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 1) — 解析の考え方 —

田中達也*1・渡辺邦夫*2・前川恵輔*3・中村直昭*4

Fracture Network Analysis Based on the Geologic Model of Channels Part 1: Ideas and Computer Code

Tatsuya TANAKA*1, Kunio WATANABE*2, Keisuke MAEKAWA*3 and Naoaki NAKAMURA*4

Key words : フラクチャーネットワークモデル fracture network model, 浸透流 ground water,
数値解析 numerical analysis, チャンネル channel

Abstract

It has been pointed out that ground water in a fractured rock mass is mainly flowing in a three dimensional network of channels. A technique for modeling this network on the basis of the geologic structures of the major fractures is proposed in this paper. It is assumed that the channel is defined as the open part and/or the part in which many small fractures are concentrated on these major fractures. Some geologic structures that can form those parts are also studied. A new computer code named "Don-Chan" was newly developed for analysis of the ground water flow and the tracer migration in the 3-D channel network. The largest advantage of this computer code is the short calculation time. Because the trial calculation using a 3-D channel network model can be rapidly carried out, this code is fit for the trial-and-error analysis used for improving the network model. The ground water flow around a tunnel in an idealized fractured rock was successfully calculated within a short time.

はじめに

不連続性岩盤の浸透流は、割れ目系を主たる透水経路とする流れと考えられる。それゆえ、近年では、対象岩

盤を均質多孔質媒体に置き換える解析手法に加え、フラクチャーネットワーク解析がよく行われている^{1)~4)}。この解析方法は、対象岩盤から主要な透水経路となる割れ目を取り出し、割れ目ネットワークを作り、地下水の浸透を解析するものである。この手法を用いて、対象岩盤の浸透流を評価するためには、まず、割れ目系の性質を知らなければならない。つまり、どういう性質の割れ目が透水経路となるのかを判断することが大事なのである。しかし、従来のフラクチャーネットワークモデルの多くは、割れ目系を単純化し、多くの単一割れ目の重ね

*1 ㈱大林組 Obayashi Corporation (前, 埼玉大学大学院)

*2 埼玉大学工学部 Faculty of Engineering, Saitama University

*3 動力炉・核燃料開発事業団 Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (P.N.C.)

*4 日鉄鉱業㈱ Nittetsu Mining Co. Ltd.

合わせとして捉えている。この時、単一割れ目は、長さ、幅、方向という形状のみで表現されるとされていた。このことは、割れ目は対象岩盤に多数かつ複雑に存在し、主要な透水経路となる割れ目の選別が難しいことによるものである。その点から言えば従来の解析モデルは、主要な割れ目が選別できないならばすべての割れ目を取り扱えばよい、という考えを基礎としていると言い換えることもできる。

しかしながら、最近の岩盤浸透流についての地質調査報告^{5),6)}では、透水経路となる割れ目と地質的な割れ目の特性の関係について、以下の2つの点が指摘されている。

1) 多くの割れ目の中で、地下水の主要な透水経路は、最も新しい変動で形成された割れ目、もしくは、その時再動 (re-activation) した古い割れ目である⁵⁾。

2) 割れ目形成時の岩盤の地下深度、温度の違いが、水みちとなる間隙系の形態に深く関係している⁶⁾。

これらのことは、割れ目の形成過程が、水みちとなる割れ目と大きく関わっていることを示している。割れ目の歴史的な形成過程を調べることを基礎として、現状の主要な透水経路となる割れ目を選別することの重要性が示されたのである。

こういった最近の研究を踏まえると、今後のフラクチャーネットワークモデルでは、単に割れ目を長さ、幅、方向という量ではなく、形成過程や割れ目の形態に関するより詳しい地質情報を基に作らなければならないということになる。今回提案するモデルは、これらの最近の研究を踏まえて著者らが開発しているものである^{7),8)}。このモデルでは、対象岩盤の主要な透水経路となる割れ目を選択し、その中の水みちを直接再現することを考えている。本論文は、(その1)として、その基本的な考えと手法を報告するものである。

