と引張強度の異方性に与える影響について研究を進めているが、本研究ではまず比較的潜在クラックの選択的配向性が顕著な花崗岩について圧裂試験を行い、引張強度の異方性について検討する。さらに潜在クラックの異方性を表わす量として比較的計測が容易な P 波の伝播速度の異方性 $(V_{pmax} - V_{pmin}) / V_{pmax} \times 100$ を考え、これと圧裂強度および圧裂強度の異方性との関係について検討を加える。なお以下の文中においては、石材加工の際に最もわれやすい面と R 面 (rift plane)、2 番目にわれやすい面と G 面 (grain plane)、両者に直交する面と H 面 (hard way plane) とし、これらの面に垂直な軸をそれぞれ R 軸、G 軸、H 軸と略記する。したがって R 面内の P 波の速度という場合は R 面に平行に伝播する供試体に関するものであり、R 面内の圧裂試験という場合は圧裂面が常に R 面に対して垂直な供試体に関するものである。

2. 異方性岩石の圧裂試験における問題点

岩石やコンクリートなどの引張強度を求める方法として、供試体作製の容易さや試験の簡便さから圧裂試験による方法が広く用いられているが、異方性岩石の圧裂試験を行おうとする場合、等方性材料の場合には存在しない異方性岩石固有の問題が生じてくる。一つは潜在クラックの選択的配向面の影響下で、圧裂強度と一軸引張強度が一致するかどうかという問題である。Hawks ら (1972)⁶⁾ は、Barre 花崗岩を含む数種の岩石について圧裂試験を行い両者がよく一致することを明らかにしており、彼らの主張は ISRM 指針に全面的にとり入れられている。しかし花崗岩の潜在クラックの配向面に関する記述は直接には見当たらない。すなわち任意の方向のコアサ

ニプルから同様の結果が得られるかについては明らかでない。

いま一つの問題は、異方性岩石の引張強度が、等方性材料を仮定して得られた圧裂強度の慣用式 ($\sigma_c = 2P/\pi d l$ (σ_c : 引張強度, P : 破壊荷重, d : 供試体直径, l : 供試体長さ)) によって正しく表現されるかどうかという問題である。Amadeiら(1983)⁷⁾は積層異方性材料と想定して圧裂試験時の引張強度と解析的に求め、真の圧裂強度は慣用強度に応力集中度数 α を乗じた値 $\sigma_c = \alpha(2P/\pi d l)$ によ、て求まることを明らかにしている。同様の考え方から金等は圧裂試験のFEM解析を行い、慣用式による強度を修正している。

筆者らは現在、潜在クラックの配向面を考慮した一軸引張試験によ、て圧裂引張強度と一軸引張強度との関係と明らかにすることを試みているが、本研究では圧裂強度と一軸強度が一致するという前提で議論を進める。また後者の問題点については、潜在クラックの影響下で圧裂試験時の材料特性が十分には明らかにされてないため強度計算には慣用式を用いている。

3. 実験方法

実験に用いた供試体は山口県徳山市黒髪島産の花崗岩で、原料の寸法は約 $1m \times 1m \times 1.5m$ である。これから圧縮強度試験用の供試体と使用するために、潜在クラックの配向面を考慮して直径 $50cm$ 、高さ $20cm$ の円柱形状に加工し、これよりコアボーリングを行、て圧裂試験用供試体を作成した(写真1)。供試体直径は $43.4mm$ 、長さは $32mm \pm 3mm$ で供試体の端面はで整形してある。

P波の伝播速度は、固有振動数 $1MHz$ の圧電素子(PZT-7)を用いて圧裂試験用供試体の直径方向に $200kHz$ の矩形パルスを入力し、P波が伝播する時間間隔をトランジェントレコーダーに書きこむことによ、て求めた。サンプリング間隔は $50ns$ で増幅器は $0.1 \sim 2MHz$ と $60dB$ で増幅可能である。潜在クラックの配向面からの角度の変化による引張強度の変動を見るためそれぞれの面内で半円周を12分割して引張強度を求めるものとし、それぞれの角度について供試体を2個づつ準備した。P波の伝播速度と圧裂強度の相関をみるため角度については図-2に示すような表記法を用いている。

