

(76) 原位置岩盤の不連続性と透水性の評価

(株)大林組 技術研究所	鈴木 健一郎
同 上	桑原 徹
同 上	丸山 誠
同 上	平間 邦興

Estimation of the Relationship between Joints and Permeability on in-situ Rock Mass

Kenichirou Suzuki, Tohru Kuwahara, Makoto Maruyama, Kunioki Hiram
of
TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE of OHBAYASHI CORPORATION

Abstract

The locality of jointing is induced by large scale geological structure formed by faults. Lugeon Water Pressure Test (LWP Test) reflects local permeability and crack tensor proposed in order to evaluate permeability of jointed rock mass can express the locality of joint geometry.

In this report, an approach to the study of the relationship between Lugeon units and local joint geometry is described by comparing Lugeon units with theoretical permeability given by crack tensor. To conclude, the dependence of LWP Test results on the locality of jointing can be explained in terms of crack tensor considering aperture of joint distinctly.

1. はじめに

岩盤の透水性を評価するために行なわれる原位置試験の中で、最も平易に実行されるのがルジオン試験であろう。一般に指摘されるようにルジオン試験は岩盤の局所性に依存するものであり、その局所性は岩盤中に存在する地質学的不連続面によって形成されるものである。しかしこれまで両者の明瞭な対応関係について論じられる機会は少なかったように思われる。

ルジオン試験と不連続面の分布特性の関係を明らかにすることは、より広い領域での岩盤の透水性を推定するに当たり大きな助けとなるはずである。本報告では、某ダム基礎岩盤において観測された不連続面の分布から、大規模な断層によって形成される地質構造が小規模不連続面群（節理群）に与える影

響を述べる。更に同岩盤において行なわれたルジオン試験の結果と節理群の幾何学的な分布特性の関係についてクラックテンソルを媒体として論じたものである。

2. 地質概要

調査地の岩盤は、黒色片岩と緑色片岩からなる岩盤である。調査地内には、最大幅15 mの横ずれ断層、あるいは正断層が発達し、副次的に形成された小規模断層や節理群が見られる。図-1に調査地の地質状況を示す。領域寸法は約50m * 25mで、その中央左にE-W方向の横ずれ断層とNW-SE方向の横ずれ断層が交差するものである。交差部周辺は節理が発達し破碎帯を形成している。¹⁾

新鮮な片岩および断層中の粘土については、試料を採取し、室内透水試験も行なっている。その結果

片岩については 10^{-9} cm/secオーダー、断層粘土については $10^{-6} \sim 10^{-5}$ cm/secオーダーの透水係数が得られている。²⁾

3. 大規模地質構造の影響

図-1に見られるような地質状況において、中・小規模の不連続面が、より大規模な地質構造より影響を受けるであろうことは十分予想される。そこで、その影響を次のような方法により調べた。

直径2.5mの円を図-2に示すようにおよそ全領域をカバーするように移動しつつ、各位置における円内の不連続面のトレースから、2次元のクラックテンソルを計算する。円領域を移動させることにより、特定方向（例えば正方形領域を考えれば対角線方向）の不連続面が強調されるのを避けることが可能である。

各位置で求められたクラックテンソルを比較することにより、小規模の不連続面が受ける影響について考えた。

計算結果をまとめたものを図-3に示す。図-3中の各線分の長さは F_{ij} の主値に、方向は主方向、そして中心位置は円領域の中心と一致するものである。図-1の節理マップと比較することにより次のような点が指摘できる。

1) 各位置での節理群の卓越方向（短線分と平行方向）は、断層周辺では断層にほぼ直角方向で、E-W方向の断層より南側では、W方向に、北側ではE方向に流れる。これらの流れは、図中の矢印で示す断層の動きと関係すると考えられる。

2) 各位置での節理の相対密度（主値の和； F_o ）は断層近傍で土砂に隠れた部分が多いためあまり明瞭ではないが、およそ2つの断層の交差部より離れた位置では、節理の相対密度は小さくなっている。

同様な解析を直径5mの円領域に対しても行なったが、ここに示したもののほど明瞭な結果とはならず、かえって傾向が弱まる結果となった。これはクラックテンソルが領域内の不連続面の平均的な幾何学特性をとらえる指標であることを示している。



