

# 亀裂ネットワークモデルを用いた浸透流逆解析に関する基礎的研究

## A FUNDAMENTAL STUDY ON THE INVERSION ANALYSIS OF SEEPAGE FLOW USING CHANNEL NETWORK MODEL

杉村淑人\*・松田育子\*\*・富森叡\*\*・渡辺邦夫\*\*\*

Yokito SUGIMURA, Ikuko MATSUDA, Satoshi TOMIMORI, Kunio WATANABE

A numerical inversion analysis method named Hydropulse Tomography (HP) to estimate permeability distribution in 3-D rock mass from hydropulse data has been developed and applied to the porous medium. However, it is difficult to apply this method to a fractured rock mass in which a large amount of groundwater flows through several selected paths called channels.

The authors have suggested the application of channel network model named “DonChan” based on the hydrogeologic structures of the major fractures. This paper presents development of a numerical formulation for “Don-Chan Model” using Hydropulse data. The validity of this numerical inversion is now being estimated through several numerical case studies in 3-D.

### 1. はじめに

近年良好なダムサイトが枯渇し遮水対策上課題の多い基礎岩盤が顕在化しており、一方、エネルギーの地下備蓄や放射性廃棄物の地層処分など多様な地下空間の利用が進む中で、岩盤の透水性の空間分布を精度よく推定できる技術開発が重要となっている。この分野の研究としては、各種のジオトモグラフィーによる方法<sup>1)</sup>、ボーリング孔の透水試験から得られた透水係数から地質統計手法の一つであるクリッキング手法を用いる方法<sup>2)</sup>がある。弾性波、比抵抗、レーダーなどを用いる前者の手法は、近年3次元解析も行われるようになったものの、不均質な岩盤の透水係数分布については間接的な情報を与えるレベルに留まっており、現状では限界がある。後者の手法は一種の補間法で、岩盤中の地下水流れの理論的裏付けを欠く手法であるところに問題があると考えられる。

一方、前二者とは異なり地下水流の基礎理論を下敷きとして、透水係数の観測値を用いその空間分布を逆解析により同定する手法が近年開発されている。これらの研究としては、統計的手法を導入した方法として奥野ら<sup>3)</sup>によるベイズ理論を用いた拡張カルマンフィルターによる方法や、増本<sup>4)</sup>らが開発した複数孔井試験の一つで、流体の圧入・停止に伴う圧力応答データから、孔周辺領域の透水係数分布を逆解析するハイドロパルストモグラフィーがある。

---

\* 正会員 水資源開発公団試験研究所

\*\* 応用地質（株）川本地盤工学研究所

\*\*\* 埼玉大学工学部

割れ目系岩盤の地下水の流れは、特定の高透水水みち（チャンネル）に支配されることが指摘されている。筆者らは、割れ目の規則性を取り出すことによりこの水みちの把握と評価を行うことを基本とする亀裂ネットワークモデルとしての Don-Chan モデル（Donen Channeling Flow Model）を提案している。<sup>5）、6）</sup> 前述の2つの逆解析の手法は、現在のところ解析の部分では対象岩盤を多孔質媒体として取り扱いモデル化を行っているため、対象岩盤が卓越した水みちの発達した岩盤である場合その適用が困難である。一方、すべての浸透流解析モデルが持つ共通の課題ではあるが、Don-Chan モデルにおいても水理パラメータの決定が困難な側面を持っている。

このような背景から、筆者らは Don-Chan モデルを用いた浸透流逆解析コードに関する基礎的検討を行っている。ここでは、Don-Chan モデルのコンセプトと逆解析を導入する着目点を述べ、増本らが提案している非線形最小自乗法に最適制御理論を適用する方法による Don-Chan モデルの定式化を報告する。

## 2. Don-Chan モデルのコンセプトと逆解析

Don-Chan モデルでは、水みち構造調査に基づき取り出された割れ目系（主要割れ目、割れ目交差部、スプレー、ステップなど）を水みちとして管路でモデル化し、この管路網が流れの場を構成する。割れ目交差部、スプレー、ステップがより大きな水みちとなることが、スイス<sup>6）</sup>、スウェーデン<sup>7）</sup>、釜石鉱山<sup>7）</sup>の割れ目系に関する研究で明らかにされている。

図-1(a)は、4面の割れ目系とステップ構造を示すもので、図-1(b)は大きな水みちを成すステップと割れ目の交線を示す。割れ目面の水みちとして通常は小さな管路網を図-1(c)に示すように設定する。これらの管路網が全体系に組み込まれて、管路網系が構築される。

本解析手法は、流体は非圧縮性で、運動方程式としてダルシー則が成立することを仮定し、連続の方程式を併せて境界条件の下に場の流れを解くもので、解析コードは非定常まで拡張されている。<sup>8）</sup>

