

不飽和浸透特性の推定方法とその適用について

*A method to predict hydraulic properties for unsaturated soils
and its application to observed data*

竹下 祐二* (Yuji Takeshita)

河野 伊一郎** (Iichiro Kohno)

飽和～不飽和浸透流解析の入力データとして、不飽和浸透特性は重要であり、不飽和土の工学的性質を議論する上でも必要なパラメータである。しかし、その計測手法は複雑であり、原位置での測定手法も確立されていないため、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現状にある。本文では、このような現状を鑑みて、不飽和浸透特性の簡便な推定法として不飽和浸透特性を関数モデルを用いて表現し、その関数モデルを同定する方法について論述する。特に、van Genuchtenの提案した不飽和浸透特性の関数モデルを採用し、その有用性を吟味するために、我が国の土に対して実施された不飽和浸透特性の代表的な測定結果に対してモデルの適用を試みた結果を報告する。

キーワード：不飽和土、透水性、浸透、地下水 (ICG:D-4/E-7)

1. はじめに

不圧帯水層における浸透問題や堤体内の浸透など自由水面を有する浸透現象、あるいは、ため池からの漏水や降雨浸透といった問題では、飽和流の浸透と不飽和流の浸透が同時に生じており、不飽和流の浸透は飽和流の浸透に付随して挙動するものであると言える。そこで、これらを一貫した系と考えた飽和～不飽和浸透流解析手法が開発され^{1)～5)}、今日、浸透流解析手法の主流となっている。そのため、入力データとして新たに不飽和浸透流を支配する不飽和土の浸透特性が必要となり、その評価が問題となってきた。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 θ と負の圧力水頭 ψ の関係）、および体積含水率 θ と比透水係数 k_r （飽和透水係数 k_s 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。このうち水分特性曲線は、不飽和土の力学的な特性の評価においても必要とされるパラメータであり、現在、不飽和浸透特性の測定は不飽和土の工学的性質を議論する上で、重要な課題の一つであると考えられる。

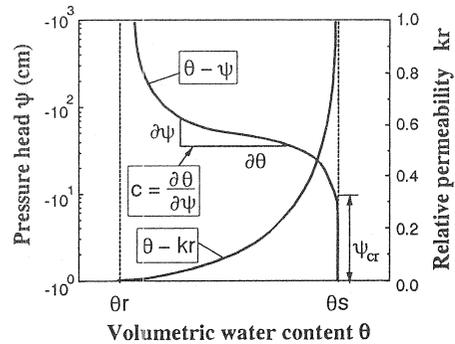


図-1 不飽和浸透特性の模式図

不飽和浸透特性は解析対象とする地層に対して、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が、そ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、特に、不飽和透水係数の測定は必ずしも容易ではない。また、原位置での測定手法も確立されていない。したがって、不飽和浸透特性の測定は一部の研究機関等において、主に室内試験によっ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現状にある。

そこで、本文では不飽和浸透特性の測定法に関する

* 岡山大学大学院自然科学研究科 講師

** 岡山大学工学部土木工学科 教授

このような現状を鑑みて、不飽和浸透特性の簡便な推定法として不飽和浸透特性を関数モデルを用いて表現し、その関数モデルを同定する方法について論述する。そして、現在までに提案されている関数モデルのうち、van Genuchtenの提案し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、その定量的な評価手法としての有用性を吟味するために、我が国の土に対して実施された不飽和浸透特性の代表的な測定結果に対してVGモデルの適用を試みた結果を報告する。

2. 不飽和浸透特性の推定方法

2.1 不飽和浸透特性の関数モデル

近年、不飽和浸透特性を理論的あるいは実験的なモデルを用いて表現し、それらのモデルを計測の容易な土の他の物性値から推定しようとする研究が行われている。これらの研究は不飽和透水係数に比べて計測の比較的容易な水分特性曲線と飽和透水係数の値から不飽和透水係数を算定しようとするものであり、水分特性曲線の持つ地盤の間隙分布との強い相関性を利用したものである。代表的な解析手法として、CCG法、MQ法、M法、およびLBC法などの推定式が提唱され⁶⁾これらはJackson⁷⁾、Campbell⁸⁾ら、Mualem and Dagan⁹⁾によってさらに実用的な推定式への改良がなされている。また、我が国においても、井上らが砂試料の実験データに対してこれらの推定式の適用を試み、各式の有効性の吟味を行っている¹⁰⁾。さらに、西垣は不飽和浸透特性に対して従来より提唱されている理論式や経験式を整理するとともに、実験結果との比較によってその適用性に対する吟味を行なっている¹¹⁾。

つまり、これらの研究の目的は水分特性曲線および不飽和透水係数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られる。一方、最近ではBrooks and Corey¹²⁾やvan Genuchten¹³⁾によって代表される不飽和浸透特性の関数モデルを用いて、それらに含まれる未知定数を原位置または室内浸透実験結果から数値解析法を用いた逆解析手法によって同定することによって、不飽和浸透特性を推定しようとする研究がなされてきており¹⁴⁾⁻¹⁷⁾、現在、不飽和浸透特性の推定手法の主流をなしている。

2.2 van Genuchtenによる不飽和浸透特性の関数モデル

van Genuchtenは式(1)に示すMualemの提案した不飽和透水係数モデル¹⁸⁾を用いて、不飽和浸透特性の解析式の誘導を試みた¹³⁾。

$$k(\phi) = k_s \cdot S_e^{1/2} \left\{ \int_0^{\phi} \frac{dS_e}{\phi} \int_0^{\phi} \frac{dS_e}{\phi} \right\} \quad (1)$$

また、 S_e は有効飽和度であり(2)式で定義される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (0 \leq S_e \leq 1)$$

式(1)は簡単な積分形をしているために、水分特性曲線の推定式が積分可能な連続関数で与えられれば、容易に不飽和透水係数が算定できる特長を有している。van Genuchtenは水分特性曲線の推定式として式(3)を提案し、これを式(1)のMualemのモデルに与えて、不飽和透水係数および比水分容量に対する解析的な閉鎖形予測式を導き、式(5)、(6)を得た。

$$S_e = \left(1 + |\alpha \phi|^n \right)^{-m} \quad (\alpha > 0) \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (0 < m < 1, n > 1) \quad (4)$$

$$k(\phi) = k_s \cdot S_e^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2 \quad (5)$$

$$C(\phi) = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r)^{1/m} S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (6)$$

上式において比水分容量 $C(\phi)$ は圧力水頭の増分に対する体積含水率の変化割合を示すパラメータで、水分特性曲線の勾配(= $d\theta/d\phi$)である。

van Genuchtenの提案したモデルは図-1に示すような水分特性曲線の持つ滑らかな曲線形状を飽和領域から不飽和領域に至るまで極めて良好に近似でき、比水分容量の連続性($\theta = 0$ および $\theta = \theta_s$ にて $C(\phi) = 0$)をも満足できる特徴を持っている。このモデルの妥当性に対する検討は、van Genuchten自身によってなされているほか²⁶⁾、今までに数多くの報告がなされている¹⁹⁾⁻²²⁾。特に、Stephensらは土質に対する適用範囲が広く簡便であり、実用上十分な精度を有するモデルであると高く評価している²³⁾。

なお、水分特性曲線は排水過程と浸潤過程に依存し

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。この問題について、KoolらはVGモデルを拡張して、水分特性曲線のヒステリシスを考慮したモデルを開発し、浸潤および排水試験結果からモデルの同定を試みている^{24), 25)}。しかし、本研究では、原位置あるいは室内での平均的な不飽和浸透特性を算定することを目的としているために、ヒステリシスの影響は工学的にさほど重要な問題ではないと判断し、ヒステリシスの影響は無視した。

