

(78) 現地調査による透水テンソルの決定法

○斎藤 禎二郎 埼玉大学大学院
小田 匡寛 埼玉大学工学部
山辺 正 埼玉大学工学部
亀村 勝美 大成建設K. K

Estimation of permeability tensor based on field investigation

Teijiro SAITO, Saitama Univ.

Masanobu ODA, Saitama Univ.

Tadashi YAMABE, Saitama Univ.

Katsumi KAMEMURA, Taisei construction CO., Ltd.

Abstract

A permeability tensor, hydraulically equivalent to a flow network formed by joints, is formulated in terms of two tensors and nondimensional scalar, both depending only on the geometrical aspects of joints. The information about the geometry of joints is interpreted to give the corresponding permeability tensor. The permeability tensor is compared with the result of lugeon tests.

1. はじめに

表層における一般的な地質調査の結果により、一体どの程度の情報を得ることができるのだろうか。ここでは地質情報の簡単な数量化の例として、地質不連続面の幾何学的特徴を表す量として知られているクラックテンソルを、通常の地質調査によって求め、さらにこのクラックテンソルより現地の岩盤の透水テンソルを決定した結果を報告し、既に公表されている実測値と比較検討するものである。

2. クラックテンソルと透水テンソル

岩盤内の水の流れについて次のような三つの仮定をする。(1)水の流れは平板間の層流であり、流速は3乗則にしたがう。(2)全水頭の勾配は量域内で一定である。(3)クラック交差部での水頭損失は無視できる。以上のような仮定に基づいて透水テンソル K_{ij} は、クラックテンソル P_{ij} によって(1)式のように表せる。

$$K_{ij} = \lambda (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (1)$$

ここで δ_{ij} はクロネッカーのデルタであり P_{ij} は(2)式で与えられる2階の対称テンソルである。

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

ただし ρ は単位体積当りのクラック数、 n_i はクラックの主面に立てた単位法線ベクトル $\underline{n}$ の規準軸 x_i への成分、 r はクラックを円と見なしたときの直径であり r_m はその最大値、 t はクラックの開口幅であり t_m はその最大値、 Ω は立体角で全立体角は 4π に等しい。また $E(\underline{n}, r, t)$ は確率密度関数である。ここで

(1)式の λ は、 $0 \leq \lambda \leq 1/12$ を満たすスカラー量である。

いま、クラックの方向、長さ、開口幅の分布は統計的な意味で互いに独立であると仮定できるならば、確率密度関数 $E(\underline{n}, r, t)$ は(3)式のように書ける。

$$E(\underline{n}, r, t) = E(\underline{n})f(r)g(t) \quad (3)$$

ただし、 $E(\underline{n}), f(r), g(t)$ はそれぞれ $\underline{n}, r, t$ の確率密度関数とする。 $\underline{n}$ の空間的分布はシュミットネット上での1%面積当りに投影された $\underline{n}$ の個数の総数に対する割合で表されるが、この割合を 4π で割ったものが $E(\underline{n})$ であるので、これについては通常の地質調査から簡単に決定できる。また、単位ベクトル $\underline{q}$ に平行で長さ h の測線を張った場合、単位長さあたりの測線と交わるクラックの個数 $N^{(q)}/h$ は(4)式で推定できる。

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

ただし、 $\langle r^2 \rangle = \int_0^{\infty} r^2 f(r) dr$, $\langle | \underline{n} \cdot \underline{q} | \rangle = \int_{\Omega} | \underline{n} \cdot \underline{q} | E(\underline{n}) d\Omega$ とする。

$N^{(q)}/h$ は RQD に相当するものであり、 $\langle | \underline{n} \cdot \underline{q} | \rangle$ は $E(\underline{n})$ と $\underline{q}$ が既知であれば容易に求められる。したがって、(4)式にこれらの計測可能な値を代入することによって $\rho \langle r^2 \rangle$ を求めることが可能になる。最終的に(2)式は次のように一般的な地質調査で得られる量のみで表せる。

