

岩盤き裂構造の定量化と透水性評価への応用

鈴木 健一郎 桑原 徹 平間 邦興

Quantification of Crack Geometry in Rock Masses and Evaluation of their Permeabilities

Kenichirou Suzuki Tohru Kuwahara Kunioki Hiram

Abstract

Connectivity and aperture distribution are important factors in evaluating the permeability of cracked rock. The effects of a micro-crack system in granitic rock on permeability was investigated. It was concluded that the third moment of crack aperture was important for estimating permeability and that the distribution of crack apertures affects the connectivity parameter. These considerations can be applied to an in-situ rock mass.

概要

岩盤き裂構造の定量化のために、クラックテンソルが用いられてきた。ここでは、き裂構造の連結性と開口幅の分布評価にそれを拡張した。風化花崗岩を例に、透水係数予測への適用性について考察した。その結果、浸透理論による連結性評価法の天然き裂への適用性と、開口幅の頻度分布の重要性が示された。開口幅の頻度分布の影響を考慮するためには、開口幅の3次モーメントを考えると連結性を低下させることが必要となる。また、現位置岩盤においても同様の手法を適用できることを示した。

1. はじめに

き裂性岩盤上または岩盤中の構造物の品質を管理する上で重要なファクターの一つにき裂の幾何学的分布特性の評価がある。筆者らは、これまでクラックテンソルの概念を用いてそれを定量化し、岩盤評価への適用を図ってきた。今回は、放射性廃棄物の地層処分や岩盤内エネルギー貯蔵施設の建設において重要となる水理特性の把握について、クラックテンソルの展開を実施した点について報告する。

岩盤を多孔質媒体と考えると等価な透水係数を推定しようとする場合、透水係数に影響を与えるき裂の幾何学的特性は、系の連結性とき裂開口幅分布の2者である。き裂系の連結性とは浸透経路となるき裂相互の連結状態をいい、その判断には浸透理論¹⁾が一つの有効なツールと考えられる。浸透理論に基づくとき裂系に十分な経路ができる限界のき裂密度が存在し、また連結性はき裂密度に依存することが知られている²⁾。一方、Longらは、十分な連結性を有していても、き裂の開口幅のサイズが広い範囲に分布する場合に、多孔質媒体として近似し得ないことを示している³⁾。

本研究では、①数値実験などの理想的なき裂系において提案されているき裂密度と連結性の関係が、実際のき裂系において成立するか、②開口幅のサイズの分布が透

水係数に与える影響の2点について考察を行い、クラックテンソル手法の展開を図った。これらの手法を、花崗岩のマイクロクラックと現位置岩盤に適用し、この手法が寸法に依存しないことを示した。

2. 透水係数の算定

き裂系の透水係数は、次式で表わされる⁴⁾。

$$k_v = \frac{\lambda}{12} (P_{*} \delta_v - P_v) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

$$P_v = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^n S^{(k)} t^{(k)3} n_i^{(k)} n_j^{(k)}$$

$$= \frac{\pi \rho}{4} \int_0^r r^2 f(r) dr \int_0^t t^3 g(t) dt \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \dots \dots (2)$$

であり、 λ は、き裂系の連結性に依存する0~1の値を持つパラメータで、き裂密度の関数である。 λ については後述する。 k 番目のき裂は面積 $S^{(k)}$ を持つ、厚さ(開口幅) $t^{(k)}$ 、法線ベクトル $n^{(k)}$ により定義され、対象領域に m 個存在する。第2式では、Fig.1のように、面積 $S^{(k)}$ を持つ直径 $r^{(k)}$ の円板でモデル化したき裂が、体積密度 ρ で空

間に均質に分布していおり、直径、開口幅、方向はそれぞれ独立であると仮定を設けている。式中の変数で開口幅と方向は計測可能であるが、体積密度と直径は直接計測できない。今、ベクトル q に沿った単位長さ当りの走査線に交わるき裂の本数を考えると、

$$\frac{m^{(2)}}{h} = \frac{1}{4} \pi \rho \int_0^r r^2 f(r) dr \int \ln \cdot q |E(n)| d\Omega$$

$$= \frac{1}{4} \pi \rho \langle r^2 \rangle \langle \ln \cdot q \rangle \dots\dots\dots(3)$$

