

(90) 花崗岩における亀裂の進展特性と破壊靱性異方性

徳山高専	正会員	○ 橋本堅一
徳山高専	正会員	工藤洋三
京都大学工学部	正会員	矢富盟祥
山口大学工学部	正会員	中川浩二

Crack Propagation and Anisotropy of Fracture Toughness in Granite

Ken-ichi HASHIMOTO, Tokuyama College of Technology
Yozo KUDO, Tokuyama College of Technology
Chikayoshi YATOMI, Kyoto University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

Granite has three mutually perpendicular planes which have a preferred orientation of microcracks. These planes are called the rift plane, the grain plane and the hardway plane in the order of ease of splitting. For several kinds of granitic rocks, these three planes have a great difference in their physical properties, e.g. P wave velocity, tensile strength. In this study, first, we investigate the crack growing process in the rift plane and the hardway plane for Oshima granite. The investigation of crack propagation is performed by thin section analysis parallel to the two sections with a polarizing microscope. Second, we investigate anisotropy of fracture toughness in Oshima granite. Fracture toughness is measured in diametric directions at 15 degree intervals between the rift plane and the hardway plane normal to the grain plane. In result, cracks in Oshima granite grow mainly through microcracks and grain boundaries. Though crack propagation in the hardway plane is affected only by grain boundaries, that in the rift plane is affected by microcracks and grain boundaries. So it is considered that cracks in the rift plane propagate more easily than those in the hardway plane. Apparent fracture toughness (K_Q) is related to crack propagation. Thus, K_Q for cracks propagated in the hardway plane have the highest value, K_Q for cracks in the rift plane have the lowest value and K_Q for other directions have middle values. The difference between K_Q for the hardway plane and for the rift plane is nearly equal to $0.35 MPa\sqrt{m}$.

1. はじめに

岩石の力学的諸性質に関する研究は近年いろいろな立場から進められている。なかでも、破壊靱性は最も多くの関心をもたれているテーマの一つであり、これに関しては多くの報告がみられる。しかし花崗岩に対しては、微小亀裂の影響により亀裂進展の方向性を考慮する必要があるにもかかわらず、その方向性を考慮した報告は最近になって直行する2方向あるいは3方向のみを扱っているものが若干みられる程度である^{1) 2) 3)}。方向性を考慮にいたった報告の中には破壊靱性の異方性の度合いが十数%と比較的小さいものもあるが²⁾、60%近くに及ぶ大きいものもある³⁾。本研究では愛媛県大島産の花崗岩を対象として、まず異方性を決定づける3つの面のうち最も割れやすい面(rift面)と最も割れにくい面(hardway面)を伝わる亀裂の経路を観察した。そしてその2つの面を含む面内(grain面内)で15°間隔、すなわち7方向について破壊靱性試験を行い、その方向依存性について検討した。

2. 破壊靱性の評価について

岩石の破壊靱性を評価する場合、モードIの応力拡大係数に限れば大きく分けて(1)ASTMで定められた試験法に準拠した方法もしくはそれを修正した方法で評価する。一矩形供試体の3点曲げ試験、コンパク

トテンション試験-(2)原位置での供試体の採取の簡便性を考慮にいたした I S R M の指針に準拠した方法で評価する。-シェブロンベンディング試験, ショートロッド試験-(3)亀裂の伸張の立場から亀裂速度が無
限大になるところを見いだす。-ダブルトーション試験, ダブルカンチレバービーム試験 etc.- が考
えられる。(1)は供試体の準備も試験方法も比較的簡単ではあるが評価点すなわち評価時の荷重と亀裂長さを
得るのが非常に困難である。(2)は供試体そのものの採取は簡単ではあるが切り欠きの挿入や実験要領が煩
雑である。また無次元化したコンプライアンスを用いて評価点を決定するが, そのコンプライアンスの異方
性岩石への適用性に問題を有する。(3)は物理的意味が前の2つに比べて明瞭であるが実験条件の設定が可
なり困難である。これらのなかで本研究では異方性
の程度を相対的に比較することを目的とするため, 供
試体の準備から実験の実施まで総合的に判断して, 最
も簡単であると考えられる(1)の3点曲げ試験を用いた。

