

割れ目のネットワークを考慮した新しい 岩盤中地下水流動解析手法の開発

DEVELOPMENT OF A NEW NUMERICAL ANALYSIS METHOD FOR GROUNDWATER FLOW IN ROCKS CONSIDERING FRACTURE NETWORK

田中靖治
Yasuharu Tanaka

正会員 工博 (財) 電力中央研究所 放射性廃棄物処分研究プロジェクト
(〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1 6 4 6)

A new numerical analysis method has been developed for groundwater flow in rocks considering fracture network. In the numerical method, large or high permeable fractures, which greatly affect on the groundwater flow, and the other fractures are modeled as disks and pipes, respectively. The groundwater flow in crystalline rocks can be estimated easily and accurately by using the numerical method.

The numerical code was applied to a fictitious rock mass in which 2,000 fractures had been generated. The groundwater flow rate was calculated by modeling a few percent of the fractures and the other fractures as disks and pipes respectively. The flow rate was almost the same as the one calculated by modeling all the fractures as disks. As a result, it was considered that the numerical code was validated.

Key Words : fracture, groundwater flow, numerical analysis, modeling, crystalline rock

1. はじめに

我が国では、原子力発電所で使用した燃料を再処理することにより生ずる高レベル放射性廃棄物を、地層深部に埋設処分することを計画している。その際、ガラスとともに固化された廃棄物は、オーバーパックを始めとする人工バリアや、岩盤である天然バリアによって多重に防護される。長年月の後に人工バリアから放射性核種が漏出した場合、核種は主に地下水を輸送媒体として、天然バリア中を移行すると考えられる。そのため、埋設処分場の安全性を評価するとともに、埋設処分場を合理的に設計・施工するためには、施設周辺岩盤の地下水の流動状況を精度良く把握することが重要となる。

埋設施設を建設する候補岩体の一つである花崗岩等の結晶質岩盤では、岩石マトリクスの透水性が低いため、地下水は主に岩盤内に分布する割れ目の中を流れる。結晶質岩盤の地下水流動を解析するために、従来、数多くの手法が開発されてきている。小田ら¹⁾、Kobayashi *et al.*²⁾、河西ら³⁾は、結晶質岩盤を多孔媒体でモデル化する解析手法を提案している。また、Dershowitz *et al.*⁴⁾、Grindrod *et al.*⁵⁾は、円盤あるいは多角形で近似した割れ目のネットワークを考慮した解析手法を提案している。

さらに、Cacas *et al.*⁶⁾や渡辺ら⁷⁾は、割れ目による水みちをパイプで表現している。多孔媒体モデルの場合、計算が簡便に行えるという利点がある反面、割れ目の連結の評価が難しい。また、割れ目ネットワークによる解析は、一般に解析精度が高いと考えられているが、多大な計算量を必要とする。そして、パイプネットワークモデルでは、計算量は比較的少なくてすむが、パイプの物性の設定が課題となる。

本研究では、比較的少ない計算量で、割れ目ネットワークによる解析手法と同等の精度での計算を可能とする地下水流動解析手法を開発した。

2. 解析手法の概要

本研究で開発した解析手法では、図-1 に示す手順により、割れ目を含む岩盤中の地下水流動解析を行う。

(1) 割れ目の発生

割れ目は、割れ目の幾何形状を表す特性値の確率密度関数と割れ目の体積密度(単位体積当たりの岩盤に含まれる割れ目数)に基づき、モンテカルロ法により発生させる。ここでいう特性値とは、割れ目面の走向傾斜、割

れ目面を円で近似した場合の半径である。これらの特性値の確率密度関数と割れ目の体積密度は、原位置で割れ目観察を行い、その結果を分析することにより得られる。

発生させる割れ目はすべて円形であり、具体的に発生させる数値は、それぞれの割れ目の中心位置と半径、割れ目面に対する法線ベクトルである。なお、微小な割れ目は、連結性が低く、開口幅も一般に狭いため、地下水流動に与える影響は小さいと考えられる。そこで、発生する割れ目の最小半径を指定することができるようにした。また、確率的に発生させる割れ目とは別に、決定論的に割れ目を加えることも可能である。

