

携帯型ミニディスクインフィルトローメータによる 現場透水係数の推定に関する一考察

A CONSIDERATION ON ESTIMATE OF FIELD HYDRAULIC CONDUCTIVITY WITH MINI DISK INFILTROMETER

小川 大輝¹・酒匂 一成²・伊藤 真一³

Daiki OGAWA, Kazunari SAKO and Shinichi ITO

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: k1776341@kadai.jp

² 鹿児島大学学術研究院 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp

³ 鹿児島大学学術研究院 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: itou@oce.kagoshima-u.ac.jp

Key Words: Mini Disk Infiltrometer, infiltration, shirasu

1. はじめに

近年, 地球温暖化の影響で集中豪雨が増加しており, それに伴う斜面崩壊が多発している. 2019年に鹿児島県では6月下旬から7月上旬にかけて集中豪雨に見舞われ, 県内各地のシラス斜面において表層崩壊や破堤などの災害が生じた. このような災害に対して, 防災関係者は崩壊発生後に崩壊原因などを検討する際に, 斜面の地形や地質の調査に加え, 土の基本的物理量や保水性, 透水性, せん断強度特性を調査することが多い. その中で, 透水係数については, 原位置試験および室内試験によって求められるが, 災害現場で試料採取が困難な場合もあるため, より簡易に原位置で透水係数を計測することができれば調査者にとって有益であると考えられる.

従来用いられてきた現場透水試験法は, 計測に用いる装置が大きく, 水を大量に使用するという問題がある. 加えて, 試験孔を用いる方法では, その孔を掘削する作業も必要になるため, 災害現場での計測は極めて困難となる¹⁾²⁾. そこで, 本研究では, 携帯型ミニディスクインフィルトローメータ (METER社, 以降, インフィルトローメータと称す.) を用いる. この方法は, 地表面で試験を行う負圧浸入計の一種であり, 従来の現場透水試験器に比べて持ち運びが容易で, 準備がほとんど要らず計測

を速やかに開始できるという利点がある. 現場での計測に導入しやすいことから, 地盤の疎水性, 浸透, 灌漑システムの設計, 侵食の危険性の評価などの多くの研究で利用されてきている³⁾. この試験法では, 負圧浸入計で計測された浸潤量から透水係数を推定する必要がある. このインフィルトローメータでは, Zhangの方法⁴⁾が広く用いられており, 不飽和透水係数を推定することができる. また, 他の方法として, Reynolds and Elrick⁵⁾が提案した現場飽和透水係数を推定する方法がある. 例えば, 杉井ら⁶⁾はこの方法を用いて, 土舗装の現場の浸透特性の計測を実施している.

Zhangの方法とReynolds and Elrickの方法は, 推定される透水係数が異なるため, 目的によって使い分けられてきた. しかし, 著者らはインフィルトローメータから不飽和透水係数と現場飽和透水係数を同時に推定できるという点に着目し, Zhangの方法で高飽和領域の不飽和透水係数, Reynolds and Elrickの方法で現場飽和透水係数を推定することで, 高飽和領域の透水関数 (サクシオン飽和・不飽和透水係数の関係) を得ることができるのではないかと考えた. 不飽和土の透水関数を求める試験方法は確立されておらず, 土質試験を実施するにも複雑で熟練を要す試験となり, 試験時間が長期にわたる問題がある. よって, 簡易に透水関数を求める方法を提案

することは意義があると思われる。そこで、本研究では、Zhang の方法と Reynolds and Elrick の方法を組み合わせ、原位置のシラス斜面における高飽和領域の透水関数を求め、試験結果および試験方法の課題について検討する。

