

(73) 不連続性岩盤の節理調査と透水試験

労働大林組技術研究所

平 間 邦 興

同 上

丸 山 誠

同 上

鈴 木 健一郎

1. はじめに

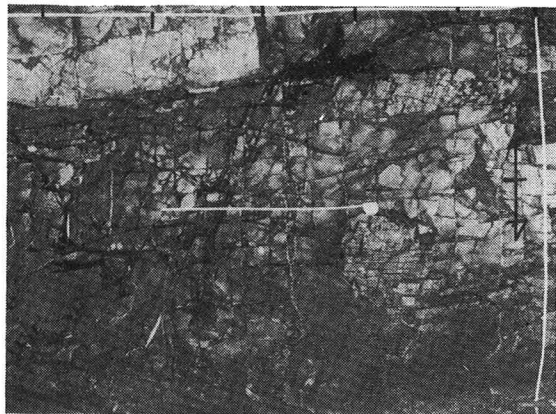
岩盤を構造物の基礎としたり、或いは構造物として利用する場合、それらの力学的及び水理学的挙動を支配する要因として次の3つがあげられる。

(1)母岩の力学及び水理学的性質(強度、変形特性、透水性)(2)不連続面の幾何学的特性(不連続面の大きさ、方向、密度、開口量)(3)不連続面の物理的及び力学的性質(挟在物の有無、せん断、垂直剛性)。不連続性岩盤の透水性状をとらえようとする場合には、主に(2)や(3)の要因の評価が重要となる。特に多くの不連続面がランダムに含まれている岩盤を対象とする場合は、等価な透水性を有する多孔質媒体としてモデル化するのが有効な評価手法となる。これまで、節理調査データの評価手法として不連続面の幾何学的特性の各々の要素について、例えば、不連続面の方向の分布は、ステレオ投影などの手法を用いたり、大きさの分布も露頭に現われる交線の長さから統計的手法により分布の評価が行なわれている。しかし、それらを統一的に表現し、更に定量化して岩盤を等価な多孔質媒体としてモデル化するには、総合的判断の基準となる指標が必要となる。近年、不連続面の大きさ、方向、密度などの幾何学性を特徴づける要素をテンソル量を用いて総合的に評価し、等価な変形特性や水理特性を推定する試みが小田ら(1)によって行なわれている。そこで、本研究では、特に不連続面の幾何学的特性に注目し、長さ数cmから数mの不連続面を多数含む、所謂、不連続性岩盤の透水性を評価しようと実施した節理調査により透水係数を推定し、同じ岩盤において実施されたルジョン試験の結果との比較を試みた。又、透水性の応力依存性について室内試験より得られた知見より、深さ方向の透水性の変化についても推定し、比較を行なった。以下にその概要について述べる。

Photo.-1



Photo.-2



岩盤割れ目系

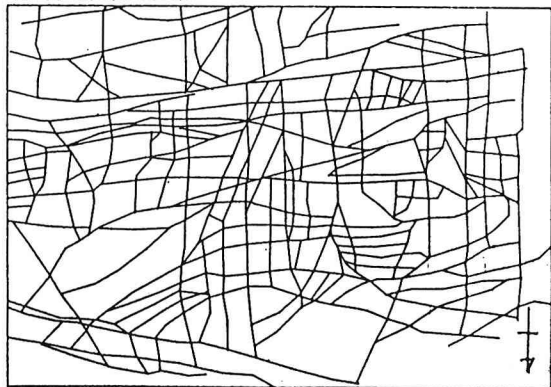


Fig-1

2. 調査地点の概要

調査地点の岩盤は、中生代後期の酸性火砕岩で、主に凝灰質頁岩から成り、下位には礫質凝灰岩が堆積している。露頭カ所は凝灰質頁岩であり、非常にクラッキーなものである。調査地点は次の3つである。A 1は河床部でほぼ水平な露頭である。A 2及

びA 3では鉛直面の観察を行なった。A 2及びA 1の露頭状況を写真1及び写真2に示す。A 1は、N-S方向に2 m程度、EW方向が3 m程度の露頭で、それ以上の範囲は、表土により測定できなくなっている。ここではN-S方向及びE-W方向にそれぞれ2本の測線を設け、交わった不連続面の走向と傾斜を測定した。又、A 2及びA 3においても上下方向に1本ずつの測線を設け、不連続面の走向と傾斜を測定した。又、ルジオン試験は露頭近くの合計10本のボーリング孔で行なっており、ボーリングコア観察よりRQDが求められている。

