

(107) 亀裂ネットワークモデルを用いた等価多孔質媒体近似に関する研究

動力炉・核燃料開発事業団 ○澤田 淳

動力炉・核燃料開発事業団 内田雅大

検査開発(株) 清宮和彦

A Numerical Experiment to Determine Equivalent Hydraulic Conductivity of Fractured Media using A Discrete Fracture Network Model

Atsushi Sawada, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Masahiro Uchida, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Kazuhiko Seimiya, Inspection Development Corporation

Abstract

A three dimensional discrete fracture network model was used to derive an equivalent hydraulic conductivity or "representative elementary volume(REV)" of fractured media. Stochastic fracture data obtained from a dam site in Japan were used. The seepage flow simulations were carried out for various region sizes applying three sets of boundary conditions. One of the major results was that a unique equivalent hydraulic conductivity can not be determined even when the region size is about 30 ~ 50 times as large as the mean fracture radius. Although a unique value may be approached with larger region size, the spatial stationarity of fracturing in real rock masses may not be maintained over such large scales. Based on those results, we propose using a stochastic equivalent conductivity tensor defined over sub-REV scales.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分の地下水シナリオでは、岩盤中の地下水がその核種移行の媒体となると考えられているため、地下水の挙動を正確に把握し現実的にモデル化することが求められている。

花崗岩等の亀裂性岩盤の水理学的特性はその主要な水みちとなる亀裂（断層、節理等）に支配されるため、モデル化に際しては個々の亀裂の効果（異方性、不均質性等）を充分考慮しなければならない。この亀裂性岩盤を等価な多孔質媒体に近似する試みが、これまでに多数なされてきている^{1), 2), 3)}。これらによれば代表的基準体積 (Representative Elementary Volume : REV) は、①等価透水係数がREVの体積の少量の増加あるいは減少によって僅かな変化しか示さない、②動水勾配の方向を変化させることにより等価な透水テンソルが得られること、③各方向の等価透水係数の比が安定すること、と定義されている。

本論ではREVを評価することを目的として、この定義に従い、我が国の亀裂データを基に、三次元亀裂ネットワークモデルを用いた浸透流解析を行い、(1)REVの検討、(2)等価透水係数の表現方法の検討を行った。

2. 解析内容と結果および検討

解析には、国際ストリパプロジェクト等により実用化が図られてきているFracMan/MAFICパッケージを使用した。このパッケージの特徴は、岩盤中の個々の亀裂を多角形並行平板で代表し決定論的または統計的に発生させ、これらの亀裂が形成する亀裂ネットワーク構造をモデル化することで岩盤内の不均質な流れを表

現することができることである。この亀裂中の流れは、連続の定理とDarcyの法則に従うとの仮定に基づき次式で表される。

$$q = S \cdot \partial h / \partial t - T \nabla^2 h \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 S 、 T 、 q 、 ∇^2 はそれぞれ亀裂の貯留係数、亀裂の透水量係数(L^2/T)、source/sink term(L/T)、二次元ラプラス演算子を表す。

また、解析には我が国の揚水発電所(輝緑岩)で取得された統計的亀裂データ⁴⁾(表1)を用いた。

2. 1 REVの検討

一辺がそれぞれ25m、32m、40m、50m、55mの立方体岩盤ブロックにおける等価な透水係数を求め、REVを検討した。

2. 1. 1 解析内容

- ① 表1の亀裂データをパラメータとして一辺70mの立方体領域に亀裂を発生させ、これを基に一辺が25m、32m、40m、50m、55mの領域を図1に示すように切り出して亀裂モデルを作成する。
- ② 個々の亀裂の透水量係数は、最も単純なケースとして一定値 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ とする。
- ③ 上記の5ケースの立方体領域の一面に一定圧力水頭1m、反対側の面を圧力水頭0mとし周囲の4面を不透水境界とした境界条件(図2)を与えて、各座標軸方向(それぞれ南北、東西、鉛直方向の三方向)の浸透流解析を行う。
- ④ 各方向の等価透水係数は次式から算出する。

$$K_i = Q_i / (P_i - P_o) L \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 K_i 、 Q_i 、 P_i 、 P_o 、 L はそれぞれ*i*方向の等価透水係数、*i*方向の流量、加圧側の圧力水頭、流出側の圧力水頭、立方体の一辺の長さを表す。

