



現場透水試験の調査手法は何を選択すれば良いのでしょうか？



現場透水試験にはいくつか調査手法があります。その中には対象の地層によって、向いている手法、向いていない手法があります。このため、出現が予想される（もしくは実際の）地層によって、調査手法を選択する必要があります。

（１）透水係数が建設工事で重要となる理由

透水係数は水の通り易さを示した係数で、この係数が大きければ水は通り易く、小さければ通り難いとなります。①貯水ダムや調整池など、貯水や流量を管理する構造物の水量コントロール、②水源調査時の確保取水量や汲み上げ時の周辺地下水への影響検討、③一般的な建設現場での地下水に飽和層を土工などで掘削する際（釜場排水等）の排水計画検討、などに用いられます。以上のように、透水係数は多様な現場で活用される重要な指標となります。

（２）透水特性を調査する手法

地層の透水特性を調べる方法として、表-1の比較表があります。一般的に、砂や礫などの堆積物中で、水は粒子間の間隙に存在し、岩盤中では割れ目に存在しています。この違いから、堆積物と岩盤は調査手法が分けられています（表-1）。また、堆積物の中でも粒径により水の通りやすさが変わるため、地層の状況によって調査手法が変わります。

このQ&Aでは、地質調査現場で多く実施される「JGS1314 単孔を利用した透水試験方法」について、まとめます。

表-1 透水特性を求めめるための試験方法の比較表¹⁾

基準番号 (JGS-)	基準名称	適用範囲						試験方法		得られるパラメータ			
		対象地盤			飽和・不飽和		定常・非定常		単孔・多孔		透水係数	貯留特性	その他
		未固結	岩盤	締め固め地盤	飽和	不飽和	定常	非定常	単孔	多孔			
1314	単孔を利用した透水試験方法	○	-	-	○	-	○	○	○	-	○	△	-
1315	揚水試験方法	○	△	-	○	-	○	○	-	○	○	○	△
1316	締め固めた地盤の透水試験方法	-	-	○	-	○	○	-	○	-	○	-	-
1321	孔内水位回復法による岩盤の透水試験方法	-	○	-	○	-	-	○	○	-	○	△	-
1322	注水による岩盤の透水試験方法	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	-
1323	ルジオン試験方法	-	○	-	○	-	○	-	○	-	-	-	ルジオン値

堆積物

岩盤

注) 適用範囲, 試験方法 ○: 用いられる, △: 用いられる場合がある, -: 一般には適用しない
得られるパラメータ ○: 求められる, △: 求められる場合がある, -: 一般には求められない

※2018年に「JGS1319 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」が新规定されています。
(後述の最近のトピック参照)

(3) 未固結土を対象として透水特性を把握する場合の試験方法

未固結土を対象とする場合は、地層の状況、地下水位、孔壁の安定性を踏まえ、下記の事項を選定して行います。

○定常法と非定常法

未固結土を対象に透水試験を行う場合、定常法と非定常法があります。どちらの手法も観測孔の地下水位を、注水もしくは揚水により自然水位から変動させて行います。定常法は変動させた水位を一定に保ち、その時の流量（注水または揚水流量）を観測する手法です。非定常法は変動させた水位から自然水位までの水位変化を観測する手法です。

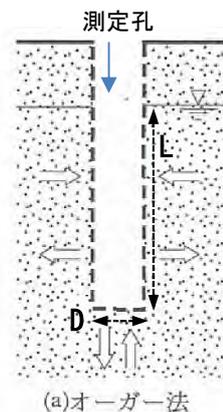
その適用性は一般的に表-2 に示した区分が用いられます。

表-2 透水性と土質区分¹⁾

		透水係数 k (m/s)											
		10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰
透水性	実質上不透水	非常に低い			低い		中位		高い				
対応する土の種類	粘性土 C	微細砂、シルト、 砂-シルト-粘土混合土 SF [S-F] M				砂および礫 GW GP SW SP G-M			清浄な礫 GW GP			定水位透水試験・・・定常法 変水位透水試験・・・非定常法	
透水係数を直接測定する方法	特殊な変水位透水試験	変水位透水試験				定水位透水試験		特殊な変水位透水試験					粒径が小さいほど透水係数が低く、粒径が大きいほど透水係数が高い。
透水係数を間接的に推定する方法	圧密試験結果から計算	なし				清浄な砂と礫は粒度と間隙比から計算						定常法は 10 ⁻³ ~10 ⁻⁵ の範囲に適用でき、10 ⁻⁴ より低い場合は非定常法が適用できます。	

