

## 不飽和地盤における浸透特性値の原位置測定方法

## Field Techniques for Measuring Soil Hydraulic Properties on Unsaturated Soils

竹下祐二 Yuji TAKESHITA (岡山大学学術研究院環境生命科学学域)



不飽和地盤や土構造物では、浸透現象に起因した地盤工学的な諸問題の検討が必要とされている。そのためには、不飽和土の保水性や透水性を表す浸透特性値の測定と評価が重要となる。本文では、不飽和土の浸透特性値の特徴および提案されている測定方法について概説し、不飽和浸透特性値や現場飽和透水係数の原位置測定事例について論述する。

キーワード：浸透特性値，原位置試験，現場飽和透水係数，不飽和地盤 (IGC : C-8, D-4)

## 1. はじめに

斜面の土砂災害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、締固め土の施工品質の管理など、地下水面よりも上部の不飽和地盤や土構造物では、浸透現象に起因した地盤工学的諸問題の検討が必要とされている。そのためには、図-1 に示すような不飽和土の保水性と透水性を表す不飽和浸透特性値の測定と評価が重要となる。不飽和土の浸透特性値として評価すべき物性値は、土の保水性に基づく水分特性曲線と飽和および不飽和状態におけるそれぞれの透水係数である。これらの物性値は工学および農学分野において計測が試みられ、数値シミュレーションの入力値として利用されている。また、不飽和土の浸透特性値は不飽和土のせん断強度や変形特性、地盤中の物質移動、蒸発散、生態系の物質循環などにも大きく影響している。本文では、不飽和土の浸透特性値の特徴および提案されている測定方法の現状と課題、そして測定事例について論述する<sup>注釈1</sup>。

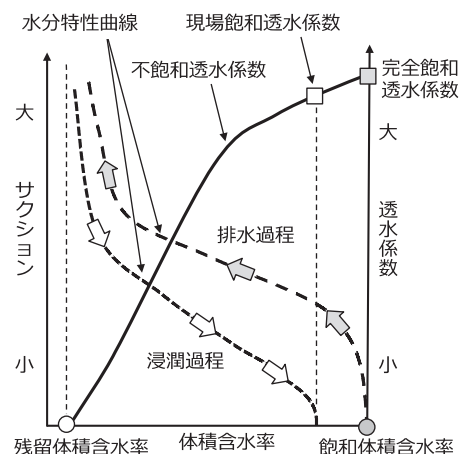


図-1 不飽和土の浸透特性値の概念図

ここで、 $s$  : サクション(kPa),  $u_a$  : 間隙空気圧(kPa),  $u_w$  : 間隙水圧(kPa)である。

大気圧下では間隙空気圧はゼロであるため、サクションは負の間隙水圧の絶対値に等しい。また、土中水分量は土全体の体積に対する土中水分量の体積の割合で定義される体積含水率で表示される場合が多い。

水分特性曲線の形状は図-1 に示すように土中水分量の増減によって非線形に変化し、土の間隙構造や乾燥密度などの土質特性によっても異なる。さらに、水が浸潤する過程と排水する過程においても、形状の異なる曲線を示すヒステリシス現象を有することが知られている。そのため、任意のサクションに対応する土中水分量は、浸潤過程よりも排水過程の方が大きくなる。

## 2. 不飽和土の浸透特性値の特徴

## 2.1 保水性

不飽和土の保水性は、土中水のポテンシャルエネルギーのうち、土粒子表面の吸着力と土粒子間の表面張力に関するマトリックポテンシャル（負の圧力水頭またはマトリックサクション）と土中水分量との関係を示す水分特性曲線を用いて評価される。マトリックポテンシャルの絶対値がサクションであり、次式で示される<sup>1)</sup>。

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

注釈1 本稿は、既発表の複数稿をまとめて拡充・再構成したものである。

## 2.2 透水性

不飽和土の透水性は、飽和土の透水性と同様にダルシーの法則に基づく透水係数を用いて表現できると考えられている。不飽和土の透水係数は間隙中の水分量やその分布状態に大きく影響され、図-1 に示すように土中水分量の減少やサクションの増加に伴って、指数関数的に小

さくなる。そのため、不飽和透水係数は土中水分量またはサクシジョンの関数として表現されており、水分特性曲線と同様にヒステリシス現象を有するが、不飽和透水係数を土中水分量の関数として表現した場合には、ヒステリシスの影響は無視できると考えられている<sup>1)</sup>。

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（飽和度 100%）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。このような浸透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されることが適切であると思われる。

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  $K_{is}$  (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<sup>2)</sup>。そのため、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。したがって、河川堤防などの盛土構造物の性能照査や安全性評価、あるいは豪雨に伴う斜面土砂災害の対策調査、さらには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。

### 3. 不飽和土の浸透特性値の原位置測定方法

#### 3.1 測定方法の現状

不飽和土の浸透特性値（以後、不飽和浸透特性値と記す）を精度良く測定する方法は確立されていない。不飽和浸透特性値は土に固有の物性値であり、原位置において計測、評価すべきであるが、土中水分量やサクシジョンに対して強い非線形性を有するため、原位置試験において、これらの制御や測定は容易ではなく、試験装置は複雑になり、高い測定技術が求められる。例えば、サクシジョンの測定では、脱気したセラミックフィルターを用いて負の間隙水圧を測定する必要がある<sup>1)</sup>。また、土中水分量の即時測定には、室内土質試験の場合には供試体の重量変化を直接測定する方法などが考えられるが、センサーを用いて間接的に計測する場合には、対象土に対するセンサーのキャリブレーション作業が必要となる<sup>1)</sup>。

