

3次元浸透流逆解析手法における 亀裂ネットワークモデルの導入

伊藤一誠・富森 叡・松田育子

Adoption of Fracture Network Model into Three Dimensional Numerical Inversion Method

Kazumasa Itoh, Satoshi Tomimori and Ikuko Matsuda

Abstract

The authors have developed Hydropulse tomography consisting of field measurement system and numerical inversion software as crosshole hydraulic test. In this numerical inversion, rock masses are approximately modeled as porous medium. Thus it is difficult to construct fracture network model from a result of numerical inversion. In order to estimate hydraulic conductivity of each fracture in rock masses, another type of modeling method is necessary.

To meet this requirement, 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. The result of numerical inversion must be bounded by geometrical model of fracture network. However, validity of geometrical model can be judged by estimating hydraulic properties calculated from numerical inversion.

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. And it was found out that for more accurate reconstruction in actual sites, observation stages should be arranged to cross the fracture that is taken into account.

With sufficient data obtained in geological survey, it is possible to directly characterize hydraulic properties in fractured rock masses with effective location of measurement stage.

KEY WORD : fracture network model, crosshole hydraulic test, numerical inversion

要 旨

筆者らは、ハイドロパルストモグラフィという孔間透水試験による透水係数分布の3次元浸透流逆解析手法の開発を行ってきた。この手法においては、対象岩盤を多孔質媒体としてモデル化する方法をとっており、対象が亀裂性岩盤の場合、その解析結果から亀裂分布を直接的に表現することは困難である。そのため、亀裂の透水性を評価することを目的として、フラクチャーネットワークモデルを導入した逆解析手法の開発を行った。ここでは、水みち構造調査に基づき取り出された割れ目系を、水みちのネットワークとしてモデル化している。本逆解析手法では、亀裂ネットワークの幾何学モデルにより制限された結果が得られるが、その幾何学モデルの妥当性については、逆に解析結果から判断することで補うことができる。

本論文では、実際の試験サイトと同等なスケールでのモデル数値実験により、実地盤への適用性を検討した。その中で、割れ目の透水係数分布を再構築することができた。また、実際の調査においてより高い精度の透水係数分布を得るには、評価対象となる割れ目が含まれるように試験区間を設置することが重要であることがわかった。

本手法により、水みち構造調査によって十分なデータが得られているサイトにおいては、試験区間を効果的に配置することによって、亀裂と直接関連した透水性分布を得ることが可能である。

キーワード：フラクチャーネットワークモデル、孔間透水試験、逆解析

1 はじめに

地上、地下を問わず、多種多様な空間利用が広がる中、地下水の流れが問題となる場合が多々ある。ダムグラウト問題、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流への影響問題など、その内容は多岐にわたる。

ダム基礎岩盤を例にとると、年々、良好なダムサイトが少なくなり、代わって遮水対策上課題の多い基礎岩盤を選択せざるを得ない状況が顕在化している。その中でも、亀裂の卓越した岩盤を基礎とするダムにおいて、亀裂の分布、連続性、透水性を明らかにすることは、止水計画の策定のみならず、ダム堤体の安定性評価に対しても重要な情報となる。

筆者らは水理地質を把握するための手法の一つとして、ハイドロパルストモグラフィの開発を行ってきた（平松・伊藤（1994）²⁾）。ハイドロパルストモグラフィとは複数孔井を用いた透水試験の一つで、水の圧入による流量と圧力応答から、地下水理特性の一つである透水係数の3次元的な分布を3次元浸透流逆解析により求めるものである。この解析手法では、対象とする岩盤を近似的に多孔質媒体としてモデル化される。筆者らは、この手法の実地盤への適用を行ってきた。

一方、最近、埼玉大学渡辺教授らが開発した水みちネットワークモデルの一つであるDon-Chanモデル¹⁾の、ダム基礎岩盤の水理地質構造解析への適用が検討されている（森田他（1997）⁶⁾、杉村他（1997）⁷⁾）。これは、亀裂系岩盤内では、亀裂の交差部・曲がり部・分岐部・端部・ステップ構造が主要な水みちを形成すると考え、それらを直接的に解析モデルに反映させることを目的としている。具体的にはまず、地表地質踏査、横坑調査、ボアホールテレビによる調査や各種物理検層、掘削面割れ目調査などといった実際の地質情報により、対象とする領域内にある亀裂を抽出する。その後、取り出した亀裂面およびそれらの交線により、幾何学的にネットワークモデルを作成する。そのため、地質情報から得られる亀裂を直接的に表現できるという特長を持つ。

杉村らは、こういった地質情報にパルステストをはじめとする透水試験結果データを加え、それらをもとにダムサイトの幾何学的な水みちネットワークモデルの構築を試みている⁷⁾。抽出した水みちの水理定数等の定量的な評価とモデル自身の妥当性の検討については課題として残しているが、Don-Chanモデルによる、孔間透水試験データを用いた浸透流解析を提案している。

Don-Chanモデルにおけるネットワーク内の浸透流

解析については、渡辺らが開発した順解析コードがあるが、順解析によって水みちの透水係数を同定するには、透水試験結果と解析結果をフィッティングさせるように透水係数に修正を加えて計算を繰り返すといった、いわゆる“トライアルアンドエラー”に頼らざるを得ない。そのため、モデルの妥当性の評価へフィードバックされるまでには、膨大な労力が費やされることになる。

これらをふまえ、筆者らは、既往の3次元浸透流逆解析にDon-Chanモデルを導入することによって、モデル化された亀裂性岩盤内の各亀裂の透水係数を自動的に計算する解析コードを作成した。対象から解析モデルを作成する段階では課題が残るものの、本手法により、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、現場対話型の総合解析が可能となる。

本論文では、はじめにハイドロパルストモグラフィの適用例、亀裂ネットワークモデルの概念および3次元浸透流逆解析アルゴリズムについて紹介する。次に、今回開発した逆解析コードについて、その定式化から数値実験による有効性評価および実地盤への適用性の検討に至るまで、その特徴を既往の逆解析のものと比較しつつ述べる。

2 ハイドロパルストモグラフィの適用例

実地盤でハイドロパルストモグラフィを適用した結果を図-1に示す。これは、Aダムで行ったパルステストによるデータから、対象岩盤を多孔質媒体としてモデル化し透水性分布を解析した結果をルジオンマップの形で示したものである。この調査地は中生代白亜紀の花崗岩が広く分布するダムサイトであり、河床部の岩盤には、応力解放が進むことにより形成されたと考えられるシーティングジョイントが発達していた。ダム堤体の力学的安定性への悪影響、基礎岩盤の遮水性が問題になるため、シーティングジョイントの連続性を把握することを目的としてパルステストおよびその結果の解析がおこなわれた。解析結果を見ると、シーティングジョイントに起因すると考えられる20ルジオン以上の高透水ゾーンが明瞭に現れているが、それは局所的なものであり、軸線方向及び上下流方向には連続しないということがわかる。

本事例では、亀裂の連続性、透水性などを評価することは可能であったが、より複雑な亀裂構造を持つ岩盤において、直接、亀裂の位置・方向・透水性などを評価することは困難であると考えられる。そのため、対象岩盤中の亀裂を直接的にモデル化することのできるDon-Chanモデルによるハイドロパルストモグラフィの開発をおこなった。

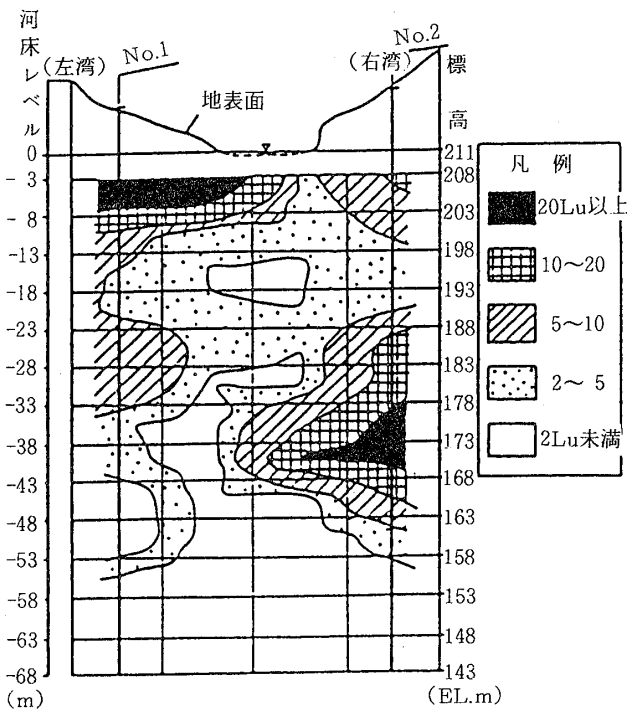


図-1 パルステスト解析結果例 (平松・伊藤 (1994)²⁾
 Fig. 1 Sample result of numerical inversion of Hydropulse tomography (Hiramatsu, Itoh, 1994)

