

プレッシャーインフィルトロメーターを用いた現場飽和透水係数の 測定方法に関する考察

Study on Techniques for Measuring the Field-Saturated Hydraulic Conductivity of Soils
by Using Guelph Pressure Infiltrometer

竹下祐二 Yuji TAKESHITA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
金 秉洙 Byeong-Su KIM (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
森井俊宏 Toshihiro MORII (新潟大学農学部)

不飽和地盤の表層近傍部分における現場飽和透水係数を計測する原位置透水試験方法として、プレッシャーインフィルトロメーターを用いた方法が提案されている。本方法では、地表面に貫入させた単一の浸潤用円筒を用いて定水位で浸潤を行い、計測された定常浸潤流量を用いて現場飽和透水係数を算定する。本文では、Reynolds と Elrick が提案しているプレッシャーインフィルトロメーターを用いた現場飽和透水係数の算出式を用いて、試験条件等が現場飽和透水係数の算出精度に与える影響について検討した。

キーワード：原位置透水試験，現場飽和透水係数，不飽和地盤 (IGC : C-8, D-4)

1. はじめに

河川堤防や斜面などの不飽和地盤や不飽和土構造物において、浸透挙動に起因した地盤工学的な諸問題を解決するためには、不飽和土の保水性や透水性を支配する浸透特性値の評価が重要である。不飽和地盤において評価すべき不飽和土の浸透特性値は、飽和および不飽和状態での透水係数と水分特性曲線である。一般に、降雨等による自然浸透や湛水に近い条件下で地表面から発生した浸潤挙動では、浸潤過程で間隙中に取り込まれた封入空気のために、その浸透領域は完全な飽和状態ではなく、それに近い疑似飽和状態にあると考えられる。この場合、浸透現象に関与する間隙量は、土の間隙率よりも小さく、有効間隙率で表される。本研究では、この状態を現場飽和状態と定義し、地下水面以下に存在する完全な飽和状態とは区別する。

現場飽和状態における透水係数を現場飽和透水係数 K_{fs} (field-saturated hydraulic conductivity) と定義すれば、その値は、室内透水試験等によって測定される完全な飽和状態での飽和透水係数 K_{fs} (truly saturated hydraulic conductivity) と比較して小さな値を示すことが指摘されている¹⁾。したがって、不飽和浸透挙動を支配する透水係数の最大値としては、飽和透水係数ではなく、現場飽和透水係数を用いる方が実際的であると考えられる。そのため、豪雨に伴う斜面土砂災害の対策調査あるいは河川堤防などの盛土構造物の性能照査や安全性評価、さらに締固め土の施工品質の管理などの実務においては、設計用地盤定数として現場飽和透水係数の活用が期待される。

現場飽和透水係数の原位置計測方法としては、不飽和地盤内に一定水位で注水を行い、その際に生じる定常浸潤流

量から現場飽和透水係数を算出する定水位定常透水試験を用いる方法が一般的である²⁾。それらの中で、不飽和地盤の表層近傍部分における現場飽和透水係数の計測方法として、プレッシャーインフィルトロメーター (Guelph Pressure Infiltrometer ; GPI) を用いた方法が提案されている。著者らは、本方法の試験装置がシンプルで、測定を簡便かつ迅速に行えるという原位置透水試験法としてのすぐれた特長を有していることに着目し、その適用性について検討を行ってきた³⁾⁷⁾。本文では、本試験方法による現場飽和透水係数の測定精度を検討するために、Reynolds と Elrick が提案している現場飽和透水係数の算出式¹⁾において、各パラメータが現場飽和透水係数の算出精度に与える影響を検討し、プレッシャーインフィルトロメーターによる原位置透水試験の試験方法や試験装置についての検討を行った。

