

## 原位置透水試験による砂質土地盤の不飽和浸透特性値の測定法

竹下祐二\*・八木一雄\*\*・森井俊広\*\*\*・井上光弘\*\*\*\*

### Determination of soil hydraulic properties of unsaturated sandy soil using in situ permeability tests

Yuji TAKESHITA \*, Kazuo YAGI \*\*, Toshihiro MORII \*\*\*  
and Mitsuhiro INOUE \*\*\*\*

#### Abstract

A new field experimental method of determining unsaturated soil hydraulic properties is proposed. In this method these properties are assumed to be represented by van Genuchten's closed-form expressions. Unknown parameters of this model are identified by Genetic algorithms (GA) incorporating finite element analysis of transient axisymmetric seepage flow. GA are search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics. They have become a popular global optimization method. A ponded single-ring infiltrometer technique, such as the Guelph Pressure Infiltrometer is performed. Simultaneously the measured change of soil water content with time and cumulative inflow data are used to identify unsaturated soil hydraulic function parameters. The advantage of the proposed method is that it allows estimation of the unsaturated soil hydraulic parameters by quite simple in-situ permeability test data. The utility of our proposed method is demonstrated by using a numerical model and experimental data for Tottori dune sand.

**Key Words:** in situ permeability test, pressure infiltrometer, unsaturated hydraulic properties, genetic algorithms, parameter estimation, inverse analysis, sandy soil

- 
- \* 岡山大学環境理工学部  
Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University
  - \*\* 応用地質(株)四国支社  
OYO Corporation, Shikoku branch
  - \*\*\* 新潟大学農学部  
Faculty of Agriculture, Niigata University
  - \*\*\*\* 鳥取大学乾燥地研究センター  
Arid Land Research Center, Tottori University

## 要 旨

砂質土地盤における飽和・不飽和浸透特性値を簡便かつ迅速に推定できる原位置透水試験方法の開発を目的として、Guelph Pressure Infiltrometerによる簡易な定水位透水試験方法を実施し、その際に計測された地盤の体積含水率と累積浸透流量の非定常データを軸対称浸透流解析によってシミュレートして、不飽和浸透特性値の関数モデルを同定する方法を提案した。不飽和浸透特性モデルには van Genuchten の提案した関数モデルを用い、そのモデルのパラメータの推定には、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る遺伝的アルゴリズムを用いた。本方法によれば、簡易な原位置透水試験による計測データによって不飽和浸透パラメータの実用解を安定に算定することが可能である。本研究で提案する方法の妥当性は数値モデルデータによって吟味し、その有用性は鳥取砂丘砂地盤による実測データを用いて確認した。

キーワード：原位置透水試験、プレッシャーインフィルトローメータ、不飽和浸透特性、遺伝的アルゴリズム、パラメータ推定、逆解析、砂質土地盤

### 1. はじめに

不飽和地盤における浸透問題や物質輸送問題など、不飽和領域での浸透挙動が卓越する現象を定量的に評価するためには、非定常不飽和浸透挙動を支配するパラメータとして、不飽和浸透特性値が必要となる。ここで、不飽和浸透特性値は水分特性曲線（地盤の体積含水率と圧力水頭の関係）および体積含水率または圧力水頭の関数として表示した不飽和透水係数値と定義される。不飽和浸透特性値は対象土の圧力水頭や含水状態に対して強い非線形性を呈するために、その測定は容易ではない。そのため、室内試験による測定が試みられているが、原位置における測定方法は確立されていない。

一般に、浸透特性値は地盤の間隙状態に大きく支配されるために、数 $100\text{cm}^3$ 程度の小さな供試体を用いた室内透水試験によって測定されるよりも、原位置透水試験を多地点において実施し、対象領域における浸透特性値の空間分布特性を評価することが望ましいといえる。そのためには、十分な精度を有し、試験装置が簡単で測定が容易であり、迅速に浸透特性値を計測できる原位置試験透水方法の開発が強く望まれる。

本研究の目的は、砂質土地盤の表層部における飽和・不飽和浸透特性値を簡便かつ迅速な原位置透水試験によって推定する方法の開発であり、簡易な原位置定水位透水試験を実施し、その際に計測した地盤の水分量と累積浸透流量の非定常データを軸対称浸透流解析によってシミュレートして、不飽和浸透特性値の関数モデルを同定する方法を提案する。本研究で提案する方法の妥当性は数値モデルデータによって吟味し、その有用性は鳥取砂丘砂地盤による実測データによって確認した。

### 2. 不飽和地盤における原位置透水試験システム

#### 2.1 原位置定水位透水試験方法

不飽和地盤における原位置透水試験方法としては、地盤に定圧注水を行い、その定常浸透流量を計測する方法が一般的である。本研究では、Reynolds & Elrick (1990) が開発した Guelph Pressure Infiltrometer 法（以後、GPI と記す）を採用した。本試験方法は図1に示すように不飽和地盤に数 cm 程度静的に貫入された直径10cm 程度の単一リングから定水位浸透を生じさせ、計測された定常浸透流量の値から透水係数を算出する方法である。定常浸透流量の計測は、マリオットサイ

フォン式の給水タンク内の水面降下量を10~30秒おきに読み取れば良く、非常に簡便な試験方法である。

GPIにより発生する浸潤領域は、浸潤過程で間隙中に取り込まれた封入空気のために完全な飽和状態ではなく、それに近い疑似飽和状態である。したがって、GPIによって計測される透水係数は *field-saturated hydraulic conductivity*,  $K_f$  と呼ばれ、室内透水試験にて測定される完全な飽和試料での飽和透水係数  $K_{fs}$  (*truly saturated hydraulic conductivity*) と比較して小さな値を示すことが指摘されている (Reynolds & Elrick, 1990)。一般に、不飽和地盤において発生する飽和浸透流は、帯水層等での完全な飽和状態での浸透流ではなく、封入空気存在による疑似飽和状態であると考えられる。したがって、不飽和地盤の浸透特性を評価する上では、原位置透水試験によって計測された  $K_f$  を設計定数とすることが実際的であると思われる。そこで、本研究では不飽和地盤の飽和透水係数として、GPIによって算出される  $K_f$  (以後、便宜的に現場飽和透水係数と記す) を採用する。なお、GPIによる  $K_f$  の算出精度に関しては文献 (森井ほか, 1999; 2000a; 2000b) を参照されたい。

