

異方性を考慮したISRM破壊靱性試験法の一試案

(株)長大

岡山大学環境理工学部 正会員 ○ 廣瀬 壮一

SveBeFo

塩尻 恭士

Finn Ouchterlony

1. はじめに

ISRM(International Society for Rock Mechanics)では、岩の破壊靱性を求めるためにChevron Bend (CB)モデルとShort Rod (SR)モデルを推奨している¹⁾。この働きかけにより多くの実験・解析結果が報告されているが、その解析の多くは等方性の条件下で行われている。そして、このことが破壊靱性の評価の誤差となるのではないかという指摘がある。そこで本研究では、異方性の影響を考慮した応力拡大係数(K値)を算出法を数値シミュレーションにより検討した。実際に実験を行う場合、異方性パラメータは全て既知であるとは限らない。本研究ではまず破壊靱性値を求めると同時に異方性パラメータを決定する方法を提案する。また、数値計算では応力拡大計数K値は亀裂先端近傍の開口変位から計算されることが多いが、実際の実験では亀裂先端近傍の変形状態を測定することは難しく、荷重-変位関係から得られるコンプライアンスをもとにK値を求めるのが普通である。そこで、異方性を考慮した場合に、亀裂開口変位から計算したK値とコンプライアンスから求めたK値がどの程度一致するかを考察し、異方性の破壊靱性評価に及ぼす影響を検討する。なお、ここでは横等方性材料に限定して解析を行っている。

2. 解析モデル

本研究では、CBモデル(図1)とSRモデル(図2)を用いてFEM解析を行った。モデル寸法は、CBモデルの場合、 $S=3.33D$, $a_0=0.15D$, $t=0$, $\theta=90^\circ$ であり、SRモデルの場合、 $W=1.45D$, $a_0=0.48D$, $t=0$, $\theta=54.6^\circ$ である。なお亀裂の進展状態を表現するために、 a の値を変化させた数種類のモデルを用意した。また横等方性の場合、等方面の取り方により、1-2平面等方(DIV)・2-3平面等方(ARR)・3-1平面等方(ST)の3ケースが考えられるが、それぞれについて等方面内のヤング率 E とそれに直交する方向のヤング率 E_T の比 $n=E/E_T$ を変化させて破壊靱性の評価を行った。

3. コンプライアンス

数値シミュレーションにより荷重 F とその荷重点での変位 u を求める。このとき、無次元化されたコンプライアンス g は $g = uE'D/F$ で得られる。ここに、 D は供試体の直径であり、 E' は平面応力、平面ひずみのそれぞれの場合に対して

$$\begin{aligned} \text{平面応力: } \begin{cases} E'_{DIV} \\ E'_{ARR} \\ E'_{ST} \end{cases} &= \begin{cases} E \\ E/f_{ps} \\ E_T/f_{ps} \end{cases} & f_{ps} &= \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sqrt{n}}{2} (E_T/G_T - 2\nu_T) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \text{平面ひずみ: } \begin{cases} E'_{DIV} \\ E'_{ARR} \\ E'_{ST} \end{cases} &= \begin{cases} E/(1-n\nu_T^2) \\ E/\{f_{pd} \cdot (1-\nu^2)\} \\ E/\{f_{pd} \cdot (1-n\nu_T^2)\} \end{cases} & f_{pd} &= \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sqrt{n}}{2} \left(\frac{E_T/G_T - 2(1-\nu)\nu_T}{\sqrt{(1-\nu^2)(1-n\nu_T^2)}} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

となる。また、 ν はポアソン比、 G はせん断弾性係数を表し、下添字 T は等方面と直交方向のパラメータを表す。

4. コンプライアンス比を用いた異方性パラメータの推定

一本のコア供試体を用いてCB試験を行い、その後、CB試験後の供試体を成形し直してSR試験を行ったとすると、等方面の向きを変えた実験を行うことができる。図3はCBモデルをDIVで試験を行った後、SRモデルをST, ARRで試験を行ったとして、数値的に得られたコンプライアンス g の比を、横軸に異方性パラメータ n を図示したもので

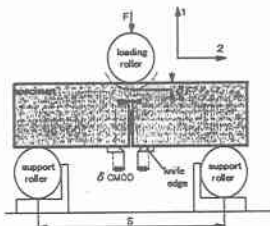


図1 Chevron Bend Model

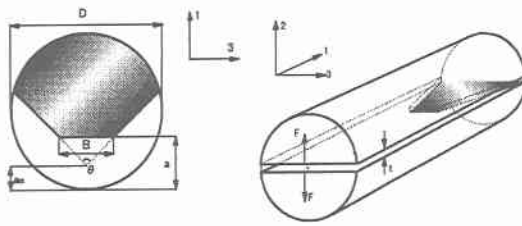
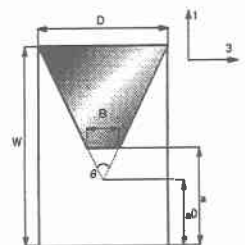


