

水分プロファイル計測による不飽和土の水理学的特性の評価

中部大学 正会員 杉井俊夫

1. まえがき 不飽和土の水理学的性質である「水分特性曲線」や「不飽和透水係数」を求める原位置での試験はサクシオンや飽和度を制御することが難しく、実施例が少ない。土壌物理学の分野においては負圧浸入計などの地表のごく浅い飽和に近いところの透水性を評価する試験法¹⁾はいくつか提案されているが、工学用としては実用にいたっていない。本報告では、不飽和地盤への浸透過程において時間・空間的に変化する水分量を表現する水分プロファイルのモデル²⁾を用いて原位置で簡単な試験から不飽和地盤の水理学的性質を示す van Genuchten モデル(以下 VG モデル)³⁾のパラメータを求めている。

2. 水分プロファイルモデル Klute⁴⁾は Richards の鉛直一次元の飽和・不飽和浸透流の支配方程式を体積含水率で表わした式(1)で与えている。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial k_{wu}}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 θ : 体積含水率, z : 深さ(下向き正), k_{wu} : 不飽和透水係数, D : 水分拡散係数(= k_{wu}/C , C : 比水分容量)である。

ボルツマン変換を用いた方法は式(1)に示すように重力項(右辺第2項)が存在するため、これまで水平流れの場合でしか適用できなかった。著者は豊浦砂を充填した原位置を想定したモデル地盤²⁾において、鉛直一次元浸透における水分分布をシグモイド曲線(式(2))を用いて表現することを可能とし(図-2), Klute 式(式(1))の解を容易に求めることに成功した。

$$\theta = \theta(z, t) = \frac{\theta_f - \theta_m}{1 + \exp(b_0 + b_1 t)} + \theta_m \quad (2)$$

ここに、 θ_m : 湿潤初期の体積含水率, θ_f : 最終到達時の体積含水率, t : 経過時間, b_0 : 観測点深さごとの深さに関するフィッティングパラメータ, b_1 : 時間に関するフィッティングパラメータ(符号は負)である。また、 b_0 は先の地盤実験²⁾より、深さの関数となることを得ており(図-3)、次式の関係にある。

$$b_0 = a_0 + a_1 z \quad (3)$$

ここに、 a_0 , a_1 は深さに関するパラメータである。

式(2),(3)は湿潤初期の体積含水率 θ_m から最終到達時の体積含水率 θ_f までの範囲の体積含水率の変化を深さと時間の空間で表す式となっている。いま、 z と t を独立とみなし、式(2)に式(3)を代入して時間 t と深さ z でそれぞれ微分すると式(4)および式(5)を得る。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -(\theta_f - \theta_m) \frac{b_1 \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t)}{(1 + \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t))^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = -(\theta_f - \theta_m) \frac{a_1 \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t)}{(1 + \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t))^2} \quad (5)$$

式(4)と式(5)の比較より本モデルのおもな特徴である式(6)の関係が導かれ、式(1)は式(6)と(5)から、式(7)に変換される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{b_1}{a_1} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (6) \quad \frac{b_1}{a_1} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-D(\theta_f - \theta_m) \frac{a_1 \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t)}{(1 + \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t))^2} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} \quad (7)$$