不飽和浸透特性値の測定方法は定常法と非定常法に大別される。定常法の試験手順は簡便であるが、対象領域の不飽和浸透が水分平衡状態に達するまでに長時間を要するため、主に高透水性材料や比較的水分量の多い領域（低サクシジョン領域）での測定に用いられる。一般に、試験時間が長期化するため、水が浸潤する過程での測定

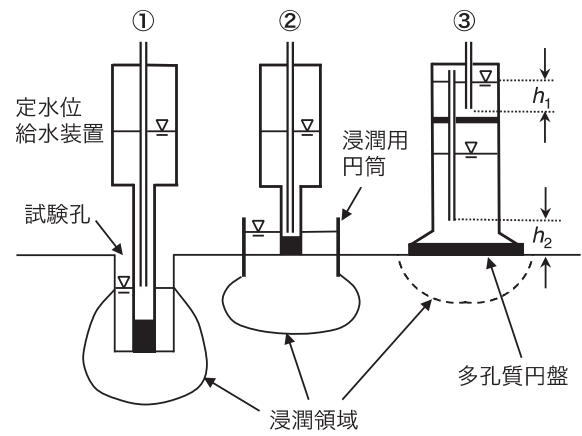


図-2 不飽和地盤表層での定水位透水試験方法

は困難である。一方、非定常法では測定時間が比較的短く、低透水性材料や高サクシジョン領域での測定にも適用可能とされているが、非定常浸透流の挙動は試料や地盤の初期状態に大きく依存するため、適切な試験条件の設定に留意する必要がある。

#### 3.2 定常法

##### 3.2.1 保水性試験

定常法による土の保水性を求める試験は地盤工学会によって、室内試験のみが基準化されている<sup>3)</sup>。その代表的な試験方法である加圧法では試料に与える任意の空気圧を段階的に増加させ、それぞれのサクシジョン状態において、試料内が水分平衡状態に達するまで排水した後の土中水分量を測定することで、水分特性曲線を測定している。この試験法では、透水性の良い材料においても数日から1ヶ月程度の長時間を要するため、実施は容易ではない。そこで、加圧法による新しい試験方法として、試料に与える空気圧を一定圧で連続的に増加または減少させ、試料内のサクシジョンと土中水分量を連続測定することで、試験時間を短縮させ、水分特性曲線のヒステリシスをも測定できる試験方法が提案されている<sup>4)</sup>。

##### 3.2.2 透水試験

不飽和地盤での透水性評価において、不均質性や異質性が懸念される場合や乱れの少ない試料を用いた室内透水試験の実施が困難である場合などには、原位置透水試験が有用である。不飽和透水係数の測定方法は基準化されていないが、現場飽和透水係数を測定する原位置透水試験としては、不飽和地盤内に一定の水頭で注水を行い、計測された定常浸潤流量から透水係数を算出する定常試験方法が地盤工学会基準として示されている<sup>2)</sup>。代表的な透水試験方法として図-2に示す3種類の 방법이提案されている。

##### (1) 試験孔を用いる方法

地盤に円筒状の試験孔を削孔し、孔内に定水位を湛水させて、孔壁および孔底より浸透させる。代表的な試験

法に E-19 法とゲルフ式ウエルパーミアメーター (Guelph Well Permeameter, 以後 GWP 法と記す) 法が提案されている。両者の違いは試験孔の形状のみである。E-19 法の試験孔は、標準として直径 300mm, 深さ 300mm 程度であり, 孔壁の崩壊防止のために孔内に粒径 5~20 mm 程度の碎石を充填する。一方, GWP 法の試験孔は直径 50mm 程度であり, 深さは孔内に設定する定水位の値 (通常 30~150mm 程度) より, 必要な深さが決定される。これらの方法では, 試験孔の孔底周辺の局所的な透水係数の測定が可能であるため, 削孔深度の異なる試験孔を用いた透水試験を実施することにより, 透水係数の鉛直分布を評価できる。

(2) 浸潤用円筒を用いる方法

地表面に単一の浸潤用円筒を打設し, 円筒内に定水位 (正の水圧) を湛水させて, 円筒の先端から浸透を生じさせる。代表的な試験法として, ゲルフ式プレッシャーインフィルトロメーター (Guelph Pressure Infiltrometer, 以後 GPI 法と記す) 法が提案されている。GPI 法では, 対象地盤の透水性に応じて, 厚さ数 mm, 直径 100~200mm 程度の浸潤用円筒を 30~50mm 程度の深さまで打設し, 円筒内に 50~250mm 程度の定水位を湛水させる。円筒の先端からは, 浸透流が 3 次元的 (球根状) に広がっていくと想定して透水係数の算出式が誘導されており, 地表面から深度 200mm 程度の領域における平均的な透水係数が測定される。この方法では, 試験地盤の攪乱を最小限に抑え, 植生等, 地表面の状態を保持した状態での透水試験が可能であるが, 浸潤用円筒を地盤に挿入する際に円筒側面と地盤に隙間が生じ, 漏水が発生しないように注意が必要である。

