

II-25

亀裂岩盤内の浸透流流動解析

室蘭工業大学大学院 学生員 岩本英規

室蘭工業大学工学部 正 員 藤間 聡

1. はじめに

現在、大深度地下開発等の計画に伴い亀裂岩盤に関する水理学的解析が多数行われている¹⁾。しかし、解析に用いられている亀裂モデルは、複雑な亀裂システムを図-1に示すような等価多孔体に置換してその特性を解析するものが一般的であり、流動特性を把握するためには必ずしも妥当なモデルとは言い難い。解析精度は用いるモデルの精度に左右されるため、亀裂の幾何学的性状を正確にモデル化することが重要である。

本研究は、岩盤の原位置調査から評価した亀裂性状を十分に反映しうるモデルを構築し、それに基づき浸透流の透水特性を把握しようとするものである。

2. 亀裂のモデル化

亀裂の分布性状を支配する要素として①亀裂の方向性、②連続性、③密度、④開口幅が挙げられる。本解析では実岩盤におけるこれらの要素の評価方法を検討し、実態に近い亀裂モデルを構築する²⁾。なお解析においては、ダルシー則が成立しない長大な亀裂を除いた微細な亀裂のみを対象とする。亀裂性状の計測は、写真-1に示す登別漁港の東側に位置する火成岩露出面の縦10m、横10mの領域で行った。この領域をカメラで撮影した後、写真上で実寸法50cm間隔のスキャンラインを設定した。これらのスキャンラインと交差する亀裂長、亀裂間隔及び卓越方向を測定し、写し込まれている標尺から実長に変換した³⁾。

ここで、後述の流動解析を容易に行うため、亀裂長としてスキャンラインとの交点から亀裂端までのセミトレース長を用いる。上述のスキャンライン測量から、亀裂性状に関する以下の結果を得た。

1) 亀裂の方向性は、ほぼ鉛直、水平方向に卓越している。

2) セミトレース長は0.1~3.9mの範囲にあり、分布形は図-2に示すように指数分布で近似される。

3) 亀裂間隔は0.1~3.1mの範囲にあり、分布形は図-3に示すように指数分布で近似される。

亀裂長及び亀裂間隔の分布が指数分布と仮定すると、確率密度関数は次式で表される。

$$f(x) = a \cdot \exp(-bx) \quad (1)$$

ここに、 x はセミトレース長、亀裂間隔である。セミトレース長及び亀裂間隔に関する a 、 b は最小二乗法により表-1のように与えられる。



写真-1 原位置岩盤亀裂

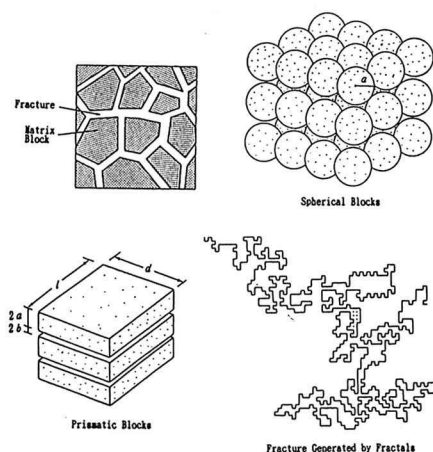


図-1 既往岩盤モデル

Steady state fluid response in fractured rock
by Hideki IWAMOTO and Satoshi TOHMA

表-1 セミトレース長、亀裂間隔解析結果

	測定個数	平均(m)	分散	a	b
セミトレース長	1187	0.38	0.14	0.238	2.53
亀裂間隔	706	0.43	0.18	0.211	2.18

