

パラメータ推定手法を用いた不飽和浸透特性の算定法

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
㈱ 鹿 島 建 設		三宅 広之

1 はじめに

不飽和土の浸透特性（水分特性曲線、不飽和透水係数）の計測は現時点では極めて困難であり、確固たる計測法は確立されていない。そのため不飽和浸透特性を理論的あるいは経験的な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原位置または室内における鉛直一次元浸透実験結果から数値解析法を用いた逆解析手法によって同定し、不飽和浸透特性を推定しようとする研究がなされている¹⁾。筆者らは、このような不飽和浸透特性の推定手法を不圧帯水層における多次元場の浸透現象に対して拡張し、van Genuchten の提案した不飽和浸透特性の関数モデルを用いた逆解析手法により、不圧帯水層にて計測された軸対称浸透流現象から不飽和浸透特性を推定する手法を提案している²⁾。本文では、室内モデル実験結果に対して本解析手法を適用し、その妥当性を吟味すると共に、未知パラメータの感度解析結果から逆解析に用いる水頭観測データの計測点および計測時間に対する考察を行った。

2 不飽和浸透特性の推定手法

van Genuchtenは不飽和浸透特性の関数モデルとして(1)式で定義される有効飽和度(S_e)を負の圧力水頭の関数として(2)式を提案し、比水分容量、および不飽和透水係数を(3)、(4)式のように表している³⁾。

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

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

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

ここに、 $m=1-1/n$, $n>1$, θ_s :飽和体積含水率、 θ_r :最小含水量、 k_s :飽和透水係数である。係数 α , n は、水分特性曲線の形状より決定されるパラメータであり、砂質土では $0.01 < \alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)} < 0.1$, $3 < n < 10$ 程度の値を取る。本解析手法では不圧帯水層における軸対称浸透流現象をF.E.M.による飽和-不飽和浸透解析手法によりシミュレートし、非線型最小二乗法による逆解析法によってvan Genuchtenモデルに含まれる未知パラメータ値を決定することにより不飽和浸透特性の推定を行う。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 , α , n , θ_s , θ_r)によって構成されるが、これらのパラメータをすべて同時に同定することは困難であるため、その内 θ_s , θ_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としては(k_s , α , n)の3個とした。

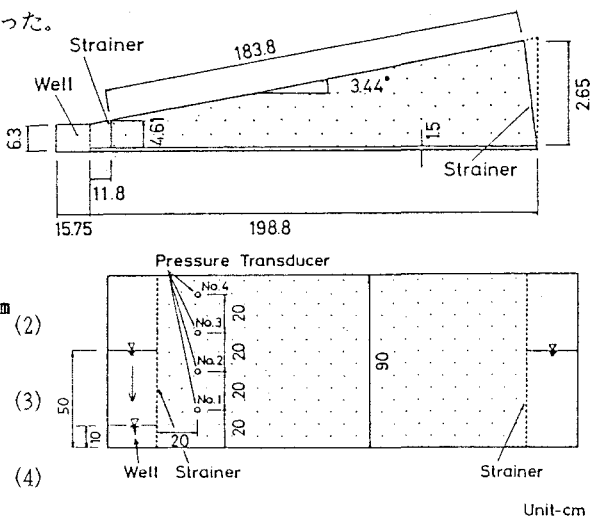


図1 軸対称不圧帯水層モデル

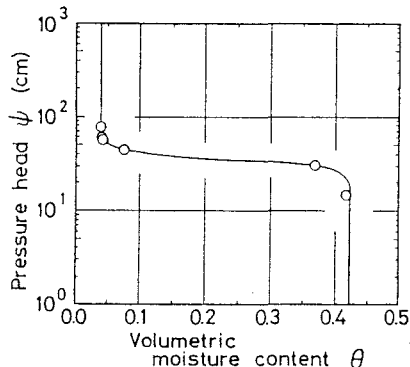


図2 豊浦標準砂の水分特性曲線

3 軸対称不圧帯水層モデルによる非定常浸透実験

図1に示す軸対称形状(扇形)の土槽に、豊浦標準砂を用いて乾燥密度 1.52 g/cm^3 、 $\theta_s=0.42$ 、 $k_s=2.56 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ の均質な不圧帯水層モデルを作成した。不圧帯水層モデルの初期および境界水位は50cmとし、一方の境界水位を50cmから10cmに低下させる境界条件を与えた。圧力水頭の経時変化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)を用い、計測点の選定は水位低下により(a)常に飽和状態、(b)初期飽和-不飽和状態、そして(c)常に不飽和状態の3種類の飽和状態から図1に示す4点(No. 1-4)を選んだ。また、土柱法により標準砂の水分特性曲線を測定し図2を得た。この水分特性曲線と van Genuchtenモデルとのフィッティングを行った結果、 $\alpha=0.028 \text{ cm}^{-1}$ 、 $n=11.1$ 、 $\theta_r=0.039$ を得た。