1. 地質情報を基礎とするフラクチャーネットワークモデルの考え方

原位置の地質情報を直接取り入れるフラクチャーネットワークモデルの開発を考える時、大きな問題に直面する。それは、地質特性の評価の不確定性である。各々の割れ目について、それらの形成過程、あるいは連続性、連結性などの性質を地質的な原理・原則のみから描き出すことは不可能であり、原位置調査によって1つ1つ調べるしか方法はない。しかしながら、地下水流を解析すべき対象岩盤では、ボーリング孔、トンネル、あるいは調査横坑の壁面観測など、調査は限られている。また、地質的解釈は必ず1つに集約されるものではなく、

図-1 現場対話型解析のフローチャートと必須条件

ある程度の幅をもっていることが一般的である。つまり、確定的な割れ目モデルを地質情報からのみでは再現しづらいのである。こういった問題を踏まえつつ、解析モデルで原位置の岩盤を再現するためには、地質的な原理・原則と、行いえた調査の枠内で、現状の地下水流を推定してゆかなければならない。その1つの方法は、大まかであってもまず割れ目モデルを作り、水圧分布などを解析し、それと実測値を比較することで割れ目モデルの妥当性の検証を行い、両者が合致していなければ、割れ目モデルを実測値と合うように修正するものである。もちろん、この修正は地質的に見て妥当な修正でなければならない。この時、特によくわからない箇所での新たな試験や調査を提案することも必要である。つまり、解析結果と実測との比較に基づく修正の繰り返しにより、現実の岩盤を再現するモデルを構築することである。この方法が、現状では実際的と考える。この方法は、トライアル・アンド・エラーによる解析と言える。このような性格の解析をここでは現場対話型解析と名付ける。図-1に、解析の流れをフローチャートで示している。最終的な割れ目モデル作成までの解析過程を考えると、この現場対話型解析に用いる計算プログラムに重要なことは以下の3点である。まず、①1つのモデルについて計算が短時間で可能であること、つまり、地質調査と並行に原位置で作業モデルを作成し、それに基づいた解析が短時間で容易にできることである。つぎに、②修正されたモデルのデータの入力が容易であることが挙げられる。これは、地質評価を行う地質技術者がモデルを作成することを考慮しているものである。具体的に

は、走向、傾斜といった割れ目面情報などのみの入力が見望ましい。最後に、③モデルや解析結果の考えが視覚的に捉えやすいことである。これは、解析結果と実測値を比較し、モデルを修正する上で極めて重要である。

これらのことは、解析のために開発される数値計算プログラムに要求される性能に関する必要条件である。もちろん、プログラム作製の基礎となる理論式の妥当性も当然大事な点である。したがって、プログラムに要求される性能を考慮しつつ、妥当性の大きい基礎理論式を選別することがまず必要となる。この時、最近の岩盤浸透流の研究動向とそれを基礎とした考え方を見ておかなければならない。最近の岩盤浸透流研究の大きなテーマの1つは、チャンネル流れの概念である。この考えは、地下水は割れ目面上を一樣に流れるのではなく、割れ目面上のチャンネルと呼ばれる特定の水みちを主要な透水経路とするというものである^{9),10)}。従来のフラクチャーネットワークモデルでは、再現させた割れ目内の流れを一樣として、その中の流れを2次元有限要素法解析により行っていた^{11)~14)}。しかし、著者らは、むしろチャンネルの存在を積極的に取り入れる解析モデルの方が、より妥当性、発展性が高いと考えた。その理由は以下である。

1) 1枚の割れ目の間部にも、水の流れやすい部分があることが多くの実験や計測で明らかになっている^{9)~13)}。

2) 孔間透水試験^{14)~16)}を実岩盤に適用した結果から、実際の地下水には管路のような直線的に近い経路を通る流れが多く見られることが報告されている^{17)~19)}。

3) 実験から、地下水は割れ目交線など、破碎程度の大きく、小さな割れ目の集中した部分を主要な透水経路とすることが報告されている²⁰⁾。

これらのことから、チャンネルを管路のように考え、それが作る3次元管路網を用いた解析プログラムを指向し、開発したものがDon-Chan (Donen Channelling flow) モデルである。ここで問題となるのは、このモデルが、

