



# 不飽和地盤の透水性をはかる

中部大学工学部都市建設工学科  
杉井 俊夫

## 1. まえがき

なぜ不飽和土を考えなければならないのか……。大学・高専の授業で習うのは殆んどが「飽和土の土質力学」である。土構造物を設計するには、危険側の飽和土で考えれば事足りる。しかし、現実にある地盤は不飽和状態にあるのが一般的だ。現状の不飽和から飽和に至るまでの土の挙動について目を瞑ることはできない。土は、その過程で、吸水、あるいは乾燥しながら吸水し、変形、破壊に至る。近年、実務においても斜面崩壊、コラプス沈下、スレーキング、キャピラリーバリア、物質移動、液状化現象と様々なところで不飽和土質力学の重要性が認識され、学会だけでなく実務でも市民権を得るようになってきた。本研究室では、地盤災害の予測・対策に寄与できる原位置における簡便な不飽和透水試験の開発を続けている。ここに、その概要を紹介する。

## 2. 水分分布形状の変化と不飽和浸透特性の評価

原位置試験としてインスタントニース法<sup>1)</sup>などがあるが、複数の水分計とサクションを測るテンシオメータが必要でその埋設なども大掛かりとなる。本研究では実務での簡便な方法を目的とし、クルートの水分拡散方程式(1)とよばれる飽和・不飽和浸透流の支配方程式を体積含水率で表わした式を用いることとした。

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

ここに  $\theta$ : 体積含水率 ( $V_w/V$ ),  $z$ : 深さ,  $k_{wu}$ : 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。式(1)を用いた不飽和透水試験には、非定常法で代表されるボルツマン変換を用いた方法がある。しかし、式(1)の重力項(右辺第2項)がある場合には用いることができず、これまで水平流れの場合(室内試験)でしか適用できなかった。本研究室では、簡便な原位置試験を目指しており、無視できない重力項を考慮した鉛直一次元流れにも適用できる方法の開発に成功した。

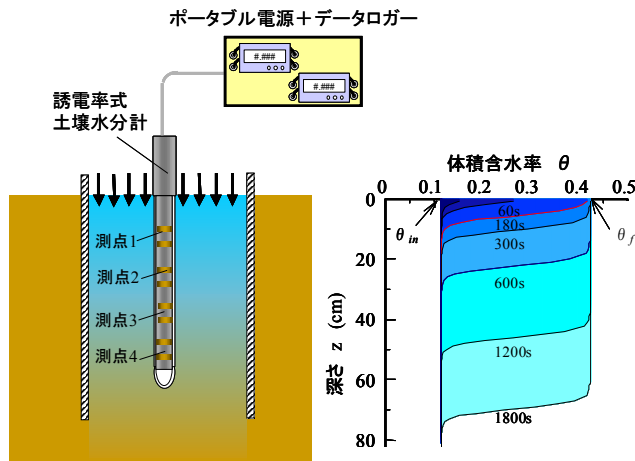


図1 鉛直一次元浸透試験と水分分布

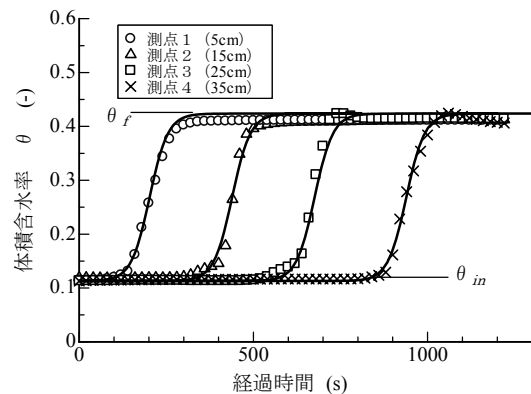


図2 水分量の時間的变化

図1のように地表面から水を浸潤させ、複数点で水分量を測ると、浸潤前線が下方に移動し、水分分布形状は逆S字形を呈することがわかる。一方、深さごとに見てみると時間とともにS字形を呈して水分量は増加していく(図2)。この計測結果から本研究室では、深さと時間に関して変化する水分分布形状を表現できるシグモイド曲線(ロジスティックカーブ) (式(2))を提案した<sup>2)</sup>。

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

ここに,  $\theta_m$ : 湿潤初期の体積含水率,  $\theta_f$ : 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(ただし,  $b_0 = a_0 + a_1 z$  として測点の深さ  $z$  別に回帰して  $a_0$  と  $a_1$  を決定する),  $b_1$ : 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。式(2)を時間、深さ、水分量空間で表した水分分

ロファイルモデルを図3に示す(どちらからみてもS字)。

式(2)を式(1)に代入することで、式(1)の複雑な偏微分方程式は、あっと驚くほど簡単に解くことができ、式(3)の水分拡散係数の式を得る。

$$D = -\frac{(\theta - \theta_m) b_1 (1 + \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t))^2}{(\theta_f - \theta_m) a_1^2 \exp(a_0 + a_1 z + b_1 t)} \quad (3)$$

