

加圧法による不飽和浸透特性の測定

宮崎大学工学部 正員 杉尾 哲
 // 井上 徹

1. まえがき

雨水流出現象や斜面の安定問題を解明するためには、不飽和浸透を定量的に把握することが不可欠であり、これらの諸現象をシミュレートするためには不飽和領域の浸透特性を計測する必要がある。ここに不飽和透水係数を室内で計測する方法としては、定常法と非定常法があるが、それぞれ長所と短所を有している。この内、普及型装置として有望なのは、定常法の短土柱法に属する加圧型不飽和透水試験器であり、本報においてもこの装置(Daiki-4150)を用いて豊浦標準砂の測定を行い、その測定手段について検討したものである。

2. 実験装置

不飽和土の透水係数を求めるには、飽和土の透水試験に比べて、①土試料を不飽和状態に保つ、②負の圧力水頭を正確に制御して与えるために、土試料の両端に不通気性で透水性のフィルターをあてがう、③不飽和状態の動水勾配を正確に測定する、④少量の透水量を正確に測定する、などに注意する必要がある。本報で使用した装置は図-1に示すように、直径100mm、高さ40mmの側壁に多数の小孔を持つリングに土試料を充填し、上下両端にあてがったメンブレンフィルターを通して土試料の上下面に水頭差を与えて透水させるものである。土試料を入れたセル内に空気圧 p_a を加えて、土試料に p_a 以下

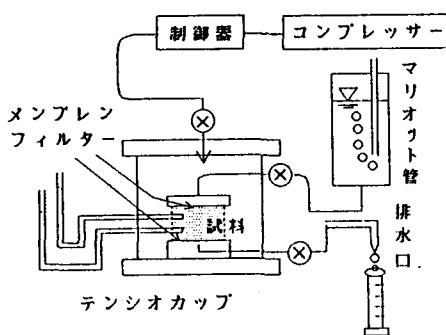


図-1 加圧型不飽和透水試験器

間隙水圧 p_w とその水頭差 ΔH を与えると、土試料には $p_w - p_a$ の負の圧力水頭（ $-\psi$ ： ψ はサクション）が作用し、リング壁の小孔から空気が土試料内に負荷されて、体積含水率の時間的変化の無い定常的な土中水移動が発生する。この時、上流側の水頭はマリオット管の設置高で決定し、下流側の水頭は排水口のドリップ位置で設定される。ここにフィルターの透水係数 k_f が土試料の透水係数 k_u に対して十分に大きければ、マリオット管と排水口の高度差が土試料に作用する水頭 ΔH となるが、一般にはそうはならない。今、フィルターの厚さを d 、土試料高を L 、断面積を A として、ダルシーの法則を適用すると、

$$Q/A = k_f \Delta H_f / d = k_u \Delta H_u / L, \quad 2 \Delta H_f + \Delta H_u = \Delta H \quad \cdots \cdots ①$$

となり、 $\Delta H \approx \Delta H_u$ とするためには、少なくとも土試料の飽和透水係数 k_s に対して、 $k_f \geq (1/10) k_s$ のフィルターを使う必要がある。本研究で使用したフィルターの透水係数は $k_f = 1.30 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であるため、 $\Delta H \approx \Delta H_u$ となる。したがって土試料に作用する動水勾配は土試料側方に挿入したテンシオカップから水頭を内径1mmのガラス管に取り出して、バーニア付きの読取り器を用いて測定した。この時、テンシオカップの距離を L_1 、測定した水頭差を ΔH_{u1} とすると、不飽和透水係数は次式で算定される。