前述した現場対話型モデルとして使いうるか否かである。この点については、後に解析結果例と合わせて示すことにする。次章に、まず、基本となるチャンネルと地質構造との関係について一般的な考えを示す。

2. 地質構造とチャンネルの設定

まず、どのような地質構造が透水性の大きい部分(チャンネル)を形成するかを考えなければならない。地下水は岩盤内の開いた空隙の中を流れる。つまり、水みちとなるためには、その部分の割れ目が開いていることが必要となる。その点から、現在の応力場で引っ張り(テンション)状態となる割れ目が集中している部分、また、局所的に大きく開口した部分が水みちとなると考えられる。ここで、前者は単に割れ目が集中している部分と言うこともできる。なぜなら、種々の方向の割れ目が存在する場合、1つの応力場では、いくつかの方向の割れ目にテンション力が働くことになるからである。

このような地質的原則を考えると、水みちとなる地質構造として、図-2に示すものが考えられる。図中、a)は割れ目の交線部、b)は割れ目の曲がり部、c)は主要割れ目と副次的割れ目の分岐部、d)は割れ目のステップ部、e)は割れ目端部である。もちろん、これ以外にも挙げることができるが、ここでは代表的と思われるものを示した。1つの岩盤で、こういった構造が水みちとなるのかは、その岩質などの特性に影響されると考えられる。つまり、対象岩盤を設定しなければ、このような構造は明示できないとも考えられる。こういった問題はあつものの、ここでは、これらの構造について考えてみる。

まず、割れ目の交線部である。一般に割れ目交線部には小割れ目が集中する。この傾向は、特に2つの割れ目が相互にスリップを繰り返した場合に顕著である。その考えを図-3に示す。図(a)、(b)は、2つの方向を持つ割れ目群が存在する岩盤を考え、各々の群の中の1つの割れ目が交互にスリップを繰り返すことを想定して

図-2 水みちを形成する可能性のある地質構造

a: 割れ目交線部, b: 割れ目の曲がり部 (図中の矢印は割れ目の局所的開口を作る変位), c: 割れ目の分岐部, d: ステップ構造, e: 割れ目端部

図-3 割れ目交線部に集中する小割れ目の形成

図-4 割れ目の曲がりの形成

- (a) 初生的な曲がり
- (b) 古い割れ目(破線)の一部を使った割れ目の形成
- (c) 割れ目面上の条線を作る凸凹

いる。この場合、図(c)に示すように交差する割れ目のスリップにより、多数の割れ目が集中する。このタイプの割れ目集中帯の具体的な例は、(その2)で示す。

割れ目の曲がり部については、図-4に示すように、さらに3つのパターンが考えられる。それぞれ、(a)岩盤の多少の強度の差によって形成されるような初生的な曲がり、(b)一部の古い割れ目が再動したことによる曲がり、(c)割れ目の条線のように小スケールの、一方向に伸びた凹凸によるものである。これらの曲がり部では、せん断変形によって割れ目開口部や小さい割れ目の集中部が形成される。

図-5 スウェーデン、ハードロック・ラボラトリーのトンネルに見られた割れ目

主要割れ目と副次的割れ目の分岐部についても、割れ目の交線部のような繰り返しの変動によって分岐点移動し、分岐点付近に小割れ目が集中していくことが考えられる。

割れ目のステップ部、端部の例として、スウェーデン、エスボ島のハード・ロック・ラボラトリーに見られた構造を示す。図-5は、このラボラトリーの地下に建設されている六角形のトンネルであり、図中の割れ目の端点がA地点に見られた。B地点ではトンネル方向が割れ目の走向に近く、連続して割れ目が観測できる。これらの地点では、割れ目から大量の湧水が認められた。図-6(a)はA地点のトンネル展開図上に割れ目をスケッチしたものであり、同図中(b)は、その模式的な平面図表示である。この図は、側壁で観測された割れ目の方向や、天井部の割れ目の連続性から推定して描いたものである。図(b)に示すように、この地点では割れ目が枝分かれしながら消滅してゆく構造(スプレィ・アウト構造)を持っていると推定できる。図-7(a)は、B地点の割れ目のスケッチである。小割れ目が3箇所に集中していることがわかる。(b)は小割れ目の中で相対的に顕著なものを取り出した図である。これらの小割れ目の集中する構造は、(c)のようにステップ構造から発達したものと解釈しうる。

