

水みちネットワークモデル を用いた岩盤浸透流逆解析

杉村淑人¹・松田育子²・富森叡³・増本清⁴・渡辺邦夫⁵

¹正会員 工博 水資源開発公団 試験研究所 (〒338-0812 浦和市大字神田936)

²応用地質(株) 技術本部岩盤技術部 (〒330-0034 大宮市土呂町2-61-5)

³応用地質(株) 技術本部岩盤技術部 (〒330-0034 大宮市土呂町2-61-5)

⁴正会員 工博 島根大学総合理工学部地球資源環境学科 (〒690-0823 松江市西川津町1060)

⁵正会員 工博 埼玉大学 工学部 (〒338-0825 浦和市下大久保255)

筆者らは、割れ目性岩盤の割れ目分布の規則性を取り出し、これを水みちとして管路網で表現する水みちネットワークモデルを提案している。本論文は、水みちネットワークモデルにおける管路の透水係数の空間分布を、孔間透水試験のデータを用いて逆解析により求める手法について論じたものである。逆解析のアルゴリズムは、非線形最小二乗法として準ニュートン法を用い、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することにより逆解析の効率化を図った。また、実際の試験サイトと同等なスケールのモデルの数値実験により、割れ目の透水係数分布の再構築ができることを示し、本逆解析手法の有効性を確認した。

Key Words : fracture network model, crosshole hydraulic test, numerical inversion

1. 序論

地表、地下を問わず、多種多様な空間利用が拡大する中、地下水の流れが問題となる場合が多くある。ダム基礎のグラウチングの問題、地下備蓄基地、放射性廃棄物の地層処分、また、トンネル掘削時の地表への影響問題など、その内容は多岐にわたるが、いずれの分野でも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極めて重要となっている。

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¹⁾、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ギング手法を用いる方法²⁾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次元的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の基礎理論を下敷きとして、透水試験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³⁾によるベイズ推定法を用いた拡張カルマンフィルターによる方法がある。また、増本⁴⁾らが開発した複数孔干渉試験の一つで、流体の注水または揚水・停止に伴う非定常圧力応答データから、孔間および孔周辺領域の透水係数分布を逆解析により求めるハイドロパルストモグラフィーがある。

一方、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⁵⁾。前述の2つの逆解析手法は、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。

筆者らは、割れ目系岩盤を対象として、割れ目の規則性を取り出し、これに孔間透水試験や孔内微流速検層などの情報を加えて水みちの把握・評価を行うことを基本とする水みち構造調査法を提案し、これを原位置に適用してその有効性を示した⁶⁾。また、浸透流解析手法として水みち構造調査によって抽出

された水みち構造を3次元の管路網でモデル化することを特徴とする水みちネットワークモデル(Channel Network Model)を提案している。その内容は、モデルのコンセプトの提示⁹、層流を仮定した非定常流解析¹⁰、比貯留係数を論じた貯留モデルや断層破碎帯モデル等の提案¹¹、非ダルシー流解析モデルの提案¹⁰に大別される。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、水みちネットワークモデルにおいても、トライアル・アンド・エラーで観測値をフィッティングすることにより水理パラメータを同定し、モデルの評価を行う作業は膨大な労力を要する。そこで、本論文では層流を仮定した非定常流解析において、水みちネットワークモデルの水理パラメータの最適化を図る手法として、逆解析手法の提案を行った。この逆解析手法を用いることにより、対象となる場に複数設定し得る水みちネットワークモデルそのものの最適化を図ることも可能となる。

前述の、増本ら¹²⁾が提案しているハイドロバ尔斯トモグラフィーには以下の優れた特徴がある。本検討では、これを水みちネットワークモデルの逆解析に適用する。

- ①3次元浸透性の分布の情報を反映した質の高い、十分なデータの取得を可能とするため、多点非定常干渉試験(孔間透水試験)を採用する。これは、空間的に不足した観測データを時間軸方向のデータにより補う考え方方に立っている。
- ②効率性と信頼性の高い逆解析のアルゴリズムを実現するため、非線形最小二乗法として準ニュートン法を用い、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する。これにより、逆解析の反復1回当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を可能とする。本論文では、まず、水みちネットワークモデルの特徴と逆解析の基本的考え方について述べる。次に上述のアルゴリズムを用いた水みちネットワークモデルの逆解析の定式化について論じる。最後に、実際の孔間透水試験の試験サイトと同程度のスケールを持つモデルサイトの数値実験により、水みちネットワークモデルの逆解析手法のアルゴリズムと解析コードの有効性について検証を行った結果について述べる。

