

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

竹下 祐二¹・森井 俊広²

¹正会員 岡山大学助教授 大学院環境学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)
E-mail: yujitake@cc.okayama-u.ac.jp

²正会員 新潟大学教授 農学部生産環境科学科 (〒950-2181 新潟市五十嵐二の町8050)
E-mail: morii@agr.niigata-u.ac.jp

不飽和砂質土地盤における表層近傍部分の飽和透水係数および不飽和透水係数を同一試験地点において連続的に、簡便かつ迅速に原位置計測することを目的として、Guelph Pressure Infiltrometerに基づいた定水位透水試験装置に挿入型土中水分計を併用した簡易な原位置透水試験方法を提案した。本試験方法では、定水位透水試験による浸潤過程での定常浸透流量により飽和透水係数を算定した後、排水過程における土中水分量の非定常データを用いてInstantaneous Profile Methodにより不飽和透水係数を算定する。この際、動水勾配の経時変化の計測を省略し、単位動水勾配の採用を提案した。本方法の適用性は数値シミュレーションデータによって吟味し、その有用性は砂丘砂地盤による実測データを用いて確認した。

Key Words : *unsaturated soil, in situ permeability test, field saturated hydraulic conductivity, unsaturated hydraulic conductivity, water content, hydraulic gradient*

1. はじめに

降雨による斜面崩壊や河川堤防の破壊現象、あるいは地下水汚染等、不飽和領域での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飽和・不飽和浸透特性値の評価が重要である。一般に、不飽和地盤において評価すべき飽和・不飽和浸透特性は、飽和透水係数、不飽和透水係数および水分特性曲線が代表的である。現在、これらの飽和・不飽和浸透特性値を原位置透水試験により簡便に計測する方法は基準化されておらず、確立された試験法もないことから、不飽和地盤での地盤調査法における重要な課題となっている。不飽和浸透特性の実用的な原位置計測方法として幾つかの方法が提案されている¹⁾が、これらにおいて、比較的信頼性の高い試験方法は、Instantaneous Profile Method であると考えられる。この方法では、地盤内に鉛直一次元の非定常浸透流を発生させ、浸透領域内の鉛直方向の圧力水頭分布と土中水分量分布の経時変化を測定すれば、対象領域の不飽和透水係数と水分特性曲線を計測することが可能である。しかし、これらの計測にはテンシオメータ等による間隙水圧計や土中水分計などの複数の

センサーの埋設設置が必要であり、多大の労力と時間を要するため、その実施は必ずしも容易でなく、実務レベルでの実施例は極めて少ない状況にある。そのため、工学的に十分な精度を有し、試験装置が簡単で測定が容易であり、かつ迅速に飽和・不飽和浸透特性値を計測できる実務的な原位置透水試験方法の開発が強く望まれている。

近年、土中水分量の測定方法として、TDR (Time Domain Reflectometry) 法等に代表される挿入型土中水分計が市販されている。これらは、地盤の誘電率を計測して、土中水分量を評価する方法であり、地盤の深さ方向の水分プロファイルをリアルタイムにて比較的容易に測定することが可能である²⁾。そこで、土中水分量の非定常計測データを用いることにより、不飽和浸透特性の迅速かつ簡便な非定常試験方法の開発が期待できる。たとえば、杉井は挿入型土中水分計によって計測される水分プロファイルを用いて、不飽和透水係数の原位置測定法を提案している³⁾。しかし、この方法では、飽和透水係数と不飽和透水係数を連続的に計測することは困難であり、不飽和透水係数の算出に際しては別途、室内での土の保水性試験が必要であるなど、課題は少なくない。そこで、本研究

では、土中水分量の非定常計測データを用いて、不飽和と砂質土地盤の表層近傍部分における飽和透水係数と不飽和透水係数とを連続して簡便に測定できる原位置透水試験方法の提案を試みる。

本方法では、単一の浸潤リングと 1 本の挿入型土中水分計を用いた簡易な透水試験装置を用いて、不飽和地盤に定圧注水を行って不飽和浸透流を生じさせ、浸潤過程における定常浸透流量から飽和透水係数を測定する。その後、地盤への注水を停止し、排水過程における土中水分量プロファイルの経時変化から不飽和透水係数の計測を行う。この際、従来より計測が容易ではなかった動水勾配の測定を省略し、単位動水勾配を採用した透水係数の算定方法についても提案を試みた。本方法によれば、一連の透水試験により、同一地点における飽和透水係数と不飽和透水係数を連続的に算出することが可能である。本研究で提案する試験方法の適用性は、飽和・不飽和浸透流解析による数値シミュレーションによって吟味し、その有用性は不飽和砂丘砂地盤による実測データを用いて確認した。

2. 土中水分計測データを用いた飽和・不飽和透水係数の原位置測定方法

(1) 原位置透水試験装置

提案する原位置透水試験装置を図-1 に示す。本透水試験装置は不飽和地盤に数 cm 程度静的に貫入させた直径 15cm 程度の鋼製浸潤リング、浸潤リング内より定水位浸透を発生させ、浸透流量を計測するためのマリョットサイフォン式給水装置、そして、浸潤リング中央部分に設置した 1 本の挿入型土中水分計から構成される。挿入型土中水分計は市販されているプローブ直径 2.8cm、プローブ長 40cm のものを用いた。この土中水分計によれば、深さ方向 10cm 間隔に 4 計測点での土中水分量を非定常状態にて測定し、鉛直方向の土中水分プロファイルを評価することが可能であり、それらの非定常計測データは市販のデータロガーにより容易に収録が可能である。

