

## III-483

## pF試験における土柱法に関する一考察

岡山大学工学部 正会員 河野伊一郎

岡山大学工学部 正会員 西垣 誠

岡山大学工学部 正会員 ○ 竹下 祐二

岡山大学大学院 学生員 田村 和久

## 1 はじめに

不飽和領域の浸透挙動を解析する場合、不飽和土の浸透特性(水分特性曲線、不飽和透水係数)が必要である。このうち水分特性曲線の測定法としてpF試験法がある<sup>1)</sup>。土柱法は分離できる多数の円筒形容器に作成した土柱にて排水または浸潤を行い、土柱内の水分状態が平衡状態に達した時点での体積含水率を測定して水分特性曲線を得るpF試験法であり、装置や手法が簡単であるために低pF値の計測法としてよく用いられている。しかし、この方法では水分平衡状態の判定が困難であり、土質試験法においても試験終了時間の基準が明確にされていないため、水分平衡状態に達する前に試験を終了する可能性があり、この場合、得られた水分特性曲線の精度には問題がある。そこで、本文では土柱法実施時に土柱内の圧力水頭分布の経時変化の計測を行い、その結果より水分平衡状態の判定、および不飽和浸透特性の推定に対する検討を試みた結果について報告する。

## 2 土柱法結果の解析法

## (1) 水分平衡状態の判定

土柱において試料の限界毛管水頭高さよりも上部に間隙水圧計を設置し、圧力水頭の経時変化を計測する。計測された負の圧力水頭値が位置水頭値と等しくなれば、その計測点より下部では水分平衡状態に達していると判断できる。また、複数個の間隙水圧計を設置した場合、土柱内の圧力水頭分布は各点での計測値から内挿または外挿補間により把握できる。

## (2) 不飽和浸透特性の算定

不飽和浸透特性を関数モデルを用いて表現し、それらに含まれる未知定数を土柱法にて計測された圧力水頭の経時変化より同定することによって不飽和浸透特性を算定できる。同定にはF.E.M.による一次元浸透解析手法を用いた逆解析手法を用い、不飽和浸透特性の関数モデルとしてvan Genuchtenの提案モデルを用いる。このモデルでは(1)式で定義される有効飽和度( $Se$ )を圧力水頭の関数として(2)式で表し、比水分容量および不飽和透水係数の関数式として(3)、(4)式を用いる<sup>2)</sup>。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1) \quad Se = \{1 + |\alpha \psi|^n\}^{-m} \quad (2)$$

$$C(\psi) = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) Se^{1/m} (1 - Se^{1/m})^m \quad (3)$$

$$k(\psi) = k_s \cdot Se^{1/2} \{1 - (1 - Se^{1/m})^m\}^2 \quad (4)$$

ここに、 $m=1-1/n$ ,  $n>1$ ,  $\theta_s$ :飽和体積含水率、 $\theta_r$ :最小含水量、

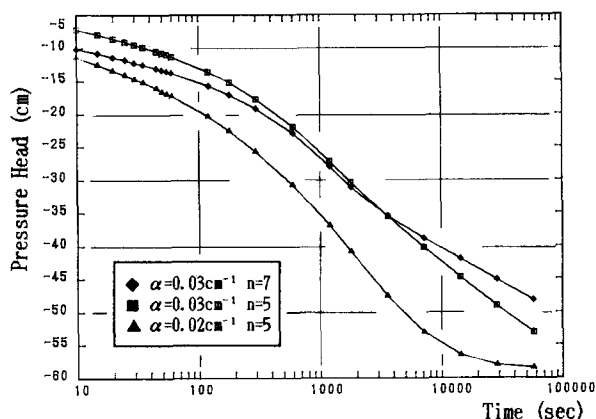


図1 van Genuchtenモデルの感度解析

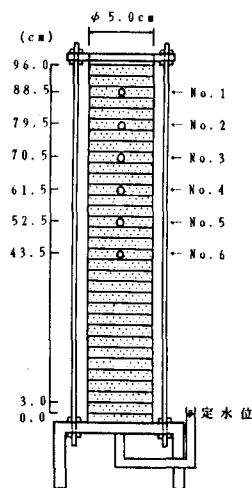


図2 土柱法試験装置(○:間隙水圧計)

$k_s$ :飽和透水係数である。係数 $\alpha$ ,  $n$ は、水分特性曲線の形状より決定されるパラメータで、砂質土では  $0.01 < \alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)} < 0.1$ ,  $3 < n < 10$  程度の値を取る。van Genuchtenの不飽和浸透特性モデルは5つの独立したパラメータ ( $k_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ) によって構成されるが、ここではその内  $k_s$ ,  $\theta_s$ , および  $\theta_r$  に対しては直情報を与えて既知量として扱い、同定すべき未知パラメータを ( $\alpha$ ,  $n$ ) の2個とする。なお、同定には変化の大きな計測初期の圧力水頭データを用いて行う。図1はパラメータ ( $\alpha$ ,  $n$ ) が図2の土柱法において圧力水頭の経時変化に及ぼす感度解析を行った結果である。一般に、水分平衡状態に達するには長時間を要するために、逆解析を利用したこの手法により土柱法の試験時間短縮が期待できる。

