遺伝的アルゴリズムを用いた多層帯水層地盤に おける揚水試験データの逆解析方法

竹下祐二*・安井克豊**・河野伊一郎*

Inverse Analysis of Hydraulic Properties of Multilayered Aquifer from Pumping Test Data Using Genetic Algorithms

Yuji TAKESHITA*, Katsutoyo YASUI** and Ichiro KOHNO*

Abstract

Pumping tests are usually performed under the multilayered aquifer system. The exact determination of hydraulic properties of each aquifer is very important for the correct groundwater flow prediction. It is, however, difficult to analyze the data obtained from the pumping test under these conditions "analytically".

In this paper, a new approach to parameter determination methodology is presented which estimates the soil hydraulic properties from pumping test data with the aid of Genetic algorithms (GA). GA belong to a family of increasingly popular global optimization methods that are designed to overcome the multimodality of the objective function without incurring the enormous expense of exhaustive search. GA are based on the mechanics of natural selection and natural genetics, which combine an artificial survival of the fittest with genetic operators abstracted from nature. The advantages of the proposed method are in the possibility of identifying the optimal hydraulic properties of aquifers. Pumping test data which are simulated under the multilayered conditions are used to evaluate availability of our proposed method.

Key words: pumping test, inverse analysis, multilayered aquifer, Genetic Algorithms, numerical analysis, groundwater

* 岡山大学環境理工学部 (

、E-mail:

)

** 岡山大学大学院工学研究科

要 旨

地下水の挙動を定量的に把握するためには、透水係数や貯留係数といった地盤の浸透特性値の精度良い計測が重要であり、その原位置計測手法としては揚水試験がよく用いられている。しかし、多層帯水層地盤等の複雑な地盤条件や試験条件下における揚水試験データの解析に対しては、従来の理論解法の適用は困難である。本文では、多層帯水層地盤にて実施された揚水試験データから多数の浸透特性パラメータを安定かつ簡便に算定する方法を提案する。遺伝的アルゴリズムは生物の進化の過程である自然淘汰・交叉・突然変異を模した多点探索法であり、組み合わせ最適化問題の近似解法の一つとして注目されている。本文で提案する方法の妥当性は、2層被圧帯水層地盤モデルにおける揚水試験のシミュレーションデータを用いて吟味し、各帯水層の透水係数の異方性および比貯留係数が同時に精度良く算定される結果を得た。

キーワード：揚水試験、逆解析、多層帯水層、遺伝的アルゴリズム、数値解析、地下水

1. はじめに

地下水の挙動を定量的に把握するためには、透水係数や貯留係数といった地盤の浸透特性値を精度良く求めることが極めて重要である。近年、地下水問題は多様化、複雑化の様相を呈するようになり、複雑な地盤条件のもとで浸透特性値を評価する必要が生じてきた。原位置における浸透特性値の計測手法としては揚水試験がよく用いられており、その解析手法としては、Theis法やJacob法に代表される理想的な被圧帯水層状態での理論解法を用いることが多い。揚水試験データの解析方法に関する従来の研究は、複雑な帯水層条件や試験条件下で実施された揚水試験データの解析処理方法の検討を主な目的としてなされてきた。たとえば、漏水や異方性を有する帯水層や不完全貫入井、大口径井戸といった特定の揚水試験条件に対しての理論解が誘導され (Kruseman & Ridder, 1991; Dawson & Istok, 1991)、それらのタイプカーブも示されている (Reed, 1980)。

しかし、地盤条件や試験条件が理論解の誘導条件に適合しない場合には、浸透特性値の算定は困難である。一般に、沖積平野の多い我国では、多層帯水層地盤に遭遇する 경우가多く、地層汚染や地下水汚染といった地盤環境問題や地盤掘削工事の安全かつ合理的な施工を検討する問題等においては、各帯水層の浸透特性値を定量的に把握する

必要がある。多層帯水層における揚水試験データの解析に関する従来の研究として、Javandel & Witherspoon (1980, 1983) は、2層被圧帯水層地盤における揚水問題について、各帯水層における水頭分布、ならびに水位低下挙動のメカニズムの解明を試みているが、浸透特性の算定方法としての展開まではなされていない。

