

# 室内試験による不飽和浸透特性の非定常算定方法

西垣 誠\*・竹下祐二\*\*・河野伊一郎\*\*\*

飽和-不飽和浸透解析における入力データとして、不飽和浸透特性が重要となる。本研究では、不飽和浸透特性の迅速かつ簡便な室内試験方法の開発を目的として、非定常不飽和浸透実験データを数値解析によってシミュレートし、逆解析手法を用いて不飽和浸透特性の関数モデルの同定を行なう方法を提案した。本試験法の有効性は、まさ土および豊浦標準砂試料による実験データを用いて吟味した。

**Keywords:** *unsaturated hydraulic properties, back analysis, laboratory test, ground water*

## 1. はじめに

自由水面を有する浸透現象や降雨浸透問題、そして汚染物質移動問題など、不飽和浸透の卓越する現象では飽和浸透流と不飽和浸透流とを一貫した系と考えた解析手法が必要となる。このような解析手法として、数値解析手法による飽和-不飽和浸透解析手法は極めて有効な解析手段であり、現在、浸透解析手法の主流となっている。しかし、この際、入力データとしては、飽和土の浸透特性に加えて不飽和浸透を支配する不飽和浸透特性が必要となる。通常、不飽和浸透特性は図-1に示すように水分特性曲線（体積含水率  $\theta$  と負の圧力水頭  $\psi$  の関係）および体積含水率と比透水係数  $k_r$ （飽和透水係数に対する不飽和透水係数の比）の関係によって解析に導入される。

これらの不飽和浸透特性は飽和透水係数などの飽和浸透特性と同様に、原位置あるいは室内試験を実施して決定すべき物理量である。しかし、不飽和浸透特性の計測手法は飽和透水係数の測定に比較すると複雑であり、現時点においてその実施は必ずしも容易ではない。したがって、数値解析を行う場合には不飽和浸透特性に関する調査データ不足のために、これらのパラメータを文献などから仮定する場合が多く、その妥当性が解析の精度上、問題となる。

現在、不飽和浸透特性の測定は、原位置における試験手法が確立されていないために、主に室内試験によって行なわれている。室内試験法として、水分特性曲線に対しては pF 試験法が、また、不飽和透水係数に対しては Richards 型の不飽和透水試験装置による測定法が代表

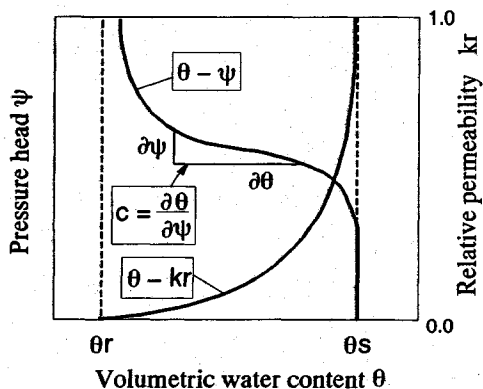


図-1 不飽和浸透特性

的である<sup>1)~4)</sup>。これらの試験法はいずれも定常法であり、試料に任意の負の圧力水頭を作用させ、試料内の水分状態が平衡状態に達した時点での体積含水率との関係を決めて不飽和浸透特性を計測する手法である。

しかし、一般に定常法では水分平衡状態の正確な判定が困難であり、また、水分平衡状態に達するまでの長時間の計測が必要であるという難点を有している。そのため、現在、これらの試験法は一部の研究機関等において実施されているに過ぎず、我が国の土に対する不飽和浸透特性データの蓄積は極めて少ない。このような不飽和浸透特性の測定データに関する現状を鑑みると、実務レベルにおいて実施できる迅速かつ簡便な測定法の開発が必要であると考えられる。すなわち、簡単な試験装置を用いて、計測が容易で安定したデータの得られる観測値から不飽和浸透特性を算定できる試験法の確立が望まれる。

そこで、本研究では不飽和浸透特性の迅速かつ簡便な室内測定法の開発を目的として、pF 試験法における加圧板法および土柱法に着目し、これらの試験法の改良および解析手法に関する検討を行った。本文で提案する方

\*正会員 工博 岡山大学助教授 工学部土木工学科  
(〒700 岡山市津島中 3-1-1)

\*\*正会員 学術博 岡山大学助手 工学部土木工学科

\*\*\*正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科

法は、非正常不飽和浸透実験データから不飽和浸透特性の関数モデルを数値解析的に同定し、不飽和浸透特性を逆解析的に算定する方法である。つまり、本方法の目的は不飽和浸透特性が圧力水頭に対して強い非線形性を有することから、これらの関係を関数表示するための適当な解析式を得ることであると言える。一般に、水分特性曲線および不飽和透水係数の正確な関数形状は未知であるために、この問題は関数モデルの同定であり、パラメータ推定問題と同様であると考えることができる。

本方法の特徴は、非正常過程での計測データを用いた解析方法であることから、長時間のデータ計測に要する負担が軽減されること、また、計測されたデータを有限要素法を用いた浸透流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試験試料の物理的な境界条件および複雑な試験条件を数値モデル上で考慮でき、試験試料の応答状態を最も良好に表わす不飽和浸透特性値を算定できることである。

なお、本方法の妥当性および有効性は、まさ土および豊浦標準砂（以下、豊浦砂と記す）に対して本方法を適用し、算定された不飽和浸透特性を従来の pF 試験法によって得られた結果と比較することにより吟味する。

## 2. pF 試験法における問題点

### (1) pF 試験法の種類

pF 試験には飽和から不飽和状態に至るまでの含水状態全般を通じて統一された試験法が確立されていない。したがって、測定すべき pF 値のそれぞれの領域において表-1 に示すような各種の試験法が用いられている<sup>2)</sup>。pF とは負の圧力水頭  $\phi$ (cm) の常用対数 ( $\log|\phi|$ ) によって次式のように定義される指標である。

$$pF = \log|\phi| \dots\dots\dots (1)$$

一般に、地下水の不飽和浸透を考えた場合、問題となるのは重力と毛管力の組合せによって移動する自由水の挙動であり、その存在は主に  $pF \leq 3$  ( $-1000 \text{ cm} \leq \phi < 0 \text{ cm}$ ) の領域である<sup>5)</sup>。したがって、本研究では  $pF \leq 3$  の領域を測定対象とする pF 試験法のうち、装置が簡単で実施の容易な土柱法と比較的計測範囲の広い加圧板法の2つの試験法について検討を行うことにする。

