

# 不連続性岩盤の亀裂評価と透水性

平 間 邦 興      丸 山    誠  
桑 原    徹      鈴 木 健 一 郎

## Hydraulic Properties and Joint Geometry in Discontinuous Rock Mass

Kunioki Hirama      Makoto Maruyama  
Tohru Kuwahara      Ken-ichiro Suzuki

### Abstract

There are two problems to be overcome in order to gain an understanding of fluid flows in jointed rock masses. The first is quantitative evaluation of the complex geometry formed by joints, and the second is interpretation of the locality of in-situ tests to learn of hydraulic behavior.

An approach to the study of the relationship between joint geometry and hydraulic properties is described comparing Lugeon units with theoretical permeability given by crack tensor. To conclude, it was found the dependence of Lugeon units on locality of jointing could be explained by joint geometry. And the average flow in a jointed rock mass was described by the estimated permeability through the concepts of both crack tensor and Representative Elementary Volume.

### 概 要

亀裂の存在は、岩盤の透水性を把握するうえでの支配要因である。岩盤の透水性を評価するためには、亀裂の幾何学的特性とその水理学的特性を捉えねばならない。更に、水理学的特性を捉えるに当たっては、試験結果が岩盤全体に対してどの程度の代表性を持つのかの議論が不可欠である。

本報告では、亀裂の幾何学的特性を定量化する手法の一つであるクラックテンソルを用いて、亀裂の幾何学性と透水性の相関関係を調べ、以下の結論を得た。

- ① 局所的な亀裂の分布から推定される透水係数とルジオン値との間には良好な相関関係がある。
- ② 広域の亀裂の分布をクラックテンソルを用いて平均化すると、岩盤内の平均的な透水係数を捉えることが可能となる。

## 1. 序論

岩盤中に存在する断層・節理・亀裂といった地質学的不連続面（以後、大規模な断層以外の中小規模の節理、亀裂などを総称して亀裂と呼ぶことにする。）の重要性が認識されたのは、古くは、Malpasset ダムの崩壊（1959年）において、ダム直下の断層と片麻岩中の亀裂に囲まれた岩塊の移動が原因であったという事例である。

近年、エネルギー施設をはじめ、重要構造物の基礎や収容体として岩盤が考えられており、Stripa Project の例<sup>1)</sup>などでも、亀裂評価と様々な実規模の原位置試験が実施され、岩盤の工学的特性の評価がされている。

不連続性岩盤の工学的特性を評価する上で、亀裂の特性を評価しなければならないことは上述の例でも明らかである。この亀裂の特性は大きく二つに分けることができる。一つは亀裂の幾何学的な分布特性であり、もう一つは亀裂個々の水理・力学的な特性である。ISRM の不連続面の定量的記載法（指針）<sup>2)</sup>によれば、亀裂の幾何学性を表現する

指標として、方向、間隔、広がり、開口度、亀裂群の数、ブロックサイズなどがある。一方、亀裂の水理・力学的な特性としては、壁面粗度、壁面強度、充てん物、浸透性などが考えられる。このような特性を定性的又は評点法などにより半定量的に表現し、岩盤を大まかに分類することは重要である。しかし、一方では、岩盤構造物へのニーズの高度化に伴い、岩盤のモデル化の精度を上げることが必要となっている。この要求には、急速に進歩した解析技術とのバランスをとることが考慮されている。如何に計算技術が進歩したとはいえ、亀裂個々の特性を直接取込むことは不可能である。そこで力学的には、亀裂を含む材料を等価な弾性体として近似する方向<sup>3),4),5)</sup>、水理学的には多孔質媒体として近似する方向<sup>6),7)</sup>などが解析法の一つとして考えられている。

このように不連続性岩盤を等価な連続体として考える場合、亀裂の情報、地質学的情報を水理・力学特性に反映するためには、亀裂情報の定量的表現が不可欠となる。その表現法への要求は、物理的意味の明瞭性、数学的展開の可

能性がある。これらの要求を満たす指標として小田のクラックテンソル<sup>8)</sup>、京谷らのダメージテンソル<sup>9)</sup>や Kachanaov<sup>10)</sup>のテンソル量がある。

一方、水理・力学的な岩盤のモデル化のためには、個々の亀裂の水理・力学的特性を知ることも不可欠であり、水理学的<sup>11),12)</sup>又は力学的<sup>13),14)</sup>、更には連成問題<sup>15),16)</sup>についても実験的な研究がなされている。対象とする岩盤の水理・力学的な応答を知ることは構造物対象規模での岩盤をモデル化するためには必要であるが、モデル実験、原位置試験結果の解釈にあたっては、実岩盤との相似性、換言すれば、実験モデルや試験サイトの岩盤が全体の岩盤を代表している程度を評価しなければならない。亀裂の幾何学性についての相似性を検討する手法には、Representative Elementary Volume (REV)<sup>17)</sup>の考え方やFractal<sup>18)</sup>の考え方があり、小田は数値実験によりクラックテンソルによるREVの決定法を示している<sup>17)</sup>。

不連続性岩盤の透水性を評価する場合、①亀裂情報を評価する、②透水性に関する岩盤の応答特性を知る、③応答を得るために行なわれた試験と対象岩盤の水理学的相似性を検討する、という流れに沿ってシステム化を図らねばならない。特に広域地下水流動を捉えるためには、③の水理学的相似性についての議論が重要となる。

本研究は、このシステムを実岩盤に適用するに当たり、亀裂調査を実施し、次の点について考察したものである。

- ① 亀裂調査と実岩盤における REV について
- ② 大規模な断層によって形成される地質構造が中・小規模の亀裂群に与える影響について
- ③ 基礎において実施された透水試験結果とクラックテンソルを用いて亀裂情報より推定される透水性との相関について
- ④ 岩盤の巨視的透水係数について  
以下にその概要についてまとめる。

## 2. クラックテンソルと亀裂調査

### 2.1 亀裂調査

岩盤の亀裂の幾何学的分布を推定するためには、亀裂の方向、長さ (ISRM 指針の広がりに対応)、密度 (ISRM 指針の間隔に対応)、開口幅が最低限必要となる。しかし、開口幅については、透水性の把握のためには重要であるにもかかわらず、通常の亀裂調査ではあまり測定されない。されていたとしても見掛け上の開口幅であり、透水性の把握のためには hydraulic Aperture (水理学的開口幅)が必要となる。水理学的開口幅は、亀裂調査ではなく透水試験などにより推定するものであり、今回はルジオン試験より推定した。

亀裂調査の方法には、定められたものではなく、露頭の状況により最適な方法がとられる。亀裂マップ作製の具体的な方法は次のようになる。例えば、

- ① 2×2 m 程度の格子中の亀裂の分布を正確にスケッチし、それを調査領域全域にわたって行なう。
- ② 全領域を一括して写真撮影を行ない、写真のゆがみ

の補正を行なった亀裂をトレースする。

③ 分割写真を貼り合せ、調査領域全体の写真を作製し、そのゆがみを補正した後亀裂をトレースする。

これらは、各岩盤で適応可能な最適方法であるが、それぞれに欠点がある。①は、亀裂として認識する規準が明確であれば、直接測定するため十分な精度が得られる。しかし、時間効率が悪く、地形的にこの方法が不可能な所もある。②や③は写真の解像度や露頭の凹凸の程度などにより、誤差は大きくなりやすい。また②のように大きく明瞭な亀裂しか認識できない。従って①のような補足的な調査も行なわれている。