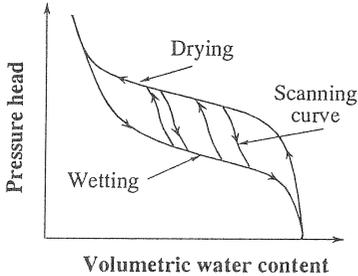


図-2 水分特性曲線のヒステリシス

2.3 水分特性曲線データによるVGモデルの同定手法

VGモデルは式(3)~(5)に示すように5つの独立したパラメータ ($k_s, \alpha, n, \theta_r, \theta_s$) によって構成されている。これらの未知パラメータのうち(α, n, θ_r)の推定法として、van Genuchtenは水分特性曲線の計測データとVGモデルとのフィッティングを行う方法を提案している²⁶⁾。この方法は間接法による逆解析手法であり、体積含水率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ている。

$$R(\mathbf{b}) = \sum_{j=1}^N \{ w_j [\theta(\phi_j) - \theta'(\phi_j, \mathbf{b})] \}^2 \quad (9)$$

ここに、 $\theta(\phi_j)$: 体積含水率の観測値、 $\theta'(\phi_j, \mathbf{b})$: 体積含水率の計算値、 \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

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 $w_j = 1$ としている。また、 $\theta'(\phi_j, \mathbf{b})$ は仮定したパラメータ \mathbf{b} におけるVGモデルによる計算値であり、その算出には、式(2)と式(3)より与えられる式(10)を用いている。なお、式(9)における $\theta'(\phi_j, \mathbf{b})$ は \mathbf{b} に対して非線形となるため、式(9)の解法には非線形最小二乗法を使用し、その解析アルゴリズムには

Gauss-Newton法が用いられている。

$$\theta = \theta_r \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \phi|^n)^m} \quad (10)$$

この手法は非常に簡便であるが、次の2つの難点を有している。

① 水分特性曲線の計測データを得るためには定常状態に達するまでの長時間の浸透試験を行う必要がある。

② 未知パラメータは水分特性曲線データのみに対するフィッティングによって推定されるため、算定された不飽和浸透特性における誤差は不飽和透水係数の値に大きく影響する。

しかし、不飽和浸透特性のうち比較的計測の容易な水分特性曲線データが測定されておれば、その土の不飽和浸透特性の関数モデルが作成できるメリットは大きく、有効な方法であると考えられる。なお、VGモデルにおいては不飽和透水係数モデルとして、式(1)に示したMualemのモデルと式(11)に示すBurdineの提案したモデル²⁷⁾のいずれかが選択可能である。土質の種類による両モデルの選択基準は特に明確にされてはいないが、van Genuchtenの論文では主にMualemのモデルが用いられているようである。したがって、本研究においてもMualemのモデルを選択した。なお、Burdineのモデルを用いる場合には、式(10)における m の値は式(4)の代わりに式(12)を用いて決定する必要がある。

$$k(\phi) = k_s \cdot S_e^2 \left\{ \int_0^{S_e} \frac{dS_e}{\phi^2} \right\} / \left\{ \int_0^1 \frac{dS_e}{\phi^2} \right\} \quad (11)$$

$$m = 1 - 2/n \quad (0 < m < 1, n > 2) \quad (12)$$

本研究で用いたVGモデルの同定コードのプログラムリストおよび入力データ作成方法を付録に示した。

3. 不飽和浸透特性の測定例

我が国の土に対して実施された不飽和浸透特性の代表的な測定結果として、表-1に示す10種類のデータを整理した。これらのデータは向上²⁸⁾の研究を基礎として、それにデータの追加を試みたものである。各測定例において計測された水分特性曲線データを用いてVGモデルの同定を行ない、不飽和浸透特性の計

測データとの比較を試みた結果を図-3~12に示す。これらの結果を見る限り、砂質土から粘性土や泥岩に至るまでVGモデルは体積含水率のほぼ全領域において十分な一致を示していると思われる。なお、土質によっては不飽和透水係数と体積含水率の関係に十分な一致の見られない場合もあるが、この原因は前節2.3で述べた難点②によるものと考察される。VGモデルの同定により得たパラメータ (α, n, θ_r) の値を表-2に示す。なお、この表において飽和体積含水率 θ_s の値には間隙率の値を用いている。これらの同定結果によれば、飽和体積含水率値の正確な決定に留意すれば、水分特性曲線からVGモデルを用いて不飽和浸透特性の推定がほぼ可能であるように考えられる。

4. おわりに

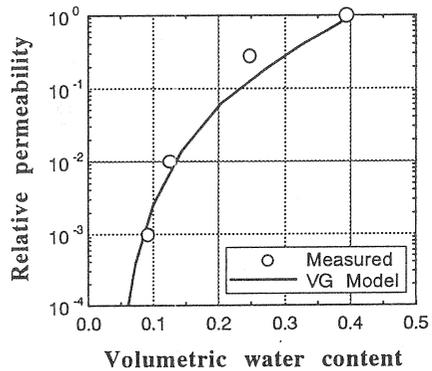
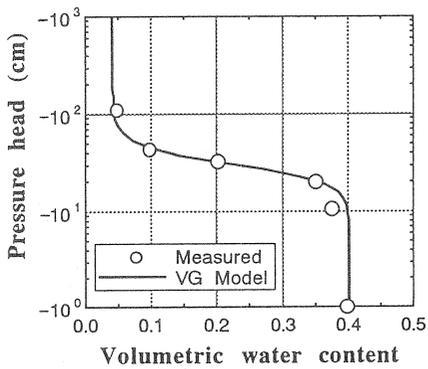
不飽和浸透特性の測定法が確立されていない現状を鑑みて、不飽和浸透特性の関数モデルの同定による不飽和浸透特性の推定法について述べ、我が国の土に対して実施された不飽和浸透特性の代表的な測定結果を整理し、van Genuchtenの提案した不飽和浸透特性関数モデルの適用を試みた結果を報告した。その結果、水分特性曲線の計測データが得られればVGモデルを用いて不飽和浸透特性の推定がほぼ可能であるように考えられる。しかし、今後も種々の試料に関しての不飽和浸透特性を計測し、そのデータを蓄積していくことは極めて重要である。特に、現在、確立されていない原位置における不飽和浸透特性の測定法の開発が急務であると思われる。

表-1 不飽和浸透特性の測定例

図番号	試料分類	測定方法		参考文献
		水分特性曲線	不飽和透水係数 $k(\theta)$ 飽和透水係数 k_s	
3	砂丘砂	pF試験(土柱法, 吸引法, テンシオメーター, 遠心分離法)	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 k_s =定水位透水試験	10)
4	アカホヤ (火山灰土)	pF試験(吸引法)	$k(\theta)$ =ショートコラム定常法 k_s =定水位透水試験	29)
5	クロニガ	pF試験(吸引法)	$k(\theta)$ =ショートコラム定常法 k_s =定水位透水試験	29)
6	クロボクA (火山灰土)	pF試験(吸引法)	$k(\theta)$ =ショートコラム定常法 k_s =定水位透水試験	29)
6	クロボクB (腐植含量約30%)	pF試験(加圧板法)	加圧型不飽和透水試験	30)
7	関東ローム	$\phi(t)$ =テンシオメーター $\theta(t)$ =中性子水分計	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 k_s =定水位透水試験	31)
8	シラスA	$\phi(t)$ =圧力変換器 $\theta(t)$ =中性子水分計	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 k_s =定水位透水試験	32)
8	シラスB	pF試験(吸引法)	$k(\theta)$ =ショートコラム定常法 k_s =定水位透水試験	29)
9	泥岩	pF試験(遠心分離法) $\theta(t)$ =水平毛管試験	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 k_s =定水位透水試験	33)
10	標準砂	$\phi(t)$ =圧力変換器 $\theta(t)$ =中性子水分計	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 k_s =定水位透水試験	15)
11	マサ土 A~C	$\phi(t)$ =圧力変換器 $\theta(t)$ =中性子水分計	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 k_s =定水位透水試験	34)
12	マサ土D	$\phi(t)$ =圧力変換器 $\theta(t)$ =中性子水分計	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 k_s =定水位透水試験	35)