3 亀裂ネットワークモデル
 3・1 Don-Chanモデルの概念

Don-Chanモデルとは、亀裂系岩盤を対象とした3次元ネットワークモデルの一つである。それは現場で得られた岩盤内の亀裂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、亀裂面の交差部・曲がり部・端部・分岐部・ステップ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。ここでいう水みちとは、水の流れる経路のことである。次に、水理地質構造調査に基づき、いくつかの同系統の亀裂を1枚の不連続面として取り出す。取り出したそれぞれの亀裂面上の全てに一樣に水が流れるのではなく、亀裂面上の水みちを通して流れるものとし、亀裂面上の管路としてモデル化する。また、亀裂交差部を特に主要な水みちと捉え、同様に管路としてモデル化する。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。逆解析においては、圧力測定点とした交点における水頭値により、管路の透水係数を未知数とする。このとき、逆解析の対象となるのは各管路毎の透水係数である。図-2(a)にDon-Chanモデルの概念図を示す。

Don-Chanモデルの場合、具体的には、直交座標系を用いて、解析領域内にある亀裂の位置・走向・傾斜か

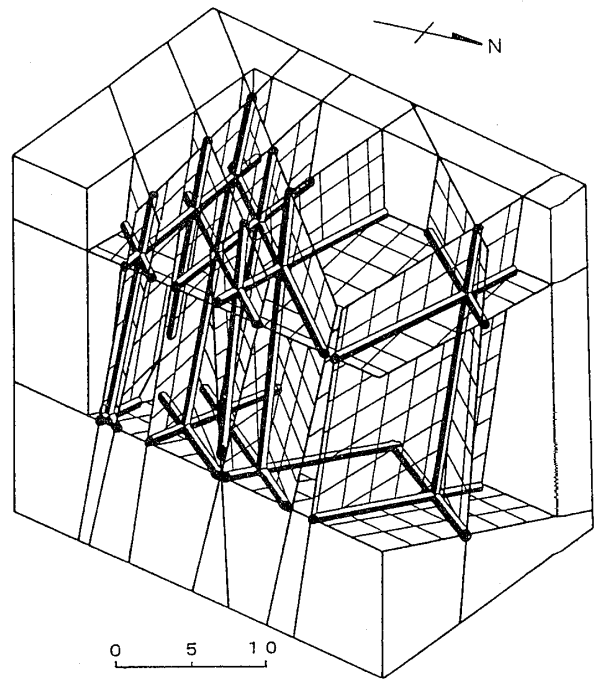


図-2(a) Don-Chanモデル概念図 (杉村他 (1997)⁶⁾)
 Fig. 2(a) Schematic diagram of "Don-Chan"

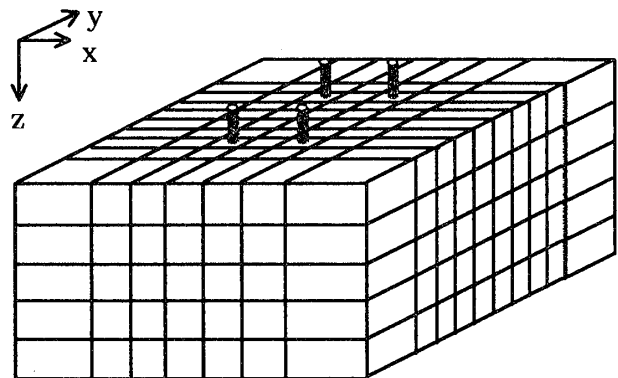


図-2(b) 多孔質媒体としてモデル化した場合の格子モデル図 (増本 (1995)³⁾に加筆)
 Fig. 2(b) An example of Grid model made by modeling rock mass as porous media (Masumoto, 1995)

ら、亀裂面の交線を管路として発生させる。また、亀裂面上にも2方向に管路を発生させる。これらの管路によりネットワークモデルを構築する。そのため、亀裂系岩盤中の亀裂による水みちを直接的に表現することができる。

比較のため、図-2(b)に岩盤を多孔質媒体としてモデル化した場合の格子状のモデルを示す。この場合、対象とする岩盤を多孔質媒体として見ることで見ることのできる程度のマクロな見方をしている。このモデルの場合、サイコロ状のグリッド毎に外からの流量や圧力値を与え、浸透流解析を行うが、逆解析の対象となるのは格子間浸透率で

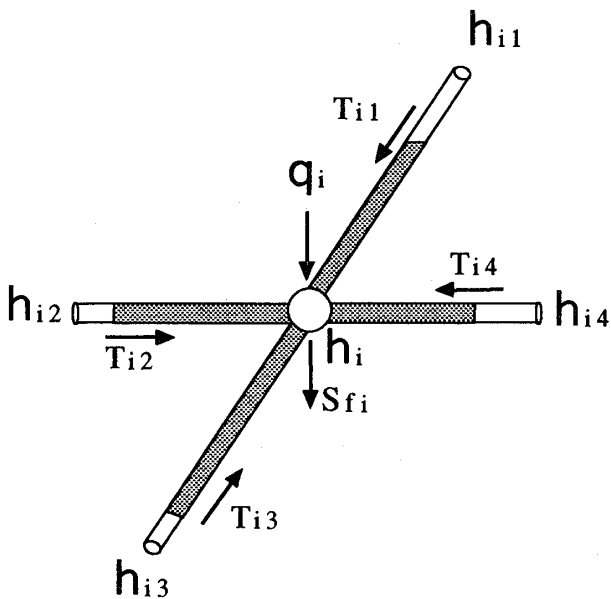


図-3 一つの交点に着目した水位計算関係図
(田中他 (1994)¹⁾に加筆)

Fig. 3 A constituent node of a network, where piezometric head value is controlled by equation(1) (Tanaka et al., 1994)

ある。

3・2 Don-Chanモデルにおける水位計算の基本方程式

Don-Chanモデルでは、各交点が水位を持つ。図-3のように、各交点の水位計算は、その交点に外部から与えられる注水または揚水と、管路で結ばれた隣の交点の水位に影響され、その基礎方程式は、以下の通りである。

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

- N_i : 交点 i に隣接する交点の数
 T_{ij} : 交点 i と、それに隣接する j 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 における水頭値 [L]
 h_{ij} : 交点 i に隣接する j 番目の交点における水頭値 [L]
 ΔL_{ij} : 交点 i と、それに隣接する j 番目の交点を結ぶ

管路の長さ [L]

Q_i : 交点 i に外部から流入する量 [$L^3 T^{-1}$]

S_{fi} : 交点 i が受け持つ貯留量 [L^3]

Δt^n : 計算上の時間ステップ間隔 [T]

添字 n : 時間ステップ

A_{ij} : 交点 i と、それに隣接する j 番目の交点を結ぶ管路の断面積 [L^2]

K_{ij} : 交点 i と、それに隣接する j 番目の交点を結ぶ管路の透水係数 [$L T^{-1}$]

3・3 Don-Chanモデルと多孔質媒体としたモデルとの比較

Don-Chanモデルによる浸透流解析と、岩盤を多孔質媒体としてモデル化し、差分法で浸透流解析する場合とを比較すると、以下ようになる。なお、ここでいう浸透流解析とは、発信する点において圧力、または流量を与えることにより、その他の全点において圧力値を計算することである。

① Don-Chanモデル

- ・亀裂の位置・走向・傾斜といった水理地質情報を直接的かつ容易にモデルに取り込むことができる。
- ・取り込む亀裂面の枚数や解析領域の大小に左右されるものの、比較的浸透流解析にかかる計算時間が短い。

② 多孔質媒体としてモデル化

- ・地質に限定されず、発信点の圧力または流量のデータがあれば解析することができる。
- ・格子状のモデルであれば、モデル作成が非常に簡単である。
- ・透水係数は対象領域をグリッドで切った部分毎の平均とする。
- ・浸透流解析の計算時間は解析領域の規模に依存する。

実際に、この二つのモデルを用いて浸透流解析する際は、対象とする領域に合わせて、各々の特長を活かすようにすることが重要である。

4 3次元浸透流逆解析アルゴリズム

4・1 3次元浸透流逆解析の流れ

3次元浸透流逆解析では、発信点での圧力または流量の経時的データおよび受信点での圧力経時データから、解析領域中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。Don-Chanモデルの場合、(1)式で示したように、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

