

# 非定常蒸発法を用いた不飽和浸透特性の推定方法の検討

東洋大学工学部環境建設学科 正会員 石田 哲朗  
 サンコーコンサルタント(株) 正会員 谷中 仁志

## 1 はじめに

室内での不飽和透水試験方法としては、定常法と非定常法の2種類があり、これまでに幾つかの方法が提案されている。しかしながら、現状では計測が長期にわたることや計測手法が複雑なことが実用に向けての課題として挙げられる。そこで、比較的短時間での計測が可能な非定常法に注目して、土質試料の蒸発現象に伴う非定常状態での水分量と圧力水頭の挙動から、逆解析により不飽和浸透特性を算定する方法を試みた。本報では、これまでに得た他の室内試験結果と比較を行いその適用性について検討すると同時に、試験方法についてもでき得る限り詳細に報告するよう心掛けた。

## 2 試験および解析の概要

試験に用いた非定常蒸発法(以下、蒸発法と記す)試験装置の概要を図1に示す。蒸発法の供試体は直径10cmφ、高さ12.7cmのモールドに試料を充填したもので、6.3mmφで長さ15mmのテンシオカップが試料上面から鉛直方向にそれぞれ2cm、4.5cmの位置に挿入されている。フィルターには予め脱気水を用いて飽和させた、透水性の大きいガラスフィルターを用いた。試験は、試料底面から毛管飽和させた後、装置を電子天秤の上にセットして、試料上面から20cm上方に設置した電球からの発熱による蒸発過程での水分量と圧力水頭の経時変化を計測するものである。ここで、試料からの蒸発を促進させる熱源としては、小型で軽量なため取扱いが容易なことや比較的光源が強いことから、一般電球のうち赤外電球(100W)を使用した。供試体上面付近での温度は概ね37程度である。計測に要した日数は1~2日間で、従来の方法に比べ非常に短時間での計測が可能となっている。また、試験に用いた標準砂と珪砂の物理特性を表1に示す。何れも殆ど乾燥状態にあるものを密度を3通りずつ変化させて試験を行っている。

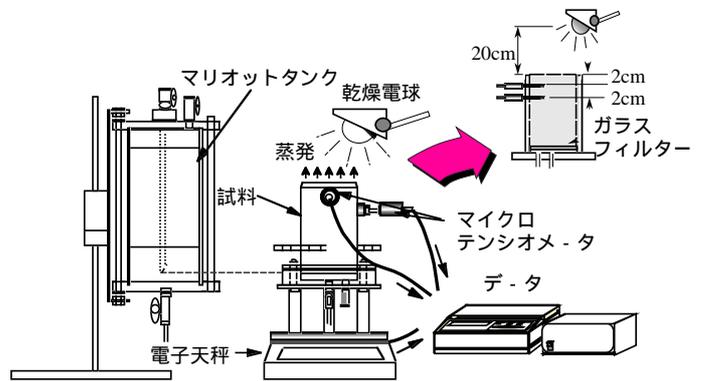


図1 試験装置の概要

試験結果は修正 Wind 法<sup>1)</sup>を用いて解析を行う。水分特性曲線は体積含水率( $\theta$ )に関する式(1)を用いて表される。

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

ここで、 $\theta_s$ :飽和水分量、 $\theta_r$ :最小含水量、 $h$ :圧力水頭、 $\alpha, n$ はパラメータであり、また $m=1-1/n$ である。これらは、不飽和浸透特性の関数モデルである Mualem-van Genuchten モデルのパラメータと等しく、非線形最小二乗法により最適化させ求めた。 $\alpha, n, \theta_s, \theta_r$ のパラメータは条件に応じて幾つかの数値を固定させて計算することが可能であり、逆解析により得られた結果を踏まえて、他の室内試験から得られたパラメータを用いるなどして様々なパターンで計算させている。

