

II-27

土性データによる火山灰土壌の透水係数

北海道開発局開発土木研究所 正員 秀島 好昭
 北海道開発局開発土木研究所 沖田 良隆

1. まえがき

土壌の水分特性曲線やコンダクティビティを土性データから予測する研究は、近年まで多く行なわれている。これらでは、粒度分布等の物理的データから土壌の間隙径分布を推定するものであって、この粒径分布と間隙径分布の推定に難があることを一つの理由に、かならずしも適合性の良い関係式は得られていない。そのため、近年では軟X線を用いた空隙分布の直接的な測定事例や空隙分布の確率論的解析やその保水性の研究(中尾ら、1992, 1995)など報じられている。前述のように土性データから水理的特性を推定する方法は確立したものではないが、水理的特性の推定に役にたつ土性図(Shirazi and Boersma, 1984)や飽和・不飽和透水係数モデル(Campbell, 1974)が報じられており、著者らの計測した内容とこれら成果との比較を行なった。

2. 試料および計測概要

網走市近郊の小清水の畑地の2地点において深さ1.5mまで試抗し、土壌断面調査と理化学性および土壌水分張力～水分曲線等の測定用不攪乱試料を採取した。試料採取は、各層序ごとに行なったが、表層の耕作土(腐植含量の大きさや土壌硬度から判断できる)を除いた、下層の成層火山灰土壌の透水性について報告する。

約30cmの耕作土を除いた下層は、カムイヌプリ岳の火山放出物、斜里ローム層(軽石混入)、粘質火山灰層(腐朽軽石を含む)等からなるが、調査地は火山放出後の二次作用(水積、風積)が伴った場所であることから、層位の配列や層界が不明瞭な点もある。したがって、試料を当地に産する火山灰土壌と一括して取扱った。計測項目および計測法はつぎのとおりであり、物理性・力学的概要を表1, 2に示した。

真比重、容積重、三相比：実容積法。pF-水分曲線：砂柱法(pF1.0まで)および遠心法(pF1.8~4.2)。

粒径組成：比重計法および篩分け法。飽和透水係数：定水位法および変水位法。不飽和透水係数：リチャードの定常法。^{5), 6)}

表1 土壌の物理性、力学的性

地点	試料番号	層名	深さ cm	土性	容積重 g/cm ³	3相比(Vol%)			真比重	孔隙率 (Vol%)	粒径組成(%) ^{a)}				USDA粒径区分(%) ^{a), b)}				(*)
						粗砂	細砂	粘土			粗砂	細砂	粘土	粗砂	シルト	粘土	名称		
A	A1	B	32-55	L	0.799	30.9	58.0	11.2	2.59	69.1	12.7	37.6	36.9	12.8	35.5	51.7	12.8	シルトローム	2000~
	A2	B	32-55	L	0.857	32.1	53.0	14.9	2.67	67.9	12.7	37.6	36.9	12.8	35.5	51.7	12.8	シルトローム	200 _f
	A3	C3	76-100	L	1.107	40.6	49.0	10.4	2.65	59.4	25.1	32.3	32.0	10.6	45.0	44.4	10.6	ローム	200~
	A4	C4	100-115	CL	1.140	42.1	43.2	14.7	2.71	57.9	12.3	35.2	35.2	17.1	33.7	49.2	17.1	ローム	20 _f
	A5	C6	125-158	L	0.834	31.4	53.3	15.3	2.65	68.9	33.7	24.9	29.2	12.0	49.0	39.0	12.0	砂質ローム	20 _f
B	B1	C	32-41	LS	0.987	39.8	33.5	26.7	2.48	60.2	41.8	45.5	5.7	7.0	69.0	24.0	7.0	砂質ローム	2 _f
	B2	A	41-52	SL	0.983	38.8	36.2	25.0	2.53	61.2	25.1	43.3	19.8	11.8	51.0	37.2	11.8	砂質ローム	粘土
	B3	C2	74-86	sicL	0.883	32.7	50.5	16.8	2.70	67.3	5.2	25.7	49.2	20.1	20.2	59.7	20.1	シルトローム	2 _f 以下
	B4	C4	100-125	CL	0.828	30.0	51.9	18.1	2.76	70.0	9.0	33.4	39.5	18.1	29.0	52.9	18.1	シルトローム	