図-1 調査地の地質状況

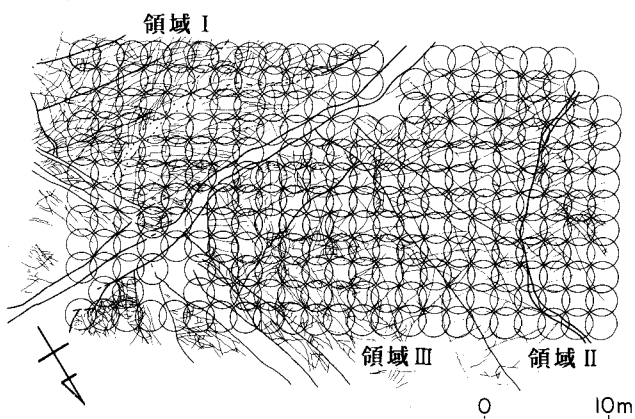


図-2 クラックテンソルの計算領域

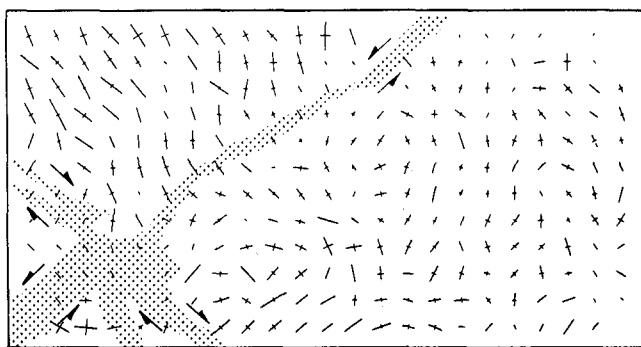


図-3 クラックテンソルの主値と主方向

以上のように、副次的に形成された節理は、大規模な地質構造に依存することが、クラックテンソルを用いることにより表現することが可能であることが確認された。

4. 均質な領域

大規模な断層により構成される地質構造は、その付近の小規模な節理の幾何学的な分布に影響を与えることが明らかになった。このような領域をモデル化していく場合（等価な連続体に置き換えてモデル化する場合）に、次のステップとして行なわれるべきことは統計的に均質な領域に分割することである。“統計的に均質”という意味は“不連続面の中心位置のランダム性と、不連続面の寸法、方向の位置に対する独立性”で定義されるものとする。³⁾ この定義に従い3節での考察結果より本調査領域は以下の3領域に分割できる。(図-2参照)

- ・領域Ⅰ：E-W方向およびNW-SE方向の断層の南側で、NW-SE方向にクラックテンソルの主値があるもの。断層の形成にともなって出来た節理とその節理に付随する小規模な節理とからなる。
- ・領域Ⅱ：E-W走向の断層の北側で、NW-SE方向の断層に平行な副次的断層の西側の領域。E-W、NW-SE方向の2つの断層に平行な、共役な比較的大きな節理が卓越し、小規模節理はあまり見られない。
- ・領域Ⅲ：2つの大規模断層の交差点の西側で、領域Ⅱの東側の領域。E-W、NW-SE方向の断層に平行な節理は認められるが、その他に方向性を有さない小さな節理が密集する領域である。

図-4にそれぞれ3つの領域に含まれる円領域で求められたクラックテンソルの第一不変量 (F_0) の分布を示した。領域Ⅰ～Ⅲは、それぞれ平均値、分布型が異なることから、節理の分布特性は各々の領域において論じられるものであり、3者を統一的に論じることは不適であると判断した。

5. 節理の幾何学的分布とルジオン試験

5. 1 ルジオン試験⁴⁾

ルジオン試験は、グラウトの注入圧力を決定するためにセメント注入の前に行なわれたもので、今回対象とした調査地内でも200 か所以上の試験結果がある。しかし、それらの結果は必ずしも原位置の岩盤の透水性を反映するものではないと考えられる。すなわち、ボーリング孔で実施された2次以降のルジオン試験は、注入の影響を受け、節理が充填されている部分も存在する。そこで今回は、調査地内で