(3) 多孔質円盤を用いる方法

図-2 中の③に示すように, マリオットサイフの組合せによって発生させた -50mm 程度の負の一定水圧 ( $=h_1-h_2$ ) を地表面に設置した多孔質円盤上に与えて浸透させる。代表的な試験法に負圧浸入計 (Disk Permeameter, Tension infiltrometer) がある。本法の利点は, 降雨, 灌漑などによる浸潤水圧が小さく, 正圧に至らない場合における浸透現象を外力として再現でき, 地盤を全く攪乱することなく透水試験を行えることにある。ただし, 多孔質円盤の透気特性やその地表面との接触状態に留意が必要である。

3.3 非定常法

不飽和浸透特性値の測定方法最も基本的な非定常法は, インスタントニアスプロファイル法<sup>5)</sup> (Instantaneous Profile Method, 以後 IP 法と記す) である。本試験方法は, 室内試験として実施される場合が多いが, 原位置試験としても実施可能である。図-3 に原位置試験における IP 法の概念図を示す。IP 法では, 供試体または地盤内に鉛直一次元の非定常浸透流を発生させ, 浸透領域内における鉛直方向の圧力水頭分布と土中水分量分布を連続的に測定する。任意区間の動水勾配と浸透流量の経時変化よ

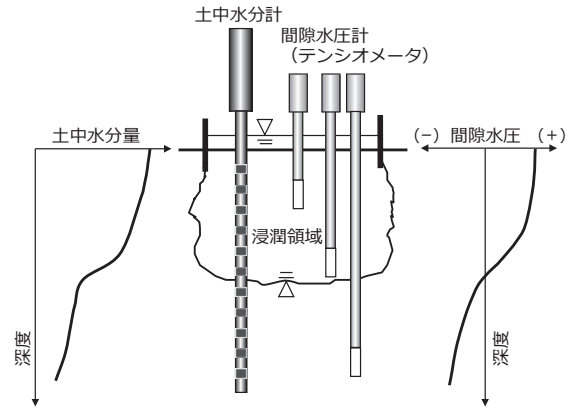


図-3 原位置試験における IP 法の概念図

り, 深度  $L$  における不飽和透水係数  $K(\theta)$  を式(2)より算定する。

$$K(\theta) = \frac{\left( \int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right)_{z,t}}{\left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)_{z,t}} \quad (2)$$

ここに,  $\theta$  は体積含水率,  $t$  は計測時間,  $z$  は鉛直座標,  $h$  は圧力水頭である。

式(2)の右辺の分子は深度  $L$  までの区間での土中水分量の経時変化であり, 分母はこの区間の動水勾配である。また, 水分特性曲線は圧力水頭の計測座標点における土中水分量を計測して算定される。

IP 法では, テンシオメータや土中水分計などの挿入型センサーを複数深度に設置して計測する必要があり, 原位置試験としての実施例は極めて少ない状況にある。そのため, 比較的透水性の高い砂質土に対しては, 浸潤領域の水分プロファイルを線形近似して, 土中水分量の計測点を低減させる方法<sup>6)</sup> や, 浸透流の動水勾配を 1.0 と仮定する試験方法<sup>7)</sup> など, 簡便な IP 法の実施が試みられている。

3.4 関数モデルによる不飽和浸透特性値の推定方法

3.4.1 不飽和浸透特性値の関数モデル

不飽和浸透特性値は非線形性の強い物性値であるため, その特性を適切な関数モデルで表現し, 室内試験または原位置試験で測定された不飽和浸透挙動を再現できる関数モデルを決定できれば, 以下の利点が期待される。

- (1) 不飽和土の保水性試験や透水試験における離散的な測定値を連続的な関数で内挿し, 任意の不飽和状態における不飽和浸透特性値を算定できる。
- (2) 関数モデル中のパラメータを変更することにより, 異なる土質の不飽和浸透特性値を表現することができ, 浸透特性値の変動を定量的に解析できる。

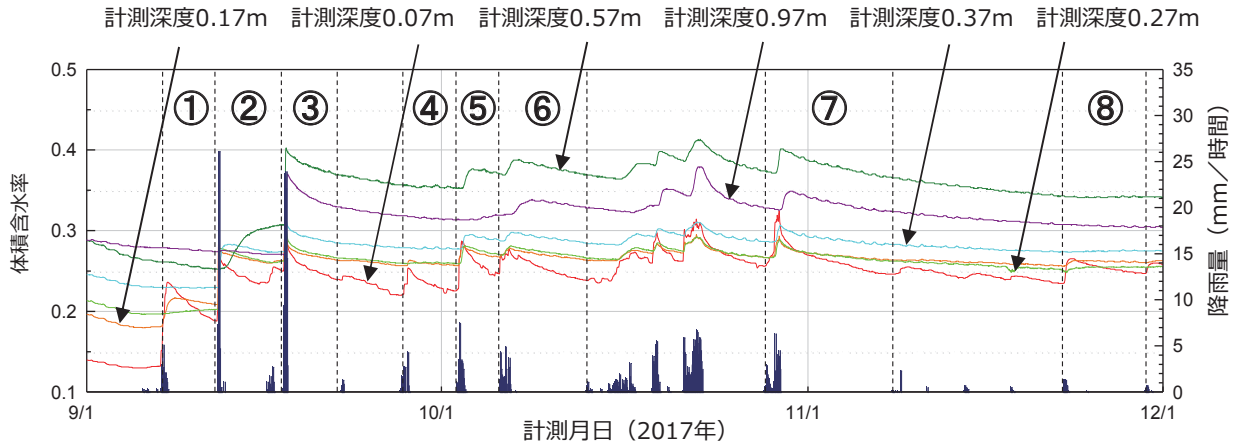


図-4 計測された土中水分量と降雨量の変動状況

(3) 関数モデルは浸透流解析コードに組込むことが容易であり、数値シミュレーションにおいて有用である。不飽和浸透特性値の正確な関数形状は未知であるが、現在、最も利用されている関数モデルは次式に示す van Genuchten のモデル<sup>8)</sup> (以後、VG モデルと記す) である。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^{1-1/n} \quad (3)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^{0.5} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/(1-1/n)})^{1-1/n} \right] \quad (4)$$