と表される。第1式のような集合平均を簡単のため以後、第2式のように表現する。(3)式を(2)式に代入して用いると、単位長さの走査線に交わるき裂の本数、き裂の方向、および開口幅が知れば透水係数が求められることがわかる。き裂の方向が直接計測できない場合は、直交する3断面で走査線と交わるき裂本数の計数により代用できることが金谷により提案されている⁵⁾。

連結性を表わす指標として、1枚のき裂に交わる他のき裂の平均個数が提案されている。Robinson²⁾ は、浸透理論から1辺の長さ $2l$ の正方形き裂が一様分布をしている場合に、それが次のように表わされることを示した。

$$I^{(3)} = 16 \rho^{(3)} l^3 \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\rho^{(3)}$ は単位体積当りのき裂の中心の個数で、(1)式の ρ と同じである。もし、正方形き裂が等価な面積を持つ円板き裂で置き換えられるとするとクラックテンソルと次のような関係にある。

$$I^{(3)} = \sqrt{\pi} F_0^{(3)} \dots\dots\dots(5)$$

2次元の場合は、長さ $2l$ の線き裂に対して、1本の線き裂に交わる他の線き裂の平均個数は次のように定義され、クラックテンソルと関係する。

$$F_0^{(2)} = 2 I^{(2)} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $\rho^{(2)}$ は単位面積当りの線き裂の中心の個数である。これら2次元と3次元の不変量は、それぞれ独立に求められている。従って、線き裂の長さが空間に分布する円板または正方形き裂を任意断面で切断した場合に現われるトレース長とは関係しない。また面密度と体積密度もそれぞれ独立に定義されている。しかし、2次元と3次元のクラックテンソルのトレースの間には、き裂が等方的に分布している場合、 $F_0^{(3)}=1.5F_0^{(2)}$ の関係があることからこれら両者の不変量も関係付けられる。

さて、(1)式の λ に議論を戻すと、連結性パラメータ λ は、浸透経路となるクラック系のデッドエンド効果や孤立した経路などの影響を考慮するために提案されたもので、き裂密度と次のような関係にある。

$$\lambda = 1 - \frac{c_1}{F_0} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 c は系が浸透可能となる場合の限界密度に相当するもので、浸透閾値と呼ぶ。正方形き裂の3次元数値実験からは、平均き裂交差数が2.46以上において系は透過可能であることが示されている²⁾。この閾値は、(6)式から F_0 で表わすと1.39となる。2次元線き裂モデルからは平均交差数3.44、(7)式から6.88となる。これは、1.39を2次元で考えた値よりかなり大きい。

以上の考察が、天然のき裂系の透水係数において適用可能かを実験および解析から検討する。

3. 花崗岩のマイクロクラック系の透水性

3.1 観察方法

用いた試料は稲田産の花崗岩であり、供試体は、同一岩塊から同一方向に採取して直径50mm、高さ100mmの円柱である。各供試体の透水係数の違いは、90℃の熱水中に浸漬させた風化試験⁶⁾において、浸漬期間を変えることにより与えた。今回の観察に用いた供試体の浸漬期間は、0日(浸漬させないもの; A供試体)、180日(B供試体)、1,030日(C供試体)、および2,000日(D供試体)の4種類である。これらの供試体では、透水係数の他、間隙率、弾性波速度も計測している(Table1)。それぞれの供試体をFig.2のように切断した断面において、レプリカ法により断面のクラックを抽出した。抽出されるクラックの幅は10nmである。詳しい測定方法は文献7)を参照されたい。また、2,000倍から10,000倍でSEM写真撮影を行い、写真上で観察面に現われたクラックの幅を測定した。