2. 透水係数の推定方法

(1) インフィルトロメータの概要

写真-1 にインフィルトロメータを示す。インフィルトロメータは、全長 32.7cm と小型であり、1 回の計測に使用する水量は 135mL と従来の現場透水試験器と比較し少量である。装置は上下の 2 つのチャンバーと圧力水頭調整チューブ、半径 2.25cm の多孔質ディスクで構成されている。上下のチャンバーはチャンバーバリアによって水が行き来しない仕組みとなっており、上部チャンバーには圧力水頭を負荷するための水が入り、下部チャンバーには地表面に浸潤させる水が入っている。さらに下部チャンバーには、浸潤量を読み取るための目盛りが記されている。写真-2 のように圧力水頭調整チューブは昇降でき、 $-0.5 \sim -7.0$ [cmH₂O] の負の圧力水頭を負荷させながら計測を行うことができる。圧力水頭は、圧力水頭調整チューブの目盛りを指す上部チャンバー内の水面の位置で設定される。

計測の手順を次に示す。

- ① 計測を行う地表面を平滑にする。
地表面の凹凸を埋めるために、珪砂などの粒径の細かい砂を用いてもよい。
- ② インフィルトロメータの準備
上下のチャンバーに水を満たし、圧力水頭調整チューブにより圧力水頭を設定する。下部チャンバーの初期体積を目盛りから読み取り記録する。
- ③ 計測開始
写真-1 のように、地表面にインフィルトロメータを設置する。同時に計測を開始し、一定時間ごとに浸潤量を目盛りから読み取る。例として、砂質土は 2~5 秒間隔、シルト質砂は 30 秒間隔である。

以上の手順から得られたデータから透水係数を推定する。推定方法について、Zhang の方法と Reynolds and Elrick の方法を示す。

(2) Zhang の方法

Zhang はインフィルトロメータからの浸潤過程を表すシンプルな 2 つの項から構成される式を提案した⁴⁾。

$$I = C_1 \sqrt{t} + C_2 t \quad (1)$$

ここに、 I : 単位面積あたりの累積流入量 [cm]、 C_1 : 吸着率に関する係数 [cms^{-1/2}]、 C_2 : 透水係数に関する係数



写真-1 インフィルトロメータ



写真-2 圧力水頭調整チューブ (左は -6 [cmH₂O]、右は -1 [cmH₂O] に設定した時の状況)

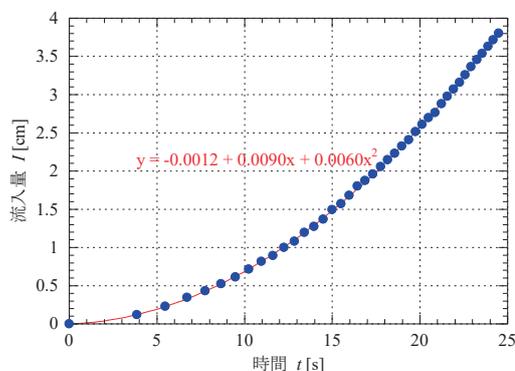


図-1 流入量 I -時間 t 関係図

[cm/s].

式(1)を図-1 のようにインフィルトロメータで計測された流入量 I -時間 t 関係にフィッティングすることで、 C_2 が求められる。 C_2 はフィッティングで得られた二次式の係数から得られ、図-1 においては $C_2=0.0060$ [cm/s] である。不飽和透水係数は次式で表される。

$$k_{wu}(h) = \frac{C_2}{A} \quad (2)$$

ここに、 $k_{wu}(h)$: 不飽和透水係数 [cm/s]、 A : 無次元係数、 h (≤ 0) : インフィルトロメータの圧力水頭 [cmH₂O].

表-1 van Genuchten のモデルパラメータ (一部抜粋) ⁷⁾

Soil Texture	Sand	Sandy Loam	Silt	Clay
α	0.145	0.075	0.016	0.008
n	2.68	1.89	1.37	1.09

インフィルトロメータの圧力水頭は、最大 $h = -7$ [cmH₂O] までしか負荷できないため、推定される不飽和透水係数は、極めて高飽和度の領域の不飽和透水係数であることを意味している。

式(2)中の A は、様々な種類の土や初期条件、インフィルトロメータのディスクの半径 R や圧力水頭 h を変化させて実施された不飽和浸透解析に基づいて決定される係数であり、次式を用いて計算される。

