

土質物性から水分特性曲線を推定する手法の一考察

岐阜大学工学部 フェロー 宇野尚雄
同 上 正会員 神谷浩二
白石 正会員 ○佐宗隆幸

1. まえがき: 不飽和浸透特性値としては水分特性曲線, 不飽和透水係数, 透気係数の3要因が挙げられ, それら要因のデータは種々の試験法により蓄積されつつあるが, 計測時間が長期化し易いなどの問題点がある. このような背景から粒度のような土質物性を用いて水分特性曲線を推定する手法が, Arya ら¹⁾, Haverkamp らなどによって提案されているが²⁾, その推定精度は必ずしも良好ではない³⁾. 本報告では, Haverkamp らの手法を利用しながら, 砂質土とシルト質土を対象にして, 粒度から水分特性曲線を推定する手法について考察する.

2. 排水過程における水分特性曲線の形状: 図-1 は排水過程の水分特性曲線(体積含水率 θ とサクシオン h_p (cm)の関係)を模式的に示したものであるが, 前報では⁴⁾, その曲線を図中に実線で示すような次の3つの直線関係で近似できると仮定した.

直線: $\theta = \theta_r$, 直線: $h_p = (\theta_s - \theta)/c_{\max} + h_c$, 直線: $\theta = \theta_s$ (1)

ここに, θ_r は残留体積含水率, θ_s は飽和体積含水率, $c_{\max}$ (1/cm)は比水分容量 $|c| = |d\theta/dh_p|$ の最大値, h_c (cm)は空気侵入値である. 即ち, 水分特性曲線の形状は, θ_r , θ_s , $c_{\max}$, h_c の4要因で決定されると考えて, 前報ではこれら要因に対して粒度の影響を考察した⁴⁾.

一方, Haverkamp らは²⁾, 図-1に破線で示したように, 排水過程における水分特性曲線を次式(2)により表現している.

$$h_p > h_c \text{ の範囲: } \theta = n \left[\frac{h_c}{h_p} \right]^\lambda \left[1 - \frac{h_c}{h_p} \left(1 - \frac{\theta_s}{n} \right) \right], h_p < h_c \text{ の範囲: } \theta = \theta_s \quad (2)$$

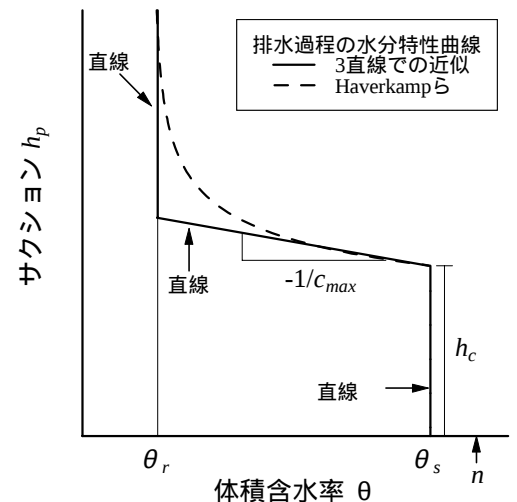


図-1 水分特性曲線の形状

ここに, λ は水分特性曲線の $\theta < \theta_s$ の範囲における曲線の形状を表す値である. 即ち, λ , θ_s , h_c の3要因を決定することにより水分特性曲線は表現される. そして, Haverkamp らは, これら3要因を土質物性から推定する手法を示しているが, その精度は必ずしも良好ではない結果を得た³⁾.

以上のように, 水分特性曲線を決定する主要因は, 空気侵入値 h_c , 中間的飽和度の範囲での曲線形状に関わる $c_{\max}$ や λ である. 次では, 主に, h_c , $c_{\max}$ や λ のそれぞれの値を粒度から推定する方法について検討する.

