

混合土における不飽和透水係数の測定

—— 湿 潤 過 程 ——

三輪晃一・難波直彦・若松千秋

(生産環境工学講座)

平成2年8月10日 受理

Measurement of Unsaturated Hydraulic Conductivity of Mixed Soil — Wetting Process —

Koichi MIWA, Naohiko NANBA and Chiaki WAKAMATSU
(Laboratory of Water Control and Reclamation Engineering)

結 言

一般に土層は地下水面以下でない限り不飽和の状態に置かれる場合が多く、その程度によっては砂層よりも粘土層で水の流れが持続する。このために粘土層の下に砂層が存在する場合、砂層は水の流れを促進するところか、それが飽和してサクシオンが低下しない限り逆に水の流れを妨げる。本論文ではこのような現象がクロボク土とシラスを母材料とした混合土においても発生することに着目した。

このような不飽和状態における土中水の流れにもいろいろの形態があって、それぞれの水の流れに対応した運動理論が示されている⁷⁾。ここでは一様不飽和流を対象とし、重力項が無視できる水平一次元流で、しかも湿潤過程のみを取り扱うことにする。その理由は黒田ら⁴⁾によって簡単な非定常用測定装置が考案されていること、その方法が広範囲な水分領域に適用できることおよび土層のサクシオン値と透水係数の関係が得られることである。

測定方法と結果

1. 理論的根拠

一次元水平流の基本式は(1)式で与えられる。

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

(1)式で θ は体積含水率 (cm^3/cm^3)、 t は経過時間 (sec)、 x は水平距離 (cm)、 $k(\psi)$ はサクシオン水頭 ψ (cm)の関数として与えられる透水係数 (cm/sec)である。 ψ は θ の関数であるので $k(\psi)$ を $k(\theta)$ と書き換えて、不飽和流の実験的取り扱いを単純化するために(2)式を導入する。

$$K(\theta) = D(\theta) \left[\frac{1}{d\psi/d\theta} \right] \quad (2)$$

(2)式において $k(\theta)$ は θ を関数とした透水係数 (cm/sec)、 $D(\theta)$ は土の水分拡散係数 (cm^2/sec)である。(2)式を用いて(1)式を書きなおすと(3)式を得る。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (3)$$

さらに(3)式にBoltzmann変換を行うと(4)式の常微分方程式が得られる。

$$-\frac{B}{2} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{d\theta} \left[D(\theta) \frac{d\theta}{dB} \right] \quad (4)$$

ただし

$$B = xt^{-1} \quad (5)$$

(6)式で与えられる初期条件と境界条件のもとで(4)式を解くと(7)式を得る。

$$\left. \begin{aligned} t=0 (B=\infty) : \theta &= \theta_i (\text{初期体積含水率}) \\ x=0 (B=0) : \theta &= \theta_s (\text{飽和体積含水率}) \\ x=\infty (B=\infty) : d\theta/dB &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$D(\theta_x) = -\frac{1}{2} \left(\frac{dB}{d\theta} \right)_{\theta_x} \int_{\theta_i}^{\theta_x} B d\theta \quad (7)$$

任意の時間 $t = t_1$ について(5)式から

$$B_1 = x_1 = xt^{-1}, \quad dB_1 = t^{-1} dx$$

となり、(7)式は(8)式になる。

$$D(\theta_x) = -\frac{1}{2t^1} \left(\frac{dx}{d\theta} \right)_{\theta_x} \int_{\theta_i}^{\theta_x} x d\theta \quad (8)$$

(2)式において $D(\theta)$ と $d\psi/d\theta$ が与えられれば、 $K(\theta)$ すなわち不飽和透水係数が任意の θ に対して求まる。したがって実験は(8)式によって $D(\theta)$ と θ の関係を求めること、および ψ と θ の関係すなわち土の水分特性

