

# 不飽和地盤における透水係数の原位置計測方法

Field Techniques for Measuring Hydraulic Conductivity of Unsaturated soils

竹下 祐二 (たけした ゆうじ)

岡山大学 教授 大学院環境生命科学研究科

## 1. 不飽和浸透挙動を支配する透水係数

河川堤防や斜面などの不飽和地盤における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、不飽和浸透挙動を支配する不飽和土の透水係数の評価が重要である。不飽和土の透水係数は、飽和土の透水係数と同様に、土中水の粘性、間隙の形や大きさなどに影響を受けるが、不飽和土中の浸透挙動は間隙中の水分量やその水分分布の状態、いわゆる土の保水性に大きく影響されるため、土の飽和度の減少（土中水分量の減少）に伴い、指数関数的に減少する特徴を有している。そのため、不飽和土の透水係数は体積含水率又は圧力水頭の関数として表現されている。

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。本文では、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。土の保水性を表す飽和体積含水率は、完全な飽和状態では間隙率に等しいが、現場飽和状態では有効間隙率（浸透現象に関与する間隙量を表す間隙率）に等しくなる。そのため、現場飽和状態における透水係数を現場飽和透水係数  $K_{fs}$  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  $K_s$  と比較して小さな値を示すと思われる。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。

不飽和地盤での現場飽和透水係数の計測方法については、数種の試験方法が提案されているが、不飽和透水係数の計測には複数のセンサーの埋設置など多大の労力と時間を要するため、その実施は容易でなく、実務での実施は困難な状況にある。そこで、本文では、現在提唱されている現場飽和透水係数の原位置試験方法について実用的な試験方法について述べる。

## 2. 現場飽和透水係数の原位置計測方法

現場飽和透水係数の原位置計測では、地盤内に一定の水位で注水を行い、その際に生じる定常浸潤流量から透水係数を算出する定水位定常透水試験が一般的である。地表面から不飽和地盤内への浸潤の与え方は、図-1に

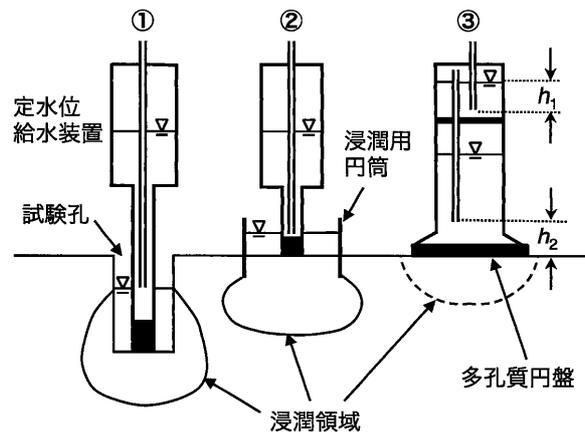


図-1 不飽和地盤における定水位透水試験方法

示す3種類の方法に大別される<sup>1)</sup>。

### 2.1 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、孔壁及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; GWP) 法がある。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30 cm、深さ30 cm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5 cm程度であり、深さは孔内に設定する定水位の値（通常3~15 cm程度）から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ることにより、透水係数の鉛直分布評価の可能性を有している。

### 2.2 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、円筒内に定水位を湛水させて、その先端から浸透を生じさせる。代表的な試験法に、ゲルフ式プレッシャーインフィルトローメーター (Guelph Pressure Infiltrometer; GPI) 法がある。GPI法では、対象地盤の透水性に応じて、厚さ数 mm、直径10~20 cm程度の浸潤用円筒を3~5 cm程度の深さまで打設し、円筒内に5~15 cm程度の定水位を湛水させる。円筒の先端からは、浸透流が三次元的(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20 cm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、地表面の状態を考慮し

## 技術手帳

た状態での透水試験が可能である。

### 2.3 多孔質円盤を用いる方法

図-1③に示すように、マリOTTサイフォンの組合せによって発生させた-5 cm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再現でき、地盤を全く攪乱することなく、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. GWP法とGPI法の実務性

GWP法とGPI法は、ともに計測量が定常浸潤流量  $Q_s$ のみであり、地表面にある点源からの浸潤に関する理論解をそれぞれ試験孔内の円筒状の浸潤及び浸潤用円筒内の面状の浸潤に拡張し、GWP法では式(1)、GPI法では式(2)を用いて  $K_{fs}$ を算定する<sup>2),3)</sup>。

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

ここに、 $a$ ：試験孔の半径、 $H$ ：試験孔内の一定水位、 $C$ ： $a$ 及び $H$ の関数として与えられる形状係数

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

$$G = 0.316 (d/a) + 0.184 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $a$ ：浸潤円筒の半径、 $H$ ：浸潤円筒内の一定水位、 $d$ ：浸潤用円筒の地表面からの挿入深さ

形状係数  $C$ と  $G$ は浸潤形態の違いを補正するために導入されており、数値解析によって算出された数式が提案されている<sup>4)</sup>。両式に含まれる  $\alpha^*$ は不飽和透水係数を負の圧力水頭の指数関数で表した場合のべき指数であり、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るが、表-1に示す値が推奨されている<sup>1)</sup>。

両試験方法はいずれもシンプルで、簡便かつ比較的短時間に多くの地点で  $10^{-4}$ から  $10^{-9}$  m/s 程度の範囲での  $K_{fs}$ を測定できるとされており、マリOTT式の給水タンクによる定水位給水装置を用いた試験装置が市販されている。定水位給水装置は共有できるため、基本的に同じ計測システムを用いて、試験地の状況に応じた両法の選択が可能である。例えば、GPI法を用いて地盤の平面的な透水性分布の測定を行い、GWP法で深さ方向の透水性分布の測定を行うことにより、浅層地盤の透水性を三次元的に評価することが可能になる。

試験時の留意点として、GWP法では、試験孔壁面の乱れ、鏡面化、あるいは試験中の壁面の目詰まりや崩壊が浸潤挙動に重要な影響を及ぼす。また、GPI法では、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。また、定常流量の正確な測定が重要であり、特に、低透水

表-1 土の組織・構造分類に基づいた  $\alpha^*$ の推奨値<sup>1)</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、湖成又は海成堆積土など	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たいの土、及び一般の土の最初の選択値	12
粗砂と礫質砂、及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

性地盤では定常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>4)</sup>。現実的な試験時間内に精度良く定常浸潤流量を測定するためには、試験地盤の透水性に応じた試験条件( $a, H$ )を適切に設定する必要がある。通常、低透水性地盤では、これらの値を大きく設定するが、明確な基準はなく、試験者の判断に任されている。

### 4. 今後の課題

不飽和地盤における標準的な単一の透水試験方法を基盤化することは、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及び実施上の制約により、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て、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、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、計測物理量として、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、新たな項目が必要と考えられ、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<sup>5)</sup>。不飽和地盤における原位置透水試験は、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に活用されていくことが期待される。

### 参考文献

- 1) 地盤工学会編：不飽和地盤の挙動と評価，pp. 67～74，2004.
- 2) Reynolds, W. D., Elrick D. E. and Clothier B. E.: The constant head well permeameter of unsaturated flow, Soil Science, Vol. 139, No. 2, pp. 172-180, 1985.
- 3) Reynolds, W. D. and Elrick, D. E.: Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, Soil Science Society of America Journal, No. 54, pp. 1233-1241, 1990.
- 4) 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.
- 5) 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.

(原稿受理 2015.4.10)