亀裂のトレースに当たっては、画像処理技術の応用が可能であるが、必ずしも直線でない、しかも交差している亀裂の端点の認識に問題が残る。従って今回の調査では、③の方法によって作製された写真を、デジタイザーによりパーソナルコンピュータに入力し、統計処理を行なった。

### 2.2 クラックテンソルの概念<sup>8)</sup>

前述の亀裂の方向・長さ・密度・開口幅の分布が、十分大きな領域において統計的に均質、すなわち、位置座標によらないと仮定する。その仮定の基、亀裂の幾何学的特徴を表現する目的で導入されたクラックテンソルは、2階のテンソルでは、次式で定義される。

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{t_m} \int_0^{r_m} \int_0^{\Omega} t^n r^m n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $\rho$  は単位体積当たりの亀裂数、 $n_i$  は亀裂の単位法線ベクトルの基準座標軸に関する方向余弦、 $t$  及び  $t_n$  は開口幅とその最大値、 $r$  及び  $r_m$  は亀裂の寸法とその最大値、 $\Omega$  は立体角で、 $E(n, r, t)$  は、亀裂の方向・寸法・開口幅に関する分布を与える密度関数である。 $n, m$  は定数で、 $n=0, m=3$  のとき幾何学性を表現し、強度特性や変形特性と対応する。 $n=3, m=2$  のとき岩盤の透水性と対応することが実験的に確かめられており、前者を  $F_{ij}$ 、後者を  $P_{ij}$  と定義する。

### 2.3 REV (構造最小単位) の考え方<sup>19)</sup>

亀裂の平均寸法に比較して十分大きく統計的に均質な領域  $V$  に対してクラックテンソル  $F_{ij}$  が決定される。一方部分的な領域  $V'$  において同様に決定されるクラックテンソル  $F_{ij}'$  は、統計的な意味での偏りから  $F_{ij}$  と、

$$\delta F_{ij} = F_{ij} - F_{ij}' \dots\dots\dots(2)$$

なる誤差を伴っている。この  $\delta F_{ij}$  を小田らは誤差テンソルと呼んでいる。不連続性岩盤が  $F_{ij}$  で特徴付けられる等価な連続体に変換できるとの立場に立てば、 $\delta F_{ij} = 0$  が成立する部分領域  $V'$  は構造最小単位となる。誤差テンソル  $\delta F_{ij}$  の大きさが  $F_{ij}$  に対する相対的な大きさであることに注意し、ここでは2次元の誤差の指標として、

$$E^{(0)} = \frac{\delta F_0}{F_0} \quad F_0 = F_{ii} \dots\dots\dots(3)$$

$$E^{(2)} = \frac{(\delta F_{ij} \delta F_{ij})^{1/2}}{(F_k F_k)^{1/2}} \dots\dots\dots(4)$$

を用いることにする。上つきの指標はテンソルの階数で、

(3)式における0階のテンソル  $F_0$  は、岩盤における亀裂の平均的な密度を表わす量で、幾何学的特性の第一次近似であり、0階の誤差テンソルは亀裂の平均密度に対する誤差を与える。又、(2)式における2階の  $F_{ij}$  は、第二次近似として幾何学的な異方性についても表現できるもので、2階の誤差テンソル  $E^{(2)}$  は、異方性に対する誤差も評価するものである。

2.4 透水係数テンソル

透水係数テンソル  $K_{ij}$  は、2.1節の  $P_{ij}$  を用いて、

$$K_{ij} = \lambda (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \dots\dots\dots(5)$$

として表わせる。ここに、 $\lambda$  は、亀裂相互の連続性に依存する無次元パラメーターであり、亀裂の相対密度や異方性の程度にも依存するものである。十分な連続性が考えられる場合には1/12となる。 $\delta_{ij}$ はクロネッカーデルタである。 $P_{ij}$ は長さの2乗のディメンジョンをもつので、 $K_{ij}$ も長さの2乗のディメンジョンである。

亀裂調査の節で述べたように、 $P_{ij}$ に含まれる開口幅に関する情報は、収集が困難である。ここでは次のような仮定を与えた。すなわち、 $t=cr$  ( $t$ :開口幅、 $r$ :寸法、 $c$ : aspect ratio (扁平率))とする。この仮定は必ずしも満足できるものではないが、断層の幅と長さに対する緒方らの研究<sup>20)</sup>によれば受け入れられる可能性を持つ。2次元亀裂マップから、 $P_{ij}$ を求めるには次の式を用いた。

$$P_{ij} = \frac{C^3}{A} \sum_{k=1}^N (r^{(k)})^4 n_i^{(k)} n_j^{(k)} \dots\dots\dots(6)$$

ただし  $A$  は調査領域の面積、上つき添字は、 $K$  本目の亀裂を意味する。扁平率  $C$  は未定数として残る。この計算はパーソナルコンピュータに入力された亀裂情報から簡単に求められるものである。

3. 地質特性<sup>21)</sup>

調査の岩盤は、黒色片岩と緑色片岩から成る岩盤である。調査地内には、最大幅15m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亀裂群が見られる。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方向の左ずれ断層とNW-SE方向の右ずれ断層が交差するものである。主断層は約80度傾斜している。これらの断層は新第三紀の火山類を変位させているが、断層に沿う変動地形やリニアメントは認められないので、活動は第四紀以前に終了したと思われる。交差部周辺は、微妙な亀裂も発達し変質した破碎帯を形成している。母岩部の新鮮な片岩及び断層中の粘土については試料を採取し、室内透水試験を行なっている。変水位透水試験によれば、断層粘土の透水係数は、 $2.5 \sim 25 \times 10^{-6}$  cm/secであり、粒度分布から Hazen Creager による推定方法<sup>22)</sup>に従えばそれぞれ  $0.7 \sim 14 \times 10^{-6}$ 、 $3 \sim 40 \times 10^{-6}$  cm/secとなる。両者は比較的一致している。新鮮な片岩については、 $10^{-9}$  cm/sec オーダーの透水係数が得られている。

4. 亀裂調査結果

4.1 調査におけるサンプリングの偏り

実際の亀裂調査においては、露頭の範囲が限られており亀裂のサンプリングに偏りが生じる。サンプリングにおける偏りについては、データの統計処理上の問題からこれまで多くの議論が成されている。表-1にそれらを簡単にまとめた。ここでは、実際の岩盤で実施された亀裂調査結果をもとに多少の予備的考察を行なってみる。

亀裂調査領域に対して、眺める視点を小さな領域から次に大きな領域へと移動する。亀裂として認識される限界の長さも次第に長くなる。この限界長さの影響を考える意味で次のような調査を行なった。