Don-Chan モデルにより、チャンネルネットワークを作るためには、上述したような水みちとなる地質構造を調査し、再現しなければならない。しかしながら、このような地質構造は、対象となる岩質により異なる。その具体的な取扱いについては、釜石鉱山KD90坑道を例

図-6 図-5中、A地点に見られた割れ目端部
(a) トンネル展開図
(b) 割れ目のスプレィ・アウト状況の模式図

図-7 図-5中、B地点に見られた割れ目形態
(a) スケッチ
(b) 顕著な割れ目を取りだした図
(c) 割れ目集中部形成のモデル

図-8 (a) 3軸応力状態下の共役割れ目の模式図
(b) 左落ち割れ目上の構造
(c) チャンネルの設定

に、(その2)で報告する。ここでは、1つの単純な例として、初期応力により形成された共役割れ目について、Don-Chan モデルで再現するチャンネルの設定方法を考えてみる。ここでは、岩盤周辺の応力場が長期にわたってそれほど変化していないことを仮定しておく。

図-8(a)に上下方向を主応力とする3軸応力状態下の共役割れ目の模式図を示す。左落ちの割れ目を取り出したものが同図(b)である。主要な割れ目となる共役割れ目から派生する割れ目やステップ構造を模式的に示している。また、割れ目上に示す破線は割れ目断面で観測される条線を示している。これは、割れ目形成時のずれの方向を表している。この時、水みちと考えられるのは、前述の地質構造の検討からすれば、まず主要割れ目の交線部である。この共役割れ目では、図(c)中Caの部分である。このチャンネルはモデルで入力した割れ目の交線部の管路で再現する。つぎに、派生割れ目と主要割れ目の交線部やステップ構造である。図中Cb, Ccで示している。これらを、割れ面上の1方向の管路で再現する。つぎに、割れ目形成時のずれの方向(条線)の水みちである。これを2方向目の管路で再現するのである。この単純なモデルであれば、割れ目交線やステップによるチャンネルと条線のチャンネルは直交することになる。しかし、実際の割れ目系は、例えば前述した新しい割れ目と古い割れ目との相互作用による曲がりなど、かなり複雑である。それらは当然、対象岩盤の地質調査に基づき、単純化を行わねばならない。ともかく、このように、Don-Chan モデルでは岩盤内のチャンネルを、地質情報の把握を基礎として、管路により再現する

のである。これがモデルの基本的な考えである。

3. Don-Chan モデル

割れ目面上には、前述したように、多くの水みちとなると考えられる地質構造が発達している。しかし、現状のDon-Chan モデルでは、それらが、割れ目面上に2方向あり、各チャンネルは等間隔と仮定した上で、解析プログラムを作製している。その方法を述べる。まず、対象岩盤の主要な割れ目は、それぞれの走向、傾斜、位置の調査データから、解析領域前面の中心を3軸座標の原点とする平面方程式により再現される。そして、それぞれ割れ目面上に等間隔で割れ目の走向方向から一定角(θ_1)に傾くチャンネルを発生させる。この時、それぞれのチャンネルについて直線方程式を作る。同様に、割れ目上に異なる傾き(θ_2)で第2の方向のチャンネルも直線方程式で表現する。これらは、前章で述べた簡単な例では、前者が割れ目分岐やステップ構造であり、後者が条線である。また、割れ目面の交線もチャンネルとして、直線方程式を求める。現在のところ、この3種類のチャンネルを直線方程式として取り扱う。割れ目面上に設定される3次元管路網の模式図を図-9に示す。そして、これらの直線の交点を求め、自動的に交点番号をとり、それぞれチャンネル上の隣合う交点と交点間距離を求めている。管路網の作製手順から、現段階では割れ目上に2方向としているチャンネル数を増加することや、等しいとしているチャンネル間隔の設定など、プログラム上の発展は容易に可能であることがわかる。しかしながら、これは解析対象岩盤の地質調査結果を基