土柱法は分離できる多数の円筒形容器に作成した土柱において、重力排水または毛管上昇による浸潤を行う方法であり、加圧板法は試料に任意の一定背圧を順次与えて土中水を排水させる方法である。いずれも試料内の水分状態が平衡状態に達した時点で体積含水率を測定し、水分特性曲線を得る定常試験法である。なお、水分特性曲線は測定時の水分移動が排水過程か浸潤過程かに依存して、図-2のようなヒステリシスを有することが知られている。しかし、本研究では、対象試料の平均的な不

表-1 pF 試験法とその測定範囲<sup>2)</sup> (一部修正)

pF 試験法	測定範囲 (pF)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
土柱法	—	—	—	—	—	—	—	—
吸引法	—	—	—	—	—	—	—	—
加圧板法	—	—	—	—	—	—	—	—
加圧膜法	—	—	—	—	—	—	—	—
遠心法	—	—	—	—	—	—	—	—
蒸気圧法	—	—	—	—	—	—	—	—

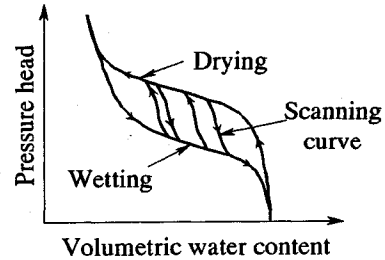


図-2 水分特性曲線のヒステリシス

飽和浸透特性の測定を目的としているため、ヒステリシスの影響は無視した。したがって、ここでは測定の容易な排水過程での pF 試験を対象とする。

### (2) 加圧板法および土柱法における問題点

加圧板法および土柱法において、実務レベルでの実施を困難にしている原因は以下のような点であると考えられる。

#### a) 水分平衡状態の確認方法

通常、水分平衡状態に達したか否かの判定は、流入または流出流量の経時変化量によって行なわれている。流量計測にはビューレットが良く用いられるが、自動計測による連続的な計測や微少な流量変化の計測は容易ではなく、正確な水分平衡状態の判定は困難である。そのため、水分平衡状態に達する前に試験を終了してしまう可能性があり、その際に得られた水分特性曲線の信頼性には問題がある。

#### b) 水分平衡状態に要する時間

一般に、水分平衡状態に達するには長時間を要するが、その値は試料の状態や pF 値によっても異なるため、明確な基準の作成は困難である。したがって、便宜的に24時間を1単位時間とした長時間の試験が行われることが多い。特に、加圧板法では複数段階の背圧を順次作用させ、各段階において水分平衡状態に達するまでの計測を必要とするため、1カ月程度の試験期間を要することも少なくない。

図-3は豊浦砂を用いて土柱法を実施し、土柱内の負の圧力水頭の経時変化を間隙水圧計によって計測した一例である。用いた土柱の高さは96cmであり、飽和体積含水率は0.425、飽和透水係数は  $2.345 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  で

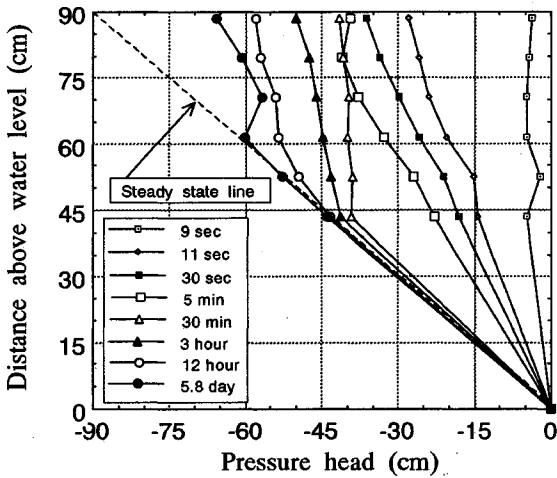


図-3 豊浦砂土柱内の圧力水頭分布の経時変化

ある。飽和した土柱の下部より重力排水を開始後、水分平衡状態に達するまでの時間は排水面からの高さが43.5 cmで約12時間、61.5 cmで約6日であり、土柱全体が水分平衡状態に達するまでには極めて長時間を要することがわかる。

c) 不飽和透水係数に関する情報

pF試験法の原理上、試験結果として得られるのは水分特性曲線のみであり、不飽和透水係数に関する情報は得られない。供試体が水分平衡状態に達するまでの時間は不飽和透水係数によっても左右されることが考えられるが、その非定常過程でのデータの解析方法は示されていない。

3. 不飽和浸透特性の非定常算定方法

前述したpF試験法の問題点を克服し、不飽和浸透特性を迅速、かつ簡便に測定するためには、非定常過程での計測データを用いた試験法の開発が考えられる。そこで、本研究では、不飽和浸透特性の非定常算定方法として不飽和浸透特性を関数モデルを用いて表現し、それらに含まれる未知定数を非定常不飽和浸透実験データより同定する方法を提案する。この方法は非定常不飽和浸透実験を数値解析によってシミュレートし、その実験データを最も良く満足する不飽和浸透特性の関数モデルのパラメータを逆解析手法にて算定するものである。この試験方法の利点を以下に示す。

- ① 非定常計測データを用いて不飽和浸透特性の関数モデルを同定するため、水分平衡状態に達するまでの長時間の計測を必要とせず、試験時間の短縮が期待できる。
- ② 従来のpF試験からは不飽和透水係数は直接得られなかったが、本方法では、同定した不飽和浸透特性の関数モデルにより、非定常過程でのpF試験データを定量的に説明できる不飽和透水係数値が算定できる。

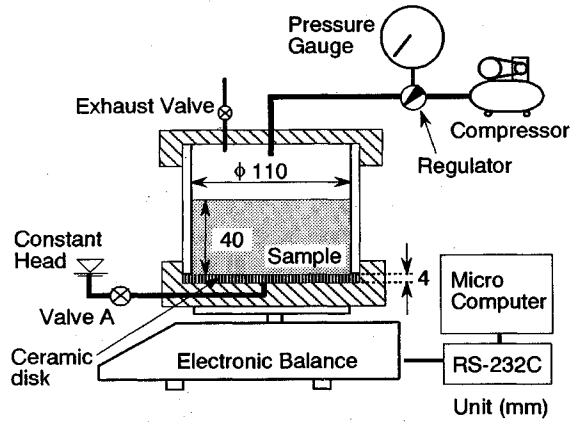


図-4 加圧板法試験装置

(1) 試験方法

非常不飽和浸透実験として、加圧板法および土柱法の改良を行う。この際、試験装置が簡単であること、そして、計測が容易で安定した非常データを得られる観測値を選定することが重要である。以下、これらについて検討する。

a) 計測データの選定

加圧板法および土柱法において計測可能な非常データとしては、一般に、試料の含水量、流出入流量、そして間隙水圧の3種類が考えられる。本研究では、これらのデータの中で試料に含まれる間隙水の重量（以下、含水重量と記す）に着目し、高精度電子上皿天秤ばかり（測定範囲0~6100 g, 読み取り限度0.01 g）を用いて供試体全体の重量変化を直接計測することにより、供試体中の含水重量の経時変化を得る方法を用いた。