2. 2. 2 解析結果と検討

各ケースそれぞれ10個のrealizationに対し解析を行った結果(10個のrealizationの平均、標準偏差を図3に示す)、各realizationともに等価透水係数が異なり、南北方向と鉛直方向はほぼ同じ値であるのに対し東西方向の等価透水係数は常に南北方向、鉛直方向より低い値となった。また、領域が大きくなると、南北方向の等価透水係数が三方向の中で最大となる傾

	亀裂セット1	亀裂セット2
亀裂の平均方向(pole)*	248.0,7.4	40.7,72.7
Fisher係数	10	10
亀裂半径の密度関数	対数正規分布	対数正規分布
亀裂の平均半径(m)	1.092	1.576
亀裂半径の標準偏差(m)	0.927	1.238
節理の中心の分布密度(個/m ²)	0.070	0.006

*: 亀裂の方向は、ステレオ投影図法(下半球投影)におけるpoleのtrendとplungeで表している。各亀裂セットの方向を図3-4に示す。

表1. 統計的亀裂データ⁴⁾

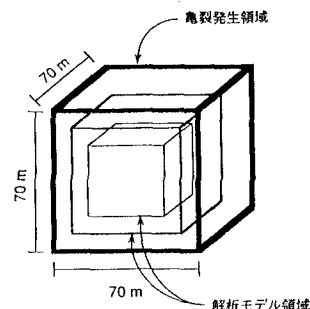


図1. 亀裂発生領域とモデル領域

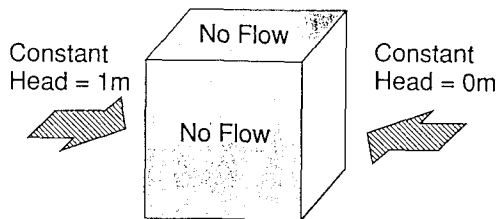


図2. 外側境界条件概念図

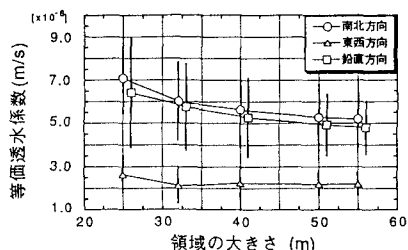


図3. モデル領域変化に伴う等価透水量係数の平均値と標準偏差の変化

向があった。そして、各領域スケールの等価透水係数の標準偏差が領域スケールが大きいくほど減少することから、領域スケールが大きいくほど各座標軸方向の等価透水係数が安定する傾向があることがわかった。

前述のREVの定義③「各方向の等価透水係数が一定の比を持つこと」に従って、常時三方向の中で最小を示した東西方向の等価透水係数に対する各方向の等価透水係数の比を求めた(図4)。その結果から、各座標軸の等価透水係数の比は50mの領域でようやく2～3の幅に安定してくるものの、東西方向と鉛直方向の関係は安定せず、各方向の等価透水係数の比が一定という関係がこの一辺50mの領域スケールでも成立していないことがわかる。

以上のことから、解析領域をさらに大きくしていけばユニークな等価透水係数に近づくことが期待される。しかし、実岩盤では①卓越する亀裂セット自体が変化する、②亀裂の平均方向が変化してくるといった理由から同じ統計値を有する亀裂がこれ以上の領域にわたって分布することは考えにくく、これ以上大きな領域の解析検討は現実的ではないと考える。

2. 2 等価透水係数の統計的表現の検討

2. 1節ではREVを合理的な領域規模で求めることができなかったが、本節では等価透水係数を統計的に表現することで合理的な領域規模で等価な多孔質媒体に近似することを検討するため、50m領域のrealizationを69ケースまで増やし2. 1節と同様の解析を行った。その結果得られた等価透水係数のヒストグラム及び累積分布図を、それぞれ図5と図6に示す。両図には等価透水係数が正規分布すると仮定し、算術平均と標準偏差から求めた確率密度曲線を示した。更に、この確率密度曲線への適合性を確認するため χ^2 検定⁵⁾で正規性を判定した結果、南北方向が90.4%、東西方向95.1%、鉛直方向98.7%となり、南北方向の信頼度がやや低いものの妥当な信頼度を得た。

したがって、各方向の等価透水係数は、それぞれ正規分布 $N(\mu, \sigma)$ に帰属し、岩盤の等価透水係数は以下のように表すことができる。

$$[K] = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α 、 β 、 γ はそれぞれ正規分布をもつ変数を