○孔壁の仕上げ方法と保孔方法

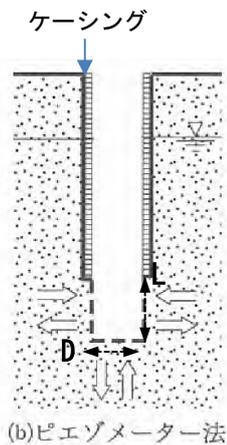
具体的な孔壁の仕上げ方には、オーガー法、ピエゾメーター法、チューブ法、パッカー法等があります。「JGS1314 単孔を利用した透水試験方法」では、 $L/D \geq 4^*$ という条件があります。孔壁を仕上げる際にもこの条件が目安となり、図-1 に示した仕上げ方法から選択します。一般的にはピエゾメーター法が多く用いられます。図-1 に示した方法で孔壁の自立が難しく、 $L/D \geq 4^*$ を満足できない場合は、掘削口径よりも細い有孔管を挿入して実施する一重管法や二重管法という方法もあります。一重管法や二重管法で実施する場合はデータ整理時に測定用パイプの内径に注意が必要です。



※D: 試験区間の孔壁の孔径、L: 試験区間の長さ

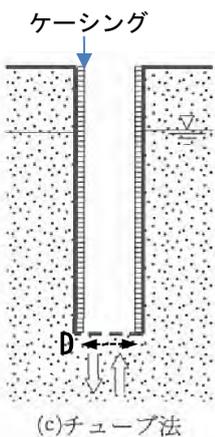
- オーガー法
- ・裸孔で実施。
 - ・水位が浅く、孔が自立する時に適用可能。
 - ・試験により孔内水位を変化させるため、その変化でも孔が自立するかを判断する必要がある。

図-1(1/2) 孔壁の仕上げ方法と保孔方法¹⁾



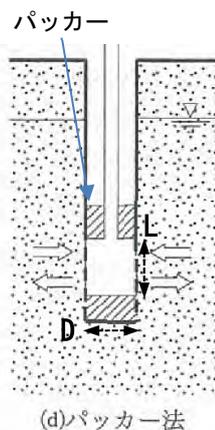
○ピエゾメーター法（ケーシング法）

- ・ケーシングを用いるため、ボーリング調査とよく併用される。
- ・試験区間の上端までケーシングを追い込み、試験区間を裸孔状態にして試験を実施。
- ・試験区間の長さL/孔径Dが4以上となるようにする。
- ・試験区間が自立しない場合は、スクリーンのある測定用パイプを設置する（下記の○二重管法）。
- ・基本的には未固結土に適用されるが、マサなどの風化土に適用される場合もある。



○チューブ法（ケーシング法）

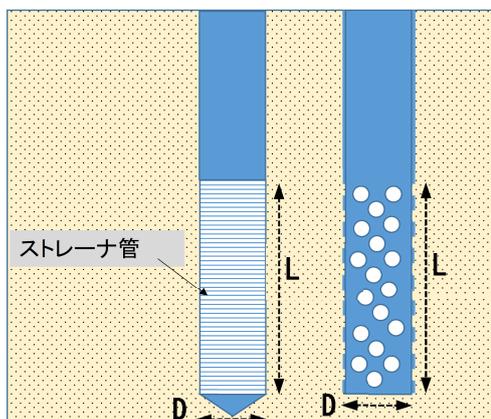
- ・ピエゾメーター法で孔壁が自立しない場合に実施。
- ・ケーシングを孔底まで追い、孔底のみを試験対象として実施。このため、孔底法とも呼ばれる。
- ・ $L/D \geq 4$ を満たさないため、基本的には参考値となる。
- ・孔底のみの試験範囲となるため、ピエゾメーター法とは計算式が異なる。