曲線を求めるために実施した。

2. 土質材料

母材料はクロボク土とシラスである。クロボク土は団粒構造の発達した有機質の火山灰質粘性土である。一方シラスは火砕流堆積物の非熔結部で、主に火山ガラスと軽石粒子で構成された砂質土である。混合試料は風乾した母材料の2mmフルイ通過分を質量比で混合した。4種類の混合試料のシラス混入率Mは、クロボク土とシラスの炉乾燥質量を m_k 、 m_s として(9)式で求めた。

$$M = 100m_s / (m_k + m_s) (\%) \quad (9)$$

Table 1. Physical properties of mixed soils

Shirasu-mix ratio M (%)	Specific gravity Gs	Water content W (%)	Liquid limit WL (%)	Plastic limit WP (%)	Sand fraction (%)	Silt fraction (%)	Clay fraction (%)
0	2.280	23.30	123	93	48	32	20
25	2.315	18.59	101	74	58	29	13
45	2.375	12.53	72	—	64	26	10
62	2.384	7.42	—	—	69	23	8
83	2.403	4.78	—	—	78	15	7
100	2.402	0.44	—	—	80	13	7

土はシルト分と粘土分の和が40%以上で粘性土、20%以下で砂質土に区分される⁵⁾。Table 1の粒度組成から混合土を分類すれば、シラス混入率が25%以下で粘性土、80%以上で砂質土になる。また塑性指数が10-30の土は粘性土と砂質土の中間的性質であるとするコンシステンシーによる区分⁶⁾に従えば、混合土はシラス混入率が25%以上で砂質土になる。それ以下の混入率の混合土は中間的性質を示すことになる。クロボク土のコンシステンシーは初期含水比によって変わるから、乾燥によってクロボク土は粘性土の

性質を弱め、その結果混合土は砂質土的性質が強まると考えられる。

3. 水分拡散係数

Fig. 1は水平距離xと体積含水率 θ の関係を求めるための装置である。円筒は内径2.74cm、厚さ1cmのプラスチックのリング30個をセロテープでつないで組み立てた。この円筒の中に混合試料を5cm程度の厚さに入れ、円筒の外側を軽くたたいて充填した。これを繰り返して測定用の土柱とした。その物理的性質がTable 2である。

測定は浸潤時間を1800secに設定した。この継続時間は土柱の長さ30cmの範囲内で各試料が(6)式の諸条件を満足することから選択した。経過時間 $t=1800$ secでマリOTT管からの水の流入を止め、すばやくリングを切り離して単リングごとの質量を求めた。この場合湿潤前線のある部分を最初に切り離して質量を測定し、湿潤側へこの測定を進めた。Fig. 2はその測定値である。経過時間が同じ場合、浸潤距離はクロボク土の方がシラスより長く、シラス混入率が増すほど短くなった。この結果はFig. 1における水平な水の流れが毛管力のみで生ずることと符号する。

Table 2. Physical properties of specimens

Shirasu-mix ratio M (%)	Dry density ρ_d (g/cm ³)	Void ratio e	Porosity n (%)	Saturated hydraulic conductivity Ks (cm/sec)
0	0.574	2.97	74.8	1.5×10^{-4}
25	0.651	2.55	71.8	3.5×10^{-4}
45	0.734	2.23	69.0	4.0×10^{-4}
62	0.806	1.96	66.2	5.0×10^{-4}
83	1.010	1.38	58.0	8.0×10^{-4}
100	1.22	0.97	49.2	1.0×10^{-3}

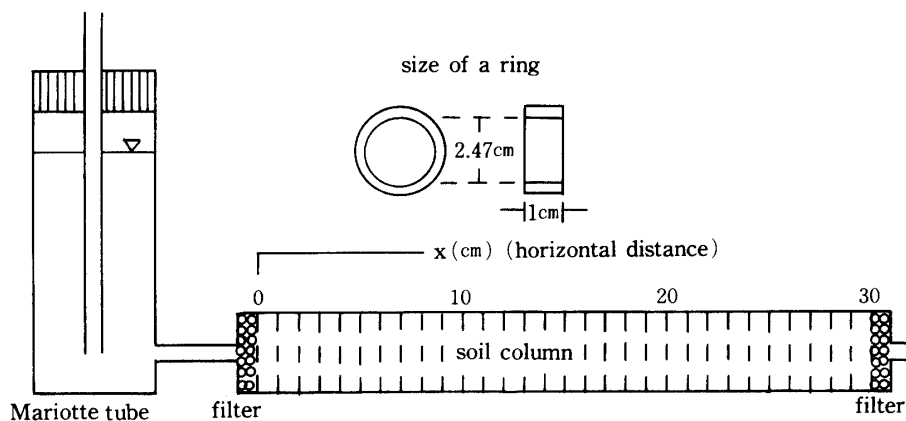


Fig.1. Apparatus for measuring water content profile in soil column.

