

3次元直交異方性におけるき裂進展挙動解析

川崎重工業 正員 ○ 福岡康文
 岡山大学工学部 正員 廣瀬壮一、谷口健男
 山口大学工学部 正員 中川浩二

1. はじめに 計算機の発達により、き裂に関する解析は3次元問題に関しても行われるようになったが、その多くは等方性体を仮定したものである。しかし、岩盤や鉄筋コンクリート、複合材料など異方性を持つ土木材料は多く、き裂の挙動に対する異方性の影響を明らかにしておく必要がある。そこで、本研究では、3次元直交異方性体におけるFEMき裂解析コードを開発し、ISRM岩盤じん性試験法の一つであるChevron Bendを取り上げて、き裂を有する異方性体の数値シミュレーションを行った。

2. 解析法 線形破壊力学を基礎としてFEM解析を進める。したがって、き裂先端における応力拡大係数を精度良く求めることが必要である。ここでは、通常の要素については20節点アイソパラメトリック立体要素を用い、き裂線を含む要素に対しては、15節点特異要素を用いた。15節点特異要素とは、20節点アイソパラメトリック要素の1面をつぶしてき裂線に一致させ、そのき裂線に隣接する辺の中点にあった節点をき裂線側の1/4点に移動させたものである。このようにすると、き裂先端近傍における変位が示す $\sqrt{r}$ (r はき裂先端からの距離)を正確に表現することができ、き裂先端近傍における応力拡大係数～変位関係式に求められた節点変位を代入することにより、高精度で応力拡大係数を求めることができる。詳しくは、文献[1]を参照されたい。

FEM解析における剛性方程式は $[K]\{u\} = \{f\}$

としてマトリックス表示できる。さらに、剛性マトリックス $[K]$ は $[K] = [B]^T[C]^{-1}[B]$ と表される。ただし、 $[B]$ はひずみ-節点変位マトリックスであり、 $[C]$ はひずみ-応力マトリックスである。材料の異方性の影響は $[C]$ に含まれる。直交異方性で、かつ、異方性の方向が直交座標系と一致している場合、マトリックス $[C]$ は式(1)のように表される。

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式では12個の定数が必要であるが、 $C_{ij} = C_{ji}$ なる関係より独立な変数は9個となる。さらに、横等方性を仮定すると、等方性を示す面内の2方向の材料定数は等しいことから独立な定数は6個となる。しかし、異方性の影響を調べるために6個の定数を独立に変化させることは大変な労力を要する。次節では実際の岩盤データをもとに独立な定数を3個にまで減少させ、横等方性材料における応力拡大係数への影響を検討する。

3. Chevron Bend じん性試験のシミュレーション

解析モデル

解析モデルはISRMが提唱する岩盤じん性試験法のChevron Bend円筒供試体である(図1)。モデル寸法は、 $D=100\text{mm}$ 、 $S=333\text{mm}$ 、 $a_0=15\text{mm}$ 、 $a=a_0+0.2D$ 、 $2\theta=90^\circ$ 、 $t=0$ とした。このモデルは1-3平面、および、2-3平面に関して対称であるので、それらの対称性を考慮した1/4モデルを用いて解析を行った。

異方性パラメータの選定

前述したように、横等方性を仮定したとしても独立な材料定数は6個存在する。ここでは、実験から得られた岩盤の材料定数をもとに、次のような仮定を置き、独立な3個の定数を選定した。いま、等方性を示す面を1-2平面とすると、1) ヤング率に関しては、 $E_1 = E_2 = \gamma^{-1}E_3$ ($\gamma < 1$) なる関係があるとする。すなわち、異方性を示す第3軸方向のヤング率は、常にそれと直交するヤング率よりも小さく、弱面を形成しているとする。2) ポアソン比に関しては、 $\nu_{23} = \nu_{13} = \gamma^{-2}\nu_{12}$ とする。3) せん断剛性に関しては、等方性を示す面内に関するせん断剛性は等方性の場合と同様に $1/G_{12} = 2(1+\nu_{12})/E_1$ とし、他の2つは近似的に $1/G_{23} = 1/E_2 + 1/E_3 + 2\nu_{23}/E_2$ 、ならびに、 $1/G_{31} = 1/E_3 + 1/E_1 + 2\nu_{31}/E_3$ によって与えられるものとする。以上のことより、独立な材料定数は、いずれか1個のヤング率、 γ 、いずれか1個のポアソン比の3個となる。

解析例

材料が横等方性であり、等方性(異方性)の軸が直交座標系と一致する場合、軸の取りかたによって、a) 1-2平面等方($E_1 = E_2 = \gamma^{-1}E_3$, $\gamma < 1$)、b) 2-3平面等方($E_2 = E_3 = \gamma E_1$, $\gamma > 1$)、c) 3-1平面等方($E_3 = E_1 = \lambda^{-1}E_2$, $\lambda < 1$)の3通りが考えられる。ただし、 $\gamma \equiv E_3/E_1$ と定義すると、c) の場合には常に $\gamma = 1$ となるので、新たな定数 $\lambda = E_2/E_1$ を導入している。