2. 水みちネットワークモデルの特徴と逆解析の未知パラメータ

水みちネットワークモデルは、割れ目系岩盤を対象とした3次元フラクチャーネットワークモデルの

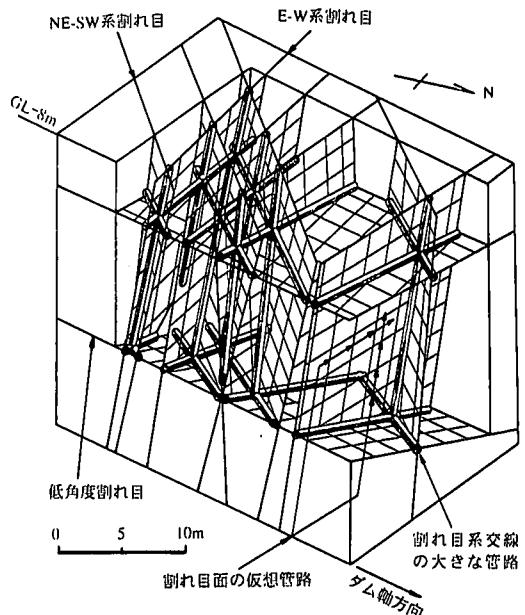


図-1 水みちネットワークモデルの概念図

一つである。このモデルは、現場で得られた岩盤内の割れ目の情報を直接的にモデル化することを目的としており、モデル化を行う上で、割れ目面の交差部、ステップ構造、スプレー構造が主要な水みちを形成するという概念に基づいている⁹。ここで、ステップ構造とは、同一方向に伸びた2セットの割れ目系において、その両者の端部を連結する形態で規則的な方向を有する割れ目群が局所的に発達する構造をさす。また、スプレー構造とは、割れ目の端部に発達するホーステイル状の引張り割れ目の構造を意味する。図-1に水みちネットワークモデルの概念図を示す。これは、花崗岩を基礎とするHダムの左岸アバットにおいて実施した孔間透水試験サイト(40m(ダム軸方向) × 40m(上下流方向) × 40m(深さ方向))の領域の一部を切り出して示したものである。図中には、掘削面の割れ目系構造調査、孔間透水試験等に基づき抽出されたNE-SW系、E-W系および低角度系の三つの主要な割れ目系とこれらの割れ目系に配置した水みちを模式的に示している。ここでいう水みちとは、水の流れる経路のことである。同図では、いくつかの同系統の割れ目を1枚の不連続面として取り出して示している。取り出したそれぞれの割れ目面上の全てに一様に水が流れのではなく、割れ目面上の水みちを通って流れる

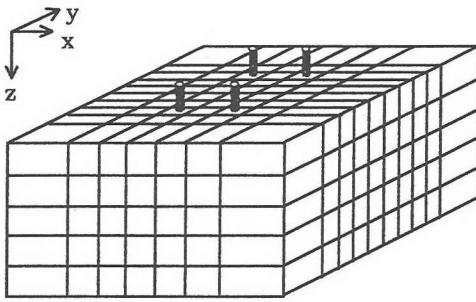


図-2 直交差分格子モデル図

ものと仮定し、割れ目面上に直交する2方向の管路としてモデル化する。また、割れ目交差部を特に主要な水みちと捉え、割れ目の交線に大きな管路を配置しこれらをモデル化する。水みちネットワークモデルでは、これらによって構成される管路網を流路とし、各交点での水頭値を未知数として浸透流順解析を行う。

3次元浸透流逆解析では、注水区間での圧力または流量の経時的データおよび観測区間での圧力経時データから、解析領域中の管路の透水係数分布を得ることを目的としている。ここで、未知数として取り扱う透水係数の与え方は逆解析上、重要な問題となる。水みちネットワークモデルの場合、透水係数を与える最小単位は、個々の管路の交点間の管路一本毎となる。しかし、膨大な本数のぼる個々の管路の透水係数を逆解析で求めることは現実的ではない。そこで、割れ目面の交差部が大きな水みちとなることが多く、次に割れ目面自体の透水性が問題となるという、既往の研究結果を踏まえて、主要な水みちを構成すると考えられる各割れ目の交線、各割れ目毎にグルーピングして透水係数を求めるものとした。具体的には、図-1に示す各割れ目面上の2方向の管路および割れ目の交線単位で与えた透水係数を未知数とする。

上述の水みちネットワークモデルによる浸透流逆解析と、増本らが提案しているハイドロパルストモグラフィーにおける直交差分格子モデルを比較すると、以下のようになる。

【水みちネットワークモデル】

- ・割れ目の位置、走向、傾斜といった水理地質情報を直接的にモデルに取り込むことができ、モデルの構築が容易である。
- ・解析領域のスケールや割れ目面の数、管路の頻度にもよるが比較的浸透流解析に要する計算時間が短い。
- ・求められる透水係数の空間分布は設定した割れ目

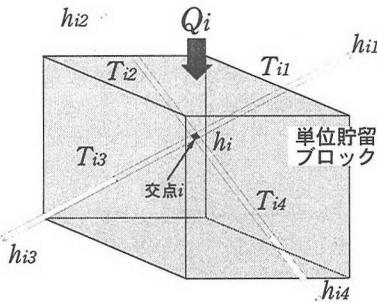


図-3 管路モデルと単位貯留ブロック

モデルに左右される。

【直交差分格子モデル】

- ・図-2に示すように格子状のグリッドで切ったモデルを作成するため、モデルの作成が極めて容易で、各方向毎の格子間透水係数が未知数となる。
- ・孔間透水試験を行えば、割れ目情報等の地質情報を用いないで上記の透水係数の空間分布を求めることができる。
- ・岩盤を多孔質媒体モデルとしても表現できる。
- ・直交しない卓越割れ目のような座標軸と非平行な成分の水理地質情報をモデルに反映させるのは困難である。

3. 水みちネットワークモデルを用いた浸透流逆解析

(1) 水みちネットワークモデルにおける水頭計算の基本式

水みちネットワークモデルでは、管路網の各交点が水頭を持つ。図-3に示す交点*i*の水頭は、その交点に外部から与えられる注水量または揚水量と、管路で結ばれた隣の交点の水頭から計算される。その基礎方程式はダルシー則を仮定して、以下のように示される。

$$S_{fi} \frac{h_i^n - h_i^{n-1}}{\Delta t^n} = \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ T_{ij} \frac{h_{ij}^n - h_i^n}{\Delta L_{ij}} \right\} + Q_i \\ = \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \frac{A_{ij} K_{ij}}{\Delta L_{ij}} (h_{ij}^n - h_i^n) \right\} + Q_i \quad (1)$$