### 3 豊浦標準砂による土柱法結果

豊浦標準砂を用いて、乾燥密度  $1.52 \text{ g/cm}^3$ ,  $\theta_s = 0.42$  なる土柱を作成し、排水過程の試験を行った。土柱の飽和透水係数は透水試験により  $k_s = 2.56 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  を得た。圧力水頭の計測には拡散型小型圧力変換器（計測範囲  $\pm 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ , ヒステリシス  $\pm 0.02\% F_s$ ）にセラミックカップを取り付けたものを用い、恒温室（室温20度、湿度70%）にて計測を行った。用いた試験装置は図2に示す。

### 4 実験結果および考察

計測された圧力水頭の経時変化を図3に示す。約6日間の計測の結果、図2のNo. 4~6の部分では水分平衡状態に達していたが、No. 1~3の部分では平衡状態に達しなかった。圧力水頭の計測データの途中において段差が認められるのは間隙空気の影響、および用いたセラミックカップの反応遅れであると考えられる。圧力水頭の経時変化の逆解析はNo. 4~6における排水開始後30~900秒のデータを用い、 $\theta_r = 0.0$  として行った。No. 5における同定結果を図4に示すが初期および定常状態において良好な一致をみている。また、同定されたvan Genuchtenモデルより得られた水分特性曲線と土柱法実験結果とを比較した図を図5に示す。推定された水分特性曲線は実験値にほぼ等しい結果を得た。《参考文献》 1) 土質工学会編(1979):「土質試験法」

(第2回改訂版)、第7章。 2) van Genuchten, M. Th. (1980): "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.", Soil Sci. Am. J., Vol. 144, pp. 892-898.

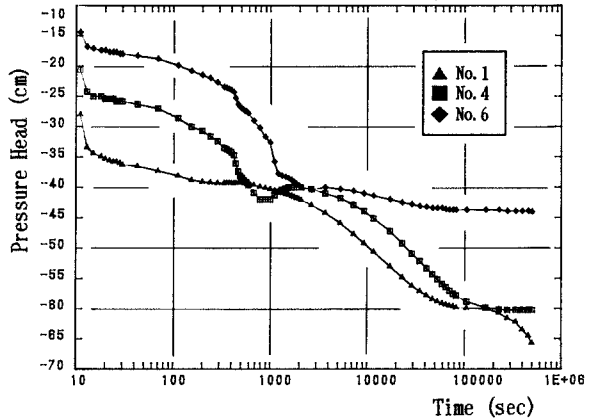


図3 圧力水頭の計測結果 (No. 1, 4, 6)

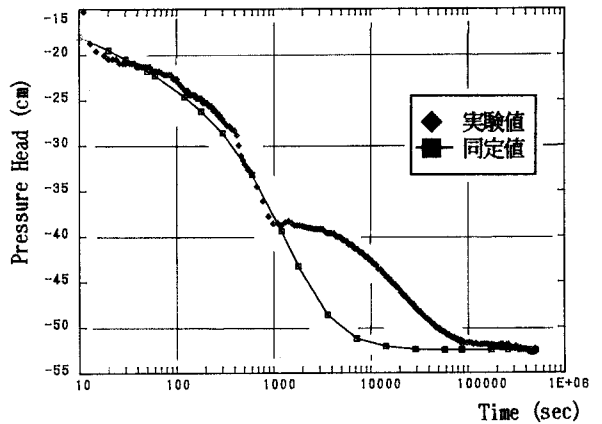


図4 圧力水頭の間定結果 (No. 5)

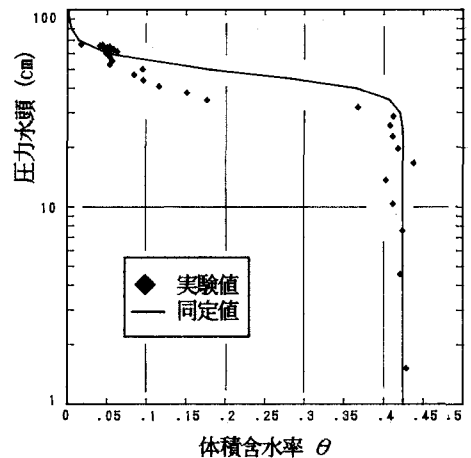


図5 水分特性曲線（土柱法と同定結果）