ミニディスクインフィルトロメータによる現場透水係数の計測精度に関する研究

A STUDY ON THE MEASUREMENT ACCURACY OF IN-SITU PERMEABILITY USING A MINI-DISC INFILTROMETER

植田 諒[1]・ジャクソン コン ゼー シェン[2]・蓮井 瑠之[1]・
酒匂 一成[3]・伊藤 真一[4]
Ryo UEDA, Jackson Kong ZHE SHENG, Runo HASUI, Kazunari SAKO, Shinichi ITO

[1]鹿児島大学理工学研究科（〒890-0065　鹿児島市郡元 1-21-40）
[2]元鹿児島大学理工学研究科（〒890-0065　鹿児島市郡元 1-21-40）
[3]鹿児島大学学術研究院（〒890-0065　鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp
[4]立命館大学理工学部（〒525-8527　滋賀県草津市野路東 1-1-1）

Key Words: *infiltrometer, in-situ permeability, unsaturated permeability, measurement accuracy*

1. はじめに

近年，日本各地で梅雨期や台風襲来期の豪雨によって土砂災害が多発している．これらの斜面崩壊のメカニズムや崩壊発生予測などにおいては，斜面の地形や地質調査に加え，土の基本的な物理量や保水・浸透などの特性を把握することが必要とされる．そこで，本研究では現地斜面の透水係数に着目する．一般に，透水係数は室内試験（定水位・変水位透水試験）や現場透水試験などから得られるが，室内試験では，実地盤の不均質性や空間的に分布する応力状態や含水状態を完全に再現することは困難ため，必ずしも現場条件を十分に反映しているとは限らない．また，斜面内の地下水位直上の土は間隙中にわずかに空気が含まれた疑似飽和状態が形成されている．この状態の透水係数は「現場飽和透水係数」と呼ばれており，室内試験で供試体を飽和状態に調整した試験結果とは値が異なる可能性が考えられる．そこで，斜面の透水係数を評価する手法として，現場透水試験に着目した．現場透水試験として，プレッシャーインフィルトロメータ法[1)]やボアホールパーミアメータ法[2)]などがあるが，本研究ではより簡便に現場透水係数を評価するためミニディスクインフィルトロメータ（METER 社製）を用いる．既往装置よりも小型であるミニディスクインフィルトロメータは，負の圧力水頭を与えながら，時間経過に伴う浸潤量の変化を計測することにより現場透水係数を得る手法となっている．小川らは地表面の含水状態が計測精度に与える影響を検証した結果，試験前の給水量の設定が計測結果の安定に寄与することを報告した[3)]．しかし，供試体寸法や初期給水条件が算出結果に及ぼす影響については未解明である．そこで，豊浦砂を用いて供試体に与える初期給水量および供試体寸法の影響に着目し，計測精度への影響について考察する．

2. 現場透水係数の算出方法

本研究では，**図-1** の METER 社製のミニディスクインフィルトロメータを用いた．この装置から現場透水係数を算出する方法として，Reynolds and Elrick の手法[4)]が広く用いられている．例えば，Sugii et al. はこの手法を用いて，土舗装路の現場透水特性の推定を行っている[5)]．Reynolds and Elrick による計算手

法は，ミニディスクインフィルトロメータ試験における水の浸潤分布がディスク直下から三次元的に広がることを仮定し，上部チャンバーで圧力水頭 h を -7.0～-0.5 cmH_2O の範囲で複数設定する．**図-2** に示す定常浸潤流量の計測結果より求められる近似直線の傾きおよび切片が a と $\log_e(Q_t)$に対応し，次式を用いて現場飽和透水係数を算出することができる．

$$k_{fs} = \frac{\exp\{\log_e(Q_t)\}}{\pi R^2 + \frac{4R}{a}} \quad (1)$$

ここに，k_{fs}：現場飽和透水係数 [cm/sec]，Q_t：定常流量 [cm^3/sec]，R：ディスクの半径 [cm]，a：パラメータ．

パラメータ a は，水の浸潤挙動に対する重力に起因する成分と吸着に起因する成分の相対的な尺度を示す指標であり，a が大きい場合では重力成分が，小さい場合では吸着成分が流れの支配的要因となるとされている [6]．