○パッカー法

- ・上記3手法よりも大掛かりな機材が必要。
- ・パッカーによって試験区間を区切り、その区間で試験を実施。
- ・孔壁の自立が前提。
- ・孔内水位の変化を観測することが難しいため、基本的に定常法で実施。

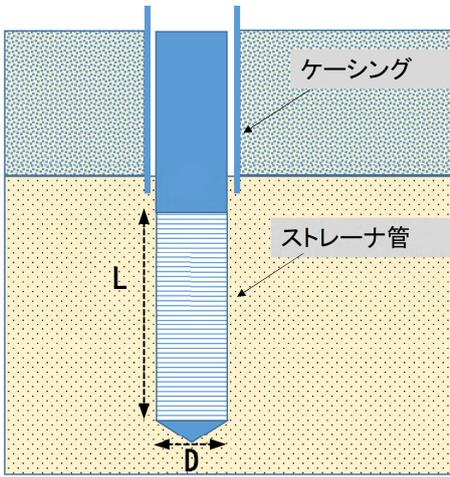
図-1(2/2) 孔壁の仕上げ方法と保孔方法¹⁾



○一重管法

- ・仕上げ方法はチューブ法とほぼ同様。
- ・ストレーナー区間を設けたケーシングもしくは塩ビパイプを挿入して実施。
- ・ストレーナー区間が試験区間となる。
(仕上げはチューブ法と似ているが、試験区間を設けられるため、参考値とならない)
- ・孔壁が自立しない地盤でも実施が可能。

図-2 一重管法による保孔方法



- 二重管法
- ・ピエゾメーター法の試験区間にストレーナー区間を設けた鋼管もしくは塩ビパイプを挿入して行う。
 - ・試験区間はストレーナー区間。
 - ・孔壁が自立しない地盤でも実施が可能。
 - ・データ整理時の測定パイプの内径に注意が必要。

図-3 二重管法による保孔方法

(4) 透水試験のデータ整理方法

透水試験のデータ整理は、非定常法と定常法で整理方法が異なります。

○非定常法

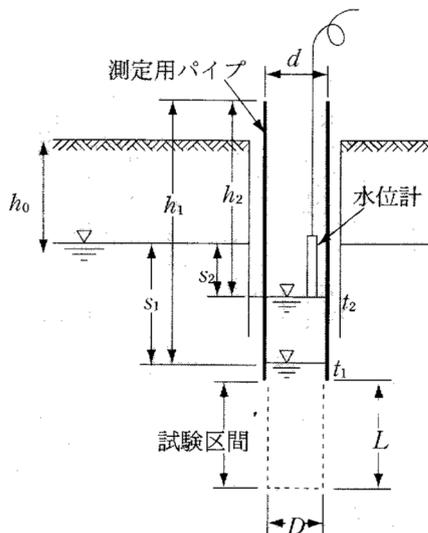
・直線勾配法

直線勾配法は、透水係数を求めるために一般的に多く用いられる方法です。

直線勾配法では、計測した水位変化を、平衡水位との水位差 (log s(m)) と時間 (t(s)) のグラフを作成します (図-4 のグラフ)。このグラフの直線上にある 2 点の値を基に、式-1 に示した計算式から勾配 *a* を求めます。この勾配 *a* を用いて、式-2 にて透水係数 *k* (m/s) を求めます。

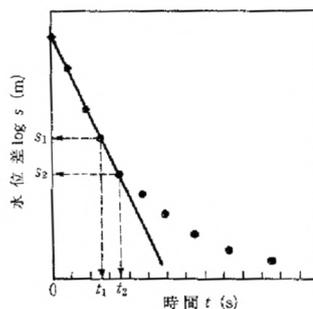
勾配 *a* を求めるためには、平衡水位との水位差を用いるため、平衡水位をしっかりと把握することが重要です (試験の最後には平衡水位を確認)。