上記の結果に基づき岩盤のモデル化を行う。モデル化は実態の分布性状を反映させるため、以下の手順で行った。

- ①10×10mの正方領域を設定し、全域を0.1m間隔の格子で分割する。
- ②0～100までの一様乱数を発生させ、これを亀裂の中心座標とする。
- ③セミトレース長は指数乱数を発生させ、中心から上下または左右方向に線分を描く。ここで、指数乱数の発生は、指数分布を0.1m階級の度数分布で近似し、一様乱数から各階級の度数ごとに割り当てる。また計算機で発生させる一様乱数は周期性を有する。これを避けるため一様乱数を10,000個発生させ、このうち1,000個ずつを取り出し、危険率5%で χ^2 検定を行い χ^2 が最小値となるものを用いる。
- ④亀裂発生本数は、縦、横方向それぞれ120本ずつとする。
- ⑤再現された亀裂間隔が測定結果に準じているかの検定を行う。

図-4は上記の手法を用いて発生させた亀裂モデルである。発生させた亀裂の中には一端が閉じて不連続なものや、他の亀裂と接続しない孤立亀裂が多数存在する。浸透流が流動できないこのような亀裂は、計算機の容量と計算時間を軽減するために取り除き、図-5のように修正した亀裂モデルを用いる。亀裂の開口幅に関しては、亀裂が長いほど開口幅が大きく、また応力開放の影響を受けて地表に近いほど開口幅は大きくなる傾向があるとの報告があるが⁴⁾、客観的な評価の方法がないため、本解析では開口幅の分布性状が正規分布に従うと仮定し、平均と標準偏差を与えて決定する。

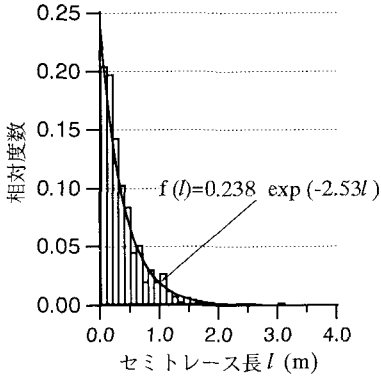


図-2 セミトレース長の分布

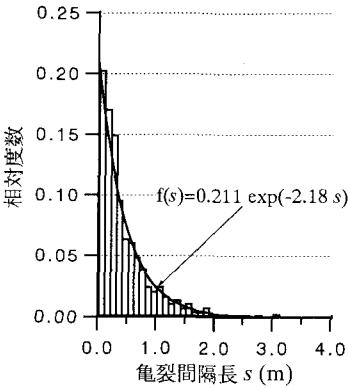


図-3 亀裂間隔の分布

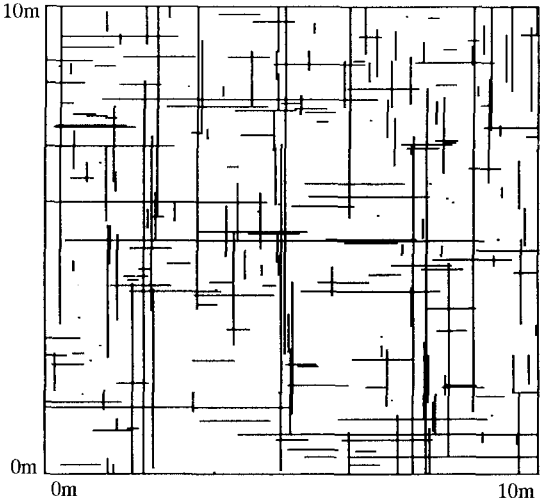


図-4 岩盤亀裂モデル

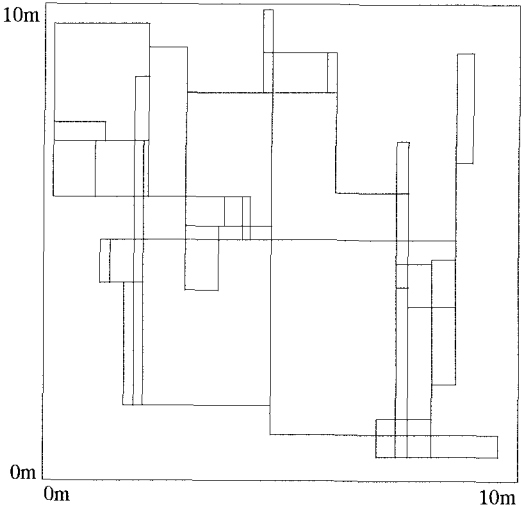


図-5 修正岩盤亀裂モデル

3. 亀裂内の流動解析

室内透水試験では亀裂のない母岩は一般に非常に小さい透水係数を示すことから⁵⁾、ここでは母岩を不透透と仮定し、亀裂内の流体流動のみを解析する。亀裂内の非圧縮粘性流体の流速は、流動が層流状態であるならば次式で与えられる。

