

粘性土の浸潤過程における不飽和浸透特性の計測手法

岡山大学環境理工学部 正会員 西垣 誠
岡山大学大学院 学生会員 〇小松 満

1. はじめに

不飽和浸透特性に関して、その水分特性曲線は、排水過程と浸潤過程との間にヒステリシスが存在するが、それぞれ保水性が違うにもかかわらず、我々が不飽和土の水分特性を議論する際には、ほとんどが排水過程のものを扱っている。したがって本報においては、従来からその取り扱いが困難とされてきた浸潤過程における不飽和浸透特性について、膨潤性粘土であるベントナイトと砂の混合土を用いて土柱法による浸潤実験を行い、その結果からBoltzman transform methodを用いて不飽和透水係数を推定する方法を述べる。

2. 浸潤過程の不飽和水分特性

PF曲線から不飽和透水係数を算定するために、Boltzman transform method¹⁾より水分拡散係数を求める。

以下にその算定法を示す。

$$\partial \theta / \partial t = \partial / \partial z \{ D(\theta) \cdot \partial \theta / \partial z \} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\lambda = zt^{-1/2}, \theta = f(\lambda) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\{ \theta = \theta_0, \lambda = \infty \}, \{ \theta = \theta_r, \lambda = 0 \},$$

$$\{ D(\theta z) [d\theta/dz]_{\theta_0} = 0, \lambda = 0 \} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$D(\theta z) = -1/2 [d\theta/dz]_{\theta z} \int_{\theta_0}^{\theta z} \lambda d\theta \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = (1 - |\alpha \psi|^\lambda)^{-m} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$C(\theta) = d\theta/d\psi = \alpha(\lambda - 1)(\theta_s - \theta_r) Se^{1/m} (1 - Se^{1/m})^m \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$D(\theta) = k(\theta) / C(\theta) \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 θ ：体積含水率、 $D(\theta)$ ：水分拡散係数(cm^2/sec)、 t ：時間(sec)、 z ：給水部からの距離(cm)、 θ_0 ：初期の体積含水率、 θ_s ：飽和体積含水率、 $C(\theta)$ ：比水分容量(cm^3)、 Se ：有効飽和度、 ψ ：負の圧力水頭(cm)、 α, λ, m ：形状パラメータ ($m=1-1/\lambda$)、 θ_r ：最小含水量。

重力項を無視すると、一次元流れにおける土中水の移動は体積含水率の変化を追跡するものとして式(1)で表される。式(1)を偏微分方程式にするために、ある境界条件のもとでボルツマン変換を行う。いま、式(2)のようなボルツマン変数を用い、体積含水率 θ が λ の関数になるとして変換を行い、さらに式(3)に示す初期及び境界条件のもとで積分すれば式(4)が得られる。

図1に示すように一定時間終了後、試料を解体して図2のように $\theta - \lambda$ 曲線を求める。これより、式(4)の右辺における $\int_{\theta_0}^{\theta z} \lambda d\theta$ は図2に示す斜線部分の面積、また $[d\theta/dz]_{\theta z}$ は、 θz における曲線の接線勾配となる。したがって、これらの値を読み取って式(4)より水分拡散係数が算定できる。

自由水面上に肉厚5mm、内径5cm、高さ5cmの亚克力製カラムを高さ約2.5cmまで積み上げ、飽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 $1.60\text{g}/\text{cm}^3$ となるように充填した。配給にはマリOTTシステムを用い、自由水面

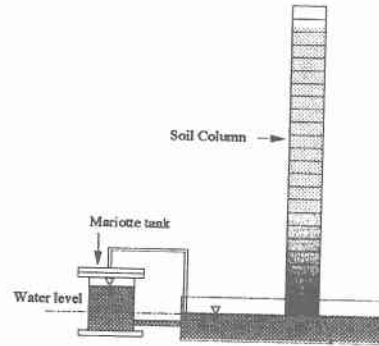


図1 土柱法浸潤過程実験装置

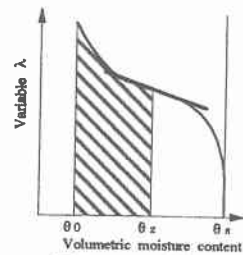


図2 $\lambda - \theta$ 関係

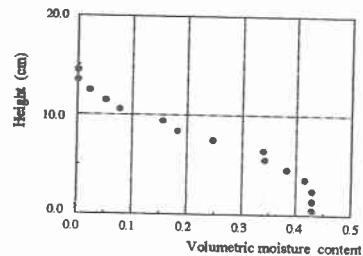


図3 Height - θ 関係

を固定した。

これより得られた図3に示す約7ヶ月（214日）後の体積含水率分布をもとにして先ほど示した手順により水分拡散係数を算定する。その結果、体積含水率 θ と水分拡散係数 $D(\theta)$ の関係を示したものが図4である。