供試体寸法は供試体幅 W を 40mm として供試体厚さ B
は平面ひずみ試験が実現できる安全側という判断から
 $B = W$ とした。スパン間隔 S は $4W$ である。また切り
欠きは直線人工切り欠きとし, その幅は約 0.5mm である。
 1mm 程度の平均粒径をもつ大島花崗岩に対してこの程度
の寸法の供試体では寸法効果をかなりうけ, たとえば
写真-1 でみられるように荷重増加段階で初期切り欠
きからの亀裂の進展が認められる。しかし本研究では異方性
の相対的な程度を比較するという目的からそれに対する修正
は考えず, 便宜的に破壊靱性の算出には初期切り欠き長さ
と最大荷重を用いている。また異方性岩石の実験結果の解釈に
等方性解を用いることには問題があるが, 一般に弾性係数が
極端に異なる値をとらないかぎりその差は小さいことが知ら
れているため本研究では A S T M の式をそのまま用いている。
 W を 30mm と 50mm とし残りの諸量を同じ比にして本研究で用い
るタイプの寸法依存性を調べたものが図-1 である。ここで
は W が小さいほど破壊靱性は小さくなるという傾向がみられ
る。図-2 は同寸法で切り欠き長さをかえた供試体により切
り欠き長さに対する依存性を調べたものである。この図から
判断するかぎり, 切り欠き長さ a と供試体幅 W の比 a/W
が 0.2 で最も大きな値をとっているが顕著な違いはみられない
このようなばらつきも考慮してももう一つの重要なパラメータ
の切り欠き長さは一般的な a/W が 0.5 の他にその $1/2$ の 0.25
についても検討することにした。したがって切り欠き長さは
 20mm と 10mm としている。

3. 供試体の準備および実験

供試体は約 $45\text{cm} \times 45\text{cm} \times 60\text{cm}$ の愛媛県大島産の花崗岩の岩
塊からまず grain 面にそって幅 40mm の板を切り出す。次に rif
t 面を基準軸 (0°) として 15° 間隔で所定の方向に 40mm 幅も
って複数の角棒を切り出していく。したがって 0° の供試体と
は hardway 面を亀裂が進展するための供試体に対応している。
角棒切り出し時の一例を写真-2 に示す。この角棒はすべて
供試体の長さ 18cm にそろえられ, 切り欠き加工は最後に行う。
供試体数は各々 2 本ずつとして, 計 28 本である。

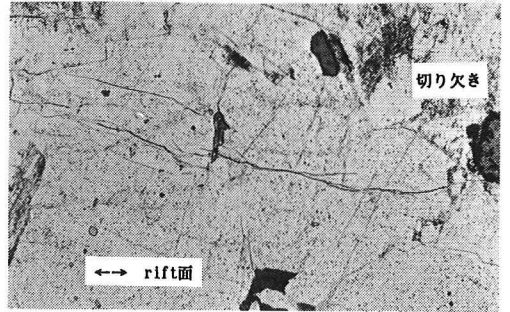


写真-1 荷重増加段階で切り欠きより発生する亀裂

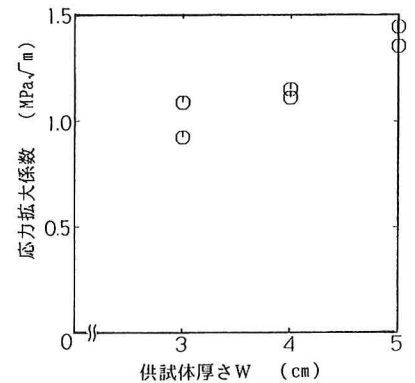


図-1 3点曲げ破壊靱性試験における寸法効果

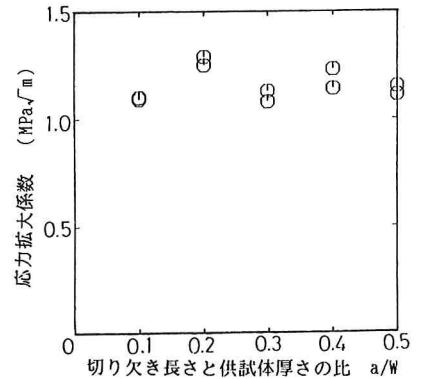


図-2 初期切り欠き長さが破壊靱性に与える影響

実験においてはサーボ制御機構を有する載荷装置（島津サーボパルサEHF-EUB30-20L）を用い、変位速度 $4 \times 10^{-4} \text{mm}$ の変位制御で 載荷している。計測量としては載荷荷重、載荷点変位、切り欠き先端の縦方向と横方向のひずみ、A E のイベントカウント、供試体の底面における亀裂開口変位の5つを扱っている。ここで載荷点変位については最大荷重時でも $5 \times 10^{-2} \text{mm}$ に満たない非常に小さい値になるため、線荷重の載荷における供試体のへこみも取り除けるように、供試体に差動型の変位計を取り付けるかたちで計測している。その様子を図-3に示すが、変位の生じないと考えられる支点のすぐ上の供試体部と載荷点の真下の供試体部の供試体長軸に垂直な方向の距離の変化をとらえるしくみになっている。