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \pi \rho / 4 \langle r^2 \rangle \langle t^3 \rangle N_{ij} \\ &= \frac{\langle t^3 \rangle N^{(q)}/h}{\langle | \underline{n} \cdot \underline{q} | \rangle} N_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

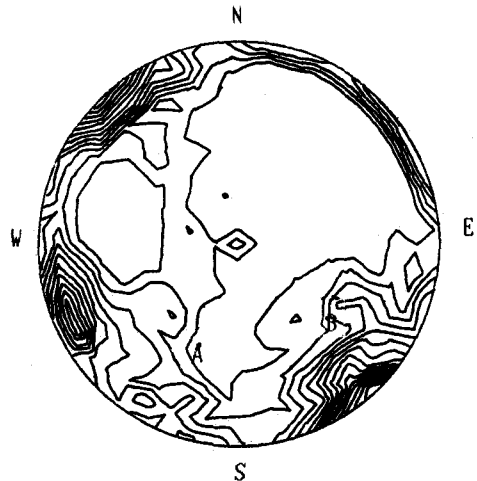
ここで、 $N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(\underline{n}) d\Omega$ であり $E(\underline{n})$ が既知であれば計算しうる二階の対称テンソルである。

3. 実岩盤での決定例

菊間石油備蓄実証プラント地表においておこなった調査の結果と、これに基づいて決定した透水テンソルについて報告する。調査は以下の要領で行った。

現地には二つの斜面が露出しており、それぞれ A 斜面 (N70W45N)、B 斜面 (N50E50N) と呼ぶことにする。クラックの走行・傾斜の計測については差別的な計測を避けるために各斜面の走行方向、傾斜方向に延べ長さが等しい測線を張り、これに沿って合計 389 の計測をおこなった。その結果は図1のコンターマップに示すとうりである。図1において主軸は、X1軸-東、X2軸-北、X3軸-上方であり、A・B斜面のボールも南半球投影で示す。現地における写真とスケッチをもとにクラックを直線近似したA・B斜面を図2に示す。

各々の斜面のクラックのトレース長さの頻度分布は図3に示すとうりである。この分布に適合す



サンプル数	;	389
コンター・インターバル	;	0.5%
Max Level	;	7.97%

図1. コンターマップ (南半球投影)

る分布として(6)式で表される負の指数分布を採用した。

$$\Psi(l) = a \cdot e^{-a \cdot l} \quad (6)$$

分布の平均値 $1/a$ は、A斜面で4.5m、B斜面で3.78m、全体では4.14mであった。

A・B斜面の走行方向に張った測線1m当りに交わるクラックの数は、A斜面では0.824本、B斜面では0.532本であった。

(5)式において $N^{(q)}/h$ の修正係数になっている $\langle | \tilde{n} \cdot \tilde{q} | \rangle$ はA斜面で0.635、B斜面で0.476であったので、 $N^{(q)}/h / \langle | \tilde{n} \cdot \tilde{q} | \rangle$ の値はそれぞれ1.30 1.12である。修正後の両者の値がかなり近いものであることは、統計幾何学を用いる方法の妥当性を示していると考えられる。

N_{ij} とこれを主軸に変換したものは以下に示す通りである。

$$N_{ij} = \begin{pmatrix} 0.43 & -0.08 & 0.00 \\ & 0.40 & 0.05 \\ \text{sym.} & & 0.17 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.498 & 0.000 & 0.000 \\ & 0.345 & 0.000 \\ \text{sym.} & & 0.157 \end{pmatrix}$$