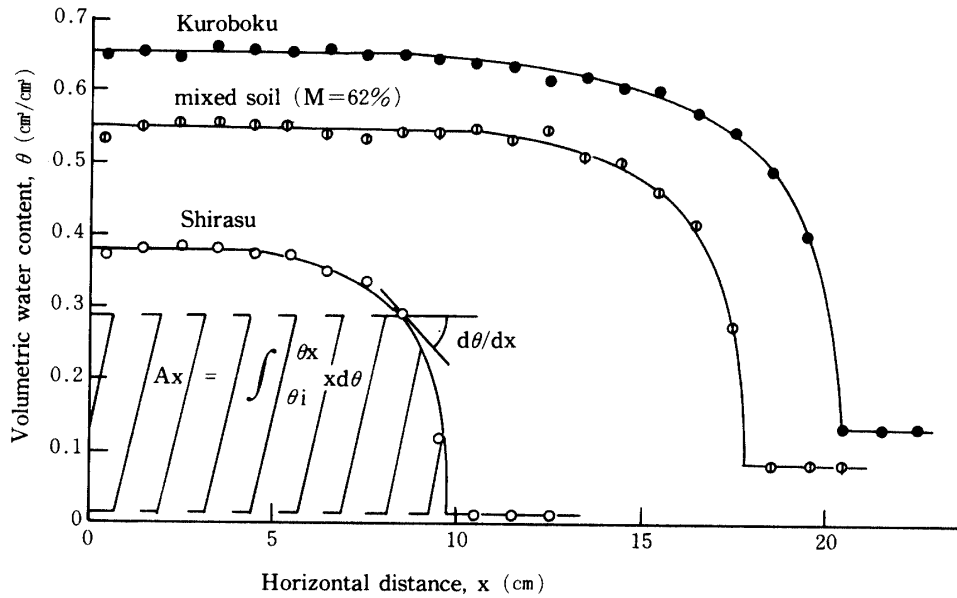


Fig. 2. Water content profile of soil column.

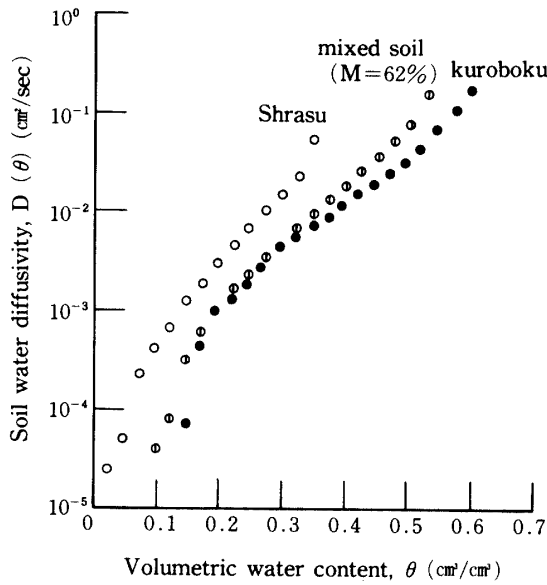


Fig. 3. Relation of diffusivity to soil wetness.

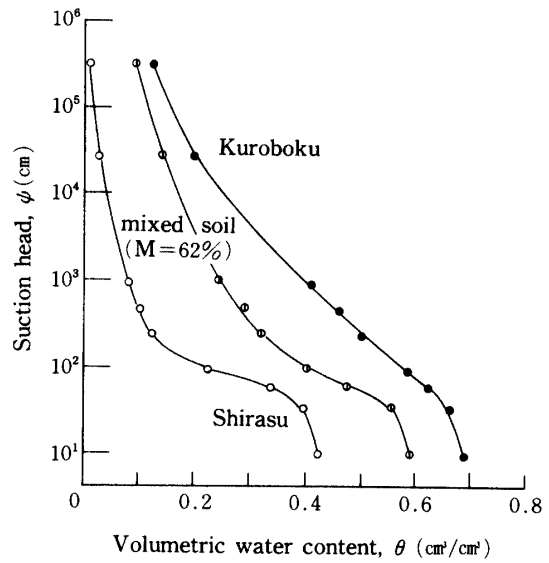


Fig. 4. Soil water characteristic curve.