本透水試験装置の特徴としては、地盤に挿入設置すべき部品が少なく、試験装置の設置が容易であること、各構成部品が軽量かつコンパクトであり、可搬性にすぐれていること、さらに、計測操作が非常にシンプルであることが指摘できる。本試験装置を用いて、同一試験地点における飽和透水係数と不飽和透水係数を連続的に測定する方法を以下に説明する。

(2) 飽和透水係数の測定方法

不飽和地盤における飽和透水係数の測定方法として

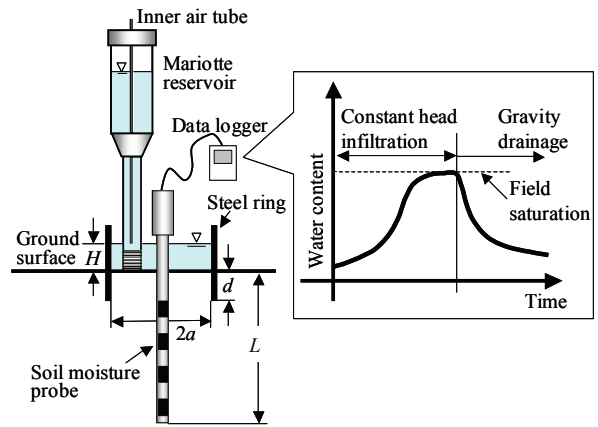


図-1 挿入型土中水分計を併用した原位置定水位透水試験

は、地盤に定圧注水を行い、その定常浸透流量を計測する定常試験方法が試験装置も単純であり、実施も容易であると考えられる。本研究では Reynolds と Elrick が開発した Guelph Pressure Infiltrometer⁴⁾ (以後 GPI 法と記す) を採用した。本試験方法では、単一の浸潤リングから 5~25cm 程度の定水位による浸透を生じさせ、計測された定常浸透流量の値から飽和透水係数を算出する非常に簡便な定水位透水試験方法である。GPI 法により発生する浸潤領域は、浸潤過程で間隙中に取り込まれた封入空気のために完全な飽和状態ではなく、それに近い疑似飽和状態である。そのため、計測される透水係数は field-saturated hydraulic conductivity k_{fs} (便宜的に、以後、現場飽和透水係数と記す) と呼ばれ、室内透水試験等によって測定される完全な飽和試料での飽和透水係数 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⁴⁾。

一般に、不飽和地盤において発生する飽和浸透流は、帯水層での完全な飽和状態での浸透流ではなく、封入空気存在による疑似飽和状態であると考えられるため、不飽和地盤の浸透特性を評価する上では、この現場飽和透水係数を設計定数とすることが実際的であると思われる。したがって、本研究では、不飽和地盤の飽和透水係数として GPI 法によって計測された現場飽和透水係数を採用する。GPI 法によれば、現場飽和透水係数は次式によって算出される⁴⁾。

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

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

ここに、 G : 浸潤リングによって決定される定数、

a : 浸潤リングの半径, d : 浸潤リングの貫入深さ,
 α^* : 土壌パラメータと呼ばれる土の種類に応じて設定
 される定数で, 一般的な土では 0.12 cm^{-1} , Q_s : 定常浸透
 流量, H : 浸潤リング内に発生させた定水位

なお, GPI法による k_{fs} の算出精度や α^* の値に関して
 は文献^{5), 6)}を参照されたい。

GPI法の難点としては, 計測データが浸透流量のみで
 あるために, 現場飽和透水係数が算出される際の土中
 水分状態を定量的に評価することが困難であることが
 指摘できる。森井らは, 数値解析結果に基づいて GPI
 法による現場飽和透水係数の測定深度は, k_{fs} が 10^2 cm/s
 程度で 20cm から 25cm, k_{fs} が 10^3 cm/s 程度で 15 cm から
 20cm であると報告している⁶⁾。そこで, 本研究では,
 浸潤リング中央部分に設置された挿入型土中水分計に
 より, 地表面近傍領域での土中水分量をモニタリング
 することを提案する。これにより, 現場飽和状態での
 土中水分量を定量的に評価することが可能となり, そ
 の計測値を用いて, 地盤の有効間隙率 (飽和体積含水
 率) の推定を行うことも可能であると思われる。

(3) 不飽和透水係数の測定方法

不飽和透水係数の算出方法としては Instantaneous
 Profile Method (以後, IP法と記す)の理論を用いた。本
 方法は Richards と Weeks によって実施された不飽和浸
 透特性の代表的な室内試験方法⁷⁾である。この方法
 を原位置試験に適用する場合には, 地盤内に鉛直一次
 元の非定常浸透流を発生させ, 浸透領域内の圧力水頭
 および土中水分量の鉛直分布の非定常挙動の測定を行
 う⁸⁾。本研究では, 前述の GPI法を実施して現場飽
 和透水係数を計測した後, 定水位注水を停止して排水
 試験を行い, 排水過程での鉛直一次元不飽和浸透挙動
 に対して IP法により不飽和透水係数の算出を行うこ
 とを提案する。

