

間隙径分布のための水分特性曲線モデルの構築

中部大学 正会員 ○杉井 俊夫
三重県津建設事務所 非会員 種瀬 香凜

1. はじめに

粒状材料の間隙径分布の推定には、毛管上昇高の考え方から水分特性曲線を用いた方法が提案されている。しかし、そこで得られる間隙径分布の粒状材料の物理的な意味合いが明確でなかったことや水分特性曲線を求める「土の保水性試験」が容易に実施できないことから、あまり利用されていなかった。特に、この方法では試験から得られる離散的なデータを補間する水分特性曲線モデルに依存することになり、水分特性曲線のモデルの形状制限を受ける課題があった。土壌物理学の分野では、Durnerらの双峰性のモデル¹⁾などが提案されて自由度が高くなり、実験データを忠実に表現できるようになった。本報告は、著者の杉井が提案してきた Sugii&Uno モデル²⁾ (以下 SU モデル) を双峰性モデルおよび PDI モデル¹⁾ と組み合わせることにより、粒状材料の間隙径分布評価に適する水分特性曲線モデルを構築している。

2. SU モデル (オリジナルモデル) の概要

SU モデル²⁾ はロジスティック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パラメータの推定が容易である特徴を有する。

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

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

ここに、 Se : 有効飽和度、 θ : 体積含水率、 θ_r : 最小水分容量、 θ_s : 飽和体積含水率、 h_p : サクシオン水頭、 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 h_p の 1 次式が得られ、 $\log_{10}|h_p|$ は pF とおくことも可能で、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。

$$\log_e \left(\frac{1}{Se} - 1 \right) = A + B \times pF \quad (3)$$

3. Durner の双峰性モデルおよび PDI 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¹⁾。二つの山の間隙径分布を持つ水分特性曲線で導かれ、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。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \sum_{i=1}^2 w_i \Gamma(h)_i + \theta_r \quad (4)$$

ここに、 w_i は i (双峰性の場合には $i=2$) に関する重みの係数であり、 $0 < w_i < 1$ 、 $\sum w_i = 1$ である。

また、Peter, Durner and Iden³⁾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 (θ_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。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) S^{cap} + \theta_r S^{ad} \quad (5)$$

ここに、 S^{cap} はメニスカス水の飽和関数、 S^{ad} は吸着水の飽和関数である。

$h=h_0$ 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(6)とおく。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \frac{\Gamma(h) - \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} + \theta_r S^{ad} \quad (6)$$

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)(2)の Se) であり、 Γ_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. 土の保水性試験

低いサクシオンから高いサクシオンまで計測する必要から、2つの試験方法で求める。

(1) 蒸発法

図1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。

キーワード 水分特性曲線, 間隙径分布, 双峰性, 土の保水性

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 杉井俊夫 TEL 0568-51-9562

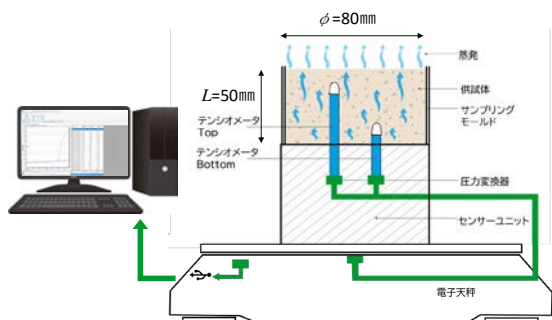


図1 蒸発法 (Hyprop) 装置

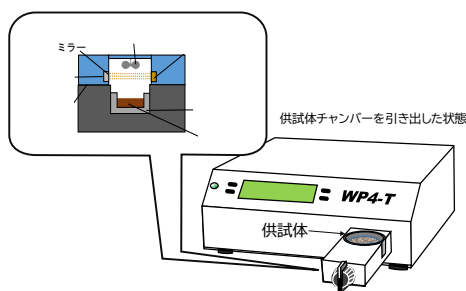


図2 チルドミラー式サイクロメータ

また、試験には2つの試料（団粒構造の母材と団粒化剤を添加して団粒化した団粒土）を用いた。

5. 自由度の高い水分特性曲線と間隙径分布

SUモデルをベースとして先述したモデルを統合させることで、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を構築する。図3に試験の結果とSUモデルをベースとした水分特性曲線を表す。実験データを双峰性で上手く推定できていることがわかる。本提案モデルによれば推定パラメータは9つで他の研究者らよりも少なく、EXCELシート上で容易に求めることができる。