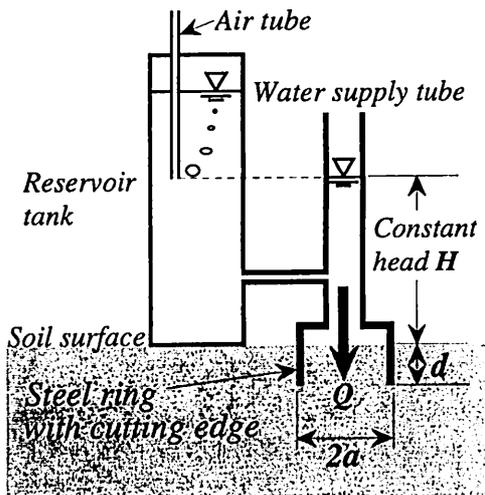


図1 Guelph Pressure Infiltrometer 法概念図  
Fig.1 Schematic diagram of the Guelph Pressure Infiltrometer apparatus.

## 2.2 非定常浸透データの測定

GPIによる透水試験を利用して不飽和浸透特性を算定するためには、非定常浸透データの計測が必要である。近年、不飽和地盤中の水分量の計測方法として TDR 法等に代表される電磁波式水分計測方法が提案され、実用化されている。これらは地盤の誘電率から体積含水率を求める方法であり、リアルタイムにて体積含水率の計測が可能で、その取り扱いも容易である (安原ほか, 1989; 開発, 1992; 堀野・丸山, 1993)。また、GPIでは現場飽和透水係数の算出のために浸透流量の経時変化を計測し、定常浸透流量の値を見いだす必要があることから、浸透流量が定常値に達するまでの累積浸透流量データは非定常計測データとして利用できる。

以上の点を鑑みて、本研究では、GPI実施時に地盤の体積含水率および累積浸透流量の非定常データを取得する原位置透水試験方法を提案する。すなわち、GPIの浸潤リング近傍に地表面から1本の電磁波式水分計を挿入設置することにより、体積含水率の計測を行う作業を追加するだけの簡便な透水試験方法である。ここで、電磁波式水分計としては Delta-T Devices 社の ThetaProbe type ML2を用いた。その概略図を図2に示す。この水分計は、3本のシールドロッドが1本の信号ロッドの同心円上に配置された4線式プローブである。3本のシールドロッドで囲まれた直径25mm、長さ60mmの範囲の体積含水率が計測可能であり、5~15VDCの電圧入力により、0~1VDCの出力電圧がリアルタイムで得られ、消費電力も20mAと少なく取り扱いが容易である (中島ほか, 1998)。図3に本研究で提案する原位置透水試験システムの概要図を示す。



図2 電磁波式水分計測センサー (ThetaProbe) の概略図

Fig.2 Schematic diagram of device for measuring soil water content (ThetaProbe).

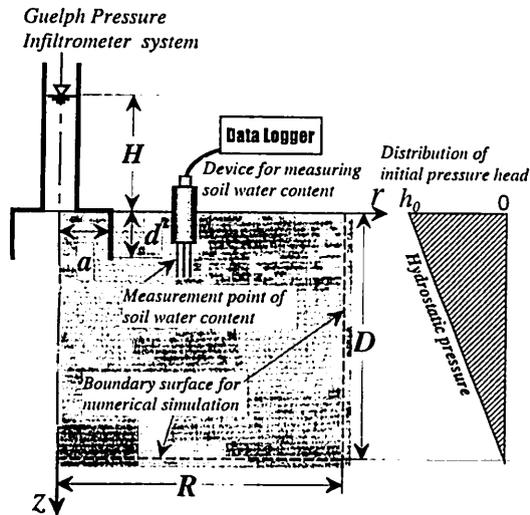


図3 原位透水試験の概念図  
Fig.3 Schematic diagram of in situ experiment..

### 3. 遺伝的アルゴリズムを用いた不飽和浸透特性値の推定方法

#### 3.1 不飽和浸透特性の関数モデル

不飽和浸透特性値の推定方法として、透水試験によって計測された不飽和浸透挙動を数値解析による浸透流解析によってシミュレートし、その浸透挙動を最も良好に表現できる不飽和浸透特性値の関数モデルを同定する、逆解析手法 (Kool, *et al.*, 1985; 竹下ほか, 1990; Eching *et al.*, 1994; van Dam, *et al.*, 1994; Simunek & van Genuchten, 1996) を採用した。この方法の利点は、透水試験による非定常計測データを浸透流解析によって数値解析的に評価するため、理論的な解析手法に比べて種々の初期条件・境界条件の導入が容易であり、多様な試験条件に対応できること、また、平衡状態に達するまでの長時間の計測データを必要とせず、試験時間の短縮が期待できる点にある。さらに、対象地盤の不飽和浸透特性値を適切に表現できる関数モデルが同定されることにより、強い非線形性を有する不飽和浸透特性の形状を滑らかに補間でき、解析パラメータとして妥当な値の算定が可能である。

本研究では、van Genuchten (1980) によって提案された不飽和浸透特性の関数モデル (以後、VG モデルと記す) を採用した。VG モデルでは式 (1) で定義される有効飽和度  $S_e$  を用い、不飽和透

水係数および比水分容量はそれぞれ式 (2), (3) にて表示される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{I}{I + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (2)$$

$$C = \alpha (n-1) (\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (3)$$

ここで、 $h$ : 圧力水頭、 $\theta_s$ : 飽和体積含水率、 $\theta_r$ : 残留体積含水率、 $K_s$ : 飽和透水係数、 $\alpha, n$ : 水分特性曲線の形状を支配する土に固有のパラメータ、 $n > 1$ ,  $m = 1 - 1/n$