3点曲げ破壊靱性試験における結果のばらつきの原因としては大きく分けて(1)岩石固有のばらつき、(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つが考えられ、結果の誤差はそれらの複合的な効果として生まれる。(1)の要因で結果がばらつくことは十分に予想され、特に本実験で用いる供試体寸法が比較的小さくしかも幅40mmにわたる切り欠き先端から亀裂が発生することを考えれば、これによる影響はある程度やむを得ないものと考えられる。一方、(2)と(3)の要因は最善の努力により極力小さくすることができよう。(2)はそれぞれの面の平滑度や接する面と面との垂直性のほか、切り欠きの挿入に関する事項が入ってくる。すなわち底面と切り欠き面との垂直性と平面ひずみ状態が実現されるための側面と切り欠き面との垂直性である。本実験において面の加工はすべて大型のブレードを用いて行っており、それ以外の整形加工は特に行っていない。(3)については試験環境、載荷速度、載荷装置、試験技術が挙げられる。ここで試験環境については供試体は加工後約1年間室温で保存したものをを用いており、試験時の温度と湿度は大きな変化がないことを確認している。また載荷速度については前記のように一定で試験を実施している。さらに載荷装置は特別に設計したものであり、多くの部分で柔軟性のある設計となっている。実験技術において特に注意することは供試体の載荷装置へのセッティングであり、ここでは載荷線と2本の支点軸をいかに所定の位置にセットするかという問題と荷重の平面状態をいかに実現するかの問題が大きい。前者は人間の視覚で入念に調べるしかないが後者は亀裂先端のひずみを調べることにより荷重の偏心が把握できる。そのため切り欠き先端部にひずみゲージを貼付し両側面のひずみができるだけ等しくなるように調整した。また前者は注意すれば注意するほど最大荷重が小さい値をとるのに対して後者は逆で、厳密に荷重偏心を取り除くほど大きな値となる。本実験ではいずれにおいても細心の注意を払っている。

4. 大島花崗岩における亀裂の進展特性

大島花崗岩内における亀裂の伝播状況を把握するため、hardway面を破断する供試体とrift面を破断する供試体については実験を終えた供試体の切り欠き先端部分を含み、切り欠き面に垂直な中央

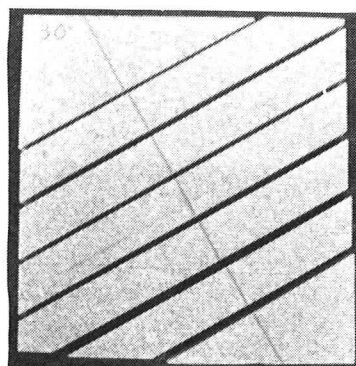


写真-2 供試体作成過程-板から30° 供試体の切り出し

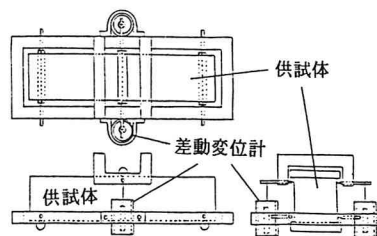


図-3 供試体に取り付けた差動変位計

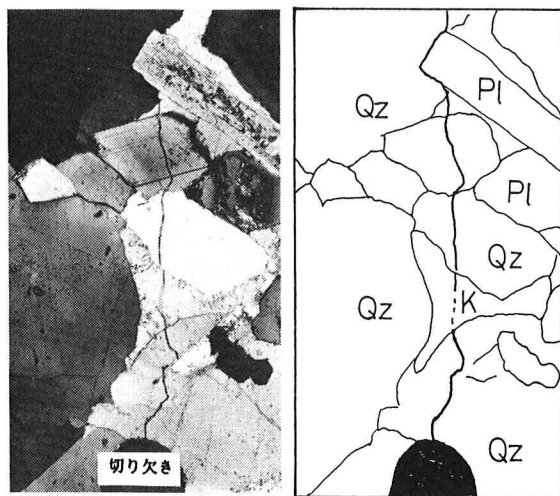


写真-3 rift面を伝わる亀裂 (Qz:石英 Pl:斜長石 K:カリ長石)

