

(31) 節理性岩盤の亀裂連続性と透水性

埼玉大学 大学院 学員 羽出山 吉裕
 埼玉大学 工学部 正員 小田 匡寛
 大成建設株式会社 正員 亀村 勝美

1. はじめに

石油の地下備蓄を初め、高レベルの放射性廃棄物の地下投棄といったプロジェクトの計画に見られる様にその設計において岩盤の透水性を具体的に評価する必要が生じている。節理性岩盤の浸透流はよく知られているように、それに内在している地質不連続面（総称してクラックとする）に大きく支配されており、その透水性はクラックの幾何学的特徴をとらえることによって評価できると考えられる。小田は¹⁾、クラックの幾何学的性質を定量的かつ一般的に表現する (1)式で定義されるテンソル量 P_{ij} を用いて岩盤の透水テンソル k_{ij} (2)式を誘導した。

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

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

ただし、 r_m 、 t_m はそれぞれクラックの寸法 r 、開口幅 t の最大値、 Ω は立体角、 n_i はクラックの単位法線ベクトル $\underline{n}$ の基準座標軸 x_i に関する方向余弦、 ρ は単位体積あたりのクラック数である。

(2)式中の λ は $0 \leq \lambda \leq 1/12$ を満足するクラック相互の連続性に依存する無次元パラメータであり、クラックの大きさ r や密度 ρ が増加すると $\lambda=1/12$ に収束していく。これは高い連続性が得られることによって数多くの水みちが形成されるからであると説明されている。(2)式の妥当性は、従来の研究^{1), 2)}

によって数値実験や現場データを用いたCase studyで検証されている。

本論は、節理の幾何学的特性が亀裂の連続性に依存する無次元パラメータ λ に与える影響について考察し、また三次元での亀裂連続性を検討する目的で二次元のクラックテンソルの諸量と三次元のそれとの対応について考察する。

2. クラック相互の連続性と λ との関係

Robinson(1984)³⁾は、クラックのネットワークを流れる浸透流への Percolation Theory の適用につ

いて言及している。Robinsonによると、等方なクラックシステムにおいて、クラック一本あたりの他のクラックとの交差数 ξ は、三次元の場合 ρr^3 二次元の場合 ρr^2 に比例すると考えている。また、 λ は ξ の関数であるとして、それが(3)式で表されている。

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda(\xi) \quad \xi = \chi \rho r^3 \\ \lambda &= \lambda(\xi) \quad \xi = \chi \rho r^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、(3)式中の χ はクラックシステムの幾何学的性質に依存する比例定数である。例えば二つの直交する方向と寸法 r の長さを持つ二次元クラックシステムの場合、 $\chi=1/2$ また、三つの直交する方向と一辺の長さ r の正方形クラックを持つ三次元クラックシステムの場合、 $\chi=4/3$ となる。

今、クラックの幾何学的性質を示す無次元のクラックテンソル F_{ij} 、(4)式を導入する。

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

また、クラックテンソルの第一不変量 $F_0 (=F_{ii})$ はクラックの幾何学的指標として ξ と同じ意味であることが(5)式より明らかである。

$$F_0^{(3)} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_{\Omega} r^3 f(r) dr = \frac{\pi\rho}{4} \langle r^3 \rangle \quad (5)$$

従って、クラックテンソル F_{ij} は異方性をも含んだより一般的なクラックの連続性の指標として考えられる。そこで(3)式に代わって、(6)式を仮定してみる。

$$\lambda = \lambda(\xi) = \lambda(F_{ij}) = \lambda(F_0, F_{II}, F_{III}) \quad (6)$$

ここで、 F_{II} 、 F_{III} は、それぞれ偏差テンソル F_{ij}' の第二、第三不変量である。

クラック相互の交差数 ξ への第三不変量の効果を見捨てるできるとすると(6)式は(7)式と書ける。ここで、 $A^{(F)}$ は、(8)式で表される異方性の程度を示すパラメータである。

$$\lambda = \lambda(\xi) = \lambda(F_0, A^{(F)}) \quad (7)$$

$$A^{(F)} = [1/F_0] \sqrt{3F_{ij}'F_{ij}} = [1/F_0] \sqrt{6F_{II}} \quad (8)$$

次に、亀裂連続性に依存するパラメータ λ と(3)、(7)式の関係を従来の数値実験の結果から考察してみる。

表1は、数値実験で用いたクラックシステムの幾何学的性質を表している。これより、用いられたクラックシステムの幾何学的特徴が実岩盤を想定するために様々な分布に従って与えられたものであることが判る。

