

(17) 花崗岩の破壊靱性評価に関する検討

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 正会員 矢富盟祥

山口大学 正会員 中川浩二

1. はじめに

岩盤の安定性の検討等を目的として多くの岩石の破壊靱性試験が行われており、ISRMでも指針として定められている。花崗岩の破壊靱性（本研究ではモードⅠに限る）を知ろうとする場合、その変形挙動が微小クラックに依存するため、多かれ少かれ非線形性を有する。そのため、微視的にみて材料の非線形性がクラックに依存すると考えて応力拡大係数により評価する場合と、巨視的にみて材料が非線形の挙動を示すという立場からJ積分により評価する場合の主に二通りが用いられているようである。応力拡大係数で評価する方法としては、ASTMにみられる3点曲げ試験やコンパクトテンション試験、切り欠き長さにより影響を受けないことやクラック進展速度がわかる利点を持つダブルトーション試験の他多くの試験が行われているが、J積分で評価する方法はコンパクトテンション試験か3点曲げ試験を行い、Riceの簡便式¹⁾により求める方法に限られる。

本研究では線形・非線形の両方の立場から破壊靱性評価に対する検討を進めるため、切り欠きの長さの異なる同寸法の供試体により3点曲げ試験を実施した。またRiceの簡便式では、その性格上弾性分の変形寄与が大きい場合の供試体への適用が困難になるので、非線形材料に対する破壊靱性評価法として一つの方法を検討しそれによる評価も行っている。

2. 新しい破壊靱性評価法の検討

破壊靱性をJ積分によって求めようとする場合、大きく分けてコンプライアンスを用いる方法、簡便式を用いる方法、有限要素法による方法の3つの手法が考えられる。このうち岩石への適用となると、BegleyとLandesが提案した実験的手法²⁾と簡便式による方法に限られよう。ここでは1つの方法としてBegleyとLandesによる方法を若干修正した方法を検討する。すなわち切り欠き長さの異なる同寸法の供試体を用い、荷重-載荷点変位曲線を求めることは同じであるが、評価までの変位を一定にしないで、ある状態（たとえば最大荷重）に至ったときの点と点を結び、その面積から破壊靱性を導く（図1）。この方法はE積分の概念³⁾に相当し、弾性体であればエネルギー解放率に対応するものである。また弾塑性体であればJ積分の物理的意味が明確でないのに対して、E積分は“ある状態に達するのに必要とされる外力がなすべき仕事の亀裂長さの違いによる差”と解釈することが可能である。

3. 評価点に対する検討

切り欠き長さを a 、荷重を P とすると、どの点 (a, P) の応力拡大係数 $K_{Ic}(a, P)$ を破壊靱性 K_{Ic} と評価するかで、破壊靱性は一般に (a, P) の関数となる。すなわち $K_{Ic}(a, P)$ と表される。本来破壊靱性を評価するには、不安定クラック

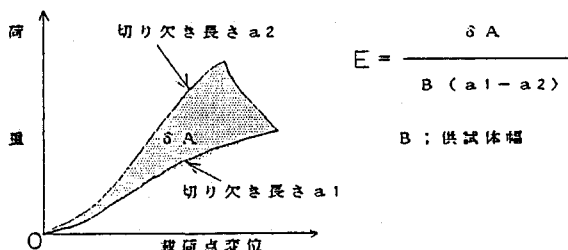


図-1 E積分による評価法

の発生するときの切り欠き長さ a_0 とそのときの荷重 P_{max} で評価されるべきであるが a_0 の測定が困難であるため便宜的に安定クラックの発生前の切り欠き長さ a_0 をもちいる場合が多い。また ASTM の基準に関連して荷重-亀裂開口変位 (COD) 図の 95 パーセント割線による荷重 P_{95} と a_0 を用いる場合もある。一方、AE の測定技術の発達などに伴い、安定クラックの発生時の荷重 P_0 を予想することが可能であり、安定クラック発生時におけるパラメータ $K_{IC}(a_0, P_0)$ で評価されることもしばしば見られる。これらの大小関係は

$$K_{IC}(a_0, P_0) < K_{IC}(a_0, P_{95}) < K_{IC}(a_0, P_{max}) < K_{IC}(a_c, P_{max})$$

