

III- 643 2次元割れ目系モデルによる岩盤内浸透流の流速に関する数値実験的考察

清水建設(株)大崎研究室 本多 眞

1. はじめに

地下水汚染や放射性廃棄物の地層処分問題では汚染物質や廃棄物の移行と関連して、地下水の流れの実流速や流動状況を正確に把握することが重要な課題となる。花崗岩などの硬質岩盤における浸透流は、土のような多孔質媒体の場合と異なり、割れ目を介して選択的な流れを生じるため、割れ目の幾何学的分布特性要素により、透水特性は強く影響を受ける。そこで本論文では、このような岩盤における地下水の流速に注目して、2次元割れ目系モデルを用いたFEM解析による数値実験により、割れ目の分布特性要素の影響について検討を行った結果について報告する。

2. 検討手順と解析ケース

1) 検討手順

図1に検討手順を示す。まず割れ目の幾何学的分布特性を確率密度関数により設定し、これを基に割れ目系モデルを作成する。作成手法の詳細は文献¹⁾²⁾に譲るが、今回モデル化に採用した分布特性要素は、浸透流解析に必要な不可欠な方向性、トレース長、開口幅および密度である。作成した割れ目系モデルから1辺10mの正方領域を切り出し、解析領域とする。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て、解析モデルを作成

する。そこで図2に示すように境界条件を明確にして、透水境界に連結していない割れ目や流れを生じない末端部を削除する。解析は線要素を用いた定常FEM解析を行う⁴⁾。得られた解析結果より、領域全体の動水勾配方向の平均的透水係数 K_M を求める。さらにモデルの有効間隙率より平均流速を求める。また解析結果と割れ目系ネットワークを用いて最短経路問題を解くことで、各経路の到達時間を算出し、最短経路の実流速および平均実流速を求める。以上の結果を比較検討することで、流速に関して分布特性要素の影響等の考察を行う。

2) 解析ケース

表1に示すように、実流速への影響としてここでは方向性とトレース長の影響について検討を行った。まず方向性は、平均方向が互いに 30° で交わる共役な2つの卓越方向を設定する。そして確率密度関数として平均方向からのばらつき $\sigma=10^\circ$ とする正規分布を仮定する。モデルとしては表に示すように流れの方向に対してModel-A, B, Cと変化させたものを考える。またトレース長は、確率密度関数として負の指数分布を仮定して、平均トレース長 $\bar{l}$ を変えたCase-a, b, c, dの4ケース設定する。なお最小トレース長は一律30cmとした。開口幅は一般にトレース長と正の相関性が認められるとされており、確率密度関数としてトレース長 l の条件の下での対数正規分布を当てはめる²⁾。ここでは全ケース平均開口幅 $\bar{l}=0.5\text{mm}$ で一定となるように平均トレース長から帰定数を設定している。さらに密度に関しては、流速に影響を及ぼす間隙率を概算で一定となるように決める。従って方向性について3ケース、平均トレース長について4ケースの計12ケース設定し、各ケース3つのモデルで計算を行った。

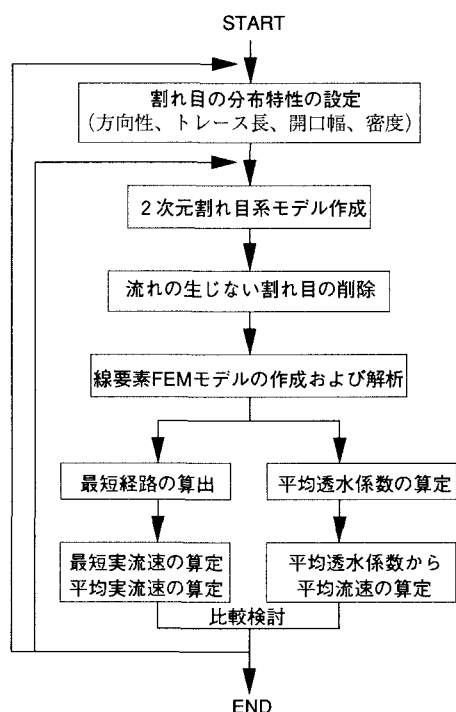


図1 検討手順

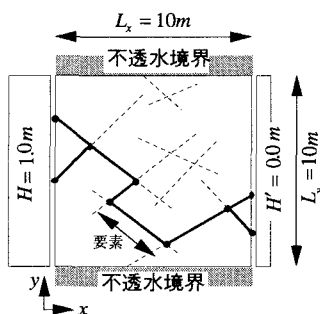


図2 解析モデルと境界条件

表1 解析ケース

方向性	Model - A
	Model - B
トレース長	Model - C
	確率密度関数
	$f_l(l) = \frac{1}{\bar{l} - l_0} \exp\left(-\frac{l - l_0}{\bar{l} - l_0}\right)$
Case - a	$\bar{l} = 0.75\text{m}$
Case - b	$\bar{l} = 1.0\text{m}$
Case - c	$\bar{l} = 2.0\text{m}$
Case - d	$\bar{l} = 3.0\text{m}$