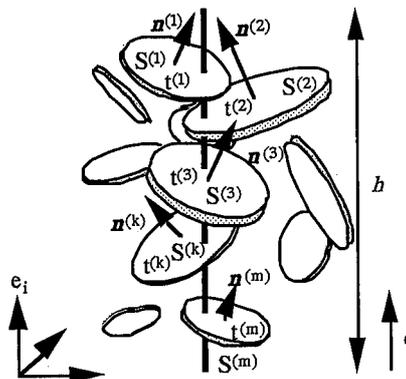


Fig.1 き裂モデル
Disk Shaped Crack Model

Table 1 供試体の試験結果
Summary of Experimental Results

sample No.	immersion period(days)	permeability (m ²)	porosity (%)	longitudinal wave velocity (km/sec)
A	0	3.05×10 ⁻¹⁸	0.510	4.33
B	180	2.52×10 ⁻¹⁸	0.311	3.77
C	1030	1.03×10 ⁻¹⁶	0.951	2.35
D	2000	4.34×10 ⁻¹⁶	1.034	2.17

3.2 クラックの抽出結果

切断面の例をPhoto1に、レプリカ法によるき裂抽出例をPhoto2に示す。このような写真より粒界クラック、貫通クラック、粒子内クラックなど全てのき裂をその幅の違いは考慮せずトレースした。その例をFig3に示す。これらのクラックマップより、クラックのトレース長さおよび走査線に交わるクラックの本数の計測を行った。

Fig. 4に、供試体AとDのX2断面で得られたトレース長さの頻度分布を示す。両者の分布形はほぼ同じで、平均トレース長はA供試体で1.30mm、D供試体で1.78mmとほとんど差が無い。これは同一供試体各断面および各供試体においても同様である。また、Fig. 5は10度刻みに設けた走査線に交わるクラック数の頻度分布である。人工的に風化させていない新鮮なA 試料にはクラック方向の卓越性が見られ、新鮮な状態での花崗岩の微視的構造には異方性が存在することが示される。この傾向は人工的な風化の度が進むつれて薄れ、90度の熱水中に2,000日浸漬させたD試料では、どの断面においてもク

ラックの角度に卓越する方向は見られない等方分布になることがわかる。

3.3 開口幅の測定結果

SEM撮影写真の典型的な例をPhoto 4に示す。これ

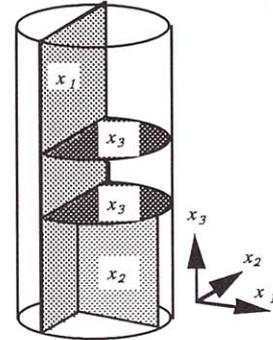


Fig.2 供試体と観察面および座標系
Observed Sections and Coordinate System

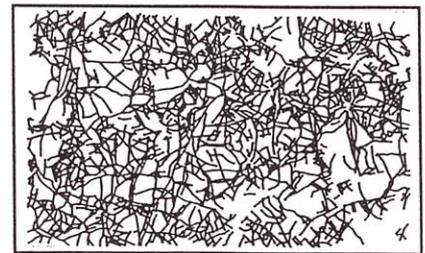
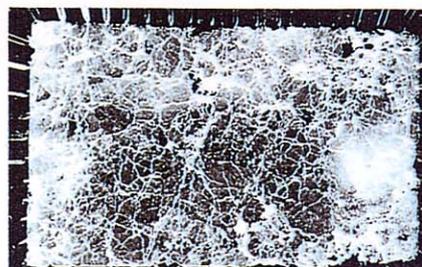
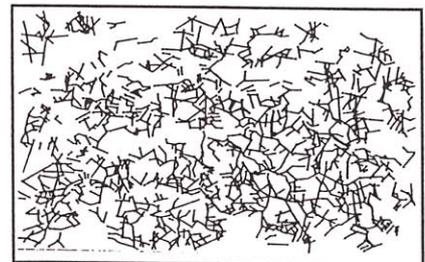


Photo 1 切断面の例
(上:A供試体, 下:D供試体)

Examples of Sections
(Up:A specimen, Low:D specimen)

Photo 2 レプリカ法によるき裂抽出例
(上:A供試体, 下:D供試体)

