

二次元割れ目系モデルによる岩盤の透水性評価に関する研究

ESTIMATION OF THE PERMEABILITY ON DISCONTINUOUS ROCK MASS BASED ON TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSES

奥野哲夫*・百田博宣**

By Tetsuo OKUNO and Hironobu MOMOTA

The objective of the present paper is to study estimations of the permeability on discontinuous rock mass.

Firstly, two-dimensional numerical analyses on seepage flow through geological discontinuities (called joints) are carried out to examine the theory proposed by Oda. Especially, the effect of the aperture distribution of joints on the permeability tensor is examined in detail. Secondly, the field method, known as the Lugeon test, is investigated on the scale effect of the packed-off interval (stage length). This effect on the estimation is discussed with the results from the numerical analyses.

Finally, the effects of the aperture distribution of joints and the packed-off interval on estimations of the permeability are demonstrated.

Keywords: permeability, seepage flow, crack tensor, rock mass, discontinuity

1. はじめに

ダム基礎岩盤の浸透問題に加え、最近では燃料用貯蔵空洞や放射性廃棄物処分場など、多様化した岩盤構造物周辺の地下水流動を正確に予測することが必要不可欠となってきている。このためには浸透流解析手法とその入力物性値である水理定数の評価が重要と考えられるが、昨今の浸透流解析手法の発達に比べ、岩盤の水理定数の評価はまだ合理的な手法はとられていないようである。たとえば、透水係数は定常、非定常の両問題にかかわる重要な水理定数であり、通常ルジオン試験から評価されることが多いが、同一の岩種においても数オーダーのばらつきをもち、解析に用いる平均的な透水係数の評価は個人の技術的判断に任されているのが現状である。また、割れ目系岩盤の透水性では異方性の評価も重要と考えられているが、ルジオン試験から異方性の評価を行うのは困難である。

このため、最近では、割れ目の密度や方向、長さ、開口幅といった幾何学的特性量の分布から、岩盤の平均的

透水係数を評価する手法が提案されている。Longら^{1),2)}の二次元割れ目系モデルを用いた数値実験によると、割れ目系岩盤では、i)割れ目密度が高い、ii)割れ目開口幅の分布が一定値に近い、iii)割れ目方向の分布が大きい、iv)割れ目長さに対して試験体領域が大きい場合に、より均質異方性の多孔質媒体に近い透水特性を示すことが明らかになっている。さらに、小田ら³⁾⁻⁵⁾はこのような割れ目の幾何学的特性量から岩盤の平均的透水係数を算定する手法を提案している。これはクラックテンソルを用いて岩盤を確率的に等価な均質異方性媒体に近似する手法であるが、この理論に導入されている仮定やパラメーターについては理論的な検討が必要と考えられる。また、この手法を実際に適用する場合、現状では割れ目開口幅の計測技術の発達が望まれ、幾何学的な開口幅と水理学的な開口幅の関係を明らかにする必要もある。

一方、ルジオン試験に代表される注入試験においても、対象領域の平均的な透水係数を評価する手法は確立していない。特に、ルジオン試験では試験区間長(ステージ長)を5.0mに設定しているが、このような試験区間長が対象領域の平均的透水係数を評価するのに妥当か、またその場合に岩盤内でどのような地下水流動が生じているか検討されていない。さらに、最近ではボーリング孔から得られる割れ目情報を用いて透水性を評価する試み

* 正会員 工修 清水建設(株)大崎研究室研究員
(〒100 千代田区内幸町2-2-2)

** 正会員 工博 清水建設(株)技術本部土木技術開発第二部
(〒108 港区芝浦4-15-33)

も行われているが、その妥当性は明らかにされていない。

以上のような観点から、本論文では二次元割れ目系モデルを用いた数値実験により、割れ目系岩盤の透水特性について検討を行う。検討を行う項目は、(1)クラックテンソル理論^{3)~5)}に導入されている仮定の妥当性とパラメーターの物理的意味、(2)注入区間長が対象領域の平均的な透水係数の評価に及ぼす影響、(3)注入区間から得られる割れ目情報を用いて算定した透水係数の妥当性、についてである。また、特に(1)については割れ目開口幅分布の影響についても調べる。なお、以上の検討に用いる割れ目系モデルは、すでに報告されている割れ目系岩盤の調査結果を参考として設定するが、本論文では基礎的な検討を行うことから等方性の割れ目系モデルを設定する。

2. 検討手順

(1) クラックテンソル理論に関する検討

クラックテンソル理論に関する検討は、図-1に示す解析フローに従って行う。以下にその手順を説明する。

まず、後に示す割れ目系岩盤の調査結果を参考として、割れ目の方向、トレース長さ、開口幅の分布特性を確率密度関数により設定する。これをもとにして割れ目系モデルを作成するが、この方法は Long ら^{1),2)}の数値実験手法と同様である。すなわち設定した割れ目密度より二次元領域に発生させる割れ目数を決定し、乱数を用いて割れ目の中心位置を発生させる。発生させた各割れ目中心

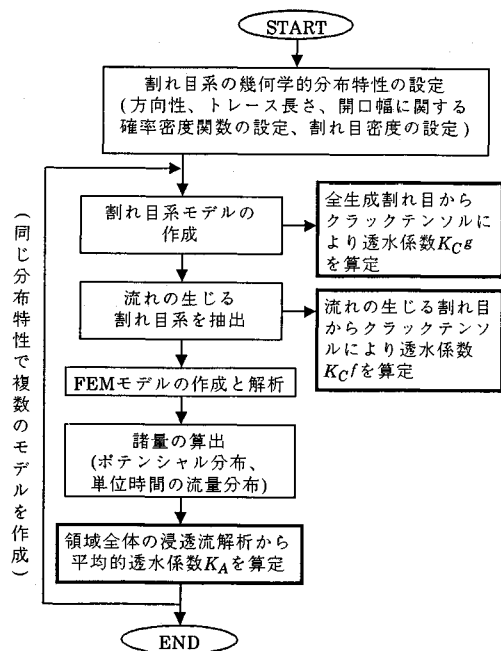
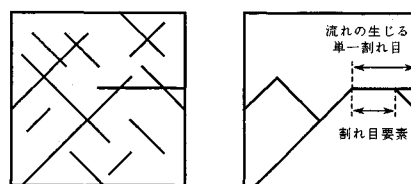


図-1 解析フロー (クラックテンソル理論の検討)