このような複雑な地盤条件下における揚水試験データの解析方法として、数値解析手法を用いた逆解析手法が提案されている (河野ら, 1989)。この方法は対象とする帯水層を数値的にモデル化して、計測データを最も良好にシミュレートできる帯水層モデルを同定することにより、帯水層モデルに含まれる浸透特性パラメータの推定を行う方法である。この解析方法の利点は、計測データを浸透解析によって数値解析的に処理することにより、従来の理論的な解析方法では考慮できなかった複雑な地盤条件および試験条件を数値モデル上で考慮でき、試験対象地盤の応答状態を最も良好に表わす浸透特性値を算定できる点である。しかし、多層帯水層地盤にて実施された揚水試験データに逆解析手法を適用し、各帯水層における複数の浸透特性パラメータを算定する際には、複数パラメータの同時推定に起因する解の不安定性や唯一解が得られない等の問題が生じ、パラメータの推定作業は必ずしも容易ではない。したがって、多層帯水層地盤における揚水試験データの逆解析

においては、多数の未知パラメータを推定するための実用的な逆解析アルゴリズムの適用が極めて重要となる。

本文では、このような状況を鑑みて、多層帯水層地盤にて実施された揚水試験データから多数の浸透特性パラメータを安定かつ簡便に算定できる逆解析手法として、遺伝的アルゴリズムと非定常浸透流解析手法とを組み合わせた方法を提案する。遺伝的アルゴリズムは生物の進化の過程である自然淘汰・交叉・突然変異を模した多点探索法であり、揚水試験データによる浸透特性値の算定問題を推定すべきパラメータの組み合わせ最適化問題として取り扱うことができる。また、目的関数の微係数などの情報を必要とせず、逆解析アルゴリズムとしてプログラミングが簡単であることも本アルゴリズムの特徴である。本文で提案する方法の有用性および妥当性は、2層被圧帯水層地盤モデルにおける揚水試験のシミュレーションデータを用いて吟味した。

2. 遺伝的アルゴリズムを用いた揚水試験データの逆解析方法

(1) 逆解析手法による揚水試験データの解析方法

地下水問題に逆解析手法を適用する場合には、種々のアプローチが考えられる(古市ら, 1989)が、ここでは揚水試験データの解析を間接法による逆問題としてとらえ、観測値と計算値の残差を目的関数とし、揚水試験データを近似できる帯水層モデルの同定を行う。観測値としては揚水試験によって計測される非定常地下水位データを用い、次式で示される重み付き残差平方和 $R(b)$ を最小にするパラメータ b を見出す手法を用いる。

$$R(b) = \sum_{j=1}^n W_j \{y_j - Y_j(b)\}^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

ここに、

y_j : 地下水位の観測値

$Y_j(b)$: 地下水位の計算値

b : 未知パラメータ; ($=b_1, b_2, \dots, b_m$)

W_j : 重み

n : 観測データ数

m : 未知パラメータ数

逆解析手法を用いて揚水試験データより帯水層モデルの同定を行う場合、帯水層モデルにおける未知パラメータの設定が重要である。一般に、対象とする帯水層は不均質であり、そのモデル化に際しては理論的に無数の未知パラメータが存在することになる。そこで、何らかの条件設定によって未知パラメータの数を減少させ、パラメータ次数を設定する作業が必要となる。本研究では、揚水試験によるインパクトが地下水に及ぶ範囲は広域な地下水問題と比較して狭い範囲であると考え、平面的な帯水層の不均質状況を細かく考慮するのではなく、帯水層の深さ方向の不均質性や透水係数の異方性に着目して、多層帯水層のモデル化を行うこととした。すなわち、帯水層における地層構成等の幾何学的な条件や外部水理境界条件は既知量として取り扱い、揚水試験における影響圏内を軸対称領域と近似した多層帯水層モデルの同定を行う。したがって、推定すべき未知パラメータは被圧状態の多層帯水層地盤を対象として、各帯水層における透水係数、比貯留係数を選定し、それらを同時に推定することを考える。

式(1)の解を得るためには、適切な最適化手法を用いて関数 $R(b)$ の最小値を探索する必要がある(中川ら, 1982)。図-1に目的関数が多峰性関数である場合の概念図を示す。この種の探索問題において、全探索を実行すれば原理的に解が得られることが明確であっても、探索空間($x_1 \leq b \leq x_2$)が非常に広大な場合、たとえば、未知パラメータの個数が多く、その存在範囲が広域に及ぶ場合には、実用上、全探索が困難である場合が存在する。

