

(71) 割れ目系岩盤の透水性に関する確率論的検討

清水建設(株)大崎研究室 正員 ○奥野 哲夫
同上 正員 百田 博宣

1. はじめに

割れ目系岩盤を均質異方性の多孔質体に近似して、透水係数を算定するクラックテンソル理論が提案されている¹⁾。この手法は、割れ目の幾何学的分布特性(方向、トレース長さ、開口幅、密度)から確率論的に岩盤の透水係数を求めるもので、最近では測定データとの比較が行われている²⁾。しかし、透水係数に最も支配的な影響を与える開口幅分布については、詳細に検討されていない。

本研究では、数値実験として割れ目の幾何学的分布特性をパラメータとし、割れ目系モデルを模擬生成した後、浸透流解析結果から透水係数を計算しクラックテンソル理論と比較した。この場合、特に開口幅分布の違いに着目して検討した。また、透水係数を評価する場合の境界条件の影響についても検討を行った。

2. 数値実験

二次元領域を対象とした数値実験のフローを図-1に示す。また検討に用いた条件を図-2と表-1に示す。

図-1に示すように、数値実験は割れ目系の幾何学的分布特性を設定後、生成した割れ目系モデルのFEM浸透流解析から透水係数を算定する部分とクラックテンソル理論から透水係数を算定する部分からなっている。

具体的には、割れ目系岩盤の幾何学的分布特性の設定は、密度以外の分布特性を確率密度関数で定義して各パラメータを設定する。割れ目系モデルの生成は、Long³⁾の数値実験と同様に、乱数を発生させ設定した割れ目密度で各確率密度関数に従う方向、トレース長さ、開口幅を持つモデルを作成する。それより解析領域を取り出し、透水境界につながっていない割れ目を取り除き、流

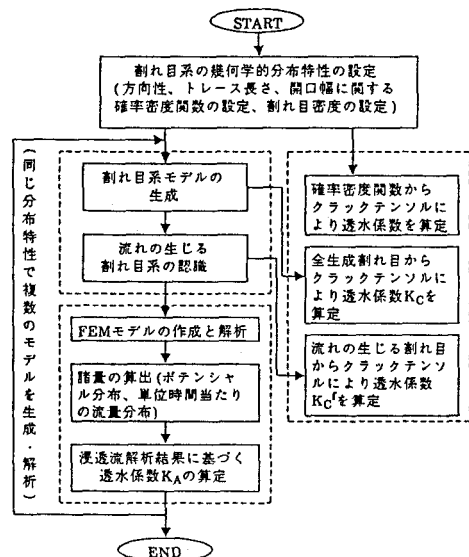


図-1 解析のフロー

表-1 解析条件の一覧表

CASE	割れ目密度 ρ (本/㎡)		トレース長さ l (m)		開口幅 t (mm)		境界条件		
	セット1	セット2	セット1	セット2	セット1	セット2			
1	2.5	2.5	E 0.75	E 0.75	C 0.10	C 0.10	①		
2	4.5	4.5							
3	6.5	6.5							
4	2.5	2.5			R 0.0~0.2	R 0.0~0.2			
5	4.5	4.5							
6	6.5	6.5							
7	2.5	2.5			E 0.10	E 0.10			
8	4.5	4.5							
9	6.5	6.5							
10	2.5	2.5			α 0.13333	α 0.13333			
11	4.5	4.5							
12	6.5	6.5							
13	2.5	2.5							
14	4.5	4.5	E 0.75	E 0.75	E 0.10	E 0.10	②		
15	6.5	6.5							
16	4.5	4.5	E 0.50	E 0.50					
17			E 1.00	E 1.00					
18			E 1.25	E 1.25					
19			E 0.75	E 0.75				E 0.01	E 0.01
20								E 0.05	E 0.05
21								E 0.15	E 0.15
22	E 0.20	E 0.20							
23			α 0.13333	α 0.13333					
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) R:一様分布(数値は分布範囲) E:負の指数分布(数値は平均値) α: $t=\alpha \cdot l$ の関係でトレース長さに比例する分布型(数値はαの値) また境界条件は図-2の番号①②に対応する。								

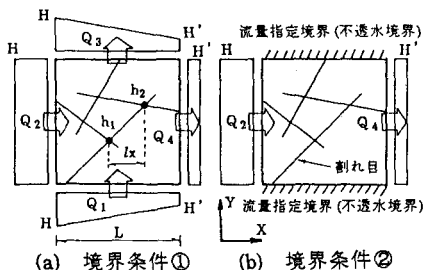


図-2 解析に用いた境界条件
(X方向の解析の場合)