ここで、 $S_e$  : 有効飽和度、 $h$  : 圧力水頭、 $\theta_s$  : 飽和体積含水率、 $\theta_r$  : 残留体積含水率、 $K(S_e)$  : 不飽和透水係数、 $K_s$  : 飽和透水係数、 $\alpha$  :  $h$  の逆数の次元を持つスケールパラメータ ( $\alpha > 0$ )、 $n$  : 無次元パラメータ ( $n > 1$ )

VG モデルでは、水分特性曲線と不飽和透水係数の関数式を共通のパラメータを用いて表現できるため、水分特性曲線と連動して不飽和透水係数の関数式を得ることができる。残留体積含水率は土粒子に拘束されている吸着水などの非自由水で、マトリックポテンシャルの変動による土中水分量の変化が生じない状態の体積含水率と考えられるが、水分特性曲線の関数式中でのフィッティングパラメータとして用いられる場合もある<sup>9)</sup>。また、砂質土では間隙で保水されている土中水分量が卓越していると考えて、 $\theta_r = 0$  であると仮定された事例もみられる。

### 3.4.2 不飽和浸透特性値の関数モデルの同定

関数モデルの同定には、非線形最小二乗法を用いて関数モデルに含まれるパラメータの推定を行う必要がある。そこで、離散的な不飽和浸透特性の測定値に対するカーブフィッティング手法や、計測された浸透挙動を浸透流

解析によりシミュレートして、式(5)で示される重み付き残差平方和  $OF(\mathbf{b})$  を最小にする関数モデルのパラメータ  $\mathbf{b}$  の推定を行う逆解析手法の適用が考えられる<sup>9)</sup>。後者では、不飽和浸透挙動を数値解析的に評価するため、種々の測定条件に対応できる利点を有している。

$$OF(\mathbf{b}) = \sum_{j=1}^N \left[ w_j \{ Y_m(t_j) - Y_c(t_j, \mathbf{b}) \} \right]^2 \quad (5)$$

ここに、 $Y_m$  と  $Y_c$  はそれぞれ浸透挙動の計測値と浸透流解析による解析値を表す。また、 $N$  は浸透挙動の計測データ数、 $t$  は計測時間、 $w$  は重みである。

VG モデルでの未知パラメータは飽和浸透特性値 ( $\theta_s$ ,  $K_s$ ) と不飽和浸透特性値 ( $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ) の計 5 個であるが、推定解の唯一性が満足されないため、これらを同時に推定することは不可能であることを指摘したい。たとえば、式(3)では、飽和体積含水率  $\theta_s$  と残留体積含水率  $\theta_r$  との差 ( $\theta_s - \theta_r$ ) が等しくなる両者の組合せは複数存在する。また、式(4)では、不飽和透水係数は飽和透水係数の関数として定義されているため、不飽和透水係数の推定値は飽和透水係数の推定値に大きく依存する。このような難点を克服するためには、原位置透水試験や乱れの少ない試料採取などを実施して、飽和浸透特性値を独立に測定し、推定すべき未知パラメータを不飽和浸透特性値 ( $\theta_r, \alpha, n$ ) のみとする方法が推奨される。なお、逆解析の実行においては、浸透挙動の計測データの空間分布と時間分布の選定や未知パラメータの初期値設定によって推定解が発散するなど、逆解析特有の問題に遭遇する場合がある。

### 3.4.3 河川堤防で計測された土中水分動態への適用事例

河川堤防のり面表層において出水時期に連続計測された土中水分動態を鉛直一次元浸透流解析により再現できる VG モデルを同定し、のり面表層の不飽和浸透特性値

表-1 推定された VG モデルパラメータ

観測期間	観測時間(h)	計測データ数	累積降水量 (mm)		VG モデルパラメータ推定値			RMSE
			降雨量	蒸発散量	$\alpha$ (1/m)	$n$	$\theta_r$	
① 9/7~9/12	115	230	21.4	12.7	5.0	1.50	0.000	0.013
② 9/12~9/16	100	200	55.4	11.4	2.5	2.11	0.128	0.019
③ 9/17~9/22	118	236	112.0	13.5	1.8	2.21	0.130	0.023
④ 9/27~10/2	113	226	13.6	11.8	4.4	1.45	0.000	0.003
⑤ 10/2~10/5	88	176	34.4	5.4	3.7	1.50	0.000	0.007
⑥ 10/5~10/13	174	348	35.2	11.9	2.8	1.86	0.130	0.010
⑦ 10/28~11/8	259	518	53.4	12.0	3.0	1.78	0.130	0.008
⑧ 11/22~11/29	167	334	9.8	6.6	7.4	1.33	0.000	0.002

