

(42) 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

Use and Evaluation of Single-hole Packer Tests in Fracture Network Flow Modelling

天野 悟*・永久 和正**・玉野 達*・丹生屋 純夫***

Satoru AMANO, Kazumasa NAGAHISA, Itaru TAMANO, Sumio NIUNOYA

Single-hole packer test has been commonly used to measure hydraulic conductivity of fractured rock. The hydraulic conductivity obtained from the single-hole packer test is, however, difficult to be evaluated because the conductivities of fractures included in the test section highly influence the test results.

Based on 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.

This paper will describe how to calibrate the fracture network flow model using the results of single-hole packer tests and examine the influence of radius of the test based on the head responses measured in other boreholes during the tests and numerical simulations of the tests using the calibrated flow model.

1. はじめに

亀裂性岩盤の透水係数を測定する場合にも、従来よりルジオン試験に代表されるような単孔式透水試験が一般的に用いられているが、試験区間に含まれる亀裂の数およびその透水性に試験結果が大きく左右されるため、試験結果の評価に問題が残されている。

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結果に基づいて、三次元のフラクチャーネットワークモデルを作成した。さらに、このモデルにおいて個々の亀裂の透水量係数をキャリブレーションするために、単孔式透水試験を実施した。

本論文では、この単孔式透水試験結果を利用したフラクチャーネットワークモデルのキャリブレーションについて述べるとともに、単孔式透水試験時に測定した他のボーリング孔での圧力応答とフラクチャーネットワークモデルによる解析結果の比較から、亀裂性岩盤における単孔式透水試験の影響範囲について考察する。

2. フラクチャーネットワークモデルの構築

2・1 亀裂調査に基づく透水亀裂モデルの作成

亀裂性岩盤内の水の流れは亀裂を主な透水経路とするため、亀裂の幾何学的分布、とりわけ水の

* 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第二部

** 第二東海自動車道清水第三トンネル工事共同企業体

*** 正会員 (株)大林組 技術研究所土木第四研究室

流れに貢献する透水亀裂を判別することが、亀裂性岩盤内での地下水挙動を予測する上で重要となる。そこで、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、地質構造とその卓越方位を比較した上で、水の流れに貢献すると思われる透水亀裂として判別した¹⁾。ここでは、この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）に基づいて以下のように確率的に再現し、亀裂モデルを作成している。

亀裂面の方向は、卓越方位解析によりもとめられた卓越方位とその卓越方位からの分散（Fisher 定数 K ）を用いて発生させている²⁾。亀裂面の大きさについては、亀裂面を円盤で表現し、坑道壁面でのスキャンライン調査より得られた半トレース長の分布と最も適合する分布である対数正規分布を仮定している³⁾。亀裂面の三次元密度は、坑道壁面における二次元的な調査結果から推定することが難しいため、モデル領域内の任意の位置にスキャンラインを模擬した直線を設定し、その直線と亀裂面が交差する密度がスキャンライン調査により得られた密度と一致するまで亀裂面を発生させている²⁾。この三次元亀裂モデルの 1 例を図-1 に示す。このモデルの領域は 1 辺 10m の立方体である。

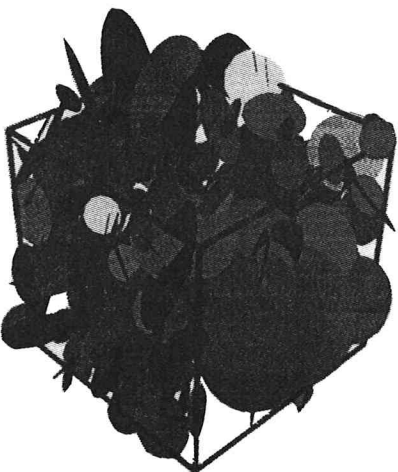


図-1：三次元亀裂モデルの 1 例

2・2 流れのモデルの作成

このように作成された三次元亀裂モデルから、Cacas らの提案したチャンネル流れの概念を取り入れた流れモデル⁴⁾を作成した。この流れモデルでは、図-2 に示すように、交差する亀裂面を中心に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、次のような特徴がある。

