

# 不連続性岩盤の力学へのアプローチ

## An Approach to the Mechanics of Discontinuous Rock Masses

お だ まさ のぶ  
小 田 匡 寛\*

### 1. はじめに

エネルギーの地下備蓄や原子力廃棄物の地層処分などの例にも見られるとおり、地下空間の積極的な利用は今後ともますます増えるものと予想される。しかし、日本列島は世界でも屈指の地質学的な変動帯にあり、かつその岩盤は種々の地質不連続面によって縦横に切り刻まれていて、不利な条件での施工を覚悟せねばならない。

従来から、このような情勢に因應べく、地質不連続面の調査・解析・処理技術の開発に多大の心血が注がれたことも事実である。例えば、有限要素法におけるジョイント要素<sup>1)</sup>やRBSM<sup>2)</sup>などの解析モデルの提案は、その際立った例である。しかし、数値解析技術の飛躍的進歩と比較すれば、地質情報の収集・評価の技術は相対的に立ち遅れていて、全体としての解析精度は期待されるほどには向上していないのではないかと危惧される。断層・節理は調査業務の一環として記載・報告されたとしても、その水理・力学的性質との係わりについてはあいまいであったり、調査結果が直接的に解析に反映されることも少ないように見受けられる。日本の地質構造の複雑さを考えれば、現状を打開する事の困難さは十分理解できる。しかし、岩盤を対象とした重要構造物の需要の増加を考える時、解析技術と地質情報との調和の取れたシステムの開発は、今後、ますます重要となるう。

### 2. 地質情報の数量化

地質不連続面の大小は、対象とする構造物の寸法との比較による。構造物の寸法と比べて規模の大きい断層、また構造物に近く若干規模の小さい断層などは、構造物の安定性への重要な影響が予想される事もあって、それらの評価・解析法への技術者の関心は高く、過去の技術的課題はこの点に集中していたように思われる。

一方、節理などの規模の小さい不連続面は、単独ではその効果を見出し得たとしても、無数の節理からなる系全体で見ると、大きい断層にも匹敵する意味を持つことも有り得る<sup>3)</sup>。このような場合、個々の節理をジョイント要素として解析するには複雑に過ぎ、いかに計算機の高速・大型化が達成されたとしても、不経済ばかりでなく非現実的

すらある。本文はこの種の不連続面を主な対象として、その数量化手法ならびに岩盤力学との係わりについて論じている。(今後、地質学的な定義とは無関係に、上のような意味で規模の小さい不連続面をクラックと総称することにする。)

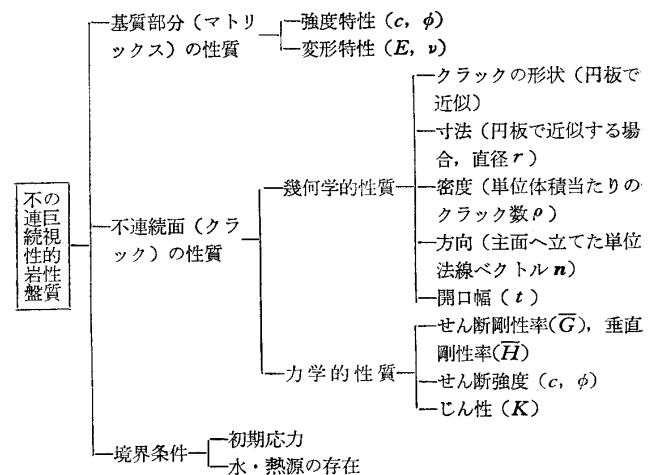
表一には、岩盤の水理・力学的性質に重要な影響を及ぼすと考えられる諸要因を整理して示している。不連続性岩盤の巨視的挙動は、これら諸要因の複雑な連成作用の結果として理解されなければならない。表の諸要因の中でも、特にクラックの幾何学的特性は数量的表現の難しい量とされており、またこの事実こそが、不連続性岩盤の力学を体系化する上で、一つのあい路になっているように見える。

筆者は、この困難を打開するために、次に定義するクラックテンソル $F$ を導入して、岩盤の水理・力学を論じている<sup>3)-5)</sup>。

$$F_{ij\dots k} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^{a+b} n_i n_j \dots n_k E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $a, b$  は0または任意の正の整数、 $\Omega$  は全立体角で $4\pi$ に等しく、 $n_i$  は単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ の $x_i$ 軸に対する成分、 $E(\mathbf{n}, r, t)$  はクラックの方向 $\mathbf{n}$ 、大きさ $r$ 、厚さ $t$ の分布を記述する密度関数、 $t_m, r_m$  は最大の厚さ、寸法をそれぞれ意味するものとする。(その他の記号は、表一を参照のこと。式中の $\pi/4$ は、クラックの形状を円板とする仮定によっていて、もし正方形で近似するとすれば、式中の $\pi/4$ は省略されるとともに、 $r$ は辺長と解釈されな