また，不飽和透水係数の計測の場合には，市販装置の取扱い説明書において Zhang の手法 [7] が採用されている．Zhang の方法は，異なる圧力水頭条件における浸潤流量を用いて，不飽和透水係数と圧力水頭の関係を評価する手段として位置づけられ，以下の式で不飽和透水係数が算出される．

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2 \cdot t \quad (2)$$

$$K(h) = \frac{C_2}{A} \quad (3)$$

ここに，I：単位面積あたりの累積浸潤量 [cm]，C_1：吸着率に関する係数 [cmsec$^{-1/2}$]，C_2：透水係数に関する係数 [cm/sec]，$K(h)$：不飽和透水係数 [cm/sec]，A：土種類や圧力水頭ごとの van Genuchten[8]によって決められたパラメータ [8]．

3. 試験概要

小川らが提案する湿潤試験における課題の一つに，原位置の地盤の湿潤状況が計測精度に与える影響が挙げられる．小川らは，定水位透水試験の透水円筒（内径 10.0 cm，高さ 12.7 cm）に豊浦砂で供試体を作製し，Reynolds and Elrick の手法において，試験前に供試体表面へ 400 mL の水を与えて湿潤させることで，計測精度が向上するとの結果を述べた．これは式(2)の吸着率に関する項においてのばらつきを除くことができるため，安定した計測が可能になると考えられるが，一つの供試体に対し，乾燥と湿潤を繰り返しながら複数の圧力水頭条件で計測を行う手法となっていた．その結果，試験ごとの初期含水状態が自然乾燥の程度に依存し，初期給水量の影響が不明になり，最適な給水量を評価することが困難であるのが現状である．また，Wooding の解析理論 [9] によれば，式(1)における $4R/a$ は浸潤分布の形状係数を表しており，その半径はミニディスクインフィルトロメータ底面に設置された多孔質ディスクの半径（R = 2.25 cm）の約 4 倍程度まで水が浸透すると仮定されている．しかし，既往研究で用いられた透水円筒の内径は 10 cm であり，浸潤分布の半径 9.0 cm（直径 18.0 cm）の条件を十分に満たしてないことが確認できる．本研究では，これらの点を踏まえ，試験前の給水量および供試体寸法が現場透水係数の計測結果に与える影響を検討することを目的とした．

(1) 供試体作成

実地盤のばらつきによる影響を排除し，試験条件の差異のみが結果に及ぼす影響を検討する目的から，試料として豊浦砂を用いた．本研究では供試体寸法の影響を検討するため，供試体の寸法を 大（直径 19 cm，高さ 20.0 cm），中（直径 19 cm，高さ 12.7 cm），小（直径 10 cm，高さ 12.7 cm）の 3 種類とし，飽和度 50%，間隙比 0.75 になるよう作成した．なお，供試体壁面は非排水条件，下部は排水条件で試験を行った．供試体の締固めはすべて 3 層に分けて実施し，締固めエネルギーを統一するため，土質試験（JIS A 1210）[10] に示される締固めエネルギーの算出式を適用し，締固め回数は大，中，小の供試体それぞれで 7，25，40 回とした．なお，試験前の供試体への給水量を 0，100，500，1000 mL の 4 ケースとした．給水