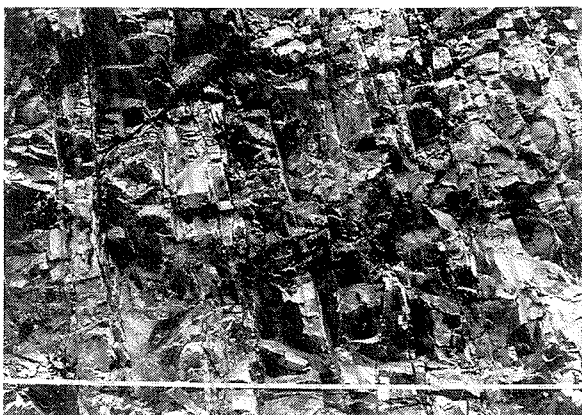
一辺の寸法が最小10cmから、最大2mまでの数段階にわたり写真を撮影した。写真-1及び写真-2はその一例である。それらの各写真上でトレースされる亀裂は、小さな領域の写真上では短いもの、開口幅の小さいものまでトレースされるが領域が次第に大きくなるとそれらはトレースできなくなる筈である。これらのトレース結果から求めた亀裂の平均密度  $F_0$  と領域面積の平方根(部分的な領域の代表寸法とする)の関係を図-2に示した。図中、●印は、撮影領域を変えて撮影した写真より直接計算したもの、○印は、●印のなかの最も撮影領域の大きいもののトレース図中に、任意の位置の任意の大きさの部分的な領域を設定して求められた  $F_0$  である。ここで、亀裂の長さの分布が指数関数で近似できると仮定すると、図-2の○印と●印は、次のような点で異なるものである。すなわち、写真撮影で領域を小さくする場合、測定される長さ  $\gamma$  の分布範囲は、図-3の(a)図のように  $\gamma_1 \sim \gamma_{m1}$  から  $\gamma_2 \sim \gamma_{m2}$  に変化する。一方、 $\gamma_1 \sim \gamma_{m1}$  の範囲の亀裂がトレースされている図から領域を小さくするとトレースされる長さの範囲は  $\gamma_1 \sim \gamma_{m2}$  に縮小される。すなわち、○印と●印の差は  $\gamma_2 \sim \gamma_1$  の範囲の亀裂を無視するかしないかの差となって表われており、トレースされる最大長さ ( $\gamma_{m1}$ ) が小さい場合には両者の間に大きな差が生じる。従って、最大長さが十分得ら



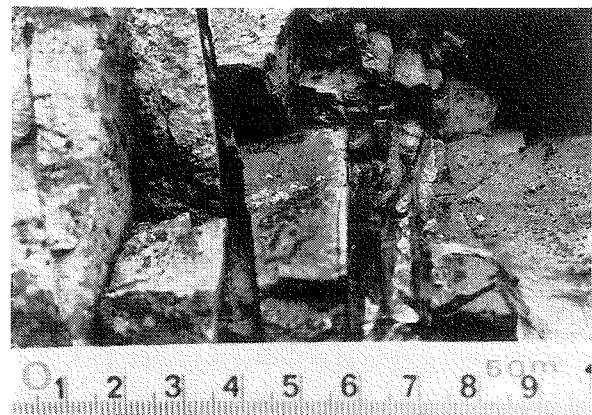
図-1 地質情況 (亀裂マップ)

表一1 亀裂調査における統計的偏り

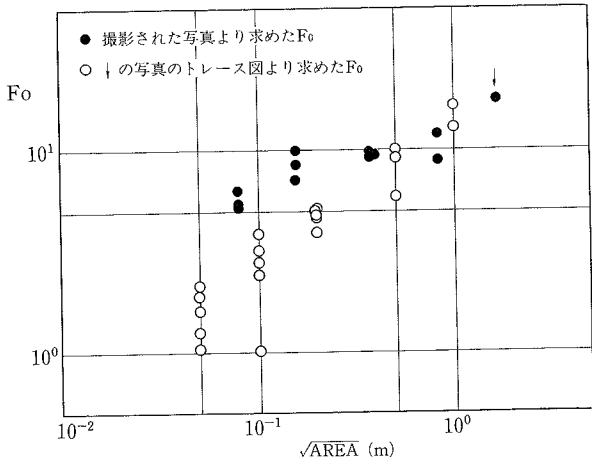
誤差の種類	誤差の生じる要素	文 献	補 正 方 法
Section effect	ネット上に節理の極を投影したときの極の密度の観察面による違い。	Terzaghi(1965) <sup>23)</sup>	観測面の極や、ボアホール軸方向を中心としてそれらと節理の交叉角度の等しいところで極の計数を行ない交叉角度 $\alpha_i$ を用いて $(\sin \alpha_i + \sin \alpha_{i+1})/2$ で計数を補正する。
Censoring bias	観察域が限られている場合の交線長さの分布	①Cruden(1977) <sup>24)</sup> ②Baecher(1980) <sup>25)</sup> ③Priest.et.ad.(1981) <sup>26)</sup> ④Rouleau.et.ad.(1985) <sup>1)</sup>	指数分布 $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ を仮定したとき、 ① $1/\lambda = \mu_c = (\sum r_i x_i + (n-r)X)/r$ X: 測走距離、n: 領域内の節理数 r: はみ出ない節理数 ② $\mu_B = L/N$ L: 全交線長和 N: はみ出ない節理数 ③ $\mu_p = -C/\ln((n-r)/n)$ C: 測定限定長 n: 全節理数 r: Cからはみ出ない節理数
Truncation bias	測定において無視される小さな節理の及ぼす交線長分布への影響	①Cruden(1977) ②Warburton(1980) <sup>27)</sup> ③Rouleau.et.ad.(1985) <sup>1)</sup>	①, ②, ③ $\mu = \mu_{OBS}^{-x_t}$ $\mu$ : 真の平均値 $\mu_{OBS}$ : 観察による平均値 $x_t$ : threshold length
Proportional size bias	特に scanline 調査において、長い交線のものほどサンプリングしがちになるために起こる交線長分布に表われる影響	Priest.et.ad.(1981)	Censoring biasの③式におけるCの影響について図にまとめてある。
	Spacing 分布に表われる影響	①Priest.et.ad.(1981) ②Cruden(1977)	① $n = (z/\epsilon)^2$ : n本サンプリングすることが必要 n: 必要標本数 z: 信頼度係数 $\epsilon$ : 要求精度 ②Lmのスキャンラインが必要 $\alpha = 100 \left(1 - \frac{1/\lambda - E(x)}{1/\lambda}\right)$ $E(x) = \frac{1}{1 - e^{-\lambda L}} [1 - (1 + \lambda L)e^{-\lambda L}]$ $\alpha$ : relative error percentage



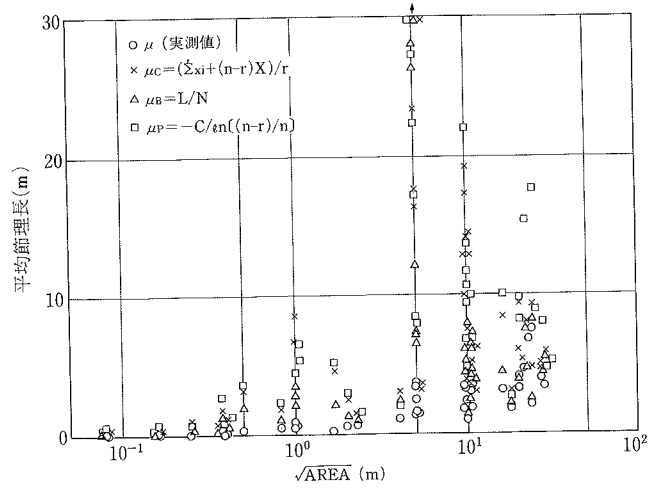
写真一1 安山岩岩盤における冷却性亀裂 (2 m × 1.4 m)



