

(32) 節理調査と透水試験に基づく岩盤の透水性評価について

協大林組技術研究所 平 間 邦 興
同 上 丸 山 誠
同 上 鈴 木 健一郎

1. はじめに

近年、岩盤の力学的及び水理学的挙動を推定するを旨とした節理調査が行われ、貴重なデータが蓄積されつつある。一方では、大型計算機の導入、解析技術の進歩が、大規模なしかも複雑な地盤を対象とする構造物の挙動を再現することを可能にしている。しかし、両者を結びつける一般的な方法が存在しないために有効なデータが定性的な判断規準の域に留まり数値計算における岩盤モデルの物性値の正当性についても定量的な議論ができないのが現状である。この様な問題を解決するための一つの手法として提案されたのがクラックテンソル¹⁾である。

著者らは、昨年来実際に岩盤の節理調査を行ないクラックテンソルを決定し、その適用性について検討してきた。今回の報文では、石灰岩の採石場において、節理調査並びに透水試験をはじめとする各種の岩盤試験を実施し、次のような点について検討を行なった。

- (1) 急峻な崖面における節理データの測定と解析
- (2) ボアホールテレビによる節理の位置、方向、開口量の観察
- (3) 単一節理に関するルジオン試験及び室内試験と水理学的開口量の関係
- (4) クラックテンソルによる透水係数の推定と実験結果との比較

以下にそれらの概要について述べる。

2. 調査地点の概要

調査地点付一近は、花崗閃緑岩や石灰岩並びに泥質片岩を主体とする古期岩類（古生層）より形成されている。対象岩盤となる石灰岩は花崗閃緑岩の併入を受けて一部変質して、中粒～粗粒の状態でかなりの層厚で分布している。調査地点は、ほぼ平坦な水平面と、鉛直に近い崖面とからなっている。本平面に見られる亀裂は、閉じているように見えるが、茶褐色の酸化鉄を挟んでいることより水径となっていることがわかる。一方、崖面は、鉛直に近い節理が、比較的多く、岩塊として浮いている所もある。水平面におけるスケッチと崖面の写真をそれぞれ図1と写真1に示す。水平面は、12m×9mの範囲を2m×2mの格子内のスケッチを行ない、つなぎ合わせたもので、注水孔（φ100mm）と観測孔（φ86mm）の位置も付記してある。崖面は高さ約15mで、写真は下方

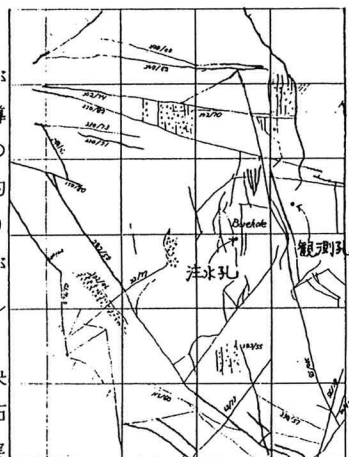


図 1 2m



写真 1 2m

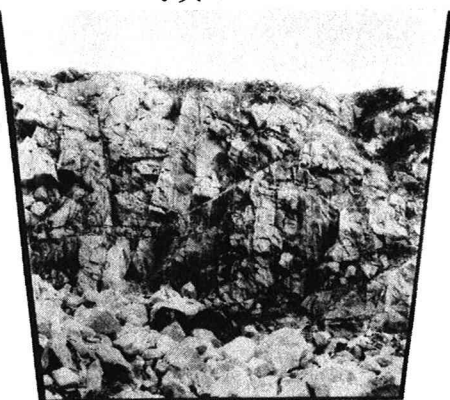


写真 2

より見上げるように撮影したために写真の上下において長さが異なる。

3. 節理調査とクラックテンソル

図1に示した水平面のスケッチから節理の交線長さを、また方向を原位置において測定している。一方、写真1に示した崖面では、原位置で方向は測定したが、交線長さについては、現地計測がかなり危険を伴うため次のような手法によった。①写真1に見られるように崖の上部と下部に長さの指標となるものを一緒に撮影する。②写真1のネガを図2aのように偏位修正を行ない焼付ける。これにより上部と下部の長さがある程度修正される。③焼付けられた写真を図2bのようにアオリをかけて撮影することによりさらに修正する。以上②、③の手順を適当に繰り返すことにより完全に上下の長さのひずみが補正される。補正後の写真を写真2に示した。この写真をもとに、デジタイザーによりパソコンシステムを用いて節理をトレースし、交線長さを求めた。