透水性が良いと、平衡水位へ戻る時間が早いため、時間 t-水位差 log s の勾配を把握できる間隔の水位測定が困難になります。このため、表-2 の「変水位透水試験」と「定水位透水試験」の適用範囲が存在します。透水試験を行う前に、ボーリングコアや標準貫入試験試料などから、対象層の粒度を把握し、試験方法を選択することが重要です。



$$a = \frac{\log(s_1/s_2)}{t_2 - t_1} \dots \text{式-1}$$

$$k = \frac{(2.3d_e)^2}{8L} (\log) \frac{2L}{D} a \quad (L/D \geq 4) \dots \text{式-2}$$



- D: 試験区間の孔壁の孔径
- L: 試験区間の長さ
- d_e: 測定用パイプ内側の直径
- t: 経過時間
- s: 経過時間における平衡水位との水位差

図-4 非定常法の模式図と log s-t 曲線例 ¹⁾²⁾

・ 曲線一致法

直線勾配法が比較的簡単に透水係数が求められるため、よく用いられていますが、地盤の貯留性が大きい場合には曲線一致法が適している場合もあります。曲線一致法は水位差比 s/s_p と時間の関係を示す標準曲線群を作成し、測定値と最もよく合致する曲線を用いて透水係数 k (m/s) と比貯留係数 S_s (1/m) を求めます。

以下が「JGS1314 単孔を利用した透水試験方法¹⁾」に記載の手順です。

- a) 平衡水位 h_0 (m)、試験中に測定した水位 h (m) 及び試験開始時の水位 h_p (m) から、試験中の水位差 $s = |h_0 - h|$ (m)、及び試験開始時の水位差 $s_p = |h_0 - h_p|$ (m) を求める。さらに、水位差比 s/s_p を求める。
- b) 片対数グラフの算術目盛（縦軸）に水位差比 s/s_p を、対数目盛（横軸）に試験開始時からの経過時間 t (s) をとって、測定値をプロットする。
- c) b) で作成したグラフと同じスケールの別の片対数グラフに、図-5 のように、貯留係数比 α 毎の水位差比 s/s_p と無次元時間 β の関係を示す標準曲線群を作成する。
- d) 図-6 に示すように、b) と c) で作成した二つのグラフを重ね、時間軸（横軸）方向に片方のグラフを平行移動させ、測定値と最もよく合致する標準曲線を選ぶ。この標準曲線に対応する α の値 (α_m) 及び任意の合致点に対応する両グラフの時間軸座標 t_m と β_m を読み取る。
- e) 次式により、透水係数 k (m/s) と比貯留係数 S_s (1/m) を求める。

(JGS1314 単孔を利用した透水試験方法 A.2 非定常法：曲線一致法¹⁾)