表一 不連続性岩盤の巨視的性質の構成



\*埼玉大学助教授 工学部

ればならない。ここでは詳しい説明は省略するが、 $E(\mathbf{n}, r, t) = E(-\mathbf{n}, r, t)$  の対称性から、奇数個の  $n_1 n_2 \dots n_k$  に対し、(1)式は恒等的に0となる<sup>4)</sup>。また、テンソルの総和規約が今後用いられる。(1)式の定義では、クラックの相対的な位置関係の概念が欠落している。すなわち、統計的な意味で均質 (statistically homogeneous) に空間に分布しているとみなしている。 $n_i n_i = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1$  に注意して(1)式を縮約すれば、0階、二階、四階のテンソンが定義でき、特に  $a=3, b=0$  とした次のテンソルは応用上重要である。

$$F_0 = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{tm} \int_0^{rm} \int_{\Omega} r^3 E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt$$

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{tm} \int_0^{rm} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt$$

$$F_{ijkl} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{tm} \int_0^{rm} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j n_k n_l E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt$$

.....(2)

同様に、 $a=2, b=3$  の二階のテンソルを特に  $P_{ij}$  と書けば、(1)式から次式を得る。

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{tm} \int_0^{rm} \int_{\Omega} r^2 t^3 n_i n_j E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt \dots(3)$$

(2)式のテンソルはいずれも無次元であるのに対し、 $P_{ij}$  は長さの二乗の次元を持ち、岩盤の透水テンソルを定式化する場合重要となる<sup>6)</sup>。

地質不連続面の幾何学的特性を(1)~(3)式のテンソル量として具体的に数値化することの意味について若干触れておきたい。

1) 岩盤の力学を論ずるためには、応力、ひずみなどのテンソル量と、またテンソル量間の関係を記述する、例えば弾性コンプライアンステンソル、透水テンソルなどの物理量を取り扱わねばならない。したがって、不連続面に係わる地質情報がテンソルの形式で数値化されていれば、地質情報を積極的に取り込んだ力学理論が違和感なく展開できる。

2) 二階のテンソルは、 $F_{ij} = F_{ji} (P_{ij} = P_{ji})$  の対称性を有し、応力テンソルと同様、三つの相互に直交する主方向に、三つの主値  $F_1, F_2, F_3 (P_1, P_2, P_3)$  を持っている。 $F_{ij}$  の偏差テンソル  $F_{ij}' (= F_{ij} - F_{kk} \delta_{ij} / 3)$  を用いれば、クラックの配列は、次の二つの不変量によってその特徴を一般的な形式で標示できる<sup>11)</sup>。

$$F_0 = F_1 + F_2 + F_3$$

$$A^{(F)} = \frac{1}{F_0} \{ (F_1 - F_2)^2 + (F_2 - F_3)^2 + (F_3 - F_1)^2 \}^{1/2}$$

.....(4)

0階のテンソル  $F_0$  は、クラックに伴われる空隙と等しい意味を持つスカラーであることが知られている<sup>4)</sup>。また  $A^{(F)}$  は等方性からの相対的なずれの大きさを表していて、クラックの配向性を測る尺度である<sup>7)</sup>。また、異方性の対

モデル名	クラックパターン	$F_0$	$F_{ij}$	$F_{ijM}$
A		1	$\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \\ 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ F_{2222} & F_{2212} \\ F_{1212} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
B		1	$\begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{pmatrix}$
C		1	$\begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.375 & 0.125 & 0 \\ 0.375 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix}$
D		1	$\begin{pmatrix} 0.488 & -0.09 \\ -0.09 & 0.512 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.378 & 0.109 & -0.039 \\ 0.403 & -0.056 & 0 \\ 0.109 & 0 & 0.109 \end{pmatrix}$
E		1	$\begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix}$ 理想化された等方性	$\begin{pmatrix} 0.375 & 0.125 & 0 \\ 0.375 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.125 \end{pmatrix}$