図1は ξ と F_0 の関係を示したものである。図中の直線は、Robinsonによって得られている等方な二次元の場合の理論値である。この図より次の事が言える。

- 1) 異方性の程度と同様なものの間には、様々なクラックシステムが用いられているのにも関わらず ξ と F_0 との間に線形関係がみられる。
- 2) 異方性の程度の指標 $A^{(F)}$ の異なる結果間で比較すると、 $A^{(F)}$ の大きいものほどその傾きは小さく、異方性の程度の、係数 χ に比例した影響を読み取ることができる。

図2は λ と ξ の関係を示したものであるが、(3)式の妥当性を示している。また、 λ と F_0 の関係を表したものが図3である。パラメータ λ は、 F_0 の増加関数でありまた、 $A^{(F)}$ によってその度合が異なることがこの図から判断することができる。よって λ の値の推定には、交差数 ξ やクラックテンソルの不変量のいずれもが利用できる。しかし、 λ を三次元で検討する場合、クラックの交差数といった地質情報の入手そのものが極めて困難であることから、三次元への適用が容易であるクラックテンソルを用いた(7)式の表現が有効であると考えられる。

表1 数値実験に用いたクラックシステムの幾何学的諸量

	Distribution of sizes	Distribution of apertures	Range of F_0	Range of $A^{(F)}$
Isotropic Crack System	Uniform	Uniform	7.12~19.10	0.07~0.15
	Normal	Uniform	2.94~18.09	0.08~0.16
	Lognormal	Uniform	9.31~19.04	0.04~0.09
		Normal	9.31~19.04	0.04~0.09
Anisotropic Crack System	Uniform	Uniform	7.57~18.87	0.48~0.49
	Normal	Uniform	2.91~21.55	0.54~0.76
	Lognormal	Uniform	9.11~21.20	0.59~0.64
		Normal	9.11~21.20	0.59~0.64
		Lognormal	9.11~21.20	0.59~0.64

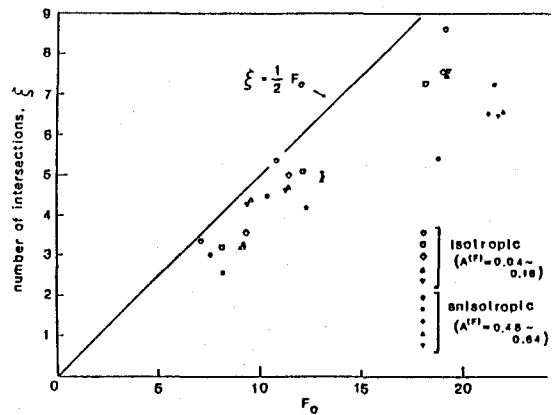


図1 ξ と F_0 の関係

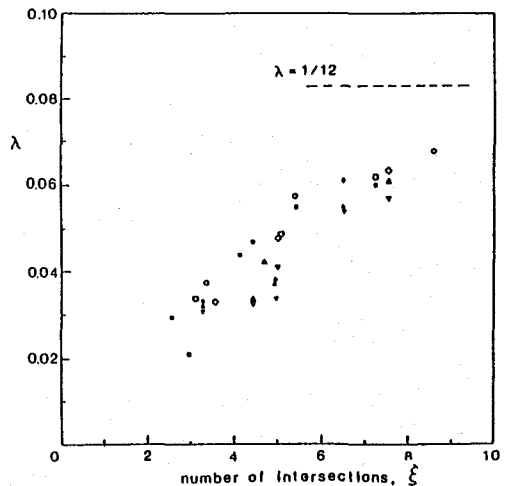


図2 λ と ξ の関係

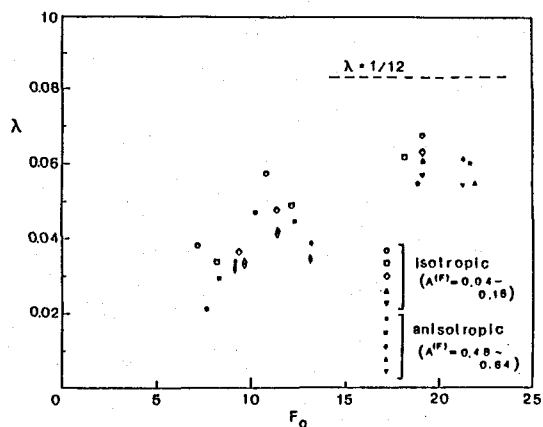


図3 λとF0の関係

3. 二次元のF0と三次元のF0との対応

以上述べたように、クラックテンソルの第一不変量 F_0 はクラック相互の連結性と密接に関係づけられる。しかし、現場調査などから得られるクラックの情報はジョイントマップなど二次元平面上での情報である。従って、実際に必要とされる三次元の透水係数を求めるためには、適切な方法を用いて三次元の F_0 を推定する有効な手段が必要であると考えられる。この節では、三次元のクラックの連結性と(7)式における λ との関連性を明らかにする目的で、二次元平面上の F_0 と三次元の F_0 との対応関係について考察するものとする。