混合土の拡散係数 $D(\theta)$ の求め方はFig. 2のシラスの $\theta-x$ 曲線によって図示した。すなわち(8)式の $dx/d\theta$ は $\theta-x$ 曲線の勾配 $d\theta/dx$ の逆数で与えた。また(8)式の積分項はFig. 2の斜線部分の面積 Ax である。任意の距離 x で求めた $dx/d\theta$ と Ax から $D(\theta)$ は(8)式で計算して求める。こうして得られた $D(\theta)$ と θ の関係を図3に示した。

4. 水分特性曲線

(2)式の $d\psi/d\theta$ はFig. 4に示す土の水分特性曲線のリニヤスケールにおける勾配である。この曲線の形状は土壌構造に強く依存し、土の種類によってはヒステリシス現象が顕著に現われる。クロボク土はそ

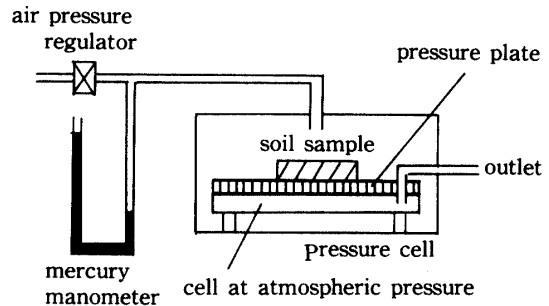


Fig. 5. Pressure plate apparatus.

の代表的な土である。しかしながら高压領域にも適用できるフィルターがないために、乾燥および湿潤

の両過程を1サイクルで測定することは難しい。ここでは水分特性曲線の形状に与える影響は乾、湿両過程の差異よりもシラス混入率の違いによる土壤構造の相違の方が大きいと考え、以下の方法を用いた。

まず試料は100cm³の円筒に入れ、Table 2の密度が得られるように円筒の外側を軽くたたいて充填した。この円筒試料は体積変化が生じないようにしながら吸水させた。測定にはFig. 5に示す加圧板法を用い、水頭10³cmに相当する圧力まで継続した。また10⁴cm以上の測定は蒸気圧法によって求めた。この場合試料はFig. 1に示した単リングに充填した状態であり、硫酸カルシウム (pF4.45用) と塩化アンモニウム (pF5.5用) の飽和水溶液を入れたデシケータの中で3ヵ月間養生した。こうして得られた混合土の水分特性曲線の例をFig. 4に示した。シラス混入率が増すにつれてクロボク土の示す曲線の形状からシラスのそれに移行する変化が得られた。

考 察

1. 毛管モデルの適用範囲

土の間隙は水分特性曲線を用いて種々の大きさの等価毛管径に変換できる。この間隙径の分布をもとに不飽和透水係数を求める式が多く研究者によって提案されている。これらの式を総括してJackson³⁾は(10)式を与えた。

$$K_i = K_s \left(\theta_i / \theta_s \right) \sum_{j=1}^m \left[2+j+1-2j \right] \psi_j^2 \Big/ \sum_{j=1}^m \left[(2j-1) \psi_j^2 \right]$$

ここで K_i は体積含水率 θ_i のときの透水係数、 m は $\theta = \theta_s$ を $j=1$ として $\theta=0$ までの等分割数、 ψ_j は θ_i と θ_{j+1} の中間のサクシオン値で

$$\psi_j = \frac{1}{2} (\psi_j + \psi_{j+1})$$

によって与えられる。 β は測定値と計算値を近似させるための係数で、これまでに $\beta=0$ から $4/3$ までの値が用いられている²⁾。また分割数 m は多いほど計算上は精密になるが、Hillel¹⁾は $m=20$ で十分な近似値が得られることを示している。

不飽和透水係数と体積含水率の関係を示すFig. 6には非定常法による測定値と $m=20$, $\beta=0$ および $4/3$ の条件における計算値を示した。測定値は水分特性曲線の勾配を用いた間接的な値であり、(10)式による計算値も勾配の分布を利用している。このことから両者の相違は毛管モデルの適用限界を与える。Fig. 6によるとシラスでは $\beta=0$ の理想的な毛管モデルによる水の流れが近似的に成り立つことになる。これに対