図-1 クラックを含む二次元モデル

称軸は、 $F_{ij}$  の主軸と完全に一致する。

3)  $F$  とクラックの幾何学との関連性を示すために、クラックを挿入した五つの二次元モデルを考えてみよう (図-1)。(図の描きやすさから二次元のモデルを例として示すが、三次元の場合もまったく同様に取り扱い得る。) モデルAでは、同じ長さの8本のクラックがそれぞれ鉛直、水平に挿入されている。モデルBは、モデルAをただ単に45° 剛体的に回転して得られた。モデルCでは、45° ずつ違う合計四つの方向に、同じ長さのクラックがそれぞれ4本配してあり、また、モデルDでは、合計16本のクラックがその方向をランダムに配置されている。モデルA, Dでは、いずれも同じ長さのクラックが合計16本挿入されているのに対し、モデルEは微小なクラックを無数持っていて (ただし  $F_{ij}=1$  とする)、理想化された等方性材料である。(2)式のクラックテンソルは積分を用いて定義されているが、すべてのクラックの寸法、方向が既知な場合、積分型に代わって次の総和形式の定義式が有用である。図-1に示す  $x_1, x_2$  を基準座標軸として選べば、例えば、 $F_{12}$  の成分は、次式で計算される。

$$F_{12} = \frac{1}{a^2} \sum r^2 \cos \theta \sin \theta \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $a$  はモデルの一辺の長さ、 $r$  はクラックの長さ、 $\theta$  は単位法線ベクトルと  $x_1$  軸とのなす角である。総和記号は、すべてのクラックについて取るものとする。(5)式と同様な総和形式の定義式を用い、各モデルの0階、二階、四階のテンソルの成分を計算し、それを行列として図-1中に示されている。モデルDを除くいずれの場合も、二階の等方テンソルで特徴づけられ、 $F_{ij}=0.5 \delta_{ij}$  と書ける

(ただし  $\delta_{ij}$  は、 $i=j$  の時 1 で、 $i \neq j$  の時 0 となるクロネッカーのデルタ記号とする)。しかし、四階のテンソルを考慮すれば、モデル A、B は等方性の条件を満足せず、モデル C との違いが明らかとなる。さらに六階のテンソルをも考えれば、モデル C すらも異方的となり、理想化されたモデル E のみが、いかなる階数のテンソル量を考えようとも等方の条件を満足している。この例に示されるとおり、クラックテンソルはその階数を増すごとに、細部の幾何学的特徴を具体的に数量化しているといえる<sup>4),9)</sup>。

4) クラックの幾何学に関する相似則は、テンソル  $\mathbf{F}$  を用いて、次のように表現できる。すなわち、“A 岩盤のテンソル  $\mathbf{F}^{(A)}$  が、B 岩盤のテンソル  $\mathbf{F}^{(B)}$  に適当な座標変換を施すことによって一致すれば、A、B 岩盤は幾何学的に相似である<sup>4)</sup>”。相似の程度は、関与するテンソルの階数によっていて、階数が大きいほど、高い相似性が期待できる。

5) 岩石は岩盤の重要な構成要素であるが、その力学的性質は岩盤のそれと質的に異なることが知られている。すなわち、岩盤の性質は断層・節理の存在に決定的な影響を受けるのであって、岩石の性質は副次的役割を担うに過ぎない場合も多い。岩石の寸法の力学試験が岩盤の性質を測る道具として不十分であるとすれば、どの寸法の供試体を取り出して試験すれば十分であるといえるのであろうか？ すなわち、岩盤と呼べる最小寸法（構造最小単位と呼ぶ）に対する理解は、いわゆる岩盤試験と呼ばれる試験の評価、ならびに、結果の解釈に決定的な影響を持つはずである。クラックテンソルの導入により、構造最小単位が具体的に議論できることを以下に示そう。今、対象とする岩盤の全体積を  $V$  とし、そのクラックテンソルを  $\mathbf{F}$  とする。 $V$  に含まれる部分領域  $V'$  を抽出し、そのクラックテンソルを  $\mathbf{F}'$  とする。部分領域の  $\mathbf{F}'$  をもって全領域の  $\mathbf{F}$  を推し量ろうとすれば、誤差  $\delta\mathbf{F} = \mathbf{F} - \mathbf{F}'$  を覚悟せねばならない。誤差テンソル  $\delta\mathbf{F}$  の大きさが  $\mathbf{F}$  の大きさに比べて許容できる部分領域  $V'$  が、この際の構造最小単位と判断できる。実際このプロセスをたどることは可能であって、最近の研究によると<sup>10)</sup>、構造最小単位の寸法は、平均クラック長の数倍以上となるようで、“岩盤試験”の困難さを物語っている。

### 3. 不連続性岩盤の弾性コンプライアンスと透水テンソル

前節では、岩盤力学にクラックテンソル  $\mathbf{F}$  を導入することの意味について述べた。しかし、最も強調すべきクラックテンソルの効用は、岩盤の水理・力学的諸物性値が  $\mathbf{F}$  を用いて具体的に定式化できる点にある。以下に、文献3)~7)の結果を要約してみよう。