3. 解析結果と流速に関する検討

図3は解析結果の一例で、割れ目分布図に計算結果のポテンシャルコンター図を示している。

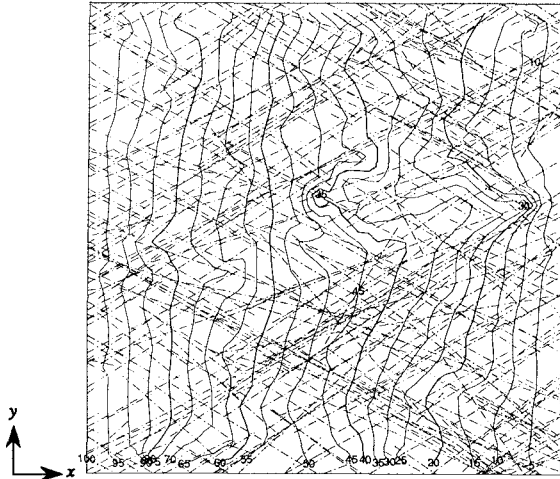


図3 解析結果の一例 (Model-A, Case-d)

1) 平均透水係数および平均流速の算定

図4は横軸に方向性モデルで分けた各ケースの平均透水係数 K_M をプロットしたものである。当然のことであるが、浸透経路の平均的長さの違いにより、Model-AよりB、BよりCの方が透水係数が小さくなっており、AとCでは1オーダーの違いが認められる。また平均トレース長が大きいほど透水係数は大きくなっており、これもCase-aとdでは1オーダー以上の違いが認められる。これは割れ目開口幅をトレース長と正の相関関係を仮定しているので、各割れ目要素の透水性の違いによるものと考えられる。ここで、領域内においてダルシー則が成り立つと仮定すると、ここで求めた平均透水係数 K_M および有効間隙率 n_e より領域全体の平均流速 v_M を次式により求めることができる。

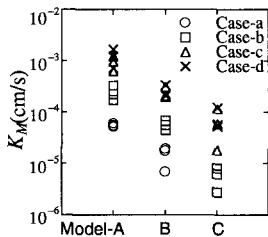


図4 平均透水係数

$$v_M = \frac{K_M i}{n_e} = \frac{K_M (H - H')}{n_e L_x}$$

2) 最短経路の算出と最短実流速および平均実流速

最短経路を求めるアルゴリズムとして、ここではDijkstra(1959)⁹⁾による手法を用いた。図5は最短経路で得られる到達時間およびx方向距離 L_x から求めた実流速(最短実流速と呼ぶ) v_s と先の式で求められる平均流速 v_M との対応関係を示したものである。これによれば全てのケースで最短実流速は平均流速より大きく、 v_s/v_M を求めると平均3.34で3倍以上となった。また方向性についてModel-A、B、Cそれぞれの v_s/v_M の平均は、3.78、3.08、3.11であり、ほとんど差がないのに対して、トレース長の違いで

見た場合、図6に示すようにトレース長が小さくなるにしたがって v_s/v_M の平均は大きくなっているのが認められる。なお図には平均値と同時に $\pm\sigma$ を示している。これはトレース長が解析領域に比して小さくなるに従い、浸透経路が複雑となり要素流速の大きな割れ目を選択的に流れることによる影響と考えられる。図7は平均到達時間から求めた平均実流速 v_A について、同様に v_M との対応関係を示したものである。これを見るとかなり1:1の関係に近づいており、 v_A/v_M を求めると平均1.89であった。しかしながら、同様にトレース長の違いで見た場合、図8に示すようにトレース長が小さくなるほど差は大きくなっており、Case-aでは v_A/v_M の平均2.66と3倍近くになっている。平均トレース長の大きさは、解析領域に対する相対的な値に意味があることを考えると、一般に広域で考えた場合、その実流速は透水係数から求められる平均流速より数倍大きな値となることが予想される。

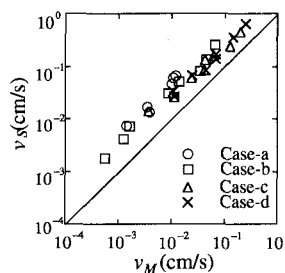


図5 最短実流速と平均流速

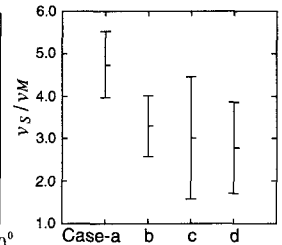


図6 最短実流速／平均流速

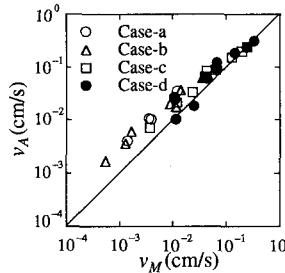


図7 平均実流速と平均流速

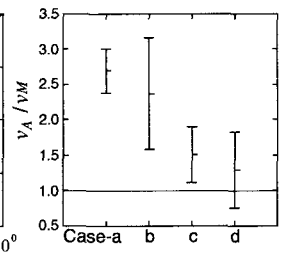


図8 平均実流速／平均流速

4. おわりに

本報告では2次元割れ目系モデルを用いた数値実験により、割れ目の分布特性要素の透水特性、特に流速への影響について考察を行った。これにより一般に浸透経路が複雑になるに従って、実流速は透水係数から求められる平均流速にくらべて数倍大きくなることが得られた。

参考文献

- 1) 2) 3) 菊地宏吉・水戸義忠・本多真：節理分布性状の確率統計学的モデル化に関する研究(その1, 2, 3), 応用地質, Vol.33, No.4, 5, 1992, その3は投稿中
- 4) Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A.: Steady State Flow in Rigid Networks of Fractures, Water Res. Rsrch., 10, 2, pp.328-335, 1974
- 5) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connection with graphs. Numer.Math., 1, pp.269-71, 1959