3. 粒度と排水過程における水分特性曲線要因との関係

(1) 空気侵入値 h_c : 筆者らは, 水分特性曲線から推定する手法による間隙径分布と粒度との関係进行分析して, 水分法の間隙径 d_m (mm)を β_r 値と粒径 D (mm)を用いて次式(3)のように表現し⁵⁾, また, β_r 値は, 土粒子の形状係数 K_s , 均等係数 U_c , 間隙比 e を用いて次式によって求めることができる⁵⁾. なお, K_s の値はおおよそ9であった³⁾.

$$d_m = \beta_r D, \quad \beta_r = \frac{4.8e}{K_s \exp[0.5(0.484 + 0.420 \ln U_c)^2]} \quad (3)$$

従って, 空気侵入値 h_c (cm)は, 毛管モデルの仮定に従うと次式(5)によって表現できると考えられる.

$$h_c = \frac{4\sigma}{\rho_w g d_m} \cdot 10 = \frac{4\sigma}{\rho_w g \beta_r D} \cdot 10 \quad (\sigma \text{ (dyn/cm): 水の表面張力, } \rho_w \text{ (g/cm}^3\text{): 水密度, } g \text{ (cm/s}^2\text{): 重力加速度}) \quad (4)$$

空気侵入値 h_c は, 大きな間隙部分に影響されそのような間隙は大きな粒径によって形成され则认为られる. そのため, 粒径 D に 85% 粒径 D_{85} (mm)を用いて, 式(3)と式(4)から空気侵入値 h_c を推定した. 図-2 は, 推定値を測定

キーワード: 不飽和土, 水分特性曲線, 粒度, β_r 値

住所: 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 Tel: 058-293-2421 Fax: 058-230-1891

値に対して示したものであるが、空気侵入値 h_c を良好な精度で推定できる。即ち、 h_c は粒径 D_{85} および β_r 値(間隙比と均等係数)に影響される。

(2) $c_{\max}$ と λ 値： 比水分容量 $|c|$ は $\theta \sim h_p$ 関係で表される水分特性曲線の勾配の逆数で表され、 $|c| = |d\theta/dh_p|$ で定義される。よって $|c|$ の最大値 $c_{\max}$ は $\theta \sim h_p$ 関係で表される水分特性曲線において水が自由に移動できる範囲 (θ_r と θ_s の範囲)における直線勾配 ($-1/c_{\max}$) の逆数で表現できる。そこで、 $c_{\max}$ と均等係数 U_c との関係について調べた結果を図 - 3 に示す。 U_c の値が大きいものほど $c_{\max}$ は小さくなる傾向が認められ、図中の実線のように $c_{\max} = 0.05/U_c$ の関係で近似的に表現できる。一方、 λ 値について均等係数 U_c との関係について調べた結果、図 - 4 に示すように、 U_c が大きいものほど λ 値は小さくなる傾向が顕著に認められ、 $\lambda = 5/U_c$ の関係で表現できる。以上のように、水分特性曲線の中間的飽和度の範囲での形状には、均等係数 U_c が支配的に影響する。

(3) 残留体積含水率 θ_r や飽和体積含水率 θ_s ： θ_r や θ_s の値は、水分特性曲線の測定で土試料の初期含水量の影響などを受けて異なることがあるため、粒度などの土質物性との関係を明確にし難いことが考えられ今後の課題である。なお、 θ_r や θ_s の値と粒度との関連性は前報で整理してある⁴⁾。

(4) 排水と浸透過程の水分特性曲線： 空気侵入値 h_c と中間的飽和度の範囲での曲線形状に関わる $c_{\max}$ や λ をそれぞれ上述に従って推定して、排水過程の水分特性曲線を先の式(1)により推定した結果を図 - 5 に実線で、式(2)によるものを破線でそれぞれ示した。なお、式(1)や式(2)において $\theta_r = 0$ 、 $\theta_s = n$ とそれぞれ仮定した。いずれの場合も、低含水量の範囲を除いて、測定値に対して比較的良好な精度で評価できることが確認できる。

ところで、Haverkamp らは排水過程の推定で用いた3要因を用いて、浸透過程の水分特性曲線を次式(5)のような関数式で表現した²⁾。

$$h_p > h_c \text{ の場合: } \theta = \frac{n}{1+\lambda} \left(\frac{h_c}{h_p} \right)^\lambda, \quad h_{we} > h_p > h_c \text{ の場合: } \theta = n \left[1 - \left(\frac{\lambda}{1+\lambda} \right) \frac{h_p}{h_c} \right],$$

$$h_p < h_{we} \text{ の場合 } \theta = \theta_s \quad (5)$$

ここで、 h_{we} は浸透過程の水分特性曲線で θ_s に対応するときのサクシオンである。図 - 5 に一点鎖線で示したように、Haverkamp らの手法では、浸透過程の水分特性曲線を比較的良好な精度で推定できる傾向にあり、それは有効な方法の一つと考えられる。