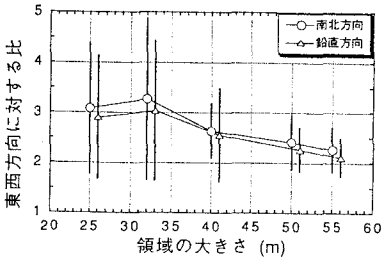


図4. モデル領域変化に伴う等価透水量係数の東西方向に対する比の平均値と標準偏差の変化

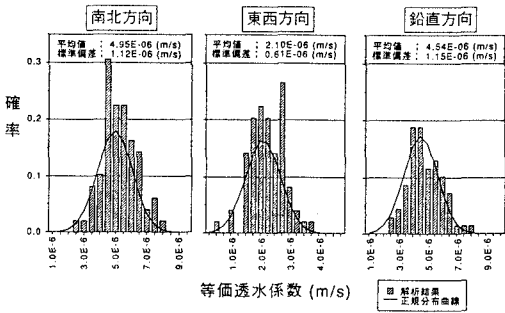


図5. 等価透水係数の分布

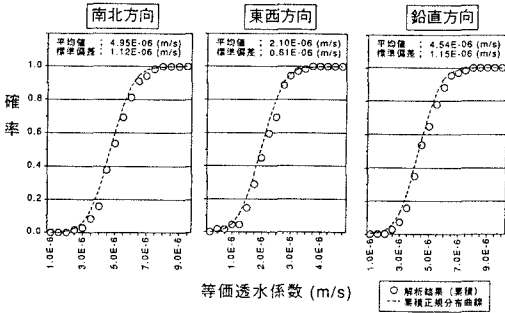


図6. 等価透水係数の累積分布

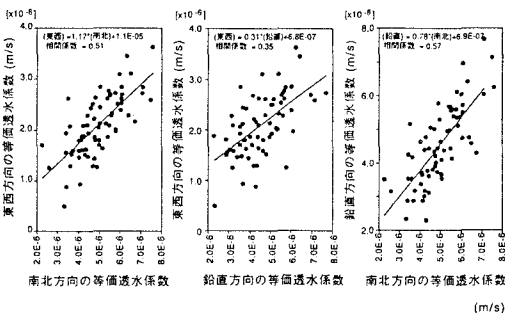


図7. 各方向の等価透水係数の相関性

示す。解析結果から得られた α 、 β 、 γ は、それぞれ α が $\mu = 4.95 \times 10^{-6}$ m/s、 $\sigma = 1.12 \times 10^{-6}$ m/s、 β が $\mu = 2.10 \times 10^{-6}$ m/s、 $\sigma = 0.61 \times 10^{-6}$ m/s、 γ が $\mu = 4.54 \times 10^{-6}$ m/s、 $\sigma = 1.15 \times 10^{-6}$ m/sであった。

また、各方向での相関性を検討した結果、各方向の相関性を示す相関係数は0.35～0.56と低いもののある程度の相関性を持つことがわかった（図7）。そこで、東西方向に対する比の分布をそれぞれ求め、確率密度曲線への適合を試みた。その結果は図8、9に示すように、正規分布では近似することができなかった。

3. 議 論

Odaら³⁾は、クラックテンソルに基づいた透水テンソル理論を用いて、領域の大きさが平均亀裂半径の3倍程度あればREVが成立すると報告している。この場合は二次元で検討しているため亀裂の交差の有無だけが考慮されているのに対し、本解析は三次元であるため亀裂同志の「かみ合いの深さ」がモデルに加味されREVが成立しなかったと考えられる。すなわち、亀裂状媒体では交差する亀裂を連ねて流路が形成されるが、その流路の抵抗は亀裂と亀裂の交差部の長さに比例して変化するということである。また、流路の抵抗を規定する要因として流路長があるが、二次元と異なり三次元では、奥行き方向の流路の迂回の効果が加味されてくる。したがって、これらの効果が相乗したことにより小田の二次元での結果は異なり、領域の大きさを平均亀裂半径の30～50倍程度とっても厳密にはREVは成立していないという結果を得たものと考えられる。