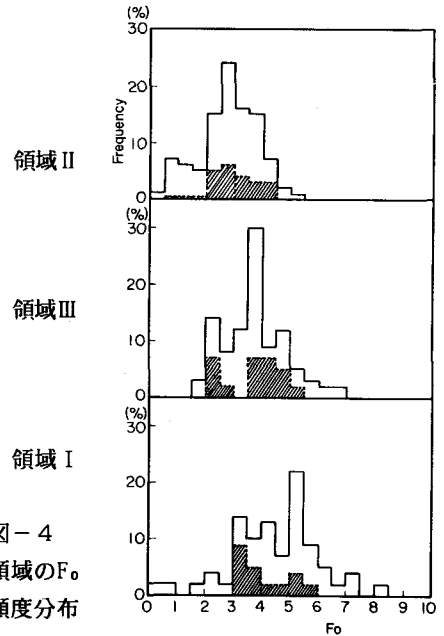


図-4
円領域の F_0
の頻度分布

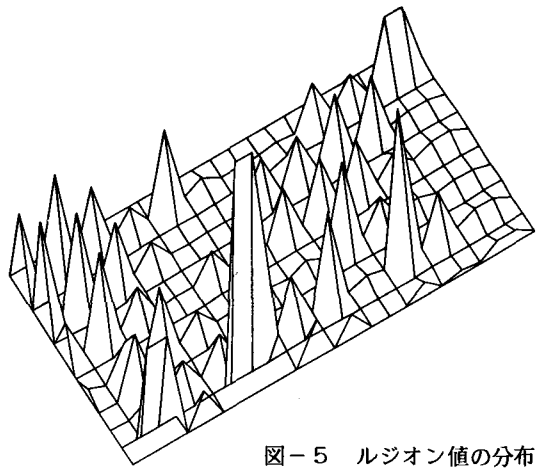


図-5 ルジオン値の分布

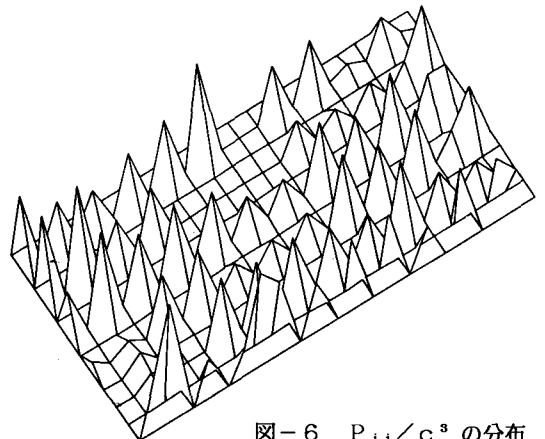


図-6 P_{13}/c^3 の分布

行なわれた1次孔(59 か所) のルジオン試験結果の
みを対象とした。

試験は、コンクリート1ブロック打設毎に地表面
から5 mの区間について行なわれたものである。図
ー5に全領域におけるルジオン試験結果を示した。
図中、山の高さはルジオン値に対応し、その位置は
およそ図ー1の平面図に対応する。ルジオン試験が
岩盤の非常に局所的な透水性をとらえていることが
分かる。

5. 2 クラックテンソルによる透水係数

節理性岩盤の透水性は、岩盤中に存在する節理に
支配される。かつ、節理中の水の流れは節理の開口
幅に左右されるとし、小田は岩盤の透水係数テンソ
ル k_{ij} を次のように表わした。⁵⁾

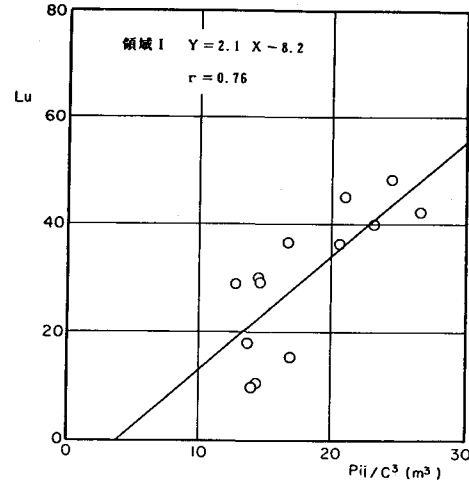
$$k_{ij} = \lambda \left(P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij} \right) \quad \cdots (1)$$