発生した割れ目には、さらに透水量係数が与えられる。透水量係数は、割れ目半径の関数として与えたり、割れ目の幾何特性とは独立してモンテカルロ法により値を発生させることも可能である。

さらに、割れ目の開口幅 b が、割れ目の三乗則に基づき、透水量係数 T の関数として与えられる。

$$b = \sqrt[3]{\frac{12\nu T}{g}} \quad (1)$$

ここで、 ν は水の動粘性係数、 g は重力加速度である。

(2) 割れ目の交差判定

割れ目 i の中心の座標を (x_i, y_i, z_i) 、半径を r_i 、割れ目 j の中心の座標を (x_j, y_j, z_j) 、半径を r_j とする時、割れ目の交差判定は、以下の手順により行う。

- 1) $\|x_i - x_j\| \leq r_i + r_j$ ならば交差の可能性がある。
- 2) 1) で交差の可能性があるとして判断され、さらに $\|y_i - y_j\| \leq r_i + r_j$ ならば、依然として交差の可能性が残る。
- 3) さらに $\|z_i - z_j\| \leq r_i + r_j$ ならば、交差の可能性が残る。
- 4) さらに $\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \leq r_i + r_j$ ならば、交差の可能性が残る。
- 5) 4) までで交差の可能性が残ると判断された場合、割れ目面に対する法線ベクトルと割れ目中心の座標から、それぞれの割れ目を含む平面の方程式を導き、その平面どうしの交線を求める。
- 6) それぞれの割れ目を含む平面において、5) で求めた交線と割れ目を表す円とが交差するか否かを調べる。いずれの平面においても交線と円とが交差し、交線がそれぞれの割れ目により切られてできる2本の線分に一致する部分があれば、割れ目 i と j は交差する。そして、その2本の線分の一致部分が、割れ目どうしの交線となる。

以上の処理を、(1)で発生させた割れ目のすべての組み合わせについて実施し、割れ目の交差判定を行う。

(3) 水流に関与しない割れ目の除去

割れ目の交差判定により、いずれの割れ目とも交差し

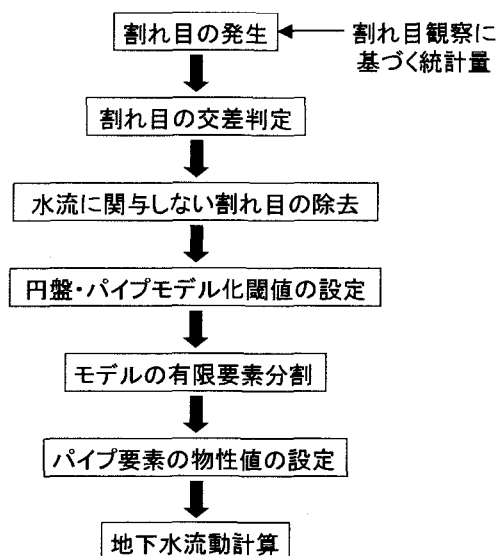


図-1 解析手法のフロー

ないと判断された独立な割れ目は、モデル化の対象から削除する。

また、解析領域の境界部（ボーリング孔や坑道のような内部境界を含む）と交差する割れ目につながる割れ目を順次辿っていき、地下水流動と直接関係のない割れ目群も、同様にモデル化の対象から削除する。具体的には、数枚の割れ目がお互いに交差しあって割れ目群を形成しているが、その割れ目群以外の割れ目とは交差せず独立しているような場合である。

(4) 円盤・パイプモデル化閾値の設定

今回開発した解析コードでは、地下水流動に大きな影響を与えると考えられる割れ目のみ円盤状のままでモデル化し、それ以外の割れ目はパイプ状にモデル化を行う。具体的には、割れ目半径あるいは透水量係数の閾値を設定して、閾値を超える割れ目についてのみ、円盤でモデル化する。