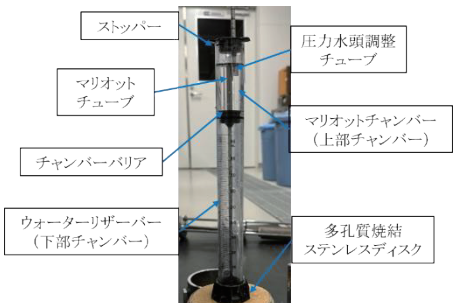


図-1　試験装置の概要図

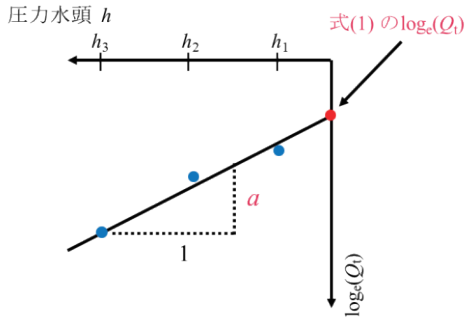


図-2　圧力水頭 h- $\log_e(Q_t)$の関係図

時は土表面に凹凸が生じぬよう，金網およびキムワイプを介してディスクを設置し所定量の水を与えた．

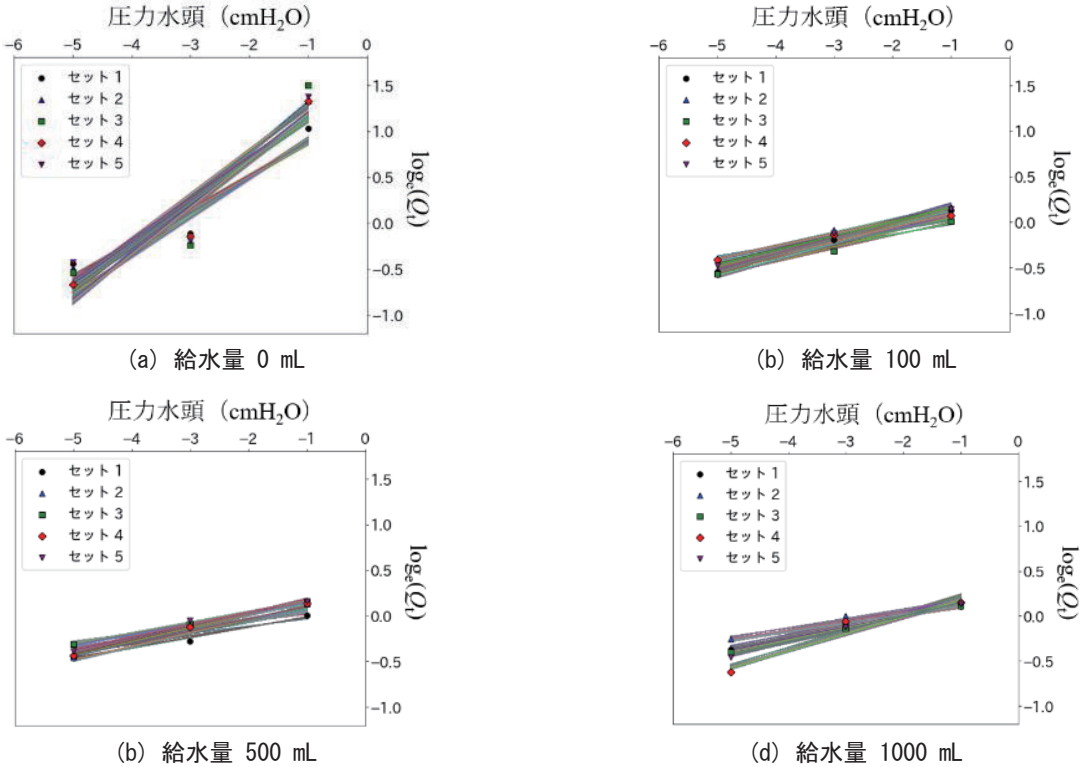
(2) 試験手順

まず，ミニディスクインフィルトロメータの上部ストッパーを取り外し，マリオットチャンバー内をマリオットチューブの高さまで水で満たす．次に，圧力水頭調整チューブを下まで下げ，ミニインフィルトロメータを反転させる．そして，底部の多孔質ディスクを取り外し，リザーバーを水で満たした後，マリオットチューブの端部が多孔質ディスクに接するように位置を調整する．取り外したディスクを取り付け，装置を元の向きに反転させる．その後，任意の圧力水頭になるよう調整チューブで調整し，装置を垂直保持した状態で多孔質ディスクから水漏れが生じないことを確認したら，土表面が平坦な供試体に設置し測定を行う．なお，設定する圧力水頭 h は-1，-3，-5 cmH_2O に設定し，4 ケースの給水量の供試体それぞれで計測を行う．これら一連の計測を 1 セットとし，合計 5 セット実施した．この時，各セットで供試体を新たに作成している．以上の手順にて得られた計測結果を用い，Reynolds and Elrick の手法で現場飽和透水係数を算出するとともに，Zhang の手法により，圧力水頭に対する不飽和透水係数を算出し，計測結果のばらつきを検討した．