図2. A, B斜面の直線近似

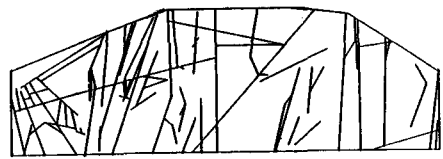
クラックの開口幅は、一般的な現地調査では計測が困難であるので、今回は図4に示す BIANCHI & SNOW (1968)のデータをベストフィットする(7)式 (ODA(1986))を用いた。

$$t = t_0 \left(1 - \frac{Z}{A + Z} \right) \quad (7)$$

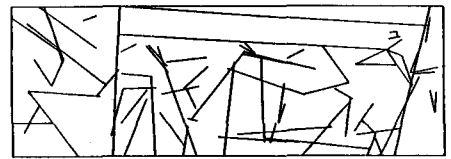
ここでは初期開口幅 t_0 として200(μm)、 $A=20$ (m)を採用し、深さZには平均土被り圧として70(m)を代入し、 $t=44.44$ (μm)を得た。(1)式および(5)式より P_{ij} , K_{ij} は次のように決定できる。

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 5.29 & 0.00 & 0.00 \\ & 3.66 & 0.00 \\ \text{sym.} & & 1.67 \end{pmatrix} \times 10^{-14} \quad (\text{m}^2)$$

$$K_{ij} = \lambda \begin{pmatrix} 5.22 & 0.00 & 0.00 \\ & 6.82 & 0.00 \\ \text{sym.} & & 8.78 \end{pmatrix} \times 10^{-5} \quad (\text{cm/s})$$



A斜面



B斜面

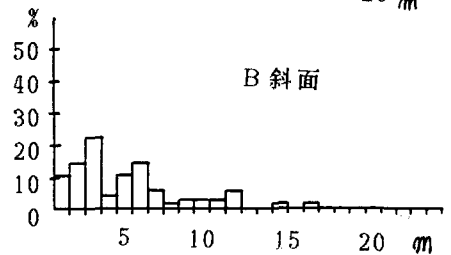
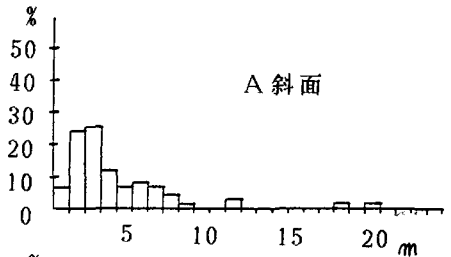


図3. クラック長さ頻度分布

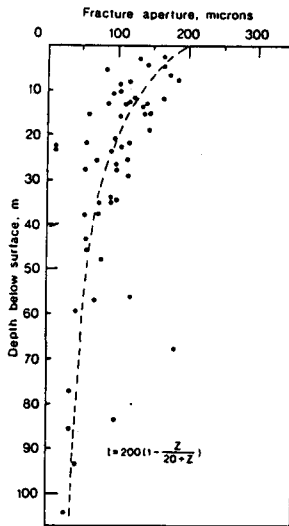


図4. 深さに伴うクラック開口幅の変化
BIANCHI AND SNOW (1986)による

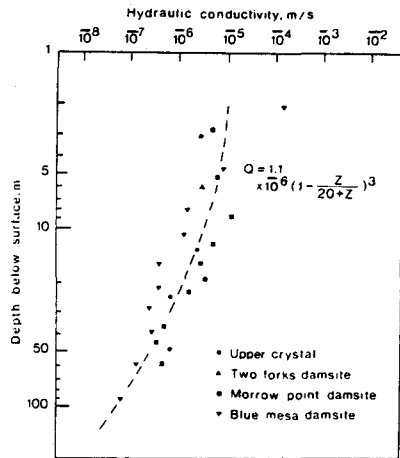


図5. 深さに伴う透水係数の変化
SNOW (1968)による

ここで、 λ については、Robinson(1984)による
パーコレーション理論により、クラック相互の連
結性は十分であると判断して最大値である1/12を
用いると平均透水係数は

$$K_{ave.} = 5.78 \times 10^{-6} \quad (\text{cm/s})$$

となる。

ところで図5に示されるSnow(1968)による透水
係数の実測値をベストフィットする(8)式で表さ
れる関数 (ODA(1986)) において、 $Q_0 = 1.1 \times 10^{-6} (\text{m/s})$
、 $A = 20 (\text{m})$ 、 $Z = 70 (\text{m})$

$$Q = Q_0 \left(1 - \frac{Z}{A + Z}\right) \quad (8)$$

を代入すると $1.21 \times 10^{-6} (\text{cm/s})$ を得た。また図6の
既に発表されている透水試験の結果にはクラックテ
ンソルにより求めた平均値、実測値の幾何平均値、
巨視的平均透水係数を記入した。図より明らかなよ
うにこれらの値はオーダー的に非常によい一致を示
していると言える。