上記の VG モデルに含まれる未知パラメータは、 $K_s, \theta_s, \theta_r, \alpha, n$  の 5 パラメータである。ここで、 $K_s$  は GPI によって独立に算定される  $K_b$  によって与えられるため既知量である。また、今回は砂質土地盤を対象としたために、 $\theta_r$  の値は零として既知量と考えた。したがって、VG モデルの同定に必要な未知パラメータは、 $\alpha, n$  および  $\theta_s$  の 3 つである。

#### 3.2 遺伝的アルゴリズム

不飽和浸透特性の関数モデルに含まれるパラメータの推定作業は、非線形性の強い問題となり、その実行は必ずしも容易ではない。原位不飽和透水試験データの工学的評価という観点に立てば、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パラメータの算定が要求される場合が少なくない。このような場合には、厳密な意味での最適解は得られなくとも、非線形性が強く、かつ広域な未知パラメータの探索空間を効率よく探索して、実用上の実行可能解を速やかに発見するアプローチが求められる。

そこで、本研究では遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, 以下 GA と記す) を採用した。GA は生物進化 (選択淘汰・突然変異) の原理に着想を得た多点探索法であり、パラメータ探索を組み合わせ最適化問題として取り扱うことにより、事前に用意した非常に多数の解集合の中から、安定かつ迅速に実行可能解を見出すことができる (Goldberg, 1989)。

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。個体は探索問題の探索点に相当し、乱数を用いて抽出された複数の個体により世代が構成される。より良い探索解を得るために、各個体の環境(対象とする問題)との適応度(評価値)を任意の評価関数を用いて計算し、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による世代交代シミュレーションを実施し、探索パラメータ値の逐次修正が行われる。その結果、最終世代における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、初期推定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。

上記のような特徴により、GAは地下水問題のパラメータ推定手法として活用される可能性を有している(竹下ほか, 1997; 1999)。しかし、GAは必ずしも広域的な最適解を生成する保証がなく、真値に近い結果が得られれば満足できる性質の問題が対象となる。また、GAでは乱数を多用しているために、複数回のパラメータ探索結果を比較することが望ましい。なお、GAの基礎的な詳細については専門書等(たとえば、坂和・田中, 1995)を参照されたい。

### 3.3 遺伝的アルゴリズムによる不飽和浸透特性モデルの同定

GPIにより生じる非定常浸透挙動は、軸対称浸

透場における飽和・不飽和浸透流であると仮定する。つまり、地盤は均質であり透水性の異方性は考えない。その場合、支配方程式はRichardsの式を用いて次式で表される。

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( K \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{K}{r} \left( \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial h}{\partial z} + K \right) \quad (4)$$

ここに、 $r, z$ : 円筒座標軸、 $K$ : 透水係数、 $t$ : 時間

本研究では、GPIを実施して計測された地盤の体積含水率および累積浸透流量の非定常データを式(1)~(4)を用いた有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析手法によってシミュレートしてVGモデルの同定を行い、不飽和浸透特性の算定を行う。VGモデルの未知パラメータ推定に際しては、体積含水率および累積浸透流量の非定常データを目的関数として、次式で示される重み付き残差平方和  $OF(b)$  を最小にする未知パラメータの組み合わせをGAによって探索する。

$$OF(b) = \omega_\theta \sum_{i=1}^N (\theta_m(t_i) - \theta_c(t_i, b))^2 + \omega_Q \sum_{j=1}^M (Q_m(t_j) - Q_c(t_j, b))^2 \quad (5)$$

ここに、 $b$ はVGモデルにおける未知パラメータ( $\alpha, n$ および $\theta_s$ )、 $\omega$ は重みであり、記号および添え字における $\theta, Q$ はそれぞれ、体積含水率[無次元]と累積浸透流量[次元は(長さ)<sup>3</sup>]を意味する。また、添え字 $m, c$ はそれぞれ、計測データと浸透流解析によって得られた解析値を表す。また、 $N, M$ は計測データ数である。

式(5)における各測定値の重みの設定方法は基本的な問題であり、一般には、各測定値に対する誤差の分散値を用いる方法等が提案されている。ここでは、体積含水率と累積浸透流量という単位の異なる物理量の計測精度およびそれらの絶対値の較差が残差平方和に与える影響を簡便に補正すること目的として、体積含水率と累積浸透流量の計測データの二乗平均値をそれぞれ算出し、それらの比を累積浸透流量データの残差平方和に重みとして与え、式(6),(7)のように設定した。ただ

し、各計測時間における計測データについては、すべて同程度の誤差を含むと考えて各計測データごとの重み付けは考えない。

$$\omega_\theta = 1.0 \tag{6}$$

$$\omega_Q = \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_m(t_i))^2 / N}{\sum_{j=1}^M (Q_m(t_j))^2 / M} \tag{7}$$

GA に用いる探索パラメータ群は以下のように構築した。まず、 $(\alpha, n)$  については Kool et al. (1985) が一般的な土に対して示している  $0.005 \leq \alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)} \leq 0.05$ ,  $1.1 \leq n \leq 10.0$  なる値を参考にして、 $0.005 \leq \alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)} \leq 0.068$ ,  $1.1 \leq n \leq 7.4$  の範囲をそれぞれ64分割し、6bit 長の2進文字列で表記した。 $\theta_s$  は対象とする砂質土の間隙率を  $0.3 \leq \theta_s \leq 0.45$  の範囲と考えると、この範囲を8分割し、3bit 長の2進文字列で表記した。したがって、未知パラメータの記号列は15ビット (=6+6+3) 長の2進文字列で表現される。以上のようにして構築したパラメータ群によって生成される未知パラメータの推定可能解の組み合わせ総数は、65,536 (=64×64×16) 通りであり、GA によりこの膨大なパラメータ群の中から実行可能解を探索する。GA の実行においては、個体数50、交叉率0.6、突然変異率0.1とし、30世代の世代交代シミュレーションで強制終了とした。