れの生じる割れ目を認識する。次に割れ目の交点で区切られる割れ目要素をFEM要素として認識し、所定の境界条件の下で浸透流解析を行う。これまでの過程を直交するX、Y方向の2方向で行う。その結果として、ポテンシャル分布、単位時間当たりの流量分布、および透水係数(以下 K_A とする)の算定を行う。一方、クラックテンソルから透水係数を算定する場合、①確率密度関数から求める値、②生成した全ての割れ目から求める値(以下 K_C とする)、③流れの生じる割れ目のみから求める値(以下 K_C^f とする)、の3種類を計算する。なお、本報告では以下に述べるように全て等方性の場合を設定しているため、テンソル表示は行わない。また、割れ目の連続性などから、透水テンソルとクラックテンソルの関係を決定する係数 λ について検討されている²⁾が、ここでは割れ目の流れが無限長さの平行平板と仮定した場合の値 $1/12$ を用いることとする。以上の手順により、同一の確率密度関数の下で複数の割れ目モデルを生成し、浸透流解析とクラックテンソルによる透水係数の計算を繰り返す。ただし今回は表-1に示す全ケースでそれぞれ5回繰り返すものとする。

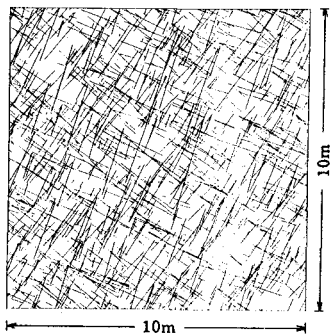
浸透流解析では、図-2に示すように境界条件を2種類設定する。図はX方向の解析の場合を示しており、境界条件①はLongら³⁾の行った数値実験と同様、境界で動水勾配を制御するものである。この場合、境界条件から求まる巨視的な動水勾配 J は $J=-(H'-H)/L$ である。これに対して境界条件②は境界で流れの方向を制御するものである。なお、今回は全て $10m \times 10m$ の解析領域とし、 $H=10.0m$ 、 $H'=0.0m$ のポテンシャル値とした。

数値実験では、表-1のように全部で23ケースの解析ケースを設定している。全ケースとも割れ目の卓越方向(セット)を2方向とし、表には示していないが、角度の分布は全ケースとも同一としている。X方向からの平均角度(割れ目法線)は、セット1、2でそれぞれ 60° (範囲 $45^\circ \sim 75^\circ$)、 -30° (範囲 $-45^\circ \sim -15^\circ$)の一様分布とし、直交する割れ目のセットとする。また全ケースとも2つのセットの割れ目密度、トレース長さ、開口幅を一致させ、全て等方的な透水性を設定している。割れ目密度の値は、Rouleauら⁴⁾の平均割れ目間隔の測定結果を参考にして3種類を設定し、トレース長さの値はPriestら⁵⁾やRouleauら⁴⁾の測定結果から設定した。開口幅分布に関してはRouleauら⁴⁾による平均開口幅(hydraulic aperture)の報告があるが、一般的にほとんど測定されていないため表に示す条件を仮定した。

3. 数値実験の結果と考察

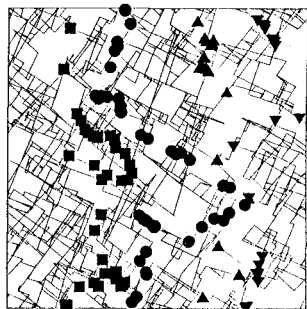
3.1 透水係数に対する開口幅分布と割れ目密度の違いの影響

今回の数値実験から得られた割れ目系モデル、ポテンシャル分布、単位時間当たりの流量分布を図-3に示す。これはCASE-9の一例であり、割れ目密度は 13.0 m/m^2 、トレース長さは平均値 0.75 m の負の指数分布、開口幅は平均値 0.10 mm の負の指数分布のものである。境界条件①の下でX方向に動水勾配を加えた場合を示しているが、ポテンシャル値 6.0 m の分布が解析領域のほぼ中央付近で境界での制御と大きく異なっている。また単位時間当たりの流量分布からは、いくつかの大きな流路が形成されていることがわかる。この場合、各境界での単位時間当たりの流量を求めると、 $Q_1=0.554 \times 10^{-5}$ 、 $Q_2=0.171 \times 10^{-4}$ 、 $Q_3=0.101 \times 10^{-4}$ 、 $Q_4=0.125 \times$