図4および図5は単粒土、団粒土それぞれの得られた水分特性曲線から、式(7)によって得たそれぞれの間隙径分布を表す。

$$h_p = \frac{4\sigma}{\rho_w g d_m} \quad (7)$$

ここに、 h_p : 負の間隙水圧, ρ_w : 水の密度(g/cm^3),
 g : 重力加速度(cm/s^2),

σ : 水の表面張力(73.46 dyne/cm)である

間隙体積率のグラフから単粒土では間隙径のピークが0.1mm付近に集中する傾向を、団粒土の場合には、間隙径の大きさが $30 \mu\text{m}$ と $0.3 \mu\text{m}$ に集中にし、単粒土に比べて2つに分かれることが明らかとなる。ことが読み取れ、間隙構造の状態を評価することが可能となる。

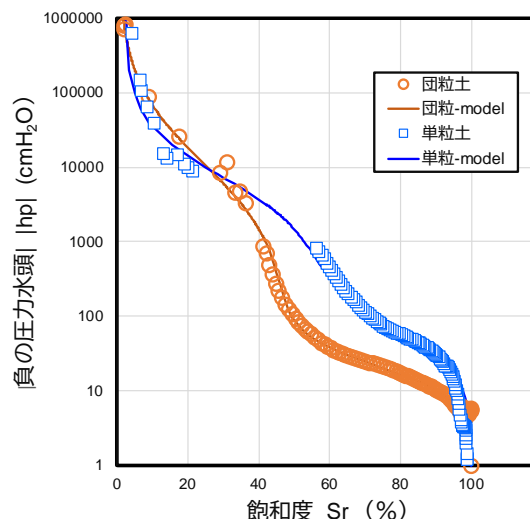


図3 自由度の高い水分特性曲線の適用

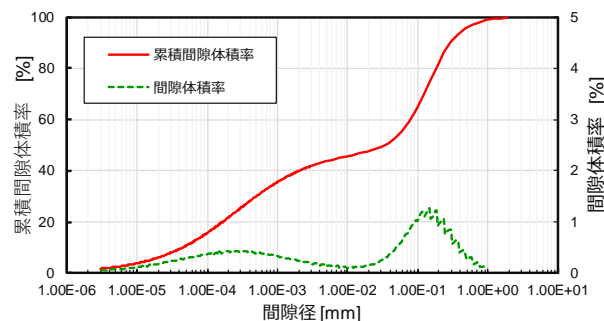


図4 得られた間隙径分布 (単粒土)

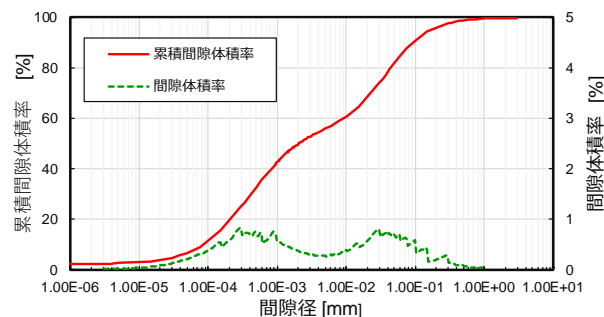


図5 得られた間隙径分布 (団粒土)

6. おわりに

間隙径分布を推定するためには、実験データを忠実に示す水分特性曲線モデルが必要であることはわかり、今後は間隙径分布の観点から土の力学的性質について解釈していく予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 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.