電子上皿天秤ばかりは増幅器等の周辺機器を必要とせず、RS-232C インターフェイスを介してマイクロコンピュータへ接続し、自動計測による連続的なデータのモニターと収録が容易である。そのため、ピューレット等を用いる排水流量の測定法に比較して、データの精度および安定性の点で有利であると考えられる。また、RIを用いた含水量測定システムや圧力変換器を用いた間隙水圧の計測システムと比較して安価であり、測定毎のキャリブレーション作業が不要であるなど、その取り扱いも極めて簡便であるという特長を有している。

b) 試験装置

① 加圧板法

本研究で用いた加圧板法の試験装置を図-4に示す。図のように供試体を電子上皿天秤ばかりに直接設置し、任意の背圧を与える。次に、バルブAを開いて排水を開始した後、供試体重量の経時変化を計測するという、極めて単純な試験である。供試体重量データは最小サンプリングタイム1秒にて測定し、マイクロコンピュータによってモニターおよび収録される。なお、加圧板法に

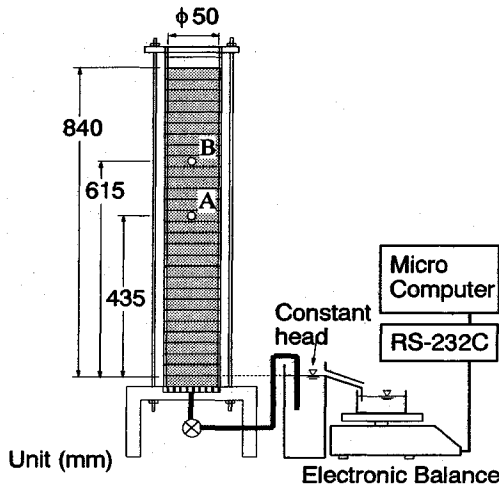


図-5 土柱法試験装置

における供試体寸法は、一般に直径 5 cm、高さ 1.0~2.5 cm 程度とされている<sup>2)</sup>が、供試体の排水流量の経時変化を計測するためある程度の体積を要することから、直径 11 cm、高さ 4 cm とした。また、供試体下部に設置する不透気性のフィルター材として、厚さ 4 mm のセラミックディスクを用いた。その空気侵入値 (Air Entry Value) は 2.7 kgf/cm<sup>2</sup> であり、飽和透水係数は加圧型変水位透水試験<sup>8)</sup>より、 $k_e = 1.65 \times 10^{-6}$  cm/s を得た。

② 土柱法

土柱法の試験装置を図-5 に示す。土柱は内径 5 cm、肉厚 5 mm、高さ 3 cm のアクリル製カラムを積み重ね、連結部分を真空グリッドとビニールテープでシールして作成し、その下部より定水位にて重力排水を行う。一般に、土柱法に用いる試料は透水性が良好であるために、非定常データとして土柱から排水される流量を計測した。その際には、図-5 のように電子上皿天秤ばかりにて排水流量の重量変化を計測し、蒸発による補正を行った。なお、計測時間間隔およびデータの収録等は加圧板法の場合と同様である。

一方、本試験法の妥当性を検証するために、これらの試験装置を用いて、従来の加圧板法および土柱法をも実施した。その際には、前述のように供試体の水分平衡状態の判定方法が問題となる。本研究では、その判定方法として供試体の間隙水圧の経時変化を計測し、計測された負の間隙水圧の絶対値がその点での位置水頭値と等しくなることを確認する方法を用いた。そのため、加圧板法では供試体高さの中央部に、また、土柱法では供試体の限界毛管上昇高さよりも上部の位置 (たとえば豊浦砂では排水面より 30 cm 以上) に複数個、間隙水圧計を設置した。間隙水圧の計測には拡散型小型圧力変換器 (計測範囲  $\pm 0.3$  kgf/cm<sup>2</sup>、ヒステリシス  $\pm 0.02\%$   $F_s$ ) にセラミックカップ (空気侵入値 = 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>) を取り付

表-2 VG モデルのパラメータ (まさ土、豊浦砂)

試料	$k_s$ (cm/s)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$	$\theta_s$	$\theta_r$
まさ土	$3.30 \times 10^{-4}$	0.070	1.82	.338	.11
豊浦砂	$2.56 \times 10^{-2}$	0.022	12.32	.411	.00

けたものを用いた。

(2) 関数モデルの同定による不飽和浸透特性の算定方法

a) 不飽和浸透特性の関数モデル

不飽和浸透特性の関数モデルとして、次式に示す van Genuchten のモデル<sup>7)</sup> (以下、VG モデルと記す) を用いた。このモデルは式 (2) で定義される有効飽和度  $S_e$  を圧力水頭  $\psi$  の関数として式 (3) で表し、比水分容量  $C(\theta)$  および不飽和透水係数  $k(\theta)$  の関数式として式 (4), (5) を用いる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2) \quad S_e = \{1 + |\alpha\psi|^n\}^{-m} \dots \dots \dots (3)$$

$$C(\theta) = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \dots \dots \dots (4)$$

$$k(\theta) = k_s \cdot S_e^{1/2} \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2 \dots \dots \dots (5)$$

$$m = 1 - 1/n, n > 1 \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $S_e$ : 有効飽和度、 $\theta$ : 体積含水率、 $\theta_r$ : 最小含水量、 $\theta_s$ : 飽和体積含水率、 $k_s$ : 飽和透水係数、 $\alpha, n$ : 水分特性曲線の形状より決定されるパラメータ