2. プレッシャーインフィルトロメーターを用いた 原位置透水試験方法

2.1 原位置透水試験装置

プレッシャーインフィルトロメーターを用いた原位置透水試験装置を図-1 に示す。試験装置は単一の鋼製浸潤用円筒とその円筒内に定水位を湛水させて、浸透流量の経時変化を計測するためのマリ奥特サイフォン式給水装置で構成されている。本透水試験方法(以後、GPI法と記す)は、対象地盤の透水性に応じて、厚さ数 mm、直径 10cm ~ 20cm 程度の浸潤用円筒を地表面から 3cm ~ 5cm 程度の深さまで打設し、円筒内に 5cm ~ 20cm 程度の定水位を湛

水させて、定常浸潤流量の計測を行う。

GPI 法の特徴として、以下の点が指摘できる。

- (1) 試験地盤の攪乱を最小限に抑え、植生等の地表面の状態を考慮した状態での透水試験が可能である。
- (2) 地盤に挿入設置すべき部品は、浸潤用円筒のみであり、試験装置の設置が容易である。
- (3) 試験装置を構成する部品が少なく、かつコンパクトであり、可搬性にすぐれている。
- (4) 計測すべき物理量は定常時の浸透流量のみであり、定常法であるため試験手順が非常に簡便である。

現在、市販されている GPI 装置では、マリオットサイフォン式の給水タンクの断面積は 35.22cm² または 2.16cm² を切り替えて給水を行うことができ、給水タンク内の水位低下量を目視することで浸潤流量の計測を行う。その給水タンクの高さは約 70cm、給水可能量は約 2500cm³ である。また、最大 25cm の定水位を与えることが可能である。

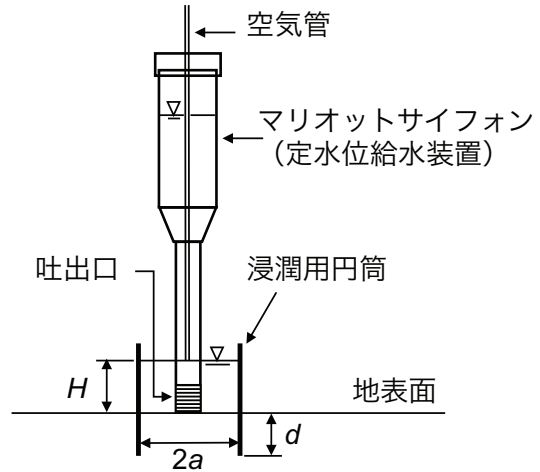


図-1 GPI を用いた原位置透水試験装置の概要

2.2 現場飽和透水係数の算出式

従来、浸潤用円筒を用いた定水位透水試験方法では、浸潤用円筒から不飽和地盤中への浸透流は鉛直下方への 1 次元浸透流を仮定して透水係数が計算されていた⁸⁾が、GPI 法では、浸潤用円筒の先端からの浸透流は、浸潤用円筒内の湛水による静水圧と地盤の飽和・不飽和浸透特性値に依存して 3 次元的（球根状）に広がっていくことを考慮した点に特徴がある。Reynolds と Elrick は地表面にある点源からの浸潤に関する理論解を浸潤用円筒からの 3 次元浸透挙動について拡張し、剛で等方均質状態である地盤の現場飽和透水係数 K_{fs} を算出する式を次のように誘導している²⁾。

$$K_{fs} = \frac{\alpha^* G Q_s}{\alpha \alpha^* H + a + G \alpha^* \pi a^2} \quad (1)$$

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad (2)$$

ここに、 a ：浸潤用円筒の半径、 H ：浸潤用円筒内の一定水位、 d ：浸潤用円筒の地表面からの挿入深さ、 Q_s ：定常浸透流量

G は浸透流が浸潤用円筒の底部より地盤内へ 3 次元に広がっていく挙動を表現するために導入された形状係数であり、 $K_{fs} = 10^{-2} \text{cm/s} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ 、 $H = 5 \text{cm} \sim 25 \text{cm}$ 、 $a = 5 \text{cm} \sim 10 \text{cm}$ 、 $d = 3 \text{cm} \sim 5 \text{cm}$ および $d/a = 0.3 \sim 1.0$ を条件とした数値計算の結果にもとづいて誘導されている¹⁾。また、 α^* は不飽和地盤の浸透特性を考慮するパラメータとして不飽和透水係数 $K(h)$ を負の圧力水頭 h の指数関数で表した場合のべき指数であり、次式で表すことができる³⁾。

