

岡山大学工学部 正会員 西垣 誠

岡山大学工学部 正会員 河野伊一郎

岡山大学工学部 学生員 浅間康史

1. はじめに

近年、有限要素法や差分法によって地下水の挙動を解析する方法が盛んに用いられるようになって来た。その中でも飽和不飽和領域を網羅した浸透解析は、地盤の複雑な要素を考慮することが可能であることより、3次元の非定常浸透解析まで拡張され、実際設計にも利用されるようになってきている。しかし、この飽和不飽和領域を対象とした浸透解析では、当然のことながら不飽和領域における不飽和透水係数や水分保持曲線が必要となるが、我国においては、この種の実験データの蓄積はきわめて少ないものである。したがって、本研究では従来より諸外国で実験的に求められたこれらの物性を整理して、Irmayらによって提唱されている経験式や実験式の適用性を有限要素法による飽和不飽和領域内の鉛直一次元浸透解析によって吟味した結果を示す。

2. 有限要素法による飽和・不飽和浸透の一次元解析

飽和・不飽和領域内の一次元浸透の支配方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\theta) \right) = C \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

ここで z は鉛直座標、 ψ は圧力水頭、 $K(\theta)$ は透水係数で体積含水率 θ の関数である。 C は比水分容量($=\partial\theta/\partial\psi$)、 t は時間。(1)式を境界での水頭が一定、あるいは流出入量が一定とした条件より解を求めるためにカラーキン法による有限要素法で離散化を行ない、時間項については後退差分法を用いて逐次計算を実施した。¹⁾

3. 解析手法の妥当性の検討

本研究で用いた有限要素法による飽和・不飽和浸透の一次元解析プログラムによる解の妥当性を検討するために、Day,²⁾ Watson,³⁾らの一次元排水実験とVachaudによる浸潤実験の結果と数値解析結果との比較を行なった一例を図-3, 4に示す。図-1, 2は、それらの解析に用いた不飽和の浸透特性である。⁴⁾

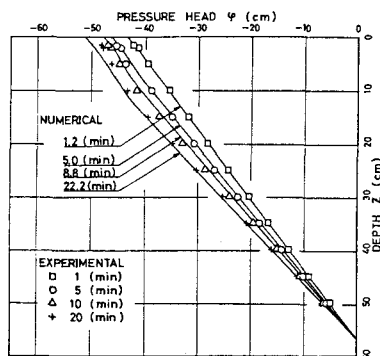


Fig.3 Experimental and numerical profiles of pressure head for Watson

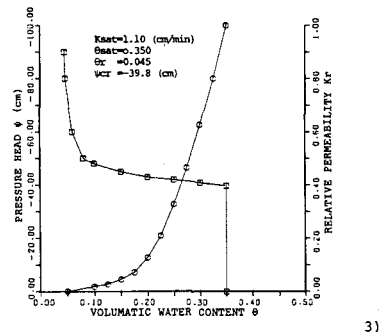
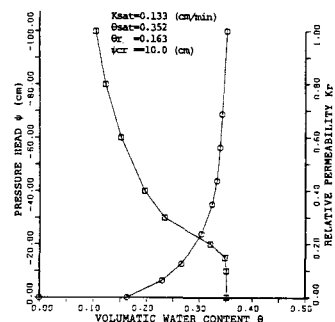
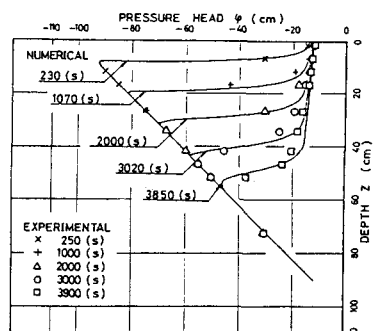
Fig.1 Unsaturated properties for sand³⁾Fig.2 Unsaturated properties for sand⁴⁾

Fig.4 Experimental and numerical profiles of pressure head for Vachaud

4. 浸透特性と経験式の関係

一般に体積含水率と圧力水頭の関係は、浸潤過程と排水過程でヒステリシス現象があるため、簡単な式で表現することはきわめて困難である。一方、透水係数と体積含水率の関係については、浸潤、排水両過程とも同様の関係が用いられることより表-1に示すような経験式が提唱されている。ここで S_e は有効飽和度であり、 θ_r は最小容水量である。表-1の各式の指数(N)を求めるために両対数、片対数紙上にそれぞれの座標変数について種々の土について得られている実験値を整理した結果を図-5, 6, 7に示す。どの関係も直線的变化をしているが、Brookらの提唱している式が比較的良好に実験結果と一致している。また、その直線の勾配も2.0~4.0の範囲に分布している。ここで、鉛直一次元浸透解析の不飽和土の透水特性としてBrookらの経験式のNを2.0~4.0まで変動させてWatsonの排水実験を解析した結果の一例を図-8, 9に示す。ここでnをパラメータとして、ある観測点での圧力水頭の時間的変化の実験結果を比較した結果(図-10), $N=3.5$ が良く一致することがわかる。このような手法で、パラメータの感度分析を行なったが、 θ_r の決定などの2, 3の問題を残すが、Brookらの式で $N=2.0\sim 4.0$ の範囲を用いるとよいことがわかった。