IP法の適用に際しては, 初期条件として, 排水試
 験開始時における試験領域の土中水分状態が定常かつ
 飽和状態に近いことが望ましい。そこで, 先行して実
 施される GPI法では, 浸透領域内の土中水分量をモニ
 ターして, 土中水分量が定常状態 (現場飽和状態) に
 達するまで注水を継続する必要がある。

IP法によれば, 地表面から深度 z_1 における不飽和透
 水係数 k_{unsat} は次式で算出できる。

$$k_{unsat} = \frac{\int_0^{z_1} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\frac{\partial h}{\partial z} + 1} \quad (3)$$

ここに, θ は体積含水率, t は計測時間, h は圧力水

頭である。

式 (3) において, 右辺の分子は地表面から深度 z_1 ま
 での土中水分プロファイルの変化を, 分母はその区間
 の動水勾配を表す。そのため, 式 (3) による不飽和透
 水係数の算出精度を左右する要因は, 土中水分量の貯
 留量および動水勾配の測定方法である。本研究では,
 以下のように実施した。

a) 土中水分プロファイルの計測

式(3)の分子は, 鉛直一次元浸透場において単位平面
 を有する土柱領域を考えると, 土柱の深度に体積含水
 率の鉛直分布を掛け合わせることで計算できる。
 本研究で用いた挿入型土中水分計の 1 計測点あたりの
 測定領域は, プローブの半径方向に 6cm 程度, 深度方
 向に 10cm 程度であると報告されており⁹⁾, この体積部
 分の平均的な土中水分量が計測される。本土中水分計
 の計測点は, 深さ方向 10cm 間隔に 4 点あることから,
 各計測点における体積含水率の計測値に深度方向の測
 定領域 10cm を掛け合わせるにより, 土中水分計を
 中心に半径 6cm, 深度 40cm の円柱領域における鉛直方
 向の土中水分プロファイルの非定常挙動が計測できる。

b) 動水勾配の測定

不飽和浸透流の動水勾配を測定するためには, テン
 シオメータ等の負の間隙水圧が測定可能な間隙水圧計
 を異なる深度に設置する必要がある。しかし, その設
 置には多大な労力を要し, タイムラグのない安定した
 非定常計測を行うことは, 必ずしも容易ではない現状
 にある。本研究では, GPI法の実施によって生じた浸
 潤領域の排水過程における鉛直一次元浸透流は, 重力
 による浸透流と見なすことができると仮定し, 動水勾
 配の測定を省略して, 動水勾配を 1.0 と近似すること
 を提案する。単位動水勾配 1.0 を用いる近似方法は, 式(3)
 による不飽和透水係数の算出を極めて容易にし, また,
 従来, 原位置透水試験において難点であった複数深
 度での負の間隙水圧測定を省略できるという, 大きな利
 点をもたらすことになる。なお, 単位動水勾配を用い
 ることによる不飽和透水係数の算定精度は数値シミュ
 レーションで確認する。

(4) 透水試験手順

本研究で提案する原位置透水試験方法では, 定水位
 透水試験と排水試験を連続して実施する。具体的な試
 験手順は以下のようである。

a) 定水位透水試験 (GPI法)

浸潤リングを地表面から 5cm 程度, 静的に貫入させ,
 浸潤リングの中央部分にオーガー孔を掘削し, 挿入型
 土中水分計を設置する。次に, マリオット管を用いて
 浸潤リング内に定水位を維持し, 定水位透水試験を実
 施する。土中水分計により, 浸潤領域内の土中水分量

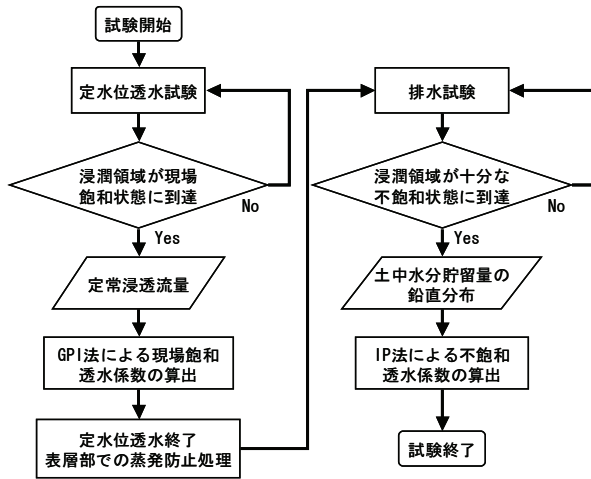


図-2 飽和・不飽和透水係数の原位置試験方法の流れ図

表-1 VGモデルパラメータ

| 土質 | θ_r | θ_s | α (cm ⁻¹) | n | k_{fs} (cm/s) |
|-----|------------|------------|------------------------------|------|----------------------|
| 砂 | 0.045 | 0.43 | 0.145 | 2.68 | 3.0×10^{-3} |
| 細粒土 | 0.034 | 0.46 | 0.016 | 1.37 | 3.0×10^{-3} |

の経時変化をモニターし、試験領域内の体積含水率分布がほぼ定常状態に到達するまで注水を継続する。この際、試験領域の現場飽和状態における土中水分量を評価する。定常浸透流量を計測し、式(1)を用いて現場飽和透水係数を算定する。

b) 排水試験 (IP法)