二次元の F_0 は、トレース長さ t とクラックの面積密度 $\rho^{(2)}$ を用いて(9)式で定義されている。

$$F_0^{(2)} = \rho^{(2)} \int_0^{\infty} t^2 \phi(t) dt \quad (9)$$

ここで、 $\phi(t)$ は、トレース長の確率密度関数である。また、従来の研究⁴⁾によるとトレース長さ t の n 次のモーメントとクラックの寸法 r の1次と $n+1$ 次のモーメントの関係は(10)式で表される。

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} t^n \phi(t) dt &= \\ &= \frac{1}{\int_0^{\infty} r f(r) dr} \int_0^{\infty} r^{n+1} f(r) dr \int_0^{\pi/2} \sin^{n+1} \theta d\theta \end{aligned} \quad (10)$$

(5),(9),(10)式より(11)式が得られる。

$$\frac{F_0^{(2)}}{\rho^{(2)}} = \frac{\pi}{6 \langle r \rangle} \frac{F_0^{(3)}}{\rho^{(3)}} \quad (11)$$

また、クラックを含んだ岩盤において単位体積あたりのクラックの個数 $\rho^{(3)}$ とその岩盤の露頭に現れる単位面積あたりのクラックの個数 $\rho^{(2)}$ の関係は(12)式で表される。

$$\rho^{(2)} = \rho^{(3)} \int_0^{\infty} \int_{\Omega} r \sqrt{1 - n_i^2} E(n) f(r) d\Omega dr \quad (12)$$

例えば、等方性を仮定すると $E(n)$ は $1/4\pi$ に等しく(11),(12)式より(13)式が得られる。

$$F_0^{(2)} = \frac{2}{3} F_0^{(3)} \quad (13)$$

次に、(13)式の妥当性について数値実験、現場データ岩石供試体のクラックデータから検討する。

数値実験：十分に大きい三次元空間内に乱数を用いてクラックの中心位置の座標を指定する。クラックの大きさ、方向は同様に所定の確率密度を用いて各クラックの中心に割り付ける。このようにして三次元空間内にクラックを発生させ、この領域の三次元の F_{ij} の諸量を求めると同時にその空間内に様々な方向をもつ平面を設定して、その上に現れるクラックのトレースにより二次元の F_{ij} の諸量を求める。

現場データ：次のデータを用いて二次元の F_{ij} の諸量を計算する。

図4は長野県南木曾町の木曾川河床に露出する花崗岩の水平面に表れるジョイントトレースである。

図5はSweden Stripa Project の Ventilation Drift の Floor のジョイントトレースである。

図6は長野県大西山で採取されたミロナイト岩石供試体の展開図である。

次に、三次元の F_{ij} の諸量は、三次元空間でのクラックの方向分布と壁面に現れているトレース長さの分布データにより計算される。

このようにして得られた F_0 の二次元と三次元との対応を示したのが図7である。この図より以下の事が言える。

1) 数値実験は、理想的に等方的なクラックシステムを作り出したもので、等方性を仮定した場合の理論値に近い結果を示している。

2) 岩石供試体、現場から得られたデータは、それが異方性を持っていることから等方の時に見られたような関係は見られないが、三次元クラックシステムの異方性の程度によってその対応の違いが認められる。

3)同一岩盤の二次元の F_0 と三次元の F_0 との間には(14)式で表せられる関係があるものと考えられ、 α は異方性の程度 $A^{(F)}$ に関係するパラメータである。

$$F_0^{(2)} = \alpha(A^{(F)}) F_0^{(3)} \quad (14)$$

4. おわりに

本論では、節理性岩盤の透水性を表現するのに用いられている亀裂連続性に依存するパラメータ λ に対する亀裂の幾何学的特性の影響について考察した。その結果、クラックテンソルの二つの不変量 $A^{(F)}$ F_0 を用いることでパラメータ λ を表現できることが示された。また、パラメータ λ を三次元で検討するために、連続性に関する F_0 の二次元情報と三次元情報の対応についても考察した。今後は、三次元空間でのパラメータ λ と F_0 の関係について現場データの解析数値実験を行なっていく方針である。

