

埼玉大学 羽出山 吉裕
小田 匡寛
(株) 熊谷組 前浜 卓郎

1. はじめに

不連続性岩盤の透水性は、石油の地下備蓄、放射性廃棄物の地下投棄といった問題と絡んで、現在多くの関心が持たれている所である。岩盤内の透水性は、節理、小断層（総称してクラック）などの不連続面の形状や規模に大きく支配されるものである。そこで本報告では、クラックの幾何学的性質を表すクラックテンソルの概念を用いて節理性岩盤の透水性を表現し、節理性岩盤をそれと等価な多孔質媒体に置き換える一般的手法を提案する為の一連の研究としてWillson, Longらによって開発された数値実験を行った。

2. 節理性岩盤の浸透モデル

岩盤中の要素、体積 V の領域の中に $m^{(v)}$ 個のクラックが、この体積中にランダムな中心座標を持って存在していると看做する。各クラックの大きさを r 、厚みを t その方向を単位法線ベクトル $\underline{n}$ で表す。

小田らの研究によると、クラック相互の連結が十分である節理性岩盤の場合、その透水テンソル k_{ij} は、

$$k_{ij} = \lambda (P_{ik} \delta_{kj} - P_{ij}) \quad (1)$$

で表される。ただし P_{ij} は、 $\rho = m^{(v)}/V$ として

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

で定義される二階の対称テンソルでありクラックの幾何学的性質のみに依存している。

また、クラックの幾何学的性質を定量的に表現したクラックテンソルは次式で表される。

$$F_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^3 n_i n_j E(r) d\Omega dr \quad (3)$$

ただし、 F_{ij} は無次元量であり、クラックの相対的密度 F_0 、異方性の程度を表す指標 R 、を以下で定義する。

$$F_0 = F_{11} + F_{22} + F_{33} = \text{tr } F_{ij} \quad (4)$$

$$R = \sqrt{3} (F_{ij} F_{ij} - F_0^2/3)^{1/2} / F_0 \quad (5)$$

ただし、二次元的なクラックの場合

$$F_0 = F_{11} + F_{22}$$

$$R = \sqrt{2} (F_{ij} F_{ij} - F_0^2/4)^{1/2} / F_0$$

3. 数値実験

1) 平面上に二次元的なクラックを発生させる。その際、クラックの諸性質、クラックの位置、大きさ r 、開口幅 t 、方向 $\underline{n}$ 、クラック密度（本数）をそれぞれ任意に指定する。2) 全水頭の勾配の方向を 15° ずつ24方向に変化させる事で、その全水頭の勾配方向の透水係数 $K^{(p^{(k)})}$ を求め、これに最もよく適合する透水テンソル k_{ij} を(6)式で計算する。

$$k_{ij} = \frac{2}{\pi} \left[\sum_{k=1}^N K^{(p^{(k)})} P_i P_j - \frac{1}{4} \delta_{ij} \sum_{k=1}^N K^{(p^{(k)})} \right] \quad (6)$$

また、この式は二乗誤差 $(K^{(p^{(k)})} - \bar{K}^{(p^{(k)})})$ の総和が最小となるように k_{ij} を決定している。

4. 数値実験の結果

Fig. 1 に例として数値実験を行ったクラックパターンとその結果を示す。

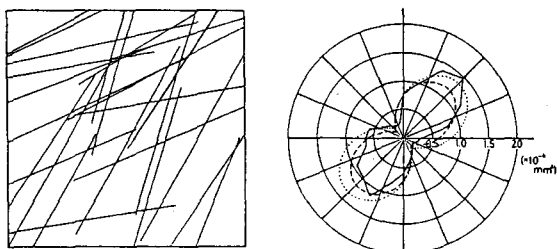


Fig.1 Crack system of sample and directional permeabilities

実線が求められた透水係数、破線がそれを近似したもの、点線が理論的に求めた透水係数である。実線と破線の間には、誤差が生じている。そこでこの誤差を評価する為に次式で定義される誤差の指標 E_r を用いる。

$$E_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} (K^{(p^{(k)})} - \bar{K}^{(p^{(k)})})^2}}{\frac{1}{24} \sum_{k=1}^{24} K^{(p^{(k)})}} \quad (7)$$

Fig. 2 は誤差の指標 E_r を縦軸にとり、横軸にクラックの相対密度 F_0 の関係を表している。この図より、 F_0 の小さいもの、つまり連結性の低いものは k_{ij} を算出する際の誤差が大きい事から、これらは多孔質媒体への置き換えが不適当であるといえる。