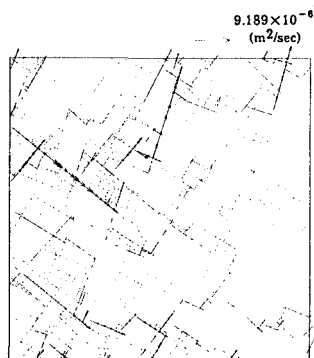


(a) 生成した割れ目モデル

ポテンシャル値
(左端、右端境界のポテンシャル値は
それぞれ 10.0 m 、 0.0 m)
■ 8.0 m ● 6.0 m ▲ 4.0 m ▼ 2.0 m



(b) ポテンシャル分布図
(動水勾配はX方向)



(c) 単位時間当たりの流量分布図
(動水勾配はX方向)

図-3 解析結果 (CASE-9の例)

$10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ である。なお符号は図-2の $Q_1 \sim Q_4$ の方向を正とする。これは他のケースと比較して対称性はよいほうであり、割れ目密度が小さく開口幅のばらつきが大きいほど対称性は悪くなっている。

図-4にはCASE-1からCASE-12までの K_A と K_C 、および K_A と K_C^f の関係を示す。これらは全て平均開口幅が 0.10 mm で、その分布型が異なるものであり、図に示した結果は各ケース5回繰り返した解析のそれぞれX方向に動水勾配を加えたものである。また、前述したように境界流量の対称性が完全に満足されていないため、 K_A は $(Q_2 + Q_4)/2$ から算定している。図-4によれば、割れ目密度が少なく開口幅のばらつきが大きいほど K_A に対して K_C の値が大きくなることわかる。ただし、開口幅がトレース長さに比例する場合は、他の分布型と比べて K_A および K_C の値が著しく大きくなっている。これはトレース長さの大きなもののほかの割れ目と交わる確率が高く開口幅も大きいので、大きな流路が形成されるためと考えられる。また K_C と K_C^f を比較すると、特に K_A の値の小さな領域で K_C^f のほうが K_A に近い値を示している。これは割れ目密度が低い場合に、流れの生じない割れ目の割合が高くなるためと考えられる。

図-5には間隙率と K_A の関係を、図-6にはクラックテンソルの一次不偏量 F_0 と K_A の関係を示している。これらもCASE-1からCASE-12までの結果であるが、間隙率がある程度大きくなるまでは K_A の増加が著しく、その後 K_A の増加の割合は小さくなることわかる。また F_0 と K_A の関係からは、 F_0 の増加に伴って K_A が増加する傾向があるが、同じ F_0 の値に対して K_A の値にばらつきがあることがわかる。

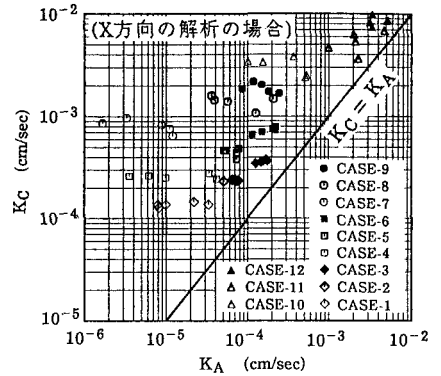
次に図-4における K_A と K_C^f の相違の原因を考えるため、各割れ目で J に対応する $j = -(h_2 - h_1)/l_x$ (図-2参照)の分布を浸透流解析結果から求め図-7に示す。なおクラックテンソル理論では $j = J$ を仮定している。図に示す頻度は割れ目要素を対象に求めているため、一つの割れ目に複数の要素が存在する場合もあり、また孤立した割れ目などは含まれていない。図の(a)はCASE-3の一例で、割れ目密度は $13.0 \text{ 本}/\text{m}^2$ と高い場合であり、開口幅は全割れ目とも 0.10 mm で一定である。この場合分布型は正規分布に近く、動水勾配 j の平均値は 0.47 であり境界条件から求まる動水勾配 $J = 1.0$ の約 $1/2$ である。これに

対して図の(b)はCASE-9の一例であり、動水勾配 j は 0.0 付近に集中している。これは(a)に示したものと開口幅の分布のみが異なるもので、このように開口幅のばらつきが大きくなると動水勾配 j は動水勾配 J と大きく異なり、クラックテンソルの仮定が成立しなくなる。