本解析手法により非定常問題を解く場合に必要のパラメータは、各(b)管路の透水係数（ $k$ ）、管路断面積（ $A$ ）、比貯留係数（ $S_s$ ）等であるが、流れ場を同定する上で最も困難な課題は管路の透水係数の決定である。管路の透水係数の設定は、これまで原位置の透水試験結果からマニュアルマッチングにより導入している。Don-Chan モデルは計算速度が速く、モデルの構築が容易な特徴を持つが、マニュアルマッチングにより透水係数を決定する作業は現状では困難を伴うことから、多点発信によるクロスホールテストのハイドロパルス応答データの自動ヒストリーマッチングによる逆解析手法の開発を行った。

逆問題の定式化を行う上で重要な要素として、未知パラメータの設定がある。膨大な数にのぼる個々の管路の透水係数を逆解析で求める(c)ことは現実的でない。ここでは、既往の水みちの構造と特性に関する研究成果を踏まえて、主要な水みちを構成すると考えられる各割れ目の交線、各ステップ構造（一本の管路としてモデル化）、各スプレー構造（一本の管路としてモデル化）、各割れ目毎に透水係数を求めるものとした。

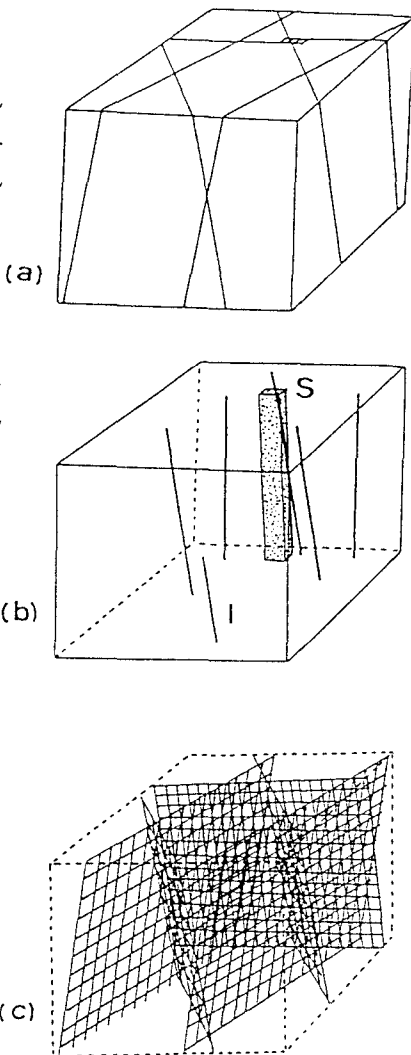


図-1 Don-Chan モデルのコンセプト

### 3. Don-Chan モデルの逆解析の定式化

Don-Chan モデルのような亀裂ネットワークモデルにおいて、ハイドロパルストモグラフィーの浸透流逆解析法を適用する場合に、適切な未知パラメータの設定と効率的な数値逆解析手法の適用が必要となる。Don-Chan モデルにおいて透水係数を与える最小単位は、個々のポイントを結ぶ管路 1 本となるが、ここでは、逆解析における同一材料のグループとして、前章で述べたように、個々の割れ目内に設定される管路の透水係数を一定として取り扱う。また、割れ目と割れ目の交線に関しては、独立に取り扱い、同一交線内の管路の透水係数を一定として逆解析を実施する。

Don-Chan モデルにおける水位計算の基礎方程式は、以下の通りとなる。

$$\sum_{j=1}^{N_m} \left\{ T_{mj} \frac{h_{mj} - h_m}{\Delta L_{mj}} \right\} + Q_m = S_{fm} \frac{h_m - h_m^{time-1}}{\Delta time} \quad (1)$$

ここで、 $N_m$  は交点  $m$  に隣接する交点の数、 $h_m$  は交点  $m$  における水頭値、 $h_{mj}$  は交点  $m$  に隣接する  $j$  番目の交点における水頭値である。また、 $T_{mj}$  は交点  $h_m$  と  $h_{mj}$  を結ぶ管路の透水量係数、 $Q_m$  は交点  $m$  に外部から流入する量、 $S_{fm}$  は交点  $m$  が受け持つ貯留量、 $\Delta time$  は計算上の時間ステップ間隔である。また、添字  $time-1$  は、前の時間ステップにおける値を示す。

逆解析では、以上の解析によって求められる圧力観測点における水頭値から決定される以下の評価関数を最小にするように透水係数分布を求める。

$$J = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_p} \left[ \left\{ W_j^n \left( h_j^n - h_{obs,j}^n \right) \right\}^2 \Delta t^n \right] \quad (2)$$