浸潤過程における  $a_0, a_1, b_1$  を水分分布から決定できれば、 $D$ :水分拡散係数(= $k_{wu}/C$ ,  $k_{wu}$ :不飽和透水係数)を求めることができる。ここに、比水分容量  $C$  とは、水分特性曲線(土の水分保持特性曲線)の勾配( $-d\theta/dh_p$ )で、土の保水性試験からも求めるのが一般的である。しかし、本研究では、van Genuchten- Mualem モデルで表される水分拡散係数式(4)と、式(3)の係数を比較して求めることを提案している。式(3)=式(4)として式(4)のパラメータ(van Genuchten モデルの  $m, \alpha, (\theta_r)$ )を誰でもできる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て決定し、van Genuchten- Mualem モデルの式(5)から不飽和透水係数を求めることとした。

$$D = \frac{k_{ws} Se^{0.5} \{1 - (1 - Se^{1/m})^m\}^2}{\alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) Se^{1/m} (1 - Se^{1/m})^m} \quad (4)$$

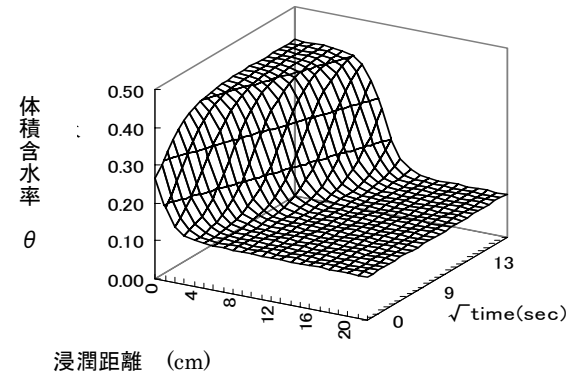


図3 水分プロファイルモデル

$$k_{wu} = k_{ws} \cdot Se^{0.5} \{1 - (1 - Se^{1/m})^m\}^2 \quad (5)$$

ここに、 $Se$ :有効飽和度( $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ),  $k_{ws}$ :飽和透水係数,  $\theta_r$ :残留体積含水率,  $\theta_s$ :飽和体積含水率

$\alpha, n, m = 1 - 1/n$ : van Genuchtenモデルのパラメーター

本方法には、この他、飽和の透水係数が必要となるが、粒径や間隙率などから推定してもよい。砂のモデル地盤を用いた室内試験の結果、水分分布形状から決定した水分拡散係数を図4に、また不飽和透水係数を図5に示す。従来の加圧型の室内不飽和透水試験法との比較の結果、良い一致が得られていることがわかる。ここに示した、不飽和浸透特性を求める作業の流れを図6にまとめておく。

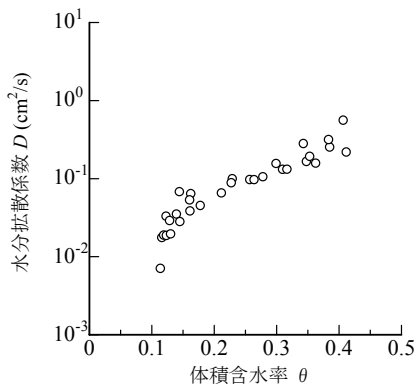


図4 得られる水分拡散係数(式(3))

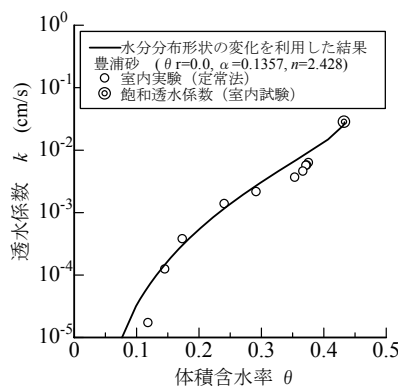


図5 不飽和透水係数

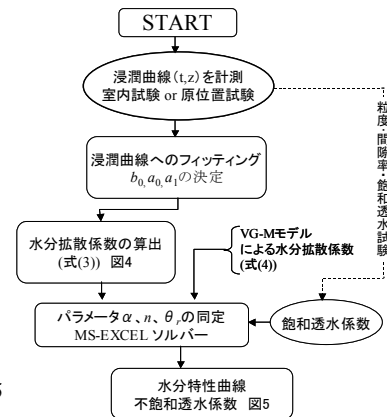


図6 不飽和浸透特性の評価フロー

### 3. あとがき

浸潤時の水分分布形状を用いた不飽和透水係数を求める方法の概要を紹介した。数値解析による検討などから他の土質や初期状態の違い、多層地盤についても確認を行っており、その適用性について近々報告する予定である。また現在、いくつかの実斜面での計測と室内試験を行っており、作業上の課題(リングの埋設法、給水境界の与え方など)といった実用性に向けた課題点の抽出とデータベースの蓄積を続けている。

**【参考文献】** 1) 竹下祐二・杉井俊夫: 不飽和地盤における原位置透水試験—水分分布計測による不飽和透水係数の測定法—, 土と基礎, Vol.54, No.5, Ser. No.580, 2006. 2) Sugii, T.: Modeling of soil moisture profile during infiltration into vadose zone, Proc. of 16th International Conference on soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.2449-2452, 2005.

問合せ先: 中部大学 工学部 都市建設工学科 (住所: 〒487-8501 春日井市松本町 1200) 杉井俊夫

[Tel : 0568-51-9562 Fax : 0568-1495 Email : nanto@isc.chubu.ac.jp]