(5) モデルの有限要素分割

円盤状にモデル化する割れ目は、板状要素により有限要素分割を行う。基本的にデローニー分割により三角形要素を作成し、最大辺を共有する隣り合う三角形要素の組み合わせから形状の良いものを選択して、一部四角形要素を作成する。

一方、割れ目をパイプ状にモデル化する場合、図-2に示すように、Cacas *et al.*⁶⁾と同様に、パイプは割れ目中心と割れ目交線の中点を結ぶ線分とする。パイプでモデル化する割れ目どうしが交差する場合には、計算を効率的に行うために、有限要素法での節点は割れ目交線上には置かず、割れ目中心にのみ置く。そして、節点どうしを割れ目交線の中点を通る折れ線上の線要素で結ぶ。

円盤割れ目とパイプ割れ目の連結部分については、点接続と線接続の2通りの接続方法が可能である。点接続

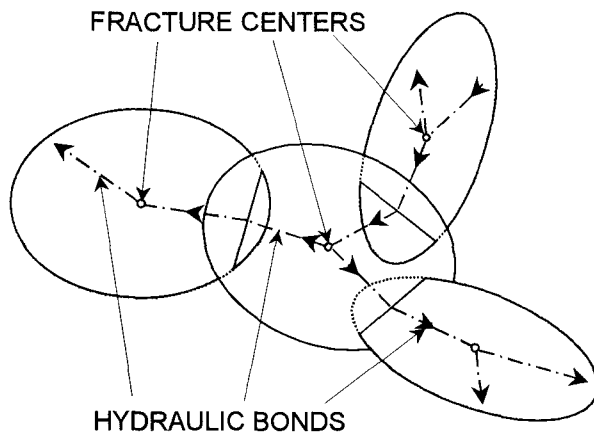


図-2 パイプによる割れ目内地下水流動経路のモデル化³⁾

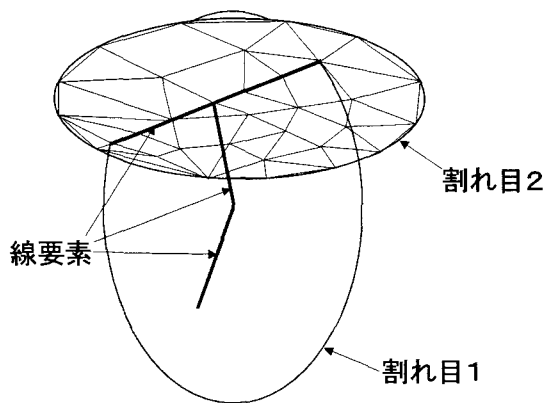


図-3 要素分割の例 (円盤割れ目とパイプ割れ目を線接続で連結した場合)

では、割れ目交線の中点に節点を置き、パイプ割れ目と円盤割れ目の水のやりとりは、この節点を介してのみ行われる。一方、線接続では、図-3 に示すように、割れ目交線を線要素で表し、パイプ割れ目をこの線要素と接続する。割れ目交線を表す線要素の透水係数を大きめに設定することにより、パイプ割れ目と円盤割れ目の水のやりとりが、割れ目交線全体で行われるようになる。解析精度は、点接続より線接続の方が良いと考えられるが、節点数、要素数が増えることになり、計算量の増大につながる。

(6) パイプ要素の物性値の設定

2条の割れ目 i と j が交差する場合を考える。

まず、割れ目 i 上のパイプの長さ L_i は、割れ目 i の中心と割れ目交線の中点との距離となる。

パイプの横幅を、Cacas *et al.*⁶⁾は割れ目交線の長さに設定している。本研究では、割れ目の中心付近での流路の拡大を考慮して、流路を図-4の台形のように考え、その台形の面積とパイプの面積とが等しくなるように、パイプの横幅 w_i を次式のように設定した。