$$\alpha^* = \frac{1}{\int_{h_0}^0 \left(K(h) / K_{fs} \right) dh} \quad (3)$$

表-1 土の組織・構造分類に基づいた α^* の推奨値²⁾

土の組織・構造分類	α^* (cm ⁻¹)
埋立て被覆材やライナーなどの締固められた構造のない粘性材料、湖成または海成堆積土など	0.01
細粒組織（粘性）で非構造性の土	0.04
非構造性材料と細砂を含む、粘土からロームまでのたいいていの土、および一般の土の最初の選択値	0.12
粗砂と礫質砂、および大きな亀裂やマクロポアをもつ高度に構造化された土も含む	0.36

ここで、 h_0 は不飽和領域の土中水分量が十分に減少した状態での負の圧力水頭の値である。

α^* は試験者が土の組織や構造にもとづいて決定すべきパラメータであり、その選択肢としては、表-1 に示す値が推奨されている²⁾。 α^* は地盤の不飽和浸透特性を考慮したパラメータであり、表-1 によれば、透水係数が小さい地盤では、一般に α^* は小さな値を有すると思われる。

3. GPI 法による現場飽和透水係数の計測精度

3.1 計測精度の検討方法

GPI 法を用いて現場飽和透水係数を算出する上で、実務的な問題点としては、以下の 3 点が考えられる。

- (1) 試験地盤の状態に応じた試験条件（浸潤用円筒の半径、地表面からの挿入深さおよび浸潤円筒内の一定水位）の設定方法。
- (2) 定水位給水装置における定常流量の計測精度
- (3) 不飽和浸透特性パラメータ α^* の選択方法

GPI 法は定常法による原位置定水位透水試験方法であり、計測すべき物理量は定常流量のみであるため、地盤の透水性に応じた試験条件の設定は非常に重要であると思われる。たとえば、地盤の透水性が小さい場合には、試験時間の短縮や定常流量の測定精度を確保する目的で、可能な限り大きな動水勾配による浸透挙動を生じさせ、透水試

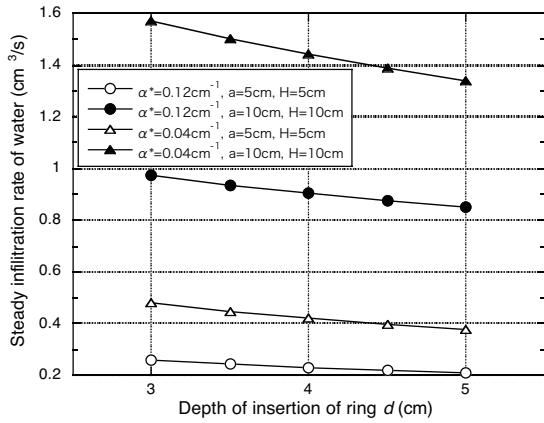


図-2 浸潤用円筒の挿入深さが定常浸透流量に与える影響

験面積を増大させる必要がある。一方で、過度の浸透挙動を与えた場合には、地盤状態の乱れや、浸透流量が過大となって、定常流量の計測が困難になることが予想される。

そこで、本研究では、現場飽和透水係数が 10^{-2}cm/s ~ 10^{-4}cm/s 程度の不飽和砂質土地盤における GPI 法の実施を想定して、現場飽和透水係数の算出式(1)に含まれる GPI 法の試験条件パラメータ (a, d, H) および地盤の不飽和浸透特性値 α^* が現場飽和透水係数の算出精度に与える感度を解析し、適切な試験条件の設定方法についての検討を試みる。なお、式(1)は $H=5\text{cm}\sim 25\text{cm}$, $a=5\text{cm}\sim 10\text{cm}$, $d=3\text{cm}\sim 5\text{cm}$ の試験条件において誘導されているため、本研究における GPI 法の試験条件等の検討は、これらの各パラメータの範囲において行う。