- | | |
|-----------------|--|
| N_i | : 交点 <i>i</i> に隣接する交点の数 |
| T_{ij} | : 交点 <i>i</i> と、それに隣接する <i>j</i> 番目の交点を結ぶ管路の透水量係数 [$L^3 T^{-1}$] |
| h_i | : 交点 <i>i</i> における全水頭 [L] |
| h_{ij} | : 交点 <i>i</i> に隣接する <i>j</i> 番目の交点における全水頭値 [L] |
| ΔL_{ij} | : 交点 <i>i</i> と、それに隣接する <i>j</i> 番目の交点を結ぶ管路の長さ [L] |
| Q_i | : 交点 <i>i</i> に外部から流入する量 [$L^3 T^{-1}$] |

S_f	: 交点 <i>i</i> が受け持つ貯留量係数 [L^2]
Δt^n	: 計算上の時間ステップ間隔 [T]
添字 <i>n</i>	: 時間ステップ
A_{ij}	: 交点 <i>i</i> と、それに隣接する <i>j</i> 番目の交点を結ぶ管路の断面積 [L^2]
K_{ij}	: 交点 <i>i</i> と、それに隣接する <i>j</i> 番目の交点を結ぶ管路の透水係数 [LT^{-1}]

以下に式(1)中の貯留量係数 S_f の設定の考え方⁹⁾を述べる。 S_f は、式(1)の左辺に関して、単位体積中の流体体積の得失が全水頭の時間変化に比例すると仮定したときの比例定数で、[L^2]の次元を持つ。一方、比貯留係数 S_s は、単位体積の圧力水頭が単位量だけ変化したとき、その単位体積が放出したり、貯留に取り込む水の体積を決定するもので[L^1]の次元を持つ¹²⁾。本モデルにおいて、貯留効果を管路自体ではなく管路の交点に代表させて持たせている。解析領域を単位ブロック(以下、単位貯留ブロックと呼ぶ。)の集合体に分割し、図-3に示す管路網が存在する単位貯留ブロックに岩盤の変形係数等を考慮して、比貯留係数 S_s を設定する。水みちネットワークモデルの貯留モデルは、単位貯留ブロックがチェーン状に連結した形態となり、これらの単位貯留ブロックは互いに重なり合うことはない。管路網の交点が受け持つ比貯留量係数 S_s は、当該単位貯留ブロック内に複数の交点が存在する場合は、交点数で S_s を除した値を各交点に与える。管路が通過するだけで交点が存在しない単位ブロックは、その貯留分を関連する交点の S_s に割り振ることで考慮するものとし、交点、管路が存在しない単位ブロックはモデルの対象外とする。管路網の交点が受け持つ貯留量係数 S_f は、単位貯留ブロックの体積 V [L^3]として、次式で表す。

$$S_f = V_s \cdot S_s \quad (2)$$

水みちネットワークモデルを用いた浸透流解析では、解析領域の全管路網の交点で式(1)が成立するよう、初期条件、境界条件の下に全交点の全水頭を求める。

(2) 評価関数

逆解析結果として出力される透水係数分布がどの程度、真の透水係数分布に近づいているかを表す指標として評価関数を用いる。ここでは次式に示すように、圧力観測点における水頭値と計算水頭値の差の二乗和を評価関数として用いており、それを最小にするように透水係数分布を求める。

$$J = \sum_{n=1}^{N_t} \sum_{m=1}^{N_p} \left[\left\{ W_m^n (h_m^n - h_{obs,m}^n) \right\}^2 \right] \quad (3)$$

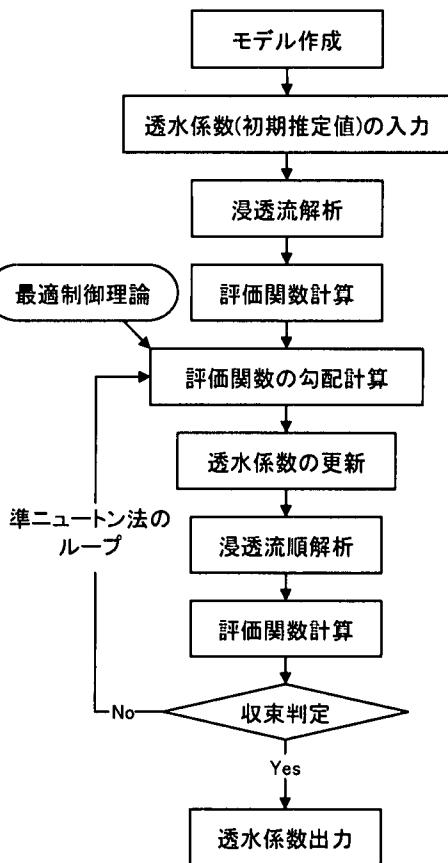


図-4 3次元浸透流逆解析フローチャート

N_t	: 観測時間ステップ数
N_p	: 観測点数
W_m^n	: 各点、各時間での重み
h_m^n	: 観測点における計算水頭値
$h_{obs,m}^n$: 観測点における観測水頭値

(3) 逆解析の流れとアルゴリズムの概要

水みちネットワークモデルを用いた浸透流逆解析の流れを図-4に示す。おおまかな流れとしては、割れ目の位置、走向・傾斜等の地質情報、そして境界条件等によりモデルを作成する。その後、比貯留係数、管路断面積および透水係数の初期推定値を入力し、浸透流順解析を行う。今回の検討では、比貯留係数および管路断面積は既知として扱っている。その結果を基に、逆解析の指標となる評価関数および透水係数によるその勾配を計算する。その勾配から透水係数の更新量を求め、新しい透水係数を求めて、浸透流順解析をし、評価関数値を求める。その評価関数値により収束判定をするが、収束しない場合は評価関数の勾配計算に戻り、収束している場合は透水係数を出力してプログラムを終了する。