図-1 関数 $R(b)$ の最小値探索問題

Fig. 1 The multiple-peak function $R(b)$ for minimum search problem

ここで対象とする多層帯水層地盤における揚水試験データの解析では、推定すべき浸透特性パラメータ数が多く、また、各帯水層での土質条件の差異により浸透特性パラメータ値の取りうる範囲が広域であることが予想される。このような揚水試験データの工学的評価においては、真値に十分近いと考えられ、実用上問題ないと思われる浸透特性値の算定が要求される場合が少なくないと思われる。つまり、厳密な意味での最適な浸透特性値は未知であるが、算出された浸透特性値の評価は可能であるという考え方によれば、広域な未知パラメータの探索空間を効率よく探索し、実用上の最適解を速やかに発見するアプローチが要求される。本研究では、このような探索手法として遺伝的アルゴリズムを採用した。

(2) 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms、以下 GA と記す) は、生物進化 (選択淘汰・突然変異) の原理に着想を得たアルゴリズムであり (Holland, 1975)、組合せ最適化問題の近似解法の一つとして注目されている。GA では、従来の最適化問題における推定すべき未知パラメータを遺伝子とみなし、同定すべきモデルは任意の遺伝子配列を有する仮想的な生物 (個体) として表現する。個体は探索問題における探索点に相当し、複数の個体を同時に用いて、各個体における環境 (対象とする問題) との適応度を任意の評価関数を用いて計算する。この際、低い適応度を持つ個体を淘汰して消滅させ、高い適応度を持つ個体を増殖させる操作に加えて、各個体において遺伝子の交叉や突然変異と呼ばれる操作を行い、適応度の高い個体を見いだす世代交代シミュレーションを実行する。その結果として、最終的に得られた非常に適応度の高い個体は、推定すべきパラメータの近似解を与えるものと考えられる。GA の特徴は以下のようである。

- ① 複数の探索点から同時に確率的探索を行い、高い評価値を有する解の近傍を中心とした広域的な解探索を行うため、収束に要する時間が比較的速く、初期値による影響も少ない。
- ② 探索過程において、次の探索点を設定するために現在の探索点における評価値 (適応度) だ

けを用いており、目的関数の導関数を用いないので、不連続もしくは離散的な目的関数や目的関数の性質が把握できない問題にも適用でき、プログラミングが容易である。

- ③ 遺伝子の交叉や突然変異を模した操作を行うことにより、最適解近傍の探索に方向性を与えて探索効率を高め、かつ局所解への収束を回避する機能が期待できる。

なお、GA の基礎的な詳細については専門書等 (北野, 1993; 坂田・田中, 1995; Goldberg, 1989) を参照されたい。

(3) GA による揚水試験データの逆解析方法

GA を用いた揚水試験データの解析手順を以下に示す。

【STEP 1】 GA による浸透特性パラメータの表記方法

揚水試験データの解析において推定すべき浸透特性パラメータを任意の記号列の形にモデル化する。記号列の組み合わせは個体と呼ばれ、GA によるパラメータ探索の基本単位となる。ここでは、対象地盤の土質情報などを参考にして、推定すべき浸透特性パラメータの最適値と予測される値を十分に網羅するようなパラメータの定義域を決定する。そして、要求される推定精度を考慮して、浸透特性パラメータの実行可能解の組合せを記号列を用いて多数個発生させ、パラメータ群を構築する。すなわち、GA によるパラメータ探索では、最適解の候補であるパラメータ群の中から最適な実行可能解を見出すという、パラメータの組み合わせ最適化問題としての解析を行う。なお、記号列としては取り扱いの容易な 2 値 {0,1} の 2 進文字列を用いた。

【STEP 2】 初代の個体集団の発生

STEP 1 で作成した個体の中から、乱数を用いてランダムに個体を抽出して個体集団を形成させ、これを初代の個体集団として GA の特徴である遺伝と進化による世代交代シミュレーションを開始する。集団として発生させる個体の数は推定すべき未知パラメータ数などを考慮して決定される。

【STEP 3】 各個体の評価

評価関数を用いて世代を構成する各個体の適応

度を評価する。評価関数の設定はGAによる世代交代シミュレーションの成否を左右する重要な役割を有しており、その設定によってはGAによる探索結果が大きく変化することが予想される。本研究では、最も単純な評価関数の設定方法として、式(1)に示した目的関数の逆数を用い、最大化問題として式(2)のように定式化した。式(2)において、地下水位の計算値 $Y_j(b)$ は各個体の有する浸透特性パラメータ値を用いて有限要素法による非定常浸透流解析手法を用いて算出し、重み値 W_j については地下水位の測定値が全て同程度の誤差を含むものと考えて1.0とした。式(2)により、揚水試験の計測データを良好にシミュレートできる個体ほど大きな適応度 $F(b)$ が与えられることになり、これによって世代を構成する個体の適応度が相対的に評価される。

$$F(b) = \frac{1}{R(b)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n W_j \{y_j - Y_j(b)\}^2} \quad (2)$$