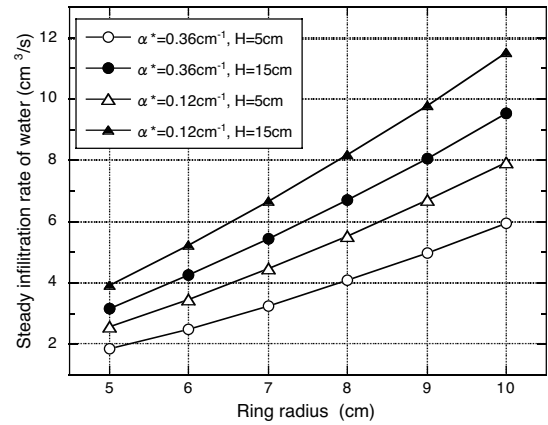
3.2 浸潤用円筒の挿入深さの選定

GPI 法によって計測される定常浸透流量 Q_s は、式 (1) より次式で算出できる。

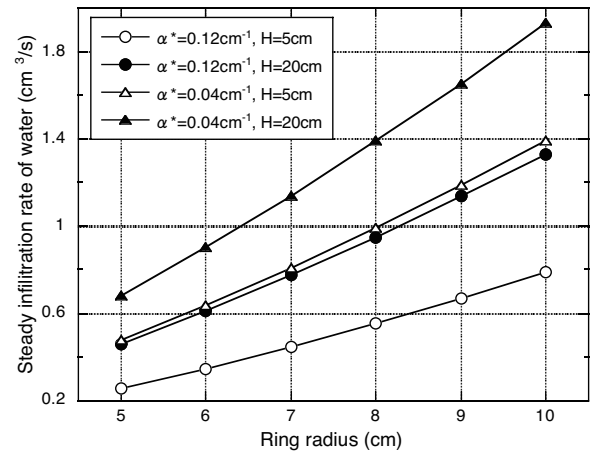
$$Q_s = \frac{K_{fs}(\alpha^* H + a + G\alpha^* \pi a^2)}{\alpha^* G} \quad (4)$$

式(4)によれば、 Q_s は K_{fs} に比例して増大することは明らかである。そこで、 K_{fs} を 10^{-3}cm/s として、 α^* が 0.12cm^{-1} または 0.04cm^{-1} の不飽和砂質土地盤において、半径が 5cm または 10cm 浸潤用円筒を用いて、5cm または 10cm の定水位を与えて GPI 法を実施した場合に、浸潤用円筒の挿入深さが定常浸透流量に与える影響について、式(4)を用いて検討した結果を図-2 に示す。浸潤用円筒の挿入深さが定常浸透流量に与える影響には以下の傾向が認められる。

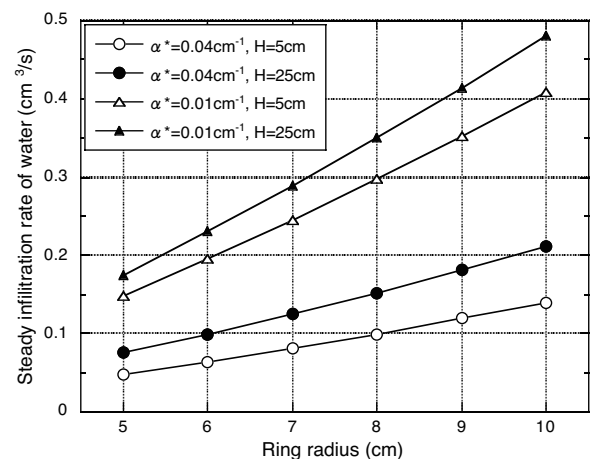
- (1) Q_s は a と H を大きくすれば増加し、 d が大きくなると Q_s は減少する。
- (2) Q_s は α^* が大きくなると減少する。
- (3) Q_s に及ぼす d の影響は、 a や H に比較して小さい。