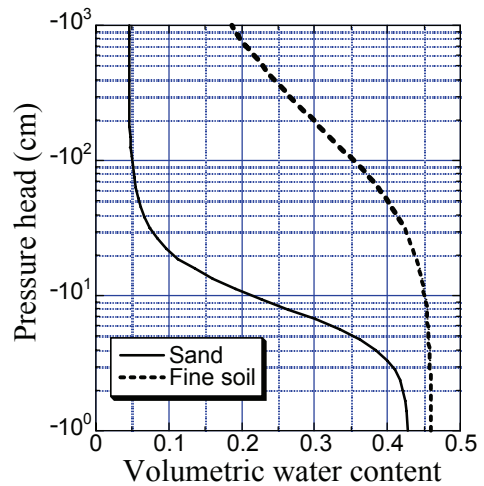
定水位透水試験による注水を停止し、排水過程での土中水分量の経時変化を計測する。この際、浸潤リング内をビニルシートなど覆い、表層部分から水分蒸発が生じないように留意する。この排水試験は浸潤領域の土中水分状態が可能な限り透水試験開始時の状態に排水されるまで実施する。計測された土中水分量の経時変化データは必要に応じて移動平均などによる平滑化処理を行い、任意の時間における土中水分貯留量の鉛直分布を算出し、単位動水勾配を用いて式(3)より不飽和透水係数を算出する。

提案する試験方法の流れ図を図-2に示す。

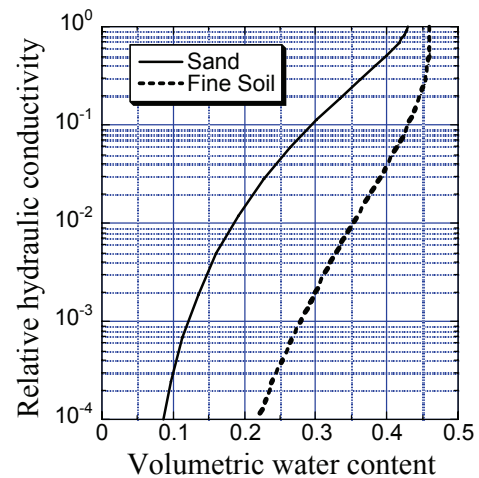
3. 飽和・不飽和浸透流解析による適用性の検討

(1) 地盤モデルおよび原位置透水試験条件

提案する原位置透水試験方法の適用性を有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析¹⁰⁾を用いて検討した。地盤の飽和浸透特性は試験対象土質として砂質土を想定し、飽和透水係数 3×10^{-3} cm/s を与えた。また、不飽和浸透特性は van Genuchten によって提案された関数モ



(a) 水分特性曲線



(b) 比透水係数と体積含水率の関係

図-3 数値解析に用いた不飽和浸透特性

デル¹¹⁾ (以後、VGモデルと記す)を用いて表現した。

VGモデルでは式(4)で定義される有効飽和度 S_e を用いて水分特性曲線を表現し、不飽和透水係数は式(5)にて表示される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (4)$$

$$k(S_e) = k_s S_e^{0.5} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (5)$$

ここで、 h : 圧力水頭、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 k_s : 飽和透水係数、 α 、 n : 土の種類や状態によって決定される定数、 $n > 1$ 、 $m = 1 - 1/n$

VGモデルは土中水の保水形態の異なる2種類の土質条件を想定し、毛管作用が卓越する砂質土と粒子表面での吸着力が卓越する細粒土の場合¹²⁾ (以後、それぞ

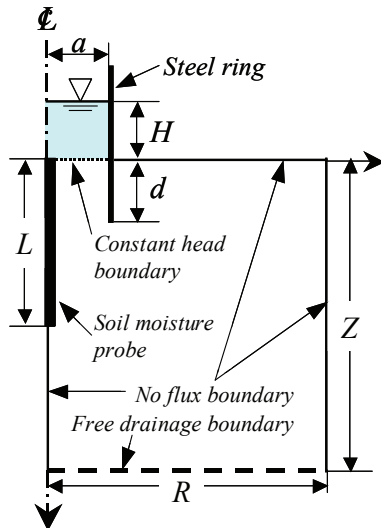


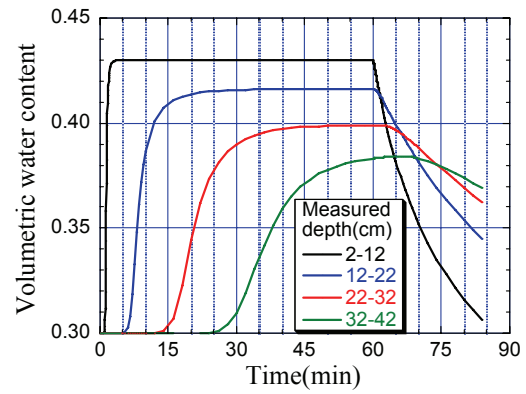
図-4 原位置透水試験の数値解析モデル

れ、砂モデル、細粒土モデルと記す)に対応するパラメータを浸透流解析ソフトウェア¹⁰⁾に付属する土質データベースより表-1のように選択した。それらの水分特性曲線および比透水係数 ($=k(S_e)/k_s$) と体積含水率の関係は図-3に示した。