平均亀裂半径の30～50倍程度の領域よりもさらに解析領域を広げて行けばREVを求められると予想されるが、2.1節で述べたようにこれ以上大きな領域でREVを求めても実岩盤に適用できる可能性は低いと考える。したがって、本論では唯一の物性値を持つという厳密な意味でのREVよりもより小さな領域をsub-REVと定義し、この領域で式(3)に示すように確率変数を成分とする透水テンソルを求めることができると仮定した。2.1節ではこの仮定の適用を試みたが、これは一辺50m領域の比較的REVに近いと考えられる領域の解析結果であるため、今後どの程度小さな領域までsub-REVの概念の適用が可能か検討する必要がある。また、 α 、 β 、 γ はお互いに独立ではなく相関関係がみられるが、本論ではこのような α 、 β 、 γ の相関性の表現法については特に検討を行わなかった。今後、この相関性を統計的に定式化する必要がある。

本論で使用した亀裂データ（表1）には亀裂の透水量係数に関するデータがないため、個々の亀裂の透水量係数に一定値 1×10^{-4} m²/sを与えた。しかしながら実岩盤における個々の亀裂の透水量係数は、亀裂の成因や原位置の応力状態によって、亀裂の方向、大きさ、間隙幅や充填鉱物など様々な要素に依存して変化すると考えられ、このような様々な不均質性は等価透水係数へ影響を与えたと考えられる。また、個々の亀裂内においても、チャネリングといった不均質性が存在することが原位置試験や室内実験から明らかになっている⁶⁾。その水理学的特性や幾何学的特徴についてはまだ明確ではないが、等価透水係数とその異方性に影響を及ぼすものと考えられる。そして、より現実的なモデル化を行うためには上記の様々な不均質性を変数

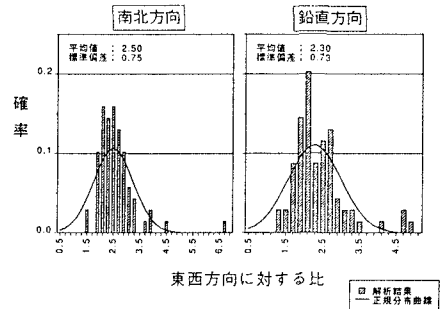


図8. 東西方向に対する比の分布

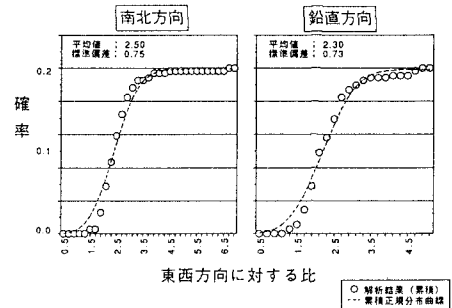


図9. 東西方向に対する比の累積分布

としてモデルへ加えていく必要があるが、この場合REVが非常に大きくなることが予想される。したがって、唯一の物性値を持つという厳密な意味でのREVはより存在しにくくなり、亀裂性岩盤を等価な多孔質媒体へ近似するためにはsub-REVに対して統計的に表現された等価透水係数を用いるのが適当と考える。

5. まとめ

三次元亀裂ネットワークモデルを用いた解析でREVの検討をした結果、以下のことがわかった。

- (1) 一辺が平均亀裂半径の20~30倍の領域においても、等価透水係数はユニークな値にはならなかった。
- (2) 実用的には、一辺が50m以下のsub-REVスケールで統計的変数を成分に持つ透水テンソルとして定義することが妥当である。

6. 参考文献

- 1) Long, J.C.S., J.S.Remer, C.R.Wilson and P.A.Witherspoon, 1982, Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resour. Res., vol.18, No.3, 645-658
- 2) Herbert, A. and B.Splawski, 1990, Prediction of Inflow into the D-Holes at the Stripa Mine, STRIPA PROJECT 90-14
- 3) Oda, M. and Y.Hatsuyama, 1984, Permeability tensor of jointed granite at Stripa mine, The 21th Japan National Conf. on Soil Mech. Found. Engrg, 1, 991-992
- 4) 吉田淳, 1990, 岩盤不連続面データの解析とそのブロック理論への適用について, (社)システム総研 第11回キーブロック実用化研究会
- 5) W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolosky and W.T.Vetterling, 1989, Numerical recipes, Cambridge Univ. Press, 470-472
- 6) Kikuchi, K., Y.Mito and T.Okuno, 1989, Experimental study for groundwater flow in an actual jointed rock mass, International Symposium Rock at Great Depth, vol.1, 457-464