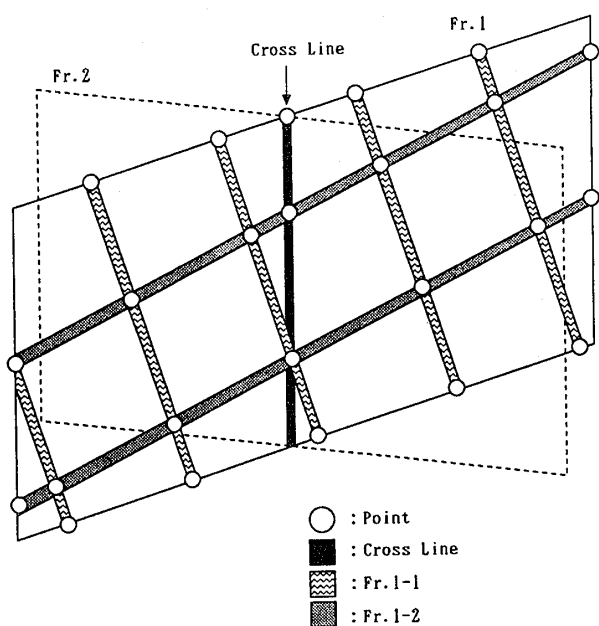


図-4 (a) Don-Chanモデルでの透水係数の与え方
Fig. 4 (a) Schematic diagram showing way to set hydraulic conductivity

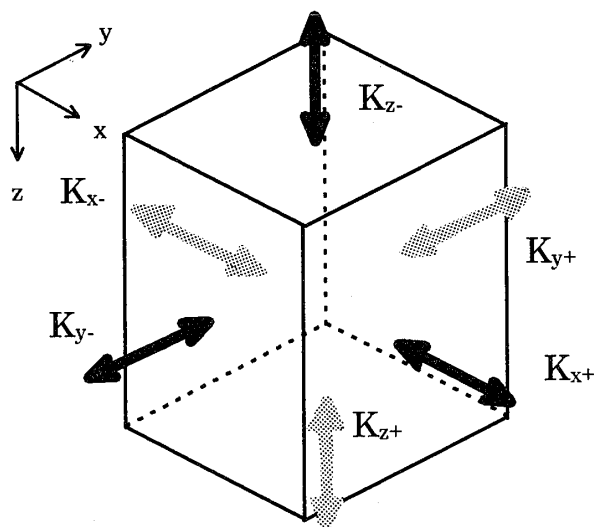


図-4 (b) 多孔質媒体としてモデル化した場合の格子間浸透率の与え方 (増本 (1995)³⁾に加筆)
Fig. 4 (b) Schematic diagram showing way to set inter-grid permeability (Masumoto, 1995)

数に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、亀裂面の交差部が大きな水みちとなることが多く、次に亀裂面自体の透水性が問題となるという、既往の水みちの構造と特性に関する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亀裂の交線、各亀裂毎に透水係数を求めるものとした。具体的には、図-4 (a)に示すように、亀裂面上の2方向の管路および亀裂の交線単位で与えた透水係数を未知数

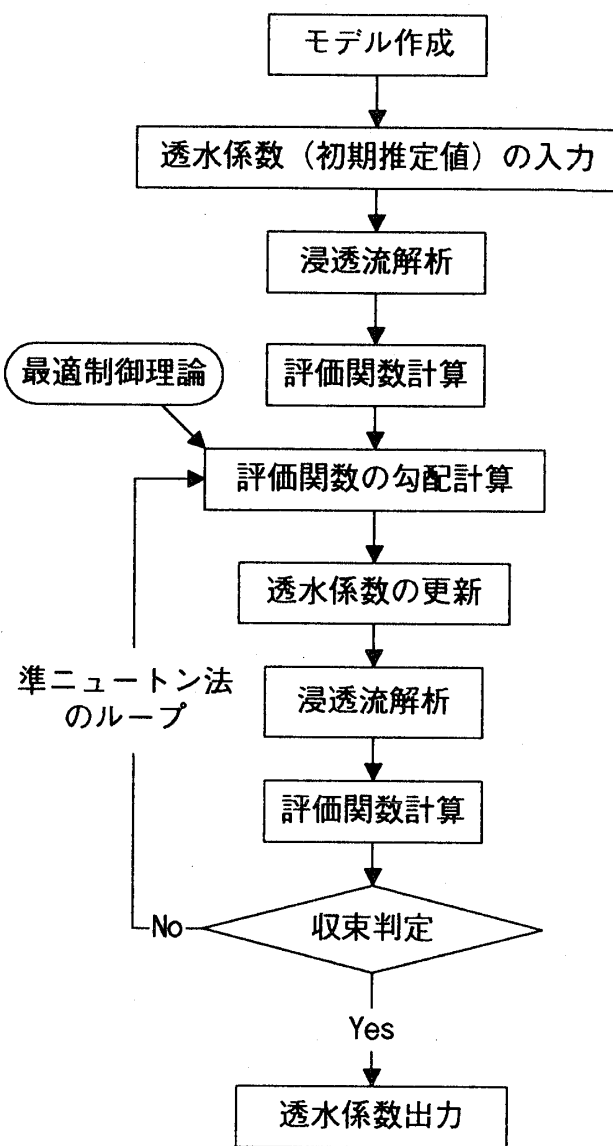


図-5 3次元浸透流逆解析フローチャート
Fig. 5 Flow chart for numerical inversion

とする。これに対して、多孔質媒体としてモデル化する場合、図-4 (b)のように格子状モデルの各方向毎の格子間浸透率が未知数となる。

3次元浸透流逆解析の流れを図-5に示す。おおまかな流れとしては、亀裂の位置、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、岩盤物性値と透水係数の初期推定値を入力し、浸透流順解析をおこなう。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、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めることであり、それは非線形最適化問題となる。本手法では、評価関数を非線形数値解析（順解析）で得られる計算圧力値で構成されること、未知数である透水係数の数が多いことから、計算量および収束性を考慮して準ニュートン法を用いて最適化をおこなう。（増本（1995）^{31）}

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回微分値の計算に伴う順解析計算に費やされる。筆者らは多孔質媒体の逆解析において用いた最適制御理論を適用し、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・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。具体的には、本手法では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。

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

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

4・3 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値を小さくする、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 $\partial J / \partial K$ の計算は、随伴関数ベクトル q 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。

$$J = \int f_0(t, h, K) dt \quad (3)$$

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。

$$\frac{h_i^n - h_i^{n-1}}{\Delta t^n} = f_i^n(t, h^n, K) \quad (4)$$

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。

$$\frac{q_i^n - q_i^{n-1}}{\Delta t^n} = - \sum_{j=1}^N \left(q_j^{n-1} \frac{\partial f_j^n}{\partial h_i^n} \right) + \frac{\partial f_0^n}{\partial h_i^n} \quad (5)$$

$$q_i^{N+1} = 0 \quad (\text{終端条件}) \quad (6)$$

ただし、 N は全交点の数である。

$$\frac{\partial J}{\partial K_{ij}} = \sum_{n=1}^{Nt} \sum_{io=1}^N \left\{ -q_{io}^{n-1} \frac{\partial f_{io}^n(h^n, K)}{\partial K_{ij}} \right\} \quad (7)$$

(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してみる。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。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{io}^n}{\partial K_{ij}} &= \frac{\partial}{\partial K_{ij}} \left\| \frac{1}{s_{fio}} \left[\sum_{jo=1}^{Nq} \left\{ \frac{A_{iojo} K_{iojo}}{\Delta L_{iojo}} (h_{iojo}^n - h_{io}^n) \right\} + Q_{io} \right] \right\| \\ &= \frac{1}{s_{fio}} \sum_{jo=1}^{Nq} \left\{ \frac{A_{iojo} (h_{iojo}^n - h_{io}^n)}{\Delta L_{iojo}} \cdot \frac{\partial K_{iojo}}{\partial K_{ij}} \right\} \\ &= \begin{cases} \frac{1}{s_{fio}} \sum_{jo=1}^{Nq} \frac{A_{iojo} (h_{iojo}^n - h_{io}^n)}{\Delta L_{iojo}} & (K_{iojo} = K_{ij}) \\ 0 & (K_{iojo} \neq K_{ij}) \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N \left(q_j^{n-1} \frac{\partial f_j^n}{\partial h_i^n} \right) &= \sum_{j=1}^N \left\| q_j^{n-1} \cdot \frac{\partial}{\partial h_i^n} \left[\frac{1}{s_{fij}} \left\{ \sum_{k=1}^{Nq} \frac{A_{ijk} K_{ijk}}{\Delta L_{ijk}} (h_{ijk}^n - h_i^n) + Q_i \right\} \right] \right\| \\ &= \sum_{j=1}^N \left\{ q_j^{n-1} \cdot \frac{1}{s_{fij}} \sum_{k=1}^{Nq} \frac{A_{ijk} K_{ijk}}{\Delta L_{ijk}} \frac{\partial}{\partial h_i^n} (h_{ijk}^n - h_i^n) \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、