$$k = \frac{d_e^2 \beta_m}{4L t_m} \quad \dots \text{式-3}$$

$$S_s = \frac{d_e^2}{LD^2} \alpha_m \quad \dots \text{式-4}$$

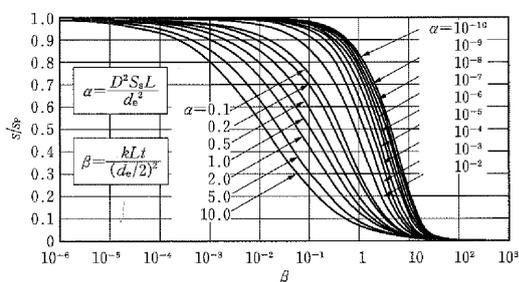


図-5 貯留係数比 α ごとの無次元時間 β と水位差比 s/s_p の標準曲線群¹⁾²⁾

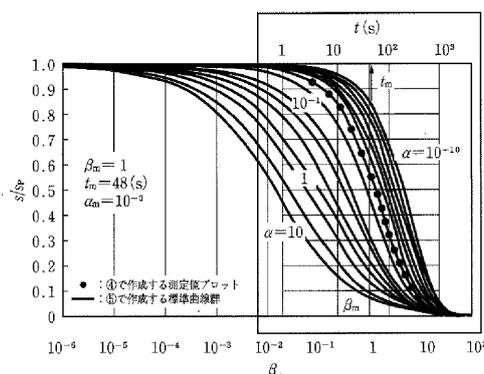


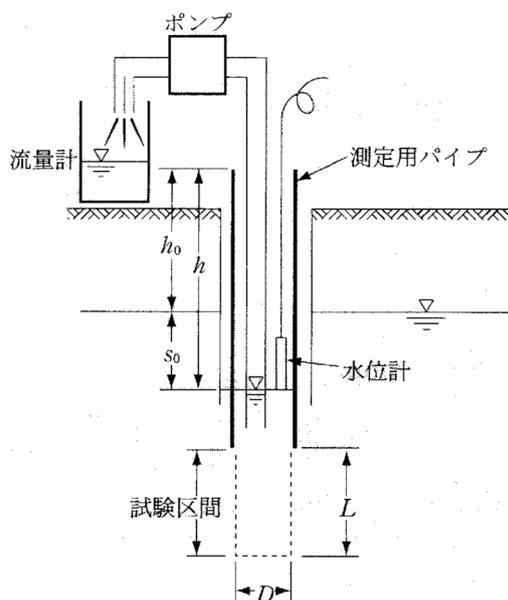
図-6 測定結果と図-5 の標準曲線群重ね合わせ図¹⁾²⁾

○定常法

試験中の定常状態の孔内水位 h (m) と平衡水位 h_0 (m) から、式-6 を用いて水位変動量 s_0 (m) を求めます。定常状態における水位変動量 s_0 (m) と揚水または注水流量 Q_0 (m³/s) から、透水試験 k (m/s) を式-7 から算出します。

定常法は、ポンプを用いて注水もしくは揚水し、平衡水位から一定の水位差を保つ必要があります。透水性が良い場合は、水位差を設けるために揚水量や注水量が多くなる可能性があります。**揚水量と注水量に合ったポンプを準備**する必要があります。

一方で、**透水性が低い場合は、揚水量と注水量がわずかになり、水位差を保つことが困難**になります。このため、定常法も表-2 で示された適用範囲があります。定常法も、非定常法と同様に、**試験を実施する対象層の状態を観察し、方法を選定**することが重要です。



$$s_0 = |h_0 - h| \quad \dots \text{式-6}$$

$$k = \frac{2.3Q_0}{2\pi s_0 L} (\log) \frac{2L}{D} \quad (L/D \geq 4) \quad \dots \text{式-7}$$

図-7 定常法の模式図¹⁾²⁾ と計算式

👉 透水試験時のちょっとしたコツ

透水試験実施の際には水位を自動で計測する**自記水位計**を用いて実施するとデータ整理が行いやすくなります。また、自記水位計設置後に「**定常法→非定常法**」の順番で試験を行えば、簡単に2手法のデータを得ることができます。表-2 では定常法と非定常法の適用範囲は被っている部分もあるため、地層の構成によってはどちらの手法を選定すればよいか判断が難しい場合があります。自記水位計を用いれば、判断が難しい場合に両方の試験方法が実施でき、どちらの手法が妥当であるか、その判断にも用いることができます。

自記水位計を用いれば、簡単に良いデータを得ることができますが、注意点もあります。自記水位計のセンサーには10m計や20m計など、水位変化に適用範囲があり、水位変化を大きくして現場透水試験を実施する場合は実際の地下水位と誤差が生じてしまう場合があります。自記水位計を用いて現場透水試験を行う際は、水位変化の大きさを考え、適切な自記水位計のセンサーを選ぶ必要があります。

👉 最近のトピック

○ 「JGS1319 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」について

2018年5月に、上記の試験方法が新規定されました。基準制定と経緯について、JGS1319の1.まえがきに記載の内容を以下に引用します。

1.1 基準制定と経緯

地盤の透水特性を表す透水係数としては、図-8に示す4つの透水係数が考えられる。このうち、地下水面よりも下の地盤は飽和地盤とみなすことができ、飽和透水係数(図-8の①)を求める透水試験方法として4つの地盤工学会基準(JGS1314、1315、1321、1322)が定められている。

一方、地下水面よりも上の地盤の飽和透水係数(図-8の②)と不飽和透水係数(図-8の③)は、ともに工学、農学分野において、実際に測定されたり、シミュレーションの入力値として利用されたりしている。なお、地下水面よりも上の地盤の飽和透水係数を、飽和地盤の透水係数と区別するために、本基準では「現場飽和透水係数」と呼ぶこととしている。