## 3 結果と考察

テンシオカップを挿入した2ヶ所での圧力水頭の経時変化について、計測した値に適合するように逆解析したものを図2に示す。全計測期間にわたって比較的良く近似しており、この結果から van Genuchten の不飽和浸透特性モデル(以下、VGモデルと記す)のパラメータである $\alpha, n, \theta_s, \theta_r$ が得られた。これらを用いて算出した不飽和浸透特性と既報<sup>2)</sup>で示した室内での不飽和透水試験やpF値からVGモデルを用いて不飽和浸透特性を同定した結果についてまとめた。ここでは、標準砂と珪砂についてそれぞれ1パターンずつ図3-a),b)に示す。また、表2に蒸発法で最適化させ最終的に得たパラメータとpF値の同定結果について各密度ごとに整理した。結果から、蒸発法の $\alpha$ は $0.017\text{cm}^{-1}$ 以下

表1 土質材料の物理特性

物理特性	標準砂	珪砂
土粒子の密度 $G_s$	2.632	2.629
自然含水比 $w_n$ (%)	0.3	0.1
均等係数 $U_c$	2.09	5.24
曲率係数 $U_c'$	1.08	1.92
細粒分含有率 (%)	4.0	9.7

Key Words : 室内試験、不飽和透水試験、不飽和浸透特性、逆解析法

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100 東洋大学工学部環境建設学科 Telephone / Telefax : 0492-39-1409

であり、いずれも pF 値から VG モデルを用いて同定した結果より小さめの値が得られた。これは、 $\alpha$  が限界毛管水頭の逆数であり、pF 値の同定結果に比べ毛管境界帯が上昇したことを示している。また、 $n$  では pF 値の同定結果に比べて大きめの値が得られた。したがって水分特性曲線の形状が異なるために、図3のように同じ水分量で比較した場合に比透水係数を大きく推定する傾向を見せている。

また、定常法や非定常による室内試験結果との比較した場合にも、 $\theta=0.2$  程度以上の水分領域において、定常法や非定常法から得られた実測値が蒸発法による推定結果とVGモデルの同定結果の中間付近に位置しており、やはり比透水係数を大きめに推定していることを確認した。

また、その差異は水分量が小さくなるほど顕著である。蒸発法から得られた実測値を逆解析し最適なパラメータを得るためには、それらの値を様々変化させて、検討する必要がある。つまり、他の試験から求めたパラメータでさえ、逆解析には固定値として限定できないように思われるのである。

#### 4 あとがき

非定常状態での計測を行う蒸発法は、その容易な操作性や計測が従来に比べ短時間で済む点で、有効な試験方法であることを確認した。また、得られた結果から浸透特性のパラメータである  $n$  が 4~7 と大きめの値を示すために、pF 値の同定結果に比べて比透水係数を大きく推定する傾向を見せた。これに関しては、解析に用いるパラメータを操作することで不飽和浸透特性を更に精度良く推定できるとも考えられる。今後はシルトやロームといった粘性土についても試験を行う予定であるが、粘性土での蒸発作用を促進する場合にはより光源を大きくする必要があるし、それに伴って高い熱源でも耐え得る水圧計測システムも必要となる。

つまり、電球やテンシオメータといった試験装置に関しても現状では検討の余地を数多く残しており、今後とも様々な土質材料について試験を行い、簡易試験方法の一つとして確立させたい。最後に、本研究の実験にあたっては、東洋大学の卒論生である横山博司君、中田誠一君らの御尽力を得た。心から感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) Wendroth, O., Ehlers, W., Hopmans, J. W., Kage, H. Halbertsma, J. & Wosten, J.H.M.: Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, pp.1436-1443, 1993
- 2) 谷中仁志, 石田哲朗: FDR を用いた不飽和透水試験方法の検討, 土木学会第 54 回年次学術講演概要集, -A287, pp.574-575, 1999