VG モデルは式 (2)~(5) に示すように 5 つの独立した未知パラメータ ( $k_s, \alpha, n, \theta_r, \theta_s$ ) によって構成されている。このモデルの妥当性に対する検討は数多くなされており、土質に対する適用範囲が広く、かつ簡便であり、実用上十分な精度を有すると評価されている<sup>8),9)</sup>。また、我国の土に対する適用性は著者ら<sup>10)</sup>や宇野ら<sup>11)</sup>によって吟味され、VG モデルのパラメータを算定した例も報告されている。

本研究で用いるまさ土および豊浦砂に対する VG モデルの妥当性を吟味するために、それらの不飽和浸透特性を RI を用いた瞬時水分計測法 (Instantaneous Profile Method)<sup>12)</sup> によって計測し、VG モデルの適用性を検討した。VG モデルの同定は、各試料において計測された水分特性曲線データと式 (3) とのフィッティングを行うことによって、( $\alpha, n, \theta_r$ ) のパラメータを算定することによって実施した<sup>13)</sup>。この際、一般に砂質土試料では  $\theta_r$  は零に等しいと考えられる<sup>17)</sup> ことから、豊浦砂においては  $\theta_r = 0$  として既知とした。また、 $k_s$  および  $\theta_s$  は土質試験により測定した値を用いた。算定された VG モデルのパラメータを表-2 に示す。同定された VG モデルと計測値とを比較した結果として、水分特性曲線を図-6 に、不飽和透水係数と体積含水率との関係を図-7 に示す。これらによれば VG モデルは計測値に

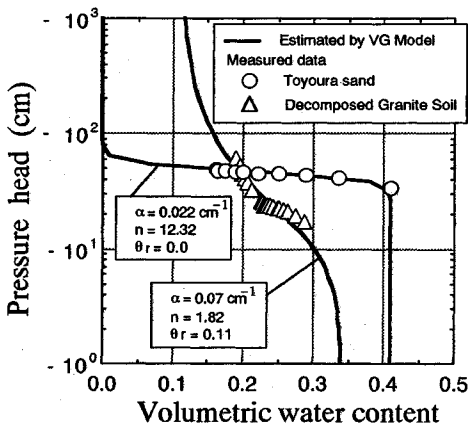


図-6 VGモデルの適用例(水分特性曲線)

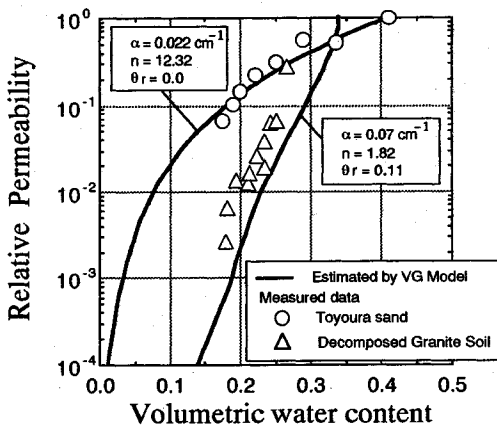


図-7 VGモデルの適用例  
(不飽和透水係数と体積含水率の関係)

メータ  $\mathbf{b}$  における数値解析による計算値であり、その算出には有限要素法による一次元飽和-不飽和浸透流解析手法を用いた<sup>14)</sup>。その支配方程式を次式に示す。

$$(C(\phi) + \beta S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(\phi) \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、不飽和領域： $\beta=0$ 、飽和領域： $\beta=1$ 、 $S_s$ ：比貯留係数、 $z$ は鉛直方向の座標（鉛直上向きを正とする）

また、初期および境界条件は土柱法の場合以下のである。

$$\phi = \phi_0(z) \quad t=0, 0 \leq z \leq L \dots \dots \dots (9)$$

$$\phi = 0 \quad t > 0, z = 0 \dots \dots \dots (10)$$

$$q = 0 \quad t > 0, z = L \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $L$ は供試体の高さ、 $\phi_0(z)$ は初期の静水圧分布、 $q$ は流入出流量である。

一方、加圧板法の場合には式(9)、(10)の代わりにそれぞれ次式を用いる。

$$\phi = \phi_0(z) + u_b / \gamma_w \quad t=0, 0 \leq z \leq L \dots \dots \dots (12)$$

$$\phi = L_c \quad t > 0, z = 0 \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $L_c$ はセラミックディスクの厚さ、 $u_b$ は作用させた背圧値、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量である。

上記の浸透流解析手法を用いて加圧板法のシミュレートを行う場合、試料内の水の流れは間隙水圧  $u_w$  を基準として圧力水頭  $\phi (= u_w / \gamma_w)$  の勾配で決定され、その時の不飽和浸透特性は試料に発生するサクション  $u_c (= (u_a - u_w) / \gamma_w)$  によって決定される。すなわち、不飽和浸透特性の値は  $\phi = -u_c / \gamma_w$  を用いて、VGモデルの式(4)、(5)より算定する。また、セラミックディスクは不透気性物質であるため、加圧板法の試験過程においては常に飽和状態である。そのため、セラミックディスクの透水係数および比水分容量の値は、それぞれ、 $k(\phi) = k_c$ (セラミックディスクの飽和透水係数値)、 $C(\phi) = 0$ なる一定値を設定している。

一方、供試体の含水重量の計算値  $W'(t, \mathbf{b})$  は、浸透流解析によって計算された試料内の圧力水頭値分布を用いて、VGモデルの式(2)、(3)より供試体内の体積含水率分布を算出することにより求められる。

なお、土柱法では計測の都合上、排水流量を計測しているため、式(7)の適用に際しては、その排水流量データから土柱全体の含水重量データへの換算を行った。

また、式(7)における  $W'(t, \mathbf{b})$  は  $\mathbf{b}$  に対して非線形となるため、式(7)の解法には非線形最小二乗法を使用し、解析アルゴリズムには修正 Marquardt 法を用いた<sup>15)</sup>。そして、同定されたパラメータが式(7)において最小値を与える最適値か否かの判定法として、残差と未知パラメータの変化量の値に着目し、以下の条件により収束判定を行っている。