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1) \exp[N(n - 1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad (3)$$

$$n \geq 1.9 \rightarrow N = 2.92$$

$$n < 1.9 \rightarrow N = 7.5$$

ここに、 R : インフィルトロメータのディスクの半径 [cm], α , n : van Genuchten のモデルパラメータ。

van Genuchten のモデルパラメータを表-1 に示す ⁷⁾。パラメータの決定については、Carsel and Parrish⁸⁾が行った 12 種類の土に関するパラメータの検討から土の工学的分類に応じた設定がなされている。

(3) Reynolds and Elrick の方法

Reynolds and Elrick が提案した方法 ⁵⁾ は、Wooding の経験則 ⁹⁾ に基づいている。Wooding は、浅い円形の溜池から浸潤する流量を理論的に計算し、ディスクから浸潤する流量を次式で表現した。

$$Q = \pi R^2 k_{wu}(h) + 4R\phi(h) \quad (4)$$

ここに、 Q : 定常流量 [cm³/s], $\phi(h)$: マトリックポテンシャル [cm²/s], $k_{wu}(h)$: 不飽和透水係数 [cm/s]。

Gardner¹⁰⁾ は不飽和透水係数が飽和透水係数の指数関数で表現できると仮定しており、不飽和透水係数は次式で表現できると述べている。

$$k_{wu}(h) = k_{fs} \cdot \exp(ah) \quad (5)$$

ここに、 k_{fs} : 現場飽和透水係数 [cm/s], a : パラメータ係数。

また、 $\phi(h)$ は次式で表現できる ¹⁰⁾。

$$\phi(h) = \int k_{wu}(h) dh = \frac{k_{fs} \cdot \exp(ah)}{a} \quad (6)$$

式(6)を式(4)に代入することで、Reynolds and Elrick⁵⁾ は、次式を導いた。

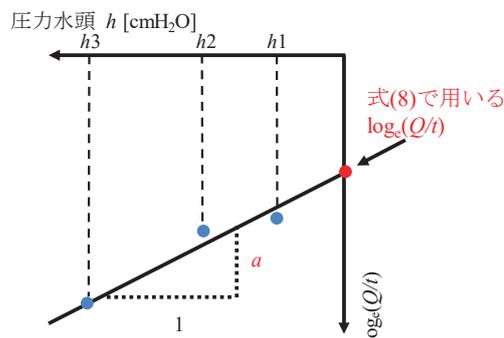


図-2 $h - \log_e(Q/t)$ 関係図

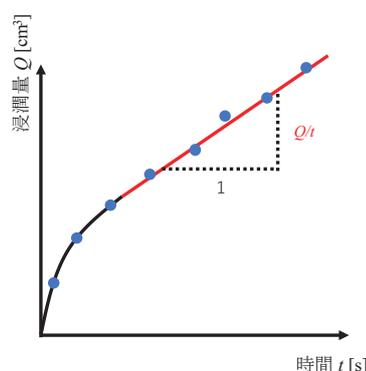


図-3 計測から得られる $Q-t$ 関係図

$$\log_e\left(\frac{Q}{t}\right) = ah + \log_e\left\{\left(\pi R^2 + \frac{4R}{a}\right) \cdot k_{fs}\right\} \quad (7)$$

ここで、式(7)は図-2 のような直線を表す式であり、 $h=0$ のとき現場飽和透水係数 k_{fs} は次式で表現される。

$$k_{fs} = \frac{\exp\left\{\log_e\left(\frac{Q}{t}\right)\right\}}{\pi R^2 + \frac{4R}{a}} \quad (8)$$

式(8)において、未知数は定常流量 $\log_e(Q/t)$ とパラメータ係数 a であり、図-2 に示すように $h - \log_e(Q/t)$ 関係の直線の傾きと切片から得られる。この方法では、1 個の現場飽和透水係数を得るために、インフィルトロメータの圧力水頭値を変えた最低 3 回の計測が必要となる。