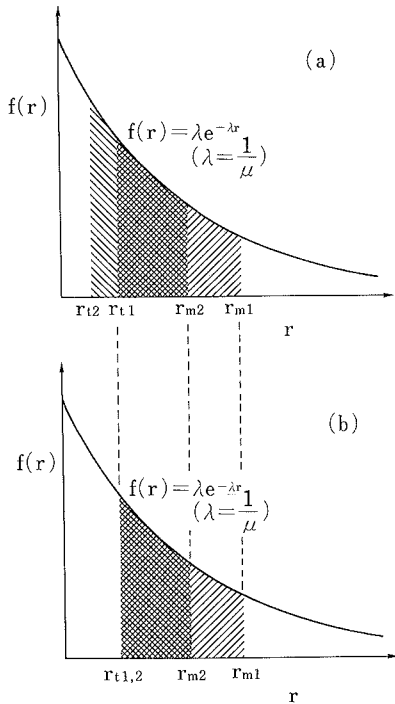
写真一2 安山岩岩盤における冷却性亀裂 (10 cm × 7 cm)



図一2 亀裂密度 (Fo) と調査領域の大きさ



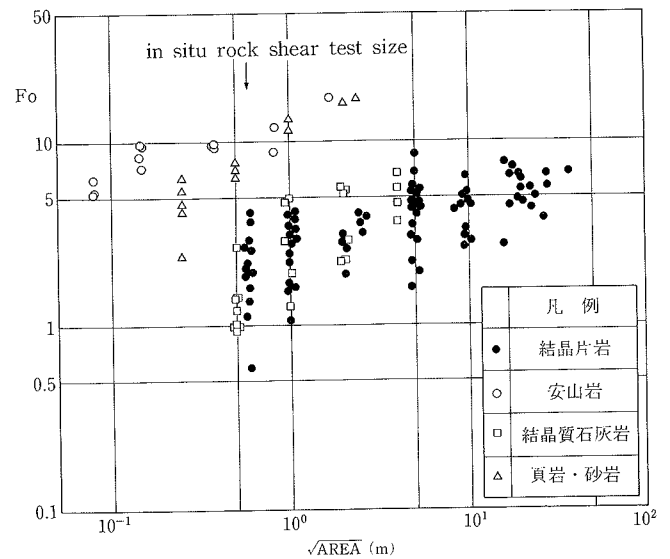
図一4 平均亀裂長さと調査領域の大きさ



図一3 長さの分布関数とサンプリングされる範囲

れる領域が望ましい。

次に、調査領域が限られている場合、すなわち、トレースされる亀裂の端点が領域の外にあるような場合、真の亀裂の長さ分布が得られるかについて考えてみる。分布型を表一に示した指数分布と考えると、平均長さが唯一のパラメータとなり、実測結果からの平均長さの測定法が幾つか提案されている。表一の3方法により、亀裂の平均長さを推定した結果を図一4に示す。横軸に領域の代表寸法を、縦軸には平均亀裂長さをとっている。小さな領域において平均長さの実測値と推定値は一致しているように見えるが、サンプリングされる亀裂が少ないために多くの場合推定値は発散してしまう。平均亀裂長さの実測値は領域の大きさとともに次第に長くなり、推定値は逆の傾向を示す。その結果実測する領域が大きくなるに従い両者は、真の平



図一5 亀裂密度と調査領域の大きさ

均長さに漸近する。本報告中の岩盤では、20~30 m程度の領域について考えればある程度実測値が真の亀裂長さの分布を与えると考えられる。

以上の予備的考察より、図一1に示した調査領域は、亀裂として認識される限界長さ及び平均亀裂長さの意味からは十分な領域であると判断された。

#### 4.2 REV (構造最小単位)

図一1に示した亀裂マップより、任意の位置及び任意の大きさの領域を仮定して、2次元のクラックテンソルを決定した。その結果を図一5に示す。図中の縦軸は、亀裂の平均的な密度を表わす  $F_o$  を、又横軸は領域の代表寸法(領域面積の平方根)をそれぞれ対数目盛りで表わしている。図中には、本調査岩盤の他に数種の岩盤での調査結果も併記した<sup>28)</sup>。実際の岩盤構造物のスケールが  $10^1 \sim 10^2$  mを対象としているのに対して、原位置岩盤せん断試験が対象とする領域は矢線で示した程度のものである。せん断試験の結果を直接岩盤に用いることは、過小評価された亀裂密度

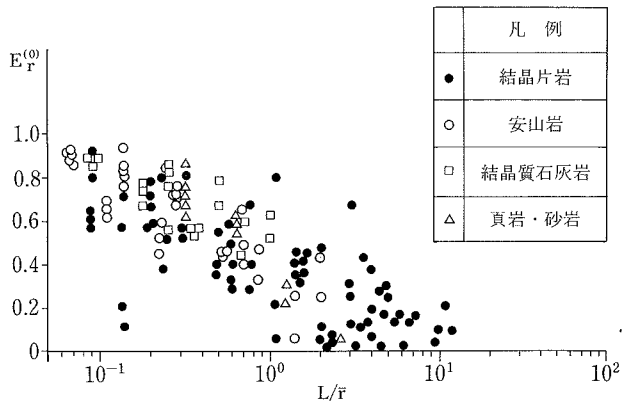


図-6 0階の誤差と相対寸法

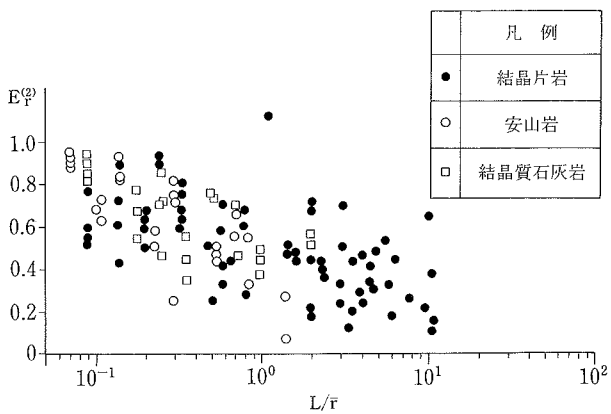


図-7 2階の誤差と相対寸法

に対する結果を用いることになり、問題が残ることが分かる。又、本調査地の岩盤は他に比べて亀裂密度のパラツキが大きい、これは調査地の岩盤の不均質性が強いことを意味しており、これについては4.3節で述べる。

領域の大きさは、亀裂分布に対する相対的なものであるから、今後、代表寸法  $L$  (面積の平方根) を亀裂の平均長さ  $r$  で除した相対寸法  $L/r$  を用いることにする。(2)式及び(3)式の誤差の指標を用いて、調査結果を整理し直すと、図-6及び図-7を得る。図-6は、岩盤の平均的な密度の誤差が相対寸法 ( $L/r$ ) の増加に伴い減少することを示している。例えば、平均亀裂長さ 2.4 m の岩盤における岩盤せん断試験サイトは、相対寸法ではおよそ 0.25 であるから、等方性であったとしても密度の誤差  $E_r^{(0)}$  は 70%~90% 程度となる。およそ岩盤によって異なるが、岩盤全体の亀裂の幾何学的分布を 2 割程度の誤差をもって評価するためには、平均亀裂長さの 4~5 倍の領域を調査することが必要である。小田らは 2 次元の数値実験の結果から、誤差を 1 割程度の精度で得るためには、亀裂平均長さの 2~3 倍の領域が必要であるとしている<sup>19)</sup>。しかし、実岩盤で亀裂を調査した結果では、均質であるという条件下で数値実験的に求められる  $L/r$  の値よりやや大きな値となる。図に示した調査結果は、岩種が異なり亀裂の地質学的特性も、①断層に直接関係する副次的な小断層や亀裂群、②周辺の構造線の影響

