

土の保水性における乾燥曲線から浸潤曲線の推定

中部大学工学部 正会員 杉井 俊夫
 豊田(株) 石塚 正樹
 (株)内藤商会 川崎 徳久

1. はじめに

土の水分特性曲線には、排水・湿潤過程のヒステリシスがあることは知られているが、現在の湿潤過程の保水性を得るための試験法は排水過程に比べて時間がかかり、あまり行われていない現状にある。しかし、降雨などの土砂災害の対策を考える上で、排水過程よりも湿潤過程が主となる場合が多い。本研究は、排水曲線しかえられていない過去の実験データからも、他の物性を利用して湿潤曲線を推定することを試みた。

2. 水分特性曲線のヒステリシス

水分特性曲線は、図-1に示すような負の圧力水頭(サクション)と体積含水率との関係において、土粒子が形成する間隙のくびれや土粒子と水との接触角などが原因で、排水過程と湿潤過程でヒステリシスを生じる。近年、湿潤曲線の計測や体積変化を考慮した土の保水性試験が行われるようになってきたが、過去のデータなど、排水曲線の結果が殆んどであり、降雨や堤体への湿潤過程の正しい現象を把握する上でその使用には問題を生ずる。水分特性曲線を表す連続関数モデルとしてvan Genuchten(式(1))が多く用いられている¹⁾。

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

ここに、 Se :有効飽和度, θ :体積含水率, θ_s :飽和体積含水率, θ_r :残留体積含水率, ψ :圧力水頭, $n, m=1-1/n$:フィッティングパラメータである。パラメータ n は水分特性曲線の勾配、 $1/n$ は飽和した水が排水を始める、または、湿潤により空気が無くなる際のサクション水頭(空気侵入値)に強く関係あるとされている。水分特性曲線から不飽和透水係数を推定するのに用いられるMuallemの式に式(1)を用いると式(2)のようになる。

$$k_{wu} = k_{ws} Se^{0.5} \left\{ 1 - (1 - Se^{1/m})^m \right\}^2 \quad (2)$$

ここに、 k_{wu} :不飽和透水係数, k_{ws} :飽和透水係数, m は式(1)と同一のものである。体積含水率と不飽和透水係数の間にはヒステリシスが少ないことや、式(2)に含まれるパラメータは $m(n)$ のみとなるため、Muallem式とこの関係が正しいといえるならば、湿潤過程と排水過程での n は等しいと考えられる。これより、湿潤過程の k_{wu} を推定することができれば、排水過程の水分特性曲線から容易に湿潤過程の水分特性曲線を推定することが可能となる。表-1、図-2に過去の文献データ²⁾から推定したvan Genuchtenモデルのパラメータ推定結果を示す。これより、vGモデルによる水分特性曲線の勾配はどの土も、ほぼ同じになった。パラメータ n は水分特性曲線の勾配に関係があるとされていることから、湿潤過程と排水過程のパラメ

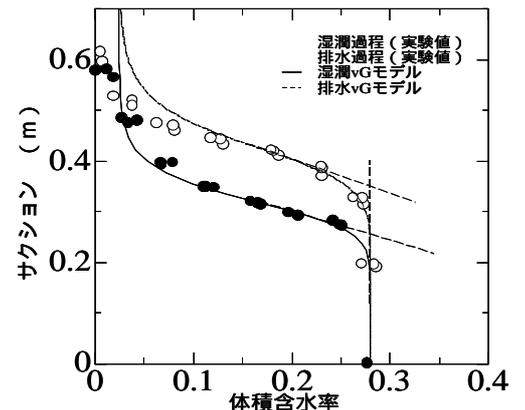


図-2 水分特性曲線
 (豊浦砂の実験値とvGモデル)

表-1 各土の推定結果

		(m^{-1})					(m^{-1})				
		n	r	s	n		r	s			
シルト	排水過程	1.4887	5.2549	0.1375	0.45	長良川砂1	排水過程	5.9829	4.8598	0.0167	0.3898
	湿潤過程	2.651	5.7989	0.1375	0.45		湿潤過程	9.6766	3.8525	0.0167	0.3898
豊浦砂	排水過程	2.3282	10.501	0.0238	0.2803	長良川砂2	排水過程	5.9173	8.0875	0.0092	0.4091
	湿潤過程	3.112	10.722	0.0238	0.2803		湿潤過程	9.5067	4.416	0.0092	0.4091
Dune sand	排水過程	2.9299	8.7537	0.0954	0.3009	長良川砂3	排水過程	6.5121	4.6172	0.003	0.4325
	湿潤過程	5.4011	4.4471	0.0954	0.3009		湿潤過程	11.4669	3.3779	0.003	0.4325

キーワード 水分特性曲線 ヒステリシス 湿潤過程 空気侵入値

連絡先 〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200 中部大学工学部都市建設工学科 TEL 0568-51-9562