**： USDA区分、 ϕ 0.05 \leq d<2.0mm, ψ ϕ 0.002 \leq d<0.05mm, 粘土 d<0.002mm

Unsaturated Conductivity of Volcanic Ash Soil from Soil Texture Data
 by Yoshiaki HIDEISHIMA and Yoshitaka OKITA

3. 試料の粒径分布、水分特性曲線、透水係数

1) 粒径分布

USDAの分類では、粒径によって土性が分類されている(表1の註記参照)。前述のShiraziらは、土の粒径分布が対数正規分布で近似できるものとし、砂・シルト・粘土が混合した土を粒径の対数平均(d_g)と対数標準偏差(σ_g)で表すものへと改良を行なった。各 d_g, σ_g は次のようである。

$$d_g = \exp(a_1), \quad \sigma_g = \exp(a_2) \dots\dots (1)$$

ここに、 $a_1 = \sum f_i \ln d_i$, $a_2 = [\sum f_i (\ln d_i)^2 - a_1^2]^{1/2}$

f_i : 組成 i の質量分率、 d_i : 組成 i の直径の算術平均であり、 $d_{0.001} = 0.001\text{mm}$,

$d_{0.075} = 0.075\text{mm}$, $d_{2.0} = 2.0\text{mm}$ が用いられる。

本報の試料は、USDA分類では表1のように、砂質ローム、ロームおよびシルト質ロームに分類される。

2) 組成分率と飽和透水係数

Campbellは、試料中のシルトおよび粘土の質量分率を使って、以下の(2)式のように飽和透水係数(k_s)を推定する方法を提案している。

$$k_s = 2 \times 10^{-3} \exp[-4.26(f_s + f_c)] \dots\dots (2)$$

ここに、 f_s, f_c : それぞれシルトと粘土の質量分率、透水係数の単位は $\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ である。

(2)式は、土の密度と飽和透水係数の関係を組入れたものではないが、試料の粒径分布を(2)式に代入してみると、砂質ローム、シルトロームおよびロームの飽和透水係数の推定値は表2のように、代表的な土性の飽和透水係数に符合している。既往の知見との符合が良いことから、 k_s は両者の含量に強く支配されると推察する。一方、計測した値と(2)式による推定値を比較すると、表2のように計測した透水係数の方が大きく、その倍率は平均値で15倍となる。堆積した火山

表2 シルト・粘土含量から推定した飽和透水係数(k_s)および計測した飽和透水係数($k_{s\dots}$) [単位: $\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$]

土性	試料番号	k_s	平均値	Campbell(1982)の k_s の要約	$k_{s\dots}$	$k_{s\dots} / k_s$
砂質ローム	A 5	0.23×10^{-3}	0.30×10^{-3}	0.45×10^{-3}	0.57×10^{-3}	2.5
	B 1	0.53×10^{-3}			8.5×10^{-3}	1.6
	B 2	0.12×10^{-3}			5.8×10^{-3}	48
シルトローム	A 1	0.13×10^{-3}	0.11×10^{-3}	0.07×10^{-3}	7.8×10^{-3}	—
	A 2	0.13×10^{-3}			4.8×10^{-3}	37
	B 3	0.067×10^{-3}			0.49×10^{-3}	7.3
	B 4	0.097×10^{-3}			0.37×10^{-3}	3.8
ローム	A 3	0.19×10^{-3}	0.16×10^{-3}	0.17×10^{-3}	0.85×10^{-3}	4.5
	A 4	0.12×10^{-3}			0.63×10^{-3}	—
					平均	15

灰は、一般的な土に比べて、乾燥密度が極端に小さく、また、空隙構造も異なるものと考えられる。火山灰土壌の飽和透水係数がシルトと粘土含量に影響され、また、(2)式の形式が当てはまるとすれば、(2)式の経験式が導かれる。