飽和地盤の透水試験方法4つの基準が存在するが、地下水面よりも上の地盤を対象とした透水試験方法としては、「締め固めた地盤の透水試験方法」(JGS1316)のみが基準として存在した。しかし、この基準は、アースダム、ロックフィルダムのコアあるいは河川堤防などの難透水性材料から構成される人工的に締め固められた地盤の表層付近のみを対象としている。また、平成23年7月の第46回地盤工学研究発表会の「地盤中の物質移動」の4つのセッションで実施したアンケート(学生を除いた回答者58名)ではその6割がJGS1316を実施した経験を有するが、地下水面よりも上の地盤を対象とした透水試験方法の基準化について「必要あり」が90%、「わからない」が10%、「必要ない」は0%の回答であった。必要性の理由としては、実務で利用40%、室内試験と比較22%、データの蓄積21%でした。

これらの結果を受けて、より広い範囲に適用できる、地下水面よりも上の地盤を対象とした透水試験方法の基準化の検討が開始した。

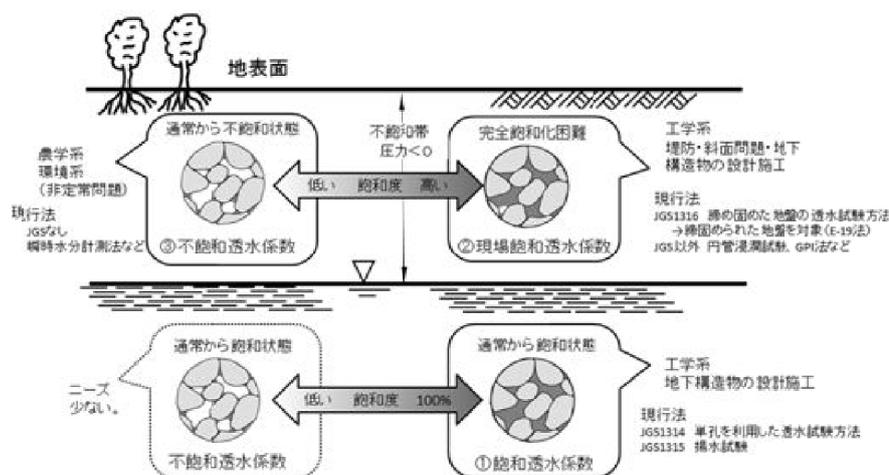


図-8 現場での4つの透水係数³⁾

地下水面よりも上の地盤の 2 つの透水係数のうち、不飽和透水係数を測定する試験方法には現段階で課題が多いが、現場飽和透水係数を測定する透水試験は、工学、農学分野で複数の試験方法が実践されていたため、これを先に基準化することとした。なお、実践されていた透水試験は、機関やサイトごとに異なる試験方法や試験条件が採用されていたため、試験結果の比較検討や統一的な評価を可能とすることを基準化の目的のひとつとした。さらに、不飽和地盤を対象とした透水試験の国際基準 (ISO) である ISO22282-5 Infiltrometer tests に対する国内基準が存在しなかったため、国際規格に対応した準備も必要であると考えた。以上のような状況を鑑み、「**地下水面よりも上の地盤を対象とした透水試験方法**」の基準制定に至った。

制定した基準は、現場飽和透水係数を原位置で求める透水試験方法を規定している。このような飽和状態に近い地盤の透水係数は、室内試験でも求めることができるが、乱された試料を整形して供試体とすることが一般的である。これに対して、原位置試験は乱さない状態の地盤の試験対象とする点において、室内試験よりも優れている。また、室内試験に比べると対象領域が大きく、地盤の平均的な値が求められるため、シミュレーションの入力値や設計に用いる場合にも適していると考えられる。

例えば、普段は地下水面よりも上の地盤 (不飽和地盤) でも、降雨の浸透や地下水の上昇により飽和度が上昇すると、斜面崩壊や堤防のり面のすべりが懸念される。このような問題では、飽和度が高いほど透水係数が高くなるため、(飽和度を変数と考えたときに) 最も高めの透水係数である現場飽和透水係数を得ることが工学的に重要となる。