逆解析計算上の目的は、評価関数を最も小さくする透水係数を求ることである。逆解析手法は、評価関数が非線形数値解析(順解析)で得られる計算圧力値で構成される非線形最適化問題を解くために、ここでは準ニュートン法を用いる。準ニュートン法では評価関数の2階微分値を1階微分値から求めることができるが、そのために1階微分値を精度良く求めることができることが重要になってくる。通常、このような逆解析において、計算時間の大半は評価関数の1階微分値の計算に伴う順解析計算に費やされる。本研究では、増本らが用いたように最適制御理論を適用して勾配計算に要する順解析計算回数を1回にすることにより、逆解析反復回数1回毎の順解析計算回数を最小とした。

4. 最適制御理論による評価関数の微分値計算の定式化

評価関数を各透水係数で微分した値は、各透水係数が評価関数值を小さくする、すなわち、透水係数分布が全体として真の分布に近づくため、どの程度の影響力を持つかを示している。また、その勾配により、各透水係数の更新量も準ニュートン法により求められる。

透水係数を K とすると、最適制御理論における評価関数の微分値 $\partial J / \partial K$ は、随伴関数ベクトル(乗数ベクトル) q を導入して以下に示す方法で計算される。

評価関数 J を、以下のように表現する。

$$J = \sum_{n=1}^{N_f} F^n(t, h, K) \Delta t \quad (4)$$

ただし、

$$F^n(t, h, K) = \sum_{m=1}^{N_p} \left[\left\{ W_m^n (h_m^n - h_{obs,m}^n) \right\}^2 \right] / \Delta t \quad (5)$$

ここで、式(1)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。

$$\frac{h_i^n - h_i^{n-1}}{\Delta t^n} = f_i^n(t, h^n, K) \quad (6)$$

このとき、最適制御理論により、式(7)、(8)の連立方程式を満たす乗数ベクトル q^n を導入すると、式(9)のように、評価関数の透水係数による微分値を表すことができる。

$$\frac{q_i^n - q_i^{n-1}}{\Delta t^n} = - \sum_{j=1}^N \left(q_j^{n-1} \frac{\partial f_j^n}{\partial h_i^n} + \frac{\partial F^n}{\partial h_i^n} \right) \quad (7)$$

$$q_i^N = 0 \quad (\text{終端条件}) \quad (8)$$

ただし、 N は全交点の数である。

$$\frac{\partial J}{\partial K_{ij}} = \sum_{n=1}^{N_f} \sum_{a=1}^N \left\{ -q_a^{n-1} \frac{\partial f_a^n(h^n, K)}{\partial K_{ij}} \right\} \Delta t \quad (9)$$

式(9)により透水係数を更新しつつ、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れる。

各式の具体的な形を見てみる。まず式(9)のかっこ内の微分計算は、式(1)より式(10)のように書き表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_a^n}{\partial K_{ij}} &= \frac{\partial}{\partial K_{ij}} \left| \frac{1}{S_{fa}} \left[\sum_{b=1}^{N_a} \left\{ \frac{A_{ab} K_{ab}}{\Delta L_{ab}} (h_{ab}^n - h_a^n) \right\} + Q_a \right] \right| \\ &= \frac{1}{S_{fa}} \sum_{b=1}^{N_a} \left\{ \frac{A_{ab} (h_{ab}^n - h_a^n)}{\Delta L_{ab}} \cdot \frac{\partial K_{ab}}{\partial K_{ij}} \right\} \\ &= \begin{cases} \frac{1}{S_{fa}} \sum_{b=1}^{N_a} \frac{A_{ab} (h_{ab}^n - h_b^n)}{\Delta L_{ab}} & (K_{ab} = K_{ij}) \\ 0 & (K_{ab} \neq K_{ij}) \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

次に乗数ベクトルに関する微分方程式(7)の右辺第一項は式(1)より次式で書き表すことができる。

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^N \left(q_j^{n-1} \frac{\partial f_j^n}{\partial h_i^n} \right) \\ &= \sum_{j=1}^N \left[q_j^{n-1} \cdot \frac{\partial}{\partial h_i^n} \left[\frac{1}{S_{fj}} \left[\sum_{k=1}^{N_j} \frac{A_{jk} K_{jk}}{\Delta L_{jk}} (h_{jk}^n - h_j^n) + Q_j \right] \right] \right] \\ &= \sum_{j=1}^N \left\{ q_j^{n-1} \cdot \frac{1}{S_{fj}} \sum_{k=1}^{N_j} \frac{A_{jk} K_{jk}}{\Delta L_{jk}} \frac{\partial}{\partial h_i^n} (h_{jk}^n - h_j^n) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、

$$\frac{\partial}{\partial h_i^n} (h_{jk}^n - h_j^n) = \begin{cases} -1 & (j = i) \\ 1 & (jk = i) \\ 0 & (j \neq i, jk \neq i) \end{cases} \quad (12)$$

であるから、

$$\frac{\partial f_j^n}{\partial h_i^n} = \begin{cases} -\frac{1}{S_{fj}} \sum_{k=1}^{N_j} \frac{A_{ik} K_{ik}}{\Delta L_{ik}} & \dots (j\text{番目の点が}i\text{番目の点の時}) \\ \frac{1}{S_{fj}} \cdot \frac{A_{jk} K_{jk}}{\Delta L_{jk}} & \dots (j\text{番目の点が}i\text{番目の点と直接繋がっている時}) \\ 0 & \dots (j\text{番目の点が}i\text{番目の点と直接繋がっていない時}) \end{cases} \quad (13)$$