4. 試験結果と考察

(1) Reynolds and Elrick 法による計測精度について

図-3 に，供試体寸法【小】の各初期給水量に対する h-$\log_e(Q_t)$の関係を示す．Reynolds and Elrick の手法により，各セットでは，圧力水頭 -1，-3，-5 cmH_2O の 3 段階の試験結果から，3 プロットを用いて 1 本の近似直線が得られる．本研究では各条件につき，5 セットの試験を実施しているため，セットごとに 1 本，計 5 本の近似直線が得られる．さらに，解析においては，同一セット内のデータのみを用いるのではなく，異なるセット間のデータを組み合わせた近似直線の算出も行った．この解析方法は，土の不均質性を考慮し，異なる初期条件を持つ供試体の組み合わせを用いることで，透水係数評価結果のばらつきを表現，再現することを目的としている．例として，セット 1 の-1，-3 cmH_2O とセット 2 の-5 cmH_2O を組み合わせる場合など，可能なすべての組み合わせを設定した．この一連により，各圧力水頭につき 5 通りの試験結果があるため，図のように得られる近似直線の総数は $5^3 = 125$ 通りとなる．図より，給水量 0 mL のケースにおいて，得られた近似直線の傾きは他のケースよりも大きく，各圧力水頭における $\log_e(Q_t)$の値に多少のばらつきが確認される．これは，圧力水頭-1 cmH_2O を最初に試験したことで，試験結果に供試体の初期含水状態の影響が生じた可能



(a) 給水量 0 mL　(b) 給水量 100 mL

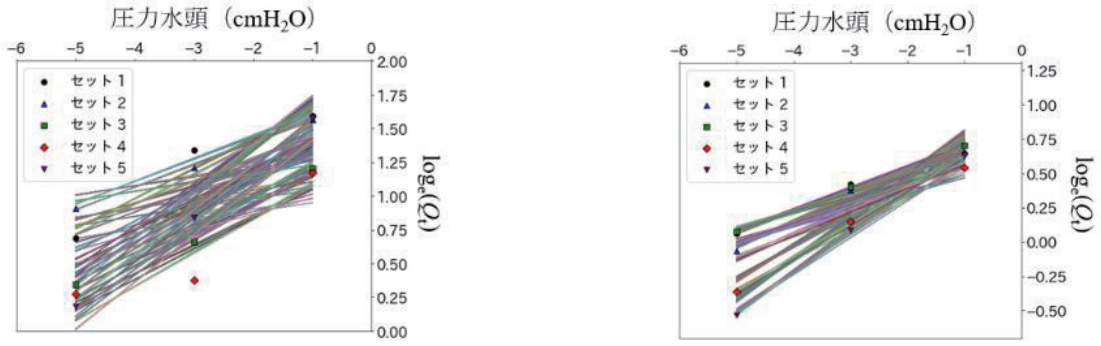
(b) 給水量 500 mL　(d) 給水量 1000 mL

図-3 供試体寸法【小】のときの初期給水量に対する h-$\log_e(Q_t)$関係

性が考えられる．一方，初期給水量 100 mL 以上のケースでは，傾きに大きな差はないことがわかるが，初期給水量 1000 mL の圧力水頭-5 cmH_2O のときにややばらつきがみられた．これは試験前に比較的小さい供試体に対して 1000 mL の給水を行ったことで，下面の境界条件を排水条件としているが，土中の間隙水が排水されるのに時間がかかるため，装置に設定した圧力水頭と土中の圧力水頭の水頭差に影響が出た可能性が考えられる。次に，供試体寸法が計測結果に及ぼす影響を確認する．**図-4**，**図-5** に，供試体寸法【中】と【大】の場合の初期給水量 100 mL と 500 mL の結果を示す．図より，供試体寸法【小】のときに比べ，供試体を大きくすると，全体的に計測結果のばらつきが大きくなる傾向がみられる．このことから，原位置での計測においても計測結果のばらつきが大きくなることが予想される．