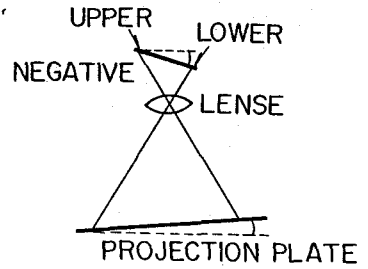


図2a

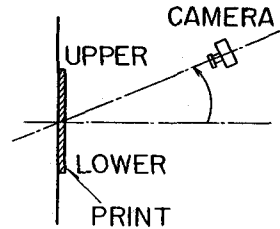


図2b

調査結果として、節理の方向の分布を等面積投影法によりネットにプロットしたのが図3である。この図からはあまり明白ではないが、写真及び現地のスケッチと合わせて判断して、水平に近い節理群、鉛直に近い傾斜を持ち、N45°E付近の走向を持つ節理群とN45°W程度の走向を持つ節理群という3つに分けられると判断した。

次にボアホールテレビ観察の結果を簡単に述べる。ボアホール壁面全体を観察した結果から、ルジオン試験を行なった4つの領域における節理の状況を図4に示す。実線の節理は十分開口していると思われるもので、破線は節理と判断できるが、密着しているものである。開口しているものは、その幅1~2mmと測定された。

以上の調査結果を用いて対象とした岩盤(領域として10m×10m×10m程度が考えられる)のクラックテンソル及び、第2種クラックテンソルは次のようになった。すなわち、

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 3.07 & 0.70 & 0.70 \\ & 3.97-2.61 & \dots \\ \text{symm} & & 8.39 \end{bmatrix} \quad P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.38 & 0.50 & 0.06 \\ & 0.51 & -0.26 \\ \text{symm} & & 1.33 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \dots \textcircled{2}$$

となる。透水係数 K_{ij} はPoiseuille 流れを仮定して

$$K_{ij} = \frac{g}{12\nu} (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij})$$

$$= \begin{bmatrix} 1.25 & -0.34 & -0.04 \\ & 1.16 & 0.18 \\ \text{symmu} & & 0.61 \end{bmatrix} \times 10^6 \times t^3 \quad (\text{m/sec}) \dots \textcircled{3}$$

を得る。ボアホールテレビによる観察結果より $t = 1 (\text{mm}) = 10^{-3} (\text{m})$ を平均節理開口量とすると、平均透水係数 $\bar{k} (=k_{ii}/3)$ は、 $1.01 \times 10^{-3} (\text{m/sec})$ と非常に大きな値となる。

4. 原位置透水試験結果と検討

まず、岩盤の透水性を把握する目的で、ボアホール全長(10m)にわたる定水位注水試験を行なった。こ

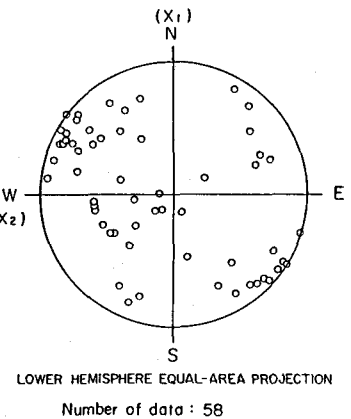


図3

の試験では、ボアホール内に注水し、地表面と同レベルに水位を保ちその時の注水量と時間を測定した。時間に対して注水量は一定で、毎分 9.75 ℓであった。その後、節理自体の透水性を知るために、図 4 の 4 区間においてダブルバック方式によるルジオン試験を行なった。ルジオン値 (Lu) は、注水圧 1 MPa における 1 m 当りの毎分の注水量 (ℓ/min/m) とすると、Darcy の法則が適用可能であるとする、透水係数 κ と次のような近似的な関係が知られている。²⁾

$$\kappa = \frac{Lu}{2\pi P} \ln \frac{\ell}{r} \quad \dots\dots\dots ④$$

ここで、Lu はルジオン値を (m²/sec) に換算し、ℓ は試験区間長 (m)、P は注入圧力で水頭差として 100 m を用いる。r は試験孔の半径である。一方、ルジオン試験区間に N 本/m の平行な節理群が孔を面の法線とるように存在しているとし、水は Poiseuille 流れに従って節理中のみを流れると仮定するとその時の透水係数 κ は、次のようになることが知られている。³⁾

$$\kappa = \frac{g}{12\nu} \frac{1}{\ell} \sum t^3 \quad \dots\dots\dots ⑤$$

ここに g は重力加速度 (9.8 m/sec²)、ν は水の動粘性係数 (13 ℃ のとき 1.2×10^{-6} m²/sec)、t は節理を平滑平行平板としたときの平板間の距離である。t が平均値 t_0 で全て同じであるとする、式④と⑤を等しいと置くことによりルジオン試験結果から t_0 を推定することが可能となる。これを節理の水理学的開口量と呼ぶことにすると、 t_0 は

$$t_0 = \left[\frac{Lu \ln(\ell/r)}{2\pi P} \frac{12\nu\ell}{gN} \right]^{1/3} \quad (m) \quad \dots\dots\dots ⑥$$