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

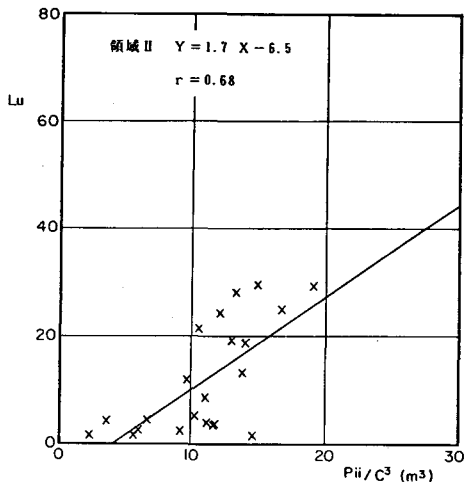
ただし、 r_m, t_m はそれぞれクラックの寸法、開口幅
の最大値、 Ω は立体角、 n_i はクラックの単位法線
ベクトルの基準座標軸に関する方向余弦、 ρ は単位
体積当たりのクラックの数である。また λ は、クラ
ック相互の連続性に依存する無次元パラメーターで
あり、クラックの相対密度や異方性の程度にも依存
するものである。透水係数テンソルを決定するのに
必要な情報のうち、収集が困難である開口幅につ
いて次の条件を与えた。すなわち、 $t = c r$ (t :開口
幅、 r :長さ、 c :扁平率, aspect ratio) とする。ま
た、調査領域に現われた節理は、調査面にたいして
垂直で深さ方向にたいして変化しない。として2次
元の P_{ij}/c^3 を図ー2に示した円領域それぞれに
ついて求めた。結果を図ー6に示す。図ー6は図ー
5と同様、山の高さが P_{ij} の第一不変量 (P_{ii}/c^3)
を示し、その位置は平面図に対応するものであ
る。ただし、表示したのはルジオン試験結果のある
位置のみとした。

5. 3 クラックテンソルとルジオン値

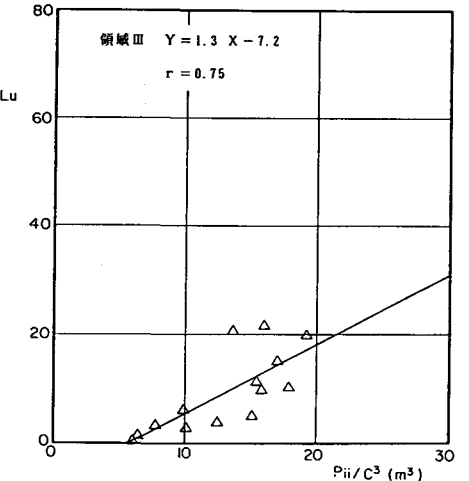
節理の幾何学的な分布特性の異なる3つの領域そ
れぞれについて、 P_{ii}/c^3 に対してルジオン値を
プロットしたのが図ー7から図ー10である。図ー7
は領域Ⅰのもので、プロットされている点の F_0 の値
は図ー4中の斜線で示した分布である。相関係数は
76%と比較的良好な相関性を示している。すなわちル
ジオン値の局所性は、試験点周辺の領域の局所的な



図ー7 ルジオン値と P_{ii}/c^3 の相関(領域Ⅰ)



図ー8 ルジオン値と P_{ii}/c^3 の相関(領域Ⅱ)



図ー9 ルジオン値と P_{ii}/c^3 の相関(領域Ⅲ)

節理の分布に依存していることが確認された。また、図中の回帰直線の傾きは、ルジオン値が透水係数に換算できるとすれば、扁平率 c と式(1)中の定数 λ を用いて λc^3 で表される。今、 λ は節理の連続性が十分であるとすれば $1/12$ であるから、これを仮定して c を推定すると 5.9×10^{-5} となる。領域中の節理の平均長さにたいして c の値から開口幅を求めると $128 \mu\text{m}$ となり、図-11に示したBianchi and Snow⁶⁾が花崗岩と片麻岩にたいして求めた開口幅の地表面付近の値と一致する。

領域ⅡおよびⅢの相関係数はそれぞれ68%、75%とこれらも相関性が認められる。また、領域Ⅰの場合と同様な方法により扁平率 c を求めるとそれぞれ 5.5×10^{-5} 、 4.9×10^{-5} となる。