- ① 亀裂面内でのチャンネル流れの概念を取り入れている。
- ② 解くべき未知数の数がネットワークに繋がっている亀裂数と同じであり、計算量が少ない。
- ③ 決めるべきパラメーターの数が比較的少ない。
- ④ 亀裂面を円盤と仮定していることは亀裂の繋がりを定義しているだけであり、流れの計算はこの亀裂面の形状に依存していない。

図-1 の三次元亀裂モデルに対応する流れのモデルを図-3 に示す。

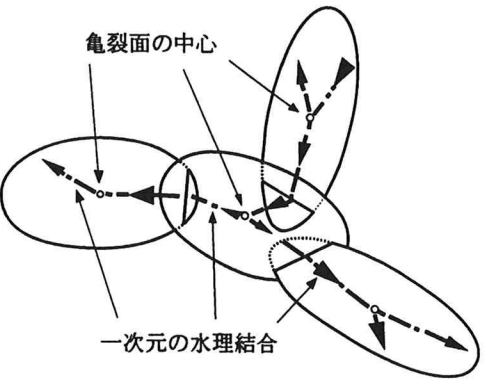


図-2：一次元パイプによる流れモデル⁴⁾

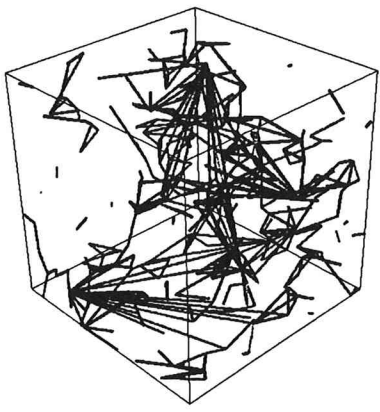


図-3：三次元流れモデルの 1 例

3. 単孔式透水試験の実施

3・1 試験概要

単孔式透水試験は図-4に示すように、岩盤試験場内に長さ約13m径76mmのボーリング孔をほぼ鉛直に3本削孔し、合計15区間で測定を実施した⁵⁾。これらの測定区間は、事前に行ったボアホールテレビ観察・コア観察によって開口性が認められる亀裂を含むように設定しており、ダブルパッカーで仕切られる試験区間長は1mである。試験時には一定注入圧を段階的に最大0.2MPaまで加え、また、透水経路の連結性を調べるために、他の2本のボーリング孔の合計6観測点において同時に圧力応答を測定した。

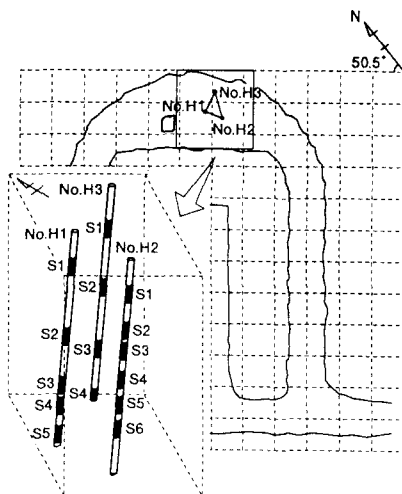


図-4：単孔式透水試験位置図

3・2 試験結果

図-5は、15回の単孔式透水試験結果を最大注入圧力0.2MPaでの注入流量分布として示したものである。横軸は注入流量を対数スケールで、縦軸は試験区間の中心深度で示している。図-5に示したように、測定された注入量は狭い領域内で試験が実施されたにもかかわらず、かなりばらついているのがわかる。これは、注入流量が試験区間に含まれる亀裂の透水性および他の亀裂との連結性に大きく影響されることを示唆するものである。図-6は、注入点から観測点までの距離と試験時の観測点での水頭変化を示したものである。図-6に示すように、注入点から5m以上離れた点では、0.2MPaの注入圧力でほとんど観測点において圧力応答がないことがわかる。一方、注入点から4m以内の観測点でも全く圧力応答がない点もあり、これは注入点と観測点では透水経路の連結性がほとんどないことを意味している。