となる。ここで 1 m 当りの節理頻度 N は、例えば節理間隔が逆指数分布に従うとすれば、地質柱状図中の RQD 値と理論的に

$$RQD^* = 100 e^{-0.1/N} (0.1/N + 1) \quad \dots\dots\dots ⑦$$

という関係式から推定することが可能である。ここではボアホール TV 観察結果より各測定区間の節理本数は既知である。すなわち、区間 1 で 1 本、区間 2 で 1 本、区間 3 は 0、区間 4 では 2 本の水径たる節理が認められた。そこで、式⑥を用いて、水理学的開口量を計算すると、それぞれ、 1.26×10^{-4} 、 1.60×10^{-4} 、 1.84×10^{-4} m $\times$ 2 本となる。これらの平均値 $t_0 = 1.64 \times 10^{-4}$ m を用いると、(3)式は、

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} 5.51 & -1.50 & -0.18 \\ & 5.12 & 0.79 \\ \text{symm} & & 2.69 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \quad (m/sec)$$

となる。ところで、区間 1 におけるルジオン試験の P~Q 曲線の一例を図 5 に示す。図中、ボーリングコアから得られた節理を含む供試体の室内試験結果も付記した。実験の概要を図 6 に示した。この供試体は区間

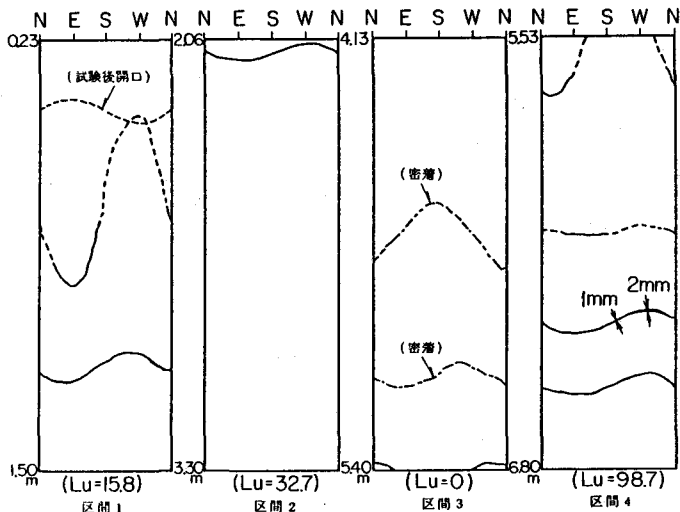


図 4

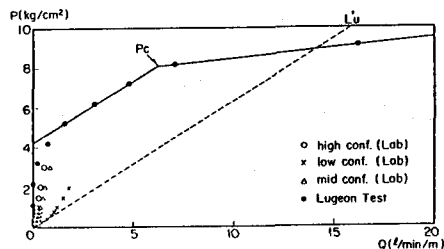


図 5

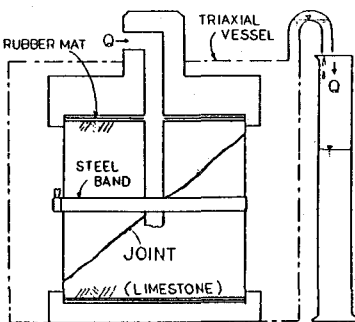


図 6

1の開口節理を含んでいるもので、節理面が傾斜しているため、スチールバンドを用いて円柱周方向に3種類の拘束を与えて試験を試みた。破線は換算ルジオン値を示す直線であるが、拘束条件の違いによつては、低注水圧においてこの直線と一致することがわかる。ある程度の注入圧力をかけると限界圧力に達し、節理が開口することはよく知られている。そこでルジオン試験後に再びボアホールTVにより壁面の状況を観察し、明らかに節理の状態が変化していることを確認した。今、P～Q曲線を限界圧力点で折れるbi-linearで近似し、限界圧力前後でのP～Q関係から得られる水理学的開口量を用いて、ルジオン試験前後での節理の状態の違いを表現することを試みた。この考え方より、ルジオン試験後の平均的な水理学的開口量として $1.96 \times 10^{-4} \text{ m}$ を得た。

最後に観測孔を利用して、注水孔全長にわたる定水位注水試験を行なった。このとき、注水孔の水位を地表面で保つのに、毎分21.5ℓが必要で、観測孔の水位は、-1.78mで一定であったことから、調査地点の岩盤の透水係数は $1.11 \times 10^{-5} \text{ (m/sec)}$ であると推定された。