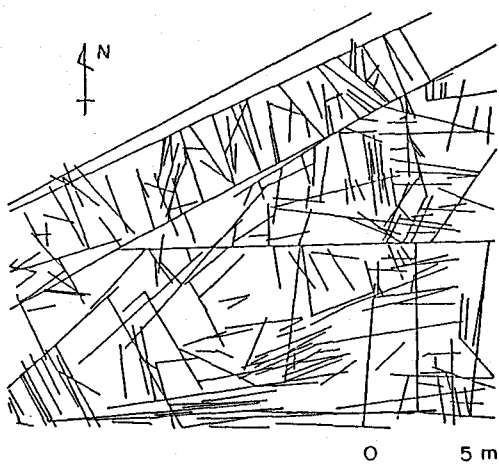


図4 木曽川河床のジョイントトレース

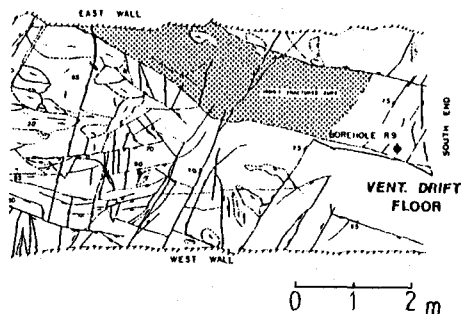


図5 ストリッパ鉱山のジョイントトレース (Thorpe, 1979)

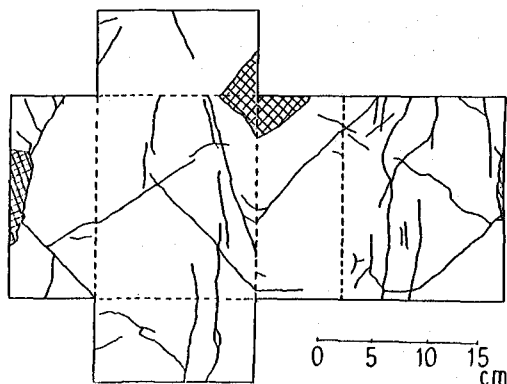


図6 岩石供試体の展開図

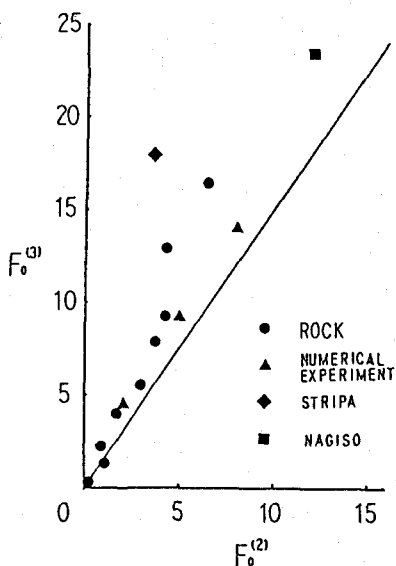


図7 F_0 の二次元と三次元の対応関係

参考文献

- 1) Oda, M., Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Geotechnique*, 35(4), 483-495, 1985
- 2) 小田匡寛, 他 地質不連続面の連結性と透水性 第21回土質工学研究発表会, pp.991-992
- 3) Robinson, P.C., Connectivity, flow and transport in network models of fractured media, Ph.D. dissertation, Oxford University 1984
- 4) Oda, M., A Method for Evaluating the Effect of Crack Geometry on the Mechanical Behavior of jointed Rock Masses., *Mechanics of Materials* 2 (1983) 163-171

(31) Connectivity among Cracks and it's Relation to Permeability
Tensor of Jointed Rock Masses

By Y.Hatsuyama¹⁾

M.Oda¹⁾

K.Kamemura²⁾

Rock masses containing a large number of geological discontinuities (called cracks) are treated as homogeneous ,anisotropic porous media. The permeability tensor is formulated by two crack tensors and non-dimensional scalar λ which is a function of the connectivity among cracks.

Based on the numerical experiments on two-dimensional crack systems, the scalar λ is mainly discussed in terms of two invariants F_0 and $A^{(F)}$ of a non-dimensional crack tensor F_{ij} .

In order to generalize the results obtained from the numerical analyses on two-dimensional crack systems, the connectivity for three-dimensional cracks is also examined.

1)Saitama University

2)Taisei Corporation