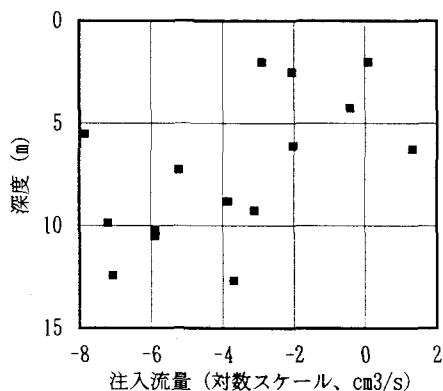


図-5：注入流量結果の分布図

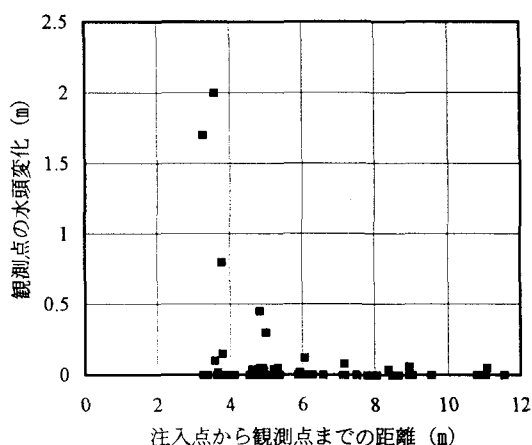


図-6：観測点での水頭変化図

4. フラクチャーネットワークモデルによるシミュレーション

4・1 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、Cacas らが提案したような単孔式透水試験の数値シミュレーション⁴⁾によってキャリブレーションを行った。まず、図-7に示すような一辺10mの立方体領域内にフラクチャーネットワークモデルを発生させる。境界条件としては、この立方体の中心に最も近い亀裂中心を注入点として注入圧に相当する水頭を与え、また、立方体のすべての外面には固定水頭を与えている。ここで、一辺10mの立方体の領域は、図-6に示した単孔式透水試験時の他のボーリング孔での圧力応答の結果を参考にして決めた。

キャリブレーションは、亀裂の透水量係数の分布を対数正規分布と仮定し、測定された注入流量のヒストグラムと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、亀裂の透水量係数の平均と標準偏差を変化させて、試行錯誤的に行った。なお、ここでは、亀裂の透水量係数の1つの分布に対して、それぞれ100個のフラクチャーネットワークモデルを発生させて、注入流量のヒストグラムをもとめている。図-8に測定された注入流量のヒストグラムに最も適合するシミュレーションによる注入流量のヒストグラムを示す。このときの亀裂の透水量係数の平均は $2.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ 、標準偏差は $4.0 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$ である。