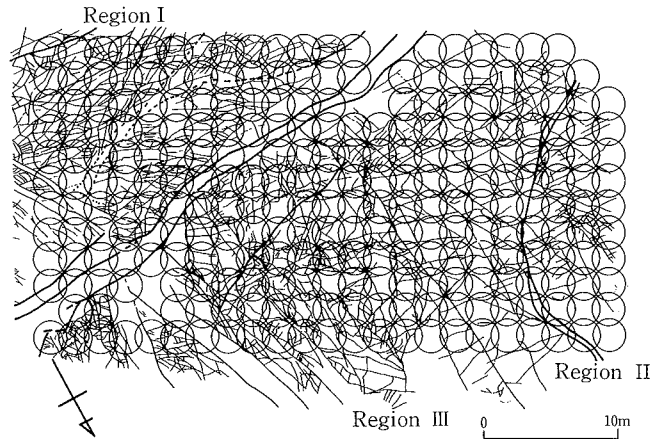


図-8 クラックテンソルの計算領域

を受けている亀裂、③岩の生成直後に形成された冷却性の亀裂など、と多様なものを含んでいる。このように全く異なる地質条件下でも亀裂の  $E_r^{(0)}$  が  $L/r$  に対してほぼ一定に収束すること、又複雑かつ多様な実岩盤と数値実験による結果がおおよそ一致していることは極めて重要な点である。

図-7は、2階のテンソル  $F_{ij}$  から収束性を考えたもので、誤差の指標  $E_r^{(2)}$  には、亀裂の幾何学的な分布の異方性も考慮されているものである。図-6と図-7を比較すると特に今回の調査地でのバラツキが大きくなっており、広い領域で考えた平均的な亀裂の幾何学的特性と小さな領域におけるそれとに大きな差があることが分かる。本調査地は図-1に示したように大規模な断層とそれに伴う副次的な断層を含んでおり、そのために亀裂の分布が領域の中でかなり不均質になっていることが予想される。そこで、次に大規模構造の及ぼす周辺亀裂への影響を調べてみる。

#### 4.3 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・小規模の亀裂が、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 2.5 m の円を図-8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亀裂のトレースから 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 (例えば正方形領域で考えれば対角線方向) の亀裂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、小規模の亀裂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-9に示す。図-9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の亀裂マップと比較することにより次のような点が指摘される。

① 各位置での亀裂群の卓越方向 (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 方向に流れる傾向

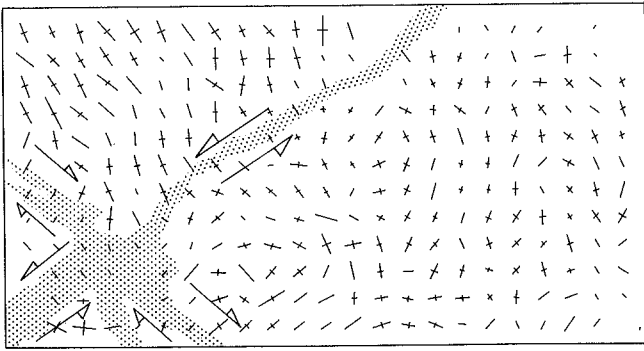


図-9 クラックテンソルの主値と主方向  
( $\phi 2.5$  mの円領域について)

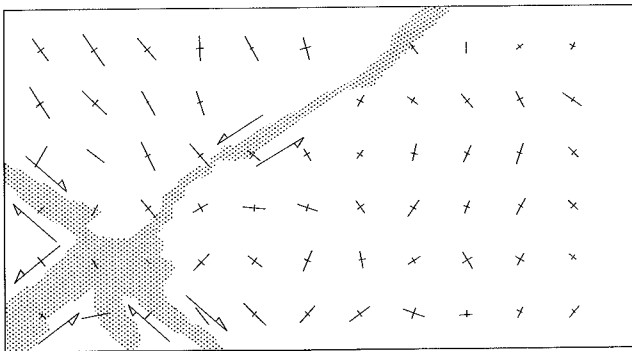


図-10 クラックテンソルの主値と主方向  
( $\phi 5.0$  mの円領域について)

にある。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 各位置での亀裂の相対密度（主値の和； $F_0$ ）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、およそ二つの断層の交差部より離れた位置では、亀裂の相対密度も小さくなっている。

同様な解析を直径 5 m の円領域に対して行なった結果が図-10である。図-10では図-9に示したほど不均質な亀裂分布の影響が明瞭に表われず、領域内で平均化される結果となった。これはクラックテンソルが領域内の平均的な亀裂の幾何学的特性を捉える指標であることを示している。

以上のように、副次的に形成された亀裂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。一方、このような不均質性の高い岩盤を等価な連続体として考えるためには、統計的に均質な領域に分割して、それぞれの領域において亀裂の分布を考えるべきであろう。従って次に均質な領域への分割を行なう。

#### 4.4 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亀裂の幾何学的な分布に影響を与えることが明らかとなった。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

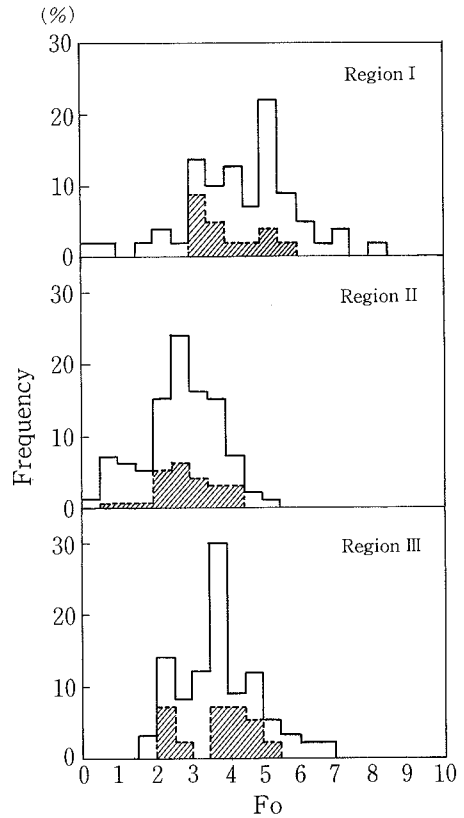


図-11 円領域の  $F_0$  の頻度分布

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、“亀裂の中心位置のランダム性と、亀裂の寸法、方向の位置に対する独立性”で定義されるものとする<sup>19)</sup>。この定義に従い前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-8参照）

- 領域Ⅰ：E-W方向及び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亀裂とその亀裂に付随する小規模な亀裂とから成る。
- 領域Ⅱ：E-W方向の断層の北側で、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方向の二つの大規模断層に平行な、共役な比較的多きな亀裂が卓越し、小規模亀裂はあまり見られない。
- 領域Ⅲ：二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亀裂は認められるが、その他に方向性を有さない小さな亀裂が密集する領域である。