#### 4. 砂地盤での適用性の検討

##### 4.1 数値モデルによる解析方法の検証

砂質土地盤を想定した数値モデルを用いて原位置透水試験のシミュレーションデータを作成し、本提案方法の妥当性を検証した。解析に用いた地盤モデルは図3において  $R = 100\text{cm}$ ,  $D = 300\text{cm}$ ,  $K_f = 3.0 \times 10^{-2}\text{cm/s}$  であり、VG モデルパラメータは  $\alpha = 0.02\text{cm}^{-1}$ ,  $n = 4.0$ ,  $\theta_s = 0.4$  を設定した。GPI の試験条件は  $a = 5\text{cm}$ ,  $d = 3\text{cm}$ ,  $H = 14.9\text{cm}$  であり、水分計による体積含水率の計測点は浸潤リング中心から  $r = 15\text{cm}$ ,  $z = 10.5\text{cm}$  である。地盤の初期水頭分布は線形分布 (静水圧分布) を仮定し、図3において地表面の初期水頭  $h_0 = -300\text{cm}$  とした。このモデルを用いて軸対称浸

透流解析を実施し、GPI により計測される体積含水率および累積浸透流量の非定常計測データを算出した。

GA による VG モデルパラメータの探索は3回 (GA run1~3) 行った。パラメータの探索過程において、各世代で算出された最も優れた ( $OF(b)$  値の小さい) 個体による  $OF(b)$  値の変化を図4に示した。3回のGA実行において  $OF(b)$  値の減少挙動が異なる原因は、GA が乱数を多用しているためである。しかし、いずれの試行においても10世代程度の世代交代シミュレーションにて  $OF(b)$  値は大きく減少し、GA run1および GA run2においては、それぞれ13世代と24世代目で設定した真のパラメータ値を探索している。すなわち、GA は未知パラメータの初期値に依存することなく、安定したパラメータ探索を実行していることが示されている。

なお、GA run3では真の値には到達していないが、 $OF(b)$  値は十分に減少しており、30世代目に推定されたVGモデルパラメータは、 $\alpha = 0.021\text{cm}^{-1}$ ,  $n = 3.8$ ,  $\theta_s = 0.39$ であった。図5, 6はこれらのパラメータによって算定された不飽和浸透特性値を設定値と比較した結果であるが、その差違は実用上問題のない精度であると思われる。以上のことから、本解析方法の妥当性および安定性を確認した。

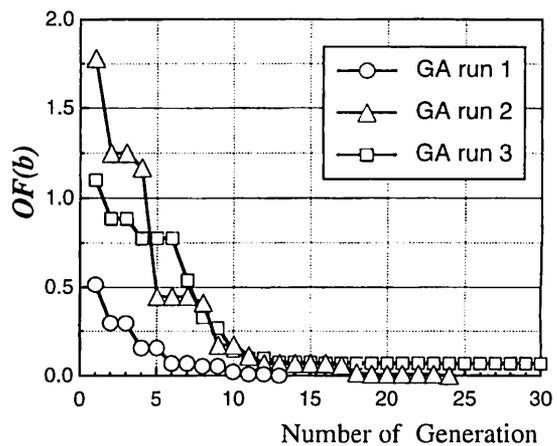


図4 残差平方和の変化 (数値モデル)  
 Fig.4 Evolution of  $OF(b)$  in the search process of the GA for numerical model.

4.2 砂丘砂地盤への適用

鳥取大学乾燥地研究センター内の砂丘砂地盤に本解析方法の適用を試み、その有用性を検証し

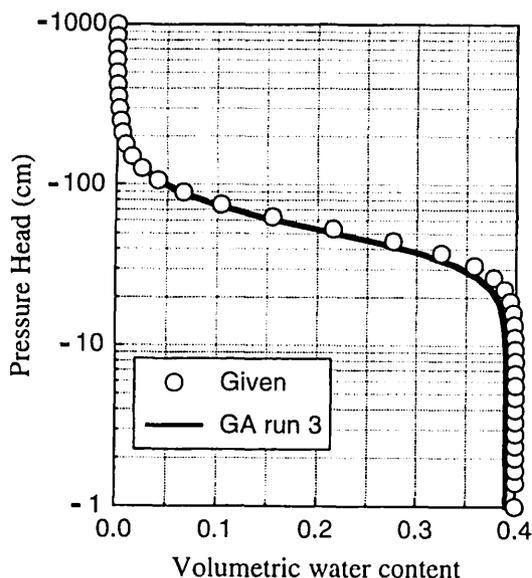


図5 水分特性曲線の推定精度 (数値モデル)  
Fig.5 Estimated and measured soil water retention curves for numerical model.

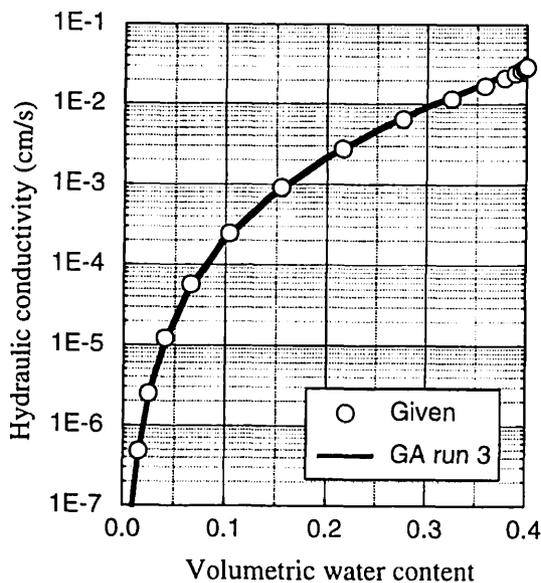


図6 不飽和透水係数の推定精度 (数値モデル)  
Fig.6 Estimated and measured unsaturated hydraulic conductivity for numerical model.