表-2 VGモデルパラメータの同定結果

図番号	試料名	同定結果			既知パラメータ	
		α (cm ⁻¹)	n	θ_r	k_s (cm/s)	θ_s
3	砂丘砂	0.0356	4.793	0.042	2.864×10^{-2}	0.403
4	アカホヤ	0.0307	1.871	0.412	1.000×10^{-2}	0.785
5	クロニガ	0.0605	1.442	0.473	3.000×10^{-2}	0.739
6	クロボクA	0.0241	1.713	0.437	3.000×10^{-2}	0.800
6	クロボクB	0.0268	3.249	0.581	7.000×10^{-4}	0.801
7	関東ローム	0.0115	1.487	0.218	4.500×10^{-3}	0.760
8	シラスA	0.0286	4.78	0.294	2.254×10^{-4}	0.520
8	シラスB	0.0167	3.116	0.128	1.000×10^{-4}	0.600
9	泥岩	0.0759	1.455	0.021	1.700×10^{-7}	0.580
10	標準砂	0.0218	12.318	0.00	2.560×10^{-2}	0.411
11	マサ土 A	0.111	2.08	0.075	9.000×10^{-3}	0.348
	マサ土 B	0.102	2.13	0.199	3.100×10^{-2}	0.517
	マサ土 C	0.0349	2.06	0.270	6.200×10^{-3}	0.554
12	マサ土 D	0.070	1.82	0.110	3.300×10^{-4}	0.338

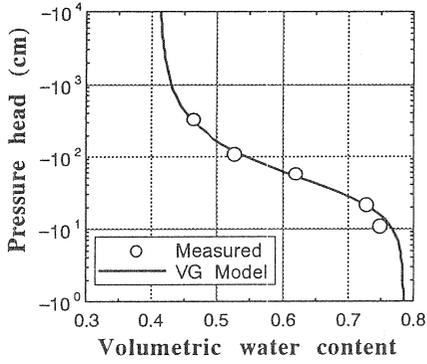


(a)水分特性曲線

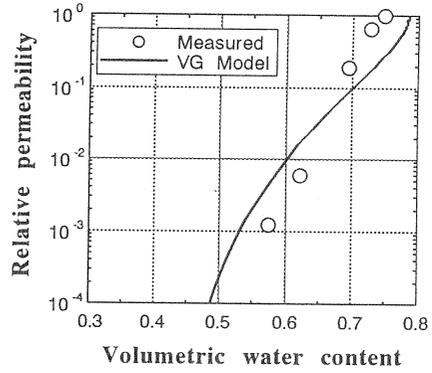
(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-3 砂丘砂に対するVGモデルの適用例

($\theta_s=0.403$, $k_s=2.864 \times 10^{-2}$ cm/s, $\theta_r=0.042$, $\alpha=0.0356$ cm⁻¹, $n=4.793$)



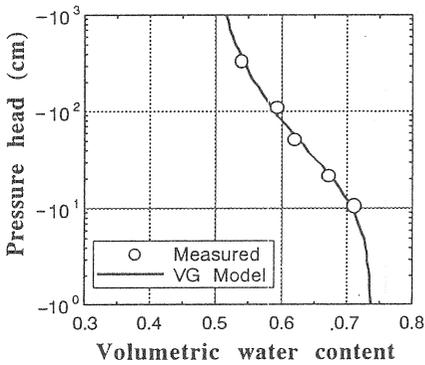
(a)水分特性曲線



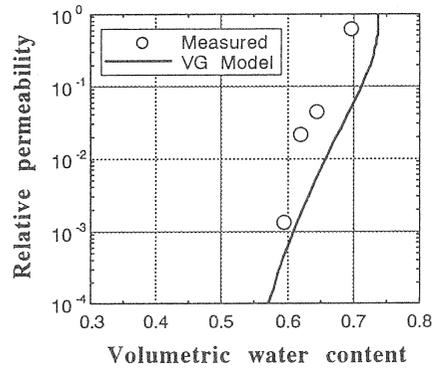
(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-4 アカホヤに対するVGモデルの適用例

($\theta_s=0.785$, $k_s=1.000 \times 10^{-2} \text{cm/s}$, $\theta_r=0.412$, $\alpha=0.0307 \text{cm}^{-1}$, $n=1.871$)



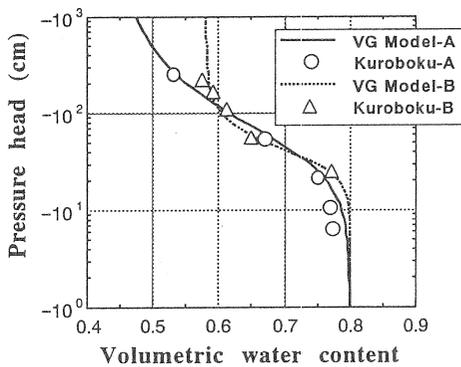
(a)水分特性曲線



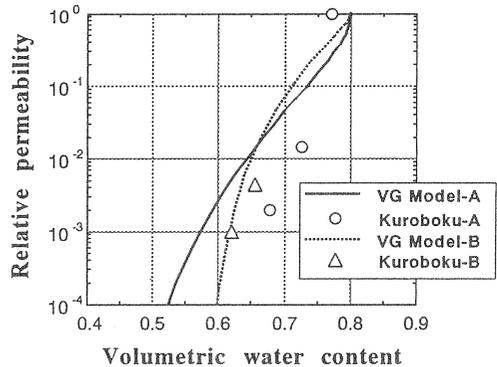
(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-5 クロヒガに対するVGモデルの適用例

($\theta_s=0.739$, $k_s=3.000 \times 10^{-2} \text{cm/s}$, $\theta_r=0.473$, $\alpha=0.0605 \text{cm}^{-1}$, $n=1.442$)



(a)水分特性曲線

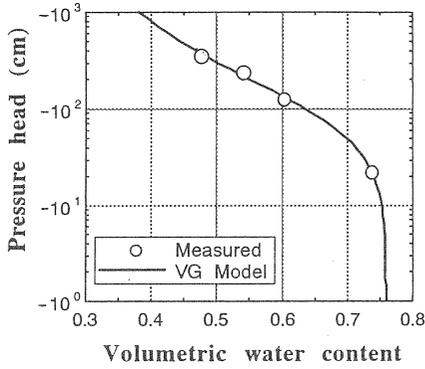


(b)体積含水率と比透水係数の関係

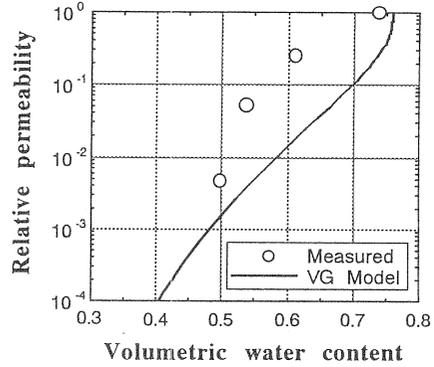
図-6 クロボクに対するVGモデルの適用例

(A : $\theta_s=0.800$, $k_s=3.000 \times 10^{-2} \text{cm/s}$, $\theta_r=0.437$, $\alpha=0.0241 \text{cm}^{-1}$, $n=1.713$)

(B : $\theta_s=0.801$, $k_s=7.000 \times 10^{-4} \text{cm/s}$, $\theta_r=0.581$, $\alpha=0.0268 \text{cm}^{-1}$, $n=3.249$)



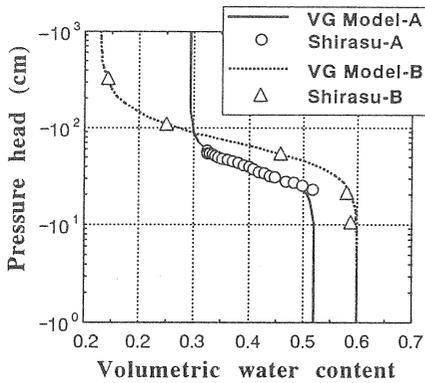
(a)水分特性曲線



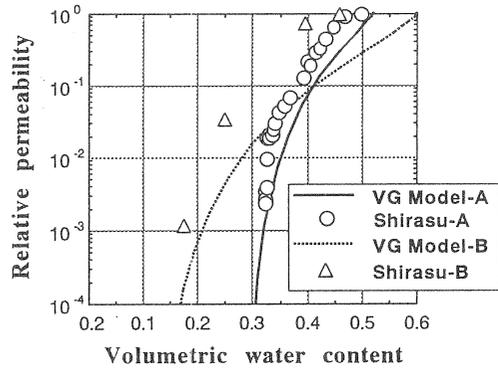
(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-7 関東ロームに対するVGモデルの適用例

