排水試験による不飽和透水係数の推定

Estimation of Unsaturated Soil Hydraulic Conductivity by Drainage Experiment

中村公人*・堀野治彦*・三野 徹*

(京都大学大学院農学研究科)

Kimihito NAKAMURA・Haruhiko HORINO・Toru MITSUNO *Graduate School of Agricultural Science, Kyoto University*

The procedure for estimating unsaturated soil hydraulic conductivity K as a function of soil water pressure head by the inverse solution technique was presented. Parameter identification was performed using differences between measured and simulated changes in soil water pressure head. Measured soil water pressure head data were obtained from gravitational drainage experiments using a soil column about 1 m high. The experiments were carried out for Toyoura standard sand and Soma silica sand. The median particle size were 0.2 mm and 0.8 mm respectively. Measured soil water pressure head and numerical results using optimized parameters determined from drainage experiments agreed well. It is clear that the method presented in this report is effective for estimating K for fine sand, and further more, for estimating K for coarse sand which is often unmeasurable by steady state method.

Key words: Unsaturated hydraulic conductivity, Drainage experiment, Parameter identification

逆解析によって圧力水頭を変数とする土壌の不飽和透水係数を推定する方法を示した。パラメータ同定は、圧力水頭の実測値と計算値の差をもとに行った。ここでは、高さ約1mの土壌カラムを用いた重力排水試験から圧力水頭を測定した。実験は、豊浦標準砂(中央粒径:0.2mm)と相馬珪砂(中央粒径:0.8mm)について行った。排水試験から同定されたパラメータを用いて計算した圧力水頭変化と実測値は、両砂ともよく一致した。本方法は、粒径の小さな土壌だけでなく、定常法で測定不可能な粒径の大きい土壌に対しても、その不飽和透水係数を有効に推定できることがわかった。

キーワード: 不飽和透水係数, 排水試験, パラメータ同定

I. はじめに

不飽和土壌中の水分移動現象を解析する際には、土壌水分特性(土壌水分特性曲線と不飽和透水係数)の適切な定式化が不可欠となる。とくに、これらは水分量や圧力水頭に対して非線形に変化するため、どのような定式化を行うかということが、現象の解析結果に大きく影響する。土壌水分特性曲線については、砂柱法、吸引法、加圧板法、蒸気圧法など、異なる土壌水分領域に対して適切な測定法が確立され

ているが、不飽和透水係数の測定法は、ある程度確立されてきたものの、現在においても様々な方法が提案されている段階にある。

不飽和透水係数の精度良い測定法として、定常法(塩沢, 1983)が挙げられるが、粒径の大きな土壌や低水分量の土壌に対しては、直ちに実験系内に空気混入するため、正しい測定値を得ることができない。また、この方法は、時間と労力を要し、正確な測定値を得ること自体が非常に困難である。

最近では、計算機の発達に伴って、one-step out-

*京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

Graduate School of Agricultural Science, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

flow methodやmulti-step outflow methodに代表されるような、土壌水分特性がいくつかのパラメータをもつモデル式で表されると仮定し、非定常水分移動現象から逆解析によって、そのパラメータを同定する方法が注目されている(例えば, Eching and Hopmans, 1993; Eching *et al.*, 1994; Wildenschild *et al.*, 1997)。

本研究では、均質土壌カラムを用いた重力排水試験を行い、上述法のようなモデル式を利用したパラメータ同定による土壌の不飽和透水係数の推定を試みた。ここでは、とくに、比較的粒径の大きな砂の不飽和透水係数が適切に得られるか否かを中心に検討した。

II. 推定方法

1. 支配方程式

飽和-不飽和土壌中の水分移動方程式は、以下のRichards式で表される。

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

ここで、 θ は体積含水率 [m^3m^{-3}]、 ψ は圧力水頭 [mH_2O]、 K は不飽和透水係数 [mh^{-1}]、 t は時間 [h]、 z は鉛直座標 [m] である。

2. 土壌水分特性曲線

土壌水分特性曲線は、吸引法で別途測定し、測定値を以下のvan Genuchten(1980)のモデル式で補間した。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (-\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (2)$$

θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残余体積含水率である。ここでは、 θ_s を間隙率、 θ_r を風乾での体積含水率とした。パラメータ α 、 n 、 m をPowellの共役勾配法(目的関数： χ^2 -基準)で同定した。ここでは、 n 、 m を独立なパラメータとしている。

3. 不飽和透水係数

後述する本研究の推定法は、一種のone-step outflow methodである。この方法で用いられる不飽和透水係数のモデル式には、Brooks and Corey式やGardner式よりも、van Genuchten式が適切であることが示されている(Russo, 1988)。したがって、不飽和透水係数は、以下のvan Genuchten(1986)のモデル式で定式化されると仮定した。

$$K(\psi) = K_s \left[1 - (-\alpha\psi)^{1-1/n} \right] \left[1 + (-\alpha\psi)^{1-1/n} \right]^2 \cdot \left[1 + (-\alpha\psi)^{1-1/n} \right]^{-m/2} \quad (3)$$