ここで、現場飽和透水係数を推定するための手順を次に示す。図-3 は 1 回の計測で得られる $Q-t$ 関係図である。図の直線部のように、計測開始後、経過時間当たりの浸潤量 (流量) がおおそ一定になり、定常状態と判断された際の流量を計測する。圧力水頭を変えた最低 3 回、同様の計測を行い、定常流量を図-2 のようにプロットし、回帰直線を引く。その回帰直線の傾きと切片から

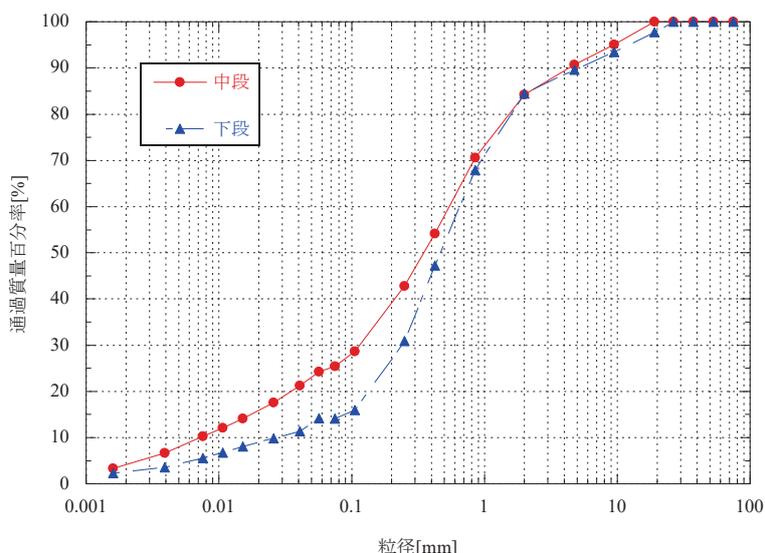


図-4 粒径加積曲線

a と $\log_e(Q/t)$ が得られ、現場飽和透水係数が得られる。

現場飽和透水係数とは、原位置の不飽和地盤において、降雨や故意に地盤を湿潤させた場合、完全な飽和状態の地盤にはならないことから、高飽和度な地盤の透水係数ということになる。さらに、現場飽和透水係数は、完全な飽和状態の領域における飽和透水係数と比べ、小さい値をとることが確認されている¹¹⁾。原位置の不飽和地盤において、透水性の評価を行う際は飽和透水係数よりもむしろ、現場飽和透水係数を用いることがより実際に即した透水性評価になると考えられる。

3. シラス斜面における原位置透水試験

本章では、第2章で述べた不飽和透水係数および現場飽和透水係数の推定方法を用いて、鹿児島県郡山町内のシラス斜面において原位置透水試験を行った。

(1) 試験箇所の概要

写真-3には、透水試験を実施した鹿児島県郡山町内のシラス斜面を示す。斜面は、入戸火砕流が堆積した一次シラスとみられ、ガリ侵食が発達しているのが確認できる。また、3段（以降、上段、中段、下段と称す。）に切り分けられており、本研究では、中段と下段を対象に調査を行った。中段と下段において表層土の不攪乱試料を計測地点周辺の2カ所から採取し、実験室にて土質試験を行った。表-2に土質試験結果を示す。図-4は中段と下段の表層土の粒径加積曲線を示している。各段の土の工学的分類は、中段は細粒分質礫質砂(SFG)、下段は細粒分混じり礫質砂(SG-F)である。中段、下段の土は表-1において、Sandy Loamに分類され、 $\alpha=0.075$ 、 $n=1.89$ である。さらに、山中式土壤硬度計を用いて各段の斜面の硬度を測定し、指標硬度が20以下であることから、