$$k_s = 3.0 \times 10^{-2} \exp[-4.26(f_s + f_c)] \dots (2')$$

ここに、後述のように試料A1, A4は除いて経験式を求めた。

3) 粒径分布とポテンシャル

不飽和透水係数(k)は、水分量(θ)の関数として(3)式のように表される。

$$k = k_s (\theta / \theta_s)^M \dots\dots (3)$$

ここに、 θ_s : 飽和時の体積含水率、 M : 乗数

また同時に、マトリックスポテンシャル(ψ_m)が空気侵入ポテンシャル(ψ_a)より小さい領域では、水分特性曲線は(4)式のように表される。

$$\psi_m = \psi_a (\theta / \theta_s)^{-b} \dots\dots (4)$$

両式を組合わせて、(5)式が得られる。

$$k/k_s = (\phi_e/\phi_m)^N \dots (5)$$

ここに、b, N:それぞれ乗数

(5)式から、測定した不飽和と飽和の透水係数の比およびポテンシャルを両対数軸上におとせば、その回帰直線の切片と傾きから、それぞれ空気侵入ポテンシャルと乗数Nが実験定数として求まる。表3は、この方法から算定した ϕ_e の一覧である。

表3 空気侵入ポテンシャルの計算

試料番号	ϕ_e (J/kg)
A1	-0.45
A2	-0.64
A3	-0.78
A4	-0.45
A5	-0.82
B1	-0.58
B2	-0.58
B3	-0.90
B4	-1.16

一方、空気侵入ポテンシャルと前項の土粒子の幾何平均 d_g とは、(6)式の形式を採る近似関係式が提案されている。

$$\phi_e = k_1 \cdot d_g^{k_2} \dots (6)$$

ここに、 k_1, k_2 :定数で、乾燥密度 $1.3\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ の土に対して、

$$\phi_e = -0.5 d_g^{-0.5}$$
 の近似関係が報じられている。

表3の計算した ϕ_e と各試料の d_g の散布は図1のとおりであり、近似式として(7)式が得られる。

$$\phi_e = -0.46 \cdot d_g^{-0.18} \dots (7)$$

(相関係数:0.73)

(7)式の近似関係式を使って、粒径分布から当火山灰土壌の空気侵入ポテンシャルをあらかじめ類推することができる。

4) 各実験定数の関係

前項までの乗数M、定数b間について、 $M=2b+3$ の関係が実験上また理論的にも導かれている。前(3)式にしたがい、測定した飽和・不飽和透水係数またそのときの水分含量のデータから乗数Mを求め、また、先の関係から定数bを求めると表4のとおりである。一方、定数bについては前述の σ_g 等を使った(8)式の形式を採る近似関係式が提案されている。

$$b = k_3 \cdot \phi_e + k_4 \cdot \sigma_g \dots (8)$$

ここに、 k_3, k_4 :定数で、乾燥密度 $1.3\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ の土に対して、

$$b = -2\phi_e + 0.2\sigma_g$$
 の近似関係が報じられている。

ここで、試料の d_g を使って(7)式の実験式から ϕ_e を定め、bと σ_g の関係を回帰すると、(8)式の形式で(9)式の近似関係式が得られる(試料A1, A4は除いた)。

$$b = -2.8\phi_e + 0.59\sigma_g \dots (9)$$

(相関係数:0.6)

すなわち、粒径分布からbがおおよそ推定できることになる。

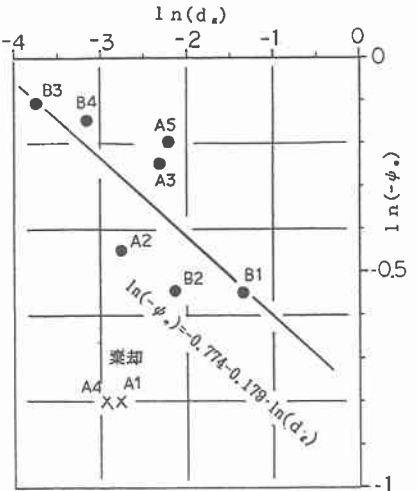


図1 粒径の幾何平均値と空気侵入ポテンシャル

4. 粒径分布からの透水係数の推定

前項までの整理から、粒径分布を使って透水係数をおおよそ推定する図2の方法が考えられる。前出の(3)式は、bを使って(10)式のように書き改められことから、粒径分布から水分量に応じた透水係数の変化が推察できる。

$$k = k_s (\theta/\theta_s)^{2b+3} \dots (10)$$

図3は粒径分布から推定した水分量～透水係数の関係と実測値を対比したもので、両者には符合がみられる。計算誤差が大きいものでも、透水係数でおおよそ5倍以内($0.5 \times 10^1 \text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$)であり、また、不飽和(θ/θ_s)にともなう透水係数の低減(勾配)もおおよそ再現できている。