の推定を試みた。対象とした一級河川堤防（岡山県高梁川）において、挿入型土中水分計（Profile Probe type PR2/6, Delta-T Devices；計測精度 $\pm 0.06\text{m}^3/\text{m}^3$ ）と簡易型転倒升雨量計（RG2, Delta-T Devices；計測精度 $\pm 2\%$ ）を川裏のり面中腹付近に設置して、連続計測を実施した<sup>10)</sup>。

2017年9月から12月の期間に計測された土中水分量と降雨量の変動状況を図-4に示す。土中水分量は一定ではなく、降雨浸透にตอบสนองして迅速に増加し、蒸発散により緩やかに減少しており、それらの動態はのり面表層からの深度によっても異なる状況が計測された。そこで、図-4中に示す①~⑧の8つの解析期間を設定し、それぞれの期間において、深度7cmでの土中水分動態を浸透流解析<sup>11)</sup>によって再現できるVGモデルの同定を試みた。

土中水分計の設置点近傍において、原位置透水試験と乱れの少ない試料採取を実施し、現場飽和透水係数  $K_{fs} = 4.0 \times 10^{-3}\text{cm/s}$  と飽和体積含水率  $\theta_s = 0.558$  を測定した<sup>10)</sup>。VGモデルの未知パラメータの初期推定値は、対象地盤の粒度組成（砂：67%，シルト：23%，粘土：10%）に応じた値を土質データベース<sup>11)</sup>により推定し、 $\theta_r = 0.042$ ， $\alpha = 0.03\text{cm}^{-1}$ ， $n = 1.41$  を用いた。浸透流解析は均質地盤を仮定した軸対称モデル（解析領域は地表面から深さ1m，直径120mmの円筒領域）を用いて、解析領域下部は重力排水境界とし、地表面の降雨境界には原位置計測された降雨量とHamon式<sup>12)</sup>により推定された可能蒸発散量を与えた。

推定されたVGモデルパラメータを表-1に、VGモデルにより描かれた水分特性曲線を図-5に示す。パラメータの推定精度は土中水分量の平均平方二乗誤差(RMSE)で評価した。各解析期間において、降雨浸透挙動に応じた土中水分動態を再現できるVGモデルが同定されているものと思われる。本事例のように、不飽和地盤での浸透挙動の長期間計測は、降雨外力などを利用した原位置透水試験の実施と同義であると思われる。今後、実務においても積極的な実施とデータの蓄積が望まれる。原位置での計測データを再現できる浸透特性の関数モデルを同

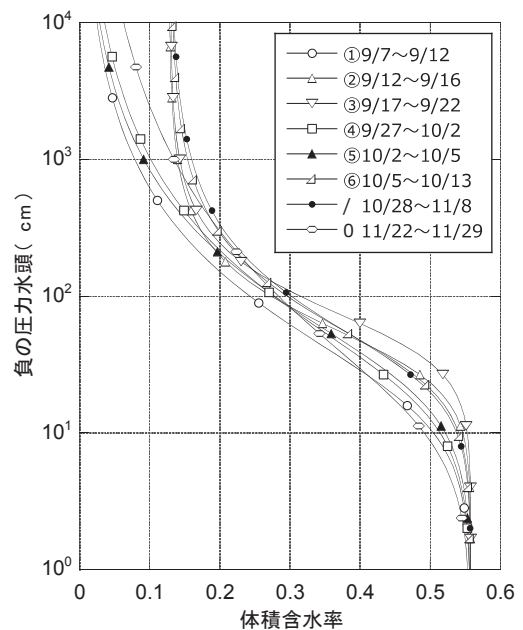


図-5 推定された VG モデルによる水分特性曲線

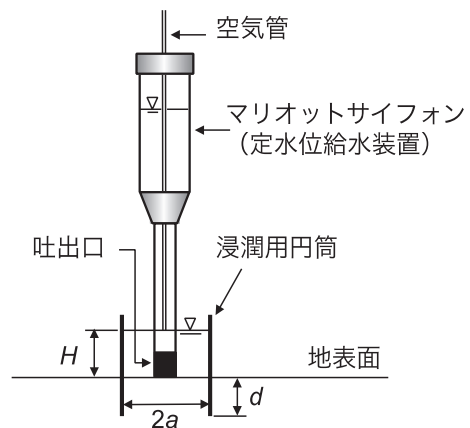


図-6 GPI 法による原位置透水試験装置

定する方法は、フィールドスケールでの不飽和浸透特性値の評価方法として有用であると考えられる。

#### 4. 現場飽和透水係数の原位置測定の実務性

##### 4.1 プレッシャーインフィルトローメーターの特徴

3.2.2 で記述した不飽和地盤の表層における現場飽和透水係数の計測方法は全て定常試験方法であり、測定を簡便に行えるという特長を有している。著者は、それらの方法のうち、ゲルフ式プレッシャーインフィルトローメーター(GPI法)の適用性について検討を行ってきた<sup>13)-17)</sup>。GPI法を用いた原位置透水試験装置を図-6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オットサイフォン式給水装置で構成されている。

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<sup>18)</sup>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次元的な浸潤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<sup>19)</sup>。

$$K_{fs} = \frac{\alpha^* G Q_s}{a \alpha^* H + a + G \alpha^* \pi a^2} \quad (6)$$

