

岩盤の破壊力学的評価に関する研究

岡山大学工学部	谷口健男
山口大学工学部	中川浩二
スウェーデン爆破研究所	F. Ouchterlony
山口大学工学部	清水則一
岡山大学工学部	廣瀬壮一

近年、トンネル、地下発電所、原油や廃棄物の地下貯蔵所といった地下空間の利用が多く行われるようになったが、それらの設計・施工においては岩盤の物性評価が重要となる。特に、岩盤は割れ目や断層などの不連続断面を含む材料であるので、破壊力学パラメータの定量的評価が必要である。本研究では、破壊力学と数値解析法(有限要素法、境界要素法)を基礎とした解析的アプローチにより、岩盤の静的、ならびに動的な破壊じん性特性を明らかにするとともに、実験値・計測値との比較照合を行い、岩盤評価の定量化を図った。

なお、本研究は平成4年度に土木学会中国四国支部からの研究活動助成を受けて行ったものである。なお、上に記した5名は本研究の代表であって、各々の研究を行うに際して他の多くの方々のご協力を仰いだ。この方々の御名前は個々の章に記している。

1. ISRM 破壊じん性試験法の数値シミュレーション

(1) はじめに

岩盤には節理があり、よって典型的な異方性材と考えられ、その破壊じん性値を評価する方法の一つが ISRM 標準試験法である。岩盤の多くは層状構造を有している。従って、本研究ではこの特性を踏まえて、横等方性を有した岩盤の静的破壊じん性を、破壊力学と数値解析法(有限要素法)を基礎とした解析的アプローチにより明らかにするとともに、ISRM 標準試験による実験値・計測値との比較照合を行い、岩盤評価の定量化を図った。なお、対象とした試験片は Chevron Bend である。

(2) 数値シミュレーション法

線形破壊力学を基礎として変位型有限要素法でもって解析を行う。その際、重要なことはき裂先端部における応力拡大係数を精度よく求めることである。ここではその部分には15節点特異アイソパラメトリック要素で、他の部分では20節点アイソパラメトリック要素でもってモデルを作ることとする。なお、15節点特異要素は20節点特異アイソパラメトリック立体要素の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から1/4点に移動させたものである。この要素を利用することにより、き裂先端部近傍の変位を $\sqrt{r}$ (ここで r はき裂先端からの距離)の形で表現でき、応力拡大係数の精度向上を図れる。[1]

有限要素解析における剛性方程式は未知変位 $\{u\}$ 、設定した力 $\{f\}$ 、剛性行列 $[K]$ を用いると、 $[K]\{u\} = \{f\}$ と表される。さらに、剛性行列 $[K]$ はひずみ-節点変位行列 $[B]$ とひずみ-応力行列 $[C]$ を用いて $[K] = [B]^T[C]^{-1}[B]$ と表される。材料の異方性は $[C]$ に含まれ、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、 $[C]$ は式(1.1)のように表される。

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}^*}{E_2} & -\frac{\nu_{31}^*}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}^*}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}^*}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}^*}{E_1} & -\frac{\nu_{23}^*}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

上式では12個の定数が必要であるが、 $C_{ij} = C_{ji}$ の関係を仮定すれば独立な変数は9個に減じる。さらに、横等方性を仮定すれば、等方性を示す面内の材料定数は等しくなり、定数の個数は6個となる。しかし、異方性の影響を調べるのに6個の定数を独立に変化させることは困難である。次節では、変化させる定数を3個にまで減少させ、横等方性の応力拡大係数への影響を調べる。

(3) Chevron Bend 試験片とその数値解析

解析モデルは ISRM が提案する岩盤じん性試験法の一つである Chevron Bend 円柱形試験片(図1.1参照)であり、その寸法は $D = 100\text{mm}$, $S = 333\text{mm}$, $a_0 = 15\text{mm}$, $a = a_0 + 0.2D$, $2\theta = 90^\circ$, $t = 0$ とした。このモデルは1-2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。その有限要素モデルの一つを図1.2に示す。図に示したように、き裂線に沿った部分に三角柱を、そして他の部分には四角柱を配している。