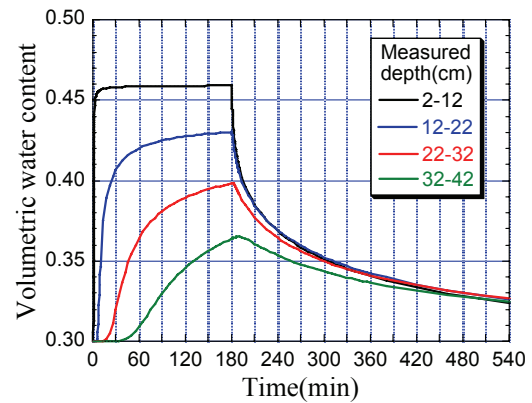
原位置透水試験の数値シミュレーションには図-4に示す均質な軸対称地盤モデルを用いた。実際の原位置透水試験条件を考慮して、図-4において $a=7.9\text{cm}$, $d=5\text{cm}$, $Z=300\text{cm}$, $R=100\text{cm}$ と設定した。この解析領域を浸透流解析ソフトウェアに付属の要素網作成ツールを用いて節点数 4183, 要素数 8065 の三角形要素に分割した。表層部分近傍での最小メッシュサイズは約 1cm である。また、地盤の初期条件として、土中水分分布は解析領域全域で一定と仮定し、過水期の不飽和砂質土地盤を想定して体積含水率 0.3 を与えた。

境界条件として、定水位透水試験時の浸透水位 H は、GPI 法の解析式(1)および(2)が $5\text{cm} \leq H \leq 25\text{cm}$ の条件で誘導されている⁵⁾ことから、地盤の透水性を考慮して砂モデルで 5cm, 細粒土モデルでは 20cm の定水位境界を与え、注水停止後は不透水境界に変更した。また、図-4において浸潤リング(リングの厚さ 0.3cm)および土中水分計(プローブ半径 1.5cm, 挿入長 L)は不透水境界としてモデル化した。土中水分計は地表面から完全に挿入設置した場合を想定し、 $L=51\text{cm}$ とした。この場合、土中水分量の計測範囲は地表面から 2cm~12cm, 12cm~22cm, 22cm~32cm, 32cm~42cm の計 4 区間である。そこで、数値解析では、これらの領域での土中水分量の平均値を算出し、原位置透水試験による土中水分量の計測データとする。

原位置透水試験計測データの算出時間は、砂モデルによる定水位透水試験では、土中水分計の挿入領域の土中水分状態が定常状態に達するまで、排水試験では、



(a) 砂モデル



(b) 細粒土モデル

図-5 原位置透水試験による土中水分量の経時変化

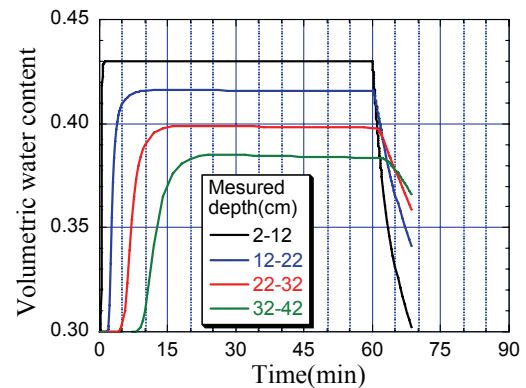


図-6 原位置透水試験による土中水分量の経時変化
(砂モデル, $k_s=9 \times 10^{-3}\text{cm/s}$)

初期水分状態に近い水分状態に排水されるまでとして、定水位透水試験を 1 時間、排水試験を 25 分とした。また、細粒土モデルでは原位置透水試験の実行可能性から判断して、定水位透水試験を 3 時間、排水試験を 6 時間として、数値シミュレーションを実施した。

(2) 原位置透水試験による土中水分量の経時変化

砂モデルと細粒土モデルのそれぞれについて、数値

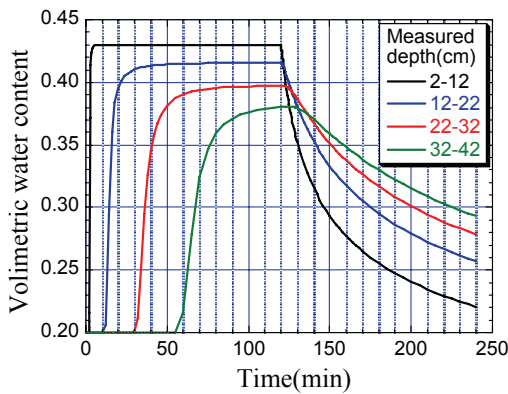
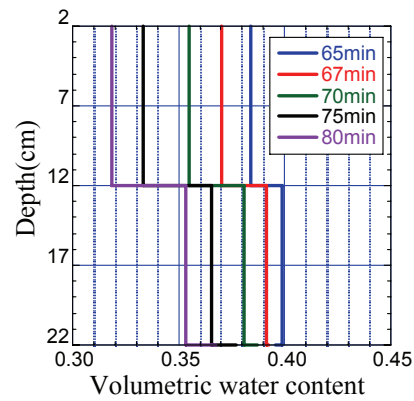


図-7 原位置透水試験による土中水分量の経時変化 (砂モデル, 初期体積含水率 0.2)



