

フラクチャーネットワークモデルに基づく亀裂性岩盤の等価透水テンソルの算定

Estimation of Equivalent Conductivity Tensor in Fractured Rock Mass Based on Fracture Network Flow Model

天野 悟*・丸山 誠**・丹生屋純夫**・田中達也***

Satoru AMANO, Makoto MARUYAMA, Sumio NIUNOYA, Tatsuya TANAKA

Based on the fracture survey carried out at an underground research laboratory, three-dimensional fracture network flow model was constructed and calibrated using the results of single-hole packer tests. The cross-hole tests were conducted to confirm the validity of the flow model.

The validity of the flow model has been confirmed by comparing the conductivity tensor obtained from the cross-hole tests with the equivalent conductivity tensor estimated from the fracture network model. Furthermore, the influence of the *in situ* stress to the flow direction was studied by comparing each direction of the principal conductivity.

1. はじめに

亀裂性岩盤内の水の流れは亀裂の存在に大きく影響されるため、亀裂性岩盤内での地下水挙動を予測するためには、亀裂の幾何学的分布を考慮し、亀裂性岩盤としての透水特性を適切に評価する必要がある。

神岡鉱山枋洞鉱内に開設した岩盤試験場において実施した亀裂調査および単孔式透水試験の結果に基づいて、フラクチャーネットワークによる三次元の岩盤水理モデルを作成し、このモデルの妥当性を確認するためにクロスホール試験を実施した。

本論文では、クロスホール試験から得られた透水テンソルとフラクチャーネットワークモデルから算定される等価透水テンソルを比較することによって、このモデルの妥当性を検討した。特に、それぞれの主透水係数の方向を比較することによって、岩盤応力状態が水の流れの方向に及ぼす影響について考察した。さらに、解析領域の大きさを変化させてそれぞれの等価透水テンソルを算定することによって、そのフラクチャーネットワークモデルに対して透水的に均質媒体と見なすことができる領域の大きさについても検討を加えた。

2. フラクチャーネットワークモデルの構築

2・1 亀裂調査に基づく亀裂流れモデルの作成

大林組神岡岩盤試験場で実施したボアホールテレビによる亀裂調査結果から開口亀裂を選び出し、水の流れに貢献する透水亀裂として判別した。¹⁾このように選び出した透水亀裂の三次元的分布を亀裂調査結果(半トレース長、方向、密度)に基づいて確率的に再現し、三次元の亀裂モデルを作成した。²⁾さらに、この三次元亀裂モデルに基づいて、Cacasらの提案した流れモデル³⁾を作成した。²⁾この流れモデルは、交差する亀裂面の中心を結ぶ一次元パイプを介して流れが生じると仮定しており、チャンネル流れの概念を取り入れた一次元パイプモデルである。

* 正会員 (株)大林組 液化石油ガス備蓄プロジェクトチーム

** 正会員 (株)大林組 技術研究所土木第四研究室

*** 正会員 (株)大林組 土木技術本部設計第二部

2・2 透水量係数のキャリブレーション

一次元パイプで表現される個々の亀裂の透水量係数は、大林組岩盤試験場で実施した単孔式透水試験を数値シミュレーションすることによってもとめた。²⁾ここでは、個々の亀裂の透水量係数の分布を対数正規分布と仮定し、単孔式透水試験で測定された注入流量のヒストグラムと数値シミュレーションによって得られる注入流量のヒストグラムが最も適合するように、試行錯誤的に亀裂の透水量係数の平均と標準偏差をキャリブレーションした。このようにして得られた亀裂の透水量係数の平均は $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 、標準偏差は $4.0 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$ である。

3. 等価透水テンソルの算定

3・1 等価透水テンソルの算定方法

このように三次元の流れモデルで表現された亀裂性岩盤の等価透水テンソルを、Long⁴⁾が行った二次元のフラクチャーネットワークモデルに対する等価透水テンソルの算定方法を次のように三次元のフラクチャーネットワークモデルに適用することによって算定した。