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad (7)$$

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

$G$  は浸透流が浸潤用円筒の底部より地盤内へ3次元的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、数値計算結果にもとづいて誘導されている<sup>19)</sup>。また、 $\alpha^*$  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、次式で表現される<sup>13)</sup>。

$$\alpha^* = \frac{1}{\int_{h_0}^0 (K(h)/K_{fs}) dh} \quad (8)$$

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。

$\alpha^*$  は試験者が土の組織や構造にもとづいて決定すべき

表-2 土の組織・構造分類による $\alpha^*$ の推奨値<sup>13)</sup>

土の組織・構造分類	$\alpha^*$ ( $m^{-1}$ )
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	1
細粒組織(粘性)で非構造性の土	4
非構造性材料と細砂を含む、粘土からロームまでの大半の土、および一般の土の最初の選択値	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	36

パラメータであり、その選択肢としては、表-2に示す値が推奨されている<sup>13)</sup>。 $\alpha^*$  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-2によれば、透水係数が小さい地盤では、一般に $\alpha^*$ は小さな値を有すると思われる。

##### 4.2 実務における GPI 法の課題

GPI法は定常浸潤流量を計測する簡便な透水試験方法であるが、現場飽和透水係数の算出精度は浸潤流量の測定精度に依存するため、定常浸潤流量の計測精度の担保が重要である。現在、種々のマリオットサイフォン型の給水装置が市販されているが、透水性の高い地盤では、定水位浸潤を維持するための十分な注水量の確保や大規模な装置や設備が必要となる。一方で、低透水性地盤では、定常浸潤状態となるまでに長時間を要する上、微量な浸潤流量の測定など、試験時間に加えて流量測定技術上の問題が生じる<sup>20)</sup>。そのため、試験対象土質や試験地点数が制限されることが懸念される。

石原らは、地表面から挿入設置した浸潤用円筒内から変水位で浸潤させる簡易型変水位透水試験方法を提案している<sup>21), 22)</sup>。この透水試験方法では、自記水位計によって自動計測された浸潤用円筒内水位の低下速度から算出した浸潤流量とその水位低下範囲での平均水位を浸潤水位と仮定し、GPI法の理論式を用いて現場飽和透水係数を算出する。浸潤用円筒内の浸潤水位は単調に低下するため、任意の浸潤水位とその水位低下速度から地盤内への浸潤流量を容易に算出でき、浸潤流量の計測精度の向上が期待できる。そこで、簡易型変水位透水試験とGPI法による原位置定水位透水試験を砂丘砂地盤において実施し、両試験法を比較することで、簡易型変水位透水試験におけるGPI法の理論式の適用可能性を検証した事例を報告する<sup>23)</sup>。

#### 4.3 GPI法を用いた簡易型変水位透水試験方法の提案

##### 4.3.1 簡易型変水位透水試験方法の概要

浸潤用円筒内に湛水させた任意の初期水位より変水位で地盤内に浸潤させ、浸潤用円筒内水位の時間変化を自記水位計にて自動計測する簡易型変水位透水試験を実施する。この透水試験を連続して複数回実施して、浸潤用円筒内の水位低下速度がほぼ一定になった時を試験地盤の現場飽和状態みなし、式(6)により現場飽和透水係数を算出する。なお、簡易型変水位透水試験によって算出され

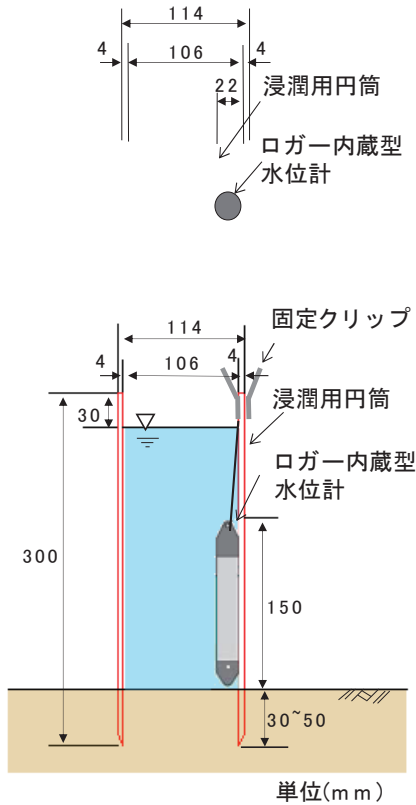


図-7 簡易型変水位透水試験装置

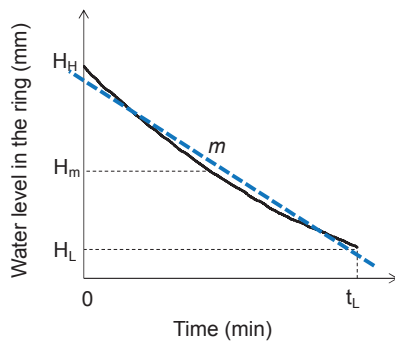
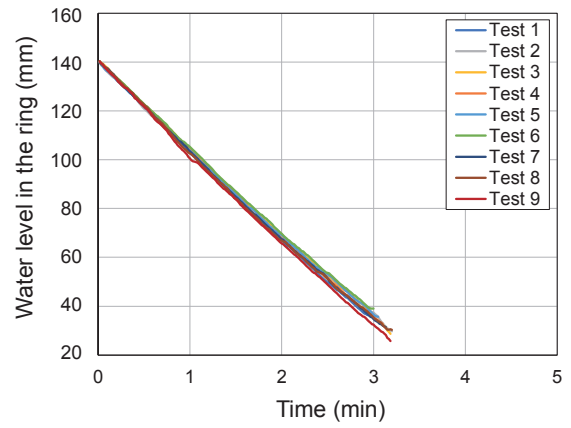