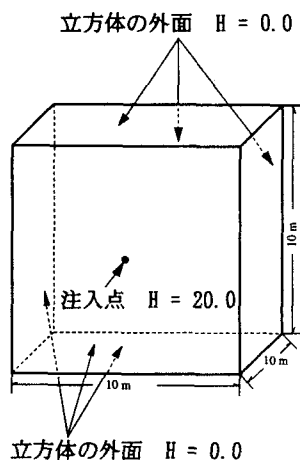


図-7：単孔式透水試験のシミュレーションモデル

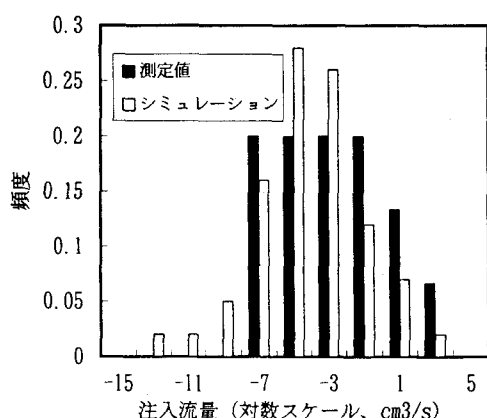
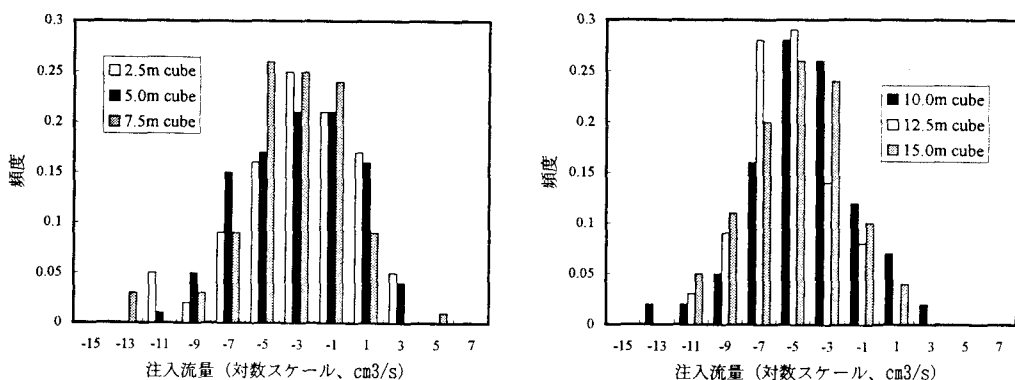


図-8：測定注入流量とシミュレーションによる注入流量のヒストグラム

4・2 影響範囲の検討

固定水頭の境界条件がキャリブレーションの結果に与える影響を調べるために、解析領域である立方体の大きさを変化させて単孔式透水試験のシミュレーションを行った。図-9は、解析領域を一辺2.5mの立方体から一辺15mの立方体に変化させた時の注入流量のヒストグラムをそれぞれ示したものである。図-9から、解析領域を一辺10mの立方体より大きくとれば、固定水頭の境界条件がキャリブレーションの結果にそれほど影響していないことがわかる。また、解析領域を大きくとると、注入流量の分布が対数正規分布に近づくこともわかる。この結果は、図-6に示した単孔式透水試験時の他のボーリング孔での圧力応答の結果と対応しており、一辺10mの立方体を解析領域としたことは、試験領域内の亀裂特性に対して適切であったと思われる。



図－9：解析領域を変化させた時の注入流量のヒストグラム

5. おわりに

神岡岩盤試験場で実施した亀裂調査結果に基づいて、三次元のフラクチャーネットワークモデルを作成し、個々の亀裂の透水量係数をキャリブレーションするために単孔式透水試験を実施した。単孔式透水試験時に実施した他のボーリング孔での圧力応答の結果および三次元のフラクチャーネットワークモデルによる単孔式透水試験のシミュレーション結果から、試験領域内の亀裂特性に対して一辺10mの立方体を解析領域とすれば、固定水頭の境界条件がキャリブレーションの結果に大きく影響しないことがわかった。同じ3本のボーリング孔を利用してクロスホール透水試験を実施しており⁵⁾、このフラクチャーネットワークモデルを用いて、クロスホール透水試験の結果との比較を今後行う予定である。

6. 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) Priest, S.D. : Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, 1993.
- 3) Priest, S.D. and Hudson, J.A. : Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Abstr. Vol.18, pp.183～197, 1981.
- 4) Cacas, M.C. et al. : Modeling Fracture Flow with a Stochastic Discrete Fracture Network : Calibration and Validation I. Flow Model, Water Resources Res., 26, pp.479～489, 1990.
- 5) 須藤 賢他：地下岩盤実験場の水理特性に関する研究（その2）、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集、3-A, pp.120～121, 1995.