図-1に示すように、立方体の亀裂の発生領域の内側に、より小さな立方体の流れの解析領域をとり、方向別の透水係数をもとめるために、この流れモデルの解析領域を中心軸まわりに回転させる。この時の流れモデルの解析領域に対する境界条件は図-2に示すように、流入面に $h_1=1.0$ 、流出面に $h_2=0.0$ の一定の水頭値を与え、他の4つの境界面には、 $h_1=1.0$ から $h_2=0.0$ に線形に変化する水頭値を与えている。このような境界条件のもとで、異方性を持つ流れの解析モデルにおいても、一定の動水勾配を与えることができる。回転された方向に対するこの立方体の方向透水係数は、この境界条件のもとでダルシー則を適用することによってもとめられる。

ここでは、方向透水係数は1つの回転軸に対して12個ずつ（すなわち、回転角 30° おき）もとめた。三次元の等価透水テンソルを得るために、互いに直交する回転軸まわりに解析領域を回転させ、1つのフラクチャーネットワークモデルに対して、合計36個の方向透水係数をもとめた。これらの36個の方向透水係数から、最小自乗法を用いて三次元の等価透水テンソルを算定している。

ただし、このように算定した三次元等価透水テンソルが正值をとらず、結果として負の主透水係数が得られる場合には、この解析領域の大きさで、この亀裂システムを透水的に均質異方性媒体と見なすことができないことを意味することになる。

さらに、この亀裂システムと近似した均質異方性媒体との差の程度を表す指標として、自乗誤差の平均値を主透水係数で割ったものを正規平均自乗誤差 (NMSE) と定義し計算した。ここで、NMSE の値が0に近づくほど、この亀裂システムは透水的に、より均質異方性媒体に近い挙動を示すといえることができる。

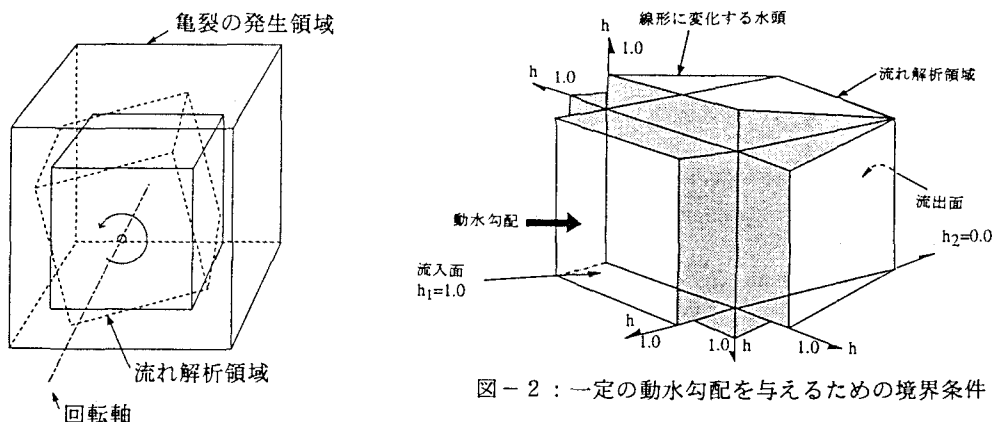


図-2：一定の動水勾配を与えるための境界条件

図-1：等価透水テンソルをもとめるための解析領域

3・2 クロスホール試験規模での等価透水テンソル

大林組神岡岩盤試験場で実施したクロスホール試験⁵⁾の規模とほぼ同等な領域として、一辺 6.5m の立方体の流れ解析領域を考えて、等価透水テンソルを算定した。50 個のフラクチャーネットワークモデルを確率的に発生させ等価透水テンソルをもとめたところ、正值を持つ等価透水テンソルは 35 個しか得られなかった。この結果は、このクロスホール試験規模では、この亀裂システムを均質異方性媒体としてとらえることが難しいことを意味している。