既に述べたように、横等方性を仮定したとしても独立な材料定数は6個ある。本研究では実験から得られた岩盤の材料定数をもとに、次の仮定により、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平面としたとき、1) ヤング率について $E_1 = E_2 = \gamma^{-1} E_3 (\gamma < 1)$ の関係を、2) ポアッソン比について $\nu_{23} = \nu_{13} = \gamma^{-2} \nu_{12}$ の関係を、そして、3) セン断剛性については等方性を示す面内に関するセン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 $1/G_{23} = 1/E_2 + 1/E_3 + 2\nu_{23}/E_2$ と $1/G_{31} = 1/E_3 + 1/E_1 + 2\nu_{31}/E_3$ とする。以上より、独立な材料定数は1個のヤング率、 γ 、1個のポアッソン比の3個となる。

(4) 解析例

まず、材料が等方性の場合の結果を示す。図1.3はき裂線上(図1.1のBの部分)における無次元化された応力拡大係数 $A(\equiv K_I/(F/D^{1.5}))$ を表したものである。図中の○は Ouchterlony[2] による結果であり、●は本解析結果である。両者は良く一致している。また、△はき裂先端において15節点特異要素を用いなかった場合の解であり、特異要素を用いなければ精度が低下することがわかる。なお、図1.3の左半分はき裂面での要素分割を表している。

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、ポアッソン比、 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ッソン比と γ (or λ) の2個である。図1.4～1.6は、a)～c) の場合に対応して、いくつかのポアッソン比に対して、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 $\bar{K}_I$ は図1.1のき裂線B上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。ポアッソン比に関しては異方性を示す面内でのポアッソン比を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。図1.4より、a) の場合は、 γ 、すなわち、 E_3 が増加するにつれて $\bar{K}_I$ の値が大きくなる。また、その増加の傾向は片対数グラフにおいてはほぼ直線的である。c) の場合は、図1.6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、き裂が開きにくなるためであろう。b) の場合は $E_2 = E_3 = \gamma E_1$ であるから、 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1.5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 のほうが大きいと考えられる。また、全体を通じてポアッ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。

(5) おわりに

本研究では、ISRM破壊じん性試験法を有限要素法によりシミュレーションし、特に岩盤の異方性が破壊じん性値に及ぼす影響を明らかにした。ここで行った解析の範囲ではいずれの場合に対しても異方性の影響は等方性の場合の数パーセント内にあることがわかった。ここでは異方性の軸が座標形の軸と一致している場合のみを解析したが、今後、両者の軸が一致しない場合について解析を進め、異方性がき裂進展に及ぼす影響などを調べる予定である。

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.

(岡山大学工学部 谷口健男、 スウェーデン爆破研究所 F.Ouchterlony
岡山大学工学部 廣瀬壮一、 川崎重工業株式会社 福岡康文)

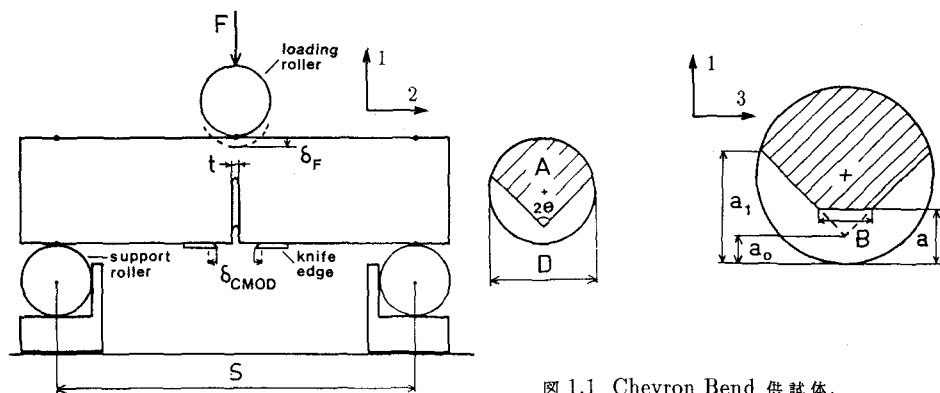


図 1.1 Chevron Bend 供試体.