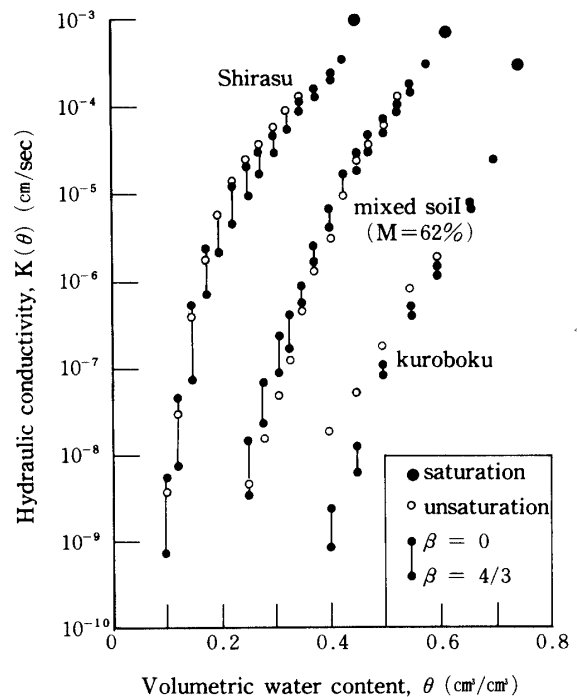


Fig. 6. Comparison between measured and calculated values.

してクロボク土では毛管モデルの仮定が困難である。シラス混入率62%の混合土の場合は $\beta=4/3$ のとき両者が比較的一致している。 β の中間の値に対しては(10)式の不飽和透水係数も中間の値になるから、(10)式の適用限界はシラス混入率が60%付近と考えられる。したがって本来砂質土に用いる毛管モデルはシラス混入率60%以上の混合土にも適用可能である。

2. シラス混入率と不飽和透水係数の関係

Table 2における混合土の間隙比はシラス混入率の増加にともなって減少する。このために間隙比と飽和透水係数との間には負の相関関係が得られる。このことは混合土の透水性が間隙の量だけでなく、その大きさの分布に影響されることを示している。間隙の大きさはサクシオン値によって近似的に与えられるから、不飽和透水係数とサクシオンの関係を図示するとFig. 7が得られる。Fig. 7によるとクロボク土とシラスはサクシオン値が約170cmのところではこれらの不飽和透水係数が逆転している。これに対して混合土では不飽和透水係数の逆転が2つの母材の間で生ずる。これらの交差点にあたるサクシオン値をシラス混入率に対して示すとFig. 8が得られる。Fig. 8によると混入率が25%ではクロボク土との交差点は800cm以上のサクシオン水頭が必要である。この交差点に相当するサクシオン値は混入率が60%付近まで急激に低下する。これに対してシラスとの交差点

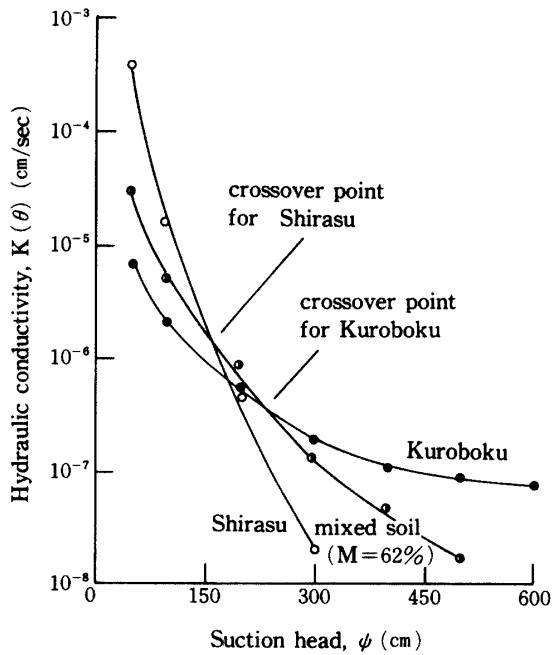


Fig. 7. Hydraulic conductivity as function of suction head.