さて、ヤング率、ポアソン比、 γ (あるいは λ) の独立な定数の内、ヤング率は応力拡大係数の値に影響を及ぼさない。したがって、ここで変動させるべきパラメータはポアソン比 γ (or λ) の2個である。図2～4は、a)～c) の場合に対応して、いくつかのポアソン比に対して、ヤング率の比 γ (or λ) を変化させたときの応力拡大係数を示したものである。横軸は対数軸である。また、ここで求めた応力拡大係数 $\bar{K}_I$ はき裂線上 (図1のBの部分) で求められた各点の K_I 値を平均し、さらに等方性材料に対する応力拡大係数の平均値 $\bar{K}_I^{iso}$ で無次元化している。ポアソン比に関しては異方性を示す面内でのポアソン比を0.1から0.4まで変化させてその影響を調べた。

以下においては E_1 が一定であるとして、 E_2, E_3 が $\bar{K}_I$ に及ぼす影響を中心に考察を進める。
a) の場合は、 $E_1 = E_2 = \gamma^{-1} E_3$ であるから、 γ を変化させることにより、 E_3 が $\bar{K}_I$ 値に及ぼす影響を検討することができる。図2より γ 、すなわち、 E_3 が増加するにつれて $\bar{K}_I$ の値は大きくなる。また、その増加の傾向は片対数グラフにおいてほぼ直線的である。c) の場合は $E_3 = E_1 = \lambda^{-1} E_2$ であるから、 λ を変化させて、1-2平面内の E_2 が $\bar{K}_I$ に及ぼす影響を考察することができる。図4より λ が増加するに伴い、 $\bar{K}_I$ の値が直線的に減少している。これは、 λ の増加とともにき裂の開口方向のヤング率 E_2 が相対的に大きくなり、き裂が開きにくくなるためである。b) の場合は、 $E_2 = E_3 = \gamma E_1$ より γ を変化させると E_2 と E_3 の両方が変化する。すなわち、a)とc)の影響を同時に受けたのと同様な効果が期待される。図3より γ が増加すると $\bar{K}_I$ は減少している。しかし、a)またはc)の場合と異なり、直線的な減少傾向はみられない。これは、 γ の増加につれて、 E_2 と E_3 の両方が増加するため、c)の場合にみられた減少傾向とa)の場合に見られた増加傾向が同時に生じたためであると考えられる。しかし、全体的には減少傾向を示していることから、 $\bar{K}_I$ に及ぼす影響は E_3 よりも E_2 のほうが大きいことがわかる。また、a)からc)のいずれの場合に対しても $\bar{K}_I$ の変動幅は等方性の場合の数パーセント内にあることがわかる。さらに、ポアソン比の及ぼす影響はヤング率比の影響よりも小さいといえる。

参考文献 [1] V. E. Saouma and E. S. Sikiotis, Eng. Fract. Mech. Vol.25, pp.115-121, 1986. [2] F. Ouchterlony, Report DS 1987:11, SveDeFo, Stockholm, Sweden, 1987.

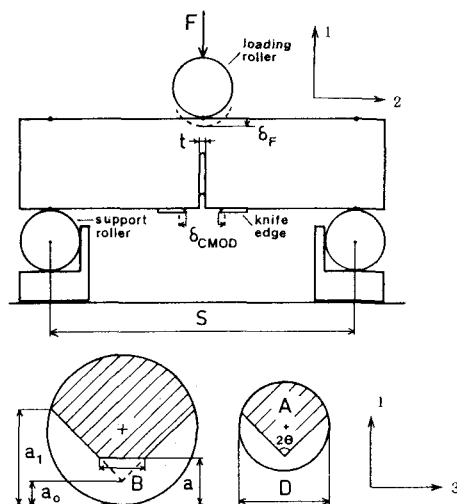


図1: Chevron Bend 供試体。

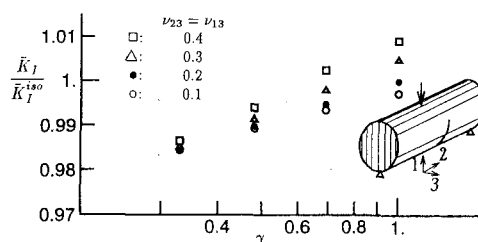


図2: γ と $\bar{K}_I$ の関係 — a) 1-2平面等方の場合。

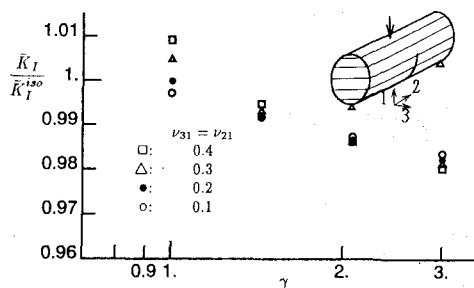


図3: γ と $\bar{K}_I$ の関係 — b) 2-3平面等方の場合。

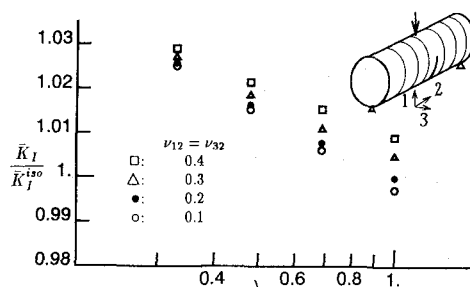


図4: λ と $\bar{K}_I$ の関係 — c) 3-1平面等方の場合。