表4 透水試験から求めたMとb

試料番号	M	b
A1	36.9	2.18
A2	20.0	2.35
A3	22.7	2.31
A4	14.7	2.51
A5	11.6	2.70
B1	18.3	2.39
B2	14.5	2.52
B3	18.6	2.39
B4	13.1	2.59

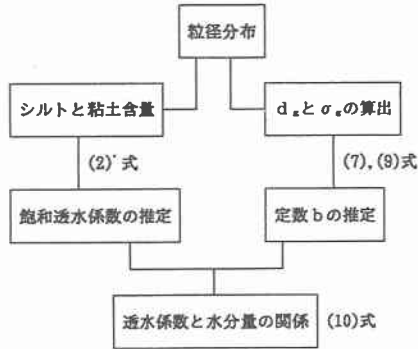


図2 粒径分布から透水係数を推察するフロー

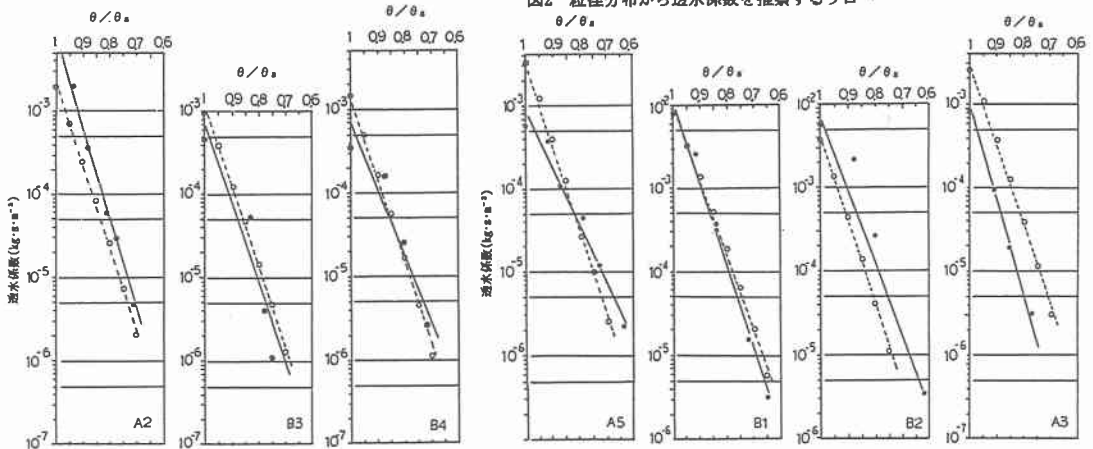


図3 透水係数の計測値と計算値との比較

【●—●:計測値、○—○:計算値】

5. あとがき

本報では、火山灰土壌の透水係数と粒径分布の関係を実験的に求めたものであり、とりあげた試料では、粒径分布などの土性から透水係数が推算できることを示した。ただし、以下の事柄、

①北海道には、多くの噴出源の異なる火山灰が産することから、それらについても 土性と透水係数の関係を明らかにすることが必要である。

②火山灰の密度(堆積)が与える透水性への効果が不明な点。

③既説の理論モデルとのすりあわせが必要な点

これらは今後の課題として調査・研究を進めたい。

参考文献

- 1)Campbell GS(1974):A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Sci. 117, pp311-314
- 2)中尾隆志・藤田睦博(1992):等球粒子モデルをもちいた不飽和浸透流の微視的解析、土木学会北海道支部論文報告集第48号、pp569-574
- 3)中尾隆志・藤田睦博(1995):等球径土粒子の空隙分布の確率論的解析、土木学会北海道支部論文報告集第51号、pp10-13
- 4)Shirazi MA, Boersma L(1984):A unifying quantitative analysis of soil texture, Soil Sci. Soc. Am. J. 48 pp142-147
- 5)土壌標準分析・測定法(1986):土壌標準分析・測定法委員会編、pp10-22, 36-42, 54-59
- 6)土壌物理性測定法(1972):土壌物理性測定法委員会編、pp191-197