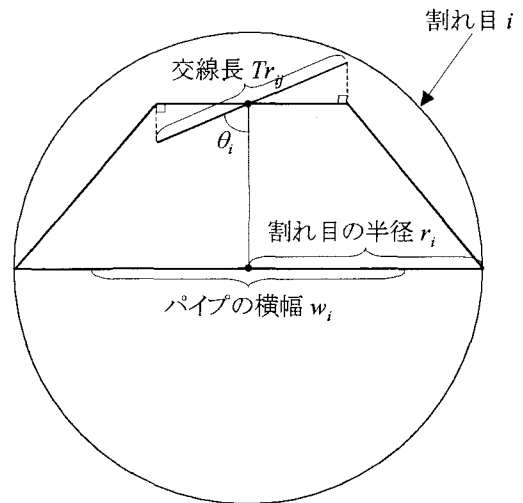


図-4 パイプの横幅の設定

$$w_i = \frac{Tr_{ij} \cdot \sin \theta_i + 2r_i}{2} \quad (2)$$

ここで、 Tr_{ij} は割れ目 i と j との交線の長さ、 θ_i は割れ目交線の中点と割れ目 i の中心とを結ぶ線分と割れ目交線とのなす角、 r_i は割れ目 i の半径である。

パイプの開口幅 b_i と透水係数 k_i は、元々の割れ目の開口幅と透水係数と同じ値とする。

割れ目 i をパイプでモデル化し、割れ目 j を円盤でモデル化する場合には、以上のパイプの長さ、横幅、開口幅、透水係数の値を、割れ目 i の中心と割れ目交線の中点を結ぶ線要素に与える。

一方、割れ目 i と j の両者をパイプ状でモデル化する場合には、(3)で述べたように有限要素法での節点は割れ目の中心にのみ設定し、割れ目交線の中点を通る折れ線上の線要素で割れ目中心どうしを結ぶ。そのため、割れ目 i と j のそれぞれの中心と割れ目交線の中点とを結ぶ2本のパイプを、等価な物性を有する1本のパイプに統合する必要がある。

まず、統合されたパイプの長さ L_{ij} は、次式のように単純に2本のパイプの長さの和となる。

$$L_{ij} = L_i + L_j \quad (3)$$

また、統合されたパイプの横幅は、将来の物質移行解析コードへの拡張も考慮して、パイプに接触する岩石マトリクスの面積が、パイプの統合前後で同じ値となるように設定した。したがって、統合化されたパイプの横幅 w_{ij} は次式で表される。

$$w_{ij} = \frac{L_i}{L_i + L_j} \cdot w_i + \frac{L_j}{L_i + L_j} \cdot w_j \quad (4)$$

そして、統合されたパイプの開口幅は、やはり将来の物質移行解析コードへの拡張も考慮して、水粒子がパイプを通過するのに要する時間がパイプ統合の前後で変わ

らないように設定した。すなわち、統合されたパイプの開口幅 b_{ij} は、次式を満たす必要がある。

$$\frac{L_{ij}}{Q_{ij}/(w_{ij} \cdot b_{ij})} = \frac{L_i}{Q_i/(w_i \cdot b_i)} + \frac{L_j}{Q_j/(w_j \cdot b_j)} \quad (5)$$

ここで、 Q_{ij} はパイプを流れる地下水流量である。式(3)と(4)を式(5)に代入することにより、統合されたパイプの開口幅 b_{ij} は次式で表される。

$$b_{ij} = \frac{L_i w_i}{L_i w_i + L_j w_j} b_i + \frac{L_j w_j}{L_i w_i + L_j w_j} b_j \quad (6)$$