K_s は飽和透水係数である。ここでのパラメータ n 、 m の間には、 $m = 1 - 1/n$ という関係が存在する。

4. 実験方法

内径28.6cm、高さ101.5cmの土壌カラム(Fig. 1)に水を張り、土壌を少しずつ沈降させて突き棒で締固め、試料が均一になるように充填させた。その後、完全飽和の状態から地下水位をある深さに設定して、自然状態で重力排水させた。カラム上下端に25℃の定温水を循環させ、約25℃の恒温室で実験を行うことにより、カラム内の温度はほぼ25℃で均一に保たれた。排水開始直後から深さ90.5、70.5、50.5、30.5、10.5cmの計5点での圧力水頭をテンシオメータで測定した。測定間隔は、排水開始後1時間は1分、1～3時間では5分とし、その後は順次時間間隔を大きくした。また、スタンドパイプに取り付けられた排水口からの排水量も併せて測定した。

土壌試料には、豊浦標準砂と相馬硅砂を用いた。それぞれの特性をTable 1に示す。試料の飽和透水係数は変水位法(豊浦標準砂)と定水位法(相馬硅砂)で測定した。

実験では、豊浦標準砂の場合は、地下水位を深さ

Fig. 1 Schematic diagram of soil column

Table 1 Properties of used soils

	Density of soil particles (g cm ⁻³)	Median particle size (mm)	Saturated hydraulic conductivity at 23°C (cm s ⁻¹)	Dry bulk density (g cm ⁻³)
Toyoura standard sand	2.64	0.2	1.6×10^{-2}	1.55
Soma silica sand	2.64	0.8	1.5×10^{-1}	1.53

79cmに設定し、相馬珪砂の場合には深さ90cmに設定した。

5. 計算方法

支配方程式(1)を有限要素法(Galerkin法)で解析するプログラムにPowellの共役勾配法(堀野, 1992)による最適化ルーチンを組み込んで、不飽和透水係数のモデル式(3)中のパラメータ α , n を同定した。目的関数は、圧力水頭値がほぼ定常状態に達するまで、つまり、豊浦標準砂の場合、排水開始から3時間まで、相馬珪砂の場合には排水開始から30分までの深さ70.5, 50.5, 30.5cmでの圧力水頭の実測値と計算値の2乗誤差とした。ここで、カラムからの排水量を目的関数に加えることは、水がカラムからスタンドパイプを通して排水口へと流れる際に損失水頭が存在することが予想されるため適切でないと考えた。

なお、比水分容量には式(2)を微分したものを用いた。有限要素法による解析では、深さ方向に線形補間した初期圧力水頭値を初期条件とし、深さ10.5, 90.5cmの圧力水頭値の経時変化をそれぞれ上下端境界条件とした。解析は、節点数161, 節点間隔0.5cm, 時間間隔5秒で行い、土壌水分特性曲線と不飽和透水係数の強い非線形性に対してはPicardの反復解法を用いて対処した。

Ⅲ. 結果と考察

上記の方法から得られた不飽和透水係数をFig. 2中の曲線①に示す。この結果の比較対象として図中に曲線②, ③を示した。曲線②は、ドット(●, ○)で示した脱水過程での定常法(大起理化学DIK-4160)による測定値に合うように式(3)のパラメータ α , n をPowell法で同定した結果得られた補間式である。曲線③は、 $m = 1 - 1/n$ という条件の下に土壌水分特性曲線の測定値から同定したパラメータ α ,

Fig. 2 Unsaturated hydraulic conductivity curves at 20°C. Refer to Table 2 for ①, ②, ③.

Table 2 Parameters of van Genuchten's equations for soil hydraulic properties optimized by Powell method. ①, ②, ③ represent parameters of unsaturated hydraulic conductivity curves. ① are optimized from drainage experiments, ② are interpolated from measured data by steady state method, and ③ are parameters of soil water retention curves under $m = 1 - 1/n$. "pF curve" represents parameters of soil water retention curve.

		α	n	m	θ_r	θ_s
Toyourea standard sand	pF curve	0.0247	10.0	0.432	0.399	0.001
	①	0.0269	7.01	1-1/n	"	"
	②	0.0283	5.40	1-1/n	"	"
	③	0.0222	6.71	1-1/n	"	"
Soma silica sand	pF curve	0.0916	5.63	0.472	0.401	0.003
	①	0.0773	7.46	1-1/n	"	"
	②	0.199	2.83	1-1/n	"	"
	③	0.0781	4.36	1-1/n	"	"

n を式(3)にそのまま当てはめたものである。それぞれのケースにおけるパラメータ値をTable 2に示す。表中の「pF curve」は、上記の推定法での計算に用いた土壌水分特性曲線のモデル式(2)のパラメータを表す。

Fig. 3 Measured and calculated changes in pressure head for Toyoura standard sand column. Refer to Table 2 for ①, ②, ③.