図-11にそれぞれ三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 ( $F_0$ ) の頻度分布を示した。領域Ⅰ～Ⅲは、それぞれ平均値、分布型が異なることから、亀裂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者を統一的に論ずることは不適であると判断した。

## 5. 亀裂の幾何学的分布とルジオン試験

### 5.1 ルジオン試験

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箇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、1次孔グラウト後に実施された2次以降のルジオン試験は、グラウトの影響を受け、部分的に充てんされた亀裂を評価することになる。そこで今回は、調査地内で行なわれた1次孔(59箇所)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ブロック打設ごとに地表面から5mの区間について行なわれたものである。図-12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-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。前節で分割した各領域におけるルジオン値の頻度分布も併記した。

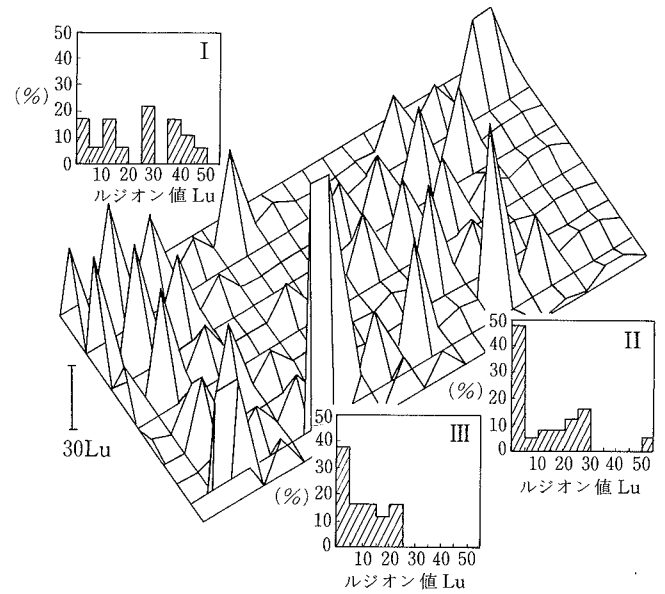


図-12 ルジオン値の分布

### 5.2 透水係数テンソル

調査領域において、図-8に示した各円領域について(6)式より透水性に関するクラックテンソルを決定した。式中cの値は未定定数として残るので、計算されたクラックテンソルは $c^3$ で除した $P_{ij}/c^3$ の形である。結果を図-13に示す。図-13は図-12と同様、山の高さが $P_{ij}$ の第一不変量( $P_{ii}/c^3$ )、すなわち、等方性を仮定したときの透水係数の2倍の値を示し、その位置は図-1の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。

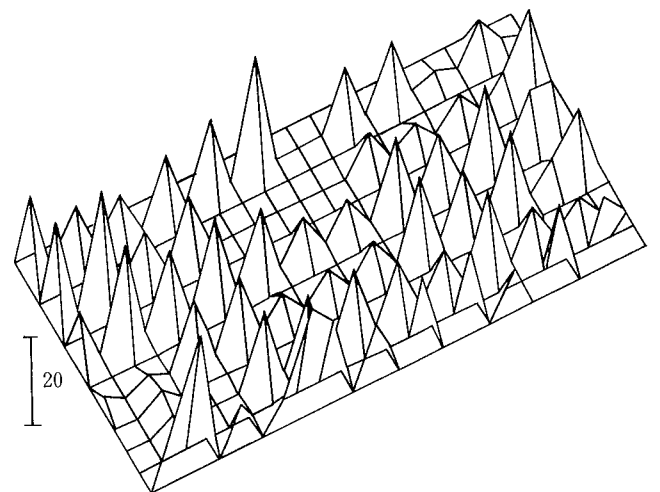


図-13  $P_{ii}/c^3$ の分布

### 5.3 クラックテンソルとルジオン値

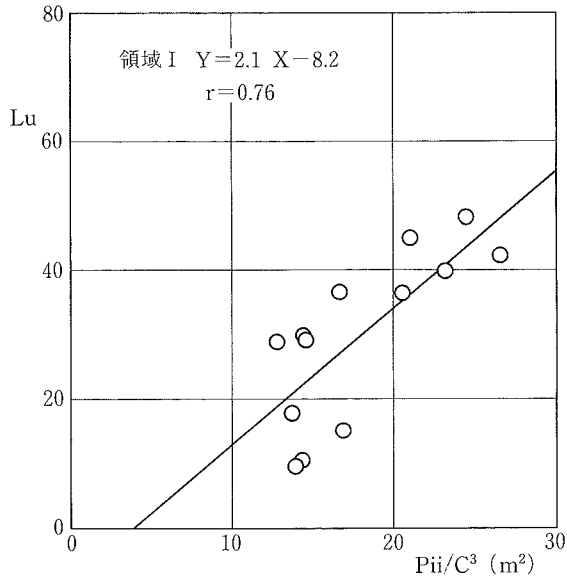
亀裂の幾何学的な分布特性の異なる三つの領域それぞれについての $P_{ii}/c^3$ に対してルジオン値をプロットしたのが図-14から図-17である。図-14は領域Iのもので、プロットされている点の亀裂の平均密度F。の値は図-11中の斜線で示した分布である。相関係数は76%と比較的良好な相関性を示している。すなわちルジオン値の局所性は、試験点周辺の領域の局所的な亀裂の分布に依存していることが確認された。また、図中の回帰直線の傾きは、ルジオン値が透水係数に換算できるとすれば扁平率cと(2)式中の定数 $\lambda$ を用いて $\lambda c^3$ で表わされる。今、 $\lambda$ は亀裂の連続性が十分であるとすれば1/12であり、 $k_{ii} = k_{11} + k_{22} = (P_{11} + P_{22})/c^3$ であることを考慮してcを推定すると $5.9 \times 10^{-5}$ となる。(補遺参照)領域中の亀裂の平均長さに対してcの値から開口幅を求めると128  $\mu\text{m}$ となり、図-18に示した Bianchi and Snow<sup>29)</sup>が花崗岩と片麻岩に対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 $5.5 \times 10^{-5}$ 、 $4.9 \times 10^{-5}$ となる。これらの値についても各領域の平均亀裂長さに対して求めた開口幅を図-18に示した。

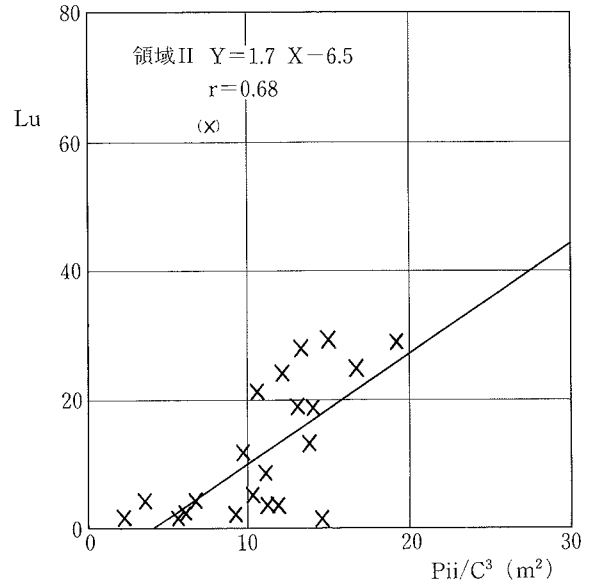
横軸と回帰直線との交点(実質的に不透水を与えるテンソルの値)も傾きと同様、3領域ともほぼ同様な値であり、ルジオン値と局所的な領域( $\Phi 2.5\text{ m}$ の円領域)における亀裂分布から推定される透水係数との間の相関性は領域に依存しないことが分かる。図-17には3領域の結果をまとめて示したが、局所的な領域において決定されたクラックテンソルはルジオン試験結果をよく反映することが確認された。