圧裂試験装置の概略を図-1に示す。載荷軸と圧裂面が同一平面内に入るように改良を加えたもので、本実験に先立って行われた同一コプルから作成された供試体(圧裂面がH面で4面が水平面内にある。)6個について得られた圧裂強度の変動係数は 3.0% であつた。載荷速度は約 $0.5kg/cm^2/sec$ である。

4. 実験結果および考察

実験によ、て得られたP波の伝播速度および圧裂強度とそれぞれの面の角度との関係を図-3 および図-4に示す。P波の伝播速度は、24個の供試体の中から任意に選ばれた供試体3個についてその円周方向に測定され

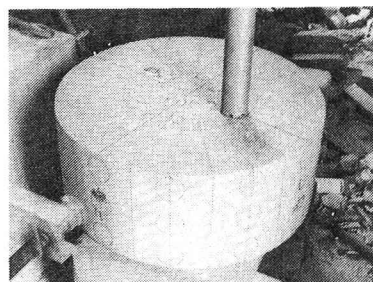


写真 1 圧裂用供試体のコアボーリング

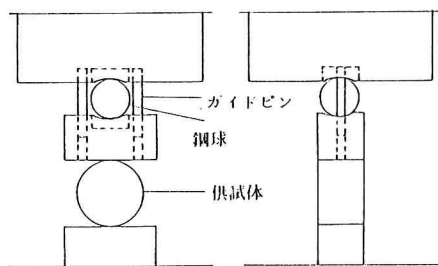


図 1 圧裂試験装置

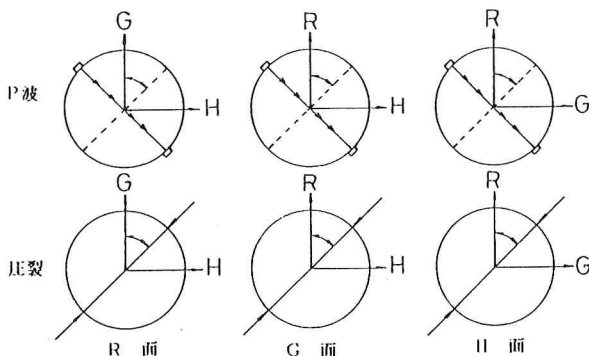


図 2 方位角の表記法

たものである。これによれば、いずれの面内でも同一の方位角に対してはほぼ一致した傾向を示しているが、若干の変動も認められる。図より明らかなようにG面内およびH面内の伝播速度に著しい異方性が認められ、それぞれの面内のR面に垂直に伝播する弾性波速度が最小値となっている。R面内の伝播速度には他の面ほどの異方性が認められない。また若干の差異ではあるがG面に垂直に伝播するP波の速度はH面に垂直に伝播するそれより小さい。このことから、R面が潜在クラックの顕着な選択的配向面で、G面は潜在クラックの選択的配向面ではあるがその力学的特性はH面に近いものと考えられる。

R面、G面、H面に関する圧裂強度は、R面が最も弱く、次にわずかの違いながらG面、H面の順となっており、石工職人の経験則とよく一致している。圧裂強度の最大値はH面の強度よりさらに大きく、両者の強度比は1.07となっている。ここでP波と圧裂強度の異方性を表わす量をそれぞれ $(V_{pmax} - V_{pmin}) / V_{pmax}$ $(\sigma_{tmax} - \sigma_{tmin}) / \sigma_{tmax}$ と定義してそれぞれの面内でのP波の伝播速度と圧裂強度の最大値、最小値、平均値、異方性を表-1に示す。図-3からも明らかなように圧裂強度の異方性はG面、H面で著しく大きくP速の伝播速度の傾向と一致している。さらに各面内での圧裂強度の平均値は、R面、G面、H面の順に大きい。すなわちR面内の場合は、G面内が垂直面に存在するため相対的に強度が大きくなり、H面内の場合はR面とG面が存在するため相対的な強度低下がみられるものと考えられ、花崗岩の強度特性に潜在クラックの選択的配向面の存