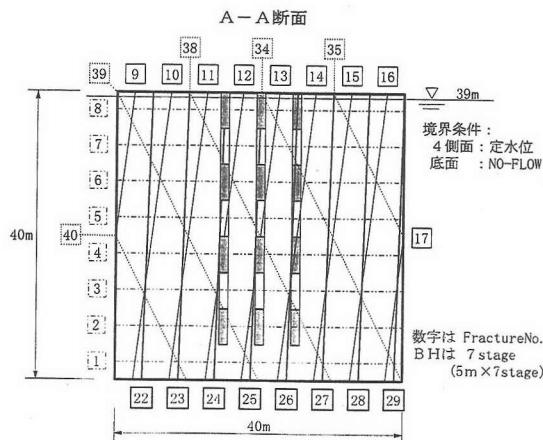
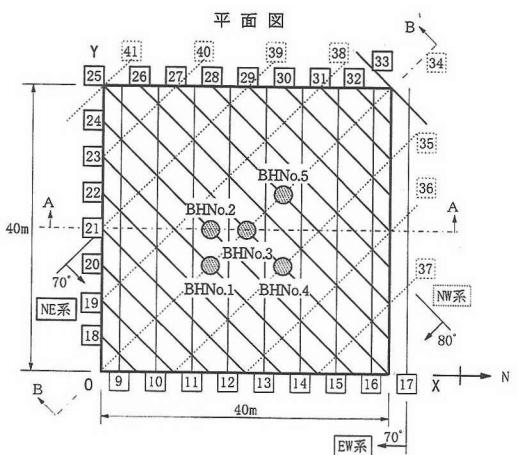


図-5(a) 孔間透水試験数値実験モデル(平面図,断面図)

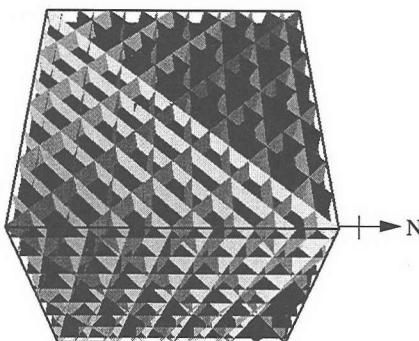


図-5(b) 孔間透水試験数値実験モデル(鳥瞰図)

式(13)を式(7)に代入し、式(7)・(8)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

トルと式(10)を用いて式(9)から評価関数の勾配を計算する。

5. 数値実験による逆解析手法の有効性の検証

ここでは、これまで述べた水みちネットワークモデルの逆解析手法のアルゴリズムと解析コードの有効性を孔間透水試験による数値実験により検証する。まず、数値実験モデルと解析条件について述べ、次に逆解析手法の有効性の検証を行う。

(1) 数値実験モデルと解析条件

図-5(a)に本検討で用いた孔間透水試験の数値実験モデルを示す。解析領域を40m × 40m × 40mの立方体とし、同図に示すように水平割れ目8枚(図中の□内の数字の1～8)、E-W系高角度割れ目9枚(同9～17)、NE-SW系高角度割れ目16枚(同18～33)、NW-SE系高角度割れ目8枚(同34～41)、計4系統41枚の割れ目を一定の間隔で規則的に発生させた。この数値実験モデルは、筆者らが行った実際の孔間透水試験サイト¹³⁾のスケールを想定している。図-5(b)は割れ目セットを示す鳥瞰図である。ここでは、各割れ目に3mピッチで互いに直交する管路を格子状に発生させた。割れ目と割れ目の相互の交線部は大きな水みちになると仮定し、前述の割れ目の管路と併せて管路系が構成される。管路網の総交点数は、21,003である。

水みちネットワークモデルで非定常問題を解く場合に必要なパラメータは、各管路の透水係数(k)、管路断面積(A)、比貯留係数(S_s)等である。ここでは、管路の透水係数を未知パラメータとし、管路断面積、比貯留係数は既知で一定であると仮定して、それぞれ 0.05m^2 、 $5 \times 10^{-5}/\text{m}$ とした。逆問題の設定で重要な要素として、未知パラメータのグルーピングがある。水みちネットワークモデルにおいて、透水係数を与える最小単位は、交点間の管路の透水係数であるが、これらを逆解析で求めることは現実的でない。ここでは、各割れ目系の交線、各割れ目毎に透水係数を求めるものとし、数値実験モデルで設定したこれらの透水係数を表-1に示す。また、同表には、割れ目面と割れ目面の交線に分けて設定した初期推定値を併せて示した。

孔間透水試験のボーリング孔は、図-5(a)に示すように5本(各35m)配置し、5m毎にステージ分割を行い観測点とした。本検討では、図中のBHNo.3孔の第1、第3、第5、第7ステージを注水区間とし、一定圧 3kgf/cm^2 で30分間注水し、注水停止後さらに30分間観測を行い、観測点の全水頭と注水量を

順解析で求め、これを模擬試験値とした。なお、これらの模擬試験値は1分単位で求めている。

逆解析では、解析によって求められる観測点における水頭値から決定される前述の評価関数を最小にするように透水係数分布を求める。なお、順解析で求めた注水量を既知とし、注水圧力は未知量として逆解析を行っており、観測点数は注水区間も含めて35点である。境界条件は、図-5(a)において4側面をGL-1mの定水位境界とし、底面を閉境界とした。

(2) 逆解析結果と評価

表-2は、数値実験モデルで設定した透水係数と逆解析反復28回目で求められたそれを比較して示したものである。同表より両者は良好な一致をみている。

次に逆解析による最適化の過程を検討する。図-6は、前述の評価関数の逆解析反復に伴う低減状況を示したもので、反復により収束に向かっていることが分かる。次に、割れ目および割れ目の交線の透水係数の逆解析の反復に伴う収束状況を検討する。図-7(a)～(d)は、表-2に示すk2, k3, k5, k8のモデル上の各設定値に対し、逆解析反復に従って、逆解析で求めた透水係数が収束する過程を示したもので、評価関数の各透水係数による勾配の絶対値も併せて示している。このとき、勾配の絶対値が大きいほど評価関数に与える影響が大きくなる。各割れ目の透水係数は、前述の評価関数の収束状況と同様に、25回程度の逆解析反復により目標とする値が得られていることが分かる。