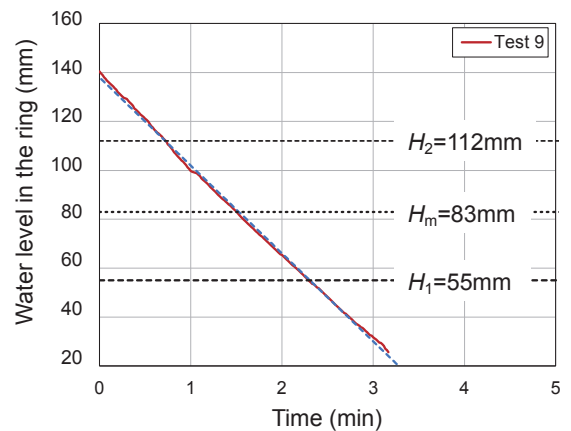
図-8 浸潤水位と水位低下勾配の算出方法

た現場飽和透水係数の精度は、定水位透水試験による GPI法との比較によって検証する。なお、本文中の透水係数は、全て水温15℃に対する換算値にて表記した。

用いた変水位透水試験装置を図-7に示す。試験装置は、鋼製浸潤用円筒（長さ300mm、内径106mm、外径114mm、肉厚4mm、断面積8820mm<sup>2</sup>）内に、データロガー内蔵式の絶対圧水位計（応用地質株式会社、S&DL mini model-4800(5m計)、外径22mm、長さ150mm、0.1% F.S.水位分解能1mm、最小計測間隔0.5秒<sup>24)</sup>を設置したものである。また、水位計は先端を浸潤用円筒内の地表面に接地させ、PEライン（直径1mm、ポリエチレン素材）と固定用クリップ（スプリングクランプ）を用いて垂直に吊り下げ設置した。



(a) 変水位透水試験 1回目～9回目



(b) 変水位透水試験 9回目

図-9 浸潤用円筒内水位の低下曲線

#### 4.3.2 浸潤水位と浸潤流量との算定方法

変水位透水試験時の浸潤水位は、現場飽和状態と判断された透水試験時に計測された浸潤用円筒内水位の低下曲線を用いて算出した。式(6)における浸潤水位 $H$ としては、水位低下曲線における最高水位 $H_H$ と最低水位 $H_L$ との中央値 $H_m$ を用いた。その概念図を図-8に示す。浸潤水位 $H_m$ に対する浸潤流量は、この範囲の水位低下曲線の平均的な勾配 $m$ （水位低下速度）と浸潤用円筒の断面積 $A$ との積により算出した。ただし、浸潤用円筒内の水位が水位計の設置深度内（図-7において地表面から高さ150mm以下）に低下した場合には、水位計の断面積（377.9mm<sup>2</sup>）を除いた浸潤用円筒の断面積 $A'$ を用いた。

変水位透水試験方法では、浸潤水位の低下速度から浸潤流量を容易に算出できることから、定水位透水試験と比較して、浸潤流量の測定精度の向上が期待できると考えられる。そのため、定水位給水装置による浸潤水位の制御が困難な場合や浸潤流量の測定精度が懸念される場合には、変水位透水試験方法は有用であると思われる。

表-3 透水試験によって計測された浸潤水位，浸潤流量と算出された現場飽和透水係数

透水試験	浸潤水位 (mm)		浸潤流量 (mm <sup>3</sup> /s)	現場飽和透水係数(m/s)
	$H_c$			
定水位	$H_c$	57	5210	$1.54 \times 10^{-4}$
簡易型変水位	$H_1$	55	5070	$1.55 \times 10^{-4}$
	$H_m$	83	5370	$1.45 \times 10^{-4}$
	$H_2$	112	5750	$1.39 \times 10^{-4}$

#### 4.3.3 砂丘砂地盤における透水試験の実施事例

鳥取大学乾燥地研究センター内にある温室実験場内の均質な砂丘砂地盤において，GPI法による定水位透水試験と簡易型変水位透水試験を実施し，算定される現場飽和透水係数の比較を試みた．試験地盤の土質状態は細粒分をほとんど含まない最大粒径 2 mm 程度のきれいな砂(S)に分類され，乾燥密度 1.48Mg/m<sup>3</sup>，間隙率 0.40，飽和透水係数  $2.0 \times 10^{-4}$  m/s 程度である<sup>7)</sup>．なお，試験地盤表層における初期体積含水率は 0.03 程度であり，非常に乾燥した状態であった．

定水位  $H_c=57$ mm による定水位透水試験によって測定された浸潤流量は 5210mm<sup>3</sup>/s と測定された．引き続き，同一試験地点にて簡易型変水位透水試験を実施した．変水位透水試験は浸潤用円筒内の水位低下状況を目視確認しながら繰り返し実施し，水位低下速度に有意な変化が見られないと判断した9回目の透水試験で終了した．計測された浸潤用円筒内水位の低下曲線を図-9に示す．図-9(a)によれば，いずれの変水位透水試験においても浸潤用円筒内の水位は3分程度で約100mm低下しており，その低下速度はほぼ一定であることから，現場飽和浸透状態における浸透流が発生していると思われる．そこで，図-9(b)に示した9回目の変水位透水試験によって計測された浸潤用円筒内の水位低下曲線において，3つの浸潤水位( $H_1$ ， $H_m$ ， $H_2$ )とそれぞれに対する浸潤流量を表-3に示すように算出した．