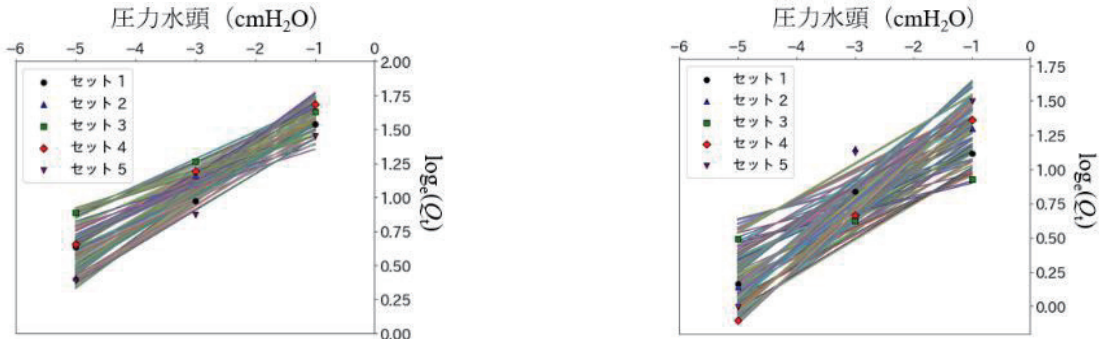
(2) 統計的指標による現場飽和透水係数の定量評価

給水量の計測結果への影響について，**図-4**，**図-5** からの判断は困難であることから，式(1)から計算した現場飽和透水係数について統計的指標により定量評価を行った．統計的指標として，各供試体寸法と供給量において，125 個の現場透水係数が得られることから，標本サイズ n = 125 の標本における平均値や標準偏差を示すとともに，125 個の現場飽和透水係数から，標本サイズ n = 10 の標本を無作為に復元抽出して，1000 個の標本を作製し，その標本平均を求め，そこから最確値（標本平均の平均）と最確



(a) 給水量 100 mL　　(b) 給水量 500 mL

図-4 供試体寸法【中】のときの初期給水量に対する h-$\log_e(Q_t)$関係



(a) 給水量 100 mL　　(b) 給水量 500 mL

図-5 供試体寸法【大】のときの初期給水量に対する h-$\log_e(Q_t)$関係

表-1 現場飽和透水係数の統計的評価結果

供試体寸法 (cm)	初期給水量 (mL)	平均値 (m/sec)	標準偏差 (m/sec)	最確値 (m/sec)	最確値の標準偏差 (m/sec)	変動係数 (%)
【小】直径：10.0cm 高さ：12.7cm	0	1.38×10^{-3}	2.88×10^{-4}	1.39×10^{-3}	$\pm$ 0.0912×10^{-3}	6.6
	100	1.78×10^{-4}	2.94×10^{-5}	1.77×10^{-4}	$\pm$ 0.0934×10^{-4}	5.3
	500	1.54×10^{-4}	2.69×10^{-5}	1.54×10^{-4}	$\pm$ 0.0855×10^{-4}	15.6
	1000	1.67×10^{-4}	3.90×10^{-5}	1.68×10^{-4}	$\pm$ 0.125×10^{-4}	7.4
【中】直径：19.0cm 高さ：12.7cm	0	7.23×10^{-4}	4.85×10^{-4}	7.24×10^{-4}	$\pm$ 1.55×10^{-4}	21.4
	100	1.01×10^{-3}	5.69×10^{-4}	1.01×10^{-3}	$\pm$ 0.150×10^{-3}	14.9
	500	3.89×10^{-4}	1.35×10^{-4}	3.89×10^{-4}	$\pm$ 0.428×10^{-4}	11.0
	1000	3.96×10^{-4}	1.08×10^{-4}	3.96×10^{-4}	$\pm$ 0.340×10^{-4}	8.6
【大】高さ：20.0cm 直径：19.0cm	0	8.40×10^{-4}	3.45×10^{-4}	8.40×10^{-4}	$\pm$ 1.09×10^{-4}	13.0
	100	1.25×10^{-3}	3.25×10^{-4}	1.25×10^{-3}	$\pm$ 0.103×10^{-3}	8.2
	500	1.04×10^{-3}	3.99×10^{-4}	1.05×10^{-3}	$\pm$ 0.128×10^{-3}	12.2
	1000	4.28×10^{-4}	1.56×10^{-4}	4.28×10^{-4}	$\pm$ 0.496×10^{-4}	11.6