図-3 から図-5 は、正值を与えた 35 個の等価透水テンソルから 3 個を取り上げて、それぞれ南北軸、東西軸、鉛直軸まわりの方向透水係数の分布を示したものである。これらは全て対数スケールで示してあるが、個々のフラクチャーネットワークモデルがそれぞれ異なる方向透水係数の分布を示していることがわかる。また、これらの NMSE の値はそれぞれ、12.38、1.22、6.71 であり（NMSE の平均値は 4.02）、均質異方性媒体として挙動すると考えるには大きすぎる値であるといえる。

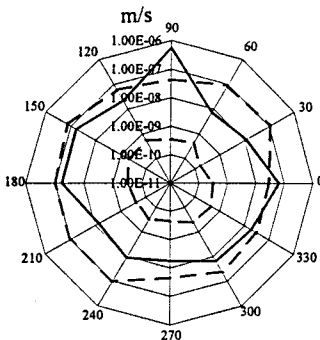


図-3：方向透水係数の分布
(南北軸周りの回転)

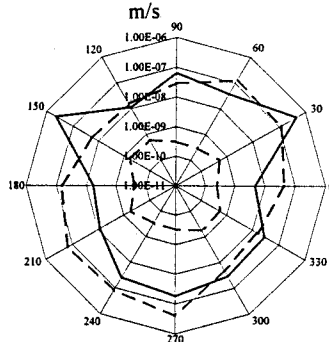


図-4：方向透水係数の分布
(東西軸周りの回転)

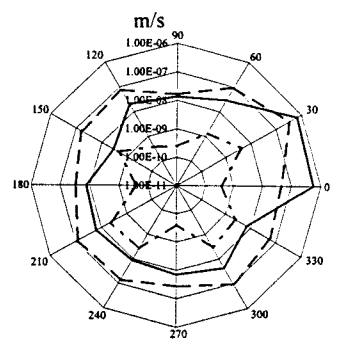


図-5：方向透水係数の分布
(鉛直軸周りの回転)

3・3 広域規模での等価透水テンソル

エルゴート仮定を用いれば、小さな領域での数値シミュレーションの結果を統計的に平均することによって、広域規模での等価透水テンソルをもとめることが可能となる。ここでは、広域規模での等価透水テンソルを推定するために、50 個のフラクチャーネットワークモデルの方向透水係数ごとに幾何平均をもとめ、この平均方向透水係数から等価透水テンソルを算定した。

図-6 は、この平均方向透水係数の分布を、南北軸、東西軸および鉛直軸ごとに示したものである。図-3 から図-5 に示したクロスホール試験規模での方向透水係数の分布には異方性が認められたが、図-6 の広域規模での方向透水係数の分布には卓越した方向の異方性は認められない。このことは、たとえ透水媒体が小さな規模で異方性を示したとしても、広域規模においては等方性に近くなることを示唆している。さらに、この時の NMSE の値は 0.038 であり、この亀裂システムを透水的に均質媒体と見なすのに十分小さな値であるといえることができる。

図-7 は、等価透水テンソルの主値とその方向を下半球ウルフネット上に示したものである。このフラクチャーネットワークモデルは、ボアホールテレビ観察の結果、開口幅が 0.5mm 以上の亀裂を水の流れに貢献する透水亀裂としたものであるが、この開口亀裂の卓越法線方位／傾斜は 207/21 である。この開口亀裂の卓越方向と等価透水テンソルの主方向とを比較すると次のことがいえる。