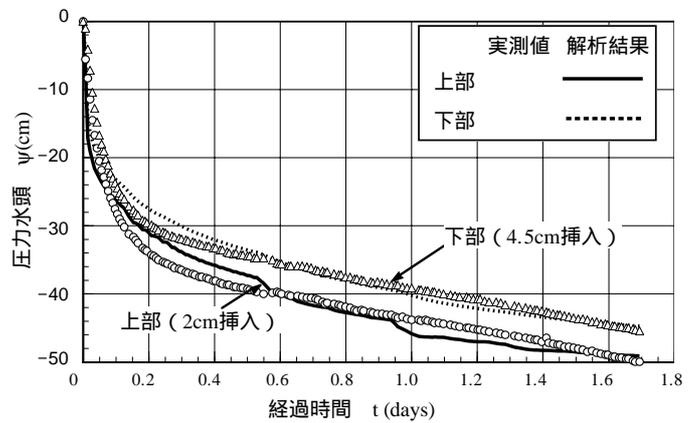


図2 圧力水頭の実測値と逆解析結果

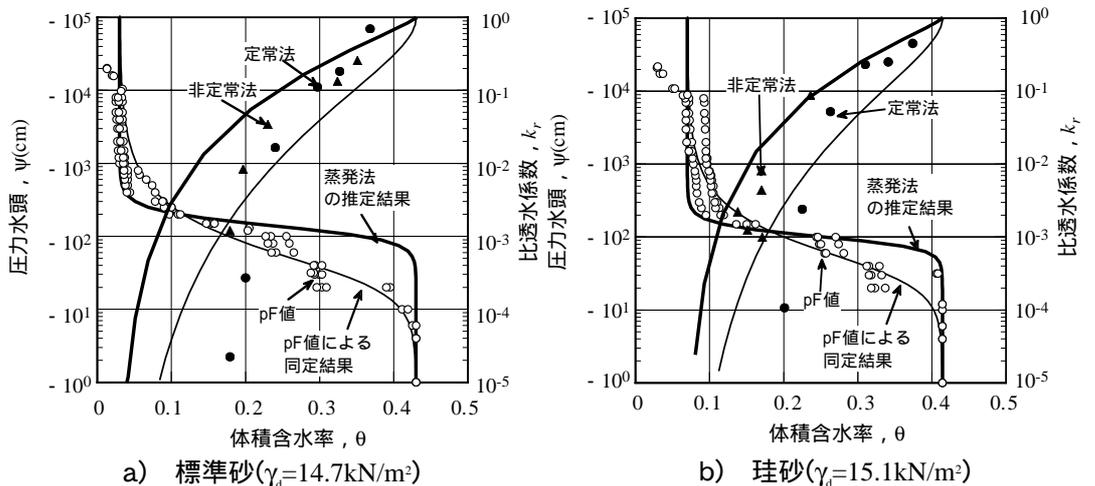


図3 不飽和浸透特性の比較

表2 VGモデルに用いるパラメータ

試料	$\gamma^d$ (kN/m <sup>3</sup> )	試験名	$\alpha$	$n$	$\theta_r$	$\theta_s$	$k_s$ (cm/sec)
標準砂	15.7	pF試験	0.015	2.15	0.020	0.392	2.83E-02
		蒸発法	0.009	5.22	0.070	0.392*	
	15.2	pF試験	0.022	1.87	0.020	0.411	3.73E-02
		蒸発法	0.006	4.18	0.020	0.411*	
14.7	pF試験	0.032	1.82	0.030	0.430	4.09E-02	
	蒸発法	0.008	4.53	0.030*	0.430*		
珪砂	15.7	pF試験	0.020	1.89	0.020	0.391	1.01E-02
		蒸発法	0.006	4.38	0.020*	0.391*	
	15.4	pF試験	0.026	1.81	0.050	0.403	1.23E-02
		蒸発法	0.017	5.51	0.050*	0.403*	
	15.1	pF試験	0.026	1.93	0.070	0.414	1.64E-02
		蒸発法	0.010	6.70	0.070*	0.414*	

固定した値 (他の室内試験から求めた値)