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

であるから、

$$\frac{\partial f_i}{\partial h_i^n} = \begin{cases} -\frac{1}{S_{fj}} \sum_{k=1}^{N_i} \frac{A_{ik} K_{ik}}{\Delta L_{jk}} \dots & \text{(j番目の点がi番目の} \\ & \text{点のとき)} \\ \frac{1}{S_{fj}} \cdot \frac{A_{ik} K_{ik}}{\Delta L_{jk}} & \text{(j番目の点がi番目の} \\ & \text{点と直接繋がっているとき)} \\ 0 & \text{(j番目の点がi番目の} \\ & \text{点と直接繋がっていないとき)} \end{cases} \quad (11)$$

(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・4 Don-Chanモデルと多孔質媒体としてモデル化した場合の逆解析上の比較

Don-Chanモデルと多孔質媒体としてモデル化した場合の違いを以下に示す。

① Don-Chanモデルの場合

- ・各亀裂面の各方向毎、亀裂面同士の交線の透水係数が解析結果となる。
- ・未知数となる透水係数の種類の数は亀裂面の枚数に依存する。
- ・地質情報と合致した逆解析が可能である。
- ・ネットワークそのものは固定されるため、透水係数分布を合わせるだけでは不十分である場合があり、その場合はネットワークモデルの見直しが必要である。
- ・順解析計算時間が比較的時間短いため、呼応して逆解析計算時間も比較的時間短。

② 多孔質媒体としてモデル化した場合

- ・解析格子の方向別の格子間透水係数が解析結果となる。
- ・グルーピングする場合は別だが、未知数となる透水係数の種類は、モデルの格子数に比例する。
- ・地質情報がなくても逆解析することができるが、反面、地質情報と矛盾する解析結果となることもある。
- ・逆解析結果を視覚化するのが非常に簡単である。

実際に、パルステストデータから対象岩盤の透水係数を解析する際は、地質情報からどちらのモデルを用いて解析するかを検討し、特長を使い分けることが重要となる。また、余裕があれば、双方のモデルで逆解析をおこない、お互いを補足し合う形が望ましいと考えられる。

5 数値実験による逆解析手法の評価

5・1 目的と数値実験の流れ

本章ではケース1として、単純なモデルにより、逆解析プログラムの動作確認および、Don-Chanモデルの逆解析上の特徴を検討する。次にケース2として、実サイトを基にして作成した亀裂ネットワークモデルを用いて数値実験を行い、実スケールでの逆解析の適用性について基礎的な検討を行う。

数値実験の手順は図-6の通りである。まず、亀裂の位置、走向、傾斜および枚数を決め、幾何学的にネットワークモデルを構築する。また観測孔となるボーリング孔を管路としてネットワークモデルに組み込む。次に各亀裂および各交線、ボーリング孔の各管路の透水係数を設定する。次に、パルステストを模擬的に行うため、発信点に圧入する流量の波形を設定し、まずは浸透流順解析を行う。このときの浸透流順解析結果を観測圧力値とみなし、透水係数分布を未知として逆解析を行う。

5・2 逆解析コードの妥当性

本節ではケース1として、割れ目面枚数が非常に少なく、交点数も少ないモデルを用いて逆解析コードの妥当性を評価する。

5・2・1 作成したモデルおよび条件

図-7に数値実験で用いたモデルを示す。解析領域を30m×30m×30mの立方体とし、3枚の亀裂によりモデルを構築した。亀裂面は低角度のものが2枚(F1, F2),

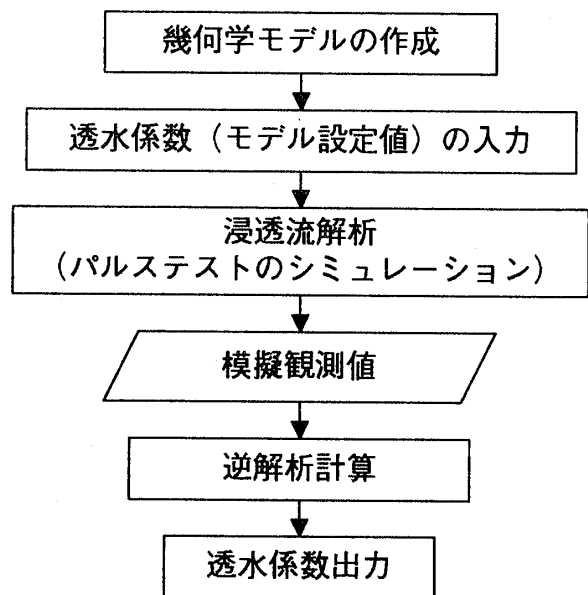


図-6 数値実験手順

Fig. 6 Flow chart for the numerical experiments

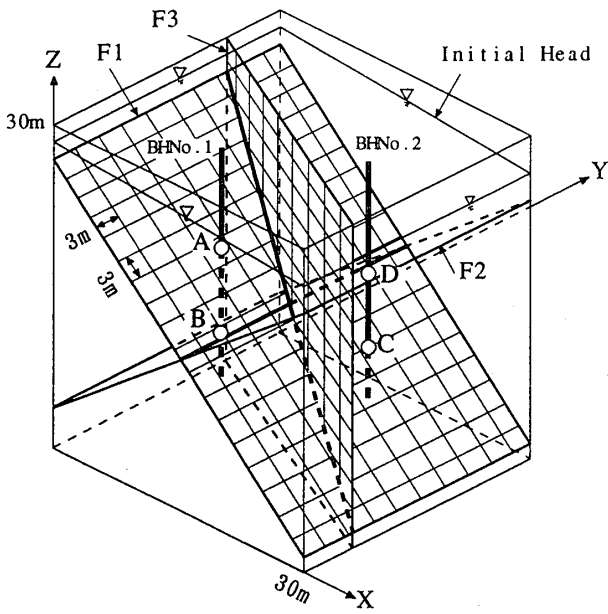


図-7 数値実験で設定したモデル (ケース1)
(杉村他 (1997)⁵⁾ に加筆)
Fig. 7 Model set in numerical experiment (Case 1)
(Sugimura et al., 1997)

高角度のもの1枚 (F3) からなる。その後、各亀裂面上に3mピッチで互いに直交する管路を格子状に発生させた。また、亀裂と亀裂の相互の交線部も管路で表現し、前述の亀裂の管路と併せて管路系を構成した。管路網の総交点数は、538点である。高角度亀裂F3を挟み、低角度亀裂F1, F2の2枚と交差するボーリング孔を2本設置し、それぞれF1, F2と交差するA~Dの4点をパルステストでの発信点および受信点とした。解析領域の境界条件としては、X軸の正方向に動水勾配をつけ、X軸方向の境界面上の交点は定水位とし、その他の境界面上の交点はNo-Flowとした。

各亀裂面および交線の透水係数のモデル設定値は表-1のように、大きな水みちとなると考えられる交線の透水係数を比較的大きく設定した。ここでは、管路断面積、1交点あたりの貯留量は既知で一定であると仮定し、それぞれ 0.05m^2 、 $5 \times 10^{-5}\text{m}^2$ とした。

本検討では、観測点となる4点全てを順番に入れ替えて模擬試験を行った。発信区間では、注水圧力が+30mで30秒間一定となるよう、図-8のように流量を設定した。観測は注水停止後さらに30秒間行った。観測点の圧力応答を順解析で求め、これを模擬試験値とした。なお、これらの模擬試験値は1秒単位で求めている。

表-1 透水係数の設定値および初期推定値 (ケース1)
(杉村他 (1997)⁵⁾)

Table 1 Model value and Initial value of Hydraulic Conductivity (Case 1) (Sugimura et al., 1997)

区分	モデル設定値	初期値
Frac-1	1.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}
Frac-2	3.0×10^{-5}	//
Frac-3	2.0×10^{-5}	//
CrossLine 1-2	6.0×10^{-5}	//
CrossLine 1-3	8.0×10^{-5}	//
CrossLine 2-3	1.2×10^{-4}	//

(単位: m/sec)