位置に、先の解析ケースで設定した確率密度関数を用いて方向、長さ、開口幅の順で各特性量を設定する。このようにして生成した割れ目系モデルから、一定の正方領域を抽出して解析領域とする。なお、ここでは解析領域を 10 m×10 m とする。次に、浸透流は連結した割れ目系を通してのみ生じるものとし、浸透流解析モデルを作成する。図-2には浸透流解析モデルの作成過程を示している。まず、(a)に示す割れ目系モデルから、透水境界に連結していない割れ目を除去する。さらに、この割れ目系から流れの生じない割れ目端部などを除去し、(b)に示すように流れの生じる割れ目系を抽出する。最終的に各割れ目交点で区切られる割れ目要素を認識し、浸透流解析モデルを作成する。また、以上の過程において、生成した全割れ目系と流れの生じる割れ目系からクラックテンソル理論により透水係数 K_C^g 、 K_C^f を算定する。

このようにして作成した浸透流解析モデルを用いて FEM 解析を実施する。FEM 要素には Wilson ら⁶⁾、川本ら⁷⁾が示している線要素を用い、定常解析からポテンシャル分布と流量を求める。この場合、図-3に示す境界条件で解析を実施し、領域全体の平均的な透水係数 K_A を求める。これは Long ら^{1),2)}の示した境界条件と同様で、図には x 方向の解析を行う場合の境界条件を示しており、動水勾配を境界で制御している。なお、本解析では境界のポテンシャル値を $H=10.0$ m、 $H'=0.0$ m とする。

以上の方法で求めた領域全体の平均的な透水係数 K_A とクラックテンソル理論により求めた透水係数 K_C^g 、 K_C^f



(a) 作成した割れ目系モデル (b) 流れの生じる割れ目系

図-2 浸透流解析モデルの作成

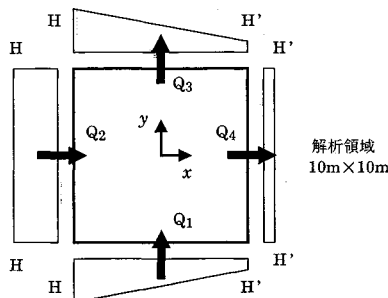


図-3 解析領域と境界条件 (クラックテンソル理論の検討)

を比較してクラックテンソル理論の検討を行う。なお、本解析では透水係数の分布も調べるため、後述する各解析ケースで乱数を用いて5つの割れ目系モデルを作成し、繰り返し解析を行う。また、透水係数 K_A , K_I , K_{IC} の算定式は次章に示す。

(2) 注入試験に関する検討

注入試験に関する検討は図-4に示す解析フローに従って行うが、注入試験のシミュレーション以外にも領域全体の平均的透水係数を求める目的で浸透流解析を実施する。この場合、実際の注入試験ではボーリング孔を用いることが多く、軸対称問題としての取扱いが適切と考えられる。しかし、本論文では割れ目系モデルの作成が複雑となるため二次元問題としてモデル化し、注入試験の定性的な検討を行うものとする。以下にこれらの検討手順を説明する。

まず、(1)と同様の手順で浸透流解析モデルを作成し、図-5に示す境界条件でFEM解析を実施して領域全体の平均的透水係数 K_A を求める。この場合の解析領域は20m×20mで、上下2境界は不透水境界として流れの方向を境界で制御している。これは後に注入試験から透水係数を算定する場合、 x 方向の水平流を仮定することに対応させており、ポテンシャル値は、 $H=20.0$ m, $H'=0.0$ mとする。次に同領域に注入区間を設定し、この注入区間と透水境界に連結した割れ目系のみ抽出して注入試験のFEM解析を行う。このとき、注入区間長の影響を調

べる目的で図-6に示す2種類の条件を設定する。図の(a)は注入区間が長い(12.5m)場合、(b)は注入区間が短い(2.5m)場合であり、それぞれA~C区間とA~O区間に独立に注入する。したがって、後述する各解析ケースで乱数を用いて1つの割れ目系モデルのみ作成し、(a)では合計3回、(b)では合計15回の解析を行う。なお、各解析で注入区間のポテンシャル値は10.0m、左右両境界のポテンシャル値は0.0mとする。このような注入試験のシミュレーションから透水係数 K_I を算定するとともに、注入区間と交わる割れ目情報から透水係数 K_{IC} を算定する。

以上の方法で求めた領域全体の平均的透水係数 K_A と注入試験より求めた透水係数 K_I 、注入区間と交わる割れ目情報から求めた透水係数 K_{IC} を比較して、注入試験に関する検討を行う。なお、透水係数 K_A , K_I , K_{IC} の算定式は次章に示す。

3. 透水係数の算定

本研究では数種類の透水係数の算定式を用いており、ここでは二次元状態での x 方向の算定式を示す。

(1) 領域全体の平均的透水係数の算定

まず、均質異方性媒体中の平均流速は透水テンソルを用いて次式のように表わされる。

$$\bar{v}_i = K_{ij} J_j = \frac{q}{v} k_{ij} J_j \quad (i, j = 1, 2) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 \bar{v}_i : 平均流速ベクトル, J_j : 動水勾配ベクトル,

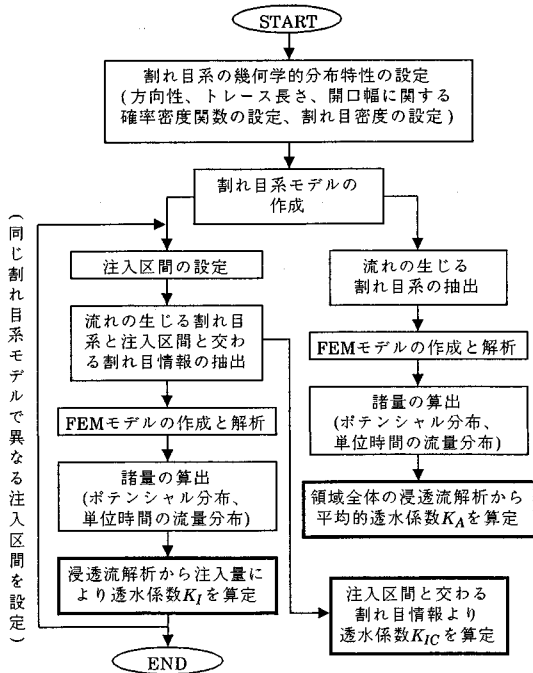


図-4 解析フロー (注入試験の検討)