図-9 3次元管路網作製手順

図-10 簡単な管路モデル

に、それぞれの地域の岩盤について改良すればよいと考えている。

3次元管路網が作製されれば、解析は容易である。図-10に、簡単な管路モデルを示す。管路内は飽和状態にあり、ダルシー則が満足されているとすると、交点 S_{mj} から交点 S_m に流入する流量 Q_{mj} は次式で表される。

$$Q_{mj} = A_{mj} \cdot K_{mj} \frac{h_{mj} - h_m}{\Delta L_{mj}} \quad (1)$$

ここで、 K_{mj} は交点 S_{mj} と交点 S_m を結ぶ管路の透水係数、 A_{mj} は管路の断面積、 ΔL_{mj} はその管路の長さ、 h_{mj} 、 h_m はそれぞれ交点の水頭値である。なお、添字 j は、交点 S_m に隣合う交点数 N について $j=1 \sim N$ を意味する。また、管路の交点では、その交点に流入出する水量について連続の関係が満たされているとすると次式

$$\sum_{j=0}^N Q_{mj} + q_m = 0 \quad (2)$$

が成り立つ。この式において、 q_m はその交点に外部から流入する量である。具体的には、その交点位置で注入試験を行った場合の注入量などがそれに当る。管路交点におけるエネルギー損失は、流れが遅いこともあり考えていない。(2)式に、(1)式を代入することにより、次式に示す各交点の浸透流方程式が得られる。

図-11 (a) ボーリング孔周辺のチャンネルの取扱い
(b) 設定注水量 (q_{i1} , q_{i2}) と水頭値 (h_{i1} , h_{i2})

$$\sum_{j=1}^N \left\{ \frac{A_{mj} \cdot K_{mj}}{\Delta L_{mj}} h_{mj} \right\} - h_m \sum_{j=1}^N \frac{A_{mj} \cdot K_{mj}}{\Delta L_{mj}} + q_m = 0 \quad (3)$$

解析領域内のすべての管路交点について(3)式を立て、境界条件を導入し、連立方程式を解くことにより、各交点の水頭値が求められる。現状のプログラムでは、各管路の透水係数 K_{mj} は、各割れ目上の2つの管路方向についてそれぞれ与えることができるように考慮されている。つまり、1つ1つの割れ目についても透水異方性を表現することができる。また、割れ目の交線を再現する管路については、交差する割れ目上の管路の最も大きい透水係数を選択することとしている。

Don-Chan モデルでは、領域内の任意の位置にボーリング孔を設定し、区間設定により注入孔、観測孔の導入が可能である。つまり、クロスホール試験などのシミュレートも可能である。ただし、ボーリング孔がどれかのチャンネルと交差する確率は小さいことから、図-11(a)に示すように注入孔、観測孔とも設定区間を横切る割れ目について、ボーリング孔と割れ目面の交点から一定半径 R_m 以内に存在するチャンネル交点で実際の注入点、観測点を近似させている。同図(b)に、ボーリング孔の設定区間に交差する割れ目を正面から見た模式図を示す。注入孔では注入量を導入し、各観測孔では水頭値を解析する。ある一定半径以内に存在するチャンネルの総数を N_c 、チャンネル i の両端の交点の水頭値を h_{i1} ,

図-12 パーティクル・トラッキング法による移動管路選択法

h_{i2} とすると観測区間の水頭値 h は次式で近似しようと仮定した。

$$h = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} (W_{i1} h_{i1} + W_{i2} h_{i2})$$

ここで、 W_{i1} は重みに相当し、 $W_{i1} = l_{i2} / (l_{i1} + l_{i2})$ である。 l_{i1} 、 l_{i2} は観測孔位置とチャンネル交点との距離である。注入区間からの一定注入量が Q のとき、一定半径内に存在する i チャンネルへの注入量を次式で与えた。