4 非定常浸透実験結果の同定

パラメータ推定問題では解析に用いる観測データの時間分布および空間分布が重要であり、未知パラメータに対して大きな感度を有する観測データが得られるように計測点および計測時間を設定すべきである。数値解析法により各未知パラメータの感度解析を行い、以下に示す結果を得た。

(a) k_s : 飽和領域の水頭計測データに対して感度が大きい。時間分布は後半(定常状態)に近づくに連れて良好になる。(b) α , n : 不飽和領域の水頭計測データにおいて感度が認められるが、飽和領域での水頭計測データではほとんど感度が認められない。したがって、感度解析の結果より本解析手法では未知パラメータを推定する上で次のような手順を用いた。Step①: 飽和領域での水頭観測データを用いて k_s の

同定を行う。この際パラメータ(α , n)は適当な値、たとえば砂質土であれば $\alpha=0.03 \text{ cm}^{-1}$ 、 $n=7.0$ 程度を与えて既知とする。Step②: Step①にて同定された k_s 値を既知として(α , n)の同定を行う。この際用いる観測データとしては不飽和領域の卓越した観測データを用いる。同定されたパラメータの値を表1に、また、圧力水頭値の同定結果と実験結果とを比較したものを図3に示す。同定された値は実験値とほぼ等しく、満足できる結果を得た。

《参考文献》 1) Kool, J.B. etc. (1987): "Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - A review.", J. Hydrology., Vol. 91, pp. 255-293. 2) 河野 他(1988): 揚水試験による不飽和浸透特性の算定法(第一報), 「第23回土質工学研究発表会」, pp. 1833-1834. 3) 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.

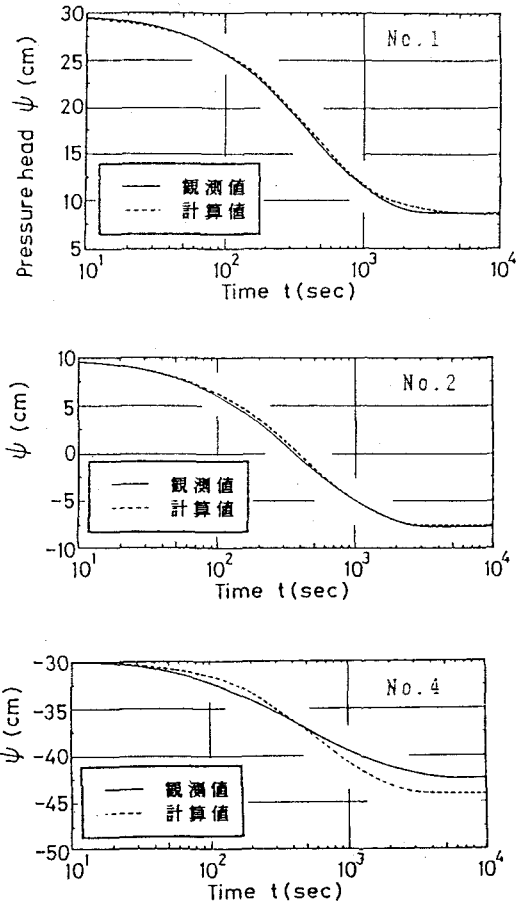


図3 圧力水頭の経時変化図

表1 van Genuchtenモデルの推定結果

Step	繰返し回数	最大残差(cm)	$k_s \text{ (cm/s)}$	$\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	n	観測点	観測時間 (sec)
①	2	1.442	2.37×10^{-2}	(0.03)	(7.0)	No. 1	10, 30, 60, 360, 600
②	1	2.202	—	0.0202	9.685	No. 4	1200, 1800, 2400