となり、左によるほど安全な評価であるといえる。 E_{IC} 、 J_{IC} に関しても同様な議論が成り立つ。本研究ではこれらの中で、 a_0 と P_0 での評価と a_0 と P_{max} での評価を行っている。

a_0 を決定するにはコンプライアンスの変化により決定する方法や AE のエネルギー m 値により決定する方法があるが、ここでは AE のカウント数と AE のカウント数の累積量により AE のカウント数が連続的に増え始める点をもって決定した (図 2)。

4. 3 点曲げ破壊靱性試験

供試体には $40 \times 40 \times 180 \text{ mm}$ の大島花崗岩を用い、スパンの長さは 160 mm とした。供試体に設けた切り欠きは直線人工切り欠き (幅 0.5 mm) とし、その長さは 4 mm , 8 mm , 12 mm , 16 mm , 20 mm の 5 種類を用意した。実験では各々 1 本についてのみ行っている。岩石内の微小クラックの影響を小さくするため、3 つの直交する微小クラックの配向面のうちでクラック密度が相対的に低い面 (hardway 面) を破壊面にして、クラック密度が一番高い面 (rift 面) が側面になるよう载荷した。したがって本研究では hardway 面に添って亀裂が進展する場合の破壊靱性を扱っている。互いにほぼ直交する 3 本の異方性軸方向の弾性波速度を表 1 に示す。用いた载荷試験機はサーボ制御機構を有する载荷装置 (島津サーボバルサ EHF-EUB30-20L 型) で変位速度 $5 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$ の変位制御で実験を行った。計測量としては荷重、载荷点変位、切り欠き先端の縦方向と横方向のひずみおよび AE のカウント数のほか亀裂開口変位を扱い、パーソナルコンピュータで GP-IB インターフェイスを介して 5 秒間隔にてオンライン処理をしている。計測システムの概要を図 3 に示す。実験に際しては若干の荷重をかけて供試体の前方と後方に取り付けた 2 本の変位計の変

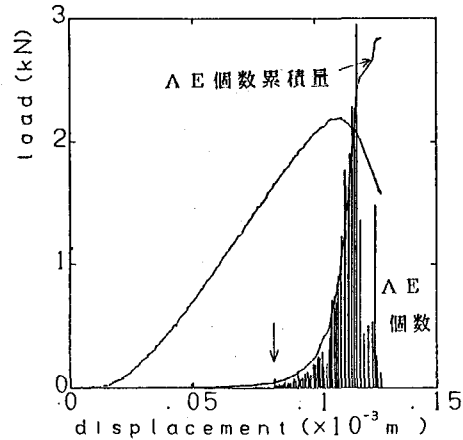


図 - 2 AE による安定クラックの発生点の決定

表 - 1 3 異方性軸に対する弾性波速度

R 軸	4100
G 軸	4400
H 軸	4700

単位: m/s

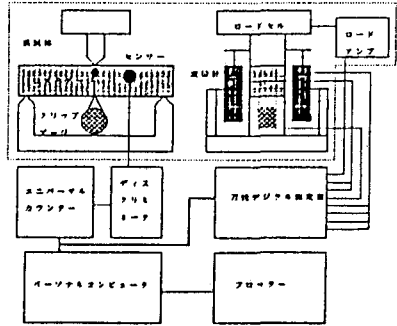


図 - 3 計測システム図

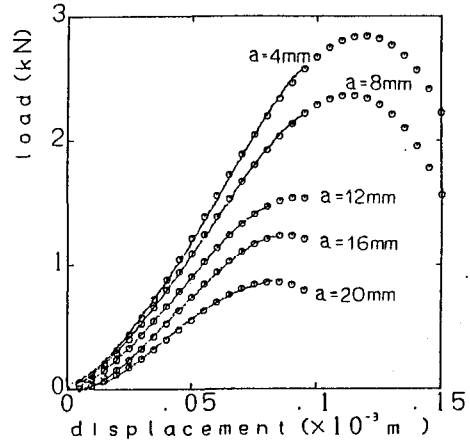
位と供試体の両側の側面に貼り付けた2枚のクロスゲージからのひずみにより線載荷における荷重の偏心を入念に調べ、それを取り除いた後、実験を開始している。