#### 3.1 弾性コンプライアンス<sup>5),11)</sup>

Goodman(グッドマン)らのジョイント要素にならない、各クラックは二つのスプリングで連結された平行板でモデ

ル化できるものとする。一つのスプリングは剛性率  $\bar{G}$  でせん断力を、また、ほかの一つは剛性率  $\bar{H}$  で垂直応力をそれぞれ伝達する。すなわち、クラックの変形性を二つの剛性率によって表現することになる。多くのクラックを含む領域が応力  $\sigma_{ij}$  を受けて弾性変形する時、ひずみは二つのひずみ成分の和として捕えられる。一つはマトリックス部分の弾性ひずみ  $\epsilon_{ij}^{(m)}$  であり、ほかの一つは、クラックの存在による付加的な弾性ひずみ  $\epsilon_{ij}^{(c)}$  である。マトリックスをヤング率  $E$  とポアソン比  $\nu$  の等方弾性体で近似すれば、 $\epsilon_{ij}^{(m)}$  は次式で与えられる。

$$\epsilon_{ij}^{(m)} = \frac{1}{E} \{ (1+\nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ij}\delta_{kl} \} \sigma_{kl} \dots\dots\dots(6)$$

Bandis (バンディス)ら<sup>12)</sup>の各種節理に対する実験結果を参考に、剛性率  $\bar{H}$ ,  $\bar{G}$  は、クラックの寸法  $r$ , 応力  $\sigma_{ij}$ , クラックの方向性の関数として定式化でき、その結果を用いて、クラックの存在による付加的弾性ひずみ  $\epsilon_{ij}^{(c)}$  は次のように求められている。

$$\epsilon_{ij}^{(c)} = \left\{ \left( \frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (F_{ik}\delta_{jl} + F_{il}\delta_{jk} + F_{jk}\delta_{il} + F_{jl}\delta_{ik}) \right\} \sigma_{kl} \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 $\bar{h} = \bar{H}r$ ,  $\bar{g} = \bar{G}r$  であり、応力の次元を持っている。また、 $F_{ij}$ ,  $F_{ijkl}$  は(2)式で定義される二階、四階のクラックテンソルである。 $\bar{h} = \bar{g}$  とみなせる場合、(7)式はさらに簡単となり、またそれは等方弾性体中に円板状のクラックが存在して解いた弾性解と完全に一致している。今、 $\bar{h} = \bar{g}$  と仮定し、一軸圧縮応力  $\sigma_{11}$  (他の応力成分はいずれも 0) 状態を考えると、(6), (7)式は次式になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{11}}{\epsilon_{11}} = E' &= \frac{E}{\frac{E}{g}F_{11} + 1} \\ -\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{11}} = \nu' &= \frac{\nu}{\frac{E}{g}F_{11} + 1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

一般論を言えば、岩盤力学における理論の実験的検証は極めて困難である。ここでは、鹿塩ミロナイトの例を取り上げて、(8)式の妥当性を検討してみる。鹿塩ミロナイトは石英閃緑岩を源岩とした圧砕岩であり、その基質は細かい等粒状の石英、斜長石、角閃石から構成されている。その基質は均質・等方的ではあるが、緑泥石や方解石に充填されたクラックによって縦横に切断されているのが特徴となっている(図-2)。図-2に示すものと同寸法で、かつ種々の幾何学的特徴を持つ合計 8 個の供試体を切り出して一軸圧縮試験を行い、また同時に、図-2の例に示すようなクラックの展開図を用いてそれぞれのクラックテンソルを決定した。図-3には、圧縮強度の 50% での割線変形係数  $E_{50}'$  が基質部分のヤング率  $E$  で無次元化され、対応するクラックテンソルの成分  $F_{11}$  に対してプロットして示されている。図には、②から⑨の番号を付した鹿塩ミロナ

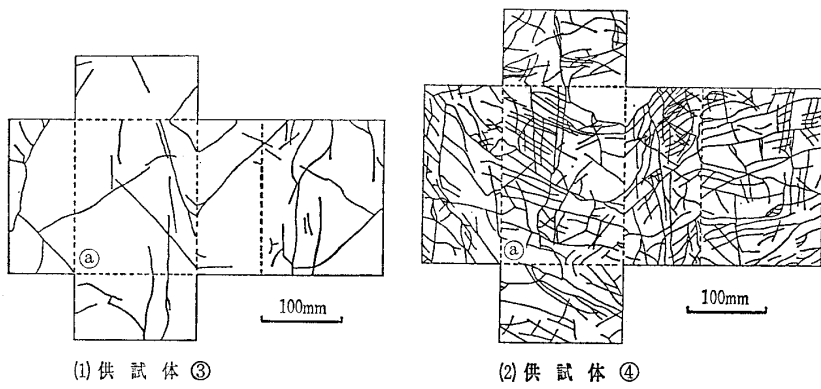


図-2 鹿塩ミロナイト供試体のクラックの展開図

イトの外に, Thorpeら<sup>18)</sup>によって報告されている, Stripa (ストリッパ) 鉱山から採取された直径 1 m, 高さ 2 m の花崗岩供試体から得られた結果も示されている。図中の実線は,  $E/\bar{g}=0.5$  とする(8)式を示していて, Stripa 供試体を除いて, 実験結果をよく説明している。この結果は, Stripa 供試体のクラックの剛性がミロナイトのそれに比べて小さいことのためであろう。

