

非定常鉛直浸透による不飽和透水係数の計測

中部大学 正会員 杉井俊夫

1. まえがき 原位置における不飽和透水試験は、土壤物理学の分野での地表面の浅いところを対象としたものがあるものの、原位置での空気圧制御、複雑なセンサーの設置、長期計測の困難な問題などから、広い飽和度範囲に対する簡便な方法は未だない。本研究は、現段階では室内試験における保水性試験を必要とするが、近年著しい発展を遂げている土壌水分計を用いて原位置での散水下における地盤内の水分プロファイル計測することにより、簡便にかつ幅広い飽和度範囲での透水係数を求めることができる試験法の提案を行っている。

2. 散水実験と水分プロファイル 土槽には直径 90cm、高さ 100cm の円柱アクリル製容器を用い、乾燥した豊浦砂を乾燥密度が 1.5t/m^3 となるよう層にわけて締固めて作成した¹⁾。水分プロファイルの計測には、誘電率式土壌水分計 (PR-1: $\phi 2.8\text{cm}$, 計測点 4 点) を用いた (図-1)。なお、今回の試料には豊浦砂を用いているため、水分計の校正式には、センサーカタログの鉍物質土壌の次式を用いている。

$$\theta(\text{cm}^3\text{cm}^{-3}) = -0.083 + 0.5V + 7.81V^2 - 32.5V^3 + 48V^4 \quad (1)$$

ここに、 θ : 体積含水率、 V : 出力電圧 である。

散水は、ノズルを使用し霧状にして 1.25cm/sec の強さで土槽断面全体が飽和しないように散水した。計測されたデータはデータロガーを介してパソコンに格納されるようになっている。散水の結果、土中内の水分変化を図-2 に示す。上部より水分量が上昇していき、全ての観測点で飽和に達していることがわかる。また、4つのセンサーは等間隔に設置されており、時間的遅れがほぼ等しいこともわかる。初期含水比や密度が同じ均質な地盤であれば、図-2 のようにいずれの深さにおいても水分増加の割合はほぼ同じように推移し、同じ体積含水率 (飽和) に達すると推察される。

ここで、この水分変化を関数で表すことを試みた。関数形には、0-1 までを連続的に表現することができる式 (2) に示すロジステック曲線 (ジグモイド関数) を用いることとした²⁾。

$$\frac{\theta - \theta_{in}}{\theta_s - \theta_{in}} = \frac{1}{1 + \exp(az + bt)} \quad (2)$$

$$az + bt = \log_e \left(\frac{\theta_s - \theta_{in}}{\theta - \theta_{in}} - 1 \right) \quad (3)$$

ここに、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_{in} : 初期の体積含水率、 a , b : フィッティングパラメータ、 z : 観測点深さ、 t : 経過時間であり、式(2)を変形すると式(3)のようになる。ここである深さにおいて水分増加の推移を式(3)で回帰すると az は定数、式(3)は経過時間に関する一次関数となり線形回帰が可能となる。また、水分増加の勾配は深さ (観測点) によらず等しいとして az と b を求め、さらに、観測点 z ごとに回帰分析により a を得ることができる。こうして得られた2つのパラメータは、 $a = 1.038$ (相関係数 0.984)、 $b = -0.038$ (相関係数 0.993) であった。得られたパラメータを用いて式(2)に代入してフィッティング結果を図-3 に示す。

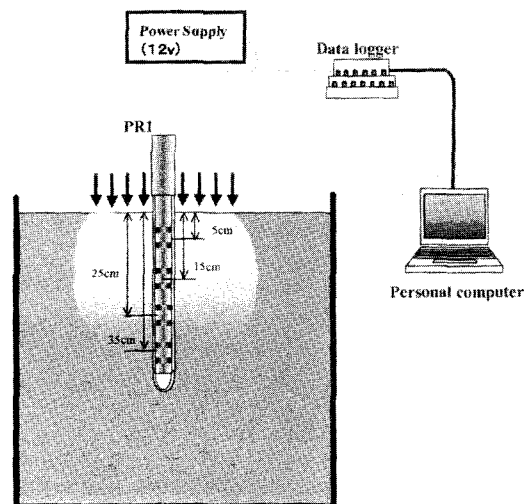


図-1 実験装置の概要

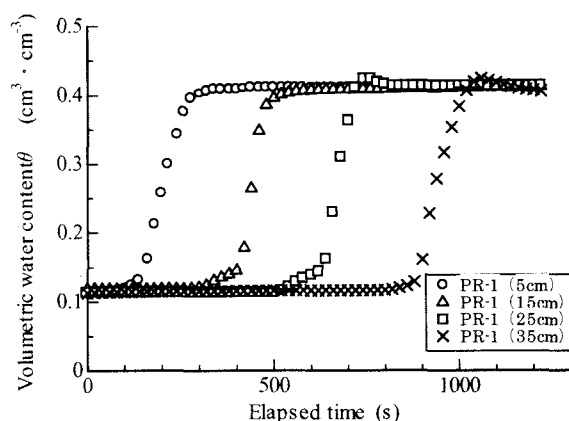


図-2 深さごとの水分増加の推移

3. 不飽和透水係数の計算 一般に、鉛直一次元浸透流の支配方程式は Krute 式で書くと次式で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} \quad (4)$$

ここに、 θ : 体積含水率, t : 時間, z : 深さ (下向き正), k : 透水係数, C : 比水分容量 ($k/C = D$: 水分拡散係数)。

体積含水率の変化を時間と深さの関数式で表現できることから、体積含水率の変化を式(5)のように表す。

$$\theta = \theta(z, t) = \frac{\theta_s - \theta_{in}}{1 + \exp(az + bt)} + \theta_{in} \quad (5)$$