- ①等価透水テンソルの最大主透水方向は、ほぼ開口亀裂の卓越方向と平行となる。
- ②等価透水テンソルの最小主透水方向は、ほぼ開口亀裂の卓越方向と垂直となる。

これらの結果は、流れの方向という点で、このフラクチャーネットワークによる三次元流れモデルの妥当性を確認するものである。

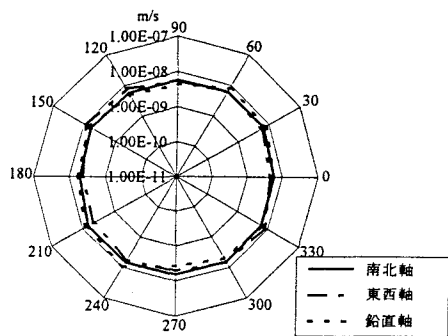


図-6：50個の亀裂ネットワークモデルの平均方向透水係数の分布

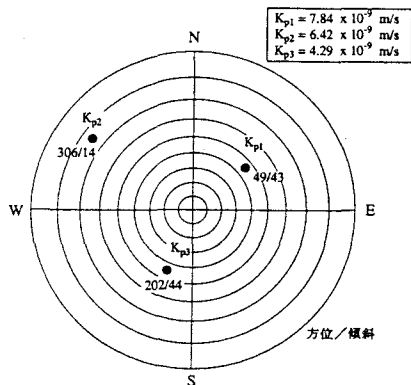


図-7：広域規模での等価透水テンソルの主値と主方向

4. クロスホール試験結果との比較

クロスホール試験規模では、50個のフラクチャーネットワークのうち35個の正值を持つ等価透水テンソルが得られているが、この35個の等価透水テンソルの主透水係数のばらつきおよびその幾何平均と実際にクロスホール結果から得られた主透水係数は、表-1のようになる。

両者の主透水係数の大きさを比較すると、最大主透水係数については、クロスホール試験結果では等価透水テンソルの主透水係数のばらつきの範囲に収まらないような大きな値が得られていることがわかる。これは、透水的に均質媒体として扱えないような小さな規模の領域では、亀裂性岩盤中の水の流れは、確率論的に作られたモデルにおけるよりも、実際には、高透水性の亀裂に支配される機会が多いことを示すものである。このような状況では、決定論的アプローチの方が確率論的アプローチよりも流れの挙動をうまく表現できる可能性がある。

図-8は、両者の主透水係数の方向を下半球ウルフネットに示したものであるが、この図からクロスホール試験から得られた最大主透水係数の方向は、数値シミュレーションから得られるそれと比べてやや南北方向にずれていることがわかる。フラクチャーネットワークモデルによる流れモデルでは、流れの方向については開口亀裂の卓越方向を表現できることを確認しているので、開口亀裂の卓越方向以外の要素が実際の流れの方向に影響を与えているものと考えられる。大林組神岡岩盤試験場での水平面内の最大および最小主応力の方向はそれぞれほぼ南北および東西方向である。¹⁾ 鉛直方向の亀裂が卓越しているので、流れの方向がこの岩盤応力状態の影響を受けて、南北方向にずれたのではないかと推測される。実際の亀裂性岩盤内の水の流れは、開口亀裂の方向とともに、岩盤内の応力状態の影響を受ける、すなわち、最小主応力の方向と垂直の方向に生じやすいといえる。

表-1：主透水係数の比較表

	等価透水テンソル (m/s)	クロスホール試験結果 (m/s)
K_{p1}	$3.0 \times 10^{-10} \sim 1.1 \times 10^{-8}$	
最大	(2.3×10^{-8})	1.7×10^{-6}
K_{p2}	$2.4 \times 10^{-10} \sim 2.8 \times 10^{-7}$	
中間	(1.2×10^{-8})	2.1×10^{-8}
K_{p3}	$5.0 \times 10^{-11} \sim 8.1 \times 10^{-8}$	
最小	(4.0×10^{-9})	6.4×10^{-9}