次に、各観測区間の全水頭の経時変化が逆解析反復回数の推移に伴い、模擬試験値に対し適合する過程を検討する。図-8(a)～(e)は、注水区間をBHN0.3の第1ステージとして、BHN0.2の第2ステージ、BHN0.3の第1ステージ、同第2ステージ、BHN0.4の第1ステージ、BHN0.5の第2ステージに代表させて、反復0回、逆解析反復12回、同24回の透水係数を用いて計算した全水頭および、模擬試験値を比較して示したものである。ここで反復0回とは、初期推定透水係数を用いて計算した全水頭を意味する。これらの図が示すように反復0回では模擬試験値からかなりかけ離れている全水頭が逆解析の反復により模擬試験値に漸近し、逆解析反復24回では、各観測区間とも両者はよく一致している。

以上述べた孔間透水試験の数値実験結果から、水みちネットワークモデルの逆解析手法のアルゴリズムと解析コードの有効性が確認できたものと考える。なお、今回の逆解析における計算時間は、ビジ

表-1 透水係数(モデル設定値と初期値)

区分	モデル設定値	初期推定値
水平系割れ目 (k1)	1.0E-6	5.0E-6
NE-SW系割れ目 (k2)	3.0E-6	"
E-W系割れ目 (k3)	1.0E-5	"
NW-SE系割れ目 (k4)	5.0E-6	"
水平/NE-SW交線 (k5)	3.0E-5	1.5E-5
水平/E-W交線 (k6)	5.0E-6	"
水平/NW-SE交線 (k7)	3.0E-6	"
NE-SW/E-W交線 (k8)	5.0E-5	"
NE-SW/NW-SE交線 (k9)	5.0E-6	"
E-W/NW-SE交線 (k10)	5.0E-6	"

(単位:m/s)

表-2 透水係数のモデル設定値と逆解析結果の比較

区分	モデル設定値	逆解析結果
水平系割れ目 (k1)	1.0E-6	1.08E-6
NE-SW系割れ目 (k2)	3.0E-6	3.10E-6
E-W系割れ目 (k3)	1.0E-5	1.01E-5
NW-SE系割れ目 (k4)	5.0E-6	5.01E-6
水平/NE-SW交線 (k5)	3.0E-5	2.97E-5
水平/E-W交線 (k6)	5.0E-6	4.89E-6
水平/NW-SE交線 (k7)	3.0E-6	2.62E-6
NE-SW/E-W交線 (k8)	5.0E-5	4.97E-5
NE-SW/NW-SE交線 (k9)	5.0E-6	5.59E-6
E-W/NW-SE交線 (k10)	5.0E-6	5.21E-6

(単位:m/s)

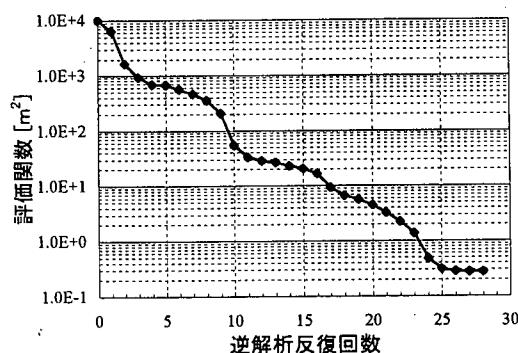


図-6 評価関数の推移

ュアルテクノロジー社製パーソナルコンピュータ VT-alpha500AXT(CPU: 500MHz, メモリ: 256Mbyte, OS: WindowsNT)を用い、約10時間であった。