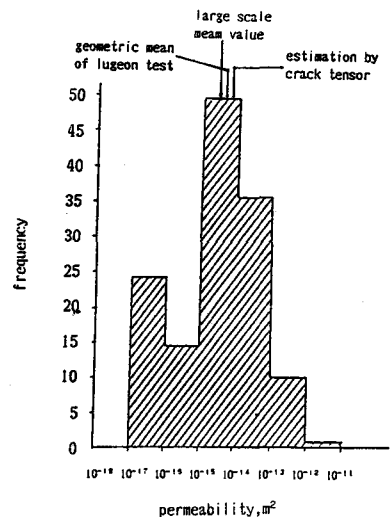


図6. ルジオン試験結果による透水係数
星野(1984)による

表1. 透水係数と水理学的開口幅

	透 水 係 数 (cm/s)	水理学的開口幅 (μ m)
クラックテンソル	5.78×10^{-6}	44.4
(8)式	1.21×10^{-6}	26.4
実測値幾何平均値	3.75×10^{-6}	38.5
巨視的平均値	2.50×10^{-6}	34.0

4. まとめ

表1に透水係数及び水理学的開口幅の数値を示す。ただし、ここで言う水理学的開口幅とは開口幅以外のクラックの幾何学的量の分布が地質調査からえられたものであるとした場合に各透水係数を得るのに必要な開口幅である。表より明かなように一般的な地質調査からある程度の精度で透水係数を求めることができたが、難点としてクラックの開口幅分布の問題が挙げられる。ここでは図4のデータを用いしかも開口幅は統計的に独立で一定という仮定に基づくものであった。同様な方法でストリッパ鉱山の透水係数を決定している例があり(Oda,1987)、やはりオーダー的に非常によい一致を示しているが、岩盤は今回の現場と同様の花こう岩である。花こう岩質の岩盤に関しては開口幅が図4に示される(すなわち式(7)でベストフィットされる)ものとよく似ているのかも知れないが、岩盤の開口幅分布に関しては今後データの蓄積が期待される。

また、今回は平均透水係数のみについて論じたが、岩盤の構造あるいは岩盤のおかれている応力状態の異方性が透水性に与えるであろう影響も検討すべき問題であると考えられる。この問題については今後数値実験等を行いたい。

いずれにしても、クラックの幾何学的特徴量の分布を調べることにより統計幾何学の手法を用いて透水テンソルを決定でき、またその値は実測値とオーダー的によい一致をみることが明らかになった。

参考文献

- 星野 一男, 菊間石油地下備蓄実証プラント(その1), 地質ニュース, 第350号, 6-18, 1983
 星野 一男, 菊間石油地下備蓄実証プラント(その2), 地質ニュース, 第353号, 48-62, 1984
 Bianchi, L., and D.T. Snow, Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientation and aperture of fractures, Ann. Arid Zone, 8(2), 231-245, 1968
 Oda, M., Permeability tensor of discontinuous rock masses, Geotechnique, 35(4), 483-495, 1985.
 Oda, M., An equivalent continuum model for coupled stress and stress and fluid flow in jointed rock mass, Water Resources Reserch, Vol. 22, No. 13, pp 1845-1856, Dec, 1986
 Oda, M., Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa Mine, Sweden, Journal of Geophysical Reserch, Vol. 92, No. B8, pp8037-8048, 1987
 Robinson, P.C., Connectivity, flow and transport in network models of fractured media, Ph.D. dissertation, Oxford Univ., New York, 1984