断面の薄片を作製した。

大島花崗岩の主要な構成鉱物は石英、長石（斜長石、カリ長石）、黒雲母、角閃石であるがそれぞれの鉱物粒には顕著な平行配列は認められない。したがってそれぞれの鉱物粒の粒界やへき開はひとつの弱面になるであろうがこれらはランダムに分布していると考えられるので、異方性を関連づける要素としては石英粒内の開口した微小亀裂と癒着した微小亀裂および長石内の癒着した微小亀裂が支配的となるものと考えられる。これらのうち石英内の開口した微小亀裂はほとんどrift面にそって存在しその数も多く、rift面が石英粒内の開口した微小亀裂の卓越した配向面になっている。それに対して癒着した微小亀裂はhardway面に多く存在するが、rift面の開口した微小亀裂に比べるとかなり数が少ない。これらの詳細については他に譲る⁴⁾。

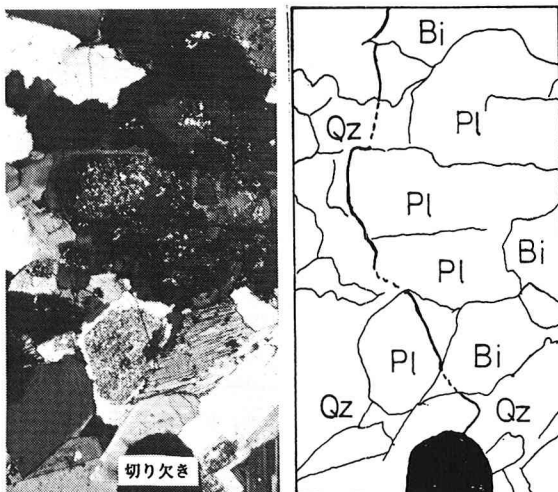


写真-4 hardway面を伝わる亀裂 (Qz;石英 Pl;斜長石 Bi;黒雲母)

写真-3と写真-4にrift面およびhardway面を伝わってゆく亀裂の進展状態を示す。鉱物および進展した亀裂の状況をさらに明瞭にするため写真のスケッチも併せて示した。写真-3では亀裂は石英内の開口した微小亀裂から発生しており他の微小亀裂と連結する形で進展してゆく。そのほかカリ長石や斜長石を貫いたり、斜長石と石英の粒界を進む経路も確認されるが石英内の微小亀裂が経路として占める割合が多い。これに対して写真-4では進展方向に亀裂がほとんどないため亀裂の発生は石英の粒界にそって起こっている。そして斜長石と石英の粒界や黒雲母と斜長石の粒内および粒界が伝播経路として確認され、写真-3とはかなり異なった伝播経路となる。これらのことから判断すればrift面を伝わる亀裂は進展方向にそった石英内の微小亀裂の影響により簡単に進める傾向にあるということが出来る。このことは破壊靱性試験結果にかなり大きい方向依存性が存在するという裏付けにもなる。

5. 亀裂の進展に関連する異方性

実験によって得られた荷重-載荷点変位図の一例を切り欠き長さ20mmのhardway面から15°をなした方向を破断する供試体と30°方向のを破断する供試体について図-4と図-5に示す。図にはAEのイベントカウントレートも付して示している。このように荷重-載荷点変位図は立ち上がりから非線形性を持っており最大荷重に近くなるにしたがってそれが増してくる。また荷重の偏心にはかなり注意を払っているが完全に取り除くことは困難で、その偏心が載荷途中から存在し始めるものは立ち上がりから最大荷重にいたるまでの非線形性は大きい。最大荷重時の載荷点変位については方向性や切り欠き長さによる違いは認めることができず、かなり狭い