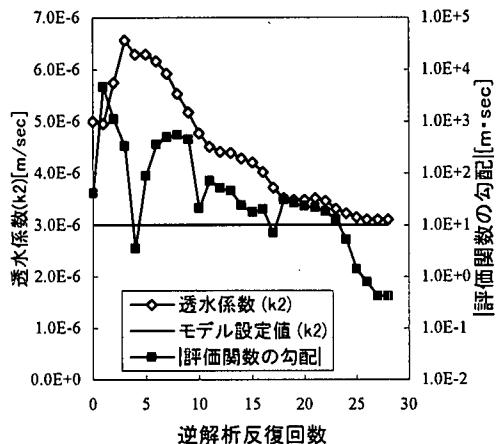


図-7(a) 透水係数(k_2)と評価関数の勾配の推移

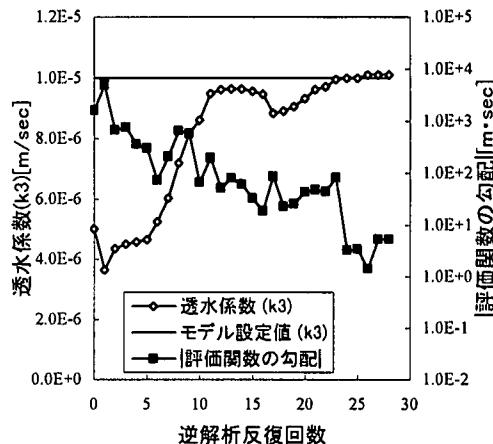


図-7(b) 透水係数(k_3)と評価関数の勾配の推移

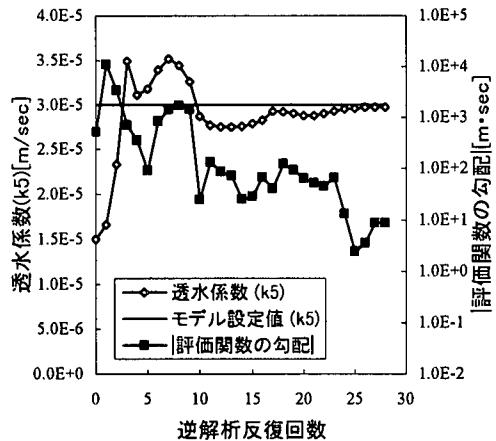


図-7(c) 透水係数(k_5)と評価関数の勾配の推移

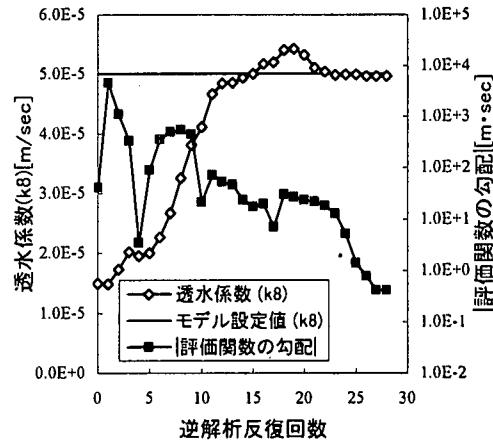


図-7(d) 透水係数(k_8)と評価関数の勾配の推移

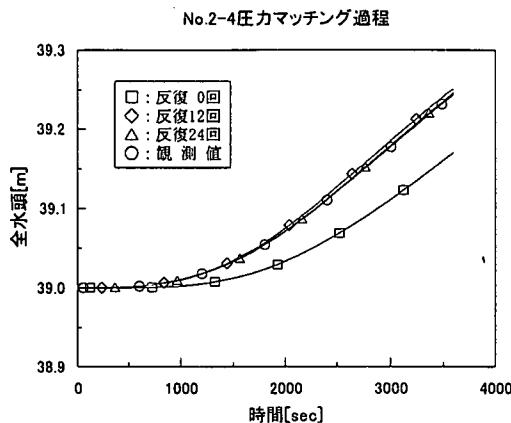


図-8(a) 圧力マッチング過程(BHNo.2,4ステージ)

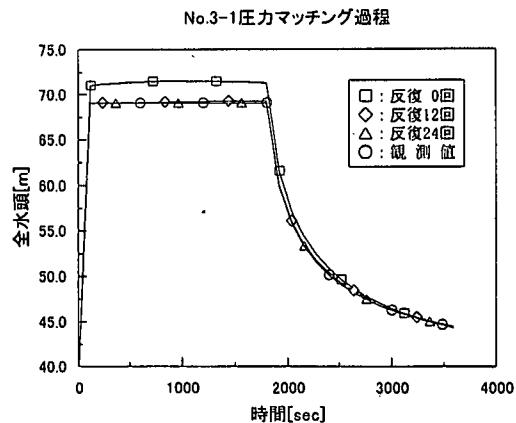


図-8(b) 圧力マッチング過程(BHNo.3,1ステージ)

6. 結論

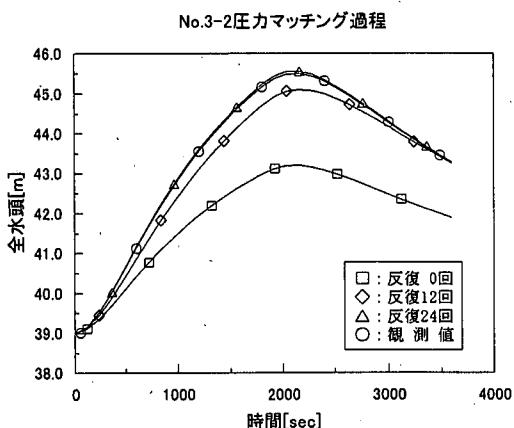


図-8(c) 圧力マッチング過程(BHN No.3,2ステージ)

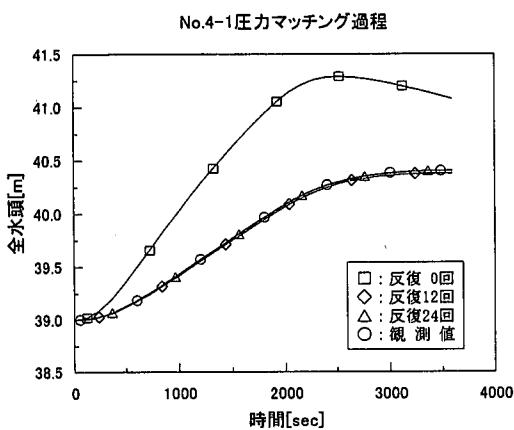


図-8(d) 圧力マッチング過程(BHN No.4,1ステージ)

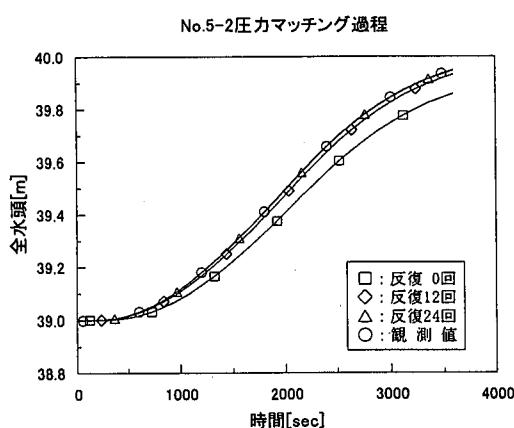


図-8(e) 圧力マッチング過程(BHN No.5,2ステージ)