さらに、パイプを流れる地下水流量がパイプの統合前後で同じ値となるように、統合されたパイプの透水係数 k_{ij} は、次式により与える。

$$\frac{1}{k_{ij}} = \frac{w_{ij} b_{ij}}{w_i b_i} \cdot \frac{L_i}{L_i + L_j} \cdot \frac{1}{k_i} + \frac{w_{ij} b_{ij}}{w_j b_j} \cdot \frac{L_j}{L_i + L_j} \cdot \frac{1}{k_j} \quad (7)$$

式(3)、(4)、(6)、(7)により得られる値を、統合されたパイプの長さ、横幅、開口幅、透水係数として、割れ目中心を結ぶ折れ線状の線要素に与える。

(7) 地下水流動計算

地下水流動計算は、有限要素法により行う。

円盤でモデル化される割れ目では、基礎方程式は次式となる。

$$\text{div}(T \text{ grad } h) + q = 0 \quad (8)$$

ここで、 T は割れ目の透水量係数テンソル、 h は全水頭、 q は流入出力である。このように、円盤でモデル化する割れ目では、割れ目内の透水異方性が考慮できる。

一方、パイプでモデル化される割れ目では、基礎方程式は次式となる。

$$wbk \nabla^2 h + Q = 0 \quad (9)$$

ここで、 w 、 b 、 k はそれぞれパイプの横幅、開口幅、透水係数であり、 Q は流入出力である。

3. 解析コードの検証

本解析手法の有効性を確認するため、仮定の割れ目を含む岩盤を設定し、ケーススタディ計算を実施した。

(1) 解析モデル

一辺の長さが200mの立方体中に、確率的に割れ目を発生させた。大野・小島⁸⁾や井尻ら⁹⁾は、原位置において様々なスケールで観察された割れ目のトレース長分布から、トレース長がスケールに依存しない1つのべき分布にしたがうことを報告している。そこで、本研究において、発生させる割れ目の半径は、べき分布にしたがうも

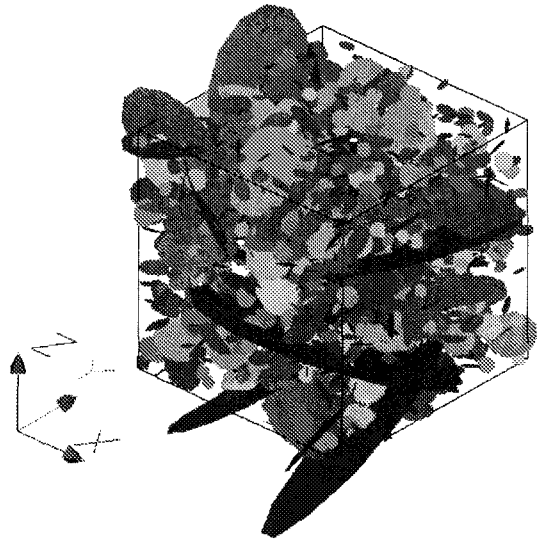


図-5 解析領域に確率的に発生させた割れ目の分布

のとした。

べき分布では、割れ目の半径の確率密度関数は、次式で表される。

$$f(r) = \alpha r^{-a} \quad \dots \quad r \geq r_{\min} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1}{\int_{r_{\min}}^{\infty} r^{-a} dr} = \frac{a-1}{r_{\min}^{1-a}}$$

ここに、 r は割れ目の半径、 a はべき乗数、 α は正規化定数の逆数、 $r_{\min}$ は割れ目半径の最小値である。

井尻ら⁹⁾は、断層を対象とした文献から、割れ目トレース長の頻度分布のべき乗数は場所や岩種により2.0～3.0の範囲に分布し、割れ目の形状を円盤と仮定することにより、割れ目の半径分布はトレース長のべき乗数に1を加えた3.0～4.0の範囲に分布するとしている。そこで、本研究においては、べき乗数を3.5と仮定した。