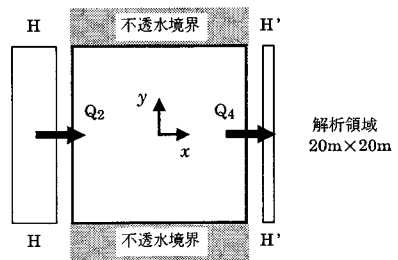
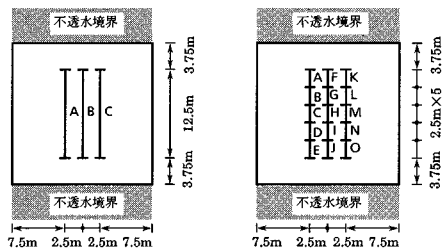


図-5 解析領域と境界条件 (注入試験の検討)



(a) 注入試験モデルA (長区間) (b) 注入試験モデルB (短区間)

図-6 注入試験モデル

K_{ij} ：透水テンソル (Hydraulic Conductivity), k_{ij} ：透水テンソル (Intrinsic Permeability), g ：重力加速度, ν ：動粘性係数であり、テンソル表示は総和規約に従う。

式(1)から図-3の境界条件において、 x 方向の透水係数 K_A は次式で与えられる。

$$K_A = K_{11} = \frac{Q_x/L_y}{(H-H')/L_x} = \frac{Q_x}{H-H'} \dots\dots\dots (2)$$

ここで Q_x は解析領域における x 方向の単位時間当たりの流量であり、本解析では Q_2 と Q_4 の平均値をとるものとする。また、 L_x, L_y はそれぞれ x 軸、 y 軸に沿った境界の長さであり、ここではともに 10 m である。なお、これはクラックテンソルの検討に用いる算定式で、動水勾配方向の透水係数を与えている。

一方、注入試験の検討でも、式(2)を用いて x 方向の平均的透水係数を算定する。しかし、この場合は図-5に示したように、流れ方向の透水係数を与えることになる。

(2) クラックテンソル理論による算定

小田ら³⁾⁻⁵⁾は割れ目の幾何学的特性量の分布から、次式で透水テンソル k_{ij} が与えられることを示している。

$$k_{ij} = \lambda \cdot (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad 0 \leq \lambda \leq 1/12 \dots\dots\dots (3)$$

$$P_{ij} = \rho \cdot \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi t^3 \ln_i n_j E(\mathbf{n}, l, t) d\theta dl dt \dots\dots (4)$$

ここに、 λ ：割れ目の連結性にかかわるパラメーター、 P_{ij} ：二階のクラックテンソル、 δ_{ij} ：クロネッカーのデルタ、 ρ ：割れ目密度、 t ：割れ目開口幅、 l ：割れ目長さ、 \mathbf{n} ：割れ目の単位法線ベクトル、 n_i ： \mathbf{n} の成分、 θ ：単位法線ベクトルの角度、 $E(\mathbf{n}, l, t)$ ： \mathbf{n}, l, t の同次確率密度関数である。 λ は割れ目の連結性に関連したパラメーターであり、連結性がなく実質的に不透水となる場合は0となり、完全に連結性が満たされる場合は Poiseuille 則を用いていることから 1/12 となる。小田ら⁵⁾は λ について二階のクラックテンソル F_{ij} との関係調べており、 λ は F_{ij} の一次不偏量 $F_0 (F_0 = F_{ii})$ と対応関係があることを示している。 \mathbf{n}, l, t が互いに独立な確率変数であれば、 P_{ij} は式(5)で与えられる。

$$P_{ij} = \rho \cdot \int_0^\infty \int_0^\infty t^3 g(t) dt \int_0^\infty l f(l) dl \int_{-\pi}^\pi n_i n_j E(\mathbf{n}) d\theta$$

$$= \rho \langle t^3 \rangle \langle l \rangle \langle n_i n_j \rangle \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $E(\mathbf{n}), f(l), g(t)$ はそれぞれ \mathbf{n}, l, t の確率密度関数であり、 $\langle \rangle$ は平均値を示す。また P_{ij} は、面積 A の二次元領域において、式(6)を用いて離散的に求めることができる。

$$P_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^{m^{(v)}} (t^{(k)})^3 \cdot l^{(k)} \cdot n_i^{(k)} \cdot n_j^{(k)} \dots\dots\dots (6)$$

なお、 k は k 番目の割れ目を、 $m^{(v)}$ は割れ目数を示す。

式(3)を式(1)に代入すると、クラックテンソル P_{ij} から x 方向の透水係数 K_C が式(7)で求められる。

$$K_C = K_{11} = \lambda \cdot \frac{g}{\nu} \cdot (P_{kk} - P_{11}) \dots\dots\dots (7)$$

本解析では式(7)より K_C を算定するが、 P_{ij} の算定方法により K_C を区別する。すなわち、生成した全割れ目から式(6)を用いて求めたものを K_C^g 、流れの生じる割れ目だけから式(6)を用いて求めたものを K_C^l とする。なお、全解析とも λ は 1/12 と仮定して求める。

(3) 注入試験と注入区間の割れ目情報による算定

図-6に示した注入試験のシミュレーションから、注入区間より左右2方向の水平流が生じるものとして x 方向の透水係数を算定する。これは実際のルジオン試験で水平方向の放射流を仮定して透水係数を算定する方法に対応している。この場合の x 方向の透水係数 K_I は、注入量を用いて次式から求められる。

$$K_I = \frac{Q_{in} \cdot R}{2 \cdot L \cdot (P_{max} - P_{min})} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 Q_{in} ：注入量、 R ：影響距離、 L ：注入区間長、 P_{max} ：注入ポテンシャル値、 P_{min} ：無限遠方ポテンシャル値であり、本解析では影響距離 R は 5.0 m とする。この影響距離の設定は、ルジオン試験から透水係数を換算する場合に準じたものである。

また、注入区間から得られる割れ目情報を用いて x 方向の透水係数 K_{ic} の算出を行う。図-7に示すとおり、注入区間に対して垂直方向に巨視的な動水勾配 J が生じるとすると、各割れ目の流量 Q_i は次式で与えられる。

$$Q_i = 2K_i \cdot t_i \cdot J \cdot \cos(\theta_i - \theta_l) \dots\dots\dots (9)$$

$$K_i = \frac{g \cdot t_i^2}{12 \cdot \nu} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 K_i ：各割れ目の透水係数、 t_i ：各割れ目の開口幅、 θ_i ： x 軸からの各割れ目の角度、 θ_l ： x 軸からの注入区間法線の角度である。したがって、注入区間と交わる