5. 岩盤透水係数の比較

表1に、定水位注水試験より得られた透水係数と、クラッチテンソルより指定される透水係数をまとめて示した。ここで $\bar{k}$ は透水係数テンソル K_{ij} から $k_{ii}/3$ の値を計算したものである。又、座標系として右手系を、 X_1 軸をN方向、 X_2 軸をW方向に、そして X_3 軸を鉛直上向きにとっているので、 $\bar{k}_h$ とは $(K_{11}+K_{22}/2)$ であり、 $\bar{k}_v$ とは K_{33} の値である。これらの結果から次のようなことがいえる。

- (1) ボアホール壁面で計測した節理の見掛けの開口量を用いて推定される透水係数は、実際の透水係数とはかなり異なる。
- (2) 平均の透水係数をルジオン試験結果から推定すると、多少小さめの値となるが、ルジオン試験前後の推定値は、概略試験結果と一致する。
- (3) 定水位注水試験結果と、クラックテンソルから推定される水平方向透水係数 $\bar{k}_h$ はルジオン試験前後ともよく一致する。

6. おわりに

本報告での検討結果をまとめると、次のようになる。

- (1) 節理の交線長さが測定不可能な場合、写真撮影により補うことが可能である。この写真撮影の際、長さにはずみが生じるような場合には、長さの指標となるものを、一定区間に設けて一緒に撮影することにより写真の補正が可能となり、正確なデータが得られる。
- (2) 節理の開口量測定において、ボアホール壁面での開口量を直接適用することは透水性の把握には十分ではない。透水性の把握のための開口量つまり、水理学的開口量を求めるためにはルジオン試験結果から
- (3) ルジオン試験結果から求めた水理学的開口量と露頭での節理調査データからクラックテンソルをもとに推定された透水係数は、原位置試験結果とよく一致する。

今後、このような原位置岩盤に関するデータをより多く蓄積し、より効率的なシステム化を計るとともに、現場の施工管理等に反映させていく諸存である。

尚、この実験を行なうにあたり、住友セメント株式会社資源事業部並びに、同社田村工場関係者各位より頂いた御助力に対し深甚なる謝意を表します。また研究の実施にあたり、埼玉大小田先生より有益な御助言を頂いていることを付記し合わせて、感謝の意を表します。

(32) Estimation of Permeability for jointed rock mass

based on joint survey and injection tests

Kuioki Hirama, Makoto Maruyama, Kenichirou Suzuki
Technical Research Institute of OHBAYASI CORPORATION

One of the problem to be overcome is how to estimate the hydraulic aperture of joint, which identify the hydraulic property of jointed rock mass. In this report, assuming cubic law for a flow through smooth parallele walls, hydraulic aperture of joint is estimated from the results of Lugeon Water Pressure test for one or two isolated joints. Further, joint survey is performed and the geometry of joints is characterized by means of crack tensor. Permeability of jointed rock mass is estimated by using crack tensor and hydraulic apertures. Out of results, the following were found worthy of being reported. (1) Joint aperture required for characterizing the hydraulic properties for jointed rock mass could be given by LWP test data. (2) Estimated permeability based on crack tensor using hydraulic aperture reflected permeability for jointed rock mass.

表 1

	Permeability before LWP tests (cm/sec)	Permeability after LWP tests (cm/sec)
Full length Injection test results	5.17×10^{-4}	1.11×10^{-3}
K estimated based *1 on visible aperture	1.01×10^{-1}	—
K estimated based *2 on hydraulic aperture	4.44×10^{-4}	7.58×10^{-4}
Kh estimated based *3 on hydraulic aperture	5.32×10^{-4}	9.07×10^{-4}
Kv estimated based *4 on hydraulic aperture	2.69×10^{-4}	4.59×10^{-4}

*1: Visible aperture on the borehole wall is average 1 mm wide investigated by borehole TV camera.

*2: Hydraulic aperture is estimated by eq. (19). Mean hydraulic aperture is 1.64×10^{-4} and 1.96×10^{-4} cm wide before and after LWP tests, respectively. K is one-third of trace of Kij.

*3: Kh is the mean of 11 and 22 components of Kij.

*4: Kv is 33 component of Kij.

参考文献

- 1) Oda et al. (1984) "Permeability of Jointed Rock Mass by Means of Crack Tensor"
Proc of the 6th Japan Symposium on Rock Mech. 121-126
- 2) 建設省土木研究所地質化学部地質研究室 "ルジオンテスト施工指針(案)" (1977)
- 3) Snow, D.T. (1969) "Anisotropic Permeability of Fractured Media"
Water Resources Research Vol. 5 No. 6 1273-1289