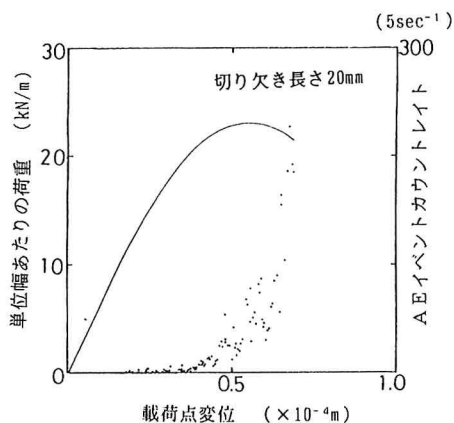


図-4 15° 供試体の荷重-載荷点変位曲線図

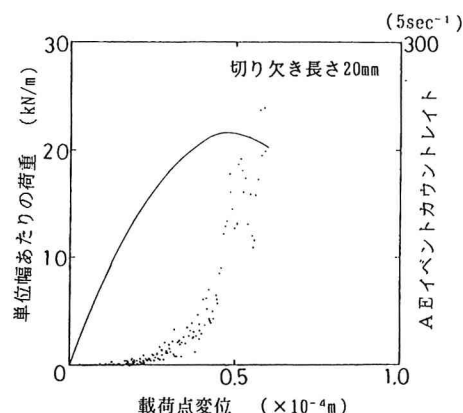


図-5 30° 供試体の荷重-載荷点変位曲線図

範囲の載荷点変位で最大荷重に達する。ここで初期のコンプライアンスを比較すると切り欠き長さが20mmのものよりは10mmのものの方が小さく、0° 供試体のコンプライアンスは90° 供試体のそれより小さく、かつ他の方向に対する供試体には極端な変動がみられるものではなく順次その中間程度となった。それよりまして相関が大きいのは最大荷重であり、総合的に初期コンプライアンスの大きいもののほど最大荷重が低い。この傾向は載荷状態が不十分で最大荷重が大きくなった場合や荷重偏心が生じて最大荷重が低くなった場合についても同様であった。A Eについては図にみられるように荷重-載荷点変位図の非線形性が大きくなるあたりから顕著に認められはじめ、最大荷重を過ぎてから極端に大きい値となる。また偏心荷重が認められる供試体のA Eは低い荷重段階から認められ始めた。

ASTMの式により実験により得られた最大荷重と初期切り欠き長さを用いて求めた応力拡大係数を各方向の供試体について図示したものが図-6と図-7である。図-6は切り欠き長さ20mmの供試体によるもので図-7は10mmの供試体によるものである。両図とも多少の値のばらつきがみられるが、hardway面に対応する供試体(0°)で一番大きく、rift面(90°)に近づくにしたがって徐々に小さくなる。そして異方性に対する変動と考えられる差は30%強であり、大まかなかたちとしては余弦波的な形状を呈している。この傾向は両図とも同じであるが切り欠き10mmの方が若干大きい方にシフトしている。ここで両図とも75°(rift面と15°をなす方向)でかなり低い値をとっており、ここが極小であるといえないこともない状況から判断すれば供試体の加工段階で異方性の主軸が若干ずれている可能性も有している。

6. おわりに

本研究では花崗岩の異方性を決定づける3つの面のうち一番割れやすい面のrift面と一番割れにくい面のhardway面を伝わってゆく亀裂の伝播経路の特性を明らかにした後、両面を含むgrain面内における破壊靱性の方向依存性を細かい方向間隔をもって明らかにした。その結果、前者についてはいずれの面を伝わる亀裂も弱面を選択して進む傾向が確認されたが、rift面にそってかなり多くの亀裂が存在するため、rift面を伝わる亀裂に対してはその亀裂が伝播経路としての選択的な弱面になりえるのに対して、hardway面ではその面にそった亀裂はほとんどないため鉱物粒子の粒界のみが選択的な弱面になる。この結果をうけて後者についてはhardway面で極大値、rift面で極小値をとるような90°を1/4周期とする調和振動状であることが確認された。

参考文献

- 1) 佐野修, ダブルトーション法による岩石内のクラック伸張現象の異方性に関する実験的研究, 材料, 37, 413, 818-824, 1988
- 2) 小杉昌幸, 異方性岩石の引張強度と破壊靱性について, 日本鉱業会誌, 102, 1182, 469-475, 1986
- 3) P. Halleck and A. J. Kumnick, THE INFLUENCE OF ORIENTATION ON FRACTURE TOUGHNESS AND TENSILE MODULI IN BERKELEY GRANITE, Proc. 21st U.S. Symp. on Rock Mechanics, 235-242, 1980
- 4) 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, 370/III-5, 189-198, 1986

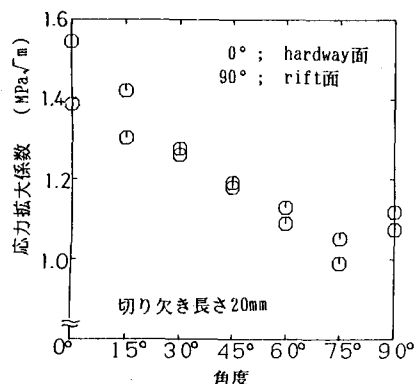


図-6 大島花崗岩の破壊靱性異方性

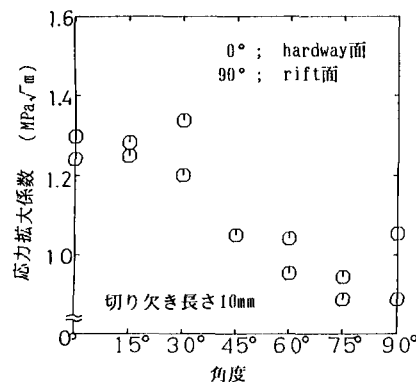


図-7 大島花崗岩の破壊靱性異方性