た。対象地盤は乾燥密度 $1.48\text{g/cm}^3$ の均質な砂丘砂であり、日本統一土質分類法(土質工学会, 1994)によれば、細粒分をほとんど含まない最大粒径 $2\text{mm}$ 程度のきれいな砂(S)に分類される。

試験実施に先立ち、小型テンシオメータ(Inoue, et al., 1998)を4深度(地表面から $-10, -15, -20, -50\text{cm}$ )に埋設し、地表面からスプレー散水を十分に行った後、自然排水状態で2日間放置して図7に示すような圧力水頭値を計測し、直線回帰した分布線を数値解析に用いた。GPIの試験条件は図3において、 $a=5.5\text{cm}$ ,  $d=3.0\text{cm}$ ,  $H=9.7\text{cm}$ である。水分計はGPIの浸潤リング中心より $r=10\text{cm}$ ,  $z=20\text{cm}$ の位置に静的に挿入設置した。GPIによる浸透挙動は約10分で定常状態に達し、 $K_f=2.74\times 10^{-2}\text{cm/s}$ が算出された。

図3において $R=40\text{cm}$ ,  $D=60\text{cm}$ の範囲を浸透流解析領域として、GAによるパラメータの探索を行った。表1にパラメータの推定結果、図8に $OF(b)$ 値の変化を示す。推定されたパラメータ値はGAの試行ごとにわずかな差が見られるが、 $OF(b)$ 値はほぼ同一の値でGAの実行ごとの

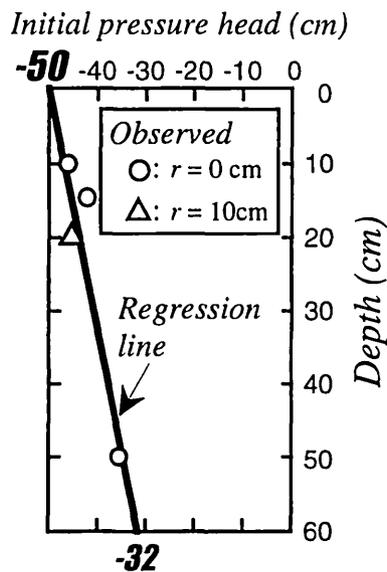


図7 初期圧力水頭の計測結果と数値解析に用いた分布線  
Fig.7 Initial pressure head measured in soil and regression line for numerical calculation.

表1 GAによる不飽和浸透特性パラメータの推定結果(砂丘砂地盤での試験)

Table 1 Estimated VG model parameters from GA for dune sand

| GA run | $\alpha$ (cm <sup>-1</sup> ) | $n$ | $\theta_s$ | $OF(b)$ |
|--------|------------------------------|-----|------------|---------|
| 1      | 0.034                        | 4.6 | 0.37       | 2.963   |
| 2      | 0.033                        | 5.0 | 0.38       | 2.938   |
| 3      | 0.033                        | 4.9 | 0.38       | 2.956   |

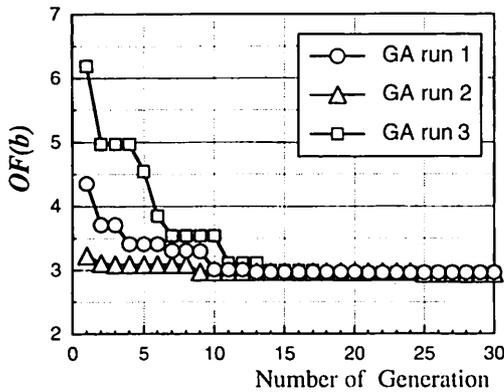


図8 残差平方和の変化(砂丘砂地盤での試験)  
Fig.8 Evolution of  $OF(b)$  in the search process of the GA for dune sand.

差異は認められない。したがって、最適値に十分近い実行可能解が算定されていると考えられる。図9, 10に計測データと推定されたVGモデルパラメータによる数値解析結果の比較を示す。体積含水率および累積浸透流量ともに、その非定常挙動は十分シミュレートされているが、若干の偏りが認められる。この原因としては、以下の点が考えられる。

- (1) GAで探索されたパラメータは最適解(真値)ではなく、真値に十分近いと考えられる実用上の実行可能解である。
- (2) 原位置での不飽和浸透挙動は地盤の不均質性などに依存して極めて複雑であり、現有の数値解析モデル(不飽和浸透特性の関数モデルも含めて)では、完全に表現することが困難である。一方、GAによって推定されたVGモデルパラメータの妥当性を検討するために、井上ほか(1982)によって報告された本砂丘砂の不飽和浸

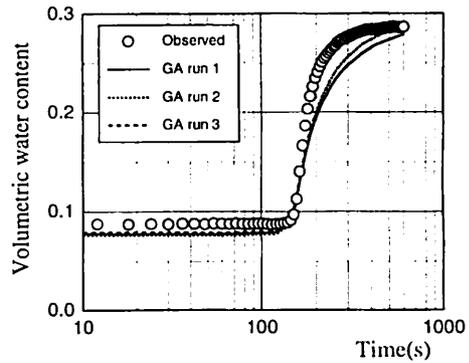


図9 体積含水率のシミュレート結果(砂丘砂地盤での試験)

Fig.9 Change of estimated and measured water content with time for dune sand.

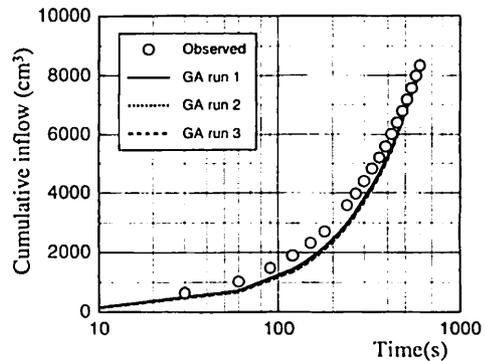


図10 累積浸透流量のシミュレート結果(砂丘砂地盤での試験)

Fig.10 Estimated and measured cumulative inflow with time for dune sand.