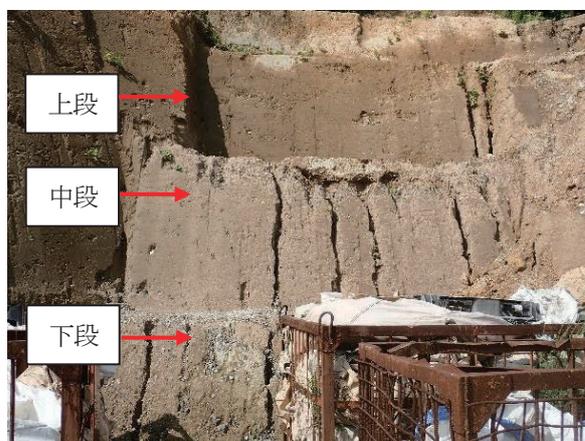


写真-3 斜面の様子

表-2 土質試験結果

採取場所	下段①	下段②	中段①	中段②
自然含水比 w_n [%]	16.0	17.6	27.2	29.6
土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.55		2.57	
湿潤密度 ρ_t [g/cm ³]	1.21	1.12	1.42	1.27
間隙比 e [-]	1.46	1.68	1.29	1.61
乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	1.04	0.95	1.12	0.98
飽和度 S_r [%]	28.10	26.72	54.03	47.15

この斜面のシラスは、極軟質シラスに分類されることがわかった¹²⁾。

(2) 計測の詳細

原位置透水試験は、中段と下段において計測点を1点定め、その点で圧力水頭を変えながら3回計測を行った。インフィルトロメータの圧力水頭は各段-1, -3, -5

表-3 推定された透水係数

場所	推定方法	圧力水頭 h [cmH ₂ O]	C_2 [cm/s]	A [-]	透水係数 k_{wu}, k_{fs} [m/s]
中段	Zhang	-1	0.0060	3.89	1.54×10^{-5}
		-3	0.0055	3.93	1.40×10^{-5}
		-5	0.0027	3.98	6.78×10^{-6}
	Reynolds and Elrick				1.94×10^{-5}
下段	Zhang	-1	0.0551	3.89	1.42×10^{-4}
		-3	0.0410	3.93	1.04×10^{-4}
		-5	0.0137	3.98	3.45×10^{-5}
	Reynolds and Elrick				3.57×10^{-4}