Examples of Cracks Picked up with
Replica Method
(Up:A specimen, Low:D specimen)

Fig.3 クラック抽出例
(上:A供試体, 下:D供試体)

Examples of Cracks Picked up Using
Digitizer
(Up:A specimen, Low:D specimen)

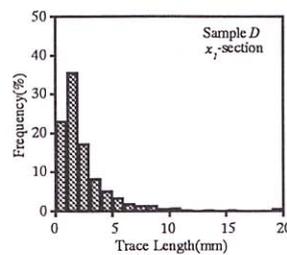
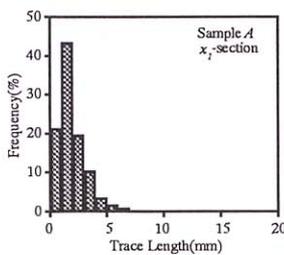


Fig.4 トレース長さの頻度分布
(左:A供試体, 右:D供試体)

Examples of Distribution of Trace Length
(Left:A specimen, Right: D specimen)

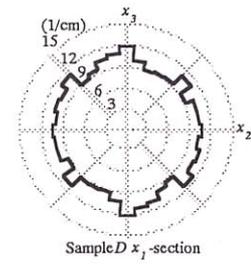
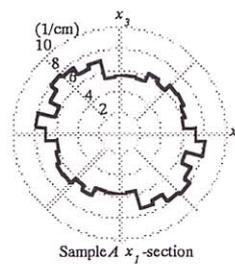


Fig.5 走査線に交ったクラック数の頻度分布
(左:A供試体, 右:D供試体)

Distribution of a Number of Cracks Crossed by a Scanning Line
(Left:A specimen, Right: D specimen)

は、観察面表面に現われるクラックの開口幅が奥における開口幅と異なる例である。このような例が、表面付近のクラックの開口幅の測定ではそれを大きく見積りやすい現状を裏付けるものと考えられる。また、1000倍程度の反射顕微鏡による観察では内部のクラックが判断できないため、開口幅を過大評価することになる。今回の測定では、クラックの開口幅は奥に見えるもので代表させることとし、A～Dのそれぞれの供試体で任意抽出により50本以上のクラックの開口幅のサンプリングを行った。SEM写真上で測定された開口幅は、切断面とクラックの交わる角度を補正していない見掛けの開口幅であることに注意されたい。結果を頻度図としてFig. 6に示す。図中の横軸は見掛け開口幅の対数をとっている。供試体AとBは対数正規分布に近い分布で高いピークをしているのに比べて、試料CとDは対称性が薄れて、ピークが開口幅の大きい領域に移動していることが注目すべき点である。これらの計測と並行して水銀注入法(MIT)⁹⁾により開口幅を測定した結果を同図に並記した。SEM観察は10⁻⁷mオーダーまでの測定であり、水銀注入法の精度には及ばないが、見掛け開口幅と真の開口幅の違いを考慮しても、両者の分布形状と平均値のA供試体からD供試体への増加傾向は十分捉えている。

透水係数を算出するためには、開口幅の3次元モーメントが必要となる。クラックの平均開口幅 $\langle t \rangle$ と見掛け開口幅の平均 $\langle w \rangle$ との関係は、クラックの方向が計測されていないのでクラックが一様に分布している、すなわち $E(\alpha, \beta) = 1/(4\pi)$ と仮定して次のように求めた。

$$\langle t \rangle = 4\langle w \rangle / \pi \dots\dots\dots(8)$$

しかし、 $\langle t^3 \rangle$ と $\langle w^3 \rangle$ の関係は直接得られないので、次のような仮定を設けた。

$$\frac{\langle w \rangle}{\sqrt[3]{\langle w^3 \rangle}} = \frac{\langle t \rangle}{\sqrt[3]{\langle t^3 \rangle}} \dots\dots\dots(9)$$

以上より、透水係数の算定に必要なき裂の幾何学的特性に関する情報が全て得られた。その結果をTable 2に示す。き裂密度 F_0 は4から12の広範囲に分布している。