透特性値との比較を図11, 12に示した。これらの図より、推定されたVGモデルパラメータは実用上、十分な精度を有していると考えられる。以上の結果から、本原位置透水試験方法によれば、実用上十分な精度で砂地盤の不飽和浸透特性値を迅速かつ安定して推定できることが検証された。また、本試験方法は迅速性や簡便性に優れていることから、複数地点にて実施して対象領域の飽和・不飽和浸透特性値の空間分布を評価するための計測データを得ることが可能である。

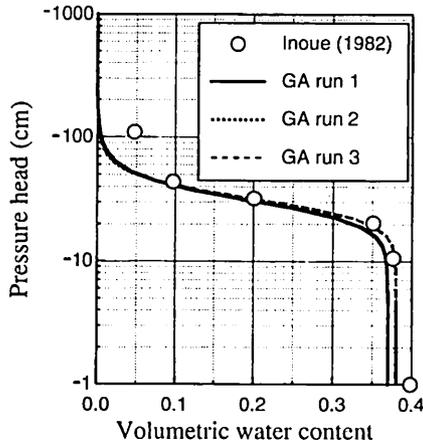


図11 算定された水分特性曲線の比較 (砂丘砂地盤での試験)

Fig.11 Estimated and measured soil water retention curves for dune sand.

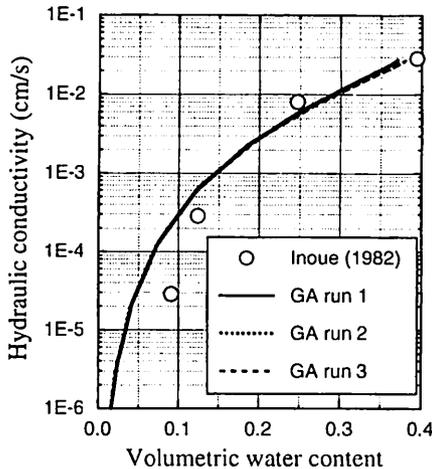


図12 算定された不飽和透水係数の比較 (砂丘砂地盤での試験)

Fig.12 Estimated and measured unsaturated hydraulic conductivity for dune sand.

### 4.3 適用上の問題点に関する考察

#### (1) 初期条件の影響

本透水試験によって生じた非定常浸透挙動をシミュレートする際には、対象領域の初期条件である圧力水頭分布の設定は、数値解に大きな影響を及ぼす。したがって、初期圧力水頭分布の精度良い計測が望まれる。そのためには、テンシオメータを複数深度に設置する方法が考えられるが、そ

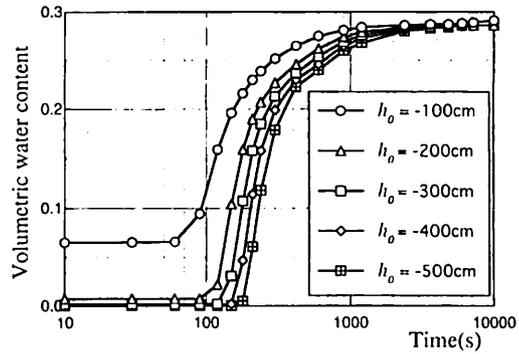


図13 初期圧力水頭分布が体積含水率に与える影響  
Fig.13 Sensitivity of initial pressure head distribution to cumulative inflow during the in-situ permeability test.

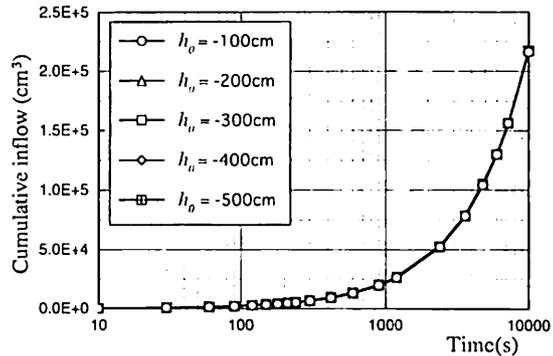


図14 初期圧力水頭分布が累積浸透流量に与える影響  
Fig.14 Sensitivity of initial pressure head distribution and water content with time during the in-situ permeability test.

の実行は必ずしも容易ではない。すなわち、実務的には初期圧力水頭分布の計測は困難である場合が多く、その際には、何らかの方法によって推定する必要がある。

数値解析解の安定性や数値モデル作成の容易さから考えれば、初期圧力水頭分布は線形分布(静水圧分布)を仮定する事が望ましい。そこで、4.1節で用いた地盤モデルにおいて線形な初期圧力水頭分布を仮定し、図3中の $h_0$ を $-100\text{cm}$ ~ $-500\text{cm}$ に変化させた地盤条件において浸透流解析を行い、GPI法を実施した場合の体積含水率および累積浸透流量に対する感度解析を行った。それらの結果を図13, 14に示す。これらの図によれば、初期圧力水頭分布が体積含水率の計測データに与える影響

は、表層部での圧力水頭値  $h_0$  の減少に比例して低減していく。一方、累積浸透流量データに対しては有意な感度は認められない。したがって、対象地盤の地下水面位置が深く、表層部の圧力水頭値が小さいような場合、言い換えれば、十分に乾燥していて初期飽和度の低い地盤では、初期圧力水頭分布を線形分布と仮定して本解析方法を適用し、対象場の不飽和浸透特性値の概略値を推定することが可能であると考えられる。

(2) 初期条件を推定した場合の実施例

前述の砂丘砂地盤を用い、初期圧力水頭分布が未計測の場合について、本透水試験を実施した。GPIの試験条件は図3において  $a = 5.5\text{cm}$ ,  $d = 3.0\text{cm}$ ,  $H = 14.9\text{cm}$  である。体積含水率の計測点はGPIの浸潤リング中心より  $r = 10\text{cm}$ ,  $z = 20\text{cm}$  の位置であり、その初期体積含水率は0.006と計測され、対象地盤の初期飽和度は非常に低い状態であった。GPIの計測開始後、約20分の浸透挙動の計測を行い、 $K_f = 2.97 \times 10^{-2} \text{cm/s}$  を算出した。

図3において  $R = 100\text{cm}$ ,  $D = 300\text{cm}$  の範囲を浸透流解析領域として、初期水頭分布を線形分布と仮定し、 $h_0 = -100\text{cm} \sim -500\text{cm}$  まで変化さ

表2 GAによる不飽和浸透特性パラメータの推定結果 (初期圧力水頭分布が未知)

