

III-90

粘性土の浸透特性に関する研究

岡山大学工学部 正会員 西垣 誠
大成建設(株) 正会員 ○多田 博光
岡山大学大学院 学生会員 吉岡 進

1. はじめに

従来の飽和及び不飽和浸透特性においては、その浸透現象に伴う体積変化、つまり間隙比の変化については考慮されていないのが現状である。しかし、特に不飽和領域においては、間隙比の変化に伴う保水のメカニズムが異なることはメニスカスの原理から考えても明らかであり、サクションを体積含水率のみでなく間隙比も加えた関数として規定する必要がある。別報¹⁾では、膨潤性粘土であるベントナイトと砂の混合土を用い、その間隙比の変化を考慮した飽和及び不飽和浸透特性を測定している。本報においては、従来からその取り扱いが困難とされてきた浸潤過程の不飽和水分特性について議論した。さらに、粘性土の不飽和透水係数を測定する為に従来の瞬時水分計測法と土中水を遠心力によって強制排水させる遠心法を併用させた新しい方法を提案した。

2. 浸潤過程の不飽和水分特性

$$D(\theta) = k(\theta) / C(\theta) \dots\dots\dots(1)$$

$$k = k_s \cdot Se^{1/2} \{1 - (1 - Se^{1/m})^m\}^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = (1 + |\alpha \phi|^\lambda)^{-m} \dots\dots\dots(3)$$

$$C(\theta) = d\theta / d\phi = \alpha(\lambda - 1)(\theta_s - \theta_r) Se^{1/m} (1 - Se^{1/m})^m \dots\dots\dots(4)$$

ここで、D:水分拡散係数(cm^2/sec)、k:不飽和透水係数(cm/sec)、C:比水分容量(cm^{-1})、 k_s :飽和透水係数(cm/sec)、Se:有効飽和度、 α, λ, m :van Genuchtenモデルの形状パラメータ ($m = 1 - 1/\lambda$)

自由水面上に肉厚5mm、内径5cm、高さ3cmのアクリル製カラムを高さ約2.5mまで積み上げ、絶乾状態のベントナイト・砂混合土(ベントナイト配合率15%)を乾燥密度が約 $1.60g/cm^3$ となるように充填した。また、給水にはマリオットシステムを用い、自由水面を固定した。尚試料の物性については別報¹⁾を参照されたい。図-1に約7ヶ月(214日)後の体積含水率の分布を示す。しかしながら、10cm程度浸潤しているものの、排水過程の水分特性曲線¹⁾より推定するとまだ水分平衡には至っていないと考えられる。従ってここではこの結果を利用して間接的に浸潤過程の水分特性曲線を推定することを考える。

まず、図-1の結果よりBoltzmann transform method²⁾を用いて体積含水率 θ と水分拡散係数Dの関係を示したものが図-2である。さらに、式(1)に示す不飽和土中の水分移動の特性を用いて図-1から比水分容量Cと有効飽和度Seの関係求めたものが図-3である。不飽和透水係数kについては別報¹⁾で定式化した式(2)を用いて算出した。いま、van Genuchtenが提案した水分特性曲線の推定式(3)の両辺を圧力水頭 ϕ で微分すると比水分容量Cが式(4)で得られる。式(4)に図-3に示すC-Se関係を代入し連立方程式をたて、 α, λ について解くと $\alpha = 0.843, \lambda = 1.303$ が得られる。この結果をもとのVGモデル、式(3)へ代入して水分特性曲線を推定すると図-4に示す結果が得られた。

このように、D- θ 関係を得ることができれば、既往のvan Genuchtenモデルを用いて浸潤過程の水分特性曲線を間接的に推定することができる。つまりこれを拡張して考えると、間隙比 e -D- θ の関係を導けば、各間隙比に対応した水分特性曲線が得られ、間隙比の変化を考慮した浸潤過程の不飽和水分特性が評価できると思われる。ただし、以上の操作を行うには、透水係数及び比水分容量は圧力水頭ではなく体積含水率のみの関数であり、透水係数には浸潤側及び排水側にヒステリシスは存在しないという仮定が必要である。

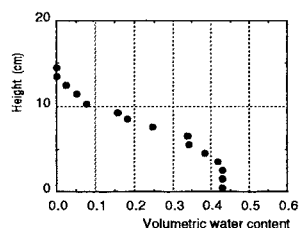
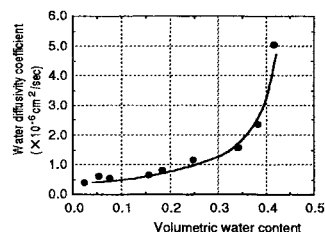
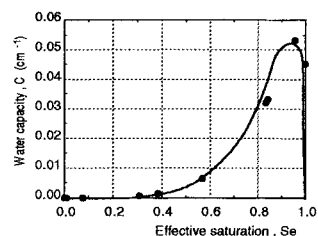
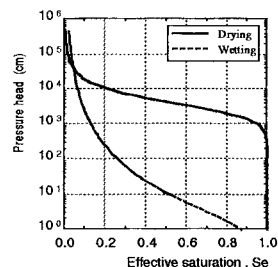