$\alpha^*=12m^{-1}$ を用いて式(1)より算出された現場飽和透水係数を表-3に示す．いずれの透水試験方法においても，ほぼ等しい現場飽和透水係数が算出されている．試験地盤の飽和透水係数が  $2.0 \times 10^{-4}$  m/s 程度であることから，算出された現場飽和透水係数は妥当な値であると思われる．したがって，簡易型変水位透水試験では，現場飽和状態において測定された浸潤水位とその浸潤流量を用いることにより，定水位透水試験によるGPI法と同等の精度で現場飽和透水係数を算出できると考えられる．

## 5. おわりに

不飽和浸透特性の原位置測定方法を基準化するためには，不飽和地盤特有の不均質性や複雑性，試験方法や手

順の制約，測定精度の検証など，課題は少なくない．今後は，簡便・迅速な測定方法の開発のために，定常試験方法のみならず非定常試験方法の指針の検討が必要であると考えられる．近年，センサー技術の向上により，非定常浸透挙動の計測は可能になっており，室内土質試験法や計測技術の知見を利用した測定方法の開発が期待される．また，同一試験地点において，複数の試験方法の組み合わせにより，土の透水係数と保水性（水分特性曲線）の計測と評価を同時に行う方法の検討も必要であると思われる．そのためにも原位置試験時には，浸潤量に加えて土中水分量や間隙水圧の変化などを精度良く計測することが必要であると考えられ，これらの非定常浸透挙動の計測値を浸透流解析を用いてシミュレートし，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<sup>25)</sup>の開発などが望まれる．

## 謝辞

原位置透水試験の実施に際しては，新潟大学フェロー森井俊廣先生より多くのご助言をいただきました．ここに記して謝意を表します．

## 参考文献

- 1) 地盤工学会編：不飽和地盤の挙動と評価，pp.11-25，2004.
- 2) 地盤工学会：新規定定地盤工学会基準・同解説 地下水より上の地盤を対象とした透水試験方法，2018.
- 3) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説，第3編 7章 土の保水性試験，pp.162-173，2009.
- 4) 畠山正則，京野修，川原孝洋：連続加圧方式による保水性試験装置の開発，応用地質技術年報 No.34，pp.23-54，2015.
- 5) 竹下祐二，小松満：不飽和地盤の調査と浸透特性値の計測，地盤工学会誌，Vol.56, No.6, pp.62-69，2008.
- 6) 杉井俊夫，山田公夫，植村真美，奥村恭：水分分布近似法による砂質土の不飽和透水特性の評価，土木学会論文集，No.792/III-71，pp.131-142，2005.
- 7) 竹下祐二，森井俊広：土中水分計測データを用いた簡便な原位置試験方法による不飽和砂質土地盤の飽和・不飽和透水係数の測定，土木学会論文集 C，Vol.62, No.4, pp.831-839，2006.
- 8) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 9) Kool, J.B., Parker, J. C. and van Genuchten, M. Th.: Parameter estimation for unsaturated flow and transport models -A review-, *J. Hydrology*, Vol.91, pp.255-293, 1987.
- 10) 竹下祐二，片山頌嵩，津國遼太郎，児子真也：漏水が発生している河川堤防における浸透挙動の計測事例，



- 地盤工学ジャーナル, Vol. 13, No. 1, pp. 100-107, 2018.
- 11) Rassam, D., Simunek, J. and van Genuchten, M. Th.: Modelling Variably saturated flow with HYDRUS-2D, *International Ground-water Modeling Center*, 2003.
  - 12) Hamon, W.R.: Estimating potential evapotranspiration. *Am. Soc. Civ. Eng. Proc.*, 87(HY3), pp.107-120, 1961.
  - 13) 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.
  - 14) 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.
  - 15) 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.
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) 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.
  - 19) 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.
  - 20) 竹下祐二, 金乗洙, 森井俊広: プレッシャーインフィルトロメータを用いた現場飽和透水係数の測定方法に関する考察, *地盤工学会中国支部論文報告集*, Vol. 33, No. 1, pp. 181-186, 2015.
  - 21) 杉山詠一, 石原雅規, 佐々木哲也, 宮澤彰仁: 地下水面より上の地盤を対象とした現場透水試験の違いによる結果の比較, 令和2年度土木学会第75回年次学術講演会講演集, 2020.
  - 22) 田川央, 石原雅規, 青柳悠大, 杉山詠一, 佐々木哲也: 地下水面より上の地盤を対象とした簡易透水試験法の開発, 第8回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp. 1-2, 2020.
  - 23) 竹下祐二, 三木愛実, 池田 結: 簡易型変水位透水試験による現場飽和透水係数の原位置測定方法, *土木学会論文集 C*, Vol.77, No.3, pp.314-324, 2021.
  - 24) 応用地質(株): 取扱説明書 MODEL-4800 S&DL mini, Rev. 12b, 2020.
  - 25) 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.

(2021年10月4日 受付)