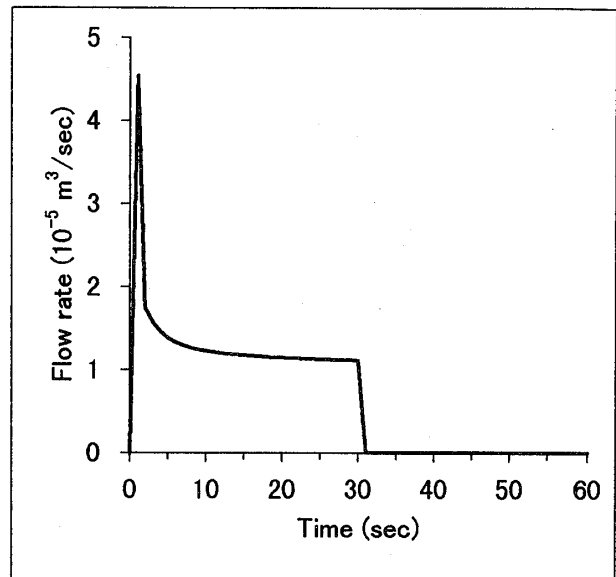


図-8 発信点で与えた流量の波形 (ケース1, A点発信の場合)

Fig. 8 Sample curve of injection flow rate (Case 1, Injection point: A)

透水係数の初期推定値としては、各透水係数値の平均から $6 \times 10^{-5}\text{m/sec}$ とした。

5・2・2 逆解析結果および考察

4章で示したように、観測点における水頭値から決定される評価関数を最小にするように透水係数分布を求めた。今回は収束状況を見るため、特に収束条件を厳しくし、逆解析反復回数100回まで計算させた。その最終的な透水係数の比較を表-2に示す。また逆解析反復に対する、評価関数の推移を図-9に、代表的な圧力値としてA点発信の場合のA点およびB点の圧力応答をそれぞれ図-10に、各透水係数及びそれぞれの透水係数による評価関数の勾配の絶対値の推移を図-11に示した。ただし圧力値は初期圧からの差を示している。

表-2 反復回数100回目での透水係数計算値(ケース1)
(杉村他(1997)⁵⁾)

Table 2 Hydraulic Conductivity obtained after the 25th step of iteration (Case 1) (Sugimura et al., 1997)

区分	初期値	逆解析結果	モデル設定値
Frac-1	6.0×10^{-5}	1.01×10^{-5}	1.0×10^{-5}
Frac-2	"	2.95×10^{-5}	3.0×10^{-5}
Frac-3	"	3.20×10^{-5}	2.0×10^{-5}
CrossLine 1-2	"	6.45×10^{-5}	6.0×10^{-5}
CrossLine 1-3	"	4.60×10^{-5}	8.0×10^{-5}
CrossLine 2-3	"	5.08×10^{-5}	1.2×10^{-4}

(単位: m/sec)

図-9をみると、逆解析の反復回数が増えるにつれ、評価関数値は小さくなり、収束に近づいていることがわかる。

図-10は、発信点Aの圧力値のマッチング状況を示している。この図より、初期推定値から反復20回に至るまでに非常によくマッチングしていることがわかる。また、受信点Bをみると、反復回数が増す毎にモデル設定値に近づいていることがわかる。

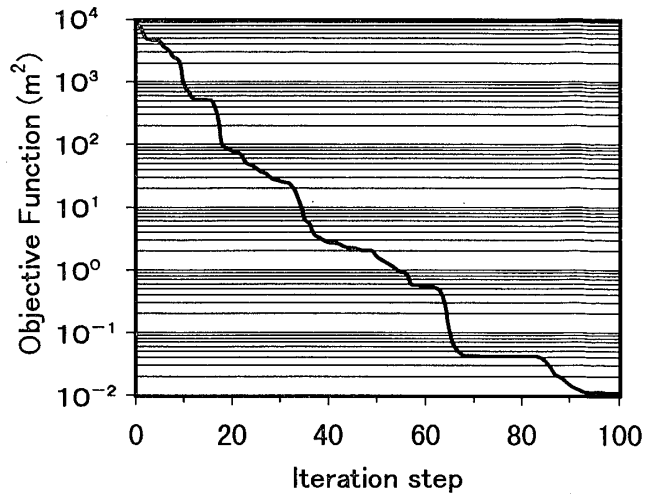


図-9 逆解析反復回数に対する評価関数の推移(ケース1)
Fig. 9 Change of Objective function with iteration step in the inversion (Case 1)

次に図-11をみると、各亀裂面および交線の透水係数がモデル設定値に対してどのような動きをしているかは一様ではない。亀裂面上の透水係数は比較的良好にマッチングされている。しかし、評価関数が小さくなり、観測

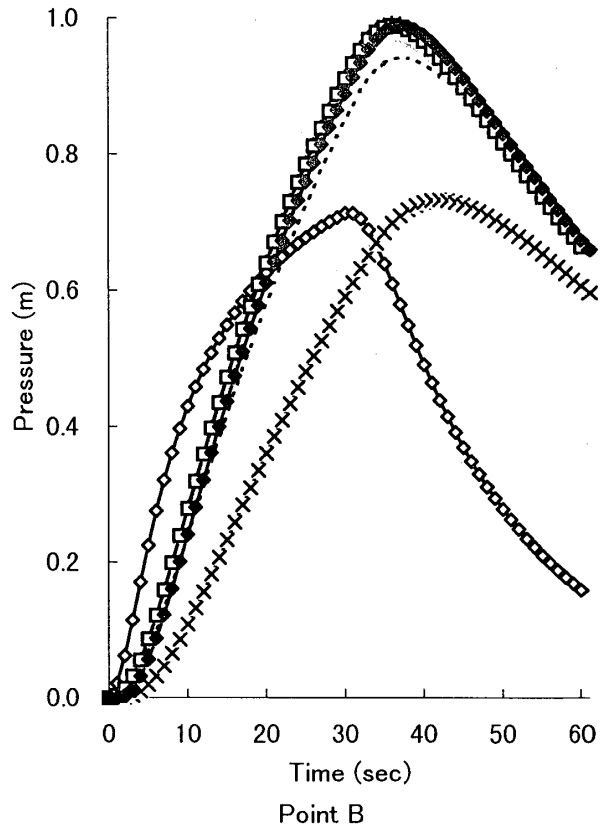
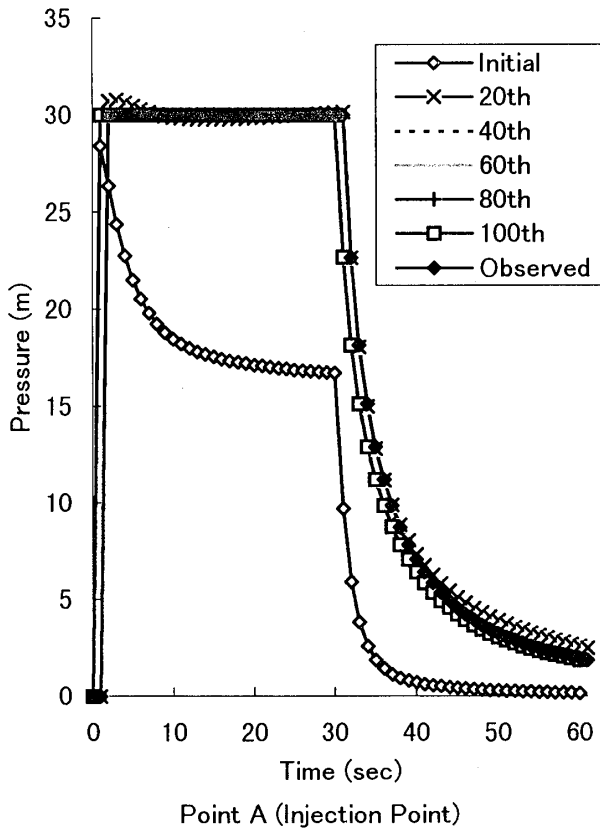


図-10 観測圧力値と計算圧力値の比較(A点からの発信)

Fig.10 Comparison of calculated piezometric head performance with observed one (Injection point : A)