() 幾何平均

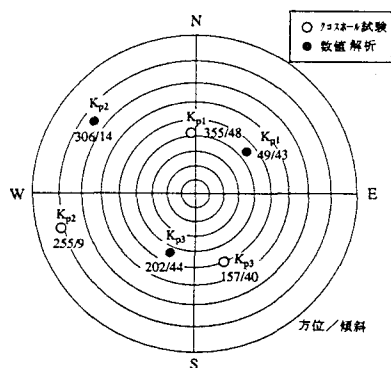


図-8：クロスホール試験と数値解析から得られた主透水係数の方向

5. 解析領域の影響

数値シミュレーションにおける解析領域の大きさの影響を調べるために、解析領域の大きさを変化させてそれぞれの等価透水テンソルを算定した。図-9は、この結果を、解析領域を変化させた場合の50個のフラクチャーネットワークモデルのうちの正値を持つ等価透水テンソルの数として示したものである。図-9に示すように、正値を持つ等価透水テンソルの数は、明らかに解析領域の拡大に伴って増加しており、解析領域の拡大に伴って、対象としている亀裂性岩盤が均質な透水媒体と見なすことができる大きさに近づいていることがわかる。

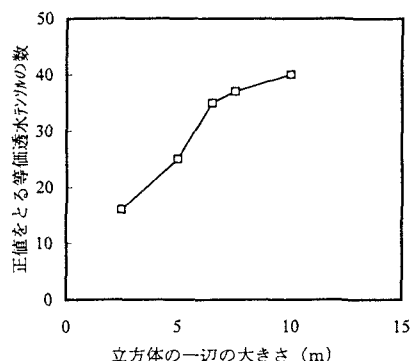


図-9：解析領域の大きさを変えた場合の正値を持つ等価透水テンソルの数

6. おわりに

亀裂調査および単孔式透水試験の結果に基づいてフラクチャーネットワークモデルによる三次元の流れモデルを作成し、対象となる亀裂性岩盤の等価透水テンソルを算定した。この等価透水テンソルと原位置で実施したクロスホール試験から得られた透水テンソルを比較することによって次のようなことがわかった。

- ① 神岡岩盤試験場で実施したクロスホール試験規模では（一辺 6.5m の立方体程度の領域）、対象となる亀裂性岩盤を均質異方性媒体と見なすことは難しい。
- ② 対象となる亀裂性岩盤が小さな領域において透水的に異方性を示したとしても、広域規模においては等方性に近くなる傾向にある。
- ③ フラクチャーネットワークモデルによる等価透水テンソルの主値の方向と開口亀裂の卓越方向の比較から、流れの方向という点で、この三次元流れモデルの妥当性を確認することができた。
- ④ 透水的に均質媒体として扱えないような小さな規模の領域では、実際の亀裂性岩盤内の水の流れは、確率論的に作られたモデルにおけるよりも、高透水性の亀裂に支配されることが多いと考えられる。
- ⑤ 実際の亀裂性岩盤内の水の流れは、開口亀裂の方向とともに、岩盤内の応力状態の影響を受けるものと考えられる。
- ⑥ 領域の拡大に伴って、対象としている亀裂性岩盤が均質な透水媒体と見なすことができる大きさに近づくことが、数値解析的に確認できた。

7. 参考文献

- 1) 天野 悟・白旗秀紀：地質調査情報に基づく透水亀裂の判別、第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.126 ~ 130、1995。
- 2) 天野 悟、永久和正、玉野 達、丹生屋純夫：フラクチャーネットワークモデルにおける単孔式透水試験結果の利用と評価、第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.201 ~ 205、1996。
- 3) Cacas, M.C. et al. : Modeling Fracture Flow with a Stochastic discrete Fracture Network : Calibration and Validation 1. Flow Model, Water Resources Res., 26, pp.479 ~ 489, 1990.
- 4) Long, J.C.S. et al. : Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resources Res., 18, pp.645 ~ 658, 1982.
- 5) 須藤 賢、丹生屋純夫、藤原紀夫、土原久哉：神岡岩盤試験場でのクロスホール透水試験による水理特性の検討、第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.191 ~ 195、1996。