5. 実験結果と考察

図4にそれぞれの供試体について実験により得られたコンプライアンスの変化を示す。図中実線がソースデータで○印が3次曲線によって最小自乗近似したものである。このように荷重-載荷点変位曲線が原点を通る最小自乗3次近似曲線 ($y = ax^3 + bx^2 + cx$) によってうまく近似されることから以後のデータの処理は 図-4 近似曲線を用いて行った。この図では当然のことながら切り欠き長さが小さいほど全体的なコンプライアンスは小さくなっている。また切り欠き長さが小さいほど非線形性も小さくなっている。

図5は応力拡大係数によって破壊靱性を求めたもので、切り欠き長さの関数すなわち切り欠き長さ a と供試体幅 W の比 (a/W) に対して図示している。ここで*印で示したものがAEによって決定した時点での値 $K_{Ic}(a_0, P_0)$ で、○印でプロットしたものが最大荷重により決定した $K_{Ic}(a_0, P_{max})$ である。この図よりAEによって決定した破壊靱性は $1\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ あたりでほぼ一定になっているが最大荷重により決定したものは $a/W=0.1$ で最小、 $a/W=0.2$ で最大の値をとっている。このことは荷重がピークになるあたりでは線形破壊力学の適用が困難になることを示唆している。したがってAEによって安定クラック発生時の荷重 P_0 を推定してやれば、ASTMの規定より切り欠き長さを広範囲に使用できるものと考えられる。

Riceの簡便式によって評価したものが図6である。この図も a/W に対して図示しており、*印がAEによって決定した時点での破壊靱性を、また○印が最大荷重に至った時点での破壊靱性を評価したものである。これらの値はいずれも切り欠き長さの小さい範囲では極端に大きな値を示すが切り欠き長さが大きくなるにつれてある一定値に漸近しているようである。これは式を導くときの仮定に起因していると考えられる。すなわちRiceの式は切り欠きに依存して生じる変位が弾



実験によって得られた荷重-載荷点変位図

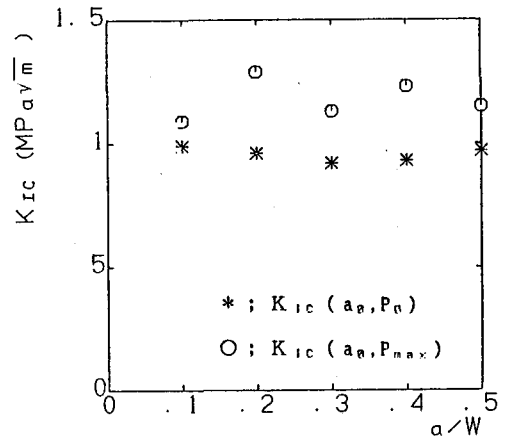


図-5 応力拡大係数による破壊靱性評価

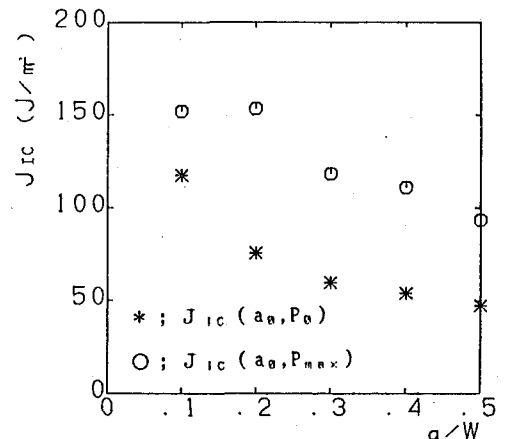


図-6 J積分による破壊靱性評価

性変形による変位に比べて非常に大きいとして弾性変形による変位を無視して式を導いている。したがって切り欠き長さの小さい供試体では弾性変形分の変位は全体の変位に対して無視できない大きさになっているものと判断される。このことはRiceの簡便式で破壊靱性を評価するときには少なくとも a/W が0.5程度の比較的長い切り欠きを設置することが必要となるということを意味している。