(a) $K_{fs} = 10^{-2}\text{cm/s}$



(b) $K_{fs} = 10^{-3}\text{cm/s}$



(c) $K_{fs} = 10^{-4}\text{cm/s}$

図-3 浸潤用円筒の半径が定常浸透流量に与える影響

表-2 α^* が現場飽和透水係数に与える影響の検討に
用いた GPI 法の試験条件

K_{fs} (cm/s)	a (cm)	H (cm)	d (cm)	α^* (cm^{-1})	Q_s (cm^3/s)
1.0×10^{-2}	5	5	3	0.36	1.826
				0.12	2.570
1.0×10^{-3}	10	10		0.12	0.972
				0.04	1.570
1.0×10^{-4}	10	20		0.04	0.193
			0.01	0.462	

以上の結果より、浸潤用円筒の挿入深さ d が定常浸透流量に与える影響は小さいと考えられる。そのため、浸潤用円筒の挿入深さは、現場飽和透水係数の算出式の誘導条件である 3cm から 5cm の範囲において、地表面の固結状態等に応じて任意に決定すれば良いと思われる。この際、地盤の攪乱や浸潤用円筒内に設定した定水位が浸潤用円筒側面を伝って地表面に漏水が生じることがないように留意する必要がある。そこで、以後の GPI 法の検討における解析条件としては、浸潤用円筒の挿入深さは 3cm とする。

3.3 浸潤用円筒半径と定水位の選定

GPI 法の実施時に適切な定常流量の計測を実施するためには、地盤の透水性に応じた浸潤用円筒半径 a と定水位 H の選定を行う必要がある。そこで、現場飽和透水係数が 10^{-2}cm/s から 10^{-4}cm/s の地盤において GPI 法を実施した場合において、 a や H の設定が定常流量に与える影響の検討を式(4)により行った。

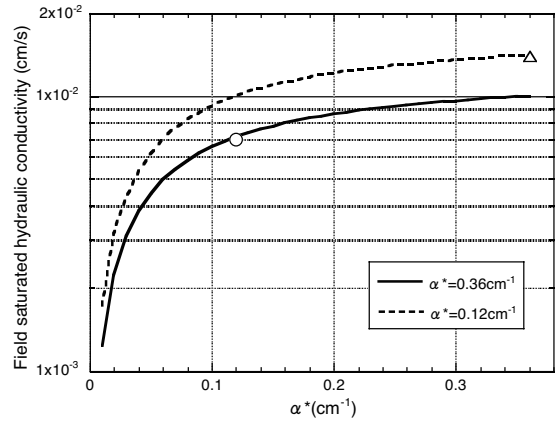
浸潤用円筒の半径と定水位挿入深さが定常浸透流量に与える影響を図-3 に示す。これらの図によれば、計測すべき Q_s は地盤の透水係数に大きく支配される。また、大きな (a, H) の組合せを選択するほど、計測すべき Q_s は単調に増加する傾向が認められる。GPI 法において、適切な精度で Q_s の計測を行うためには、低透水性地盤では、浸透流量が過小にならないように、 (a, H) を大きく設定することによって浸透断面積と動水勾配を大きくして浸透流量を増加させ、高透水性地盤では、逆に、 (a, H) を小さく設定し、浸透流量が過大にならないようにすることが必要であるとされる。そこで、GPI 法による K_{fs} の算出式(1)が誘導された条件である $a=5\text{cm}\sim 10\text{cm}$ 、 $H=5\text{cm}\sim 25\text{cm}$ の範囲において、図-3 に示した解析結果から、地盤の K_{fs} に応じた (a, H) の設定値として、以下のような組合せを提案した。

- (1) $K_{fs}=10^{-2}\text{cm/s}$: $a=5\text{cm}$ 程度, $H=5\text{cm}$ 程度
- (2) $K_{fs}=10^{-3}\text{cm/s}$: $a=5\sim 10\text{cm}$ 程度, $H=5\sim 10\text{cm}$ 程度
- (3) $K_{fs}=10^{-4}\text{cm/s}$: $a=10\text{cm}$ 程度, $H=10\sim 20\text{cm}$ 程度