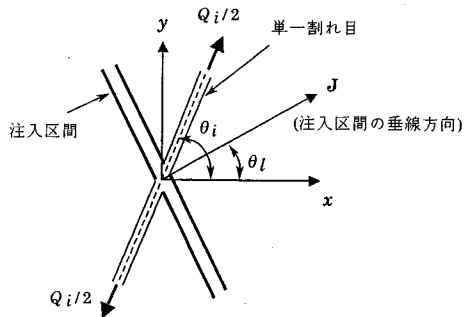


図-7 注入区間と交わる単一割れ目

割れ目数 n と各割れ目の開口幅および方向がわかれば、総流量 $\sum Q_i$ と巨視的な動水勾配 J との関係から、 K_{IC} が次式のように求められる。

$$K_{IC} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{2L \cdot J} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n K_i \cdot t_i \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) \dots \dots \dots (11)$$

なお、本解析の注入区間はすべて鉛直方向であるため、透水係数 K_{IC} は x 方向の透水係数となる。

4. 解析ケース

本検討では、Priestら⁸⁾、Rouleauら⁹⁾、菊地ら¹⁰⁾、平間ら¹¹⁾が実施した割れ目系岩盤の調査結果を参考に割れ目の幾何学的特性量の分布を設定する。調査されている岩種は泥岩、砂岩、花崗岩、凝灰質頁岩と同一ではないが、割れ目の卓越方向は3~4方向観察されており、トレース長さは負の指数分布となるものが多く、平均トレース長さは0.8~2.2m程度の範囲にある。また、割れ目密度は壁面で多くとも10本/m²程度と考えられる。これらの調査結果をもとに、以下の解析ケースを設定する。

(1) クラックテンソル理論に関する検討

クラックテンソル理論に関する検討を行うため、設定した解析ケースを表-1に示す。本解析は二次元領域の解析であるため卓越方向を減少させて2方向(セット)とする。これらの卓越方向の平均値は全解析ケースとも x 軸から60°と-30°の直交する2方向とし、ともに平均値より±15°の範囲の1様分布とする。次に、割れ目の平均長さは2セットとも0.75mとし、その分布型は負の指数分布とする。また、割れ目密度は2セットとも同一とし、合計5、9、13本/m²の3種類とする。最後に開口幅を設定するが、この実測データはほとんど報告されていないため、平均開口幅がすべて0.10mmとなる4種類の分布を仮定する。分布型は、一定値、1様分布、負の指数分布、割れ目長さに比例する負の指数分布の4

表-1 クラックテンソルの検討に用いる解析ケース

解析ケース	割れ目密度 ρ (* / m ²)		開口幅分布 l (mm)	
	セット1	セット2	セット1	セット2
(5,C)	2.5	2.5	C (0.10)	C (0.10)
(9,C)	4.5	4.5		
(13,C)	6.5	6.5		
(5,U)	2.5	2.5	U (0.0~0.2)	U (0.0~0.2)
(9,U)	4.5	4.5		
(13,U)	6.5	6.5		
(5,E)	2.5	2.5	E (0.10)	E (0.10)
(9,E)	4.5	4.5		
(13,E)	6.5	6.5		
(5,A)	2.5	2.5	A (0.13333)	A (0.13333)
(9,A)	4.5	4.5		
(13,A)	6.5	6.5		
備考	上記の記号は次の分布型を示す。 C : 一定値 (数値は一定値) U : 1様分布 (数値は分布範囲) E : 負の指数分布 (数値は平均値) A : $t=A \cdot l$ の関係でトレース長さに比例する分布 (数値はAの値)			

種類であり、それぞれC, U, E, Aの記号で表わすものとする。したがって、パラメーターとなる割れ目密度 ρ と開口幅 l の分布型を用いて解析ケースを標示している。なお、本解析で設定した解析ケースは、直交する2方向の割れ目特性がすべて同一であるため等方性の割れ目系モデルとなる。

(2) 注入試験に関する検討

次に、注入試験に関する検討を行うために設定した解析ケースを表-2に示す。卓越方向は先と同様2セットとするが、方向を変えて2種類設定している。1つは卓越方向の平均値を x 軸から90°と0°とし、他の1つは60°と-30°としている。また、その分布型はすべて平均値より±15°の範囲の1様分布とする。次に、割れ目の平均長さは先と同様0.75mとし、その分布型も負の指数分布とする。また、割れ目密度は2セットとも同一とし、合計5、7、9本/m²の3種類とする。最後に開口幅を設定するが、ここでは平均開口幅0.10mmの負の指数分布とする。したがって、パラメーターとなる割れ目密度 ρ 、卓越方向、注入試験モデルを用いて解析ケースを標示している。なお、これらの解析ケースは、先と同様に等方性の割れ目系モデルとなる。

5. 解析結果と透水性評価に関する検討

(1) クラックテンソル理論に関する検討

作成した割れ目系モデルを用いて浸透流解析を実施した例を図-8に示す。ここに示した例は、クラックテンソルの検討のために実施した解析ケース(13, E)の一例である。(a)には作成した割れ目系モデルを示しており、(b)にはポテンシャル分布図を、(c)には単位時間当たりの流量分布図を示しており、 x 方向に動水勾配を加えた場合である。ポテンシャル分布図からは必ずしも y 軸に沿った直線的な等ポテンシャル線は得られていない。また、ポテンシャル分布図には流れの生じる割れ目系を示しており、割れ目数が低減していることがうかがえる。

表-2 注入試験の検討に用いる解析ケース

解析ケース	割れ目密度 ρ (* / m ²)		卓越法線方向 (°)		注入試験モデル
	セット1	セット2	セット1	セット2	
(5,①(A))	2.5	2.5	90°	0°	①(A)
(5,①(B))			(75°~105°)	(-15°~15°)	①(B)
(5,②(A))			60°	-30°	②(A)
(5,②(B))	3.5	3.5	(45°~75°)	(-45°~-15°)	②(B)
(7,①(A))			90°	0°	①(A)
(7,①(B))			(75°~105°)	(-15°~15°)	①(B)
(7,②(A))	4.5	4.5	60°	-30°	②(A)
(7,②(B))			(45°~75°)	(-45°~-15°)	②(B)
(9,①(A))			90°	0°	①(A)
(9,①(B))	4.5	4.5	(75°~105°)	(-15°~15°)	①(B)
(9,②(A))			60°	-30°	②(A)
(9,②(B))			(45°~75°)	(-45°~-15°)	②(B)
備考	卓越法線方向(セット1、セット2)の値は1様分布の平均値を示し、()内にその分布範囲を示す。注入試験モデルは図-6を参照。				