また、本研究においては、 $r_{\min}$ を5 mと仮定した。その結果、上式より α の値は140となる。

割れ目の方向はランダムとし、2,000条の割れ目を発生させた。

解析領域に確率的に発生させた割れ目の分布を図-5に示す。また、発生させた割れ目の半径とその累積割れ目数との関係を図-6に示す。図-6において、両対数グラフ上で割れ目の半径とその累積数とはほぼ直線上に並んでおり、割れ目の発生が良好に行われたことを示す。

すべての割れ目について、透水係数は 1×10^{-3} m/sec、開口幅は1 mmに設定した。

(2) 解析結果

(1)で発生させた割れ目について、割れ目の交差判定を行った。その結果、 x 、 y 、 z のいずれの方向についても、2,000条中の902条の割れ目が、解析領域を横切る水流に関与することがわかった。

表-1 有限要素分割によるモデル毎の節点数と要素数

割れ目数		半径閾値 (m)	節点数	要素数			
円盤	パイプ			六面体	三角形	四角形	線
902	0	—	45,965	—	55,798	17,220	—
28	874	30	5,473	—	5,351	1,806	1,453
6	896	50	2,267	—	1,346	475	1,500
0	902	—	1,048	—	—	—	1,513
スメアード割れ目モデル		—	68,921	64,000	—	—	—

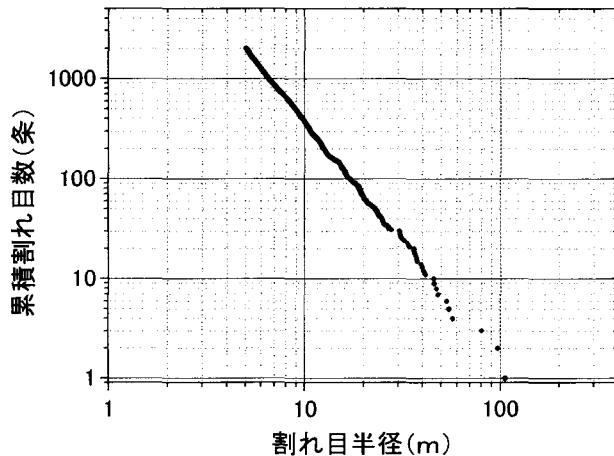


図-6 発生させた割れ目の半径と累積度数の関係

地下水流動解析は、902条の割れ目をすべて円盤でモデル化した場合、円盤でモデル化する割れ目とパイプでモデル化する割れ目の半径の閾値を30 mあるいは50 mとした場合、すべてパイプでモデル化した場合について行うこととした。

それぞれの場合について、解析モデルの有限要素分割を行った。各ケースの円盤割れ目数、パイプ割れ目数、節点数、要素数を表-1に示す。すべての割れ目をパイプでモデル化した場合の節点数は、すべて円盤でモデル化した場合のわずか2%程度となっている。閾値を30 mとした場合には、28条の割れ目を円盤で、他の874条の割れ目をパイプでそれぞれモデル化することになるが、節点数はすべて円盤でモデル化した場合の約12%である。

続いて、パイプでモデル化する割れ目について、式(2)～(7)に基づき、各パイプを表す線要素の横幅、開口幅、透水係数の設定を行った。また、パイプの横幅を、式(2)、(4)ではなく、Cacas *et al.*⁶⁾と同様に、割れ目どうしの交差線の長さに設定した場合についても、比較のために計算を行うこととした。

さらに、多孔体要素による解析手法の一つであるスメアード割れ目モデル³⁾による解析も、比較のために実施することとした。スメアード割れ目モデルでは、図-7に示すように、割れ目がいくつかの有限要素と交差している場合、図で灰色で示したその有限要素の透水係数テンソル k_s を、以下の式により与える。