また、降雨の排水や灌漑を検討したり、表面流出量を計算したりする農学分野の問題に対しても、降雨中あるいは降雨後の飽和状態に近い地盤の透水係数が測定できれば地盤の浸透能を定量的に評価することができる。

最後に、飽和地盤の透水係数に比べて、地下水面よりも上の地盤の現場飽和透水係数は、基準として規定可能な試験方法だけではなく、試験実施前の初期条件、試験実施中の境界条件、対象となる地盤の性質等にもより強く依存することに注意が必要である。すなわち、本基準がすべての目的、対象地盤に適用可能であることを保証しているものではない。したがって、本基準を利用する場合には、基準本文だけではなく、解説の記載事項もできるだけ参考にして、試験の目的や対象地盤に対して、本基準を適用することが可能であるか否かの判断を行っていただきたい。

(JGS1319 地下水面よりも上の地盤を対象とした透水試験方法 1. まえがき)

今回の Q&A ではトピックとして取り上げましたが、現地での作業性や、取得したデータの整理例、検討内容の例など、ノウハウが蓄積され次第、この Q&A でも解説していきます。

試験状況の参考として、図-9 に試験方法の例を示します。試験方法は、地表面で実施する場合と試験孔を用いて実施する場合があります。

また、定水位浸潤装置の一例として、図-10 に地表面で実施する場合のうち負圧で浸潤させる方法の装置を、図-11 に試験孔で実施する場合のうち試験孔全体を用いる方法の装置を示します。

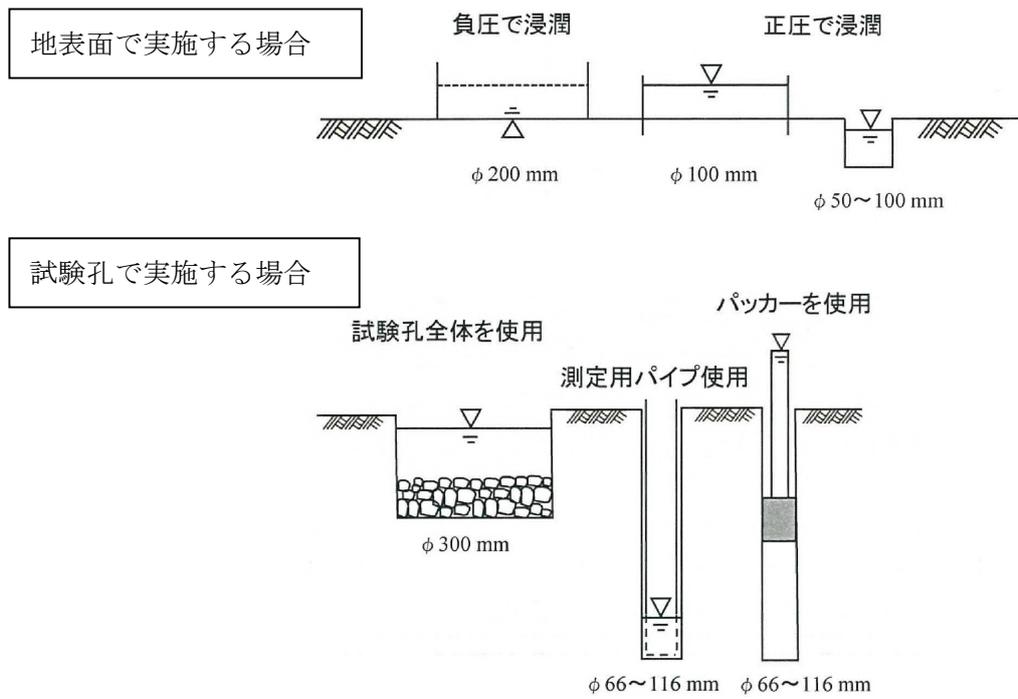


図-9 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法の例³⁾
 地表面で実施する場合と試験孔で実施する場合があります。