($\theta_s=0.760$, $k_s=4.500 \times 10^{-3}$ cm/s, $\theta_r=0.218$, $\alpha=0.0115$ cm $^{-1}$, $n=1.487$)



(a)水分特性曲線

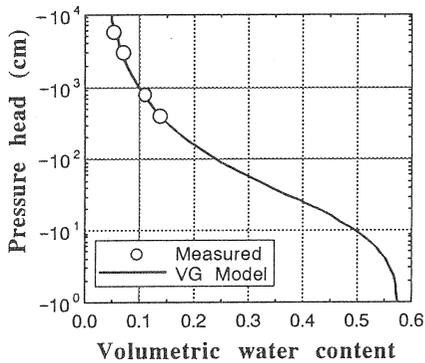


(b)体積含水率と比透水係数の関係

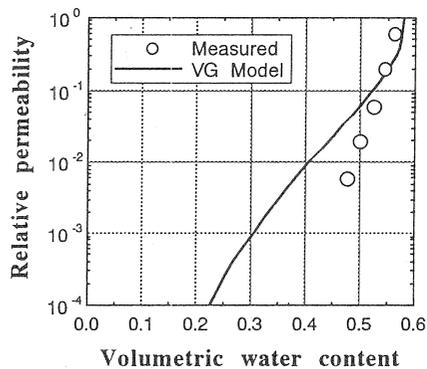
図-8 シラスに対するVGモデルの適用例

(A : $\theta_s=0.520$, $k_s=2.254 \times 10^{-4}$ cm/s, $\theta_r=0.294$, $\alpha=0.0286$ cm $^{-1}$, $n=4.780$)

(B : $\theta_s=0.600$, $k_s=1.000 \times 10^{-4}$ cm/s, $\theta_r=0.128$, $\alpha=0.0167$ cm $^{-1}$, $n=3.116$)



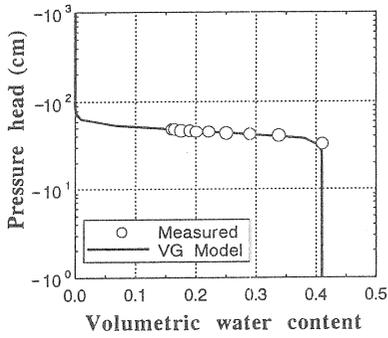
(a)水分特性曲線



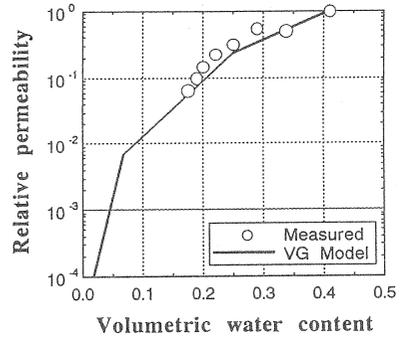
(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-9 泥岩に対するVGモデルの適用例

($\theta_s=0.580$, $k_s=1.700 \times 10^{-7}$ cm/s, $\theta_r=0.021$, $\alpha=0.0759$ cm $^{-1}$, $n=1.455$)



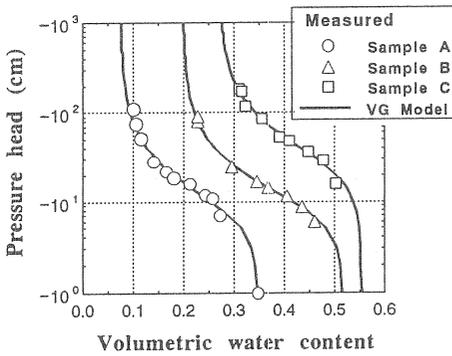
(a)水分特性曲線



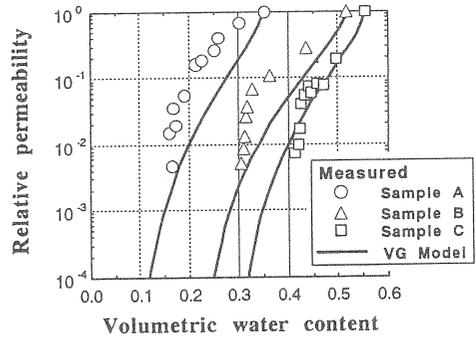
(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-10 標準砂に対するVGモデルの適用例

($\theta_s=0.411$, $k_s=2.560 \times 10^{-2}$ cm/s, $\theta_r=0.00$, $\alpha=0.0218$ cm $^{-1}$, $n=12.318$)



(a)水分特性曲線



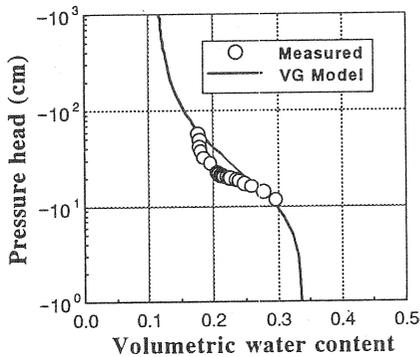
(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-11 マサ土A~Cに対するVGモデルの適用例

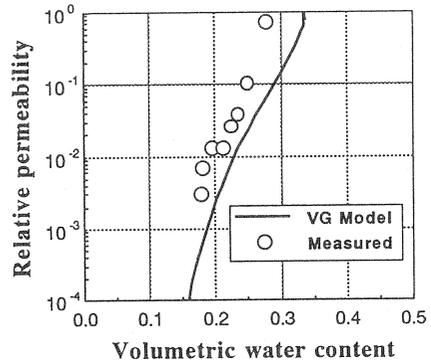
(Sample A: $\theta_s=0.348$, $k_s=9.0 \times 10^{-3}$ cm/s, $\theta_r=0.075$, $\alpha=0.111$ cm $^{-1}$, $n=2.08$)

(Sample B: $\theta_s=0.517$, $k_s=3.1 \times 10^{-3}$ cm/s, $\theta_r=0.199$, $\alpha=0.102$ cm $^{-1}$, $n=2.13$)

(Sample C: $\theta_s=0.554$, $k_s=6.2 \times 10^{-3}$ cm/s, $\theta_r=0.27$, $\alpha=0.0349$ cm $^{-1}$, $n=2.06$)



(a)水分特性曲線



(b)体積含水率と比透水係数の関係

図-12 マサ土Dに対するVGモデルの適用例

($\theta_s=0.338$, $k_s=3.30 \times 10^{-4}$ cm/s, $\theta_r=0.110$, $\alpha=0.070$ cm $^{-1}$, $n=1.82$)

記号説明

$C(\phi)$:比水分容量、 $k(\phi)$:不飽和透水係数、
 k_s :飽和透水係数、 k_r :比透水係数、 S_e :有効飽和度、
 ϕ :圧力水頭、 θ :体積含水率、 θ_s :飽和体積含水率、
 θ_r :最小含水量、 α, n :土の種類や間隙状態により
 決定されるV Gモデルパラメータ