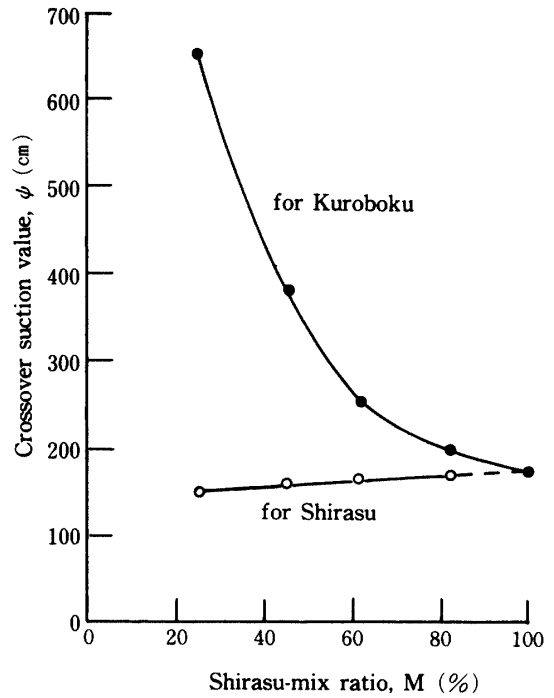


Fig. 9. Relations between hydraulic conductivities and Shirasu-mix ratios.

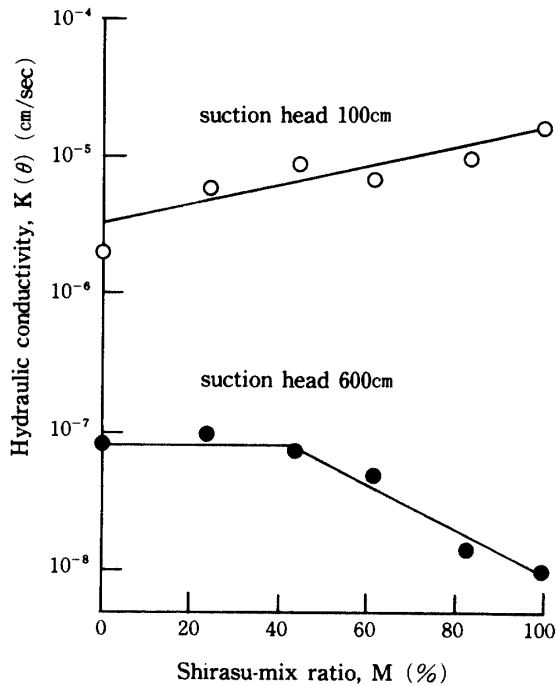


Fig. 8. Changes of suction values of mixed soil corresponding to crossover points for Kuroboku and Shirasu soils.

はサクシヨン水頭が170cmから200cmの低水頭の範囲内で生じている。このようにシラス混入率によって母材との交差点にあたるサクシヨン水頭が変わるから、混合土の不飽和透水係数とシラス混入率の関係はサクシヨンの範囲によって異なった傾向を示すことになる。

Fig. 9は2つのサクシヨン水頭における不飽和透水

係数とシラス混入率の関係である。サクシヨン水頭100cmのときは混入率の増加にもなって不飽和透水係数は増加している。しかしサクシヨン水頭が600cmの場合、混入率が40%程度まではクロボク土とほぼ同じ不飽和透水係数であるが、それ以上の混入率では逆に不飽和透水係数が低下する。これらの結果から混合土におけるシラス混入量の増加は飽和に近い水分状態で水の流れを促進する。しかしながら混合土が乾燥してくると、含まれるシラスは水の流れを妨げることになる。このような現象はシラス混入率が60%以上で顕著に現われる。この場合のサクシヨン水頭はpF2.8程度であり、土中水は毛管流の形態で流動すると考えられる。

要 約

作物の根群域における土中水の移動は一般に不飽和の状態が生ずる。この不飽和流は定量的に測定することが困難である。それは流動中に土中水の形態と量に変化するためである。このような変化は土の含水量、吸引圧および透水係数の間に複雑な関係を含んでいる。このために非定常流を取り扱う理論的、実験的方法の開発が遅れていたが、最近その研究は進歩している。ここでは一次元水平流の方法を適用して混合土の不飽和透水性について検討した。結果はつぎのように整理できる。