- ① 各観測データに対して得られた残差  $S_i$  の内、最

対して十分な一致を示しており、本研究において同定されたVGモデルを用いれば、不飽和浸透特性を十分な精度で推定することが可能であると考えられる。

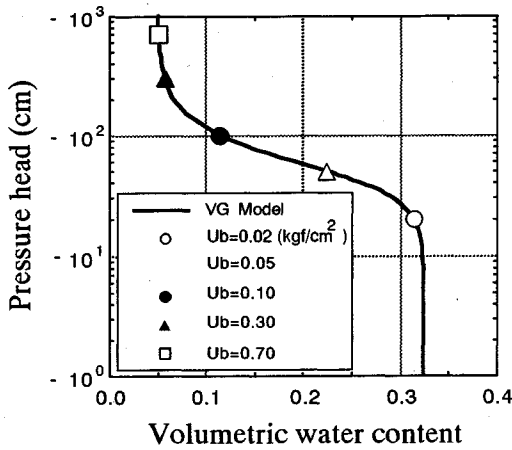
b) 未知パラメータの推定手法

VGモデルを構成する未知パラメータのうち  $k_s$  および  $\theta_s$  は他の土質試験(透水試験等)により測定可能であると考えられるため、推定すべき未知パラメータは  $(\alpha, n, \theta_r)$  の3個とする。これらのパラメータの推定手法としては間接法による逆解析手法を採用し、供試体の含水重量の経時変化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  $R(\mathbf{b})$  を最小にするパラメータ  $\mathbf{b}$  を見出す手法を用いる。

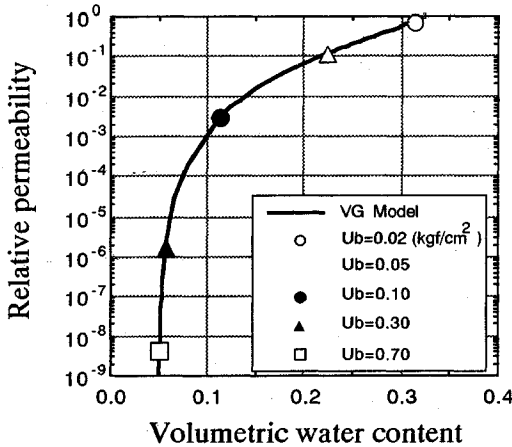
$$R(\mathbf{b}) = \sum_{j=1}^N \{ w_j [ W(t_j) - W'(t_j, \mathbf{b}) ] \}^2 \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $W(t_j)$ ：含水重量の観測値、 $W'(t_j, \mathbf{b})$ ：含水重量の計算値、 $\mathbf{b}$ ：VGモデルにおける未知パラメータ、 $w_j$ ：重み、 $N$ ：観測データ数、 $t$ ：計測時間

ただし、測定値は全て同程度の誤差を含むと考えて、重みは  $W_j = 1$  とする。また、 $W'(t_j, \mathbf{b})$  は仮定したパラ



(a) 水分特性曲線



(b) 不飽和透水係数と体積含水率の関係

図-8 感度解析に用いた VG モデル

表-3 感度解析に用いたパラメータ

$k_s$ (cm/s)	$k_c$ (cm/s)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$	$\theta_s$	$\theta_r$
$1.0 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-6}$	0.02	3.	.325	.05

非定常計測データを用いて関数モデルの同定を行う場合、計測データに対する未知パラメータの感度および同定に用いる計測データの時間分布に対する検討は極めて重要である。ここでは、まさ土試料に対して加圧板法を実施した場合を対象とし、有限要素法による次元浸透流解析を用いてこれらに対する検討を行った例を示す。

本研究における加圧板法では、従来法のように複数段階の背圧を順次作用させるのではなく、任意の背圧を1段階だけ作用させた時の非定常計測データよりVGモデルを同定し、不飽和浸透特性の算定を行う。そのため、作用させる背圧の大きさとVGモデルのパラメータの感度の関係を検討しておく必要がある。パラメータの感度解析には、まさ土試料を想定した図-8(a), (b)のような不飽和浸透特性を考え、これをVGモデルにて表現し、表-3に示すVGモデルパラメータおよびセラミックディスクの飽和透水係数 $k_c$ の値を用いた。また、背圧値 $u_b$ としては図-8(a), (b)中に示した5種類の値を用い、同図に各背圧を作用させた場合の水分平衡状態における不飽和浸透特性の状態をプロットで示している。

表-3に示したパラメータ( $\alpha, n, \theta_r$ )の値を各々微小に変化させた条件で浸透流解析を行い、背圧と試料の含水重量の経時変化( $\Delta W'$ )との関係をシミュレートした。その結果を図-9(a), (b), (c)に示す。これらの図における縦軸は各パラメータの変化による含水重量の変動量を式(7)の記号を用いて次式のように整理したものである。

$$\frac{\partial W'}{\partial b} = \frac{|W'(t, b, +\Delta b) - W'(t, b)|}{\Delta b} \quad (17)$$

ここに、 $\Delta b$ はパラメータ( $\alpha, n, \theta_r$ )の変化量であり、それぞれ図-9(a), (b), (c)に示した値を用いている。

これらによれば、( $\alpha, n$ )については0.05, 0.1 kgf/cm<sup>2</sup>程度の背圧を、一方、 $\theta_r$ については0.1~0.7 kgf/cm<sup>2</sup>程度の背圧を作用させた場合に、含水重量の変動量が大きく、パラメータの感度が良好であると言える。これはVGモデルにおいて、( $\alpha, n$ )が体積含水率が $\theta_r < \theta \leq \theta_s$ 部分における水分特性曲線の形状を支配するパラメータであり、また、 $\theta_r$ は飽和度の低い部分での不飽和浸透特性を支配するパラメータであることによると考えられる<sup>16)</sup>。つまり、対象とする供試体の水分特性曲線が図-8(a)の場合、( $\alpha, n, \theta_r$ )の3パラメータを同時に同定する上で、平均的に良好な感度を得るために

大値が許容値 $\epsilon_1$ 以内であること。

$$\max(S_1, S_2, \dots, S_N) \leq \epsilon_1 \quad (14)$$

$$S_j = |W(t_j) - W'(t_j, \mathbf{b})| \quad (j=1 \sim N) \quad (15)$$

ここに、 $\epsilon_1$ の値は観測データの計測精度から決定される値である。ここでは用いた試料の飽和含水重量の1%程度を考え、加圧板法では $\epsilon_1=1.5$ g、土柱法では $\epsilon_1=10.0$ gと設定した。

