

(73) 応力を考慮した岩盤の浸透解析

埼玉大学大学院○斎藤禎二郎

埼玉大学工学部 小田 匡寛

大成建設㈱ 大坂 一

1. はじめに

岩盤の浸透流に関する問題は、エネルギーの地下備蓄や高レベル放射性物質の廃棄など、地下空間利用が具体化され始めた事に伴い重視され始めた。しかし、岩盤の浸透流に圧倒的な影響を与える地質不連続面の分布状態は、日本列島が地質学的変動帯に位置していることから極めて複雑な様相を呈していて、調査・解析手法の確立を一段と困難なものにしている。

この論文は現地調査の結果を、浸透流解析に直接利用するシステム開発の一端として、応力が岩盤の浸透流におよぼす影響を検討したものである。

2. 応力を考慮した透水テンソル

2-1. 垂直剛性

小田(1986)は、クラックテンソルを用いて、応力を考慮した岩盤浸透流の基礎式を報告した。地質不連続面のモデルとしてベニーコイン型・スプリングモデルを採用し、その変形性を垂直方向、セン断方向のバネ剛性 H 、 G で表している。Bandisら(1983)により発表された不連続面を含む岩石の圧縮試験の結果は、次式のように双曲関数でbest fitできる。

$$\sigma_n = \delta / (a - b \delta) \quad (1)$$

ここで、 σ_n は有効垂直応力(有効応力を σ'_{ij} とすれば $\sigma_n = \sigma'_{ij} n_i n_j$)、 δ はクラックの開口変位、 a 、 b は実験定数である。 H を σ_n / δ で定義すると、(1)より、

$$H = (1 + b \sigma_n) / a = (1 + b \sigma'_{ij} n_i n_j) / a \quad (2)$$

を得る。ただし、 n_i はクラックに立てた単位法線ベクトル $\underline{n}$ の x_i 軸方向への成分である。 t_0 、 H_0 をそれぞれ初期開口幅、初期垂直剛性とするとき、 a 、 b は、

$$a = 1/H_0, \quad b = 1/(t_0 \cdot H_0) \quad (3)$$

となる。また、Bandisらの実験結果を参考に、セン断剛性と同様に垂直剛性はクラックの直径 r に反比例すると仮定でき、クラックのアスペクトレシオ $c (=r/t_0)$ を用いると、

$$H = (h + c \sigma'_{ij} n_i n_j) / r \quad (4)$$

と表せる。全立体角にわたって平均すると

$$\bar{H} = \int H E(\underline{n}) d\Omega = (h + c \sigma'_{ij} N_{ij}) / r = \bar{h} / r \quad (5)$$

ここで $E(\underline{n})$ は単位法線ベクトルの確率密度関数であり地質調査から決定される。また、 N_{ij} と $\bar{h}$ は次式で表される。

$$N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(\underline{n}) d\Omega \quad (6), \quad \bar{h} = h + c \sigma'_{ij} N_{ij} \quad (7)$$

2-2. 透水テンソル

岩盤が巨視的に多孔質媒体と見なせるならば、水の流れの記述にダルシー則を用いることができる。均質な多孔質媒体の一般化されたダルシー則は、

$$v_i = -(g/\nu) k_{ij} J_j \quad (8)$$

で表される。ここで v_i は x_i 方向の巨視的平均流速、 J_j は x_j 方向の動水勾配である。また、 k_{ij} は透水テンソルであり、

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

と表せる(ODA,1986)。ここで λ は、 $0 \leq \lambda \leq 1/12$ の不等式を満足する無次元のスカラー量であり、クラック相互の連結性に依存することが知られている。また、 P_{ij} は、次式で表される2階の対称テンソルである。

$$P_{ij} = \int_0^t \int_0^r \int_{\Omega} (\pi \rho / 4) t^3 r^2 n_i n_j E(\underline{n}, r, t) d\Omega dr dt \quad (10)$$

開口幅 t は、(5)式で定義される垂直バネ定数 H を用いると

$$t = t_0 - (\sigma_n / H) = r (1/c + \sigma'_{ij} n_i n_j / \bar{h}) \quad (11)$$

で表される。これを(10)式の t に代入すれば P_{ij} は

$$\begin{aligned} P_{ij} = & (1/c^3) f_{ij} - (3/c^2 \bar{h}) f_{ijkl} \sigma'_{kl} \\ & + (3/c \bar{h}^2) f_{ijklmn} \sigma'_{kl} \sigma'_{mn} \\ & - (1/\bar{h}^3) f_{ijklmnop} \sigma'_{kl} \sigma'_{mn} \sigma'_{op} \end{aligned} \quad (12)$$