$$k_u = (Q \cdot L_1) / (A \cdot \Delta H_{u1}) \quad \cdots \cdots ②$$

ここに Q はマリオット管で供給した流量と下流側の排水口からの流出量が一致した状態の値を使用する。

3. 問題点と改良点

加圧法の問題点としては次の3点があげられる¹⁾。

- ①土試料内の円周方向の体積含水率のバラツキ。②土試料内の上下方向の体積含水率のバラツキ。③土

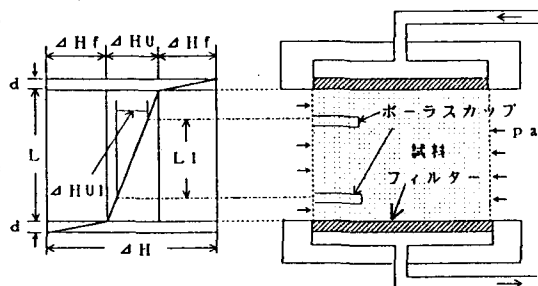


図-2 土試料に作用する水頭差

試料下部の水の貯留。このうち①、②については、宇野らの研究によって、土試料の上下面の水頭差が数cmである時、土試料内の体積含水率 θ の分布は、上下方向に数%、円周方向に1~2%のバラツキを持つが、 $k-\theta$ の關係にバラツキは現れず、大きな問題でないことが判明している。③については次のように処理した。装置の取扱説明書によれば、マリOTT管の空気取入れ管の高さは土試料上面と一致させ、排水口の先端は土試料下面と一致させるようになっている。しかしこの設定ではフィルターと土試料の透水係数の比率によっては ΔH_u が発生せず、むしろ下側のポーラスカップの水頭の方が上側より大きくなってしまう場合がある。この場合には、マリOTT管と排水口の設置高を調節し、 ΔH を大きくすることによって測定した。なお取扱説明書ではポーラスカップの設置高とマンメータの水面との差をサクシオンとしているかのように誤解される記述があるが、マンメータの水面が設置高より高くてもセルに作用する p_a によってサクシオンが働くことを考慮すべきである。

4. 標準砂の測定結果

以上の手法で豊浦標準砂の不飽和透水係数を測定すると、図-3のような測定結果を得た。図中には中野の測定結果²⁾も示しており、両結果はよく一致していることが分かり、本報で用いた測定手法の妥当性が確認できたものと考えた。次のこの測定結果から $k-\theta$ 、 $\theta-\psi$ の不飽和浸透曲線を描くために、鉛直排水実験を行って $\theta-\psi$ の關係を求めた。鉛直排水実験は直径5cmの円筒に土試料を飽和状態で充填して図-4のように水面上に直立させ、土中水を十分に排水した後に、各区間の土試料の湿潤重量と乾燥重量を測定して求めたものである。この測定結果に次のvan-Genuchten式³⁾を適用すると図-5のようになる。

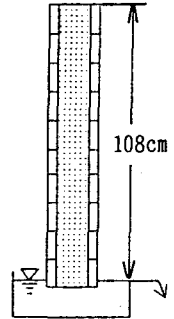


図-4 鉛直排水
実験装置

$$S_e = 1 / \{ 1 + (a\psi)^n \}^{1-1/n}, \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

ここに θ_r は最小体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率。式③を用いて測定値に一致するように $\psi-\theta$ 曲線を決定すると、比透水係数 $K_r = k_u/k_s$ は式④で推定されるので、これを図-6に示している。これに図-3の測定結果を図-5で換算してプロットすると、両者はよく一致する。

$$k_u/k_s = S_e^{1/2} \{ 1 - (1 - S_e^{1/n})^m \}^2, \quad m = 1 - 1/n \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

このことから図-4のような鉛直排水実験を行えば、その結果から式④を用いて不飽和透水係数を精度よく推定できることが分かる。

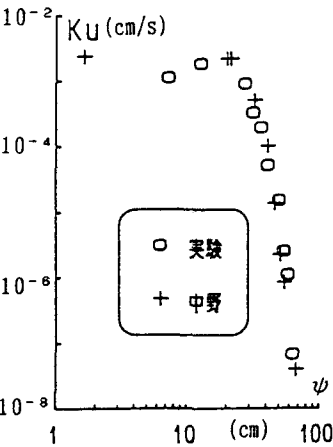


図-3 不飽和透水係数 $k(\psi)$

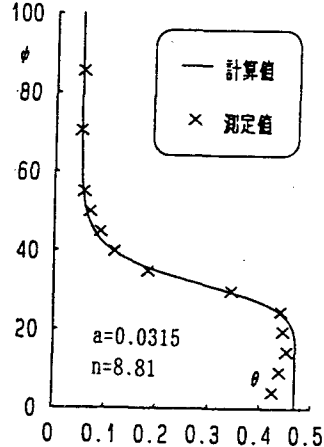


図-5 標準砂の $\psi-\theta$ 曲線

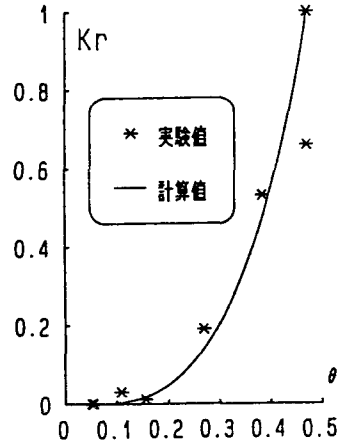


図-6 標準砂の $k-\theta$

本研究は財団法人鹿島学術振興財団研究助成金によるものである。

参考文献 1)宇野ら：第24回土質工学研究発表会、1989。 2)農業土木学会編：土の理工学的実験ガイド、1983。 3)河野ら：第23回土質工学研究発表会、1988