同様の相関性を直径5mの円領域に対して行なったところ良好な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。

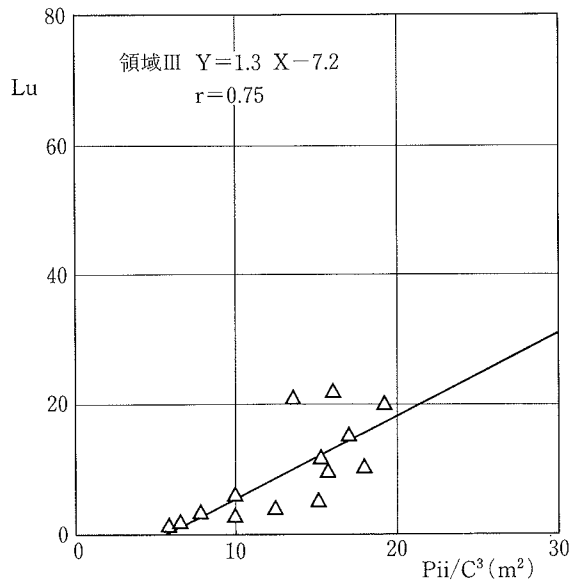




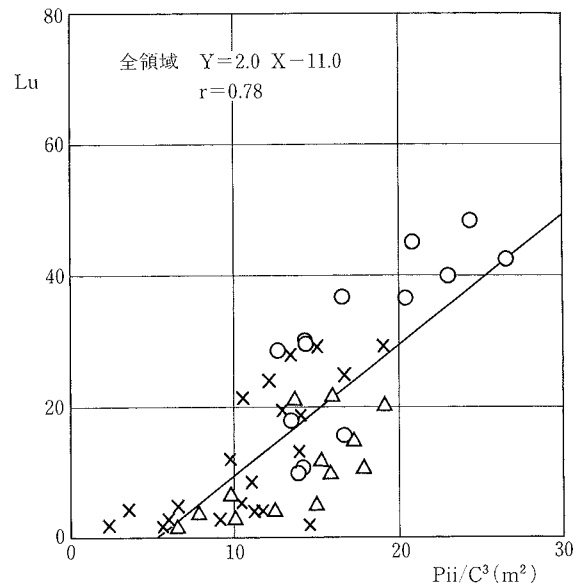
図一14 ルジオン値と Pii/c³の相関 (領域 I)



図一15 ルジオン値と Pii/c³の相関 (領域 II)



図一16 ルジオン値と Pii/c³の相関 (領域 III)



図一17 ルジオン値と Pii/c³の相関 (全領域)

## 6. 岩盤の透水性

本調査領域のように大規模な断層が存在し、周辺の亀裂の分布がその影響を強く受けているような岩盤の解析モデルはどのように考えたらいいであろうか。ここでは次のような簡単な2次元モデルによる数値実験を行なった。

case 1: ルジオン試験から得られた透水係数を各要素に分布させて行なった定常解析

case 2: 分割された3領域において、クラックテンソルより推定される透水係数(前節で得られた3領域の平均開口幅を用いて透水係数を推定した。)を用いた定常解析

断層については2ケースとも室内透水試験より得られた透水係数 ( $5 \times 10^{-8}$  m/sec) を用いることとした。

ケース1は、およそ全領域をカバーする透水試験結果または亀裂調査結果がある場合の不均質な岩盤を想定したものであり、ケース2は、亀裂分布が既知であり、局所的な透水試験結果から広域の亀裂分布から推定される透水係数を用いて平均的な流れを考える場合を想定した。

図一19に示すケース1の流速ベクトル図から明かに流れのパスがあることが分かる。図一12のルジオン値の領域内の分布から分かるように、透水性の低いものから高いものまで分散の大きい分布をする場合には、透水性の高い区域を連ねるパスができる<sup>30)</sup>。各区域の透水係数をクラックテンソルを用いて表わしても、ルジオン値との相関性からほとんど同じ結果を得る。

一方、図一20は、同様なモデル岩盤において、不均質性

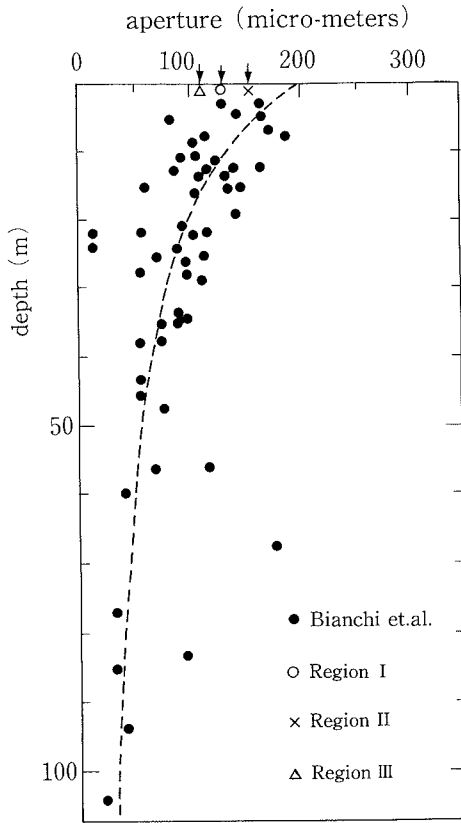


図-18 開口幅の変化

の影響を無視して、領域内の平均的な流れを調べたものである。ここで仮に、解析領域全体の平均透水係数を推定するために、長手方向 (X 方向) に一様な勾配でポテンシャルが低下するとする。ケース 1 は  $1.04 \times 10^{-4}$  (cm/sec) で、ケース 2 は  $0.83 \times 10^{-4}$  (cm/sec) と、およそ等しい透水係数を与える。これは、クラックテンソルによる領域の透水性の平均化が適当であることを示している。

### 7. 結論

亀裂の存在は、岩盤（室内試験や現位置試験の供試体レベルではなく）の工学的特性を把握するうえでの大きな課題となっている。本研究では主に透水特性に主眼をおき、現地調査と試験データをもとにその課題に対する評価法を検討した。その結果以下の点が確認された。

① 岩盤物性評価のためのモデルまたは現位置試験が対象とする岩盤をどの程度代表しているかを論じるに当たり、その代表性の程度を評価する一つの指標が小田により与えられている。その概念は実岩盤においても適応性が確認された。

② 小規模な亀裂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。小さな領域（ここでは亀裂の平均長さと同程度の領域）における亀裂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し、副次的に形成された亀裂群の特性を捉えている。