4. あとがき： 本報告では、土質物性から水分特性曲線を推定する手法について、その曲線の特徴と粒度との関係を考察した。その結果、空気侵入値 h_c は 85% 粒径 D_{85} および β_r 値 ($= f(\text{間隙比}, \text{均等係数})$) を用いて表現でき、中間的飽和度の範囲における曲線形状は均等係数 U_c に支配的に影響されることを示した。

【参考文献】 1) Arya, L.M. et al.: A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, *Soil Science of America Journal*, Vol.45, No.6, pp1023-1030, 1981. 2) Haverkamp, R. et al.: Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter, *Soil Science*, Vol.142, No.6, pp.325-339, 1986. 3) 佐宗隆幸: 土質物性を用いた不飽和浸透特性値の推定法, 岐阜大学大学院修士論文, 2002. 4) 宇野ら: 粒度から見た不飽和土の浸透特性値, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp.1295-1296, 2001. 5) 神谷浩二: 砂質土の間隙径分布の評価とその利用, 岐阜大学博士学位申請論文, 1999.

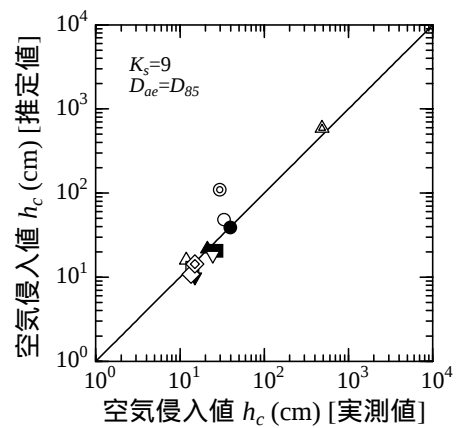


図 - 2 空気侵入値 h_c の推定

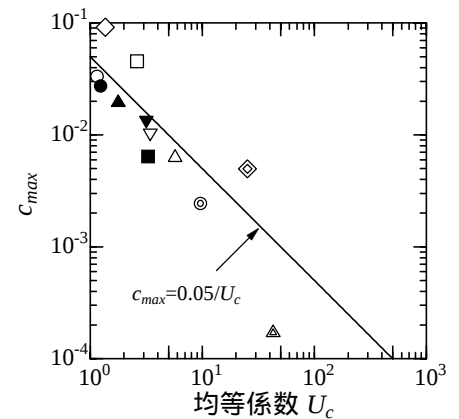


図 - 3 $c_{\max}$ と均等係数 U_c

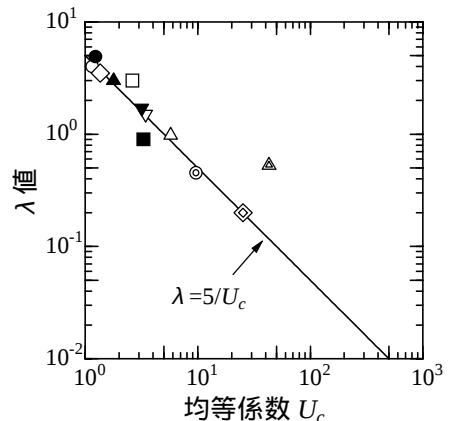


図 - 4 λ 値と均等係数 U_c

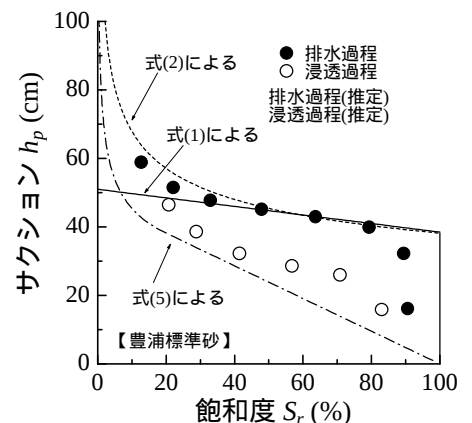


図 - 5 水分特性曲線の推定