3.2 透水テンソル<sup>6),11)</sup>

岩盤内の水の流れは, エネルギーの地下備蓄や原子力廃棄物の地層処分などの問題と絡んで, 昨今強い関心を集めている。前節と同様, 各クラックを 2 枚の平行板で置き換えるモデル化を行い, クラック系と等価な透水テンソルを導くことができる。このために, 次の仮定を設ける。1) 水の流れは平行板間の層流であり, 流速はいわゆる cubic law に従う。2) 全水頭の勾配は対象とする領域内で一様である。3) クラックの交差部での水頭損失は無視できる。これらの仮定が近似的に正しいとすると, クラック系と等価な透水テンソル  $k_{ij}$  は次式で与えられる。

$$k_{ij} = \lambda(P_{kk}\delta_{ij} - P_{ij}) \dots \dots \dots (9)$$

ただし,  $P_{ij}$  は(3)式のテンソルであって, クラックの幾何学的性質にのみ依存している。また,  $\lambda$  は  $0 \sim 1/12$  の範囲にあるスカラー量であって, クラック相互の連続性が増すと大きくなる。二次元クラック系に対する数値実験の結果から,  $\lambda$  は  $F_0$  の増加関数であるとともに, 異方性の尺度である  $A^{(F)}$  の減少関数でもある。三次元の節理系での  $\lambda$  の設定は, 今後, パーコレイション理論などを参考としつつ検討して行かねばならないが, 高い密度でクラックを持つ通常の節理性岩盤では, 近似的に  $\lambda=1/12$  が採用できる。

4. 実岩盤への適用<sup>14)</sup>

地質不連続の幾何学的特徴を(1)式のテンソルの形式で標示することの効用は, すでに明らかになったといえる。しかし, (1)式の標示がどのように優れているとも, 実岩盤の  $F$  を確定する具体的な方法論を欠けば, 絵にかいた餅となる。事実, (1)式中に含まれる  $\rho, E(n, r, t)$  を実岩盤の地質調査から割り出すことは, 不可能ではないとしても,

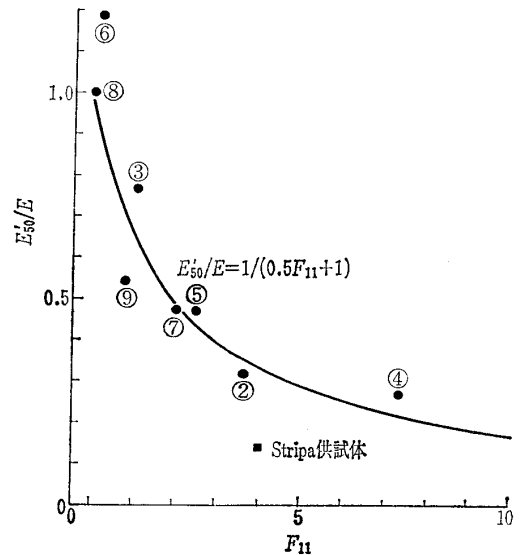


図-3 鹿塩ミロナイトにおける  $E'_{50}/E \sim F_{11}$  関係図

大変に面倒な作業を伴うのを覚悟せねばならないであろう。ここでは,  $\rho, E(n, r, t)$  から  $F$  を求める直接法に代わって, 通常の地質調査から得られる資料を用いて必要なテンソルを決定する間接法についてその概要を述べてみよう。

4.1 理論的準備<sup>3),4)</sup>

変数  $n, r, t$  が統計的な意味で独立であると仮定する。(もし, この仮定が実岩盤の実状にそぐわない場合, クラックを数個の群(セット)に分け, その各々に対しこの仮定を適用すればよい。)すると,

$$E(n, r, t) = E(n)f(r)g(t) \dots \dots \dots (10)$$

と書ける。ただし,  $E(n), f(r), g(t)$  はそれぞれ  $n, r, t$  の密度関数とする。クラックへの単位法線ベクトル  $n$  の空間的分布は, 普通等面積のステレオ投影網上に, 1%面積あたりに投影される  $n$  の個数の総数に対する割合として示される。この割合を  $4\pi$  で割れば, (10)式中の  $E(n)$  に変換されることに注意すれば,  $E(n)$  は適当な地質調査から決定できると考えてよい。