【STEP 4】淘汰および増殖

各個体の適応度に応じて次世代に生き残る個体を決定する。ここではルーレット選択 (Holland, 1975) を用いて適応度の低いいくつかの個体は淘汰し、その個数だけ適応度の高い個体を増殖させる。これは広大なパラメータ探索空間における探索方向の模索に相当する。ただし、エリート保存選択 (坂田・田中, 1995) を採用し、各世代で最も優れた個体は必ず次世代に残るように設定した。したがって、GAによるパラメータ探索過程においては、次世代における最も優れた個体の残差平方和値は、必ず前世代以下の値となり、その値は単調に減少して行くことが期待される。

【STEP 5】交叉

より高い適応度を持つ個体の発生を期待して、任意の2つの個体の文字列をランダムな位置で入れ換える操作を行い、新しい個体を生成する。この操作により、パラメータ探索空間における探索方向を次世代の個体に伝達する。初代の世代においては、乱数により発生されたさまざまな個体集団を有するため、交叉によっても同様に多種多様な個体を生じる。しかし、世代交代シミュレーションが進んで行く過程では、進化が進み、世代はある特徴を有する個体集団によって形成されるた

め、交叉によってもある傾向に沿った個体が多く生じることになる。このことは、パラメータの探索空間を初めは大局的に調べ、傾向をつかんでからはより詳細に調べるというGAの特徴が、交叉という操作によって実現されていることを示している。なお、交叉は任意の確率値(交叉率)を用いて、Syswerda (1989)の提案した一様交叉なる手法にて実施した。

【STEP 6】突然変異

各個体を構成する文字列の任意のビット(2進文字列を構成する数字の0または1)をある確率(突然変異率)で変化させ、新しい個体を生成する。これは探索過程における局所解からの脱出および突発的に良い解を得ることを期待するものであり、前述の交叉とともにGAの動作を特徴づける重要な操作である。

以上、STEP 3～6の操作を繰り返し、個体の評価値が設定した条件を満足するか、あらかじめ定めた世代数に到達すれば世代交代シミュレーションを終了する。その際、最終世代における最も適応度の高い個体は推定すべき浸透特性パラメータの最適値を有していると判断される。なお、GAの動作を制御するパラメータである初代の世代における個体数、交叉率、突然変異率については、対象問題に応じて最適値を決定する手法が確立されていないため、試行錯誤または経験的に決定する必要がある。本研究では、従来の研究例(夏秋ら, 1994)等を参考に、初代の世代の個体数は推定すべき浸透特性パラメータ数の10倍程度、交叉率は0.6程度、突然変異率は0.1程度を基準として設定した。図-2にGAを用いた揚水試験データの逆解析手順のフローチャートを示す。

3. 多層帯水層地盤における揚水試験データの逆解析例

従来、多層帯水層地盤における揚水試験データの逆解析において、修正 Marquardt 法等の非線形最小二乗法の解析アルゴリズムを適用した場合には、複数の未知パラメータを同時に算定することの困難さから、感度解析により推定すべき浸透特性パラメータの低減を図ったり、複数段階の逆解析を順次行う等の方法が提案されている(守本

図一 2 遺伝的アルゴリズムによるパラメータ推定方法のフローチャート

Fig. 2 Flow chart of parameter estimation using Genetic Algorithms

ら、1996；西垣・今井、1996)。ここでは、このような揚水試験の逆解析問題に対して、本文で提案する方法の有用性および妥当性を検討するために、2層被圧帯水層地盤における揚水試験モデルデータを用いて、各帯水層の透水係数 k 、比貯留係数 S_s を逆解析する問題を考えた。帯水層モデルは透水係数の異方性の有無により、等方性モデルおよび異方性モデルの2種類を作成し、それらの揚水試験条件をそれぞれ図-3、図-4に示す。ここで、揚水はパッカー等で限定された区間から一定流量で行われ、各帯水層における地下水低下挙動は間隙水圧計を用いて独立に計測される試験条件を想定した。