となる、ただし式中の f_{ij} は不連続面の幾何学的特性に依存するテンソルであり、次式で定義される。

$$f_{ij \dots k} = \int_0^t \int_0^r \int_{\Omega} (\pi \rho / 4) r^5 n_i n_j \dots n_k E(\underline{n}, r, t) d\Omega dr dt \quad (13)$$

3. 数値実験

3-1. 実験概略

BIANCHI AND SNOW(1968)は、花こう岩質岩石の節理の開口幅 t を実測し、その結果を深さの関数として報告している(Fig.1)。Fig.1の結果は(11)式とも整合的であって、次式でbest fitされる。

$$t = 200 \{1 - z / (20 + z)\} \quad (14)$$

ただし、 z は深さ(m)である。式(14)は、 $H_0 = 0.27 \text{ Mpa/m}$ 、 $t_0 = 200 \mu$ とすることに対応している。この結果を用い、次に述べる2次元クラックパターンに対し定常浸透流の数値解析を行った。

(1) 十分大きい領域 (辺長100m) に乱数を用いてクラックの中心座標を割り当てる。

(2) 中心座標にクラックの長さ r 、方向 n 、初期開口幅 t_0 を次の要領で決定する。

長さ：平均=10m、標準偏差=3m、正規分布

方向：等方なモデルを得るため平均= $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の各方向、標準偏差= 10° で同数のクラックを発生する。

初期開口幅：(14)式より 200μ と設定した。

以上の方法で作られたクラック・パターンは $F_0 = 8.76$ 、 $F_0 = 11.49$ の2例であり、それぞれFig.2、Fig.3に示す。二つのクラックパターンを用いて等方応力を与える実験を行い、異方的な応力状態と透水テンソルの関係を調べる数値実験には $F_0 = 11.49$ とするFig.3のクラックパターンが用いられた。

(3) 解析領域を決定する (一辺 $L = 50 \text{ m}$ の正方形領域)。

(4) 任意の深さに対応する有効垂直応力 σ'_v を次式で計算する。

$$\sigma'_v = 0.017 \cdot z \quad (\text{Mpa}) \quad (15)$$

有効水平応力 σ'_h は、有効垂直応力 σ'_v に対する比である

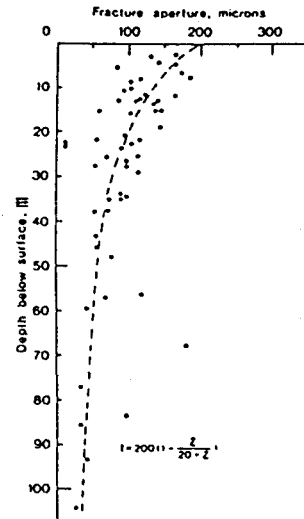


Fig.1. Change of crack aperture with depth (Data are taken from Bianchi and Snow [1968]).

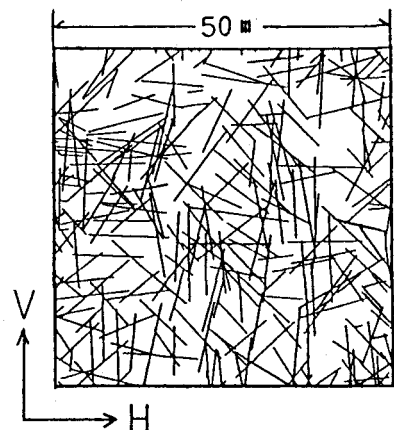


Fig.2. Flow region ($F_0 = 8.76$).

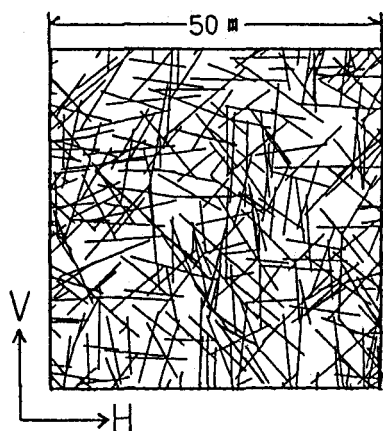


Fig. 3. Flow region ($F_0=11.49$).