単位ベクトル  $q$  に平行で長さ  $h$  の測線を張る。すると単位長さ当たりの測線と交差するクラックの個数  $N^{(q)}/h$  は次式で推定できる。

$$\begin{aligned} N^{(q)}/h &= \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^2 |n \cdot q| f(r) E(n) d\Omega dr \\ &= \frac{\pi\rho}{4} \langle r^2 \rangle \langle |n \cdot q| \rangle \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

ただし,

$$\langle r^n \rangle = \int_0^{r_m} r^n f(r) dr,$$

$$\langle |n \cdot q| \rangle = \int_{\Omega} |n \cdot q| E(n) d\Omega$$

とする。 $N^{(q)}/h$  の量は, いわゆる RQD にも相当していて, 岩盤調査でなじみ深い。一方,  $\langle |n \cdot q| \rangle$  は,  $E(n)$  と測線の方向  $q$  が既知であれば, 容易に計算できる。したがっ

て、(1)式は、実測し得る二つの量を使って、 $\rho \langle r^2 \rangle$ を求めのりに利用できる。

クラックは、壁面とクラック面との交線（トレース）として観察される。トレース長さ $l$ の密度関数 $\Psi(l)$ は、 $n$ が $r$ と独立な変数であるとの条件付きで、観察される壁面の方向に依存せず、また $f(r)$ と次の関係を満たしている。

$$\Psi(l) = \frac{1}{\langle r \rangle} \int_l^{l_m} \frac{lf(r)}{\sqrt{r^2 - l^2}} dr \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 $l_m$ は最大のトレース長である。(12)式を用いて、 $l$ の $n$ 次のモーメント $\langle l^n \rangle$ を計算すれば、若干の計算の後、次式を得る。

$$\langle l^n \rangle = \int_0^{l_m} l^n \Psi(l) dl = \frac{\langle r^{n+1} \rangle}{\langle r \rangle} \int_0^{\pi/2} \sin^{n+1} \theta d\theta \dots\dots\dots(13)$$

(11), (13)式を用いれば、(2), (3)式のクラックテンソル $F_{ij}$ ,  $P_{ij}$ は次式で表せる。

$$F_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j E(n) f(r) d\Omega dr$$

$$= \frac{\pi \rho}{4} \langle r^3 \rangle N_{ij} = \frac{3\pi}{8} \frac{\langle l^2 \rangle}{\langle l \rangle} \frac{N^{(q)}/h}{\langle |\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}| \rangle} N_{ij} \dots\dots\dots(14)$$

$$P_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} t^3 r^2 n_i n_j E(n) f(r) g(t) d\Omega dr dt$$

$$= \frac{\pi \rho}{4} \langle t^3 \rangle \langle r^2 \rangle N_{ij} = \frac{\langle t^3 \rangle N^{(q)}/h}{\langle |\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}| \rangle} N_{ij} \dots\dots\dots(15)$$

ただし、 $N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega$ であって、 $E(n)$ を既知とすれば、計算し得る二階の対称テンソルである。(14)の $\langle l \rangle$ ,  $\langle l^2 \rangle$ の計算には、 $\Psi(l)$ を決定するための計測が必要である。(14), (15)式は唯一の解ではなく、例えば、 $f(r)$ の関数型

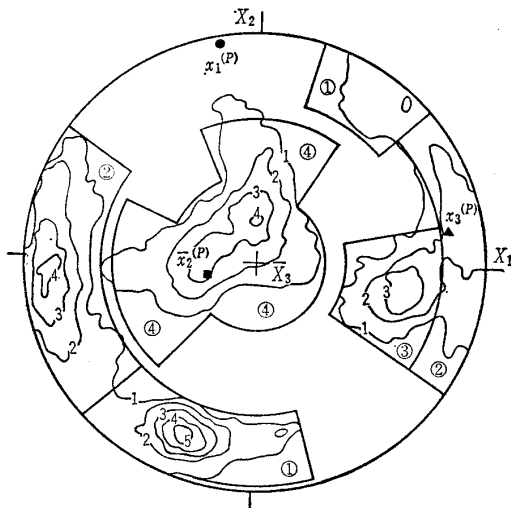


図-4 Stripa 鉱山の Ventilation Drift の節理の方向分布<sup>16)</sup> (コンター線の数値は、1%面積当たりの集中度を百分率で表して、その値を $4\pi$ で割れば、 $E(n)$ に変換される。また図中の①~④は、四つの節理群(セット)を示す。図中の●は $P_{ij}$ の最大主軸を、■は中間主軸を、▲は最小主軸を示す。)