横軸と回帰直線との交点(実質的に不透水を与えるテンソルの値)も3領域ともほぼ同様な値であり、ルジオン値と P_{ij} の間のこの傾向は領域に依存しないことが分かる。図-10には3領域の結果をまとめて示したが、局所的な領域において決定されたクラックテンソルはルジオン試験結果をよく反映することが確認された。

同様の相関性を直径5mの円領域にたいして行なったところ相関性が得られなかった点を考慮するとルジオン試験の局所性は、試験孔周辺の半径1~2m程度の領域ではないかという推定も成り立つ。

6. まとめ

今回の調査より得られた知見をまとめる次のようになる。

- (1) 小さな領域(ここでは節理の平均長さと同程度の領域)における節理の幾何学的な分布特性をクラックテンソルで表現した場合、その特性は位置に依存する。すなわち、小規模な節理群の幾何学的特性はより大規模な断層により形成される地質構造に影響されることを意味する。
- (2) ルジオン試験は節理性岩盤の透水性を評価する1手法であるが、局所性が指摘されている。局所的な節理の幾何学性を節理の開口幅を考慮したクラックテンソル P_{ij} で表現すると、ルジオン値とよく対応する。
- (3) ルジオン値と P_{ij} の相関性より推定される節理の扁平率は $5 \sim 6 \times 10^{-5}$ となり、節理の平均長さから推定される平均開口幅は $110 \sim 150 \mu\text{m}$ である。

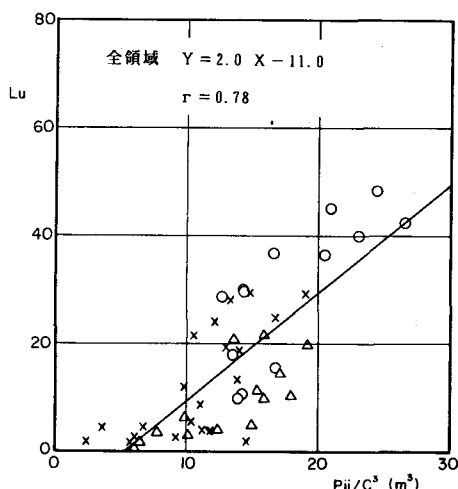


図-10 ルジオン値と P_{ij}/C^3 の相関(3領域)

節理性岩盤の透水性を評価する上で、ルジオン試験は、局所的ではあるがその周辺の節理分布を反映するものである。従って、クラックテンソルと一緒に用いることにより、より広い領域の岩盤の透水性を知る上で有効な指標たり得ることが示唆される。

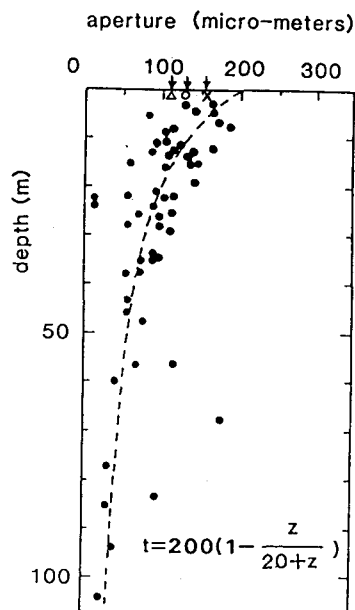


図-11 開口幅の変化⁷⁾

【参考文献】

- 1) 鈴木ほか, "各種岩盤における構造最小単位について" 第7回岩の力学内シンポジウム講演論文集, pp 115 to 120, (1987)
- 2) 桑原ほか, "結晶片岩中の断層粘土に関する地質・工学的特性", 第2回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp 166 to 170, (1987)
- 3) 小田ほか, "不連続性岩盤の水利・力学的性質を評価するために必要な最小供試体寸法について", 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp 126 to 130, (1985)
- 4) 建設省土木研究所地質化学部地質研究室, "ルジオンテスト施行指針(案)", (1977)
- 5) Oda, M. "Permeability tensor for discontinuous rock masses", Geotechnique 35, No. 4 pp 483 to 495, (1985)
- 6) Bianchi, L. et al., "Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures", Annals of Arid Zone, Vol. 8, No. 2, pp 231 to 245, (1968)
- 7) 山辺, "軟岩と不連続性岩盤の力学性評価および変形解析に関する基礎的研究" 博士論文 (1988)