GAに用いたパラメータ群は表-1のように構築し、透水係数値は $5.0 \times 10^{-4} \leq k(\text{cm/s}) \leq 3.4 \times 10^{-1}$ の範囲を128(2^7)分割し、7 bit長の2進文字列で、また、比貯留係数値は $1.0 \times 10^{-6} \leq S_s(\text{cm}^{-1}) \leq 1.6 \times 10^{-4}$ の範囲を32(2^5)分割し、5 bit長の2進文字列で表記した。なお、GAの妥当性を検討するために、各帯水層モデルにおいて設定した真の浸透特性値は表-1に構築したパラメータ群内

表-1 GAに用いたパラメータ群

Table 1 Pattern of hydraulic properties for GA solution

No.	k (cm/s)	2進文字列 (7bit)	No.	S_s (cm ⁻¹)	2進文字列 (5bit)
0	5.0×10^{-4}	0000000	0	1.0×10^{-6}	00000
1	5.2×10^{-4}	0000001	1	1.6×10^{-6}	00001
.	.	.	.	.	.
60	8.0×10^{-3}	0111100	15	1.0×10^{-5}	01111
61	8.2×10^{-3}	0111101	16	1.6×10^{-5}	10000
.	.	.	.	.	.
126	3.2×10^{-1}	1111110	30	1.0×10^{-4}	11110
127	3.4×10^{-1}	1111111	31	1.6×10^{-4}	11111

に存在するものとした。

(1) 等方性帯水層モデル

図-3において、 $k_1 = 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、 $S_{s1} = 7.0 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ 、 $k_2 = 1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 、 $S_{s2} = 1.0 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ を真値と設定した帯水層モデルを用いて浸透流解析を行い、計算された各帯水層での水位低下データを用いて、 k_1 、 k_2 、 S_{s1} 、 S_{s2} の4パラメータを同時に推定する問題を考える。すなわち、問題は表-1のパラメータ群によって構成される 2^{24} 通り($2^7 \times 2^7 \times 2^5 \times 2^5$)の解集合の中から、GAにより最適なパラメータを探索することである。探索に用いた個体のパラメータ表記例を図-5に示す。逆解析に用いる水位低下データの時間分布としては、観測時間全体を網羅するように図-6中にプロットで示した各観測点あたり19点のデータを用いた。GAによる解析は個体数と交叉率の設定値が解析結果に及ぼす影響を考察するために、表-2に示す4 Caseについて30世代までの世代交代シミュレーションを行った。また、乱数による初期世代の個体設定の影響を検討するために、各 Caseとも3回の試行を試みた。

GAによるパラメータの探索状況を評価するために、式(1)を変形した式(3)に示される平均残差値(Root Mean Squared Error)を定義し、各世代で最も優れた個体におけるその変化を各 Caseについてそれぞれ図-7~10に示す。

$$RMSE = \left\{ \sum_{j=1}^n (y_j - Y_j(b))^2 / n \right\}^{1/2} \quad (3)$$

これらの図において世代数が5世代程度までの平均残差値の状況が異なっているのは、GAで用い

図-3 等方性帯水層モデル

Fig. 3 Numerical model for two-layered isotropic aquifer system

図-4 異方性帯水層モデル

Fig. 4 Numerical model for two-layered anisotropic aquifer system

図-5 個体におけるパラメータの表記例(等方性帯水層モデル)

Fig. 5 Example of string of parameter (two-layered isotropic aquifer model)

図-6 逆解析に使用した水位低下データ(等方性帯水層モデル)

Fig. 6 Computed drawdown data for back analysis (two-layered isotropic aquifer model)

表-2 等方性帯水層モデルにおけるGAの解析パターン

Table 2 GA for two-layered isotropic aquifer system

Case	個体数	交叉率	突然変異率
1	30	0.6	0.1
2	50	0.6	0.1
3	30	0.8	0.1
4	50	0.8	0.1

ている乱数の影響である。しかしながら、各Caseとも平均残差値は十分な減少を示し、良好なパラメータの探索を行っていると言える。図中、黒塗りのプロットは平均残差値がゼロになり、真のパラメータを探索したことを示している。これらの結果から判断すれば、本例題では図-8のCase 2 (個体数50、交叉率0.6)が良好な探索結果を示しているが、他のCaseも実用上は大きな差

図-7 各世代で最も優れた個体の平均残差の変化 (Case 1 : 個体数30、交叉率0.6)

Fig. 7 Root mean squared error between estimated and given drawdown data (Case 1: Population: 30, Crossover probability: 0.6)

図-8 各世代で最も優れた個体の平均残差の変化 (Case 2 : 個体数50、交叉率0.6)

Fig. 8 Root mean squared error between estimated and given drawdown data (Case 2: Population: 50, Crossover probability: 0.6)