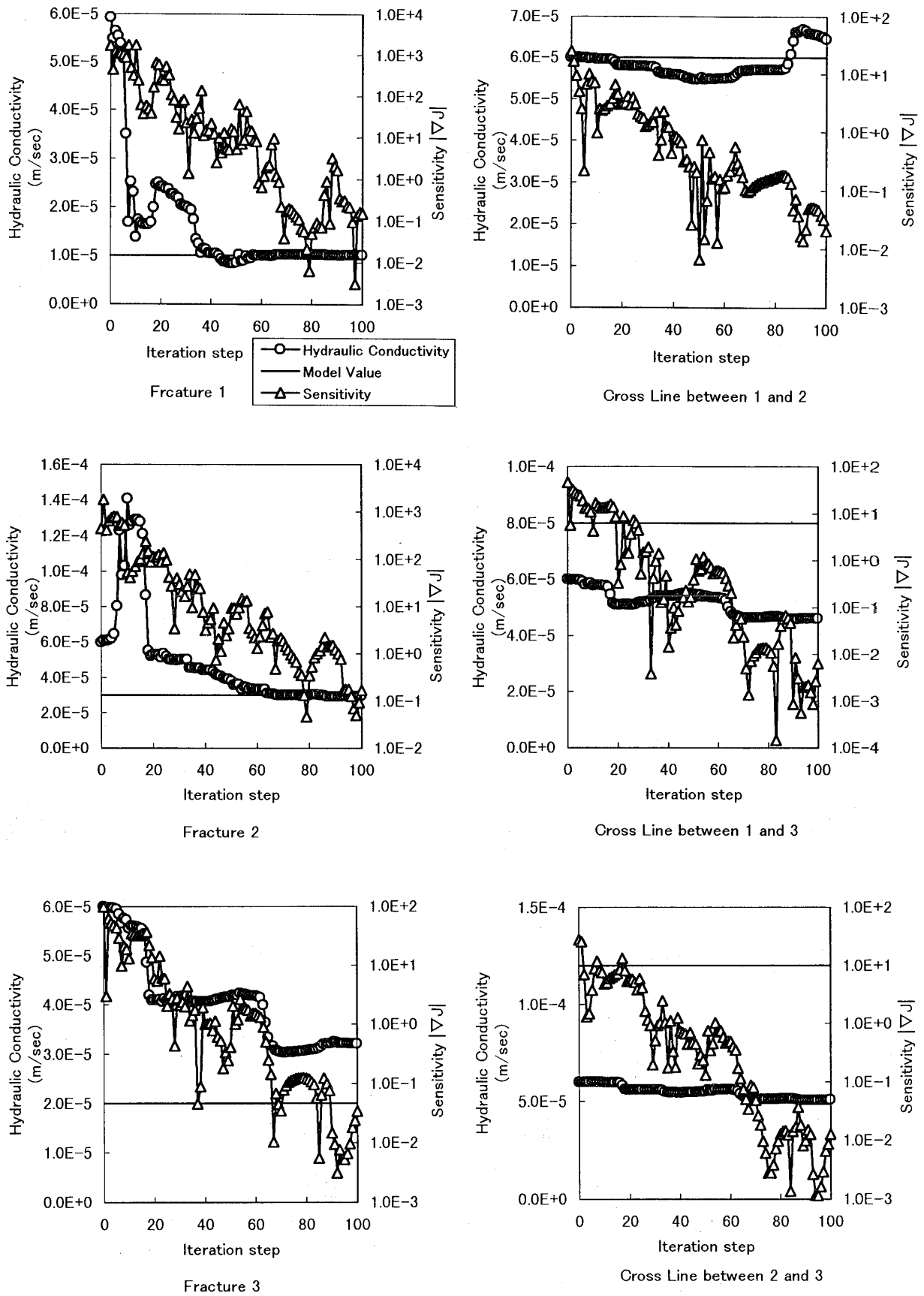


図-11 逆解析反復回数に対する各透水係数の推移 (ケース1)
 Fig.11 Change of Hydraulic Conductivity with iteration step in the inversion (Case 1)

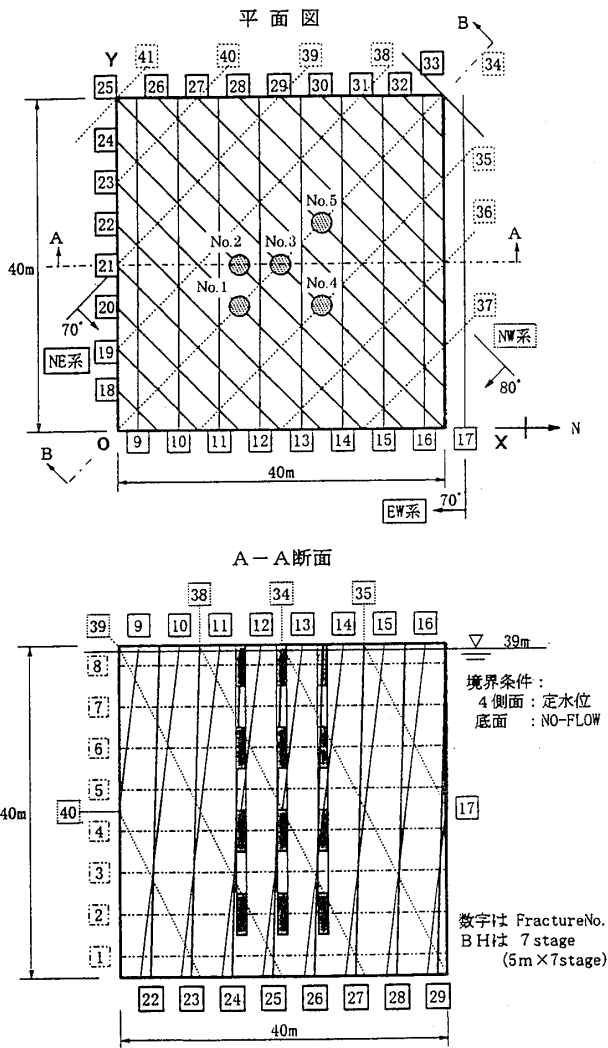


図-12 数値実験で設定したモデル (ケース2)
(杉村他 (1998)?)

Fig. 12 Model set in numerical experiment (Case 2)
(Sugimura et al., 1998)

点における圧力値もマッチングされているにも関わらず、交線の透水係数は逆にモデル設定値から遠ざかっているものも見受けられる。この原因は観測点が交線上になく、亀裂面上のみに存在していたためと考えられる。このことは各透水係数の評価関数に対する感度を示す、評価関数の勾配の絶対値の大きさが、亀裂面のものに比べ、交線のものが小さいということからもわかる。これらより観測点の位置を効果的に配置することの重要性が示唆される。

以上のことにより、本逆解析コードの妥当性は証明されたものの、パルステストにおける観測点の配置に対する課題が示された。

表-3 透水係数の設定値および初期推定値 (ケース2)
(杉村他 (1998)?)

Table 3 Model value and Initial value of Hydraulic Conductivity (Case 2) (Sugimura et al., 1998)

区分	モデル設定値	初期値
水平系割れ目 (k1)	1.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
NE-SW系割れ目 (k2)	3.0×10^{-6}	〃
E-W系割れ目 (k3)	1.0×10^{-5}	〃
NW-SE系割れ目 (k4)	5.0×10^{-6}	〃
水平/NE-SW交線 (k5)	3.0×10^{-5}	1.5×10^{-5}
水平/E-W交線 (k6)	5.0×10^{-6}	〃
水平/NW-SE交線 (k7)	3.0×10^{-6}	〃
NE-SW/E-W交線 (k8)	5.0×10^{-5}	〃
NE-SW/NW-SE交線 (k9)	5.0×10^{-6}	〃
E-W/NW-SE交線 (k10)	5.0×10^{-6}	〃

(単位: m/sec)

5・3 サイトスケールでの数値実験への適用

前節の数値実験により、Don-Chanモデルにおける逆解析コードの正当性を確認した。本節ではケース2として、実サイトを基にして作成した、亀裂ネットワークモデルを用いて数値実験を行い、実スケールでの逆解析の適用性について基礎的な検討を行う。

5・3・1 作成したモデルおよび条件

図-12に数値実験で用いたモデルを示す。解析領域を40m x 40m x 40mの立方体とし、4系統41枚の亀裂によりモデルを構築し、図中にあるように方位を定めた。亀裂の系統としては、実サイトの地質調査結果に基づき、水平亀裂が1系統、高角度亀裂がNE系、EW系、NW系の3系統で、それぞれ一定の間隔で規則的に亀裂を発生させた。その後、各亀裂面上に3mピッチで互いに直交する管路を格子状に発生させ、亀裂面の交線も併せて管路系を構成した。管路網の総交点数は、21,003点である。ここでも、管路断面積、各交点毎の貯留量は既知で一定であると仮定し、それぞれ 0.05m^2 、 $5 \times 10^{-6}\text{m}^2$ とした。解析領域の境界条件としては、境界面上の交点を定水位とした。

各亀裂系の交線、各亀裂面毎の透水係数の設定値は、表-3の通りである。

パルステストで用いるボーリング孔は、図-12に示すように5本(各35mずつ)配置し、5m毎にステージ分割を行い観測区間とした。観測区間数は注水区間も含めて35区間である。本検討では、図中のBHN No. 3孔の第1、第3、第5、第7ステージを注水区間とし、注水区