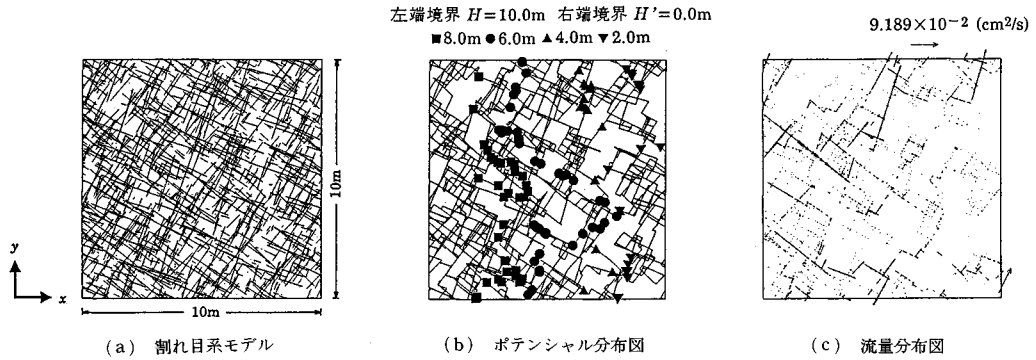


図-8 解析結果の一例 (解析ケース (13, E))

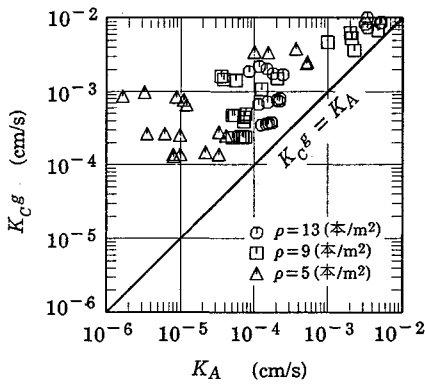


図-9 K_A と K_c^g の関係 (割れ目密度の影響)

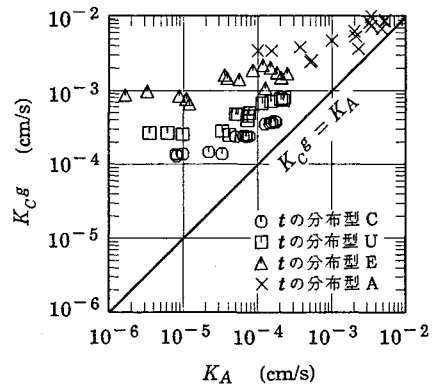


図-10 K_A と K_c^g の関係 (開口幅分布の影響)

さらに、流量分布図からはいくつかの卓越する流路が形成されていることがわかる。

以下に透水特性の検討を行うが、クラックテンソルに関する検討では、 x 方向と y 方向で同様の結果が得られているので x 方向の結果のみを示す。

全解析結果から K_A と K_c^g の関係を求め、図-9、10 に示す。図-9 は割れ目密度 ρ をパラメーターとして、また図-10 には割れ目開口幅 t の分布型をパラメーターとして示している。これらの図から、生成した全割れ目から求めた透水係数 K_c^g は、浸透流解析より求めた透水係数 K_A より大きな値を示し、透水係数が小さいほど両者の差は大きくなっていることがわかる。これは式 (7) において λ を $1/12$ と設定したことにより、連結性が十分あるものとして K_c^g が評価されているためと考えられる。さらに、同じ開口幅分布では割れ目密度が高いほど透水係数が大きくなっている。また、割れ目密度が同じであれば、開口幅分布 C、U、E の順で K_c^g が K_A に近づいている。このことは、クラックテンソルから透水係数を評価するには、開口幅分布を考慮して λ を設定する必要があることを示している。一方、開口幅分布 A

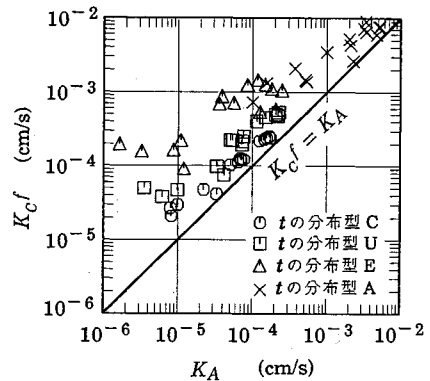


図-11 K_A と K_c^f の関係

では、他のものと比較して K_A と K_c^g がともに大きな値となっている。一般に長さが長い割れ目は他の割れ目と多くの交点を持ち、卓越する流路を形成しやすい。したがって、開口幅分布 A では、そのような長い割れ目ほど開口幅が大きくなっており、さらに卓越する流路が形成されるためと考えられる。

また、図-11 には K_A と K_c^f の関係を示している。図

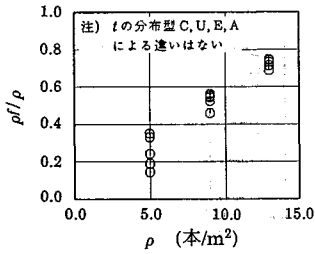


図-12 ρ と ρ'/ρ の関係

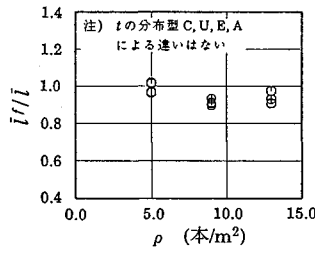


図-13 ρ と l'/l の関係

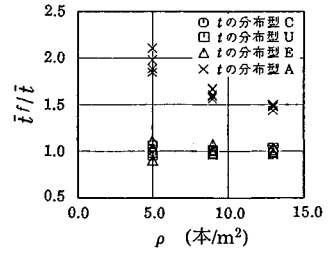


図-14 ρ と t'/t の関係

—10に示した Kc^g と比較して、 Kc^g の方が K_A に近い値となっている。このように、 λ を $1/12$ と設定しても流れの生じる割れ目系のみ抽出すれば連結性が十分保たれるので、両透水係数はある程度一致する。しかし、依然、 Kc^g は K_A より大きくなる傾向を示しており、ここではこの点について詳細に検討する。なお、参考として、全割れ目から求めたクラックテンソル F_{ij} の一次不偏量 F_0 の値を示すと、全解析モデルについて $4.72 \sim 14.73$ の範囲にある。