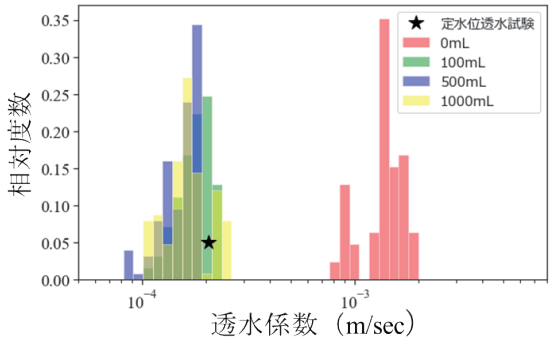


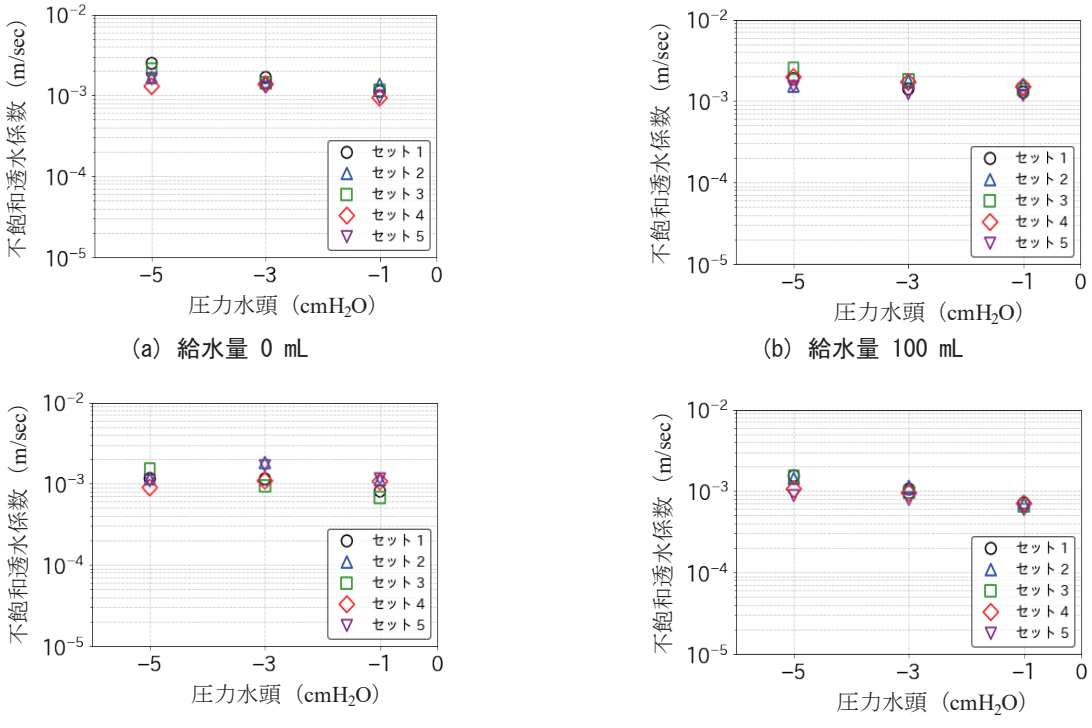
図-6 初期給水量ごとの透水係数の標本平均分布（供試体寸法【小】）

値の標準偏差（標本誤差），変動係数を求めた．その結果を**表-1** に示すとともに，一例として**図-6** に供試体【小】の各給水量における標本平均分布を示す．また，**図-6** 中には，5 回の定水位透水試験から得られた飽和透水係数の平均値 2.05×10^{-4} m/sec も示している．供試体【小】については，**表-1**，**図-6** から，初期給水量 0 mL において，最確値が 1.39×10^{-3} m/sec と，他の給水条件および定水位透水係数と比較して大きい値を示していることがわかる．一方，給水量 100～1000 mL では，現場飽和透水係数の最確値は，飽和透水係数とほぼ同程度の値を示し，100 mL のときが最も変動係数が小さいことがわかる．**表-1** の変動係数から，供試体【中】や供試体【大】では，供試体【小】に比べ，全体的にばらつきが大きくなるとともに，最確値が飽和透水係数よりも過大評価されることがわかる．各供試体の給水量に着目すると，供試体【中】では，1000 mL のときが，最も変動係数は小さく，最確値は飽和透水係数に近い値を得た．一方，供試体【大】では，給水ケース 100 mL における変動係数が最も小さいと確認されるが，最確値と飽和透水係数の差は他のケースよりも大きい結果となった．これに対して，1000 mL の給水ケースをみると，変動係数は大きいが，最確値は飽和透水係数に近い値が得られた．このことから，供試体【中】以上では初期給水量が 1000 mL でも不十分であり，さらに給水量を増やすことで定水位透水係数に近い値が得られるのではないかと推測できる。

以上のことから，計測の安定性を求める場合，試験前の給水量を供試体と【大】では 100 mL，供試体【中】では 1000 mL とすることで安定したデータが得られることがわかる．しかし，最確値や変動係数を考えると，供試体寸法が大きくなると，給水量が多いほど定水位透水係数の飽和透水係数に近い結果が得られることが考えられる．ただし，現場での計測においては，給水用の水はできるだけ少ない量が望ましいため，必要な精度に合わせて，給水量を設定する必要があると考えられる．