さて、得られた水分拡散係数（ D ）と水分量の関係から浸潤過程の透水係数を算定するために比水分容量（ C ）を用いる。ここで比水分容量（ C ）は、水分特性曲線の圧力水頭に対する体積含水率の変化率を表している。いま、van Genuchtenが提案した水分特性曲線の推定式(5)を圧力水頭 ψ で微分すると比水分容量（ C ）は式(6)で得られる。ここで式(5)および式(6)の中の未知パラメータを推定する。図3とのフィッティングにより形状パラメータ α 、 n を推定すると、 $\alpha=0.13235$ 、 $\lambda=5.71053$ が得られる。また θ_r ：最小含水量、 θ_s ：飽和体積含水率であり、この場合簡単に曲線の形状から最小含水量及び、飽和体積含水率を判断し、 $\theta_r=0.0$ 、 $\theta_s=0.43$ とした。よって式(6)より比水分容量（ C ）と体積含水率（ θ ）との関係を求めたものを図5に示す。

不飽和透水係数 k については式(7)を用いて算出した。ここで間隙比は $e=0.663$ である。この結果を図6に示す。

3. 透水係数のヒステリシス

水分特性曲線にはヒステリシスがあることは明らかであるが同様に排水過程と浸潤過程の透水係数の間にヒステリシスが存在するかどうかについて考える。

図7に先ほど算定した浸潤過程の透水係数と遠心法により求めた排水過程の透水係数を比較したものを示す。この結果を見る限りでは排水過程と浸潤過程の透水係数の間においてもヒステリシスが存在するのではないかとと思われる。

4. おわりに

浸潤過程の不飽和水分特性をより迅速に求めることが今後の課題である。その計測手法として現在、遠心法を用いた瞬時水分計測法による方法や空気圧をかけて強制的に水を浸潤させる方法を行っている。ただ遠心力によって強制的に浸潤を行う場合においては、浸潤と同時に排水を生じ、また土粒子自体も遠心力によって移動し、さらに膨張も生じるなど多くの考慮に入れるべき問題が多い。もしこれらが解決されれば、時間的に有効であり、比較的簡単であることから非常に有効な手段であるといえる。

【参考文献】

- 1) Bluce, R. R. & Klute, A.: Soil Sci. Am. Proc., Vol. 20, pp. 458-462, 1956.

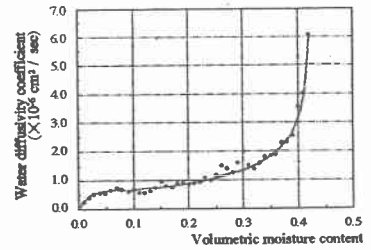


図4 D- θ 関係

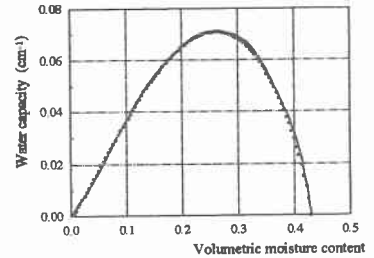


図5 C- θ 関係

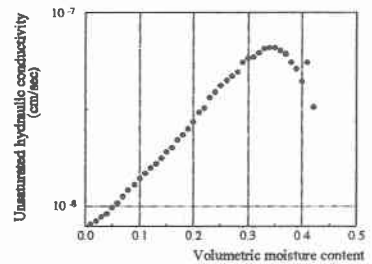


図6 k- θ 関係

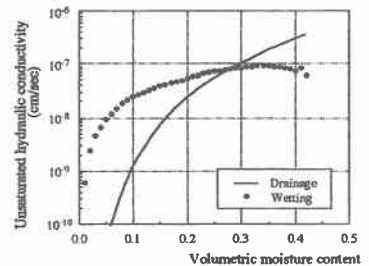


図7 排水過程の透水係数との比較
($e=0.663$)