SEM観察による1次元モーメントと水銀注入法による1次元モーメントはほぼ一致しており、観察法の適用性が示された。

次にこれらの幾何学的特性から算出された数値について考察を行う。

3.4 浸透閾値とクラックテンソルのトレースの関係

3次元のクラック系における浸透閾値は数値実験上の理想き裂系において前述の1.39であった。これは4つの試料のき裂密度 F_0 で考えると、全てが十分に浸透閾値を上回っていることになる。この結果は、少なくとも理想的なクラック分布において数値実験的に算定された値は自然のクラック系においても成立することを示している。一方、岩盤断面の観察などにおいて得られる2次元情報から連結性を判断するには、2次元の浸透閾値(前述の6.88)を用いることは危険側の判断となり、より小さなき裂密度においても浸透可能性があることが示された。

浸透閾値から判断して、き裂系は完全に連結している、 $\lambda=1$ 、として透水係数を予測した。Table2に示した透水係数の予測値を熱水への浸漬期間に対してプロットしたのがFig.7である。図中に示した範囲は、開口幅測

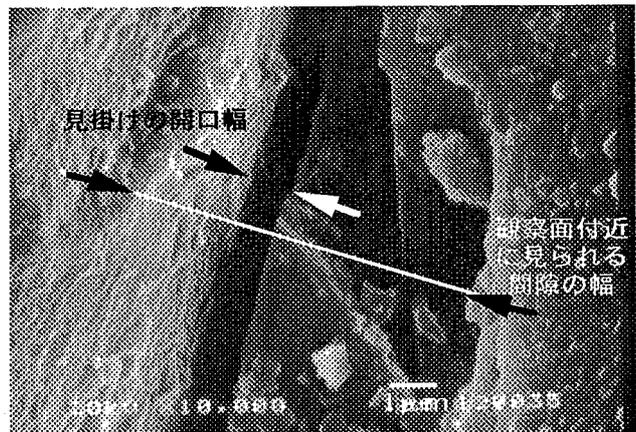


Photo 3 クラックのSEM写真の例
Examples of SEM Micrograph of a Crack

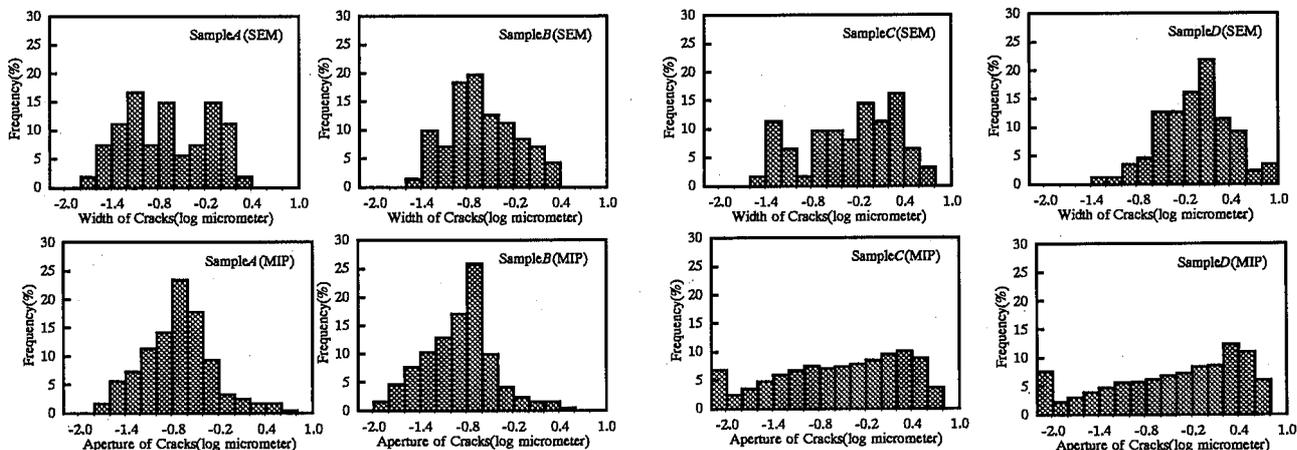


Fig.6 開口幅のサイズの頻度分布 (上段:SEM観察結果, 下段:水銀注入法計測結果)
Distributions of Aperture(Up:Results of SEM Observation, Low: Results of MIT Measurements)