$$v = K \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (2)$$

ここに、 v は亀裂内の流速、 K は透水係数、 $\partial \phi / \partial n$ は全水頭（ポテンシャル）勾配をそれぞれ表す。一方、亀裂内の定常浸透流の連続の式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

ここで、(2)、(3)式中の透水係数 K は次式で与えられる⁶⁾。

$$K = \frac{\lambda g t^2}{12\nu} \quad (4)$$

ここに、 λ は空隙率、 g は重力加速度、 ν は流体の動粘性係数、 t は亀裂開口幅をそれぞれ表す。上式から、透水係数の異方性は異なる方向の亀裂開口幅を変化させることにより導入することができる。亀裂開口幅の決定に関しては、一本の亀裂においても測定位置により開口幅が異なり、測定値に不確実性が含まれるため、本解析では平均0.10mm、標準偏差0.025mmの正規乱数を発生させて亀裂の開口幅とし、(4)式から透水係数を決定した。図-5に示す亀裂モデルにおいて、交点間の各亀裂をそれぞれ4節点7ノード・ラマトリックス要素で近似した有限要素法⁷⁾により所与の境界条件で亀裂交点の全水頭値を求める。ここで、全要素数は236、全節点数は380である。亀裂交点における全水頭値を算定するため、(3)式を重み付き残差法により定式化を行う。本解析で使用した重み付き残差法はガラーキン法である。要素節点における全水頭値を用いて、要素内部の任意点の全水頭値を補間する試行関数は次式で与えられる線形関数を用いる。

$$\bar{\phi}(x, y) = \sum_{i=1}^4 \phi_i N_i(x, y) \quad (5)$$

ここに、 $\bar{\phi}$ は近似値を示し、添字 i は一要素において反時計回りに付けた1から4までの節点番号を表し、 N_i は形状関数と呼ばれ、接点 i における関数値が他の点の値に及ぼす影響を表す。(3)式の解 ϕ を数値解積によって求める場合、一般に近似解 $\bar{\phi}$ とは一致せずに残差 ε を生じる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right) = \varepsilon \quad (6)$$

ガラーキン法はこの残差に重みをかけて、要素内で平均的に0となるように解を求める方法で、次式で示される(4)式の離散化方程式を得る。

$$\sum_{e=1}^m \left(K \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \phi_i dx dy = 0 \quad (7)$$

ここに、 e は要素番号、 m は要素総数、 i, j は節点番号を表す。

境界条件として図-5の左右に1mの水頭差を与え、(7)式を用いて各要素節点における全水頭を求める。次に亀裂の両端交点の全水頭値から全水頭勾配を求め(4)式より透水係数を乗じて流速を求める。ただし、交点間の亀裂幅は一定で、亀裂は浸透流のみで満たされていると仮定する。図-6、7は、最も流れ易い経路を太線で表したものであり、亀裂開口幅 t を変化させた2試行について図示している。両試行においては各亀裂の透水係数が異なるが、流下経路はほぼ同じである。この理由は本解析に用いた亀裂開口幅の分散が小さいために透水係数の変動が少なく、主に全水頭勾配に支配された結果と考えられる。

図-8は、流下経路における全水頭の変化を示す。図中の実線は図-6におけるA-Pathの全水頭の変化である。一方、波線はB-Pathにおける全水頭の変化を示す。この図から浸透流は全水頭の最急勾配の経路を選択して流下することが分かる。