ここで、 $N_t$ : 観測時間ステップ数、 $N_p$ : 観測点数、 $W_j^n$ : 各点、各時間での重み、 $h_j^n$ : 観測点における計算水頭値、 $h_{obs,j}^n$ : 観測点における観測水頭値、 $\Delta t$ : 時間間隔である。

一般的に、透水性の逆解析を非線形最小 2 乗法で行う場合、解の収束性の問題とともに、実用上では(2)式で表される評価関数の未知パラメータ（透水係数）による勾配を計算するために、多大の計算時間を要する。そこで、筆者らは、増本<sup>4)</sup>の方法を、Don-Chan モデルに適用し、効率的な逆解析手法の提案を行う。増本<sup>4)</sup>の手法は、非線形最小 2 乗法として、準 Newton 法を用い、逆解析の収束性を高めるとともに、評価関数の微分値を求める方法として、最適制御理論を導入し、逆解析の反復 1 ステップあたりの順解析実施回数を最小とすることで、実用的な計算時間で逆解析が可能となっている。Don-Chan モデルにおける逆解析の流れを図-2 に示す。

逆解析の定式化のうち、準 Newton 法に関しては増本<sup>4)</sup>の方法と同様であるため、ここでは詳細な記述は割

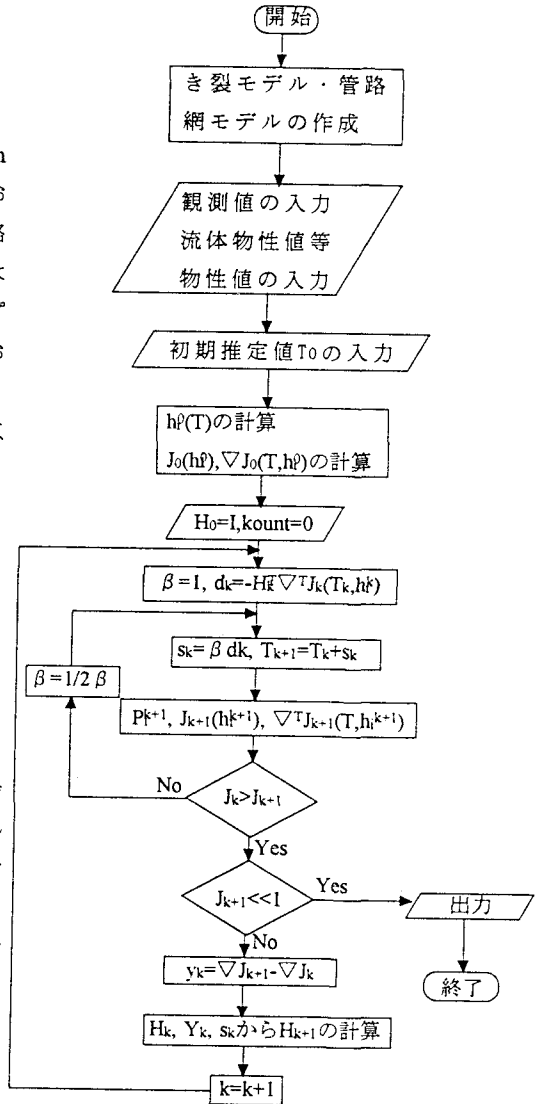


図-2 逆解析手法のフローチャート

受し、最適制御理論による Don-Chan モデルにおける評価関数の微分値計算の定式化について記述する。

最適制御理論における評価関数の微分値の計算は、随伴関数ベクトルを導入し、以下のような手順で実施している。

評価関数  $J$  を、以下のように表現する。

$$J = \int f_o(t, h(t), T) dt \quad (3)$$

ここで、(1) 式より、各点における水頭値の時間微分は次式のように表すことができる。

$$\frac{h_m^n - h_m^{n-1}}{\Delta t^n} = f_m^n(t, h^n(t), T) \quad (4)$$

このとき、最適制御理論により、(5)、(6) 式の連立方程式を満たす乗数ベクトル  $q^n$  を導入すると、(7) 式のように、評価関数の透水量係数による微分値を表すことができる。

$$\frac{q_m^n - q_m^{n-1}}{\Delta t^n} = - \sum_{j=1}^N \left( q_j^{n-1} \frac{\partial f_j^n}{\partial h_m^n} \right) + \frac{\partial f_o^n}{\partial h_m^n} \quad (5)$$

$$q_m^{N_t} = 0 \quad (6) \quad (\text{終端条件})$$

ただし、 $N$  は全交点の数である。

$$\frac{\partial J}{\partial T_{mj}} = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_m} \left\{ -q_i^{n-1} \frac{\partial f_i^n(h^n, T)}{\partial T_{mj}} \Delta t^n \right\} \quad (7)$$