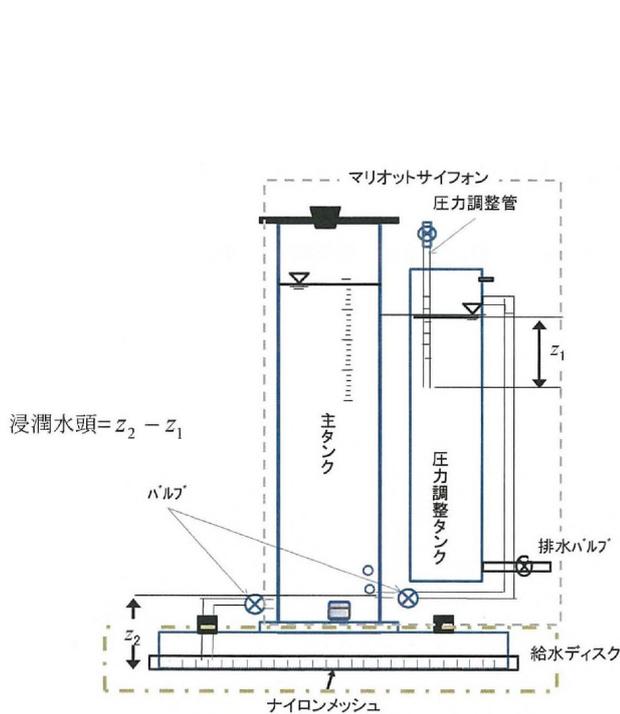


図-10 地表面で実施する場合の定水位浸潤装置の例³⁾
 (負圧で浸潤させる方法)

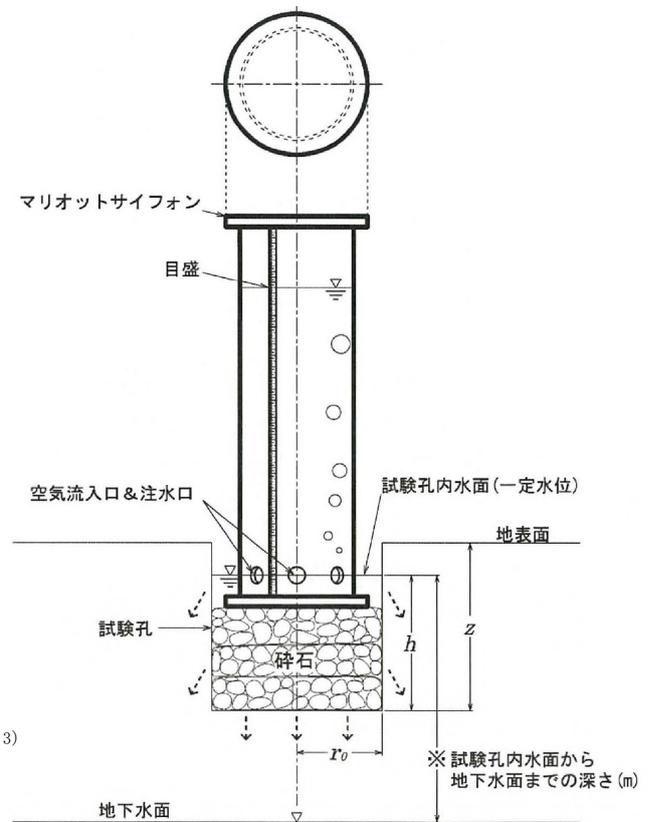


図-11 試験孔で実施する場合の定水位浸潤装置の例³⁾
 (試験孔全体を用いる方法)

(5) まとめ

以上のように、透水試験は試験の手法、試験に使用する孔の仕上げや保孔方法、定常法と非定常法の選択など、対象層の状態によって適切な方法を選択する必要があります。また、試験手法は、最後にトピックとして取り上げた「JGS1319 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」のように、日々適用範囲が変化しつつあります。

冒頭でも述べたように、透水係数は様々な場面で利用されるため、試験実施の際は、対象層の状態を詳細に観察し、地層・地下水位状況に応じた試験方法を選択していくことが重要です。

【引用文献】

- 1) 公益財団法人 地盤工学会 (2013) : 地盤調査の方法と解説、pp. 512-530.
- 2) 公益財団法人 地盤工学会 (2013) : 地盤調査 基本と手引き、pp155-158.
- 3) 公益財団法人 地盤工学会 (2018) : JGS1319 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法

(回答者 小井戸 一浩)