式(4)の左辺は、式(5)を使って求めると

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\theta_s - \theta_{in}}{1 + \exp(az + bt)} + \theta_{in} \right) = -(\theta_s - \theta_{in}) \frac{b \exp(az + bt)}{(1 + \exp(az + bt))^2} \quad (6)$$

また、式(4)の右辺の第2項の微分は

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\theta_s - \theta_{in}}{1 + \exp(az + bt)} + \theta_{in} \right) = -(\theta_s - \theta_{in}) \frac{a \exp(az + bt)}{(1 + \exp(az + bt))^2} \quad (7)$$

式(4)に式(6)および式(7)を代入すると

$$-(\theta_s - \theta_{in}) \frac{b \exp(az + bt)}{(1 + \exp(az + bt))^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{k}{C} (\theta_s - \theta_{in}) \frac{a \exp(az + bt)}{(1 + \exp(az + bt))^2} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} \quad (8)$$

ここで、式(6)と式(7)の関係から次式(9)の関係が成り立つことから、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{b}{a} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (9)$$

式(9)を式(8)の左辺に代入して

$$\frac{b}{a} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{k}{C} (\theta_s - \theta_{in}) \frac{a \exp(az + bt)}{(1 + \exp(az + bt))^2} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} \quad (10)$$

を得る。これより両辺を z で積分することができ、

$$\theta = -\frac{k}{C} (\theta_s - \theta_{in}) \frac{a^2 \exp(az + bt)}{b(1 + \exp(az + bt))^2} - \frac{a}{b} k + c_1 \quad (11)$$

$z=0, t=0$ で $\theta = \theta_r$ (残留水分量) のとき、 $k \neq 0$ で $c_1 \neq \theta_r$ より

$$\theta = k \left(-\frac{(\theta_s - \theta_{in})}{C} \frac{a^2 \exp(az + bt)}{b(1 + \exp(az + bt))^2} - \frac{a}{b} \right) + \theta_r \quad (12)$$

室内の土の保水性試験から比水分容量 C が得られているとすると

(図-4), 式(12)を変形して θ に対する透水係数 k を得ることができる。

$$k = (\theta - \theta_r) \left/ \left(-\frac{(\theta_s - \theta_{in})}{C} \frac{a^2 \exp(az + bt)}{b(1 + \exp(az + bt))^2} - \frac{a}{b} \right) \right. \quad (13)$$

4. あとがき 式(13)と比水分容量を用いて透水係数を求めた結果が図-5である。室内試験で得られた結果を示す。深さによる試料密度の影響やフィッティングの精度から判断しても十分な結果を得ることができた。これより、原位置では間隙水圧を計測せずに、簡便に原位置で不飽和透水試験が可能になることが考えられる。本実験は、本研究室4年生の伊藤泰範・長縄圭両君に協力を得た。記して謝意を表します。

【参考文献】 1) Sugii, T. and Okumura, T.: Determination of unsaturated hydraulic conductivity taking account of in-situ test, *Is-OKAYAMA*, pp.475-481, 2003. 2) 杉井俊夫・宇野尚雄：簡便な不飽和浸透特性のモデル化，不飽和地盤の透水に関わる諸問題シンポジウム発表論文集，pp.179-184, 1996.

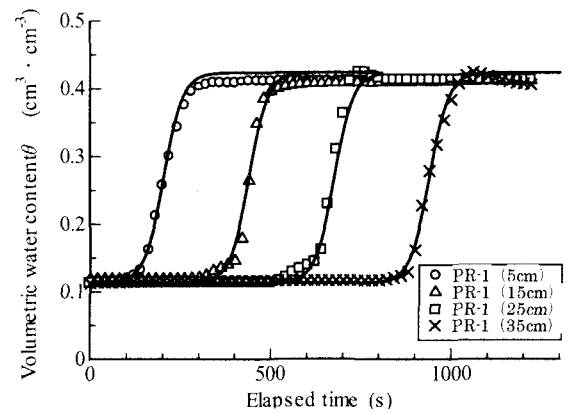


図-3 水分変化の関数のフィッティング

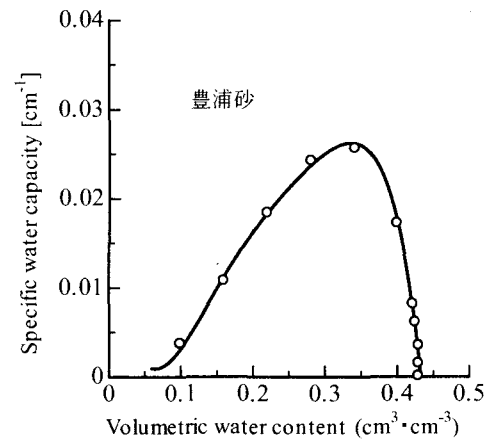


図-4 比水分容量 C (豊浦砂/保水性)

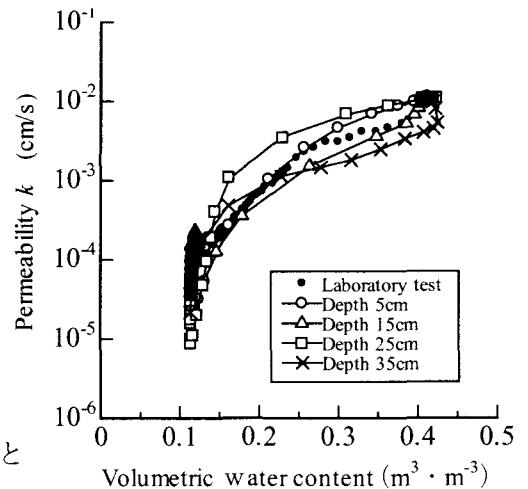


図-5 不飽和透水係数の比較