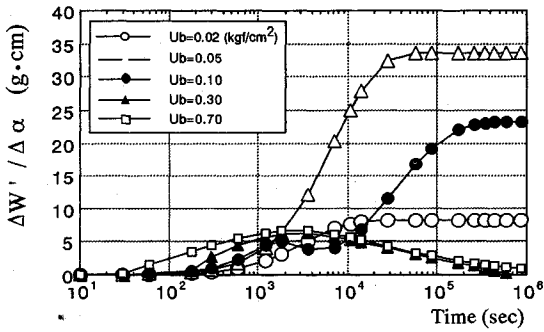
② 反復計算過程において各未知パラメータの変化量が十分小さくなり、同定されたパラメータの値の変動幅がある一定値以内であること。

$$\left| \frac{\Delta b}{b} \right| < \epsilon_2 \quad (16)$$

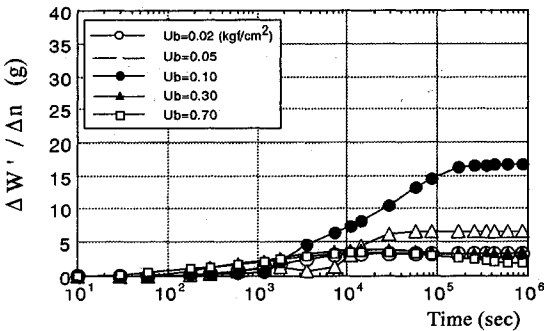
$\epsilon_2$ の値は未知パラメータの有効桁によって決定される値であり、ここでは $\epsilon_2=10^{-2}$ と設定した。

本解析手法では、上記の条件①, ②のいずれかが成立した場合に収束したと判定し、計算を終了している。

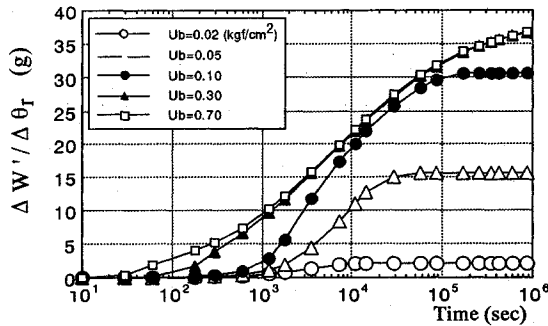
c) 数値解析によるVGモデルの感度解析



(a)  $\alpha$  の感度 ( $\Delta\alpha(\text{cm}^{-1})=0.025-0.015$ )



(b)  $n$  の感度 ( $\Delta n=3.5-2.5$ )



(c)  $\theta_r$  の感度 ( $\Delta\theta_r=0.1-0.0$ )

図-9 加圧板法における感度解析結果

は、供試体に与えるインパクトとして  $0.1 \text{ kgf/cm}^2$  程度の背圧を設定し、供試体内の間隙水を排水させる必要があると言える。

一方、いずれのパラメータも水分平衡状態に近づくほど感度が大きくなる傾向が認められることから、VGモデルの同定には、試験開始からほぼ水分平衡状態に達するまでの非定常データが必要であると考えられる。なお、計測終了時間は供試体の含水重量の経時変化をモニターすることによって予測できる。

#### 4. 試験方法の妥当性の検証

ここで提案した試験方法を実際の試料に対して適用し、得られた水分特性曲線を従来の pF 試験結果と比較

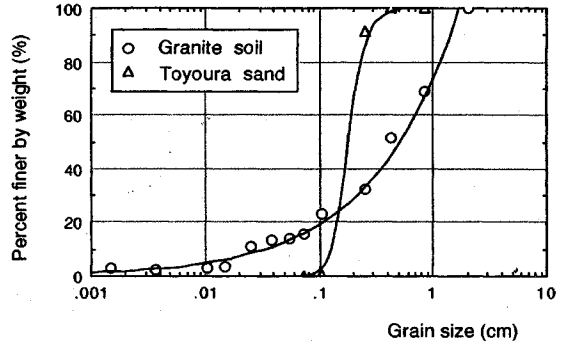


図-10 試料の粒径加積曲線

表-4 VGモデルの同定結果(まさ土)

パラメータ	初期推定値	逆解析による同定値	同定に用いた観測時間 (min)	反復計算回数	平均残差 (g)	最大残差 (g)	pF試験による計測値
$\alpha (\text{cm}^{-1})$	0.015	0.0159	5.1, 10.5, 30.2, 90.4, 180.5, 467.0, 1464.0	2	0.29	0.56	0.0189
$n$	3.0	2.82					4.37
$\theta_r$	0.02	0.03					0.08

平均残差:  $\sum | \text{観測値} - \text{計算値} | / \text{観測データ数}$

することによって、本法の有効性を検討する。用いた試料は加圧板法が岡山市内で採取されたまさ土(比重 2.663)であり、土柱法は豊浦砂(比重 2.640)である。それらの粒径加積曲線を図-10に示す。

#### (1) 加圧板法

まさ土試料を乾燥密度  $1.80 \text{ g/cm}^3$ 、 $\theta_s=0.325$  にて図-4のモールドに締め、通水後、真空脱気により飽和供試体を作成した。その後、飽和透水係数を変水位透水試験より求め  $k_s=1.1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$  を得た。この試料に背圧  $u_0=0.1 \text{ kgf/cm}^2$  を作用させ、排水開始後、含水重量の計測を約70時間行った。VGモデルの同定は排水開始後24時間程度の非定常データを用いて行った。VGモデルの同定結果を表-4に示す。含水重量変化の計測値と同定されたVGモデルを用いた一次元浸透流解析結果との比較を図-11に示す。また、同定されたVGモデルによって得られた水分特性曲線を従来の pF 試験法(加圧板法、土柱法)によって計測された結果と比較したものを図-12に示す。また、比較のために、表-4には従来の pF 試験により得られた水分特性曲線データと式(3)とのフィッティングにより算定されたVGモデルのパラメータ値をも併記した。

#### (2) 土柱法

図-5に示す試験装置に豊浦砂を水中落下によって締め、乾燥密度  $1.52 \text{ g/cm}^3$ 、 $\theta_s=0.42$  なる飽和土柱を作成した。土柱の飽和透水係数は変水位透水試験より求め、 $k_s=2.35 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  を得た。土柱下部より定水位にて排水させ、試験開始後、排水流量の計測を約120時間行った。VGモデルの同定には、排水開始後8時間程

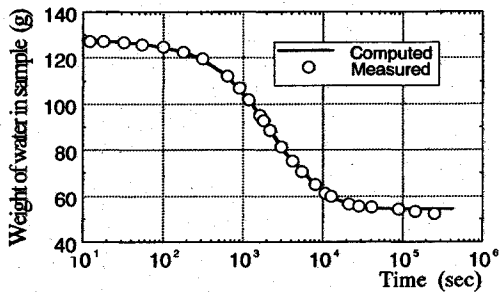


図-11 加圧板法による含水重量変化の計測値と浸透流解析結果との比較 (まさ土)