参考文献

- 1) Freeze, R. A. (1971): "Three-dimensional transient saturated-unsaturated flow in a ground water basin." *Water Res. Res.* Vol. 7, No. 2, pp. 347-363.
- 2) Neuman, S. P. (1973): "Saturated unsaturated Seepage by finite elements." ASCE, HY12 Vol. 99, No. 12, pp. 2233-2250.
- 3) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠(1977):有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析,「土木学会論文報告集」,第264号, pp. 87-95.
- 4) 草深守人・向上拡美・三原正哉・北村孝海(1977):有限要素法による飽和-不飽和浸透の二次元非定常解析について,「間組研究年報」, pp. 33-50.
- 5) 駒田広也(1978):不飽和土中の非定常浸透流解析,「電力中央研究所報告」, No. 377015.
- 6) Klute, A. (1972): "The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils." *Soil Sci.*, Vol. 113, No. 4, pp. 264-276.
- 7) Jacson, R. D. (1972): "On the calculation of hydraulic conductivity." *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 36, pp. 380-382.
- 8) Campbell, G. S. (1974): "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data." *Soil Sci.*, vol. 117, pp. 311-314.
- 9) Mualem, Y. and Dagan, G. (1978): "Hydraulic conductivity of soils: Unified Approach to the Statistical Models." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 42, pp. 392-395.
- 10) 井上光弘・矢野友久・吉田 勲・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」,第46号, pp. 21-26.
- 11) 西垣 誠(1983):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,「土質工学会論文報告集」, Vol. 23, No. 3, pp. 165-177.
- 12) Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1966): "Properties of porous media affecting fluid flow." ASCE, Vol. 92, IR. 2, pp. 61-88.
- 13) Van Genuchten, M. Th. (1980): "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Sci. Am. J.*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.
- 14) Kool, J. B., Parker, J. C. and Van Genuchten, M. Th. (1987): "Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - A review." *J. Hydrology*, Vol. 91, pp. 255-293.
- 15) 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」,第30巻,第2号, pp. 199-210.
- 16) 西垣 誠・竹下祐二・河野伊一郎(1992):室内試験による不飽和浸透特性の非定常算定方法,「土木学会論文集」, No. 454/Ⅲ-20, pp. 103-112.
- 17) 竹下祐二・西垣 誠・河野伊一郎(1993):原位置における不飽和浸透特性の測定法,土質工学会,「不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題」シンポジウム発表論文集, pp. 115-118.
- 18) Mualem, Y. (1976): "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water Res. Res.*, vol. 12, No. 3, pp. 513-522.
- 19) Dane, J. E. (1980): "Comparison of field and laboratory determined hydraulic conductivity values," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 228-231.
- 20) Hopmans, J. W. and Overmars, B. (1986): "Presentation and application of an analytical model to describe soil hydraulic properties," *J. Hydrology*, Vol. 87, pp. 135-143.
- 21) Sakelellariou-Makrantonaki, M., Tzimopoulos, C., and Gouliaras, D. (1987): "Analysis of a closed-form analytical model to predict the hydraulic conductivity function," *J. Hydrology*, Vol. 92, pp. 289-300.
- 22) Russo, D. (1988): "Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic

- properties," *Water Res. Res.*, vol.24, No. 3, pp. 453-459.
- 23) Stephens, D. B. and Rehfeidt, K. R. (1985): "Evaluation of closed-form analytical models to calculate conductivity in a fine sand," *Soil Sci. Soc. Am., J.*, Vol. 49, pp. 12-19.
- 24) Kool, J. B., Parker, J. C. and van Genuchten, M. Th. (1986): "The Inverse Problem for Hysteretic Unsaturated Flow," in *Proc. 6th Int. Conf. on Finite Elements in Water Resources*, pp. 337-346.
- 25) Kool, J. B. and Parker, J. C. (1987): "Development and Evaluation of Closed-Form Expressions for Hysteretic Soil Hydraulic Properties," *Water Res. Res.*, vol. 23, No. 1, pp. 105-114.
- 26) van Genuchten, M. Th. (1978): "Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed form analytical model," *Princeton Univ. Research Report No. 78-WR-08*.
- 27) Burdine, N. T. (1953): "Relative permeability calculations from pore-size distribution data," *Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall. Eng.* 198, pp. 71-77.
- 28) 向上拡美・北村孝海(1986): 浸透流における不飽和特性と解析精度に関する考察, 間組研究年報, pp. 163-174.
- 29) 雨宮悠・中野政詩・塩沢昌・武藤勲(1979): シラス地帯における土の特性と水の動態(Ⅱ)宮崎県東諸県郡塚原シラス台地の水文地質構造, 昭和54年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 210-211. (Ⅲ)台地不飽和土壌水分帯域の保水と移動, 昭和54年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp. 212-213.
- 30) 長谷川周一・前田隆(1977): 不飽和浸透流におけるダルシーの法則の適用-不飽和土壌水の運動に関する研究(1), 「農業土木学会論文集」, 第70号, pp. 13-19.
- 31) 開発一郎・佐倉保夫(1981): 野外土槽中の不飽和土の水分特性, 「筑波大学水理実験センター報告」, 第5号, pp. 19-23.
- 32) 西垣 誠・森田 修・浅野茂生・延山政之(1988): 不攪乱不飽和土の浸透特性の求め方, 「土木学会第43回年次学術講演会」, Ⅲ, pp. 890-891.
- 33) 西垣誠・鍵富淳・下茂道人(1982): 瞬時水分計測法の適用限界と泥岩の保水特性について, 「第17回土質工学研究発表会概要集」, pp. 2385-2388.
- 34) 青山千彰(1987): 乱さないまさ土の物理・工学的性質に関する研究, 関西大学工学部学位論文, pp. 59-96.
- 35) 河野伊一郎・西垣 誠・竹下祐二・堀謙一郎・清水孝昭(1991): p F 試験における間隙水圧の挙動に関する考察, 第26回土質工学研究発表会, pp. 1683-1684.

付 録

V Gモデルの同定コードのプログラムリストおよび
入力データ作成方法

A 1. 入力データの作成方法

この解析コードでは非線形最小二乗法を用いているために、未知パラメータの初期値をなんらかの方法で推定しなければならない。その際、真値から著しく離れた値を初期値として設定した場合、解法の性格上演算時間が増加し、解の精度が劣るだけでなく、時には発散する場合がある。van GenuchtenはV Gモデルの形状定数である(α、n)の初期値の決定方法として以下の方法を提案している。

① 観測データをプロットし、水分特性曲線を描く。

(付図-1 参照)

② θ_rとθ_sの中間θ_pにおいて接線を引く。この場合、θ_rの値が水分特性曲線データより明確に決定できない場合には仮定値を入力し、V Gモデルにより推定することも可能である。

③ 次式(1)を用いて接線の傾き S_pを求める。

$$S_p = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{d\theta}{d(\log h)} \right| \quad (a.1)$$

④ 得られた S_pの値を次式に代入し n を求める。

$$n = 1.733 S_p + 0.37 \quad (n > 4) \quad (a.2)$$

ここで、n ≤ 4 となる場合、次式(a.3)を用いて n を求める。

$$S_p = 1.151(n-1) \{1 - 2^{-(n/(1-n))}\} \quad (a.3)$$

⑤ θ_rとθ_sの中間θ_pにおける圧力水頭値 h_pを求め、次式より α を計算する。

$$\alpha = \frac{1}{h_p} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad [cm^{-1}] \quad (a.4)$$

係数 m の値は、不飽和浸透特性モデルのタイプ(付表-1 入力データリストの Group Dカード参照)により、本文中の式(4)、(11)のいずれかを用いて求める。

A 2. 同定例

付図-1 に示したマサ土試料(間隙比0.48)の水分特性曲線データにV Gモデルの同定を試みた際の入力データ例示す。

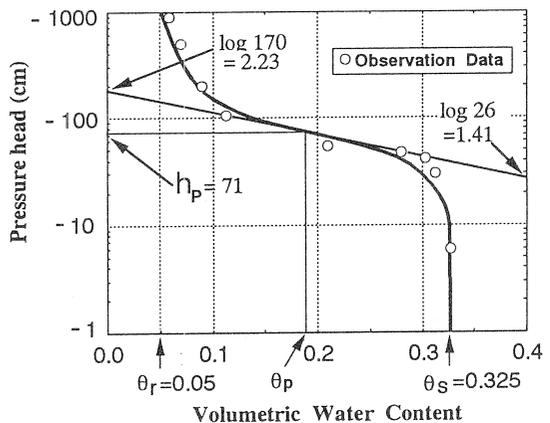
(1) 水分特性曲線の同定に用いる(α、n)の初期値の算定

付図-1 より、飽和体積含水率 θ_s=0.325、最小含水量 θ_r=0.05である。したがって、θ_p=0.1875 であり、このθ_pにおいて接線を引く。式(a.1)より接線の傾き S_pを求めると以下のものである。

$$\begin{aligned} S_p &= \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{d\theta}{d(\log h)} \right| \\ &= \frac{1}{0.325 - 0.05} \left| \frac{0.40 - 0.0}{2.23 - 1.41} \right| \\ &= 1.77 \end{aligned}$$