図-1 約7ヶ月後の θ 分布

図-2 D- θ 関係


図-3 C-Se関係


図-4 水分特性曲線($e=0.663$)

3. 遠心法を併用した瞬時水分計測法

従来より不飽和透水係数の測定には、瞬時水分計測法が最も精度良く、時間的にも有効な方法であるとされている。しかし、粘性土については測定時間に長時間要することや測定装置、測定方法が複雑になることから瞬時水分計測法にかかわらず、他の方法においてもその適用が困難である。従って本報では、計測時間を短縮するために、土中水を遠心力によって強制排水させる遠心法と瞬時水分計測法を併用させる新しい方法を提案する。

連続の式(5)と運動方程式(6)より、遠心場における一次元浸透基礎方程式は式(7)のように誘導できる。いま、 $r = r_0$ において、水の補給がないため $v = 0$ という境界条件の下で式(7)の両辺を r で積分し整理すると、任意の点の任意時間での不飽和透水係数 k は式(8)より求めることができる。(図-5参照)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial r} \dots\dots\dots(5)$$

$$v = k \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{g} r \omega^2 \right) \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left\{ k \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{g} r \omega^2 \right) \right\} \dots\dots\dots(7)$$

$$k = \frac{\left(\int_{r_0}^r \frac{\partial \theta}{\partial t} dr \right)_{r, t}}{\left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{g} r \omega^2 \right)_{r, t}} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 θ :体積含水率, t :時間(sec), v :流速(cm/sec), r :回転軸からの距離(cm), ϕ :圧力水頭(cm), k :不飽和透水係数(cm/sec), g :重力加速度(cm/sec²), ω :角速度(rad/sec)

式(8)の右辺の分子、分母は以下の手法で求めることができる。

(a)分子の値の求め方; 各任意の時間回転後、図-6に示すように中性子水分計を用いて各点の体積含水率分布の経時変化を計測する。任意の点($r = r$)を時間 $t_1 \sim t_2$ に通過する流量は図-5の斜線部分の面積(A)となるから式(8)の分子は次式(9)で得られる。

$$\left(\int_{r_0}^r \frac{\partial \theta}{\partial t} dr \right)_{r, (t_1+t_2)/2} = \frac{A}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots(9)$$

(b)分母の値の求め方; 任意の点($r = r$)における動水勾配は、その上下の点($r = r_1, r_2$)における圧力水頭の値を知れば得ることができる。従来の方法では、試料に直接圧力変換器を設置してサクシヨンの経時変化を測定することが可能であるが、本研究で対象としているベントナイト混合土のような粘性土においては、かなり高いサクシヨンが発生することから圧力変換器の測定範囲上の問題や装置の複雑化によりこの測定方法を用いることができない。従って、ここでは上下の点において体積含水率と間隙比の時間的変化を、それぞれ中性子水分計、ガンマ線密度計によって計測し、別報¹⁾で求めた排水過程の $\phi(pF) - \theta - e$ 関係から圧力水頭(ϕ_1, ϕ_2)を決定する。よって、式(8)の分母の値は次式(10)で得られる。

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{g} r \omega^2 \right)_{r, (t_1+t_2)/2} = \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{r_2 - r_1} \right) (t_1+t_2)/2 + \frac{1}{g} r \omega^2 \dots\dots\dots(10)$$

従って式(10)、(11)の値を式(9)に代入すると間隙比の変化を考慮した不飽和透水係数を得ることができる。また、不飽和透水係数と体積含水率及び間隙比の関係は、不飽和透水係数を計算した時間 $(t_1+t_2)/2$ 及び計測点($r = r$)に対応する体積含水率と間隙比の値を求めることによって得られる。

4. おわりに

粘性土(ベントナイト・砂混合土)の浸潤過程における水分特性曲線を、透水係数にヒステリシスが存在しないという仮定の下で、Boltzmann transform methodより得た水分拡散係数と体積含水率のデータから、水分特性曲線の傾きである比水分容量を逆算することで推定を行った。浸潤過程の水分特性曲線のデータの蓄積が稀少であるために、今回示した結果の正否の確認ができなかったことが問題として残る。しかし、もし正しいとすれば、時間的にも有効であり、簡単でもあることから非常に有利な手段であるといえる。

【参考文献】

- 1)西垣他:粘性土の浸透特性に関する研究 土木学会中国四国学術講演会, 1994. 2)Bluce, R. R. & Klute, A.: Soil Sci. Soc. Am. Proc., Vol. 20, pp. 458-462, 1956. 3)van Genuchten, M. Th.: Princeton Univ., Research Report, No. 78-WR-08, 1978.

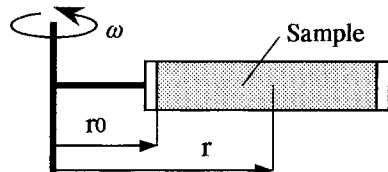


図-5 概念図

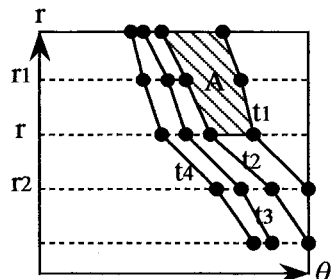


図-6 θ 分布の経時変化