a) 流れの生じる割れ目特性

生成した全割れ目系と流れの生じる割れ目系で、その特性の違いを調べ図-12, 13, 14に示す。図-12には、設定した割れ目密度 ρ と流れの生じる割れ目密度 ρ' との比 ρ'/ρ を示している。全解析モデルで ρ'/ρ は 1.0 以下となり、 ρ が増加すると ρ'/ρ が増加する傾向を示している。また、図-13には設定した平均割れ目長さ l と流れの生じる割れ目の平均長さ l' との比 l'/l を示しているが、 ρ による l'/l の変化はほとんど 1.0 に近い値である。さらに図-14には、設定した平均割れ目開口幅 t と流れの生じる割れ目の平均開口幅 t' との比 t'/t を示している。開口幅分布 A は他のものと比較して t'/t が大きく、 ρ の増加に伴って t'/t は減少しているが、他の開口幅分布では ρ に依存せず 1.0 に近い値である。また、ここには示していないが、割れ目方向の分布は生成した全割れ目と流れの生じる割れ目でほとんど変化がない。

以上から生成した全割れ目と流れの生じる割れ目で、平均長さ、平均開口幅、割れ目方向の平均値はほぼ一致しており、 Kc^g が K_A に近い値となる理由は割れ目密度を適切に評価したためと考えられる。

b) 割れ目に作用する動水勾配

図-15に示すように、クラックテンソル理論^{3)~5)}では、単一割れ目に作用する動水勾配 $J^{(c)}$ は巨視的動水勾配 J の割れ目方向成分として与えられることを仮定している。ここでは浸透流解析より各割れ目要素に作用する動水勾配 $J^{A(c)}$ を求め、上記の仮定から求まる $J^{(c)}$ との比 $a(a = J^{A(c)}/J^{(c)})$ を調べることとする。

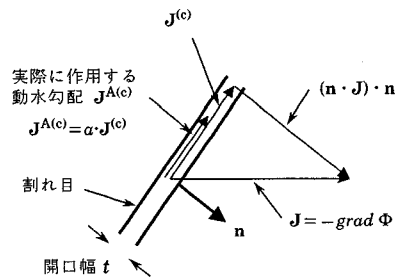


図-15 単一割れ目に加わる動水勾配

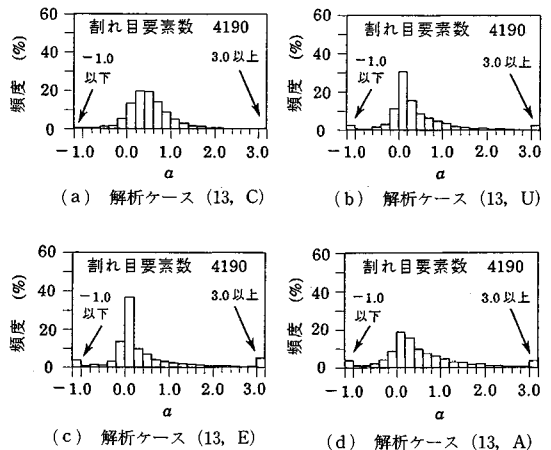


図-16 a のヒストグラム

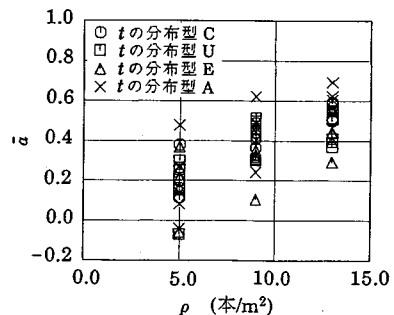


図-17 ρ と a の関係

図-16には、解析ケース(13, C), (13, U), (13, E), (13, A)の4種類の解析結果から、 a のヒストグラムを示している。これより a の分布は開口幅分布の違いにより特徴的な分布型を示し、その分布は広範囲にわたることがわかる。次に、割れ目密度 ρ と a の平均値 \bar{a} の関係を図-17に示す。これより一般に割れ目密度 ρ が大きくなると \bar{a} も大きくなるが、13本/m²においても0.3~0.7と1.0以下の値であることがわかる。このように \bar{a} が1.0以下の値を示していることから、 a を1.0として求めたことになる K_C^f の値が K_A より大きくなる。

c) パラメーター λ^0 の物理的意味

以上より、 K_C^f が K_A より大きな値を示す原因は、割れ目密度と割れ目に作用する動水勾配を過大評価しているためと考えられる。このことから、小田らの示しているクラックテンソル理論⁹⁾⁻¹¹⁾を以下のように拡張し、パラメーター λ の物理的意味を考察する。

まず、図-15より $J^{A(c)}$ は次式で与えられる。

$$J^{A(c)} = a(\delta_{ij} - n_i n_j) J_j \dots\dots\dots (12)$$

各割れ目には式(12)の $J^{A(c)}$ が作用するものとし、さらにPoiseuille則が成立するものとする、流れの生じる割れ目から領域全体の平均流速が式(13)で与えられる。

$$\bar{v}_i = \frac{q\rho^f}{12\nu} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} t^3 l a (\delta_{ij} - n_i n_j) J_j E^f(\mathbf{n}, l, t, a) d\theta dl dtda \dots\dots\dots (13)$$

ここで割れ目密度は、流れの生じる割れ目密度 ρ^f であり、 $E^f(\mathbf{n}, l, t, a)$ は a も含めた同次確率密度関数で、流れの生じる割れ目に対して定義されるものである。したがって、式(13)と式(1)の関係から透水テンソルは式(14)で与えられる。なお、透水テンソルは先の式(3)と区別するため、 k'_{ij} として表わす。

$$k'_{ij} = \frac{1}{12} \cdot (P'_{kk} \delta_{ij} - P'_{ij}) \dots\dots\dots (14)$$

$$P'_{ij} = \rho^f \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} t^3 l a n_i n_j E^f(\mathbf{n}, l, t, a) d\theta dl dtda \dots\dots\dots (15)$$