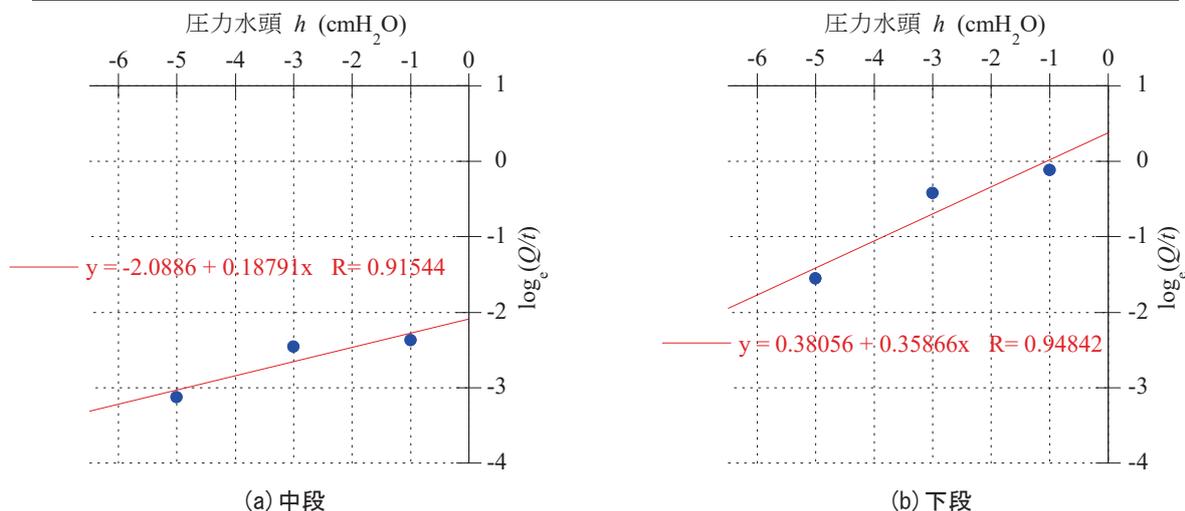


図-5 計測で得られた h - $\log_e(Q/t)$ 関係図

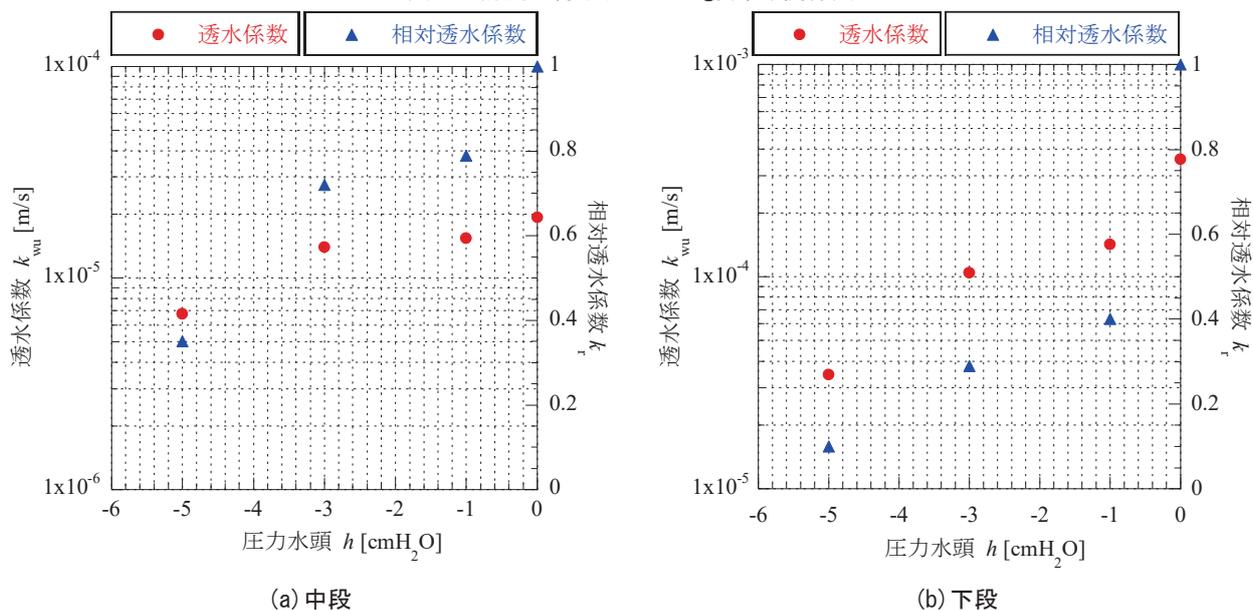


図-6 各計測地点での透水関数

[cmH₂O]に設定し、上記の順で計測を実施した。浸潤量の計測にあたり、砂質土のような透水性の良い地盤を対象に計測を行うと、地表面へ浸潤する速度が大きく、流量を目盛りから読み取ることが困難な場合があるため、今回の計測では録画機器を用いて、計測を行った。

(3) 計測結果

原位置透水試験によって得られた透水係数を表-3に

示す。本試験では、各段3回の計測を行ったため、Zhangの方法では3個の不飽和透水係数 $k_{wu}(h)$ 、Reynolds and Elrickの方法では1個の現場飽和透水係数 k_{fs} が得られた。図-5は、Reynolds and Elrickの方法における h - $\log_e(Q/t)$ の関係図である。いずれの測定結果も回帰直線の相関係数 R が約0.9以上を示し、相関性の高い回帰直線を描くことができている。Reynolds and Elrickの方法は常に圧力水頭の異なる3点以上の計測結果が必要となるため、