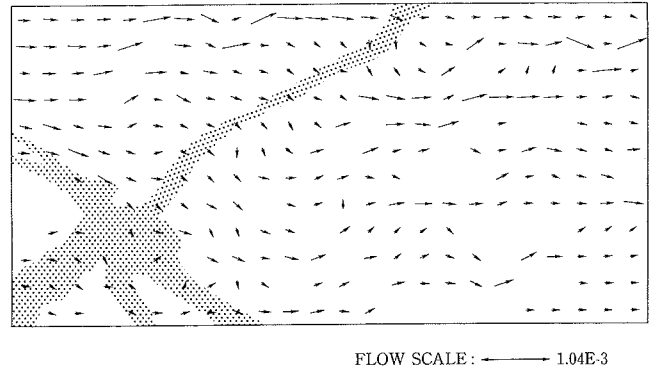


図-19 流速ベクトル図 (ケース 1)

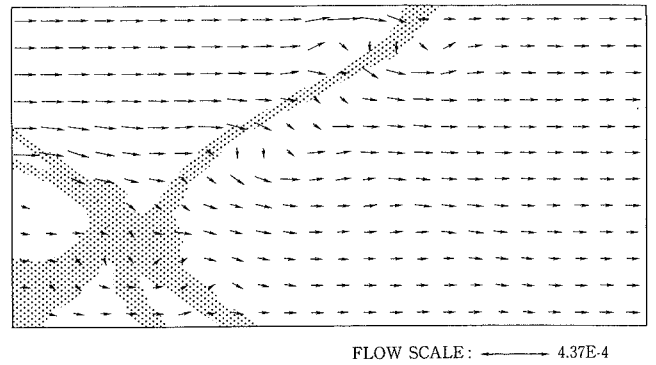


図-20 流速ベクトル図 (ケース 2)

③ ルジオン試験は岩盤の透水性を評価する一手法であるが、局所性が指摘されている。局所的な亀裂の幾何学性を亀裂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。従って、①の結果を考慮して、局所的な水理学的応答から岩盤の水理学的特性を推定することが可能となることが示唆される。

④ 亀裂の幾何学性を広い領域においてクラックテンソルにより平均化して捉えると、領域内の平均的な透水係数を推定することが可能となる。

以上のような結論を踏まえて、今後は同様なデータを蓄積するとともに、リアルタイムでこれらの検討ができるようにシステムの総合化を図ることが課題と考える。

### 補遺

ルジオン試験において、注入圧力と注入量がダルシー則を満足するとすると、

$$K \doteq \frac{Q}{2\pi LH} \ln \frac{L}{r}$$

ここに、Q：注入量 (cm<sup>3</sup>/sec)

L：試験区間長 (cm)

H：全水頭 (cm)

r：試験孔の半径 (cm)

1Lu は、注入圧力 10 kgf/cm<sup>2</sup> 下で試験孔長 1 m 当たりの毎分の注入量 (1/min) であるから、単位系に注意して

$$1Lu = 1.3 \cdot 10^{-5} (\text{cm/sec})$$

である。また、水の動粘性係数を  $1.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、重力加速度を  $9.8 \text{ m}/\text{sec}^2$  とすると

$$1Lu = 1.6 \cdot 10^{-14} (\text{m}^2)$$

となる。

#### 参考文献

- 1) Rouleau, A. & Gale, J. E. : Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22, No. 6, p. 353~367, (1985)
- 2) Brown, E. T. : Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 15, No. 6, p. 319~368 (1978)
- 3) Budiansky, B & O'Connell, R. J. : Elastic moduli of a cracked solid, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 12, p. 81~97, (1976)
- 4) Horii, H., Nemat-Nasser, S. & Maesibu, T. : Overall moduli of solids with microcracks, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 31, No. 2, p. 156~171, (1983)
- 5) Oda, M. & Suzuki, K. : Elastic compliance for Rock-like materials with random cracks, *Soils & Fund.*, Vol. 24, No. 3, p. 27~40, (1984)
- 6) Oda, M. : Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Geotechnique* 35, No. 4, p. 483~495, (1985)
- 7) Snow, D. T. : Anisotropic permeability of fractured media, *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 6, p. 1273~1289, (1969)
- 8) Oda, M. : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils & Fund.*, Vol. 22, No. 4, p. 96~108, (1982)
- 9) 京谷孝史, 市川康明, 川本眺万 : 岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適応について, *土木学会論文集*, No.358/III-3, p.27~35, (1985)
- 10) Kachanov, M. : Continuum model of medium with cracks, *EM5, Proc. ASCE*, p. 1039~1051, (1980)
- 11) Ohnishi, Y. & Goodman, R. E. : Results of laboratory tests on water pressure and flow in joints, *Proc. 3rd Cong. ISRM*, p. 660~666, (1984)
- 12) Iwai, K. : Fundamentals study on fluid flow through a single fracture, *Ph. D. Dissaertation of Univ. of Calif., Berkeley*, (1976)
- 13) Bandis, S. C., Lunsden, A. C., & Barton, N. R. : Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 20, No. 6, p. 249~268, (1983)
- 14) Walsh, J. B. & Grosenbaugh, M. A. : A new model for analyzing the effect of features on compressibility, *J. Geophysical Research*, Vol. 84, No. B7, p. 3532~3637, (1979)
- 15) Raven, K. G. & Gale, J. E. : Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22, No. 4, p. 251~261, (1985)
- 16) 平間邦興, 丸山 誠, 鈴木健一郎 : 割れ目の変形と透水性に関する一考察, 第22回土質工学研究発表会, p.883~884, (1985)
- 17) 小田匡寛, 羽出山吉裕, 亀村勝美 : 不連続性岩盤の REV について, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 109~114, (1987)
- 18) 山田俊雄 : 岩盤亀裂のフラクタル表示, *情報地質* (12), p.187~205, (1987)
- 19) 小田匡寛, 羽出山吉裕, 高野正明 : 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, p. 126~130, (1986)
- 20) 小田匡寛 : 岩盤力学の基礎理論, 講義資料, (1984)
- 21) 桑原 徹, 鈴木健一郎, 丸山 誠, 平間邦興 : 結晶片岩中の断層粘土に関する地質・工学的特性, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p.166~170, (1988)
- 22) *土質工学ハンドブック*, 土質工学会, (1982)
- 23) Terzaghi, R. D. : Sources of error in joint surveys, *Geotechnique*, 15, p. 287~304, (1965)
- 24) Cruden, D. M. : Describing the size of discontinuities, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 14, p. 133~137, (1977)
- 25) Baecher, G. B. : Progressively censored sampling of rock joint trace, *Mathematical Geology* Vol. 12, No. 1, p. 133~137, (1980)
- 26) Priest, S. D. & Hudson, J. A. : Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 18, No. 13, p. 183~197, (1981. 6)
- 27) Warburton, P. M. : A stereological interpretation of joint trace data, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 17, No. 4, p. 181~190, (1980. 8)
- 28) 鈴木健一郎, 桑原 徹, 丸山 誠, 平間邦興 : 各種岩盤の構造最小単位について, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p.115~120, (1987)
- 29) Bianchi, L., et. al. : Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientation and apertures of fractures, *Annals of Arid Zone*, Vol. 8, No. 2, p. 231~245, (1968)
- 30) 下茂道人, 亀村勝美 : 測定値における分布を考慮した岩盤の平均透水係数の予測手法について, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p.229~234, (1987)