BegleyとLandesの方法を修正したE積分による方法で評価した破壊靱性を表2にまとめた。各々供試体の荷重－載荷点曲線の組合せにより、右上半分がAEによって決定した時点での値を、そして左下半分の網掛けした部分が荷重ピーク時で求めた値である。少しばらつきがあるが両者とも平均すれば（ $E_{IC}(a_0, P_0)=47.5J/m^2$ ， $E_{IC}(a_0, P_{max})=92.1J/m^2$ ）切り欠き長さ20mmの供試体で求めたRiceの簡便式による値（ $J_{IC}(a_0, P_0)=47.4J/m^2$ ， $J_{IC}(a_0, P_{max})=93.4J/m^2$ ）とよく一致している。また切り欠き長さの影響もこの表から判断する限り表れていない。したがってこの評価法は非線形材料の破壊靱性評価法の一つとして利用することができると考えられる。

6. おわりに

本研究では切り欠きの長さの異なる同寸法の供試体により花崗岩の破壊靱性評価を試みた。そして比較的容易でよく用いられる3点曲げ破壊靱性実験により線形材料と非線形材料の両立場から検討してきた。以下に本研究で明らかになったことを挙げる。

（1）AEが若干認められはじめた範囲で破壊靱性の評価点を設定するなら、切り欠き長さに関係なく線形破壊力学に基づく評価が可能である。

（2）非線形材料によく用いられるRiceの簡便式を利用した評価法は切り欠き長さに著しく影響を受ける。すなわち切り欠き長さと供試体幅の比が0.5程度の比較的大きい切り欠き長さをを用いないと過大評価することになる。

（3）今回検討したBegleyとLandesによる評価法を修正したE積分による方法は、弾塑性材料に対しても物理的意味が明確である上に、切り欠き長さに対して広範囲に利用できるため今後、岩石を非線形材料として評価する場合には一つの有効な手法となる。

表－2 E積分による破壊靱性評価

参考文献

1) J.R.Rice, et al.:Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, pp.231-245 (1973).

2) J.A.Begley and Landes:Fracture Toughness, astm stp 514, pp1-20(1972)

3) 矢富盟祥：エネルギー解放率の新公式とその応用－多軸荷重の場合の簡便式－材料，第35巻，第394号，pp 767-771(1986)

単位は J / m²

供試体	A (4mm)	B (8mm)	C (12mm)	D (16mm)	E (20mm)
A (4mm)	0	43.8	51.2	53.1	53.7
B (8mm)	78.5	0	49.4	48.5	47.1
C (12mm)	93.2	116.3	0	44.7	42.7
D (16mm)	91.2	101.8	81.1	0	40.8
E (20mm)	90.2	97.6	83.3	87.3	0

・右上半分は亀裂の発生時における値
・左下半分網掛け部分は最大荷重による値
・（ ）内は切り欠き長さ

(17) Consideration on evaluation of fracture toughness for granite

Ken-ichi Hashimoto*
Yozo Kudo*
Chikayoshi Yatomi**
Koji Nakagawa***

Abstract

Fracture toughness measurements were made on three-point-bend fracture specimens of Ohshima granite with notch of various length and the dependence of notch length on the fracture toughness was investigated. Evaluations of fracture toughness were performed by stress intensity factors in linear-elastic fracture mechanics, J-integral simplified method by Rice and E-integral method which modified the experimental method by Begley and Landes.

The loads to obtain the fracture toughness were evaluated in stable crack initiation and in peak load ; for the determination of stable crack initiation, acoustic emission(AE) was employed. For both evaluations, initial crack length was evaluated at the initial notch length.

As a result, the following became clear:

- (1) If we detect the stable crack initiation by AE, regardless of crack length it is possible to evaluate the fracture toughness on the basis of linear-elastic fracture mechanics.
- (2) J-integral simplified method by Rice is greatly influenced by crack length. It is restricted to use the specimen with deep notch, whose notch length / specimen width ratio is about 0.5.
- (3) E-integral method proposed in this study is not very influenced by crack length. Since it is valid for non-linear material, it will become an important method for evaluation method of fracture toughness.

* Tokuyama college of technology
** Kyoto University
*** Yamaguchi University