定を実施していない試料の透水係数のものである。この結果は、同一花崗岩の風化過程における透水係数の増加傾向、特に1,000日浸漬前後での急激な透水係数の増加をよく反映した。透水係数へのき裂密度と開口幅の寄与の度合をTable2の値から詳細にみると、実測透水係数の値は浸漬期間により2オーダーの増加している。き裂密度の増加は数倍、開口幅の平均値は数倍から数十倍であり、これらからは透水係数の変化を推定できない。しかし、開口幅の3次モーメントではおよそ2オーダーの増加があり、その重要性が示されたと考える。

3.5 連結性パラメータについての考察

絶対値として透水係数を過大評価する傾向を連結性パラメータに代表させることを考える。透水係数の実測結果の推定結果に対する比が、連結性パラメータを代表させるものとする、 λ の値は、Fig. 8に示すようにほぼ一定値を示す。図中の点線は、(6)式の定数を3次元の浸透閾値の値を F_0 に変換した値(1.39)を仮定したものである。4つの供試体はき裂密度 F_0 で4から12程度まで変化するにもかかわらず、 λ の値はそれに依存せずほぼ一定の値を示したことは非常に興味深い。また、4供試体とも十分なき裂密度を持つにもかかわらず、一定値はおよそ0.17という小さい値であることは、クラックの円板モデル上で考えられたパラメータの値と天然のクラックの差であるとともに次のように考えられる。連結性が十分でなく浸透経路が限られている場合には、系の透水性を支配するのは経路の途中に存在する開口幅の小さいクラックである。しかし、多くの経路が存在するような場合には、大きな開口幅を連ねた経路が系の透水性を支配する。すなわち、多孔質媒体として近似できるようなクラック密度を有する場合も系の中に水径が存在する。ここで得られた小さな連結性の値は、この支配的な経路の存在を示唆するものである。

4. 現位置岩盤の透水性評価への適用例

神岡岩盤試験場における孔間透水試験をこれまでの考察に従って検討した。3次元のクラックテンソルのトレース F_0 は5.3と推定されるので、連結性の観点からは十分に連結していると判断される。また、き裂の方向については走向/傾斜が計測されているので(2)式の方角に関する項は計算できる。開口幅についてはマイクロスコブによる表面に現われたき裂の幅 w を3.3節の考察から、再評価した。Fig.9にはき裂の開口幅の頻度分布図を示した。平均開口幅は122 μm である。計測値を(9)式より補正し、3次モーメントを算出した結果は $6.39 \times 10^{-12} \text{m}^3$ である。この分布形状は、前述のC試料およびD試料のものと類似している。き裂密度はC試料およびD試料より小さく、しかも開口幅が広範囲に分布していることから透水経路としてのき裂の連結性は低い、すなわち λ の値としては浸透閾値に近いことが予想される。孔間透水試験との比較から、 λ の値は0.01と小さい値となる。

Fig.10には、孔間透水試験における圧力応答を飽和非定常の浸透流解析により再現した結果を示した。図には計測結果を○印で、点線で透水楕円から推定した透水係数

Table 2 開口幅の計測結果と透水係数の予測結果
Summary of Measuring Results and Estimated Permeability

	A	B	C	D
F_0	3.95	4.58	9.91	12.02
$\langle w \rangle (\mu\text{m})$	0.394	0.408	1.078	1.522
$\langle t \rangle (\mu\text{m})$	0.309	0.320	0.847	1.195
SEM				
$\langle w^3 \rangle (\mu\text{m}^3)$	0.541	0.541	10.346	51.562
$\langle t^3 \rangle (\mu\text{m}^3)$	0.262	0.262	5.009	24.974
MIP $\langle t \rangle (\mu\text{m})$	0.348	0.228	0.964	1.153
estimated $k_{33} (\text{m}^2)$	1.76×10^{-17}	1.58×10^{-17}	5.61×10^{-16}	2.72×10^{-15}
measured $k_{33} (\text{m}^2)$	3.05×10^{-18}	2.52×10^{-18}	1.03×10^{-16}	4.34×10^{-16}
λ	0.173	0.159	0.184	0.160
calculated porosity(%)	0.058	0.043	0.170	0.283
measured porosity(%)	0.510	0.311	0.951	1.034