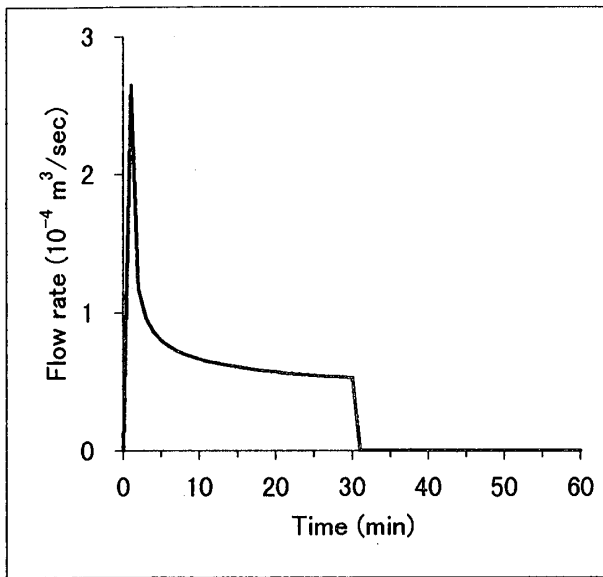


図-13 発信点で与えた流量の波形 (ケース 2, BHN0.3 第 1 ステージ発信の場合)

Fig. 13 Sample of injection flow rate (Case 2, Injection stage: the 3rd stage in BHN0.3)

表-4 反復回数25回目での透水係数計算値 (ケース 2) (杉村他 (1998)⁷⁾)

Table 4 Hydraulic Conductivity obtain after the 25th step of iteration (Case 2) (Sugimura et al., 1998)

区分	初期値	逆解析結果	モデル設定値
水平系 割れ目 (k1)	5.0×10^{-6}	1.08×10^{-6}	1.0×10^{-6}
NE-SW系 割れ目 (k2)	"	3.10×10^{-6}	3.0×10^{-6}
E-W系 割れ目 (k3)	"	1.01×10^{-5}	1.0×10^{-5}
NW-SE系 割れ目 (k4)	"	5.01×10^{-6}	5.0×10^{-6}
水平/NE-SW 交線 (k5)	1.5×10^{-5}	2.97×10^{-5}	3.0×10^{-5}
水平/E-W 交線 (k6)	"	4.89×10^{-6}	5.0×10^{-6}
水平/NW-SE 交線 (k7)	"	2.62×10^{-6}	3.0×10^{-6}
NE-SW/E-W 交線 (k8)	"	4.97×10^{-5}	5.0×10^{-5}
NE-SW/NW- SE交線 (k9)	"	5.59×10^{-6}	5.0×10^{-6}
E-W/NW-SE 交線 (k10)	"	5.21×10^{-6}	5.0×10^{-6}

(単位: m/sec)

間を入れ替えて計 4 回の模擬試験を行った。発信区間では、注水圧力が +30m で 30 分間一定となるよう、図-13 のように流量を設定した。観測は注水停止後さらに 30 分間行った。なお、これらの模擬試験値は 1 分単位で求めている。

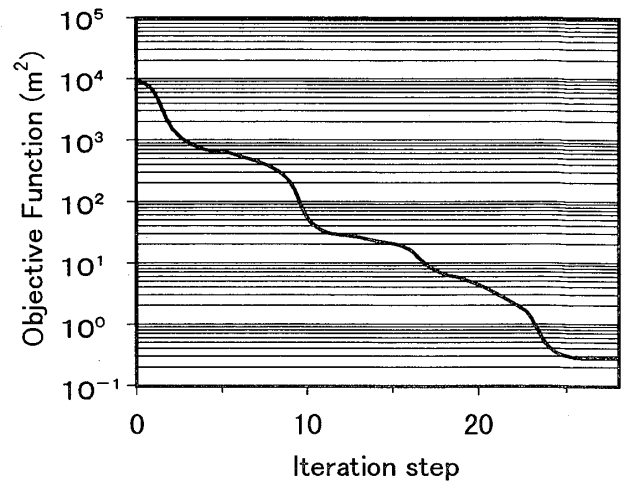


図-14 逆解析反復回数に対する評価関数の推移 (ケース 2)

Fig. 14 Change of Objective function with iteration step in the inversion (Case 2)

初期推定値としては、各系統のオーダーをとるため、亀裂系、交線毎にそれぞれ透水係数の平均値をとり、その値をとった。

5・3・2 逆解析結果

今回は逆解析反復を 25 回まで行った。その最終的な透水係数の比較を表-4 に示す。また、逆解析反復回数毎の評価関数の推移を図-14 に示す。同様に、BHN0.3 孔の第 1 ステージを注水区間とした場合の代表的な圧力値を図-15 に示す。また、代表的な透水係数として、低角系、NE 系、E-W 系亀裂および低角系-NE 系、NE 系-E-W 系の交線の透水係数および評価関数の勾配の絶対値の推移を図-16 に示す。

図-14, 15 をみると、逆解析の反復回数を重ねる毎に、およそ全観測点で安定して解に近づいていることがわかる。反復回数 25 回目での評価関数の値は 0.3 m^2 程度であり、全てのデータの数 $\times 35$ 観測点 $\times 60$ タイムステップ $\times 4$ 回の試験 = 8,400 個ということから、1 観測点あたりの観測値からの圧力差は、単純平均で $6 \times 10^{-3} \text{ m}$ 程度であるといえる。

図-16 をみると、多少の増減はあるものの、逆解析反復により透水係数が全体的にモデル設定値に近づき、安定して収束に近づいていることがわかる。

以上により、実際のパルステストに対応できる規模のモデルでの逆解析計算が可能であることが示された。

5・4 数値実験のまとめ

以上の数値実験により、以下のことが言える。

まず、本逆解析コードの妥当性は証明された。

次に、ケース 1, 2 での逆解析結果を比べてみると、

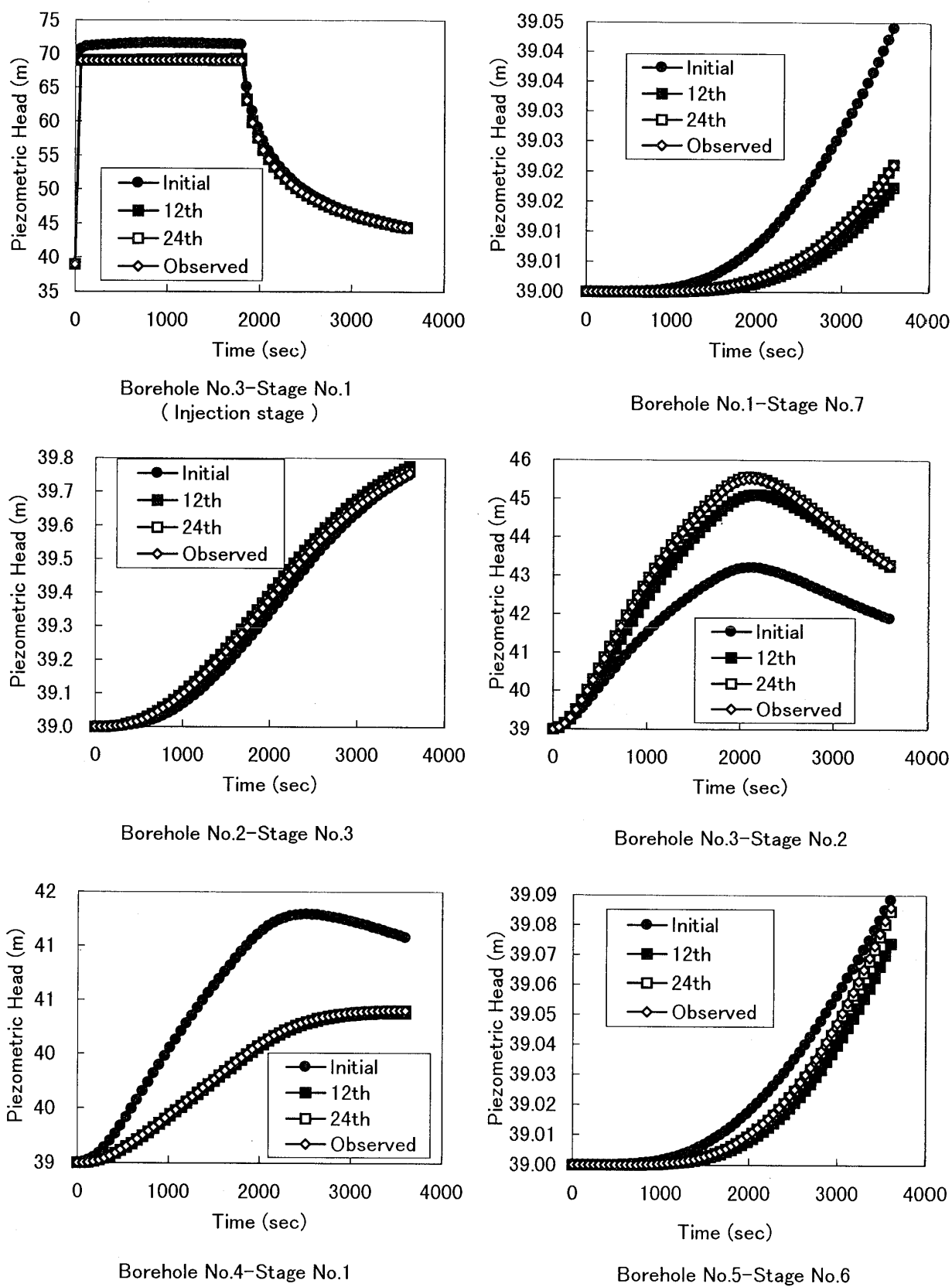


図-15 BHN.3 孔第 1 ステージ発信時の観測水位と計算水位の比較 (ケース 2)