Table-1 Empirical equations for relation of hydraulic conductivity

$$(K_r = K/K_{sat})$$

$$(S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_{sat} - \theta_r))$$

$K_r = S_e^N$ (Brooks and Cory ⁵⁾)
$K_r = \exp((S_e - 1)N)$ (Topp, D ⁶⁾)
$1 - (1/K_{sat}) + (1/K) = (1/S_e)^N$ (Gardner, W.R. ⁷⁾)

- 参考文献 1) 大西有三, 西垣誠, 土中水の不飽和流動, 3. 不飽和流の解析, 土と基礎, 1981, Vol.129(6), 65-72.
 2) Day, P.R. and N. Luhrig, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1956, Vol. 20, 443-447.
 3) Watson, K.K., ASCE, 1964, HY(2), 1-15. 4) Vachard, G. and J.L. Thony, Water Res. Res., 1971, Vol. 7, 111-127.
 5) Brooks, R.H. and A.T. Cory, ASCE, 1966, IR(92), 61-88. 6) Topp, D., Water Res. Res., 1971, vol. 7, 914-920.
 7) Gardner, W.R., Soil Sci. Soc., 1958, Vol. 85, 244-249.

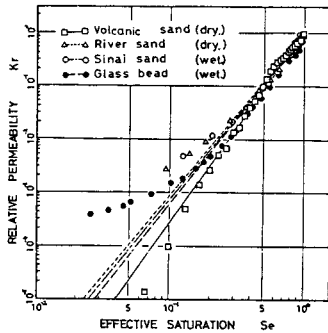


Fig.5 Relationships between $\log(K_r) - \log(S_e)$

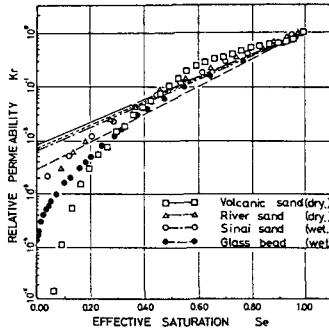


Fig.6 Relationships between $\log(K_r) - S_e$

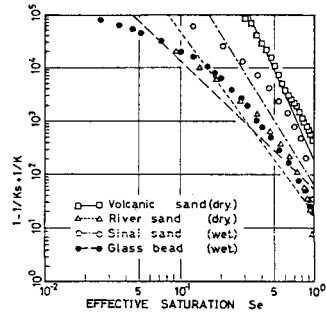


Fig.7 Relationships between $\log(1 - 1/K_s + 1/K) - \log(S_e)$

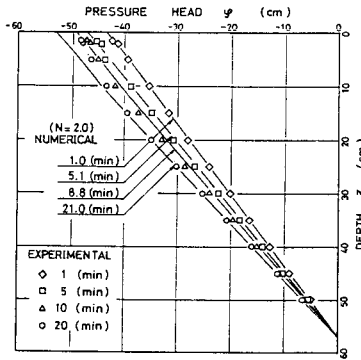


Fig.8 Comparison of numerical and experimental results for Botany sand of Watson(N=2)

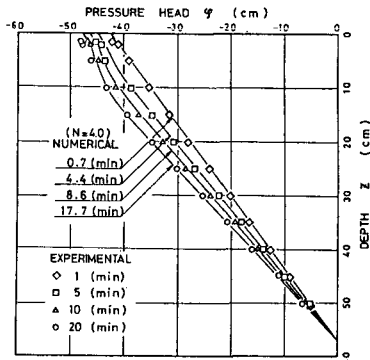


Fig.9 Comparison of numerical and experimental results for Botany sand of Watson(N=4)

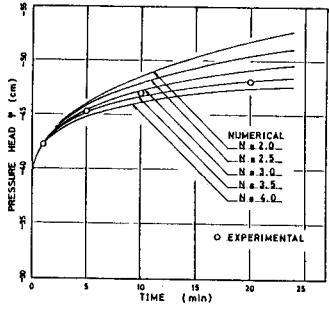


Fig.10 Change of pressure head with time during drainage for Botany sand of Watson