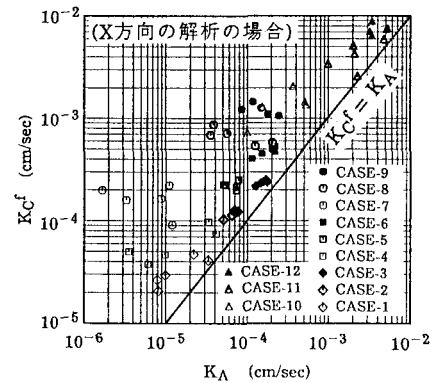
3.2 透水係数に対する境界条件の

違いの影響

次に、浸透流解析より境界条件②の場合の透水係数を求め(以下 K_A' とする)、



(a) K_A と K_C の関係



(b) K_A と K_C^f の関係

図-4 K_A と K_C , K_C^f の関係

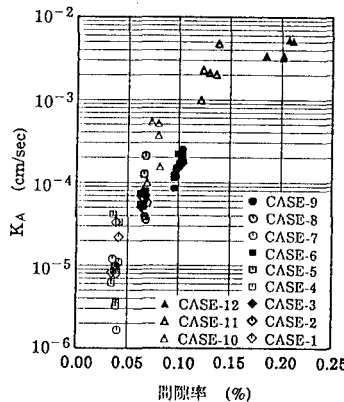


図-5 間隙率と K_A の関係
(X方向の解析の場合)

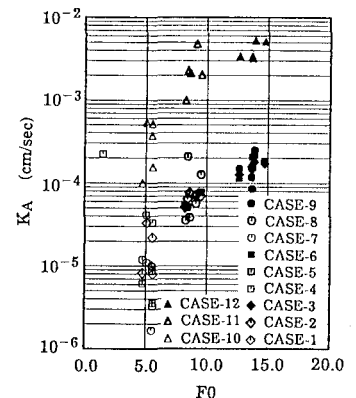


図-6 F_0 と K_A の関係
(X方向の解析の場合)

境界条件①の場合の K_A と比較した。図-8にCASE-7からCASE-9の平均割れ目密度と K_A の関係、ならびにCASE-13からCASE-15の平均割れ目密度と K_A' の関係を示す。図には各ケース5回繰り返し解析のそれぞれX、Y方向の値を共に示している。これより K_A' のほうが小さな値を示しており、その傾向は割れ目密度が小さいほど顕著である。これは境界条件①の場合は、割れ目密度が小さくても解析領域の四隅において隣接する境界へ流路が形成され易く、この局所的な透水性が大きく影響するためと考えられる。

図-9、10は境界条件②の下で求めた K_A' を、それぞれ平均トレース長さと平均開口幅でみたものである。平均トレース長さが大きいほど透水係数は大きくなり、オーダーとしてのばらつきは小さくなる。また平均開口幅の3乗に比例して K_A' が増加しており、開口幅がトレース長さに比例する場合は著しく大きな K_A' を示している。また境界条件以外が全て一致する先の結果と比較すると、全て K_A より K_A' のほうが小さな値となっている。

4. おわりに

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- ① クラックテンソルから求まる透水係数は、割れ目密度が小さく開口幅のばらつきが大きいほど浸透流解析から求まる値と比べて、大きな値を示す。ただし、開口幅がトレース長さに比例する場合は、両者の透水係数とも他の開口幅分布のものより著しく大きな値を示す。
- ② ①の透水係数の違いが生じる一原因は、クラックテンソルから透水係数を算定する場合に流れの生じない割れ目も計算に用いていることである。また、開口幅のばらつきが大きい場合、実際には境界条件から定義される動水勾配 J が各割れ目に作用しないことも原因となる。
- ③ 浸透流解析から求まる透水係数は、境界条件により動水勾配を制御する場合と流れの方向を制御する場合では、後者のほうが小さくなる。
- ④ 平均トレース長さが大きいほど透水係数は大きくなり、オーダーとしてのばらつきは少なくなる。

参考文献

- 1) 小田 他, 第6回岩の力学国内シンポ, pp121-pp126, 1984. 2) Oda, M. et al., J. Geophys. Res., Vol. 92, No. 8, pp8037-pp8048, 1987. 3) Long, J.C.S. et al., Water Resources Res., Vol. 18, No. 3, pp 645-pp658, 1982. 4) Rouleau, A. et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol. 22, No. 6, pp353-pp367, 1985. 5) Priest, S.D. et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol. 18, pp183-pp197, 1981.