$$q_{i1} = \frac{Q}{N_c} W_{i1}$$

また、トレーサー移動解析をパーティクル・トラッキング法を用いて行っている。これは、トレーサーを多くの玉のようなパーティクルの集まりと仮定し、各々のパーティクルの流下する軌道の集合を移動経路と考えるものである。実際の計算では、注入区間付近のチャンネル交点を注入点とし、パーティクルを3次元チャンネルネットワークの流速に基づき移動させる。移動した結果、下流側のチャンネル交点にぶつかったパーティクルは、モンテカルロ法により各チャンネルの流量に基づき、次に移動する経路を選択する。図-12にパーティクル・トラッキング法による移動経路選択法の模式図を示す。図中矢印の出ている地点は3つのチャンネルの交点である。この時、パーティクルの流れうる経路としては、矢印で示された3通りである。解析では、これら3つのチャンネルの流量 (Q_1 , Q_2 , Q_3) 比から、それぞれの経路の選択の容易さを設定する。そして、モンテカルロ法により選択するチャンネルを決定するのであ

る。この作業を解析領域面または設定トンネルにパーティクルが到着するまでチャンネル交点毎に繰り返し、トレーサーの1つの移動経路を再現するのである。注入地点から、500個・1,000個といったパーティクルを投入し、各々の移動を解析することで、注入されたトレーサーの広がり再現するのである。解析では、注入区間から求めたチャンネル交点1つについてのトラッキング回数を設定する。また、定常計算ではあるが流速に基づくトレーサーの移動時間も、各経路について求めることができる。つまり、トレーサー試験結果であるブレイクスルーカーブ (濃度の経時変化曲線) との比較検討が可能である。

ここで、このモデルに導入する透水係数やチャンネルの断面積 [式(1)の k_{mj} や A_{mj}] の推定について考えておく必要がある。もちろん、チャンネルと考えている割れ目の交線部の透水係数を直接測定すればよいが、困難であろう。現実的には、一般によく行われている注水型透水試験から評価しておかねばならない。この時、もし、注水試験が再現されたモデルの交点で行われていれば、注水圧力をモデルのその交点に与え、注水量を再現するよう、逆解析によって求めうる。しかし、このような場合は、一般的には存在し難い。ただ、透水試験は一般に、顕著な割れ目を対象にして行われることが多い。そのため、割れ目周辺で多数の試験が行われていれば、一定注水圧で最大の注水量を示した試験は、便宜的に交点で行われたものと近似できると考え、このデータを基に逆解析する。ただし、この場合、各チャンネルの透水性を一定に仮定せざるをえない。また、チャンネル断面積は、実際の割れ目集中部の面積から平均的に求める。このように、透水係数などの推定にはまだ問題もある。しかし、このように求めた値の妥当性は、トレーサー試験の解析によって検証することもできる。ただ、チャンネル透水係数のより正確な推定については、今後の課題である。

以上述べたように、Don-Chan モデルを用いたトライアル・アンド・エラー解析では、再現する割れ目モデルの完成度は、原位置試験や必要な箇所での詳細な地質調査の進行と並行して高まる。図-13に原位置調査の進行と岩盤のモデル化の完成過程を示す。図に示すように、モデル化過程としては大きく3段階に分けられる。1次・2次モデルは割れ目系の水みちを正確に捉える過程であり、3次モデルでは原位置の割れ目系の定量的な評価を含めることを目標としている。また、図-14にDon-Chan モデルを用いた調査、解析のフローチャートを示す。図(a)から(e)は、トンネル壁面やボーリング孔

図-13 岩盤モデルの完成過程

図-15 解析領域とトレーサー注入地点

図-14 Don-Chan モデルを用いた調査、解析のフローチャート

図-16 解析結果の出力例

- (a) 設定した割れ目図。割れ目数34枚
- (b) チャンネル・ネットワーク図
- (c) 投入したトレーサーの移動経路
- (d) トンネル展開図上の湧水量とトレーサー分布
- (e) 計算されたブレイクスルーカーブ

の観測から主要な割れ目を取り出し、先述したような地質的な考察から対象岩盤のチャンネルを再現する過程を示している。そして、図(f)では、解析結果と試験結果との比較・検討により、新たな調査の提案と、比較・検討結果に基づいてモデルの修正を行うトライアル・アンド・エラーの過程を示している。