異があるとはいいがたく、個体数や交叉率の変化により探索結果が大きく異なる現象は認められなかった。

次に、Case 2における各世代で最も優れた個体の浸透特性パラメータの変化を図-11~13に示す。あるパラメータが真値近傍に到達しながら、いったん真値近傍から離れて、その後真値に収束している状況が認められる。これはGAが未知パラメータ (k_1 、 k_2 、 Ss_1 、 Ss_2) の組み合わせにより

図-9 各世代で最も優れた個体の平均残差の変化 (Case 3 : 個体数30、交叉率0.8)

Fig. 9 Root mean squared error between estimated and given drawdown data (Case 3: Population: 30, Crossover probability: 0.8)

図-10 各世代で最も優れた個体の平均残差の変化 (Case 4 : 個体数50、交叉率0.8)

Fig.10 Root mean squared error between estimated and given drawdown data (Case 4: Population: 50, Crossover probability: 0.8)

図-11 各世代で最も優れた個体における透水係数値の変化 (Case 2 : 個体数50、交叉率0.6)

Fig.11 Evolution of estimated hydraulic conductivity in the GA solution. (Case 2: Population: 50, Crossover probability: 0.6)

図-12 各世代で最も優れた個体における比貯留係数 Ss_1 の変化 (Case 2 : 個体数50、交叉率0.6)

Fig.12 Evolution of estimated specific storage of aquifer 1 in the GA solution. (Case 2: Population: 50, Crossover probability: 0.6)

個体の適応度を評価しているためであり、局所解にとらわれることなく、真値の探索がなされている現象であると考えられる。

(2) 異方性帯水層モデル

図-4において、 $k_{r1}=1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、 $k_{z1}=6.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、 $S_{s1}=4.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ 、 $k_{r2}=1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $k_{z2}=5.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、 $S_{s2}=1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ を真値と設定した異方性帯水層モデル

を用いて浸透流解析を行い、計算された各帯水層での水位低下データを用いて、 k_{r1} 、 k_{z1} 、 S_{s1} 、 k_{r2} 、 k_{z2} 、 S_{s2} の6パラメータを同時に推定する問題を考える。すなわち、問題は表-1のパラメータ群の 2^{38} 通り ($2^7 \times 2^7 \times 2^7 \times 2^7 \times 2^5 \times 2^5$)の解集合の中から、GAにより最適なパラメータを探索することである。

このような複雑な地盤条件下での揚水試験の実施においては、揚水による地下水へのインパクト

図-13 各世代で最も優れた個体における比貯留係数 Ss_2 の変化 (Case 2 : 個体数50、交叉率0.6)

Fig.13 Evolution of estimated specific storage of aquifer 2 in the GA solution. (Case 2: Population: 50, Crossover probability: 0.6)

を良好に計測できる観測点配置が非常に重要である。ここでは水位観測点として揚水に起因する水平および鉛直方向の流れ成分が計測でき、評価関数に用いる観測データが透水係数の異方性を良好に評価できるように考慮して、図-4中に示す井戸スクリーン部(揚水区間)の側方部分に2点、そして井戸スクリーン設置深度の上部、下部に各1点の計4点を設置した。逆解析に用いる観測データとしては図-14中にプロットで示した各観測点あたり19点の水位低下データを用いた。なお、一般に鉛直方向の透水係数 k_z は水平方向の透水係数 k_r 以下であると考えられるため、パラメータの探索過程において個体の有するパラメータ値が $k_r < k_z$ となる場合には、その個体の適応度は非常に小さいとして、ここでは $F(b) = 1.0 \times 10^{-5} \text{cm}^{-2}$ を設定した。

GAによる解析は個体数50、交叉率0.6、突然変異率0.1を設定し、推定すべきパラメータ数が多いことから、世代交代シミュレーションは50世代までとして、3回の試行を行った。各世代で最も優れた個体における平均残差値の変化を図-15に示す。乱数の影響により各試行において初期の残差減少過程は異なるが、20世代程度ではほぼ同様の値を示し、30世代以後の平均残差値は1.2~1.0cmであり、変化はほとんど認められない。次に、各世代で最も優れた個体の浸透特性パラメー

図-14 逆解析に使用した水位低下データ(異方性帯水層モデル)

Fig.14 Computed drawdown data for back analysis (two-layered anisotropic aquifer model)

図-15 各世代で最も優れた個体の平均残差の変化(異方性帯水層モデル)

Fig.15 Root mean squared error between estimated and given drawdown data (two-layered anisotropic aquifer model)