1. 不飽和透水係数 $K(\theta)$ は土の拡散係数 $D(\theta)$ と水分特性曲線の勾配 $d\psi/d\theta$ から間接的に求めた。すなわち、

$$K(\theta) = D(\theta) \left[\frac{1}{d\psi/d\theta} \right]$$

2. 上式で求めた測定値とJackson式による計算値の比較から、シラス混入率が60%以上の混合土では毛管モデルが仮定できる。

3. サクシヨン水頭が100cm(pF 2)以下ではシラス混入率の増加に伴って混合土の不飽和透水係数も増加する。しかしサクシヨン水頭が600cm(pF2.8)以上になると不飽和透水係数は逆に低下する。この傾向はシラス混入率が60%以上で顕著に現われる。

これらの結果からクロボク土にシラスを混入した混合土においても、シラス混入量の増加が水の流れを妨げる場合がある。その原因の一つはシラス粒子間あるいは団粒間にできる大きい間隙内の水が排水されたとき、団粒内の水は移動できずにそのまま残ることによると思われる。

謝 辞

本研究には平成元年度非常勤講師(大学院)として来学された九州大学教授黒田正治博士の助言を得た。また実験には池畑兼太郎氏(現九州農政局)の協力を得た。付記して謝意を表する。

文 献

- 1) Hillel, D.: *Fundamentals of soil physics*, p. 224 Academic Press Inc., New York (1980)
- 2) 井上光弘・矢野友久・吉田勲・山本太平・筑紫二郎: 土壌水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算, 土壌の物理性, **46**, 21-29 (1982)
- 3) Jackson, R. D.: On the calculation of hydraulic conductivity, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36**, 380-382 (1972)
- 4) 黒田正治・国枝正: クロボク土の不飽和透水係数とその測定上の問題点, 土壌の物理性, **48**, 17-25 (1983)
- 5) 最上武雄編著: 土質力学, p.534, 技報堂, 東京 (1969)
- 6) 矢部正宏: 粘性土, 土と基礎, **23** (1), 59-64 (1975)
- 7) 八幡敏雄: 土壌の物理, p.95, 東京大学出版会, 東京 (1975)

Summary

It is during the time when the soil is under an unsaturated condition that there occurs the flowing of water in the rooting zone of most of the crop-plants. Due to the fact that this unsaturated flow often changes soil water both in its state and contents, the quantitative measuring of the flow becomes quite difficult for us to carry out. In such changes are involved some complicated relationships existing among the following items, namely, variable water contents, suctions and conductivities. On account of this fact, a development of theoretical and experimental methods necessary for solution of these problems has rather been deferred.

Recently, however, some significant advances have been brought forth in theory and practice in this researching field. Making use of one of these detected procedures, measuring was carried out on the unsaturated hydraulic conductivities of the mixed soil.

The results obtained are as in the following :

1. Kuroboku and Shirasu soils were used as the mother materials for mutual mixings. Here Kuroboku soil is a volcanic clayey soil with organic matter and aggregated structure. Shirasu soil is a volcanic sandy soil existing in pyroclastic flow-deposits.

2. Using the soil-water diffusivity $D(\theta)$, and the gradient of the soil-water characteristic curve $d\psi/d\theta$, the hydraulic conductivity $K(\theta)$ is to be obtained indirectly through the following equation :

$$K(\theta) = D(\theta) [d\theta/d\psi]$$

3. By comparing the values fixed in one-dimensional horizontal flow with those obtained by Jackson's equation, the capillary model applicable to sand comes to be applicable to the mixed soil showing more than 60 percent of Shirasu-mixration in weight.

4. The hydraulic conductivity of the mixed soil increases as the Shirasu-mix ratio increases at suction head less than 100cm. On the other hand, the conductivity decreases as the mix ratio increases at the

suction head more than 600cm. This tendency is revealed strongly at the mix-ratio counting more than 60 percent.

In conclusion, it may be noted that the mixing of Shirasu soil into Kuroboku soil impedes the movement of unsaturated water until the accumulation of water makes the suction decreased enough to let the water enter into large pores.