次に、式(a.3)から n を求め、本文中の式(4)より m を求める。その結果 n=3.47、m=0.71と求められる。また、付図-1 より h_p=71cmであるから、式(a.4)を用いて α=0.016 [cm⁻¹]となる。

以上より α、nの初期値は α=0.016 [cm⁻¹]、n=3.47 となる。次ページのデータを用いて同定した結果、α=0.0164 [cm⁻¹]、n=3.37なる値が推定された。



付図-1 マサ土試料(e=0.48)による水分特性曲線

(2) 入力データ例

1	2	3	4	5	6	7	
PRESSURE PLATE METHOD NO. 1 + COLUMN METHOD							Group A
$\theta_s = \text{KNOWN} = 0.325, \theta_r = \text{KNOWN} = 0.05$							Group B
$\alpha, n = \text{UNKNOWN}$							Group C
2	2	20	0.001	0.05	0.325	0.000146	Group D
0.016	3.47						Group E
α	n						Group F
6.000	0.327						Group G
30.000	0.312						
42.000	0.303						
48.000	0.280						
54.000	0.209						
106.055	0.112						
201.330	0.090						
496.870	0.069						
891.940	0.059						Group H (Blank Card)

付表-1 入力データリスト

Group	Columns	Format	Symbol	Description
A	1-80	20A4	TITLE	実験タイトル等
B	1-80	20A4	TITLE	同上
C	1-80	20A4	TITLE	同上
D	1-10	I10	MODE	不飽和浸透特性モデルのタイプ = 1 : Mualem theory (未知係数 α, n, θ_r) = 2 : Mualem theory (未知係数 α, n) = 3 : Burdine theory (未知係数 α, n, θ_r)
	11-20	I10	NP	未知係数の数 MODE = 1 or 3 の時 NP = 3 MODE = 2 の時 NP = 2
	21-30	I10	MIT	非線形最小二乗法での最大繰り返し計算数
	31-40	F10.0	STOPCR	収束基準 各未知係数で相対的な変化がSTOPCR以下 であればイテレーションを停止する
	41-50	F10.0	WCR	最小含水量 (θ_r) (MODE=2の時のみ入力)
	51-60 61-70	F10.0 F10.0	WCS SATK	飽和体積含水率 (θ_s) 飽和透水係数 (ks) [cm/s]
E	1-10	F10.0	B(1)	θ_r の初期値 (Group D で NP=3 の時) α [cm ⁻¹] の初期値 (Group D で NP=2 の時)
	11-20	F10.0	B(2)	α [cm ⁻¹] の初期値 (Group D で NP=3 の時) n の初期値 (Group D で NP=2 の時)
	21-30	F10.0	B(3)	n の初期値 (Group D で NP=3 の時のみ)
F	1-6	A4, A2	BI(1)	Group E の B(1)の係数の名称
	11-16	A4, A2	BI(2)	Group E の B(2)の係数の名称
	21-26	A4, A2	BI(3)	Group E の B(3)の係数の名称 (Group D で NP=3 の時のみ入力する)
G	1-10	F10.0	X(1)	圧力水頭の計測値 [cm]
	11-20	F10.0	Y(1)	体積含水率の計測値 (水分特性曲線の計測データを1カード1組 として観測点の数だけ入力する)
H				Blank Card

A 3. V Gモデル同定プログラムソースリスト

```

C ***** PROGRAM VANG-SP.FOR *****
C *      A COMPUTER MODEL FOR CALCULATING          *
C *      THE UNSATURATED SOIL HYDRAULIC PROPERTIES *
C *      FROM SOIL MOISTURE RETENTION DATA.       *
C *                                               *
C *      NON-LINEAR LEAST-SQUARES ANALYSIS         *
C *                                               *
C *      ORIGINAL BY RIEN VAN GENUCHTEN (1978) --> SOHYP *
C *                                               *
C *      MODIFIED BY Y.TAKESHITA (1987 JAN.)      *
C *      M.CHIJIMATSU (1991 FEB.)                *
C *****
C
C ----- FILE INFORMATION -----
C
C          * = KEYBOARD & DISPLAY
C          FILE 5 = INPUT DATA
C          FILE 6 = RESULTS
C -----
C
C ----- LIST OF THE MOST SIGNIFICANT VARIABLES IN THIS PROGRAM -----
C
C  AK          Hydraulic conductivity.
C  ALPHA       Coefficient  $\alpha$  in van Genuchten's model.
C  B(I)        Array containing initial estimates of coefficients.
C  BI(I)       Array of coefficient names.
C  DIFFUS      Soil moisture diffusivity.
C  MIT         Maximum number of iterations.
C  MODE        Designates model type to be used in program
C              = 1 Three-parameter fit ( $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$ ) (Mualem theory)
C              = 2 Two-parameter fit ( $\alpha$ ,  $n$ ) (Mualem theory)
C              = 3 Three-parameter fit ( $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$ ) (Burdine theory)
C  MODEL       Subroutine to calculate soil moisture content from
C              pressure head.
C  NIT         Iteration number during program execution.
C  NOB         Number of observed data points (must not exceed 40).
C  RK          Relative hydraulic conductivity.
C  RM          Equals  $1-1/n$  for Mualem theory,  $1-2/n$  for Burdine theory.
C  RN          Coefficient  $n$  in van Genuchten's model.
C  RWC         Dimensionless moisture content.
C  SATK        Hydraulic conductivity at saturation.
C  SSQ,SUMB    Residual sum of squares.
C  STOPCR      Stop criterion. Iteration process stops when the relative
C              change in each coefficient becomes less than STOPCR.
C  TITLE(I)    Array containing information of title cards.
C  WC          Volumetric water content.
C  WCR         Residual water content.
C  WCS         Saturated water content.
C  X(I)        Array of observed pressure head
C              ( values are assumed to be positive).
C  Y(I)        Array of observed water content.
C -----
C
C      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C      CHARACTER*70 TITLE
C      CHARACTER*20 FNAME5,FNAME6
C
C      DIMENSION X(40),Y(40),R(40),F(40),DELZ(40,4),LSORT(40),B(3),BI(8),
C      &E(3),P(3),PHI(3),Q(3),TB(3),A(3,3),D(3,3),TH(3)
C
C ----- OPEN INPUT DATA FILE -----

```

```

WRITE (*,101)
READ (*,1010) FNAME5
OPEN (5, FILE=FNAME5)
C----- OPEN OUTPUT DATA FILE -----
WRITE (*,102)
READ (*,1010) FNAME6
OPEN (6, FILE=FNAME6, STATUS='NEW' )
C-----
101 FORMAT(1H0, '=== INPUT DATA FILE NAME [ EX. B:DATA1.DAT ] ==> 'Y)
102 FORMAT(1H0, '=== OUTPUT FILE NAME [ EX. C:DATA1.OUT ] ==> 'Y)
C-----
WRITE(6,1000)
C ----- READ HEAD TITLE -----
DO 10 I=1,3
READ(5,1010)TITLE
10 WRITE(6,1020)TITLE
WRITE(6,1030)
C ----- READ INPUT PARAMETERS -----
READ(5,1040)MODE, NP, MIT, STOPCR, WCR, WCS, SATK
GO TO(20,30,40)MODE
20 WRITE(6,1050)
GO TO 50
30 WRITE(6,1060)
GO TO 50
40 WRITE(6,1070)
GO TO 50
50 WRITE(6,1080)NP, MIT, STOPCR, WCR, WCS, SATK
C ----- READ INITIAL ESTIMATES -----
READ(5,1090)(B(I), I=1, NP)
C ----- READ COEFFICIENTS NAMES -----
NBI=2*NP
READ(5,1100)(BI(I), I=1, NBI)
C ----- READ AND WRITE EXPERIMENTAL DATA -----
WRITE(6,1110)
I=0
60 I=I+1
READ(5,1090)X(I), Y(I)
IF(X(I).EQ.0.)GO TO 70
WRITE(6,1120)I, X(I), Y(I)
GO TO 60
70 NOB=I-1
C -----
DO 80 I=1, NP
80 TH(I)=B(I)
IF((NP-2)*(NP-3))90,100,90
90 WRITE(6,1130)
GO TO 500
100 GA=0.02
CALL MODEL(TH, F, NOB, X, WCS, MODE, WCR)
SSQ=0.
DO 110 I=1, NOB
R(I)=Y(I)-F(I)
110 SSQ=SSQ+R(I)*R(I)
NIT=0
WRITE(6,1150)
IF(MODE.EQ.2) WRITE(6,1140) NIT, WCR, B(1), B(2), SSQ, MODE
IF(MODE.NE.2) WRITE(6,1140) NIT, B(1), B(2), B(3), SSQ, MODE
C ----- BEGIN OF ITERATION -----
120 NIT=NIT+1
GA=0.1*GA
DO 140 J=1, NP