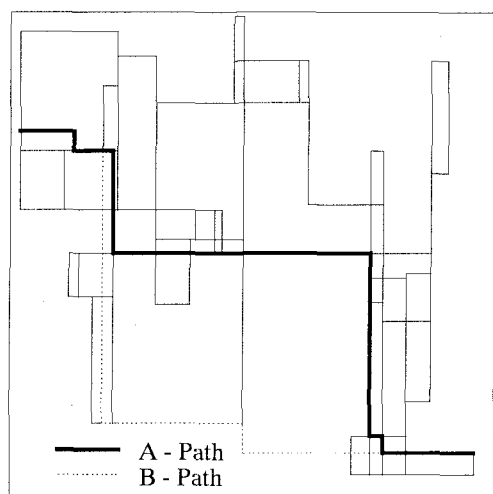


図-6 浸透流経路（試行1）

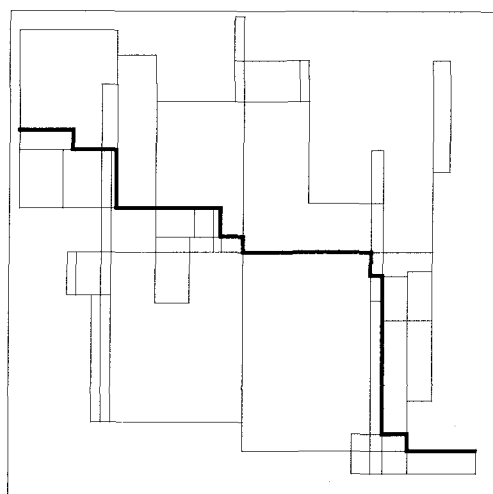


図-7 浸透流経路（試行2）

4. 結 論

亀裂岩盤内の流動解析は、亀裂のモデル化の精度に解の信頼性が支配される。本研究では、原位置岩盤の亀裂性状をスキャンライン測量により定量化し、従来用いられている等価多孔体モデルより実岩盤の亀裂性状を反映したモデルを提示した。その結果、次の結論を得た。

- 1) 亀裂長の分布形は指数関数で近似できる。その結果
- 2) 亀裂間隔の分布形は亀裂長と同様に指数関数で近似できる。
- 3) 浸透流は亀裂密度が大きい領域では水平亀裂内の流速が大きく、一方、亀裂密度が小さい領域では水平及び鉛直亀裂内の流速の差異は小さい。

参考文献

- 1) 千田 信, 他, 二次元および三次元ネットワークモデルによる岩石の孔隙構造の表現と孔隙径分布の推算, 日本鉱業会誌 100 1152, pp. 554-559, 1982.
- 2) 藤間 聡, 亀裂岩盤内における溶質分散の確率的解析, 水工学論文集第36巻, 土木学会・水理委員会, pp. 417-422, 1992.
- 3) Priest, S. D. and J. A. Hudson, Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scan-line Surveys, Int. J. Rock Mech. Sic. & Geomech. Abstr., 18, pp. 183-197, 1981.
- 4) 永井博史, 稲生道裕, 加藤克行, 上野勇武, 岩盤中の節理分布性状の定量的評価とモデル化に関する検討, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 127-132, 1984.
- 5) グットマン, R. E. 著(大西有三・谷本親伯訳), わかりやすい岩盤力学, 鹿島出版, pp. 24, 1984.
- 6) 土木学会編, 土木技術者のための岩盤力学, pp. 240, 1966
- 7) 戸川隼人, BASICによる有限要素の基礎, サイエンス社, pp. 151-161, 1985.

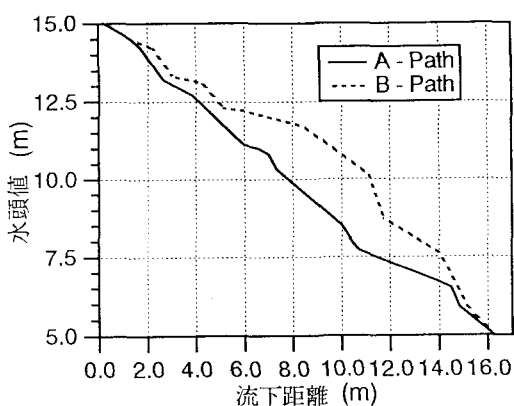


図-8 流下経路における全水頭の変化