(3) 供試体【大】に対する Zhang の計算手法を用いた試験結果と考察

原位置での不飽和透水係数の計測精度を考慮するため，供試体寸法【大】の不飽和透水係数を Zhang の手法により，初期給水量における各圧力水頭での不飽和透水係数を算定し，その結果を**図-7** に示す．全体的な傾向としては，各圧力水頭における不飽和透水係数のばらつきが抑えられており，安定な計測結果が得られたと言える．また，圧力水頭の負の値が小さくなるにつれて不飽和透水係数が低下する傾向がわかる．しかし，この傾向は，一般に圧力水頭の低下に伴い，透水係数が増大するという従来の不飽和土質力学で考えられている傾向と逆になっている．この原因について，初期飽和度 50%の試験を圧力水頭 −1, −3, −5 cmH_2O の順で実施したことから，初期飽和度や試験順番が試験結果に影響を与えた可



(a) 給水量 0 mL　(b) 給水量 100 mL

(c) 給水量 500 mL　(d) 給水量 1000 mL

図-7 供試体【大】の各初期給水量の *h*-不飽和透水係数の関係

能性を考察した．そのため，初期飽和度 30%の試験で計測順番を変えて追加実施したが，得られる傾向は変化しなかった．各給水量の結果に着目すると，不飽和透水係数の値は 1 オーダーも変わらない結果となっている．本試験では，設定可能な圧力水頭の範囲に制約があり，理論的に領域に対応する不飽和透水係数のみが得られる手法といえる．一般に，不飽和透水係数は飽和度の低下とともに非線形的に減少するが，高飽和度領域ではその変化は比較的緩やかである可能性がある．したがって，本研究で得られた透水係数の差異は，大きな変化が生じにくい領域で測定が行われたことに起因していると考えられる．また，Zhang の手法は水分特性曲線（van Genuchten モデル[8]）および不飽和浸透解析に基づいてパラメータを設定する手法である．van Genuchten モデルにおけるパラメータの決め方には，土の区分として明確な基準がないことに加え，間隙比など透水係数に影響を与える要因が考慮されてない．そのため，モデル仮定やパラメータ設定が結果に影響を及ぼす可能性があり，計測結果の妥当性については今後さらに慎重な検証が必要である．