$$k_s = \frac{V_f k_f + V_m k_m}{V} \quad (11)$$

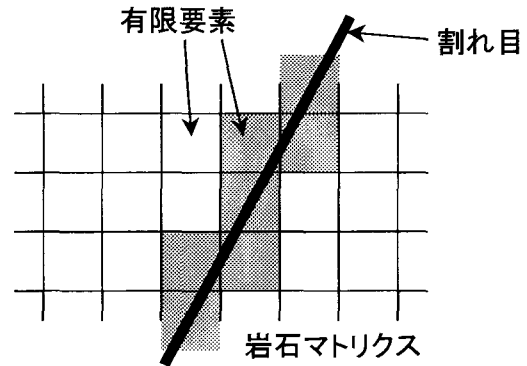


図-7 スメアード割れ目モデル

ここで、 V は有限要素の体積、 V_f と V_m はそれぞれ有限要素中に占める割れ目および岩石マトリクスの体積、 k_f と k_m はそれぞれ割れ目および岩石マトリクスの透水係数テンソルである。今回は、全解析領域をすべて一辺の長さが5mの立方体要素で分割して、スメアード割れ目モデルによる解析を実施した。

以上に述べたそれぞれの計算ケースについて、地下水流動解析を実施した。地下水流動解析は x 、 y 、 z の三方向について一方向ずつ実施し、それぞれの方向に対する解析領域全体の透水性を適性に評価できているか検討することとした。 x 方向の地下水流を計算する際には、 x 軸に直交する二つの断面の全水頭を、両者の水頭差が20 mH₂Oになるように固定し、他の四つの境界面は不透水境界とした。 y 方向および z 方向の地下水流を計算する際も同様である。

地下水流動解析により得られた地下水流量を表-2に示す。ただし、Case 2, 3, 4は、各パイプを表す線要素の横幅、開口幅、透水係数の設定を、式(2)～(7)に基づいて行ったケースである。一方、Case 5, 6, 7は、パイプの横幅を、割れ目どうしの交差線の長さに設定したケースである。また、前述したように、割れ目を考慮した解析手法の中で、割れ目を円盤あるいは多角形で近似しそのネットワークを考慮した解析手法が一般に解析精度が高いと考えられている。そのため、表-2には、割れ目をすべて円盤でモデル化した場合に対する各計算ケースの流量の倍率も示すこととした。

各パイプの物性を式(2)～(7)に基づいて設定すると、割れ目をすべてパイプでモデル化した場合の流量は、すべて円盤でモデル化した場合の1.16～1.59倍(3方向の平均1.35倍)となり、流量を過大評価する結果となった。

表-2 各計算ケースの地下水流量とCase1の流量との比

Case No.	割れ目数		半径閾値 (m)	流量 (m ³ /sec)						平均倍率
	円盤	パイプ		x 方向	倍率	y 方向	倍率	z 方向	倍率	
Case1	902	0	—	1.26E-6	1.00	3.10E-6	1.00	1.09E-6	1.00	1.00
Case2	28	874	30	1.25E-6	1.00	2.83E-6	0.91	1.05E-6	0.96	0.96
Case3	6	896	50	1.30E-6	1.03	3.27E-6	1.06	1.29E-6	1.18	1.09
Case4	0	902	—	1.46E-6	1.16	4.93E-6	1.59	1.43E-6	1.30	1.35
Case5	28	874	30	3.63E-7	0.29	1.99E-6	0.64	7.76E-7	0.71	0.55
Case6	6	896	50	3.23E-7	0.26	1.68E-6	0.54	4.33E-7	0.40	0.40
Case7	0	902	—	3.11E-7	0.25	1.49E-6	0.48	2.99E-7	0.27	0.33
Case8	スミアード割れ目モデル		—	4.77E-6	3.79	5.95E-6	1.92	2.83E-6	2.59	2.77

それに対し、閾値を50 m、30 mとした場合の流量は、すべて円盤でモデル化した場合に比べて、平均でそれぞれ1.09倍、0.96倍となり、大きな割れ目を円盤でモデル化することにより、解析精度が向上することがわかった。