タの変化を図-16~21に示す。パラメータの中には真値に到達していないものも認められるが、全体的には十分な推定精度で6つのパラメータが同時に推定されていると考えられる。

(3) 揚水試験データの逆解析に対するGAの適用性に関する考察

前述の例題によれば、本手法を用いて多層帯水層での揚水試験データから複数の未知パラメータを効率良く、かつ、安定して算定することが可能

図一六 各世代で最も優れた個体における透水係数値 kr_1 の変化(異方性帯水層モデル)

Fig.16 Evolution of estimated horizontal hydraulic conductivity kr_1 of aquifer 1 in the GA solution. (two-layered anisotropic aquifer model)

図一七 各世代で最も優れた個体における透水係数値 kz_1 の変化(異方性帯水層モデル)

Fig.17 Evolution of estimated vertical hydraulic conductivity kz_1 of aquifer 1 in the GA solution. (two-layered anisotropic aquifer model)

図一八 各世代で最も優れた個体における透水係数値 kr_2 の変化(異方性帯水層モデル)

Fig.18 Evolution of estimated horizontal hydraulic conductivity kr_2 of aquifer 2 in the GA solution. (two-layered anisotropic aquifer model)

図一九 各世代で最も優れた個体における透水係数値 kz_2 の変化(異方性帯水層モデル)

Fig.19 Evolution of estimated vertical hydraulic conductivity kz_2 of aquifer 2 in the GA solution. (two-layered anisotropic aquifer model)

であると考えられる。その際、従来の間接法逆解析において、Gauss-Newton 法系の反復改良法を適用した場合に懸念された未知パラメータ数の増加や初期推定値の設定がパラメータ推定に及ぼす影響は認められない。また、GA では解析担当者がコーディングしたパラメータ群の中から、任意のパラメータの組み合わせを抽出し、目的関数の評価を行いながらパラメータの探索を行うため、事前に未知パラメータの感度解析を行う必要もな

く、目的関数の導関数などの複雑な計算も不要であり、プログラミングの容易なアルゴリズムであると言える。さらに、パラメータ推定問題を組み合わせ最適化問題として取り扱うため、パラメータの探索においては必ず実用解の推定が期待できる。以上が GA の適用における利点である。

一方、GA を揚水試験データの解析に適用する上での問題点は、評価関数の設定方法にある。特に、推定すべき浸透特性パラメータに対する計測

図-20 各世代で最も優れた個体における比貯留係数 Ss_1 の変化 (異方性帯水層モデル)

Fig.20 Evolution of estimated specific storage of aquifer 1 in the GA solution. (two-layered anisotropic aquifer model)

データの感度特性が異なる場合や、複数の異なる物理量を計測データとして選定した場合に、個体の適合度の差異を適切に評価できる関数の設定が重要となる。坂田・田中(1995)は、評価関数の設定方法や適応度のスケールリング手法を提案しているが、確立された手法はなく、対象問題毎に検討すべき要素を含んでおり、今後の重要な研究課題であると言える。また、GA は組み合わせ最適化問題を対象とした解法であるため、パラメータの推定値は事前に構築されたパラメータ群の中から選択される。したがって、最終世代で得られた解が必ずしも最適解であるという保証はない。そのため、2. (3) で述べたパラメータ群の構築は GA の成否を左右する重要な作業となる。

なお、GA の演算時間は推定すべき未知パラメータの数ではなく、評価関数の計算量に大きく依存する。したがって、GA では推定すべき未知パラメータ数が多い問題ほど、演算効率が高いと言える。GA で必要とされる評価関数の計算回数は、(個体数×世代数)回であり、評価関数の計算負荷が著しく大きい場合には、多大な演算時間を要することになる。しかし、従来の方法では解析の困難であった問題の実用解が、莫大な解集合の中から簡便なアルゴリズムによって探索されることは大きな利点であると言え、コンピュータ処理能力の著しい向上を考えれば、GA は複数個のパラメータを同時に推定する手法として大きな可能

図-21 各世代で最も優れた個体における比貯留係数 Ss_2 の変化 (異方性帯水層モデル)

Fig.21 Evolution of estimated specific storage of aquifer 2 in the GA solution. (two-layered anisotropic aquifer model)