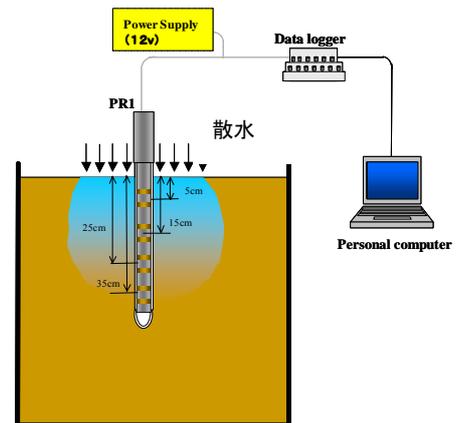


図-1 モデル地盤による浸透実験²⁾

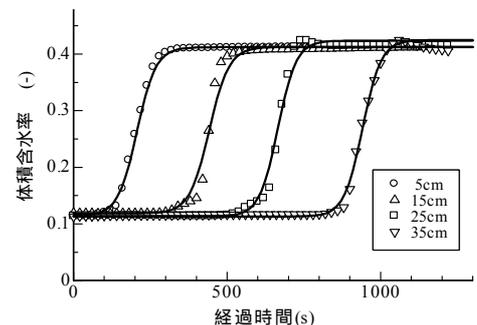


図-2 体積含水率の時刻歴(豊浦砂)²⁾

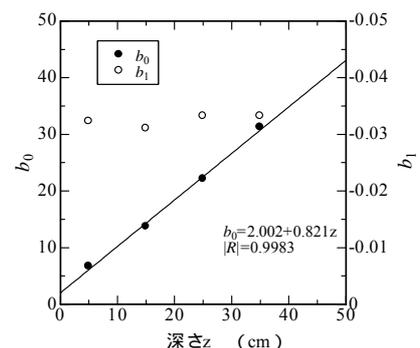


図-3 フィッティングパラメータ(豊浦砂)²⁾

キーワード 不飽和透水係数, 原位置試験, 水分拡散係数, 水分特性曲線, 鉛直一次元浸透

連絡先 〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200 中部大学工学部都市建設工学科 TEL 0568-51-9562

式(7)は z, t を独立と考えており, z のみの微分方程式となり, 簡単に解くことができる。

$$\theta = -D(\theta_f - \theta_{in}) \frac{a_1^2 \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t)}{b_1 (1 + \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t))^2} - k_{ws} \frac{a_1}{b_1} + c_1 \quad (8)$$

c_1 は積分定数であるが, 式(8)において $t=0$ のとき $\theta = \theta_{in}$, また, $\partial\theta/\partial t = 0$ (式(4)=0)より, 水分拡散係数(式(9))を容易に得られる。

$$D = -\frac{(\theta - \theta_{in}) b_1 (1 + \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t))^2}{(\theta_f - \theta_{in}) a_1^2 \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t)} \quad (9)$$

図-4 は式(9)より得られた水分拡散係数である。これより比水分容量 C を室内試験で測ることにより透水係数(= k_{ws}/C)を得ることができるが^{2),4)}、今回、式(9)で得られる水分拡散係数を被説明変数として VG モデルのパラメータを非線形回帰することとした。van Genuchten- Mualem³⁾モデル(以下 VG-M)より, 不飽和透水係数, 比水分容量は

$$k_{ws} = k_{ws} \cdot Se^{0.5} \{1 - (1 - Se^{1/m})^m\}^2 \quad (10)$$

$$C = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) Se^{1/m} (1 - Se^{1/m})^m \quad (11)$$

となることから, VG-M モデルで表される水分拡散係数は次式となる。

$$D = \frac{k_{ws} Se^{0.5} \{1 - (1 - Se^{1/m})^m\}^2}{\alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) Se^{1/m} (1 - Se^{1/m})^m} \quad (12)$$

ここに Se : 有効飽和度, k_{ws} : 飽和透水係数, θ_r : 残留体積含水率

θ_s : 飽和体積含水率, $\alpha, n, m=1-1/n$: VGパラメータ

式(9)の D は計測された水分プロファイルを式(2)(3)でフィッティングする(図-2)ことにより得られるため, VG-M モデルが適用可と仮定するならば, 式(9)=式(12)として式(12)のパラメータを非線形回帰によって求めた。今回, 非線形回帰には汎用アプリケーションソフトである MS-Excel 2000 のソルバーを使用した。図-5 は図-1 の豊浦砂を充填した原位置を想定したモデル地盤²⁾で得られた水分プロファイル計測による結果と室内実験⁵⁾との比較である。また, 図-6 には, シルト混じりの粘性土の斜面で行った結果⁶⁾での比較を示す。どちらも本方法で得た透水係数と一致していることが分かる。