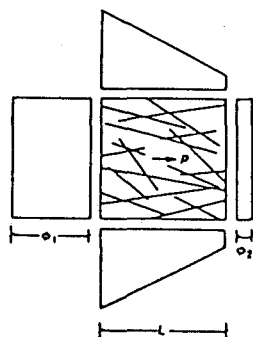


Fig. 4. Cubical flow region with two constant head boundaries ($\phi_1 > \phi_2$) and two boundaries with a linear variation in head from ϕ_1 to ϕ_2 (two-dimensional drawing, $L=50\text{m}$).

K_0 値を変化させることによって種々の応力状態を作った。今回 K_0 値=1.0 とする等方応力状態と、 K_0 値=2.5の異方応力状態を採用した。各応力状態に対応するクラックの開口幅を式(14)を用いて計算する。

(5) Fig. 4のように境界条件を与える。

(6) クラックは線要素であり、岩盤中の水の流れはクラック間の流れをPoiseuille流れとし、基質部の水の流れは無視できるものとする。さらにクラック連結部でのエネルギー損失は無いものと仮定して流量を計算し、それぞれのクラックパターンについて24方向の透水係数 $K^{(p)}$ を求める(ODA, 1986)。

(7) (6)で求めた透水係数をもとに、 $K^{(p)}$ の方向による変化を説明する透水テンソル k_{ij} を次式で求める(KANATANI, 1984)。

$$k_{ij} = (4/N) \left\{ \sum_{p=1}^{p=24} K^{(p)} p_i p_j - (1/4) \delta_{ij} \sum_{p=1}^{p=24} K^{(p)} \right\} \quad (16)$$

なお、今回の数値実験では $N=24$ である。

3-2. 実験結果

F_0 が8.76のクラックパターンで深さ9.53m および152.5mにおける $K^{(p)}$ 、 k_{ij} をFigs. 6, 7に示す。

Figs. 6, 7では実線が数値実験より得られた透水係数であり、一方破線は(15)式により数値実験結果をbest fitさせたものを示している。

等方応力状態($K_0=1.0$)の数値実験によって得られた平均透水係数を深さ z に対してプロットして示しのがFig. 5である。ここで、平均透水係数は次式で求めたものである。

$$R = (g/24v) \sum_{p=1}^{p=24} K^{(p)} \quad (17)$$

図中の●, ▲, ▼, ■印はSnow(1968)によって報告された実測データを示している。クラック密度の指標である F_0 の大小は平均透水係数の差として示される。例えば深さ9.53mの所でみると F_0 が8.76から11.49へ増加することに伴い平均透水係数は $1.002 \times 10^{-6} (\text{m/s})$ から $2.078 \times 10^{-6} (\text{m/s})$ へと増加している。しかし、 F_0 が岩盤の透水性に及ぼす影響は意外に小さく、むしろ深さによる応力の増加の影響が著しい。

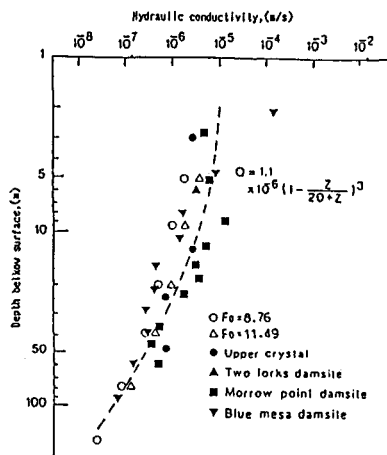


Fig. 5. Change of hydraulic conductivity with depth (Data are taken from Snow 1968).

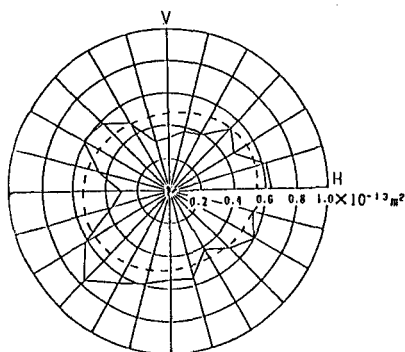


Fig. 6. Directional permeabilities. $F=8.76$; Depth=9.53(m)
: $K_0=1.0$; $\sigma'_v=\sigma'_h=0.162$ (Mpa)

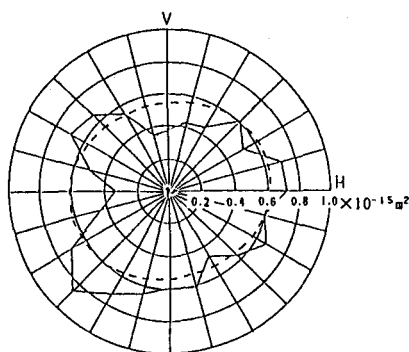


Fig. 7. Directional permeabilities. $F=11.49$; Depth=132.5(m)
: $K_0=1.0$; $\sigma'_v=\sigma'_h=2.592$ (Mpa)