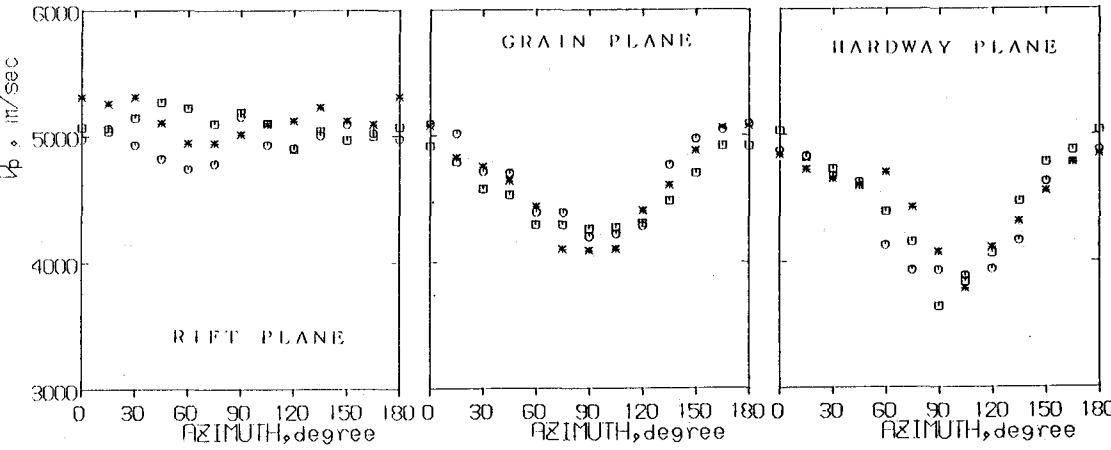


図-3 R、G、H面内でのP波の伝播速度

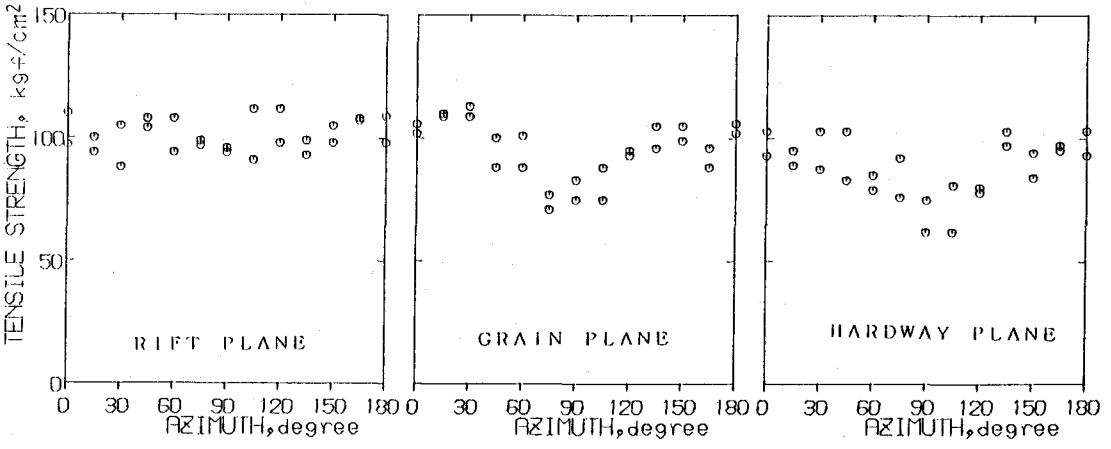


図-4 R、G、H面内での圧裂強度

	V_{pmax} (m/sec)	V_{pmin} (m/sec)	V_{pave} (m/sec)	$\frac{V_{pmax}-V_{pmin}}{V_{pmax}} \times 100$	σ_{lmax} (kgf/cm ²)	σ_{lmin} (kgf/cm ²)	σ_{lave} (kgf/cm ²)	$\frac{\sigma_{lmax}-\sigma_{lmin}}{\sigma_{lmax}} \times 100$
R	5128	4986	5055	2.7	108.1	94.9	100.8	12.2
G	5076	4094	4588	19.3	111.2	74.1	94.7	33.4
H	4955	3789	4410	23.5	100.3	68.9	87.3	31.3

表1 R, G, H面内の弾性波速度と圧裂強度の異方性

存在が深く分かって、いることが認められる。表-1から、全ての面内での圧裂強度の異方性を求めてみると38.0%となり、同じ材料について任意の方向から採られた供試体について実験を行、た場合、最大40%近い強度の変動を覚悟しなければならぬことになる。しかもこの異方性の程度は本研究で用いた材料に固有のもので、産地や採石場が変わればかなり異なることが予想される。一般に全ての花崗岩について本研究で行、たような実験を行うことは不可能であり、実用上の立場からすれば、より簡便な強度特性の推定法が要求される。そこで、P波の伝播速度と圧裂強度の間に存在する相関を調べるために、図-5に両者の関係を示す。