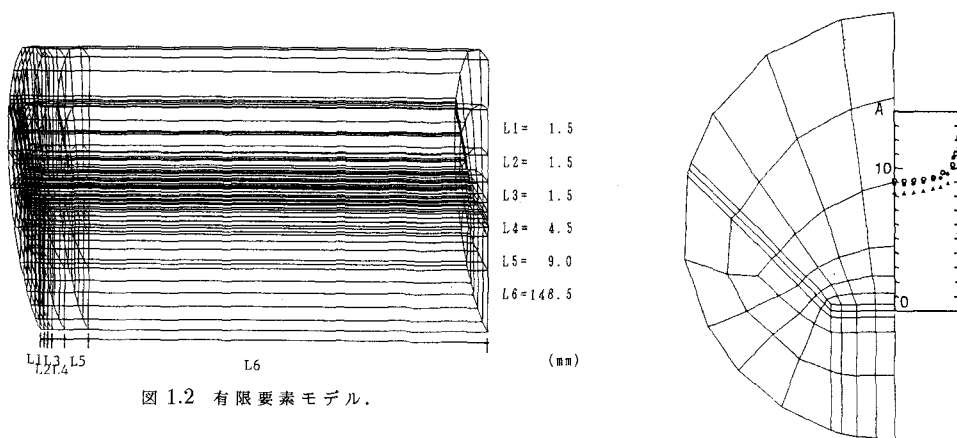


図 1.2 有限要素モデル.

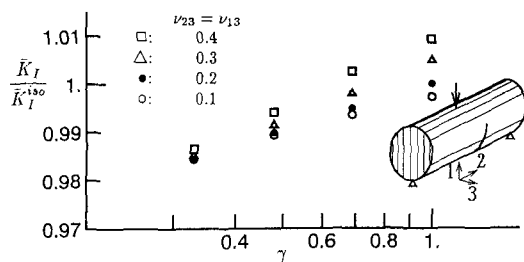
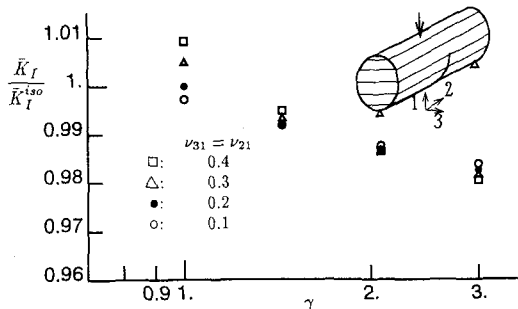
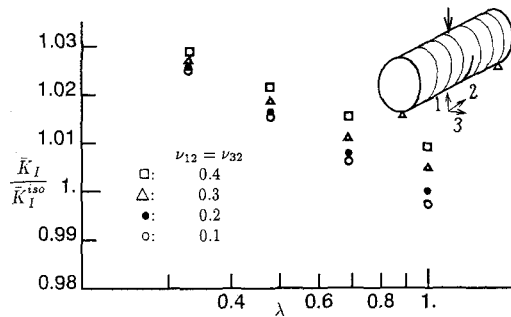
図 1.4 γ と $\bar{K}_I$ の関係 — a) 1-2 平面等方の場合.図 1.5 γ と $\bar{K}_I$ の関係 — b) 2-3 平面等方の場合.

図 1.3 き裂線上での応力拡大係数の分布 (等方性の場合).

図 1.6 λ と $\bar{K}_I$ の関係 — c) 3-1 平面等方の場合.