Table 2 Estimated VG model parameters from GA (Initial pressure head distribution is unknown)

| $h_0$ (cm) | GA run | $\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | $n$ | $\theta_s$ | $OF(b)$ |
|------------|--------|-------------------------------|-----|------------|---------|
| -100       | 1      | 0.030                         | 6.6 | 0.39       | 0.151   |
|            | 2      | 0.030                         | 6.6 | 0.39       | 0.151   |
|            | 3      | 0.030                         | 6.6 | 0.39       | 0.151   |
| -200       | 1      | 0.025                         | 4.2 | 0.40       | 0.204   |
|            | 2      | 0.025                         | 4.2 | 0.40       | 0.204   |
|            | 3      | 0.025                         | 4.2 | 0.40       | 0.204   |
| -300       | 1      | 0.022                         | 3.3 | 0.42       | 0.249   |
|            | 2      | 0.022                         | 3.4 | 0.41       | 0.232   |
|            | 3      | 0.022                         | 3.4 | 0.41       | 0.232   |
| -400       | 1      | 0.021                         | 3.0 | 0.40       | 0.262   |
|            | 2      | 0.020                         | 3.0 | 0.42       | 0.266   |
|            | 3      | 0.021                         | 3.0 | 0.40       | 0.262   |
| -500       | 1      | 0.019                         | 2.8 | 0.41       | 0.259   |
|            | 2      | 0.019                         | 2.8 | 0.42       | 0.256   |
|            | 3      | 0.019                         | 2.8 | 0.42       | 0.256   |

せ、それぞれの条件においてGAによるVGモデルパラメータの探索を3回ずつ実施した。推定されたパラメータを表2に示す。圧力水頭分布条件の内、最も  $OF(b)$  値の小さいケースを採用し、それらに対して、図15, 16に計測データと推定されたパラメータによる数値解析データの比較を示す。また、不飽和浸透特性値の比較を図17, 18に示した。

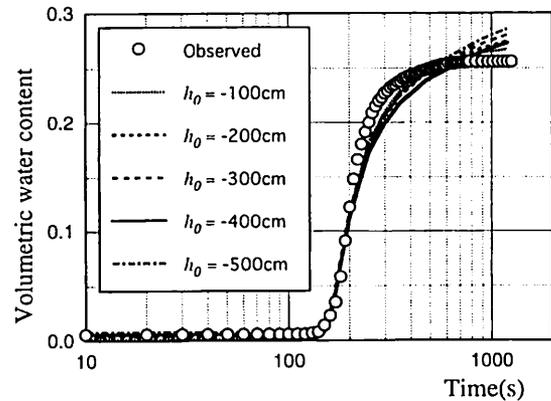


図15 体積含水率のシミュレート結果 (初期圧力水頭分布が未知)

Fig. 15 Change of estimated and measured water content with time. (Initial pressure head distribution is unknown)

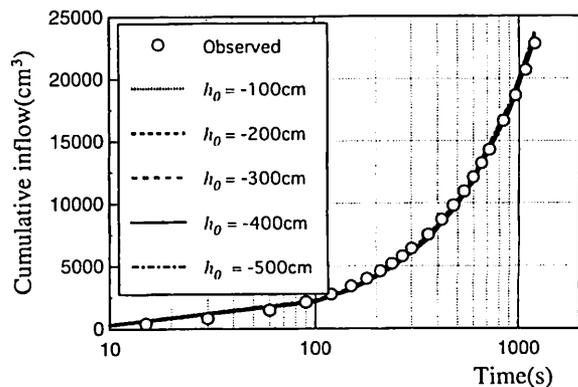


図16 累積浸透流量のシミュレート結果 (初期圧力水頭分布が未知)

Fig. 16 Estimated and measured cumulative inflow with time sand. (Initial pressure head distribution is unknown)

OF(b) 値は初期水頭値  $h_0$  が減少するにつれて増加する傾向が認められるが、計測データのシミュレート状況には有意な差異は認められない。推定された不飽和浸透特性の形状も井上ほか (1992)

が報告しているデータに類似したのもであり、不飽和浸透特性値の推定精度としては十分であると思われる。したがって、初期圧力水頭分布の実測が困難な場合でも、地下水面位置が地表面から深く、表層部が十分に乾燥していて表層部での圧力水頭値が小さいような場合には、初期圧力水頭分布を線形分布と仮定し、本提案方法を用いて不飽和浸透特性値の概略値を推定することの可能性が示唆されたと思われる。

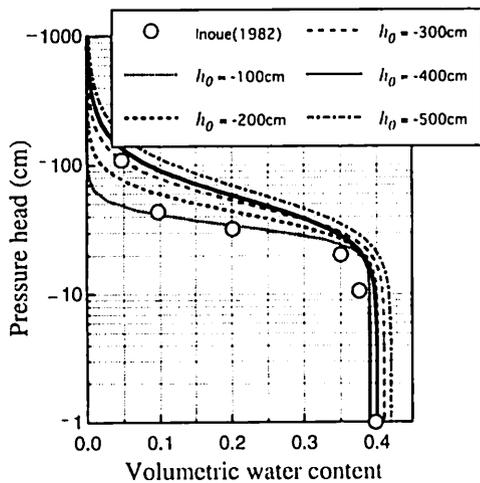


図17 算定された水分特性曲線の比較 (初期圧力水頭分布が未知)

Fig. 17 Estimated and measured soil water retention curves for dune sand. (Initial pressure head distribution is unknown)

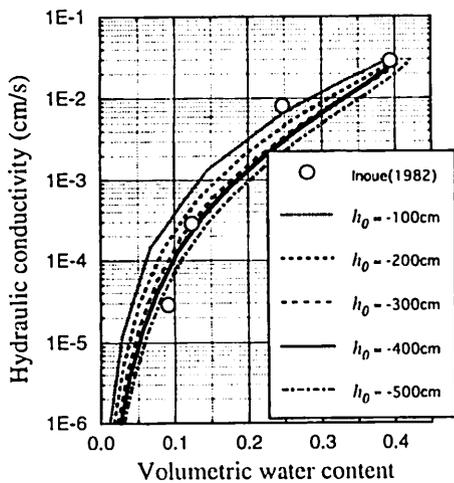


図18 算定された不飽和透水係数の比較 (初期圧力水頭分布が未知)