(7) 式により透水量係数を更新しつつ、圧力応答のマッチングを行い、最も妥当な透水係数分布を求める。

各式の具体的な形を見てみる。まず (7) 式のかっこ内の微分計算は (1) 式より (8) 式のように書き表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i^n}{\partial T_{mj}} &= \frac{\partial}{\partial T_{mj}} \left[ \frac{1}{s_{ji}} \left\{ \sum_{k=1}^{N_i} \left( T_{ik} \frac{h_{ik}^n - h_i^n}{\Delta L_{ik}} \right) + Q_i \right\} \right] \\ &= \begin{cases} \frac{1}{s_{ji}} \sum_{k=1}^{N_i} \frac{h_{ik}^n - h_i^n}{\Delta L_{ik}} & (T_{ik} = T_{mj}) \\ 0 & (T_{ik} \neq T_{mj}) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

次に乗数ベクトルを求める。(5) の右辺第一項は、(1) 式より次式で書き表すことができる。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N \left( q_j^{n-1} \frac{\partial f_j^n}{\partial h_m^n} \right) &= \sum_{j=1}^N \left[ q_j^{n-1} \cdot \frac{\partial}{\partial h_m^n} \left\{ \sum_{k=1}^{N_j} \left( T_{jk} \frac{h_{jk}^n - h_j^n}{\Delta L_{jk}} \right) \right\} \right] \\ &= \sum_{j=1}^N \left\{ q_j^{n-1} \sum_{k=1}^{N_j} \frac{T_{jk}}{\Delta L_{jk}} \cdot \frac{\partial}{\partial h_m^n} (h_{jk}^n - h_j^n) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、

$$\frac{\partial}{\partial h_i^n} (h_{jk}^n - h_j^n) = \begin{cases} -1 & (j = i) \\ 1 & (jk = i) \\ 0 & (j \neq i, jk \neq i) \end{cases} \quad (10)$$

であるから、

$$\frac{\partial f_j}{\partial h_i''} = \begin{cases} -\frac{1}{s_{jj}} \sum_{k=1}^{N_j} \frac{T_{jk}}{\Delta L_{jk}} \cdots & (\text{j 番目の点が i 番目の点のとき}) \\ \frac{1}{s_{jj}} \cdot \frac{T_{jk}}{\Delta L_{jk}} \cdots & (\text{j 番目の点が i 番目の点と直接繋がっているとき}) \\ 0 & \cdots (\text{j 番目の点が i 番目の点と直接繋がっていないとき}) \end{cases} \quad (11)$$

(11) 式を (5) 式に代入し、(5)・(6) 式の連立方程式を解いて乗数ベクトルを求める。求めた乗数ベクトルと (8) 式を (7) 式に代入して評価関数の勾配を計算する。

#### 4. まとめ

亀裂ネットワークモデルとしての Don-Chan モデルにおいて、非線形最小自乗法に最適制御理論を適用できる形に定式化した。これにより、従来のマニュアルマッチングでなく、自動ヒストリーマッチングが行えるようになる。Don-Chan モデルは、地質情報からのモデルの構築が容易であり、計算が速いという長所がある。これは透水係数を未知として逆解析する場合にも受け継がれるものである。また、差分法などに比べた場合、地質的な情報を容易に有効利用できるという利点があり、割れ目系の岩盤などにおいて透水係数が極端に変化する場合にも対応できる。

今後の課題としては、モデルを構築して数値実験による検証を行い、将来的には原位置試験のデータに適用し、実際に透水係数分布を推定することが挙げられる。

#### 参考文献

- 1) 鈴木浩一、藤光康宏他 (1922) : 弾性波・比抵抗ジオトモグラフィーの地質分野への適用、電力中央研究所報告、U92028
- 2) I.Clark: Practical Geostatistics, Applied Science Publisher, 1982
- 3) 奥野哲夫、鈴木誠 : 不圧地下水を対象とした拡張カルマンフィルタによる透水係数の空間分布推定法、土木学会論文集 No.469/Ⅲ-23. 1993
- 4) 増本清 : ハイドロパルストモグラフィー技術の開発 (1995.3) 、東京大学博士論文
- 5) Munier, R : Four dimensional analysis of fracture at Aspo hard rock laboratory, engineering geology, Vol.33, 1993
- 6) Bossart, P., Mazurec, M. : Structural geology and water flow paths in the migration shear zone, TR91-12, NAGRA, 1991
- 7) 渡辺邦夫、田中達也、内田雅大他 : 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) 、応用地質、Vol.35、1994
- 8) 田中達也、三上哲司、永久和正、渡辺邦夫 : Don-Chan モデルを用いた非定常浸透流解析の試み、土木学会年講、第3部、1995