(a) 砂モデル

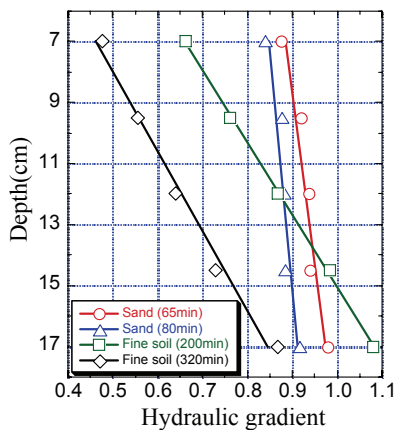
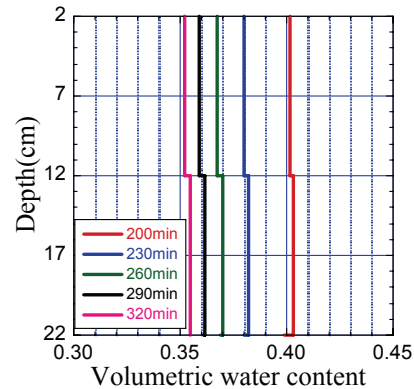


図-8 排水試験における動水勾配の鉛直分布



(b) 細粒土モデル

図-9 排水試験における土中水分貯留量の経時変化

解析によって算出された原位置透水試験による土中水分量の計測データを図-5 に示す。これらの結果によれば、砂モデルの方が定水位透水試験時に発生する浸潤領域の土中水分量が短時間で定常状態に達し、その後の排水時間も短いことがわかる。また、図-6 は砂モデルにおいて、飽和透水係数を $9 \times 10^3 \text{ cm/s}$ とした場合の土中水分量の経時変化であるが、図-5(a) との比較によれば、土中水分量の挙動は迅速になっている。これらの数値解析結果は、本透水試験において計測される土中水分量の挙動が飽和・不飽和浸透特性に依存することを示しており、土中水分量の計測データを用いて、飽和透水係数および不飽和透水係数の評価を行うことができると考えられる。

図-7 は初期土中水分量として体積含水率 0.2 を与えた場合の砂モデルにおける土中水分量の経時変化を示している。図-5(a) と比較すれば、初期土中水分量が低い場合では、定水位透水試験による土中水分量が定常状態に到達するためにはやや時間を要するが、排水試験において計測可能な不飽和透水係数の土中水分量の範囲は大きくなる。したがって、本透水試験方法は表層部分の土中水分量が低い地盤状態において、実施する

ことが望ましいと言える。

図-5, 6, 7 によれば、定水位透水試験における土中水分状態は、いずれの場合も計測深度 2cm~12cm では飽和状態に、計測深度 12cm~22cm では飽和に近い状態にて定常状態に達している。このことから、本透水試験を実施して IP 法により不飽和透水係数が算出可能であると思われる計測範囲は、地表面から 20cm 程度の地表面近傍領域であると判断される。

(3) 単位動水勾配による不飽和透水係数の算出精度

排水試験における地表面近傍での動水勾配の鉛直分布を図-8 に示した。これらによれば、動水勾配の値は一定ではなく、排水時間経過とともに変動し、深度方向にはほぼ単調に変化する状況が認められる。砂モデルでの動水勾配は 0.84~0.98 に分布しており、時間変動は小さいが、細粒土モデルでの動水勾配は 0.48~1.08 であり、その時間的な変動は大きい。したがって、砂モデルのような不飽和浸透特性を有している比較的透水性の高い地盤条件においては、単位動水勾配を適用することが可能であると考えられる。

今回用いた砂モデルによれば、動水勾配の値を 1.0 と近似して不飽和透水係数を算出する際に生じる誤差は、

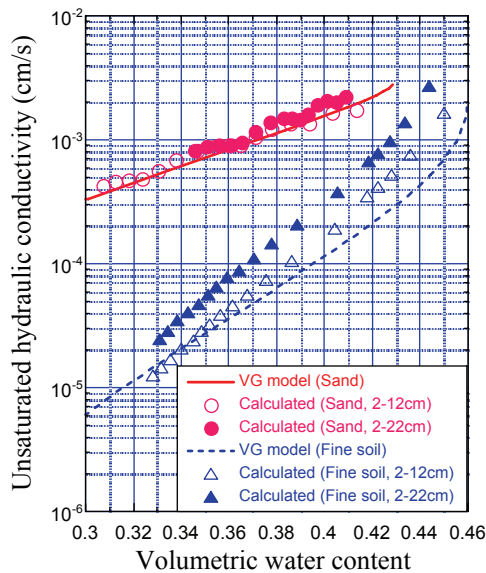


図-10 不飽和透水係数の算出結果

式(3)より、動水勾配 0.84 の場合で 19%、動水勾配 0.98 の場合で 2%程度と計算される。また、式(3)より算出される不飽和透水係数は、実際の動水勾配の値が 1.0 より小さければ過小な値が、1.0 より大きければ過大な値が算出されることになる。

図-9 には排水試験時における土中水分量の数値解析データを用いて、IP 法の適用が可能であると思われる地表面から 20cm 程度の領域の土中水分貯留量の経時変化を示した。図中の水分分布が 10cm の層で不連続な分布を示している理由は、用いた土中水分計のセンサー間隔と各センサーの深さ方向の測定範囲がそれぞれ 10cm であるためであり、数値解析データを用いて、各測定範囲での土中水分量の平均値を算出した。