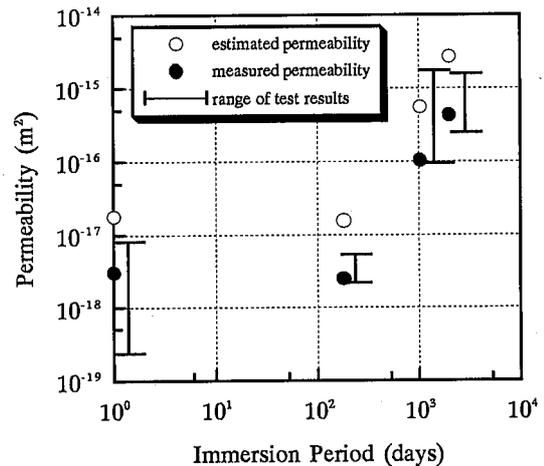


Fig.7 透水係数の予測値と計測値
Estimated and Measured Values of Permeability

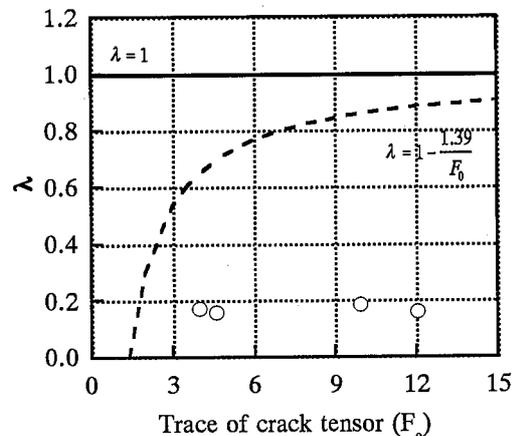


Fig.8 連結性パラメータとき裂密度との関係
Relationship between Connectivity Parameter and Crack Density

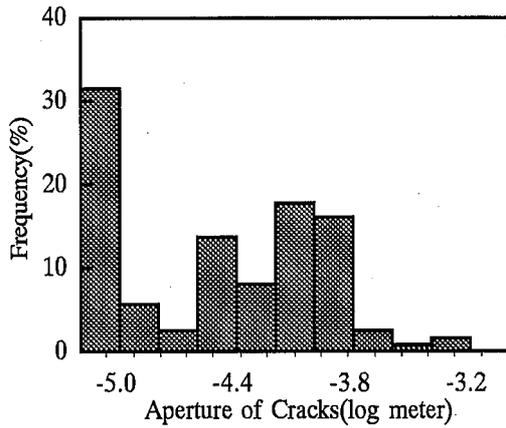


Fig.9 開口幅の頻度分布
Distribution of Aperture

を、実線で今回の推定結果を示した。注水区間を設けたNo.2孔からそれぞれ孔口間距離で2.87mと4.26mの2孔の3 深度における応答結果を示してある。き裂内の浸透流を、等価な透水テンソルを有する多孔質媒体としてモデル化において、およそ十分な近似と考えられる。