3. あとがき 原位置で水分プロファイルのみの計測で, サクション計測を行わずに不飽和浸透特性に関するパラメータを簡単に推定する方法を提案した。本方法は, 一種の逆解析であるが提案する式(2)のモデルを使用することにより, 数値解析を必要とせず浸透現象を表現でき, 境界条件や初期条件を意識せずに行えることなど有利な点が多く, もちろん室内試験にも適用可能である。また, パラメータ推定には Excel のソルバーを用いることでできるため, これまで室内の保水性試験結果から VG モデルのパラメータを求めるものと殆ど作業量は変わらないなどの長所を含む方法である。さらに, 原位置試験および数値実験により適用性について検討していく予定である。

【参考文献】 1) White, I., Sully, J.M. and Perroux, M. K. Measurement of surface-soil hydraulic properties: Disk Permeaters, Tension Infiltrimeters, and other techniques, *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*, SSSA Special publication, 30, 69-103, 1992. 2) 杉井: 非定常鉛直浸透による不飽和透水係数の計測, 土木学会中部支部研究発表講演概要集, 259-260, 2004. 3) van Genuchten, M.Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 44, 892-899, 1980. 4) Klute, A.: The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils, *Soil Sci.*, 113 (4), 105~116, 1972. 5) 宇野・佐藤・杉井・柘植: 空気圧制御による不飽和砂質土の透水試験法, 土木学会論文集, 418(III-13), 115-124, 1990. 6) 杉井他: 水分プロファイルを利用した原位置不飽和透水試験法の試み, 地盤工学研究発表会, 印刷中, 2004.

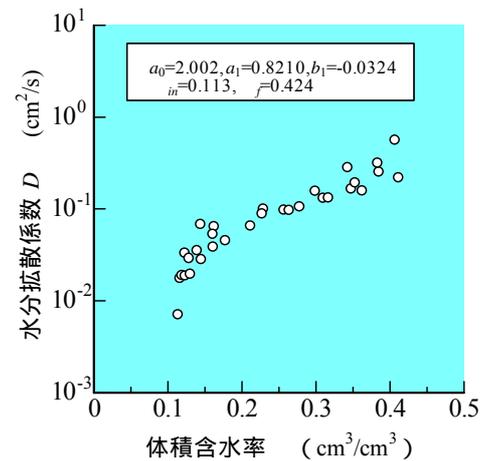


図-4 式(9)による水分拡散係数

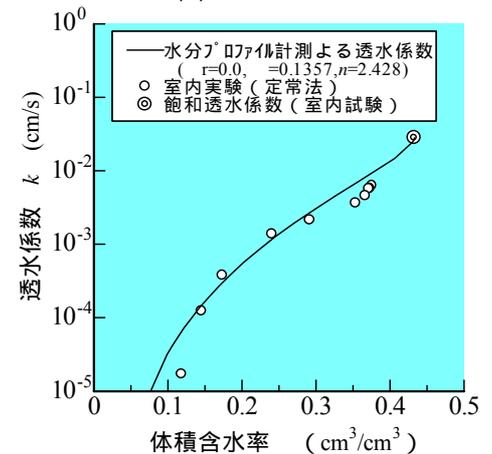


図-5 水分プロファイル計測による結果と室内試験結果の比較

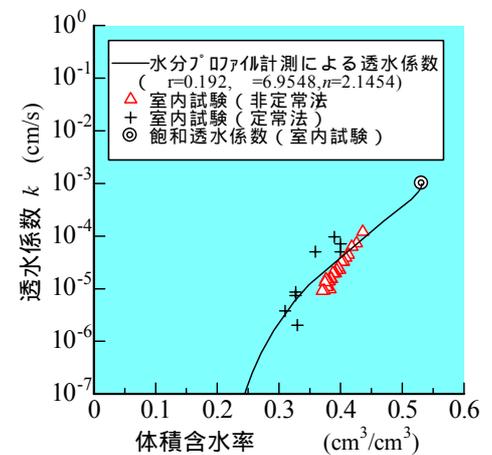


図-6 斜面での水分プロファイル計測による結果と室内試験結果の比較