Fig. 18 Estimated and measured unsaturated hydraulic conductivity for dune sand. (Initial pressure head distribution is unknown)

### 5. 結論

砂質土地盤における飽和・不飽和浸透特性値の迅速かつ簡便な原位置測定法の開発を目的として、原位置定水位透水試験にて計測された体積含水率と累積浸透流量の非定常データを軸対称浸透流解析によってシミュレートし、不飽和浸透特性値の関数モデルを同定することによって、不飽和浸透特性値を算定する方法を検討した。本研究により得られた成果を要約すれば、以下のようになる。

- (1) 単一リングを用いた定水位透水試験方法である Guelph Pressure Infiltrometer と電磁波式水分計を組合せ、体積含水率と累積浸透流量の非定常計測データを計測する簡便な原位置透水試験方法を提案した。本試験方法は迅速性や簡便性に優れていることから、複数地点にて実施して、対象領域の飽和・不飽和浸透特性値の空間分布を評価するための計測データを得ることが可能である。
- (2) 原位置透水試験で計測された体積含水率および累積浸透流量の非定常データを飽和・不飽和浸透流解析によってシミュレートし、遺伝的アルゴリズムを用いて不飽和浸透特性の関数モデルの同定を行うことにより、不飽和浸透特性値を算定する方法を開発した。本方法によれば、不飽和浸透特性の関数モデルに含まれるパラメータの推定を組み合わせ最適化問題として取り扱うことにより、事前に構築した非常に多数の解集合の中から安定かつ迅速に実行可能解を見出すことが可能である。本方法の妥当性は数値モデルデータおよび砂丘砂地盤における実測データによって吟味した結果、実用上十分な

精度を有する不飽和浸透特性値が安定して算定されることを確認した。

- (3) 本解析方法による不飽和浸透特性の算定精度は対象領域の初期条件に依存するため、初期圧力水頭分布の精度良い計測が必要であること指摘した。ただし、初期圧力水頭分布の計測が困難な場合にでも、地下水面位置が地表面から深く、表層部が十分に乾燥して表層部での圧力水頭値が小さい場合には、初期圧力水頭分布を線形分布と仮定して本解析方法を適用し、不飽和浸透特性値の概略値の推定を行える可能性を示した。

今後は、多様な土質条件に対して本試験方法の適用性を検討し、不飽和浸透特性データの蓄積を行うことが必要である。

### 謝 辞

本研究の遂行に際しては、鳥取大学乾燥地研究センター共同研究の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 井上光弘・矢野友久・山本太平・筑紫二郎 (1982) : 土壌水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算, 土壌の物理性, 46, 21-26.
- 開発一郎 (1992) : 不飽和水分測定における TEM 波 TDR 法の有効性, 水資源研究センター研究報告, 3-11.
- 坂和正敏・田中雅博 (1995) : 「遺伝的アルゴリズム」朝倉書店, 199p.
- 竹下祐二・西垣 誠・河野伊一郎 (1990) : 不圧帯水層での揚水試験結果による不飽和浸透特性の算定方法, 土質工学会論文報告集, 30, 2, 199-210.
- 竹下祐二・安井克豊・河野伊一郎 (1997) : 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, 地下水学会誌, 39, 4, 313-325.
- 竹下祐二・中澤一磨・福田大樹・河野伊一郎 (1999) : 遺伝的アルゴリズムを用いた室内非定常不飽和透水試験による不飽和浸透特性の算定方法, 土木学会論文集, 624/Ⅲ-47, 67-74.
- 土質工学会編 (1994) : 土質試験の方法と解説, 土質工学会, 186-199.
- 中島 誠・井上光弘・澤田和男・Nicholl, C. (1998) : ADR 法による土壌水分量の測定とキャリブレーション, 地下水学会誌, 40, 4, 509-519.
- 堀野治彦・丸山利輔 (1993) : 3 線式プローブによる土壌水分の TDR 計測, 農業土木学会論文集, 168, 119-120.
- 森井俊広・井上光弘・竹下祐二 (1999) : プレッシャーインフィルトロメータ法を用いた土の原位置透水試験方法, 農業土木学会論文集, 204, 149-158.
- 森井俊広・井上光弘・竹下祐二 (2000a) : プレッシャーインフィルトロメータ法の測定理論に関する実験および数値計算による検討, 農業土木学会論文集, 206, 19-27.
- 森井俊広・井上光弘・竹下祐二 (2000b) : プレッシャーインフィルトロメータ法を用いた原位置透水試験の測定精度, 農業土木学会論文集, 207, 29-37.
- 安原正也・安池慎治・丸井敦尚・鈴木裕一・高山茂美 (1989) : TDR 法に基づく電磁波土壌水分計の試作とキャリブレーション, ハイドロロジー 19, 2, 96-102.
- Eching, S.O., Hopmans, J.W. and Wendroth, O. (1994) : Unsaturated hydraulic conductivity measurements from transient multistep outflow and soil water pressure data. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 687-695.
- Inoue, M., Simunek, J., Hopmans, J.W. and Clausnitzer, V (1998) : In situ measurement of soil hydraulic functions using a multistep soil-water extraction technique, *Water Resources Research*, 34, 5, 1035-1050.
- Kool, J.B., Parker, J.C. and van Genuchten, M.T. (1985) : Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation, I, Theory and numerical studies, *Soil Science Society of America Journal*, 49, 1348-1354.
- Goldberg, D.E. (1989) : *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Pub. Co., 412p.
- Parker, J.C., Kool, J.B. and van Genuchten, M.T. (1985) : Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation, II, Experimental studies, *Soil Science Society of America Journal*, 49, 1354-1360.
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. (1990) : Poned infil-

- tration from a single ring, *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1233-1241.
- Simunek, J. and van Genuchten, M.Th (1996): Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion, *Water Resources Research*, 32, 9, 2683-2696.
- van Dam, J.C., Stricker, J.N.M. and Droogers, P. (1994): Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments, *Soil Science Society of America Journal*, 58, 647-652.
- van Genuchten, M. Th (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44,892-898.