5. おわりに

風化花崗岩および現位置岩盤を例に、き裂の幾何学的特性と透水性との関係について考察した。その結果、以下のような知見を得た。

- 1) き裂の平均交差数で示された浸透閾値は、クラックテンソルのトレースで表わせる。
- 2) 理想状態の3次元き裂系で得られた浸透閾値は、岩石中のクラック分布においても浸透可能なき裂密度の必要条件となる。
- 3) 2次元浸透閾値は、浸透可能なき裂密度を過大評価する。
- 4) 開口幅のサイズは広い範囲に分布しており、等価透水係数の予測には、平均開口幅の3乗ではなく、開口幅の3次モーメントが重要な役割を果たしている。
- 5) 実際のき裂性岩盤において透水性を予測する場合は、き裂相互の連結性を低く見積もる必要があった。これは、見掛け上多くの透水経路を持っている多孔質媒体であるとしても、透水に有効なき裂によって形成される経路が存在することを示唆するものである。
- 6) 以上の考察を用いて、現位置岩盤の透水係数を推定し、孔間透水試験結果を数値計算により再現した。

開口幅の適切な評価と岩種やき裂による連結性パラメータの評価については、今後データを蓄積し、検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) Stauffer, D. :Introduction to percolation theory, Taylor & Francis (1985)
- 2) Robinson P. C. :Connectivity, flow and transport in network models of fractured media. Ph.D.

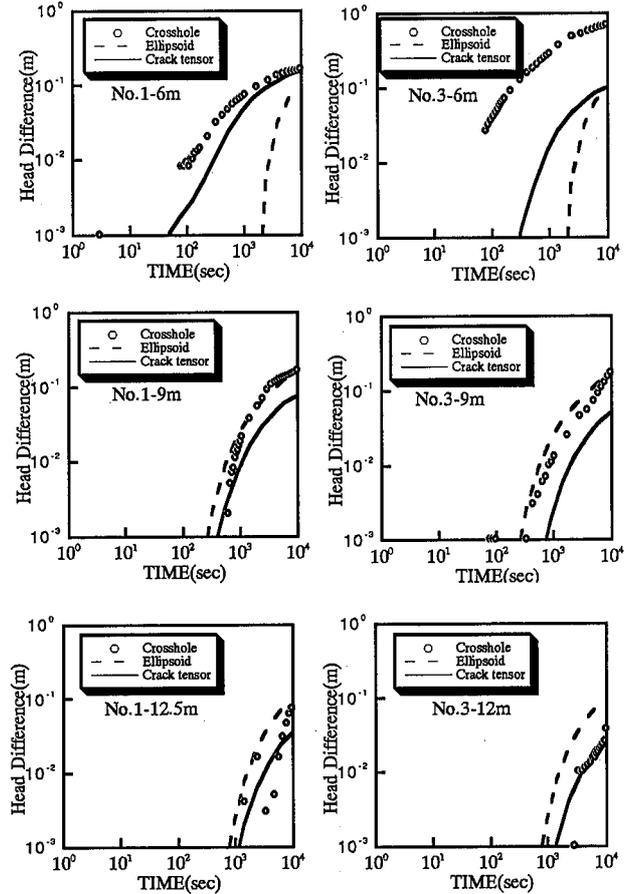


Fig.10 孔間透水試験の計算例
Example of Simulation of Cross-hole Tests

- dissertation, Oxford Univ., Oxford (1984)
- 3) Long J. C. S., Remer J. S., Wilson C. R., and Witherspoon P. A. :Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. W. R. R., Vol. 18, No. 3, 645-658 (1982)
- 4) Oda, M. :Permeability tensor for discontinuous rock masses, Geotechnique, 35(4) 483-495 (1982)
- 5) Kanatani, K. :Measurement of crack distribution in a rock mass from observation of its surfaces, Soil and foundations, Vol. 25, No. 1, 77-83, (1985)
- 6) Suzuki, K., Oda M., Kuwahara T., and Hirama K. :Material property changes of granitic rock under long-term immersion in hot water. Engineering Geology, 40, 29-39 (1995)
- 7) 鈴木清史, 高橋学:レプリカフィルムを用いた空隙, 亀裂の可視化法, 応用地質35巻2号, 31-32, (1994)
- 8) Scheidegger, A. E.:The physics of flow through porous media. University of Toronto Press, (1957)
- 9) 現位置岩盤試験研究開発グループ:神岡鉱山における研究開発(平成6 年度)不連続性岩盤の水利特性の検討ークロスホール試験実施と水理解析モデルの開発ー, p. 150, 1995