3. 調査結果の整理

A 1, A 2, A 3において測定された不連続面の走向、傾斜のデータをまとめてシュミットネット上にプロットしたのが図-2である。これより明らかに3つの分布が存在し、3つの不連続面群に分けられることがわかる。写真よりわかるように現場で不連続面の長さを1本1本測定することは非常に時間がかかるので、ここでは、全領域を1枚の写真に撮ることにより、後でその長さをトレースしたのが図-1である。この平面図により傾斜がほぼ90度、表向がN-Sであるグループ1と走向がE-Sであるグループ2に関する長さの分布を求めたのが図-3と図-4である。破係は、そのとき同時に推定される確率密度関数で、グループ1及びグループ2において、それぞれ

$$f(l) = 1.20 \exp(-1.20 l) \dots\dots\dots G 1$$

$$f(l) = 2.30 \exp(-2.30 l) \dots\dots\dots G 2$$

と示される。ここで密度関数には負の指数分布、 $f(l) = \lambda e^{-\lambda l}$ を仮定しているが、両分布の間に明らかな違いが見られる。これは、両者の測定範囲の違いによるものと推定される。Priest & Hudsonによると不連続面の両端が十分に得られていない場合に次式が用いられる。

$$f(l) = \lambda e^{-\lambda l}; \lambda = -\ln[(N_l - N_c)/N_t]/C \dots\dots (1)$$

ここで N_t は、測線を設けた時に交わった不連続面の全本数、 N_c は領域 $C(m)$ 内で長さが完全なものの総数である。これを用いて計算された密度関数を実線で図中に示す。図4のように範囲の狭い場合、推定される分布形状が大分異なることがわかる。鉛直面についての交線長さの分布も(1)式により推定が可能であるとする、グループ1、グループ2及びグループ3についての密度関数は、

$$f(l) = 1.09 \exp(-1.09 l) \dots\dots G 1$$

$$f(l) = 1.30 \exp(-1.30 l) \dots\dots G 2$$

$$f(l) = 0.76 \exp(-0.76 l) \dots\dots G 3$$

となる。

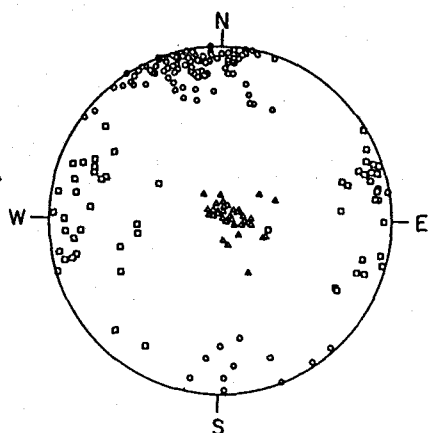


Fig-2

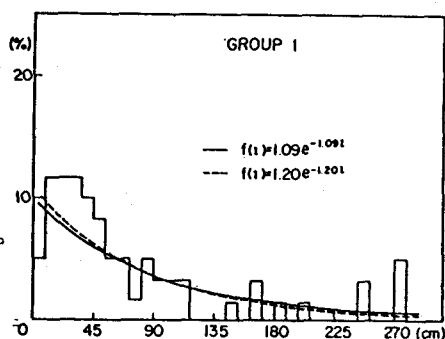


Fig-3

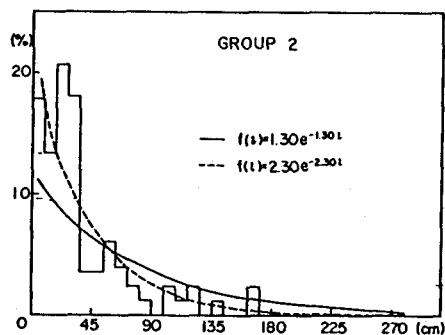


Fig-4

4. 透水係数の推定

岩盤中のある要素；体積 V の領域中に $m(v)$ 個の不連続面がランダムな中心座標をもって存在している場合不連続面の大きさを r ，厚みを t ，その方向を単位法線ベクトル $\underline{n}$ で表わすとする。小田らの研究によると不連続面の連結が十分である場合，その透水テンソル k_{ij} は $k_{ij} = C(P_{kk}\delta_{ij} - P_{ij})$ で表わされる。ただし， P_{ij} は， $\rho = m(v)/V$ として $P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_\Omega t^3 r^2 n_i n_j E(\underline{n}, r, t) d\Omega dr dt$ で定義される二階の対称テンソルであり，不連続面の幾何学性だけに依存している。また不連続面の幾何学的性質を定量的に表現したクラックテンソル F_{ij} は， $F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^\infty \int_\Omega r^3 n_i n_j E(\underline{n}, r) d\Omega dr$ で表わせる。 F_{ij} 及び P_{ij} は，不連続面の方向，大きさ，開口量がそれぞれ独立である。そして，開口量 t は t_0 なる定数であると仮定すると，①不連続面の方向 $\underline{n}$ ，②交線長さ l ，③方向 $\underline{q}$ ，長さ h を持つ測線に交わる不連続面数 $N^{(q)}$ の3測定量で簡単に決定できる。節理調査より決定された P_{ij} 及び F_{ij} は，