より安定性のある透水係数の推定が可能であると考えられる。しかし、今回の計測において、1回目の試験は自然含水状態の地表面にインフィルトロメータを設置して試験したが、2回目以降は1回目の試験後の湿潤した地表面にインフィルトロメータを設置して試験を行った。この試験前の地表面の含水状態の試験結果に与える影響については、今後検討が必要である。

表-3より、Zhangの方法では、中段、下段ともに設定した圧力水頭値が大きくなるほど、不飽和透水係数 $k_{wu}(h)$ は小さくなった。一方、Reynolds and Elrickの方法で推定した現場飽和透水係数は、中段、下段ともにZhangの不飽和透水係数よりも大きな値として推定された。図-6は2つの方法から推定された透水係数について、横軸をインフィルトロメータの圧力水頭 h 、縦軸を透水係数および相対透水係数 $k_r=k_{wu}(h)/k_{rs}$ とした透水関数を図示したものである。インフィルトロメータの圧力水頭は、最大 $h = -7$ [cmH₂O]までしか負荷できないため、高飽和領域における透水関数を示している。図より、圧力水頭が0近づく（飽和度が増加する）につれて、透水係数も大きくなるという飽和・不飽和透水特性の一般的な傾向を示していることがわかる。よって、3種類の圧力水頭を設定したインフィルトロメータの試験を実施することで、高飽和領域の透水関数を得ることができる。計測値の妥当性については、今後、室内土質試験や原位置透水試験の結果と比較していく必要があるが、透水関数の傾きなどがわかることによって、不飽和土の保水・透水性に関する数理モデルのパラメータ設定などに役立つと考えられる。

4. おわりに

本研究では、シラス斜面においてインフィルトロメータを用いた計測を行い、Zhangの方法とReynolds and Elrickの方法を用いて、高飽和度領域の透水関数を求めることができた。試験時の地表面の含水状態が結果に与える影響や試験結果の妥当性評価などに課題はまだ残るが、得られた透水関数は、不飽和土の保水・透水性に関する数理モデルのパラメータ設定などに役立つと考えられる。今後、試験データを蓄積しながら、試験精度の検証などを実施したい。

謝辞：レモン通商株式会社には、試験場所を提供していただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

1) Elrick, D.E. and Reynolds, W.D. : Infiltration from Constant-head Well Permeameters and Infiltrometers, *Advanced in Measurement*

of Soil Physical Properties, SSSA Special Publication No.30, pp.1~24, 1992.

- 2) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. : In Situ Measurement of Field-saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity, and the α -parameter Using the Guelph Permeameter, *Soil Sci.*, Vol.140, pp.292~303, 1985.
- 3) METER Group : Mini Disc Infiltrometer, <https://www.metergroup.com/environment/products/mini-disk-infiltrometer/>, (令和2年6月22日12時現在) .
- 4) Renduo Zhang : Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer, *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.61, pp.1024~1030, 1997.
- 5) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. : Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tensiometer Infiltrometer, *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.55, pp.633~639, 1991.
- 6) T. Sugii, H. Yokawa and M. Ishii : Measurement of field-hydraulic soil properties using suction infiltrometer for soil-based pavement, Proc. of the 7th Asia-Pacific Conference of Unsaturated Soils (AP-UNSAT2019), pp.84-89, 2019.
- 7) METER Group Inc. : *Mini Disk Infiltrometer Use's manual*, p.13, 2018.
- 8) Carsel, Robert F. and Rudolph S. Parrish. : Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resource Research*, Vol.24, no. 5, pp.755~769. 1988.
- 9) Wooding, R.A. : Steady infiltration from a circular pond, *Water Resour. Res.* 4, pp.1259~1273, 1968.
- 10) Gardner, W.R. : Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table, *Soil Sci.* Vol.85, pp.228~232, 1958.
- 11) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. : A Laboratory and Numerical Assessment of the Guelph Permeameter Method, *Soil Sci.*, Vol.144, pp.282~299, 1987.
- 12) 山内豊聡監修 土質工学会九州支部編：九州・沖縄の特殊土, pp.145~169, 1983.

(2020. 7. 1 受付)