が既知であると仮定できれば、問題はさらに容易となる。)

4.2 ストリッパ鉱山への適用

高レベル核廃棄物の地層処分に係わる問題点をさぐる目的で、スウェーデンの中部にある Stripa (ストリッパ) 鉱山を野外実験場として、種々の岩盤調査・試験が行われている。ここでは、いろいろな site の中から Gale (ゲール) から<sup>15), 16)</sup>によって詳細に分析された Ventilation drift (地下338mに掘削された巨視的透水係数を検討するための横坑) から、必要な地質情報を利用して、 $F_{ij}$ ,  $P_{ij}$ を決定してみる。地質情報は、横坑での詳細なクラックのスケッチとともに、地表面から打たれた300m以上のボーリング3本、横坑から30~40mのボーリング13本から得られた。データの信頼性についてはここでは言及しないが、今までに報告された資料の中でも信頼性の極めて高いものであることは間違いない。(ただし、クラックテンソルの決定に際し、同程度の質の高い資料が常に必要である、という意味ではない。)

図-4~6に、(14), (15)式の計算に必要なデータが取りまとめられている。図-4には、合計2648本のクラックの法線ベクトル $\mathbf{n}$ が、シュミットネットに投影して示されている。四つの卓越方向に注目して、クラックはセット①から④に分類されている。図-5には、例としてセット①を取り上げ、トレース長さの頻度分布が示されている。この分布に最も適合する分布は、

$$\Psi(l) = ae^{-al} \dots\dots\dots(16)$$

であり、分布の平均値 $1/a$ は、セット①で2.16m、セット②で0.86m、セット③で1.51m、セット④で1.03mである。図-6には、セット①の卓越方向( $\mathbf{n}$ の集中方向)に測線を張った場合のクラック間の距離(spacing)の分布が示されている。測線1m当たりにかかるクラックの数は、セット①で1.03本、セット②で2.64本、セット③で0.91本、セット④で1.83本である。

(14), (15)式中の $\langle |\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}| \rangle$ は、 $N^{(q)}/h$ の方向 $\mathbf{q}$ に対する修正係数に相当しているが、 $\mathbf{q}$ が各セットの卓越方向に選ば

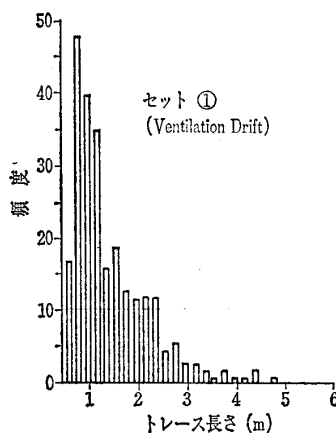


図-5 セット①の節理群に関するトレース長さ分布図<sup>16)</sup>

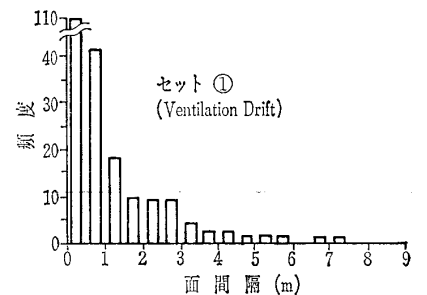


図-6 セット①の節理群に関する面間隔 (Spacing) 分布図<sup>16)</sup>

れる場合、ほぼ1に等しいとみなせる(厳密には1より若干小さい値をとる。また、個々のクラックの方位に関するデータが与えられていれば、 $\langle n \cdot q \rangle$ は厳密に計算できる)。 $F_{ij}$ の計算は、以上の地質情報を用い、①から④の各セットごとに行い、それらを重ね合わせて最終的なクラックテンソルを得る。今、座標軸として、東を $x_1$ 、北を $x_2$ 、上方を $x_3$ の右手系を選ぶと、 $F_{ij}$ は行列の形式で次のように求められる。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 7.792 & 1.589 & 0.150 \\ 1.589 & 4.348 & 0.816 \\ 0.150 & 0.816 & 5.940 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

$P_{ij}$ を計算するには開口幅 $t$ に関するデータが必要である。 $t$ を求めるにはいろいろな方法が考えられるが、ここでは、特別に工夫されたPacker Injection Testから得られた、水理学的開口幅の $5.43 \times 10^{-6}$  mを用いることにする。すると $P_{ij}$ は、

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 5.236 & 0.630 & -0.658 \\ 0.630 & 1.479 & -0.040 \\ -0.658 & -0.040 & 3.544 \end{bmatrix} \times 10^{-16} \text{ m}^2 \dots\dots\dots (18)$$