ここに P'_{ij} は割れ目の動水勾配の比率も含んだ二階のテンソルである。式(15)において \mathbf{n}, l, t, a が互いに独立な確率変数と仮定すると P'_{ij} は式(16)で与えられる。

$$P'_{ij} = \rho^f \cdot \int_0^{\infty} t^3 g^f(t) dt \int_{-\infty}^{\infty} l f^f(l) dl \int_{-\pi}^{\pi} n_i n_j E^f(\mathbf{n}) d\theta \cdot \int_{-\infty}^{\infty} a h^f(a) da = \rho^f \langle t^3 \rangle^f \langle l \rangle^f \langle n_i n_j \rangle^f \langle a \rangle^f \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $E^f(\mathbf{n}), f^f(l), g^f(t), h^f(a)$ は、 \mathbf{n}, l, t, a の確率密度関数であり、流れの生じる割れ目に対して定義される。また、 $\langle \rangle^f$ は流れの生じる割れ目に対する平均

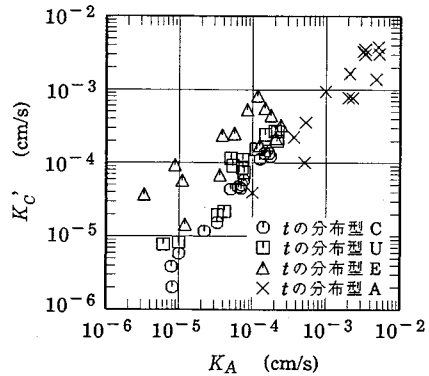


図-18 K_A と K'_C の関係

値を表わす。先の図-13, 14などから、開口幅分布A以外で $\langle t^3 \rangle^f, \langle l \rangle^f, \langle n_i n_j \rangle^f$ は、それぞれ $\langle t^3 \rangle, \langle l \rangle, \langle n_i n_j \rangle$ とほぼ一致するものと仮定できる。したがって、式(5), (14), (16)から式(17)が得られる。

$$k'_{ij} = \frac{1}{12} \cdot \frac{\rho^f}{\rho} \cdot \langle a \rangle^f \cdot (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \dots\dots\dots (17)$$

式(3)と式(17)を比較すると、式(3)中の $\lambda(0 \leq \lambda \leq 1/12)$ は式(17)中の係数部分 $1/12 \cdot \rho^f / \rho \cdot \langle a \rangle^f$ に対応している。このことは、 λ の評価は流れの生じる割れ目密度の比率 ρ^f / ρ と割れ目に作用する動水勾配の比率 a の平均値 $\langle a \rangle^f$ を評価するのと同じことを示している。なお、 $0 \leq \rho^f / \rho \leq 1, 0 \leq \langle a \rangle^f \leq 1$ となることが推定される。以上より、すでに求めた x 方向の透水係数 K_C^f を用いて、 k'_{11} に対応する x 方向の透水係数 K'_C が式(18)で求められる。

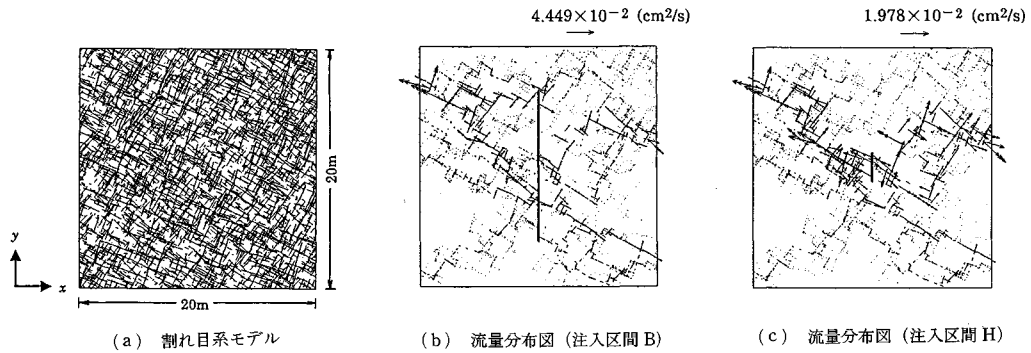
$$K'_C = \frac{\rho^f}{\rho} \cdot \langle a \rangle^f \cdot K_C^f \dots\dots\dots (18)$$

全解析モデルについて K'_C を求め、 K_A と比較したのが図-18である。なお、ここでは流れの生じる割れ目の $\langle a \rangle^f$ として、図-17に示した割れ目要素に対する a の平均値 \bar{a} を用いている。図-11と図-18を比較して一般的に K'_C が K_A と一致している。これは K_C^f では評価されなかった $\langle a \rangle^f$ の効果が評価されたためと考えられる。ただし、開口幅分布E, Aのものは、他のものほど一致しておらず、これらは $\langle t^3 \rangle$ と $\langle t^3 \rangle^f$ が一致しないことや、 a と \mathbf{n}, l, t の関係が独立とならないことなどが原因と考えられる。

(2) 注入試験に関する検討

次に、注入試験のシミュレーションならびに注入区間の割れ目情報から求めた透水係数の検討を行う。

図-19に注入試験のシミュレーション結果を示す。これは解析ケース(9, ②, A), (9, ②, B)の一例であり、(a)には作成した割れ目モデルを示しており、(b)



図一19 解析結果の一例 [解析ケース (9, ②, ④), (9, ②, ⑥)]

には (9, ②, ④) において注入区間 B から注入を行った場合, (c) には (9, ②, ⑥) において注入区間 H から注入を行った場合の流量分布図を示している。これらの結果から, 注入区間から卓越する流路が形成されることが確認でき, 特に注入区間の短い (9, ②, ⑥) においてその傾向は大きい。

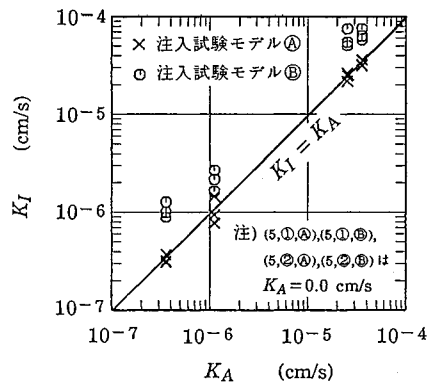
a) 領域全体の平均的透水係数の評価

注入試験から岩盤領域全体の平均的透水係数を評価する場合, 注入区間長が透水係数の評価に及ぼす影響について検討を行う。図一20 には注入試験モデル④と⑥の両解析結果について K_A と K_I の関係を示している。なお, 注入試験モデル⑥の 2.5 m の注入区間から求めた透水係数は, これと対応する注入試験モデル④の 12.5 m (⑥の 5 区間) の注入区間で算術平均値を求めて示している。この図から, 長区間の試験から求めた透水係数は領域全体の平均的透水係数とよく一致していることがわかる。一方, 短区間の試験から評価した透水係数は, 領域全体の値の約 2 倍程度大きな値を示している。このことは, 領域全体の平均的透水係数を求めるためには, 対象領域の長さに近い注入区間を設定し試験を行う必要があることを示している。