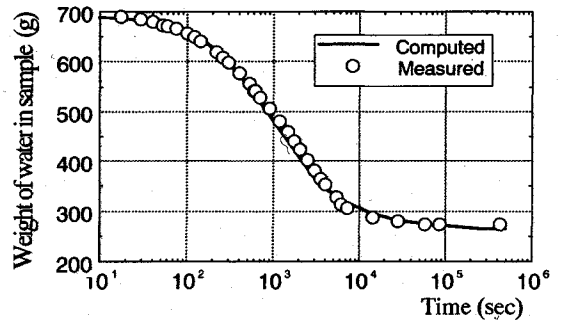


図-13 土柱法による含水量重量変化の計測値と浸透流解析結果との比較 (豊浦砂)

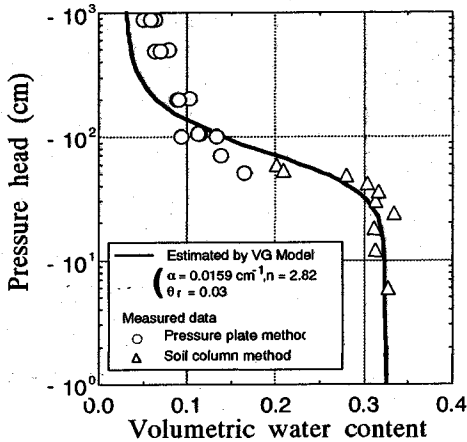


図-12 同定した水分特性曲線と pF 試験より得た結果との比較 (まさ土)

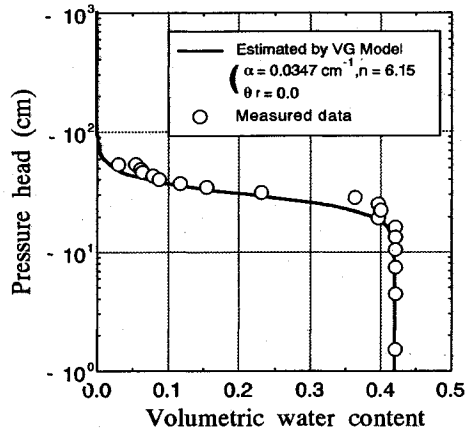


図-14 同定した水分特性曲線と pF 試験より得た結果との比較 (豊浦砂)

表-5 VG モデルの同定結果 (豊浦砂)

n パラメータ	初期推定値	逆解析による同定値	同定に用いた観測時間 (min)	反計算回数	平均残差 (g)	最大残差 (g)	pF 試験による計測値
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0.03	0.0347	1, 2, 5, 10, 60, 121, 4...	2	6.2	11.5	0.0308
n	7.0	6.15	293, 3, 477, 5				6.41

平均残差:  $\Sigma | \text{観測値} - \text{計算値} | / \text{観測データ数}$

度の非定常データを用いて行った。なお、3.(2)a) で述べたように豊浦砂の  $\theta_r$  は零に等しいと考えて既知パラメータとし、 $(\alpha, n)$  の2つを未知パラメータとして VG モデルの同定を行った。同定された VG モデルのパラメータの値を表-5 に、含水重量変化の計測値と計算値との比較を図-13 に示す。さらに、同定された VG モデルによる水分特性曲線と従来の土柱法による結果とを比較したものを図-14 に示す。

(3) 考察

本研究で提案した加圧板法および土柱法によって計測された含水重量の非定常データは、図-11, 13 に示すようにいずれも十分な精度でシミュレートされていると判断できる。また、同定された VG モデルによって推定された水分特性曲線も、図-12, 14 に示すように従来の pF 試験法による結果と比較してほぼ等しい値が得

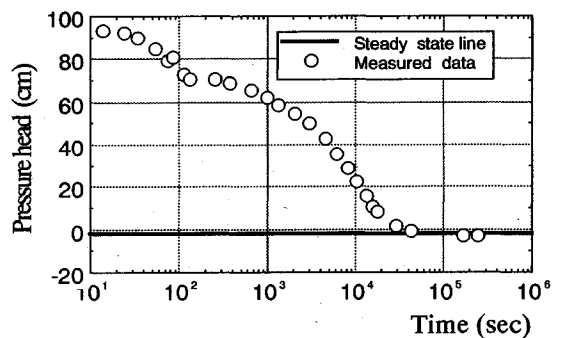
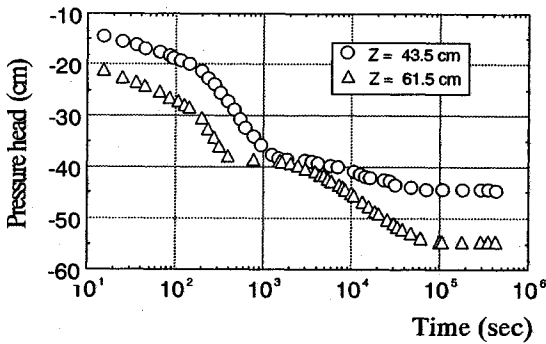


図-15 間隙水圧の経時変化 (加圧板法)

られており、本試験方法の妥当性が確認されたと考えられる。

図-15 は、まさ土試料に背圧  $u_b = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$  を作用させた加圧板法において、供試体内の間隙水圧挙動を示したものである。この場合、間隙水圧の計測値から水分平衡状態が判断されたのは、試験開始から約3日後であった。従来の加圧板法を用いて水分特性曲線を得るためには、さらに高い背圧を4~5段階順次作用させる必要があり<sup>2)</sup>、この試料の場合には20日程度の試験時間





図一16 間隙水圧の経時変化 (土柱法)

が必要であると考えられる。しかし、ここで提案した試験方法によれば、比較的低い背圧を1段階作用させ、24時間程度の非定常データを用いて不飽和浸透特性の推定が可能であり、従来の試験法に比べ、大幅に試験時間を短縮できると考えられる。