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 8.93 & -0.91 & -0.02 \\ & 7.60 & 0.41 \\ & & 8.94 \end{pmatrix} \times 10^{-2} \times t_0^3 \quad \dots\dots(2) \quad F_{ij} = \begin{pmatrix} 9.19 & -0.86 & 0.44 \\ & 15.07 & -0.84 \\ & & 23.29 \end{pmatrix} \quad (3)$$

となり， F_0 が 47.75 と十分大きいので k_{ij} は $C = \frac{g}{12\nu}$ を用いて，

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} 1.13 & 0.62 & 0.01 \\ & 1.22 & -0.23 \\ & & 1.13 \end{pmatrix} \times 10^3 \times t_0^3 \quad \dots\dots(4)$$

と推定される。平均の透水係数は $\bar{k} = k_{ij}/3 = 1.16 \times 10^3 \times t_0^3$ である。

5. ルジオン試験結果との比較

同じ地点で行なったルジオン試験結果を RQD に対して示したのが図-5である。今，隣り合う不連続面の間隔 S が負の指数関数 $(f(s)) = \lambda e^{-\lambda s}$ に従うとすると， RQD の理論値は次式で与えられる。(図-6参照)

$$RQD_{0.1}^* = 100 e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad \dots\dots(5)$$

ここで λ は平均間隔の逆数，即ち $N(q)/h$ を $|\underline{n} \cdot \underline{q}|$ の平均値で割ったものに等しい。節理調査より得られた λ は 8.5 であり図-6より $RQD_{0.1}^*$ はほぼ 80% となる。透水係数は t_0 を仮定しなければ求まらないので，調査結果より $RQD=80\%$ のとき 10 l/h とすると(5)式より平均の透水係数 $\bar{k}$ を与える開口量 t_0 は $4.4 \times 10^{-3} \text{ cm}$ を得る。この t_0 が一定として RQD による透水係数の変化を図-5に併記した。これによると，節理調査より推定された平均の透水係数はルジオン試験結果によく対応しているといえる。筆者らは，花崗岩を用いた放射流型の透水試験(図-7参照)を行ない，応力に伴う

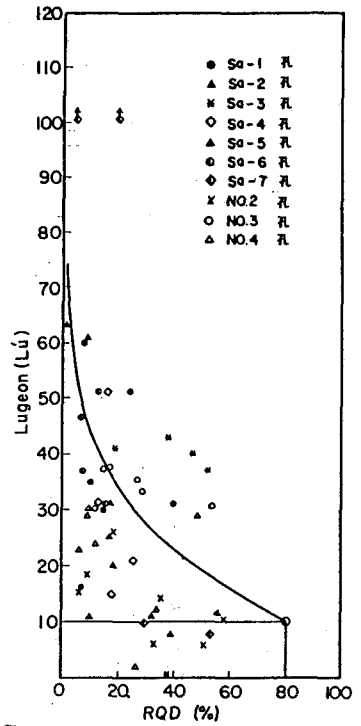


Fig-5

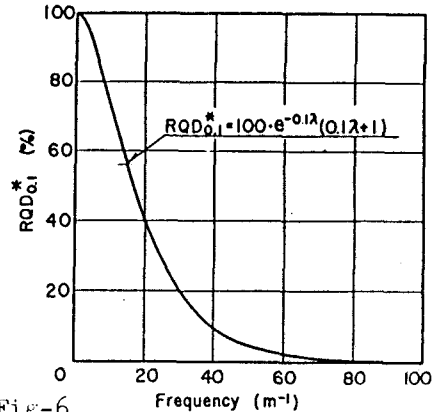


Fig-6

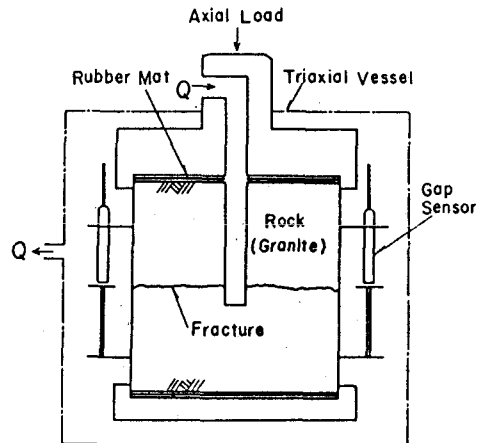


Fig-7

透水性の変化について次のような知見を得た。平行平板内の層流を考えた場合に、流量から推定される開口幅は、応力の対数に対して線型関係にあり、その傾きは面の状態により異なるが、ある応力でほぼ同じ値に収束し、その後一定の挙動を示す。これを定式化すると $l = l_0 - \log(\sigma_n / \sigma_0)$ となる。ここで l_0 は収束したときの応力 σ_0 のときの開口量で、図-8 にその一例を示す。同一試料における処女载荷 (○印) と 4 回目の载荷 (△印) による透水性の変化である。○印は、面がかなり粗い場合で载荷除荷のくり返しにより面が滑らかになったと考えられるのが△印の場合である。これらを数式化すると、それぞれ、