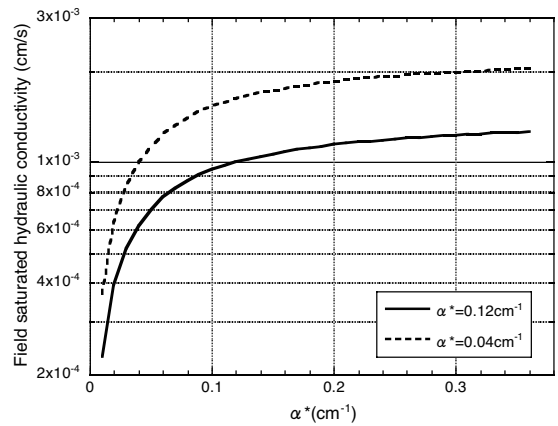
また、GPI 法の実施においては、図-3 に示された Q_s を十分な精度で計測できる給水装置が必要となる。

3.4 α^* の選定

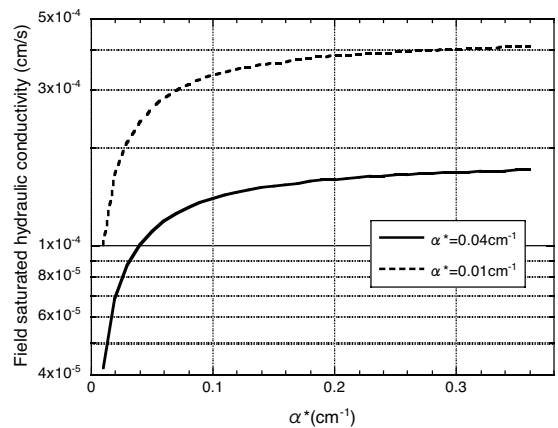
GPI 法では、土の不飽和透水係数 $K(h)$ を Gardner が経験



(a) $K_{fs} = 10^{-2}\text{cm/s}$



(b) $K_{fs} = 10^{-3}\text{cm/s}$



(c) $K_{fs} = 10^{-4}\text{cm/s}$

図-4 α^* が現場飽和透水係数の算出に与える影響

的に提案した式(5)の指数関数⁹⁾で表せると仮定することにより、浸透現象に関する理論式を単純化して、式(1)を導いている。

$$K(h) = K_{fs} \exp(\beta h) \quad (5)$$

ここに、 β は $\ln K$ と h の関係の勾配であり、土質状態によって決定されるパラメータである。

したがって、土の不飽和透水係数が指数関数で表せない場合や、式(1)に含まれる α^* の設定において、表-1 に示された α^* の推奨値が試験地盤の状態を反映しなければ、正確な K_{fs} の算定は行えず、GPI 法の制約にもなり得る。そこで、ここでは表-1 に示された α^* の推奨値が現場飽和透水係数の算出に与える影響を検討する。前述 3.3 の結果に基づいて、現場飽和透水係数に応じた代表的な試験条件として表-2 に示すような条件を設定し、式(1)を用いて検討した。

α^* の設定値が現場飽和透水係数の算出値に与える影響を図-4 に示す。これらの図によれば、算出に用いる α^* の値に依存して、現場飽和透水係数の算出値が異なることがわかる。たとえば、図-4 (a) によれば、 $\alpha^*=0.36\text{cm}^{-1}$ の地盤条件において、 $\alpha^*=0.12\text{cm}^{-1}$ として K_{fs} を算出した場合には、図中に○で示すように、約 $7 \times 10^3 \text{cm/s}$ が算出され、また、 $\alpha^*=0.12\text{cm}^{-1}$ の地盤条件において、 $\alpha^*=0.36\text{cm}^{-1}$ として K_{fs} を算出した場合には、図中に△で示すように、約 $1.4 \times 10^2 \text{cm/s}$ が算出されることがわかる。図-4 (b)、図-4 (c) においても同様の傾向が認められる。したがって、 K_{fs} の算定において、地盤の有する実際の α^* よりも小さな α^* を用いた場合には、現場飽和透水係数を過小に評価し、大きな α^* を用いた場合には過大に評価することがわかる。