一方、図一16は標準砂による土柱法の試験実施時に排水面から、高さ  $Z=43.5$  cm、および  $61.5$  cm (図一5の点A、およびB)における負の間隙水圧の計測結果を示したものである。排水開始から約5日経過した時点において、高さ  $43.5$  cm程度の領域では、水分平衡状態に達したと判断されるが、高さ  $61.5$  cmにおいてはまだまだあり、高さ  $84$  cmの土柱全体が水分平衡状態に達するまでには、さらに試験時間を要することがわかる。しかし、本方法で用いた計測データは含水重量の経時変化がほぼ落ち着くまでの8時間程度の非定常データであり、土柱法の場合も短時間で不飽和浸透特性の推定が可能であるといえる。

なお、以上の非定常実験データによるVGモデルの同定解析に要した演算時間はマイクロコンピュータ {インテル 80386 (25 MHz) CPU} にて1~2時間程度であった。したがって、本試験方法によれば試験終了後、直ちに試験室内において解析を行なって、不飽和浸透特性の算定が可能であり、不飽和浸透特性の迅速かつ簡便な測定方法として極めて有効であると考えられる。

## 5. 結 論

本研究では、不飽和浸透特性の室内測定法であるpF試験のうち加圧板法および土柱法について、これらの試験方法および解析方法を改良し、不飽和浸透特性を迅速かつ簡便に測定する試験方法を提示した。本研究により得られた成果を要約すれば以下ようになる。

(1) 不飽和浸透特性を迅速に測定する室内試験方法として、非定常法による加圧板法および土柱法を提案した。非定常計測データとしては供試体の含水重量を選定し、安定したデータを容易に計測する方法として、高精度電子上皿天秤ばかりを用いて供試体重量の変化を直接

計測し、試料の含水量変化に換算する方法を提示した。

(2) 加圧板法および土柱法の解析方法として、不飽和浸透特性を関数モデルを用いて表現し、それらに含まれる未知定数を非定常計測データより同定することにより不飽和浸透特性を算定する方法を示した。この方法は非定常計測データを数値解析によってシミュレートし、その計測データを最も良く満足するように逆解析手法によって関数モデルのパラメータを算定するものである。

この方法は、関数モデルの同定を非定常過程での計測データを用いて行うために、定常法のように水分平衡状態に達するまでの長時間の計測を必要とせず、試験時間が短縮できること、そして、同定された不飽和浸透特性の関数モデルを用いて、従来のpF試験では困難であった不飽和透水係数に関する情報も得られるという利点を有している。

(3) 不飽和浸透特性の関数モデルとして van Genuchten の提案するモデルを採用し、まさ土および豊浦標準砂に対する適用性を吟味した。また、まさ土試料による加圧板法を対象として、その関数モデルの同定時に問題となる未知パラメータの感度および同定に用いる計測データの時間分布に対する検討を数値解析によって行った。その結果、同定には、供試体の飽和度が50%程度まで減少するような背圧を作用させ、試験開始からほぼ水分平衡状態に達するまでの非定常データが必要であることを示した。

(4) 本研究で提案した試験方法をまさ土および豊浦砂に対して適用し、算定された不飽和浸透特性を従来のpF試験法によって得られた結果と比較することによって、本試験法の妥当性および有効性について吟味した。その結果、簡便法として満足できる結果が得られ、不飽和浸透特性の算定に要する試験時間については、従来の方法と比較して大幅な短縮が可能であることが判明した。

本研究は文部省科学研究費 (一般研究 (C) 01550390 研究代表者: 西垣 誠) の援助を受けた。また、解析および実験に協力していただいた本学卒業生、田村和久君、平松直樹君 (共に現、岡山県)、堀 謙一郎君、清水孝昭君 (共に現、本学大学院) に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 農業土木学会編: 土の理工学性実験ガイド, (実験書シリーズNo.1), 農業土木学会, pp.72-82, 1983.
- 2) 土質工学会: 土質試験の方法と解説, pp.90-105, 1991.
- 3) 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, pp.239-249, 1979.
- 4) 土壌物理性測定法委員会編: 土壌物理性測定法, 養賢堂, pp.191-197, 1976.
- 5) 文献3) の pp.211-225.
- 6) 河野伊一郎・西垣誠: 室内透水試験に関する2,3の考察,

- 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 4, pp. 181-190, 1982.
- 7) Van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci, Am, J., Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980.
  - 8) Dane, J.H. and Hruska, S. : In-situ Determination of Soil Hydraulic Properties during drainage, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.47, pp.619-624, 1983.
  - 9) Stephens, D.B. and Rehfeidt, K.R. : Evaluation of closed-form analytical models to calculate conductivity in a fine sand, Soil Sci, Soc, Am. J., Vol.49, pp.12-19, 1985.
  - 10) 西垣 誠・楠見和紀：不飽和土の浸透特性の評価に関する考察，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 179-186, 1987.
  - 11) 宇野尚雄・佐藤 健・柘植浩史：2, 3 砂質土の水分保持特性，不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 187-192, 1987.
  - 12) 河野伊一郎・西垣 誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 307 号，pp. 59-69, 1981.
  - 13) Van Genuchten, M.Th. : Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed form analytical model," Princeton Univ. Research Report No.78-WR-08, 1978.
  - 14) 河野伊一郎・西垣 誠：有限要素法による不飽和土中の鉛直次元浸透解析，Rep. Research and Development, Okayama Univ. Computer Center, Vol.2, No.1, pp. 39-64, 1983.
  - 15) 中川 徹・小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析，東京大学出版会，pp. 95-110, 1982.
  - 16) 竹下祐二・西垣 誠・河野伊一郎：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, Vol. 30, No. 2, pp. 199-210, 1990.
  - 17) 西垣 誠：飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する 2, 3 の考察，土質工学会.

(1991. 11. 28 受付)

## DETERMINATION OF UNSATURATED SOIL HYDRAULIC PROPERTIES FROM UNSTEADY DRAINAGE EXPERIMENTS IN THE LABORATORY BY PARAMETER IDENTIFICATION

Makoto NISHIGAKI, Yuji TAKESHITA and Iichiro KOHNO

The unsaturated soil hydraulic properties are essential data to predict the seepage behavior in the vadose zone. In this paper, a new experimental methodology of determining these properties is proposed. In this method the unsaturated soil hydraulic properties are assumed to be represented by van Genuchten's closed-form expressions. Unknown parameters of this model are identified by nonlinear least-squares algorithm incorporating finite element analysis of one-dimensional nonsteady seepage flow. The advantages of the proposed method are in the possibility of identifying the optimal unsaturated soil hydraulic properties and diminishing experimental time. To evaluate availability of our proposed method, experimental results which are determined by proposed method and conventional method are compared for decomposed granite soil and Toyoura sand.