となり、その主軸は図-4に $x_1^{(P)}$ (最大)、 $x_2^{(P)}$ (中間)、 $x_3^{(P)}$ (最小)として示されている。

$F_{ij}$ から計算される $F_0$ は約18であり、また数値実験の結果ならびにRobinson(ロビンソン)<sup>17)</sup>によるパーコレイション理論をより所として、Stripa 鉱山においてはクラック相互の連結性は十分であると判断された。今、(9)式中の $\lambda$ として、最大値の1/12を用いれば、透水テンソル $k_{ij}$ は $P_{ij}$ の主軸に対して次の成分を持つテンソルとして計算される。

$$k_{ij} = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 8.89 & 0 & 0 \\ 0 & 6.93 & 0 \\ 0 & 0 & 4.71 \end{bmatrix} \times 10^{-16} \text{ m}^2$$

その平均透水係数は $0.57 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ となり、Ventilation driftで実験的に求められた巨視的透水係数 $0.10 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ と、ルジオン試験から得られた平均的透水係数 $0.89 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ との中間の値となっている。

## 5. あとがき

クラックテンソルを軸とした不連続性岩盤へのアプローチを概説したが、これを実務に定着させるためには、今後解決すべき技術的課題も多い。その一つに、例えば、露頭の写真を用いて簡単に三次元のクラックテンソルを決定する問題などである。今後、残された課題に取り組みつつ、実際問題への適用例を増やして行くつもりである。

## 参考文献

- 1) Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L.: Model for the Mechanics of Jointed Rock, J. Soil Mech. Fdr. Div., ASCE, 94(SM3), pp. 637~659, 1968.
- 2) Kawai, T.: New Discrete Structural Models and Generalization of the Method of Limit Analysis, Int. Conf. on Finite Elements in Nonlinear Solid and Structural Mechanics, Vol. 2, Geilo, Norway, pp. GO 4.1~GO4.20, 1977.
- 3) Oda, M.: A Method for Evaluating the Effect of Crack Geometry on the Mechanical Behavior of Cracked Rock Masses, Mechanics of Materials, Vol. 2, pp. 163~171, 1983.
- 4) Oda, M.: Similarity Rule of Crack Geometry in Statistically Homogeneous Rock Masses, Mechanics of Materials, Vol. 3, pp. 119~129, 1984.
- 5) Oda, M., Suzuki, K. and Maeshibu, T.: Elastic Compliance for Rock-Like Materials with Random Cracks, Soils and Foundations, Vol. 24(3), pp. 27~40, 1984.
- 6) Oda, M.: Permeability Tensor for Jointed Rock Masses, Geotechnique, Vol. 35(4), pp. 483~495, 1985.
- 7) Oda, M., Yamabe, T. and Kamemura, K.: A Crack Tensor and Its Relation to Wave Velocity Anisotropy in Jointed Rock Masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 23(6), pp. 387~397, 1986.
- 8) Kyoya, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: A Damage Mechanics Theory for Discontinuous Rock Mass, Fifth Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol. 1, pp. 469~480, 1985.
- 9) Kanatani, K.: Distribution of Directional Data and Fabric Tensors, Int. Engng Sci., Vol. 22(2), pp. 149~164, 1984.
- 10) 小田匡寛・羽出山吉裕・高野正明: 不連続性岩盤の水理・力学的性質を評価するために必要な最小供試体寸法について、第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 126~130.
- 11) Oda, M.: An Equivalent Continuum Model for Coupled Stress and Fluid Flow Analysis in Jointed Rock Masses, Water Resources Res., Vol. 22(13), pp. 1845~1856, 1986.
- 12) Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.R.: Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20(6), pp. 249~268, 1983.
- 13) Thorpe, R., Watkins, D.J., Ralph, W.E., Hsu, R. and Flexser, S.: Strength and Permeability Tests on Ultra-Large Stripa Granite Core, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, LBL-11203, SAC-31, 1980.
- 14) Oda, M., Hatsuyama, Y. and Ohnishi, Y.: Numerical Experiments on Permeability Tensor and Its Application to Jointed Granite at Stripa Mine, Sweden (in preparation).
- 15) Gale, J.E. and Rouleau, A.: Hydrogeological Characterization of the Ventilation Drift Area, NEA Information Symposium on In Situ Experiments in Granite Associated with the Disposal of Radioactive Waste, Stockholm, Sweden, 1985.
- 16) Rouleau, A. and Gale, J.E.: Statistical Characterization on the Fracture System in the Stripa Granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22(6), pp. 353~367, 1985.
- 17) Robinson, P.C.: Connectivity, Flow and Transport in Network Models of Fractured Media, Ph. D. Dissertation, Oxford University, 1984.

(原稿受理 1986.12.8)