Fig. 15 Comparison of calculated piezometric head performance with observed one (Injection stage : the 3rd stage in BHN.3) (Case 2)

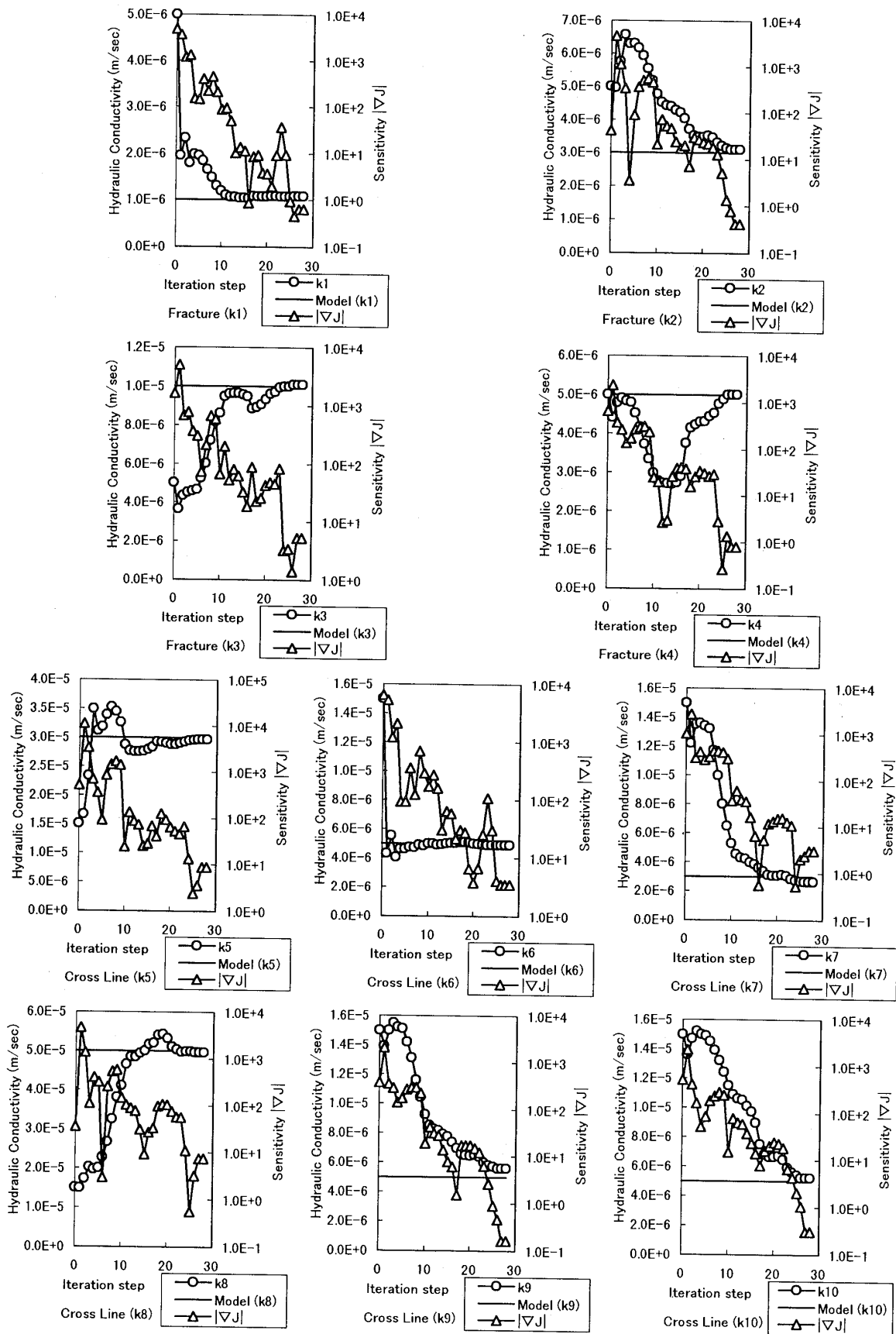


図-16 逆解析反復回数に対する各透水係数の推移 (ケース 2)

Fig.16 Change of Hydraulic Conductivity with iteration step in inversion (Case 2)

2での逆解析結果の方が安定して収束に向かっている。この原因としては、以下のことが考えられる。

- ケース1よりもケース2での逆解析の方が未知数となる透水係数の数に対して、観測データの数が多いため
- ケース2では亀裂面や交線に対して観測点がほぼ均等に配置されており、透水係数分布全体として収束に近づいたため

また、今回の数値実験では透水係数の初期推定値に全ての透水係数の平均値をとった。しかし、逆問題では初期推定値がモデル設定値から非常に遠くかけ離れている場合、収束に向かわないことがある。その閾値を検討することが今後の課題として挙げられる。

6 まとめと今後の課題

亀裂ネットワークモデルの一つであるDon-Chanモデルを、非線形最小二乗法に最適制御理論を適用した3次元浸透流逆解析手法に導入した。これにより、岩盤を近似的に多孔質媒体としたモデルに加えて亀裂ネットワークモデルでも、透水性を評価することができるようになった。

Don-Chanモデルを用いた本逆解析手法には次の二つの長所がある。

- 地質情報を直接的にモデルに取り込むことができる。
- 亀裂系岩盤などにおいて、透水係数の大きさに極端な差がある水みちが混在する場合にも対応できる。
- 最適な透水係数分布が自動的に計算され、計算時間も比較的短いため、モデルの妥当性評価へのフィードバックも速い。

また、数値実験によるケーススタディにより、以下の結果が得られた。

- 実際のハイドロパルストモグラフィーに利用可能な規模のモデルでの逆解析が可能である。
- 透水係数分布を精度良く安定して求めるためには、パルステストにおける観測点の効果的な配置が重要である。

この論文では、あくまでモデル化された亀裂を出発点として、亀裂面上の水みちあるいは交線部の透水係数を計算する手法そのものの開発について述べている。したがって、実際に領域の水理特性を評価する一貫した技術にしていくためには、モデル化そのものの技術と、そのための水理地質調査手法、計算結果の解釈、評価をする技術などを、逆解析手法と整合させる形で構築していくことが必要である。

今回開発した逆解析手法を加えることによって、ハイドロパルストモグラフィーは、以下の二つの逆解析手法

をもつことになる。

- 多孔質媒体に近似したモデルでの逆解析
- 亀裂ネットワークモデルでの逆解析

5-4節でも述べたように、逆解析における透水係数の初期推定値の取り方は、計算の収束性だけでなく、再構築される透水係数分布にも影響する。これは上述の逆解析手法の両方について言えることである。これは逆問題全般について、解の一意性の問題として避けられない課題として残るものである。この問題については、二つの逆解析を並行して実施し、地質情報も考慮に入れた上で両結果を比較することが、問題解決への一つの方法であると考えられる。また、この比較は、ハイドロパルストモグラフィー全体の技術を相乗的に向上させることにもつながり、より複雑な構造を持つ岩盤の水理特性評価を可能にするものであると期待する。

参考文献

- 1) 田中達也, 渡辺邦夫, 前川恵輔, 中村直昭: 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), 応用地質35巻3号, 1994. 8, pp. 22-33.
- 2) 平松晋一, 伊藤一誠: パルステストのダム基礎岩盤への適用例, 日本応用地質学会平成6年度研究発表会講演論文集, 1994. 10, pp. 143-146.
- 3) 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, 1995. 3.
- 4) 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. 9, pp. 236-237.
- 5) 杉村淑人, 松田育子, 富森叡, 渡辺邦夫: 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, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1997. 1, pp. 229-233.
- 6) 森田豊, 杉村淑人, 渡辺邦夫: ダム基礎岩盤を対象とした水みちネットワークモデル, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1997. 1, pp. 234-238.
- 7) 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, 1997. 12, pp. 229-246.
- 8) 杉村淑人, 松田育子, 富森叡, 増本清, 渡辺邦夫: 水みちネットワークモデルを用いた浸透流逆解析に関する数値実験, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 1998. 1, pp. 371-376.