つぎに、Don-Chan モデルの解析結果例を示し、Don-Chan モデルの解析プログラムとしての性能を、その問題点を含めて示す。

4. Don-Chan モデルによる解析結果例

今回の解析では1辺80 mの3次元解析領域を仮定し、その中心部に図-15に示すようなトンネルを設定した。トンネルの大きさは縦3 m、横4 m、長さ60 mとした。また、異なる走向・傾斜をもつ2種類の割れ目を等間隔に34枚再現した。トンネル上方20 m、西側に20 mの位置にトンネルと平行なボーリング孔を設定し、トレーサー注入区間はトンネル入り口から40から43 mとした。図-15に解析領域とトレーサー注入地点を示す。また、トラッキング回数は500回とし、注入交点は設定区間から半径2.5 mのものとした。境界条件はトンネル入り口面を流入出0境界とし、その他はトンネル中心を基準とした一定水頭100 mとした。各割れ目上のチャンネルは透水係数 1.0×10^{-5} m/s、断面積 0.06 m^2 、間隔5 mで一定とした。ここで、透水係数、断面積は(その2)で述べる釜石鉱山での測定例を参考に設定した。

図-16(a)~(e)にDon-Chan モデルによる解析結果例を示す。図(a)はDon-Chan モデルで再現した割れ目である。領域中心にトンネル、2種類の割れ目が再現されている。図(b)はこれらの割れ目上に再現したチャンネルネットワークである。チャンネル方向はすべての割れ目について、走向方向から0度・90度と一定にした。チャンネル交点の総数は約17,000点となった。図(c)は注入区間からのトレーサーの広がりを3次元的に表している。注入区間から求めた注入地点は2点となり、トラッキング総数は1,000回となった。このような3次元的な移動経路の表示は、入力した割れ目の中でどの割れ目が重要となるかを指摘し、今後の原位置試験の提案などの重要な資料となる。図(d)は坑道への湧水量、トレーサーの分布を示している。トンネル展開図上に交差する割れ目が示されている。右上に伸びる直線の表示地点が湧水、トレーサー到達地点、その長さが湧水量、トレーサーの到達回数を示している。図(e)がトンネルへのトレーサー到達時間と到達回数の関係を示している。

これらの解析結果はすべてワーク・ステーション(Sun SP/2)で解析・出力したものであり、その計算時間は入力から図化まで約1.5時間となる。Don-Chan モデルの1つ目の長所は、この計算の速さである。もちろん、どの程度の時間が現場対話型解析に望ましいか問題もあるが、17,000もの計算点(交点)に対して1.5時間であれば、現場対話できると考えている。つぎに、調査と解析が一体となったトライアル・アンド・エラーによるモデル構築である。さらに、これは計算の速さとも関連してくることであるが、このモデルは管路網を基礎としているため、要素分割などの前処理の時間を大幅に減らすことができることである。また、解析結果例からもわかるように、仮定した割れ目面、チャンネル、トレーサーの動きなどを3次元的に図化して、現場技術者にも結果が極めてわかりやすいようにしていることである。これらの点は、現場対話型の解析を行う上で極めて大きな長所である。もちろん、本論文中で述べたように、透水係数などの推定や、実岩盤でチャンネルと考えられる地質構造が取り出しうるかなどの問題が残っている。しかしながら、現場対話という方向を見る限り、本解析手法は実用性があると言える。今後、原位置試験への適用により、これらの問題は克服できると考えている。これらの点については、(その2)で、釜石鉱山KD90坑道で行われたトレーサー試験の解析を通して、検討していきたい。

結 論

地質情報を基礎とする現場対話型モデルとして、Don-Chan モデルを開発し、解析例を示した。研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 地質現象の不確定性や、調査の限界を推定・評価する現場対話型解析の考えを提案した。
- 2) 割れ目内の流れをチャンネルとして捉え、3次元管路網により解析するモデルを開発した。
- 3) 開発したモデルによれば、計算時間、前処理時間が少なく、現場対話型解析が可能である。
- 4) 地質情報を基礎として解析することを考えて、チャンネルとなる構造を提案した。
- 5) チャンネルに与える透水性などの水理パラメータの評価の方向を示した。