```

```

TEMP=TH(J)
TH(J)=1.01*TH(J)
Q(J)=0.
CALL MODEL(TH, DELZ(1, J), NOB, X, WCS, MODE, WCR)
DO 130 I=1, NOB
DELZ(I, J)=DELZ(I, J)-F(I)
130 Q(J)=Q(J)+DELZ(I, J)*R(I)
Q(J)=100.*Q(J)/TH(J)
C ----- STEEPEST DESCENT -----
140 TH(J)=TEMP
DO 170 I=1, NP
DO 160 J=1, I
SUM=0.
DO 150 K=1, NOB
150 SUM=SUM+DELZ(K, I)*DELZ(K, J)
D(I, J)=10000.*SUM/(TH(I)*TH(J))
160 D(J, I)=D(I, J)
C ----- D = MOMENT MATRIX -----
E(I)=DSQRT(D(I, I))
170 CONTINUE
180 DO 190 I=1, NP
DO 190 J=1, NP
190 A(I, J)=D(I, J)/(E(I)*E(J))
C ----- A IS THE SCALED MOMENT MATRIX -----
DO 200 I=1, NP
P(I)=Q(I)/E(I)
PHI(I)=P(I)
200 A(I, I)=A(I, I)+GA
CALL MATINV(A, NP, P)
C ----- P/E IS THE CORRECTION VECTOR -----
STEP=1.0
210 DO 220 I=1, NP
220 TB(I)=P(I)*STEP/E(I)+TH(I)
DO 230 I=1, NP
IF(TH(I)*TB(I))250, 250, 230
230 CONTINUE
SUMB=0.0
CALL MODEL(TB, F, NOB, X, WCS, MODE, WCR)
DO 240 I=1, NOB
R(I)=Y(I)-F(I)
240 SUMB=SUMB+R(I)*R(I)
250 SUM1=0.0
SUM2=0.0
SUM3=0.0
DO 260 I=1, NP
SUM1=SUM1+P(I)*PHI(I)
SUM2=SUM2+P(I)*P(I)
260 SUM3=SUM3+PHI(I)*PHI(I)
ANGLE=57.29578*DACOS(SUM1/DSQRT(SUM2*SUM3))
C -----
DO 270 I=1, NP
IF(TH(I)*TB(I))280, 280, 270
270 CONTINUE
IF(SUMB/SSQ-1.0)310, 310, 280
280 IF(ANGLE-30.0)290, 290, 300
290 STEP=STEP/2.0
GO TO 210
300 GA=10.*GA
GO TO 180
C ----- PRINT COEFFICIENTS AFTER EACH ITERATION -----
310 CONTINUE

```

```

DO 320 I=1, NP
320 TH(I)=TB(I)
IF(MODE.EQ.2) WRITE(6, 1140) NIT, WCR, TH(1), TH(2), SUMB, MODE
IF(MODE.NE.2) WRITE(6, 1140) NIT, TH(1), TH(2), TH(3), SUMB, MODE
DO 330 I=1, NP
IF(DABS(P(I)*STEP/E(I))/(1.0E-20+DABS(TH(I)))-STOPCR)330, 330, 340
330 CONTINUE
GO TO 350
340 SSQ=SUMB
IF(NIT-MIT)120, 120, 350
C ----- END OF ITERATION LOOP -----
350 IDF=NOB-NP
CALL MATINV(D, NP, P)
C ----- WRITE CORRELATION MATRIX -----
DO 360 I=1, NP
360 E(I)=DSQRT(D(I, I))
C WRITE(6, 1160)(I, I=1, NP)
DO 380 I=1, NP
DO 370 J=1, I
370 A(J, I)=D(J, I)/(E(I)*E(J))
C WRITE(6, 1170) I, (A(J, I), J=1, I)
380 CONTINUE
C ----- CALCULATE 95% CONFIDENCE INTERVAL -----
RMS=SUMB/FLOAT(IDF)
SDEV=DSQRT(RMS)
WRITE(6, 1180)
TVAR=TTEST(IDF)
DO 390 I=1, NP
SECOEF=E(I)*SDEV
TVALUE=TH(I)/SECOEF
TSEC=TVAR*SECOEF
TMCOF=TH(I)-TSEC
TPCOE=TH(I)+TSEC
K=2*I
J=K-1
390 WRITE(6, 1190) BI(J), BI(K), TH(I), SECOEF, TVALUE, TMCOF, TPCOE
C ----- PREPARE FINAL OUTPUT-----
LSORT(1)=1
DO 440 J=2, NOB
TEMP=R(J)
K=J-1
DO 400 L=1, K
LL=LSORT(L)
IF(TEMP-R(LL))410, 410, 400
400 CONTINUE
LSORT(J)=J
GO TO 440
410 KK=J
420 KK=KK-1
LSORT(KK+1)=LSORT(KK)
IF(KK-L) 430, 430, 420
430 LSORT(L)=J
440 CONTINUE
WRITE(6, 1200)
DO 450 I=1, NOB
J=LSORT(NOBI-1)
450 WRITE(6, 1210) I, X(I), Y(I), F(I), R(I), J, X(J), Y(J), F(J), R(J)
C ----- WRITE SOIL HYDRAULIC PROPERTIES -----
WRITE(6, 1220)
PRESS=1.18850
RN1=0.

