# 自由度の高い水分特性曲線モデルの構築

中部大学工学部	正会員	杉井	俊夫
中部大学工学部	学生会員	○種瀬	香凜

## 1. はじめに

土中水の挙動をシミュレーションする際に欠かせ ない水分特性曲線は、これまで van Genuchten モデル を代表に多くの研究者らが提案してきた。一方、杉井 ら<sup>1)</sup>は水分特性曲線から粒状材料の間隙くびれ径の 分布を示すことを得てきたが、提案されている水分 特性曲線モデルでは、団粒化した土など双峰性を有 する間隙径分布の場合や最小の間隙径(間隙くびれ 径)までを示すことができなかった。すなわち、水分 特性曲線モデルからの間隙径の推定を行う場合、モ デル形状の影響を受けてしまっていた。そこで本研 究は、実験データを忠実に再現できる自由度の高い 水分特性曲線モデルの構築を目的に、杉井・宇野が提 案したロジスティック曲線を用いたモデル(以下 SU モデル)<sup>2)</sup>を改良することを目的としている。

### 2. SU モデル (オリジナルモデル)の概要

SUモデルはロジスティクス曲線を利用したモデ ル(式(1))であり、本研究ではオリジナルモデルとし て用いることとする。本モデルは、0~1 までを連続 関数として2つのパラメータで表現できること、パ ラメータの推定も線形回帰で行えることから容易で ある特徴を有する。

 $Se = [1 + \exp(A + B\log_{10}|h|)]^{-1}$ (1)

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{2}$$

ここに、Se:有効飽和度、θ:体積含水率, θr:最小水分 容量、θs:飽和体積含水率, h:サクション水頭、 A、Bはフィッティングパラメータである。

式(1)を変形して式(3)の負の圧力水頭 hp の 1 次式 が得られ、このときパラメータ A と B を容易に回帰 して求めることができる。

$$\log_{e}\left(\frac{1}{Se} - 1\right) = A + B\log_{10}\left|h_{p}\right|$$
(3)

図1には、単峰性の試料(Sample-1)と双峰性の試料

(Sample-2)の試験データに式(3)のモデルをフィッ ティングした結果を示しいる。通常の土試料のよう な単峰性の Sample-1 の水分特性曲線は、SU モデル



図1 SUモデルによる実験値のフィッティング

で十分表現できているが、Sample-2の双峰性の実験 結果には一部しか再現できていないことが明らかで ある。

#### 3. 低飽和域(吸着水分領域)に対応したモデル

Peter, Durner and Iden<sup>3)</sup>らは、吸着水だけとな る低水分量域を考慮した PDI model を提案した。こ れまでのモデルでは、吸着水だけの低水分量域は最 小水分容量( $\theta$ r)以下については表現できておらず、 体積含水率  $\theta$ =0 にはならなかった。本モデルでは  $\theta$ r よりも低い水分領域を関数で表し、最終的には  $\theta$ =0 となる形をとっており、自由度が増やすとともによ り正確に物理現象を表すものとなってい。

 $\theta(h) = \theta^{cap}(h) + \theta^{ad}(h) = (\theta_s - \theta_r)S^{cap} + \theta_r S^{ad}$ (4)

ここに、S<sup>cap</sup>はメニスカス水の飽和関数、S<sup>ad</sup>は吸着水の 飽和関数、0<sub>r</sub>は吸着水のための最小水分容量である。

 $h=h_0$ で体積含水比がゼロに達することを保証する ために、 $S^{cap}$ は単峰性モデルでスケーリングされた式 (5)とおく。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \frac{\Gamma(h) - \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} + \theta_r S^{ad}$$
(5)

ここで、 $\Gamma(h)$ は単峰性の水分特性曲線関数モデル (ここでは、式(1)の Se)であり、 $\Gamma_0$ は  $h=h_0$ の時の単峰 性の水分特性曲線関数の有効飽和度 Se の値となる。

# 4. 双峰性モデル

団粒構造などの階段状になった水分特性曲線に対 応した2つの単峰性を組み合わせた双峰性のモデル (Bimodal model)が Durner により提案されている。 二つの山の間隙径分布を持つ水分特性曲線で導かれ る。単峰性モデルよりも自由度が高いため、複雑な水 分特性曲線をフィッティング精度が高くなる。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta r) \sum_{i=1}^{2} w_i \Gamma(h)_i + \theta_r$$
(6)

- ここに、wiはi(双峰性の場合にはi=2)に関する重みの係 数であり、 $0 < w_i < 1$ 、 $\Sigma w_i = 1$ である。
- 5. 土の保水性試験(蒸発法+サイクロメーター法) 低いサクションから高いサクションまで計測する 必要があるから、1つの試験装置では計測できない。 そこで、2つの試験方法で求める。

(1) 蒸発法

図 2 に示すように電子バランス上に、負圧を計測 できるテンションメータを挿入した供試体を載せ、 蒸発していくときの負圧と供試体内の水分の経時変 化を求める(|hp|=約900 cm水頭まで)。



図2 蒸発法(Hyprop)装置の概要

(2) チルドミラー式サイクロメータ

図3のチルドミラー式のサイクロメータにより、1 点ずつ水分量を蒸発させながら計測していく。サイ クロメータによる土中水のポテンシャルは、式(7)で 求める。

$$\phi = \rho_w \frac{RT}{M} ln \left(\frac{p}{p_o}\right) \tag{7}$$

ここに、 $\phi$ :土中水ポテンシャル、 $\rho_w$ :水の密度(g/cm<sup>3</sup>)、 R: 気体定数(8.314J/(K·mol))、T: 絶対温度(K)、 M: 水の分子量(kg/mol)、p/p<sub>0</sub>: 相対温度、p: 土中水と平衡している水蒸気の圧力、po::等 温大気圧下の蒸留水と平衡している水蒸気の 圧力である。



図3 チルドミラー式サイクロメータの概要

#### 6. 改良した自由度の高いモデルによる推定

今回、双峰性を示す団粒化しに対し、オリジナルモ デルに2つのモデルを組み合わせて適用を調べた。 フィッティング結果を図4に示す。



図4 実験値の提案モデルによる再現

サイクロメータでの計測範囲(|hp|=1000cm 以上) では、離散的なデータとなる。今回、自由度の高いモ デルにより実験データを忠実に再現することができ たと同時に、10個のパラメータで推定が可能となる。 7. おわりに

今後、様々なデータについて適用を試み、検証を続 けていく予定である。

【参考文献】1) 杉井俊夫・川部らら:水分特性曲線を用い た砂の間隙構造の評価, 地盤工学会誌, Vol.67, No.9, pp.12~ 15, 2019. 2) 杉井俊夫・宇野尚雄: 簡便な不飽和浸透特性の モデル化、不飽和地盤の透水性に関わる諸問題シンポジウム 発表論文集, p.179-184,1996. 3) A. Haghverdi, M. Najarchi, H. S. Ozturk and W. Durner: Studying Unimodal, Bimodal, PDI and Bimodal-PDI Variants of Multiple Soil Water Retention Models: I. Direct Model Fit Using the Extended Evaporation and Dewpoint Method, pp.6-9,2020..