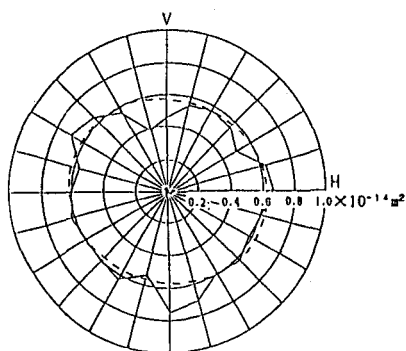


Fig. 8. Directional permeabilities. $F=11.49$; Depth=76.2(m)
: $K_0=1.0$; $\sigma'_v=\sigma'_h=1.296$ (Mpa)

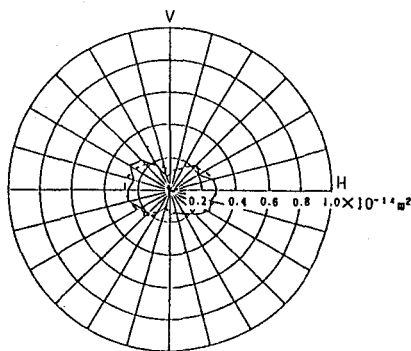


Fig. 9. Directional permeabilities. $F=11.49$; Depth=76.2(m)
: $K_0=2.5$; $\sigma'_v=\sigma'_h=1.296$ (Mpa), $\sigma'_v=3.24$ (Mpa)

Snowによる実測は、いわゆるpacker試験から得られたものであり、ここで述べた二次元クラックに沿う浸透と直接比較することはできない。しかし、図に示されるように各深さごとの平均透水係数の絶対値や、深さ方向の変化の傾向、ともに数値実験の結果がSnowの実測データと整合的であることは注目してよい。

異方応力状態($K_0=2.5$)とした場合、透水性 $K^{(p)}$ は方向により大きく変化する(Figs. 8, 9)。すなわち、クラックパターンが等方的であっても応力によってinduceされた異方透水性が認められる。Figs. 8, 9での表記法はFig. 6, 7と同様であり、深さは76.2mにとり、有効垂直応力は1.296Mpaである。

4. 結論

日本のように地質学的変動帯に位置する地域では、応力の分布状態も複雑で予想しにくいものであろう。従って、岩盤の透水性を調査・解析するとき不連続面の幾何学的特性はもとより、原位置の応力状態をも把握することが重要であるといえる。

今回の実験より応力状態が透水性に大きな影響を及ぼすことが明らかになったが、今後は構造的に異方性を持つ領域に関する実験や、実際に地下空間利用の対象となる深さにおけるものなど、より現実的な実験を行い、 P_{11} との比較をする予定である。

(73) Numerical experiments on coupled stress and
fluid flow in jointed rock masses

Saitama univ. :Teijiro Saito
" :Masanobu Oda
Taisei Construction Co.:Hajime Osaka

ABSTRACT

Rock masses commonly contain a large number of geological discontinuities which may play an important role in the determination of permeability. Experiments have also suggested that the stress state gives a fundamental influence on the permeability. Oda(1986) has proposed an equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses, by assuming that any discontinuity can be replaced by a set of parallel planar plates connected by two springs. In order to check the reliability of the theory, numerical experiments are done with the special emphasis on making clear the effect of stress distribution on fluid flow in jointed rock masses. A comparison is also made between the result of the experiments and field evidences to examine the applicability of the present experiments for the practical purpose of rock mass hydraulics.

参考文献

- Bandis, S.C., A.C. Lumsden, and N.R. Barton, Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 20(6), 249-268, 1983.
- 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
- E. Hoek & E.T. Brown, Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, 1980
- Kanatani, K., Distribution of directional data and fabric tensors, Int. J. Eng. Sci., 22(2), 149-164, 1984
- Oda, M., Permeability tensor of discontinuous rock masses, Geotechnique, 35(4), 483-495, 1985.
- Oda, M., An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow in jointed rock mass, Water Resources Research, Vol. 22, No. 13, pp 1845-156, Dec, 1986
- Snow, D.T., Hydraulic characteristics of fractured metamorphic rock of the front range and implications to the Rocky mountain Arsenal well, Colo. Sci. Mines Q., 63, 167-199, 1968