森井は α^* の設定について、土の不飽和透水係数 $K(h)$ が式(5)のように指数関数モデルで表現できない場合には、 $K(h)$ を直接積分し、式(3)を用いて等価な α^* を求める方法を提示している³⁾。しかし、現状では $K(h)$ の測定は容易ではなく、すべての地盤状態における $K(h)$ の情報を得ることが困難である。実際の不飽和浸透特性値を忠実に反映できる α^* の決定方法は、GPI 法における今後の重要な研究課題である。

3.5 給水装置における流量測定精度の選定

GPI 法の給水装置としては、一般にマリOTTサイフォン式の給水タンクが用いられている。目視により浸透流量の計測を行う場合、その計測精度は、給水タンクの断面積（タンク給水率）および給水タンク内の水位低下速度に依存する。検討に用いた給水タンク断面積は、市販されている GPI 装置の給水タンク断面積 35.22cm^2 および 2.16cm^2 を選定した。

図-5 に給水タンクの断面積が 35.22cm^2 と 2.16cm^2 である場合に、給水タンク内の水位低下速度と計測可能な定常浸透流量の関係を示した。前述 3.3 の結果によれば、計測すべき定常浸透流量 Q_s は地盤の現場飽和透水係数 K_{fs} に応じて以下のようにまとめられる。

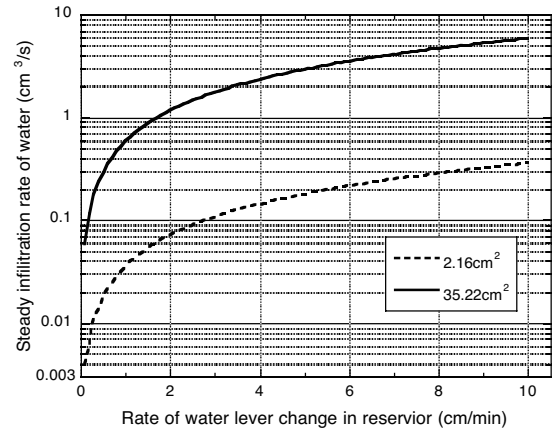


図-5 給水タンク内の水位低下速度と計測可能な定常浸透流量の関係

- (1) $K_{fs}=10^{-2}\text{cm/s}$: $Q_s=1.5\sim 3\text{cm}^3/\text{s}$ 程度
- (2) $K_{fs}=10^{-3}\text{cm/s}$: $Q_s=0.8\sim 2\text{cm}^3/\text{s}$ 程度
- (3) $K_{fs}=10^{-4}\text{cm/s}$: $Q_s=0.1\sim 0.5\text{cm}^3/\text{s}$ 程度

したがって、図-5 において、給水タンク内の水位低下速度が $1\sim 3\text{cm}/\text{min}$ 程度必要であるとした場合、 K_{fs} が 10^{-4}cm/s 程度の透水試験では、断面積 2.16cm^2 のタンクの使用が、また、 K_{fs} が $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{cm/s}$ 程度の透水試験では、断面積 35.22cm^2 のタンクの使用が適していることがわかる。このように、定常浸透流量の適切な計測精度を確保するためには、試験地盤の現場飽和透水係数に応じた給水タンクと浸潤用円筒の選択を行うことが重要であると思われる。

4. おわりに

不飽和地盤における原位置透水試験方法として、試験装置や試験方法がシンプルで、簡便かつ比較的短時間に多くの地点での現場飽和透水係数を測定できるとされているプレッシャーインフィルトローメーター法に着目し、Reynolds と Elrick が提案している現場飽和透水係数の算出式において、試験条件によって決定されるパラメータが現場飽和透水係数の算出精度に与える影響を検討した。

本研究で得られた知見は以下のものである。

- (1) 浸潤用円筒の挿入深さが定常浸透流量に与える影響は小さいため、浸潤用円筒の挿入深さは、GPI 法による現場飽和透水係数の算出式の誘導条件である 3cm から 5cm の範囲において、地表面の固結状態等に応じて任意に決定すれば良いと思われる。この際、地盤の攪乱や浸潤用円筒内に設定した定水位が浸潤用円筒側面を伝って地表面に漏水が生じることがないように留意する必要がある。
- (2) 浸潤用円筒の半径と浸潤用円筒内の定水位が定常浸透流量に与える影響は大きく、それらの組合せを大き