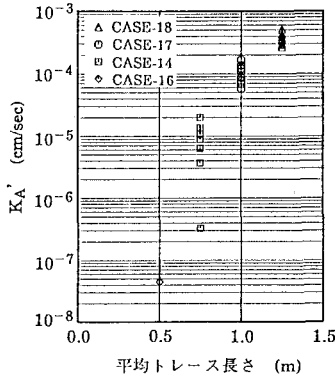


図-9 平均トレース長さと K_A' の関係

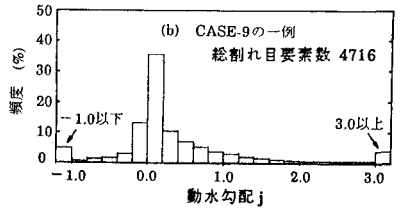
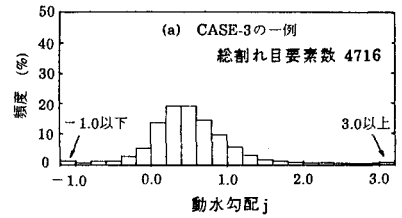


図-7 動水勾配 j のヒストグラム

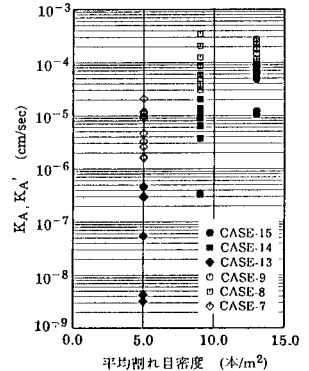


図-8 平均割れ目密度と K_A, K_A' の関係

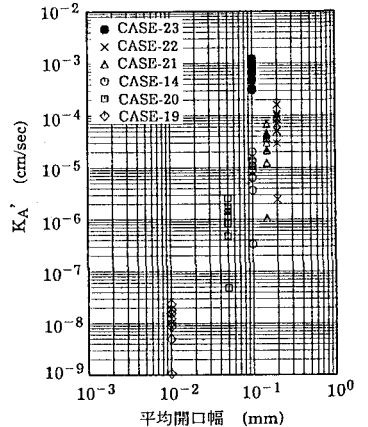


図-10 平均開口幅と K_A' の関係

(71) A stochastic discussion on hydraulic conductivity of discontinuous rock masses

by T. Okuno, H. Momota
(Shimizu Corporation)

ABSTRACT

Recently, a theory for estimating the permeability of rock masses has been proposed by Oda. In this theory, discontinuous rock masses are treated as homogeneous, anisotropic porous media and the hydraulic conductivity is stochastically calculated from the geometry (orientation, trace length, aperture and joint density) of geological discontinuities (joints) using a crack tensor. In the course of this study, the outcomes of the theory have been compared with the field data taken from Stripa mine. However the effect of the distribution of apertures on the hydraulic conductivity has not been studied in detail.

In this paper, numerical simulations are carried out with the distribution of the joint geometry as a parameter. The probability density function of each geometric property is assumed by taking into account of field data in literature. In the numerical simulation, a two-dimensional joint system is stochastically generated in a square flow region, and the hydraulic conductivity calculated from the crack tensor is compared with that calculated from the seepage flow analysis of the joint system. The effect of the aperture distribution on the hydraulic conductivity is examined as well as the effect of the boundary conditions.

The following results have been obtained :

- ① The hydraulic conductivities of discontinuous rock masses calculated by the crack tensor are relatively larger than those calculated by the seepage flow analysis. The difference between them becomes large as the crack density decreases and it depends on the form of the aperture distribution. When the aperture of a joint is assumed to be proportional to its length, the hydraulic conductivities obtained from the crack tensor and from the seepage flow analysis are remarkably larger than those of any other cases in this study.
- ② By including the joint in which the flow does not happen, the hydraulic conductivity obtained from the crack tensor is larger than that obtained from the seepage flow analysis. In addition, it is found that the gradient of hydraulic head which is distributed over the entire flow domain is not uniformly distributed at each joint.
- ③ The hydraulic conductivities calculated on condition that the direction of the flux is controlled at the boundaries are smaller than those calculated on condition that the gradient of hydraulic head is controlled at the boundaries.
- ④ As the mean trace length of joints increases, the hydraulic conductivity also increases and the range of its distribution becomes narrower.