```

```

RKLN=1.
WRITE(6, 1240) RN1, WCS, RKLN, SATK
DO 490 I=1, 75
IF(RKLN. LT. (-16.))GO TO 500
PRESS=1. 18850*PRESS
IF(MODE-2)460, 470, 460
460 WCR=TH(1)
ALPHA=TH(2)
RN=TH(3)
GO TO 480
470 ALPHA=TH(1)
RN=TH(2)
480 RM=1. -1. /RN
IF(MODE. EQ. 3) RM=1. -2. /RN
RN1=RM*RN
RWC=1. / (1. +(ALPHA*PRESS)**RN)**RM
WC=WCR+(WCS-WCR)*RWC
TERM=1. -RWC*(ALPHA*PRESS)**RN1
IF(RWC. LT. 0. 06) TERM=RM*RWC**(1. /RM)
IF(MODE. EQ. 3) RK=RWC*RWC*TERM
IF(MODE. NE. 3) RK=DSQRT(RWC)*TERM*TERM
TERM=ALPHA*RN1*(WCS-WCR)*RWC*RWC**(1. /RM)*(ALPHA*PRESS)**(RN-1.)
AK=SATK*RK
DIFFUS=AK/TERM
PRLN=ALOG10(PRESS)
AKLN=ALOG10(AK)
RKLN=ALOG10(RK)
DIFLN=ALOG10(DIFFUS)
490 WRITE(6, 1230) PRESS, PRLN, WC, RK, RKLN, AK, AKLN, DIFFUS, DIFLN
500 CONTINUE
C
----- END OF PROBLEM -----
1000 FORMAT(80(1H*))//9X, ' van Genuchtenモデルによる水分特性曲線の同定'
1//)
1010 FORMAT(A)
1020 FORMAT(A)
1030 FORMAT(/80(1H*))
1040 FORMAT(3I10, 5F10. 0)
1050 FORMAT(/' INPUT PARAMETERS' /16(1H=)//
1 ' モデルのタイプ..... Mualem theory (未知係数  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,
2 n)')
1060 FORMAT(/' INPUT PARAMETERS' /16(1H=)//
1 ' モデルのタイプ..... Mualem theory (未知係数  $\alpha$ , n)')
2)
1070 FORMAT(/' INPUT PARAMETERS' /16(1H=)//
1 ' モデルのタイプ..... Burdine theory (未知係数  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,
2 n)')
1080 FORMAT(' 未知係数の数..... ', I3/
1 ' 最大繰り返し計算回数..... ', I3/
2 ' 収束基準..... ', F7. 4/
3 ' 最小容水量  $\theta_r$  (FOR MODEL 2)..... ', F7. 4/
4 ' 飽和体積含水率  $\theta_s$  ..... ', F7. 4/
5 ' 飽和透水係数 k s..... ', 1PE9. 3)
1090 FORMAT(4F10. 0)
1100 FORMAT(4(A4, A2, 4X))
1110 FORMAT(/' 水分特性曲線データ' /18(1H=)// ' データNO.', 6X, ' 圧力水頭'
1, 7X, ' 体積含水率' //)
1120 FORMAT(15, 5X, F12. 2, 4X, F12. 4)
1130 FORMAT(/5X, 10(1H*), ' ERROR- INCORRECT NUMBER OF COEFFICIENTS')
1140 FORMAT(4X, I2, 6X, F8. 4, 3X, F10. 6, 2X, F10. 4, 3X, F12. 7, 6X, I4)
1150 FORMAT(/' 繰り返し回数', 5X, '  $\theta_r$ ', 9X, '  $\alpha$ ', 10X
1 ' n', 8X, ' 残差二乗和', 2X, ' モデルのタイプ' /)

```

```

1160 FORMAT(// '相関行列' /8(1H=)//3X, 10(4X, I2, 5X))
1170 FORMAT(I3, 10(2X, F7. 4, 2X))
1180 FORMAT(// '非線形最小二乗解析-最終結果' /
1          28(1H=)/58X, '95% 信頼区間' //4X, '変数', 9X, '値',
2          9X, 'S. E. COEFF.', 4X, 't 値', 9X, '下限', 10X, '上限' //)
1190 FORMAT(2X, A4, A2, 4X, F10. 5, 5X, F9. 4, 5X, F6. 2, 4X, F9. 4, 5X, F9. 4)
1200 FORMAT(//10(1H-), 'インプットデータ', 11(1H-), 5X, 5(1H-),
1          '残差の順に並べたデータ', 10(1H-)//
2          'NO.', 2X, '圧力水頭', 5X, '体積含水率', 5X, '残差', 5X,
3          'NO.', 2X, '圧力水頭', 5X, '体積含水率', 5X, '残差' //
4          16X, '観測値', 2X, '計算値', 28X, '観測値', 2X, '計算値' /)
1210 FORMAT(I2, F10. 2, 1X, 3F8. 4, 5X, I2, F10. 2, 1X, 3F8. 4)
1220 FORMAT(//1X, '圧力水頭', 3X, 'p F', 1X, '体積含水率', 5X, '比透水係数'
1          , 8X, '透水係数', 8X, '水分拡散係数' //4X, 'P', 5X, 'log P'
2          , 4X, 'θ', 7X, 'Kr', 4X, 'log Kr', 4X, 'k', 5X, 'log k'
3          , 5X, 'D', 5X, 'log D' /)
1230 FORMAT(E9. 3, F7. 3, F8. 4, 1X, 3(E10. 3, F8. 3))
1240 FORMAT(E9. 3, 7X, F8. 4, 1X, E10. 3, 8X, E10. 3)
      STOP
      END

```

C

```

SUBROUTINE MATINV(A, NP, B)
  IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
  DIMENSION A(3, 3), B(3), INDEX(4, 2)
  DO 10 J=1, 4
10  INDEX(J, 1)=0
     I=0
20  AMAX=-1. 0
     DO 60 J=1, NP
       IF(INDEX(J, 1))60, 30, 60
30  DO 50 K=1, NP
       IF(INDEX(K, 1))50, 40, 50
40  P=DABS(A(J, K))
       IF(P. LE. AMAX) GO TO 50
       IR=J
       IC=K
       AMAX=P
50  CONTINUE
60  CONTINUE
     IF(AMAX) 150, 150, 70
70  INDEX(IC, 1)=IR
     IF(IR. EQ. IC) GO TO 90
     DO 80 L=1, NP
       P=A(IR, L)
       A(IR, L)=A(IC, L)
80  A(IC, L)=P
       P=B(IR)
       B(IR)=B(IC)
       B(IC)=P
       I=I+1
       INDEX(I, 2)=IC
90  P=1./A(IC, IC)
     A(IC, IC)=1. 0
     DO 100 L=1, NP
100 A(IC, L)=A(IC, L)*P
       B(IC)=B(IC)*P
     DO 120 K=1, NP
       IF(K. EQ. IC)GO TO 120
       P=A(K, IC)
       A(K, IC)=0. 0
     DO 110 L=1, NP

```

```

110 A(K, L)=A(K, L)-A(IC, L)*P
    B(K)=B(K)-B(IC)*P
120 CONTINUE
    GO TO 20
130 IC=INDEX(I, 2)
    IR=INDEX(IC, 1)
    DO 140 K=1, NP
    P=A(K, IR)
    A(K, IR)=A(K, IC)
140 A(K, IC)=P
    I=I-1
150 IF(I)130, 160, 130
160 RETURN
    END
C
SUBROUTINE MODEL(B, FY, NOB, X, WCS, MODE, WCR)
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
DIMENSION B(3), FY(40), X(40)
C
C MODE=1 : MUALEM THEORY WITH THREE COEFFICIENTS
C MODE=2 : MUALEM THEORY WITH TWO COEFFICIENTS
C MODE=3 : BURDINE THEORY WITH THREE COEFFICIENTS
C
IF(MODE-2) 10, 20, 30
10 CONTINUE
DO 15 J=1, NOB
15 FY(J)=B(1)+(WCS-B(1))/(1.+(B(2)*X(J))*B(3))*B(3)**(1.-1./B(3))
RETURN
20 CONTINUE
DO 25 J=1, NOB
25 FY(J)=WCR+(WCS-WCR)/(1.+(B(1)*X(J))*B(2))*B(2)**(1.-1./B(2))
RETURN
30 CONTINUE
DO 35 J=1, NOB
35 FY(J)=B(1)+(WCS-B(1))/(1.+(B(2)*X(J))*B(3))*B(3)**(1.-2./B(3))
RETURN
END
C
FUNCTION TTEST(IDF)
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
DIMENSION TA(30)
DATA TA/12. 706, 4. 303, 3. 182, 2. 776, 2. 571, 2. 447, 2. 365, 2. 306, 2. 262,
12. 228, 2. 201, 2. 179, 2. 160, 2. 145, 2. 131, 2. 120, 2. 110, 2. 101, 2. 093, 2. 086,
22. 080, 2. 074, 2. 069, 2. 064, 2. 060, 2. 056, 2. 052, 2. 048, 2. 045, 2. 042/
IF(IDF-30)10, 10, 20
10 TTEST=TA(IDF)
RETURN
20 IF(IDF-120)40, 40, 30
30 TTEST=1. 96
RETURN
40 IF(IDF-40)50, 50, 60
50 TTEST=2. 042-0. 021*FLOAT(IDF-30)/10. 0
RETURN
60 IF(IDF-60)70, 70, 80
70 TTEST=2. 021-0. 021*FLOAT(IDF-40)/20. 0
RETURN
80 TTEST=2. 000-0. 002*FLOAT(IDF-60)/60. 0
RETURN
END

```