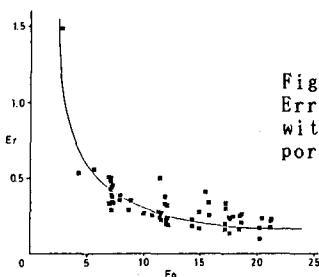


Fig. 2
Error associated
with equivalent
porous media

次に式 (1) の無次元量パラメータ λ についての考察を行なう。Fig. 3 に数値実験の総ての結果より得られた λ と F_o の関係を示す。

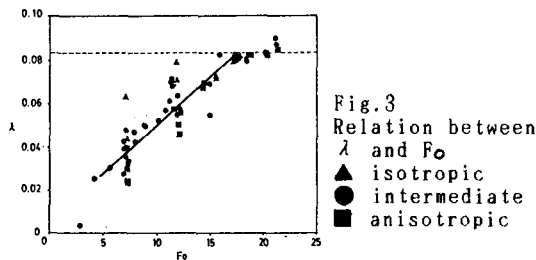


Fig. 3
Relation between
 λ and F_o
▲ isotropic
● intermediate
■ anisotropic

FIG. 3 より以下の事が言える。

- 1) F_o が 6 未満の場合、クラックの連結性が低い為に岩盤の透水性を考える際には基質部のみ考えればよい
- 2) F_o が 6 以上 17 未満の場合、 F_o が増加するに従って λ はほぼ線形的に増加し、その割合はクラックの異方性の程度 R によって若干異なり等方的なものの程大きい勾配を持つ。
- 3) F_o が 17 以上の場合、クラックの相互の連結性は十分に保たれ $\lambda = 1/12$ とみなせる。

5. 実岩盤への適用例

実際の岩盤を例として、その平均的な透水係数をこの手法を用いて決定してみる。実岩盤として、小田らが調査を行った長野県南木曾付近の木曾川河床に露出する花こう岩を用いて (20m×25m) 開口幅一定とすると P_{ij} , F_{ij} は以下である。

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 2.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1 \end{bmatrix} \times 10^3 \quad F_{ij} = \begin{bmatrix} 9.965 & 0.1616 & 1.651 \\ & 5.691 & 1.066 \\ \text{Symm} & & 7.715 \end{bmatrix} \quad (8) \quad (9)$$

平均的な透水係数 $\bar{K}$ は次式で求まる。

$$\bar{K} = \frac{K_{ii}}{3} \quad (10)$$

$$\text{ただし、} \quad K_{ij} = \frac{g}{\nu} k_{ij} \quad (11)$$

g : 重力加速度 ν : 水の動粘性係数

(1) 式、(11) 式を用いて (10) 式は (12) 式で求まる。

$$\bar{K} = \frac{2g}{3\nu} \lambda P_{ii} \quad (12)$$

F_o が十分に大きい事から $\lambda = 1/12$ とする。

Fig. 4 は、合計十ヶ所のダムやトンネルからサンプリングされた花こう岩、片麻岩における地表面からの深さと開口幅 t の関係を Bianchi and Snow が報告したものである。この図を用いて、様々な深さに対する開口幅 t を (12) 式に用いる事で平均的な透水係数を求めその結果が Fig. 5 に点線で示されている。この図には同時に四ヶ所の花こう岩種の Injection 試験により実測された透水係数も示してあり両者がよく一致している事がわかる。

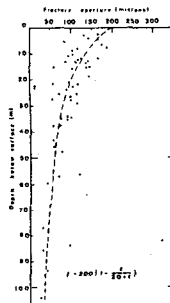


Fig. 4
Change of fracture
aperture by depth
below surface

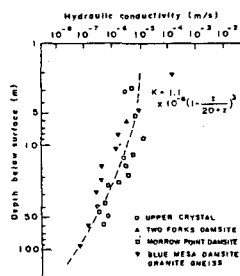


Fig. 5
Change of hydraulic
conductivity by de-
pth below surface

6. おわりに

節理性岩盤をクラックテンソルを用いて等価な多孔質媒体で置き換える事が二次元モデルの上で可能である事が明らかとなった。またこの解析法はクラックの情報を含んだ新しい解析法であり従来の現場計測と併用することで、将来、より実情とあった透水解析が可能になると期待される。

謝辞：本研究を進めるにあたり数値解析プログラムを提供していただいた京都大学工学部 大西有三先生に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Long, J.C.S., Remer, J.S., Willson, C.R. and Witherspoon, P.A. (1982): Porous media equivalents for networked of fractures, Water resources research, Vol. 18(3), pp645-658
- 2) 小田 匡寛 他 (1984): クラックテンソルによる岩盤透水係数の評価, 第六回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 pp121-126
- 3) Bianchi, L. and Snow, D.T. (1968): Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures, Annals of Arid Zone 8(2), pp231-245