ータ n は共通とみなしてよい。よって湿潤過程の α を推定できれば、湿潤曲線が推定される。

3. 空気侵入値に関する van Genuchten モデルのパラメータ

図 - 2 に示すように排水・湿潤過程の接線と s からの接線の交点のサクション値を空気侵入値として読む。この空気侵入値は $1/\alpha$ と強い関係があるとされている。そこで、まず空気侵入値と粒径の関係を土の毛管上昇高と粒径の関係（式(3)）として整理した。

$$h_c = \frac{C}{e \cdot D_{10}} \quad (3)$$

ここに h_c : 毛管上昇高、 e : 間隙比、 D_{10} : 有効径 (10%粒径)、 C : 係数である。この毛管上昇高を土の空気侵入値と考え、係数 C を求めることを試みた。次に、6 種類の砂の文献データから空気侵入値 cr と $1/eD_{10}$ の関係をプロットした結果、図 - 3 のように湿潤過程、排水過程において線形関係になることが分かる。したがって間隙比 e と有効径 D_{10} が分かれば湿潤過程、排水過程の空気侵入値 cr を推定することができる。また、 $1/\alpha$ は土の空気侵入値 cr に関するパラメータとされており、この関係を使って $1/\alpha$ が推定できないか両者の関係を調べた結果を図 - 4 に示す。

図 - 5 に示した手順で豊浦砂とシルトへの適用を試みた結果を表 - 2、表 - 3 に示す。表 - 3 の結果から豊浦砂の場合、湿潤過程の実験から得られた cr と推定した cr はほぼ一致したが、シルトについてはかなりのズレが生じた。その原因として図 - 4 の回帰範囲が砂であるために空気侵入値が小さく、シルトの空気侵入値まで含まれていないこと、水分特性曲線から得る場合の cr の精度などが挙げられる。

4. おわりに

水分特性曲線の関数モデルである Van Genuchten モデルのパラメータ n は排水過程、湿潤過程で共有できる可能性を得た。間隙比と有効径の積と空気侵入値の関係は、湿潤過程と排水過程で異なることがわかり、砂については間隙比と有効径から土の湿潤過程、排水過程の空気侵入値を推定することができる。また、van Genuchten モデルのパラメータ n と空気侵入値の関係は線形となることが得られ、空気侵入値から n が推定することができる。本方法をシルトなど砂以外の試料への適用については、さらに検討する必要があると考えられる。

【参考文献】

1) van Genuchten, M.Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.44, pp.892-898, 1980. 2) Kamiya, K. and Uno, T.: Grain size and void diameter distributions of sand, Unsaturated soils for Asia, pp.399-404, 2000.

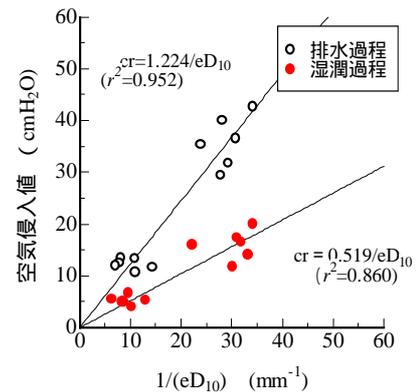


図 - 3 間隙比、有効径、空気侵入値の関係

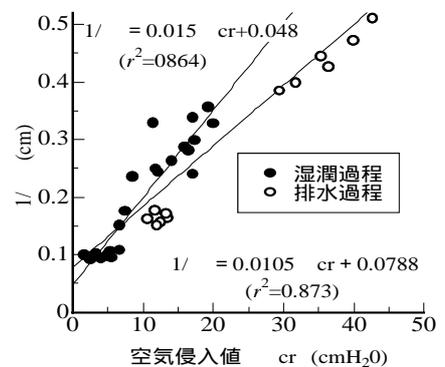


図 - 4 空気侵入値と $1/\alpha$ の関係

表 - 2 豊浦砂、シルトの排水過程のデータ

	r	s	n	e	$D_{10}(\text{mm})$	
豊浦砂	0.0238	0.28	10.501	2.3282	0.62	0.045
シルト	0.1375	0.45	5.2549	1.4487	0.818	0.002

表 - 3 の推定値と実験値（湿潤過程）の比較

	cr (推定値)	cr (推定値)	cr (実験値)
豊浦砂	18.6cm	3.06 (cm ⁻¹)	3.11 (cm ⁻¹)
シルト	317.2cm	4.65 (cm ⁻¹)	2.65 (cm ⁻¹)

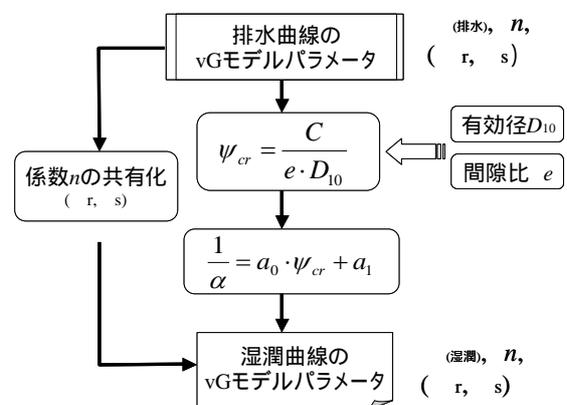


図 - 5 湿潤曲線の推定手順