図2 Short Rod Model



ある。 g の比と $\log(n)$ は比例関係にあることから、 g の比から n を推定する事ができる。等方面のヤング率 E 、ポアソン比 ν_p が既知であり、 n がコンプライアンス g から決定できたとすると、近似式を用いて他の異方性パラメータ G_p 、 ν_p などを決定することができる²⁾。

5. 応力拡大係数の算定

コンプライアンス g 値から応力拡大係数 K 値を求める式は以下のよう表せる。

$$KD^{1.5}/F = \frac{1}{2} \sqrt{(\partial g / \partial \alpha) / \{(\alpha - \alpha_0) \tan \frac{\theta}{2}\}}$$

ここで、 $\alpha (=a/D)$ は亀裂の進展状態を表すパラメータであり、 α_0 はその初期値である。ここでは、 g を α の関数として補間しなければならないが、その補間式は等方性材料に対するものと同じ式を用いることにした³⁾。

図4は、SRモデルにおいて等方面をDIV, ARR, STのそれぞれの方向に設定した場合に得られる K 値を横軸に a/D をとって図示したものである。実線はコンプライアンスから得られた K 値であり、記号は亀裂先端での開口変位から得られた K 値である。異方性のパラメータ n を変化させて計算した結果、DIVの場合は、異方性の影響がほとんどないのに対して、ARR, STの場合は、異方性の影響が大きいことがわかる。また、コンプライアンスから求めた K 値と開口変位から求めた K 値を比較すると、DIVとSTの場合は両者がよく一致していることがわかる。それに対して、ARRについては傾向は一致しているものの、異方性が強くなるにつれて両者の差が大きくなっている。これについては、コンプライアンスの補間関数を工夫するなど改善が必要である。

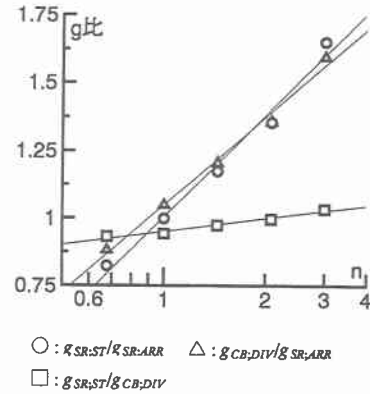
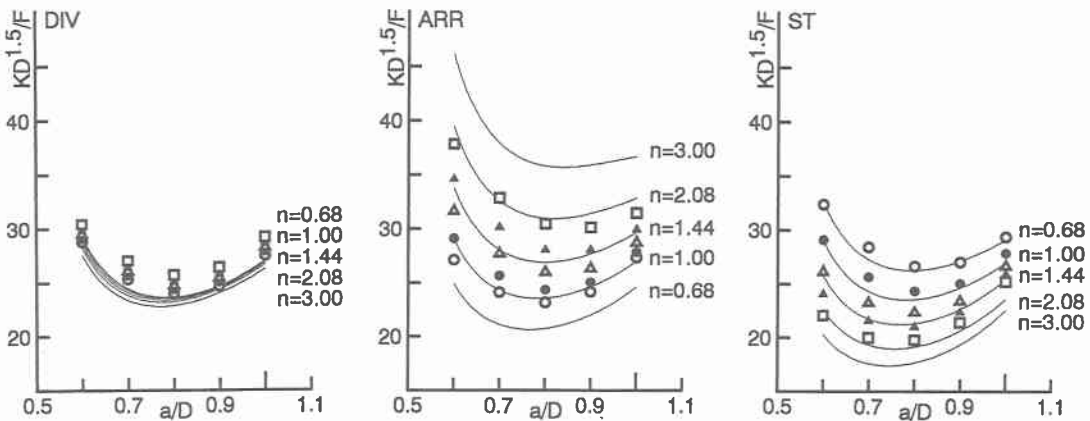


図3 n - g 比グラフ

参考文献 1) ISRM, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 25, 71-96, 1988. 2) S. Hirose et al., The effect of anisotropy on the K_I calibration of ISRM standard fracture toughness specimens, in: Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mech., A. A. Balkema, 165-168, 1995. 3) K. Matuki et al., Boundary element analysis for standard specimen configurations in the ISRM suggested methods for determining fracture toughness of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 28, 355-363, 1991.



(○: $n=0.68$, ●: $n=1.00$, △: $n=1.44$, ▲: $n=2.08$, □: $n=3.00$)

図4 K 値に対する異方性の影響