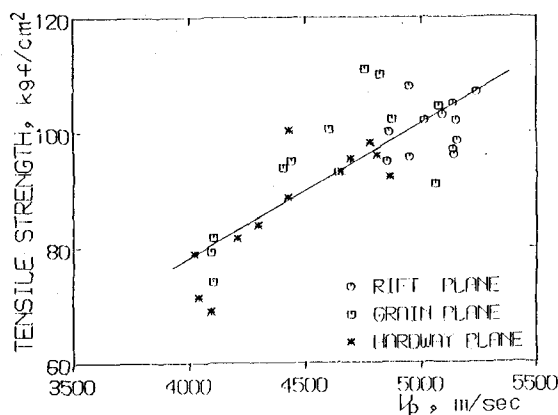


図-5 P波の伝播速度と圧裂強度の相関

さらに両者の間の相関係数を求めると0.81となり、かなり高い正の相関があることがわかる。表-1のそれぞれの面の異方性の程度がうも同様の傾向が認められる。このことは、P波速度の異方性を知ることによって、圧裂強度の異方性を推測することがある程度可能であることを示唆している。たとえば、G面内のP波の伝播速度の異方性と、相対的に高めの強度を与えると考えられるH面の圧裂強度から、圧裂強度の最大値、最小値、平均値などを予測することが可能であると考えられる。

5. あとがき

以上述べてきたように従来等方性という仮定のもとに扱われてきたものの多かつた花崗岩について、潜在クラックの選択的配向面を考慮して、P波の伝播速度および圧裂強度を測定してきた。その結果、潜在クラックの選択的配向面の存在によって圧裂強度とP波の伝播速度に著しい異方性が存在することが明らかになった。またP波速度の異方性と圧裂強度のそれの間にはかなりの相関があることが予想され、今後はこの点について研究を進めていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、黒髪石材(株)には原石の提供と円盤状への整形とお願いした。また徳山高専卒業生中野村智則、藤井政良の両君には端面整形の際、手伝っていただいた。記して謝意を表す。

(参考文献)

- 1) Osborne F. F., Quebec. Econ. Geol., 30, pp. 540-551 (1935).
- 2) McWilliams J. R., Am. Soc. Test. Mat., STP402, pp. 175-189 (1966).
- 3) Douglass, P. M. and Voight J., Geotechnique, 19, 376-398 (1969).
- 4) Peng S. S. and Johnson A. M., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, (1972).
- 5) 佐野修, 水田茂明, 岩本健, 地質学会秋季大会, C21, pp. 185 (1982).
- 6) Mellor M. and Hawkes I., Engng. Geol., 5, pp. 173-225 (1971).
- 7) Amadei B., Rogers J. D. and Goodman R. E., ISRM, pp. 189-196 (1983).
- 8) 金子勝比呂, private communication

(60) Tensile Strength Anisotropy of Granite

Yozo KUDO, Ken-ichi HASHIMOTO*

Koji NAKAGAWA**

Granite contains numerous preexisting cracks which are preferentially oriented along three mutually perpendicular planes. These planes are called as rift, grain and hardway plane in order of ease of splitting. The cracks significantly affect the mechanical property of granite. In this study we wish to report tensile strength anisotropy of granite and the correlation among the compressive wave velocity anisotropy and the tensile strength.

Kurokami granite was chosen for this test. Oriented drill cores were cut in three mutually perpendicular directions from large block of granite and the cores were cut into disks. Compressive wave velocity and tensile strength were measured for diametric direction at 15° intervals, from 0° to 180°. Anisotropy of compressive wave velocity is greater in the grain and hardway planes than in the rift plane.

Tensile strength anisotropy $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / \sigma_{\max}$ ranged from 12% to 33% in each planes. Therefore if we wish to examine the tensile strength of same block from the cores drilled arbitrary directions, we must consider same degree of change. There was a strong correlation among the anisotropy of compressive wave velocity and the tensile strength anisotropy.

* Tokuyama Technical College

** Yamaguchi University