性を秘めていると思われる。

4. 結論

本文では、揚水試験データの解析を間接法による逆問題としてとらえ、多層帯水層地盤における揚水試験データから多数の浸透特性パラメータを安定かつ簡便に推定できる逆解析方法として、生物の進化の過程である自然淘汰・交叉・突然変異を模した多点探索法である遺伝的アルゴリズムと非定常浸透流解析手法とを組み合わせる方法を提案した。本方法の有用性および妥当性は、多層帯水層地盤モデルにおける揚水試験のシミュレーションデータを用いて吟味した。本研究で得られた成果をまとめると以下のである。

- (1) 遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析手法によれば、揚水試験データによる浸透特性値の算定問題を推定すべき浸透特性パラメータの組み合わせ最適化問題として取り扱うことが可能であり、従来の逆解析手法では困難であった多数個の浸透特性パラメータ推定においても実用解の算定が期待できる。また、本方法は、未知パラメータの探索過程において評価関数のみを情報として探索方向を決定するため、目的関数の微係数の計算などの複雑プログラミングを必要としないこと、また、未知パラメータ数の増加や初期推定値の設定がバ

ラメータ推定結果に及ぼす影響が非常に小さいといった利点を有し、多層帯水層地盤における揚水試験データの逆解析方法として有用な方法である。

- (2) 本方法の有用性および妥当性は、2層被圧帯水層地盤における透水係数の等方性および異方性帯水層モデルを用いて算出した揚水試験のシミュレーションデータを用いて吟味した。その結果、30世代程度の世代交代シミュレーションにより各帯水層の透水係数の異方性および比貯留係数値が同時に精度良く算定された。その際、遺伝的アルゴリズムの実行に際して決定すべきパラメータである世代の個体数や交叉率が解析結果に与える影響についても考察した。
- (3) 本方法を適用する上での重要な問題点として、揚水試験データにより推定すべき浸透特性パラメータ群の構築作業と評価関数の設定方法を指摘した。特に、推定すべき浸透特性パラメータに対する計測データの感度特性が異なる場合や、複数の異なる物理量を計測データとして選定した場合に、個体の適合度の差異を適切に評価できる関数の設定が重要であることを述べた。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、岡山大学工学部情報工学科田中雅博助教授ならびに(株)ジャストシステム岡山研究所秦伸吾氏より貴重なご助言をいただきました。また、解析には本学大学院雪本孝則君の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 北野宏明(1993):「遺伝的アルゴリズム」産業図書、328p.
- 河野伊一郎・西垣 誠・竹下祐二(1989):逆解析手法を用いた被圧帯水層における揚水試験結果の解析方法、土質工学会論文報告集、29、2、159~168.
- 坂和正敏・田中雅博(1995):「遺伝的アルゴリズム」朝倉書店、199p.
- 守本幸平・奥山一典・楨 建雄・西垣 誠(1996):被

圧多層帯水層における揚水試験結果による帯水層定数の同定について、第31回地盤工学研究発表会講演集、2103~2104.

中川 徹・小柳義夫(1982):「最小二乗法による実験データ解析」東京大学出版会、206p.

夏秋義広・向台 茂・保田敬一・古田 均(1994):GAによる連続桁RC床版の打設計画、第2回ファジイ土木応用シンポジウム講演論文集、日本ファジイ学会、1~9.

西垣 誠・今井紀和(1996):多層帯水層における逆解析手法による浸透特性の算定手法について、第31回地盤工学研究発表会講演集、2105~2106.

古市 徹・林田貴範(1989):地下水汚染(5) 地下水汚染予測のための逆問題、地下水学会誌、31、1、45~55.

Dawson, K.J. and J.D. Istok (1991): Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests. Lewis Pub., Chelsea, MI. 344p.

Goldberg, D.E. (1989): Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Pub. Co., 412p.

Holland, J.H. (1975): Adaptation in Natural and Artificial systems, University of Michigan Press.

Javandel, I and P.A. Witherspoon (1980): A Semianalytical Solution for Partial Penetration in Two-Layer Aquifers. Water Resources Research, 16-6, 1099~1106.

Javandel, I and P.A. Witherspoon (1983): Analytical Solution of a Partially Penetrating Well in a Two-Layer Aquifer. Water Resources Research, 19-2, 567~578.

Kruseman, G.P. and N.A. de Ridder (1990): Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Second ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Publication 47, Wageningen, The Netherlands. 377p.

Reed, J.E. 1980. Type Curves For Selected Problems of Flow To Wells In Confined Aquifers, Techniques of Water-Resources Investigations of The United States Geological Survey, Chapter B3, book 3, Applications of Hydraulics.

Syswerda, G. (1989): Uniform crossover in genetic algorithms, in Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, 2~9.

(受付:1997年6月2日、受理:1997年9月12日)