深度 2cm~12cm および深度 2cm~22cm における土中水分貯留量の変化に対して IP 法を適用し、単位動水勾配 1.0 を用いて不飽和透水係数を算出した。算出された不飽和透水係数と数値シミュレーションに用いた VG モデルの不飽和透水係数とを比較した結果を図-10 に示す。図-10 より、細粒土モデルでは、VG モデルの不飽和透水係数よりも大きな値が算出されており、その差は、水分貯留量の測定深度が深くなるにつれて大きくなっている。一方、砂モデルでは、細粒土モデルと比較して、両者はほぼ良好な一致が得られていると考えられるが、深度 2cm~22cm での水分貯留量を用いた結果では、VG モデルの不飽和透水係数よりも大きな値が算出されている。

図-8 によれば、排水試験における動水勾配の値はいずれのモデルにおいても 1.0 より小さいため、単位動水勾配を用いた場合には、過小な不飽和透水係数の値が算出されるはずであるが、図-10 では異なる傾向を示し

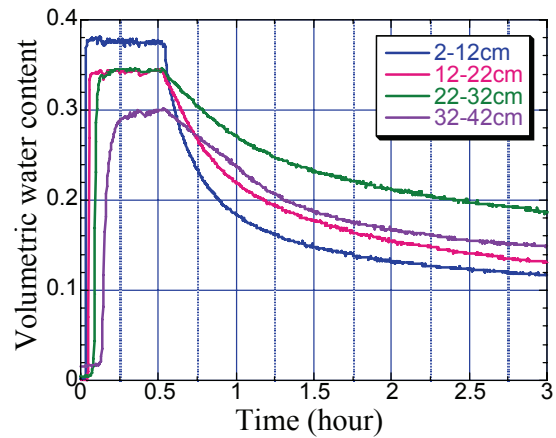


図-11 砂丘砂地盤にて実施した原位置透水試験による土中水分量の経時変化

ている。これらの理由として、排水試験開始時の水分状態が十分に飽和状態に到達しておらず、IP 法の適用条件を十分に満足していなかったため、水分貯留量の経時変化において算出誤差が生じたためと推測される。したがって、本文で提案する原位置透水試験方法は、比較的透水性の高い砂質土地盤の表層部分において適用が可能であり、単位動水勾配を用いて不飽和透水係数を精度良く算出するためには、試験対象領域が現場飽和状態に達した後、排水試験を実施することが望ましいと言える。

4. 実砂丘砂地盤における適用性の検討

鳥取大学乾燥地研究センター内の砂丘砂地盤において、提案する透水試験を実施し、その有用性を検証した。対象地盤は乾燥密度 1.48g/cm^3 、間隙率0.40、初期体積含水率0.03程度の非常に乾燥した均質な砂丘砂であり、日本統一土質分類法¹³⁾によれば、細粒分をほとんど含まない最大粒径2mm程度のきれいな砂(S)に分類される。透水試験条件は図-1において、 $a=7.9\text{cm}$ 、 $d=5\text{cm}$ 、 $H=5\text{cm}$ 、 $L=51\text{cm}$ である。

計測された体積含水率の経時変化を図-11に示す。現場飽和透水係数は砂質土地盤に対する α^* として、文献⁹⁾を参考に 0.06cm^{-1} を用い、式(1)より $2.0 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ と算出された。深度2cm~12cmおよび深度12cm~22cmの土中水分量計測データを用いることにより、深度2cm~22cmを通過した土中水分量による不飽和透水係数を算出した。単位動水勾配1.0を仮定して、式(3)より算出された不飽和透水係数と体積含水率の関係を図-12に示す。図中の実線は、井上らが室内試験によって測定した砂丘砂の水分特性曲線データ¹⁴⁾をVGモデルによりフィッ

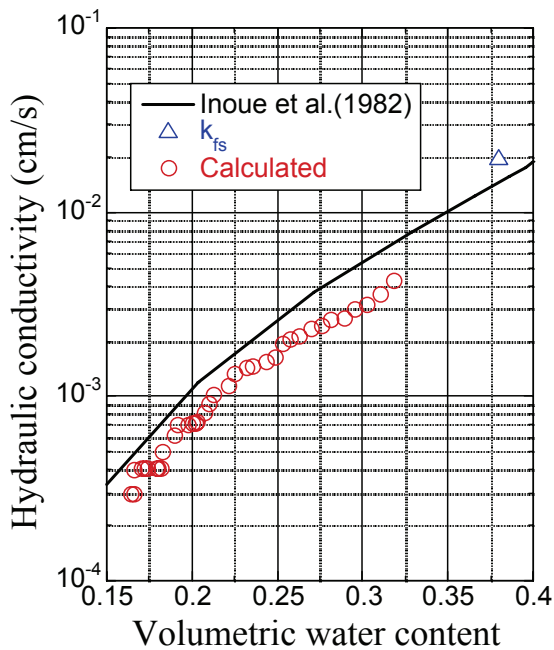


図-12 砂丘砂地盤における現場飽和透水係数および不飽和透水係数の計測結果

ティングし、得られたVGモデルパラメータ ($\alpha = 0.0356\text{cm}^{-1}$, $n = 4.793$, $\theta_s = 0.403$, $\theta_r = 0.042$, 飽和透水係数 $2.864 \times 10^2 \text{ cm/s}$) によって算定された砂丘砂の不飽和透水係数と体積含水率の関係を示した曲線である。図-12によれば、両者はほぼ等しい結果を示しており、不飽和砂丘砂地盤に対して本文中で提案した透水試験方法の適用性が確認されたと考えられる。