一方、パイプの横幅を、割れ目どうしの交差線の長さに設定すると、割れ目をすべてパイプでモデル化した場合および閾値を30mとした場合の流量は、すべて円盤でモデル化した場合のそれぞれ平均0.33倍、0.55倍となり、流量を過小評価する結果となる。

また、スミアード割れ目モデルによる計算で得られた流量は、割れ目をすべてパイプでモデル化した場合の平均2.77倍となり、流量を大幅に過大評価する結果となった。これは、スミアード割れ目モデルでは、割れ目を含む有限要素の物性値を要素内で一様に平均化してしまうために、隣接する有限要素にそれぞれ含まれる割れ目が実際には連結していないくても、要素間の水の流れが生じてしまうことに起因する。

計算に要した時間は、すべての割れ目を円盤でモデル化した場合に比べて、すべての割れ目のパイプで表した場合6%、半径閾値を50mとした場合は8%、30mとした場合は12%であり、大幅に短縮することができた。

4. まとめ

結晶質岩等の亀裂性岩盤を対象として、割れ目のネットワークを考慮した新しい地下水流動解析コードを開発した。その解析コードでは、地下水流動に支配的な影響を与えと考えられる割れ目のみ円盤でモデル化し、他の割れ目はパイプ状に簡略化してモデル化することにより、比較的少ない計算量で高精度な解析が可能である。

本解析コードにより、仮定の岩体に2,000条の割れ目を確率的に発生し、その岩体を通過する地下水流量を計算した。全割れ目のうち半径の大きい3%の割れ目のみ円盤でモデル化し、その他の割れ目をパイプでモデル化して有限要素分割を行い、地下水流動計算を実施した。その結果、すべての割れ目を円盤でモデル化した場合に比べて、12%程度の計算時間でほぼ同じ地下水流量が得られ、本解析手法の有効性が確認できたものとする。

今後は、本解析手法を原位置試験等に適用するとともに

に、亀裂性岩盤内の物質移行解析に拡張していきたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、株式会社竹中工務店の重野喜政氏、株式会社計算力学研究センターの達橋直幸氏に多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 小田匡寛, 前沢卓郎, 数納慎吾, 羽出山吉裕: クラックテンソルによる岩盤透水係数の評価, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 121-126, 1984.
- 2) Kobayashi, A., Yamashita, R., Chijimatsu, M., Nishiyama, H. and Ohnishi, Y.: Analysis of LPT2 in the Äspö HRL with continuous anisotropic heterogeneous model, SKB ICR 94-07, 1994.
- 3) 河西基, 田中靖治, 五十嵐敏文: 高レベル廃棄物処分の天然バリア性能評価手法の開発 (その1) —割れ目系岩盤中の地下水流動解析手法—, 電中研研究報告U93054, 1994.
- 4) Dershowitz, W. S., Wallmann, P. and Kindred, S.: Discrete fracture modeling for the Stripa site characterization and validation drift inflow predictions, SKB Stripa Project TR 91-16, 1991.
- 5) Grindrod, P., Herbert, A., Roberts, D. and Robinson, P.: NAPSAC technical document, SKB Stripa Project TR 91-31, 1991.
- 6) Cacas, M. C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B. and Peaudecerf, P.: Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation, 1. The flow model, *Water Resour. Res.*, Vol.26, No.3, pp.479-489, 1990.
- 7) 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 岩崎浩: 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発 (その2) —釜石鉱山KD-90坑道・トレーサー試験の解析—, 応用地質, Vol. 35, Nr. 4, pp. 2-12, 1994.
- 8) 大野博之, 小島圭二: 岩盤割れ目のフラクタル (その2) —フラクタル特性と分布のばらつき—, 応用地質, 第34巻第2号, pp. 12-26, 1993.
- 9) 井尻裕二, 澤田淳, 内田雅大, 石黒勝彦, 坂本和彦: 割れ目ネットワークモデルを用いた岩盤中の核種移行解析, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム, pp. 201-210, 2001.

(2003. 9. 30受付)