今後のフラクチャーネットワークモデルでは、地下水流れに影響を与えると考えられる地質情報があれば、パラメータとして積極的に導入することが重要である。そのため、このような現場対話型モデルを用いること

によって、解析モデルの開発と地質調査手法の確立を同時並行的に進めてゆくことが必要であると考ええる。

参 考 文 献

- 1) LONG, J. C. S., REMER, J. S., WILSON C. R. and WITHERSPOON P. A. (1982): Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resour. Res.*, Vol. 18, No. 3, pp. 645 - 658.
- 2) 水戸義忠, 菊池宏吉等(1993): 節理性岩盤における3次元浸透流システムの提案, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 496 - 500.
- 3) 澤田 淳, 内田雅大, 清宮和彦(1993): 亀裂ネットワークモデルを用いた等価多孔媒体近似に関する研究, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 516 - 520.
- 4) OLSSON, O. (1992): Site characterization and validation - Final Report, TR92 - 22, Stripa project, pp. 1 - 364.
- 5) MUNIER, R. (1993): Four dimensional analysis of fracture at the Åspö hard rock laboratory, *Engineering Geology*, Vol. 33, pp. 159 - 175.
- 6) BOSSART, P., MAZUREC, M. (1991): Structural geology and water flow paths in the migration shear zone, TR91 - 12, NAGRA, pp. 1 - 55.
- 7) 藍沢裕幸, 渡辺邦夫, 長 久(1990): 水みちを考慮した実際の空洞における3次元岩盤浸透流解析, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 386 - 390.
- 8) 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 中村直昭, 岡田敏治(1993): Don-Chan モデルによるトンネル湧水と岩盤内トレーサー移動の解析, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 521 - 525.
- 9) TSANG, Y. W., TSANG, C. F. (1987): Channel model of flow through fractures medium. *Water Resour. Res.*, Vol. 23, No. 3, pp. 467 - 469.
- 10) HAKAMI, E. (1989): Water flow in single rock joint, TR89 - 08, Stripa project, pp. 1 - 99.
- 11) WATANABE, K. (1991): Evaporation measurement in the validation drift - Part 3, TR91 - 36, Stripa project, pp. 1 - 32.
- 12) WATANABE, K., SAKUMA, H., NOGUCHI, Y. (1991): Transient change and spatial variability of the evaporation on the tunnel wall, *Proc. Congress, ISRM*, pp. 647 - 650.
- 13) 水戸義忠, 菊池宏吉等(1990): 実岩盤の節理内流れに関する実験と考察, その2, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 176 - 180.
- 14) HSIEH, P. A., NEUMAN, S. P., STILES, G. K., SIMPSON, E. S. (1985): Field determination of the three dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media 1. Theory, *Water Resour. Res.*, Vol. 21, No. 11, pp. 1655 - 1676.
- 15) HSIEH, P. A., NEUMAN, S. P., STILES, G. K., SIMPSON, E. S. (1985): Field determination of the three dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media 2. methodology and application to fractured rocks, *Water Resour. Res.*, Vol. 21, No. 11, pp. 1655 - 1676.
- 16) NOY, D., BARKER, J., BLACK, J., HOLMES, D. (1988): Crossholes investigations-implementation and fractional dimension interpretation of sinusoidal tests, TR88 - 01, Stripa project, pp. 1 - 62.
- 17) BLACK, J., OLSSON, O., GALE, J., HOLMES, D. (1990): Site characterization and validation-stage 4 - preliminary assessment and detail predictions, TR91 - 08, Stripa project, pp. 51 - 163.
- 18) 長 久, 野口義文, 穂刈利之等(1990): 孔間透水試験による岩盤透水係数の3次元異方性評価, 第8回岩の力学シンポジウム講演論文集, pp. 447 - 452.
- 19) BALL, J. K., BLACK, J., BRIGHTMAN, M., DOE, T. (1991): Large scale crosshole testing, TR91 - 17, Stripa project, pp. 1 - 97.
- 20) 下茂道人, 飯星 茂(1993): 複数亀裂を有する岩盤ブロック内の浸透挙動に関する室内実験, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp. 491 - 495.

(1994年3月9日受付, 1994年8月15日受理)