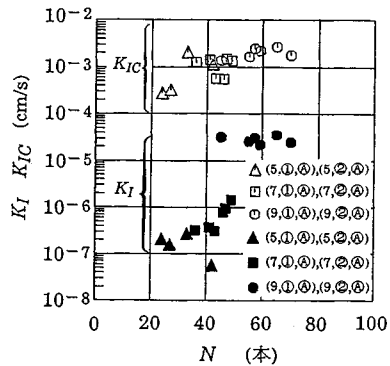
この点について先の図一19 を参考にして若干の考察を行う。注入試験モデル④の区間 B から注入した場合, 注入区間全体のうち相対的に透水性の高い流路から順に大きな流れを生じている。したがって, 区間 B において区間 H 位置に着目すると, さほど大きな流路は形成されておらず, これはこの区間に連結する流路よりも他の流路の方が透水性が高いためである。これに対して, 注入試験モデル⑥の区間 H から注入した場合は他の透水性の高い流路が閉ざされ, 先と比較してこの区間に過大な流量が発生する。このため, 短区間の試験から領域全体の透水係数を評価すると大きな値になる。

b) 注入区間と交わる割れ目数と透水係数の関係

注入試験の全解析ケースについて, 注入区間と交わる



図一20 K_A と K_I の関係



図一21 N と K_I, K_{IC} の関係 (解析モデル④)

割れ目数 N と K_I ならびに K_{IC} の関係を示したものが図一21, 22 である。図一21 は注入試験モデル④の結果であり, 図一22 は注入試験モデル⑥の結果である。両図とも K_{IC} が K_I より著しく大きくなっており, 特に割れ目数が少ないほどその差は大きい。また, 交わる割れ目数が多くなると K_I が大きくなる傾向を示すが, その相関はあまり大きくない。このような現象は, 岩盤の透水係

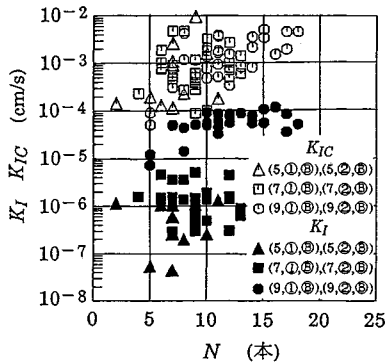


図-22 N と K_I , K_{IC} の関係 (解析モデル③)

数が個々の割れ目の透水係数だけから決定されるのではなく、割れ目相互の連結性に依存して一部の割れ目で顕著な流れが生じるためと考えられる。

6. 結 論

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) クラックテンソル理論より割れ目の連結性にかかわるパラメーター λ を $1/12$ と仮定して求めた透水係数は、浸透流解析から求まる値より大きな値を示し、両透水係数のこのような違いは割れ目開口幅分布により影響を受ける。

(2) クラックテンソル理論を流れの生じる割れ目だけに適用し、割れ目に作用する動水勾配の分布も考慮してパラメーター λ の物理的意味を考察した。それによると、パラメーター λ を評価することは、流れの生じる割れ目密度と割れ目に作用する動水勾配分布を評価することと等価である。さらに動水勾配分布は割れ目開口幅分布によっても影響を受けるため、割れ目の幾何学的な特性量だけからパラメーター λ を設定するには割れ目開口幅分布も考慮する必要がある。

(3) 注入試験から領域全体の平均的透水係数を評価する場合、対象領域の長さに比べて短い区間で試験を行うと透水係数を大きく評価する可能性がある。このため対象領域の長さに近い注入区間を設定する必要がある。

(4) 注入区間などから得られる割れ目情報 (割れ目本数, 開口幅, 方向) を用いて岩盤の透水係数を評価すると透水係数を著しく大きく評価する危険がある。この理由は、割れ目系岩盤の透水性は割れ目相互の連結性に大きく依存し、一部の割れ目で顕著な流れが生じるためである。

透水係数の表示に用いた記号の説明

K_A : 浸透流解析から求めた領域全体の平均的透水係数

K_C^d : 生成した全割れ目からクラックテンソル理論を用

いて求めた透水係数

K_C^d : 流れの生じる割れ目だけからクラックテンソル理論を用いて求めた透水係数

K_C^c : 流れの生じる割れ目密度と割れ目に作用する動水勾配を評価し、クラックテンソル理論を用いて求めた透水係数

K_I : 注入試験の浸透流解析から、注入量を用いて求めた透水係数

K_{IC} : 注入区間から得られる割れ目情報を用いて求めた透水係数

参 考 文 献

- Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A.: Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resources Research, Vol. 18, No. 3, pp. 645~658, June, 1982.
- Long, J.C.S.: Investigation of Equivalent Porous Media Permeability in Networks of Discontinuous Fractures, Ph.D. dissertation, Univ. of Calif., Berkeley, 1983.
- 小田匡寛・前浜卓郎・数納慎悟・羽出山吉裕: 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講演論文集, pp. 121~126, 1984.
- Oda, M.: Permeability tensor for discontinuous rock masses, Geotechnique 35, No. 4, pp. 483~495, 1985.
- Oda, M., Hatsuyama, Y. and Ohnishi, Y.: Numerical Experiments on Permeability Tensor and Its Application to Jointed Granite at Stripa Mine, Sweden, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. B8, pp. 8037~8048, July 10, 1987.
- Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A.: Steady State Flow in Rigid Networks of Fractures, Water Resources Research, 10, 2, pp. 328~335, 1974.
- 川本眺万・門田俊一: 亀裂性岩盤内の浸透流の解析について, 発電水力, No. 147, pp. 7~16, 1977.
- Priest, S.D. and Hudson, J.A.: Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 183~197, 1981.
- Rouleau, A. and 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, pp. 353~367, 1985.
- 菊地宏吉・三室俊昭・百田博宣・泉谷泰志・奥野哲夫・水戸義忠: 節理性岩盤における岩盤浸透流の流れモードに関する実験的研究, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 334~338, 1988.
- 平間邦興・丸山 誠・鈴木健一郎: 不連続性岩盤の節理調査と透水試験, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 361~365, 1986.

(1989.10.2・受付)