①, ②, ③の不飽和透水係数の式のうち、どれが有効であるかを考察するために、各ケースの不飽和透水係数を用いて、同定に使用した排水試験における水分移動解析(有限要素法)をそれぞれ行った。得られた圧力水頭の経時変化を両砂についてそれぞれ Figs. 3, 4 に示す。また、カラム深さ70.5, 50.5, 30.5cmでの排水開始から24時間後までの圧力水頭の実測値と計算値の平方平均2乗誤差(root mean square error)をTable 3 に示す。

相馬珪砂の定常法による測定値(Fig. 2 中の○)をみると、値自体がばらついており、豊浦標準砂に比べて測定信頼性は非常に低い。この測定値の補間

Fig. 4 Measured and calculated changes in pressure head for Soma silica sand column. Refer to Table 2 for ①, ②, ③.

式を用いた場合(②)は明らかに圧力水頭の実測値が再現されていない(Fig. 4 ②)。また、詳細にみると、Table 3 より、豊浦標準砂の場合、土壌水分特性曲線のパラメータ値をそのまま用いたとき(③)に、誤差が他のケースと比較して大きい。上記以外の場合は、ほぼ実測値と計算値は適合しているが、相馬珪砂の場合に土壌水分特性曲線のパラメータ値をそのまま用いたとき(③)の誤差が最も小さいものの、両砂とも、排水試験から同定されたモデル式を用いたとき(①)に、実測値との適合性が良好となっている。

以上から、定常法では適切な測定値が得られない相馬珪砂においても、排水試験からの推定法によって不飽和透水係数の有効な定式化が可能であること

Table 3 Root mean square errors [cmH₂O] between measured and calculated pressure heads at various depths during 24 hours from the start of experiments. "Total" means values for all data at 70.5, 50.5 and 30.5cm depth. Refer to Table 2 for ①, ②, ③.

	Depth	①	②	③
Toyoura standard sand	70.5cm	2.34	2.49	2.86
	50.5cm	2.82	2.96	3.61
	30.5cm	2.77	3.18	3.14
	Total	2.65	2.89	3.22
Soma silica sand	70.5cm	0.454	7.50	0.635
	50.5cm	1.31	8.34	0.883
	30.5cm	0.507	6.74	0.664
	Total	0.853	7.56	0.736

が明らかになった。

IV. おわりに

ここで示した方法では、ある程度の土壌カラムの高さが求められるが、重力排水を行い、圧力水頭値を測定するという簡単な方法によって、比較的粒径が大きな土壌の不飽和透水係数も推定することができることがわかった。圧力水頭の測定点を増やしたり、土壌によっては土壌カラムの高さをさらに大きくすることにより、より広い水分量域で信頼性のある推定が可能となると考えられる。しかし、ここで示したような砂土の場合、100cmH₂O程度の吸引圧以上の不飽和透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{ cm s}^{-1}$ 以下に低下するため、液状水の移動量自体が極めて小さくなる。よって、一般的な土壌水分移動を取り扱う上では、吸引圧がおおよそ100cmH₂O以下の水分量域での不飽和透水係数を精度よく得ることが肝要であり、本方法は実用上その期待に応えられるものと思われる。

引用文献

- 1) Eching, S.O. and J.W. Hopmans(1993) : Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data, Soil Sci. Soc. Am. J., 57, pp.1167-1175.
- 2) Eching, S.O., J.W. Hopmans, and O. Wendroth (1994) : Unsaturated hydraulic conductivity from transient multistep outflow and soil water pressure data, Soil Sci. Soc. Am. J., 58, pp.687-695.
- 3) Russo, D. (1988) : Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties, Water Resour. Res., 24, pp.453-459.
- 4) van Genuchten, M. Th. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898.
- 5) Wildenschild, D., K.H. Jensen, K.J. Hollenbeck, T.H. Illangasekare, D. Znidarcic, T. Sonnenborg, and M.B. Butts(1997) : A two-stage procedure for determining unsaturated hydraulic characteristics using a syringe pump and outflow observations, Soil Sci. Soc. Am. J., 61, pp.347-359.
- 6) 塩沢 昌(1983) : 定常法による不飽和透水係数の測定方法と精度について, 農土論集, 106, pp.73-79.
- 7) 堀野治彦(1992) : 地下水数値計算法(5)3-2. パウエル法によるパラメータ同定問題, 地下水学会誌, 34, pp.31-40.

(受付:1997年11月5日, 受理:1997年12月25日)