くするほど、計測すべき定常浸透流量は単調に増加する傾向が認められる。適切な精度で定常浸透流量の計測を行うためには、低透水性地盤では、浸透流量が過小にならないように、また、高透水性地盤では、浸透流量が過大にならないようにすることが必要である。そのため、GPI法による K_{fs} の算出式の誘導条件である $a=5\text{cm}\sim 10\text{cm}$ 、 $H=5\text{cm}\sim 25\text{cm}$ の範囲において、地盤の透水性に応じた浸潤用円筒の半径と浸潤用円筒内の定水位の組合せを提案した。

- (3) α^* の設定値が現場飽和透水係数の算出値に与える影響について検討し、地盤の有する実際の α^* よりも小さな α^* を用いた場合には、現場飽和透水係数を過小に評価し、大きな α^* を用いた場合には過大に評価することを示した。
- (4) 給水タンクの断面積が異なる場合について、給水タンク内の水位低下速度と計測可能な定常浸透流量の関係を示した。定常浸透流量の適切な計測精度を確保するためには、試験地盤の現場飽和透水係数に応じた給水タンクと浸潤用円筒の選択を行うことが重要であることを指摘した。

不飽和地盤における標準的な単一の透水試験方法を標準化することは、不飽和地盤固有の不均質性や複雑性、また、それぞれの透水試験方法が有する理論的および実施上の制約により、必ずしも容易ではないと考えられる。そのため、複数の試験方法を組み合わせ、透水係数の計測と評価を行うことが有用であると思われる。そして、今後、不飽和浸透特性値（不飽和透水係数と水分特性曲線）の原位置測定に展開していくためには、浸潤量に加えて透水試験時の土中水分量や間隙水圧の変化など、新たな計測物理量が必要と考えられ、これらの非定常計測データを浸透流解析でシミュレートし、不飽和浸透特性の関数モデルを同定する、迅速かつ簡便な非定常透水試験方法の開発が望まれる¹⁰⁾。

謝辞

本研究は平成 26 年度科学研究費補助金（基盤研究(A) 25252043a5、代表者：森井俊広）の助成により実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Reynolds, W.D., and Elrick, D.E.: Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 54, pp.1233-1241, 1990.
- 2) 地盤工学会編: 不飽和地盤の挙動と評価, pp.67-74, 2004.
- 3) 森井俊広, 井上光弘, 竹下祐二: プレッシャーインフィルトロメータ法を用いた土の原位置透水試験方法, *農業土木学会論文集*, No.204, pp.149-158, 1999.
- 4) 森井俊広, 井上光弘, 竹下祐二: プレッシャーインフィルトロメータ法の測定理論に関する実験および数値計算による検討, *農業土木学会論文集*, No.206, pp.19-27, 2000.
- 5) 森井俊広, 井上光弘, 竹下祐二: プレッシャーインフィルトロメータ法を用いた原位置透水試験の測定精度, *農業土木学会論文集*, No.207, pp.29-37, 2000.
- 6) 森井俊広, 竹下祐二, 志賀 剛: 原位置浸潤試験法を用いた土砂堆積地盤の透水性の評価, *土と基礎*, Vol.49, No.11, pp.7-9, 2001.
- 7) 森井俊広, 竹下祐二, 小林 薫, 松本和伸: 不飽和地盤における原位置透水試験, *地盤工学会誌*, Vol.62, No.5, pp.18-21, 2014.
- 8) Bouwer, H.: Intake rate: cylinder infiltrometer, *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, pp.825-844, 1986.
- 9) Gardner, W. R.: Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, *Soil Science*, Vol. 85, pp.228-232, 1958.
- 10) 竹下祐二, 諏訪隼人, 森井俊広: 不飽和砂質土地盤におけるヒステリシス現象を考慮した浸透特性値の原位置試験方法, *土木学会論文集C*, Vol.63, No.4, pp.1153-1162, 2007.

(2015 年 6 月 22 日 受付)