$$l_0 = 5.0 \times 10^{-4} - 7.2 \times 10^{-3} \times \log(\sigma_n / 50)$$

$$l_0 = 5.0 \times 10^{-4} - 3.2 \times 10^{-3} \times \log(\sigma_n / 50)$$

となる。この試験結果を単位体積重量 2.5 g/cm^3 として、深さ方向におけるルジオン値の変化を示したのが図-9 である。ルジオン試験の結果を十分に表わしており、それぞれ試験値の上限と下限を与えていると推察される。

6. おわりに

今回、節理調査結果にある仮定を設けて透水係数の推定を試みた。その値が原位置でのルジオン試験結果のバラツキを比較的良好に説明していたことより、クラックテンソルを用いた不連続性岩盤のモデル化の適用性が認められた。今後、調査のシステム化を計り、一般的な不連続面の定量的記載に加え、テンソル量の算定、簡単なシミュレーションを行なう解析システムについて検討していく所存である。なお、この調査にあたり、埼玉大学小田助教授の御指導を得た。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- (1) 例えば小田、前沢 “クラックテンソルによる岩盤透水係数の評価” 第6回岩の力学国内シンポジウム pp121 to 126 (1984)
- (2) S.D.Priest & J.A.Hudson “Estimation of Discontinuity Spacing and Trace length Using Scanline Surveys” Int. J. Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr. vol. 18 pp183 to 197 (1981)

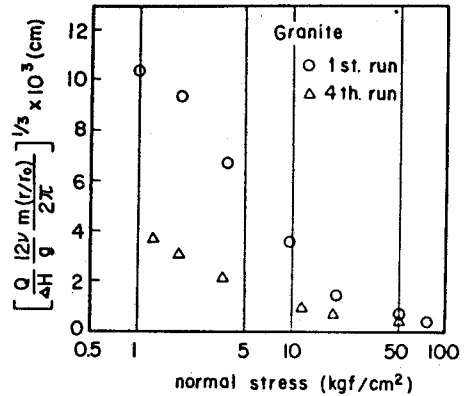


Fig-8

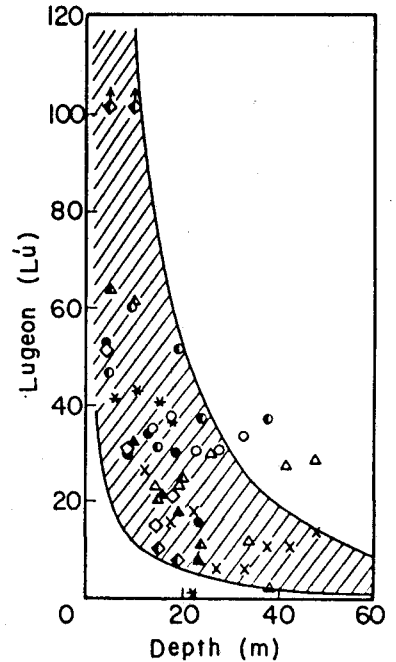


fig-9

(73) Joint surveys and Permeability tests
on Discontinuous Rock Mass

Kunioki Hirama *
Makoto Maruyama *
Kenichirou Suzuki *

*Technical Research Institute of OHBAYASHI CORPORATION

The groundwater flow through a discontinuous rock mass is determined by the geometry of discontinuities; the permeability of intact rock is generally negligible compared with the hydraulic conductivity of discontinuities.

In order to characterize the geometry of discontinuities, joint surveys usually include measurement of trace length, orientations of discontinuities and so on. The so-called crack tensor which has been introduced by Oda(1983) as an index measure for analytically identifying the geometry of discontinuities can be determined from those data.

In this paper, permeability of discontinuous rock mass by means of crack tensor is estimated by joint survey data and compared with the results of Lugeon tests. Out of results, the followings were found worthy of being reported;

- (1) The predicted permeability of rock mass shows the variation of permeability with RQD value.
- (2) The predicted variation of permeability with depth which is based upon the elastic Hertzian contact theory reflects in-situ test results.