5. 結論

不飽和地盤における簡便な原位置透水試験方法の開発を目的として、砂質土地盤の表層近傍部分での現場飽和透水係数および不飽和透水係数を連続的に計測する方法を提案した。本研究で提案する方法の適用性は数値シミュレーションによって吟味し、その有用性は不飽和砂丘砂地盤による実測データを用いて確認した。本研究により得られた成果を要約すれば、以下のようになる。

(1) 単一の浸潤リングと 1 本の挿入型土中水分計を用いたシンプルな定水位透水試験装置を用いて、Guelph Pressure Infiltrometer 法による定水位透水試験と Instantaneous Profile Method による排水試験を同一試験地点において連続して実施し、定水位透水試験時の定常浸透流量および排水試験時の土中水分量プロファイルの経時変化データにより、地表面から深度 20cm 程度の領域における現場飽和透水係数と不飽和

透水係数を簡便に算定する透水試験方法を提案した。
(2) 定水位透水試験時に計測された土中水分量の計測データを用いることにより、従来、Guelph Pressure Infiltrometer 法により定量的評価の困難であった現場飽和透水係数算出時の土中水分状態を定量的に評価することが可能であることを指摘した。

(3) Instantaneous Profile Method の理論を適用した不飽和透水係数の算出過程において、従来、計測が容易ではなかった動水勾配の計測を割愛し、近似的に単位動水勾配 1.0 を用いる方法を提案した。本方法によれば不飽和透水係数の原位置測定において、複数深度での負の間隙水圧測定を省略できるという大きな利点が得られ、不飽和透水係数の原位置測定を容易に実施できる可能性を有している。本方法による不飽和透水係数の算定精度を数値シミュレーションにより吟味し、比較的透水性の高い砂質土地盤の表層近傍において、良好な精度で不飽和透水係数を算出することが可能であることを示した。

(4) 乾燥状態にある不飽和砂丘砂地盤において本透水試験を実施した結果、算出された現場飽和透水係数および不飽和透水係数は、室内試験によって得られた値とほぼ等しく、砂丘砂地盤に対して本透水試験方法の適用性が確認された。

今後は、各種の不飽和地盤に対する計測データの蓄積を行い、不飽和地盤における原位置透水試験方法としての基準化に対する検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、平成 17 年度科学研究費補助金（基盤研究(B)15360253）の助成により実施した。また、原位置透水試験の実施に際しては、鳥取大学乾燥地研究センター井上光弘先生にご助言をいただいた。数値解析および原位置透水試験の実施には、岡山大学大学院自然科学研究科（現在岡山県）山下正博君、岡山大学大学院環境学研究科諏訪隼人君、牛尾正人君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Houston, S. L. and Fredlund, D. G.: Unsaturated soil engineering practice, *Geotechnical special publication*, No.68, ASCE, pp.146-161, 1997.
- 2) 地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価, pp.67-76, 2004.
- 3) Sugii, T.: Modeling of soil moisture profile during infiltration into vadose zone, *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, JA-62, pp. 2449-2452, 2005.
- 4) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E.: Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 54, pp.1233-1241, 1990.
- 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ー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*, Vol. 206, pp.19-27, 2000.
- 6) 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, Vol. 207, pp. 29-37, 2000.
- 7) Richards, S. J. and Weeks, L. V. : Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurements on soil columns, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 17, pp.206-209, 1953.
- 8) Hillel, D., Krentos, V., and Stylianou, Y.: Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ, *Soil Sci.*, Vol.114, No.5, pp. 395-400, 1972.
- 9) 井上光弘: プロファイルプローブによる土壌水分測定とその応用, 第 57 回農業土木学会中国四国支部講演要旨, pp.113-114, 2002.
- 10) Rassam, D., Simunek, J. and van Genuchten M. Th.: Modelling Variably Saturated Flow With HYDRUS-2D, International Ground-water Modeling Center, 2003.
- 11) 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.
- 12) 土壌物理研究会編: 土の物理学-土質工学の基礎-, pp.199-238, 森北出版, 1979.
- 13) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, pp.214-237, 2001.
- 14) 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, Vol. 46, pp.21-26, 1982.

(2006. 4. 21 受付)

FIELD MEASUREMENT OF FIELD SATURATED AND UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY USING SOIL MOISTURE PROFILE

Yuji TAKESHITA and Toshihiro MORII

A new in-situ permeability test of determining field-saturated hydraulic conductivity k_{fs} and unsaturated hydraulic conductivity k_{unsat} in the near surface of unsaturated sandy soils is proposed. A ponded single-ring infiltrometer technique, such as the Guelph Pressure Infiltrometer method was performed to determine k_{fs} . The Instantaneous Profile method with the unit hydraulic gradient assumption was applied to determine k_{unsat} during drainage period. The advantage of our proposed method is to measure k_{fs} and k_{unsat} continuously by simple permeability tests with soil moisture profile. The utility of our proposed method is demonstrated by using a numerical model and experimental data of unsaturated dune sands.