5. おわりに

本研究では，ミニディスクインフィルトロメータを用いて，Reynolds and Elrick の手法による現場飽和透水係数および Zhang の手法による不飽和透水係数について，試験開始時の給水量および供試体寸法が算出結果に及ぼす影響について検討した．

Reynolds and Elrick の手法を用いた現場飽和透水係数の算定では，供試体寸法が大きい条件において，初期給水量を増加させることで，算出値が定水位透水試験結果と概ね整合し，ばらつきも小さくなる傾向が確認された．これは，初期給水量が十分に確保されることで，試験初期の過渡的吸水過程の影響が緩和されたためと考えられる．また，供試体寸法が大きいほど，得られた現場飽和透水係数は，透水円筒を用いた定水位透水試験結果より大きく評価される傾向がある．このことから，本試験による評価が過大であるというよりも，透水円筒試験では供試体寸法の制約や側壁境界の影響により，流れ場が拘束され，透水係数が相対的に小さく算定されている可能性があると考えられる．また，初期飽和度を変更した場合でも，算定結果に顕著な差異は認められなかったが，各条件において一定の傾向は確認されており，初期状態が浸透挙動への影響は限定的である．ただし，現場での計測においては，給水用の水量は少量が望ましいため，必要な精度に合わせて給水量を設定する必要があると考えられる．

Zhang の手法について，初期給水量の影響を検討した結果，算定値の統計的ばらつきは比較的小さいものの，得られた不飽和透水係数の変化傾向が従来の不飽和土質力学で想定される傾向と一致しないことが認められた．本研究では，試験順序や給水条件を変更して再検討したが，傾向の改善は限定的であるため，パラメータ設定や初期条件の仮定が結果に大きく影響する可能性があると考えられる．したがって，適用に際しては van Genuchhten モデルの透水係数への影響因子を無視する妥当性やパラメータ設定基準を慎重に検討する必要があることが示された．

謝辞：本研究は，JSPS 科研費　JP25K07927 の助成を受けた．ここに謝意を表す．

参考文献

1) Elrick, D. E., Reynolds, W. D.：Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrometers, Advances in Measurement of Soil Physical Properties：Bringing Theory into Practice, SSSA Special Publication. 30, Soil Sci. Soc. Am., Madison WI, pp.1-24, 1992.
2) Reynolds, W. D., Elrick, D. E.：A Method for Simultaneous in Situ Measurement in the Vadose Zone of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship, Ground Water Monit. Remediat. 6, pp.84-95, 1986.
3) 小川大輝，酒匂一成，伊藤真一：携帯型ミニディスクインフィルトロメータによる現場透水係数の推定に関する一考察，第 10 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 97−102，2020.
4) Reynolds, W. D. and Elrick, D.E.: Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrometer, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.55, pp.633-639, 1991.
5) 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, pp.84-89, 2019.
6) Philip, J. R.：Steady Infiltration from Buried Point Sources and Spherical Cavities, Water Resour. Res. 4, pp.1039-1047, 1968.
7) Zhang, R：Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.61, pp.1024-1030, 1997.
8) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Soc. Am. J., 44, pp.892-898, 1980.
9) Wooding, R. A.：Steady infiltration from a circular pond, Water Resour. Res. 4, pp.1259-1273, 1968.
10) 公益社団法人地盤工学会編：「土質試験　基本と手引き」第二回改訂版，pp. 71−78，2010.

（2026.5.29　受付）