すべての浸透流解析モデルが持つ共通の課題として、実測結果に適合する水理パラメータの決定の問題がある。順解析を用いてマニュアルフィッティングにより水理パラメータを求める作業は、一般的にかなりのトライアル・アンド・エラーを繰り返す必要がある。筆者らが亀裂性岩盤の浸透流解析手法として提案している水みちネットワークモデルにおいても同様の課題を持っており、管路の透水係数の空間分布の決定と水みちネットワークモデルそのものの最適化を図る手法として、逆解析に関する検討を行った。

本検討では、増本らが提案しているハイドロパルストモグラフィーの優れた特徴である、①多点非定常干渉試験(孔間透水試験)の圧力応答の時系列データの使用、②非線形最小二乗法として準ニュートン法を用い、評価関数の微分値を求める方法として最適制御理論の採用、の2点に着目し、この逆解析手法を水みちネットワークモデルの逆解析に導入した。本論文では上述のアルゴリズムを用いた水みちネットワークモデルの逆解析の定式化について述べ、実際の孔間透水試験サイトのスケールのモデル数值実験により、水みちネットワークモデルの逆解析手法のアルゴリズムと解析コードの有効性について検証を行った。結論を以下に述べる。

- (1) 孔間透水試験の数値実験の結果、数値モデルで設定した透水係数とほぼ一致する値が逆解析反復25回程度で求められ、計算時間も実用的な範囲であった。
- (2) 逆解析の反復に伴う解の収束過程を、評価関数の低減、透水係数の収束、逆解析より求めた全水頭と模擬試験値の適合度等により確認し、逆解析として妥当な結果が得られた。
- (3) 以上により、水みちネットワークモデルの逆解析手法のアルゴリズムと解析コードの有効性が確認できたものと考える。

本逆解析手法を発展させることにより、水みち構造把握という課題に対し、現場での地質調査から透水係数分布解析結果出力、解釈に至るまで、一貫した現場対話型の総合解析が可能となることが期待される。

今後、以下の課題に取り組む必要がある。

- (1) 水みちネットワークモデルは、割れ目面の空間分布を決定論的に扱う不連続体モデルであり、逆解析の現場への適用性は割れ目モデルの妥当性そのものに非常に支配される。多様な岩

- 盤の割れ目から、水みち構造を抽出する技術の開発とモデルの妥当性を実証する研究が最重要課題である。
- (2) 今回の逆解析では、初期推定値は解に比較的近い値を設定した。今後、初期推定値が解の安定性、収束性に及ぼす影響について検討を行う必要がある。
 - (3) 比貯留係数は圧力応答の計算値に大きな影響を与える。これは全ての浸透流解析に共通した課題ではあるが、今後比貯留係数の合理的な設定方法について研究する必要がある。
 - (4) 複雑な水みち構造を有するモデルに対する本逆解析手法の適用性を数値実験により検討した上で、実際の原位置孔間透水試験へ適用する。

謝辞：本研究を進めるにあたり、応用地質(株)大塚康範氏、同伊藤一誠氏、アイドールエンジニアリング(株)森田豊氏には終始有益なご助言を頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木浩一、藤光康宏：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, 1992.
- 2) Clark,J. : Practical Geostatistics, Applied Science Publisher, 1982.
- 3) 奥野哲夫、鈴木誠：不透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) 登坂博行、増本清、伊藤一誠、大塚康範：パルスステストデータを用いた岩盤水理特性分布の3次元逆解析手法、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.399-404, 1990.
- 5) 渡辺邦夫：地下水研究に関する最近の話題－特に岩盤浸透流の場の評価について－、土と基礎, Vol.43, No.9, Sep, No.452, pp.1, 1995.
- 6) 杉村淑人、森田豊、渡辺邦夫：ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み、土木学会論文集, No.582/III-41, pp.229-246, 1997.12.
- 7) Watanabe,K., Sugimura,Y., Morita,Y. and Tanaka,T. : Channel network modelling of the fractured granite in the Hinachi area, Japan, Developments in Geotechnical Engineering, 81 Earthquake Proof Design and Active Fault, pp.256, 1997.
- 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、土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, pp.236-237, 1995.
- 9) 杉村淑人、森田豊、渡辺邦夫：孔間透水試験圧力応答パターンの水みちネットワークモデル数値実験による検討、土木学会論文集, No.596/III-43, pp.224-226, 1998.6.
- 10) Sugimura,Y., Morita,Y., Watanabe,K. : Non-darcy flow analysis of jointed rock foundations using channel network model, Proc. 9th Int. Cong. on Rock Mech., Vol.2, pp.971-974, 1999.
- 11) 増本清：ハイドロパルストモグラフィー技術の開発、東京大学博士論文, pp.5-59, 1995.3.
- 12) P.A. ドミニコ、F.W. シュワルツ：地下水の科学 I - 地下水の物理と化学 -、地下水の科学研究会(大西有三監訳)、土木工学社, pp.89, 1995.
- 13) 杉村淑人、森田豊、渡辺邦夫：ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み、土木学会論文集, No.582/III-41, pp.234, 1997.12.

(1998.5.7受付)

NUMERICAL INVERSION METHOD OF SEEPAGE FLOW USING CHANNEL NETWORK MODEL

Yokito SUGIMURA, Ikuko MATSUDA, Satoshi TOMIMORI,
Kiyoshi MASUMOTO and Kunio WATANABE

The authors have newly developed a numerical inversion method using a fracture network model. In this method, fracture network system identified in geological survey is modeled as a channel network of flow paths.

Through the numerical experiments with fracture network model on a scale of field application, the authors examined applicability of the method to actual investigations. As a result, hydraulic conductivity distribution was reconstructed successfully.